

# 动静耦合加载下受载钻孔试件力学特性 及破坏特征研究

张玉江<sup>1,2</sup>, 李书乐<sup>1</sup>, 杨永聪<sup>1</sup>, 冯国瑞<sup>1</sup>, 张帅<sup>1</sup>, 杜云楼<sup>1</sup>, 王千<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山东能源集团 博士后科研工作站, 山东 济南 250014)

**摘要:** 钻孔卸压是防治冲击地压的主要手段, 卸压孔径是重要的卸压参数. 研究动静组合作用下受载试件钻孔卸压单轴压缩力学性质和破坏特征, 对钻孔卸压参数优化及保持钻孔卸压后围岩的稳定性具有重要意义. 采用三维动静载多场耦合试验系统、DS5-8B 声发射采集分析系统和XTDIC 三维全场变形测量及分析系统, 开展了受载试样钻孔卸压后动载扰动的单轴压缩试验, 探究了预静载水平、动载幅值、钻孔直径对试件单轴力学特性和破坏特征的影响. 试验结果表明: 动静载荷之和小于 73% 无侧限抗压强度( $\sigma_{uc}$ )时动静组合作用对试件单轴压缩强度起增强作用. 扰动后试件的弹性模量明显增大, 钻孔对试件强度起削弱作用, 且呈正相关, 钻孔直径越大, 削弱效果越明显. 钻孔和动静载荷影响疲劳应变, 随着钻孔孔径和动载幅值增大疲劳应变呈线性增大, 预静载影响疲劳应变, 试件处于压密阶段时, 动载扰动会使试样内部原生裂隙压密, 疲劳应变较大; 试件处于弹性阶段时, 裂隙发育很少, 疲劳应变减小; 试件处于塑性阶段时, 出现不可逆的塑性变形, 疲劳应变增加. 钻孔直径的增加会使试件声发射事件(振铃计数、能量)减少, 损伤阈值降低; 动载扰动会使试件压密, 增加声发射事件, 提高试件的损伤阈值, 且破坏时瞬间释放的能量变大, 试件表现出更强的脆性. 钻孔直径的增大改变了试件裂隙发育特征, 钻孔直径从 0 增大到 12 mm, 试件从拉伸破坏转变为 X 状共轭斜面剪切破坏, 且部分试件表面出现了片状剥落. 该研究为钻孔卸压围岩破坏机理的揭示提供理论基础, 对钻孔卸压参数优化具有重要参考作用.

**关键词:** 受载钻孔; 动载循环扰动; 动静组合加载; 力学特性; 破坏特征

**中图分类号:** TD 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0577-18

## Research on mechanical properties and failure characteristics of loaded borehole specimens under static-dynamic coupled loading

ZHANG Yujiang<sup>1,2</sup>, LI Shule<sup>1</sup>, YANG Yongcong<sup>1</sup>, FENG Guorui<sup>1</sup>,  
ZHANG Shuai<sup>1</sup>, DU Yunlou<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Postdoctoral Research Station, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** Borehole pressure relief is a primary method for preventing and controlling rock-

收稿日期: 2024-12-11 修回日期: 2025-02-10 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.2024.0590

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374100, 52304150); 国家杰出青年科学基金项目(51925402)

通信作者: 冯国瑞(1976—), 男, 山西省阳城县人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事遗留煤炭资源开采与灾害防控方面的研究.

E-mail: fgr\_tut@163.com Tel: 13643697785

引用格式: 张玉江, 李书乐, 杨永聪, 等. 动静耦合加载下受载钻孔试件力学特性及破坏特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 577-594.

ZHANG Yujiang, LI Shule, YANG Yongcong, et al. Research on mechanical properties and failure characteristics of loaded borehole specimens under static-dynamic coupled loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 577-594.

bursts, with the diameter of the relief borehole serving as a crucial relief parameter. Conducting research on the mechanical properties and failure characteristics of loaded specimens subjected to uniaxial compression with borehole pressure relief, under combined static and dynamic loading conditions, holds significant importance for optimizing borehole pressure relief parameters and maintaining the stability of surrounding rock post-relief. In this paper, a three-dimensional static-dynamic multi-field coupling experimental system, acoustic emission (AE) equipment, and digital image correlation (DIC) devices were employed to conduct uniaxial compression tests on loaded specimens subjected to dynamic loading disturbances after borehole pressure relief. The effects of pre-static load levels, dynamic load amplitudes, and borehole diameters on the uniaxial mechanical properties and failure characteristics of the specimens were explored. The experimental results indicate: When the sum of static and dynamic loads is less than 73% of  $\sigma_{uc}$  (uniaxial compressive strength), the combined static and dynamic loading enhances the uniaxial compressive strength of the specimens. The elastic modulus of the specimens increases significantly after disturbance. Boreholes weaken the strength of the specimens in a positively correlated manner; as the borehole diameter increases, the weakening effect becomes more pronounced. Boreholes and loads (both static and dynamic) influence fatigue strain. Fatigue strain increases linearly with the borehole diameter and dynamic load amplitude. Pre-static loads also affect fatigue strain. When the specimen is in the compaction stage, dynamic loading disturbances compact the original fractures inside the specimen, resulting in larger fatigue strain. In the elastic stage, with minimal fracture development, fatigue strain decreases. During the plastic stage, irreversible plastic deformation occurs, leading to an increase in fatigue strain. An increase in borehole diameter reduces the AE events (ring counts and energy) of the specimen and lowers the damage threshold. Dynamic loading disturbances compact the specimen, increasing AE events and raising the damage threshold. The energy released instantaneously during failure increases, making the specimen exhibit stronger brittleness. An increase in borehole diameter alters the fracture development characteristics of the specimen. As the borehole diameter increases from 0 to 12 mm, the failure mode of the specimen transitions from tensile failure to X-shaped conjugate oblique shear failure, with some specimens showing flaking on their surfaces. This research provides a theoretical foundation for revealing the failure mechanism of surrounding rock under borehole pressure relief and serves as an important reference for optimizing borehole pressure relief parameters.

**Key words:** loaded drilling; dynamic load cyclic disturbance; dynamic and static combined loading; mechanical properties; failure characteristics

采深增加造成冲击地压等动力灾害日益严重<sup>[1-2]</sup>,冲击地压防治的难题日益复杂.近年来,众多学者针对冲击地压的发生机理进行研究,发现静载应力与动载扰动相叠加是引发冲击地压产生的主要原因<sup>[3-4]</sup>.

针对巷道卸压,大直径钻孔卸压是最常用的防冲技术手段<sup>[5]</sup>,围岩钻孔后力学特性与破坏特征会发生很大改变.煤矿开采过程其实就是对原岩应力场不断扰动的过程,如图 1 所示,超前工作面进行大直径钻孔卸压时,钻孔周围的围岩会经历如下阶段:开始时,围岩处于围岩应力状态,对

预卸压位置进行钻孔;由于顶板断裂,断层滑移等作用,钻孔后的围岩受到扰动动载影响;随工作面的推进,煤层中的支承压力(即垂向应力)由三向等压的静水压力状态逐渐升高至峰值应力<sup>[6]</sup>;若过度卸压,煤体破坏进入卸压状态,垂向应力逐渐降低至煤壁处的单压残余强度状态.岩石在三轴压缩下,在一定范围内随着围压的提高弹性阶段的斜率变化不大<sup>[7]</sup>,即弹性模量和强度于单轴压缩下基本不变.因此,对试验进行简化,将三轴压缩简化为单轴压缩.采用单轴压缩试验研究试件在钻孔、动静载荷组合作用下的力学性质和破坏

特征,对冲击地压钻孔卸压参数优化及保持钻孔卸压后的围岩稳定性具有重要意义。

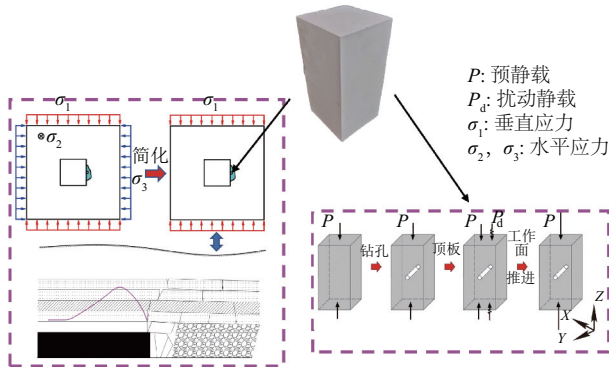


图 1 巷道钻孔卸压过程

Fig. 1 The process of borehole pressure relief in roadways

文献[8]首先提出了岩石动静组合加载的课题,先后运用 INSTRON 试验机和 SHPB 装置开展了一系列的研究.文献[9]用低周疲劳加载方法,进行了单轴动静组合加载试验,研究了组合加载条件下的岩石动态响应和破坏特性.文献[10-11]开展了一维和二维动静组合加载试验,研究了静压与扰动对红砂岩的力学响应及破坏特性的影响.文献[12]研制了岩石动态扰动伺服三轴试验系统,并进行了一组大理岩单轴压缩的动态扰动试验,分析了频率和振幅对试样破坏的影响.其他学者也对动静载荷组合作用下岩石力学性质及破坏特征进行了研究.文献[13-15]定量表征岩石的损伤和破裂行为,研究了初始静应力、扰动幅度和扰动频率 3 个影响因素对损伤和压裂演化的影响,并通过显微镜观察和图像分析技术分析了试样内的裂纹扩展模式.文献[16]开展了大理岩试样高应力下小幅循环动力扰动试验,认为有一阈值,当扰动上限小于该值时,扰动可增强岩石抵抗变形的能力.文献[17]研究了岩石的动弹性模量对应力幅值和应力水平的响应特性.文献[18]开展上限荷载位于不同应力区间的单轴等幅循环加卸载试验,研究了粉砂岩的疲劳强度确定方法和疲劳破坏先兆.文献[19]研究了动态循环载荷砂岩疲劳特性,认为疲劳强度随加载频率和幅值的增加而降低.文献[20]认为损伤与疲劳有关,循环单轴抗压强度相对于单调试验有所降低。

许多学者对预制钻孔试件的力学性质及破坏特征进行了研究.文献[21]通过单轴压缩试验,研究了钻孔布置对岩石模型力学特性的影响,发现强度和弹性模量随钻孔直径、钻孔数或钻孔排数的增加而减小.文献[22]以钻孔类煤样为研究对象,通过单轴压缩试验,对比分析了等直径钻孔和

变直径钻孔的卸压效果.文献[23]采用室内试验、数值模拟等方法研究了强排煤粉防治冲击地压的机制,建立了钻孔间距、钻孔直径等强排煤粉技术参数的确定方法.文献[24]通过室内试验与数值模拟等方法,研究了孔径、孔间距及孔深等参数对试样强度的影响.文献[25]应用物理模型和声发射技术,研究了预制圆形孔洞脆性岩石的断裂演化过程.文献[26]使用 DIC 和声发射设备,研究了单轴加载条件下孔洞形状对含孔洞岩石力学性质和断裂特征的影响.文献[27]通过相似试验,研究了不同卸压孔直径下煤柱破坏特征、强度特征及声发射特性,认为合适的卸压孔直径和煤柱高度之比为 0.05~0.10。

现有钻孔孔径对围岩力学特性的影响只考虑静载,未考虑动载扰动的影响且大多为预制钻孔,在实际工况中,钻孔卸压是在围岩受载的情况下进行的.因此,本研究拟开展受载试样钻孔卸压后受到动载扰动的单轴压缩试验,以探究预静载水平、动载幅值和钻孔直径对围岩力学性质和破坏特征的影响规律,为钻孔卸压参数选择提供依据。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 试样制备

为减弱煤体节理裂隙的影响,众多学者采用类煤相似材料进行试验<sup>[28-29]</sup>,经对比分析,本文拟采用高强石膏和水浇筑边长为 100 mm × 100 mm × 200 mm 的立方体试样(水和石膏的质量比为 0.4 : 1),用来模拟具有强冲击倾向性的煤体.具体浇筑流程如图 2 所示。

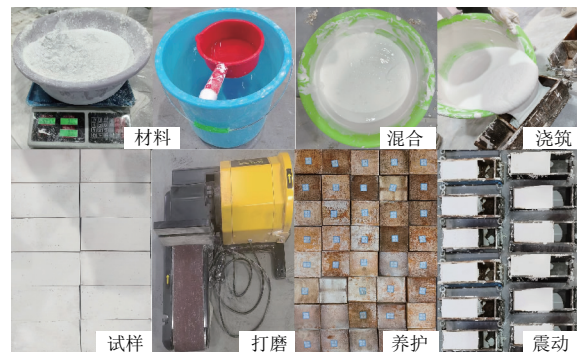


图 2 试件制备流程

Fig. 2 Specimen preparation procedure

首先按比例先后称量水和石膏并将其混合均匀;接着将混合均匀的浆液倒入刷好脱模油的模具,用手抖动模具以消除气泡.随后静置 3 h 后脱模,将脱模后的试件在室温下养护 28 d;然后对试件进行打磨处理,使其满足岩石物理力学性质试

验规程中对试件断面平整度的技术标准<sup>[30]</sup>.对浇筑试样进行冲击倾向性测试,单轴抗压强度均值为 20.20 MPa,动态破坏时间均值为 60.19 ms,冲击能量指数均值为 8.75,弹性能量指数均值为 8.71,试样具有强冲击倾向性.最后,在试样表面先后喷白色与黑色哑光漆,以便更好地使用数字图像相关技术(DIC)分析.

### 1.2 试验系统及设备

采用三维动静载多场耦合试验系统进行受载试样钻孔卸压后单轴压缩和动静耦合加载试验,试验系统如图 3 所示.试验系统可施加的最大静载荷为 2 000 kN,动载荷加载频率为 0.01~20 Hz,

动载荷幅值为 0~135 kN,静载与动载扰动可同步施加.采用万向轴钻孔机对受载试样进行定向钻孔,钻孔直径的范围为 4~16 mm.采用声发射和 DIC 技术对试样的损伤与破坏进行追踪,将 4 个声发射传感器用耦合剂粘接到声发射底座,并用胶水将声发射底座粘接到试样表面,以确保良好的采集效果.用 8 通道监测软件(DS5-8B)记录声发射(AE)信号.信号采集时,采样率为 2.5 MHz,信号采集阈值设置为 40 dB. DIC 相机以 2 s/张的速度记录图像,采用 2 个蓝光光源,以保持试件表面的漫反射和均匀的照明.将获得的图像导入处理软件,以获得全场位移.

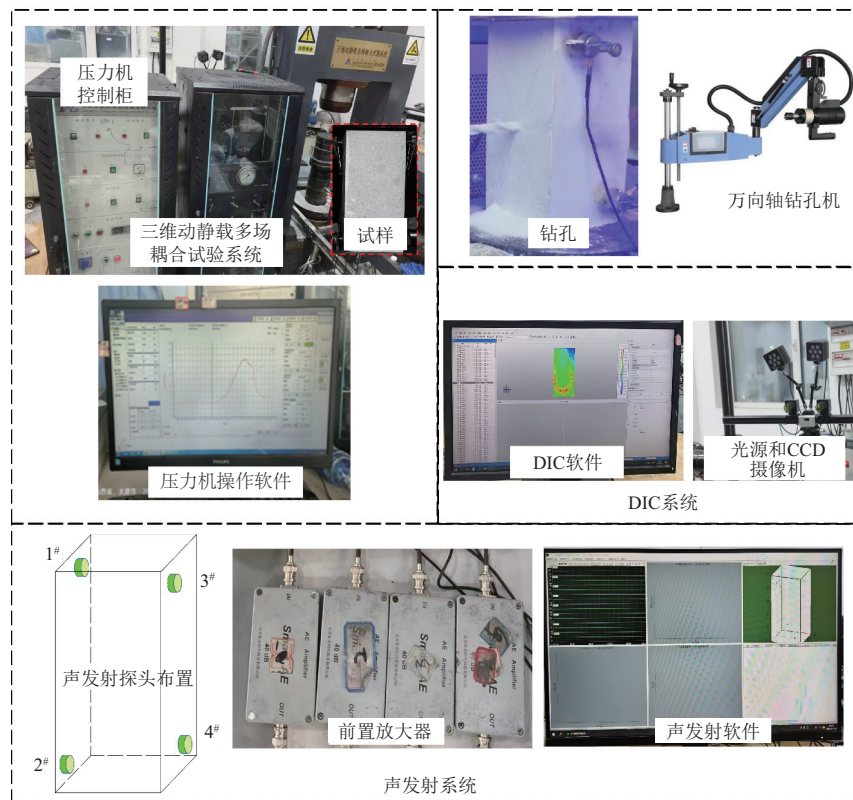


图 3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

### 1.3 加载路径

首先进行 3 个完整试件的单轴压缩试验,以 0.05 MPa/s 的速度加载直至试件破坏,得到完整试件的静态单轴压缩强度和变形特征,其应力-应变曲线如图 4 所示.3 条应力-应变曲线具有良好的一致性,试件均质性良好,3 个试件的平均无侧限抗压强度为 23.00 MPa,可为后续受载钻孔试样动静耦合加载试验方案提供依据.

受载钻孔试样动静耦合加载单轴压缩的应力路径由预静载加载阶段、钻孔卸压阶段、动载扰动阶段和扰动后加载阶段组成.如图 5 所示,A 为扰

动载荷的幅值, $T$  为扰动载荷的周期, $f$  为扰动载荷的频率, $\sigma_{\max}$  为最大应力, $\sigma_{\min}$  为最小应力.由于围岩所处的应力状态不同,因此对试件施加不同的预静载水平来模拟围岩所处的初始应力状态.预静载加载采用荷载控制模式,轴向加载速率为 0.05 MPa/s<sup>[31]</sup>.然后,固定施加静载的油泵,保持压力机压头位移不变,使用万向轴钻孔机对试件进行钻孔来模拟钻孔卸压过程.接着,使用动态油泵对试件轴向施加周期性循环正弦波,来模拟采矿活动或地震波对围岩的动力扰动.最后,若扰动后试件未破坏,以 0.05 MPa/s 的速度加载直至试

件破坏,以模拟工作面推进,围岩所处的应力增加.

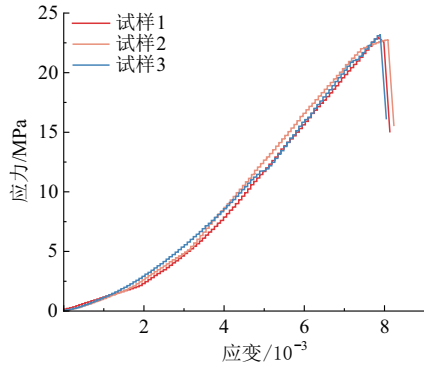


图 4 相似模拟试件在静载作用下的应力-应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curve of similar simulation specimens under static loading

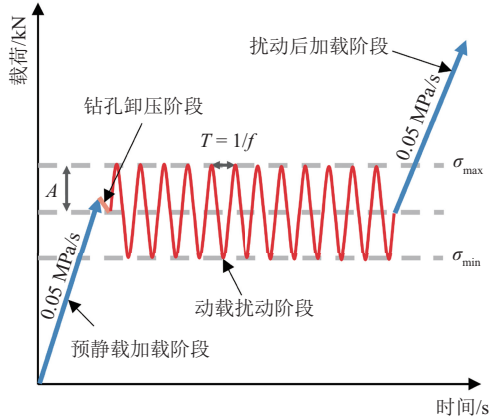


图 5 动静耦合加载路径示意  
Fig. 5 Schematic diagram of dynamic-static coupling loading path

1.4 试验方案

预静载作用下试样的初始损伤与后续试样钻孔和动力扰动阶段的损伤演化和裂隙发育密切相关.因此,改变预静载水平,分别设置为 4.6,9.2,13.8,18.4 MPa,对应 20%,40%,60%,80%的无侧限抗压强度.循环扰动参数和钻孔卸压参数会影响岩石的损伤演化、裂隙发育和破裂行为.因此,改变动载幅值,分别设置为 1.15,2.30,3.45,4.60 MPa,对应 10%,20%,30%,40%的无侧限抗压强度,来模拟实际工况中不同强度的扰动,频率均为 6 Hz,循环时间为 30 s<sup>[16,32-33]</sup>.经过统计,煤矿井下巷道围岩高度为 3~4 m,实际卸压孔常用孔径为 100~200 mm<sup>[34]</sup>,对应试件高度为 200 mm,则钻孔直径应为 5~13 mm,由于没有直径为 5 mm 的钻头,改变钻孔直径,分别选取 4,6,8,10,12 mm.受载钻孔试样动静耦合加载单轴压缩试验方案如表 1 所示.表 1 中试样编号的定义如下所述,以 S60-D20-6 为例,S60 表示预静载水平为

60% $\sigma_{uc}$ ,D20 表示动载幅值为 20% $\sigma_{uc}$ ,6 表示钻孔直径为 6 mm.

表 1 受载钻孔试样动静耦合加载单轴压缩试验方案  
Table 1 Experimental scheme for uniaxial compression test with dynamic-static coupling loading on loaded drilled specimens

编号	预静载水平/MPa	幅值/MPa	钻孔直径/mm
S60-D0-4	13.8	0	4
S60-D0-6	13.8	0	6
S60-D0-8	13.8	0	8
S60-D0-10	13.8	0	10
S60-D0-12	13.8	0	12
S60-D20-0	13.8	2.30	0
S60-D20-4	13.8	2.30	4
S60-D20-6	13.8	2.30	6
S60-D20-8	13.8	2.30	8
S60-D20-10	13.8	2.30	10
S60-D20-12	13.8	2.30	12
S20-D20-6	4.6	2.30	6
S40-D20-6	9.2	2.30	6
S80-D20-6	18.4	2.30	6
S20-D20-10	4.6	2.30	10
S40-D20-10	9.2	2.30	10
S80-D20-10	18.4	2.30	10
S60-D10-0	13.8	1.15	0
S60-D30-0	13.8	3.45	0
S60-D40-0	13.8	4.60	0
S60-D10-6	13.8	1.15	6
S60-D30-6	13.8	3.45	6
S60-D40-6	13.8	4.60	6
S60-D10-10	13.8	1.15	10
S60-D30-10	13.8	3.45	10
S60-D40-10	13.8	4.60	10

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

为研究动载循环扰动下受载钻孔的应力-应变曲线特征,将试件加载到不同预静载水平后钻孔,钻孔后施加不同动载幅值的扰动,循环结束试件未破坏则施加静载直至破坏.

图 6 和图 7 给出了受载试样在静态加载和动静组合加载条件下的典型应力-应变曲线.其中动静组合加载的应力-应变曲线可分为动载扰动过程中破坏和扰动后加载破坏 2 种情况,若动载扰动过程中试件未发生破坏,则应力-应变曲线可分为 4 个阶段:预静载加载阶段、钻孔卸压阶段、循环动载扰动阶段及扰动后加载阶段.如图 71 所示,若试

件在动载扰动过程中发生破坏,则无扰动后加载阶段。

对于每种试验情况,预静载加载阶段和单轴压缩过程相似,证明该阶段变形过程基本保持一致。在钻孔卸压阶段,由于钻孔,试件强度降低,孔周围应力集中,试件发生变形,导致应力降低应变增加;在循环动载扰动阶段,试件在循环动载扰动作用下产生变形,应力-应变曲线呈现滞回环,滞回环由稀疏到密集,若循环过程中试件破坏,则滞回环由稀疏到密集再到稀疏;在扰动后加载阶段,应力-应变曲线的斜率显著高于预静载加载阶段,这表明循环扰动导致试件压密。

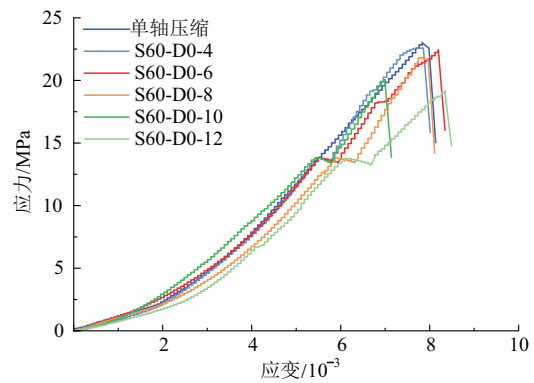


图 6 静态加载下受载钻孔试样应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curve of loaded drilled specimens under static loading

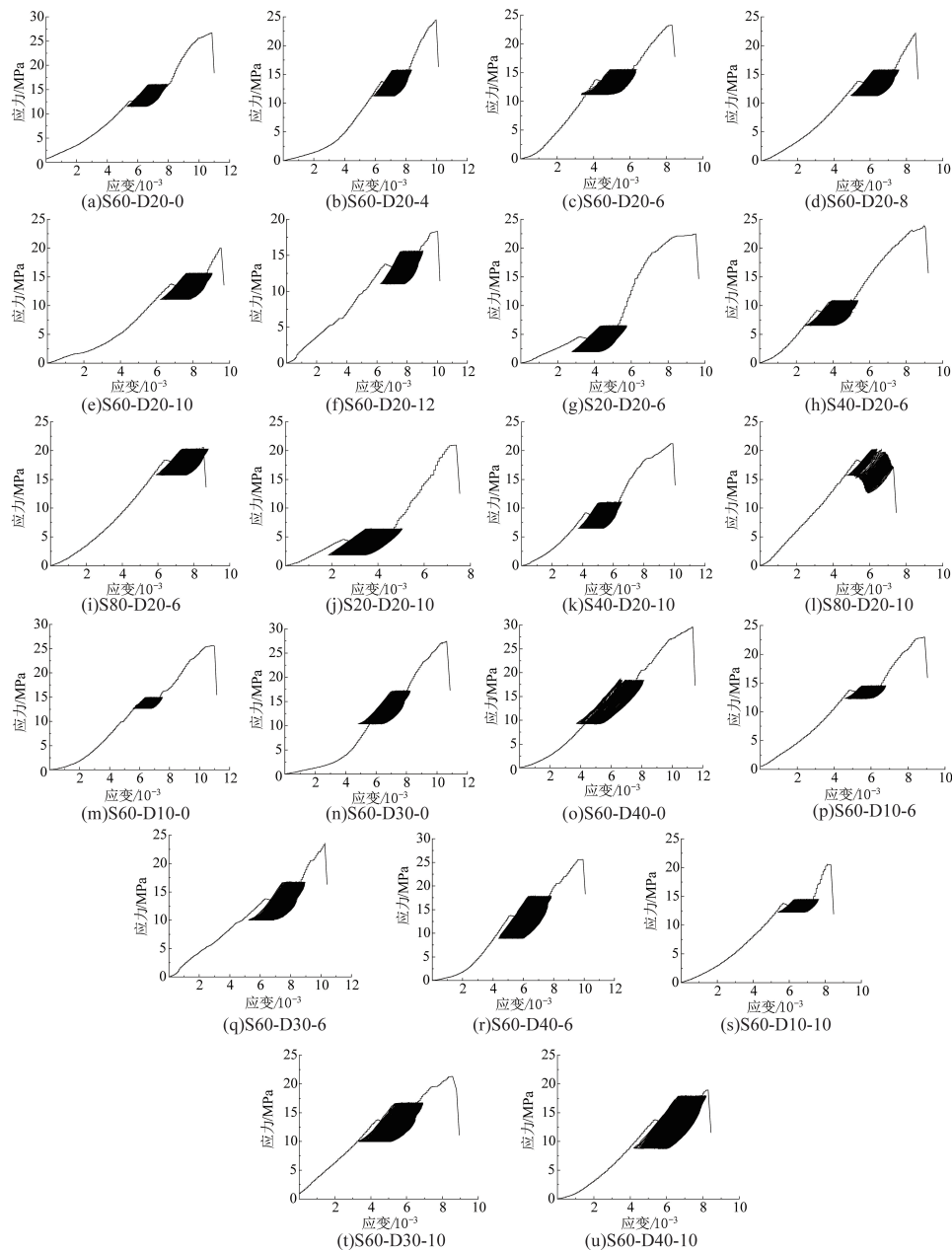


图 7 动静组合下受载钻孔试样应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of loaded drilled specimens under combined dynamic and static loading

## 2.2 力学特征

为了明晰试验各个参数对弹性模量的影响,做出以下定义,定义动载扰动前应力-应变曲线中弹性变形阶段应力与应变的比例系数为扰动前弹性模量  $E_f$ ,定义动载扰动后应力-应变曲线中弹性变形阶段应力与应变的比例系数为扰动后弹性模量  $E_m$ .显而易见,当预静载为  $20\% \sigma_{uc}$  时,没有扰动前弹性模量  $E_f$ ;预静载为  $80\% \sigma_{uc}$  时,无扰动后弹性模量  $E_m$ ,特殊的是,编号为 S60-D40-10 的试件在扰动后虽然没有破坏,但是已经进入塑性阶段,并无扰动后弹性模量  $E_m$ .定义试件受循环扰动所产生不可逆的塑性变形为疲劳应变,编号为 S80-D20-10 的试件在扰动中破坏,无疲劳应变.

### 2.2.1 预静载水平的影响

为了定量描述相似模拟试件在不同预静载水平、动载幅值和钻孔直径下强度的增强与削弱效应以及相似模拟试件受动力扰动后产生的模量增强效应,使用强度变化率( $\Delta\sigma_{uc}$ )和弹性模量变化率( $\Delta E$ )的概念<sup>[35]</sup>. $\Delta\sigma_{uc}$  和  $\Delta E$  定义如下:

$$\Delta\sigma_{uc} = \frac{\sigma_c - \sigma_{uc}}{\sigma_{uc}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_{uc}$  为强度变化率; $\sigma_c$  为试件在不同条件下的强度.

$$\Delta E = \frac{E_m - E_f}{E_f} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $\Delta E$  为弹性模量变化率; $E_m$  为扰动后弹性模量; $E_f$  为扰动前弹性模量.

预静载水平对试件力学特征的影响主要体现在单轴抗压强度与疲劳应变,对扰动前与扰动后的弹性模量影响不大.表 2 和图 8 展示了相同扰动载荷条件下卸载钻孔试件在不同预静载水平下的试件强度、 $\Delta\sigma_{uc}$ 、 $\Delta E$  以及疲劳应变.动载扰动幅值为  $20\% \sigma_{uc}$ ,钻孔直径为 6 mm 时,试件强度变为 20.64~23.89 MPa, $\Delta\sigma_{uc}$  变化范围为  $-10.26\% \sim 3.87\%$ , $\Delta E$  变化范围为  $22.40\% \sim 40.66\%$ ,疲劳应变变化范围为  $0.280 \sim 0.309$ ;钻孔直径为 10 mm 时,试件强度变为 17.12~20.97 MPa, $\Delta\sigma_{uc}$  变化范围为  $-25.57\% \sim -8.83\%$ , $\Delta E$  变化范围为  $27.75\% \sim 36.18\%$ ,疲劳应变变化范围为  $0.299 \sim 0.323$ .同时,可以看出,岩石试件在扰动过程中突然破坏时,处于应力上升阶段.

结果表明,预静载水平对试件强度的影响与钻孔直径密切相关,钻孔直径为 6 mm 时,预静载水平提高对试件单轴压缩强度的影响为先增大后减小;当钻孔直径为 10 mm 时,预静载水平的提高仅会降低试件的单轴抗压强度.对于疲劳应变而言,随着预静载水平的增加,疲劳应变会呈现出先减小后增大的趋势.

表 2 不同预静载条件下的试验结果

Table 2 Experimental results under different pre-static loading conditions

编号	$\sigma_c$ /MPa	$E_f$ /GPa	$E_m$ /GPa	疲劳应变/ $10^{-3}$	$\Delta E/\%$	$\Delta\sigma_{uc}/\%$
S20-D20-6	22.49		5.82	0.308		-2.22
S40-D20-6	23.89	3.96	5.57	0.293	40.66	3.87
S60-D20-6	23.22	3.84	4.7	0.280	22.40	0.96
S80-D20-6	20.64	3.94		0.309		-10.26
S20-D20-10	20.97		5.18	0.323		-8.83
S40-D20-10	20.23	4.00	5.11	0.311	27.75	-12.04
S60-D20-10	20.02	3.62	4.93	0.299	36.18	-12.96
S80-D20-10	17.12	4.02				-25.57

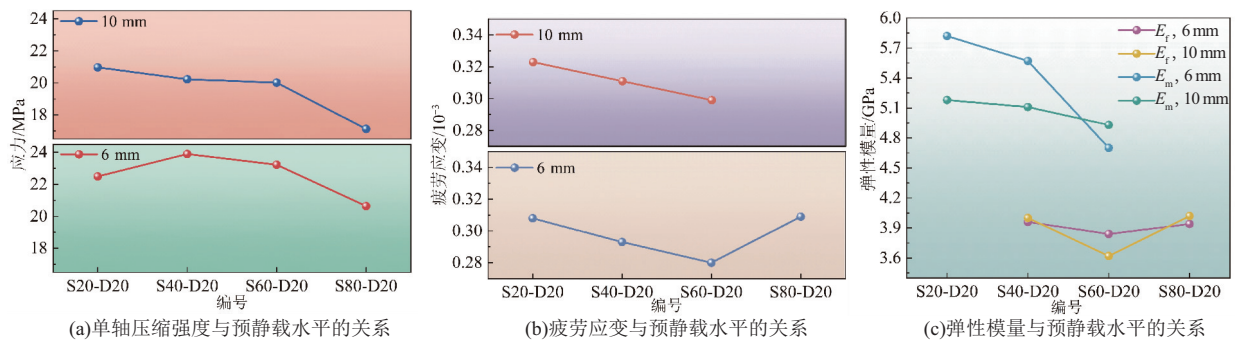


图 8 预静载水平的影响

Fig. 8 Impact of pre-static load level

这是因为预静载水平由  $20\%\sigma_{uc}$  提升到  $80\%\sigma_{uc}$ , 预静载小幅增加会导致试件在轴向方向的压密程度增加, 试件的强度增加, 当预静载水平继续提高时, 预静载与扰动载荷的叠加作用会导致孔隙周围的应力集中程度超过试件的承载能力, 促进孔周围裂隙的发展贯通, 引起试件失稳破坏, 降低试件强度. 钻孔直径为 10 mm 时, 试件可视为存在巨大的缺陷, 此时预静载水平的提高会直接促进孔周围裂隙发育, 降低试件强度. 随着预静载水平的提高, 疲劳应变先减小后增大, 预静载水平由  $20\%\sigma_{uc}$  提升至  $80\%\sigma_{uc}$ , 试件分别位于岩石应力-应变曲线中的孔隙裂隙压密阶段、弹性阶段和微弹性裂隙稳定发展阶段, 预静载水平由  $20\%\sigma_{uc}$  增加至  $60\%\sigma_{uc}$ , 预静载水平的提高导致试件的压密程度增加, 试件在动载扰动阶段产生的塑性变形变小, 预静载由  $60\%\sigma_{uc}$  提升至  $80\%\sigma_{uc}$ , 试件受到扰动会产生不可逆的塑性形变, 疲劳应变增加.

上述对比表明, 相似模拟试件在高预静载水平下受动载扰动后, 试样表现出明显的强度弱化效应.

### 2.2.2 扰动载荷的影响

如表 3 和图 9 所示, 扰动载荷增加弹性模量, 影响单轴抗压强度. 扰动载荷导致弹性模量增加, 是因为扰动载荷会引起试件在轴向方向压密, 试件的孔隙率降低, 抵抗变形的能力增强, 从而导致弹性模量和峰值强度出现大的提升, 而  $\Delta E$  随着动载幅值增大而变化不大, 这是因为预静载水平在  $60\%\sigma_{uc}$  条件下, 较小的动载幅值已经使试件足够致密, 因此动载幅值的变化并不会引起  $\Delta E$  的变化. 扰动载荷影响试件强度与试件有关, 若试件内部含有较大的裂隙、弱面等缺陷, 则动载会削弱试件强度, 反之, 则会增强试件强度.

与预静载水平类似, 扰动载荷幅值对试件力学特征的影响同样体现在单轴抗压强度与疲劳应变中. 表 3 和图 8 显示了不同扰动载荷条件下受载钻孔试件在相同预静载水平下的试件强度、 $\Delta\sigma_{uc}$ 、 $\Delta E$  以及疲劳应变. 预静载水平为  $60\%\sigma_{uc}$ , 钻孔直径为 6 mm 时, 试件强度变为 22.98~25.62 MPa,  $\Delta\sigma_{uc}$  变化范围为  $-0.09\%\sim 11.39\%$ ,  $\Delta E$  变化范围为 22.40%~33.15%, 疲劳应变变化范围为 0.265~0.318; 钻孔直径为 10 mm 时, 试件强度变为 20.56~21.68 MPa,  $\Delta\sigma_{uc}$  变化范围为  $-10.61\%\sim -5.74\%$ ,  $\Delta E$  变化范围为 23.57%~36.19%, 疲劳应变变化范围为 0.281~0.335.

结果表明, 动载幅值对试件强度的影响与预静载水平的影响相似, 均表现出与钻孔直径的密切关系. 钻孔直径为 0 或 6 mm 时, 动载幅值的增加会提高试件单轴压缩强度, 当钻孔直径为 10 mm 时, 动载幅值的增加对试件的单轴抗压强度的影响为先增大后减小. 同时疲劳应变会随着动载幅值的增加而增加.

试件无钻孔或钻孔直径较小时, 扰动载荷会使试件在轴向方向压密, 从而导致强度增加, 动载幅值继续增加后, 其压密效果越明显, 导致试件强度升高. 当钻孔直径过大时, 适当的动载幅值会使试件压密, 而动载幅值过大, 预静载与扰动载荷的叠加作用会促进试件内部裂隙发育, 试件强度降低. 因此, 在不同的预静载水平和钻孔直径条件下, 动载幅值存在一个阈值, 小于该阈值动载对试件强度体现加强作用, 反之, 则起削弱作用. 同时, 扰动加载过程是一个快速加载-卸载过程, 幅值越大, 动载导致试件不可逆的损伤增多, 试件产生的塑性变形越大, 疲劳应变增加.

表 3 不同动载幅值条件下的试验结果

Table 3 Experimental results under various dynamic load amplitude conditions

编号	$\sigma_c/\text{MPa}$	$E_f/\text{GPa}$	$E_m/\text{GPa}$	疲劳应变/ $10^{-3}$	$\Delta E/\%$	$\Delta\sigma_{uc}/\%$
S60-D10-0	25.63	3.94	4.64	0.242	17.77	11.43
S60-D20-0	26.68	3.73	4.86	0.259	30.29	16.00
S60-D30-0	27.47	4.08	4.99	0.265	22.30	19.43
S60-D40-0	29.54	3.82	4.93	0.300	29.06	28.43
S60-D10-6	22.98	3.59	4.78	0.265	33.15	-0.09
S60-D20-6	23.22	3.84	4.70	0.28	22.40	0.96
S60-D30-6	23.58	3.86	4.96	0.292	28.50	2.52
S60-D40-6	25.62	3.84	4.70	0.318	22.40	11.39
S60-D10-10	20.56	4.03	4.98	0.281	23.57	-10.61
S60-D20-10	21.68	3.62	4.93	0.299	36.19	-5.74
S60-D30-10	21.29	3.87	5.11	0.316	32.04	-7.43
S60-D40-10	20.89	3.75		0.335		-9.17

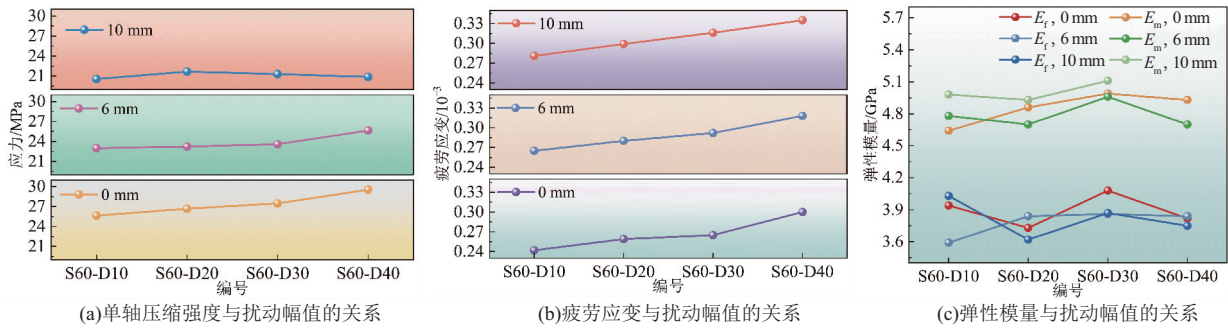


图 9 扰动载荷的影响

Fig. 9 Impact of disturbance loads

2.2.3 钻孔直径的影响

如表 4 和图 10 所示, 钻孔直径影响试件强度与疲劳应变. 无动载扰动时, 钻孔直径从 0 增加到 12 mm, 试件强度从 23 MPa 降低到 18.58 MPa, 受到 20% $\sigma_{uc}$  的扰动载荷时, 钻孔直径从 0 增加至 12 mm, 试件强度从 26.68 MPa 降低到 18.33 MPa, 疲劳应变从 0.259 增加至 0.307.

抗压强度, 增加疲劳应变, 且随着钻孔直径的增大, 试件的力学特征退化越发明显, 塑性也随之增强. 因此, 钻孔可以实现卸压, 且钻孔直径越大, 卸压效果越明显. 这是因为钻孔产生的孔洞周围应力分布发生变化, 应力集中, 孔周围的应力超过试件所承受的压力, 孔洞周围产生缺陷, 导致试件的强度降低, 塑性增加.

上述结果表明, 钻孔会显著降低试件的单轴

表 4 不同钻孔直径条件下的试验结果

Table 4 Experimental results under various borehole diameter conditions

编号	$\sigma_c$ /MPa	$E_t$ /GPa	$E_m$ /GPa	疲劳应变/ $10^{-3}$	$\Delta E$ /%	$\Delta\sigma_{uc}$ /%
S60-D0-4	22.59	4.03				-1.78
S60-D0-6	22.46	4.05				-2.35
S60-D0-8	21.84	3.91				-5.04
S60-D0-10	20.10	3.97				-12.61
S60-D0-12	18.58	3.93				-19.22
S60-D20-0	26.68	3.73	4.86	0.259	30.29	16.00
S60-D20-4	24.51	3.82	4.98	0.265	30.37	6.57
S60-D20-6	23.22	3.84	4.70	0.280	22.40	0.96
S60-D20-8	22.25	3.75	4.99	0.285	33.07	-3.26
S60-D20-10	21.68	3.62	4.93	0.299	36.16	-5.74
S60-D20-12	18.33	3.67	4.67	0.307	27.25	-20.30

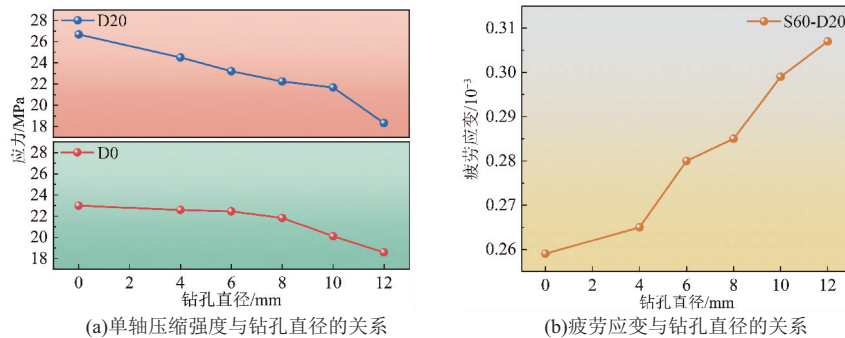


图 10 钻孔直径的影响

Fig. 10 Influence of borehole diameter

2.3 能量特征与破坏特征

2.3.1 AE 特性分析

众所周知, 试件中裂纹压密、产生、扩展或贯

通时, 会产生声发射信号. 利用声发射信号, 可以对不同加载条件下试件内部损伤进行检测和评估. 本文选取声发射振铃计数与能量作为表征声

发射活动的参数. 其中, 声发射计数用来评价声发射活动性的强弱, 声发射能量用于评价试样破坏过程中释放能量的整体趋势. 图 11 和图 12 为几种

典型条件下试件单轴压缩声发射参数和应力随时间的变化曲线.

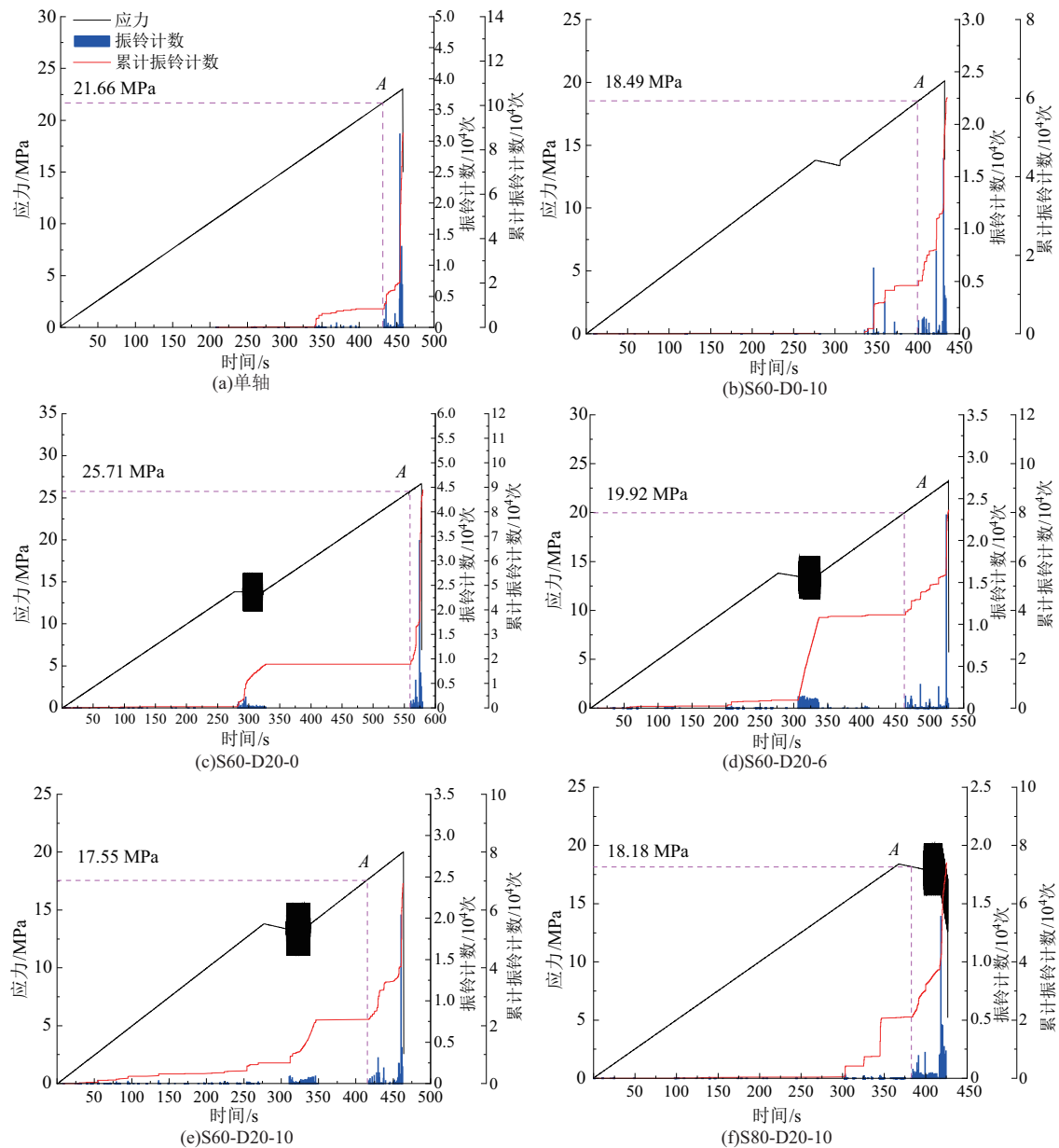


图 11 典型条件下应力-时间曲线与振铃计数和累计振铃计数

Fig. 11 Stress-time curve, ringing count, and cumulative ringing count under typical conditions

与试件在静态加载条件下的变形情况相对应, AE 曲线也可分为 4 个阶段. 在第 1 阶段, 试件处于孔隙、裂隙压密阶段, 原生裂隙闭合, 并未产生显著的声发射活动, 试件声发射事件较小; 在第 2 阶段, 试件处于弹性变形阶段, 试件稳定, 也无明显的声发射活动; 在第 3 阶段, 试件处于微弹性裂隙稳定发展阶段, 试件中的微裂隙数量稳定增长, 声发射活动输出稳定; 在第 4 阶段, 试件处于非稳定破裂发展阶段, 声发射事件显著增加, 试件发生

宏观破坏, 声发射活动急剧上升. 钻孔后, 由于孔周围出现应力集中, 孔周围裂纹沿试件轴向产生拉伸裂缝并稳定发展, 导致第 3 阶段与第 4 阶段分界线并不明显.

施加动载扰动的试样, 相比于静态加载, AE 曲线增加了 1 个阶段, 试件在扰动载荷的作用下, 试件内的裂隙不断地闭合、扩展、贯通, 声发射活动连续. 由于 Kaiser 效应, 动载扰动停止, 再次加载时声发射活动并不明显. 特殊的是, 试件在动载

扰动时破坏, 试件声发射振铃计数曲线仅存在 3 个阶段, 此时, 微弹性裂隙稳定发展阶段与非稳定破裂发展阶段被包含在动载扰动中.

本试验采用力控制加载, 因此应力-时间曲线无明显的凹陷, 而峰值处的应力突降显示了相似模拟试样的脆性破坏特征. 临界应力对于判断试样在外部应力作用下的破坏至关重要, 本文拟采

用 AE 演化来识别试样的临界应力阈值<sup>[16]</sup>. 一直以来, 声发射活动的爆发增加被认为是试件裂纹相互作用和合并的开始. 因此, 将 A 点处的应力识别为试件损伤应力阈值, 当轴向应力接近峰值时, 声发射活动急剧增加, 峰值附近达到最大值, 在此处可以观察试样的破坏形态.

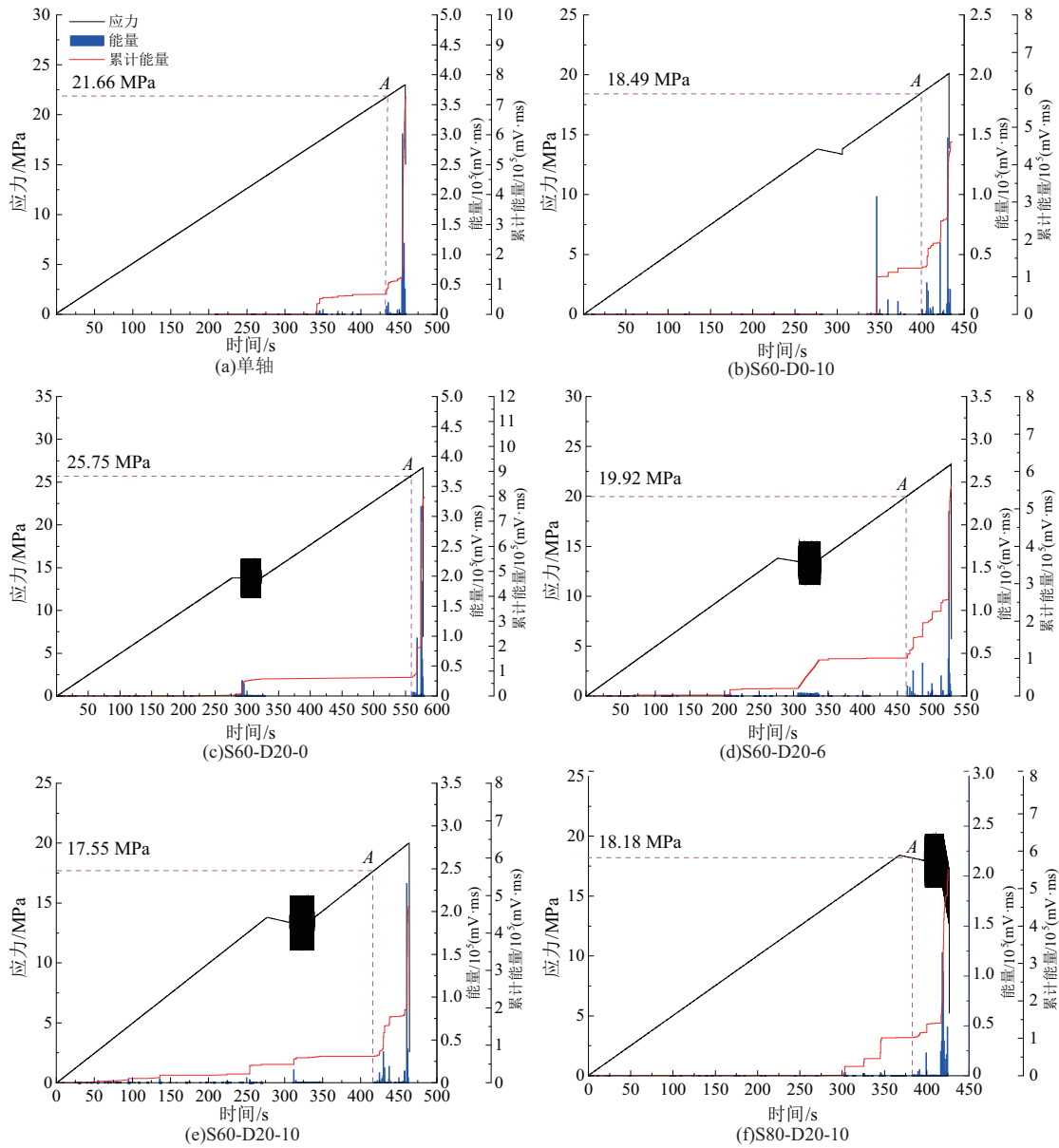


图 12 典型条件下应力-时间曲线与能量和累计能量

Fig. 12 Stress-time curve, energy, and cumulative energy under typical conditions

典型条件下试件损伤应力阈值与声发射参数如表 5 所示. 对比表中数据可知, 施加动载扰动的完整试件在各个阶段的声发射信号最为活跃, 原因是, 相对于单轴压缩, 动载扰动增加了声发射振铃计数并释放了部分能量, 同时, 动载扰动使试件在轴向方向上压密, 临近破坏时产生的裂纹变多,

释放能量增加, 试件脆性增强, 印证了上文. 完整试件或钻孔直径较小时, 施加一定幅值的动载会使试件强度增加, 钻孔直径为 10 mm 时, 各个阶段的声发射信号减弱明显, 原因可能是钻孔的存在抑制了试件内声波的传递, 并且钻孔周围应力集中导致试件内裂纹集中扩展.

表 5 典型条件下试件损伤应力阈值与声发射参数

Table 5 Stress threshold for specimen damage and acoustic emission parameters under typical conditions

编号	损伤应力阈值/ MPa	单次最大振铃计数/ 次	累计振铃计数/ 次	单次最大能量/ (mV·ms)	累计能量/ (mV·ms)
单轴压缩	21.66	31 075	87 595	300 972.16	725 842.26
S60-D0-10	18.49	16 704	60 082	147 039.37	460 484.16
S60-D20-0	25.71	34 092	88 886	315 274.87	795 842.86
S60-D20-6	19.92	23 034	80 973	215 394.96	561 411.83
S60-D20-10	17.55	20 371	69 126	232 439.27	471 968.04
S80-D20-10	18.18	13 886	74 030	190 103.99	549 874.15

完整试件单轴压缩损伤应力阈值为 21.66 MPa, 钻孔直径为 10 mm 时, 试件损伤应力阈值降低为 18.49 MPa, 施加 20% $\sigma_{uc}$  动载后, 试件损伤应力阈值增加至 25.71 MPa, 分别对应该条件峰值强度的 94.17%, 92.40%, 96.51%, 钻孔会降低试件损伤应力阈值, 动载扰动则会增加损伤应力阈值, 表明裂纹首先出现在钻孔试样中, 施加动载会使试件中裂纹的萌生推迟, 印证了上文动载增加试件强度, 钻孔降低试件强度的结论. 经过对比可知, 对声发射活动影响最大的参数为钻孔直径, 相同钻孔直径试件的声发射活动区别不大. 因此仅从声发射能量的角度分析, 钻孔直径越大, 卸压效果越好.

### 2.3.2 破坏特征分析

基于 DIC 技术, 可以获得试件在静载和动静

耦合加载作用下的全场位移或应变. 图 13 给出了相似模拟试件在 S40-D20-6 加载条件下典型的全场位移. 在预静载加载阶段, 开始时, 位移场呈现出杂乱的状态, 此时试件处于微裂隙压密阶段; 随后, 试件进入弹性阶段, 位移场开始有序, 呈现试件下部位移大于试件上部, 且呈梯度增加的趋势; 在钻孔卸压阶段, 由于钻孔导致试件中部出现空白; 扰动加载阶段, 随着动载正弦波形的变化, 试件位移场也发生较大变化, 处于峰值时试件中下部出现大的位移, 处于谷值时试件下部小范围出现大的位移, 在该阶段, 试件未产生明显的塑性形变; 扰动后加载阶段与预静载加载阶段弹性阶段类似, 试件位移场自下而上梯度减小.

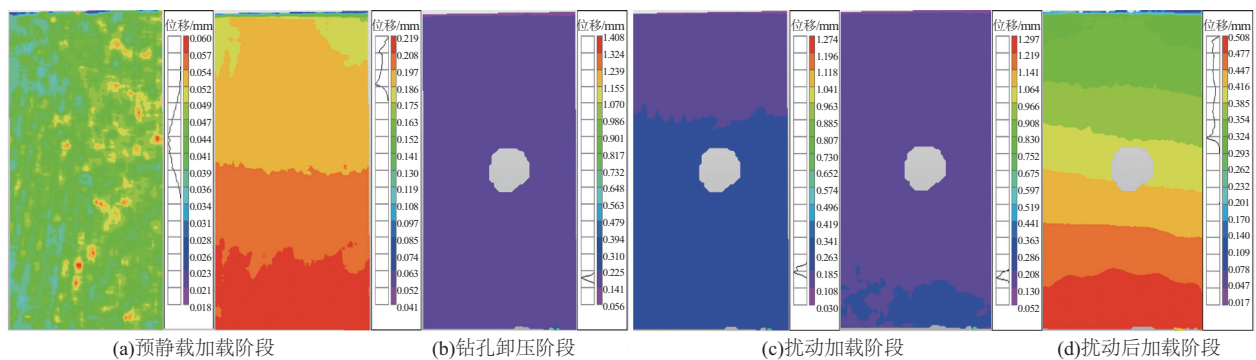


图 13 典型时刻全场位移图

Fig. 13 Displacement maps of the entire field at typical time points

图 14 展示了静态加载下试样宏观裂纹扩展规律以及在预静载加载阶段、钻孔后加载阶段和应力峰值时的表面位移特征, 由于试件脆性较强以及 DIC 采样频率限制, 无法抓拍破坏的瞬间, 此时选取附近图像. 发现试件破坏形态与表面位移有良好的对应关系, 在表面位移出现较大差异的区域发现明显裂纹的萌生. 从裂纹形态来看, 试件破坏产生的裂纹以拉伸裂纹为主, 剪切裂纹为辅, 裂纹发展贯穿引起试件的破坏. 当完整试件破坏时,

表面靠近试样边缘处出现 2 条自上而下呈平行发展趋势的贯穿裂纹; 钻孔直径为 4 mm 的试件破坏时, 除平行试样边缘出现贯穿裂纹外, 在孔周围出现 2 条有一定角度的裂缝, 交汇贯穿整个试件; 钻孔直径为 6 mm 的试件破坏时, 试件中部在钻孔旁边出现 1 条径向裂纹, 轴向裂纹在其附近发展贯通; 钻孔直径为 8 和 10 mm 时, 试件表面出现小幅片状剥落, 整体呈现出 X 状共轭斜面剪切破坏, 在试样边缘仍出现横向张拉破坏特征; 钻孔直径为

12 mm 时,试件表面出现较大范围剥落,整体呈现张拉破坏特征. 钻孔会显著影响试件的破坏形态,但破坏均以张拉破坏为主.

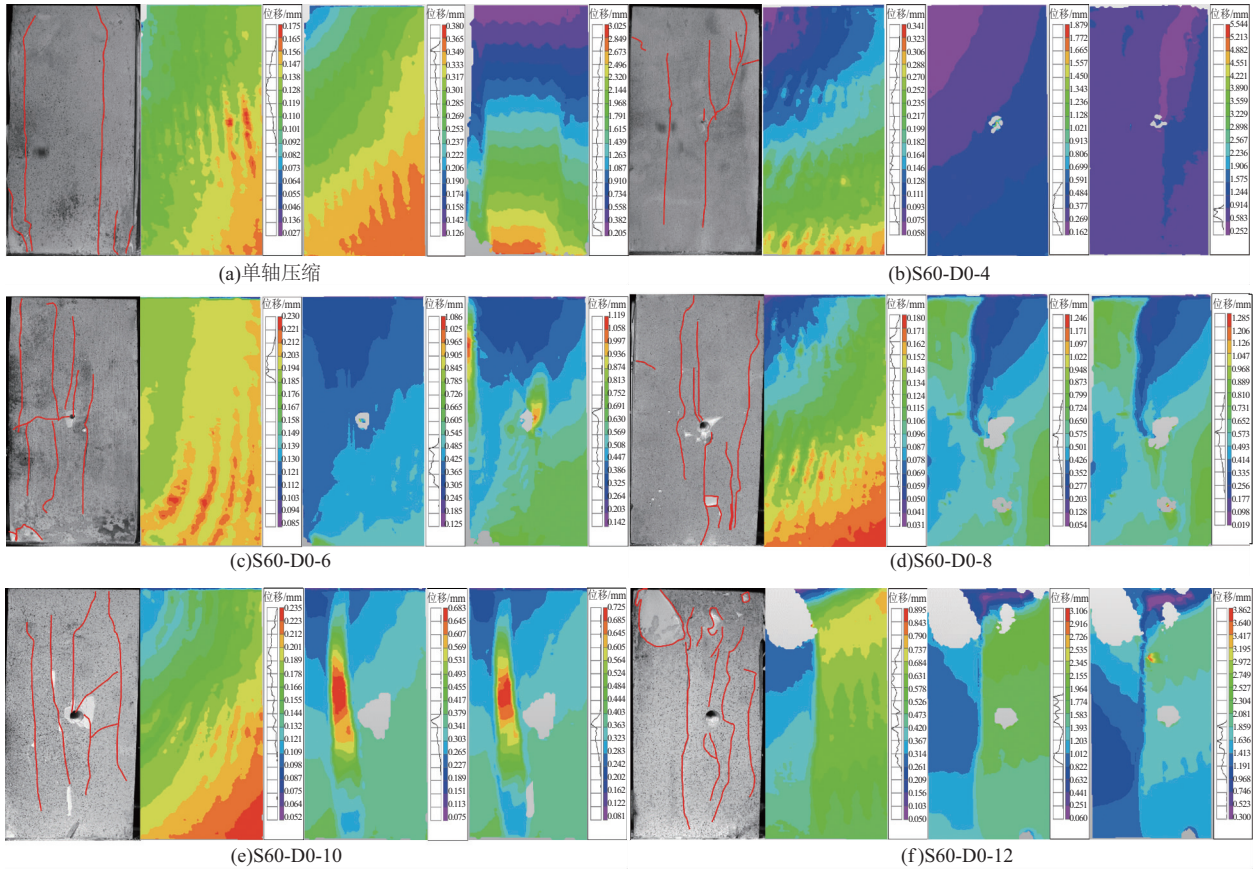


图 14 不同钻孔直径下的试件破坏特征

Fig. 14 Failure characteristics of specimens under various borehole diameters

如图 15 和图 16 所示,为动静组合加载下试样宏观裂纹扩展规律以及在预静载加载阶段、钻孔卸压阶段、扰动加载阶段和扰动后加载阶段的表面位移特征,可以看出,预静载水平与动载幅值的改变对试件破坏特征的影响并不显著.

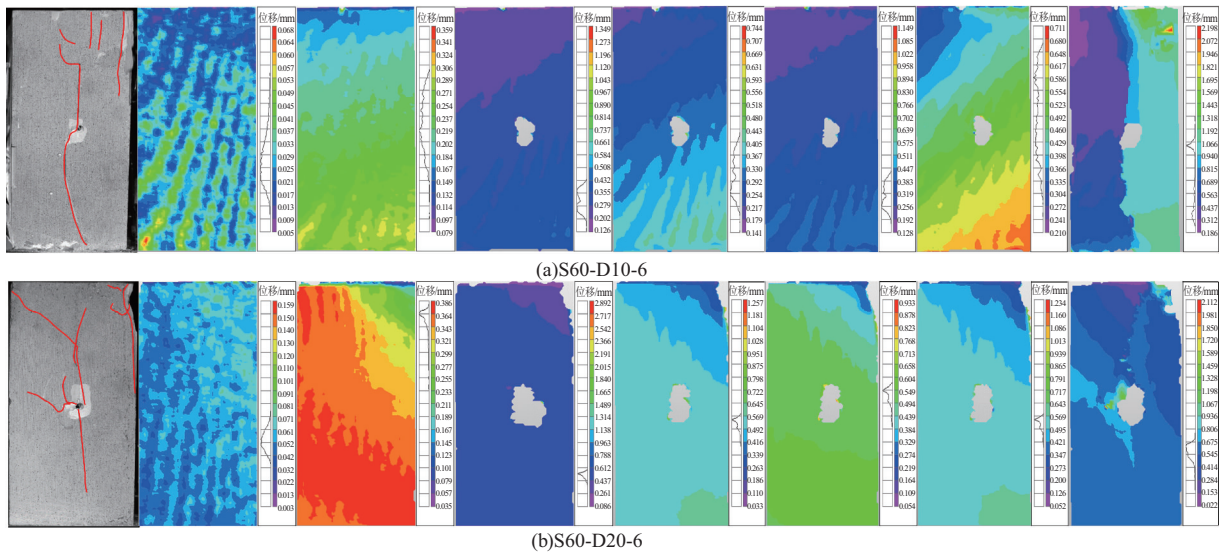


图 15 不同动载幅值下的试件破坏特征

Fig. 15 Failure characteristics of specimens under various dynamic load amplitudes

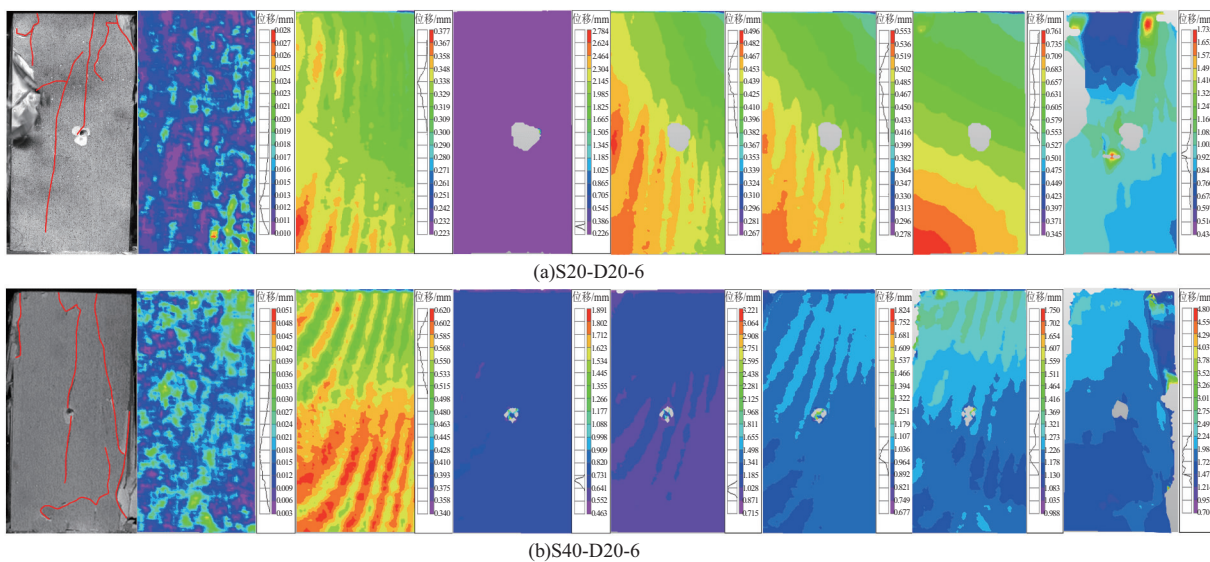


图 16 不同预静载水平下的试件破坏特征

Fig. 16 Failure characteristics of specimens under different pre-static load levels

### 3 动静载组合作用下相似模拟材料的强度变化分析

#### 3.1 预静载水平对相似模拟材料的强度变化分析

上文提到预静载水平对试件强度的影响为先增大后减小,存在一个动载扰动阈值使得动静组合加载对试件强度的影响发生变化.为明确该阈值,对不同预静载条件下试件强度进行拟合,如图 17 所示.在 6 mm 钻孔条件下,不施加动载时试件强度为 22.46 MPa,当预静载水平小于 67.87%  $\sigma_{uc}$ ,预静载与动载的共同作用未使试件孔洞周围裂隙贯通,动载对试件起增强作用,其中预静载水平为 43.72%  $\sigma_{uc}$  时,动载对强度的增强作用最大.在 10 mm 钻孔条件下,不施加动载时试件强度为 20.10 MPa,当预静载水平超过 58.86%  $\sigma_{uc}$ ,预静载与动载的共同作用使试件孔洞周围裂隙贯通,动载对试件起削弱作用,而当预静载水平为 33.87%  $\sigma_{uc}$  时,动载对强度的增强作用最大.随着钻孔直径的增加,预静载水平对强度的增强阈值降低.

通过对比上文中的试验结果,容易发现在相同钻孔直径下,预静载水平与扰动幅值之和相等时,预静载水平过高(S80-D20-10)会导致试件在动载扰动过程中失稳,而扰动幅值过高(S60-D40-10),试件能够承受高幅值的循环扰动,这一现象表明,在动静组合加载条件下,过高的预静载是导致试件在扰动过程中破坏的主要原因.预静载水平过高时,试件更易在扰动载荷作用下发生失稳破坏.

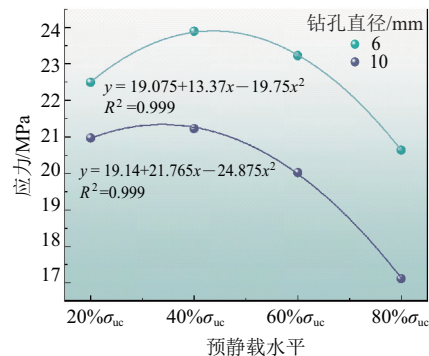


图 17 相同扰动幅值和钻孔直径下强度与预静载水平关系

Fig. 17 Graph of the relationship between strength and pre-loading level under the same disturbance amplitude and borehole diameter

#### 3.2 扰动幅值对相似模拟材料的强度变化分析

不施加动载时,0,6 和 10 mm 钻孔试件的强度分别为 23.00,22.46 和 20.10 MPa.结合图 18 中相同预静载水平和钻孔直径下的扰动幅值与试件强度关系可知,在预静载的基础上增加扰动载荷,强度都大于单纯静载荷载条件下的强度,在这 3 种情况下,扰动对试件强度均起增强作用.钻孔直径为 0 和 6 mm 时,试件强度与动载幅值为正相关关系,随着动载幅值的增加,试件强度也随之增加.钻孔直径为 10 mm 时扰动幅值对强度的影响,与上文中预静载水平对强度的影响类似,存在一个阈值,使得动静组合加载对试件强度的影响发生变化,在扰动幅值为 25.79%  $\sigma_{uc}$  时,动载对强度的增强作用最大.扰动载荷对试件强度起增强作用,但是当动载幅值较高时,其与预静载水平叠加作用会使试件孔洞周围裂隙贯通,此时,随着动载幅值增加,试件反而会被削弱.

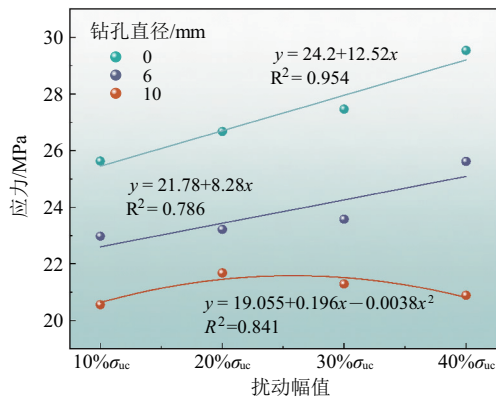


图 18 相同预静载水平和钻孔直径下强度与扰动幅值关系

Fig. 18 Graph of the relationship between strength and disturbance amplitude under the same pre-static load level and borehole diameter

### 3.3 钻孔直径对相似模拟材料的强度变化分析

为研究钻孔直径对试件强度的影响,对相同预静载水平和动载幅值不同钻孔直径下试件强度进行拟合,如图 19 所示.由图可知,钻孔对试件起削弱作用,且呈明显的负相关关系,随着钻孔直径的增大,试件强度随之降低.当无动载影响下,钻孔直径为 10 mm 时,试件强度出现显著降低,说明当钻孔直径小于 10 mm 时,虽然可以起到一部分卸压效果,但是卸压效果并不显著,因此不考虑动载影响的条件下,试件卸压孔径应大于等于 10 mm.考虑动载影响时,钻孔导致试件出现明显下降的直径为 12 mm,因此在 20%σ<sub>uc</sub> 扰动幅值的影响下,钻孔卸压孔径应大于等于 12 mm.这对实际工程中钻孔卸压的参数选择有指导意义,即考虑动载影响的情况下,钻孔直径与围岩高度比应大于 0.06.

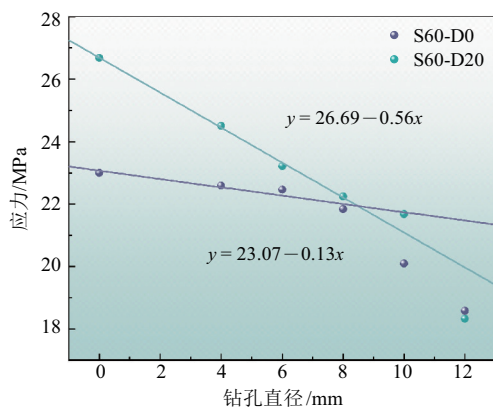


图 19 相同预静载水平和扰动幅值下强度与钻孔直径的关系

Fig. 19 Graph of the relationship between strength and borehole diameter under the same pre-static load level and disturbance amplitude

## 4 结 论

1) 钻孔和动静载荷影响试件强度,当预静载和动载叠加未达到试件塑性阶段时,动静组合加载对试件单轴压缩强度起增强作用,反之,则会弱化试件强度,其影响阈值为 73%σ<sub>uc</sub>. 钻孔对试件强度起削弱作用且呈正相关,钻孔直径增大,削弱效果越明显.循环扰动会使试件弹性模量增大,但与预静载水平、动载幅值和钻孔直径无明显关系.

2) 钻孔和动静载荷影响疲劳应变,随着钻孔孔径和动载幅值的增大,疲劳应变线性增加,预静载影响疲劳应变,与试件的应力状态密切相关,当试件处于压密阶段,动载扰动会使试样内部原生裂隙压密,疲劳应变较大,当试件处于弹性阶段时,动载扰动仅使试样细观结构发生改变,裂隙发育很少,疲劳应变减小,试件处于塑性阶段时,动载扰动会使试件出现不可逆的变形,疲劳应变增加.

3) 钻孔和动静载荷影响试件声发射特性和损伤阈值,钻孔直径的增加会使试件声发射事件(振铃计数、能量)减少,损伤阈值降低;动载扰动则会增加声发射事件,提高试件的损伤阈值,且动载扰动会使试件破坏瞬间释放的能量变大,试件表现出更强的脆性.

4) 钻孔改变试件的破坏形态,预静载与动载幅值的改变并不会影响试件的破坏形态.钻孔直径的增大改变了试件裂隙发育特征,当无钻孔时,试件呈现横向拉伸破坏,随着钻孔直径的增大,试件逐渐出现剪切裂纹,孔径大于 8 mm 后,试件整体呈现 X 状共轭斜面剪切破坏,部分试件表面逐渐出现片状剥落,但是无论孔径如何改变,试件均会出现平行于轴向的拉伸裂纹.

5) 冲击地压防治可从避免围岩位于高应力状态和避免围岩受到高幅扰动出发.通过大直径钻孔卸压、切顶卸压、煤层注水等措施降低围岩的应力集中.在高应力无法避免的情况下,可通过防止采掘活动相互影响,超前工作面卸压等措施,尽量将震源远离应力集中区,来降低扰动载荷的影响.当使用大直径钻孔卸压时,考虑扰动载荷的影响,应保证钻孔直径与围岩高度比大于 0.06,以取得较好的卸压效果.

### 参考文献:

[1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.

- XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5):1283-1305.
- [2] 高明仕,赵世帆,席国军,等. 重复冲击特厚煤层巷道围岩裂隙演化及破坏特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(4):634-646.
- GAO Mingshi, ZHAO Shifan, XI Guojun, et al. Fracture evolution and failure characteristics of roadway surrounding rock in extra-thick coal seams subjected to multiple coal bursts[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(4):634-646.
- [3] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. *Engineering*, 2021, 7(5):687-700.
- [4] 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.
- [5] 马衍坤,李笑笑,翟少彬,等. 含预制钻孔煤体承载破坏应变场与声发射响应真三轴试验[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(3):497-508.
- MA Yankun, LI Xiaoxiao, ZHAI Shaobin, et al. The true triaxial test of strain field and acoustic emission response of bearing failure of coal with prefabricated borehole[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(3):497-508.
- [6] 谢和平,高峰,鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11):2161-2178.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11):2161-2178.
- [7] 宫凤强,李夕兵,刘希灵. 三维动静组合加载下岩石力学特性试验初探 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6):1179-1190.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling. Preliminary experimental study of characteristics of rock subjected to 3d coupled static and dynamic loads [J]. 2011, 30(6):1179-1190.
- [8] 李夕兵,古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]//香山第 175 次科学会议论文集. 北京:中国环境科学出版社,2002:101-108.
- LI Xibing, GU Desheng. The hazard control and cataclysmic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]//Proceedings of the 175th Xiangshan Science Congress. Beijing:China Environmental Science Press,2002:101-108.
- [9] 马春德,李夕兵,陈枫,等. 单轴动静组合加载对岩石力学特性影响的试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2004(4):1-3.
- MA Chunde, LI Xibing, CHEN Feng, et al. Test and study of mechanical properties of rock under uniaxial static-and-dynamical combination load [J]. *Mining Research and Development*, 2004(4):1-3.
- [10] 左宇军,李夕兵,马春德,等. 动静组合载荷作用下岩石失稳破坏的突变理论模型与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(5):741-746.
- ZUO Yujun, LI Xibing, MA Chunde, et al. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(5):741-746.
- [11] 左宇军,李夕兵,唐春安,等. 受静载荷的岩石在周期载荷作用下破坏的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):927-932.
- ZUO Yujun, LI Xibing, TANG Chun'an, et al. Experimental investigation on failure of statically loaded rock subjected to periodic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5):927-932.
- [12] 陈旭,张俊文. 岩石动态扰动伺服三轴试验系统的研制与应用[J]. *岩土力学*, 2017, 38(3):918-924.
- CHEN Xu, ZHANG Junwen. Development of a servo-controlled rock triaxial test system with dynamic disturbance and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(3):918-924.
- [13] HU L H, LI Y C, LIANG X, et al. Rock damage and energy balance of strainbursts induced by low frequency seismic disturbance at high static stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(11):4857-4872.
- [14] CHEN Y Q, WATANABE K, KUSUDA H, et al. Crack growth in westerly granite during a cyclic loading test[J]. *Engineering Geology*, 2011, 117(3/4):189-197.
- [15] MIAO S T, PAN P Z, KONICEK P, et al. Rock damage and fracturing induced by high static stress and slightly dynamic disturbance with acoustic emission and digital image correlation techniques [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5):1002-1019.
- [16] 唐礼忠,武建力,刘涛,等. 大理岩在高应力状态下受小幅循环动力扰动的力学试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12):4300-4307.

- TANG Lizhong, WU Jianli, LIU Tao, et al. Mechanical experiments of marble under high stress and cyclic dynamic disturbance of small amplitude [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4300-4307.
- [17] 何明明, 李 宁, 陈蕴生, 等. 分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(10): 2907-2913.
- HE Mingming, LI Ning, CHEN Yunsheng, et al. An experimental study of dynamic behavior of rock under stepwise cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2907-2913.
- [18] 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): 1476-1486.
- 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): 1476-1486.
- [19] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42 (2): 237-250.
- [20] MOGHADDAM R H, GOLSHANI A. Fatigue behavior investigation of artificial rock under cyclic loading by using discrete element method [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 160: 108105.
- [21] HUANG B, GUO W Y, FU Z Y, et al. Experimental investigation of the influence of drilling arrangements on the mechanical behavior of rock models [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(4): 2425-2436.
- [22] LI Y Y, GUO R W, ZHANG S C, et al. Experimental study on pressure relief mechanism of variable-diameter borehole and energy evolution characteristics of the surrounding rock [J]. *Energies*, 2022, 15 (18): 6596.
- [23] 刘金海, 姜福兴, 孙广京, 等. 强排煤粉防治冲击地压的机制与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (4): 747-754.
- LIU Jinhai, JIANG Fuxing, SUN Guangjing, et al. Mechanism of intensive venting pulverized coal to prevent coal burst and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(4): 747-754.
- [24] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39 (6): 1115-1122.
- JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, et al. Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(6): 1115-1122.
- [25] ZHAO X D, ZHANG H X, ZHU W C. Fracture evolution around pre-existing cylindrical cavities in brittle rocks under uniaxial compression [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 806-815.
- [26] WU H, ZHAO G Y, LIANG W Z. Mechanical properties and fracture characteristics of pre-holed rocks subjected to uniaxial loading: A comparative analysis of five hole shapes [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 105: 102433.
- [27] 齐燕军, 靖洪文, 孟 波, 等. 卸压孔尺寸效应的模型试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 538-544.
- QI Yanjun, JING Hongwen, MENG Bo, et al. Experimental modelling on size effect of pressure relief hole [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 538-544.
- [28] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 岩爆物理模拟试验研究现状及思考 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34 (5): 915-923.
- ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Review and status of research on physical simulation test for rockburst [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34 (5): 915-923.
- [29] ZHANG S C, LI Y Y, SHEN B T, et al. Effective evaluation of pressure relief drilling for reducing rock bursts and its application in underground coal mines [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 7-16.
- [30] WANG Q, ZHANG Y J, CUI D L, et al. Effect of indenter angle on bearing performance of coal and accompanying rocks under point load and characterization of mechanical parameters [J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 13(1): 374-391.
- [31] 赵 凯, 乔春生, 罗富荣, 等. 不同频率循环荷载下石灰岩疲劳特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增2): 3466-3475.
- ZHAO Kai, QIAO Chunsheng, LUO Furong, et al. Experimental study of fatigue characteristics of limestone samples subjected to uniaxial cyclic loading with different frequencies [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Sup 2):

- 3466-3475.
- [32] 文晓泽,冯国瑞,郭 军,等. 中低应变率扰动荷载作用下砂岩动态拉伸力学响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(增 1):2812-2822.  
WEN Xiaoze, FENG Guorui, GUO Jun, et al. Dynamic tensile mechanical response properties of sandstone under medium and low strain rate disturbance load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(Sup 1):2812-2822.
- [33] 王俊光,梁 冰,杨鹏锦. 动静载荷作用下片麻岩蠕变实验及非线性扰动蠕变模型[J]. 煤炭学报,2019,44(1):192-198.  
WANG Junguang, LIANG Bing, YANG Pengjin. Creep experiment and nonlinear disturbance creep model of gneiss under dynamic and static loads [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(1):192-198.
- [34] 袁红辉,季相栋,杜泽文,等. 深部巷道钻孔卸压围岩力学性能研究[J]. 煤炭技术,2022,41(3):39-43.  
YUAN Honghui, JI Xiangdong, DU Zewen, et al. Study on mechanical properties of surrounding rock in deep roadway after drillholes destressing [J]. Coal Technology,2022,41(3):39-43.
- [35] WU W X, GONG F Q, JIANG Q. Strength weakening effect of high static pre-stressed granite subjected to low-frequency dynamic disturbance under uniaxial compression[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(7):2353-2369.

(责任编辑 沈 菊 全 腾)