

高海拔矿区混凝土耐久性提升路径探析

但俊斌

广州新源企业管理有限公司 广东广州

【摘要】高海拔矿区特殊的低温、强辐射、大温差环境，易导致混凝土出现冻融破坏、碳化加速、裂缝发育等问题，严重影响矿区工程结构的安全性与使用寿命。本文从高海拔矿区混凝土耐久性衰减的核心诱因入手，结合混凝土材料特性与矿区工程实际需求，系统探析材料优化、施工管控、防护加固及监测预警等提升路径，旨在为解决高海拔矿区混凝土耐久性不足问题提供理论参考与实践方向，保障矿区基础设施长期稳定运行。

【关键词】高海拔矿区；混凝土耐久性；提升路径；冻融破坏；工程防护

【收稿日期】2025年10月15日 **【出刊日期】**2025年11月15日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250273

Exploration of durability enhancement paths for concrete in high-altitude mining areas

Junbin Dan

Guangzhou Xinqi Enterprise Management Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong

【Abstract】The unique environmental conditions of high-altitude mining areas — including low temperatures, strong radiation, and large temperature fluctuations — tend to cause concrete to experience freeze - thaw damage, accelerated carbonation, and crack development, which seriously affect the safety and service life of engineering structures. This paper starts from the core causes of concrete durability degradation in high-altitude mining areas and, based on the material characteristics of concrete and the practical needs of mining engineering, systematically explores enhancement paths such as material optimization, construction control, protective reinforcement, and monitoring and early warning. The aim is to provide theoretical reference and practical guidance for addressing the issue of insufficient concrete durability in high-altitude mining areas, thereby ensuring the long-term stable operation of mining infrastructure.

【Keywords】High-altitude mining area; Concrete durability; Enhancement path; Freeze - thaw damage; Engineering protection

引言

高海拔矿区作为矿产资源开发的重要区域，其工程建设需面对极端自然环境带来的多重挑战，其中混凝土耐久性不足已成为制约矿区基础设施长期服役的关键问题。在低温反复冻融作用下，混凝土内部孔隙水结冰膨胀会产生内应力，导致微观裂缝不断扩展；强紫外线辐射则加速水泥石碳化进程，降低混凝土碱度与钢筋保护能力；加之昼夜温差大引发的温度应力，进一步加剧混凝土结构的损伤。这些问题不仅增加工程维修成本，还可能引发安全隐患。基于此，本文聚焦高海拔矿区混凝土耐久性提升，在明确耐久性衰减机制的基础上，探索科学

可行的技术路径，为矿区工程建设质量提升提供支撑，同时也为类似高海拔地区工程实践提供借鉴。

1 高海拔矿区混凝土耐久性衰减的主要问题与诱因分析

高海拔矿区混凝土服役首遭冻融破坏：冬季低温、15-20℃昼夜温差致内部孔隙水冻融循环，产生微裂缝并贯通，引发强度下降、表面剥落甚至承载力不足。强辐射与碳化亦加速劣化，强紫外线破坏水泥石、增干缩裂缝，矿区二氧化碳渗透引发碳化，降低碱度致钢筋锈蚀，形成“碳化-锈蚀-开裂”恶性循环^[1]。高海拔矿区的特殊地质与水文条件，也会加剧混凝土耐久性衰减。部分矿区存在地下水或矿坑

水侵蚀问题，水中含有的氯离子、硫酸盐等有害离子，会通过混凝土孔隙渗透至内部。氯离子会优先吸附在钢筋表面，破坏钝化膜的稳定性，导致钢筋锈蚀速率加快；硫酸盐则与水泥石中的水化产物发生反应，生成膨胀性物质，如钙矾石、石膏等，这些物质在混凝土内部产生膨胀应力，引发混凝土开裂、剥落。同时，矿区工程施工过程中，若地基处理不当，在冻胀土的作用下，混凝土基础易产生不均匀沉降，进一步诱发结构裂缝，降低混凝土整体耐久性。

2 基于材料特性优化的混凝土耐久性提升方法

胶凝材料体系是提升高海拔矿区混凝土耐久性的基础，通过调整水泥品种与掺合料比例，可改善其抗冻、抗碳化及抗侵蚀性能。水泥宜选强度等级适配的普通或矿渣硅酸盐水泥，这类水泥水化热较低且后期强度稳定，能减少温度裂缝。掺入粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料，可发挥“填充-活性”作用，降低孔隙率、提升密实度与抗氯离子渗透能力。合理选择骨料与外加剂也至关重要，骨料需坚硬、吸水率低、级配良好，外加剂则注重引气剂、防冻剂与减水剂协同，以增强抗冻性、保证低温水化及改善工作性能。

调整混凝土配合比，实现“低水胶比、高密实度”的设计目标，是适应高海拔矿区环境的重要举措。高海拔矿区混凝土应采用低水胶比设计，水胶比越低，混凝土内部孔隙越细小、分布越均匀，抗渗、抗冻与抗碳化性能越强。同时，需根据矿区环境特点调整砂率与单位用水量，砂率过高易导致混凝土干缩增大，过低则影响和易性；单位用水量应结合外加剂性能与施工要求确定^[2]。在保证混凝土坍落度满足泵送需求的前提下，尽量减少用水量，避免因水分过多导致混凝土内部孔隙率增加。例如，某高海拔矿区选矿厂混凝土结构，通过适配的水胶比、砂率设计，并掺加适量矿物掺合料优化配合比，经现场检测，其抗压强度与抗冻等级均能达到预期标准，能有效抵御矿区冻融环境的影响。

3 高海拔矿区混凝土施工过程的耐久性管控策略

高海拔矿区混凝土施工需注重施工时机与环境温度的把控，避免在极端低温或恶劣天气条件下施工，为混凝土水化与强度发展创造适宜条件。施工前需密切关注天气预报，当环境温度低于5℃时，应采取冬季施工措施，如对骨料进行预热、采用热水拌合混凝土，热水温度控制在60℃以下，避免烫伤

水泥；拌合过程中，需保证骨料、水泥、外加剂等原材料混合均匀，搅拌时间较常温施工延长30s-60s，确保混凝土拌合物温度不低于10℃。浇筑过程中，若遇大风、雨雪天气，需及时搭建防护棚，防止混凝土表面水分过快蒸发或受冻，同时控制浇筑速度，避免因浇筑过快导致混凝土离析，影响密实度。

加强混凝土振捣与养护管理，是保障施工质量、提升耐久性的关键环节。振捣时应采用插入式振捣器，振捣点间距控制在300-400mm，振捣时间以混凝土表面出现浮浆、不再下沉为宜，避免过振导致骨料离析或漏振形成蜂窝、麻面等缺陷，这些缺陷会成为有害离子渗透与冻融破坏的通道。养护阶段，高海拔矿区混凝土需采用“保温-保湿”双重养护方式：浇筑完成后12h内覆盖土工布与塑料薄膜，防止水分蒸发；当环境温度较低时，需在塑料薄膜外侧覆盖岩棉被或草帘进行保温，确保混凝土中心温度与表面温度差不超过25℃，表面温度与环境温度差不超过20℃。养护时间应不少于14d，对于掺加矿物掺合料较多的混凝土，养护时间可延长至21d，保证水泥与掺合料充分水化，形成密实的水泥石结构。

严格把控施工过程中的质量检测与验收环节，可及时发现问题并采取补救措施，避免耐久性隐患。原材料进场时，需对水泥、骨料、外加剂等进行性能检测，如水泥的安定性、强度，骨料的颗粒级配、含泥量，外加剂的减水率、防冻性等，检测不合格的原材料严禁使用^[3-7]。混凝土拌制过程中，需定时检测拌合物的坍落度、含气量与温度，确保各项指标符合设计要求；浇筑完成后，按规范要求制作混凝土试块，分别进行标准养护与同条件养护，标准养护试块用于检测混凝土28d抗压强度，同条件养护试块用于指导现场拆模与后续施工。同时，采用回弹法、超声回弹综合法等无损检测技术，对已浇筑的混凝土结构进行质量抽检，若发现内部空洞、裂缝等缺陷，及时采用压力注浆等方式进行修补，保障混凝土结构的完整性与耐久性。

4 混凝土结构服役期的耐久性防护与监测措施

对高海拔矿区混凝土结构进行表面防护处理，可有效阻隔外界有害因素侵蚀，延长结构服役寿命。根据结构所处环境与损伤程度，可采用不同的表面防护技术：对于暴露在室外的混凝土结构，如矿区厂房外墙、输送栈桥，可涂刷渗透型无机硅烷涂料，硅烷分子能渗透至混凝土内部2-5mm，与水泥石中

的羟基发生反应，形成疏水层，阻止水分与氯离子等有害离子侵入，同时硅烷涂料具有良好的耐紫外线性能，能抵抗高海拔地区强辐射的破坏，一次施工可维持 8-10 年防护效果；对于存在轻微裂缝的混凝土结构，如蓄水池、沉淀池，可采用环氧砂浆进行表面修补，先将裂缝表面凿成 V 型槽，清理干净后涂刷环氧基液，再抹压环氧砂浆，环氧砂浆具有高强度、高粘结力与良好的抗渗性，能有效封闭裂缝，防止裂缝进一步扩展。

建立混凝土结构耐久性长期监测系统，可实时掌握结构损伤发展情况，为及时维修提供依据。监测系统应结合高海拔矿区特点，选择适宜的监测参数与技术手段：在钢筋锈蚀监测方面，采用钢筋锈蚀传感器，将传感器预埋在混凝土内部钢筋附近，通过测量钢筋的极化电阻、腐蚀电流等参数，判断钢筋锈蚀程度，当腐蚀电流超过 $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时，发出预警信号；在混凝土碳化监测方面，定期采用碳化深度测定仪，在结构表面钻取直径 10mm、深度 20mm 的孔洞，喷洒酚酞试剂，测量碳化区域长度，计算碳化深度，当碳化深度达到钢筋保护层厚度的 80% 时，采取防腐处理措施；在裂缝监测方面，采用裂缝宽度监测仪，对已发现的裂缝进行定期测量，记录裂缝宽度与长度变化，当裂缝宽度超过 0.3mm 时，及时进行修补。同时，利用物联网技术，将各监测点数据传输至矿区监控中心，实现数据的实时采集、分析与可视化展示，管理人员可通过监控平台随时查看结构耐久性状态。

制定混凝土结构耐久性维修与加固方案，需根据监测结果与结构实际损伤情况，采取针对性措施，避免损伤进一步恶化。对于钢筋锈蚀程度较轻的结构，可采用电化学再碱化技术，通过向混凝土内部通入低压直流电，将碱性溶液（如氢氧化钠溶液）输送至钢筋表面，恢复混凝土碱度，重建钢筋钝化膜；对于混凝土强度下降明显、承载力不足的结构，如矿区主井井塔、选矿设备基础，可采用外包型钢加固法，在混凝土柱、梁表面包裹角钢与缀板^[8]。通过环氧树脂砂浆将型钢与混凝土粘结牢固，利用型钢承担部分荷载，提高结构承载力与稳定性；对于存在严重冻融破坏的结构，如露天矿边坡挡土墙，可采用喷射混凝土加固法，先清除结构表面酥松层，凿毛处理后，采用湿喷工艺喷射 C30 喷射混凝土，喷射厚度控制在 50-80mm，喷射混凝土中可掺加钢

纤维，提高其抗裂性与抗冻性，加固后结构的抗冻等级可提升 1-2 个等级。

5 结语

本文围绕高海拔矿区混凝土耐久性提升展开系统性研究，从环境诱因、材料优化、施工管控到服役期防护监测，构建了全周期提升路径体系。研究明确，低温冻融、强辐射碳化及有害离子侵蚀是耐久性衰减的核心诱因，通过胶凝材料改良、骨料与外加剂协同选配、配合比优化，可从源头增强混凝土抗劣化能力；严格的施工温度控制、振捣养护及质量检测，能保障施工阶段耐久性落地；服役期表面防护与智能监测，则为结构长期稳定提供保障。这些路径经逻辑验证与技术整合，可为高海拔矿区工程提供切实可行的解决方案，也为极端环境下混凝土耐久性研究拓展思路，后续可深化新型材料与智能化技术的融合应用。

参考文献

- [1] 包振军. 高海拔高寒隧道保温及支护施工技术探索[J]. 汽车周刊, 2025, (11): 83-85.
- [2] 次仁罗布, 次旺旦增. 高海拔地区大型水电站施工企业统招分签材料核销管理研究[J]. 四川水利, 2025, 46(05): 169-173.
- [3] 陈歆, 黄馨, 刘旭, 等. 高海拔地区桥墩混凝土表层温度应力分析(英文)[J/OL]. 硅酸盐学报, 1-15[2025-11-04].
- [4] 李善佩. 高海拔地区混凝土表面防冻涂层材料耐久性评价与工程应用验证[J]. 中国高新科技, 2025, (18): 90-92.
- [5] 秦伟, 吕晓霞, 艾杰. 高寒高海拔地区混凝土防腐涂装关键技术研究[J]. 建筑机械, 2025, (08): 287-290.
- [6] 赖发旺, 庄友, 翟长权, 等. 高海拔地区砾石土心墙堆石坝防渗土料级配改善措施经济成本分析[J]. 水利技术监督, 2025, (08): 158-163.
- [7] 刘胜虎, 李东强. 高海拔高寒地区预制混凝土衬砌管片的生产工艺与质量控制[J]. 四川水力发电, 2025, 44(03): 38-41.
- [8] 苏荟, 胡江, 李星, 等. 改进温度分量的高海拔混凝土坝位移监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(02): 106-112.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS