

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.027

## 爆破工程实验教学创新平台构建\*

王雁冰,李书萱,汪东宸,杨国梁,李胜林,马鑫民

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

**摘要:** 针对“爆破工程”实验教学中存在的问题,结合高校和科研院所自身的实际情况,提出了搭建爆破工程实验教学创新平台的思路。通过自主设计研发和引进金属丝电爆炸破岩装置、室内小药量岩石爆破破碎装置、爆破智能专家系统与虚拟仿真系统组合等手段,构建了综合创新平台。主要包括3个模块:非化学反应的爆炸加载、岩石爆破效果的定量评价、现场工程爆破参数自动优化设计及作业仿真。该平台的主要特色在于用金属丝电爆炸代替传统化学炸药破岩,实现了爆炸动载的实验室模拟;确立了室内小药量岩石爆破损伤破裂程度的评价方法;实现了现场爆破施工图表的自动绘制和爆破全过程的虚拟仿真反演。学生利用该平台,开展了非化学反应的爆炸加载破岩试验、不耦合装药爆破破裂程度量化研究、巷道爆破图表自动绘制与掏槽爆破虚拟仿真研究,效果良好。该平台也可用于开展其他创新性实验。

**关键词:** 爆破工程;实验教学;创新平台;岩石爆破

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)04-0173-07

## Construction of Innovative Platform for Experimental Teaching of Blasting Engineering

WANG Yan-bing, LI Shu-xuan, WANG Dong-chen, YANG Guo-liang, LI Sheng-lin, MA Xin-min

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

**Abstract:** In view of the problems existing in the experimental teaching of blasting engineering and the actual situation of universities and scientific research institutes, an idea of building an innovative platform for experimental teaching of blasting engineering was proposed. Through independent design and development, a comprehensive innovative platform was built, which includes introduction of the rock breaking device with a metal wire electric explosive, indoor rock blasting device with a small charge and a system combined by the blasting intelligent expert system and virtual simulation system. It mainly includes three modules: explosive loading module of non-chemical reaction, quantitative evaluation module of rock blasting effect, automatic optimization design and operation simulation model of blasting parameters in field engineering. The main feature of the platform is that the metal wire electric explosion was used instead of the traditional chemical explosive to break rock, and the laboratory simulation of explosive dynamic load was realized. Meanwhile, an evaluation method of blasting damage and fracture degree of rock with small charge was established. Besides, the automatic drawing of site blasting construction chart and the virtual simulation inversion of the whole process of blasting were realized. With this platform, students have carried out experiments on rock breaking under explosive loading without chemical reaction, quantitative research on the degree of rupture of uncoupled charge blasting, automatic drawing of tunnel blasting chart and virtual simulation of cutting blasting, and the results are satisfactory. The platform could also be used to conduct other innovative experiments.

**Key words:** blasting engineering; experimental teaching; innovative platform; rock blast

“爆破工程”是土木工程、城市地下空间工程、采矿工程等专业的一门选修课,主要讲授炸药爆炸基本理论、爆破器材、岩石爆破机理与岩石破碎技术和爆破安全等内容<sup>[1]</sup>。为了培养学生的实际操作能力,课程通常安排爆破综合实验课。通过实验可以加深学生对岩石爆破机理的理解,增强感性认识,能够正确地选用爆破方法和确定爆破参数,能用理论计算方法和图表设计常规爆破方案,并具有分析和解决爆破技术问题的能力<sup>[2,3]</sup>。但目前实验课的开设存在着诸多问题。

1) 开展基于真实的炸药、雷管的室内爆破实验较为困难。国家对爆破器材、爆破作业实施的管控越来越严格。爆破器材的购买、运输、使用及存放需要层层审批,且高校和科研院所大多位于城市的繁华区,逢重要节日及重大活动,所有剩余火工品必须全部销毁。

2) 使用炸药存在安全隐患。许多炸药对温度、摩擦、光照等较为敏感,一旦操作不规范,极易引发误爆。实验室空间狭小,炸药的爆炸会产生一定的有毒有害气体,影响人员健康。爆破振动给建筑物和构筑物带来危害<sup>[4]</sup>。

3) 目前,实验设计对于土木类专业的针对性不强。过去的实验主要是针对采矿工程专业设计的,主要涉及传统的爆破采煤和爆破落矿。近年来,随着科技的不断发展,对精细化爆破和围岩损伤精准控制提出了更高的要求。按原有的实验设计教学,将不利于激发学生的兴趣,达不到理想的教学效果。

4) 传统的巷(隧)道模型爆破实验耗时长<sup>[5,6]</sup>,且费用非常高,不宜用于本科生教学。相似模型实验涉及动力学相似,很难做到完全匹配。另外,由于爆炸的随机性和瞬态性<sup>[7]</sup>,爆破实验往往难以重复,这就导致如果要得到普遍的科学规律,需要进行大量的实验,费时费力。

针对上述现实问题,构建了爆破工程综合实验平台;自主设计、研发和改进了相关实验装置和软件系统,使学生能够在没有火工炸药的前提下完成爆破实验,同时对现场爆破实验进行了真实模拟再现;改进和提升了平台运营模式和管理考核方法,使得学生综合能力得到提升。

## 1 综合实验平台的设置和搭建

根据教学大纲和培养方案的要求,对爆破工程综合实验平台进行模块化设计,实验平台包括3个模块:非化学反应的爆炸加载、岩石爆破效果的定量评价和现场工程爆破参数自动优化设计及作业仿真。

### 1.1 非化学反应的爆炸加载

实验室开展爆破破岩相关研究需要满足安全要求、时间可控要求和便于各项测试关联。炸药爆破和气体致裂的方法难以在这面进行时间关联,时间分散性大,而且炸药不安全,属严控物质。需要发展实验室用破岩新技术和方法,满足上述研究的需求和要求。

现代岩石爆破理论认为<sup>[8]</sup>,岩石的破碎是爆炸应力波和爆生气体共同作用造成的,爆炸应力波首先作用于岩体使其产生裂隙,随后而来的爆生气体楔入到这些裂隙中,促使裂隙进一步扩展。基于这种理论,引进和研制物理爆破方法,取代传统的雷管和炸药等火工品。

为了模拟爆炸的强动载作用,搭建了“金属丝电爆炸破岩装置”,在脉冲大电流作用下,金属丝吸收能量,瞬时(数微秒至数十微秒)历经升温、熔化、气化和形成等离子体等过程,在岩石受限空间内形成高温高压气体,膨胀对周围介质做功,在岩石中产生脉冲应力波,致使岩石发生破坏。图1是电爆炸装置构成的示意图。图2是四路实验室用电爆炸破岩装置,金属丝直接起爆替代含能材料做功,金属丝可同时爆炸也可延时爆炸。

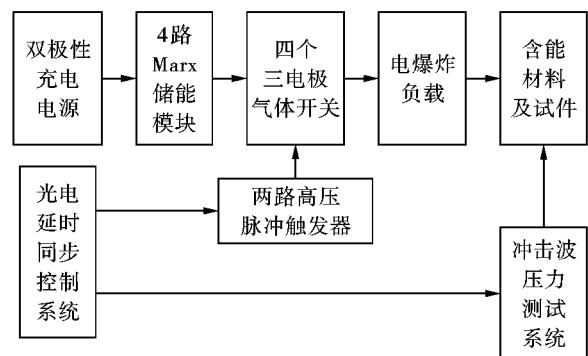


图1 电爆炸装置构成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electroexplosive device composition

与传统的化学炸药相比,平台中金属丝电爆炸破碎岩石时,等离子化的气体很少,并且迅速冷却下来吸附在岩石的表层,因而金属丝电爆炸爆生气体的作用可以忽略不计,只产生应力波作用。具有安全可控、无

收稿日期:2021-06-15

作者简介:王雁冰(1987-),男,山东潍坊人,博士、副教授、硕士生导师,主要从事爆破工程和岩石动力学方面的教学和科研工作,(E-mail) ceowyb818@163.com。

基金项目:中国矿业大学(北京)教学改革项目资助(编号J200720);中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目资助(编号C202006867);中国矿业大学(北京)越崎青年学者资助项目资助(编号800015Z11A24)

毒无污染、能量可调、操作简单、可重复性高等优势。

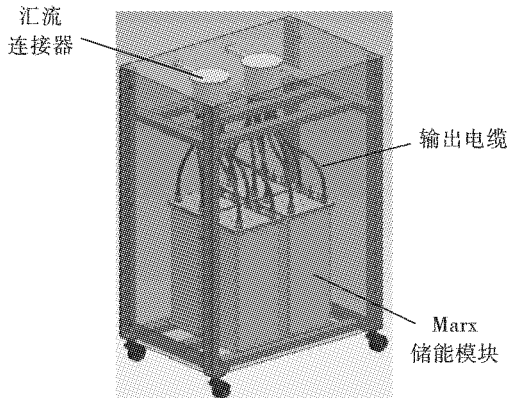


图 2 四路实验室用电爆破岩装置

Fig. 2 Four-way laboratory electric blasting rock device

### 1.2 岩石爆破效果的定量评价

实验室内岩石爆破试验后,岩石的爆破破碎效

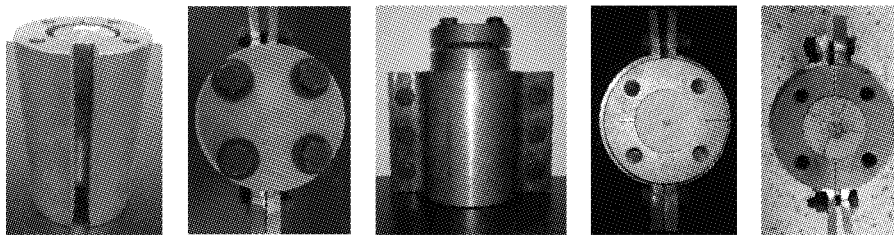


图 3 室内小药量岩石爆破破碎装置实物图

Fig. 3 Physical diagram of indoor rock crushing device with small dosage

基于 CT 扫描和 Mimics 三维重构<sup>[9,10]</sup>,提出了试件爆破后损伤破裂程度  $\omega$  的计算方法,见式(1)。

$$\omega = \frac{D_i - D_0}{D_i^{\max} - D_0} \quad (1)$$

式中: $D_i$  为爆炸后介质内部损伤面积的分形维数; $D_0$  为爆炸前介质内部初始损伤面积的分形维数; $D_i^{\max}$  为介质达到最大损伤面积时的分形维数,对于平面问题  $D_i^{\max} = 2$ ,对于三维问题  $D_i^{\max} = 3$ 。

### 1.3 现场工程爆破参数自动优化设计及作业仿真

爆破作业是采矿、土木、交通等工程施工条件最差的工序环节,往往独头掘进、空间狭窄、粉尘浓度大、各工种干扰多,学生如果进入爆破作业现场不仅影响企业的正常生产,而且可能带来不必要的安全隐患,而爆破作业需专人操作,学生无法获得实操机会。在教学中,通常以室内模型试验代替现场观摩实验,但模型试验耗时、耗力、耗材,且试验结果难以重复。借助爆破掘进智能专家系统和虚拟仿真系统<sup>[11-13]</sup>,学生可进行爆破参数的选取和爆破方案的设计,利用虚拟仿真可以对整个爆破作业过程进行再现。

果如何定量评价,不同的爆破参数和装药结构对岩石爆破效果的影响如何定量体现,为此设计了实验室内小药量小试件的爆破破碎装置,构建了岩石试件爆破损伤破裂程度的定量评价方法。

自主设计研发了一套“室内小药量岩石爆破破碎装置”<sup>[9,10]</sup>,如图 3 所示。该装置的材料选用高强度钢并经淬火处理,可以抵抗爆炸冲击的强破坏力不变形。装置的外观为圆柱形,外径 100 mm,高度 200 mm,中间为直径 50 mm、高度 150 mm 的柱状空间,用于放置岩石试件。为了方便安装、拆卸试件,将该装置设计成由两个半圆柱拼装而成的对称结构。腔体外侧设置对称的套箍并配有 6 个螺栓,用于施加约束压力。腔体上方有一法兰圆盘,并用橡胶垫作为二者的间隔,在实验时通过螺栓将法兰圆盘固定在圆柱腔体上。

智能专家系统的开发基于 Micorsoft Visual Studio 平台,系统建立了基于典型案例、规则推理“专家知识库”和“数据库”,知识库设计本着管理科学,便于知识更新和完善,及时提供高效支持的原则,依据系统实际需要,对爆破技术进行分析,确定了产生式规则进行知识表示。产生式规则表示法与人的思维接近,可较简洁地表达知识库中相关知识;易于理解推理,便于人机交换信息。

引进和建立巷(隧)道掘进爆破虚拟实验系统,将绘制好的爆破图表导入系统,该系统可将巷(隧)道钻孔爆破的全过程——钻孔、清孔、验孔、装药、堵塞、起爆、出矸、挂网、支护、喷浆全过程都展现出来。利用该系统,还可以对爆破粉尘浓度、有毒有害气体浓度、爆炸压力,爆破振动信号等进行监测,直接导出数据。

平台将智能专家系统与虚拟仿真系统有机地组合在一起。爆破掘进智能专家系统具有较强的智能性,可根据绘图规则和要求,自动满足现场各种炮眼布置的图形绘制。虚拟仿真系统则以动画的形式再现爆破作业的全过程。

## 2 实验教学案例及效果评价

### 2.1 非化学反应的爆炸加载破岩试验

学生利用平台中的“金属丝电爆炸装置”代替传统化学炸药进行爆破破岩试验。首先预制直径50 cm、高度50 cm的圆柱形水泥砂浆试件,用以模拟岩石材料。从圆柱形的上表面垂直向下钻凿直径2 cm,深度25 cm的炮孔。之后将金属丝放入炮孔中,通过调节充电电压可以获得不同能级的爆炸压力。试验过程中,利用该平台可以对爆炸压力进行实时精准监测,实现了爆炸压力的精准控制。试验结束后学生可根据试验测量结果编写实验报告,对试验结果进行更进一步分析和总结。

学生可直接在该平台上模拟爆炸的强动载作用,通过金属丝电爆炸可以有效的破碎岩石等脆性材料。该平台最大限度的保证了学生及操作人员的

安全。与此同时,参与大学生创新训练和毕业论文的学生也可利用该平台开展相关试验,例如,通过改变金属电极的抵抗线的长度,进行不同尺度的装药爆破模型试验。另外,金属丝自身细而长,通过改变金属丝的直径规格可以开展不同耦合系数条件的爆破试验;通过改变长度可以开展跨尺度的条形药包装药爆破试验。

### 2.2 不耦合装药爆破破裂程度量化

学生利用平台中的“室内小药量岩石爆破破碎装置”,开展了小药量岩石试件不耦合装药爆破试验<sup>[14]</sup>。试验选用直径50 mm,高度100 mm的红砂岩试件,利用工业CT对试验前后的试件进行扫描,计算爆破前后试件的分形维数 $D_0$ 和 $D_t$ ,利用平台自带Minics软件对爆后试件进行重构,如图4所示,最后计算了损伤破裂程度 $\omega$ 。

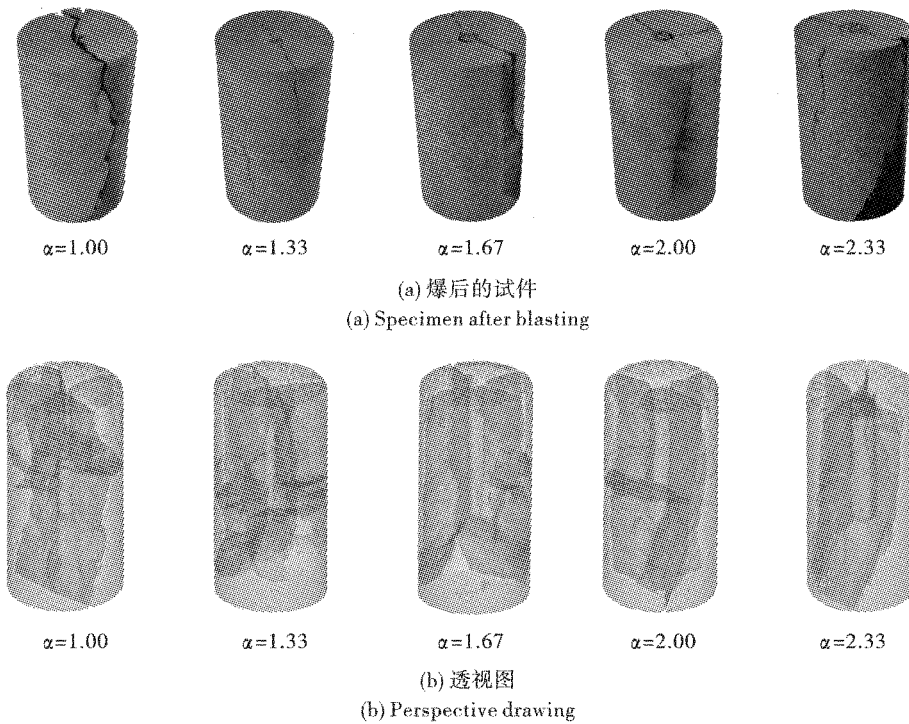


图4 原试件及重构试件对比

Fig. 4 Comparison of original and reconstructed specimens

该平台解决了室内爆破试验边界约束和冲孔的问题。学生可以定量的评价爆炸压力对岩石的破坏效应。装置体积小、装卸灵活、操作简单、造价低廉,同时具有防噪音、减震的效果。实验课上,可并行多组同时进行实验,每个学生都可以亲自动手操作。学生通过该平台重构得到的岩样,能够很好地代替真实的岩样,且通过重构岩样内部裂隙的空间分布情况,分析其力学破坏机制是可行的。

### 2.3 巷道爆破图表自动绘制与掏槽爆破虚拟仿真

根据山西某矿岩石巷道的实际地质情况,学生将巷道的形状、几何尺寸、巷道顶底板情况、岩性、爆破方式等参数输入该平台中的智能专家系统中,然后系统自动生成一阶/二阶掏槽等多种爆破方案的图表(图5)、爆破参数表和爆破效率表。将爆破图表和爆破参数导入虚拟仿真仿真系统,再现了巷道爆破全过程,如图6和图7所示。

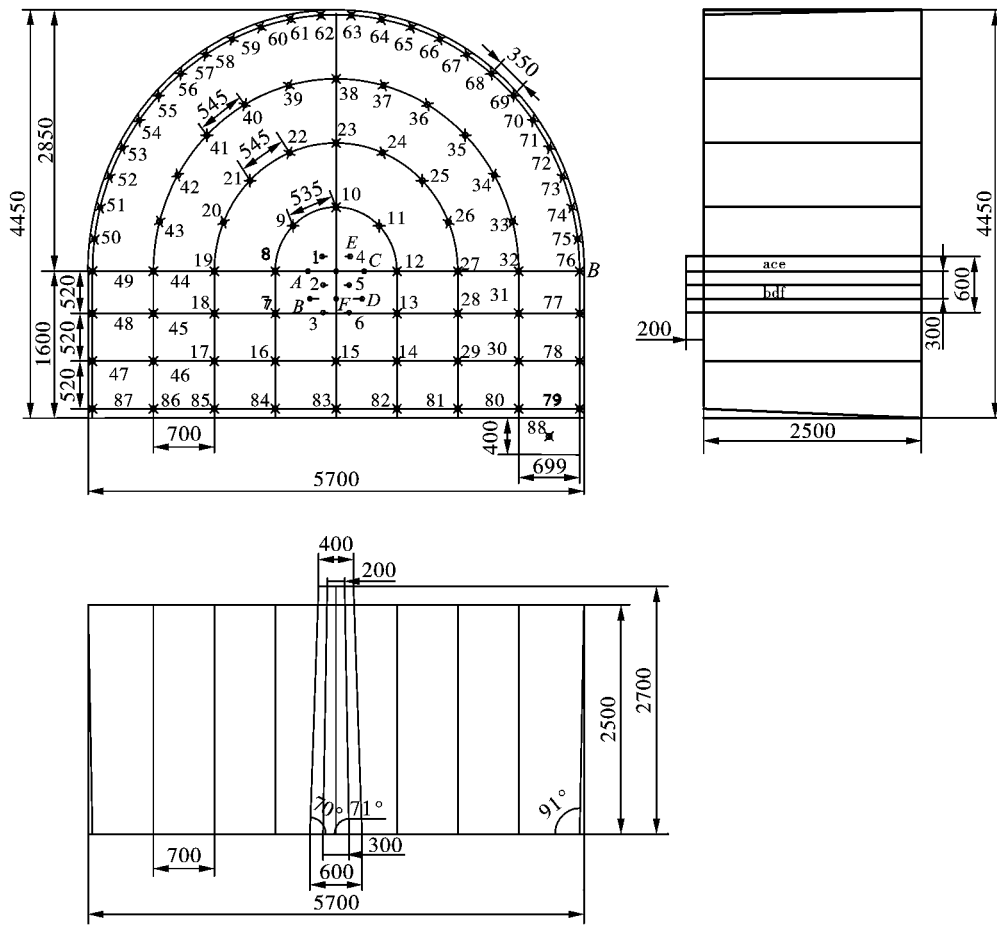


图5 学生自主设计的爆破图表(单位:mm)

Fig. 5 Blasting chart independently designed by students(unit:mm)

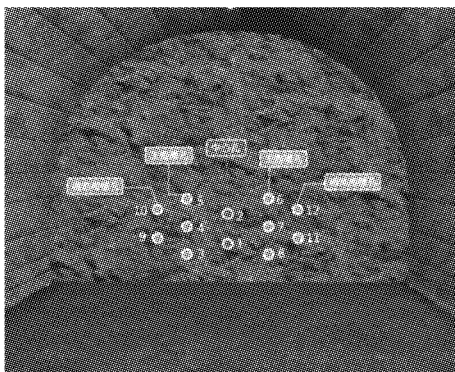


图6 钻掏槽孔

Fig. 6 Drilling grooves

平台中组合后的新系统充分体现了“虚实结合、相互补充、能实不虚、相辅相成”的原则,将人工智能、模糊数学及专家级爆破经验和规则结合,研发了智能推理机制,依托虚拟仿真、多媒体、人机交互、数据库和网络通信等技术,建立了逼真的虚拟实验环境,学生产生浓厚的兴趣,从而置身于虚拟环境中全身心投入开展爆破实验,身临其境,感受真实的现场爆破过程,取得意想不到的教学效果。另外,学生

设计的爆破方案不同,则监测的数据也会发生改变,可直接生成数据图表对爆破效果和危害进行分析研究。利用该平台,学生可以快速的设计爆破方案,并且能快速的检测爆破效果,节省了时间。

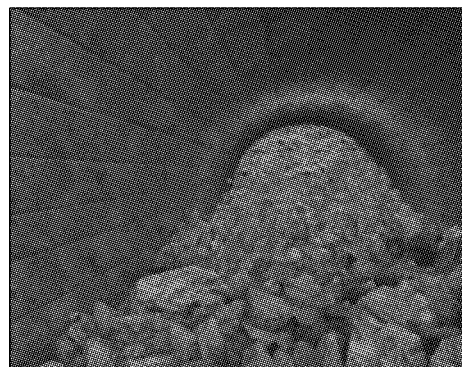


图7 爆破后形成的爆堆

Fig. 7 Blasting piles formed after blasting

### 3 综合实验平台的运行与管理

综合实验平台中的装置及系统不仅能够满足“爆破工程”实验课程教学的需要,而且可以为本科

生开展创新训练等提供必要的辅助支撑。为此,将实验的8学时分为3部分,2学时的常规实验;6学时的创新设计实验。常规实验中,按照大纲要求,学生完成岩石试件的爆破试验,观察爆后岩石的粉碎区、裂隙区的范围,比较不同岩性的岩石或类岩石材料爆破的差异,撰写试验报告。创新设计实验中,以6~8人为一小组。一种是就岩石爆破中的某个具体问题(如装药参数、装药结构等)自主设计实验,开展研究,比较差异,分析原因,小组内部充分的交流和讨论,并以PPT的形式向全体同学汇报,其他同学进行提问,最终形成研究报告。另一种是利用“组合”系统,设计不同的爆破方案,比较不同方案的爆破效果,并进行优化,比选过程中,给学生充分的时间讨论、分析。最终针对特定的岩性、特定的地质条件,提出最优的爆破方案,并形成技术交底。

实验课以百分制考核,常规实验占40分,2个创新实验各占30分,见表1,得分60以上即为合格。

表1 考核内容、方法及分值  
Table 1 Test content, method and scores

实验类型	考核内容	考核方法	分值
常规实验	仪器使用 实验过程 结果分析	实验报告	40
创新实验1	实验目的 实验原理 结论	PPT演示 小组讨论 实验报告	30
创新实验2	方案设计 方案比选优化 技术交底	技术交底 教师判断方案 的可行性	30

## 4 结语

爆破工程实验教学综合平台解决了“爆破工程”课程室内真实的爆破实验和巷(隧)模型实验难以开展的问题,用电爆炸装置取代了传统的火工化学炸药,模拟爆炸应力波和爆生气体的爆破作用,并对爆破破岩效果进行定量评价,将专家系统与虚拟仿真系统组合,成功构建了高仿真的巷(隧)掘进现场环境。利用该平台,学生既可做室内爆破试验又可做现场爆破实验,取得了理想的教学效果。

爆破工程实验教学综合平台采用的创新型研究式的教学模式,不仅有助于学生理解课程教学的基本理论,而且能够激发学生的学习兴趣,使学生学习的深度和广度有所增加。另外,与传统的实验教学相比,教学模式也呈现多样化的特点,有利于培养学

生自主学习的能力,同时学生的团队协作能力、工程实践能力、语言表达能力、创新思维能力都得到了相应的提高。该平台也可为不同专业的学生提供共享使用服务,拓宽了实验教学资源的共享和应用范围。

## 参考文献(References)

- [1] 杨国梁,郭东明,曹辉. 现代爆破工程[M]. 北京:煤炭工业出版社,2018.
- [1] YANG Guo-liang, GUO Dong-ming, CAO Hui. Modern blasting engineering [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 陈世万,左双英,鲁鲲鹏. 岩土工程专业爆破工程教学改革探讨[J]. 中国教育技术装备,2020(6):96-97,100.
- [2] CHEN Shi-wan, ZUO Shuang-ying, LU Kun-peng. Teaching reform in blasting engineering for geotechnical engineering [J]. Chinese Education Equipment, 2020(6):96-97,100. (in Chinese)
- [3] 汪海波,宗琦,徐颖. 土建类专业爆破工程教学内容体系探讨[J]. 大学教育,2015(9):167-168.
- [3] WANG Hai-bo, ZONG Qi, XU Ying. Structure discussion of blasting engineering education in civil engineering major [J]. University Education, 2015(9):167-168. (in Chinese)
- [4] 费鸿禄,孙晓宇,关福晨. 水下深埋岩石爆破振动衰减规律研究[J]. 爆破,2020,37(3):26-33,55.
- [4] FEI Hong-lu, SUN Xiao-yu, GUAN Fu-chen, et al. Vibration attenuation law of underwater deep buried rock blasting [J]. Blasting, 2020, 37(3):26-33,55. (in Chinese)
- [5] 杨仁树,张宇菲,王梓旭,等. 新型地质力学模型实验系统的研制与应用[J]. 煤炭学报,2018,43(2):398-404.
- [5] YANG Ren-shu, ZHANG Yu-fei, WANG Zi-xu, et al. A newly-built geomechanical model test system and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):398-404. (in Chinese)
- [6] 刘康,郭东明,陈亮亮,等. 爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏规律试验研究[J]. 爆破,2020,37(3):15-20.
- [6] LIU Kang, GUO Dong-ming, CHEN Liang-liang, et al. Experimental study on surrounding rock failure law of adjacent roadway under explosive loading [J]. Blasting, 2020, 37(3):15-20. (in Chinese)
- [7] 柴修伟,李建国,习本军,等. 等体积空孔直眼掏槽槽腔形成过程及其分析[J]. 爆破,2020,37(4):48-52.
- [7] CHAI Xiu-wei, LI Jian-guo, XI Ben-jun, et al. Formation process and analysis of cavity by burn cut with equal vol-

- ume empty hole[J]. *Blasting*, 2020, 37(4):48-52. (in Chinese)
- [8] 明胜,姚颖康,孙金山,等. 钻孔爆破过程中炮孔远区爆炸荷载的实验研究[J]. *爆破*, 2019, 36(3):1-8, 15.
- [8] MING Sheng, YAO Ying-kang, SUN Jin-shan, et al. Experimental study on explosive load far from boreholes during engineering blasting[J]. *Blasting*, 2019, 36(3):1-8, 15. (in Chinese)
- [9] 王雁冰,杨仁树. 一种定量分析岩石爆破损伤的实验方法, 中国:ZL201910042939.7[P]. 2019-05-28.
- [10] 王雁冰,于冰冰,孔骥,等. 室内小药量岩石爆破损伤评价方法及装置[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(6):624-631.
- [10] WANG Yan-bing, YU Bing-bing, KONG Ji, et al. Methods and devices for evaluation of blasting damage to indoor small quantity rock[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(6):624-631. (in Chinese)
- [11] 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.
- [11] 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)
- [12] 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.
- [12] ZHANG Fei-yan, YANG Xiao-lin, HAN Ying, et al. Construction 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)
- [13] 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.
- [13] 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)
- [14] 王雁冰,文志杰,刘国清,等. 解耦装药爆破岩石损伤传播特性及基于计算机断层扫描的研究[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136:104540.

英文编辑:陈东方

(上接第128页)

- [5] 黄胜松. 混装乳化炸药配方多样性在某矿爆破剥离中的应用研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
- [5] HUANG S S. Application of formula diversity of mixed emulsion explosives in blasting separation of a mine [D]. Guiyang:Guizhou University, 2020. (in Chinese)
- [6] 赵明生,徐海波,张敢生. 基于神经网络的炸药与岩石匹配的研究[J]. *辽宁科技学院学报*, 2009, 11(1):1-3.
- [6] ZHAO M S, XU H B, ZHANG G S. Neural network-based explosive and rock matches[J]. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 2009, 11(1):1-3. (in Chinese)
- [7] 郑长青. 炸药与岩石智能匹配系统研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2009.
- [7] ZHENG C S. Study on the intelligent matching system for explosive and rock [D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing), 2009. (in Chinese)
- [8] 叶海旺. 基于模糊神经网络的炸药与岩石匹配优化系统研究[J]. *爆破器材*, 2005(3):5-7.
- [8] YE H W. Optimization system of dynamite and rock matching based on fuzzy neural network[J]. *Blasting Equipment*, 2005(3):5-7. (in Chinese)
- [9] 李晓杰,王小红,王宇新. 孔隙塌缩对工业炸药爆轰的多重作用[J]. *工程爆破*, 2021, 27(4):1-13, 21.
- [9] LI X J, WANG X H, WANG Y Xi. Multiple effects of pore collapse on industrial explosive bombardment[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(4):1-13, 21. (in Chinese)
- [10] 李新平,陈萍萍. 非对称不耦合装药结构对预裂爆破效果的影响[J]. *爆破*, 2017, 34(3):25-30.
- [10] LI X P, CHEN P P. Effect of asymmetric uncoupled loading structure on the pre-crack blasting effect[J]. *Blasting*, 2017, 34(3):25-30. (in Chinese)

英文编辑:陈东方