

# 寒冷地区水工建筑物用抗冻融复合材料性能优化研究

易 鹏

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830049

**摘要:** 寒冷地区水工建筑物长期受冻融循环威胁, 抗冻融复合材料性能优化是保障工程耐久性的关键。本文通过组分配比调控、制备工艺适配、改性剂功能化设计及服役环境匹配四维路径, 实现材料孔隙结构细化、抗冻机制强化及环境耐受性提升。优化后材料在冻融试验中表现出更高强度保留率与更低裂缝扩展速率, 有效延长水工建筑物使用寿命, 为寒冷地区工程防护提供技术支持。

**关键词:** 水工建筑物; 抗冻融复合材料; 性能优化

**引言:** 寒冷地区水工建筑物长期面临冻融循环挑战, 传统材料易因冻胀破坏引发结构失效风险。抗冻融复合材料通过骨料优化、聚合物改性及纤维增强等手段, 成为提升工程耐久性的核心手段。基于工程实际需求, 聚焦材料性能优化关键技术, 探索从微观组分调控到宏观性能提升的全链条解决方案, 为寒冷地区水工建筑物安全稳定运行提供可靠技术保障, 助力工程全生命周期风险防控与效能提升。

## 1 寒冷地区水工建筑物抗冻融复合材料概述

寒冷地区水工建筑物长期面临低温、冻融循环等极端环境挑战, 抗冻融复合材料作为关键防护手段, 其性能优化直接关系工程安全与耐久性。此类材料以提升抗冻融能力为核心, 通过多组分协同作用实现功能强化, 常见配方包括改性水泥基材料、聚合物复合材料及纤维增强复合体系等。(1) 在材料组成上: 抗冻融复合材料注重骨料选择与胶凝体系优化。优质骨料需具备低吸水性、高抗冻性, 如玄武岩、石英砂等天然骨料或高性能再生骨料, 可减少水分迁移引发的冻胀破坏。胶凝体系常采用硅酸盐水泥与矿物掺合料复合, 如粉煤灰、硅灰等, 通过微集料效应与火山灰反应改善孔隙结构, 降低有害孔比例, 提升抗渗性与抗冻性。(2) 功能强化方面: 聚合物改性是重要途径。丙烯酸酯、环氧树脂等聚合物乳液可填充材料内部孔隙, 形成致密网络结构, 抑制水分渗透与冰晶形成, 同时增强材料韧性, 缓解冻融循环产生的应力集中。纤维增强技术则通过钢纤维、合成纤维等添加, 提升材料抗裂性能, 防止冻融过程中微裂纹扩展。性能评价需结合实际工况, 通过快速冻融试验、动弹性模量测试等手段量化材料抗冻性能, 同时关注材料与基材的粘结强度、耐久性等综合指标。优化方向聚焦于材料体系创新与工艺改进, 如纳米材料改性提升早期强度, 智能响应型材料实现环境自适应防护, 以及绿色环保型

材料降低生态影响<sup>[1]</sup>。通过多维度性能优化, 抗冻融复合材料可有效延长寒冷地区水工建筑物使用寿命, 保障工程安全运行。

## 2 寒冷地区水工建筑物抗冻融复合材料特性解析

### 2.1 冻融循环下的力学性能特性解析

寒冷地区水工建筑物所处环境温度差剧烈, 冻融循环作用下, 抗冻融复合材料的力学性能会经历显著变化。冻融过程中, 材料内部水分迁移形成冰晶, 体积膨胀产生应力, 导致微裂纹萌生与扩展。这一过程直接削弱材料的抗压强度与抗折强度, 同时降低弹性模量, 使材料刚度退化。材料基体的孔隙结构对冻融耐久性起关键作用。孔隙率过高时, 水分易渗入并加速冻胀破坏; 孔隙细化且分布均匀的材料, 能有效抑制冰晶形成, 减缓力学性能衰减。骨料与胶凝材料的界面过渡区是薄弱环节, 冻融循环可能引发界面脱粘, 进一步降低材料整体强度。聚合物改性或纤维增强可显著改善冻融下的力学稳定性。聚合物乳液填充孔隙形成网络, 抑制水分渗透并增强韧性; 纤维通过桥接裂纹延缓扩展, 维持材料完整性。此外, 材料早期强度发展影响冻融损伤累积速度, 早期强度高可减少冻融初期微损伤, 延缓性能退化。冻融循环下的力学性能特性需结合实际工况评估, 通过模拟试验量化强度衰减规律, 为材料优化设计提供依据。这种特性解析对提升寒冷地区水工建筑物耐久性具有直接指导意义。

### 2.2 寒冷环境中的抗冻融耐久特性解析

寒冷环境中, 水工建筑物抗冻融复合材料的耐久特性主要体现在长期冻融循环下的性能稳定性。低温环境促使材料内部水分反复冻结膨胀, 形成冰晶压力, 导致微结构损伤累积; 这种损伤若未有效控制, 将逐步引发材料开裂、剥落甚至整体失效。材料孔隙特征是影响抗冻融耐久性的核心因素, 合理控制孔隙率与孔径分布, 可减少水分迁移通道, 抑制冰晶形成; 例如, 采用低吸

水率骨料与致密胶凝体系,能降低有害孔比例,提升抗渗性,从而减缓冻融损伤速度。界面过渡区作为材料薄弱环节,其粘结强度直接影响整体耐久性。通过优化骨料表面处理工艺或引入高性能胶凝材料,可增强界面结合力,减少冻融循环下的脱粘现象;此外,添加功能性添加剂如引气剂,可在材料内部形成微小封闭气泡,缓解冰晶膨胀压力,提升抗冻性能。寒冷环境中的抗冻融耐久性需结合实际工况评估,关注材料在长期暴露下的性能退化规律。通过系统测试与模拟分析,可明确材料在冻融循环中的强度衰减、裂缝扩展等关键指标,为优化设计提供科学依据,最终实现水工建筑物在寒冷环境中的长期安全运行。

### 2.3 与水工建筑物结构的适配特性解析

水工建筑物结构类型多样,抗冻融复合材料需与基体形成稳定协同体系。材料与混凝土、岩石等基材的界面粘结强度是关键,通过优化胶凝材料配比或添加专用界面剂,可提升粘结力,减少冻融循环下的脱层风险,保障结构整体性。变形协调性需重点考虑,寒冷地区温度波动剧烈,结构易产生收缩或膨胀,材料需具备适度弹性模量与延伸率,避免因刚度差异引发应力集中;例如,采用高韧性纤维增强复合材料,可缓冲冻胀应力,减少裂缝萌生与扩展,延长结构使用寿命。施工适应性直接影响应用效果,材料需满足现场施工需求,如可泵送性、可塑性及快速硬化特性,以适应复杂结构形状与施工工艺。例如,自流平材料可高效填充不规则结构表面,提升施工效率与质量。长期耐久性需与结构寿命同步,材料需经受长期冻融、紫外线等环境考验,抗老化性能需经严格测试,避免因材料劣化导致结构提前失效<sup>[2]</sup>。适配特性解析需结合实际工况,通过模拟试验与现场监测,明确材料与结构在冻融环境中的协同作用规律,为优化设计提供科学依据,最终实现水工建筑物在寒冷环境中的长期安全稳定运行,保障工程效益与生态效益双赢。

### 2.4 冻融作用下的损伤演化特性解析

冻融环境下,抗冻融复合材料的损伤演化呈现阶段性特征。初期,水分在材料孔隙中迁移并冻结,冰晶膨胀产生静水压力与渗透压力,导致微裂纹在薄弱区域萌生;这些微裂纹在后续冻融循环中逐步扩展,形成可见裂缝,材料强度与刚度随之衰减。损伤演化速率受材料孔隙结构、骨料类型及胶凝体系影响,孔隙率过高或孔径分布不均会加速水分渗透与冰晶形成,加剧损伤;而致密孔隙结构与低吸水性骨料可有效抑制冻胀破坏。界面过渡区作为应力集中点,其粘结强度不足易引发脱粘与裂缝扩展,需通过优化胶凝材料配比或添加界面增强

剂强化。环境因素如温度波动幅度、冻融频率及水分条件直接影响损伤演化路径。剧烈温差加速冰晶生长与应力累积,频繁冻融加剧疲劳损伤,而水分充足环境则提供持续冻胀动力。损伤演化特性解析需结合无损检测与模拟试验,量化裂缝扩展速率、强度衰减规律等指标。通过明确损伤机制与演化规律,可为材料优化设计提供科学依据,如引入纳米材料细化孔隙、添加引气剂缓解冰晶压力,最终提升材料在冻融环境中的长期耐久性,保障水工建筑物安全运行。

## 3 抗冻融复合材料性能优化路径探索

### 3.1 基于抗冻需求的组分配比优化路径

抗冻需求驱动下,组分配比优化需以微观结构调控与抗冻机制强化为核心。水泥基体选择低碱品种,可有效抑制碱骨料反应引发的膨胀破坏,延长材料在冻融环境中的服役寿命,同时维持适宜的水化活性以保障早期强度发展。水灰比控制需平衡施工性能与抗冻性:过高易导致孔隙增多,加剧冻融损伤;过低则可能影响混合料的工作性,需通过多轮试验确定最优范围,确保既满足施工要求又具备良好抗冻潜力。矿物掺合料如硅灰、矿粉通过微集料填充与火山灰反应,可优化孔隙结构分布,减少连通孔比例,提升材料密实度与抗渗性能。骨料选择需兼顾抗冻性与经济性,玄武岩、花岗岩等低吸水性骨料可减少水分迁移路径,延缓冰晶形成;合理级配骨料通过优化颗粒搭配,可降低整体孔隙率,增强抗冻能力。功能性添加剂中,引气剂通过引入封闭气泡缓解冻胀压力;聚合物乳液可形成三维网络结构,提升材料韧性;纳米材料通过细化孔隙进一步提升抗冻性<sup>[3]</sup>。组分配比优化需结合实际工况,通过冻融试验验证不同配比方案性能,最终确定最佳组合,实现材料在极端环境中的长期耐久性,保障水工建筑物安全稳定运行。

### 3.2 适配水工场景的制备工艺优化路径

水工场景对制备工艺的适配性要求极高,需在施工效率与材料性能间取得平衡。低温环境下,胶凝材料的固化速度显著降低,易引发冻害风险。通过优化胶凝材料配比,如增加硅酸盐水泥比例或引入硫铝酸盐水泥,可加速水化反应进程;配合适量早强剂使用,能进一步缩短凝结时间,确保材料在低温下快速形成初期强度,避免冻胀导致结构缺陷。复杂结构施工要求材料具备优异的可塑性,自流平工艺通过重力作用自动填充不规则表面,减少人工振捣需求,提升施工均匀性;喷射成型则利用高压气流将材料喷射至曲面或异形结构,实现高效覆盖与密实填充。二者均需材料具备良好的流动性与粘聚性,以确保施工精度与结构完整性。养护工艺直接

影响材料最终性能,寒冷地区需采用双重保温措施,外层覆盖岩棉或聚苯板阻隔冷空气,内层铺设电热毯维持内部温度,确保水化反应充分进行。同时,需定期监测养护环境湿度,避免过早失水导致开裂。通过模拟极端冻融环境进行工艺验证,可确保材料在长期服役中保持稳定性能,最终实现水工建筑物耐久性与安全性的全面提升。

### 3.3 靶向提升抗冻性的改性剂优化路径

靶向提升抗冻性需聚焦改性剂的功能化设计,引气剂通过引入微小封闭气泡,有效缓解冻融循环中的冰晶膨胀压力,减少内部应力集中,延缓裂缝萌生。其优化路径在于控制气泡尺寸分布与稳定性,确保气泡均匀分散且不易破裂,维持长期抗冻效果。聚合物乳液改性可增强材料韧性,丙烯酸酯、环氧树脂等乳液填充孔隙,形成三维网络结构,抑制水分渗透与冰晶形成,同时提升材料抗裂性能。优化需关注乳液与胶凝材料的相容性,避免相分离导致性能衰减。纳米材料改性通过细化孔隙结构实现抗冻强化,纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等可填充微孔隙,降低孔隙率,提升材料密实度与抗渗性。其优化需控制纳米材料掺量与分散均匀性,避免团聚影响性能。改性剂协同作用是关键优化方向,通过复配不同功能改性剂,如引气剂与聚合物乳液联合使用,可同时实现压力缓释与韧性提升;纳米材料与矿物掺合料复合,可协同细化孔隙并增强界面过渡区。最终,通过靶向改性剂的系统优化,实现材料抗冻性能的精准提升,保障寒冷地区水工建筑物长期安全运行。

### 3.4 匹配服役环境的性能适配优化路径

匹配服役环境需实现材料性能与动态环境条件的深度协同适配。寒冷地区年温差剧烈,冻融循环频繁且剧烈,材料必须具备持续稳定的抗冻融循环能力,以应对极端温度波动带来的结构性挑战。通过调控孔隙结构,如采用纳米材料技术细化孔隙至微纳米尺度,可显著提升材料对温度变化的适应性,有效减少因热胀冷缩引发的

微裂纹扩展风险,增强结构耐久性。湿度与水分迁移是冻胀破坏的核心诱因,材料需通过优化胶凝体系与骨料级配,实现低吸水率与高抗渗性的双重保障。胶凝体系的优化可增强材料密实性,降低有害孔隙比例;骨料级配的合理搭配能优化内部结构,延缓水分迁移路径,从根本上抑制冻胀破坏的发生。环境耐受性需通过模拟极端工况进行严格验证,包括低温、高湿及高频次冻融循环场景,量化分析材料强度变化、裂缝演化等关键指标,明确材料在真实环境中的性能边界<sup>[4]</sup>。性能适配优化需整合材料设计、制备工艺与环境模拟技术,形成从实验室研发到实际工程应用的全流程解决方案,通过动态调整材料组成与工艺参数,实现材料性能与服役环境的精准匹配,最终提升寒冷地区水工建筑物的长期安全性与稳定性,推动工程效益与生态效益的协同发展。

结束语:未来,可深入融合智能监测技术与自适应材料体系,通过部署物联网传感器网络实时采集冻融环境数据,结合大数据分析与机器学习算法实现材料性能动态调控。例如,根据温度、湿度变化自动调整材料孔隙结构或释放抗冻因子,实现风险精准预警。同时,推动绿色制备工艺革新,降低全生命周期碳排放,促进寒冷地区水工建设向智能化、绿色化双轨升级,最终实现工程安全性能与生态效益的协同提升。

### 参考文献:

- [1]吴燕,张达.水工混凝土冰拔冻融劣化机理及防护技术研究进展[J].水力发电,2025,51(4):31-38+110.
- [2]邵晓妹,陈亮,孙正,周璐,李娟,曾大文.高寒地区水工建筑物环氧砂浆防护材料耐候性能及工程应用[J].长江科学院院报,2024,41(7):158-162+167.
- [3]柴健.矿渣-粉煤灰复合材料混凝土抗冻融性能研究[J].中国新技术新产品,2024(17):109-111.
- [4]陈章浩.基于不同含气量的水工混凝土抗冻性能与力学性能研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(7):26-28+68.