

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.260>



冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律

汤明高, 许强*, 邓文锋, 陈旭, 周剑, 赵欢乐

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 为了探究川藏交通廊道沿线典型岩石冻融循环条件下的劣化规律, 选取昌都—林芝段的花岗岩、片麻岩和砂岩为试验对象, 开展冻融循环条件下岩石加卸荷试验, 结果表明: (1) 随着冻融循环次数的增加, 岩石抗压强度损失率达 30%, 粘聚力降幅达 18.4%, 内摩擦角降幅达 10.5%, 弹性模量逐渐下降, 泊松比逐渐增加; (2) 三轴压缩试验中, 岩样的变形模量呈现与抗压强度类似的劣化趋势, 但是变形模量的劣化幅度比抗压强度劣化幅度大; 冻融循环作用下岩石抗压强度越大劣化程度越低, 对砂岩的劣化最明显, 片麻岩次之, 花岗岩最小; (3) 与三轴压缩试验相比, 在卸围压试验中, 冻融循环作用对岩石的卸荷量同样有劣化作用, 卸荷程度较小时岩石劣化并不明显, 随着卸荷量的逐渐增加, 卸荷量大于 80% 时, 岩石的变形模量呈指数型下降, 泊松比呈指数型增加; (4) 随着冻融循环次数的增加, 三轴压缩试验中由拉张和剪切破坏造成的裂纹数量增多; 卸围压试验中岩石以拉张破坏为主; 岩石微裂纹数量增加的同时, 不平整度增加, 矿物颗粒之间的胶结状态变差; (5) 综合试验结果分析, 冻融作用对岩石劣化作用最强的为砂岩, 其次是片麻岩, 最弱为花岗岩。

关键词: 川藏交通廊道; 加卸荷试验; 冻融循环; 力学特性; 劣化规律; 岩土工程。

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2022)06-1917-15

收稿日期: 2021-09-26

Degradation Law of Mechanical Properties of Typical Rock in Sichuan-Tibet Traffic Corridor under Freeze-Thaw and Unloading Conditions

Tang Minggao, Xu Qiang*, Deng Wenfeng, Chen Xu, Zhou Jian, Zhao Huanle

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: In order to explore the degradation law of typical rock along Sichuan-Tibet traffic corridor under freeze-thaw cycles, granite, gneiss and sandstone of Changdu-Linzhi section of Sichuan-Tibet traffic corridor were selected as the test objects, and the loading and unloading tests of rock with different freeze-thaw cycles were carried out. The results show follows: (1) With the increase of freeze-thaw cycles, the loss rate of rock compressive strength is 30%, the cohesion decreases by 18.4%, the internal friction angle decreases by 10.5%, the elastic modulus decreases gradually, and the Poisson's ratio increases gradually. (2) In triaxial compression test, the deformation modulus of rock sample presents the degradation law similar to compressive strength. Freeze-thaw action has the most obvious degradation effect on sandstone, followed by gneiss and granite, which is proportional to

基金项目: 国家自然科学基金重大专项(No.41941019); 第二次青藏高原综合科学考察研究(No.2019QZKK0201).

作者简介: 汤明高(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害机理、评价预测及防治研究. ORCID:0000-0002-5890-9511. E-mail:tomyr2008@163.com

* **通讯作者:** 许强, 教授. E-mail:xuqiang_68@126.com

引用格式: 汤明高, 许强, 邓文锋, 陈旭, 周剑, 赵欢乐, 2022. 冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律. 地球科学, 47(6): 1917-1931.

Citation: Tang Minggao, Xu Qiang, Deng Wenfeng, Chen Xu, Zhou Jian, Zhao Huanle, 2022. Degradation Law of Mechanical Properties of Typical Rock in Sichuan-Tibet Traffic Corridor under Freeze-Thaw and Unloading Conditions. *Earth Science*, 47(6): 1917-1931.

the compressive strength of rock, and the degradation range of deformation modulus is larger than that of compressive strength. (3) Compared with compression test, in unloading confining pressure test, freeze-thaw cycle also has degradation effect on unloading amount of rock, and the rock degradation is not obvious when the unloading degree is small. With the gradual increase of unloading amount, when the unloading amount is greater than 80%, the deformation modulus of rock decreases exponentially and the Poisson's ratio increases exponentially. (4) With the increase of freeze-thaw cycles, the number of cracks caused by tensile and shear failure increases in triaxial compression tests. The rock of unloading confining pressure test is mainly tensile failure. When the number of micro-cracks increases, the degree of irregularity increases, and the cementation state between mineral particles becomes worse. (5) According to the comprehensive test results, freeze-thaw action has the strongest deterioration effect on sandstone, followed by gneiss, and the weakest is granite.

Key words: Sichuan-Tibet traffic corridor; loading and unloading test; freeze-thaw cycle; mechanical property; deterioration law; geotechnical engineering.

0 引言

青藏高原是世界屋脊,也是全球构造最活跃、气候最敏感、地表隆升最快、地形差异最大、岩体风化卸荷最剧烈的区域.川藏交通廊道起点为四川成都,途经雅安,西藏昌都、林芝,最终到达拉萨(潘桂棠等,2020;薛翊国等,2020;邓林等,2021).由于海拔高(平均海拔 5 000 m),地形陡峻(平均坡度 65°),昼夜温差大(-30 °C~50 °C),气候环境恶劣,岩体冻融及卸荷问题十分突出,因此导致斜坡失稳的灾害性事件时有发生,例如易贡滑坡(吕杰堂等,2003)、白格滑坡(许强等,2018)等.因此开展该区域冻融及加卸荷条件下岩石力学特性的劣化规律研究具有重要的理论和实践意义.

目前,相关学者在岩石冻融力学特性研究方面做了不少工作.在冻融作用对岩石力学特性的影响方面,大多数试验都通过岩石的单轴以及三轴压缩试验进行,Yamabe and Neaupane(2001)利用单轴压缩试验揭示了不同温度和围压条件下砂岩力学特性的变化规律;Bayram(2012)通过单轴抗压强度试验,建立了预测冻融后石灰岩强度的百分数损失值统计模型,但只适用于石灰岩.也有学者选取不同岩石进行冻融试验,研究岩石的力学特征与冻融循环次数的关系,如 Luo *et al.*(2014)通过对辉绿岩进行不同次数的冻融循环试验,得到了辉绿岩 P 波波速和质量随冻融次数的变化规律;Khanlari *et al.*(2015)对采自伊朗的典型红砂岩进行了室内和现场冻融循环试验,分析其物理力学性质随冻融循环次数的变化规律,这些冻融试验从宏观角度研究较多,比较零散,且在岩石力学特征研究方面还不全面.徐光苗和刘声泉(2005)从细观的角度,研究了孔隙率对岩石材料冻融劣化特征的影响,拟合得到

了岩石强度、变形参数与冻融循环次数之间的关系表达式;杨更社等(2002)以细观损伤力学为基础,建立了以 CT 数为函数的岩石冻融循环损伤变量.张慧梅和杨更社(2011,2013)进一步研究了冻融作用对岩石物理力学特征的影响,分析了岩石冻融损伤的机理以及损伤过程;张磊涛(2020)通过对砂岩进行不同冻融循环次数下的电镜扫描、三轴压缩以及卸载蠕变试验,分析岩石内部结构、力学性质和蠕变特性的变化规律,建立了冻融环境下红砂岩冻融-损伤蠕变模型;郎东明和李天成(2020)通过对岩石进行冻融循环试验,分析研究了冻融作用下岩石的强度损伤和能量演化,并以损伤等效原理 Weibull 分布理论为理论基础,建立了冻融作用下岩石的损伤本构模型;还有多位学者开展过单一岩石在冻融循环作用下的加卸载力学试验,如俞缙等(2015)、王乐华(2016)、朱珍德等(2018)等.综上所述可知,虽然学者们在岩石冻融力学特性的宏观和细观研究方面已取得不少认识,但对于冻融作用下岩石劣化的破坏机理和力学特性的变化规律仍然存在很多不明之处,特别是针对川藏交通廊道沿线典型岩石在冻融循环后的加、卸荷力学特性的变化规律研究甚少,缺乏对工程实践的指导.

昌都-林芝段是川藏交通廊道建设中难度最大的一段(图 1),沿线地层从元古界到第四系的地层均有出露(郭长宝等,2020).杜世回(2019)统计了昌都-林芝段的主要岩性的分布,包括砂岩、片麻岩、花岗岩、片岩和灰岩等岩石.本文通过对昌都-林芝段的典型岩石分布的统计发现,占比最大的 3 类岩石为:花岗岩(占比约为 22%)、片麻岩(占比约为 19%)、砂岩(占比约为 16%).因此,本文以这 3 类典型岩石作为研究对象,通过三轴加、卸荷试验对冻融损伤后岩石的力学特性的劣化规律进行研究,

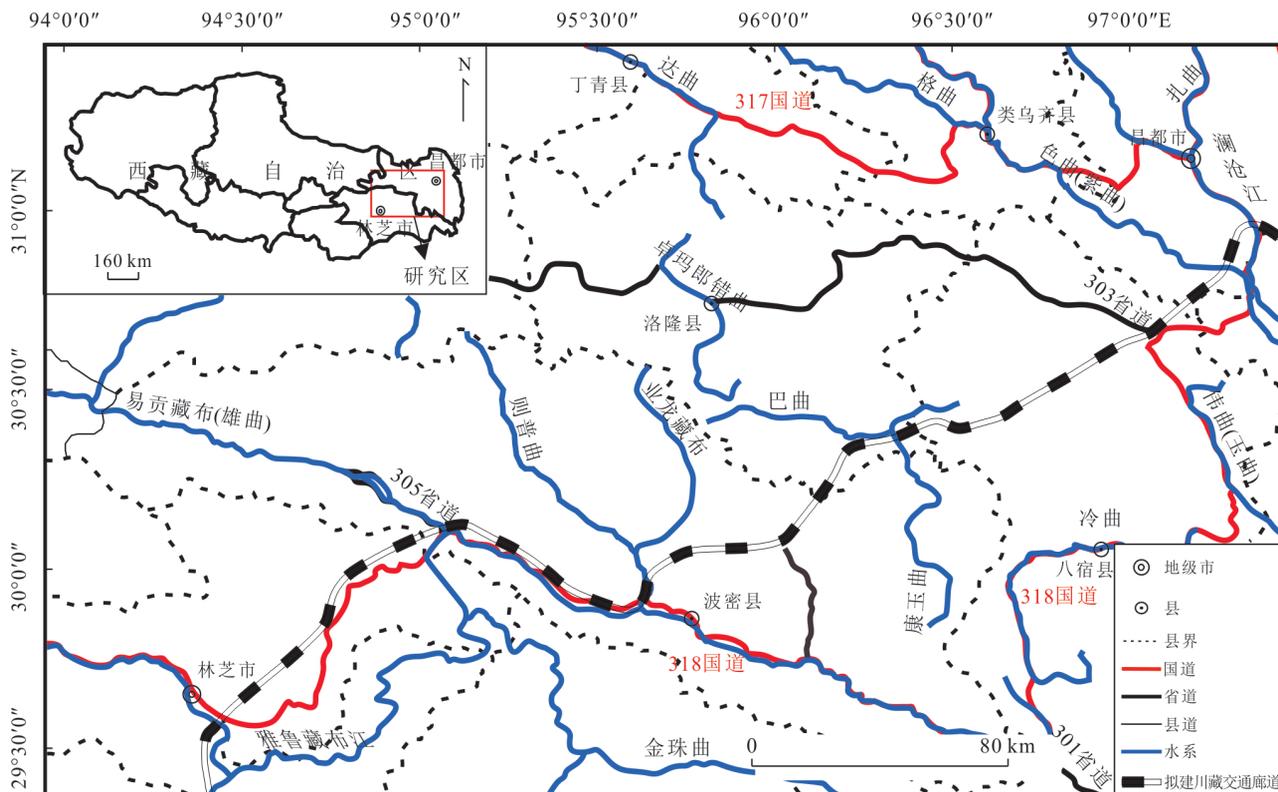


图 1 川藏交通廊道昌都—林芝段交通位置

Fig.1 Traffic location map of Changdu-Linzi section of Sichuan-Tibet traffic corridor

旨在揭示岩石冻融损伤后的力学参数变化规律以及破坏特征机理,为川藏交通廊道沿线高寒山区边坡稳定性评价及灾害防治提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试样选取

岩石分别采取于西藏自治区林芝市巴宜县的花岗岩(经纬度:94°34'32.31",29°33'49.08")、林芝市波密县的片麻岩(经纬度:95°3'58.28",30°5'51.44")、林芝市波密县的砂岩(经纬度:96°1'59.23",30°3'22.32"),均为弱风化—新鲜岩石,通过 X 射线衍射技术对试样矿物成分进行了分析,岩石主要矿物成分如表 1,经测定岩石的含水率参数如表 2 所示。

1.2 试样制备

根据国际岩石力学学会的岩石三轴力学试验标准进行制样,试样为圆柱体,高度(h)为 100 mm、直径(d)为 50 mm,高径比(h/d)为 2:1,试样高度、直径误差不超过 0.3 mm,两端面的不平行度最大不超过 0.05 mm,端面垂直试件轴的偏差不得超过 0.25°。对于满足标准的岩样,再进行声波测速,按照“波速相近”的原则选取试样。

表 1 各岩石主要矿物成分

Table 1 Main mineral components of each rock

岩性	主要矿物	含量(%)
花岗岩	石英	83.2
	方解石	3.2
	高岭石	11.6
片麻岩	石英	34.6
	钠长石	32.6
	伊利石	31.5
砂岩	石英	12.1
	钠长石	59.0
	伊利石	25.8

表 2 各岩石含水率参数

Table 2 Water content parameters of each rock

岩性	花岗岩	片麻岩	砂岩
天然含水率(%)	1.6	1.5	2.8
饱和含水率(%)	3.1	3.8	5.1

1.3 试验设备

本次试验的主要仪器有 JA31002 型电子天平(精度为 0.01 g)、电子数显游标卡尺(测试岩样规格)、电热鼓风干燥箱、RSM-SY7 型超声波自动循

测仪、全自动冻融测试箱、S-3000N型扫描电镜系统和MTS815岩石高温高压刚性试验机等。

1.4 方案设计

每种岩性岩样采用相同的试验方法,每种岩性分8组进行试验,例如花岗岩分别为A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7和A8,每种岩性24个试样。首先将岩样进行抽真空饱水,然后进行冻融循环试验,冻结时间为4 h,冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后在 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下解冻4 h,每8 h为一个冻融循环,将A1、A2、A3和A4进行饱水后分别冻融0次、30次、60次和90次,将冻融后的试样进行三轴压缩试验;对A5、A6、A7和A8饱水后冻融循环0次、30次、60次和90次,在进行三轴卸围压试验。每组3个岩样,分3 MPa、6 MPa、9 MPa三个围压下进行三轴压缩和卸围压试验,表3为试验分组情况。

将冻融循环后的岩样放入三轴试验机中,在试验过程中,首先采用应力控制式的加载方式,以 0.1 MPa/s 的速度加载轴压和围压,至围压达到设定值,然后保持围压不变,采用应变控制式,以 0.1 mm/min 的速度加载轴压(σ_1),至岩样发生破坏,记录岩样破坏的应力应变曲线。

三轴卸围压试验采用的围压值与三轴压缩试验相同,加载围压达到设定值(3 MPa、6 MPa、9 MPa),然后保持围压不变,以 0.1 MPa/s 的速度加载轴压,加载至相同围压条件下岩样三轴压缩强度值的70%~80%,再保持轴向压力不变,以 0.1 MPa/s 的速度卸载围压(σ_3)至岩样发生破坏,记录岩样破坏过程的应力应变曲线,其余试验步骤与三轴压缩试验相同。

表3 试验分组
Table 3 Test groups

试验方法	冻融循环次数(n)	岩组编号及数量	岩样规格(mm)
三轴压缩	0	A1(3个)	圆柱 50×100
	30	A2(3个)	
	60	A3(3个)	
	90	A4(3个)	
卸围压	0	A5(3个)	
	30	A6(3个)	
	60	A7(3个)	
	90	A8(3个)	

注:片麻岩、砂岩试验分组以B、C开头,试验分组类似。

2 冻融后岩石加荷力学特性劣化规律

2.1 冻融试验下岩石力学特性

根据研究结果表明,随着冻融循环次数的增加,岩石的力学特性会出现不同程度的下降,本文通过三轴实验的处理,计算出3种岩石经历冻融循环劣化后的内摩擦角以及粘聚力数值,统计结果如表4,变化趋势如图2。

由实验结果可知各岩性试样的粘聚力和内摩擦角随着冻融循环次数的增加均呈下降趋势。在冻融循环90次后,花岗岩粘聚力下降了 0.52 MPa ,内摩擦角下降了 1.66° ;片麻岩的粘聚力下降了 2.13 MPa ,内摩擦角下降了 3.79° ;砂岩粘聚力下降了 1.53 MPa ,内摩擦角下降了 6.04° 。砂岩的粘聚力和内摩擦角下降幅度较大,片麻岩次之,花岗岩的粘聚力和内摩擦角下降幅度较小,总体而言,冻融循环90次后,粘聚力的降幅在 $6.0\%\sim 18.4\%$,内摩擦角的降幅在 $3.2\%\sim 10.5\%$ 。其中,片麻岩在冻融循环30次的粘聚力和内摩擦角变化趋势有所不同,笔者认为这是个别试样误差所导致,不影响整体趋势。

2.2 岩石抗压强度劣化规律分析

为了定量分析冻融作用对岩样力学特性劣化规律,特对选取3种岩样破坏时的峰值强度进行了统计,图3为3种岩石的峰值强度随冻融循环次数的变化曲线。

为了更好分析加荷阶段冻融作用对岩样力学特性的影响,定义冻融作用下破坏时峰值强度 σ 的累积降低幅度为总劣化度 D_n ,单次冻融试验造成的峰值强度降低幅度为单次劣化度 ΔD_n ,计算公式如下(Fang *et al.*, 2019; 邓华锋等, 2021):

$$D_n = (\sigma_0 - \sigma_n) / \sigma_0 \times 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta D_n = (D_n - D_{n-1}), \quad (2)$$

式(1)~(2)中, σ_0 为0次冻融循环下的峰值强度, σ_n 为 n 冻融循环下后的峰值强度,各围压下不同冻融循环次数下的岩石劣化度如表5所示。

分析可知,在同围压下,3种岩石中砂岩的峰值强度最大,片麻岩次之,花岗岩峰值强度最小,随着冻融循环次数的增加,岩石的峰值强度逐渐下降;根据岩石劣化情况分析,同围压下每种岩石的劣化度随冻融循环次数增加,冻融作用对砂岩的劣化最明显,片麻岩次之,花岗岩最小,与岩石的抗压强度成正比,抗压强度越大,劣化作用越明显;冻融作用

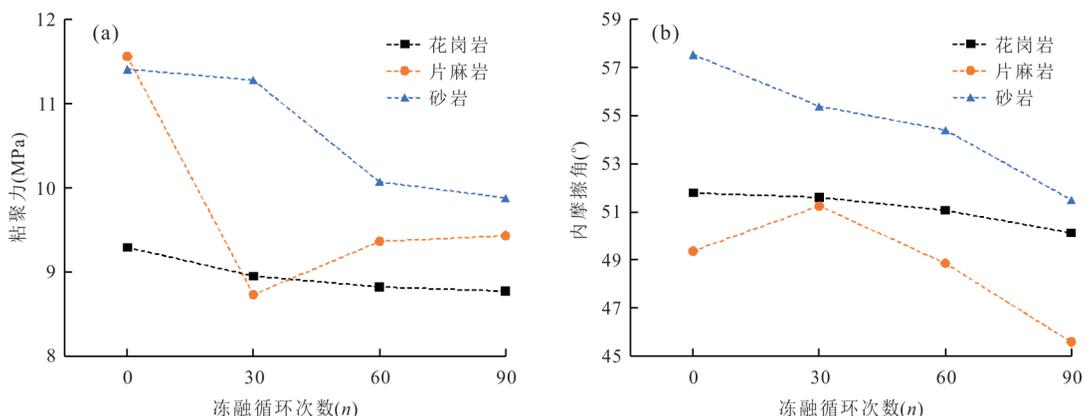


图 2 抗剪强度参数随冻融循环次数变化曲线

Fig.2 Curves of shear strength parameters versus freeze-thaw cycles

a. 粘聚力变化趋势; b. 内摩擦角变化趋势

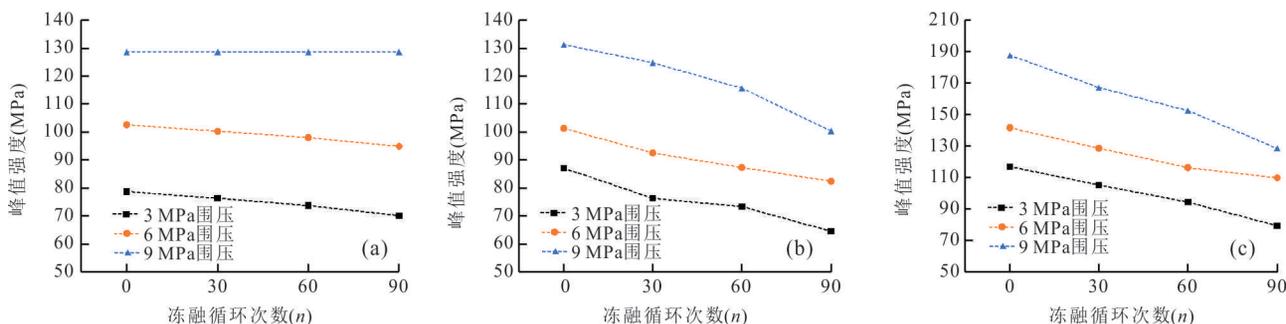


图 3 加载试验峰值强度随冻融循环次数变化曲线

Fig.3 Curves of peak strength of loading test changing with freezing-thaw cycles

a. 花岗岩; b. 片麻岩; c. 砂岩

表 4 岩石的粘聚力和内摩擦角参数

Table 4 Parameters of rock cohesion and internal friction angle

岩性	参数	冻融循环次数(n)			
		0	30	60	90
花岗岩	粘聚力(MPa)	9.29	8.95	8.82	8.77
	内摩擦角(°)	51.78	51.60	51.06	50.12
片麻岩	粘聚力(MPa)	11.56	8.73	9.36	9.43
	内摩擦角(°)	49.37	51.24	48.86	45.58
砂岩	粘聚力(MPa)	11.41	11.28	10.07	9.88
	内摩擦角(°)	57.54	55.39	54.40	51.50

对岩石抗压强度的单次劣化作用(即单次劣化度 ΔD_n),与冻融循环次数相关性较小,例如,在 3 MPa 围压下,花岗岩冻融循环 30 次后,花岗岩单次劣化度 ΔD_{30} 为 3.0%,再冻融 30 次后,即累计冻融循环 60 次后,单次劣化度 ΔD_{60} 为 3.3%,再冻融 30 次后,即累计冻融循环 90 次后,单次劣化度 ΔD_{90} 为 4.3%。冻融作用对岩石的劣化度与围压的大小相关性也较小。

表 5 冻融后岩石的劣化度情况

Table 5 Degradation of rocks after freezing and thawing

破坏围压(MPa)	岩性	冻融循环 n 次后的劣化度(%)		
		30	60	90
3	花岗岩	3.0	6.3	10.9
	片麻岩	12.4	15.8	26.0
	砂岩	10.3	19.3	32.2
6	花岗岩	2.2	4.5	7.5
	片麻岩	8.7	13.8	18.6
	砂岩	9.2	17.9	22.5
9	花岗岩	2.3	5.5	10.1
	片麻岩	5.0	11.9	23.5
	砂岩	11.0	18.8	31.6

2.3 岩石变形特性劣化规律分析

2.3.1 应力—应变曲线分析 由于试验数据过多,碍于篇幅的限制,下文以花岗岩的数据做分析,图 4 为花岗岩在不同围压和冻融循环次数下的应力—应变曲线。由图 4 可得不同冻融循环条件下的花岗岩应力—应变曲线可明显地分为 4 个阶段:压密阶

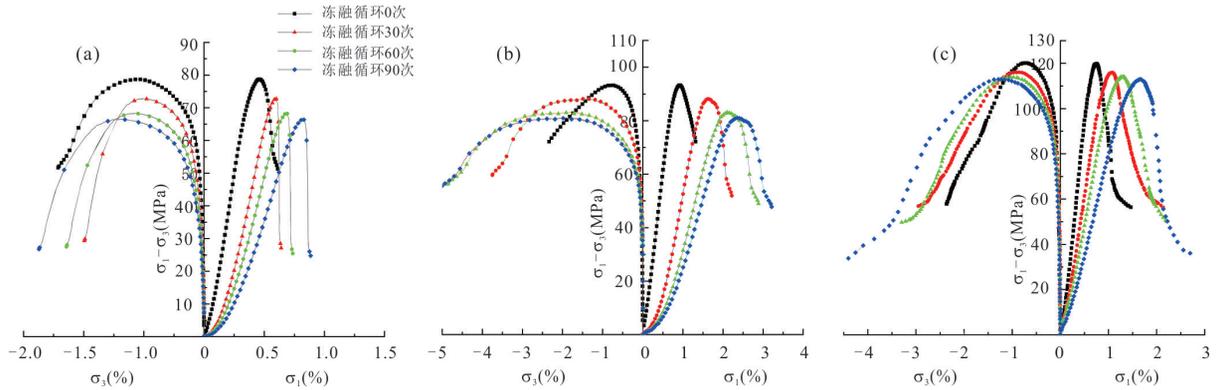


图 4 不同冻融循环次数下花岗岩应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of granite under different freeze-thaw cycles

a. $\sigma_3=3$ MPa; b. $\sigma_3=6$ MPa; c. $\sigma_3=9$ MPa

段、弹性变形阶段、屈服阶段和峰后破坏阶段。在相同围压下,随着冻融循环次数的增加,试样的压密阶段更长,峰值应变更大,峰值强度减小。笔者认为随着冻融循环次数的增加,岩样内部受到热胀冷缩变形和冻胀应力,岩石内部裂隙逐渐扩展,但裂隙扩展方向由岩样内部原生裂隙的方向决定,总体而言,内部裂隙的扩展导致了岩石压密阶段的变形和峰值应变增大。随着围压升高,试样的峰值强度和峰值应变逐渐增大,试样破坏后表现出一定的延性,但冻融循环作用对岩石延性和脆性影响并不明显,且在相同的围压下,随着冻融循环次数的增加,试样的屈服阶段有增长的趋势。

片麻岩、砂岩的应力—应变曲线变化规律与花岗岩相似,但砂岩在强度达到峰值之后,应力迅速跌落如图 5 所示(以围压 $\sigma_3=3$ MPa 为例),表现出更强的脆性破坏特征,未出现随着围压的增加表现出的延性破坏特征,可能是由于砂岩强度较大,9 MPa 围压未达到其临界围压,故未表现出延性破坏特征。

2.3.2 变形参数分析 冻融作用下花岗岩变形参数劣化规律如图 6 所示,随着冻融循环次数的增加,花岗岩的弹性模量逐渐减小,泊松比逐渐增大,随着围压的升高,弹性模量逐渐增大,泊松比逐渐减小;在冻融循环作用下,岩样的变形模量呈现与抗压强度类似的劣化规律。典型情况如下:3 MPa 围压下,经历 30、60、90 次冻融循环作用之后,花岗岩变形模量分别降低了 17.7%、31.1%、48.8%。比较而言,变形模量的劣化幅度比抗压强度劣化幅度大。其原因可能是,在冻融循环作用下,花岗岩矿物颗粒骨架软化,内部孔隙、裂隙逐渐增加(周翠英等, 2003; Lin *et al.*, 2005),劣化了岩石的抗压强度,在

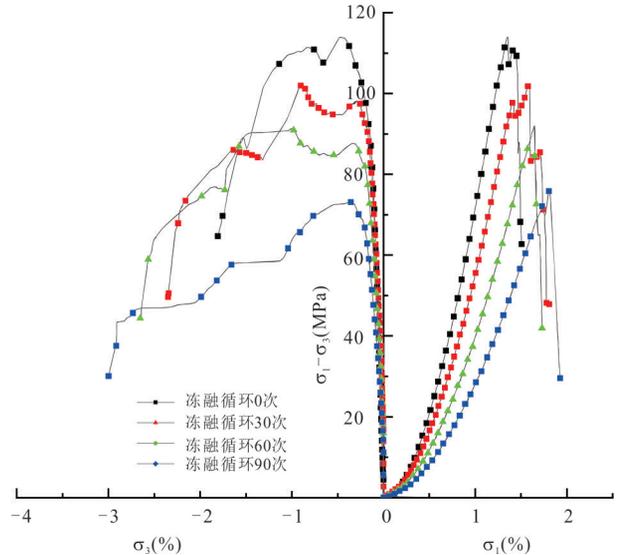


图 5 3 MPa 围压下不同冻融循环次数下砂岩应力—应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of sandstone under different freeze-thaw cycles under confining pressure of 3 MPa

相同应力条件下的变形明显增大,从而使得花岗岩的变形模量劣化幅度增大。片麻岩、砂岩试验结果弹性模量和泊松比随冻融循环次数的变化趋势与花岗岩相同。

2.4 岩石破坏特征分析

2.4.1 宏观破坏特征 由于破坏试样较多,本文以 3 MPa 围压下试样破坏状态进行分析。图 7~图 9 分别为花岗岩、片麻岩和砂岩在 3 MPa 围压下破坏后的形态。由图 7 可知,当冻融循环次数为 0 次时,花岗岩试样的破坏特征并不十分明显,在试样中部形成一条较短的破坏面,除了中部的破坏面,试样其余部位的裂纹较少;当冻融循环次数为 30 次时,试

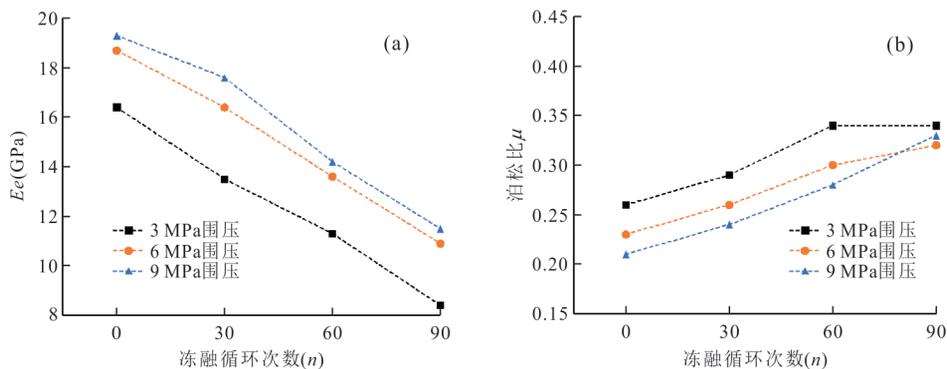


图 6 花岗岩弹性模量(a)和泊松比(b)随冻融循环次数变化趋势

Fig.6 Change trend of elastic modulus (a) and Poisson's ratio (b) of granite with freeze-thaw cycles

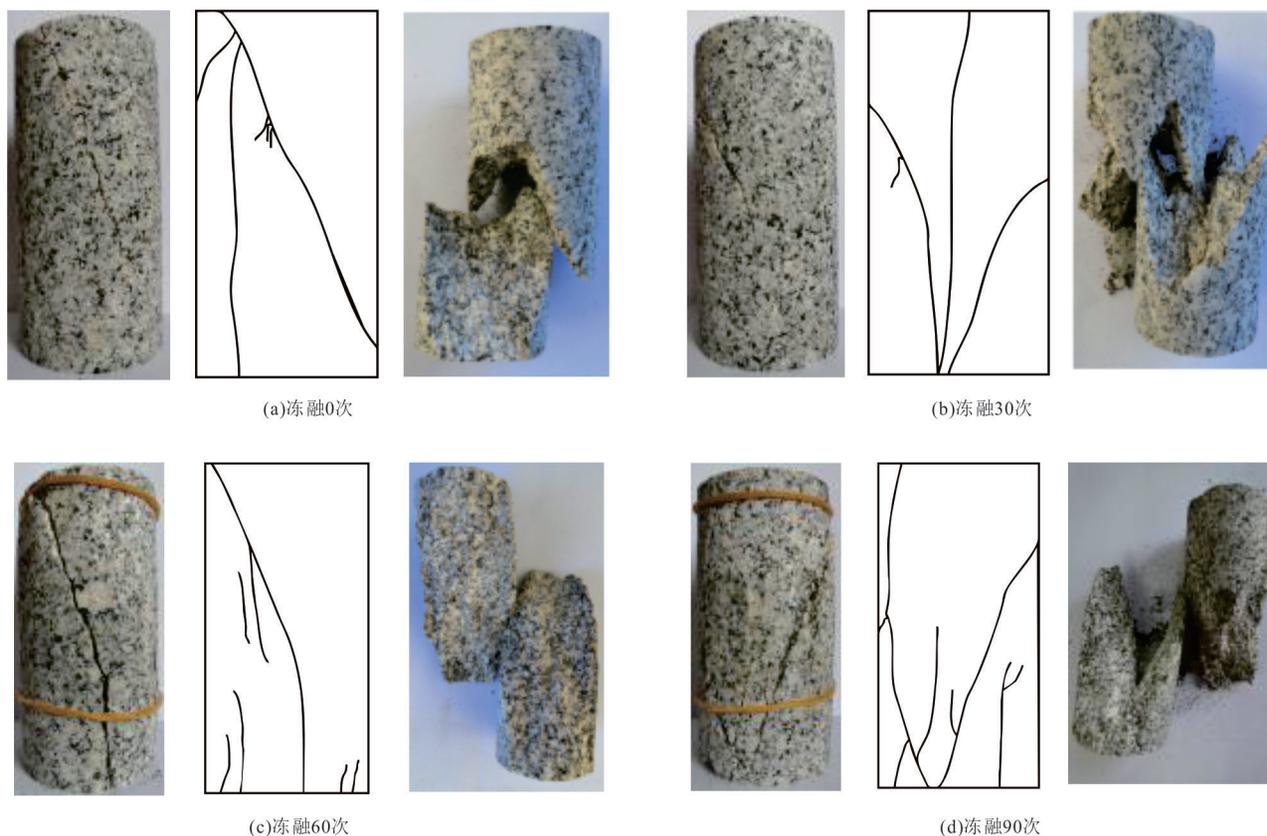


图 7 3 MPa 围压下花岗岩试样破坏照片

Fig.7 Failure photos of granite samples under 3 MPa confining pressure

样中部形成一条贯穿的破裂纹,除主裂纹外还有一些细微的裂纹分布在主裂纹旁边,有明显的张性破坏特征;当冻融循环次数为 60 次时,试样破坏的剧烈程度加大,试样产生的裂纹数量进一步增多;当冻融循环次数为 90 次时,试样除了形成的 2 条贯穿的剪切裂纹,还发育有若干次级裂纹.随着冻融循环次数的增加,裂纹数量增加.

由图 8 可知,当冻融循环次数为 0 次时,片麻岩试样沿着一条剪切破坏面发生破坏,破坏后的试样

主要分为两块,碎块较少;当冻融循环次数为 30 次时,破坏试样的中间形成了一条贯穿的剪切破裂面,剪切面更破碎,剪切面中有一定的粉碎块体;当冻融循环次数为 60 次时,破坏试样中间形成了两条主要的贯穿的裂缝,产生的次级裂缝较多,破坏后产生较多碎块;当冻融循环次数达到 90 次时,试样破坏严重,试样形态较为破碎,既有明显的剪切裂纹又有轴向裂纹.

图 9 为砂岩试样破坏后的照片,在 3 MPa 围压

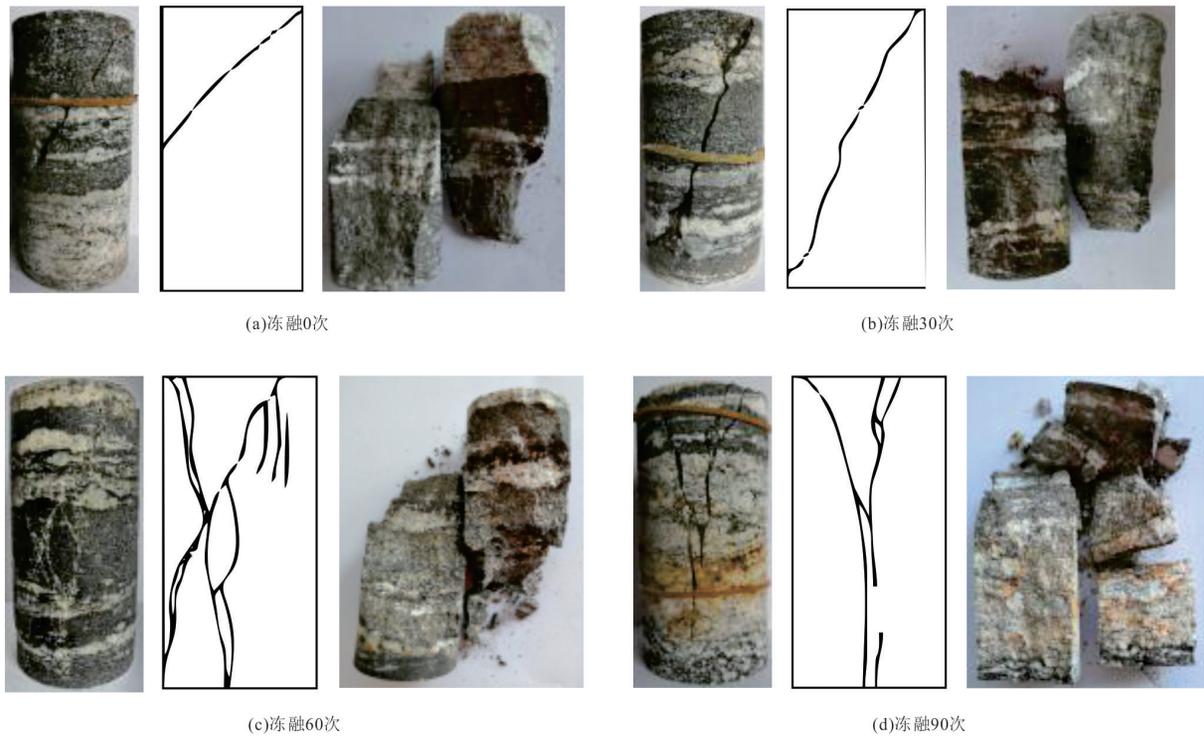


图 8 3 MPa 围压下片麻岩试样破坏照片

Fig. 8 Failure photos of gneiss specimens under confining pressure of 3 MPa

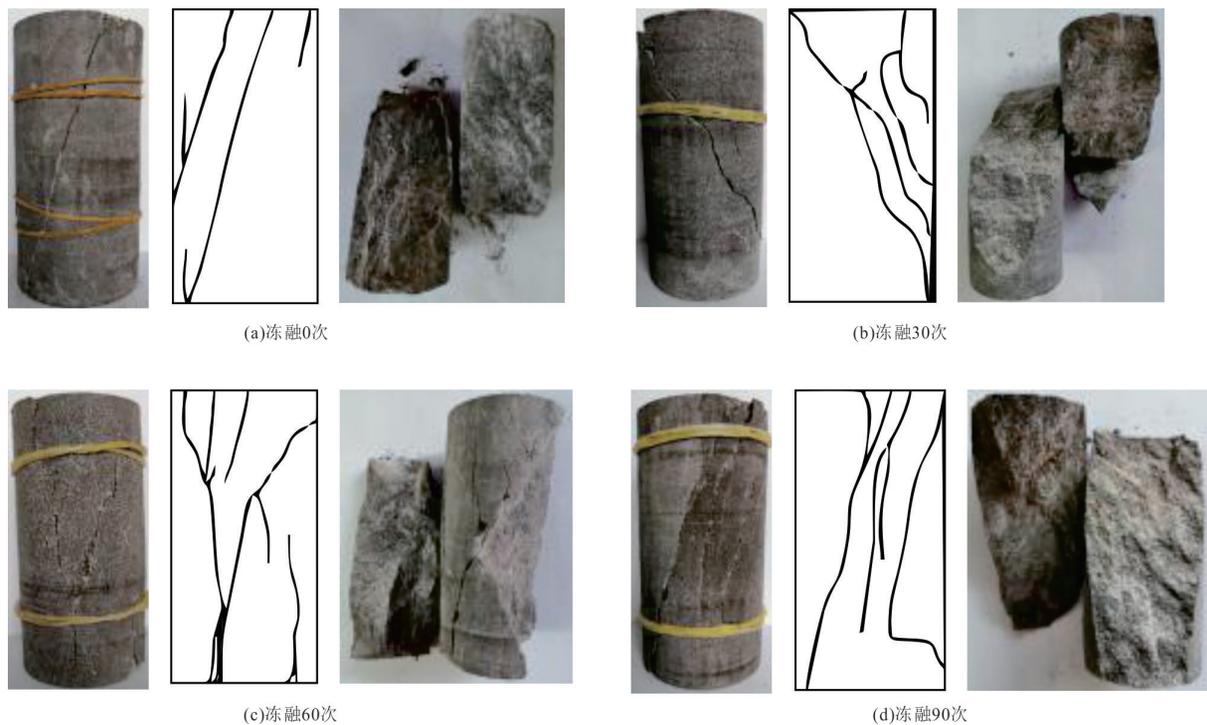


图 9 3 MPa 围压下砂岩试样破坏照片

Fig. 9 Failure photos of sandstone samples under confining pressure of 3 MPa

下,当冻融循环次数为 0 次时,形成的剪切破坏面不平整,主要表现为剪性破坏,除了主破裂面外次级小裂纹较少,破坏试样较完整;当冻融循环次数为

30 次时,试样表现为张剪性的破坏特征,试样中间形成贯穿试样上下的破裂面,破裂面与轴向夹角较小,无次级破裂面形成;当冻融循环次数为 60 次时,

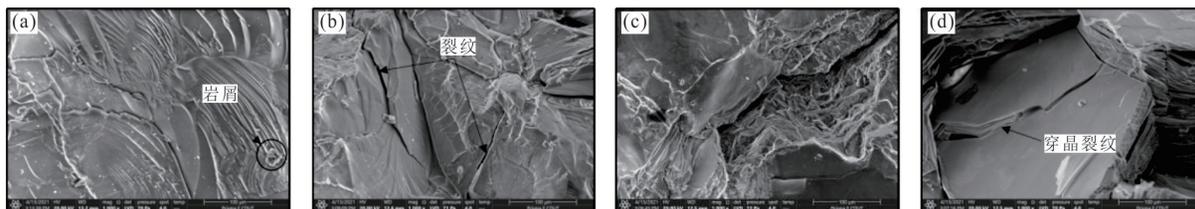


图 10 花岗岩 1 000 倍下不同冻融次数下微观形貌

Fig.10 Micro morphology of granite under different freeze-thaw cycles at 1 000 times

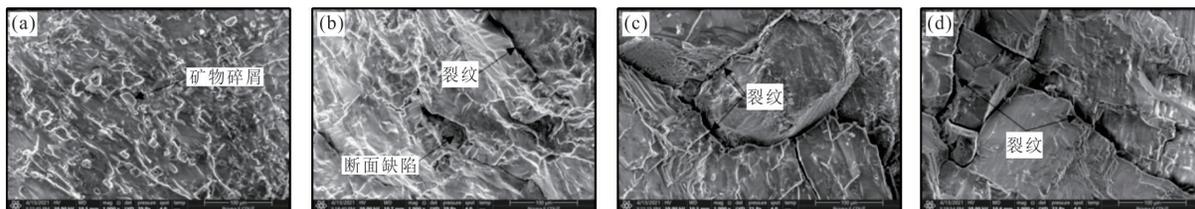


图 11 片麻岩 1 000 倍下不同冻融次数下微观形貌

Fig.11 Micro morphology of gneiss under different freeze-thaw cycles at 1 000 times

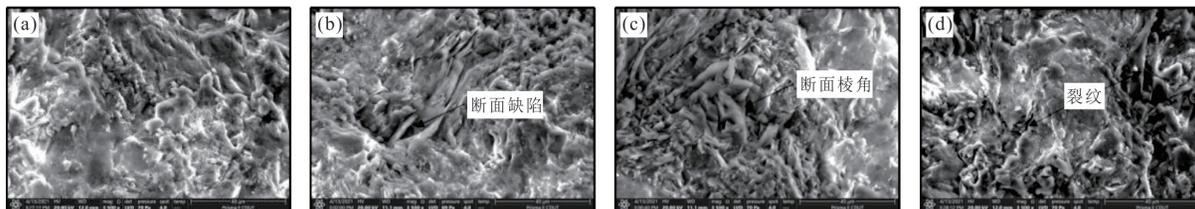


图 12 砂岩 3 500 倍下不同冻融次数下微观形貌

Fig.12 Micro morphology of sandstone under different freeze-thaw cycles at 3 500 times

破坏试样中间形成两条主要破裂面,并伴有次级小裂纹,表现为张性破坏特征;当冻融循环为 90 次时,破坏试样较为破坏,有贯穿的主破裂面并伴有多条次级裂纹,表现出张性破坏特征。

随着冻融循环次数的增加,岩样破坏后更加破碎,形成的裂纹数量更多,不同岩性及强度岩石对冻融作用下岩石破坏特征的响应不同,由于试验花岗岩强度较低,随着冻融循环次数的增加,破坏时的特征有由剪性—张剪性—张性破坏特征的发展趋势,损伤作用对岩石破坏特征的影响规律较明显。

2.4.2 微观破坏特征 图 10~图 12 分别为花岗岩、片麻岩和砂岩破坏断面形态电镜扫描照片。由电镜扫描照片可知:在未冻融条件下,3 种典型岩性岩石的表面均较为平整,无明显的孔隙、裂隙,矿物之间的胶结性较好,断面整体结构性较好,随着冻融循环次数的增加(30 次、60 次),断面开始出现孔隙和裂纹,变得凹凸不平更加粗糙,棱角更加明显,颗粒之间的胶结作用变差,颗粒之间的凝聚力下降,其中花岗岩和片麻岩的颗粒较大,断面随冻融循环次数的变化更加明显,在冻融循环 90 次后试样断面变

得很不平整,产生的裂纹数量较多,裂纹的长度和宽度都增大,断面的结构性变差,颗粒之间的胶结状态和凝聚力都下降,弱化现象不仅出现在结构和胶结物中,矿物晶体结构也发生了破坏,出现了穿晶裂纹。

综上所述,随着冻融循环次数的增加岩石内部的微孔隙逐渐增加,表面出现微裂纹,水分在冻融过程中不断渗透,冻融形成的膨胀力作用以及冰透镜体,使得孔隙和裂纹数量不断扩展,在初始损伤基础上形成新损伤,游离的岩石颗粒,也导致颗粒之间的胶结作用变差,随着孔隙和裂隙的增多最后裂纹发生贯通形成裂隙,导致岩石发生宏观的破坏。

3 冻融后岩石卸荷力学特性劣化规律

岩石在三轴压缩状态和三轴卸围压状态下所表现出来的力学特性并不相同,在研究区内,由于河谷下切作用造成的边坡的卸荷作用十分强烈,且随着铁路建设的进行,遇到的边坡开挖现象愈来愈多,其在力学作用上来说是岩体卸荷的过程。本文

表 6 各岩石卸围压试验破坏围压参数

Table 6 Failure confining pressure parameters of rock unloading confining pressure test

冻融循环次数(<i>n</i>)	0			30			60			90			
初始围压(MPa)	3	6	9	3	6	9	3	6	9	3	6	9	
花岗岩	1.61	5.21	7.42	1.75	5.38	7.87	2.01	5.12	7.87	2.08	5.44	8.02	
破坏围压 σ_d (MPa)	片麻岩	1.22	3.61	6.93	1.42	4.51	7.69	2.12	5.15	8.12	2.62	5.67	8.29
	砂岩	1.70	4.21	7.66	2.03	4.51	7.94	2.13	5.23	8.09	2.62	5.64	8.51

采用峰前卸围压试验对冻融后岩石在卸荷作用下的力学特性进行分析,与其在三轴压缩状态下的力学特性对比,分析卸荷作用对其力学特性的影响.本文卸围压试验中的偏应力是三轴压缩试验偏应力的 75%.

3.1 岩石卸荷量劣化分析

根据卸围压试验统计数据,表 6 为各试样破坏时的围压,图 13 为破坏围压随冻融循环次数的变化曲线,结果表明:在卸围压试验中,随着冻融循环次数的增加,试样破坏时的围压呈上升趋势.例如花岗岩在初始围压为 3 MPa 时,未冻融试样卸荷破坏时的围压为 1.61 MPa,冻融循环 90 次后的破坏围压为 2.08 MPa,上升了 29.2%;初始围压为 6 MPa 时,未冻融岩石到冻融循环 90 次,破坏时围压上升了 4.4%;初始围压为 9 MPa 时,未冻融岩石到冻融循环 90 次,破坏时围压上升了 8.1%.随着冻融循环次数的增加,试样破坏时的卸荷量越来越小,即试样在卸荷量更少的情况发生破坏,说明冻融循环作用对岩石的卸荷量同样有劣化作用;加载试验与卸荷试验发生破坏时的围压不同,卸荷时的围压低于加载试验时的围压,卸荷作用下更容易导致岩石的破坏.与花岗岩相比,片麻岩相同初始围压下破坏时围压的变化量更大,且随着初始围压的升高,破坏围压对冻融循环的响应有减弱作用,表现在其破坏围压的变化量减小,说明在卸荷时,冻融作用对片麻岩的劣化作用更加明显;根据试验结果,砂岩卸荷时破坏时峰值强度下降速率更快,冻融损伤特性更加显著,即岩石劣化作用更为强烈.

3.2 岩石变形特性劣化分析

3.2.1 应力—应变曲线分析 由于应力—应变曲线较多,本文以花岗岩卸围压试验下的应力—应变曲线为例,如图 14 所示.由图 14 可得,在峰值强度前曲线基本呈直线,由于强度未达到相同条件下三轴压缩试验的峰值强度,并无明显屈服阶段,说明一直处于弹性变形阶段;随着冻融循环次数的增加,试样的峰值应变逐渐增大,但与三轴压缩试验的峰

值应变相比,在卸荷条件下的轴向应变更小,这是由于试样的峰值强度更小;与三轴压缩条件下的曲线对比,卸围压试验条件下当围压卸到一定值后,试样强度从峰值点以大斜率下降,到达某点后基本呈直线趋势下降,强度迅速降低,峰后破坏阶段表现出明显的区别,有更强烈的脆性破坏特征,且破坏时试样的轴向变形较小,而径向变形迅速增加,表现出强烈的扩容特性,试样的破坏为侧向扩容作用造成的破坏,与压缩破坏不同,轴向的加载是岩石在压缩破坏时的主要原因,而侧向的扩容则是岩石卸荷破坏的主要因素.

3.2.2 变形参数分析 在单轴压缩试验和三轴压缩试验中,岩石的变形参数为弹性模量和弹性泊松比,对于卸围压试验,我们采用变形模量 E 和泊松比 μ 是岩石峰值强度之后的变形模量和泊松比.

在卸围压试验中的卸荷阶段,试样的变形参数随着卸荷量的增加不断变化,因此,本文引入卸荷当量 $\Delta\sigma_3, \Delta\sigma_3$ 表示卸围压过程中某一时刻的卸荷量占卸荷破坏时总的卸荷量的百分比,计算公式为:

$$\Delta\sigma_3 = (\sigma_3^T - \sigma_3^0) / (\sigma_3^0 - \sigma_d), \quad (3)$$

式(3)中: σ_3^T 为卸围压阶段各时刻的围压, σ_3^0 为初始设计围压, σ_d 为试件破坏时围压.

由于试验曲线较多,且不同岩石之间的变形参数变化规律类似,本文以花岗岩的变形参数为例进行分析.以花岗岩的变形模量 E 为纵坐标,卸荷当量 $\Delta\sigma_3$ 为横坐标建立坐标系,得到花岗岩试样在卸围压过程中变形模量与卸荷当量的变化曲线,如图 15 所示.

由图 15 可得,在卸荷过程中,开始阶段曲线的斜率较小,随着卸荷量的增加变形模量逐渐减小,但速度较为缓慢,说明在卸荷程度较小时岩石劣化并不明显,随着卸荷量的逐渐增加,在达到某一临界值(卸荷量大于 80%)时,岩石的变形模量呈指数型下降,岩石发生破坏,表现出突发性;在相同围压下,不同冻融循环条件下试样的变形模量不同,冻融循环次数增多,变形模量更小,说明冻融循环对

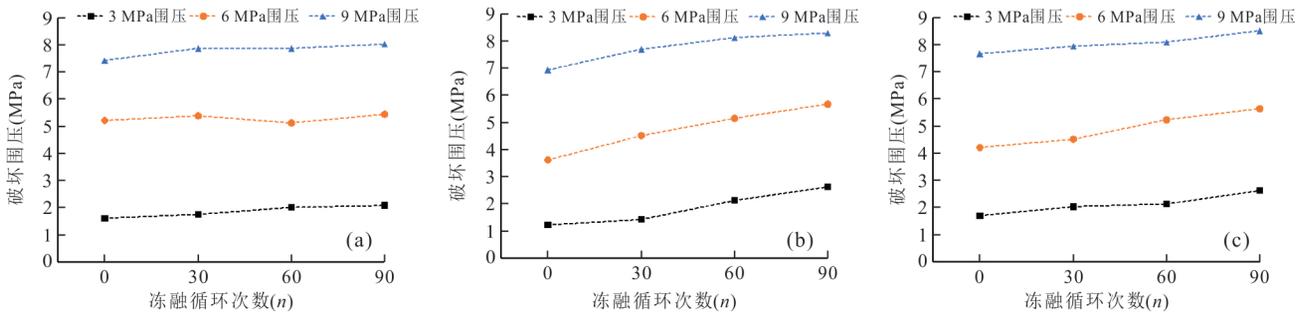


图 13 卸围压试验破坏围压

Fig.13 Destruction confining pressure of unloading confining pressure test

a. 花岗岩; b. 片麻岩; c. 砂岩

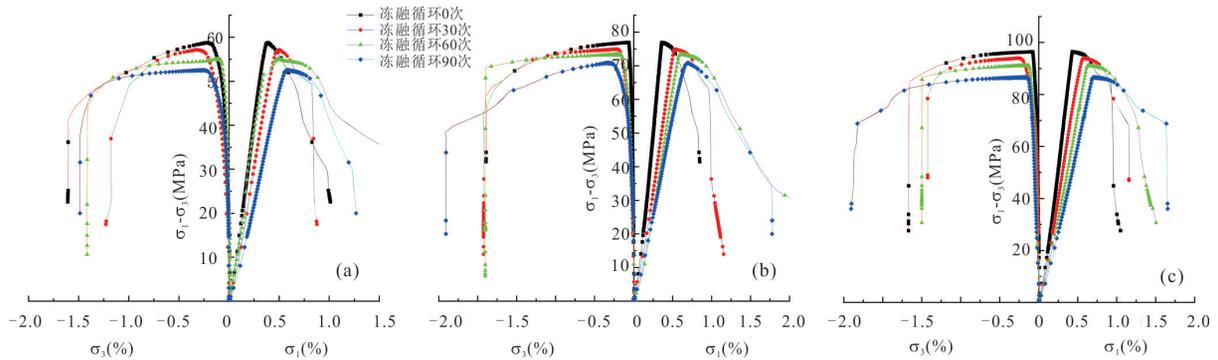


图 14 花岗岩卸围压应力-应变曲线

Fig.14 Stress-strain curves of unloading confining pressure of granite

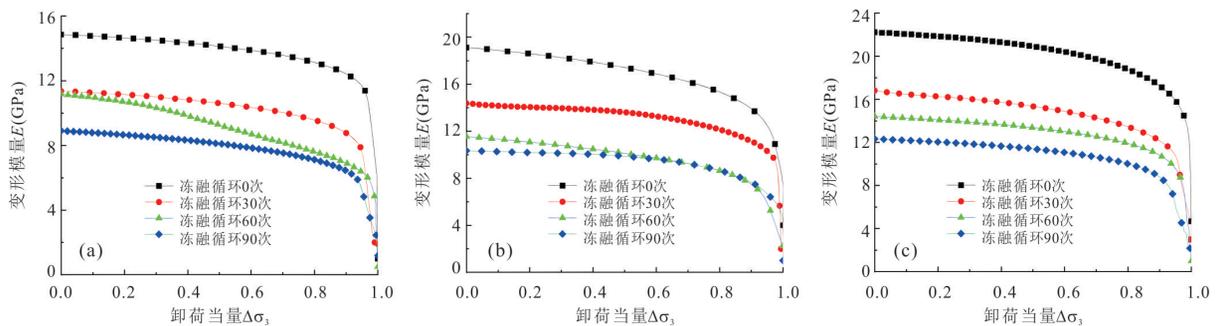


图 15 花岗岩变形模量随卸荷量变化曲线

Fig.15 Curves of deformation modulus of granite with unloading

试样的抗变形能力有削弱作用。

图 16 为花岗岩试样在卸荷过程中泊松比随卸荷量的变化曲线,由图 16 可得,在卸荷过程中,随着卸荷作用的进行泊松比不断增大,开始阶段泊松比的增长较为缓慢,当试样接近破坏点时,泊松比呈指数形式增长,增长速率迅速增大;在相同的围压下,随着冻融循环次数的增加,初始泊松比逐渐增大,即未进行冻融循环的试样泊松比最小,冻融循环 90 次试样的泊松比最大;卸荷开始时,各试样的泊松比均小于 0.5,但随着卸荷量的逐渐增加各试样的泊松比均超过了 0.5 并且持续增大,超过了弹塑

性材料的极限泊松比 0.5,这是由于岩石在卸荷过程除了产生回弹变形外还会发生裂隙扩展并形成新的裂隙,随着裂隙的逐渐贯通,试样产生强烈的侧向扩容现象,环向变形迅速增加,超出了弹性极限,试样发生破坏,这时的泊松比不仅表示材料的变形特性,还包括裂隙的张开变形.根据试验结果显示在花岗岩、片麻岩和砂岩中,砂岩破坏时的泊松比较小,扩容现象不如花岗岩、片麻岩明显。

3.3 岩石破坏特征分析

由于砂岩的强度大,破坏特征更加明显,所以以砂岩的破坏特征为例进行分析.图 17 可得,相比

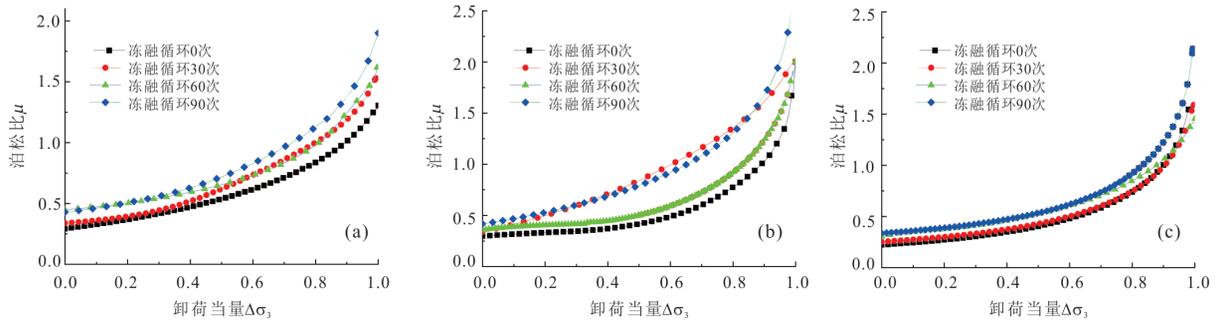


图 16 花岗岩卸荷过程泊松比随卸荷量变化曲线

Fig.16 Curves of Poisson's ratio versus unloading amount during unloading process of granite



图 17 砂岩试样卸围压试验破坏照片

Fig.17 Failure photos of sandstone specimens under unloading confining pressure test

于三轴压缩试样岩样的破坏状态,在卸围压试样中,试样的破坏状态更加明显,产生的轴向裂隙数量明显增多,试样破坏时可见明显向侧向进行鼓胀,侧向扩容作用显著,表现出明显的脆性破坏特征,说明在卸荷作用状态下,试样破坏作用更加强烈,卸荷作用比压缩作用更易造成岩石的破坏;与陈招军等(2017)对冻融循环后岩石的卸荷破坏特征类似,与加载状态下岩石的破坏特征相比,在卸

荷状态下试样破坏时的裂纹以张性裂纹为主,剪切裂纹为辅,这是由于卸围压作用相当于给试样施加一个径向的张力,导致产生的张性裂纹较多,且裂纹数量也多于加载时产生的裂纹数量;同级围压下,随冻融循环次数的增加以及围压的增加,破坏试样的裂隙数量也呈上升趋势,破坏作用更加强烈.

砂岩的强度更高,卸荷时产生的裂纹数量更多,卸荷时的都是以张剪性破坏,且随着强度的增大,张性破坏特征更加明显,冻融循环次数的增加促进了裂纹的产生,在破坏特征中有明显的体现,但围压的升高对裂纹的产生有一定的抑制作用.

4 岩石冻融劣化的影响因素

影响岩石冻融损伤劣化的因素多种,如岩性、岩石的孔隙率、含水量、饱和度、冻融循环次数以及应力状态等;通过对 3 种岩样花岗岩、片麻岩以及砂岩进行加卸荷三轴试验,发现冻融作用对 3 种岩石的劣化强度有着明显的不同,冻融作用对岩石劣化作用最强的为砂岩,其次是片麻岩,最弱为花岗岩.在本次试验中由于对 3 种岩石试验,所以在冻融和卸荷试验中设置的试验变量不多,但是 3 种岩石由于岩性不同,首先岩石的含水参数也不同,砂岩的饱和含水率最高,片麻岩其次,花岗岩最低,试验结果符合岩石含水量对冻融作用的影响,含水量高的岩石受冻融作用劣化强,反之则较小;其次是岩石的强度,随着冻融循环次数的增加,3 种岩石的强度损失不一致,强度损失越多,冻融循环的劣化作用越大,反正则越小,花岗岩的强度损失比片麻岩和砂岩的强度损失更小,所以冻融作用对花岗岩的劣化作用最小.

5 结论

(1)通过对冻融循环后的岩石进行三轴压缩试验,分析得到了冻融后岩石的应力应变曲线、峰值强度、粘聚力、内摩擦角、弹性模量和泊松比的变化规律.试验结果表明:随着冻融循环次数增加,岩石的强度逐渐下降,在冻融循环90次后,砂岩的强度损失最大,强度损失率为30%;岩石的粘聚力、内摩擦角在冻融循环后都有一定程度的降低,冻融循环90次后,花岗岩粘聚力下降了0.52 MPa,内摩擦角下降了1.66°;片麻岩的粘聚力下降了2.13 MPa,内摩擦角下降了3.79°;砂岩粘聚力下降了1.53 MPa,内摩擦角下降了6.04°,其中粘聚力降幅在6.0%~18.4%,内摩擦角的降幅在3.2%~10.5%.弹性模量随着冻融循环次数的增加而逐渐减小,泊松比随冻融循环次数的增加而增大,弹性模量降低了0~12 GPa,泊松比增加了0~0.2.

(2)三轴压缩试验中,根据岩石抗压强度劣化情况分析,冻融作用对砂岩的劣化最明显,片麻岩次之,花岗岩最小,与岩石的抗压强度成正比,抗压强度越大,劣化作用越明显;冻融作用对岩石抗压强度的单次劣化作用(即单次劣化度 ΔD_n),与冻融循环次数相关性较小,冻融作用对岩石的劣化度与围压的大小相关性也较小;在冻融循环作用下,岩样的变形模量呈现与抗压强度类似的劣化规律,比较而言,变形模量的劣化幅度比抗压强度劣化幅度大.

(3)通过对冻融后的岩样进行三轴卸围压试验,对卸围压条件下岩石力学特性进行了分析.在卸围压作用下,试样的峰值强度随冻融循环次数增加逐渐下降,冻融循环作用对岩石的卸荷量同样有劣化作用,破坏围压随着冻融循环次数增加而逐渐上升;变形模量随着卸荷量的增加逐渐减小,泊松比逐渐增大,开始阶段,下降速率较缓慢,当卸荷量达到80%左右时,变形模量呈指数型下降,泊松比呈指数型增加,岩石发生破坏,且随着冻融循环次数增多,变形模量和泊松比更小.

(4)对冻融循环后岩石的宏观破坏特征进行了分析.首先,从宏观上分析,在三轴压缩试验中,随着冻融循环次数的增加,岩石破坏后的状态更加破碎,裂纹数量增多,由拉张破坏和剪切破坏共同造成;在卸围压实验中,岩石破坏形式由三轴压缩时的拉剪破坏变为卸围压时的以拉张破坏为主,试

样破坏时产生的轴向裂隙数量明显增多,试样破坏时可见明显的侧向鼓胀,表现出更明显的脆性破坏特征;从微观上分析,随冻融循环次数的增加,岩石断面产生的微裂纹数量更多,不平整度增加,矿物颗粒之间的胶结状态变差.

(5)从试验结果来看,冻融作用对3种岩样花岗岩、片麻岩以及砂岩有着不同的劣化强度,根据试验变量进行评价,产生不同的劣化规律与综合试验结果分析,川藏交通廊道昌都—林芝段沿线典型岩石中,冻融作用对岩石劣化作用最强的为砂岩,其次是片麻岩,最弱为花岗岩.

References

- Bayram, F., 2012. Predicting Mechanical Strength Loss of Natural Stones after Freeze-Thaw in Cold Regions. *Cold Regions Science and Technology*, 83–84: 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.07.003>
- Chen, Z. J., Wang, L. H., Wang, S. M., et al., 2017. Loading and Unloading Mechanical Characteristics of Rock under Freezing-Thawing Cycles. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 34(1): 98–103 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. F., Qi, Y., Li, J. L., et al., 2021. Degradation Mechanism of Intermittent Jointed Sandstone under Water-Rock Interaction. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 43(4): 634–643 (in Chinese with English abstract).
- Deng, L., Wang, H., Li, K. J., 2021. Analysis of Deformational Mechanism and Stability Evaluation of Lacustrine Deposit within the Corridor of Sichuan-Tibet Railway: An Example from an Outcrop at Songzong Town. *Earth Science*, 47(3): 959–973 (in Chinese with English abstract).
- Du, S. H., 2019. Researches on the Characteristics of High In-Situ Stress in the Changdu-Nyingchi Section of Sichuan-Tibet Railway. *Sichuan-Tibet Railway*, 5: 175–179 (in Chinese with English abstract).
- Fang, J. C., Deng, H. F., Qi, Y., et al., 2019. Analysis of Changes in the Micromorphology of Sandstone Joint Surface under Dry-Wet Cycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019: 8758203. <https://doi.org/10.1155/2019/8758203>
- Guo, C. B., Wang, B. D., Liu, J. K., et al., 2020. Main Progress and Achievements of the Geological Survey Project of Sichuan-Tibet Railway Traffic Corridor. *Geological Survey of China*, 7(6): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Khanlari, G., Sahamieh, R. Z., Abdilor, Y., 2015. The Effect of

- Freeze-Thaw Cycles on Physical and Mechanical Properties of Upper Red Formation Sandstones, Central Part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8): 5991–6001. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1653-y>
- Lang, D.M., Li, T.C., 2020. Study on the Energy Evolution and Damage Constitutive of Rock Under Freeze-Thaw Cycles. *Mining Research and Development*, 40(4): 74–78 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M.L., Jeng, F.S., Tsai, L.S., et al., 2005. Wetting Weakening of Tertiary Sandstones: Microscopic Mechanism. *Environmental Geology*, 48(2): 265–275. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1318-y>
- Lü, J.T., Wang, Z.H., Zhou, C.H., 2003. Discussion on the Occurrence of Yigong Landslide in Tibet. *Earth Science*, 28(1): 107–110 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X.D., Jiang, N., Zuo, C.Q., et al., 2014. Damage Characteristics of Altered and Unaltered Diabases Subjected to Extremely Cold Freeze-Thaw Cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(6): 1997–2004. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0516-2>
- Pan, G.T., Ren, F., Yin, F.G., et al., 2020. Key Zones of Oceanic Plate Geology and Sichuan-Tibet Railway Project. *Earth Science*, 45(7): 2293–2304 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.H., Jiang, Z.R., Li, J.L., et al., 2016. The Bedding Sandstone Unloading Mechanical Properties Experimental Study in the Freeze-Thaw Cycle Conditions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(4): 1052–1058 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G.M., Liu, Q.S., 2005. Analysis of Mechanism of Rock Failure Due to Freeze-Thaw Cycling and Mechanical Testing Study on Frozen-Thawed Rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3076–3082 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zheng, G., Li, W.L., et al., 2018. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1534–1551 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y.G., Kong, F.M., Yang, W.M., et al., 2020. Main Unfavorable Geological Conditions and Engineering Geological Problems along Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(3): 445–468 (in Chinese with English abstract).
- Yamabe, T., Neaupane, K.M., 2001. Determination of Some Thermo-Mechanical Properties of Sirahama Sandstone under Subzero Temperature Condition. *Int. J. Rock Mech. Mini. Sci.*, 38(7): 1029–1034.
- Yang, G.S., Pu, Y.B., Ma, W., 2002. Discussion on the Damage Propagation for the Rock under the Frost and Thaw Condition of Frigid Zone. *Journal of Experimental Mechanics*, 17(2): 220–226 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J., Fu, G.F., Chen, X., et al., 2015. Experimental Study on Mechanical Properties of Sandstone after Freezing-Thawing Cycles under Triaxial Confining Pressure Unloading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(10): 2001–2009 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.M., Yang, G.S., 2011. Freeze-Thaw Cycling and Mechanical Experiment and Damage Propagation Characteristics of Rock. *Journal of China University of Mining & Technology*, 40(1): 140–145, 151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.M., Yang, G.S., 2013. Experimental Study of Damage Deterioration and Mechanical Properties for Freezing-Thawing Rock. *Journal of China Coal Society*, 38(10): 1756–1762 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.T., 2020. Study on Creep Properties and Model of Sandstone under Freeze-Thaw Environment (Dissertation). Xi'an University of Science and Technology, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C.Y., Deng, Y.M., Tan, X.S., et al., 2003. Research on the Variation Regularities of Microstructures in the Testing of Interaction between Soft Rocks and Water. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 42(4): 98–102 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z.D., Semerjan, M., Fang, R.J., et al., 2018. Unloading Strength Characteristics and Damage Characteristics of Sandstone under Freeze-Thaw Cycles. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 35(3): 1–5, 12 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈招军, 王乐华, 王思敏, 等, 2017. 冻融循环条件下岩石加卸荷力学特性研究. *长江科学院院报*, 34(1): 98–103.
- 邓华锋, 齐豫, 李建林, 等, 2021. 水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理. *岩土工程学报*, 43(4): 634–643.
- 邓林, 王虎, 李开锦, 2021. 川藏交通廊道湖相地层斜坡断错变形机理分析及其稳定性评价——以松宗镇湖相剖面为例. *地球科学*, 47(3): 959–973.
- 杜世回, 2019. 川藏交通廊道昌都-林芝段高地应力特征探讨. *中国铁道学会*, 5: 175–179.
- 郭长宝, 王保弟, 刘建康, 等, 2020. 川藏交通廊道交通廊道地质调查工程主要进展与成果. *中国地质调查*, 7(6): 1–12.

- 郎东明,李天成,2020.冻融循环作用下岩石能量演化及损伤本构研究.矿业研究与开发,40(4):74-78.
- 吕杰堂,王治华,周成虎,2003.西藏易贡大滑坡成因探讨.地球科学,28(1):107-110.
- 潘桂棠,任飞,尹福光,等,2020.洋板块地质与川藏交通廊道工程地质关键区带.地球科学,45(7):2293-2304.
- 王乐华,姜照容,李建林,等,2016.冻融循环条件下层理砂岩卸荷力学特性试验研究.冰川冻土,38(4):1052-1058.
- 徐光苗,刘泉声,2005.岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究.岩石力学与工程学报,24(17):3076-3082.
- 许强,郑光,李为乐,等,2018.2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究.工程地质学报,26(6):1534-1551.
- 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等,2020.川藏交通廊道沿线主要不良地质条件与工程地质问题.岩石力学与工程学报,39(3):445-468.
- 杨更社,蒲毅彬,马巍,2002.寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨.实验力学,17(2):220-226.
- 俞缙,傅国锋,陈旭,等,2015.冻融循环后砂岩三轴卸围压力学特性试验研究.岩石力学与工程学报,34(10):2001-2009.
- 张慧梅,杨更社,2011.岩石冻融力学实验及损伤扩展特性.中国矿业大学学报,40(1):140-145,151.
- 张慧梅,杨更社,2013.冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究.煤炭学报,38(10):1756-1762.
- 张磊涛,2020.冻融环境下砂岩蠕变特性及其模型研究(硕士学位论文).西安:西安科技大学.
- 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等,2003.软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究.中山大学学报(自然科学版),42(4):98-102.
- 朱珍德,色麦尔江·麦提玉苏普,方若进,等,2018.冻融循环作用下砂岩卸荷强度特性试验及损伤特性研究.长江科学院报,35(3):1-5,12.