

文章编号: 1004-4051(2025)03-0205-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241050

高速冲击下岩石劈裂力学特性及破坏特征分析

燕磐¹, 赵光明^{1,2}, 许文松^{1,2}, 周俊^{1,2}, 汪聪聪¹, 武新文³

- 安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽淮南 232001;
- 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽淮南 232001;
- 中煤山西华润联盛能源投资有限公司, 山西吕梁 033000)

摘要: 为探究不同冲击荷载下砂岩的力学特性和破坏机理, 利用分离式 SHPB 试验系统开展了不同冲击荷载下砂岩动态劈裂试验, 分析砂岩的应力-应变曲线, 阐述砂岩基本力学性质, 并结合数字图像相关法(DIC), 确定中间主应变场演化情况, 探究砂岩的破坏模式, 并对破碎岩块进行分型处理, 分析了砂岩受拉伸破坏后的破碎程度。研究表明: 砂岩的动态应力-应变曲线分为弹性变形阶段、塑性阶段和破坏阶段。砂岩的破坏模式是首先在初始受力处形成应力集中区, 沿应力波方向贯穿试样, 整体上发生拉伸破坏。原生裂纹始终参与破坏, 随着载荷增加, 加剧了原生裂纹在破坏中的作用, 试样所受的动能也随之增大, 使得试样内部积聚的应变能快速释放, 造成原生裂隙发育更加彻底, 与新生裂隙的相互连接、不断贯通作用更加显著, 从而产生了明显的剪切破坏。基于分形理论, 随着载荷的增加, 砂岩的破碎程度也更为剧烈, 当载荷进一步增加, 砂岩的破碎程度逐渐趋于稳定。本文研究为学习岩石动态力学特征及应用提供一定的理论依据。

关键词: SHPB; 动态力学特征; DIC; 破坏演化特征; 分形维数

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A

Mechanical properties and failure characterization of rock splitting under high velocity impacts

YAN Pan¹, ZHAO Guangming^{1,2}, XU Wensong^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2},
WANG Congcong¹, WU Xinwen³

- School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China;
- Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining of Education, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China;
- China Coal Shanxi China Resources Liansheng Energy Investment Co., Ltd., Lyuliang 033000, China)

Abstract: In order to explore the mechanical properties and failure mechanism of sandstone under different impact loads, the dynamic splitting test of sandstone under different impact loads is carried out

收稿日期: 2024-06-02 责任编辑: 聂虹

基金项目: 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金项目资助(编号: EC2023020); 国家重点研发计划项目资助(编号: 2022YFF1303302); 安徽省科技重大专项项目资助(编号: 202203a07020011); 高校协同创新项目资助(编号: GXXT-2021-075); 安徽省“特支计划”领军人才项目资助(编号: T000508); 安徽省高校优秀科技创新团队项目资助(编号: 2022AH010053)

第一作者简介: 燕磐(1997—), 男, 汉族, 安徽涡阳人, 硕士研究生, 主要从事矿山岩石力学等方面的研究工作, E-mail: 122788048@qq.com。

通讯作者简介: 赵光明(1976—), 男, 汉族, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力及控制方面的研究, E-mail: 13955471006@163.com。

引用格式: 燕磐, 赵光明, 许文松, 等. 高速冲击下岩石劈裂力学特性及破坏特征分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(3): 205-214.

YAN Pan, ZHAO Guangming, XU Wensong, et al. Mechanical properties and failure characterization of rock splitting under high velocity impacts[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(3): 205-214.

by using the separated SHPB test system. The stress-strain curve of sandstone is analyzed, and the basic mechanical properties of sandstone are expounded. Combined with the digital image correlation method (DIC), the evolution of the intermediate main strain field is determined, and the failure mode of sandstone is explored. The broken rock blocks are classified and the degree of fragmentation of sandstone after tensile failure is analyzed. The research shows that the dynamic stress-strain curve of sandstone is divided into elastic deformation stage, plastic stage and failure stage. The failure mode of sandstone is that the stress concentration zone is formed at the initial stress, and the specimen is penetrated along the direction of stress wave, and the tensile failure occurs as a whole. The primary crack always participates in the failure. As the load increases, the role of the primary crack in the failure is aggravated, and the kinetic energy of the sample is also increased, so that the strain energy accumulated inside the sample is quickly released, resulting in more thorough development of the primary crack. The interconnection and continuous penetration of the new cracks are more significant, resulting in obvious shear failure. Based on fractal theory, with the increase of load, the crushing degree of sandstone is more intense. When the load increases further, the crushing degree of sandstone gradually tends to be stable. The research results provide a theoretical basis for studying the dynamic mechanical properties of rock and its application.

Keywords: SHPB; dynamic mechanical characterization; DIC; failure evolution characteristic; fractal dimension

0 引言

目前,我国的浅层矿物资源已临近枯竭,岩矿工程由浅层矿井开采向深部矿井开采的转型^[1],随着矿区开采深度的增加,深部巷道的岩体受力情况也更为复杂,岩体失稳破坏的现象也极为严重^[2],例如,在开采爆破时受到的动力扰动,极大影响深部煤炭的开采工作^[3]。因此,探究不同动力载荷下砂岩的力学性质和破坏特征,对提高深部煤炭开采工作的安全性和深部巷道围岩的稳定性有着重要意义。

目前,有关静荷载作用下的砂岩破坏机理的研究已经非常成熟,对动荷载作用下砂岩的动力学破坏特征的研究也取得了一定进展^[4-6]。宫凤强等^[7]利用分离式霍普金森对砂岩进行间接拉伸试验,基于准静态和动载条件下,得出砂岩抗拉强度具有明显的动态效应;平琦等^[8]利用直锥变截面分离式Hopkinson压杆试验装置对砂岩试样进行六种不同气压的加载方式,分析高应变率下煤矿砂岩的拉伸应力和应变率特性;纪杰杰等^[9]对不同岩石开展霍普金森的力学试验,利用标准筛对岩石碎块进行筛分,结果表明,岩石破碎块度符合分形规律,用分形维数可对岩石在冲击荷载下的破碎特性进行定性分析。然而,现阶段针对岩石破坏过程的分析手段大多以力学性质和能量耗散为主^[10-12],使用DIC技术和裂纹扩展相结合的方式进行分析的文献尚少。

DIC技术^[13]是一种用于测量全场形变的无接触、高精度位移,是目前光学测量机械中最具潜力的一种测量手段。孙文进等^[14]针对400~1 000℃的砂岩进行巴西圆盘劈裂实验,得出不同温度下受拉伸破

坏的力学性质,研究发现:砂岩抗拉劣化的温度阈值为800℃,随着温度的升高,砂岩内部裂纹剧烈增加。范杰等^[15]利用DIC技术和声发射相结合的方法,对不同倾角预制裂纹的细黄砂岩进行单轴压缩试验,印证了DIC技术在提高认识岩石损伤行为具有显著意义;齐飞飞等^[16]结合DIC技术对不同节理密度的岩石进行单轴冲击试验,将试件破坏模式划分为轴向拉伸破坏、拉贯通带破坏及混合破坏;李建旺^[17]对单轴压缩状态下的含双预制裂隙岩石进行研究,通过DIC技术与PFC相结合的方式,得出应变、位移的演化过程,以及裂纹的发展模式,研究结果表明:当载荷增大到一定阶段时,试样由I型裂纹和II型裂纹共同作用,最终发生破坏。MUNOZ等^[18]提出在砂岩单轴压缩时采用3D-DIC的测量方法,在准静态加载下,对砂岩进行单向单轴压缩试验,分析了岩样表面应变场,结果表明:当应力达到一定程度时,主破裂面才会显示出来;王磊等^[19]利用DIC技术对含瓦斯煤的动态过程进行检测,分析瓦斯气体对煤体破坏模式的影响,结果表明:随着初始瓦斯压力的增加,煤体破坏模式为横向层裂、纵向劈裂共存的复合型破坏;李小龙等^[20]采用DIC技术获取弱胶结砂岩的全场应变演化,结果表明:加载速率对弱胶结砂岩劈裂过程中的应变演化影响较小,不同加载条件下岩样应变场演化规律基本相同,研究成果对弱胶结软岩巷道变形破坏分析具有指导意义。

基于上述研究,利用可视化SHPB试验系统对砂岩进行冲击劈裂试验,宏观分析砂岩力学性质,并结合DIC技术和动态断裂特征定量分析裂纹扩展,探

讨砂岩破坏机制,对砂岩动力学体系进行补充与完善。

1 试验概述

1.1 试验系统及原理

SHPB系统的纺锤型子弹(撞击杆)、入射杆、

透射杆和吸收杆的直径均为50 mm,长度分别为2 000 mm、1 500 mm和600 mm,材质为C40高强铬钢,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为210 GPa,弹性纵波传播速度为5 172 m/s。SHPB系统装置如图1所示。

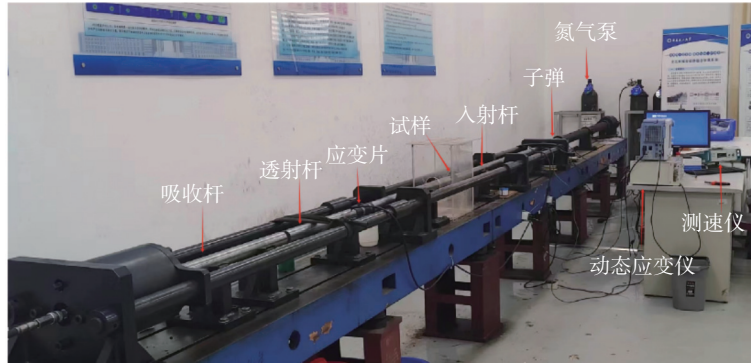


图1 SHPB系统装置

Fig. 1 SHPB system installation

冲击试验时,子弹与入射杆发生撞击时,会产生应力波,粘贴在两杆的应变片会接收相应的应力波信号,导出到超动态应力应变仪中。基于一维弹性波理论和均匀性假定,可得砂岩动态应力、应变和平均应变率的计算公式^[2],见式(1)~式(3)。

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C}{l_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

式中: $\sigma(t)$ 为砂岩动态应力,MPa; $\varepsilon(t)$ 为砂岩应变,MPa; $\dot{\varepsilon}(t)$ 为砂岩平均应变率, s^{-1} ; E 为弹性模量,GPa; C 为纵波波速,m/s; A 和 A_s 分别为杆和试样的横截面积, mm^2 ; l_s 为砂岩原始长度,mm; ε_i 、 ε_r 和 ε_t 分别为杆的入射应变、反射应变和透射应变。

1.2 试样制备

试样选用淮南矿业集团某矿二采区10-2煤层顶板的砂岩,砂岩状况良好,无明显裂隙。为适应SHPB压杆系统,先将试件钻芯取样,对试样两端仔细打磨,保证不平行度和不垂直度均小于0.02 mm,端面法线偏差小于0.25°,最终加工成外径为50 mm、厚度为25 mm的完整圆盘试样,如图2所示。为保证岩体赋存结构一致性,使用U510非金属超声波检测仪准确测定试样波速,剔除波速偏离超过5%的试样。

1.3 试验方案

在SHPB试验系统对砂岩在0.40 MPa、0.50 MPa、0.60 MPa、0.70 MPa、0.80 MPa等5种不同冲击气压条件下进行劈裂冲击,每组冲击气压3个试样。每

组试验均用高速摄像机进行图像采集。高速摄像仪的拍摄频率为50 000 fps,实时查看试样预制散斑点的变化情况及破坏状态。考虑到试样与入射杆和透射杆的接触面光滑,为防止其脱落及消除端部摩擦效应,在试件两表面均匀涂抹凡士林。

2 冲击作用动力学特征分析

2.1 高速冲击下的试验结果

为探究冲击荷载对砂岩力学特性的影响,绘制不同冲击荷载下的典型砂岩应力-应变曲线,研究砂岩峰值应力、峰值应变与冲击荷载的关系。冲击荷载的砂岩试验结果见表1。

整体上,应变率与峰值应力随冲击荷载增加而增加,这是因为冲击荷载具有高能量、持续时间短的特点,在增加荷载的同时,会导致加载时间进一步缩短,这意味着试样在极短时间内会发生较大变形,应变率会显著提高。通常来说,当荷载作用于试样时,由于加载速率较快,试样内部的微观结构未能及时响应,因此,会在极短时间达到较高的应力水平。

2.2 应力-应变曲线

砂岩的动态应力-应变曲线如图3所示。由图3可知,不同冲击荷载下,砂岩动态冲击的应力-应变曲



图2 加工后的岩样

Fig. 2 The processed rock samples

表 1 冲击试验参数

Table 1 Impact test parameters

编号	冲击气压/MPa	冲击速率/(m/s)		应变率/(ϵ^{-3})		峰值应力/MPa	
		单个试样	平均值	单个试样	平均值	单个试样	平均值
A-1	0.40	4.96		189.62		43.16	
A-2	0.40	5.01	4.98	207.21	202.43	45.52	44.33
A-3	0.40	4.98		210.45		44.33	
B-1	0.50	5.66		234.83		52.10	
B-2	0.50	5.66	5.72	241.82	240.07	50.41	51.41
B-3	0.50	5.83		243.57		51.72	
C-1	0.60	6.23		285.81		57.22	
C-2	0.60	6.35	6.30	279.22	280.05	56.65	56.67
C-3	0.60	6.33		275.12		56.16	
D-1	0.70	7.15		314.68		59.15	
D-2	0.70	7.29	7.22	336.11	324.57	60.10	59.21
D-3	0.70	7.21		322.92		58.40	
E-1	0.80	8.02		369.46		61.42	
E-2	0.80	8.19	8.13	345.98	358.60	60.93	61.18
E-3	0.80	8.18		360.37		61.18	

线变化形式表现出高度一致性,但不同冲击荷载直接影响砂岩应力峰值。砂岩应力-应变曲线可分为三个阶段。首先是弹性变形阶段,砂岩受冲击载荷的作用,应力随应变的增加近似呈线性增加,斜率也保持不变,这是因为在加载过程中,受冲击速度快的影响,砂岩微裂隙闭合时间极短,并且曲线没有下凹段,因此,试样不存在压密阶段,而是直接进入线弹性阶段。其次是塑性阶段,随着冲击时间的增加,应力增加减缓,不再表现为线性增长,这是因为砂岩内的孔隙和裂缝不断闭合,原生裂隙不断扩展,新生损伤开始发育,最终达到峰值应力。最后是砂岩破坏阶段,此阶段表现为应变继续增大,应力降低。

由图 3 可知,载荷较高的试样率先达到峰值应力点。因为在高速冲击下,试样更快地吸收能量并

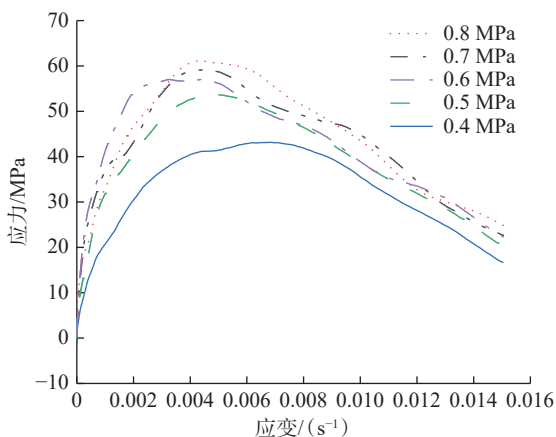


图 3 应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves

发展损伤,导致试样更快地达到峰值应力。从整体上来看,峰值应力的大小是严格由冲击载荷决定的,这表明选用的试样表现出很好的应变率效应。值得注意的是,0.6 MPa 下的试样率先达到峰值应力,这可能是由于试样承受低载荷时,试样内部微裂纹扩展和损伤积累相对较慢,经历了更多塑性变形,从而更快地达到峰值应力。

2.3 应变率特征

不同冲击速率下典型砂岩应变率随时间变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,冲击速率高,其应变率峰值越大,具备一定规律,说明本试验加载方式合理。

岩石力学性质中,通过应变率分析岩石性质,通过改变冲击气压方式决定冲击速率,对冲击速率和应变率进行数值拟合,拟合曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,拟合效果较好,并且应变率随着冲击速率的增加呈线性增长,这是因为在高速冲击下,砂岩的内部裂纹扩展是需要更高的应变率来实现,与相应的冲击速率匹配,因而在冲击试验中,冲击速率与应变率有较好的线性关系。

2.4 峰值应力特征

峰值应力表征岩石等材料所能承受的极限应力。对峰值应力和应变率进行数据拟合,如图 6 所示。由图 6 可知,应变率为 $202.43 \epsilon^{-3}$ 时,峰值应力为 44.33 MPa,当应变率增加到 $358.60 \epsilon^{-3}$ 时,峰值应力增加到 61.18 MPa,增值幅度为 38.01%,由此可见,砂岩在整体上表现出明显的应变率效应,此外在应变率由 $280.05 \epsilon^{-3}$ 到 $324.57 \epsilon^{-3}$ 时,峰值应力由 56.67 MPa 增

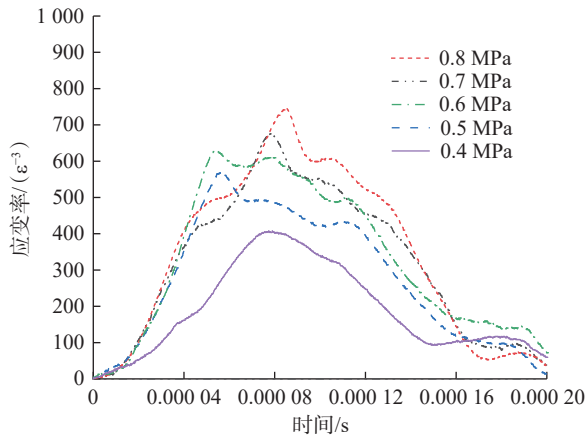


图 4 应变率-时间曲线
Fig. 4 Strain rate-time curves

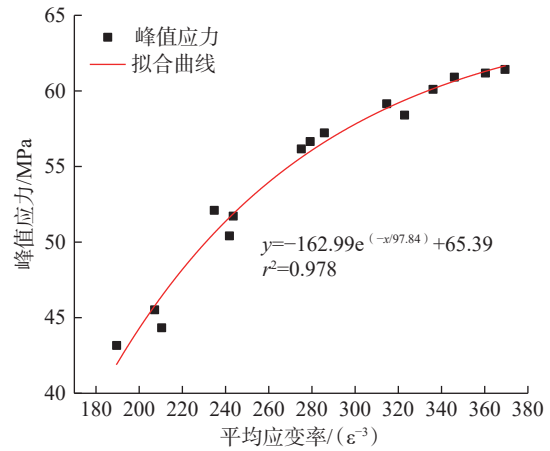


图 6 应变率-峰值应力拟合函数曲线
Fig. 6 Strain rate-peak stress fitting function curves

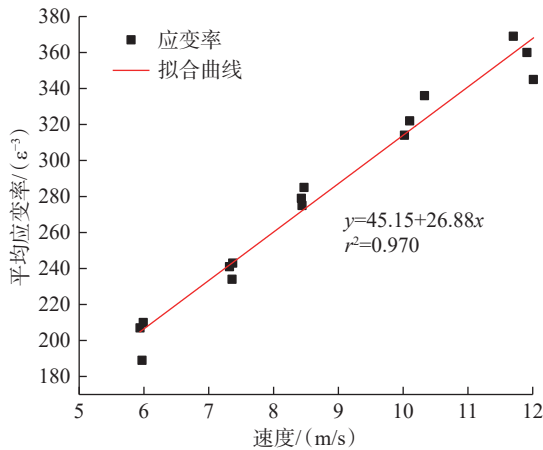


图 5 应变率-速度拟合函数曲线
Fig. 5 Strain rate-velocity fitting function curves

至 59.21 MPa, 增值幅度 4.48%, 应变率由 $324.57 \text{ } \epsilon^{-3}$ 到 $358.60 \text{ } \epsilon^{-3}$ 时, 峰值应力由 59.21 MPa 增至 61.18 MPa, 增值幅度为 3.33%。这表明, 随着应变率的增大, 峰值应力也会随之增加, 但后期增长缓慢。

在拉伸试验中, 峰值应力能够准确反应岩石内部的损伤已经积累到一定程度, 最终导致岩体破坏。由图 6 可知, 峰值应力随应变率的增加呈指数增长, 这是因为随着应变率的增加, 砂岩抵抗拉伸变形的能力显著增强, 但随着应变率的进一步增加, 峰值应力增加缓慢, 这是因为高应变率下会加速岩石内部的微裂纹扩展和新裂纹产生, 导致岩体损伤的积累增多, 砂岩内部的摩擦与断裂现象会持续增加, 从而导致应力集中和能量耗散的增加, 即砂岩难以变形, 最终达到一个稳定的状态。

3 冲击破坏特征分析

3.1 数字图像相关法

数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)是在 1980 年由 PETERS、RANSON 和 YAMAGUCHI

提出的, 本质是根据试件受力变形前后, 由高速摄像机采集预制散斑的位置和形态的改变, 通过计算机及相应处理的程序, 将所需要的信息直观的展现(图 7)。值得注意的是, DIC 法是依靠试件表面的特征点分布, 即散斑点。由图 7 可知, 选取散斑分布均匀的正方形区域作为参考子区, 选取该区域的中心点 M 和其任意临近点 N , 点 M 和点 N 是在试件变形后与其相对应的坐标点。基于连续性假说理论, 在形变前, 参考子区的中心点周围的一系列临近点仍是形变后目标子区的临近点。

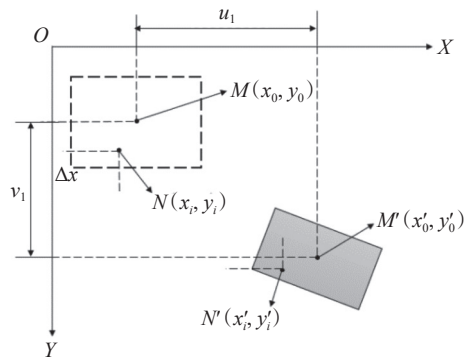


图 7 DIC 技术原理
Fig. 7 Principle of DIC technology

其中, 中心点 M 的位移场的计算公式见式(4)和式(5)。

$$x'_i = x_i + u_1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x_i - x_0) + \frac{\partial u}{\partial y}(y_i - y_0) \quad (4)$$

$$y'_i = y_i + v_1 + \frac{\partial v}{\partial x}(x_i - x_0) + \frac{\partial v}{\partial y}(y_i - y_0) \quad (5)$$

式中: x_i 、 y_i 、 x_0 、 y_0 分别为点 N 、点 M 在 x 方向、 y 方向的坐标分量; u_1 、 v_1 为从参考坐标到转换坐标在 x 方向、 y 方向的位移分量。

依据格林-拉格朗日对应变分量进行计算, 见式

(6)~式(8)。

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left\{ 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right\} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left\{ 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

式中, ε_{xx} 、 ε_{xy} 、 ε_{yy} 为水平应变、剪切应变和垂直应变。

3.2 应变场演化特征

以试样初始散斑图像作为参考图像, 分布选取不同冲击载荷下, 加载过程典型时刻的散斑图作为变

形图像, 利用 Matlab 处理软件, 对试件的散斑图像进行分析。图 8 为不同冲击载荷下砂岩的应变场位移云图。其中, 图像右方为子弹方向。由图 8 可知, 砂岩在不同加载速率下, 应变场演化特征具有高相似性, 其特征为在动态加载初期, 入射波沿压杆和试样接触面方向进入, 首先在试样右端面处形成应变集中区, 并且, 其迁移特征表现为高应变沿着应力波的传播方向(试样中心位置)随之移动, 最终贯穿整个试样, 随着应力的传播, 最大主应变值也逐渐变大。

对于不同冲击荷载的砂岩来说, 砂岩应变集中带的扩展速度也有所不同。冲击荷载较低时, 砂岩

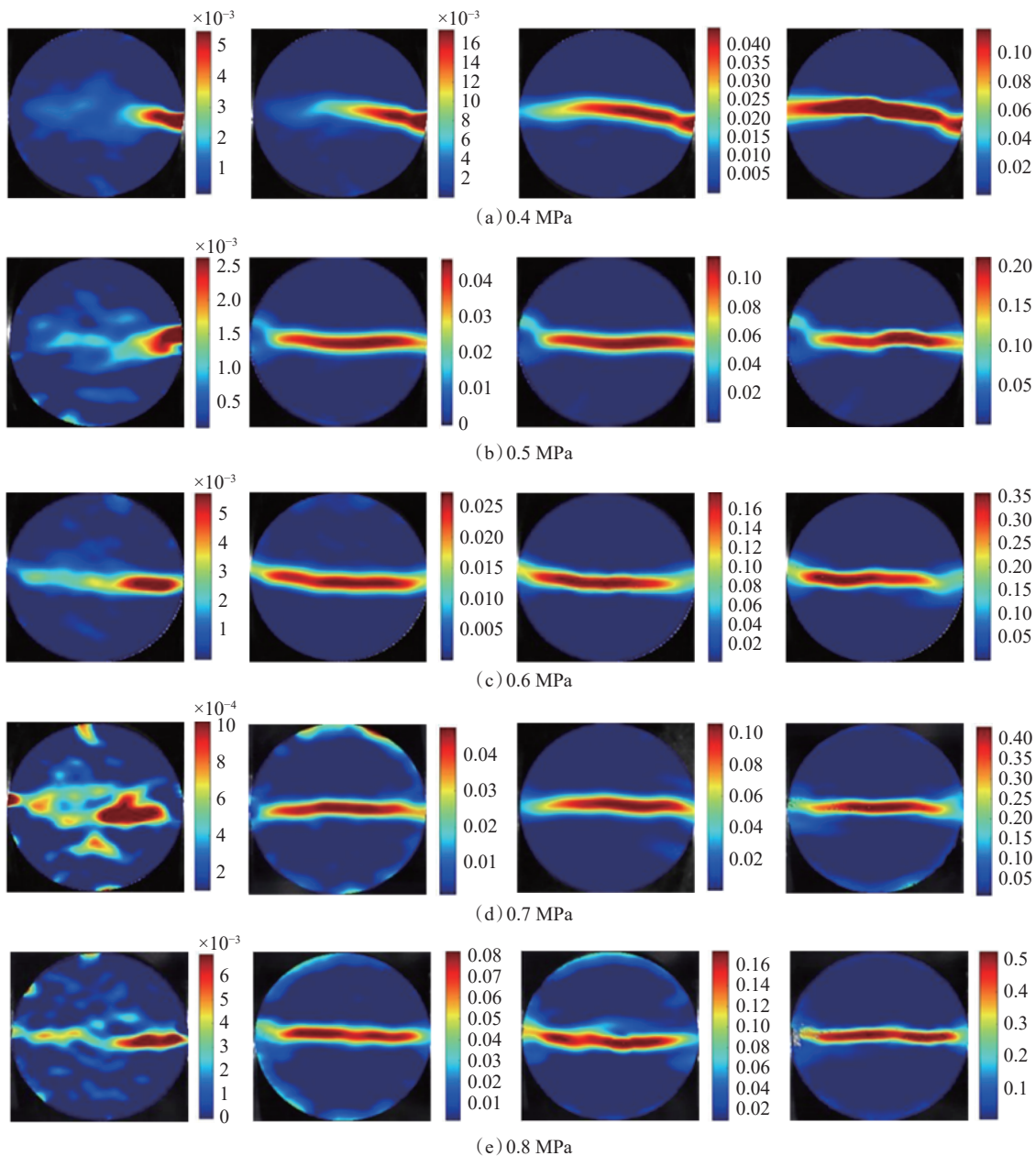


图 8 劈裂破坏演化

Fig. 8 Splitting failure evolution

(注: 色条均为应变, 无量纲)

对内部的裂隙作用较小,其扩展速度相对较慢,因此,沿试件中心位置拉伸破坏缓慢,最大主应变值也较低。而冲击荷载较高时,砂岩对内部的裂隙作用明显,扩展速度较快,发生拉伸破坏的时间也较短,最大主应变值也有较为明显的应变场效应。

3.3 动态断裂破坏特征分析

在冲击载荷作用下,用高速摄像机捕捉不同阶段砂岩裂纹萌生和扩展,研究砂岩的断裂行为是分析岩石破坏形态的有效手段。砂岩的动态断裂行为分为两个阶段:一是主裂纹开始,二是次生裂纹的衍生及主裂纹扩展。值得注意的是,砂岩受不同冲击荷载的影响,岩体裂纹扩展有着明显差异。绘制不

同冲击荷载下的砂岩劈裂破坏过程,其中,“ T ”代表轴向裂纹,“ S ”代表径向裂纹,除“ T_1 ”代表主裂纹外,其余均视为次生裂纹。符号后的数字代表裂纹产生的顺序,如图 9~图 11 所示。0.40 MPa、0.50 MPa 和 0.60 MPa 时,试样表现的断裂行为相似。

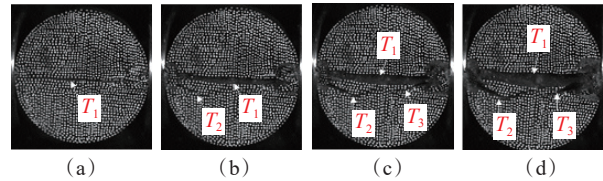


图 9 0.40 MPa 下砂岩动态断裂行为

Fig. 9 Dynamic fracture behavior of sandstone under 0.40 MPa

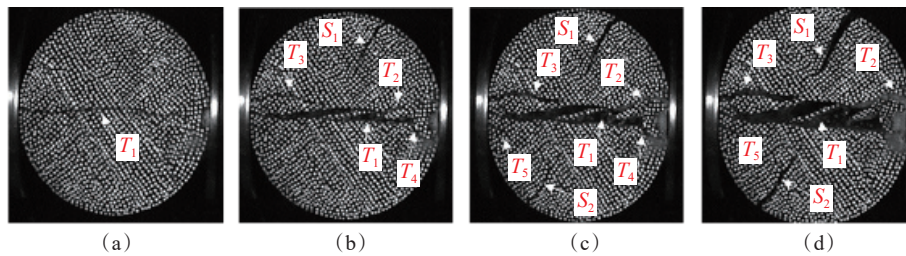


图 10 0.70 MPa 下砂岩动态断裂行为

Fig. 10 Dynamic fracture behavior of sandstone under 0.70 MPa

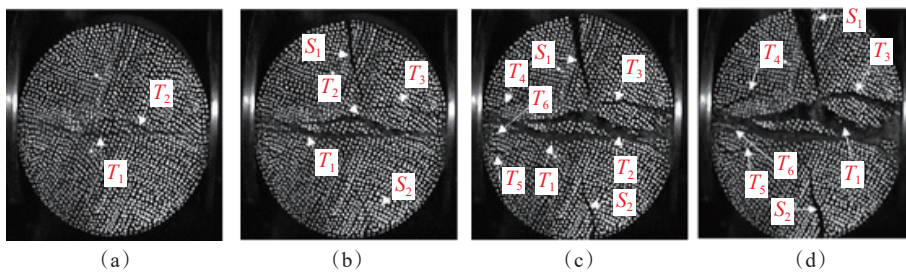


图 11 0.80 MPa 下砂岩动态断裂行为

Fig. 11 Dynamic fracture behavior of sandstone under 0.80 MPa

1)0.40 MPa 时,冲击载荷沿入射杆方向(右侧)作用于试样的接触端面,加载初期,在图 9(a)所示阶段时,首先在接触面形成应力集中(可参考 DIC),并且可以看到中间主裂纹 T_1 ,随着进一步加载,率先在接触端面出现破碎区,这是由于在压应力集中区域积累了一定的弹性应变能。在图 9(b)所示阶段时,产生次生裂纹 T_2 ,扩展方向由试件左侧向中部延伸。在图 9(c)所示阶段时,由端部破碎区产生次生裂纹 T_3 ,次生裂纹 T_2 不断发育,其扩展路径延伸至与裂纹 T_3 接触。在图 9(d)所示阶段时,试样被中间主裂纹 T_1 完全贯穿,次生裂纹 T_2 和次生裂纹 T_3 最终结合,试样发生完全拉伸破坏。

2)0.70 MPa 时,在图 10(a)所示阶段,右侧接触

端面出现小的破碎区,并伴有中间主裂纹 T_1 出现,扩展路径为直线型。在图 10(b)所示阶段,次生裂纹 T_2 和径向裂纹 S_1 相继出现,扩展路径均为直线型,并且都是沿试件端部向中心点扩展,产生的裂纹 T_3 与中心主裂纹 T_1 交汇,同时端部破碎区产生的微裂纹 T_5 ,与主裂纹 T_1 结合,这可能是由于破碎区产生非均匀性变形导致的。在图 10(c)所示阶段,出现径向裂纹 S_2 ,扩展方向为由下端面向试件中心处延伸,扩展路径为直线型。在图 10(d)所示阶段,试样左端面出现微裂纹 T_6 、径向裂纹 S_1 和径向裂纹 S_2 持续发育,最终将主裂纹 T_1 贯穿,右端面破碎区不断发育,伴随少量碎块滑落,主裂纹处有较大碎块滑落,径向裂纹 S_1 和径向裂纹 S_2 与主裂纹 T_1 共同作用,试样最终发生

拉伸剪切破坏。

3) 0.80 MPa 时, 在图 11(a) 所示阶段, 在应力波加载方向, 出现两条裂纹 T_1 、 T_2 。在图 11(b) 所示阶段, 相继出现次生径向裂纹 S_1 和次生径向裂纹 S_2 , 均由试样端面向中心处扩展, 扩展路径为直线型。由试样右端面产生次生裂纹 T_3 , 扩展路径为直线型。在图 11(c) 所示阶段, 次生裂纹 T_3 与径向裂纹 S_1 交汇, 试样左端面出现微裂纹 T_5 和微裂纹 T_6 , 次生裂纹 T_4 与主裂纹 T_1 交汇。在图 11(d) 所示阶段, 主裂纹 T_1 和次生裂纹 T_2 交汇, 形成中心主裂纹 T_1 , 并伴

随较大的碎块滑落, 径向裂纹 S_1 和次生裂纹 T_3 最终与主裂纹 T_1 交汇, 径向裂纹 S_2 持续发育, 最终主裂纹 T_1 被径向裂纹 S_1 和径向裂纹 S_2 贯穿, 试样最终发生拉伸剪切破坏。

3.4 动态冲击破坏程度分析

为了探讨冲击载荷对岩石破碎程度的影响, 现将每次动态拉伸试验后产生的碎块进行收集, 并选用不同规格的标准网筛对砂岩碎块进行筛分, 此次选用七种筛分尺寸。绘制不同粒径组碎块质量占比百分表, 如图 12 所示。



图 12 砂岩破碎图

Fig. 12 Sandstone crushing diagram

冲击破坏块度分布见表 2。由表 2 可知, 随着冲击载荷的增加, 砂岩破碎程度逐渐增大, 其主要原因: 砂岩作为一种脆弱的岩石, 其抗拉强度和抗剪强度较低, 砂岩内部存在众多微小裂隙, 在外载荷作用下, 这些裂隙极易扩展成较大裂纹, 而随着冲击载荷的增加, 会引发更大的应力和应变进一步推动砂岩裂纹的扩展和聚集, 最终导致砂岩的破碎。直径在 0~2.00 mm 区间的微小颗粒, 随着冲击载荷的增加, 其所占比重有明显的增加; 直径在 2.00~5.00 mm 的细小颗粒, 也随着冲击载荷的增加, 其占比也略有增加; 对 5.00~10.00 mm 的中型碎块, 随冲击载荷的增加, 其占比略有起伏, 但整体有增长的趋势; 对颗粒直径大于 10.00 mm 的大型碎块, 满足随着冲击速率

的增加, 而占比降低的关系。这也说明岩石的破碎程度受冲击载荷的影响, 并且对细小颗粒的影响最大。

有关分形理论的提出, 首先是由法国数学家 MANDLEBROT 提的, 是作为那些已破碎的、没有几何关系的形状问题的主要处理手段。对于岩石的破碎块度常采用质量-等效尺寸进行计算, 得到碎块分布方程见式(9)和式(10)。

$$D = 3 - \alpha \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\lg(m/m_R)}{\lg R} \quad (10)$$

式中: D 为碎块的分形维数; α 为在双对数坐标下的直线的斜率; m 为试件总质量; m_R 为颗粒直径在 R 内

表 2 冲击破坏块度分布

Table 2 The fragmentation distribution of impact failure

编号	速率/ (m/s)	破碎砂岩筛分质量比/%									b	分形维数 D	相关系数 R
		0~ 0.50 mm	0.50~ 0.75 mm	0.75~ 1.00 mm	1.00~ 1.50 mm	1.50~ 2.00 mm	2.00~ 5.00 mm	5.00~ 10.00 mm	10.00~ 20.00 mm	>20.00 mm			
A-0.4-1	4.96	0.34	0.08	0.07	0.14	0.28	0.95	1.46	16.15	80.53	0.75	2.25	0.979
A-0.4-2	5.01	0.18	0.06	0.07	0.13	0.08	0.62	1.15	14.49	83.22	0.80	2.20	0.998
A-0.4-3	4.98	0.32	0.09	0.09	0.17	0.14	1.04	4.27	9.69	84.19	0.76	2.24	0.991
A-0.5-1	5.66	0.38	0.12	0.11	0.21	0.18	0.91	7.21	7.14	83.74	0.69	2.31	0.994
A-0.5-2	5.66	0.54	0.17	0.16	0.29	0.26	1.28	4.66	3.08	89.56	0.70	2.30	0.998
A-0.5-3	5.83	0.42	0.17	0.16	0.23	0.29	0.89	2.11	6.81	88.92	0.71	2.29	0.991
A-0.6-1	6.23	1.16	0.28	0.35	0.59	0.69	1.91	1.63	21.81	71.58	0.65	2.35	0.991
A-0.6-2	6.35	0.53	0.09	0.10	0.20	0.47	0.83	1.44	15.12	81.22	0.66	2.34	0.967
A-0.6-3	6.33	0.68	0.14	0.38	0.21	0.37	1.12	2.56	6.13	88.41	0.64	2.36	0.977
A-0.7-1	7.15	1.07	0.25	0.31	0.36	0.41	1.65	3.83	10.99	81.13	0.57	2.43	0.948
A-0.7-2	7.29	1.44	0.27	0.29	0.38	0.35	1.19	2.34	18.58	75.16	0.58	2.42	0.998
A-0.7-3	7.21	1.07	0.38	0.34	0.36	0.33	1.30	3.43	29.27	63.52	0.52	2.48	0.969
A-0.8-1	8.02	1.05	0.32	0.34	0.38	0.43	1.28	3.93	6.59	85.68	0.56	2.44	0.986
A-0.8-2	8.19	1.44	0.35	0.42	0.51	0.67	1.49	6.30	3.54	85.28	0.54	2.46	0.985
A-0.8-3	8.18	1.21	0.30	0.31	0.43	0.53	1.35	2.28	7.51	86.08	0.54	2.46	0.992

的试件质量和。

根据表 2 绘制出不同冲击荷载下的砂岩块度分形的破碎分布曲线, 如图 13 所示。砂岩受外载荷作用时, 微小裂纹会扩展成较大的破裂裂纹, 随着外力的作用最终导致砂岩的宏观破裂, 裂纹的扩展与聚集是一个自相似的过程, 即砂岩破碎后的碎块也具有相同的自相似性。分形维数作为衡量碎块的自相似程度的手段, 可以揭示砂岩的破碎机制和规律。由图 13 可知, 同等冲击条件下砂岩各区间的碎块占比略有不同, 整体并且随着冲击荷载的增加, 砂岩破碎分形性质的差异愈发明显, 砂岩的破碎程度增大, 坐标中曲线的线性相关性较好, 印证了试件破碎程度越高, 需要的冲击荷载的强度越大。砂岩内部裂隙随冲击荷载的改变, 参与岩石破坏的比重也有所

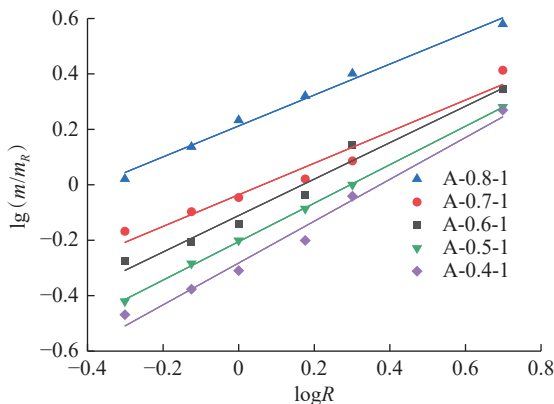


图 13 砂岩块度质量分布

Fig. 13 Sandstone blockness mass distribution

不同, 冲击载荷较低时, 砂岩原生裂纹受影响小, 砂岩破碎程度低; 而随着冲击荷载的增加, 原生裂纹受冲击荷载作用增大, 参与砂岩破坏的比重增加, 进一步导致砂岩破碎程度增加, 但 0.70 MPa 较 0.80 MPa 的分形维数相似, 表明原生裂纹参与试件破坏的程度是有一定限度的。

4 结论

1) 砂岩破坏的应力-应变曲线分为三个阶段: 弹性变形阶段、塑性阶段和破坏阶段。其中, 峰值应力表现出应变率相关性, 即随着应变率的增加, 峰值应力呈指数型增加, 最终增加趋势近于缓慢。

2) 依据 DIC 技术, 展现砂岩破坏变形的全过程, 在施加外载荷时, 载荷越大, 裂纹扩展越快, 但对径向裂纹的影响较小。讨论砂岩的破坏模式, 低载荷作用下, 试件的破坏受内部裂纹影响较小, 沿加载方向横向扩展, 最终发生整体拉伸破坏, 当荷载增加时, 试件次生裂纹增多, 发生沿径向裂纹方向的剪切破坏, 试样最终发生整体拉伸-剪切破坏。

3) 砂岩破坏程度受载荷作用明显, 随着荷载的增加, 直径在 0~0.50 mm 的微小颗粒和 0.50~2.00 mm 的细小颗粒的比重显著增加, 破碎块度不断减小, 砂岩的破碎程度更为剧烈。

参考文献 (References):

[1] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Jour-

- nal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [2] 苏士龙, 顾晓伟, 张力, 等. 深部层状岩体巷道承载特性的物理模拟试验研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(1): 123-128.
SU Shilong, GU Xiaowei, ZHANG Li, et al. Physical simulation test study on bearing characteristics of deep layered rock mass roadway[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(1): 123-128.
- [3] 龙翼, 雷刚, 陈治洋, 等. 爆破扰动对巷道围岩损伤的数值模拟[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 118-124.
LONG Yi, LEI Gang, CHEN Zhiyang, et al. Numerical simulation of surrounding rock damage in roadway under high stress blasting disturbance[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(11): 118-124.
- [4] 张岩, 李庆文, 李森, 等. 不同应变率下砂岩的动态力学特性研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(S2): 162-166.
ZHANG Yan, LI Qingwen, LI Miao, et al. Dynamic mechanical characterization of sandstone under different strain rates[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 162-166.
- [5] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846-866.
- [6] 刘少虹, 秦子晗, 娄金福. 一维动静加载下组合煤岩动态破坏特性的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2064-2075.
LIU Shaohong, QIN Zihan, LOU Jinfu. Experimental study of dynamic failure characteristics of coal-rock compound under one-dimensional static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2064-2075.
- [7] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 34(9): 2433-2441.
GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2433-2441.
- [8] 平琦, 马芹永, 张经双, 等. 高应变率下砂岩动态拉伸性能 SHPB 试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3363-3369.
PING Qi, MA Qinyong, ZHANG Jingshuang, et al. SHPB test and analysis of dynamic tensile performance of sandstone under high strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3363-3369.
- [9] 纪杰杰, 李洪涛, 吴发名, 等. 冲击荷载作用下岩石破碎分形特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 176-183.
JI Jiejie, LI Hongtao, WU Faming, et al. Fractal characteristics of rock fragmentation under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 176-183.
- [10] 李晓锋, 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 rocks subject to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393-2405.
- [11] 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 load[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 1-5.
- [12] 陈璐, 郭利杰. 高应力条件下深部花岗岩冲击破碎耗能试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 354-359.
CHEN Lu, GUO Lijie. Experimental study on crushing energy dissipation characteristics of deep granite under high geostress conditions[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 354-359.
- [13] LIN Q. Identification of rock fracture by imaging techniques[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2010.
- [14] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于 DIC 的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 511-518.
SUN Wenjin, JIN Aibing, WANG Shuliang, et al. Study on sandstone split mechanical properties under high temperature based on the DIC technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 511-518.
- [15] 范杰, 朱星, 胡桔维, 等. 基于 3D-DIC 的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1009-1019.
FAN Jie, ZHU Xing, HU Juwei, et al. Experimental study on crack propagation and damage monitoring of sandstone using three-dimensional digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1009-1019.
- [16] 齐飞飞, 张科, 谢建斌. 基于 DIC 技术的含不同节理密度类岩石试件破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1669-1680.
QI Feifei, ZHANG Ke, XIE Jianbin. Fracturing mechanism of rock-like specimens with different joint densities based on DIC technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1669-1680.
- [17] 李建旺. 基于数字图像技术的含双预制裂隙类岩石试件力学特性细观研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(9): 168-174.
LI Jianwang. Meso research on the mechanical properties of rock specimens with double pre-existing fissures based on digital image correlation[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(9): 168-174.
- [18] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Pre-peak and post-peak rock strain characteristics during uniaxial compression by 3D digital image correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7): 2541-2554.
- [19] 王磊, 张帅, 刘怀谦, 等. 冲击荷载下含瓦斯煤力学特性与破坏特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(6): 1323-1334.
WANG Lei, ZHANG Shuai, LIU Huaiqian, et al. Mechanical properties and damage characteristics of gas-bearing coal under impact loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(6): 1323-1334.
- [20] 李小龙, 李进, 黄辉, 等. 加载速率对弱胶结砂岩劈裂特性的影响研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(2): 165-172.
LI Xiaolong, LI Jin, HUANG Hui, et al. Effect of loading rate on splitting characteristics of weakly cemented sandstone[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(2): 165-172.
- [21] 赵毅鑫, 龚爽, 黄亚琼. 冲击荷载下煤样动态拉伸劈裂能量耗散特征实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2320-2326.
ZHAO Yixin, GONG Shuang, HUANG Yaqiong. Experimental study on energy dissipation characteristics of coal samples under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2320-2326.