

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220927001

# 三轴压缩冻融裂隙砂岩疲劳破坏机理与 本构模型研究\*

任建喜, 刘政, 谷禹, 张凡, 谢易, 张路

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 西部铁路、公路沿线的高陡裂隙岩体边坡在冻融循环与疲劳荷载的共同作用下容易诱发边坡失稳等灾害, 亟需研究三轴疲劳压缩作用下冻融裂隙砂岩的破坏机理。为研究冻融裂隙砂岩宏观疲劳破坏规律, 完成了三轴疲劳压缩作用下冻融裂隙砂岩宏观力学试验, 同时进行声发射监测分析, 并采用核磁共振试验分析其微观破坏规律, 建立内变量疲劳本构模型。结果表明: 剪切破坏角度与裂隙倾角呈正相关, 峰值强度、应变与裂隙倾角呈负相关; 砂岩主裂隙衍生支裂隙, 随裂隙角度的增大, 破坏程度加剧, 破坏形态趋于复杂化; 声发射振铃数随裂隙倾角的增大而增加, 且破坏阶段累计振铃数远大于疲劳阶段累计振铃数; 砂岩在20次冻融循环后,  $T_2$ 图谱出现较小的左移现象, 疲劳加载试验后, 各峰值信号增幅明显, 甚至出现新的第四峰; 基于岩石内变量理论, 建立以轴向残余应变为内变量的疲劳本构模型, 理论拟合曲线与试验曲线基本吻合。

**关键词:** 冻融; 裂隙砂岩; 疲劳; 破坏机理; 声发射; 核磁共振试验; 本构模型

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0680-08

## Study on Fatigue Failure Mechanisms and Constitutive Model of Freeze-thaw Fractured Sandstone under Triaxial Compression

REN Jianxi, LIU Zheng, GU Yu, ZHANG Fan, XIE Yi, ZHANG Lu

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

**Abstract:** The high and steep fractured rock slopes along railways and highways in western regions are prone to disasters such as slope instability under the combined effects of freeze-thaw cycles and fatigue loading, which necessitates in-depth research on the failure mechanisms of freeze-thaw fractured sandstone under triaxial fatigue compression. To investigate the macro-micro fatigue failure patterns of freeze-thaw fractured sandstone, macroscopic mechanical tests were conducted on fractured sandstone specimens under triaxial fatigue compression, accompanied by simultaneous acoustic emission monitoring. Additionally, nuclear magnetic resonance (NMR) tests were performed to analyze the microscopic failure characteristics, and an internal variable-based fatigue constitutive model was established. The results showed that the shear failure angle was positively correlated with the fracture dip angle, while the peak strength and strain were negatively correlated with fracture dip angle. The primary frac-

\* 收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072259)资助

作者简介: 任建喜(1968—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事防灾减灾方面的研究。E-mail: renjianxi1968@163.com

通信作者: 刘政(1996—), 男, 硕士, 研究生。主要从事防灾减灾方面的研究。E-mail: 1072642852@qq.com

tures in sandstone generated secondary fractures. With increasing fracture dip angle, the failure severity intensified, and failure modes became more complex. The acoustic emission ringing count increased with increasing fracture dip angle, and the cumulative ringing count during the failure stage far exceeded that during the fatigue loading stage. After 20 freeze-thaw cycles, the  $T_2$  spectrum exhibited a small left shift, and after fatigue loading tests, all peak signals increased significantly, even showing a new fourth peak. Based on rock internal variable theory, a fatigue constitutive model using axial residual strain as the internal variable was established, and the theoretical results were in good agreement with the experimental curves.

**Keywords:** freeze-thaw; fractured sandstone; fatigue; failure mechanism; acoustic emission; nuclear magnetic resonance test; constitutive model

## 0 引言

西部寒区岩体历经地质演变和构造运动,在冻融、疲劳荷载共同作用下岩体结构的稳定性、力学特性以及变形破坏变得更为复杂<sup>[1-2]</sup>。寒区岩体失稳实质是岩体中裂隙水在不断结冰冻胀—消融补给的循环作用下,内部裂隙的扩展、贯通、滑移破裂,最终失去承载能力,引发冻融滑坡、冻融风化等工程灾害。因此,研究冻融裂隙砂岩的疲劳力学特性,能够为寒区岩体工程的稳定性控制与评价提供理论支撑<sup>[3-6]</sup>。

近年来,众多学者对岩石的疲劳特性进行了大量的研究,刘向御等<sup>[7]</sup>、张强等<sup>[8]</sup>进行单轴循环加卸载试验,并结合细观试验,发现岩石孔隙率均呈先减小后增加的总趋势,具有瞬时破裂特征。汪泓等<sup>[9]</sup>、朱凌等<sup>[10]</sup>、赵博等<sup>[11]</sup>对不同含水率、不同裂隙、不同应力上下比的岩石进行单轴循环加卸载试验,得到了不同状态下砂岩的强度、变形及能量演化与分配规律。裴向军等<sup>[12]</sup>对寒区裂隙岩石进行冻融应变试验,发现胀缩率的变化程度与岩样的孔隙率特征有关。王者超等<sup>[13]</sup>对花岗岩进行三轴循环试验,发现残余应变和变形模量与循环次数相关。王宇等<sup>[14-15]</sup>设计4种不同预制裂隙角度的空心圆柱体试样,发现裂隙角度的增大,岩石的疲劳强度、体积变形逐渐增大。以上研究表明,目前岩石疲劳力学特性从含水率、应力比、倾角进行了较为全面的研究,但对冻融裂隙岩石的疲劳破坏机理研究较少,而冻融循环和疲劳荷载是影响西部寒区岩体工程稳定性的关键因素,开展冻融裂隙砂岩疲劳破坏机理与本构模型的研究对寒区岩体稳定性评价至关重要。

基于此,对不同倾角的冻融裂隙砂岩开展三轴疲劳压缩试验,辅以声发射实时监测,并在试样破坏前后进行核磁共振扫描试验,分析其宏细观破坏规律,研究冻融及疲劳荷载作用下裂隙砂岩的破坏机理及演化特征,并建立以轴向残余应变为内变量的疲劳本构模型。研究成果对寒区岩体工程的安全建设、运营及灾害防治具有重要参考价值。

## 1 试验方法

### 1.1 试样制备

按照国际岩石力学与工程学会(ISRM)试验规程<sup>[16]</sup>,将砂岩加工成( $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ )的圆柱体标准试件,对试样两端进行抛光处理,保证试样两端的平行度误差小于 $0.1\text{ mm}$ 。通过岩石数控金刚石切割机对试样进行宏观裂隙预制,裂隙与试样中心径向分别呈 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ,宽度为 $1\text{ mm}$ ,制备完成的裂隙砂岩(图1)。

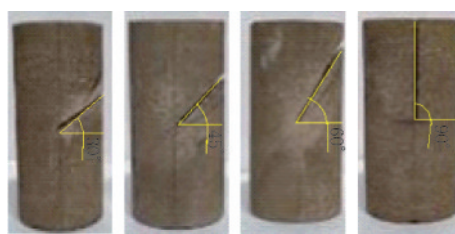
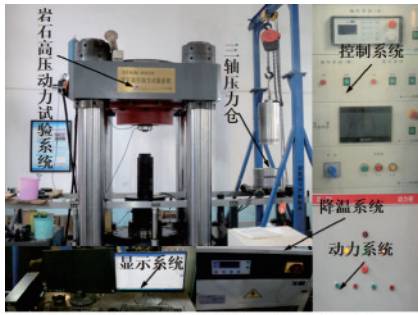


图1 预制贯通裂隙砂岩试样

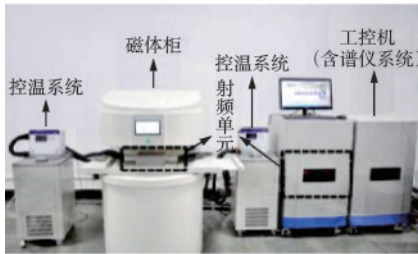
Fig.1 Prefabricated through-going fractured sandstone specimens

### 1.2 试验系统

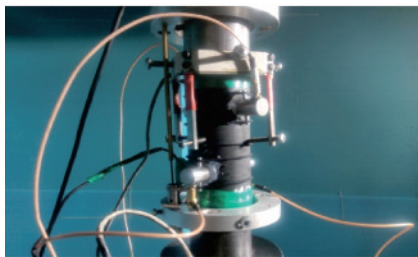
本次试验所使用的仪器(图2)包括冻融循环机、DTAW-8 000岩石高压动力试验系统、声发射检测系统和NMRC12-010V核磁共振孔隙分析仪。



(a) DTAW-8 000岩石高压动力试验系统



(b) NMRC12-010V核磁共振孔隙分析仪



(c) 声发射微型传感器RAFT-30

图2 试验仪器

Fig.2 Experimental apparatus

### 1.3 试验方案

(1)根据《工程岩体试验方法标准》<sup>[17]</sup>对裂隙砂岩试样进行20期冻融循环试验,每期8 h(冻结4 h,解冻4 h),设定冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,解冻温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。并对冻融循环前后裂隙砂岩<sup>[18]</sup>进行核磁共振细观试验,得到砂岩试样内部孔隙分布。

(2)裂隙砂岩试样分两阶段进行加载试验,即常规三轴静态压缩试验和三轴疲劳压缩试验,并在加载过程中同步开启声发射。常规三轴静态压缩试验,轴向加载速率为 $0.06\text{ mm/min}$ ,直至砂岩试样破坏。三轴疲劳压缩试验,围压加载至 $4\text{ MPa}$ ,轴向静载加载速率为 $0.06\text{ mm/min}$ ,加载至 $10\text{ kN}$ 后,施加频率为 $1\text{ Hz}$ ,振幅 $0.5\text{ MPa}$ ,周期 $N=1000$ 的正弦应力波动载疲劳试验。疲劳加载结束后,再次以静载方式加载至试样破坏。破坏后岩样进行饱水处理再次进行核磁共振细观试验,得到破坏后砂岩试样的孔隙分布情况。试样分为两组(12个),一组

为常规三轴压缩加载试样(4个),一组为三轴疲劳压缩加载试样(8个)。

## 2 三轴压缩裂隙砂岩疲劳试验与声发射特征分析

### 2.1 三轴压缩裂隙砂岩疲劳试验

不同倾角的裂隙砂岩试样20次冻融循环后进行三轴试验,绘制砂岩试样三轴压缩应力-应变曲线(图3)、三轴疲劳压缩应力-应变曲线(图4)。分析图3可得:围压为 $4\text{ MPa}$ 的常规三轴压缩试验中砂岩试样破坏峰值为 $4.80、4.07、3.88、3.57\text{ MPa}$ ,峰值轴向应变为 $0.23\%、0.26\%、0.30\%、0.38\%$ 。峰值强度随预制倾角的增大而降低,峰值轴向应变随预制倾角的增大而增大。分析图4可得:在围压 $4\text{ MPa}$ 、振幅 $0.5\text{ MPa}$ 、周期为 $1000$ 的三轴疲劳压缩试验中,砂岩试样疲劳应变为 $0.025\%、0.034\%、0.039\%、0.042\%$ ,疲劳作用下砂岩试样破坏峰值为 $3.54、2.53、2.27、2.01\text{ MPa}$ 。相比同倾角砂岩试样的三轴压缩,峰值强度降低了 $26.3\%、37.8\%、41.5\%、43.7\%$ ,峰值轴向应变降低了 $12.8\%、28.8\%、31.6\%、35.7\%$ 。疲劳应变与砂岩裂隙角度呈正相关,砂岩峰值强度呈负相关。疲劳加载期间,由于反复加卸载作用,试样内部矿物颗粒间继续发生摩擦滑移,形成宏观裂隙面之后,试样发生失稳破坏。砂岩试样在疲劳荷载作用下出现一定的塑性变化,加载曲线与卸载曲线构成滞回曲线,随疲劳应变增大逐渐重合。滞回曲线由稀疏逐渐密集,循环加载初期,应力幅值瞬间变大,引起砂岩内部损伤及塑性变形较大。随循环次数的增大,冻融砂岩试样内

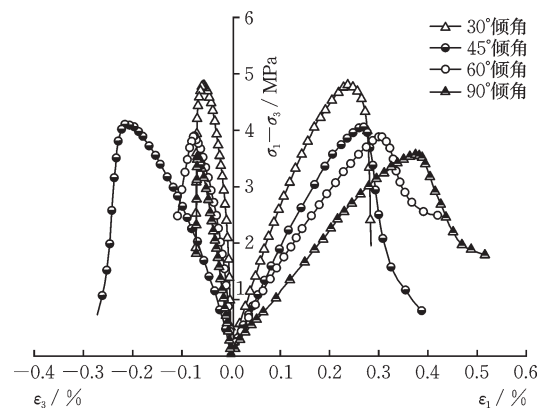


图3 三轴静态压缩应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves under triaxial static compression

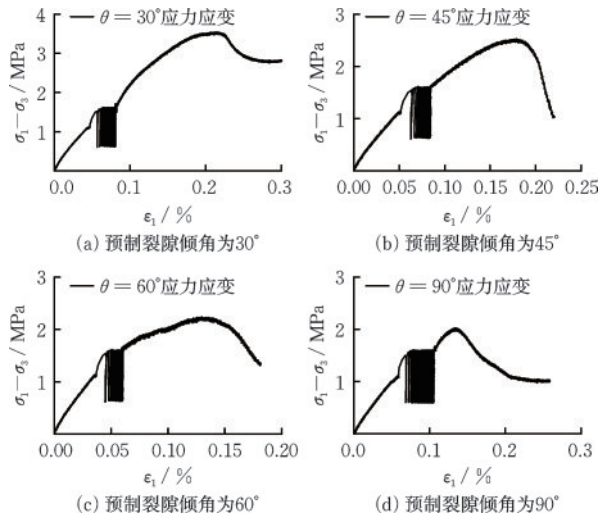


图4 三轴疲劳压缩应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves under triaxial fatigue compression

部裂隙减小,变形逐渐稳定,滞回曲线逐渐重合。滞回曲线的形态变化与岩石内部细观结构息息相关,揭示了在应力幅值增加的瞬间,岩石变形最大、损伤最大。

## 2.2 声发射特征演化规律分析

声发射振铃计数(图5)可以进一步反映裂隙起裂、扩展至失稳破坏的全过程演化特征<sup>[19]</sup>。不同倾角的冻融裂隙砂岩试样,声发射演化规律分为5个阶段:加载初期,围压上升,裂隙压密,裂隙砂岩试样处于弹性阶段,所处应力水平较低,几乎无明显声发射事件,声发射振铃计数曲线近水平分布,处于沉寂期(OA段);疲劳加载前期,砂岩试样应变开始跳跃增长,试样裂隙萌生、扩展,内部颗粒间摩擦滑移,导致振铃计数出现陡增,声发射累计振铃曲线斜率大幅提升,处于活跃期(AB段);疲劳加载中后期,裂隙砂岩应变增长缓慢,声发射振铃几乎不发生,重新归于“沉寂期”,声发射振铃计数小幅度发生,处于过渡期(BC段);砂岩试样进入塑性阶段,出现宏观裂隙面,颗粒间的摩擦滑移加剧,最终试样发生失稳破坏,声发射振铃计数达到极值,持续时间长且信号强度高,处于爆发期(CD段);砂岩试样破坏后,外力加载下岩样存在残余应力,仅有零星声发射事件发生,声发射累计振铃曲线回归于水平状态,处于衰弱期(DE段)。声发射计数与预制裂隙倾角也存在一定关系,30°、45°裂隙砂岩试样在静载初期,既OA段前期振铃,声发射振铃计数不明显,振铃基本为0。60°、90°裂隙砂岩在静载初期,

有明显的声发射振铃计数。随着加载的进行,声发射计数呈现剧烈增加趋势,在试样破坏前声发射计数增加最为明显。随着预制裂隙倾角的变大,声发射振铃计数随之增大。

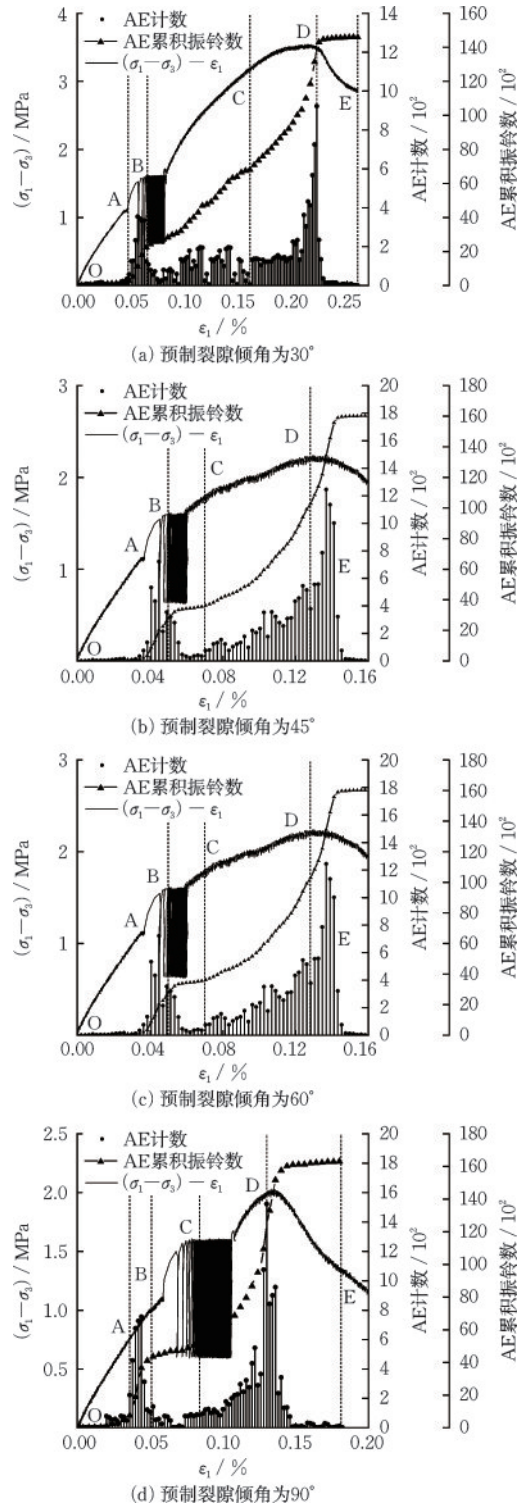


图5 裂隙砂岩三轴应力和振铃计数变化曲线

Fig.5 Variation curves of triaxial stress and acoustic emission ringing count of fractured sandstone

### 3 核磁共振微观分析

核磁共振  $T_2$  谱测试是测量岩石孔隙内部所含的 H 流体, 孔隙分布会对  $T_2$  谱测试产生影响,  $T_2$  谱峰面积反映岩石内部孔隙尺寸及数量变化,  $T_2$  谱峰值的位置由孔隙尺寸决定<sup>[20]</sup>。图 6 为不同倾角裂隙砂岩在试验各阶段核磁共振  $T_2$  谱分布图, 图 7 为孔径占比图。

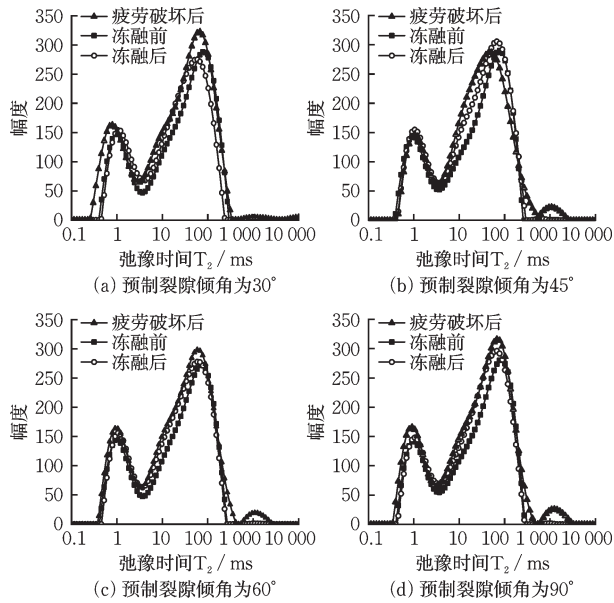


图 6 裂隙砂岩核磁共振  $T_2$  谱分布

Fig.6 Distribution of NMR  $T_2$  spectrum of fractured sandstone

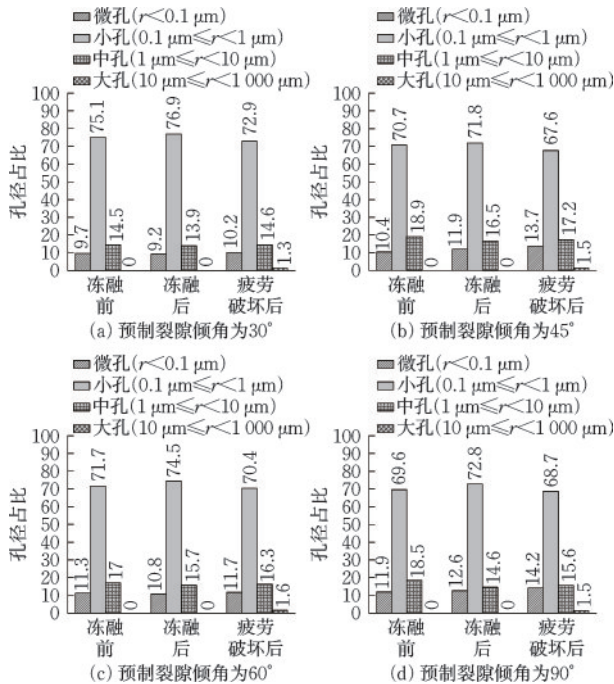


图 7 裂隙砂岩核磁共振孔径占比

Fig.7 Pore size distribution of fractured sandstone based on NMR analysis

不同倾角的冻融裂隙砂岩在 20 次冻融循环后峰谱曲线出现左移现象, 各主峰强度信号变化较小。砂岩在冻融循环过程中, 融化时水分向岩样内部迁移, 冻结时再次冻结成冰, 从而产生冻胀作用, 如此反复的冻融循环使岩样内部孔隙得到萌生与发育, 岩样内部产生初始损伤。对比冻融前后裂隙砂岩孔径占比, 小孔占比有所提升, 中孔降低, 同时出现大孔。裂隙砂岩由于冻胀力的影响, 部分孔隙扩展、延伸、发育成为大孔隙, 孔隙之间相互贯通, 砂岩的孔隙结构发生改变, 渗透性增强, 有利于水分的渗透, 使砂岩内部发生了初始损伤, 其力学性能发生了改变。

不同倾角的冻融裂隙砂岩在疲劳加载破坏后各个主峰强度信号明显增强, 曲线整体呈现左移的趋势。动载扰动下, 岩样内部萌生了微孔隙, 孔隙结构发生了改变, 微孔隙持续扩展发育, 最终与预制裂隙相互贯通, 形成剪切破坏面, 岩样发生失稳破坏。对比加载前后孔径占比, 微孔大幅度的增加, 同时大孔也有所增加, 不同裂隙倾角砂岩微孔占比分别增加了 54.9%、16.8%、25.5%、25.7%, 小孔占比分别降低了 0.7%、1.5%、1.0%、2.8%; 中孔占比降低了 34.3%、6.7%、21.1%、7.7%。由此可以看出, 加载过程微孔数量增大, 当微孔隙在裂隙尖端处形成贯通的裂隙面时, 岩样随即发生失稳破坏。

冻融循环 20 次前不同裂隙倾角砂岩  $T_2$  谱面积为 13 623.27、13 207.61、14 141.082、13 764.384; 冻融循环 20 次后不同裂隙倾角砂岩  $T_2$  谱面积分别增加了 5.17%、5.69%、6.19%、8.05%。冻融循环后砂岩试样  $T_2$  谱面积增长率与裂隙倾角呈正相关。砂岩试样第一峰面积均呈增大趋势, 第二峰面积占比减小, 甚至出现了第四个峰, 但占比相对极小。疲劳破坏后的  $T_2$  谱面积分别增加了 20.7%、12.7%、15.2%、12.0%。三轴疲劳压缩加载后  $T_2$  谱面积变化明显, 第三峰占比增加, 但  $T_2$  谱面积增长率与倾角无明显的线性关系。动载扰动后, 砂岩试样第三峰面积占比提升最为明显, 且有部分岩样出现了第四峰, 岩样内部孔隙中大孔径孔隙比例增大, 孔隙发育、扩展形成新裂隙, 最终与宏观裂隙贯通, 形成破坏面, 导致岩样的失稳破坏, 疲劳加载后的峰面积增加趋势与裂隙倾角不再相关, 动载振幅、频率及周期为主要影响因素。

## 4 裂隙砂岩内变量本构模型的建立

连续介质力学内变量理论是基于材料内部结构变量(即内变量)描述材料性质的一种理论方法。岩石内变量疲劳本构模型可以反映循环荷载作用下岩石变形模量的变化<sup>[22]</sup>。模型选用残余轴向应变作为内变量,同时考虑裂隙倾角对变形模量的影响。

循环荷载作用下岩石的动弹性模量受岩石残余变形影响较大,基于循环荷载作用下可以反映动弹性模量变化的内变量疲劳本构模型,选取残余轴向应变为内变量,建立如下内变量疲劳本构模型<sup>[21]</sup>。

循环荷载下的动弹性模量 $E_{fc}$ 可表达为

$$E_{fc} = A(\sigma^{-cr})^n \epsilon_{lr}^m \quad (1)$$

式中, $A$ 、 $n$ 、 $m$ 均为模型参数; $\epsilon_{lr}$ 为残余轴向应变。

$$\sigma^{-cr} = \frac{q_p - p_p \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta} \quad (2)$$

式中, $\sigma^{-cr}$ 为等效应力; $\beta$ 为等效应力线倾角。

$$p_p = \frac{(\sigma_c + 2\sigma_3)}{3} \quad (3)$$

$$q_p = \sigma_c - \sigma_3 \quad (4)$$

式中, $\sigma_c$ 为峰值轴向应力; $\sigma_3$ 为围压。

依据20次冻融循环裂隙砂岩疲劳加载试验,绘制周期数、动弹性模量与残余应变三者之间的关系如图8所示。在疲劳加载过程中,加载周期数的增加,轴向残余应变减小,动弹性模量增大,轴向应变

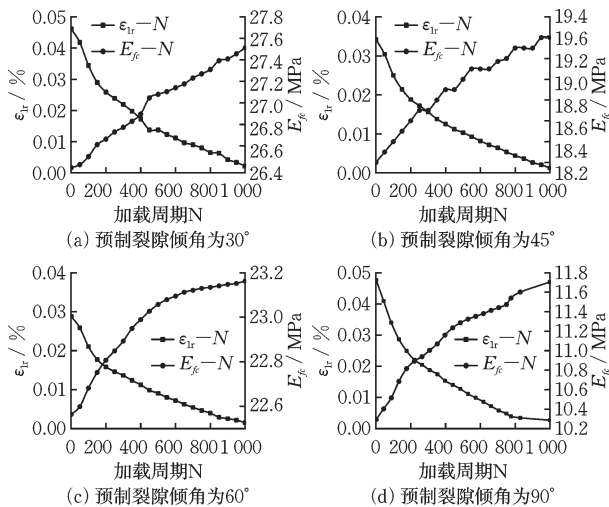


图8 裂隙砂岩动弹性模量、残余轴向应变与周期曲线

Fig.8 Curves of dynamic elastic modulus, residual axial strain, and cycle number of fractured sandstone

与动弹性模量呈现良好的对应关系,轴向残余应变越大,动弹性模量越小。

根据式(1)并对裂隙砂岩的循环阶段进行参数拟合求解,结果见表1,拟合 $R^2$ 均大于0.9,相关性较高。分析图9可知:试验数据与本构模型拟合曲线基本吻合,因此本模型可以较好地反映冻融裂隙砂岩的疲劳力学行为。

表1 模型拟合参数

Table 1 Model fitting parameters

裂隙倾角 $\theta/(^\circ)$	$A$	$n$	$m$	$R^2$
30	3.761	5.545	0.016	0.964
45	3.037	5.030	0.022	0.912
60	3.442	5.353	0.017	0.933
90	2.526	3.814	0.040	0.921

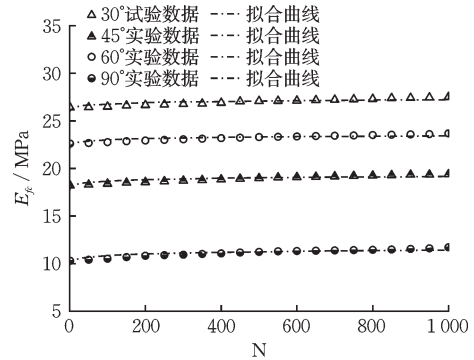


图9 不同裂隙倾角砂岩疲劳加载试验数据与拟合曲线

Fig.9 Fatigue loading test data and fitted curves of sandstone with different fracture dip angles

## 5 结论

(1)三轴疲劳压缩作用下冻融裂隙砂岩力学性质发生劣化,主裂隙衍生支裂隙,裂隙角度的增大,破坏程度加剧,破坏形态趋于复杂化;峰值强度、应变与裂隙倾角呈负相关。

(2)三轴疲劳压缩冻融裂隙砂岩声发射试验表明,累计振铃数随裂隙砂岩裂隙角度的增大而增加,且在破坏阶段累计振铃数大于疲劳阶段累计振铃数。

(3)核磁共振试验结果表明,裂隙砂岩在冻融循环20次后, $T_2$ 图谱出现较小的左移现象。疲劳破坏后,各峰值信号增幅明显,甚至出现第四峰。在疲劳荷载扰动下,裂隙砂岩内部颗粒胶结程度减

弱,微小孔隙增多,内部孔隙发育、扩展形成大孔隙。

(4)基于岩石内变量理论,建立以轴向残余应变为内变量的疲劳本构模型,试验数据与理论结果基本吻合,本构模型合理可靠。

## 参考文献:

- [1] 唐鑫,张吾渝,童国庆,等.冻融循环作用下西宁地区黄土动力特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(4):887-895.  
Tang X, Zhang W Y, Tong G Q, et al. Experimental study on dynamic characteristics of loess in Xining area under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(4): 887-895. (in Chinese)
- [2] 邱恩喜,何巧玲,孙希望,等.冻融循环作用下西藏东南冰碛土剪切力学特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1267-1279.  
Qiu E X, He Q L, Sun X W, et al. Experimental study on shear mechanical properties of moraine soil in southeast Tibet under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1267-1279. (in Chinese)
- [3] 廖浩浩,陈有亮,李诗铭,等.化学溶蚀及冻融循环作用下砂岩的力学特性研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):1009-1017.  
Liao H H, Chen Y L, Li S M, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycling and chemical corrosion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1009-1017. (in Chinese)
- [4] 肖建清,张庆伟,张士科.循环加载试验中岩石单轴抗压强度的影响及溯源算法[J].防灾减灾工程学报,2016,36(5):804-810.  
Xiao J Q, Zhang Q W, Zhang S K. Influence and inverse deriving method of the uniaxial compressive strength in cyclic loading test of rock[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 804-810. (in Chinese)
- [5] 李树刚,刘思博,林海飞,等.分级循环加卸载煤体变形破坏特征试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(4):199-205.  
Li S G, Liu S B, Lin H F, et al. Experimental study on deformation and failure characteristics of coal under graded cyclic loading and unloading [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 199-205. (in Chinese)
- [6] 宋勇军,杨慧敏,谭皓,等.冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1513-1524.  
Song Y J, Yang H M, Tan H, et al. Triaxial creep properties and model of red sandstone under freeze-thaw environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1513-1524. (in Chinese)
- [7] 刘向御,柴肇云,刘绪,等.循环荷载下粉砂岩孔裂隙扩展及卸载破坏特征[J].煤炭学报,2022,47(增1):77-89.  
Liu X Y, Chai Z Y, Liu X, et al. Study on pore fracture propagation and unloading failure characteristics of saltire under cyclic loads [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(Sup1): 77-89. (in Chinese)
- [8] 张强,王军保,宋战平,等.循环荷载作用下盐岩微观结构变化及经验疲劳模型[J].岩土力学,2022,43(4):995-1008.  
Zhang Q, Wang J B, Song Z P, et al. Microstructure variation and empirical fatigue model of salt rock under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 995-1008. (in Chinese)
- [9] 汪泓,杨天鸿,刘洪磊,等.循环荷载下干燥与饱和砂岩力学特性及能量演化[J].岩土力学,2017,38(6):1600-1608.  
Wang H, Yang T H, Liu H L, et al. Mechanical properties and energy evolution of dry and saturated sandstones under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1600-1608. (in Chinese)
- [10] 朱凌,裴向军,崔圣华,等.含脉状缺陷结构岩石循环加卸载损伤及强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):900-911.  
Zhu L, Pei X J, Cui S H, et al. Experimental study on cycle loading and unloading damage and strength characteristics of rocks with vein defects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 900-911. (in Chinese)
- [11] 赵博,徐涛,杨圣奇,等.循环荷载作用下高应力岩石疲劳损伤破坏数值模拟与试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2725-2735.  
Zhao B, Xu T, Yang S Q, et al. Experimental and numerical study of fatigue damage of highly stressed rocks under cyclic loading [J]. Journal of Central South University (Science Edition), 2021, 52(8): 2725-2735. (in Chinese)
- [12] 裴向军,蒙明辉,袁进科,等.干燥及饱水状态下裂隙岩石冻融特征研究[J].岩土力学,2017,38(7):1999-2006.  
Pei X J, Meng M H, Yuan J K, et al. Freezing-thaw-

- ing characteristics of fractured rock mass under dry and saturated conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(7):1999-2006. (in Chinese)
- [13] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(9):1888-1900.  
Wang Z C, Zhao J G, Li S C, et al. Fatigue mechanical properties and constitutive model of granite under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(9):1888-1900. (in Chinese)
- [14] 王宇, 杨浩男, 易雪枫, 等. 增幅疲劳荷载作用下含双裂隙花岗岩空心圆柱破裂演化试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7):1325-1337.  
Wang Y, Yang H N, Yi X F, et al. Investigation on fracture evolution of pre-flawed hollow-cylinder granite under increasing-amplitude cyclic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1325-1337. (in Chinese)
- [15] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10):1976-1989.  
Wang Y, Gao S H, Meng H J, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and fracture network patterns of pre-flawed granite subjected to increasing-amplitude fatigue loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 1976-1989. (in Chinese)
- [16] 国际岩石力学与工程学会试验规程: DZ/T 0276.20—2015[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015.
- [17] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [18] 赵建军, 解明礼, 余建乐, 等. 冻融作用下含裂隙岩石力学特性及损伤演化规律试验研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6):1199-1207.  
Zhao J J, Xie M L, Yu J L, et al. Experimental study on mechanical properties and damage evolution law of fractured rock under freeze-thaw action [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6):1199-1207. (in Chinese)
- [19] Yang S Q, Yang J, Xu P. Analysis on pre-peak deformation and energy dissipation characteristics of sandstone under triaxial cyclic loading[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(12):1199-1207.
- [20] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4):825-831.  
Song Y J, Zhang L T, Ren J X, et al. Study on damage characteristics of weak cementation sandstone under drying-wetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4):825-831. (in Chinese)
- [21] 陈招军, 王乐华, 王思敏, 等. 冻融循环条件下岩石加卸荷力学特性研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(1): 98-103.  
Chen Z J, Wang L H, Wang S M, et al. Loading and unloading mechanical characteristics of rock under freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(1): 98-103. (in Chinese)
- [22] 乔丽苹, 王者超, 李术才, 等. 岩石内变量蠕变模型研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12):3529-3537.  
Qiao L P, Wang Z C, Li S C, et al. An internal-variable creep model for rocks [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12):3529-3537. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)