

白云岩动力学特性及破坏模式试验研究*

张智宇¹, 王建国², 黄永辉³, 李祥龙¹, 赵文⁴

(1. 昆明理工大学 国土资源与工程学院, 昆明 650093; 2. 云南农业大学 建筑工程学院, 昆明 650201;
3. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500; 4. 贵州开源爆破工程有限公司, 贵阳 551400)

摘要:为分析矿山深部岩石动力学特性及细观裂纹萌生、扩展以及相互贯通的破坏机制,使用改进的霍普金森试验设备,对白云岩进行常规单轴冲击试验,从应力-应变、强度、能量分布方面探讨了矿岩的动态力学性质,并借助高速摄影设备对白云岩试件的冲击破坏形态及模式进行细观描述。试验得到:白云岩试件动态强度随加载应变率从 41.5 s^{-1} 增大到 112.5 s^{-1} , 动态抗压强度峰值从 104.53 MPa 提高到 208.6 MPa, 且强度峰值出现的时间越来越早;单位体积吸收能随应变率提高呈线性增加关系,破碎块体尺寸随单位体积吸收能的增大而减小;高速摄影细观分析显示,冲击应变率越大,试件完全破坏的发生时间越早,破坏越严重,试件主要破裂面的形成方向与冲击方向一致,属于沿轴方向冲击荷载作用下的拉伸破坏。

关键词:霍普金森压杆;深部白云岩;应变率;破坏模式;高速摄影

中图分类号:TD 235

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1195-07

Experimental Analysis on Dynamic Characteristics and Failure Mode of Deep Dolomite Based on High-speed Photography

Zhang Zhiyu¹, Wang Jianguo², Huang Yonghui³, Li Xianglong¹, Zhao Wen⁴

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P.R. China; 2. College of Civil and Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, P.R. China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R. China; 4. Guizhou Kaiyuan Blasting Engineering Co. Ltd., Guiyang 551400, P.R. China)

Abstract: In order to analyze the rock dynamic characteristics and failure mechanism in the process of generation, propagation and coalescence of cracks, a dynamic impact compression test for dolomite was carried out by using improved split Hopkinson pressure bar apparatus. The dynamic impact characteristics of deep dolomite was obtained. The impact failure morphology and mode of dolomite specimens were described by means of high-speed photographic equipment. The results show that as the load strain rate increased from 41.5 s^{-1} to 112.5 s^{-1} , the peak dynamic compressive strength of dolomite increased from 104.53 MPa to 208.6 MPa, and the intensity peak appeared earlier. The unit volume absorption energy increased linearly with the strain rate, and the size of the broken block decreased with the increasing of unit volume absorption energy. Mesoscopic analysis of high-speed photography showed that the larger the impact strain rate was, the earlier the failure occurred, the more serious the damage was. The failure of the specimens was mainly formed on the fracture surface along the impact direction. There was no

* 收稿日期:2018-04-20(修改稿)

作者简介:张智宇(1973-),男,广东韶关人,副教授,主要从事工程爆破施工和振动测试技术方面的研究。

E-mail:924221851@qq.com

通讯作者:黄永辉(1981-),男,河北石家庄人,博士,主要从事爆破工程数值模拟与应用研究。

E-mail:8176309@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51564027);云南省科技厅基础研究青年项目(2016FD029);云南省教育厅科学研究基金(2016ZZX108)

interaction between the fracture plane, which was the tensile failure caused by the poisson effect of axial impact.

Keywords: SHPB; deep dolomite; strain rates; failure mode; high-speed photography

0 引言

随着矿产资源地下开采深度逐渐增加,深部岩石因岩体自重及构造作用处于高应力场环境,岩石在高应力作用下存在完全异于浅部的力学本构行为^[1],由于对深部及超深部岩石性质和行为缺乏了解,难以有效预测与防治,在深部资源开采中时常发生重大灾害事故。因此,针对高应力和高应变率及共同作用下的岩石动态力学性质的研究,对深部矿体安全高效的开采具有重要意义。周宗红等^[2]利用改进的三维 SHPB 动静组合加载装置分析轴压、围压和应变率对白云岩强度、变形模量、能量吸收等的影响,探讨了岩石动静组合加载的应变率效应;牛勇等^[3]利用该装置对红砂岩进行一维预应力状态下岩石的冲击力学特性试验,研究高地应力下再受动力扰动的岩石力学特性;唐礼忠等^[4]对取自井下 900 m 深处的砂卡岩岩样进行一维静载及循环冲击共同作用下的加载试验,分析砂卡岩的动力学特性;王建国等借助 SHPB 设备研究了低温花岗岩^[5]、模拟节理岩石^[6-9]、分层介质^[10]和红砂岩^[11]的动力学特性及破坏特征。然而上述文献中多数动态破坏模式的分析都是从宏观角度,对裂纹起裂模式及发展路径关注较少,但也有部分学者将高速摄影技术运用到层裂破坏试验^[12]、动态压缩试验^[13]研究裂纹起裂及扩展。本文拟将高速摄影设备与 SHPB 冲击破坏过程相结合,从细观角度分析玉溪矿业狮子山矿 16 中段白云岩的冲击破坏过程,为今后该地下矿山的合理高效采矿及围岩的支护稳定性服务。

1 冲击试验

1.1 试验设备

冲击试验选择国际岩石力学学会推荐的岩石动力学标准测试工具——分离式霍普金森压杆 (SHPB)^[14],SHPB 装置杆件和冲头的材质均采用 40Cr 合金钢,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,纵波波速为 $5\,400\text{ m/s}$,杆径为 50 mm ,入射杆和透射杆长度均为 2 m ,冲头选择纺锤形冲头以实现近似恒应变率的半正弦波加载^[15]。入射杆和透射杆应变片测得的典型冲击原始波形如图 1 所示。

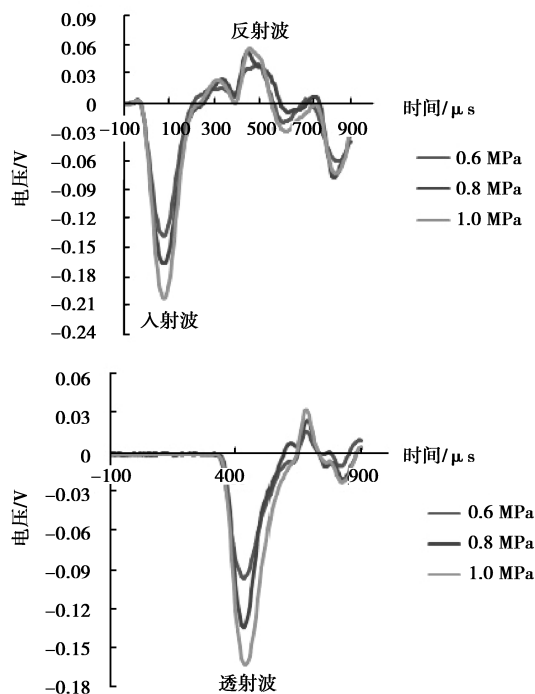


图 1 典型冲击加载波形图

Fig.1 Typical impact loading waveform diagram

1.2 试验试件

岩石试件取自玉溪矿业狮子山矿 16 中段回采落矿的大块,距离地面垂直距离 400 m 以上,距离山顶距离超过 800 m。国际岩石力学学会已确定岩石材料 SHPB 试验的试件长径比在 $0.5\sim 1.0$ 之间较准确^[16],本试件长径比选 1.0 ^[17],圆柱形试件尺寸为 $\phi 50\times 50\text{ mm}$ 。取样岩石为含矿(铜)青灰色白云岩,基本物理参数静载力学性能如表 1,加工过程及合格试件如图 2。

表 1 白云岩静载力学参数表

Table 1 Static mechanical parameters of dolomite

试件 岩性	加载速率/ ($\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	强度/ MPa	弹模/ GPa
白云岩	0.5	2 828	3 918	71.24	43.4

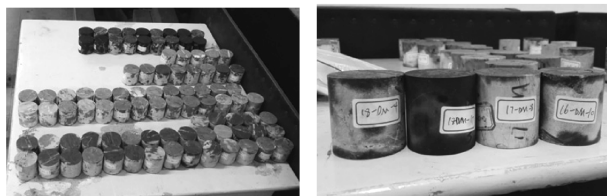


图 2 加工合格的白云岩试件

Fig.2 Dolomite specimens processing qualified

1.3 试验方案

试验前,在已加工好试件与杆件接触的端头部位涂上凡士林,保证试件与入、反射杆的无缝连接,试件底部采用抹布和垫块进行支持,用于防止试件下滑,详见图3和图4^[18]。先进行试冲试验,满足试验条件,在气压范围为0.5~1.0 MPa情况下,依次进行试件的冲击试验,研究单轴冲击下应变率对深部白云岩样动态力学特性及破坏模式的影响。



图3 试件端面涂抹凡士林

Fig.3 Daub vaseline to the end of the specimen



图4 固定好的试件

Fig.4 Fix the specimen with a block

1.4 试验数据处理方法

根据一维弹性波理论,采用三波法^[10]处理应变片测得的入射脉冲、透射脉冲、反射脉冲可求得试件的时程应力、应变,进而获得应力应变关系和平均应变率。计算式如下:

$$\varepsilon_s = \frac{u_1}{u_2} = \frac{C_0}{l_s} \int_{t_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{C_0}{l_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (3)$$

式中, σ_s 、 ε_s 、 $\dot{\varepsilon}_s$ 分别为试件的应力、应变和应变率应变; u_1 、 u_2 分别为输入杆、输出杆与试件相接触的端面位移; C_0 为压杆系统中弹性纵波波速; P_1 、 P_2 为输入杆、输出杆作用在试件两端的力; E 为压杆系统的弹性模量, l_s 为试件长度, A_s 为试件横截面

积, A 为压杆的横截面积。

2 动态力学特性分析

2.1 应力-应变关系

图5为青灰色白云岩试件不同应变率的应力-应变曲线,图6为不同加载应变率下的冲击破坏形态图。图5显示,白云岩的初始应力-应变曲线基本重合,说明初始阶段不同应变率作用下,弹性模量基本不变,该阶段变形特性属于线弹性。加载后期,曲线斜率随应变率的增大而减缓,试样进入屈服阶段,内部裂纹、裂隙逐步扩展、贯通,产生塑性应变,即弹性模量逐步减小。应变率为75.3 s⁻¹时,试件的破坏应变较小,试样破裂成3个大块;随着应变率的增大($\dot{\varepsilon}_s = 98.7$ s⁻¹、 $\dot{\varepsilon}_s = 112.5$ s⁻¹),试样破坏应变增大,屈服强度提高,破裂程度随之加剧,如图6。

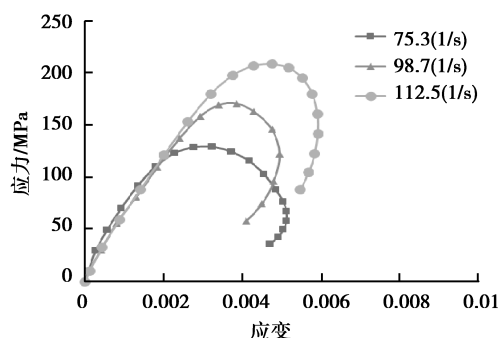


图5 应变率改变的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves with different strain rates

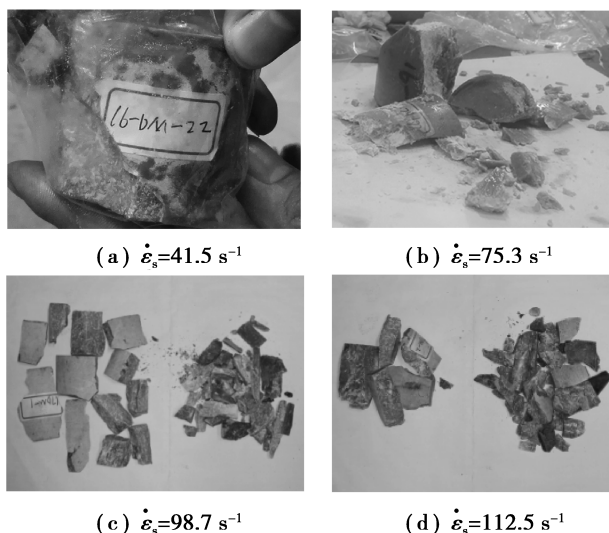


图6 冲击应变率改变的不同破坏形态

Fig.6 Failure modes of dolomite with different strain rates

对图6中碎块长度尺寸大于2 cm进行统计,然后绘制应变率随不同块度的分布规律曲线,如图7;试验结果显示随着平均应变率的增加大块占比逐渐降低。单轴冲击应变率超过75.3 s⁻¹时,大于2 cm的碎块占比减少幅度呈现加快趋势,当应变率由75.3 s⁻¹增加至98.7 s⁻¹时,大块占比缩小到原来的0.58倍,从0.73降为0.42。

2.2 动态抗压强度

利用SHPB原理和弹性波理论,对入射杆和透射杆的应变数据进行统计、分析和计算,获得了岩石试件在冲击荷载作用下的平均应变率、动态强度和能量分布等参数,部分试验统计数据与计算数据如表2。

表2 不同应变率下试件的动力学参数及各能量值

Table 2 Kinetic parameters and energy values of the specimens under different strain rates

气压 /MPa	平均应变 率/s ⁻¹	应力峰值 /MPa	入射能/J	反射能/J	透射能/J	吸收能 /J	峰值时间 /ms	是否破坏
0.35	41.50	104.53	88.07	1.57	78.68	7.82	0.226	表层脱落
0.45	75.30	129.49	118.14	9.93	60.68	47.53	0.194	是
0.55	98.70	171.14	174.96	16.50	93.65	64.82	0.175	是
0.80	112.50	208.60	246.91	17.79	163.11	66.02	0.147	是

在试验应变率范围内(40 s⁻¹ ~ 120 s⁻¹),白云岩的动态强度均高于静载强度,动、静强度比值为1.1 ~ 1.8。动态抗压强度表现出很强的应变率效应,利用指数函数进行拟合^[9],如图8。岩石内部天然存在各类缺陷如裂纹、孔隙和节理等,试件破坏即裂纹的扩展及贯通过程,应变率增大促使试件内部裂隙增多,所需能量随之增加。然而,冲击荷载作用的时间极短,试件无法积累能量,由能量守恒,试件平衡外部能量的方式只能采用提高应力的方法,所以,随着应变率的增加,试件动抗压强度呈增加趋势。

2.3 吸能规律分析

因入射波携带的能量不同,这里仅以试件单位体积吸收能量随应变率的变化关系分析试件冲击破坏的能量吸收规律,如图9所示。

本实验应变率范围内,单位体积吸收能较小,均低于1 J/cm³,但已表现出很强的应变率相关性,拟合得到线性关系如下:

$$E_v = 0.01\dot{\varepsilon} - 0.25$$

$$(R^2 = 0.976, \dot{\varepsilon} = 40 \text{ s}^{-1} \sim 120 \text{ s}^{-1}) \quad (1)$$

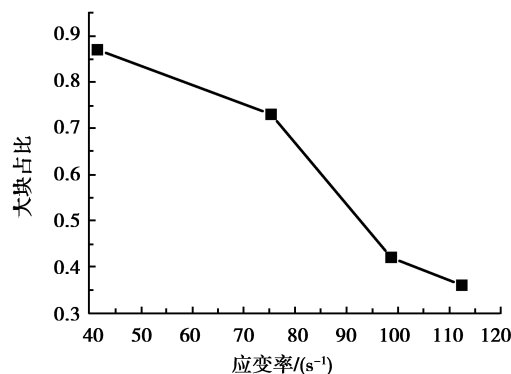


图7 大块占比与应变率相关性

Fig.7 Block rate vs. strain rate

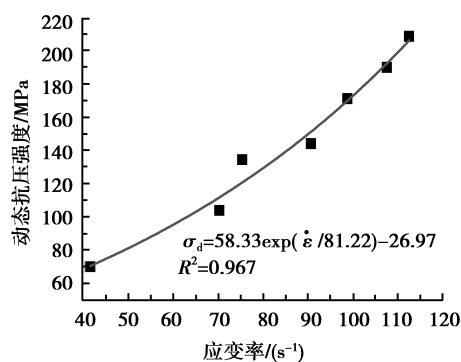


图8 动态抗压强度随应变率的变化规律

Fig.8 Dynamic compressive strength vs. strain rate

结合图7试件破坏形态统计,作出大块占比与单位体积吸收能关系如图10所示。由图可得,大块占得比例随着应变率和跨度单位体积吸收能的增大呈现减小趋势,试验结果表明:岩石破裂的能量随加载力的增加而增加,由此在岩石内部形成的破裂面同样增加,所以,岩石试件的整体块度程减小趋势,大块占比变小。

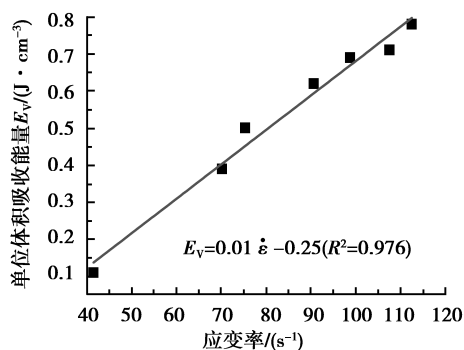


图 9 应变率随单位体积吸收能的变化关系

Fig.9 Relationship of absorbing energy per unit volume and strain rate

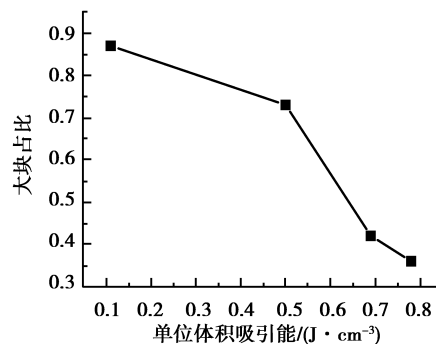


图 10 大块占比与单位体积吸收能关系

Fig.10 Relationship of block rate and absorbing energy per unit volume

3 破坏过程高速摄影

高速摄影试验采用 384×240 分辨率,影像的帧频率设置为 10 000 fps,每 0.1ms 拍摄一张,这里选择加载应变率为 41.5 s^{-1} 和 98.7 s^{-1} 的冲击破坏

过程进行对比分析,考虑到人为控制 SHPB 发射装置和高速摄影机,观察分析时记试件表面裂纹出现时为 $t=0$ 时刻,则高速摄影记录的不同应变率下试件破坏过程如图 11、图 12。

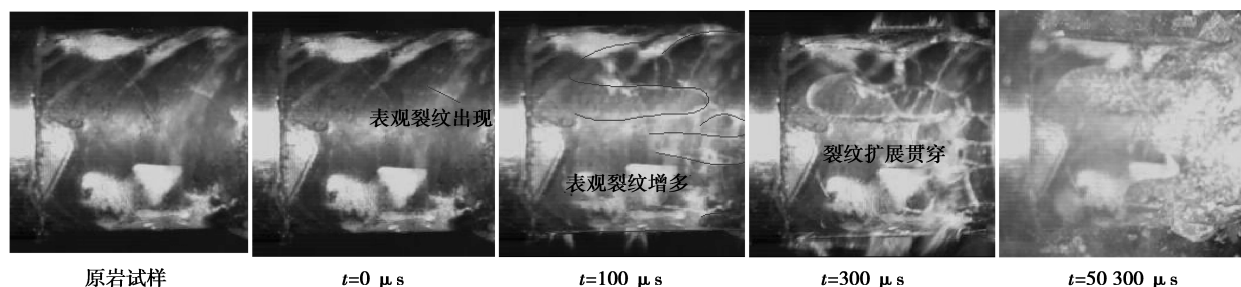
图 11 $\dot{\varepsilon}_s = 41.5 \text{ s}^{-1}$ 时破坏过程高速摄影

Fig.11 High-speed photography of destruction process ($\dot{\varepsilon}_s = 41.5 \text{ s}^{-1}$)

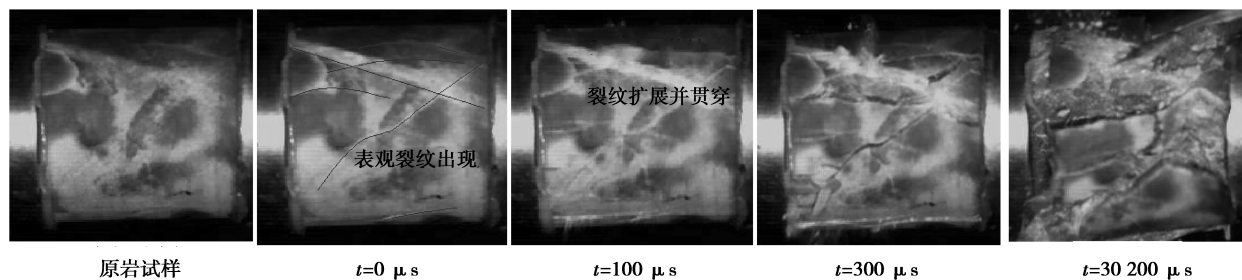
图 12 $\dot{\varepsilon}_s = 98.7 \text{ s}^{-1}$ 时破坏过程高速摄影

Fig.12 High-speed photography of destruction process ($\dot{\varepsilon}_s = 98.7 \text{ s}^{-1}$)

(1) 较低应变率冲击下 ($\dot{\varepsilon}_s = 41.5 \text{ s}^{-1}$, 图 11), 最先 ($t = 0 \text{ μs}$) 仅出现一条约 10 mm 长的细观裂纹, 裂纹走向与冲击方向夹角约 30° ; 100 μs ($t = 100 \text{ μs}$) 后, 表面裂纹显著增多, 扩展方向主要与冲

击方向平行, 长度 10 mm ~ 45 mm 不等; 300 μs ($t = 300 \text{ μs}$) 后, 原有裂纹已沿不同方向全部贯通, 并伴有新生裂纹开始扩展; 最后 ($t = 50 300 \text{ μs}$), 试件周围都出现表层脱落, 裂纹扩展深度较浅, 中心部位

保留为整体,如图6(a)。

(2)当 $\dot{\varepsilon}_s = 98.7 \text{ s}^{-1}$,如图12,最先($t = 0 \text{ }\mu\text{s}$)已出现纵向、X型交叉裂纹数条;100 μs ($t = 100 \text{ }\mu\text{s}$)后,原有裂纹贯通、裂隙宽度增加,同时伴有新生裂纹发展;200 μs ($t = 200 \text{ }\mu\text{s}$)后,裂纹全部贯通,裂隙分块明显;最后($t = 30 \text{ } 200 \text{ }\mu\text{s}$),试件破碎成块,如图6(c)。

可见,冲击应变率越大,试件完全破坏的发生时间越早,破坏越严重,块度越小,收集的破坏形态及大块率占比参见图6、图7。单轴冲击荷载作用下试件破裂面大多沿轴向形成,各破裂面之间基本不存在相互挤压,属于撞击后垂直于轴向的拉伸破坏。

4 结论

借助高速摄影设备对白云岩试件的冲击破坏形态及模式进行细观描述,得到如下结论:

(1)常规单轴冲击荷载作用时,岩石试件的动态强度与应变率紧密相关,加载应变率增大则动态抗压强度提高且强度峰值出现的时间越来越早。

(2)对试件结果进行能量分布计算,得到岩石试件的单位体积吸收能随应变率增加而增加,呈现近似线性关系,但均低于 $1 \text{ J}/\text{cm}^3$ 。破碎块体尺寸随单位体积吸收能的增大而减小。

(3)冲击应变率越大,试件完全破坏的发生时间越早,破坏越严重,属于轴向冲击产生泊松效应造成的拉伸破坏。

由于地下深部岩体处于复杂的应力环境当中,本次单轴冲击的试验结论仅能作为参考,下一步将开展三维状态下的岩体力学性能研究,以期将实验数据有效应用到工程实际中。

参考文献(References)

[1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178. (Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178. (in Chinese))

[2] 周宗红,章雅琦,杨安国,等.白云岩三维动静组合

加载力学特性试验研究[J].煤炭学报,2015,40(5):1030-1036. (Zhou Zonghong, Zhang Yaqi, Yang Anguo, et al. Experimental study on mechanical characteristics of dolomite under three-dimensional coupled static-dynamic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1030-1036. (in Chinese))

[3] 牛勇,李克钢,刘德克,等.一维应力预加载下红砂岩冲击力学特性试验研究[J].实验力学,2016,31(3):409-416. (Niu Yong, Li. Kegang, Liu Deke, et al. Experimental investigation on impact dynamics properties of red sandstone subjected to one-dimensional stress preloading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3): 409-416. (in Chinese))

[4] 唐礼忠,王春,程露萍,等.一维静载及循环冲击共同作用下矽卡岩力学特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3898-3906. (Lizhong Tang, Chun Wang, Luping Cheng, et al. Experimental study of mechanical characteristics of skarn under one-dimensional coupled static and cyclic impact loads [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3898-3906. (in Chinese))

[5] 王建国,杨阳,郭延辉,等.高应变率下饱水花岗岩动力学特性的低温效应[J].岩土力学,2017,38(增2):163-169. (Wang Jianguo, Yang Yang, Guo Yanhui, et al. Low temperature effect of saturated granite on dynamic characteristics under high strain rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Supp.2): 163-169. (in Chinese))

[6] 王建国,郭延辉,张小华,等.冲击荷载下节理数对类岩石动力学特性的影响[J].地下空间与工程学报,2017,13(增2):559-564. (Wang Jianguo, Guo Yanhui, Zhang Xiaohua, et al. Mechanics properties of simulated rock affected by layer joints under impact loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Supp. 2): 559-564. (in Chinese))

[7] 杨阳,杨仁树,王建国.节理厚度对岩石动力特性影响的模拟试验[J].中国矿业大学学报,2016,45(2):211-216,309. (Yang Yang, Yang Renshu, Wang Jianguo. Simulation material experiment on dynamic mechanical properties of jointed rock affected by joint thickness [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 211-216, 309. (in

- Chinese))
- [8] 杨仁树,王茂源,杨阳,等. 充填材料对节理岩石动力学性能影响的模拟试验[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 125-131. (Yang Renshu, Wang Maoyuan, Yang Yang, et al. Simulation material experiment on the dynamic mechanical properties of jointed rock affected by joint-filling material [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 125-131. (in Chinese))
- [9] 李祥龙,王建国,张智宇,等. 应变率及节理倾角对岩石模拟材料动力特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 483-490. (Li Xianglong, Wang Jianguo, Zhang Zhiyu, et al. Experimental study for effects of strain rates and joint angles on dynamic responses of simulated rock materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 483-490. (in Chinese))
- [10] 王建国,高全臣,陆华,等. 分层介质冲击响应的 SHPB 实验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19): 192-197, 212. (Wang Jianguo, Gao Quanchen, Lu Hua, et al. Impact response tests of layered medium with SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 192-197, 212. (in Chinese))
- [11] 杨阳,杨仁树,王建国,等. 低温条件下红砂岩动态力学性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 967-975. (Yang Yang, Yang Renshu, Wang Jianguo, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of red sandstone under low temperatures[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 967-975. (in Chinese))
- [12] 李夕兵,陶明,宫凤强,等. 冲击载荷作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1081-1088. (Li Xibing, Tao Ming, Gong Fengqiang, et al. Theoretical and experimental study of hard rock spalling fracture under impact dynamic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1081-1088. (in Chinese))
- [13] 尹土兵,李夕兵,王斌,等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 777-784. (Yin Tubing, Li Xibing, Wang Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 777-784. (in Chinese))
- [14] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2889-2900. (Huang Lixing. Development and new achievements of rock dynamics in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2889-2900. (in Chinese))
- [15] 卢玉斌,张松燕. 脆性材料 SHPB 试验中实现近似恒应变率加载必要性的研究[J]. 西南科技大学学报, 2012, 27(3): 47-51. (Lu Yubin, Zhang Songyan. Study on the necessity of achieving nearly constant strain-rate loading in split hopkinson pressure bar tests for brittle materials[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2012, 27(3): 47-51. (in Chinese))
- [16] 张靖,李福清. 影响 SHPB 试验精度因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增1): 1635-1639. (Zhang Jing, Li Fuqing. Analysis of factors influencing SHPB test precision [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Sup. 1): 1635-1639. (in Chinese))
- [17] 李胜林,刘殿书,李祥龙,等. $\phi 75$ mm 分离式霍普金森压杆试件长度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 93-97. (Li Shenglin, Liu Dianshu, Li Xianglong, et al. The effect of specimen length in $\phi 75$ mm Split Hopkinson Pressure Bar experiment[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(1): 93-97. (in Chinese))
- [18] 刘石,许金余,陈腾飞,等. 基于 SHPB 试验的岩石动态力学响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 992-995. (Liu Shi, Xu Jinyu, Chen Tengfei, et al. Study on dynamic response of rock based on Split Hopkinson Pressure Bar test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 992-995. (in Chinese))