高寒地区渠道冻胀破坏机理及防治措施分析

雪富富
新疆生产建设兵团第四师水利工程管理服务中心　新疆　伊宁　835000

摘　要：本文旨在系统阐述高寒地区渠道冻胀破坏的核心机理，深入剖析其影响因素，并在此基础上，全面梳理与评述当前主流的防治技术体系。文章首先从土力学、热物理学和水文学的交叉视角，解析了冻胀发生的“水-热-力”耦合过程；继而详细探讨了土质、水分、温度、荷载及渠道结构形式等关键因素对冻胀的影响规律；随后，将现有防治措施归纳为“避、放、抗、改”四大策略，并分别论述了保温法、置换法、排水法、柔性衬砌、化学改良等具体技术的原理、适用条件及优缺点；最后，提出应采取“因地制宜、综合治理、预防为主”的设计理念，并对未来智能化、生态化、长效化的冻胀防治技术发展方向进行了展望。本研究可为高寒地区渠道工程的规划、设计、施工与运维提供理论参考与技术支撑。

关键词：高寒地区；渠道工程；冻胀破坏；破坏机理；防治措施；水-热-力耦合

引言

我国高寒地区地域广袤，包括青藏高原、西北干旱半干旱区以及东北严寒地带。这些区域气候条件恶劣，冬季漫长且寒冷，年平均气温低，负温持续时间长，冻土广泛分布。为满足农业灌溉等需求，修建了大量输水渠道。但渠道在冬季停水或低水位运行时，易受季节性冻融循环影响而冻胀破坏。冻胀是土体水分冻结体积膨胀，在冻结锋面处积聚成冰透镜体等，对周围土体及结构物产生膨胀力。对于渠道，不均匀膨胀力会使衬砌板隆起、断裂等。我国高寒地区已建渠道超70%存在冻胀病害，部分严重渠段需每年大规模维修，影响水利工程效益与安全。所以，探究渠道冻胀破坏机理、识别影响因素、制定防治措施，是关键科学与工程问题。本文将围绕此展开系统分析，为工程实践提供指导。

1 渠道冻胀破坏的机理分析

渠道冻胀破坏并非单一物理过程的结果，而是由水分、热量和应力三者相互作用、动态耦合的复杂过程，即“水-热-力”耦合过程。理解这一过程是认识冻胀本质和制定有效防治策略的基础。

1.1 冻胀发生的必要条件

根据经典冻胀理论，土体发生显著冻胀需要同时满足三个基本条件：（1）土的冻胀敏感性：土体必须含有足够数量的细颗粒（如粉粒和粘粒）。这类土具有较大的比表面积和阳离子交换容量，能吸附结合水膜，并在冻结过程中形成有效的毛细通道，为水分迁移提供路径。粗颗粒土（如纯净的砾石、卵石）由于缺乏毛细作用，通常不具冻胀性[1]。（2）充足的水分补给：土体初始含水率需达到或超过某一临界值（塑限附近），并且在冻结过程中，冻结锋面下方必须存在一个能够持续向冻结区供水的水源。这个水源可以是地下水、渠水本身（在非满流状态下）、侧向渗水或大气降水。（3）负温环境与冻结速率：环境温度必须降至冰点以下，使土体开始冻结。冻结速率对冻胀形态有决定性影响。缓慢冻结有利于水分有充足时间迁移并形成大型冰透镜体，导致强烈的不均匀冻胀；而快速冻结则可能将水分“锁”在原位，形成分散的微小冰晶，冻胀量相对较小但更均匀。

1.2 “水-热-力”耦合过程解析

渠道冻胀的具体过程可分解如下：（1）热传导阶段冬季来临，大气温度骤降，冷量通过渠坡和渠床表面向土体内部传导，形成自上而下的温度梯度。土体表层首先达到冰点并开始冻结，形成冻结锋面。（2）水分迁移阶段：冻结锋面的形成在土体内部建立了显著的水势梯度（未冻区水势高于冻结区）。在这一梯度的驱动下，冻结锋面下方未冻土中的液态水（包括重力水、毛细水和部分弱结合水）会通过土体孔隙，源源不断地向冻结锋面迁移。这一过程被称为“水分的未冻水动力学迁移”。（3）冰透镜体形成与冻胀力产生阶段：迁移至冻结锋面的水分随即冻结，并在特定条件下（如存在微裂缝或软弱夹层）积聚、长大，形成分层的冰透镜体或连续的冰夹层。冰的生成导致局部体积膨胀，对周围的土颗粒骨架施加巨大的压力，即冻胀力。冻胀力可分为两种：一是垂直于冻结锋面的法向冻胀力，它直接向上顶推渠道衬砌；二是在约束条件下产生的切向冻胀力（又称冻拔力），它沿冻结锋面方向作用，可能导致衬砌板被“拔起”或产生水平位移[2]。（4）结构响应与破坏阶段：渠道衬砌结构（通常是刚性的混凝土板）在冻胀力的作用下发生

变形。由于渠床和渠坡的边界条件不同（渠坡存在侧向约束），以及土体冻胀的不均匀性（受土质、含水率、温度场分布不均影响），衬砌板各部位受到的冻胀力大小和方向各异，从而产生复杂的应力状态。当应力超过材料的抗拉或抗剪强度时，便出现裂缝、错台、架空等破坏现象。春季融化时，冰透镜体消融，土体强度急剧下降，失去支撑的衬砌板在自重和水压力作用下可能发生塌陷，形成恶性循环。

2 影响渠道冻胀的主要因素

渠道冻胀的严重程度是多种因素综合作用的结果，主要可归纳为以下几类。

2.1 土质因素

土的颗粒组成、矿物成分、密实度和结构性是决定其冻胀潜势的根本。粉质壤土、粉土和低液限粘土因其良好的持水性和毛细性能，是典型的强冻胀性土。砂土次之，而纯净的砾石、碎石几乎不冻胀。土的塑性指数（Ip）常被用作评价冻胀性的简易指标，Ip值越大，通常冻胀性越强。

2.2 水分因素

水分是冻胀的物质基础。除了土体自身的初始含水率外，外部水源的补给能力至关重要。渠道在非满流运行时，水面以下的渠床土处于饱和状态，是绝佳的水分来源。地下水位的高低直接影响渠基土的含水状况，高地下水位会加剧冻胀风险。此外，降雨、融雪入渗也会增加土体含水量。

2.3 温度因素

气温决定了冻结深度和冻结速率。极端最低气温越低、负温持续时间越长，最大冻结深度就越深，冻胀影响范围越大。日温差大、温度波动频繁会加剧冻融循环的次数，加速结构疲劳破坏。渠道走向（南北向或东西向）会影响阴阳坡的日照差异，进而导致两侧渠坡冻胀的不对称性。

2.4 荷载与约束条件

渠道衬砌结构自重及其上的水压力构成外部荷载。荷载的存在会抑制土体的自由冻胀，但同时会增大土体内部的约束应力，可能导致更大的冻胀力。渠坡的几何形状（坡度、高度）和边界约束（如与渠底、相邻衬砌板的连接方式）也会影响冻胀变形的模式和大小。

2.5 渠道结构形式

传统的刚性衬砌（如现浇混凝土、预制混凝土板）适应变形的能力差，极易开裂。相比之下，柔性或半柔性的衬砌结构（如膜料复合衬砌、铰接式连锁块）能更好地适应冻胀变形，从而减轻破坏。

3 渠道冻胀防治措施体系

针对冻胀的形成机理和影响因素，工程界发展出了“避、放、抗、改”四大防治策略，并衍生出一系列具体的技术措施。

3.1“避”——主动规避冻胀风险

“避”的核心思想是通过前瞻性的工程选址或巧妙的设计优化，从根本上避开最不利的冻胀条件，将风险扼杀在摇篮之中。在规划阶段，线路选择至关重要，应尽可能将渠道布置在地下水位较低、地势较高、排水通畅、且土质为非冻胀性或弱冻胀性的地段，坚决避开沼泽、湿地等高含水区域。另一种“避”的思路是通过增加埋深来实现，即将渠道的关键结构，如暗渠或涵洞，置于当地最大冻结深度以下，使其完全免受季节性冻融循环的侵扰。然而，这种方法通常会大幅增加土方开挖和回填的工程量，导致造价显著上升，因此多适用于小型构筑物或对安全性要求极高的关键节点。

3.2“放”——释放或适应冻胀变形

“放”的策略是一种务实而智慧的选择，它承认在某些条件下冻胀难以完全避免，转而通过精巧的结构设计来释放或适应由此产生的变形，从而保护主体结构免受破坏。在刚性衬砌中，按一定间距设置贯通的伸缩缝或沉降缝，并填充沥青油毛毡、闭孔泡沫塑料等柔性填料，是释放温度应力和冻胀应力的经典做法，能有效防止衬砌板因应力累积而开裂。更为根本的“放”体现在采用柔性或半柔性衬砌结构上，例如使用聚乙烯（PE）或聚氯乙烯（PVC）等土工膜作为防渗层，其上覆盖砂砾石或预制混凝土连锁块作为保护层，土工膜优异的延展性使其能随下卧土体自由变形而不破裂；又如采用六角形、矩形等预制混凝土块，通过企口或钢筋相互铰接形成的连锁结构，允许各板块之间发生微小的相对转动和位移，从而巧妙地协调了不均匀冻胀带来的变形差异[3]。此外，在衬砌板与基土之间铺设一层低摩擦系数的材料，如砂垫层或土工布，形成滑动层，可以有效减小切向冻胀力（冻拔力）对衬砌板的约束，使其在冻胀时能自由抬升，在春季融沉时又能顺利回落，实现了对冻胀变形的动态适应。

3.3“抗”——增强结构抵抗冻胀的能力

“抗”的策略侧重于提升渠道结构自身的强度和整体性，以期能够直接抗衡强大的冻胀力。一种直接的方法是加大结构断面，通过增加混凝土衬砌板的厚度来提高其抗弯和抗剪能力，虽然简单有效，但成本高昂，且无法根除冻胀源，一旦遭遇超设计标准的冻胀力，仍难逃破坏的命运。相比之下，配置构造钢筋是一种更为经济

合理的“抗”法，在混凝土衬砌板内配置双向钢筋网，将其从素混凝土升级为钢筋混凝土，钢筋能够有效控制裂缝的开展宽度，显著提高结构的整体性和韧性，即使在经历冻胀变形后，也能保持足够的承载能力，防止结构功能的完全丧失。此外，采用U型或弧形渠断面也是一种巧妙的“抗”法，相比传统的梯形断面，U型或弧形断面具有更优的整体受力性能，能够将冻胀产生的径向力更有效地转化为环向压力，从而大大减少开裂的风险。

3.4“改”——改变土体的冻胀特性

“改”的策略是最为治本的方法，它旨在通过物理、化学或热学手段，直接干预渠基土的性质，从源头上消除或削弱其发生冻胀的条件。保温法便是通过改变热条件来实现“改”的目标，在衬砌底部或渠坡铺设一层导热系数极低的保温材料，如聚苯乙烯泡沫板（EPS/XPS）或聚氨酯泡沫，形成一道高效的隔热屏障。这能有效阻隔冬季冷量向下传递，显著减小冻结深度，甚至能使渠基土在严冬中依然保持正温，从而彻底根除冻胀隐患，该方法效果显著、耐久性好，已成为高寒地区大型渠道的首选方案之一。置换法则通过改变土质来实现目标，即将渠床和渠坡一定深度内的冻胀性土全部挖除，换填为粗砂、砾石等非冻胀性材料。这个换填层不仅自身不会冻胀，还能起到良好的排水作用，并有效隔断下部毛细水的上升，可谓一举多得，但其工程量巨大，成本较高，且依赖于充足的非冻胀性料源。排水法则是从水分条件入手，通过构建完善的排水系统，如在渠底和渠坡脚处设置由透水性材料包裹透水管构成的盲沟，或在渠基下铺设水平及垂直的塑膜隔水层，旨在降低渠基土的含水率，切断冻胀所需的水分供应链[4]。化学改良法则是向冻胀性土中掺入石灰、水泥、粉煤灰或专用土壤固化剂，这些添加剂能与土中的活性成分发生复杂的物理化学反应，改善土的颗粒级配，降低其塑性指数和亲水性，从而从根本上减弱其冻胀潜能，该方法适用于处理深度不大、面积较小的局部病害，但在应用时需审慎评估其长期耐久性和潜在的环境影响。

4 工程应用与综合防治建议

在实际工程中，单一的防治措施往往难以应对复杂的冻胀问题。成功的案例无不体现了“因地制宜、综合治理”的原则。例如，对于穿越强冻胀性粉土地区的大型干渠，可采用“保温法+柔性衬砌+完善排水”的组合方案：在渠底铺设XPS保温板，渠坡采用土工膜复合预制连锁块衬砌，并在渠脚设置纵向排水盲沟。这种多道防线的设计，从热、水、力多个维度协同作用，能有效保障渠道的长期安全。综合防治应遵循以下理念：（1）预防为主，防治结合：在规划设计阶段就应充分考虑冻胀问题，将防治措施融入主体工程，而非等到破坏后再行补救。（2）系统思维，多措并举：根据具体的工程地质、水文气象和经济条件，灵活组合运用上述四种策略，构建多层次、立体化的防护体系。（3）注重耐久性与全生命周期成本：优先选择技术成熟、性能稳定、维护简便且寿命长的方案，虽然初期投资可能较高，但从长远看更具经济效益。

5 结语

高寒地区渠道冻胀破坏由“水-热-力”多场耦合驱动，防治是系统工程，需理解机理、把握因素、科学应用“避、放、抗、改”策略。未来研究与实践要聚焦多方向：利用数值模拟软件如COMSOL等精细仿真冻胀全过程，结合物联网技术构建智能预警系统；研发兼具保温、排水等特性的新型复合材料；探索生态化防治技术，实现工程与生态和谐；加强现有防治措施长效性能评估，建立寿命预测模型。相信随着科技进步与工程经验积累，高寒地区渠道冻胀防治技术会更高效、智能、绿色、可持续，为国家水网在极端环境下的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献

[1]林世巍.混凝土衬砌渠道冻胀影响因素分析[J].水利科学与寒区工程,2024,7(05):9-12.

[2]李瀚翔,王正中,陆立国,等.考虑冻拔影响的寒区渠道衬砌冻胀破坏力学模型分析[J].农业工程学报,2024,40(16):103-112.

[3]聂成元,熊伟,郑宝平,等.大型灌区渠道冻胀特性分析及防治措施研究[J].甘肃水利水电技术,2025,61(01):43-48.

[4]宋成飞.冻土区防渗衬砌渠道抗冻胀处理措施及方法[J].水上安全,2025,(05):148-150.