

冲击荷载下加卸载效应对冲击性岩石力学特性的影响

陈见行, 曾班全, 张俊文

(中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要: 为研究矿井基本顶周期来压对冲击性矿柱动力学特性的影响, 采用一维动静组合加载 SHPB 实验装置对循环加卸载预处理过的冲击性砂岩开展动态冲击实验, 实验中预先设置 3 种不同的轴向循环阈值: 6、12、18 MPa, 然后进行不同冲击气压条件下的动态压缩实验。探讨了不同循环阈值和冲击气压下冲击性砂岩动态力学响应特性、能量演化规律及碎块分布特征。研究结果表明: 岩样动态应力-应变曲线整体划分为弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段。动态应力-应变曲线起始阶段近似直线, 不存在静态单轴压缩中的裂隙压密阶段。平均动态抗压强度、平均动态弹性模量和平均动态变形模量随循环阈值增大先增大后减小; 而平均动态峰值应变随循环阈值增大先减小后增大。临界阈值处岩样平均动态抗压强度、平均动态弹性模量和平均动态变形模量最大, 平均动态峰值应变最小。反射能和耗散能密度随循环阈值增大先减小后增大; 而透射能随循环阈值增大先增大后减小。临界阈值处岩样反射能和耗散能密度最小, 透射能最大。冲击荷载下岩样呈 4 种破坏形态: 粉碎破坏、岩块碎裂、岩块侧面剥落脱离、岩块劈裂。各冲击气压下岩样分形维数随循环阈值增大先减小后增大, 随耗散能密度增加呈非线性增长。冲击性岩石致密性越好, 冲击破坏时剧烈程度越弱, 碎块块度越大, 耗散能密度越小, 分形维数越小。研究结果表明矿井基本顶周期来压小于冲击性矿柱损伤门槛值时, 周期来压可提高岩层密实性, 进而影响动态冲击时的破坏程度。

关键词: 冲击性矿柱; SHPB; 循环加卸载; 动力学响应特性; 能量演化规律; 碎块分布特征

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2283-15

Influence of loading and unloading effect on mechanical properties of impact rock under impact load

CHEN Jianhang, ZENG Banquan, ZHANG Junwen

(School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the effect of basic roof period pressure on the dynamic characteristics of impact pillar, one-dimensional dynamic and static combined loading SHPB experimental device is used to carry out dynamic impact experiment on the impact sandstone pre-treated by cyclic loading and unloading. In the experiment, three different axial cycle thresholds are pre-set: 6, 12, 18 MPa, and then carry out dynamic compression experiments under different impact pressure conditions. The dynamic mechanical response, energy evolution and fragmentation distribution characteristics of impact sandstone under different cycle thresholds and impact pressure are discussed. The results show that the dynamic stress-

收稿日期: 2023-05-04 修回日期: 2023-07-25 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0572

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (52034009); 国家自然科学基金面上资助项目 (52174093)

作者简介: 陈见行 (1989—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士。Tel: 010-62339059, E-mail: jianhang314@163.com

通讯作者: 张俊文 (1977—), 男, 内蒙古凉城人, 教授, 博士。E-mail: zhangjw@cumt.edu.cn

引用格式: 陈见行, 曾班全, 张俊文. 冲击荷载下加卸载效应对冲击性岩石力学特性的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2283-2297.

CHEN Jianhang, ZENG Banquan, ZHANG Junwen. Influence of loading and unloading effect on mechanical properties of impact rock under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2283-2297.



移动阅读

strain curve of rock samples can be divided into elastic stage, yield stage and failure stage. The initial stage of dynamic stress-strain curve is almost straight line, and there is no fracture compaction stage in static uniaxial compression. The average dynamic compressive strength, the average dynamic elastic modulus and the average dynamic deformation modulus first increase and then decrease with the increase of the cyclic threshold. The average dynamic peak strain decreases first and then increases with the increase of cycle threshold. The average dynamic compressive strength, average dynamic elastic modulus and average dynamic deformation modulus of rock samples at the critical threshold are the largest, and the average dynamic peak strain is the smallest. The density of reflected energy and dissipated energy decreases first and then increases with the increase of the cycle threshold. The transmission energy increases first and then decreases with the increase of the cycle threshold. At the critical threshold, the density of reflected energy and dissipated energy is the smallest and the transmitted energy is the largest. There are four kinds of failure modes of rock samples under impact load: crushing failure, rock fragmentation, rock side spalling and rock splitting. Under each impact pressure, the fractal dimension of rock samples decreases first and then increases with the increase of cycle threshold, and increases nonlinearly with the increase of dissipated energy density. The densification of impact rock is better, the intensity of impact failure is weaker, the fragmentation degree is larger, the dissipated energy density is smaller, and the fractal dimension is smaller. The research results show that when the basic roof period pressure is less than the damage threshold value of the impact pillar, the periodic pressure can improve the rock density and affect the damage degree of the dynamic impact.

Key words: impact pillar; SHPB; cyclic loading and unloading; dynamic mechanical response characteristics; law of energy evolution; fragmentation distribution characteristics

煤岩体冲击倾向性,是煤岩体自身固有冲击破坏属性。实际开采的煤岩体能否发生冲击地压等动力灾害,除与开采过程中煤岩体受力状况有直接关系外,还与煤岩体自身是否具有冲击倾向性有关^[1]。随着煤炭资源开采深度增加和开采强度加大,冲击地压对深部资源安全高效开采造成了严重威胁^[2]。通过对发生过冲击地压的矿井进行研究发现,其煤岩体大多具有冲击倾向性。冲击倾向性岩石是诱发冲击地压灾害的一类特殊岩石,研究该类岩石受动载扰动时的力学性能、能量演化规律及块度分布特征,有利于揭示冲击倾向性岩石在微观尺度上的损伤劣化机理。

目前已有许多学者从力学演化特性、能量传递规律和碎块分形维数角度对岩石破碎过程进行分析,并取得了不少成果。ZHANG 等^[3]开展了循环加卸载实验,探讨了循环加卸载作用下砂岩力学响应特征,研究表明:砂岩承载能力、弹性模量和变形模量随卸荷损伤增大而显著降低。YIN 等^[4]研究了循环加卸载作用下页岩岩样力学响应特征及机理,定量分析了循环加卸载过程中强度、变形特征、应变能及损伤演化规律。刘向御等^[5]基于循环加卸载及 CT 联合实验方法,把等幅度循环荷载下粉砂岩破坏阶段裂缝扩展细分为 3 个阶段:裂缝萌生、裂缝扩展和加速破坏。俞缙等^[6]研究不同循环加载方式下大理岩力学特性,研究发现,大理岩弹性模量随循环加卸载次数增加先增大后减小。杨小彬等^[7]基于数字散斑技术,探究了等幅

及分级等幅循环加载扰动下红砂岩非均匀变形过程中的位移演化规律。李欣慰等^[8]对砂岩开展单轴循环加载实验,发现在循环载荷作用下砂岩变形模量先增加后减小。ZHU 等^[9]借助改进的分离式霍普金森压杆实验装置,对含 2 个矩形孔棱柱状花岗岩开展动态冲击实验,分析了岩样在冲击荷载下能量演化特征。FAN 等^[10]采用 SHPB 实验装置对双裂纹砂岩进行了一维动静组合加载实验,探讨了动载作用下双裂纹砂岩力学特性、分形特征及能量演化规律。WANG 等^[11]探究了花岗岩在循环动载冲击下能量演化情况,发现随冲击循环次数增加,耗散能密度逐渐增加。李成杰等^[12]以型煤、砂浆及 2 者组合体为研究对象,探讨了不同冲击强度下煤岩组合体中煤、岩 2 种组分的能量吸收特性与破碎块度特征。王磊等^[13]基于分离式霍金森压杆系统开展了煤岩动态冲击实验,揭示了不同冲击气压下煤岩分形特征与能量演化间内在联系。杜超超等^[14]利用动静组合加载 SHPB 实验系统,对复合岩石进行了一维动静组合加载实验,研究了不同应变率下轴压对岩样动力学特性影响。马芹永等^[15]借助霍普金森杆实验装置,研究了含不同倾角充填型软弱贯通节理对岩体动态裂纹扩展、破坏机制及其动力学特性的影响。李成杰等^[16]以预制裂隙类煤岩组合体为研究对象,开展动态压缩实验,探究了裂隙位置与倾角对组合体破碎分形维数影响。

在煤层开采中,工作面初次来压后,随工作面推

进, 冲击性矿柱会经受基本顶周期来压影响。基本顶周期来压路径类似循环加卸载过程。循环加卸载过程中岩石力学响应特性与其应力状态和受力路径密切相关^[17-19]。因此, 在循环加卸载效应影响下, 冲击性矿柱本身结构及性质可能会发生变化, 进而可能会诱发冲击地压事故。此外, 循环载荷扰动过的冲击性矿柱在冲击荷载下其强度特性、变形特征、能量耗散及块度分布有着独特演化规律, 但现存研究主要关注上覆岩层常规加载下普通岩石在动载扰动时的压缩力学性质^[20-22], 涉及经过循环加卸载预处理的冲击性岩石在动载作用下的力学行为鲜有研究。因此, 笔者开展初步尝试, 以 3 次循环加卸载模拟周期来压对冲击性矿柱产生的循环加卸载效应, 随后开展冲击性实验以研究岩样在循环加卸载和动载作用下冲击性岩石破碎过程中的力学响应特性、能量演化规律、破碎形态及分维特征。

笔者以冲击性砂岩为研究对象, 选取强度、变形、能量、碎块粒径和碎块分形维数作为力学特征参数, 基于动静组合加载实验, 探究不同循环阈值与不同冲击气压对冲击性岩石动态破坏特性的影响规律, 揭示循环加卸载造成的初始损伤、冲击性岩石结构特性、循环加卸载载荷和动载荷双重扰动对冲击性岩石破坏失稳的影响。

1 岩样制备及实验设备

1.1 冲击性岩样制备

所取岩样来自鄂尔多斯纳林河二号煤矿 3-1 上煤顶板岩层。依据 GB/T 25217.1—2010^[23], 计算得到该煤矿 3-1 上煤顶板岩层弯曲能量指数为 90.627 kJ, 属于 II 类。该数据表明 3-1 上煤顶板具有弱冲击倾向性。此外, 郭森林^[24]研究了该煤矿 3-1 上煤顶板岩层冲击倾向性, 认为 3-1 上煤顶板岩层具有强冲击倾向性。因此, 根据本文及参考前人研究结果, 综合评判纳林河二号煤矿 3-1 上煤顶板岩层具有冲击倾向性。但由于本文所取岩样弯曲能量指数为 90.627 kJ, 小于 GB/T 25217.1—2010 规定的 120 kJ, 因此判定所取岩样具有弱冲击倾向性。表 1 为岩层冲击倾向性分类。

根据国际岩石力学学会 (ISRM) 关于岩石动力学实验推荐标准^[25], 冲击性砂岩岩样长径比为 0.5。在同一冲击性砂岩大块上钻取均质性较好的 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 标准圆盘岩样。然后打磨岩样上下两面, 确保两端面不垂直度和不平行度均符合实验标准。加卸载预处理前后的砂岩如图 1 所示。

单轴压缩下岩样应力-应变曲线如图 2 所示, 由

图 2 可知岩样单轴抗压强度为 30 MPa。表 2 为岩样静态力学参数。

表 1 岩层冲击倾向性分类

Table 1 Classification of rock burst liability

冲击倾向性类别	冲击倾向性大小	弯曲能量指数 U_{WQ}/kJ
I	无	$U_{WQ} < 15$
II	弱	$15 \leq U_{WQ} \leq 120$
III	强	$U_{WQ} > 120$

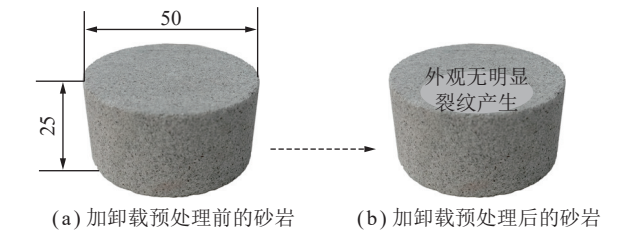


图 1 经循环阈值为 18 MPa 循环加卸载预处理前后的砂岩

Fig.1 Sandstone which was pretreated before and after cyclic loading and unloading with a cyclic threshold of 18 MPa

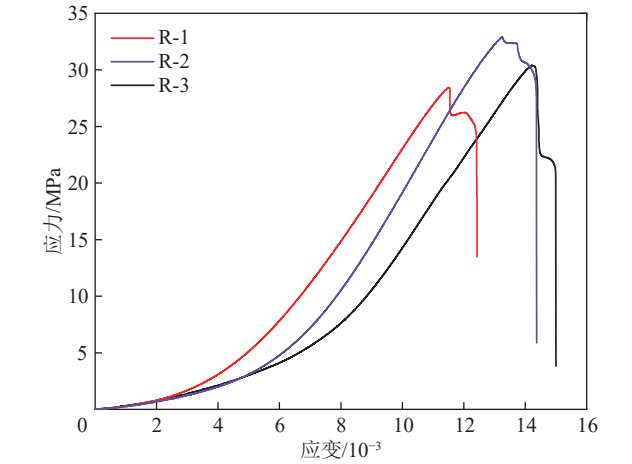


图 2 单轴压缩应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of the uniaxial compression test

表 2 岩样静态力学参数

Table 2 Static mechanical parameters of rock samples

岩样编号	冲击倾向	峰值应变/ 10^{-3}	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
R-1	有	11.5	2 428	27.75	3.93
R-2	有	13.2	2 459	32.23	4.57
R-3	有	14.1	2 516	30.02	4.09
平均值		12.9	2 468	30.00	4.20

曾鹏^[26]指出当冲击性砂岩所受加卸载载荷达到轴向应力水平的 60%~70% 时, 岩石不会失稳, 仍处于稳定阶段。因此, 采用 SHPB 轴向加载设备对冲击

性砂岩进行循环加卸载制备加卸载岩样,循环阈值分别为 6、12 和 18 MPa,相当于单轴抗压强度的 20%、40%、60%。各循环阈值下循环次数为 3 次。对岩样进行等三次变阈值循环加卸载实验,并保证得到的冲击性岩样表面无明显裂纹产生。如图 1(b) 为经循环

阈值为 18 MPa 循环加卸载预处理后的砂岩。
借助 HC-U81 超声波检测仪测出不同循环阈值加卸载前后岩样的超声波波速,进而计算出岩样经过循环加卸载预处理后的损伤因子。超声波检测实验过程如图 3 所示。



图 3 冲击性岩样超声波检测
Fig.3 Ultrasonic detection of impact rock samples

根据经典力学中第 2 种损伤因子定义^[27],损伤因子 N 与超声波速关系为

$$N = 1 - T/T_0 \tag{1}$$

式中, T 为加卸载后弹性模量; T_0 为原始弹性模量。

由应力波基础理论确定岩样原始纵波波速 v_0 及加卸载后波速 v 为

$$\begin{cases} v_0 = \sqrt{\frac{T_0(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)(1+\mu)}} \\ v = \sqrt{\frac{T(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)(1+\mu)}} \end{cases} \tag{2}$$

式中, μ 为岩样泊松比; ρ 为岩样密度。

将式 (1)、(2) 合并后可以得到循环加卸载预处理岩样的损伤因子为

$$N = 1 - (v/v_0)^2 \tag{3}$$

根据式 (3) 计算得到 3 种不同加卸载方式后岩样损伤因子,见表 3。由表 3 可知,当循环阈值为 6、12、18 MPa 时,循环加卸载预处理后岩样平均损伤因子分别为-0.07、-0.21、0.26。上述结果表明,当循环阈值为 6、12 MPa 时,岩样内部原始裂隙在循环加卸载作用下被压密,致密性增大,结构特性变好。但当循环阈值为 18 MPa 时,与循环阈值为 12 MPa 的工况相比,岩样内部结构开始遭到一定程度破坏,岩样内部损伤开始孕育、累积,结构特性变差。

1.2 一维动静组合加载实验设备及方案

一维动静组合加卸载实验中岩样受力示意如图 4 所示,图中, P_s 为轴向循环加卸载载荷; P_d 为动态冲击载荷; P 为载荷; t 为时间。

图 5 为使用的一维动静组合加载实验装置。该

表 3 循环加卸载预处理后岩样损伤因子

Table 3 Damage factors of rock samples after cyclic loading and unloading pretreatment

岩样	循环阈值/MPa	原始波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	加卸载后波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	损伤因子	平均损伤因子
C-7-0.1	6	2.34	2.41	-0.06	-0.07
C-8-0.1		2.35	2.39	-0.03	
C-9-0.3		2.29	2.36	-0.06	
C-10-0.3		2.31	2.42	-0.10	
C-11-0.5		2.38	2.45	-0.06	
C-12-0.5		2.31	2.43	-0.11	
C-13-0.1	12	2.31	2.48	-0.15	-0.21
C-14-0.1		2.24	2.53	-0.28	
C-15-0.3		2.29	2.56	-0.25	
C-16-0.3		2.25	2.55	-0.28	
C-17-0.5		2.38	2.54	-0.14	
C-18-0.5		2.37	2.56	-0.17	
C-19-0.1	18	2.43	2.15	0.22	0.26
C-20-0.1		2.29	1.96	0.27	
C-21-0.3		2.25	1.84	0.33	
F-9-0.3		2.39	2.12	0.21	
C-23-0.5		2.34	2.09	0.20	
C-24-0.5		2.25	1.86	0.32	

装置在传统 SHPB 实验装置基础上增加了轴压系统,轴压系统可以实现岩样循环加卸载实验。弹性杆选用直径为 50 mm 的弹簧钢 60 Si₂Mn,其密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 206 GPa,纵波波速为 5.1 km/s。

循环加卸载预处理过程具体步骤为:①量取事先准备好的冲击性岩样,记录岩样高度、直径、体积、质量 4 项参数;②将岩样放入 SHPB 动静组合实验装置

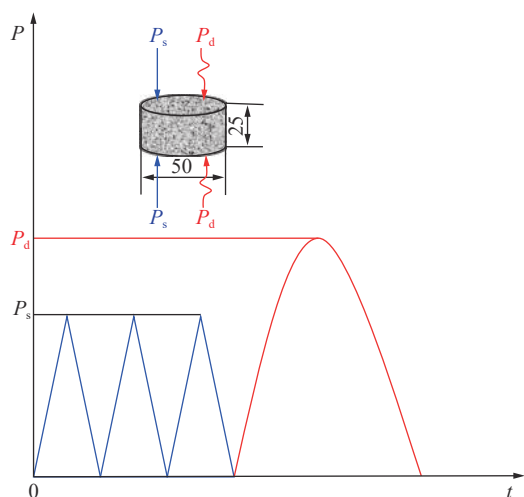


图 4 一维动静组合加卸载下岩样受力示意

Fig.4 Schematic diagram of the force of the samples under one-dimensional dynamic and static combination loading and unloading

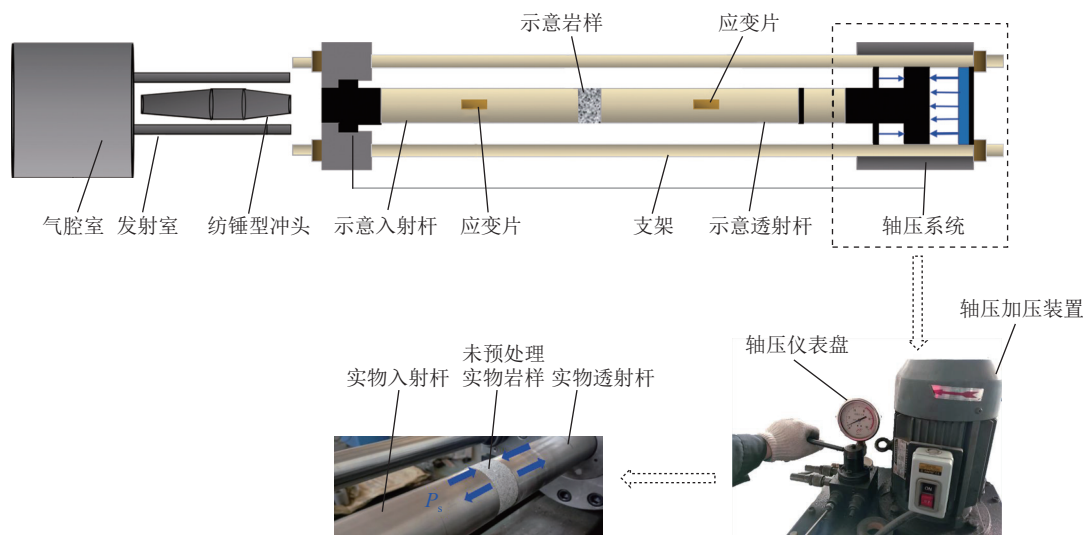


图 5 循环加卸载预处理过程

Fig.5 Cyclic loading and unloading preprocessing process

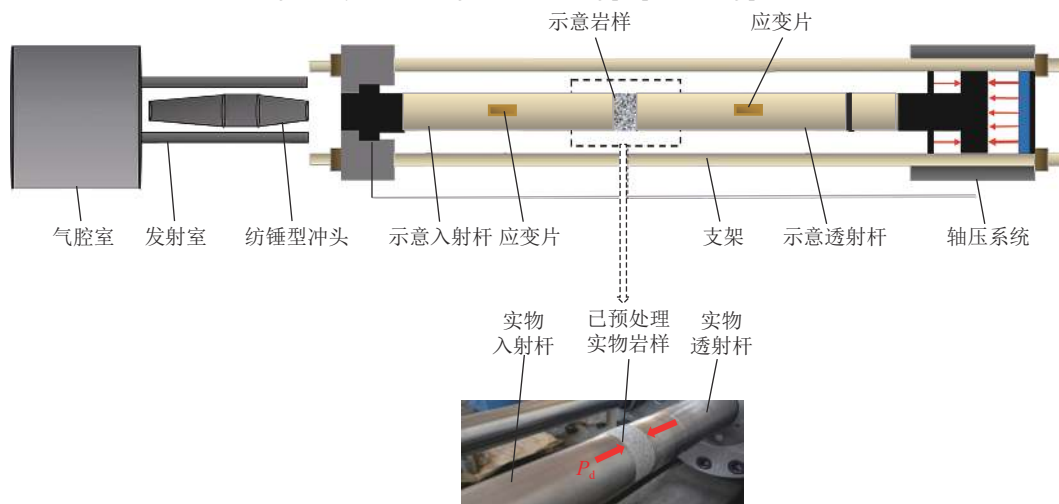


图 6 动态冲击过程

Fig.6 Dynamic impact process

入射杆和透射杆间并保证岩样与两杆充分接触;③ 设定循环阈值为 6 MPa, 并借助 SHPB 轴压系统中的轴压加载装置对岩样加载。当轴压仪表盘记录到轴向应力为 6 MPa 时, 操作轴压加载装置对岩样卸载至 0。重复上述步骤直至完成 3 次循环加卸载。整个过程连续进行。每次加载和卸载时间相等, 均为 6 s;④ 当循环阈值为 12、18 MPa 时, 循环加卸载预处理遵从第 3 步操作过程;但每次加载和卸载时间分别为 12 和 18 s;⑤ 循环加卸载预处理实验结束。

图 6 为动态冲击过程。在实验过程中设定冲击气压分别为 0.1、0.3、0.5 MPa, 并开展冲击实验。

2 冲击荷载下冲击性砂岩动力学特性

2.1 动态应力平衡关系

入射应力与反射应力的叠加应力反映岩样入射端应力;透射应力反映岩样透射端应力。图 7 为冲击

性岩样动态应力平衡,由图7可知,冲击实验过程中叠加应力曲线与透射应力曲线基本吻合,表明岩样满足动态应力平衡条件^[28]。

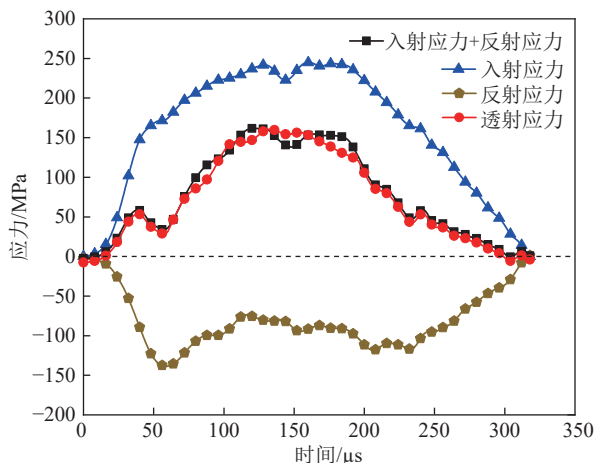


图7 冲击性岩样动态应力平衡

Fig.7 Dynamic stress balance of impact rock samples

2.2 动态应力-应变关系

由图7可以看出本次动态冲击实验满足 SHPB

实验的动态应力平衡条件,因此使用“两波法”计算冲击性岩样的应力 σ_s 、应变 ε_s 和应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ ^[29]。

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_T(t) \\ \varepsilon_s = -\frac{2C}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \\ \dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C}{L} \varepsilon_R(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中, E 、 A 、 C 分别为杆弹性模量、横截面积、纵波速度; A_s 、 L 分别为岩样横截面积、高度; ε_R 、 ε_T 分别为反射应变和透射应变。

图8为冲击性岩样动态应力-应变曲线(其中,“0”代表未进行循环加卸载预处理岩样;“0-6 MPa-0”代表循环阈值为6 MPa的预处理岩样;“0-12 MPa-0”代表循环阈值为12 MPa的预处理岩样;“0-18 MPa-0”代表循环阈值为18 MPa的预处理岩样)。在冲击作用下,动态应力-应变曲线整体划分为弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段。曲线起始段近似直线,不存在单轴压缩中的压密阶段。该现象与陈彦龙等^[30]对煤样进

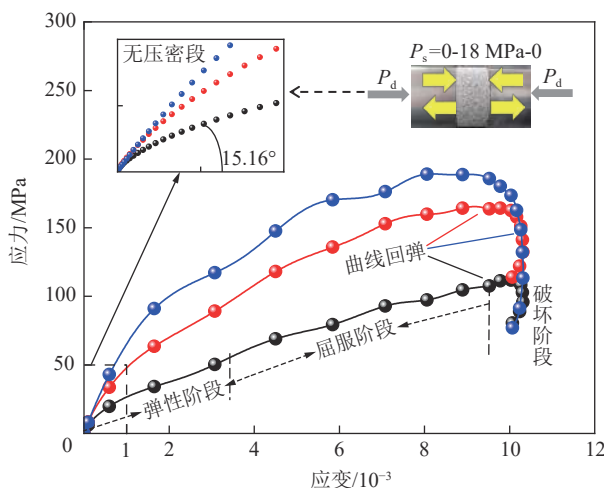
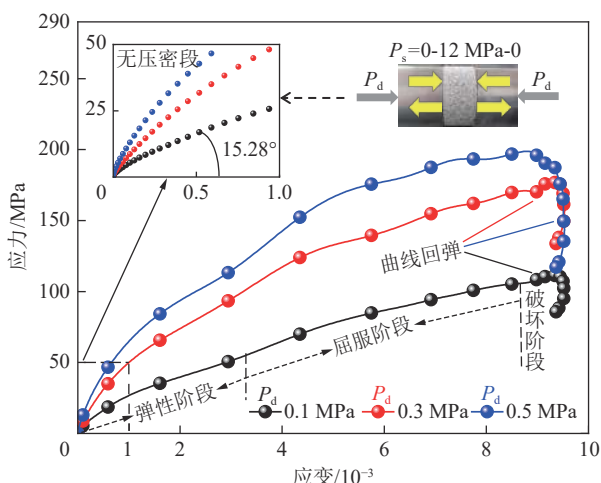
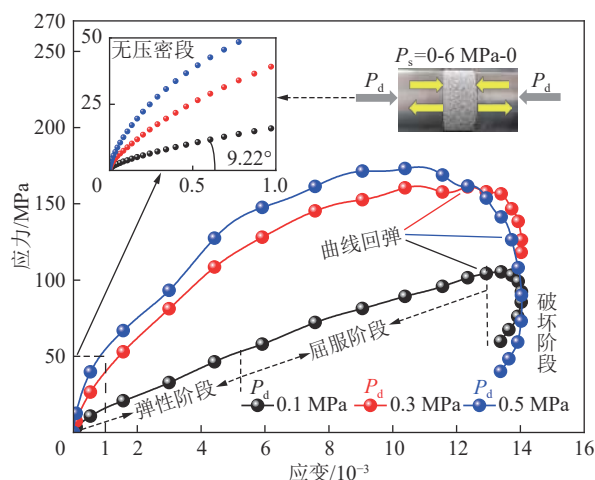
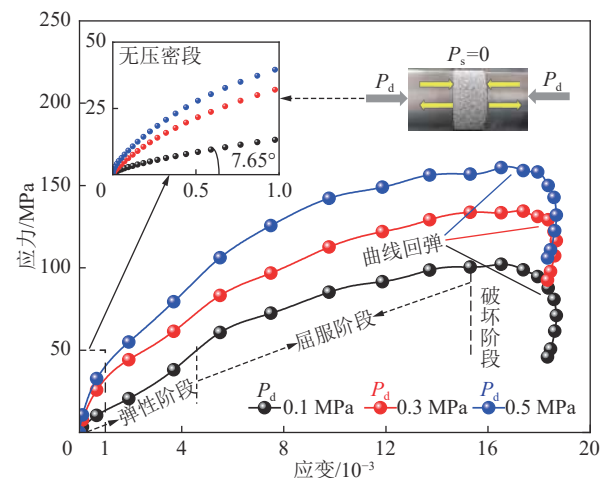


图8 冲击性岩样动态应力-应变曲线

Fig.8 Dynamic stress-strain curves of impact rock samples

行循环加卸载预处理后开展冲击实验结果一致。其原因可能是岩样在动态冲击下其内部微孔裂隙瞬间闭合所致。此外,随循环阈值增大,岩样动态应力-应变曲线起始段切线倾角先增大后减小,说明岩样弹性模量先上升后下降。冲击荷载下未进行循环加卸载岩样动态应力-应变曲线起始段斜率最小,破坏阶段曲线出现回弹现象。

当循环阈值为 6 MPa 时,在岩样受动载之前,其内部孔裂隙已被循环加卸载载荷压实,压密阶段消失。冲击气压越大,动态应力-应变曲线起始段斜率越大。应力-应变曲线偏离直线后,岩样从弹性阶段进入裂隙稳定发展阶段即屈服阶段。当应力-应变曲线达到峰值时,岩样从屈服阶段过渡到破坏阶段;此时,其内部微裂隙在冲击荷载下迅速生长直至形成宏观贯通裂隙。由于冲击能量较大,岩样会沿着贯通裂隙向四周弹射。

当循环阈值为 12 MPa 时,岩样动态应力-应变曲线起始段斜率继续增大。但当循环阈值增大至 18 MPa 后,曲线起始段斜率出现下降趋势;这是因为岩样在 18 MPa 循环阈值作用下进入了非稳定发展阶段,其内部损伤逐渐累积。因此,当循环阈值为 18 MPa 时,与循环阈值为 12 MPa 的工况相比,只需要相对较小的动载就可以使岩样破坏。

为了深入探究不同循环阈值对冲击性岩样动态力学性质影响,选取各岩样平均动态峰值强度、平均动态弹性模量和平均动态峰值应变作为力学特征参数。此外,为了反映冲击性岩样动态压缩变形特征。借鉴唐礼忠等^[31]的研究,选取割线模量 E_1 、第 2 类割线模量 E_2 、加载段变形模量 E_3 的加权平均值作为动态变形模量。其计算示意如图 9 所示(其中, σ_d 、 σ_{d50} 分别为峰值应力、峰值应力的一半(50% 峰值应力); ε_d 、 ε_{d50} 分别为峰值应力、50% 峰值应力对应的应变)。

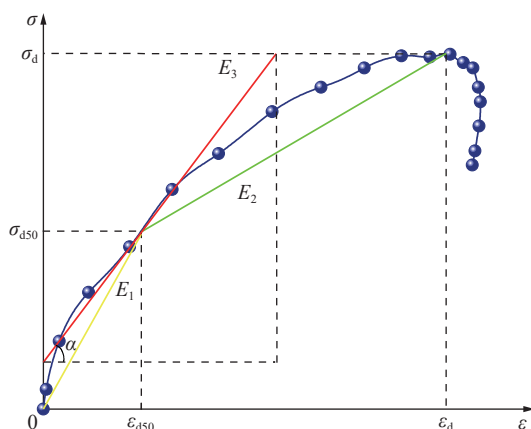


图9 岩石动态变形模量计算示意

Fig.9 Schematic diagram of dynamic deformation modulus calculation of rock

图 10 为不同循环阈值作用下冲击性岩样动力学特征变化情况,其中柱状图上方“工”字线为标准差。图 10(a) 为冲击性岩样平均动态抗压强度与循环阈值关系。各循环阈值下,平均动态峰值强度与冲击气压呈正相关。动载不变时,循环阈值越大,平均动态峰值强度强化现象越明显;但当循环阈值增大到一定程度后,强度强化现象消失,岩样平均动态峰值强度开始减小,说明当循环阈值为 18 MPa 时,冲击性岩样进入塑性变形阶段(循环阈值大于 60% 的静态峰值应力)后其动态峰值强度开始下降。但这和红砂岩进入塑性变形阶段(静载大于 70% 的静态峰值应力)后动态抗压强度才会下降^[32]有所区别,说明岩样预处理方式对冲击作用下岩样动态峰值强度下降临界点有影响。

图 10(b) 为冲击性岩样平均动态弹性模量与循环阈值关系。在各冲击气压下,随循环阈值增加至 12 MPa,岩样平均动态弹性模量逐渐上升。该现象与刘忠玉等^[33]发现循环加卸载预处理可提高煤岩弹性模量结果一致。其原因在于循环加卸载导致煤岩样内部产生碎屑,这些碎屑填充至附近孔隙,抑制了裂隙面间滑移,增大了裂隙面摩擦力,提高了煤岩样弹性模量。但当循环阈值增加至 18 MPa 后,岩样平均动态弹性模量开始下降。其原因在于当循环阈值增大至 18 MPa 后,循环阈值已非常接近岩样屈服强度。表明循环阈值为 18 MPa 的循环加卸载一定程度上损伤了岩样结构。

图 10(c) 为冲击性岩样平均动态峰值应变与循环阈值关系,循环阈值不变情况下,岩样平均动态峰值应变与冲击气压呈负相关。这是由于岩样受较大气压冲击时还来不及变形就已破坏。

冲击性岩样平均动态变形模量与循环阈值关系如图 10(d) 所示。相同冲击气压下,平均动态变形模量随循环阈值增加,先增大后减小。循环阈值较小时,岩样受压进入弹性阶段,其内部密实性提高,导致岩样平均动态变形模量变大,抵抗冲击能力增强。但当循环阈值超过岩样弹性极限后,岩样开始发生塑性变形,从弹性阶段过渡到屈服阶段;此时,岩样平均动态变形模量不增反减。

3 能量耗散规律

3.1 能量计算结果

在冲击性岩样动态压缩过程中,可以通过入射应变 ε_i 、反射应变 ε_R 、透射应变 ε_T 计算出岩样入射能 W_i 、反射能 W_R 、透射能 W_T ^[34],其计算公式为

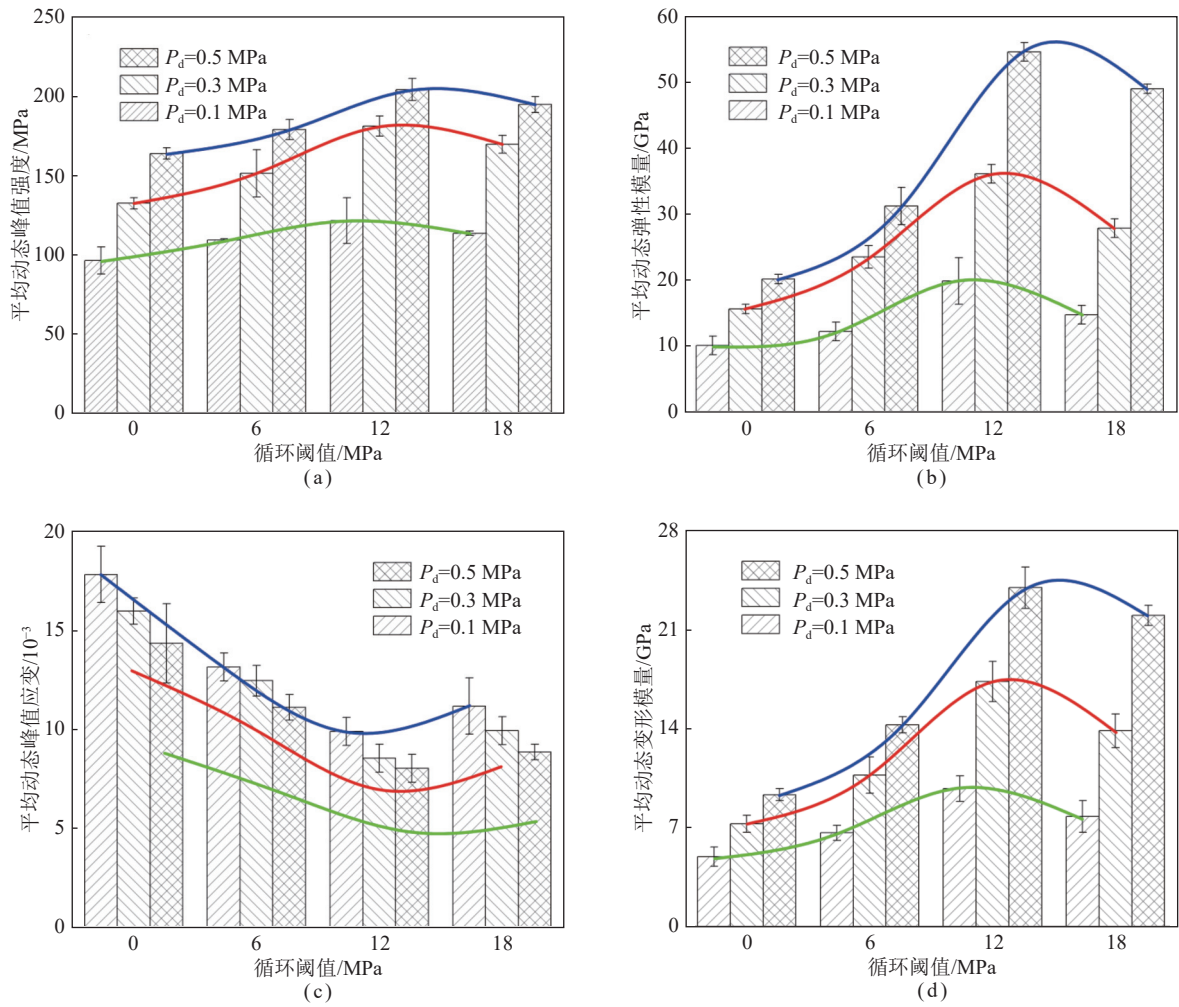


图 10 冲击性岩样动力学特征变化情况

Fig.10 Dynamic mechanical characteristics of impact rock samples

$$\begin{cases} W_I = AEC \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \\ W_R = AEC \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \\ W_T = AEC \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \end{cases} \quad (5)$$

动态压缩实验过程中岩样所吸收部分能量称为吸收能 W_S ^[35], 计算方式为

$$W_S = W_I - W_R - W_T \quad (6)$$

吸收能主要由 3 种能量构成: 岩样动态破碎耗散能 W_D 、碎块弹射动能及其他形式耗散能。其他形式耗散能一般可忽略不计。借鉴前人研究^[36]可知碎块弹射动能仅占总入射能 5% 左右, 因此, 上式可简写为

$$W_S = W_D \quad (7)$$

为了减小岩样尺寸影响, 使用破碎耗散能密度 E_D 反映岩石破碎能耗情况。

$$E_D = \frac{W_S}{V} \quad (8)$$

式中, V 为岩样体积。

根据式 (5)~(8) 求出冲击性岩样入射能、反射能、透射能、耗散能密度。动静组合加卸载下岩样动态能量参数见表 4。

3.2 反-透射能与入射能的关系

图 11 为冲击性岩样在动载作用下反射能与入射能的关系。各循环阈值下, 反射能与入射能呈线性增长关系。图 11 左上角子图展示了当冲击气压为 0.5 MPa 时, 循环阈值对反射能的影响。通过对比不同预处理方式条件下冲击性岩样反射能, 可以看出, 经过 3 次循环加卸载预处理后, 冲击性岩样反射能随循环阈值增大先减小后增大, 但均小于无预处理环节岩样的反射能。究其原因, 在于经过 3 次循环加卸载预处理后, 岩样内部原始孔隙被压实闭合; 在卸载环节, 岩样内部松动微粒在卸载扰动作用下填充至周围孔隙中。因此, 经过 3 次循环加卸载预处理后, 岩样密实性得到提高。由于岩样越密实, 应力波透射率越高, 最终导致反射能减小。但当循环阈值超过岩样损伤门槛值后其内部次生裂隙逐渐孕育, 扩展, 裂隙面间隙增

表 4 冲击性岩样动态能量参数

Table 4 Dynamic energy parameters of impact rock samples

岩样	循环阈值/MPa	冲击气压/MPa	入射能 W_I/J		反射能 W_R/J		透射能 W_T/J		耗散能密度 $E_D/(J \cdot cm^{-3})$	
			单块岩样值	算术平均值	单块岩样值	算术平均值	单块岩样值	算术平均值	单块岩样值	算术平均值
C-1-0.1	0	0.1	132.704	141.135	26.381	27.368	51.673	54.367	1.113	1.210
C-2-0.1			149.566		28.355		57.060		1.307	
C-3-0.3		0.3	360.300	358.692	74.344	73.066	115.954	117.155	3.463	3.432
C-4-0.3			357.083		71.787		118.355		3.401	
C-5-0.5		0.5	470.805	475.147	111.126	107.454	131.117	136.140	4.656	4.717
C-6-0.5			479.489		103.782		141.163		4.778	
C-7-0.1	6	0.1	116.354	120.036	18.765	17.883	56.314	61.995	0.841	0.818
C-8-0.1			123.718		17.001		67.675		0.795	
C-9-0.3		0.3	334.149	327.698	50.242	55.362	145.320	142.803	2.823	2.639
C-10-0.3			321.246		60.481		140.285		2.454	
C-11-0.5		0.5	485.959	490.528	89.623	81.878	178.752	185.309	4.433	4.550
C-12-0.5			495.096		74.132		191.866		4.667	
C-13-0.1	12	0.1	110.861	111.861	8.046	8.474	86.862	82.617	0.325	0.425
C-14-0.1			112.861		8.902		78.371		0.521	
C-15-0.3		0.3	341.846	336.304	37.475	40.438	185.500	186.757	2.422	2.223
C-16-0.3			330.761		43.400		188.014		2.024	
C-17-0.5		0.5	481.733	482.220	62.142	59.921	236.364	232.183	3.733	4.873
C-18-0.5			482.706		57.700		228.002		4.013	
C-19-0.1	18	0.1	120.031	132.131	12.727	16.390	77.031	74.022	0.617	0.850
C-20-0.1			144.231		20.052		71.013		1.083	
C-21-0.3		0.3	335.608	346.569	42.210	44.237	168.181	169.574	2.551	2.695
F-9-0.3			356.530		46.264		170.966		2.838	
C-23-0.5		0.5	490.443	494.314	78.072	74.775	207.424	202.454	4.175	4.423
C-24-0.5			498.185		71.478		197.483		4.670	

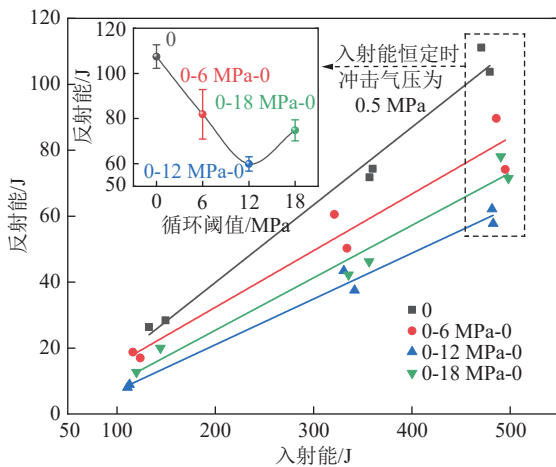


图 11 冲击性岩样反射能与入射能关系

Fig.11 Relation between reflection energy and incident energy of impact rock samples

大, 致密性减小, 岩样反射能开始不降反升。说明随循环阈值增加, 岩石致密性并不会线性增大, 而是先

增大后减小, 相应地其反射能先减小后增大。基于此, 可以认为当循环阈值增大到某一个应力时入射能会发生突变, 发生突变应力处于 12~18 MPa 循环阈值内, 可能存在“临界阈值”。

式 (9) 为反射能与入射能拟合公式。当循环阈值从 0 增长到 12 MPa 时, 拟合线斜率从 0.236 下降到 0.139, 下降了 40.1%。继续增大循环阈值到 18 MPa 后, 其斜率不降反升, 上升了 12.6%。表明循环阈值对岩样反射能影响显著。

$$\begin{cases} W_R^0 = 0.236W_I^0 - 7.241 (R^2 = 0.980) \\ W_R^6 = 0.172W_I^6 - 2.039 (R^2 = 0.933) \\ W_R^{12} = 0.139W_I^{12} - 6.799 (R^2 = 0.982) \\ W_R^{18} = 0.159W_I^{18} - 6.460 (R^2 = 0.966) \end{cases} \quad (9)$$

式中, W_R^0 为未经循环加卸载预处理岩样的反射能; W_I^0

为未经循环加卸载预处理岩样的入射能; $W_R^m (m > 0)$ 为循环阈值为 m 时岩样的反射能; W_I^m 为循环阈值为 m 时岩样的入射能。

冲击性岩样在动载作用下透射能随入射能变化关系如图 12 所示。由图 12 可知, 循环阈值相同时, 透射能随入射能增加而线性增加。入射能恒定时, 透射能随循环阈值增加先增加后下降。此外, 未经预处理岩样透射能最小。

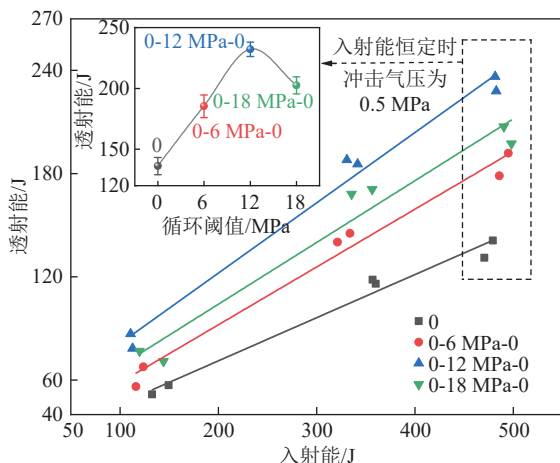


图 12 冲击性岩样透射能与入射能关系

Fig.12 Relation between transmitted energy and incident energy of impact rock samples

3.3 耗散能密度与入射能的关系

图 13 为冲击性岩样在动载作用下耗散能密度与入射能关系。循环阈值不变时, 随入射能增加, 耗散能密度线性增长。该结果与平琦等^[37]对砂岩岩样开展冲击实验得到的结果一致。同时, 可以看出循环阈值会影响岩样失稳情况, 使得岩样消耗的能量不同, 说明循环阈值会影响岩样吸能效果。

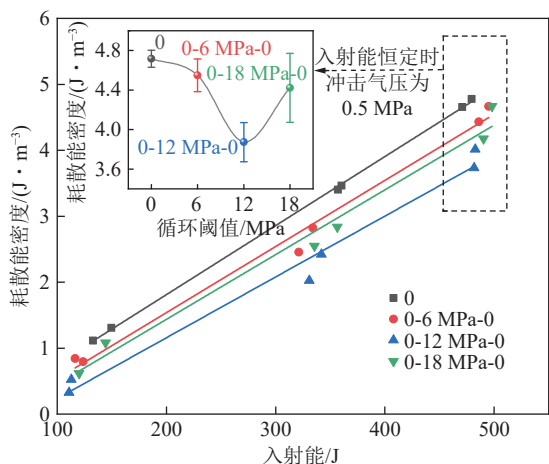


图 13 冲击性岩样耗散能密度与入射能关系

Fig.13 Relation between dissipated energy density and incident energy of impact rock samples

4 冲击性砂岩破碎程度

冲击载荷下岩石破碎过程蕴含了功能转化关系, 其能量耗散特性与内部损伤特征联系十分密切^[38]。为了定量分析冲击性岩样在冲击荷载下破碎块度, 采用岩块平均粒径 d_j 表征岩样破坏程度:

$$d_j = \frac{\sum w_i d_i}{\sum w_i} \quad (10)$$

式中, d_i 为各孔径筛中岩块平均尺寸; w_i 为对应 d_i 的岩块质量分数。

岩块平均粒径可以比较冲击性岩样破碎程度, 但不能直观反映碎块分布特征, 即具有相同岩块平均粒径并不代表每个筛子上的碎块质量都相同, 因此, 不能真正量化破碎岩块分布特征。为此, 采用岩样破碎分形维数量化岩块分布特征。根据质量-等效尺寸计算岩块分形维数^[39]。

$$M_x/M_t = x^{3-D} \quad (11)$$

式中, M_t 、 M_x 分别为岩块总质量和直径小于 x 的碎块累计质量; D 为岩块分形维数。

将式 (11) 取对数, 在双对数坐标下绘制 $\ln(M_x/M_t) = \ln x$ 直线。从而得到岩块分形维数:

$$D = 3 - k \quad (12)$$

式中, k 为所绘制直线斜率。

4.1 碎块尺寸与破碎形态

整理冲击实验后冲击性岩样碎块。根据碎块特征, 选用尺寸为 <0.6 , $0.6 \sim 1.2$, $1.2 \sim 2.5$, $2.5 \sim 5.0$, $5.0 \sim 10.0$, $10.0 \sim 14.0$, $14.0 \sim 20.0$, >20.0 mm 的标准岩样筛进行筛选, 然后使用精密电子天平称量各筛上碎块质量。部分岩样碎块尺寸与动态破坏形态如图 14 所示。动载不变时, 随循环阈值增加, 岩样呈 4 种破坏形态: 粉碎破坏、岩块碎裂、岩块侧面剥落脱离、岩块劈裂, 岩样破碎程度先减小后增大, 破碎岩块尺寸先增大后减小, 存在峰值尺寸块度, 处于峰值的冲击性岩样破坏程度最小。

4.2 碎块粒径分布与分形维数

根据式 (10)~(12) 算出冲击性岩样碎块相关参数, 见表 5 (其中, $\bar{d}_j$ 为平均岩块粒径; $\bar{D}$ 为平均分形维数)。

冲击性岩样块度分形碎块质量分布对数曲线如图 15 所示, 根据各分形碎块质量分布规律, 可知冲击性岩样破碎块度分布特征。

图 16 为冲击气压为 0.5 MPa 时冲击性岩样平均碎块粒径、平均分形维数与循环阈值间关系, 其中黑

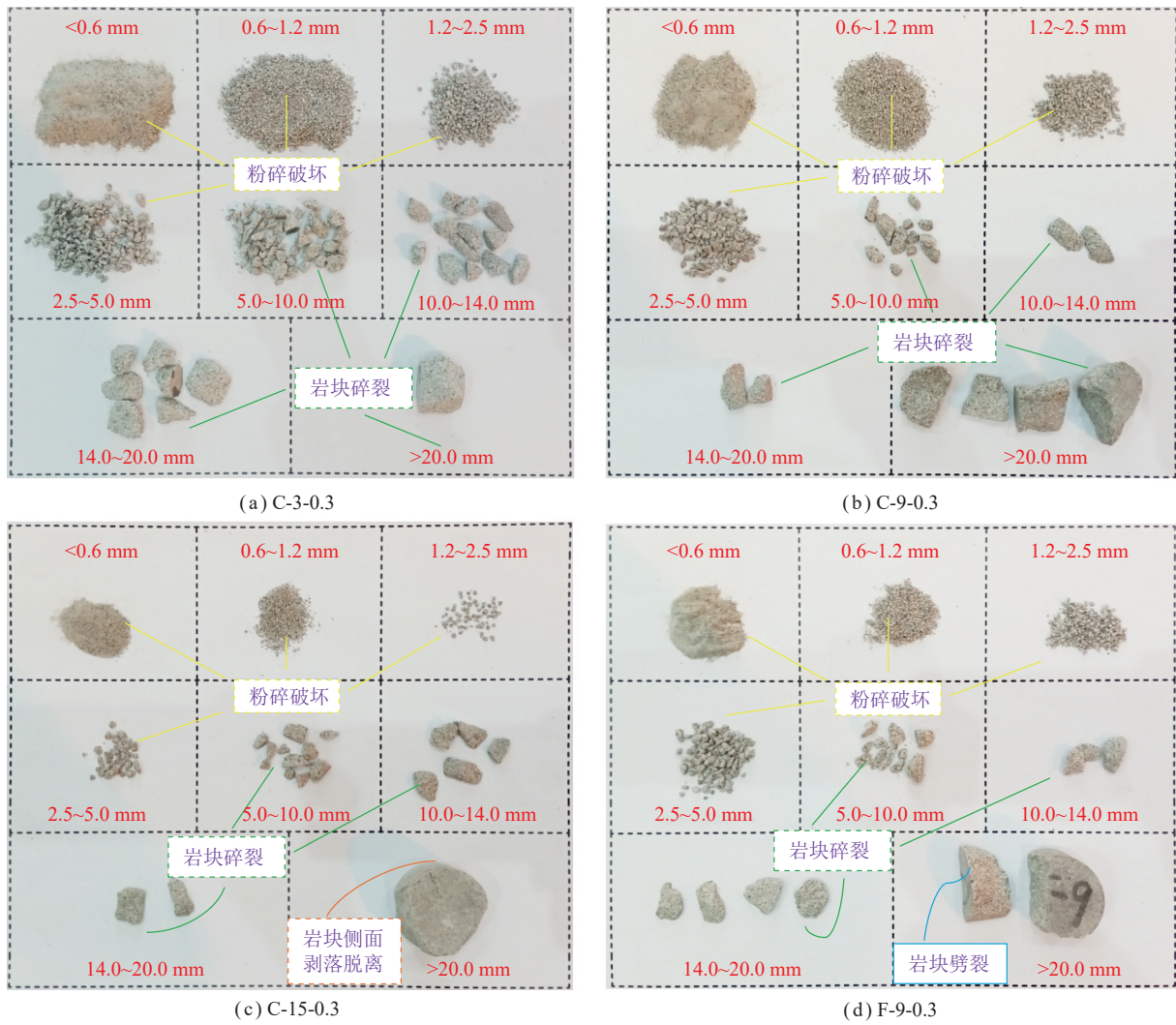


图 14 部分岩样碎块尺寸与动态破坏形态

Fig. 14 Size and dynamic failure pattern of partial rock samples

表 5 冲击性岩样粒径和分形维数

Table 5 Particle size and fractal dimension of impact rock samples

岩样	各筛孔筛上累计质量分数								d_f / mm	$\bar{d}_f$ / mm	D	$\bar{D}$	相关 系数
	<0.6 mm	0.6~1.2 mm	1.2~2.5 mm	2.5~5.0 mm	5.0~10.0 mm	10.0~14.0 mm	14.0~20.0 mm	>20.0 mm					
C-1-0.1	0.016	0.013	0.019	0.021	0.035	0.063	0.035	0.798	20.199	19.991	2.303	2.309	0.991
C-2-0.1	0.018	0.026	0.009	0.030	0.054	0.050	0.051	0.762	19.783		2.315		
C-3-0.3	0.206	0.135	0.043	0.110	0.123	0.050	0.176	0.156	9.865	10.456	2.669	2.655	0.971
C-4-0.3	0.176	0.141	0.059	0.103	0.125	0.048	0.207	0.142	11.054		2.640		
C-5-0.5	0.321	0.235	0.036	0.096	0.159	0.060	0.094	0	5.848	6.430	2.752	2.749	0.927
C-6-0.5	0.301	0.243	0.036	0.080	0.184	0.027	0.129	0	7.012		2.745		
C-7-0.1	0	0	0	0.001	0	0	0.081	0.918	46.822	45.071	2.587	2.555	0.94
C-8-0.1	0	0	0.008	0.007	0	0	0.022	0.962	43.319				
C-9-0.3	0.101	0.084	0.040	0.081	0.036	0.036	0.043	0.579	16.115	15.472	2.513	2.555	0.951
C-10-0.3	0.083	0.073	0.054	0.094	0.050	0.018	0.080	0.549	14.829		2.513		
C-11-0.5	0.287	0.144	0.034	0.102	0.177	0.107	0.149	0	7.516	8.246	2.672	2.659	0.976
C-12-0.5	0.257	0.169	0.041	0.084	0.193	0.134	0.123	0	8.976		2.646		

岩样	各筛孔筛上累计质量分数								d_f / mm	$\bar{d}_f$ / mm	D	$\bar{D}$	相关 系数
	< 0.6 mm	0.6~1.2 mm	1.2~2.5 mm	2.5~5.0 mm	5.0~10.0 mm	10.0~14.0 mm	14.0~20.0 mm	> 20.0 mm					
C-13-0.1	0	0	0	0	0	0	0	1.000	50.000	50.000	2.449	2.409	0.946
C-14-0.1	0	0	0	0	0	0	0	1.000	50.000				
C-15-0.3	0.032	0.041	0.009	0.020	0.038	0.052	0.043	0.765	23.253	24.836	2.369	2.511	0.936
C-16-0.3	0.033	0.059	0.024	0.037	0.055	0.069	0.025	0.700	26.418				
C-17-0.5	0.155	0.071	0.090	0.126	0.184	0.115	0.130	0.129	10.510	10.690	2.505	2.508	0.999
C-18-0.5	0.136	0.077	0.097	0.118	0.135	0.134	0.118	0.185	10.870				
C-19-0.1	0	0.001	0.001	0.002	0	0	0.018	0.979	42.376	43.902	2.400	2.472	0.925
C-20-0.1	0	0	0	0.002	0.003	0	0.026	0.970	45.428				
C-21-0.3	0.041	0.084	0.037	0.086	0.063	0.069	0.052	0.569	16.746	16.990	2.543	2.567	0.992
F-9-0.3	0.054	0.059	0.023	0.057	0.029	0.041	0.072	0.665	17.223				
C-23-0.5	0.196	0.103	0.070	0.116	0.169	0.171	0.126	0.050	9.300	9.841	2.585	2.603	0.977
C-24-0.5	0.214	0.136	0.068	0.099	0.133	0.201	0.112	0.038	10.383				

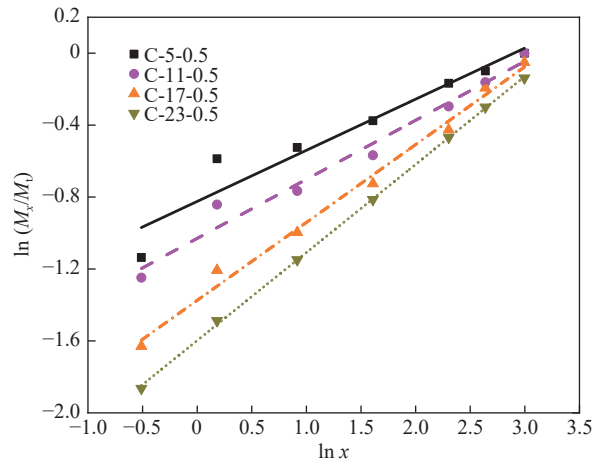


图 15 冲击性岩样破碎分布曲线

Fig.15 Fracture distribution curves of impact rock samples

色点线为各组岩样平均碎块粒径与循环阈值间关系。动载相同时，碎块平均粒径随循环阈值增大先增大后下降。循环阈值为 12 MPa 时岩样碎块平均粒径最大。碎块粒径定量描述了碎块整体破碎程度，但忽略了破碎块度分布整体特征。为了反映岩样破碎块度分布特征，结合分形理论对岩样块度进行分形研究。

分形维数既能表征材料破碎程度，又能综合反映材料结构、加载方式、尺寸形状等。紫色点线为平均分形维数与循环阈值间关系，可以看出，当采用循环加卸载方式预处理岩样时，即循环阈值分别为 6、12、18 MPa 时，岩样平均分形维数均小于未经预处理的岩样。平均分形维数越小，岩样冲击破坏程度越低。因此，经循环加卸载预处理后，岩样受动载冲击后的破坏程度小于未经循环加卸载预处理的岩样。这是因为岩样经过循环加卸载预处理后，岩样内部原

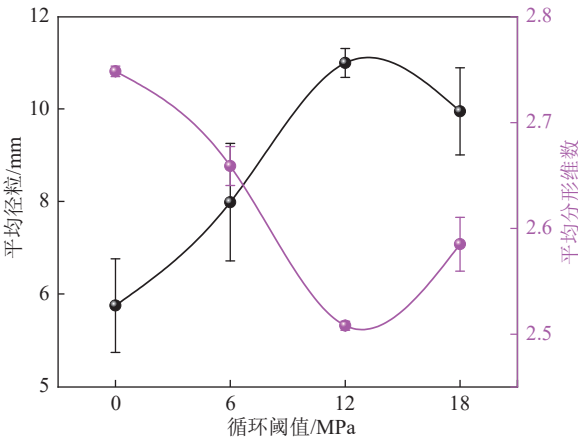


图 16 平均碎块粒径、平均分形维数与循环阈值间关系

Fig.16 Relation between mean fragment size, mean fractal dimension and the cyclic threshold

始裂隙得到压实闭合。循环加卸载预处理改变了岩样结构特性，一定程度上提高了岩样完整性。经过循环加卸载预处理环节的岩样，分形维数随循环阈值增大先减小后增大，存在突变分形维数。处于突变分形维数的岩样分形维数最小，受冲击后破坏程度最小。当循环阈值超过岩样损伤门槛值后，岩样进入塑性变形阶段，其内部微裂纹开始萌生，分形维数出现回升现象。此时，与循环阈值为 12 MPa 的工况相比，岩样受冲击后破坏程度增大。说明岩样受冲击后破坏程度与其结构特性相关。

4.3 分形维数、循环阈值和耗散能密度的关系

图 17 展示了冲击气压为 0.5 MPa 时，岩样分形维数与耗散能密度间关系。其中以 98% 置信区间为分形维数估计区间。冲击作用下，岩样分形维数随耗散能密度增加以非线性方式增加。与之类似，王磊等^[40]

对大量高径比不同的煤样开展冲击实验,发现煤样分形维数随耗散能密度增加而非线性增加。

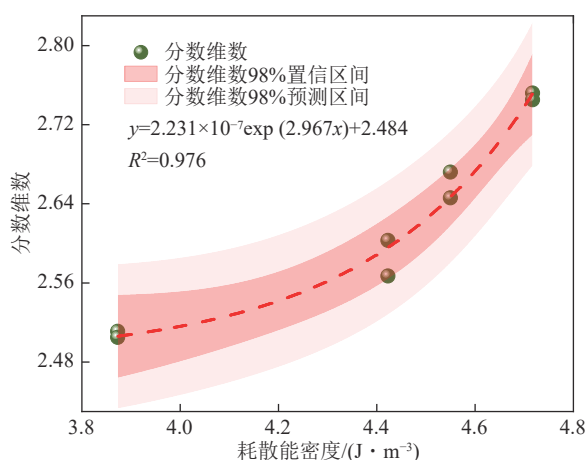


图 17 冲击性岩样分形维数与耗散能密度间关系

Fig.17 Relation between fractal dimension and dissipated energy density of impact rock samples

由图 18 可知,当循环阈值小于等于 12 MPa 时,随循环阈值增加,岩样平均分形维数由 2.749 持续下降至 2.508,下降了 8.8%。岩样平均分形维数可以反映岩样受冲击破坏时的剧烈程度,且平均分形维数越小,岩样受冲击破坏时剧烈程度越低。因此,当循环阈值 ≤ 12 MPa 时,随循环阈值增加,岩样受冲击破坏时剧烈程度逐渐降低。究其原因,在于当循环阈值 ≤ 12 MPa 时,循环加卸载可以压实岩样内部原始裂隙,从而提高岩样密实性和完整性。因此,密实性和完整性得到提高的岩样受动载冲击破坏时剧烈程度降低。

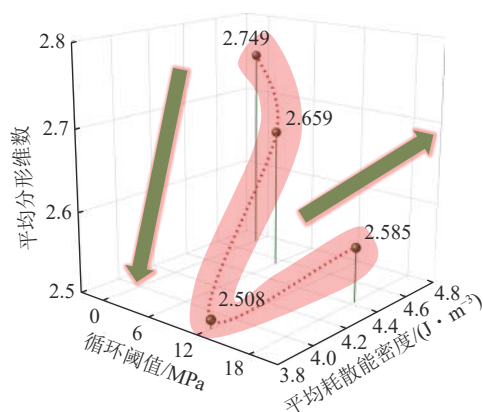


图 18 平均分形维数、循环阈值和平均耗散能密度间关系

Fig.18 Relation between average fractal dimension, cyclic threshold and average dissipated energy density

但当循环阈值 > 12 MPa 时,随循环阈值增加,岩样平均分形维数上升至 2.585。说明当循环阈值大于 12 MPa 后,继续增大循环阈值会导致岩样受冲击破坏

时剧烈程度升高。究其原因,在于当循环阈值增大至 18 MPa 后,虽然预处理环节压紧了岩样内部原始裂隙,但此时循环阈值已非常接近岩样屈服强度。因此,循环阈值为 18 MPa 的循环加卸载一定程度上损伤了岩样结构。当循环阈值为 18 MPa 时,内部结构被损伤的岩样受动载冲击后,破坏时的剧烈程度上升。

5 结 论

(1) 岩样动态应力-应变曲线整体划分为弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段。起始阶段近似直线,不存在单轴压缩中的压密阶段。曲线起始段切线倾角随循环阈值增大先增大后减小。

(2) 动载不变时,平均动态抗压强度、平均动态弹性模量、平均动态变形模量随循环阈值增大先上升后下降。各循环阈值下,平均动态抗压强度、平均动态弹性模量、平均动态变形模量与冲击气压呈线性增长关系。

(3) 入射能恒定时,反射能、耗散能密度随循环阈值增大先减小后增大。透射能随循环阈值增大先增大后减小。各循环阈值下,反射能、透射能、耗散能密度与冲击气压线性相关。

(4) 各冲击气压下,碎块分形维数随循环阈值增大先减小后增大。岩样碎块粒径随循环阈值增大先增大后减小。岩样破坏程度与其结构特性密切相关。动态冲击下岩样呈 4 种破坏形态:粉碎破坏、岩块碎裂、岩块侧面剥落脱离、岩块劈裂。

(5) 各冲击气压下,岩样分形维数随耗散能密度增加呈非线性增长。冲击荷载下,冲击性岩石密实性越高,内部结构特性越好,冲击破坏时分形维数越小,剧烈程度越低。冲击性岩石受损后,内部结构特性变差,动载作用下分形维数变大,剧烈程度上升。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新,彭永伟,李宏艳,等. 煤岩冲击倾向性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2736-2742.
QI Qingxin, PENG Yongwei, LI Hongyan, et al. Study of bursting liability of coal and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2736-2742.
- [2] 陈光波,李谭,张国华,等. 基于剩余能量释放速率指数的煤岩组合体冲击倾向性判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1366-1383.
CHEN Guangbo, LI Tan, ZHANG Guohua, et al. Determination of bursting liability of coal-rock combined body based on residual energy release rate index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1366-1383.
- [3] ZHANG H, WANG L, LI J, et al. Study on the mechanical properties of unloading damaged sandstone under cyclic loading and un-

- loading[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 7370.
- [4] YIN P F, YANG S Q, GAO F, et al. Experiment and DEM simulation study on mechanical behaviors of shale under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 10.
- [5] 刘向御, 柴肇云, 刘绪, 等. 循环荷载下粉砂岩孔裂隙扩展及卸载破坏特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(S1): 77–89.
- LIU Xiangyu, CHAI Zhaoyun, LIU Xu, et al. Fracture propagation and unloading failure characteristics of siltstone pores under cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(S1): 77–89.
- [6] 俞缙, 刘泽瀚, 林立华, 等. 变幅循环加卸载作用下大理岩扩容特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(11): 2934–2942.
- YU Jin, LIU Zehan, LIN Lihua, et al. Characteristics of dilatancy of marble under variable amplitude cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(11): 2934–2942.
- [7] 杨小彬, 韩心星, 王逍遥, 等. 等幅循环加载岩石变形局部化带位移演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1041–1048.
- YANG Xiaobin, HAN Xinxing, WANG Xiaoyao, et al. Displacements evolution laws of deformation localization bands of rock under constant amplitude cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1041–1048.
- [8] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, et al. Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- [9] ZHU Q, LI D, HAN Z, et al. Failure characteristics of brittle rock containing two rectangular holes under uniaxial compression and coupled static-dynamic loads[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(1): 131–152.
- [10] FAN W, ZHANG J, NIU W, et al. Study on dynamic loading characteristics and energy evolution of sandstone with double cracks[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103893.
- [11] WANG X, LIU Z, GAO X, et al. Dynamic characteristics and energy evolution of granite subjected to coupled static-cyclic impact loading[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 62.
- [12] 李成杰, 徐颖, 叶洲元. 冲击荷载下类煤岩组合体能量耗散与破碎特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 981–988.
- LI Chengjie, XU Ying, YE Zhouyuan. Energy dissipation and crushing characteristics of coal-rock-like combined body under impact loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 981–988.
- [13] 王磊, 邹鹏, 焦振华, 等. 冲击荷载下两种应变率作用方式煤岩能量演化及分形特征研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(14): 280–289.
- WANG Lei, ZOU Peng, JIAO Zhenhua, et al. Energy evolution and fracture characteristics of coal and rock under impact load with two kinds of strain rate action modes[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(14): 280–289.
- [14] 杜超超, 温森, 孔庆梅. 一维动静组合加载下复合岩样动态力学特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(21): 168–178, 206.
- DU Chaochao, WEN Sen, KONG Qingmei. Tests for dynamic mechanical properties of composite rock samples under 1-D dynamic-static combined loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(21): 168–178, 206.
- [15] 马芹永, 苏晴晴, 马冬冬, 等. 含不同节理倾角深部巷道砂岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1104–1116.
- MA Qinyong, SU Qingqing, MA Dongdong, et al. SHPB experimental study on dynamic characteristics and failure behaviors of sandstone containing weakly filled joints with various angles in deep roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1104–1116.
- [16] 李成杰, 徐颖, 张宇婷, 等. 冲击荷载下裂隙类煤岩组合体能量演化与分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(11): 2231–2241.
- LI Chengjie, XU Ying, ZHANG Yuting, et al. Study on energy evolution and fractal characteristics of cracked coal-rock-like combined body under impact loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(11): 2231–2241.
- [17] 任洋, 吴云峰. 不同循环加卸载速率下砂岩的力学特性研究[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(11): 111–119.
- REN Yang, WU Yunfeng. Study on mechanical properties of sandstone under different cyclic loading and unloading rates[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(11): 111–119.
- [18] 王瑞红, 危灿, 刘杰, 等. 循环加卸载下节理砂岩宏观损伤破坏机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(4): 810–820.
- WANG Ruihong, WEI Can, LIU Jie, et al. Macro and micro characteristics of jointed sandstone under cyclic loading and unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(4): 810–820.
- [19] 郭红军, 季明, 孙中光, 等. 循环荷载作用下红砂岩能量演化特征研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(4): 15–23.
- GUO Hongjun, JI Ming, SUN Zhongguang, et al. Energy evolution characteristics of red sandstone under cyclic load[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(4): 15–23.
- [20] 刘志义, 甘德清, 于泽峰, 等. 一维动静组合加载下磁铁矿石力学特性及破碎特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 2869–2880.
- LIU Zhiyi, GAN Deqing, YU Zehao, et al. Experimental study on mechanical properties and crushing characteristics of magnetite under one-dimensional static and dynamic combined loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 2869–2880.
- [21] 解北京, 栾铮, 刘天乐, 等. 静水压下原生组合煤岩动力学破坏特征[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 2153–2167.
- XIE Beijing, LUAN Zheng, LIU Tianle, et al. Dynamic failure characteristics of primary coal-rock combination under hydrostatic pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 2153–2167.
- [22] 李地元, 胡楚维, 朱泉企. 预制裂隙花岗岩动静组合加载力学特性和破坏规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1081–1093.
- LI Di yuan, HU Chuwei, ZHU Quanqi. Experimental study on mechanical properties and failure laws of granite with an artificial flaw under coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock*

- Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1081–1093.
- [23] 煤炭科学研究总院开采设计研究分院. 冲击地压测定、监测与防治方法 第1部分: 顶板岩层冲击倾向性分类及指数的测定方法[S]. 2010: 8.
- [24] 郭森林. 纳林河二号煤矿工程地质特征及开采条件分析[J]. 陕西煤炭, 2020, 39(4): 53–55, 68.
- GUO Senlin. Analysis of engineering geological characteristics and mining conditions of Nalinhe No. 2 Mine[J]. Shaanxi Coal, 2020, 39(4): 53–55, 68.
- [25] International Society for Rock Mechanics. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3): 99–103.
- [26] 曾鹏. 冲击性岩石应力状态与声发射信号频率特征相关性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 53–55.
- ZENG Peng. Correlation on frequency characteristics of acoustic emission with stress state of bump-prone rocks[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 53–55.
- [27] 王倩倩. 基于不同循环静载的损伤砂岩静态力学性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021: 55–57.
- WANG Qianqian. Study on static and dynamic mechanical properties of damaged sandstone under different cyclic static loads[D]. Huai nan: Anhui University of Science and Technology, 2021: 55–57.
- [28] 杨科, 刘文杰, 马衍坤, 等. 煤岩组合体冲击动力学特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2569–2581.
- YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental research on dynamic characteristics of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2569–2581.
- [29] 陈彦龙, 崔慧栋, 李明, 等. 实时低温条件下露天矿饱和损伤煤系砂岩动态力学特性及其破坏机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1168–1179.
- CHEN Yanlong, CUI Huidong, LI Ming, et al. Dynamic mechanical properties and failure mechanism of saturated coal-measure sandstone in open pit mine with damage under real-time low-temperature conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1168–1179.
- [30] 陈彦龙, 李明, 浦海, 等. 考虑循环载荷初始损伤效应的煤样动态力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2123–2137.
- CHEN Yanlong, LI Ming, PU Hai, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of coal specimens considering initial damage effect of cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2123–2137.
- [31] 唐礼忠, 王春, 程露萍, 等. 一维静载及循环冲击共同作用下砂卡岩力学特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3898–3906.
- TANG Lizhong, WANG Chun, CHENG Luping, et al. Experimental study of mechanical characteristics of skarn under one-dimensional coupled static and cyclic impact loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3898–3906.
- [32] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1387–1395.
- LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1387–1395.
- [33] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下层理煤岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2593–2602.
- LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2593–2602.
- [34] 温森, 吴斐, 李胜, 等. 冲击荷载下强度比对类复合岩样能量耗散影响的研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 111–118.
- WEN Sen, WU Fei, LI Sheng, et al. Effects of strength ratio on energy dissipation of quasi-composite rock samples under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 111–118.
- [35] HONG L, ZHOU Z L, YIN T B, et al. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(4): 677–682.
- [36] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526–533.
- HONG Liang, LI Xibing, MA Chunde, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 526–533.
- [37] 平琦, 骆轩, 马芹永, 等. 冲击载荷作用下砂岩试件破碎能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4197–4203.
- PING Qi, LUO Xuan, MA Qinyong, et al. Broken energy dissipation characteristics of sandstone specimens under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4197–4203.
- [38] 夏昌敬, 谢和平, 鞠杨, 等. 冲击荷载下孔隙岩石能量耗散的实验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 1–5.
- XIA Changjing, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental study of energy dissipation of porous rock under impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 1–5.
- [39] 武仁杰, 李海波, 李晓峰, 等. 冲击荷载作用下层状岩石破碎能耗及块度特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1053–1060.
- WU Renjie, LI Haibo, LI Xiaofeng, et al. Broken energy dissipation and fragmentation characteristics of layered rock under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1053–1060.
- [40] 王磊, 袁秋鹏, 谢广祥, 等. 冲击荷载下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1534–1546.
- WANG Lei, YUAN Qiupeng, XIE Guangxiang, et al. Length-diameter ratio effect of energy dissipation and fractals of coal samples under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1534–1546.