

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0088

基于高速 3D-DIC 技术的砂岩 动力特性粒径效应研究*

邢灏喆, 王明洋, 范鹏贤, 王德荣

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 利用分离式霍普金森压杆(SHPB), 对粗砂岩、中等粒径砂岩和细砂岩进行了应变率为 $69\sim 83\text{ s}^{-1}$ 的动态单轴抗压实验, 研究了粒径尺寸效应对砂岩动力特性的影响。通过三维数字图像相关(3D-DIC)技术分析高速摄像图像, 获得了砂岩的实时应变场, 据此分析了动态荷载下 3 种粒径砂岩的动力变形特性和裂纹开展行为。结果表明, 砂岩弹性应变储能可逆释放的临界应变率随着粒径的减小而升高, 动态压缩强度随着粒径减小而增大, 动态强度应变率敏感度则与强度规律相反。相较于静态条件下, 中等粒径砂岩和细砂岩的动态弹性模量增长了 2~3 倍, 粗砂岩的动态弹性模量增长达 5 倍以上。细砂岩的动态泊松比相较于静态提高了约 25%, 中等粒径砂岩的动态泊松比约为静态时的 70%。动态裂纹首先出现于试件内部, 然后传播至表面, 呈现出应变局部化, 动态荷载下岩石裂纹的孕育和扩展相比静态条件下均有所提前, 其中细砂岩在动态荷载条件下的归一化裂纹起裂阈值仅为峰值强度的 10%。微观分析表明, 矿物粒径大小和黏土矿物含量分别在砂岩的动力学性质和裂纹开展行为方面发挥主要作用。

关键词: 砂岩; 动态起裂; 粒径效应; 高速 3D-DIC; 分离式霍普金森压杆

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Grain-size effect on dynamic behavior of sandstone based on high-speed 3D-DIC technique

XING Haozhe, WANG Mingyang, FAN Pengxian, WANG Derong

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The grain size effect on the dynamic behavior of sandstone was investigated through the compression tests on coarse-grained (CG), medium-grained (MG) and fine-grained (FG) sandstones by split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests under the strain rates of $69\sim 83\text{ s}^{-1}$ based on the thin section and electron scanning microscopic (SEM) images analysis, the CG, MG and FG sandstone were mainly composed by quartz with the average grain size of $200\sim 500$, $90\sim 500$ and $55\sim 120\text{ }\mu\text{m}$, respectively. With the increasing grain size, the percentage of clay mineral was decreased correspondingly from 8% to 1%. During the dynamic compression, two high-speed cameras were applied to capture the deformation of sandstone at frame rate of $2\times 10^5\text{ s}^{-1}$ and resolution of 256×256 . The real-time strain fields of rock were obtained by high-speed three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) technique, the dynamic deformative properties, particularly the lateral strain of the specimen, were extracted by averaging the lateral strain field by pixels. The fracturing behavior of three sandstones was analyzed through the strain localization evolution within the strain fields. Results show that the critical strain rate for reversible release of elastic strain energy increases with the decreasing grain size. The dynamic strength ascends along with the reduction

* 收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(52009138, 11772355, 51979280); 江苏省自然科学基金(BK20200583);
陆军工程大学前沿创新基金

第一作者: 邢灏喆(1989—), 男, 博士, 讲师, haozhexing@hotmail.com

通信作者: 范鹏贤(1983—), 男, 博士, 副教授, fan-px@139.com

of grain size, while the strain rate sensitivity to the dynamic strength has an opposite trend. Compared to the quasi-static case, the dynamic elastic modulus increases by 2–3 times for MG and FG sandstone, particularly 5 times for CG sandstone. The Poisson's ratio under dynamic loading in FG sandstone is grown by 25%, but drops at 70% of the static one in MG sandstone. The crack primarily generates inside the specimen and propagates to the surface of the specimen afterwards. The crack development is advanced under dynamic loadings, where the normalized stress threshold for crack initiation in FG sandstone is only 10%. Based on the microscopic analysis, mineral structure and clay percentage dominate the dynamic property and fracturing behavior of sandstone, respectively.

Keywords: sandstone; dynamic fracturing; grain-size effect; high-speed 3D-DIC; split Hopkinson pressure bar

岩石矿物粒径的大小决定着岩石的微观结构分布, 对于岩石的宏观力学特性具有不可忽视的影响。砂岩是地壳浅层分布最广的岩石之一, 作为一种多孔、渗透性强的岩石, 其所处地层在增强型原油开采、二氧化碳贮存和增强型地热系统等地质工程选址中受到高度重视^[1]。然而, 对于地下工程而言, 来自于外部的冲击、爆炸等动力荷载的威胁不可忽视。由于砂岩的矿物颗粒粒径为 0.062 5~2 mm, 为确保砂岩地层存放能源、废料的可靠性以及地质资源开采的可持续性, 有必要就粒径效应对砂岩动态力学特性和裂纹发展的影响开展深入研究。

早在 20 世纪 60 年代, 就有关于矿物粒径大小与岩石宏观静态力学性质之间关系的研究, 其中一个普遍的结论是岩石的力学特性随着岩石平均颗粒粒径的增大而变弱。随后, 学者们致力于找到描述粒径大小与岩石力学特性关系的退化方程, 代表性的有: 粒径加权平均值与最终失效强度之间的线性退化方程^[2]、平方根倒数方程^[3]和对数方程^[4]等。

岩石在不同的应变率下会呈现不同的力学响应。微观测量研究表明, 岩石的断裂特征也会受应变率影响, 即随着应变率的提高, 断裂面粗糙度下降, 断裂模式从沿晶主导向穿晶断裂主导转变^[5]。因此, 一些学者开展了关于砂岩粒径与应变率耦合效应对岩石力学特性影响的研究。Wasantha 等^[6]选取了 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} 和 10^{-3} s^{-1} 4 个不同应变率, 对粗、中、细 3 种粒径的砂岩开展了单轴抗压实验, 讨论了不同粒径的砂岩在准静态加载范围内强度对应变率变化的敏感度, 研究发现, 粗砂岩的强度随着应变率的提升反而下降, 这与常见的应变率增强效应结论截然相反。Yu 等^[7]针对不同粒径的砂岩开展了分离式霍普金森压杆 (SHPB) 巴西盘试验, 研究了加载率与粒径效应对砂岩动态拉伸强度的共同影响。

尽管如此, 关于动态荷载条件下粒径尺寸效应对岩石力学特性的影响, 尤其是岩石动态变形特征与宏观裂纹发展行为的报道仍然较少。一个主要原因是在高速冲击荷载下, 岩石试件变形时程短、变形量大, 关键性的径向变形难以通过静态实验中的应变片或者引伸计等接触式电测手段定量给出。高速三维数字图像相关 (3D-DIC) 技术作为一种全场无损光学量测技术, 最早在复合材料与合金材料的动态变形测量中获得应用, 近年来, 逐步推广到地质类材料的动态抗压^[8]、动态断裂^[9]、爆炸^[10]、侵入^[11]等实验中。因其具有准确性高、可操作性和灵活适应性强等优点, 为解决动态荷载下岩石三维全场变形的量测难题提供了途径。

本文中, 利用 SHPB 对 3 种粒径砂岩进行动态单轴抗压实验, 通过 3D-DIC 技术分析岩石受动载过程中的应变场。通过像素平均化提取应变场中的轴向、径向特征应变并与杆中波形计算得到的应力时程进行同步, 获得 3 种粒径砂岩的动态单轴抗压强度、动态弹性模量、动态泊松比以及裂纹开展主要阶段的应力阈值, 揭示不同粒径下砂岩的动态力学变形性质, 并结合微观颗粒结构的观测结果, 解释动态荷载下粒径效应对岩石裂纹发展过程的影响机理。

1 实验设置

1.1 岩石试件

本实验中的粗砂岩 (CG) 取自澳大利亚珀斯盆地, 中等粒径砂岩 (MG) 和细砂岩 (FG) 取自悉尼盆

地。3种粒径砂岩试样均为圆柱型,直径和高均为50 mm,如图1所示。图2为3种粒径砂岩的显微镜薄片观测图例,根据比例尺可知,细砂岩、中等粒径砂岩和粗砂岩的粒径范围分别为55~120、90~500和200~600 μm ,平均粒径尺寸分别为105、230和320 μm 。通过测试可知,细砂岩、中等粒径砂岩和粗砂岩的孔隙率分别为12.97%、14.32%和16.37%。

3种砂岩中主要矿物种类通过薄片偏光显微照片与扫描电镜元素能谱分析获得,其中石英均占主导地位(石英含量>90%)并伴随少量的方解石,不同的是,随着石英平均粒径尺寸的减小,黏土质矿物(主要为高岭土)的含量越来越高。3种粒径砂岩具体的基本物理力学参数列于表1。

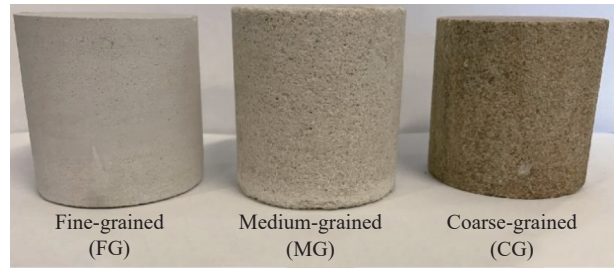


图1 细砂岩(FG)、中等粒径砂岩(MG)、粗砂岩(CG)试样

Fig. 1 FG, MG and CG sandstone specimens

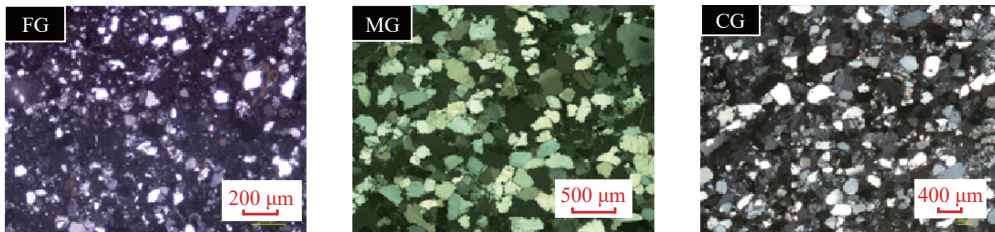


图2 三种粒径砂岩矿物组成的薄片显微照片

Fig. 2 Section micrograph of mineral composition of three grain-sized sandstones

表1 三种粒径砂岩的基本物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of three grain-sized sandstones

砂岩	ω (石英)/%	ω (黏土矿物)/%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	准静态单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	泊松比
FG	95	<1	2 165	13	1.9	3 116	0.27
MG	92	4	2 214	41	6.9	2 110	0.21
CG	90	8	2 331	47	7.2	4 128	0.20

1.2 加载系统与高速摄像参数设置

实验采用的分离式霍普金森压杆材料为40Cr合金,直径为50 mm,波速5 440 m/s,弹性模量为233 GPa。实验过程中,对3种粒径砂岩选用不同子弹撞击速度,以获得砂岩试样不同的应变率。入射杆受冲击端部贴有铜片整形器,用于平缓入射波波形,试样与杆件端面涂抹二硫化钼以减少端面摩擦效应。实验中应变仪选取10 kHz低通滤波和1 MHz采样率,记录杆中入射波 $\varepsilon_i(t)$ 、透射波 $\varepsilon_t(t)$ 和反射波 $\varepsilon_r(t)$ 的波形。在应力平衡($\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$)条件下,根据一维波传播理论,可得到试样中的应力、应变率和应变时程,进而获得试样的动态应力应变曲线。

分离式霍普金森压杆与双高速相机的设置如图3所示,两台高速相机上下排列,相互之间立体角为25°,确保高速3D-DIC计算面内变形和离面变形的可靠度。分辨率采用256×256,搭配 $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 的帧率和4 μs 的曝光时间。相机镜头焦距在35 mm,景深范围为1 mm,保证岩石试样压缩产生径向膨胀时依然对焦。

采用15 400 lm的LED灯作为光源,防止试样和空气升温造成测量误差。两台高速相机通过两个独立同步的TTL信号进行触发,通过杆中波速的推算,可将高速相机拍摄的变形与应变片计算得到的应力时程进行同步关联。

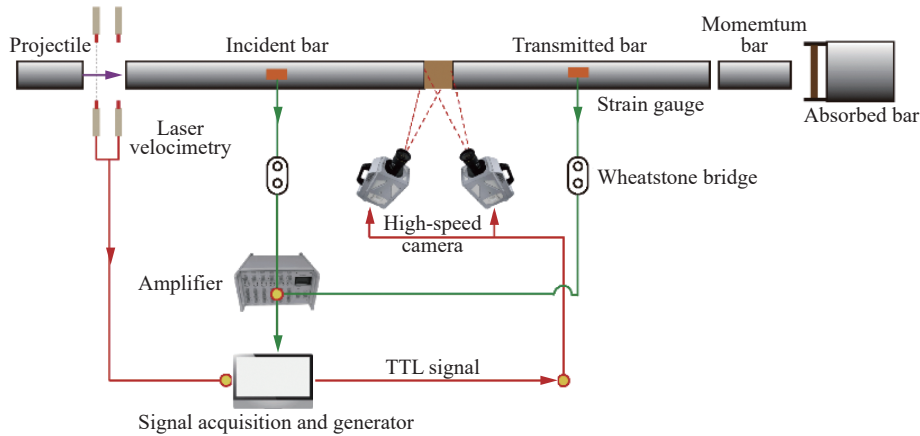


图 3 分离式霍普金森压杆与双高速相机布置示意图

Fig. 3 Setup of SHPB system integrated with two high-speed cameras

1.3 加载系统与高速摄像参数设置

数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术是一种非接触式光学量测方法,通过追踪所拍摄目标表面散斑的变化,得到目标的形状、变形和运动。本实验利用白色亚光喷漆作为底色,黑色哑光喷漆喷涂散斑,散斑随机分布。单个散斑尺寸大于3个像素,整体散斑面积与底色面积接近1:1。当目标为曲面并且存在离面位移时,需采用基于双目立体视觉原理的3D-DIC技术,其详细的工作原理和操作方法可以参考文献[12]。

针对岩石分离式霍普金森压杆单轴抗压实验,本文中使用了100 mm×100 mm的校正板,板上均匀排列9×9的点阵,点与点间隔10 mm。校正时使用相机的全像素(1 280×800)采集校正板图像,校正的残差标准误差小于0.01个像素。DIC设置方面,针对分辨率256×256,选取35个像素作为子集大小;高斯权重作为子集权重;2个像素单元为计算步长;零均值归一化平方差准则作为相关函数。由于变形后期应变较大,选取低通滤波设置以及相邻图像递增相关匹配法确保应变结果可靠。图像像素为256×256,所对应实际空间大小为59 mm×59 mm,则一个像素实际代表0.23 mm×0.23 mm。因此,根据DIC算法的精度阈值(0.05个像素),实际可测得变形的精度为0.011 5 mm,对应于试件尺寸,可得到工程应变的精度为0.002 37%,满足实验需求。

2 实验结果

2.1 力学变形特性

由于不同粒径砂岩的波阻抗不尽相同,即便相同加载条件下也无法确保试件中产生一致的应变率,因此在开展多组实验后选取了应变率相近的实验结果进行分析。此外,由于各粒径砂岩自身的应变率效应已有大量研究,本文中重点讨论砂岩动力特性中粒径效应的横向对比,为此本实验的应变率范围集中在60~90 s⁻¹之间。在此区间内,试件加载过程中需满足应力均匀化,减少试件两端应力差导致的轴向惯性效应^[13]。图4所示为中等粒径砂岩实验中试件两端应力平衡的结果。最终3组细砂岩(FG01~FG03)、4组中等粒径砂岩(MG01~MG04)和3组粗砂岩(CG01~CG03)实验应力平衡符合要求,作为有效数据进行分析。

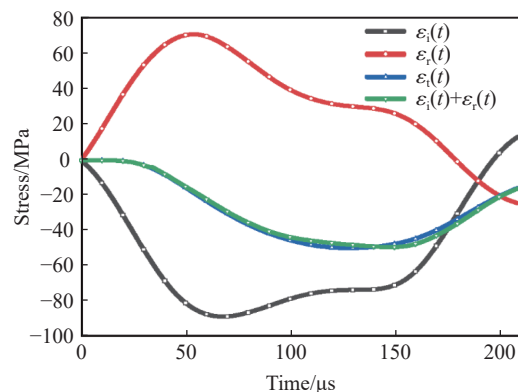


图 4 中等粒径砂岩实验中应力平衡情况

Fig. 4 Stress equilibrium status in MG experiment

根据杆中应变片波形以及一维波传播理论, 可获得岩石应力、应变和应变率的时程曲线, 进而得到动态应力应变曲线, MG01 和 MG04 实验的结果如图 5 所示。由图 5 可知, MG01 实验中, 撞击杆入射能较小, 加载初期应变与应力上升, 应变率到达峰值 (69 s^{-1}) 后开始下降, 应变累积趋缓。应力增加至峰值 (52 MPa) 后进入卸载阶段, 在峰后 $175 \mu\text{s}$ 时, 应变率降至负值, 意味着岩石轴向应变方向改变, 即发生了应变回弹。由于峰值应力未超过该应变率下的动态单轴抗压强度, 试件仅周边发生剥落而主体结构未被破坏。MG04 实验中, 撞击杆入射能较大, 应变率上升至 83 s^{-1} 后保持恒定, 在该恒定应变率下, 应力达到动态抗压强度 67 MPa 后试件被完全破坏。卸载阶段内, 残余应变继续累积, 未发生应变回弹。

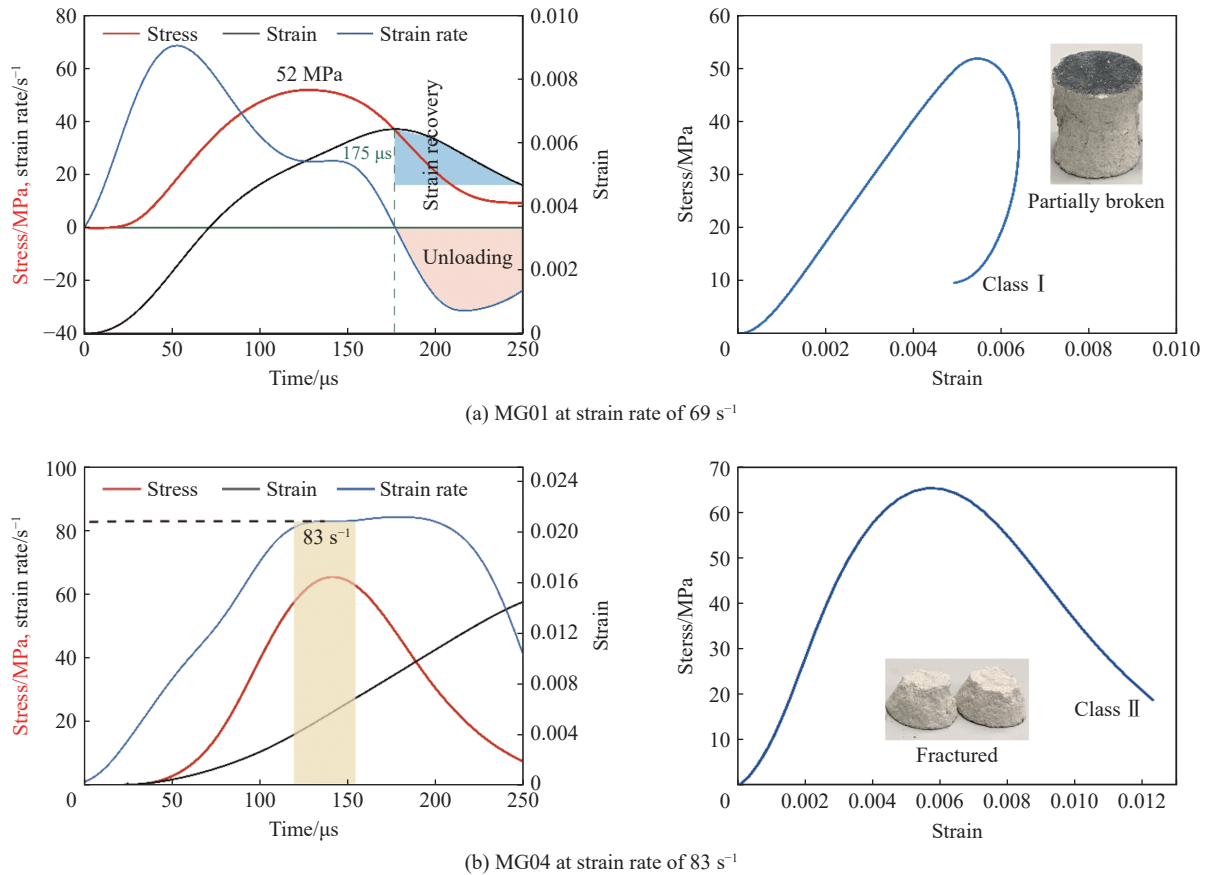


图 5 MG01 和 MG04 实验的应力、应变、应变率时程曲线及动态应力应变曲线

Fig. 5 Stress, strain, strain rate histories and stress strain curve in MG01 and MG04 experiments

图 6 为不同应变率下 3 种粒径岩石的动态应力应变曲线。动态条件下, 根据峰后轴向应变是否回弹的特点, 将岩石动态应力应变曲线分为 Class I (有回弹) 和 Class II (无回弹) 两种模式^[14]。应变回弹意味着存储的部分弹性能在卸载阶段发生可逆变形, 而试件主体结构的完整性是弹性变形可以恢复的必要条件, 因此 Class I 和 Class II 应力应变曲线模式与试件破坏形式存在内在联系。从图 6 可以看出, 粗砂岩在 $76 \sim 83 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内均为 Class II 模式, 意味着即便在动态荷载下, 较低的应变率亦可造成粗砂岩结构的不可逆破坏, 使得加载过程中储存的弹性应变能无

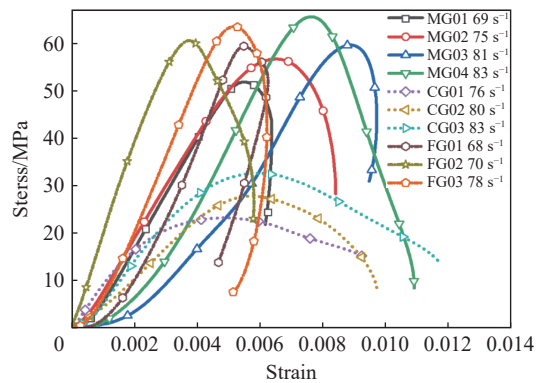


图 6 三种粒径砂岩动态应力应变曲线

Fig. 6 Dynamic stress strain curves of three grain-sized sandstones

法在卸载阶段回收。中等粒径砂岩随着应变率的升高表现为从 Class I 到 Class II 模式的转变, 转换对应的临界应变率约为 82 s^{-1} , 其主体结构相应地从部分破坏转换至完全破坏。而细砂岩在相近的应变率范围内均呈现 Class I 模式, 加载后其结构性依然完整, 压缩过程中储存的弹性变形在峰后卸载过程中依然可以回弹。由此可见, 弹性应变储能可逆释放的临界应变率随着粒径的减小而增高。

各组实验的应变率与对应的动态强度(峰值应力)列于表 2, 3 种粒径砂岩在动态荷载下都存在应变率增强效应。由于在同一应变率条件下, 造成破坏的动态强度将大于未完全破坏的峰值应力, 因此细砂岩具有最大的动态单轴抗压强度, 其次分别为中粒径砂岩和粗砂岩, 这与 3 种砂岩准静态单轴抗压强度的顺序一致。当岩石的应变率在 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内时, 其强度增长与应变率近似呈幂函数关系^[15], 由于本实验中应变率区间跨度较小, 该范围内动态强度或峰值应力的应变率敏感度 κ 可近似视为线性:

$$\kappa = \frac{\sigma_{\text{dyn}}(\dot{\epsilon}_{\text{max}}) - \sigma_{\text{dyn}}(\dot{\epsilon}_{\text{min}})}{\dot{\epsilon}_{\text{max}} - \dot{\epsilon}_{\text{min}}} \quad (1)$$

3 种粒径应变率敏感度结果列于表 2。Class I 模式下试件未达到动态单轴抗压强度而没有完全破坏, 因而为峰值应力。

随着粒径增大, 强度应变率敏感度也随之增大, 这意味着当应变率进一步提升时, 粗、中、细砂岩之间的动态强度差距将会进一步缩小。因此, 更高应变率下三者之间实际强度大小关系无法从某一区间应变率下的强度关系推测, 而必须通过实验获得。动态弹性模量通过图 6 中动态应力应变曲线中近似直线段的切线斜率来确定, 结果如表 3 所示。可以看出, 动态荷载下细砂岩的弹性模量最大, 其次分别为中等粒径砂岩和粗砂岩, 与动态强度的变化趋势一致。相较于静态弹性模量, 中等粒径砂岩和细砂岩动态荷载下弹性模量分别增长了 2~3 倍, 而粗砂岩增长长达 5 倍以上。可以看出, 动态荷载显著增强了砂岩的轴向刚性, 抑制了轴向变形的发展。

泊松比定义为径向应变与轴向应变比值的绝对值, 在纯弹性阶段为 0~0.5 的常数, 代表材料的一种弹性参数。而在受载过程中, 泊松比随着材料轴向变形经历动态变化, 通常可以分为 3 个阶段: 泊松比不断增加阶段, 泊松比基本保持不变阶段, 泊松比继续增加阶段^[16]。弹性阶段外泊松比的动态变化主要是岩石软化所导致^[17], 作为弹性范围外的名义泊松比, 可以体现试件的结构性质, 其值可以为负^[18], 也可大于 0.5^[19]。名义泊松比的起始值为负值, 主要是由于加载初期裂纹闭合过程中, 晶粒在孔隙间内旋翻转导致轴向压缩的同时, 径向也在收缩, 形成名义上的“负泊松比”。由于动态单轴抗压实验中径向应变难以通过传统接触式方法获得, 因而岩石的动态泊松比一直难以直接测量。本文中, 分别对感兴趣区域 (129×209) 中轴向应变场和径向应变场(图 7)中每个像素点的应变值平均化:

表 2 动态荷载下 3 种砂岩的动态力学特性

Table 2 Dynamic mechanical properties of three types of sandstones

试件	应变率/ s^{-1}	动态单轴抗压强度 (峰值应力*)/MPa	动态单轴抗压强度(峰值应力*) 应变率敏感度/(MPa·s)
CG01	76	23	1.4
CG02	80	28	1.4
CG03	83	33	1.4
MG01	69	52*	1.0
MG02	75	57*	1.0
MG03	81	60*	1.0
MG04	83	67	1.0
FG01	68	59*	0.5
FG02	70	61*	0.5
FG03	78	64*	0.5

注: “*” 代表峰值应力。

表 3 不同应变率下 3 种砂岩动态弹性模量与泊松比

Table 3 Dynamic Young's modulus and Poisson's ratio of three types of sandstones under different strain rates

试件	应变率/ s^{-1}	动态弹性模量/GPa	动态泊松比
CG01	76	10.0	0.17
CG02	80	6.6	
CG03	83	9.3	
MG01	69	12.0	0.15
MG02	75	11.5	0.15
MG03	81	12.4	0.15
MG04	83	13.7	0.15
FG01	68	17.8	0.25
FG02	70	21.3	0.25
FG03	78	16.4	0.25

$$\varepsilon_x = \frac{\sum_{j=1}^{129} \sum_{i=1}^{209} \varepsilon_x(i, j)}{129 \times 209}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{\sum_{j=1}^{129} \sum_{i=1}^{209} \varepsilon_\theta(i, j)}{129 \times 209} \quad (2)$$

进而得到每一时刻砂岩轴向应变 ε_x 和径向应变 ε_θ 的特征值。根据泊松比的定义, 得到不同应变率下 3 种砂岩名义动态泊松比随轴向应变发展的曲线, 绘于图 8。由图 8 可知, 动态泊松比也是一个动态变量且存在 3 个阶段。部分名义泊松比起始值为负值, 反映了加载初期裂纹闭合的过程。曲线中近似平台部分的平均值作为加载中准弹性阶段的动态泊松比常数, 如表 3 所示。近似平台阶段过后, 大量裂纹的产生造成径向变形超过轴向变形, 泊松比快速上升。

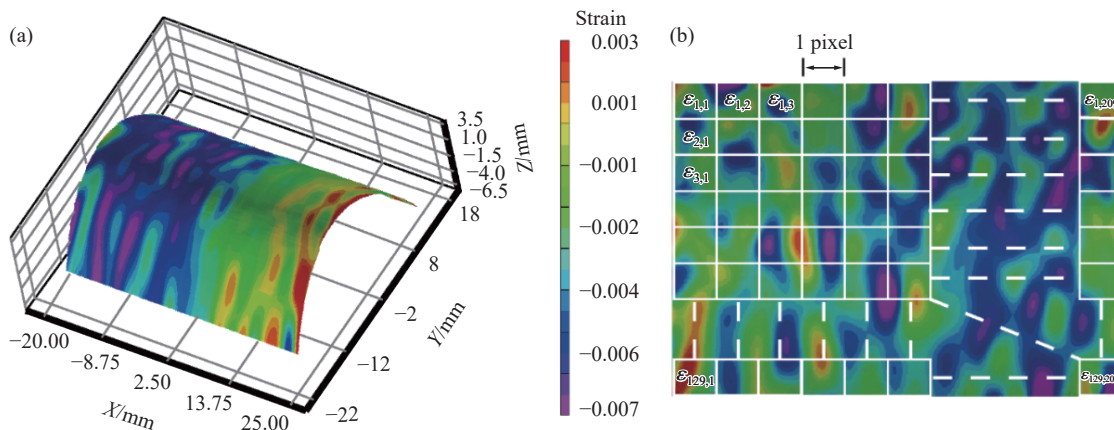


图 7 三维重构试件应变场和应变场像素分布

Fig. 7 Reconstructed 3D strain field of a sandstone specimen and pixel distribution in the strain field

一般而言, 岩石的动态泊松比大于其静态泊松比^[20], 细砂岩的动态泊松比最高且比静态条件下提高约 25%。而中等粒径砂岩则表现出相反的性质, 其动态泊松比为静态的 71%。由于随着岩石孔隙率的增大, 其泊松比对加载状态变得敏感^[21], 在动态荷载下, 中等粒径砂岩侧向变形相对于慢速加载下无法充分发展, 从而呈现泊松比降低的现象。粗砂岩情况相对特殊, 除 CG01 试件在 76 s^{-1} 应变率下动态泊松比具有一段平台 (动态泊松比 0.17, 为静态下的 63%) 外, 当应变率超过 80 s^{-1} 后, 粗砂岩的名义泊松比无平台阶段, 而是直接快速爬升, 意味着荷载应变率超过一定界限时, 几乎不存在准弹性变形协调阶段, 动载下粗砂岩径向剧烈变形造成直接失稳。

2.2 动态裂纹开展

Xing 等^[22] 的研究表明, 动态荷载下岩石裂纹发展主要存在 4 个阶段: (1) 裂纹闭合; (2) 裂纹稳定开展; (3) 裂纹不稳定开展; (4) 峰值应力。其中裂纹闭合阶段对应于裂纹应变 ε_c (负值为存在裂纹) 提升至零的阶段, 接着裂纹应变重新下降到负值, 进入裂纹稳定开展阶段; 裂纹不稳定开展的节点则对应于体积应变 ε_V 达到最大值的时刻。上述裂纹应变、体积应变随时间变化规律为:

$$\varepsilon_V(t) = \varepsilon_x(t) + 2\varepsilon_\theta(t), \quad \varepsilon_{VE}(t) = \frac{1+2\nu}{E} \sigma(t), \quad \varepsilon_c(t) = \varepsilon_V(t) - \varepsilon_{VE}(t) \quad (3)$$

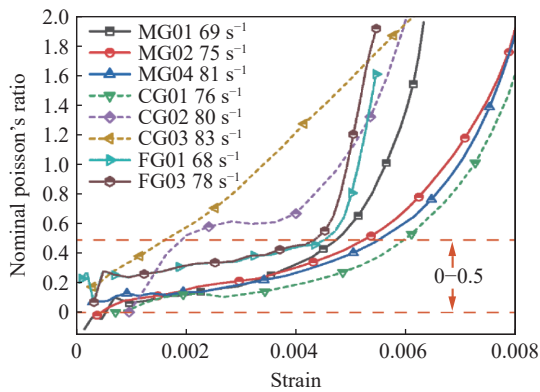


图 8 动态荷载下三种砂岩名义动态泊松比演化曲线

Fig. 8 Nominal dynamic Poisson's ratio curves for three types of sandstones under high strain rates

式中: ε_{VE} 为弹性体积应变; E 、 ν 分别为动态弹性模量与动态泊松比; $\sigma(t)$ 为试件中的实时应力, 根据应变片采集波形, 通过一维波传播定理获得; 轴向应变 $\varepsilon_x(t)$ 和径向应变 $\varepsilon_\theta(t)$ 由式 (2) 得到。裂纹应变 $\varepsilon_c(t) = 0$ 的时间点所对应的应力值为稳定裂纹开展应力阈值 σ_{ci} , 体积应变 ε_V 达到最大值时的应力为不稳定裂纹开展应力阈值 σ_{cd} 。图 9 为 MG01 实验根据式 (3) 得到的包含裂纹开展各阶段的应力应变曲线及各阶段应力阈值与所对应变变场的示意图。各组实验得到的应力阈值和归一化应力阈值列于表 4。

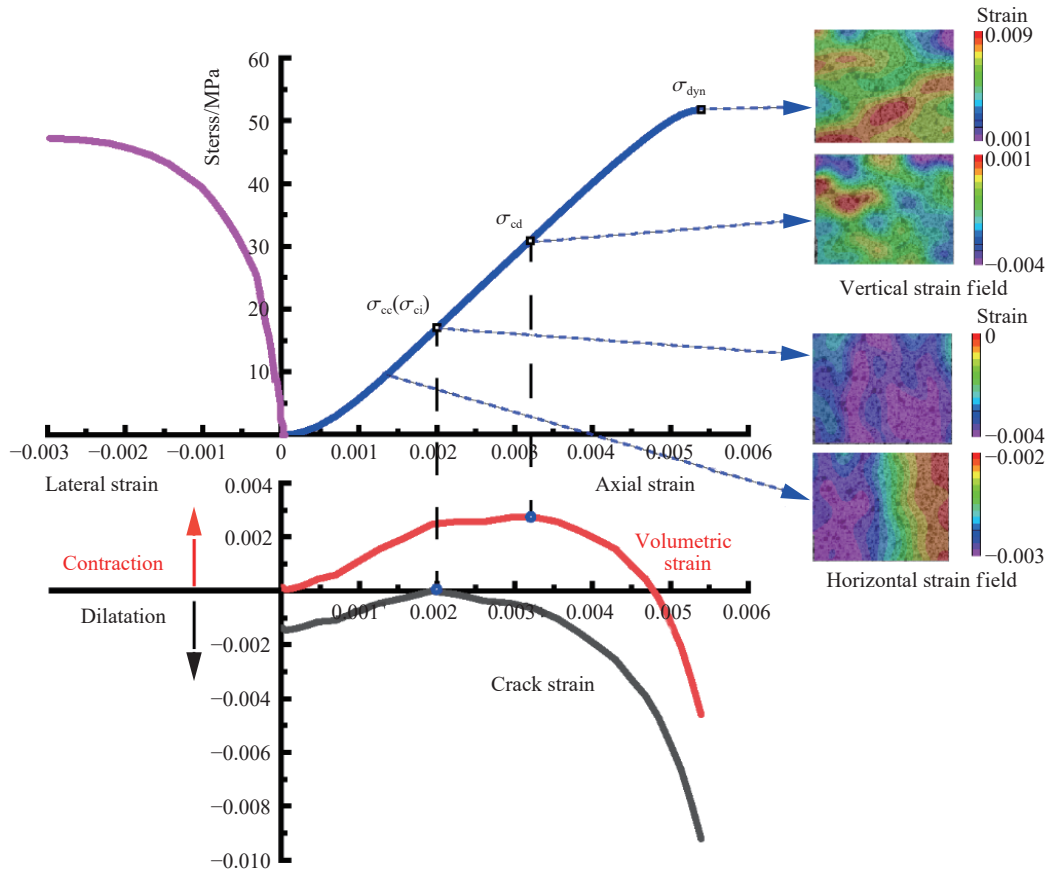


图 9 MG01 实验峰前应力应变曲线及裂纹开展各阶段应力阈值及应变场

Fig. 9 Pre-peak stress strain curves and stress threshold for crack development with corresponding strain field in MG01

根据裂纹应变曲线的特点不难发现, 动态与准静态加载过程中裂纹发展阶段的主要区别在于缺少了纯弹性阶段(裂纹应变恒定为零)。但是在稳定与不稳定裂纹开展之间的应力应变曲线中, 存在一段近似线弹性的准弹性阶段(σ_{ci} 与 σ_{cd} 之间)。结合应力阈值对应的应变场可知, 稳定裂纹起始时刻对应于压缩波刚好传播到试件末端的时刻, 而表面出现应变局局部化时刻对应于不稳定裂纹开展的时刻。因此, 裂纹最早出现于试件内部而后传播至表面呈现出应变局局部化。

从表 4 中可以看出, 随着应变率增高, 3 种粒径砂岩的稳定/不稳定裂纹开展应力阈值及对应的归一化应力阈值都在减小。岩石静态下归一化稳定裂纹开展应力阈值普遍在峰值应力的

表 4 不同应变率下三种砂岩裂纹发展应力阈值

Table 4 Stress thresholds of sandstones at various strain rates

试件	应变率/s ⁻¹	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_{dyn} /MPa	σ_{ci}/σ_{dyn}	σ_{cd}/σ_{dyn}
CG01	76	5.5	12.6	23	0.24	0.54
CG02	80		8.3	28		0.30
CG03	83		6.7	33		0.20
MG01	69	16.1	31.5	52	0.31	0.61
MG02	75	13.4	29.9	57	0.24	0.53
MG03	81	11.6	24.4	60	0.19	0.41
MG04	83	8.6	19.0	67	0.13	0.29
FG01	68	9.1	21.8	59	0.15	0.38
FG02	70	8.1	16.1	61	0.13	0.26
FG03	78	6.1	13.8	64	0.10	0.22

30%~50% 之间^[23], 而归一化不稳定裂纹开展应力阈值在 70%~80% 范围内^[24]。而在本实验中的动态荷载下, 这两个阈值分别下降到峰值应力的 30% 以下与 20%~60%。换言之, 相较于准静态加载条件, 动态荷载下岩石裂纹的孕育和扩展均被提前。横向对比来看, 在近似应变率下, 中等粒径砂岩具有最高的归一化裂纹稳定、不稳定开展的应力阈值, 其次是粗砂岩和细砂岩。细砂岩在动力加载条件下归一化裂纹起裂阈值仅为峰值应力的 10%, 裂纹闭合阶段极短。稳定与不稳定裂纹开展归一化应力阈值的差值, 体现了准弹性阶段的容量, 显然, 随着应变率的增加, 准弹性阶段不断缩短。对于粗砂岩而言, 其本身强度较低, 使得应变率上升后两个应力阈值更接近, 极易造成快速跳过准弹性阶段。这也是 2.1 节中粗砂岩的应变率在 80 s^{-1} 以上时, 名义泊松比跳过平台阶段出现快速爬升现象的内在原因。

应变场可以提供应变局部化分布随时间演化的过程, 从侧面体现裂纹开展的时域特性。图 10 选取了应变率为 $(75 \pm 5) \text{ s}^{-1}$ 的试件 (CG02、MG02、FG03) 加载过程中垂直方向上的应变场演化特征。由图 10 可以看出, 裂纹开展位置分布上, 粗砂岩表面的应变局部化首先从试件中部开始出现, 随后在试件多处相继孕育, 最终先后形成的应变局部化汇合贯通, 构成控制岩石断裂的主裂纹。中、细砂岩的应变局部化则是从端部开始出现, 并由此延伸贯通至试件另一端形成主裂纹。

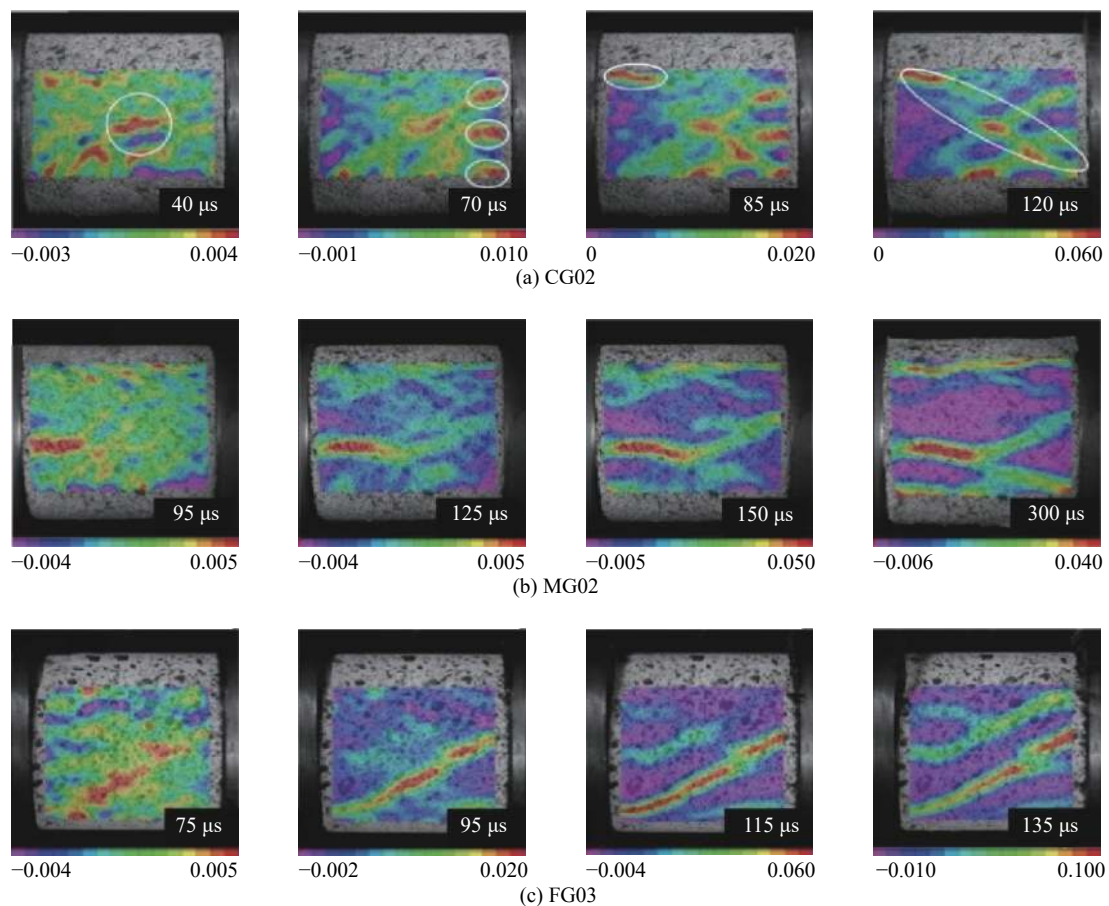


图 10 三种砂岩试件在 75 s^{-1} 应变率时垂直方向应变局部化演化过程

Fig. 10 Evolutions of vertical strain localization for three types of sandstones under the strain rate of 75 s^{-1}

3 讨论

对于砂岩而言, 其内部造岩矿物主要由粒状矿物 (石英、方解石等) 和黏土矿物 (高岭土等) 胶结连接组成, 因此两者的含量比例关系以及分布结构特征将主导砂岩的动态力学性质。

图 11 为利用扫描电镜拍摄的 3 种粒径砂岩的内部矿物颗粒微观形貌。结合图 2 中 3 种粒径砂岩矿

物组成的薄片显微照片可以看出,粗砂岩具有明显的矿物颗粒边界,黏土矿物成分最低,并且矿物之间具有较多的孔隙。细砂岩中黏土矿物成分最高,矿物颗粒轮廓不明显,被黏土介质包裹且孔隙较少。

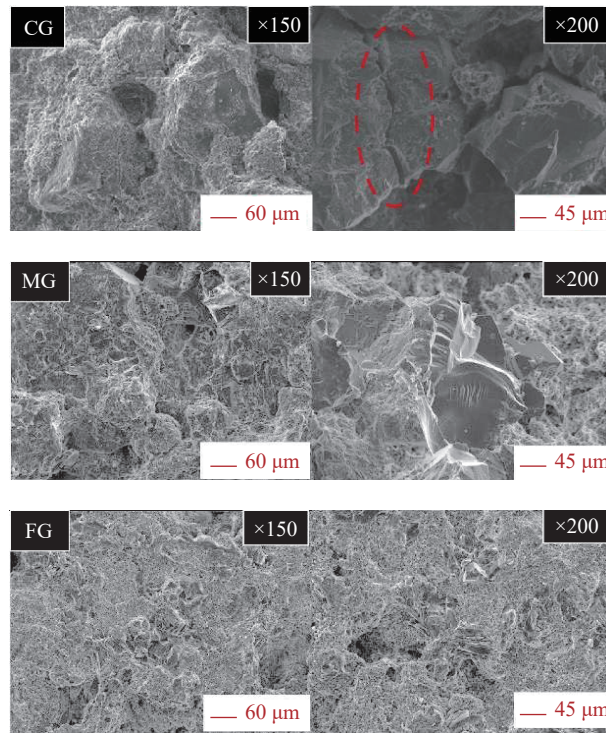


图 11 破坏前后三种砂岩微观颗粒形貌扫描电镜照片

Fig. 11 SEM images of grain topography in three types of sandstones before and after failure

与 Wasantha 等^[6]在静态范围内得到的细砂岩应变率敏感度最高的结论相反,在本文中的动态荷载应变率范围内,粗砂岩的应变率敏感度最高。原因在于:低应变率时,较小的矿物颗粒在致密分布的情形下,应力易于在试件中散布而不断形成新的自适应分布,从而提升其本身的刚度和强度。相反,当应变率处于高位时,短时间内 3 种粒径砂岩的内部应力均来不及在固体颗粒间重新分布。于是孔隙率较大的粗砂岩的动态强度、弹性模量相较于静态情况大幅增长。可见,在动态荷载下,微观矿物结构对于岩石动力力学性质起到主要影响作用。

而在裂纹开展方面,裂纹前兆的应变局部化最先在最大拉应变处孕育。从微观角度分析,由于中、细砂岩含有较多的黏土介质,沿晶裂纹更易找到能量最小路径开展裂纹,因此其归一化起裂应力阈值较低,易于从应力集中处(端部)产生最大拉应变,穿越矿物颗粒间胶结物(黏土介质)延伸形成贯通裂纹。而矿物颗粒较多且粒径较大的粗砂岩,最大拉应变的位置将不可避免地落在晶粒中,被迫产生穿晶裂纹,如图 11 中红圈部分所示。相比于沿晶裂纹,穿晶裂纹的启动更具随机性,加上较大的孔隙率,因此起始时试件中部多处出现应变局部化,随后相邻的应变局部化交汇、连接形成岩石失稳的主裂纹。由此可知,在动态荷载下,微观矿物成分,尤其对于矿物颗粒通过胶结物连接的岩石,其胶结物的含量对岩石动力裂纹发展具有更大的影响。

4 结 论

为深入研究矿物颗粒粒径与动力荷载耦合效应对岩石动力特性和裂纹开展的影响,对 3 种不同粒径的砂岩开展了分离式霍普金森杆动态单轴抗压实验,得到以下主要结论。

(1) 通过对高速 3D-DIC 应变场进行像素平均化,获得了试件径向应变时程曲线,可填补动态荷载下岩石试件径向变形量测手段的不足。

(2) 在 $69\sim 83\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内, 砂岩弹性应变储能可逆释放的临界应变率随着粒径的减小而增高; 动态压缩强度、弹性模量随着粒径减小而增大, 而动态强度应变率敏感度则与强度规律相反。相较于静态条件下, 中等粒径砂岩和细砂岩的动态弹性模量增长了 2~3 倍, 粗砂岩可增长 5 倍以上, 细砂岩动态泊松比相较于静态提高了约 25%, 中等粒径砂岩约为静态时的 70%。

(3) 动态荷载下岩石裂纹的孕育和扩展相比静态条件下均被提前, 其中细砂岩在动力荷载条件下归一化裂纹起裂阈值仅为峰值强度的 10%。动态裂纹首先出现于试件内部而后传播至表面呈现出应变局部化, 其中粗砂岩应变局部化出现在试件的多处, 最终汇合贯通形成控制岩石断裂的主裂纹。中等粒径砂岩、细砂岩的应变局部化从端部开始出现, 并由此延伸、贯通至试件另一端形成主裂纹。

(4) 动态荷载下, 微观矿物结构对于岩石动力力学性质发挥主要影响作用, 胶结物的含量对于岩石动力裂纹发展更具影响作用。

参考文献:

- [1] THOMAS D C, BENSON S M. Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations—results from the CO₂ capture project: vol 2—geologic storage of carbon dioxide with monitoring and verification [M]. USA: Elsevier, 2015.
- [2] YUSOF N Q A M, ZABIDI H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor [J]. *Procedia Chemistry*, 2016, 19: 975–980. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.144.
- [3] RÄISÄNEN M. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-litti complex, southeastern Finland [J]. *Engineering Geology*, 2004, 74(3): 197–211. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.03.009.
- [4] HARELAND G, POLSTON C, WHITE W. Normalized rock failure envelope as a function of rock grain size [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 33(5): 479–485. DOI: 10.1016/0148-9062(93)90012-3.
- [5] 李柯莹, 李铁. 不同加载速率下砂岩弯曲破坏的细观机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 043101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0178.
LI K X, LI T. Micro-mechanism of bending failure of sandstone under different loading rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 043101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0178.
- [6] WASANTHA P, RANJITH P G, ZHAO J, et al. Strain rate effect on the mechanical behaviour of sandstones with different grain sizes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5): 1883–1895. DOI: 10.1007/s00603-014-0688-4.
- [7] YU M, WEI C, NIU L. The coupled effect of loading rate and grain size on tensile strength of sandstones under dynamic disturbance [J]. *Shock and Vibration*, 2017: 6989043. DOI: 10.1155/2017/6989043.
- [8] XING H Z, ZHANG Q B, RUAN D, et al. Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 61–72. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.011.
- [9] LIU X, YANG J, XU Z, et al. Experimental investigations on crack propagation characteristics of granite rectangle plate with a crack (GRPC) under different blast loading rates [J]. *Shock and Vibration*, 2020: 8885582. DOI: 10.1155/2020/8885582.
- [10] 徐振洋, 杨军, 郭连军. 爆炸聚能作用下混凝土试件劈裂的高速 3D DIC 实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 400–406. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0400-07.
XU Z Y, YANG J, GUO L J. Study of the splitting crack propagation morphology using high-speed 3D DIC [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 400–406. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0400-07.
- [11] XING H Z, ZHAO J, WU G, et al. Perforation model of thin rock slab subjected to rigid projectile impact at an intermediate velocity [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 139: 103536. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103536.
- [12] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications [M]. USA: Springer Science and Business Media, 2009.
- [13] DAI F, HUANG S, XIA K, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657–666. DOI: 10.1007/s00603-010-0091-8.
- [14] ABEN F, DOAN M L, GRATIER J P, et al. High strain rate deformation of porous sandstone and the asymmetry of

- earthquake damage in shallow fault zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 463: 81–91. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.01.016.
- [15] LIU K, ZHAO J, WU G, et al. Dynamic strength and failure modes of sandstone under biaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104260. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104260.
- [16] 王学滨. 加载速度对岩样全部变形特征的影响 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 353–358. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.02.012.
- WANG X B. Effect of loading rate on entire deformational characteristics of rock specimen [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 353–358. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.02.012.
- [17] 王学滨. 软化模量对岩样全部变形特征的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(5): 600–605. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2006.05.010.
- WANG X B. Effect of softening modulus on entire deformational characteristics of rock specimen [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(5): 600–605. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2006.05.010.
- [18] 王让甲, 樊冀安, 高学之. 岩石负泊松比的探讨 [J]. *探矿工程*, 1996, 4: 17–19.
- WANG R J, FAN J A, GAO X Z. Note on rock with negative Poisson's ratio [J]. *Mine Exploring Engineering*, 1996, 4: 17–19.
- [19] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪膨变形特征研究 [J]. *力学与实践*, 2001, 23(5): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0879.2001.05.004.
- ZHU J M, XU B Y, CEN Z Z. Study on the deformation mechanics of sliding dilation of post-failure rocks [J]. *Mechanics in Engineering*, 2001, 23(5): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0879.2001.05.004.
- [20] BURSHEIN L S. Determination of Poisson's ratio for rocks by static and dynamic methods [J]. *Soviet Mining*, 1968, 4(3): 235–238. DOI: 10.1007/BF02501543.
- [21] GERCEK H. Poisson's ratio values for rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 1–3. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.011.
- [22] XING H Z, ZHANG Q B, ZHAO J. Stress thresholds of crack development and Poisson's ratio of rock material at high strain rate [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51: 945–951. DOI: 10.1007/s00603-017-1377-x.
- [23] BRACE W, PAULDING B, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(16): 3939–3953. DOI: 10.1029/JZ071i016p03939.
- [24] MARTIN C, CHANDLER N. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 643–659. DOI: 10.1016/0148-9062(94)90005-1.

(责任编辑 蔡国艳)