

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.023

## 换流变压器阀厅抗爆门抗冲击性能实验研究

杨黎波<sup>1</sup>, 赵欣宇<sup>1</sup>, 董一夫<sup>1</sup>, 付万璋<sup>1</sup>, 任家帆<sup>2</sup>

(1. 国网电力科学研究院 武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;

2. 南京理工大学 化工学院, 南京 210094)

**摘要:** 抗爆门作为换流变压器阀厅的重要安全防护设施, 有着很高的质量要求, 因此对阀厅抗爆门的抗冲击性能研究具有很大的实用价值。主要对300 kPa和1000 kPa冲击波超压载荷工况下, 有泡沫铝填充和无填充的抗爆门抗爆性能进行实验研究, 验证抗爆门的抗冲击性, 并通过门扇形变量对两种不同材质抗爆门的抗爆性能进行对比评估。实验结果表明: 有泡沫铝填充的抗爆门在300 kPa和1000 kPa强度冲击波情况下, 面板最大变形量为分别为2 mm和3 mm, 与不带填充的抗爆门相比, 抗冲击性能明显提高, 且随着爆炸载荷的增加, 其抗冲击性能提升越显著。

**关键词:** 抗爆门; 抗爆实验; 抗爆性能; 泡沫铝填充; 抗爆设计

**中图分类号:** X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0147-06

## Experimental Study on Anti-shock Performance of Explosion-resistant Door of Converter Transformer Valve Hall

YANG Li-bo<sup>1</sup>, ZHAO Xin-yu<sup>1</sup>, DONG Yi-fu<sup>1</sup>, FU Wan-zhang<sup>1</sup>, REN Jia-fan<sup>2</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan Nanrui Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

2. Chemical Engineering Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** As an important safety protection facility of converter transformer valve hall, the explosion-resistant door should meet high quality requirements. Therefore, it is of great practical value to study the anti-shock performance of the explosion-resistant door of the valve hall. The anti-shock performance of the explosion-resistant door filled with foam aluminum and nothing filled was studied and verified experimentally under the shock wave condition of 300 kPa and 1000 kPa, respectively. The anti-shock performance of the two different doors was evaluated through the amount of deformation, whose maximum values turned out to be 2 mm and 3 mm. The experimental results show that the explosion-resistant door with aluminum foam filling has better anti-shock performance under higher loadings.

**Key words:** explosion-resistant door; anti-shock test; anti-shock performance; foam aluminum filling; explosion resistant design

抗爆门主要用于石油化工、电力工业、石油化工、军工、部队等工业建筑的各种房间, 以及辅助建

筑的各种房间<sup>[1]</sup>, 诸如避难所、变电站、控制室或通道等。近年来在国内外爆炸事故频繁发生, 因抗爆门性能不足造成的殉燃殉爆导致损失大幅增加, 因此抗爆门在确保生命财产安全方面发挥着重要作用。

对于不同应用领域的抗爆门的性能和设计理论, 国内外人员做了很多有意义的研究。许柯等人

收稿日期: 2020-10-30

作者简介: 杨黎波(1985), 男, 工程师、硕士, 主要从事电力系统安全技术研究, (E-mail) 286915326@qq.com。

通讯作者: 任家帆(1994), 男, 硕士, 主要从事爆炸力学及安全系统工程等方面研究, (E-mail) 625595053@qq.com。

通过数值模拟研究了高阻尼橡胶在加固防护门方面的效果和机理<sup>[2,3]</sup>,并通过设计激波管实验,验证了数值模拟的可靠性,研究发现橡胶板和钢板存在一个使加固效果提升明显的最优厚度范围。张寅等人通过数值模拟利用等效 TNT 的方法研究了结构设计对抗爆门抗爆性能的影响<sup>[4]</sup>,结果表明,通过增大防爆门迎爆面的面板厚度及其内部骨架梁数能够显著的提高抗爆性能。Yan 等人分析了边长比、阻尼比、爆炸荷载等因素对抗爆门的影响<sup>[5-7]</sup>,结果表明:随着边长比的增大,正、负剪力峰值逐渐减小,此外,在爆炸荷载作用下,阻尼比和相对正剪切力几乎没有影响,甚至可以忽略,但对负剪切力的影响很大。谭朝明、肖长亮等人通过有限元软件 LS-DYNA,对抗爆门在爆炸冲击载荷作用下的动力响应进行分析,获得其整机及局部等位移变化、应力分布等参数,为抗爆门设计提供依据<sup>[8-10]</sup>。

尽管国内外研究人员对抗爆门的性能、设计理论等进行了大量研究。但是,有关换流变压器阀厅抗爆门设计的数据相对较少,在实际设计中,由于抗爆效果不同、应用条件不同、抗爆门尺寸不同,因此应对抗爆门的工程设计应该根据具体情况进行测试和验证。

换流站是直流输电线路最重要的节点,保证换流站安全、稳定运行是直流输电的关键,换流变压器是换流站最重要的设备之一。当换流变因故障发生火灾时,由于压力瞬间增大,变压器油热解产生蒸气,可能会引起严重爆炸事故<sup>[11]</sup>,对阀厅内设备产生严重的破坏,造成巨大的经济损失。因此需要在不影响换流变正常运行的前提下,采取必要的设备防护措施,最大程度降低火灾爆炸事故下造成的经济损失。本文通过对有泡沫铝填充及无泡沫铝填充的换流变压器区域抗爆门进行 TNT 爆炸冲击试验,验证抗爆门的抗冲击性能。

## 1 爆炸荷载的确定

爆炸发生时,爆炸荷载经常以冲击波形式作用在建构物上,爆炸的时间、位置和方式不确定,这增加了抗爆设计的难度。但是,爆炸对建构物的破坏属于冲击破坏,即爆炸荷载具有作用时间短,强度高的特点。为了简化计算,根据“超压的峰值相等,正压的脉冲相同”的原理,将爆炸发生时产生的空气冲击波的超压简化为三角波,而不需要增压阶段。抗爆门的抗爆荷载公式如下

$$I = \frac{1}{2} P_{\max} t \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$  为最大脉冲压力值; $t$  为冲击荷载作用时间。

## 2 抗爆门抗爆性能实验方案

### 2.1 试验材料及设备

#### 2.1.1 试验样本

本次实验样本有四个,其中样本 1 和样本 3 均为 304 不锈钢方管框架和 Q235 钢门扇构成的无填充样本,样本 2 和样本 4 均为在样本 1、3 中填充泡沫铝,泡沫铝厚度为 60 mm。抗爆门门扇长为 1.5 m,宽为 1 m,厚度为 3 mm。方钢壁厚 6 mm,长宽均为 80 mm。具体样本如图 1 和图 2 所示。



图 1 无填充样本

Fig. 1 Unfilled samples



图 2 有填充样本

Fig. 2 Filled samples

#### 2.1.2 试验设备

(1)自由场传感器:美国 PCB 公司产本,型号 113B 系列,量程(0~3.4)MPa,灵敏度1.45 mV/kPa。压力传感器利用石英晶体的压电效应把压力信号转换成电信号,后续的仪器对电信号进行调理和记录,得到压力波形曲线。

(2)数据采集系统:Elsys 数采系统,该采集系统兼有数据采集、存储、处理、计算等功能,共有 16 个通道,通道采样频率 1 MHz/s。

除了上述仪器之外还有地面压电传感器、应变片、无人机、单反、DV 等。

### 2.1.3 实验设备工作原理

#### (1)压力测试工作原理

压力测试系统的工作原理如下:当爆轰波或冲击波超压信号传到压力传感器时,传感器将压力信号转变成电荷信号,然后经电荷放大器转换为相应的电压信号,再经数据采集系统采集储存,由计算机对数据分析处理,就可以得到相应的压力信号随时间变化曲线,以及冲击波的各项参数。

#### (2)应变片测试原理

通过将应变片贴合在样本上,当样本受到冲击产生形变时,此形变同样的作用与应变片,这种形变导致了其端电阻变小。通过测量应变片的电阻,可以推算出其覆盖区域的应变。

## 2.2 实验方法

换流变压器的爆炸危险主要体现在变压器油的的危险性上,变压器油高温热解,生成大量氢气和其他烃类气体,因此可认为变压器油的爆炸为可燃气

体与空气中的氧气混合后发生化学爆炸。通过前人的研究以及实际事故调研可以发现,阀厅爆炸事故类型为爆燃,而以上气体混合物的最大爆燃压力接近 1 MPa,因此选用 1 MPa 作为实验研究的最大冲击波超压。实验选取 TNT 当量为 1 kg 压装药柱,根据所用 TNT 药柱的超压-距离数据确定施加要求超压的对应距离。实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数  
Table 1 Experimental parameters

样本	预计超压/ kPa	药柱到样本 距离/m	样本中心 高度/cm	药柱高度/ cm
1	300	1.75		
2	300	1.75	140	137
3	1000	1.30		
4	1000	1.30		

实验中 TNT 药柱中心与抗爆门中心处于同一高度。左右两侧距样本等距离各 30°处布置两个自由场传感器,高度与 TNT 药柱中心高度一致;左右两侧地面上距样本直线距离相等处各 30°处布置两个普通压电传感器,其示意图如图 3 所示。

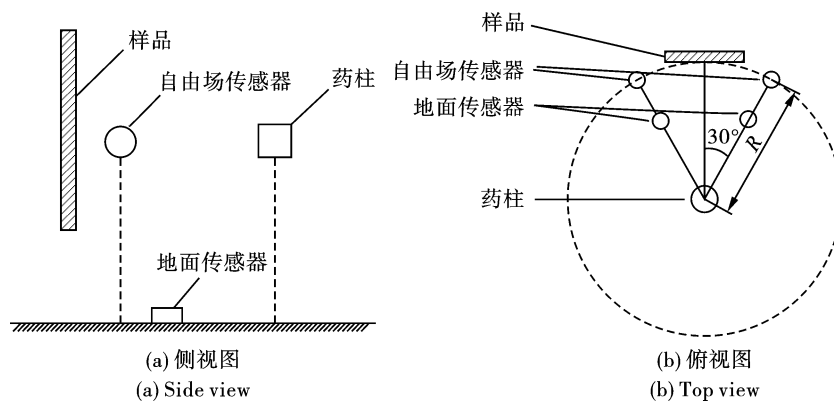


图 3 试验平面布置图

Fig. 3 Test layout

样本背面应力较为集中的几个典型位置贴上应变片。试验时,同时将高速摄像机、摄像机、红外热成像仪放置在安全距离处对样本进行拍摄,无人机于药柱正上方 100 m 处记录试验过程。试验方法引用的标准为:GJB—5412《燃料空气炸药 (FAE) 类弹种爆炸参数测试及爆炸威力评价方法》以及 GJB—5232.4《战术导弹战斗部靶场试验方法》。

由于带泡沫铝填充的样本 2 和样本 4 内部无法添加应变片,因此只给样本 1 和样本 3 在门扇背面布置 6 个应变测点。其中 1#~4#位于门扇背面加

筋处,垂直于方钢,5#和 6#位于背面加筋板中心,呈 90°布置,背面加筋板中心布置加速度测点 1 个,如图 4 所示。

## 3 实验结果分析

### 3.1 实验超压

表 2 为实验过程中的超压测量结果。由表 2 可以看出:空中超压由自由场传感器测得的是入射超压,与预计设定超压基本保持一致,实验精度控制较好。

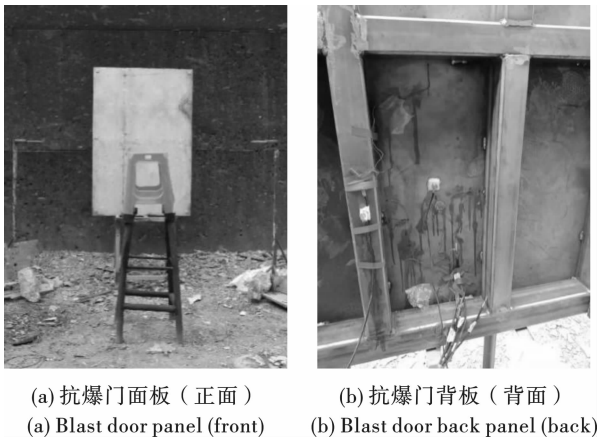


图 4 抗爆门正反面

Fig. 4 Front and back of anti explosion door

表 2 实验超压

Table 2 Overpressure test results

样本	预计超压/ kPa	实测空中 超压/kPa		平均空中 超压/kPa
1	300	346.831	365.001	355.916
2	300	325.608	368.403	347.005
3	1000	916.893	941.997	929.445
4	1000	905.877	934.928	920.403

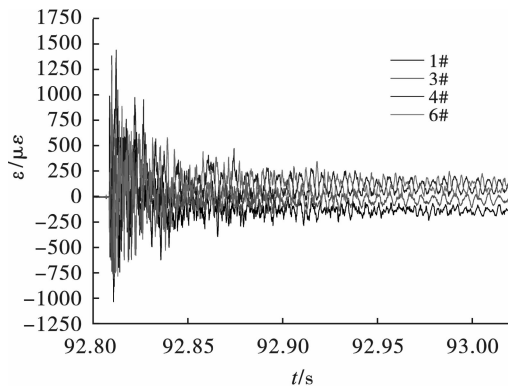
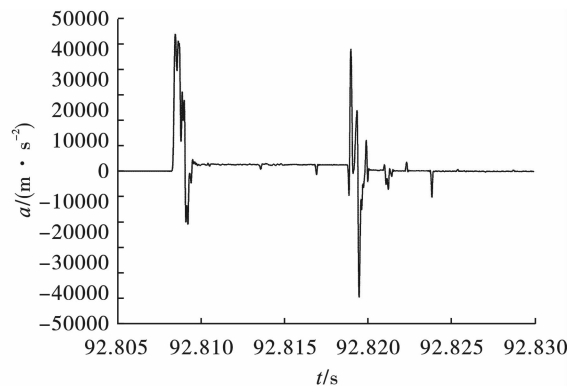
(a) 爆炸冲击过程中应变曲线  
(a) Strain curve during explosion shock(b) 加速度时程曲线  
(b) Acceleration time history curve

图 5 样本 1 应变和加速度时程曲线

Fig. 5 Sample 1 residual strain and acceleration time history curves

可见,该门扇结构在自由场压力 355.916 kPa 荷载作用下,测点位置变形较小,保持为弹性状态。但爆炸产生的钢板振动很大,加速度峰值已经超过  $40\,000\text{ m/s}^2$ 。

### 3.2.2 样本 3 应变实验结果

样本 3 实验过程中,自由场压力设计值为 1000 kPa。下图显示了样本 3 不同位置处的应变动态分布:从图 6 可见,只有 3#测点应变峰值较小,在弹性范围内,其余各点在爆炸冲击作用下的应变峰值均超过屈服应变。其中,5#测点微应变最大峰值

## 3.2 应变实验结果

### 3.2.1 样本 1 应变实验结果

爆炸造成能量急剧释放,将爆炸材料转变成高温、高压的气体。这些高压气体相对应的压力阵面沿径向传入周围空气,从而形成一个炽热的气体驱动并支持着的强冲击波。

冲击波载荷施加在抗爆门面板上,面板在其作用下发生局部的相对变形,即应变。应变表示的是长度的相对变化量,是形变量与原来尺寸的比值,用  $\varepsilon$  表示。

本设备所测得的应变为微应变,是单位长度光纤的相对相对变化量,描述极其微小的形变,用符号  $\mu\varepsilon$  表示,其与应变的关系为  $\varepsilon = 10^6 \mu\varepsilon$ 。通过对应变的分析,能够根据材料属性判断在该外力作用下材料是否失效。

样本 1 实验过程中自由场压力设计值为 300 kPa,其测试结果如图 5 所示。

本次试验门扇材料为 Q235 钢,其在冲击波作用下屈服的微应变  $\mu\varepsilon$  临界值为 1679。从图 5 试验数据可知,所有测点均未超过屈服应变,其中 2#和 5#应变测点在冲击波作用下振动脱落失效。

达到 2600,6#测点微应变最大峰值达到 3100。2#测点与 4#测点为对称排布,实验过程中 2#测点与加速度计在冲击波作用下振动脱落失效。可见,该门扇结构在自由场压力 929.445 kPa 荷载作用下,测点位置出现塑性变形,加筋钢板中心的不可恢复的变形量最大。

### 3.3 凹陷深度

图 7 显示了 4 种样本在 TNT 爆炸实验后抗爆门面板最大凹陷程度的对比图,表 3 展示了其最大凹陷程度的数值对比。

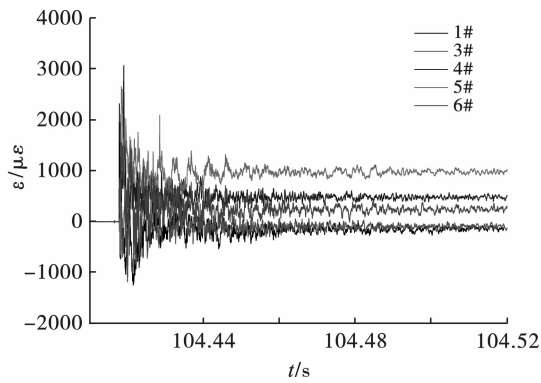


图6 样本3爆炸冲击过程中应变曲线

Fig. 6 Sample 3 residual strain time history curve

表3 实验后凹陷深度对比  
Table 3 Depression thickness before and after the experiment

样本编号	1	2	3	4
填充情况	否	是	否	是
冲击波超压/kPa	355.916	347.005	929.445	920.403
凹陷程度	约4mm 凹陷	约2mm 凹陷	约12mm 凹陷	约3mm 凹陷

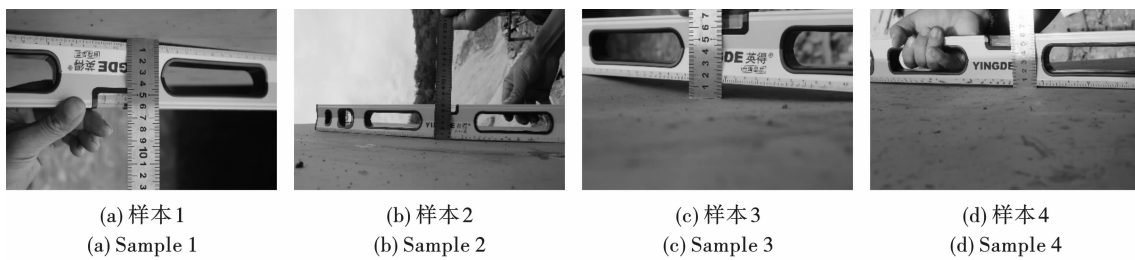


图7 实验前后凹陷深度

Fig. 7 Depression thickness before and after the experiment

由实验结果可知,有填充的抗爆门在两种强度冲击波超压作用后,凹陷分别为2 mm和3 mm;无填充的抗爆门在两种强度冲击波超压作用后,凹陷分别为4 mm和12 mm。在同样强度的爆炸载荷下,带泡沫铝填充的抗爆门抗爆性能更好。并且随着爆炸载荷的增加,无填充抗爆门凹陷程度显著增加,而带填充抗爆门凹陷程度增加不明显。说明有填充抗爆门有效的抵消了爆炸载荷增加后所带来的破坏。因此当爆炸冲击波载荷强度越大,有填充的抗爆门抗爆性优势越发明显。

#### 4 结论

通过抗爆实验,研究了不同压力载荷下有泡沫铝填充与无泡沫铝填充抗爆门的抗冲击性能,得到以下结论:

(1)通过抗爆实验以及应变片测量可较好描述爆炸冲击波荷载作用下抗爆门的动力特性。

(2)无泡沫铝填充的门扇结构在冲击波超压355 kPa作用下,钢板变形较小,保持为弹性状态。但爆炸产生的钢板振动很大。门扇结构在冲击波超压929 kPa作用下,钢板存在塑性变形。

(3)在爆炸载荷增加约3倍的情况下,无填充抗爆门的面板凹陷程度也增长了3倍,而有填充抗爆门凹陷程度仅增加了1.5倍。因此随着载荷强度

的增加,有填充的抗爆门抗爆性优势越发明显。

#### 参考文献 (References)

[1] 曾 娅,葛广全.关于抗爆门结构设计的探讨[J].四川建材,2019,45(8):226-227,230.  
 [1] ZENG Ya, GE Guang-quan. Discussion on structural design of blast resistant door[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(8): 226-227, 230. (in Chinese)  
 [2] 许 珂,李秀地,刘佳鑫,等.高阻尼橡胶加固防护门抗爆机理的数值分析[J].兵器装备工程学报,2018,39(10):155-161.  
 [2] XU Ke, LI Xiu-di, LIU Jia-xin, et al. Numerical analysis on anti-explosion mechanism of blast door reinforced with high damping rubber[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(10): 155-161. (in Chinese)  
 [3] 毛怀源,李秀地,许 珂,等.高阻尼橡胶的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型[J].当代化工,2018,47(10):2186-2192.  
 [3] MAO Huai-yuan, LI Xiu-di, XU Ke, et al. Dynamic compressive properties of high damping rubber and its strain rate related constitutive model[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(10): 2186-2192. (in Chinese)  
 [4] 张 寅,姜宏亮,杨俊杰,等.海洋平台防爆门结构设计及其抗爆性能[J].应用科技,2020,47(2):6-11.  
 [4] ZHANG Yin, JIANG Hong-liang, YANG Jun-jie, et al.

- Structure design of explosion door on the offshore platform and research of its anti-explosion performance [J]. Applied Science and Technology, 2020, 47(2): 6-11. (in Chinese)
- [5] YAN Qiu-shi, GUO Dong. Elastic rebound of a blast door under explosion loadings [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(10): 4-18.
- [6] YAN Qiu-shi, SUN Bo-wen, LIU Xue-mei, et al. The effect of assembling location on the performance of precast concrete beam under impact load [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(8): 1211-1222.
- [7] YAN Qiu-shi, GUO Dong. Rebound effects of loading conditions for blast door [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2019, 26(22): 1-8.
- [8] 谭朝明, 吕贝贝. 平板抗爆门动力响应有限元分析 [J]. 橡塑技术与装备, 2017(12): 57-60.
- [8] TAN Chao-ming, LV Bei-bei. Finite element analysis of dynamic response for fiat blast door [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2017(12): 57-60. (in Chinese)
- [9] 肖长亮, 丁维国, 王 喆. 防爆密闭门的有限元分析 [J]. 煤矿机械, 2019, 40(2): 60-61.
- [9] XIAO Chang-liang, DING Wei-guo, WANG Zhe. Finite element analysis of explosion-proof close door [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(2): 60-61. (in Chinese)
- [10] 刘文思, 朱倩, 徐华. 空中爆炸载荷作用下舰船水密门抗冲击分析 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(2): 51-54.
- [10] LIU Wen-si, ZHU Qian, XU Hua. Impact analysis of ship watertight door under the action of airborne explosion research [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(2): 51-54. (in Chinese)
- [11] 王五静. 矿物绝缘油过热分解过程仿真分析与实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [11] WANG Wu-jing. Study on simulation and experimental of pyrolysis process of mineral insulating oil under thermal fault [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)

英文编辑: 袁必和

(上接第 69 页)

- [8] 赵 彬, 王新民, 史良贵, 等. 基于 BP 神经网络的爆破参数优选 [J]. 矿冶工程, 2009, 29(4): 24-27.
- [8] ZHAO Bin, WANG Xin-min, SHI Liang-gui, et al. Optimization of blasting parameters based on Back-Propagation neural network [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2009, 29(4): 24-27. (in Chinese)
- [9] 王 莉, 赵 彬, 张德明, 等. 矿岩爆破参数预测新方法研究 [J]. 爆破, 2010, 27(4): 27-30, 39.
- [9] WANG Li, ZHAO Bin, ZHANG De-ming, et al. Research on new prediction method of blast parameters [J]. Blasting, 2010, 27(4): 27-30, 39. (in Chinese)
- [10] 郭进平, 王 靖, 李角群. 中深孔爆破炮孔布置优化设计研究 [J]. 爆破, 2017, 34(3): 79-84, 89.
- [10] GUO Jin-ping, WANG Jing, LI Jiao-qun. Study on optimum design of blasting hole arrangement in medium-length hole blasting [J]. Blasting, 2017, 34(3): 79-84, 89. (in Chinese)
- [11] 段永维, 庄培新, 周 斌. 应用三心布孔法优化中深孔设计施工 [J]. 矿业工程, 2013, 11(1): 33-34.
- [11] DUAN Yong-wei, ZHUANG Pei-xin, ZHOU Bin. Optimization of design and construction of medium deep hole by three center hole arrangement method [J]. Mining Engineering, 2013, 11(1): 33-34. (in Chinese)
- [12] 程 平, 郭进平, 孙锋刚. 现代爆破工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [13] 王树西, 李安渝. Dijkstra 算法中的多邻接点与多条最短路问题 [J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 217-224.
- [13] WANG Shu-xi, LI An-yu. Multi-adjacent-vertexes and multi-shortest-paths problem of dijkstra algorithm [J]. Computer Science, 2014, 41(6): 217-224. (in Chinese)
- [14] 赵卫绩, 巩占宇, 王 雯, 等. 几种经典的最短路径算法比较分析 [J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(12): 47-49.
- [14] ZHAO Wei-ji, GONG Zhan-yu, WANG Wen, et al. Comparative analysis of several classical shortest path algorithms [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2018, 34(12): 47-49. (in Chinese)
- [15] 黄书力, 胡大裘, 蒋玉明. 经过指定的中间节点集的最短路径算法 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(11): 41-46.
- [15] HUANG Shu-li, HU Da-sha, JIANG Yu-ming. Algorithm for finding shortest path which must go through specified intermediate node set [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(11): 41-46. (in Chinese)
- [16] 卢立果, 刘立越, 鲁铁定, 等. 一种改进的 Floyd 算法 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 78-81.
- [16] LU Li-guo, LIU Li-yue, LU Tie-ding, et al. A modified Floyd algorithm [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2019, 42(1): 78-81. (in Chinese)

英文编辑: 何 松