



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403704

引用格式:祝榆峰,任建喜,云梦晨,等.冻融裂隙大理岩三轴压缩疲劳损伤特性及本构模型[J].科学技术与工程,2025,25(11):4733-4742.

Zhu Yufeng, Ren Jianxi, Yun Mengchen, et al. Triaxial compression damage characteristics and constitutive model of freeze-thaw fissured marble[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4733-4742.

冻融裂隙大理岩三轴压缩疲劳损伤特性及本构模型

祝榆峰,任建喜*,云梦晨,张凡,张琨

(西安科技大学建筑与土木工程学院,西安 710054)

摘要 为研究寒区岩体在冻融循环和疲劳荷载耦合作用下的损伤特性,开展单一裂隙大理岩冻融循环试验及核磁共振微观试验和不同围压下三轴压缩疲劳宏观试验,分析了冻融循环后裂隙大理岩的孔隙结构扩展特征及冻融循环与疲劳荷载作用下裂隙大理岩的力学特性和变形破坏特征。引入损伤变量,建立了冻融与疲劳荷载作用下基于西原蠕变模型的单一裂隙大理岩疲劳损伤本构模型。结果表明:随冻融次数增加,裂隙大理岩的质量损失率和纵波波速损失率均逐渐升高,核磁共振 T_2 曲线呈现出三峰特征,曲线整体右移,次峰与第三峰逐渐连接,峰总面积不断增大。围压与裂隙大理岩的疲劳强度呈正相关,随着围压的增大,裂隙大理岩的抗疲劳能力增加,延性增强,岩样破坏模式逐步由局部剪切破坏转变为整体剪切破坏。所建立的疲劳损伤本构模型理论曲线与试验数据基本吻合。研究结果可为寒区岩体工程灾害的防治提供参考依据。

关键词 单一裂隙大理岩;冻融;疲劳;破坏特征;本构模型

中图法分类号 TU458; 文献标志码 A

Triaxial Compression Damage Characteristics and Constitutive Model of Freeze-thaw Fissured Marble

ZHU Yu-feng, REN Jian-xi*, YUN Meng-chen, ZHANG Fan, ZHANG Kun

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

[Abstract] To study the damage characteristics of rock masses in cold regions under the coupling effect of freeze-thaw cycles and fatigue loads, freeze-thaw cycle tests, nuclear magnetic resonance microscopic tests, and triaxial compression fatigue macroscopic tests under different confining pressures were carried out on single crack marble. The pore structure expansion characteristics of fissured marble after freeze-thaw cycles, as well as the mechanical properties and deformation failure characteristics of fissured marble under freeze-thaw cycles and fatigue loads were analyzed. A single crack marble fatigue damage constitutive model based on Nishihara creep model was established by introducing damage variables under freeze-thaw and fatigue loads. The results showed that with the increase of freeze-thaw cycles, the mass loss rate and longitudinal wave velocity loss rate of fissured marble gradually increased. The nuclear magnetic resonance T_2 curve showed a three peak characteristic, with the whole curve shifting to the right. The second peak gradually connected with the third peak, and the total peak area continued to increase. There was a positive correlation between confining pressure and the fatigue strength of fissured marble. With the increase of confining pressure, the fatigue resistance and ductility of fissured marble increased, and the failure mode of the rock sample gradually changed from local shear failure to overall shear failure. The theoretical curve of the established fatigue damage constitutive model was basically consistent with the experimental data. The research results could provide reference for the prevention and control of rock engineering disasters in cold regions.

[Keywords] single fissure marble; freeze-thaw; fatigue; failure mode; constitutive model

随着“一带一路”的实施,国家重点工程开始建设大量线性交通基础设施,其沿线分布着大量的明洞段及路堑岩质边坡,在施工和长期运营过程中,这些岩质边坡不仅遭受寒区季节变更带来的大温差冻融循环作用,还受到周期性车辆荷载的影响,

进而诱发滚石、崩塌、滑坡等工程地质灾害,对人民生命财产和国家发展造成了严重威胁。究其原因,是由于冻融与疲劳荷载共同作用下导致岩体内部损伤与强度劣化。因此,急需开展冻融与疲劳荷载共同作用下裂隙岩石损伤力学特性及其破坏机理

收稿日期:2024-05-19 修订日期:2024-08-18

基金项目:国家自然科学基金(12072259)

第一作者:祝榆峰(1999—),男,汉族,重庆人,硕士研究生。研究方向:岩土损伤力学。E-mail:1392853468@qq.com。

*通信作者:任建喜(1968—),男,汉族,陕西西安人,博士,教授。研究方向:岩土损伤力学。E-mail:renjianxi1968@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

的研究。

寒区裂隙岩体冻融损伤的影响因素复杂多样,国内外学者主要针对岩石的岩性、冻融循环次数、冻融温度、孔隙率和含水量等^[1-3]方面进行了大量的研究,取得了丰硕的成果。吴刚等^[4]详细分析了冻融循环对大理岩物理力学特性的影响。王生祖等^[5]研究了砂岩在经历不同冻融循环次数后波速、力学性能和孔隙结构的劣化规律。任建喜等^[6]研究了砂岩在不同冻结温度下解冻后的强度劣化规律和破坏形式。王前朋等^[7]通过扫描电镜与核磁共振试验分析了冻融后片麻岩的微观孔隙结构。Liu等^[8]利用核磁共振技术研究了包含宏观缺陷和微观缺陷的岩体冻融损伤演化规律。任建喜等^[9]采用周期荷载试验与颗粒流数值模拟相结合的方法研究了冻融后裂隙砂岩的破坏机理。此外,通过考虑加载频率^[10]、应力幅值^[11]、上限应力^[12]等影响因素,岩体受疲劳荷载损伤的问题也得到了大量研究。张培森等^[13]通过3种围压及循环荷载试验,得到了不同围压对岩样力学特性的影响规律。李昊禹等^[14]提出含水率对周期荷载作用下砂岩横向累计不可逆转应变的影响程度大于应力水平的影响。张琰等^[15]通过数值模拟研究了单调荷载与周期荷载作用下大理岩的断裂破坏规律。

浦少云等^[16]基于分数阶微积分理论,将 Burgers 模型中的 Maxwell 常值黏壶替换,建立了动应力荷载作用下的本构模型。吴明白等^[17]基于 Weibull 分布假设,建立了考虑 Mohr-Coulomb 准则损伤门槛及 Hoek-Brown 准则残余应力的损伤本构模型。吕思清等^[18]根据统计损伤力学原理,构建了考虑宏观总损伤的本构模型,为描述预制裂隙砂岩的损伤机制提供了有力工具。万镇昂等^[19]引入 Weibull 函数,利用残余应变来表征损伤度,建立了疲劳损伤的本构模型。彭述权等^[20]考虑了节理岩体的瞬时塑性,改进了伯格斯疲劳模型,使其能更准确地描述岩体的疲劳损伤行为。Lin等^[21]基于宏观损伤,建立了能够有效描述裂隙岩体疲劳损伤特征的本构模型。Zhong等^[22]建立了西原模型与弹性体耦合的损伤本构模型。郭夏飞等^[23]研究了岩石在冻融循环条件下的蠕变力学和变形特性,并提出了冻融循环蠕变损伤模型。

虽然寒区岩石损伤破坏机理研究已经取得大量成果,但由于问题的复杂性,仍需进一步开展冻融环境与周期载荷耦合作用下寒区裂隙岩石疲劳损伤破坏规律与本构模型研究,目的是为寒区岩体边坡稳定性评价及其灾害防治提供基础数据。

1 试验概述

1.1 试验准备

试验所采用的大理岩试样为国际标准圆柱形试样,为保证试验岩样的均一性,采用声波测试进行岩样筛选。加工的预制裂隙大理岩裂隙宽为 1 mm,裂隙倾角为 30°(图 1)。

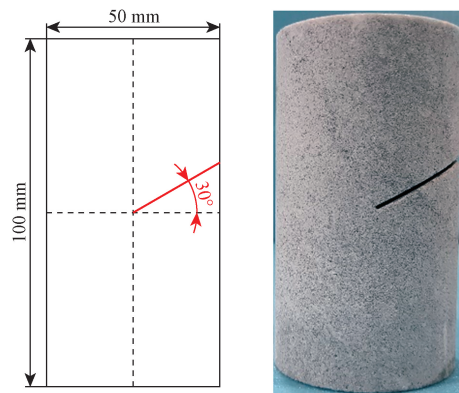


图 1 30°裂隙倾角岩样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 30° fractured rock sample

1.2 试验设备

试验采用的主要仪器有:①RMT-201 岩石力学试验系统,该系统可施加最大轴力 1 500 kN,最大围压 50 MPa(图 2);②冻融循环试验箱,其箱体温度控制范围为(-40~25)℃,温度波动度为±0.5℃(图 3);③NMRC12-010V 核磁共振孔隙分析仪,其磁场强度为(0.3±0.05)T(图 4)。



图 2 RMT-201 试验系统

Fig. 2 RMT-201 test system

1.3 试验方案

将裂隙大理岩进行筛选分组,每组 3 个试样(表 1),主要试验步骤如下。

(1)冻融循环试验及核磁共振试验:将饱水后的试样进行冻融循环试验,设定一次冻融周期为 8 h(冻结 4 h,解冻 4 h),冻结和解冻温度分别为 -20℃和 20℃,冻融循环次数(f_c)为 20、40、60、80、100 次。



图3 冻融循环试验箱

Fig. 3 Freeze-thaw cycle test chamber

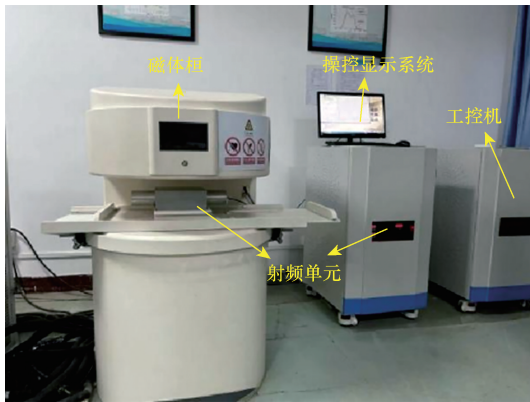


图4 核磁共振测试系统

Fig. 4 Nuclear magnetic resonance testing system

对经历不同冻融循环次数后的裂隙大理岩进行核磁共振试验,随后将岩样烘干并测得其质量及纵波波速。

(2) 三轴压缩周期荷载试验:对冻融 100 次的裂隙大理岩进行不同围压水平(3、6、9 MPa)下的疲劳加载试验。首先将裂隙大理岩岩样套上热缩管并做密封处理后安装轴向与径向位移传感器,以 0.01 MPa/s 的恒速率加载至预定围压且稳定后,在常规三轴压缩试验峰值 $\Delta\sigma_{\max}$ 的基础上,再以轴向应力控制 0.1 kN/s 的恒速率加载至周期荷载平均值,施加频率为 1 Hz、振幅 A 为 $0.6 \Delta\sigma_{\max}$ ($0.3 \sim 0.9 \Delta\sigma_{\max}$) 的正弦波周期荷载至岩样破坏。试验结束后,取出试样并拍照。

表1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

试验类型	试样个数	
常规三轴压缩试验和 三轴压缩周期荷载试验	围压 3 MPa	各 3 个
	围压 6 MPa	各 3 个
	围压 9 MPa	各 3 个
核磁共振试验	3 个	

2 试验结果及分析

2.1 冻融循环后裂隙大理岩物理特性分析

2.1.1 不同冻融次数下裂隙大理岩质量及波速损失

将经历不同冻融循环次数的裂隙大理岩岩样进行解冻后,放入烘干箱烘干处理,测得其烘干后的质量及纵波波速,并计算裂隙大理岩冻融前后的质量损失率及纵波波速损失率(图 5)。由图 5 可知,随着冻融循环次数的增加,岩样的质量损失率较低,介于 0.05% ~ 0.50%,呈上升趋势,但是岩样均未破碎,表面也没有碎块剥落现象。同时波速损失率逐渐增加,说明在冻融循环过程中冻胀力的作用促使岩石膨胀和收缩交替进行,导致岩样内部微裂隙和孔隙的进一步扩展,矿物颗粒联结减弱,岩石致密性变差。冻融循环过程中水冰相变作用加速了岩样的劣化过程。

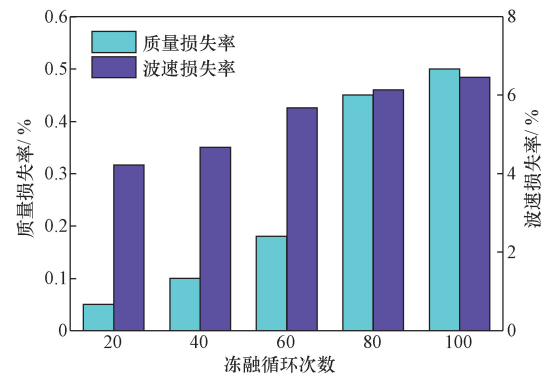


图5 不同冻融次数下裂隙大理岩质量及波速损失率

Fig. 5 The mass and wave velocity loss rate of fissured marble under different freeze-thaw cycles

2.1.2 不同冻融次数下裂隙大理岩 T_2 谱分布规律

对经历不同冻融循环次数的裂隙大理岩进行核磁扫描,通过核磁共振 T_2 曲线可以反映裂隙大理岩内部的孔隙结构变化情况(图 6),幅值与孔隙数量成正比,弛豫时间(T_2)与孔隙大小成正比。不同冻融次数后裂隙大理岩的 T_2 曲线均呈现双低峰和单高峰的特点,首峰面积小,次峰面积增大,第三峰面积达到极大值,弛豫时间主要集中在 10 ~ 1 000 ms 范围内。随着冻融循环次数的增加, T_2 曲线分布整体右移,次峰与第三峰逐渐连接,峰总面积不断增大。表明冻融过程中,岩石孔隙中水的液-固相变过程促进了孔隙发育,导致大孔隙形成,改变了岩样内部结构,岩样的损伤程度不断加剧。

2.2 裂隙大理岩三轴压缩疲劳特性分析

2.2.1 裂隙大理岩三轴压缩疲劳力学特性

对经历 100 次冻融循环后的裂隙大理岩进行常

规三轴压缩试验和三轴压缩疲劳荷载试验,得到三轴压缩试验峰值如表2所示,周期荷载试验应力-应变曲线如图7所示。不同围压下裂隙大理岩的应力-应变曲线特征基本一致。在循环加载与卸载阶段,岩样均产生了不可逆的塑性变形。随着疲劳荷载的持续加载,曲线产生了互不重叠的“滞回环”,且滞回曲线不断右移,不可逆变形逐渐累积至极限变形量后岩样发生脆性破坏,应力跌落,滞回环变成普通曲线。值得注意的是,在围压的作用下,即使岩样在预制裂隙尖端处发生断裂,其径向应变值仍然显著增大,这表明岩样在预制裂隙受荷载闭合后仍具有一定的承载能力。

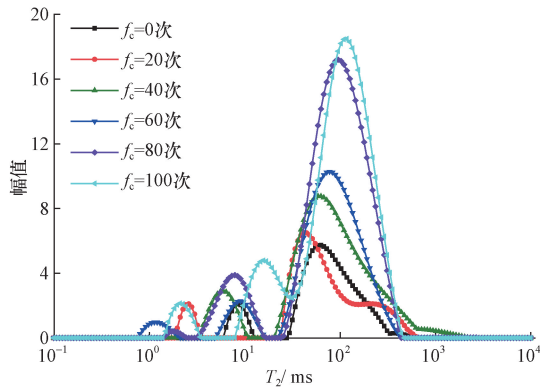


图6 不同冻融次数下裂隙大理岩 T_2 谱分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of T_2 spectrum of fissured marble under different freeze-thaw cycles

表2 冻融后裂隙大理岩的三轴压缩峰值应力
Table 2 Triaxial compressive peak stress of fissured marble after freeze-thaw cycles

围压 σ_3 /MPa	峰值应力 $\Delta\sigma_{\max}$ /MPa
3	41.53
6	63.77
9	77.89

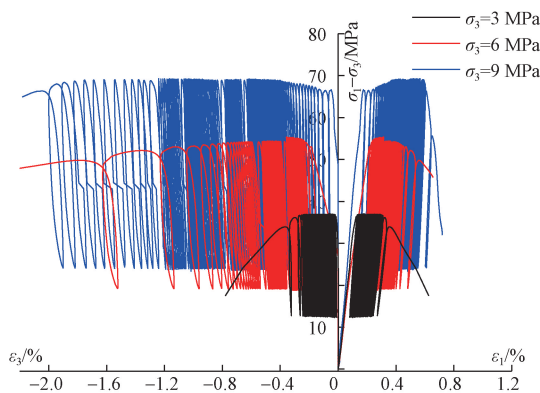


图7 冻融后不同围压下裂隙大理岩周期荷载试验应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of fissured marble under cyclic loading test under different confining pressures after freeze-thaw cycles

冻融后不同围压下裂隙大理岩的疲劳力学参数如表3所示。可知随着围压的增加,在振幅 $0.6 \Delta\sigma_{\max}$, 频率为 1 Hz 的正弦型周期荷载作用下,裂隙大理岩破坏点处的应变及周期荷载循环次数均呈现增加趋势,这表明岩样的疲劳损伤强度对围压的变化表现出高度的敏感性。随着围压的增加,岩样在疲劳荷载作用下的峰值应变分别增长了 69.70% 和 87.88%; 周期荷载循环次数分别增长了 93.61% 以及 276.26%, 围压增加了裂隙大理岩的延性,提高了其承受疲劳荷载的能力。

表3 冻融后不同围压下裂隙大理岩疲劳力学参数
Table 3 Fatigue mechanical parameters of fissured marble under different confining pressures after freeze-thaw cycles

裂隙倾角 θ /($^\circ$)	振幅 A	围压 σ_3 /MPa	破坏点处应变 ε_1 /%	循环次数 N /次
30	$0.6\Delta\sigma_{\max}$	3	0.33	219
		6	0.56	424
		9	0.62	824

2.2.2 裂隙大理岩三轴压缩疲劳变形特征

裂隙岩样的应力-应变曲线能够反映岩样发生疲劳破坏的各个阶段,可将轴向应变作为评估裂隙大理岩稳定性的指标。葛修润等^[24]借用蠕变的概念,将岩石整个疲劳过程的不可逆轴向变形发展划分为初始、等速和加速 3 个阶段,变形发展曲线如图8所示。当上限应力高于疲劳强度阈值时,轴向变形发展曲线在短暂的初始阶段后即进入等速阶段,轴向应变以近似恒定的速率缓慢增加,直到裂隙大理岩在临近破坏前的数个周期荷载作用下,轴向应变骤增进入加速阶段,最终裂隙大理岩应变峰值超过应变极限值从而引发破坏;等速阶段在整个周期荷载过程中占据了绝大部分时间,但其累积变形量仅占变形总量的约 1/3。

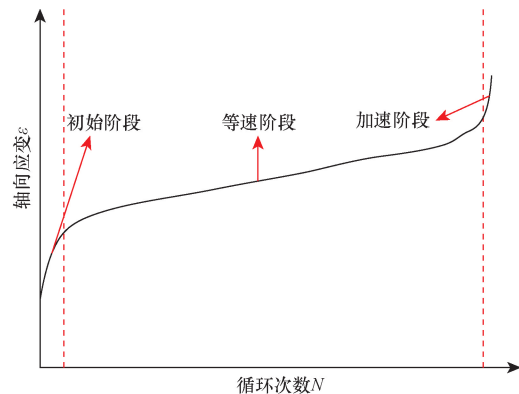


图8 周期荷载作用下轴向变形示意图

Fig. 8 Schematic diagram of axial deformation under cyclic loading

冻融 100 次后裂隙倾角岩样在不同围压下最大(最小)轴向应变随周期荷载循环次数变化的曲线如图 9 所示,其中 ε_{\max} 表示循环内最大轴向应变、 ε_{\min} 表示循环内最小轴向应变。随着围压的增大,冻融后裂隙大理岩在轴向变形发展曲线的初始阶段,轴向变形量呈减小趋势;等速阶段所持续的循环次数变多,但变形速率在递减;进入加速阶段后变形量增加。以围压为 3 MPa 的情况为例,在周期荷载的作用下,岩样的轴向应变在经历 27 个循环周期的初始阶段后进入等速阶段,这个阶段持续到第 196 次循环,随后进入加速阶段,经历 23 个循环周期后岩样破坏;类似地,当围压为 6 MPa 时,初始阶段持续了 8 个循环周期,等速阶段在第 402 次循环后结束,加速阶段则持续了 22 个循环周期;围压为 9 MPa 时,在经历 4 个循环周期的初始阶段后进入等速阶段,直到第 778 次循环后进入了加速阶段,加速阶段持续了 42 个循环周期。

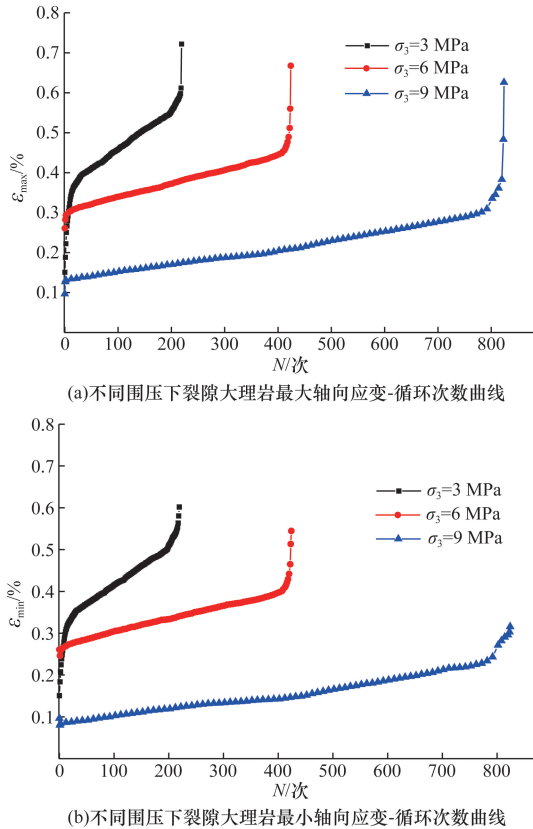
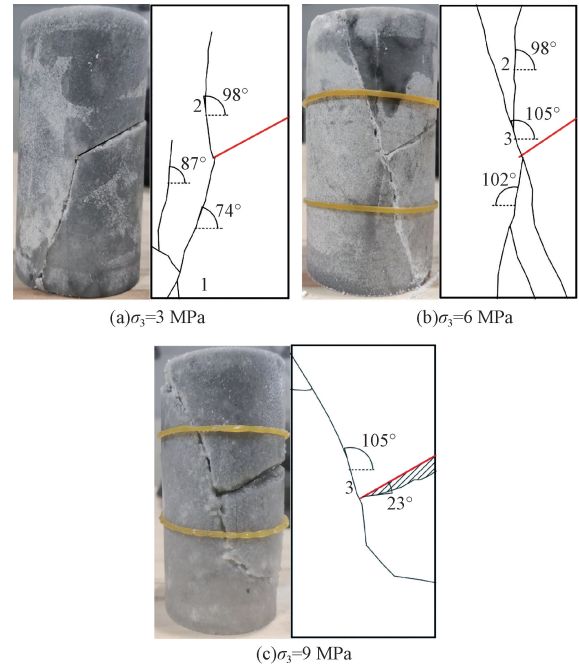


图 9 冻融后不同围压下裂隙大理岩变形特征
Fig. 9 Deformation characteristics of fissured marble under different confining pressures after freeze-thaw cycles

2.3 裂隙大理岩三轴压缩疲劳破坏特征分析

在周期荷载作用下,裂隙大理岩的破坏模式随着围压的增加逐步由局部剪切破坏转变为整体剪切破坏。如图 10 所示,岩样在 3 MPa 围压作用下沿预制裂隙尖端处扩展出 1 条翼裂纹及 1 条反翼裂纹,



1 为翼裂纹;2 为反翼裂纹;3 为剪切裂纹、次裂纹
图 10 冻融后不同围压下裂隙大理岩破坏特征图
Fig. 10 Failure characteristics of fissured marble under different confining pressures after freeze-thaw cycles

随后向岩样上下端部延伸,同时岩样底部边角处出现了剪切裂纹。围压 6 MPa 时,裂隙大理岩破坏模式趋于复杂化,翼裂纹与反翼裂纹皆发育到了岩样端部,并出现了一条贯通整个岩样的剪切裂纹,剪切角度也相应增大。当围压增加至 9 MPa 时,岩样主要以整体剪切破坏为主,形成了一道约 105° 的宏观破裂面,同时在三轴周期荷载的反复作用下,岩样累积了一定损伤,预制裂隙处下部出现了岩体掉落,试件发生疲劳破坏。

3 冻融裂隙大理岩三轴压缩疲劳本构模型

3.1 建立疲劳本构模型

由 2.2.2 节可知,冻融裂隙大理岩在整个三轴压缩疲劳试验过程中的最小轴向应变及最大轴向应变的三阶段与蠕变曲线中的瞬时蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段相似。故考虑将循环次数与频率换算,以此代替蠕变时间,并引入冻融后裂隙大理岩的初始损伤变量,建立疲劳本构模型。

3.1.1 损伤变量的定义

将冻融后裂隙大理岩视为存在一定的初始损伤,且这种损伤存在于疲劳损伤的全过程中。当初始损伤 $D_0 = 0$ 时,可看作为没有裂隙的完整大理岩在冻融前的损伤模型。

基于应变等效性假说,定义损伤变量表达式为

$$D_N = 1 - \frac{E_N}{E} \quad (1)$$

式(1)中: D_N 为损伤变量; E_N 为冻融后裂隙大理岩在周期荷载作用过程中的岩石弹性模量; E 为岩样的初始弹性模量。

3.1.2 基本元件

郭建强等^[25]采用与蠕变本构模型相似的方法,定义了疲劳模型中的3个基本元件:弹性疲劳元件(hookean fatigue, HF)、塑性疲劳元件(plasticity fatigue, PF)和黏性疲劳元件(newtonian fatigue, NF)。这些元件的本构关系可分别表示为

$$F(f, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_c) = k\varepsilon(N) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varepsilon(N) = 0, & \sigma < \sigma_{\text{cri}} \\ \varepsilon(N) \rightarrow \infty, & \sigma > \sigma_{\text{cri}} \end{cases} \quad (3)$$

$$F = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta f \frac{d\varepsilon}{dN} \quad (4)$$

式中: f 为周期荷载频率; σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为周期荷载的上下限应力; σ_c 为岩石单轴抗压强度; k 为弹性疲劳系数; σ_{cri} 为材料临界应力上限; η 为黏性疲劳系数; $\frac{d\varepsilon}{dN}$ 为每个循环周期塑性应变增量。

对式(4)积分得

$$\varepsilon = \frac{F}{\eta}t + C \quad (5)$$

当 $t = 0$ 时, $\varepsilon = 0$, 则积分常数 $C = 0$, 在周期荷载作用下, 循环次数 $N = tf$ 。

3.1.3 周期荷载的函数表达

根据前人的相关研究,周期荷载可以使用应力函数来表达,岩体在受循环荷载方向的最大主应力 σ_1 作用下,岩体所受的应力可表达为

$$\sigma = \sigma_{\text{av}} \exp\left[\left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_s}{\sigma_c}\right)f\right] \quad (6)$$

式(6)中: σ_{av} 为周期荷载平均值; σ_s 为周期荷载作用下岩石的临界强度。

根据式(6)可以发现,当周期荷载应力上限 $\sigma_{\max} > \sigma_s$ 时, $\sigma > \sigma_{\text{av}}$ 岩石发生疲劳破坏;反之 $\sigma_{\max} \leq \sigma_s$ 时, $\sigma \leq \sigma_{\text{av}}$ 岩石不会发生疲劳破坏。

如图11所示,在模型构建过程中周期荷载可等效分解为静力荷载与交变荷载,其中静力荷载为

$$\sigma = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2 \quad (7)$$

交变荷载为

$$\sigma_f(t) = [(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2] \sin\omega t \quad (8)$$

则周期荷载的表达式为

$$\sigma(t) = [(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2] + [(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2] \sin\omega t \quad (9)$$

式(9)中: ω 为圆角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

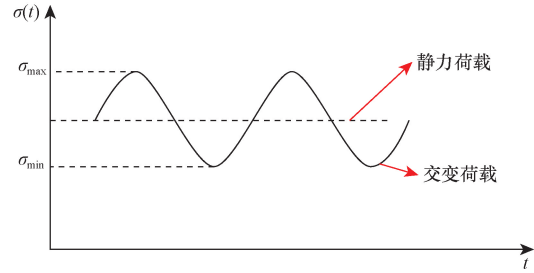


图11 周期荷载等效分解示意图

Fig. 11 Cyclic loading equivalent decomposition diagram

3.1.4 疲劳本构模型的建立

传统西原体的力学模型由弹性体、黏弹性和黏塑性体串联组成。在常应力作用下,该模型具有流变学特征,当 $\sigma < \sigma_s$ 时,变形快速开始,到达一定程度后趋于稳定,形成稳态蠕变,当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时逐步转化为不稳定变形。

传统西原本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_1}t}\right), & \sigma < \sigma_s \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_1}t}\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2}t, & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: η_1 、 η_2 分别为黏弹性体、黏塑性体的黏滞系数; E_M 为弹性体的弹性模量; E_K 为黏弹性体的弹性模量。

由元件间串联性质可知总应力与各串联体应力相同,总应变为各串联体应变之和,可表达为

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 及 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为各串联体的应力及应变。

由于 $t = N/f$, 则 $dt = dN/f$, 故该模型满足条件

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_M \varepsilon_e(N) \\ \sigma_2 = E_K \varepsilon_{ve}(N) + \eta_1 \frac{d\varepsilon_{ve}(N)}{dN} f \\ \sigma_3 = \sigma_{\text{av}} + \eta_2 \frac{d\varepsilon_{vp}(N)}{dN} f \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon(N) = \varepsilon_e(N) + \varepsilon_{ve}(N) + \varepsilon_{vp}(N) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为弹性体、黏弹性体、黏塑性体所受的应力; $\varepsilon_e(N)$ 、 $\varepsilon_{ve}(N)$ 、 $\varepsilon_{vp}(N)$ 为上述3个部件随循环次数增加而产生的应变; $\frac{d\varepsilon_{ve}(N)}{dN}$

为黏弹性体每个循环周期的应变增量; $\frac{d\varepsilon_{vp}(N)}{dN}$ 为黏塑性体每个循环周期的应变增量。

将参数代入式(10)可得基于西原模型建立的疲劳本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\}, & \sigma < \sigma_s \\ \varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\} + \\ \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} \left(\frac{N}{f} \right), & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (13)$$

将初始损伤变量引入式(13),采用全解耦合法进行耦合,可得到改进后的疲劳模型。

当 $\sigma < \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M(1-D_N)} + \frac{\sigma}{E_K(1-D_N)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M(1-D_N)} + \frac{\sigma}{E_K(1-D_N)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2(1-D_N)} \left(\frac{N}{f} \right) \quad (15)$$

但改进的疲劳模型在描述岩石非线性加速变形阶段的流变特性时仍存在一定局限性,为此,考虑将黏塑性体中的线性黏性元件替换成非线性的黏性元件。

对于非线性黏弹性问题,可以采用由试验拟合的经验本构关系式,即

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^b t^c \quad (16)$$

积分可得

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{m+1} \right) A\sigma^b t^{c+1} \quad (17)$$

式(17)中: A 、 b 、 c 均为可由试验结果拟合的参数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; σ 为等效应力; t 为蠕变时间。

岩石的蠕变应变量正比于 t^{c+1} , 则岩石的蠕变柔量正比于 t^{c+1} , 则在周期荷载应力 σ 的作用下, 非线性黏性元件疲劳系数为

$$\eta_2(N) = \eta_{20} \left(\frac{N}{f} \right)^n \quad (18)$$

式(18)中: n 为疲劳变形参数, $n = 0$ 时, $\eta_2(N) = \eta_{20}$ 为线性西原模型, 该参数可以通过试验结果拟合后得到, 用来表示岩石在疲劳加速阶段的应变率; η_{20} 为非 0 常数, 为非线性黏性元件的黏性疲劳系数初始值。

将式(18)代入式(10)中黏塑性体本构关系可得非线性黏塑性体本构关系为

$$\varepsilon(N) = \begin{cases} 0, & \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_{20}} \left(\frac{N}{f} \right)^{1-n}, & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)替换式(15)中黏塑性体本构关系可得改进的非线性西原疲劳本构模型为

当 $\sigma < \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M(1-D_N)} + \frac{\sigma}{E_K(1-D_N)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma}{E_M(1-D_N)} + \frac{\sigma}{E_K(1-D_N)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f} \right) \right] \right\} + \frac{\sigma - \sigma_s}{(1-D_N)\eta_{20}} \left(\frac{N}{f} \right)^{1-n} \quad (21)$$

3.1.5 非线性西原疲劳本构模型的三维推广

裂隙大理岩在三维应力下周期荷载试验的应力状态为

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \begin{bmatrix} \sigma_1(t) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(22)中: $\sigma_1(t) = \sigma_1 + \sigma_d \sin(\omega t)$; σ_d 为周期荷载应力幅值, $\sigma_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ 。

根据周期荷载等效方法可分解为静力荷载与交变荷载, 表达式为

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_d \sin(\omega t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

用张量表示岩石的三维应力状态为

$$\begin{cases} S_{ij} = 2G e, & \boldsymbol{\sigma} = 3K \boldsymbol{\varepsilon} \\ G = \frac{E}{2(1+\mu)}, & K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为球应变张量; \boldsymbol{S} 为偏应力张量; $\boldsymbol{\sigma}$ 为球应力张量; \boldsymbol{e} 为偏应变张量; G 为剪切模量; K 为体积模量; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

三维应力下弹性体、黏弹性体、黏塑性体的应变表达式分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}^e = \frac{1}{2G_M} \boldsymbol{S} + \frac{1}{3K_M} \boldsymbol{\sigma} \\ G = \frac{E}{2(1+\mu)} \\ K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \end{cases} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{ij}^{ve}(N) = \frac{1}{2G_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_K}{\eta_1} \frac{N}{f}\right) \right] S_{ij} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{ij}^{vp}(N) = \frac{1}{\eta_2} \left[Q \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \right] \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{N}{f} \quad (27)$$

$$F = \sqrt{J_2} - \sigma_s / \sqrt{3} \quad (28)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (29)$$

式中: G_M 为弹性体剪切模量; K_M 为弹性体体积模量; G_K 为黏弹性体剪切模量; F 为屈服函数; F_0 为初始屈服强度; Q 为大理岩的塑性势函数; J_2 为应力偏量第二不变量。

这里, $\sigma_2 = \sigma_3$, 故

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \\ \mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \sigma_m \boldsymbol{\delta} \\ \sqrt{J_2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (30)$$

式(29)中: σ_m 为平均正应力; $\boldsymbol{\delta}$ 为单位矩阵。将式(30)代入式(25)~式(27), 再结合式(20)、式(21)可得裂隙大理岩三维应力状态下轴向非线性疲劳本构方程。

当 $\sigma < \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_M(1 - D_N)} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K_M(1 - D_N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_K(1 - D_N)} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f}\right)\right] \right\} \quad (31)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时:

$$\varepsilon(N) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_M(1 - D_N)} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K_M(1 - D_N)} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_K(1 - D_N)} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G_K}{\eta_1} \left(\frac{N}{f}\right)\right] \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{3(1 - D_N)\eta_{20}} \left(\frac{N}{f}\right)^{1-n} \quad (32)$$

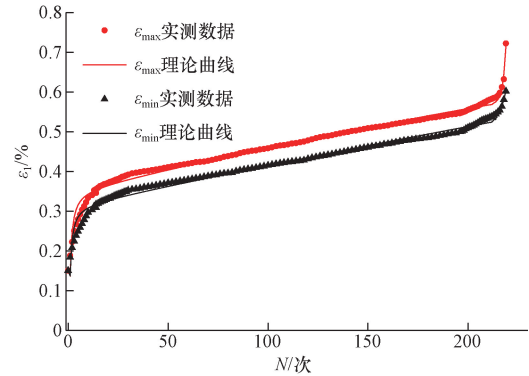
3.2 疲劳本构模型的验证及参数识别

通过采用 Levenberg-Marquardt 最小二乘法, 对周期荷载作用下冻融裂隙大理岩疲劳本构模型进行模型参数识别, 结果如表 4 所示。对 2.2.2 节试验结果进行参数反演的具体步骤为: 将式(32)以自定义函数的形式输入拟合软件; 将大理岩三轴压缩疲劳荷载试验数据输入拟合软件; 选择最小二乘法进行计算得到本构模型参数。对比分析各种工况下的试验结果与拟合结果, 如图 12 所示, 模型能够较好地描述周期荷载作用下冻融后单一裂隙大理岩发生疲劳破坏的 3 个阶段, 验证了模型的适用性。

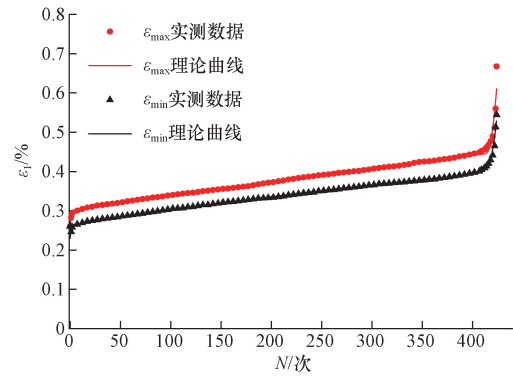
表 4 本构模型参数拟合结果

Table 4 Fitting results of constitutive model parameters

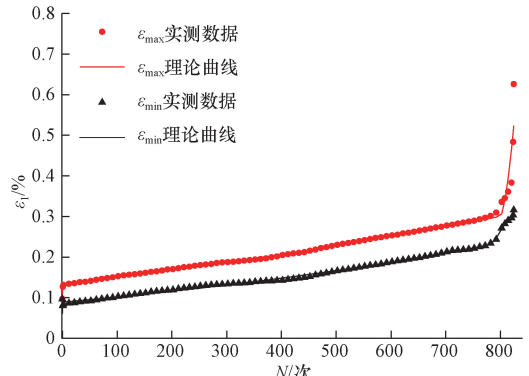
$\theta /$ 振幅 (°) 等级	本构模型参数						
	G_M	K_M	G_K	η_1	η_{20}	n	
30	0.6	257.385	362.827	35.632	343.707	-23.542	0.778



(a) $\theta=30^\circ$, $A=0.6\Delta\sigma_{max}$, $\sigma_3=3$ MPa



(b) $\theta=30^\circ$, $A=0.6\Delta\sigma_{max}$, $\sigma_3=6$ MPa



(c) $\theta=30^\circ$, $A=0.6\Delta\sigma_{max}$, $\sigma_3=9$ MPa

图 12 冻融后不同围压下裂隙大理岩变形特征拟合结果
Fig. 12 Fitting results of deformation characteristics of fissured marble under different confining pressures after freeze-thaw cycles

4 结论

通过对冻融单一裂隙大理岩开展核磁共振微观试验和三轴压缩疲劳宏观试验, 研究了冻融与疲劳荷载耦合作用下单一裂隙大理岩的损伤破坏机

理,得到如下主要结论。

(1)核磁共振细观试验结果表明,随着冻融循环次数的增加,裂隙大理岩核磁共振 T_2 曲线分布整体向右迁移,第二峰与第三峰开始连接,峰总面积逐渐增加,微孔占比减少,小孔及中孔数量增多,岩样内部孔隙结构持续发育,损伤程度不断加大。

(2)三轴压缩疲劳试验结果表明,在频率为 1 Hz、振幅为 $0.6 \Delta\sigma_{\max}$ 的周期荷载作用下,冻融循环 100 次后裂隙大理岩破坏点处的应变及周期荷载循环次数与围压成正相关,围压的作用可以增加裂隙大理岩的延性,提高裂隙大理岩承受疲劳荷载的能力,延缓其变形破坏。随着围压的增加,裂隙大理岩的破坏由局部剪切破坏转变为整体剪切破坏。

(3)引入损伤变量,建立了周期荷载作用下基于西原模型的冻融单一裂隙大理岩三轴压缩疲劳本构模型,理论曲线与试验数据基本吻合。

(4)本文重点研究了围压作用对单一裂隙大理岩疲劳荷载力学特性及损伤规律的影响,因此,仅进行了在一定频率及振幅条件下,不同围压水平的三轴压缩疲劳荷载试验。对不同冻融循环次数、不同频率、不同振幅、不同裂隙数等条件下的冻融裂隙大理岩三轴压缩疲劳损伤特性的研究是下一步的重点工作。

参 考 文 献

- [1] Brondani C, Faccin C, Specht L P, et al. Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures: influence of aggregates, visual analysis, and mechanical tests[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(2): 04022433.
- [2] Chen Y, Lin H. Deterioration laws of Hoek-Brown parameters in freeze-thaw multi-fractured rock mass[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123: 103716.
- [3] Wen H, Yang R, Lu M, et al. Experimental comparisons of different cryogenic fracturing methods on coals[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220: 111250.
- [4] 吴刚,何国梁,张磊,等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1): 2930-2938.
Wu Gang, He Guoliang, Zhang Lei, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1): 2930-2938.
- [5] 王生祖,武康森,达哇,等. 砂岩冻融劣化机理的多尺度试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(35): 15194-15200.
Wang Shengzu, Wu Kangsen, Da Wa, et al. Multiscale experimental study on the mechanism of sandstone freeze-thaw degradation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(35): 15194-15200.
- [6] 任建喜,王晓琳,陈旭. 洛河组砂岩解冻后物理力学性质及破坏特征研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2): 53-158.
Ren Jianxi, Wang Xiaolin, Chen Xu. Physical and mechanical properties and failure mode of Luohe Formation sandstone after thawing[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2): 153-158.
- [7] 王前朋,范宣梅,王文松,等. 青藏高原片麻岩宏观冻融损伤特性试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(31): 13515-13524.
Wang Qianpeng, Fan Xuanmei, Wang Wensong, et al. Experimental study on macroscopic and microscopic freeze-thaw damage characteristics of gneiss in the Tibetan Plateau[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(31): 13515-13524.
- [8] Liu T Y, Zhang C Y, Cao P, et al. Freeze-thaw damage evolution of fractured rock mass using nuclear magnetic resonance technology [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170: 102951.
- [9] 任建喜,宋嘉炜,张琨,等. 周期荷载作用下冻融裂隙砂岩变形破坏机理[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(14): 5943-5950.
Ren Jianxi, Song Jiawei, Zhang Kun, et al. Deformation and failure mechanism of freeze-thaw fractured sandstone under cyclic loading[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(14): 5943-5950.
- [10] Peng K, Zhou J, Zou Q, et al. Effect of loading frequency on the deformation behaviours of sandstones subjected to cyclic loads and its underlying mechanism [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131: 105349.
- [11] Vaneghi R G, Ferdosi B, Okoth A D, et al. Strength degradation of sandstone and granodiorite under uniaxial cyclic loading [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(1): 117-126.
- [12] Wang Y, Feng W K, Li C H. On anisotropic fracture and energy evolution of marble subjected to triaxial fatigue cyclic-confining pressure unloading conditions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105524.
- [13] 张培森,许大强,张睿,等. 不同围压及循环荷载下砂岩的渗流、力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(12): 2432-2450.
Zhang Peisen, Xu Daqiang, Zhang Rui, et al. Experimental study on seepage and mechanical properties of sandstone under different confining pressures and cyclic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2432-2450.
- [14] 李昊禹,孟陆波,李天斌,等. 不同含水状态砂岩单轴循环荷载的微观损伤机制研究[J]. *中国测试*, 2023, 49(10): 163-171.
Li Haoyu, Meng Lubo, Li Tianbin, et al. Study on microscopic damage mechanism of sandstone under uniaxial cyclic loading in different water-bearing states [J]. *China Measurement & Test*, 2023, 49(10): 163-171.
- [15] 张琰,李江腾. 单调及循环加载下大理岩断裂特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3313-3320.
Zhang Yan, Li Jiangteng. Study on fracture characteristics of marble under monotone and cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3313-3320.
- [16] 浦少云,黄质宏,饶军应,等. 低动应力下岩石分数阶 Burgers 本构模型[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(2): 109-115.
Pu Shaoyun, Huang Zhihong, Rao Junying, et al. Fractional-order Burgers constitutive model for rock under low dynamic stress [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(2): 109-115.
- [17] 吴明白,殷亚娟. 岩石损伤本构模型及稳定性分析中的应用 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(12): 98-102.
Wu Mingbai, Yin Yajuan. Application of rock damage constitutive

- model and stability analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(12): 98-102.
- [18] 吕思清, 朱杰兵, 汪斌, 等. 冻融荷载耦合作用下含开口裂隙砂岩宏观损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1124-1135.
Lü Siqing, Zhu Jiebing, Wang Bin, et al. Study on macro-meso damage model of sandstone with open cracks under the coupling action of freeze-thaw and load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1124-1135.
- [19] 万镇昂, 马昆林, 龙广成, 等. 基于 Weibull 分布和残余应变的 SCC 疲劳损伤本构模型[J]. 材料导报, 2019, 33(4): 634-638.
Wan Zhenang, Ma Kunlin, Long Guangcheng, et al. A fatigue damage constitutive model of SCC based on Weibull distribution and residual strain [J]. Materials Reports, 2019, 33(4): 634-638.
- [20] 彭述权, 王培宇, 樊玲, 等. 节理岩体弹塑黏性疲劳本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 379-389.
Peng Shuquan, Wang Peiyu, Fan Ling, et al. Research on elastoplastic viscous fatigue constitutive model of jointed rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 379-389.
- [21]]Lin Q, Cao P, Mao S, et al. Fatigue behaviour and constitutive model of yellow sandstone containing pre-existing surface crack under uniaxial cyclic loading [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 109: 102776.
- [22] Zhong Z, Li Y, Huang D. Prestress loss mechanism and constitutive model of an anchored joint rock mass under low-frequency fatigue loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 1517-1535.
- [23] 郭夏飞, 李伟. 饱和岩石循环冻融蠕变力学特性及损伤分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7584-7591.
Guo Xiafei, Li Wei. Mechanical characteristics and damage analysis of cyclic freeze-thaw creep of saturated rocks [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7584-7591.
- [24] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 10: 1581-1585.
Ge Xiurun, Jiang Yu, Lu Yunde, et al. Experimental study on fatigue deformation characteristics of rocks under cyclic loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 10: 1581-1585.
- [25] 郭建强, 黄质宏. 循环荷载作用下岩石疲劳本构模型初探 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1698-1704.
Guo Jianqiang, Huang Zhihong. Constitutive model for fatigue of rock under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1698-1704.