

恶劣环境下基础设施工程混凝土裂缝防控技术与设计要点

宋德栋

青岛第一市政工程有限公司 山东 青岛 266034

【摘要】：随着基础设施工程规模的不断扩大与建设环境的日益复杂化，混凝土结构在恶劣条件作用下的裂缝问题逐渐成为影响工程安全与耐久性的关键因素之一。极端环境如冻融循环、盐雾侵蚀、干湿交替、高温干燥及强腐蚀气体，使混凝土裂缝产生的机制更加复杂，裂缝的早发与扩展常常导致承载力下降、钢筋裸露与结构寿命缩短。为此，对恶劣环境下混凝土裂缝的成因、演化机制及防控技术进行深入探讨具有重要工程意义。本文从材料性能、环境作用、结构与施工因素四方面分析裂缝产生的内在逻辑，并通过文献梳理和工程实践归纳提出裂缝防控措施。文章围绕材料配比优化、结构抗裂设计、施工过程控制以及长期监测技术展开系统论述，提出恶劣环境下混凝土裂缝防控的设计原则与关键实践路径。研究表明，有效的裂缝控制需在全寿命周期视角下实现材料、工艺、设计、施工和运维五大环节的协同。本文的分析可为未来基础设施工程的裂缝治理提供理论参考和实践指导。

【关键词】：混凝土裂缝；恶劣环境；防控技术；结构设计；耐久性

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.019

引言

混凝土作为基础设施工程中应用最广泛的材料之一，在道路桥梁、隧道、港口、水工建筑及能源工程等领域占据重要地位。然而，在恶劣环境如寒冷地区、海洋环境、荒漠区域及化工污染区，混凝土结构易出现裂缝、剥落、腐蚀及强度退化等问题，严重影响工程使用性能与寿命。裂缝作为混凝土劣化的最早期指标，若未得到及时控制和管理，将快速演变为结构损伤，提高维护成本甚至引发安全隐患。因此，研究恶劣环境条件下混凝土裂缝产生机理、探寻高效防控方法，是现代基础设施工程技术发展的重要方向。当前裂缝控制研究虽较为丰富，但针对恶劣环境的系统化分析仍显不足，尤其是在材料改性、环境适应性设计、施工温控与后期监测等方面，尚需进一步总结和提升。本文从恶劣环境的实际需求和工程特性出发，结合结构全寿命周期管理理念，对裂缝防控技术进行全面探讨，以期为高质量基础设施建设提供参考。

1 恶劣环境下混凝土裂缝的特征与成因分析

1.1 环境作用诱发的裂缝特征及机理扩展

恶劣环境因素如温度变化、湿度循环、盐分侵蚀与化学腐蚀等均会对混凝土内部结构产生破坏性影响。温度骤变引起的膨胀收缩不均会形成温度裂缝；湿干交替使混凝土反复收缩膨胀，易导致微裂缝累积生成；海洋环境中的氯离子可沿裂缝快速渗透，引发钢筋锈蚀，产生锈胀应力，使裂缝进一步扩展；硫酸盐侵蚀通过化学反应产生膨胀产物，使混凝土出现剥落与内部空洞。环境因素常呈现耦合作用，导致裂缝成因复杂化、发展突发性增强。

1.2 材料性能不足导致的内部缺陷积累

混凝土由水泥、骨料、水及外加剂构成，其材料性能直接影响抗裂能力。高水胶比导致孔隙率增大，使干缩、温缩效应

增强；骨料级配不均或界面过渡区强度不足，会形成初始微裂缝；掺合料比例不当、早期强度过低或保水性差，均可在硬化初期产生内部裂缝。此外，外加剂使用不当会造成凝结时间异常、泌水增加等问题，进一步影响材料稳定性，使裂缝更易在早期出现。

1.3 结构约束与施工因素的复合作用

结构设计中的刚性约束过强、构件厚度不均、截面突变等均会诱发裂缝。例如厚大混凝土结构内部温度梯度较大，降温过程中因表面与核心温差显著而形成拉应力导致裂缝。施工中常见的振捣不足、模板变形、局部离析、浇筑间歇过长、温度控制不当等因素，会在混凝土塑性阶段和硬化阶段产生裂缝。此外，养护不到位，如暴晒、风干、低温未保温等，也会使早期裂缝迅速发展。结构约束与施工管理不足的叠加，是恶劣环境下裂缝形成的重要诱因。

2 恶劣环境下混凝土裂缝的防控原则与总体策略

2.1 遵循全寿命周期的防控原则

裂缝防控不应局限于单一阶段，而应贯穿于设计、材料配置、施工管理与后期维护全过程。在设计阶段需制定环境适应性指标，避免仅以强度为目标；材料阶段需优先保证耐久性与稳定性；施工阶段应严格温控、湿控及养护制度；运维阶段应基于监测数据及时采取预防措施。全寿命周期防控的核心在于“预防优于修复”，强调提前识别裂缝风险并采取综合治理措施。

2.2 构建环境适应性设计策略

不同环境应采用不同的防裂策略，如在寒区需提高混凝土的抗冻性；在海洋环境应增强抗氯盐、抗腐蚀能力；在干燥地区需控制早期收缩；在化学腐蚀环境需提高抗侵蚀能力。环境适应性设计要将材料性质、环境参数、构件受力特点与施工工

艺综合考虑，不仅做到满足标准，更需符合实际环境长期作用规律。

2.3 建立设计—材料—施工—监测协同体系

裂缝产生往往源于多因素叠加，因此需构建跨阶段协同体系，使设计意图与施工行为一致、材料性能与结构要求对应、监测结果与维护措施联动。通过协同体系可确保裂缝防控中的每一措施不是孤立的，而是形成闭环管理模式，实现预警、控制、反馈三位一体的管理机制。

3 混凝土裂缝防控关键技术体系扩展研究

3.1 材料性能优化与抗裂能力提升技术

材料是裂缝防控的基础，优化材料性能可从以下方面展开：

一是控制水胶比，采用高效减水剂提高流动性同时保持低孔隙率，使混凝土更致密。二是合理掺入粉煤灰、矿渣、硅灰等矿物掺合料，改善混凝土的微观结构，提高抗渗性、抗裂性与耐久性。三是采用纤维增强技术，通过钢纤维、玄武岩纤维或聚丙烯纤维等提高拉伸韧性，使裂缝受到有效钝化。四是选用高性能骨料并优化级配，提高整体稳定性。五是推广自密实混凝土及高性能混凝土，减少因施工引起的空洞与离析，使材料本体裂缝控制更可靠。

3.2 结构设计优化与应力调控技术

结构抗裂设计应从受力与变形两方面考虑。首先，可通过合理设置伸缩缝、沉降缝、分仓缝等方式减少温度与收缩产生的附加拉应力。其次，构件厚度与尺寸应避免突变，采用圆滑过渡以降低应力集中。再次，钢筋布置应遵循分布均匀、直径适宜的原则，通过增设构造钢筋或分布钢筋增强抗裂能力。此外，应进行温度场模拟分析，对厚大结构采取冷却管、后浇带等手段调节温差，避免因降温速度不一致而产生裂缝。

3.3 施工过程控制与早期裂缝预防技术

施工阶段是裂缝防控的重要关口。施工控制可分为温控、防裂工艺及养护管理三部分。温控方面，应控制混凝土入模温度，通过冷却骨料、遮阳降温或夜间浇筑等方式降低初始温度；大体积混凝土可采用埋设冷却水管，分层分段浇筑以减少温差。防裂工艺包括加强振捣、避免过振或漏振、保证连续浇筑、减少施工间歇等。养护管理方面，应及时进行覆盖保湿、喷雾等措施，防止早期收缩裂缝；在低温季节施工需采用保温材料，避免混凝土冻结导致裂缝。施工过程的规范化能显著减少裂缝早期萌生。

4 恶劣环境条件下裂缝控制的工程化设计要点

4.1 海洋环境下的抗裂设计要点扩展

海洋环境具有高盐度、高湿度、温度变化大及波浪冲击作用，氯离子侵蚀与钢筋腐蚀是裂缝发展的主要因素。因此设计

中应采取多重防护措施。首先，提高混凝土密实性并加强抗渗性能，采用低水胶比比与高等级矿物掺合材料，使氯离子渗透路径延长。其次，钢筋应采用防腐蚀涂层、环氧涂层或采用不锈钢筋，保护层厚度应根据环境等级提高。再次，结构表面可采用防腐涂料或憎水剂，减少氯盐附着。波浪冲刷区域需提高混凝土强度与韧性，通过纤维增强技术提升抗裂性能。

4.2 寒冷地区冻融环境的裂缝控制要点扩展

冻融循环造成混凝土内部水分膨胀，是寒区裂缝最主要原因。设计中需引入引气剂，形成闭合气泡结构缓解冻胀压力。混凝土需具有足够抗冻等级，并控制饱水率使其处于安全状态。施工期必须防冻养护，避免早期强度不足导致裂缝。对于长期暴露在冰雪环境中的基础设施，还需设立排水坡度，确保融水及时外排，减少冻融循环频次。

4.3 高温干燥及工业腐蚀环境下的裂缝控制要点

在高温干燥地区，混凝土易因快速失水而产生塑性收缩裂缝。为提升早期抗裂能力，应加强浇筑后的及时养护，通过喷雾保湿、覆盖薄膜或洒水保湿等方式减缓水分蒸发速度。引入纤维增强技术可有效提高混凝土的抗拉强度，使材料在收缩过程中具有更好的变形协调能力，从而降低裂缝产生概率。施工过程中应避免高温时段浇筑，并采用防蒸发剂降低自由水蒸发速度，使混凝土在初期硬化阶段保持适宜湿度。在化工腐蚀环境中，酸性介质、硫酸盐以及含重金属颗粒的化学成分会加速混凝土材料的分解与剥蚀，导致内部裂缝逐渐扩展。为提升耐久性，可选用防腐蚀型混凝土材料，并在表面设置保护层，如涂覆环氧涂料、聚脲防护层或抗渗涂层，使腐蚀因子难以进入材料内部。

5 基础设施混凝土裂缝的监测、预警与维护策略

5.1 构建在线监测体系

裂缝治理是一项持续性的工作，需要借助长期监测手段掌握裂缝的演化趋势，从而为结构安全管理提供可靠依据。通过人工巡检、三维激光扫描、超声波检测、电磁感应等多种方式，可定期获取裂缝的宽度、深度、走向与扩展速度等信息，使裂缝变化情况得到及时记录与分析。三维激光扫描能够构建裂缝区域的精细模型，便于对比不同阶段的形态变化；超声波和电磁检测技术可评估裂缝内部的损伤范围，判断材料内部的连续性与密实度。在关键受力区域布设智能传感器，可实时监测温度、湿度、变形、应力等影响裂缝发展的关键参数，实现全天候数据采集。监测系统在数据阈值异常时能够及时发出预警，使管理人员迅速采取加固、减载或修补措施。通过构建完善的长期监测体系，可有效识别裂缝的加速扩展现象和潜在风险，为科学制定维护计划与提升结构耐久性提供重要支撑。

5.2 基于大数据与人工智能的裂缝预测方法

随着智能建造技术的持续进步，工程结构监测逐渐从单点

检测走向多源数据融合。通过对温度、湿度、应变、荷载等监测数据的协同分析，可构建更精细的混凝土裂缝演化模型，使裂缝产生与发展的机制呈现出可量化、可解释的动态过程。数据融合技术能够整合监测设备、现场检测、历史资料与环境数据，使裂缝演化从单一变量分析转向综合性分析，从而提高模型的准确性与适用性。人工智能在特征提取与趋势识别方面具有优势，通过对监测数据进行连续学习，可揭示裂缝萌生、扩展与稳定阶段的规律，为工程结构健康评估提供科学依据，使设施管理更加主动化、精细化。

5.3 裂缝修复加固与维护管理体系

裂缝产生后，应根据裂缝的成因、深度与危害程度选择适宜的修复技术，使结构性能得到及时恢复。一般浅表裂缝可采用表面涂抹法、聚合物修补或防护层覆盖等方法，通过封闭裂缝阻断水分与腐蚀介质的进一步侵入。对于贯穿性或深层裂缝，灌浆修补法能够将浆液注入裂缝内部，实现密实填充并恢复材料整体性。若裂缝影响承载能力或属于结构性损伤，可采用粘贴碳纤维板、外包钢等加固措施，以提升构件的抗拉与抗

弯性能，使结构稳定性得到可靠保障。长期维护体系应依托监测数据持续更新修复策略，对关键区域实施重点巡查，及时处理新生或扩展裂缝。通过完善定期检查、健康评估与动态维护机制，可有效阻断裂缝发展趋势，延缓材料老化速度，为结构长期安全运行提供坚实支撑。

结论

恶劣环境下基础设施工程混凝土裂缝防控是结构耐久性保障的重要课题，裂缝产生机制复杂，涉及材料性能、环境作用、结构与施工工艺等多方面因素。防控措施需贯穿工程全寿命周期，从设计源头加强环境适应性，从材料层面提升抗裂性能，从施工过程强化质量控制，并通过长期监测与预测模型及时了解裂缝演化状态。研究表明构建以环境适应性设计、材料优化、施工控制及智能监测为核心的综合防控体系，是提升恶劣环境下混凝土结构耐久性的有效路径。未来研究可更加关注裂缝发展机理的数值模拟、智能化预测模型与新型抗裂材料的开发，为基础设施可持续发展提供更加坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 张国伟, 李新友. 恶劣环境下混凝土耐久性问题研究[J]. 建筑材料学报, 2021.
- [2] 王建军, 刘敏. 基础设施工程混凝土裂缝控制技术综述[J]. 土木工程学报, 2020.
- [3] 陈海峰, 周文胜. 海洋环境下混凝土结构裂缝控制研究[J]. 水运工程, 2022.
- [4] 赵岩. 寒冷地区混凝土裂缝形成机制与控制措施[J]. 建筑科学, 2019.
- [5] 刘俊强. 基于环境因素的混凝土裂缝综合防治技术研究[J]. 工程建设, 2023.