

基于3D-DIC系统的白砂岩单轴压缩应变率效应的力学性能试验研究^①

张春阳^{1,2,3,4,5}, 张宇超¹, 李小双^{4,5,6}

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070; 4. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 5. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000; 6. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 通过选取典型岩样, 研究了白砂岩在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的单轴压缩性能, 采用3D-DIC系统观测和采集岩样表面位移云图, 并分析不同应变率下岩样变形破坏特征差异。结果表明, 岩样表面位移场变化反映了破坏面演化规律, 剪切破坏面与位移场集中存在对应关系。全局轴向应变差异主要发生在微裂隙压密到弹性变形期间; 加载初期, 全局径向应变存在差异, 在峰值强度时下端部区域径向位移最大, 岩样上端部变形受到端部效应影响, 径向向外膨胀受端面与垫片间摩擦限制; 此外, 下端部局部轴向应变大于上端部区域。随着加载速率增大, 岩样从延性特征向脆性特征转变。加载速率较低时, 岩样破坏过程中孔隙坍塌使得部分裂隙再次闭合、滑移而产生摩擦效应, 从而使峰值强度附近的应力-应变曲线出现波动。白砂岩峰值强度、弹性模量、泊松比等力学参数随加载速率增大而增加。

关键词: 白砂岩; 单轴压缩; 应变率; 3D-DIC系统; 加载速率; 变形破坏特征; 位移场; 力学性能

中图分类号: TU431

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.005

文章编号: 0253-6099(2023)01-0021-05

Experimental Study on Mechanical Properties of White Sandstone Under Uniaxial Compression with Different Strain Rate Based on 3D-DIC System

ZHANG Chunyang^{1,2,3,4,5}, ZHANG Yuehao¹, LI Xiaoshuang^{4,5,6}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 4. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co Ltd, Maanshan 243000, Anhui, China; 5. State Key Laboratory of Safety and Health in Metal Mines, Maanshan 243000, Anhui, China; 6. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China)

Abstract: Some typical rock was taken as the sample in an experiment to study the mechanical properties of white sandstone under uniaxial compression with strain rates ranging from 10^{-5} s^{-1} to 10^{-3} s^{-1} . The surface displacement contours of the samples were observed and collected by using 3D-DIC system, and the difference in the deformation and failure characteristics of samples under the effect of different strain rate was also analyzed. The results show that the variation of displacement field on the surface of rock sample reflects an evolution law of failure surface, and there is a corresponding relationship between shear failure plane and concentrated displacement field. The difference in the overall axial strain mainly occurs during the period from micro-crack compaction to elastic deformation. At an initial stage of loading, there is difference in the overall radial strain. The lower end part of the sample has the largest radial displacement when the strength reaches the peak, while the upper end part is deformed under the impact of the end effect. The radial outward

① 收稿日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174088, 42277154); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题(Z020015); 国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金(NECP2022-04)

作者简介: 张春阳(1981—), 男, 湖南怀化人, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿山开采与岩石力学。

通信作者: 李小双(1983—), 男, 湖北随州人, 博士(后), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为边坡工程与露天矿山开采。

expansion is limited by the friction between the end face and the gasket. In addition, the local axial strain at the lower end is greater than that at the upper end. With an increase in the loading rate, rock sample has its mechanical characteristics converted from ductility to fragility. During the failure process of rock sample under the uniaxial compression with a lower loading rate, the occurred pore collapse results in friction effect due to the closure again and slippage of some cracks, thus there appears fluctuation in the stress-strain curve near the peak strength. It is shown that the mechanical parameters (peak strength, elastic modulus and Poisson's ratio) of white sandstone increase as the loading rate increases.

Key words: white sandstone; uniaxial compression; strain rate; 3D-DIC system; loading rate; deformation and failure characteristics; displacement field; mechanical properties

岩石力学一直是岩土工程领域的主要研究方向之一,其对不同应力环境下的矿山开采、隧道掘进、岩土爆破的工程设计与施工有重要的指导意义。不同加载速率下岩石的物理力学性质存在差异,即岩石力学性能对应变率存在明显依赖性。国内外学者针对不同加载方式下岩石力学特性进行了多角度研究^[1-7]。随着计算机技术的发展,三维测量技术逐渐成熟,DIC技术在岩石力学试验方面的应用越来越广泛^[8-11]。本文选用白砂岩试样,基于压缩伺服试验系统和3D-DIC系统对其进行不同应变率下的单轴压缩试验,分析试样表面位移场演化过程,并讨论应变率对白砂岩力学性质的影响,为白砂岩的工程应用提供相关参考。

1 试验方案及设备

试验选用的白砂岩主要成分为石英、黏土、针铁矿,粒径为0.5~1 mm,质地细腻,颗粒均匀。根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),对试件表面进行打磨,使其不平行度和不垂直度小于0.025 mm,最终制成直径50 mm、高100 mm的圆柱形试件。试验前对岩样进行了声波测试,挑选波速相近的试样进行试验,提高测试结果的可靠性。试样挑选结束后,利用相关制斑工具对砂岩试件进行散斑处理,制作后的试样如图1所示。

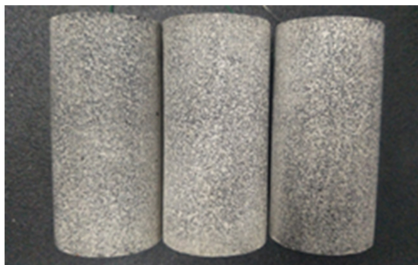


图1 散斑处理后的典型试件

试验设备为TWT通用万能试验机和3D-DIC设备,加载方式为位移控制,为了获取不同的应变率,试验采用0.3、0.6和6.0 mm/min 3种不同加载速率,因

试样高100 mm,通过计算得到其对应的应变率分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 和 10^{-3} s^{-1} 。各试样参数如表1所示。

表1 试样参数及其对应的加载速率

加载速率/ (mm·min ⁻¹)	试件 编号	直径/ mm	高度/ mm	体积/ cm ³	质量/ g	密度/ (g·cm ⁻³)
0.3	A ₁	50.15	100.64	198.79	468.77	2.36
	A ₂	50.21	100.61	199.21	474.75	2.38
	A ₃	50.36	100.59	200.36	468.53	2.34
0.6	B ₁	50.23	100.70	199.54	470.98	2.36
	B ₂	50.12	100.67	198.62	473.18	2.38
	B ₃	50.33	100.64	200.22	468.68	2.33
6.0	C ₁	50.13	100.55	198.46	468.04	2.36
	C ₂	50.24	100.52	199.27	469.18	2.35
	C ₃	50.15	100.36	198.24	466.08	2.35

2 试验结果分析

2.1 加载速率对表面位移场演化的影响

试验结束后,需要对典型试样的三维表面变形场进行分析,图2为单轴压缩条件下试样的典型应力-应变曲线,图3为3D-DIC软件中设置的坐标轴方向。为了方便分析测试结果,在图2单轴压缩曲线典型区段选取5个特征点O、A、B、C、D,这5个点分别对应于试样破坏过程中的初始阶段、压密阶段、弹性阶段、裂隙加速扩展阶段和破坏阶段,它们能清晰反映试验过程中试样表面的变形特征。

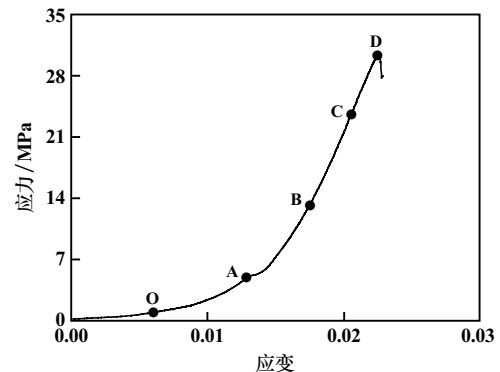


图2 试样单轴压缩应力-应变曲线

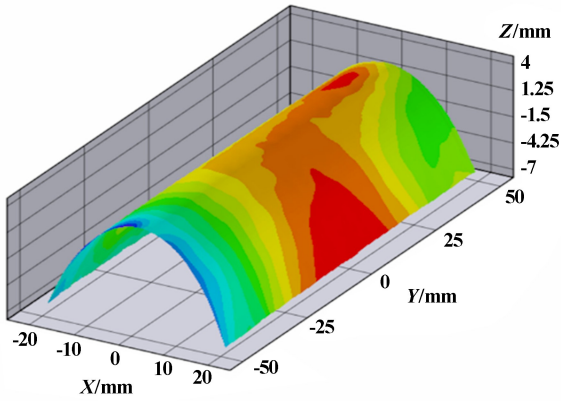


图 3 试样坐标轴设置

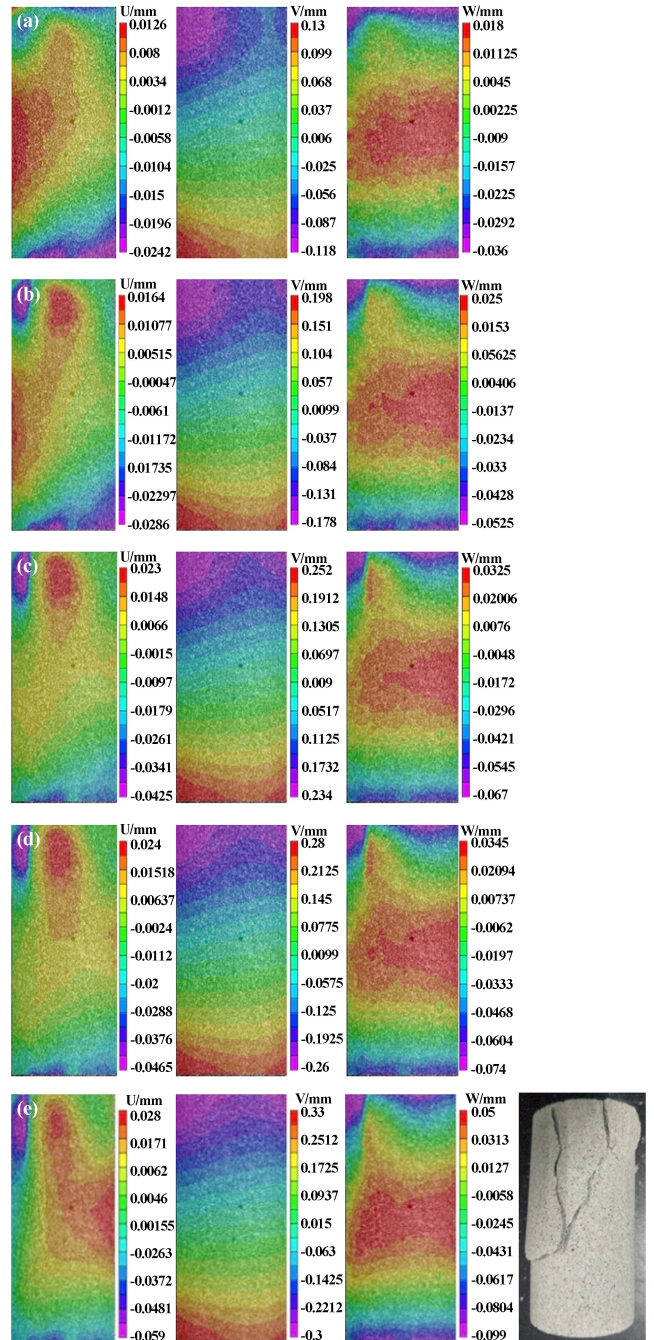
岩样表面位移场可以反映其变形破坏特征。加载速率 0.6 mm/min 条件下,上述 5 个特征点对应的三维变形场如图 4 所示,其中 U、V、W 分别对应于 X、Y、Z 方向,结合图 3 可知,其中 X 和 Z 方向为径向,而 Y 方向为轴向,由于试样为圆柱形,通过 3D-DIC 系统观察到的表面不在一个平面内,因此,可得到 3 个方向位移分量的云图。整体来看,全过程试样沿 Y 方向的位移云图形状变化总体较小,加载过程中未出现明显的局部应变突然增大的现象,且在压力机作用下,试样两端的变形及其程度大于中部区域,这主要是由于端部直接承受压力机的荷载,荷载会随着岩石颗粒之间的接触而逐渐往试样中部转移,并且通过变形或微裂纹扩展,能量会逐渐被吸收和耗散,试样中部变形小于端部。此外,从图 4 还可以发现,试样底部的位移总体比顶部要稍大一些。

A 点在 X 方向端部表现出明显的应变集中现象,表明在外部荷载作用下微裂纹首先在此压密,并且从理论上讲,此处的微裂纹应最先扩展。B 点和 C 点位移场总体值比 O 点和 A 点大出不少,并且随着位移增大,进一步表明微裂纹在稳定扩展,最终在 D 点位移场连通试样表面,这表明从 A 时刻试样内部发育的裂隙已经贯通,形成贯通性破裂面。

Z 方向上,试样中部区域存在位移场集中,其范围从中部边缘向上端部延伸。此外,D 点 X 方向位移场集中也具有类似特征。剪切破坏面与位移场集中存在对应关系,最终在中部边缘和上端部剪断形成破坏面,如图 4(e) 右侧破坏岩样所示。

图 5 为不同加载速率下典型岩样峰值强度时刻对应的位移场和试样最终破坏形态。通过位移场云图和最终破坏状态对比分析可知,试样的破坏由表面位移场集中区域演化,尤其是加载速率 0.3 mm/min 时,X

和 Z 方向最终在位移场集中区的边界形成宏观裂隙,贯穿试样侧面,导致试样表面局部区域破坏。加载速率 0.6 mm/min 时,试样的宏观破坏程度更明显,宏观破坏面更靠近试样内部。加载速率 6 mm/min 时,由一条主裂隙从试样右上往左下贯穿砂岩试样,角度近似 45°,破坏面更靠近岩样中心,且破坏程度也较大。同时也发现,破坏面形态与 X 和 Z 方向位移场具有较好的对应关系,岩样破坏面位于位移场集中区域的边界上。



(a) O 点位移云图; (b) A 点位移云图; (c) B 点位移云图; (d) C 点位移云图; (e) D 点位移云图

图 4 加载速率 0.6 mm/min 时砂岩的三维应变场演化

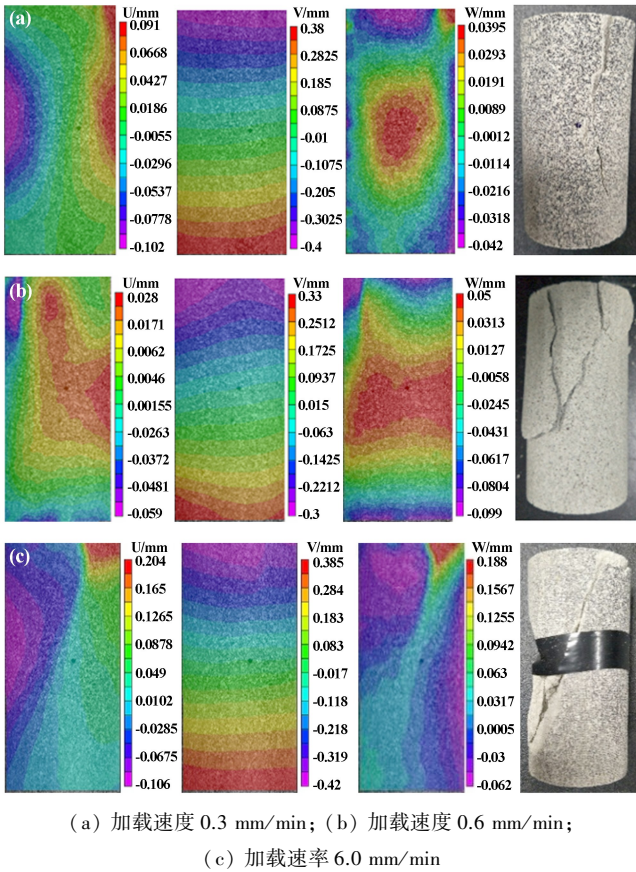
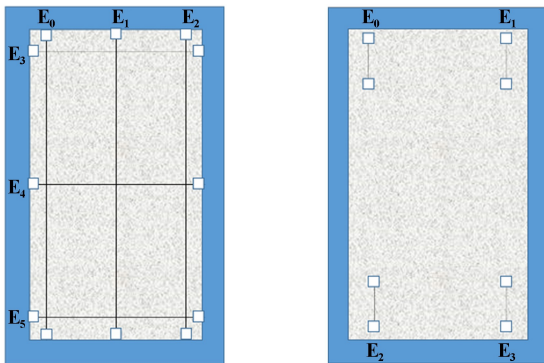


图5 不同加载速率下试样峰值时刻位移云图与岩样破坏特征

2.2 试样表面非均匀变形分析

相较于以往采用应变片或引伸计等测量试样变形的繁琐性和局限性,3D-DIC 系统采用的虚拟引伸计方法非常简单快捷。如图 6 所示,整个区域代表岩样表面,在 3D-DIC 系统中,选定灰白色区域参与岩样表面变形分析和计算。方案 1:为获取试样全局应变变化情况,沿垂直方向于灰白色计算区域均匀布置 $E_0 \sim E_2$ 共 3 条等长度虚拟引伸计,计算结果为全局轴向应变,沿水平方向均匀布置 $E_3 \sim E_5$ 共 3 条等长度虚拟引伸计,计算结果为全局径向应变。方案 2:为获取试样局

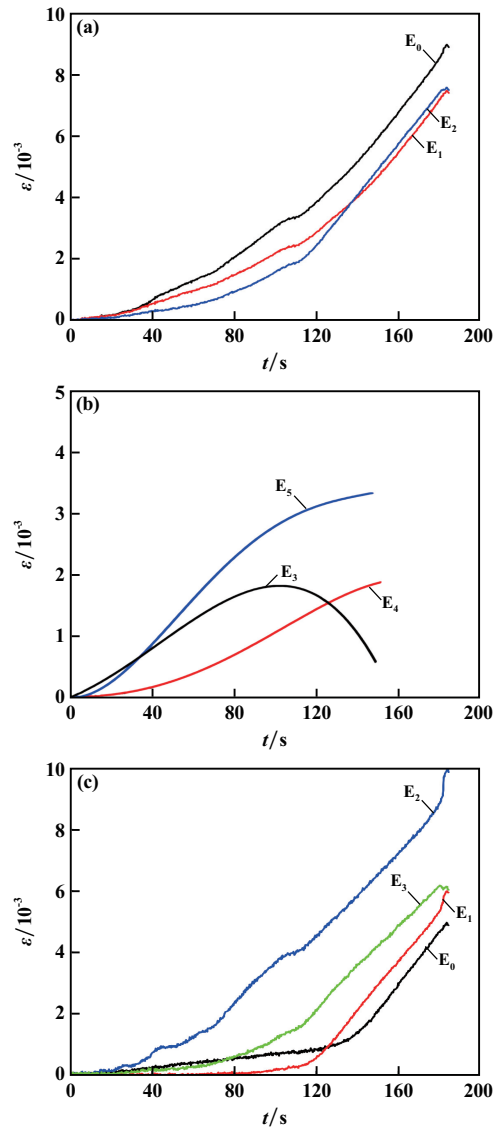


(a) 全局布置方式; (b) 局部布置方式

图6 虚拟引伸计布置方式

部轴向应变变化情况,在计算区域顶部和底部两侧分别布置 E_0, E_1 和 E_2, E_3 共 4 条等长度虚拟引伸计。

虚拟引伸计计算结果见图 7。由图 7(a)可以看出,均匀分布的 3 条轴向引伸计在试样压缩初期应变曲线差异很小,全局轴向应变差异主要发生在裂隙压密到弹性变形期间,曲线斜率增加,应变速率增加,其中 E_0 区域轴向应变最大, E_1, E_2 区域在弹性变形之后应变曲线非常接近。由图 7(b)可以看出,加载初期应变就出现差异, E_3 区域应变最大;试样破坏时,各区域径向应变差异较大,其中 E_5 区域径向应变最大,表明试样加载到峰值强度时下端部区域的径向位移最大; E_3 区域的应变表现为先增大后减小,说明加载过程中上端部区域变形受端面效应的影响,径向向外膨胀受到端面与垫片间摩擦限制,导致上端部变形量减小。由图 7(c)可以看出,下端部区域应变大于上



(a) 全局轴向应变; (b) 全局径向应变; (c) 局部径向应变

图7 虚拟引伸计计算结果

端部区域,尤其是 E_2 区域。 E_0 、 E_1 、 E_3 区域在试验前期应变增长较为缓慢,大约 100 s 后,弹性变形阶段应变增长加快,可能是这 3 个区域微裂隙发育程度相对较弱,导致在裂隙压密阶段变形不显著。

2.3 应力-应变曲线及主要力学参数分析

图 8 为白砂岩试样在 3 种不同加载速率下的应力-应变曲线,每个加载速率下选取了 3 个试样数据进行比较,以不同线型来区分。从图 8 可以看出,加载初期曲线上升缓慢,并有下凹的特点,可能是岩样内部原有微裂隙或张开性结构面受压闭合引起。后续过程中试样原生裂隙和节理完全闭合,试样进入弹性变形阶段和裂隙稳定发育阶段,应力-应变曲线斜率稳定,近似直线上升。随着加载荷载不断增大,试样由弹性变形进入塑性变形,在此阶段微裂隙迅速扩展,应力-应变曲线斜率逐渐减小,上升速率减缓,并迅速下降直至岩样破坏。塑性屈服变形阶段与加载速率大小密切相关,加载速率 0.3 mm/min 时,岩样的塑性屈服变形表现比较明显,具有显著的延性破坏特征;加载速率增大到 0.6 mm/min 和 6.0 mm/min 后,岩石塑性屈服变形越来越不显著,在弹性变形后期岩石表现出突然脆断特征,与加载速率 0.3 mm/min 相比,曲线弹性变形阶段偏长。可见,随着加载速率增大,岩石的脆性特征越来越显著;当达到极限荷载后,内部裂隙贯穿表面,导致岩石发生破坏,同时储存的应变能释放加剧了岩样破坏程度,最终应力-应变曲线陡然下降。

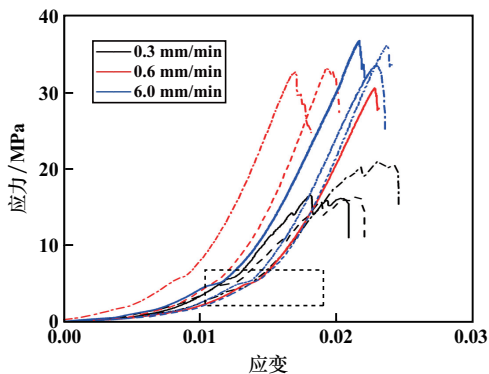


图 8 不同加载速率下的应力-应变曲线

在微裂隙压密阶段,由于砂岩微裂隙较为发育,岩样轴向应变增长较快,增长持续时间较长,应力-应变曲线斜率较小。在压密阶段后期,应力-应变曲线存在一个小的波动,如图 8 虚线框内所示,这可能是岩样受压变形不均所致。从位移场图和局部轴向引伸计结果可以看出,岩样下端部变形总体大于上端部,这可能是白砂岩内原生裂隙分布不均衡,导致岩样上、下端部变形不同步,岩样各部分未同时进入弹性变形阶段。此

外,加载速率 0.3 mm/min 时,在峰值强度附近应力-应变曲线出现了波动现象,这是岩样破坏过程中孔隙坍塌使得部分裂隙再次闭合,裂隙面滑移过程中产生的摩擦效应导致^[12]。加载速率较大时,应力-应变曲线无明显波动现象,岩石表现为脆断特征,裂隙坍塌和再闭合持续的时间非常短;岩体储存的弹性应变能更多,能量释放也更剧烈,难以看到应力-应变曲线的波动现象。

不同加载速率下白砂岩试样力学参数见表 2。表 2 结果表明,白砂岩力学性质受加载速率影响较大,峰值强度、弹性模量、泊松比等力学参数随加载速率增大而增加。这是由于内部微裂隙不断扩展贯穿导致岩样受压破坏,在较大加载速率下,岩样破坏所需时间缩减,原生裂隙缺乏足够时间扩展,使岩样抵抗外部荷载的变形能力增强,峰值强度和弹性模量增加。此外,从微观角度来看,外力导致岩样内部颗粒排列位置变化而引起变形,随着加载速率增大,内部颗粒空间序列缺乏足够时间调整,使得岩样各向异性特征增强,轴向、径向变形差异性扩大,岩石泊松比随之增大。

表 2 不同加载速率下白砂岩试样力学参数

加载速率/(mm·min ⁻¹)	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
0.3	18.01	1.16	0.20
0.6	32.05	1.41	0.24
6.0	35.40	1.61	0.27

3 结 论

1) 在单轴压缩曲线典型区段选取 5 个特征点,分别对应于初始、压密、弹性、裂隙加速扩展和破坏阶段。通过 3D-DIC 系统,得到各特征点在 X、Y、Z 方向上的位移分量云图,并分析了位移云图的分布规律,结果表明,岩样表面位移场变化反映了破坏面演化规律,剪切破坏面与位移场集中存在对应关系。

2) 全局轴向应变差异主要发生在裂隙压密到弹性变形期间;在加载初期全局径向应变就存在差异,试样加载到峰值强度时下端部区域的径向位移最大,加载过程中试样上端部区域变形受到端部效应影响,径向向外膨胀受到端面与垫片间摩擦限制,导致上端部变形量减小。总体来说,下端部局部轴向应变大于上端部区域,微裂隙发育程度较弱,可能会导致岩样在裂隙压密阶段变形不显著。

3) 加载速率 0.3 mm/min 时,岩样具有明显的延性破坏特征;加载速率 0.6 mm/min 和 6.0 mm/min 时,岩样表现出突然脆断特征。在压密阶段后期,应力-应变

(下转第 31 页)

的构想,以期提高爆破破岩效果。

2) 采用数值模拟进行研究得知,相较于常规扇形孔爆破,高地应力环境下扇形组合孔短延时爆破可以获得更为优良的岩石破碎效果;短延时间隔爆破裂纹拓展较好,印证了抵抗线较小时高应力环境对爆破效果确实起促进作用;当炮排与最大主应力成较小角度时,可以获得较为优良的爆破效果,同时对后续炮排以及岩体的保护也更加到位。

3) 在谦比希铜矿 1020-1-3 采场对扇形组合孔构想进行现场试验,采用扇形组合孔方案可以有效降低大块率,破岩效果提高显著,验证了其可行性。

参考文献:

- [1] 刘志祥,郑斌,刘进,等. 金属矿深部开采岩爆危险预测的 GA-ELM 模型研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):1-4.
- [2] 马春德,徐家庆,刘焕新,等. 基于 ANSYS-FLAC^{3D} 的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):20-23.
- [3] LU W B, CHEN M, GENG X, et al. A study of excavation sequence and contour blasting method for underground powerhouses of hydropower stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2012,29(5):31-39.
- [4] 杨建华,孙文彬,姚池,等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击, 2020,40(7):118-127.
- [5] 赵建平,程贝贝,卢伟,等. 深部高地应力下岩石双孔爆破的损伤规律[J]. 工程爆破, 2020,26(5):14-20.

(上接第 25 页)

曲线存在小波动,估计是岩样受压变形不均所致;在峰值强度附近,应力-应变曲线的波动是岩样破坏过程中孔隙坍塌使得部分裂隙再次闭合、滑移产生摩擦效应所致。此外,白砂岩峰值强度、弹性模量、泊松比等力学参数随加载速率增大而增加。

参考文献:

- [1] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995(3):265-269.
- [2] 苏承东,李怀珍,张盛,等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(5):943-950.
- [3] 宋义敏,邢同振,邓琳琳,等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究[J]. 岩土力学, 2017,38(10):2773-2779.
- [4] 李兵磊,远彦威,曹洋兵,等. 冲击荷载下灰岩的动力学特性及能量耗散规律[J]. 金属矿山, 2021(8):61-66.
- [5] 甘德清,田晓曦,高锋,等. 循环冲击条件下磁铁铁矿石损伤特征研究[J]. 金属矿山, 2020(3):79-84.
- [6] 李杰林,洪流,周科平,等. 不同加卸载方式下饱和岩石力学特

- [6] Yi C P, Johansson D, Greberg J. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 104:321-330.
- [7] Jayasinghe L B, Shang J L, Zhao Z Y, et al. Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence[J]. Computers and Geotechnics, 2019,116(C):103207.
- [8] LI X B, TAO M, WU C Q, et al. Spalling strength of rock under different static pre-confining pressures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017,99:69-74.
- [9] ZHANG P F, YAN G L, PENG J Y, et al. Experimental study on crack formation in sandstone during crater blasting under high geological stress[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment: The official journal of the IAEG, 2020,79(2):1323-1332.
- [10] 陈辉. 深井高地应力环境下岩石爆破破岩机理与工程应用[D]. 长沙:中南大学资源与安全工程学院, 2022.
- [11] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报, 2009,23(4):277-283.
- [12] XIE L X, LU W B, ZHANG Q H, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2017,66:19-33.
- [13] 矿冶科技集团有限公司. 谦比希铜矿东南矿体深部地应力规律测试及分析研究报告[R]. 2019.

引用本文:温晨,乔秋秋,邱贤阳,等. 深井扇形组合孔短延时爆破裂纹扩展模拟研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):26-31.

- 征的试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):15-19.
- [7] 李涛涛,左宇军,孙文吉斌,等. 不同倾角内蕴裂纹页岩力学特性及破坏过程研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):27-31.
- [8] 大久保诚介,汤杨,许江,等. 3D-DIC 系统在岩石力学试验中的应用[J]. 岩土力学, 2019,40(8):3263-3273.
- [9] 彭守建,冉晓梦,许江,等. 基于 3D-DIC 技术的砂岩变形局部化荷载速率效应试验研究[J]. 岩土力学, 2020,41(11):3591-3603.
- [10] Aliabadian Z, Zhao G F, Russell A R. Crack development in transversely isotropic sandstone discs subjected to Brazilian tests observed using digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019,119(7):211-221.
- [11] Sharafifisafa M, SHEN Lu-ming, XU Qing-feng. Characterization of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018,112(12):122-138.
- [12] 杨仕教,曾晟,王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005,27(7):786-788.

引用本文:张春阳,张宇超,李小双. 基于 3D-DIC 系统的白砂岩单轴压缩应变率效应的力学性能试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):21-25.