



工程爆破虚拟仿真实验教学资源建设

张宇菲, 孙 强, 岳中文*, 郭东明, 易 锦

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 高校开展工程爆破实验教学本身存在局限性, 爆破危险品难以申购、实验环境安全标准严苛、实验操作危险性高且可重复性低等问题无法妥善解决。该文以中国矿业大学(北京)工程爆破实验课程为例, 论述了建设虚拟仿真实验资源的必要性, 介绍了工程爆破虚拟仿真实验教学平台以及实验资源建设的设计思路与过程。为最大程度还原真实场景, 研发团队多次前往炸药工厂实地拍摄取材, 结合理论课程内容, 正确引导学生开展炸药爆速测试、猛度测试、起爆网络连接设计以及炮孔布设方案等实验内容, 努力探索线上线下教学相结合的个性化、智能化实验教学新模式。

关键词: 虚拟仿真; 工程爆破; 实验教学

中图分类号: G420; TB41

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220401

Construction of Teaching Resources for Blasting Engineering Virtual Simulation Experiment

ZHANG Yufei, SUN Qiang, YUE Zhongwen*, GUO Dongming, YI Jin

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

Abstract: There are limitations in carrying out engineering blasting experiment teaching in universities. The problems of difficult purchase of blasting dangerous goods, strict safety standards for experimental environment, high risk and low repeatability of experimental operation cannot be properly solved. Taking the engineering blasting experiment course of China University of Mining and Technology (Beijing) as an example, this paper discussed the necessity of building virtual simulation experiment teaching resources, and introduced the engineering blasting virtual simulation experiment teaching platform, as well as the designed the idea and process of experimental resource construction. Relying on the theoretical course content, this resource can correctly guide students to carry out the following experimental content, such as explosive explosion speed test, intensity test, detonation network connection design and gun hole layout scheme design. In order to restore the real scene to the greatest extent, the R&D team went to the explosive factory to take on-site photos and materials for many times. Moreover, the team is taking the opportunity to explore a new personalized and intelligent experimental teaching mode combining online and offline teaching.

Key words: virtual simulation; engineering blasting; experimental teaching

爆破工程是许多高校岩土工程、土木工程、城市地下空间工程以及采矿安全工程等方向的专业选修课, 主要探讨各类炸药基本性能及破岩机理、介绍常见爆破器材使用方法及适用条件、讲述爆破安全知识及个人安防措施等课程内容^[1]。为加深学生对理论知识的理解, 常配合开设若干学时的实验教学, 开展炸药爆速测试、猛度测试、起爆网络连接设计以及炮孔布设方案设计等经典工程爆破实验, 通过实际操作增强学生的感性认

知。中国矿业大学(北京)学院路校区作为北京城区内唯一一所配备爆破硐的高校, 工程爆破实践教学环节是力建学院土木工程专业长久以来的优势和特色^[2-5]。学生在做好个人安防的前提下, 学习高压数显起爆器、爆速测试仪等设备的使用方法, 掌握导爆索、导爆管雷管、四通等爆破器材的操作要领, 进而从理论计算过渡为具有一定分析和解决爆破技术问题的专业型人才, 这也与新形势下我国对高校人才培养的要求更为契合^[6-7]。

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 中国矿业大学(北京)本科教育教学改革与研究项目资助(J20ZD20, J200701, J200722)。

作者简介: 张宇菲(1990-), 女, 博士, 实验师, 主要从事实验室教学与安全管理方面的研究。

*通信作者: 岳中文(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程爆破与岩石破碎方面的研究。E-mail: zwyue75@163.com

但是,目前高校开展工程爆破实验教学还存在着诸多困难。

1) 工程爆破实验教学涉及管制品使用。目前国家对于民用爆破危险品的申购及运输都有严格限制,实验教学所需的导爆索、导爆管雷管、乳化炸药和黑索金等均隶属管制品。凡遇节假日或重要庆典活动,所有爆破危险品须彻底销毁,封存爆破硐,再次申购还需属地公安机关层层审批把关,无法确保实验教学按计划开展。

2) 爆破危险品的存放及使用条件较高。申购到的危险品须在符合文献 [8] 的药库中存放,且须专业技术人员,即保管员、安全员、爆破员同时在场的情况下领取和使用。这对任课教师的专业技能要求较高,实验过程中若出现操作失误,极易引发安全事故。

3) 实验内容受限,专业针对性不强。经典的工程爆破实验内容虽然对辅助学生理解理论知识有一定的帮助,但以演示性实验为主,学生自主设计类实验较少。且爆破类实验普遍具有瞬态性^[1],学生无法反复观察实验现象,往往难以达到理想的实验教学效果。

基于上述问题,土木工程实验中心联合北京润尼尔网络科技有限公司,以教育部产学研合作协同育人项目为契机,围绕工程爆破开展虚拟仿真实验资源建设以及课程体系改革^[9-10]。为探索新工科背景下校企合作培养新机制,学院创建了“工程爆破虚拟仿真实验教学中心”,配合理论教学构建高仿真度的虚拟乳化炸药生产线、导爆管雷管装配、炸药爆速及猛度测试、起爆网络设计、炮孔布设方案设计以及爆破安全准入系统测试,将爆破高危环境综合性虚拟仿真教学资源融入实践教学环节,利用现代信息技术拓宽传统实验教学模式^[11-13],力争体现学校土木工程专业学科优势和一流专业特色,提升国家、社会与学生三者间期望与能力的符合程度,培养出能够服务未来能源革命需求的高素质创新型人才。

1 工程爆破虚拟仿真实验教学资源建设

1.1 设计背景

作为中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院的传统特色教学项目和优势学科,工程爆破类

相关教学资源丰富,且学院现代爆破技术应用研究所已创建多年,工程背景广、现场经验多、师资力量雄厚,能够为虚拟仿真教学实验平台的建设与优化提供理论指导和专业建议^[14-16]。

另外,学院实验中心与北京京煤化工有限公司、天津宏泰化工有限公司保持良好的长期合作关系,为在虚拟仿真实验教学资源建设中获得较高的仿真度和完整性,研发团队多次前往炸药生产现场进行实景拍摄,获得了详实素材,为最大程度还原真实场景提供了有力保障。

1.2 实验目的

掌握常见炸药特性、熟练操作爆破器材、设计起爆网络及炮孔布设方案是工程爆破的核心教学内容,也是系统性、实践性、可重复性要求较高的实验教学环节,但受安全、环境、爆破危险品申领等因素影响,学生难以在真实爆破场景中进行系统学习和实验,因此,建设工程爆破虚拟仿真实验资源有如下 5 个目的。

1) 建立对炸药和雷管生产线的真实感知。通过对炸药厂实景、炸药及雷管生产车间各关键工艺流程的三维仿真模拟,引导学生认识生产乳化炸药及导爆管雷管过程中涉及的原材料、生产流程及装配系统。

2) 掌握常用爆破器材的结构、工作原理及操控方法。对高压电子数显起爆器、爆速仪、导爆管雷管等爆破器材进行高仿真还原,全景展示器材细节,配合文字介绍工作原理、使用方法及适用场景。

3) 掌握导爆索传爆速度、乳化炸药爆速及猛度测试的流程、操作要点和 safety 注意事项。在高仿真虚拟爆破硐场景中,按照爆破作业安全操作规程,逐一交互式选择爆破器材、设定测试段长度、制作起爆探针、绑扎起爆雷管、设置爆速仪参数以及高压数显起爆器操作等实操环节训练,掌握实验各步骤的技术要点和 safety 操作要求。

4) 掌握起爆网络和炮眼布设方案的基本设计思路。通过综合设计类实验建立理论知识与实际工程的联系,给出限定条件和工程实际背景,引导学生逐步完成爆破方案决策,提升学生自主解决工程实际问题的能力。

5) 掌握使用爆破危险品的安全操作规程。通

过阅读爆破管理制度和学生守则树立安全防范意识,通过爆破安全准入考试夯实基础知识,通过高仿真虚拟场景实操实训完善爆破危险品安全使用规程,逐步将安全操作规程根植于学生内心,为实际操作打好基础。

工程爆破虚拟仿真实验资源建设突破了传统教学方式,学生可以在PC端共享实验资源(<http://school.cumt.bj.cn/virexp>),如图1所示,在高仿真虚拟场景中反复演练危险品操作,在关键性节点设置人机交互环节,使学生能够深刻领会操作要领的同时又无需直面爆炸风险,身处爆破虚拟环境中提升专业知识和技能。

1.3 实验资源

结合爆破工程、井巷工程等理论教学内容,实验教学资源包含常用爆破器材生产流程介绍、炸药爆速及猛度测试、起爆网络设计以及炮孔布设方案设计,可作为理论教学的重要补充。

1.3.1 爆破器材生产流程

研发团队多次前往天津宏泰华凯科技有限公

司实地取材,详细还原制备乳化炸药关键步骤:1)总控制室把控各个生产环节要点;2)油相备料将复合蜡与乳化剂按照固定比例拌和;3)水相备料将硝酸钠颗粒与水按照固定比例溶解完全;4)乳化阶段会将油、水两相材料在指定压力下混合均匀;5)借助喷淋低温冷却水镇定融合材料性质;6)敏化阶段掺入定量发泡剂与催化剂加速化学变化;7)高速自动化装药器实现无人操作;8)喷印乳化炸药标识信息完成分包装箱运输,如图2所示。



图1 中国矿业大学(北京)工程爆破虚拟仿真实验教学资源

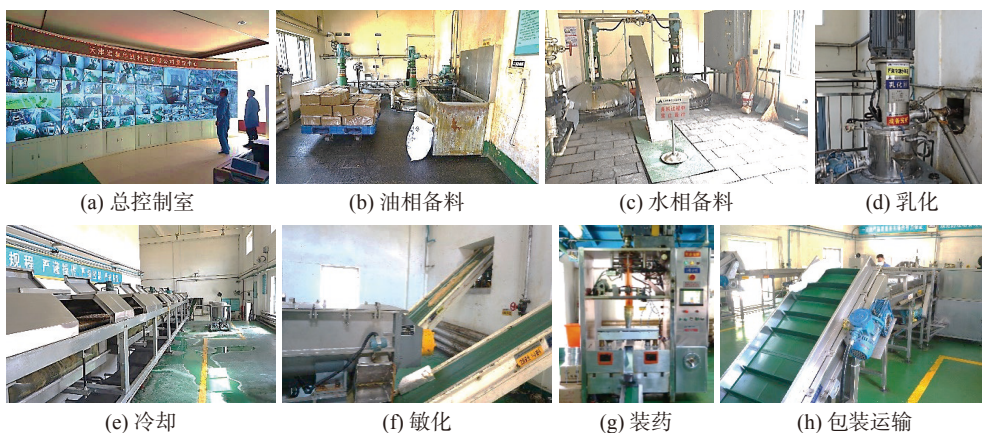


图2 乳化炸药生产流程

1.3.2 炸药爆速测试

利用探针(电离子型导通传感器)短路产生的电脉冲信号,配合使用示波器或计数器进行记录,获得炸药爆速或导爆管传爆速度。学生首先需要选定炸药种类,即导爆索或乳化炸药,再挑选匹配炸药种类的爆速测试工具,自主选择炸药测试段长度,学习起爆探针的制作、炸药与雷管的连接方式、高压起爆器和爆速测试仪的使用方法,进入高仿真还原的爆破洞中观察实验现象,记录爆速测试数据,如图3所示。

1.3.3 炸药猛度测试

建设炸药猛度测试资源时,研发团队选用了

目前较为常用的铅柱压缩法,即在规定的参量(质量、密度和几何尺寸)的条件下,炸药装药爆炸时对铅柱进行压缩,以压缩值来衡量炸药猛度^[17]。重点考察学生的实验操作、了解标记铅柱参考点的原则、学习50分度值游标卡尺的数据判读、熟悉炸药密度测试方法、掌握炸药与雷管的绑扎方式等,如图4所示。

1.3.4 起爆网络设计

资源建设主要围绕工程爆破网络连接的常用方法,即串联网、并联网、串并联网和串并联网展开,学生需进行雷管安全性检测、设置延时、起爆电压计算、雷管授时以及高压充电

起爆等环节，如图 5 所示。

1.3.5 炮孔布设方案设计

学生根据系统随机给出的四通与雷管数量进行起爆网络设计，按要求将雷管一次性起爆完全；综合考虑巷道掘进面尺寸、岩性、炸药性

能、单耗、炮孔深度等因素设计掏槽方式、装药结构、周边孔参数以及掏槽孔参数，在保证爆破效果的前提下，尽可能减少炮孔数目，通过综合设计类实验，提升学生自主解决工程实际问题的能力。



图 3 炸药爆速测试

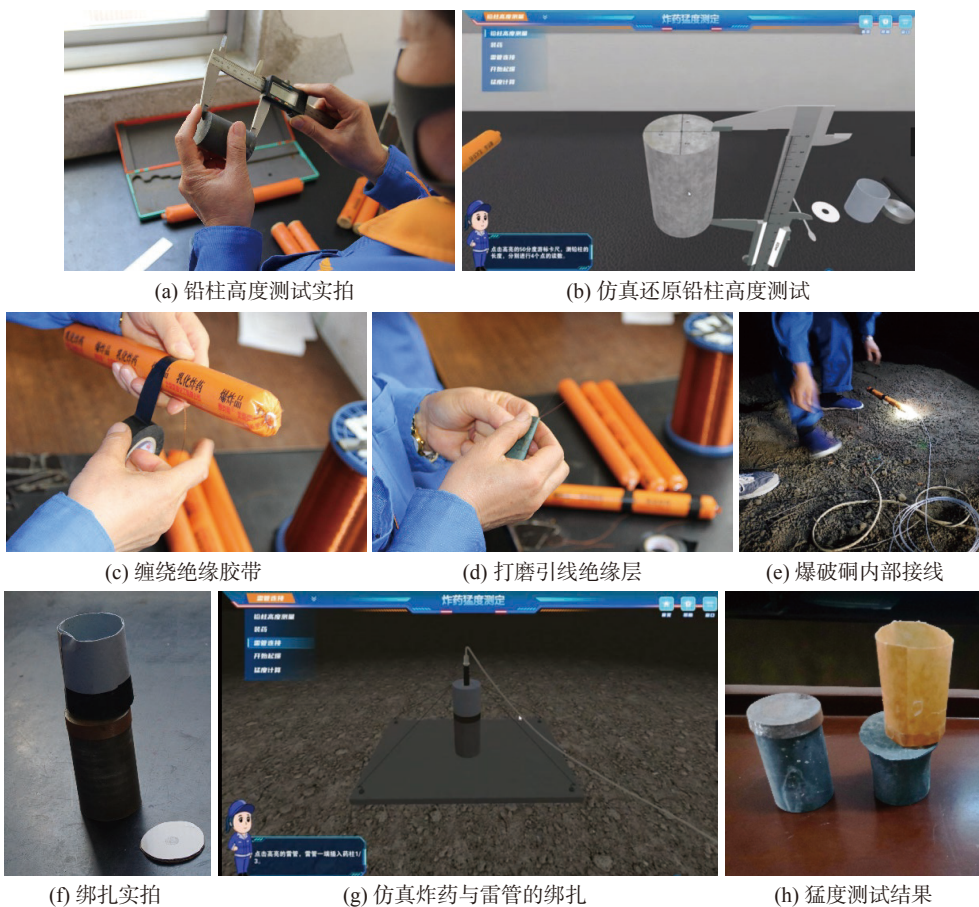


图 4 炸药猛度测试

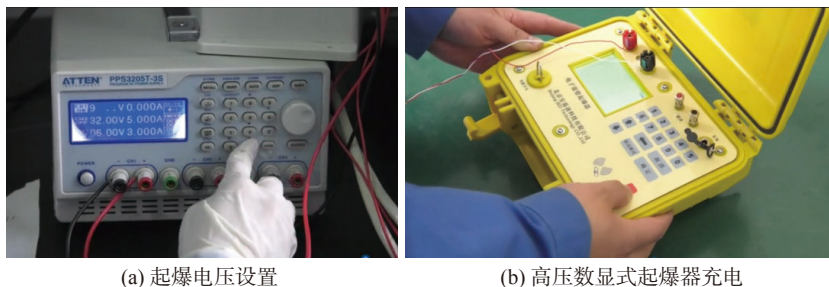


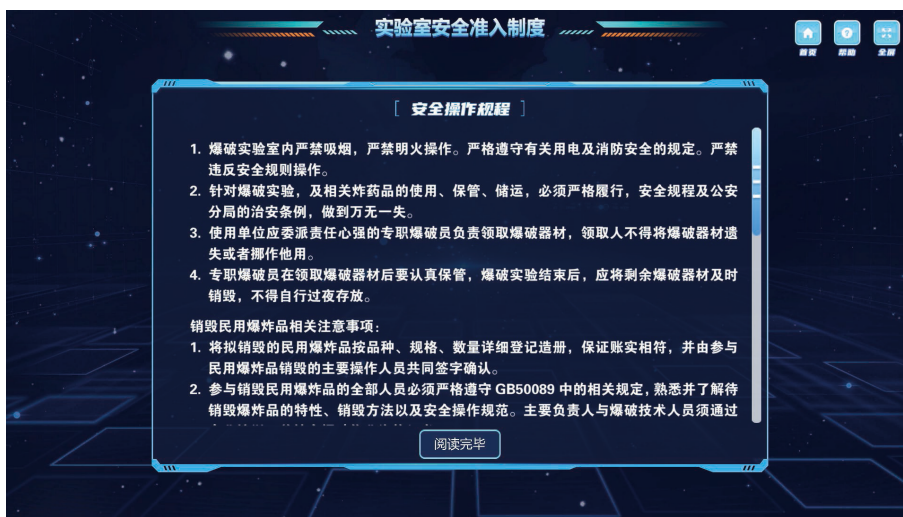
图 5 起爆网络设计

2 工程爆破虚拟仿真实验教学平台构建

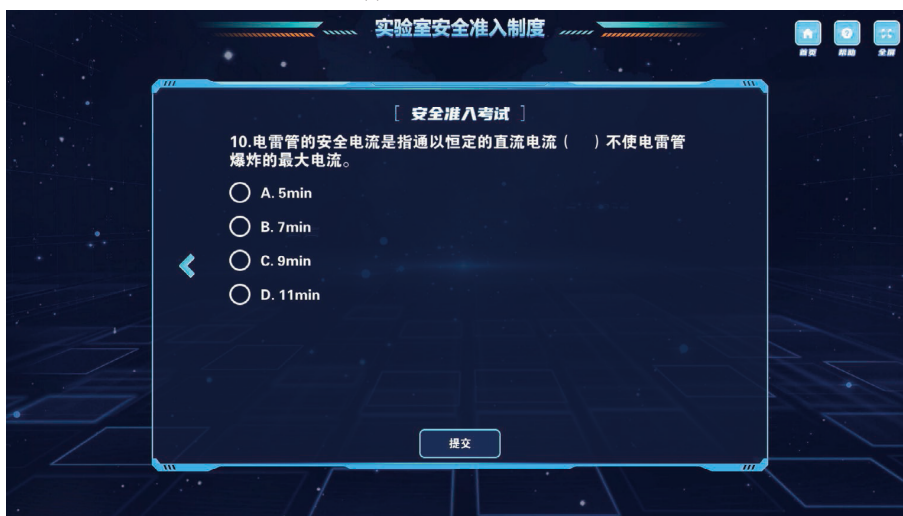
2.1 安全准入

登录虚拟仿真教学平台后, 学生首先须认真学习《民用爆破危险品使用规范》和《工程爆破实验室管理规程》, 内容涵盖常规安全操作及个人安全防护常识。学习完毕后在规定时间内通过工程爆破实验室安全准入考试, 题目

是系统从内置题库中随机抽取的 30 道客观题, 学生须一次性答对全部题目, 否则无法进行下一实验环节。未达标者, 需再次研读规范和章程。通过设置“安全准入”环节, 逐步建立学生的安全实验意识、充实安全技术知识、培养安全操作习惯, 以达到降低实验室安全事故的发生频次, 切实保障学生的实验室安全操作, 如图 6 所示。



(a) 阅读安全操作规程



(b) 参加安全准入考试

图 6 安全准入系统

2.2 人机交互

根据实验内容进行人机交互步骤设置，实验设计环环相扣，参数设置不合理将无法进行下一步操作，以下将以“炸药爆速测量”模块为例，阐述虚拟仿真实验资源人机交互环节的具体设置情况。

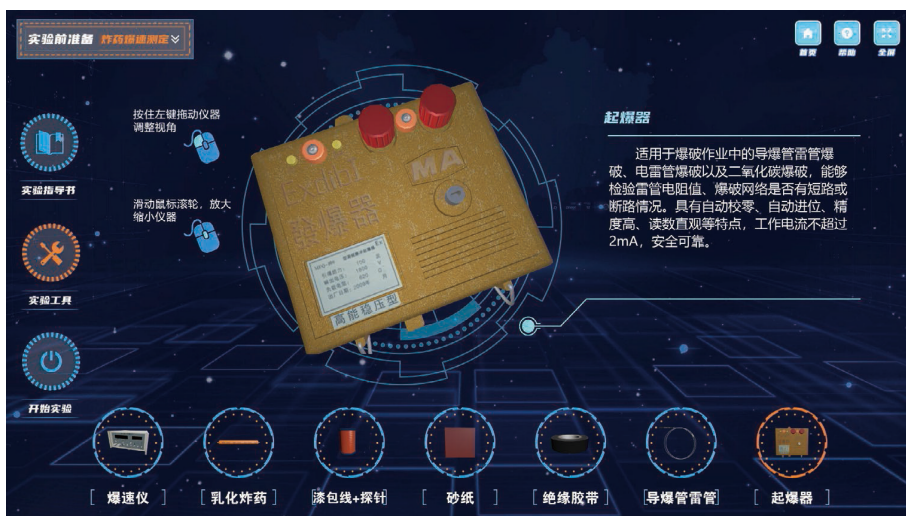
2.2.1 实验指导

学生阅读系统内置的炸药爆速测量实验指导书，在“实验工具”部分，学生可自行点选爆速仪、乳化炸药、漆包线、探针、绝缘胶带、导爆管雷管、高压数显起爆器、导爆索等爆破器材，详细了解仪器设备性能、使用方法和适用条件；还可单击鼠标左键点选仪器设备调整视角，360°

观察 3D 视图，滚动鼠标滚轮；还能放大细节位置，便于观察理解。鉴于研发团队多次进行实景取材，资源中的爆破器材、实验场景建模真实度较高(如图 7 所示)。

2.2.2 工具选择

学生在这一环节需要将炸药爆速测试需要的所有工具从器材设备库中挑选出来(如图 8 所示)，包括天平、砝码、游标卡尺、漆包线、爆速测试仪、导爆管雷管、砂纸、绝缘胶带、乳化炸药、铅柱、装药纸筒、高压电子起爆器、钢片、导爆索以及木柄尖锥。学生需要根据炸药种类，一次性将匹配工具全部选择正确，错选或漏选系统会进行提示并扣除相应分数。



(a) 高压电子起爆器



(b) 爆速测试仪

图 7 爆破器材介绍

由于雷管和炸药均属危险管制品，学生难以在课堂上见到实物，因此在仿真资源建设时力求

最大程度拟实。以雷管仿真重构为例，本资源进行 3D 建模时不仅还原了雷管外形、聚能穴、导爆

管及其连接卡口,还复刻了雷管管身上的13位编码。通过移动鼠标,学生可以调整观察视角,滑动鼠标滚轮还可以放大细节观察,全方位展示器

材细节。与同类型实验教学资源相较,本资源制作精细化程度高,基本达到了实物复刻(如图9所示)。



图8 器材设备库



(a) 本资源雷管建模 (b) 同类型资源雷管建模

图9 雷管建模效果对比

2.2.3 个人防护

学生在实验准备间完成探针制作后,将炸药移入爆破硐,此时需要完成个人防护装备检查,依次进行穿防静电服、胶底靴、戴护目镜、使用防静电扶手消除人体静电等环节的操作,如图10所示,学生操作正确规范,系统后台将自动记录成绩,不规范将被扣分。“个人防护”是本仿真资源的独创性环节,旨在向学生强调危化品使用中个人防护的重要性。

2.2.4 爆速计算

在爆速测试环节中,学生将结合理论课知识和实验指导书内容,首先在爆破硐中完成炸药探针连线、雷管与起爆针连接并完成安全检查,返回操作间后,学生独立操作爆速测试仪和高压数显起爆器,成功引爆炸药,获得爆速值。过程中,系统将对对应操作进行打分。



图10 个人防护环节

3 工程爆破虚拟仿真实验教学考核管理

虚拟仿真实验教学资源是工程爆破理论教学的辅助支撑,为此32个总授课时长中包含6个实验学时,随着理论课程的逐步推进,学生依次完成上述实验资源,即爆破器材生产流程、炸药爆速测试、炸药猛度测试、起爆网络设计及炮孔布设方案设计,完成后提交对应资源的实验报告,系统后台再根据实验资源的不同权重乘以对应难度系数,将各个实验的加权平均分计为实验教学总成绩。

针对每个实验资源,考核系统内设安全准入、实验准备、实验过程、实验总结,共计 4 个

打分环节,百分制计算,具体考核内容、方法及对应分值如表 1 所示。

表 1 实验考核内容、方法及分值一览表

考核项目	考核内容	评分方法	分值
安全准入	研读《民用爆破危险品使用规范》和《工程爆破实验室管理规程》,学习常规安全操作及个人防护常识	系统随机抽取30道客观题	10(一次性通过)
实验准备	研读实验指导书,巩固理论知识,掌握实验原理、了解仪器设备	根据知识点答题情况,系统自动评判考核	10
实验过程	根据实验指导书独立完成实验操作,得出实验结论	根据人机交互实验步骤完成情况,系统自动评判考核	50
实验总结	在规定时间内,完成实验思考题	根据思考题答题情况,系统自动评判考核	10
	根据实验过程整理数据并简要分析,提交完整报告	教师根据实验报告完成情况进行评判考核	20

由于工程爆破实验环节对安全操作和个人防护要求较为严苛,要求学生安全准入考核须一次性通过,方能获得 10 分。若答题有误,系统会提示该学生重新研读《民用爆破危险品使用规范》《工程爆破实验室管理规程》,学习常规安全操作及个人防护常识,再次进行答题,直至完全回答正确,方可进行下一环节,但 10 分将不计入考核成绩。

待学生完成 5 个实验资源后,教师登录系统查阅实验报告,根据报告格式、实验过程叙述以及实验结果分析进行评判,考核系统将加权平均分计为实验教学总成绩。

4 结束语

虚拟仿真实验教学资源将课堂理论教学与学科前沿实际操作相结合,提升学生对各类炸药基本性能的测试分析能力。仿真实验教学自身具有安全性、可重复性、无时间和地域限制、低能耗、低成本等特点,通过可视化的动态结果,学生可以对实验结果有更直观的认识,加深对课程基础知识的理解与掌握,增强课堂参与度。

目前我校工程爆破虚拟仿真实验教学资源建设尚在进行,计划与井巷工程、工程特殊施工技术理论课程相结合,通过补充建设煤矿岩石井巷爆破掘进技术与工艺的虚拟仿真实验教学资源,实现井巷工程项目全过程施工作业的虚拟仿真实验教学,探索线上线下教学相结合的个性化、智能化实验教学新模式。同时,也为后期激发学生创新意识、培养科研素养、开展大学生创新创业科学研究项目以及毕业设计奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 刘殿书,李胜林.爆破工程[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 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.
- [3] 杨立云,杨仁树,许鹏.新型数字激光动态焦散线实验系统及其应用[J].中国矿业大学学报,2013,42(2): 188-194.
- [4] 岳中文,张士春,邱鹏,等.装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究[J].振动与冲击,2018,37(10): 27-34.
- [5] 杨立云,张蓝月,丁晨曦,等.超高速数字图像相关实验系统及其在爆炸研究中的应用[J].科技导报,2018,36(13): 58-64.
- [6] 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.
- [7] 田婧,罗通,罗华锋,等.新建本科院校虚拟仿真实验室的建设及教学[J].实验科学与技术,2015,13(6): 219-222.
- [8] 公安部治安管理局.小型民用爆炸物品储存库安全规范:GA838-2009[S].北京:中华人民共和国公安部,2009.
- [9] 李胜林.高等院校土木类专业爆破工程课程改革与实践[J].科技创新导报,2017,14(9): 223-225.
- [10] 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.
- [11] 王伟,孟祥贵,安寅.“创新人才培养模式”下的实验教学改革创新探索[J].实验科学与技术,2013,11(2): 144-146.
- [12] 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] 胡振华,王颖,王崇革,等.虚拟仿真教学法在工程爆破实验中的研究[J].实验科学与技术,2020,18(5): 91-96.
- [14] YANG R S, CHEN C, XU P, et al. Experimental investigation of obliquely incident blast wave effect on deflection of running cracks[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021, 49(2): 20190030.
- [15] 杨仁树.我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2013,41(9): 18-23.
- [16] 李胜林,梁书锋,李晨,等.露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J].矿业科学学报,2021,6(5): 598-605.
- [17] 国家技术监督局.炸药猛度试验 铅柱压缩法:GB/T 12440-1990[S].北京:中国标准出版社,1990.

编辑 钟晓