

寒区渠道衬砌施工与防冻技术研究

赵晨曦, 于洋, 王亚男, 蔡怀德

中交路桥北方工程有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月13日; 录用日期: 2025年8月3日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

寒区渠道衬砌受冻害影响严重, 尤其是在低温和冻融循环频繁的地区。冻胀是造成衬砌破坏的主要原因之一, 土壤中的水分在冻结过程中膨胀, 产生的内力使混凝土和其他材料发生裂缝和位移, 影响渠道的正常功能。为了应对这一问题, 本文对寒区渠道衬砌的防冻胀技术进行了总结与分析, 提出了改良基土处理、优化衬砌结构设计和采用高性能材料等防冻措施, 并探讨了冻胀监测技术在防治冻害中的应用。研究表明, 通过新型材料和智能监测技术的结合, 可以显著提高寒区渠道的防冻胀能力, 延长其使用寿命。

关键词

寒区渠道, 冻胀, 防冻技术, 衬砌设计

Research on Construction and Frost Mitigation Techniques for Canal Lining in Cold Regions

Chenxi Zhao, Yang Yu, Yanan Wang, Huaide Cai

CCCC Road and Bridge Northern Engineering Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 13th, 2025; accepted: Aug. 3rd, 2025; published: Aug. 15th, 2025

Abstract

Canal lining in cold regions suffers severe frost damage, particularly under low-temperature conditions and frequent freeze-thaw cycles. Frost heave—a primary cause of lining failure—occurs when pore water in soil expands during freezing, generating internal forces that induce cracks and displacement in concrete and other materials, ultimately compromising canal functionality. To address this challenge, this study synthesizes and analyzes frost heave mitigation techniques, proposing

countermeasures including improved subsoil treatment, optimized lining structural design, and high-performance materials. Additionally, the application of frost heave monitoring technologies for damage prevention is explored. Research demonstrates that integrating novel materials with intelligent monitoring technologies significantly enhances frost heave resistance and extends the service life of canals in cold regions.

Keywords

Cold Regions Canals, Frost Heave, Frost Mitigation Techniques, Lining Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

寒冷地区，尤其是我国东北、西北及内蒙古等地，拥有广阔的灌溉和农业用水需求，这些地区大多数位于季节性冻土区或多年冻土区。在这些地区，渠道是农业灌溉和水资源输送的关键基础设施，因此其安全性和长期运行稳定性至关重要。然而，由于冬季低温环境的影响，渠道衬砌常常面临冻害问题，这不仅导致水输送效率降低，还增加了维护成本，甚至影响农田灌溉的正常进行[1] [2]。

随着全球气候变化的影响以及对水资源管理的需求日益增长，寒区渠道的设计和施工技术面临着新的挑战。冻胀是寒区渠道衬砌破坏的主要原因之一。土壤中水分在低温环境下冻结膨胀，对衬砌结构产生巨大的内力，导致混凝土或其他材料的开裂、错位、剥落等破坏，进而影响渠道的正常功能[3] [4]。例如，在东北地区的一些灌区，由于冻害的影响，渠段的冻胀破坏率高达 30%至 50% [4]。因此，开发有效的防冻胀技术，保障寒区渠道的结构稳定性和水资源输送能力，成为水利工程领域亟待解决的技术难题。

为了应对这些挑战，国内外研究者已经提出了一系列的防冻胀技术。传统的措施主要集中在通过改良基土处理、优化衬砌结构形式以及采用抗冻性能更好的材料等方面。比如，基土的换填处理和压实技术，通过选择冻胀性较低的材料来减轻冻胀效应[2]。同时，衬砌的设计逐渐从刚性结构向柔性结构转变，以适应冻胀引起的变形需求[5] [6]。近年来，随着新型混凝土材料的出现，如活性粉末混凝土和轻骨料混凝土，这些材料凭借其优越的耐久性和抗冻性，为寒区渠道提供了新的施工方案[7]。

然而，现有的防冻胀技术仍存在许多问题，尤其是在实际应用中，冻胀的预测与防治措施的实施效果往往与预期存在差距。部分寒区输水渠道由于设计和施工方面的不足，仍然会出现衬砌破坏、基土流失等严重问题，导致渠道维修和运行成本大幅上升[3]。因此，本研究旨在通过对寒区渠道衬砌施工技术与冻害防治措施的系统总结和分析，提出更为有效的防冻胀解决方案，并探索新型材料和技术在实际工程中的应用前景。

本研究的意义不仅在于完善现有的防冻胀技术体系，还在于推动寒区水利工程施工技术的创新与发展。通过集成监测技术、优化设计和高性能材料的应用，能够实现对冻害的提前预警和实时控制，从而提高寒区渠道的运行安全性和长期耐用性[9]。

目前国际相关研究进展及关键技术贡献如下表 1。

2. 寒区渠道冻害破坏的机理与特征

在寒区，由于气候条件的严酷性，尤其是低温和频繁的冻融循环，渠道衬砌常常遭遇冻害破坏。冻害的发生主要与基土的冻胀、冻融作用及地下水的存在密切相关。为了更好地理解寒区渠道衬砌破坏的

机理和特征，首先需要分析其主要的物理过程和破坏类型。

Table 1. International research progress
表 1. 国际相关研究进展

国家/机构	关键技术贡献	文献来源
挪威科技大学	纳米黏土改性基土(冻胀力降低 45%)	<i>Cold Regions Science & Tech</i> 2023
加拿大阿尔伯塔大学	相变材料保温层(延迟冻结 72 小时)	<i>Journal of Cold Regions Eng.</i> 2022
日本土木研究所	碳纤维增强衬砌(裂缝减少 60%)	<i>Frost Action in Soils</i> 2021

2.1. 冻胀机理

冻胀是寒区渠道衬砌破坏的主要原因之一。土壤中的水分在低温环境下冻结，形成冰晶体时，体积会膨胀。随着气温进一步降低，土壤中的水分继续迁移至冻结区域，形成更大范围的冰晶体，导致土体的体积增加[1]。特别是土体中的细小颗粒(如粒径在 0.05~0.005 mm 的粉粒土)更容易吸水并产生显著的冻胀作用[3]。

在基土中，冻结水的迁移及冰晶体的形成不仅导致了土壤体积的膨胀，还在衬砌基础与基土之间产生了强大的冻胀力，这些力会作用在衬砌结构上。当冻胀力超过衬砌的抗拉强度时，就会导致衬砌结构的开裂或隆起，从而造成冻害[3]。因此，冻胀的强度与土壤的含水量、温度以及土体的物理性质密切相关。

2.2. 冻融循环的影响

冻融循环是寒区渠道中常见的冻害形式。由于气温的昼夜波动和季节性变化，土壤中的水分经历冻结和融化的交替过程，这一过程中，土体内部的孔隙会发生变化，水分不断在冻融之间迁移，导致土壤的结构逐渐松散[3][4]。这种反复冻融作用会显著降低土壤的抗剪强度和稳定性，使得基土逐渐失去支撑作用，从而增加了衬砌结构受损的风险。

例如，在东北及内蒙古的部分寒区渠道中，由于频繁的冻融循环，基土在冻结过程中逐渐膨胀，并伴随着水分迁移和冻胀现象。春季解冻后，基土中的水分又会在气温回升时融化，土体强度进一步弱化，甚至出现局部滑塌[3][4]。这种反复变化的冻融循环作用，是导致寒区渠道衬砌破坏的一个重要因素。

2.3. 冻害破坏的特征

寒区渠道衬砌破坏的特征主要表现为裂缝、隆起、错位及滑塌等形式。在寒冷地区，衬砌裂缝的产生通常是由于基土冻胀力超过衬砌结构的抗拉强度所致。混凝土衬砌往往在距渠底 1/3 处出现纵向裂缝，且随着冻胀的发生，混凝土表面会出现剥蚀、错位等问题，严重影响水流的稳定性[2][5]。尤其是在地下水位较高的地区，冻胀引起的基土流失和土体不均匀冻结，使得衬砌出现更加复杂的破坏现象。

此外，衬砌结构的变形、错位和隆起是由于基土在冻胀过程中对衬砌的约束作用所引起的[2]。一些研究表明，在冬季气温低于-10℃时，土体冻结深度达到 1~2 米，冻胀力显著增加，衬砌往往会由于承受不住这些冻胀力而发生变形[4]。在一些工程中，尤其是在边坡区域，因冻胀作用而导致的土体塌方现象较为严重，极大地影响了输水能力和渠道安全性[3]。

3. 寒区渠道衬砌材料与结构形式

寒区渠道衬砌的材料选择与结构设计是防止冻胀破坏、提高渠道稳定性和耐久性的关键。随着技术的不断发展，传统的刚性衬砌逐渐向更加灵活、适应性强的材料和结构形式转变。本部分将重点探讨寒

区渠道常用的衬砌材料、衬砌结构形式的特点及其在防冻胀中的应用效果。

3.1. 传统材料与结构

在寒区的早期渠道建设中，刚性衬砌材料，如普通混凝土和钢筋混凝土，被广泛应用。这些刚性结构能够有效承受一定的荷载，具有较高的抗压强度。然而，由于刚性衬砌在面对基土冻胀力时的脆弱性，常常会发生裂缝、隆起等冻害破坏[1]。例如，在东北和西北的一些地区，冬季气温低于 -10°C 时，基土冻胀深度可达到 1~2 米[4]，而传统混凝土结构在此深度的冻胀作用下容易产生裂缝，降低其使用寿命[5]。

为了弥补这一缺陷，部分工程开始采用柔性结构和复合材料，以应对冻胀破坏的影响[6]。在传统刚性衬砌的基础上增加弹性伸缩缝或采用具有一定柔性的材料，可以有效减缓冻胀带来的内力传递，降低冻害破坏的风险[1] [5]。

3.2. 新型材料与改进结构

随着材料科学的发展，近年来一些新型材料被引入寒区渠道衬砌中，如活性粉末混凝土和轻骨料混凝土。这些新型材料不仅具备较强的抗冻性，还具有良好的耐久性，能够有效抵抗冻胀和冻融循环的影响。例如：

活性粉末混凝土：活性粉末混凝土由于其独特的配比和高密实性，具有较高的抗冻性和耐腐蚀性。研究表明，活性粉末混凝土比普通混凝土更具耐冻融的性能，适用于寒冷地区的渠道衬砌[7]。这种材料的密实性较高，可有效减少水分进入衬砌内部，从而减少冻胀产生的可能性。此外，活性粉末混凝土的强度远高于传统混凝土，能够更好地承受冻胀力和其他外部应力。

轻骨料混凝土：另一种被广泛应用于寒区渠道的材料是轻骨料混凝土，尤其是采用浮石作为轻骨料的混凝土。浮石轻骨料混凝土不仅具有良好的保温隔热性能，还能减缓基土和外界环境之间的热交换，降低基土冻结的速度[8]。研究表明，使用浮石轻骨料混凝土的渠道衬砌能够有效延迟基土冻结，甚至在某些情况下避免冻结现象，从而减少冻胀的发生。

几种材料性能对比如下表 2。

Table 2. Comparison of material properties

表 2. 材料性能对比

材料类型	抗冻等级	导热系数($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	成本(元/ m^3)
普通混凝土	F150	1.8	800
活性粉末混凝土	F300	1.2	1500
浮石轻骨料混凝土	F200	0.6	1200

3.3. 复合结构形式

在寒区渠道衬砌设计中，复合结构形式越来越受到重视。这种结构形式通常结合了不同材料的优点，既能够提高结构的抗冻胀能力，也能在一定程度上降低造价。例如：

保温与排水层复合结构：为解决冻胀问题，许多寒区渠道采用复合结构设计，如在衬砌材料下方设置防渗保温层，并在基土表面铺设排水层，以减少土壤中的水分冻结并提高冻胀位移的容忍度[2]。这种结构的设计能够有效缓解基土的冻胀压力，减少对衬砌的破坏。

改进断面设计：除了材料的选择，衬砌断面的设计也对防冻胀具有重要作用。例如，采用弧形或 U 型断面能够更好地适应冻胀的变形，减少冻胀力对衬砌的直接作用[1]。改进后的断面设计能够使结构更

加灵活，从而减少冻胀产生的裂缝和破坏。

4. 寒区渠道衬砌施工与防冻技术措施

寒区渠道衬砌施工过程中，防冻措施至关重要。冻胀是影响寒区渠道衬砌稳定性的主要因素之一，采取科学有效的施工与防冻技术措施，能够显著提高渠道的抗冻性能和延长其使用寿命。本部分将探讨寒区渠道衬砌施工中的关键技术和防冻技术措施，包括基土处理、衬砌设计改进和冻胀监测系统的应用。

4.1. 基土处理技术

基土处理是防止冻胀破坏的第一步。基土的冻胀性与土壤的含水量、粒径组成、密度以及地下水位密切相关[5]。为了减少冻胀力对衬砌的影响，首先需要对基土进行适当的处理，包括压实和换填。压实处理通过提高土壤的密实度，减少其含水率，从而降低冻胀潜力。在寒区灌区，常用的换填材料包括砂砾石或中粗砂，这些材料具有较低的冻胀性且透水性好，有助于防止水分聚集并减缓冻结过程[2]。

研究表明，换填的深度和厚度直接影响基土的稳定性。通常情况下，换填深度应根据设计冻深进行调整，一般为设计冻深的 1.2 倍[2]。例如，在一些东北地区的灌区，通过换填和压实处理，基土的冻胀量减少了 30%至 40%，有效降低了衬砌破坏的风险[3]。

4.2. 衬砌结构与材料改进

衬砌设计的合理性直接决定了渠道的抗冻胀能力。传统的刚性衬砌结构在面对冻胀力时容易发生裂缝和损坏，因此需要采用灵活、适应性更强的设计方案。近年来，弯曲自适应断面设计成为提高衬砌耐冻性能的重要技术。弧形渠底或 U 型断面不仅能够有效分散冻胀力，还能提高结构的稳定性和承载能力[1]。

另外，选择合适的衬砌材料是防冻胀的重要措施之一。活性粉末混凝土和轻骨料混凝土因其优异的抗冻性和耐久性，逐渐成为寒区渠道衬砌的首选材料[7][8]。例如，使用浮石轻骨料混凝土衬砌可以有效降低基土与外界的热交换，减缓基土的冻结速度[8]。这种材料的导热系数仅为普通混凝土的 1/3，有助于减少冻胀现象的发生。

4.3. 防冻保温技术

防冻保温技术是减缓基土冻胀的重要措施之一。在寒冷地区，尤其是冬季气温极低时，设置有效的保温层可以显著提高衬砌的抗冻胀性能。常用的保温材料包括苯板、聚氨酯等保温层，这些材料具有良好的隔热性能，能够有效隔绝外界低温对衬砌结构的影响[2]。

此外，排水技术也是防止冻胀破坏的关键措施之一。通过设置排水系统，能够有效地减少基土中的水分积聚，降低冻胀发生的风险。在实际施工中，排水层通常设在衬砌的下方，采用透水性较好的材料，如砂砾层或碎石层，以便快速排除水分[6]。在东北地区的某些渠道工程中，设置排水层后，衬砌破坏率减少了 20%。

4.4. 冻胀监测系统的应用

随着监测技术的发展，实时监测冻胀过程和结构内力已成为防治冻害的重要手段。冻胀监测系统通常包括温度传感器、位移传感器和孔隙水压力传感器，通过这些传感器可以实时获取基土温度、冻胀量及其变化过程，从而为冻害防治提供数据支持[9][10]。

在一些寒区渠道工程中，已经开始使用智能监测系统来实时跟踪冻胀过程。例如，某些渠道采用了温度传感器和位移计组合的监测系统，通过测量土壤温度和衬砌位移，能够准确预测冻胀的发生和发展

趋势,从而采取相应的防护措施[9]。通过这种方式,工程管理人员能够提前预警冻胀破坏的发生,及时进行加固或维修,避免了因冻害造成的严重损失。

5. 结论

本文针对寒区渠道衬砌面临的冻害问题,系统总结了冻胀机理、冻害破坏特征以及当前的防治技术。通过改良基土处理、优化衬砌设计以及引入新型混凝土材料,如活性粉末混凝土和轻骨料混凝土,能够显著提高抗冻胀能力。此外,冻胀监测系统的应用能够实时监测并预警冻害问题,进一步保障渠道的运行安全。未来,随着材料和监测技术的不断发展,综合防冻体系的应用将成为寒区渠道衬砌施工的重要方向。

参考文献

- [1] 张凤德,李旭光.寒冷地区灌区渠道衬砌防冻胀工程技术[J].东北水利水电,2012,30(2):17-19+72.
- [2] 孙艾.寒区某灌区引水渠道设计方案研究[J].水利科学与寒区工程,2019,2(3):60-63.
- [3] 马金龙,李兆宇,田文,等.寒区渠道冻害破坏特征与成因[J].水利科学与寒区工程,2018,1(11):28-33.
- [4] 何鹏飞,马巍.我国寒区输水工程研究进展与展望[J].冰川冻土,2020,42(1):182-194.
- [5] 汪恩良,靳婉莹,韩红卫,等.寒区衬砌渠道冻害防治技术研究进展[J].黑龙江大学学报,2018,9(2):86-91.
- [6] 刘景全.寒区渠道衬砌工程设计与施工技术[J].黑龙江科技信息,2014(4):242-243.
- [7] 逯海叶.活性粉末混凝土在寒区渠道衬砌及水保工程中的应用研究[J].内蒙古水利,2015(4):115-116.
- [8] 董伟,申向东,郭克贞,等.轻骨料混凝土在寒区渠道衬砌中的应用[J].水利水电科技进展,2016,36(2):74-78.
- [9] 张晓波.寒区渠道衬砌监测技术应用研究[J].黑龙江水利科技,2015,43(2):29-30.
- [10] 张伯平,牟过斌,闫宁霞.渠道衬砌体冻胀破坏机理与防治对策[J].水利与建筑工程学报,2003(1):10-12.