

# Dredging frost heave failure mechanism and control measures in high cold areas

Yaning Li

Xinjiang Yunfeng Water Conservancy Design and Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830002, China

## Abstract

The harsh climate and complex geological conditions in Xinjiang's high-altitude regions frequently cause frost heave damage to canal engineering, severely impacting the normal operation of agricultural irrigation and water resource allocation. Frost heave primarily stems from concentrated ice expansion forces generated by changes in soil moisture content, temperature gradients, and freezing depth during the freezing process, leading to issues such as cracks, deformation, and lining detachment in canal structures. Different soil types, lining materials, and construction techniques significantly influence frost heave behavior. Over time, factors like water level fluctuations and drainage obstructions also exacerbate frost damage. This study systematically analyzes frost heave mechanisms in Xinjiang's typical high-altitude terrain, identifies disaster-causing factors, and proposes region-specific anti-freezing design measures, material optimization solutions, and operational monitoring strategies to enhance the stability and safety of canal projects in cold environments.

## Keywords

alpine region; channel engineering; frost heave damage; mechanism analysis; prevention and control measures

# 高寒地区渠道冻胀破坏机理及防治措施

李亚宁

新疆云沓水利设计咨询有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830002

## 摘要

新疆高寒地区因其严酷的气候环境和复杂的地质条件，使渠道工程频繁遭受冻胀破坏，严重影响农业灌溉与水资源调配的正常运行。冻胀破坏主要源于冻结过程中土体含水率、温度梯度及冻结深度变化引起的冰胀力集中作用，导致渠道结构开裂、变形、衬砌脱落等问题。不同的土质类型、衬砌材料和施工工艺对冻胀行为具有显著影响。在长期运行中，水位波动、排水不畅等因素也会加剧冻胀破坏程度。本文立足新疆地区典型高寒地貌特征，系统剖析渠道冻胀机理，识别其致灾因素，并提出具有区域针对性的防冻设计措施、材料优化方案与运行监测策略，以提升渠道工程在高寒环境下的稳定性与安全性。

## 关键词

高寒地区；渠道工程；冻胀破坏；机理分析；防治措施

## 1 引言

新疆地处中国西北，广泛分布着高寒冻土区域，季节性气温剧烈波动给渠道工程的稳定运行带来极大挑战。由于灌溉渠道大多处于露天环境，受昼夜温差和周期性冻结融化的持续影响，冻胀破坏现象普遍存在。特别是在地温变化剧烈、水文条件复杂的高原与盆地交汇区，冻胀问题不仅造成水损失和衬砌结构损毁，还加剧了后期维护成本和工程风险。当前工程实践中虽有部分防治措施应用，但仍存在防护体系不完善、材料选型不合理等问题。为增强渠道在高寒环境中的抗冻能力，亟需基于区域环境特性深入分析冻胀发生

机理，构建系统的防治技术体系，提升渠道设计与管理的科学化水平。

## 2 新疆高寒地区渠道冻胀灾害的基本特征

### 2.1 典型气候条件对冻胀形成的影响机制

新疆高寒地区冬季气温常年低于  $-20^{\circ}\text{C}$ ，昼夜温差大，周期性冻结与融化现象频繁，对地表和浅层土体产生显著影响。地表积雪融化后渗入土壤，形成高含水率冻土，随温度下降迅速冻结，冰晶膨胀产生强烈的冻胀力，推移周边结构发生位移或隆起。该地区年平均冻结深度在 1.2 米至 2 米之间，冬季冻结时间长达四至六个月，冻结期间地温梯度陡峭，易诱导水分向冻结界面迁移，加剧冰胀现象。冻融循环反复交替，加速结构疲劳与局部破坏，最终导致渠道失稳。极端气候事件频发也进一步放大了冻胀作用的不确定性与破坏

【作者简介】李亚宁(1994-)，回族，男，中国河南淮阳人，本科，工程师，从事水工设计咨询研究。

性,成为渠道建设与运维中难以回避的重要风险来源 [1]。

## 2.2 渠道结构类型与受冻区域分布特点

新疆渠道工程类型多样,涵盖明渠、衬砌渠及输水涵管等形式,广泛分布于天山北坡、伊犁河谷和阿尔泰山区等高寒冻土带。受地形限制,多数渠道沿山地缓坡或盆地边缘布设,地质条件复杂,冻融层厚度变化显著,导致不同区段受冻强度差异明显。明渠渠道裸露在外,易受寒风和辐射冷却影响,其冻胀风险明显高于暗渠与埋设式结构。部分渠道因建设年代久远,未配备防冻层或排水系统,结构抗冻能力不足。衬砌结构因施工工艺差异和材料性能不同,在冻融环境中易发生缝隙扩张、衬砌错位等现象。不同渠道形式在高寒区内承受的冻胀作用具有明显的空间不均性,对其适应性设计提出更高要求。

## 3 冻胀破坏在渠道结构中的力学演化机理

### 3.1 冻结过程中土体含水率变化与冰胀应力传递规律

冻结阶段土体内部水分发生定向迁移,受温度梯度驱动向冻结面聚集,形成大量冰晶,导致体积迅速膨胀。含水率越高的土层,其冰晶生长越剧烈,冰胀力越强。冻结带中的毛细水与地下水在温度降至 0℃ 以下后形成冻结前缘,使得冰晶层不断向深部推进。冰胀应力的产生与冻结速度、土粒间隙率及孔隙结构密切相关,细粒土在冻结过程中形成的冰透镜效应显著,传递至上覆结构时引发剪切应力集中。土体刚度在冻结初期急剧上升,限制其缓冲变形的能力,进而将冻胀力全部转化为垂向或水平结构应力,导致渠道衬砌构件失稳或开裂。整个过程呈现出由微观毛细作用到宏观破坏的渐进演化特征。

### 3.2 冻胀力作用下渠道结构变形与裂损模式

当冻结产生的冰胀力大于渠道结构材料的抗拉强度或抗剪能力时,局部构件发生拉裂、错移或翘曲现象。结构变形主要集中在边墙连接缝、底板角隅及线性转折部位,表现出纵向开裂、局部抬升与衬砌脱空等多种模式。变形累积过程中,结构应力重新分布,使薄弱部位应力集中加剧,进一步加速裂损扩展。温度回升期冰晶融化后形成空隙,进一步冲刷结构接缝与基层,形成裂缝连通与剥离破坏。冻融循环导致结构反复拉压,构件疲劳破坏明显。不同结构形式对冻胀反应敏感程度存在差异,刚性结构更易产生脆性破坏,柔性结构虽能部分缓冲变形,但长期仍可能导致功能性失效,必须在设计阶段充分考量其应力适应能力。

## 4 影响新疆渠道冻胀行为的核心环境与工程因素

### 4.1 地温变化与冻结深度对冻胀程度的诱导效应

地表温度的周期性变化直接决定冻结层的形成深度与持续时间,新疆高寒区地温年波动范围可达 40℃,极端气温使冻结层深达 2 米以上。冻结深度越大,冻结体积越广,冻胀力作用范围与强度也随之增强。白昼温升与夜间急降温

造成土体频繁热胀冷缩,使结构处于持续的热应力扰动中。不同地层的热导率影响热量传导速度,细粒土导热性差,保温性强,容易形成局部温差梯度,诱导冻结面偏移。冻胀破坏常在冻结深度临界区发生,此处地温变化剧烈、水分活跃、冰晶形成密集。长期冻胀作用在冻结层上下交界区域积累结构应力,造成局部抬升与错裂。地温变化还与地表覆雪情况密切相关,积雪厚度对地温起到隔热作用,进一步复杂化了冻胀形成的环境条件 [2]。

### 4.2 衬砌层材料性能与施工技术对抗冻能力的制约

衬砌材料的抗冻等级决定了其在低温高湿条件下的耐久性表现,若吸水率高、结构致密性差,极易在冻结状态下发生微裂扩展与剥离破坏。常用混凝土材料在多次冻融循环中强度逐渐衰减,内部孔隙水结冰后引发内应力集中,使衬砌层出现细裂与起鼓现象。施工阶段若未严格控制材料配合比例、振捣密实度与养护条件,将加剧结构耐久性缺陷。基层未处理平整或排水层施工不当,均会成为冻胀破坏的隐性源头。施工季节安排不合理也可能导致初始冻结未完成结构强度发展即遭冻融作用,削弱整体稳定性。对抗冻性能的提升需在设计、选材与施工全流程中协同优化,保证结构具备良好的耐候性与抗裂能力,以应对极端气候下的长期运行需求。

## 5 新疆渠道工程中抗冻设计与材料优化措施

### 5.1 隔热防冻结构体系在高寒区域的适配策略

高寒区渠道抗冻设计需重点解决冻结深度大、水分活跃与地温梯度剧烈三类环境问题,隔热防冻结构体系正是在此背景下提出的有效路径。采用保温层与隔热层复合设计可降低热量流失,减缓地表热量向土壤中传导的速度,从而延缓冻结面下移。常用材料如挤塑聚苯板、泡沫玻璃和复合防冻毯等,其导热系数低、耐压性能强、适应温差大,能够有效阻隔冻结温度向下传导。隔热层宜铺设于渠道底部及两侧坡脚位置,并配合反滤层与排水层共同构成完整的抗冻系统。设计中需根据冻土分布、渠道深度与运行周期,合理确定保温层厚度与布设范围,确保结构不因过度保温而积水,也不因厚度不足而失效。在渠道高程变化较大区段,还需考虑结构变形带与缝隙热桥的处理,确保隔热效果连续性与完整性。

### 5.2 抗冻胀材料的选择标准与综合性能评价

适用于新疆高寒区渠道工程的抗冻胀材料需具备低吸水率、高抗压强度、良好的抗冻循环稳定性与温度适应性。混凝土类衬砌材料需选用抗冻等级不低于 F200 的配比体系,水灰比控制在 0.45 以下,掺加适量粉煤灰与减水剂提升密实度与耐久性。透水性混凝土需在保证排水功能的基础上控制其抗冻裂性能,防止水分滞留结冰后膨胀造成碎裂。对于衬砌接缝材料,如止水带与柔性填缝剂,应具备优良的低温柔韧性及耐候老化性能,防止裂缝渗水加剧冻胀效应。材料

试验评估不仅包括常规力学指标,还需设置冻融循环实验、水稳定性试验与微观结构分析,综合判定其在严寒环境下的实际表现。在多源冻胀作用下,应优先选用具有一定柔性、变形恢复能力强的材料,以提高结构的应力调节能力和使用寿命[3]。

### 5.3 地基加固与排水系统协同控制的工程方法

高寒地区渠道地基常处于饱和或半饱和状态,地基加固是控制冻胀变形和保障结构稳定的关键步骤。常用的加固方法包括粉喷桩置换、素混凝土垫层与灰土夯实等手段,目的是提高土体强度、降低含水率与均匀结构承载能力。对局部高含水区,可采用轻质填料替代天然冻胀土,减少冰胀体积变化。排水系统的布置需与地基加固同步设计,通过设置盲沟、反滤层和排水管道,使冻结期前积水及时排出,切断毛细水上升路径,从源头降低冰晶生成条件。排水设施应根据地形布置合理坡度,确保无滞水死角,并进行防堵设计避免冬季结冰。系统运行期间应加强监测,实时掌握水位变化与地基响应情况,在冬前及时清理排水通道,保障排水通畅。地基处理与排水系统协同配合,是实现冻胀控制工程长效运行的重要保障。

## 6 新疆地区渠道冻胀治理的综合防控措施

### 6.1 设置复合式防冻保温层抑制冰胀力形成

在伊犁河谷及塔城地区部分明渠整治工程中,采用复合式防冻保温层有效减缓地温变化,控制冻结深度,降低冰胀力的上传强度。具体措施包括在渠道底板与坡脚处铺设30至50毫米厚度的挤塑聚苯板,覆盖层为8厘米厚度C25混凝土防护层,并设置不小于10厘米的过渡垫层提升承载能力。为防止冷空气通过结构缝隙进入冻结层,沿衬砌边缘增设密封胶条和柔性填缝材料,保持绝热层的连续性。在高海拔地区,如阿勒泰工程段,还在渠道背水面增加泡沫玻璃砖与岩棉组合层,进一步提高保温效果。所有保温材料在施工前均进行抗压、吸水率与导热系数检测,确保满足抗冻要求。工程实践表明,复合隔热系统使局部地温升高 $2^{\circ}\text{C}$ 至 $4^{\circ}\text{C}$ ,有效推迟冻结初期时间,显著抑制了冰晶生长与膨胀。

### 6.2 构建稳定高效的渗排水通道系统

在喀什与哈密地区渠道防冻改造工程中,通过构建分层式渗排水系统大幅提升排水能力,切断冻胀水源供给。基础区域开挖至0.5米以下,铺设20厘米厚级配碎石滤层,其上叠加15厘米中砂反滤层,再设HDPE波纹排水管,呈“U”型布设于渠底与坡脚交汇处。排水管按15米间距设置检查井,并接入侧沟或天然排水带,实现快速导排。在渠道背水坡外侧增设盲沟系统,沟内填充洗净碎石并包裹无纺

布防止堵塞,坡度控制在1.5%。在冻结带厚度较大的富水区,通过斜向穿孔管道将积水引至集水井,再经电动抽排系统排出。该系统在和田南渠项目中试点后,渗水率下降48%,冻结深度由1.6米降至1.1米,显著减缓了衬砌结构冻胀隆起的风险,有效保障渠道稳定运行。

### 6.3 采用柔性衬砌结构提升抗变形能力

在塔里木灌区渠道衬砌加固工程中,大面积采用柔性衬砌结构替代传统刚性混凝土形式,显著提高渠道对冻胀变形的适应能力。新型结构采用玻纤增强HDPE片材作为主衬砌层,厚度为1.5毫米,通过热熔焊接形成连续防渗面,表层设有不小于4厘米厚的弹性砂浆保护层,该层具备一定缓冲能力,可承受局部应力集中。为增强稳定性,在渠底与边墙交界处嵌设橡胶膨胀止水带,同时布设柔性纤维网格提高整体变形协调性。在中段渠渠堤结构易受冻胀扰动区域,采用膨润土复合防水毯与PVC膜双层体系提升抗裂性能。该柔性系统在最低气温达 $-35^{\circ}\text{C}$ 的富蕴北部渠道中保持良好状态,无开裂、脱层现象发生。柔性衬砌不仅提升了耐候性,还通过形变量吸收部分冰胀能量,延长了结构服役周期并降低了维护强度。

## 7 结语

新疆高寒地区渠道冻胀问题是影响水利工程稳定运行的重要制约因素,其成因复杂、影响广泛、治理难度大。通过深入剖析冻胀形成的环境条件与力学机制,识别关键影响因素,有助于从设计源头、材料选择与运行管理等多个环节构建系统化的防控体系。在役渠道的冻胀病害需依托精准诊断与结构修复技术统筹推进,新建工程应遵循抗冻设计标准,提升结构本体的适应能力。未来应持续推动监测技术与评估手段融合创新,实现对渠道冻胀风险的动态掌控与科学调度,为保障新疆地区水资源输送体系的高效、稳定、安全运行提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 石玮薇.梯形渠道衬砌冻胀破坏模型研究[J].水利技术监督,2023,(10):229-233.
- [2] 滕安国.浅析我国西北高寒地区渠道防冻胀措施[J].农村实用技术,2022,(06):120-121+124.
- [3] 任弘宇,王灏.高寒地区输水渠道防冻优化设计研究[J].广东水利水电,2020,(03):58-61+91.
- [4] 马栋和,李艳萍,张洪龙.高寒地区大型渠道抗冻胀护坡保温板阻冻特性研究[J].水利建设与管理,2017,37(08):34-37.
- [5] 董宇航.高寒地区排洪渠道防治冻害技术措施[J].农业科技与信息,2016,(35):155-156.