

现代工程学

Modern Engineering



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.
(United States)

Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

Wei Su

Cinotop Electronics Co., Ltd.

Yi Wu

Tian'an (Shanghai) Investment Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第3卷 第2期 2026年2月刊

主管 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主办 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

地址: 263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

网址: <https://arttechpress.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- | | | |
|-----|---|---------------------------------------|
| 001 | EPC总承包模式下工程造价风险识别与应对
Risk Identification and Response of Project Cost under EPC General Contracting Mode | 范孟雷
Fan Menglei |
| 004 | 旧路改造中既有水泥混凝土路面破碎再利用技术与结构一体化设计
Reuse Technology and Integrated Structural Design for Crushed Existing Cement Concrete Pavement in Old Road Reconstruction | 张宁宇
Zhang Ningyu |
| 008 | 建筑装饰工程墙面空鼓开裂成因及防治技术研究
Research on the Causes and Prevention Techniques of Wall Hollowing and Cracking in Architectural Decoration Engineering | 许利民
Xu Limin |
| 011 | 公路工程施工协同管理关键影响因素研究
Research on Key Influencing Factors of Collaborative Management in Highway Engineering Construction | 王进冈
Wang Jingang |
| 014 | 建筑施工现场质量控制与风险防控
Quality Control and Risk Prevention and Control in Construction Site | 李杰
Li Jie |
| 017 | 建筑工程项目成本动态控制研究
Research on Dynamic Cost Control of Construction Engineering Projects | 吕鹏辉
Lv Penghui |
| 020 | 智能建造技术在城市建筑施工中的应用研究
Research on the Application of Intelligent Construction Technology in Urban Building Construction | 武晓莉
Wu Xiaoli |
| 023 | 建筑工程施工质量控制与管理优化研究
Research on Construction Quality Control and Management Optimization in Construction Engineerings | 申鑫恒, 王伟伟
Shen Xinheng, Wang Weiwei |
| 026 | 城市更新背景下市政设施维修改造策略探析
Analysis on Maintenance and Reconstruction Strategies of Municipal Facilities under the Background of Urban Renewal | 杨璐, 朱聿宝
Yang Lu, Zhu Yubao |
| 029 | 高层建筑施工质量控制技术及管理策略
Construction Quality Control Technology and Management Strategies for High-rise Buildings | 荆涛
Jing Tao |
| 032 | 复杂地质条件下公路桥梁桩基施工稳定性研究
Research on the Stability of Highway Bridge Pile Foundations under Complex Geological Conditions | 黄军, 安顺波
Huang Jun, An Shunbo |
| 035 | 公路工程路面施工质量控制关键技术与实践研究
Research on Key Technologies and Practical Applications for Quality Control in Highway Engineering Pavement Construction | 姜玮琦
Jiang Weiqi |
| 038 | 基于PDCA循环的施工项目质量管理应用研究
Research on the Application of PDCA Cycle in Construction Project Quality Management | 王沿娣
Wang Yandi |

041	大型仓储物流园项目主体结构混凝土跳仓法施工技术研究 Research on Construction Technology of Concrete Sequential Placement Method for the Main Structure of Large-scale Warehousing and Logistics Park Projects	张军军 Zhang Junjun
044	公建项目 EPC 模式下设计——施工协同管理问题与对策 The Issues and Countermeasures of Design — Construction Synergy Management in the EPC Mode of Public Construction Projects	朱磊 Zhu Lei

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

047	高精度机械加工工艺改进与质量控制研究 Research on Process Improvement and Quality Control of High-Precision Machining	顾文杰 Gu Wenjie
050	汽车结构件低压压铸后处理关键非标设备开发与应用研究 Research on the Development and Application of Key Non-standard Equipment for Post-processing of Low-pressure Die Casting Automotive Structural Components	刘永刚, 汤天昊 Liu Yonggang, Tang Tianhao
053	某型装载机驾驶室设计及异型管的应用 Design of a Certain Type of Loader Cab and the Application of Special-shaped Tubess	黎俊宏, 黎毅, 米晨雷, 周登宏 Li Junhong, Li Yi, Mi Chenlei, Zhou Denghong
056	工业场景下流体控制设备可靠性提升策略探究 Research on Strategies for Enhancing the Reliability of Fluid Control Equipment in Industrial Environments	林焱 Lin Yao
059	论如何保障船闸的安全畅通 On How to Ensure the Safe and Smooth Operation of Ship Locks	张汉峰 Zhang Hanfeng
062	低合金调质高强度 STRENX1100E 焊接工艺研究 Research on the Welding Process of Low Alloy Quenched and Tempered High-Strength Steel STRENX1100E	张晓刚 Zhang Xiaogang

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

065	北斗导航 + GPS 导航的油电混合动力无人机 Hybrid Electric Unmanned Aerial Vehicle with BeiDou Navigation + GPS Navigation	周琛知 Zhou Chenzhi
068	运动想象脑电信号的分析与处理算法研究 Research on Analysis and Processing Algorithms for Motor Imagery EEG Signals	侯启恩, 刘建 Hou Qien, Liu Jian
071	建筑经济视角下的公路工程合同管理优化研究 Research on Optimization of Highway Engineering Contract Management from the Perspective of Construction Economy	赵风雪 Zhao Fengxue
074	商业遥感卫星系统项目进度延误风险识别研究 Research on Schedule Delay Risk Identification of Commercial Remote Sensing Satellite System Project	杜兴强, 郭明珠, 杜立强 Du Xingqiang, Guo Mingzhu, Du Liqiang

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

077	水利工程勘测设计中数字化工具研究 Research on Digital Tools in Survey and Design of Water Conservancy Projects	巩明 Gong Ming
080	城市近郊通江闸控河流水质波动成因与整治策略——以白塔河为例 Analysis of the Causes of Water Quality Fluctuation in the Tongjiang Control Channel of the Urban Suburb and the Remediation Strategies — Taking Bai Ta River as an Example	王根兵 Wang Genbing
083	地质测量在井工煤矿安全生产中的应用研究 Research on the Application of Geomapping in the Safety Production of Underground Coal Mines	徐宏强 Xu Hongqiang
086	深度调峰工况下火电厂热力设备腐蚀行为预测模型研究 Research on Corrosion Behavior Prediction Models for Thermal Equipment in Thermal Power Plants Under Deep Peak Shaving Conditions	赵小娇 Zhao Xiaojiao
089	油田建设地面工程管线施工要点与技术分析 Key Points and Technical Analysis of Pipeline Construction in Surface Engineering for Oilfield Development	彭山峰 Peng Shanfeng
092	临时用电环节安全管理措施及优化分析 Safety Management Measures and Optimization Analysis for Temporary Power Supply	赵旭 Zhao Xu

化学技术与安全工程 | CHEMICAL TECHNOLOGY AND SAFETY ENGINEERING

095	梯度浓度正极材料的电化学稳定性与循环衰减机理分析 Analysis of Electrochemical Stability and Cyclic Degradation Mechanism of Positive Electrode Materials with Gradient Concentrations	张磊, 贾见果, 杨晓红 Zhang Lei, Jia Jianguo, Yang Xiaohong
098	双氰胺车间自动化改造要点分析 Analysis of Key Points of Dicyandiamide Workshop Automation Transformation	刘海涛 Liu Haitao
101	煤化工污水深度处理及回用工艺优化研究 Research on the Optimization of Deep Treatment and Reuse Process of Coal chemical Wastewater	张宝玉 Zhang Baoyu
104	大型储罐底板腐蚀防护与安全评估策略研究 Research on Corrosion Protection and Safety Assessment Strategies for Large Storage Tank Bottom Plates	范宪雨 Fan Xianyu

107	基于相场法的液态 CO ₂ 相变爆破致裂裂缝扩展研究 Research on Crack Propagation Induced by Liquid CO ₂ Phase Transition Blasting Based on the Phase Field Method	刘祖沛, 袁志刚, 赵锦涛 Liu Zupei, Yuan Zhigang, Zhao Jintao
110	高温水热超稳 Y 型分子筛改性分析 Modification Analysis of High Temperature Hydrothermal Ultra Stable Y Zeolite	王定国 Wang Dingguo
113	基于 Ti ₃ C ₂ /Au 自组装构建电化学适配体传感器检测四环素 Construction of an Electrochemical Aptamer Sensor Based on Ti ₃ C ₂ /Au Self-Assembly for Tetracycline Detection	王格, 张琰, 刘洁 Wang Ge, Zhang Yan, Liu Jie
116	聚多巴胺改性中空介孔二氧化硅微球在水性涂料中的应用 Application of Polydopamine-Modified Hollow Mesoporous Silica Microspheres in Waterborne Coatings	刘巧宾, 范俊梅, 孙金鹏, 李冬至, 王雁, 张汉玲 Liu Qiaobin, Fan Junmei, Sun Jinpeng, Li Dongzhi, Wang Yan, Zhang Hanling

EPC 总承包模式下工程造价风险识别与应对

范孟雷

上海凯盛节能工程技术有限公司, 上海 201100

DOI:10.61369/ME.2026020001

摘 要 : EPC 总承包模式下工程造价风险具有多元性、关联性与阶段性特征, 精准识别并科学应对该类风险是保障项目造价管控成效的核心关键。本文以 EPC 总承包项目工程造价风险为研究对象, 从风险来源、项目全生命周期两个维度开展风险识别, 归纳出业主方、承包商自身、外部环境、合同四大类风险来源, 梳理出决策、设计、采购、施工、竣工结算各阶段的核心风险点, 并提出多方法融合的风险识别应用策略; 遵循全面性、科学性等原则构建风险评估指标体系, 通过风险等级划分、风险值量化计算、关键风险筛选认定三步确定项目关键造价风险; 围绕全面性、主动性等五大原则, 制定项目全生命周期各阶段的针对性风险应对措施, 阐释规避、降低、转移、承受四大风险应对手段的适用条件与组合运用策略, 并提出建立风险动态调整机制的要求。

关 键 词 : EPC 总承包模式; 工程造价; 风险识别; 风险评估

Risk Identification and Response of Project Cost under EPC General Contracting Mode

Fan Menglei

Shanghai Triumph Energy Conservation Engineering Co., Ltd., Shanghai 201100

Abstract : The project cost risks under the EPC general contracting mode exhibit characteristics of diversity, correlation, and phased nature. Accurately identifying and scientifically addressing these risks are crucial for ensuring effective project cost control. This paper takes the project cost risks in EPC general contracting projects as the research subject, conducting risk identification from two dimensions: risk sources and the entire project lifecycle. It summarizes four major categories of risk sources: the owner, the contractor itself, the external environment, and contracts. It also outlines the core risk points at each stage, including decision-making, design, procurement, construction, and completion settlement, and proposes an integrated risk identification application strategy using multiple methods. Following principles of comprehensiveness and scientificity, it constructs a risk assessment index system and identifies key project cost risks through three steps: risk classification, quantitative calculation of risk values, and screening and identification of key risks. Centered around five principles, including comprehensiveness and proactivity, it formulates targeted risk response measures for each stage of the project lifecycle, explains the applicable conditions and combined application strategies for four major risk response methods—avoidance, reduction, transfer, and acceptance—and proposes the requirement to establish a dynamic risk adjustment mechanism.

Keywords : EPC general contracting mode; project cost; risk identification; risk assessment

引言

当前, 在 EPC 项目实施过程中, 受业主需求界定模糊、设计与施工衔接不畅、市场价格波动、政策法规调整、合同条款不严谨等多重因素影响, 造价超支、风险管控失控等问题频发, 不仅严重影响承包商的经济效益, 还可能导致项目延期交付、质量隐患等连锁问题, 制约工程建设行业的高质量发展。基于此, 本文以 EPC 总承包模式下工程造价风险为核心研究对象, 系统梳理风险来源与全生命周期风险节点, 构建科学的风险评估体系, 探索针对性的风险应对策略, 旨在厘清各类造价风险的内在关联与影响机制, 为 EPC 项目各参与方提供全面、可行的造价风险管控方案, 有效规避造价超支问题, 保障项目建设顺利推进与各方主体合法权益, 同时为推动 EPC 模式下工程造价管理的规范化、科学化发展提供理论参考与实践支撑。

一、EPC 总承包模式下工程造价风险识别

（一）EPC 项目造价风险的来源分析

EPC 是指总承包商受项目法人委托，依据合同约定对工程建设项目的的设计、采购、施工、试运行等实行全过程或若干阶段的承包，以合同管理为主要手段，对项目的质量、进度和资金进行控制，对项目的安全全面负责^[1]。EPC 总承包模式下，工程造价风险的来源具有多元性，主要可归纳为业主方风险、承包商自身风险、外部环境风险、合同风险四大类，各类风险相互关联、相互传导，共同影响项目造价管控效果^[2]。业主方风险，含需求界定不清、付款履约不足、审批流程不规范、过度干预项目等；承包商自身风险，涉及设计缺乏经济性、采购管理不善、施工组织不合理、资金管理欠缺等；外部环境风险，包括市场价格波动、政策法规调整、自然灾害/地质不符、社会纠纷干扰等不可控因素；合同风险，核心为条款约定不严谨、风险分担不合理、索赔条款不完善。

（二）基于项目全生命周期的造价风险识别

EPC 项目全生命周期涵盖决策、设计、采购、施工、竣工结算五大核心阶段，各阶段工作内容与造价风险点不同，全过程风险识别可实现全方位管控，规避风险遗漏与传导^[3]。决策阶段核心为立项、可研、投资估算，风险主要是投资估算不准、项目定位不合理、可研深度不足，易引发后期造价超支。设计阶段对造价影响达 70% 以上，核心是方案设计与优化，风险包括设计方案不经济、深度不足、变更管理不规范以及方案与采购需求不匹配^[4]。采购阶段设备材料成本占总造价 50%-70%，风险主要有采购计划不合理、市场价格预判失误、供应商管理不善、采购合同不规范^[5]。施工阶段风险复杂且突发，核心是资源整合与现场管控，风险包括施工方案不合理、现场管理混乱、变更签证不规范、人材机成本超支。竣工结算阶段核心为验收、核算与结算，风险主要是结算资料不完整、造价核算不准、业主审核拖延、结算争议处理不当。

（三）风险识别方法的应用

要把工程花费的风险找全、找准，不能只靠经验，还要用合适的方法，有时候还需要把多种方法结合起来用^[6]。查阅以前类似工程的资料，看看别人遇到过哪些花费风险，借鉴经验，找出自己工程可能遇到的风险；找懂工程、懂造价的专家，通过多轮匿名咨询，让专家给出意见，找出那些隐藏的、不容易发现的风险，最后达成共识；组织工程团队的所有人，一起开会讨论，畅所欲言，快速找出工程各个阶段可能遇到的各种风险，不管是明显的还是隐藏的；以工程花费超支为核心，梳理出哪些因素会导致超支，这些因素之间有什么关系，形成一个清晰的逻辑框架，系统地找出所有可能的风险；对照排查法是根据以前类似工程的经验，整理出一份风险清单，对照清单逐一排查自己的工程，看看有没有遗漏的风险，这种方法简单好操作，但需要有足够的经验，不然容易漏掉一些风险。

二、EPC 总承包模式下工程造价风险评估

（一）风险评估指标体系的构建

要判断风险的大小，需建立一套简单易懂的评估标准，这套标准要全面、科学，还要贴合工程实际，容易操作^[7]。结合风险来源，可以把风险分成四个大类（一级标准），甲方带来的风

险、承包方自己带来的风险、外部环境带来的风险、合同带来的风险。然后把每个大类再细化，比如甲方带来的风险，再分成需求没说清、没按时付款等小类（二级标准）；再把每个小类进一步细化，比如需求没说清，具体表现为设计方案反复修改、项目定位模糊等（三级标准），这样就形成了一套完整的评估标准，方便后续判断风险大小。在评估风险时，还要确定每个风险的重要程度，比如材料价格大幅上涨比工人效率稍低更重要，影响更大。常用的方法是，结合专家的意见，通过科学的计算，确定每个风险的重要性权重，确保评估结果准确。

（二）风险评估模型的选择

风险评估模型，简单来说就是判断风险大小的工具，不同的工程适合不同的工具，要根据工程的规模、复杂程度来选择^[8]。模糊综合评价法适合风险比较复杂、不容易精确判断的工程，比如一些大型复杂工程，很多风险无法用具体数字衡量，就可以通过专家打分、综合判断的方式，评估风险大小，不过这种方法的缺点是，专家的判断会有主观性，可能影响结果；综合评估法（结合权重和模糊评价）是最常用的一种方法，既考虑了每个风险的重要程度（权重），又能处理复杂的、无法精确衡量的风险，评估结果更准确、更可靠，适合大多数 EPC 工程，尤其是中小型工程；神经网络模型适合大型、复杂，且有大量历史数据的工程，比如大型场馆、高速公路等，它可以通过计算机自动分析历史数据，找出风险之间的关系，不需要人工过多干预，但缺点是需要大量的历史数据，操作复杂，对技术要求高；随机模拟法适合需要判断风险发生概率的工程，比如判断材料价格上涨的概率有多大、可能造成多少损失，它通过模拟各种可能的情况，计算出风险的大小，结果比较客观，但操作复杂、计算量大，需要专业的技术支持。实际应用中，中小型工程用综合评估法就足够了，操作简单、效果好；大型复杂工程，可以结合神经网络模型或随机模拟法，让评估结果更科学。同时要做好数据收集工作，确保数据真实、完整，才能让评估结果可靠。

（三）关键造价风险的确定

工程中的风险有很多，我们不需要平均用力去应对，重点关注那些影响最大、最容易导致花费超支的关键风险，具体可以分三步进行。第一步划分风险等级，就是根据风险发生的概率（比如大概率发生、中等概率、小概率）和对花费的影响程度（比如影响很大、中等影响、影响很小），把所有风险分成高、中、低三个等级，比如设计方案反复修改，发生概率高、对花费影响大，就是高等级风险；工人效率稍低，发生概率低、影响小，就是低等级风险；第二步量化风险大小，即运用前面提到的评估模型，计算每个风险的风险值，就是用风险发生的概率乘以对花费的影响程度，风险值越高，说明这个风险越需要重视；第三步筛选关键风险，优先把高等级风险列为关键风险，比如设计变更频繁、材料价格大幅上涨等，若有些中等级风险影响也比较大，也可以纳入关键风险，明确这些关键风险后，后续就可以重点制定应对措施。

三、EPC 总承包模式下工程造价风险应对策略

（一）风险应对基本原则

EPC 总承包模式下，工程造价风险应对需遵循全面性、主

动性、针对性、成本效益及协同性五大原则，以此保障风险防控措施的科学性、合理性与有效性^[9]。其中，全面性原则要求风险防控覆盖项目全生命周期与各类风险点，兼顾风险间的内在关联性，防范单一风险引发连锁反应；主动性原则秉持预防为主的经营理念，通过建立健全预警机制，提前预判风险隐患并实施前置应对；针对性原则需结合风险类型、风险等级制定个性化防控方案，对不同等级的风险实施差异化精准管控；成本效益原则强调统筹平衡风险应对成本与潜在损失，择优选用高性价比的防控策略；协同性原则要求联动项目各参与方，明晰各方权责、强化协同协作，凝聚形成风险管控的整体合力。

（二）不同阶段的风险应对措施

应对工程风险需贯穿项目全流程，各阶段聚焦核心风险，采取针对性措施。决策阶段重点解决估算不准、定位不合理问题，需提前开展充分调研，摸清工程需求、市场情况及地质条件，优化估算方法提升准确性，明确项目定位贴合实际，建立专家评审机制，从源头把控风险。设计阶段着力解决成本超标、设计粗糙、变更频繁问题，明确设计成本上限，加强方案审核与对比，选择经济合理方案，提升设计深度细化图纸，规范设计变更审批流程，杜绝随意修改^[10]。采购阶段重点防范价格波动、计划不当、供应商失信风险，制定科学采购计划，合理安排采购时间，实时关注价格走势并预判变化，必要时签订长期合同锁定价格，严格筛选及管理供应商，完善采购合同明确双方权责。施工阶段聚焦方案不合理、管理混乱、签证不规范问题，优化施工组织设计，加强现场管理减少材料浪费，规范变更及签证审批流程，确保签证及时准确，实时监控施工成本，发现超预算及时调整。竣工结算阶段重点解决资料不全、核算不准、结算拖延问题，做好资料全流程收集整理，提高造价核算精度，加强与甲方沟通协调，及时提交资料并督促审核，规范争议处置机制，通过协商调

解化解纠纷。

（三）具体风险应对手段

工程花费风险应对主要有四种方法，承包方可根据风险的类型、等级及自身承受能力灵活选择，且常需组合使用。规避风险针对发生概率高、影响大且难控制的重大风险，通过放弃相关工程环节或调整方案彻底消除风险，不过可能损失项目机会或产生额外调整成本；降低风险是最常用的方法，可通过优化管理、改进技术等降低风险发生概率或减少损失，适用性强且成本相对较低；转移风险则借助签订合同、购买保险等方式将风险转移给第三方，以减轻自身负担，但需支付一定成本且部分风险无法完全转移；承受风险适用于发生概率低、影响小且应对成本高于损失的轻微风险，操作简单且无需额外成本，但要求承包方有足够的风险承受能力。实际工程中，单一应对方法往往不足，需组合使用多种方法，同时建立动态调整机制，随工程推进及时调整应对措施，确保贴合工程实际需求。

四、结束语

本文围绕 EPC 总承包模式下工程造价风险的识别、评估与应对三大核心环节，结合项目全生命周期管理理念，开展了系统性研究与探讨，厘清了 EPC 项目工程造价风险的多元来源、阶段特征与内在关联，构建了科学可行的风险评估体系与针对性应对策略，形成了一套覆盖识别 - 评估 - 应对的全链条造价风险管控思路。

期望本文的研究能为后续相关领域的深入探索奠定基础，也期待更多学者与行业从业者关注 EPC 模式下工程造价风险管控问题，共同推动我国工程承包市场的健康可持续发展。

参考文献

[1]王可,阮鹏高,黄艳芬,等. 水利工程 EPC 总承包模式分析[J]. 长江技术经济, 2022, 6(4): 62-65. DOI: 10.19679/j.cnki.cjjsj.2022.0411.

[2]李从山. EPC 总承包模式探讨[J]. 市政技术, 2016, 34(5): 214-215. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7767.2016.05.056.

[3]杨洋. EPC 总承包模式研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014(8). DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2014.08.0121.

[4]邵旭. EPC 总承包模式应用研究[J]. 科技资讯, 2014(26): 126-127. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2014.26.096.

[5]于然然. EPC 总承包模式设计管理研究[J]. 中国科技纵横, 2018(23): 115-116. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2064.2018.23.055.

[6]刘培禄,刘毅. 水电工程 EPC 总承包模式[J]. 技术与市场, 2013, 20(11): 192. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8554.2013.11.124.

[7]冯杳科. EPC 总承包模式的管理应用分析[C]//2024 工程技术与新材料发展交流会论文集. 2024: 1-3.

[8]杜春玲. EPC 总承包模式工程项目管理研究[D]. 陕西: 西安理工大学, 2013. DOI: 10.7666/d.D516062.

[9]邓雨红. EPC 总承包模式成本管控分析——以贵州某磷矿 EPC 项目为例[J]. 工程技术研究, 2023, 8(24): 139-141, 216. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.24.045.

[10]吕东. EPC 总承包模式管理的探讨[J]. 科学之友, 2012(18): 103-104.

旧路改造中既有水泥混凝土路面破碎再利用技术与结构一体化设计

张宁宇

张家口路缘公路工程有限责任公司, 河北 张家口 076250

DOI:10.61369/ME.2026020002

摘 要 : 城市化进程的飞速推进, 让旧路的改造与再利用成为交通工程里的关键课题, 尤其是在水泥混凝土路面破碎再利用技术和结构一体化设计领域, 深入研究对提高资源利用效率、削减施工成本、减轻环境负担意义重大, 本论文剖析旧路改造的技术现状和面临的挑战, 提出基于结构一体化设计的创新举措, 结合实际工程情况, 阐释破碎再利用技术和路面结构一体化的优化设计途径, 并依靠实验研究和数值模拟加以验证, 结果显示, 合理的技术路径可切实增强路面结构的稳固性与耐用性, 达成资源的高效循环利用, 兼具良好的社会与经济效益。

关 键 词 : 水泥混凝土路面破碎再利用; 结构一体化设计; 旧路改造; 资源循环利用; 施工技术

Reuse Technology and Integrated Structural Design for Crushed Existing Cement Concrete Pavement in Old Road Reconstruction

Zhang Ningyu

Zhangjiakou Luyuan Highway Engineering Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 076250

Abstract : The rapid advancement of urbanization has made the reconstruction and reuse of old roads a critical issue in traffic engineering, particularly in the field of crushed cement concrete pavement reuse technology and integrated structural design. In-depth research in this area is of great significance for improving resource utilization efficiency, reducing construction costs, and alleviating environmental burdens. This paper analyzes the current technological status and challenges faced in old road reconstruction, proposes innovative measures based on integrated structural design, and explains optimization approaches for crushed reuse technology and pavement structure integration in light of actual engineering conditions. Verification through experimental research and numerical simulation demonstrates that a reasonable technological path can effectively enhance the stability and durability of pavement structures, achieve efficient recycling of resources, and deliver favorable social and economic benefits.

Keywords : crushed reuse of cement concrete pavement; integrated structural design; old road reconstruction; resource recycling; construction technology

引言

交通网络持续拓展, 旧有道路的修复与改造成为交通工程中的常见工作, 特别是水泥混凝土路面, 因其耐久性佳, 拆除并再利用成为重要研究方向, 而水泥混凝土路面破碎再利用既能有效利用资源, 又能降低施工时对环境的影响, 不过在破碎再利用技术应用时, 怎样保障路面结构的稳定性和耐久性, 特别是怎样借助结构一体化设计提升其综合性能, 仍是亟待攻克的难题, 文章围绕这一问题展开探讨, 提出一体化设计方案, 通过实验和理论研究验证其可行性与效果, 为旧路改造提供理论依据和技术指引。

一、水泥混凝土路面破碎再利用技术研究

(一) 水泥混凝土路面破碎技术概述

水泥混凝土路面破碎技术历经多个发展时期, 常见的破碎手段有机械破碎、爆破破碎、液压破碎之类。机械破碎一般用路面破碎机或者履带式破碎机, 靠旋转切割刀具对水泥混凝土路面实

施破碎, 好处是可控程度高、效率佳, 适合大规模道路改造工程, 爆破破碎是控制炸药爆炸力使路面破裂, 破碎效率颇高, 尤其适用于大面积拆除工作, 不过爆破法对周边环境影响大, 施工时可能存在安全风险, 所以应用范围有所受限, 液压破碎属于比较精准的技术, 借助液压工具把水泥混凝土块弄碎, 适用于局部修复以及特殊区域作业。依据工程规模、周边环境还有破碎效率

需求来挑选恰当的破碎方式，对提升破碎效率和后续再利用意义重大^[1]。

（二）水泥混凝土破碎再利用的技术挑战与创新

水泥混凝土路面破碎再利用在实际运用中遭遇不少技术难题，破碎效果不稳定便是其中一个，不同类型路面混凝土强度差别明显，传统破碎设备适应性欠佳，易出现破碎不彻底或者破碎不均的状况，而且，破碎后材料的质量把控也存在挑战，像粒径分布、抗压强度等方面控制不到位，可能会对再利用材料性能产生影响。为提高破碎效率、减少资源浪费，近些年新型破碎设备不断涌现，像电动液压破碎机、高频振动破碎机等，这些设备改进破碎力传递方式，提高了破碎效率，还能更精准地控制破碎粒度，保障再利用材料质量。从具体数据来看，使用新型设备能让破碎效率提高30%至50%，还可减少对环境的破坏，破碎后的再利用材料质量更稳定，工程适应性更强。

（三）基于结构一体化设计的破碎再利用优化方案

破碎再利用技术与结构一体化设计相结合可显著增强道路结构综合性能，结构一体化设计让破碎后的再利用材料和路面结构系统完美融合，使材料性能与结构稳定性充分整合。精准的参数化设计，将破碎材料粒径、强度、稳定性等特性与路面设计需求相契合，保障道路长期使用的稳定性与耐久性。基于一体化设计优化的路面结构能使材料分布更均匀，减少因结构不均产生的裂缝与损伤，且破碎后骨料抗压强度超60MPa，满足交通荷载要求，还具备良好抗冻性与抗湿性，适应不同气候条件，精确的结构分析让优化设计后的路面在使用中维护频率降低20%至30%，大幅削减后期养护成本。

二、结构一体化设计的核心原理与应用

（一）结构一体化设计概述

结构一体化设计作为一种系统优化设计手段，把道路项目里材料、构件、施工工艺等各类设计要素有机整合起来，以此达成整体功能和性能的最优状态。它兴起于20世纪80年代末，伴随信息技术持续发展，特别是建筑信息模型（BIM）技术进步，结构一体化设计逐渐走向成熟，成为现代土木工程领域尤其是道路改造中的关键技术，它的独特之处在于能达成设计与施工全流程的数字化、智能化管理，减少各阶段冲突与设计变更，提升工程效率，且在保障路面、基层及上部结构功能协同的同时，增强道路整体稳定性与耐久性，在长期使用中展现出更强适应能力与耐用性，实际操作里，运用此设计方法的项目可使设计周期有效缩短15%到20%，施工成本降低约10%，还能提高项目交付的质量和效率，在道路建设中发挥着不可小觑的作用，为道路工程带来更好的效益与更长远的发展前景^[2]。

（二）旧路改造中的一体化设计方案分析

旧路改造时，结构一体化设计给出了优化的实施办法，能切

实整合各类设计元素，增进改造成效，设计流程一般有初步调查、数据分析、系统整合以及优化设计等一系列操作，保障各个环节彼此协作，关键技术点涵盖道路基层材料筛选、路面结构性能剖析还有施工工艺的配合，保证各层次间顺畅衔接，就拿一些城市老旧水泥路面改造工程来说，采用一体化设计，重新选定适宜的破碎再利用材料让基层均匀性与承载力得以优化，设计方案配合模拟分析预估路面在不同荷载状况下的应力分布，经数值优化对路面厚度与配筋比例加以调整，让改造后的道路既能承载更高交通荷载，又增强了抗疲劳、抗裂以及抗变形能力，进而延长道路使用寿命、提升安全性，改造后的道路可承受的交通荷载较原路面提高近30%，这一显著提升充分展现出结构一体化设计在旧路改造中的巨大价值，为城市交通基础设施的升级提供了有力支撑，使得道路能更好地适应日益增长的交通需求，减少后期维护成本，确保交通顺畅与安全。

（三）一体化设计的技术挑战与未来发展方向

虽说结构一体化设计于道路改造而言优势明显，不过实施时还是会碰到些技术难题，设计颇为复杂，进行材料选择时，既要满足力学性能，又得考量环境适应性、耐久性以及成本控制等诸多因素，施工期间协调性欠佳，设计与实际施工容易出现偏差，致使整体效果难达预期。当下的一体化设计系统在数据集成、智能化优化方面存在技术瓶颈，多方协同工作时信息流通不畅。随着计算机辅助设计技术和建筑信息模型（BIM）技术持续进步，结构一体化设计会朝更智能、更高效方向迈进，预计到2030年，BIM在道路建设里的应用会覆盖80%以上项目。提升设计精度、缩短项目周期、优化资源配置，进而推动道路建设高质量发展^[3]。

三、水泥混凝土破碎再利用与一体化设计的结合

（一）破碎再利用材料的特性分析

水泥混凝土破碎再利用与一体化设计结合，破碎再利用材料的特性值得分析，水泥混凝土破碎后再利用材料在物理和化学性质上有明显改变，破碎后的骨料颗粒形状不规则、强度较低，不过在合适工艺条件下，控制好破碎粒度、抗压强度等关键指标能提高其适用性，破碎混凝土抗压强度通常在30MPa至50MPa之间，具体数值受原混凝土质量和破碎工艺精细程度影响，耐久性上，破碎后材料抗冻性与原混凝土差别不大，适当添加改性材料可提高抗渗透性与抗裂性，稳定性方面，筛分后的破碎材料在合理颗粒组合下能保证路面基层均匀密实，道路设计中这些特性直接关乎道路结构承载力与使用寿命，在低温地区和高交通荷载条件下表现尤为关键。合理应用破碎再利用材料可提升道路经济性和环境友好性，在减少天然骨料使用方面意义重大。

（二）破碎再利用材料与结构一体化设计的协调性研究

把水泥混凝土破碎再利用材料与结构一体化设计相融合，可

让道路结构的综合性能得到最大程度提升，而破碎再利用材料的粒度、强度以及配比，乃是达成这种协调性的关键要素，一体化设计里，经精确计算和模拟分析，能依据破碎骨料特性，对材料配比和层次设计予以优化，保证每一层次结构功能达至最优。某市旧路改造项目，经优化设计，破碎材料和基层结合使道路承载力得以提升，设计采用的破碎再利用材料粒径在5mm到50mm间不等，合理分配不同粒径材料，既增强了路面稳定性，又确保有足够压实度，防止破碎后材料松散性影响路面质量，和上层结构紧密结合，还增强了整体路面抗压强度与抗疲劳性能，实现了施工效果和使用性能的最佳状态，让道路在长期使用中能更好地承受各种交通荷载和环境因素的考验。

（三）实际案例分析与效果验证

该项目运用水泥混凝土破碎再利用材料并结合结构一体化设计方案，把拆除的旧水泥混凝土路面破碎后，用作路基和基层材料，经结构一体化设计与精准施工优化达成资源高效利用，设计时采用数值模拟技术优化破碎材料配比，让基层材料抗压强度达55MPa，而未用破碎再利用材料的对比段强度仅47MPa，施工中凭借精细控制确保基层密实稳定，使路面使用寿命延长约25%，同时项目施工成本较传统全新材料施工降低约15%，此实际案例成功应用证实水泥混凝土破碎再利用与结构一体化设计结合可行且效益显著，彰显出在提升道路性能、削减成本以及减轻环境影响等方面的可观潜力^[4]。如图1所示。

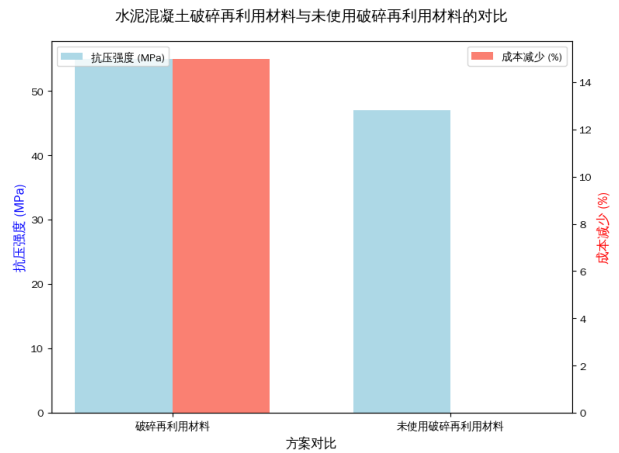


图1 水泥混凝土破碎再利用材料与传统材料对比

四、实验研究与数值模拟验证

（一）破碎再利用材料的实验室测试与数据分析

实验室对破碎再利用材料开展性能测试，涉及力学、耐久性与长期表现等指标，可为结构一体化设计参数提供依据。以北京市道路改造工程为例，把旧水泥混凝土路面破碎并按粒径分级后，依据 ASTM C39/C78 等标准开展抗压与抗折测试，测试结果表明，5 - 10 mm 粒径的材料抗压强度平均约 42 MPa，10 - 20 mm 的约 50 MPa，20 - 50 mm 的能达到 55 MPa，依据

ASTM C666 标准进行 300 次抗冻测试，破碎再生材料于低温循环过程中的质量损失率小于 2 %，而传统天然骨料通常低于 1 %，按照 DIN 1048 进行抗渗透性检测，渗透系数处于 1.0×10^{-6} cm/s 量级，这对地下水渗透控制有益，凭借这些符合道路基层级配设计指标的测试结果，可为工程设计中考虑路基承载力提供基础数据参考。如表 1 所示。

表 1 破碎再利用材料性能实验数据

数据来源：北京市旧路再生利用项目实验室测试

粒径范围 (mm)	抗压强度 (MPa)	冻融循环损失率 (%)	渗透系数 (cm/s)
5 - 10	42	1.8	1.5×10^{-6}
10 - 20	50	1.5	1.2×10^{-6}
20 - 50	55	1.2	1.0×10^{-6}

（二）数值模拟在结构一体化设计中的应用

有限元数值模拟（FEM）用于结构一体化设计，重点评估破碎再利用材料在不同荷载与环境状况下的力学反应，就拿北京市东城区幸福大街改造项目来说，运用 PLAXIS 或者 ABAQUS 构建三维路面模型，对汽车荷载以及热胀冷缩作用时的应力分布状况予以模拟，模型内考量了分层材料的弹性模量、泊松比、界面摩擦系数等关键参数，在 1.2 MPa 交通荷载施加时，破碎再利用基层展现出较强的承载力分配能力，和传统无再生材料设计相比，最大垂直位移减少约 15 %、最大剪切应力降低约 10 %。依据这些模拟数据可进一步优化道路设计的层厚比与材料配比，保证设计能达到 CBR > 80 % 的标准，以契合道路长期稳定性的承载要求，同时模拟结果也能为实际施工提供有效指引^[5]。

（三）综合实验与模拟结果的对比分析

将综合实验和模拟结果加以对比分析，能明晰破碎再利用材料和传统材料在综合性能呈现上的差别。于北京市朝阳区白桥大街旧路改造工程当中，把运用一体化设计且结合破碎再利用材料的方案同传统全新材料方案开展了对比评估，从对比数据可知，采用破碎再利用材料的方案抗压强度约达 55 MPa，较传统方案增长近 17%，抗弯强度涨幅约为 19%，疲劳寿命（循环次数）提升近 25%，基层材料总体弹性模量从原本的 2600 MPa 增长到 3100 MPa。不仅如此，此方案施工成本较对照段减少约 15% - 18%，施工周期也缩短了约 10%，而且在长期使用过程中，使用破碎再利用材料的设计维护成本更低，这充分显示出其不但拥有较高的结构性能，还可使全生命周期成本降低。如表 2 所示。

表 2 破碎再利用设计方案与传统方案对比

数据来源：北京市白桥大街旧路改造项目综合分析

设计指标	破碎再利用方案	传统方案
抗压强度 (MPa)	55	47
抗弯强度 (MPa)	7.5	6.3
疲劳寿命 (次)	500 000	400 000
弹性模量 (MPa)	3100	2600
成本减少 (%)	15 - 18	0

五、结语

本研究聚焦于将水泥混凝土破碎再利用与结构一体化设计相融合的技术路径展开深入探究。经实验和数值模拟双重验证，破碎再利用材料于提升路面抗压强度、增强耐久性以及削减施工成

本上展现出明显长处，融合一体化设计的优化举措既增强了道路结构稳固性与耐久性，又达成了资源高效循环利用，这一技术路径为旧路改造输送了切实可行的理论支撑与实践参照，有力推动可持续发展导向的道路工程实践迈向新高度，为道路建设领域注入了新活力，提供了极具价值的发展方向。

参考文献

- [1] 陈晔. 水泥混凝土路面拓宽改造工程“白改黑”策略及工程实践 [J]. 四川水泥, 2024, (11): 261–265.
- [2] 李奇仁. 城市道路水泥混凝土路面改造工程设计 [J]. 江苏建材, 2024, (05): 75–76.
- [3] 薛翔宇. 旧水泥混凝土路面改沥青混凝土路面技术浅析 [J]. 福建建设科技, 2024, (04): 110–112.
- [4] 张镇翔. 水泥混凝土路面沥青化改造设计分析 [J]. 福建建筑, 2024, (05): 143–146.
- [5] 黄家骏. 新时期城市道路水泥混凝土路面改造设计研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(12): 153–155.

建筑装饰工程墙面空鼓开裂成因及防治技术研究

许利民

浙江乙未古建园林工程有限公司, 浙江 杭州 311199

DOI:10.61369/ME.2026020010

摘 要： 建筑装饰工程极速发展之际，墙面空鼓与开裂现象愈发凸显，这会左右工程质量及其使用寿命，给施工单位和业主造成诸多麻烦，本文先阐述建筑装饰墙体的结构特点，再剖析墙面空鼓与开裂的主要诱因，涉及材料质量，施工工艺，结构设计以及环境因素等方面，参照国内外研究成果并结合实际工程实例，交流有关防治技术和经营手段，譬如改良材料，改善施工方法，开展质量检查以及经营养护工作。研究表明，经由科学选材，规范施工，加强监测和养护，可以有效地减小墙面空鼓开裂的发生几率，从而改善装饰工程的整体质量，本文的研究成果给施工应用赋予了理论支撑和技术参照。

关 键 词： 建筑装饰；墙面空鼓；开裂；成因分析；防治技术

Research on the Causes and Prevention Techniques of Wall Hollowing and Cracking in Architectural Decoration Engineering

Xu Limin

Zhejiang Yiwei Ancient Architecture Landscape Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311199

Abstract： With the rapid development of architectural decoration engineering, the phenomena of wall hollowing and cracking have become increasingly prominent, which can affect the project quality and service life, causing numerous troubles for construction units and property owners. This paper first elaborates on the structural characteristics of architectural decoration walls, then analyzes the main causes of wall hollowing and cracking, involving aspects such as material quality, construction techniques, structural design, and environmental factors. Drawing on domestic and international research findings and combining them with practical engineering examples, this paper discusses relevant prevention techniques and management strategies, such as improving materials, enhancing construction methods, conducting quality inspections, and performing maintenance work. Research indicates that through scientific material selection, standardized construction, and strengthened monitoring and maintenance, the occurrence rate of wall hollowing and cracking can be effectively reduced, thereby improving the overall quality of decoration projects. The research findings in this paper provide theoretical support and technical references for construction applications.

Keywords： architectural decoration; wall hollowing; cracking; cause analysis; prevention techniques

引言

现代建筑装饰工程当中，墙面是室内装饰的关键构成部分，墙面的平整度，附着力以及耐久性会直接左右建筑的美观程度和使用感受，但是墙面存在空鼓和开裂的情况很常见，特别是在大面积涂饰或者多层住宅里表现得越发突出，这些状况不但影响到视觉效果，而且有可能引发结构安全风险并提升养护费用，所谓空鼓就是指涂层和基层之间局部产生了脱离现象，用手指轻敲时能听到“空”的声音，而开裂则是指墙面出现了裂纹，这种裂纹的发生受到施工方法，所用材料，建筑结构以及周围环境等诸多因素的影响。近些年来，材料和工艺变得多种多样，于是问题产生的原因就更为繁杂，依靠传统经验很难彻底规避这种情况，所以，本文就从材料性能，施工工艺，结构设计以及环境影响这些方面来探究墙面出现空鼓和开裂的原因，然后给出一些科学合理的预防办法，给施工操作赋予一定的参照依据，从而保证工程质量得以长久维持。

一、墙面空鼓开裂的成因分析

（一）材料质量与基层处理因素

墙面空鼓和开裂大多源于建筑装饰材料自身质量存在瑕疵，

涂料，腻子粉，水泥砂浆等装饰材料若配比失误或者质量未达标准，它们的粘结强度及抗裂性能就会出现短缺状况，从而引发墙面在干燥，收缩或者承受压力的时候发生局部脱离情况。譬如说，腻子粉吸水能力过强或者干燥收缩系数较大，那么在施工完

毕之后不久就有可能生成裂纹，而且涂料的附着力较差，便极易造成空鼓现象，材料的存放与运输环境同样会对其性能施加影响，高温，潮湿或者被长期堆积都会改变材料的物理化学特性，进而使其施工适应性变差，有些施工单位出于削减成本的目的，采用质量较差或者伪劣的材料，这也会进一步加重墙面空鼓开裂的问题。

墙体基层处理不当时，很可能会引发空鼓开裂现象，基层的平整度，干燥度，强度以及清洁度会直接左右装饰层的附着力。如果基层存在灰尘，油污或者松散颗粒，那么涂料和腻子粉就很难与墙体紧密贴合，从而极易产生空鼓情况，而且基层含水量过高，会影响到材料的固化进程，造成墙面局部脱开或者裂缝扩展，基层强度不够，比如陈旧混凝土墙体出现风化或者空鼓状况，就会减小整体结构的承重能力，加大墙面开裂的可能性，所以，材料挑选和基层处理应当一同考量，以保障装饰层和墙体能够很好地融合起来，进而为后续施工构筑稳固根基。

（二）施工工艺与操作管理因素

施工工艺不规范也是造成墙面空鼓与开裂的一个重要原因，其一，施工时，腻子粉，砂浆或者涂料的搅拌比例，施工厚度以及层间干燥时间若不符合规范，就会对墙面的附着力及其整体结构的稳定性产生影响，比如，腻子粉涂抹过厚或者层间干燥时间不够长，很可能会在收缩期间出现应力集中现象，进而引发裂纹或者空鼓情况；而且，涂料涂刷不均也有可能造成局部附着不良，伴随温湿度的改变而产生分层或者脱落现象。其二，施工工序的安排杂乱无章或者施工人员的操作水平较低，这些都会加大墙面质量问题产生的概率，有些施工单位想要赶工期，也许会轻视材料是否完全干燥或者忽视基层处理环节，于是就使得施工应力和材料性能不相适应，这样就引发了空鼓和裂纹现象。

施工管理和现场监督存在不足，这同样是潜在因素，墙面装饰工程包含诸多工序，需严格把控施工环境，材料配比以及操作规范。若施工现场温湿度调节欠佳，譬如冬季低温或者夏季高湿，会左右材料的固化速率及其性能的稳定性，引发空鼓或者裂缝现象发生，而且，现场缺少质量检测及及时修正的机制，倘若出现质量问题无法立即解决，空鼓与裂纹就会慢慢加剧，进而影响到整体的装饰效果，所以，把科学的施工工艺同严格的管理举措融合起来，这对于减小墙面空鼓开裂的风险十分关键。

二、结构设计与环境影响因素分析

（一）墙体结构与承重设计因素

建筑装饰墙面存在空鼓及开裂现象，这既同材料有关，也与施工相关，而且和墙体结构设计紧密相连。墙体的厚度，承重形式以及分隔结构设计都会直接左右墙面装饰层的受力状况，就多层建筑而言，墙体若承受竖向荷载，横向风荷载或者遭遇楼板沉降情况，局部应力集中便极易引发装饰层开裂；特别是在轻质隔墙或者非承重墙处，因为墙体自身强度较低，附着于其上的涂料或者腻子粉层更为轻易地发生空鼓和裂纹，墙体预先设置的管线或者在装修改造期间形成的孔洞，暗管，这些都会损害局部结构

的完整性，造成装饰层在受力时产生应力集中，进而产生空鼓或者裂缝。

墙体结构的刚性与弹性是否契合，这属于影响墙面质量的关键要素，不同材料的热膨胀系数，收缩系数存在明显差别，受温湿度变化或者建筑沉降的影响，就会出现微观应力。特别在混合结构当中，比如钢筋混凝土墙同轻质砖墙或者石膏板相邻施工，要是设计时不充分考量材料的适配性，那么装饰层就极易因应力作用而局部脱落或者开裂，所以，在墙面设计时期，要充分顾及墙体结构特点和装饰层性能的适配情况，经由合理规划墙体厚度，提升承重能力并改良孔洞分布，来减小空鼓和裂缝发生的可能性。

（二）环境因素与使用条件影响

环境条件是墙面空鼓与开裂的关键外部要素，建筑物处于施工及使用阶段时，会受温度，湿度以及气候变化的影响，这些环境因素对材料性能和结构稳定性有着突出的作用。冬季低温有可能致使水泥基材料硬化变缓，湿度过大就会使腻子粉和砂浆含水量上升，在干燥收缩期间形成应力，从而引发裂纹或者空鼓现象；而夏季高温和强烈日照也许会加快材料水分的蒸发，造成局部收缩应力聚集，环境温湿度的季节性变化对于多层建筑来说格外突出，不同楼层之间的温湿度差别还可能带来装饰层应力的差别，进而加大裂缝出现的可能性。

建筑物长时间被使用时，震动，荷载变化以及日常守护情况都会影响到墙面质量，电梯运行，楼板震动或者机械设备使用产生的微小震动，长时间聚集起来会妨碍墙体结构的稳定性。而且，室内空气不流通或者管道漏水等现象，也许会改变墙面的湿度分布，引发局部脱落和开裂，如果使用环境中存在化学腐蚀，污染物积聚之类情况，那么就会对涂料的附着力以及装饰层的耐久性造成影响，所以，在防止墙面空鼓和开裂的时候，应当全面考量施工环境，使用条件以及守护经营方面的因素，并且采取一些防范和调控的举措，从而来提升装饰层的使用寿命，维持建筑的美观性。

三、墙面空鼓开裂的防治技术与施工管理措施

（一）材料优化与施工工艺改进

墙面空鼓与开裂的防治需先从材料选择做起，选用优质涂料，腻子粉以及砂浆，这关乎到墙面是否平整，附着力强且耐久性佳，不同墙体种类要挑选合适的装饰材料，轻质隔墙宜用收缩率小，弹性良好的腻子粉，混凝土墙面则应选附着力强，干燥稳定性高的涂料，在材料使用期间，也要严格把控搅拌比例，施工厚度以及层间干燥时延，促使各施工层彻底固化，应力均匀分配，从而减小空鼓和裂缝出现的可能性。

施工工艺的改良同样是防范墙面问题的关键举措，其一，需按规范流程细致做好基层处理工作，清除灰尘与油污，确保墙面干燥且强度达标，对于基层不平整或者为旧墙体的情况，则要执行找平或者加固处理，从而提升墙面的承重能力，其二，涂抹腻子粉及涂料的时候应当分层操作，把握好各层的厚度，并且等前

一层彻底干透之后再开展下一层作业，防止因一次涂抹过厚而引发收缩应力聚集，其三，施工过程中要维持适宜的温湿度环境，规避高温或者潮湿状况给材料性能带来不良后果，经由材料升级和施工工艺改良，便能够从核心处减小空鼓和裂纹发生的概率，改善墙面的整体品质。

（二）质量监测与养护管理

施工完毕之后，质量监测以及后期的养护管理同样十分关键，施工单位需形成起墙面质量检测体系，其中涵盖空鼓检测，附着力考察以及裂纹观测等方法，以及时察觉潜在的问题并采取补救措施，可以经由敲击法或者仪器来检测墙面是否存在空鼓情况，针对已经找到的空鼓部分，要做局部打磨，重新抹灰或者局部加固的处理，防止问题进一步恶化，定时监测墙面的状态，还可以给后期的养护和保护赋予参考数据，从而提升工程的安全性及其使用寿命。

养护经营上，要重视施工后的环境调控并开展定期守护，墙面装饰层处于干燥期间时，不能让它接触水源，也不能遭受强烈的机械冲击，还要控制好室内的温湿度，促使材料稳定地固化。到了使用阶段，建筑内部应当保证通风良好，防止因管道漏水，空调湿气聚集或者长时间处于潮湿环境而致使装饰层受到损害，如果已经出现了一些微小的裂纹或者空鼓情况，就要及时予以填补，修复或者局部重新涂刷，不可以让这些问题的加剧，经由融合科学监测和养护经营，既可以延长墙面的使用期限，又能够缩减长期维持的费用，提升建筑整体的美观程度和实用价值。

四、墙面空鼓开裂的工程应用与技术优化前景

（一）工程应用中的实践经验

在实际的建筑装饰工程当中，墙面空鼓与开裂防治技术的效果渐渐表现出来，其一，很多工程因为采用了优质材料，而且施工工艺变得规范之后，取得了很大的成绩。就拿大型住宅和商业综合体来说，它们用的是低收缩，高弹性的腻子粉，再加上分层施工，充分干燥这些办法，所以墙面空鼓和裂纹出现的几率就明显减小，其二，施工现场要是随时监测温湿度以及基层处理情况，那么施工单位就能马上察觉到潜在的问题，并及时作出调整，进而缩减质量问题的发生，事实显示，把材料和工艺融合起来实施系统的运作，这是保障墙面质量的关键方法。

部分先进工程运用了信息化运作和数字化监测手段，使得墙面空鼓开裂问题的可控性得以改善，利用墙面空鼓检测仪器，红

外热成像或者激光扫描技术，全面监测施工及竣工后的墙面，可以立即找到空鼓区域，并考量裂纹发展态势，该技术对于保障施工质量以及后期守护十分关键，还给施工单位给予了科学决策按照，经由工程操作验证可知，综合运用材料改良，施工规范和技术监测手段，能够有效地加强建筑装饰工程的整体质量和使用年限，从而给行业给予可推广的经验与参考。

（二）技术优化与未来发展方向

建筑装饰技术持续发展过程中，墙面空鼓与开裂防治技术也表现出新的趋向，日后，材料性能会得到进一步改良，譬如研发出高附着力，低收缩率且具备智能调湿功能的腻子粉及涂料，这种涂料能够适应各类墙体以及环境状况，缩减空鼓和裂纹的发生几率，而且，施工工艺将会变得更为标准，智能，利用自动化喷涂设备，湿度调节系统以及智能施工观察平台，达成施工全过程的数字化运作，以此来减轻因人工操作差别而引发的质量缺陷。

墙面防治技术会越发重视全生命时段经营观念，从施工前改良设计开始，到施工期间的质量观测，再到投入使用后执行环境守护并定时开展养护工作，以此达成墙面质量的动态调节与不断改善，智能检测系统能够随时察觉墙面细微的形变或者裂缝情况，并依靠数据分析给出科学的修补意见，从而加强保养的效果和准确性，而且，相关行业准则及施工指南也会逐步完善，融入绿色低碳材料和可持续施工理念之后，就能给建筑装饰工程墙面质量保障带来更为全面，更具参考价值的办法，经由技术革新和经营提升，日后的墙面空鼓及开裂现象将会被更好地防止和约束住，进而做到既巩固工程质量又增添视觉美感的目标。

五、结论

建筑装饰工程当中，墙面空鼓和开裂现象会左右工程品质及其使用寿命，经由对材料性能，基层处理，施工工艺，墙体结构以及环境状况等方面加以剖析，便能找出空鼓和裂纹产生的关键原因。对于这些原因，若采用改良材料，按标准开展施工，实施质量检测并加强养护管理这样的综合性防治手段，就可以有效地缩减墙面质量问题出现的频率，从实际工程项目来看，科学选用材料，采用恰当的工艺并且结合数字化监测，确实是保证墙面长久稳定的可行办法，日后，伴随着材料性能得以改善，施工朝着智能方向发展以及全生命时段经营观念得到推行，墙面空鼓开裂的防治技术将会持续完善，从而给建筑装饰工程带来更为牢靠的质量保障和科技支撑。

参考文献

- [1] 翟秀春. 预防墙面装饰性开裂的施工措施分析 [J]. 工程建设与设计, 2024, (13): 235-237.
- [2] 雷文火. 真石漆外墙装饰墙面开裂综合防治措施探究 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(18): 73-75.
- [3] 陈硕. 关于建筑装饰墙面开裂原因与防治 [J]. 绿色环保建材, 2016, (12): 8. DOI: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2016.12.008.
- [4] 曹敏, 王领. 建筑外墙面开裂成因及防治 [J]. 现代物业 (上旬刊), 2011, 10(09): 58-59.

公路工程施工协同管理关键影响因素研究

王进冈

云南齐鹏建设工程有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2026020011

摘 要 : 为系统厘清公路工程施工协同管理的运行规律与优化重点, 本文以协同管理、系统管理及项目管理理论为依据, 遵循全面性、科学性、针对性与可操作性原则, 采用文献研究、实地调研与专家访谈法, 识别出组织协同、信息协同、资源协同、环境协同四大维度共 12 项关键影响因素。在此基础上, 剖析各因素单独作用及同类内部、跨类别间的交互机理, 揭示其动态演化特征; 运用层次分析法 (AHP) 对关键因素进行优先级排序, 并通过专家评价与工程项目案例验证排序结果的科学性与合理性。研究表明, 协同机制完善性、信息共享程度、责任划分清晰度为核心影响因素, 组织协同与信息协同合计权重超 68%, 是提升协同管理效能的关键抓手; 资源协同为重要支撑, 环境协同起辅助作用。研究结果可为公路工程施工协同管理体系构建、冲突化解及效率提升提供理论依据与实践参考。

关 键 词 : 公路工程; 施工协同管理; 影响因素; 层次分析法 (AHP)

Research on Key Influencing Factors of Collaborative Management in Highway Engineering Construction

Wang Jingang

Yunnan Qipeng Construction Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract : To systematically clarify the operational patterns and optimization priorities of collaborative management in highway engineering construction, this paper draws on theories of collaborative management, systems management, and project management. Following the principles of comprehensiveness, scientific rigor, relevance, and operability, it employs literature review, field research, and expert interviews to identify 12 key influencing factors across four dimensions: organizational collaboration, information collaboration, resource collaboration, and environmental collaboration. Building on this foundation, the study analyzes the individual effects of each factor, as well as the interaction mechanisms within and across categories, revealing their dynamic evolutionary characteristics. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied to prioritize the key factors, with the scientific validity and rationality of the ranking results verified through expert evaluations and real-world project case studies. The research indicates that the perfection of collaborative mechanisms, the degree of information sharing, and the clarity of responsibility division are the core influencing factors. Organizational and information collaboration collectively account for over 68% of the total weight, serving as crucial leverage points for enhancing collaborative management effectiveness. Resource collaboration provides essential support, while environmental collaboration plays a supplementary role. The findings offer a theoretical basis and practical reference for constructing collaborative management systems, resolving conflicts, and improving efficiency in highway engineering construction.

Keywords : highway engineering; construction collaborative management; influencing factors; Analytic Hierarchy Process (AHP)

引言

公路工程作为我国综合交通运输体系的核心组成部分, 是支撑国民经济高质量发展、推进区域协调发展、保障民生出行的重要基础设施。随着我国交通强国战略的深入推进, 公路工程建设规模不断扩大, 建设标准持续提高, 涉及的建设、施工、监理、设计等参与方日益多元, 施工环节涵盖路基、路面、桥梁、隧道等多个专业, 工序交叉复杂、工期要求严格、资源投入庞大, 传统分散式、粗放式的施工管理模式已难以适应新时代公路工程建设的需求。施工协同管理作为整合多方资源、化解协同冲突、提升管理效能的核心手段, 其

实施效果直接决定公路工程的施工质量、工期进度、成本控制及安全管理水平。基于此，针对公路工程施工协同管理的复杂性、多元性特点，本文聚焦关键影响因素这一核心问题，通过系统识别、机理分析、优先级排序及验证，厘清各因素的影响程度与作用路径，明确协同管理的重点方向，为公路工程施工协同管理效能提升提供理论支撑与实践指引，助力我国公路工程建设高质量发展。

一、公路工程施工协同管理关键影响因素识别

（一）影响因素识别的依据与原则

公路工程是我国基础设施建设的重要内容，其施工质量直接影响人民的生命财产安全及我国的经济发展^[1]。公路工程施工协同管理关键影响因素识别，以协同管理、系统管理、项目管理三大理论为核心依据，结合公路工程施工行业特性构建识别框架^[2]。协同管理理论提供核心逻辑，系统管理理论提供全面识别支撑，项目管理理论为因素细化与分类提供具体指引，同时结合行业标准规范，保障识别的针对性与合理性。为确保识别的全面性、科学性、针对性与可操作性，识别遵循四项原则^[3]。全面性原则覆盖全流程、各参与方及各环节；针对性原则聚焦行业特性，筛选与协同管理密切相关、影响显著的因素；科学性原则采用文献研究、实地调研、专家访谈等多元方法，保障客观性；可操作性原则要求因素清晰可量化或描述，为后续研究与实践提供支撑。

（二）核心影响因素分类识别

结合公路工程施工协同管理实际，基于相关理论与识别原则，通过文献梳理、3个不同规模类型公路工程项目实地调研及15名相关领域专家（含建设、施工、监理单位管理人员及高校学者）访谈，系统识别出其核心影响因素并形成完整体系。这些因素分为四大类及对应子因素，其中作为核心因素的组织协同因素决定协同管理组织基础，包括参与方协同意识、组织架构合理性、责任划分清晰度、协同机制完善性、管理人员能力；作为关键支撑的信息协同因素影响信息传递效率与准确性，关系协同决策科学性，包括信息共享程度、信息传递渠道、信息标准化水平、信息化技术应用；作为物质基础的资源协同因素影响施工效率与工程质量，涉及各类资源配置整合，包括人力资源配置、物力资源整合、财力资源协同、技术资源协同；作为外部因素的环境协同因素间接影响协同实施效果，含内外部环境，包括政策法规环境、市场环境、自然环境、现场施工环境。

二、公路工程施工协同管理关键影响因素作用机理

（一）各关键影响因素的作用机理

组织协同中，参与方协同意识是核心，直接决定协同意愿，强意识可促进信息共享、资源整合，减少冲突；弱意识则易导致信息封锁、推诿扯皮，制约效能。责任划分清晰度是前提，权责明确可避免盲区与交叉，推动各方主动履职；划分模糊会引发推诿，影响协同推进^[4]。协同机制完善性是制度保障，其包含的决策、沟通、冲突解决及激励约束机制，可提升决策科学性、化解

矛盾、激发积极性。管理人员能力直接影响实施效果，专业与沟通协调能力可助力制定科学策略、协调利益、推动工作^[5]。信息协同方面，信息共享程度是核心支撑，高共享可实现信息互通，避免不对称引发的决策失误；低共享则导致决策偏差、流程脱节。BIM等信息化技术是重要手段，可实现信息实时采集共享，打破壁垒，提升协同智能化水平。资源协同中，人力资源配置合理可保障施工环节专业人员充足，推动各环节协同；配置不当则导致衔接不畅。物力资源整合可优化配置、避免浪费，提升利用率并降低成本。财力资源协同顺畅可保障资金到位，避免短缺影响进度；协同不畅则引发资金问题与冲突。技术资源协同可实现技术共享融合，解决难题、优化工艺，提升质量效率^[6]。环境协同方面，完善的政策法规、行业标准可规范协同行为、明确责任；不完善则导致协同混乱。良好市场秩序可激发协同积极性；秩序混乱则加剧利益冲突，降低协同意愿。

（二）关键影响因素的交互作用机理

公路工程施工协同管理的12项关键影响因素并非独立存在，而是相互关联、交织成复杂的交互作用体系。这种复杂性主要体现在三个方面，同类因素内部的交互，如组织协同类中，协同意识与机制彼此促进，责任划分与管理能力双向优化，共同维系系统运转^[7]。不同类别间的协同效应，信息协同的技术应用与信息共享能为资源整合提供支撑，而组织协同机制又能反向推动信息、资源协同的落地与成效提升。正负向交互并存且动态演化，协同意识强、信息共享足，会形成提升效能的正向循环；意识薄弱、责任模糊，则引发信息不对称与资源浪费的负向循环。同时随施工阶段推进，影响权重也在变化，初期侧重组织与政策环境，中期则更依赖信息与资源协同，共同构成管理效能的动态波动。

三、关键影响因素的优先级排序与验证

（一）优先级排序的依据与方法

公路工程施工协同管理关键影响因素的优先级排序，依据影响程度、重要性、可操作性三个维度（影响程度指对协同效能的影响大小，重要性指对协同目标的支撑作用，可操作性指可控性与可优化性），采用层次分析法（AHP）对12项关键因素排序^[8]。AHP作为多准则决策方法，具系统性、科学性、实用性，步骤为，构建目标层（优先级排序）、准则层（组织/信息/资源/环境协同）、方案层（12项因素）的层次结构模型；邀请15名专家用1-9标度法构造判断矩阵；进行一致性检验（ $CI < 0.1$ 、 $CR < 0.1$ ，未通过则调整）；通过特征值法计算权重，按权重确定优先级。

（二）关键影响因素优先级排序

经层次分析法构造判断矩阵并完成一致性检验（ $CR < 0.1$ ），

12项关键影响因素按权重从大到小排序为,协同机制完善性(0.152)、信息共享程度(0.138)、责任划分清晰度(0.125)、参与方协同意识(0.113)、信息化技术应用(0.097)、人力资源配置(0.085)、物力资源整合(0.076)、管理人员能力(0.064)、财力资源协同(0.058)、技术资源协同(0.042)、政策法规环境(0.031)、市场环境(0.029)^[9]。其中,组织协同类(协同机制完善性、责任划分清晰度、参与方协同意识、管理人员能力)与信息协同类(信息共享程度、信息化技术应用)权重合计68.9%,为核心影响因素;资源协同类(人力资源配置等4项)权重合计26.1%,为重要支撑因素;环境协同类(政策法规环境、市场环境)权重合计6.0%,为辅助因素。结果符合实际,核心因素决定协同管理的组织与信息基础,资源协同提供物质保障,外部环境影响相对间接。

(三) 优先级排序验证

为确保关键影响因素优先级排序结果的合理性与准确性,采用专家验证与案例验证相结合的方式,对排序结果进行验证^[10]。其中专家验证邀请了参与本次研究的15名专家,对优先级排序结果进行评价,采用1-5分制对排序结果的合理性进行打分并计算平均得分,本次专家验证的平均得分为4.2分,其中10名专家给出5分,4名专家给出4分,1名专家给出3分,表明专家普遍认可本次优先级排序结果,排序结果具有较高的合理性。同时,征求专家对排序结果的意见,专家提出信息化技术应用的权重可适当提高、技术资源协同的权重可适当调整等建议,结合专家意见,对部分因素的权重进行微调(微调后仍保持原排序顺序,权重变化幅度不超过0.01),进一步提升排序结果的合理性。案例验证则选取2个不同类型的公路工程项目(项目A:高速公路改扩建项目,项目B:农村公路新建项目)展开,通过分析两个项目施工协同管理的实际情况,对比优先级排序结果与项目实际存在的协同管理问题,以此验证排序结果的准确性。项目A在施工过程中,存在协同机制不健全、信息共享不充分、责任划分不清晰等问题,导致施工过程中出现协同冲突频繁、工期延误、成本超支

等问题,与排序结果中权重较高的协同机制完善性、信息共享程度、责任划分清晰度等因素的影响相符,通过完善协同机制、提升信息共享程度、明确责任划分,项目的协同管理效能得到显著提升,进一步验证了这些因素的核心影响作用。项目B在施工过程中,主要存在参与方协同意识薄弱、人力资源配置不合理、信息化技术应用不足等问题,导致施工效率低下、质量隐患较多,与排序结果中权重较高的参与方协同意识、人力资源配置、信息化技术应用等因素的影响相符,通过强化参与方协同意识、优化人力资源配置、推广信息化技术应用,项目的协同管理水平得到有效提升,验证了排序结果的准确性,案例验证结果表明,本次关键影响因素的优先级排序结果能够准确反映公路工程施工协同管理的实际情况,排序合理、科学,能够为后续协同管理优化策略的制定提供可靠依据。

四、结束语

本文围绕公路工程施工协同管理关键影响因素展开系统研究,以协同管理、系统管理及项目管理理论为支撑,通过文献研究、实地调研、专家访谈等方法,系统识别出组织协同、信息协同、资源协同、环境协同四大维度12项关键影响因素,深入剖析了各因素的单独作用机理及交互作用特征,运用层次分析法完成关键因素优先级排序,并通过专家验证与案例验证,证实了排序结果的科学性与合理性。研究明确了协同机制完善性、信息共享程度、责任划分清晰度是影响公路工程施工协同管理效能的核心因素,组织协同与信息协同是提升协同管理水平的关键抓手,资源协同为协同管理提供物质支撑,环境协同发挥辅助保障作用,这一研究结论清晰厘清了公路工程施工协同管理的核心矛盾与优化重点,弥补了现有研究中因素识别零散、机理剖析不深、优先级量化不足的缺口,为公路工程施工协同管理实践提供了明确的理论依据与实践指引。

参考文献

- [1] 李晓东. 公路工程建设中监理与施工单位的协同管理研究[J]. 大陆桥视野, 2025, (07): 120-122.
- [2] 张波. 公路工程施工管理中的常见问题及解决措施[J]. 交通世界, 2018, (20): 139-140. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2018.20.064.
- [3] 田萌萌. 建筑工程施工质量与施工进度协同管理模式研究[J]. 标准生活, 2025, (07): 108-110.
- [4] 王沈杰. 基于利益协同的工程施工进度管理研究[J]. 江西建材, 2023, (06): 367-369.
- [5] 万建秋. 基于 BIM 技术的建设工程施工质量管理体系研究[D]. 重庆科技学院, 2022. DOI: 10.27854/d.cnki.gcqkj.2022.000174.
- [6] 芮至婕. 住宅景观设计与施工协同管理模式研究[J]. 中国住宅设施, 2021, (07): 77-78.
- [7] 梁华春. 浅谈 BIM 下建筑工程施工质量协同管理措施[J]. 中华建设, 2020, (03): 54-55.
- [8] 王威威. 基于 BIM 的建筑工程施工质量协同管理研究[D]. 西安建筑科技大学, 2018.
- [9] 王森昌, 邓勇, 陈拥军, 等. 工程施工项目部协同管理信息平台的应用[J]. 项目管理技术, 2010, 8(11): 65-70.
- [10] 郑培信. BIM 环境下设计—施工总承包项目施工阶段协同管理研究[D]. 长沙理工大学, 2017.

建筑施工现场质量控制与风险防控

李杰

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ME.2026020012

摘 要： 聚焦建筑施工现场质量控制和风险防控的关键环节，对管理体系、技术手段、人员因素以及风险识别和应对机制展开系统梳理，着重强调实施全过程控制与动态管理的重要性，结合施工实际状况，剖析质量缺陷和安全风险的主要源头，构建起多维度的防控途径，达成质量提升与风险降低的协同效应，凸显标准化、信息化和精细化管理于施工阶段的运用，加强过程管控并以数据作为支撑，增强工程的可靠性和综合效益，推动施工管理水平不断优化升级，在保障工程质量的同时有效防范各类风险。

关 键 词： 施工现场；质量控制；风险防控；精细化管理；信息化

Quality Control and Risk Prevention and Control in Construction Site

Li Jie

Hebei Construction Group Corporation Limited, Baoding, Hebei 071000

Abstract： By focusing on critical aspects of quality control and risk prevention in construction sites, this study systematically examines management systems, technical approaches, personnel factors, and risk identification mechanisms. It emphasizes the importance of implementing end-to-end control and dynamic management strategies. Through analyzing actual construction conditions, the research identifies primary sources of quality defects and safety risks, establishing multidimensional prevention pathways to achieve synergistic effects of quality enhancement and risk reduction. The study highlights the application of standardized, informatized, and refined management practices during construction phases, strengthens process control with data-driven support, enhances project reliability and overall benefits, and drives continuous optimization of construction management standards. These measures ensure project quality while effectively mitigating various risks.

Keywords： construction site; quality control; risk prevention and control; refined management; informatization

引言

建筑工程规模不断拓展、结构形式日益繁杂，施工现场质量波动和安全风险叠加的特性愈发显著，传统管理模式难以契合高标准建设需求，质量缺陷与隐患显现出隐蔽化、动态化态势，聚焦质量控制与风险防控关键节点，需强化全过程管控与多维协作，统筹管理体系、技术举措和人员要素，搭建系统化防控路径，运用标准化、信息化和精细化方法增强过程可控性与风险识别能力，推动工程质量与安全水平同步提高。

一、施工现场质量控制体系构建

（一）质量管理组织与责任划分

施工现场质量控制的根基，要依据项目规模和施工特点，搭建层级清晰、职责明确的质量管理组织架构，把质量管理职责细化到各管理岗位和作业层级，形成横向协作、纵向畅通的管理网络，明确项目经理、技术负责人、质量管理人员及班组长的职责范围，保证各环节都有专人负责与监督，构建完备的责任追溯机制，对质量问题全程记录并界定责任，做到问题可查、责任可究，结合绩效考核机制，将质量责任与岗位考核直接关联，提升管理人员和作业人员的质量意识与执行能力，从制度层面保障质

量控制有效实施，避免因职责不清或管理脱节引发质量风险^[1]。

（二）标准化施工与工序控制

标准化施工与工序控制方面，标准化施工是提升现场质量稳定性的关键举措。要围绕施工全流程建立统一的技术标准和操作规范，细化施工工艺流程，对关键工序、重点部位以及易出现质量通病的环节重点把控，确保施工行为符合规范，推行“样板引路”制度，正式施工前通过样板段或样板构件明确质量标准和施工方法，让作业人员直观掌握施工要点，从源头上减少质量偏差，施工过程中设置关键工序控制点和验收节点，对隐蔽工程、结构关键部位等严格检查并记录，防止问题积累和扩大，借助工序交接制度强化前后工序的质量衔接，确保每道工序都在可控状

态下完成，进而实现施工过程规范化、可控化和可追溯。

（三）质量信息化管理应用

信息技术发展推动质量管理朝数字化、智能化转型，引入BIM技术和施工信息化平台，能实时采集、分析、反馈施工进度、质量检测结果、现场问题记录等信息，构建可视化数据体系，让管理人员及时掌握现场质量状况，借助移动终端和云平台快速上报现场问题并闭环处理，缩短问题响应周期，通过数据分析判断质量问题趋势、识别原因，为后续决策提供依据，促使质量管理从经验依赖转向数据驱动，信息化手段应用提升管理效率、增强过程控制能力，为构建系统化、精细化质量控制体系提供有力支撑^[2]。

二、施工关键环节质量控制要点

（一）材料与设备质量控制

材料与设备是工程实体形成基础，其质量直接影响工程整体质量，施工中要建立严格材料进场检验制度，对原材料、构配件、成品设备多层级质量把关，涵盖出厂合格证明、性能检测报告、现场抽检等，保证符合设计与规范要求，供应链管理上优选资质好、信誉稳的供应商，建立长期合作与质量评价机制，从源头降低材料质量风险，加强材料运输、储存、使用管理，防止受潮、污染、损坏致性能下降，大型机械设备和关键施工设备进场前要性能检测与调试，确保运行稳定、安全可靠，建立设备维护与保养制度，减少设备故障引发的施工质量问题，利用信息化手段对材料与设备全过程跟踪管理，实现来源可追溯、使用可记录，全面提升材料与设备质量控制规范性与可控性。

（二）施工工艺与质量控制

施工工艺和技术水平对工程实体质量起着直接作用，需针对关键施工环节展开精细化技术管控，就混凝土工程而言，严格把控配合比设计、浇筑工艺以及养护条件，避免出现裂缝、蜂窝麻面这类质量通病，防水工程要加强基层处理、节点构造和施工环境把控，保证防水层连续且密实，结构施工着重控制钢筋绑扎、模板支设以及构件安装精度，以此保障结构安全、尺寸精准，针对不同工程特性制定专项施工方案和技术交底，让施工人员明晰工艺流程和操作要点，加强施工过程中的技术复核与现场指导，及时纠正不规范操作，避免质量偏差扩大，引入新技术、新工艺和先进施工装备，能进一步提升施工精度与效率，降低人为误差，结合质量通病防治措施，把经验性问题转化为制度化控制内容，推动施工工艺从粗放执行迈向精细控制^[3]。

（三）现场检测与质量验收机制

现场检测与质量验收作为保障工程质量的重要环节，需贯穿施工全程，构建系统化质量监控体系，建立完备的过程检测制度，对关键工序和重要部位实时检测与动态监控，使施工质量始终可控，隐蔽工程严格执行验收程序，覆盖前全面检查并记录，确保隐蔽部位质量可靠，阶段性施工结束后开展分部分项工程质量评估，通过标准化验收流程系统评价工程质量，及时发现潜在

问题并整改，检测手段结合无损检测技术与信息化工具，提高检测效率与准确性，实现质量数据实时采集与分析，建立质量问题闭环管理机制，对发现问题登记、整改、复检与销项，确保问题彻底解决，强化检测与验收刚性约束，防止质量问题累积扩大，提升施工现场质量管理整体水平^[4]。图1展示施工现场质量控制与风险防控的整体框架，涵盖体系构建、关键控制、风险识别与持续改进等内容，体现全过程管理与多层级协同关系

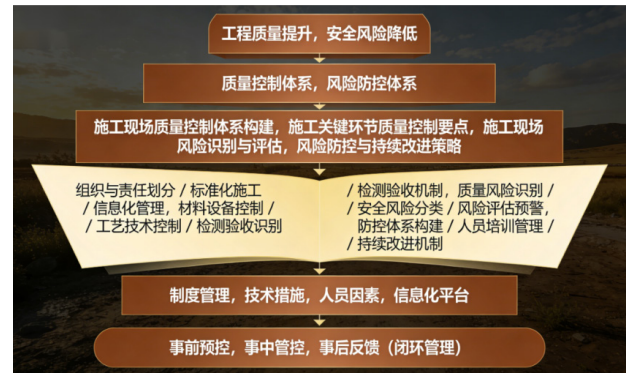


图1 施工现场质量控制与风险防控体系框架图

三、施工现场风险识别与评估

（一）质量风险来源分析

施工现场质量风险呈现多源性与隐蔽性特点，需从设计、材料、施工过程等多维度开展系统识别工作。设计偏差属于重要风险源头，要是图纸有错漏或者和现场条件不契合，容易造成施工偏差，甚至留下结构隐患，材料上原材料质量不达标或性能不稳定会直接影响工程实体质量，施工工艺不当是造成质量通病的关键，像操作不规范、工序衔接不合理等情况，都可能引发裂缝、渗漏、结构缺陷等问题，人员技术水平欠佳、管理不到位以及环境因素变化（像温湿度影响）也会加重质量风险。梳理分类各类风险因素，构建系统化风险清单，把潜在问题提前识别并纳入管理范畴，为后续风险控制提供支撑，结合历史项目经验与典型案例分析，归纳总结高频质量问题，能提升风险识别的准确性与针对性，推动质量管理从被动应对转向主动预防^[5]。

（二）安全风险识别与分类

施工现场安全风险类型繁杂，具备突发性与高危性特点，要依据作业内容和环境条件进行系统识别与分级管理，高空作业是常见高风险作业，涵盖脚手架搭设、模板支撑、外立面施工等环节，防护措施不到位就易引发坠落事故，深基坑施工存在坍塌、涌水、周边环境扰动等风险，对支护结构和监测系统要求颇高，机械操作时，起重设备、运输机械、施工机具管理不善，可能导致碰撞、倾覆等安全事故，针对不同类型风险，按发生概率和后果严重程度分级，分为重大风险、较大风险和一般风险，实施差异化管控举措，重大风险需制定专项施工方案和应急预案，强化现场监控并专人负责，一般风险通过日常检查和规范操作控制。

（三）风险评估与预警机制

基于风险识别，要建立科学的风险评估与预警机制，达成风

险的动态管理和实时控制，构建风险评估模型，对风险发生概率和影响程度做量化分析，综合评价各类风险，确定重点控制对象，实施时结合现场监测数据（如结构变形监测、环境监测以及设备运行数据等），持续跟踪风险状态，通过信息化平台集成与分析数据，监测指标接近或超过预警阈值时系统自动发出预警信号，提醒管理人员及时行动以防止风险扩大。建立现场反馈机制，把巡检记录、隐患排查结果和整改情况纳入风险评估体系以实现数据与实际情况联动更新，完善应急响应机制，针对不同等级风险制定处置流程，确保突发状况下能快速反应、有效控制。风险评估与预警机制协同运行^[6]。

四、风险防控与持续改进策略

（一）风险防控措施体系构建

施工现场风险防控要以系统性和层级化为核心，构建涵盖制度、技术和管理多维度要素的综合防控体系，完善质量与安全管理制

度，明确风险控制流程和责任分工，用标准化制度约束施工行为，奠定刚性管理基础，针对不同施工阶段和关键风险点，制定专项技术措施（如深基坑支护方案、高空作业防护措施、关键结构施工控制方案等），以技术手段降低风险发生概率，强化过程监督和动态检查，采用定期巡查、专项检查和随机抽查相结合的方式，持续识别并及时处置风险隐患，注重多层次协同管理，有效衔接企业管理、项目管理和班组管理，形成纵向贯通、横向协同的防控格局，利用信息化手段动态跟踪风险并分析数据，可提高防控体系响应速度和精准性，推动风险控制从分散应对向系统治理转变。。

（二）人员培训与行为管理

人员因素于施工现场质量与安全管理而言起着决定性作用，要以系统化培训和规范化行为管理增强整体执行能力，构建分层分类的培训体系，结合不同岗位特征安排针对性培训内容，涵盖施工技能、安全操作规范以及质量标准要求等，让作业人员拥有必要专业能力与安全意识，强化岗前培训和持续教育机制，使人员在施工过程中不断更新知识技能，以适应复杂施工环境，行为管理上，采用制度约束与现场监督结合的办法，规范作业行为，

规避违规操作和经验主义引发的风险，借助安全交底、技术交底和班前教育等，加强信息传递与风险提示，提高人员对关键风险点的认知，把人员行为表现纳入绩效考核体系，利用奖惩机制强化正向激励与约束，促使施工人员自觉遵循规范，持续加强人员培训和行为管理，能有效减少人为因素对质量与安全的不利影响，提升施工现场整体管理水平，为工程的顺利推进和高质量完成奠定坚实基础^[7]。

（三）持续改进与反馈机制

持续改进于提升施工现场质量和风险防控能力而言是关键路径，完善反馈机制与闭环管理能达成管理优化。建立质量问题与安全隐患闭环管理流程，从发现问题、记录状况、深入分析到整改落实与最终复检，形成完备处理链条解决问题且防止再犯，而非仅作阶段性处理，加强经验总结和信息反馈，把施工积累的典型问题与有效措施归纳整理成标准化管理内容，为后续项目提供参考，实施时利用信息化平台统计分析问题数据，识别高频问题和关键薄弱环节以针对性优化管理措施，鼓励现场人员反馈问题并提改进建议营造全员参与持续改进氛围，定期开展质量与安全评估系统评价管理效果，依据评估结果调整策略实现动态优化。持续改进与反馈机制有效运行推动施工管理从阶段性控制迈向长期优化，不断提高工程质量和风险防控水准，让施工现场管理在不断调整与完善中更上一层楼，为工程建设的顺利推进和高质量完成奠定坚实基础^[8]。

五、结语

施工现场质量控制和风险防控应贯穿工程全流程，注重体系化和精细化协同推进，完善管理机制、优化技术手段并规范人员行为，促使质量控制与风险防范深度交融，引入信息化手段，采用动态管理模式，增强风险识别和应对能力，保障各关键环节稳定可控，推进标准化与闭环管理，可减少质量瑕疵和安全隐患，提高工程整体可靠性和施工管理效能，助力建筑工程朝着高质量方向稳健迈进，在不断探索与实践持续提升工程品质与管理水平，为建筑行业发展注入新动力。

参考文献

- [1] 董学玲, 谢文彬. 建筑施工现场的质量控制策略探讨 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (17): 148-150.
- [2] 王屹航, 耿杰, 杨海勇, 等. 建筑工程建设中施工现场管理与质量控制 [J]. 建筑科学, 2024, 40(09): 199.
- [3] 崔鹏翔, 刘裕诚, 刘占磊. 建筑工程施工现场质量控制探讨 [J]. 中华建设, 2025, (05): 23-25.
- [4] 左继增. 建筑施工现场质量控制措施研究 [J]. 城市开发, 2025, (14): 106-108.
- [5] 季湧, 韩海朋, 陈国顺. 房屋建筑施工现场的质量及安全管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (04): 59-61.
- [6] 樊刚. 基于建筑施工现场质量控制与风险管理研究 [J]. 产品可靠性报告, 2023, (09): 39-40.
- [7] 岑龙. 建筑施工现场质量控制及风险管理分析 [J]. 中国住宅设施, 2024, (05): 98-100.
- [8] 谢婷. 建筑施工现场质量控制与风险管理的现状分析及对策研究 [J]. 中国住宅设施, 2025, (11): 170-172.

建筑工程项目成本动态控制研究

吕鹏辉

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ME.2026020013

摘 要 : 基于建筑工程项目建设各环节成本变化特点, 形成目标成本 – 过程监管 – 偏差校正 – 动态调整的闭环管理模式。应用信息技术和精益化管理方法, 整理出设计、采购、施工和结算四个环节成本变动的主要影响要素及其管控点和措施, 利用实时信息获取和传递方式来达到及时发现并纠正成本偏差的目的, 在此基础上加强了成本、工期、质量三者相互制约的关系。采用BIM技术和数据分析工具提高成本估算水平以及预判能力从而减少不确定风险的发生几率, 提升项目的经济效益水平以及管理水平。

关 键 词 : 成本动态控制; 全过程管理; BIM技术; 偏差分析; 信息化管理

Research on Dynamic Cost Control of Construction Engineering Projects

Lv Penghui

Hebei Construction Group Corporation Limited, Baoding, Hebei 071000

Abstract : Based on the characteristics of cost changes in each link of construction projects, a closed-loop management mode of target cost process supervision deviation correction dynamic adjustment is formed. By using information technology and lean management methods, the main influencing factors of cost changes in the four links of design, procurement, construction and settlement, as well as their control points and measures, were sorted out. The real-time information acquisition and transmission methods were used to find and correct cost deviations in time. On this basis, the relationship among cost, duration and quality was strengthened. BIM Technology and data analysis tools are used to improve the cost estimation level and prediction ability, so as to reduce the probability of uncertain risks and improve the economic benefit level and management level of the project.

Keywords : cost dynamic control; whole process management; BIM Technology; deviation analysis; information management

引言

建筑工程项目的周期时间较长, 涉及方较多并且施工环境比较复杂, 成本的变化也受到很多因素的影响, 在设计变更以及材料价格上涨甚至是施工组织管理等等都会导致成本发生变动。传统的事后核算式静态的成本管理模式很难对成本进行监控, 容易造成资源的浪费现象和投资失控情况。伴随着信息技术的进步, 成本管理正朝着全生命周期以及动态性的趋势发展, 采用实时的数据收集以及反馈的方式, 能够对成本进行不间断地监测以及调节。在多方参与管理的过程中, 建立目标成本为导向的动态成本管理体系可以优化成本控制效果, 增加项目的综合效益。

一、建筑工程项目成本动态控制理论基础

(一) 成本动态控制的内涵与特征

成本动态控制是围绕着工程项目的整个建设过程进行的时间线性展开, 通过对成本信息及时采集、分析以及反馈从而达到对成本变动的有效追踪和动态修正的目的。相比传统的静态管理模式来说重点在于突出过程性和连续性, 将事后成本控制转变为事中成本控制。具体而言就是全过程的特点, 即涵盖设计、招标采购、施工到竣工结算全部环节均属于监控范畴之内; 数据化特点, 利用信息技术手段得到的数据作为判断的基础; 反馈闭环特

点, “检测 – 分析 – 整改 – 再检测” 环环相扣构成闭环; 多重目的统一特点, 在控制费用的同时也要考虑项目总体进度和工程质量的要求等。通过方案成本与实际成本不断进行比较分析可以很快找出差异原因并且做出相应措施, 避免出现成本过度超支的风险, 提高整个项目的管理水平^[1]。

(二) 成本构成及影响因素分析

建筑工程项目成本结构较为繁琐, 一般分为直接成本与间接成本两大类, 其直接成本主要包含人工费、材料费以及机械使用费等, 是成本控制的重点所在; 间接成本包括管理费、措施费以及其他方面的费用等, 对项目总体经济效益有着直接影响。在实

际的操作过程中，成本的变化是由很多方面一起综合影响的结果：设计方案是否合理直接影响到工程量和资源投入的程度，而设计变更更会导致成本出现较大的起伏；市场的变动尤其是材料的价格和人力成本的变化会使得预算发生较大的变化；施工组织和水平影响着资源利用效率和工期长短；合同管理和结算方式会影响到成本负担以及风险承担情况等。另外，政策环境和外在条件的变化也存在着不确定因素，各种各样的因素彼此之间互相影响之下，成本就具有了波动性和不稳定的特点，加大了管理和控制的困难，所以要进行整体分析并采取相应的控制措施来解决^[5]。

（三）动态控制基本原理与方法

成本动态控制的有效落实离不开系统化管理理念以及合理的方法论，在理论上主要分为“计划、实施、检查、改进”四个步骤。首先是计划环节：将目标成本层层分解形成控制标准；然后实施环节：在实际工作中对资源投入及费用支出情况进行跟踪记录；接着检查环节就是把收集起来的数据进行对比分析得出成本差异；最后改进环节则是依据所获得的结果进行相应的纠正措施从而达到不断完善的目的。在技术上采用挣值法可以融合成本及进度的信息来评定项目的整体情况，有利于把握偏差苗头；而运用目标成本法则侧重于对预先确定的成本目标予以限制，进而起到一个全程管控的作用；最后是价值工程通过对产品功能与成本两者之间的全面考量来进行资源分配优化以及节省开支等效果。采用信息技术对数据进行实时分析、趋势分析来提升对项目成本控制的预见性和准确性，让项目管理由事后救火变为事前预防，进而使得项目的成本管理水平不断提升以及高效运转。

二、建筑工程项目成本动态控制体系构建

图1表现的是建筑工程项目的成本动态管理体系的整体框架及运作流程，体现出目标成本分解、过程监督、偏差分析以及动态调整之间形成封闭回路的特点^[3]。



图1 建筑工程项目成本动态控制体系结构图

（一）目标成本的分解与控制指标设定

目标成本是成本动态控制的重要参照物，必须在工程开始时合理估算并分层分解，把总投资目标分配到各分部分项工程以及具体的施工工序中去，构成有条理、可计量的目标成本控制序列。分解的同时，要根据施工组织设计、工程量表、资源配备状况把各项成本指标分解落实到责任人，达成“指标到位、责任到

人”。并且建立健全责任制成本管理模式，使成本节约与否同个人绩效挂钩，增强其执行力以及自觉性。在此基础上，科学确定警戒线及变动范围，在一定程度上使得成本目标具有一定的灵活性而又不能太宽松，以此来应对施工现场环境复杂变化的要求下的管控的有效性和灵活性。

（二）动态成本信息采集与监控机制

动态成本管理的有效开展离不开精确有效的信息收集传送系统。利用信息化平台对工程施工进展、用料、使用机械以及发生的一切费用开支等信息实行及时的收集汇总并加以整合，建立起一个综合的成本数据库，在实际操作过程中要制定标准的信息录入及审核方式保证信息的真实性与时效性，利用数据接口使设计、采购、施工各阶段能够互相联系起来。还要建立多层次监督结构，针对重要成本点进行密切关注，运用图表形式清晰呈现成本变动情况。基于数据分析能力，通过异常数据探测以及报警提醒，为管理者提供参考信息进而从事后的处理变为事中的监管，增强成本控制的时间性和准确性^[4]。

（三）成本偏差分析与纠偏机制

对于动态控制来说，成本偏差分析是最有决定性意义的一个过程，它要求通过对目标成本与发生的实际成本之间的差异来找到差距的原因并确定差距大小，明确差距产生的根源，包括设计变更，材料涨价或是施工进度缓慢等等，分析时要采用定量计算的方法把差距分解开来，并区别开可以控制的部分和无法控制的部分，从而制定出相应的解决办法，在纠正偏差的过程中，根据情况变化及时改变施工方案、调整资源分配或者是修正成本预算以避免差距进一步加大，在纠正偏差之后要建立一种循环反馈的模式，把纠正的效果运用到以后的工作当中去，对接下来的成本控制做出指导作用。建立偏差识别-原因分析-措施实施-结果反馈的循环模式可以大大加快成本控制反应速度及调整的速度，在项目的整个生命周期内使项目成本处于不断优化、稳定的状况下^[5]。

三、建筑工程项目关键阶段成本动态控制路径

（一）设计阶段成本控制

设计环节决定了工程造价的基本规模，在整个造价环节有前瞻性和约束的作用。从设计方案入手，选取合理的结构体系及施工工艺可在根本处减少能源消耗及施工复杂度。加强限额设计思想，把投资额控制指标融入其中，在保证功能质量和安全性的基础上达到最佳性价比。利用方案审查的方式，考察方案的经济效益、可行性以及存在的各类风险等，尽早找出并解决存在的隐患。采用价值工程的方法，研究工程的功能与造价的关系，消除不合理成本的支出，提高投入产出比。另外就是加强设计、施工、造价等各个方面的配合与沟通，减少设计变更的发生，避免由于信息不对称造成的设计变故的发生，降低项目的成本波动。

（二）施工阶段成本控制

施工阶段是成本的实际发生及控制的关键时期；管理水平高低决定了成本的管控程度。在施工阶段要通过合理的施工组织、

计划管理来合理安排工序穿插、劳动力及机械的投入，加快进度缩短工期，降低窝工率及返工情况的发生率。加强资源配置，重视材料采购、使用管理，严控材料损毁及浪费行为的发生，提高材料使用效率。加强对人材机使用情况的跟踪管理，杜绝资源闲置及浪费现象的发生，在施工现场建立健全的成本核算台账，及时准确地核算各项费用开支，做到成本支出发现的问题有据可查。对于施工期间设计变更及现场签证等应严格按照审批程序办理，杜绝出现不合理费用的发生。通过对成本实施情况进行跟踪管理以及根据工程进度、工程质量的要求做好全面调整就可以达到对于施工期成本的有效管控及优化^[6]。

（三）竣工结算阶段成本控制

竣工结算阶段是对成本管控的最后一环及确认工作，直接影响着整个项目的收益情况，在此期间做好工程量核查流程，对于各个子工程量进行仔细核查，保证核查的结果准确全面，杜绝出现重复计算或者漏算等问题；按合同规定及相应的定额标准编制结算书，审查时要依据充分合理，条理清楚；根据全周期的成本资料汇总整理，把施工过程中形成的各类记录文件进行分类保存，作为结算的依据；在此过程中强化相互之间的联系沟通，加快结算进度，使结算过程更加公开公正，降低诉讼风险。对该项目成本实施情况进行全面的研究，提炼出成本管控的经验及存在的问题，以供下一次进行项目时借鉴，进而达到成本治理不断完善的过程。

四、信息化技术在成本动态控制中的应用

（一）BIM技术在成本管理中的应用

利用 BIM 技术建立三维数字模型，使工程几何参数和造价参数相结合，给成本管理提供了立体、准确的数据参考，在成本估算阶段，可以依托模型完成工程量的自动生成以及及时更新，减少了手工估算中的人为偏差，加快了预算编制的速度；在项目建设期间，如出现设计变动，则可以通过模型即时地对相关的工程量及造价指标产生改动，能够迅速做出应对并调整到位，防止由于信息延迟而造成成本超出控制范围；并且运用其强大的三维显示效果，能够形象化地展现各个部位以及施工工艺流程，便于查找存在的隐患并提前做好对策，减少了无效投入。利用 BIM 技术与进度管理相融合的方式可以做到对项目的成本及工期进行联合测算，从而增强成本控制精准度、提升决策合理性^[7]。

（二）大数据与智能分析技术应用

在建筑工程项目成本管控中的大量历史数据及实时数据是动态管理的重要依据。基于大数据的处理方法来整理项目各环节的成本信息，并从中提炼出成本变动趋势以及主要影响要素等，从而给予成本预估参考。再根据智能化手段进行材料价格变动情况、工作效率提升情况及配置资源状况的变化趋势的研究，做到早发现问题并及时发出警报提示做好预防工作，加大成本管理工作的前见性和能动性。另外通过建立数学算法，来预测不同的施工方案或者管理方式带来的结果差异，以便更好的选择实施方向。智能算法的应用让成本测算从过去的经验式判断转为以数据为基础，提升了成本测算的准确性以及反应能力，有利于成本管理工作的不断改进。

（三）信息化平台与协同管理机制

信息化平台是实施成本动态管理的有效工具，依托综合性信息系统，对设计、采购、施工和结算等方面的信息实行一体化管理和资源共享，消除信息壁垒，提升信息传递速度，在平台上各个主体可以及时地了解到项目的成本信息，便于管理和协作；利用权限设置及审批流对成本信息的标准化处理，保证信息的真实可靠安全保密性。实际操作时，借助手机 APP 以及现场管理系统，做到随时采集并远程查看，使管理更加便捷广泛的同时也加强了监督力度。充分发挥平台分析和警报的作用，在整个过程中不断监测重要费用环节，发现问题时立刻做出相应处理解决办法，加强全方位控制力度，提高项目的综合管理程度以及经济效益^[8]。

五、结语

建筑工程项目的成本动态管控是以全生命周期管理为基础，通过对目标成本的分解、动态监控以及纠正偏差的方式达到对工程成本进行持续性的调整和完善以及严格把控的作用，重点工序上的精准化的管理可以从根本上减小成本波动的可能性，而信息技术手段的应用提高了数据信息收集和处理的水平使得成本管理工作更具有针对性及有效性。建立完整的成本动态管理体系加强各节点之间协调配合以及基于数据分析做出决策有利于节省资源消耗提高利用率减少未知因素影响造成的损失促进工程成本管理由粗放型向精细化、智能化转变。

参考文献

- [1] 马伟. 建筑工程项目成本精细化管理研究 [J]. 行政事业资产与财务, 2023, (24): 40-42.
- [2] 刘琳. 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制 [J]. 中国招标, 2024, (05): 117-119.
- [3] 胡玉洁. 建筑工程项目施工成本管理优化分析 [J]. 投资与创业, 2025, 36(05): 76-78.
- [4] 马舒琳. 建筑工程项目全过程成本动态管控体系构建 [J]. 中国住宅设施, 2025, (04): 116-118.
- [5] 王丹. 高校建筑工程项目成本超支风险识别与动态管控对策研究 [J]. 城市建设, 2025, (08): 71-73.
- [6] 赵萍. 建筑工程项目成本控制与精细化管理模式优化研究 [J]. 建筑, 2025, (05): 91-93.
- [7] 石磊. 建筑工程项目成本控制的有效策略研究 [J]. 住宅与房地产, 2025, (17): 116-118.
- [8] 侯媛媛, 孙鲁楠, 任泽俭. 建筑工程项目造价动态管理存在问题及解决策略分析 [J]. 中华建设, 2025, (10): 34-37.

智能建造技术在城市建筑施工中的应用研究

武晓莉

石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050800

DOI:10.61369/ME.2026020014

摘 要： 随着新型城镇化建设加快，城市建设工程面临多重挑战，传统施工模式已无法满足高质量发展需求。智能建造技术作为新一代信息技术与工业化建造技术的融合产物，可有效破解施工难题、推动行业转型升级。本文结合城市建筑施工实际，阐述智能建造核心技术应用相关内容，剖析当前应用中的突出问题并提出优化建议，为该技术在城市建筑施工领域的推广应用提供指导，助力行业高质量发展。

关 键 词： 智能建造技术；城市建筑施工；数字化施工；智能管控；应用优化

Research on the Application of Intelligent Construction Technology in Urban Building Construction

Wu Xiaoli

Shijiazhuang University of Applied Technology, Shijiazhuang, Hebei 050800

Abstract： With the acceleration of new urbanization, urban construction projects are facing multiple challenges, and traditional construction methods can no longer meet the demands for high-quality development. Intelligent construction technology, as a fusion of next-generation information technology and industrialized construction techniques, can effectively address construction challenges and drive industry transformation and upgrading. Based on the actual situation of urban building construction, this paper elaborates on the application of core intelligent construction technologies, analyzes prominent issues in current applications, and proposes optimization suggestions. It provides guidance for the promotion and application of this technology in the field of urban building construction, facilitating high-quality development in the industry.

Keywords： intelligent construction technology; urban building construction; digital construction; intelligent management and control; application optimization

引言

随着城市建设持续推进，城市建筑逐渐向高层化、复杂化、集约化方向发展，施工中的场地限制、工序配合、质量管理等难题日益突出，传统人工操作与经验管理模式已难以适配需求。智能建造以信息技术、智能化设备与施工技术深度融合为基础，实现施工过程的精确控制、自动化管理与智能化应用，有效突破传统施工瓶颈。在建筑产业化发展趋势下，加强智能建造技术在城市建筑工程中的应用，可显著提升施工效率、保障工程质量与安全，推动建筑业向绿色低碳转型，契合城市高质量发展需求。

一、智能建造技术在城市建筑施工中的核心应用场景

（一）建筑信息模型技术的全流程应用

建筑信息模型（BIM）技术是智能建造的核心支撑技术，核心是对建筑工程全施工过程进行数字化建模与协同管理，破解各专业、各部门间的信息孤岛问题。在城市建设初期，利用 BIM 技术构建三维数字模型，可集成主体结构、机电安装、装饰装修等各专业信息，实现设计方案的直观展示与优化；通过施工过程仿真模拟，能提前发现管线交叉碰撞、结构矛盾等设计问题，避免后期返工造成的经济损失与工期延误^[1]。工程实施阶段，结合现场智能化设备应用 BIM 技术，将施工进度导入模型实现进度与

模型联动，可实时对比实际进度与计划差距，及时修正施工组织设计；同时依托模型精准计算材料用量与工序顺序，优化资源分配，降低损耗。竣工后，BIM 模型可作为验收依据，形成建筑全生命周期数据底座，为后期运营维护提供支撑。相较于传统二维图纸，BIM 技术实现了施工信息的集成化、可视化与协同化，尤其适用于城市高层、超高层等大型工程项目的施工管理。

（二）物联网技术在施工现场管控中的应用

物联网技术通过在施工现场部署传感器、射频识别、无线通信等设备，对人、机、料、法、环等要素进行实时监测与联动，构建智能化施工管理平台。在人员管控方面，采用智能安全帽等设备，实时获取工人的位置与工作状态，实现精准定位和考勤打

卡，并在工人进入危险区域时自动报警，保障人身安全。在机械设备管理方面，为塔吊、施工电梯、混凝土输送泵等加装感应器，实时采集运行数据，实现远程监控与故障预警，及时发现并排除隐患，减少设备停机损失，提升利用率。在物资管理方面，利用 RFID 标签对建材进行编码管理，实现材料从进场、入库、出库到消耗的全流程追踪，精准掌握库存与用量，避免积压或浪费，优化采购计划^[2]。

（三）智能装备在施工工序中的应用

智能装备是智能建造技术的重要载体，能够替代人工完成危险、繁重、重复的作业，在提升效率与质量的同时，降低工人劳动强度。目前，智能装备已广泛应用于混凝土施工、钢筋加工、模板支护、高空作业等城市建设环节。在混凝土施工中，智能布料机、混凝土输送机器人等设备可实现精准浇筑与摊铺，避免人工操作带来的密实度不足、浇筑不均等问题，有效保障施工质量。在钢筋加工方面，智能钢筋切断机、弯曲机、焊接机器人等可实现自动化生产，精准控制钢筋规格、形状与焊接效果，加快加工效率，减少人为失误。在模板支撑环节，智能化模板系统能根据建筑结构尺寸自动调节并安装到位，提升模板支撑的精度与速度，同时可回收再利用，降低施工成本。在高空作业领域，智能高空作业平台、爬模机器人等设备可替代人工完成焊接、喷涂等高空作业，有效消除坠落风险，保障作业人员安全^[3]。

（四）人工智能技术在施工管控中的应用

人工智能技术通过大数据分析、机器学习、图像识别等手段，对施工过程进行智能化分析、判断与控制，提升施工管理的自动化水平。在质量管理方面，利用图像识别技术实时监控施工工序，可自动识别混凝土裂缝、钢筋间距异常、墙面垂直度超标等问题，并及时报警，实现问题的早发现与早解决。在安全管理方面，结合视频监控与 AI 算法，可自动检测工人未戴安全帽、高空抛物、违规用火等违章行为，并即时报警提醒整改，有效减少安全事故发生。在进度管理方面，运用大数据分析对施工进度与资源数据进行解析，预判可能出现的延误情况，便于及时采取补救措施，保障工程按期完工。同时，该技术还可用于施工组织设计，根据现场实际智能优化施工顺序与工艺流程，推动项目更加合理高效地推进^[4]。

二、智能建造技术在城市建筑施工应用中存在的问题

（一）技术应用深度不足，集成化水平偏低

当前，部分城市建筑施工企业在智能建造技术应用层面仍处于初级探索阶段，技术应用多呈现碎片化、单一化特征，缺乏多技术体系间的深度集成与协同融合。以建筑信息模型（BIM）技术为例，其应用多集中于设计阶段，与物联网、人工智能等前沿技术的联动融合较为薄弱，难以支撑工程项目全生命周期的信息互通与协同管控。部分企业仅零散引入少量智能化装备，未构建系统化、一体化的智慧施工现场体系，致使智能建造技术的整体效能无法有效发挥。此外，部分施工单位对智能建造的内涵与价值认知不足，施工生产仍以传统模式为主导，智能技术与施工工

艺的融合应用程度较低，进而制约了智能建造应用水平与实施成效的提升^[5]。

（二）复合型人才供给短缺，岗位适配度不高

智能建造技术的推广应用，亟需兼具建筑施工专业素养与信息技术、智能装备运维能力的复合型人才。当前建筑行业从业人员仍以传统施工人员为主，普遍缺乏对智能建造技术及智能化设备的认知与实操能力，难以满足智能化施工岗位要求。与此同时，高等院校及职业院校智能建造相关专业人才供给总量不足，人才培养体系与施工现场实际需求存在脱节，部分毕业生实践能力薄弱，无法快速适应岗位工作。此外，多数企业针对现有从业人员开展的智能建造专项培训体系尚不健全，培训频次与覆盖范围有限，导致从业人员技术能力提升滞后，难以跟上行业数字化、智能化发展进程。

（三）前期投入成本较高，企业推广动力不足

智能建造技术的规模化应用，离不开持续且充足的资金投入，主要用于智能装备购置、核心技术引进、集成系统搭建及专业人才培养等方面。现阶段，智能设备与智能系统的采购成本、运维成本普遍偏高，对中小型施工企业而言资金压力较大，难以承担大规模智能化升级改造投入。同时，智能建造相关技术与设备的投资回报周期相对较长，部分企业过于注重短期经济效益，对智能建造的长期价值与发展潜力认识不足，导致技术推广应用内生动力不足。此外，部分智能建造技术与装备的场景适用性有限，在老旧小区改造、既有建筑翻新及狭小空间施工等场景中难以充分发挥效能，进一步影响了企业应用智能建造技术的积极性与主动性。

（四）标准体系尚不健全，行业统筹管理滞后

当前，智能建造技术在城市建设工程领域的应用仍处于起步阶段，统一、完善的技术标准与行业规范体系尚未完全形成。由于各参建单位采用的智能技术、装备类型及数据格式缺乏统一标准，致使各信息系统之间难以实现高效的数据互通与协同联动，进而形成新的信息孤岛。同时，智能建造技术应用的部分质量检验标准、安全管理规范尚不健全或指导性不足，工程实践缺乏统一、可直接落地的操作准则，易引发设备使用不规范、过程管控不到位等问题。此外，行业内尚未建立统一、科学的应用成效评估机制，无法对智能建造实施效果进行客观评价，一定程度上制约了技术的推广与普及。

三、智能建造技术在城市建筑施工中深度应用的优化策略

（一）推动技术融合，提升应用深度

施工企业应树立全局发展理念，强化智能建造核心技术的统筹应用与深度集成，构建覆盖工程全流程的智能化施工体系。强化建筑信息模型（BIM）、物联网、人工智能、智能装备等技术的协同集成，推动 BIM 技术跨环节延伸，合理规划智能设备配置、构建一体化智慧工地系统，实现施工全过程数据共享与联动管控；搭建完善的技术应用保障体系，制定实施方案、明确责任分

工，加强与科研机构、高校等的合作破解技术痛点，建立考核评价机制持续优化应用模式，推动智能建造技术从点状浅层应用向系统深度落地转型，切实提升应用实效。

（二）优化人培机制，打造复合型人才队伍

高校及职业院校应优化完善智能建造相关专业课程体系，打破学科壁垒，强化建筑施工专业知识与信息技术、智能装备操作等内容的融合，重点加强实践教学环节建设，搭建校企合作实训平台，提升学生实践动手能力与岗位适配能力，确保培养人才符合施工现场实际需求；施工单位需加大现有职工再教育投入，针对性开展智能建造技术、智能设备操作使用等专项培训，系统提升职工专业素养与技能水平，推动传统建筑工人向智能化技术工人转型；同时，注重从行业外部引进具备建筑工程施工与信息技术双重知识结构的复合型人才，充实人才队伍，构建全方位、多层次的人才供给体系，为智能建造技术的深度应用提供坚实的人力资源保障。

（三）优化成本管控，增强企业推广动力

政府层面应加大对智能建造技术研发的扶持力度，强化资金投入保障，出台针对性补贴、税收减免等配套政策，降低企业技术研发与设备购置成本，激发企业应用积极性。施工单位需科学统筹自身资金安排，在保障工程项目正常推进的前提下，合理规划智能建造技术研发与设备投入的资金比例，坚持实用性 with 性价比导向，审慎筛选适配施工现场需求的智能化技术与装备，杜绝盲目投资造成的资源浪费；同时，加强新技术、新设备应用过程中的精细化管理，通过提升施工效率、减少返工整改、节约材料消耗等方式，加快投资成本回收速度，提升企业经济效益。此外，应大力培育和发展智能机械租赁市场，完善租赁服务体系，通过设备租赁模式减轻施工单位尤其是中小企业的购置压力，进一步提升各类施工企业采用智能建造技术的主动性与可行性。

（四）完善标准体系，规范技术应用

行业主管部门要尽快健全智能建造技术应用相关标准体系及

行业规范，制定统一的数据格式、技术标准、质量验收标准以及安全管理规定等，打破不同技术、不同系统间的信息壁垒，实现各技术、各系统的信息互通与协同联动，推动智能建造应用规范化、标准化发展。建立健全智能建造技术应用评估机制，围绕技术应用水平、施工效率提升、安全性能保障、环保效益发挥等核心维度，制定量化评估指标，客观评价企业智能建造技术应用成效，为企业规范、高效应用智能建造技术提供指导。加强行业监督管理力度，严格执法检查，严厉打击违反相关法律法规、擅自违规应用智能建造技术的行为，净化行业发展环境，促进行业健康有序发展；积极引导企业、行业协会参与标准编制工作，结合工程实践经验，持续优化完善标准内容，增强标准的实用性、针对性和可操作性，确保标准体系与行业发展实际同频同步。

四、结论

智能建造技术作为建筑业转型升级的核心驱动力，在城市建设工程领域具有广泛的应用场景，能够有效破解传统施工模式存在的诸多弊端，显著提升工程建设的质量、效率与安全水平，助力建筑行业实现数字化、智能化与绿色化转型发展。建筑信息模型（BIM）、物联网、智能装备、人工智能等关键技术，在城市建筑工程的设计、施工及管理全环节均发挥着不可或缺的支撑作用，但当前其应用过程中仍面临技术整合不完善、复合型人才短缺、应用成本偏高、标准体系缺失等突出问题。为进一步扩大智能建造技术在城市建筑施工中的应用广度与深度，充分释放其技术优势，需针对性采取技术集成融合、复合型人才培育、应用成本管控、标准体系完善等一系列优化措施，破解应用困境、改善应用现状，推动智能建造技术与城市建设工程深度融合，助力建筑行业高质量发展。

参考文献

- [1] 吴奔生. 智能建造技术在城市建筑施工中的应用与挑战 [J]. 四川建材, 2026, 52 (01): 14-15+51.
- [2] 李艳春. 智能建造技术在绿色建筑施工中的应用与发展趋势 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (23): 93-95.
- [3] 陈彤, 柏洪福, 刘学兵, 王成城. 智能建造技术在高层建筑施工中的应用研究 [J]. 工程质量, 2025, 43 (11): 94-97.
- [4] 罗勇. 智能建造技术在厂房建筑施工中的应用 [J]. 石材, 2025, (10): 86-88.
- [5] 史娟. 智能建造技术在绿色建筑施工过程中的应用与成效分析 [J]. 建材发展导向, 2025, 23 (18): 109-111.

建筑工程施工质量控制与管理优化研究

申鑫恒, 王伟伟

中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013

DOI:10.61369/ME.2026020015

摘 要 : 针对建筑工程项目施工质量管理中存在的材料管理不到位、管理人员职责不明晰、施工过程监控力度不够以及信息化手段运用不足等问题, 在工程施工管理的基础上, 从建立健全质量管理机制、加强重要环节把控、严格材料及机具管理、增强现场人员技能水平、深化信息化监督等几个方面入手寻求解决对策; 形成全链条式、精准化、规范化质量管理体系可切实降低施工质量通病及事故隐患出现概率, 保证建设工程工程质量、进度、管理水平得到提升, 实现建筑工程项目有序可控高质量推进。

关 键 词 : 建筑工程; 施工质量控制; 质量管理优化; 全过程管理; 信息化监督

Research on Construction Quality Control and Management Optimization in Construction Engineerings

Shen Xinheng, Wang Weiwei

China Construction Technology Group Co., Ltd., Beijing 100013

Abstract : In response to the problems of inadequate material management, unclear responsibilities of management personnel, insufficient monitoring of the construction process, and inadequate use of information technology in the construction quality management of construction projects, solutions are sought from several aspects, including establishing and improving quality management mechanisms, strengthening control of important links, strict management of materials and equipment, enhancing the skills of on-site personnel, and deepening information technology supervision, based on the foundation of engineering construction management; The formation of a full chain, precise, and standardized quality management pattern can effectively reduce the probability of common construction quality problems and hidden dangers, ensure the improvement of construction project quality, progress, and management level, and achieve orderly, controllable, and high-quality promotion of construction projects.

Keywords : construction engineering; construction quality control; quality management optimization; whole process management; information supervision

引言

建筑工程项目质量既影响建筑物的安全可靠程度及其使用寿命以及建筑的功能需求还决定着施工单位的社会形象及经济效益。现阶段由于项目越来越多, 工艺越来越先进, 质量标准越来越高, 因此对施工质量管理的要求也越来越高但是对于工程质量的管控中还有着职责不明晰, 管理不到位, 重视不够等问题阻碍了工程建设的质量水平的进步所以有必要立足于施工实践来总结工程质量的不足之处再探索更为合理有效地加强工程质量管理的方法措施从而为进一步的研究和解决问题做好铺垫。

一、建筑工程施工质量控制的现状与主要问题

(一) 施工质量控制的重要性认识不足

针对建筑工程施工管理而言, 质量把控就应该放在首要位置上, 在实际当中部分施工单位对于工程质量的重要性缺乏足够理解, 很多工程项目的实施过程中侧重的是进度与成本控制, 在他们看来把质量作为次要因素是可以接受的, 忽视了其贯穿整个工程管理过程中的必要性, 在激烈的竞争环境中, 某些施工单位为了获取短期内的利益, 一味追求工期进度, 忽视了质量保证机制

的实际运行, 使得一线负责质量工作的人员质量观念薄弱, 施工队伍的操作工艺标准流于形式。这不但会导致工程质量出现粗制滥造、偷工减料的现象, 而且会使整个建设工程出现裂缝、渗漏、空鼓等一系列通病问题, 一旦发生此类质量问题, 轻则影响建筑的美观效果及使用功能完整性, 重则危及建筑物的整体稳定性以及人们的生命财产安全。所以, 缺乏质量控制理念已经成为制约着建筑工程施工质量提高的关键性难题。

(二) 施工过程质量控制存在薄弱环节

施工阶段是工程项目建设质量形成的决定性阶段, 其每一个

环节把控不到位都会影响工程项目的最终质量，在很多建设工程项目的施工过程中，施工过程的质量控制还存在着较大的薄弱点，一方面在前期准备阶段，技术人员交底不到位、施工方案部署不全面的现象较多出现，使现场施工人员不清楚了解工艺流程以及具体的操作规定；另一方面在材料进场检验、样板制作、交叉作业及隐蔽工程验收等重要步骤上，一些工程项目的质量把控不够严苛，仅停留在表面的检查阶段，无法实现全时段的跟踪与动态监管，容易造成质量问题得不到有效解决，从而引发的小瑕疵逐渐发展成为严重的质量问题。另外加上一些现场管理巡查次数不够、填写记录不到位、整改落实不到位等问题，导致质量问题频繁出现重复修补，加大了返修费用及进度压力，降低了工程质量把控的真实性。

（三）质量管理体系执行不到位

在制度方面，不少建设施工单位已构建了较为健全的质量管理制度，如质量责任制、监督检查制以及缺陷处理制度等等，在具体落实过程中差异较大。一些企业在有较完备的制度的基础上却没有对应该与现场作业同步的监督落实措施，使得相关的要求不能够切实得到贯彻实施；一方面各个工作岗位之间的责任分工模糊不清，项目经理部，技术人员、质量员以及施工组等在质量管理方面的分工配合协调性差，出了问题互相逃避责任，降低了整改的效果。另一方面，监督监管手段不到位，一些规章制度仅限于纸上谈兵，在实际的工作中标准不一样、尺度不一，导致质量管理失去延续性和约束力^[2]。

二、影响建筑工程施工质量控制的主要因素分析

（一）人员因素对施工质量的影响

人的因素是最为活跃、最具不确定性的建筑工程项目施工质量管理因素，直接影响到施工活动是否按规范进行及质量目标的达成情况。施工单位管理人员的统筹协调能力、质量观念、现场管理力度，决定了工程质量管理制度的能否真正落实到各个施工工序上，技术人员的技术判定水平和技术交底的细致程度，决定了施工计划能否被正确解读并得以实施，一线操作工人的技术水平、规范化意识、工作经验等更是影响着整个工程的质量好坏。如果项目经理对于质量把控不够重视，现场巡查走过场的话，很有可能会出现问题不能及时发现的情况。如果技术交底不详细、不充分，施工队伍不了解工艺标准，就会在钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑、防水施工等环节出现问题；如果现场人员教育培训不够或者责任心不强就容易存在违章指挥、偷工减料、工序缺失等现象，从而导致施工出现裂缝、空鼓、渗漏、尺寸不符合设计要求的情况发生。所以，人员因素不仅仅是个人的技术水平高低的问题，还在于其质量观念、履行职责、配合协作能力高低程度的问题，它对工程质量的作用是根本性的和持久性的^[3]。

（二）材料与设备因素对施工质量的影响

材料及机具是工程建设过程得以正常进行的基础条件，它们的质量水平以及管理程度决定着整个建筑物的质量和技术水平。而建筑材料则是建筑整体的基础组成元素，必须要满足设计的要求、技术指标以及相应的规范标准，如果出现材料不合格、规格型

号不对或者检查不严格的现象，则会危害到建筑物的安全可靠、耐用性和功能需求等。比如钢筋强度不够，水泥安定性不合格或者防水材料性能不能达到要求等都会给后期施工和使用过程带来危险因素^[4]；另外，施工机械装备的工作性能状况、工作误差大小以及保养情况也会极大地影响着工程质量的好坏。模板支撑设备、测量仪器、起重机械、混凝土振捣设备等等如果长时间得不到维修保养就容易产生精度不准、运转不好乃至停工的现象，导致构件尺寸误差，混凝土密实度不够，安装误差放大的质量缺陷。而更为形象地揭示出施工质量问题的主要原因就是表一的内容。

表1 建筑工程施工质量问题主要影响因素统计表			
序号	主要影响因素	占比（%）	数据说明
1	人员操作不规范	32.5	反映施工人员技术水平与责任意识不足
2	材料质量不达标	24.3	反映材料采购、验收及保管存在漏洞
3	施工过程监管不到位	21.8	反映过程检查、验收和整改不及时
4	机械设备管理不善	11.4	反映设备维护保养及使用管理不足
5	技术交底不充分	10.0	反映施工方案传达不清、执行偏差

由表格可知，材料不合格以及设备管理不到位，在造成工程质量缺陷中所占比重很大，反映出目前工程项目对物资采购控制、进场检验以及机械运转管理等方面仍然存在较大不足之处，必须进一步加强对物资采购审批制度、二次抽查程序、设备台帐及日常维护保养等方面的管控力度。

（三）管理与技术因素对施工质量的影响

管理和技术因素存在于整个建设工程施工组织过程中，是保证工程建设质量管理体系高效运转的关键点。管理上，如果工程质量管理体制机制不完备、职务分工不明晰、工序联系不到位，则易使现场的质量管理存在缺位、重叠以及脱节的现象，在特别是多种工种交叉施工和特殊构造施工情况下如果缺少统筹安排及管理，质量问题常常发生在工序交接点上被放大。技术层面上，施工组织设计是否合理、工程技术措施是否到位、技术规范落实情况如何，直接影响到整个工程能否达到规定的设计指标和技术要求。如果前期方案论证不彻底，没有依据施工现场实际情况做出调整，很有可能会造成施工工艺与现场情况不相适应的问题出现；如果没有对重要环节制定有效的技术手段或者标准化工序落实不到位，则非常容易导致质量问题的发生；再者随着建筑工程越来越复杂，信息技术对于质量监控的作用越来越大，在一些项目中仍然采用传统的手工管理模式，巡查不到位、信息滞后、问题反馈慢等问题严重阻碍了信息化闭环管理的实现；同时在复杂的工程项目里，管理失控和技术失控往往会双重叠加在一起，降低质量控制精准度的同时也使得返工增多、质量事故频发^[5]。

三、建筑工程施工质量控制与管理优化的实施路径

（一）完善质量管理制度，压实各方责任

做好建筑工程项目质量管理，首先要从完善、明晰、可行的

质量管理体系做起，施工单位应当根据自身项目管理情况，构建起包括项目的立项审批、施工组织、工序实施、质量检验、缺陷修复及追踪问责在内的工程质量责任制，把质量指标分解到岗位上、落实到具体人员身上，做到职责分明，层层递进，相互衔接。在现场实际操作的过程中，要更加突出项目经理对于整个工程项目的质量管理责任，加强技术人员对于施工方案以及施工组织设计和技术交底、工艺标准执行情况的审查职能，强化质检员对重要分项工程及隐蔽工程验收环节的质量监理任务，明确各班组及一线操作工人对自己操作过程中的产品质量的责任义务，让质量管理从“说一不二”变成“有法可依”。在此基础上还要建立健全相关考核奖惩措施，把项目过程中的质量问题纳入到绩效考核范围之内，对于出现问题不整改、管理不到位等行为给予严厉处罚，保证质量管理体系切实得到贯彻落实^[6]。

（二）强化施工全过程控制，提高现场管理水平

工程质量产生于整个施工过程中，在任何一个方面的管理松懈都有可能导致出现质量问题，所以必须要做到全过程管理的理念贯穿到整个工程建设之中。施工单位要从施工前开始就要注重做好图纸会审，施工方案选择，技术交底以及风险预控等工作；在材料进场上要严格进行检验、复核以及取样等措施来避免不合格的材料进入工地；在施工过程中，要以样板引路，工序交接检查，节点控制以及隐蔽工程验收作为重点，加强对重要部位、关键技术、常见病防治的关键部位实施旁站管理以及过程记录。保证每个环节都要符合相应的要求；而在竣工验收时，就需要对施工资料，工程实体以及整改情况进行全面检查，提高验收质量。实行从预防到控制再到整改的一体化的全链条质量管理，可以大大降低施工失误率，返工率，使施工现场管理从粗放式走向精细化，规范化^[7]。

（三）推进信息化与人员培训，提升管理优化成效

随着建筑业施工质量管理越来越趋于精细化，标准化，信息科技及人的素质提升成了提升管理效能的有效手段。施工单位需要大力推广使用 BIM 技术、智慧工地平台、质量安全巡查系统、移动终端记录系统等信息化手段，把日常的质量核查、安全隐患上传、隐患整改、留痕、责任追究等工作全部纳入信息化管理系统当中去，在第一时间发现问题、及时上报并形成闭环，加快现场管控速度，提升质量把控的精准度。同时信息化措施的有效实施还需要有较高水平的技术管理人员及操作人员的支持下才能进行，所以还要建立健全长期的教育培训制度。对项目经理部管理人员、技术干部以及一线工人分别就质量标准、施工规范、操作工艺和安全知识进行教育学习，提高他们的技术水平和素质修养。把信息化建设和教育培训结合起来，在很大程度上提高了工程施工质量管理的效率以及准确程度；而且可以从源头防止出现错误以及管理漏洞等问题的发生，为建筑工程项目施工质量的不断提升提供了可靠的基础^[8]。

四、结语

建筑工程项目施工质量控制直接影响到项目的安全，使用性能以及经济效益。通过实际工程项目来看，施工过程中的质量管理还存在职责不到位、管控不够细致、制度落实不到位等情况，受人员素质、物资、机械、技术和管理等多种因素制约，须从完善规章制度，加强全过程管理，运用信息技术手段以及强化技术人员教育等方面不断改进管理方法，提升工程项目的质量管理水平，为建筑工程安全建造与建筑业产业升级保驾护航。

参考文献

- [1]叶浩然. 建筑工程施工过程中的质量控制与安全管理 [J]. 房地产世界, 2025, (20): 74-76.
- [2]黄衍泽. 建筑工程管理中的施工质量控制措施研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(21): 153-156.
- [3]徐永恒. 建筑工程管理优化对施工质量控制的作用机制研究 [J]. 城市开发, 2025, (22): 124-126.
- [4]王军. 建筑工程管理及施工质量控制的有效对策 [J]. 城市开发, 2025, (24): 103-105.
- [5]陈沛军. 建筑工程施工过程质量控制与安全管理策略 [J]. 建材发展导向, 2026, 24(01): 43-45.D
- [6]姜培亮. 建筑工程管理及施工质量控制的有效策略研究 [J]. 城市开发, 2026, (01): 159-161.
- [7]刘艳伟. 探讨建筑工程管理及施工质量控制的有效策略 [J]. 标准生活, 2026, (01): 197-199.
- [8]周雯雯. 建筑工程混凝土施工中的质量控制与优化管理研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2026, (03): 130-132.

城市更新背景下市政设施维修改造策略探析

杨璐¹, 朱聿宝²

1. 鄂尔多斯市康巴什区基础市政工程有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

2. 内蒙古自治区鄂尔多斯市康巴什区建设工程质量安全技术服务中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

DOI:10.61369/ME.2026020016

摘 要 : 在城市更新持续推进的背景下, 市政设施作为城市运行的“生命线”, 其维修改造是完善城市功能、保障民生福祉、建设宜居韧性城市的关键举措。本文以城市更新的核心目标为出发点, 明确市政设施维修改造安全韧性、功能适配、绿色低碳、智能高效这四大核心诉求, 对目前改造过程中出现的规划统筹不够、技术适应性差、运维机制不健全、保障体系不完善等问题进行分析, 并结合相关的实践经验, 从规划、技术、运维、保障四个方面提出相应的改进措施, 为提高市政设施改造的质量、促进城市高质量发展提供理论上的参考和实践上的借鉴。

关 键 词 : 城市更新; 市政设施; 维修改造; 宜居城市; 韧性城市

Analysis on Maintenance and Reconstruction Strategies of Municipal Facilities under the Background of Urban Renewal

Yang Lu¹, Zhu Yubao²

1. Kangbashi District Basic Municipal Engineering Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017010

2. Kangbashi District Construction Engineering Quality and Safety Technology Service Center, Ordos, Inner Mongolia 017010

Abstract : Against the backdrop of ongoing urban renewal initiatives, municipal infrastructure serves as the "lifeline" of urban operations. Its maintenance and renovation constitute critical measures for enhancing urban functions, safeguarding public welfare, and building livable, resilient cities. This study begins with the core objectives of urban renewal, identifying four key requirements for municipal facility upgrades: safety and resilience, functional adaptability, green and low-carbon practices, and intelligent efficiency. It analyzes current challenges in renovation processes—including inadequate planning coordination, poor technical compatibility, incomplete operation and maintenance mechanisms, and insufficient support systems—while incorporating practical experience. Based on these findings, the paper proposes improvement measures across four dimensions: planning, technology, operations, and support systems. These recommendations aim to provide theoretical references and practical insights for enhancing municipal facility renovation quality and promoting high-quality urban development.

Keywords : urban renewal; municipal facilities; maintenance and renovation; livable city; resilient city

引言

伴随着我国新型城镇化建设的推进, 城市更新也成为破解城市发展难题、补齐城市建设短板的有效途径。市政设施是支撑城市生产生活的基础设施, 包含排水、道路、燃气等众多方面, 老化破损、功能落后等问题日益突出, 既影响城市运行效率, 又制约宜居韧性城市建设。市政设施维修改造不应仅停留在简单的修复整治, 而应该和城市更新深度结合。因此, 本文以城市更新背景下的市政设施维修改造为研究对象, 探究科学合理的优化途径, 助力城市功能提质、民生福祉改善。

一、城市更新背景下市政设施维修改造的核心诉求

城市更新背景下, 市政设施维修改造并非简单的“修修补补”, 而是以城市发展需求为导向、以民生保障为中心、以提质增效为目标的系统性工程, 其主要诉求集中在以下四个方面: 一

是安全韧性要求, 要对市政设施安全隐患进行全方位排查, 破解老旧破损造成的运行风险, 提高设施抗御自然灾害和突发事件的能力, 确保城市的正常运转; 二是功能匹配诉求, 补齐设施供给短板, 改善设施分布及数量, 适应人口增多、产业升级、消费升级所产生多样化的需求, 促使市政设施由“基本满足”向“优质

适配”升级；三是绿色低碳要求，推行新能源、新材料、新技术的使用，缩减设施运行耗能和碳排放，促进市政设施同生态环境协同发展，符合海绵城市建设的理念；四是智能高效要求，加入数字化、智能化技术，创建智慧运维体系，提升设施运行效率和管理水平，达成市政设施全生命周期精细化治理。

二、城市更新背景下市政设施维修改造的现存困境

虽然市政设施维修改造已经成为城市更新的重要任务，但是在实践推进的过程中仍然存在着许多深层次的困境，从而影响到改造成效的充分发挥。

其一，规划统筹不足，协同性缺失。目前，市政设施维修改造大多采取“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化方式，缺少同城市更新总体规划、国土空间规划、产业规划的有机衔接，造成改造方案缺乏系统性和前瞻性。加之，各专项市政设施（排水、燃气、道路等）的维修改造缺乏协同联动，造成重复建设、资源浪费，导致产生管线冲突、施工扰民等问题^[1]。同时，改造规划缺乏为新型基础设施建设留出足够的空间，无法适应城市智慧化、绿色化的发展要求，造成改造后市政设施短期内再次出现功能滞后的问题。

其二，技术适配性不足，改造质量参差不齐。部分城市在市政设施维修改造时仍然使用传统的技术、工艺，缺少对新型修复技术、环保材料的应用推广，造成改造后设施耐久性、安全性无法确保，维修频繁。技术应用缺乏针对性，缺乏根据各个区域、不同类型的市政设施老化程度、功能需求来制定不同的改造方案，造成“一刀切”的改造现象，这不仅增大了改造成本，也无法有效解决实际问题。此外，数字化、智能化技术在运维中应用较少，缺少完善的智慧监测和预警系统，无法达到准确找到设施故障并迅速处理的效果。

其三，运维机制不完善，长效性不足。市政设施维修改造重建设轻运维的现象比较普遍，改造完成之后缺少完善的常态化运维机制，运维资金投入不足、专业运维队伍短缺，造成部分改造后的设施因为维护不及时而再次出现老化、破损的问题，无法达到改造的长期效益。运维责任不清，政府、企业、居民之间的协同运维机制尚未建立，居民参与度不高，无法形成共建共治共享的运维格局，不利于市政设施的长效管理。

其四，保障体系不健全，制约改造推进。资金保障方面，市政设施维修改造资金主要靠政府财政投入，市场化投融资机制不健全，社会资本参与度不高，资金短缺严重，无法支撑大规模、高质量的改造工程。就政策保障而言，城市更新所适用的市政设施维修改造标准、审批程序缺乏健全，部分改造项目由于审批手续复杂、耗时长，影响了改造速度。人才保障上缺少既懂技术又会管理的复合型人才，无法满足智慧化、精细化运维的要求，影响了改造质量以及运维水平的提高^[2]。

三、城市更新背景下市政设施维修改造的优化策略

（一）强化规划统筹，构建协同联动体系

规划是市政设施维修改造的前提，要从城市更新的整体目标出发，建立“多规合一”的协同规划体系，实现改造工作的系统

性与前瞻性。一方面，坚持规划引领，以城市更新总体规划为龙头，将市政设施维修改造专项规划同国土空间规划、产业规划、民生规划、生态规划深度融合，确定改造重点区域、主要任务和推进时间表，防止出现零散化改造。在规划编制阶段开展全要素现状普查，了解各类市政设施的分布、数量、使用情况以及服役状况，创建数字化档案库，为改造方案制订提供科学支撑^[3]。另一方面，加强协同联动，创建住建、城管、水务、燃气等部门协同工作制度，统筹安排各类市政设施维修改建工作，杜绝重复建设及管线矛盾。同时推动市政设施改造和老旧小区改造、历史街区保护、公共空间提升等城市更新重点任务的协同推进，达到功能互补、效益最大化的目的。再一方面，预留未来发展空间，改造规划为充电桩、5G基站、智慧监测设备等新型基础设施留出安装位置和管线通道，适应城市智慧化、绿色化的发展需要，提高市政设施的可持续性，广泛征求居民、企业和专家意见以提高规划的科学性、可操作性，使其符合实际。

（二）优化技术应用，提升改造质量与适配性

技术创新是提高市政设施维修改造质量的重要途径，要根据改造需求，推广使用先进适用的技术和材料，达到差异化、精准化改造的目的。一是推广新型修复技术，根据不同类型的市政设施老化问题，使用相应的修复技术，例如对老化破损的管网采用非开挖修复技术（紫外光固化、注浆修复），减少路面开挖和环境影响；对破损的道路采用低噪微表处、预制拼装等技术，缩短施工工期，提高路面耐久性^[4]。推广PE管、球墨铸铁管、UHPC新型管材等环保耐用材料代替传统老旧材料，提高设施使用寿命。二是推行差异化改造模式，根据市政设施的种类、老化程度、所在区域特点来制定“一设施一方案”的差异化改造策略，防止出现“一刀切”的现象。对于老旧城区主要解决设施老化、安全隐患问题，新建城区主要完善设施功能、提高智能化水平，历史街区主要兼顾设施功能和历史风貌保护，实现修旧如旧、功能焕新。三是推进智慧化技术的融合，创建市政设施智慧运维平台，在管网关键节点、道路交叉口、能源站点等处布置传感器，对设施运行数据实施实时监测，达成故障预警、负荷预估和优化调度的目的。推广BIM技术的应用，开展管线三维碰撞检测，降低施工返工的风险，提高改造效率和质量。此外，需建立一套科学完善的科技适配评价体系，在全面评价区域资源禀赋、发展水平、实际需求、实施条件的基础上，慎重选择真正适合本区域的、高效的、可行的技术方案，坚决防止盲目跟风或者片面追求先进性而引进不符合本区域实际需求的高价格技术，避免造成宝贵的财政资金和人力资源的浪费^[5]。

（三）完善运维机制，保障改造长效性

市政设施维修改造的长效性在于运维，必须克服重建设、轻运维的倾向，创建起常态化的、精细化的、协同化的运维体系。其一，建立全生命周期运维体系，将运维工作贯穿于改造项目规划、设计、施工、验收全过程，在设计阶段充分考虑运维便利性，施工阶段严格把控工程质量，验收阶段明确运维标准和责任，确保改造后设施具备良好的运维条件。其二，建立协同运维机制，明确政府、企业、居民的运维责任，构建起政府主导、企

业运营、居民参与的共建共治共享格局。政府负责统筹协调、监管，企业承担专业运维工作，依托市场化运作提高运维效率；鼓励居民参与设施维护监督，畅通意见反馈渠道，提高居民参与度、责任感。其三，加强运维队伍建设，培养专业运维队伍，开展技术培训和技能考核，提高运维人员专业水平和应急处置能力，满足智慧化运维需求。建立运维绩效考核机制，将运维质量同绩效结合，推动运维企业改善服务水平^[6-7]。此外，定期开展运维巡检和设施检修工作，制定故障应急处置预案，确保设施发生故障后可以及时响应、及时处理，从而达到运维的长效性。同时，创建运维数据共享机制，促使各个部门、各个运维单位的信息资源共享和互通，从而提高运维决策的科学性以及及时性。

（四）健全保障体系，破解改造制约因素

完善的保障体系是市政设施维修改造顺利进行的有力保障，要从资金、政策、人才三方面入手，解决改造过程中出现的各种制约因素。一是加强资金保障，创建起“政府主推、市场补缺、社会参与”的多元投融资体系。加大政府财政投入，主要针对老旧小区、重点区域的市政设施维修改造予以支持，完善市场化投融资机制，推动社会资本采用 PPP 模式、REITs 产品等形式参与改造项目，拓展资金供给途径，创建起资金使用监管体系，确保资金专款专用，提升资金运用效能。^[7-8]二是完善政策保障，创建契合城市更新需求的市政设施维修改造标准、审批程序和激励机制，削减审批环节，缩减审批时长，加快改造项目的推进速度。同时出台相关扶持政策，推动企业应用新型技术、新型材料，对

优秀的改造项目予以表彰奖励，促使企业改善改造质量。三是加强人才建设，培育既具备专业技术又具有管理能力的复合型人才，采取高校培养、企业培训、人才引进等途径来充实人才队伍，建立人才激励机制，完善薪酬福利制度，吸引和留住人才，为市政设施维修改造和长效运维提供人才支持。此外，必须着力加强不同地区间的经验交流与协作，积极学习和借鉴在保障体系建设方面走在前列的地区所积累的先进理念、成功做法与成熟模式。在此基础上，在结合本地实际情况、发展阶段、具体需求等实际情况，对当地进行创造性转化并加以运用的过程中，进而使自己的保障体系更加完善^[9]。

四、结论

城市更新背景下市政设施维修改造是民生工程、系统工程、长期工程，解决目前设施老化、功能不全等现实问题的同时，也要兼顾城市未来发展智慧化、绿色化的需求。本文研究表明，规划统筹缺乏、技术不匹配、运维机制缺乏长效性、保障体系不完善等都是造成改造成效低下的原因。通过加强多规协同、优化技术应用、健全运维体系、完善保障机制，可提高市政设施维修改造质量与效益，实现设施安全韧性提升、功能优化升级，为城市更新赋能，推动宜居城市、韧性城市建设，助力城市高质量可持续发展。

参考文献

[1] 薛远, 梁志华, 李志霏. 城市更新背景下市政工程更新改造策略研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(20): 48-53.

[2] 郑林骄, 罗京, 顾灵琰. 基于大数据背景下城市更新改造潜力评价与提升策略研究 [J]. 市政技术, 2024, 42(10): 227-241.

[3] 朱黔沫, 陈浩, 叶建锋. 城市排水系统的碳排放特征与减排策略综述 [J]. 净水技术, 2024, 43(03): 47-60.

[4] 杨佳麟. 城市更新背景下老旧供水管网韧性评估与改造策略 [J]. 中国住宅设施, 2026, (01): 230-232.

[5] 林松. 市政工程施工中地下管线施工技术 [J]. 中国住宅设施, 2025, (06): 163-165.

[6] 王新亮, 张高嫒. 城市更新背景下的老城区合流制可持续改造策略研究 [C]// 中国城市规划学会, 沈阳市人民政府. 迈向中国式现代化: 规划的价值与作为——2025中国城市规划年会论文集 (04城市工程规划). 天津市城市规划设计研究总院有限公司, ; 2025: 188-195.

[7] 曹凤娇. 市政设施改造全面展开 [N]. 抚顺日报, 2010-06-09(002).

[8] 方绪武. 加强老城区市政设施维修改造工作 [N]. 中国建设报, 2006-07-14(003).

[9] 赵静. 市政道路路面的养护及维修技术探析 [J]. 中国房地产业, 2017(15): 201. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8536.2017.15.165.

高层建筑施工质量控制技术及管理策略

荆涛

河北建设集团股份有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ME.2026020017

摘 要 : 随着城镇化的发展, 高层建筑工程越来越多, 工程质量关系到建筑物的安全使用期限, 工程质量控制是保证建设工程能够按时完成的重要条件, 在结构复杂的大型高层建筑中更是如此, 由于工期较长、质量控制较为困难, 所以如何才能做到有效的进行工程质量控制是一个很大的难题。只有采用有效的工程质量控制技术以及合理的管理模式才能够防止出现质量问题, 增加工程质量和施工进度。本文分析了高层建筑工程施工质量控制的关键技术及管理措施, 通过对具体工程项目进行研究, 探索出新的工程质量控制方式来达到提高高层建筑工程项目质量管理水平的目的。

关 键 词 : 高层建筑; 施工质量控制; 管理策略; 质量技术; 风险管理

Construction Quality Control Technology and Management Strategies for High-rise Buildings

Jing Tao

Hebei Construction Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000

Abstract : With the development of urbanization, there are more and more high-rise building projects. The quality of the project is related to the safe use period of the building. Engineering quality control is an important condition to ensure that the construction project can be completed on time, especially in large high-rise buildings with complex structures. Due to the long construction period and difficult quality control, how to effectively carry out engineering quality control is a great challenge. Only by adopting effective engineering quality control techniques and reasonable management models can quality problems be prevented, and engineering quality and construction progress be increased. This article analyzes the key technologies and management measures for construction quality control of high-rise building projects. By studying specific engineering projects, new methods of engineering quality control are explored to improve the quality management level of high-rise building projects.

Keywords : high-rise buildings; construction quality control; management strategy; quality technology; risk management

引言

高层建筑迅速崛起促进了城市化的进程, 但是伴随着高层建筑物的高度、体量加大以后, 施工工艺就越来越复杂, 出现许多的问题, 如何有效地把控工程质量是整个行业都急需解决的问题之一, 工程质量的控制是施工管理的重点也是影响到工程能否按时交付的关键因素。而随着越来越多的高楼大厦建设, 高难度施工质量问题层出不穷, 所以对高层建筑施工问题现状的研究以及提出有效的对策建议是很有必要的。本文主要针对高层建筑施工过程中存在的几个重要质量问题进行研究, 总结出一些有效的控制技术和管理方法。

一、高层建筑施工质量控制的关键技术

(一) 施工技术的选择与质量控制

高层建筑物施工工程复杂, 涉及到多种施工技术和结构形式, 常用的施工方法有钢筋混凝土结构施工、预制装配整体式建筑以及新型装饰装修材料的应用。而在高层建筑物施工过程中, 结构施工技术决定了整个建筑物的安全稳固程度以及使用寿命长短等问题; 通过采用钢结构以及预应力混凝土结构能够增强建筑物的抗震性能及抗风能力; 选用高性能混凝土及耐腐蚀等新型材

料不仅增强了建筑结构自身承载力而且还增强了其抵御自然灾害的能力。建筑施工技术的选择与应用合理能够很大提升建筑的安全系数、使用功能以及抵抗灾害的能力, 防止在施工过程中的质量问题出现是由于采用了不合理的技术造成的^[1]。

(二) 施工现场的质量监控方法

高层建筑施工现场的质量监管非常重要。伴随着技术的发展, 质量管理的方法也在发展进步, 现今建筑工地使用了许多质量检测仪器例如激光测距仪, 全站仪, 三维扫描仪等等, 对每一道工序进行精确地测量计算从而保证每道工序都满足规范标准。

在工程项目实施过程中，对工程实时数据的收集以及回馈更是至关重要，在工地安装监控装置能够做到对工程质量参数进行实时观察，能及时发现存在的问题并且加以改正，就能够在很大程度上避免出现质量问题，避免了过多不必要的返修和拖延工期，从而使整个工程顺利推进，保质保量完成任务。

（三）技术创新对质量控制的促进作用

新技术的应用给高层建筑工程施工质量管理带来了很大的帮助，其中最重要的就是 BIM 技术和智能化施工的应用。BIM 技术通过对数字化设计与建造的过程进行仿真模拟可以预见所有技术问题，在正式施工之前就解决了所有的质量问题；智能化施工的应用即机械化施工设备以及智能检测系统的应用，不仅能够使工程更加精细同时也加快了施工速度。这种新科技的应用不仅仅改善了施工的方法，也给予工程施工质量监督更加精确化的数据和技术支撑以及及时的信息反馈，从而提高了整个高层建筑工程的质量水平^[2]。

二、高层建筑施工质量控制的管理策略

（一）质量管理体系的建立与完善

高层建筑施工质量管理体系建设对保证工程建设质量有着重要作用。一个健全的质量管理体系一般由质量策划、质量控制、质量检验、质量改进四个部分组成。在质量策划中明确各阶段的质量方针、质量目标及控制标准等内容；在质量控制中以统一的标准流程和技术方法来保证整个建设过程中质量水平的一致性；而在质量检验中严格按照规定的要求进行审查监督确保所有施工活动都达到规定的质量标准；在质量提高方面，根据反馈信息持续完善工程建设的过程。管理者之间分工合作以及相互配合是质量管理体系建设顺利实施的基础条件。管理者应建立责任制，使各职能部门能够协同工作共同完成质量任务。

（二）施工过程中的质量检查与验收

高层建筑工程的质监及验收是对工程质控起着至关重要的作用。在施工环节中，根据不同部分例如地基施工、主体施工、装修施工等应规定相应的质量把控指标以及验收细则，在此基础上才能保证各个施工环节都能满足相关质控目标的需求，以防止后期因为质量问题造成的返工及滞后现象，在实际施工过程中往往会存在许多问题比如缺乏标准、延迟验收等情况的发生都会使得最终施工质量得不到矫正，针对此现象要加大现场监管力度，保证所有检查项以及验收程序在规定时间内、按标准完成并建立严密的监督体系来防止检查工作出现偏差^[3]。

（三）风险管理与预防措施

高层建筑施工的风险主要体现在技术方面、物资方面的、环境方面等，所以做好施工风险管理工作是非常重要的，首先，通过对风险的辨识并对存在的风险进行风险评价，就可以对施工中存在的可能出现的问题提前做出相应的应对方案来防范，对于风险的辨识方式有技术审查，设计评审，统计分析等方法，而对其进行风险评估需要考虑施工环境，工程项目难度和使用的物资情况等要素来进行综合的风险评估，在风险管理措施实施中要明确

有效的防护手段，比如：在重要步骤设专人专岗、制订应急计划等等，这样就可以最大限度的降低风险发生的可能性，保证工程能够正常的进行下去并且提升施工的质量^[4]。

三、高层建筑施工质量控制中的人员管理

（一）施工人员的技能培训与管理

高层建筑施工质量的提升离不开施工人员的技术水平，所以施工人员的技能培训以及管理尤为重要。工程师和工程师们的技术培训不仅要熟练掌握施工基本技术还要学习最新的施工技术和质量管理方式，如定期开展培训讲座，使工程技术人员掌握新的施工规程，建筑材料的应用及安全生产等方面的要求可使施工质量有所提升。同时，施工人员的质量观念教育也十分重要，只有所有施工人员都有强烈的责任心才能在每道工序上把好质量关，避免不合格的产品进入后续工序。理论与实践学习相结合，在锻炼提高技术能力的同时可以培养出有责任心、注重工程质量的精神风貌，保障整个工程项目的全过程的质量要求得到实现^[5]。

（二）团队协作与沟通机制

在建筑工程中，质量管理并不只是技术员的责任，一个优秀的队伍配合以及沟通是非常重要的。现场施工涉及到许多部门与岗位工作人员相互搭配合作，比如项目经理、施工人员、监理人员等等，团队间的良好交流可以及时对存在的问题作出回应并且解决，比如说工程技术部与施工现场的工程队伍之间如果可以做到实时互通质量把控的信息的话，那么解决措施就可以当即执行掉而不会出现因为信息不对称而产生的一些质量问题等等；同时现场也存在一些困难比如信息不通畅、角色划分不清楚等问题，如果没有完善的管理机制就会造成推卸责任或者进度拖延等情况的发生。解决上述问题的办法就是建立起一个有效的信息传递方式以及相应的责任分工，使得每一步骤能够相互配合衔接好进而提高整体工程的质量水平。

（三）人员考核与激励机制

对高层建筑工程施工质量的把控上，人员的考评以及激励措施起着举足轻重的地位。明确质量考核指标能够调动员工的积极性和主动性从而保证工程项目的顺利进行；比如对于施工质量，可采取月、季指标考核形式，例如施工质量合格率、返工率等等都可列入到考核范围内，奖罚分明。同时好的激励措施也可以极大程度的提升工程的质量，制定相应的质量控制奖励政策，如优质项目奖、团队合作奖等等，这样能从很大程度上鼓舞施工人员的工作激情和主动性。尤其是在高层楼宇工程这种高危、高负荷情况下，适时的奖励以及鼓励措施可以增强施工人员的精神状态，以此来减少质量问题出现的概率，保证工程得以正常开展并且符合质量要求^[6]。

四、高层建筑施工质量控制的案例分析与数据支持

（一）成功案例分析

在超高层建筑工程的施工中，良好的质量管理措施可以大

幅提高质量水平，减少质量问题的发生率，以上海中心大厦为例，其高度达到632m，为中国第二高建筑，本工程在施工中利用BIM技术进行全程的质量管理，提早发现了并解决了很多存在的施工隐患问题，通过对BIM模型的构建，项目部可以在施工中模拟每一道程序的过程，保证施工过程中的每一个环节都是精确无误的，同时还可以对整个工程实施进度以及质量的状态进行监测；同时在钢结构工程施工时还采用了机器人焊接工艺，这样就有效的减少了由于人工焊接所造成的偏差，保障了建筑结构的安全性。经过这样一系列创新措施后，上海中心大厦做到杜绝发生较大质量事故，工程的质量得到了业界的认可，在这个项目的经验里就是说在质量管理上除了依靠技术及设备还需要借助信息化工具来集成信息资源，从而做到防患未然，使得工程建设顺利开展^[7]。

（二）常见质量问题与解决方案

在高层建筑工程中，经常出现的一些质量问题有建筑物结构性裂缝、建筑材料不合格、施工工序不合理等问题。如某高层住宅工程中，在施工时有几层出现了建筑物结构性裂缝的问题，经过调查发现主要是因为混凝土浇筑的时候没有很好的把握好水泥和水之间的比例关系，造成混凝土达不到预期的强度。为了解决这个问题，施工单位马上进行了技术复核并加大了对原材料的检查力度，保证每次浇筑之前都要对水泥和砂、石的比例加以测定。而且在施工过程中缺少一个良好的质量管理体系，使得一些质量的重点环节不清楚。项目管理人员再次对质量管理程序进行了改进，增加了更多质量检测环节并且经常开展针对工程师以及施工人员的质量教育培训工作，经过一系列有力的质量措施的实施以后，项目之后期的质量问题得到了很好的控制，质量优良率达到整改之前85%以上的水平。

（三）数据分析与质量控制效果

工程质量控制效果以一系列数据来进行评判的，工程建设质量问题发生数量及整改率、业主满意程度等等都成为工程建设项目成功与否的评判标准。比如在某市标志性商务楼工程建设项目中，在工程建设中出现了建筑结构不正及漏水的现象，造成初次返工率为10%，通过对质量监督和风险管控的加强使得二次返工

率降低到3%，并且客户的满意程度也达到了92%，以下是该项目质量控制过程中的一些相关的数据汇总^[8]；如表1所示。

表1 施工质量控制数据统计表

数据项	初始阶段 (%)	整改后 (%)
施工质量问题发生率	10%	3%
返工率	10%	3%
客户满意度	78%	92%
工程进度符合计划率	85%	95%
材料合格率	92%	98%

上述资料来源于现场工程项目的质量管理档案，工程质量问题发生率以及整改率的数据也都是由项目质量部门所进行的统计分析所得到的结果，至于客户的满意程度则是根据工程完成之后对于客户的询问及反馈所了解到的信息汇总而成的。通过对这些数据的分析能够发现，合理有效的质量管理体系对于提升工程的质量水平、加快返修进度以及提升客户满意的程度都具有一定的影响作用。

根据以上实例及数据的支持，可推断出：高层建筑工程的施工质量控制效果好坏并不仅仅依靠新技术的应用，更重要的是做好管理工作，获取精确的数据信息，强化质量管理、提升现场管理人员的质量观念，实行精细化管理都是做好工程质量的有效方法。

五、结语

高层建筑工程施工质量控制的技术管理和相互融合非常重要。合理选取施工工艺，加大质量管理力度，采用新技术，建立完善管理体系都可以使工程的质量得到很大提高。今后随着建筑技术水平不断发展，BIM、智能化建筑等新技术的应用也会越来越多，从而促进工程质量管理水平的提高；加强管理人员培养，建立健全沟通渠道及奖励制度也将为高层建筑质量控制提供强有力的支持。面对越来越多复杂的施工要求，精细化的质量管理工

作将成为建筑工程发展的必然趋势。

参考文献

[1] 夏杰. 超高层建筑防火工程施工关键环节质量控制技术与实践要点探讨 [J]. 消防界 (电子版), 2025, 11(13): 69-71.
[2] 高立飞. 高层建筑混凝土施工质量控制关键技术 [J]. 江苏建材, 2025, (04): 103-105.
[3] 唐中华. 超高层建筑基础工程施工关键技术及质量控制措施研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(16): 25-28.
[4] 王伟雪, 柴延鲁. 高层建筑工程施工关键技术与质量控制要点研究 [J]. 中国房地产业, 2025, (36): 62-65.
[5] 郝赵坤. 高层建筑施工技术要点及其质量控制的策略探讨 [J]. 居舍, 2021, (16): 168-169+175.
[6] 贺军. 高层建筑施工关键技术及质量控制策略 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (10): 145-147.
[7] 梁晓东, 刘芳, 李永康. 高层建筑外立面施工中的安全管理与质量控制技术 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(18): 151-153.
[8] 宋欣蔚. 建筑施工项目中的质量控制与技术管理策略 [J]. 石河子科技, 2025, (06): 64-66.

复杂地质条件下公路桥梁桩基施工稳定性研究

黄军¹, 安顺波²

1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 311305

2. 浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI: 10.61369/ME.2026020022

摘 要 : 公路桥梁桩基是桥梁结构主要受力部分, 直接影响整个桥梁的安全性和耐久性, 在复杂地质条件下进行桩基施工容易出现不稳定情况甚至发生事故。本文基于公路桥梁施工实际情况, 避免空泛的理论论述以及大量数据罗列, 针对软土地基、岩溶区、砂卵石地层等常见复杂地质类型探讨其对桩基施工稳定性的影响并给出切实可行的施工控制对策, 解决施工过程中易发生的塌孔、缩颈、桩身质量问题等问题, 为在复杂地质环境下开展公路桥梁桩基作业提供借鉴, 确保工程顺利实施及质量达标。

关 键 词 : 复杂地质; 公路桥梁; 桩基施工; 稳定性; 施工控制

Research on the Stability of Highway Bridge Pile Foundations under Complex Geological Conditions

Huang Jun¹, An Shunbo²

1. Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 311305

2. Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : The pile foundation of highway bridges is the main load-bearing part of the bridge structure, directly affecting the safety and durability of the entire bridge. In complex geological conditions, the construction of pile foundations is prone to instability and even accidents. Based on the actual situation of highway bridge construction, this paper avoids abstract theoretical discussions and extensive data listing. It focuses on the influence of common complex geological types such as soft soil foundation, karst area, and sandy conglomerate stratum on the stability of pile foundation construction and provides practical and feasible construction control countermeasures to solve problems such as hole collapse, necking, and quality issues of the pile body that occur during construction. It provides a reference for conducting pile foundation operations of highway bridges in complex geological environments, ensuring the smooth implementation of the project and meeting the quality standards.

Keywords : complex geology; highway bridge; pile foundation construction; stability; construction control

引言

随着我国公路桥梁建设逐步向山区、河谷、沿海等地发展, 越来越多的工程项目面临复杂的地质条件进行施工。桩基施工作为桥梁建设的基础环节, 在施工过程中受到地质条件的影响较大, 在复杂地质条件下, 由于岩土体性质变化大以及不良地质现象频繁发生而容易引发桩基施工中出现孔壁坍塌、桩身变形、混凝土灌注缺陷等问题, 不但会影响施工进度而且会留下安全隐患, 严重的会导致桩基报废、工程返工造成人力和物力上的浪费^[1]。因此有必要对复杂地质条件下公路桥梁桩基施工稳定性开展研究, 找到影响稳定性的主要因素并提出有效的控制措施, 针对施工现场的具体情况进行处理以提高工程质量及保证施工安全, 这也是目前公路桥梁施工亟待解决的问题。

一、复杂地质条件的主要类型及对桩基施工稳定性的影响

复杂地质条件是岩土体性质不均、不良地质发育造成桩基施工困难大、稳定性差的一种地质情况, 在公路桥梁建设中出现较多的复杂地质有软土地基、岩溶地区以及砂卵石地层等, 还有如膨胀土、冻土等特殊地质, 各种不同的地质类型对桩基施工稳定

性的不利影响程度也不同, 下面分别进行说明:

(一) 软土地基对桩基施工稳定性的影响

软土地基在公路桥梁建设中较为常见, 在沿海及河谷冲积地区尤为突出, 其主要特征为土质松散、含水量较大、抗剪强度较低以及较大的沉降量和较差的整体稳定性等。对于桩基施工造成的影响主要有以下几点: 一方面是在成孔阶段易发生塌孔、缩径等问题, 由于软土本身的承载能力较弱, 在钻进过程中如果操作

不当或泥浆护壁措施不到位,则很容易造成孔壁坍塌的现象发生,特别是当钻速过快时更为常见;另一方面是成桩之后容易出现下沉与桩身弯曲的情况,软土地基受到桩基载荷的作用会产生长期蠕变而产生较大的沉降量,从而引起桩头下沉过大或者不均匀下沉的问题,进而降低桩基的承载能力,严重情况下还会导致桩身折断,危及整个桥体的安全性。另外,在进行软土地基施工的过程中,桩机设备也极易陷入其中,造成桩位偏移,给后续工作带来不利影响^[2]。

(二)岩溶地区对桩基施工稳定性的影响

岩溶地层主要位于山地丘陵地带,其显著特点是地下有溶洞、溶沟、溶槽等现象发生,在此基础上基岩高低起伏较大给桩基施工造成很大困难。一方面钻孔过程中容易产生漏浆、塌孔问题,溶洞内部大多为空洞或者被松散土质填充,当钻头碰到溶洞时泥浆迅速流失使得孔内水位骤降,孔壁失去泥浆保护而坍塌,停工处理;如果遇到大体积溶洞并且未进行预先探测的话还会造成桩身悬空,达不到设计承载能力的要求。另一方面嵌岩桩基施工难度高,由于岩溶地区基岩高低不平,桩基嵌入岩层长度不易把握,而且溶洞周围岩石风化严重,桩底与岩层之间难以良好结合从而降低桩基端承力作用效果,同时钻孔作业中易出现卡钻、埋钻等情况,对整个工程的安全性以及工期进度都带来不利影响。

(三)砂卵石地层对桩基施工稳定性的影响

砂卵石地层主要位于河岸及山前冲积扇等地质环境中,其特征为粒径较大、强度较高以及透水性较好,在桩基施工中对成孔以及混凝土灌注两方面造成较大的影响。在成孔过程中由于砂卵石硬度大,一般钻头难以将其破碎,钻速较低,而且容易发生孔壁坍塌现象,因砂卵石地层具有良好的透水性能,泥浆护壁不易形成有效泥皮,孔壁土体易受到地下水侵蚀而产生塌孔;另外,砂卵石颗粒间存在较大间隙,在钻孔时易产生大量孔底沉渣,如果清孔不到位,则会降低桩端承载能力。在混凝土浇筑过程中,由于砂卵石地层透水性强,混凝土浇筑过程中易出现浆液流失,导致桩身出现蜂窝、麻面、断桩等问题,影响桩身完整性和稳定性^[3]。

(四)其他复杂地质对桩基施工稳定性的影响

除了以上三种常见的复杂地层之外,还有像膨胀土、冻土这样的特殊地层也会对桩基施工造成不利影响。膨胀土地层遇水膨胀、失水收缩,会对桩身施加较大的水平推力,使桩体发生弯曲甚至断裂;而冻土地层由于受到低温作用而硬化,在温度升高融化之后其承载能力会突然降低,从而引起桩基下沉过大,此外,在冻结期间土壤体积增大也会给桩身带来挤压效应,解冻时土壤体积缩小还会造成桩周土体松散,不利于发挥桩侧摩阻力的作用^[4]。

二、复杂地质条件下公路桥梁桩基施工稳定性控制措施

根据不同的复杂地质情况影响,基于公路桥梁桩基施工实际情况出发,“接地气、可落地、重实效”,避免过多的理论阐述以及专业的器械堆砌,在施工前准备阶段、成孔过程、钢筋笼加工及吊装就位、混凝土浇筑这四个方面给出相应的稳定性保障措施

来解决施工中遇到的问题。

(一)施工准备阶段的稳定性控制

施工前的准备工作对于保证桩基工程顺利实施至关重要,主要是做好地质勘探以及施工组织设计工作,防止盲目开工。一是加强地质勘察,在施工之前不能仅仅依靠之前的勘探资料,而应该根据现场情况再做进一步勘探,特别是要查明桩位附近有无溶洞、软土夹层、砂卵石富集区等地质不良地段,了解岩土体分布及地下水位高低等问题,并标出危险点位,以便为后续制定合理的施工方案提供可靠依据;二是完善施工方案,基于补充勘探成果,根据不同类型的地层分别编制相应的施工方案,确定钻进方法、泥浆性能指标、清孔要求、灌注程序等内容,不能简单套用一般性方案,例如在软土地基上应着重考虑泥浆护壁与防塌孔措施,在岩溶地区应注意采取溶洞处理及防漏浆措施,在砂卵石地层中需重视钻进和清孔措施等;三是做好机械设备及物资储备工作,依据地质状况选用合适的钻具,如在砂卵石地层使用耐磨且强度高的钻头,在软土地基采用适用的旋挖钻机等;同时备足各种类型的泥浆原料和填充物,如在岩溶地区携带片石、黏土等用于填充溶洞,确保工程能够有序开展^[5]。

(二)成孔阶段的稳定性控制

成孔过程是桩基工程中保证施工安全的重要一环,在此过程中要把握好对孔壁稳定性、孔型规则性以及孔底洁净度的控制,根据不同的地层情况采用相应的对策。

针对软土地基,一方面控制钻进速度,采取分层钻进的方法,防止过快钻进造成孔壁松动,在钻进时根据土质情况调节钻速,软土地段降低钻进速度,减少对周围土体的扰动;另一方面改善泥浆护壁措施,使用粘度合适的泥浆,增强泥浆护壁作用,保证孔内泥浆液面高出地下水位一定高度,保持孔内外压力一致,避免塌孔现象发生;最后要及时清理钻孔,钻到预定深度后,进行换浆、正反循环等清孔工序,将孔底残留物清除干净以免过多沉渣影响桩身强度。

对岩溶地区,第一是预先处理好溶洞,如发现小溶洞可用片石、黏土混合填充,压实后继续钻进;如发现大溶洞则用钢筋混凝土套管进行保护,保证孔壁稳定;第二是控制好泥浆用量及比重,在钻探时注意观察泥浆液面的变化情况,如有漏失应及时补入泥浆并加大比重以提高护壁能力;第三是不要盲目钻进,在遇到岩石硬度突然变化的情况下应放慢钻速,检查是否有溶洞或者岩面凹凸不平的情况发生以免造成卡钻、埋钻等事故^[6]。

针对砂卵石地层,一是选择合理的钻进方式,以旋挖钻进为主,使用专用的砂卵石钻头,加快钻进速度,降低对孔壁的扰动;二是做好泥浆护壁工作,使用高粘度泥浆,在孔壁上形成一层较厚的泥皮,阻止地下水侵蚀孔壁,避免塌孔的发生;三是反复清孔,因为砂卵石地层容易造成沉渣堆积,在钻至设计标高之后,先进行一次清孔,放入钢筋笼后再第二次清孔,保证孔底沉渣达到规定的要求。

(三)钢筋笼制作与安装阶段的稳定性控制

钢筋笼制作及安装质量对桩身结构稳定性以及承载能力有较大影响,在施工时应注重对钢筋笼制作精度、安装垂直度以及固

定效果进行把控，防止发生钢筋笼偏移、变形、上浮等现象。第一是加强钢筋笼制作管理，在图纸设计基础上明确钢筋笼规格、间距和长度，在加工过程中保证焊接结实、绑扎严密，杜绝出现松散、扭曲等情况，同时留足保护层厚度以避免桩身外露。第二是控制好安装垂直度，在吊装之前要检测钻孔垂直度是否合格，然后匀速下放钢筋笼以免碰撞到孔壁造成塌陷事故的发生，另外还需要用定位器来固定住它以防产生位移。第三是要预防钢筋笼上浮，在浇筑混凝土时要随时监控其位置变化情况一旦发现上浮趋势就要立即采取措施改变浇注速度或者导管埋深，严重情况下还需使用重物压住它使其保持不动。

（四）混凝土灌注阶段的稳定性控制

混凝土灌注是形成桩身的重要一环，关键是保证灌注连续性、导管埋深以及混凝土质量，防止发生断桩、夹泥、蜂窝等情况。首先保证混凝土质量，使用满足设计要求的混凝土，控制好混凝土坍落度及和易性，防止混凝土离析，在浇筑前检验混凝土均匀程度是否达标；其次控制好导管埋深，将导管放置到孔底之上一定高度后进行灌注，在灌注时适时上拔导管使导管埋深处于正常范围内，以防埋深太小造成断桩或者埋深太大而引起导管堵塞；最后保证灌注连续性，在混凝土灌注期间尽量不要停止，如果不可避免需要暂停，则暂停时间不能太久并且做好相关记录并检查是否有问题发生；当灌注至桩顶部位时，超过设计标高一定长度，以确保桩顶混凝土的质量，防止出现桩顶浮浆过多、强度不够的现象。此外，灌注过程中还需注意混凝土的供应速度，确保与导管提升速度相协调，避免因供料不足而中断。同时，加强孔内水位与泥浆指标的监测，防止塌孔。在拔除最后一节导管前，应准确测量混凝土面标高，确保超灌高度足以在桩顶形成良好桩体。灌注结束后，及时清洗导管与灌注设备，并按要求对桩头进行养护。

三、施工过程中的应急处置措施

在复杂地质条件下进行桩基施工具有较大不确定性，不可避免会出现一些意外情况，在此之前做好应急预案能够尽可能减少

事故带来的损失以及保证工程顺利进行。一是塌孔应急措施，在施工过程中发生塌孔时要立刻停止钻探作业并撤走所有机械设备，向孔内注入一定量的泥浆以保持孔壁稳定，如果塌孔面积不大可以用片石、黏土回填后继续钻探；如果塌孔严重就需要清理掉孔内的塌陷物然后再重新成孔。二是漏浆应急措施，在岩石溶洞或者砂卵石地层中容易出现漏浆现象，一旦发生漏浆就要马上停止灌注工作并向孔内加注泥浆来弥补流失的部分同时用片石、黏土等材料对漏浆位置进行封堵，待漏浆停止后再继续后续工序。三是卡钻、埋钻应急措施，在钻进过程中发生卡钻、埋钻的情况切忌硬拉钻杆以免造成钻具损坏，可采取松动钻具、注入泥浆润滑等方法慢慢把钻具拔出，如无法取出则需要清除孔内泥土后再处理。四是混凝土浇筑异常应急措施，若出现混凝土离析、导管堵塞等问题，立即停止浇筑，清理导管内堵塞的混凝土，重新调整混凝土配合比，确保混凝土质量后，再继续灌注，避免出现断桩。

四、结论

在复杂地质环境下，公路桥梁桩基施工稳定性受到多种因素的影响，如地质条件、施工方法以及操作规程等。常见的不良地质有软土、溶洞、砂卵石等地质情况，容易造成塌孔、缩颈、断桩等问题的发生，影响工程质量及施工安全。为了保证桩基施工质量，在施工前应进行详细的地质勘探工作并制定合理的施工方案，根据不同的地质情况进行成孔、钢筋笼安装、混凝土浇筑等工作时要采取相应的措施加以控制，同时做好应急预案以防止突发事件发生。本文所提出的控制措施贴近实际应用，避免空泛的理论论述与大量数据罗列，针对公路桥梁工程的具体问题提出切实可行的解决方案，可作为复杂地质条件下公路桥梁桩基施工的重要参考依据，有助于提高桩基施工的质量水平，确保公路桥梁的安全性和耐久性得到有效保障。

参考文献

- [1] 张建. 高速公路岩溶区桥梁桩基溶洞预处理施工工艺对比与优化研究 [J]. 工程建设与设计, 2026, (02): 157-159.
- [2] 马朋朋, 李超, 马永政, 李豪杰, 王飞. 铁路跨海大桥墩基施工对毗邻公路桥扰动敏感性研究 [J]. 中外公路, 1-12.
- [3] 曹俊林. 公路桥梁施工中桩基施工技术与质量控制 [J]. 工程建设与设计, 2026, (01): 217-219.
- [4] 董化林. 复杂地质条件下高速公路桥梁桩基施工难点与要点分析 [J]. 运输经理世界, 2025, (35): 107-109.
- [5] 胡睿智, 徐海峰. 浅谈桥梁桩基大型溶洞处理技术 [J]. 技术与市场, 2025, 32 (12): 100-104.
- [6] 朱旭东. 山岭陡坡段桥梁桩基竖向承载特性现场检测方案及结果分析 [J]. 交通世界, 2025, (35): 181-183.

公路工程路面施工质量控制关键技术与实践研究

姜玮琦

浙江中惠服务外包有限公司杭州分公司，浙江 杭州 310023

DOI:10.61369/ME.2026020023

摘 要： 公路路面是公路工程项目主要构成部分，直接影响行车安全、行车舒适性和工程耐久性，在整个公路工程建设过程中，对路面施工质量把控至关重要。本文基于公路路面工程施工实际情况，摒弃空泛理论及大量数据罗列，围绕施工全过程重点环节进行阐述，即从路基处理、材料控制、摊铺碾压到接缝处置等方面的质量控制措施以及在实际操作中容易忽视的问题点，并提出切实可行的具体应对方案，以期给相关从业人员带来一定借鉴意义，促进优质高效公路建设发展进程，防止后期出现开裂、下沉、松散等病害发生率降低维修费用支出水平。

关 键 词： 公路工程；路面施工；质量控制；关键技术；实践应用

Research on Key Technologies and Practical Applications for Quality Control in Highway Engineering Pavement Construction

Jiang Weiqi

Hangzhou Branch, Zhejiang Zhonghui Service Outsourcing Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310023

Abstract： The highway pavement serves as a crucial component of highway engineering projects, directly influencing driving safety, ride comfort, and project durability. Throughout the entire highway construction process, it is of paramount importance to maintain strict quality control over pavement construction. Based on the actual conditions of highway pavement construction, this paper eschews vague theories and extensive data listings, focusing instead on key aspects of the entire construction process. It elaborates on quality control measures from subgrade treatment, material control, paving and compaction, to joint handling, as well as issues that are easily overlooked in practical operations. Furthermore, it proposes practical and specific solutions, aiming to provide reference for relevant practitioners, promote the development of high-quality and efficient highway construction, and reduce the incidence of defects such as cracking, subsidence, and loosening in the later stages, thereby lowering maintenance costs.

Keywords： highway engineering; pavement construction; quality control; key technologies; practical applications

引言

我国交通基础设施建设不断加强，公路通行需求及要求不断提高，路面施工质量决定着道路使用效率以及使用寿命，在实际施工中由于材料质量、施工技术、操作技能、环境状况等因素的影响，易造成各种质量问题，给行车带来不便同时也加大后期维护保养工作量和费用支出^[1]。因此有必要对公路工程路面施工质量控制关键技术进行探讨并总结出切实可行的质量管理措施，避免流于形式的理论研究，针对施工现场存在的主要问题与难点开展相关研究工作，这对于提高公路路面施工质量、保证公路长期安全运行有着十分重要的指导作用。

一、公路工程路面施工质量控制的核心原则

公路路面施工质量控制应以现场为基础，坚持“预防为主、全程监控、贴近实际、责任到人”的基本原则，防止走过场式的管理，使每一条技术措施都真正发挥作用。预防为主是指在施工前就预见可能会发生的问题，例如材料不合格、施工方法不当等，在开工之前做好相应的预案，而不是等到问题出现再补救，这样可以节省很多返工的时间；全过程监控就是对整个施工过程

进行全方位的监督，包括前期准备阶段、原材料进场检验、摊铺碾压以及后期养护等各个阶段都要严格把关，不能有“重施工、轻监管”的思想；贴近实际就是所有的控制技术和手段都要适合施工现场的情况，而不只是照搬书本上的知识，针对不同的路段地势、气候等情况做出相应的改变，保证技术的有效性；责任到人就是要将每一个工序的责任落实到具体的班组乃至个人身上，避免出现互相推委的现象^[2]。

二、公路工程路面施工质量控制关键技术

（一）路基处理质量控制技术

路基是路面的基础，如果路基的质量不好，那么即使有再好的路面施工工艺也无法保证整个道路的整体质量，许多路面出现下沉、开裂等现象都是由于对路基处理不当所造成的，在实际的工程当中，路基处理的主要任务就是保证路基的密实度以及稳定性来防止以后发生不均匀沉降^[3]。

在路基填料的选择上应根据实际情况选择强度较高、稳定性较好、含水量适中的材料作为填料，不宜采用淤泥、腐殖质含量较高的劣质土进行填充，因为这些材料承载能力弱、易变形后对道路造成沉降影响。如果所用填料含水量较大，则不能直接用于路基施工，需要对其进行晾晒或者掺灰处理以减少其含水量使其满足施工要求；而对于强度偏低的填料可以加入适量水泥或石灰等稳定剂来改善其性能从而提高该类材料的承载能力。

路基压实是路基施工的重要一环，在实际操作时应根据不同填料选用相应的碾压机械，如黏性土宜采用振动式压路机，砂性土宜采用光轮式压路机等，防止因碾压设备与所用材料不匹配而造成压实不良的现象发生。在碾压过程中应注意掌握好碾压程序以及碾压力度，按照“先轻后重、先边后中、先慢后快”的原则逐层进行碾压，每碾压一层都要做一次检测，以保证该层达到规定密实度后再继续铺筑上一层，严禁出现漏压或者分层碾压不足的情况。此外，在道路建设当中还需要做好排水工作，以免雨水浸润路基使路基变得松软从而降低其承载能力，可以在道路两旁开挖边沟来及时排除积水保持路面干燥稳固。

（二）施工材料质量控制技术

施工材料是道路铺设的基础，在道路上，材料的质量直接影响着路面的承载能力、抗磨耗性和耐久性，在实际施工过程中，对材料进行管理是保证工程质量的重要一环同时也是最易出问题的一环，一些施工单位为了节省开支而采用劣质材料从而造成路面质量事故^[4]。

沥青及集料是道路铺设主要原料，在沥青质量把控上应着重关注其粘性、耐高温性能以及耐久度，在进场时要对其进行检验，观察沥青颜色、状态等是否达到施工要求，防止使用已经失效或者变质沥青；而对集料也要做好筛分工作，保证颗粒大小一致，含泥量少，在进入工地之后要进行一次筛选，把不符合条件的剔除掉以免造成日后路面松散甚至开裂。在沥青混合料搅拌阶段要注意沥青与集料的比例关系，不能太多也不能太少，如果沥青加多了会使得路面产生油皮现象，反之又会影响到路面之间的结合强度，在此期间还要注意控制好拌和温度以使材料充分融合在一起而不至于发生分离的情况。

水泥、砂石等辅助材料也需要进行质量控制，水泥需查看产品合格证书以及生产日期，防止使用过期水泥；砂石要严格把关含泥量及颗粒大小，以防含泥量过高而降低材料之间的粘结强度。所有材料进厂之后应分类储存并贴上标签，防止不同类型材料混在一起堆放，在此基础上还要做好防水防潮措施，如沥青要密封保存，砂石不能淋湿受潮以免影响到后期使用的品质。

（三）摊铺与碾压质量控制技术

摊铺施工前，应对路基顶面进行清理及检测工作，保证路基顶面平整、清洁，无任何杂质以及积水存在；同时要调试好摊铺设备，检查摊铺机的摊铺速度、摊铺厚度调节功能是否完好，保证设备运转良好^[5]。在摊铺时，应掌握好摊铺的速度，匀速行驶，不能太快也不能太慢，太快会造成摊铺厚度不一致，太慢又会降低工作效率，在摊铺的同时还要注意控制好摊铺的厚度，按照设计的标准精确调整，防止出现摊铺过厚或者过薄的现象发生。摊铺过程中要有专人负责观察混合料的摊铺情况，及时解决混合料离析、结块等问题，使摊铺路面平整、均匀。

碾压应紧跟摊铺，防止混合料温度下降后再进行碾压造成碾压效果不佳。碾压需选择合适的碾压机械，根据道路类型以及混合料性质合理配置钢轮压路机和胶轮压路机，按照“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则分初压、复压、终压三个阶段施工。初压是使混合料初步稳定的过程，在此过程中使用小型压路机，速度不宜太快以免将混合料推出或者松散；复压是为了提高密实度而进行的关键步骤，此时采用大型压路机并增加碾压力以达到规定要求的密实度；终压是为了消除碾压印痕的过程，在此过程中也用小型压路机来保证路面平整度良好。碾压时要掌握好碾压次数及碾压速度，防止碾压次数太少造成压实不足或是碾压速度过快引起路面开裂的情况发生，还要注意做好碾压接缝处的工作以免出现漏压或者重压的现象。

（四）接缝处理质量控制技术

横向接缝一般发生在摊铺中断或一天工作结束时，处理方法是先将摊铺终止处的路面切齐，清理掉表面松散混合料及杂质等，在接缝上涂刷透层沥青，提高接缝强度，再进行下一步摊铺作业，摊铺过程中要使新旧两部分之间连接良好，碾压时应加强对接缝部位的压实，保证其密实度和平整度与原路面相同，防止产生凸起或者下沉现象。

纵向接缝一般位于两幅摊铺连接部位，在施工过程中应注意控制好两幅摊铺宽度，保证连接紧密无间，不得有空隙存在，在摊铺时应将后一车料铺至前面一段路面边缘，碾压宽度不少于10cm，并且要喷洒乳化沥青作为粘结剂加强连接部位强度防止后期产生纵向裂缝。接缝处理完毕之后需要对其进行检验，发现问题及时修正，使接缝处达到标准要求。

（五）路面养护质量控制技术

道路维护是保证道路质量及延长其使用寿命必不可少的一环，一些施工单位注重施工而忽略养护，造成道路过早损坏，在实际施工过程中应做到“及时、全面、科学”，结合道路种类以及施工条件选择合适的养护措施。

沥青路面养护应注重前期养护，在摊铺碾压后要尽快封闭交通，防止车辆碾压造成路面损伤，同时做好保湿养护，以防路表水分蒸发过快而产生裂缝；在养护过程中要经常查看道路状况，一旦发现松散、裂缝等现象应及时处理，以免扩大。水泥混凝土路面养护要掌握好养护时间，在浇筑之后要立即覆盖保湿材料防止表面开裂，在养护期间要使路面处于潮湿状态并且禁止通车，保证混凝土强度正常发展。

三、公路工程路面施工质量控制实践措施

（一）完善施工质量管理体系

质量管理体系是质量控制的基础，在实际施工过程中应根据施工现场情况建立切实可行、具有针对性的质量管理体系，防止流于形式。要对各个施工工序的质量标准以及检查方法进行明确规定并形成书面文件，实行“三检制”，即班组自检、工序互检、专职检验，每一道工序完成以后都需要经过检验合格之后方可进入下一道工序，不允许不合格的产品流入到下一个环节当中去。

要落实质量管控责任，把责任分解到每一个班组、每一个岗位、每一个人身，制定相应的奖惩措施，在保证工程质量的前提下，对于认真履行职责、严格把控工程质量的班组和个人予以表彰奖励；反之，则对其进行相应的惩罚以起到警示作用，从而提升全体施工人员的质量意识以及责任感。另外还需要做好对工地现场的管理工作，做到有条不紊地开展各项作业，防止因管理混乱而造成质量问题的发生，科学规划施工顺序，防止由于工序间的配合出现问题而导致工程出现质量问题。

（二）提升施工人员专业水平

施工人员技术水平对工程质量有很大影响，在实际施工过程中，许多质量问题都是因为施工人员操作不当或者技术水平不够造成的。所以要加强对施工人员的教育和培训工作，根据施工现场具体情况有针对性地进行培训，主要介绍施工技术重点、操作规程以及质量控制要求等知识，使施工人员了解并掌握正确的施工方法，防止违章作业的发生。

对新入场的工人进行上岗前的安全教育培训，考核通过方能上岗操作；对老员工也要不定期地对其进行技能培训，掌握新的施工工艺及管理方式以满足不同的施工环境要求。还要加强对一线作业人员的质量观念培养，使他们明白质量把关的意义所在，做到自觉执行规程制度，在工作中积极主动地做好每一道工序的质量检查工作，防止由于马虎大意而造成事故的发生。

（三）强化施工现场质量巡查

施工现场的质量检查是及时发现问题并解决问题的重要手段，在工地现场应有专人负责质量检查工作，对整个施工过程进行全方位、全过程的监控，尤其要重视路基处理、材料进场、摊铺碾压以及接缝处理等重要部位和关键工序，一旦发现问题立即下发整改通知书，指定整改负责人、提出整改意见及要求整改时

限，保证问题得到妥善解决。

巡查时应做好巡查记录，认真填写巡查情况、发现问题及处理结果等信息以便日后查阅以及总结教训，在重点部位、重要环节上要进行旁站监控保证工程实施符合标准规定的要求防止发生质量事故；还要建立质量隐患台账，对发现的问题进行归类整理并跟踪整改落实情况，做到所有问题都得到解决不留尾巴，消除一切潜在的质量隐患。

（四）结合现场环境调整施工方案

公路路面施工受环境因素的影响较大，各个地方的地理情况以及气候条件各不相同，在施工过程中需要根据实际情况作出相应的改变，不能生搬硬套使用固定的方案造成工程质量的问题，在实际操作之前应对工地的具体情况进行勘探，掌握当地的降雨量、温度等信息，再依据勘探的结果来确定合适的施工方法。

例如，在多雨地区施工，应做好排水工作，合理规划施工进度，尽量避开下雨天铺筑、碾压，雨停后及时检查路基及路面情况，无积水、无软化方可继续施工；在炎热环境下施工时，应对沥青混合料温度加以控制，防止由于高温造成沥青混合料产生泛油、离析等现象发生，还要注意对施工人员采取相应的防暑降温措施；在寒冷环境中施工时，应注意防冻，以免沥青混合料被冻结而影响到工程质量。

四、结论

公路工程路面施工质量控制是一项复杂的工作，贯穿整个施工过程以及各个环节，不能一概而论，要结合实际情况，抓住主要技术点和重点部位，制定切实可行的质量控制方法。路基处理、材料管理、摊铺碾压、接缝处理及养护都是影响路面施工质量的重要环节，在每一个环节都要做好相应的质量控制措施以防止发生质量问题。

在实践中，要健全和完善质量管理体系，提高施工人员的技术素质，加强工地检查巡视工作，在施工现场根据实际情况及时调整施工方法，把质量管理落实到整个施工过程当中去，这样才能切实提高道路建设的质量水平，防止以后发生开裂、下沉、松散等常见问题的发生，延长道路使用年限，减少维修养护费用支出，建设出一条优质、安全、舒适的公路，以适应社会交通运输需求。

参考文献

- [1] 胡维强. 公路工程路面基层施工技术 [J]. 运输经理世界, 2025, (33): 42-44.
- [2] 张淑贤. 沥青混凝土施工工艺在公路工程路面施工中的应用 [J]. 中国房地产业, 2025, (30): 210-213.
- [3] 甄颜洪. 公路工程路面施工技术的优化与提高分析 [J]. 科技资讯, 2025, 23 (19): 149-151.
- [4] 齐伟. 沥青混凝土施工工艺在公路工程路面施工中的应用 [J]. 工程机械与维修, 2025, (09): 73-75.
- [5] 陈健. 公路工程路面基层施工技术 [J]. 大众标准化, 2025, (16): 55-57.

基于 PDCA 循环的施工项目质量管理应用研究

王沿娣

武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026020030

摘 要： 施工项目的质量管理工作，是确保工程质量达到标准、降低潜在安全风险、提高项目整体效益的关键，与工程的使用时长以及使用过程中的安全性紧密相连。PDCA 循环为一种具备科学性的质量管理手段，借助计划、执行、检查、处理四个形成闭环的环节，达成质量管理工作的持续改善与优化。本文对当下施工项目质量管理存在的实际问题予以分析，结合施工项目整个流程具备的特点，探究 PDCA 循环各个阶段在施工质量管理工作的具体应用途径，构建一套完善的应用保障机制。为提高施工项目质量管理的水准、推动工程建设朝着高质量方向发展提供理论参考以及实践支撑。

关 键 词： PDCA 循环；施工项目；质量管理；应用研究

Research on the Application of PDCA Cycle in Construction Project Quality Management

Wang Yandi

Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract： The quality management of construction projects is crucial for ensuring that the project quality meets standards, reducing potential safety risks, and enhancing the overall project benefits. It is closely related to the duration of the project's use and its safety during use. The PDCA cycle is a scientific quality management method that achieves continuous improvement and optimization of quality management through the four closed-loop steps of planning, execution, inspection, and handling. This paper analyzes the actual problems existing in the current quality management of construction projects, combines the characteristics of the entire process of construction projects, explores the specific application approaches of each stage of the PDCA cycle in construction quality management, and constructs a complete application guarantee mechanism. It provides theoretical references and practical support for improving the quality level of construction projects and promoting the construction industry to develop towards high-quality directions.

Keywords： PDCA cycle; construction project; quality management; application research

引言

PDCA 循环为在国际上普遍运用的质量管理手段，依靠其系统性、闭环性和持续性的特性，在各类工程的质量管理中得到广泛应用。当下，一些施工项目质量管理呈现出流程缺乏规范性、管控未能做到位、持续改进不够充分等问题，造成工程质量存在较大差异。把 PDCA 循环融入施工项目质量管理的整个过程，对管理流程加以优化、对闭环管控予以强化，对提高工程质量、减少质量风险、达成项目效益的最大程度提升，具备重要价值。

一、PDCA 循环在施工质量管理中的适配性与实操价值

（一）实操适配性

PDCA 循环并非是抽象的、只存在于理论层面的模型，包含的四个环节和施工项目质量管理的整个流程有较高的契合度，能精确无误地满足施工准备、施工实施、工程竣工等各个阶段的管理要求。施工项目呈现出工序繁杂、周期相对较长、影响因素众

多的特性。从项目前期的材料进入施工现场，一直到后期的竣工交付使用，每一个环节都必须进行封闭式的管理控制。PDCA 循环具备的计划、执行、检查、处理整套流程，刚好可以把施工的各个环节紧密地衔接，达成从目标设定开始直至问题整改完成的全链条式管理。不管是土建方面的施工、装饰类的装修，亦或是设备的安装工作，PDCA 循环均能依据施工的具体类型进行灵活的调整，不需要经过复杂的理论转换过程，能直接与施工的实际结合，应用到实际中，匹配不同规模大小、不同困难程度的施工项

目管理需求^[1]。

（二）实操价值

与传统的质量管理模式相比，PDCA循环在施工项目里的实际操作价值格外显著，能切实解决施工过程中质量管控棘手难题，具备的闭环管理特性，可以有效地处理施工时质量管控出现脱节、隐患整改不彻底的问题，保证每一个质量环节都做到有规划、有落实、有检查、有改进。在实际的施工工作中，PDCA循环能直接对现场的质量管理起指导作用，如在计划环节能清晰地确定钢筋绑扎、混凝土浇筑类关键工序的质量标准；执行环节对施工操作进行规范；检查环节查找工序质量存在的隐患；处理环节对问题加以整改，并且对流程进行优化，形成一个完整的质量管控闭环。该类具备较强实操特性的管理模式可助力施工企业在短时间内显著提高施工现场质量管理的效率，削减质量潜藏的隐患，降低因返工产生的成本，切实地保障工程项目的质量^[2]。

二、当前施工项目质量管理现状

（一）管理计划不完善

一些施工项目的质量管理计划制定过度粗疏，缺少对工程特性、施工难题、质量隐患的全方位考量，没有清晰确定具体的质量目标、管控要点以及实施细则，甚至没有结合施工流程、作业环境等实际情形制定计划。计划的制定与施工实际脱离，缺乏可执行性，使质量管理工作找不到依据，难以有力地指导施工全流程的质量管理，出现计划和实际操作不匹配的问题。质量计划缺少一种能动态调整的机制，当遭遇施工条件出现变动、设计方案进行更改、材料被替换等情形时，没办法及时进行优化与调整，而是依旧依照原本的计划执行，不但会对质量管理所达成的效果产生影响，而且有可能诱发质量潜在问题，使施工所需的成本以及工期的风险增加^[3]。

（二）执行环节不规范

在工程施工进程中，质量管理的执行阶段出现了许多不符合规范的问题，直接对工程的整体质量产生了影响。一部分施工人员质量观念淡薄，过度地只看重施工的速度，没有严格依照施工规范以及质量标准开展操作，存在违规进行施工、削减用料、简化工序等不良行径。例如，钢筋绑扎的间距没有达到规定的标准、混凝土浇筑时的配比存在偏差等。施工工序间的衔接不顺利，没有严格落实工序交接的制度，上一道工序的质量还未合格就进入下一道工序，使质量隐患不断积累，给后期的整改工作增加了难度^[4]。

（三）检查管控不到位

在施工项目质量管理的检查环节中，存在管控未达预期的问题，检查的方式相对比较单一，大多是以事后检查为主要方式，事前预防以及事中控制欠缺。检查涵盖的内容不周全，针对隐蔽工程、关键工序的检查力度不够，容易遗漏质量潜在隐患。检查结果的反馈不够及时，在发现质量问题后，没有及时进行通报，并且没有及时督促整改，使问题进一步扩大，对工程的整体质量产生了影响。

（四）持续改进不足

一些施工项目质量管理欠缺持续改进的观念，针对检查过程里发觉的质量问题，仅仅开展了浅层次的整改工作，没有深入探究问题产生的根本原因，也没有对经验教训加以总结，更没有优化管理办法，没有构建完备的持续改进制度，质量管理始终处于原本的水平，很难契合施工项目不断更迭的质量要求。缺少对质量管理经验的积累以及推广，相同类型的质量问题屡次出现，阻碍了质量管理水准的提高^[5]。

三、PDCA循环在施工项目质量管理中的应用

（一）计划阶段：明确目标

PDCA循环里计划阶段属于基础性环节，其核心要点在于综合施工过程中的实际操作，清晰地确定质量管理目标，以及能切实执行的实施方案，为后续的质量管控工作打下坚实根基。依据施工项目的合同规定、工程设计的标准要求、现场施工的具体，设定出详细且能量化衡量的质量目标，明确各个分项工程以及关键工序应遵循的质量标准，并且将其细化至每一道工序的操作规范以及验收准则，全方位地排查施工过程中或许存在的质量风险，风险涉及材料质量、施工工艺、作业环境等多个层面，深入探究风险产生的根源，制定出具有针对性的防控办法。对各岗位的质量管理责任予以划分，明晰工作的分工，制订出详尽的实施计划以及具体的时间节点，保证质量管理工作能依照规则有序开展，使每一个岗位、每一道工序均具备清晰明确的质量指引。

（二）执行阶段：落实措施

在整个流程里，执行阶段属于让计划方案得以落地实施的关键部分，在这个阶段中，关键在于把质量管控措施确切地应用到施工的每一处环节，保证施工质量能契合既定的标准。要着重强化施工人员质量意识教育，并且开展专业技能的培训工作，可以结合施工现场实际操作的案例详细讲解质量规范要求，使施工人员能全面地认识到质量隐患带来的严重危害，确保能严格依照施工规范、质量标准以及计划方案开展操作。对施工工序的管理要进行规范化操作，要严格落实工序交接检验的制度，只有当上一道工序的质量达到规定要求，并且经过验收确定合格后，才可以开启下一道工序的施工。强化对材料以及设备的管理工作，对材料进场检验环节与设备调试环节予以严格把控，针对材料质量，要按照批次逐一开展检验工作，对设备的运行状态，需进行调试，严禁将不合格的材料和设备投入使用。

（三）检查阶段：排查偏差

在检查阶段，其核心要点在于针对执行的实际效果展开全面性的检验工作，对质量存在的偏差以及潜在的隐患进行细致排查。构建具备全方位、多层次特征的检查机制，把事前开展的检查、事中推进过程中的检查以及事后完成后的检查相互结合，针对施工的整个过程实施质量管控举措，着重强化针对隐蔽性质的工程、起到关键作用的工序以及占据重要地位的部位的检查力度，保证质量隐患能尽早被察觉、尽早得到处理。运用专业人员实施的检查和广大群众进行的监督相互融合的形式，增强检查工

作的全面程度以及准确程度。迅速记录检查所得的结果，对照质量目标剖析偏差出现的缘由，生成一份详尽的检查报告。

（四）处理阶段：优化改进

PDCA 循环里，处理阶段是关键所在，其核心为对经验加以总结、对问题进行整改，以及开展持续不断的优化。检查期间察觉到的质量问题，需把整改的责任主体、整改的具体措施以及整改的时间期限予以明确，对相关人员进行督促，使其在规定期限内完成整改工作，保证问题能整改到符合要求的程度。要对质量管理进程中的有效经验与做法进行总结，把经验和做法进行标准化、规范化处理，将其纳入施工项目的质量管理体系中，为后续的项目提供可参考的依据。针对尚未得到解决的遗留性问题，开展深度的根源分析工作，后进入下一个 PDCA 循环流程中，持续不断地推动整改与优化工作的开展，达成质量管理水平的持续提升。

四、施工项目质量管理 PDCA 应用保障措施

（一）组织保障

设立专门用于质量管理的组织机构，把各部门以及各岗位的职责分工予以明确。配置具备专业能力的质量管理人员，全面推动 PDCA 循环于施工项目质量管理运用，保证循环的各个环节能实现有序衔接。将质量管理领导小组的核心职责加以明确，该小组负责质量目标的设定、计划的审核、过程的监督以及效果的评估。定时开展现场的巡查工作，及时察觉质量管理里的问题，并且协调解决问题，确保各项管理举措能落实并产生实际成效。搭建全体人员都参与其中的质量管理局面，清晰界定施工人员、技术人员以及管理人员的质量职责，把质量管控的要求确切地落实至每一个岗位、每一道工序，营造出上下协调、责任共同承担的管理架构，促使全体人员积极主动地投身于质量管控工作。

（二）制度保障

把和施工项目质量管理相关的制度加以完善，拟定 PDCA 循环应用的详细规则、质量检查制度、工序交接制度、质量整改制度等内容，让质量管理流程以及操作标准变规范。把 PDCA 循环各个环节的工作要求、时间的关键节点—责任承担主体明确，保证循环能有序地推进。构建质量考核制度，把质量管理取得的成效和岗位的绩效关联在一起，增强责任意识，激发所有成员参与质量管理工作的积极态度与主动精神，促使质量管理工作能实现常态化、规范化。

（三）人员保障

对质量管理相关人员的培育与训练予以强化，定时开展有关 PDCA 循环管理方法、施工规范、质量标准等内容的培训活动，让人员的专业素养以及实际操作能力得到提升。邀请业界专家举办专题性的讲座，分享先进的质量管理经验和实际操作案例，使人员的视野得到拓展。构建常态化的考核机制，对管理人员和施工人员进行定时考核，对考核未达标的人员暂停其上岗资格，保证人员素养能契合质量管理工作的要求。

（四）技术保障

强化对于施工技术的研究开发以及实际应用，对具备先进性的施工工艺、技术、设备予以推广，让施工的质量以及效率得到提升，降低存在质量隐患的可能性。构建技术交底的相关制度，在施工开始前针对施工人员开展详尽的技术交底工作，让施工流程、质量标准以及操作要点得以明确。加大施工过程中技术指导的力度，迅速解决施工期间出现的技术难题，保证施工质量能契合相关要求。借助信息化的技术手段，搭建质量管理的平台，达成质量数据的实时采集、分析以及反馈，提高质量管理的智能化程度。

（五）资源保障

强化质量管理资源投入，确保在质量管理事务中所需的人力、物力、财力等资源处于充足状态。对专业质量管理人员进行合理地调配，保证各个环节的质量管理工作能有条不紊地开展。配置必不可少的质量检测设备以及工具，提高质量检查精准度和效率表现，保障在质量管理培训、质量检测、问题整改等领域的经费投入，为 PDCA 循环的应用以及质量管理水平的提升给予稳定的资源支撑。

五、结论

目前，施工项目质量管理存有许多问题，把 PDCA 循环融入施工项目质量管理的整个过程，经由计划阶段明确目标、执行阶段落实措施、检查阶段排查偏差、处理阶段优化改进，能切实规范管理流程、强化质量管控、解决质量问题。经由构建包含组织、制度、人员、技术以及资源等全方位保障体系，能促使 PDCA 循环得以高效地投入应用，有助于不断增进施工项目在质量管理层面的水准，确保工程质量与安全得以维护。

参考文献

[1] 张红兵. 精益建设理念引领下的房建工程项目管理策略 [J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(02): 169-171.
[2] 王婷渲. 基于 PDCA 的施工项目安全管理 [J]. 有色金属设计, 2023, 50(02): 48-51.
[3] 周洪文, 燕灿阳. 基于 PDCA 的建筑施工安全管理分析 [J]. 广东建材, 2023, 39(08): 126-128+108.
[4] 吕一方. 基于 PDCA 循环控制质量的泵站工程管理优化研究 [J]. 建筑技术, 2025, 56(01): 18-22.
[5] 朱绍奇. 融合 OBE 理念与 PDCA 循环理论的数字化施工竞赛项目管理模式探究 [J]. 房地产世界, 2025, (16): 41-43.

大型仓储物流园项目主体结构混凝土跳仓法 施工技术研究

张军军

北京城建集团有限责任公司，北京 100088

DOI:10.61369/ME.2026020033

摘 要： 随着现代物流体系不断健全，大型仓储物流园项目规模越来越大，主体结构大多为大面积钢筋混凝土结构。施工时由于构件尺寸大、混凝土浇筑量集中、环境温差的影响，很容易产生温度裂缝和收缩裂缝，影响结构的耐久性和使用安全。跳仓法是通过分区分段、间隔施工来释放结构应力的一种施工技术，在大体积混凝土工程中效果较好。本文根据大型仓储物流园项目的特点，对跳仓法施工技术基本原理、适用条件、施工方案设计及工艺流程进行分析，提出相应的质量控制措施，为类似工程提供一定的参考。

关 键 词： 仓储物流园；主体结构；混凝土施工；跳仓法

Research on Construction Technology of Concrete Sequential Placement Method for the Main Structure of Large-scale Warehousing and Logistics Park Projects

Zhang Junjun

Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088

Abstract： With the continuous improvement of the modern logistics system, the scale of large-scale warehousing and logistics park projects has been increasing, and the main structures are mostly large-area reinforced concrete structures. During construction, due to the large size of components, the concentrated amount of concrete pouring, and the influence of environmental temperature differences, temperature cracks and shrinkage cracks are easily generated, which affect the durability and safety of the structure. The jump-laying method is a construction technology that releases structural stress by dividing and segmenting and conducting construction at intervals. It has a good effect in large-volume concrete projects. Based on the characteristics of large-scale warehousing and logistics park projects, this paper analyzes the basic principles, applicable conditions, construction scheme design and process flow of the jump-laying construction technology, and proposes corresponding quality control measures, providing certain references for similar projects.

Keywords： warehousing and logistics park; main structure; concrete construction; jump-laying method

引言

近些年来，在电子商务以及智慧物流迅速发展影响之下，大型仓储物流园的建造趋向于规模化、集约化。此类工程一般跨度大、面积广、结构连续性好，主体结构施工多为大面积混凝土一次浇筑。但是由于混凝土水化热释放集中、温度梯度大、收缩变形受限制等原因，在实际施工中容易产生结构裂缝，不但影响工程外观质量，还会降低结构耐久性。因此研究跳仓法在大型仓储物流园主体结构施工中的应用，对提高工程质量、施工效率有重大意义。

一、跳仓法施工技术原理

（一）跳仓法的基本概念

跳仓法是在混凝土结构施工过程中，把整个结构分成若干个独立的施工单元（即“仓块”），然后按照“间隔施工、分批完

成”的原则进行浇筑。第一次施工只浇筑一部分仓块，等其强度达到一定程度时再对中间预留区域进行补浇，形成完整的结构。该方法的核心就是人为地“切断”结构的施工连续性，给混凝土在早期阶段留出一定的自由变形空间，减少内部应力的积累。与传统的后浇带施工相比，跳仓法可以减少后期处理工序，提高施

工效率，在工程实际中具有很强的适用性。

（二）技术机理分析

跳仓法的主要作用机理就是温度应力释放和收缩变形的控制。大体积混凝土浇筑时，水泥水化反应会放出大量的热量，如果一次性浇筑，内部温度升高明显，而外部散热快，温度梯度大，产生温度应力。采用跳仓法后，由于分区浇筑，可以分散水化热的集中释放过程，减小温差峰值。其次，混凝土硬化时会产生收缩变形，如果结构整体连续，则变形受到约束，容易产生拉应力而产生裂缝。跳仓施工就是间隔留设空仓，给已浇筑的区域留有一定程度的收缩释放空间，减小约束程度，减少裂缝产生。

（三）跳仓法与传统预留施工缝施工方式对比分析

大体积混凝土结构施工时，传统的预留施工缝或者后浇带来释放温度应力和收缩变形的方式，在大型仓储物流园这样的大面积、超长结构中越来越明显地存在不足。后浇带长期暴露，容易积存垃圾、积水，界面污染严重，钢筋外露也会生锈，降低结构的耐久性；同时它的封闭时间一般要到主体封顶后的1~2个月，大大延长了施工工期，占用模板和支撑体系，降低材料周转速度，增加成本。另外后浇带还会造成施工组织上的干扰，影响场地通行和工序的穿插。更重要的是，该方法属于被动释放应力，在超大面积结构中很难有效地分散温度应力，裂缝风险仍然很高。跳仓法按照《超长大面积混凝土结构跳仓法技术规程》（T/CECS 640-2019）设计，把整体结构分成若干个施工单元，在7天内完成封仓，达到主动控裂的目的。该方法把传统的后浇带变成阶段性连续施工方式，实现两缝变一缝，使结构在早期就形成了整体受力体系，避免了垃圾堆积、钢筋锈蚀、渗漏隐患，工期大大缩短，模板周转率提高。同时连续完整的施工空间有利于材料堆放、机电安装等工序的穿插。用分区释放、逐步约束的方式可以提高温度、收缩应力，提高抗裂性能。

二、大型仓储物流园主体结构特点

（一）工程结构特征

大型仓储物流园主体结构一般采用钢筋混凝土框架或者框架-剪力墙结构形式，柱网布置规则、跨度大、楼板面积广。为了满足货物堆放和物流设备运行的要求，其结构设计要具有较高的承载能力以及良好的整体稳定性。除此之外，此类工程一般会重视空间利用效率，内部很少有隔墙或者大开间，这样就使混凝土结构更加连续，施工阶段的应力控制也变得更为困难。

（二）混凝土施工难点

施工期间，仓储物流园主体结构会碰到许多技术难题。单次浇筑面积大，混凝土用量集中，容易造成水化热积聚；结构尺寸大，温度控制难度增大，内外温差容易超过允许值。另外施工工期长，环境条件复杂（昼夜温差大），混凝土收缩、徐变等也更明显。另外大面积施工对施工组织协调的要求较高，任何一个环节出现故障都会影响整个施工进度。

（三）跳仓法应用的必要性

为了解决以上问题，采用跳仓法有明显的必要性。合理划分

施工单元，把大面积结构分成若干个相对独立的施工区域，从而减小单次浇筑规模，减小温度应力。同时时间间隔施工可以给混凝土留出一定的变形释放空间，减小收缩裂缝的出现。跳仓法还可以改善施工组织，实行分区流水作业，从而提高施工速度。因此，大型仓储物流园主体结构施工中推广应用该技术有重大的现实意义。

三、跳仓法施工技术方案设计

（一）分仓原则与划分方法

跳仓法施工时，分仓划分是决定其技术效果的关键所在，在保证结构受力合理的基础上还要考虑施工的可行性以及温度控制的要求。根据《超长大面积混凝土结构跳仓法技术规程》（T/CECS 640-2019）的规定以及浙江龙港某物流仓储项目实际情况，选取3#双层框架结构仓库作为研究对象。该仓库单层建筑面积约2.5万平方米，结构具有典型的大型跨度、大开间特点，楼板连续性好，属于超长大体积混凝土结构体系。为了有效地控制温度应力和收缩变形，分仓划分以结构柱网为基础，结合施工组织和混凝土供应能力来综合确定。具体划分时先沿8m×8m柱网轴线布置，将整个楼板分成若干规则矩形仓块，单个仓块的尺寸控制在约24m×24m左右，面积约为576m²，满足规程中“单仓面积宜控制在500-1500m²”的要求。同时控制仓块长宽比不大于2:1，防止出现狭长或者不规则的区域，减小应力集中。在分仓布置上用“棋盘式”间隔划分的方式，使相邻仓块不同时浇筑，给已浇筑区域留出自由收缩的空间。另外在划分时也尽量避开主梁交汇节点以及受力比较复杂的区域，保证结构受力路径的连续性、合理性。

（二）跳仓浇筑顺序与施工节奏控制

跳仓法施工的关键是通过合理的浇筑顺序和时间间隔，使混凝土早期应力得到有效的释放，因此施工节奏控制要严格按照技术规程进行组织。本工程在施工时遵循“隔仓浇筑、分批推进”原则，即先施工奇数编号仓块，待其达到一定强度后才进行相邻偶数仓块的浇筑，从而形成有规律的施工间隔。按照《超长大面积混凝土结构跳仓法技术规程》（T/CECS 640-2019）的要求，相邻仓块之间施工间隔不应小于3d，在后续浇筑前已浇筑的混凝土强度不应小于1.2MPa，以保证其有一定的抗变形能力。根据本项目实际情况，施工过程中将整体仓块分成两部分进行施工，第一部分完成约50%仓块的浇筑并形成均匀分布的“跳仓”状，第二部分在前一阶段混凝土达到强度要求后，对剩余仓块进行补浇，逐步闭合结构。整个封仓工作用时7天完成，使混凝土在温度峰值前完成应力释放及结构连接。采用这样的施工节奏安排，一方面可以使得已经浇筑的区域开始收缩、降温，减小对后浇区的约束作用；另一方面也保证了整个施工进度连续性，使质量控制和工期控制达到协调统一的效果。

（三）模板与支撑体系设计

模板及支撑体系要达到强度、刚度、稳定性要求，在分仓施工时不能使结构产生变形或者位移。模板选择要根据构件尺寸及

施工工艺来定,尽量选用整体性好、拼缝严密的模板体系,从而减小漏浆和变形的风险。对相邻仓块之间接缝处要重点加强模板连接,采取加固措施提高接缝处密封性,防止浇筑过程中出现漏浆、错台现象。同时对模板安装精度加以控制,保证标高、轴线位置符合设计要求。

四、跳仓法施工工艺流程

(一) 施工准备

在正式施工前要进行系统的技术交底工作,使现场管理人员和施工人员清楚地了解跳仓法的施工原理、分仓划分方法以及具体的施工要点,防止由于理解不到位而造成施工质量出现问题。同时结合工程实际情况编制专项施工方案,对重要工序做重点说明。在资源准备上要做好原材料的采购和进场验收工作,保证水泥、骨料、外加剂等材料质量稳定可靠;合理配置混凝土运输设备、振捣设备、测温仪器等施工机具,保证施工过程中设备运转正常、供应不断。人员上要确定岗位分工,保证技术人员、操作人员和质检人员到位。另外还要对模板、钢筋、预埋件进行全方位的检查,主要看尺寸精度、安装牢固性、位置准确性是否符合设计和规范的要求。同时还要根据跳仓施工的特点来制订详细的施工组织计划和应急预案,以应对各种突发状况,保证施工有条不紊地进行。

(二) 分仓浇筑施工工艺

浇筑时必须按规定的跳仓顺序进行,一般采用“隔仓施工、分批推进”的方式,保证各仓块之间有合理的间隔时间。混凝土浇筑应按分层、分段进行,每层厚度应根据振捣设备性能来控制,一般不宜过大,以保证振捣效果。振捣时应采用插入式振捣器均匀布置振点,控制振捣时间,防止过振造成离析或者漏振产生蜂窝麻面等质量问题。同时注意振捣顺序和浇筑方向的协调,保证混凝土整体密实均匀。对大面积楼板结构,在混凝土初凝之前要及时进行表面整平、收光处理,必要时用机械抹平设备来提高表面平整度和密实度。在浇筑过程中还要对标高、平整度进行实时控制,保证施工质量符合设计要求。

(三) 施工缝处理技术

跳仓法施工体系里,施工缝既是施工阶段的分界线,又是结构受力的关键连接点,施工缝处理得好坏直接影响到结构的整体性及抗裂能力。因此,本工程对于施工缝处理采取了不同于常规做法的加强措施。在界面处理上,除了传统的凿毛处理外,还采用机械凿毛或者高压水射流技术对施工缝表面进行深度处理,使

界面粗糙度不小于5mm,粗骨料外露率大于70%,从而大大增强新旧混凝土之间机械咬合作用。其次,浇筑前对施工缝做好充分的湿润处理,使施工缝达到饱和面干的状态,防止界面吸水影响粘结性能,防止出现明水导致界面弱化。在此基础上,在施工缝处用水泥基界面剂或与原结构相同的水泥砂浆均匀涂抹一层,厚度为3~5mm,提高界面粘结强度。另外对于受力大的地方还要设置附加钢筋或者剪力键,用构造措施提高界面抗剪能力,保证施工缝可以传递结构内力。封仓浇筑时对施工缝处加强振捣控制,适当延长振捣时间2~3秒,使新浇混凝土与原结构充分密实结合,防止产生夹层、冷缝。经过上述多层次控制措施之后,施工缝由原来的“施工间歇面”变成具有明确受力功能的结构连接界面,进而保证跳仓法施工条件下结构整体性。

(四) 温度监测与控制要点

大体积混凝土施工时温度应力控制是关键环节。本工程按照超长混凝土结构跳仓法技术规程(T/CECS 640-2019)来建立全过程温度监测和调控体系。测温点按照分仓布置,每个仓内不少于3个测点,表层(约50mm)、中部、底部各一个,全面了解温度分布和梯度变化。控制指标为内外温差不大于25℃,降温速率不大于2℃/d。测温自浇筑完成之后立刻开始,前7d为重点监测期,每4h记录一次数据,然后根据分析结果来判断温度的发展趋势。接近控制限值时,立即采取增设保温覆盖、推迟拆模或者改变浇筑节奏等手段予以调节。工程安装了自动化测温系统对数据进行采集,并上传到信息化管理平台,可以实现数据的实时监测和预警。施工组织上配合低温入模、分层浇筑、夜间施工等措施,从源头控制温升峰值。采用“监测+调控”的方式,可以有效地控制温度应力的发展,保证结构的抗裂性。

五、结束语

针对大型仓储物流园主体结构混凝土施工中容易出现的温度裂缝、收缩裂缝问题,采用跳仓法即分仓划分、间隔浇筑的施工方法,可以有效地减小结构内部应力集中,提高混凝土的抗裂性及整体施工质量。根据施工方案设计和工艺流程控制可知,该方法在改善施工组织、提高资源利用率、保证工程耐久性等方面有较好的应用价值。跳仓法的实际应用要结合工程规模、结构形式、环境条件等因素除有目的地改进。通过信息化监测、智能建造技术可以实现施工全过程的控制,大型复杂工程中也可以推广施工技术的应用。

参考文献

- [1] 赵建新, 韩艳军. 跳仓法施工在大体积混凝土基础底板中的应用 [J]. 工程技术研究, 2020, 5 (10): 41-42.
- [2] 韩亚新, 单宏伟, 谢良兵, 等. “跳仓法”在大体积混凝土无缝施工中的应用研究 [J]. 施工技术, 2018, 47 (S1): 1439-1442.
- [3] 章谊. 跳仓法替代后浇带在大体积混凝土施工中的运用 [J]. 建筑施工, 2020, 42 (7): 1166-1168.
- [4] 杨俊召. 跳仓法施工在大体积混凝土基础底板中的应用探究 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46 (10): 46-47.
- [5] 刘小龙. 跳仓法在大体积混凝土工程施工中的应用 [J]. 江西建材, 2023 (12): 329-331.

公建项目 EPC 模式下设计——施工协同管理问题与对策

朱磊

扬州市上善建设工程有限公司, 江苏 扬州 225000

DOI:10.61369/ME.2026020036

摘 要 : EPC模式作为“设计—采购—施工”一体化的总承包模式,其基本特点就是用全流程整合打破传统分段管理的桎梏,因而更有利于对项目质量、工期、成本予以协同控制。因此本文以公建项目实际为背景,就设计环节中施工协同管理的具体问题展开分析,提出有专业价值、有创新思路的协同管理对策,系统且全面地讨论数字化协同、流程再造、激励约束诸种路径,对提高公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理水平、促进公建项目高质量建设都有极好的示范意义。

关 键 词 : 公建项目; EPC 模式; 设计—施工协同; 协同管理; 创新对策

The Issues and Countermeasures of Design — Construction Synergy Management in the EPC Mode of Public Construction Projects

Zhu Lei

Yangzhou Shangshan Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225000

Abstract : The EPC model, as an integrated general contracting model of "design – procurement – construction", has the basic characteristic of breaking the constraints of traditional segmented management through the integration of the entire process. Therefore, it is more conducive to the coordinated control of project quality, schedule, and cost. Thus, based on the actual situation of public construction projects, this paper analyzes the specific issues of construction coordination management in the design phase, proposes professional and innovative management countermeasures, and systematically and comprehensively discusses various paths such as digital coordination, process reengineering, and incentive and restraint. These have excellent exemplary significance for improving the design–construction coordination management level of the EPC model in public construction projects and promoting the high–quality construction of public construction projects.

Keywords : public construction projects; EPC model; design–construction coordination; coordination management; innovative countermeasures

引言

EPC 总承包模式凭借其“统一规划、统一设计、统一施工、统一管控”的一体化优势,逐渐成为公建项目的主流建设模式。与传统 DBB (设计—招标—施工) 模式不同, EPC 模式将设计、施工等环节整合交由总承包单位统筹推进,其核心逻辑是通过各环节的深度协同,化解分段管理带来的衔接矛盾,实现项目全生命周期价值最大化。基于此,本文立足公建项目实操场景,重点剖析 EPC 模式下设计环节中施工协同管理的具体问题,提出协同管理对策,为我国公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理提供实践借鉴,助力公建项目实现高质量建设。

一、公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理的重要性

从总体上说, EPC 模式下设计—施工协同管理对公建项目有十分明确并且逻辑严密的三大重要意义: 第一是有利于提高项目建设质量, 因为设计、施工双向联动可以及早发现设计方案中的种种不合理之处, 因而能减少施工中的返工、变更, 让项目建

设真正符合公建项目的技术标准及使用功能, 也更切实保护公共利益。第二是有利于控制项目建设成本, 设计阶段确定了项目 70% 以上的造价, 故施工方提前介入设计有利于优化设计方案, 避免设计不合理造成的造价浪费, 也能防止施工返工带来的额外成本, 因此造价易于精准控制^[1]。第三是有利于保障项目按期交付, 公建项目一般都有刚性的交付节点(学校要在开学前交付, 医院要按规定时间投入使用), 设计—施工协同有利于缩短设计

作者简介: 朱磊(1982.03), 男, 汉族, 江苏扬州人, 本科学历, 中级职称, 主要研究方向为施工进度管控、质量验收与 EPC 协同管理等工作。

与施工衔接的周期，自然也就更有可能避免因衔接不畅而造成的工期延误。

二、公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理的具体问题

（一）设计环节施工介入滞后，方案可施工性不足

这是当前公建项目 EPC 模式下设计—施工协同最突出的问题。多数 EPC 项目中，设计环节仍以设计团队为主导，施工团队介入时间较晚，往往在设计方案定稿、施工图设计完成后才介入，导致设计方案缺乏施工实操考量，可施工性差，施工过程中频繁出现返工、设计变更，不仅增加了成本，还延误了工期。像某市级政务服务中心 EPC 项目，设计方案中存在多处不符合现场施工实际的问题：政务服务大厅的吊顶设计采用大面积弧形造型，且吊顶内机电管线密集，但设计方案未考虑管线安装和检修空间，导致施工时无法正常安装管线，不得不拆除部分弧形吊顶进行优化，返工成本达 80 余万元，延误工期 15 天；卫生间防水设计采用传统卷材防水，未结合现场施工环境（地下水位较高）和施工工艺特点，施工后出现多处渗漏，返工修复耗时 20 天，增加修复成本 30 余万元^[2]。

（二）信息传递不畅，协同沟通存在壁垒

由于公建项目 EPC 模式下设计、施工两方协同必然要进行大量信息传递，诸如设计图纸、设计意图、施工要求、现场工况、技术参数等，但是总体来说，目前多数项目仍沿袭传统沟通方式（会议沟通、邮件沟通、纸质文件传递），故信息传递不及时、不准确、不完整，由此形成明显的信息壁垒，设计团队不能及时掌握现场施工情况，施工团队不能充分、可靠地理解设计意图，二者因此容易发生协同冲突。华南师范大学附属中学（知识城校区）EPC 项目给出了十分典型的教训：设计阶段对实验楼实验室通风系统做了优化设计，但是设计团队没有及时、完整地将优化后的图纸及设计说明传递给施工团队，施工团队仍按原图纸进行风管安装，安装到 30% 时才发现图纸与现场实际设计要求不符，所以就是不得已已拆除已安装的风管，重新采购、安装。

（三）协同理念脱节，专业融合不足

由于目前绝大多数设计团队、施工团队都沿用传统的工作理念，故设计团队在做设计方案时重视规范性、美观性、创新性，但忽略了施工的可行性、经济性、安全性，而施工团队在管理施工进度、施工质量、施工成本时有明确思路，却忽略了对设计方案提出优化建议，因此二者没有真正树立起“设计为施工服务、施工为设计落地”的正确协同理念^[3]。更根本的是，设计团队与施工团队专业融合不够充分，设计人员缺少施工工艺、施工技术的知识，施工人员缺少设计规范、设计理念的素养，故双方难以顺畅沟通协作。

三、公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理的创新对策

（一）创新协同流程，推动施工提前介入设计全过程

由于打破了传统“设计完成后施工介入”的流程，因此可以更明确的去建立“施工提前介入、双向联动”的协同流程，把施

工团队介入时间提前到项目策划、方案设计阶段，由此让设计方案真正满足施工需要。

首先建立施工提前介入机制，确定施工团队在设计各阶段的介入节点、介入内容及职责分工：项目策划阶段，施工团队参加项目可行性研究，从现场施工条件出发，主动、充分地提出施工工艺、工期安排、造价控制等方面的建议，方案设计阶段施工团队全程参与，就设计方案的施工可行性、经济性、安全性逐项论证，对不合理设计内容予以重点优化，施工图设计阶段施工团队配合设计团队，及时、准确地提供施工工艺、施工节点、现场工况诸种资料，因此能完善施工图设计，杜绝脱离现场实际的设计错误。其次配套建立协同评审机制，即设计方案及施工图设计完成之后，由总承包单位组织设计、施工、监理、建设各方进行协同评审，重点就设计方案的施工可行性予以正式评审，施工团队所提出的优化建议须经各方论证之后，方由设计团队予以正式修改完善，由此保证最终设计方案既符合公建项目的技术规范及功能要求，又具备极强的可施工性。

创新点就是由于引入了“协同评审+动态优化”模式，故能把施工介入贯穿于设计全过程，又由此顺理成章地建立设计方案动态优化机制，因此施工中发现设计方案不合理之处时可以及时提出优化建议，设计方随即予以调整，真正做到设计、施工两者同步优化^[4]。

从华南师范大学附属中学（知识城校区）EPC 项目的优化过程可以看到施工提前介入设计全过程的协同效应：项目后期对协同流程做了合理调整，让施工团队提前介入方案设计阶段，由此施工团队就实验楼、教学楼的管线布置、施工工艺各环节提出 127 条优化建议，设计团队据此对设计方案做动态、系统的优化，共解决 1144 处潜在变更设计问题，因此现场返工大大减少，施工成本节约约 300 万元，工期缩短 25 天。

（二）搭建数字化协同平台，打破信息传递壁垒

以数字化技术为手段，建设公建项目 EPC 模式下设计—施工协同信息平台，将设计、施工、造价、进度诸种信息予以集成，做到信息实时传递、及时共享、有机联动，由此自然、合理地打破设计、施工两方的信息壁垒，切实提高协同效率。

首先系统、有层次地构建“BIM+物联网+大数据”一体化协同平台，以 BIM 模型作为核心载体，把设计图纸、设计说明、施工方案、现场工况、进度数据、造价数据诸种信息自然、合理地集成起来，由此做到设计与施工信息的一体化管理：设计人员可随时查看现场施工进度及施工工况，及时、主动调整设计方案，施工人员可随时查阅设计图纸及设计意图，即时反馈施工需求及现场问题，真正实现双向信息联动。其次，在平台中完善、补充协同沟通、设计变更管理、问题反馈、进度管控诸种功能模块，让设计团队和施工团队在平台直接实时沟通，设计变更经平台快速审批、正式传递，现场问题经平台及时上报、即时解决，信息传递因而及时、准确、完整。最后，组织开展对设计、施工各方相关人员的平台应用培训，让所有协同人员都熟练掌握平台功能，让平台所蕴藏的信息共享、协同联动的价值落到实处。

创新点就是把 BIM 技术与物联网、大数据技术有机、充分地

结合，因而能突破传统 BIM 技术只用于设计建模的局限，由此就可以建成“设计—施工—管控”一体化数字化协同平台，实现信息实时共享、动态管控，又辅以移动端应用，让协同人员随时随地查阅信息、开展协作，真正提高协同效率^[5]。

某市级政务服务中心 EPC 项目后期很好地建设了“BIM+物联网”协同平台，把设计图纸、施工方案、现场监测诸种信息都集成于平台，因此设计单位能随时、直接地查看现场施工情况，并且能够及时的进行方案的调整设计，施工单位也能随时查看优化后的设计图纸，自然杜绝返工。平台应用以后，设计变更传递时间由原来的 7 天缩短到 1 天，现场问题解决周期由原来的 10 天缩短到 3 天，返工成本下降 60%，工期提前 15 天交付，信息传递不畅的问题由此得到根本解决。

（三）强化理念引导与人才培养，促进专业深度融合

转变设计团队和施工团队的传统工作理念，树立“协同共赢、设计为施工服务、施工为设计落地”的协同理念，同时加强复合型协同管理人才培养，提升双方人员的专业素养，促进设计与施工的专业深度融合。

具体措施一是加强协同理念引导，通过专题培训、案例分享、座谈会等形式，向设计团队和施工团队传递协同管理的重要性，引导设计团队重视施工可行性、经济性，引导施工团队重视设计理念、设计规范，树立协同共赢的理念，打破“各自为战”的思维模式。二是加强复合型人才培养，一方面，组织设计人员参加施工工艺、施工技术、现场管理等相关培训，提升设计人员的施工实操素养；组织施工人员参加设计规范、设计理念、BIM 技术等相关培训，提升施工人员的设计专业素养。另一方面，与高校、职业院校合作，定向培养兼具设计专业和施工专业素养的复合型协同管理人才，为设计—施工协同提供人才支撑。三是建立设计与施工人员双向交流机制，安排设计人员驻场办公，深度参与施工环节的技术指导、方案优化，了解现场施工实际；安排施工技术骨干参与设计环节的方案论证、图纸审核，反馈施工需求，促进双方人员的深度交流和专业融合^[6]。

创新方向就是建立“理念引导+人才培养+双向交流”三位

一体的提升体系，不仅注重理念转变和人才培养，还通过人员双向交流，让设计人员深入了解施工、施工人员深入理解设计，实现专业素养的双向提升和专业深度融合，从根本上解决协同理念脱节、专业融合不足的问题。

某市级文体中心 EPC 项目后期加强了理念引导和人才培养，组织设计团队和施工团队开展协同专题培训 4 次，安排 5 名设计人员驻场办公、3 名施工技术骨干参与设计论证，双方人员双向交流累计达 20 人次。设计人员驻场后，深入了解施工实际，优化了体育馆屋面钢结构设计方案，将大跨度钢结构调整为分段式钢结构，既保证了建筑美观性，又降低了施工难度、节约了造价 150 万元；施工技术骨干参与设计论证后，提出了 8 条合理的优化建议，均被设计团队采纳，有效解决了前期协同理念脱节、专业融合不足的问题，项目顺利推进，最终按期交付。

四、结论

公建项目 EPC 模式下设计—施工协同管理是实现项目质量、工期、造价三者协同管控的核心，也是充分发挥 EPC 模式一体化优势的关键，因此本文从公建项目实操场景出发，结合典型案例，提出三大创新对策：第一是创新协同流程，让施工尽早介入设计全过程，由此形成“协同评审+动态优化”模式，第二是建设“BIM+物联网+大数据”数字化协同平台，真正打破信息传递壁垒，第三是强化理念引导，完善“理念引导+人才培养+双向交流”三位一体体系，系统、有力地促进专业深度融合。诸种对策彼此衔接，专业性强，可操作性突出，又都有典型案例予以验证，故能直接、扎实地解决设计—施工协同管理中的种种问题，切实提高协同管理水平，也因而更好地实现公建项目 EPC 模式的根本价值。未来宜顺势而为，更充分、更成熟地将人工智能、区块链等新技术与协同管理融合，打造智能化协同管理平台，让协同流程实现真正的自动化、智能化管控。

参考文献

- [1] 周文东. EPC 总承包合同管理问题及其对策研究——以 S 企业某项目为例 [J]. 企业改革与管理, 2025, (19): 46-48.
- [2] 吴志伟. 设计牵头建筑市政类 EPC 项目质量安全管理问题与应对措施 [J]. 电力勘测设计, 2025, (S1): 113-116.
- [3] 代超. 住宅 EPC 项目质量管理中存在的问题及应对措施研究 [J]. 居舍, 2025, (25): 177-180.

高精度机械加工工艺改进与质量控制研究

顾文杰

中天射频电缆有限公司，江苏 南通 226000

DOI:10.61369/ME.2026020004

摘 要： 高精度机械加工工艺于现代制造业应用广泛，在航空、汽车、精密仪器等领域，对加工精度要求颇高，随着工艺要求持续提高，传统加工工艺遭遇诸多难题，像加工误差、加工稳定性欠佳等，优化加工参数、采用新型材料与刀具、引入先进加工技术等办法，可有效增强加工精度与生产效率，结合统计过程控制、实时监控等质量控制手段，能保障加工过程稳定 and 产品质量，实施这些改进措施既提升加工精度，又提高生产效率，为制造业精密零件生产提供可靠支撑。

关 键 词： 高精度加工；工艺优化；刀具材料；质量控制；生产效率

Research on Process Improvement and Quality Control of High-Precision Machining

Gu Wenjie

Zhongtian RF Cable Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226000

Abstract： High-precision machining processes are widely applied in modern manufacturing industries, particularly in aviation, automotive, and precision instrumentation sectors, where stringent machining accuracy requirements are prevalent. As process demands continue to escalate, traditional machining techniques encounter numerous challenges, such as machining errors and suboptimal processing stability. By optimizing machining parameters, adopting novel materials and cutting tools, and integrating advanced machining technologies, significant enhancements in machining accuracy and production efficiency can be achieved. Furthermore, incorporating quality control measures such as statistical process control and real-time monitoring ensures stable machining processes and consistent product quality. Implementing these improvement measures not only elevates machining precision but also boosts production efficiency, providing reliable support for the production of precision components in the manufacturing industry.

Keywords： high-precision machining; process optimization; tool materials; quality control; production efficiency

引言

现代制造业对产品精度要求不断提高，传统机械加工工艺难以满足高精度加工需求，航空航天、汽车、精密仪器等领域对加工精度的严苛要求促使高精度机械加工技术迅速发展，但现有加工工艺仍存在诸多挑战，如误差累积、加工稳定性差、生产效率低等，制约生产能力提升，探索高精度加工工艺改进方法和质量控制策略成为行业急需解决的课题，优化加工参数、引入先进技术与材料以及创新质量控制方法，可提升加工精度和生产效率，对提高整体制造水平意义重大，能让制造业在高精度加工领域取得更出色成果，满足不断升级的市场需求。

一、高精度机械加工工艺的现状与挑战

（一）高精度机械加工的定義与特点

高精度机械加工，指利用数控（CNC）设备对工件尺寸、形状、位置等实施极限把控，加工公差往往在 $\pm 0.001\text{ mm}$ 以内甚至更低，表面粗糙度能控制于 $Ra\ 0.1\ \mu\text{m}$ 级别，以此契合航空航天、医疗器械、光学等高端行业对部件精度的严格要求，它不光注重尺寸精度，对几何形位公差、表面质量以及重复性都有严格

标准，加工过程高度依靠高分辨率控制系统、多轴联动技术和先进测量设备如坐标测量机（CMM）等^[1]。

当下，高精度加工在航空发动机叶片、精密齿轮、光学镜片、医疗植入物等领域得到广泛运用，特别是在复杂几何形状和微小结构制造里起到关键作用，现代航空航天部件常常要达到微米级精度和出色的重复性，以此保障整体系统性能和可靠性，多轴联动、高速主轴和实时数控反馈技术成为达成高精度加工的核心技术支撑，高精度机械加工凭借其独特优势，不断拓展应用范

围，为众多高端领域的发展注入强劲动力，推动着相关行业不断迈向新的高度。

（二）现有工艺的瓶颈分析

传统机械加工工艺受制于机床刚性、刀具磨损以及环境扰动等诸多因素，加工误差控制颇具难度，普通数控设备典型加工误差范围能达到 $\pm 0.05 \text{ mm}$ ，高精度设备虽可将误差控制在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 甚至更低水平，然而仍会受到热膨胀、振动和动态误差影响，致使精度出现波动，其中导轨、滚珠丝杠几何误差以及伺服系统响应延迟是常见的精度误差来源^[2]。

超精密加工技术诸如超精密车削、磨削或者电火花加工能够把精度提升到亚微米乃至纳米级别，不过这些技术对设备刚性、环境温控和制作工艺有着更高要求，要知道环境温度仅仅变化 0.1°C 就可能引发机床热变形，进而对微米级加工精度造成影响，这已然成为精密制造领域的关键控制难题，在实际操作中，这些复杂的影响因素相互交织，使得加工精度的稳定保障面临着巨大挑战，需要不断探索新的解决途径来克服这些难题，以推动机械加工工艺向更高精度迈进。

（三）质量控制中的主要问题

高精度加工里常出现的误差类型涵盖尺寸误差、形状误差和位置误差等，具体呈现为直线度、圆度、平面度偏差这类几何误差，要是尺寸公差偏差超出设计所定区间，便可能造成部件装配不佳或者功能失效；精密加工一般会采用细致的公差级别定义，像 ISO 286 标准里的 IT 等级，以此来规范加工精度要求^[3]。

误差产生的机制是多种多样的，有机床动态特性方面的原因，有切削热引发的热变形因素，还有工件材料热膨胀以及夹具系统刚度不够等情况，加工过程中的环境因素，诸如温度、湿度和振动，也会对加工质量造成影响，高精度制造得全面考量这些因素，运用控制系统补偿、优化夹具设计以及稳定加工环境等手段来降低误差累积，保证最终产品能够符合严苛的质量指标，以达成高精度加工的预期效果。

二、高精度机械加工工艺改进方法

（一）优化加工参数

优化加工参数、运用新型材料与刀具是提升高精度机械加工水平的关键，加工参数在高精度机械加工里意义非凡，像进给速度、切削深度、切削速度以及刀具角度等常见加工参数，直接左右着加工精度和表面质量，对这些参数进行优化，能减少加工时热变形、振动和刀具磨损情况，在数控铣削中，合理选进给速度和切削深度可减小切削力与刀具变形，最终提高加工精度，ISO 3685 标准指出，切削速度关乎刀具寿命与加工精度，速度过高会使热效应增强，影响刀具材料稳定性而增加误差^[4]。

借助实验设计如正交实验或响应面法能为特定工艺和材料确定最佳加工条件，超精密车削时，调整切削深度和刀具角度组合，能让表面粗糙度降到 $Ra 0.05 \mu\text{m}$ 以下，提高加工精度同时提升生产效率，优化后的加工参数既能减少加工误差，又提升工艺稳定性进而降低生产成本。

（二）新型材料与刀具的应用

新型材料应用可提高加工精度，硬质合金、陶瓷等高性能材料让切削工具耐磨性和强度大增，硬质合金刀具比传统高速钢刀具热稳定性高且磨损率低，适合高硬度材料精密加工，在现代精密加工中常用于高温合金、钛合金等难加工材料，可提高加工精度与效率^[5]。

刀具的选用直接影响加工稳定性，刀具材料、几何形状、涂层技术等因素决定其耐用性与加工精度，刀具涂层技术发展如 TiN、TiAlN 涂层应用让刀具表面硬度提升，能降低切削力、减少热变形保证加工精度稳定。在航空航天等高精领域，用涂层刀具可将加工精度控制在 $\pm 0.001 \text{ mm}$ 以内，为高精度机械加工提供有力支持。

（三）先进加工技术的引入

引入精密加工技术是提升加工精度的关键，能有效突破传统机械加工在精度上的局限，激光加工作为先进加工技术，优势突出，具备高精度且可实现微米级切割，和传统加工方法相较，激光加工能达成更高精度控制，加工精度可达 $\pm 0.01 \text{ mm}$ ，适用于薄壁零件与微细结构件加工，在精密光学元件和微型器件制造领域应用广泛，热影响区小，不易产生变形，可保证复杂几何形状的高精度加工，其非接触加工特性适用于脆性、柔性等特殊材料，加工时无需物理接触，不会引发材料机械应力或热变形，提高了加工精度与可靠性^[6]。

电火花加工（EDM）同样是适用于高精度加工的技术，尤其适合硬脆材料加工，它能精准加工出复杂形状与微小结构，在传统机械加工难以实现的细微孔洞和复杂三维结构方面优势明显，电火花加工精度可达 $\pm 0.002 \text{ mm}$ ，适用于高硬度材料精密加工，在模具制造、航空航天及医疗器械等领域应用广泛，在模具制造里，电火花技术可加工出高精度模具型腔，用于生产复杂形状和高精度要求的热等静压制品、航空发动机叶片等零件，其出色的精度和细节处理能力，使其成为精密模具制造必不可少的技术手段。

（四）工艺流程的优化设计

工艺流程的优化设计对提高高精度机械加工的效率与稳定性意义重大，精简不必要的加工步骤、重组工艺流程，能减少加工过程中误差的累积，确保加工精度的一致性，像在复杂零件加工时，采用一次装夹多道工序的加工方式，降低工件装夹误差累积，提升加工精度^[7]。

现代生产引入数字化工艺规划与自动化控制手段来实现精确的工艺设计与优化，实施工艺重组合理配置各类加工设备和工序能在不增加设备成本的情况下提升生产线的精度和效率，标准化和模块化的工艺设计增强了生产的灵活性有效保障工艺质量，减少因人为操作失误造成的精度波动，让高精度机械加工在效率与稳定性上更上一层楼，为机械制造行业的发展提供有力支撑。

三、高精度机械加工中的质量控制策略

（一）质量控制的基本理念

高精度机械加工质量控制原则的核心是实现全过程掌控，严

格界定质量指标、实时监测关键变量并构建闭环反馈机制，以此保障最终产品契合严格的公差与性能要求。质量控制体系应遵循国际标准，像 ISO 9001 质量管理体系，还要结合行业专属规范，像航空制造的 AS9100、汽车行业的 IATF 16949，以此规范加工流程、检验手段和质量保证程序，产品加工前需明确尺寸精度、公差带、表面粗糙度等关键质量特性，同时设定相应控制限与检测频率。

实时监测和反馈机制作为质量控制的关键，借助高精度传感器、数据采集单元和现场总线技术，对机床状态、切削力、振动、温度等参数进行毫秒级数据采集，这些实时数据经分析与预设控制限比对，能快速识别加工偏离趋势并开启反馈调整，防止偏差累积引发不可挽回的质量问题，在整个高精度机械加工过程中，各个环节紧密相连，从前期对关键质量特性的明确，到过程中的实时监测与反馈调整，每一步都关乎最终产品能否达到高质量标准，都需要严格把控与精准操作，只有这样才能确保高精度机械加工的质量稳定可靠，满足不同行业的严格要求。

（二）在线监控与实时调整

加工过程的在线监控系统整合了多种高精度传感器，像力传感器、加速度计、热电偶之类，和制造执行系统（MES）深度协作，实时监测加工过程里的各类工况，持续采集切削力、主轴振动、刀具磨损等关键数据，这些系统可实时评估刀具工作状态，及时察觉加工过程中的异常状况，像冲击 / 偏载或者过载等，保证生产过程中的任何偏差都能被快速识别，为不错过任何细微波动，数据采集频率一般需达到每秒数百至数千次，精准监控每个细节，保障加工精度不受影响^[8]。

闭环控制系统把实时监控数据反馈到数控系统，结合内置控制算法，对加工参数诸如进给速度、主轴转速、刀补补偿等做动态调整，系统能依据传感器反馈信息自动调节加工条件，当系统检测到刀具磨损或者加工温度超出设定阈值，便会自动降低切削速度或调整进给率，进而有效把控误差累积，维持尺寸精度和表面质量稳定，这种闭环机制提升了产品合格率，减少人工干预的滞后性，确保加工过程高效且一致，同时，在复杂多变的加工场景中，它还能灵活应对各种突发状况，进一步保障了加工的稳定性和可靠性。

（三）统计过程控制（SPC）

统计过程控制（SPC）作为基于统计技术的质量控制手段，对生产过程展开持续监控与分析。运用统计控制图实时剖析过程

数据，能识别制造过程里的变异走向，辨别普通原因变异和特殊原因变异，进而预先实施纠正举措，控制图常见类型有 X - R 图、X⁻ - R 图、P 图等，以 3σ 控制界限界定稳定过程范围，有力降低工艺波动，增强加工一致性，使生产过程更为稳定高效，保障产品质量的稳定性和可靠性。如表 1 所示。

表 1 SPC 系统在线监控中的典型对比数据		
指标	传统离线检测	在线 SPC 监控
数据采集频率	10 次 / 班次	≥ 1000 次 / 分钟
异常响应延迟	≥ 1 小时	≤ 15 秒
缺陷预测准确率	~68%	≥ 90%
过程能力指数 (Cpk) 稳定性	波动较大	Cpk ≥ 1.33 稳定控制
结合自动生成控制图、Cp/Cpk 分析、过程能力评估等手段，系统剖析尺寸、形位公差及表面质量指标波动状况，进而实施预警和防范举措，减少缺陷率、提升稳定性。		

（四）质量控制的优化方案

质量控制优化方案需综合采用多种质量管理工具与办法，像 ISO 9001、IATF 16949、六西格玛（6σ）等，以系统方式持续提升产品一致性和可靠性，其中六西格玛注重通过定义、测量、分析、改进和控制（DMAIC）流程精准把控各环节，削减制造缺陷、提高过程能力，对生产过程细致分析，可使产品误差维持在微米级精度要求的容忍区间。

实际生产中，质量控制优化方案实施效果可借典型精密零件加工案例呈现，高精度轴类零件加工时，实时监控系统与 SPC 技术结合实现刀具磨损动态补偿，保障加工精度稳定，使尺寸偏差控制在 ± 0.003 mm 以内，用六西格玛方法优化工艺流程，将批次产品不良率从 2.5% 降至不到 1%，提高生产一致性和质量合格率，进一步增强市场竞争力，这类综合性质量控制策略既提升加工过程高效稳定性，又保证产品质量持续改进。

四、结语

高精度机械加工于现代制造业中作用愈发关键，其精度要求直接关乎产品质量与性能，优化加工参数、应用新型材料和刀具、引入先进加工技术，配合科学质量控制策略，可有效提高加工精度和生产效率，应用实时监控与反馈机制、统计过程控制等技术，提升加工过程稳定性与一致性，确保产品达高精度要求下的质量标准。

参考文献

[1]程海洋. 机械加工工艺对零件加工精度影响及质量控制措施 [J]. 模具制造, 2025, 25(01): 33-35.
[2]王喆健. 基于加工精度优化的机械加工工艺研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(10): 130-132.
[3]贾俊良. 机械加工质量影响因素及控制措施 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(03): 73-75.
[4]陈永戟. 现代汽车制造业中机械加工技术的应用 [J]. 内燃机与配件, 2024, (19): 114-116.
[5]陈海权. 自动化机械加工在金属制品生产中的应用研究 [J]. 产业创新研究, 2024, (22): 76-78.
[6]胡军宝, 李宁, 杨赫. 数控加工技术在机械加工制造中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(09): 113-115.
[7]李选祥, 郭佳乐, 黄莉. 精密机械零件加工中的表面质量控制与提升技术研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(03): 141-143.
[8]陈培勇. 机械加工工艺对零件加工精度的影响及质量控制措施 [J]. 大众标准化, 2024, (01): 28-30.

汽车结构件低压压铸后处理关键非标设备开发与 应用研究

刘永刚, 汤天昊

杭州亚太智能装备有限公司, 浙江 杭州 311200

DOI:10.61369/ME.2026020008

摘 要 : 汽车工业规模持续扩大, 相关工艺水平也在逐步提升。而在汽车结构件的加工生产中, 多采用低压压铸成型工艺, 后处理工序则关系着结构件表面完整性、尺寸精度等。文章围绕汽车结构件低压压铸后处理关键非标设备开发应用相关内容展开论述, 分析了现阶段的后处理工艺需求, 探讨了后处理关键非标设备开发的核心内容, 总结了具体的应用场景, 以期提升设备利用率和运行稳定性。

关 键 词 : 汽车结构件; 低压压铸; 后处理; 非标设备

Research on the Development and Application of Key Non-standard Equipment for Post-processing of Low-pressure Die Casting Automotive Structural Components

Liu Yonggang, Tang Tianhao

Hangzhou Yatai Intelligent Equipment Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311200

Abstract : The scale of the automotive industry continues to expand, and the level of related processes is also gradually improving. In the processing and production of automotive structural components, low-pressure die casting is commonly used as the molding process, while post-processing steps are crucial for ensuring the surface integrity and dimensional accuracy of the structural components. This article discusses the development and application of key non-standard equipment for post-processing low-pressure die casting automotive structural components, analyzes the current post-processing process requirements, explores the core aspects of developing key non-standard equipment for post-processing, and summarizes specific application scenarios, aiming to enhance equipment utilization and operational stability.

Keywords : automotive structural components; low-pressure die casting; post-processing; non-standard equipment

随着新能源汽车产业的蓬勃发展, 对于车身与底盘轻量化提出了更高的要求, 一体化底盘已然成为汽车制造领域的主流趋势。相较于传统的高压压铸工艺而言, 低压压铸具有平稳充型以及材料利用率高等优势, 在大型复杂薄壁件成型加工领域应用较为广泛, 但低压压铸件的后处理工序繁多, 热-力耦合较为敏感, 不同程度上影响着尺寸一致性。针对此类问题, 大力开发面向汽车结构件专用的关键非标设备以及集成方案, 对于缩短节拍、提升良率等大有裨益。

一、汽车结构件低压压铸后处理工艺需求

(一) 低压压铸后处理的核心工序

结构件作为车辆承载传动等核心部件, 制造精度关系着车辆整体的行驶安全和使用寿命^[1]。在汽车结构件低压压铸工艺中, 铝合金材料具有强度高、密度小且耐腐蚀等优势, 已然成为汽车转向节、控制臂、变速箱壳体等结构件的主要材料。但成型后却容易出现尺寸偏差、浇冒口残留或毛刺等问题, 往往需要后处理工序, 进一步消除缺陷, 以此保障产品质量。低压压铸后处理

核心工序主要有以下几类: ①毛刺清理, 主要处理压铸件排气槽、分型面等位置的毛刺、飞边缺陷, 避免后期使用阶段应力集中, 处理后区域毛刺残留量不超过0.1mm, 非关键位置不超过0.3mm; ②浇冒口切除, 作为金属液补给通道, 成型后需完全切除, 保证切口平整, 误差不超过0.2mm/m, 避免凸起影响后续装配; ③表面清洁工序, 清理铸件表面残留的油污、氧化皮等杂质, Ra不超过1.6 μ m, 便于后期电镀和涂装等工艺处理; ④尺寸检测, 精准测量验证工件关键尺寸是否合乎设计标准, 剔除不合格产品; ⑤整形校正, 针对压铸中冷却收缩不均等因素造成的轻

微变形进行校正,保证工件尺寸规格符合标准;⑥防锈处理,对铝合金工件进行表面钝化以及喷涂防锈剂进行防锈处理,盐雾试验耐腐蚀时间在48h以上,用于延缓工件的氧化腐蚀速度^[2]。

(二) 非标设备开发的核心需求

现有的汽车结构件低压压铸后处理工艺普遍存在人工处理方式效率低、强度大、风险大等问题,加之通用自动化设备处理方式仅能满足单一规格且结构简单的汽车结构件,精度和适配性等方面存在较大的局限性。现有非标设备功能单一,难以支持多工序协同处理,设备故障率较高,往往需要人工频繁调整参数,影响生产线连续运行。针对此类问题,结合汽车结构件低压压铸产业发展趋势,围绕功能、性能以及安全环保等几大核心需求开发非标设备,以便更好地满足批量化工业生产需要,提高后处理效率和质量^[3]。功能需求方面,要求非标设备具有多工序集成能力,整合表面清洁、毛刺清理、浇冒口切除等核心工序,实现工件压铸成型到成品入库的一站式处理,缩短生产节拍。性能需求方面,保证设备高效且稳定是其核心指标,设备需要具有高效处理能力,面对汽车结构件单件处理时间保持在2~3分钟内,连续运行故障率不超过1%,以此保证生产线的连续、稳定。另外,设备需具有操作、维护简便的特性,设计更为直观的人机交互界面,人员简单培训后即可上岗操作;后标准化生产零部件,便于快速维修与更换,降低总体维护成本^[4]。

二、汽车结构件低压压铸后处理关键非标设备开发

(一) 确定核心技术参数

结合后处理工艺需求,设定核心技术参数:

(1) 毛刺处理工序,选择硬度 HB 80~100 的铝合金材质的结构件,根据毛刺分布特点设定刀具转速8000r/min~12000r/min,切削深度0.05mm~0.3mm,进给速200mm/min~500mm/min,全面清理结构件毛刺,避免本体受损。

(2) 浇冒口切除工序,根据浇冒口具体尺寸规格、连接强度,设定锯片转速3000r/min,锯切速度在200mm/s~40mm/s之间,刀具功率13kW~15kW,夹紧力5kN~15kN,切口平整。

(3) 表面清洁工序,结合具体表面杂质类型,设定高压气流压力在0.4MPa~0.6MPa范围内,清洗液温度40℃~60℃,清洗时间30s~60s。

(4) 尺寸检测工序,根据 CT5~CT7 级的结构件关键尺寸公差要求,确定设备检测精度在 ±0.01mm,检测效率不超过10s/件,测量范围0mm~500mm。

(二) 优化设计设备整体结构

选择正交实验法优化参数,以汽车转向节和控制臂等典型结构件作为研究对象,设计正交实验方案,对结构件的进给速度、刀具转速、夹紧力等核心参数全面优化。根据试验数据极差分析、方差分析,寻求最佳的参数组合。以控制臂毛刺处理工序为例,刀具转速10000r/min,切削深度0.15mm,进给速度350mm/min,毛刺残留量不超过0.08mm,设备单位能耗不超过

0.2kWh/件^[5]。

(1) 进出料模块设计。进料模块选择传送带式输送结构,根据最大工件尺寸不超过500mm的规格,确定传送带宽度为600mm,输送带在0.5m/min~2m/min区间无极调节,并配备各类传感器实现工件精准定位;出料模块设置产品分流通道,借助气动推料装置实现合格以及不合格产品分类输送,响应时间不超过0.5s。设备整体结构推行模块化设计理念,如多工序处理模块、进出料模块、控制系统模块等,模块独立又协同,便于后期安装调试、维护管理。整体结构要布局合理、操作便捷,为设备安全稳定运行提供保障^[6]。

(2) 多工序处理模块设计。该模块集合了浇冒口切除、毛刺处理、表面清洁等多个工序。毛刺清理模块,借助多轴联动机械臂进行,机械臂配备了可更换刀具以及高速电动主轴,能够结合不同工件、不同部位毛刺特点,基于程序自动化控制机械臂运行,从而实现结构件毛刺的全方位清理;浇冒口切除单元设计液压驱动的圆盘锯高速锯切技术,适合去除结构件浇口、冒口及流道残余。该工艺操作风险较高,可由六轴机器人抓持工件锯切,从而实现全过程的自动化及柔性化作业,有效提高切口质量和切割效率。配备金刚石切割片,基于伺服电机控制切割速度进给量,为结构件切口质量提供保障;表面清洁单元,提供超声波清洗以及高压气流吹洗等功能,其中超声波功率为500W~1000W,高压气流喷嘴支持360°旋转,频率28kHz~40kHz,充分清除结构件表面杂质;尺寸检测单元配备视觉检测、激光位移传感器等装置,可精准测量结构件尺寸、检测表面缺陷;整形校正单元配备精度 ±0.01mm 的位移传感器,在液压驱动下实现闭环控制,为结构件整形精度提供保障^[7]。

(3) 工件定位夹紧模块设计。对于尺寸规格多样且形状复杂的汽车结构件,应设计自适应、动态定位的夹紧机构^[8]。该机构结合可调节定位销,实现不同规格结构件的精准定位;采取气动夹紧方式,配备多组可调节的夹紧单元,从而根据作业需要实现5kN~15kN范围内的动态调节,并借助柔性夹紧垫保护工件完整性,避免表面受损影响总体质量。

(三) 深度开发控制系统

控制系统作为非标设备的智能化核心所在,设计分层架构,具体包含 PLC、机器人控制器以及 MES 上位机。系统主控制器为 Siemens S7-1500 的高性能 PLC,具有 I/O 信号处理、逻辑互锁等功能;机器人控制器实现轨迹、控制器控制;运动控制卡,驱动伺服进给与整形缸、切割主轴运作,实现闭环控制与反馈;传感器网络,全面采集位移、压力、温度等信号,实时获取结构件各项参数^[9]。

控制系统提供安全连锁以及故障诊断等功能,基于 PLC 技术实时采集传感器信号,从而智能分析设备的运行状态,精准定位设备故障所在,发出声光报警信息,在人机交互界面显示故障位置、类型以及处置建议。同时,第一时间停机,避免设备故障扩大,造成不必要的损失。安全连锁功能则是软硬件联合方式实现,其中硬件配备紧急停机按钮以及安全防护栏连锁开关,软件层面则设置不同的管理权限以及负载过载保护等,借此全面保障

设备与人员安全^[10]。

软件程序开发，功能如下：①状态机调度：依托有限状态机模型，动态该管理各工位运行、故障、等待等状态，实现各工序自动、高效衔接；②多设备协同：PLC与机器人控制器联动，主要借助 Ether CAT 高速总线实现数据同步传输；③工艺参数管理，实现切割路径、冷却速率、模温等参数采集、存储和利用；④在线检测集成，检测结果输送至 PLC 后统一控制；⑤故障预警与诊断；识别刀具磨损、通信中断等异常问题，第一时间发送预警信息，并做好故障记录，为技术人员远程维护提供支持。

（四）设计辅助系统

为保证设备高效稳定运行，需设计辅助系统提供支撑。基于螺旋输送 + 斗提机联动方式，将护罩内部铝屑输送至排屑机，将金属以及非金属杂质精准分离，待杂质干燥后统一回收；冷却液经由多层过滤后回收利用，减少不必要污染物排放，延长设备使用寿命。切割与整形工位配备抽风罩，提供净化油雾功能，处理合格后方可排放到自然环境中，营造安全、洁净的车间环境。

三、汽车结构件低压压铸后处理关键非标设备应用

以某国内大型汽车零部件制造企业为例，转向节、控制臂等低压压铸结构件采用人工和通用设备联动后处理方式，产品合格率波动大、生产效率偏低，需针对性开发非标设备。应用方案实施要点如下：

（1）产线布局与集成。根据汽车结构件加工生产需要，在压铸机下游区域逐一配备机器人取件工位、双工位六轴切割单元、

线上检测与打码工位、整形与冷却工位、成品缓存区。基于工厂内部现有的柱网和天车通道，设计紧凑的 U 型布局，缩短机器人的输送距离，减少不必要的能源损耗。

（2）设备联动与优化。将电气、机械和气路安全连接，随后单机空载以及负载调试，检验双工位轮转同步以及自动换刀的可靠性；离线仿真以及试运行后，针对性优化 PLC 状态机调度逻辑，便于产线节拍达到设计标准。

（3）工艺参数优化与培训。针对电池托盘纵梁、副车架等不同结构件，设定差异化的工艺参数配方，具体涵盖冷却速率、模温设定以及整形压力等参数，将其统一存储在配方库中；定期组织设备操作和维护人员参加专业培训活动，重点学习设备操作、故障排查以及刀具更换等方法，为产线高效、稳定运行保驾护航。

（4）MES 对接。将设备 PLC 与工厂 MES 系统对接，生产订单、加工参数以及质量数据源等同步传输，支持全流程数字化转型。

四、结论

综上所述，结合汽车结构件低压压铸后处理的痛点和需要，加强智能化、自动化以及柔性化的非标关键设备开发是必然选择，便于改善传统后处理工序效率低、产品质量波动大的问题，提高结构件后处理效率和质量，减少不必要资源损耗，为企业创造更加理想的经济效益。

参考文献

[1]王家麟. 碳纤维复合材料模具成型压铸控制参数优化方法 [J]. 冶金与材料, 2025, 45 (12): 40-42.

[2]黄丽容, 乔艺, 何毅, 等. 多筋薄壁铝合金结构件数值模拟与工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (12): 1838-1843.

[3]黄腾佐, 滕兴宇, 李清华, 等. 减震塔一模两件压铸工艺设计与优化 [J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60 (05): 59-64.

[4]徐清魁, 饶旭东, 王跃, 等. 钢丝螺套在一体化压铸铝合金车身结构件上的应用 [J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63 (07): 128-131.

[5]张传泽, 马飞, 柴恒辉. 大型车身结构件压铸工艺研究及 9000t 压铸岛开发 [J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60 (03): 13-16.

[6]毕星瑞, 刘朝彤, 张星. 基于无定位基准压铸结构件的余量在机测量技术 [J]. 锻压技术, 2025, 50 (06): 196-203.

[7]刘付曙, 黄祥, 万里, 等. 一体化压铸车身结构件的自冲铆接技术开发及应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (06): 954-957.

[8]宋学磊, 陈亚荣, 耿明亮, 等. 新能源汽车用一体化压铸铝合金研发现状与趋势 [J]. 汽车知识, 2025, 25 (03): 16-18.

[9]赵海, 王晓璐, 罗丰源, 等. 汽车箱体结构件高压压铸数值模拟及参数优化 [J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2025, 43 (01): 64-72.

[10]刘波, 唐永鑫, 伍毅, 等. 一体压铸铝合金车身结构件的轻量化设计研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (12): 2154-2163.

某型装载机驾驶室设计及异型管的应用

黎俊宏, 黎毅, 米晨雷, 周登宏
广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545027
DOI:10.61369/ME.2026020024

摘 要 : 安全舒适、外形美观是工程机械驾驶室的发展趋势。驾驶室采用异型管拼焊为主体骨架的结构, 在外观新颖性、安全性、驾驶舒适性、成本等方面均具有明显优势, 是工程机械驾驶室的重要发展方向。本文阐述了装载机驾驶室的立柱布置思路, 介绍了立柱采用异型管的结构特点以及异型管的截面形状选取, 对装载机驾驶室的设计开发具有参考和借鉴作用。

关 键 词 : 工程机械驾驶室; 立柱布置; 异型管截面

Design of a Certain Type of Loader Cab and the Application of Special-shaped Tubess

Li Junhong, Li Yi, Mi Chenlei, Zhou Denghong
Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545027

Abstract : Safety and comfort, as well as an attractive appearance, are the development trends of construction machinery cab designs. The cab adopts a structure with special-shaped tubes as the main frame, which has obvious advantages in terms of novelty of appearance, safety, driving comfort, and cost. It is an important development direction for construction machinery cabs. This paper elaborates on the layout ideas of the cab columns, introduces the structural characteristics of the columns using special-shaped tubes, and the selection of the cross-sectional shape of the special-shaped tubes. It has reference and learning value for the development and design of the loader cab.

Keywords : construction machinery cab; column layout; cross-sectional shape of special-shaped tubes

一、装载机驾驶室设计现状与异型管应用背景

随着时代的变迁及技术的进步, 人们对工程机械产品的安全性、操作舒适性和外观提出了更高的要求, 特别是装载机驾驶室作为驾驶人员对设备进行各种作业的控制室, 其安全性、操作舒适性尤为重要。早期的装载机驾驶室主要是由多种规格形式的钣金零件焊接而成的钣金驾驶室, 其安全性并不高; 后来逐步发展为采用矩形钢管和金属蒙皮组合的驾驶室框架结构, 其安全性得到了极大的提升, 然而这种结构存在一些弊端, 一是驾驶室立柱尺寸变宽致其遮影盲区变大; 二是新增的矩形钢管与金属蒙皮焊接工序, 加剧制造成本上涨。如何在满足安全要求的前提下, 尽可能减小驾驶室立柱的遮影盲区以及降低制造成本, 成为驾驶室设计的关键点。

常见的驾驶室结构形式使用常规的矩形钢管并在钢管外侧面焊接覆盖钣金, 钣金两侧凸肩分别用于门密封和玻璃粘接; 此时为保证立柱的承载能力, 钢管截面选取不宜过小, 而钢管前后两侧的凸肩又使立柱整体横截面尺寸大幅增加, 从而导致立柱遮影盲区加大, 不利于司机作业过程观察整车周围区域。同时, 由于钢管和钣金的组合方式, 驾驶室骨架生产过程中, 需经过钣金成型、拼装、焊接、打磨等工序, 这些工序占据不少工时成本, 减少或者取消该工序, 可使驾驶室成本得到有效降低。

通常装载机驾驶室由4个立柱组成骨架(图1), 分前后各2

个, 驾驶员在4个立柱的中间区域位置。装载机的整机视野分A/B/C/D/E/F共六个区域^[1], 其中A/B/C视野区域是评价装载机操作视野是否优良的重要区域(图1), 而这些区域主要遮挡物是驾驶室左/右前立柱以及相应的门窗附属件。因此, 如何布置左/右前立柱在驾驶室的位置、前立柱截面设计及门窗附件的布置直接决定了驾驶室视野的优异与否。

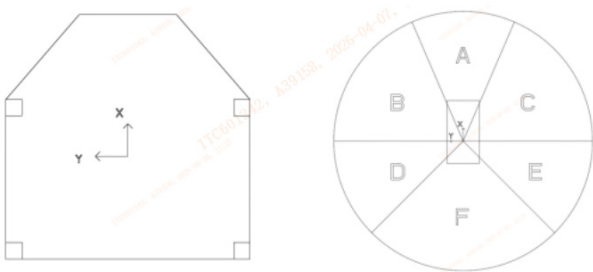


图1 驾驶室的布置及视野区域分布示意图

在驾驶室的布置设计之前, 首先要确定驾驶室在整车的位置, 即首先确定SIP在整车的位置^[2]。SIP指司机座椅标定点, 用于确定人体(司机)在驾驶室的位置, 当然也包括眼睛的位置。一旦SIP位置确定, 驾驶室将围绕其开展所有的相关分析。本文仅对驾驶室的布置做介绍, 因此SIP在整车的位置确定本文不做概述。

装载机一般是通过前、后车架铰接旋转实现转向,转向角度由整车设计参数确定,整车在极限转向角度时观察铲斗最高位置的某个点或区域,作为整车前视野输入要求(图2)。根据已定义的SIP位置进一步确定司机眼睛中心位置^[1],即以SIP为坐标原点分别偏移20mm、680mm得到眼睛的中心点坐标(20, 0, 680),此处所指坐标系方向定义:以整车前进方向为X向,整车左右方向且向左为Y向,整车高度向上为Z向。以眼睛中心点为原点在Y向作对称直线65mm,直线的两端点即为左眼点、右眼点。此时,以眼点为起始点,以整车在极限转向角度时观察铲斗最高位置的某个定义点为终点作直线,即为前视野的视线区域。按照双目视野规则,左眼视线限定右前立柱不得超过该视线位置,右眼视线限定左前立柱不得超过该视线位置(图2)。理论上在满足驾驶室其它设计边界条件下,前立柱在X方向上越朝后布置,前视野越好。

确定前视野线之后,就可以定义立柱的截面。以右前立柱截面设计为例,首先立柱的前端面不应超过前视线,当端面平行与前视线时可认为最佳布置。其次立柱的前外侧面与驾驶室的外轮廓边界齐平或平行,该轮廓边界指前侧玻璃或钣金外侧面。考虑前侧挡风玻璃的固定连接,其粘接面应在前视野线的后部,避免玻璃粘接面及黑色边框侵占可视区域导致盲区加大。通常右侧的表面与整机X向平行,后侧面则与右侧面垂直。

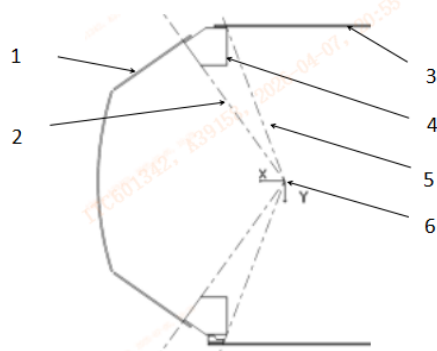


图2 驾驶室布置示意图

右前侧玻璃; 2-右前视野线; 3-右侧玻璃; 4-右前立柱; 5-立柱视线遮影线; 6-眼点

图3是三种常见的前立柱截面示意图,其中:第一种图形异型管立柱截面形式较简单,易于成型且满足更大壁厚的异型管,从而获得更大的承载能力。第二种图形则在第一种截面形式基础上增加凸肩,此结构使玻璃、立柱之间搭接更平顺,外观效果更好,但由于增加了凸肩,其成型难度变大,也限制了壁厚值不宜过大,因此其承载能力相比第一种的形式有所下降。在实际产品开发设计过程中,根据驾驶室应用于整车系列覆盖范围要求测算其承载能力,从而选取合适的立柱截面进行设计。

对比常规的钢管和钣金组合的设计方案(图3第三种图形),在同等视野线要求的条件下,采用异型管的设计,其立柱截面理论上可增加25%~35%,这对于驾驶室的安全设计能力提升是显而易见的。异型管立柱外侧面作为玻璃的粘接面,无需钣金支撑及钣金冲压模具投入,驾驶室取消了钣金与钢管的焊合工序,降低了驾驶室骨架焊接工时、打磨工时等,使制造成本有效降低,

达到降本提效的设计目的。



图3 非开门侧前立柱截面示意图

驾驶室左侧通常布置进出通道及门组件,门组件与左前立柱的配合关系如图4三种形式,其中:第一种图形所示左前立柱的外侧面作为门的密封面,并在Y向与左门框重叠,这种布置方式的优点是:门组件隐藏在立柱外侧,对司机的视野线几乎未形成遮影。对比常规的门组件布置(图4第二种图形)所示布置方式可知,门组件对视野遮影影响最小。图4第三种图形的立柱截面形式同样获得最佳视野效果。

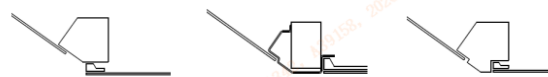


图4 开门侧前立柱截面示意图

后立柱作为驾驶室安全设计的重要承载支柱,其截面优先选用更为简洁的截面形式,通常选用宽大截面且壁厚大的钢管获得更大的承载能力。当然,在满足安全设计前提下,也可以采用异型管的形式。

图5是某系列车型装载机驾驶室整体布置结构图。根据已知的SIP并结合整车观察区域的要求作前视野线,确定前立柱前视野线夹角 α (通常取值 $115^\circ \sim 125^\circ$),按照视野区域遮影确定视野线夹角 β (通常取值 $12^\circ \sim 18^\circ$,图5第二图形)。根据视野线夹角限定的区域,并结合立柱内饰空间需求,确定了立柱的截面尺寸边界。为满足多车型同平台开发设计,立柱采用更简洁的无挡肩截面(图6),使异型管在实际生产中壁厚达到8mm以上,确保立柱承载能力更大,实现大吨位装载机的防滚翻防落物结构的安全设计要求。

驾驶室左侧设计有进出通道,因此左门的结构布置对视野的影响尤为重要。考虑到通用性及经济性,左前立柱采用与右前立柱一样的截面形式,如图6所示结构,左前立柱的外侧面同时作为左门的铰链安装面和胶条密封面,即左门的框架结构及密封胶条均布置在左前立柱的外侧面上,形成重叠区域布置结构,并隐藏在左前立柱视野遮影范围内,使立柱整体视野遮影面积最小,达到提升作业视野的最佳效果。同样地,门的另一侧搭在后立柱外侧面形成重叠区域并通过胶条密封,改善左后侧视野。

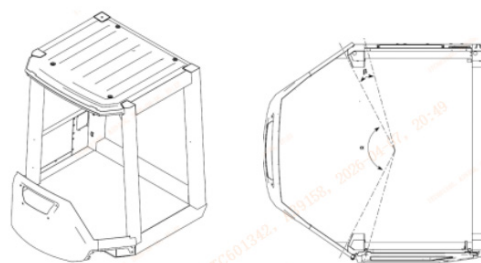


图5 某型号驾驶室整体布置图

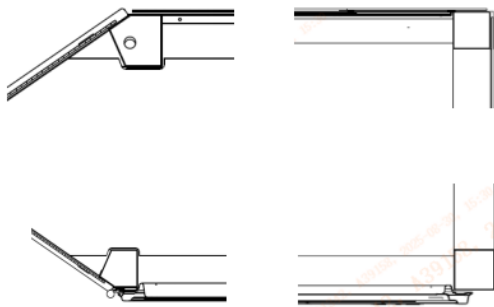


图6 某型号驾驶室立柱截面示意图

按照上述完成立柱截面设计及整体骨架布置之后，根据设计规划该驾驶室应用至9吨装载机，即最大整车重量40吨装载机及ROPS&FOPS安全承载要求作为输入条件^[3,4]，通过CAE有限元分析，结果表明：该驾驶室骨架在侧向加载位移约370mm满足侧向承载力及吸能要求；垂向加载位移约70mm满足垂向承载力要求；纵向加载位移约320mm满足纵向承载力要；驾驶室骨架发生位移变形后，承载力及能量吸收符合标准要求且未侵入DLV边界^[3,4]，满足安全设计要求。

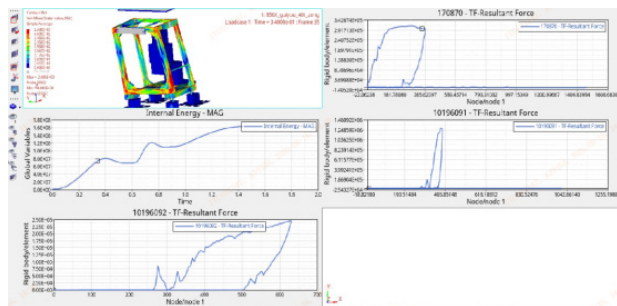


图7 某型号驾驶室 ROPS&FOPS 分析结果图

驾驶室采用异型管立柱取消了钣金蒙皮后，相比采用钢管和金属蒙皮焊合件立柱的驾驶室，单台立柱焊缝数量（每段焊缝长度20~25mm）减少了约200段，焊接工时减少约0.6小时，焊后打磨工时减少约0.12小时，同时减少投入钣金冲压模具费用约72万元。

二、结语

驾驶室立柱设计采用异型管并通过合理的布置，相比矩形管和金属蒙皮的组合布置，在开发设计过程减少了模具成本投入，生产制造方面减少了零件数量和焊接工时，驾驶室操作视野改善方面得到极大的提升；同时，合理的选用异型管截面，可以充分利用空间使立柱截面更大、承载能力更强，能够满足更大吨位车型的安全设计要求。

参考文献

- [1] GB/T 16937 土方机械 司机视野试验方法和性能准则。
- [2] GB/T8591 土方机械 司机座椅标定点。
- [3] GB-T17771 土方机械 落物保护结构 试验室试验和性能要求。
- [4] GB-T17922 土方机械 滚翻保护结构 实验室试验和性能要求。
- [5] 刘南才，孙平，朱华，等. 漫谈装载机驾驶室的设计发展方向 [J]. 工程机械，2014, 45(10): 36-42+7.
- [6] 杨军，张汝英，杨昌远，等. 新型型材骨架在工程机械驾驶室中的应用与研究 [J]. 湖南工业职业技术学院学报，2017, 17(01): 7-10.

工业场景下流体控制设备可靠性提升策略探究

林垚

深圳蓝动精密有限公司, 广东 深圳 518108

DOI:10.61369/ME.2026020025

摘 要： 本文以工业场景下该类设备可靠性提升为研究对象，分析了设备可靠性现状及常见故障模式，从设计制造、安装运维、外部环境及工况、管理与人员四维度剖析关键影响因素，针对性提出设计源头优化、全生命周期运维管控等多维度提升策略，并构建技术、制度、资源三位一体的实施保障体系，研究成果为企业提升设备可靠性提供了实操性参考。

关 键 词： 工业场景；流体控制设备；设备可靠性

Research on Strategies for Enhancing the Reliability of Fluid Control Equipment in Industrial Environments

Lin Yao

Shenzhen Blue Dynamics Precision Co.,Ltd. Shenzhen, Guangdong 518108

Abstract： This paper focuses on the improvement of the reliability of such equipment in industrial scenarios. It analyzes the current status of equipment reliability and common failure modes. It examines the key influencing factors from four dimensions: design and manufacturing, installation and operation maintenance, external environment and working conditions, and management and personnel. It proposes multi-dimensional improvement strategies such as optimizing the design source and implementing full life cycle operation control. Additionally, it constructs a three-in-one implementation guarantee system of technology, system, and resources. The research results provide practical references for enterprises to enhance the reliability of equipment.

Keywords： industrial scenarios; fluid control equipment; equipment reliability

引言

工业自动化发展对流体控制设备可靠性提出更高要求，而该类设备受设计、运维、环境等多重因素影响，故障频发问题突出，影响生产效率与安全。本文通过分析设备可靠性影响因素，探究针对性提升策略及保障体系，为企业优化设备管理提供思路。

一、流体控制设备可靠性现状分析

（一）流体控制设备可靠性的重要性

在工业生产场景中，流体控制设备是把控介质输送、工艺参数调节的核心装置，其可靠性水平直接关联设备运维效率与企业经营效益，是决定设备维护周期、管控维修成本的核心要素。设备可靠性达标，能够有效延长稳定运行时长，拉长常规维护周期、减少非计划性检修频次，进而压缩维修人力、备件损耗等各项成本支出；反之，可靠性不足会大幅缩短设备有效服役周期，倒逼运维人员缩短维护间隔、增加检修投入，持续推高全生命周期维修成本。同时，流体控制设备一旦发生失效故障，极易引发介质泄漏、生产流程中断、工艺失控等问题，不仅会造成直接的生产停滞经济损失，还可能诱发安全隐患，扰乱整条工业生产链路的有序运转，甚至给企业带来额外的安全合规与产能损耗风险^[1]。

（二）当前流体控制设备的常见故障模式

当前工业场景下的流体控制设备，受运行工况、使用周期与人为管控等多重因素影响，故障发生频次较高且故障模式呈现多元化特征，机械故障、电子故障、操作失误是最为高发的三类故障类型。机械故障多源于长期运行带来的部件磨损、密封失效、结构卡涩等物理损耗，是设备运行中的基础性故障；电子故障则多因电路老化、传感元件失灵、现场电磁干扰等问题引发，制约设备的精准控制性能；操作失误多源于运维人员操作不规范、参数设置偏差、巡检维护不到位等人为因素，进一步放大了故障发生概率。除此之外，设备长期服役带来的自然老化，叠加工业现场高温、高压、粉尘侵蚀、介质腐蚀等恶劣环境因素，会持续加剧设备性能衰减，成为诱发各类故障、拉低设备可靠性的关键外部诱因^[2]。

二、工业场景流体控制设备可靠性关键影响因素分析

（一）设计制造层面的影响因素

设计制造层面是决定流体控制设备可靠性的先天根基，各类细节疏漏会从源头埋下运行隐患，全方位制约设备长期稳定运行的能力，成为可靠性短板的核心诱因。结构设计合理性不足，往往体现在设备受力结构规划疏漏、流道设计不科学、防护结构缺失等方面，会导致设备在工业连续重载作业中出现应力集中、介质涡流损耗、部件干涉卡顿等问题，难以适配复杂工况的长效运行需求；核心材料选型与实际工况适配性存在偏差，未结合现场腐蚀、磨损、高低温交变等特性甄选材质，轻则引发材质老化、表面锈蚀，重则出现部件形变、脆裂破损，直接破坏设备结构完整性；加工装配精度管控缺失，缺乏全流程的精度校验与质量把控，会造成零部件配合间隙超标、密封面贴合不严、传动部件错位等隐性瑕疵，即便设备出厂验收合格，投用后也会因先天缺陷快速诱发故障；再加上核心泵体、阀芯、传感元件等零部件存在性能短板，整体设备的耐用性、精准性与抗干扰性便会被大幅拉低，从根源上筑牢不了可靠性基础^[3]。

（二）安装运维层面的影响因素

安装运维层面的不规范操作与体系化管控漏洞，是加剧设备可靠性衰减的关键中间环节，即便设备先天质量达标，也会因后天运维不当快速出现性能衰退。现场安装调试流程不规范，未严格遵照工业安装标准开展设备定位、管路接驳、密封试压、参数校准等作业，易出现安装倾角偏差、管路应力过载、初始运行参数错位等问题，直接引发设备早期频发故障，缩短无故障运行周期；运维管控体系不完善，缺乏标准化的运维流程、设备台账与故障记录机制，导致日常巡检、养护、检修工作无章可循，运维行为杂乱无序难以形成闭环；检修维护频次与方式不合理，要么过度拆解检修造成精密部件二次损耗、无谓增加运维成本，要么检修频次滞后、检修方式粗放，难以及时排查隐性故障与细微隐患，进而加剧故障恶化态势；设备工况适配调试不到位，未结合现场生产负荷、介质参数优化运行模式，致使设备长期处于偏离最优工况的状态运行，持续损耗内部构件性能，进一步拉低整体可靠性^[4]。

（三）外部环境与工况影响因素

外部环境与工况的复杂多变，会对流体控制设备形成持续性的外部侵蚀与动态冲击，是诱发设备突发故障、破坏运行稳定性的重要客观因素，且这类影响往往具有隐蔽性与累积性。工业现场普遍存在高温、高压、粉尘弥漫、潮湿积水、腐蚀性气体弥散等恶劣环境，会持续侵蚀设备外壳防护层、密封件、电子线路板，加速构件老化、绝缘失效与电路短路，逐步蚕食设备可靠性；流体介质自身的强腐蚀性、高含杂率、大黏度波动等特性，会对阀芯、阀体、管路内壁等核心部件形成持续冲刷、化学腐蚀与堵塞淤积，破坏设备内部精密结构与流通性能；生产过程中的工况骤变、瞬时过载、压力波动等冲击，会打破设备平稳运行状态，造成部件应力骤增、传动失灵、控制失准等问题；同时配套的动力系统、传感系统、控制系统若存在协同适配偏差、运行故障隐患，还会引发连锁反应，进一步放大流体控制设备的运行风

险，加剧可靠性衰减^[5]。

（四）管理与人员层面的影响因素

管理与人员层面的软性短板，是制约设备可靠性长效提升的核心主观因素，往往会放大技术层面的不足，导致各类可靠性管控举措难以落地见效。运维人员专业素养不足，既未系统掌握设备结构原理、运维规范与故障排查技巧，也无法应对复杂工况下的设备调试与隐患处置，甚至会因违规操作、误判故障加剧设备损坏程度；可靠性管理制度体系缺失，未针对设备全生命周期制定专项的可靠性管控、风险预判、故障溯源与整改制度，使得可靠性提升工作缺乏顶层设计与制度支撑，沦为零散化的被动运维；运维监管与考核机制不健全，无法有效约束运维人员的作业行为，也未将设备可靠性指标纳入运维考核体系，导致日常巡检、养护、检修等工作流于形式，责任落实不到位，难以从管理端筑牢设备可靠性的保障防线，最终制约整体可靠性水平的稳步提升^[6]。

三、工业流体控制设备可靠性多维度提升策略

（一）设计源头可靠性优化策略

设计源头是保障流体控制设备可靠性的核心根基，推行全流程的设计优化策略，能从根源规避先天缺陷，筑牢设备长效稳定运行的基础。针对工业场景的复杂作业需求，开展精细化结构设计并借助专业仿真工具开展多工况模拟验证，可提前排查结构受力、介质流通、部件配合等潜在问题，优化设备整体构造，适配重载、连续运行的工业工况；结合现场腐蚀、磨损、高低温等实际工况特性，优选适配性强的优质材料与高性能核心零部件，能有效提升设备抗损耗、抗老化能力，规避材质与部件短板引发的故障；搭建标准化加工装配管控体系，落实全流程精度校验与质量把控，可消除加工装配瑕疵，保障设备整机装配质量；同时优化冗余设计与容错性能，针对关键控制模块、核心执行部件增设冗余配置，提升设备故障容错能力，即便局部部件出现异常也能维持基础运行，最大限度降低失效风险^[7]。

（二）全生命周期运维管控策略

全生命周期运维管控是维持流体控制设备可靠性的关键抓手，通过构建系统化运维机制，能实现从被动抢修向主动防控的转变，延缓设备性能衰减。构建分级分类预防性维护体系，结合设备运行时长、工况强度、部件损耗规律划分维护等级，制定差异化预防性维护计划，可提前消除隐性隐患，减少非计划停机；搭建实时状态监测与故障预警机制，依托传感技术、智能监测设备全程追踪设备运行参数，及时捕捉异常信号并发出预警，实现故障早发现、早处置；规范精准化检修维护流程，明确检修标准、操作规范与质量验收要求，杜绝粗放式检修，保障检修作业的有效性；落实设备老化管控与迭代更新管理，建立设备老化评估机制，对超期服役、性能衰退严重的设备及时开展维修改造或迭代更新，避免老化设备带病运行，持续维系设备可靠运行状态^[8]。

（三）工况适配与环境防护策略

工况适配与环境防护是抵消外部不利因素、稳固设备可靠性的重要举措，针对性优化防护与调控措施，能弱化恶劣工况与环

境对设备的侵蚀冲击。针对工业现场高温、粉尘、腐蚀、潮湿等恶劣环境，开展专项防护改造，加装防护套件、做好密封防腐处理、优化设备布设环境，阻断外界侵蚀路径，保护设备核心构件；结合流体介质的腐蚀性、含杂率、黏度等特性，开展适配性优化调整，通过介质预处理、部件抗腐蚀性等方式，降低介质对设备的冲刷、腐蚀与堵塞风险；升级工况波动调控与过载防护装置，优化压力、流量调控逻辑，缓解工况骤变、过载运行带来的设备冲击，减少应力损耗与部件损伤；同时推进配套系统协同可靠性优化，梳理设备与动力、传感、控制系统的协同适配逻辑，排查协同故障隐患，保障整套系统联动运行的稳定性，避免连锁故障影响流体控制设备运行。

（四）管理与人员赋能提升策略

管理与人员赋能是保障各类可靠性提升策略落地见效的软性支撑，通过补齐管理短板、强化人员素养，能筑牢设备可靠性管控的人文防线。着力培育专业化运维团队，吸纳兼具设备原理、运维实操、故障处置能力的专业人才，打造懂技术、善操作的专项运维队伍，夯实运维工作的人力基础；完善全流程可靠性管理制度，结合设备全生命周期管控需求，制定覆盖设计、运维、检修、更新各环节的管理制度，明确管控标准与责任边界，为可靠性提升工作提供制度遵循；推动标准化运维作业流程落地，细化巡检、维护、检修、调试等各环节操作细则，让运维人员有章可循，规范作业行为；构建系统化技能培训与考核激励机制，定期开展运维技能、可靠性管控知识培训，将设备可靠性指标与运维考核、激励挂钩，倒逼运维人员履职尽责，提升整体运维管控水平，助力设备可靠性持续提升。

四、可靠性提升策略实施保障体系

（一）技术保障

技术保障是工业流体控制设备可靠性提升策略落地的核心支撑，唯有筑牢技术根基，才能让各类优化管控举措具备实操性与长效性，切实破解设备可靠性管控的技术痛点。针对设备运维与故障管控需求，引入先进的无损检测、在线监测等专业技术，能够突破传统检测模式的局限，精准捕捉设备隐性故障与性能衰减信号，实现隐患早识别、早处置；依托数字化、智能化技术赋能，搭建设备可靠性管控平台，整合运行数据、运维信息、故障记录等资源，推动运维管控从人工粗放式向智能精准化转型，提升管控效率与预判

能力；同时聚焦工业复杂工况需求，持续推进流体控制设备核心技术研发与迭代升级，针对设备设计、运维、防护中的技术短板开展攻关，不断优化技术方案，让可靠性提升策略始终适配行业技术发展

（二）制度保障

制度保障是规范各项工作流程、压实管控责任的关键抓手，能够为可靠性提升策略的有序推进提供刚性约束，避免管控工作流于形式、权责模糊。健全层级化责任管控机制，明确企业管理层、技术部门、运维班组等各层级的责任边界与履职要求，构建层层压实、闭环管控的责任体系，杜绝责任真空与推诿扯皮问题；完善运维考核与激励制度，将设备可靠性指标、运维工作成效、隐患整改落实情况纳入核心考核范畴，配套对应的奖惩举措，充分调动运维人员的工作积极性与责任心，倒逼管控举措落地见效；搭建合规化管理体系，贴合行业安全生产规范、设备运维标准与质量管控要求，梳理全流程管理细则，确保策略实施的每一项工作都有章可循、合规开展，筑牢制度层面的保障防线^[10]。

（三）资源保障

资源保障是推动可靠性提升策略稳步落地、长效运行的物质基础，充足且适配的资源供给，能够破解策略实施中的资金、物资、技术资源瓶颈，保障各项工作有序开展。落实专项资金投入保障，合理规划资金使用方向，重点倾斜于技术引入、设备改造、运维升级、人员培训等核心环节，杜绝资金短缺导致的管控举措停滞问题；优化核心备件储备与管理，结合设备运行工况、故障规律与备件损耗周期，科学规划备件储备品类与数量，建立规范的备件入库、领用、盘点机制，保障故障抢修时备件供应及时，缩短停机检修时长；积极整合行业技术资源，加强与行业内科研机构、设备厂商、同行企业的交流合作，共享先进技术、管控经验与解决方案，借助外部优质资源补齐自身短板，全方位夯实资源保障体系，助力可靠性提升策略高效落地。

五、结语

综上所述，工业流体控制设备可靠性受多维度因素交织影响，本文经现状分析、因素剖析，提出系统化的可靠性提升策略并搭建配套保障体系，可切实指导企业解决设备故障问题、降低运维成本。未来结合数字化技术实现设备智能管控，将成为设备可靠性提升的重要发展方向。

参考文献

[1]王发好,张彩虹,姜鲁艳,等.基于PLC的日光温室混施肥系统设计[J].农机化研究,2025,47(12):126-135.
[2]杨森.移动供热系统就地阀门故障诊断与快速维修技术研究[J].家电维修,2025,(09):6-8.
[3]张镇,王芷衍,华卫星,等.油罐快速清洗智能机器人工作头分析与设计[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(15):103-105.
[4]吕宏强,唐天成,包晨宇.基于SPH法的流固耦合物理自然对流传热数值模拟[J/OL].航空学报,2024.
[5]张飞,张磊,王鹏.关于施工现场如何正确关井的分析与探讨[J].石油工程建设,2024,50(S1):108-116.
[6]池志翔,陈海耀,陈耀,等.智能阀门在流体控制领域的应用研究[J].阀门,2025,(05):534-540.
[7]鲜中东.基于节能理念的铜制阀门性能提升研究[J].城市建筑空间,2024,31(S1):177-178.
[8]李岩,薛东升,孙超,等.阀门质量验收的重要性及流程分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(11):7-9.
[9]罗敏.速特自动化:助力创新制造,引领流体控制技术新篇章[J].造纸信息,2024,(11):43-45.
[10]黄卫星,伍勇,潘大伟.工程流体力学[M].化学工业出版社:202408:336.

论如何保障船闸的安全畅通

张汉峰

扬州市港航事业发展中心芒稻船闸运行中心，江苏 扬州 225299

DOI:10.61369/ME.2026020032

摘 要： 经济要发展，交通必先行，作为运输中的先锋队员，水运以最低的运输成本、最大的运输能力占据了各种运输方式的首席。因此，船闸的安全畅通与否，又事关水运事业的发展，事关国民经济的发展。本人结合在船闸多年的工作经验，对如何保障船舶安全通过船闸问题做探讨。

关 键 词： 船闸；管理；安全运行

On How to Ensure the Safe and Smooth Operation of Ship Locks

Zhang Hanfeng

Mangdao Ship Lock Operation Center, Yangzhou Port and Shipping Development Center, Yangzhou, Jiangsu 225299

Abstract： Economic development necessitates the advancement of transportation. As a vanguard in transportation, water transport occupies a leading position among various modes of transportation due to its lowest transportation cost and largest transportation capacity. Therefore, the safe and smooth operation of ship locks is crucial for the development of water transport and the national economy. Based on years of work experience at ship locks, this paper explores how to ensure the safe passage of vessels through ship locks.

Keywords： ship lock; management; safe operation

芒稻河由南向北穿过扬州市江都区境内，上连京杭运河，下接长江，是南水北调东线源头的江水引流河道，也是苏北京杭大运河运输的一条重要水上交通通道，芒稻船闸则位于扬州市江都区境内的芒稻河上，地处江淮要冲，扼守南水北调东线水上交通咽喉，是江河联通的重要“沿江口门船闸”之一。船闸上游和下游的通航水落差常年保持在5米左右，受南水北调送水期和长江潮汐的影响最大差达到8米，上游引航道内水流急，待闸船舶进入引航道时容易发生漂移、下游航道在长江底潮时负水位，使得大部分船舶只能远离边坡停靠，从而占据了部分主航道，使进、出闸的船舶航行困难，现场秩序混乱，很容易发生搁浅，影响航道通行安全^[1]。

一、船闸现场运行中存在的安全问题及因素分析

芒稻船闸始建于1964年10月，当时作为江都引江水利枢纽工程的配套工程，于1966年10月建成通航，船闸尺度为12（闸首口门宽10米）×135×3（米）（闸室宽×闸室长×槛上水深），年设计通过能力300万吨的五级船闸，建闸初期，年通过量仅为几十万吨，改革开放后，各地大搞基础设施建设、红火的房地产业对建材的需求具增，船舶大型化、船闸设备老化、设施陈旧等方面的因素，使得待闸船舶最长等闸时间已达一星期多，为改善船闸通航条件，缩短船民待闸时间，于2014年11月对原有老船闸进行拆除扩建，于2017年1月通航，新建船闸为三级，船闸尺度为180×23×4（长×宽×门槛水深）设计最大船舶吨位为1000吨，由于其处于特殊的地理位置，芒稻河在南水北调送水和汛期泄洪排涝期间流量大、流速快，水文条件错综复杂，这也给芒稻船闸的安全运行管理工作带来诸多困难，主要归纳为以下几个问题：

（一）船的因素和人为因素

芒稻船闸是苏北京杭大运河和长江之间除运河线船闸之外的

一条快捷通道，常年受施桥、邵伯待闸数量多、待闸时间长的影响，一批船舶绕道高水河经芒稻闸进入长江或苏北京杭大运河，导致船舶待闸数量时多时少，极不稳定，船少时，部分船闸工作人员警惕性就会有所放松，从而淡化了安全意识，认为通过的船舶少了，就不会有什么安全问题，进而就埋下了安全隐患。

（二）地理位置的特殊，给航道的管理增加了难度

1、恶劣天气对船闸运行、船舶航行的影响。芒稻船闸地处高水河，下游与长江相通，受长江潮汐和恶劣天气长江限航的影响，很多下行船舶出闸后停滞在下游的引航道内的待闸停泊区，从下游锚地过来的待闸船舶无法停靠待闸区，加之长江潮汐影响，经常发生船舶飘移，堵塞主航道，造成上行船舶无法进行正常调度、下行船舶出不了闸等。

2、船舶的停靠秩序对航道的影响。船闸上游的停泊区受南水北调送水期的影响，水位高、流速快，有些船舶不听指挥，乱停乱靠，加之下游航道受长江潮汐的影响，现场船舶停靠秩序混乱，加大了航道管理的难度。

3、汛期、枯水期对航道的影响。高水河是南水北调东线源

头,也是淮河和里下河地区的泄洪通道,每年都受汛期、长江枯水期影响,汛期水大流急,船舶停靠、航行困难,枯水期由于近年长江水位持续低位,使本来就不宽、不长的航道变的更窄,加之长江潮汐的变化,大部分船舶远离岸边停靠,占据大部分主航道位置,少量吨位大、吃水超过航道等级限制的船舶往往在退潮时段容易搁浅在航道内,影响航道通行安全。

（三）过闸效率低、偶发安全事故，船舶调度和现场运行有待改善

传统的运调模式是不论船舶核定吨位大小,每闸调度一定数量的船舶至引航道待闸,调进的船舶没有进行科学计算,或登记数据,与实际尺度不符,进入闸室的船型及数量不能最大利用闸室安全容积,调少了,浪费闸室有效容积,调多了一闸进不完,降低了船舶通过船闸的效率,又存在安全隐患。船舶调入引航道靠船墩后,不能按船闸要求双帮有序停靠,加上引航道长度局限,不能满足大型及拖带船队等提供安全停靠位置,恶劣天气时易产生漂移,堵塞航道影响过闸时间及出闸船舶的交汇。船在引航道为便于抢进闸往前挤,多帮停靠,有的甚至超越安全停靠线,造成闸门口或引航道拥堵。通知进闸时,因船员担心一闸进不下而抢挡超越,齐头并进,造成在闸门口夹挡、碰撞,损坏闸门或闸门动力传递设备,甚至发生沉船,死人等恶性事故。

二、船闸安全运行管理的具体措施

针对船闸安全运行管理中所面临的诸多问题,必须进一步加强制度建设,充分调动人的主观能动性,制定科学的安全运行管理措施,才能有效提高船闸通过能力,确保船闸安全运行。

（一）完善制度建设，落实安全生产责任制，是船闸安全运行根本

完善安全规章制度建设,用制度建设来保障船闸安全运行,制度是工作的根本保障,健全的制度可以规范各项工作,使各项工作有章可循,制度建设的好坏,直接关系到船闸能否有一个良好的通航秩序。健全的规章制度是船闸管理的“软件”是确保运行安全的可靠保障。为保证船闸各项规章制度与关键性操作的规范性、可靠性和实用性,应制定严格的安全规章制度,规章制度的建立必须覆盖到船闸管理的所有岗位,对船闸管理所涉及的工作内容,如劳动纪律、文明服务、运行管理、船舶调度、过闸管理规定、应急处理措施、后勤保障等管理工作,都要有一个明确的规定。并要求严格遵守规章制度和操作规程,为保证制度的顺利执行,要制定考核、检查、监督、奖励、处罚管理办法,做到用制度来保障船闸安全运行。船闸管理工作是一个全方位、全天候、全过程、全员的管理,需要各个部门各尽其责、相互配合,做好运行管理工作中每一个环节,使各个环节相互衔接,高效运行。船多时,首先领导要高度重视,健全各项规章制度,用制度来管人、管事、管物,对船闸运行中出现的新问题,采用新方法、新措施,制定新的管理规定,应加强船舶停靠、登记、调度、航道管理、船舶进出闸以及机电设备运行管理,每项工作都至关重要,都会对安全运行、安全畅通带来很大影响。领导应经常

深入实地,调查了解,根据具体情况,制定科学的运行、调度方案,使管理工作横向到位,纵向到底。其次,值班人员应严格执行规章制度,严守操作规程,杜绝“三违”。严守船闸运行安全管理规则即船舶进出闸,闸室停靠、灌泄水时安全管理规则、闸次安全宣传,闸阀门安全运行观察,启闭机运行安全管理,运行现场主要危险点与应急预案管理等。在实际工作中,以往曾出现过船未进好强行关闸门,结果造成船舶被夹漏水,造成严重经济损失,还有闸室水未平,强行开闸门,造成闸门面板撕裂,损坏启闭机械等。在闸室涨泄水时,尤其需要注意两点:一是注意闸室动态,防止出现人员落水,船舶碰撞等各种险情发生,二是注意观察阀门运行情况,防止出现行程开关失灵而提过阀门,烧毁电机,损坏启闭机械。最后要加大监督检查、考核力度、落实岗位责任制和责任追究制^[2]。

（二）转变思想意识，充分调动人的主观能动性，是船闸安全高效运行的源泉

内因是决定事物的主要因素。面对船闸待闸船舶多、船闸通过能力小等客观存在情况,要主动与地方交通行政执法部门、水利、水上公安等开展“联防、联治、联保”工作,适时采取过闸船舶“三级调度”、“动态调度”,以及“72小时2+1”等运行管理方式,只有从主观上加以改变,发扬主人翁的责任感,充分发挥船闸管理的内部潜能,调动人的生产积极性,多放快放,闸船联动,加快船闸的放行速度,船舶的运行速度,使其安全、高效、有序运行,才能最大限度地发挥船闸的社会经济效益。船闸职工是船闸运行管理的直接参与者,船闸运行管理质量的提高有赖于员工的思想文化水平和操作技能的提高,因此,要结合单位的实际情况,制定学习计划,对员工进行形势教育、安全宣传、安全知识竞赛、安全生产法规、操作技能方面知识培训,通过组织学习培训,技术练兵等方式,不断提高员工的思想、安全意识和操作技能水平,使大家实现从“要我安全”向“我要安全”的转变。同时要结合不同时期,每年有针对性地开展夏安赛、冬安赛、春运、安全月等安全生产劳动竞赛活动,通过一系列活动的引带,员工的综合素质提高了,工作的积极性增强了,放闸速度加快了,待闸船舶才能减少,通航安全管理工作才能得到充分落实^[3]。

（三）加强机电养护，规范航道管理，是船闸安全畅通的保障

1.加强机电养护,确保船闸正常运行。机电是船闸心脏,应加强对船闸机电设备日常巡查、养护,使其不受恶劣天气影响。船闸机电设备冬季常受低温雨雪、大雾冰冻影响,造成机电设备损坏,如行程开关冻坏,启闭机液压油温过低,液压油黏度太高,启闭机无法工作,船闸不能运行,这时应采取保护、保暖、更换措施。

2.加强航道管理处罚力度,规范航道停靠秩序。根据船闸来船较多,船舶乱停乱靠问题,应主动联系地方交通行政执法部门24小时动态巡查,对违章船舶进行处罚。抓好关键时间,关键地段的预防管理,对下水过闸船舶滞留航道不走加强管理,在上、下游重点易堵航段增设视频监控点,及时发现航道险情,消

除航道堵塞苗头。在早晚货轮、船队调度更替时期及时上航疏散船舶，防止航道由不畅转为堵塞。同时应拉待闸区与闸门口的距离，将原船舶待闸区向后延伸一公里，在水面开阔处设立待闸船舶停靠区，加大闸口与待闸船舶停靠区之间航道的长度，并加强此段航道船舶停靠秩序的管理。合理划分停泊区，实施分级、分段停靠，分区管理，危险品船指定专门停靠区。防止船舶一哄而上造成拥堵。同时根据闸口船舶放行情况适时按计划调度船舶至引航道停靠，其余船舶原地停泊区待命，保证航道秩序井然。

3.加强汛期、枯水期航道的管理。在汛期、枯水期应加大航道管理力度，加强船闸源头管理，在船舶登记报到时，应检查船舶主要尺度，对船舶严重漏水、机器发生故障、超载、超长、超宽、超高等超过船闸及航道等级限制的船舶应不予登记，防止船舶不能通过船闸或在航道中搁浅，发生事故堵塞航道。目前芒稻船闸对船长超过50.00米、船宽超过10.80米的船舶一律不予登记放行。

（四）引入智能调度系统，是船闸管理的必由之路

安全畅通是船闸各项工作的重中之重，加强船闸运行现场管理，采取科学的闸次、闸向调度方式，缩短船舶待闸时间，是船闸管理中心任务。经过多年的不断探索，不断总结，改善管理方法，采用船队闸外编组和货轮实施档位图能有效解决船闸管理中的诸多问题。船队闸外编组就是将已调入引航道待闸的船队提前根据闸室有效尺度改缆编组双帮停靠，船队进闸时无需改缆直接进出，减少了船队进出闸时间，加快了放闸速度，降低了船队进出闸安全运行的风险。货轮过闸档位图是船闸工作人员运用计算机技术，根据闸室有效面积选择最佳的船舶组合，合理搭配进闸货轮的条数并编排货轮进闸的具体位置，在闸室、引航道靠船墩上用大号字书写编号，根据闸室有效宽度，大小船搭配，双帮停靠。

1.实行船队闸外编组和货轮档位图能有效提升船闸的管理水平和通过能力，船舶按档位图进闸不必担心一闸进不下，而发生抢档、夹档、闸门口碰撞，损毁助航设施等事故。同时按档位图能有效提高闸室利用率，缩短进闸时间，加快船舶进闸速度。

2.实行船队闸外编组和货轮档位图，规范引航道停靠秩序。货轮进入引航道按指定的档位图停靠，有利于引航道内货轮停靠

秩序的约束，也避免了以往的超帮或多帮停靠，提高了进出闸船舶的交汇能力，缩短船舶在引航道交汇时间和降低交汇时危险系数，保障了运行现场的安全。

（五）加强高科技的研发，是船闸的发展方向

随着新技术和新系统在船闸运行安全管理中的广泛应用，安全管理理念，安全管理模式都应当发生根本性变革；应当坚持运用船闸智能调度系统、GPS辅助系统、视频监控系统、船舶尺度激光测量系统、手机短息和高频对讲、语音播报等，推进管理创新，提升服务能力，实现船闸运行安全管理跨越式发展。

由江苏省交通运输厅组织实施的“水上ETC”便民工程（内河船舶智能过闸管理系统—船讯通APP），是一种综合运用物联网技术、移动互联网技术、电子支付技术的新型船舶过闸管理系统，船舶过闸只需船上设备接收信息，船民再也不需要上岸办理过闸手续，船舶过闸从原来的上岸、登记、征收、调度等八个程序减至ETC简单的识别、调度、过闸三个步骤，在船舶过闸登记、船闸运行调度、过闸费结算等方面带来极大的便利，应用效果非常明显：一是改善了船舶航行条件。二是方便了船舶过闸登记。三是降低了船舶运输成本。四是提升了船闸通过能力。五是规范了船闸安全管理。六是提高了船闸服务水平。因此，必须把它运用好、发展好、维护好。

在管理方式上，应当创新思维方式，打破固有模式，创建新型模式，构建“领导推动、多部门联动、典型带动、奖惩调动”的多维工作体系；通过信息化技术不断规范运调行为，全力推进“船讯通过闸APP”应用更新，让船员评价船闸管理工作，推动船闸管理转型升级；研究船舶登记行为，规范登记秩序管理，做到公平、公正、公开，尽力缩短船舶待闸时间，构建船闸船舶快速通道，实现船闸安全畅通^[4]。

安全工作只有现在时，没有完成时；服务水平只有更好，没有最好；只要我们树立高度的事业心和强烈的责任感，树立群体意识和大局意识，充分发挥主人翁精神，聚焦时代，与时俱进，不断总结，不断创新，才能把船闸管理工作做足、做实、做好、做强，才能提升船闸管理能力，从而实现“保安全、保畅通、强服务”，有了船闸安全畅通才能创造出更多的经济和社会效益，造福于民。

参考文献

- [1] 吉顺莉. 船闸知识 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2014: 176-206.
- [2] 吴丽华. 航道知识 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2014: 6-20.
- [3] 《江苏省航道管理条例》. 2006年11月30日, 江苏省第十届人民代表大会常务委员会第二十七次会议通过. 2007年3月1日起施行.
- [4] 《船闸管理办法》. 交通部令1989年第5号. 10月1日起施行.

低合金调质高强度钢 STRENX1100E 焊接工艺研究

张晓刚

太原重型机械集团有限公司, 山西 太原 030024

DOI:10.61369/ME.2026020034

摘 要 : 为了满足大型起重机伸缩臂研制需求, 针对低合金调质高强度钢 STRENX1100E 进行焊接性分析, 对焊接接头的力学性能和显微组织进行了研究。试验表明: 按该焊接工艺执行, STRENX1100E 钢板的焊接接头具有良好的力学性能, 能够满足我公司大型起重机伸缩臂的性能要求。

关 键 词 : 低合金调质高强度钢; 力学性能; 显微组织; 大型起重机伸缩臂

Research on the Welding Process of Low Alloy Quenched and Tempered High-Strength Steel STRENX1100E

Zhang Xiaogang

Taiyuan Heavy Machinery Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030024

Abstract : To meet the requirements for the development of the telescopic arm of large cranes, the weldability of low-alloy quenched and tempered high-strength steel STRENX1100E was analyzed. The mechanical properties and microstructure of the welded joints were studied. The tests showed that, when this welding process was carried out, the welded joints of STRENX1100E steel plates had good mechanical properties and could meet the performance requirements of our company's large crane telescopic arms.

Keywords : low-alloy quenched and tempered high-strength steel; mechanical properties; microstructure; large crane telescopic arm

引言

我公司研发的大吨位伸缩臂起重机, 为了减轻车体自重, 提高整车结构强度, 关键结构件均采用高强度材料。对起吊重物的关键受力件伸缩臂, 采用高强度 STRENX1100E, 减轻了伸缩臂自重, 同时提高了结构稳定性。高强度 STRENX1100E 为进口的瑞典 SSAB 公司的超高强钢板, 具有很高的强度和良好的韧性。

低合金调质高强度钢是一种含碳量和合金元素都比较低而强度高的工程结构用钢, 随着工程结构向轻量化和大型化发展, 低合金调质钢因综合力学性能优异和经济效率显著而被广泛应用于机械工程领域。

本文对 STRENX1100E 钢板进行焊接工艺研究, 分析材料焊接性能。针对调整钢焊接易出现的冷裂纹、焊接接头综合性能弱化的问题, 制定了科学的焊接工艺方案并进行了焊接工艺试验和力学性能分析, 保证了大型起重机伸缩臂的制造。

一、STRENX1100E 钢焊接性分析

结构设计, 选取板厚 9mm 为焊接试验板, 材料的化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。

STRENX1100E 钢板属于低合金调质钢, 依据起重机伸缩臂

表 1 STRENX1100E 钢板化学成分实测值 (质量分数) %

名称	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
STRENX1100E	0.17	0.20	1.17	0.011	0.001	0.5	0.01	0.6	0.44	0.001

表 2 STRENX1100E 钢板力学性能

名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	-40°C 冲击功 KV2(J) 平均值
STRENX1100E	标准	1100	1250-1550	10
	实测	1192	1446	12

依据国际焊接学会推荐的碳当量公式： $CE(IIW)=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15$ 计算，该钢板的碳当量为：0.594%，该材料 $CE>0.4\%$ 。依据日本JIS标准规定碳当量公式： $CE(JIS)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ 计算，该钢板的碳当量为：0.60%。说明钢材易淬硬，焊接性较差，焊接时需预热才能防止焊接裂纹^[1]。

按照合金元素冷裂纹敏感指标 $P_{cm}=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B[1]$ 计算，冷裂敏感指数为：0.296%，说明钢材有冷裂敏感性。

按照预热温度公式：
 $T_0=324P_{cm}+17.7[H]+0.14\sigma_b+4.72\delta-214$ ，
计算得知：预热温度 $T_0=108\text{℃}$

调质钢焊接时，当热影响区温度超过母材的回火温度，其机械性能将发生变化，要尽量限制焊接过程热量对母材的影响。在制定焊接工艺时，必须解决冷裂纹问题。

表3 焊丝化学成分实测值（质量分数）%

名称	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
ER120S-G	0.12	0.65	1.83	0.009	0.008	0.119	0.38	2.46	0.49

表4 焊丝熔敷金属力学性能实测值

名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	-40℃冲击功 KV2(J) 平均值
ER120S-G	893	959	15.5	63.2

（三）焊接工艺参数

焊接低合金调质钢时，影响冷裂纹和热影响区脆化的关键点是焊接时的冷却速度。冷却速度主要由焊接热输入决定，同时又受到预热及焊件散热条件的影响。快速冷却对防止脆化有利，但对防止冷裂纹不利。反之，减缓冷却可防止冷裂纹，却易引起热影响区的脆化。热影响区软化主要受焊接热输入的影响。因此为了确保焊缝的强度、韧性，不宜采用过大的焊接热输入，焊接操作上不用横向摆动，采取多层多道施焊。

焊接试验

（1）焊接试件组对尺寸：9X300X500，V型对接，单面焊双面成型（图1）；焊材选用 ER120S-G 实心焊丝，焊丝直径为 $\Phi 1.2\text{mm}$ ；焊机：KRII500；电源极性：直流反接；保护气体：20%CO₂+80%Ar 混合气体；

坡口型式：V型50°；钝边尺寸：0；组对间隙：2mm；

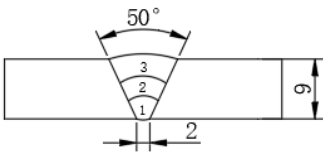


图1

（2）焊前清理坡口周围50mm范围内油污、铁锈、水分及其他杂质，坡口打磨出金属光泽。

（3）采取多层多道焊接方法，焊前预热100~120℃，预热范围：坡口两侧各75mm。焊丝干伸出度15~20mm，采用 ER120S-G，焊道层间温度 $\leq 170\text{℃}$ ，焊后立即用石棉布包裹焊缝

二、STRENX1100E 钢板焊接工艺

（一）焊接方法

选用能量密度集中的焊接方法，结合我公司的设备情况，选用混合气体保护焊 MAG。

（二）焊接材料

由于该调质钢焊后不进行热处理，故在选择焊接材料时要求焊缝金属在焊态下具有接近母材的力学性能。选择强度级别比母材略低的焊材有利于防止冷裂纹，改善热影响区的冷裂倾向。目前，与该材料力学性能接近、技术成熟的焊材为 ER120S-G 级别。因此，按照低强原则选用意大利 FILEUR $\Phi 1.2\text{mm}$ ER120S-G 焊丝。焊丝化学成分和熔敷金属的力学性能分别见表3和表4。

至室温。焊接工艺参数见表5。焊接线能量：0.95~1.3KJ/mm。

表5 试件焊接工艺参数表

焊道	焊接方法	焊材规格 (mm)	电流强度 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (mm/min)
打底	135	$\Phi 1.2$	100~110	18~20	100~110
填充	135	$\Phi 1.2$	240~260	26~28	320~330
盖面	135	$\Phi 1.2$	260~280	28~30	340~350
保护气体	Ar80%+CO ₂ 20%		气体流量 (L/min)		20

四、试验结果及分析

（一）试样的位置及截取^[2]

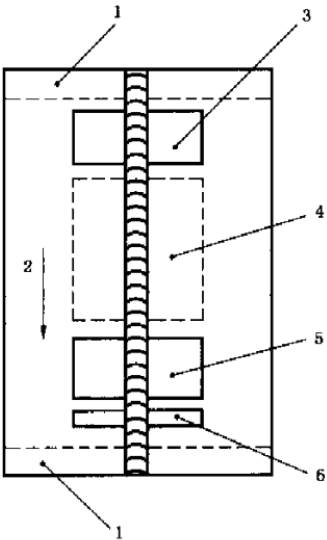


图2

试件进行 UT 探伤，避开缺欠部位，从合格的部位截取试样。取样位置说明：1—去除 25mm；2—焊接方向；3—该部位，一个拉伸试样，弯曲试样；4—该部位，三个 VWT 冲击试样，三个 VHT 冲击试样；5—该部位，一个拉伸试样；6—该部位，一个金相试样，一个硬度试样。

（二）拉伸、冲击试验结果

按照 GB/T 19869.1-2002/ISO 15614-1:2004 焊接工艺评定试验标准，焊接接头的力学性能结构见表 6。从表 6 中得知，两组试验的抗拉值分别为 1030MPa、1050MPa，断在焊缝。接头强度满足伸缩臂设计要求值。

冲击试验采用 JB-300B 冲击试验机 0833。冲击试样尺寸为 7.5X10X55，从冲击试验结果得知，-40℃低温冲击时，当缺口开在接头焊缝上时，冲击功分别为 48J、54J、56J，平均值为 52.7J；当缺口开在接头热影响区时，冲击功分别为 86J、100J、86J，平

表 6 STRENX1100E 焊接接头力学性能表

室温拉伸试验		-40℃ 冲击试验 KV2(J)					
抗拉强度 (MPa)	断裂位置	焊缝		热影响区			
1030	断在焊缝	48	54	56	86	100	86
1050	断在焊缝						

（三）硬度试验结果

硬度试验采用 VH-3 型维氏硬度计 30719，测量位置为母材左上部、右上部、左下部、右下部，热影响区左上部、右上部、左下部、右下部，焊缝上部、下部。测试结果见表 7。

位置	上部							下部						
	左			右			平均值	左			右			平均值
母材	373	359	324	390	386	361	365	359	352	359	396	399	394	376
热影响	408	401	352	378	327	321	365	321	310	317	324	328	302	317
焊缝	313, 312, 309						319	324, 318, 319						320

从表 7 可知，距焊缝上部母材硬度平均值为 HV365，下部母材硬度平均值为 HV376，母材硬度平均值为 HV371；距焊缝上部热影响区硬度平均值为 HV365，下部热影响区硬度平均值为 HV317；焊缝上部硬度平均值为 HV319，焊缝根部硬度平均值为 HV320。从测量数据得知，焊缝区的硬度略低，热影响区上部硬度与母材硬度基本相同，热影响区下部由于采用多层多道施焊，后道焊缝对前道焊缝有回火作用，硬度值略低。本试验条件下，未出现明显的热影响区软化和脆化问题。

（四）显微组织分析

STRENX1100E 钢板焊接接头的显微组织见表 8。母材组织主要为回火索氏体，晶粒度为 7.5；热影响区组织主要为回火索氏体，晶粒度为 5.5；焊缝组织，主要为粒状贝氏体 + 少量铁素体，晶粒度为 6.5。在本试验工艺参数条件下，焊缝区组织粒状贝氏体具有较高的强度和高的韧性，少量铁素体组织的存在，使焊缝区硬度略低于母材。热影响区组织回火索氏体，具有高韧性、高强度的特点，因此，热影响区的冲击试验值较高，硬度值与母材硬

度值基本一致。说明制定的焊接工艺合理。

表 8 STRENX1100E 钢板焊接接头组织表

部件	组织	晶粒度
母材	回火索氏体	7.5
热影响区	回火索氏体	5.5
焊缝	粒状贝氏体 + 少量铁素体	6.5

五、结论

（一）按照本焊接工艺焊接 STRENX1100E 钢，焊接接头各项力学性能均能达到相关标准要求，具有良好的强度和韧性，满足了设计要求。

（二）按照此焊接工艺，我公司生产的多台 500t 及以上吨位伸缩臂起重机，经过长期的吊装性能试验及现场使用，吊装过程安全可靠，伸缩臂制造满足设计要求。

参考文献

[1] 陈祝年. 焊接工程师手册（第 2 版）. 机械工业出版社，2016：191-201，923-927，992-998.
[2] 中国国家标准化管理委员会 . 钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验 GB/T19869.1-2005/ISO15614-1:2004.1-21.

北斗导航 + GPS 导航的油电混合动力无人机

周琛知

中国广电湖南网络股份有限公司, 湖南 长沙 410003

DOI:10.61369/ME.2026020006

摘 要 : 针对纯电动无人机续航短、单一卫星导航可靠性不足的痛点, 结合 2026 年中国商业航天卫星互联网规模化组网的背景, 提出一种融合北斗三号 (BDS-3) 与 GPS 的油电混合动力无人机系统架构。系统以增程式油电混合动力为核心, 构建“北斗 +GPS”双模高精度导航与容错控制体系, 解决长航时能源供给与复杂环境下的导航连续性问题。通过 Doppler 平滑伪距 (DSC) 与载波相位联合的 PPK/RTK 混合定位方案, 实现水平 3–5 cm、垂直 5–8 cm 的动态定位精度, 卫星可用性提升至 99.99%。同时设计双层模糊能量管理策略, 使发动机工作于高效区, 续航较纯电动方案提升 200% 以上。外场试验涵盖城市编队、电力巡检、山区物流等场景, 结果表明, 该系统在信号遮挡、电磁干扰等条件下, 导航连续性与动力可靠性显著优于单系统方案, 可满足低空经济规模化应用的核心需求。

关 键 词 : 北斗导航; GPS; 油电混合动力; 增程式电推进; 双模融合定位; 能量管理

Hybrid Electric Unmanned Aerial Vehicle with BeiDou Navigation + GPS Navigation

Zhou Chenzhi

China Radio and Television Hunan Network Co., Ltd. Changsha, Hunan 410003

Abstract : Addressing the pain points of short endurance and insufficient reliability of single satellite navigation in pure electric drones, and in the context of China's large-scale networking of commercial space satellite internet by 2026, a hybrid oil-electric drone system architecture integrating BeiDou-3 (BDS-3) and GPS is proposed. The system, with extended-range oil-electric hybrid power as its core, constructs a "BeiDou + GPS" dual-mode high-precision navigation and fault-tolerant control system to solve the issues of long-duration energy supply and navigation continuity in complex environments. Through a PPK/RTK hybrid positioning scheme combining Doppler-smoothed pseudorange (DSC) and carrier phase, it achieves dynamic positioning accuracy of 3–5 cm horizontally and 5–8 cm vertically, with satellite availability improved to 99.99%. Additionally, a dual-layer fuzzy energy management strategy is designed to operate the engine in the high-efficiency zone, increasing endurance by over 200% compared to pure electric solutions. Field tests covering urban formations, power line inspections, and mountain logistics scenarios demonstrate that the system significantly outperforms single-system solutions in navigation continuity and power reliability under conditions such as signal occlusion and electromagnetic interference, meeting the core requirements for large-scale applications in low-altitude economics.

Keywords : BeiDou Navigation; GPS; hybrid fuel-electric system; extended-range electric propulsion; dual-mode fusion positioning; energy management

引言

低空经济作为新引擎, 2023 年市场规模已破 5000 亿。无人机是核心载体, 但纯电动方案续航仅 30–60 分钟, 且单一卫星导航在复杂环境下可靠性不足, 难以满足长航时作业与高精度编队需求。2026 年商业航天爆发, 低轨卫星互联网与北斗三号组网, 为无人机提供密集导航信号。结合北斗 +GPS 双模融合与增程式油电混合动力, 可显著提升定位精度与续航, 破解行业痛点。在卫星导航融合领域, 高晓等提出的 GPS/BDS 组合 PPK 定位, 精度可达厘米级; 中国移动 5G+ 北斗网已服务 12 万架次无人机, 动态定位稳定性达 99.99%。但现有研究多聚焦静态场景, 对高机动编队等场景的容错控制研究不足。混合动力方面, 增程式方案使续航提升显著, 如氢-锂混合系统续航超 2 小时。然而, 现有系统多未与双模导航深度耦合, 缺乏基于导航状态的动力自适应调控策略。本文提出一种北斗 +GPS 双模导航油电混合无人机, 实现导航与动力深度融合。其创新在于: 采用联邦强跟踪滤波与 PPK/RTK 混合定位, 确保高机动场景下的精度与实时性; 设计双层模糊能量管理策略, 使动力与导航需求动态匹配。经多场景验证, 可为低空经济规模化提供技术支撑。

作者简介: 周琛知 (1974.08—), 男, 汉族, 湖南长沙人, 工商管理硕士, 工程师, 从事自然语言处理、大模型、智能情报分析与数据挖掘的工作和研究。

一、系统总体设计

（一）设计目标与性能指标

基于低空经济典型应用场景，确定系统核心设计目标：长航时续航、厘米级定位精度、高导航容错性、动力系统高效可靠。具体性能指标如表 1 所示。

表 1 无人机系统核心性能指标

指标类别	具体指标	备注
导航性能	动态定位精度	水平 3-5 cm，垂直 5-8 cm（RTK 模式）
	卫星可用性	≥ 99.99%，双模融合较单系统提升 30%
	容错能力	单系统失效时，定位精度不低于 0.5 m，续航 ≥ 10 min
动力性能	续航时间	巡航模式 ≥ 4 h，编队表演模式 ≥ 2 h
	动力架构	增程式油电混合动力，串联式构型
	能量效率	巡航工况燃油消耗率 ≤ 280 g/(kW · h)
平台性能	最大起飞重量	40 kg，有效载荷 7 kg
	巡航速度	60 km/h，最大速度 120 km/h
安全性能	应急保障	自动降落伞、箱式起降，发动机停机时电池续航 ≥ 15 min

（二）系统总体架构

系统采用“导航-动力-控制”三位一体的集成架构，核心由双模导航子系统、增程式油电动力子系统、飞控与容错控制子系统三部分组成。双模导航子系统负责位置、速度、时间（PVT）信息获取，由 BDS-3/GPS 双模接收机、RTK 基准站、IMU 惯性测量单元组成，通过融合算法输出高精度、高可靠的导航数据。增程式油电动力子系统作为能量核心，包括航空活塞发动机、ISG 启动/发电一体电机、锂电池组、电机控制器与能量管理单元（EMU），实现燃油化学能到电能的转换与智能调度。飞控与容错控制子系统基于导航状态与动力参数，实现编队协同、路径规划与应急容错，保障飞行安全。

二、双模导航融合技术

（一）导航硬件选型与集成

该无人机系统采用小型化 BDS-3/GPS 双模接收机，支持双频观测，灵敏度 ≤ -165dBm，并配备多阵元抗干扰天线（增益 ≥ 5dBi，重 ≤ 150g），有效抑制电磁干扰与多路径效应。其核心采用“RTK 为主、PPK 为辅”的混合定位架构：在城市编队、电力巡检等场景启用 RTK，实现厘米级实时定位；在山区物流等无基准站场景启用 PPK，通过事后解算保证精度。系统还集成了 MEMS IMU，在卫星信号失锁时可实现 10 秒内误差 ≤ 0.5 米的短时定位续接，确保了复杂环境下导航的高可靠性与连续性。

（二）双模融合算法设计

为提升伪距观测精度，采用 Doppler 平滑伪距算法，公式如下
$$\bar{P}_k = \omega P_k + (1 - \omega) \left[\bar{P}_{k-1} + \lambda \int_{t_{k-1}}^{t_k} D(t) dt \right]$$
 其中， $\bar{P}_k$ 为第 k 历元的平滑伪距， P_k 为原始伪距， ω 为平滑因子（取历元倒数）， λ 为载波波长， $D(t)$ 为 Doppler 观测值。该算法使伪距精度从米级提升至分米级，加速载波相位模糊度收敛。

系统采用联邦强跟踪滤波（FSTF）融合 BDS 与 GPS 数据：两个子滤波器分别处理双系统信号，主滤波器通过时变渐消因子实现全局融合与容错，有效应对机动状态下的模型失配。当任一子系统卫星数 <4 颗或 PDOP>6 时，自动切换至单系统 +IMU 模式，确保持续导航。仿真验证表明，双模融合下平均可见卫星 25.6 颗，PDOP 均值 1.1，较单系统提升 40%；在遮挡干扰下仍保持厘米级精度，而单系统出现米级误差甚至失锁。

该能量管理策略采用双层模糊控制架构，实现动力与导航的深度协同。上层根据负载功率（巡航 <11kW/高负载 ≥ 11kW）与电池 SOC（分低、中、高、满四档）制定 8 条规则，动态设定 ISG 电机目标发电功率，例如高负载且 SOC>90% 时，ISG 输出 9kW 且电池不放电；巡航且 SOC 中位时，ISG 输出 10kW 为电池充电。下层将目标功率转换为发动机转速，以目标与实际转速差值及冷却液温度为输入，通过 Mamdani 模型模糊控制节气门开度，确保发动机平稳运行于高效区。此外，策略具备导航自适应能力：当信号遮挡切换至单系统 +IMU 模式时，EMU 自动降功率保电以延长容错时间；高机动编队场景下，则控制电池持续峰值输出、发动机基础发电，兼顾动力响应与导航可靠性。

三、增程式油电混合动力系统设计

（一）动力系统构型与组成

该系统采用串联式增程式电推进构型，发动机仅驱动 ISG 电机发电，与旋翼实现动力解耦，兼顾燃油高能量密度与电池快速响应优势。核心部件包括：额定功率 15kW 的二冲程发动机、峰值功率 20kW 且响应 ≤ 10ms 的 ISG 电机、能量密度 400Wh/kg 的超低温锂电池（-40℃放电保持率 ≥ 80%），以及采用 SiC 器件效率 ≥ 98% 的电机控制器与能量管理单元（EMU）。该构型通过“燃油发电+电池储能”的双能源耦合，为长航时作业提供了高效稳定的动力基础。

（二）动力系统匹配与优化

1. 上层、下层发动机管理模糊控制

该能量管理策略采用双层模糊控制架构，实现动力与导航的深度协同。上层根据负载功率（巡航 <11kW/高负载 ≥ 11kW）与电池 SOC（分低、中、高、满四档）制定 8 条规则，动态设定 ISG 电机目标发电功率，例如高负载且 SOC>90% 时，ISG 输出 9kW 且电池不放电；巡航且 SOC 中位时，ISG 输出 10kW 为电池充电。下层将目标功率转换为发动机转速，以目标与实际转速差值及冷却液温度为输入，通过 Mamdani 模型模糊控制节气门开度，确保发动机平稳运行于高效区。此外，策略具备导航自适应能力：当信号遮挡切换至单系统 +IMU 模式时，EMU 自动降功率保电以延长容错时间；高机动编队场景下，则控制电池持续峰值输出、发动机基础发电，兼顾动力响应与导航可靠性。

四、飞控与容错控制集成

该系统采用主从式编队架构，以双模导航与5G+北斗通信为技术核心，实现厘米级高精度协同控制。主无人机负责全局路径规划与编队指令下发，从无人机通过低延迟通信网络实时接收指令，并融合视觉避障技术，将编队间距精准控制在0.5米以内，即使在高密度动态编队中也能有效避免碰撞风险，支持“打咏春拳”等复杂3D空中电影与动态图案表演，极大拓展了无人机的商业应用场景。

安全容错机制构建了三重保障体系：导航失效时，系统毫秒级自动切换至“单系统+IMU”模式，并同步下发编队收缩指令，降低碰撞风险；若双模导航完全失效，则立即启动惯性导航应急返航程序，确保飞行器安全归航。动力容错方面，发动机突发停机时，电池可单独供电续航15分钟以上，并自动触发降落伞缓降；电池低电量时，发动机满功率发电优先保障安全降落。地面监控平台通过5G网络实时回传无人机状态数据，支持远程干预与箱式起降技术，实现从飞行控制到回收的全流程精准管理，为低空经济规模化应用提供了坚实的安全保障。

五、外场试验与结果分析

为全面验证系统性能，本研究选取城市编队表演、电力巡检和山区应急物流三个典型场景开展外场试验。试验配置包括10架试验无人机、3座地面基准站、5G通信基站、地面监控平台及第三方定位精度测试仪、燃油消耗仪等设备。其中，城市编队表演试验在城市广场进行，周边高层楼宇密集、电磁干扰较强，组织100架无人机组成“北斗卫星”“无人机表演”等2D图案及“打咏春拳”3D动态效果，重点测试导航精度、编队稳定性与信号连续性。试验结果表明，该系统在复杂城市环境下表现出优异的抗干扰能力与高精度定位性能，为低空经济规模化应用提供了可靠的技术验证支撑。

在湖北复杂地形开展的电力巡检试验中，无人机沿220kV输电线路完成自主巡检与杆塔缺陷识别，RTK模式下定位精度达水平3.5cm、垂直5.2cm，杆塔定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ ；在甘肃积石山地震灾区无地面基准站、信号弱的条件下，无人机携带5kg医疗物资完成跨山区配送，PPK事后解算定位精度达水平0.8cm、垂直1.1cm，验证了系统在无基站环境下的高精度定位能力与复杂地形

参考文献

- [1] 刘建业, 曾庆化, 赵伟. 卫星导航与惯性导航组合原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [2] 高晓, 库新勃, 白皓, 等. 基于GPS/BDS组合系统实现航测无人机动态定位 [J]. 全球定位系统, 2019, 44 (3): 101–107. DOI:10.13442/j.gnss.1008-9268.2019.03.016.
- [3] 中国移动上海产业研究院. 5G+北斗高精度导航网赋能低空经济 [R]. 上海: 中国移动上海产业研究院, 2024.
- [4] 陈忠伟, 张盟, 吴私. 氢-锂混合动力系统在工业无人机中的应用研究 [J]. 电源技术, 2025, 49 (8): 987–992.
- [5] 湖南泰德航空. 增程式电推进系统在低空飞行器中的技术突破 [R]. 长沙: 湖南泰德航空, 2026.
- [6] 北斗卫星导航系统官网. 电力北斗厘米级定位赋能无人机巡检 [EB/OL]. (2023-09-12).
- [7] 央视网. 5G+北斗广域无缝融合定位技术助力亚冬会安防 [EB/OL]. (2025-02-12).
- [8] 天目山实验室. 全球首款百公里级氢动力多旋翼无人机研发报告 [R]. 杭州: 天目山实验室, 2024.
- [9] 中国电力科学研究院. 北斗无人机复杂环境下作业性能检测体系 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2024.
- [10] 蓝箭航天. 朱雀三号可回收火箭技术进展 [R]. 湖州: 蓝箭航天, 2026.

适应性。

外场试验验证了双模导航油电混合动力无人机的核心性能。导航方面，城市编队场景双模融合定位精度达水平4.2cm、垂直6.8cm，编队间距误差 $\leq 0.3\text{m}$ 且全程无信号丢失，而单GPS出现三次失锁；电力巡检RTK模式精度达3.5cm/5.2cm，杆塔定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ ；山区物流PPK模式精度达0.8cm/1.1cm，满足精准投递。动力方面，巡航续航4.2小时，较纯电动提升210%；高机动模式下续航2.3小时；发动机油耗275g/(kW·h)处于高效区，电池SOC维持在30%–80%健康区间。容错方面，GPS失效时自动切换至BDS+IMU模式，定位精度0.3m并安全收缩编队；发动机停机后电池单独供电18分钟保障返航。结果表明，系统在导航精度、续航与容错方面达到设计指标，可适应低空经济多场景规模化应用需求。

六、结论与展望

本文提出并实现了一种融合北斗与GPS的油电混合动力无人机系统，通过双模导航融合算法与增程式动力系统的深度集成，解决了纯电动无人机续航短、单一导航可靠性不足的核心问题。主要结论如下：

采用Doppler平滑伪距与联邦强跟踪滤波的双模融合方案，实现了水平3–5cm、垂直5–8cm的动态定位精度，卫星可用性提升至99.99%，复杂环境下导航连续性显著增强；串联式增程式油电动力架构与双层模糊能量管理策略，使无人机续航较纯电动方案提升200%以上，发动机稳定运行于高效区，能量效率最优；导航–动力–控制三位一体的容错机制，保障了无人机在单系统失效、发动机停机等极端情况下的飞行安全，满足商业表演、工业巡检等场景的高可靠性需求。随着2026年中国低轨卫星互联网的规模化组网，无人机导航精度与覆盖范围将进一步提升。未来研究方向包括：（1）融合北斗短报文通信，实现无地面网络的远程控制；（2）引入氢能增程式动力，降低碳排放，实现绿色飞行；（3）结合AI大模型，实现编队表演创意的自动生成与动力系统的自适应优化，推动无人机技术向更智能、更高效的方向发展。

运动想象脑电信号的分析与处理算法研究

侯启恩, 刘建

淮北职业技术学院, 安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ME.2026020007

摘 要： 运动想象脑电信号是脑机接口领域的重要研究内容，在人体未进行真实肢体动作的情况下获取大脑神经元电位变化，从而达到人脑对外界装置控制的目的，在医学康复、智能化人机交互等方面有着广泛的应用前景。该类信号幅度小、信噪比低、非平稳性高以及个体间差异大等特性决定了对其分析计算的正确程度直接影响着整个系统的性能表现。本文主要针对信号预处理、特征提取以及分类识别这三大方面进行相关算法的研究探讨，对其工作原理及优缺点进行了阐述，并通过实验比较不同方法的效果差异并提出改进意见，以期提高对信号的解析准确率促进脑机接口技术的发展应用。

关 键 词： 运动想象；脑电信号；信号预处理；特征提取；分类算法

Research on Analysis and Processing Algorithms for Motor Imagery EEG Signals

Hou Qien, Liu Jian

HuaiBei Vocational and Technical College, HuaiBei, Anhui 235000

Abstract： Motor imagery EEG signals are a significant area of research in the field of brain-computer interfaces (BCIs). These signals capture changes in neuronal electrical potentials in the brain without requiring actual physical movement, enabling the control of external devices through the human brain. They hold broad application prospects in medical rehabilitation and intelligent human-computer interaction. The characteristics of these signals, including their small amplitude, low signal-to-noise ratio, high non-stationarity, and significant inter-individual variability, directly influence the accuracy of their analysis and computation, thereby affecting the overall performance of the system. This paper focuses on the research and discussion of algorithms related to three key aspects: signal preprocessing, feature extraction, and classification recognition. It explains the working principles, advantages, and disadvantages of these algorithms, compares the effects of different methods through experiments, and proposes improvement suggestions to enhance the accuracy of signal analysis and promote the development and application of BCI technology.

Keywords： motor imagery; EEG signals; signal preprocessing; feature extraction; classification algorithms

引言

脑机接口是一种超越传统人机交互方式的新技术，主要是利用大脑神经电信号进行采集解析从而实现大脑与外界设备之间的信息传递，不需要借助外周神经系统以及肌肉组织来完成。运动想象脑电是目前最实用的一种脑机接口信号源，在没有真实肢体动作发生的情况下，大脑想象自己做某件事情所产生的一系列神经电信号可以用来操控一些外部装置，帮助那些有肢体残疾的人恢复行动或者交流的能力。

一、运动想象脑电信号的基本特性

（一）微弱性与低信噪比

运动想象脑电幅值一般为1-100 μ V，远远小于环境中工频

干扰、肌电干扰以及眼电干扰等，信噪比很低，在此之中，工频干扰主要是来自电网中50Hz频率信号及谐波成分；肌电干扰是由于头部肌肉不自主收缩；而眼电干扰则是由眼球转动或者闭眼造成。这些干扰信号的幅度往往是运动想象脑电信号几倍甚至几十

课题信息：

- 安徽省教育厅高校重点自然科学研究项目：2025AHGXZK31227；
- 安徽省教育厅高校重大自然科学研究项目：2025AHGXZK20094；
- 淮北职业技术学院重点自然科学研究项目：2025-YJZK-01；
- 淮北职业技术学院重点自然科学研究项目：2025-YJZK-05；
- 淮北职业技术学院重点教学研究项目：2024jyxm-02；

作者简介：

侯启恩（1997.09—），男，汉族，安徽宿州人，工学硕士，淮北职业技术学院助教，研究方向：脑电解码，生物信号处理，深度学习；

刘建（1975.03—），男，汉族，安徽淮北人，工学硕士，淮北职业技术学院讲师，研究方向：模式识别，机器学习。

倍,大大压制了有效信号特征信息提取的效果,给后续对信号分析处理带来很大麻烦^[1]。

（二）非平稳性与时变性

运动想象脑电是典型的非平稳信号,它的统计特性随着时间的变化而变化,在进行运动想象的时候,大脑中的神经元由静息的状态转变为激活的状态然后又回到任务完成之后的恢复状态,相应的脑电信号的频率、幅度等都会发生较大的改变。因此对于这样的非平稳信号传统的基于平稳信号的方法就不再适用了,必须使用针对非平稳信号的方法来加以解决。

（三）个体差异性与任务相关性

不同的个体之间大脑结构、神经活动方式有很大区别,而且同一个体在不同的时刻、不同状态下做相同的运动想象任务也会产生不一样的脑电波形,因此算法对个体的适应性就变得很重要。另外,运动想象脑电信号是有很强的任务相关的,不同的运动想象任务会激活不同的脑区,比如想象右手运动的时候左半球的感觉运动皮质区域会有较大的波动,而想象左手运动时右半球感觉运动皮质区域就会有较大的波动,所以这个任务相关性就是提取特征以及分类识别的基础^[2]。

（四）神经生理基础特性

运动想象脑电的主要神经生物学特性为事件相关去同步以及事件相关同步,主要表现在大脑的感觉运动皮质区的 μ 节律和 β 节律中。 μ 节律在人处于休息、肢体不动的状态下其能量最大,在此状态下代表大脑皮质静息状态;而 β 节律则与运动准备、运动实施以及运动抑制有关。人在做运动想象的时候相应的大脑区域的 μ 节律和 β 节律的能量都会明显下降,这就是事件相关去同步现象;而在完成运动想象的任务之后,这些波段的能量又会恢复并且高于原来的水平。

二、运动想象脑电信号预处理算法

（一）滤波去噪算法

滤波去噪是预处理的重要环节,主要是提取运动想象脑电信号8—30Hz的有效频率范围(其中 μ 节律、 β 节律是最主要的有效成分),去掉无用噪声,一般采用巴特沃斯滤波、小波滤波以及自适应滤波。巴特沃斯滤波是一种常用的线性滤波器,幅频特性平坦、相位畸变小,在设计一个8—30Hz带通滤波器后可以很好地保留有用信号并抑制50Hz工频以及其他高频噪声,但是对于肌电、眼电等非平稳干扰抑制效果较差^[3]。小波滤波是以小波变换为基础的一种非线性方法,具有良好的多尺度分析能力,能够将信号分解到不同的尺度上进行分析从而区分出有用信号和干扰信号,其去噪效果比巴特沃斯滤波更好一些,主要是把脑电信号转化为小波系数之后再利用阈值来消除掉这些干扰的小波系数然后重新组合成新的信号,但是阈值的选择也会影响到最终的去噪结果,如果设置得过高就会导致有用的特征被丢弃掉,而设置得太低又不能完全去除所有的噪声。自适应滤波可以根据情况改变自身的参数不需要预先知道信号及噪声的相关信息就可以通过自适应的方法不断调节滤波器的参数使得输出误差达到最小,主要

有最小均方算法(计算量较小、实时性较好但是收敛速度较慢)以及递归最小二乘算法(收敛速度快、准确率较高但是计算量较大并且对于硬件的要求也比较高)。

（二）基线校正算法

运动想象脑电在采集过程中会受到电极接触电阻的变化以及人体自身状况的影响而产生直流漂移,造成信号基线偏移,给之后的特征提取带来一定困难。基线校正主要是为了去除直流漂移,使信号基线回到零电平附近,一般采用的方法有线性趋势消除或者基线减法等。线性趋势消除是根据信号的趋势来拟合出一条直线,在原始信号中减去这条直线就可以去掉线性的直流漂移,适合于基线为线性偏移的情况;基线减法则取运动想象任务开始之前的一段静息状态下的信号作为基线,求出其均值后用这个均值去减掉原来的信号即可完成基线校正,此方法操作简便实用广泛,但是基线的选择对于结果有很大影响,应选择比较稳定的静息状态下的信号作为基线^[4]。

（三）信号归一化算法

由于各个受试者的脑电幅值有很大区别,即使是同一个体不同时间段采集得到的信号其幅值也会有变化,而幅值的不同会直接影响到之后进行特征提取以及分类算法的效果。信号归一化就是把不同幅值范围的信号转化为相同的范围来去除幅值差异造成的影响,在这里使用的是Z-score归一化和最小-最大归一化两种方式。Z-score归一化是将信号变为均值为0、标准差为1的标准正态分布信号,可以很好地消除信号幅值上的差异并保留住信号本身的相对信息,适合用于后面的基于统计特性的特征提取及分类算法;最小-最大归一化则是将信号幅值映射至0-1之间,操作简便明了但是对异常值比较敏感,适用于信号幅值变化较小的情况。

三、运动想象脑电信号特征提取算法

（一）时域特征提取算法

时域特征是从信号的时间序列上提取出来的,可以表示出信号的幅度的变化情况,具有计算量小、速度快的优点,常用的有均值、方差、偏度、峰度以及波形长度等。均值代表了整个信号的大小,而方差则表示出其幅值的离散程度;偏度与峰度是用于描述信号分布形态的两个参数,波形长度则是指信号在时间轴上的波动频率。它们能够比较直观地反映出运动现象脑电信号的变化情况,但是容易受到外界环境的影响较大,在单独使用的情况下分类效果一般较差,需要和其他类型的特征结合起来使用才能取得较好的结果^[5]。

（二）频域特征提取算法

频域特征是从频率的角度进行提取,可以体现信号的频率分布情况,在运动想象EEG中是主要的特征之一,常用的提取方法有傅里叶变换、功率谱密度估计以及小波包变换等。傅里叶变换可以将时域信号转化为频域信号并获取不同频段的能量值,但是只适合对平稳信号进行分析而不适合用于非平稳信号,具有一定的局限性;而功率谱密度估计则是频域特征提取的重要手段,主要有两种方式:周期图法和Welch法,其中周期图法虽然计算

简便但是其方差较大且准确率较低；相反地，Welch法则利用分段重叠和平滑加窗的方法来减小方差并且提高准确率，这是目前最常用来处理运动想象 EEG 的一种方法，能够得到 μ 节律及 β 节律的相关能量信息从而为后续的分类识别奠定基础。小波包变换是在小波变换基础上发展而来的新技术，不仅可以精确地解析出信号中的高频成分还可以同时获得时域与频域的信息，适用于非平稳信号，通过对脑电信号进行小波包分解然后从中提取各个频段的能量值得到完整的关于运动想象过程下信号频率的变化情况，相比起傅里叶变换而言效果更好一些。

（三）空域特征提取算法

空域特征是以多导联脑电信号的空间分布为依据提取的，可以体现不同脑区激活程度的不同，在多导联信号上应用较多，常用的有共空间模式以及改进版共空间模式等。共空间模式是最传统的算法，主要是利用最优空间滤波器把多导联信号映射到一个新的空间中去使得不同运动想象任务之间的差异最大化从而得到具有区分性的空域特征，该方法计算量小、区分性好适合两分类问题但是对外界干扰及个体间差异比较敏感，在多个类别的问题上效果会有所降低。为了弥补它的缺点人们提出了正则化共空间模式、自适应共空间模式等多种改进版本：正则化共空间模式增加了一个正则项来减少噪声对于滤波器的设计造成的影响提高了鲁棒性；而自适应共空间模式可以根据所采集到的数据本身的统计性质实时地改变滤波器的相关系数以提高个性化程度，这样做的好处就是让这些优化过的算法更准确并且更加健壮地进行空域特征的学习同时扩大了其适用范围。

四、运动想象脑电信号分类识别算法

（一）传统机器学习分类算法

传统的机器学习分类算法由于计算量小、可解释性强以及实时性好而被广泛应用于运动想象脑电信号分类上，主要支持向量机、K近邻算法及线性判别分析。支持向量机是以统计学习理论为基础，在所有可能的分类超平面中找到一个使不同类别的样本点之间的距离尽可能大的最优分类超平面，具有很好的泛化能力和抗过拟合能力，可以很好地解决高维特征以及小样本的问题，是最常用的也是应用最广的传统方法之一，但是它的分类结果受到核函数以及参数的影响较大，需要进行交叉验证来确定最佳参数值。K近邻算法是一种实例化的分类方式，主要是根据样本间的相似程度，把待测样本分配到与其最为接近的 K 个已知类别中的频率最高的那个类别当中去，操作简便并且不需要预先训练模型就可以直接使用，适合用于实时的应用场合，但是其运算速度较慢并且对于样本的数量以及质量要求较高，容易受到噪声干扰导致识别率下降。

（二）深度学习分类算法

伴随着深度学习的发展，它被应用于运动想象脑电信号分类上越来越普遍了，在这类算法中可以自动地学到信号内部的一些深层次的信息而不需要人为的设计，适合用于复杂的非平稳信号的分类工作当中，常用的有卷积神经网络、循环神经网络以及注意力机制网络等。卷积神经网络利用其特有的卷积层和池化层结构能够自动获取到信号的时间域及频率域信息并且擅长发现局部特征以及空间的相关性，适合对多导联信号进行分类并且效果良好但是计算量较大对于硬件的要求也较高需要大量的样本来进行训练；循环神经网络可以用来解决序列的问题，在其中使用了循环单元来保存信号的历史信息从而发现其中存在的时序上的联系，适合用来应对非平稳信号但是会出现梯度消失或者梯度爆炸的现象一般会采用长短时记忆网络或者是门控循环单元对其进行优化。

（三）算法性能对比分析

为了比较不同的分类方法的效果，选择 BCI 竞赛Ⅳ数据集 I 中的左手、右手运动想象脑电信号作为研究对象，此数据集采样率为 200Hz，在对其进行预处理之后得到时域、频域以及空域联合特征，利用支持向量机、K近邻、线性判别分析、卷积神经网络和注意力机制网络对其分类实验，用分类准确率、灵敏度及特异性来衡量其效果。结果显示深度学习算法的分类能力总体上要优于传统的机器学习算法，其中注意力机制网络的分类准确率达到 90.05%，灵敏度为 89.7%，特异性为 90.4%；卷积神经网络排第二位，分类准确率为 85.15%；支持向量机在传统算法中表现最好，分类准确率为 72.9%；K近邻与线性判别分析的分类准确率分别为 68.3%和 65.7%。深度学习的优点是可以自动地获取更深层次的信息并且可以发现信号的变化情况等一些复杂的规律，而传统的机器学习需要人为的设计特征，很难充分利用信号的有效信息。但是深度学习的计算量较大，实时性不及传统机器学习的方法，在应用的过程中应根据具体情况选用相应的算法。

五、结论

本文对运动想象脑电信号进行分析及处理算法进行了探讨，在信号基本性质的基础上，从预处理、特征提取以及分类识别三个方面介绍了常用的算法并对其效果进行了比较分析，最后给出了相应的改进意见。实验结果表明：运动想象脑电信号的微弱性、非平稳性和个体差异性制约算法性能的重要原因；预处理算法可以有效地抑制噪声的影响为后续的工作做好铺垫；多特征融合的方法可以提高特征之间的可分度；深度学习方法在分类准确率上优于传统的机器学习方法但是实时性较差。

参考文献

- [1] 聂旭. 基于单侧上肢运动想象的脑电信号识别与分析 [D]. 南京邮电大学, 2024.
- [2] 戎宇莹. 运动想象脑电信号的分析与处理方法研究 [D]. 陕西师范大学, 2020.
- [3] 王雪娇阳. 运动想象脑电信号识别的影响因素分析与多域处理方法研究 [D]. 东北师范大学, 2020.
- [4] 张艳, 徐子衡. 基于小波分析的运动想象脑电信号分类算法 [J]. 金陵科技学院学报, 2019, 35 (04): 6-9+88.

建筑经济视角下的公路工程合同管理优化研究

赵风雪

中交（青岛）城市建设有限公司，山东 青岛 266300

DOI:10.61369/ME.2026020009

摘 要： 为有效避免工程项目超预算，提高项目资源配置利用效率、项目经济效益，降低经济风险，工程建设全过程中需要采取合理措施，引入建筑经济管理模式，从不同角度持续强化合同管理。因此建筑经济视角下的公路工程合同管理优化研究受到广泛关注，相关理论研究及实践探索大量涌现。基于此，简单分析合同管理的意义，深入探讨相关的管理要点与优化策略，以供参考。

关 键 词： 建筑经济；公路工程；合同管理

Research on Optimization of Highway Engineering Contract Management from the Perspective of Construction Economy

Zhao Fengxue

China Communications Construction (Qingdao) Urban Construction Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266300

Abstract： In order to effectively avoid exceeding the budget of engineering projects, improve the efficiency of project resource allocation and utilization, project economic benefits, and reduce economic risks, reasonable measures need to be taken throughout the entire process of engineering construction, introducing construction economic management models and continuously strengthening contract management from different perspectives. Therefore, research on the optimization of highway engineering contract management from the perspective of construction economy has received widespread attention, and a large number of related theoretical studies and practical explorations have emerged. Based on this, a brief analysis of the significance of contract management is conducted, and relevant management points and optimization strategies are explored in depth for reference.

Keywords： construction economy; highway engineering; contract management

引言

近年来一级、二级等不同等级的公路工程，在我国各地大量兴建，工程的经济管理工作也在随之升级。但结合实际调研可以发现，部分工程未能有效运用建筑经济理念加强合同管理，影响工程建设成效与经济效益。为改变这一现状，本文围绕建筑经济视角下的公路工程合同管理要点与优化策略，开展具体研究。

一、建筑经济视角下的公路工程合同管理优化意义

（一）保障工程合规建设

建筑经济视角下，公路工程加强合同管理，有助于保障不同主体的合法权利与权益，避免产生矛盾，引发法律纠纷，降低工程建设的合规性风险。如合同条款中明确规定工程建设周期与周期变更的处理要求，能避免工程延期，导致工程承包商与业主之间出现纠纷，影响工程成本管控与进度。

（二）提高工程经济效益

合同管理在成本把控方面具有优势，避免合同实施、执行时，出现内容细节实施不规范、执行力度不足、执行监管效果不

佳等问题，增加经济损失。而且优化整体合同管理体系，还可以实现工程项目各项直接成本、间接成本精细化管理，避免成本过度支出，使成本可控，提高工程资金利用效率。

（三）明确工程参与方权利与义务

公路工程通常涉及多种参建主体，在建筑经济基础上优化合同管理，可以使各主体更加明确自身的权利与义务，为工程的稳定建设提供支持^[1]。例如，施工单位按照合同，有权利享有施工报酬，有责任与义务根据相关标准规范与施工设计需求、施工图纸方案完成施工任务，保障路面、路基、桥涵等部位的施工质量。

作者简介：赵风雪（1990.10-），女，山东泰安人，汉族，本科，工程师，从事合约管理研究。

二、建筑经济视角下的公路工程合同管理要点

（一）合同条款设计优化

公路工程合同范围较为广泛，其中在设计部分，应加强条款内容的初步设计和优化管理。在合同中需设置精准的质量控制标准，以保障工程建设质量，并细化条款内容，明确规定索赔机制，保障违约责任有效落实。如在工程质量方面，合同中可以设置精细化的质量日常巡检制度、周期性检查制度、具体的质量验收指标、质量不达标工序返工处置措施，实现在根源上，防范沥青混凝土路面开裂、路基沉降等质量缺陷。之后应优化工期方面的合同条款，考虑实际施工条件、施工需求，应设置合适的进度管理标准与进度调整后的工期延误补偿条款，考虑暴雨、大风等恶劣天气条件，与地震等外部环境中的不可抗力自然灾害因素，应保障合同工期条款具有较强的灵活性，可以在一定范围内，支持调整施工周期，避免引起合同双方分歧。最后合同条款设计时，应明确规定资金支付要求，保障固定资产、流动资金的设计规范、精准，使资金配置利用、筹集、支出、流转，均符合相关法律法规要求，也可以综合使用阶段性验收与运用分期支付等方法，防范资金管理风险。

（二）施工图预算编制

在施工方面，合同设计部分包括施工图的编制，其中可重点加强预算内容的编制。根据相关的公路工程预算定额标准，明确桥涵工程、路面工程、路基工程、绿化工程、临时工程、交通工程的预算定额运算要点^[2]。桥涵工程中应考虑桥墩、台身模板安装、拆除的费用，对于高度较小的高墩，预算定额中应综合考虑模板吊装机械的配合施工费用，可不再单独计取其他费用，如果高墩高度超出标准规定，应另行考虑使用提升模架等设备配合施工的相关费用。在桥涵开挖基坑工序中，预算定额应全面考虑基坑深度、开挖宽度、基坑周边地质环境、土质条件等情况，在基坑开挖后，应详细考虑基坑渣土清运出坑外的具体范围、基底的铺平、清洁、夯实、回填等成本。对于桥涵的筑岛，可根据无围堰筑岛和有围堰筑岛两种情况确定预算定额，并且对于除木笼铁丝的围堰工程量，应计为围堰所包围的体积，将围堰的其余部分纳入预算定额范畴，如其余部分的围堰场地，可根据施工设计要求确定，围堰高度可根据实际施工时的水面深度考虑预算。

在路面工程中，应考虑沥青混凝土等主要路面摊铺材料的数量，与施工设备的定额相匹配。例如，对于一级公路以上的公路，应考虑路面的连续摊铺施工要求，确定拌和设备的产量。路基工程中应计价土石方数量，考虑天然方、压实方换算问题、土石方平衡性，将土石方调配后详细编制预算。在填方碾压工序中，应考虑填方损耗与土方的来源确定土方单价，如编制预算时如果填方损耗较小，并且土方为外购，需要到场价作为土方单价计算。绿化工程中应规定苗木等绿化植物的运输定额、栽植金额，与栽植后的洒水、施肥养护等预算。临时工程中应考虑临时便道、施工生产、生活所需的结构物等预算。交通工程中应考虑标志牌、道口标柱的数量、结构等情况编制预算，如对于金属标志牌，应考虑立柱、横梁、法兰盘等部件的重量。

（三）施工现场与竣工验收合同管理

合同的设计部分除了施工图，还包括施工现场技术服务与竣工验收。在施工现场，可关注合同风险的管理，为避免人为因素引发合同风险，应保障施工团队签订合同前，对业主的需求、经营状况等充分了解，保障工程款按时交付。防范合同管理内部风险时，应确保合同管理流程标准、管理人员专业能力强，防止影响合同的正常履行^[3]。为避免出现外部风险，公路施工现场合同管理时，应加强市场环境与自然因素等不可控因素的管理。同时在施工现场，还可以采用PDCA等管理模式，提高合同管理的规范性。首先应建立标准、清晰的合同审批手续办理流程，防止出现违法分包等问题。相关工作人员需要注意在已经完成用地规范许可证、建设规划许可证的办理后，有序进行工程项目承接手续的办理，之后需要按照合同内容规定，严禁违反施工合同实质内容的分包违法行为。最后需要加强进度、质量、变更的管理，并系统检查现场施工状况，包括工序、材料、零配件等，提高合同管理成效。

在竣工验收合同管理时，合同签订双方需要在合同中，明确规定交工验收与竣工验收的界定，判断二者是否为同一概念，避免出现分歧、冲突。如果确定二者为不同概念，双方可单独选择交工验收或竣工验收概念，进一步明确条件、程序、责任主体。同时在合同履行结束后，如果合同双方对交工验收与竣工验收之间产生分歧，为缓解矛盾，防止影响工程效益，应尽量使用友好协商的方法处理解决，但如果长时间无法解决分歧，仍需及时通过法律途径解决。

（四）工程量清单管理

工程量清单计价的主要问题，通常聚焦合同范围内的付费或免费项目界定不明确、工程项目名称、内容及项目特征甲供材料约定不明确、工程量清单内容不真实、不全面、工程计量及支付约定模糊、工程变更及索赔规定不明确等方面，对工程单价的科学合理调整造成不利影响。因此该模式下，施工合同管理时需要持续完善合同示范文本，进一步提高合同合规性与管理水平，为合同的顺利履行奠定基础。其次应注意完善施工企业的内部计价依据，考虑市场情况与工程建设费用组成要素，通过施工现场实地调查与多方询价环比分析，选择投入性价比比较高的社会资源，进行工程项目建设。并完善施工定额与造价资料，防止合同管理时，出现价格盲从、虚高等问题。

三、建筑经济视角下的公路工程合同管理优化策略

（一）落实合同信息化建设与人才培养

在信息化背景下，公路工程可加强合同的信息化管理。管理过程中可综合使用大数据与云计算等先进的现代信息技术，合理运用大数据技术，可通过数据分析、数据挖掘、数据统计、数据清洗等功能，深入采集、挖掘、分析、计算不同的合同数据，之后从中提取关键特征，精准识别合同管理全过程可能出现的问题与明确管理的重难点，制定有效的解决方案与管理措施。通过大数据分析功能，可及时明确合同履行环节的潜在风险，制定防范

预案与应急处置方案，并把握履行管理的要点，促进履行管理效果提高。合理使用云计算技术，可以将合同数据与合同条款内容高效管理、集中存储，使合同信息数据的协同处理与共享更加顺畅、灵活，防止数据分散导致合同管理效率低下。同时云计算技术还提供数据安全防御支持，避免合同中的隐私敏感数据、关键数据、机密数据遗失或遭受窃取。此外，合同管理可以和信息化系统挂钩，使用电子合同信息化管理系统，以在线、远程操作、自动化等形式，进行合同签订、编制、审批、执行等环节的全面管理。

人员因素会直接影响合同管理效果，公路工程可加强专业合同管理人才的培养，适当提高人才选拔标准，引入外界专业能力强、知识储备丰富、经验丰富的人才，参与合同管理相关岗位。并持续培训原有的合同管理人员，制定系统化的培训计划与培训标准，使合同管理人员深入了解合同管理的有关规章制度、最新政策、法律法规要求、理论知识、实践技能，持续提高业务水平、责任意识、安全意识、服务能力。

（二）完善合同管理流程与制度

为进一步优化合同管理效果，可以从管理流程、管理制度等方面，提供管理保障。优化管理流程时，应保障全部流程环节，均根据公路项目的具体性质特点不断细化，使各环节的实施要求更加清晰明确，其中在合同起草环节，公路项目负责人应严格按照项目的工程量、进度、预算、人力、物力资源等要求，结合项目招标文件，详细起草合同草案，之后起草负责人需要和工程的技术部门、施工部门、项目负责人、财务部门、法律部门等主体密切沟通交流，仔细讨论审核合同草案，保障合同条款与内容的可操作性、草案实施的可行性。在合同审批流程中，应注意明确审批的时限与合理设置审批标准、规定审核内容，防止审批全过程出现拖延等问题，导致合同管理与工程整体施工建设进度滞后。在合同签署后的执行环节，工程的合同管理部门应及时统筹部署，合理安排时间，调配人员与资源，保障合同的全部条款内容被严格执行。

合同管理时可制定责任分工、风险管控等方面的制度，合同管理涉及财务、法务、技术、人力资源、项目管理、施工等多个

部门与岗位，工程负责人应保障各部门与岗位的人员，充分明确自身的合同管理职责，使全部合同管理流程高效、顺畅进行。合同管理风险防控时，可建立完善的风险预警机制，识别潜在风险，确定不同常见风险的等级，针对性制定处置方案。

（三）加强合同执行监督与变更管理

合同执行环节与合同变更不确定性较强，容易影响合同管理效率与质量，应强化管理。合同执行时可建立完善的执行监督机制，定期检查与评估合同的执行情况，如可定期评估施工进度、施工材料、采购工程质量，检查预算的执行情况，防止实际支出与设计需求之间出现较大偏差。同时工程单位可专门成立合同执行监督小组，各小组成员需分工合作，负责公路项目建设全过程的合同执行监督工作。如在项目实施阶段，执行监督小组成员可按照月度，开展合同执行评估，详细比对实际执行情况与规定的执行要求，并分析比较项目进度与计划，检查是否存在偏差。如果偏差较大应及时纠正处理，保障项目进度按合同要求推进。此外，小组成员应定期检查工程质量，保障质量执行标准，与工程合同约定的质量标准相符合，对于不符合质量标准的执行部分，应及时提出整改方案。

合同变更管理时，应加强对变更费用核算等工作的严格管理，根据合同中的计价规则要求，与工程项目变更后施工工序、工艺、工程量出现的具体变化确定费用。同时应加强变更申请、审批等流程环节的管理，保障变更的可行性。如对于项目设计导致的变更，设计部门应提交变更申请方案进行审批，并详细阐述变更原因。

四、结论

综上所述，基于建筑经济的合同管理效果，会直接影响公路工程的整体施工建设质量。必须聚焦工程合规建设与经济效益等方面建筑经济视角下公路工程合同管理意义，明确合同条款设计、工程量清单优化等管理要点，并采取完善合同流程等策略进一步优化管理，保障获得理想的合同管理效果，推动公路工程各项施工建设工作顺利开展。

参考文献

- [1] 崔永国. 公路施工图预算编制要点 [J]. 工程设计与设计, 2025, (05): 246-248.
- [2] 陶骏. 建设工程施工现场合同管理及其风险防范措施 [J]. 房地产世界, 2024, (12): 77-79.
- [3] 吴佳琳. 高速公路工程合同管理优化措施 [J]. 汽车周刊, 2025, (06): 196-198.

商业遥感卫星系统项目进度延误风险识别研究

杜兴强¹, 郭明珠¹, 杜立强²

1. 中国四维测绘技术有限公司, 北京 100091

2. 北京空间机电研究所, 北京 100094

DOI:10.61369/ME.2026020019

摘 要 : 商业遥感卫星系统项目具有技术复杂、周期长及多主体协同等特点, 进度延误问题频发且影响显著。围绕项目全生命周期, 梳理进度延误的主要风险来源, 从技术研发、供应链管理、任务集成与外部环境等维度进行系统分析, 构建风险识别框架与指标体系。结合典型项目案例, 对关键风险因素进行归纳与验证, 揭示各类风险对进度的作用机制与耦合关系。研究表明, 系统化风险识别能够有效提升项目进度管控的前瞻性与精准性, 为商业航天项目管理提供理论支持与实践参考。

关 键 词 : 商业遥感卫星; 进度延误; 风险识别; 项目管理; 系统工程

Research on Schedule Delay Risk Identification of Commercial Remote Sensing Satellite System Project

Du Xingqiang¹, Guo Mingzhu¹, Du Liqiang²

1. China Siwei Surveying and Mapping Technology Co., Ltd. Beijing 100091

2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094

Abstract : the commercial remote sensing satellite system project has the characteristics of complex technology, long cycle and multi-agent cooperation, and the schedule delay problem occurs frequently and has a significant impact. Around the whole life cycle of the project, the main risk sources of schedule delay are sorted out, and the system analysis is carried out from the dimensions of technology research and development, supply chain management, task integration and external environment to build a risk identification framework and index system. Combined with typical project cases, the key risk factors are summarized and verified, and the mechanism and coupling relationship of various risks on schedule are revealed. The results show that systematic risk identification can effectively improve the foresight and accuracy of project schedule control, and provide theoretical support and practical reference for commercial aerospace project management.

Keywords : commercial remote sensing satellite; progress delay; risk identification; project management; systems engineering

商业航天产业快速发展推动遥感卫星系统项目数量持续增长, 项目组织模式与实施环境日趋复杂, 进度管理面临更高不确定性。延误不仅影响经济收益, 还可能削弱企业市场竞争力与行业信誉。传统进度管理方法在多源风险交织的背景下难以有效识别关键影响因素, 有必要从系统视角对延误风险进行深入研究。围绕商业遥感卫星系统项目的特点, 探讨进度延误风险的识别路径与分析方法, 为提升项目执行效率与风险控制能力提供依据。

一、商业遥感卫星系统项目进度延误风险的形成机理与关键影响因素分析

(一) 复杂技术体系与研发不确定性对项目进度的影响机制研究

商业遥感卫星系统项目涉及众多技术领域和多个子系统的集成, 项目本身具备高度的技术复杂性。研发过程中的技术难题、

创新性要求和技术间的协同整合, 使得进度管理面临较大的不确定性。特别是在卫星系统的设计与制造阶段, 由于新技术的研发可能存在未知的技术瓶颈, 研发人员对新型技术的掌握进度和外部环境的适应性都会直接影响到项目的时间安排。技术难题的解决往往需要较长时间进行实验验证、测试和改进, 这些环节无法预见的延误会直接拖延整体进度^[1]。研发过程中的人员流动、技术难度加大和系统集成的复杂性都增加了项目进度的风险。这些

技术不确定性使得项目进度的规划和控制更加困难，因此需要建立有效的风险识别机制，对技术层面的潜在问题进行提前预判，以降低因技术难题带来的进度风险。

（二）供应链协同失衡与外部环境变化引发的进度风险识别

商业遥感卫星系统的研制不仅依赖于自身技术的进展，还涉及供应链中各类资源的协调与配合。供应链管理的失衡可能成为项目进度延误的重要风险源。具体来说，关键部件和原材料的供应不及时、零部件的质量问题以及供应商的生产能力波动都可能直接导致项目的中断或延误，尤其是当供应链环节过于依赖少数供应商时，这种风险愈加显著。与此同时，外部环境的变化，如政策调整、市场需求波动、自然灾害等因素，也会影响供应链的稳定性。这些外部环境因素的不可控性使得项目管理者难以提前做出准确的预测，进而影响进度安排。为了有效识别此类风险，需要对供应链的每个环节进行细致分析，并采取动态监控措施，确保供应链各环节的稳定性与高效性，以避免外部环境的突发变化对项目进度造成不可预测的影响。

二、面向全生命周期的进度延误风险识别框架构建与指标体系设计

（一）基于系统工程视角的进度延误风险识别模型构建路径

商业遥感卫星系统项目贯穿需求论证、方案设计、研制生产、在轨测试及运营应用等多个阶段，各阶段之间存在紧密的耦合关系与信息传递链条。基于系统工程视角构建进度延误风险识别模型，需要从整体性与层次性出发，对项目结构进行功能分解与过程映射，将复杂系统划分为若干相互关联的子系统与关键节点。在此基础上，围绕任务分解结构与工作分解结构，梳理各环节的输入输出关系与时间依赖特征，将潜在风险嵌入系统运行流程中进行识别^[2]。模型构建过程中需引入动态反馈机制，对关键路径上的不确定因素进行持续跟踪，同时结合系统耦合强度分析，识别可能引发连锁延误的关键节点。通过建立覆盖全生命周期的风险识别逻辑框架，使技术风险、管理风险与外部风险能够在统一模型中实现协同分析，从而提升风险识别的系统性与完整性。

（二）多维度风险指标筛选与分层分类识别方法研究

进度延误风险的有效识别依赖于科学合理的指标体系构建，需从多维度对风险要素进行系统梳理与筛选。结合商业遥感卫星项目特点，可从技术成熟度、资源保障程度、任务复杂度、组织协同水平及外部环境稳定性等方面提取关键指标，并通过专家评估与历史数据分析相结合的方式，对指标进行筛选与优化^[3]。在指标体系构建过程中，需按照风险来源与作用路径进行分层分类，将风险划分为战略层、管理层与执行层等不同层级，并进一步细化为可量化与可监测的具体指标。针对不同层级风险，建立相应的识别方法，如基于概率分析的定量评估方法与基于经验判断的定性识别方法相结合，以增强识别的准确性。同时，通过构建指标之间的关联关系网络，分析各类风险之间的传导路径与影响程度，使复杂风险结构能够在多维空间中得到清晰表达，从而

为后续进度控制提供数据支撑^[4]。

三、商业遥感卫星项目进度延误风险的关键因素分析与作用机制验证

（一）典型项目案例驱动的关键风险因素识别与特征提取

在分析商业遥感卫星项目进度延误风险时，典型项目案例提供了宝贵的经验与风险暴露信息。通过对历史案例的深入剖析，可识别出技术实现难度、资金保障不足、供应链不稳定、人员流动及外部政策变化等共性及个性化风险因素。结合风险发生时间节点、频率及对进度的量化影响，可提取不同风险因素的特征模式。例如，技术瓶颈与原材料供应滞后常为延误的直接原因，而政策调整与环境突发事件则主要引发间接影响。借助案例可建立风险因果关系模型，为预测进度延误提供基础数据，并通过成功与失败因素的对比分析，提炼有效的风险应对策略。上述分析揭示了关键风险因素的存在，而实际项目中的进度延误往往由多类风险在特定条件下相互作用、叠加放大所致，因此需进一步分析多源风险耦合作用下的延误形成机制^[5]。

（二）多源风险耦合作用下进度延误形成机制分析

在商业遥感卫星项目中，风险的形成往往不是单一因素造成的，而是多个风险源相互作用的结果。多源风险耦合作用的分析揭示了进度延误的复杂性和多维性。技术风险、管理风险、外部环境风险及供应链风险等因素常常在项目生命周期中交织在一起，彼此影响并叠加放大。例如，技术研发阶段的延迟可能导致关键组件未能按时供应，而供应链的不稳定又进一步加剧了项目延误的可能性。此外，项目中的各个阶段可能会因管理上的滞后或协调不当而导致时间节点的拖延，这种跨部门的管理风险与技术风险的耦合作用通常形成了恶性循环。通过建立系统性分析框架，利用多元数据挖掘与模型仿真技术，可以量化各类风险因素的相互作用及其对进度的集体影响^[6]。

四、提升商业遥感卫星系统项目进度管控能力的风险应对策略研究

（一）基于风险识别结果的进度优化控制方法与管理策略设计

在商业遥感卫星系统项目中，风险识别成果可以为进度管理和控制提供参考。基于识别的风险因素，可以提出一些进度优化和控制的办法来解决进度延误的问题。首先，利用风险评价的方法对项目的各个时期存在的各种风险进行量化的评价，确定每一个风险点的风险大小以及发生的可能性，在此基础上采取一些措施来规避这些风险；其次，在技术开发方面如果存在技术上的困难，可以通过增加技术人员的技术水平或者不同部门之间的合作，合理配置资源，加快技术的研发进度；再者，在供应链方面如果存在问题，可以从改进采购方式入手，寻找多家供应商并且制定应急方案来减少由于物料不能按时到位所带来的影响^[7]。最后，在管理上项目经理要根据实际情况及时调整项目计划，做好

沟通协调工作使项目能够顺利进行下去。

（二）构建动态监测与预警机制以强化项目进度风险防控能力

为了有效应对商业遥感卫星系统项目中的进度延误风险，构建动态监测与预警机制是关键。通过引入实时数据监控与风险预警技术，能够及时发现项目进度中的异常情况，并迅速采取应对措施。在项目执行过程中，采用智能化信息系统对项目的每个环节进行全程追踪，包括任务执行进度、关键设备的交付、供应链的稳定性以及技术研发的进展等^[8]。一旦监测系统发现与预设的时间节点存在偏差或风险因子触发阈值时，便自动启动预警机制，向相关管理人员发出风险警报，并提供相应的处理建议。这种动态监测系统能够显著提升对突发风险的反应速度，为项目管理者提供实时的决策支持。结合大数据分析 with 机器学习技术，预警机制不仅能基于历史数据预测潜在的风险趋势，还能够根据项目实际进展进行动态调整，确保项目进度始终保持在可控范围内。

（三）面向多源风险耦合的协同干预与韧性提升策略

商业遥感卫星项目进度延误常由技术、供应链、管理及外部环境等多源风险耦合所致，单一应对措施难以阻断风险的链式传导。为此，需构建面向风险耦合的协同干预机制。首先建立跨部

门、跨主体的风险协同应对平台，围绕关键风险因素制定联合预案，明确各方职责、资源调配路径与信息共享流程，打破组织壁垒。其次识别全生命周期中的高风险耦合节点，针对性引入冗余设计与弹性资源储备，如在研发阶段预留系统集成时间缓冲，在供应链上对关键部件构建“主备双源”模式，化解技术延迟与供应失衡叠加引发的连锁延误^[9]。再次，引入进度韧性管理理念，通过多源风险情景模拟与压力测试，动态优化资源调度与进度计划，确保项目在多重风险冲击下仍能保持核心路径稳定推进^[10]。

五、结语

商业遥感卫星系统项目进度延误风险源于技术研发、供应链协同、多主体管理与外部环境的复杂交织，风险间耦合效应显著。通过构建全生命周期风险识别框架与指标体系，结合典型案例分析，能够系统揭示关键风险因素及其作用机制。在此基础上，综合运用进度优化控制、动态监测预警及多源风险协同干预等策略，可有效提升项目进度的稳健性与抗扰动能力。未来需进一步探索智能化风险识别方法与动态韧性管理机制，以应对商业航天领域日益复杂的项目管理挑战。

参考文献

[1]王立科,雷朝阳,杨坤.航天技术应用产业孵化项目管理风险控制与策略探究[J].军民两用技术与产品,2025,(06):24-29.
[2]路轶晨.北京大力促进商业卫星遥感数据资源开发利用[N].中国电子报,2026-01-30(005).
[3]第三届商业航天遥感卫星应用大会暨首届空天信息与遥感卫星技术设备展览会在即[J].遥感信息,2025,40(04):92.
[4]韦树波,王钰昭.基于PEST模型的商业遥感卫星公司科研管理体系建设研究[J].中小企业管理与科技,2024,(22):66-69.
[5]万林涛,张连翀,李栋,等.星环号商业红外遥感卫星及其应用[J].卫星应用,2026,(01):58-60.
[6]汤秀,张兰庆,苏浩.浅析国外三大遥感卫星公司商业模式[J].卫星应用,2025,(11):59-64.
[7]崔少伟,张晓磊,张宜坤.中国商业卫星产业发展分析[J].中国航天,2025,(10):46-53.
[8]李德仁,王珈樱,王密.我国商业遥感卫星系统发展建议[J].卫星应用,2024,(05):6-10.
[9]李双宇,朱继东,贺博,等.中国四维商业遥感卫星系统建设及创新应用场景[J].卫星应用,2023,(10):20-27.
[10]戴阳利,龚燃.国外商业航天发展情况分析[J].卫星应用,2017,(10):22-27.

水利工程勘测设计中数字化工具研究

巩明

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2026020021

摘 要： 在信息技术飞速发展的大背景下，水利工程勘测设计领域正经历着从传统模式向数字化转型的深刻变革。本文以当前水利工程勘测设计领域的数字化工具应用为聚焦点，对地理信息系统、建筑信息模型、遥感技术与无人机、协同设计平台等核心工具类型进行系统梳理。文章对技术标准不统一、数据孤岛现象、人才技能滞后及软件国产化率低等现实困境展开深入剖析，并围绕强化标准建设、构建数据中台、加强人才培养、推进技术融合及优化管理流程等方面提出针对性的实践措施，以期为推动水利勘测设计行业的高质量发展提供理论层面的参考。

关 键 词： 水利工程；勘测设计；数字化工具

Research on Digital Tools in Survey and Design of Water Conservancy Projects

Gong Ming

Xinjiang Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： Against the backdrop of rapid information technology advancements, the field of hydraulic engineering survey and design is undergoing profound digital transformation from traditional models. This paper focuses on the application of digital tools in hydraulic engineering survey and design, systematically examining core technologies such as Geographic Information Systems (GIS), Building Information Modeling (BIM), remote sensing technologies and drones, and collaborative design platforms. The study conducts an in-depth analysis of practical challenges including inconsistent technical standards, data silos, outdated professional skills, and low domestic software adoption rates. Targeted practical measures are proposed to strengthen standardization frameworks, establish data integration platforms, enhance talent development, promote technological convergence, and optimize management processes. These insights aim to provide theoretical references for advancing high-quality development in the hydraulic engineering survey and design industry.

Keywords： hydraulic engineering; survey and design; digital tools

引言

在“数字中国”和“智慧水利”建设的宏观背景之下，作为国家基础设施建设关键所在的水利行业，正面临着效能提升与精准管控的双重需求。传统勘测设计手段对人工经验和二维图纸有所依赖，对于复杂工程全生命周期的管理要求已难以满足。随着大数据、云计算以及人工智能等新兴技术的渗透，水利勘测设计向数字化、智能化方向的迭代升级成为必然。在勘测、规划、设计等前端环节将数字化工具进行深度嵌入，这是提升工程品质、缩短建设周期、控制投资成本的关键突破口，也是实现水利现代化的重要技术支撑。

一、水利工程勘测设计中数字化工具类型

（一）地理信息系统（GIS）：空间数据管理之基

地理信息系统作为水利工程勘测设计阶段的核心空间数据载体，能够全方位整合流域范围内地形地貌、水文地质、土地权属以及生态红线等多维度海量空间信息，并且依托专属数据库完成各类数据的标准化存储、分层分类管理与动态更新，彻底打破传统纸质资料零散存储、调取低效的痛点。工作人员借助该系统可快速完成流域汇流分析、库区淹没范围测算、工程选址避让分析等核心工作，还能直观呈现工程区域内空间要素的分布规律与关

联关系，为前期规划论证、方案比选提供精准的空间数据支撑，同时适配不同规模水利工程的空间数据管理需求，兼顾基础测绘数据梳理与专项勘测数据整合，实用性极强。

（二）建筑信息模型（BIM）：工程设计协同之本

建筑信息模型聚焦水利工程全生命周期的三维可视化设计与多专业协同作业，核心是构建包含水工建筑物尺寸、材质、结构参数以及机电设备配置等全要素的数字化三维模型，并且实现设计信息从二维图纸向三维实体模型的完整转化，彻底解决传统二维设计中专业冲突、细节遗漏的行业难题。该模型可同步完成工程量精准核算、施工工序模拟、结构受力验算等延伸工作，水

工、地质、机电、施工等不同专业设计人员可基于同一模型开展并行设计，实时同步修改内容与设计思路，大幅压缩设计周期、降低设计返工率，还能后续施工交底、运维管理提供完整的数字化依据，真正打通设计与后续环节的信息壁垒。

（三）遥感与无人机勘测：地形采集感知之眼

在水利工程野外地形数据采集工作中，由遥感技术与无人机航测设备共同构建起高效的感知体系，这一体系可突破传统人工勘测存在的地形复杂、作业范围受限以及耗时耗力等局限，尤其适合山区、库区、沼泽等人员难以到达的复杂勘测区域。搭载着高清航摄相机与激光雷达设备的无人机，能够快速完成大范围地形航拍和三维点云数据采集任务，并同步生成高精度的数字高程模型与数字地表模型；而遥感技术则可以远距离获取工程区域内地表覆盖、水文变化、地质隐患等宏观信息。二者通过相互配合实现数据互补，不仅能保障地形数据采集的精度，提升野外勘测的作业效率，还能实时反馈现场勘测动态，让设计人员及时调整勘测方案与设计思路，在整个过程中减少野外作业风险。

（四）协同设计管理平台：数据流转交互之枢

水利工程数字化设计里，核心枢纽般的协同设计管理平台，负责着各类勘测数据、设计成果、技术文件的统一流转与高效交互。它可对 GIS 空间数据、BIM 三维模型、勘测原始资料、设计图纸等全品类工程资料进行整合，还搭建起跨部门、跨专业、跨地域的实时协作通道，将传统设计模式中数据传递滞后、版本混乱、沟通不畅的问题彻底解决。平台拥有文件权限管理、版本追溯、在线批注、成果归档等完整功能，设计人员在平台内可直接调取勘测数据来开展设计工作，完成的成果能实时同步至相关岗位，管理人员也可全程把控设计进度与成果质量，实现勘测设计全流程的数据闭环管理，使整个设计流程更顺畅、更规范，让团队整体协作效率与成果管控水平大幅提升。

二、水利工程勘测设计中数字化工具应用困境

（一）标准体系缺位：数据接口兼容之困

水利行业针对数字化勘测设计的专项技术标准尚未形成统一框架，不同软件开发厂商遵循的技术规范以及数据格式存在明显差异，各类 GIS、BIM 软件之间的数据接口无法实现无缝对接，勘测生成的原始地形数据、三维模型数据在跨软件调用时频繁出现丢包、失真问题。基层设计人员日常操作中，往往要花费大量时间手动转换数据格式，不仅拖慢工作进度，还容易引发数据误差，直接影响整体设计工作的推进效率^[1]。

（二）信息壁垒固化：业务环节流通之阻

水利工程勘测设计涉及勘测、规划、设计、审查以及管理等多个独立业务模块，多数单位依旧沿用传统分段作业模式，各环节之间的数据共享机制完全没有打通。勘测部门掌握的野外实测数据，无法直接同步至设计端用于 BIM 模型搭建，设计成果也难以快速传递至审查环节核验，各环节数据单独存储、封闭运行，硬生生形成了业务孤岛，导致跨环节协同作业流于形式，数字化工具的高效协同优势根本发挥不出来。

（三）技术能力断层：传统人员转型之难

水利勘测设计队伍中，资深从业人员长期深耕传统纸质图纸作业以及人工勘测模式，对 GIS 数据分析、BIM 建模、无人机数据处理这类数字化技术的接受速度偏慢，并且多数单位没有配套系统化的定向培训机制。基层设计人员日常忙于常规项目作业，没有充足时间自主钻研数字化工具操作技巧，专业技术能力出现明显断层，即便配备了先进软硬件设备，也只能用到基础功能，核心数字化应用场景完全无法落地。

（四）软件生态依赖：核心技术自主之忧

国内水利工程数字化勘测设计领域，高端设计软件以及核心算法模块依旧依赖国外进口产品，本土自主研发的适配软件功能不够完善，难以满足大型水利工程复杂设计需求。国外软件的底层架构以及数据接口不对外开放，后期升级维护完全受制于外部厂商，不仅使用成本居高不下，还存在核心工程数据泄露的潜在风险，长期依赖的现状也制约了国内水利数字化技术自主创新脚步，行业长远发展存在明显短板^[2]。

三、水利工程勘测设计中数字化工具应用实践措施

（一）统一数据标准：夯实互联互通技术底座

水利行业主管部门需牵头联合国内顶尖勘测设计单位、软件研发企业以及高校科研团队，组建专项标准编制工作组，结合水利工程勘测设计的全流程业务需求，制定覆盖数据采集、格式规范、接口对接以及成果交付的全链条统一技术标准，彻底解决不同软件、不同环节之间数据不兼容的核心问题。工作组要深入调研 GIS、BIM、无人机勘测等各类数字化工具的现有数据格式，梳理流域地形、水文地质、水工结构、机电设备为核心数据的分类编码规则，明确各类数据的存储格式、精度要求以及交互接口参数，并且将标准细化到野外勘测数据录入、三维模型构建、图纸输出、成果归档等每一个具体操作环节，避免基层人员执行时出现模糊地带。针对已有的存量勘测设计数据，安排专业团队按照新出台的统一标准完成格式转换与清洗梳理，搭建标准化的行业基础数据库，确保新老数据能够无缝衔接。

（二）搭建共享平台：打破专业领域信息孤岛

水利勘测设计单位要立足自身业务架构与项目开展流程，搭建集数据存储、信息交互、协同作业、成果管理于一体的数字化共享平台，将前期勘测、规划论证、多专业设计、审查校核、成果归档等全业务环节纳入同一平台管控，彻底打通各专业、各环节之间的信息壁垒，告别传统分段作业、数据封闭运行的落后模式^[3]。平台搭建要充分对接前文制定的统一数据标准，兼容 GIS 空间数据、BIM 三维模型、无人机点云数据、水文勘测数据等各类数字化成果，实现各类数据的一键调取、实时同步与多方共享，勘测人员在野外采集的地形数据、地质资料，可直接上传至平台云端，无需通过线下文件传输的方式传递给设计人员，设计人员登录平台即可调取最新数据开展三维建模与方案设计。

（三）强化人才建设：培育复合应用技术梯队

水利勘测设计单位要打破传统人才培养模式，聚焦数字化工

具落地应用需求,构建分层分类、理论与实操相结合的系统化人才培养体系,着力打造一批既精通水利专业技术,又熟练掌握数字化操作技能的复合型人才梯队,破解传统人员技术转型难、能力断层的困境。针对单位内部资深从业人员,这类人员拥有丰富的传统勘测设计经验,只是对数字化工具操作较为陌生,单位要定制专项转型培训课程,避开复杂的理论讲解,侧重实操教学,安排技术骨干一对一指导,重点教授 GIS 数据处理、BIM 基础建模、无人机数据解译、协同平台操作等实用技能,结合实际项目案例开展手把手教学,让老员工快速适应数字化作业模式,把自身经验优势与数字化工具结合起来。针对青年技术人员,这类人员接受新事物速度快,要开展进阶式培训,不仅覆盖基础工具操作,还要延伸至三维模型深化设计、数据可视化分析、工程模拟仿真等核心技能,同时鼓励青年员工参与科研项目与技术攻关,提升数字化技术应用深度。

(四) 推动技术融合:拓展数字工具应用边界

水利勘测设计单位要打破单一数字化工具独立应用的局限,推动 GIS、BIM、遥感无人机、大数据分析等各类数字技术的深度融合,拓展技术应用场景与覆盖范围,让数字化工具从单一环节辅助,延伸至勘测设计全周期、全方位应用,充分释放技术叠加优势。在前期野外勘测阶段,将无人机航测与遥感技术相结合,快速采集大范围地形数据与地表信息,同步导入 GIS 系统完成空间分析与数据处理,生成高精度的流域地形模型以及库区淹没分析报告,为工程选址提供精准依据,避免传统人工勘测的盲区与误差^[4]。在设计阶段,将 GIS 空间数据与 BIM 技术深度融合,把流域水文、地质、生态等空间信息直接嵌入 BIM 三维模型,构建包含地理环境与工程实体的一体化数字模型,不仅能完成常规的结构设计与工程量核算,还能模拟工程建成后的水文变化、生态影响以及施工建设过程,提前预判设计方案存在的隐患,优化设计细节。同时可引入大数据分析技术,整合历年水利工程勘测

设计数据、项目实施数据,通过数据分析提炼设计规律与优化方向,为新型水利工程设计提供参考。

(五) 优化管理机制:适配敏捷设计流程再造

水利勘测设计单位要围绕数字化作业模式的特点,优化现有内部管理机制,摒弃传统粗放式、分段式的管理模式,重构适配数字化工具运行的敏捷设计流程,实现管理模式与技术应用的同频适配,保障数字化应用落地见效。首先调整项目管理架构,打破传统按专业划分的部门壁垒,成立跨专业的数字化项目工作组,实行项目负责人统筹负责制,整合勘测、设计、审核、管理等全岗位人员,围绕同一项目开展协同作业,明确各岗位在数字化流程中的职责分工,避免出现责任推诿、流程脱节的情况。其次优化设计审批流程,依托数字化共享平台简化线下审批环节,将传统的层层纸质报审,改为线上流程化审批,设计成果上传平台后,审核人员实时在线核验、出具意见,审批进度全程可查,大幅压缩审批耗时,打造敏捷高效的设计流程。同时建立数字化成果质量管控机制,针对数据采集精度、模型构建标准、图纸设计规范等制定专项质控细则,安排专人依托数字化工具开展全程质量校核,利用软件自动校验与人工复核相结合的方式,及时发现并整改数据错误、设计缺陷,保障数字化成果质量。

四、结束语

在水利工程勘测设计的各个环节,数字化工具已有深度渗透,成为行业生产力提升的关键要素。技术迭代与应用落地过程中存在诸多挑战,需以标准先行的方式打破数据壁垒,以平台思维促进业务协同,以人才战略支撑技术创新。只有把数字化工具与水利专业需求深度融合,才能让其降本增效、风险预控等方面的巨大潜力得到真正发挥,为构建系统完备、智能绿色的现代化水利基础设施体系注入强劲动能。

参考文献

- [1] 高庆保. 水利工程勘察设计与施工中数字化工具的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2022, (18): 100-102.
- [2] 刘双喜. 数字化工具在水利工程勘测设计和施工中的应用 [J]. 科学技术创新, 2017, (19): 66-67.
- [3] 牛晓宁, 张雷. 水利工程勘探设计和施工中数字化工具的应用解析 [J]. 科技展望, 2015, 25(01): 68.
- [4] 曹黎明. 数字化工具在水利工程勘测设计和施工中的应用 [J]. 农业科技与信息, 2010, (20): 45-46.

城市近郊通江闸控河流水质波动成因与整治策略 ——以白塔河为例

王根兵

扬州市江都生态环境局, 江苏 扬州 225200

DOI:10.61369/ME.2026020029

摘 要 : 针对江苏省扬州市江都区白塔河桥省考断面2026年1月水质由Ⅲ类下降为Ⅳ类的异常波动现象, 依据近三年(2023—2025年)水质监测数据与现场溯源排查结果, 系统剖析了水质下降的多维成因, 并提出针对性整治方针。结果表明, 水质波动是多因素叠加的结果: 枯水期水闸关闭致使的水体滞流、自净能力不足是根本原因; 已建水质增强工程未正常运行削弱了污染削减能力; 生活污水收集管网不精进及沿岸餐饮摊点直排构成持续点源输入; 农业面源随泄洪进入并在闸控下滞留, 叠加密集垂钓活动等人为干扰, 共同加重了有机物污染负荷。研究提出, 保障河流生态基流、修复工程效能、实行准确控源截污以及生态修复、强化常态化监管是增强和稳定白塔河水质的重点途径。该实例显示了闸控城市河流水质管理的复杂性, 重点说明了系统治理与精细化管理的重要性。

关 键 词 : 水质波动; 闸控河流; 生态基流; 面源污染; 达标整治; 白塔河

Analysis of the Causes of River Water Quality Fluctuation in the Surrounding Areas of the City and the Remediation Strategies — Taking Bai Ta River as an Example

Wang Genbing

Yangzhou Jiangdu Environmental Protection Bureau, Yangzhou, Jiangsu 225200

Abstract : In response to the abnormal water quality fluctuation phenomenon of the Bai Ta River at the provincial monitoring section in Yangzhou, Jiangdu District, Jiangsu Province, which dropped from Class III to Class IV in January 2026, based on the water quality monitoring data from the past three years (2023 – 2025) and the on-site investigation results, this paper systematically analyzed the multi-dimensional causes of the water quality decline and proposed targeted remediation policies. The results show that the water quality fluctuation is the result of multiple factors: the closure of the sluice gate during the dry season causing water body stagnation and insufficient self-purification ability is the fundamental reason; the non-normal operation of the established water quality enhancement projects weakened the pollution reduction capacity; the unimproved collection network for domestic sewage and the direct discharge from roadside food stalls constituted continuous point source input; agricultural non-point sources entering through the flood discharge and remaining under sluice control, combined with dense fishing activities and other human disturbances, jointly aggravated the organic matter pollution load. The study proposes that ensuring the ecological base flow of the river, restoring the effectiveness of the projects, implementing accurate source control and interception, as well as ecological restoration, strengthening regular supervision are the key approaches to enhancing and stabilizing the water quality of Bai Ta River. This example demonstrates the complexity of river water quality management through sluice control and highlights the importance of systematic governance and refined management.

Keywords : water quality fluctuation; sluice-controlled river; ecological base flow; non-point source pollution; compliance remediation; Bai Ta river

引言

城市近郊河流作为连接城市与自然生态系统的重要廊道, 不光承担着行洪排涝、生态涵养的功能, 也是区域水环境质量考核的核心

载体。可是，受城市化进程、农业生产活动和水利工程调控等多重因素影响，此类河流的水质稳定达标面对严峻考验^[1]。特别对于设有节制闸的河流，水文条件的改变大多变成水质波动的直接诱因^[2]。

白塔河作为江苏省扬州市江都区两条重要的通江支流之一，其省考断面——白塔河桥的水质状况直接关系到区域水环境质量的整体评定。2026年1月，该断面水质由Ⅲ类下降为Ⅳ类，主要超标因子为五日生化需氧量（BOD₅），同样高锰酸盐指数（COD_{Mn}）以及化学需氧量（COD）接近临界值。针对这一现象，本研究依据溯源排查以及整治方案编制工作，从水文条件、工程效能、污染源管控及人为活动等维度融合诊断水质下降成因，并提出系统治理方略，希望为我国南方水网地区同类闸控河流的水环境精细化管理给予专业参照。

一、材料与方法

（一）研究区概况

白塔河地处江苏省扬州市江都区，北起通扬运河，流经宜陵、吴桥、大桥三镇，南至河口闸汇入长江，全长约22公里，其中大桥镇段长约16公里，该河是区域核心的行洪通道以及生态廊道，河道建有大桥闸、河口闸等控制性的水工建筑物，对区域水量调控有着决定性的作用。

（二）数据来源

江都生态环境局给予了研究数据，包含2023年1月至2025年12月白塔河桥省考断面及部分支流的常规水质监测数据，还有2026年1月水质下降后启动的专项溯源排查结果，水质样品采集以及实验室分析均严格遵循《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）的相关要求。

（三）分析方法

使用趋势分析法研究近三年主要污染因子（高锰酸盐指数、化学需氧量）的月均值变化规律。融合现场踏勘、污染源解析及工程效能评估，从水文条件、外源输入、内源释放及人为干扰四方面融合诊断水质下降的深层原因。

二、结果与分析

（一）水质变化趋势与特征

近三年监测数据显示，白塔河桥断面年度水质虽能维持在Ⅱ~Ⅲ类，但月度波动剧烈，稳定性差（图1）。具体表现为：①周期性波动明显，水质恶化多发生在枯水期（如2024年2—4月）或汛期初期（如2023年7月、2025年6月）；②特征污染因子集中，超标或接近临界值的因子始终围绕耗氧性有机物（高锰酸盐指数、化学需氧量及五日生化需氧量），说明水体有机污染负荷持续偏高，自净能力不足；③2026年1月水质恶化，在枯水期背景下水质由Ⅲ类降至Ⅳ类，BOD₅变成新增主要超标因子，暗示近期可能存在有机污染物突增或溶解氧水平急剧下降。

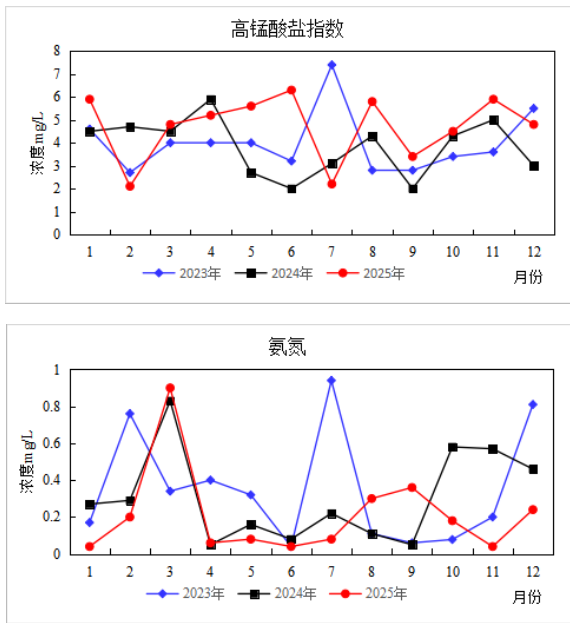
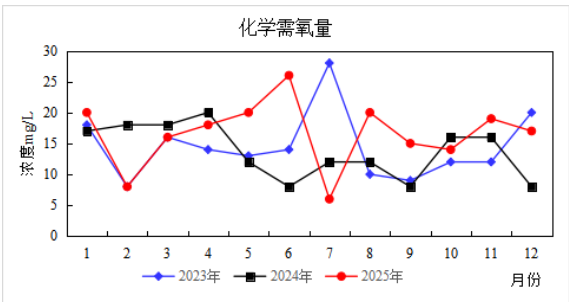


图1 白塔河桥断面主要污染因子月均值变化趋势（2023—2025年）

Figure 1 Monthly variation trend of main pollution factors at Baitahe Bridge section (2023–2025)

（二）水质下降成因诊断

融合分析表明，2026年初的水质下降是“水文条件不利、治理设施闲置、污染管控薄弱”共同作用的结果。

1. 水文条件的刚性制约

大桥闸至河口闸长约4.8 km的河段，枯水期（12月至次年3月）因降雨的减少跟水闸的长期关闭，该河段基本沦为“死水区”，水体滞流严重地限制了复氧的能力以及污染物的稀释扩散^[3]，除了上述所说，水生植物的季节性死亡及藻类的衰解会大量耗氧并释放有机物，更深一步激化水体内部的耗氧负荷^[4]。除了上述内容以外，汛期上游的农业面源随泄洪进入河道，汛后关闸则滞留于此，形成污染物的“汇”，持续改变水质。

2. 治理工程效能的缺失

2024年6月建成的白塔河水质增进工程本应是削减污染的核心防线，但因未完成竣工验收而长期停运，设计的水质净化功能完全失效，这折射出环境基础设施的建设以及运行管理脱节的问题，使得应接水质波动的工程能力严重不足。

3. 点源与面源污染的交织

生活源污染方面，中闸片区管网的不精进及沿河管网的破损使得生活污水直排；中海生活区外围的违章搭建以及密集餐饮摊

点属于非正规点源，产生的高浓度有机污水直排入河，是COD、NH₃-N、BOD₅升高的直接原因之一。农业面源污染立场下，上游宜陵、吴桥等镇的农业种植和畜禽养殖产生的污染物，在降雨径流的冲刷下进入河道，构成区域性面源污染背景。

4. 人为活动的干扰

断面周边的环境中，频繁的垂钓活动投放的饵料含有大量的有机物以及营养盐，直接地加重了水体负荷，饵料溶解渗出、鱼类排泄物还有随意丢弃的废弃物，一同使得局部水质变差。

三、讨论

白塔河例证显示了目前城市近郊闸控河流水质管理的多个共性问题。

水闸调度以及水质协同管理方面急切需要加强相关工作，传统闸坝调度服务于防洪排涝跟水资源储蓄，大多忽视河流生态健康^[5]，本研究区枯水期关闸蓄水虽保障了水量，却切断了河流与长江的水力联系，使得生态系统服务功能退化。建立考虑生态基流需求的精细化水闸调度方案，并对核心闸坝实行生态化改造（如河口闸改造），是实现水质根本好转的前提。

审视治理的效能，环境基础设施“建管脱节”是明显的“短板”，投入资金建设的环境工程，因验收、运维等后续环节滞后而变成“晒太阳”的工程，造成资源的浪费，必须建立工程建设到长效运维的全周期管理机制，保证治理设施“建成即投用、投用即见效”。

环境监管精细化观点下，“小微”污染源的管控不可忽视，大型点源对比下，沿岸的餐饮摊点、违章搭建区的生活污水等“小微”污染源因分散性、隐蔽性，常沦为监管的盲区，白塔河COD、NH₃-N、BOD₅升高，很可能与此类近距离直排污水的贡献高度相关。这说明环境管理需向“神经末梢”延伸，执行精细化的网格管理。

水质保障体系的健全需要将公众环境行为管理纳入，垂钓等亲水活动在人口稠密的城市近郊河流的累积效应明显，设立禁钓

区、加强宣传教育等软性管理手段，指引公众参加水环境保护，是巩固治理成效的社会基础。

四、结论与对策

依据水质治理的专业观点，针对白塔河桥断面水质波动的难题，本研究拟定了一套系统的整治方案。

a) 实行“活水提质”工程，破解水文瓶颈，短期来看，属地政府（大桥镇）需建立常态化夹江补水机制，保障4.8 km问题河段基本生态流量；长期来看，水利部门牵头启动河口闸改造加强工程，增强区域水体流动性，从根源增进水体自净能力。

b) 工程效能激活方面，应立即组织已建水质增强工程的竣工验收并投入运行，同样由主管部门牵头审核并改良该河段水体的内循环体系，最大化地利用工程措施削减污染负荷。

c) 围绕加强的控源截污实行准确治理，在点源清零层面，集中整治中海的生活区周边的违章搭建跟餐饮摊点，严查污水直排，加速助推中闸片区的污水管网建设以及沿河管网排查修复，做到生活污水全收集、全处理；在面源削减层面，于二级支流入河口等核心区域建设生态安全缓冲区，借助生态塘、湿地系统削减入河污染。

d) 生态修复强化方面，白塔河大桥闸至河口闸段试点建设人工水草净化带，利用生物膜技术增强水体有机物的原位降解，加强水质稳定达标水平。

e) 为健全长效监管、防范环境风险，智慧监管领域加密水质监测频次，设立水质预警机制，联动巡查环节建立多部门联合巡河机制，及时发现且处置排污、水面漂浮物等问题；公众参加环节设立禁钓区警示标识，设立常态化巡查劝导机制，严格管理垂钓等亲水活动，减少人为活动给水体带来的负面作用。

靠着“活水、通脉、强基、固本”的系统治理举措，有望尽快地扭转白塔河水质波动局面，能给同类型的城市河流水环境治理给予可复制的经验。

参考文献

- [1] 王浩, 严登华. 中国水环境治理的现状、问题与对策 [J]. 环境保护, 2018, 46(2): 13-17.
- [2] 张永勇, 陈求稳, 夏军. 闸坝对河流水质水量影响及其调控研究进展 [J]. 水利学报, 2011, 42(5): 537-544.
- [3] 金相灿. 湖泊富营养化控制理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] 王国祥以及濮培民在《应用生态学报》2001年第12卷第3期发表的研究中讨论了水生植物腐烂分解对水质的作用, 相关内容见第429至432页。
- [5] 董哲仁. 河流生态修复的尺度层次 [J]. 水利学报, 2003, 34(8): 1-6.
- [6] 赵长进, 陈钢, 杨汉杰, 等. 南方典型闸控河口水质风险转变及调度方案 [J]. 中国环境专业, 2023, 43(7): 3644-3654.
- [7] 刘萌斐, 焦涛, 贾俊杰. 感潮闸控河网区水污染特征及控制断面水质达标方案研究 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(3): 192-195.

地质测量在井工煤矿安全生产中的应用研究

徐宏强

天地（榆林）开采工程技术有限公司，陕西 榆林 719300

DOI:10.61369/ME.2026020031

摘 要：井工煤矿开采生产是地质测量的关键技术之一，关系着地质测量在井工煤矿的安全性。安全是防线，为了能够保证开采工作的有效进行，本文针对地质测量在煤矿安全生产重要性为主，探析地质测量在井工煤矿安全生产中的应用为依据，结合测图制作、空间管理安全信息系统、数据统计为依据来完善安全应用，提出优化提升策略，充分发挥地质测量的保障作用，同时还要坚持以智能化、科学化技术的渗透，优化安全生产，为井工煤矿生产提升新标准和新进程。

关 键 词：地质测量；井工煤矿；安全生产

Research on the Application of Geomapping in the Safety Production of Underground Coal Mines

Xu Hongqiang

Tian Di (Yulin) Mining Engineering Technology Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719300

Abstract：Underground coal mining production is one of the key technologies in geological mapping, and it is related to the safety of geological mapping in underground coal mines. Safety is the defense line. In order to ensure the effective conduct of mining operations, this paper focuses on the importance of geological mapping in the safety production of coal mines, analyzes the application of geological mapping in the safety production of underground coal mines as the basis, and combines mapping production, spatial management safety information system, and data statistics as the basis to improve safety applications, proposes optimization and improvement strategies, fully exert the guarantee role of geological mapping, and at the same time, adhere to the penetration of intelligent and scientific technologies, optimize safety production, and raise new standards and new processes for underground coal mine production.

Keywords：geomapping; underground coal mines; safety production

引言

能源是带动我国经济发展的基石，煤炭是我国支撑社会经济可持续运行的根源，井工煤矿是地质测量工作的形式之一，从作业环境、地质情况多变量来说有很大的风险。传统技术的开采已经无法满足现代技术的需求，从源头上实施把控，现代化的精准信息感知、有效的动态监测和科学性的预判是引领井工煤矿安全生产的前沿；为了能够完善生产安全的标准化、智能化支撑、完善的应用体系就要坚持可持续发展道路，保证地质测量在井工煤矿高效性和安全性。为此，本文结合地质测量在井工煤矿生产中的应用和安全为主题，展开讨论和分析，不足之处尽请谅解。

一、地质测量在煤矿安全生产中的重要性

（一）煤矿地质构造对安全生产的影响

地质测量工作中，煤矿生产建设工作带有一定的技术支撑，地质测量数据是矿井安全的源头，很多工序需要数据存储，对于一些地质资料不全面的现象，会出现方向偏差，采掘位置失控，断层和水质问题的判断失误，这一系列的问题会导致煤矿地质的垮落，还有瓦斯异常等重大风险，因此必须加强地质测量工作，需要专业的技术指导工作。其次，在生成和运行上存在影响，地

质测量成果直接决定了开采计划、分项布置、支护及施工进度等，前期的准备工作上需要精准测量偏差，完善施工的一次性需求减少不断返工，从根本上提高了生成效率和降低成本；同时还要结合地质构造的多变性问题进行分析，统筹通风系统和排水系统的构造；在地质构造上，结合煤炭开采的技术要点和井工煤矿的周边特点，统计数据，构造的坚固性和稳定性是支撑煤炭行业的冲击，强化安全的范畴，因此，要结合地质测量输欧段对煤矿构造来进行分析和研究，对特殊地质构造要进行特殊出来了，还要提供有效的数据，为煤炭事业的安全性带来保障。

（二）地质测量在煤矿安全生产中的作用

首先，地质测量是煤矿开采的基础，贯穿着井工煤矿的勘测、设计和验收闭环管理，前期要做好的就是精准的排查地质隐患问题，防止安全的特大事故，煤矿井下作业多变复杂，是引发突水、瓦斯爆炸等事故的直接因素，在整个生产线上，结合地质勘测和水文勘测等监测手段，能够提前对井下地质构造进行分布，精准圈定的危险地区，结合开采的布置和方向提供安全的依据，从根源上规避突发事件，保证安全隐患防控。其次，完善的保障开采施工，筑牢安全生产作业是基础，在井工煤矿开掘构造上，需要全面的技术作业，对施工精度要求很高，一旦出现方向偏差，极易导致贯穿失误、煤层断裂、支护失效等现象；因此，在地质测量上以科学性数据进行测量和标定，严格把控各个巷道构造，不管是方向还是坡度及位置，都要确保开采按合理的设计流程施工，保证各个巷道的贯穿性，避免因施工偏差带来的安全风险。再次，坚持科学智能化监测系统，有效的防止地质灾害，对于开采作业来说，事故的频发率比较高，在周边岩层上和压力变化上都是引发顶板的垮落，对地面冲击力比较大，因此，需要借助现代化技术的设备，对周边的围岩进行分析，结合地表的距离进行测试，在岩层的压力上需要精准的给出数据，实施24小时动态跟踪，获取数据的变化，并有专业人进行数据分析，一旦出现数据异常，第一时间进行警告，为现场作业人员的安全和调整方案带来了保障。

（三）科学布置，提高生产效益

现代煤矿开采中地质测量工作需要提高精准测量和科学应用，地质测量的精准化可以提高资源配置，降低损耗，提升生产效益，在资源配置上，不可盲目的去开采，要提高精准数据测量和储存计算，避免出现破坏，做到见好就收这样可以提高煤炭的回收，将现有的储存资源转化现有实际经济资源。还要科学布局工作流程，依托精准的数据，设计可优化的部门布置，避开一些比较复杂的构造，减少资源的浪费，缩短工作周期，提高整个开采的空间保障。同时，在材料耗材上，对于地压数据和相关周边岩石数据，需要科学的支护手段，在支护方案上，优选材料的精准度，例如钢筋、水泥等材料，避免操作不当，出现返工浪费现象，材料消耗的合理性，也是降低成本的关键。在生产过程中，适当的减少停工现象，保证工期稳定的进行也是提高生产效益的关键，前期的测量手段可以避免突发状况，从源头上减少停工整顿，返工修复的实际，保证采掘计划的有序推荐，使得生产效益最大化。

二、探析地质测量在井工煤矿安全生产中的应用

（一）煤矿地质勘测图的制作与分析

煤矿地质勘测图的制作与分析是关系着生产安全的基础，在前期规划上，需要结合矿区的地质条件和位置及分层进行高精度分析，统计相关数据为开采工作提供参考数值，然而地质勘测图主要是以现代三维构建模型来分析周边的地质情况和特征，帮助技术人员对开采作业前期的整合和规划带来帮助，三维构建不仅

可以构建地图还可以直观的勘测位置的薄弱地方，结合三维模式直观的看到地质变化和预防风险问题，还要通过勘测图的分析，让技术人员明确地质薄弱的环节，从而加固防御措施；然而对于地质勘测图的分析来说，科学性的定制可以有效的对煤矿进行开采设计，还可以判断煤层的厚度、倾角识别厚度和冲刷性能，优化开采的布置避免出现无效进度，同时还可以结合储存计算功能，合理的回收煤炭规划设计，勘测图可以说是矿井的眼睛，他制作的质量直接决定地质的可靠性和安全生产，因此规范合理的制图，动态实施更新，科学的分析，是提高井工煤矿安全高效的重要保障。

（二）地测空间管理信息系统的功能与应用

首先，针对地测空间管理信息系统来说是专业的地理信息系统，直属矿山开采的应用，主要是结合地质条件、测量数据、水文特点及储量数据一体化的核心技术，在煤矿开采前期需要准备数据管理，结合测量，水文等数据，统一进行归类管理，还要以智能化进行，全方面实施汇总流程，使得图形和属性数据动态关联，对空间管理进行全面更新的效果。其次，在测量数据自动校正上，结合测量的台账，和动态填绘的效果，在井上井下进行统一管理，在空间数据上进行自动调整。其次，在自动生成图纸上，结合勘测图和岩层对比图，进行协同分析，提取相关数据进行对比，同时还要联动修改，使各个部门开采工作能够完善工作，确保协同性。

（三）地质测量数据在煤矿安全生产中的应用

地质测量数据是煤矿地质的地质条件和空间位置，主要结合精准设计和科学依据为前提，在基础测量数据上，能够清晰的对井上井下的内部环境进行分析，结合测量和导线及高成测量，采集空间位置与形态，产生的数据和动态监测可以传递道技术人员。还可以通过精确的地质数据，作业人员能够从地质测量数据中，有效的分析地质结构和特征，预估岩层的各种风险，并且结合地质的区域完善支护结构和设计，降低坍塌的风险，在巷道和工作设计上，要从源头控险，避开所有的断层带和防水带，减少顶板的风险和突水情况，从而保证开掘部署空间关系，防止出现误投的现象；在地质编辑上坚持预判顶板的稳定性，避免因断层或陷落引发的生产中断。因此，地质测量数据是比较关键的，不仅是测量设备和数据的有效依据，还可以提高测量的精确性和时效性。

三、如何做好地质测量在井工煤矿安全的应用

（一）强化测量工作质量管理

首先，完善测量工作管理是煤矿开采的重要组成部分，煤矿地质测量是煤矿采掘中的重要环节，地质测量是井工煤矿安全的导航仪，巷道开掘和工作面上采集精准管理，主要体现在测量标定中线，严格把控掘进的方向和坡度，避免出现设计偏离，同时还要结合方位导向的失误，避免出现返工问题，在测量工作上要结合煤层厚度和走向机器划定的边界，把控采高推进度，为工作安全开采提供空间定位，避免超额开采和垮落的安全风险。其

次，在地质构造探测和灾害预警上，井上断层、破碎等地质构造是引发事故的主要原因，地质测量是通过三维勘测和导线测量等技术手段，提前探明地质构造的位置和规模及发育程度，通过绘制剖面图为矿井指定的支护方案和布局，为煤矿采掘提供科学依据。强化测量工作质量管理的措施上，需要严格把控测量中的质量管控，遵循从高到低真的测量原则，严格执行反复测量的校验，消除误差；严禁出现伪造和篡改等现象，最后，就是要加强专业队伍的建设，提升人员素质培养，定期组织地质测量人员的培训工作，从知识理论、仪器操作、数据统计、安全规则上，提升人员专业技能，强化责任意识教育，让测量人员深刻认识质量的安全性，同时还要定期进行人员培训，打造技术过硬和责任心强的队伍。

（二）引入信息化、智能化科学技术

煤矿地质测量工作引入信息科学技术，就要结合高精度感知系统和数据采集技术，结合物联网和地测融合，来完善测量工作。智能化技术主要结合三维激光仪器、无人机航测来实现井下工作，通过云采集提升工作效率减少人员的安全风险；在进行槽波地震和地质雷达工作上，该技术可以超前识别断层、瓦斯富集区，精准的规避了一些风险，还结合多源传感网络，对地应力和水压、温度等传感器进行全方位、全天候数据上传工作，保证每个部门能够清楚自己的工作范畴和注意事项；智能预警与安全防护技术，结合全方面的信息化，动态预警的结构，进行布局监测，如一旦发现动力冲击的现象，设备会出现预警，准确率高；在井下场景上，需要同步地质和设备及相关人员的状态，模拟灾害需要结合应急方案、优化开采路径，通过自发式预案，完善应急能力，同时还可以通过 AI 智能化技术，提前判断历史灾害数据，去有效的判断和识别规律，提前做好风险预测和灾害预测的防控。信息化科学技术可以提高测量的准确性，还可以结合不同的天气和地域条件进行测量，提高了效率和使用性，降低了传统测量技术的误差，和预测风险的警报系统。因此，未来趋势是大

规模的深度融合数据，不仅可以完善智能化解释还建立自动预警，智能钻机机器人的使用也势在必行，使得作业流程实现动态管控和全程透明化操作。

（三）提高人员地质测量的水平

首先，强化专业理论知识，夯实专业素养，在进行开展地质测量等专业技术，需要专业的人员进行统筹，定期组织业务培训和学习，以基础知识为主，还要结合新规范完善智能化标准学习和培训，强化安全优势。加强风险评估意识教育，从源头上控制地质灾害的冲击，结合相关典型事例，树立数据精准的安全理念。其次，提升操作技能，规范作业流程，在强化测量工作时，需要结合地质的基础训练为主，严格执行一个人操作多人验收的制度，确保数据的真实有效，同时还要提高新技术的培训，要求每个作业人员都要熟练掌握智能装备系统的应用，会操作测量，同时还会结合数据分析故障问题。完善优质的考核制度，稳实岗位责任，坚持理论结合、图纸质量还要预报准确性来考核，坚持持证上岗，和专业能力上岗原则，同时还不断推动老带新的原则，加快新时代青年的成长，为煤炭地质测量在煤矿安全生产提升新的赛道。

四、结束语

综上所述，随着科技技术不断的发展，煤矿地质测量技术的应用也迫在眉睫，本文结合生产安全的重要性来展开分析，结合数据测量和数据分析、地质勘测图的制作，智能化技术的辅助来降低煤矿生产的安全风险，同时还结合 AI 监测手段，全方位的技术监测，并建立预警系统，保障了现代化煤矿事业的发展，在此不断培养专业技术作人员，利用科学化、智能化技术的优势，为地质测量在井工煤矿安全生产带来保障，因此，高效性、精准性的技术是煤炭事业可持续发展的必经之路。

参考文献

- [1] 常艳斌, 周家荣. 论煤矿地质测量工作在安全生产中的作用 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(1): 175-177.
- [2] 邢煌灿, 刘芳菲. 地质测量在煤矿井下安全生产中的作用 [J]. 矿业装备, 2024(1): 112-114.
- [3] 李显军, 马进钟. 煤矿地质测量在煤矿安全生产过程中的作用 [J]. 山西冶金, 2025, 45(3): 127-129.
- [4] 李倩楠, 翟封. 浅谈煤矿安全生产过程煤矿地质测量的作用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(23): 210-212.
- [5] 宋志鹏, 陈鑫. 煤矿地质测量在煤矿安全质量生产过程中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 41(10): 140-141.
- [6] 王海燕, 朱雁明. 论煤矿地质测量在煤矿安全生产过程中的作用 [J]. 当代化工研究, 2024(7): 54-55.

深度调峰工况下火电厂热力设备腐蚀行为预测模型研究

赵小娇

黄陵矿业集团有限公司, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ME.2026020035

摘 要 : 随着火电机组深度调峰的常态化, 热力参数波动大, 设备腐蚀问题日益突出。针对传统静态预测模型在变工况条件下准确性不足的问题, 本文分析调峰过程中多参数耦合作用机理, 建立基于机理分析和支持向量回归 (SVR) 的动态预报模型, 提取温度、压强等特征构建预测框架。应用实践表明, 本研究的成果可为电厂优化水质调控策略、延缓设备寿命损失提供可靠技术支持。

关 键 词 : 深度调峰; 火电厂; 热力设备; 腐蚀预测; 数学模型

Research on Corrosion Behavior Prediction Models for Thermal Equipment in Thermal Power Plants Under Deep Peak Shaving Conditions

Zhao Xiaojiao

Huangling Mining Group Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000

Abstract : With the normalization of deep peak shaving in thermal power units, significant fluctuations in thermal parameters have led to increasingly prominent equipment corrosion issues. Addressing the inaccuracies of traditional static prediction models under variable operating conditions, this study analyzes the multi-parameter coupling mechanisms during peak shaving. A dynamic forecasting model based on mechanism analysis and Support Vector Regression (SVR) is established, incorporating features such as temperature and pressure to construct the prediction framework. Practical application demonstrates that the findings provide reliable technical support for optimizing water quality control strategies and delaying equipment life loss in power plants.

Keywords : deep peak shaving; thermal power plant; thermal equipment; corrosion prediction; mathematical model

随着“双碳”战略的实施, 以风电、光伏为代表的间歇性新能源大规模接入电网, 对电网调峰能力提出了严峻挑战。大型火电机组作为电网的基础支撑电源, 必然要频繁地进行深度调峰。在深度调峰条件下, 机组负荷往往需要在超低负荷和额定负荷间快速切换^[1]。大范围高频率变工况完全打破了热力设备原有稳定的服役环境。蒸汽系统内流体工况随负荷变化而发生剧烈变化, 致使管内壁面临复杂应力交变和水化学环境退化, 极易引发流动加速腐蚀、应力腐蚀等多种损伤形式^[2]。长期以来, 火电厂热力设备的腐蚀监测主要依靠离线水质检测和定期停机监测, 缺乏对运行工况变化的实时追踪能力。已有腐蚀预测模型多基于稳态负荷下的经验公式, 很难准确反映深度调峰过程中参数剧烈波动引起的腐蚀率非线性激增现象。因此, 探索热力设备在变负荷工况下的腐蚀演化规律, 建立高精度动态预报模型, 是保障火电机组安全、经济运行的迫切需求。

一、深度调峰期热力系统运行特性

(一) 关键热力参数动态响应特征

当火电机组执行深度调峰命令时, 锅炉的燃烧率、进汽量和给水泵的转速都会发生较大的变化。这一系统的调整直接导致了给水与蒸汽在温压、流量等方面的强烈动态响应。在降低负荷时, 主蒸汽压力、温度急剧下降, 给水量也随之急剧下降。受系统热惯性的影响, 管壁温度下降速度往往滞后于流体降温速度, 厚壁构件内壁不可避免地产生剧烈的瞬态热应力^[3]。在变工况条

件下, 管壁瞬态热应力可用以下公式近似计算:

$$\sigma = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\nu} f(Bi, Fo) \quad (1)$$

其中, E是金属材料的弹性模量; ΔT 为管道内、外瞬态温度差; $f(Bi, Fo)$ 为含毕奥数 (Bi) 和傅里叶数 (Fo) 的瞬态热传导修正函数; α 为金属的线膨胀系数; ν 为泊松比。这种交变的热应力不仅导致了金属的疲劳, 而且也破坏了已有的钝化保护层。同时, 管内流体雷诺数随工质流动速度的减小而变化, 近壁区边界层厚度增大, 传质阻力增大。在超低负荷运行工况下, 除氧效果

急剧下降，除氧器进水压力不足，给水溶解氧浓度容易发生超限波动。

（二）气液两相流态演变规律与传质模型

除单相流体参数波动之外，深度调峰还容易诱发局部管网内气-液两相流动形态发生突变。尤其是低压加热器疏水管和省煤器入口段，由于负荷骤降引起的系统压力骤降，导致局部工质闪蒸，形成高速汽液两相流动。在弯头、三通和节流孔板等局部阻力部位，将产生强烈的冲刷和剥离效应。在交变切应力与汽泡溃灭微射流的共同作用下，原本致密的四氧化三铁保护膜迅速破碎、剥落^[4]。

在流动加速腐蚀（FAC）过程中，金属基体材料的损失速率主要由界面质量传递过程决定，其传质速率可用基本方程来描述：

$$J = K(C_{eq} - C_b) \quad (2)$$

其中，J是腐蚀产物在金属表面的溶质通量；K是传质系数，它的大小与当地流速以及变负荷过程中的流体形态有关； C_{eq} 为铁离子在不同水化学条件（如pH、温度等）下的平衡溶解度； C_b 为铁离子在主流体中的浓度。调峰工况下，两相流强化使传质系数呈现非线性骤升，引起传质通量急剧增加，加剧设备局部减薄。此外，当系统停机备用或极低负荷运行时，易形成局部汽-水滞留区，微缝隙及沉积物下易富集氯离子等侵蚀性阴离子，是腐蚀与点蚀孕育的温床。

二、腐蚀行为预测模型构建

（一）多参量耦合机制分析

深度调峰环境下热力设备腐蚀问题是热力学、流体力学和电化学等多学科耦合的复杂动力学系统。为建立准确的腐蚀预测模型，首先需要提取影响腐蚀速率的核心特征参数。水化学参数中，pH值直接决定上述公式中平衡溶解度的大小，溶解氧浓度对氧化膜的孔隙率及致密性有影响；流体力学参数中，速度和几何形状对传质系数的影响是加剧腐蚀的重要因素。其次，引入温度变化率和压力波动方差等表征瞬态载荷特性参数，量化热应力对氧化膜力学完整性的损伤作用。构建包含水化学参数、水动力参数和工况瞬态参数的多维特征空间，实现深度调峰条件下复杂腐蚀耦合机理的全面映射。在这种机理下，尽管舍伍德数和雷诺数关联式可用于理论上的逼近，但要适应现场大量非线性操作数据，还需引入先进数据驱动的映射回归算法^[5]。

（二）预测算法核心流程与目标函数

以多参数耦合机理为基础，利用支持向量回归（SVR）算法，建立腐蚀行为预测模型。支持向量回归在处理小样本，高维和非线性回归方面有明显的优越性。其核心是将采集的多源异构运行数据映射到高维特征空间，在此空间中寻找最佳拟合超平面。

给定一个训练样本集 (x_i, y_i) ，其中 x_i 是抽取的多维运行特征向量， y_i 是对应的腐蚀速率。引入惩罚系数和不敏感损失函数构

造优化目标函数：

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \frac{1}{2} ||w||^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3)$$

约束条件为：

$$y_i - (w^T \phi(x_i) + b) \leq \delta + \xi_i \quad (4)$$

$$(w^T \phi(x_i) + b) - y_i \leq \delta + \xi_i^* \quad (5)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad (6)$$

其中， w 是权重向量， b 是偏置项； C 是调整模型复杂程度和拟合误差权重的惩罚系数； δ 给出了不敏感损失函数所允许的误差带半宽； ξ_i 和 ξ_i^* 为松弛变量； $\phi(x_i)$ 是一种非线性映射函数，它把输入数据映射到一个高维空间。

本研究采用径向基（RBF）核函数处理腐蚀速率与各参数的强非线性映射关系。为提高模型在瞬态变工况下的泛化能力，采用滑动时间窗口技术，以历史时刻的参数变化梯度作为时序特征输入模型，实现模型对迟滞效应的记忆功能。如图1所示，整个预测算法的数据流转、模型训练和参数优化的预测结果可直接映射到某一临界管段上等效腐蚀减薄率，为后续寿命评价提供定量指标。

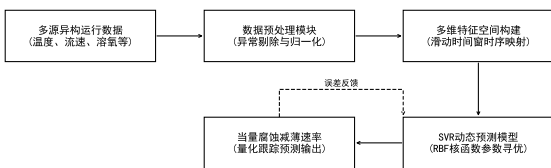


图1 腐蚀动态预测模型算法流程

三、模型应用验证评估

（一）预测结果准确性对比

以某600 MW超超临界火电机组为例，通过连续一个月的深度调峰试验，对所建模型进行验证。在这段时间里，机组多次经历了由满负荷到30%的深度调峰周期。将预处理数据输入训练好的预测模型中，获得对应时间序列的腐蚀速率预测值，并与现场高频超声测厚探头获取的实测结果进行对比分析。以均方根误差和平均绝对误差为评价指标，通过横向比较建立的支持向量回归动态预测模型与传统的静态多元线性回归模型，具体误差统计见表1。

表1 不同预测模型在深度调峰工况下的误差对比

模型类型	均方根误差 (mm/a)	平均绝对误差 (mm/a)	决定系数 (R2)
传统静态多元线性回归模型	0.086	0.065	0.76
支持向量回归动态预测模型	0.021	0.015	0.94

当负荷剧烈波动时，传统静态模型的预测残差明显增大，决定系数只有0.76，基本丧失了对变工况条件下瞬时腐蚀的跟踪能力。本文动态预测模型使均方根误差降至0.021 mm/a，决定系数

达到0.94，融合时变梯度和多参数耦合作用机理的预测模型，能极灵敏地捕捉负荷瞬变引起的水化学劣化和流场畸变信号，实现深调峰工况下异常腐蚀波动的精确锁定和定量预测。

（二）防腐控制优化阈值

通过对模型的高精度验证，可用于指导实际操作中的防腐蚀控制。模型内特性灵敏度分析表明，在机组快速降负荷阶段，溶解氧控制偏差是腐蚀增量最大的因素。通过对模型参数进行迭代仿真，得到不同降负荷率条件下除氧器运行压力和供氧量之间的动态匹配阈值。在超低负荷（小于40%）条件下，预先进行微量增氧干预，辅以精准 pH 调控，可有效抑制钝化膜在流体冲刷下的溶解破裂趋势。利用该模型输出的实时预报数据，可使操作人员摆脱过去人工调节水质的滞后性，建立起一种前馈控制策略。该方法不仅能有效抑制深调峰过程中出现的尖峰异常腐蚀现象，还能大幅度减少化学药剂的无效投药量。

四、结语

深度调峰使火电设备服役边界发生根本性变化，频繁的工况瞬态导致复杂的传质加速和机械损伤耦合作用。本文突破传统状态评估方法的局限性，建立基于支持向量回归的腐蚀动态预测模型，采用高维非线性映射的方法，捕捉热力学参数响应时序特性，实现对超低负荷、快变载荷工况的高精度跟踪，挖掘诱发腐蚀灾变的关键因素。这一模型可为我国新型电力系统柔性调峰和设备安全运行提供一条可行的智能化技术途径。

参考文献

- [1] 刘碧燕, 李栋, 刘娅莉, 等. 海上风电腐蚀防护与监测技术综述 [J]. 材料保护, 2025, 58(12): 22-32.
- [2] 周京学, 王海超. 燃煤电厂基建阶段腐蚀防护前沿技术研究 [J]. 吉林电力, 2025, 53(06): 17-20.
- [3] 何成; 游溢; 王宗江; 黄路遥; 张强; 陈云; 卢壹梁; 杨丙坤; 王晓芳. 电网碳钢材料腐蚀预测模型研究 [J]. 装备环境工程, 2025(02).
- [4] 陈文飞, 李进, 陈虎, 等. 基于 AI 的石化设备损伤精准识别及预测技术探索 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(S1): 1-6.
- [5] 李嘉轩, 孙庆峰, 刘瀚宇, 等. 基于机器学习的 H₂S/CO₂ 耦合腐蚀速率预测 [J]. 炼油与化工, 2025, 36(06): 37-44.

油田建设地面工程管线施工要点与技术分析

彭山峰

胜利油田分公司地面工程建设监督中心, 山东 东营 257000

DOI:10.61369/ME.2026020037

摘 要： 为切实保障油田生产安全性与运营高效性，在油田建设地面工程中应着重提升管线施工质量。文章结合油田建设地面管线施工实践与行业经验，总结其工程规模大、技术标准高、环境复杂与多专业协调等特点，系统梳理施工全流程中的关键点，聚焦从图纸审查、测量放线到沟槽开挖、管线安装等关键工序，深入分析各个环节的实施规范与关键点，通过细化技术操作提升油田建设地面工程管线施工质量与技术水平，降低施工风险，保障工程整体的经济效益。

关 键 词： 油田建设；地面工程；管线施工；防腐处理

Key Points and Technical Analysis of Pipeline Construction in Surface Engineering for Oilfield Development

Peng Shanfeng

Shengli Oilfield Branch Surface Engineering Construction Supervision Center, Dongying, Shandong 257000

Abstract： To effectively ensure the safety and operational efficiency of oilfield production, it is essential to focus on improving pipeline construction quality during surface engineering construction. This article integrates practical experience and industry insights from oilfield surface pipeline construction, summarizing its characteristics such as large-scale engineering, high technical standards, complex environments, and multi-disciplinary coordination. It systematically reviews key points throughout the entire construction process, concentrating on critical procedures from drawing review and surveying to trench excavation and pipeline installation. By analyzing implementation standards and key aspects of each phase, the study enhances the quality and technical level of pipeline construction in oilfield surface engineering through refined technical operations, reduces construction risks, and ensures the overall economic benefits of the project.

Keywords： oilfield construction; surface engineering; pipeline construction; anti-corrosion treatment

引言

随着我国能源需求持续增长，油田开发建设数量与规模持续扩大，地面工程管线施工作为油气集输、输送的核心载体，其施工技术水平与施工质量对油田生产运营有着决定性影响。但由于这类管线输送介质多具有易燃、易爆、腐蚀性强等特点，再加上油田地面环境复杂多变，管线施工若存在质量问题极易引发泄漏、爆炸等安全事故。因此，深入研究油田建设地面工程管线施工要点与关键技术，规范施工流程，优化技术方案，保障工程质量，推动油田行业高质量发展。

一、油田建设地面工程管线施工特点

（一）工程规模庞大

油田建设地面工程管线施工往往覆盖数十甚至数百平方公里的油区，跨越不同区域、不同地形，部分大型油田管线工程甚至跨越多个市县。再加上这类管线施工需要配套建设阀门井、接口设施、防护设施等附属工程，工程量大、施工点位分散、物资需求多，为施工组织、进度管控、质量监管提出较大挑战。

（二）技术要求较高

由于油田建设地面工程管线主要用于输送原油、天然气等易

燃易爆介质，同时还要承受内部介质压力、环境温度变化和外部土体荷载等复杂作用，对管线密封性、耐压性、防护性等性能均有严格标准。管线施工需严格遵循国家和行业相关规范，从管材选择、接口处理到防腐施工、闭水试验等各个环节均有明确的技术规范。

（三）现场条件复杂

从油田建设地面工程管线施工的位置来看，多位于远离城市地区的荒野区域，现场地形复杂，常涉及农田、山地、河流、沼泽等多种地形，部分区域还可能存在软土地基、岩石层、地下水位较高等恶劣的地质条件，导致沟槽开挖、管线铺设等技术实施

作者简介：彭山峰（1988.09-），男，汉族，山东东营人，本科，助理工程师，从事油田地面工程建设监督与风险防控施工现场标准化、精细化管理研究。

难度大幅提升^[1]。另外，野外施工通常会在较大程度上受到天气的影响，高温、暴雨、严寒等恶劣天气都可能对施工进度和施工质量造成影响，同时还要应对现场交通不便、水电供应不足、原有管线设备密集和地下障碍物多等问题，给施工组织带来诸多不便。

（四）需要多方协调

油田建设地面工程管线施工涉及建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等多个单位以及当地政府、交通、水利、环保等相关部门，施工前需协调土地征用、管线路由审批、环境保护评估等相关手续，施工期间需协调施工班组和专业工种相互配合，确保施工流程有序推进，同时还要与当地群众沟通协调，减少施工对周边环境和群众生产生活的影响。若协调不到位，则极易导致施工中断、设计变更或交叉作业冲突，影响工期和质量。

二、油田建设地面工程管线施工要点与关键技术实施

（一）图纸审查

（1）依据《油气输送管道线路工程施工规范》《钢质管道焊接及验收》等现行国家及行业规范对设计图纸进行符合性审查。（2）围绕图纸目录、设计说明、平面图、纵断面图、节点详图、防腐结构图以及材料表等设计内容和成果开展完整性审查。（3）重点核对管线路由与现场地形、地下管线的实际位置，避免管线交叉冲突；核查管径、管材规格与现场进场管材的匹配性，确认接口方式、防腐要求能否通过现有施工设备实现；检查阀门井、支吊架等附属设施的布置位置，确保不影响后续施工与后期维护。（4）整合工艺、结构、防腐、电气等专业图纸，通过专业协同审查核对专业之间是否存在矛盾。

针对审查过程中发现的设计漏洞、尺寸偏差等问题，当场形成会审纪要，要求设计单位在规定期限内出具设计变更，经三方签字确认后方可生效。会审合格后，由技术负责人向施工班组开展技术交底工作，结合现场标记明确每段管线的施工要点、技术参数与注意事项，同步发放图纸复印件，确保施工人员掌握设计意图，避免因理解偏差导致施工质量问题。

（二）测量放线

以设计图纸为参照，在施工现场提前收集现场水准点、控制点资料，校验全站仪、水准仪等专业工程测量设备，确保仪器精度误差不超过2mm。根据设计坐标，运用全站仪定位管线中心线，间隔20–50m设置1个中心桩，在转角处、变坡处加密至每隔10m一个，管线中心线偏差不得超过5cm。沿中心线两侧用白灰线作出清晰标记。采用水准仪测量高程，在中心桩上标注沟槽开挖深度以及管底设计标高，确保槽底高程偏差不得超过3cm。

放线完成后，由监理单位牵头，施工单位配合，对中心线、开挖边线、高程进行双重复核，采用交叉测量的方式核对中心桩位置，高程复核需至少测量3个点位，确认误差在允许范围内^[2]。若涉及山地、河流穿越等复杂地形，需增加临时测量控制点，加密测量频次，每日施工前重新复核1次，保障测量放线精准性。对中心桩、高程控制点采用混凝土浇筑的形式进行固定，避免施工

过程中因碰撞产生移位，同时在标记处设置明显的警示标识，防止破坏放线成果。

（三）沟槽开挖

根据工程现场的实际情况，常规条件下设置管线埋深为 $\geq 1.2\text{m}$ ，但若穿越道路或河流，则需调整管线埋深至 $\geq 1.5\text{m}$ 、 $\geq 2.0\text{m}$ ，结合不同位置具体的管线埋深和地质条件确定开挖坡度。开挖断面采用梯形，槽底宽度在管线外径基础上增加0.6m，便于人员操作。

组织开展沟槽开挖作业期间，采用挖掘机分层开挖，根据现场地质条件确定单层开挖厚度，一般每层厚度不超过1.5m，避免一次性开挖过深导致沟槽坍塌，上层开挖完成后测量设计开挖厚度，而后继续开挖下层。在开挖至距离槽底20cm时，停止机械开挖改用人工清理，避免机械碾压破坏基底土壤。在沟槽两侧距离沟底0.5m以上的位置堆放开挖的土方，堆高控制在1.5m以下，避免土方坍塌涌入沟槽。当地下水位高于槽底0.5m时，以降水处理为重点，采用集水坑降水的方式，每间隔50m设置1个集水坑，坑深为1.0–1.2m，配备潜水泵持续排水。对于地下水位较高、土层渗透系数较大的区域，可采用轻型井点降水，将地下水位降至沟槽底面以下0.5m，防止沟槽积水、边坡坍塌。开挖过程中，及时清理沟槽内的浮土、杂物，槽底清理完成后，采用打夯机夯实，夯实次数不低于3遍，夯实度不低于90%。对于软土地基，需按照3:7的砂石比例铺设10–15cm厚的砂石垫层，铺设后平整夯实，增强地基承载力。

（四）管线安装

作为整个油田建设地面工程管线施工的核心环节，在管线安装前需规范落实进场检验环节，严格核查所有进场管材的出厂合格证、质量检测报告。采用现场抽样检查的方式，钢管检查表面无裂纹、锈蚀，用卡尺测量管径偏差，不超过2mm，PE管检查外观无破损、无气泡，进行热熔对接试验，试对接后检查接口无虚焊、无开裂，严禁不合格管材进场。

管材就位后对管材进行处理，清理管材接口处的油污、铁锈等杂物，保证接口清洁。根据不同的管材类型选择合适的接口方式。钢管采用手工电弧焊，对口间隙控制在2–4mm，坡口角度为 60° – 70° ，焊接分两层进行，第一层打底焊，厚度为3–4mm，第二层为盖面焊，厚度不低于5mm。焊接完成后清除焊渣，采用超声波检测的方式检验焊接质量，对不合格焊缝需铲除重焊。PE管采用热熔对接，设定 200°C – 220°C 的热熔温度，根据管径合理设定加热时间，如DN100管加热10–15s，对接压力0.3–0.5MPa，对接冷却30min以上方可移动。

采用吊车配合专用尼龙带或橡胶垫吊钩进行下管，严禁钢丝绳与管身发生直接接触。合理确定吊点位置，避免管材在吊装环节产生过大弯曲变形，下管时安排专人负责指挥，避免碰撞沟壁或槽底。采用专用支吊架固定，支吊架间距根据钢管与PE管进行区分，分别控制在3m和2.5m以内。在安装过程中，用水平仪校准管线坡度，确保管线顺直，无弯曲、无移位。管线安装完成一段后，采用砂袋在管线两侧固定，每2m设置1组，防止管线在回填前移位、变形，同时核对管线位置和高程，偏差超标的及时

调整。

（五）防腐处理

为保障油田建设地面工程管线施工质量，有效解决内外部腐蚀问题，需先采用喷砂除锈工艺，使得管线表面无可见铁锈、氧化皮，呈现均匀金属光泽，除锈等级达到 Sa2.5 级，喷砂压力控制在 0.5–0.7MPa，喷砂距离 30–50cm，喷砂后及时清理管线表面砂尘，1 小时内进行防腐施工，避免二次锈蚀。

针对由土壤、地下水、大气等环境因素引起的外部腐蚀，可采用 3PE 防腐层，底层涂刷 80–100 μm 厚环氧底漆，中间缠绕胶粘剂，外层缠绕厚度不低于 1.5mm 的聚乙烯层。局部修补采用防腐胶带，缠绕宽度重叠 1/2，缠绕层数超过 3 层。针对由输送介质中腐蚀性物质引起的内部腐蚀，采用厚度 3–5mm 的聚四氟乙烯衬里，衬里后进行打压试验，设置 0.8MPa 的压力，稳压 30min 无渗漏即可。对于输送原油的管线，采用环氧煤沥青涂料涂刷 2–3 遍，总厚度控制在 200 μm 以上，采用毛刷均匀涂刷，涂刷后自然养护 24 小时以上^[3]。

防腐处理完成后，对外防腐层采用电火花检测仪检测，若无击穿现象则说明防腐合格。涂层厚度采用涂层测厚仪检测，每 10m 检测 1 个点，偏差不得超过 $\pm 10\mu\text{m}$ 。内防腐层采用目测与超声波测厚相结合的方式，确保涂层均匀、无破损。

（六）闭水试验

在确保管道与管道外观完好、内部无填土且所有预留孔洞均全部封闭严实的前提下，关闭管线所有阀门，采用橡胶堵头封堵管线两端，在管线最高点设置排气阀，最低点设置排水阀。打开排气阀，向管线内缓慢注水，注水速度控制在 5 m^3/h 以内，直至排气阀有水流出时关闭排气阀，继续注水至设计水位。静置 24 小时，期间补充水位确保水位保持稳定。采用电动试压泵缓慢升压，升压速度不超过 0.1MPa/min，整个过程采用分级升压的方式，每升压一级稳压 5–10 分钟，检查无异常后再次升压，升至设计压力 1.5 倍后稳压 30min，期间观察管线接口、阀门、堵头是否有渗漏、冒汗现象，同时用压力表读取压力值，压力降低于设计

压力的 10% 则说明合格。

若在闭水试验期间发现管线出现渗漏，则需立即泄压排水，重点检查接口、阀门密封处等部位，查找渗漏点，采用补焊、更换密封件等方式进行修补。修补后重新注水、试压，直至合格。试验合格后打开排水阀缓慢排水，排水速度低于 10 m^3/h ，避免水流冲击损坏管线。排水完成后，用压缩空气吹扫管线内部，清除残留水分和杂物，做好试验记录存档。

（七）沟槽回填

闭水试验合格后，清除沟槽内积水以及石子、建筑垃圾等杂物，确保槽内干燥、清洁。回填土选用无杂质、无冻土、颗粒粒径不超过 5cm 的粉质黏土或砂土，严禁使用石块、尖锐杂物，避免划伤管线防腐层。采用分层回填、分层夯实的方式，单层回填厚度控制在 20–30cm，回填土铺设平整后，在沟槽内外分别采用小型打夯机、压路机压实。

在沟槽回填施工过程中，在管线两侧及顶部 50cm 范围内需采用人工夯实，以实现管线保护，避免机械碾压对管线造成冲击。回填至管线顶部 50cm 后，方可采用压路机碾压，碾压速度不超过 2km/h，碾压次数不低于 2 遍。回填至设计标高后，整体平整夯实，确保回填土无下沉、无凹陷。若沟槽穿越农田，回填后需平整土地，恢复原有地貌；穿越道路的沟槽，回填至路面标高后，采用压路机反复碾压，确保路面平整，满足通行要求。

三、结论

综上所述，油田建设地面工程管线施工是确保工程安全、稳定、长效运行的关键环节，在具体实践中需从工程实际出发，采用先进的施工技术和工艺，优化施工方案，加强全流程施工控制，提升施工效率和工程质量。未来，随着油田建设技术的不断进步，可推动管线施工智能化、绿色化、精细化发展，实现工程经济效益与社会效益的高度统一。

参考文献

- [1] 毕青, 任井保, 于瑾, 等. 油田地面集输管线腐蚀与防腐措施研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(3): 199–201.
- [2] 郝明. 油田场站建设施工中的施工要点探析 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 202–204.
- [3] 李建松. 油田地面集输管线的防腐管理措施研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(4).

临时用电环节安全管理措施及优化分析

赵旭

胜利油田分公司地面工程建设监督中心, 山东 东营 257000

DOI:10.61369/ME.2026020038

摘 要 : 大部分项目工程均具有施工线路长、施工环节较为复杂、施工难度大的特点, 临时用电节点较多, 收到各种内外部因素的共同影响, 施工现场内的临时用电系统存在漏电等多种安全隐患。为此, 本文通过探究项目工程施工现场临时用电的特点, 明确了施工现场的实际临时用电需求, 并在此基础上, 以油气集输总厂孤罗东输油管道迁建工程为例, 详细剖析了临时用电环节安全管理措施的优化与落实策略, 旨在为相关从业者提供理论参考与实践指导, 提升临时用电质量。

关 键 词 : 项目工程; 临时用电环节; 安全管理

Safety Management Measures and Optimization Analysis for Temporary Power Supply

Zhao Xu

Shengli Oilfield Branch Surface Engineering Construction Supervision Center, Dongying, Shandong 257000

Abstract : Most project engineering projects are characterized by long construction routes, complex construction processes, and high construction difficulty, with numerous temporary power supply nodes. Affected by various internal and external factors, temporary power supply systems on construction sites pose multiple safety hazards such as electrical leakage. Therefore, this paper explores the characteristics of temporary power supply in project engineering construction sites, clarifies the actual temporary power supply needs on-site, and takes the relocation project of the Goru East oil pipeline in the oil and gas gathering and transportation plant as an example to conduct a detailed analysis of the optimization and implementation strategies for safety management measures in temporary power supply. The aim is to provide theoretical references and practical guidance for relevant professionals, thereby improving the quality of temporary power supply.

Keywords : project engineering; temporary power supply; safety management

引言

作为项目工程的重要动力保障, 临时用电贯穿了项目工程的施工区域按流程其安全性和可靠性会对施工人员的人身安全, 以及整个项目工程质量产生重大影响。如何采取积极有效的安全管理措施, 尽快解决临时用电随意性等现象, 就成为了相关行业目前亟需解决的关键问题之一。

一、项目工程施工现场临时用电特点分析

(一) 流动性

通常来说, 项目工程施工规模较大, 所涉及人员较多, 整个施工现场存在着较强的不可预测性特征, 除了关键施工人员以外, 设计单位、业主、建设单位等多个不同责任主体, 也可能会派遣专人到施工现场进行考察, 整个施工现场人员流动性较强, 若不严格按照相关标准规定的要求对施工现场进行人员疏散与管理, 可能就会造成因人员流动所导致的触电问题, 影响所有人员和整个项目工程的安全^[1]。

(二) 变化性

不同施工环节在用电需求方面存在较大差异, 随着项目工程的不断深入推进, 临时用电需求量会逐渐增大, 凸显出项目工程施工现场临时用电的变化性特征。比如, 项目工程初始施工阶段的临时用电量较小, 但当项目工程推进到一定的程度后, 关键施工工艺和施工环节数量增加, 特别是在赶工期阶段, 整个项目工程需要较大的电能作为支撑, 这种变化性为临时用电安全管理工作提出了考验。

(三) 临时性

为了满足项目工程施工周期内的用电需求, 施工现场会搭建

并使用临时用电设备设施，这些设备设施会在项目工程竣工后被拆除，与社会大众日常生活中常见的永久性供电设施不同，临时用电设备设施的搭建周期较短，搭建过程中可能会忽视安全细节，或多或少存在部分隐患问题，再加上项目工程施工具有一定动态性，临时用电设施的使用情况不够确定，这也会加大临时用电设备设施安全管理难度。

（四）危险性

通过上述分析可知，项目工程在实际建设施工过程中就存在一定的安全隐患问题，再加上临时用电设备设施本身性能不够稳定，受到人员因素、环境因素、工艺因素等多方影响，项目工程建设过程中的临时用电环节存在大量安全隐患问题，危险性较高，若不安排专员及时进行现场用电监管，可能会导致施工过程中发生无法预估的用电事故，这对整个项目工程或行业来说都是较大损失。

二、项目工程施工现场临时用电基本要求

（一）三级配电系统

一是分级分路规则。为保证总配电箱、二级分配电箱、三级开关箱能够各司其职，使得分配电流能够顺利流向各个重要节点，保证临时用电稳定，可以选择靠近电源进线的区域，进行一级总配电箱布置，然后再从一级总配电箱中分出多个不同分路，每个分路再根据当前施工现场其他配电箱不设位置和用电需求量，做好支路设计，保证每个分路配电箱均有稳定电力供给三级开关箱。

二是缩短配电距离规则。考虑到当前项目工程施工规模较大，临时用电时间较多，且用电需求量大，为避免配电箱设置不合理所导致的施工现场混乱问题，需要集中对配电箱的布局进行优化，尽可能缩短配电箱与项目工程中大规模用电设备之间的距离，同时，还应将相邻二级分配电箱与三级开关箱之间的距离，控制在30m范围之内^[2]。

三是环境安全原则。为避免项目工程施工工艺的应用扰乱用电秩序，需要加强对整个三级配电系统的防护，定期勘察施工现场环境状态，保证整个施工现场，特别是三级配电系统设置区域内，始终处于良好通风环境。

（二）二级剩余电流动作保护系统

二级剩余电流保护系统是保持项目工程临时用电安全的重要措施之一，这是一种利用相线传输方法，做好用电负载电流、回流中心线N电流控制的用电安全措施，主要构成包括总剩余电流动作保护器、末端剩余电流动作保护器两大部分。

二级剩余电流保护系统的具体工作原理为：施工人员或其他与项目工程有关的责任主体，若在临时用电过程中产生触电行为，人体就会成为电流通向大地的媒介，二者之间会存在能量不平衡现象，二级剩余电流保护系统中的两个剩余电流动作保护器，会在短时间内获取这种能量不平衡现象，及时触发开关脱扣机制，快速切断导致人体触电的电源，避免人员所受伤害加剧。需要注意的是，为了进一步增强二级剩余电流保护系统的安全防

护作用，还需要将末端剩余电流动作保护器的安装作为基础，先确定好末端剩余电流动作保护器的额定动作电流、额定漏电动作时间，然后再使用分级保护方法进行辅助，强化整个系统的分级分段保护功能。

三、临时用电环节安全管理措施及优化

（一）完善规章制度

第一，从宏观层面出发，确认好当前项目工程施工要求与施工目标，据此分析，临时用电安全管理具体工作内容。

第二，按照施工目标的指引，对各级管理人员进行角色分配与任务划分，明确项目经理、安全管理部门、电气设计员与工程师等人的职责，保证各岗位均配备专业管理人才，推进临时用电安全管理措施的全面落实。

第三，按照设计好的施工顺序，全面梳理临时用电安全管理工作流程，要求相关负责人重点关注用电安全计划合规性审查、下属负责人工作实施准确性检查、用电安全隐患整改及时性等工作。

第四，在临时用电安全管理制度中，明确针对不同设备设施的日常监管周期，对于各种关键电气设备和线路，应在合理范围内缩短检查与维护周期，做好设备设施保养。

第五，在管理制度中，重点指出临时用电隐患排查方法、风险分级评估方法，以及针对不同类型安全隐患问题的整改措施。

第六，要求各部门负责人尽快组织下属员工安全培训会议，先从理论上明确临时用电安全的重要性，然后再通过实践演练等方式，保证关键施工人员始终能按照相关标准要求，正确使用施工工艺，保证临时用电安全。

（二）加大监管力度

针对目前项目工程施工现场临时用电的流动性、变化性、临时性、危险性的特点，为保证施工现场用电安全，需要采取更具有针对性的措施，不断加大用电监管力度。

应安排专业的用电安全监管人员，深入到项目工程施工现场中，加强对当前施工现场内所有临时用电情况的全面检查与管理，比如，检查关键设备设施和线路是否存在损坏问题、随时考察施工人员的用电安全知识掌握情况，必要时还可采取随机抽查的方式，不定期对各种施工材料、施工设备进行性能校验，一旦在实际工作中发现临时用电环节存在安全隐患，或是已经产生的用电安全事故，需要立刻暂停施工，根据现场实际情况，采取应对措施，做好相关负责人的追责处理，避免类似临时用电安全事故的再次发生。考虑到人工作业方式的局限性，可以在实际临时用电安全管理过程中引入现代化信息技术手段，实现对施工现场临时用电的全流程、不间断智能监管。

可以直接在三级配电系统，即总配电箱、分配电箱、关键开关箱内的相应位置上安装高精度传感器，如漏电流传感器、温度传感器、电流电压传感器等，这些传感器能够实时采集三级配电系统各组成部分的运行数据，借助物联网完成关键数据传输与共享，安全管理人员可直接在线上了解现有临时用电设备设施的

实际运行状态，评估临时用电安全性。除此之外，还可使用大数据分析技术和人工智能技术，挖掘现有临时用电数据，找出当前项目工程的临时用电规律，据此，构建智能模型，结合项目工程设计要求，预测未来可能出现的临时用电问题，提醒管理人员及时到场处理^[3]。

（三）加强漏电保护管理

除了要通过制度手段和监管手段，加强临时用电环境安全管理防范以外，为保障用电安全，必须根据当前项目工程的实际建设要求，加强漏电保护管理。特别是对于管道迁建工程来说，由于该项目工程涉及较多复杂施工工艺，比如管沟开挖施工、管道敷设施工、深基坑施工等，再加上整个施工作业环境条件较差，使用常规漏电保护装置进行漏电保护，可能会出现误操作或保护不及时等问题。为规避此类事情在管道迁建工程中的出现和蔓延，应结合当前施工现场条件，进一步提升施工现场临时用电专业技术水平，采用更具有针对性和差异化的安全管理措施，完成漏电保护。

对于地下管沟等施工作业区域来说，在该区域内配置具有较高灵敏度的漏电保护器，防止挂钩开挖施工过程中产生的粉尘对整个电气回路和漏电保护器内部元件造成影响，同时，还应结合当前施工现场所采用的等电位连接方法，以线路防护为目标，精准计算并规范好接地电阻的实际大小，根据施工要求优化接地及位置，防止在临时用电过程中出现的接地不良问题，保证漏电保护系统能够在检测到故障电流后，迅速做好故障电流泄放动作。对于当前项目工程中所存在的路线变更施工等其他关键施工环节来说，由于这些关键施工环节需要频繁进行线路变更操作，因此，可以通过规划电缆路径等方式，尽可能减少管线或电缆的迁移次数，同时，还可对重点管道进行绝缘保护，降低漏电问题发生概率。

四、某项目工程临时用电安全管理优化案例分析

以油气集输总厂孤罗东输油管道迁建工程为例，该项目工程在实际建设中，存在较多临时用电节点，特别是对于管段碰头施工来说，此次作业涉及特级动火、局级高风险作业，叠加吊装、深基坑等多重高危环节，安全管控难度较大，需要各责任主体加强监管，从多个不同维度出发，全面构建起基于临时用电环节的

安全管理架构。

为确保油气集输总厂孤罗东输油管道迁建工程安全顺利推进，对照安全规范逐项核查作业票据、消防器材、防护设施等关键要素，严格落实相关要求，杜绝隐患盲区。中心副总常庆华通过视频连线同步督导，实现现场管控与远程监督无缝衔接，形成多级联动的监督网络，主要包括以下几方面内容：

（1）作业人员严格执行动火作业安全标准，规范穿戴防护装备，精准操控施工设备，监护人全程紧盯关键环节。经过全体人员协同奋战，本次高风险管段碰头作业安全顺利完成，为工程整体推进奠定坚实基础，彰显了地面工程监督中心对工程安全质量的责任担当。

（2）以此次复工检查为契机，对分级管控与隐患排查治理、安全环保典型案例、各专业质量问题分析、标准化工地建设、脚手架验收、高处作业风险识别。

区域部牢牢抓住春节后人员思想容易松懈、岗位技能易生疏的关键时间节点，聚焦复工后的具体施工内容与潜在风险，精心策划并实施了《油田地面工程常见质量问题典型案例（电气专业）》《储罐安装质量控制要点及常见问题》《常用焊评标准解析》。

（3）区域部围绕《脚手架安全管理》《土建工程典型QHSE问题分析》《临时用电安全管理》等方面，开展精准专项送教培训。建设单位基层分管领导、现场监护人员及承包商管理人员、特种作业人员参加培训，为建设单位后续工程项目施工安全筑起坚实“防护屏障”。

（4）胜采区域监督部监督人员已抵达电厂烟气脱硝还原剂液氨改尿素改造工程施工现场，针对临时用电、电气安装、尿素水解车间钢结构安装、产品气和辅助蒸汽管道焊接质量开展巡检。

（5）检查中发现，临时用电配电箱内PE排重复接地线松动、箱门跨接线断开等安全隐患，监督人员当即责令施工单位立即进行整改，及时消除安全隐患。尿素水解车间钢结构焊缝成形差，坡口外引弧灼伤母材等焊接质量缺陷，要求建设单位组织施工单位及时进行整改闭环，消除质量隐患。

结束语：综上所述，相关从业者应尽快转变传统工作理念，梳理当前项目工程中所存在的各个临时用电节点，找到相对应的安全管理方法，尽快弥补现有管理手段的不足，必要时还可引入现代化信息技术，保证安全管理效果。

参考文献

[1] 张荣海, 翟勇, 石小燕. 施工现场临时用电技术和管理关键问题探讨 [J]. 建筑安全, 2025, 40(S1): 81-85.
[2] 郭俊林. 地铁电力工程施工现场临时用电的特点与安全管理措施探讨 [J]. 中国设备工程, 2025, (08): 240-242.
[3] 石煜. 建筑工程施工现场的临时用电安全管理优化策略分析 [J]. 大众标准化, 2024, (05): 86-88.

梯度浓度正极材料的电化学稳定性与循环衰减机理分析

张磊¹, 贾见果², 杨晓红^{3*}

1. 中国原子能科学研究院核技术综合研究所, 北京 102413

2. 昆山凯瑞莱生物科技有限公司, 江苏 昆山 215339

3. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819

DOI:10.61369/ME.2026020003

摘 要 : 用不同浓度的正极材料进行组分梯度改性来优化电化学性能的方法是一种建立在多尺度结构调控基础上的提升稳定性和减少循环损失的改进方法。本文系统地对浓度变化对物相结构、界面行为以及电化学反应进行了考察并阐明了循环过程中容量衰减原因, 这就为我们在寻找更加稳定的电池材料提供了一定的理论基础。

关 键 词 : 梯度浓度正极; 电化学稳定性; 循环衰减机理; 结构调控; 界面优化

Analysis of Electrochemical Stability and Cyclic Degradation Mechanism of Positive Electrode Materials with Gradient Concentrations

Zhang Lei¹, Jia Jianguo², Yang Xiaohong^{3*}

1. Institute of Nuclear Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413

2. Kunshan Kairuilai Biotechnology Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu 215339

3. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819

Abstract : Modifying the composition of positive electrode materials with varying concentrations to create a gradient for optimizing electrochemical performance represents an improved approach based on multi-scale structural regulation to enhance stability and reduce cyclic losses. This paper systematically investigates the effects of concentration variations on the phase structure, interfacial behavior, and electrochemical reactions, elucidating the causes of capacity degradation during cycling. This provides a theoretical foundation for the search for more stable battery materials.

Keywords : gradient concentration positive electrode; electrochemical stability; cyclic degradation mechanism; structural regulation; interface optimization

引言

针对电能汽车及储能应用中对动力电池能量密度及寿命的要求较高, 常规正极材料存在循环稳定性差、容量衰减快等问题, 在元素组成上由表及里进行梯度设计是实现梯度浓度正极材料高比能及结构稳定的关键技术点。例如在高镍三元中逐渐增加的 Ni 含量有利于抑制晶格 O 的释放及相变行为, 同时提升了 Li⁺ 的扩散动力学性能, 实现了电池高首效以及长寿命的提升。本文从电化学稳定性及失效机制两方面对梯度设计的作用机理进行了系统分析。

一、梯度浓度正极材料电化学稳定性的机制基础

通过采用不均匀化元素分布的设计思路, 我们可以大幅提高正极材料的电化学稳定性。其基本思想就是形成自表面到本体的浓度梯度, 让高活组分 (Ni) 被富集在深部, 稳定组分 (Mn 和 Co)

主要在表面。这种设计有效地降低了在高压下发生在界面上的二次反应: 表面丰富的锰可阻止晶格氧的释放以及电解质的侵蚀, 在内部分布的高镍区域则具有高的储锂能力。

同时, 使用浓度阶跃诱导价态变化 (Ni²⁺ + /⁴⁺) 来改变电子传输路径从而缓解循环中可能发生的结构应变及相变倾向。该方法被

课题信息: 东北大学国防重大培育项目 (N25GFZ031)。

作者简介:

张磊 (1981.06-), 男, 陕西省宝鸡市人, 中国原子能科学研究院, 高级工程师。2012年毕业于陕西师范大学。研究方向: 放射性同位素技术生产和应用。公开发表学术论文10余篇, 授权发明专利7项。

贾见果 (1994.02-), 男, 甘肃省定西市人, 美国伯乐生命科学技术有限公司, 高级研究员。2023年毕业于澳大利亚麦考瑞大学, 工程系, 获工学博士学位。研究方向: 纳米生物材料。公开发表SCI论文10余篇。

杨晓红 (1984.02-), 女, 内蒙古包头市人, 东北大学冶金学院, 副教授。2014年毕业于澳大利亚新南威尔士大学, 材料科学与工程专业, 获工学博士学位; 2018年5月至2020年7月在澳大利亚麦考瑞大学做访问学者。研究方向: 能量转化与环境保护催化剂设计、冶金固废处理技术。公开发表学术论文130余篇, 其中SCI论文120余篇。

证实可以在较高电位下 (如 $> 4.5\text{ V}$) 保持结构稳定性的原因在于抵抗了过度脱锂导致的晶格崩塌作用。另外, 表面 Ni 贫化区减小了与溶剂接触面积从而有利于减少有害副产物生成, 因而也有利于提升电极寿命。这也加强了我们在高比能电池开发方面的关键性理论支撑。多级协同效应大幅度提升了浓度梯度结构的电化学性能, 在循环稳定性上, 由于表层富 Mn 层提供了稳定的电化学界面, 有效抑制了电解液浸入及副反应的链式反应, 使得容量保持率长时间内处于较高水平。

例如, 采用一定规律梯度排列的多种组分正极材料, 在 1500 周后仍可以维持初始容量的 88%, 而且不会发生粉化现象, 优于单一组成。从热稳定性角度来说, 这样的梯度构型将活性部分与表面隔离开, 推迟了脱锂态下放热峰点, 未发生潜在的热失控现象。

另外, 利用体相高镍区间晶格间距调节可加快离子传输速率, 使其具有稳定的倍率特性; 需要注意的是, 上述梯度设计的方法可以配合表面包覆 (Li_2ZrO_3 等) 或者内部掺杂 (Ti^{4+} 等), 以提高抗还原能力和抑制不可逆相变。从而降低氧损失。以上改善手段均能很好地解决一般性高镍电池在高压环境下出现的容量衰减以及安全性问题, 为其未来应用提供强有力的技术保障。

目前研究者们正试图采用跨尺度的设计以及先进的表征手段对梯度浓度材料进行进一步稳定性的改善, 如利用机器学习及同步辐射成像对浓度梯度进行了精准调控, 在 4.7V 的高电压下实现了正极材料循环性能的大幅度提高。此外, 将有序岩盐 (DRX) 和层状设计结合起来可以有效避免高脱锂条件下的机械化学分解。但仍有一些问题有待解决: 如怎样改进梯度材料制备工艺 (如共沉积法), 降低梯度材料成本; 对梯度结构长期使用的稳定性还需进一步探讨; 此外, 在钠离子电池体系内如何利用梯度设计也是值得考虑的问题。展望未来, 探索原位表征手段来阐明其梯度演变机理并从绿色化学理念出发构建低毒性电解液配伍体系是进一步发展的方向。相信在理论模拟与实验手段不断融合的前提下, 梯度浓度正极材料有望为新型高安全性、长循环寿命储能器件带来新的机遇。

(一) 浓度梯度对结构完整性的维护

采用梯度浓度构筑法能够实现充放电过程中各类异质应力的均衡调控, 在所用的高镍层状氧化物表面富镍区可形成稳定的永久性岩盐相缓释层, 避免深度 Li^+ 迁移造成晶格坍塌。如在 $\text{LiNi}_0.9\text{Co}_0.05\text{Mn}_0.05\text{O}_2$ 中而我们发现在其表层存在钠离子可以配合内部的高镍结构, 大幅降低因氢至氢三价转化带来的体积应变影响。这种结构设计可以实现 C 轴晶格参数随充放电过程不发生变化以避免细微裂纹出现。而梯度化的设计则实现了 (003) 晶面间距的增加从而有效抑制了 Li^+ 和 Ni^{2+} 的混排有利于提升其热力学稳定性能, 并证实优化后样品可以在高温下维持其层状结构稳定。并且其电池储电量高于一般均匀物质。

(二) 界面稳定性的提升机制

基于浓度梯度调控的表层组分变化能有效抑制电极和电解液间的副反应, 在富锂锰基中因为表层富 Mn 的稳定性及高活性的 $\text{Mn}^{4+}/7+$ 氧化还原对的存在, 导致其晶格氧难以直接暴露到电解液中。如全浓度梯度材料: 在较高电势 (4.5 V) 工作条件下, 表面 Mn^{4+} 浓度梯度能有效抑制氧释放速率从而避免非持久性相变的发生。

同时, 形成 Na 富集界面层梯度结构提升了耐蚀性能。 Na^+ 掺杂界面层抑制了 HF 对正极体相的腐蚀, 降低了 TM 溶解量; 该修饰设计有效控制了长循环后较高的低频阻抗, 提升其电化学性能。

(三) 电化学性能的优化表现

采用浓度梯度调控的方式提升体相和表面活性位点的电子富集能力, 以期在保证其高比容的同时又能够获得长循环寿命, 这种双浓度梯度三元体系中, 体相高镍组分具有较高的储锂能量密度, 而表面富 Mn 部分则提升了其倍率性能。如 $\text{LiNi}_0.8\text{Co}_0.1\text{Mn}_0.1\text{O}_2$ 在 1C 下循环 200 次后, 容量保持率可达 90.4%, 在 10C 下具有 159.1 mAh/g 的可逆比容量。主要是由于梯度结构降低了锂离子的散射系数, 同时梯度材料具有更高的热稳定性, 在高负载下脱锂放热峰最大温度可达 261.5°C, 提高了电池的安全性。

(四) 热稳定性的协同增强

采用浓度梯度调控的方式改善物相的热动力学特性, 大幅提高耐高温性能。对于富镍含量高的镍体系而言, 因为低价态镍离子 ($\text{Ni}^{2+}/3+$) 存在于正极表面富镍区, 有利于抑制氧的氧化还原行为, 从而防止热失控的发生。如全浓度梯度例子中, 在 250°C 温度下, 其容量衰减速度相比常规降低 70% 的热稳定性主要来源于梯度结构锁定了晶格氧的效果。另外, 可以通过控制梯度材料的体相以及表面 CTE 来减少由于热应力导致的结构损伤, 在实验中发现经优化后的样品能够在高温下保持层状结构而不会发生粉化。

(五) 机械稳定性的结构基础

梯度浓度可以提高材料的力学性能, 在循环过程中增加机械稳定性。对于高镍三元而言, drx 结构存在于表面富 Mn 区域可阻断裂纹扩展; 层状结构存在体相高镍区域可以获得较大的弹性模量。

例如, 当电压提高到 4.7 V 后, 在梯度材料中 c 轴晶格常数随着充放电容量变化的趋势依旧稳定, 并且相比普通正极材料具有一定的优势, 这是由于其梯度结构能够有效降低晶格应力; 另外该材料通过对表面层和体相区不同区域的硬度设计降低了循环中的机械损伤以及疲劳破坏现象的发生。随后研究表明, 在长时间循环测试中该材料依然具有良好的结构完整性和电化学性能稳定性。

二、梯度浓度正极材料的循环衰减机理分析

尽管梯度浓度正极材料能拓宽锂离子的输运通道来提升初始性能, 但其衰减机理包含了一系列耦合因素, 在最初的 100 次循环中主要归因于正极界面阻抗增大以及负极储锂能力降低而引起的容量损失。由于正极上电解液在表面被氧化形成不稳定 SEI 膜, 并反复生长及破裂, 导致膜堵塞电极内孔隙并阻碍 Li^+ 的迁移, 造成一部分孔径大幅收缩; 另一方面, 负极上的析锂现象加剧, “死锂”的产生。

不仅消耗掉了活性的锂离子而且也降低了负极的充电容量。虽然该阶段形成的梯度结构可以降低锂离子传输阻力, 但无法有效避免界面副反应的进行; 大量由电解液分解生成的物质 (如 O_2 和可燃气体) 的积累加速了电极材料老化过程, 并伴随有正极材料

相变(如层状相向非层状相变化)及过渡金属溶解造成的不可逆容量损失。而负极表面 SEI 膜持续形成也会导致孔隙堵塞及极化增加,引发掉线模式。

随着深度增加到一定程度(超过100周循环以后),主导的失效机制变成以正极材料的结构性破坏为主导,在采用梯度浓度方法提高锂离子传输效率的前提下,经过长期的循环后仍然不可避免的是正极材料因脱嵌过程产生的体积膨胀以及力学损伤,可能导致粒子破裂及活性物质损失;如在高镍三元中,当电压高于4.4 V 后会出现不可逆的相变过程而阻塞 Li⁺ 的通道;以及电解液和正极表面反应(如 TM 溶出),导致副产物对电极结构产生更大的破坏作用。正极侧 SEI 膜具有更多的层,且已填满了孔隙,导致了不可逆容量的损失及更快的 Li⁺ 沉积速率;同时也有存储效应的影响,在某 SOC 下搁置一段时间后,电解液仍持续地发生分解,电极也发生了变化。虽然没有完全断电,但是依然会造成失效。采用梯度式的材料进行观察其性能变化情况,发现它呈现非线性衰退的趋势,在前半阶段以 SEI 膜增长造成的线性衰减为主,后半阶段则以析出锂以及结构性破坏带来的快速失容为主。

(一) 晶格氧释放与相变

影响高镍正极材料服役过程中性能退化的一个重要因素是其在循环过程中的晶格氧逃逸现象。当电池充电截止电压超过4.3V后,镍富集区域的晶格氧将与电解液发生反应形成不可逆岩盐相,导致电极表面结构塌陷,因此对 Li⁺ 的传输通道进行限定。例如,ncm811 在 4.6v 高压下容量衰减率可达 0.15%/cycle;晶格氧释放的同时伴随 h₂→h₃ 的相转变进而产生晶格坍塌及微裂缝,累积效应使得容量迅速衰减。

(二) 过渡金属离子溶出

过渡金属离子(如 Mn、Co 等)的溶出问题是已知影响电池寿命的重要原因。比如,富锂锰基正极材料中从 Mn⁴⁺ 到 Mn⁷⁺ 的可逆转化将引起活性物质流失,这些溶出的 Mn 在电解质相迁移。具体地,对于 LiNi_{0.9}Mn_{0.1}O₂ 而言,在100次充放电循环后,其表面 Mn 的溶解速率可达到 0.8 μg/h/cm²,引起的容量衰减约为0.25%/次,而且这一现象在温度升高时会更为严重(因为高温有利于 TM 离子的氧化溶解)。此外,溶解出来的 Mn 进一步发生电解液体系中的一系列循环腐蚀,也会对电池的容量保持产生更大的危害。

(三) 界面副反应

造成这种电池性能退化的主因是正极活性物质与电解液之间的不相容性,尤其是对于高镍三元体系而言,在表面富镍区域会发生结构转变产生副产物 LiOH/NiO 等在电极表面不断积累,形成 SEI 膜;以 NCM523 材料工作电压为4.3V 为例,则在电极/电

解质界面处形成的阻抗可达50μΩ,并可能造成每次充/放循环损失高达0.1%的能量;其次该副反应还伴随电解液的分解并产生 CO₂、O₂ 等气相组分从而破坏体系内部结构完整性。

电池老化主要是由正负极与电解质之间的副反应引起的,在高镍三元体系中,因为其表面富集镍组分而发生一系列副反应形成 LiOH 和 NiO 等副产物,界面处会堆积大量副产物。对锂离子迁移能力的影响;如 NCM523 在 4.3V 截止电压下的界面阻抗就增加了到 50μΩ 的水平,造成其每圈容量衰减达到 0.1% 水平;同时会导致电解液发生化学分解产生 CO₂ 或者 O₂ 等气体,进而导致电极结构遭到破坏。

(四) 结构疲劳与裂纹扩展

由于循环中功能的损失导致了疲劳,这在 Ni 含量高的材料上更加严重,因为由 Li⁺ 的反复嵌入脱出产生的晶格应力累积会导致微观裂纹的形成并扩展;如 LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ 在经过 200 次充放电后,表面裂纹密度可达到 10μm/cm²。这种结构损伤会引起此类材料每年的容量衰减增加到0.3%,其主要原因在于各层间梯度材料之间的热膨胀差异;裂纹进一步扩展还可能导致活性物质从集电极中脱落,从而导致性能损失加重。

(五) 温度与电压的耦合效应

值得关注的是,在电热耦合作用下导致电池失效的现象主要是高温条件下发生的,其表现形式为材料内部晶格氧流失以及 TM 元素迁移速度加快;对 LiNi_{0.9}Mn_{0.1}O₂ 而言,其 55℃下的循环寿命较之 25℃ 降低约50%;当将电池置于高电位工作状态(例如 4.7V),则有反而会加速晶格氧被氧化的过程而破坏了材料结构并增加电池的衰减程度。并且实验观察到该协同作用满足阿伦尼乌斯规律,并具有高达 45 kJ/mol 的活化能。

三、结束语

梯度浓度的正极材料在控制高容量的同时获得了结构稳定性的提升,在一定程度上提升了电池的电化学性能。这是由于梯度浓度可以同步地改善结构完整性和界面稳定性,并调控了热力学行为。研究表明,电池的衰减原因包括循环中的晶格氧释放、过渡金属离子损失及表面反应、结构磨蚀效应、温-电压耦合效应等等。因此,在今后工作中应深入研究浓度分布与电极电化学性能之间的精确关系机理,并为开发新的具有优异循环稳定性的电极材料提供基础理论指导。随着新能源汽车动力系统以及储能器件的发展,梯度浓度型正极材料将成为突破目前能量密度瓶颈的重要技术路线之一。

参考文献

- [1]KONISHI H, HIRANO T, TAKAMATSU D, et al. Improvement of electrochemical performance of nickel-manganese-based lithium-rich layer-structured cathode material by controlling lithium/transitionmetal ratio[J]. Solid State Ionics, 2018, 327: 39-46.
- [2]肖忠良, 周乘风, 宋刘斌, 等. 富镍锂离子电池三元材料 NCM 的研究进展 [J]. 化工进展, 2020, 39(1): 216-223. XIAO Zhongliang, ZHOU Chengfeng, SONG Liubin, et al. Research progress of ternary material NCM for nickel-rich lithium ion battery[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(1): 216-223.
- [3]GUAN P Y, ZHOU L, YU Z L, et al. Recent progress of surface coating on cathode materials for high-performance lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Chemistry, 2020, 43: 220-235.
- [4]HRYU H H, PARK N Y, SEO J H, et al. A highly stabilized Ni-rich NCA cathode for high-energy lithium-ion batteries[J]. Materials Today, 2020, 36: 73-82.
- [5] 陈鹏, 肖冠, 廖世军. 具有不同组成的镍钴锰三元材料的最新研究进展 [J]. 化工进展, 2016, 35(1): 166-174.

双氰胺车间自动化改造要点分析

刘海涛

美吉星供应链管理(黑龙江)有限公司, 黑龙江 大庆 166200

DOI:10.61369/ME.2026020005

摘 要： 双氰胺生产具有工艺复杂、参数耦合性强、安全环保要求严苛等特点，传统人工操作模式已难以适配现代工业对生产效率、产品质量及安全管控的高要求。本文结合双氰胺生产工艺特性，从改造背景与必要性出发，系统分析原料预处理、反应过程、分离提纯及环保处理等关键环节的自动化改造要点，阐述自动化控制系统的架构设计与核心功能，结合实际改造案例验证改造成效，并提出改造实施的保障措施，为双氰胺生产企业开展自动化升级提供实操性参考。

关 键 词： 双氰胺车间；自动化改造；工艺调控；控制系统；安全运维

Analysis of Key Points of Dicyandiamide Workshop Automation Transformation

Liu Haitao

Meijixing Supply Chain Management (Heilongjiang) Co., Ltd. Daqing, Heilongjiang 166200

Abstract： The production of dicyandiamide is characterized by complex processes, strong parameter coupling, and stringent safety and environmental requirements. Traditional manual operation modes can no longer meet the high demands of modern industry for production efficiency, product quality, and safety control. This paper, based on the production characteristics of dicyandiamide, systematically analyzes the key points of automation transformation in critical stages such as raw material pretreatment, reaction process, separation and purification, and environmental treatment, starting from the background and necessity of the transformation. It elaborates on the architecture design and core functions of the automation control system, validates the transformation effectiveness through practical case studies, and proposes safeguard measures for implementation. The findings provide actionable references for dicyandiamide manufacturers to carry out automation upgrades.

Keywords： dicyandiamide workshop; automation retrofit; process control; control system; safety operation and maintenance

引言

双氰胺作为一种重要的精细化工原料，广泛应用于医药、农药、染料、树脂合成及化肥增效剂等领域。近年来，随着下游产业升级对双氰胺产品质量稳定性、纯度及产能提出更高要求，传统双氰胺车间依赖人工监测工艺参数、手动调控设备运行的模式弊端日益凸显：一是人工操作响应滞后，难以应对氨氰化、聚合等关键反应环节的参数波动，导致产品合格率仅维持在85%–90%；二是生产过程中涉及的氨、氰化物等危险化学品，人工巡检易因疏忽引发泄漏、爆炸等安全事故；三是能耗居高不下，人工凭经验调控蒸汽、电力等消耗，单位产品综合能耗较行业先进水平高出15%–20%。在此背景下，开展双氰胺车间自动化改造研究，梳理改造核心要点，不仅能为企业提升生产效益提供技术支撑，更对推动整个双氰胺行业高质量发展具有重要现实意义^[1]。

一、双氰胺车间核心生产环节自动化改造要点

双氰胺生产工艺流程主要包括：原料预处理（尿素熔融、氯化铵溶解）→氨氰化反应→聚合反应→结晶分离→干燥包装→环保处理（废水、废气处理）。各环节工艺特性不同，自动化改造要点需精准匹配其控制需求。

（一）原料预处理环节：精准配料与稳定供给

原料预处理是保障后续反应稳定性的基础，核心需求是实现

尿素与氯化铵的精准配比及熔融、溶解过程的温度稳定。改造要点包括：

自动化配料系统 替代传统人工称重配料，采用“料位传感器+定量给料机+PLC控制器”模式。通过料位传感器实时监测尿素、氯化铵料仓液位，当液位低于设定阈值时，系统自动启动上料泵；定量给料机根据工艺要求的配比（摩尔比1:1.2）精确控制原料输送量，误差控制在±0.5%以内。同时，系统具备配料数据自动记录功能，可追溯每批次配料参数。

熔融与溶解过程温控 尿素熔融需维持温度在130–135℃，传统蒸汽加热依赖人工调节阀门，温度波动较大。改造后，采用夹套式加热装置，通过PT100温度传感器实时采集熔融釜内温度，DCS系统根据温度偏差自动调节蒸汽调节阀开度，实现温度精准控制；氯化铵溶解环节，通过液位传感器监测溶解槽液位，自动启动搅拌电机，同时根据浓度传感器数据自动补充清水，确保溶液浓度稳定在25%–30%^[2]。

（二）反应环节：参数精准调控与反应过程监控

1. 氨氰化反应自动化控制

氨氰化反应在高压反应釜中进行，反应温度170–180℃、压力0.8–1.0MPa，需严格控制反应进度避免副反应。改造要点：一是安装高温高压传感器、压力变送器，实时采集釜内温度、压力数据，传输至DCS系统；二是采用PID调节算法，系统根据温度偏差自动调节夹套蒸汽供应量，根据压力偏差控制安全阀开度，当压力超过1.1MPa时自动泄压并触发报警；三是通过流量传感器监测原料进料速度，实现进料量与反应速度的动态匹配，进料误差控制在±1%。

2. 聚合反应自动化控制

氨氰化反应产物进入聚合釜后，在碱性条件下发生聚合反应，需控制温度80–90℃、pH值8–9。改造要点：一是安装pH传感器、温度传感器，实时监测反应液pH值与温度；二是DCS系统根据pH值数据自动调节氢氧化钠溶液投加量，根据温度数据调节冷却水阀门开度；三是引入反应终点在线监测装置，通过近红外光谱传感器分析反应液成分，当双氰胺含量达到95%以上时，系统自动判定反应终点并切换至下一工序，避免过度反应导致杂质增加。

3. 反应过程可视化监控

在反应釜顶部安装高清工业摄像头，配合红外热成像仪，实时传输釜内反应状态画面至中央控制室；同时，DCS系统实时绘制温度、压力、pH值等参数趋势曲线，操作人员可通过监控界面直观掌握反应进程，异常情况下系统自动弹窗报警并显示故障原因。

（三）分离与干燥环节：高效分离与质量追溯

1. 结晶分离自动化

采用全自动离心机替代传统人工操作离心机，通过液位传感器监测结晶釜内料液液位，当达到设定值时自动启动离心机；离心机运行过程中，振动传感器实时监测设备振动幅度，当振幅超过阈值（≥5mm/s）时自动停机保护；分离完成后，系统自动控制卸料阀开启，将结晶物料输送至干燥机，实现分离过程无人化操作^[3]。

2. 干燥过程自动化控制

干燥采用热风循环干燥机，需控制干燥温度100–110℃、含水率≤0.5%。改造要点：安装湿度传感器、温度传感器，实时采集干燥机内湿度与温度数据；DCS系统根据湿度数据自动调节热风温度与风机转速，当含水率达到要求时，系统自动停止干燥并启动卸料装置；同时，在干燥机出口安装在线粒度分析仪，实时监测产品粒度分布，不合格产品自动回流至重新处理环节。

3. 自动化包装与追溯

采用全自动包装机，通过称重传感器精确控制每袋产品重量（25kg/袋，误差±0.1kg），自动完成封口、贴标；标签采用二维码形式，包含生产批次、原料来源、工艺参数、检测结果等信息，实现产品质量全程可追溯。

（四）环保处理环节：达标排放与智能运维

1. 废水处理自动化

采用“预处理+生化处理+深度处理”工艺，改造要点：一是在预处理阶段，安装COD、氨氮、氰化物在线监测仪，实时采集废水水质数据，DCS系统根据水质数据自动调节絮凝剂、氧化剂投加量；二是在生化处理阶段，通过溶解氧传感器监测曝气池溶解氧浓度，自动调节曝气风机风量，确保微生物活性；三是深度处理阶段，安装水质在线监测装置，达标废水自动排放，不达标废水回流至预处理环节重新处理，同时实现排放数据自动上传至环保部门监控平台。

2. 废气处理自动化

废气经“冷凝回收+活性炭吸附”处理，改造要点：安装气体浓度传感器监测废气中氨、氰化物浓度，当浓度超过设定值时，系统自动加大冷凝回收装置负荷并启动备用活性炭吸附塔；同时，设置废气泄漏监测点，一旦发生泄漏，自动启动引风装置将泄漏气体导入处理系统，避免大气污染。

二、双氰胺车间自动化控制系统架构设计

（一）现场设备层：数据采集与指令执行

现场设备层是自动化系统的“感知与执行终端”，由各类传感器、执行器、智能仪表及现场设备组成。传感器包括温度、压力、液位、流量、pH值、浓度、气体检测等类型，负责实时采集生产过程各类参数；执行器包括调节阀、电磁阀、电机、水泵、风机等，负责执行控制层下发的调控指令；智能仪表包括在线分析仪、称重仪表等，实现关键指标的实时检测。所有现场设备采用标准化接口，确保数据传输的稳定性与兼容性^[4]。

（二）控制层：核心调控与逻辑运算

控制层采用“DCS+PLC”协同控制模式，是系统的“决策核心”。DCS系统负责全局工艺参数的集中监控与协调，实现多变量耦合控制，如反应过程温度、压力、进料量的协同调节；PLC控制器负责单台设备或局部工序的逻辑控制，如原料配料、离心机运行、包装机操作等，响应速度快，控制精度高。两者通过工业以太网实现数据交互，当某一环节出现异常时，控制层自动执行连锁保护逻辑，如反应釜超压时自动切断进料并泄压，确保生产安全。

（三）监控管理层：数据展示与运维管理

监控管理层由中央控制室监控平台、数据服务器、运维管理系统组成。监控平台采用组态软件搭建，实时展示各环节工艺参数、设备运行状态、报警信息等，操作人员通过人机界面实现远程监控与操作；数据服务器负责存储生产过程数据、设备运行数据、质量检测数据等，存储周期不少于1年，为工艺优化提供数据支撑；运维管理系统具备设备故障预警、维护计划制定、备件管

理等功能，通过分析设备运行数据，提前预判设备故障，如根据泵的振动数据判断轴承磨损情况，及时发出维护提醒。

三、改造案例与成效分析

（一）案例概况

某化工企业双氰胺车间建于2015年，年产双氰胺1万吨，改造前采用人工操作模式，存在产品合格率低（88%）、能耗高（单位产品综合能耗1200kgce/t）、安全隐患多（2020–2022年发生3起轻微泄漏事故）等问题。2023年企业投资800万元开展自动化改造，改造内容涵盖原料预处理、反应、分离干燥、环保处理全流程，控制系统采用DCS+PLC架构，配套在线监测设备32台套、智能执行器28台套。

（二）改造成效

1. 生产效率提升

改造后车间生产周期由原来的8小时/批次缩短至6.5小时/批次，年产能提升至1.3万吨，较改造前增长30%；人工岗位由原来的28人减少至12人，劳动生产率提升57%。

2. 产品质量改善

关键工艺参数波动幅度控制在 $\pm 2\%$ 以内，产品合格率由88%提升至98.5%，纯度稳定在99.6%以上，杂质含量 $\leq 0.08\%$ ，高端客户订单占比由30%提升至65%。

3. 能耗与成本降低

单位产品综合能耗降至1020kgce/t，较改造前降低15%，年节约能源成本约120万元；原料损耗率由5%降至2%，年节约原料成本约80万元。

4. 安全环保达标

改造后实现危险工序无人化操作，安全事故发生率降至0；废水处理氨氮浓度 $\leq 5\text{mg/L}$ 、氰化物浓度 $\leq 0.1\text{mg/L}$ ，废气排放浓度远低于《大气污染物综合排放标准》，环保投诉率为0，顺利通过环保部门专项检查。

四、双氰胺车间自动化改造实施的保障措施

（一）技术保障：前期调研与方案优化

改造前需开展全面的工艺调研，梳理各环节工艺瓶颈、设备运行状况及控制需求，避免改造方案与实际生产脱节；选择具备化工行业自动化改造经验的服务商，结合车间生产规模、工艺特性定制改造方案，例如中小规模车间可采用“PLC+简易监控平

台”架构降低成本，大规模车间采用“DCS+智能运维系统”提升管控水平；改造过程中加强技术交底，确保施工单位准确理解工艺要求，关键设备安装后进行单机调试与联动调试，验证控制精度与系统稳定性。

（二）人员保障：技能培训与团队建设

自动化改造后，操作人员需具备设备操作、系统监控、故障排查等技能，企业需建立完善的培训体系：一是开展岗前培训，内容包括自动化系统原理、监控平台操作、应急处置流程等，邀请技术专家现场授课；二是开展岗位练兵，通过模拟故障场景提升操作人员实战能力；三是建立“操作人员+运维工程师”团队，操作人员负责日常监控，运维工程师负责系统维护与优化，确保系统长期稳定运行。

（三）管理保障：制度完善与流程优化

建立健全自动化车间管理制度，包括《自动化设备操作规程》《系统维护保养制度》《数据管理制度》《应急处置预案》等，规范操作与运维行为；优化生产管理流程，将自动化系统采集的数据纳入生产管理体系，通过分析参数趋势优化工艺方案；建立考核机制，将产品合格率、能耗、安全指标与员工绩效挂钩，激发员工积极性。

（四）资金保障：合理规划与多元融资

自动化改造前期投入较大，企业需合理规划资金：一是做好投资预算，涵盖设备采购、施工安装、系统调试、人员培训等费用，避免资金缺口；二是争取政策支持，部分地区对化工企业自动化改造提供补贴或税收优惠，企业可积极申报；三是采用“分期改造”模式，优先改造核心工序（如反应环节、环保处理环节），逐步实现全流程自动化，降低资金压力^[6]。

五、结论

双氰胺车间自动化改造是应对市场竞争、满足安全环保要求、提升生产效益的必然选择。改造需紧扣各生产环节工艺特性，原料预处理环节聚焦精准配料与温控，反应环节核心是参数精准调控与过程监控，分离干燥环节侧重高效分离与质量追溯，环保处理环节重点保障达标排放；同时，构建“现场设备层–控制层–监控管理层”三级自动化控制系统，实现全流程数据集成与智能调控^[6]。实际案例表明，通过科学的改造方案与完善的保障措施，可实现产能提升30%以上、产品合格率提升至98%以上、能耗降低15%以上，显著提升企业核心竞争力。

参考文献

- [1] 中国石油和化学工业联合会. 化工智能制造发展行动计划（2021–2025年）[S]. 北京：化学工业出版社，2021.
- [2] 王建华，李红梅，张伟. 双氰胺生产工艺优化与自动化控制研究[J]. 化工进展，2022，41（5）：2315–2322.
- [3] 刘志强，王丽娜. 化工车间自动化控制系统的设计与应用[J]. 自动化仪表，2021，42（8）：68–72.
- [4] 张晓东，赵亮. 双氰胺废水处理技术及自动化控制实践[J]. 环境工程，2023，41（3）：112–117.
- [5] 陈光明. 化工企业自动化改造的实施策略与成效分析[J]. 化工管理，2022（18）：89–91.
- [6] 国家安全生产监督管理总局. 危险化学品重大危险源监督管理暂行规定[S]. 北京：煤炭工业出版社，2019.

煤化工污水深度处理及回用工艺优化研究

张宝玉

久泰能源（准格尔）有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 010319

DOI:10.61369/ME.2026020018

摘 要： 煤化工产业高质量发展导向下，强化对污水的深度处理和回用，已经成为生产管理变革的必然要求，也是减少生产污染排放的重要路径。但是由于污水成分较为复杂、难降解有机物浓度高、盐分高，处理难度相对较大，需要结合实际选用合适的深度处理技术。本文从煤化工污水特征和处理需求出发，以零排放理念为导向，系统说明电解氧化、双膜法、臭氧催化氧化、芬顿氧化等深度处理技术原理和应用成效，系统说明深度处理后的回用工艺优化策略，以此为煤化工企业污水治理和资源化利用提供参考，为推动煤化工产业高质量发展起到应有促进作用。

关 键 词： 煤化工；污水；深度处理；回用

Research on the Optimization of Deep Treatment and Reuse Process of Coal Chemical Wastewater

Zhang Baoyu

Jiutai Energy (Zhungeer) Co., Ltd., Ordos , Inner Mongolia 010319

Abstract： Under the guidance of high-quality development of the coal chemical industry, strengthening the deep treatment and reuse of sewage has become an inevitable requirement for production management reform and an important path to reduce production pollution emissions. However, due to the complex composition of sewage, high concentration of difficult to degrade organic matter, and high salt content, the treatment difficulty is relatively high, and suitable deep treatment technologies need to be selected based on actual conditions. This article starts from the characteristics and treatment needs of coal chemical wastewater, guided by the zero emission concept, and systematically explains the principles and application effects of deep treatment technologies such as electrolytic oxidation, double membrane method, ozone catalytic oxidation, Fenton oxidation, etc. The system also explains the optimization strategies for the reuse process after deep treatment, providing reference for wastewater treatment and resource utilization in coal chemical enterprises, and playing a necessary role in promoting the high-quality development of the coal chemical industry.

Keywords： coal chemical industry; sewage; deep processing; reuse

煤化工是我国能源化工产业的重要组成部分，也是国民经济健康稳定发展的支柱性产业，但是受工艺和技术影响，在生产过程中会消耗大量水资源，产生大量污水，这些污水具有浓度高、成分复杂等德政，且含有酚类、多环芳烃、氰化物等有毒有害物质，部分有机物降解难度较大。单纯依靠传统生化处理工艺，污染指标控制不到位，无法满足高质量发展要求。以此为背景，系统分析煤化工污水深度处理工艺，优化回用工艺，是提升煤化工行业水资源利用效率，降低环境污染，推动行业整体高质量发展的必然要求。

一、煤化工污水特征与处理需求

（一）煤化工污水特征

煤化工污水主要包括气化废水、焦化废水、液化废水及各类洗涤、冷却排污水等种类型，处理难度大。从整体上而言，主要具有如下几种特征：（1）有机物成分复杂、浓度高，依据实验测定，污染物包括酚类、多环芳烃、杂环化合物及长链烷烃等多种物质，其中来自焦油分离、煤气洗涤等环节的酚类化合物占比最高，且具有较高生物毒性；萘、蒽等多环芳烃类物质，由于结

构较为稳定，极难被微生物分解^[1]。（2）无机成分复杂、含盐量高，在煤化工生产过程中，为控制设备腐蚀和结垢现象，需要投加不同剂量的化学药剂，在冷却塔、锅炉等污水中，也富集大量盐分，以此导致污水中总溶解固体浓度相对偏高，部分含盐污水电导率可达到2000~3000 μ S/cm。在阳离子和阴离子含量较高情形下，后续处理会对生化系统微生物活性产生抑制作用，甚至导致膜处理运行不稳定^[2]。（3）水质波动大、生物毒性强，在煤化工处理过程中，受煤种差异、生产负荷变化及设备周期性清洗等因素影响，污水水质通常呈现显著波动性特征，COD、氨氮及特

作者简介：张宝玉（1986.02-），男，汉族，内蒙古赤峰市翁牛特旗人，本科，中级化工工程师，研究方向：煤化工、烯烃工艺生产运行、技术管理及运行优化。

征污染物浓度常会发生变化，峰值浓度远高于平均值，对处理效果产生影响。酚类、氰化物及杂环化合物等物质，在浓度过高情形下，也会对微生物产生显著抑制作用，使得常规生化处理系统难以稳定运行，对出水水质产生影响。

（二）零排放背景下污水处理需求

双碳目标指引下，煤化工污水处理逐渐朝向“零排放”方向转型，要求在污水处理中，充分利用技术优势，将污水中的污染物以固体形式或气体形式分离出来，在厂区内实现污水的全部回用^[3]。以此为指引，要求在污水处理中，不仅要高效去除有机污染物和悬浮物，还需要深度脱除盐分，实现水质的分级分质回用，能够满足不同生产环节再生水利用要求。但是就技术层面而言，传统单一生化处理或物理化学方法，都无法满足零排放对出水水质的要求，必须要在预处理基础上，通过多种深度处理技术的有机结合，加强各单元工艺协同，逐步削减污染物，实现资源的最大化回收利用^[4]。在回用标准要求更加严格背景下，传统粗放式污水处理运行管理方式，已经无法保障系统长期稳定运行，需要积极采用在线监测、智能控制及数字孪生等技术，实现基于实时水质数据的工艺参数动态优化，提升系统运行稳定性和经济性，有效提升污水回用水平。

二、煤化工污水深度处理技术

（一）电解氧化技术

电解氧化技术在煤化工污水深度处理中的应用，主要是通过阳极反应生成羟基自由基等强氧化性物质，高效分解污水中难降解的有机物，处理效果受电极材料选择和反应条件控制直接影响。以硼掺杂金刚石电极或钛基涂层电极为阳极，通过外加电场作用下，在阳极表面可生成羟基自由基。利用羟基自由基的氧化还原电位作用能力，分解有机污染物分子结构，逐步矿化为CO₂和H₂O₂，实现污水的有效处理^[5]。以某煤化工企业处理生化出水项目为例，进水COD浓度为150~200 mg/L，氨氮浓度为20~30 mg/L，选用钛基涂层阳极，运行电流密度设定为15~25 mA/cm²，电解时间30~60 min。依据运行结果分析，COD的平均去除率达35%~45%，处理后COD稳定在100 mg/L以下；对氨氮去除率约30%，结合后续沉淀处理，出水氨氮浓度控制在15 mg/L以内；酚类、氰化物等高毒性有机物去除率达90%以上，整体去除效果显著，有效提升水质安全^[6]。

（二）双膜法深度处理技术

双膜法在污水深度处理中具有较为广泛应用，主要是指超滤与纳滤或反渗透的工艺组合形式，是煤化工污水深度脱盐和回用的核心单元。以超滤进行预处理，能够有效截留污水中的悬浮物、胶体和大分子有机物，悬浮物去除率能够达到99.03%以上，

浊度降低至1NTU以下，确保后续反渗透系统稳定运行^[7]。纳滤膜主要起到选择性截留Ca²⁺、Mg²⁺和SO₄²⁻等二价及高价离子作用，总硬度脱除率能够达到98.23%，主要用于循环冷却水补充水处理环节。反渗透膜在脱盐率方面具有显著优势，能够截留97%以上的盐分和绝大部分有机物，处理后水质能够满足锅炉补给水等需求。

（三）臭氧催化氧化工艺

臭氧催化氧化工艺是指在臭氧氧化基础上，利用不同形式的催化剂，使臭氧分解产生更多羟基自由基，强化有机物的氧化分解，在分解污水中残留酚类、多环芳烃等难以降解的有机物方面，具有良好处理效果，能够有效改善出水的可生化性。传统的臭氧氧化工艺，对COD的去除率多在50%以下，臭氧利用率也较低，因此当前多是采用“臭氧催化氧化+曝气生物滤池”组合工艺进行处理。先利用羟基自由基将污水中难降解的大分子有机物进行开环、断链处理，转化为小分子、可生化性好的中间产物，在后续BAF单元中，利用高比表面积的生物膜，进一步降解为有机物和氨氮，实现COD的深度处理^[8]。在工艺运行中，处理效率主要受催化剂种类、填充密度、臭氧投加量及反应时间等因素影响，合理优化催化剂活性组分和载体结构，能够有效提升臭氧向羟基自由基的转化效率，因此需要根据污水水质波动情况，动态调整臭氧添加量，在保证出水水质达到标准的同时，有效降低整体运行成本。

（四）芬顿氧化法

芬顿氧化法原理是利用Fe²⁺催化H₂O₂分解生成具有极强氧化能力的羟基自由基（·OH），高效氧化分解有机污染物，对含酚、苯类等有毒难降解有机物的处理效果显著，在煤化工有机污水深度处理中，具有较为广泛应用。在工艺运行中，芬顿反应效率受H₂O₂与Fe²⁺的物质的量比、H₂O₂投加量及反应pH值等因素影响，在相关模拟试验中，n(H₂O₂)/n(Fe²⁺)=15:1时，COD去除率达到77.71%。继续增加H₂O₂比例，去除率趋于稳定，表明该条件下产生的羟基自由基能够基本满足氧化需求。反应液中H₂O₂质量浓度从602 mg/L增至1205 mg/L时，COD去除率从43.63%提升至88.05%；继续增加投加量，去除率则因H₂O₂与羟基自由基的副反应而略有下降。pH=4时，COD去除率最高，过高或过低的pH都会影响Fe²⁺的催化活性，导致反应效率降低^[9]。芬顿氧化反应能够在短时间内实现有机物的快速讲解，在煤化工污水生化出水的深度处理中，具有良好应用效果，但也存在药剂消耗量大、产生含铁污泥等二次污染物等问题，因此多是与其他工艺结合，作为生化处理后的深度处理单元，用于去除常规工艺难以降解的残余有机物。

（五）深度处理技术应用效果对比

综合对比上述各类处理技术应用效果，具体如表1所示。

表1 不同类型深度处理技术应用效果

技术名称	电解氧化	双膜法	臭氧催化氧化	芬顿氧化法
适用对象	生化出水，高盐、高毒废水	脱盐、回用前处理	生化出水，难降解废水	含酚、高浓有机废水
主要作用机制	电化学产生·OH、活性氯	物理筛分、电荷排斥	催化产生·OH，开环断链	Fe ²⁺ 催化产生·OH
典型去除效率	COD: 35%~45%，氨氮: 30%，高毒有机物: >90%	悬浮物: >99%，总硬度: >98%	COD: >50%，提高B/C值	COD: >70%
技术优势	适应性强，反应快，无药剂添加	出水水质好，可实现分盐	无二次污染，与生化工艺耦合性好	反应速度快，设备简单
技术局限	能耗较高，电极材料成本高	膜污染问题，运行维护复杂	臭氧利用率待提高，催化剂成本	药剂消耗大，产生铁泥

三、煤化工污水深度处理后的回用工艺

（一）回用工艺流程优化

当前煤化工污水深度处理要求不断提升情形下，回用工艺通常是遵循“分级处理、分质回用”原则，科学集成多个工艺单元，以实现水资源利用效率和运行经济性的统一。深度处理单元是回用系统的核心，主要承担去除生化出水残余污染物、提升水质的作用。以本企业深度处理工艺为例，采用“臭氧催化氧化+膜生物反应器（MBR）”技术路线，利用臭氧催化氧化单元开环断链，提高污水可生化性；在MBR单元中，通过高效截留和生物降解协同作用，有效去除COD和氨氮，稳定出水水质，为后续脱盐单元运行创造良好条件。分质回用则是根据各用水点水质要求，合理配置差异化处理模块。经深度处理后的污水，70%~80%进入“超滤-反渗透”双膜系统，进行深度脱盐，产水输送至循环冷却水及锅炉补给水系统；剩余的反渗透浓水，进入“纳滤-高效反渗透”浓水浓缩单元^[10]。在纳滤单元中，将浓水中的二价例子和一价离子分离，提高Cl⁻浓度；利用高效反渗透将盐含量浓缩至6%~8%之间，确保总回收率提升至90%以上。最终产生的少量高浓盐水，进入蒸发结晶单元，实现零排放目标。

（二）不同回用场景方案

从上述分质利用要求出发，在回用工艺设计中，需要根据不同场景的水质啊哟球，设计差异化处理方案，以实现水资源的高效利用。以循环冷却水回用为例，水质要求相对适中，主要关注浊度、硬度、碱度、氯离子及硫酸盐等指标，通常情形下，采用深度处理+纳滤组合工艺，即可确保出水指标满足《工业循环冷却水处理设计规范》要求，有效避免换热器结垢，直接作为循环水系统的补充水。锅炉补给水对水质要求极为严格，尤其是在电导率、二氧化硅、铁离子等指标方面，都有明确的标准，以避免锅炉结垢和腐蚀现象，因此需要采用深度处理+反渗透+电除盐的深度除盐工艺^[11]。在反渗透单元中，将97%以上的盐分及几乎全部的有机物和胶体去除，将产水电导率控制在10 μS/cm以下，在后续电除盐单元中，利用离子交换树脂和直流电场，将电导率控制在0.2 μS/cm以下，以满足高压锅炉补水要求。工艺

用水直接参与生产反应，对水中有机物残留控制要求较高，以避免催化剂中毒或影响产品质量等现象，因此选用“活性炭吸附+移动床生物膜反应器（MBBR）”组合工艺。利用活性炭吸附单元的孔隙结构和吸附能力，深度去除污水中的微量有机物；利用MBBR单元的转性菌群，降解参与有机物，确保达到工艺用水纯净度要求。

（三）系统运行管理要点

针对回用系统运行稳定性高，工艺流程复杂等特征，在实际运行管理中，需关注如下方面要点：（1）加强膜污染控制，在污水深度处理中，受胶体、有机物和微生物在膜表面的沉积作用影响，常会出现跨膜压差上升、通量下降等现象，需要通过投加阳离子聚电解质等药剂方式进行预处理，优化胶体电中和效应，降低进入膜系统的污染物负荷；合理控制初始通量，避免出现快速污染；在日常运行中，及时采取物理和化学清洗维护，有效保障膜性能，延长膜运行寿命。（2）加强关键工艺参数的动态优化，由于不同工艺单元能耗和药耗对总运行成本的影响不同，需要充分利用在线监测和智能控制技术，动态优化工艺参数，例如在臭氧催化氧化单元运行中，利用COD去除率和臭氧投加量关系模型分析，在满足出水标准前提下，动态调整臭氧投加量，实现处理效果与运行成本的平衡。（3）构建智能化运维体系，利用数字孪生技术搭建智能监控平台，结合紫外-可见光谱、离子选择性电极等在线传感器监测数据，实现对膜污染的监测预警，在出现污堵风险时，提前进行自动清洗，以此能够有效提升整体运行效率。

四、结束语

煤化工污水深度处理和回用工艺优化，是推动产业绿色低碳转型的必然要求，对技术人员而言，应当明确零排放理念导向作用，准确分析不同类型深度处理技术应用优势，结合生产实际和技术发展，优化回用工艺体系，实现多工艺深度协同，以此才能够实现对污水的高效处理，切实降低污染排放，为推动煤化工产业高质量发展起到应有促进作用。

参考文献

- [1] 姚振璇, 刘洪强. 基于电解氧化技术的煤化工污水处理方案实例分享 [J]. 流程工业, 2026, (01): 88-90.
- [2] 蔡雨雨, 范统帅. 煤化工污水处理技术研究与应用 [J]. 山东化工, 2025, 54 (20): 188-190.
- [3] 白永强. 煤化工生产污水深度处理及回用技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (19): 148-150.
- [4] 呼文平. 基于双膜法深度处理技术的煤化工污水处理研究 [J]. 山西化工, 2024, 44 (12): 209-211.
- [5] 张立伟, 周树鹏, 张明. 非均相臭氧催化氧化工艺深度处理煤化工废水 [J]. 山西化工, 2024, 44 (06): 250-253.
- [6] 刘洪星. 零排放技术在煤化工污水处理中的实践研究 [J]. 现代盐化工, 2023, 50 (05): 29-31.
- [7] 塔斯很·阿勒太. 煤化工生产污水深度处理及回用技术 [J]. 化学工程与装备, 2023, (03): 233-235+232.
- [8] 马学成, 孟凡凯. 煤化工废水资源化回收及深度处理技术 [J]. 化工管理, 2022, (14): 40-42.
- [9] 高意. 煤化工废水项目污水处理案例分析 [J]. 化工管理, 2021, (26): 13-14.
- [10] 杨海琴. 污水零排放技术及其在煤化工污水处理项目中的应用分析 [J]. 决策探索 (中), 2020, (04): 23.
- [11] 齐亚兵, 许鹏飞, 冉佳城, 等. 芬顿氧化法用于煤化工含酚废水的深度处理 [J]. 能源化工, 2019, 40 (06): 59-62.

大型储罐底板腐蚀防护与安全评估策略研究

范宪雨

济南圣泉集团股份有限公司, 山东 济南 250200

DOI:10.61369/ME.2026020020

摘 要： 大型储罐是石油、化工、仓储等行业用于存储原料及成品的主要容器，而底板则是整个储罐的基础结构，在长期受到多种恶劣条件影响下容易产生腐蚀破坏问题，从而造成介质外泄甚至引发火灾或爆炸事故，危及人们的生命安全以及环境安全。本文基于真实的工程项目案例出发，对大型储罐底板所遭受的各种形式的腐蚀进行探讨并剖析其产生的原因及其带来的危害，而是更加注重贴近实际应用的技术措施，建立合理的安全评价方法，制定有效的防护与评估方案来帮助企业减小腐蚀所带来的损失降低潜在的安全隐患，促进相关产业的发展进步。

关 键 词： 大型储罐；底板腐蚀；腐蚀防护；安全评估；实用策略

Research on Corrosion Protection and Safety Assessment Strategies for Large Storage Tank Bottom Plates

Fan Xianyu

Jinan Shengquan Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250200

Abstract： Large storage tanks are the main containers used in the petroleum, chemical, and warehousing industries for storing raw materials and finished products. The bottom plate is the basic structure of the entire storage tank. Under the long-term influence of various harsh conditions, it is prone to corrosion damage, which may cause medium leakage and even trigger fire or explosion accidents, endangering people's lives and environmental safety. Based on real engineering project cases, this paper discusses various forms of corrosion suffered by the bottom plates of large storage tanks and analyzes the causes and hazards they bring. It pays more attention to practical technical measures, establishes a reasonable safety assessment method, and formulates effective protection and assessment plans to help enterprises reduce the losses caused by corrosion and lower potential safety hazards, promoting the development and progress of related industries.

Keywords： large storage tanks; bottom plate corrosion; corrosion protection; safety assessment; practical strategies

引言

大型储罐在石油、化工、粮油储备等行业中起着重要作用，是保证工业生产及人民生活的重要设施之一，在运行过程中安全性直接影响整个行业的稳定性和人民群众的生命财产安全。而储罐底板则是直接与地面以及所存物质接触的部分，受到物质的压力、土壤的侵蚀以及环境温度湿度的变化等多种因素的影响，容易发生腐蚀现象，这也是影响到储罐寿命以及造成事故的主要原因。因此有必要对大型储罐底板进行腐蚀防护的研究工作，制定合理的检测方法并提出有效的措施来应对现场出现的问题，从而提高储罐的安全性，延长使用寿命，减少维修费用开支等具有重要的现实意义，同时也是相关行业实现安全、高效、可持续发展的必然要求。

一、大型储罐底板腐蚀类型及成因分析

（一）电化学腐蚀

电化学腐蚀是大型储罐底板最常见的也是危害最大的一种腐蚀形式，主要发生在底板与土壤接触的外部和与储存介质接触的底部，在本质上就是金属在电解质溶液中发生的氧化还原反应，形成微电池造成金属损耗^[1]。从实际情况看，底板外侧所接触的

土壤中含有水分、盐分等电解质，而不同的地方土壤的酸碱性和透气性不同，使得底板金属表面出现电位差从而产生腐蚀电流；底板内侧一直接触着储存介质，其中含有水、硫化物、有机酸等成分可构成电解质溶液，特别是介质沉淀下来积聚在一起形成的积水会直接浸润到底板上，加剧电化学腐蚀的发展。另外，储罐底板上的焊缝、接口处因焊接质量不好或者表面清理不到位而产生局部电位差，成为电化学腐蚀的重点部位，易发生点蚀、缝隙

腐蚀等情况，这也在日常检查中最容易发现的问题^[2]。

（二）化学腐蚀

化学腐蚀是底板金属与周围的介质直接发生化学反应而使金属表面遭到破坏的一种形式，它不会产生电流效应，它的严重性取决于所储存物质的属性以及环境状况，在石油、化工行业当中，储罐中存放的原油、成品油、酸碱溶液等都会对底板金属造成一定的影响，比如原油中的硫化物就会和金属铁发生反应生成松散的硫化物，不能起到保护作用，从而继续腐蚀下去；酸碱介质也会直接侵蚀金属表面，改变金属内部结构，使底板变薄、强度降低。同时外界空气中的氧、二氧化碳等也会与底板金属发生氧化反应形成氧化层，一旦氧化层剥落，就会再次腐蚀金属表面，时间久了就会造成整个底板大面积腐蚀损坏^[3]。

（三）物理腐蚀与微生物腐蚀

物理腐蚀主要是由环境温度的变化、介质的冲刷、机械磨损等物理因素造成底板金属表面防护层破坏而引起的腐蚀。例如，在储罐运行时，介质流动对底板有冲刷作用，特别是在底部接管处，长时间冲刷会使该部位防腐层剥落，使金属裸露在介质中；环境温度骤变会使底板金属发生热胀冷缩现象，从而产生内应力，导致开裂，裂缝是腐蚀的良好入口点^[4]。微生物腐蚀一般发生在潮湿、缺氧条件下，土壤及储存介质中存在的微生物，它们的新陈代谢产物会对底板金属起到腐蚀作用，而且微生物还会附着于底板上形成生物膜，造成局部缺氧，加速电化学腐蚀，此类腐蚀比较隐蔽不易察觉，常常会造成突然性的腐蚀破坏。

（四）施工与运维不当引发的腐蚀

除上述自然腐蚀原因之外，施工质量以及后期维护管理疏忽也是造成底板腐蚀主要原因之一，在实际应用过程中往往被忽略。在施工期间如果底板焊接工艺粗糙，焊缝夹渣、气泡、未熔合等问题发生，则会引起介质渗入，产生局部腐蚀；底板表面除锈不到位，防腐漆涂抹不均或漏涂，会造成防腐层结合强度不足，易脱落，起不到有效防护效果；储罐基础建设不合理，地基下沉不一致，使底板受力分布不均，产生裂缝，从而引起腐蚀。在运行过程中如果没有及时对储罐进行检修、清污工作，储存物质中所含杂质及水分长时间滞留，就会加快底板腐蚀速度；防腐层老化而未能及时修补，导致金属裸露于外界环境中遭受侵蚀；对于储罐周围环境缺乏有效治理措施，如地面积水、污染等都会加大对外部底板腐蚀程度^[5]。针对上述施工与维护环节的隐患，必须采取系统性的全生命周期防控策略。在施工阶段，应严格遵循石油化工工程建设标准，对底板焊接实施无损检测，确保焊缝致密无缺陷；同时强化表面处理工艺，达到 Sa2.5 级除锈标准，并采用高压无气喷涂技术保证防腐层厚度均匀、无针孔，从源头切断腐蚀通道。此外，储罐基础需经夯实处理并设置防渗层，防止不均匀沉降导致底板变形。

在运行维护层面，需建立周期性清罐与检测机制，重点排查底板凹陷处及搭接部位的积液情况，利用超声波测厚技术监测底板剩余壁厚。针对防腐层老化问题，应采用同等级或更高性能材料进行局部修补，并考虑在罐底边缘板实施柔性防水密封。同时，应完善储罐区排水系统，及时清理积水，对已发生的局部腐蚀坑可采取堆焊修复或加装阴极保护系统等补救措施。通过强化施工质量管控与精细化维护管理，形成“以防为主、防修结合”的闭环体系，可显著延长储罐底板的使用寿命。

二、大型储罐底板腐蚀防护实用策略

（一）施工阶段的腐蚀防护措施

施工阶段是防腐蚀的第一道防线，在施工过程中做好防护措施可以有效预防腐蚀的发生，降低后期维护费用。首先应做好底板选材工作，根据所储存介质特性及环境情况选用具有良好耐腐蚀性的金属材料，并保证其质量达到相关要求，不得采用劣质材料；对焊缝、接口等易损位置使用抗腐蚀性强的焊材以及先进焊接技术进行施焊，在焊接之后立即对其进行探伤检查以排除焊接缺陷防止介质渗漏。其次应对底板表面进行处理，在焊接完成后将底板表面彻底除锈并清除表面氧化皮、铁锈、油污等杂质使表面清洁干燥以便于后续防腐涂料涂刷作业顺利开展；除锈完毕后应及时喷涂底漆以防再次被氧化。最后要合理规划储罐基础建设，保证地基水平且坚固以免造成日后因地基下沉而引起底板开裂现象发生；在基础上铺设一层防腐垫层隔离土壤与底板接触从而减轻了土壤腐蚀作用。

（二）防腐涂层防护技术

防腐涂层是大型储罐底板上使用最为普遍、最经济的一种防腐措施，主要是利用在底板表面涂覆一层致密的保护层来阻止金属与腐蚀性物质接触而实现防腐效果，在此过程中应注意选择合适的涂料以及正确的方法来进行涂抹并加以保养以适应现场的具体情况。对于涂料的选择应根据底板各部分所处的不同腐蚀条件选用相应的涂料品种，其中底板内部接触储存介质的部分应采用对介质具有较好抵抗能力并且附着力好、耐磨性强的涂料，例如环氧富锌底漆或者聚氨酯面漆等；而底板外部接触土壤的地方则应该用抗土壤腐蚀性能良好并且能够抵御潮湿环境影响及具备一定抗老化特性的涂料进行覆盖，比如沥青涂层或者是环氧煤沥青涂层等等。施工时要按照正确的工艺流程实施，保证涂层均匀一致地被涂抹在整个表面上并且没有任何遗漏或者气泡存在，同时也要注意控制好每一道工序中涂层的厚度达到规定的要求，在完成之后要及时做好后期养护工作使它充分固化定型从而增强其结合强度和防腐能力。

（三）阴极保护防护技术

阴极保护主要是为了减轻底板电化学腐蚀的影响，在底板外部土壤腐蚀以及内部介质腐蚀严重的情况下使用，分为牺牲阳极法和强制电流法两种，根据具体情况选择合适的方案保证防护的有效性和便利性。牺牲阳极法是在底板上安装比底板金属更活泼的阳极材料（例如锌合金、铝合金）来代替底板金属发生氧化反应从而达到保护的目的，该方法结构简单便于施工而且不需要外部电源供电适用于中小型储罐或者腐蚀较轻的情况，在后期只需要对阳极材料消耗情况进行定期查看并及时补充即可。强制电流法则是通过外部电源让底板成为阴极产生阴极保护电流阻止底板金属氧化腐蚀，这种方法防护效果更好适用范围也更大，可以用于大型储罐或者是腐蚀比较厉害的地方，在实际应用中要正确调节好电源的各项参数并且定时监测电流、电位的变化以确保防护作用满足需求。但是需要注意的是，阴极保护必须配合防腐涂层一起使用才能发挥出最好的防锈能力，防止单一防护措施带来的不足之处。

（四）运维阶段的腐蚀防护措施

防腐蚀是一项持久的工作，在运行期间的日常巡检及保养，

直接决定了防腐效果以及储罐寿命长短，是最贴近实际、最容易实施的一环。首先制定定期巡检计划，定期对储罐底板进行检查，特别是焊接处、连接点、拐角处等易损位置，观察是否有腐蚀、油漆剥落、开裂等情况发生，一旦发现问题立即处理，防止腐蚀继续恶化；定期清除罐体内杂质、积水，减轻介质对底板侵蚀作用。其次做好防腐层养护工作，定期查看防腐层老化程度，如有老化、脱落现象应及时除锈、重涂，使防腐层一直保持良好状态；避免尖锐物撞击底板表面造成涂层损坏。最后改善储罐周围环境条件，及时排泄地面水渍，防止土地被污染，定期监测土地酸碱值、含盐量，如果土地腐蚀严重，则应考虑更换新土或铺设防渗层等方式来缓解土壤腐蚀带来的危害。

三、大型储罐底板安全评估策略

（一）评估原则

对大型储罐底板进行安全评价应本着“实事求是、科学严谨、贴合实际、注重实效”的原则，根据所查评储罐的服务时间长短以及其存储物质种类、腐蚀环境条件、施工工艺水平高低及日常维护保养状况等具体情况来确定合理的检测项目和检测内容，使得到的结果能准确地反映出该类设备的实际运行情况，在检查中要特别注意腐蚀隐患点及危险源的存在位置，重点检查容易出现腐蚀现象或者可能造成事故的位置，同时也要考虑到检测的成本费用以及实施难度的问题，防止出现重复检测或是漏检的情况发生。

（二）评估内容

安全检测的主要对象为底板腐蚀状况以及结构安全性，根据具体情况而定一般包括以下几部分：一是对腐蚀情况进行分析，主要针对底板腐蚀部位、腐蚀形式、腐蚀程度进行考察，观察有无点蚀、穿孔、裂纹、涂层剥落等情况发生，预测腐蚀发展趋势；二是对于结构强度进行检验，检查底板厚度、强度及刚度能否达到使用需求，查看是否有变形、下沉、开裂等问题出现，判定底板承重能力；三是防护体系检测，对防腐层和阴极保护系统运行情况进行分析，观察防腐层老化、脱落情况如何，阴极保护系统是否良好运作，判断防护体系防护作用大小；四是维护保养评价，对企业维修养护制度、日常巡检记录、隐患排查整改情况进行考察，确定其维护保养工作是否到位，能否及时发现并处理腐蚀隐患。

（三）评估方法

根据实际情况，选取简便易行、切实有效的检验方式，不采用繁琐的仪器设备及专业技术，保证企业可以自行实施一般性的检查工作，在需要的情况下也可以联合第三方专业检测单位对特

定项目进行专项检查。一是直观观察法：是最基本也是最常用的一种检验手段，由检查人员用肉眼或者借助一些简易工具来观察底板表面是否有腐蚀、油漆剥落、开裂等问题，尤其要着重查看焊接处、连接点以及边缘等容易出现问题的地方，适用于日常的一般性检查；二是超声波探伤法：使用超声波探伤仪测量底板厚度以确定其被腐蚀而变薄的程度并排查有无内部裂纹或分层等情况发生，该方法操作方便快捷并且精确度高，适合用于周期性的专门检查；三是涂层测厚法：利用涂层测厚计测定防腐涂层厚度并观察其粘结强度从而了解涂层老化程度以便尽早地发现涂层破损、脱落等问题；四、经验分析法：依据储罐运行时间长短、所装物料种类、腐蚀条件以及维护保养状况等因素，依靠技术人员现场判断底板腐蚀情况及安全性，给出相应建议及处理措施。

（四）评估结果处理与整改

安全检测结束后，及时汇总分析检测结果，依据腐蚀情况及安全隐患大小分为一般风险、较大风险、重大风险三级。针对一般风险，主要是轻度腐蚀、涂层局部脱落等问题，采取一般性维护措施，定期巡查监控，适时处理；针对较大风险，主要是中度腐蚀、局部开裂、底板厚度稍有减少等问题，立即停止相关操作，制定专门整改计划，迅速实施防腐补救、加固等工作，整改完毕后再次检验，达标之后才能投入使用；针对重大风险，主要是严重腐蚀、穿孔、大面积开裂、底板厚度大幅度降低等问题，马上停用该储罐，实施应急抢救措施防止事故的发生，在条件允许的情况下替换掉底板，从根本上排除危险因素。另外还需要建立相应的评估档案，保存整个过程中的所有信息包括评估内容、结论、整治方法以及效果等，供以后的评估与维修使用。

四、结论

对大型储罐底板进行腐蚀防护以及对其进行安全评价是保证其正常工作的基本要求，也是关系到相关行业安全生产乃至社会公共安全的重要一环。本文基于现场实际情况介绍了造成大型储罐底板发生电化学腐蚀、化学腐蚀及物理腐蚀的主要原因，并提出了在施工过程中应注意的问题，在涂装方面应采取措施，在阴极保护上需要做的工作，在日常维护管理中应该注意的地方等内容；建立了一套切实可行、具有指导意义的安全检查制度并提出相应的检测方法和处理方案，摒弃了空泛笼统的论述方式，而是采用具体实在的技术手段和应对措施来解决实际生产中存在的关于储罐底板防腐和安全性检查方面的难题。随着相关行业的不断发展进步，大型储罐所处的工作条件将会越来越恶劣，对于防腐以及安全性的需求也会越来越高。

参考文献

- [1] 刘文博. 原油储罐底板腐蚀原因及对策研究 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 246-248.
- [2] 江锋, 庞鹏, 金辉, 李杨平, 舒同, 肖娜. 滨海核电厂室外柴油储罐腐蚀分析与处理对策 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(06): 88-91+102.
- [3] 栾媛, 汪海波, 王岗. 钢制原油储罐的腐蚀检测与防护 [J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(09): 33-37.
- [4] 邱姝娟, 卢可义, 王淑英, 史兴治. 原油储罐腐蚀原因与防护措施 [J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(08): 45-47+82.
- [5] 姜鹏. 钢制原油储罐底板腐蚀机理及防护技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32 (07): 49.

基于相场法的液态 CO₂ 相变爆破致裂裂缝扩展研究

刘祖沛, 袁志刚*, 赵锦涛

湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201

DOI:10.61369/ME.2026020026

摘 要 : 液态 CO₂ 相变爆破致裂是一种安全、高效、环保的煤岩增透技术, 但施工现场难以观察到其裂缝扩展。因此, 本文基于相场断裂理论, 通过引入初始应力项建立的能量泛函使用 COMSOL 进行多场耦合求解, 并与现场试验相结合研究液态 CO₂ 相变爆破致裂煤岩裂缝扩展规律, 为复杂地质环境中的施工提供了可靠的技术工具。

关 键 词 : 液态 CO₂ 相变爆破; 相场法; 裂缝扩展

Research on Crack Propagation Induced by Liquid CO₂ Phase Transition Blasting Based on the Phase Field Method

Liu Zupei, Yuan Zhigang*, Zhao Jintao

School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

Abstract : Liquid CO₂ phase transition blasting fracturing is a safe, efficient, and environmentally friendly technique for enhancing coal and rock permeability, but observing crack propagation on site is challenging. Therefore, based on the phase field fracture theory, this study establishes an energy functional incorporating initial stress, employs COMSOL for multi-field coupling solution, and investigates the crack propagation laws through field experiments, providing a reliable technical tool for construction in complex geological environments.

Keywords : liquid CO₂ phase transition blasting; phase field method; crack propagation

引言

针对低透气性煤层的瓦斯治理问题, 液态 CO₂ 相变爆破通过高压气体产生拉应力^[1]致裂岩体达到增透效果, 目前相关研究在现场或者实验室难以观察到其裂缝扩展。因此有必要对液态 CO₂ 相变爆破致裂煤岩裂缝扩展规律进一步研究。

近年来, 相场法作为一种高效的弥散型裂缝模拟方法, 能够自动演化获取裂缝路径及位置^[2]。这极大的避免了追踪裂缝面的繁琐性并解决了裂缝扩展出现的复杂转向和相交等问题, 因此相场法在模拟裂缝的产生、扩展等方面具有很好的优势^[3]。

本文基于变分断裂理论为框架, 通过建立包含初始应力项的能量泛函, 推导了位移场、渗流场、相场的控制方程, 在 COMSOL 中实现了多物理场耦合求解, 并结合试验研究 CO₂ 相变爆破致裂煤岩的裂缝扩展路径和偏转行为, 为现场施工提供了科学依据。

一、液态 CO₂ 相变爆破相场断裂数学模型

(一) 系统的总能量泛函

考虑初始地应力作用时, 多孔弹性介质域 Ω 的能量泛函 $L(u, p, \Gamma)$ 为^[4]:

$$\begin{aligned} L(u, p, \Gamma) = & L_k + L_p - L_\varepsilon - L_{ins} - L_f + L_{ext} \\ = & \int_{\Omega} \Psi_k(\dot{u}) d\Omega + \int_{\Omega} \Psi_p(p, u) d\Omega - \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_\varepsilon(\varepsilon) d\Omega \\ & - \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_{ins} d\Omega - \int_{\Gamma} G_c dS + \left(\int_{\Omega} b^* \cdot u d\Omega + \int_{\partial\Omega_t} t^* \cdot u dS \right) \quad (1) \end{aligned}$$

式 (1) 中, L_k 为动能、 L_p 为孔隙压力做功量、 L_ε 为弹性能、 L_{ins} 为初始应变能、 L_f 为断裂能及 L_{ext} 为外力做功量。其中, $\Psi_k(\dot{u})$ 为单位体积动能, $\Psi_p(p, u)$ 为孔隙压力势能密度, $\Psi_\varepsilon(\varepsilon)$ 为弹性能密度, Ψ_{ins} 为初始应变能密度, G_c 为临界能量释放率。

(二) 尖锐裂缝的相场近似

通过引入相场变量 d 描述损伤, 再通过引入裂缝表面密度函数 $\gamma(d, \nabla d)$ 来描述单位体积内的等效裂缝表面积, 所以裂缝表面断裂能数学形式表达为^[5]:

$$\pi = \int_{\Gamma} G_c dS \approx \int_{\Omega} G_c \cdot \gamma(d, \nabla d) d\Omega = \int_{\Omega} G_c \left(\frac{d^2}{2l_0} + \frac{l_0}{2} \nabla d \cdot \nabla d \right) d\Omega \quad (2)$$

根据液态 CO₂ 相变爆破致裂的两阶段特点, 采用不同应变能分解方式, 并引入退化函数 $g(d)$ 以防止奇异性, 则域 Ω 弹性能泛函为^[6]:

$$L_{\varepsilon} = \int_{\Omega/\Gamma} g(d) \Psi_g(\varepsilon) d\Omega \quad (3)$$

基于煤岩体裂缝的形成机制, 应变能分解为两部分, $g(d)$ 只作用与拉伸应变, 所以:

$$L_{\varepsilon} = \int_{\Omega} \{[(1-d)^2(1-k)+k] \Psi_g^+(\varepsilon) + \Psi_g^-(\varepsilon)\} d\Omega \quad (4)$$

同理, 考虑初始应力对裂缝扩展没有贡献。则退化函数在能量泛函 L_{ins} 中的应用为:

$$L_{ins} = \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_{ins} d\Omega \approx \int_{\Omega} g(d) \sigma_0 : \varepsilon d\Omega \quad (5)$$

(三) 控制方程

根据变分原理^[7], 令总能量泛函等于0, 推导的位移场的控制方程为:

$$\sigma_{ij,j}^{por} + b_i^* = \rho \ddot{u}_i \quad (6)$$

由于材料的断裂行为是不可逆的, 所以引入历史应变场 $H(x,t)$, 相场控制方程为:

$$\left[\frac{2l_0 H(1-k)}{G_c} + 1 \right] d - l_0^2 \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{2l_0(1-k)H}{G_c} \quad (7)$$

将多孔介质域 Ω 划分为三个子域: 未断裂域 Ω_p 、过渡域 Ω_t 和断裂域 Ω_f 。各子域物理力学参数通过线性指示函数和插值获得^[9], 如图1所示:

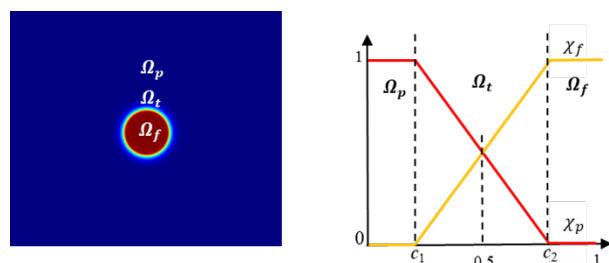


图1 多孔介质域 Ω 子域分布及线性指示函数

采用达西定律描述渗流, 统一的质量守恒方程为^[10]:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho k}{\mu} (\nabla p + \rho g) \right) + \rho S \frac{\partial p}{\partial t} = q - \rho \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (8)$$

二、液态 CO₂ 相变爆破相场断裂模型验证及分析

为验证相场断裂数学模型可靠性, 模拟文献^[11]中实验室混凝土试件, 采用 $400 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ (如图2) 来模拟液态 CO₂ 相变爆破致裂过程。相关计算参数如表1所示。

表1 液态 CO₂ 相变爆破致裂算例模拟采用相关参数

参数	值	单位	参数	值	单位
E	5.2	GPa	v	0.27	--
G _c	10	N/m	k	1×10^9	--
l ₀	3×10^{-3}	m	C ₁	0.4	--
C ₂	1	--	Q _p , Q _f	0	kg/(m ³ · s)
ρ_p	1.784	kg/m ³	ρ_f	1.784	kg/m ³
μ_p	1×10^3	Pa · s	μ_f	1×10^3	Pa · s
K _p	1×10^{-14}	m ²	K _f	1×10^{-6}	m ²
C _p	0.97	1/Pa	C _f	0.97	1/Pa

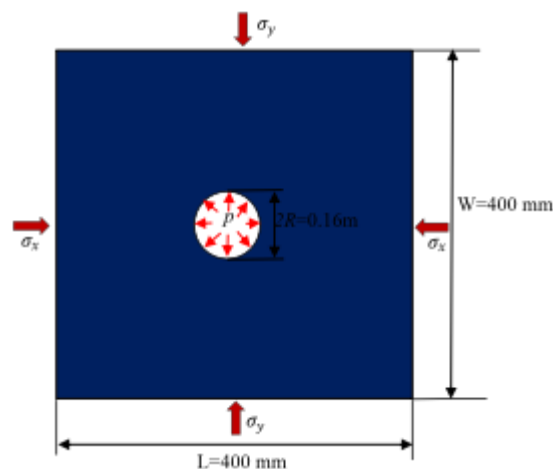
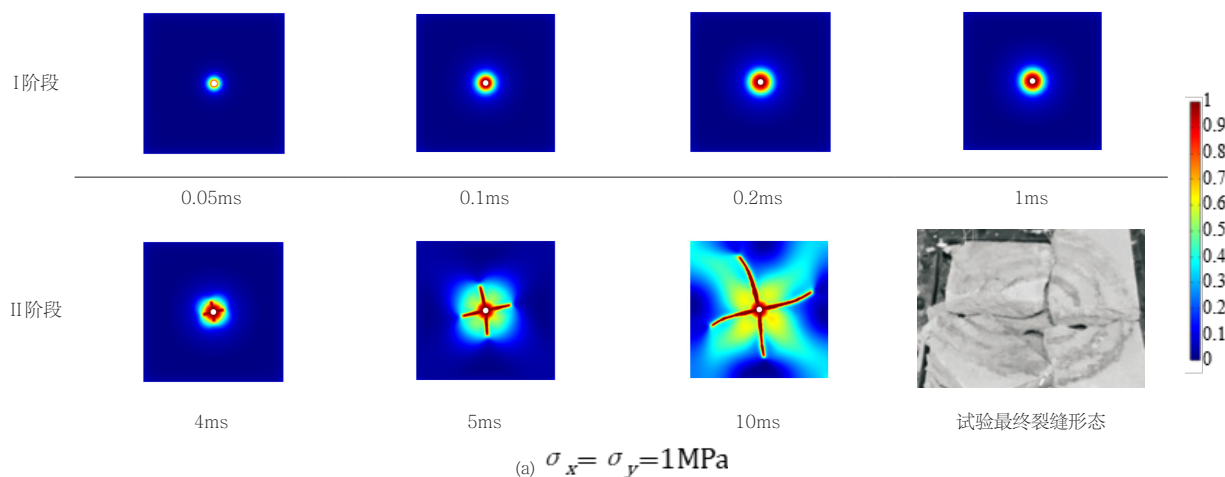


图2 液态 CO₂ 相变爆破致裂算例模拟几何模型



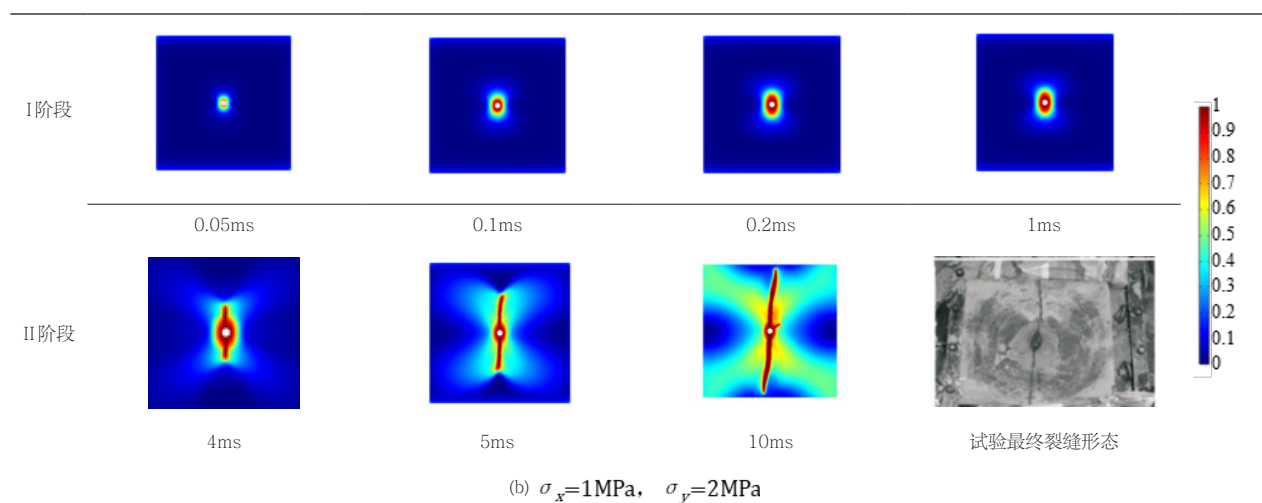


图3 液态 CO₂相变爆破致裂算例试验结果与模拟结果裂缝分布

由图3(a)可知，试验结果为，试件形成以钻孔为中心直径78mm的粉碎区，产生对称分布的4条裂隙，通过钻孔成“十”字交叉分布，并贯穿整个试件；模拟结果为，试件形成以钻孔为中心直径60mm的粉碎区，产生对称分布的4条裂缝，通过钻孔成“十”字交叉分布。图3(b)可知，试验结果为试件钻孔内部形成长65mm、宽30mm的椭圆型粉碎区，产生2条分布沿竖直方向的裂缝，贯通整个试件；模拟结果为试件钻孔内部形成长60mm、宽30mm的椭圆型爆破空腔，产生2条分布沿竖直方向的裂缝和1条较短裂缝，两条较长裂缝贯穿整个试件，是由于在边界加载时裂缝扩展过程中，地应力效应占据主导地位。两种边界加载条件下的裂缝形态模拟结果与实验观测的裂缝形态结果基本一致，

本文提出的相场断裂数学模型及数值实现在模拟地应力作用下液态 CO₂相变爆破致裂裂缝扩展方面是可靠的，能够为复杂的地质工程提供依据。

三、结论

(1) 基于相场断裂理论以及液态 CO₂相变爆破致裂煤岩裂缝特点，构建了考虑初始地应力场的相场断裂数学模型。分别描述 I-II 型混合裂缝扩展与 I 型裂缝扩展行为，克服了传统相场法仅适用于拉伸裂缝的局限性。

(2) 液态 CO₂相变爆破致裂数值模拟与试验结果在粉碎区形态、主裂缝分布及扩展方向上吻合良好，验证了模型模拟地应力作用下裂缝演化过程的有效性与可靠性。

(3) 模型揭示了地应力差异对裂缝走向的控制作用，为液态 CO₂相变爆破技术在复杂地质条件下的工程应用提供了理论依据与数值分析工具。

参考文献

- [1] 袁永，陈忠顺，梁小康等. 二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展 [J]. 煤炭科学技术. 2024, 0315: 118.
- [2] 梁鑫，侯鹏，薛熠，刘嘉，高峰，基于相场法的岩石预制裂缝定向水力压裂裂缝扩展规律研究，岩土工程学报 [J], 47 (2025) 1865-1873.
- [3] Provatas N, Elder K. Book-phase-field methods in materials science and engineering[M]. Wiley-VCH Press, 2010.
- [4] 温继伟，项天，朱茂，胡萍，毛建设，荆羽慧，基于扩展有限元分析的页岩水力压裂裂缝扩展规律探究 [J], 钻探工程, 49 (2022) 177-188.
- [5] Zhou S W, Zhuang X Y, Timon Rabczuk, Phase field method for quasi-static hydro-fracture in porous media under stress boundary condition considering the effect of initial stress field[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 107: 102523.
- [6] Bourden M.J., Verhoosel C.V., Scott M.A., et al. A phase-field description of dynamic brittle fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2012, 217220(1): 7795.
- [7] Francfort G, Marigo J.J. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(8): 1319 - 1342.
- [8] Miehe C, Hofacker M, Welschinger F, A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2010, 199: 2765 - 2778.
- [9] Lee S, Wheeler M.F, Wick T. Pressure and fluid driven fracture propagation in porous media using an adaptive finite element phase field model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 305 (2016) 111 - 132.
- [10] Biot M.A. J Acoust Soc of A me, 1962, 34 (9) : 1254-1264.
- [11] 孙可明，辛利佳，吴迪，等. 初应力条件下超临界 CO₂气爆致裂规律研究 [J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473482.

高温水热超稳 Y 型分子筛改性分析

王定国

中国石化催化剂有限公司长岭分公司, 湖南 岳阳 414000

DOI:10.61369/ME.2026020027

摘 要 : 超稳 Y 型分子筛在催化裂化及重油转化中具有重要作用, 但在高温水热环境下易发生骨架脱铝、晶胞收缩及酸性衰减等结构变化, 进而影响其稳定性与催化性能。围绕高温水热条件下超稳 Y 型分子筛的改性问题, 以晶胞收缩为分析主线, 考察骨架脱铝引起的结构重整过程, 分析其对孔道特征、酸性中心分布及应用性能的影响, 并结合水热处理、化学改性和复合调控等路径, 探讨晶胞参数变化与材料性能演变之间的对应关系。结果表明, 适度晶胞收缩有利于骨架稳定化和酸性优化, 过度收缩则会导致孔结构受损和催化功能下降。围绕晶胞收缩开展改性分析, 可为高稳定性超稳 Y 型分子筛的优化提供依据。

关 键 词 : 超稳 Y 型分子筛; 高温水热; 晶胞收缩; 骨架脱铝; 改性分析

Modification Analysis of High Temperature Hydrothermal Ultra Stable Y Zeolite

Wang Dingguo

Changling Branch of Sinopec Catalyst Co., Ltd., Yueyang, Hunan 414000

Abstract : ultra stable Y-zeolite plays an important role in catalytic cracking and heavy oil conversion, but it is prone to structural changes such as dealumination of framework, cell shrinkage and acid decay under high temperature hydrothermal environment, which will affect its stability and catalytic performance. Focusing on the modification of ultra stable Y-zeolite under high temperature hydrothermal conditions, the structural reforming process caused by framework dealumination was investigated by taking cell shrinkage as the main analysis line, and its influence on pore characteristics, acid center distribution and application performance was analyzed. The corresponding relationship between cell parameter changes and material performance evolution was discussed by combining hydrothermal treatment, chemical modification and composite control. The results show that moderate cell shrinkage is conducive to the stabilization of the skeleton and the optimization of acidity, while excessive shrinkage will lead to the damage of pore structure and the decline of catalytic function. The modification analysis around cell shrinkage can provide a basis for the optimization of high stability and ultra stable Y-zeolite.

Keywords : ultra stable Y zeolite; high temperature hydrothermal; cell contraction; dealumination of framework; modification analysis

超稳 Y 型分子筛是催化裂化体系中的关键酸性材料, 其骨架结构、晶胞参数和孔道特征直接影响大分子裂化反应的活性、选择性与运行稳定性。随着原料重质化趋势增强, 催化剂长期处于高温含水环境中, Y 型分子筛在服役过程中常出现骨架脱铝、晶胞收缩、酸中心迁移和孔道结构变化等现象, 材料稳定性面临更高要求^[1]。晶胞收缩是高温水热条件下超稳 Y 型分子筛骨架演变的重要结构表征, 它不仅反映脱铝程度, 也与孔结构调整、酸性重构及催化性能变化密切相关。

一、高温水热处理下超稳 Y 型分子筛的晶胞收缩与结构演变

(一) 高温水热环境对晶胞收缩形成的影响

超稳 Y 型分子筛骨架由硅氧四面体和铝氧四面体构成, 在高温水热条件下, 骨架中的 Al—O 键稳定性下降, 部分骨架铝逐步脱离四面体配位环境, 导致骨架硅铝比上升。随着骨架铝减少, 晶胞参数发生变化, 表现为晶胞逐步收缩。晶胞收缩不是孤立现象, 而是骨架脱铝和局部重排共同作用的结果。适度晶胞收缩通

常表明分子筛骨架由相对不稳定状态向更高硅、更高稳定性的结构转变, 这一过程有利于提高材料的热稳定性和水热耐受能力。若水热处理过强, 晶胞收缩幅度过大, 则意味着骨架缺陷持续累积, 材料会由稳定化重整转向结构损伤, 最终影响孔道完整性和功能保持能力。因此, 晶胞收缩程度可视为判断高温水热改性是否合理的重要结构信号。

(二) 晶胞收缩对孔道结构与比表面积的影响

晶胞收缩直接反映骨架单元排列方式的变化, 这种变化会进一步传递至孔道体系。高温水热处理初期, 伴随适度脱铝和晶胞

轻微收缩，部分不稳定结构单元被清除，孔道环境趋于规整，材料可能保持较好的微孔骨架。随着晶胞持续收缩，骨架局部应力增加，微孔入口可能收窄，孔壁稳定性下降，导致比表面积、微孔体积和孔道连通性逐步减弱。若同时伴随非骨架铝沉积和局部重整，还可能形成一定数量的次级孔结构，使材料呈现微孔—介孔并存状态^[9]。由此可见，晶胞收缩并不只对应骨架尺寸变化，它还通过影响孔道尺度和空间连续性改变分子扩散条件。对超稳Y型分子筛而言，理想的改性方向不是单纯追求更大收缩幅度，而是在晶胞适度收缩的基础上维持主体微孔结构，并使传质路径得到优化。

（三）晶胞收缩诱导的酸性中心重构特征

高温水热条件下的晶胞收缩通常伴随骨架铝数量减少和铝物种迁移，这会直接改变分子筛酸性中心的构成与分布。随着晶胞收缩加深，部分由骨架铝形成的 Brønsted 酸中心减少，强酸位点衰减，而脱出的铝物种则可能形成新的 Lewis 酸中心。酸性中心的这种变化并非简单的总酸量降低，而是酸种比例、酸强度和酸位空间分布的重整过程。晶胞轻度收缩时，酸性中心通常会由过强向适中方向调整，有利于降低二次裂化和积炭倾向；晶胞过度收缩时，骨架完整性下降，酸位数量和可接近性同步受损，催化活性也会明显衰减。因此，晶胞收缩不仅是结构表征参数，也是酸性优化与功能重构的重要前提，其合理控制直接关系到超稳Y型分子筛的催化适配性。

二、晶胞收缩导向下超稳Y型分子筛的改性路径与工艺控制

（一）水热改性工艺参数对晶胞收缩的调节作用

高温水热改性工艺中，处理温度、蒸汽分压、处理时间和升温速率共同决定晶胞收缩的形成程度。温度升高会加快骨架脱铝和局部重排，使晶胞参数更明显地向收缩方向变化；蒸汽分压增大会增强水热作用强度，推动晶胞收缩过程加快；处理时间决定晶胞收缩的演变深度，时间不足时结构重整不充分，时间过长则可能引起过度收缩；升温速率则影响骨架应力释放方式，关系到缺陷扩展速度。工艺调控的关键不在于单一参数最优，而在于构建一个能够使晶胞适度收缩的协同窗口，使骨架稳定化、孔结构保持和酸性调整在同一工艺过程中协调实现。对超稳Y型分子筛改性而言，晶胞收缩程度是工艺效果的集中体现，也是参数优化的重要判据。

（二）化学改性对晶胞收缩过程的强化与修正

单纯水热处理虽然能够诱导晶胞收缩，但对收缩幅度和后续结构结果的控制仍有限，因此常需引入化学改性手段进行强化和修正。酸处理能够去除部分非骨架铝，使由无序沉积造成的局部

堵塞减轻，从而使晶胞收缩所对应的结构演变更加均衡。稀土离子交换可通过增强骨架局部稳定性，减缓过快脱铝引起的剧烈收缩，使晶胞参数变化保持在较可控范围内。补硅处理有助于提高骨架硅含量，抑制晶胞过度收缩后的缺陷扩展，改善结构连续性。磷改性则能调节酸中心强弱和分布，在晶胞收缩已发生的基础上进一步稳定酸性环境。化学改性的作用，不只是改变某一部性质，而是围绕晶胞收缩这一结构主线，对骨架重整过程进行修饰，使收缩效应更多地表现为稳定化而非损伤化。

（三）复合改性下晶胞收缩与孔酸匹配的协同优化

在复杂催化反应体系中，仅通过单一手段控制晶胞收缩，往往难以兼顾结构稳定、传质效率和酸性匹配等要求。复合改性通过将水热处理与脱铝、补硅、稀土交换等手段结合起来，使晶胞收缩不仅成为骨架变化的结果，也成为整体性能设计的切入点^[9]。合理的复合改性可使晶胞在适度收缩过程中完成结构稳定化，同时保留主体微孔骨架并引入适量次级孔，从而改善大分子扩散能力。与之相对应，酸中心则由过强、过密分布向中强酸主导、空间分布更均衡的方向调整。这样形成的孔结构与酸性匹配关系，更适合重质原料转化条件下的反应需要。复合改性的价值，在于将晶胞收缩从单纯结构表征参数转化为连接骨架、孔道和酸性协同优化的核心控制线索。

三、晶胞收缩相关表征方法与性能评价

（一）晶胞收缩及骨架稳定性的表征分析

晶胞收缩的识别和分析，是高温水热超稳Y型分子筛改性研究中的关键环节。X射线衍射能够通过特征峰位置和晶胞常数变化反映分子筛晶胞收缩程度，是判断骨架演变最直接的方法。固体核磁共振可用于识别骨架铝与非骨架铝的存在状态，从而解释晶胞收缩与脱铝行为之间的内在联系。

（二）晶胞收缩对孔结构与酸性质的测试评价

晶胞收缩对材料功能的影响，需要通过孔结构与酸性质测试进一步加以验证。氮气吸附—脱附测试可获得比表面积、微孔体积、总孔容及孔径分布等参数，用于判断晶胞收缩后微孔骨架是否保持、传质路径是否优化以及次级孔结构是否适度形成。程序升温脱附和吡啶吸附红外测试可分析总酸量、酸强度和 Brønsted 酸与 Lewis 酸比例的变化，用于揭示晶胞收缩对酸中心重构的实际影响。测试结果若显示晶胞适度收缩、比表面积保留率较高、中强酸比例提升且酸位分布更均衡，通常说明改性效果较理想；若晶胞收缩过大，同时伴随微孔体积明显下降、总酸量快速衰减和酸位可达性降低，则说明结构演变已超出合理范围。由此，晶胞收缩可以作为连接表征结果与性能评价的重要中间参数。

表1 高温水热改性超稳Y型分子筛晶胞收缩相关表征指标与评价重点

指标类别	具体指标	常用测试方法	反映内容	评价重点
晶胞参数	晶胞常数、特征峰位变化	XRD	晶胞收缩程度与骨架有序性变化	晶胞收缩是否适度、结晶保持率是否稳定
骨架铝状态	骨架铝、非骨架铝分布	²⁷ Al MAS NMR	脱铝程度及铝物种迁移状态	晶胞收缩是否由适度脱铝引起
孔结构	比表面积、微孔体积、孔径分布	N ₂ 吸附—脱附（BET）	晶胞收缩对孔道体系的影响	微孔骨架是否保持、扩散通道是否改善
酸性质	总酸量、酸强度、B 酸 /L 酸比例	NH ₃ -TPD、Py-IR	晶胞收缩诱导的酸性重构	总酸衰减是否可控、中强酸占比是否提升
微观形貌	晶粒形貌、表面缺陷	SEM、TEM	局部损伤与颗粒完整性	晶胞收缩是否伴随明显缺陷累积
稳定性能	老化后结构与酸性保持情况	水热老化试验结合复测	长期服役条件下的稳定性	晶胞收缩后结构和功能是否持续稳定
应用性能	活性、选择性、积炭倾向	催化评价实验	晶胞收缩在实际反应中的最终表现	是否实现稳定性与催化性能平衡

通过上述指标的联合分析，可较为清晰地判断晶胞收缩对骨架、孔道和酸性中心的综合影响，并为改性效果判定提供结构依据。

（三）以晶胞收缩为核心的热稳定性与水热稳定性判定

超稳 Y 型分子筛在高温和蒸汽环境中的应用价值，主要取决于晶胞收缩是否处于可控范围以及由此带来的结构与功能保持能力。热稳定性评价关注晶胞参数变化、结晶度保持和酸性损失程度，水热稳定性评价则更强调蒸汽作用下晶胞收缩的持续演变。为定量表征高温水热处理前后超稳 Y 型分子筛的结构变化幅度，可引入晶胞收缩率，其表达式为：

$$S = \frac{a_0 - a_t}{a_0} \times 100\%$$

其中， S 为晶胞收缩率， a_0 为改性前样品的晶胞常数， a_t 为处理后样品的晶胞常数。 S 值越大，表明晶胞收缩程度越明显。若晶胞收缩适度，且结晶保持率、孔结构和酸性仍处于较稳定状态，说明材料具有较好的热稳定性和水热稳定性；若晶胞持续收缩并伴随微孔塌陷、酸性衰减和活性下降，则表明材料已进入失稳区间。

四、晶胞收缩对高温水热超稳 Y 型分子筛应用适配性的影响

（一）晶胞收缩对催化活性位保持能力的影响

催化裂化反应条件下，超稳 Y 型分子筛活性位的保持能力与晶胞收缩程度存在密切关系。适度晶胞收缩通常对应骨架脱铝后的稳定化重整，有利于削弱不稳定强酸位的快速失活倾向，并提高有效酸中心的长期利用率。此时，活性位不仅在数量上得到较好保留，在空间可接近性上也更具优势。若晶胞收缩过度，骨架缺陷增多，孔道连续性受损，酸位可达性下降，即使残余酸中心

仍存在，其实际利用效率也会显著降低。

（二）晶胞收缩对重油转化扩散性能与选择性的影响

重油分子尺寸大、反应过程复杂，对分子筛孔道体系和酸性环境极为敏感。晶胞适度收缩时，材料骨架趋于稳定，孔结构在保持主体微孔特征的同时可能形成更合理的传质环境，有助于大分子进入活性中心并及时扩散出孔道，降低孔内深度裂化和缩合积炭倾向。与此同时，酸性中心由过强向中强方向调整，也更利于控制副反应发生，改善目标产物选择性。若晶胞收缩过大，则微孔入口变窄、扩散阻力增加，反应物和中间产物易在孔内滞留，导致选择性下降和积炭加剧。

（三）工业应用中晶胞收缩控制的优化方向

从工业应用角度看，超稳 Y 型分子筛的改性优化不能只停留在实验室层面的脱铝或酸位调节，而应将晶胞收缩作为结构控制的重要抓手。不同硅铝比、晶粒尺寸和原料条件下，材料对高温水热环境的响应不同，晶胞收缩幅度及其后续性能影响也存在差异。工业催化剂体系中基质、粘结剂和功能组分的存在，还会进一步放大或削弱晶胞收缩的实际效应^[4]。未来优化方向应围绕目标反应体系，建立晶胞参数变化与孔结构保持、酸性分布、活性衰减和再生耐受之间的对应关系，使晶胞收缩由经验判断转向可控调节。

结语：高温水热条件下，超稳 Y 型分子筛的改性效果归根结底取决于晶胞收缩过程是否处于合理范围。适度晶胞收缩反映了骨架脱铝后的稳定化重整，有助于实现结构保持、孔道优化和酸性匹配之间的协调统一；过度晶胞收缩则会引发骨架缺陷累积、孔结构受损和催化功能衰减。以晶胞收缩为主线分析超稳 Y 型分子筛的改性行为，有助于从骨架演变源头理解材料性能变化规律，并为高稳定性、高适配性催化材料的优化提供更集中的技术依据。

参考文献

- [1] 陈光敏, 孙永杰, 陈鹏飞, 刘定华, 刘晓勤. 碱处理改性 ZSM-5 吸附分离间 / 对甲酚异构体 [J]. 高校化学工程学报, 2025, 39(03): 401-409.
- [2] 魏鑫杰, 王静静, 温志慧, 廖俊杰, 常丽萍. FAU 分子筛中金属活性位的构筑与表征研究进展 [J]. 应用化工, 2024, 53(12): 2989-2993+2998.
- [3] 王永超, 严加松, 王若瑜, 李蕊, 王仕豪. 苯乙烯在 4 种分子筛催化剂上的催化裂化规律 [J]. 应用化工, 2023, 52(05): 1343-1346+1352.
- [4] 李贵生, 史静, 何万仁, 赵国良, 滕加伟. 高分子及表面活性剂对 ZSM-5 分子筛形貌调控 [J]. 石油化工, 2023, 52(01): 20-28.

基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Au}$ 自组装构建电化学适配体传感器 检测四环素

王格, 张琰, 刘洁*

湖南工业大学, 湖南 株洲 412000

DOI:10.61369/ME.2026020028

摘 要 : 四环素类抗生素滥用严重威胁食品安全与人体健康, 研发快速灵敏的检测技术, 是防控残留危害的重要保障。本研究创新性构建适配体功能化 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Au}$ 纳米复合材料电化学传感器, 结合 Ti_3C_2 高导电性、Au 优良生物相容性与适配体高特异性识别机制, 实现 TET 超灵敏检测。该传感器线性检测范围 1–40 ng/mL, 检测限低至 4.8017 ng/mL, 选择性、抗干扰性与重现性优异, 牛奶实际样品加标回收率 101.33%–103.36%, 结果准确可靠, 在食品安全快速检测领域应用前景广阔, 为动物性食品抗生素残留监测提供高效便捷新策略。

关 键 词 : MXene; 纳米材料; 适配体传感器

Construction of an Electrochemical Aptamer Sensor Based on $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Au}$ Self-Assembly for Tetracycline Detection

Wang Ge, Zhang Yan, Liu Jie*

Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412000

Abstract : The abuse of tetracycline antibiotics seriously threatens food safety and human health. Developing rapid and sensitive detection technologies is an important guarantee for preventing residual hazards. This study innovatively constructed an aptamer-functionalized $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Au}$ nanocomposite material electrochemical sensor, combining the high conductivity of Ti_3C_2 , the excellent biocompatibility of Au, and the high specificity recognition mechanism of aptamers, to aptamers ultra-sensitive detection of TET. The linear detection range of this sensor is 1–40 ng/mL, and the detection limit is as low as 4.80 ng/mL. The selectivity, anti-interference ability and reproducibility are excellent. The recovery rate of actual milk samples with added standards is 101.33%–103.36%. The results are accurate and reliable. It has broad application prospects in the field of rapid food safety detection and provides an efficient and convenient new strategy for monitoring antibiotic residues in animal food.

Keywords : MXene; nanomaterials; aptamer sensor

引言

畜牧业抗生素滥用, 导致四环素类抗生素^[1]在动物源性食品中大量残留, 经食物链侵入人体后, 会损伤肝肾、引发过敏, 还会加速耐药基因扩散, 危及公共卫生。现有检测技术依赖色谱–质谱联用与 ELISA, 要么仪器昂贵难现场检测, 要么稳定性差等, 亟需便捷灵敏的新型检测技术。

纳米材料修饰电化学传感器因便携、灵敏、易操作, 在食品安全检测中潜力突出。 Ti_3C_2 ^[2]作为新型二维材料, 电导率高、生物相容性好, 是构建传感器的理想基底, Wu 等^[3]也证实了纯 Ti_3C_2 在目标物检测中的应用价值。但纯 Ti_3C_2 易受层间作用力影响发生自堆叠, 且易被氧化, 大幅降低其导电性与电化学活性, 制约检测性能。现有 Ti_3C_2 复合材料虽能改善堆叠问题, 但各有缺陷: $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{碳纳米管}$ ^[4]相容性差, 难以形成稳定结构; $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{金属氧化物}$ ^[5]导电性低、循环稳定性差; $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{MOF}$ ^[6]骨架易破损、导电受限, 且这类材料普遍缺少生物分子固定的特异性位点, 限制了生物传感应用。

贵金属金纳米粒子^[7]可通过静电与配位作用, 均匀锚定在 Ti_3C_2 片层间, 有效抑制其自堆叠与氧化, 同时凭借高导电性与 Ti_3C_2 形成协同电子传输通道, 弥补导电缺陷。AuNPs 还可通过 Au–S 键固定适配体, 规避非特异性吸附引发的假阳性^[8], 以及粒子团聚迁移导致

作者简介:

王格 (1999.01–), 女, 黎族, 海南三亚人, 硕士, 研究方向: 生物技术与工程;

张琰 (2001.10–), 女, 汉族, 江西吉安人, 硕士, 研究方向: 生物技术与工程;

通讯作者: 刘洁 (1985.07–), 女, 汉族, 湖南株洲人, 博士研究生, 职称: 讲师, 研究方向: 生物技术与工程。

的灵敏度衰减^[9],提升传感器选择性与稳定性。

基于此,本研究结合末端固定适配体“伸展-折叠”构象转变的电阻型传感机制^[10,11],与 Au/ Ti₃C₂复合材料的信号放大效应,构建可逆可重复、高灵敏高稳定的电化学传感器^[12,13],制备适配体功能化 Ti₃C₂/Au 复合电极,用于牛奶中四环素类抗生素检测。该传感器便携、灵敏、特异性强,可替代传统大型仪器,为监控抗生素残留、保障食品安全提供可行技术方案。

一、实验部分

(一) 材料和仪器

四环素 (TET)、碳钛化铝 (Ti₃AlC₂)、氟化锂 (LiF) 等购自伊诺凯公司。TET-Aptamer、氯金酸 (HAuCl₄) 购自上海生工生物工程有限公司。

CHI 660E (上海华辰), SEM、XPS、XRD (科学指南针)。

(二) 电化学测量

三电极体系: 玻碳电极、饱和 Ag/AgCl 电极、铂丝电极。

电化学测试在含 5.0 mM K[Fe(CN)₆]/K₄[Fe(CN)₆] (1:1) 和 0.1 M KCl 的溶液中进行。CV: 扫描速率 95 mV/s, 电位范围 -0.4~0.8 V; EIS: 脉冲幅度 5 mV, 频率 0.1~100 kHz; DPV: 幅值 50 mV, 脉宽 0.050 s, 阶跃电位 5.0 mV, 电位范围 -0.4~0.8 V。本实验原理如图 1 所示。

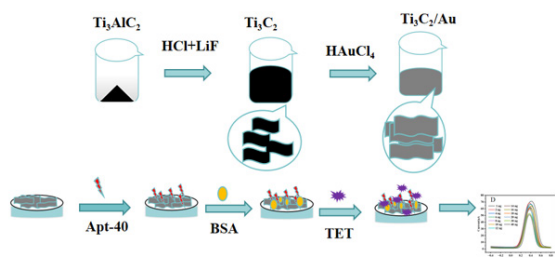


图1 四环素电化学适配体传感器构建示意图

(三) 数据处理

采用 Jade 6 和 Advantage 分别分析 XRD 与 XPS 数据,通过 Origin 2024 完成所有实验数据的统计与可视化。

二、结果与讨论

(一) Ti₃C₂ 及 Ti₃C₂/Au 的合成与表征

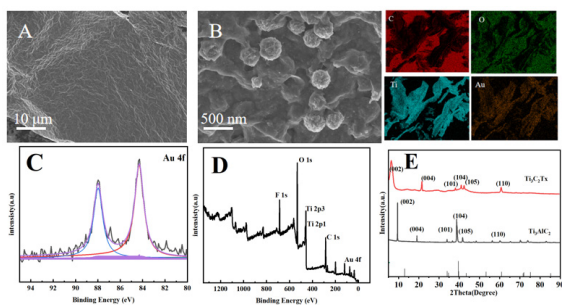


图2 A、B: Ti₃C₂和 Ti₃C₂/Au 的 SEM 形貌及 mapping 图; C、D: Ti₃C₂/Au 的 XPS 图; E: Ti₃C₂ 的 XRD 图

SEM 图像显示, 纯 Ti₃C₂ 呈现典型二维层状褶皱结构 (图 2 A); Ti₃C₂/Au 表面均匀分散着球形 Au 纳米颗粒, 无明显团聚 (图 2 B)。元素 mapping 图证实 C、O、Ti、Au 元素均匀分布, 直观证明 Au 成功负载。XPS 分析表明, Au 4f 谱在 84.0 eV 和 87.7 eV 处出现金属态 Au 的特征峰 (图 2 C); 全谱检测到 C 1s、O 1s、Ti 2p、F 1s 及 Au 4f 信号, 验证了复合材料的元素组成与化学态 (图 2 D)。XRD 谱图显示, 有 Ti₃C₂/Au 特征衍射峰, MAX 相 Ti₃AlC₂ 特征峰基本消失, 证明 MAX 相已成功刻蚀 (图 2 E); 综上, Ti₃C₂/Au 复合材料已成功制备。

(二) 电化学研究

1. 电化学传感的可行性分析

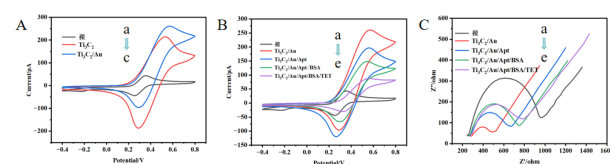


图3 电化学传感器构建过程的循环伏安曲线

CV 曲线显示, Ti₃C₂/Au 修饰电极的峰电流显著高于纯 Ti₃C₂ 和裸玻碳电极 (GCE), 证明 Ti₃C₂/Au 可有效增强电极电化学活性、加速电子转移。在依次修饰 Apt、BSA 及 TET 后, 氧化还原峰电流逐步降低, 源于生物分子绝缘层对电子传递的阻碍, 证实传感器逐级组装成功。EIS 谱图进一步验证: 阻抗半圆直径按顺序增大, 说明各修饰层均成功固定, 且 TET 与适配体的特异性结合进一步增加了界面电荷转移电阻。综上, 基于 Ti₃C₂/Au 的电化学适配体传感器构建成功, 具备检测四环素的可行性。

2. 传感器检测限、特异性、抗干扰性、重复性及稳定性测定

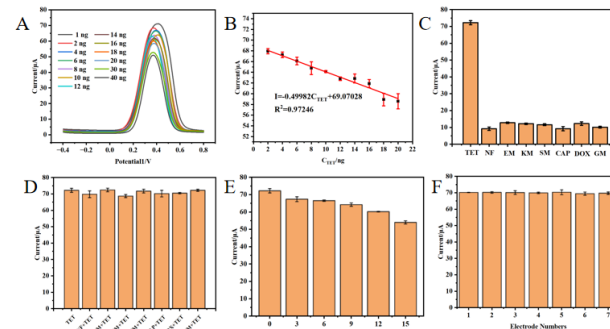


图4 A、B: 传感器检测限; C、D、E、F: 传感器的特异性、抗干扰性、稳定性及重复性

图 4 A、B 显示, 随着四环素 (TET) 浓度增加, 电流逐渐降低, 线性回归方程为 $I = -0.49982C_{TET} + 69.07028$, 相关系数 $R^2 = 0.97246$, 表明传感器在 1~40 ng/mL 范围内对 TET 具有良好的线性响应。图 4 C 的选择性测试表明, 传感器对 TET 的电流

响应显著高于 NF、EM 等干扰抗生素，表现出优异的特异性识别能力。图 4 D、E、F 分别验证了传感器的抗干扰性、稳定性与重复性，在多种干扰物共存、15 天储存及 7 支平行电极测试中，电

流响应均保持稳定，相对标准偏差均处于较低水平，证明该传感器具备良好的抗干扰能力、长期稳定性与可重复性，为实际样品中四环素的检测提供了可靠保障。

3.实际样品检测

表1 传感器实际样品检测

Sensor	Specimen	Sample volume (ng)	Detection value (ng)	Recovery(%)	RSD (n=3,%)
Ti ₃ C ₂ /Au/Apt	Milk	5	5.09	101.92	5.04
		10	10.13	103.36	3.78
		20	20.26	101.33	3.64

以牛奶为基质的加标回收实验显示（表1），Ti₃C₂/Au/Apt 传感器具备良好的回收率，可满足实际样品检测需求。

三、总结

本研究针对牛奶中四环素残留，构建了基于 Ti₃C₂/Au 复合材料与适配体协同作用的高灵敏度电化学检测传感体系。在 1 - 40 ng/mL 浓度范围内，传感器检测性能良好，稳定性优

异，RSD 均低于 5.05%；LOD 低至 4.80 ng/mL，较部分传统四环素检测方法实现了灵敏度提升。将该传感器应用于牛奶样品中四环素的检测，回收率为 101.33% - 103.36%，有效丰富了四环素残留的快检技术体系，不仅可针对牛奶等食品样本进行分析，也为食品安全监管环节中四环素的现场快速分析与监控提供了有效手段和支撑，为新兴纳米材料与生物分子相结合构建食品污染物检测装置提供了新思路。

参考文献

[1]Gao X, Sun Z, Wang X, et al. Construction of a ratiometric electrochemical aptasensor based on graphdiyne-methylene blue and Fc-labeled hairpin for cyclic signal amplification detection of kanamycin[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 373: 132706.

[2]Li H, Geng W, Haruna S A, et al. A target-responsive release SERS sensor for sensitive detection of tetracycline using aptamer-gated HP-UiO-66-NH₂ nanochannel strategy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022: 339999.

[3]Wu D, Wu M, Yang J, et al. Delaminated Ti₃C₂Tx (MXene) for electrochemical carbendazim sensing[J]. *Materials Letters*, 2019, 236: 412-415.

[4]Keneshbekova A, Smagulova G, Kaidar B, et al. MXene/carbon nanocomposites for water treatment[J]. *Membranes*, 2024, 14(9): 184.

[5]Su H Y, Sun K, Gu X K, et al. Finding key factors for efficient water and methanol activation at metals, oxides, MXenes, and metal/oxide interfaces[J]. *ACS catalysis*, 2022, 12(2): 1237-1246.

[6]Chen R, Pang W, Li S, et al. Recent advances and prospects in MOF/MXene sensors[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 40: e00935.

[7]Labib M, Sargent E H, Kelley S O. Electrochemical methods for the analysis of clinically relevant biomolecules[J]. *Chemical reviews*, 2016, 116(16): 9001-9090.

[8]Wang W, Gunasekaran S. MXene/Gold nanoparticles heterostructure as catalase mimic for colorimetric detection of penicillin G[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482: 148693.

[9]Wang W, Yin Y, Gunasekaran S. Gold nanoparticles-doped MXene heterostructure for ultrasensitive electrochemical detection of fumonisins B₁ and ampicillin[J]. *Microchimica Acta*, 2024, 191(5): 294.

[10]Du X, Du W, Sun J, et al. Self-powered photoelectrochemical sensor for chlorpyrifos detection in fruit and vegetables based on metal - ligand charge transfer effect by Ti₃C₂ based Schottky junction[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132731.

[11]Nguyen D K, Jang C H. Label-free liquid crystal-based biosensor for detection of dopamine using DNA aptamer as a recognition probe[J]. *Analytical Biochemistry*, 2020, 605: 113807.

[12]Zhu C, Liu D, Li Y, et al. Hairpin DNA assisted dual-ratiometric electrochemical aptasensor with high reliability and anti-interference ability for simultaneous detection of aflatoxin B₁ and ochratoxin A[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2021, 174: 112654.

[13]Zheng J, Wang B, Ding A, et al. Synthesis of MXene/DNA/Pd/Pt nanocomposite for sensitive detection of dopamine[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 816: 189-194.

聚多巴胺改性中空介孔二氧化硅微球 在水性涂料中的应用

刘巧宾¹, 范俊梅¹, 孙金鹏¹, 李冬至¹, 王雁², 张汉玲³

1. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000

2. 新奥科技发展有限公司, 河北 廊坊 065000

3. 临沂斯科瑞聚氨酯材料有限公司, 山东 临沂 276000

DOI:10.61369/ME.2026020039

摘 要 : 本研究构建了 BTA@DMSNs/PDA 多功能微胶囊, 并将其应用于水性涂料, 旨在提升涂层的防腐性能。该微胶囊以聚多巴胺 (PDA) 为改性层, 利用其优异的粘附性、生物相容性和化学活性, 有效改善了微胶囊在水性涂料中的分散性、稳定性以及与基体的界面结合力。通过 SEM、TEM、XRD 等手段对微胶囊的结构和组成进行了表征。并将制备的 BTA@DMSNs/PDA 微胶囊加入到水性聚氨酯 (WPU) 树脂中, 配制为具备防腐特性的水性涂料。为全面评估其性能, 系统测试了涂层的电化学腐蚀能力与机械性能, 考察其防腐性能以及对涂层机械性能和附着力的影响。结果显示, BTA@DMSNs/PDA 微胶囊的加入增强了防腐涂层的性能; Tafel 曲线分析表明, 添加该微胶囊的水性涂料以其优异的电腐蚀速率及极化拟合后的比较, 表现出优异的耐腐蚀性能。

关 键 词 : 聚多巴胺; 微胶囊; 水性涂料; 防腐

Application of Polydopamine-Modified Hollow Mesoporous Silica Microspheres in Waterborne Coatings

Liu Qiaobin¹, Fan Junmei¹, Sun Jinpeng¹, Li Dongzhi¹, Wang Yan², Zhang Hanling³

1. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, Hebei 065000

2. Xin'ao Technology Development Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000

3. Linyi Skyruai Polyurethane Materials Co., Ltd., Linyi, Shandong 276000

Abstract : This study constructed BTA@DMSNs/PDA multifunctional microcapsules and applied them to waterborne coatings to enhance the corrosion resistance of the coatings. Using polydopamine (PDA) as a modifying layer, the microcapsules effectively improved their dispersion, stability, and interfacial adhesion to the substrate in waterborne coatings, leveraging PDA's excellent adhesion, biocompatibility, and chemical reactivity. The structure and composition of the microcapsules were characterized using SEM, TEM, XRD, and other techniques. The prepared BTA@DMSNs/PDA microcapsules were incorporated into waterborne polyurethane (WPU) resin to formulate waterborne coatings with corrosion-resistant properties. To comprehensively evaluate their performance, the electrochemical corrosion resistance and mechanical properties of the coatings were systematically tested, examining their corrosion resistance and impact on the mechanical properties and adhesion of the coatings. The results showed that the addition of BTA@DMSNs/PDA microcapsules enhanced the performance of the anticorrosive coatings; Tafel curve analysis indicated that the waterborne coatings containing these microcapsules exhibited excellent corrosion resistance, as evidenced by their superior electrochemical corrosion rates and polarization fitting comparisons.

Keywords : polydopamine; microcapsules; waterborne coatings; corrosion resistance

引言

金属腐蚀是制约工业装备、海洋工程、交通设施长期安全运行的关键问题, 全球每年因腐蚀造成的经济损失超万亿美元^[1]。有机防腐涂层因施工便捷、成本可控、防护效果显著, 成为金属防护最广泛的技术手段。传统溶剂型防腐涂料存在 VOC 排放高、环境污染大等缺陷, 水性聚氨酯涂料以水为分散介质, 具备绿色环保、施工安全等优势, 已成为防腐涂料发展的主流方向^[2]。但纯水性聚氨酯涂层

存在致密度不足、缺陷易扩展、缺乏自修复能力等问题,在高盐、高湿、强腐蚀环境下易出现起泡、脱落、锈蚀蔓延等失效现象,难以满足长效防腐需求^[3]。

微胶囊自修复技术为解决涂层缺陷修复难题提供了有效途径。将缓蚀剂封装于微纳米容器中,当涂层受损时,微胶囊响应腐蚀环境刺激释放缓蚀剂,在金属表面形成钝化膜,实现原位自修复^[4]。中空介孔二氧化硅(DMSNs)比表面积大、孔道规整、生物相容性好,是理想的缓蚀剂载体,但存在与树脂基体相容性差、易团聚、界面结合力弱等问题^[5]。聚多巴胺(PDA)在弱碱性条件下可自发氧化聚合,具备强粘附性、丰富官能团与良好化学活性,能显著改善无机填料与有机树脂的界面相容性^[6]。基于此,本研究采用溶胶-凝胶法制备DMSNs,负载BTA缓蚀剂后进行PDA表面改性,构建BTA@DMSNs/PDA智能防腐微胶囊,系统研究其结构、形貌及在水性聚氨酯涂料中的应用性能,为开发高性能智能水性防腐涂层提供实验支撑。

一、实验部分

(一) 实验原料与仪器

主要原料: 苯并三氮唑(BTA, AR)、正硅酸四乙酯(TEOS, AR)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB, AR)、盐酸多巴胺(AR)、三乙醇胺(TEA, AR)、水杨酸钠(AR)、水性聚氨酯乳液(工业级)、固化剂、流平剂、消泡剂等。主要仪器: S10-3 恒温磁力搅拌器、DZF-6032 真空干燥箱、KSL-1100x 马弗炉、CHI-760E 电化学工作站、S-4700 扫描电子显微镜(SEM)、H-9500 透射电子显微镜(TEM)、X'Pert-Pro MPD X 射线衍射仪(XRD)、傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、BET 比表面积测试仪、热重分析仪(TGA)、涂层测厚仪、铅笔硬度计、漆膜冲击器、盐雾试验箱。

(二) BTA@DMSNs/PDA 微胶囊制备

DMSNs 制备: 采用溶胶-凝胶法,将 0.13 g 三乙醇胺与 0.34 g 水杨酸钠溶于 50 mL 去离子水,加入 0.73 g CTAB 搅拌至完全溶解,缓慢滴加 8 mL TEOS, 400 r/min 搅拌 2 h;离心、乙醇洗涤, 60 °C 真空干燥, 600 °C 煅烧 5 h 去除模板,得到白色 DMSNs 粉末。

BTA@DMSNs 制备: 配制 BTA 乙醇饱和溶液,将 1 g DMSNs 加入 25 mL 饱和溶液中,磁力搅拌、超声分散, 25 °C 真空处理 2 h,重复 3 次;乙醇洗涤、60 °C 真空干燥 12 h,得到 BTA@DMSNs。

BTA@DMSNs/PDA 制备: 配制 pH=8.5 的 Tris-HCl 缓冲液,加入 30 mg BTA@DMSNs 超声分散,加入 120 mg 盐酸多巴胺, 25 °C 避光搅拌 12 h;离心、去离子水洗涤, 50 °C 干燥,得到 BTA@DMSNs/PDA 微胶囊。

(三) 水性防腐涂料制备

以水性聚氨酯树脂为基料,按质量比添加固化剂、流平剂(1~2 g)、增稠剂(1~2 g)、防闪锈剂(1~2 g)、消泡剂(1~2 g)、分散剂(1~2 g),分别添加制备的制备对比涂料。Q235 钢材经砂纸抛光、除油除锈处理,采用喷枪喷涂,固化,得到待测涂层。

(四) 表征与性能测试

结构表征: XRD ($5^\circ \sim 60^\circ$, $5^\circ/\text{min}$)、FT-IR (4000~400 cm^{-1})、BET (N_2 吸附-脱附)、TGA (25~600 °C, $10^\circ\text{C}/\text{min}$),

N_2 气氛)。形貌分析: SEM (喷金处理)、TEM、EDS 能谱。力学性能: 厚度、光泽度、铅笔硬度、附着力(划格法)、耐冲击性、阻尼硬度。防腐性能: 电化学阻抗谱(EIS, $10^5 \sim 10^{-2}$ Hz, 5 mV)、极化曲线($-1 \sim 1$ V, 10 mV/s)、3.5% NaCl 中性盐雾试验(GB/T 1771—2007)。

二、结果与讨论

(一) 微胶囊结构与形貌分析

将制备的 BTA@DMSNs/PDA 微胶囊进行电镜分析,如图 1 所示。

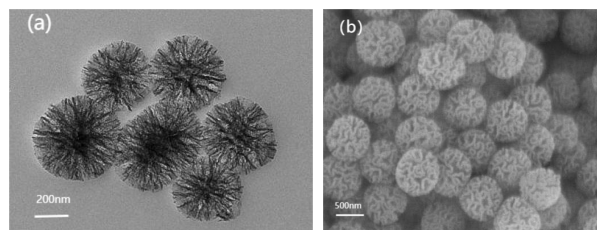


图1 BTA@DMSNs/PDA 微胶囊的微观电镜图

从图(a)和图(b)可以看出,产物为均匀的中空球形多孔结构,有着较为光滑的表面。

将配置的涂层进行电化学研究,将不同涂层极化曲线汇总于图3-14,并对各极化曲线拟合后汇总于表3-3。

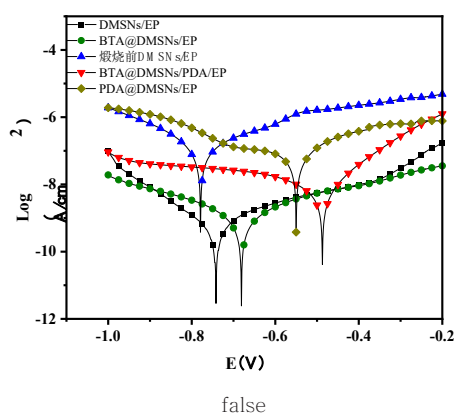


图2 不同涂层的极化曲线

表 1 不同涂层极化曲线的拟合结果

涂层	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\Phi_{\text{corr}}(\text{V s. Ag/AgCl})/\text{V}$	$\nu_{\text{corr}}/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
DMSNs	8.05×10^{-10}	-0.751	9.36×10^{-6}
BTA@DMSNs	4.63×10^{-10}	-0.678	5.38×10^{-6}
BTA@DMSNs/PDA	2.63×10^{-10}	-0.488	3.06×10^{-6}
PDA@DMSNs	4.62×10^{-10}	-0.552	5.37×10^{-6}
煅烧前 DMSNs	5.52×10^{-9}	-0.775	6.42×10^{-5}

图3展示了不同涂层的极化曲线，表明其电化学行为存在差异，再结合表1可知改性后的 BTA@DMSNs/PDA 的腐蚀电位相对较高、腐蚀电流密度较低，表明该涂层具有较好的耐腐蚀性能。通过不同涂层极化曲线的拟合结果，可以得知，从电流密度上看，较低的腐蚀电流密度更能有效阻止腐蚀介质的渗透，BTA@DMSNs/PDA 的腐蚀电流密度最低为 $2.63 \times 10^{-10} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，表明 BTA@DMSNs/PDA 的防腐蚀性能最好；相对于腐蚀电位来说，腐蚀电位越负，则越容易发生腐蚀。BTA@DMSNs/PDA 腐蚀电位为 -0.488V 最正，则最不容易发生腐蚀，且腐蚀速率越小，则耐腐蚀性越好。

三、结论

采用溶胶-凝胶法与多巴胺原位聚合，成功制备 BTA@DMSNs/PDA 多功能微胶囊，微胶囊呈球形中空介孔结构，BTA

负载均匀，PDA 包覆完整，比表面积 $374 \text{ m}^2/\text{g}$ ，热稳定性优异。聚多巴胺改性显著提升微胶囊在水性聚氨酯涂料中的分散性与界面结合力，复合涂层附着力 0 级、铅笔硬度 $\geq 5\text{H}$ 、耐冲击 50 cm、阻尼硬度 429 次，力学性能优良。BTA@DMSNs/PDA 微胶囊赋予涂层高效果防腐功能，自腐蚀电流密度 $2.63 \times 10^{-10} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，盐雾 72 h 无明显腐蚀，防腐性能显著优于未改性涂层。本研究制备的 BTA@DMSNs/PDA 水性防腐涂料兼具环保性、力学性能与长效防腐能力，为金属腐蚀防护提供新型功能涂料方案，具有良好的学术价值与应用前景。

参考文献

[1] 傅伟强, 马心语, 杨家乐, 等. 金属有机框架材料在防腐涂层中的研究进展 [J]. 聚酯工业, 2025, 38 (02): 77-80.
[2] 武少峰, 满瑞, 宋成程, 等. 有机小分子改性石墨烯防腐涂料的研究进展 [J]. 上海涂料, 2025, 63 (01): 45-50.
[3] 方亮, 张淑芳, 王至恒, 等. MXene 基有机复合防腐涂层研究进展 [J]. 四川轻化工大学学报 (自然科学版), 2024, 37 (06): 1-14.
[4] 陈宏, 亢淑梅, 曹启栋, 等. 掺杂碳纳米管聚砒微胶囊自修复涂层耐蚀机理研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (04): 4180-4192.
[5] 石浩, 褚贵文, 李正利, 等. 中空二氧化硅微球包覆 2-巯基苯并噻唑自修复涂层防腐性能 [J]. 中国表面工程, 2023, 36 (05): 112-122.
[6] 王旭辉. 聚多巴胺/沸石咪唑杂化微胶囊的合成及其在自修复防腐涂层中的应用 [D]. 北京化工大学, 2024.