

循环冲击下预加静载岩石损伤破坏机制

王汉鹏^{1,2}, 王伟^{1,2}, 张冰^{1,2}, 邱廷麟^{1,2}, 侯夫斌^{1,2}

(1. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学岩土工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:为研究深部地下工程高地应力静载与采掘爆破施工等循环扰动耦合作用下岩石的损伤破坏机制, 利用自主研发的多应变率动静叠加岩石力学试验系统, 开展了不同预加静载(0.45 σ_c 、0.65 σ_c 、0.85 σ_c)叠加循环冲击荷载以及相同预加静载叠加不同频率(0.5、1.0、2.0 Hz)循环冲击荷载的砂岩动静叠加试验。试验结果表明: 动静叠加试验中岩石峰值强度小于静载试验, 最大变形量大于静载试验, 表明动静叠加荷载对岩石损伤具有显著促进作用, 且不同动静荷载叠加下岩石强度、变形、破坏等演化规律具有一致性, 其中峰值强度、破碎持续时间与预加静载呈线性负相关, 与循环冲击频率呈对数正相关; 最大应变、裂隙分形维数、碎块分形维数与预加静载呈线性正相关, 与循环冲击频率呈对数负相关; 不同动静叠加下岩石表面裂隙与碎块粒径分形维数演化趋势基本一致, 且前者略大于后者, 表明岩石表面及内部裂隙发育的同步性, 相比岩石内部三维应力状态, 表面更利用裂隙萌生与扩展; 不同动静叠加条件下岩样破坏模式发生转变, 随着预加静载的增大或冲击频率的减小, 破坏模式经历“斜面剪切破坏—竖向拉伸破坏—整体爆裂破坏”的转变, 且爆裂破坏位置由底部向整体扩展。为定量表征循环冲击下预加静载岩石损伤机制, 结合理论分析与试验数据, 建立了综合考虑静载损伤与不同峰值、频率、次数循环冲击损伤以及应变率强化效应的动静叠加损伤因子, 进而开展了4组不同参数下的动静叠加试验, 理论计算与试验结果对照误差率分别为0.5%、1.8%、0.6%、1.7%, 误差均较小; 但基于动静叠加损伤因子的理论计算强度均小于试验强度, 初步分析这是由于高频循环冲击下损伤发育存在细观滞后性, 循环冲击实际产生的累积损伤小于单次冲击损伤的循环次数倍, 后期可开展细观测试, 探索循环冲击下岩石细观损伤演化规律, 进一步完善理论模型。

关键词:岩石力学; 损伤机制; 破坏模式; 循环冲击; 预加静载

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-1860-13

Damage and failure mechanism of pre-static loaded rock under cyclic impact

WANG Hanpeng^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}, QIU Tinglin^{1,2}, HOU Fubin^{1,2}

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Research Centre of Geotechnical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To study the damage and failure mechanism of rocks under the coupling effect of high ground stress static load and cyclic impact disturbance generated by mining and excavation, the multi-strain rate dynamic static superposition rock mechanics test system was used to carry out the experiments with different pre-imposed static loads (0.45/0.65/0.85 σ_c) superimposed cyclic impact and the same pre-imposed static load superimposed with cyclic impact loads of different frequencies (0.5/1.0/2.0 Hz). The experimental results indicate that the peak strength of rocks in the dynamic static superposi-

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-02-28 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1554

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174081); 国家重大科研仪器研制资助项目(52227901); 国家资助博士后研究人员计划资助项目(GZC20231481)

作者简介: 王汉鹏(1978—), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师。E-mail: whp@sdu.edu.cn

通讯作者: 王伟(1994—), 男, 山东济宁人, 博士。E-mail: 201714565@mail.sdu.edu.cn

引用格式: 王汉鹏, 王伟, 张冰, 等. 循环冲击下预加静载岩石损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1860-1872.

WANG Hanpeng, WANG Wei, ZHANG Bing, et al. Damage and failure mechanism of pre-static loaded rock under cyclic impact[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1860-1872.



移动阅读

tion test is smaller than that in the static load test, and the maximum deformation is greater than that in the static load test, indicating that the dynamic static superposition load has a significant promoting effect on rock damage. The evolution of strength, deformation, and failure under dynamic and static superimposed loads are consistent, also, peak strength, fracture duration are linearly negatively correlated with pre-loading static, and logarithmically positively correlated with cyclic impact frequency. The maximum strain, fracture fractal dimension, and fragment fractal dimension are linearly positively correlated with pre-loading static, and logarithmically negatively correlated with cyclic impact frequency. Under different dynamic and static superpositions, the evolution trend of the fractal dimension of rock surface cracks and fragment sizes are basically consistent, and the former is larger than the latter, that shows the synchronicity of the development of rock surface and internal cracks, and rock surface cracks are more prone to generation and expansion. As the pre-loading static increases or the impact frequency decreases, the rock failure gradually intensifies, and the failure mode undergoes a transition from “inclined shear failure to vertical tensile failure to overall burst failure”. The burst failure position extends from bottom to overall. To quantify the damage mechanism of pre-loading static and cyclic impact, a dynamic static superimposed damage factor evolution model was established, which comprehensively considers static load damage, different peak, frequency, and number of cyclic impact damage, and strain rate strengthening effects. Further dynamic and static superposition experiments were conducted, and the error rates of rock peak strength obtained from theoretical calculations and experimental results were 0.5%, 1.8%, 0.6%, and 1.7%, respectively, the errors were relatively small. The theoretical calculation strength based on the superposition of dynamic and static damage factors is lower than the experimental strength. Preliminary analysis shows that this is due to the microscopic hysteresis of damage development under high-frequency cyclic impact. The actual cumulative damage generated by cyclic impact is less than single impact damage multiplied by cycle number. In the later stage, the microscopic testing can be carried out to explore the evolution law of rock microscopic damage under cyclic impact and further improve the theoretical model.

Key words: rock mechanics; damage mechanism; destruction mode; cyclic impact; pre-loading static

随着地球浅部能源、资源、空间逐渐开发殆尽,向地球深部发展已成为必然选择^[1-2]。目前全球范围煤矿最大开采深度已超 1 500 m^[3],金属矿最大开采深度已超 4 000 m^[4],隧道最大建设深度已超 2 000 m^[5],放射性废物处理及油气开采等工程也多处于千米以深^[6]。随着地下工程建设深度的增加,围岩承载的准静态地应力逐渐增大,且常受到连续爆破、采掘施工等多种循环动载荷的叠加扰动^[7-9]。上述动静叠加力学环境下围岩弹脆性及密实性逐渐增强,更利于弹性应变能积聚以及动载应力波的快速、远程传播,极易发生岩爆、冲击地压等动力灾害^[10-12]。

目前,动静叠加下岩石损伤破坏特征及其致灾机理研究已成为地下工程动力灾变机理与防控领域的热点问题^[13-14]。在室内试验方面,主要利用电-液伺服系统进行快速循环加卸载或者利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 进行循环冲击。

在循环加卸载试验方面,主要采用电液伺服循环加卸载试验系统开展研究, SUN 等^[15]研究得出循环加卸载会促进岩石颗粒的破碎和磨损,降低岩石孔隙度。YE 等^[16]研究得出岩石细观等效弹性模量随着循环次数的增加而增大,随着最大接触力的增加而减小。MARTIN 等^[17]研究得出循环加载力学条件增强了岩

石流变特性。ZHANG 等^[18]、MENG 等^[19]研究得出当循环荷载达到 1/3 强度时,岩石 Felicity 效应较明显。WANG 等^[20]研究得出循环加载下岩石损伤呈现倒“S”型演化规律。

在循环冲击试验方面,主要采用 SHPB 试验系统开展研究, DING 等^[21]研究得出冲击速度越大,剪切应力对能量耗散的影响越明显。LU 等^[22]研究得出岩石动态峰值应力随着冲击次数的增加而减小,且均呈现脆性破坏。WANG 等^[23]和 JIANG 等^[24]研究得出循环冲击下岩石骨架被压实,孔隙结构逐渐闭合,渗透性减弱。LUO 等^[25]和 SHI 等^[26]研究得出岩石破坏特征随层理角增大呈现张拉破坏—剪切破坏—劈裂破坏的演变过程。ZHANG 等^[27]研究得出随着冲击次数的增加,单位时间能量密度逐渐降低。JIANG 等^[28]和 LIU 等^[29]研究得出岩石微裂纹随着冲击次数的增加而聚合扩展,最终形成较大的微裂纹区。XUE 等^[30]和 WANG 等^[31]研究得出随着循环冲击次数的增加,岩石峰值强度呈现先强后弱、极限应变呈现先降低后升高的趋势。MA 等^[32]和 WANG 等^[33]研究得出,循环冲击下损伤因子和冲击时间曲线可分为损伤初始阶段、损伤累积阶段和损伤加重阶段。CHEN 等^[34]研究得出单轴循环荷载和冲击荷载共同作用下,岩样的

损伤变量与初始损伤具有显著的正相关关系。

在理论分析方面, KALLIONTZIS 等^[35]修正了简单摇摆模型的恢复系数, 并建立了可控摇摆冲击模型。GONG 等^[36]建立了包含压缩耗散系数、应变能、塑性应变的脆性岩石循环损伤本构模型。CHEN 等^[37]建立了循环荷载作用下岩石的损伤破坏模型, 并提出了细观单元强度线性退化假设。WANG 等^[38]建立了轴向和扭转复合冲击模型, 得出岩石破碎量随冲击荷载振幅和冲击加载次数的增加而增加。FAN 等^[39]分析得出累积残余变形率随间隔时间的延长而增大, 并建立了循环加载寿命与间隔时间之间的定量关系。

综上所述, 现有动载试验研究多集中于低应变率液压循环加卸载以及高应变率 SHPB 冲击, 介入 2 者之间的中应变率动载及其与静载的叠加作用研究相对较少; 且循环冲击过程中的连续性较差, 如 SHPB 冲击需要复杂的安装操作才能完成 1 次冲击。同时, 尚未建立综合考虑预加静载与循环冲击耦合作用损伤因子。

笔者系统研究了不同预加静载叠加循环冲击下岩石损伤破坏特性, 通过峰值强度、变形模量、残余应变等定量表征了岩石的损伤演化规律, 通过裂隙分形维数及碎块分形维数定量表征了岩石破坏特征, 并通

过理论分析探索了动静叠加下岩石损伤破坏机制。

1 试验装置与方案

1.1 试验装置

采用如图 1 所示自主研发的多应变率动静叠加岩石力学试验系统开展试验^[40]。该试验系统实现了多种类型不同应变率循环动静荷载叠加, 并可通过高压气体瞬间膨胀实现了弹性应变能释放过程的模拟加载。试验系统技术指标见表 1。

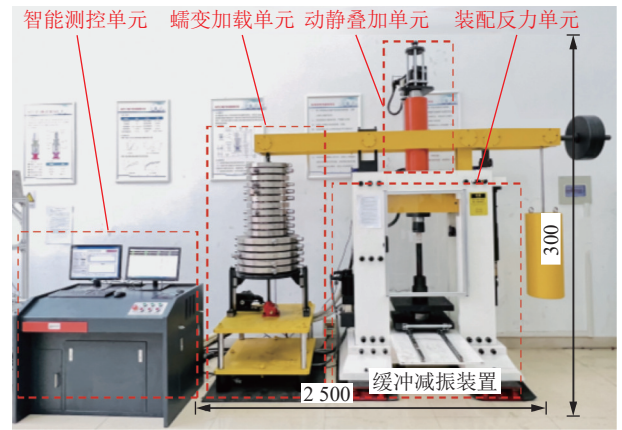


图 1 多应变率动静叠加岩石力学试验系统

Fig. 1 Multi strain rate rock mechanics testing system

表 1 试验系统技术指标

Table 1 Indicators of the testing system

应变率/s ⁻¹	蠕变荷载/kN	液压静载/kN	脉冲动载/kN	冲击动载/kN	动载频率/Hz	动载能量/J	荷载精度/%	采样频率/kHz
10 ⁻⁶ ~10 ²	0~200	0~300	0~300	0~30	0~10	0~100	±0.1	0~100

1.2 试验方案

选用 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 砂岩开展试验, 所用砂岩均取自四川自贡, 埋深约 50 m, 岩块新鲜完整。所有试件取自同一岩块, 并打磨使其表面平整度 $\leq \pm 0.05 \text{ mm}$; 超声波速及幅度离散性 $\leq 5\%$ 。设计 3 组试验, 共计 7 种变量, 为保证试验结果与规律的可靠性, 每组试验开展 3 次重复试验。

试验参数见表 2。组 1 试验直接利用液压加载至破坏; 组 2 及组 3 试验步骤为: ① 根据组 1 结果计算不同应力阶段的对应静载; ② 利用液压施加目标预静载, 并保压; ③ 静载保压条件下施加目标频率的 5 次冲击荷载; ④ 利用液压加载至破坏。

静载速度均为 0.04 mm/s, 冲击峰值均为 8 MPa。试件表面粘贴横/竖 2 条应变片, 获取切向/轴向应变;

表 2 具体试验参数

Table 2 Specific test parameters

组号	编号	预加静载	冲击峰值/MPa	冲击频率/Hz	冲击次数	采集频率/kHz	
1	静载试验	1-1	直至破坏	—	—	20	
		2-1	0.45 σ_c	8	1.0	5	20
2	不同静载叠加循环冲击	2-2	0.65 σ_c	8	1.0	5	20
		2-3	0.85 σ_c	8	1.0	5	20
		3-1	0.65 σ_c	8	0.5	5	20
3	不同频率循环冲击叠加静载	3-2	0.65 σ_c	8	1.0	5	20
		3-3	0.65 σ_c	8	2.0	5	20

冲击传感器放于试件底部,采集轴向荷载;应力、应变的采集频率均设为 20 kHz;试件破坏瞬态过程裂隙像采集速度为 8 000 fps;收集破坏后的试件碎块,并采用 0.6、1.0、2.0、4.0、8.0、15.0、20.0、30.0 mm 的标准筛筛分,然后采用精度为±0.01 g 的天平分级称量。

2 试验结果

2.1 力学时程曲线

组 1 静载下试件应力-应变曲线如图 2(a)所示,岩石单轴抗压强度约为 50 MPa,失稳破坏时最大轴向应变为 -6920×10^{-6} ,最大切向应变为 2300×10^{-6} 。组 2 应力时程曲线如图 2(b)所示,应变时程曲线如图 2(c)所示。组 2 分别施加 $0.45\sigma_c$ 、 $0.65\sigma_c$ 、 $0.85\sigma_c$ 静载+冲击荷载(5次、频率 1 Hz、峰值 8 MPa)时;相比组 1,岩石峰值强度分别下降了 1.0%、4.1%、10.5%,最大轴

向应变分别增大 0.4%、16.7%、29.7%,最大切向应变分别增大 8.5%、72.2%、93.4%。可得随着预加静载增大,峰值强度呈降低趋势,最大轴向和切向应变呈增大趋势。组 2-3 循环冲击过程中动静叠加荷载峰值已明显超过该试样后续静载破坏阶段峰值强度,但是并为发生破坏,表明岩石存在显著应变率强化效应。

组 3 应力时程曲线如图 2(d)所示,应变时程曲线如图 2(e)所示。组 3 分别施加 $0.65\sigma_c$ 静载+冲击荷载(5次、频率 0.5/1.0/2.0 Hz、峰值 8 MPa)时;相比组 1,岩石峰值强度分别下降了 6.9%、4.7%、2.4%,最大轴向应变分别增大 17.5%、17.1%、1.3%,最大切向应变分别增大 73.4%、60.6%、6.8%。可得随着冲击频率的增大,岩石最终峰值逐渐增大,但均小于静载峰值强度;最大轴向和切向应变逐渐减小,但均大于静载应变。

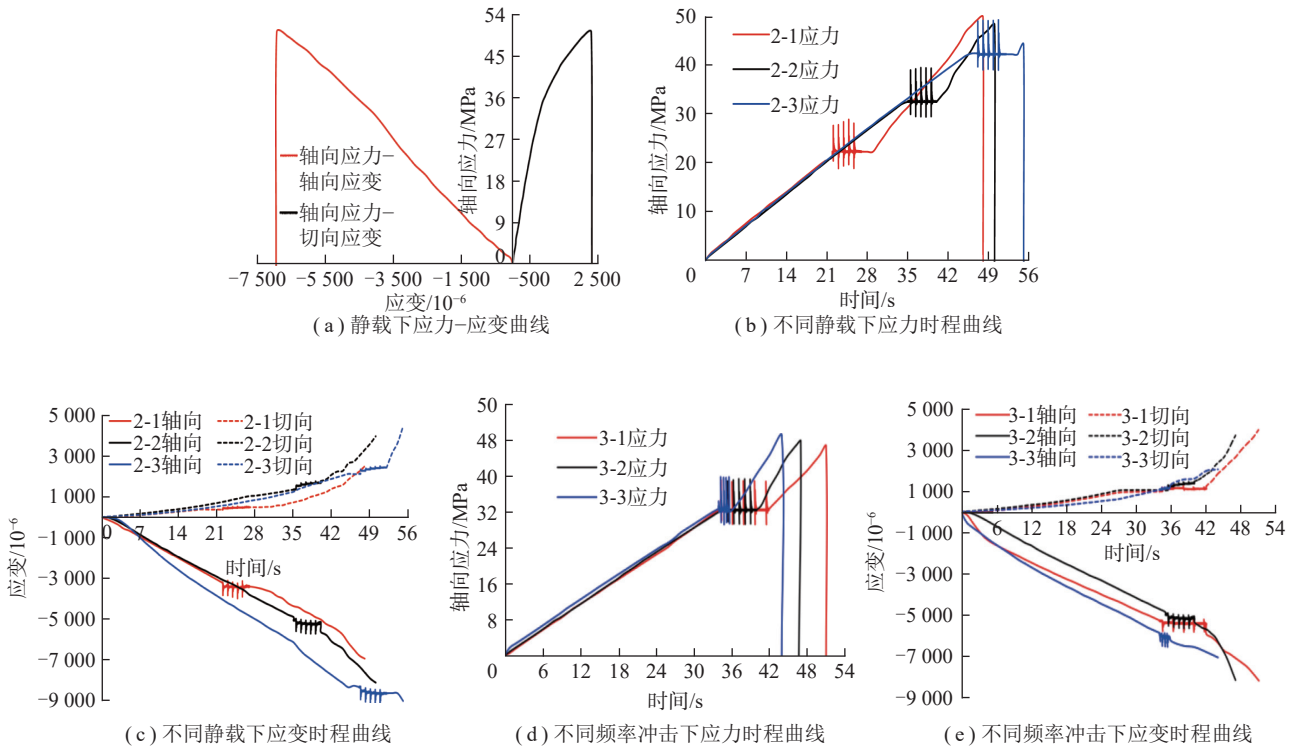


图 2 循环冲击与静载叠加下力学时程曲线

Fig.2 Mechanical curves under impact and static superposition

组 2-2 试验循环冲击荷载波形局部放大如图 3 所示,循环冲击 5 次应力时程曲线如图 3(a)所示,单次冲击波形放大如图 3(b)所示,可得组 2-2 试验动静叠加过程预加静载可稳定于 65% 静载峰值 (32.5 MPa),冲击荷载可按指定频施加 (1.0 Hz),冲击荷载峰值与谷值的差值为目标冲击荷载 (8 MPa),但由于应力波的往复传递,冲击过程中出现小范围荷载波动。

2.2 破坏特征分析

根据高速摄像帧率以及试样从起裂到破坏的图像张数,便可求得试样破坏持续秒数,其中拍摄帧率

为 8 000 fps。组 1 破坏特征如图 4(a)所示,可得岩石整体呈现弹脆性,达到峰值后瞬间发生单斜面剪切破坏,从起裂到最终破坏的持续时间为 214 ms。组 2 破坏特征如图 4(b)~(d)所示,可得随着预加静载的增大,破坏形式由单斜面剪切破坏,向竖向劈裂拉伸破坏+底部部分爆裂破坏,再向整体爆裂破坏逐步变化,破坏持续时间逐渐减小;组 3 破坏特征如图 4(e)~(g)所示,可得破坏形式由整体多面竖向劈裂拉伸破坏,向竖向劈裂拉伸破坏+底部部分爆裂破坏,再向共轭斜

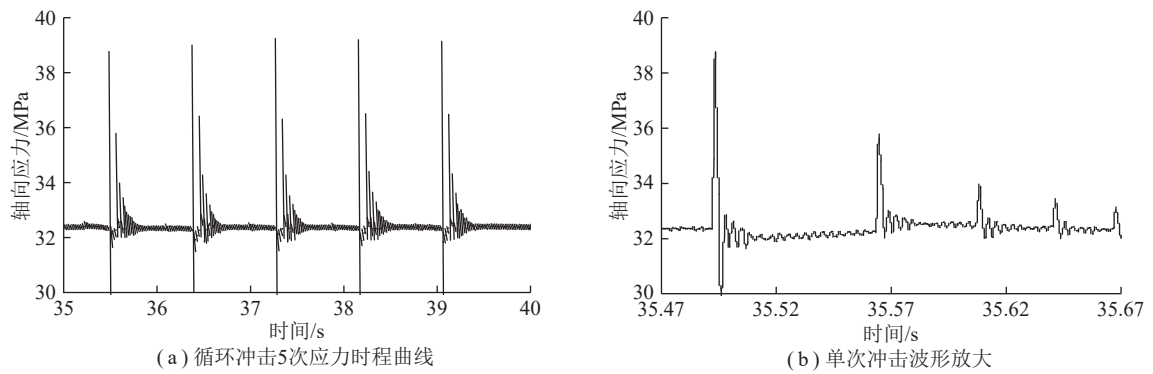


图 3 组 2-2 试验循环冲击荷载波形局部放大

Fig.3 Partial amplification of cyclic impact load waveform in group 2-2 test

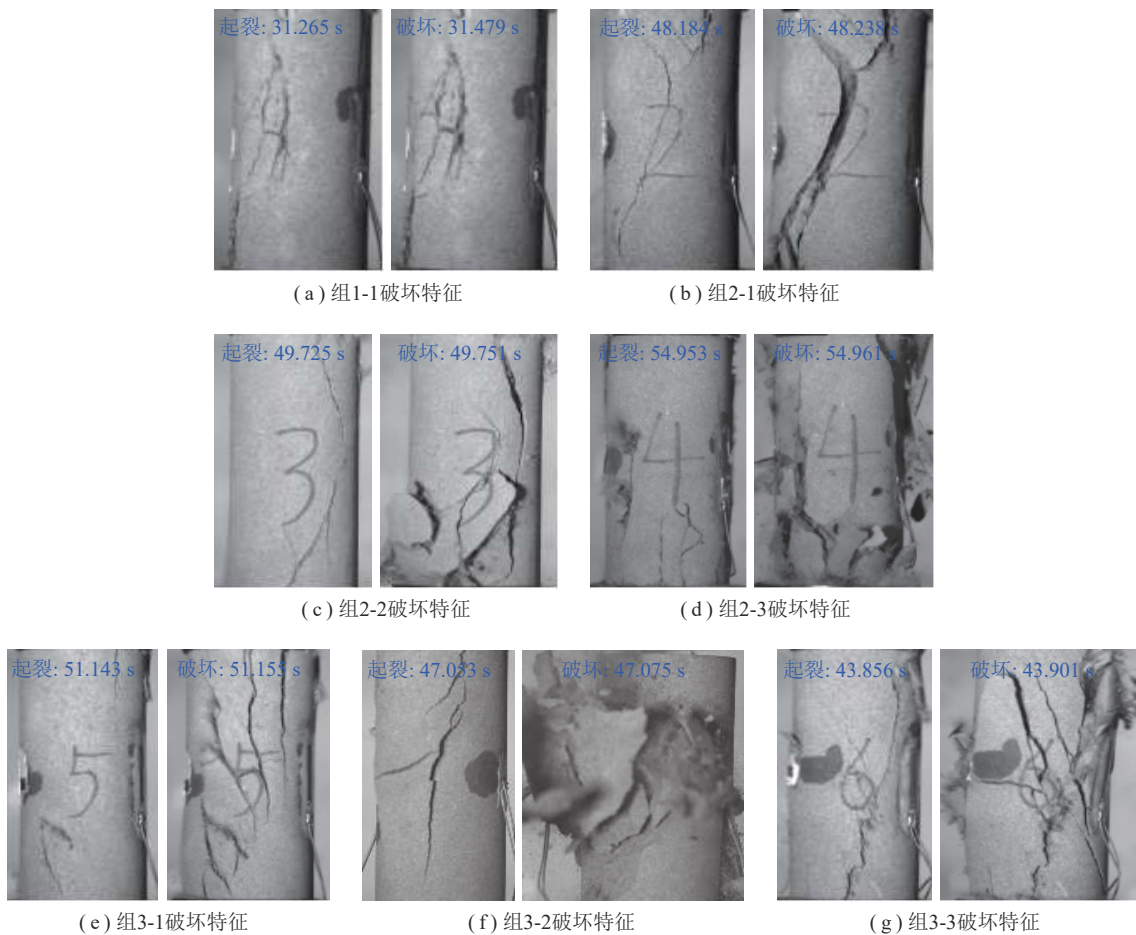


图 4 动静叠加下破坏特征

Fig.4 Damage characteristics under dynamic and static superposition

面剪切破坏逐步变化,破坏持续时间逐渐增大。

通过盒维数法对岩石破坏特征进行分形分析,利用计算程序获取不同尺寸正方形格子下覆盖所有裂隙所需的格子数量,格子尺寸与格子数量存在关系^[41-42]为

$$\lg N(\delta) = \lg \theta - D \lg \delta \quad (1)$$

式中, $N(\delta)$ 为格子数量; θ 为比例常数; δ 为格子尺寸; D 为分形维数。

依次获取多个方格尺寸及其对应方格数量的数组 (δ, N_i) , 其拟合直线斜率的绝对值即为该岩石裂隙发育阶段的分形维数 D 。分形维数越大, 表征裂隙越密集, 岩石损伤程度越高。每组试验从高速相机拍摄的岩石裂隙发育全过程照片中选取 5 张图像作为不同裂隙发育阶段进行分形分析, 不同试验条件下数组 (δ, N_i) 拟合直线如图 5 所示。

根据分形拟合直线斜率求得不同动静叠加条件下多个裂隙发育阶段的分形维数, 由图 6 可得, 裂隙

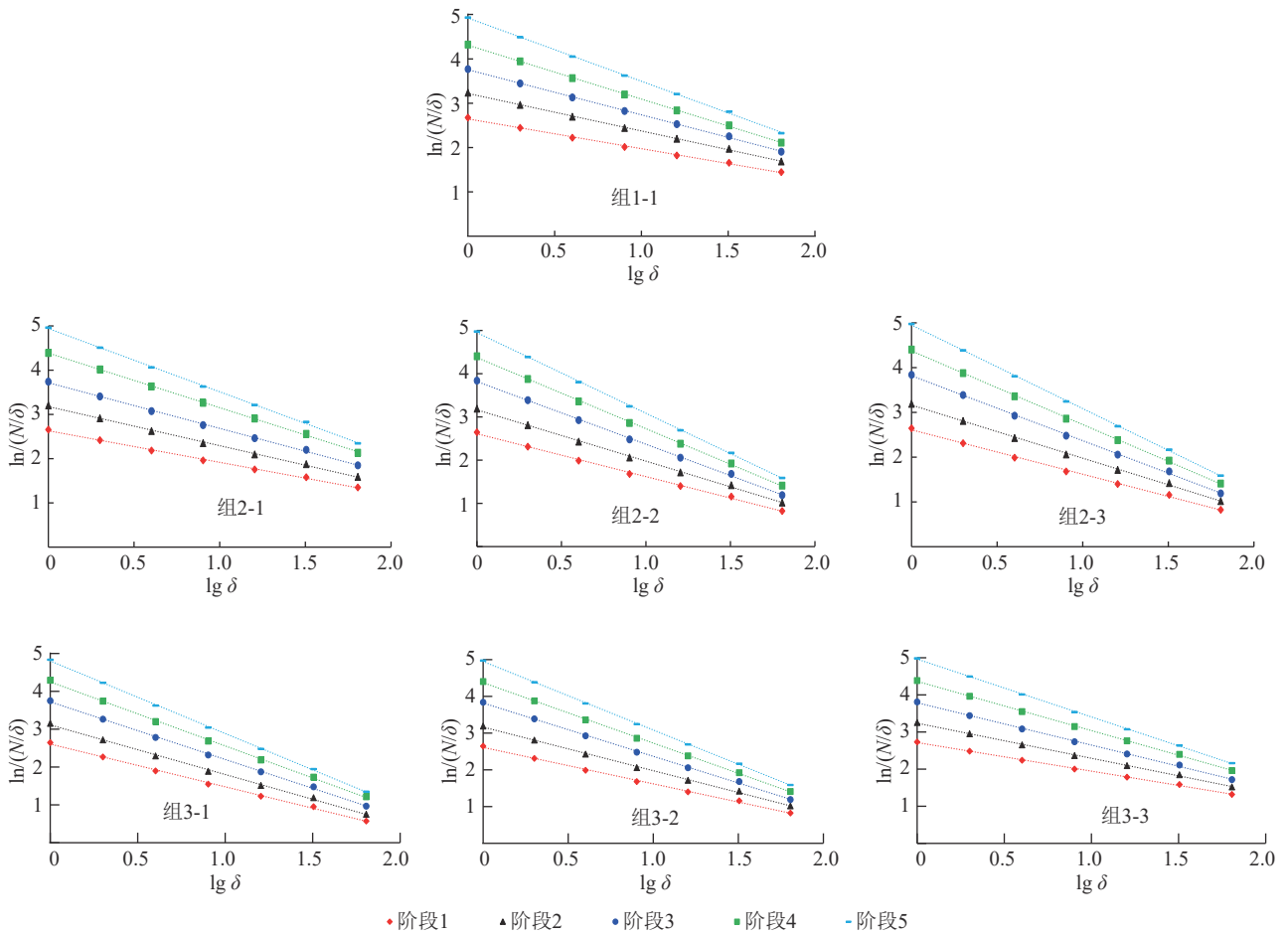


图 5 岩石裂隙分形拟合直线

Fig.5 Fractal fitting of rock fractures

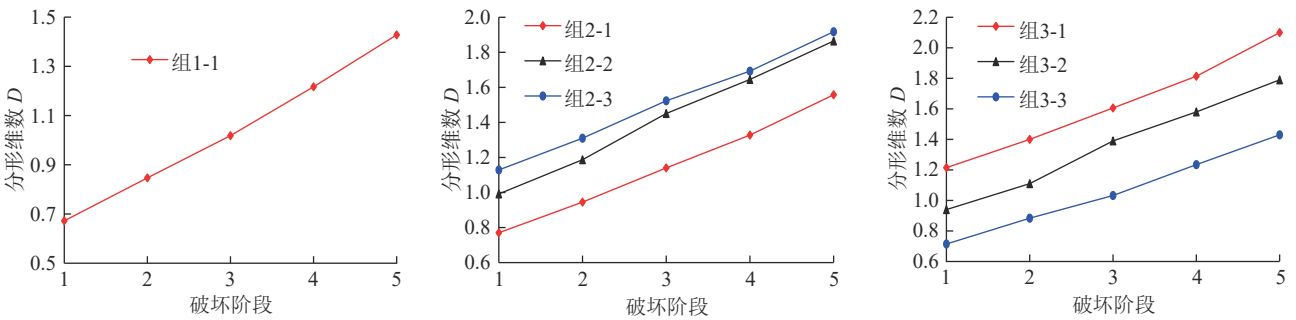


图 6 裂隙发育过程分形维数

Fig.6 Fractal dimension of fracture

发育 5 个阶段的分形维数基本呈线性增大; 组 2 及组 3 动静叠加下分形维数均大于静载下相同破坏阶段的分形维数, 表征了动静叠加对岩石裂隙发育的促进作用; 同时裂隙分形维数随着预加静载的增大而增大, 随着循环冲击频率的增大而减小。

2.3 碎块粒径分布

根据相关研究, 岩石受载破碎后的粒径存在分形特征, 进而假设岩石破碎块度符合 G-G-S(Gate-Gandin-Schumann) 分布, 则碎块粒径分布满足式 (2), 关系^[43-44]为

$$k = M(r)/M_T = (r/r_m)^\alpha \tag{2}$$

式中, k 为直径小于 r 的质量分数; $M(r)$ 为直径小于 r 的碎块累积质量; M_T 为碎块总质量; r 为碎块最大尺寸; r_m 为碎块最大直径; α 为分布参数。

进而对式 (2) 求导为

$$dM \propto r^{\alpha-1} dr \tag{3}$$

同时碎块数量与碎块质量之间的增量关系为

$$dM \propto r^3 dN \tag{4}$$

由式(2)~(4)可得式(5)所示的碎块粒径分形维数 D 。分形维数 D 越大, 岩石破碎越剧烈, 碎块粒径越小。

$$D = 3 - \alpha, \alpha = \ln k / \ln r \quad (5)$$

不同试验条件下岩石碎块筛分如图7所示。



图7 循环冲击与静载叠加下岩石碎块

Fig.7 Fragments under impact and static superposition

根据岩石碎块筛分称量数据, 求得数组 $(\ln r, \ln k)$, 并建立如图8所示碎块粒径分布及线性拟合, 进而结合拟合直线斜率求得碎块分形维数。可得组2及组3动静叠加下碎块粒径分形维数均大于静载下粒径分形维数, 表征了动静叠加对岩石破碎的促进作用; 碎块粒径分形维数与预加静载正相关, 与循环冲击频率负相关。

2.4 损伤演化规律

为系统探索不同预加静载及循环冲击频率下岩石损伤特性, 开展峰值强度、最大应变、破碎持续时间、裂隙分形维数、碎块分形维数等参数的对比分析, 其中破碎持续时间通过岩石起裂至完全破坏阶段高速相机拍摄的照片张数以及拍摄帧率计算得出, 裂隙分形维数选取破坏阶段5的分形数据。作为对比, 静载下峰值强度为 50 MPa, 最大轴向应变为 -6.920×10^{-6} , 最大切向应变为 2.300×10^{-6} , 破坏持续时间 214.3 ms, 裂隙分形维数 1.43, 碎块分形维数 0.886。

组2不同预加静载下岩石的损伤演化特性如图9

所示。通过数据拟合可得, 岩石峰值强度、破碎持续时间与循环冲击时的静载应力呈线性负相关, 且明显小于组1静载试验; 最大应变绝对值、裂隙分形维数、碎块分形维数均与循环冲击时的静载应力呈线性正相关, 且明显大于组1静载试验; 表明动静叠加荷载对岩石损伤具有明显促进作用, 且动静叠加荷载下岩石强度、变形以及裂隙等损伤特性演化具有一致性。

组3不同频率循环冲击下岩石损伤演化特性如图10所示, 通过数据拟合可得, 岩石峰值强度、破碎持续时间与相同静载下循环冲击频率呈对数正相关, 但均小于组1静载试验; 最大应变绝对值、裂隙分形维数、碎块分形维数均与相同静载下的循环冲击频率呈对数负相关, 但均明显大于组1静载试验; 进一步表明动静叠加荷载对岩石损伤具有明显促进作用, 且动静叠加荷载下岩石强度、变形以及裂隙等损伤特性演化具有一致性。

2.5 损伤破坏机制

通过上述试验结果可得, 预加静载与循环冲击叠加作用对岩石存在显著损伤促进作用, 总体损伤破坏规律为: 循环冲击荷载相同时, 静载越大, 则峰值强度越小、最终应变越大、破坏过程越剧烈, 裂隙越密集; 预加静载相同时, 冲击频率越大, 则峰值强度越大、最终应变越小、破坏过程越和缓、裂隙越稀疏。基于上述规律, 地下工程建设及运营过程应对可能产生的动静叠加荷载进行针对性防护, 且应特别注意高地应力与低频率、大能量循环冲击荷载的叠加作用, 此时发生岩爆、冲击地压等动力灾害的危险性较大。

针对预加静载对岩石的损伤破坏机制进行分析, 预加静载越大, 则弹脆性岩石内部弹性应变储能越大, 岩石发生初始损伤后应变能释放产生的2次损伤作用越明显, 从而峰值强度越小, 岩石发生剧烈爆裂的倾向越明显, 即发生冲击地压、岩爆等动力灾害的危险性越大。

针对循环冲击频率对岩石的损伤破坏机制进行分析, 相同冲击次数下, 冲击频率越大, 无法及时传递于孔裂隙尖端的能量比例越大, 在基质内部及交界面积聚耗散能量越多, 从而使基质交界面疲劳裂纹以及穿晶裂纹、晶内裂纹数量增多, 然而此类裂纹多局限于微细观损伤, 对岩石宏观力学性能的损伤作用相对较小, 从而使岩石峰值强度随着冲击频率的增大而增大。

针对岩石破坏过程进行分析, 不同静载及冲击频率下, 表面裂隙分形维数与碎块粒径分形维数演化趋势基本一致, 表明试件表面及内部裂隙发育的同步性; 数值上前者略大于后者, 分析这是由于试件表面为一

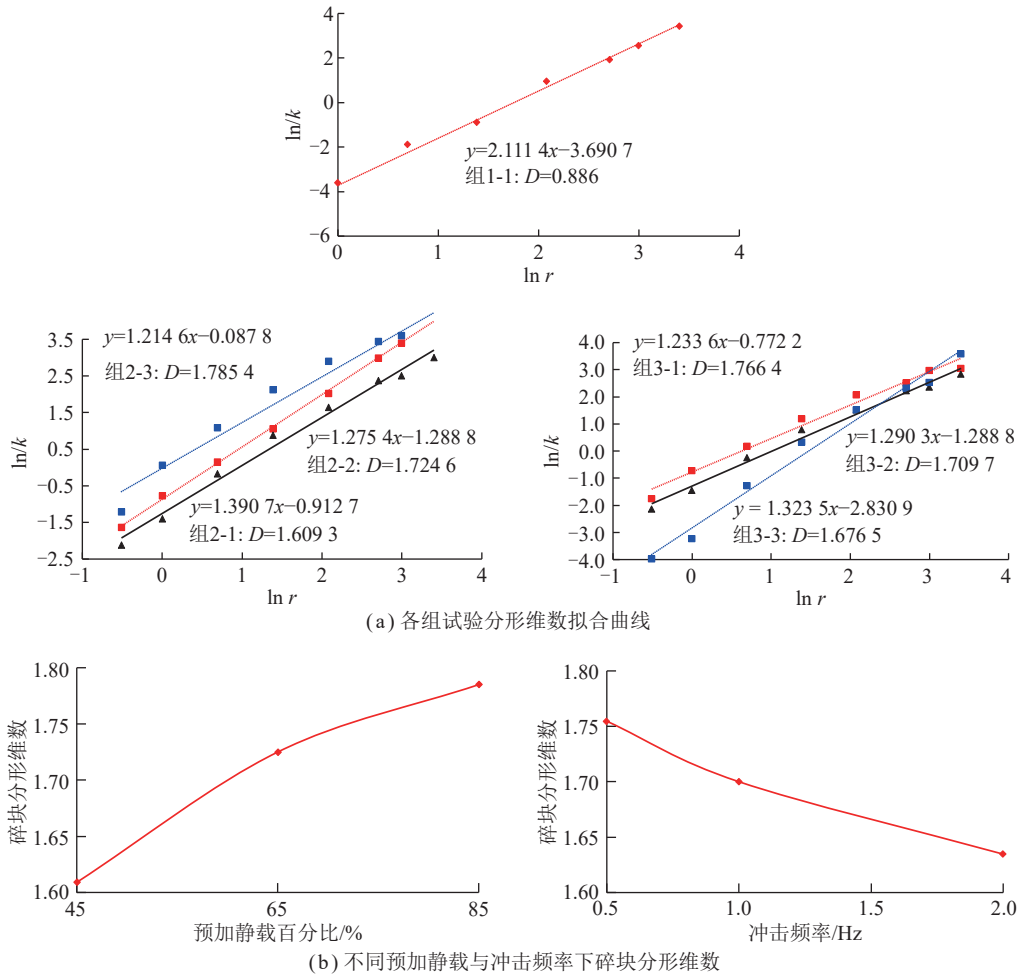


图 8 试样碎块分形维数

Fig.8 Fractal dimension of sample fragments

维或者二维受力状态, 相比试件内部的三维受力状态, 表面更利用裂隙的产生与扩展。

此外, 动静叠加作用下岩石存在应变率效应, 其本质为岩石损伤传播速度的有限性。地下工程考虑动载防护参数时, 可将岩石应变率效应作为安全系数, 降低防护成本。

3 动静叠加作用下岩石损伤演化机制

为进一步定量表征不同预加静载叠加不同频率循环冲击下岩石损伤演化机制, 通过理论分析及试验数据, 建立了综合考虑应变率强化效应以及动静叠加效应的耦合损伤因子。笔者研究中的损伤因子旨在建立动静叠加作用与岩石最终峰值强度、最大应变等参数之间的定量关系, 忽略动载施加前后单纯静载造成的岩石损伤。

3.1 动静叠加损伤因子

3.1.1 损伤变量与应变等效假设

基于连续损伤力学相关理论及应变等价原则分析动静叠加荷载耦合作用下岩石损伤因子演化规律^[45],

则岩石损伤前后存在以下关系为

$$\begin{cases} \sigma_1 S_1 = \sigma_2 S_2 \\ \varepsilon = \frac{\sigma_1}{E_2} = \frac{\sigma_2}{E_1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 S_1 、 S_2 、 E_1 、 E_2 分别为损伤前后岩石有效应力、有效承载面积和弹性模量; ε 为岩石应变。

定义 D_s 为预加静载损伤因子, 根据式 (6) 可得预加静载前后存在以下关系为

$$\begin{cases} \sigma' = \frac{\sigma_0}{(1-D_s)} \\ E' = E_0(1-D_s) \end{cases} \quad (7)$$

式中, σ_0 、 σ' 、 E_0 、 E' 分别为预加静载前后无冲击下有效应力及弹性模量; ε 为预加静载应变。

定义 D_d 为循环冲击损伤因子, 定义预加静载造成的损伤为初始损伤状态, 并在其基础上叠加循环冲击损伤, 根据式 (6)、(7) 可得循环冲击前后存在以下关系为

$$\begin{cases} \sigma'' = E'(1-D_d)\varepsilon \\ \sigma' = E_0(1-D_s)(1-D_d)\varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

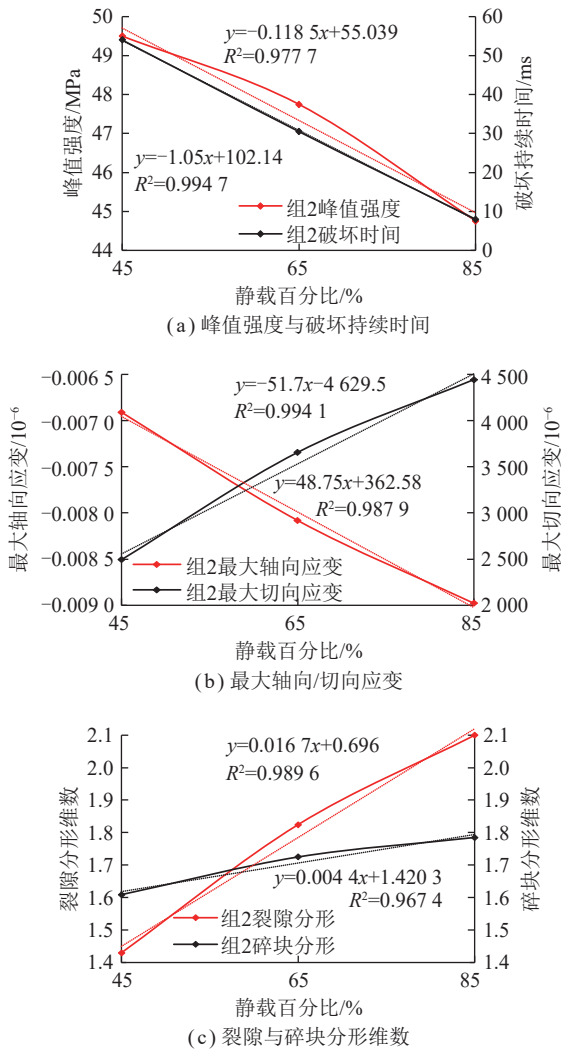


图 9 不同静载叠加循环冲击下岩石损伤特性对比

Fig.9 Damage characteristics under different static load

式中, σ' 为动静叠加下岩石有效应力; D_d 为循环冲击损伤因子。

基于式 (8) 进一步求得动静叠加下岩石耦合损伤因子为

$$D = D_s + D_d - D_s D_d \quad (9)$$

其中, 动静叠加损伤因子 D 由预加静载损伤因子 D_s 与循环冲击损伤因子 D_d 通过多项式形式构成, 表征了动静叠加耦合损伤关系, 下面将分别求得静载损伤因子 D_s 与动载损伤因子 D_d , 进而求得动静叠加耦合损伤因子 D 。

3.1.2 预加静载损伤因子

根据前文试验研究, 岩石强度、变形以及裂隙等损伤特性均随着预加静载呈线性演化关系, 因此以线性函数为框架, 以峰值强度为数据基准, 建立预加静载损伤模型。

根据试验数据, 组 1 试验静载下岩石峰值强度为 50 MPa, $0.45 \sigma_c$ 、 $0.65 \sigma_c$ 、 $0.85 \sigma_c$ 预加静载叠加循环冲

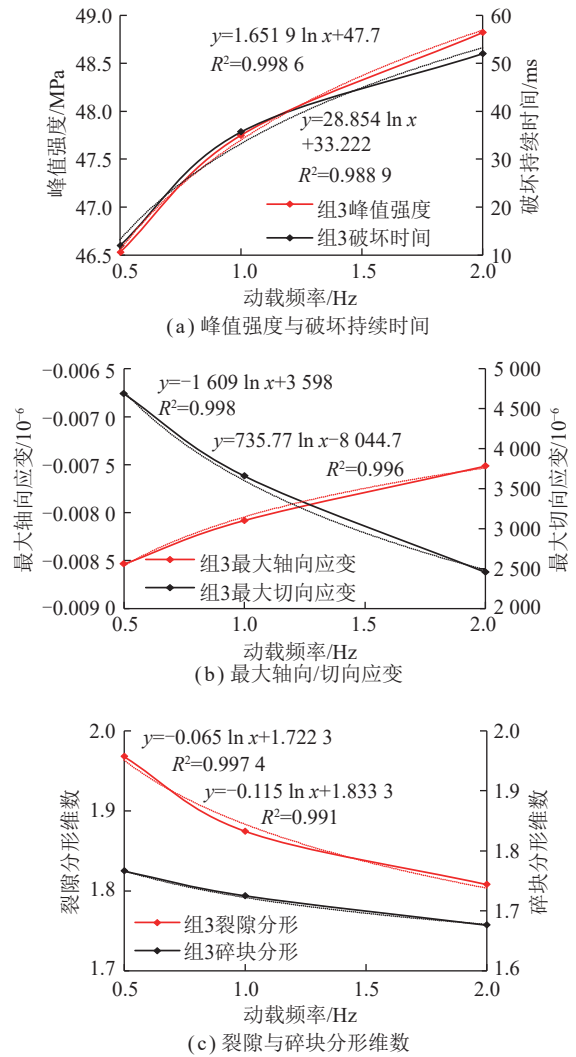


图 10 不同频率循环冲击叠加静载下岩石损伤特性对比

Fig.10 Damage characteristics under different frequency cyclic impact

击下岩石峰值强度分别为 49.50、47.75、44.76 MPa, 强度损伤率分别为 1.00%、4.50%、10.48%, 岩石峰值强度损伤率随预加静载的演化趋势如图 11 所示。

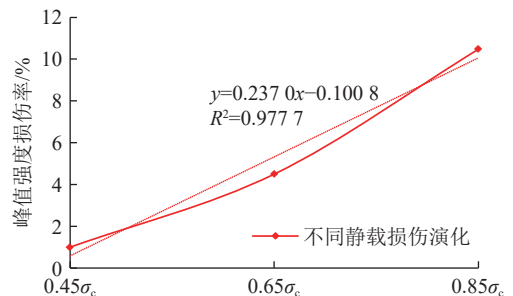


图 11 强度损伤率随预加静载演化

Fig.11 Strength damage rate with pre-loading static

进而通过线性函数拟合求得预加静载损伤因子为

$$D_s = 0.237R_s - 0.1008 \quad (10)$$

式中, R_s 为预加静载与静载下岩石峰值强度的比值。

3.1.3 循环冲击损伤因子

相比静态荷载, 冲击荷载的核心区别为应变率较大, 存在应变率强化效应。因此, 以预加静载损伤因子为基础, 进一步考虑应变率强化效应以及循环冲击峰值、次数、频率等参数, 建立循环冲击损伤因子。

应变率强化效应一般通过动态增强因子模型 f_{DI} 表征。根据前人的研究经验, 综合考虑标准差、拟合度以及试验验证等因素, 优选出全应变率下不同岩石 f_{DI} [46-47] 为

$$f_{DI} = f_d/f = \left[\frac{a}{a - \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_{cd}}{\dot{\epsilon}}\right)} \right]^{1 - \frac{b}{a} \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_{cd}}{\dot{\epsilon}}\right)} \quad (11)$$

式中, f_d 为动态强度; f 为最小量级应变率加载下的静态强度; $\dot{\epsilon}$ 为岩石静态应变率; $\dot{\epsilon}_{cd}$ 为岩石动态静态应变率; a 、 b 为与材料性质相关的拟合常数。

参考文献[47]研究成果, 选取获得最优拟合结果的常量开展计算, 取 $a=8.13$, $b=0.63$ 。

进而结合循环冲击峰值以及动态增强因子模型, 求得循环冲击损伤因子为

$$D_d = \frac{D'_s}{f_{DI}} = \frac{0.237R'_s - 0.1008}{f_{DI}} \quad (12)$$

式中, D'_s 为循环冲击荷载峰值; R'_s 为冲击荷载峰值与静载下岩石峰值强度的比值。

假设循环冲击过程中每次产生的损伤相等, 则不同次数循环冲击 n 作用下岩石累积冲击损伤为

$$D_d = \frac{nD'_s}{f_{DI}} \quad (13)$$

根据前文试验研究, 岩石强度、变形以及裂隙等损伤特性均随着循环冲击频率呈对数演化关系, 因此以对数函数为框架, 以峰值强度为数据基准, 建立频率对循环冲击损伤因子的作用机制。组 1 试验静载下岩石峰值强度为 50 MPa, 组 3 在 $0.65\sigma_c$ 预加静载条件下对不同试样分别叠加 0.5、1.0、2.0 Hz 循环冲击荷载, 获取的不同试样最终峰值强度分别为 46.53、47.63、48.82 MPa, 强度损伤率分别为 6.9%、4.7%、2.4%, 可得在相同预加静载、相同冲击峰值、相同冲击次数条件下, 不同岩石峰值强度损伤率随循环冲击频率的演化趋势如图 12 所示。

进而通过对数函数拟合求得不同循环冲击频率对岩石损伤的作用规律为

$$K_f = -0.033 \ln f + 0.046 \quad (14)$$

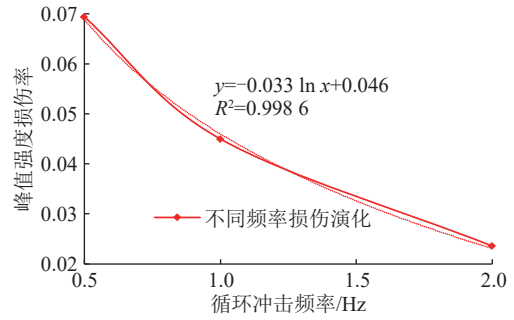


图 12 强度损伤率随冲击频率演化

Fig.12 Strength damage rate with impact frequency

式中, K_f 为冲击频率参量对循环冲击损伤因子的作用因子; f 为循环冲击频率。

综合考虑应变率强化效应以及循环冲击峰值、次数、频率等参数, 联立式 (11)~(14), 求得循环冲击损伤因子为

$$D_d = \frac{nK_f D'_s}{f_{DI}} \quad (15)$$

3.1.4 损伤因子最终形式

联立式 (9)~(15), 可得出循环冲击下预加静载岩石损伤因子最终形式为

$$\left\{ \begin{aligned} D &= (0.237R'_s - 0.1008) + \frac{nK_f D'_s}{f_{DI}} - \\ &\quad (0.237R'_s - 0.1008) \frac{nK_f D'_s}{f_{DI}} \\ f_{DI} &= \frac{f_d}{f} = \left[\frac{a}{a - \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_{cd}}{\dot{\epsilon}}\right)} \right]^{1 - \frac{b}{a} \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_{cd}}{\dot{\epsilon}}\right)} \\ K_f &= -0.033 \ln f + 0.046 \\ D'_s &= 0.237R'_s - 0.1008 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

3.2 损伤因子试验验证

进一步开展了不同预加静载以及循环冲击峰值、次数、频率下的动静叠加试验, 试验参数见表 3。利用式 (16) 计算不同动静叠加条件下岩石力学参数, 并与试验结果对照。

表 3 验证试验参数

Table 3 Validation test parameters

序号	预加静载	冲击峰值/MPa	冲击频率/Hz	冲击次数
1	$0.55\sigma_c$	4	1.0	3
2	$0.55\sigma_c$	8	1.5	3
3	$0.75\sigma_c$	4	1.5	7
4	$0.75\sigma_c$	8	1.0	7

如图 13 所示, 验证试验与理论计算获取的峰值强度接近, 4 组试验的误差率分别为 -0.5%、-1.8%、

-0.6%、-1.7%，误差率均小于2%，验证了笔者建立动静叠加损伤模型的正确性和合理性。

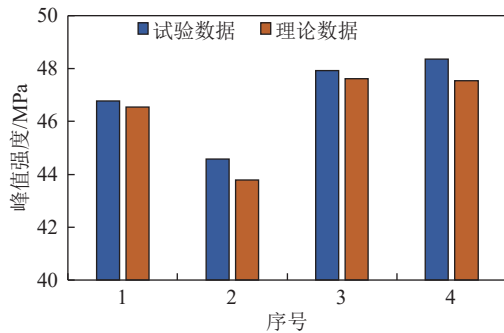


图 13 验证试验与理论计算数据对比

Fig.13 Comparison of test and theoretical calculation

此外，理论计算强度均小于试验强度。经分析，高频循环冲击下损伤发育存在滞后性，循环冲击实际产生的累积损伤应小于单次冲击损伤的循环次数，使式(16)求得的损伤因子偏大，最终造成理论求得峰值强度均略小于试验结果。后期可进一步开展微细观试验研究，探索循环冲击下岩石损伤演化规律，进一步完善优化动静叠加损伤模型。

4 结 论

(1) 试验参数范围内，不同预加静载及循环冲击频率下岩石强度、变形、破坏等特性演化具有一致性，其中峰值强度、破碎持续时间与预加静载呈线性负相关，与冲击频率呈对数正相关；最大应变、裂隙分形维数、碎块分形维数与预加静载呈线性正相关，与冲击频率呈对数负相关。

(2) 试验参数范围内，随着预加静载的增大或冲击频率的减小，不同岩样破坏模式经历“斜面剪切破坏—竖向拉伸破坏—整体爆裂破坏”的转变；岩石表面裂隙与碎块粒径分形维数演化趋势基本一致，前者略大于后者，表明岩石表面及内部裂隙发育的同步性，且岩石表面更利用裂隙的产生与扩展。

(3) 建立的动静叠加损伤因子可综合考虑应变率强化效应、预加静载损伤以及不同峰值、频率、次数循环冲击损伤；不同动静叠加条件下，基于损伤因子求得的峰值强度与试验结果误差率分别为0.5%、1.8%、0.6%、1.7%，表明了该模型的正确性与合理性。

参考文献(References):

[1] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal

Society, 2021, 46(3): 716-725.
[2] XU Dilu, ZHANG Xuehui, CHEN Wei, et al. Utilisation of the deep underground space in Shanghai[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Municipal Engineer*, 2019, 172(4): 218-223.
[3] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 846-866.
[4] VAN S H J, V RENSBURG J F, GROENEWALD H J. Optimal use of mobile cooling units in a deep-level gold mine[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(4): 547-553.
[5] LOEW S, LÜTZENKIRCHEN V, HANSMANN J, et al. Transient surface deformations caused by the Gotthard Base Tunnel[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 75: 82-101.
[6] ZHANG Yue, ZHANG Qiangyong, DUAN Kang, et al. Reliability analysis of deep underground research laboratory in Beishan for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 118: 103328.
[7] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396-3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3396-3409.
[8] RESENDE R, LAMAS L N, LEMOS J V, et al. Micromechanical modelling of stress waves in rock and rock fractures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 741-761.
[9] GONG Fengqiang, WANG Yunliang. A new rock brittleness index based on the peak elastic strain energy consumption ratio[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(3): 1571-1582.
[10] LI Xibing, LI Chongjin, CAO Wenzhuo, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 104: 131-146.
[11] DU Hongbo, DAI Feng, XU Yuan, et al. Mechanical responses and failure mechanism of hydrostatically pressurized rocks under combined compression-shear impacting[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 165: 105219.
[12] WANG Wei, WANG Hanpeng, ZHANG Bing, et al. Coal and gas outburst prediction model based on extension theory and its application[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 154: 329-337.
[13] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention

- methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1469–1476.
- [14] WANG Hanpeng, ZHANG Bing, YUAN Liang, et al. Analysis of precursor information for coal and gas outbursts induced by roadway tunneling: A simulation test study for the whole process[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122: 104349.
- [15] SUN Binxiang, YANG Lijun, BAI Wenhui, et al. Experimental investigation on porosity reduction of a coarsely crushed rock layer subject to vertically cyclic loading[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 104–105: 88–96.
- [16] YE Yang, ZENG Yawu, SUN Hanqing, et al. An experimental and theoretical study of the cyclic contact behaviour for rock sphere[J]. *Powder Technology*, 2021, 385: 375–385.
- [17] MARTIN C C, OUGIER S A, VANDEGINSTE V. Impact of second phase content on rock salt rheological behavior under cyclic mechanical conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(10): 5245–5267.
- [18] ZHANG Mingwei, MENG Qingbin, LIU Shengdong, et al. Impacts of cyclic loading and unloading rates on acoustic emission evolution and felicity effect of instable rock mass[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 1–16.
- [19] MENG Qingbin, ZHANG Mingwei, HAN Lijun, et al. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(4): 969–988.
- [20] WANG Y, YANG H N, HAN J Q, et al. Effect of rock bridge length on fracture and damage modelling in granite containing hole and fissures under cyclic uniaxial increasing-amplitude decreasing-frequency (CUIADF) loads[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 158: 106741.
- [21] DING Yu, TAN Zhuoying, LI Shuguang, et al. Research on tunnel surrounding rock failure and energy dissipation based on cyclic impact and shear loading[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1–15.
- [22] LU Hua, CHEN Qiaoli, MA Xiaotong. Investigation into dynamic behaviors of high-temperature sandstone under cyclic impact loading using dic technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 9247.
- [23] WANG Xuesong, GUO Lianjun, XU Zhenyang, et al. Dynamic response and damage evolution of red sandstone with confining pressure under cyclic impact loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(3): 1078–1092.
- [24] JIANG Zhen, DENG Hongwei, LIU Taoying, et al. Study on microstructural evolution of marble under cyclic dynamic impact based on NMR[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138043–138055.
- [25] 罗宁, 索云琛, 张浩浩, 等. 循环冲击层理煤岩动力学行为及破坏规律研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(4): 42–55.
- LUO Ning, SUO Yunchen, ZHANG Haohao, et al. On dynamic behaviors and failure of bedding coal rock subjected to cyclic impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 42–55.
- [26] 石竟成, 李建春, 李星, 等. 循环冲击下节理表面粗糙度对其法向刚度与形貌的影响[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2021, 52(8): 2661–2668.
- SHI Jingcheng, LI Jianchun, LI Xing, et al. Effect of joint surface roughness on normal stiffness and morphology in rock masses under cyclic impact[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2661–2668.
- [27] ZHANG Jie, XI Xun, TAN Wenhui, et al. Experimental investigation of failure mechanisms of granites with prefabricated cracks induced by cyclic-impact disturbances[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3680.
- [28] JIANG Zhen, YU Songtao, DENG Hongwei, et al. Investigation on microstructure and damage of sandstone under cyclic dynamic impact[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 133145–133158.
- [29] 刘伟, 曾鹏, 闫雷, 等. 循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1855–1863.
- LIU Wei, ZENG Peng, YAN Lei, et al. Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1855–1863.
- [30] XUE Jinchun, ZHAO Zhuyun, DONG Longjun, et al. Effect of chemical corrosion and axial compression on the dynamic strength degradation characteristics of white sandstone under cyclic impact[J]. *Minerals*, 2022, 12(4): 429.
- [31] 王宇, 翟成, 唐伟, 等. 循环冲击载荷作用下页岩动力学响应及能量耗散特征[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(6): 76–89.
- WANG Yu, ZHAI Cheng, TANG Wei, et al. Dynamic response and energy dissipating characteristics of shale under cyclic impact loadings[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(6): 76–89.
- [32] MA Jinyin, LI Diyuan, LUO Pingkuang, et al. Dynamic damage and failure of layered sandstone with pre-cracked hole under combined cyclic impact and static loads[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(3): 2271–2291.
- [33] WANG Pin, YIN Tubing, LI Xibing, et al. Dynamic properties of thermally treated granite subjected to cyclic impact loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 991–1010.
- [34] CHEN Yanlong, WU Haoshuai, PU Hai, et al. Investigations of damage characteristics in rock material subjected to the joint effect of cyclic loading and impact[J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2154.
- [35] KALLIONTZIS D, SRITHARAN S. Dynamic response and impact energy loss in controlled rocking members[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(4): 319–338.
- [36] GONG Fengqiang, ZHANG Peilei, DU Kun. A novel staged cyclic damage constitutive model for brittle rock based on linear energy dissipation law: modelling and validation[J]. *Rock Mechanics and*

- Rock Engineering*, 2022, 55(10): 6249–6262.
- [37] CHEN Xu, TANG Mingguo, ZENG Peng, et al. Modeling progressive damage and failure of rock under continuous cyclic loading considering strength degradation of mesoscopic finite elements[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(12): 335.
- [38] WANG Wei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Numerical simulation study on rock-breaking process and mechanism of compound impact drilling[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 3137–3148.
- [39] FAN Jinyang, CHEN Jie, JIANG Deyi, et al. Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 109–115.
- [40] 王伟, 王汉鹏, 王粟, 等. 多应变率动静叠加岩石力学试验系统研制及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(7): 1680–1694.
- WANG Wei, WANG Hanpeng, WANG Su, et al. Development and application of rock mechanics experimental system with multi strain rate dynamic and static superposition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(7): 1680–1694.
- [41] 梁涛, 刘晓丽, 王思敬. 采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3729–3739.
- LIANG Tao, LIU Xiaoli, WANG Sijing. Fractal study on the crack network evolution and permeability change in mining rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3729–3739.
- [42] 鲍园, 安超. 基于 FE-SEM 的微生物降解煤岩孔隙演化特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 4105–4112.
- BAO Yuan, AN Chao. Evolution characteristics of coal pore structure by biodegradation based on FE-SEM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 4105–4112.
- [43] 谢和平, 高峰. 岩石类材料损伤演化的分形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 1991, 10(1): 74–82.
- XIE Heping, GAO Feng. The fractal features of the damage evolution of rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(1): 74–82.
- [44] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击载荷作用下煤的破坏特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(3): 594–600.
- WANG Dengke, LIU Shumin, WEI Jianping, et al. The failure characteristics of coal under impact load in laboratory[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(3): 594–600.
- [45] 张慧梅, 孟祥振, 彭川, 等. 冻融-荷载作用下基于残余强度特征的岩石损伤模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3404–3411.
- ZHANG Huimei, MENG Xiangzhen, PENG Chuan, et al. Rock damage constitutive model based on residual intensity characteristics under freeze-thaw and load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3404–3411.
- [46] 周永强, 盛谦, 李娜娜, 等. 不同应变率下岩石材料强度和模量的动态增强因子模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S2): 3245–3259.
- ZHOU Yongqiang, SHENG Qian, LI Nana, et al. Dynamic increasing factor model for strength and modulus of rock materials at different strain rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2): 3245–3259.
- [47] 官凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(7): 1586–1595.
- GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1586–1595.