

河套灌区衬砌渠道冻融破坏机理及防护技术研究

郭宇坤

内蒙古河套灌区水利发展中心义长分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015100

【摘要】：河套灌区位于季节性冻土区，衬砌渠道冻融破坏问题较为突出，严重影响灌溉工程安全运行及水资源高效利用。本文针对灌区水盐迁移剧烈、衬砌材料劣化及结构失稳等难题，系统剖析冻融损伤机理，提出适配区域环境的防护技术体系。从水盐运移调控、衬砌材料改良、结构性能强化三方面开展研究，构建源头防控、材料提升与结构加固的综合防治模式。研究成果可有效减轻渠道冻融病害，提升工程耐久性与输水效率，为寒旱区灌区渠道冻害治理提供理论支撑与技术参考。

【关键词】：河套灌区；衬砌渠道；冻融破坏；防护技术；水盐迁移

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.043

引言

河套灌区作为国家重要粮食生产基地，输水渠道长期遭受季节性冻融循环与水盐耦合作用的双重影响，衬砌开裂、隆起、滑塌这类病害频繁出现，已成为制约灌区现代化进程的关键瓶颈。践行水资源高效利用与工程安全耐久的发展理念，破解渠道冻融破坏难题相当紧迫。立足灌区特殊气候与地质条件，揭示冻融损伤内在机制，进而研发针对性防护技术，不仅能完善寒区工程理论体系，也能为灌区提质增效及长效稳定运行提供坚实技术保障。

1 河套灌区衬砌渠道冻融相关概况及研究价值

河套灌区地处北方季节性冻土区，冬季低温持续时间长，冻融循环频繁且作用强度大，衬砌渠道长期处于冻胀与融沉交替的复杂受力状态，冻融破坏问题十分突出。渠道衬砌普遍出现开裂、隆起、错台及局部滑塌等病害，直接降低输水效率与结构耐久性，也增大工程维护投入^[1]。开展河套灌区衬砌渠道冻融破坏机理与防护技术研究，能够系统揭示水盐运移、材料劣化及结构失稳的耦合作用规律，构建适配区域气候地质条件的冻害防控体系，为渠道工程设计、病害治理及长效安全运行提供理论依据与技术支撑，对保障灌区灌溉供水稳定、提升水资源利用效率具有重要意义。

2 河套灌区衬砌渠道冻融破坏机理分析

2.1 水盐迁移诱发衬砌冻融损伤

河套灌区地下水位普遍偏高，水分在温度梯度驱动下向冻结锋面持续运移，相变过程与盐分富集同步发生，形成显著的水盐耦合作用。冻结期内土体孔隙水不断向渠基及衬砌界面聚集，相变膨胀产生的不均匀冻胀力直接挤压衬砌结构。盐分随水分迁移在衬砌界面与土体孔隙中累积，结晶膨胀进一步扩大内部裂隙，削弱土体与衬砌的接触稳定性^[2]。冻融循环反复作用下，水分相变产生的体积变化与盐胀效应相互叠加，持续改

变衬砌受力状态，造成界面脱空、局部挤压及拉裂损伤。水盐迁移路径与分布不均直接决定损伤位置与程度，这既是衬砌开裂、错动、隆起等病害的核心诱因，也是冻融破坏从局部向整体扩展的关键驱动因素。

2.2 衬砌材料冻融劣化过程分析

衬砌混凝土在周期性负温与正温交替作用下，内部自由水反复冻结与融化，形成持续的应力循环。冻结阶段水分在毛细孔及胶凝孔中膨胀，挤压孔壁产生微裂纹，进入融化阶段后裂纹进一步扩展贯通，材料密实度与整体性随之下降。冻融循环次数增加使混凝土抗拉强度快速衰减，界面黏结力逐步丧失，表面出现起皮、掉块、麻面等现象。长期劣化过程中衬砌从表层损伤逐步发展为结构性损伤，抵抗外部变形与应力的能力明显降低。材料劣化与外部冻胀力相互促进，构成劣化—损伤—更严重劣化的递进过程，最终导致衬砌失去防渗与承载能力，这成为渠道冻融破坏中不可逆转的重要环节。

2.3 渠道结构冻融破坏作用机制

渠基土在冻融周期内表现出不均匀冻胀与融沉变形，带动衬砌结构发生非协调变位并形成复杂的内力重分布。冻结阶段土体向上隆起，法向冻胀力作用于衬砌，底部与坡脚承受挤压，坡面则受拉产生弯曲变形。进入融化阶段后土体沉陷，失去支撑的衬砌出现悬空、回弹及滑移，界面摩擦力与约束力骤减，结构稳定性随之大幅降低。不同断面受力差异明显，整体式衬砌易出现集中裂缝，装配式衬砌则易在接缝处错动。冻融变形沿渠坡与渠底呈不对称分布，拉应力与压应力交替出现，一旦应力超过材料极限便会形成贯通裂缝与结构失稳，最终表现为衬砌开裂、鼓胀、滑塌等典型破坏形态。如图1。

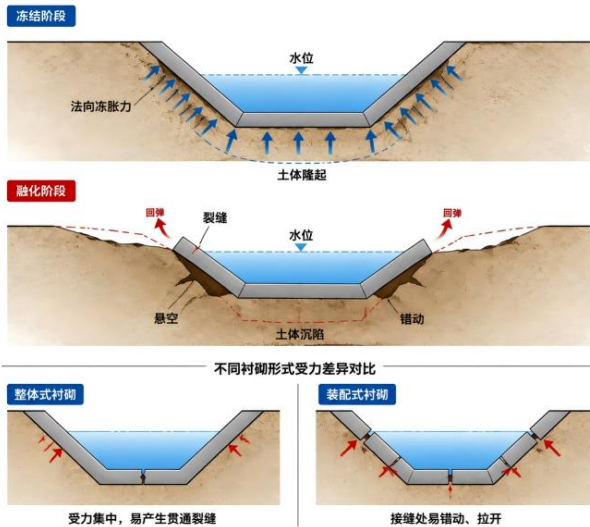


图1 渠道冻融循环破坏过程及不同衬砌形式受力差异示意图

3 河套灌区衬砌渠道冻融防护技术及应用效果

3.1 针对水盐迁移的防护技术及应用

针对水盐迁移引发的衬砌冻融损伤,从阻断水分补给、调控盐分分布、改善排水条件入手实现冻害源头防控。渠基内部设置连续排水构造可降低地下水位,减少冻结期水分向衬砌界面集聚,削弱水分相变带来的冻胀效应。衬砌下方铺设防渗隔断层,阻止渠内水体下渗与土体水分向上迁移,切断水盐运移通道,减少盐分在衬砌与土体界面处富集结晶。合理布设竖向与横向排水设施,及时排出融沉阶段的孔隙水及渗水,降低土体含水率与盐分累积程度。渠坡与渠底采用换填非冻胀性材料的做法,能改变土体水盐运移路径,减小冻胀敏感土层的厚度与分布范围。结合灌区水文地质条件优化排水系统布置,实现长期稳定控水控盐,减轻不均匀冻胀与盐胀对衬砌的挤压及拉裂作用。各类技术协同应用可有效降低水盐耦合作用强度,提升衬砌在冻融循环下的稳定性,延长工程使用寿命,为河套灌区衬砌渠道冻害防治提供可靠的前置防护方案。

3.2 适配冻融环境的衬砌材料改良技术及应用

适配冻融环境的衬砌材料改良以提升抗冻性能、抗渗性能及体积稳定性为核心,通过优化组分与结构改性增强抵御冻融

循环的能力。混凝土中掺入适宜矿物掺合料与引气组分,能够优化内部孔结构,减少冻结膨胀带来的应力集中,提高材料抗冻等级与耐久性能。调整胶凝材料配比可提升混凝土密实度,降低水分渗透系数,减少水分与盐分侵入内部引发劣化。改良后的衬砌材料在反复冻融作用下仍能保持较高抗拉强度与界面黏结强度,延缓表面起皮、掉块与内部裂纹扩展。借助材料韧性与变形适应能力的提升,使其能够应对渠基不均匀冻胀变形,减小应力破坏。材料改良技术兼顾抗冻、抗渗、抗裂多重需求,有效降低冻融劣化速度,提升衬砌整体性能,与灌区气候地质条件高度适配,能够减少维修频次,提升渠道长期运行可靠性。

3.3 强化渠道结构的防护技术及应用

强化渠道结构的防护技术以提升衬砌整体刚度、协调性与抗变形能力为目标,借助结构优化与构造加强来抵御冻融循环引起的不均匀变形。采用整体性更强的衬砌结构形式,可减少分缝数量与接缝薄弱点,提高结构抵抗弯曲及剪切变形的能力。合理设置结构过渡段能够平滑传递冻胀变形,降低应力集中导致的开裂风险。在坡脚、渠底等受力关键部位进行局部加强,增强抗挤压与抗滑移能力,避免衬砌出现隆起、错动及滑塌^[1]。优化衬砌厚度与断面形态,使结构更好适应冻胀沉陷变形,释放内部应力并提升复位能力。采用柔性接触构造降低冻土与衬砌之间的刚性约束,减少冻胀力直接传递造成的损伤。通过结构强化与构造优化,实现衬砌与渠基的变形协调,提高整体稳定性,从结构层面增强渠道抵御冻融破坏的能力,保障灌区输水工程在长期冻融作用下安全稳定运行。

4 结语

河套灌区衬砌渠道冻融破坏由水盐迁移、材料劣化与结构受力失衡共同作用促成,各类病害的产生及发展均遵循冻融循环下的多场耦合规律。针对水盐迁移、材料性能、结构形态实施分级分类防护技术,能够从源头削弱冻胀诱因、提升材料耐久水平、增强结构适应能力。系统构建的冻融破坏防控体系可有效缓解衬砌损伤、提升工程稳定性,为河套灌区灌溉输水工程长效安全运行提供坚实支撑,对同类寒区灌区渠道病害治理具有广泛借鉴价值。

参考文献:

- [1] 温苑,薛富平,王臣龙,等.河套灌区渠道衬砌结构型式发展分析[J].内蒙古水利,2024,(05):63-65.
- [2] 刘伟,邹春霞,薛慧君,等.渠道衬砌混凝土冻融风蚀耐久性能及寿命预测[J].排灌机械工程学报,2023,41(06):568-575.
- [3] 孙涛.早寒区输水渠道全周期冻融破坏机理与结构优化仿真研究[D].西北农林科技大学,2022.