

文章编号: 1000-4750(2017)05-0247-10

# 变温度区间冻融作用下 岩石物理力学性质研究及工程应用

闻 磊<sup>1,2</sup>, 李夕兵<sup>2</sup>, 唐海燕<sup>3</sup>, 翁 磊<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学工程力学系, 河北, 石家庄, 050043; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南, 长沙, 410083;

3. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南, 长沙, 410012)

**摘 要:** 利用取自西藏玉龙铜矿的花岗岩试样进行变温度区间的冻融循环实验, 分析饱水状态花岗岩在四种温度区间( $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ )冻融循环作用下的质量损失率、饱和吸水率、单轴抗压强度、弹性模量、峰值应变、泊松比、冻融系数。将实验结果应用于具体工程实例中, 采用强度折减法计算冻融循环对花岗岩边坡稳定性的影响程度, 分析边坡破坏模式, 并提出相应的防护措施。研究表明: 随着冻融温度下限的降低, 花岗岩试样质量损失率、饱和吸水率、峰值应变略有增大, 单轴抗压强度、弹性模量有所减小, 温度下限降低至 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下时, 花岗岩抗冻性由较好变为较差。温度区间是岩石冻融过程中影响其物理力学性质的重要原因, 该研究可为岩石冻融循环室内实验与寒区岩质边坡工程的有效结合提供参考。

**关键词:** 冻融循环; 温度区间; 岩石; 物理力学特性; 强度折减法

中图分类号: TU452 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.11.0921

## STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCK UNDER DIFFERENT FROZEN-THAWED CIRCLE TEMPERATURE RANGE AND ITS ENGINEERING APPLICATION

WEN Lei<sup>1,2</sup>, LI Xi-bing<sup>2</sup>, TANG Hai-yan<sup>3</sup>, WENG Lei<sup>2</sup>

(1. Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

3. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd, Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract:** The physico-mechanical behavior of granite (sampling from Tibet Yulong copper mine) has been investigated under different frozen-thawed temperatures in laboratory. The temperature range was classified into 4 groups:  $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$  and  $-40^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ . Mass loss rate, saturated water absorptivity, uniaxial compressive strength, elastic modulus, peak strain, poisson ratio and coefficient of freezing and thawing were measured. The lab results were used to evaluate the stability of the slope of the Yulong copper mine. And corresponding safety factors of the slope before and after frozen-thawed cycles were calculated and compared. The results show that the decrease of the temperature lower limit leads to larger mass loss rate, larger saturated water absorptivity of granite, and larger peak strain, but lower uniaxial compressive strength and lower elastic modulus. When the lower limit of temperature is below  $-30^{\circ}\text{C}$ , the frost-resistance of granite becomes worse. The temperature range is an important factor for the physico-mechanical characteristics of the rock under

收稿日期: 2015-11-20; 修改日期: 2016-05-04

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2017131); 国家自然科学基金项目(41272304, 11472311)

通讯作者: 闻 磊(1983—), 男(满族), 河北保定人, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学方面的教学与研究(E-mail: wl0921@126.com).

作者简介: 李夕兵(1962—), 男, 湖南宁乡人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事采矿工程与岩石力学方面的教学与研究(E-mail: xbli@mail.csu.edu.cn);

唐海燕(1973—), 女, 湖南安仁人, 工程师, 学士, 主要从事岩石力学方面的研究(E-mail: 535411618@qq.com);

翁 磊(1987—), 男, 湖北武汉人, 博士生, 从事岩石力学与采矿方面的研究(E-mail: wenglei08@gmail.com).

freezing-thawing cyclic effect. This study is useful for analyzing slope stability under the influence of freeze-thaw.

**Key words:** frozen-thawed cycles; temperature range; rock; physico-mechanical characteristics; strength reduction method

中国西部高海拔地区矿业工程数量不断增多, 规模不断加大, 高寒地区极端环境下的露采矿山岩质边坡稳定性分析已成为一项重要课题。近年来, 国内外针对岩石冻融进行了大量实验研究, 并取得了一定成果。文献[1-3]实验研究了孔隙率、饱水程度对岩石冻融损伤的影响; 文献[4-6]研究了应力状态和岩石的冻融损伤关系; 刘华等<sup>[7]</sup>对花岗岩和安山岩进行了循环冻融实验, 发现冻融过程中可能会出现负泊松比; Yavuz<sup>[8]</sup>对安山岩岩样进行冻融循环测试, 分析了安山岩的劣化情况; 杨更社等<sup>[9]</sup>对煤岩和砂岩进行了常温和不同冻结温度条件下的岩石三轴压缩试验, 研究了围压和冻结温度对岩石的影响规律。刘泉声等<sup>[10-11]</sup>对裂隙岩体冻融损伤进行了探讨。普遍认为, 水分迁移和水、冰相变引起的 9% 的体积膨胀以及内部矿物质产生的差异性收缩膨胀是导致岩石冻融损伤的主要原因。目前, 对变温度区间冻融循环作用下土的力学性质有了一定的研究<sup>[12]</sup>, 对混凝土冻融温度区间影响进行了相关实验<sup>[13]</sup>, 但岩石的冻融研究相对滞后, 对特定冻融温度区间岩石的物理力学性质研究较多, 对于变温度区间的岩石冻融研究极少。

随着计算机的快速发展, 数值模拟技术在边坡稳定性分析中的应用越来越普遍。目前采用数值计算方法模拟边坡冻融稳定性过程中, 一般将冻融交界面以上岩层视作同一种岩体, 直接赋予岩石冻融后的力学属性, 由此导致计算得到的边坡失稳滑移面基本是冻融交界面。但事实并非如此, 在寒区露采矿山岩质边坡失稳时, 大多仅是近表层风化岩石的滑移, 尤其对含水量大、软弱结构面发育的岩质边坡更为明显<sup>[14]</sup>。这是因为寒区冬季边坡冻结层温度随深度的增加而升高, 随着季节更替, 不同深度的岩石承受不同温度下限的冻融循环影响。因此, 在计算过程中, 将冻融交界面以上岩体赋予相同参数, 按相同冻融条件计算是不合理的, 应根据冬季冻结岩层温度梯度分布特征赋予不同岩体属性, 这是过去冻融影响下边坡稳定性分析常忽视的问题。由此可见, 岩石冻融循环室内实验成果在寒区露采边坡工程的应用仍存在一些问题, 简单的假设条件

导致了计算结果与工程实际存在偏差。变温度区间冻融循环作用下岩石物理力学性质研究是冻融作用下边坡稳定性分析的必要条件, 但目前对变温度区间冻融作用下岩石物理力学性质研究还很少。本次以寒区露采边坡岩层温度分布特征为出发点, 利用取自西藏的花岗岩试样进行变温度区间的冻融循环实验, 研究饱水状态花岗岩在四种温度区间 ( $-10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ) 冻融循环作用下的相关物理力学特征, 为变温度区间岩石冻融研究提供试验依据, 为西部高海拔地区露采岩质边坡稳定性研究提供参考。

## 1 试验方法和设备

本次岩石冻融循环试验过程参照了相关规程<sup>[15]</sup>。采用圆柱体试样, 直径约 50 mm, 高约 100 mm, 加工完成的部分岩样如图 1 所示。通过测量岩样的饱和吸水率及纵波波速, 选出 15 块物理指标相近的岩样, 将岩样分为 5 组, 每 3 块编为一组。第一组进行相关常温实验, 其余各组分别进行冻融温度下限为  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ , 温度上限为  $20^{\circ}\text{C}$  的冻融循环实验。试样采用真空抽气法强制饱水, 真空压力值为 0.1 MPa, 抽气时间为 6 h, 抽完浸泡 24 h。



图 1 部分岩石样本

Fig.1 Parts of the rock samples

试验主要测定饱水花岗岩试样不同温度区间冻融后的物理、力学性质。试验使用的仪器设备主要有: 低温箱、电热鼓风干燥箱、真空饱水设备、电子天平、岩石力学试验机等。单轴压缩试验是在 250 t 全数字型液压伺服刚性试验系统(MTS-815 型)上完成的, 实验加载和记录系统如图 2 所示。



图 2 加载测试和记录系统

Fig.2 Equipment of mechanics experiment

具体实验步骤如下:

- 1) 将试样进行编号, 对所有试样进行干燥, 测定岩石的纵波波速、质量; 对试样进行强制饱水, 计算出岩石的饱和吸水率等物理参数;
- 2) 选取饱和吸水率、纵波波速等指标相近的 15 块试样并分为 5 组, 3 块为一组;
- 3) 取第一组试样, 测得岩石的饱和单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数;
- 4) 取第二、三、四、五组试样, 分别进行温度下限为  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$  的冻融循环试

验。把饱水岩样放入恒温箱中冻结 12 h 后再放入  $20^{\circ}\text{C}$  的蒸馏水中融化 12 h, 每个冻融循环周期为 24 h, 测量岩石冻融 5 次、10 次、15 次后的饱和吸水率、质量损失率等物理指标。

5) 对冻融 15 次的试样进行力学实验, 测得饱水岩石的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数。

## 2 实验结果分析

### 2.1 饱和吸水率及质量损失率

按以上实验步骤测得不同冻融次数(0 次、5 次、10 次、15 次)后花岗岩岩样的干燥、饱水质量, 并由此计算得到岩样不同冻融次数后的饱和吸水率及质量损失率, 见表 1。不同冻融温度区间试样饱和吸水率、质量损失率随冻融次数的变化分别见图 3、图 4。本次使用的花岗岩试样平均初始干密度为  $2640.55 \text{ kg/m}^3$ , 饱和吸水率为 0.144 %。花岗岩的饱和吸水率及质量损失率普遍较小, 表明花岗岩的张开型孔隙数量少, 岩石较致密。

表 1 岩样的干燥及饱水质量

/g

Table 1 Quality of the rock samples under dry and saturated conditions

温度下限/ $(^{\circ}\text{C})$	岩样编号	0 次冻融		5 次冻融		10 次冻融		15 次冻融	
		干燥质量	饱水质量	干燥质量	饱水质量	干燥质量	饱水质量	干燥质量	饱水质量
-10	HG-6	523.05	523.76	522.51	523.82	522.50	523.96	522.50	524.02
	HG-17	522.88	523.68	522.38	523.71	522.36	523.85	522.35	523.86
	HG-9	509.65	510.39	509.12	510.47	509.09	510.51	509.09	510.53
-20	HG-4	523.59	524.37	523.04	524.42	523.00	524.60	523.00	524.68
	HG-11	520.84	521.58	520.28	521.71	520.24	521.77	520.17	521.82
	HG-18	513.20	513.92	512.70	514.07	512.66	514.12	512.60	514.21
-30	HG-1	525.72	526.52	525.18	526.60	525.09	526.91	525.03	527.02
	HG-13	526.30	527.04	525.70	527.18	525.62	527.40	525.57	527.52
	HG-14	521.53	522.28	520.91	522.37	520.79	522.59	520.73	522.55
-40	HG-2	513.98	514.69	513.39	514.85	513.27	515.08	513.19	515.09
	HG-7	521.41	522.21	520.80	522.32	520.70	522.55	520.65	522.65
	HG-16	525.39	526.12	524.81	526.32	524.70	526.50	524.67	526.61

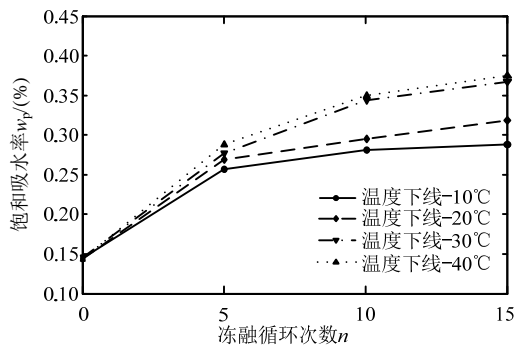


图 3 不同循环次数后岩样的饱和吸水率

Fig.3 Saturated water absorptivity vs freezing-thawing cycles

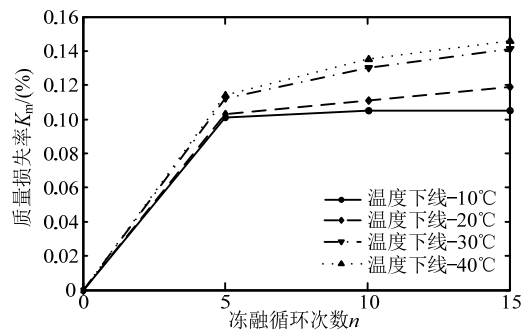


图 4 不同循环次数后岩样的质量损失率

Fig.4 Mass loss rate vs freezing-thawing cycles

随着冻融次数的增加, 岩石饱和吸水率逐渐增大, 温度下限越低, 饱和吸水率、质量损失率变化越大。试样在前 5 次冻融循环过程中, 饱和吸水率、质量损失率变化较明显, 之后变化趋于平缓。当温度下限为-10℃时, 冻融 5 次后, 岩样饱和吸水率增长极少, 质量损失率基本无变化。冻融 5 次后, 温度下限为-30℃与-20℃时岩样的饱和吸水率、质量损失率变化曲线更进一步分离, 说明温度下限为-30℃与-20℃时的多次冻融对岩石造成的损伤差别较大。而温度下限为-30℃、-40℃时, 饱和吸水率、质量损失率变化曲线则比较接近, 说明温度下限为-40℃与-30℃时的冻融对岩石造成的损伤差别相对较小。随着冻融次数的增加, 冻融温度下限越低, 微裂隙扩展程度越大, 微小颗粒脱落越明显。前 5 次冻融循环过程中试样裂隙扩展较迅速, 岩样表层微小颗粒脱落较多, 温度下限为-30℃、-40℃时裂隙扩展程度、微小颗粒脱落程度接近, 当温度下限为-10℃时, 冻融 5 次后, 微裂隙扩展、微小颗粒脱落趋于停止, 当温度下限为-20℃以下时, 冻融 15 次后, 微裂隙仍有微弱的扩展, 微小颗粒继续脱落。

在实际工程中, 以上实验结果可表现为, 冻融 5 个周期内冻融区域岩石微裂隙扩展较明显, 之后趋于平缓。近地表岩石冻结温度低于-20℃时, 经历 5 次冻融循环后, 微裂隙仍会继续扩展, 主要结构面的细小岩石颗粒逐步脱落, 造成表层岩石冻融风化强烈, 节理面张开度有所增大, 充填物风化变得更严重, 可能由硬质充填物变为软质充填物, 严重影响岩体整体强度, 而内部岩石虽也经历冻融作

用, 但温度下限较表层岩石高, 冻融风化作用较弱, 岩体质量降低程度较小。

2.2 力学性质变化

常温下, 对经历不同温度区间(-10℃~20℃、-20℃~20℃、-30℃~20℃、-40℃~20℃)冻融 15 次的花岗岩试样进行了单轴压缩试验, 部分岩样破坏照片如图 5(试样表面已变干燥, 因此颜色较浅), 典型应力-应变曲线如图 6, 试样冻融前、后实验结果见表 2。

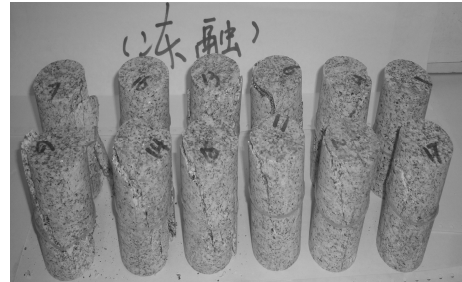


图 5 部分岩样破坏照片

Fig.5 Experimental pictures of rocks after uniaxial compression experiment

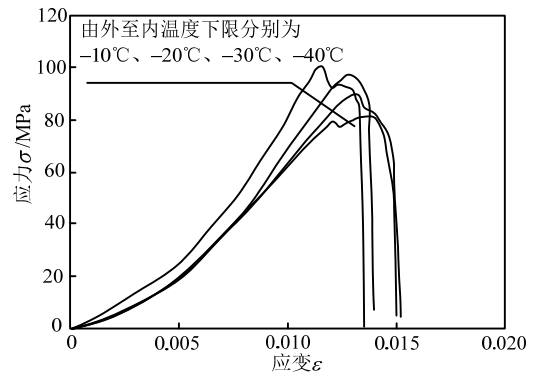


图 6 典型应力-应变曲线

Fig.6 Typical stress-strain curve

表 2 试样冻融前、后实验结果

Table 2 Experimental result before and after frozen-thawed circles

温度下限/(℃)	试样编号	单轴抗压强度/MPa		弹性模量/GPa		泊松比	
		实验值	平均值	实验值	平均值	实验值	平均值
冻融前	HG-101	126.12		50.66		0.17	
	HG-102	110.24	118.56	41.15	45.33	0.18	0.17
	HG-105	119.33		44.18		0.17	
-10	HG-6	100.02		40.98		0.19	
	HG-17	106.42	101.05	36.21	38.53	0.16	0.18
	HG-9	96.70		38.40		0.18	
-20	HG-4	98.58		38.37		0.21	
	HG-11	94.92	97.73	32.92	36.57	0.20	0.20
	HG-18	99.70		38.42		0.19	
冻融后	HG-1	84.70		30.20		0.23	
	HG-13	89.07	88.84	36.07	33.13	0.20	0.22
	HG-14	92.75		33.13		0.22	
-40	HG-2	87.49		32.42		0.23	
	HG-7	81.73	83.34	32.52	31.24	0.24	0.23
	HG-16	80.79		28.77		0.23	

1) 应力-应变曲线及单轴抗压强度

本次单轴压缩试验岩样全部为单斜面剪切破坏, 岩样应力-应变曲线的形状总体上是相似的, 呈脆性破坏特征。实验得到的应力-应变曲线分为 4 个阶段, 即压密阶段、弹性阶段、裂纹发展阶段、破坏阶段。冻融 15 次后, 随着温度下限的降低, 试样的应力-应变曲线压密阶段相对延长, 说明温度下限越低, 岩石在冻融过程中微裂隙的产生、扩展越显著, 岩石损伤越大。

相比未冻融岩石冻融 15 次后的岩石(温度下限 -10℃)单轴抗压强度减小了 17.5 MPa, 冻融前后岩石单轴抗压强度变化明显。温度下限由 -10℃降低到 -40℃(冻融 15 次), 岩样单轴抗压强度减小了 17.7 MPa, 相同冻融次数时, 随冻融温度下限的降低, 试样单轴抗压强度呈减小趋势。

通过 MATLAB 软件曲线拟合工具箱, 拟合出花岗岩单轴抗压强度与温度下限的关系式及关系曲线, 见图 7。

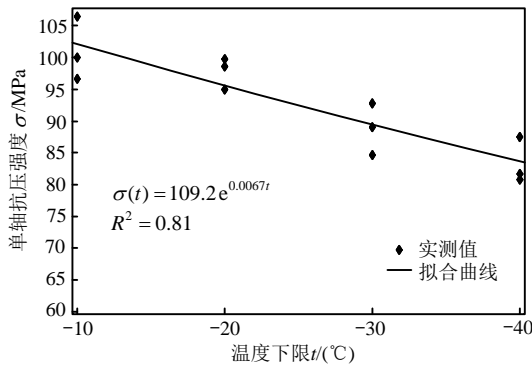


图 7 花岗岩单轴抗压强度与温度下限的关系式及关系曲线

Fig.7 Uniaxial compressive strength vs. temperature lower limit

2) 弹性模量

岩石冻融 15 次后(温度下限 -10℃)弹性模量减小了 6.8 GPa, 冻融前后岩石弹性模量改变较明显。相同冻融次数条件下, 随冻融温度下限的降低, 试样弹性模量逐渐减小, 温度下限由 -10℃降低到 -40℃(冻融 15 次), 岩样弹性模量减小了 7.3 GPa。

通过 MATLAB 软件曲线拟合工具箱, 拟合出花岗岩弹性模量与温度下限的关系式及关系曲线, 得到了岩样弹性模量随冻融温度下限的变化规律, 见图 8。

3) 峰值应变与泊松比

由岩石压缩试验结果可知, 岩样冻融 15 次后, 随着冻融温度下限的降低, 峰值应变呈增大趋势,

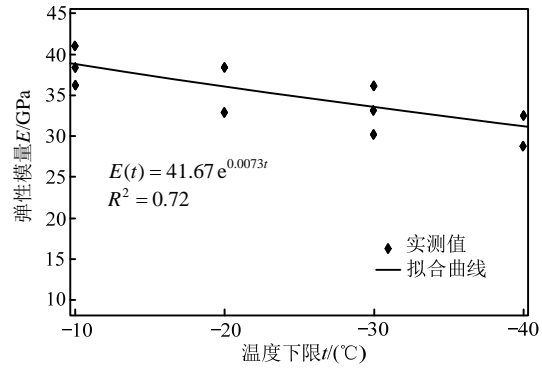


图 8 花岗岩弹性模量与温度下限的关系式及关系曲线

Fig.8 Elastic modulus vs. temperature lower limit

温度下限从 -10℃下降到 -30℃时, 峰值应变增大趋势明显, 增大了近 0.002, 温度下限从 -30℃下降到 -40℃时, 峰值应变变化相对较小。随着温度下限的降低, 岩样冻融损伤加剧, 内部微裂纹更加发育, 使得岩石应力-应变曲线压密段增长, 从而使得峰值应变增大。

岩石泊松比与岩石结构、颗粒成分、胶粒成分、胶结物、风化程度、围压大小等多种因素有关。岩石冻融后微裂隙扩展, 晶粒界面形成新的细观裂面, 岩石颗粒胶结程度发生变化, 冻融循环作用下, 随着冻融温度下限的改变, 岩石内部结构改变程度不同, 从而导致岩石泊松比变化程度不同。本次实验得到花岗岩泊松比随温度下限的降低略有增大, 通过 MATLAB 软件曲线拟合工具箱, 得到花岗岩泊松比与温度下限的关系式及关系曲线, 见图 9。由于泊松比的影响因素极为复杂, 本次实验仅能证明泊松比与冻融温度下限有关, 并不能完全证实泊松比的变化与冻融温度下限的改变具有很强的规律性, 岩石泊松比与冻融温度区间的关系仍需大量实验考证。

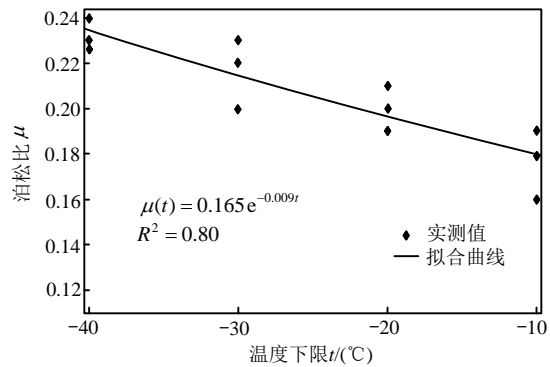


图 9 花岗岩泊松比与温度下限的关系式及关系曲线

Fig.9 Poisson ratio vs. temperature lower limit

依据图 7~图 9 岩石强度、弹性模量、泊松比

与温度下限的关系式可得到冻融影响下边坡不同深度岩层的力学特征,在边坡稳定性分析时,可在冻融范围内依据温度梯度分层赋予不同力学属性,为冻融影响下的边坡稳定性计算参数选取提供重要依据。

温度下限是冻融过程中岩石力学特性变化的重要因素。相同冻融次数时,随冻融温度下限的降低岩样的单轴抗压强度、弹性模量有所下降,峰值应变、泊松比有所增加。本次选用的花岗岩试样孔隙率较低,但在温度下限较低的冻融条件下抗压强度、弹性模量下降仍比较明显,这也证明岩样内部矿物颗粒差异性收缩膨胀是导致岩石冻融损伤的主要原因之一。岩石是矿物颗粒相互粘结在一起的聚集体,其内部存在大量的节理、裂纹,岩石冻融循环后,水冰相变产生的体积膨胀使其内部细小裂纹发生了扩展,同时,由于组成岩石的矿物晶体膨胀系数不同,冻融温度区间越大导致岩样内部矿物晶体变形越不协调,晶粒相互间发生更大的错动,受温度应力影响,晶粒界面的初始状态受到破坏,围绕晶粒界面形成细观裂面<sup>[16]</sup>,岩石内部损伤不断积累,孔隙水融化时会在其内部微孔裂隙中迁移,进而加速冻融损伤<sup>[17]</sup>,这是岩石在不同冻融温度区间产生力学特性差异的主要原因。

### 2.3 冻融系数

岩石抵抗冻融破坏的性质可以用冻融系数( $K_f$ )表示,冻融系数采用下式计算:

$$K_f = \frac{R_f}{R_s} \quad (1)$$

式中: $R_s$ 为冻融前饱和单轴抗压强度; $R_f$ 为冻融后饱和单轴抗压强度; $K_f$ 为冻融系数。

将表2中试样单轴抗压强度值代入式(1)中,可得到岩样冻融循环后的冻融系数值,具体计算结果见表3。

表3 岩样冻融系数

Table 3 Coefficient of freezing and thawing

冻融温度下限/(°C)	-10	-20	-30	-40
冻融系数	0.85	0.82	0.75	0.70

随着冻融温度下限的降低,试样抗冻性能普遍下降。一般认为,冻融系数大于75%的岩石为抗冻性较好的岩石<sup>[18]</sup>,在普通岩石冻融循环试验(冻融区间为-20°C~20°C)中,此类花岗岩抗冻性较好,而当温度下限降低至-30°C以下时,冻融系数低于75%,表明在此温度区间冻融条件下花岗岩抗冻性

较差。由此可推断出,在寒区此类岩体边坡,冬季冻结温度低于-30°C的岩层更易在季节更替过程中产生较明显的冻融风化现象。

## 3 工程实例分析

### 3.1 工程背景

长期冻融循环作用下,边坡岩体冻融损伤逐渐加剧,其强度不断下降,可能发生崩塌现象,在工程设计中须考虑长期冻融作用对边坡稳定性的影响。岩质边坡长期受到冻融循环作用会造成极大破坏,主要表现为边坡表层岩石崩塌、脱落<sup>[14,19-20]</sup>,尤其对含水量较大、软弱结构面发育的岩质边坡更为明显。低温下岩石的强度大于常温,且低温限制了水的流动,因此冬季寒区岩质边坡不易发生损坏。当温度较高时,边坡冻结岩石融化,易导致岩石崩塌,因此,一般采用冻融后非冻结岩石的参数进行边坡稳定性分析。

不同地域所处的纬度及海拔高度不同,气温年较差有所区别,区域冻融程度受地理位置特征影响明显。张瑞芳等<sup>[21]</sup>引入年均气温和气温年较差两个指标,结合各地区的地理特征对我国冻融程度进行了等级划分,将我国划分为强冻融区、中等冻融区、弱冻融区(含非冻融区)三大类。本次计算的边坡位于西藏地区,属于强冻融区,冻融特征为季节融化。

本次所选边坡位于西藏境内,最低海拔4560 m,属大陆性高寒山地气候,年最高气温19°C,最低气温-27°C,冻融层厚度约为2 m。花岗岩边坡高30 m,边坡平均坡度45°,本文以该花岗岩边坡为例进行分析。由于冻融循环过程的数值模拟分析很复杂,岩石冻融劣化的因素较多<sup>[19]</sup>,本次模拟将简化冻融过程,按冻融前后边坡不同岩体参数赋值计算,按岩体含水量最高且冻融次数较多等最不利条件考虑。为与第2节室内实验数据及结论相适应,数值计算模型从地表至边坡内部划分为4部分,依次为冻融区间-30°C~20°C的岩体;冻融区间-20°C~20°C的岩体;冻融区间-10°C~20°C的岩体;未冻融岩体。

### 3.2 边坡岩体质量评价

Bieniawski的RMR岩体质量分类法考虑的因素较全面,是岩体质量分级的常用方法。该分类法主要考虑5个指标,即完整岩石的强度、岩石质量指标、节理状态、节理间距、地下水条件,并根据边坡与节理方位的关系进行修正。本次采用该方法

对花岗岩边坡岩体进行质量评价。

通过对边坡新开挖面及受多年冻融风化面进行的详细工程地质调查发现,花岗岩边坡冻融风化岩体与新鲜岩体相比,节理长度及裂隙间距基本无变化,节理张开度、粗糙度变化较小,但节理充填物由平均小于 5 mm 的硬质充填物转化为平均大于 5 mm 的软质充填物,节理由微风化变为高度风化。

本次综合花岗岩力学试验结果、边坡岩体节理间距、节理状态及钻孔 RQD 值等因素,确定花岗岩 RMR 值。冻融前后岩体的 RMR 值见表 4(表中仅标明了冻融前后变化较大的评分指标)。根据第 2 节实验结果可知,温度下限为-10℃时,多次冻融循环后岩石单轴抗压强度下降明显,说明温度下限为-10℃时岩石已产生明显冻融损伤,因此温度下限为-10℃、-20℃、-30℃的节理状态均按软质充填、高度风化考虑。

表 4 冻融后岩体 RMR 分级结果

Table 4 RMR values after frozen-thawed circles

温度下限/(℃)	单轴抗压强度/MPa	充填物	风化程度	RMR 值	分级
未冻融	118.56	硬质	微风化	53	III
-10	101.05	软质	高度风化	45	III
-20	97.73	软质	高度风化	40	IV
-30	88.84	软质	高度风化	40	IV

花岗岩初始状态 RMR 值为 53,属中等质量岩体,温度下限为-10℃时 RMR 值有所下降,但仍属中等质量岩体,温度下限为-20℃、-30℃时 RMR 值为 40,岩体质量较差。

### 3.3 边坡稳定性计算

#### 1) 岩体力学参数的选取

岩体力学参数可依据 Hoek、Carranza-Torres 提出的岩体破坏经验准则确定,具体参数按照与 RMR 值相关的经验公式得到。Rocscience 公司的岩体力学参数分析软件 RocLab 正是基于这种原理开发的,本次利用 RocLab 软件进行岩石到岩体力学参数的转换,最终选取的岩体力学参数见表 5、表 6。

#### 2) 边坡稳定性系数分析

本次数值模拟软件选择目前岩土行业应用广泛的 FLAC<sup>3D</sup> 软件,利用强度折减法分析花岗岩边坡稳定性系数。强度折减法理论由 Duncan 提出,随着计算机性能的提高和众多商用软件的使用,强度折减法已成为解决岩土工程问题的一个有效方法<sup>[22-23]</sup>。强度折减法中,边坡安全系数定义为,岩土体的实际抗剪强度与折减后临界破坏时剪切强度的比值。强度折减法利用式(2)和式(3)来调整岩土

表 5 初始状态花岗岩岩体力学参数

Table 5 Mechanical parameters of rock before frozen-thawed circles

岩性	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	粘结力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)
花岗岩	6684	0.17	0.584	62.35

表 6 冻融循环后花岗岩岩体力学参数

Table 6 Mechanical parameters of rock after frozen-thawed circles

温度下限/(℃)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	粘结力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)
-10	4217	0.18	0.435	59.02
-20	3144	0.20	0.375	56.99
-30	2966	0.22	0.362	56.39

体的强度指标 C 值、φ 值,对边坡稳定性系数进行计算,逐步增大折减系数,并反复试算,直至达到临界破坏状态,此时得到的折减系数值即为安全系数 F<sub>s</sub>。

$$C_f = \frac{C}{F_{\text{trial}}} \quad (2)$$

$$\tan \varphi_f = \frac{\tan \varphi}{F_{\text{trial}}} \quad (3)$$

式中: C<sub>f</sub> 为折减后的内聚力; φ<sub>f</sub> 为折减后的内摩擦角; F<sub>trial</sub> 为折减系数。

本次按冻融风化深度 2 m 计算,边坡模型冻融区域每 0.66 m 划为一个分层,冻融温度区间分别为 -10℃ ~ 20℃、-20℃ ~ 20℃、-30℃ ~ 20℃,建立的 FLAC<sup>3D</sup> 网格模型如图 10 所示,图中,岩组类别 1、类别 2、类别 3、类别 4 分别表示冻融区间 -30℃ ~ 20℃、-20℃ ~ 20℃、-10℃ ~ 20℃ 及未冻融的岩体。模型的长、宽、高分别为 87 m、20 m、47 m。

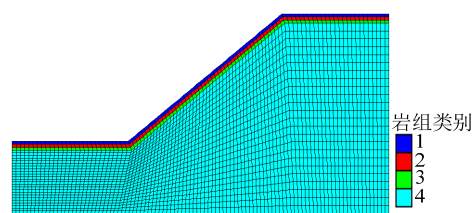


图 10 FLAC<sup>3D</sup> 网格模型

Fig.10 FLAC<sup>3D</sup> mesh model

计算过程中每一种岩体都视为各向同性的连续介质,仅考虑自重应力的作用,忽略地震波、爆炸冲击波等因素对岩体稳定性的影响。本次数值模拟采用表 5、表 6 所示的岩体力学参数,计算采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

忽略冻融循环对岩石热导率、比热的影响,外界温度设为与边坡冬季实际温度相近的 -30℃,模拟得到冬季边坡冻结岩层温度的近似分布特征,如

图 11 所示。温度随岩层埋深的增加递增,在埋深 2 m 处温度为 0℃。由此可见,边坡不同埋深处岩体承受的冻融温度区间不同,将边坡岩层按埋深划分为不同分层,分别赋予不同力学属性是符合实际情况的。

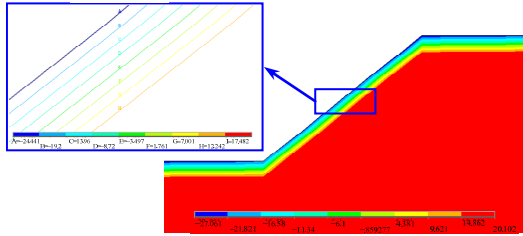


图 11 边坡冻结岩层温度分布图

Fig.11 Temperature distribution of frozen rock

根据数值模拟结果可知,冻融后岩体的粘聚力为 94 kPa,内摩擦角为 17°时,边坡达到极限平衡状态。由式(2)、式(3)得,花岗岩边坡冻融风化前稳定性系数为 6.2,冻融风化后稳定性系数为 3.8。冻融前后边坡稳定性均较好,但冻融后边坡稳定性系数降低近一半,冻融对边坡稳定性产生了显著影响。将边坡岩层按埋深划分为不同分层,分别赋予不同力学属性后,边坡失稳时的塑性区见图 12。边坡为表层岩体剪切破坏,产生表层岩体滑落,与实际情况吻合较好。

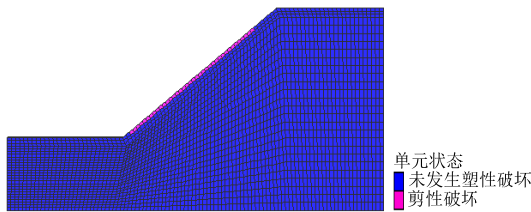


图 12 边坡失稳时的塑性区分布

Fig.12 Plastic zone distribution when the slope is instability

若以冻融深度 2 m 为界,将冻融交界面以上 2 m 范围内的岩体视为单一岩性,则边坡失稳滑移计算结果见图 13,边坡将沿着冻融交界面滑动,无法解释边坡表层岩体冻融滑移的情况。因此,按不同冻

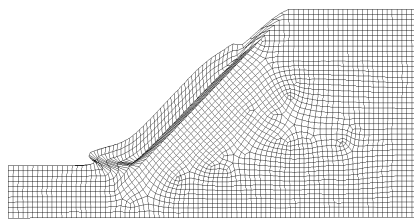


图 13 冻融范围内岩体视为单一岩性的计算结果

Fig.13 The calculated result when the rock is treated as single lithology in frozen-thawed scope

融温度区间分别赋予边坡岩体不同属性的计算方法与实际更为吻合,可很好的解释边坡表层滑移破坏模式。

### 3.4 冻融岩体边坡防护措施

若将冻融交界面以上岩体按同一种岩体考虑,直接赋予岩石冻融后的力学属性,计算得到的边坡失稳滑移面基本是冻融交界面,当冻融交界面埋深较深时,依据计算结果不可避免的会用到长锚杆甚至锚索进行边坡防护。当弄清寒区边坡岩体冻融失稳机理及表现形式后,针对边坡的表层滑移破坏模式制定防治措施的工程量将明显减少。针对金属矿山边坡表层冻融滑移的防治措施主要有柔性防护和刚性防护。

#### 1) 柔性防护措施

柔性防护系统一般由高强度钢丝绳、锚杆及其他附件组合而成。柔性防护允许整个系统有一定的变形,在边坡上打孔设置锚杆,将钢丝网固定在锚杆上,边坡柔性防护网系统具有高强韧性、高防护强度、易铺展性、施工灵活的优点。比如常用的 SNS 防护网适合松散且有一定轻微变形的浅层破坏岩质边坡,在寒区冻融边坡岩体防护中较适用。边坡柔性防护网克服了刚性防护工程量大、施工难度大等弊病,采用此类方法可缩短工期、节省施工费用,并且整个施工过程安全系数较高,对边坡岩体本身基本没有损坏。柔性边坡防护可分为两部分,即覆盖边坡裂隙岩体的主动防护网系统和拦截边坡滚石的被动防护网系统。实际工程中,可结合高寒地区地质、地形条件,选用不同型号的 SNS 防护网对边坡大面积表层软弱岩体进行综合防护。

#### 2) 刚性防护措施

边坡刚性防护一般是在边坡构筑浆砌石、混凝土或钢筋混凝土挡墙、锚杆或锚索框架梁、抗滑桩等方法进行加固处理。刚性防护一般用于边坡岩体强冻融风化的高边坡上。对于寒区冻融失稳边坡,使用锚杆框架梁,并在框架内喷射混凝土覆盖层不仅可以加固岩体,而且可以有效减缓边坡表层岩体的进一步冻融风化。采用锚杆框架梁加固岩体机理为:将边坡岩体作为支护体系的一部分,将表层不稳定岩体固定于深部冻融风化较弱的稳固岩体,通过增加正向压应力,提高浅层滑移岩体的摩擦力,增强滑移面的抗剪强度,遏制边坡岩体滑移,构筑一个由表及里的综合加固体系,保证边坡的整体稳定。



## 4 结论

利用取自西藏的花岗岩试样进行变温区间的冻融循环实验,得到花岗岩在不同温度区间冻融循环作用下的相关物理力学参数,并将实验结果应用于具体工程实例中,分析了冻融循环对花岗岩边坡稳定性的影响程度及破坏模式,得出以下结论:

(1) 随着冻融温度下限的降低,花岗岩试样质量损失率、饱和吸水率、峰值应变略有增大,单轴抗压强度、弹性模量有所减小,温度下限降低至 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下时,花岗岩抗冻性由较好变为较差。

(2) 在西部高海拔地区,冬季边坡冻结岩层温度随埋深的增加而升高,随着季节更替,不同埋深的岩层经历不同温度下限的冻融循环过程。温度区间是岩石冻融过程中影响其物理力学性质的重要原因,变温区间的冻融循环实验是冻融作用下边坡稳定性分析的必要条件。

(3) 根据本次边坡工程实例分析可知,冻融前后边坡稳定性系数变化明显,冻融对边坡稳定性产生了显著影响,边坡表层滑移破坏是寒区边坡冻融影响下失稳的主要形式。在边坡稳定性计算过程中,将冻融交界面以上岩体赋予相同参数进行分析是不合理的,根据边坡温度梯度分布特征将冻融区的岩体进行分层,随岩层深度赋予不同岩体属性进行建模计算,可很好的解释边坡表层滑移破坏模式,与实际吻合较好。

### 参考文献:

- [1] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermomechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1029—1034.
- [2] 吴刚,何国梁,张磊,邱一平.大理岩循环冻融试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(增刊1):2930—2938.  
Wu Gang, He Guoliang, Zhang Lei, Qiu Yiping. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Suppl 1): 2930—2938. (in Chinese)
- [3] 王俐,杨春和.不同初始饱水状态红砂岩冻融损伤差异性研究[J].*岩土力学*,2006,27(10):1772—1776.  
Wang Li, Yang Chunhe. Studies on different initial water-saturated red sandstones' different damaged extension under condition of frost and thaw [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1772—1776. (in Chinese)
- [4] 张先军,林传年,张俊兵.昆仑山隧道围岩冻融状况数值分析[J].*岩石力学与工程学报*,2003,22(增刊2):2643—2646.  
Zhang Xianjun, Lin Chuannian, Zhang Junbing. Numerical analysis of freezing-thawing state of surrounding rocks of Kunlunshan tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(Suppl 2): 2643—2646. (in Chinese)
- [5] 马静蝶,杨更社.软岩冻融损伤的水-热-力耦合研究初探[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(增刊1):4373—4377.  
Ma Jingrong, Yang Gengshe. Study on hydro-thermo-mechanical coupling of freezing-thawing damage of soft rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2004, 23(Suppl 1): 4373 — 4377. (in Chinese)
- [6] 徐光苗.寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.  
Xu Guangmiao. Study on mechanical characteristics of rock at low temperature due to freezing-thawing and multi-physical coupling problems of rock in cold regions [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [7] 刘华,牛富俊,徐志英,林战举,许健.循环冻融条件下安山岩和花岗岩的物理力学特性试验研究[J].*冰川冻土*,2011,33(3):557—563.  
Liu Hua, Niu Fujun, Xu Zhiying, Lin Zhanju, Xu Jian. Acoustic experimental study of two types of rock from the Tibetan Plateau under the condition of freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 557—563. (in Chinese)
- [8] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(2): 187 — 192. (in Chinese)
- [9] 杨更社,奚家米,李慧军,等.三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2010,29(3):459—464.  
Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, et al. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and frozen condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 459—464. (in Chinese)
- [10] 刘泉声,康永水,刘小燕.冻结岩体单裂隙应力场分析及热-力耦合模拟[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(2):217—223.  
Liu Quansheng, Kang Yongshui, Liu Xiaoyan. Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture freezed rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 217—223. (in Chinese)
- [11] 刘泉声,康永水,黄兴,徐朝政.裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J].*岩土力学*,2012,33(4):971—

- 978.
- Liu Quansheng, Kang Yongshui, Huang Xing, Xu Chaozheng. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 971—978. (in Chinese)
- [12] 韩春鹏, 何东坡, 贾艳敏, 程培峰. 变温度区间冻融循环下石灰改良路基土回弹模量衰减规律及原因解析[J]. *公路*, 2013, 9(9): 14—18.
- Han Chunpeng, He Dongpo, Jia Yanmin, Cheng Peifeng. The attenuation law and reasons analysis of lime modified subgrade soil resilience modulus on different Frozen-thawed circle temperature range [J]. *Highway*, 2013, 9(9): 14—18. (in Chinese)
- [13] 陆采荣, 戈雪良, 梅国兴, 刘伟宝. 冻融温度对水工混凝土抗冻性的影响[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(6): 228—232.
- Lu Cairong, Ge Xueliang, Mei Guoxing, Liu Weibao. Effect of low temperature on frost resistance of hydraulic concrete [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(6): 228—232. (in Chinese)
- [14] 刘欣欣. 季节性冻土地区边坡稳定性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013: 37.
- Liu Xinxin. The stability analysis of the slope in the seasonal frozen soil area [D]. Chong Qing: Chongqing Jiaotong University, 2013: 37. (in Chinese)
- [15] SL264-2001, 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- SL264-2001, Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering [S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese)
- [16] 张慧梅, 杨更社. 冻融荷载耦合作用下岩石损伤力学特性[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 161—165.
- Zhang Huimei, Yang Gengshe. Damage mechanical characteristics of rock under freeze-thaw and load coupling [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 161—165. (in Chinese)
- [17] 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, 24(17): 3076—3082.
- Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3076—3082. (in Chinese)
- [18] 李广杰. 工程地质学[M]. 长春: 吉林大学出版社: 102—105.
- LI Guangjie. *Engineering geology* [M]. Changchun: Jilin University Publishing House, 102—105. (in Chinese)
- [19] 陈玉超. 冻融环境下岩土边坡稳定性研究初探[D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 9.
- Chen Yuchao. Preliminary study on rock and soil slope stability under the freezing-thawing condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006: 9. (in Chinese)
- [20] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- Li Jielin. Experiment study on deterioration mechanism of rock under the conditions of freezing-thawing cycles in cold regions based on NMR technology [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [21] 张瑞芳, 王瑄, 范昊明, 等. 我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 24—28.
- Zhang Ruifang, Wang Xuan, Fan Haoming, et al. Study on the regionalization of freeze-thaw zones in China and the erosion characteristics [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 24—28. (in Chinese)
- [22] 夏世友, 张电吉, 夏亮, 等. 有限差分强度折减法求解边坡安全系数[J]. *武汉工程大学学报*, 2012, 34(4): 19—26.
- Xia Shiyu, Zhang Dianji, Xia Liang, et al. Strength reduction finite difference method for solving safety factor of slope [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2012, 34(4): 19—26. (in Chinese)
- [23] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 王敬林. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(3): 343—346.
- Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Shi Weimin, Wang Jinglin. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 343—346. (in Chinese)