

应用研究·非煤矿山·

# 高寒地区冻融作用对高陡边坡安全稳定性影响分析

Analysis of the influence of freezing and thawing on the safety and stability  
of high and steep slopes in alpine region

鲁金涛(应急管理部研究中心,北京 100013)

**摘要:**本文根据某高寒地区矿山实际建设情况,通过现场测量、实验室试验、SVOoffice 软件模拟及极限平衡理论分析等方式,分析了高陡岩质边坡在冻融循环下的安全稳定性变化情况。经试验模拟及现场验证,当温差浮动在 50℃左右时,冻融循环对岩体的影响主要体现在对浅部岩体强度的降低及裂隙的增加,冻结深度约小于 8 m。针对某矿山的高陡边坡实际情况,经极限平衡理论分析,边坡整体安全系数较冻融前下降 2.1%~5.2%,冻融循环对整体边坡稳定性影响较轻。

**关键词:**冻融;高陡边坡;温度场;安全系数

**中图分类号:** TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)04-0013-04

**Abstract:** According to the actual construction situation of a mine in alpine region, the safety and stability of high and steep rock slope under freezing and thawing cycles are analyzed by means of field measurement, laboratory test, SVOoffice software simulation and limit equilibrium theory analysis. The experimental simulation and field verification show that when the temperature difference is about 50℃, the influence of freeze-thaw cycle on rock mass is mainly reflected in strength decrease and fissure increase of shallow rock mass, and the freezing depth is less than 8 m. According to the actual situation of a mine with high and steep slope, the limit equilibrium theory analysis show that the overall safety factor of the slope is reduced by 2.1% - 5.2% compared with that before freezing and thawing, and the influence of freezing and thawing cycle on the overall slope stability is light.

**Key words:** freezing and thawing; high and steep slope; temperature field; safety factor

## 1 前言

据不完全统计,我国多年冻土面积占国土面积的 22.3%,属于世界第三大冻土国<sup>[1]</sup>,尤其在西部高原,常年冻土及冻融循环造成的工程地质问题及安全问题成为西部工程开发不可回避的研究内容<sup>[2-3]</sup>。

冻土热融及岩石冻胀易造成基础滑塌、边坡加速失稳等安全问题,严重可造成工程失效及毁灭性破坏<sup>[4-5]</sup>。随着我国资源开发逐渐向西部迁移,西部高海拔高寒地区新建多座大型露天采矿工程,边坡高度达 300 m 以上,如何在设计及施工中考虑冻融对边坡的影响,并把影响降低到最小限度,对矿山

开采安全至关重要。

本文以西藏某大型露天矿开采为实例,通过实测冻融深度及相关参数,模拟露天采场的温度场与冻融深度的关系,分析冻融边坡滑动模式,利用极限平衡理论计算分析露天边坡的安全稳定性,为矿山安全生产提供必要的理论基础。

## 2 矿山基本情况

### 2.1 情况介绍

项目位于 5 000 m 左右的高海拔地区,自然地理条件异常恶劣,地势险峻,切割强烈,5~12 月平均气温 2.0℃。

露天边坡主要由流纹岩、黑云母二长花岗斑岩、二长花岗岩、花岗闪长斑岩以及凝灰岩组成,地表由四系松散砂砾及碎块石覆盖,露天采场最大边坡高度 945 m。矿山地下水及大气降水较差,水文地质条件简单。

[作者简介] 鲁金涛(1988-),男,硕士,主要从事矿山安全生产、城市风险评估、安全和应急等政策研究。

[引用格式] 鲁金涛. 高寒地区冻融作用对高陡边坡安全稳定性影响分析[J]. 中国矿山工程,2021,50(4):13-16.

### 2.2 永冻层实测

通过查明矿山的不同区域、不同标高永冻层的埋深,了解季节融化层的厚度随不同标高变化的规律,本次共选择了21处测量点。经测量,永冻层埋藏较浅,永冻层埋深并未随着海拔的增加而增厚,反而是海拔相对较低的位置( $\leq 5\ 200\text{ m}$ )融化层厚度较大(1.80 m),实测数据显示永冻层的埋深与标高关系不明显,具体如图1所示,主要原因是由于表层松散岩土的厚度、颗粒级配、含水量、坡向以及接受日照时间的长短不同,造成了温度与冻土层厚度的反向差异。

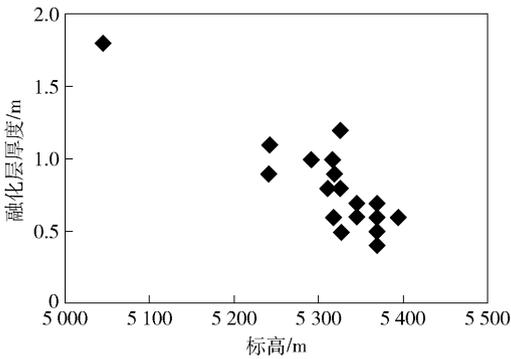


图1 永冻层埋深与标高关系

## 3 岩石冻融实验

通过露采边坡所取岩样在导热系数、比热和冻结温度、岩石循环冻融后的抗压强度、岩石冻结强度试验,分析岩石在冻融循环下的热物理、力学参数变化,揭示边坡岩体的冻融破坏的机制。

### 3.1 热物理参数试验

研究温度在岩石中的传导能力对岩石冻融深度至关重要,试验采用非稳定态法中的热线法测定岩样的导热系数与比热。实验表明,对同一个样品来说,其导热系数是随着温度降低而增大,其比热则是随着温度降低而减小,即温度越低,岩石的导热能力越强,所需的能量越多。实验结果见表1。

### 3.2 岩石冻融试验

对6种岩石在5种冻融循环次数后(分别为0、10、20、30、50次)进行常温下的饱和单轴压缩试验<sup>[6]</sup>。经试验分析,冻融循环次数对岩石的冻融损伤劣化影响非常明显,冻融循环次数越多,岩石劣化越明显。总体趋势随冻融循环次数的增加,强度逐渐降低。应力曲线如图2、图3所示。

## 4 冻融作用下边坡的安全稳定性分析

### 4.1 冻融边坡滑动模式分析

对该矿山边坡而言,处于多年的冻土区,边坡体

表1 不同岩体的热物理参数实验结果

岩石种类	含水率/%	导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	
		20℃	-25℃	20℃	-25℃
灰岩	0.04	3.16	3.19	624	602
闪长岩	0.11	2.37	2.41	667	634
花岗斑岩	0.05	2.10	2.12	627	612
花岗岩	0.08	2.24	2.29	635	609
砂卡岩	0.02	2.01	2.04	592	574
凝灰岩	0.13	3.63	3.65	594	577
灰岩	0.02	3.17	3.19	639	627
碎石土	21.04	1.38	1.62	765	738

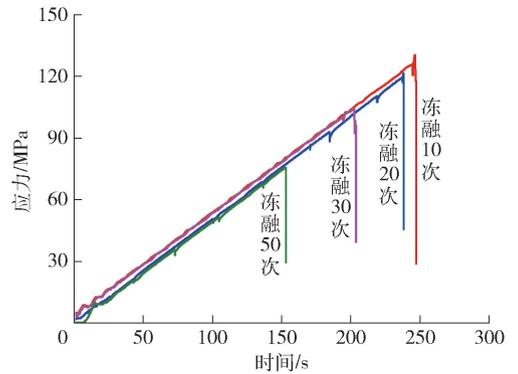


图2 不同冻融次数后的应力曲线(花岗斑岩)

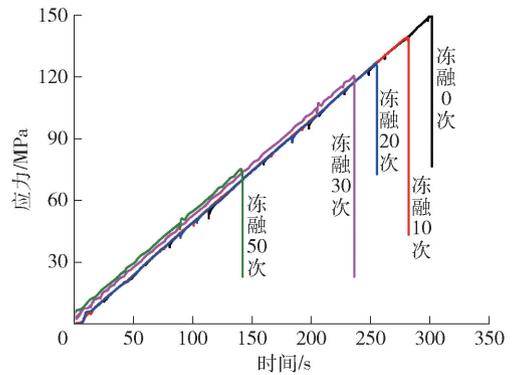


图3 不同冻融次数后的应力曲线(闪长岩)

上部覆盖有第四系土体及强风化岩体,冻融作用会导致部分第四系土体和强风化岩体内水融化而渗入到下部岩体内,由于多年冻土层具相对隔水性,对水的入渗不利,影响了边坡体稳定性仍是表层的岩体,其破坏模式为表层崩塌,对台阶表层稳定性的影响较重。

### 4.2 露天采场温度场分析

在热传导的过程中,岩体内各点的温度随着各点的位置和时间而变化,因而温度  $T$  是位置坐标和时间  $t$  的函数<sup>[7]</sup>。

$$q = -\lambda \nabla T$$

式中: $q$ ——热流密度;  
 $\nabla T$ ——温度梯度;  
 $\lambda$ ——导热系数。

通过了解岩石热传导的特征,模拟分析气温对裸露边坡岩石的影响深度及程度,进而为分析研究冻融作用对边坡稳定性的影响提供依据。

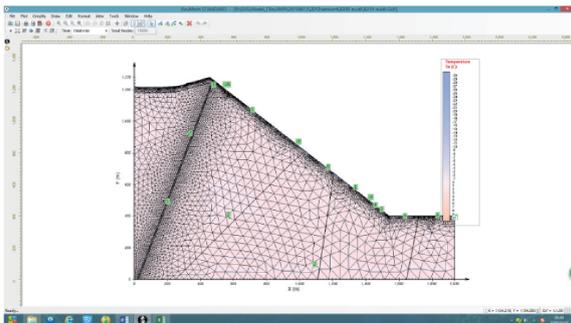
本工程采用 SVOoffice 软件建立了典型露天边坡模型,确立了四类边界条件,其中大地热流值参考青藏高原地区的多年经验值,取值  $0.048 \text{ W/m}^2$ 。

### 1) 分析方案

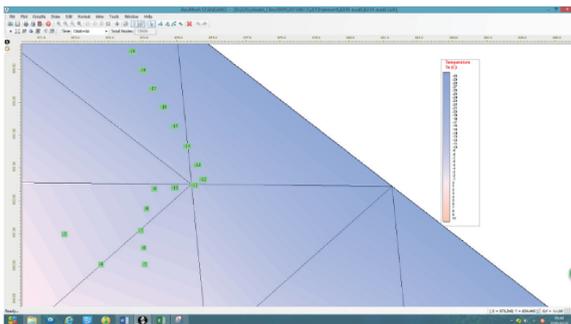
实验共分析了 4 种方案,分别为极端最低温、平均最低温、极端最高温、平均最高温,计算时步为 1 个月。通过输入密度、比热、导热系数等参数,准确计算热梯度、追踪冻结锋面。

### 2) 模拟结果

第一种方案中坡体上部凝灰岩的冻结深度最大值约为  $7.5 \text{ m}$ ;坡体中部花岗岩的冻结深度最大值约为  $6.9 \text{ m}$ ;坡体下部闪长岩的冻结深度最大值约为  $5.6 \text{ m}$ 。分析模型第一种方案计算结果如图 4 所示。



(a) 边坡整体计算结果



(b) 边坡局部放大结果

图 4 分析模型第一种方案计算结果

第二种分析方案结果,坡体上部凝灰岩的冻结深度最大值约为  $6.8 \text{ m}$ ;坡体中部花岗岩的冻结深度最大值约为  $5.5 \text{ m}$ ;坡体下部闪长岩的冻结深度

最大值约为  $4.5 \text{ m}$ 。

第三种分析方案结果,坡顶第四系土体及强风化层的融化深度的最大值约为  $6.4 \text{ m}$ 。

第四种分析方案结果,坡顶第四系土体及强风化层的融化深度的最大值约为  $5.5 \text{ m}$ 。

### 3) 结果分析

从温度场模拟分析结果看,极端条件下边坡温度场最大冻结深度均小于  $8 \text{ m}$ ,验证了冻融循环对表层稳定性的影响最为严重。

## 5 冻融影响下边坡的极限平衡分析

选取温度场模拟中的代表性边坡剖面,采用边坡稳定性的极限平衡分析,其岩土体物理力学参数值参照冻融后温度场指标,边坡剖面整体稳定性分析如图 5 所示,冻融前后边坡整体安全系数见表 2。

表 2 冻融前后边坡整体安全系数对比

分析剖面	状态	安全系数(简化 Bishop 法)		
		受力 I	受力 II	受力 III
B2 剖面	冻融前	1.306	1.072	1.053
	冻融后	1.246	1.020	0.999
C3 剖面	冻融前	1.335	1.103	1.083
	冻融后	1.306	1.078	1.054

考虑边坡在自重状况和地震状况下,即在受力 I、II、III 情况下,冻融后边坡整体安全系数较冻融前下降  $2.1\% \sim 5.2\%$ ,冻融对边坡整体稳定性存在一定的影响,主要对表层岩体的强度及完整性影响严重,温差浮动  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  左右时,影响深度大致在  $10 \text{ m}$  以内。

## 6 结论

(1)冻土层与海拔关系:高原高寒地区冻土层厚度与海拔高度不存在正相关性,冻土层厚度受松散岩土厚度、颗粒级配、含水量、坡向以及接受日照时间等因素影响。

(2)温度场对岩体影响:针对含水率较低弱风化岩体,当气温差浮动在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  左右时,岩体温度场最大影响深度及冻结深度小于  $8 \text{ m}$ ,冻融循环对岩体的弱化作用主要集中在浅部岩体。

(3)冻融循环对整体边坡的影响:在三种受力情况下,边坡整体安全系数较冻融前下降  $2.1\% \sim 5.2\%$ ,冻融循环对整体边坡稳定性影响较轻,对局部及浅部滑坡体影响较大。

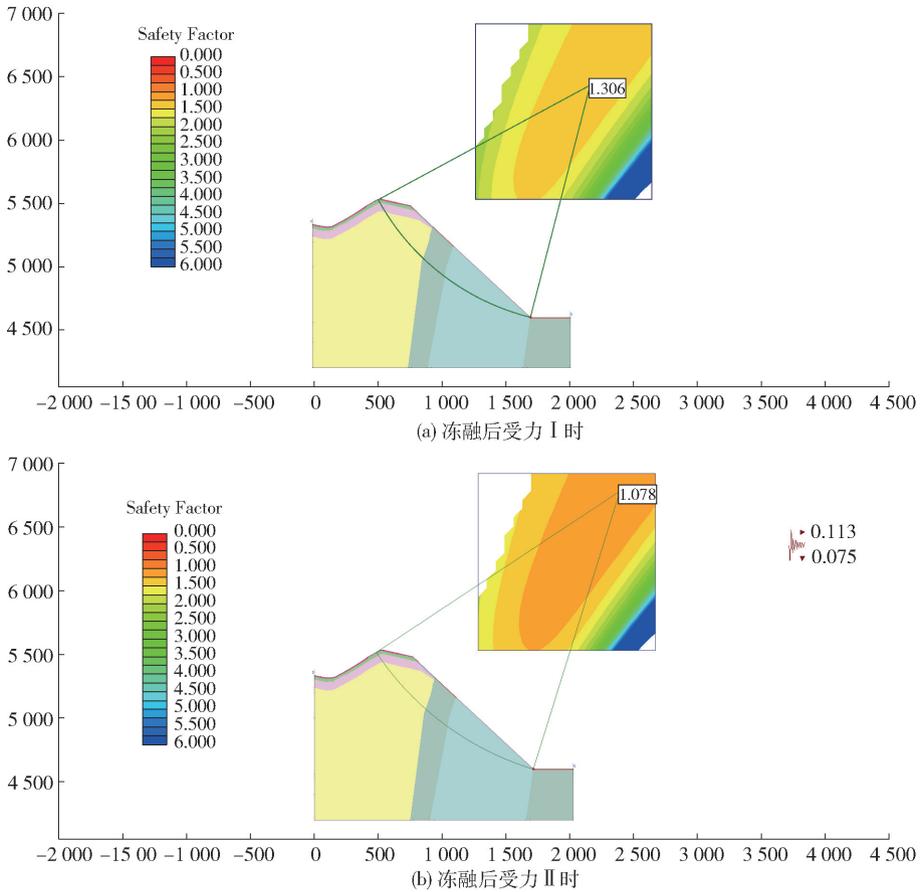


图5 C3边坡剖面整体稳定性分析图

[参考文献]

[1] 王澄海, 靳双龙, 施红霞. 未来 50 a 中国地区冻土面积分布变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 1-8.

[2] 宋恩来. 丰满大坝溢流面裂缝和渗水及冻融与冻胀对坝体结构安全影响分析[J]. 东北电力技术, 2008(2): 1-6, 24.

[3] 原思成, 张鲁新, 韩利民, 等. 青藏铁路冻土区环境问题对工程安全可靠影响[J]. 工程地质学报, 2006(4): 433-437.

[4] 牛富俊, 马巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程

热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.

[5] 徐拴海, 李宁, 王晓东, 等. 露天煤矿冻岩边坡饱和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2561-2571.

[6] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(17): 3076-3082.

[7] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001(3): 41-46.