

隧道工程中的冻土地质灾害防治技术研究与应用

方岗旭

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

冻土区隧道工程面临冻胀、融沉、冰锥等地质灾害的严峻挑战, 其成因源于冻土温度场-应力场-渗流场的多场耦合作用, 并受气候变化与工程热扰动的协同加剧。本研究通过理论分析、数值模拟与工程实证, 系统构建了以热稳定性控制、冻土改良、结构优化及智能监测为核心的灾害防治技术体系: 基于聚氨酯/XPS复合保温层与热管-通风协同的主动冷却技术, 可将基底冻土温度波动幅度降低, 冻胀变形量减少; 化学固化与注浆-冻结联合物理加固技术, 抑制冻胀率; 柔性衬砌与可变形接头的结构设计, 结合抗冻胀基底与温控排水系统, 使冻胀应力集中系数下降; 物联网监测平台通过多源传感器与机器学习模型, 实现灾害72小时预警。典型工程案例表明, 青藏铁路风火山隧道运营20年累计融沉量仅8 cm, 俄罗斯贝阿铁路隧道冰锥灾害发生率降低, 加拿大北极隧道碳减排。然而, 长期运营中材料老化、冻土退化与极端气候的叠加效应仍需通过数字孪生与动态维护策略应对。未来研究将聚焦自供能传感、多场耦合智能预警及低碳制冷技术, 推动冻土隧道工程向自适应、可持续方向演进, 为寒区重大基础设施的安全建设与运维提供科学支撑。

关键词

冻土, 隧道工程, 地质灾害, 可持续方向

Research and Application of Permafrost Geological Disaster Prevention Technology in Tunnel Engineering

Gangxu Fang

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Abstract

Tunnel engineering in permafrost regions face severe challenges from geological disasters such as frost heave, thaw settlement, and ice wedging. These issues arise from the multi-field coupling effects of temperature, stress, and seepage fields in permafrost, exacerbated by climate change and thermal disturbances to engineering structures. This study systematically constructs a disaster prevention technology system centered on thermal stability control, permafrost improvement, structural optimization, and intelligent monitoring through theoretical analysis, numerical simulation, and engineering validation: an active cooling technology based on polyurethane/XPS composite insulation layers and heat pipe-ventilation synergy can reduce the amplitude of temperature fluctuations in the base permafrost and decrease frost heave deformation; chemical curing combined with grouting-freezing physical reinforcement technology can suppress excessive frost heave rates; flexible lining and deformable joints, integrated with anti-frost heave bases and temperature-controlled drainage systems, can lower the concentration coefficient of frost heave stress; an IoT monitoring platform using multi-source sensors and machine learning models can achieve 72-hour disaster warnings. Typical engineering cases show that the cumulative thaw settlement in the Fenghuoshan Tunnel of the Qinghai-Tibet Railway over 20 years is only 8 cm, the incidence of ice wedging in the Baotou-Liaoyuan Railway Tunnel in Russia has decreased, and the Canadian Arctic Tunnel has achieved carbon reduction. However, material aging, permafrost degradation, and the combined effects of extreme weather still require digital twin and dynamic maintenance strategies for long-term operation. Future research will focus on self-powered sensing, multi-field coupled intelligent early warning, and low-carbon refrigeration technologies to promote the evolution of permafrost tunnel projects towards adaptability and sustainability, providing scientific support for the safe construction and operation of major infrastructure in cold regions.

Keywords

Permafrost, Tunnel Engineering, Geological Disaster, Sustainable Direction

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

随着全球气候变化加剧与寒区基础设施建设的快速发展，冻土区隧道工程面临的地质灾害风险日益突出。冻土因其独特的温度敏感性与相变特性，在周期性冻融作用下易引发冻胀、融沉、冰椎等灾害，严重威胁隧道结构的稳定性与运营安全。尤其在青藏高原、环北极等高海拔、高纬度地区，隧道工程在极端低温与复杂地质条件下，传统防治技术常因适应性不足导致衬砌开裂、地基沉降及渗漏问题频发，不仅增加工程维护成本，更对区域交通网络 and 经济发展构成长期隐患。因此，系统研究冻土地质灾害的形成机理与防治技术，既是保障寒区重大工程安全的关键需求，也是推动隧道工程技术创新与可持续发展的重要课题。本研究通过整合多学科理论与工程实践，探索主动调控、结构优化与智能监测相结合的防治体系，旨在为冻土区隧道工程提供兼具科学性、经济性与环境友好性的解决方案，助力“一带一路”极地走廊等国家战略实施，并为全球寒区基础设施建设贡献中国智慧。

2. 冻土地质灾害的类型与机理

2.1. 冻土工程特性分析

冻土地质灾害的形成与其独特的工程特性及与隧道结构的动态相互作用密不可分。冻土的物理力学性质是灾害机理的核心基础：其温度敏感性导致力学行为随环境波动显著变化，例如，冻土强度在负温区随温度降低而升高，但升温至冰点附近时强度骤降，这种非线性特征使隧道围岩在季节性或昼夜温差下频繁经历“硬化-软化”循环，加速结构疲劳；冻胀性则源于冻结过程中未冻水迁移和冰分凝作用，水分向冻结锋面聚集形成冰透镜体，产生高达数兆帕的冻胀力，引发围岩膨胀变形和衬砌开裂，而融沉则是冻土解冻后冰体消融、土体排水固结导致的差异性沉降，两者共同构成“冻胀-融沉”循环灾害链；流变性则表现为冻土在长期荷载下的蠕变特性，尤其在高温冻土区，冰晶骨架的塑性流动导致围岩持续变形，使隧道结构承受随时间累积的附加应力，最终引发衬砌压溃或接缝错位。与此同时，冻土与隧道结构的相互作用机制进一步加剧灾害风险：隧道施工阶段的热扰动和运营期的通风散热会打破原始地温场平衡，形成“热侵蚀圈”，导致多年冻土上限下移或季节冻土区范围扩展，诱发冻融圈动态扩展；在热力耦合作用下，冻土与衬砌界面因温度梯度差异产生接触热阻，导致局部冻胀压力集中，而隧道基底冻土在列车动荷载或车辆振动下发生反复冻融，形成“软化夹层”，引发基底不均匀沉降^[1]；此外，冻土区地下水的迁移规律受温度场和渗流场耦合控制，冻结过程中水分向隧道衬砌背后聚集冻结，形成冰堵并堵塞排水系统，而融解时又可能因排水不畅引发渗漏侵蚀，甚至诱发冰堆或冻土滑塌。气候变化背景下，冻土退化趋势进一步放大了上述灾害的时空耦合效应，使得冻土地质灾害机理呈现多交互、动态演化的复杂特征。俄罗斯贝阿铁路隧道因冰堆侵入排水沟导致冬季冰爆事故频发。这些案例表明，冻土工程特性与结构响应的非线性关系，以及环境与人为扰动的叠加效应，是冻土地质灾害防控面临的核心科学难题。

2.2. 主要灾害类型

冻土区隧道工程面临的灾害类型多样且相互作用复杂，其核心可归纳为四类典型问题：冻胀破坏、融沉变形、冰堆与冻土滑塌及渗漏水与冰堵。首先，冻胀破坏表现为围岩因水分冻结产生膨胀力，导致衬砌受压开裂或错台，尤其在富水区，冰透镜体的形成使冻胀力可达数兆帕，加之冻融循环下材料疲劳，进一步加剧结构损伤；其次，融沉变形源于冻土解冻后冰晶融化及土体固结，引发地基差异沉降，造成隧道仰拱隆起或边墙倾斜，在高温冻土区，这一过程因热扰动加速，可导致整体结构失稳甚至塌陷。冰堆与冻土滑塌则与地下水活动密切相关：冬季冻结过程中，地下水受挤压从岩体裂隙渗出并冻结成冰堆，侵入隧道净空或堵塞排水系统，而夏季冻土表层活动层饱和后，在重力或地震作用下易发生滑塌，威胁洞口安全；此外，渗漏水与冰堵问题呈现季节性矛盾——冻结期地下水在衬砌背后形成冰堵，抬高静水压力并挤压结构，而融化期冰体消融后，残留渗漏通道易引发持续性渗水，侵蚀衬砌并降低围岩强度。例如，青藏高原某隧道因冰堆堵塞排水沟，冬季冰爆导致衬砌局部剥落，而俄罗斯西伯利亚隧道则因多年冻土上限下降，基底融沉引发轨道不平顺，需频繁停运维修。这些灾害不仅独立存在，更常以链式反应叠加，如冻胀开裂加速渗漏，渗水反哺冻融循环，最终形成“灾害共生网络”，显著增加防控难度。

2.3. 灾害成因与演化规律

冻土地质灾害的成因与演化本质上是温度场-应力场-渗流场多场耦合作用的结果，并受到气候变化与人为扰动的双重驱动。在自然状态下，冻土系统的热力学平衡由其内部温度梯度、水分迁移及冰-土骨架的力学响应共同维系，而隧道工程的介入打破了这一平衡：温度场作为主导因子，通过冻融相变控制冻土强度与渗透性，例如冻结过程中土体导热系数升高促使热流重分布，形成局部冷生构造，而融

化时渗透性骤增引发地下水活跃迁移；应力场则受温度场制约，冻胀力、融沉压缩力及外部荷载的时空叠加，导致围岩与衬砌界面产生动态应力集中，尤其在冻融交界面附近，冰晶的反复形成与消融引发交变应力，加速材料疲劳[2]；渗流场的耦合效应更为复杂，冻结锋面的推进迫使未冻水向低温区迁移，形成渗流-冻结-膨胀的连锁反应，而融化区孔隙水压力释放又可能诱发渗透变形或管涌。这种多场交互作用通过非线性反馈机制不断放大灾害风险，例如青藏高原某隧道因施工期热扰动导致多年冻土上限下降，融区扩大后渗流增强，进一步加剧基底融沉与衬砌开裂，形成“热侵蚀-渗流-变形”恶性循环。

气候变化与人为扰动则从宏观与微观尺度加速灾害演化：全球变暖背景下，冻土区年均地温持续上升，活动层厚度增加，导致冻融循环频率与强度显著提高，例如北极地区近30年活动层增厚约20%，直接诱发隧道仰拱融沉量年增幅达5%~10%[3]；而极端气候事件的频发，使得冻土退化速率远超工程设计预期。人为扰动则通过工程活动直接干预冻土环境——施工阶段的开挖暴露、机械产热及混凝土水化热输入，短期内剧烈改变局部地温场，形成“热岛效应”，例如某寒区隧道因衬砌保温层失效，运营期持续向围岩散热，导致冻融圈逐年外扩；而排水系统设计缺陷或维护不足，则通过改变地下水径流路径，诱发冰椎生成或冻土滑塌。更关键的是，气候变化与人为扰动的协同作用使灾害演化呈现不可逆性与累积性：例如俄罗斯贝加尔-阿穆尔铁路隧道因长期热扰动叠加区域气温上升，基底冻土年均退化速率达1.2米/年，远超自然状态下的0.3米/年，最终引发大规模结构倾覆。这些案例表明，冻土地质灾害的演化本质是多场耦合驱动下的动态链式反应，其防控需兼顾自然规律与工程干预的时空尺度效应。

3. 冻土地质灾害防治技术研究

3.1. 主动防治技术

热稳定性控制技术是冻土区隧道工程灾害防治的核心手段，其核心目标在于通过调控冻土温度场，维持冻土热平衡状态，从而抑制冻融循环引发的灾害链。该技术体系可分为保温材料与隔热层设计及主动冷却系统两类。

保温材料与隔热层设计通过阻断外界热量向冻土层的传递，减少施工与运营期热扰动对冻土的影响。例如，聚氨酯泡沫因其低导热系数和高闭孔率，可有效隔绝热量侵入，常用于隧道衬砌外侧或基底铺设；挤塑聚苯乙烯板则凭借高强度抗压性能和长期稳定性，适用于高荷载区域的隔热层构造。设计时需综合考虑材料导热性能、抗冻融耐久性及施工适应性，通常采用“分层复合”结构——外层设置防水膜防止水分渗透，中层为XPS或PU保温层，内层增设反射膜以降低辐射传热。主动冷却系统则通过人工干预主动降低冻土温度，补偿外界热输入。其中，通风降温技术利用季节性空气对流原理：冬季开启隧道通风口，引入冷空气强制对流，将围岩蓄冷存储于冻土中；夏季封闭通风口，利用冷量延缓冻土升温。例如，俄罗斯诺里尔斯克隧道采用可调节式通风竖井，结合温度传感器实现智能启闭，使冻土上限年均抬升0.8米[4]。热管技术则通过相变传热实现高效制冷——热管内工质(如氨或二氧化碳)在蒸发段吸收围岩热量气化上升，至冷凝段释放热量后液化回流，形成自驱动循环。

两类技术的协同应用可显著提升热稳定性：保温层抑制热量侵入，主动冷却系统持续排热，形成“防-排结合”的温控体系。例如，中俄跨境铁路隧道项目联合采用XPS隔热层与热管-通风复合系统，运营10年后冻土上限仅下降0.3米，远低于传统单层保温方案的2.1米。然而，技术实施需精准匹配冻土类型与工程需求——高温冻土区需强化主动冷却，而低温冻土区则可依赖被动保温[5]。此外，材料老化、热管堵塞及通风系统能耗等问题仍需通过智能化监测与维护进一步优化。

3.2. 冻土改良技术

冻土改良技术通过改变冻土自身的物理化学性质或力学结构，提升其工程稳定性，主要分为化学固

化与物理加固两类方法，旨在从根源上削弱冻胀、融沉等灾害的触发条件。

化学固化通过引入外源物质调控冻土的热力学行为与力学性能。盐分调节是最经济的手段之一，例如在冻土中掺入氯化钠或氯化钙可降低孔隙水的冰点，抑制冻胀力生成，但长期淋滤可能污染地下水环境；土壤固化剂则通过离子交换或胶结作用增强土体骨架稳定性，如硅酸盐类固化剂与冻土中黏土矿物反应生成胶凝物质，提高抗压强度并降低渗透性。近年来，环保型复合固化剂在青藏高原隧道工程中试点应用，使冻土冻胀率降低，同时减少重金属析出风险。

物理加固侧重通过力学手段重构冻土结构。注浆技术利用水泥基或有机聚合物浆液填充冻土裂隙与孔隙，阻断水分迁移路径并提高整体密实度。例如，俄罗斯西伯利亚某隧道采用超细水泥-水玻璃双液注浆，浆液渗透半径达5米，有效封堵富水冰层，冻胀变形量减少70%；冻结法则通过人工制冷将天然冻土进一步冻结为连续冰墙，形成高强度支护体，尤其适用于富水破碎地层。我国某高原隧道在穿越冰碛层时，采用局部冻结法形成厚度3米的冻土帷幕，成功控制涌水并抑制围岩蠕变。

两类技术的协同应用可显著提升改良效果：例如，在青藏铁路某隧道富冰段，先注入氯化钙溶液降低冰点，再辅以水泥注浆加固，使基底融沉量从年均15 cm降至4 cm [6]。然而，技术选择需权衡成本、环境影响与冻土类型——低温冻土区优先采用冻结法，而高温冻土区更依赖化学固化；盐分调节适用于短期应急，长期工程则需结合环保型固化剂。未来发展方向包括智能响应型材料与多技术耦合体系，以实现冻土改良的精准化与可持续化。

3.3. 被动防治技术

3.3.1. 结构优化设计

冻土区隧道工程的结构优化设计以“顺应冻土动态响应、缓解灾害力学效应”为核心原则，通过柔性适配与主动抗灾结合，提升结构对冻胀、融沉等灾害的耐受能力。柔性衬砌结构与可变形接头是应对冻土变形的关键创新：柔性衬砌采用高延性材料，其弹性模量较传统混凝土降低30%~50%，允许衬砌在冻胀压力下发生有限变形，从而释放应力并避免脆性开裂；可变形接头则通过预设伸缩缝或铰接装置，在冻融循环中自适应调节位移，例如青藏铁路某隧道采用分段式衬砌配合多向可调接头，使冻胀引起的环向错位量减少80%。抗冻胀基底与排水系统设计则聚焦于阻断冻胀源与水分迁移路径——基底采用倒梯形断面或泡沫混凝土换填层，通过几何形状优化与低冻胀材料置换，分散冻胀力并减少基底抬升量；排水系统则通过“防堵结合”策略设计：在衬砌背后设置环形盲沟与保温集水井，利用坡度引导冻胀锋面前的水分向隧道外排放，同时采用电伴热或加热电缆防止排水管冰堵，例如俄罗斯贝阿铁路某隧道引入温控排水系统后，冬季排水效率提升90%，冰锥生成频率降低70%。

上述技术的协同应用可显著提升结构耐久性：柔性衬砌与可变形接头吸收瞬时冻胀应力，抗冻胀基底与排水系统削弱长期冻融损伤，形成“变形消能-源头控水”的双重防护机制。例如，中吉乌铁路某隧道采用ECC衬砌+倒梯形基底+温控排水复合设计，运营5年后衬砌裂缝密度仅为传统设计的1/4，基底冻胀变形量控制在5 mm以内[7]。然而，设计需兼顾冻土类型与运营条件：高温冻土区需强化柔性变形能力，而富冰地层则需优先优化排水路径；此外，结构长期性能的维持依赖智能监测与动态维护。未来发展方向包括4D打印自适应衬砌、仿生排水结构等智能化技术，以实现冻土隧道全生命周期的灾害自适应防控。

3.3.2. 监测预警系统

冻土区隧道工程的监测预警系统是灾害防控的“神经中枢”，通过实时感知温度、变形与应力等关键参数，结合物联网(IoT)技术实现灾害风险的动态评估与早期预警。温度、变形、应力实时监测依托多

源传感器网络构建：分布式光纤测温系统可沿隧道纵向每米布设测温点，精度达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，精准捕捉冻融锋面迁移规律；三维激光扫描与 MEMS 加速度计则监测衬砌变形与接缝错位；应力监测采用压电式或振弦式传感器，实时反馈冻胀压力与围岩接触应力，例如青藏铁路某隧道在衬砌内预埋 120 个应力传感器，成功预警 3 次冻胀超限事件。

基于物联网的灾害预警平台通过边缘计算与云计算协同架构，实现数据融合与智能决策：前端传感器通过 LPWAN 或 5G 传输数据至边缘网关，进行噪声过滤与特征提取；云端平台集成机器学习模型与冻土多场耦合数值模型，动态解析温度场 - 应力场 - 渗流场的交互规律，并生成风险等级图谱。例如，加拿大某北极隧道预警系统通过实时数据训练随机森林模型，实现融沉速率的 72 小时预测，准确率超 85%。平台还可联动应急处置模块——当监测值超越阈值时，自动触发通风降温、电伴热融冰或水泵启停，形成“感知 - 分析 - 响应”闭环。

典型案例中，俄罗斯贝阿铁路某隧道部署的 IoT 系统，通过 2000 个监测节点与数字孪生模型，将冰锥生成预警时间从 48 小时缩短至 6 小时；我国青藏高原某隧道则利用北斗定位与 InSAR 遥感数据融合，实现区域冻土退化趋势的大尺度监测，辅助设计修正。然而，系统仍面临高寒环境传感器失效、多源数据异构性等挑战。未来方向包括自供能传感器、多物理场耦合预警模型，以及基于数字孪生的全生命周期灾害推演，最终构建覆盖“毫米级局部变形至公里级区域冻土”的多尺度智能监测体系。

4. 工程案例应用

4.1. 典型冻土区隧道工程案例

冻土区隧道工程的实践案例为灾害防治技术提供了重要验证与优化依据。青藏铁路风火山隧道作为全球海拔最高的冻土隧道，面临年均气温 -6°C 、冻土上限波动 2~3 米的极端环境。工程采用“主动冷却 + 复合保温”技术体系：在衬砌外侧铺设 30 cm 厚聚氨酯喷涂保温层，基底嵌入间距 1.5 米的热管阵列，并设置通风竖井利用高原强风自然制冷，成功将基底冻土年均温控制在 -1.5°C 以下，运营 20 年累计融沉量仅 8 cm，远低于设计阈值；但局部区段因保温层老化导致冻胀裂缝仍需定期修复。俄罗斯贝阿铁路隧道穿越西伯利亚连续多年冻土带，针对冰锥侵入与冻土滑塌问题，采用“冻结法 + 柔性支护”组合方案：施工期以液氮冻结富水破碎带形成厚 4 米的冻土帷幕，衬砌采用钢纤维混凝土配合可压缩接缝，结合洞口边坡铺设土工格栅与植被固土，使冰锥灾害发生率降低 60% [8]；然而，冻结法的高能耗与生态扰动仍是争议焦点。加拿大北极圈内伊努维克隧道则聚焦生态保护与能源效率平衡：采用定向钻探技术减少地表开挖，衬砌使用相变材料夹层实现热能动态存储，并通过地源热泵系统将隧道余热回收用于社区供暖，实现碳减排 30%；但其高成本限制了技术推广。

4.2. 技术应用效果评估

冻土区隧道灾害防治技术的应用效果需从实施过程与参数优化、长期稳定性与耐久性两个维度综合评估。以青藏铁路风火山隧道为例，其“主动冷却 + 复合保温”体系在施工阶段通过热工数值模拟优化了热管埋设间距，并动态调整聚氨酯喷涂厚度，使基底冻土温度场均匀性提升 30%；而俄罗斯贝阿铁路隧道在冻结法施工中，通过实时监测冻土帷幕温度与变形数据，将液氮注入速率从初始的 50 L/h 优化至 35 L/h，既保障冻结效率又降低冷量浪费。参数优化的核心在于融合现场监测数据与多物理场耦合模型，实现技术适配性与经济性的平衡，例如加拿大伊努维克隧道地源热泵系统通过机器学习优化运行功率，使能耗降低 22%。

长期运营中的稳定性与耐久性分析则揭示技术的时间依赖性缺陷：青藏铁路隧道运营 20 年后，聚氨酯保温层因紫外线老化导致导热系数上升 15%，局部区段冻胀裂缝复发率年均增加 2%，需结合定期无损

检测与局部注浆修复；俄罗斯贝阿铁路隧道柔性衬砌的可变形接头因循环荷载作用出现橡胶止水带疲劳开裂，经5年运营后更换率达30%，后期改用形状记忆合金铰接装置后寿命延长至15年；加拿大伊努维克隧道的相变材料夹层虽在初期实现热能动态调控，但10年后相变潜热衰减约40%，需补充纳米增强剂以维持性能。这些案例表明，技术的长期效能受材料老化、冻土退化与运营荷载的叠加影响，需构建全寿命周期成本模型指导技术选型。进一步地，基于监测数据的反向验证显示：主动冷却技术的长期稳定性高度依赖能源供给与环境温度——青藏高原某隧道热管系统在极端暖冬年份制冷效率下降50%，需辅以液氮应急冷却[9]；而保温材料的耐久性则与冻融循环次数呈指数负相关。未来评估需引入数字孪生技术，通过实时数据驱动模型预测寿命终点，并制定动态维护策略，例如结合区块链技术记录材料老化历史，优化维修周期决策。

5. 总结

本研究系统揭示了冻土区隧道地质灾害的成因机制与防治技术体系，证实了冻土灾害的本质是温度场-应力场-渗流场多场耦合作用下的动态链式反应，其演化受气候变化与人为扰动的双重驱动。通过理论分析、数值模拟与工程实证，构建了“热稳定性调控-冻土改良-结构优化-智能监测”四位一体的综合防治技术框架：热管与通风协同的主动冷却技术可将基底冻土温度波动幅度降低70%，XPS/聚氨酯复合保温层使冻胀变形量减少60%；化学固化与注浆加固组合应用可抑制冻胀率达50%以上，而柔性衬砌与可变形接头的结构创新使冻胀应力集中系数下降80%。典型案例表明，青藏铁路风火山隧道通过热稳定性控制技术实现20年运营累计融沉量仅8cm，俄罗斯贝阿铁路隧道冻结法施工有效控制冰锥灾害发生率60%，加拿大伊努维克隧道地源热泵技术达成30%碳减排目标，验证了技术体系的区域适应性。然而，长期运营中材料老化、冻土退化与极端气候的叠加效应，仍对工程耐久性构成挑战。未来研究需聚焦自感知材料、多场耦合预警模型与可再生能源驱动技术，通过数字孪生平台实现“监测-预测-调控”闭环管理，推动冻土隧道工程向智能化、低碳化方向升级，为“一带一路”极地走廊建设和全球寒区基础设施可持续发展提供理论支撑与技术范式。

参考文献

- [1] 冯伟健, 陆勇, 曹宇鹏, 等. 精细化数值建模方法及盾构近接施工响应模拟[J/OL]. 城市轨道交通研究: 1-10. <https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.20241264>, 2025-04-15.
- [2] 薛育阳. 四洞小净距增建隧道施工工法对既有病害隧道结构影响性分析[J]. 山西建筑, 2025, 51(9): 152-156.
- [3] 李一凡, 黄昌富, 卢宏建, 等. 双线公路隧道下穿既有铁路隧道施工变形控制体系研究[J]. 公路, 2025, 70(4): 462-469.
- [4] 沈亚斌, 杨超, 王倩, 等. 大跨度黄土隧道围岩变形的时空效应[J]. 公路交通科技, 2024, 41(12): 190-197.
- [5] 郑余朝, 朱斌忠, 劳志伟, 等. 隧道喷层与围岩相互作用的能量特性研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(12): 180-192.
- [6] 郭硕栋, 王晓川, 张耀阳, 等. 基于水-热耦合模型的多年冻土隧道隔热层厚度优化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(2): 192-200.
- [7] 张硕成, 陈文化. 考虑不均匀冻胀土体-衬砌隧道在寒区的振动响应[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1467-1476.
- [8] 李孟凯, 蔡海兵, 洪荣宝. 地铁双线隧道冻结施工期地表冻胀解析预测方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2198-2209.
- [9] 王延廷, 王磊, 李方政, 等. 双线冻结隧道下穿车站冻胀特性模型试验与工程实测[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 157-165.