

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.023

爆破振动对露天矿山永久边坡稳定性的影响分析

厉美杰, 杜军, 王洪强, 李泽华
(北方爆破科技有限公司, 北京 100097)

摘要: 为研究爆破振动对露天矿山永久边坡稳定性的影响,以卡莫亚-卡兹比兹矿群中的3个矿坑作为研究对象,对比爆破振动对于不同岩性边坡稳定性的影响。通过选择爆破测振仪并设置测振仪参数,通过振动监测得到测点的爆破振动速度,对爆破振动速度、最大一段起爆药量以及测点到爆源中心距离等数据进行整理,并按照幂函数进行回归分析,得出各矿爆破振动速度 v 与 $\sqrt[3]{Q}/R$ 的趋势线,进而得到对应矿坑的爆破振动公式,根据振动公式来预测爆破振动。为得出测点到爆源中心距离和最大一段起爆药量对边坡振动速度的影响大小,把距离与药量作为影响因子,把爆破振动速度作为因变量,并根据各矿拟合得出的爆破振动公式分别计算振动速度,制定九组实验方案;采用SPSS软件进行方差分析,得出测点到爆源中心距离这一因素对于爆破振动速度敏感性较高,对于矿坑边坡振动的影响较大;因此对于卡兹、东二软岩边坡,采取预留2~3排孔作为非爆破区域,采用机械挖掘修坡;对于南二中硬岩石边坡,采用提前进行预裂爆破来减弱爆破振动对边坡稳定性的影响。该研究成果对于刚果(金)其他相同地质条件的露天铜钴矿爆破施工有借鉴及应用的价值。

关键词: 爆破振动; 永久边坡; 矿群; 公式拟合; 方差分析

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)01-0170-07

Influence Analysis of Blasting Vibration on Stability of Permanent Slope in Open-pit Mine

LI Mei-jie, DU Jun, WANG Hong-qiang, LI Ze-hua
(North Blasting Technology Limited Company, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to study the influence of blasting vibration on the stability of permanent slopes in an open-pit mine, this paper takes three pits in the Kamoya-Kazibizi mine as the research object, and compares the effects of blasting vibrations on the stability of the slopes with different rock characteristics. By collating the measured blasting vibration data, the maximum charge per delay and the distances from the measuring points to the center of the blast source, the blast vibration attenuation law and curve are obtained by regression analysis with a power function, which can be used to predict future blasting vibrations. In order to obtain the influence of the distance from the measuring point to the center of the blast source and the maximum charge per delay on the vibration velocity, the distance and charge are taken as the influence factor, and the blasting vibration velocity is taken as the dependent variable. Based on the vibration velocity calculated according to the fitted blasting vibration formula of each pit, nine groups of experimental schemes are designed. Using SPSS software to carry out variance analysis, it is concluded that the distance between the measuring point and the center of the blast source is highly sensitive to the blasting vibration velocity, and has a greater impact on the mine slope vibration. Therefore, for the soft rock slopes of Kazibizi mine and East No. 2 mine, 2~3 rows of holes are reserved as a non-blasting area, and mechanical excavation is used to trim the

收稿日期: 2022-09-04

作者简介: 厉美杰(1991-),男,工程师、硕士,主要从事矿山爆破研究, (E-mail) meijie_li@foxmail.com。

slopes. For the medium hard rock slope of South No. 2 mine, pre-split blasting is used to reduce the impact of blasting vibration on the slope stability. The research results have reference and application value for other open-pit copper-cobalt mines in Congo.

Key words: blasting vibration; permanent slope; mine group; formula fitting; variance analysis

边坡安全是露天开采中重要的安全问题之一, 爆破作业是露天开采中的重要环节, 爆破产生的振动效应会破坏边坡中岩石的内聚力、抗压强度以及内摩擦角等关系着矿坑边坡稳定的因素的本质结构, 进而带来安全问题。国内外专家学者针对爆破振动做了大量研究, 王旭为研究爆破振动信号在高陡边坡传播规律, 提出了测点布置原则, 并基于HHT方法研究了IMF分量、Hilbert瞬时能量谱、能量谱及边际谱^[1]; 李继业等人对节理岩体爆破振动传播衰减规律进行研究, 通过相似模拟实验, 采用TC-4850监测入射波与出射波爆破振动速度, 得出爆破振速衰减随着节理倾角的增大而减小且变化幅度显著^[2]; 马文有通过多次爆破振动试验, 现场收集爆破振动数据, 根据爆破振动计算萨道夫斯基公式, 利用数学回归分析的方法计算出矿山爆破振动 K 和 α 值^[3]; 代树红等人对露天煤矿爆破振动速度计算公式进行研究, 通过回归分析对比了传统萨道夫斯基公式与考虑高程后改进公式的相对误差, 并采用量纲分析法推导出适用于计算露天煤矿爆破振动速度的公式^[4]; 范新宇等人对爆破振动作用下节理岩体边坡变形破坏因素进行敏感性分析, 利用正交设计试验对各项指标进行交互组合, 通过灰关联

分析法计算各因素对稳定系数的关联度, 结果表明爆破振动作用对边坡稳定影响最大^[5]。重点对南二矿坑、东二矿坑、卡兹比兹矿坑构成的矿群进行爆破振动测试, 对比不同岩性下爆破振动对于边坡稳定性的影响, 通过爆破测振仪测试测点的振动速度, 并按照乘幂函数进行回归分析, 得出各矿爆破振动速度 v 与 $\sqrt[3]{Q}/R$ 的趋势线, 进而得到对应矿坑的爆破振动公式; 对测点到爆源中心距离和最大一段起爆药量两因素进行敏感性分析, 得出爆破振动对边坡稳定性影响的主要因素, 同时根据研究结果提出针对软岩区和中硬岩区减弱爆破振动的施工措施。

1 工程概况

1.1 矿群概况

卡莫亚-卡兹比兹矿群位于赞比亚—刚果(金)铜矿带的北西部, 该矿群主要开采铜钴混合矿, 主要研究对象为矿群内的南二矿坑、东二矿坑及卡兹比兹矿坑。矿群所处区域每年分旱、雨两季: 4-11月为旱季, 基本无降雨; 12月到翌年4月为雨季, 大雨乃至暴雨不断, 全年99%的降水来自雨季, 其中南二矿坑进入水位线下区域开采阶段。各矿坑主要岩性及台阶设计参数见表1。

表1 矿群岩性及台阶设计参数

Table 1 Mineral lithology and bench design parameters

矿坑	主要岩性	边坡设计最终帮坡角/°	台阶高度/m	台阶坡面角/°	最大采深/m
南二	碳质白云岩、硅化白云岩、白云质页岩、白云质粉砂岩	65	12	75	300
东二	泥质白云质粉砂岩, 白云质页岩	60	12	75	167
卡兹比兹	粉砂岩	60	12	75	183

1.2 爆破施工概况

爆破炮孔统一采用三角形布孔, 高压潜孔钻机穿孔, 采用V型或斜线型逐孔起爆方式微差起

爆, 具体爆破参数如表2。装药结构为连续耦合装药, 孔内放置高精度导爆管雷管及起爆弹, 起爆弹置于装药中心处, 如图1所示。

表2 爆破施工参数

Table 2 Blasting parameters

孔径/mm	超深/m	孔距/m	排距/m	炸药类型	堵塞长度/m	装药长度/m	延米装药量/(kg·m ⁻¹)	孔间延期/ms	排间延期/ms	孔内延期/ms
138	1.5	5.5/6	4/5	铵油/乳化	5~6	7~8	12.5(铵油)	17	42	500

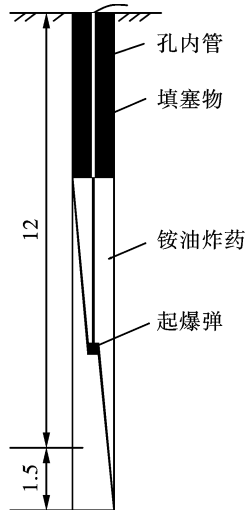


图1 装药结构示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the charge structure(unit:m)

2 爆破振动测试与数据分析

2.1 爆破振动测试

2.1.1 测振仪型号及主要参数设置

(1) 本试验选用 TC-4850 爆破测振仪,测振仪由传感器、记录仪、充电头、数据线、信号线五个部分组成,并另附钢钎一个,可在软弱岩层或土层固定使用。主要参数包括采样频率、采样时间、触发电平、触发条件、采样延时等参数。

(2) 采样频率为该测点频率估值的 100 倍以上。

(3) 根据孔网延期时间选择相应的采样时间,采样时间是仪器从触发开始记录到记录完毕的时间。

(4) 为了保证有效采集到信号,避免周围干扰信号致使误触发,根据测试区的地形地质条件以及爆破参数和方式,预估爆破振动衰减系数 k, α 值,估算各测点的最大爆破振动峰值,将触发电平值设为被测信号幅度峰值的 20%,这样既避免误触发,又能保证有效信号可靠触发。

(5) 触发条件选择内触发。

(6) 为了保证不丢失触发前的信号头,需要在信号缓存区内预留一定空间保存信号头,即从触发点向前预留数据,因此需要设置负延时,采样延时设置为: $-2000 \sim +2000$ ms 区间^[6]。

2.1.2 测点布置原则

(1) 以爆区几何中心作为爆源中心,在爆破振动影响范围内布置测点;

(2) 测点布置选择原状土层或基岩,避开沟槽、地形突变和人工改造的位置;

(3) 测点传感器 x 方向指向振源中心,在测点位置 $0.5 \sim 1$ m 处设置对照点,以保证 x 方向误差 $\pm 3^\circ$ 以内。

2.2 爆破振动数据分析及公式拟合

2.2.1 爆破振动数据测试结果

见表 3 ~ 表 5。

表 3 南二矿爆破振动测试结果

Table 3 Blasting vibration test results of South No. 2 Mine

爆区编号	测点标号	矢量合速度 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	测点到爆源 中心距离 R/m	最大一段起爆 药量 Q/kg
S II 1360 - 1348 - 001	1	18.38	45.9	960
	2	24.40	41.3	960
	3	11.90	50.8	900
S II 1324 - 1312 - 001	4	3.70	124.5	900
	5	2.90	93.0	900
	6	0.47	287.6	600
S II 1372 - 1360 - 001	7	0.47	176.5	600
	8	1.25	288.8	600
	9	10.92	48.0	600
S II 1324 - 1312 - 002	10	5.70	86.0	1280
	11	6.90	98.0	1280
	12	3.90	151.0	1280

2.2.2 公式拟合

根据萨道夫斯基公式 $v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha$, 式中 v 代表

爆破振动波的矢量合速度, Q 代表一次最大起爆药量(延期时间小于 8 ms), R 代表测点到爆源中心距离, k, α 是与岩性有关的系数。将测得振动数据按照乘幂函数进行回归分析,得出各矿爆破振动速度

v 与 $\sqrt[3]{Q/R}$ 的趋势线如下。拟合度分别为东二 $R^2 = 0.9524$, 卡兹比兹 $R^2 = 0.9825$, 南二 $R^2 = 0.9534$, 整

体拟合度较高, 其中卡兹比兹的拟合度最高, 南二其次, 说明与实际矿山条件下的爆破振动趋势接近^[7]。见图2。

表4 东二矿爆破振动测试结果
Table 4 Blasting vibration test results of East No. 2 Mine

爆区编号	测点标号	矢量合速度 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	测点到爆源 中心距离 R/m	最大一段起爆 药量 Q/kg
E II 1377 - 1365 - 001	1	4.40	54.8	200
	2	3.40	55.2	200
	3	4.20	57.2	200
E II 1377 - 1365 - 002	4	2.41	109.0	612.5
	5	3.63	101.0	612.5
E II 1389 - 1372 - 001	6	1.50	104.2	500
	7	0.70	152.9	500
	8	0.36	242.7	500
	9	0.36	263.9	500

表5 卡兹比兹爆破振动测试结果
Table 5 The results of the blasting vibration test of Kazibizi

爆区编号	测点标号	矢量合速度 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	测点到爆源 中心距离 R/m	最大一段起爆 药量 Q/kg
KZ1376 - 1364 - 001	1	26.68	32.2	612.5
	2	11.13	53.9	612.5
	3	10.19	57.7	612.5
	4	9.27	61.7	612.5
	5	3.67	80.3	612.5
	6	2.04	103.6	612.5
	7	13.60	51.6	800
KZ1364 - 1352 - 001	8	6.70	68.4	800
	9	4.00	101.2	800
	10	1.80	178.0	800
	11	0.40	339.5	800
KZ1364 - 1352 - 002	12	4.60	86.1	700
	13	3.04	92.9	700
	14	0.94	158.7	700
	15	0.52	171.1	700

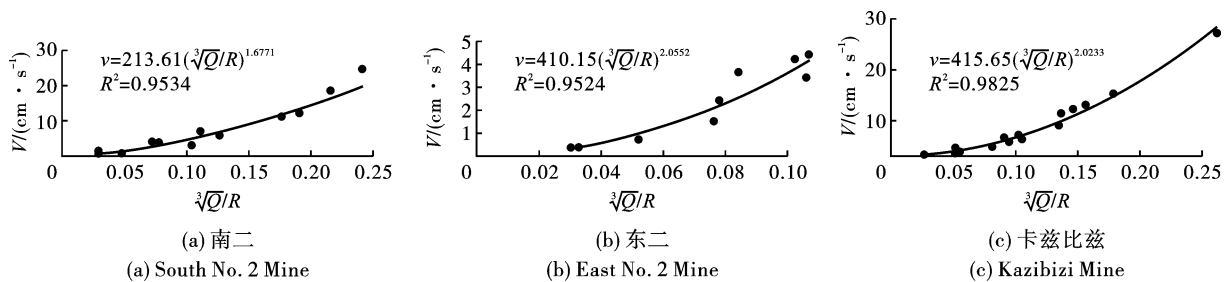


图2 爆破振动回归趋势线

Fig. 2 Blasting vibration regression results

根据振动回归趋势线拟合出对应矿坑的爆破振动公式,其中南二为 $v = 213.61 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.6771}$; 东二为 $v = 410.15 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.0552}$; 卡兹比兹 $v = 415.65 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.0233}$ 。

根据每个矿坑对应的公式可以对今后爆破振动进行预测,并通过调整爆破参数等方式来降低爆破振动对永久边坡稳定性的影响。根据拟合结果可以看出 k 值排列顺序为:卡兹比兹 > 东二 > 南二; α 值排列顺序为:东二 > 卡兹比兹 > 南二; 根据《爆破设计与施工》中 k 、 α 范围与岩性关系,可以得出南二矿的岩石硬度要大于卡兹比兹及东二,进一步得出南二矿边坡属于中硬岩石边坡,卡兹比兹和东二矿边坡

属于软岩边坡,这与矿山实际岩石地质情况相符。由于软岩边坡稳定性相对较差,因此卡兹比兹及东二矿的边坡监测及防护尤其重要^[8]。

3 爆破振动速度影响因素的方差分析

3.1 试验方案

为得出测点到爆源中心距离 R 和最大一段起爆药量 Q 对边坡振动速度 V 的影响大小,把距离 R 与药量 Q 作为影响因子,并根据上述各矿拟合得出的爆破振动公式分别计算振动速度。测点到爆源中心的距离分别取 50 m、150 m、250 m,最大一段起爆药量分别取 400 kg、600 kg、800 kg,计算振动速度,分别得到九组试验方案如表 6。

表 6 各矿方案分析表

Table 6 Analysis table of each plan

距离 R/m	药量 Q/kg	南二振动速度 $v_1/(cm \cdot s^{-1})$	东二振动速度 $v_2/(cm \cdot s^{-1})$	卡兹振动速度 $v_3/(cm \cdot s^{-1})$
50	400	8.61	8.01	8.63
50	600	10.80	10.58	11.35
50	800	12.68	12.88	13.78
150	400	1.36	0.84	0.93
150	600	1.71	1.11	1.23
150	800	2.01	1.35	1.49
250	400	0.58	0.29	0.33
250	600	0.73	0.39	0.44
250	800	0.85	0.47	0.53

3.2 方差分析

将表 6 中振动速度作为因变量,距离及药量作为因子,导入 SPSS 软件进行方差分析,显著性水平 α 取 0.05,得出各矿方差分析结果见表 7~表 9。根据方差分析理论,如果 $\text{sig} < \alpha$,说明结果显著,从表 7~9 中可以看出三个矿的一次最大起爆药量的因素 sig 值均大于 0.05,说明在目前爆破规模下一次最大起爆药量对于爆破振动速度敏感性较低,对于矿坑边坡振动的影响较小;而测点到爆源中心距离

这一因素的 sig 值均小于 0.05,说明测点到爆源中心距离对于爆破振动速度敏感性较高,对于矿坑边坡振动的影响较大。因此未来对于该露天矿群边坡爆破振动的控制应该侧重于增大爆源距永久边坡的距离,对于卡兹、东二软岩边坡,可以采取预留 2~3 排孔作为非爆破区域,采用机械挖掘并修坡的形式来保护永久边坡;对于南二中硬岩石边坡,可以采用在边坡设计线上钻探预裂孔,提前进行预裂爆破来减弱爆破振动对永久边坡的影响^[9,10]。

表 7 东二方差分析结果

Table 7 East No. 2 mine variance analysis results

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig
校正模型	196.088 ^a	4	49.022	28.570	0.003
截距	143.352	1	143.352	83.544	0.001
测点到爆源中心距离	190.935	2	95.468	55.638	0.001
一次最大起爆药量	5.153	2	2.577	1.502	0.326
误差	6.864	4	1.716		
总计	346.304	9			
校正的总计	202.952	8			

表8 南二方差分析结果

Table 8 South No.2 mine variance analysis results

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig
校正模型	185.687 ^a	4	46.422	42.226	0.002
截距	171.882	1	171.882	156.348	0.000
测点到爆源中心距离	181.523	2	90.761	82.559	0.001
一次最大起爆药量	4.164	2	2.082	1.894	0.264
误差	4.397	4	1.099		
总计	361.966	9			
校正的总计	190.084	8			

表9 卡兹方差分析结果

Table 9 Kazibizi mine variance analysis results

源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	Sig
校正模型	224.128 ^a	4	56.032	29.436	0.003
截距	166.514	1	166.514	87.476	0.001
测点到爆源中心距离	218.321	2	109.160	57.346	0.001
一次最大起爆药量	5.807	2	2.904	1.525	0.322
误差	7.614	4	1.904		
总计	398.256	9			
校正的总计	231.742	8			

4 结论

(1)通过爆破振动测试并对数据进行整理分析,运用回归分析法得出可以预测各矿爆破振动规律的公式,同时结果表明软岩区的 K 、 α 值大于硬岩区。

(2)通过对边坡距爆源距离和一次最大段起爆药量进行影响因素敏感性分析,得出在现有爆破规模下,爆破振动对于该矿群永久边坡稳定性影响的主要因素是边坡距爆源距离,而一次最大起爆药量对于该矿群边坡爆破振动影响较小。

(3)根据影响因素的分析结果并结合实际施工情况,对于中硬岩石边坡采取提前进行单独的预裂爆破来减小爆破振动对永久边坡稳定性的影响;对于软岩边坡采取预留2~3排非爆破区域,由机械开挖并修坡来减弱爆破振动对矿山永久边坡稳定性的影响。

参考文献 (References)

- [1] 王旭. 基于HHT的高陡边坡爆破振动规律研究[J]. 露天采矿技术, 2022, 37(2): 58-61.
- [1] WANG Xu. Research on blasting vibration law of high steep slope based on HHT[J]. Surface Mining Technology, 2022, 37(2): 58-61. (in Chinese)
- [2] 李继业, 康强, 赵明生, 等. 节理岩体爆破振动传播

衰减规律相似模型试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(2): 30-35.

- [2] LI Ji-ye, KANG Qiang, ZHAO Ming-sheng, et al. Experimental study on similar models of blasting vibration propagation and attenuation law of joint rock mass[J]. Blasting, 2022, 39(2): 30-35. (in Chinese)
- [3] 马文有. 某露天矿爆破振动萨道夫斯基回归分析[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(3): 130-134.
- [3] MA Wen-you. Sadowski regression analysis of blasting vibration in an open-pit mine[J]. Western Prospecting Engineering, 2022, 34(3): 130-134. (in Chinese)
- [4] 代树红, 安志奎, 王晓晨, 等. 露天煤矿爆破振动速度计算公式研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 41-46.
- [4] DAI Shu-hong, AN Zhi-kui, WANG Xiao-chen, et al. Research on the calculation formula of blasting vibration rate of open-pit coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2022, 41(1): 41-46. (in Chinese)
- [5] 范新宇, 张争, 陈国将, 等. 爆破振动作用下节理岩体边坡变形破坏因素敏感性分析[J]. 西北水电, 2021(6): 61-64, 74.
- [5] FAN Xin-yu, ZHANG Zheng, CHEN Guo-jiang, et al. Sensitivity analysis of deformation failure factors of joint rock mass under blasting vibration[J]. Northwest Hydropower, 2021(6): 61-64, 74. (in Chinese)
- [6] 韩亮, 闫杰. 露天煤矿场地振动及其对边坡安全

- 的影响研究[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(1): 22-25.
- [6] HAN Liang, YAN Jie. Study on site vibration of open-pit coal mine and its influence on slope safety[J]. *Open-cast Mining Technology*, 2021, 36(1): 22-25. (in Chinese)
- [7] 谭清燕, 何慕平. 露天矿山爆破振动监测及分析方法研究[J]. *世界有色金属*, 2020(19): 152-153.
- [7] TAN Qing-yan, HE Mu-ping. Research on monitoring and analysis method of blasting vibration in open-pit mine [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(19): 152-153. (in Chinese)
- [8] 阳生权, 张家辉, 吕中玉, 等. 较大高程差迎波坡面爆破地震地形效应分析[J]. *工程爆破*, 2021, 27(1): 22-28.
- [8] YANG Sheng-quan, ZHANG Jia-hui, LV Zhong-yu, et al. Analysis of the seismic topographical effect of blasting on the upside-wave slope with large elevation difference[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(1): 22-28. (in Chinese)
- [9] 黄伯强, 李启才. 带交互作用的双因素方差分析的线性回归建模[J]. *统计与决策*, 2021, 37(1): 10-15.
- [9] HUANG Bo-qiang, LI Qi-cai. Linear regression modeling of two-factor analysis of variance with interaction[J]. *Statistics and Decision*, 2021, 37(1): 10-15. (in Chinese)
- [10] 孙冰, 罗志业, 曾晟, 等. 爆破振动影响因素及控制技术研究现状[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(6): 129-134.
- [10] SUN Bing, LUO Zhi-ye, ZENG Sheng, et al. Research status of blasting vibration influencing factors and control technology[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2021, 48(6): 129-134. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

(上接第 138 页)

- [4] 曹跃, 庞端根, 杨昌森, 等. 大型石拱桥坍塌爆破拆除[J]. *爆破*, 2005, 22(2): 61-63.
- [4] CAO Yue, PANG Duan-gen, YANG Chang-sen, et al. Demolition of a large stone arch bridge by collapse blasting[J]. *Blasting*, 2005, 22(2): 61-63. (in Chinese)
- [5] 林梅玲. 公路石拱桥爆破拆除施工技术[J]. *交通科技与经济*, 2006, 34(2): 86-199.
- [5] LIN Mei-ling. Construction technology of dismantlement and blasting for a stone arch bridge [J]. *Technology Economy in Areas of Communication (TEAC)*, 2006, 34(2): 86-199. (in Chinese)
- [6] 吴远林, 詹振铨, 池恩安. 兴钛石拱桥爆破拆除的数值模拟研究[J]. *工程爆破*, 2013, 19(3): 43-44.
- [6] WU Yun-lin, ZHAN Zhen-qiang, CHI En-an. Numerical simulation research of blasting demolition of xingtai stone arch bridge[J]. *Engineering Blasting*, 2013, 19(3): 43-44. (in Chinese)
- [7] 孙永, 李中辉, 李健飞, 等. 复杂环境下分离立交桥控制爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(3): 95-98.
- [7] SUN Yong, LI Zhong-hui, LI Jian-fei, et al. Demolition blasting of large shaft ridge separation overpass in complex environment[J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 95-98. (in Chinese)
- [8] 茆恒阳, 郑德明, 廖和平, 等. 复杂环境下 350 m 钢筋砼桥梁爆破拆除[J]. *爆破*, 2019, 36(4): 108-111.
- [8] MAO Heng-yang, ZHENG De-ming, LIAO He-ping, et al. Blasting demolition of a 350 m reinforced concrete simply supported beam bridge in complex environment[J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 108-111. (in Chinese)
- [9] 蒋跃飞, 何贤辉, 刘桐, 等. 双侧紧贴运营新桥的大型桥梁爆破拆除技术[J]. *工程爆破*, 2019, 25(3): 32-34.
- [9] JIANG Yue-fei, HE Xian-hui, LIU Tong, et al. The blasting demolition technology of large-scale bridge in close proximity to bilateral new operational bridges [J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(3): 32-34. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T17742—2008 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- [10] State Administration of Quality Supervision Inspection and. GB/T17742—2008 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [11] 汪旭光, 于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [12] 王璞, 周卫华, 欧阳光, 等. 紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(1): 108-112.
- [12] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. Explosive demolition of large reinforced concrete arch bridge adjacent to existing bridges [J]. *Blasting*, 2020, 37(1): 108-112. (in Chinese)
- [13] 齐鹏, 尚修瑞, 刘川, 等. 复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究[J]. *爆破*, 2021, 38(3): 104-111.
- [13] QI Peng, SHANG Xiu-rui, LIU Chuan, et al. Optimization of blasting schemes for demolition of cross-road bridges in complicated conditions [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 104-111. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方