

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.025

## 巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统构建\*

张飞燕<sup>1a,2,3</sup>, 温佳宇<sup>1a</sup>, 韩颖<sup>1b</sup>

- (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:** 已上线运行的巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台, 实现了巷道掘进爆破方案设计、爆破施工、爆破危害监测与分析三个方面的实验教学内容; 但尚未涉及井巷掘进爆破事故的应急救援。以井巷掘进爆破过程中的典型事故—炮烟中毒为例, 借助虚拟仿真、多媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术, 采用3D Max 软件建模及 Unity 3D 软件开发等手段, 构建了巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统, 实现了掘进爆破炮烟中毒事故演示、工人自救互救及救援人员救援两大环节实操。该系统是巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台的拓展与延伸, 既可用于安全工程、土木工程专业本科生及研究生实验教学, 也可用于矿山开采、工程爆破等领域相关专业技术人员的培训教学。

**关键词:** 巷道掘进; 爆破安全; 炮烟中毒; 应急救援; 虚拟仿真

中图分类号: X936 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0166-06

## Construction of Virtual Simulation System for Emergency Rescue of Blasting Fume Poisoning Accident during Roadway Excavation

ZHANG Fei-yan<sup>1a,2,3</sup>, WEN Jia-yu<sup>1a</sup>, HAN Ying<sup>1b</sup>

- (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:** The experiment teaching platform for blasting safety during roadway excavation based on virtual simulation technology has been running online and realized three experimental teaching contents: tunnelling blasting scheme design, blasting construction, blasting hazard monitoring and analysis. However, the emergency rescue of blasting accidents during roadway excavation has not yet been involved. Therefore, taking the blasting fume poisoning which is a typical accident in the process of blasting as an example, the virtual simulation system for emergency rescue was studied and constructed by using the 3D Max software modeling and Unity 3D software development in this paper. Finally, a blasting fume poisoning accident was demonstrated on the computer to show the self-rescue and mutual rescue of workers and rescue by rescue workers. The system is an expansion and extension of the experiment teaching platform for blasting safety during roadway excavation. It can be used for the experimental teaching of undergraduates and graduate students majoring in safety engineering and civil engineering, as well as the training and teaching of relevant technical personnel in the fields of mining and engineering blasting.

**Key words:** roadway excavation; blasting safety; blasting fume poisoning; emergency rescue; virtual simulation

“爆破安全”、“爆破工程”均为我校安全工程、土木工程专业的核心课程,主要讲述爆破理论基础、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、爆破危害与安全防控、爆破安全管理等内容<sup>[1,2]</sup>。巷道掘进爆破安全实验是上述课程的主要实验内容之一,实验教学过程中存在问题:①实验危险性高。爆破实验安全要求高,实验涉及到的雷管、炸药等均为国家严格管控的高危险性爆破器材,实验环境极端复杂且过程不可逆。②实验条件不可及。GA990—2012《爆破作业单位资质条件和管理要求》<sup>[3]</sup>规定:爆破作业按照要求实施资质管理,“非营业性条件要求”国内各高校均不具备。③爆破有害效应多。井下爆破产生的有毒有害气体、粉尘、爆破振动、爆破冲击波等危害,不仅会造成大气环境及地下水资源污染、巷道围岩损伤、工人炮烟中毒等,而且一定程度上还会诱发瓦斯爆炸、煤尘爆炸等次生灾害。基于以上现实问题,探索新型、有效的实验教学手段迫在眉睫。

近年来,教育部连续出台了一系列政策,大力支持与推动虚拟仿真实验教学项目研究。教育部高等教育司在其发布的《关于开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知》(教高司函[2013]94号)中明确指出:虚拟仿真实验教学的任务是构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象,实现真实实验不具备或难以完成的教学功能,在涉及高危或极端的环境、不可及或不可逆的操作,高成本、高消耗、大型或综合训练等情况时,提供可靠、安全和经济的实验项目<sup>[4]</sup>;《教育部关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知》(教高函[2018]5号)中指出:国家虚拟仿真实验教学项目是推进现代信息技术融入实验教学项目、拓展实验教学内容广度和深度、延伸实验教学时间和空间、提升实验教学质量和水平的重要举措<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2021-05-12

作者简介:张飞燕(1978-),女,山西芮城人,副教授、硕士生导师、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,副教授、硕士生导师、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:河南省虚拟仿真实验教学项目(2019047);矿业工程国家级实验教学示范中心(山东科技大学)开放基金资助项目(KYSF20180204);工程类硕士专业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);安全科学与工程河南省优势学科本科教学工程与教学改革研究项目(2019YSJG01、2017YSJG03);河南理工大学教育教学改革研究与实践项目(2019JG071);河南理工大学研究生课程案例库建设项目(2020YAL02);河南理工大学研究生教育教学改革基金项目(2021YJ14)

在此背景下,各高校虚拟仿真实验教学项目建设工作开展得如火如荼<sup>[6-11]</sup>。笔者借助虚拟仿真、多媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术,构建了巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台并已上线运行<sup>[12,13]</sup>,让学生能够在高度仿真的虚拟环境中开展爆破实验、模拟真实实验过程,实现了巷道掘进爆破方案设计、爆破施工、爆破危害监测与分析三个方面的实验教学内容;但美中不足的是,该平台尚未涉及井巷掘进爆破事故的处理,即事故应急救援。为此,本文以井巷掘进爆破过程中的典型事故—炮烟中毒为例,构建炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统,以期对巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台加以拓展与延伸。

## 1 虚拟仿真系统模块设置

基于煤矿真实掘进巷道,依据《煤矿安全规程》相关规定<sup>[14]</sup>,结合煤矿事故应急救援要求与内容<sup>[15]</sup>,参考爆破事故应急救援预案<sup>[16]</sup>,虚拟仿真系统模块设置为两部分:工人自救互救模块、救援人员救援模块,如图1所示。

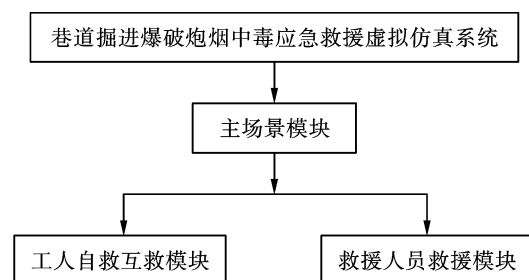


图1 虚拟仿真系统模块设置

Fig. 1 Module setup of virtual simulation system

### 1.1 主场景模块

主场景是系统的初始界面,可进行角色选择操作。根据系统模块设置,人物角色分为两类:工人、救援人员;不同角色将进入不同的任务场景。

### 1.2 工人自救互救模块

工人自救互救模块主要包括以下内容:工人选择下井装备、佩戴自救器后进入掘进巷道、协助炮烟中毒人员佩戴自救器并搀扶其撤离灾区、向地面调度室报警等。

该模块设置思路如下:

- (1)在主场景模块,选择人物角色为工人。
- (2)进入工人自救互救模块后,首先选择下井装备。
- (3)工人穿戴好下井装备后,按提示向掘进巷道行进。

(4)发现炮烟中毒工人,及时检查中毒人员身体状况,并协助尚有活动能力的轻度中毒人员撤离工作地点。

(5)人员撤至安全地点后,利用井下调度电话,向地面调度室报警,请求救援。

### 1.3 救援人员救援模块

救援人员救援模块主要包括以下内容:救援人员选择救援设备、到达事故地点将炮烟中毒者抬至新鲜风流处、进行人工呼吸等。

该模块设置思路如下:

(1)救援人员下井前,首先选择生命探测仪、正压氧气呼吸器、急救包、通讯设备等救援装备。

(2)根据提示箭头到达事故发生地点。

(3)检查重度中毒人员的呼吸、心跳等情况后,用担架将其抬至新鲜风流处。

(4)对重度中毒人员进行人工呼吸急救。

(5)重度中毒人员恢复意识,救援成功。

## 2 巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统构建

巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统采用3D Max 软件建模,采用Unity 3D 软件、按主场景模块→工人自救互救模块(worker 场景)→救援人员救援模块(rescuer 场景)顺序依次进行系统开发,使用W、A、S、D 四键控制角色移动。根据真实巷道规格与尺寸,按1:1 比例构建的煤矿掘进巷道模型如图2 所示。

### 2.1 主场景开发

系统主场景由3D 物体与UI 界面组合构成,其界面如图3 所示。点击worker 按钮进入工人自救互救模块,点击rescuer 按钮进入救援人员救援模块,点击Exit 则退出系统。主场景运行时,两人物角色处于奔跑状态。

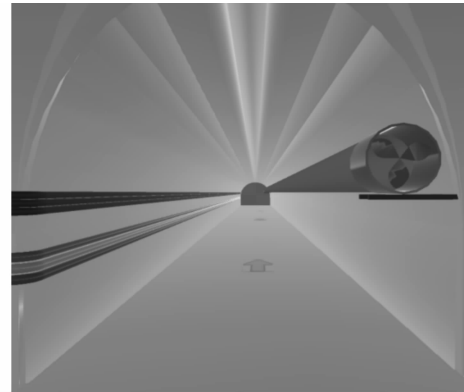


图2 掘进巷道模型

Fig. 2 Roadway model



图3 系统主场景界面

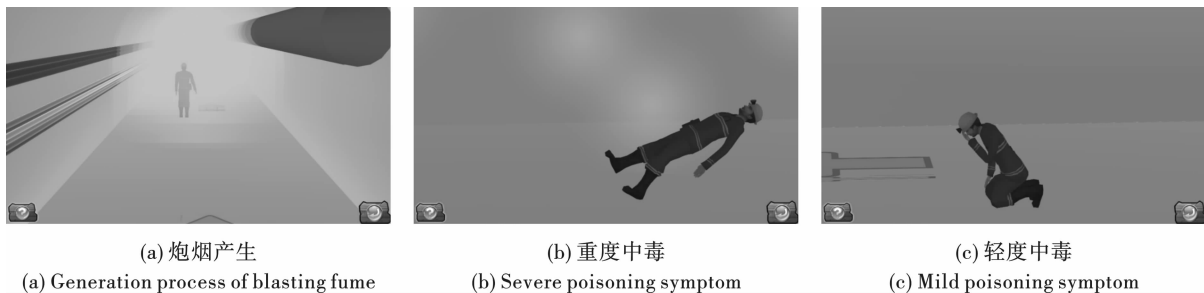
Fig. 3 Main scene interface

### 2.2 工人自救互救模块开发

根据设置思路,工人自救互救模块开发步骤如下:

#### (1) 过场动画

该模块共设置6 个UI 界面、5 个相机。进入该模块后,首先播放一段过场动画,展示炮烟产生与工人中毒倒地的过程<sup>[17]</sup>,如图4 所示。工人炮烟中毒程度设置为两种:①重度中毒,工人直接倒地、丧失活动能力;②轻度中毒,工人具有活动能力,在搀扶下可进行撤离。



(a) 炮烟产生  
(a) Generation process of blasting fume

(b) 重度中毒  
(b) Severe poisoning symptom

(c) 轻度中毒  
(c) Mild poisoning symptom

图4 过场动画

Fig. 4 Cutsscenes

#### (2) 下井装备选择界面

过场动画播放完毕后,系统自动进入下井装备

选择界面,如图5 所示。在此界面中,用户需通过鼠标点击UI 界面装备按钮,选择下井装备—矿灯与自

救器后,向掘进巷道行进;工人若未穿戴下井装备,后续操作将无法进行。通过该种设计方式,强化用户下井前必须佩戴矿灯与自救器的安全意识。

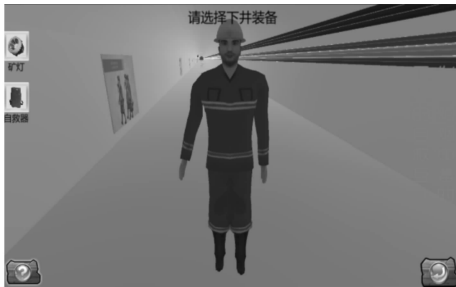


图5 下井装备选择界面  
Fig. 5 Equipment selection interface before entering the coal mine

### (3)工人自救互救界面

进入掘进巷道后,工人在倒地工友附近站立2秒,即可触发撤离按钮,如图6所示。点击“搀扶撤离”按钮,工人将协助轻度炮烟中毒人员佩戴自救器并协助其撤离事故地点,如图7所示。

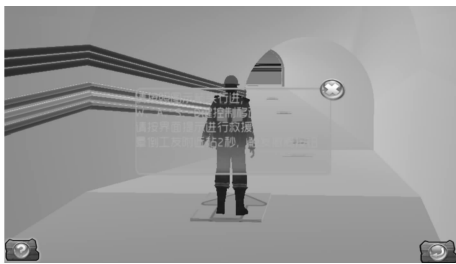


图6 工人自救互救起始界面  
Fig. 6 The starting interface of workers' self-rescue and mutual rescue



图7 搀扶撤离界面  
Fig. 7 Assist evacuation interface

### (4)报警界面

协助轻度中毒人员撤至安全地点后,工人到井下调度电话旁停留2秒,即可触发报警界面,如图8所示。点击“报警”按钮,工人将向地面调度室报

警,请求救援。



图8 报警界面  
Fig. 8 Alarm interface

### (5)任务完成界面

前述任务全部完成后,将显示任务完成界面,如图9所示。在此界面中,用户可以选择重新进行任务,也可选择返回主场景。

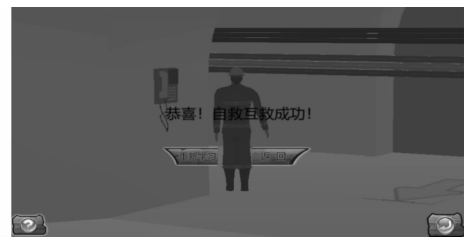


图9 任务完成界面  
Fig. 9 Mission completed interface

## 2.3 救援人员救援模块开发

### (1)救援装备选择界面

救援装备选择界面如图10所示。在此界面中,设置有救援装备背包,主要包括生命探测仪、正压氧气呼吸器、急救包、通讯设备;其中,正压氧气呼吸器、急救包点选即完成穿戴,生命探测仪与通讯设备则在电脑屏幕中央360°旋转展示。救援人员必须配备全部救援装备后,方可进行后续操作。

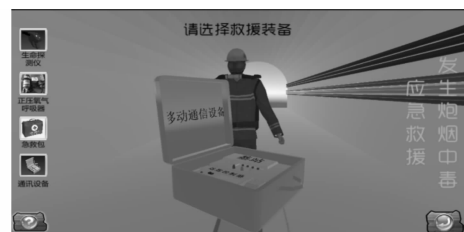


图10 救援装备选择界面  
Fig. 10 Rescue equipment selection interface

### (2)抬出中毒人员界面

救援人员到达炮烟中毒事故现场后,在重度中毒人员附近站立2秒,系统便会弹出“请将中毒者

抬到有新鲜风流的地方,并立即展开急救”的提示框,如图 11 所示。点击“前往进风巷”按钮,将播放抬出中毒人员的动画,如图 12 所示。



图 11 救援提醒界面  
Fig. 11 Rescue reminder interface

摄像机,进入人员急救界面。根据 UI 提示,点击揭开衣服、检查脉搏、人工呼吸三步急救,每步均有相应动画演示,如图 13 所示。

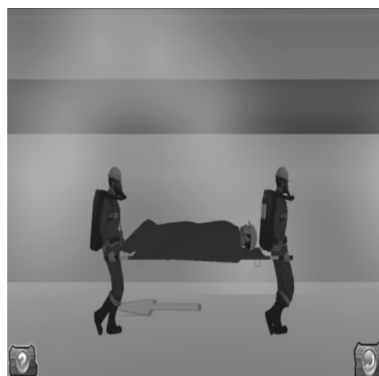


图 12 抬出中毒人员界面  
Fig. 12 The interface of carrying out the poisoned person

(3) 人员急救界面

重度中毒人员被抬至进风巷后,系统激活相应

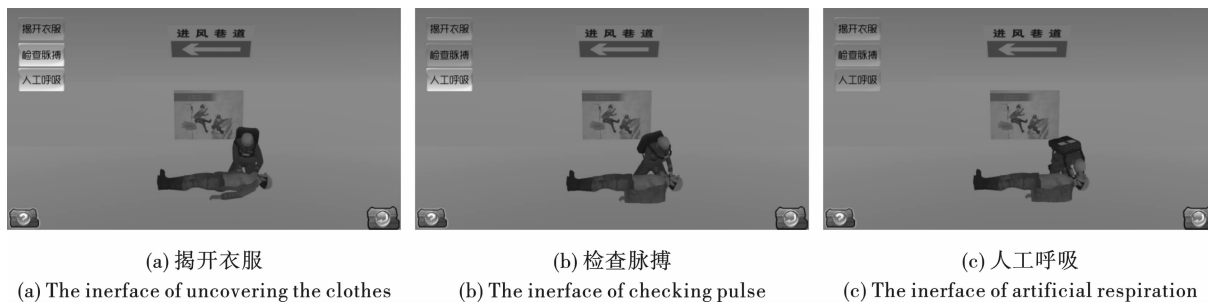


图 13 人员急救界面  
Fig. 13 First aid interface

(4) 救援成功界面

人员急救步骤完成后,将进入救援成功界面,并提示“工人苏醒,请立即送往就近医院进行治疗”,如图所示。在此界面中,用户可以选择重新进行救援任务,也可选择返回主场景。见图 14。

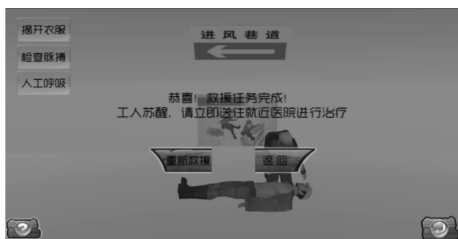


图 14 救援成功界面  
Fig. 14 Rescue success interface

2.4 系统完善

系统完善主要包括添加背景声音、人员脚步声以及操作提示按钮等,用以提升用户体验与沉浸感。此外,在系统任一界面,均在左下角设置有操作提示按钮,点击即可弹出相应操作说明;在右下角设置有

返回按钮,点击将退出当前界面,并返回主场景。

3 结语

本文借助虚拟仿真、多媒体、人机交互、数据库和网络通讯等技术,采用 3D Max 软件建模及 Unity 3D 软件开发等手段,构建了巷道掘进爆破炮烟中毒应急救援虚拟仿真系统,实现了掘进爆破炮烟中毒事故演示、工人自救互救及救援人员救援两大环节实操。该系统是巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验教学平台的拓展与延伸,既可用于安全工程、土木工程专业本科生及研究生实验教学,也可用于矿山开采、工程爆破等领域相关专业技术人员的培训教学。

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] 中华人民共和国公安部. GA990—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.
- [4] 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/A08\\_gggs/A08\\_sjhj/201308/t20130821\\_156121.html](http://www.moe.gov.cn/s78/A08/A08_gggs/A08_sjhj/201308/t20130821_156121.html),2013-08-13.
- [5] 中华人民共和国教育部.教育部关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知[EB/OL].[http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201806/t20180607\\_338713.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201806/t20180607_338713.html),2018-06-05.
- [6] 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.
- [6] 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)
- [7] 钟祥华,于岩,楼晓明,等.露天矿台阶爆破虚拟仿真系统的建设与实践[J].实验技术与管理,2020,37(7):140-144.
- [7] ZHONG Xiang-hua, YU Yan, LOU Xiaoming, et al. Construction and practice of virtual simulation experimental teaching system for bench blasting in open-pit mine[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(7): 140-144. (in Chinese)
- [8] 卞晓晨,石连栓,韩笑.基于目标导向的虚拟仿真实验项目设计与开发[J].实验技术与管理,2021,38(6):241-244.
- [8] BIAN Xiao-chen, SHI Lian-shuan, HAN Xiao. Design and development of virtual simulation experiment project based on goal-oriented theory[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(6): 241-244. (in Chinese)
- [9] 吴可玉,庄建军,徐琳玲.基于Unity 3D的虚拟消防与安全教育系统[J].实验技术与管理,2020,37(12):237-240.
- [9] WU Ke-yu, ZHUANG Jian-jun, XU Lin-ling. Virtual fire protection and safety education system based on Unity 3D[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(12): 237-240. (in Chinese)
- [10] 何书建,李晓伟.基于虚拟仿真的煤巷掘进工作面综合防突实验系统的构建[J].实验技术与管理,2021,38(3):136-140.
- [10] HE Shu-jian, LI Xiao-wei. Construction of comprehensive outburst prevention experimental system for coal roadway driving face based on virtual simulation[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(3): 136-140. (in Chinese)
- [11] 程耀东,贾桂云,戴亮,等.隧道施工虚拟仿真实验教学平台的开发与应用[J].实验技术与管理,2021,38(6):151-155.
- [11] CHENG Yao-dong, JIA Gui-yun, DAI Liang, et al. Development and application of virtual simulation experimental teaching platform for tunnel construction[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(6): 151-155. (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] 河南理工大学.巷道掘进爆破安全虚拟仿真实验软件:中国,2019SR0837209[P].2019-07-18.
- [14] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[S].北京:煤炭工业出版社,2016.
- [15] 兰国辉,陈亚树,苟守奎.基于RS-IPA煤矿突发事件应急救援能力评价[J].中国安全科学学报,2020,30(5):169-176.
- [15] LAN Guo-hui, CHEN Ya-shu, XUN Shoukui. Evaluation of emergency rescue ability of coal mines based on RS-IPA[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(5): 169-176. (in Chinese)
- [16] 张广荣,赵明生,明悦,等.爆破事故应急救援预案演练的研究与探讨[J].爆破,2013,30(2):184-188.
- [16] ZHANG Guang-rong, ZHAO Ming-sheng, MING Yue, et al. Research and discussion of walkthrough of blasting accident emergency rescue plan[J]. *Blasting*, 2013, 30(2): 184-188. (in Chinese)
- [17] 丁厚成,权萌萌,时训先,等.钻爆法施工隧道炮烟运移规律数值模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(4):82-87.
- [17] DING Hou-cheng, QUAN Mengmeng, SHI Xun-xian, et al. Study on numerical simulation of blasting fume migration laws in tunnel with drilling and blasting construction[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(4): 82-87. (in Chinese)