

# 渠道衬砌冻胀破坏机理及防治方法研究

卢紫娟

新疆生产建设兵团建筑工程科学技术研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**【摘要】**：渠道衬砌在寒冷地区运行过程中易受冻胀作用影响而产生开裂、鼓胀与脱空等病害，严重削弱输水安全与结构耐久性。围绕冻胀破坏机理这一核心问题，系统分析温度梯度、水分迁移及土体冰胀力对衬砌结构的耦合作用机制，揭示衬砌受力失衡与变形失稳的形成过程。在此基础上，从材料优化、结构设计改进及排水保温措施等方面提出针对性防治路径，构建集预防与治理于一体的技术思路，为寒区渠道工程安全运行与寿命提升提供理论依据与实践参考。

**【关键词】**：渠道衬砌；冻胀机理；水分迁移；结构破坏；防治措施

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.041

## 引言

寒冷地区渠道工程在长期运行中普遍面临冻胀破坏问题，衬砌结构一旦产生裂缝和变形，影响输水效率，还可能诱发渗漏与基础失稳等连锁反应。冻胀现象受气温变化、地下水补给及土体性质等多重因素影响，其形成过程复杂，治理难度较大。深入剖析冻胀作用下衬砌结构的受力与变形特征，是提升工程耐久性和安全性的关键环节。在此背景下，围绕冻胀破坏机理与防治路径展开系统探讨，有助于完善寒区渠道设计理念，并为后续工程实践提供科学依据。

## 1 渠道衬砌冻胀破坏的形成机理与影响因素

渠道衬砌冻胀破坏的形成源于寒区水热条件与土体物理特性的共同作用。当气温降至冰点以下，衬砌结构下部及两侧土体中的孔隙水开始结冰，在温度梯度驱动下，未冻结区水分不断向冻结锋面迁移并形成冰晶体。冰晶生长产生体积膨胀效应，在毛细作用下形成持续补水条件，使冻胀力不断累积。衬砌板底若存在渗水通道或排水不畅现象，水分供给更加充足，冰胀压力便以垂直和切向形式共同作用于混凝土板块，引起板体上拱、接缝张开及局部隆起。冰冻过程中产生的相变潜热还会改变周围土体热场分布，加剧温度不均，从而使结构受力状态更加复杂。

从结构受力角度分析，衬砌冻胀破坏本质上表现为外部冻胀力与结构自重及约束力之间的失衡。当基层土体冻胀变形受限时，产生的附加应力通过基础传递至混凝土衬砌板，导致板底出现拉应力集中区<sup>[1]</sup>。混凝土材料抗拉性能较弱，在反复冻融循环作用下，微裂缝逐渐扩展并贯通，形成结构性裂缝。若衬砌接缝止水结构老化或填缝材料失效，水分更易侵入板底空隙，形成脱空区，使板体受力由面支承转变为点支承或线支承状态，弯曲应力显著增大。长期循环荷载叠加冻融作用，衬砌板可能发生剪切滑移、错台甚至局部破碎，破坏模式呈现渐进性和隐蔽性特征。

影响冻胀破坏程度的因素涉及土质类型、地下水埋深、结构形式及施工质量等多个方面。细粒土具有较强毛细吸水能力和较高冻胀敏感性，是诱发衬砌变形的重要地基条件；地下水位较浅区域更易形成持续补水环境，使冻胀作用周期延长。衬砌厚度不足或配筋率偏低，会削弱结构整体刚度和抗裂能力；基层压实度不足或存在不均匀沉降，也会导致应力分布不均。排水系统设置不合理、保温层缺失或施工缝处理不当，都可能为水分迁移提供路径，放大冻胀效应。在多种因素叠加影响下，渠道衬砌易出现开裂、鼓胀及空鼓等病害，进而影响输水安全与结构耐久性。

## 2 基于机理分析的渠道衬砌冻胀防治技术路径

围绕冻胀形成过程中水分迁移与冰晶生长的内在规律，防治技术的构建应以削弱补水条件和控制冻结深度为核心。在地基处理中，可采用换填非冻胀性砂砾料或级配碎石，降低毛细上升高度，破坏连续供水通道；对高含水率细粒土区域，设置反滤层与透水垫层形成有效排水体系，使地下水及时疏导，减小冻结锋面处的水分集聚。对于地下水位较浅地段，可结合截水沟与盲沟布置，控制水位埋深，降低孔隙水压力。在寒冷等级较高区域，引入保温材料构成隔热层，调节热传导路径，减缓土体降温速率，控制冻结线位置，从热力学角度削弱冻胀势能的积累。

衬砌结构自身性能的提升同样是防治体系的重要组成部分。混凝土材料可掺加引气剂、减水剂及矿物掺合料改善孔隙结构，提高抗冻等级与抗渗性能，增强抵御冻融循环的能力。合理配置双向钢筋网或采用纤维混凝土技术，有助于分散拉应力集中，控制裂缝宽度，提升整体刚度与延性<sup>[2]</sup>。伸缩缝与沉降缝设计需兼顾温度变形与基础差异变形，填缝材料应具备良好的弹性恢复能力与耐低温性能，防止低温条件下脆化失效。对于板底易产生脱空的区域，可采用灌浆加固或设置柔性垫层，使结构受力更加均匀，减少局部弯曲应力峰值。

施工与运行阶段的综合管理对防治效果具有决定性影响。基层压实度应达到设计指标,确保地基承载力和均匀性,避免因不均匀沉降诱发附加应力。混凝土浇筑需严格控制水胶比与振捣质量,防止产生蜂窝麻面和内部空隙,降低渗透通道形成的概率。工程投入运行后,应建立温度与变形监测机制,利用应变计与位移观测点对关键断面进行动态跟踪,及时掌握冻胀发展趋势。对已出现裂缝和鼓胀的部位,可通过压力注浆、表层修补及排水系统优化等方式进行综合处治,形成从源头控制到结构强化再到后期维护的完整技术路径,提升渠道衬砌抗冻胀能力与长期稳定性。

### 3 渠道衬砌抗冻胀体系的优化与工程应用效果分析

渠道衬砌抗冻胀体系的优化建立在水热耦合调控与结构协同受力理念之上,对地基处理、结构构造及附属设施进行整体统筹,实现多层次防护。工程实践中,将非冻胀性填料、反滤排水层与保温隔热层进行组合布置,可在垂向上形成削减水分迁移与控制冻结深度的复合结构;在横向上,完善边坡防渗与截水构造,减少侧向水源补给,降低冻结区含水率。衬砌板块与基层之间设置柔性过渡垫层,有助于缓冲冻胀变形所产生的附加应力,使结构由刚性对抗转变为适度协调,从而提升整体稳定性与耐久性能。该体系强调结构、材料与环境条件之间的匹配关系,体现出系统化防控思路。

在优化设计理念指导下,工程应用效果呈现出明显改善。提高混凝土抗冻等级、优化配筋率及合理划分板块尺寸,衬砌

结构在低温循环作用下的裂缝开展速度显著减缓,弯拉应力峰值分布更加均匀<sup>[3]</sup>。现场监测资料显示,经排水与保温综合处理后,地基土体含水率波动范围得到控制,冻结深度相对减小,板底脱空发生概率明显下降。渠道运行期间的输水效率保持稳定,渗漏量减少,维护频次降低,结构变形值处于允许范围内。抗冻胀体系在长期服役条件下表现出良好的适应性和可靠性,验证了机理导向设计方法的有效性。

综合不同寒区工程实例的对比分析可以发现,抗冻胀体系的优化效果与地质条件、气候强度及施工质量密切相关。对高寒地区而言,单一措施难以满足长期安全要求,复合技术组合更具优势;在中等寒区区域,强化排水与结构加固即可取得较好成效。实际应用过程中,还需结合数值模拟与现场试验结果,对温度场、应力场及变形场进行联合评估,进一步完善设计参数取值。抗冻胀体系的持续优化提升了渠道衬砌的安全储备,也为寒区水利工程耐久性设计提供了可复制的技术模式,体现出工程实践与理论分析相互印证的成果。

### 4 结语

本文围绕渠道衬砌冻胀破坏机理及防治技术展开系统分析,阐明水分迁移、温度变化与结构受力之间的内在联系,明确影响冻胀破坏的关键因素。在此基础上提出以排水控制、材料优化与结构协同为核心的综合防治思路,并结合工程应用对抗冻胀体系效果进行分析。研究成果为寒区渠道衬砌耐久性提升与安全运行提供了理论支撑与技术参考。

### 参考文献:

- [1] 张亚坤,杨松林,雷恒,等.引黄灌区渠道衬砌混凝土冻胀破坏及对策研究[J].中国水运,2024,(24):102-104.
- [2] 郑涛.冻结灌渠基土-衬砌接触面冰膜形成机理及力学特性研究[D].四川农业大学,2022.
- [3] 田金玉.不同换填材料对渠基土冻胀影响试验研究[D].沈阳农业大学,2022.