

灰岩冻融循环的劣化规律研究

刘 晨¹, 于清杨¹, 王城斌¹, 宋泽宇¹, 杜博宇²

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省长春生态环境监测中心, 吉林 长春 130022)

摘要:基于岩石损伤理论推导了冻融循环作用下岩石的损伤劣化模型, 并采用冻融循环试验方式测试了后崴子隧道灰岩岩样冻融循环后的物理力学特征变化规律, 分析了其损伤劣化规律。获得了岩样的质量、纵波波速随冻融循环呈现先增后减的趋势, 单轴抗压强度持续减小, 弹性模量和峰值应变逐渐增大的结果。分析获得了冻融循环作用下灰岩总损伤变量与应变的关系, 冻融和载荷的共同作用会使总损伤加剧, 但损伤曲线表明耦合作用也可适当缓解这一影响, 且灰岩应变值趋于一致, 表明影响灰岩强度极限的主要因素可以不考虑冻融循环。

关键词:冻融循环; 劣化规律; 声波波速; 耦合劣化; 损伤模型; 灰岩; 隧道

中图分类号: P642.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)12-0080-06

Deterioration law of limestone freeze-thaw cycles

LIU Chen¹, YU Qingyang¹, WANG Chengbin¹, SONG Zeyu¹, DU Boyu²

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Changchun Ecological Environment Monitoring Center of Jilin Province, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Based on the rock damage theory, the damage deterioration model of rock under the freeze-thaw cycle is derived. The freeze-thaw cycle test method is used to test the physico-mechanical characteristics of the Houwaizi Tunnel limestone rock sample, and analysis is made of its damage deterioration law. The results show that the rock mass and the longitudinal wave velocity of increase first and then decreases with freezing-thawing cycle, the uniaxial compressive strength decreases continuously with freezing-thawing cycle, and the elastic modulus and peak strain increase gradually with freezing-thawing cycle. Through analysis, the relationship between the total damage variable and strain of limestone under the action of freezing-thawing cycle is obtained. The combined action of freezing-thawing and load will aggravate the total damage, the coupling effect will weaken the total damage, and the limestone strain values tend to agree that the number of freeze-thaw cycles is not the main factor affecting the strength limit.

Key words: freeze-thaw cycle; deterioration law; acoustic wave velocity; coupling deterioration; damage model; limestone; tunnel

我国东北地区分布着大量的季节性冻土区域, 修建在季冻区的公路、铁路隧道、桥梁等重要基础设施在运营期间由于季节更替、昼夜循环, 遭受着围岩冻胀的影响导致冻融破坏, 影响着隧道的安全运营。造成围岩冻融破坏的主要原因是岩体内的液态水随温度变化冻结成固态冰, 相变过程中岩体内部微观结构和宏观结构的变化导致围岩内部劣化。

目前国内外学者对岩石冻融循环后的物理力学特性及损伤劣化方面开展了一定的研究, 如徐光苗

等^[1-2]在 -20~20 °C 以及干燥和饱水环境下对岩样进行单轴及三轴试验, 分析了不同受力环境下岩石的破坏规律, 给出了波速、导热系数与温度之间的关系, 提出了分别代表砂岩和灰岩的冻融损伤模型; Yavuz 等^[3]对安山岩进行 20 次冻融循环及热冲击后发现岩样 P 波波速及施密特硬度降低, 并对试验数据进行多元回归分析, 建立了预测冻融循环后岩石参数的模型。Momeni, A 等^[4]在 300 次冻融循环后探究其对伊朗 Alvand 硬岩物理力学性质的影

收稿日期: 2019-09-28; 修回日期: 2019-11-27 DOI: 10.12143/j.tkge.2019.12.015

作者简介: 刘晨, 女, 汉族, 1994 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为隧道稳定性分析, 吉林省长春市西民主大街, liusir2013@sina.com。

通信作者: 于清杨, 女, 汉族, 1974 年生, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为数值方法, 吉林省长春市西民主大街, qingyang@jlu.edu.cn。

引用格式: 刘晨, 于清杨, 王城斌, 等. 灰岩冻融循环的劣化规律研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 80-85.

LIU Chen, YU Qingyang, WANG Chengbin, et al. Deterioration law of limestone freeze-thaw cycles[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 80-85.

响。贾海梁等^[5]利用不同周期的疲劳荷载模拟自然条件下的冻融循环,且周期应用顺序对损伤结果影响较大。唐江涛等^[6]利用 3 种岩石进行冻融循环,利用 X 射线光粉晶衍射试验等发现岩石内部矿物质成分的转化以及波速、质量和含水率等变化。Ghobadi 等^[7]利用伊朗砂岩进行冻融循环,分析其物理力学损失,并使用衰变函数模型统计崩解速率。张慧梅等^[8]从细观力学及宏观唯象角度出发探讨了冻融受荷岩石损伤模型。龙翔等^[9]利用循环冻融研究页岩内部裂隙损伤进而探究其热传效率。赵尚传等^[10]通过对混凝土的冻融耐久性进行测评研究其破坏机理。Al-Omari A 等^[11]利用灰岩在热应力、冷凝及冻融 3 种环境下研究了多孔结构内部损伤规律以及岩石表面剥落因素的影响。Zhong Zhou 等^[12]利用土-岩混合物进行冻融循环,并通过 PFC3D 实现混合物的细观模拟。Weng Fang 等^[13]通过引入冷却衰减模型探索应力应变特征参数解析表达。Dengxing Qu 等^[14]引入损伤修正系数酸性冻融下岩样损伤进行调整并建立相应本构方程。可以看出,目前国内外学者在岩石冻融损伤方面的研究不断进行,对损伤机理、物理力学性质和损伤影响条件等方面有所进展,但围岩冻融损伤复杂性高,针对不同研究区域影响条件更复杂,尤其是季冻区的围岩冻融循环的研究还远远不够。

本文基于现有的岩石损伤模型,建立针对吉林省季冻区后崴子隧道的冻岩损伤模型。通过对灰岩的冻融循环试验等物理力学实验,得到研究区域内灰岩的冻融劣化规律。

1 灰岩冻融损伤模型

Lemaitre 提出的应变等价理论中指出^[15]:在应变本构方程中任意损伤引起的通常应力可以无损材料中的有效应力代替,即:

$$\epsilon = \sigma / E' = \sigma' / E \quad (1)$$

式中: E 、 E' ——分别为无、有损材料的弹性模量。

因多数岩石具有初始破坏,实际的完整围岩弹性模量较难获得。张全胜等^[16]提出推广后的应变等价理论可知:

$$\sigma_1 A_1 = \sigma_2 A_2 \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 A_1 、 A_2 ——分别为岩石损伤后产生的两种损伤状态下的有效应力和面积。

则可推出其应变为:

$$\epsilon = \sigma_1 / E_2 = \sigma_2 / E_1 \quad (3)$$

式中: E_1 、 E_2 ——分别为岩石材料受力损伤后两种损伤状态下的弹性模量。

同样基于该原理,将围岩的初始损伤及冻融后的损伤分别定义为两种损伤状态。则

$$\sigma_0 A_0 = \sigma_n A_n \quad (4)$$

$$D_n = (A_0 - A_n) / A_0 \quad (5)$$

式中: D_n —— n 次冻融循环下的冻融损伤变量。

联立式(4)、(5)可得:

$$\sigma_n = \sigma_0 / (1 - D_n) \quad (6)$$

则两种状态下的应变为:

$$\epsilon = \sigma_0 / E_n = \sigma_n / E_0 \quad (7)$$

联立式(6)、(7)可得这两种损伤的本构关系分别为:

$$E_n = E_0 (1 - D_n) \quad (8)$$

$$\sigma_n = E_0 (1 - D_n) \epsilon_n \quad (9)$$

再次应用上述推导理论分别定义冻融、受荷损伤为两种损伤状态,可得岩样共同损伤下总的应力应变关系为:

$$\sigma_m = \epsilon_m E_n / (1 - D_p) \quad (10)$$

式中: D_p ——受荷损伤变量; σ_m 、 ϵ_m —— m 次冻融循环后的有效应力和应变。

由式(8)、(10)可得冻融受荷后的总损伤应力应变关系为:

$$\sigma_m = \epsilon_m E_0 / (1 - D_m) \quad (11)$$

其中:

$$D_m = D_n + D_p - D_n D_p \quad (12)$$

式中: D_m ——冻融受荷下岩石材料的损伤变量。

式(12)表明冻融与荷载两种作用对岩石材料的耦合劣化作用。

在这两种作用下,岩石材料结构发生微小变化,其宏观的性质变化可反映出内部微观的破坏程度。由式(8)可将岩石冻融损伤变量表示为:

$$D_n = 1 - E_n / E_0 \quad (13)$$

岩石内部微观结构并不均匀,其劣化程度主要与单元体内的缺陷有关,因单元体的强度受其影响,因此 D_p 与单元体损伤的应变存在如下关系:

$$\frac{dD_p}{d\epsilon_m} = \varphi(\epsilon) \quad (14)$$

式中: $\varphi(\epsilon)$ ——岩石材料在受荷过程中单元体的损伤率,反映了岩石的损伤程度,但依据杨天鸿等^[17]的理论,微观上的单元体没有损伤率,只有破坏与

否。岩石材料宏观强度的损伤即单元体的破坏的累积。

通过宁建国等^[18]的双参数的 Weibull 分布理论,由式(14)可得到受荷岩石的损伤方程为:

$$D_p = \int_0^{\varepsilon} \varphi(x) dx = 1 - e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m} \quad (15)$$

式中: m ——岩石材料损伤特征参数, $m = 1/\ln(\varepsilon_f E_0/\sigma_f)$; ε_f ——应变峰值。

代入式(12)、(13)可得到总损伤方程为:

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m} \quad (16)$$

由式(16)可知,总损伤变量 D_m 与冻融后的弹性模量、初始模量、岩石材料损伤特征参数、应变以及应变峰值有关,冻融后的弹性模量受冻融次数的影响。

2 灰岩冻融损伤的试验研究

2.1 试验设备

本次试验使用 MDF-40H105 型冻融箱,其温度范围为 $-10 \sim -40\text{ }^\circ\text{C}$;波速测试使用 RSM-SY6 型声波检测仪。

2.2 试验步骤

为尽可能模拟灰岩赋存条件,本次设计试验步骤如下^[19-20]:

(1)灰岩试件制作。选取后崮子隧道典型灰岩岩样,按照试验要求标准制作成灰岩试件 15 个,3 个一组。

(2)将试件放置 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重,冷却后测量所有试件的质量以及纵波波速。

(3)对所有试件进行强制真空饱水,测量饱和后试件的纵波波速、质量。

(4)将所有试件用保鲜膜包裹后放置于冰箱内进行冻融循环试验,并控制冻融温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,4 h 后取出置于常温下融化 4 h,一个冻融周期为 8 h。

(5)在冻融 0、2、5、10、20、30、40 次时,取样测量其质量,并对试样进行纵波波速试验。

(6)冻融后对 5 组试样分别进行单轴抗压强度试验,观察外观。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 外观损伤

冻融循环后不同结构、成分和强度的岩石表面

可能出现不同的岩样破坏,对应于表面颗粒之间连接较弱,表面有大量自由颗粒且孔隙率大的岩石会出现颗粒损失模式;矿物成分简单,孔隙率小,强度较高的岩石会出现片落现象;结构较致密,强度相对较高的层理岩体,出现裂纹^[21-23]。

本次试验通过对冻融循环过程中的岩样外观变化的观察,灰岩的表面变化较少,在冻融循环 30~40 次的时候,岩样表面出现了一部分片落现象(见图 1)。这是由于灰岩矿物成分单一,孔隙率小且强度比较高。经过 40 次冻融循环的情况下,灰岩岩样产生的损伤劣化对整个岩样的岩体结构影响较小。

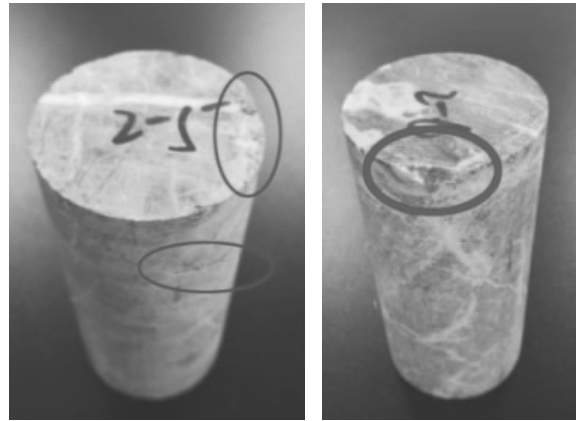


图 1 冻融 40 次后的岩样外观

Fig.1 Rock appearance after 40 cycles of freezing-thawing

2.3.2 质量变化

本次试验使用的天平精度为 0.01 g ,获得岩样质量分布范围为 $500 \sim 520\text{ g}$ 。冻融后即称量,不补充水分故不考虑水循环,由于材料之间的质量差较大,因此以质量变化量来说明。

由图 2、图 3 中可看出,整体上随着冻融循环次数的增加灰岩的质量先上升后下降。在冻融循环期间,质量变化率最大损失为 0.074% ,最大增量为 0.242% 。冻融循环早期的质量升高主要是由于岩石材料表层的微裂隙中的水结冰引起的冻胀力作用造成一部分表层的微孔隙发育,这样的扩展有利于水分渗透到岩石中。

经过 5~20 次的冻融循环后,灰岩的质量有明显的下降,这是由于冻融循环导致岩石损伤加剧,微孔隙进一步发育,水分不断转移,同时岩样表面的自由颗粒增多,水分转移消除了部分损失的质量。因此,在一定次数的冻融循环后,岩石经过较长时间的风化作用,自身的状态较不稳定,如此前期的变化和

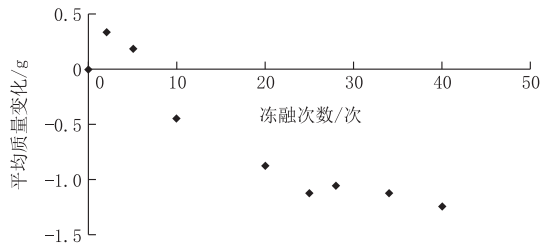


图 2 冻融次数对平均质量的影响

Fig.2 Effect of freezing-thawing times on the average mass

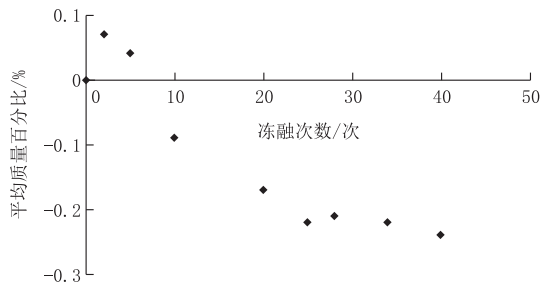


图 3 冻融次数对平均质量百分比的影响

Fig.3 Effect of freezing-thawing times on the average mass percentage

破坏在冻融循环的劣化作用趋势明显。但经过多次的冻融循环,岩样发生劣化后会达到新的较稳定状态,随着岩石对冻胀力的平均抗拉强度增加,质量损失率相应减小。

2.3.3 纵波波速试验

波速的大小反映了围岩的致密程度,从本质上来讲,波速的大小与岩石内部的孔隙、裂隙密切相关。冻融循环试验的岩石样品的劣化程度可以通过波速的变化间接地反映出来。从图 4 可以得出结论,试验进行中,岩样的纵波波速先增加,随后缓慢下降,这是因为前期的冻融循环使微空隙不断扩展贯通,其中又有水分逐渐填充空隙,波速上升;而在后期岩石完整性下降,波速降低。冻融 40 次后,材料波速损失为 36.63%。

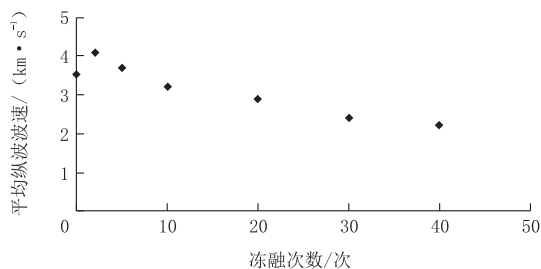


图 4 冻融次数对平均纵波波速的影响

Fig.4 Effect of freezing-thawing times on the average longitudinal wave velocity

2.3.4 单轴抗压强度试验

由图 5、图 6 可明显看出,岩样试件加载前期经过了裂隙闭合阶段,其间岩样内部的微空隙随着外力的增加而逐渐压密,这一阶段并不明显,切线斜率较大,主要由于原生裂隙较少;弹性变形阶段随着外力的增加表现出线性变化的特点。同时可看出,后期的破坏阶段随损伤加剧斜率变缓,并且随着冻融损伤程度变大,裂隙闭合阶段变长。30~40 次的峰值应力由于误差数据不明显。

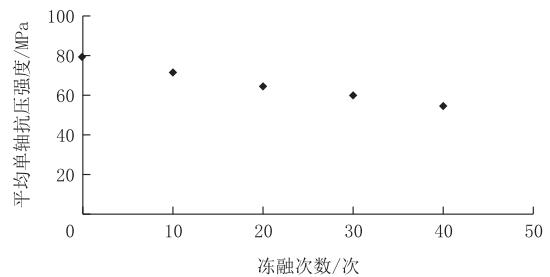


图 5 冻融次数对平均单轴抗压强度的影响

Fig.5 Effect of freezing-thawing times on the average uniaxial compressive strength

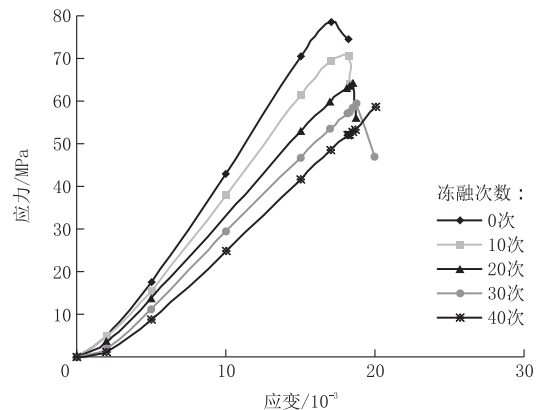


图 6 不同冻融次数的应力应变关系

Fig.6 Stress vs strain of different freezing-thawing times

3 灰岩的冻融损伤分析

根据前面得到的后崮子隧道灰岩单轴抗压强度试验实测值,利用式(16)来计算灰岩材料的冻融受荷总损伤变量 D_m 的演化曲线。首先需计算出岩石材料损伤特征参数 m ,取值公式即 $m = 1/\ln(\epsilon_t E_0 / \sigma_t)$ 。参数见表 1。

表 1 后崮子隧道灰岩岩石材料参数

Table1 Limestone parameters at Houwaizi Tunnel

岩性	峰值应变	m	E_0 / GPa	E_{10} / GPa	E_{20} / GPa	E_{30} / GPa	E_{40} / GPa
灰岩	0.01	1.83	7.980	6.747	5.956	5.415	4.980

通过表 1 参数计算出后崮子隧道灰岩总损伤变

量 D_m 与应变 ϵ 之间的关系见图 7。

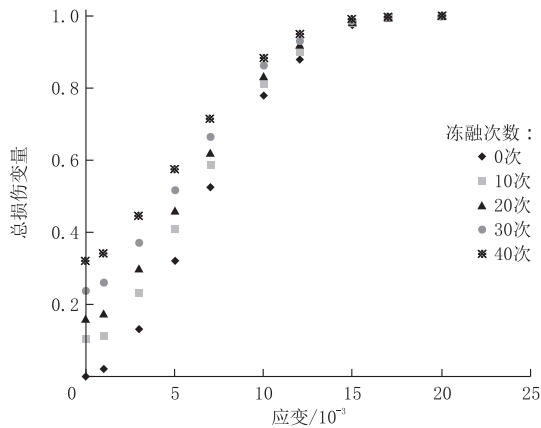


图 7 后崮子隧道灰岩总损伤变量与应变的关系
Fig.7 Total damage variable vs strain
of limestone at Houwaizi Tunnel

从图 7 中可以看出,同一冻融循环次数下,后崮子隧道灰岩总损伤变量随其应变的增大而增大。同一应变条件下灰岩的损伤变量与冻融次数呈正相关,相同损伤程度时,冻融次数与岩石应变量为负相关;在应变为 0 时,未经冻融循环的岩石无损伤变量,而经历多次循环后,灰岩的冻融损伤变量分别为 0.102、0.159、0.238、0.319。由图 7 可知未冻融灰岩在初始阶段即裂隙闭合阶段曲线较缓,推断内部孔隙裂隙少,岩样较为致密;随后的冻融循环加深了岩石材料孔隙裂隙的损伤率,使得初期裂隙闭合阶段曲线变陡,并且在每次冻融之后,由于冰的冻胀,裂缝增加并且水迁移导致岩石内的微孔隙裂隙增加。在岩石继续变形至破坏的过程中,岩石内微裂缝发育至汇合贯通,直至总损伤变量趋于 1,最终达到峰值破坏。但在较大应变情况下,无论循环次数为多少,其损伤变量及应变都逐渐趋近,此时其损伤变量趋近 1,说明在应变达到一定程度时,二者的耦合可适当缓解岩石的破坏,且表明冻融循环次数不是影响强度极限的主要因素,灰岩最终破坏。

4 结论

(1) 基于岩石损伤模型,推导建立了后崮子隧道灰岩内部细观层次上冻融-荷载耦合破坏机制模型。

(2) 测试了后崮子隧道灰岩岩样不同循环次数后的物理力学特征,分析发现:在冻融循环作用下,灰岩呈现出片落模式的冻融劣化,岩样的质量、纵波波速先增后减,单轴抗压强度持续减小,弹性模量和峰值应变则随冻融次数逐渐增大。

(3) 分析了冻融循环作用下后崮子隧道灰岩总损伤变量与应变的关系,冻融和载荷的共同作用会使总损伤加剧,但损伤曲线表明耦合作用也可适当缓解这一影响,同时灰岩应变值趋于一致表明冻融循环次数并非影响其强度极限的主要因素。

(4) 对岩石工程性质的研究主要基于室内试验,不能较好的模拟围岩岩体的周边环境,如果可以进行实地的原型比例模拟实验的话,将对围岩岩体的损伤研究和冻融循环过程有更直观更准确的研究结果。因此针对季冻区冻融围岩的研究还有很大的发展前景。

参考文献(References):

- [1] 徐光苗,刘泉声,彭万巍,等.低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2502-2508.
XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(12):2502-2508.
- [2] 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 study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(17):3076-3082.
- [3] H. Yavuz, R. Altindag, S. Sarac. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006,43(5):767-775.
- [4] Momeni A, Abdilor Y, Khanlari G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016,75(4):1649-1656.
- [5] 贾海梁,项伟,申艳军,等.冻融循环作用下岩石疲劳损伤计算中关键问题的讨论[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):335-346.
JIA Hailiang, XIANG Wei, SHEN Yanjun, et al. Discussion of the key issues within calculation of the fatigue damage of rocks subjected to freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(2):335-346.
- [6] 唐江涛,裴向军,裴钻,等.冻融循环作用下岩石的损伤研究[J].科学技术与工程,2016,16(27):101-105.
TANG Jiangtao, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Study on rock injured in freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(27):101-105.
- [7] Ghobadi M H, Babazadeh R. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015,48(3):1001-1016.
- [8] 张慧梅,杨更社.冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471-476.
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471-476.
- [9] 龙翔, 陈晨, 彭伟, 等. 油页岩试样在循环冻融条件下破裂实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 19-22.
LONG Xiang, CHEN Chen, PENG Wei, et al. Experimental study on oil shale samples fragmentation under freezing-thawing cycle[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3): 19-22.
- [10] 赵尚传, 鲁亚斌. 桥梁混凝土结构冻融耐久性无损检测评定[J]. 中国公路, 2017(10): 34-36.
ZHAO Shangchuan, LU Yabin. Non-destructive testing and evaluation of freeze-thaw durability of bridge concrete structures[J]. China Highway, 2017(10): 34-36.
- [11] Al-Omari A, Brunetaud X, Beck K, et al. Effect of thermal stress, condensation and freezing-thawing action on the degradation of stones on the Castle of Chambord, France[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(9): 3977-3989.
- [12] Zhong Zhou, Kai Xing, Hao Yang, et al. Damage mechanism of soil-rock mixture after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1): 13-24.
- [13] Wen Fang, Nan Jiang, Xuedong Luo. Establishment of damage statistical constitutive model of loaded rock and method for determining its parameters under freeze-thaw condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 31-38.
- [14] Dengxing Qu, Dengke Li, Xiping Li, et al. Damage evolution mechanism and constitutive model of freeze-thaw yellow sandstone in acidic environment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 174-183.
- [15] 张世文, 刘仓理, 李庆忠. 应变等价原理适用性探讨[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集(下册), 2009.
ZHANG Shiwen, LIU Cangli, LI Qingzhong. Discussion on the applicability of the principle of strain equivalence[C]//Proceedings of the Ninth National Conference on Impact Dynamics (Part 2), 2009.
- [16] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30-34.
- [17] 杨天鸿, 屠晓利, 於斌, 等. 岩石破裂与渗流耦合过程细观力学模型[J]. 固体力学学报, 2005, 26(3): 333-337.
YANG Tianhong, TU Xiaoli, YU Bin, et al. A micromechanical model for simulating the coupling of fracture and flow of rock[J]. ACTA Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(3): 333-337.
- [18] 宁建国, 朱志武. 含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J]. 力学学报, 2007, 39(1): 70-76.
NING Jianguo, ZHU Zhiwu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(1): 70-76.
- [19] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1775-1782.
SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1775-1782.
- [20] 周宇翔. 西藏高海拔地区冻岩冻融循环过程中劣化规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHOU Yuxiang. The deterioration law of frozen rock during freeze-thaw cycles in the Tibetan high altitude[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [21] 母剑桥, 裴向军, 黄勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 103-108.
MU Jianqiao, PEI Xiangjun, HUANG Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing action[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 103-108.
- [22] 吴洋. 冻融循环下类岩石材料强度、损伤及蠕变特性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
WU Yang. Study on strength, damage and creep characteristics of rock-like materials under freeze-thaw cycle[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [23] 张慧梅, 夏浩峻, 杨更社, 等. 冻融循环和围压对岩石物理力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 441-448.
ZHANG Huimei, XIA Haojun, YANG Gengshe, et al. Experimental research of influences of freeze-thaw cycles and confining pressure on physical-mechanical characteristics of rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 441-448.

(编辑 周红军)