第 53 卷第 10 期
2025 年 10 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 10
Oct. 2025

文章编号：0253-374X(2025)10-1508-10 **DOI**：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 24247

等幅循环荷载下钾长花岗岩疲劳损伤力学特性试验

吕玺琳[1,2]，张　海[1]，刘先林[1,3]，米德才[3]，薛大为[1,2]

(1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092；3. 广西交通设计集团有限公司，广西 南宁 530029)

摘要：为研究上限应力比对钾长花岗岩疲劳损伤力学特性的影响，开展了单轴压缩试验和4组不同上限应力比(0.75、0.80、0.85、0.90)下的等幅循环加卸载试验。基于试验数据，总结分析了钾长花岗岩应力-应变曲线、疲劳寿命、疲劳极限应变比及宏微观破坏特征演变规律。基于循环加卸载过程中的滞回曲线，计算了动模量、阻尼比、动泊松比及累积残余应变等重要参数。进一步地提出了平均残余应变法计算钾长花岗岩变形破坏过程中的损伤值。结果表明，试样存在一个扩容应力比，当上限应力比高于此值时，试样发生疲劳破坏。疲劳寿命随上限应力比增大而减小，且疲劳破坏时的轴向变形受到单轴静力应力-应变曲线演化的控制。试样宏观破坏程度随上限应力比增大而加剧，断口微观形貌随上限应力比增大而趋于复杂。疲劳破坏时的试样动模量和动泊松比呈现两阶段变化趋势，而阻尼比和残余应变呈现三阶段变化特征。通过平均残余应变法计算得到的试样疲劳损伤值与循环次数呈三阶段的“反S”型演化规律。最后，引入了低周疲劳损伤模型描述疲劳损伤规律，与试验结果对比表明，模型预测效果良好。

关键词：循环荷载；钾长花岗岩；疲劳损伤；变形特征

中图分类号：TU458. 3　　**文献标志码**：A

Fatigue Damage Mechanics of Potassic Granite Under Constant Amplitude Cyclic Loading

LÜ Xilin[1,2], *ZHANG Hai*[1], *LIU Xianlin*[1,3], *MI Decai*[3], *XUE Dawei*[1,2]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Guangxi Communication Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: To investigate the effects of the upper limit stress ratio on the fatigue damage mechanics of potassic granite, uniaxial compression tests and constant amplitude cyclic loading tests with four upper limit stress ratios (0.75, 0.80, 0.85, 0.90) were conducted. Based on the experimental data, the stress-strain curves, fatigue life, fatigue limit strain ratio, as well as the macroscopic and microscopic evolution pattern of granite failure characteristics were summarized and analyzed. Based on the hysteresis curves during cyclic loading, key parameters such as dynamic modulus, damping ratio, dynamic Poisson's ratio, and cumulative residual strain were calculated. Additionally, a damage value computation method based on average residual strain was proposed to describe the deformation and failure process of the rock sample. The results indicate the presence of a dilatancy stress ratio. When the upper limit stress ratio exceeds this threshold, the samples undergo fatigue failure, and the fatigue life decreases as the upper limit stress ratio increases. The axial deformation during fatigue failure is governed by the evolution of the uniaxial static stress-strain curve. Macroscopically, the extent of damage in the samples increases with the upper limit stress ratio, while microscopically, the complexity of fracture morphology also intensifies. The dynamic elastic modulus and Poisson's ratio during fatigue failure exhibit a two-stage variation trend, while the damping ratio and residual strain show a three-stage varying feature. The fatigue damage values, calculated using the average residual strain method, exhibit a three-stage “inverse ‘S-shaped’” evolution pattern as the number of cycles increases. Finally, a low-cycle fatigue damage model was introduced to describe the fatigue damage pattern, whose predictive performance was satisfactory according to the comparison with experimental data.

Keywords: cyclic loading; potassic granite; fatigue damage; deformation characteristics

随着交通、能源等基础设施建设向西部山区发

收稿日期：2024-07-29
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFE0120100)，广西重点研发计划项目(AB22080024)
第一作者：吕玺琳，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为岩土力学与工程。E-mail：xilinlu@tongji. edu. cn
通信作者：薛大为，特聘研究员，博士生导师，工学博士，主要研究方向为计算岩土力学。
E-mail：daweixue@tongji. edu. cn

论文拓展介绍

展，越来越多的地下工程项目建设在西部地区岩体中。工程建设与运营过程中，地下工程围岩常经受爆破、开挖扰动及运营荷载等动力扰动作用[1]。在这些扰动作用下，地下工程围岩承受循环荷载，因而其在循环荷载作用下的力学性能是影响地下构筑物稳定性的重要因素。循环荷载使岩石经历反复的加载和卸载过程，从而导致岩石宏观力学性能的退化和微观裂纹的发育扩展，最终可能发生疲劳破坏[2]。我国西部地下工程建设常穿越钾长花岗岩地层，此类岩石形成的温度较高、压力较低，形成条件较为苛刻，自然露出较少，其在循环荷载作用下的疲劳损伤力学特性尚不够明确。因此，探讨循环荷载下钾长花岗岩疲劳损伤力学特性，对于评价地下工程围岩整体稳定性具有重要意义。

疲劳损伤是指岩石在低于单轴抗压强度的长期循环应力下会发生弱化和破坏[3]。疲劳强度是循环荷载作用下岩石变形特性变化的临界阈值，通常定义为无限次应力循环次数下岩石不发生破坏时的最大应力，而岩石给定应力条件下发生破坏时的循环次数则被定义为“疲劳寿命”[4]。当前，岩石在循环荷载作用下的疲劳行为和力学响应规律已经得到了广泛的研究，荷载频率、上限应力、应力幅值、加载波形和围压等关键因素的影响得到了很好的探索[5]。例如，苗胜军等[6]和梁明纯等[7]针对粉砂岩开展了一系列循环荷载试验，发现上限荷载与疲劳强度的相对大小决定了累积残余应变的变化规律，进一步提出了疲劳强度的确定方法，并揭示了近疲劳强度循环荷载下岩石细观破裂机制。Liu 和 Dai[4]考虑了加载波形对岩石疲劳寿命的影响，试验结果表明，试样对正弦波敏感性介于梯形波和三角波之间，但发现正弦波与实际工程所经受的波形最为接近。李克升和刘传孝[8]以黄砂岩为研究对象开展了不同荷载频率的循环荷载试验，发现试样疲劳寿命和峰值强度随着频率增加均呈现二次函数增长趋势。邓华峰等[9]开展了岩石的多级循环荷载试验，系统地研究了循环荷载作用下动模量、阻尼比和阻尼系数等动力参数的演化规律。此外，需要指出的是，岩石在长期循环荷载作用下不可避免的会产生疲劳损伤，损伤的本质是微裂纹和微孔隙的发育扩展[10]。Erarslan[11]基于扫描电镜（SEM）已获得了循环荷载作用下岩石内部微裂纹的发展过程，并对微观层面损伤演化过程进行了描述。相较于微观层面上的损伤演化过程，岩石宏观损伤演化过程更易获取，弹性模量法、最大应变法和残余应变法是常用的损伤计算方法[12]。在弹性模量法中，循环荷载试验中得到的动态弹性模量可能高于初始弹性模量，这与损伤理论不符。最大应变法和残余应变法则存在着初始损伤值过高的问题，忽略了循环荷载过程中损伤的累积效应。综上所述，已有的研究主要关注常见岩石的疲劳力学特性受不同因素的影响情况，并从微观和宏观角度描述了这些岩石在循环荷载下的损伤演化过程。然而，钾长花岗岩作为一种形成条件较为苛刻，自然露出较少的岩石类型，其在循环荷载作用下的疲劳损伤力学特性尚不够明确。此外，目前关于损伤变量的计算方法仍存在争议，并且宏观破坏和微观损伤之间的关系亦不够清晰。

本文针对地下工程建设扰动花岗岩地层工况，以广西钾长花岗岩作为研究对象，开展了单轴静力压缩和疲劳试验，分析了钾长花岗岩的力学响应特性，研究了钾长花岗岩的疲劳寿命、动模量、阻尼比、动泊松比和残余变形的变化规律。进一步地，根据试样宏观破坏形态并结合断口扫描电镜图，从宏微观角度探讨了钾长花岗岩疲劳破坏过程。利用平均残余应变法进行疲劳损伤变量计算，并引入低周疲劳损伤模型对疲劳损伤进行拟合，分析了钾长花岗岩损伤演化过程。

1　试验设计

1.1　试样制作

根据国际岩石力学学会（ISRM）试验规程[13]，将大块岩石进行钻取、切割和打磨等工序制成高度 h=100 mm、直径 φ=50 mm 的圆柱体试样。为减小试验结果的离散性，试样均从同一大块岩石上制取，并剔除了加工过程中出现破损的试样样品，每组试验两个平行试样，共计 10 个试样，部分试样如图 1 所示。对试样开展了 X 射线衍射（XRD）测试，矿物分析结果表明其主要矿物为石英（38.5 %）、钾长石（27.6 %）、斜长石（15.4 %）、云母（9.9 %），还包括黄铁矿（0.9 %）、粘土矿物（7.7 %）等。

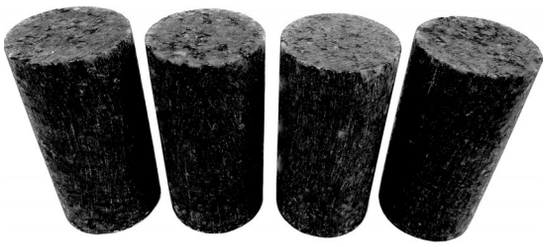
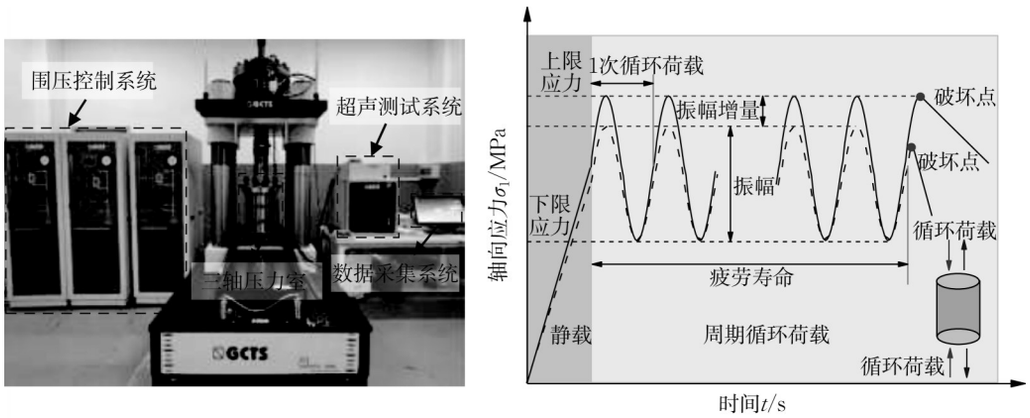


图 1　钾长花岗岩试样

Fig. 1　Potassic granite samples

1.2 试验方案

单轴压缩试验和循环荷载试验均在岩石伺服机上完成,其动荷载最大出力±1 000 kN,最大频率10 Hz,如图2a所示。单轴压缩试验采用应变控制的加载方式,其加载速率为0.1 mm·min^{-1},直至试样发生破坏后结束加载,从而获得单轴抗压强度σ_c和扩容应力σ_{cd}。在单轴压缩试验中,岩样体积由压缩向膨胀转变时对应的应力值为扩容应力,基于扩容应力值可选取单轴循环荷载试验时的上限应力[14]。单轴循环荷载试验采用应力控制的两阶段加载方式。首先以0.2 MPa·s^{-1}的加载速率将轴向应力加载至平均应力σ_0;然后采用正弦波进行循环加载,直至试样发生疲劳破坏,循环应力最大值为上限应力σ_{max},反之为下限应力σ_{min},疲劳破坏前试样完成的应力循环次数为疲劳寿命为N、上限应力比为$M=\sigma_{max}/\sigma_c$,平均应力为$\sigma_0=(\sigma_{max}+\sigma_{min})/2$。工程建设过程中,开挖、钻孔、爆破等施工扰动均会产生动荷载。结合相关文献[15],本文循环荷载加载频率取0.05 Hz。根据单轴静力压缩试验结果,上限应力比M取0.75、0.80、0.85和0.90,同时保持下限应力恒定,加载应力路径如图2b所示。



a 高温高压电液伺服岩石三轴仪　　b 应力路径

图2 试验仪器和循环荷载应力路径

Fig. 2 Test instrument and cyclic loading stress paths

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线

单轴静力压缩条件下试验得到的轴向、径向和体应变演化曲线如图3所示。根据轴向应变演化曲线可知,试样在变形破坏过程中可分为压密阶段、线弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。体应变演化曲线反映了岩样在轴向应力作用下体积由压缩向膨胀转变的过程,其转折点对应的轴向应力为扩容应力,此时岩样内部微裂纹扩展、连通,导致其变形破坏过程加剧。图3表明了花岗岩试样的单轴压缩强度为187.21 MPa,峰值应变为0.373 %,弹性模量为62.16 GPa,泊松比为0.241。此外,试验获得的花岗岩扩容应力为145.83 MPa,其与单轴压缩强度的比值(0.779)即为扩容应力比。

不同上限应力比M(0.75,0.80,0.85和0.90)条件下,试样轴向应变和径向应变演化规律如图4所示。图中,同一个M对应的两条线,是代表的两组

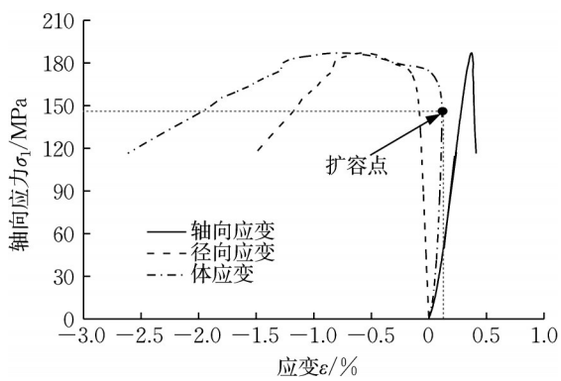


图3 试样单轴静力压缩试验应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves obtained from uniaxial static compression tests

平行试验的结果。试样轴向应变和径向应变的变化规律相似,随着循环次数增加,滞回环向应变增大的方向移动,且滞回环间距呈现由稀疏-密集-稀疏的三阶段特征。循环荷载作用初期,试样在外荷载作用下产生塑性变形,滞回环间距较大。随着外荷载

在一定范围内循环往复,试样内部应力达到新的平衡状态后,几乎不产生塑性变形,滞回环间距较小。最后,多次应力循环下试样在新的平衡状态下继续发育微裂纹并扩展、连通至表面,塑性变形显著,滞回环间距最大,试样发生破坏。综上,循环荷载作用下试样破坏过程经历了屈服、硬化及破坏三个阶段。

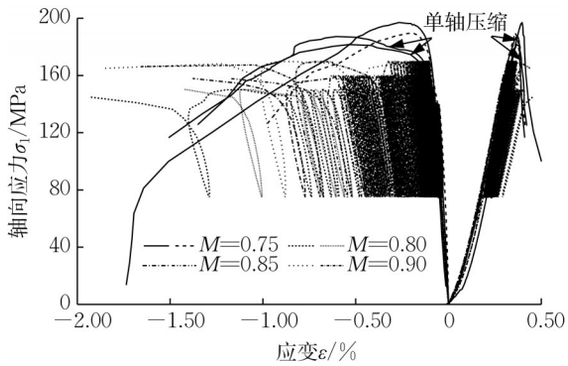


图4　试样循环荷载试验应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves obtained from cyclic loading tests

2.2　疲劳寿命

不同上限应力比M条件下试样疲劳寿命曲线如图5所示。上限应力比M为0.80、0.85和0.90时,试样疲劳寿命分别为91、87和72,而在上限应力比M为0.75时,试样疲劳寿命大于250(上限应力比M为0.75时疲劳寿命远大于其他,故进行250次应力循环后停止)。上限应力比M为0.75时其疲劳寿命趋向于无穷大,而疲劳寿命曲线在上限应力比M为0.75和0.80之间出现陡降,表明单轴循环荷载条件下花岗岩疲劳强度在140.25~149.6 MPa之间。作疲劳寿命曲线的两条切线,其交点即为疲劳寿命曲线转折点,此时M的值为0.779,与单轴静力压缩试验中扩容应力与单轴抗压强度比值基本一致。因此,根据岩样单轴静力压缩试验应力-应变曲线,通过确定扩容应力进而得到单轴循环荷载作用下疲劳强度具有一定的可行性。值得注意的是,一些研究表明扩容应力对应疲劳强度[14],而其他研究则表明将扩容应力等同于疲劳强度是存在偏差的[6],这一方面还值得进一步探讨。

2.3　疲劳极限应变比

当上限应力比为0.75时,试样在250次循环后仍未发生破坏,其加载过程中塑性变形较小,滞回环加载曲线近似呈现线性,且滞回环间距保持稳定。当循环应力比为0.80、0.85和0.90时,试样在多次

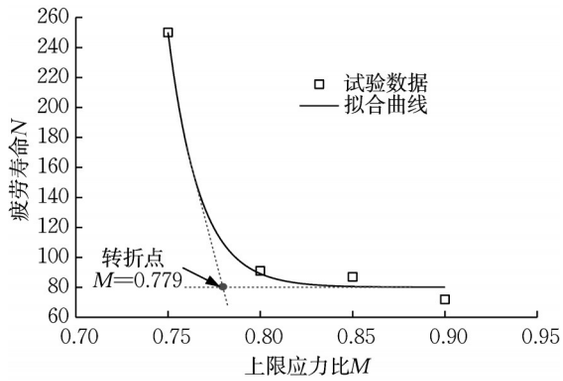


图5　疲劳寿命曲线

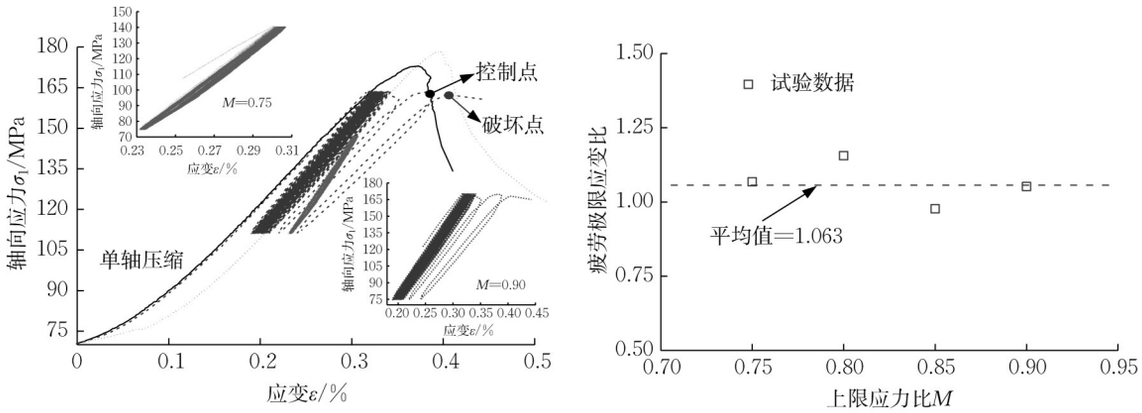
Fig. 5　Curve of fatigue life

循环后发生了疲劳破坏(例如M=0.90),其加载过程中塑性变形较大,滞回环加载曲线为非线性,且滞回环间距随着循环次数增加呈现出逐渐减小、保持恒定和逐渐增大的趋势,如图6a所示。此外,试样经过250次循环后,进行单轴静力加载直至破坏,结果表明其强度相较于只进行单轴压缩试验提高了5.33 %,表明在低于扩容应力的条件下进行应力循环有助于强化试样。根据不同上限应力下的试验数据计算得到疲劳极限应变比,其值稳定在1.063附近,如图6b所示。

岩样在轴向载荷作用下的疲劳极限应变与单轴静力压缩试验控制点处的轴向应变基本一致,疲劳极限应变比可以作为预测岩石在循环载荷下的疲劳破坏应变的依据。因此,通过单轴静力压缩试验确定单轴循环荷载试验下钾长花岗岩疲劳破坏是可行的。破坏点应变为循环荷载下最后一个滞回环最大应力处应变,控制点应变为循环荷载上限应力水平线与单轴静力压缩试验峰后应力-应变曲线的交点。

2.4　宏观破坏形态

试样宏观破坏形态如图7所示,总体上呈现以拉裂纹为主的脆性张拉破坏特征。单轴静力压缩条件下,试样表观分布着多条未贯通竖向拉裂纹,裂纹的长度和宽度较小,同时顶部和中部出现轻微剥落。当上限应力比$M=0.75$时,两条贯通的竖向拉裂纹导致了试样的破坏,裂纹的长度和宽度增大,且周围分布着一些次生裂纹,试样底部剥落、破碎较严重。当上限应力比$M=0.80$、0.85和0.90时,多条竖向拉裂纹贯通试样,裂纹的长度和宽度很大,且周围发育有多条次生裂纹。多次应力循环过后,裂纹之间挤压摩擦现象显著,碎屑、粉末物质增多,试样破坏严重。单轴静力压缩和$M=0.75$时的循环加载试验结果表明,试样在静载作用下短时间内发生拉伸-

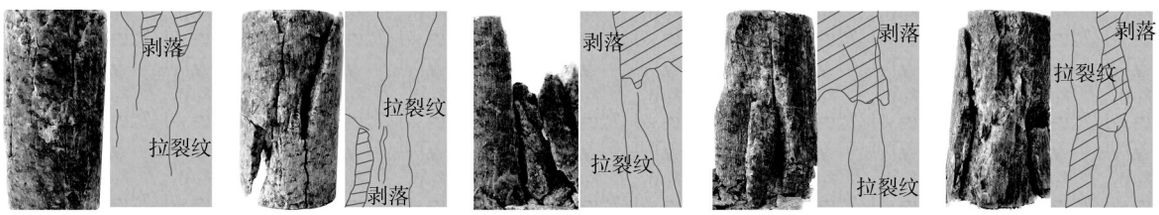


a 循环荷载试验破坏点　　b 疲劳极限应变比

图6　试样循环荷载破坏点与疲劳极限应变比

Fig. 6　Ratios of failure point to fatigue limit strain under cyclic loading

劈裂破坏,其破坏主要由竖向拉裂纹主导,沿破裂面处的变形未得到充分发展,试样整体结构仍完整。而在上限应力比M为0.80、0.85和0.90时,试样在应力循环过程中发生疲劳破坏,竖向贯通裂纹周围次生裂纹发育充分,沿破裂面处的变形得到充分发展,试样大面积剥落,其整体结构破坏崩解。



a 单轴静力压缩　b M=0.75　c M=0.80　d M=0.85　e M=0.90

图7　循环荷载作用下试样的破坏

Fig. 7　Failure of samples after cyclic loading

2.5　微观断口形貌

试样破坏断口微观结构形貌特征如图8所示。单轴静力压缩试验下试样断口扫描电镜(SEM)图表明,试样断口呈平滑面状,无裂隙分布,且断口处碎屑及破碎矿物极少。其原因是单轴静力压缩条件下,试样在短时间内发生破坏,试样矿物晶体发生脆性拉伸断裂,破裂面变形来不及发展。上限应力比M=0.75时的循环加载试验下试样断口SEM图表明,断口光滑程度高,仅分布有零星碎屑,同时存在一处沿晶裂纹和一处台阶状断口。其原因是峰前应力循环对试样存在扰动作用,使得试样微裂纹得到发育,后续静力加载至破坏时碎屑和破碎矿物散布程度增大。当上限应力比M = 0.80、0.85和0.90时,试样在应力循环过程中达到疲劳破坏,应力循环过程中挤压、摩擦等作用使得断口粗糙程度逐渐增大,同时裂隙和碎屑物大量增加,并广泛分布有台阶状、叠片状和波纹状花样。随着循环应力比增大,试样受到的扰动越大,进而微裂纹发育程度越高、分布范围越广,断口面微观形态越复杂。

a 单轴静力压缩　b M=0.75　c M=0.80　d M=0.85　e M=0.90

图8　试样断口微观特征

Fig. 8　Detailed characteristics of sample fracture

3　讨论

3.1　力学特性参数演化规律

3.1.1　力学特性参数计算原理

岩石在加载过程中会出现一些非线性弹性效应，如应力-应变曲线的滞后。在循环荷载加载和卸载过程中，岩石会经历应力-应变关系的非线性变化，岩石的应变会随着应力的增减而发生滞后和不同程度的塑性变形，导致滞回环的出现。滞回环的形状和面积大小反映了岩石在循环荷载下的能量耗散情况和内部损伤程度。基于滞回环曲线，计算了循环荷载作用下岩样的动模量、阻尼比、动泊松比和累积残余应变等重要参数，并分析了其变化规律。

动模量 E_d 能够反映岩石抵抗变形的能力，计算表达式如下：

$$E_d = (\sigma_{dmax} - \sigma_{dmin}) / (\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dmin}) \tag{1}$$

式中：σ_{dmax}、σ_{dmin} 分别为单次应力循环中上、下限应力点对应的应力；ε_{dmax}、ε_{dmin} 分别为单次应力循环中上、下限应力对应的应变。

阻尼比 λ 是描述岩石对循环荷载能量耗散能力的参数，计算表达式如下：

$$\lambda = A_1 / (4\pi A_2) \tag{2}$$

式中：A_1 为滞回环的面积，滞回环面积反映了单次应力循环中岩样内部损伤耗散的能量；A_2 为以加载-卸载起始点连线中点至卸载起始点的直线为斜边的直角三角形的面积。

动泊松比 μ_d 描述了岩样在循环荷载时的侧向应变和轴向应变关系。残余应变是指岩石在经历循环加载-卸载过程后未能完全恢复的应变。

3.1.2　动模量演变规律

不同上限应力比（$M = 0.75$、0.80、0.85 和 0.90）条件下试样动模量 E_d 演化规律如图 9 所示。

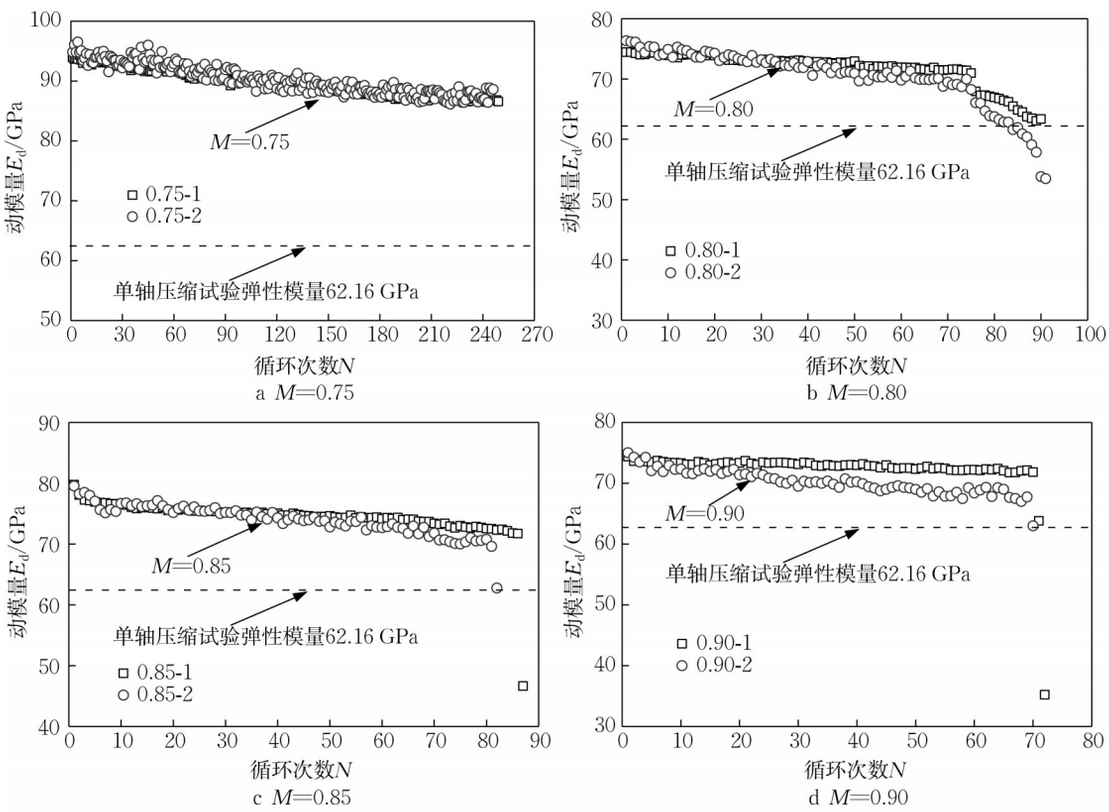


图 9　不同上限应力比下试样动模量演化曲线

Fig. 9　Evolution of dynamic modulus of samples at different upper stress ratios

当上限应力比 $M = 0.80$、0.85 和 0.90 时，动模量呈现两阶段变化趋势，两阶段分界点为破坏点，破坏点前动模量随着循环次数增加逐渐减小，达到破坏点后在几个应力循环内急剧减小，脆性特征明显。高于疲劳强度的应力循环中不可逆塑性变形随循环次数增加逐渐增大，加卸载曲线塑性特征显著，动模量逐渐减小，直至试样破坏时发生陡降。当上限应力比 $M = 0.75$ 时，动模量随着循环次数增加逐渐减小至稳定。低于疲劳强度的应力循环中不可逆塑性变形发展缓慢，动模量几乎保持恒定。上限应力比

$M=0.80$时,动模量演化曲线较$M=0.85$和0.90时更早出现快速减小的趋势,这可能是试样在加载过程中局部裂隙提前贯穿至表面引起的。

3.1.3 动泊松比演变规律

试样疲劳破坏时动泊松比μ_d变化规律($M=0.80$、0.85和0.90)如图10所示。总体上看,随着循环次数增加,泊松比呈现出两个阶段的变化趋势:初期缓慢增长,随后加速急剧增长。同时,岩石的弹性逐渐减弱、塑性逐渐增强,表现为在单次应力循环中泊松比不随应力下降而减小。循环荷载作用前期,试样的变形主要以微裂纹、孔隙的闭合、扩展为主,此时轴向应变较径向应变增长快,泊松比缓慢增长。随着循环次数增加,试样内部微裂纹、孔隙处发育有次生裂纹,同时伴随着不同微裂纹、孔隙之间的扩展、连通,试样的变形主要以径向扩展为主,并伴有明显的体积膨胀现象,此时径向应变较轴向应变增长快,泊松比加速急剧增长。此外,循环荷载作用提高了试样径向变形程度,其动泊松比均大于单轴静力压缩试验泊松比。

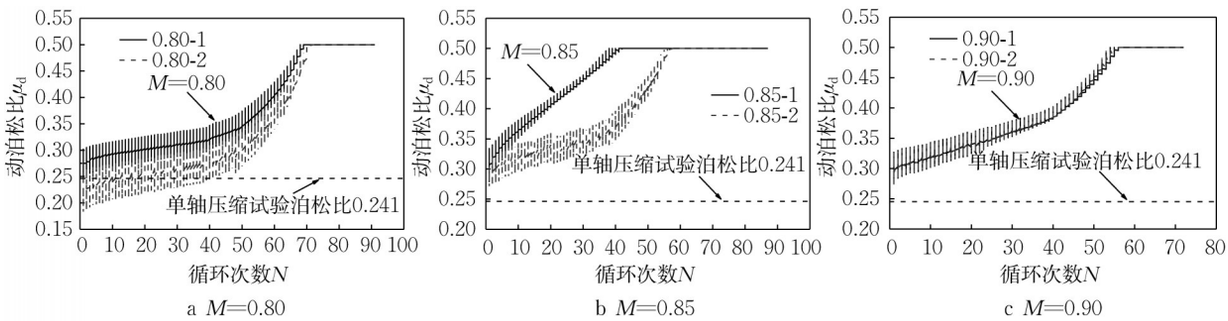


图10 不同上限应力比下试样动泊松比

Fig. 10 Dynamic Poisson's ratio at different upper stress ratios

3.1.4 阻尼比演变规律

试样疲劳破坏时阻尼比λ变化规律($M=0.80$、0.85和0.90)如图11所示。总体上看,随着循环次数增加,阻尼比呈现三阶段变化趋势。阻尼比在阶段Ⅰ和阶段Ⅲ期间变化剧烈,分别呈现陡降和陡增的特征,而在阶段Ⅱ中则呈现出小幅度波动变化特征。通过计算各阶段占比(阶段循环次数与总循环次数之比),可以发现,阶段Ⅰ和阶段Ⅲ平均占比分别为4.87 %和4.10 %,而阶段Ⅱ平均占比为91.03 %。阻尼比反映的是岩石在应力循环中损伤发展所耗散的能量。阶段Ⅰ中,外荷载作用下试样内部微裂纹发育,此时外界输入能量主要以耗散能的形式用于试样损伤发展。阶段Ⅱ中,随着循环次数增加,恒定幅值内试样内部不再发育新的微裂纹,取而代之的是原有微裂纹的周期性闭合与张开,此时外界输入的能量主要以弹性能的形式储存在试样中。最后,阶段Ⅲ中,试样内部原有微裂纹在长期应力循环作用下产生次生裂纹并逐渐扩展、连通至表面,此时外界输入的能量主要以耗散能的形式用于试样破碎,其损伤达到最大。

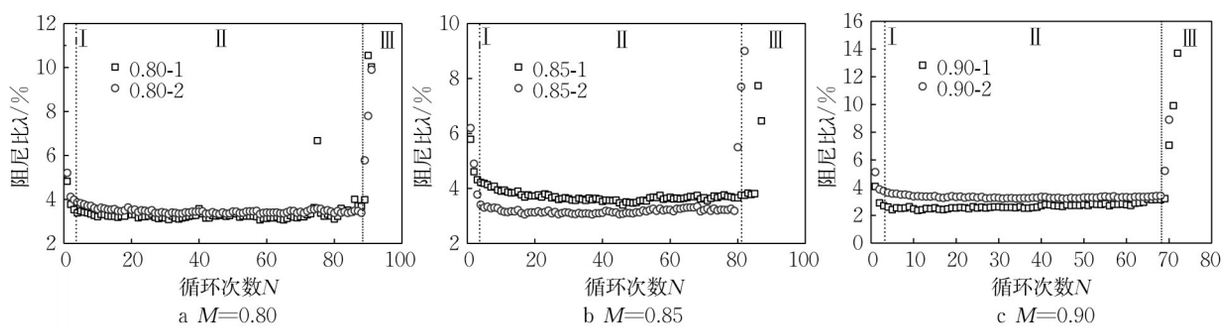


图11 不同上限应力比下试样动阻尼比

Fig. 11 Dynamic damping ratio of samples at different upper stress ratios

3.1.5 累积残余应变演变规律

循环荷载会导致岩石内部微观结构的变化和损伤,使得岩石产生永久性变形,表现为残余应变。定义残余应变为循环荷载中下限应力处的应变,不同

上限应力比（$M=0.75$、0.80、0.85和0.90）下岩样累积残余应变曲线如图12所示。发生疲劳破坏时（$M=0.80$、0.85和0.90）轴向累积残余应变可分为初期快速增长、稳定增长和加速急剧增长三个阶段，径向累积残余应变则可分为初期缓慢增长和加速急剧增长两个阶段。上限应力比$M=0.75$时，发生疲劳破坏的轴向累积残余应变分为初期快速增长、波动变化两个阶段，径向累积残余应变则处于稳定阶段。试样中微裂纹及微孔隙在循环加载初期被压实，此时累积残余应变变化较大，而随着低于疲劳强度的外荷载循环往复，试样中不发育新的微裂纹，累积残余应变变化速率减小。同时，径向累积残余应变在微裂纹及微孔隙的周期性闭合与张开过程中保持恒定。随着上限应力比增大（$M=0.80$、0.85和0.90），外荷载在高于疲劳强度的范围内循环往复，试样内部微裂纹及微孔隙处发育有新的微裂纹，轴向累积残余应变呈现稳定增长趋势、径向累积残余应变呈现缓慢增长趋势。然后，随着循环荷载作用次数增加，试样内部微裂纹扩展、连通直至出现宏观裂纹，轴向、径向累积残余应变均呈现加速急剧增长趋势。最后，试样表面拉裂纹大量发育，变形主要以径向扩展导致的体积膨胀为主，试样发生破坏。

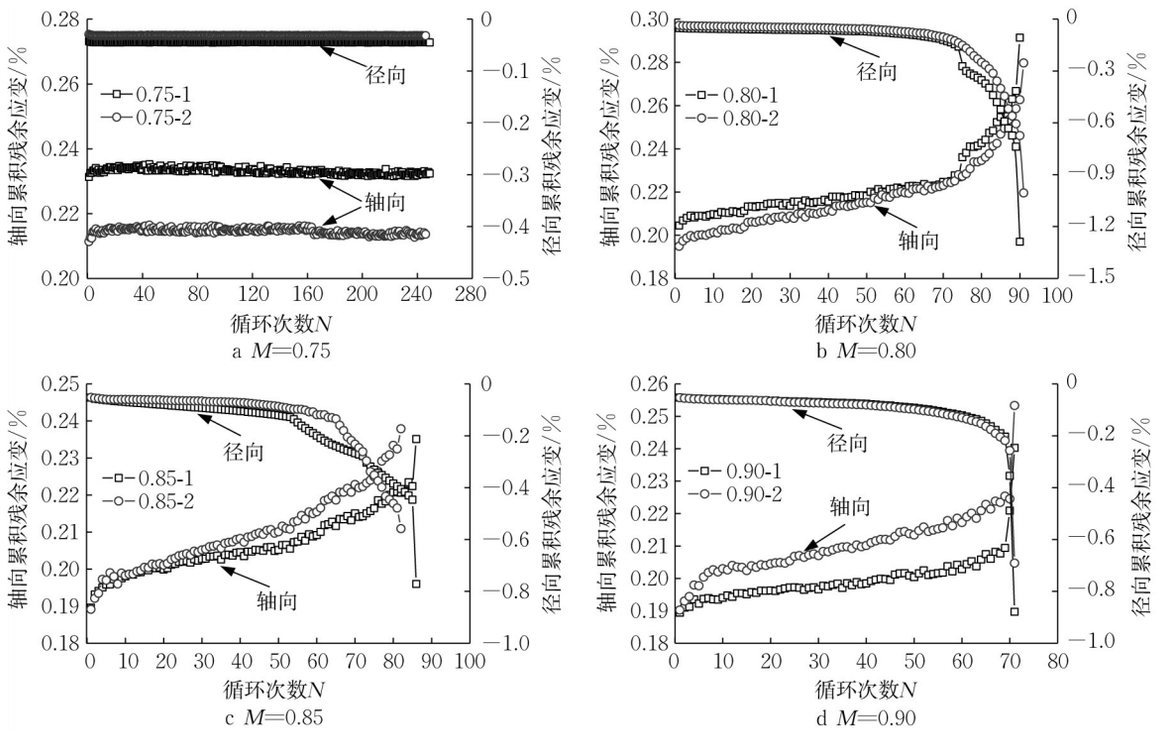


图12　不同上限应力比下试样累积残余应变演化曲线

Fig. 12　Cumulative residual strain evolution at different upper stress ratios

3.2　损伤演化规律

外荷载作用下，岩石变形破坏实质上是其内部微裂纹和微孔隙发育扩展、联通，直至外表面出现宏观裂隙的过程。将微裂纹和微孔隙的发展定义为损伤，则循环荷载作用下岩石疲劳损伤由每次应力循环中产生的损伤累积所引起。疲劳损伤会导致岩石强度、刚度等力学特性的劣化。残余应变反映了岩石在循环荷载下的塑性变形和损伤程度，具有明确的物理意义，能够真实反映岩石力学特性的劣化，可采用残余应变法计算疲劳损伤[13]。目前，采用绝对残余应变法计算疲劳损伤较为常见，但此方法初始损伤过高，严重低估了循环过程中累积的疲劳损伤[4]。若采用相对残余应变法计算疲劳损伤，又导致初始损伤为0，这明显不符合实际。为此，提出平均残余应变法进行疲劳损伤计算，在考虑初始损伤的前提下又强调了循环过程中疲劳损伤的累积。本文提出的疲劳损伤计算表达式如下：

$$D=(D_{\mathrm{a}}+D_{\mathrm{r}})/2 \tag{3}$$

式中：D_{a}为绝对疲劳损伤，D_{r}为相对疲劳损伤，分别表示为

$$D_{\mathrm{a}}=\varepsilon_{i\mathrm{dmin}}/\varepsilon^{\mathrm{u}}{}_{\mathrm{dmin}} \tag{4}$$

$$D_{\mathrm{r}}=\left(\varepsilon^{(i)}{}_{\mathrm{dmin}}-\varepsilon^{(1)}{}_{\mathrm{dmin}}\right)/\left(\varepsilon^{\mathrm{u}}{}_{\mathrm{dmin}}-\varepsilon^{(1)}{}_{\mathrm{dmin}}\right) \tag{5}$$

式中：$\varepsilon^{(i)}{}_{\mathrm{dmin}}$为第$i$次应力循环对应的残余应变；$\varepsilon^{(1)}{}_{\mathrm{dmin}}$为第1次应力循环对应的残余应变；$\varepsilon^{\mathrm{u}}{}_{\mathrm{dmin}}$为循环荷载

作用下疲劳破坏时对应的残余应变。

三种不同方法计算得到的疲劳损伤如图13所示。总体上看,试样疲劳损伤呈现初期快速增长、匀速增长和加速增长的三阶段“反S”型演化规律,且随着上限应力比增大其初始损伤增大、加速增长阶段更加陡峭。在初期快速增长阶段,试样在最初的几个应力循环中因微裂纹、孔隙闭合而导致疲劳损伤积累较快。在匀速增长阶段,试样在应力循环中逐渐发育次生裂纹,疲劳损伤匀速积累。在加速增长阶段,试样微裂纹、孔隙发育、扩展至宏观表面,疲劳损伤急剧积累,试样达到疲劳破坏状态。

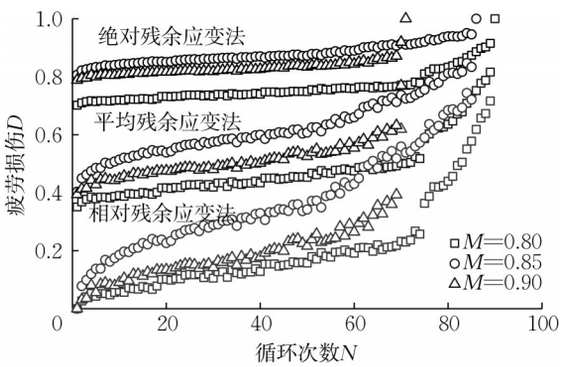


图13 试样损伤演化曲线

Fig. 13 Damage evolution of samples

试样疲劳损伤演化曲线符合“反S”型分布特征,引入低周疲劳损伤模型[16]对其进行描述,表示为

$$D=1-[1-(N/N_F)^a]^b \tag{6}$$

式中:N为循环次数;N_F为疲劳破坏时的循环次数;a和b为拟合参数。

基于损伤模型对疲劳损伤数据进行回归分析,相关系数R^2均大于0.823 3,表明低周疲劳损伤模型可很好地描述疲劳损伤规律,如图14所示。

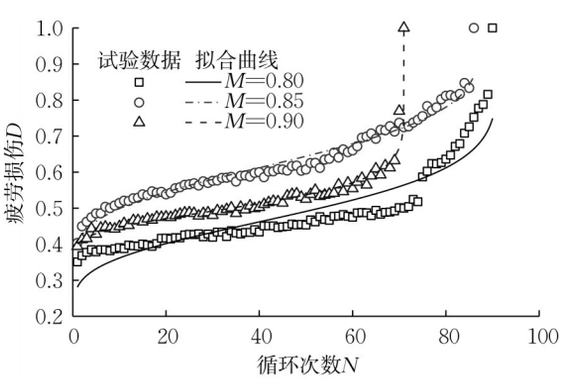


图14 试样疲劳损伤模型预测

Fig. 14 Model predictions of fatigue damage

若以疲劳损伤加速增长阶段的线性斜率(即疲劳损伤对上限应力比的响应系数k)来表征试样损伤规律,可以发现,上限应力比为0.90时疲劳变形响应最显著,k=0.230 7;上限应力比为0.85和0.80时疲劳变形响应偏小,k=0.166 4~0.184 3。这与第2.4节和2.5节的试样宏微观破坏特征分析一致。

4 结论

本文开展了不同上限应力比条件下钾长花岗岩试样循环荷载试验,分析了试样应力-应变响应规律。根据试样宏观破坏形态和断口扫描电镜图像,从宏、细观角度探讨了上限应力比对该类岩石变形破坏特性的影响。基于平均残余应变法获得了试样损伤演化规律,并引入低周损伤模型描述了钾长花岗岩的疲劳损伤特性。论文得出的主要结论如下:

(1)单轴静力压缩试验确定了扩容应力比。当上限应力比低于扩容应力比时,试样不发生疲劳破坏;反之,则发生疲劳破坏,且疲劳寿命逐渐减小。疲劳破坏时极限应变与单轴静力压缩试验中加载控制点处应变几乎一致。循环荷载试验下试样疲劳强度和疲劳极限应变可通过静力压缩试验确定。

(2)基于滞回曲线,获得了循环荷载作用下试样的动模量、阻尼比、动泊松比和残余应变。疲劳破坏时,动模量呈现两阶段下降趋势、泊松比呈现初期缓慢增长和加速急剧增长两阶段变化趋势、阻尼比呈现陡降、波动变化和陡增三阶段变化趋势,轴向残余应变可分为初期快速增长、稳定增长和加速急剧增长三个阶段,径向残余应变则可分为初期缓慢增长和加速急剧增长两个阶段。

(3)不同上限应力比条件下,试样宏观破坏模式均呈现以拉裂纹为主导的脆性张拉破坏,但随着循环应力比增大,其破坏程度加剧。细观分析表明,试样未发生疲劳破坏时断口光滑,表面分布零星碎屑,疲劳破坏时断口粗糙程度提高,裂隙和碎屑物大量增加,并广泛分布有台阶状、叠片状和波纹状花样。

(4)基于绝对残余应变法和相对残余应变法,提出了平均残余应变法计算疲劳损伤。试样疲劳损伤呈现初期快速增长、匀速增长和加速增长的三阶段“反S”型演化规律。引入了低周疲劳损伤模型描述疲劳损伤规律,模型预测效果良好。上限应力比增加,疲劳损伤对上限应力比的响应系数增大。

作者贡献声明:

吕玺琳:研究思路提出,文稿审阅,研究资金获取。
张　海:开展试验,撰写论文。
刘先林:试验分析,研究资金获取。
米德才:参与试验设计。
薛大为:数据验证,论文修改。

参考文献:

[1] 朱要亮, 俞缙, 许汉华, 等. 大理岩短时蠕变-低周疲劳交替作用力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 2115.
ZHU Yaoliang, YU Jin, XU Hanhua, *et al*. Experimental study on mechanical properties of marble under alternation between short-time creep and low-cycle fatigue [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(11):2115.

[2] WANG H, FALL M, MIAO S J. Characteristics of fracture changes and fatigue failure signals for siltstone under cyclic loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 174:105645.

[3] PEELLAGE W H, FATAHI B, RASEKH H. Stiffness and damping characteristics of jointed rocks under cyclic triaxial loading subjected to prolonged cyclic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 181:108121.

[4] LIU Y, DAI F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13:1203.

[5] HUANG Z, ZHANG W, ZHANG H, *et al*. Study on the fatigue properties and constitutive model of siltstone under the coupled action of dry-wet cycles and cyclic loads [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 171: 107990.

[6] 苗胜军, 尚向凡, 王辉, 等. 近疲劳强度循环荷载下粉砂岩强度变化机制[J]. 工程科学学报, 2024, 46(6):982.
MIAO Shengjun, SHANG Xiangfan, WANG Hui, *et al*. Strength change mechanism of siltstone under near fatigue strength cyclic loading [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(6):982.

[7] 梁明纯, 苗胜军, 蔡美峰, 等. 多孔弱胶结粉砂岩疲劳强度确定方法及疲劳破坏先兆[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4):1476.
LIANG Mingchun, MIAO Shengjun, CAI Meifeng, *et al*. Determination method of fatigue strength and precursors of fatigue failure of porous weakly cemented siltstone [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4):1476.

[8] 李克升, 刘传孝. 梯级等幅周期循环荷载作用下双裂隙黄砂岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8):1945.
LI Kesheng, LIU Chuanxiao. Experimental investigation on mechanical properties of yellow sandstone samples containing two coplanar fissures under multistage constant-amplitude-cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8):1945.

[9] 邓华锋, 胡玉, 李建林, 等. 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(12):3402.
DENG Huafeng, HU Yu, LI Jianlin, *et al*. Effects of frequency and amplitude of cyclic loading on the dynamic characteristics of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12):3402.

[10] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1994, 31(6):643.

[11] ERARSLAN N. Microstructural investigation of subcritical crack propagation and fracture process zone (FPZ) by the reduction of rock fracture toughness under cyclic loading [J]. Engineering Geology, 2016, 208:181.

[12] XIAO J Q, DING D X, JIANG F L, *et al*. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3):461.

[13] CULSHAW M G. ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007—2014 [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74:1499.

[14] 俞缙, 姚玮, 任文斌, 等. 高应力下大理岩循环扰动变形规律及一种破坏前兆特征[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8):1521.
YU Jin, YAO Wei, REN Wenbing, *et al*. Deformation laws of cyclic disturbance and a failure precursor feature of marble under high stresses [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8):1521.

[15] ZHOU X, ZHANG D M, NOWAMOOZ H, *et al*. Investigation on damage and failure mechanisms of roadway surrounding rock triggered by dynamic - static combined loads [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55:5639.

[16] 李树春, 许江, 陶云奇, 等. 岩石低周疲劳损伤模型与损伤变量表达方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1611.
LI Shuchun, XU Jiang, TAO Yunqi, *et al*. Low cycle fatigue damage model and damage variable expression of rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6):1611.