

# 预冲击损伤白砂岩抗拉力学特征试验研究

朱传奇, 汤鲁培, 王磊, 陈礼鹏, 杨震宇, 晋康, 肖强  
(安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为探究预冲击损伤对白砂岩抗拉力学特征的影响规律, 首先运用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 冲击试验系统, 通过改变冲击气压制备不同损伤程度岩样, 然后针对预损伤岩样, 开展 CT 扫描试验, 观测裂隙分布形态, 并进行静态巴西劈裂试验, 结合 DIC 技术监测表面形貌变化过程. 研究表明: 随冲击气压的增大, 白砂岩裂隙率、连通裂隙体积、三维连通度均先缓慢后快速增大, 连通裂隙占比线性增大、三维分形维数先快速后缓慢增大. 随着冲击气压增大, 白砂岩从完整状态逐步转变为破碎状态, 当损伤岩样受到拉伸载荷时, 会发生应力跌落现象, 且冲击气压越大, 应力跌落越频繁. 不同冲击气压作用下, 白砂岩的巴西劈裂破坏过程展现出了一定的差异; 冲击气压越大, 高应变区域越集中. 随冲击气压的增大, 白砂岩抗拉强度呈指数降低, 而峰值应变呈指数增长. 研究结果可为深部煤矿失稳灾害防控提供一定的理论和试验依据.

**关键词:** 白砂岩; 冲击载荷; 巴西劈裂; 裂隙结构; 应力跌落

**中图分类号:** TD 313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0372-13

## Experimental study on tensile mechanical characteristics of pre-impact damaged white sandstone

ZHU Chuanqi, TANG Lupei, WANG Lei, CHEN Lipeng, YANG Zhenyu, JIN Kang, XIAO Qiang  
(State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** To investigate the influence of pre-impact damage on the tensile mechanical characteristics of white sandstone, this study first prepared rock specimens with varying damage degrees using a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) impact experimental system by adjusting impact air pressure. Subsequently, CT scanning tests were conducted on pre-damaged specimens to observe crack distribution patterns, followed by static Brazilian splitting tests integrated with Digital Image Correlation (DIC) technology to monitor surface morphology evolution. The experimental results show that with increasing impact air pressure, the white sandstone exhibited phased growth patterns: crack density, connected crack volume, and 3D connectivity initially increase slowly then rapidly, while the proportion of connected cracks shows linear growth and 3D fractal dimension increases rapidly and then slowly. Progressive structural transformation from intact to fragmented states occurs with rising impact air pressure. Tensile loading induces frequent stress drop phenomena in damaged specimens, with occurrence

收稿日期: 2024-09-09 修回日期: 2024-12-05 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.20240427

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(2023AH040153)

通信作者: 汤鲁培(2000—), 男, 安徽省合肥市人, 工学硕士, 从事煤矿地下安全开采和深部开采应力灾害等方面的研究.

E-mail: tlp20000526@163.com Tel: 18326105920

引用格式: 朱传奇, 汤鲁培, 王磊, 等. 预冲击损伤白砂岩抗拉力学特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 372-384.

ZHU Chuanqi, TANG Lupei, WANG Lei, et al. Experimental study on tensile mechanical characteristics of pre-impact damaged white sandstone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 372-384.

frequency positively correlated to impact intensity. The Brazilian splitting failure characteristics of white sandstone demonstrate distinct variations under different blasting gas pressures, with higher pressure levels leading to more concentrated zones of high strain. The tensile strength decreases exponentially while peak strain increases exponentially with ascending impact air pressure. These findings provide theoretical and experimental foundations for disaster prevention in deep coal mine stability control.

**Key words:** white sandstone; impact loading; Brazilian splitting; fracture network; stress drops

深部煤矿采掘作业过程中,机械割煤、钻孔爆破等产生强动载对围岩造成冲击损伤,采掘完成后,围岩又长期承受应力重新分布带来的高静载,由于损伤煤岩抗拉强度远低于抗压强度,煤岩极易发生拉伸破坏,引发片、冒等失稳事故<sup>[1-4]</sup>。因此,针对冲击损伤后的煤岩,研究其抗拉力学特征演化规律,对防控失稳灾害具有重要的理论和实践意义。

针对煤岩动态力学特征,学者们从不同角度开展了大量研究。文献[5-6]通过岩石动静组合加载试验,对比了不同尺寸的岩石动态冲击试验结果,总结了岩石动态强度与试件尺寸的关联;文献[7]利用改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置,研究了动载荷与地应力共同作用下岩石的强度和变形特征,并基于试验结果构筑了岩石动态力学参数演化模型;文献[8]对岩石开展单轴SHPB试验,发现岩石屈服强度具有明显的“率”相关性,并基于细观离散元建立了晶体尺度岩样模型;文献[9]分析了岩石在SHPB冲击试验中破碎能量的吸收与耗散过程。

针对煤岩抗拉力学特征,国内外学者也进行了相应的研究<sup>[10-16]</sup>,取得了丰富的成果。文献[17]探究了液氮循环冷冲击作用下煤体受拉破坏特征,为液氮压裂煤层、提高煤层瓦斯抽采效率提供重要理论依据;文献[18]采用标准的巴西圆盘试验研究在冲击载荷与静载荷作用下砂岩的破裂机制;文献[19]开展干燥及不同压力水浸泡下煤样的巴西劈裂试验,探究压力水浸泡下煤岩抗拉特性;文献[20]对不同高径比圆盘煤样开展巴西劈裂试验,揭示不同高径比煤样裂纹破断机制;文献[21]采用静态循环加载与数值模拟相结合的方法,研究了试件在巴西圆盘试验中的抗拉强度变化;文献[22]结合了大理石圆环的静态与动态劈裂试验结果,对不同内径岩样的拉伸强度和破坏模式开展研究,并揭示了试样内外半径之比与冲击速度之间的关联。

目前,专家学者们主要从宏、细观角度观测煤岩破坏。常用宏观观察方法为摄像机取样,为克服摄像机取样存在的图像灰度值低下、分辨率影响观测等问题,许多学者采用了全息干涉测量、红外热成像以及数字图像相关(DIC)等<sup>[23-27]</sup>技术。电镜扫描、核磁、CT扫描等<sup>[28-36]</sup>技术被应用在岩石力学领域用于煤岩细观结构观测。CT扫描技术具有高清晰度、高精度等优点,已成为研究煤岩细观结构的重要手段。

国内外诸多学者在煤岩动、静载荷下力学特征响应方向取得了丰硕的成果,但多集中在单一动态压缩或静态拉伸荷载下煤岩渐进破坏全过程,预先冲击后的煤岩抗拉力学特征仍需深入探索。基于此,本文针对白砂岩,设计并开展了预冲击损伤白砂岩巴西劈裂力学试验,结合DIC技术与CT扫描技术,研究预冲击损伤煤岩力学特征参数及裂隙分布随冲击荷载的变化规律,为防控失稳灾害提供试验依据。

## 1 试验概况

### 1.1 岩样制备

如图1,岩样选择深部煤矿常见的白砂岩,白砂岩体的表面存在少量的深色斑点并且有较少的矿物质结核。



图1 圆柱形白砂岩岩样  
Fig. 1 Cylindrical white sandstone specimen

试验采用尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的圆柱体白砂岩,筛选出上下端面平整度 $< 0.05 \text{ mm}$ 、两端

面不平行度  $< 0.02$  mm 的合格岩样, 岩样上下表面平行度及侧表面垂直度符合国际岩石试验标准试件的要求<sup>[37]</sup>, 并通过 U510 非金属超声波检测仪测定岩样波速, 筛选出波速在  $1.20 \sim 1.45$  km/s 之间的试样备用。

为制备预损伤岩样, 开展了不同冲击气压下的预冲击试验, 发现: 当冲击气压低于  $0.20$  MPa

时, 无法对岩样造成可观察到的明显损伤, 当冲击气压高于  $0.28$  MPa 时, 岩样完全损毁, 无法完成后续试验。因此, 为开展相关试验, 将岩样分成 5 组, 冲击气压依次为  $0$  (原始岩样),  $0.20, 0.22, 0.24, 0.26$  MPa, 每组 4 块岩样, 一共 20 块。样的基本物理参数如表 1 所示, 其中,  $M_i$  为岩样质量;  $v_{0i}$  为初始波速;  $v_0$  为初始波速平均值。

表 1 岩样基本参数  
Table 1 Basic parameters of rock samples

岩样编号	尺寸(直径×高度)/ (mm×mm)	$M_i/g$	$v_{0i}/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_0/$ ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	冲击气压/MPa
Nc1	49.9×25.1	115.76	1.389		
Nc2	49.9×24.9	113.85	1.225		
Nc3	50.1×25.0	115.80	1.250	1.29	0
Nc4	50.1×24.9	114.54	1.302		
A1	50.0×25.0	115.24	1.250		
A2	49.9×24.9	113.97	1.302		
A3	50.0×24.9	114.70	1.302	1.32	0.20
A4	50.0×24.9	114.62	1.420		
B1	49.9×24.9	113.75	1.302		
B2	49.9×25.0	114.31	1.359		
B3	49.9×25.0	114.47	1.389	1.32	0.22
B4	50.0×25.0	115.12	1.250		
C1	50.0×25.0	114.99	1.250		
C2	49.9×25.0	114.85	1.389		
C3	50.1×25.0	115.43	1.276	1.30	0.24
C4	50.1×25.0	115.68	1.276		
D1	49.9×24.9	113.88	1.302		
D2	50.1×25.0	115.54	1.276		
D3	49.9×25.0	114.41	1.359	1.30	0.26
D4	50.0×25.0	115.28	1.250		

注: 表中 Nc 代表原始岩样。

## 1.2 试验设备与流程

试验采用安徽理工大学煤炭无人开采数智技术全国重点实验室的 SHPB 试验系统、CT 扫描仪、MTS-816 试验机与标准铬合金钢巴西劈裂模具, 分别完成预冲击损伤试验、扫描试验、损伤白砂岩巴西劈裂试验。

试验与数据处理流程如图 2 所示, 具体如下:

1) 预冲击损伤试验。试验前对 SHPB 系统入射杆、透射杆端面进行精细打磨, 并通过空杆冲击试验验证系统状态, 保证无反射波产生。试验采用纺锤形子弹头以消除岩样-杆件接触间隙引发的 P-C 震荡效应。为降低接触面摩擦影响, 在白砂岩试样两端均匀涂覆凡士林后夹持于杆件之间, 确

保轴向加载应力波的有效传递。设定好冲击气压后, 对岩样进行冲压, 并记录相关数据。基于一维应力波理论和应力均匀假设<sup>[38]</sup>, 采用应力波信号, 通过式(1)计算出岩样动态应力( $\sigma$ )、应变( $\epsilon$ )、平均应变率( $\dot{\epsilon}(t)$ )。

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{EA}{A_0} \epsilon_t(t), \\ \epsilon(t) = -\frac{2C}{l_0} \int_0^t \epsilon_r(t) dt, \\ \dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C}{l_0} \epsilon_r(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_r(t)$  为反射波应变;  $\epsilon_t(t)$  为透射波应变;  $A$  为弹性压杆的横截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $E$  为弹性模量, MPa;  $C$  为纵波波速,  $\text{m/s}$ ;  $A_0$  为岩样横截面积,

$\text{mm}^2$ ;  $l_0$  为岩样原始长度,  $\text{mm}$ ;  $t$  为应变值所对应的时刻值,  $\text{s}$ .

2) CT 扫描试验. 将冲击后的岩样放置在工业 CT 扫描平台上, 获取预损伤后岩样的二维扫描图像, CT 扫描试验参数为: 电压 160 kV, 电流 170  $\mu\text{A}$ , 曝光时间 1 000 ms, 投影数 1 500 张, 分辨率 30  $\mu\text{m}$ , 扫描时间 35 min. 基于二维扫描图像重构出三维裂隙结构, 并利用开源数据处理软件, 提取裂隙体积、三维分形维数、连通裂隙体积等参数, 基于裂隙体积采用式(2)计算出裂隙率.

$$\varphi = \frac{V_p}{V} \times 100 = \frac{V - V_s}{V} \times 100, \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为岩样的裂隙率;  $V_p$  为岩样内部裂隙体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $V_s$  为岩样实体体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $V$  为岩样总体积,  $\mu\text{m}^3$ .

同时引入三维连通度用于表征连通裂隙体积在岩样总体积中的占比<sup>[39]</sup>:

$$C' = \frac{V'}{V}, \quad (3)$$

式中:  $C'$  为三维连通度;  $V'$  为连通裂隙体积,  $\mu\text{m}^3$ .

连通裂隙占比( $\eta$ )为连通裂隙体积与总裂隙体积的比值, 即:

$$\eta = \frac{V'}{V_p}. \quad (4)$$

三维分形维数能够有效、直观地展示岩样内部的分散状态及裂隙分布的繁复性, 是评估岩石内部裂隙发育的关键指标<sup>[39]</sup>. 三维结构不规则、粗糙的几何对象的分形维数计算公式为

$$\lg V = \frac{3}{D} \lg A - \lg a_0, \quad (5)$$

式中:  $D$  为三维分形维数;  $a_0$  为常数.

CT 扫描后运用 Avizo 图像处理软件对 CT 扫描切片进行后处理与阈值分离, 获取三维裂隙图像, 并提取岩样中的裂隙体积及三维分形维数.

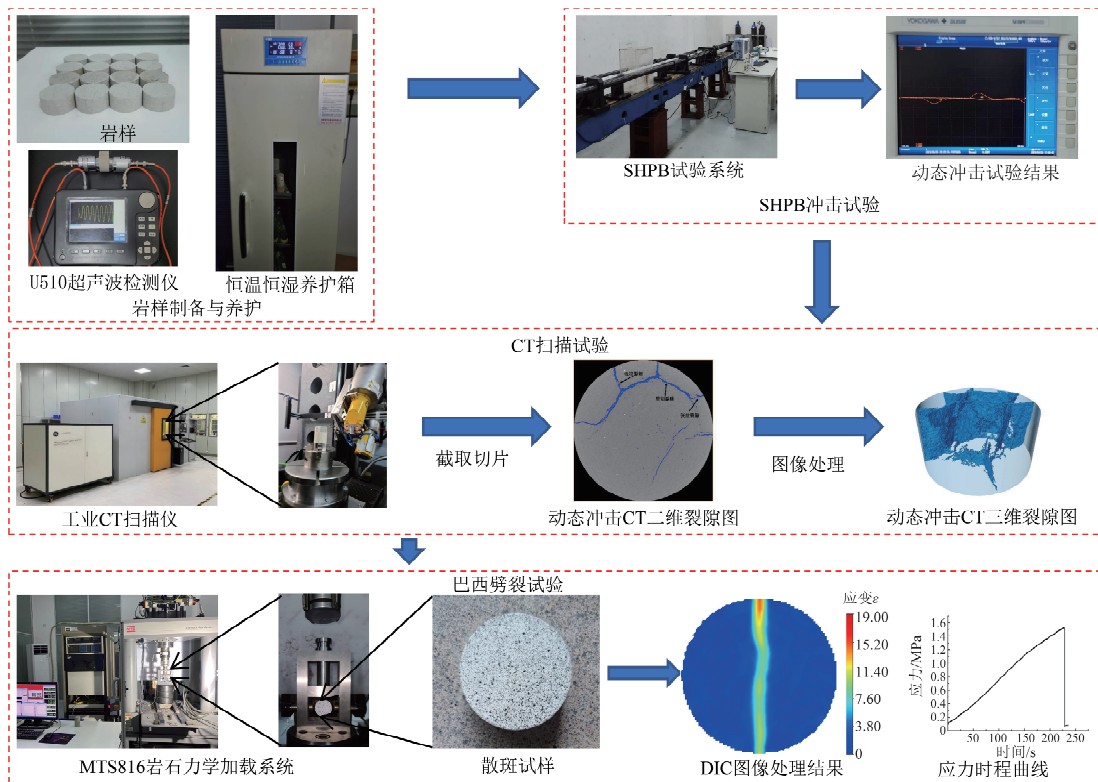


图 2 试验与数据处理流程

Fig. 2 Trials and data processing processes

3) 巴西劈裂圆盘劈裂试验. CT 扫描试验结束后, 在岩样表面喷涂散斑, 如图 2, 将岩样放置于巴西劈裂模具, 并确保岩样中轴线与模具压头重合, 调整 MTS-816 加载系统压头, 使其与模具压头接触; 调整并保持相机与试件表面平行; 设定加载速率为 0.05 mm/s 后启动加载系统, 并在 MTS-816 控制系统中实时记录试验数据, 同时, 启动相机摄

录岩样表面形态.

基于式(6)计算巴西劈裂抗拉强度<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dH}, \quad (6)$$

式中:  $\sigma_t$  为岩石的抗拉强度,  $\text{MPa}$ ;  $P$  为岩石加载破坏所承受的最大荷载,  $\text{N}$ ;  $d$  和  $H$  分别为岩石试件的直径和高度,  $\text{mm}$ .

## 2 预冲击损伤试验结果与分析

代表性岩样的 SHPB 试验原始波形如图 3 所示,岩样的动态应力平衡曲线、应力-应变曲线如图 4,5。从图 4 中可以看出入射波与反射波在叠加之后形成的曲线与透射波的原生应力曲线基本一致,表明试验满足动态应力平衡条件。

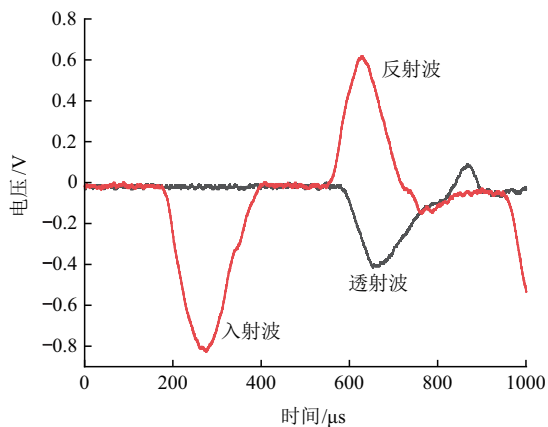


图 3 代表性岩样的原始波形曲线  
Fig. 3 Original waveform curves of representative rock samples

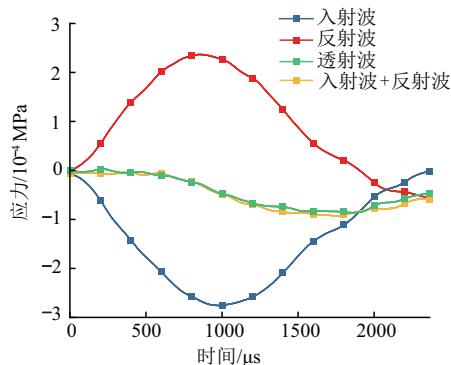


图 4 代表性岩样动态应力平衡曲线  
Fig. 4 Dynamic stress equilibrium curves of representative rock samples

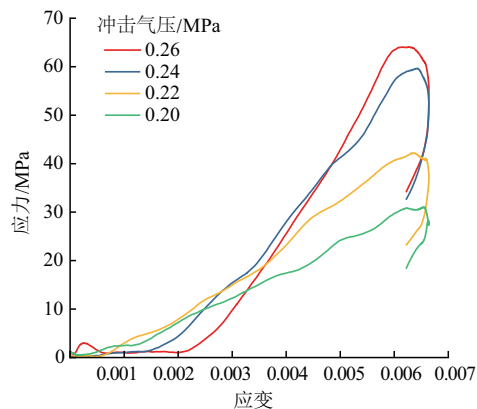


图 5 代表性岩样应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves of representative rock samples

在不同冲击气压作用下,白砂岩动态应力-应变曲线在达到峰值应力后均存在应力回弹现象,这与文献[39]的试验结果相似,说明岩样在冲击后并未完全损坏,仍具有一定的承载能力。

## 3 预冲击损伤白砂岩三维裂隙分布特征

基于重构的损伤白砂岩三维模型,表 2 列出不同冲击气压下代表性岩样(A1,B1,C2,D1)的三维模型,模型中浅蓝色部分为砂岩基质,深蓝色区域为低密度区域,是岩样受到冲击后形成的裂隙。

如表 2 所示,在受到 0.20 MPa 气压冲击后,岩样没有产生新生裂隙,此气压下不足以对岩样产生宏观裂隙;冲击气压上升至 0.22 MPa 时,岩样岩芯区域产生少量裂隙,并在边缘处产生环状裂隙;当气压达到 0.24 MPa 时,相对 0.22 MPa 气压冲击下的岩样,中心位置裂隙尺度不断扩大,岩样边缘呈环状拉伸扩展,冲击后岩样内部形成了一条近乎贯通岩样的环形破坏面;在 0.26 MPa 气压冲击下,内部裂隙不断发育扩展,岩芯裂隙与周边的环状裂隙之间相互连通,同时部分裂隙向边界方向继续延伸,岩体破裂呈现由局部、有序的破坏向弥散、无序的方向发展。

整体来看,0.20 MPa 气压冲击后的岩样内部不存在明显裂隙,岩样内部较为致密;当冲击气压高于 0.22 MPa 时,岩样内部结构发生明显变化,动态冲击导致的变形使得岩样均有不同体积的裂隙出现。

表 3 为冲击损伤白砂岩三维裂隙特征参数,图 6 为白砂岩三维裂隙特征参数随冲击气压变化趋势图。分析可知:

0.22,0.24,0.26 MPa 冲击下裂隙体积随冲击气压增大而不断攀升,裂隙率不断增长,且增长幅度也随冲击气压不断变大,裂隙率从 0.22 MPa 的  $0.70 \times 10^{-9} \%$  增长至 0.24 MPa 的  $4.30 \times 10^{-9} \%$ ,增长 6.14 倍,随后快速增长至 0.26 MPa 的  $17.60 \times 10^{-9} \%$ ,约为 0.22 MPa 的 25.14 倍。

随着冲击气压的增大,白砂岩连通裂隙体积差异较大,最小连通裂隙体积为 0.22 MPa 气压冲击下的  $14.3 \mu\text{m}^3$ ,最大连通裂隙体积为 0.26 MPa 气压冲击下的  $856.5 \mu\text{m}^3$ 。通过对比连通裂隙体积,可以看出高冲击气压下岩样裂隙更易出现互通趋势。同时,连通裂隙占比随冲击气压的增大而增大,先从冲击气压为 0.20 MPa 时的 0 增加至冲击气压为 0.22 MPa 时的 42.2%,随后增至冲击气压为 0.24 MPa 时的 74.3%,最终增长至 0.26

MPa 时的 99.7%，冲击气压达到 0.26 MPa 时，岩样内部的裂隙基本全部贯通。

三维分形维数随冲击气压的增大不断上升，且在 0.20~0.22 MPa 的气压区间内增长幅度尤为明显。白砂岩三维连通度随冲击气压的增大，呈现持续增长的变化规律，先从冲击气压为 0.20

MPa 时的 0 缓慢增长至冲击气压为 0.22 MPa 时的  $0.3 \times 10^{-9}\%$ ，随后增长至冲击气压 0.24 MPa 时的  $0.32 \times 10^{-8}\%$ ，此后三维连通度拟合曲线斜率迅速上升，最终达到冲击气压 0.26 MPa 时的  $1.76 \times 10^{-8}\%$ 。

表 2 不同冲击气压作用后白砂岩三维模型  
Table 2 3D model of white sandstone after different impact pressures






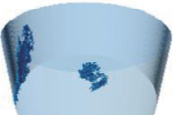
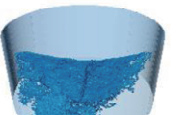



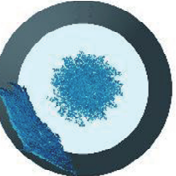

试样状态	不同冲击气压下代表性岩样裂隙分布				
	0.20 MPa	0.22 MPa	0.24 MPa	0.26 MPa	
冲击前	三维模型				
	三维模型				
冲击后	俯视图				

表 3 冲击损伤白砂岩三维裂隙特征参数  
Table 3 3D fracture characteristic parameters of impact damaged white sandstone

岩样编号	冲击气压/MPa	裂隙体积/ $\mu\text{m}^3$	连通裂隙体积/ $\mu\text{m}^3$	裂隙率/ $10^{-9}\%$	连通裂隙占比/%	三维连通度/ $10^{-9}\%$	三维分形维数
A1	0.20	0	0	0	0	0	0
A2	0.20	0	0	0	0	0	0
A3	0.20	0	0	0	0	0	0
A4	0.20	0	0	0	0	0	0
均值	0.20	0	0	0	0	0	0
B1	0.22	35.1	14.9	0.72	47.2	0.34	1.783
B2	0.22	37.9	18.7	0.77	49.4	0.38	1.985
B3	0.22	29.8	9.8	0.61	32.8	0.20	1.724
B4	0.22	34.9	13.8	0.71	39.4	0.28	1.703
均值	0.22	34.4	14.3	0.70	42.2	0.30	1.799
C1	0.24	190.3	136.5	3.9	71.8	2.8	2.141
C2	0.24	201.6	132.3	4.1	65.9	2.7	2.088
C3	0.24	264.5	215.4	5.4	81.5	4.4	2.498
C4	0.24	178.1	138.8	3.6	77.8	2.8	2.199
均值	0.24	208.6	155.8	4.3	74.3	3.2	2.232
D1	0.26	842.2	841.2	17.3	99.9	17.3	2.372
D2	0.26	793.4	787.4	16.3	99.2	16.3	2.469
D3	0.26	887.7	885.1	18.2	99.8	18.2	2.417
D4	0.26	913.1	912.4	18.7	99.9	18.7	2.375
均值	0.26	859.1	856.5	17.6	99.7	17.6	2.408

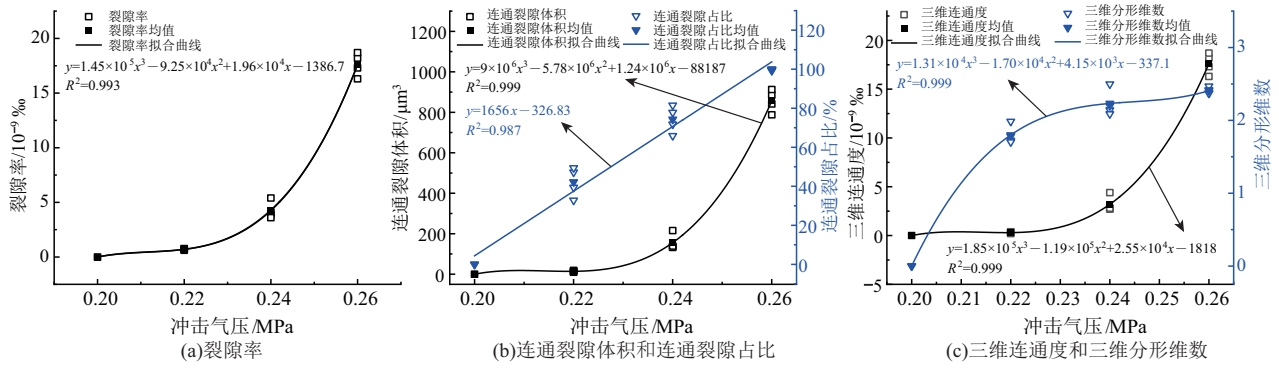


图 6 三维裂隙特征参数随冲击气压变化趋势

Fig. 6 Three dimensional crack characteristic parameters with the shock pressure change trend

总体来看,随冲击气压的增加,白砂岩裂隙率、连通裂隙体积、三维连通度均呈先缓慢后快速增长趋势,连通裂隙占比线性增大、三维分形维数先快速后缓慢增大,这一结果说明了冲击气压的提升直接导致岩体裂隙数量的增长及裂隙网络复杂性的加剧。

#### 4 预损伤白砂岩巴西劈裂试验结果分析

##### 4.1 巴西劈裂载荷-时程曲线

一般而言,在静载作用下,冲击气压对岩样的强度和变形等参数有一定的弱化作用.为具体分析冲击气压对岩样拉伸强度的影响,开展了白砂岩巴西劈裂试验.由于 0.26 MPa 气压冲击后的岩样无法承受巴西劈裂模具压头重量,未能完成后续巴西劈裂试验,本文仅对 0, 0.20, 0.22, 0.24 MPa 冲击气压下的岩样巴西劈裂力学特征进行研究,代表性岩样的载荷-时程曲线如图 7 所示。

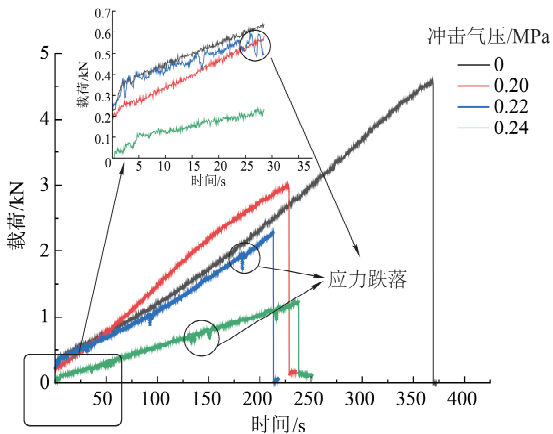


图 7 冲击预损伤岩样巴西劈裂载荷-时程曲线

Fig. 7 Brazilian splitting load-time history curve of impact pre-damaged rock samples

由图 7 可见,峰前部分载荷-时程曲线的斜率受冲击气压影响显著,呈现先增大后减小的趋势.岩样的峰后曲线也均表现为脆性破坏,冲击气压

对劈裂峰值载荷的影响较为显著.当冲击气压增大至 0.22 MPa 时,曲线出现了应力跌落现象,该现象随着冲击气压的增加愈加频繁。

鉴于巴西劈裂载荷-时程曲线中存在的应力跌落现象,统计不同冲击气压下岩样应力跌落次数,结果如表 4 所示,并结合表 3、表 4 动态冲击后岩样的三维裂隙特征参数与载荷-时程曲线特征参数绘制图 8。

表 4 试验岩样载荷-时程曲线特征参数

Table 4 Characteristic parameters of the load-time history curve of the test rock sample

岩样编号	冲击气压/MPa	峰值载荷/kN	峰值载荷均值/kN	应力跌落次数	应力跌落次数均值
Nc1	0	4.587		0	
Nc2	0	4.256	4.484	0	0
Nc3	0	4.079		0	
Nc4	0	5.015		0	
A1	0.20	2.996		0	
A2	0.20	3.201	3.115	0	0
A3	0.20	3.387		0	
A4	0.20	2.876		0	
B1	0.22	2.105		2	
B2	0.22	2.143	2.255	3	2
B3	0.22	2.471		2	
B4	0.22	2.299		1	
C1	0.24	1.226		4	
C2	0.24	1.162	1.289	5	4.75
C3	0.24	1.389		6	
C4	0.24	1.377		4	

如图 8a 所示,岩样的应力跌落次数与峰值载荷呈线性降低,拟合函数相似性为 0.997,二者呈反比关系,随着冲击气压的不断增长,岩样巴西劈裂峰值载荷逐渐减小,应力跌落愈加频繁.为探究受冲击气压损伤后的岩样三维裂隙特征参量与峰值载荷关联性,针对图 8b~8e 进行分析。

如图 8b 所示,随着三维分形维数的增加,岩样劈裂抗拉强度呈现减小的趋势,且分形维数越

大,岩样巴西劈裂峰值载荷下降越明显,应力跌落次数越多.结合分形理论<sup>[39]</sup>,三维分形维数越大,岩样内部孔隙的孔径与空间分布越复杂,孔隙占据空间的能力就越强<sup>[40]</sup>.因此当岩样受到拉伸应力时,其孔隙结构空间分布的复杂性可以改变岩样力学性能,对岩样的抗拉强度起到劣化作用.

结合图 8c,8e,裂隙率的不断增长使应力跌落愈加频繁,巴西劈裂峰值载荷呈现先快速降低后

缓慢衰减的趋势,裂隙率对岩样的劣化趋势与三维连通度较为相似.

图 8d 连通裂隙占比对巴西劈裂峰值载荷的影响基本呈线性关系,线性相关系数为 0.997,证明连通裂隙占比对岩样的巴西劈裂峰值载荷影响更为敏感,对应力跌落现象的频率影响呈先缓慢后快速增长的趋势.

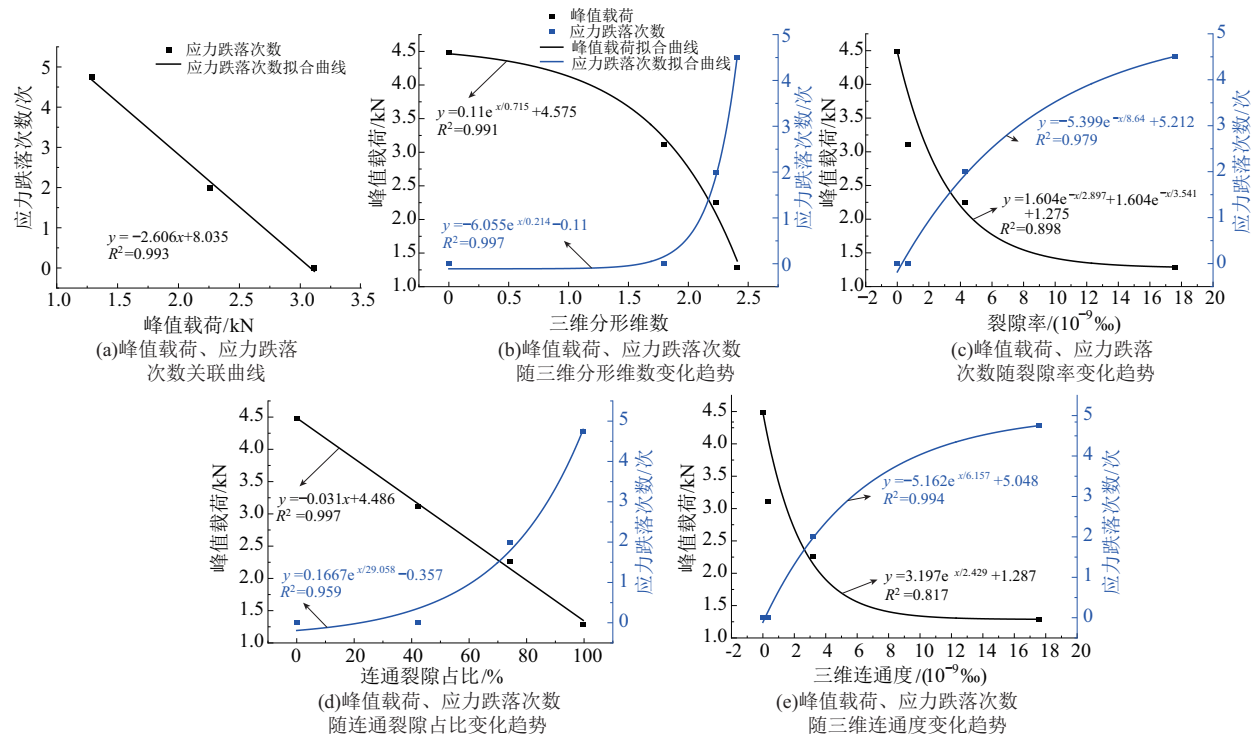


图 8 岩样三维裂隙特征参数与巴西劈裂峰值载荷关系

Fig. 8 The relationship between the characteristic parameters of three-dimensional fractures of rock samples and the peak load of splitting in Brazil

综上所述,预冲击产生的损伤会使得岩样脆性材料特征明显,导致岩样易发生失稳破坏<sup>[41]</sup>.当损伤岩样受到拉伸应力影响后,岩体碎裂的块体位移,发生应力跌落现象,随后块体形成新的支撑结构,致使应力跌落有所攀升,但受持续拉伸的影响,支撑结构被打破,应力再次降低,经多次重复该过程后,载荷-时程曲线频繁产生应力跌落现象.

#### 4.2 巴西劈裂白砂岩表面变形

图 9 给出了代表性岩样在 16.7%,33.4%,50.1%,66.7%,83.3%和 100%峰值荷载( $P_{max}$ )时的 DIC 散斑应变云图,分析可见不同冲击气压作用后的白砂岩巴西劈裂应变云图具有一定的差异性.

完整岩样(冲击荷载 0 MPa)在巴西劈裂试验中表现出典型的轴向拉伸破坏特征,试验初期,岩

样顶部与底部同步形成对称分布的应变集中区,随轴向荷载持续增大,应变集中区沿岩样轴向呈现渐进式扩展演化特征,随着应力的增大,最大主应变集中带逐渐变宽,最大主应变值逐渐增大,逐步发育为破坏临近点时的纵向最大主应变带,最终呈纵向拉伸破坏.破坏后的岩样贯穿裂隙基本呈直线形,这是由于岩样内部微裂隙发育程度低,累积损伤小,均质性相对较好,但材料破坏要遵循耗能最小的原理<sup>[42]</sup>,裂隙在扩展过程中不可避免地会绕过介质中一些质地坚硬的矿物颗粒,导致贯穿裂隙存在偏离直线的曲折.

当冲击气压达到 0.20 MPa 时,白砂岩贯穿裂隙仍保持直线开裂形式,结合表 2 中 CT 三维重构结果,岩样在动态冲击后没有产生明显损伤,预冲击仅降低了岩体基质间的微小联结力,破坏后的岩样裂隙形态与完整岩样相似.

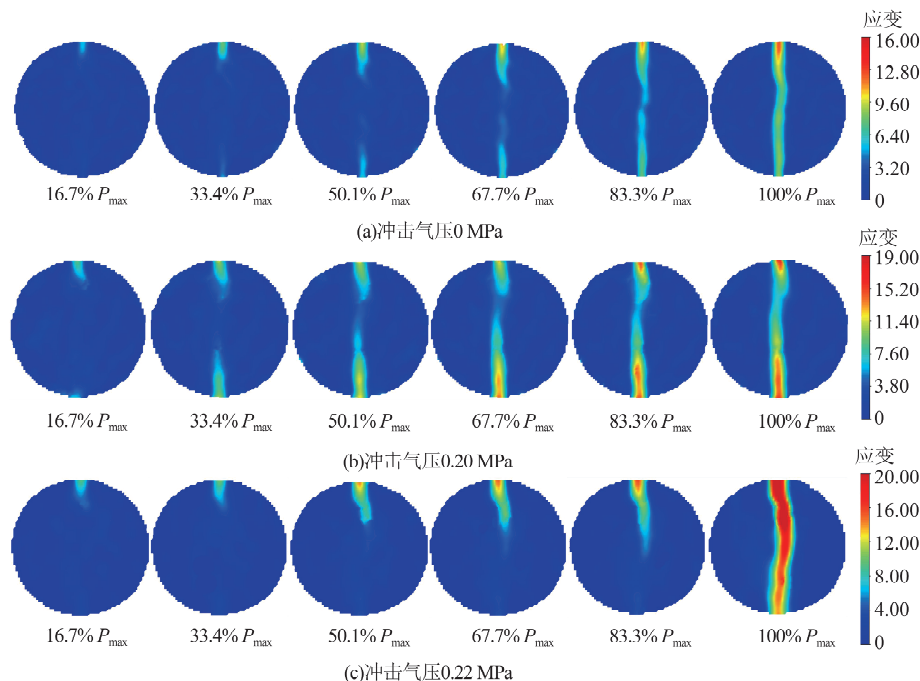


图 9 不同冲击损伤下岩样应变云图

Fig. 9. Stress contours of typical rock samples under different impact damages

冲击气压在 0.22 MPa 下, 试验开始时, 岩样受冲击裂隙影响, 首先在顶部出现单个应变集中区, 并沿轴向向下不断延伸扩展, 随着应力的增大, 最大主应变集中带逐渐变宽, 且弯曲程度较未受冲击和 0.20 MPa 冲击下的岩样愈加明显, 最大主应变值略微增大, 高应变区域明显增多, 最终呈纵向拉伸破坏。

综上所述, 对比原始岩样的巴西劈裂表面裂纹演化过程, 低气压冲击后的岩样, 高应变区域较集中, 最大应变较大, 基本呈现中部拉伸破坏; 高压冲击后的岩样高应变集中区域面积明显增大, 最大应变也有所增长。

#### 4.3 力学特征参数随冲击气压变化规律

通过式(6)计算出岩样抗拉强度, 并汇总于表 5, 结合表 5 绘制图 10, 该图反映了巴西劈裂抗拉强度、峰值应变随冲击气压变化趋势。

可以看出: 随着冲击气压的增大, 白砂岩巴西劈裂抗拉强度随冲击气压的增大呈指数降低, 先从冲击气压为 0 MPa 时的 2.285 MPa 衰减至冲击气压为 0.20 MPa 时的 1.587 MPa, 随后锐减至冲击气压为 0.22 MPa 时的 1.149 MPa, 最终降至 0.657 MPa。

白砂岩的巴西劈裂峰值应变随冲击气压呈指数增长, 在 0.2, 0.22, 0.24 MPa 冲击下白砂岩的峰值应变较未受冲击的岩样分别上升了 17.16%, 29.54%, 241.1%。

表 5 冲击损伤白砂岩巴西劈裂力学参数

Table 5 Impact damage to white sandstone Brazilian splitting mechanics parameters

岩样编号	冲击气压/MPa	抗拉强度/MPa	抗拉强度均值/MPa	峰值应变	峰值应变均值
Nc1	0	2.337		14.5	
Nc2	0	2.169		16.7	
Nc3	0	2.079	2.285	15.7	16.1
Nc4	0	2.555		17.4	
A1	0.20	1.527		18.7	
A2	0.20	1.631		19.0	
A3	0.20	1.726	1.587	19.1	18.9
A4	0.20	1.465		18.6	
B1	0.22	1.073		22.9	
B2	0.22	1.092		21.6	
B3	0.22	1.259	1.149	25.8	23.6
B4	0.22	1.171		24.2	
C1	0.24	0.625		48.7	
C2	0.24	0.592		55.5	
C3	0.24	0.708	0.657	59.0	54.9
C4	0.24	0.702		56.4	

深部煤岩开采作业时机械割煤、钻孔爆破等产生的动载荷促使白砂岩内部产生大量裂隙, 致使煤岩有效抗拉阈值应力降低, 高静载作用下的煤岩更易发生拉伸破坏, 引发失稳事故。

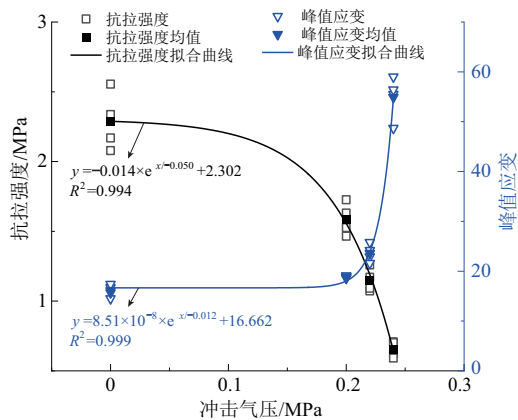


图10 巴西劈裂抗拉强度、峰值应变随冲击气压变化趋势

Fig. 10 The trend of Brazilian splitting peak stress and strain with changing impact pressure

## 5 结论

1) 冲击气压对白砂岩裂隙特征参数影响显著。随冲击气压的增加,白砂岩裂隙率、连通裂隙体积、三维连通度均先缓慢后快速增大,连通裂隙占比线性增大、三维分形维数先快速后缓慢增大。

2) 受冲击气压的影响,白砂岩会产生不同程度的损伤,当损伤岩样受到拉伸载荷时,会发生应力跌落现象,且冲击气压越大,应力跌落现象越频繁。

3) 不同冲击气压作用后,白砂岩的巴西劈裂破坏过程展现出了一定的差异,高应变区域随冲击气压的增大更加集中,最大应变增大。

4) 预损伤白砂岩抗拉强度和峰值应变随冲击气压变化呈指数型劣化,冲击气压超过 0.22 MPa 后,岩体抗拉强度锐减,峰值应变激增。

## 参考文献:

- [1] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1370-1379.  
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1370-1379.
- [2] 贾后省, 潘坤, 李东发, 等. 含软弱夹层顶板采动巷道冒顶机理与控制方法[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 67-76.  
JIA Housheng, PAN Kun, LI Dongfa, et al. Roof fall mechanism and control method of roof with weak interlayer in mining roadway [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 67-76.
- [3] 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.
- [4] 焦振华, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 侧限约束冲击载荷下煤样能量耗散与损伤特征[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 492-501.  
JIAO Zhenhua, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. Influence of loading and unloading effect on mechanical properties of impact rock under impact load [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 492-501.
- [5] 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 X B, ZHOU Z L, YE Z Y, 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.
- [6] 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.
- [7] 金解放, 杨益, 廖占象, 等. 动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1990-2002.  
JIN Jiefang, YANG Yi, LIAO Zhanxiang, et al. Effect of dynamic loads and geo-stresses on response characteristics of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1990-2002.
- [8] 李晓峰, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2393-2405.  
LI Xiaofeng, LI Haibo, LIU Kai, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rock subject to impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393-2405.
- [9] 王梦想, 汪海波, 宗琦. 冲击荷载作用下煤矿泥岩能量耗散试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1716-1725.  
WANG Mengxiang, WANG Haibo, ZONG Qi. Experimental study on energy dissipation of mudstone in coal mine under impact loading [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1716-1725.

- [10] LIU B, ZHAO Y X, DAO S, et al. Effects of displacement rate on mechanical behaviors and failure mechanism of non-caking coal in Brazilian splitting tests[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(5): 179.
- [11] LONGINOS N S, SKRZYPACZ P, HAZLETT R. Cryofracturing effectiveness using liquid nitrogen on granite; Fracture toughness and Brazilian tests following freezing-thawing cycle[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21101895.
- [12] CHEN Y J, YIN T B. Digital fracture surface morphology and statistical characteristics of granite brazilian tests after non-steady-state thermal disturbance[J]. *Mathematics*, 2024, 12(5): 670.
- [13] ZHANG Y K, CHEN S B, ZHAI X H, et al. Brazilian splitting experiment and finite element simulation analysis of the influence of bedding loading angle on shale fracture mode[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(6): 602-612.
- [14] 方新宇, 许金余, 刘石, 等. 岩石动态劈裂试验的最优试件尺寸分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(21): 73-79.  
FANG Xinyu, XU Jinyu, LIU Shi, et al. Optimal specimen size analysis for rock dynamic splitting tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(21): 73-79.
- [15] 许金余, 刘石, 孙蕙香. 3种岩石的平台巴西圆盘动态劈裂拉伸试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增1): 2814-2819.  
XU Jinyu, LIU Shi, SUN Huixiang. Analysis of dynamic split tensile tests of flattened brazilian disc of three rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Sup 1): 2814-2819.
- [16] 尤明庆, 苏承东. 平台巴西圆盘劈裂和岩石抗拉强度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(18): 3106-3112.  
YOU Mingqing, SU Chengdong. Experimental study on split test with flattened disk and tensile strength of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(18): 3106-3112.
- [17] 陈爱坤, 翟成, 丛钰洲, 等. 液氮循环冷冲击作用下煤体受拉破坏特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(2): 342-353.  
CHEN Aikun, ZHAI Cheng, CONG Yuzhou. Tensile failure characteristics of coal after the cyclic cold shock of liquid nitrogen[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(2): 342-353.
- [18] 周磊, 朱哲明, 董玉清, 等. 砂岩在不同应变率条件下的劈裂破坏特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 555-567.  
ZHOU Lei, ZHU Zheming, DONG Yuqing, et al. Fracture properties of sandstone materials at different strain rates[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(2): 555-567.
- [19] 尹大伟, 丁屹松, 汪锋, 等. 压力水浸泡下煤岩抗拉特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(增1): 3178-3191.  
YIN Dawei, DING Yisong, WANG Feng, et al. Experimental study on tensile properties and deterioration mechanism of coalsamples under pressure water immersion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(Sup 1): 3178-3191.
- [20] 雷瑞德, 粟罗, 贺培, 等. 不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(10): 63-77.  
LEI Ruide, SU Luo, HE Pei, et al. Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio [J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(10): 63-77.
- [21] LIU Y, DAI F, XU N W, et al. Experimental and numerical investigation on the tensile fatigue properties of rocks using the cyclic flattened Brazilian disc method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 105: 68-82.
- [22] LI D Y, WANG T, CHENG T J, et al. Static and dynamic tensile failure characteristics of rock based on splitting test of circular ring [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7): 1912-1918.
- [23] 陈磊, 张广清, 张敏, 等. 水力裂缝穿越非连续面扩展时的断裂过程研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(1): 159-170.  
CHEN Lei, ZHANG Guangqing, ZHANG Min, et al. Propagation process of hydraulic fracture crossing an orthogonal discontinuity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(1): 159-170.
- [24] 杨仁树, 赵勇, 赵杰, 等. 基于DIC技术的爆炸应力波过异质界面应变场演化规律实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(12): 52-67.  
YANG Renshu, ZHAO Yong, ZHAO Jie, et al. Experimental study on evolution of strain field of explosion stress wave passing through a heterogeneous interface based on the DIC method[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(12): 52-67.
- [25] 金爱兵, 王杰, 陈帅军, 等. 基于不同粒径分布尾

- 砂的充填体强度及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3083-3093.
- JIN Aibing, WANG Jie, CHEN Shuaijun, et al. Strength and damage characteristics of tailings filling body with different particle size distributions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3083-3093.
- [26] 余力, 罗家成, 姚迪, 等. 数字图像相关方法在力学特性试验中的应用研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(增1): 146-151.
- YU Li, LUO Jiacheng, YAO Di, et al. Research on application of digital image correlation method in mechanical property test[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(Sup 1): 146-151.
- [27] 郭聚坤, 王瑞, 寇海磊, 等. 基于三维数字图像相关技术钙质砂颗粒运动行为试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2785-2798.
- GUO Jukun, WANG Rui, KOU Hailei, et al. Experimental study on movement behavior of calcareous sand particles based on three-dimensional digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2785-2798.
- [28] 刘汉香, 叶刁瑜, 别鹏飞, 等. 循环加卸载过程中灰岩微细观损伤特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 685-696.
- LIU Hanxiang, YE Diaoyu, BIE Pengfei, et al. Experimental study of microscopic and mesoscopic damage features of limestone under cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 685-696.
- [29] 王磊, 王安铖, 陈礼鹏, 等. 含瓦斯煤循环冲击动力学特性与裂隙扩展特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2628-2642.
- WANG Lei, WANG Ancheng, CHEN Lipeng, et al. Dynamic characteristics and crack propagation characteristics of gas-bearing coal under cyclic impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2628-2642.
- [30] 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等. 基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2659-2671.
- ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2659-2671.
- [31] 王登科, 张平, 魏建平, 等. CT可视化的受载煤体三维裂隙结构动态演化试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增2): 574-584.
- WANG Dengke, ZHANG Ping, WEI Jianping, et al. Research on dynamic evolution of 3D fracture structure of loaded coal body based on CT visualization[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Sup 2): 574-584.
- [32] WANG Y, HOU Z Q, HU Y Z. In situ X-ray micro-CT for investigation of damage evolution in black shale under uniaxial compression[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(20): 1-12.
- [33] 张玉芝, 王玺, 王盟, 等. 冻融过程中冰水相变对非饱和粉土动力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1799-1808.
- ZHANG Yuzhi, WANG Xi, WANG Meng, et al. The effect of ice-water phase change on the dynamic properties of unsaturated silt during freeze-thaw process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1799-1808.
- [34] 马学舟, 温颖远, 曹安业, 等. 微波弱化煤体微结构损伤特征及能量释放规律分析[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-12 [2024-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240408.0845.001.html>.
- MA Xuezhou, WEN Yingyuan, CAO Anye, et al. Analysis of microstructure damage characteristics and energy release law of coal weakened by microwave[J]. Coal Science and Technology, 1-12 [2024-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240408.0845.001.html>.
- [35] 马衍坤, 黄勤豪, 孔祥国, 等. 震动载荷多次作用下烟煤孔裂隙结构演化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1882-1893.
- MA Yankun, HUANG Qin hao, KONG Xiangguo, et al. Experimental study on the evolution characteristics of bituminous coal pore-fissure structure under multiple vibration load[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1882-1893.
- [36] 卢海峰, 李中洋, 张凯. 改性粉煤灰材料固沙特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增1): 3374-3384.
- LU Haifeng, LI Zhongyang, ZHANG Kai. Experimental study on sand fixation characteristics of modified fly ash materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Sup 1): 3374-3384.
- [37] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 49: 105-112.
- [38] 殷志强. 高应力储能岩体动力扰动破裂特征研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.

- YIN Zhiqiang. Research on fracture characteristics of rock with high energy accumulation under dynamic disturbance[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [39] 胡 健, 宫凤强, 贾航宇. SHPB 压缩试验中红砂岩的力学与能量耗散特性研究[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(3): 411-420.
- HU Jian, GONG Fengqiang, JIA Hangyu. Research on mechanical and energy dissipation characteristics of red sand stone in shpb compression test[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(3): 411-420.
- [40] 王雁冰, 王兆阳, 付代睿, 等. 爆后岩石裂隙结构可视化及定量表征方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1388-1402.
- WANG Yanbing, WANG Zhaoyang, FU Dairui. Visualization and quantitative characterization methods of post-blast rock fracture structure[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1388-1402.
- [41] 辛子朋, 柴肇云, 孙浩程, 等. 砂质泥岩峰后破裂承载特征与块体分布规律研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2369-2380.
- XIN Zipeng, CHAI Zhaoyun, SUN Haocheng. Post-peak fracture-bearing characteristics and fragmentation distribution of sandy mudstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2369-2380.
- [42] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1781-1783.
- ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass. [J] Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1781-1783.

(责任编辑 宋 爽 全 腾)