

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.025

露天煤矿超高台阶抛掷爆破振动效应评价

杨茂森^{1,2}, 陈永祥³, 郝润华⁴

(1. 内蒙古自治区公安厅, 呼和浩特 010051; 2. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083;
3. 国家能源集团准能集团有限责任公司, 鄂尔多斯 准格尔旗 010300; 4. 鄂尔多斯市公安局, 鄂尔多斯 017010)

摘要: 大型露天煤矿高台阶深孔剥离爆破, 具有爆破规模大、振动主频低、持续作用时间长等特点, 分析评估爆破振动对临近建(构)筑物的影响对于保证施工安全十分重要。结合黑岱沟露天煤矿超高台阶爆破工程实际, 采用现场爆破振动监测与回归分析的方法研究了露天矿爆破作用下临近建(构)筑物的爆破振动效应, 并结合爆破安全规程对临近建(构)筑物的安全性进行评价。研究表明: 现场爆破作用下, 各方向振动速度衰减大小表现为 X 方向 $> Z$ 方向 $> Y$ 方向。其中, X 方向爆破振动速度最大, 对爆破振动效应起控制作用; 本次爆破条件下, 各监测点爆破振动频率较低, 主要集中在 $3 \sim 6$ Hz 范围内, 各监测点爆破振动持续时间较长, 分布在 $7 \sim 9$ s 范围内; 在不考虑后续爆破对结构造成累积破坏的前提下, 各监测对象在本次爆破作用下均处于安全状态。

关键词: 露天矿; 爆破振动效应; 振动速度; 频率; 持续时间

中图分类号: U25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0156-07

Analysis and Evaluation of Vibration Effects of Adjacent Building Structures under Open-pit Mine Blasting

YANG Mao-sen^{1,2}, CHEN Yong-xiang³, HAO Run-hua⁴

(1. Public Security Department of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China;
2. School of Emergency Management and Safety Engineering, CUMTB, Beijing 100083, China;
3. National Energy Group Zhunneng Group Co., Ltd., Erdos 010300, China;
4. Erdos Public Security Bureau, Erdos 017010, China)

Abstract: High bench and deep hole stripping blasting in large open-pit coal mine possesses the features of large scale of blasting, low vibration in dominant frequency and long duration of action. It is very important to analyze and evaluate the influence of open-pit mine blasting on adjacent building structures to ensure construction safety. Based on the engineering background of Heidaigou open-pit coal mine, the blasting vibration effect of adjacent building structures under the open-pit mine blasting is studied by blasting vibration monitoring and regression analysis, and the safety of adjacent building structures is evaluated combined with the blasting safety regulations. The results show that under the open-pit mining blasting, the attenuation rates of blasting vibration velocity in different directions from large to small are x direction $> Z$ direction $> y$ direction. Among them, the blasting vibration velocity in X direction is the largest, which controls the blasting vibration effect; Under the blasting conditions, the blasting vibration frequency of each monitoring point is low, mainly within the range of $3 \sim 6$ Hz, and the blasting vibration duration of each monitoring point is long, within the range of $7 \sim 9$ s; Without considering the cumulative damage of the structures caused by subsequent blasting, all monitoring objects are in a safe state under this blasting condition.

Key words: open-pit mine; blasting vibration effect; vibration velocity; frequency; duration

我国是能源消耗大国,矿石资源丰富,但开发储量有限。露天矿开采具有生产规模大、开采效率高、成本低等优点,在我国的矿石资源开采中占据主要地位。目前露天矿开采主要采用爆破技术,相关研究表明:由于露天矿开采爆破药量一般较大,引发的爆破振动效应较为显著,容易对周围建(构)筑物的稳定性造成不利影响^[1-7]。因此,开展露天矿爆破作用下临近建(构)筑物的爆破振动效应分析与评估研究,对于保证施工安全十分重要^[8-10]。

近年来,关于露天矿爆破振动效应分析与评估,相关学者开展了大量研究。孙豁然等结合现场爆破振动监测数据,通过分析露天矿爆破地震强度、地震频谱以及振动持续时间的特点,对露天矿爆破临近建(构)筑物的安全性进行了评估^[11]。郝全明等通过研究露天矿边帮最大振动速度、爆心距以及最大单段药量的关系,提出了露天矿近帮爆破振动控制最大单段药量^[12]。王莉莉通过爆破振动监测结果发现,采用萨道夫斯基公式可较准确地对露天矿爆破振动速度衰减规律进行预测^[13]。付晓强等针对露天矿爆破开采实际工程,在对现场爆破振动信号分析的基础上,研究分析了不同地形条件下的爆破振动信号传播规律和衰减特性^[14]。费志超采用应用层次分析法等对露天矿爆破震动危害效应进行分

析比较,得到了孔网参数、爆破药量等因素对爆破振动的影响大小,提出了爆破振动安全控制的建议^[15]。综上所述,以往研究大多针对一般露天矿爆破作用下振动信号的传播以及衰减特征进行研究分析,对于台阶高达50 m的超深孔抛掷大爆破产生的爆破振动特点及其振动效应的研究还较少涉及。

由于高台阶抛掷爆破炮孔超深、单次规模大、持续时间长,爆破振动对周边环境造成的影响与一般爆破相比会更大。为此,结合我国特大露天煤矿国家能源集团准能集团黑岱沟露天煤矿超高台阶抛掷大爆破生产实际,通过现场爆破振动监测与分析,对露天矿爆破作用下临近建(构)筑物爆破振动效应进行研究,并结合相关规范从爆破振动强度、振动频率两方面对建(构)筑物爆破振动安全性进行评估,具有重要的应用与参考价值。

1 工程背景

准能黑岱沟露天矿位于内蒙古准格尔煤田南部,煤层上覆盖岩层是沉积岩,主要岩石品种有:细(粉)砂岩、中砂岩、粗砂岩、砂页岩、泥(页)岩和高岭土,具体岩性见表1,基本呈缓倾斜层状分布。抛掷爆破区基本上不赋存细(粉)砂岩等较硬岩石,一般不存在抛掷爆破存在大块、根底等爆破质量问题。

表1 黑岱沟露天煤矿岩石种类

Table 1 Rock types of Heidaigou open-pit mine

岩石名称	岩性描述	硬度系数	可爆性
中等			
细(粉)砂岩	灰白(黄)色,致密、坚硬	4~7	位于台阶顶部时,易产生大块 位于台阶底部时,易产生根底
中等			
中砂岩	灰黄(褐)色,泥质胶结	4~6	位于台阶上部时,易产生大块 位于台阶下部时,易出现根底
粗砂岩	灰白(黑),泥质胶结	4~5	易爆破
砂页岩	褐色、致密、块状	3~4	易爆破
泥页岩	灰褐色、致密、块状	2~4	易爆破
高岭土	灰褐(白)色、松散状	1.5~2	不爆破,采掘设备能挖动

采用高台阶抛掷爆破技术进行剥离,一般台阶高度在50 m左右。结合黑岱沟露天矿一次典型的抛掷大爆破(爆破编号:18北2次抛掷爆破)工程实际及其周边环境特点展开讨论。

18北2次抛掷爆区位于1095~1130水平北

部,爆区长度为500 m,宽度为85 m,台阶高度为42~46 m,爆区位置见图1所示。爆破采用数码雷管孔内延时起爆方式,炮孔深度为46~51 m,总开挖量为1 721 411 m³。

18北2次爆破时,临近爆区周边存在新建涵洞、破碎站以及信号塔等构筑物,为评价爆破振动是否对这些设施造成破坏影响,爆破过程中在上述构筑物地面分别布置了6个测点进行了爆破振动监测,周边环境及测点布置见图2。

收稿日期:2021-09-29

作者简介:杨茂森(1975-),男,山西应县人,硕士在读,从事爆炸物品安全管理工作,(E-mail) yqjxz777168@163.com。

通讯作者:郝润华(1974-),男,工程师,从事爆炸物品安全管理工作,(E-mail) 3308942024@qq.com。

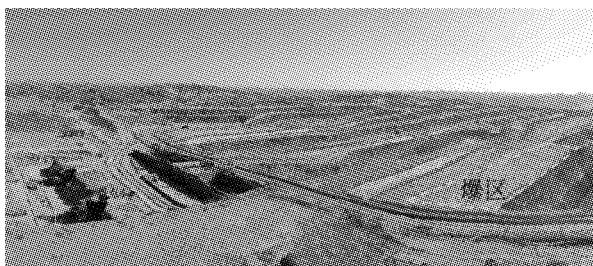


图 1 爆区位置实际拍摄照片

Fig. 1 Site photos of blasting area

本次爆破总炮孔数量为 685 个,其中 493 个抛掷爆破孔、192 个预裂爆破孔,总装药量为 1304 t,最大单段药量为 8.99 t。抛掷爆破孔分为 12 排布置,炮孔间距为 12 m,排距为 6~7 m。预裂孔包括 161 个后排预裂孔以及 31 个北端预裂孔,先于主抛渣孔起爆,炮孔间距为 3 m。爆破炮孔布置如图 3 所示,

主要爆破参数见表 2。

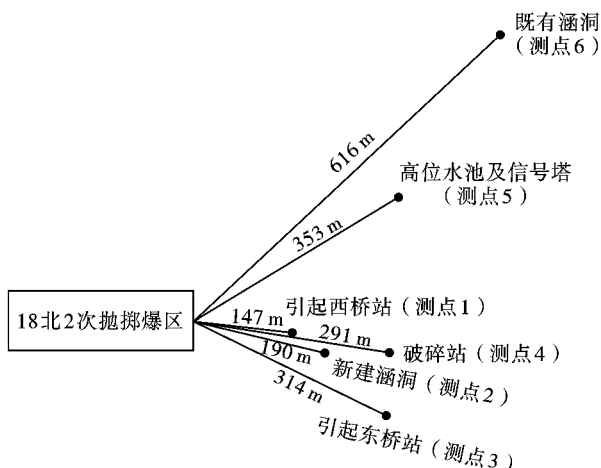


图 2 爆区周边环境及测点布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Layout of surrounding environment and measuring points of blasting area(unit:m)

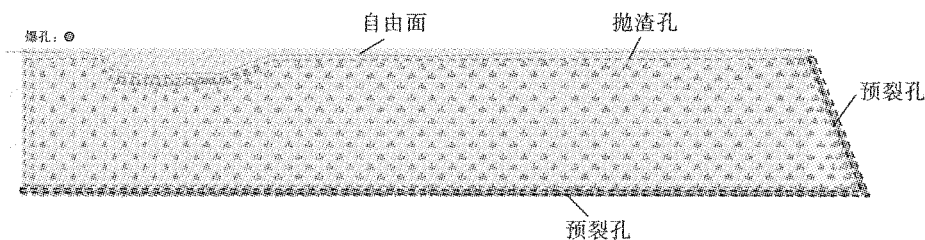


图 3 黑岱沟露天矿 18 北 2 次爆区炮孔布置平面示意图

Fig. 3 Blastholes layout of No. 18 North 2nd blasting area in Heidaigou open pit mine

表 2 黑岱沟露天矿 18 北 2 次爆区主要爆破参数

Table 2 Blasting parameters of No. 18 North 2nd blasting area in Heidaigou open-pit mine

炮孔类型	炮孔数量/个	炮孔间距/m	炸药单耗/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	雷管数量/发	延期时间/ms
抛渣孔	493	12	0.758	986	1000~5185
预裂孔	192	3	1.600	18	910~990
合计	685			1004	

2 爆破振动监测与分析

2.1 现场爆破振动监测

为分析此次爆破振动对爆区临近建(构)筑物的影响,爆破过程中进行了现场爆破振动监测。通过现场踏勘,将破碎站以及新建涵洞等 6 个建(构)筑物作为监测对象,在每个监测对象附近布置爆破振动监测点,如图 2。爆破振动测试仪采用 TC-4850 爆破测振仪,对每个测点 X 方向(指向振动来波方向)、Y 方向(水平垂直来波方向)以及 Z 方向(垂直地表向上)的爆破振动数据进行监测记录。为保证监测数据的准确、可靠,爆破振动测试前对所有仪器进行系统标定。现场爆破振动监测数据结果

见表 3,图 4 为测点 3 处的典型振动波形图。

2.2 爆破振动特征分析

基于 3.1 节现场爆破振动监测结果,以下从爆破振动强度、振动频率以及持续时间三个方面分析露天矿爆破开采作用下临近建(构)筑物爆破振动效应。

(1) 爆破振动强度衰减特征

目前国内外学者普遍采用萨道夫斯基公式对爆破振动速度衰减预测。萨道夫斯基公式通过将测点振速、爆心距与最大单段药量建立关系,对测点爆破振动速度衰减规律进行回归分析,具体表达式为

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: K 为场地系数; α 为衰减系数; Q 为最大单段药量,kg; R 为爆心距,m。采用式(3)对表2各监测点不同方向爆破振动速度进行回归分析,得到

本次爆破各方向振动速度衰减公式,见表4。由表4可以看出, X 方向爆破振动速度衰减最快,其次为 Z 方向, Y 方向爆破振动速度衰减最慢。

表 3 现场爆破振动监测数据
Table 3 Field blasting vibration monitoring data

测点	距离/m	方向	最大振速 $V_{\max}/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	振动主频 f/Hz	振动持时/s
1	147	X	7.83	6.90	7.45
		Y	3.90	5.05	
		Z	6.04	9.13	
2	190	X	5.75	7.52	7.11
		Y	2.03	4.95	
		Z	1.54	10.00	
3	314	X	3.50	10.99	6.97
		Y	1.53	9.17	
		Z	3.62	8.33	
4	291	X	4.24	4.57	7.60
		Y	2.37	6.02	
		Z	2.78	6.06	
5	353	X	3.68	3.38	8.39
		Y	1.23	3.05	
		Z	1.80	3.97	
6	616	X	0.56	10.53	7.58
		Y	0.31	5.85	
		Z	0.46	4.50	

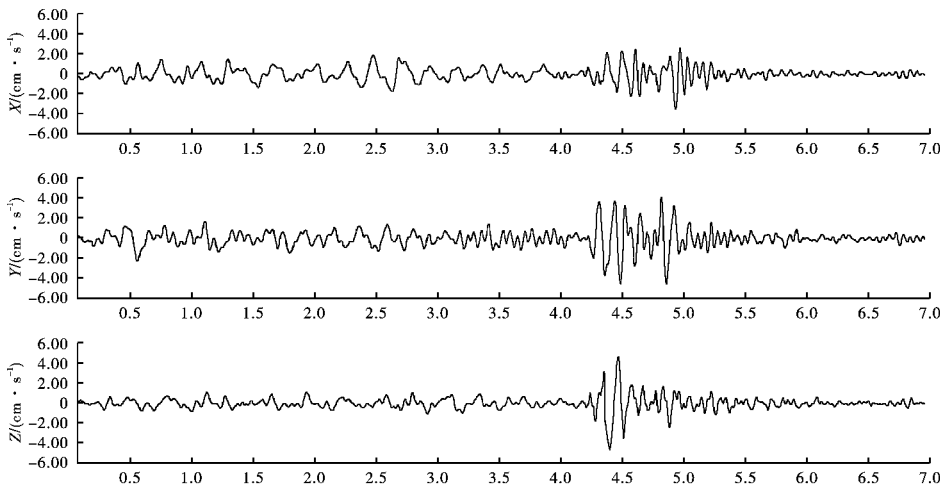


图 4 爆破振动测试典型波形图
Fig. 4 Typical waveform of blasting vibration monitoring

(2) 爆破振动主频特征

爆破振动主频率对建(构)筑物爆破振动效应起着重要作用,当建(构)筑物自振频率与地表振动频率接近时,容易产生共振现象,破坏力极大。分析

表3监测数据发现,各监测点 X 、 Y 、 Z 三个方向爆破振动主频均在3~11 Hz范围内,主要集中在3~6 Hz左右,爆破振动主频最大值出现在测点3位置 X 方向上,为10.99 Hz。总体上看,本次所测爆破振

动频率范围较窄,振动主频较低,基本无高频成分。

(3) 爆破振动持续时间

爆破振动作用时间通常指自爆破振动记录中开始有幅值的零点开始至爆破振动记录最后无幅值的零点止的时间。对微差爆破而言,震动持续时间还应考虑微差间隔时间与延期段数的影响。根据表 3 监测数据以及图 3 振动波形可以看出,各监测点不同方向爆破振动速度最大值出现时间并不相同,考虑是由于露天矿采取孔内微差起爆的方式,各方向爆破振动速度最大值由不同起爆段别引起。由于爆区规律较大,炮孔数量较多,雷管起爆间隔时间较长,因此,本次爆破各监测点振动持续时间较长,分布在 7~9 s 范围内。

表 4 萨道夫斯基公式回归分析结果

Table 4 Regression analysis results by Sadovsky formula

方向	拟合公式 $V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha$	相关系数 r^2
X	$V = 409.53 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.85}$	0.89
Y	$V = 112.76 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.65}$	0.90
Z	$V = 305.57 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.82}$	0.95

2.3 爆破振动效应评价

在建(构)筑物爆破振动安全评估方面,早期大多数学者采用单一强度参数峰值作为评价爆破振动作用下建筑物安全性的唯一指标。我国旧版规范《爆破安全规程》(GB6722—86),瑞典、美国矿务局等早期使用的安全控制标准,也都是采用质点振动加速度或速度作为独立阈值判据。随着人们对爆破震害的深入研究发现,采用单一强度参数进行爆破振动安全评估具有很大局限性,爆破振动频率也是在建(构)筑物地震破坏中起主导作用的一个重要因素^[16-19]。因此,本文从爆破振动强度、振动频率两个方面综合考虑,对监测对象爆破振动安全性进行评估。

我国爆破安全规程规定(GB6722—2014)^[20],当矿山巷道爆破振动主频小于 10 Hz 时,质点安全振动速度为 15~18 cm/s。根据现场爆破振动监测结果,各监测点爆破振动速度最大值基本均发生在 X 方向,表明 X 方向爆破振动速度对本次爆破振动效应起控制作用,可将 X 方向爆破振速作为评价本次爆破振动强度的物理量。根据以上分析,现场各

监测点爆破振动主频基本小于 10 Hz, X 方向爆破振动速度最大值为 7.83 cm/s,在上述安全振动速度范围内。根据陈世海等人的研究^[21],对于不考虑累积爆破破坏的结构,振动频率和幅值相同时,不同的爆破振动持续时间引起的结构应力响应最大值相同。由于本文不考虑后续爆破对结构的影响,尽管各监测点爆破振动持续时间较长,仍可得到各监测对象在本次爆破作用下均处于安全状态的结论。

3 结论

结合黑岱沟露天矿爆破开采实际工程背景,通过分析现场爆破振动监测数据,在结合相关规范的基础上,对爆区临近建(构)筑物爆破振动效应进行分析与评估,主要结论如下:

(1) 结合黑岱沟露天矿生产实际,分析并获得了高台阶深孔大爆破的振动强度预测公式,揭示了其爆破振动的主振频率及作用时间等参量特征,此类爆破的爆破振动速度回归公式场地系数与衰减系数均较大。

(2) 现场爆破作用下,各方向爆破振动速度衰减大小表现为 X 方向 > Z 方向 > Y 方向。其中, X 方向爆破振动速度最大,对爆破振动效应起控制作用。

(3) 本次爆破条件下,各监测点爆破振动频率范围较窄且较低,主要集中在 3~6 Hz 范围内。由于爆区规模较大,炮孔起爆延期时间较长,各监测点爆破振动持续时间均较长,分布在 7~9 s 范围内。

(4) 在不考虑后续爆破对结构造成累积破坏的前提下,各监测对象在本次爆破作用下均处于安全状态。

参考文献 (References)

- [1] 姚 东. 露天开采爆破振动对邻近台阶边坡稳定性影响[D]. 衡阳:南华大学,2016.
- [1] YAO Dong. Effect of blasting vibration on the stability of adjacent slope in open pit mining[D]. Hengyang: University of South China, 2016. (in Chinese)
- [2] 张 鹏, 刘 宇, 周永利, 等. 露天煤矿台阶边坡爆破振速的高程放大效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 221-226.
- [2] ZHANG Peng, LIU Yu, ZHOU Yong-li, et al. Study on elevation amplification effect of blasting velocity of bench slope in surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 221-226. (in Chinese)
- [3] 马诺诺. 露天矿爆破振动强度物理量分析及其时频特征研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2009.
- [3] MA Luo-luo. Analysis of intensity of physical quantities of

- open-pit blasting vibration and research of time-frequency characteristics of it [D]. Buxin: Liaoning Technical University, 2009. (in Chinese)
- [4] 王涛. 黄麦岭露天矿台阶爆破参数优化及爆破振动效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [4] WANG Tao. The bench blasting parameters optimization and the study of blasting vibration effect of Huamailing open-pit [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 冯春, 李世海, 郑炳旭, 等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 110-120.
- [5] FENG Chun, LI Shi-hai, ZHENG Bing-xu, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in and open-pit mine based on CDEM [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2): 110-120. (in Chinese)
- [6] 周文海, 梁瑞, 余建平, 等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 1-8.
- [6] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, YU Jian-ping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 1-8. (in Chinese)
- [7] 王韶辉. 露天煤矿煤岩爆破块度分布规律及爆破参数优化研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [7] WANG Shao-hui. Study on blasting fragmentation distribution law and blasting parameters optimization in open-pit coal mine [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Propagation and prediction of blasting vibration on slope in an open pit during underground mining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 409-421.
- [9] 周子涵, 陈忠辉, 王建明, 等. 爆破荷载作用下露天矿边坡稳定性的突变研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 849-857, 868.
- [9] ZHOU Zi-han, CHEN Zong-hui, WANG Jian-ming, et al. Catastrophe analysis of open-pit slope stability under blasting load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 849-857, 868. (in Chinese)
- [10] 王亮, 闻磊, 高海松. 露采中深孔爆破震动监测及控制技术研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(3): 76-78.
- [10] WANG Liang, WEN Lei, GAO Hai-song. Study on vibration monitoring and control technology of medium and deep hole blasting in open pit mining [J]. Mining Technology, 2017, 17(3): 76-78. (in Chinese)
- [11] 孙豁然, 佟彦军, 李孝林, 等. 露天煤矿抛掷爆破振动效应的研究[J]. 爆破, 2008, 25(1): 69-73.
- [11] SUN Huo-ran, TONG Yan-jun, LI Xiao-lin, et al. Study on the vibration effect of sling blasting in an open coal mine [J]. Blasting, 2008, 25(1): 69-73. (in Chinese)
- [12] 郝全明, 徐自军. 内蒙古某露天矿爆破振动效应监测及分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2015(1): 88-89.
- [12] HAO Quan-ming, XU Zi-jun. Monitoring and analysis of blasting vibration effect in an open pit mine in Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2015(1): 88-89. (in Chinese)
- [13] 王莉莉. 某露天矿爆破振动效应监测分析[J]. 中国科技纵横, 2011(8): 143-143.
- [13] WANG Li-li. Monitoring and analysis of blasting vibration effect in an open pit mine [J]. China Science & Technology Panorama Magazin, 2011(8): 143-143. (in Chinese)
- [14] 付晓强. 露天矿山爆破振动信号分析与边坡稳定性数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [14] FU Xiao-qiang. The research of open-pit mine blasting vibration signal analysis and slope stability of numerical simulation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 费志超. 露天矿爆破震动效应分析与安全评价[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [15] FEI Zhi-chao. Safety evaluation and vibration analysis on production blasting in open pit mine [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 钟冬望, 何理, 操鹏, 等. 爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 703-709.
- [16] ZHONG Dong-wang, HE Li, CAO Peng, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5): 703-709. (in Chinese)
- [17] 何如. 下穿隧道爆破作用下建筑结构的动力响应特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [17] HE Ru. Dynamic response characteristics of buildings subjected to blasting excavation in under-crossing tunnels [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [18] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 爆破振动对建(构)筑物影响数值计算模型及安全判据的研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 22-29.
- [18] ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, HU Hai-ying, et al. Study on numerical model and safety criterion of the influence of blasting vibration on buildings and structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 22-29. (in Chinese)
- [19] 苏莹, 吴立, 彭亚雄, 等. 紧邻建(构)筑物水下爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 58-64.
- [19] SU Ying, WU Li, PENG Ya-xiong, et al. Research review on safety criterion of underwater blasting nearby con-

- structions[J]. Explosive Materials, 2016, 45(3): 58-64. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [20] National Standard Compilation Group of the people's Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 陈士海, 魏海霞, 钱七虎. 爆破震动持续时间对结构震动响应影响研究[C] // 现代爆破理论与技术—第十届全国煤炭爆破学术会议论文集, 2008.
- [21] CHEN Shi-hai, WEI Hai-xia, QIAN Qi-hu. The study on effect of structures vibration response by blast vibration duration[C] // Modern blasting theory and technology—Proceedings of the 10th National Coal Blasting Academic Conference, 2018. (in Chinese)

英文编辑: 柯 波

(上接第 119 页)

6 结论

以龙门桥渡槽爆破拆除工程为研究背景, 对保留槽墩并控制其损伤的特殊要求下, 跨间合理起爆时差的选择进行了研究, 主要研究工作和结论如下。

(1) 为分析渡槽槽墩的动态受力特征, 建立了逐跨起爆模式下单跨拱形上部结构定轴转动的动力学方程, 计算了失稳拱架的支座反力以及不平衡支座反力对槽墩产生的力矩, 建立了槽墩横截面边缘应力随时间变化的计算模型。

(2) 拱架爆破时, 自拱脚起爆直至槽墩截面边缘的应力达到新的峰值需要一定的时间, 所需时间约为单跨上部结构和槽墩自振周期之和的 $1/4$ 。

(3) 根据龙门桥渡槽的实际情况, 计算了控制保留槽墩损伤时应选取的合理跨间起爆时差, 为实际爆破方案的设计提供了依据, 并取得了预期的工程效果。

参考文献 (References)

- [1] 金宏忠, 高 巍, 来猛刚. 桥梁拆除工程分析探讨[J]. 中外公路, 2011(6): 213-216.
- [1] JIN Hong-zhong, GAO Wei, LAI Meng-gang. Analysis and discussion on bridge demolition engineering[J]. Sino Foreign Highway, 2011(6): 213-216. (in Chinese)
- [2] 高 波, 胡清和, 施园园. 浅谈桥梁拆除技术[J]. 工程与建设, 2017, 31(5): 683-685.
- [2] GAO Bo, HU Qing-he, SHI Yuan-yuan. On bridge demolition technology[J]. Engineering and Construction, 2017, 31(5): 683-685. (in Chinese)
- [3] 谢先启, 贾永胜, 姚颖康, 等. 复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11): 65-71, 77.
- [3] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Study on key technology of fine blasting demolition of urban super long Viaduct under complex environment[J]. China Engineering Science, 2014, 16(11): 65-71, 77. (in Chinese)
- [4] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] GB6722—2014 Blasting safety regulations[S]. Beijing: China Standards Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 谢先启, 韩传伟, 贾永胜, 等. 宜春大桥爆破拆除[J]. 爆破, 2012, 29(1): 62-64, 68.
- [5] XIE Xian-qi, HAN Chuan-wei, JIA Yong-sheng, et al. Blasting demolition of Yichun bridge[J]. Blasting, 2012, 29(1): 62-64, 68. (in Chinese)
- [6] 刘国军, 梁 锐, 杨元兵. 复杂环境下钢筋混凝土简支梁式桥爆破拆除[J]. 爆破, 2017(4): 115-119.
- [6] LIU Guo-jun, LIANG Rui, YANG Yuan-bing. Blasting demolition of reinforced concrete simply supported beam bridge in complex environment[J]. Blasting, 2017(4): 115-119. (in Chinese)
- [7] 周 雯, 刘 战, 张怀杰, 等. 城市桥梁爆破拆除数值模拟及分析[J]. 公路与汽运, 2020(3): 121-123.
- [7] ZHOU Wen, LIU Zhan, ZHANG Huai-jie, et al. Numerical simulation and analysis of blasting demolition of urban bridges[J]. Highway and Automobile Transportation, 2020(3): 121-123. (in Chinese)
- [8] 周 奎, 冯晓臣. 桥梁爆破拆除数值模拟[J]. 装备制造技术, 2017(1): 264-266.
- [8] ZHOU Kui, FENG Xiao-chen. Numerical simulation of bridge blasting demolition[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(1): 264-266. (in Chinese)
- [9] 李宗揆. 基于 LS-DYNA 车桥耦合振动数值分析的拱桥提高限速研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [9] LI Zong-kui. Research on increasing speed limit of arch bridge based on LS-DYNA vehicle bridge coupling vibration numerical analysis[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [10] 池恩安. 公路桥梁组合拆除爆破及数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [10] Chi En-an. Blasting and numerical simulation of combined demolition of highway and bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of technology, 2011. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方