

基于隧道工程的复合型衬砌施工技术的应用分析

吴涛，兰智斌

浙江八咏公路工程集团有限公司，浙江 金华 321000

摘 要： 本文旨在探讨复合型衬砌施工技术在隧道工程中的应用，通过结合实例，对典型隧道项目的案例分析，综合评价该技术在提升隧道安全性、降低维护成本以及改善运营环境方面的优越性。文章首先阐述了复合型衬砌的基本概念，即一种将喷射混凝土初衬、防水隔离层及现浇混凝土二次衬砌相结合的多层复合结构体系，其次介绍了其设计原则与施工流程。随后，通过工程实例分析，阐述复合型衬砌施工工艺，分析其施工应用效果。最后，提出复合型衬砌施工技术的质量控制措施，希望能够为我国隧道工程发展提供有效参考。

关 键 词： 隧道工程；复合型衬砌；施工技术；应用分析

Application Analysis of Composite Lining Construction Technology Based on Tunnel Engineering

Wu Tao, Lan Zhibin

Zhejiang Bayong Highway Engineering Group Co., LTD. Jinhua, Zhejiang 321000

Abstract： This paper aims to explore the application of composite lining construction technology in tunnel engineering, and comprehensively evaluate the advantages of this technology in improving tunnel safety, reducing maintenance costs and improving operating environment by combining examples and analyzing typical tunnel projects. This paper first describes the basic concept of composite lining, that is, a multi-layer composite structure system which combines the primary lining of shotcrete, the waterproof isolation layer and the secondary lining of cast-in-place concrete, and then introduces its design principle and construction process. Then, through the analysis of engineering examples, the construction technology of composite lining is expounded and its construction application effect is analyzed. Finally, the quality control measures of complex lining construction technology are proposed, hoping to provide effective reference for the development of tunnel engineering in our country.

Keywords： tunnel engineering; composite lining; construction technology; application analysis

引言

隧道工程作为连接山地、水域等自然障碍的重要通道，在促进区域经济发展、改善交通网络布局方面发挥着不可替代的作用。然而，隧道建设往往面临复杂的地质环境挑战，如何确保结构安全与长期稳定性，一直是行业内外关注的焦点。传统的单一衬砌方案虽能满足一定时期的使用需求，但在面对复杂工况时暴露出抗变形能力不足、防水性能有限等问题。在此背景下，复合型衬砌技术应运而生，以其独特的多层次防护理念，不仅有效增强了隧道结构的稳固性，还大幅提高了防渗漏能力和耐久性，成为当前隧道工程领域的一大创新突破。本研究聚焦于复合型衬砌技术的实际应用，通过理论分析与工程实例相结合的方式，全面解析其技术特点、实施策略及经济效益，以期对相关领域的科研人员和工程师提供有益参考。

一、复合型衬砌施工技术

（一）技术概念

复合型衬砌施工技术在隧道工程中应用广泛，能够有效提升隧道的支护效果，这种创新的支护方法应用多种材料与技术，从结构层面对隧道整体进行性能提升，特别是面对复杂的地质条件，其搭建的多层衬砌体系能够更好的发挥其各层功能^[1]。

通常情况下，复合型衬砌包括以下几个组成部分：（1）初期

支护：作为直接接触围岩的第一道屏障，主要由喷射混凝土、锚杆及钢筋网组成。其作用是迅速稳定围岩表面，控制围岩变形，为后续作业创造安全环境；（2）防水隔离层：铺设于初期支护之上，旨在防止地下水及其他液体渗透，维持内部结构的干燥状态，降低腐蚀风险，延长隧道使用寿命。常用的防水材料包括防水板、土工织物、自粘防水卷材等；（3）二次衬砌：亦称永久衬砌，为最外侧的混凝土结构，具备高强度和刚性，不仅支撑重量，还加强整个衬砌系统的稳固性，同时提供平滑美观的内墙

面；（4）填充注浆：在特定条件下，会在初期支护与二次衬砌间实施注浆工序，填充空隙，增强结构的紧密性和稳定性^[2]。

（二）技术特点与优势

复合型衬砌施工的特点及其应用价值主要表现在以下几个方面：

（1）提升隧道结构稳定性与防护能力：复合型衬砌施工技术在一次衬砌基础上开展复合型衬砌施工，这不仅大幅提升了隧道结构的承载能力和抗变形能力，还能有效分散和转移来自隧道周围岩石的压力，减轻初次衬砌的负荷，避免隧道结构受损或失效^[3]。此外，复合型衬砌还提供了更佳的防水和防渗性能，有效抵御水分及腐蚀性物质对隧道结构的侵害，从而延长隧道的使用寿命。

（2）高度的施工灵活性与适应性：复合型衬砌施工是在初次衬砌完成后实施的，因此可以根据隧道内部的具体空间条件和实际需求进行灵活设计与施工。这种灵活性使得复合型衬砌施工技术能够很好地适应各种地质条件和不同的隧道结构形式，确保隧道的安全稳定运行。

（3）优良的经济效益与社会效益：通过科学合理地选择材料和控制施工工艺，复合型衬砌施工技术在早期施工成本与后期维护成本改善上效明显，能够进一步保证项目的经济收益，为企业带来良好的社会效益^[4]。

复合型衬砌施工技术的优势在于其高度的灵活性，能够针对不同地质条件调整各层材料的类型和厚度，从而实现最优的力学表现和经济效益。此外，该技术还表现出优异的抗震、防水和耐久性，适用于多种类型的隧道工程项目，包括但不限于公路隧道、地铁隧道以及特殊用途的水力发电隧洞等。

（三）技术应用价值

从多个维度分析，复合型衬砌施工技术展现出重要的应用价值：（1）运营效率的提升：通过优化隧道的通行能力和改善服务质量，例如，技术的应用不仅加快了车辆的通行速度，减少了交通拥堵现象，还提高了乘客的出行体验，工程项目运营水平逐渐提升，间接的推动了交通运营效率的提高^[5]；（2）工程安全性增强：复合型衬砌施工技术在工程原有的一次衬砌基础上增加了二次衬砌，分散了隧道所面临的地质压力，显著降低了因结构破坏而引发的安全风险，极大增强了隧道结构的整体稳定性和承载能力，为隧道的长期安全运营提供了坚实保障；（3）环境保护效果显著：采用复合型衬砌施工技术有助于减轻隧道施工对周围环境的负面影响。通过科学的施工方法和环保材料的选择，可以有效控制施工过程中产生的噪音、粉尘以及废水排放，减少对周边自然生态的干扰和破坏，实现工程建设与环境保护的和谐共生；（4）工程耐久性提升：在隧道工程建设中，应用复合型衬砌施工技术，能够对隧道内的地下水与各类腐蚀物进行阻挡，保护隧道具有足够的耐久性，还能够提升隧道使用寿命，降低维护成本。

二、工程概况及施工方案

（一）工程概况

某大型跨海隧道工程位于我国东南沿海地区，全长约15公

里，是连接两个重要经济中心的战略性交通纽带。该隧道穿越复杂多变的海底地质环境，包括硬岩层、软土地层以及高水压区域，施工难度极大，对施工技术提出了严峻考验。为了确保隧道的安全稳定运行，项目团队决定采用复合型衬砌施工技术，以适应复杂地质条件，强化隧道结构的整体性能。

（二）施工方案

该项目的复合型衬砌设计遵循“初期支护－防水隔离－二次衬砌”的基本原则，各节材料与技术严格挑选。一次衬砌施工采用液压式衬砌台车开展；初期支护阶段，运用高压喷射混凝土配合高强度锚杆，迅速形成了坚固的第一道防线；防水隔离层选用特制的防水膜，有效阻挡海水侵蚀；二次衬砌则采用C50高强度混凝土，确保了结构的持久稳定。在整个施工过程中，项目团队严格监控每一步骤的质量，通过精密测量仪器实时检测围岩压力、地下水位变化等因素，及时调整施工参数，保证衬砌质量符合高标准要求。

三、施工技术要点

（一）二衬混凝土灌注前的检查

在隧道工程施工中，开展二次衬砌前需要对台车高度进行检查，同时对台车仓内的尺寸进行检查。在台车检查时，还需要对检查车辆挡头模的牢固程度进行检查，检查脱模剂涂抹情况、模板缝隙紧密度、衬砌钢筋、防水板等安装情况。

（二）钢筋加工与绑扎

钢筋的加工与绑扎是复合型衬砌施工技术的关键环节，根据相关设计要求，本项目需在隧道洞内进行加工与安装，衬砌钢筋安装过程中应采取定位措施，环向受力筋与纵向分布筋每个节点应进行绑扎或焊接，环向受力筋的搭接应采用焊接或机械连接，相邻环向受力筋搭接位置应错开，错开距离不小于1000mm。在具体的绑扎过程中，需要保证钢筋纵向与横向节点的绑扎与焊接质量，同时焊接的长度与缝隙需要符合规定，针对连接节点在纵横筋交叉的箍筋连接点，要绑扎或焊接处理。

（四）灌注混凝土

在开展复合型衬砌施工技术时，需要在浇筑二衬混凝土前对隧道内基地与垃圾进行清理，保证坑内无积水与污物。按照施工配合比进行水泥搅拌，应采用混凝土输送泵送料入模、均匀布料。混凝土应从两侧边墙向拱顶、由下向上依次分层对称浇筑，两侧混凝土浇筑面高差不应大于1.0m，同一侧混凝土浇筑面高差不应大于0.5m。此外，还需要对浇筑速度进行把控，选择软管进行输送，保证混凝土的垂直落差在规定范围内，避免离析情况。

（五）拆模与养护

拆模时间的选择需要根据封顶混凝土而确定，通常情况下，隧道工程混凝土强度为5MPa时进行拆模操作。针对二衬施工时出现围岩变形的情况，则需要及时上报，并根据实际情况延长拆模时机。本跨海隧道工程洞内采用喷水养护，设置养护管，在拆模前需要对淋台模板进行喷淋，并对混凝土面进行喷淋。且工程项目洞内与洞外养护标准存在一定差异，洞口养护标准为100m范

围内开展14d，洞内则养护7d，贯通后养护时间为14d。

四、复合型衬砌施工质量控制措施

（一）搭建质量管理体系

质量管理体系在隧道工程衬砌施工中发挥着至关重要的作用，它不仅提供了清晰的指导方针、操作标准与流程，还保障了工程项目的安全性，有效的提升了隧道工程施工的稳定性。该体系的核心在于确立具体而切实可行的质量政策与目标，这些政策和目标应当基于国家和行业规范，并根据项目实际情况制定具有针对性的施工方案，确保所有相关方——如设计人员、施工单位、监理机构和业主——都能充分理解并达成一致。全面的质量管理计划和程序应当贯穿项目的全生命周期，涵盖从初步设计、采购原材料、施工执行直至后期保养的所有环节，明确规定每一阶段的质量基准、检验手段、职责分配及反馈渠道^[6]。为保证这些计划和程序得以有效执行，必须构建项目质量管理架构，同时在各施工环节配备专业技术人才进行专项管理与监督，一旦发现任何偏差或问题，须立即采取措施予以修正，防止对整体工程质量造成负面影响。

另外，构建一套完整且高效的反馈与修正系统同样是质量管理体系不可或缺的一部分。隧道工程施工中，依托这一反馈优化系统收集数据、整理分析数据，能够举一反三的评估工程项目质量管理水平，从而提升整体工程质量。

（二）提升质量监控与检测水平

在隧道工程中，施工现场的质量监控极为重要，高质量的质量监控工作能够为整个工程安全推进提供保障，其主要监控检测的内容包括施工团队操作情况、设备与材料情况，如出现不合规的情况，则立即进行整改。监测时通常会利用各类传感器与摄像机进行记录，对施工各环节进行全方面捕捉，并对施工进行分析，保证项目施工的质量。材料质量的检验则是保障整体工程质量的根本所在，对于进入工地的原材料，应实施随机抽查，并开展符合严格的混凝土测试与评估。此外，在监测时，可利用诸如光谱分析、超声波探测和电磁波检测等现代技术手段，更加精准地

判断材料是否符合设计要求，从而有效预防因材料不合格而引发的工程质量隐患^[7]。通过上述措施，不仅能够确保施工项目的高品质完成，也为后续的运营维护打下了坚实的基础。

（三）识别早期故障并进行调整

在隧道工程项目中，早期的风险识别与应对极为重要，识别缓慢将会影响到工程结构成本，进而增加后期的维修养护成本，故而，需要对识别人员开展针对性培训，提升其对不规范行为的敏感性。此外，隧道工程项目衬砌技术施工时，需要提前制定各类情况的应急策略，针对出现的问题采用相关策略，最大限度的减少早期风险影响到隧道工程全生命周期的发展。

（四）提升工程后期维护水平

在隧道工程完工后，面临的便是长期隧道的长期维护与保养问题，为了保证衬砌施工的质量，需要持续对其进行补救与维护。工程项目需要成立专业的后期检查团队，对裂缝、渗漏等情况进行全方位的检查，针对工程所显现的问题开展快速补救。针对常见的工程缺陷，比如裂缝，可以使用专门的注射剂或者封闭材料来进行修补；而对于渗漏问题，需要在工程衬砌结构内外进行防水补救工作。通过及时的发现与预防补救，能够进一步延长隧道工程施工寿命，提升其安全性。除了补救措施之外，还需要开展预防性措施，根具项目实际情况，进行隧道表面的长期清理，及时更换需要替换的构件，在危险来临之前消除危害。

五、结论

综上，隧道工程复合型衬砌施工技术在项目发挥极大作用，是保证隧道结构安全与功能正常使用的重要环节。本文以某跨海隧道为研究案例，对复合型衬砌施工技术进行分析，根据实际情况提出设计方案，并对复合型衬砌施工技术应用进行研究。能够明确，高质量的技术应用能够有效提升隧道工程质量，降低维护成本，从运营、经济效益、使用寿命等方面得到提升。此外，本文还提出了相关策略，从监管、早期维护等层面出发，为隧道施工质量提升提供帮助。

参考文献

- [1] 方坚涛. 隧道衬砌后期裂缝成因及处理施工技术研究 [J]. 散装水泥, 2023, (04): 26-28.
- [2] 张志恩, 雷军, 李利平, 等. 隧道衬砌施工缝抗渗性及影响因素室内试验研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 44(08): 1609-1616.
- [3] 赵克坤. 隧道施工中的二次衬砌施工工艺与效果分析 [J]. 工程技术研究, 2020, 9(15): 81-83.
- [4] 李富强, 康波. 水利水电工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工技术研究 [J]. 中国高新科技, 2023, (14): 139-141.
- [5] 秦子强. 小断面隧洞不连续衬砌模板设计及施工技术 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 53(06): 39-40.
- [6] 李臻, 文涛, 钱斌. 水工隧洞转弯段混凝土高精度衬砌施工工艺 [J]. 人民黄河, 2023, 46(S1): 183-184.
- [7] 岳先龙. 高速铁路隧道衬砌施工质量控制关键技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2023, (08): 184-186.