

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.026

爆破工程虚拟仿真实验系统及教学实践研究*

叶海旺,雷涛,李梅,李宁,王其洲,李庆,陈张梦,李立峰,谭海,黄刚

(武汉理工大学资源与环境工程学院,武汉430070)

摘要: 针对爆破工程课程实验存在较高危险性的难题,开展爆破虚拟仿真实验系统的研究与构建。采用数值模拟方法模拟炸药爆破作用,并通过动画模拟爆破对象的破坏过程,达到爆破过程再现的演示功能。开发爆破工程虚拟仿真实验系统平台,设置爆破破岩机理、台阶爆破、隧道掘进爆破、拆除爆破四个仿真实验模块。通过本仿真实验系统,学习者可清楚地了解炸药爆破作用机理,掌握炸药性能和爆破参数对爆破效果的影响,直观真实;同时,大大降低了爆破工程课程实践教学危险性和实验成本,为改善课程教学效果提供保障。

关键词: 爆破工程;爆破实验;教学实践;虚拟仿真

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0153-06

Virtual Simulation Experiment System and Teaching Practice of Blasting Engineering

YE Hai-wang, LEI Tao, LI Mei, LI Ning, WANG Qi-zhou, LI Qing,
CHEN Zhang-meng, LI Li-feng, TAN Hai, HANG Gang

(School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problem of high risk in blasting engineering course experiment, the research and construction of virtual simulation experiment system for blasting were carried out. Numerical simulation method is used to simulate the blasting action of explosives, and the destruction process of blasting objects is simulated by animation, so as to achieve the demonstration function of reappearance of blasting process. The virtual simulation experiment system platform for blasting engineering is developed, and four simulation experiment modules, blasting mechanism, step blasting, tunneling blasting and demolition blasting are set up. Through this simulation experiment system, learners can clearly understand the blasting mechanism of explosives and master the effects of explosive performance and blasting parameters on blasting effect, which is intuitive and real. At the same time, it greatly reduces the practical teaching risk and experimental cost of blasting engineering course, and provides guarantee for improving the teaching effect.

Key words: blasting engineering; blasting experiment; teaching practice; virtual simulation

爆破工程是采矿、土木、道桥与水电等诸多工科专业的核心课程之一,其实验和实践教学受到越来越

越多高校师生的关注^[1,2]。由于具有危险性大和实践性强的特点,爆破工程很难像其他课程一样开展室内实验,导致学生既难以直观地学习各种爆破工程的实施过程,也不能观察到爆破过程和最终效果,限制了学生对于爆破作用机理的理解^[3-5],对后续《爆炸动力学》课程的学习带来一定的困难。

随着虚拟现实技术的发展,虚拟仿真实验在现代教学体系中变得愈加重要^[6-8]。针对爆破工程课程中的高危且具有不可及、不可逆特性的操作实验项目,

收稿日期:2020-07-07

作者简介:叶海旺(1971-),男,副教授、博士,武汉理工大学资源与环境学院采矿系主任,主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作,(E-mail)yehaiwang@sina.com。

通讯作者:雷涛(1983-),男,讲师、博士,主要从事采矿、数字化矿山方面的教学和科研工作,(E-mail)354810915@qq.com。

基金项目:湖北省教学改革研究项目(2015131);教育部产学合作协同育人项目(201802019002、201802191003、201802072004、201802136032)

通过虚拟仿真实验,演示爆破过程及效果,揭示爆破作用机理及各种类型爆破的实质,可有效激发学生学习的兴趣,为学生今后从事爆破工程或进一步深造提供感性支撑^[9]。然而,目前虚拟仿真实验仍处在起步阶段,爆破相关虚拟仿真实验资源极为匮乏。因此,开发一套爆破工程虚拟仿真实验平台,开展虚拟仿真实验项目建设,对爆破工程教学效果提升乃至爆破人才的培养都具有重要意义^[10]。同时,虚拟仿真实验平

台也可作为爆破从业人员再教育学习的优质资源。

1 爆破工程虚拟仿真实验设计

鉴于爆破工程的强实践特性,爆破虚拟仿真实验必须能建构出虚拟实验环境与现实世界的映射关系。因此,爆破虚拟仿真实验过程必然要做到虚实结合,即必须以实际爆破工程项目为依据,开展相应的虚拟仿真实验,这一过程如图1所示。

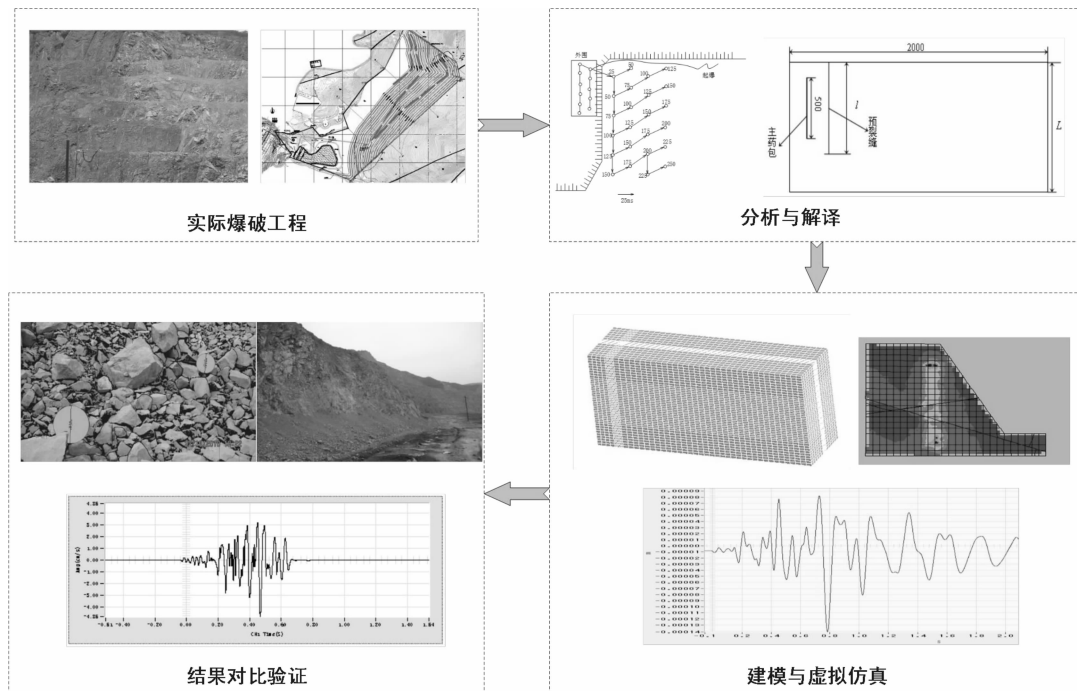


图1 爆破工程虚拟仿真实验过程

Fig. 1 Virtual simulation experiment process of blasting engineering

由图1可知,爆破工程虚拟仿真实验过程可分为4个步骤:

(1)实际爆破工程数据采集,教师选择具有代表性的案例组建案例库,在案例库中导入现场观测所获取的基础数据,并在实验开始时向学生讲解如何获取相关数据。

(2)学生在教师引导下进行数据分析与解译,并在专业理论知识的支撑下理解数据用途。

(3)学生利用虚拟实验平台建立爆破工程仿真模型,开展虚拟仿真实验,并初步分析实验结果,解释实验现象。

(4)基于教师给出的实际工程结果,学生验证虚拟仿真结果的正确性,并在对比分析基础上修正和完善虚拟仿真实验。

2 爆破工程虚拟仿真实验系统开发

2.1 系统需求分析

爆破工程虚拟仿真实验系统的核心需求就是要

克服时空障碍,让学生在虚拟环境中“身临其境”地开展爆破工程实验,并直接获取和运用相关知识和技能,实现提高学生兴趣、促进学生认知和提升学生能力的目标。

在具体知识点上,通过虚拟仿真实验,应能解决以下主要问题:

(1)爆破漏斗实验,裂纹产生、扩展、贯通与岩石抛掷过程实验等,了解炸药爆炸破岩过程,更好地理解爆破破岩机理。

(2)抵抗线对爆破效果的影响。

(3)自由面数量对爆破效果的影响。

(4)单孔爆破、多孔爆破同时起爆及延时爆破的作用特点。

(5)毫秒延时爆破作用机理及其破岩特点。

(6)改变起爆顺序,观察土岩爆破效果及对围岩的破坏特性。

(7)爆破工程中炸药单耗设计原理。

(8)爆破地震波传播与衰减特征。

(9) 针对不同的建(构)筑物,如砖混结构、框架结构、高耸结构、桥梁结构等,预演拆除爆破过程,选取最佳的爆破方案和爆破参数。

(10) 通过设计不同类型爆破的虚拟场景,让学生通过该系统亲身体会爆破现场的爆破过程,实现虚拟化“现场观摩”的目的。

2.2 系统总体设计

爆破工程涉及到的实验项目多、内容差别大,实验课程必须形成一个有机系统,才能满足现代大学教学的需求。这一系统要求既能反映爆破工程涉及到的不同爆破方法,也要符合学生学习从基本原理到应用技术的认知规律。同时,如将图1所示的爆破工程虚拟仿真实验过程放到整个系统中进行描述,还应理顺教师和学生在学习与教之间的逻辑对应关系。将爆破工程实验内容和教学过程整合在一起,就可形成如图2所示的爆破工程虚拟仿真实验系统的总体设计。

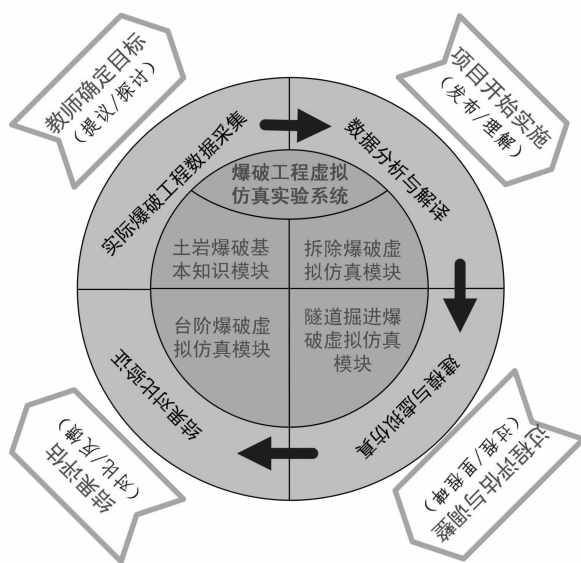


图2 爆破工程虚拟仿真实验系统总体设计

Fig. 2 Overall design of virtual simulation experiment system for blasting engineering

如图2所示,位于图中心的土岩爆破基本知识、台阶爆破虚拟仿真、隧道掘进爆破虚拟仿真与拆除爆破虚拟仿真等4个模块构成了爆破工程虚拟仿真实验系统的核心部分,相关的硬件与软件都在其中。目前初步构建的虚拟仿真实验系统是基于多软件平台开发的:利用VB语言编写系统界面,并建立地质、材料与爆破参数数据库;三维模型则首先使用3Dmine、3DSMAQX软件进行建模,并形成实体模型库;根据现场爆破项目的影像数据,结合数值软件模拟的不同参数下爆破实验结果数据,建立参考结果数据库;采用Unity 3D对三维模型和参考结果处理后,进行VR和AR

开发,学生可以以观察者或操作者的视角进行实验。

实验时,学生和教师的角色也与传统实验有所区别,其角色可如图2所示。

围绕爆破工程虚拟仿真项目,学生可按照“接触—融入—贯通—创新”4个阶段开展实验。其中,接触的目的是让学生理解实际工程,学会数据采集。融入则要求学生探索爆破工程的相关机理,开展数据分析和解译;贯通是整个虚拟仿真实验项目的核心部分,要求学生以某个虚拟仿真项目为支撑,在虚拟仿真过程中掌握相关知识;创新阶段必须结合结果对比验证进行,引导学生在探讨实验结果和参考结果差异原因的基础上,重新开展创新性实验,以取得深度学习的效果。

在仿真实验中,教师的角色则从知识传授者变成行动引导者,可由4个环节组成。(1)提议/探讨:由教师确定整体目标,学生分组提议目标并开展探讨,确定实验过程阶段小目标(里程碑);(2)发布/确保理解:教师对学生目标和任务安排进行指导,以保证实验项目被正确理解。(3)过程评估/目标调整:在虚拟仿真实验过程中,开展过程评估并进行必要的调整,确保学生深入理解每个实验操作的目的和意义;(4)对比/反馈:虚拟仿真实验的优点之一就是能实现反馈式教学,在一个项目实现仿真后,必须开展对比验证,并根据对比结果的反馈做出调整,这种调整以鼓励学生用创新性方法挑战更高的目标为主。

2.3 实验项目介绍

本爆破工程虚拟仿真实验系统包括以下内容:

(1) 土岩爆破基本知识模块

基于炸药爆炸破岩理论,首先,建立炸药在岩体中爆炸时形成应力波和爆生气体模型,演示其作用过程和破岩机理;其次,建立爆破漏斗实验模型,演示松动爆破、标准抛掷爆破和加强抛掷爆破作用特性以及各爆破目标下炸药单耗变化规律;再次,建立不同的装药形状(条形药包和球形药包)的爆破模型,演示不同装药形状的破岩作用特点。

(2) 台阶爆破虚拟仿真模块

基于条形装药形式,首先,建立连续装药结构的仿真模型,考察不同堵塞材料、堵塞长度对爆破效果的影响演示;其次,建立多孔模型,改变延期时间,观察不同延时而对爆破效果的影响演示;再次,改变装药结构(径向不耦合、轴向不耦合装药),观察不同装药结构及不耦合系数工况下的爆破效果演示。

(3) 隧道掘进爆破虚拟仿真模块

建立隧道模型,首先,基于一定的隧道断面尺寸(受限空间内),改变掘进进尺,观察爆破效果及炮

孔利用率;其次,采用不同的起爆顺序、掏槽孔布置形式,观察掏槽效果;再次,改变周边孔的布置形式及参数,观察光面爆破效果。

(4) 拆除爆破虚拟仿真模块

分别建立砖混结构、框架结构的房屋建筑,观察爆破倾倒过程,并考察不同结构尺寸(长、宽、高)及爆破缺口高度对倾倒效果、爆堆尺寸等的影响;建立高耸建筑物模型,选用单向倾倒、折叠单向倾倒、折叠双向倾倒、原地坍塌等不同爆破模式的爆破效果及倾倒范围,并在模拟折叠爆破时考察不同延长时间对爆破效果的影响。见图3。

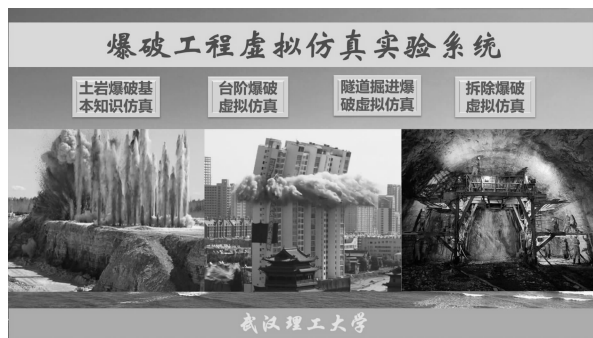


图3 爆破工程虚拟仿真实验系统软件界面

Fig. 3 Software interface of virtual simulation experiment system for blasting engineering

3 爆破工程虚拟现实实验教学实践

分别以框架楼房拆除爆破虚拟仿真实验和隧道掘进爆破工艺流程虚拟仿真为例,阐述虚拟仿真实验系统的功能。

3.1 框架楼房拆除爆破虚拟仿真实验

利用有限元软件 ANSYS 建立 10 层钢筋混凝土框架楼房模型,楼房长 21 m,宽 13.5 m,高 33 m,层高 3.3 m,柱结构断面尺寸为 600 mm × 600 mm,采用斜切形切口定向倾倒的方案爆破拆除,分别对不同爆破切口高度的三种爆破方案进行模拟,切口尺寸为:方案一 9.9 m、方案二 13.2 m、方案三 16.5 m。四排立柱间的延期时间间隔均为 400 ms。

观察楼房倒塌过程,比较不同切口高度楼房在起爆后倒塌过程中的倒塌姿态和解体情况随时间变化如图 4~6 所示,对比分析楼房的倒塌时间,倒塌效果及爆堆范围如表 1 所示。

通过虚拟仿真,可以更直观地观察框架楼房爆破拆除的倒塌过程、楼房的倒塌姿态和建筑物构件的运动及解体过程。并且通过对比分析爆破效果各项指标,结合实际爆破对安全环保的要求,选择合理的爆破方案。

3.2 隧道掘进爆破工艺虚拟仿真实验

首先,根据隧道掘进所需达到的要求,设计隧道掘进爆破方案、选取爆破参数。其次,基于不同的爆破方案和工艺参数进行数值模拟仿真,得出不同工况条件下隧道掘进爆破效果,并分析其爆破危害效应。最后,结合爆破模拟仿真结果,开发隧道掘进爆破生产工艺流程仿真动画。

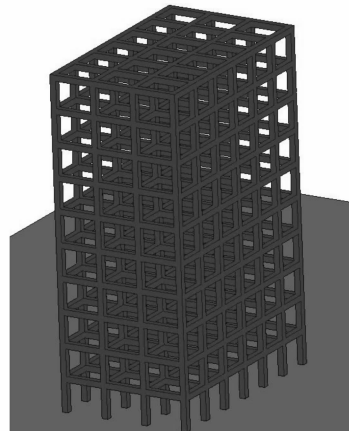


图4 楼房模型

Fig. 4 Building Model

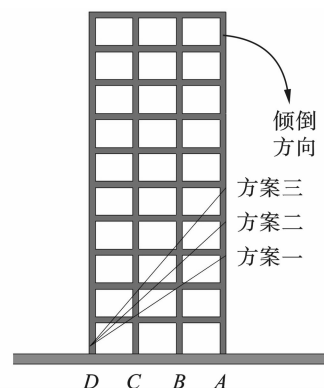


图5 爆破切口(侧视图)

Fig. 5 Blasting cut (side view)

表1 爆破仿真结果参数对比

Table 1 Comparison of parameters of blasting simulation results

方案	倒塌时间/s	倒塌长度/m	爆堆高度/m	后座距离/m
一	4.7	48.8	4.8	8.3
二	4.3	47.7	4.6	11.2
三	4.1	46.8	4.2	10.9

4 结语

(1) 基于虚拟仿真实验教学理论和爆破工程专业实际情况,构建了爆破虚拟仿真实验系统,该系统

设计合理、内容丰富、教学过程符合教学认知规律, 为爆破工程虚拟仿真实验提供良好的平台。

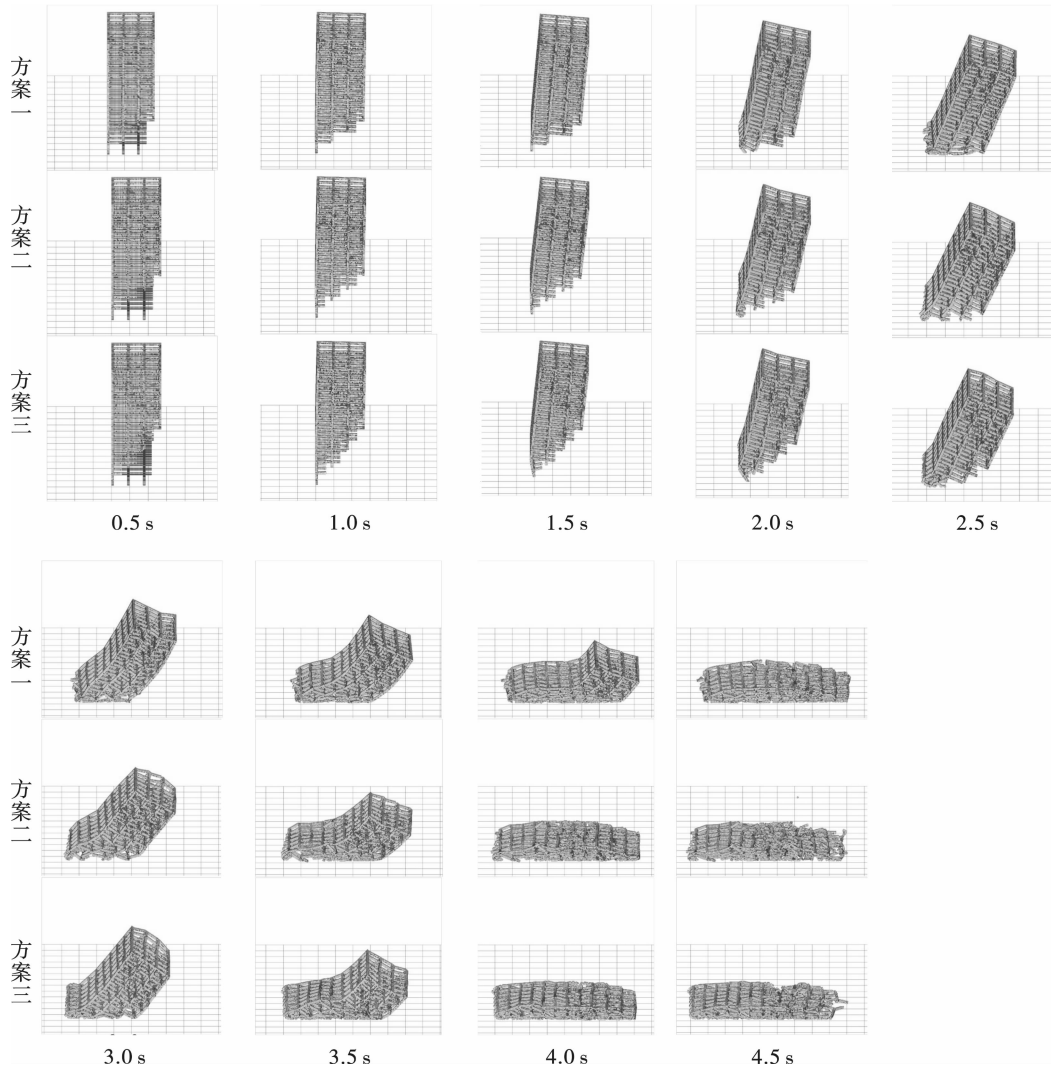


图 6 框架楼房倒塌过程仿真
Fig. 6 Collapse process simulation of frame building

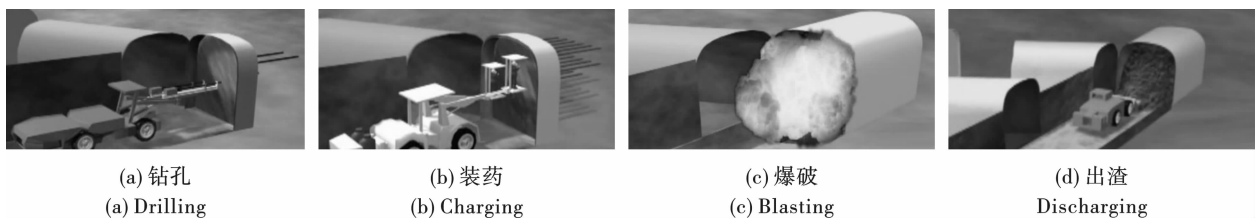


图 7 隧道掘进爆破仿真动画过程
Fig. 7 Simulation animation process of tunneling blasting

(2) 教学实践证明,爆破工程虚拟仿真实验可以很好地反映爆破工程的真实情况,不但提升了学生的工程实践能力,还极大地激发了探究爆破机理的学习兴趣,达到了教学目标要求。

参考文献 (References)

[1] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.

[2] 王依娇. 基于虚拟现实技术的爆破工程学习系统研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2013.

[2] WANG Yi-jiao. Study on learning system of blasting engineering based on virtual reality technology [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2013. (in Chinese)

[3] 张飞燕, 杨小林, 韩颖, 等. 巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台构建 [J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6): 151-156.

[3] ZHANG Fei-yan, YANG Xiao-lin, HAN Ying, et al. Con-

- struction of experimental teaching platform for blasting safety during tunnelling based on virtual simulation[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(6): 151-156. (in Chinese)
- [4] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. *爆破*, 2019, 36(2): 1-12.
- [4] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. *Blasting*, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)
- [5] 杨仁树, 马鑫民, 李 清, 等. 煤矿巷道掘进爆破智能设计系统及应用[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(7): 1130-1135.
- [5] YANG Ren-shu, MA Xin-min, LI Qing, et al. Application on intelligent system for optimization design of blasting in mine tunnel excavation of coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(7): 1130-1135. (in Chinese)
- [6] 陈振杰, 李满春, 程 亮, 等. 地球系统科学虚拟仿真实验研发[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(3): 133-138.
- [6] CHEN Zhen-jie, LI Man-chun, CHENG Liang, et al. Development of virtual simulation experiment in earth system science[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(6): 151-156. (in Chinese)
- [7] HUANG F R, CHEN B, CAO Q, et al. Three-dimensional construction and visualization of complex geologic environments for virtual field practice and virtual education[C] // *International Conference on Geoinformatics*. New York, USA: IEEE, 2013.
- [8] 教育部. 关于2019—2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知[Z/OL]. [2019-07-13]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html.
- [9] 凌天龙, 武 宇, 李胜林, 等. 煤矿巷道光面爆破智能设计系统开发与应用[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(2): 29-35.
- [9] LING Tian-long, WU Yu, LI Sheng-lin, et al. Development and application of intelligent design system for smooth blasting of coal mine roadway[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2018, 37(2): 29-35. (in Chinese)
- [10] JIANG H X, LIN G F. The design and application of geography experimental simulation platform[C] // *International Conference on Computer Science & Education*. Singapore, 2011: 1246-1250.

英文编辑: 赵 亮

(上接第 133 页)

- [9] 余 波. 气云爆炸场的数值模拟及响应分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 42-45.
- [9] YU Bo. Numerical simulation and response analysis of gas cloud explosion field[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015: 42-45. (in Chinese)
- [10] 清华大学抗震抗爆工作室. 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986: 53-60.
- [10] Anti-seismic and Anti-explosive Studio of Tsinghua University. Performance of reinforced concrete structural members under impact load[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986: 53-60. (in Chinese)
- [11] 李猛深, 李 杰, 李 宏, 等. 爆炸荷载下钢筋混凝土梁的变形和破坏[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 177-183.
- [11] LI Meng-shen, LI Jie, LI Hong, et al. Deformation and failure of reinforced concrete beams under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 177-183. (in Chinese)
- [12] 陈万祥, 卢红标, 陈小伟, 等. 高强钢筋混凝土板抗爆性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(10): 135-141.
- [12] CEHN Wan-xiang, LU Hong-baio, CHEN Xiao-wei, et al. Texts for anti-blast performance of concrete slabs with high-strength reinforcements under blast loading. [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(10): 135-141. (in Chinese)
- [13] 刘文燕, 赵 勇. 混凝土结构基本热工参数进展研究[C] // 第十三届全国结构工程会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2004: 88-92.
- [13] ZHAO Wen-yan, ZHAO Yong. Research progress on basic thermal parameters of concrete structures[C] // *Papers Collection of the Thirteenth National Conference on Structural Engineering*, Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 88-92. (in Chinese)
- [14] 段玉龙, 周心权. 矿井瓦斯爆炸下巷道内的对流热系数的探讨[J]. *煤矿安全*, 2010, 41(4): 105-108.
- [14] DUAN Yu-long, ZHOU Xin-quan. Discussion on convection heat coefficient in mine gas explosion roadway[J]. *Safety in Coal Mines*, 2010, 41(4): 105-108. (in Chinese)
- [15] 孙珊珊, 赵均海, 张常光, 等. 爆炸荷载下混凝土墩柱柱面压力分布研究[J]. *爆破*, 2018, 35(2): 12-18.
- [15] SUN Shan-shan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Chang-guang, et al. Study on cylinder overpressure distribution of concrete-filled steel tube pier subjected to explosive loading[J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 12-18. (in Chinese)

英文编辑: 袁必和