

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0152

基于拉格朗日反分析法的砂岩动态力学特性*

张子健¹, 陈 骏¹, 朱 锐¹, 余浩然¹, 李冉鑫¹, 张渊通²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 为深入研究深部地层中砂岩在冲击荷载作用下的动态力学特性, 建立了一种改进的霍普金森压杆实验系统, 对灰砂岩长杆试件开展了不同加载速率的动态压缩实验, 并结合高速数字图像相关技术(DIC)监测试件表面位移场和应变场的演化过程, 探讨了灰砂岩在近场冲击加载下的拉伸破坏的规律。从 DIC 分析得到的位移场中提取出不同质点位移时程曲线, 进行了拉格朗日反分析算法计算, 获得了灰砂岩材料的全场应力-应变规律。结果表明: 灰砂岩长杆试件以拉伸破坏为主, 且出现了近加载端破碎、远离加载端层裂的现象; 灰砂岩长杆试件的动态抗压强度因子随应变率增大而增大, 有明显的应变率效应; 随着加载速率升高, 各测点应力峰值与应变峰值均呈增大趋势; 在同一加载速率下, 灰砂岩长杆的应力-应变曲线呈现出近端测点曲线包络远端测点曲线的现象。

关键词: 动态力学特性; 数字图像相关法; 拉格朗日反分析; 砂岩; 动态强度增强因子

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Experiment on dynamic mechanical properties of sandstone based on Lagrangian inverse analysis method

ZHANG Zijian¹, CHEN Jun¹, ZHU Rui¹, YU Haoran¹, LI Ranxin¹, ZHANG Yuantong²

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing, 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the dynamic mechanical properties of sandstone in deep strata under impact loads, an improved Hopkinson pressure bar experimental system was established. The traditional Hopkinson pressure bar's transmission rod was replaced with a long rod specimen made of gray sandstone to better simulate deep geological conditions. Point spalling treatment was applied to the specimen, and strain gauges were meticulously affixed at critical measurement points. Dynamic compression experiments were meticulously conducted on the gray sandstone long rod specimen at various loading rates (9.57, 14.78, 19.32 and 27.60 m/s). Utilizing high-speed digital image correlation (DIC) technology, the evolution of displacement and strain fields on the surface of the specimen throughout each test was closely monitored. This advanced technique enabled a detailed exploration of how the gray sandstone responded to near-field impact loading, particularly focusing on its tensile failure characteristics. Employing the Lagrangian inverse analysis method, displacement-time curves for different mass points derived from the DIC analysis of displacement fields were extracted. These curves provided critical data to compute the stress-strain behavior of the gray sandstone material under dynamic loading conditions. The study reveals several key findings: the gray sandstone long rod specimen predominantly exhibits tensile failure, with distinct patterns of fragmentation near the loading end and layer cracking away from it. Moreover, the dynamic compressive strength factor of the gray sandstone long rod specimen shows a notable increase with higher strain rates, indicating a significant strain rate effect. Correspondingly, both

* 收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(51934001); 国家重点研发计划(2021YFB3401501)

第一作者: 张子健(2001—), 男, 硕士研究生, 1264928116@qq.com

通信作者: 陈 骏(1990—), 男, 博士, 副编审, cj0354@cumtb.edu.cn

stress and strain peaks observe an upward trend at various measurement points with increasing loading rates. Remarkably, under identical loading rates, stress-strain curves of the gray sandstone long rod specimen exhibit a unique phenomenon where curves from measurement points closer to the loading end envelop those from points farther away. This observation underscores the complex nature of dynamic loading responses in geological materials. Overall, this comprehensive investigation provides essential theoretical insights and methodological references for understanding the dynamic behavior of sandstone within deep geological formations under impact loads. The findings offer valuable contributions to engineering practices concerned with the stability and resilience of underground structures subjected to dynamic loading conditions.

Keywords: dynamic mechanical properties; digital image correlation (DIC); Lagrangian inverse analysis; sandstone; dynamic increase factor (DIF)

随着建设需求和技术的发展以及浅部资源的逐渐衰竭,煤炭开采、巷道施工等地下深部空间的开发和利用已日益成为新常态^[1-2],然而在深部煤炭资源的开采过程中,高强度采掘活动会产生强扰动力,使得上覆地层中的砂岩基本顶遭到动载荷冲击^[3],这会引起工作面顶板的垮塌,并对采场产生矿压冲击^[4],严重影响工程的安全,因此深入研究砂岩的动态力学特性有着重要的工程意义。

常用于研究冲击荷载下材料的动态力学特性方法主要有 2 种,分别为分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验^[5-7]与波传播反演分析实验^[8-10]。SHPB 实验基于两项基本假设,即一维弹性波假设和应变均匀性假设,然而在对岩石、混凝土、陶瓷等脆性材料进行实验时,由于其破坏应变较小,可能在加载尚未结束前就已经发生断裂破坏,造成试件两端应力差距较大,无法满足应力平衡条件^[11],导致实验数据出现错误。波传播反演分析实验是一种基于材料中多点测量的波传播信息来反推材料的动态本构行为^[12]的实验方法,其中较为广泛应用的是由 Fowles^[13]、Cowperthwaite 等^[14]和 Grady^[15]提出并发展的拉格朗日反分析法(简称拉氏反分析法),该方法无需事先对实验材料进行任何本构假定,通过测量应力波传播过程中的一系列力学量,结合守恒方程推算出其余未知力学量的具体数据,因此该方法能够较好的运用到脆性材料的动态力学研究之中^[16-19]。近年来,众多学者对拉氏反分析法的运算与理论作出了补充与改进。陶为俊等^[20]提出了基于最小二乘法的拉格朗日反解法并通过该方法揭示出混凝土材料与应变率相关的弹-塑性本构关系的特征。李运良等^[21]通过在重塑黄土试样内布设多根电磁粒子速度计,对实测粒子速度波形进行了拉格朗日反分析,揭示了重塑黄土介质的本构滞回效应。丁圆圆等^[22]基于路径线法和零初始条件,提出了一种改良型拉氏反分析方法。朱珏^[23]针对利用大直径 Hopkinson 压杆来获取混凝土本构关系时的难题,发展了 Hopkinson 杆技术与改进的基于路径线法的拉格朗日反分析相结合的新方法,成功地获得了 C30 混凝土试样的在高应变率下的动态应力-应变关系。

虽然拉氏反分析法在理论与计算方面已愈发成熟,可是其在实验研究中的使用仍然较少,对于应力与应变历史的测量方法,限制了其在力学实验中的大范围使用。而高速数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术是近年来广泛使用的一项基于材料表面变形的光学非接触测试技术,可对试件表面的位移场、速度场和应变场进行实时观测,且不对试件本身造成任何影响,已大量运用于材料的动态力学实验中^[24-33],此技术可为拉氏反分析法在实验中的运用提供准确的数据支持^[34]。

针对砂岩脆性材料的动态力学特性研究,本文以改进的分离式霍普金森压杆装置作为加载手段,使用超高速相机来实时监测灰砂岩长杆表面的散斑图像,借助 VIC-2D 软件进行图像处理分析,获得试件表面质点的位移场和应变场,通过拉格朗日反分析算法计算并分析灰砂岩长杆试件的动态破坏过程及其全场应力-应变的变化规律。

1 实验原理与方案

1.1 DIC 方法原理

高速数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术是一种先进的无损实验测量方法,通过高速相机所拍摄的图像,匹配所选研究区域的不同图片变化过程以获取全场位移数据,如图 1 所示, A 区域为选

定点 $P(x_0, y_0)$ 为中心的参考子区, 该区域内存在一定数量且随机分布的散斑, 当试件受荷载作用时, A 区域改变了空间位置, 在荷载作用发生后的图像中寻找与参考子区相关系数最大值的区域 A' , 对区域内的点集进行坐标比较, 从而得到位移场 \mathbf{u} 和应变变量 ε_{xx} 与 ε_{yy} 。

其中目标子区中任意一点 Q' 的坐标均可通过以点 $P(x_0, y_0)$ 为中心的参考子区计算表示:

$$x'_i = x_i + u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta y \quad (1)$$

$$y'_i = y_i + u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u_y}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

式中: u_x 、 u_y 分别为散斑点位移的横向分量与纵向分量。

应变变量的计算公式为:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left[2 \frac{\partial u_y}{\partial y} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: ε_{xx} 、 ε_{yy} 分别为沿试件轴向方向和径向方向的应变。

1.2 拉格朗日反分析法原理

一维应力杆中的应变过程在拉格朗日坐标下的质量守恒和动量守恒方程为^[13]:

$$\frac{\partial v}{\partial X} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial X} \quad (6)$$

式中: ρ 为材料的平均密度, v 、 σ 和 ε 分别为质点的速度、应力和应变, X 和 t 分别为计算位置的拉格朗日坐标和时间。

为了解决实验数据点数量有限的问题, 在执行微积分操作时, 可借鉴 Grady^[15] 提出的路径线方法, 如图 2 所示。这种方法通过数学建模精确追踪和计算变化路径上的物理量, 增强了分析的精度和可靠性, 为材料力学领域中的一种有效的数学工具法。

通过拉格朗日物质点的量计线, 我们获取了材料在 V 、 X 、 t 三维空间中的力学状态。其中, V 是力学量, 此处代指应力和应变。以应力 σ 为例, 其沿路径线 p 的全微分为:

$$\left(\frac{d\sigma}{dX} \right)_p = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial X} \right)_t + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_X \left(\frac{dt}{dx} \right)_p = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial X} \right)_t + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_X \left(\frac{1}{X} \right)_p \quad (7)$$

结合式 (6) 和式 (7), 将应力对空间位置的偏微分转为应力对时间的偏微分, 并改写为相应的差分方程形式为:

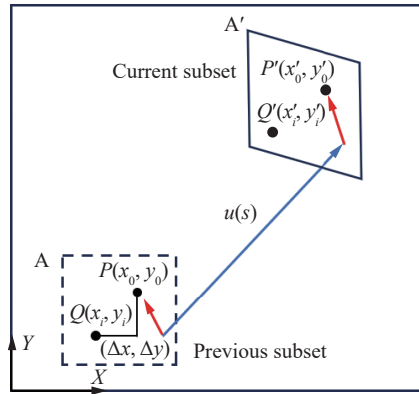


图 1 DIC 方法基本原理
Fig. 1 Basic principle of DIC method

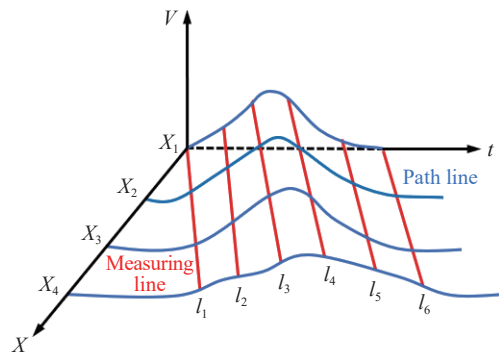


图 2 路径线法示意
Fig. 2 Schematic of path line method

$$\sigma_{i,j} = \sigma_{i-1,j} + \left[-\rho_0 \frac{\partial v_{i-1,j}}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_{i-1,j}}{\partial t} \left(\frac{dt_{i-1,j}}{dX} + \frac{dt_{i,j}}{dX} \right) \right] (X_i - X_{i-1}) \quad (8)$$

此外, 路径线的构造与全微分公式的应用需结合其他实验和理论手段, 综合评估材料性能。

拉氏反分析法在材料力学中至关重要, 它通过精确建模材料的应力-应变关系来揭示材料行为。在实际操作中, 路径线的构造对于分析的精度具有显著影响。路径线需紧密贴合实际情况, 以减小误差, 否则可能导致对材料性能的误判。因此, 路径线方法中常假设试样为半无限长杆以简化问题, 但如此可能无法完全反映复杂条件下的材料行为。值得注意的是, 拉氏反分析法并非必须依赖路径线。当实验数据充足时, 无需引入路径线, 可直接进行分析求解:

$$\varepsilon(X, t_0 + \Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial X} \right)_t dt + \varepsilon(X, t_0) \quad (9)$$

$$\sigma(X_0 + \Delta X, t) = \int_{X_0}^{X_0 + \Delta X} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_x dX + \sigma(X_0, t) \quad (10)$$

现代光学测量技术的发展为此提供了支持, 通过高精度设备获取速度(位移)时程曲线, 实现空间坐标的高精度积分, 可以在仅有一维应力波假设的前提下直接计算应力应变历史。

1.3 实验材料与实验装置

实验材料选用来自四川自贡的灰砂岩, 对灰砂岩进行取芯、切割和打磨, 确保试件端面不平行和不垂直度均在 0.02 mm 以内, 并按照国际岩石力学学会推荐尺寸加工, 得到直径 50 mm、长度 400 mm 的标准圆柱体灰砂岩长杆试件, 试件的静态物理参数如表 1 所示。

表 1 灰砂岩的物理参数

Table 1 physical parameters of gray sandstone

密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
2680	0.19	36.38	3.29	4.43

由于灰砂岩试件表面的自然纹理和对比度不能满足 DIC 分析所需精度, 因此需要在灰砂岩试件表面进行手动点斑。为满足后续应变波形的分析需要, 避开散斑区域, 沿灰砂岩试件表面轴向方向, 距端面距离分别为 100、150、200、250 及 300 mm 处粘贴应变片; 同时为减小实验误差, 选择在试件表面上述位置的环向对称点再贴一个应变片, 以便后续与 DIC 记录结果进行标对, 验证实验的准确性。

图 3 为灰砂岩长杆试件冲击实验装置, 将 SHPB 系统的透射杆替换为灰砂岩长杆散斑试件, 试件撞

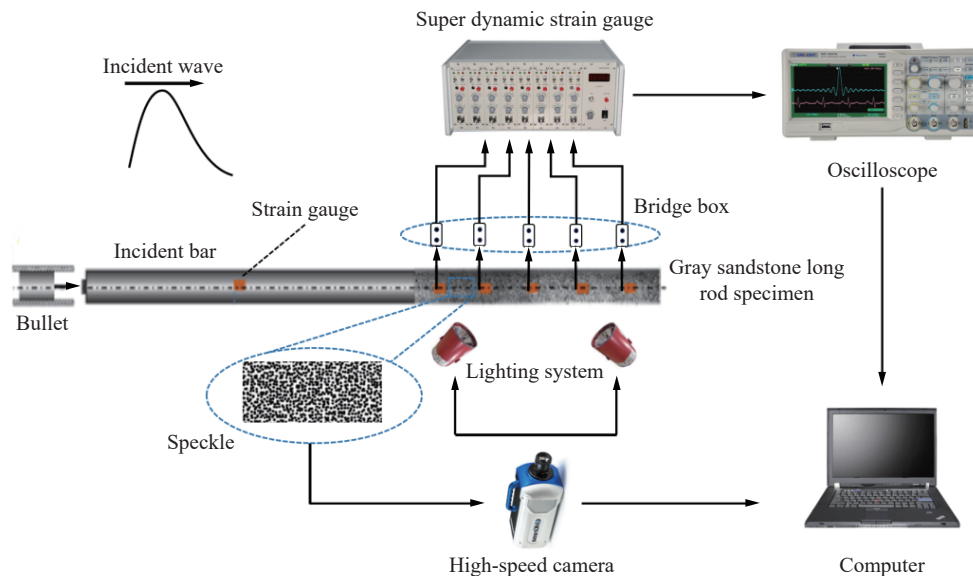


图 3 灰砂岩长杆试件冲击实验装置

Fig. 3 Impact test device of gray sandstone long rod specimen

击端涂抹凡士林并与入射杆端面紧密贴合。通过改变冲击气压来实现不同应变率加载, 共设置了 4 种不同的冲击气压: 0.20、0.25、0.30、0.35 MPa, 对应的子弹冲击速度分别为 9.57、14.78、19.32、27.60 m/s。

图像采集系统主要由超高速摄像机和闪光灯构成, 超高速相机的拍摄帧率为 2×10^5 Hz, 图像分辨率为 924×768 , 曝光时间为 500 ns。电测系统为超动态应变仪, 为提高信噪比, 通常采用大桥压小增益的参数设置, 考虑到噪声信号相对较小, 本次实验选用的采样率为 10 MHz, 应变片灵敏度系数为 2, 桥压设定为 2 V, 增益设定为 100。

实验时高压气体推动子弹撞击入射杆, 当压缩波传递到钢杆中部, 使得该位置处的应变达到一定的幅值, 从而触发图像采集装置, 随后压缩波继续向前传播透射进入灰砂岩长杆试件中, 当压缩波传递至试件撞击端轴向距离 100 mm 处时, 触发应变采集装置, 最终将收集到的各项数据传入计算机中进行下一步分析。

2 DIC 实验结果分析

2.1 破坏形态

不同的冲击气压加载所对应的灰砂岩长杆试件宏观破坏形态如图 4 所示。当加载速率较低时, 试件整体外观未见明显破坏。而在高加载速率下, 试件加载端区域发生破碎, 其表面和内部出现细长的断裂带, 呈现出拉伸破坏的特征; 远离加载端区域, 试件表面出现环向断裂裂纹, 且断口较平整, 呈现出层裂破坏的特征。分析表明, 近加载端应变峰值较大, 达到了材料的拉伸断裂应变; 远端入射压缩波与自由面反射的拉伸卸载波相互叠加, 导致最大应力达到试件的最大抗拉强度, 形成了层裂现象。随着冲击速度增加, 近端破坏范围向试件中部扩展, 破坏程度显著增大, 远端自由面附近的层裂裂纹条数也增加到了 2 条。

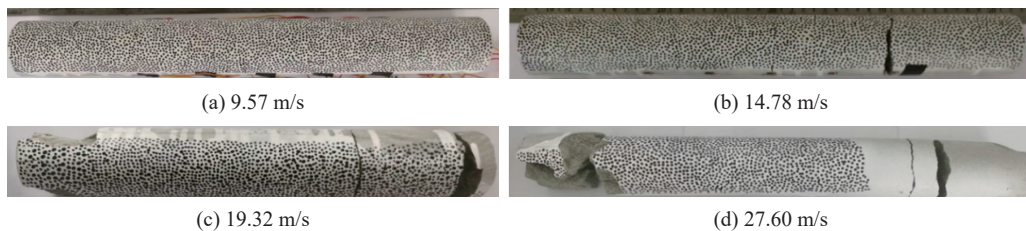


图 4 不同冲击气压下灰砂岩宏观破坏形态

Fig. 4 Macroscopic damage pattern of gray sandstone under different impact pressures

2.2 DIC 数据准确性验证

为确保 DIC 数据的准确性, 便于进行后续拉氏反分析算法的计算, 需对该数据进行验证分析。图 5 展示了相同冲击速度下, 灰砂岩长杆上应变片测得的轴向应变与同一截面上由 DIC 方法分析得到的应变时程曲线对比, 两种方法得到的应变时程曲线在形态上较为相似, 尤其是入射加载段, 变化趋势和斜率均保持一致, 卸载端下降趋势相同, 且均存在压缩和拉伸应变; 两种方法测得的应变曲线的起跳时间几乎相同, 测点之间的起跳间隔均为 $25 \mu\text{s}$, 同一测点处应变率水平较为接近, 应变峰值随着距加载端轴向坐标的增加而衰减。

然而, DIC 计算结果极易因相机拍摄效果和

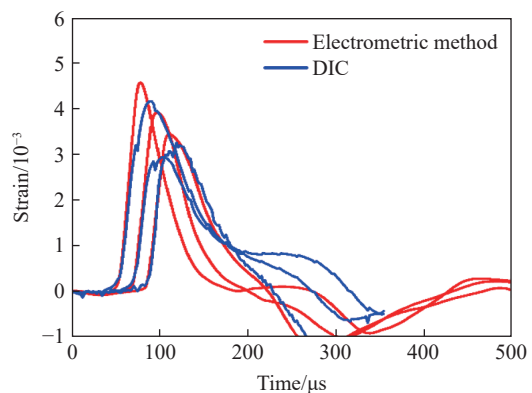


图 5 DIC 计算应变与电测应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of strain curves by DIC calculation and electrical measurement

散斑质量影响,此外冲击载荷下试件的运动也会影响到 DIC 计算的精度;另一方面,相较于电测法 4×10^5 Hz 的采集频率,高速相机的拍摄帧率仅能达到 2×10^5 Hz,因此在应变率水平和峰值应变上,高速相机记录的数据通常要小于电测法获得的数据,同时在曲线的光滑程度上也不及电测法得到的曲线。尽管如此,从总体趋势上来看,两种方法的曲线在加载段、卸载段以及叠加段都能形成良好的对应。综上所述,得以验证由 DIC 数字图像方法得到数据的准确性。

2.3 DIC 应变位移云图分析

利用高速相机记录冲击载荷下灰砂岩表面应变场、位移场及动态破坏过程。通过将照片导入 VIC-2D 软件后使用标准化平方差相关函数进行计算,得到了不同时刻灰砂岩表面轴向应变的变化以及裂纹扩展过程,如图 6 所示,其中:率先传入试件的压缩应力波产生的应变为负值,而拉伸应力波在试件表面产生的轴向应变为正值,各图右下角数字为相机拍摄的照片序号。

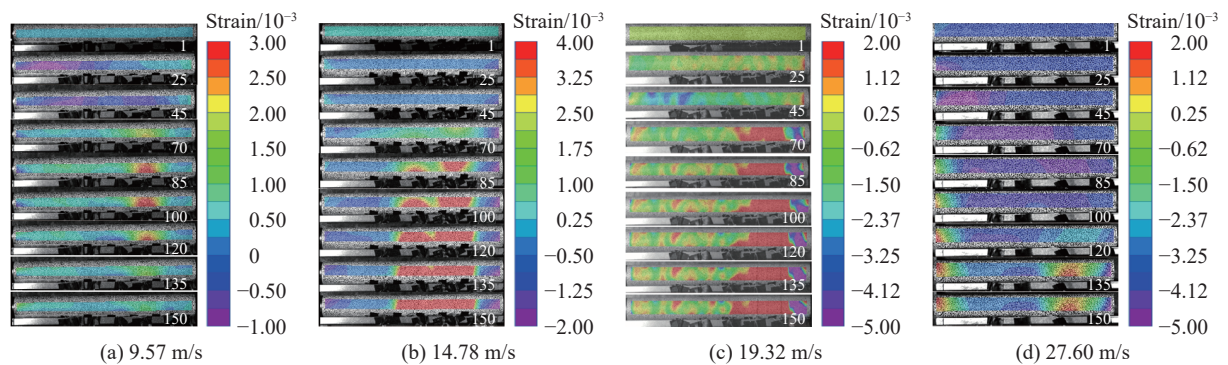


图 6 不同冲击速度下应变的 DIC 计算云图

Fig. 6 Strain cloud diagram by DIC calculation under different impact velocities

以图 6(b) 为例,实验时入射杆撞击岩石长杆试件,入射压缩应力波从加载端往自由面方向传播,到达自由面处反射成拉伸波,反射波从自由面端往加载端传播。从第 70 张图片可以看出,当拉伸波开始传播时,靠近加载端部分仍呈现压缩形态,表明压缩应力波尚未结束卸载状态。随着冲击速度增大,加载端近区处的应变达到了材料的断裂应变,该区域产生张拉破坏;同时,加载远端处,灰砂岩试件的应变达到最大拉应变,极易产生拉伸破坏。

比较四组实验结果发现,在 9.57 m/s 冲击速度下,试件两端出现应力集中区且持续了较长时间,同时在距加载端 300 mm 附近,出现拉应变区。在 14.78 m/s 冲击速度下,试件整体保持完整,两端出现明显的拉应变区,从第 85 张照片到第 150 张照片,拉应变始终都未发生明显变化,结合宏观破坏结果分析可知该区域已发生破坏,可认为此处的应变达到了试件的断裂应变。在 19.32 m/s 冲击速度下,加载近端发生张拉破坏;加载远端叠加应力达到试件的最大拉应力时,试件表面开始出现拉伸裂纹,裂纹首先出现在近自由面处,随着拉伸裂纹的不断扩展,形成新的自由面,试件表面又出现后续新拉伸裂纹,此时应变持续达到材料的断裂应变,因此出现试件两端及中部均发生应变数值未变动的情况,相较于低速冲击,断裂区域范围更大。

3 拉格朗日反分析法计算结果与分析

3.1 数据处理

在使用拉氏反分析法式 (10) 进行应力场历史求解时,首先需要对速度场进行微分以得到加速度场,然后在空间区域上对加速度场进行积分。由于本次实验中未能直接测取速度场,而是先通过 DIC 技术获取试件表面的质点位移时程曲线,因此在求取加速度场时,需将位移场对时间进行二次微分。但在实际进行具体计算时,由于测量方法与实验仪器都无法避免地会对测得数据产生一定的误差,而即便是极

其微小的误差也可能会对二次微分的计算结果产生较大的影响^[24-26], 所以此处需对位移场进行进一步修正, 同时结合稳定的微分算法, 才能尽可能保证拉氏反分析法的准确性。本文采用高斯平滑对位移场进行优化后导入 Matlab 程序, 对其一次求导得到速度场, 如图 7 所示。

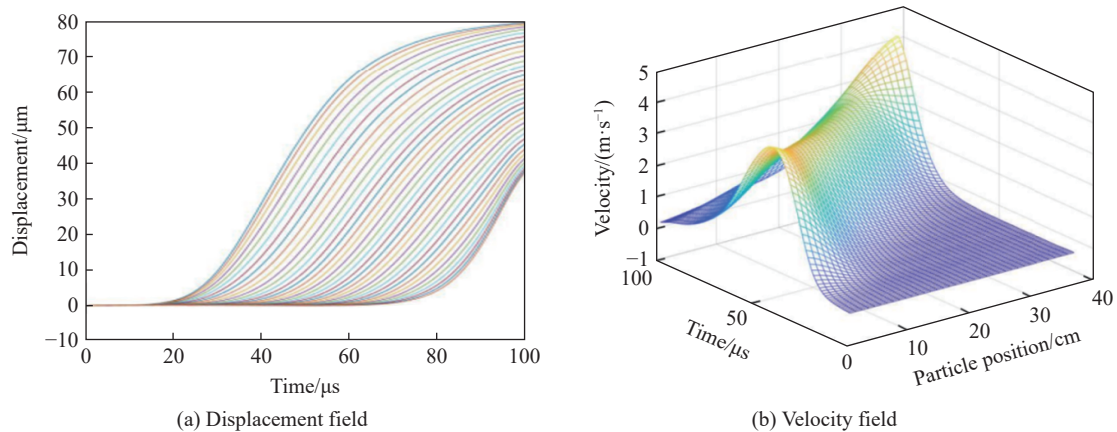


图 7 拉氏反分析法计算得到的位移场和速度场

Fig. 7 Displacement field and velocity field calculated by Lagrangian inverse analysis

图 8 展示了通过拉氏反分析法计算, 将速度场分别对时间和拉格朗日坐标进行偏导计算, 得到 9.57 m/s 冲击速度下灰砂岩长杆表面轴向应力和应变的发展变化情况, 其余各组均按此方法计算, 由图可知, 在加载时间一定时, 随着距加载端位置越远, 灰砂岩试件表面轴向应变越小, 灰砂岩所受冲击应力越小。由此提取同一试件各点处的应力、应变时程曲线, 分析不同加载幅值下的灰砂岩动态本构关系。

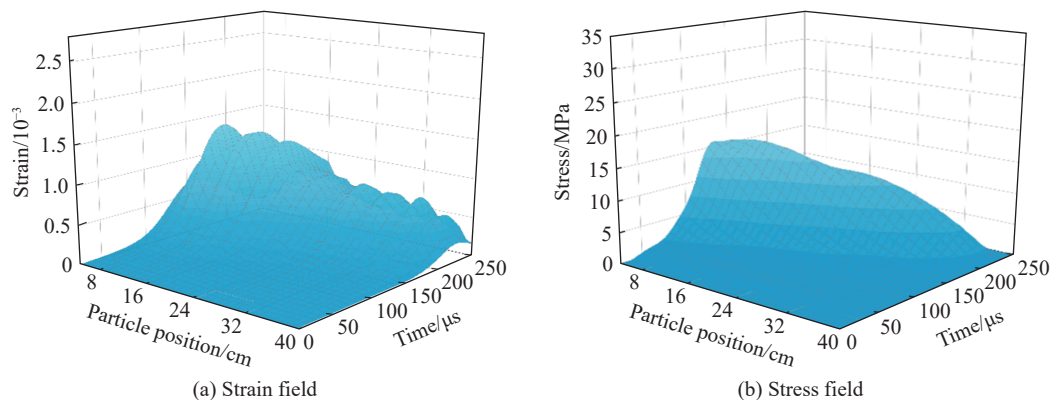


图 8 拉氏反分析法计算得到的应变场和应力场

Fig. 8 Strain field and stress field calculated by Lagrangian inverse analysis

3.2 准确性验证

为验证拉氏反分析法计算数据的可靠性, 将该方法计算得到的应变场中各测点位置的应变时程曲线提取并绘于图 9。将图 9 与 DIC 方法测得的应变结果(图 5)进行对比验证。首先, 在采集时间上, 该方法只提取了压缩波未与拉伸波叠加时的位移曲线进行计算, 这导致图中的应变曲线下降段没有出现降至零点的情况, 但应变峰值已经可以确定; 其次, 拉氏反分析法的曲线光滑程度明显优于 DIC 法, 便于观察与分析计算; 最后, 从总体波形上看, 两种方法测得的曲线在变化趋势上均具有“强加载、缓卸载”的相似性。

在不同冲击速度下, 拉氏反分析法与 DIC 法于同一测点处峰值应变对比如图 10 所示, 其对应差值与上升趋势形成明显相似关系, 且平均差值仅为 7.32%。综上对比验证了拉氏反分析法的合理性与准确性。

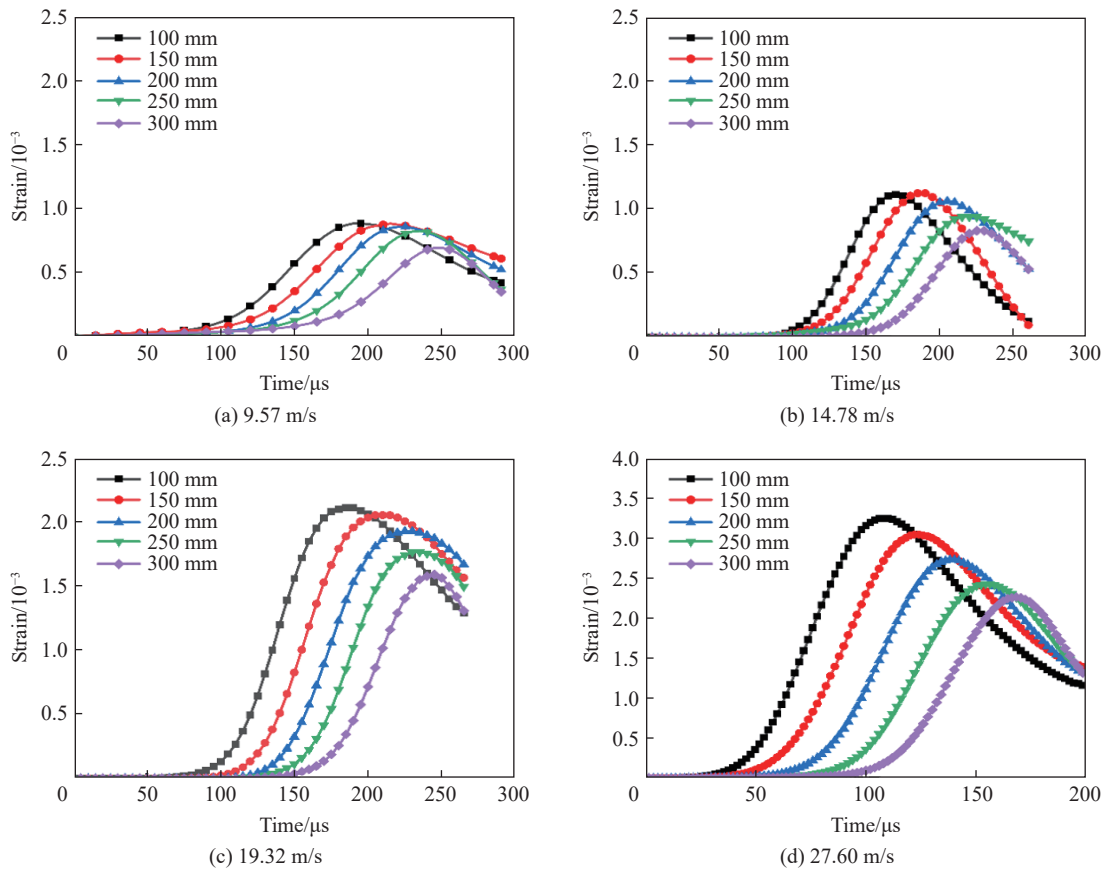


图 9 冲击载荷下灰砂岩中的应变时程曲线

Fig. 9 Strain time history curve in gray sandstone under impact load

3.3 结果分析

在低加载率下, 试件表面的应变峰值几乎未衰减; 随着加载速率不断增加, 应变峰值逐渐明显表现出随距加载端轴向坐标的增加而衰减的规律, 同时同距测点应变峰值也随加载速率增加而增大, 整体上表现为典型压应变。分析认为, 由于入射波能量与加载速度息息相关, 当冲击载荷足够大时, 试件加载端的应力状态由线弹性阶段进入塑性阶段, 内部节理裂隙开始发育, 冲击能量部分耗散, 断裂能增大。同时冲击能转换为试件的动能和内能, 这是应变峰值衰减的因素之一。随着加载速度增加, 每一小段试件中转化和耗散的能量变多, 导致应变衰减速度加快。

从拉氏反分析法计算得到的应力场中提取测点位置的应力时程曲线, 结果如图 11 所示。可以看到, 四组实验中应力时程曲线形态相似, 随着冲击速度增大, 试件中整体应力峰值也随着增大, 加载段斜率随之增大, 波形变得更加陡峭, 应力衰减差值增大。

为进一步探讨应变率对灰砂岩动态抗压强度的影响程度, 利用动态增强因子 (dynamic increase factor, DIF), 即灰砂岩试样的动态抗压强度与静态抗压强度的比值作为其抗压强度的增幅指标, 表 2 所示为 DIF 的计算参数。

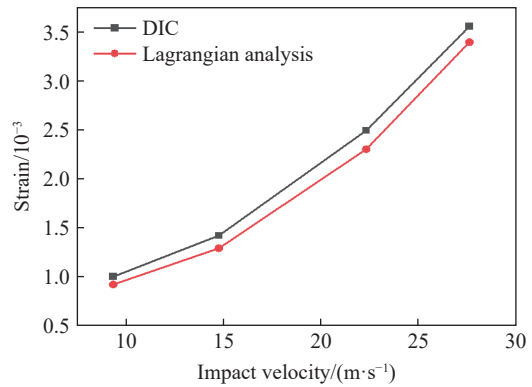


图 10 两种方法峰值应变的对比

Fig. 10 Comparison of peak strain between the two methods

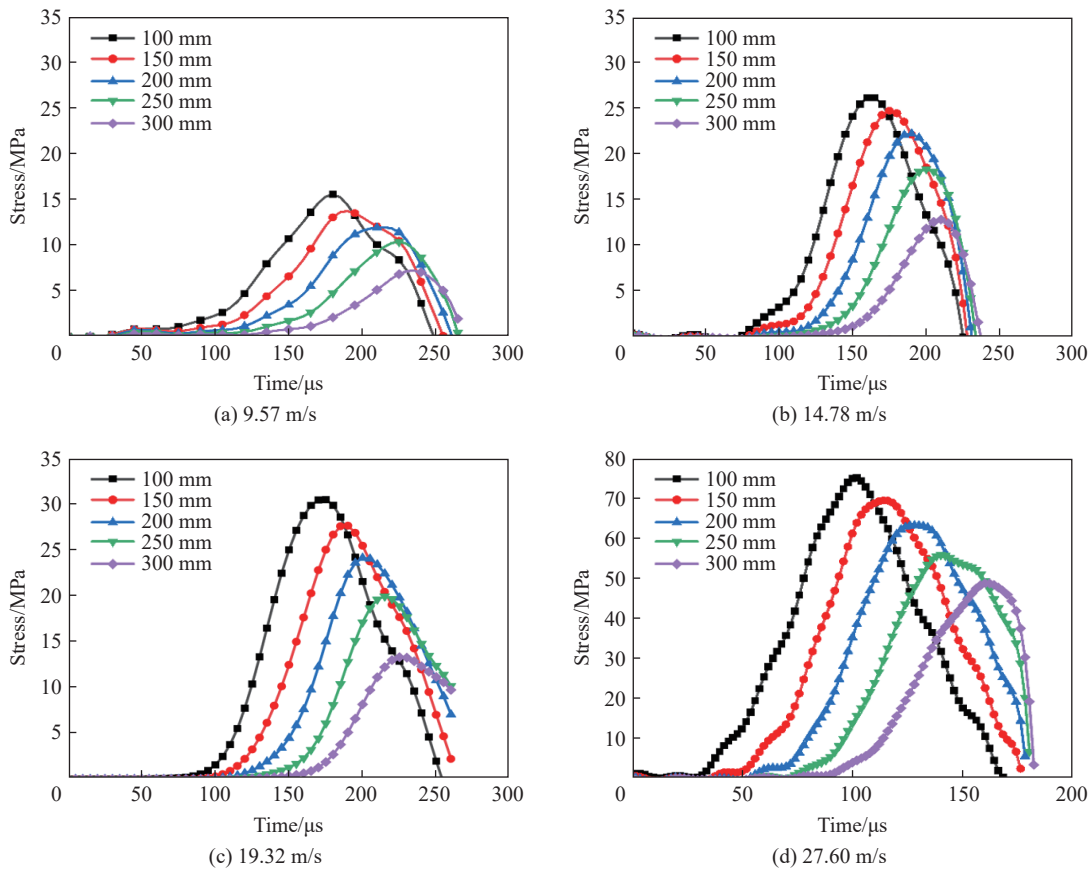


图 11 冲击载荷下灰砂岩中的应力时程曲线

Fig. 11 The stress time history curve in gray sandstone under impact load

图 12 给出了灰砂岩试件的动态抗压强度增强因子与应变率的关系, 相关系数 $R^2=0.7838$ 。图中前三组实验的 DIF 值均小于 1.0, 这是由于在使用拉氏反分析法对 DIC 技术记录下的数据进行运算时, 由于仅采集到试件受到首次脉冲作用下的数据, 然而由于试件的致密性较好, 首次脉冲的时间内试件未被直接破坏, 因此计算得到的动态抗压强度将小于真实值, 从而发生 DIF 值小于 1.0 的情况。然而, 图中拟合直线斜率可以很好地体现出动态抗压强度的应变率敏感度, 同时从整体上来看, 灰砂岩长杆试件的动态抗压强度增强因子随应变率的增大呈现明显的递增趋势。综上所述, 由拉氏反分析法算出灰砂岩的动态抗压强度具有应变率效应。

不同冲击速度下灰砂岩试件在不同测点处的应力-应变曲线如图 13 所示。对曲线形态进行分析, 发现曲线均经历了压密、线性加载、非线性加载、屈服卸载 4 个阶段, 整体形态与冲击加载短尺寸试件时的形态相似; 同时, 距加载端近的测点的应力-应变曲线往往包络着距加载端

表 2 DIF 计算参数

Table 2 The calculated parameters of the DIF

冲击速度/(m·s ⁻¹)	动态抗压强度/MPa	DIF	应变率/s ⁻¹
9.57	17.3	0.4755	38.9
14.78	26.9	0.7394	85.5
19.32	31.2	0.8576	257.9
27.60	74.2	2.0396	271.2

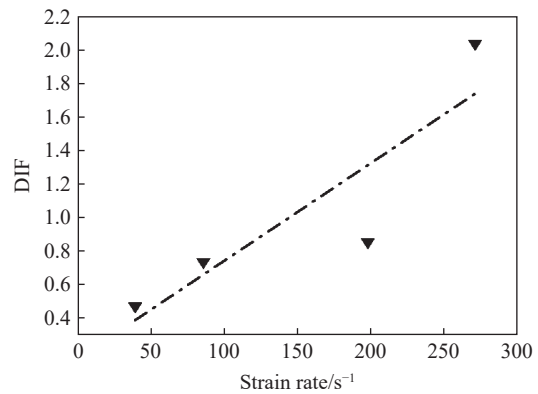


图 12 不同应变率下灰砂岩试样的 DIF 值

Fig. 12 DIF value of gray sandstone samples under different strain rates

更远测点处的曲线,反映了应力波在试件中的传播特性。当冲击速度增大时,试件中的最大应力和应变整体呈增大趋势。随着测点距加载端越远,该位置处的应力与应变峰值均呈下降趋势。低应变率下,各测点的弹性模量相差不大,在图中表现为直线加载段曲线重合,几乎无差别;应变率增大时,同一试件不同测点处的弹性模量相差较大,直线加载段出现分离不重合的情况。分析认为,不同冲击速度导致入射杆对试件施加的冲击能量不同,是峰值差异的主要原因。

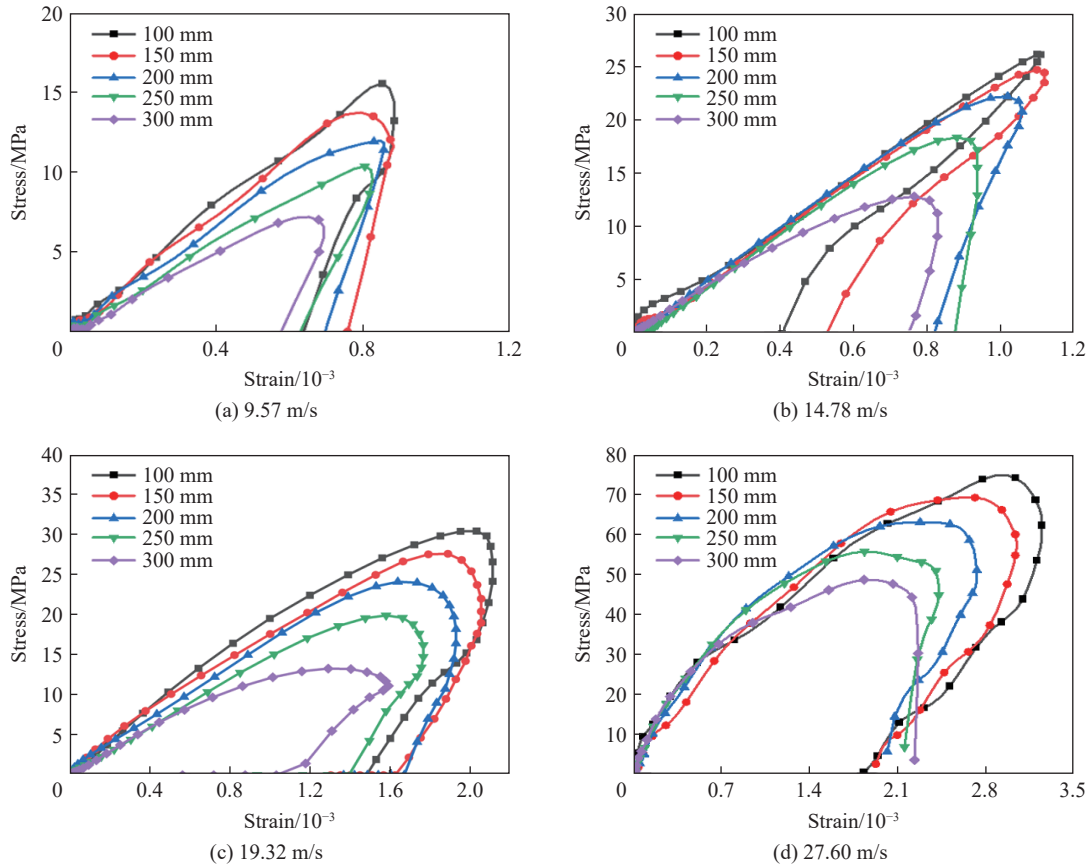


图 13 冲击载荷下灰砂岩中的应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves in gray sandstone under impact load

4 结 论

(1) 通过 DIC 技术,计算分析了冲击加载时灰砂岩试件表面应变演化云图并与宏观破坏结果相结合,发现在近场冲击作用下,灰砂岩长杆试件在加载端附近表现出明显破碎现象,而在远离加载端的区域因加载波与反射波重叠作用出现层裂破坏,随着加载速度的增加,近端破碎程度逐渐变大,远端层裂面增加到 2 个。

(2) 基于全场 DIC 获得的位移场,通过高斯平滑修正后,导入 Matlab 程序对位移场进行两次求导并积分,获得了不同加载速率下灰砂岩长杆上各位置处的应变场和应力场,对比拉氏应变和 DIC 得到的应变数据,二者峰值应变变化趋势一致,且平均差值仅有 7.32%,认为具有良好的相似性。

(3) 基于拉氏反分析法计算得到的动态抗压强度因子随着应变率的增大而呈明显上升趋势,灰砂岩动态抗压强度具有应变率效应。

(4) 从拉氏反分析算法得到的应力场和应变场中提取出各测点处灰砂岩的动态应力-应变关系,随着冲击速度升高,初始应力峰值、应变峰值均呈增大趋势;对于同一冲击速度,测点距加载端越远,峰值应力逐渐衰减,远端测点的应力-应变曲线被近端测点曲线包络。

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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6038.
XIE H P. 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. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6038.
- [2] HEBIG K H, ITO N, SCHEYTT T, et al. Review: deep groundwater research with focus on Germany [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(2): 227–243. DOI: 10.1007/s10040-011-0815-1.
- [3] 卢爱红, 茅献彪, 逢增伟. 扰动载荷对冲击矿压危险性的影响研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(2): 175–179. DOI: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.002.
LU A H, MAO X B, PANG Z W. The influence of stress disturbance on the danger of rock burst [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(2): 175–179. DOI: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.002.
- [4] 杨敬轩, 刘长友, 于斌, 等. 坚硬厚层顶板群结构破断的采场冲击效应 [J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 8–15. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000008.
YANG J X, LIU C Y, YU B, et al. Impact effect caused by the fracture of thick and hard roof structures in a longwall face [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1): 8–15. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000008.
- [5] 解北京, 李晓旭, 栾铮, 等. 应力波作用下红砂岩复合动态断裂特征研究 [J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(1): 42–52. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.01.005.
XIE B J, LI X X, LUAN Z, et al. Study on the dynamic fracture characteristics of red sandstone composite under stress waves [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(1): 42–52. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.01.005.
- [6] 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. DOI: 10.1016/S1003-6326(16)64307-8.
- [7] 康一强, 张祥, 贾文豪, 等. 张开型节理角度和长度对类岩石材料动力学特性的影响 [J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(3): 296–303. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.03.004.
KANG Y Q, ZHANG X, JIA W H, et al. Effects of dip angle and length of open joints on dynamic properties of materials like rock [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(3): 296–303. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2022.03.004.
- [8] 赖华伟, 王占江, 杨黎明, 等. 由球面波径向质点速度实测数据反演材料黏弹性本构参数 [J]. *高压物理学报*, 2013, 27(2): 245–252. DOI: 10.11858/gywlyxb.2013.02.012.
LAI H W, WANG Z J, YANG L M, et al. Inversion of constitutive parameters for visco-elastic materials from radial velocity measurements of spherical wave experiments [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(2): 245–252. DOI: 10.11858/gywlyxb.2013.02.012.
- [9] 唐晓明, 王鹤鸣, 苏远大, 等. 用孔隙、裂隙介质弹性波理论反演岩石孔隙分布特征 [J]. *地球物理学报*, 2021, 64(8): 2941–2951. DOI: 10.6038/cjg202100478.
TANG X M, WANG H M, SU Y D, et al. Inversion for micro-pore structure distribution characteristics using cracked porous medium elastic wave theory [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(8): 2941–2951. DOI: 10.6038/cjg202100478.
- [10] 崔伟雄, 王保利, 王云宏. 基于透射槽波的工作面煤层厚度高精度反演方法 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2482–2490. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.dz20.0670.
CUI W X, WANG B L, WANG Y H. High-precision inversion method of coal seam thickness based on transmission channel wave [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2482–2490. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.dz20.0670.
- [11] 平琦, 马芹永, 袁璞. SHPB 试验岩石试件应力平衡时间预估分析 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(12): 55–60. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.12.004.
PING Q, MA Q Y, YUAN P. Prediction for stress equilibrium time in rock SHPB test [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(12): 55–60. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.12.004.
- [12] 王礼立, 朱珏, 赖华伟. 冲击动力学研究中实测波信息的解读分析 [J]. *高压物理学报*, 2010, 24(4): 279–285. DOI: 10.11858/gywlyxb.2010.04.007.
WANG L L, ZHU J, LAI H W. Understanding and interpreting of the measured wave signals in impact dynamics studies [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(4): 279–285. DOI: 10.11858/gywlyxb.2010.04.007.
- [13] FOWLES R. Conservation relations for spherical and cylindrical stress waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(6):

- 2740–2741. DOI: 10.1063/1.1659298.
- [14] COWPERTHWAIT M, WILLIAMS R F. Determination of constitutive relationships with multiple gauges in nondivergent waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(1): 456–462. DOI: 10.1063/1.1659623.
- [15] GRADY D E. Experimental analysis of spherical wave propagation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(8): 1299–1307. DOI: 10.1029/JB078i008p01299.
- [16] WANG L, ZHU J, LAI H. A new method combining Lagrangian analysis with Hopkinson pressure bar technique [J]. *Strain*, 2011, 47(2): 173–182. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2008.00533.x.
- [17] 赖华伟, 王礼立. 用改进的基于质点速度测量的拉格朗日分析方法研究尼龙动态力学特性 [J]. *实验力学*, 2011, 26(2): 221–227.
- LAI H W, WANG L L. Nylon dynamic mechanical behavior study through a modified Lagrangian analysis based on particle velocity profile measurement [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(2): 221–227.
- [18] DING Y Y, WANG S L, ZHENG Z J, et al. Dynamic crushing of cellular materials: a unique dynamic stress-strain state curve [J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 100: 219–231. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.07.001.
- [19] 丁圆圆, 张振, 赖华伟, 等. 基于全光纤激光干涉测速技术的拉氏反分析方法应用于脆性材料动态本构关系研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(11): 116–120, 131. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.11.018.
- DING Y Y, ZHANG Z, LAI H W, et al. Lagrangian inverse analysis method for studying dynamic constitutive relation of brittle materials based on all-fiber laser interference velocity measurement technique [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(11): 116–120, 131. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.11.018.
- [20] 陶为俊, 浣石, 蒋国平. 基于最小二乘法的 Lagrange 分析方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(21): 98–101, 142. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.21.001.
- TAO W J, HUAN S, JIANG G P. Lagrangian analysis method based on least square [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(21): 98–101, 142. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.21.001.
- [21] 李运良, 李进, 景吉勇, 等. 重塑黄土一维应变实验粒子速度测试波形的拉格朗日分析 [J]. *工程力学*, 2017, 34(3): 29–35. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0786.
- LI Y L, LI J, JING J Y, et al. Lagrangian analysis for a set of particle velocity profiles measured in remolding loess under one-dimensional strain experiment [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3): 29–35. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0786.
- [22] 丁圆圆, 杨黎明, 王礼立. 对基于质点速度测量的拉格朗日分析法的进一步探讨 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2012, 25(4): 83–87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2012.04.017.
- DING Y Y, YANG L M, WANG L L. A further discussion on the Lagrangian analysis method based on particle velocity wave-profiles measurements [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2012, 25(4): 83–87. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2012.04.017.
- [23] 朱珏. 混凝土类材料冲击本构特性的 SHPB 技术及 Lagrange 反解法的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- ZHU J. On SHPB technique and Lagrangian analysis used for studying the impact response of concrete-like materials [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [24] 胡良鹏, 孙阳阳, 岳松林, 等. 基于高速 DIC 的近场冲击下高强混凝土动态压缩性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(12): 77–87, 117. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.012.009.
- HU L P, SUN Y Y, YUE S L, et al. Investigation of dynamic compression performance of high-strength concrete under near-field impact based on high-speed DIC [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(12): 77–87, 117. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.012.009.
- [25] 邢灏喆, 王明洋, 范鹏贤, 等. 基于高速 3D-DIC 技术的砂岩动力特性粒径效应研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(11): 113101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0088.
- XING H Z, WANG M Y, FAN P X, et al. Grain-size effect on dynamic behavior of sandstone based on high-speed 3D-DIC technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(11): 113101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0088.
- [26] 俞鑫炉, 付应乾, 董新龙, 等. 混凝土一维应力层裂实验的全场 DIC 分析 [J]. *力学学报*, 2019, 51(4): 1064–1072. DOI: 10.6052/0459-1879-19-008.
- YU X L, FU Y Q, DONG X L, et al. Full field DIC analysis of one-dimensional spall strength for concrete [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1064–1072. DOI: 10.6052/0459-1879-19-008.
- [27] 申海艇, 蒋招绣, 王贝壳, 等. 基于超高速相机的数字图像相关性全场应变分析在 SHTB 实验中的应用 [J]. *爆炸与冲击*,

- 2017, 37(1): 15–20. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0015-06.
- SHEN H T, JIANG Z X, WANG B K, et al. Full field strain measurement in split Hopkinson tension bar experiments by using ultra-high-speed camera with digital image correlation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 15–20. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0015-06.
- [28] HUANG Y, JI J J, LEE K M. Model-based digital image correlation for noncontact deformation measurement of strain field and mechanical property [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(9): 5109–5118. DOI: 10.1109/TII.2019.2896167.
- [29] 陈静静. 基于高速 DIC 方法的脆性材料动态力学性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
CHEN J J. Study on the dynamic mechanical properties of brittle materials by high-speed DIC [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [30] 李二强, 冯吉利, 朱天宇, 等. 基于数字图像相关方法的层状板岩 I 型断裂特性研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 979–987. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0375.
LI E Q, FENG J L, ZHU T Y, et al. Examining type I fracture characteristics in layered slates with digital image correlation [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 979–987. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0375.
- [31] 张沛. 基于数字图像相关方法的煤岩表面应变场及裂纹演化特征 [J]. *煤炭技术*, 2024, 43(4): 52–56. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2024.04.011.
ZHANG P. Surface strain field and crack evolution characteristics of coal-rock based on digital image correlation method [J]. *Coal Technology*, 2024, 43(4): 52–56. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2024.04.011.
- [32] SATO K, YU Q, HIRAMOTO J, et al. A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviors of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 75: 11–26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.001.
- [33] LINGGA B A, APEL D B, SEPEHRI M, et al. Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(5): 771–776. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.12.002.
- [34] 丁圆圆, 张振, 赖华伟, 等. 基于数字图像相关性方法的脆性材料拉氏反分析实验技术 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1310–1316. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0049.
DING Y Y, ZHANG Z, LAI H W, et al. A Lagrangian inverse analysis technique for studying dynamic mechanical properties of brittle materials based on digital image correlation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1310–1316. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0049.

(责任编辑 王小飞)