

化工建筑抗爆改造关键技术与管理措施应用分析

吴卫荣

上海慧盾工程科技有限公司，上海 201906

DOI:10.61369/ERA.2026060002

摘 要： 本文以青海盐湖镁业有限公司集中人员建筑物抗爆改造项目为例，系统论述高海拔、强风、干燥及有爆炸风险环境下化工建筑抗爆改造关键技术体系与 EPC 全过程管理措施。重点剖析基于爆炸风险评估确定抗爆设计标准的方法，阐述结构加固、抗爆门窗与泄压设施安装、机电安全系统升级等核心技术应用要点，提出高海拔严酷环境专项施工策略。同时，从设计、采购、施工一体化角度，总结保障项目质量、安全与进度的关键管理措施。项目实践表明，集成应用本文所述技术与管理方法，可提升既有化工建筑在爆炸荷载下的结构安全性与人员防护能力，为类似工程提供实施路径。

关 键 词： 化工建筑；抗爆改造；结构加固；泄压设计；高海拔施工

Application Analysis of Key Technologies and Management Measures for Anti-Explosion Renovation of Chemical Buildings

Wu Weirong

Shanghai Huidun Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 201906

Abstract： Taking the anti-explosion renovation project of centralized personnel buildings at Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co., Ltd. as an example, this paper systematically discusses the key technical system for anti-explosion renovation of chemical buildings and the EPC (Engineering, Procurement, and Construction) whole-process management measures in environments characterized by high altitudes, strong winds, dryness, and explosion risks. It focuses on analyzing the method for determining anti-explosion design standards based on explosion risk assessment, elaborates on the application points of core technologies such as structural reinforcement, installation of anti-explosion doors and windows and pressure relief facilities, and upgrading of electromechanical safety systems, and proposes special construction strategies for harsh environments at high altitudes. Meanwhile, from the perspective of integrating design, procurement, and construction, it summarizes key management measures to ensure project quality, safety, and schedule. Project practice demonstrates that the integrated application of the technologies and management methods described in this paper can enhance the structural safety and personnel protection capabilities of existing chemical buildings under explosion loads, providing an implementation path for similar projects.

Keywords： chemical buildings; anti-explosion renovation; structural reinforcement; pressure relief design; high-altitude construction

引言

化工生产装置区内的集中人员建筑物，如办公楼、中控室、休息室等，由于内部人员密集且承担生产指挥、人员休憩等重要功能，倘若遭遇邻近装置可能发生的爆炸事故，极易容易造成群死群伤严重后果^[1]。对该类建筑物开展抗爆改造，提升抵御爆炸冲击波的能力，属于化工企业本质安全水平提升的关键环节。青海盐湖镁业有限公司厂区位于高海拔且气候条件恶劣的盐湖地区，公司人员密集建筑物的抗爆改造工程，不但要解决常规的抗爆技术难题，还需应对特殊地理气候环境带来的施工挑战^[2]。本文以该项目为背景，立足于 EPC（设计、采购、施工）总承包模式，深入分析抗爆改造过程里关键技术应用与系统性管理措施，目的是形成一套适用于严苛环境条件下且可复制推广的化工建筑抗爆改造综合解决方案。

一、工程概况

(一) 项目工程概况

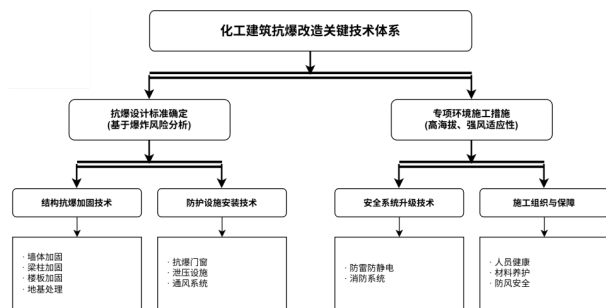
本项目改造主体为青海盐湖镁业有限公司厂区内的多栋人员集中建筑物，包括办公楼、中央控制室、员工休息室及食堂等，共计8栋建筑，总建筑面积约6500 m²。厂区地处青海盐湖区域，平均海拔超过2800m，具有典型的高原气候特征：空气稀薄、年平均气温低、昼夜温差大、风力强劲、气候干燥。厂区内存在镁冶炼及相关化工工艺流程，潜在爆炸危险源明确。改造工程需在保证建筑物日常使用功能基本不受影响的前提下进行，施工安全管控要求极高。

(二) 抗爆改造面临的主要技术与管理难点

高海拔环境条件会导致施工人员工作效率降低，材料性能变化如混凝土养护与密封胶固化效率下降，机械设备功率还会显著降低；强风天气会对高空及室外作业造成持续的安全风险^[3]。厂区在改造期间需要维持部分区域正常办公与生产指挥功能，对施工组织的分区管理、隔离措施以及作业时序安排提出极高要求，同时厂区内动火、吊装等危险作业审批流程严格，协调管理工作十分复杂。抗爆性能要依据厂区特定危险介质如镁粉、氢气等的爆炸特性进行量化分析，通过爆炸压力与冲击波超压计算科学确定各建筑抗爆设防等级以确保设计合理。改造涉及建筑、结构、给排水、消防、电气、通风等多系统集成，需基于既有建筑进行协同升级，存在技术接口繁多、施工精度要求高的挑战。项目地处偏远地区，特种抗爆材料如甲级抗爆门、泄压板采购周期长，长途运输受天气与路况影响显著，供应链稳定性管理尤为关键。

二、抗爆改造核心关键技术应用分析

针对上述问题，研究所述化工建筑抗爆改造关键技术体系，见图1^[4]：



(一) 基于风险分析的抗爆设计标准确定

依据《石油化工建筑物抗爆设计标准》(GB/T 50779-2022)，采用风险分析法确定设防等级。针对镁粉爆炸风险（爆炸介质质量Q=500 kg，爆炸空间体积V=1000 m³），计算爆炸压力峰值^[5]：

$$P_{\max} = K \cdot \frac{Q}{V}$$

式中，K为爆炸系数（取0.25，基于镁粉特性），Q=500kg，

V=1000m³，得：

$$P_{\max} = 0.25 \times \frac{500}{1000} = 0.125 \text{ MPa}$$

考虑到安全系数为1.2以及冲击波叠加效应情况，最终把设防压力确定为0.15 MPa，该数值满足规范要求，即Ⅱ级爆炸风险设防压力需≥0.1 MPa，建筑物在遭受设防压力冲击波作用的时，应达成“结构不倒塌、关键抗爆构件不穿透、碎片飞散受控、人员疏散通道保持可用”的性能目标。

(二) 建筑主体结构抗爆加固关键技术

对既有钢筋混凝土框架和砖混结构建筑做抗爆加固，核心要点是提升其抵御爆炸冲击波超压与冲量的整体能力，承重墙体加固采用单侧或者双侧浇筑钢筋混凝土面层的方法，加固之后墙体总厚度不能低于300mm，面层混凝土强度等级要大于C30，内置双向钢筋网片并通过植筋和原结构可靠连接，以此显著提高墙体的抗剪强度、抗弯刚度和整体性。梁柱构件加固主要采用外包角钢并灌注结构胶的方案，会用到外包角钢并灌注结构胶的办法，并在梁柱节点区域把箍筋间距加密到100mm，增强节点区的抗剪承载力与塑性耗能能力，避免爆炸荷载下发生脆性破坏，加固楼板是在原有楼板表面铺设Φ8@150mm双向钢筋网片，并浇筑60mm厚的C35细石混凝土叠合层，从而提高楼板的抗冲切性能与整体刚度，地基与基础得进行复核验算，对承载力不够的独立基础采取扩大基底面积的方式加固，对条形基础用压力注浆法加固地基土体，保证结构在爆炸荷载增量作用下地基稳定且沉降可控，植筋作为关键连接工艺，其流程包括定位、钻孔（孔径d+4到6mm，孔深大于或等于15d，d为钢筋直径）、清孔（用高压风吹和专用毛刷清理）、注胶（注入足量A级环氧树脂植筋胶）、插筋（旋转插入至孔底）及固化养护，固化后必须做现场拉拔试验，验证其抗拔力不低于钢筋屈服强度标准值，这样才能满足设计要求。具体材料及参数见表1。

表1 主体结构抗爆加固主要材料与工艺参数

加固部位	加固方法	关键材料 / 规格	主要工艺参数	性能目标
承重墙	钢筋混凝土面层	c30混凝土，hrb400钢筋网	厚度300MM，植筋深度≥15D	抗爆压力下墙体完整
框架梁柱	外包角钢灌注胶	q345b角钢，a级结构胶	箍筋加密区间距100MM	节点抗剪强度提升≥40%
楼板	钢筋网混凝土叠合层	c35细石混凝土，Φ8钢筋	叠合层厚60MM，网格150MM	抗冲切能力满足设计要求
新旧连接	植筋	hrb400钢筋，a级植筋胶	孔深≥15D，清孔彻底	拉拔力≥钢筋屈服强度

(三) 爆炸荷载作用下的动态响应分析与防护设施设计

以0.15 MPa的设防标准作为基础，把确保建筑和防护设施在爆炸冲击波下的动态响应能够控制当作核心任务，用到ANSYS/LS-DYNA有限元软件去模拟关键部位与防护设施在爆炸荷载里的动态响应，通过建立简化模型并输入设计好的超压-时程曲线来做整体结构的响应分析，对结构整体的位移、层间变形以及关键构件（柱、梁、节点）的应力应变发展进行评估，以此去判断有没有达到“大震不倒”的性能目标并把薄弱环节找出来给

加固提供依据,局部防护设施的响应分析则是针对抗爆门、抗爆窗以及泄压设施建立了精细化模型来分析它们的动力响应,重点对抗爆门/窗的框体变形和玻璃应力分布进行模拟,验证它们的抗爆压力等级还有连接节点的有效性,分析结果显示甲级抗爆门在0.15 MPa 超压下的最大变形是远远低于规范限值的。在分析泄压设施的时候,主要对开启压力、开启时间还有泄压面积的有效性去检查,通过模拟去把布置位置和构造优化一下,确保可以快速开启,把室内超压给降低,模拟结果也证实了轻质泄压板能够在规定超压下破裂,形成了有效的泄压通道。次生碎片伤害评估分析爆炸可能引发飞散碎片的轨迹和速度,给出人员伤亡风险给评估,据此指导采用抗爆玻璃、防护膜,或者对室内布局进行优化,把次生伤害减少,防护设施的设计优化是依据动态响应分析结果开展的,比如抗爆门窗的选型要满足静态压力等级,而且连接节点要经过计算验证,保证荷载能有效传递,泄压设施的设计则需要精准计算泄压面积,并且采用脆性连接或专用五金件,让其能准确动作,所有设计都以模拟结果为导向,从而保证性能可靠。

（四）关键安全系统的抗爆适应性分析

为确保爆炸发生之后建筑还能维持核心安全功能,需要对关键机电系统开展抗爆适应性分析与升级,消防系统要分析冲击波对管道、喷头以及消火栓箱所产生的影响,通过采用抗爆型设备、防震支撑并且加强箱体,以此确保管路在结构变形的情况下依旧保持完整,让关键设备在爆炸之后能够正常启动。应急照明与疏散指示系统要保证在主电中断的时候不受损坏且持续工作,设备必须具备抗震防爆性能,线路敷设应该采取防破坏保护措施。应急通信与报警系统必须保障在紧急状态下可以可靠运行,其主机与关键线路应当设置冗余保护与物理防护。通风与排烟系统需要分析爆炸对风管以及风机造成的影响,穿越抗爆墙的风管要安装抗爆防火阀,使其能够在冲击波或者高温的情况下自动关闭以防止爆燃蔓延,系统设计还需要考虑爆炸之后可能出现的堵塞或者损坏情况,确保维持基本的通风安全,此部分改造的核心之处在于,基于爆炸可能造成的破坏模式进行分析,对现有系统开展针对性强化或者将其更换为抗爆型产品,确保其在设计爆炸事件之后仍能执行预设的安全功能。

（五）改造施工过程与抗爆性能保障的关键控制

针对高海拔恶劣环境以及抗爆改造的特殊性,需要实施专项控制措施。在材料与工艺的适应性控制方面,必须针对高海拔低温、干燥环境去调整并验证混凝土配合比、植筋胶固化条件以及焊接工艺参数,例如采用低温适应性材料并且延长养护时间,以此确保加固材料性能能够满足设计要求。关键工序的质量控制包含结构加固、防护设施安装以及密封封堵等方面。结构加固工序必须严格控制植筋的钻孔深度、清孔质量与注胶饱满度,并且进行现场拉拔试验来验证锚固力。防护设施安装必须确保抗爆门窗与结构连接节点的施工质量,从而保证荷载能够有效传递。泄压设施的安装必须保证其活动部件灵活且脆弱连接部位符合设计。所有穿越抗爆墙/板的管线孔洞必须进行专业抗爆防火封堵,防止冲击波与火焰窜入。在检验与测试环节,要对关键抗爆构件进

行抽样气密性或压力测试,施工完成后必须通过专业检测手段验证各系统功能。整个施工过程的质量控制,最终目标是确保每一道工序都符合抗爆设计的性能要求,而不是仅满足外观或常规标准。

三、EPC 模式下的全过程管理措施

（一）设计阶段的管理

建立涵盖建筑结构工艺安全及机电的多专业协同设计平台,运用 BIM 技术开展碰撞检查与管线综合工作以确保抗爆设计在各专业间协调一致,组织相关专家针对初步设计进行抗爆专项评审并围绕加固节点泄压计算与材料选型等方面优化,在施工图阶段实施严格内部审核流程保证施工图纸具备可实际施工特性。

（二）采购与供应链管理

对核心抗爆产品供应商,要求具备国家级抗爆性能检测报告以及化工领域相关资质,且进行工厂考察和技术协议签订。依据施工网络计划制定详细的物资采购与供应计划明确各类材料采购周期提前锁定产能并签订供货合同,针对青海偏远地区规划可靠运输路线以此规避雨季与冬季极端天气,物资到场后由质量部、监理及施工方联合验收核查质量证明文件并对关键材料进行见证取样送检合格后方可入库使用。

（三）施工阶段的组织与管控

施工部署采用“分区分段、滚动施工”策略,将厂区8栋建筑划分为 A、B、C 三个施工区并设置硬质围挡隔离。按序先进行 A 区非核心区域改造,验收恢复后再依次推进 B、C 区施工,以最小化对生产办公的影响。严格执行动火与高危作业管理,所有动火作业需办理二级动火票,划定警戒区域并配备监火人及灭火器材;高空及吊装作业需编制专项方案并进行交底。过程控制设立关键质量控制点与停工待检点,涵盖植筋孔清洁度、抗爆门焊接质量及接地电阻测试等环节,检验合格后方可进入下道工序;每日开展安全巡检,重点检查临时用电、脚手架及个人防护用品使用情况。应用移动巡检 APP 实时记录并跟踪质量问题整改,同时利用视频监控系统对重点施工区域进行远程可视化监管。

四、应用效果评估

本项目通过系统性关键技术应用与严格 EPC 过程管理,取得显著成效。安全性能方面,经第三方机构采用计算分析与局部现场试验验证,所有建筑均满足 ≥ 0.15 MPa 抗爆设防要求,结构安全储备大幅提升。施工影响通过科学分区组织实现最小化,确保了中控室等核心建筑在改造期间的安全与基本可用,保障了厂区生产连续稳定。工程质量受全过程严格管控,抗爆加固、密封、接地等隐蔽工程及关键节点一次验收合格率达 100%。工期与成本通过高效采购供应链与精细化施工部署得以控制,克服高海拔与长途运输等不利因素,项目按期完工且总投资未超出预算。

五、结语

本文通过青海盐湖镁业有限公司抗爆改造项目的实践，系统总结了高海拔严酷环境下化工建筑抗爆改造的关键技术与管理措施。项目通过科学的风险评估、针对性的结构加固与防护设施安

装，以及 EPC 全过程精细化管理，显著提升了建筑物的抗爆安全性能，实现了施工期间生产运行的有效保障。该经验可为类似环境条件下的化工建筑抗爆改造提供技术参考与管理借鉴，对推动化工行业本质安全建设具有积极意义。

参考文献

- [1] 刘迪,王雅真,邝辰,等. 变压吸附氢气纯化装置爆炸事故定量风险研究 [J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(1): 149-157.
- [2] 张建萍. 石油化工企业抗爆控制室结构设计技术 [J]. Electronic Communication&Computer Science, 2025, 7(10).
- [3] 李振华,赵松林,陈林伟,等. 石油化工建筑物抗爆设计分析 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(9): 114-117.
- [4] 黄可奇. 多自由度抗爆建筑结构动力弹塑性分析设计 [J]. 2025(6): 017-023.
- [5] 吴广强,付路路. 某煤化工厂控制室抗爆改造技术及施工风险分析 [J]. 化工安全与环境, 2023, 36(3): 41-44.