

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.029

## 铜绿山矿井下爆破振动对矿区周边建筑扰动研究

熊国雄,肖泽宇,尹东升,郑旭

(大冶有色金属有限责任公司 铜绿山铜铁矿,黄石 435000)

**摘要:** 铜绿山矿目前已进入深部开采阶段,为评估地下爆破作业对周边居民建筑物的安全影响,采用理论分析与现场监测相结合的方法,对矿区井下爆破振动特性及其传播规律进行研究。在露天坑南侧铜山村布置爆破测振仪及配套速度传感器,对三次中深孔爆破过程中的振动进行监测,获取了振动主频、振动速度等爆破振动效应数据。通过与国家爆破振动安全允许标准对比,分析了爆破振动对周边建筑物的影响程度,并采用萨道夫斯基经验公式对爆破振动的衰减特性及影响范围进行拟合与预测。结果表明:(1)铜绿山矿三次中深孔爆破的振动主频范围为9.0~50.0 Hz,各监测点爆破振动速度矢量合成最大值分别为0.036 cm/s、0.048 cm/s、0.043 cm/s,均低于建筑物爆破振动安全允许限值;(2)通过对三次中深孔爆破振动参数的回归分析,萨道夫斯基经验公式中与爆破条件及岩性有关的系数 $K$ 和 $\alpha$ 分别为93.68和1.76,铜绿山矿爆区岩石特性属于中硬-坚硬岩石,爆破效应可有效控制在安全范围内,能够确保深部采矿对周边环境及建筑安全影响较小。

**关键词:** 深部开采;爆破振动;中深孔;分段空场嗣后充填法;微差爆破

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0278-07

## Assessment of Blasting Vibration Effects from Tonglushan Mine Operations on Surrounding Buildings

XIONG Guo-xiong, XIAO Ze-yu, YIN Dong-sheng, ZHENG Xu

(Tonglushan Cu-Fe Mine, Daye Nonferrous Metals Co., Ltd., Huangshi 435000, China)

**Abstract:** Tonglushan Mine has progressed into deep-level mining operations. This study employs an integrated methodology that combines theoretical models with in situ vibration monitoring to characterize blast-induced vibrations in surrounding buildings in the mining region. Vibration monitoring systems with blast seismographs and velocity sensors were deployed in Tongshan Village, adjacent to the open pit's southern perimeter, capturing three sets of medium-depth blasting parameters, including dominant frequency, vibration velocity, and other vibration parameters. The acquired data were benchmarked against national safety thresholds to assess the potential for structural impact. Subsequent application of the Sadoskij empirical formula enabled quantitative modeling of vibration attenuation characteristics and the range of vibration influence. The monitoring results demonstrate: (1) The three medium-deep-hole blasts exhibited dominant frequencies ranging from 9.0 to 50.0 Hz, with peak resultant vibration velocities of 0.036 cm/s, 0.048 cm/s, and 0.043 cm/s at respective monitoring stations, all values remaining well within the prescribed safety limits. (2) Parameter regression yields Sadoskij coefficients  $K=93.68$  and  $\alpha=1.76$ , reflecting site-specific blasting conditions and lithology consistent with medium-hard to hard rock classification. These findings confirm that current blasting protocols maintain effective vibration control, safeguarding both environmental stability and

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-01

网络首发日期 (Published online): 2025-11-19

作者简介:熊国雄(1979-),男,湖北黄梅人,本科,采矿高级工程师,主要从事采矿技术方面的研究,(E-mail)670118709@qq.com。

**About the author:** XIONG Guo-xiong (1979-), male, born in Huangmei city, Hubei province, bachelor degree, senior mining engineer, mainly engaged in research on mining technology, (E-mail)670118709@qq.com.

structural integrity of adjacent buildings during deep mining operations.

**Key words:** deep mining; blasting vibration; medium-deep hole; sublevel open stoping with delayed backfilling; millisecond delay blasting

随着浅层矿物资源的逐渐枯竭,矿体开采深度不断增加,深部矿产资源的开发已经逐渐成为了我国金属矿山未来发展的主要趋势。而我国大多数金属矿山深部开采绝大多数均采用钻爆法,采用该方法形成的地下矿山爆破振动可能造成多种危害<sup>[1]</sup>,主要包括以下几个方面:爆破造成的振动可能会对矿井内的设备、支护结构和其他基础设施造成损坏<sup>[2,3]</sup>,影响矿山的安全运营;振动可能会影响矿山周边的地质结构,导致岩土松动和塌方,进而对周围环境造成威胁<sup>[4-6]</sup>;矿山靠近居民区,爆破振动可能会引起住宅墙体开裂、门窗破损等问题,影响居民的生活质量与安全<sup>[7]</sup>;频繁的爆破会对周围的生态环境造成干扰,影响动植物的生存环境<sup>[8]</sup>;爆破振动可能导致矿山内部的不稳定,增加矿井事故的风险<sup>[9,10]</sup>,影响矿工的安全。

贾皓琦等人通过小波包变换、HHT算法、STFT算法开展爆破振动波衰减规律研究,分析了某金属地下矿山断层对爆破振动波传播的影响<sup>[11]</sup>,确定了由爆破振动产生能量的发展趋势。曾令峰为了明确某地下矿山采场爆破振动对运输大巷和地表民房等的影响程度<sup>[12]</sup>,应用理论分析与现场工业试验的方式获取实测数据资料,确定了不同起爆方式下爆源与保护建筑物最小安全距离。厉建华等人以爆破振动对地面建筑物的影响为判据<sup>[13]</sup>,采用被保护对象所在地质点峰值振动速度和主振频率作为分析对象,分析和评价地下矿山开采爆破振动对地表房屋的影响。杨凯等人基于现场监测数据<sup>[14]</sup>,采用质点峰值振动速度评价方法得到地下采场爆破振动的萨道夫斯基公式,对不同药量、不同距离的爆破振动速度进行预测,对矿山采场爆破振动提出药量控制标准。

铜绿山矿资源开发始于上世纪中期,上世纪末已经由露天开采转入地下开采,目前已进入深部开采阶段,而目前矿山开采所产生的爆破振动是否会对矿区周边环境及居民建筑造成影响没有理论和数据的支撑。因此,亟需结合矿山实际开采情况与理论分析对地下矿山爆破振动进行监测分析,以论证其对矿山周边环境及建筑的影响。

## 1 工程概况

### 1.1 矿床条件

铜绿山铜铁矿床为大型矽卡岩矿床,南北长

2100 m,东西宽600 m。矿床由13个规模大小不等的矿体组成,以I、III、IV号矿体为主,II、V、VII、XI、XI1、XII号矿体为次,主要呈透镜状或似层状赋存于石英二长闪长玢岩与大理岩的接触带上。矿体长一般为200~520 m,延深较大,一般为-105~-650 m,局部可达-1000 m以下。矿体顶、底板围岩主要有高岭石化石英二长闪长玢岩、斜长石岩化石英二长闪长玢岩、大理岩、白云质大理岩、石榴石透辉石矽卡岩。

### 1.2 凿岩爆破方式

分段空场嗣后充填采矿法凿岩设备采用山特威特DL331凿岩台车,切割槽区域采用凿岩台车打垂直上向平行孔,分段凿岩巷道内打上向扇形平行炮孔,钻孔直径 $\phi 76$  mm,切割槽孔排距1.0 m,正常孔排距为1.5~1.8 m,孔底距为1.2~1.5 m,边孔角度 $15^\circ$ ,装药系数0.8,中深孔炮孔布置如图1所示。采用金能JNJR-100型装药台车装药,数码电子雷管起爆,单批次起爆排数为2~4排,排间微差起爆,微差间隔时间250 ms。单次起爆炸药量600~1200 kg。

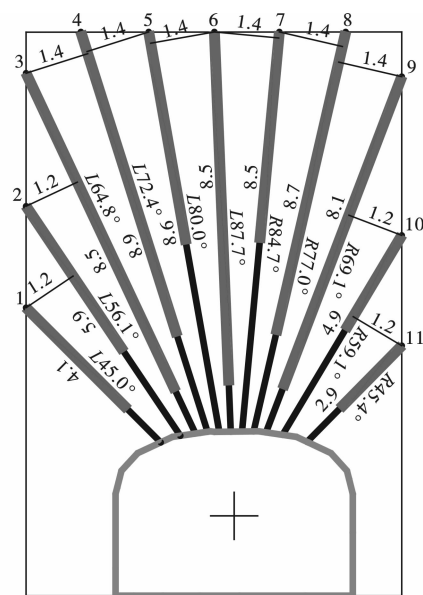


图1 中深孔炮孔布置图(单位:m)

Fig. 1 Layout of medium-deep holes(unit:m)

## 2 爆破振动监测与分析

### 2.1 爆破振动监测方案

#### (1) 监测仪器

监测仪器采用成都交博科技有限公司生产的

L20(速度)型爆破测振仪及配套的速度传感器,可实现多通道数据采集、存储和分析。L20 型爆破测振仪是一款专为工程爆破设计的便携式振动监测仪,具有轻便灵巧、抗振、抗电磁干扰、低噪声、高可靠性等特性。爆破振动数据处理系统与监测流程如图 2 与图 3 所示。

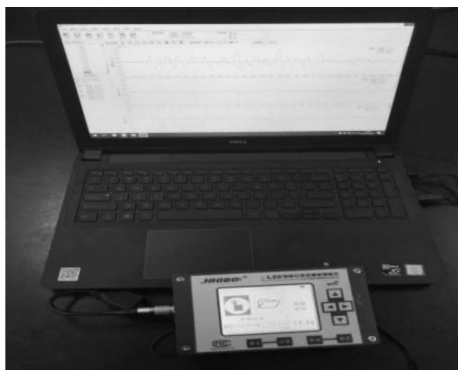


图 2 L20 爆破振动记录分析系统

Fig. 2 L20 blasting vibration recording and analysis system

### (2) 监测方案

为达到铜绿山铜铁矿爆破振动监测目的,准确

监测地下爆破振动对露天坑南侧铜山村民用建筑的振动影响,根据以往类似工程经验和工程现场周围环境,同时为了准确分析爆破振动的传播衰减特性,爆破振动效应监测点设置 10 个(点位布置如图 4 所示),均布置在露天坑南侧民宅旁,测点应设置在牢固的基岩或基础上,监测传感器用速凝石膏耦合粘结基础,为了确保监测数据可靠,每次爆破振动监测测点位置不变。测点坐标如表 1 所示。



图 3 爆破振动监测流程图

Fig. 3 Flow chart of blasting vibration monitoring

### (3) 爆破振动参考标准

铜绿山铜铁矿为了监测地下爆破产生的爆破振动对周边居民建筑物的影响程度和范围,确保后期生产过程中爆破振动对周围居民建筑物的影响在可控范围内,根据一般民用建筑物、爆破振动安全允许标准结合《爆破安全规程》<sup>[15]</sup>对现场实际的爆破振动安全允许标准,参见表 2。

表 1 测点位置详情

Table 1 Location details of monitoring points

| 测点编号<br>Monitoring points | 测点位置描述<br>Description of location                | 坐标(X)<br>Coordinate(X) | 坐标(Y)<br>Coordinate(Y) | 坐标(Z)<br>Coordinate(Z) |
|---------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1#                        | 巷道拐角处<br>The corner of the alleyway              | 29 836.744             | 89 876.810             | +30.55                 |
| 2#                        | 民房拐角处<br>The corner of a residential house       | 29 807.996             | 89880.701              | +30.112                |
| 3#                        | 民房路灯下<br>Under the street lamp                   | 29 760.703             | 89 877.786             | +29.713                |
| 4#                        | 损坏围墙边<br>Damaged fence edge                      | 29 715.803             | 89 883.000             | +29.688                |
| 5#                        | 墙角消防水管处<br>Fire water pipe                       | 29 682.296             | 89 883.892             | +28.951                |
| 6#                        | 民房台阶处<br>The steps of the residential houses     | 29 650.329             | 89 876.755             | +28.177                |
| 7#                        | 下水道台阶旁<br>Beside the sewer steps                 | 29 623.554             | 89 867.874             | +27.994                |
| 8#                        | 墙角开裂处<br>Crack at the wall                       | 29 612.896             | 89 862.911             | +28.288                |
| 9#                        | 民房窗户下<br>Under the window of a residential house | 29 575.524             | 89 829.944             | +28.859                |
| 10#                       | 路边台阶处<br>The roadside steps                      | 29 429.439             | 89 823.298             | +31.174                |

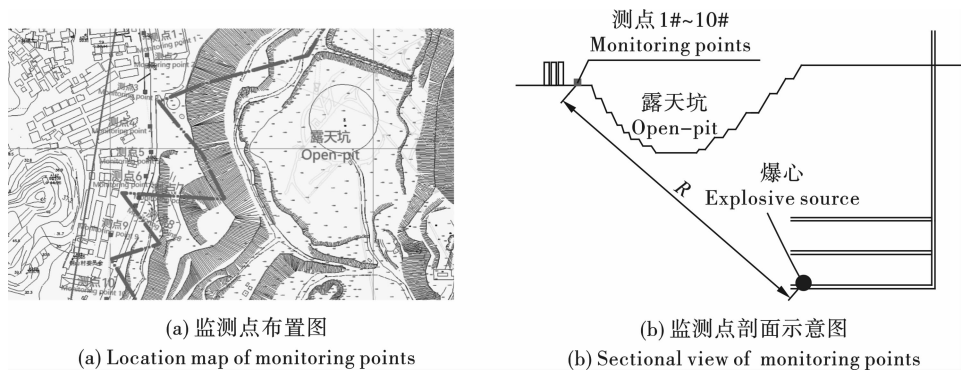


图 4 爆破振动监测点位图

Fig. 4 Location map of blasting vibration monitoring points

表 2 现场爆破振动安全允许标准  
Table 2 Allowable safety standard for blasting vibration

| 保护对象类别<br>Category of protected objects | 安全允许振速<br>Safe allowable vibration velocity/(cm · s <sup>-1</sup> ) |                   |           |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
|                                         | ≤ 10 Hz                                                             | 10 Hz < f ≤ 50 Hz | > 50 Hz   |
| 一般民用建筑物<br>Common civil buildings       | 1.5 ~ 2.0                                                           | 2.0 ~ 2.5         | 2.5 ~ 3.0 |

监测仪器的安装操作、振动影响的评价标准执行《机械振动与冲击固定建筑结构的振动振动测量及对结构影响评价的指南》<sup>[16]</sup>。

### 2.2 爆破振动监测结果与分析

根据爆破振动监测方案设计,对铜绿山矿 3 次中深孔爆破进行监测,具体数据见表 3。

对铜绿山矿周边居民区 10 个监测点位的 3 次监测数据进行分析,所有爆破监测数据中,1#、2#、3#、4#、5#、6#、7#、8#、9#、10#测点监测到爆破振动的主频范围均在 9.0 ~ 50.0 Hz,监测到的爆破振动速度矢量合成最大值分别为 0.036 cm/s、0.048 cm/s、0.043 cm/s。

参照国家标准:爆破振动主频  $f \leq 10$  Hz 时,爆破振动安全允许标准为 1.5 ~ 2.0 cm/s,爆破振动主频  $10 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$  时,爆破振动安全允许标准为 2.0 ~ 2.5 cm/s。铜绿山矿地下中深孔爆破产生的质点振动速度均低于安全允许下限值 1.5 cm/s,即对于周边的爆破振动影响均在安全范围之内。

### 2.3 爆破振动影响范围估算

对爆破振动影响范围的预测估算是预防爆破振动事故的重要措施,我国爆破安全规程采用保护对象所在地质点峰值振动速度作为爆破振动判据的主要物理量指标,其计算大多使用工程爆破监测数据所推导的萨道夫斯基经验公式,见式(1)。

$$v = K \left( \frac{Q}{R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: $v$  为介质质点的振动速度,cm/s; $R$  为爆心距,即观测(监测)点到爆源的距离,m; $K$  和  $\alpha$  是与爆破条件、岩石特性等有关的系数; $Q$  为炸药量,齐发爆破时取总装药量,延迟爆破为最大段装药量,kg。

对表 3 中的数据进行一元线性回归分析,将式(1)两端取对数,得

$$\ln V = \ln K + \alpha \ln \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) \quad (2)$$

此处令因变量  $Y = \ln V$ ,令自变量  $X = \ln \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$ , $\ln K$  和  $\alpha$  均为常数,对爆破振动监测的数据采用最小二乘法进行线性回归拟合分析,结果如图 5 所示,即爆破振动萨道夫斯基公式中与爆破条件、岩石特性等有关的系数  $K$  和  $\alpha$  分别为 93.68 和 1.76。

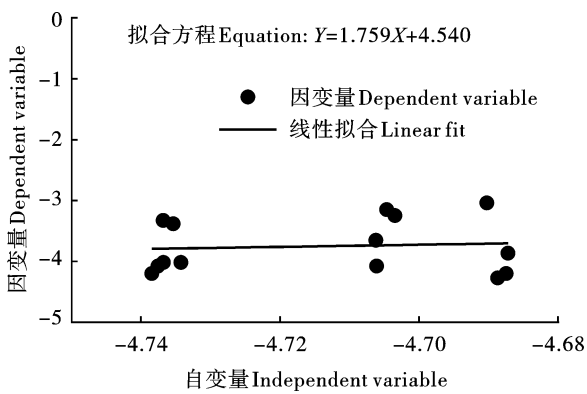


图 5 爆破振动速度拟合回归

Fig. 5 Fitting regression of blasting vibration velocity

表 3 地下中深孔爆破振动数据  
Table 3 Vibration data of underground medium-deep hole blasting

| 爆破监测<br>时间<br>Blasting<br>monitoring<br>time | 起爆药量<br>Explosive<br>charge/kg | 测点编号<br>Monitoring<br>points | 爆心距<br>Distance<br>from<br>explosive<br>source/m | 仪器编号<br>Instrument<br>number | 振动最大<br>速度<br>Maximum<br>vibration<br>velocity/<br>(cm · s <sup>-1</sup> ) | 振动最大主频<br>Maximum main<br>frequency of vibration/Hz |               |               | 质点振动<br>速度允许值<br>Allowable value<br>of vibration<br>velocity/<br>(cm · s <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                              |                                |                              |                                                  |                              |                                                                            | X 轴<br>X-axis                                       | Y 轴<br>Y-axis | Z 轴<br>Z-axis |                                                                                          |
| 2024 - 12 - 1<br>15:00                       | 94                             | 1#                           | 519.5                                            | N25128                       | 0.015                                                                      | 18.3                                                | 19.7          | 21.8          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 2#                           | 519.1                                            | N25512                       | 0.017                                                                      | 19.0                                                | 15.3          | 16.5          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 3#                           | 518.7                                            | N24783                       | 0.036                                                                      | 10.8                                                | 12.5          | 12.0          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 4#                           | 518.6                                            | N24972                       | 0.018                                                                      | 11.9                                                | 9.8           | 11.0          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 5#                           | 518.0                                            | N24677                       | 0.034                                                                      | 14.4                                                | 16.8          | 13.1          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 6#                           | 517.2                                            | L2017 - 107                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 7#                           | 517.0                                            | L2017 - 112                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 8#                           | 517.3                                            | L2017 - 129                  | 0.018                                                                      | 15.2                                                | 23.3          | 11.3          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 9#                           | 518.0                                            | L2017 - 122                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 10#                          | 520.4                                            | L2015 - 100                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
| 2024 - 12 - 2<br>15:00                       | 104                            | 1#                           | 512.9                                            | N25128                       | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 2#                           | 512.5                                            | N25512                       | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 3#                           | 512.0                                            | N24783                       | 0.048                                                                      | 10.1                                                | 13.1          | 14.0          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 4#                           | 512.0                                            | N24972                       | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 5#                           | 511.2                                            | N24677                       | 0.014                                                                      | 53.9                                                | 20.5          | 56.9          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 6#                           | 510.5                                            | L2017 - 107                  | 0.021                                                                      | 8.9                                                 | 64.2          | 50.4          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 7#                           | 510.3                                            | L2017 - 112                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 8#                           | 510.6                                            | L2017 - 129                  | 0.015                                                                      | 15.6                                                | 8.2           | 28.4          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 9#                           | 511.2                                            | L2017 - 122                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 10#                          | 513.6                                            | L2015 - 100                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
| 2024 - 12 - 5<br>14:55                       | 100                            | 1#                           | 514.4                                            | N25128                       | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 2#                           | 514.0                                            | N25512                       | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 3#                           | 514.0                                            | N24783                       | 0.026                                                                      | 10.9                                                | 10.7          | 12.0          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 4#                           | 513.5                                            | N24972                       | 0.017                                                                      | 9.1                                                 | 11.0          | 16.3          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 5#                           | 512.7                                            | N24677                       | 0.043                                                                      | 11.9                                                | 12.0          | 12.8          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 6#                           | 512.0                                            | L2017 - 107                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 7#                           | 512.0                                            | L2017 - 112                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 8#                           | 512.1                                            | L2017 - 129                  | 0.039                                                                      | 12.7                                                | 9.4           | 15.0          | 2.0 ~ 2.5                                                                                |
|                                              |                                | 9#                           | 512.7                                            | L2017 - 122                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |
|                                              |                                | 10#                          | 515.1                                            | L2015 - 100                  | <0.010                                                                     | 0.0                                                 | 0.0           | 0.0           | 1.5 ~ 2.0                                                                                |

根据表 4 中爆区不同岩性的  $K$  及  $\alpha$  值,结合爆破监测现场的工程地质条件和爆破区域测点的布设情况,岩性属于中硬-坚硬岩石。即爆破振动速度的衰减规律可用如下公式估算

$$v = 93.68 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.76}$$

(3)

表 4 爆区不同岩性的  $K$ 、 $\alpha$  值  
Table 4  $K$ 、 $\alpha$  values of different rock  
character in blasting area

| 岩性 Lithology          | $K$             | $\alpha$    |
|-----------------------|-----------------|-------------|
| 坚硬岩石 Hard rock        | 50.00 ~ 150.00  | 1.30 ~ 1.50 |
| 中硬岩石 Medium hard rock | 150.00 ~ 250.00 | 1.50 ~ 1.80 |
| 软岩石 Soft rock         | 250.00 ~ 350.00 | 1.80 ~ 2.00 |

### 3 爆破振动控制措施

铜绿山铜铁矿的正常生产须在确保其周围居民住宅建筑物安全稳定的前提下进行,为了控制地下爆破产生的振动影响,可以采取以下措施控制爆破振动:

(1)控制单响(齐发)药量,采用微差爆破。在孔内采用多段装药结构,分段毫秒延时爆破,减少瞬间一次分段起爆的药量,孔内分段装药毫秒雷管的段数大于孔外连接起爆毫秒雷管的段数,以保证起爆线路的安全传爆。下段用大段雷管,上段用小段雷管,孔内各段的段差在1~2段,使上段先爆,下段后爆,先爆的上段装药为后爆的下段装药创造能量向上传爆的条件,以减少地震波能量在孔内作用的时间,改变其水平传播方向,减弱单段装药爆破产生的地震波强度。

(2)充分利用既有沟槽缝空间实现隔振减震作用。目前铜绿山铜铁矿已经开采多年,地下形成了一定数量的采准巷道空区,爆破振动传播经过采准巷道空区时将发生吸能、反射、折射的减震作用,监测到的振动数据均远低于国家爆破安全规程规定的质点速度安全允许标准。在今后组织生产爆破作业时优化爆破顺序,使得先爆破形成的采准巷道空区可以为后续爆破隔振减震。

(3)控制不同中段爆破起爆时间,避免爆破振动叠加。铜绿山铜铁矿每天不同生产中段会进行多次爆破,需严格控制起爆时间,避免由于起爆时间重叠或接近,形成爆破振动的累计叠加效应,对周边建筑造成影响。

### 4 结论

爆破振动监测目的是研究矿山生产过程中地下爆破振动对露天坑南侧居民住房建筑物的安全影响,根据(国家标准《爆破安全规程》(GB6722—2014))的相关允许标准,通过客观、科学地对地下爆破产生的爆破振动进行监测,并对爆破振动的实际监测数据进行分析,得出如下结论:

(1)对地下中深孔爆破振动进行了三次监测,通过仪器数据分析发现,1#、2#、3#、4#、5#、6#、7#、8#、9#、10#测点监测到爆破振动的主频范围均在9.0~50.0 Hz,爆破振动速度矢量合成最大值分别为0.036 cm/s、0.048 cm/s、0.043 cm/s,均在爆破振动安全允许范围内。

(2)结合爆破监测现场的工程地质条件和爆破区域测点的布设情况,爆破振动萨道夫斯基公式中

与爆破条件、岩石特性等有关的系数 $K$ 和 $\alpha$ 分别为93.68和1.76,对照相应岩性的 $K$ 及 $\alpha$ 值,属于中硬-坚硬岩石。

### 参考文献(References)

- [1] 周传波,吕国鹏,蒋楠.爆破振动效应研究若干进展[J].工程爆破,2024,30(5):61-74.
- [1] ZHOU Chuan-bo, LV Guo-peng, JIANG Nan. Progress in the study of blasting vibration effects[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5): 61-74. (in Chinese)
- [2] 崔光久,李祥龙,左庭,等.临近胶结充填体矿房爆破装药结构及振动规律分析[J].矿产保护与利用,2024,44(4):18-28.
- [2] CUI Guang-jiu, LI Xiang-long, ZUO Ting, et al. Analysis of blasting charge structure and vibration law of stope near cemented filling body[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 18-28. (in Chinese)
- [3] 赵尔丞,魏昭君,沈彦丞,等.爆破振动对龙首矿露天转地下安全顶柱稳定性影响研究[J].爆破,2024,41(2):75-85,126.
- [3] ZHAO Er-cheng, WEI Shao-jun, SHEN Yan-cheng, et al. Study on effect of blasting vibration on stability of safety roof pillar for open-pit to underground transition in Longshou Mine[J]. Blasting, 2024, 41(2): 75-85, 126. (in Chinese)
- [4] 聂兴信,郭雅婷,程平,等.基于LS-DYNA的不同装药量对爆破振动效应的影响研究[J].采矿技术,2024,24(5):162-167.
- [4] NIE Xing-xin, GUO Ya-ting, CHENG Ping, et al. Influence of different charge quantities on blasting vibration effect based on LS-DYNA[J]. Mining Technology, 2024, 24(5): 162-167. (in Chinese)
- [5] 黄焕新,盘子东.爆破振动对某矿山边坡稳定性影响的研究[J].化工矿产地质,2024,46(4):363-369.
- [5] HUANG Huan-xin, PAN Zi-dong. Study on the influence of blasting vibration on the stability of a mine slope[J]. Geology of Chemical Minerals, 2024, 46(4): 363-369. (in Chinese)
- [6] 刘梦,王晶晶,蒙萌,等.爆破振动对临近尾矿坝的影响分析[J].爆破器材,2024,53(2):44-49.
- [6] LIU Meng, WANG Jing-jing, MENG Meng, et al. Influence of blasting vibration on tailings dams nearby[J]. Explosive Materials, 2024, 53(2): 44-49. (in Chinese)
- [7] 闫鹏,张云鹏,申宇宙,等.爆破振动作用下建筑物动力响应研究综述[J].金属矿山,2025(6):131-143.
- [7] YAN Peng, ZHANG Yun-peng, SHEN Yu-zhou, et al. Review on the dynamic response of buildings subjected to blasting vibration[J]. Metal Mine, 2025(6): 131-143. (in Chinese)
- [8] 郭雅婷.某铁矿生产爆破振动传播规律及爆破参数优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024.

- [8] GUO Ya-ting. Research on blasting vibration propagation law and blasting parameter optimization of an iron mine [D]. Xi'an; Xi'an University of architecture and technology, 2024. (in Chinese)
- [9] P K Singh, M P Roy, RANJIT K Paswan, et al. Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 79-88.
- [10] ZHANG Shi-an, SHI Xiu-zhi, QIU Xian-yang, et al. Influence of free surface width on blasting damage in open stope mining in narrow vein orebodies[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 194: 106194.
- [11] 贾皓琦, 黄永辉, 张智宇. 基于小波包理论研究地下断层对爆破振动传播的影响[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(2): 35-44.
- [11] JIA Hao-qi, HUANG Yong-hui, ZHANG Zhi-yu. Influence of underground fault on blasting vibration propagation based on Wavelet Packet Theory[J]. Nonferrous Metals(Mine Section), 2024, 76(2): 35-44. (in Chinese)
- [12] 曾令峰. 基于矿区建(构)筑物保护的井下爆破振动控制研究[J]. 爆破, 2023, 40(2): 210-216.
- [12] ZENG Ling-feng. Research on vibration control of underground blasting based on structure protection in mining area[J]. Blasting, 2023, 40(2): 210-216. (in Chinese)
- [13] 厉建华, 叶元寿, 郑 冰. 某地下矿山爆破振动对地表房屋安全影响的分析[J]. 采矿技术, 2021, 21(1): 80-83.
- [13] LI Jian-hua, YE Yuan-shou, ZHENG Bing. Analysis of the impact of blasting vibration on the safety of surface buildings in an underground mine[J]. Mining Technology, 2021, 21(1): 80-83. (in Chinese)
- [14] 杨 凯, 吕淑然, 董华兴. 地下采矿爆破振动对地面环境影响的监测与分析[J]. 金属矿山, 2013(10): 144-147.
- [14] YANG Kai, LV Shu-ran, DONG Hua-xing. Monitoring and analysis of impact of blast vibration on ground environment in underground mining [J]. Metal Mine, 2013(10): 144-147. (in Chinese)
- [15] 全国安全生产标准化技术委员会非煤矿山安全分技术委员会(SAC/TC 288/SC 2). GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [15] National Safety Production Standardization Technical Committee Non Coal Mine Safety Sub Technical Committee (SAC/TC 288/SC 2). GB 6722—2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [16] 全国机械振动, 冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC 53). GB/T 14124-2024 机械振动与冲击 固定建筑结构的振动振动测量及对结构影响评价的指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [16] National Technical Committee on Mechanical Vibration, Shock, and Condition Monitoring Standardization (SAC/TC 53). GB/T 14124-2024 Mechanical vibration and shock-Vibration of fixed structures-Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024. (in Chinese)

(上接第 234 页)

- [5] 许守信, 黄绍威, 李二宝, 等. 复杂破碎岩体矩形聚能药包预裂爆破试验研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 55-63.
- [5] XU Shou-xin, HUANG Shao-wei, LI Er-bao, et al. Experimental study on presplitting blasting with rectangular shaped charge in complex and fractured rock mass[J]. Metal Mine, 2021(11): 55-63. (in Chinese)
- [6] 关富儒. 裂隙发育岩体地下洞室预裂爆破装药参数和结构研究[D]. 成都: 四川大学, 2022.
- [6] GUAN Fu-su. Study on charging parameters and structure of presplitting blasting in underground caverns of fissure-developed rock mass [D]. Chengdu: Sichuan University, 2022. (in Chinese)
- [7] 马 军. 逐孔预裂爆破裂纹扩展规律及损伤特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [7] MA Jun. Study on crack propagation law and damage characteristics of hole-by-hole presplitting blasting [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)
- [8] 丁汉望, 张 阳, 西子阳, 等. 基于能量分布的深孔预裂爆破参数优化研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(5): 120-122.
- [8] DING Han-kun, ZHANG Yang, XI Zi-yang, et al. Research on parameter optimization of deep-hole presplitting blasting based on energy distribution[J]. Mining Technology, 2017, 17(5): 120-122. (in Chinese)
- [9] 王 晋. 宽孔距预裂爆破在三板溪水电站建设中的试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [9] WANG Jin. Experimental study on wide-spacing presplitting blasting in the construction of Sanbanxi Hydropower Station [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.