

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.031

爆破工程教学中材料动态力学性能 实验及仿真实践*

李胜林, 梁书锋, 侯仕军

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 掌握岩石(体)在爆破动载作用下的动态力学响应是《爆破工程》课程的一项重要教学内容。由于土木或采矿类专业学生缺乏波动力学、岩石动力学等基础理论,采用讲授法讲解岩石动态力学特性的知识点时教学效果较差,影响后续的岩体破碎机理等内容的学习。为此,将岩石类材料的分离式霍普金森压杆实验(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)应用于《爆破工程》实践教学中,通过测定岩石动态压缩强度,观察试件破坏形态,引导学生理解岩石材料在不同应变率下的动态力学响应。运用有限元软件 LS-DYNA 对 SHPB 实验进行数值模拟,再现应力波传播和岩石破坏过程,达到动态冲击的演示功能。实践效果表明:这种教学方式使学生能够直观地感知应力波的传播过程,清晰地了解岩石动态破坏机理,掌握岩石类材料动态力学性能与应变率之间的关系,为进一步学习爆破工程理论奠定基础。

关键词: 爆破工程; 实验教学; 霍普金森压杆(SHPB); 数值仿真

中图分类号: TD8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0223-07

Teaching Experiment and Simulation Practice of Dynamic Mechanical Properties of Materials in Blasting Engineering Course

LI Sheng-lin, LIANG Shu-feng, HOU Shi-jun

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of
Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: It is an important content in the course of "Blasting Engineering" to master the dynamic mechanical response of rock (body) under the action of blasting dynamic load. Since students majoring in civil or mining engineering lack basic theories such as wave mechanics and rock dynamics, the teaching effect is poor when the knowledge of dynamic mechanical properties of rock is explained in class, which will affect the subsequent learning of rock breakage mechanism. Therefore, the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiment of rock materials is applied to the practical teaching of "Blasting Engineering". By measuring the dynamic compression strength of rock samples and observing the failure forms of specimens, students are guided to understand the dynamic mechanical response of rock materials under different strain rates. The finite element software LS-DYNA is also used to simulate the SHPB experiment, and the process of stress wave propagation and rock failure is reproduced to achieve the demonstration function of dynamic impact. Practice shows that this teaching method enables students to intuitively perceive the stress wave propagation, clearly understand the dynamic failure mechanism of rock, master the relationship between dynamic mechanical properties of rock materials and strain rate, and lay a foundation for further study of blasting engineering theory.

Key words: blasting engineering; experimental teaching; Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB); numerical

收稿日期: 2023-01-02

作者简介: 李胜林(1977-), 男, 博士, 副教授, 从事工程爆破与岩石动力学方面的研究与教学工作, (E-mail) lsl@cumt.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374210, 51574247); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2010Q1L05)

simulation

钻爆法是矿山开采和路桥建设中广泛采用的技术手段之一。“爆破工程”因此成为多数高校的土木工程、采矿工程、安全工程等专业的核心课程之一,其实验教学体系的构建受到越来越多高校的关注^[1-3]。然而,岩石在爆破作用下的力学特性与其在静力荷载作用下的力学特性明显不同,原因在于爆破荷载的瞬态特性以及岩石的瞬态响应特性^[4-7]。加之受限于国家对爆破器材管控政策等原因,开展基于真实爆破器材的室内爆破实验较为困难^[1]。实验教学的缺失将导致学生对岩石爆破机理缺乏理性认识。此外,中国矿业大学(北京)的土木工程和采矿工程本科专业学生仅学过经典力学的相关知识,缺乏波动力学、岩石动力学等基础理论,对《爆破工程》中冲击动力学的应力波、应变率效应等概念认知较为模糊。这给授课教师带来了很大的挑战。在此背景下,如何在不增加新课程的前提下,探索安全、科学的实验教学手段势在必行。近20年来,中国矿业大学(北京)应用 SHPB 实验系统和数值仿真技术对岩石、混凝土类材料的动态力学特性开展了广泛的研究,取得诸多重要成果^[8-13]。为此,结合长期的科学研究和教学实践,中国矿业大学(北京)爆破工程教学团队自2010年开始探索将 SHPB 实验系统引入到本科生《爆破工程》的实践教学。教学人员使用 SHPB 系统冲击加载岩石类试件,获取岩石材料在一定应变率范围内的动态应力-应变曲线,进而分析材料的动态力学特性。在此基础上,应用计算机仿真技术对 SHPB 实验进行数值模拟,让学生更加直观地感知应力波的传播过程,了解材料在动态冲击作用下的破坏过程,掌握岩石类材料的基本动态力学特性。

1 SHPB 实验系统

中国矿业大学(北京)于2004年建设了 SHPB 系统(图1),广泛应用于矿山开采、结构抗震与防爆等领域中常见岩土类材料动态力学性能的测试与研究。该 SHPB 系统可进行 $10 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的材料动态力学性能测试。

1.1 SHPB 系统组成

典型的 SHPB 装置由加载系统、控制系统、测速系统、压杆系统(冲击杆、入射杆、透射杆、吸收杆)、阻尼系统和数据记录系统组成,如图2所示。

压杆系统有钢质和铝质两种,杆直径有 14 mm、50 mm、75 mm。一般地讲,小直径压杆系统的试验

对象主要为材质较为均匀的陶瓷类材料;而对于岩石与混凝土类材料,为克服材料材质不均引起的测量误差,一般采用大直径 SHPB 系统。



图1 中国矿业大学(北京) SHPB 实验系统
Fig. 1 SHPB experimental equipment in China University of Mining and Technology, Beijing

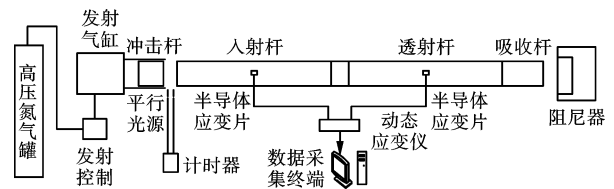


图2 分离式霍普金森压杆实验系统简图
Fig. 2 The Schematic diagram of SHPB experimental system

1.2 SHPB 实验原理

SHPB 实验基于两个基本假定:(1)一维应力波假定,即压杆在变形时横截面始终保持为平面,在横截面上只有均匀分布的轴向应力;(2)应力均匀假定,即试件足够短,以便经历多次应力波的反射后,其内部可处于均匀应力状态^[14,15]。

SHPB 实验原理如图3所示。实验过程中撞击杆以一定的速度冲击入射杆,在入射杆中产生一轴向传播的一维压缩应力脉冲波(ε_i),其到达入射杆与试件相接触的界面时(图3中1-1界面),一部分会反射到入射杆中(卸载波 ε_r),另一部分继续在试件中传播,通过试件后在试件与透射杆的相接触的界面(图3中2-2界面)发生反射与透射,反射应力波(ε_r)进入试件中,透射应力波(ε_t)继续传播进入透射杆中。反射回试件的应力波,将会继续在试件与入射杆及透射杆的两个界面之间来回地发生反射与透射,当这种来回反射达到3~6次以后,即可认为试件内部的应力达到了平衡^[16]。

基于一维应力波假设和位移连续性条件,可得“三波法”公式^[17,18]

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E_0}{2A} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中： ε_i 为入射波应变； ε_r 为反射波应变； ε_t 为透射波应变； ε 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别为试件的应变和应变率； C_0 、 A_0 和 E_0 分别为杆件弹性波波速、横截面积和弹性模量； A 和 L 分别为试件横截面积和长度。

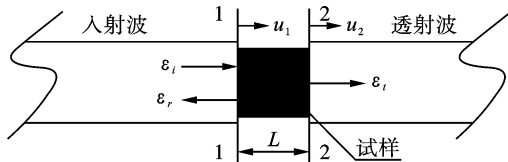


图 3 SHPB 实验原理简图

Fig. 3 The schematic diagram of SHPB experiment theory

2 实验课程的设计

教学环节中的实验课时包含在课程总课时中，目前大学专业课程的课时普遍偏少。我校爆破工程总课时为 32 学时，根据课程内容与试验内容，设置 SHPB 实验为 1 课时。针对学生不具备波动力学基础，以前也未接触过动力学实验，为达到实验的教学目的，须对实验的相关环节进行详细筹划与设计。

2.1 实验前的准备

实验课程前，教师应提前打磨试件，选择的岩石试件的矿物分布尽量均匀。近几年，我们选择的是粉砂岩，试件尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，端面不平行度控制在 0.02 mm 以内，试件的外观如图 4 所示。

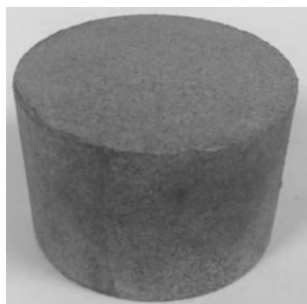


图 4 $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 粉砂岩试件

Fig. 4 The $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ siltstone specimens

考虑场地及教学效果的因素，同时观看演示实验的学生不超过 15 人，教师应提前对学生分组，为每组准备两个以上合格试件。

为对比分析，需提前进行同尺寸试件的单轴压缩静载平行实验 3 次以上，强度取标准值，记录应力-应变（位移）曲线，如图 5 所示，单轴压缩参数见

表 1。

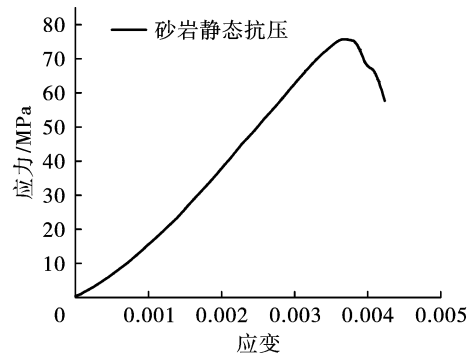


图 5 静载下的粉砂岩应力-应变曲线

Fig. 5 The static constitutive curve of sandstone

表 1 $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 砂岩试件静态力学参数

Table 1 Static mechanical parameters of sandstone specimens of $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$

编号	抗压强度/ MPa	最大应变/ 10^{-6}	弹性模量/ GPa	泊松比
1	75.670	4230	23.980	0.217
2	73.430	4120	26.680	0.211
3	77.630	4280	24.240	0.223
4	74.680	4190	25.600	0.220
5	73.510	4160	24.400	0.210
6	76.240	4250	25.200	0.220
均值	75.193	4205	25.017	0.217
方差	1.641	59.582	1.020	0.005
变异系数	0.022	0.014	0.041	0.024
修正值	1.012	1.008	1.023	1.014
标准值	76.130	4239	25.600	0.220

为保证正式实验时系统的顺利进行，教师应提前检查 SHPB 系统的各个部件与参数，包含气瓶压力、速度与应变测试装置、应变片等。待一切准备就绪后，教师应进行完整的动态压缩实验，以检查、判断 SHPB 系统的状态，调整参数直至 SHPB 系统的稳定。

2.2 教学内容

2.2.1 实地介绍 SHPB 系统

实验课开始时，教师通过实物、展板向学生介绍 SHPB 系统的构成与原理，并重点告知以下知识点：

(1) SHPB 系统能将应力波效应和应变率效应解耦^[19]。SHPB 方便之处在于：一维应力弹性状态下的入射杆与透射杆具有冲击加载和测量双重作用，因此允许只计应力波的传播而忽略应变率效应；而夹在入射杆和透射杆之间的试件由于长度足够短，使应力波在试件两端间传播所需时间与加载总历时相比很短，足以可把试件视为处于均匀变形状

态,从而允许忽略试件中的应力波效应,而只计其应变率效应。这样,实现了压杆和试件中的应力波效应和应变率效应解耦,试件材料力学响应的应变率相关性可以通过弹性杆中应力波传播的信息来确定。

(2)冲击过程中必须保证压杆的弹性状态,这是应变测量的基础,也是 SHPB 系统维护的必要要求^[20]。对此,教师可以布置一个小作业:已知杆材的物理力学属性,根据冲击力学的基本公式,求出 SHPB 系统子弹允许的最大速度。作业答案可以在下次课堂教学中讲解。

2.2.2 SHPB 演示实验

介绍完相关知识后,教师要给学生演示试件动态压缩实验,内容包括标定、冲击实验及相应分析。

(1) 标定

SHPB 系统输出的是应变片的电压时程曲线,要得到应变,应首先进行标定试验,即不加试件,使用子弹直接撞击入射杆。中国矿业大学(北京)钢质压杆的密度为 7800 kg/m^3 ,弹性波速为 5060 m/s ,

试验中直接测的子弹速度 v ,入射杆中的应变 ε 按下式计算^[17]

$$\varepsilon = -\frac{V}{2C_0} \quad (4)$$

ε 与超动态应变仪测量的电压值 U 的比值为标定系数 K

$$K = \frac{\varepsilon}{U} \quad (5)$$

(2) SHPB 冲击压缩试验

将凡士林或黄油均匀地涂抹在试件顶部与底部以减小实验中的摩擦效应,然后将试件放在入射杆与透射杆中间。先以低气压进行冲击实验,然后逐渐增加气压以增大子弹速度,即逐渐增加试件上的压缩应力,记录子弹速度及应变片的电压数据,在控制台电脑上向学生展示测试的波形,演示数据处理过程。汇总获得的典型波形曲线如图 6 所示。

根据“两波法”公式,对采集的不同冲击速度下试件反射波信号及透射波信号进行数据处理,得到不同速度下试件的应力-应变曲线,如图 7 所示。

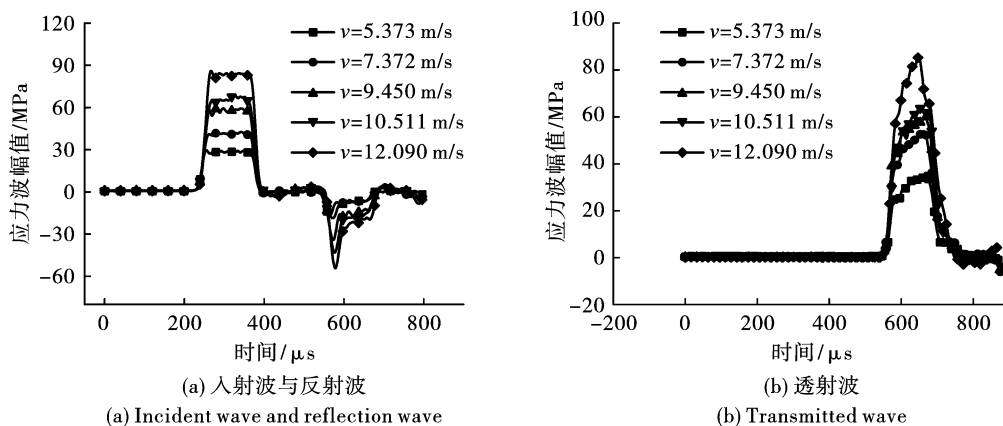


图 6 不同冲击速度下的典型应力波形(波长为 800 mm)

Fig. 6 The typical stress waveforms at different impact velocities (wavelength 800 mm)

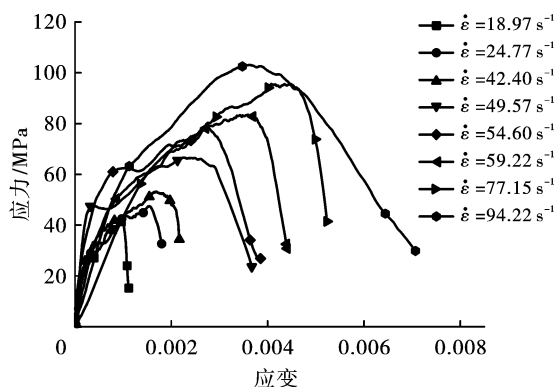


图 7 800 mm 波长时的砂岩动态本构曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of siltstone specimens at 800 mm wavelength

图 8 是波长为 800 mm、砂岩产生的应变率为 54.6 s^{-1} 时,单次冲击得到的典型动态应力-应变曲线。由图 8 可知,该应力-应变曲线大致分为四个阶段。①线弹性阶段(AB 段):应力-应变线型为直线型,应力急剧上升,而应变仅略微增长,该阶段斜率较大,反映砂岩的动态弹性模量较大。②新裂隙形成阶段(BC 段):弹性变形已达到极限,仅有应变的增大而应力增长很小,其线型为斜率极缓的近似水平线段。③塑性增强段(CD 段):塑性发展和应力的增长同时进行,但曲线的斜率较弹性阶段有较大程度减小,并且此阶段的强度增长越来越缓,逐渐达到峰值强度,该峰值就是砂岩在某应力波参数下的动态强度。④卸载段(DE 段):当超过峰值强度之

后,应变持续微量增加,应力迅速下降,曲线为正卸载,在此过程中不发生弹性恢复的现象。表明岩石中已发生不可逆转的变形损伤甚至破坏。

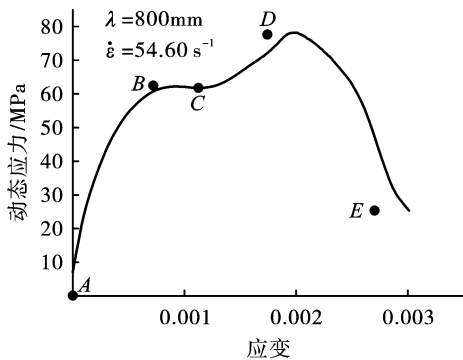


图 8 砂岩单次冲击下典型动态本构曲线
Fig. 8 The typical dynamic constitutive curves of sandstone under a single impact

通过与静载实验结果对比可知,动载作用下岩石材料的强度值与弹性模量呈增加趋势,增加幅度与应变率相关。

(3)应用数值模型的对比分析

为生动再现动态冲击过程,教师需要借助 LS-DYNA 建立数值模型,模型各部件尺寸及子弹速度同原型,如图 9 所示,压杆采用弹性材料、岩石试件

采用 HJC 本构^[21,22],采用国际单位制。以轴向应力代表压缩波,以动画形式撞击过程演示应力波在输入杆、试件、输出杆透射、反射的传播过程,从输入或输出杆件表面上取一个节点,查看其轴向速度历史曲线,计算得到弹性波的传播速度,并与理论解进行对比分析。



图 9 SHPB 数值模型
Fig. 9 SHPB numerical model

将应力波作用于试件后的应力和破坏状态截取如图 10 所示。从 10(a)可看出,此时应力波较为均匀地作用于试件与输入杆的接触面,其最大压应力与入射波幅值大小一致;随着时间的推移,应力波逐渐向试件内部传播并发生力的作用,同时在试件端面发生反射,其应力云图如 10(b)所示。随后,试件内部压应力逐渐增大,个别单元符合失效准则,单元被删除,试件开始出现裂纹;最后,更多单元发生破坏删除,试件呈现破碎。

数值模型可以生动再现应力波的传播过程,使学生深入体会动力作用下试件逐步破坏的现象,利于掌握岩石类材料动态力学特性。

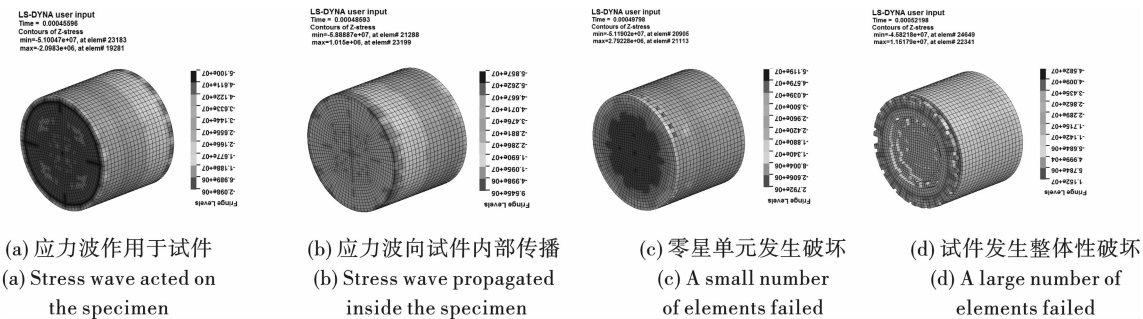


图 10 试件破坏过程模拟
Fig. 10 The simulation of specimen failure process

2.3 教学手段

面向本科教学的 SHPB 试验设计为“演示型”实验,主要以教师讲解与操作为主。在实际教学过程中,为激发学生主动参与实验的兴趣并锻炼其动手能力,子弹发射、数据处理等过程在教师演示讲解后,安排学生自己独立进行处理与分析。与静力学结果比较与讨论过程,教师适当引导,让学生自行总结。

由于试件的动态压缩过程速度很快,肉眼无法捕捉动态过程,有条件时可使用高速摄影进行录制,然后结合数值模型,对比分析与讲解。

2.4 考核与检验

实验报告是必做作业,引申的相关问题是选做

作业。

学生应在实验结束两周内提交实验报告,报告内容包括 SHPB 原理、实验过程、实验数据记录、结果分析。

同时,在课堂教学布置课后作业时,教师可设计一些与 SHPB 实验相关习题,如:试件平整度不满足会对实验结果及 SHPB 系统有何影响? 处理数据时为何会有两波法和三波法? 能否应用 SHPB 进行钢筋混凝土试件压缩实验? 将 SHPB 作为加载手段进行巴西圆盘劈裂实验会对常规的 SHPB 系统产生哪些伤害? 回答这些问题,需要学生在掌握 SHPB 原理的基础上进一步分析,甚至需要借助专业文献检

索工具才能找到答案。

从近5年的统计数据上看,所有学生均能独立完成实验报告,客观记录了试验数据。约30%同学在自学了波动力学或弹性波理论、查阅相关文献的基础上对选做问题阐述了自己的观点,进行了相关的推导与说明。在我校的大学生本科生创新项目中,每年会有3到5组学生申报 SHPB 相关项目,项目的申报、实验、数据的整理与分析过程均是由学生自己独立完成。

上述结果与现象说明了爆破工程中引入 SHPB 实验教学引起了学生的兴趣,激发了他们独自探索的热情,锻炼了科研动手能力。

3 结语

为加深土木和采矿类专业本科生对岩石动力学特性的认识与理解,将 SHPB 实验系统引入到《爆破工程》课堂教学中,并基于《爆破工程》实践理论和岩石材料动态力学性能研究成果,设计了一套适用于短学时的《爆破工程》实验教学方法与体系,同时引入数值仿真技术与此实践教学方法配套。该教学方法设计合理、内容丰富,能使岩石动态力学特性的教学过程更符合教学认知规律,可以更好地反映岩石动态冲击的真实情况,不但可以提升学生的工程实践能力,亦可为将来相关专业课程学习奠定基础。结合近几年教学效果看,本校学生对爆破工程及波动力学产生了浓厚的兴趣,在达到课程教学目标的同时,进一步引导了学生在岩石动力学方面的深入研究与探索。

参考文献 (References)

- [1] 王雁冰,李书莹,汪东宸,等. 爆破工程实验教学创新平台构建[J]. 爆破,2021,38(4):173-179.
- [1] WANG Yan-bing, LI Shu-xuan, WANG Dong-chen, et al. Construction of innovative platform for experimental teaching of blasting engineering[J]. *Blasting*, 2021, 38(4): 173-179. (in Chinese)
- [2] 叶海旺,雷涛,李梅,等. 爆破工程虚拟仿真实验系统及教学实践研究[J]. 爆破,2020,37(3):153-158.
- [2] YE Hai-wang, LEI Tao, LI Mei, et al. Virtual simulation experiment system and teaching practice of blasting engineering[J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 153-158. (in Chinese)
- [3] 张飞燕,刘珂含,韩颖.“爆破安全”课程融合实验教学体系构建与实践[J]. 爆破,2022,39(2):55-62.
- [3] ZHANG Fei-yan, LIU Ke-han, HAN Ying. Construction and practice of integrated experimental teaching system of “blasting safety” course[J]. *Blasting*, 2022, 39(2): 55-62. (in Chinese)
- [4] 廖志毅,朱建波,唐春安. 高地应力作用下岩石和地下洞室的动态力学行为和响应[J]. 岩土工程学报,2016,38(S2):260-265.
- [4] LIAO Zhi-yi, ZHU Jian-bo, TANG Chun-an. Dynamic behavior and response of rock and underground openings subjected to high initial stresses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(S2): 260-265. (in Chinese)
- [5] 夏开文,姚伟. 预加载下岩石的动态力学性能研究[J]. 工程爆破,2015,21(6):7-13.
- [5] XIA Kai-wen, YAO Wei. Dynamic mechanical properties of rock under pre-load[J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(6): 7-13. (in Chinese)
- [6] 姜峰,李子沐,王宁昌,等. 高应变率条件下山西黑花岗岩的动态力学性能研究[J]. 振动与冲击,2016,35(8):177-182.
- [6] JIANG Feng, LI Zi-mu, WANG Ning-chang, et al. Research on dynamic characteristics of Shanxi black granite under high strain rates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(8): 177-182. (in Chinese)
- [7] 张志刚,孔大庆,宫光明,等. 高应变率下混凝土动态力学性能 SHPB 实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2007(6):611-618.
- [7] ZHANG Zhi-gang, KONG Da-qing, GONG Guang-ming, et al. Dynamic mechanical behavior of concrete under high strain rate using SHPB[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2007(6): 611-618. (in Chinese)
- [8] 李胜林,张青成,吴帅峰,等. 均质砂岩损伤临界值的研究及 SHPB 试验验证[J]. 北京理工大学学报,2017,37(8):807-812,823.
- [8] LI Sheng-lin, ZHANG Qing-cheng, WU Shuai-feng, et al. Theoretical study and SHPB experimental verification on the critical damage of uniform sandstone[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(8): 807-812, 823. (in Chinese)
- [9] 单仁亮,陈石林,李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2000(1):32-38.
- [9] SHAN Ren-liang, CHEN Shi-lin, LI Bao-qiang. Experimental study of granite constitutive properties under uniaxial impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000(1): 32-38. (in Chinese)
- [10] 王宇涛,刘殿书,李胜林,等. 基于Φ75mm SHPB 系统的高温混凝土动态力学性能研究[J]. 振动与冲击,2014,33(17):12-17.
- [10] WANG Yu-tao, LIU Dian-shu, LI Sheng-lin, et al. Dynamic performance of concrete based a Φ75mm SHPB

- system under high temperature[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17):12-17. (in Chinese)
- [11] 凌天龙, 吴帅峰, 刘殿书, 等. 砂岩 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数确定[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2211-2216.
- [11] LING Tian-long, WU Shuai-feng, LIU Dian-shu, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook model parameters for sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8):2211-2216. (in Chinese)
- [12] 夏昌敬, 桂乐乐, 谭金彪, 等. 冲击载荷作用下岩石动态力学性能的数值分析[J]. *弹道学报*, 2009, 21(3): 11-14.
- [12] XIA Chang-jing, GUI Le-le, TAN Jin-biao, et al. Numerical analysis of dynamic mechanical properties of rocks under impact load[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(3):11-14. (in Chinese)
- [13] 夏正兵. 硅酸盐混凝土与岩石材料的动态力学性能比较研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(3): 124-127, 148.
- [13] XIA Zheng-bing. Dynamic mechanical performance comparison between silicate concrete and rock[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(3):124-127, 148.
- [14] 卢芳云, 陈 荣, 林玉亮, 等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] LU Fang-yun, CHEN Rong, LIN Yu-liang, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [15] 胡石胜. 霍普金森压杆技术[J]. *兵器材料科学与工程*, 1991(11):40-47.
- [15] HU Shi-sheng. Hopkinson pressure bar technology[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1991(11): 40-47. (in Chinese)
- [16] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. *爆炸与冲击*, 2005(1):17-25.
- [16] WANG Li-li, WANG Yong-gang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005(1):17-25. (in Chinese)
- [17] RAMZI Othman. The Kolsky-Hopkinson bar machine[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG part of Springer Nature, 2018.
- [18] ZHANG Qian-bing, ZHAO Jian. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behavior of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4):1411-1478.
- [19] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [19] WANG Li-li. Foundations of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [20] XIA Kai-wen, YAO Wei. Dynamic rock tests using split Hopkinson(Kolsky) bar system- A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(1):27-59.
- [21] 李成武, 王金贵, 解北京, 等. 基于 HJC 本构模型的煤岩 SHPB 实验数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1):158-164.
- [21] LI Cheng-wu, WANG Jin-gui, XIE Bei-jing, et al. Numerical simulation of SHPB tests for coal by using HJC model[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1):158-164. (in Chinese)
- [22] 方 秦, 孔祥振, 吴 昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. *工程力学*, 2014, 31(3):197-204.
- [22] FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3):197-204. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第 222 页)

- [18] RYAN Brady, SEBASTIEN Muller, MARGARETA Petrovan-boiarciuc, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 3; design of efficient protections using numerical simulations [C] // *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2009*, v3, Design and Analysis: ASME, 2009:667-675.
- [19] SEBASTIEN Muller, RYAN Brady. Prevention of transformer tank explosion PART 1: Experimental tests on large transformers [C] // *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2008*, vol 4, Fluid-structure interaction: ASME, 2008:357-365.
- [20] RYAN Brady, SEBASTIEN Muller. Prevention of transformer tank explosion PART 2: Development and application of a numerical simulation tool [C] // *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2008*, vol 4, Fluid-structure interaction: ASME, 2008:49-58.

英文编辑:陈东方