

# 抗冲磨混凝土在冻融-冲磨耦合作用下的劣化机理与防护对策

张丽华

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 抗冲磨混凝土广泛应用于水工建筑物、泄洪消能结构及寒冷地区水利工程中,常同时遭受水流冲刷磨损(冲磨)与冻融循环的复合作用。这种冻融-冲磨耦合作用显著加速了混凝土的性能劣化,严重威胁工程结构的安全性与耐久性。本文系统综述了冻融-冲磨耦合作用下抗冲磨混凝土的劣化机理,重点分析了冻融损伤对混凝土微观结构的破坏效应、冲磨作用对表层材料的剥蚀机制,以及二者相互促进的协同劣化过程。在此基础上,从原材料优化、配合比设计、外加剂应用、纤维增强及表面防护等多个维度,提出了针对性的防护对策。最后,结合当前研究现状,展望了未来在多场耦合模拟、智能监测与寿命预测等方面的发展方向,旨在为提升寒冷地区水工混凝土结构的长期服役性能提供理论支撑与技术参考。

**关键词:** 抗冲磨混凝土;冻融循环;冲磨作用;耦合劣化;防护对策;耐久性

## 引言

随着我国水利水电工程向高寒、高海拔的青藏高原、东北及西北等地拓展,水工混凝土结构长期暴露在恶劣自然环境中。溢洪道等结构既要承受高速水流裹挟泥沙、卵石的冲磨,又要抵御冬季反复冻融循环造成的物理化学损伤。单一环境因素对混凝土劣化的研究虽多,但冻融与冲磨耦合作用并非简单相加,而是协同效应显著,劣化速率远超单一因素作用之和。抗冲磨混凝土虽在强度等方面有所提升,可在冻融-冲磨耦合环境下仍挑战重重。冻融循环使混凝土内部微裂缝扩展、孔隙率上升、界面过渡区弱化;冲磨作用又不断剥蚀表层,暴露新薄弱区域,加速水分和侵蚀介质侵入,加剧冻融损伤,形成“冻融损伤—表层剥蚀—加速冻融”的恶性循环,是结构提前失效的关键。深入揭示冻融-冲磨耦合作用下抗冲磨混凝土的劣化机理,并提出有效防护对策,对保障高寒地区重大水利工程安全运行、延长服役寿命、降低维护成本意义重大。本文将围绕这一核心问题展开系统论述。

## 1 冻融-冲磨耦合作用下的劣化机理

### 1.1 冻融循环对混凝土的损伤机制

冻融循环是寒冷地区混凝土劣化的主导因素之一,其根本机理源于混凝土孔隙中自由水结冰时产生的体积膨胀效应。当温度降至冰点以下,孔隙水结冰体积膨胀约9%,在孔壁周围产生高达200MPa的静水压力;与此同时,未冻结区域的水分在浓度梯度驱动下向冻结锋面迁移,形成渗透压。当这些内应力超过混凝土局部抗拉强

度时,便会在微观尺度上引发微裂缝。随着冻融循环次数的增加,这些微裂缝不断扩展、贯通,最终导致混凝土表层出现剥落、强度显著下降以及渗透性急剧增大<sup>[1]</sup>。尽管抗冲磨混凝土通常具有较低的水胶比和较高的密实度,从而在一定程度上延缓了水分的侵入,但其微观结构中依然不可避免地存在毛细孔、凝胶孔以及骨料与水泥浆体之间的界面过渡区(ITZ)等薄弱环节。在反复冻融作用下,这些区域首先发生劣化,表现为孔隙结构向大孔方向演化、ITZ粘结性能弱化、弹性模量与抗压强度持续衰减,以及表层混凝土逐渐疏松化。这种由内而外的结构性损伤,为后续冲磨作用提供了优先剥蚀路径,成为耦合劣化的起点。

### 1.2 冲磨作用对混凝土的剥蚀机制

冲磨作用主要由高速水流携带的固体颗粒(如砂、砾石)对混凝土表面施加的复合力学效应所引起,包括冲击、切削、凿削以及空蚀等多种破坏形式。当水流速度较高时,颗粒以一定角度撞击混凝土表面,造成局部压溃和塑性变形;而在颗粒沿表面滑动或滚动过程中,则产生持续的微切削与刮擦效应,导致材料逐步剥离。此外,水流在结构突变处(如闸墩、消力坎)易发生空化现象,空泡溃灭时产生的微射流冲击力可达数百兆帕,进一步加剧表面损伤。抗冲磨混凝土通过提高基体强度、优化骨料级配以及掺入硅灰等活性矿物掺合料,可在一定程度上提升其抵抗冲磨的能力。然而,这种提升主要建立在材料整体密实性和界面粘结良好的前提下。一旦混凝土表层因其他环境因素(如冻融)而预先

劣化,其抗冲磨性能将大打折扣。此时,冲磨作用不再局限于均匀磨损,而是倾向于沿已有微裂缝或弱化区域进行选择性的剥蚀,导致局部坑蚀、片状剥落等非均匀破坏形态,显著降低结构的整体完整性与服役安全性。

### 1.3 冻融-冲磨耦合的协同劣化机制

冻融与冲磨并非独立作用,而是存在强烈的正反馈耦合效应,其协同劣化过程可概括为以下三个阶段:

#### 1.3.1 第一阶段:冻融预损伤阶段

在无冲磨或低流速条件下,冻融循环首先在混凝土表层(0-20mm深度)形成微裂缝网络,降低表层密实度与强度。此阶段冲磨作用较弱,但为后续协同劣化奠定基础。

#### 1.3.2 第二阶段:冲磨加速冻融阶段

随着水流速度增加,冲磨作用开始剥蚀已被冻融弱化的表层混凝土。剥蚀不仅直接损失材料,更关键的是暴露新的内部结构,使水分更容易渗入更深区域。同时,冲磨造成的表面粗糙度增加,有利于水分滞留与冻结,进一步加剧冻融损伤深度与速率。

#### 1.3.3 第三阶段:恶性循环与加速失效阶段

冻融损伤→表层弱化→冲磨剥蚀加剧→新界面暴露→水分侵入加深→冻融损伤范围扩大……这一循环不断自我强化,导致混凝土质量损失率、表面磨损深度、动弹性模量衰减速率等指标呈非线性快速增长<sup>[2]</sup>。实验研究表明,在相同冻融次数下,耦合作用下的质量损失可达单一冻融作用的2-4倍;而在相同冲磨强度下,经冻融预处理的试件磨损深度增加30%-70%。此外,耦合作用还改变了劣化模式:单一冲磨以均匀磨损为主,而耦合作用下常出现局部坑蚀、片状剥落等非均匀破坏形态,对结构安全构成更大威胁。

## 2 防护对策

### 2.1 原材料优化与配合比设计

提升抗冲磨混凝土在冻融-冲磨耦合环境下的耐久性,首先应从原材料选择与配合比设计入手,构建高密度、低渗透、强界面的微观结构体系。在胶凝材料方面,应采用低水胶比(通常控制在0.35以下)作为基础,以最大限度减少毛细孔数量。同时,推荐使用硅酸盐水泥与矿物掺合料的复合胶凝体系。其中,硅灰因其极细的粒径(纳米级)和高火山灰活性,能够有效填充水泥颗粒间的微孔隙,显著细化界面过渡区,提高基体密实度与强度,掺量一般控制在5%至10%之间。粉煤灰或矿渣粉虽可改善工作性并降低水化热,但其早期活性较低,可能影响早期抗冻性,因此建议与硅灰复掺,以兼顾早期与后期性能。近年来,纳米SiO<sub>2</sub>、纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等纳

米材料也被用于进一步致密化基体,但其成本较高,尚处于工程应用探索阶段。在骨料选择上,粗骨料宜采用坚硬、致密、吸水率低的玄武岩或辉绿岩,最大粒径不宜超过20mm,以避免应力集中;细骨料则推荐使用机制砂,并合理控制石粉含量在5%至10%之间,以增强颗粒间的嵌锁效应。此外,通过优化骨料级配实现最紧密堆积,可有效降低混凝土整体孔隙率,从源头上抑制水分侵入与冻胀应力的产生。

### 2.2 引气技术与抗冻剂应用

引气技术是提升混凝土抗冻性的经典且有效手段,其核心在于通过引入大量封闭、稳定且尺寸适宜的微小气泡(直径10-200μm),为孔隙水结冰时提供膨胀缓冲空间,从而显著缓解冻胀应力。对于抗冲磨混凝土而言,引气量的控制尤为关键,需在抗冻性与耐磨性之间取得平衡。一般建议在寒冷地区将含气量控制在4%至6%之间,并确保气泡间距系数不超过200μm,以保证气泡系统的有效性<sup>[3]</sup>。为此,应优选高性能引气剂,如松香皂类或烷基磺酸盐类,以获得稳定、细小的气泡结构。此外,可考虑使用憎水型引气剂,在引气的同时赋予孔壁一定的疏水性,进一步减少可冻水含量。除引气剂外,有机硅类抗冻剂或成膜型养护剂也可作为辅助手段。这类材料能在混凝土孔隙内壁形成一层疏水膜,降低水分吸附与迁移能力,从而从本质上减少冻融损伤的驱动力。值得注意的是,引气虽提升抗冻性,但可能略微降低强度与耐磨性,因此必须与高强度基体设计相结合,避免顾此失彼。

### 2.3 纤维增强增韧

纤维的引入能够有效提升混凝土的抗裂性、韧性和能量吸收能力,从而在冻融-冲磨耦合作用下发挥显著的防护作用。钢纤维因其高弹性模量和强桥接能力,可有效抑制微裂缝的扩展与贯通,大幅提高混凝土的抗冲磨性与抗剥落能力。工程实践中,钢纤维长度通常为30-60mm,体积掺量控制在0.5%至1.0%之间,可在不显著影响工作性的前提下显著改善耐久性能。然而,钢纤维在潮湿环境中存在锈蚀风险,需结合防腐措施或用于非暴露部位。相比之下,聚丙烯纤维(PP纤维)虽强度较低,但具有良好的化学稳定性与分散性,掺量约为0.9-1.2kg/m<sup>3</sup>时,即可有效抑制塑性收缩裂缝和早期冻融微裂,且成本低廉,适用于大面积应用。近年来,玄武岩纤维和碳纤维因其高强、耐腐蚀、耐高低温等优点,逐渐在高要求工程中得到应用,尤其适用于极端冻融-冲磨环境。研究表明,掺加0.8%钢纤维的抗冲磨混凝土在耦合作用下,其磨损深度可降低40%以上,动弹性模量保

留率提高25%，充分体现了纤维增韧在协同防护中的关键价值。

#### 2.4 表面防护技术

对于已建工程或关键易损部位，仅依靠混凝土本体性能可能难以满足长期服役要求，此时可辅以表面防护技术，形成“本体+屏障”的双重防护体系。环氧树脂涂层具有高附着力、优异的耐磨性与化学稳定性，常用于水工结构表面防护，但其在低温下易变脆，需注意施工温度与柔韧性匹配。聚脲弹性体涂层则兼具高弹性、高耐磨性与优异的抗开裂能力，且固化速度快、适应复杂曲面，特别适用于冻融-冲磨耦合环境下的动态防护。对于大面积、非结构性防护，硅烷或硅氧烷类浸渍剂是一种理想选择，其通过毛细作用渗透至混凝土表层数毫米深度，与内部硅羟基反应形成憎水层，显著降低吸水率而不改变外观，且不影响水蒸气透过，避免内部湿气积聚<sup>[4]</sup>。在极端工况下，如高流速泄洪洞底板，可采用超高性能混凝土（UHPC）薄层覆面技术，其厚度通常为10-30mm，抗压强度超过150MPa，几乎不透水，抗冲磨与抗冻性远超常规混凝土，虽成本较高，但寿命长、维护少，综合效益显著。

#### 2.5 施工质量控制与养护

在拌合阶段，应确保胶凝材料、骨料、纤维及外加剂充分均匀混合，避免离析或纤维结团；浇筑过程中需分层振捣密实，杜绝蜂窝、麻面等缺陷；对于暴露面，建议进行二次抹面处理，以减少表面微孔与初始裂缝。养护是决定混凝土早期性能发展的关键环节，尤其对于低水胶比、高掺合料的抗冲磨混凝土，必须保证不少于14天的充分湿养护，其中前7天尤为关键，直接关系到强度发展、孔隙细化与界面形成。在寒冷季节施工时，更需采取严格的保温防冻措施，如覆盖保温毯、搭设暖棚或使用防冻剂，严防混凝土在强度未达临界值前遭受早期冻害。只有将材料设计、施工工艺与养护管理有机统一，才能真正实现抗冲磨混凝土在严酷环境下的长效服役。

### 3 研究展望

尽管现有研究取得一定进展，但仍存在以下挑战与发展方向：（1）多场耦合本构模型缺失：现有模型多基

于单一或双因素，缺乏考虑温度-湿度-应力-冲刷速度等多物理场耦合的精细化数值模型；（2）长期性能预测困难：冻融-冲磨耦合作用具有高度非线性与时变性，需建立基于损伤力学与机器学习的寿命预测方法；（3）智能监测技术应用不足：发展嵌入式传感器（如光纤光栅、压电陶瓷）实时监测裂缝、含水率、冲刷深度等参数，实现结构健康状态动态评估；（4）绿色低碳防护材料研发：探索工业固废（如锂渣、赤泥）在抗冲磨混凝土中的资源化利用，开发环境友好型防护涂层；（5）标准规范滞后：现行规范（如DL/T5241、SL352）对耦合作用考虑不足，亟需制定冻融-冲磨耦合环境下的设计、施工与评价标准。

### 4 结语

抗冲磨混凝土在冻融-冲磨耦合作用下的劣化是一个复杂的多尺度、多物理场交互过程。冻融循环通过微裂缝扩展弱化混凝土表层结构，冲磨作用则加速剥蚀并暴露新界面，二者形成正反馈协同效应，显著加速材料性能退化。为有效应对这一挑战，应采取系统性防护策略：在材料层面，通过低水胶比、矿物掺合料、引气技术及纤维增强优化混凝土本体性能；在结构层面，结合高性能表面涂层或覆面层提供额外屏障；在施工与运维层面，强化质量控制与智能监测。未来研究应聚焦于多场耦合机理深化、寿命预测模型构建及绿色智能防护技术开发，为高寒地区重大基础设施的长寿命、高可靠服役提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 白银,叶小盛,刘海洋,等.冻融循环与水流冲磨耦合作用下混凝土损伤进程[J].水利水电快报,2019,40(11):64-69.
- [2] 吴保国.严寒区水工混凝土在冻融—冲磨交替作用下的损伤机理研究[D].新疆农业大学,2024.
- [3] 肖敏,郭文瑛,汪永剑,等.冻融循环与海水腐蚀对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响研究[J].混凝土世界,2022,(07):20-24.
- [4] 刘明辉,韩冰,马金泉.冻融循环作用下混凝土抗冲磨性能研究[J].土木工程学报,2019,52(07):100-109.