

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.009

“爆破安全”课程融合实验教学体系构建与实践^{*}

张飞燕^{1a,2,3}, 刘柯含^{1a}, 韩颖^{1b,2}

(1. 河南理工大学 a. 安全科学与工程学院; b. 能源科学与工程学院, 焦作 454003;

2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 焦作 454003;

3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 焦作 454003)

摘要: 为有效破解“爆破安全”课程真实实验难以开设的难题, 基于虚拟仿真技术及其相关专利技术, 展开融合实验教学体系构建与实践研究。以爆破安全工程中的“巷道掘进爆破安全设计与实现”环节为例, 开发了巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台, 可以实现爆破方案设计、爆破施工以及爆破危害监测的全工艺流程; 配套开发了巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真平台, 可以实现炮烟中毒事故动画演示, 并可在虚拟环境中交互式完成工人自救互救、救援人员救援两项实际操作; 研发了岩巷掘进爆破仿真模型及教学用模拟电雷管, 可完成炮孔布置、雷管检测、起爆网路连接与网路导通性检测四项实践操作。基于此, 进行了融合实验教学内容设计, 研究探索型的线上实验具有启发式、探究式、多途径与多方案的特点; 综合设计型的线下实验具有互动式、团队式与设计性的特点。教学实践表明: 线上虚拟仿真实验不仅极大丰富了实验教学形式、增强了实验课程的趣味性, 同时突破了时间、地域对于实验课程的限制, 学生随时随地皆可通过网络完成实验任务; 而线下实体仿真实验, 不仅培养了学生团队合作精神, 而且加深了学生对课堂所学理论知识的理解与应用, 其动手操作能力得以同步提高。融合实验教学体系构建了虚实结合、相互补充的混合式教学模式, 为破解爆破类实验课程难以开设的难题提供了思路与参考。

关键词: 爆破安全; 课程实验; 融合教学体系; 虚拟仿真; 线上下混合式

中图分类号: X936 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0055-08

Construction and Practice of Integrated Experimental Teaching System of “Blasting Safety” Course

ZHANG Fei-yan^{1a,2,3}, LIU Ke-han^{1a}, HAN Ying^{1b,2}

(1. a. College of Safety Science and Engineering; b. School of Energy

Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China;

3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to effectively solve the difficulty of setting up real experiments in the “Blasting Safety” course, the construction and practical research of integrated experimental teaching system are carried out based on virtual simulation technology and related patented technology. Taking the “design and implementation for blasting safety during roadway excavation” in the blasting safety project as an example, a experimental teaching platform for blasting safety during roadway excavation based on virtual simulation is developed, which can realize the whole process of blasting plan design, blasting construction and blasting hazard monitoring. Meanwhile, a virtual simulation system for emergency rescue of blasting fume poisoning accident during roadway excavation has been developed, which can realize the animation demonstration of blasting fume poisoning accidents, and interactively complete the

two practical operations of self-rescue and mutual rescue of workers and rescue of rescuers in a virtual environment. Then the simulation model of rock tunnel excavation and blasting and the simulated electric detonator for teaching have been developed, which can complete four practical operations of blast hole arrangement, detonator detection, detonation network connection and network continuity detection. Based on above work, the teaching content of fusion experiment is designed. The research and exploration online experiment has the characteristics of heuristic, inquiry, multi-way and multi scheme; The comprehensive design offline experiment has the characteristics of interaction, team and design. The comprehensive design offline experiment has the characteristics of interaction, team and design. Teaching practice shows that online virtual simulation experiment not only greatly enriches the form of experimental teaching and enhances the interest of experimental courses, but also breaks through the limitations of time and region for experimental courses, and students can complete experimental tasks through the network anytime and anywhere. The offline physical simulation experiment not only cultivates the teamwork spirit of the students, but also deepens the students' understanding and application of the theoretical knowledge learned in the classroom, and their hands-on operation ability can be simultaneously improved. Combining the experimental teaching system, a hybrid teaching mode of combining virtual and real and complementing each other is constructed, which provides ideas and references for solving the difficult problems of blasting experimental courses.

Key words: blasting safety; course experiment; integrated teaching system; virtual simulation; online-offline mixed mode

“爆破安全”为安全工程、采矿工程以及土木工程等专业的核心课程,主要讲述爆炸理论基础、工业炸药、起爆技术、岩石爆破理论、矿山与地下工程爆破技术及安全、爆破危害与安全防护、爆破安全管理等内容^[1,2]。课程教学内容包括理论与实验两部分,两者相辅相成。理论教学为实验教学奠定坚实的理论基础,而实验教学则可通过学生对爆破实验设备及仪器的实际操作,深化学生对理论知识的理解,并切实提高其实践能力;同时,实验教学是学生创新思维、创业意识、团队合作精神乃至综合素质培养的关键环节,更是实现立德树人、三全育人的重要方式与途径。

但是,因涉及高危险性爆破器材和极端复杂的环境,国内爆破类课程实验开设均面临如下难题^[3]:①按照国家管控要求^[4],爆破实验器材无法

购置;②爆破施工现场真实环境,实验室难以复制;③爆破实验过程不可逆,危险性极高;④高温、高压、瞬时且不可逆的爆炸过程难以演示,爆破危害监测与控制等后续环节无从谈起。在此背景下,如何有效破解上述难题,探求新型、安全的课程实验教学手段势在必行。为此,结合长期的教学实践,基于虚拟仿真技术及其相关专利技术,展开融合实验教学体系构建与实践研究。

1 融合实验教学体系构建

1.1 融合实验教学体系构建背景

推进信息技术与教育教学深度融合,对于提高教育质量、促进教育公平、构建学习型社会和人力资源强国具有重大意义^[5]。教育部于2013年明确指出:作为学科专业与信息技术深度融合的产物,虚拟仿真实验教学依托虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术,构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象,可实现真实实验不具备或难以完成的教学功能^[6];全国高校探索虚拟仿真实验教学资源建设的热潮由此掀起^[7-10]。2017年,教育部决定在高校实验教学改革和实验教学项目信息化建设的基础上,在普通本科高等学校开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设工作^[11]。

2022年5月6日,国务院联防联控机制召开新闻发布会,教育部高等教育司一级巡视员宋毅指出:“2017年以来已经遴选出728门虚拟仿真实验一流课程。2018年,上线了‘实验空间’虚拟仿真实验教学平台,为全国高校提供了虚拟仿真课程开放共享

收稿日期:2022-01-08

作者简介:张飞燕(1978-),女,山西芮城人,教授、博士,主要从事安全技术及工程领域的教学与科研工作,(E-mail)yanzi@hpu.edu.cn。

通讯作者:韩颖(1980-),男,山东济南人,教授、博士,主要从事矿山安全工程领域的教学与科研工作,(E-mail)hyhpu@hpu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974108,51404093);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF210315);河南省虚拟仿真实验教学项目(2019047);河南省高等教育教学改革研究与实践项目(学位与研究生教育)(2021SJGLX024Y);工程类硕士学位研究生教育在线课程、在线讲座和教辅资源建设项目(2019021、2019024);教育部产学研合作协同育人项目(201902044044,201901292013);河南理工大学研究生教育教学改革基金项目(2021YJ14);河南理工大学研究生课程案例库建设项目(2020YAL02);河南理工大学教育教学改革研究与实践项目(2019JG071,2021JG045);河南理工大学安全科学与工程学院研究生教育教学改革研究项目(2021YAL01)

服务,这个平台上线的虚拟仿真实验课程已经达到3250多门,涵盖了61个专业类;教育部计划在2022年6月,“智慧高教”平台二期建设将增设虚拟仿真实验板块^[12]。可以看出,虚拟仿真实验教学在高等教育中的作用日益凸显,尤其自2019年12月新冠疫情暴发以来,为高校实验教学提供了强有力的支撑。

但是,虚拟仿真实验教学建设的基本原则为:虚实结合、相互补充、能实不虚^[6]。教育部要求:“根据实验教学计划 and 实际情况,在坚持‘能实不虚’的基础上加大虚拟仿真实验教学项目建设力度,探索线上线下教学相结合的新型实验教学模式”^[11]。基于此,展开了线上与线下相结合的融合实验教学体系探索,总体框架如图1所示。

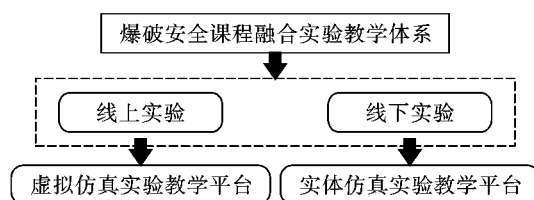


图1 融合实验教学体系框架

Fig. 1 The framework of integrated experimental teaching system

1.2 融合实验教学内容设计

结合“爆破安全”课程理论教学内容安排,对实验教学内容进行了整体优化,选择爆破安全工程中最具代表性的“巷道掘进爆破安全设计与实现”这一关键环节,进行融合实验教学内容设计,如图2所示。

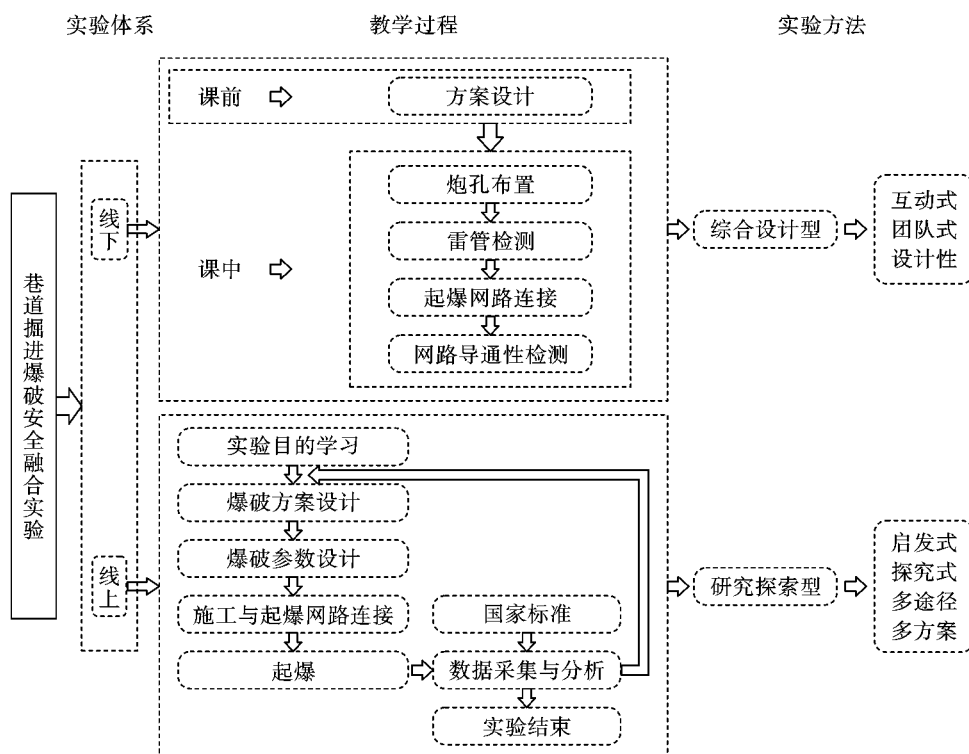


图2 融合实验教学内容设计

Fig. 2 Content design for integrating experimental teaching

由图2可以看出,“巷道掘进爆破安全融合实验”由线下、线上两部分组成:①线下实验属综合设计型,具有互动式、团队式与设计性的特点。学生需于课前在任课教师指导下进行爆破方案设计;实验课上需动手完成四项操作:炮孔布置、雷管检测、起爆网路连接、网路导通性检测。②线上实验属研究探索型,具有启发式、探究式、多途径与多方案的特点,学生需基于线上平台依次完成以下环节的实操:实验目的学习→爆破方案设计→爆破参数设计→炮孔施工与起爆网路连接→起爆→基于国家标准完成

数据采集与分析→实验结束,其中任意一环出现错误操作,实验将无法继续进行。

2 融合实验教学平台构建与实践

2.1 线上虚拟仿真实验教学平台构建与实践

借助虚拟现实、多媒体与人机交互等技术,开发了“巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验软件”^[13],基于此承担的“巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验”项目于2021年被认定为河南省一流本科课程(虚拟仿真实验教学课程),之后该实验在“实验空间”虚拟仿

真实验教学平台上线。同时,为满足线上实验教学需要,课程团队拓展开发了“巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真实验系统”^[3]。

2.1.1 巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台构建与实践

巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验可以实现从爆

破方案与参数设计,到现场施工,直至最后进行爆破危害监测的全工艺流程^[14]。实验平台构成要素如图 3 所示。

(1) 实验环境

虚拟实验环境主要设置为两类:煤矿井下岩巷、非煤矿山井下岩巷。

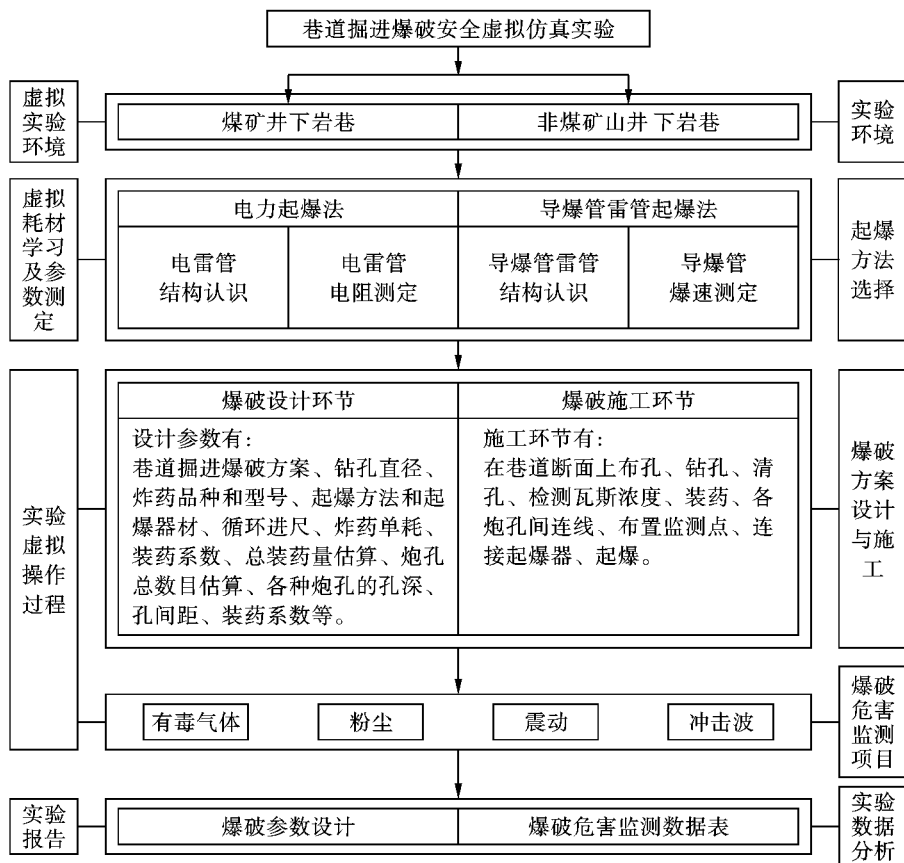


图 3 虚拟仿真实验平台构成要素

Fig. 3 Elements of the virtual simulation experiment platform

(2) 起爆方法选择

可进行 2 种起爆方法的虚拟实验操作:电力起爆法、导爆管雷管起爆法。主要学习电雷管与导爆管雷管的结构,测定电雷管电阻与导爆管爆速。

(3) 爆破方案设计与施工

虚拟实验操作过程分为两个环节:爆破设计与爆破施工。

在爆破设计环节,需要基于线上平台进行以下参数设计:巷道掘进爆破方案、钻孔直径、炸药品种和型号、起爆方法和起爆器材、循环进尺、炸药单耗、装药系数、总装药量估算、炮孔总数目估算以及各种炮孔的孔深、孔间距、装药系数等。

在爆破施工环节,需进行以下虚拟操作:在巷道断面上布孔、钻孔与清孔,检测瓦斯浓度,装药,各炮孔间连线,布置监测点,连接起爆器,起爆。

(4) 爆破危害监测

爆破危害监测项目主要包括:有毒气体、粉尘、震动及冲击波。

(5) 实验数据分析

学生需基于平台提取爆破危害安全监测实验数据,完成爆破参数设计表、爆破危害监测数据表,然后在线提交实验报告,以供任课教师在线批改。

虚拟仿真实验平台界面如图 4 所示。通过网站登录实验平台后,学生需首先完成实验指导书学习、实验相关知识点测试与复习等准备工作后,方可进入实验环节,部分虚拟实验过程如图 5 所示。

2.1.2 巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真实验平台构建与实践

巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真实验平台的主场景界面如图 6 所示,主要设置两个模块:

工人自救互救模块、救援人员救援模块,可实现巷道掘进爆破炮烟中毒事故动画演示,并可在虚拟环境

中交互式完成工人自救互救、救援人员救援两项实际操作,提高学生自救互救与应急救援能力。



图 4 虚拟仿真实验平台界面
Fig. 4 The platform interface of virtual simulation experiment



图 5 部分实验过程展示
Fig. 5 Display of some experimental process

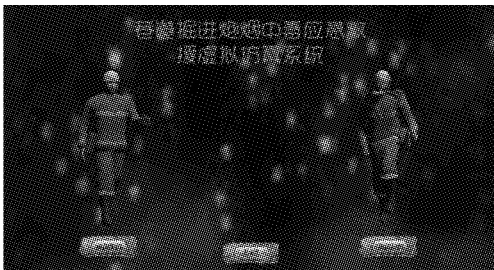


图 6 主场景界面
Fig. 6 Main scene interface

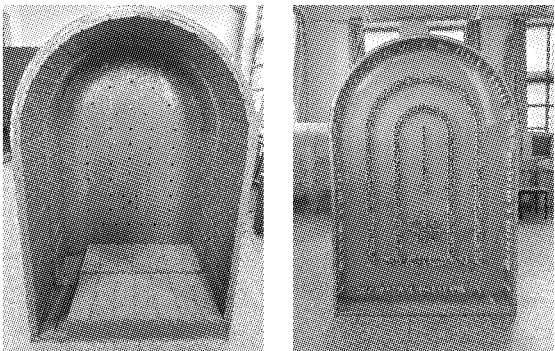
2.2 线下实体仿真实验教学平台构建与实施

2.2.1 平台构建

线下实体仿真实验教学平台主要由岩巷掘进爆破仿真模型、教学用模拟电雷管、专用欧姆表组成,现分述如下:

(1)岩巷掘进爆破仿真模型

该模型基于煤矿井下岩巷掘进爆破工艺设计,如图 7 所示。



(a) 正视图 (a) Front view
(b) 后视图 (b) Back view

图 7 岩巷掘进爆破实体仿真模型
Fig. 7 Solid simulation model for rock roadway excavation and blasting

由图 7 可以看出,岩巷掘进爆破仿真模型的正面可清晰展示掏槽孔、辅助孔及周边孔(即光面孔)在岩巷掘进工作面的整体布局及相应位置,有助于

加深学生对炮孔设计原则与要求的准确理解与掌握;模型背面可清晰展示钻孔内部结构,有助于加深学生对炮孔施工工艺的整体把握以及对周边孔作用的理解,进而理解循环进尺的概念。

(2) 教学用仿真电雷管

基于线下实验需求,课程教学团队设计了教学用模拟雷管^[15,16],其结构如图 8 所示。

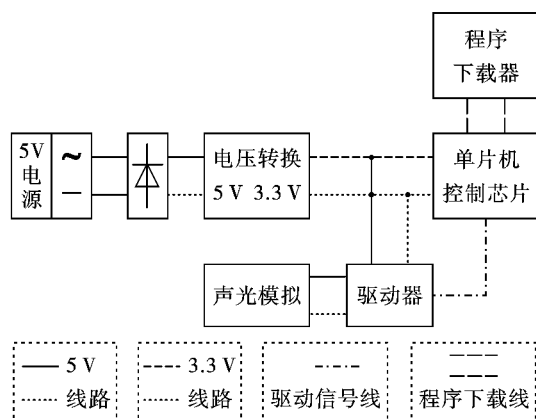


图 8 模拟雷管结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the simulated detonator structure

教学用模拟雷管主要包括模拟瞬发电雷管、固定延期电雷管、可变延时电雷管以及延期导爆管雷管,有助于学生直观了解不同雷管的结构,准确辨别瞬发电雷管与延期雷管结构上的异同,最终理解并掌握不同雷管的作用。

(3) 专用欧姆表

线下实验采用真实的欧姆表,对教学用模拟电雷管进行检测。

2.2.2 线下实体仿真实验教学环节

线下实体仿真实验分为课前、课中两个阶段。

课前,任课教师将班级学生分为若干小组,并提供岩巷掘进爆破仿真模型的断面尺寸。基于此,各个小组首先进行炮孔布置方案设计,确定工作面所需炮孔的布置方式及数量;然后进行起爆方法与起爆网路设计,确定起爆网路连接方式以及实验所需不同段别的电雷管数量;最后,提前准备各种实验仪器与耗材。

为检验学生的设计方案正确与否,并锻炼其动手操作能力,任课教师提前在岩巷掘进爆破仿真模型的正面粘贴一层白纸,将模型预设的炮孔遮挡住,该项工作也可由学生在实验室开始时完成。实验课开始后,各个小组首先领取专用欧姆表、教学用模拟电雷管等仪器与耗材,然后依据课前设计的方案,在白纸上完成炮孔布置;接下来,依次完成电雷管检测、将检测合格的电雷管装入炮孔、连线、起爆网路导通性检测等工作,最后进行模拟起爆。部分线下实验环节如图 9 所示。

上述实验环节完成后,让各个小组将白纸撕掉,并认真观察岩巷掘进爆破仿真模型的正面与背面,对比讨论各自设计方案的缺陷与不足。经此最后一环,学生对于理论知识的理解得到加深与提升。

3 融合实验教学效果分析

“爆破安全”课程融合实验不仅优化了实验教学项目,而且丰富了实验教学内容,实验教学效果综合对比分析见表 1。

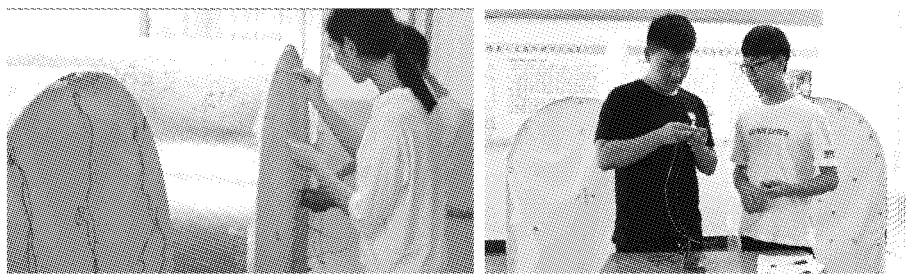


图 9 线下实验环节展示

Fig. 9 Showcase of offline experiments

表 1 融合实验教学效果综合对比分析表

Table 1 Comprehensive comparative analysis of integrated experimental teaching effect

平台类型	实验类型	教学内容	教学方法	考核
线下	综合设计型	炮孔布置、雷管检测、起爆网路连接、网路导通性检测	团队互动式	任课教师考核
线上	研究探索型	爆破方案设计、施工直至爆破危害监测的全过程	启发探究式	实验平台考核 + 任课教师考核

巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验平台,为学生

完成巷道掘进爆破设计、施工与监测的全过程提供

了空间与载体;学生可对爆破方案进行自主设计,并通过交互式操作进行爆破施工与监测,从而体验真实实验环境、高温高压瞬时的爆破过程以及爆破后产生爆破危害的情况;通过监测数据分析,学生可对设计方案的合理性进行评判,并对方案进行实时、动态调整。线上虚拟仿真实验极大丰富了实验教学的形式,它不仅形象、立体地展示出巷道掘进爆破真实

的施工环境以及爆破的瞬时过程,增强了实验课程的趣味性,同时突破了时间、地域对于实验课程的限制,学生随时随地皆可通过网络完成实验任务。线上虚拟仿真实验平台在“实验空间”网站上线以来的应用数据,充分体现了线上实验教学的良好效果,如图10所示。

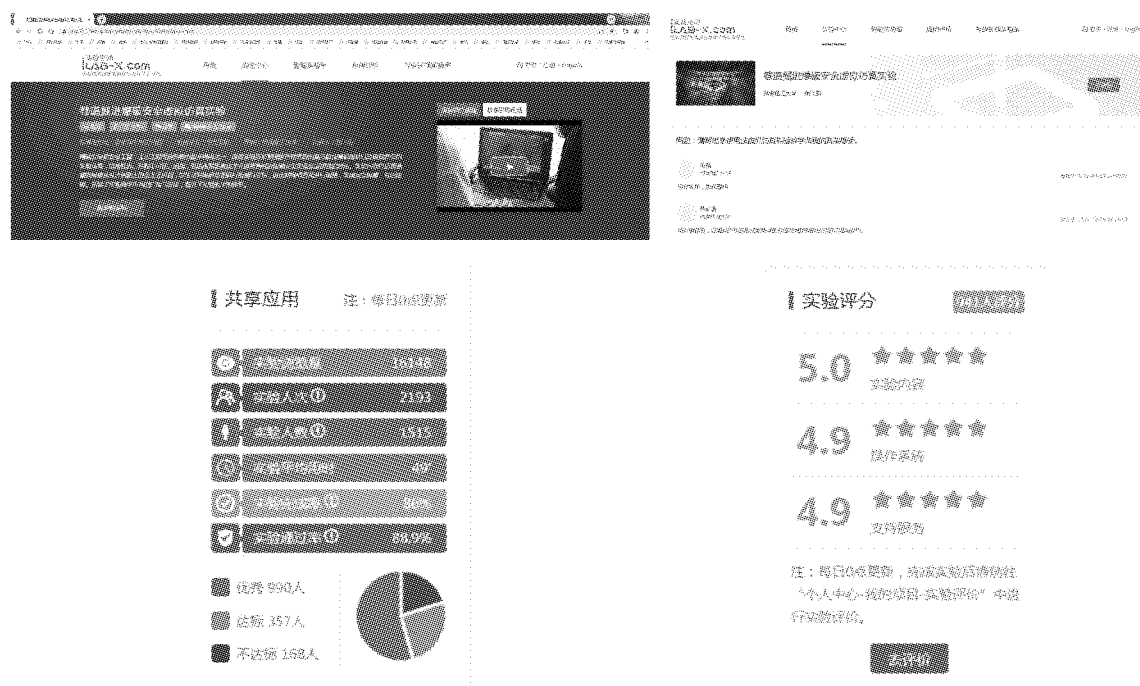


图10 线上实验平台应用效果
Fig. 10 Application effect of online experiment platform

而线下实体仿真实验,以实体仿真模型为对象,学生分小组完成方案设计实验操作;在此过程中,不仅培养了学生团队合作精神,而且加深了学生对课堂所学理论知识的理解与应用,其动手操作能力得以同步提高。

4 结语

通过采用线上、线下相结合的教学方法,“爆破安全”课程线下实验无法实现的教学内容,由线上实验进行有效补充;融合实验教学体系构建了虚实结合、相互补充的混合式教学模式,为破解爆破类实验课程难以开设的难题提供了思路与参考。但是,融合实验教学体系的应用效果,仍需通过教学实践进一步检验,课程团队也将继续对线上与线下两个仿真平台的功能进行完善与拓展。

参考文献 (References)

- [1] 王玉杰. 爆破工程[M]. 2版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
- [2] 张飞燕. 爆破安全工程[M]. 北京: 冶金工业出版社,

2020.

- [3] 张飞燕, 温佳宇, 韩颖. 巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统构建[J]. 爆破, 2021, 38(3): 166-171.
- [3] ZHANG Fei-yan, WEN Jia-yu, HAN Ying. Construction of virtual simulation system for emergency rescue of blasting fume poisoning accident during roadway excavation[J]. Blasting, 2021, 38(3): 166-171. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国公安部. GA 990—2012 爆破作业单位资质条件和管理要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] 教育部. 教育部关于印发《教育信息化十年发展规划(2011—2020年)》的通知[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201203/t20120313_133322.html, 2012-03-13.
- [6] 教育部高等教育司. 关于开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/201308/t20130821_156121.html, 2013-08-13.
- [7] 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.
- [7] YE Hai-wang, LEI Tao, LI Mei, et al. Virtual simulation experiment system and teaching practice of blasting engineer-

- ing[J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 153-158. (in Chinese)
- [8] 王雁冰, 李书萱, 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.
- [8] 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)
- [9] 张 敏, 文福安, 刘俊波. 高质量虚拟仿真实验教学课程内涵和特征[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(3): 1-4.
- [9] ZHANG Min, WEN Fu-an, LIU Jun-bo. Connotation and characteristics of high quality virtual simulation experiment teaching course[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(3): 1-4. (in Chinese)
- [10] 王恩元, 王 亮, 徐剑坤, 等. 高瓦斯突出煤层石门安全揭煤虚拟仿真实验建设[J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(2): 176-180.
- [10] WANG En-yuan, WANG Liang, XU Jian-kun, et al. Construction of virtual simulation experiment for safe uncovering of coal seam with high gas outburst[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2022, 41(2): 176-180. (in Chinese)
- [11] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于 2017—2020 年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html, 2017-07-11.
- [12] 中国政府网. 国务院联防联控机制权威发布文字实录[EB/OL]. <http://www.gov.cn/xinwen/gwylflkjz195/wzsl.htm>, 2022-05-06.
- [13] 河南理工大学. 巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验软件[CP/CD]. 著作权登记号: 2019SR0837209.
- [14] 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.
- [14] 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)
- [15] 河南理工大学. 一种教学用模拟电雷管: 中国, 201921082080.4[P]. 2020-06-23.
- [16] 河南理工大学. 一种模拟导爆管及导爆管雷管: 中国, 201921082709.5[P]. 2020-05-01.

英文编辑: 黄 刚

(上接第 54 页)

- [13] 李山山. 不粘煤煤粉火焰传播及热动力特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [13] LI Shan-shan. Study on flame propagation and thermodynamic properties of non-stick coal pulverized coal[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 陈晓坤, 王二飞, 王秋红. 管道内瓦斯煤尘共混爆炸温度特性[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(11): 5-10.
- [14] CHEN Xiao-kun, Wang Er-fei, Wang Qiu-hong. Explosion temperature characteristics of mixed gas and coal dust in pipeline[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(11): 5-10. (in Chinese)
- [15] 王晓彬. 点火延迟时间对甲烷煤尘爆炸特性的影响[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(3): 23-27.
- [15] WANG Xiao-bin. Effect of ignition delay time on explosion characteristics of methane and coal dust hybrid mixtures[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(3): 23-27. (in Chinese)
- [16] 任纯力. 粉尘云最小点火能实验研究与数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [16] REN Chun-li. Experimental investigation and numerical simulation of minimum ignition energy of dust cloud[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)
- [17] 王晓东. 基于定容燃烧弹的甲烷-氧气-水蒸气混合气的层流火焰特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [17] WANG Xiao-dong. Laminar flame characteristics research of methane-oxygen-water mixture based on constant volume combustion bomb[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [18] 陈雪阳. 富氢燃烧球形膨胀火焰不稳定性与胞状化特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [18] CHEN Xue-yang. Study on instability and cell characteristics of spherical expansion flame with hydrogen-rich combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 李洪萌. 合成气预混层流燃烧特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [19] LI Hong-meng. Research on laminar burning characteristics of syngas-air premixed flames[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [20] 暴秀超, 刘福水, 孙作宇. 预混火焰胞状不稳定性研究[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(1): 79-83.
- [20] BAO Xiu-chao, LIU Fu-shui, SUN Zuo-yu. Study on instability of outwardly propagating spherical premixed flame[J]. *Journal of Xihua University · Natural Science*, 2014, 33(1): 79-83. (in Chinese)
- [21] 刘 义. 甲烷、煤尘火焰结构及传播特性的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [21] LIU Yi. Study on flame structure and propagation characteristic of methane and coal dust[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)

英文编辑: 何 松