

循环冻融作用下岩体渗透性变化对边坡稳定性影响研究现状

刘东升¹, 代碧波^{2,3}, 张世文¹, 赵武鹏^{2,3}

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山

³金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年9月17日

摘 要

全球约有一半以上地域处于寒区, 但其却蕴藏着丰富且宝贵的各种资源, 因对资源的需求与日俱增, 其资源的开发利用已经刻不容缓。目前在世界范围内都开展了大量的工程建设及资源开发活动, 其因循环冻融作用下岩体的劣化特征而导致的边坡稳定性问题最为突出, 但此方面的研讨主要围绕着岩体的裂隙, 所处应力场、含水率这些方面, 通过模拟结果与室内试验来研究对边坡稳定性造成的影响, 岩体的渗透性对边坡稳定性造成的影响研究相对较少, 为了表明岩体渗透性变化对边坡的影响, 将从岩体力学文献及相关理论基础上, 从岩体相关自身的裂隙发育、相关强度及浸润线变化等参数与岩体渗透性之间的关系来阐述, 从而为边坡稳定性研究提供一些新的思路。

关键词

循环冻融作用, 岩体劣化特征, 边坡稳定性, 渗透性, 浸润线

Research Status of Influence of Permeability Change of Rock Mass on Slope Stability under Cyclic Freeze-Thaw Effect

Dongsheng Liu¹, Bibo Dai^{2,3}, Shiwen Zhang¹, Wukun Zhao^{2,3}

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Ma'anshan Mining Research Institute Co., Ltd., Ma'anshan Anhui

³State Key Laboratory of Safety and Health of Metal Mines, Ma'anshan Anhui

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 30th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

文章引用: 刘东升, 代碧波, 张世文, 赵武鹏. 循环冻融作用下岩体渗透性变化对边坡稳定性影响研究现状[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1001-1010. DOI: 10.12677/me.2025.135114

Abstract

About more than half of the world's regions are in cold regions, but they contain rich and valuable resources. Due to the increasing demand for resources, the development and utilization of their resources is urgent. At present, a large number of engineering construction and resource development activities have been carried out around the world. The problem of slope stability caused by the deterioration characteristics of rock mass under cyclic freezing and thawing is the most prominent. However, the research in this field mainly focuses on the cracks of rock mass, the stress field and water content. The influence of slope stability is studied by simulation results and laboratory tests. The influence of permeability of rock mass on slope stability is relatively few. In order to show the influence of permeability change of rock mass on slope, this paper will be based on the literature of rock mass mechanics and related theories. This paper expounds the relationship between the parameters such as fracture development, related strength and saturation line change of rock mass and the permeability of rock mass, so as to provide some new ideas for the study of slope stability.

Keywords

Cyclic Freeze-Thaw Effect, Deterioration Characteristics of Rock Mass, Slope Stability, Permeability, Line of Saturation

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

全球约有一半的陆地因极端气候、地貌特征及区域地质条件等因素而变成多年、季节性或短期寒的冻土区。在我国，冻土区域占国土面积的较大比例，相关数据显示其分布广泛[1][2]，但是其区域内矿产资源、水资源、木材等资源富饶。随着世界人口总数的不断上涨，伴随而来的也是资源消耗的日益增加问题，面对非极地区域的资源逐渐枯竭，极地资源开发即使困难重重但却迫在眉睫且也是必须攻克的问题。

在世界范围上，一些地区，如西伯利亚、北极，我国的西藏、东北三省都开展了大量的工程建设和资源开采活动[3]-[5]。在如此季节性极地和昼夜温度交替较快及其它因素综合而导致的环境使工程岩体长期因循环冻融而处在一定应力环境下[6][7]，形成塑性且连续劣化性损伤积累，最终引起岩质边坡风化剥蚀及垮塌[8]-[11]、高危失稳[12]-[14]、极地岩体劣化破坏等问题[15][16]。

现今，国内外学者把寒区岩体冻融灾害作为研究热点，寒区岩土工程的安全性评价已成为亟待解决的重点问题[17]-[21]，国内、外普遍采用室内外试验并结合现场监测调查及数值模拟、微观分析、概率分析研究岩体劣化对边坡稳定性的影响。但是，现今尚缺乏循环冻融下岩体渗透率对边坡安全性影响研讨，岩体渗透性作为边坡稳定性的关键因素之一，其在循环冻融过程变化对边坡稳定性影响需进一步揭示。因此，深入开展循环冻融作用下岩体渗透性对边坡稳定性影响研究对准确评估寒区边坡的稳定性具有重要的学术和工程应用价值。本文将深入探讨循环冻融作用下岩体渗透性对边坡稳定性的影响，从而为后期有针对性评估边坡稳定服务。

岩体的渗透性

岩体渗透性就如自然界中筛子，决定了水和矿物质如何在地下穿梭，影响着我们的生态环境和资源

利用及岩土工程安全性。裂隙岩体的渗透性是地质危害、水力工程、岩土工程等众多领域研究中重点的一个因素[22]，伴随着国家总体经济体系逐渐壮大，岩体的渗透性研究已经成为一个无法回避的问题[23]。岩体的渗透性具体以水为代表具有流动性能的介质能够穿透的能力[24]，还直接或者间接地涉及工、农业的基础建设及城市的建造等多个行业，精确的渗透性数值能够给予工程师设计的建筑更高的安全性。

2. 岩体渗透性变化的因素

2.1. 内部因素

(1) 岩体的渗透性主要受到其内部裂隙发育度及其形式影响[25]。在喀斯特裂隙媒介中，地下水在裂隙中流动主要为渗流为主，其在裂隙内形成一定范围的导水网格则成为地下水存储及流动的通路[26]。裂隙的发育方式多种多样，有张拉裂隙、剪切裂隙等，而其发育程度，从细微到显著，也有所不同。相关的研究显示，渗透性随裂隙发育程度的增大而提升。初始阶段，岩体较完整，其渗透性也相应降低；随着裂隙数量逐渐增多及后期的扩大，水流通道也会随着逐渐形成，渗透性也会快速提高，如表 1。

Table 1. Effect of thawing cycle on crack propagation in rock mass

表 1. 冻融循环对岩体裂隙扩展的影响

冻融次数(次)	裂隙宽度增加(%)	渗透率变化($\times 10^{-15} \text{ m}^2$)
0	0	1.2
10	35	1.8
30	80	3.0
50	1.2	3.5

(2) 基于数字岩心技术，有关学者提出孔隙连通性是渗透性变化的主控因素，冻融作用会优先扩大原有优势渗流通道，导致渗透性各向异性增强[27]，然而其不一致性是主要探讨点[28]。岩体中的结构面就像是岩体内部的运输路径，其具体的性质很大程度上影响了这些“路径”的宽窄性、连通性等；岩块的岩性，如岩石的类型、孔隙度、各向强度等指标也对渗透性起着关键作用。大体上而言，岩体的结构面越发育其自身的渗透性可能就越强；岩块的孔隙度提高，也会一定程度上扩大岩体劣化能力。

(3) 相关储层的储水及其自身的渗透率受到岩体自身的孔隙特征影响，经常被作为储层分类判定的一种重要的依据，储层孔隙结构能够一定程度上反映岩体内部的孔洞、裂隙或者喉道的类型及几何形状、大小、分布的位置及之间互通关系[29] [30]。孔隙结构就像是大自然在各种物质中自行建造的内部通道。当孔隙较大且相互连通性好时，水或其他流体就如同在宽敞的高速公路上畅行无阻，渗流能力自然就强。反之，若孔隙细小又曲折，那流体通过时就仿佛在走羊肠小道，阻力增大，渗流能力也就大打折扣。

2.2. 外部因素

(1) 岩体内部结构会因温度这种外在因素下一定程度上发生变形破坏及一些物理化学变化[31]。国外一些学者[32] [33]在大气压力、模拟油藏压力和高温环境下对砂岩的岩心做了加热渗透性实验并模拟不同围压下及温度条件石英二长石内部的裂隙变化，发现砂岩岩心渗透率最少比原来增加了 1/2，声速及岩体强度也都下降了大约 1/2，石英二长石的裂隙及孔洞数量的增加一定程度提高了其渗透率。一些与之相关的文献数据也有说明[34]-[36]，一定程度的加热能够极大程度上使岩体的内部结构发生改变，从而间接或直接性地改善其内部的流动路径。有些学者则通过动态加载试验结合冻融循环，发现砂岩渗透率随冻融

次数呈指数增长, 裂隙扩展速率在 -20°C 至 0°C 区间最显著, 发现冻融-荷载耦合作用会加速岩体渗透性劣化, 需在寒区边坡设计中考虑动态荷载的叠加效应[37]。

(2) 相关文献资料表明地应力与埋深呈正比例关系。地应力对渗透率又有着重要影响, 原因其一是垂直作用力源于其上部覆岩, 其二是构造应力则在水平方向上来展示。应力松弛的地区其渗透率相对其他低应力区较高, 当深度到达一定程度时其渗透率将会保持不变; 渗透率平常则往往是处于应力一般地区, 从其数学角度来看, 渗透率的高低与深度数值大小呈反比例函数关系[38]-[41]。事实上, 地应力就像空气一样看不见也摸不着却真实存在且制约着渗透的规律。当地应力增大时, 岩石等其它物质的孔隙结构也会发生变化, 之前畅通无阻的渗流通道也可能变得狭窄更甚者因此而变得堵塞, 渗透率也会因此受到影响而降低; 相反, 地应力降低, 渗透通道会因此发生较之前扩张呈增大的趋向, 渗透率则也会随之提高。经过学界前辈们数次实验及实际检测, 这种影响是实实在在且较明显的。了解地应力对渗透率的影响及关系, 对工程建设, 地质普查, 矿产开发等诸多方面都有着极其重要的影响。

(3) 流体一般都因具有不同密度、压缩性、膨胀性等这些物理化学性质而类别不同。而这些性质是流体在岩体孔隙中流动的速度及方式的关键所在, 从而影响着岩体的渗透性。黏性较高流体在岩体孔隙里流动时, 由于和岩体摩擦而产生的阻力致使流动受到阻碍从而使自身的化学性质发生变化如酸碱度、离子成分等降低从而直接使其在岩体中流动时渗透性降低。此外, 液体中某些成分可能会与岩体自身构成物质发生化学反应而产生一些新的化学性质较稳定的沉淀物致使孔隙堵塞从而降低渗透性[42]。流体的密度对岩体的渗透率及流体速度影响则体现在其压力梯度这方面。在控制变量的情况下, 密度大的流体在同样的压力梯度下, 其流动速度相对较慢且渗透率也会降低[43]。

3. 岩体渗透性与边坡稳定关系

岩体渗透性与边坡稳定性之间存在紧密且复杂的关系, 主要体现在应力状态、岩体的物理力学性质、变形与破坏模式三个方面。通过现场监测指出冻融循环会导致裂隙岩体渗透性呈阶段性增长, 渗透率变化与边坡位移量则会随之发生显著的变化[14]。此外, 随着冻融次数的增加, 岩体的渗透率也随着增加。如表 2。

Table 2. The relationship between permeability and freeze-thaw times
表 2. 渗透率与冻融次数的关系

冻融次数(次)	平均渗透率($\times 10^{-6}$ cm/s)	标准差($\times 10^{-6}$ cm/s)	样本数(n)
0	1.25	0.12	5
5	2.78	0.23	5
10	4.56	0.35	5
15	6.89	0.47	5
20	9.32	0.62	5

3.1. 应力状态的影响

边坡内的主应力方向及大小会直接影响着边坡的变形和破坏模式, 从空间角度来看, 当边坡坡面与最大主力方向位置关系是平行时, 则边坡则处于极限稳定状态; 但边坡的坡面与最大主应力成直角关系时, 则边坡安全稳定性会因此相对改善, 保持稳定。此外, 随着主应力的增大, 其边坡的剪切破坏的安全系数也会降低[44]。在边坡的坡脚或者坡顶等其它位置, 但由于其地形地貌的变化, 一般都会出现剪应力聚集的现象, 这些位置的岩体往往达到屈服状态, 从而导致的边坡的局部甚至整体性稳定性问题。此

外, 应力状态和渗透性也是相互作用, 相互影响, 从而共同决定着边坡的稳定性状况。

3.1.1. 静水压力的作用

1) 静水压力作用于边坡岩体上, 会使岩体受到额外向下的作用力而使边坡自身因重力而产生下滑的分力, 致使边坡的安全稳定性系数降低, 如果静水压力足够大的时候, 则可能会导致其边坡的稳定性显著下降, 甚至引发滑坡等地质灾害或者工程事故。在一些水库边坡的位置, 由于其水库的水位上升, 静水压力的增大致使原本稳定的边坡出现失稳现象, 赋存于岩体裂隙中水时会对其孔隙两侧产生静水压力。边坡岩体位移引发张裂隙充水, 水从破坏面向下流致直至从坡脚逸出, 产生向上的浮力从而抵消部分正应力, 进而减小摩擦阻力。当滑动面位于低于地下水水位位置时, 岩体强度会因静水压力作用降低且岩体因水的浸泡产生软化而使颗粒间摩擦力降低。此外, 岩土体的应力状态也会因静水压力作用而发生改变从而降低安全系数最终增加剪切破坏的风险[45]。通过学者研究表明, 随着冻融次数的增加, 边坡的安全系数也会随之降低, 如表 3。

Table 3. The change of slope safety factor under freeze-thaw action

表 3. 冻融作用下边坡安全系数变化

冻融次数(次)	安全系数(静水压力)	安全系数(扬压力)
0	1.50	1.45
20	1.25	1.15
40	1.05	0.95

2) 有些学者通过构建热 - 水 - 力 - 化学(THMC)四场耦合模型, 模拟了冻融循环下渗透性变化对孔隙水压力的影响, 揭示安全系数下降 10%~30%的临界阈值, 提出渗透性变化是边坡失稳的关键中间变量, 未来需开发更精确的冻融 - 渗流耦合算法[14]。

3) 引发其他地质灾害。静水压力还可能引发一些常见的地质灾害, 如泥石流、塌方等。引发的灾害不但会使原来的边坡形态受到破坏而且可能对附近的居民及其财产安全造成危害[46]。

3.1.2. 扬压力的作用

扬压力是因地下水在岩土体孔隙中渗流时对岩体产生的一种向上的力, 会抵消一部分自身重力, 从而使岩体的安全稳定性一定程度地降低, 尤其是特殊物质组成且透水较差岩土体边坡, 扬压力的影响更为显著[47]。

3.2. 岩体物理力学性质影响

岩体渗透性对孔隙水压力影响显著, 渗透率高则孔隙水压力小, 有效应力提高, 增强岩体强度和稳定性; 渗透率低则相反, 容易导致地质灾害。同时, 岩体变形特性也受渗透性影响。而岩体物理力学性质对边坡稳定性起决定性作用, 岩体抗剪强度由内摩擦角、粘聚力和抗拉强度来反映也是边坡稳定性分析的关键参数, 岩体质量指标也影响边坡稳定性。

3.2.1. 软化作用

岩体中的一些化学性质不稳定的成分会因水的渗入而变化, 此外, 长期处于饱水状态的岩体, 随后其自身强度会因此降低从而对边坡稳定造成严重负面影响[47]。

3.2.2. 冻融破坏

在寒区岩体中的水会因结冰而出现体积膨胀产生冰劈作用, 当温度升高作用融化成水, 如此反复从

而使岩体内部结构破坏而影响其自身的完整性和强度，此外，如此循环冻融作用还会使岩体发生一定程度的风化作用，从而又加剧了边坡的不稳定性[47]。

3.2.3. 内摩擦角

一般来说，当岩体渗透性增加时，孔隙水压力可能减小，这会导致有效应力增加。有效应力的提高可以增加岩体颗粒之间的接触力和咬合力，从而有助于提高内摩擦角。相反，当岩体渗透性降低时，孔隙水压力可能增大，有效应力减小，导致岩体颗粒间的接触力和咬合力减弱，内摩擦角随之降低。岩土体的抗剪切能力由内摩擦角这个关键强度指标来体现，在边坡稳定性分析中，内摩擦角是一个关键因素。较大的内摩擦角意味着岩土体拥有更高抵抗岩土体受剪切破坏的能力，提升了边坡稳定性系数。

3.2.4. 黏聚力作用

(1) 粘聚力能够说明岩土体颗粒间的黏结和内摩擦力，其颗粒间连接紧密程度及其岩体的抵抗剪切破坏强度与其数值的大小成正比关系。在边坡中，较大的粘聚力能力够一定程度上增加岩体承受自身重力和外部荷载产生的剪应力，从而提高边坡的安全系数。但是，降雨的渗入一定程度上增加了岩体的含水率，从而降低粘聚力；此外，岩土体受到长期的风化、地震等综合性作用也能导致其结构损坏从而使粘聚力下降；另一方面，边坡岩土体的应力状态和结构也会因人类的工程行为而发生变化进而改变粘聚力。粘聚力与内摩擦角会相互作用及影响抗剪强度从而对边坡的稳定性造成影响。一般而言，从数学的函数角度来看，边坡的安全系数与粘聚力成正比例关系[48]。数值模拟表明，渗透性增加会通过降低黏聚力(最高达 30%)和内摩擦角(约 15%)显著影响边坡安全系数，需在设计中考考虑渗透性 - 强度参数耦合效应[49]，如表 4。

Table 4. The influence of strength parameter reduction caused by permeability on slope safety factor
表 4. 渗透性引起的强度参数降低对边坡安全系数的影响

工况描述	黏聚力降低幅度(Δc)	内摩擦角降低幅度($\Delta \varphi$)	安全系数变化(ΔFS)
低渗透性岩土体	0% (参考值)	0% (参考值)	$FS \geq 1.50$
中等渗透性增加	10%~20%	5%~10%	$FS \downarrow 0.15 \sim 0.30$
高渗透性	20%~30%	10%~15%	$FS \downarrow 0.25 \sim 0.45$
极端饱和	30%~40%	15%~20%	$FS \downarrow 0.40 \sim 0.60$

(2) 粘聚力的大小对边坡潜在滑动面的形成和发展有着重要影响。较大的粘聚力可稳固岩土体内部结构，减少破裂面产生，降低潜在滑动面出现几率；即便边坡内部因不利因素出现应力集中或变形，较大黏聚力也能一定程度阻止裂缝扩展贯通，从而降低潜在滑动面形成的机率。而粘聚力较小则会使岩土体易破裂松动，潜在滑动面更易形成与发展，最终使边坡稳定性降到临界值以下[49]。

3.2.5. 弹性模量

岩土体的抗弹性变形能力由弹性模量这个参数体现，此外弹性模量还影响着岩体内部的应力分布。

1) 影响岩土体变形特性

在岩土工程中，较高的弹性模量对边坡稳定性至关重要，因为这意味着岩土体在外力作用下变形微小，能更好地维持形状与结构稳定。具有较高弹性模量的岩土体，受短暂荷载后复原能力佳。这一特性使边坡在遭遇地震、暴雨等临时荷载产生变形后，拥有较强的恢复力，利于保持长期稳定。而弹性模量低的岩土体，在荷载下容易有大塑性变形且难恢复，可能致使边坡永久变形及稳定性降低。

2) 与其他力学参数的关联性

(1) 强度参数的发挥受多种因素影响, 其中弹性模量与岩土体的抗剪强度指标(像内摩擦角、黏聚力等)存在一定关联。通常情况下, 较高的弹性模量对增强岩土体抗剪强度有重要正面作用。这是因为具有较高弹性模量岩土体, 颗粒间的连接与咬合状况往往更佳, 从而能使内摩擦角和黏聚力等强度参数的作用得到更充分的发挥。就拿砂土边坡来讲, 弹性模量较大的密实砂土, 内摩擦角相对较大, 边坡的稳定性也更为良好。

(2) 影响应力分布。弹性模量的不同会造成边坡内部应力分布有别, 在均质边坡里, 弹性模量高的区域可承受更多应力, 弹性模量低的区域则应力相对集聚。这种应力分布不均的现象会作用于边坡稳定性, 比如在边坡软弱夹层处, 若其弹性模量远低于周边岩土体, 应力易在此集中, 可能引起边坡局部破坏, 最终导致整体边坡安全系数降到临界值以下而失稳。

3) 对边坡数值模拟研究影响

(1) 弹性模量是重要的一个参数。不同的弹性模量取值会对计算结果产生显著影响。研究表明, 当弹性模量在一定范围内变化时, 边坡的稳定性安全系数也会相应发生变化且变化也可能不是线性的。因此, 在数值模拟中需要准确地确定岩土体的弹性模量从而提高边坡稳定性分析的准确性。

(2) 极限平衡法模拟计算边坡安全系数, 尽管弹性模量未直接体现在计算式中, 然而它却能通过影响滑动面的位置以及岩土体的力学特性来间接发挥作用; 当弹性模量参数发生变化, 便会引起边坡潜在滑动面的位置及形状产生相应地改变, 原因在于具有不同弹性模量的岩土体在承受外力时的变形行为存在差异, 这就可能导致在某些特定情况下滑动面更倾向于向深层或浅层发展, 从而对边坡稳定性的评判产生影响。

3.3. 影响变形、破坏模式及其他方面变化

岩体的渗透性变化对边坡的变形与破坏模式产生显著影响, 这一领域的研究已取得诸多成果。以下将从渗透性变化对节理面强度、边坡稳定性、变形特征等方面的影响进行阐述。

3.3.1. 变形量的变化

岩体的渗透性越强, 在水的作用下, 岩体发生的变形就越大。这是因为水的渗透会使岩体颗粒之间的有效应力减小, 同时水的润滑作用也会使岩体颗粒更容易发生相对位移。例如在一些软岩边坡中, 水的渗入会导致边坡出现较大的侧向位移和沉降, 使边坡的变形逐渐发展, 最终可能导致边坡的破坏。

3.3.2. 破坏模式变化

不同的渗透性能会导致边坡的破坏的模式不同。在渗透性较好的岩体边坡里, 水的渗流能够使滑动面的位置改变, 使原先的滑动向更深一层加剧。而在渗透性较差的岩土工程边坡上, 雨水则会在地面形成地表径流在边坡表面流动, 从而易引发表层崩塌、滑坡之类的破坏。

3.3.3. 节理面强度变化

1) 强度降低机制发生改变

岩体中节理面的强度受渗透性作用明显。当水渗进节理面时, 会致使节理面上的矿物质出现溶解、膨胀等物理化学变化, 使得节理面的抗剪强度下降。比如, 在某些包含黏土矿物的节理面里, 水的渗入让黏土矿物吸水膨胀, 减少了节理面相互间摩擦力与咬合力。而且, 渗透水的压力也会对节理面产生影响, 令节理面更易产生相对位移, 进而使其整体强度降低。

2) 稳定性系数变化

岩体渗透性的变化会对边坡稳定性系数产生直接影响。由有效应力理论可知岩体的有效应力与边坡

岩体的孔隙水压力为此消彼长关系, 渗透性提高的情况下边坡的安全稳定性系数会因有效应力减少而降低。相反, 孔隙水的压力与渗透性呈正比例函数关系, 边坡的稳定性会随着渗透性降低而增加。例如, 在降雨入渗的情况下, 边坡的渗透性增大, 大量雨水渗入边坡内部, 导致孔隙水压力迅速上升, 使边坡的安全系数迅速降低, 容易导致滑坡、塌方或其它地质灾害。

4. 结论

(1) 循环冻融作用下边坡稳定性研究需进一步深入。当前研究多聚集在岩体力学参数的变化, 而对岩体渗透性引起的浸润线变化及其对边坡稳定性的影响研究较少; 未来应综合考虑岩体渗透性、冻融循环作用及外部环境因素, 以全面评估边坡稳定性。

(2) 循环冻融作用对岩体的渗透性改变显著, 主要表现为裂隙扩展、孔隙连通性增强及渗透率阶段性增长。冻融次数增加会加剧岩体劣化, 导致渗透率呈指数上升, 尤其在 -20°C 至 0°C 区间内裂隙扩展最为显著。

(3) 透性变化对边坡稳定性的作用机制主要从应力状态、物理力学性质、变形与破坏模式这三个方面来体现, 因此对渗透性变化对边坡稳定影响的研究要结合这些作用机制来开展; 裂隙发育度、孔隙结构、地应力和流体性质是影响渗透性的核心因素, 寒区边坡设计需考虑冻融-荷载耦合效应, 在此方面可以开发更精确的冻融-渗流耦合算法, 并针对性优化排水措施以控制孔隙水压力。

(4) 未来需加强多场耦合(热-水-力-化学)模型研究, 结合现场监测与微观分析, 量化渗透性变化的临界阈值, 为寒区边坡稳定性评估与灾害防治提供理论支撑。

基金项目

深地国家科技重大专项 2024ZD1003802。

参考文献

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-10.
- [2] 张立新, 徐学祖, 王家澄. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268-272.
- [4] 郭长宝, 周家作, 刘筱怡, 等. 青藏高原东部冻融作用下花岗岩力学性质弱化机理研究[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 943-955.
- [5] 赵波. 超低温环境下致密岩石孔隙力学特性研究及应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [6] Taheri, A., Zhang, Y. and Munoz, H. (2020) Performance of Rock Crack Stress Thresholds Determination Criteria and Investigating Strength and Confining Pressure Effects. *Construction and Building Materials*, **243**, Article ID: 118263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118263>
- [7] 李国锋, 李宁, 刘乃飞. 基于 FLAC~(3D)的含相变三场耦合简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3841-3851.
- [8] 陆翔. 寒区露天矿泥岩边坡冻融损伤机理与季节性控制开采研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [9] 刘昊, 王宇, 王华建, 等. 冻融循环作用下岩石含冰裂隙冻胀力演化试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1122-1131.
- [10] 刘乃飞. 寒区裂隙岩体变形-水分-热质-化学四场耦合理论构架研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [11] 许砚. 高寒地区露天矿泥岩崩解对边坡稳定性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [12] 孙浩. 考虑时间效应的高寒地区岩质高边坡破坏机制[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [13] 金培杰. 重庆市万梁高速公路顺层岩石高边坡失稳破坏机制与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(z2): 3.

- [14] 肖永刚. 高寒边坡岩体采动响应与多场耦合时效致灾过程研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [15] 王鲁男, 尹晓萌, 韩杰, 等. 化学溶液与冻融循环作用下粉砂岩强度衰减及预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2361-2372.
- [16] 廖茹雪, 谌文武, 王南, 等. 基于砂岩冻融敏感性的遗迹劣化预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3084-3096.
- [17] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 305-320.
- [18] 单仁亮, 张蕾, 杨昊. 饱水红砂岩冻融特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 923-929.
- [19] Guo, Y. and Shen, Y. (2016) Agricultural Water Supply/Demand Changes under Projected Future Climate Change in the Arid Region of Northwestern China. *Journal of Hydrology*, **540**, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.033>
- [20] Liu, J., Wang, R., Zhao, Y. and Yang, Y. (2019) A 40,000-Year Record of Aridity and Dust Activity at Lop Nur, Tarim Basin, Northwestern China. *Quaternary Science Reviews*, **211**, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.023>
- [21] 侯志强. 高海拔寒区矿山边坡裂隙岩体冻融力学特性及其稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [22] 付贵. 裂隙岩体渗透性理论研究进展[J]. 地下水, 2011, 33(4): 85-86.
- [23] 陈洪凯. 裂隙岩体渗流研究现状(I) [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 1996, 15(2): 29-34.
- [24] 张人权. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [25] 刘晓丽, 王思志, 王思敬, 等. 裂隙岩体渗透性研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 中国地质学会工程地质专业委员会 2006 年学术年会暨“城市地质环境与工程”学术研讨会论文集. 2006: 6.
- [26] 蔡昊, 陈植华, 周宏. 裂隙对雾龙洞岩溶发育及地下径流的影响分析[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 1-6.
- [27] 徐诗雨, 祝怡, 曾乙洋, 等. 四川盆地蓬莱气田茅口组储层孔隙结构特征及分类评价[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(12): 2132-2141.
- [28] Goldscheider Dredw. 岩溶水文地质学方法[M]. 陈宏峰, 何愿, 译. 北京: 科学出版社, 2015.
- [29] 徐诗雨, 祝怡, 曾乙洋, 等. 蓬莱气田茅口组储层孔隙结构特征及分类评价[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(12): 2132-2141.
- [30] 刘广峰, 王连鹤, 孙仲博, 等. 致密砂岩储层孔喉结构研究进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 406-419.
- [31] Hettema, M.H.H., Niepce, D.V. and Wolf, K.A.A. (1999) A Microstructural Analysis of the Compaction of Claystone Aggregates at High Temperatures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**, 57-68. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00178-8)
- [32] Somerton, W.H., Mehta, M.M. and Dean, G.W. (1965) Thermal Alteration of Sandstones. *Journal of Petroleum Technology*, **17**, 589-593. <https://doi.org/10.2118/907-pa>
- [33] Heard, H.C. (1980) Thermal Expansion and Inferred Permeability of Climax Quartz Monzonite to 300°C and 27.6 MPa. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **17**, 289-296. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)90811-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90811-6)
- [34] Jamaluddin, A.K.M., Vandamme, M. and Mann, B.K. (1995) Formation Heat Treatment (FHT): A State-Of-The-Art Technology for Near-Wellbore Formation Damage Treatment. *Annual Technical Meeting*, Calgary, 6-8 June 1995, PETSOC-95-67. <https://doi.org/10.2118/95-67>
- [35] Jamaluddin, A.K.M., Hamelin, M., Harke, K. and McCaskill, H. (1996) Field Testing of the Formation Heat Treatment Process. *Annual Technical Meeting*, Calgary, 9-11 June 1996, PETSOC-96-88. <https://doi.org/10.2118/96-88>
- [36] 吴晓东, 刘均荣, 秦积舜, 等. 岩石渗透率受热变化的实验研究[M]//高德利. 地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术. 北京: 中国科学技术出版社, 1999: 154-157.
- [37] Liu, X., Liu, Y., Dai, F. and Yan, Z. (2022) Tensile Mechanical Behavior and Fracture Characteristics of Sandstone Exposed to Freeze-Thaw Treatment and Dynamic Loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, **226**, Article ID: 107405. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107405>
- [38] 赵庆波, 李贵中, 孙粉锦, 等. 煤层气地质选区评价理论与勘探技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 6-12.
- [39] 姚纪明, 于炳松, 车长波, 等. 中国煤层气有利区带综合评价[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 354-358.
- [40] 赵黔荣, 贵州六盘水地区煤层气选区及勘探部署[J]. 贵州地质, 2003, 20(2): 92-9
- [41] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 等. 煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(10): 5-9.
- [42] 王猛, 李星甫, 杨鑫, 等. 不同流体与黏土矿物对岩石渗透率影响实验研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1):

275-283.

- [43] 孙建孟, 闫国亮, 姜黎明, 等. 基于数字岩心研究流体性质对裂缝性低渗透储层弹性参数的影响规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 39-44.
- [44] 钟志辉. 基于应力场和变形场的边坡稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [45] 李钊, 牛升晟, 甘柯. 静水压力对岩体边坡稳定性的影响分析[J]. 城市地质, 2018, 13(2): 72-78.
- [46] 周罕, 徐则民, 吴吉民. 水对边坡稳定性的影响及防治措施[J]. 工程建设, 2008(2): 23-27.
- [47] 宋增祥. 有软弱夹层岩体边坡稳定分析及安全系数的确定[J]. 农业科技与信息, 2008(22): 32.
- [48] 王维娜, 葛文渊. 基于 GeoStudio 软件的边坡稳定性影响因素分析[J]. 中国公路, 2017(18): 116-117.
- [49] 吴海军, 张宗堂, 杨期君, 等. 黏聚力与摩擦角对三维边坡稳定性的影响分析[J]. 公路工程, 2021, 46(6): 30-33, 73.