矽卡岩在不同幅值变速率循环荷载作用下的阻尼与刚度响应

姜志功[1],李远方[2*]

1.山金国际黄金股份有限公司,北京 100020;
2.北京科技大学资源与安全工程学院,北京 100081

摘 要:为探究加载速率与应力幅值对矽卡岩在循环荷载作用下力学特性的影响,开展了变速率循环加载试验。结合微观结构分析,系统探讨了动剪切模量、阻尼比和损伤演化规律。结果表明:剪切模量随应力幅值的增大而提高,但在同组循环内随加载次数的增加而下降,且低速率下衰减更明显;阻尼比呈先降后升的"凹形"变化,并随加载速率提高而整体降低,表明高速率抑制能量耗散;基于轴向应变建立的损伤模型能够有效描述损伤累积,呈现"S"形曲线。此外,循环荷载下矽卡岩主裂纹呈斜向剪切特征,明显区别于单调加载的垂直拉伸裂纹。研究揭示了加载速率与应力幅值是控制矽卡岩动态响应的关键因素,为相关工程安全评估提供理论依据。

关键词:循环荷载;加载速率;剪切模量;阻尼比;损伤模型;破坏特征

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2518(2026)04-0954-14 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.355

引用格式:姜志功,李远方.矽卡岩在不同幅值变速率循环荷载作用下的阻尼与刚度响应[J].黄金科学技术,2026,34(4):954-967.JIANG Zhigong,LI Yuanfang.Damping and Stiffness Response of Skarn Rock Under Variable-Rate Cyclic Loading with Different Amplitudes[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):954-967.

地震扰动是地下工程可能遭受的重要动力扰动之一(王勇等,2023),其反复加—卸载特征会引起岩体内部裂纹扩展、刚度退化和能量耗散变化(何颖等,2025),从而影响地下硐室、巷道及采场顶板的稳定性。对于金属矿山而言,除天然地震之外,深部开采过程中的爆破振动、采动应力调整及采动诱发微震也会使围岩处于复杂的循环动力扰动环境中。因此,研究矿山岩体在循环荷载作用下的动力学响应,不仅有助于认识地震扰动下岩石材料的刚度退化和耗能特征,也可为矿山地下工程在多源动力扰动作用下的稳定性评价提供科学依据(喻永杰等,2025)。剪切模量是表征岩体抵抗剪切变形能力的重要参数,其大小直接反映岩体在动力扰动作用下的刚度水平(Pan et al,2022;Yan et al,2023;刘新凡等,2025)。阻尼比则反映岩体在循环振动过程中的能量耗散能力,阻尼比越高,岩体对振动能量的耗散越充分,动力响应幅值相应受到抑制(Wang et al,2024a)。剪切模量和阻尼比是评价岩体在地震动、矿震、爆破振动及采动扰动作用下动力响应特征的重要参数。基于此,开展不同循环模式下矽卡岩动力学特性研究,对揭示矿山围岩在循环动力扰动下的刚度劣化、阻尼耗能和损伤演化机制具有重要的理论意义和工程价值。

在力学试验中,岩石的剪切模量和阻尼比受材料组成、应力幅值和加载频率等因素影响(苗浩东等,2023;Jindal et al,2024)。学者们已对完整岩石

收稿日期:2025-12-01;**修订日期:**2026-02-09
基金项目:国家重点研发计划重点专项"覆岩结构与应力场演化理论及全尺度连续监测技术"(编号:2022YFC3004601)资助
作者简介:姜志功(1969—),男,山东烟台人,高级工程师,从事采矿生产技术等研究工作。E-mail:jzg663125@163.com
*通信作者:李远方(2000—),男,江西赣州人,硕士研究生,从事岩石力学等研究工作。E-mail:879865409@qq.com
© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

的疲劳变形、强度及损伤开展了大量理论和试验研究。在砂岩、页岩和盐岩等软岩的疲劳特性研究中,含水率和应力幅值对动剪切模量和阻尼特性具有显著影响。在低应变幅值条件下,含水率对动剪切模量的影响较小,但对阻尼比和阻尼系数的影响显著(Wang et al,2021)。然而,随着应力幅值的增大,含水率对动剪切模量的影响逐渐突显。这表明含水率与应力幅值之间存在复杂的交互作用,共同决定着软岩的动力响应特性(王先甲等,2024;荣浩宇等,2025)。在分级循环荷载作用下,软岩的阻尼参数随应力幅值的增大而增加,且该趋势在不同应力路径下存在差异。具体而言,应力水平递增的应力路径下测得的阻尼参数值高于应力幅值递增的路径,这可能归因于岩石内部结构的非线性响应及相关的损伤累积机制(刘汉香等,2022;余颂等,2025)。在恒定幅值循环荷载作用下,软岩的阻尼比和阻尼系数随循环次数的增加而变化,且遵循特定的演化规律,尤其当应力水平超过岩石的疲劳损伤阈值时,阻尼参数的演化呈现三阶段半U形曲线,涵盖了岩石从初始弹性响应、疲劳损伤累积到最终破坏的全过程(Zhu et al,2022)。

对于大理岩、花岗岩和片岩等硬岩,其力学疲劳特性受循环荷载条件的影响。硬岩通常具有较高的剪切模量和较低的阻尼比,这与其内部结构致密性和矿物成分有关。在循环荷载作用下,硬岩的疲劳损伤和阻尼特性呈现出与软岩不同的演化规律。硬岩的疲劳损伤过程往往更为剧烈,应力—应变曲线在损伤发生前表现出更直观的线弹性阶段。此外,硬岩的阻尼行为可能受内部裂纹和孔隙等缺陷影响,这些缺陷可能增强其阻尼能力(邓鹏海等,2024;宋战平等,2024;赵飞等,2025)。Song et al(2022)通过设计2种差速疲劳荷载试验,对不同干湿循环作用后的煤试样开展了力学性能测试,发现循环荷载作用下煤体刚度存在孔隙压密导致的刚度强化与裂纹扩展引发的刚度劣化2种竞争机制。侯国庆等(2025)对白云岩开展循环加卸载试验,分析试样在不同阶段的弹性模量变化,发现围压变化对动态弹性模量具有正向影响,根据应力水平将变形过程区分为强化阶段和弱化阶段。综上所述,现有关于软岩和硬岩的研究主要集中于岩石类型、应力水平、应力路径和循环次数的影响,忽略了加载速率与试验材料剪切模量、阻尼比之间的关联。

基于此,本研究聚焦于变速率循环荷载作用下硬岩(矽卡岩)的动力学特性,分析加载速率和应力幅值对矽卡岩动剪切模量、阻尼比和损伤演化规律的影响。

1 试样制备与试验方案

1.1 微观测试

试验材料取自中国云南某铅锌矿,在采矿区顶部的凿岩硐室顶板钻取直径为110 mm的钻孔以获取岩芯样品,随后对岩芯样品进行切割、研磨和抛光处理,制备标准试样。由于矿物成分和结构对岩石力学性能具有关键影响,试验前对材料进行了X射线粉末衍射(X-Ray Diffraction, XRD)和偏光显微镜测试,以确定试样的微观组成。如图1(a)所示,偏光镜下可见材料的主要结构成分有阳起石、石榴石、透辉石和石英颗粒,这些颗粒胶结在一起。图1(b)所示为试样破坏后粉碎样品的XRD分析结果,主要成分为黑柱石、阳起石和方解石,含量分别为26.1%、42.6%和16.9%。

矽卡岩的力学行为受其主要矿物颗粒(尤其是黑柱石和阳起石)刚度的明显影响,这2种矿物刚度较高,占岩石总量的60%。这些硬矿物的存在有效阻碍了微裂纹的扩展。在单调荷载作用下,岩石内部的粒间张力可能导致竖向裂纹形成。在循环荷载作用下,不同刚度矿物颗粒之间的错位位移会导致应力集中,尤其在矿物颗粒边缘处。随着荷载循环,应力集中区域会累积损伤,导致裂纹贯通,并沿岩石对角线形成宏观剪切断裂,最终导致岩石破坏。

1.2 试样制备

试验机对试验材料的形态有严格要求,为确保岩石力学试验的科学性和有效性,建议按照国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)要求进行试样预处理,以提高试验数据质量,为岩石力学性能研究及其工程应用提供可靠依据。根据试验目的和要求,试样的形状和尺寸需满足试验设备的规格要求,以避免边界效应(试样上下端面不平行度控制在0.02 mm以内)。图2所示为试样选取过程,首先从钻取的岩芯中筛选无可见裂

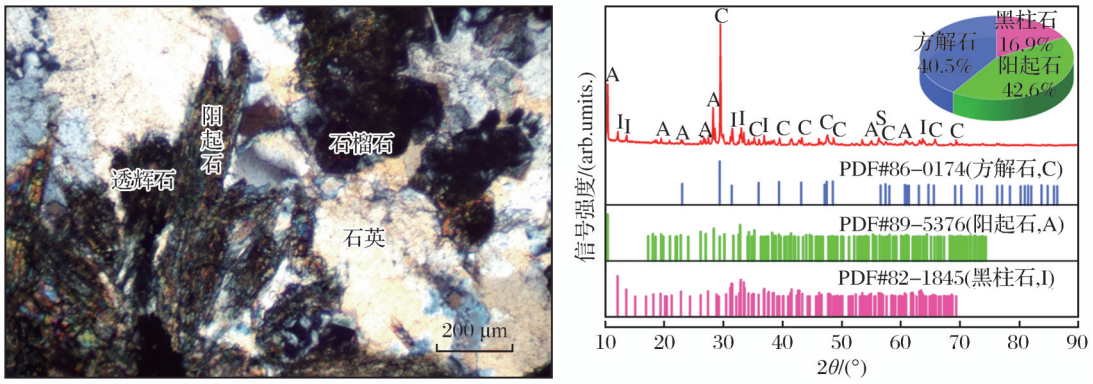


图1　矽卡岩微观结构分析

Fig. 1　Analysis of the microstructure of skarn rock

纹和孔隙等缺陷的样品，采用NM-4A非金属超声波检测仪测量所有试样的质量、尺寸、密度及波速等物理参数；随后选取3个密度和波速接近批次平均值的试样进行单轴抗压强度试验，作为循环荷载试验的应力幅值设计基准；另随机选取4个物理参数离散度小于等于5%的试样进行疲劳试验，以确保试样的代表性和试验数据的可靠性（张泽坤等，2022；宋战平等，2023）。试样的物理参数详见表1。

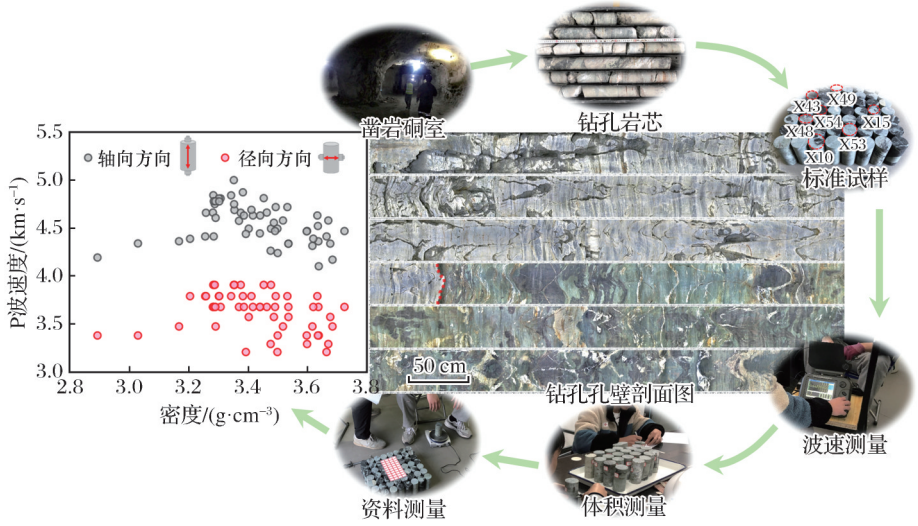


图2　试样制备与物理参数测量流程

Fig. 2　Samples preparation and physical parameter measurement process

表1　矽卡岩试样物理参数（试验部分）

Table 1　Physical parameters of skarn specimens（experimental part）

试样编号	质量/g	高度/mm	直径/mm	密度/(g·m^{-3})	轴向波速/(m·s^{-1})	径向波速/(m·s^{-1})
X10	675.1	100.29	49.82	3.45	4 811	3 906
X15	675.6	99.63	50.09	3.44	4 630	3 676
X49	676.0	100.15	50.19	3.41	4 690	3 788
X43	718.9	100.30	50.23	3.62	4 314	3 472
X48	635.9	100.15	50.19	3.41	4 690	3 788
X53	645.6	99.78	50.03	3.29	4 606	3 472
X54	658.8	100.57	49.58	3.39	4 438	3 205

1.3 试验设备

本研究采用YAW-2000型伺服控制岩石力学试验系统进行循环加载试验,该设备主机刚度超过10 GN/m,适用于花岗岩和矽卡岩等高强度材料的单轴压缩及疲劳试验(图3)。设备最大载荷容量为2 000 kN,能够生成精准平滑的应力—应变曲线。控制界面由德国DOLI电子系统设计和操作,可实现试验路径的精准控制。该精密设备具备载荷、应变或位移等多种控制模式,可在多种手动控制模式之间动态切换。数据采集频率最高可达1 000 Hz,确保了试验结果的高分辨率采集。

试验过程中采用YYSJ50型引伸计(Linear Variable Displacement Transducer, LVDT)测量轴向和径向变形。为防止高应力条件下岩石突发破裂导致引伸计损坏,试件表面包裹了热缩膜,尽管该薄膜会略微提高岩石的强度,但不会对试验结果的可比性产生不利影响,试验过程中变量的一致控制确保了这种强度提升不会影响基于试验数据得出的分析结论。

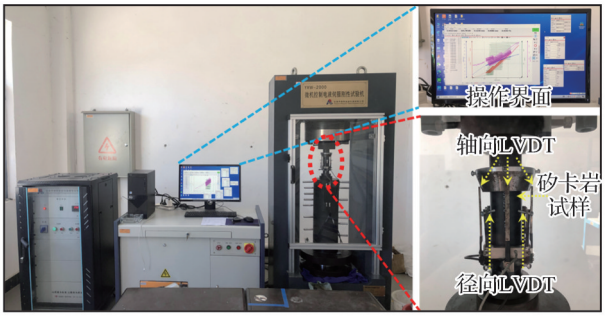
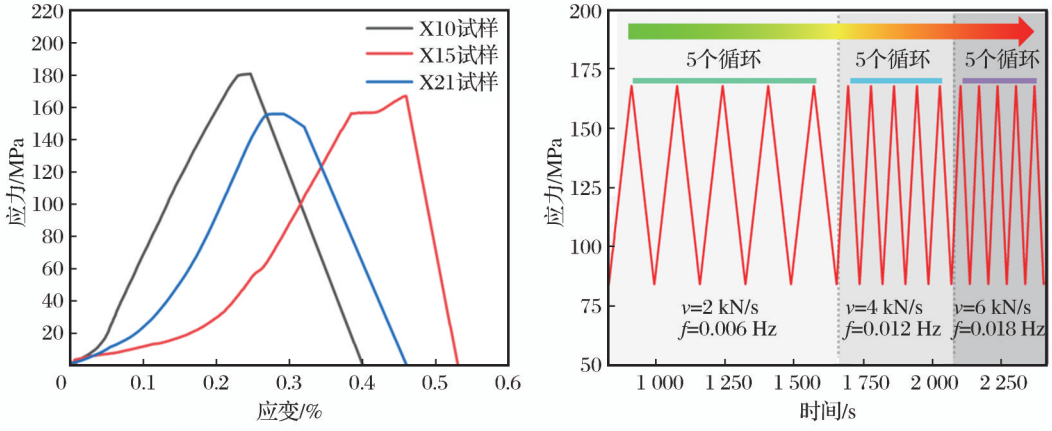


图3 岩石力学测试试验装置

Fig. 3 Rock mechanics test devices

1.4 试验方案设计

(1)单轴抗压强度试验。根据试验前准备,选取X10、X45和X49共3个试样进行单轴抗压强度试验,试验结果作为循环荷载试验路径设计的基准。试验采用应力控制模式,试验机与试样表面的接触力保持为2 kN,以0.2 kN/s的速率加载至试样破坏。3个试样的峰值强度分别为180.86,155.95,167.06 MPa,平均峰值强度为168 MPa,应力—应变曲线如图4(a)所示。



(a) 矽卡岩单轴测试应力—应变曲线　(b) 随载荷频率增加的循环加载路径

图4 试验设计

Fig. 4 Experimental design

(2)循环荷载试验。本部分试验分为恒定幅值循环荷载试验和递增幅值循环荷载试验,为了研究逼近疲劳损伤演化阶段不同速率和幅值下剪切模量和阻尼比等参数的演变趋势,每个循环组包含15次循环,从而揭示加载速率对岩石动力响应的早期影响机制。试验路径如图4(b)所示。加载速率设置如下:前5次循环为2 kN/s(频率f=0.006 Hz),中间5次循环为4 kN/s(f=0.012 Hz),最后5次循环为6 kN/s(f=0.018 Hz)。恒定幅值加载试验的3个试样幅值区间,上限幅值(Upper Limit Amplitude, ULA)和下限幅值(Lower Limit Amplitude, LLA),设计方案如下:模式1为50%σ_m-100%σ_m,模式2为60%σ_m-110%σ_m,模式3为70%σ_m-120%σ_m;在指定循环区间内经历超过6组循环后,以0.2 kN/s的速

率单调加载至试样损伤破坏。递增幅值循环荷载试验为模式4，下限幅值恒定为10%σ_m，每次递增15%σ_m，直至试样破坏。4个试样的峰值强度分别为206.8，258.8，260.3，163.5 MPa，4种模式的加载路径如图5所示。

1.5 剪切模量和阻尼比确定

作为多相材料，黑柱石、阳起石和石英等矿物颗粒之间的相互作用以及微观结构的动态重组对剪切模量具有明显影响。在循环荷载条件下，颗粒之间的相对位置和接触状态发生变化，导致应力集中区域的转移和重新分布，这些变化可能导致剪切模量的变化趋势产生差异。具体而言，应力集中的转移、接触状态的改变、微观结构的重组、损伤累积以及颗粒间作用力的变化均会影响岩石的剪切模量。

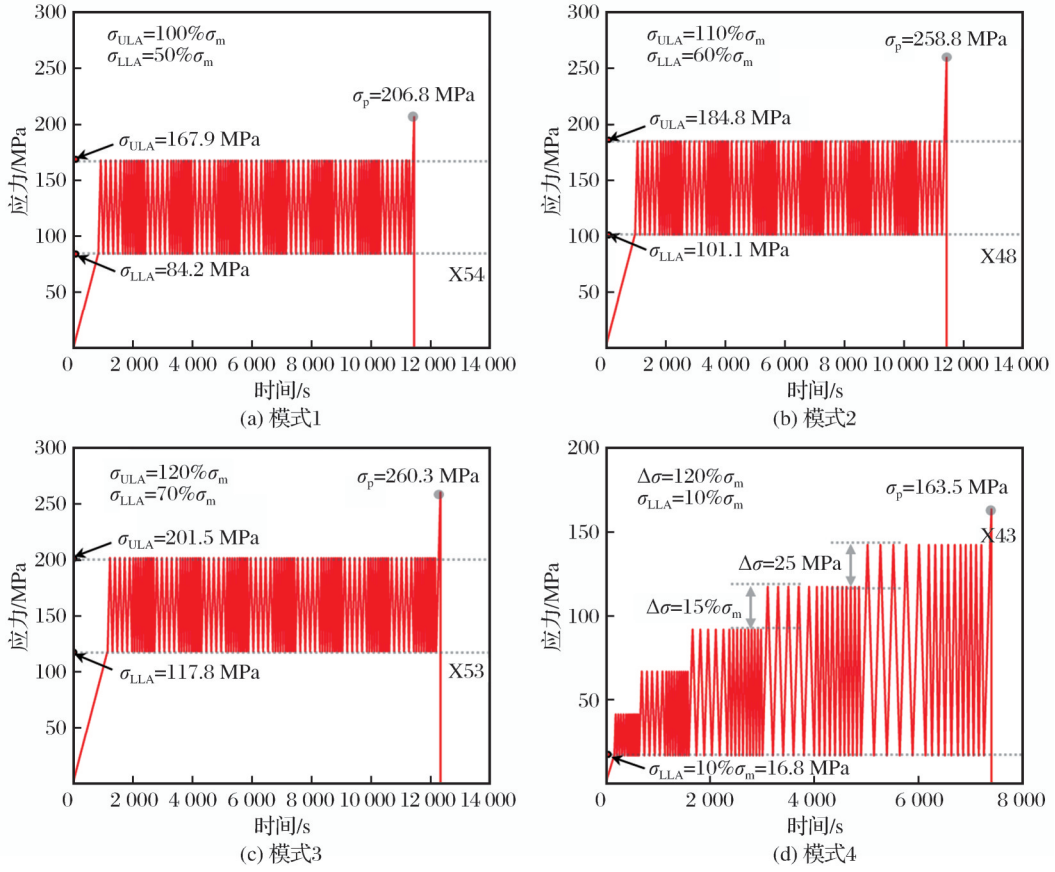


图5 4种模式的循环加载路径

Fig. 5 Cyclic loading path of four modes

在循环加卸载试验中，加卸载曲线不重合，通常形成滞回环，表明单次循环加载过程中存在导致能量耗散的不可逆力学行为。岩石试样的剪切模量和阻尼比通常由其应力—应变曲线确定，反映材料的非线性和滞后特性（宋永明，2025）。本试验中，弹性模量E定义为单次循环内加载阶段的应力差（峰值应力减去最小应力）与应变差（峰值应力对应的应变减去最小应力对应的应变）之比。阻尼比与应力—应变曲线形成的滞回环相关，该比值的大小直观反映了材料在加载作用下因阻尼导致的能量耗散程度。动剪切模量G和阻尼比λ的计算公式如下：

$$E=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{\varepsilon_{max}-\varepsilon_{min}} \tag{1}$$

式中：σ_{max}为单次循环中的最大应力；σ_{min}为本次循环卸载过程中的最小应力；ε_{max}为最大应力对应的应变；ε_{min}为最小应力对应的应变。

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)} \tag{2}$$

式中：v为泊松比。

$$\lambda=\frac{A_R}{4\pi A_S} \tag{3}$$

式中:A_R为ABCDA区域的面积;A_S为AOE区域的面积。图6中横坐标为应变ε_d,纵坐标为应力σ_d。

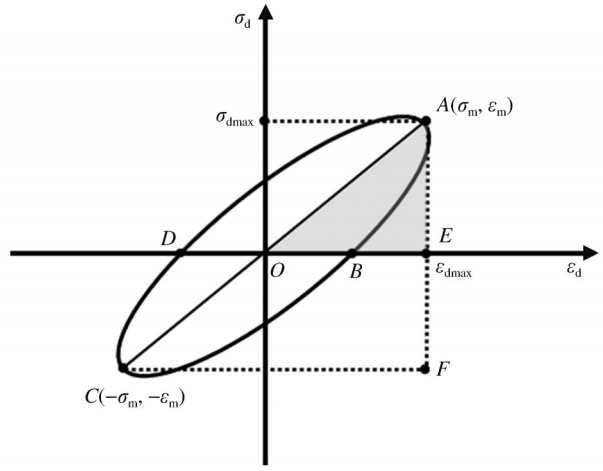


图6 轴向应力—应变滞回环(σ_d-ε_d)

Fig. 6 Hysteresis loop of axial stress (σ_d-ε_d)

2 试验结果分析

2.1 剪切模量演化规律

岩石的剪切模量随循环加卸载次数的累积呈现相应的变化趋势,这主要归因于加载过程中岩石内部微裂纹和裂隙的逐渐扩展和贯通。这导致内部损伤不断累积,岩石的强度和刚度逐渐降低,最终导致破坏(郭纪哲等,2024;侯国庆等,2025)。循环加卸载试验中,矽卡岩的剪切模量变化趋势主要表现为初始下降、随后稳定和最终衰减的特征,受岩石微观结构、加载频率和应力水平等多种因素的影响。深入理解这一变化规律,对预测岩石的工程行为至关重要。

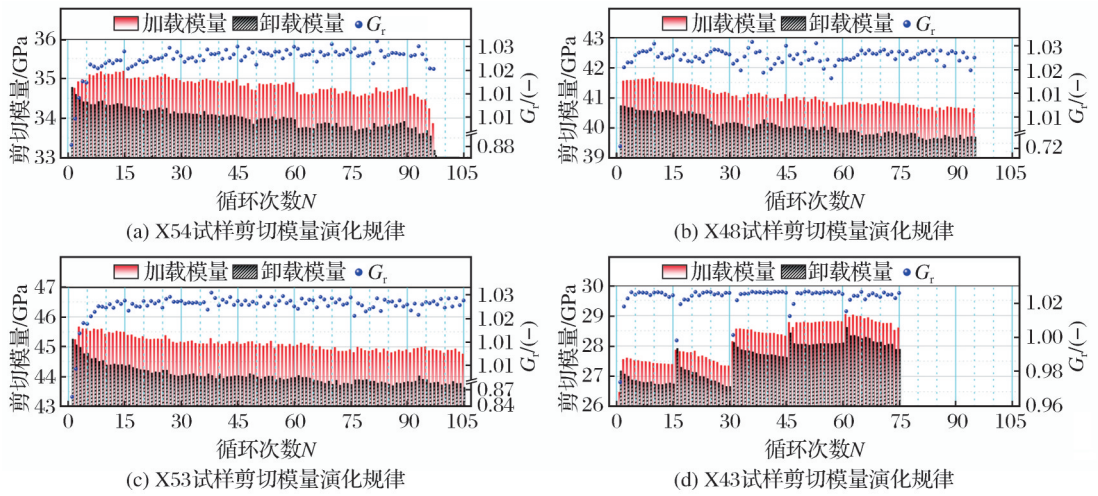
图7展示了4个试样的剪切模量与循环次数之间的关系。由图7可知,随着幅值区间增大,加载和卸载剪切模量均同步增加,加载阶段,X43、X54、X48和X53试样的平均剪切模量分别为28.22,34.78,40.91,45.04 GPa,相对于X43试样的增长率分别为23.3%、45%和59.5%。卸载阶段,X43、X54、X48和X53试样的平均剪切模量分别为27.58,34.01,40.07,44.04 GPa,相对于X43试样的增长率分别为23.3%、45.3%和59.7%。在速率试验中,相同循环水平下的加卸载剪切模量随循环次数的增加而降低,横向幅值试验表明,整个阶段内2种剪切模量均呈整体下降趋势。

G_r定义为加载切线模量与卸载切线模量的比值,如图7(a)所示。初始阶段,G_r随循环次数的增加而快速增加,在同一循环组内,G_r随加载速率的增大而增大。在相邻2个循环组之间,当加载速率从6 kN/s降低为2 kN/s时,G_r突然下降,这表明加载速率对切线模量具有直接影响,这种现象在3个横向幅值加载试样中均一致存在。在递增幅值试验中,相同循环水平下G_r的变化趋势与横向幅值加载的表现相似,先增长,达到1.022时,岩石内部微裂纹扩展速率趋于平缓,矿物颗粒间接触状态趋于稳定,损伤累积进入平台期,此时岩石处于稳定损伤阶段。在不同循环水平下,初始阶段G_r明显增加,之后随循环水平的提高,G_r的增长幅度逐渐减小。

2.2 阻尼比演化规律

在循环加卸载过程中,矽卡岩试样已出现明显的局部损伤,形成不可恢复的宏观裂纹。这将导致在后续循环加卸载过程中这些裂纹进一步扩展,由于裂纹扩展降低了岩石的整体能量吸收能力,阻尼比随之减小。随着循环加载次数的增加,矽卡岩的阻尼比逐渐降低,这归因于岩石内部微观裂纹和裂隙的逐渐扩展和贯通。这一过程导致岩石的刚度和强度逐渐降低,进而导致阻尼比减小,当循环加载次数达到一定值后,矽卡岩的阻尼比趋于稳定。此时,岩石内部的裂纹和微观结构相对稳定,裂纹的发展和贯通速率减缓,阻尼比变化随之放缓。长期循环加载可能导致岩石内部裂纹持续扩展和贯通,其强度和刚度大幅降低,通常在岩石接近损伤状态时,阻尼比会急剧下降,且这种下降可能与岩石的破坏同步发生。在循环荷载作用下,岩石的阻尼比会呈现“凹形”变化规律,即先降低后逐渐增加,这反映了岩石从压实、弹性变形到裂纹扩展、破坏的全过程(宋战平等,2023;Wang et al,2024b)。

图8展示了4个试样的阻尼比与循环次数的关系,通过对比可知,在整个循环阶段,矽卡岩的阻尼比随循环次数的增加呈先下降后上升的变化趋势。如图8(a)所示,在前5次循环阶段,阻尼比在初始时下降,当加载速率提高至4 kN/s时,阻尼比急剧下降后趋于稳定,当加载速率达到6 kN/s时,阻尼

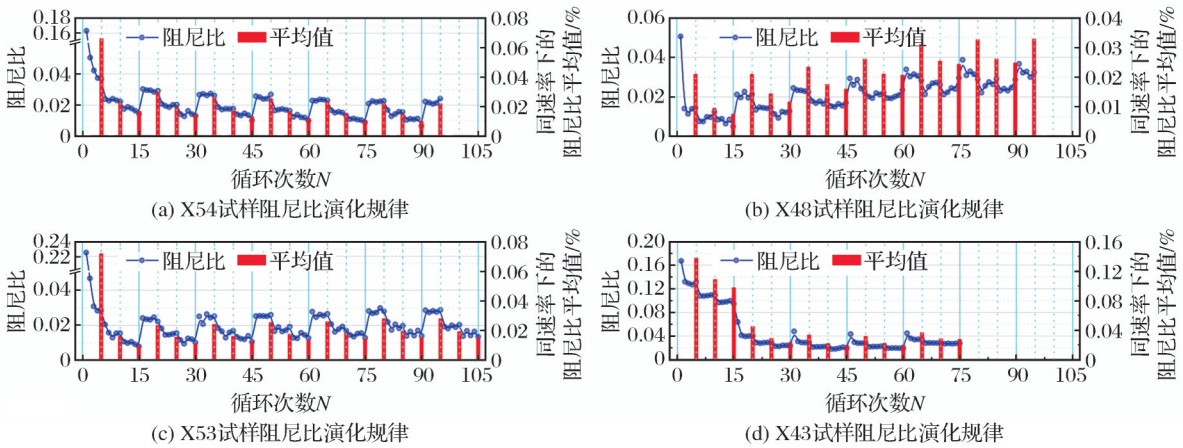


(a) X54试样剪切模量演化规律　(b) X48试样剪切模量演化规律

(c) X53试样剪切模量演化规律　(d) X43试样剪切模量演化规律

图7　剪切模量与循环次数的关系

Fig. 7　Relationship between shear modulus and number of cycles



(a) X54试样阻尼比演化规律　(b) X48试样阻尼比演化规律

(c) X53试样阻尼比演化规律　(d) X43试样阻尼比演化规律

图8　阻尼比与循环次数的关系

Fig. 8　Relationship between damping ratio and number of cycles

比出现不连续下降。上述现象主要原因是在高速率加载下，岩石内部裂纹扩展时间不足，颗粒间摩擦与能量耗散不充分，导致阻尼比降低；当低速率加载时，裂纹有足够时间扩展与贯通，颗粒间摩擦加剧，能量耗散增强，阻尼比更高。对后续未使用循环组的阻尼比变化观察表明，其速率依赖性行为与第一个循环组一致，这种行为在其他3个试样中均存在。图8中的红色柱状表示每种速率下的平均阻尼比，无论恒定幅值还是递增幅值加载，每个循环组在3种速率下的平均阻尼比均呈阶梯式下降，这表明加载速率对阻尼比具有较大的影响。具体而言，加载速率越高，阻尼比越低，能量耗散相应越少。如表2所示，不同试样在相同速率下的平均阻尼比拟合曲线相关性较高，其中X48和X53试样在6 kN/s加载速率下R^2≥0.96，验证了阻尼比与循环次数的对数关系具有良好相关性，且高速率下阻尼比演化更稳定。综上所述，循环荷载作用下砂卡岩阻尼比的变化趋势与内部损伤、裂纹发展和加载速率密切相关，这些趋势对理解和预测动荷载下岩石的长期稳定性至关重要。

2.3　基于轴向变形的岩石损伤特征分析

在循环加卸载条件下，岩石的损伤演化建模较为复杂，涵盖了变形、损伤累积和最终破坏的全过程。损伤变量是岩石力学中的核心概念，量化岩石从完整到损伤的劣化程度。在循环荷载作用下，微观结构变化（包括微裂纹的萌生、扩展和贯通）通过

表2　单个样品相同速率下平均阻尼比拟合

Table 2　Fitting of the mean damping ratio of a single sample at the same rate

试样编号	加载速率/(kN·s^{-1})	拟合曲线	R^2
X43	2	$y = -0.063\ln(x) + 0.1167$	0.772
	4	$y = -0.05\ln(x) + 0.0895$	0.718
	6	$y = -0.044\ln(x) + 0.0789$	0.677
X48	2	$y = 0.0071\ln(x) + 0.0181$	0.833
	4	$y = 0.0096\ln(x) + 0.0084$	0.968
	6	$y = 0.0104\ln(x) + 0.006$	0.961
X53	2	$y = -0.018\ln(x) + 0.0549$	0.520
	4	$y = 0.0021\ln(x) + 0.0151$	0.752
	6	$y = 0.003\ln(x) + 0.0095$	0.983
X54	2	$y = -0.02\ln(x) + 0.0553$	0.768
	4	$y = 0.0071\ln(x) + 0.0181$	0.992
	6	$y = -0.004\ln(x) + 0.017$	0.987

累积损伤效应表现为宏观损伤。损伤演化模型旨在捕捉这些行为,将损伤变量D定义为0(无损伤)至1(完全损伤)(Wang et al,2024c)。该模型基于试验观察构建,并通过理论分析和数值模拟验证,以确保在岩石力学应用中的准确性和可靠性。

轴向残余应变可作为岩石损伤的可靠宏观代理变量,能够直接、定量地反映微裂纹萌生、扩展和贯通等不可逆损伤过程。本研究中,基于轴向应变对岩石损伤进行量化,计算公式如下:

$$D=\frac{\varepsilon_{\mathrm{p}}}{\varepsilon}\cdot\frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\varepsilon_{\mathrm{p}}-\varepsilon_0} \tag{4}$$

式中:D为损伤变量;ε为单次循环中卸载最小应力对应的应变;ε_0为第一次循环的轴向初始应变;ε_{p}为最后一次循环中卸载最小应力对应的轴向应变。

基于式(4)计算结果,图9展示了疲劳荷载作用下矽卡岩试样的损伤演化趋势。图中的"S"形曲线表明损伤值与相对循环次数(循环次数n与总循环次数N的比值n/N)之间的相关性。循环加载初期,岩石内部孔隙的压实导致损伤值快速增加。随着循环次数的累积,裂纹扩展和进一步的损伤累积成为岩石内部的主导过程。当损伤累积到一定程度后,在循环后期损伤值的增长显著加速,这表明岩石处于即将发生损伤的临界状态。如图9(a)所示,在单个循环组内,不同加载速率对岩石的损伤效应存在差异。矩形框标记的数据点显示,损伤随循环次数的增加而增大,且低速率加载条件下损伤值更高,这表明加载速率对损伤累积过程具有影响。对比相邻循环组,6 kN/s与2 kN/s加载速率相比,后者导致的损伤增量更突出,凸显了加载速率在岩石损伤行为中的作用。此外,图9(d)所示循环组中,递增加载速率对岩石损伤的影响与前述趋势一致。随着应力幅值的增大,损伤增量呈下降趋势,这主要是由于较高应力水平下岩石具有更大的变形能力和损伤耐受性,表明应力幅值是影响岩石损伤演化的另一个关键因素。

本研究基于岩石的应力—应变关系建立了数学模型,用于描述循环荷载作用下岩石的损伤演化。该模型通过参数拟合推导得出,可对岩石的损伤状态进行量化和数字化表征。提出的岩石损伤演化数学模型表达式如下:

$$D=1-\left[1-\left(\frac{n}{N}\right)^{a}\right]^{b} \tag{5}$$

式中:n为当前循环次数;N为该试样达到破坏时的总循环次数(疲劳寿命);a为形状参数(损伤累积的陡峭程度和速率);b为位置参数(反映损伤加速转折的相对循环比例)。该模型通过对试验测得的轴向应变数据进行非线性最小二乘拟合得出,所有循环组的拟合相关系数R^2均超过0.97,表明模型具有可靠性。

图10展示了4个试样在不同循环组下最大损伤与相对循环次数之间的关系,以及损伤累积随相对循环次数的演化趋势。通过对试验数据点进行"S"函数拟合,得到损伤变量随循环次数增加的动态变化规律,拟合参数列于图10(a)和图10(d)的左上角框内。所有循环组的拟合相关系数均大于0.97,表明该基于应变的疲劳损伤模型具有较高的可靠性和准确性,能够有效描述循环荷载作用下岩石的损伤演化过程。从整个循环阶段的演化曲线可以看出,累积损伤模型的切线斜率逐渐增大,反映了材料在长期应力作用下微裂纹扩展更为充分的现象。因此,将累积损伤参数与相对循环次数相结合,可为地下工程在循环动荷载条件下的稳定性评价、疲劳寿命预测及风险分级提供具有物理意义的量化依据。

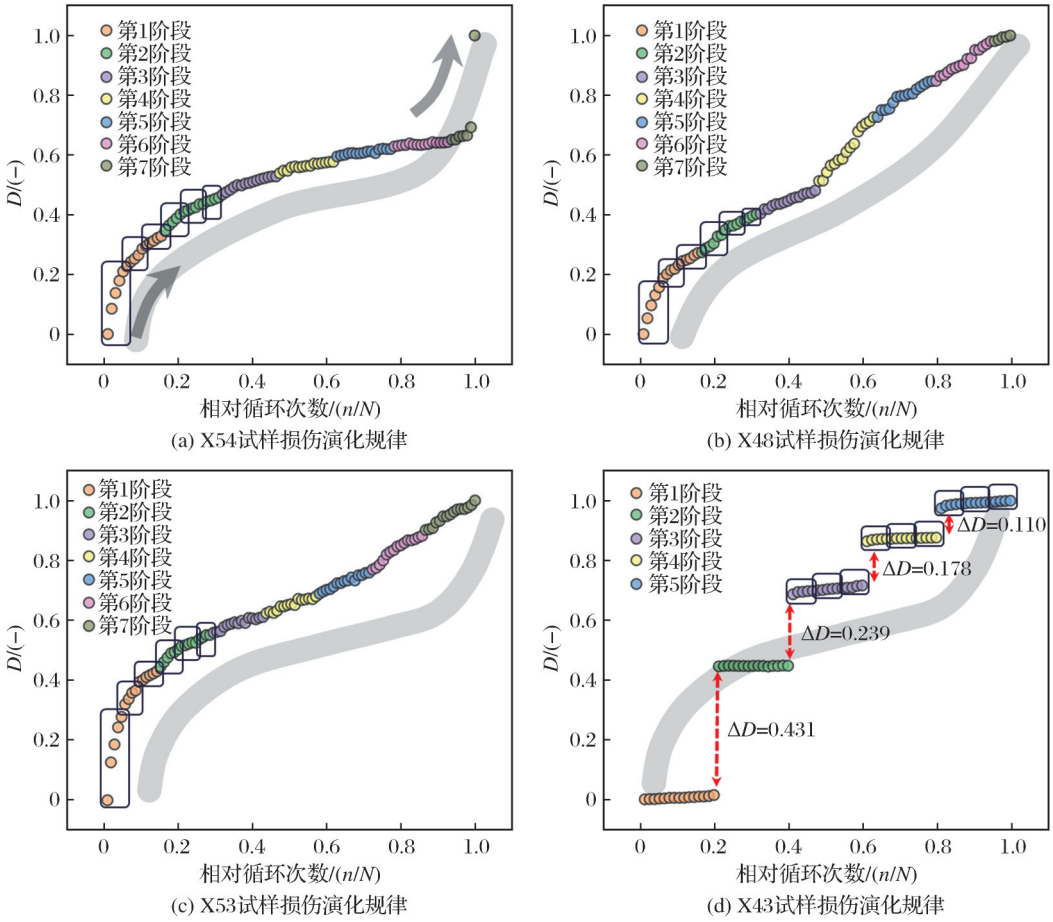


图9　循环荷载作用下岩石损伤演化趋势

Fig. 9　Trend of rock damage evolution under cyclic loading

2.4　加载速率对断裂机制的影响

格里菲斯(Griffith)对玻璃的试验研究开创了断裂力学发展的新纪元,该研究揭示了材料内部缺陷(如裂纹)的存在会显著降低其实际强度,使其低于理论强度。这一见解为理解脆性材料在应力作用下的行为奠定了基础,引入了断裂力学的关键概念,该概念随后被广泛应用于包括岩石在内的多种材料研究中(肖源杰等,2025)。

岩石本质上属于脆性材料,由一种或多种矿物集合体组成,由于其地质形成过程,内部包含大量微观裂纹和缺陷。这些缺陷在决定岩石损伤模式方面发挥着关键作用,岩石损伤模式受力学加载条件、微观结构颗粒组成及固有裂纹尺寸等多种因素的共同影响。研究发现,与循环加卸载条件相比,单调(单一、连续)加载条件下岩石的损伤模式更为简单。循环加载的特点是应力的反复施加和去除,往往导致更复杂的断裂模式,使裂纹扩展区域周围的岩石颗粒产生更多破碎和粉化现象(邵国梁等,2024;黄婉滢等,2026)。这一现象凸显了加载条件对岩石材料完整性和结构行为的影响,强调了在涉及岩石材料的结构(如隧道、地基和岩石工程边坡)设计和分析中考虑循环应力效应的重要性。

图11展示了试验后矽卡岩试件的损伤模式,其中X10、X15和X21试样展示了单轴单调加载下的不同响应特征。这种加载条件下的主要损伤模式表现为贯穿试件全高的垂直拉伸裂纹,这种损伤模式在X10试样中尤为明显,该试件出现了5条完全贯穿的垂直裂纹,同时还存在其他非贯穿裂纹;X15试样观察到明显的贯穿主裂纹,伴随1条与主裂纹相交的剪切裂纹。此外,该试件左侧区域存在大量细小裂纹聚集,表明这些区域存在应力集中和材料破坏现象;X21试样同样表现为贯穿主裂纹,

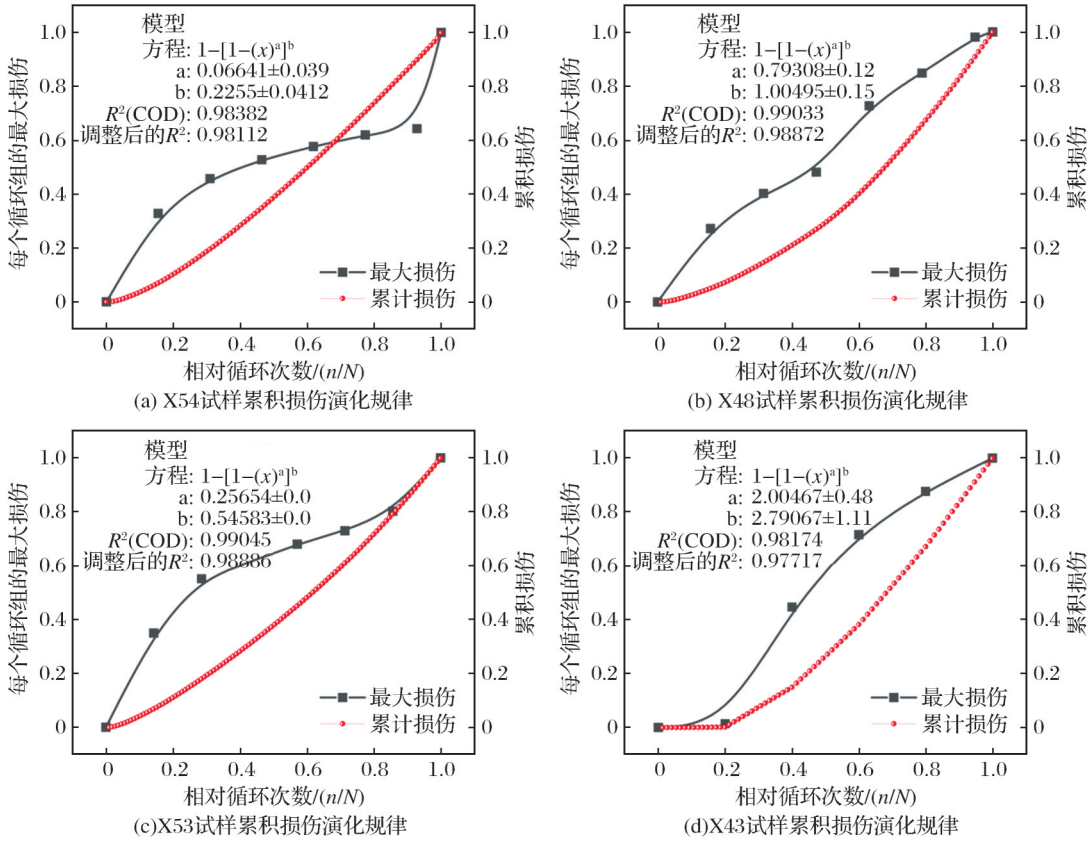


图10　岩石累积损伤演化模型

Fig. 10　Cumulative damage evolution model of rocks

同时在上左角形成一个与水平方向成45°剪切角的锥形裂纹。这些观察结果凸显了内部微观结构特征和加载条件对岩石试件断裂行为的关键影响,贯穿拉伸裂纹表明单调加载下拉伸破坏机制占主导地位,而剪切裂纹和锥形断裂的存在则表明材料内部拉伸应力和剪切应力之间存在复杂的相互作用。不同试样损伤模式的差异,进一步凸显了岩石材料的非均质性,以及原生缺陷与微观结构在引导裂纹扩展与最终破坏模式中的关键作用。

图11展示了循环加载下试样X54、X48、X53和X43矽卡岩的损伤模式,其与单调加载模式存在明显区别。循环加载下的主裂纹呈斜向剪切特征,各试样主裂纹与水平面夹角主要集中在58°~67°,平均夹角约为63°。随着循环加载幅值的增加,可观察到以下趋势:试样主裂纹宽度逐渐减小(分别为4 mm、3 mm和1 mm),次生裂纹数量相应减少(分别为6条、5条和2条)。例如,X53试样以单一剪切主裂纹为特征,凸显了加载幅值对裂纹发展的影响。与单调加载相比,循环加载后的断裂面出现更多粉化颗粒,表明循环荷载促进了颗粒边界或岩石内部原生缺陷周围的拉伸应力集中,进而诱发平行于加载方向的拉伸微裂纹扩展,说明循环条件下拉伸与剪切应力之间存在复杂的交互作用。

从力学机制上分析,不同加载历史对主导破坏模式的影响主要源于应力路径与能量输入方式的差异。在单调加载中,应力持续单向增大,轴向拉应变快速累积,内部微裂纹沿最大主拉应力方向扩展并逐渐贯通,宏观上因而表现为以竖向张拉裂纹为主的破坏形态。而在循环加载过程中,应力经历反复加卸载,局部应力场方向不断调整,使既有微裂纹在多轴应力状态下发生偏转和聚合;同时,荷载循环引起的反复摩擦与滑移作用增强了剪应力分量,促使裂纹沿斜向剪切带优先生长并最终贯通。

通过分析可知,试验材料矽卡岩主要由黑柱石、阳起石和方解石等矿物组成,其刚度关系为黑柱石>阳起石>方解石。黑柱石和阳起石作为较硬

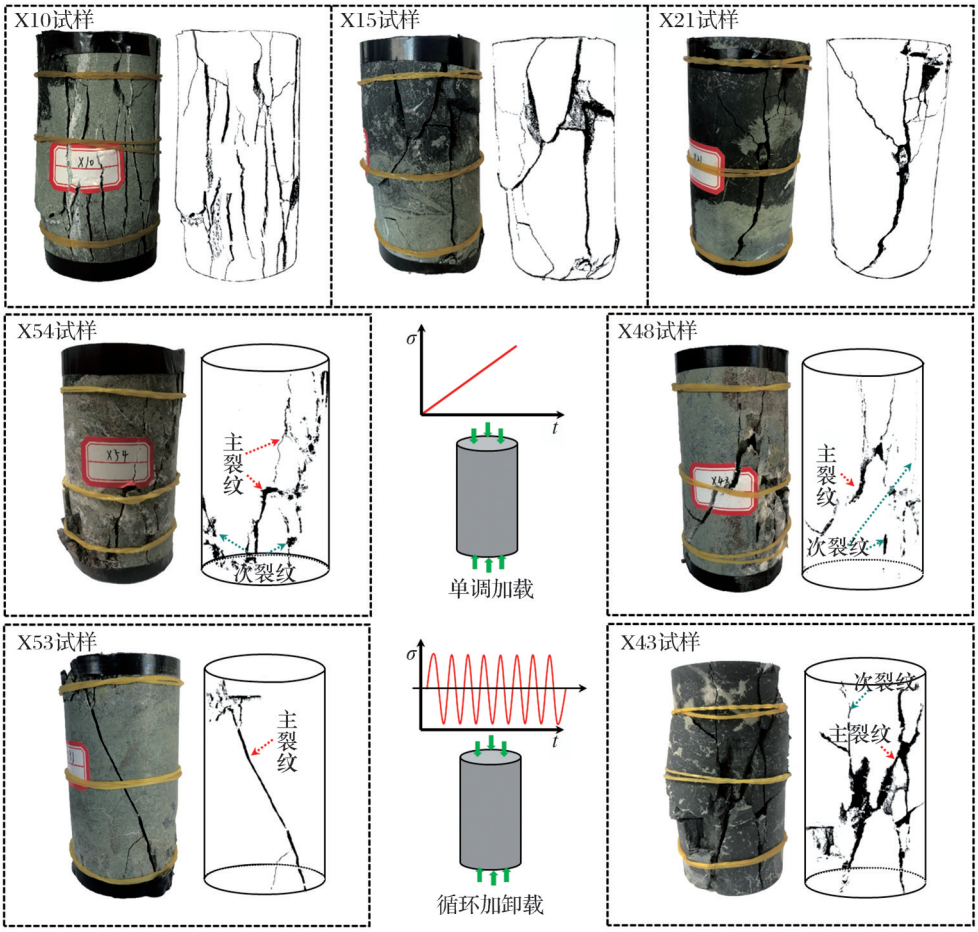


图11　矽卡岩损伤破坏模式图

Fig. 11　Diagrams of damage failure patterns of skarn

矿物，占主要矿物含量的60%，在抑制微裂纹扩展方面发挥着重要作用。在单调加载下，晶间张力导致垂直裂纹扩展，而循环加载则引发不同刚度矿物之间的颗粒错位和位移。这种错位导致矿物颗粒边缘产生应力集中，尤其在岩石对角线方向，反复摩擦使裂纹聚合成宏观剪切带，最终导致岩石破坏。该分析阐明了不同加载方式下岩石断裂的复杂机制，揭示了矿物组成与加载动态之间的相互作用如何影响裂纹扩展和岩石破坏，这对理解这些机制对于预测不同应力条件下岩石的行为至关重要，对建立在岩体内部或之上的结构稳定性设计和评估具有重要意义。

3　结论

设计了3种不同加载速率，在递增幅值和恒定幅值2种路径下进行循环荷载试验，分析了加载速率和应力幅值对其动剪切模量、阻尼比及损伤演化规律的影响。研究重点阐述了加载速率、阻尼比与岩石力学行为之间存在复杂的关系，得出如下主要结论：

（1）在恒定幅值加载条件下，随着幅值区间的增大，加载和卸载阶段的剪切模量均呈上升趋势；相反，在横向幅值试验中，剪切模量在整个试验阶段呈下降趋势。此外，相邻2个循环组的剪切模量比出现突然下降，表明较高的加载速率将导致更大的G_r值。

（2）在循环过程中，闪长岩的阻尼比随循环次数的增加呈先下降后上升的变化趋势，这一趋势在恒定幅值和递增幅值加载路径下均存在，每个循环组在3种不同速率下的阻尼比平均值随加载速率的增加呈阶梯式下降。

(3)与单调荷载下的垂直拉伸裂纹不同,循环荷载作用下矽卡岩主裂纹呈斜向剪切特征,断裂面角度约为63°,且随着应力幅值的增大,主裂纹宽度变窄,次生裂纹减少,表明加载方式对岩石断裂机制具有决定性影响。

(4)模型拟合结果显示,损伤变量随循环次数的增加呈"S"形函数动态变化,实现了对损伤演化过程的定量描述。低加载速率下矽卡岩损伤累积更明显,矿山隧道或地下结构工程中需重点关注地震等低速率动态荷载作用下的岩体稳定性,循环荷载导致的斜向剪切破坏模式,要求地下工程支护结构需强化剪切抗力设计。

参考文献(References):

Jindal S, Rahmanli U, Aleem M, et al, 2024. Identification of soil damping for stiff piles based on experiments: methodology and results[J].Ocean Engineering, 301: 117124.

Pan K, Yuan Z H, Zhao C F, et al, 2022. Undrained shear and stiffness degradation of intact marine clay under monotonic and cyclic loading[J].Engineering Geology, 297: 106502.

Song Z Y, Wu Y F, Konietzky H, et al, 2022.Mechanical behaviors of anthracite coal subject to low-cycle compressive differential cyclic loading (DCL) after wetting-drying (WD) treatment: an experimental study [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 8(4): 116.

Wang S N, Zhu Y, Ma W, et al, 2021. Effects of rock block content and confining pressure on dynamic characteristics of soil-rock mixtures[J].Engineering Geology, 280: 105963.

Wang Y, Yi X F, Long D Y, et al, 2024a. Energy-based fatigue-creep damage and failure pattern of rock-backfill composite structure material in mine stopes under high static stress: disturbed amplitude effect [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57(4): 3021-3042.

Wang Y, Yi X F, Long D Y, et al, 2024b. Macro-meso fracture and instability of rock-backfill composite structure (RBCS) specimens subjected to fatigue-creep interaction loading: cement-tailing ratio effect [J]. Construction and Building Materials, 420: 135615.

Wang Y, Yi X F, Long D Y, et al, 2024c. On the fracture and energy characteristics of rock-backfill composite structure specimens exposed to fatigue-creep interaction loading[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, 47(1): 153-169.

Yan J B, Kong L W, Wang J T, 2023. Evolution law of small strain shear modulus of expansive soil: from a damage perspective[J].Engineering Geology, 315: 107017.

Zhu C, Karakus M, He M C, et al, 2022. Volumetric deformation and damage evolution of Tibet interbedded skarn under multistage constant-amplitude-cyclic loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 152: 105066.

邓鹏海,刘泉声,2024.基于FDEM数值模拟的软岩大变形预测及新分级研究[J].中国公路学报,37(11):164-180. Deng Penghai, Liu Quansheng, 2024. Prediction of large deformation and new classification of soft rock based on FDEM simulation [J]. China Journal of Highway and Transport, 37(11): 164-180.

郭纪哲,冯增朝,李学成,2024.基于PFC3D的花岗岩剪切破裂细观裂隙与能量演化规律探究[J].煤炭科学技术,52(5):60-70. Guo Jizhe, Feng Zengchao, Li Xuecheng, 2024. Evolution of microcracks and energy of granite during shear test with PFC3D[J].Coal Science and Technology, 52(5): 60-70.

何颖,陈雅,尹奔驰,等,2025.频率相关等效线性山谷交错场地多点地震动模拟[J].岩土力学,46(10):3280-3288. He Ying, Chen Ya, Yin Benchi, et al, 2025. Multi-point ground motion simulation at mountain-valley coupled sites using frequency-dependent equivalent linearization method[J].Rock and Soil Mechanics, 46(10): 3280-3288.

侯国庆,王运敏,李小双,等,2025.干湿循环及循环加卸载作用下白云岩力学特性及能量演化规律研究[J].黄金科学技术,33(4):865-876. Hou Guoqing, Wang Yunmin, Li Xiaoshuang, et al, 2025. Study on mechanical properties and energy evolution of dolomite under dry-wet cycle and cyclic loading and unloading effects[J].Gold Science and Technology, 33(4): 865-876.

黄婉滢,温韬,陈宁生,2026.冻融循环作用下含裂隙砾岩力学特性及宏微观破坏机理[J].岩土工程学报,48(5):1082-1091. Huang Wanying, Wen Tao, Chen Ningsheng, 2026. Mechanical properties and microstructure failure mechanism of conglomerate with prefabricated fissures under freeze-thaw cycles[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 48(5): 1082-1091.

刘汉香,别鹏飞,李欣,等,2022.三轴多级循环加卸载下千枚岩的力学特性及能量耗散特征研究[J].岩土力学,43(增刊2):265-274, 281. Liu Hanxiang, Bie Pengfei, Li

Xin, et al, 2022. Mechanical properties and energy dissipation characteristics of phyllite under triaxial multi-stage cyclic loading and unloading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 43(Suppl.2): 265-274, 281.

刘新凡, 魏艳君, 牛浩, 等, 2025. 基于突变理论隧道硬软组合夹层围岩稳定性分析[J]. 公路交通科技, 42(6): 160-168. Liu Xinfan, Wei Yanjun, Niu Hao, et al, 2025. Catastrophe theory based surrounding rock stability analysis for tunnel hard-soft composite interlayer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 42(6): 160-168.

苗浩东, 任富强, 2023. 冻融循环作用下不同含水率砂岩抗拉特性研究[J]. 工矿自动化, 49(5): 133-138, 152. Miao Haodong, Ren Fuqiang, 2023. Study on the tensile properties of sandstone with different water contents under freeze-thaw cycles [J]. Industry and Mine Automation, 49(5): 133-138, 152.

荣浩宇, 李桂臣, 王伟, 等, 2025. 含水率影响下软岩锚固单体宏细观力学特性[J]. 采矿与安全工程学报, 42(3): 601-612. Rong Haoyu, Li Guichen, Wang Wei, et al, 2025. Macro and meso-mechanical properties of anchored soft rock under the influence of moisture content [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 42(3): 601-612.

邵国梁, 夏冬, 贾淯斐, 等, 2024. 冻融作用下条带状磁铁石英岩破裂失稳过程裂纹演化特征试验研究[J]. 黄金科学技术, 32(6): 1030-1045. Shao Guoliang, Xia Dong, Jia Yufei, et al, 2024. Experimental study on crack evolution characteristics of banded magnetite quartzite during fracture instabiligy under freeze-thaw action [J]. Gold Science and Technology, 32(6): 1030-1045.

宋永明, 2025. 砂岩循环加/卸载下能量演化及破坏特征研究[J]. 中国安全科学学报, 35(增刊1): 158-165. Song Yongming, 2025. Investigation into energy evolution and failure characteristics of sandstone under cyclic loading and unloading [J]. China Safety Science Journal, 35(Suppl. 1): 158-165.

宋战平, 程昀, 杨腾添, 等, 2024. 循环荷载下硬质层理砂岩疲劳损伤机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 46(3): 490-499. Song Zhanping, Cheng Yun, Yang Tengtian, et al, 2024. Experimental study on fatigue damage evolution mechanism of hard layered sandstone under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 46(3): 490-499.

宋战平, 刘洪珂, 郑方, 等, 2023. 考虑层理倾角的硬质砂岩力学行为及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 51(12): 167-175. Song Zhanping, Liu Hongke, Zheng Fang, et al, 2023. Mechanical behavior and failure response characteristics of hard sandstones considering bedding dip angles [J]. Coal Geology & Exploration, 51(12): 167-175.

王先甲, 高增奎, 付志强, 等, 2024. 浸水条件下含水率对粉砂质泥岩蠕变特性的影响研究[J]. 安全与环境工程, 31(5): 28-37. Wang Xianjia, Gao Zengkui, Fu Zhiqiang, et al, 2024. Study on the influence of water content on creep characteristics of silty mudstone rock under water immersion [J]. Safety and Environmental Engineering, 31(5): 28-37.

王勇, 吴爱祥, 杨军, 等, 2023. 深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J]. 工程科学学报, 45(8): 1281-1292. Wang Yong, Wu Aixiang, Yang Jun, et al, 2023. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 45(8): 1281-1292.

肖源杰, 王小明, 李文奇, 等, 2025. 基于高效颗粒破碎算法的再生骨料路基填料颗粒破碎微细观机理[J]. 土木工程学报, 58(12): 136-151. Xiao Yuanjie, Wang Xiaoming, Li Wenqi, et al, 2025. Microscopic crushing mechanisms of recycled aggregates for subgrade fill materials using an efficient particle crushing algorithm via DEM [J]. China Civil Engineering Journal, 58(12): 136-151.

余颂, 徐梦冰, 冯治国, 等, 2025. 不同饱和度下松散粉细砂土的阻尼比特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 42(11): 103-110. Yu Song, Xu Mengbing, Feng Zhiguo, et al, 2025. Experimental study on damping ratio characteristics of loose silty fine sand at different saturations [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 42(11): 103-110.

喻永杰, 李弢, 戴靠山, 等, 2025. 地震动持续时间对阻尼折减系数的影响[J]. 地震工程与工程振动, 45(5): 121-130. Yu Yongjie, Li Tao, Dai Kaoshan, et al, 2025. Influence of ground motion duration on damping reduction factor [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 45(5): 121-130.

张泽坤, 宋战平, 程昀, 等, 2022. 加载速率影响下类硬岩声发射及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 50(2): 115-124. Zhang Zekun, Song Zhanping, Cheng Yun, et al, 2022. Acoustic emission characteristics and fracture response behavior of hard rock-like material under influence of loading rate [J]. Coal Geology & Exploration, 50(2): 115-124.

赵飞, 石振明, 俞松波, 等, 2025. 层状岩质边坡动力失稳及

加固研究进展[J].岩土力学,46(11):3585-3614. Zhao Fei, Shi Zhenming, Yu Songbo, et al, 2025.Research progress on dynamic failure and reinforcement of stratified rock slopes[J].Rock and Soil Mechanics, 46(11):3585-3614.

Damping and Stiffness Response of Skarn Rock Under Variable-Rate Cyclic Loading with Different Amplitudes

JIANG Zhigong[1], LI Yuanfang[2]

1.*Shandong Gold International Gold Co., Ltd., Beijing* 100020;

2.*School of Resources and Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100081, *China*

Abstract: This study systematically investigated the effects of loading rate and stress amplitude on the mechanical properties of skarn under cyclic loading by conducting variable-rate cyclic loading tests in conjunction with microstructural analysis. The compositional and structural characteristics of skarn were elucidated, and its dynamic shear modulus, damping ratio, and damage evolution law were comprehensively examined. The test specimens were derived from roof core samples of a lead-zinc mine in Yunnan, China, which were subsequently cut, ground, and polished to meet standard specifications. X-ray diffraction (XRD) and polarizing microscopy analyses confirmed that the primary mineral constituents are ilvaite (26.1%), actinolite (42.6%), and calcite (16.9%). Notably, ilvaite and actinolite, which possess higher hardness, collectively constitute approximately 60% of the composition and play a crucial role in inhibiting microcrack propagation. The experiments were conducted using the YAW-2000 servo-controlled rock mechanics testing system, supplemented with the YYSJ50 extensometer (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) for precise deformation monitoring. A cyclic loading scheme comprising two distinct paths—constant amplitude and incremental amplitude—was developed, incorporating three different loading rates (2 kN/s, 4 kN/s, 6 kN/s) for each path. Fifteen cycles were executed for each group to simulate various seismic loading conditions. The findings indicate that the shear modulus increases with rising stress amplitude but exhibits a declining trend as the number of cycles increases within the same group. This decrease is particularly pronounced under low loading rate conditions. The damping ratio follows a "concave-shaped" evolution pattern, initially decreasing and then increasing with the number of cycles, and generally diminishes as the loading rate increases. This suggests that higher loading rates inhibit the material's energy dissipation capacity. Regarding damage analysis, the damage evolution model, based on axial strain, effectively elucidates the cumulative process of rock damage. The damage variable demonstrates an S-shaped growth curve with an increasing number of cycles, with damage accumulation being more pronounced under low loading rate conditions. Furthermore, the analysis of fracture mechanisms reveals that the primary cracks in skarn subjected to cyclic loading exhibit oblique shear characteristics, which starkly contrast with the vertical tensile cracks observed under monotonic loading. As the stress amplitude increases, the width of the primary cracks decreases, and the number of secondary cracks diminishes, indicating that the loading method significantly influences the rock's failure mode. This study systematically demonstrates that loading rate and stress amplitude are critical factors in regulating the dynamic mechanical behavior of skarn. The developed damage evolution model, along with the elucidated damping and stiffness response laws, provides a crucial theoretical foundation and experimental reference for safety assessment and structural design in seismic engineering, mining, and related geotechnical fields.

Key words: cyclic loading; loading rate; shear modulus; damping ratio; damage model; failure characteristics