

装药结构与孔内延期对露天深孔爆破振动影响研究

辛鹏飞¹, 关福晨^{2,3*}, 郝春晖², 谷思焱², 张鑫²

(1. 神东天隆集团股份有限公司武家塔露天煤矿; 2. 辽宁农业职业技术学院;
3. 辽宁工程技术大学爆破技术研究院)

摘要:为研究露天矿山深孔爆破装药结构与孔内延期对爆破振动的影响,基于萨道夫斯基公式,应用 Matlab 软件对连续装药结构的多级台阶质点振速峰值进行数据拟合,得出3个方向的质点振速峰值衰减公式。分析结果表明:竖直方向质点振速峰值衰减最快,水平方向接近;二级台阶的水平方向质点振速峰值稍大于竖直方向,与高程放大效应有关。经过对比间隔装药孔内延期结构分析得知,延期时间设置在 15 ms 与 25 ms 时,对降低爆破振动的效果明显,可为类似工程项目施工提供参考依据。

关键词:露天开采;爆破振动;萨道夫斯基公式;衰减规律;装药结构;孔内延期

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0050-04

doi:10.11792/hj20250309

引言

露天矿山爆破振动是生产过程中无法避免的危害之一,爆破振动强度对安全生产有直接影响,近年来国内外众多学者和工程技术人员在这方面做了大量的工作和研究。SAHELI 等^[1-2]研究得出,爆破振动会对邻近既有建筑物造成一定影响,产生影响的主要原因在于爆破振动效应的主振频率与建(构)筑物的固有频率接近,从而发生共振破坏效应。史灵杰^[3]针对露天矿山爆破振动对邻近民房和其他建筑物产生潜在影响的问题,以现场爆破振动监测为依据,确定了不同结构建筑物的安全距离。李胜林等^[4]依据现场爆破振动数据,基于日本株式会社公式和萨道夫斯基公式对爆破振动峰值速度进行分析与预测。张爱华等^[5]考虑不同岩石条件、岩石完整性及岩石软硬程度,对爆破振动速度峰值进行萨道夫斯基公式拟合,研究分析爆破振动的衰减效应。张锁珠^[6]详细分析了爆破振动产生的机理和影响爆破振动的关键因素,在此基础上提出多种爆破振动控制措施。付俊等^[7]研究了爆破振动对露天矿山边坡的影响,将监测数据与地质条件结合,采用修正的经验公式相关系数达到 0.94。李继业等^[8-9]在实际生产中总结了影响爆破振动的因素,提出岩石结构与起爆网络等对爆破振动的具体影响。张士科等^[10]为探索有效的爆破振动预测方法,通过建立遗传算法优化 BP 神经网络预测模型,

分析得出爆破振动预测模型参数与特征参量之间呈非线性关系。张波等^[11-13]采用量纲分析法推导出了包含高程等因素的振速预测模型,丰富了复杂场地环境的振速预测方式。

为研究得出露天矿深孔爆破装药结构与孔内延期对爆破振动的影响,本文依托某露天矿山工程项目,基于控制变量法分别采用连续装药结构与间隔孔内延期装药结构 2 种爆破方案进行现场试验,并对 2 种装药结构所诱发的爆破振动信号进行监测与分析,得出深孔装药结构和孔内延期对台阶地表振动强度衰减规律的影响。

1 工程背景

1.1 项目概况

该露天矿山岩层多为砂岩和泥岩,岩石密度为 2 500 ~ 2 700 kg/m³,岩石抗压强度为 15 ~ 40 MPa,矿区岩体属于软岩和中硬岩,纵波在岩体内传播速度为 2 900 ~ 3 900 m/s。

1.2 试验参数

为研究该露天矿深孔爆破装药结构与孔内延期对爆破振动的影响,采用控制变量法进行现场试验,即现场分别采用深孔连续装药与间隔装药 2 种装药结构进行 5 种方案的爆破试验。2 种装药结构如图 1 所示。

现场爆破试验均采用梅花布孔,数码电子雷管起爆,起爆药包均为 2 kg 的二号岩石乳化炸药,主起爆

收稿日期:2024-08-19; 修回日期:2024-09-30

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”教学名师项目(XLYC2211015)

作者简介:辛鹏飞(1991—),男,工程师,从事矿山爆破开采与勘查设计工作;E-mail:1272757103@qq.com

*通信作者:关福晨(1995—),男,工程师,博士研究生,研究方向为爆破工程、地下工程、岩土与隧道工程;E-mail:13841809725@163.com

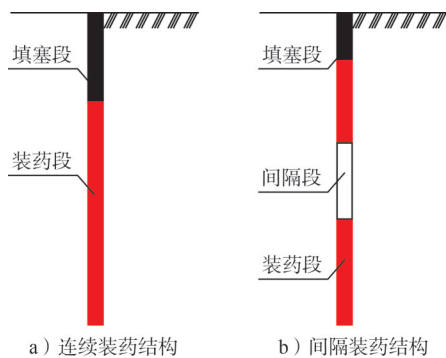


图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the charge structure

药为混装粒状铵油炸药,连续装药结构填塞长度为 6 m,间隔装药结构的间隔长度为 2.5 m。间隔装药填塞长度为 3.5~4 m,5 种现场爆破试验方案控制变量具体参数如表 1 所示。

表 1 5 种现场爆破试验方案控制变量具体参数

Table 1 Specific parameters of controlled variables for 5 on-site blasting test schemes

参数	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
孔径/mm	170	170	170	170	170
炮孔间距/m	7	7	7	7	7
炮孔排距/m	5	5	5	5	5
孔深/m	15	15	15	15	15
装药结构	连续装药	间隔装药	间隔装药	间隔装药	间隔装药
孔间延期/ms	42	42	42	42	42
排间延期/ms	65	65	65	65	65
孔内延期/ms		0	5	15	25
单孔药量/kg	160	160	160	160	160
上部药量/kg		60	60	60	60
下部药量/kg		100	100	100	100

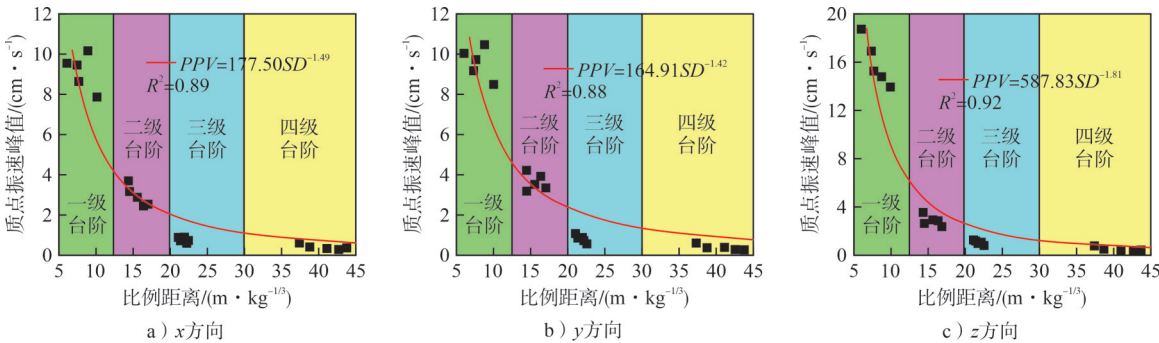


图 2 连续装药结构质点振速峰值拟合结果

Fig. 2 Fitting results of peak particle velocity in continuous charge structure

大,说明振动能量在透过传播介质后几何形态发生变化,振动方向也随之改变,从而影响 3 个方向具体的振动强度。这一现象从侧面也说明,爆破振动信号在传播过程中存在高程放大效应,即二级台阶的某方向质点振速峰值衰减变缓,导致在传播过程中该方向质点振速峰值出现大于其他方向现象。③结合三级台阶和四级台阶的质点振速峰值发现,z 方向质点振

2 爆破振动信号分析

爆破振动信号监测采用 TC-4850 爆破测振仪,仪器布置在一级台阶、二级台阶、三级台阶和四级台阶进行同时监测。监测过程中,测振仪 x 方向指向爆区中心,x 方向为爆破径向,y 方向为爆破切向(x、y 方向为水平方向),z 方向为爆破竖向(竖直方向)。

由于更高台阶监测振动数据较小,所以仅选取一至四级台阶监测所得数据进行处理与分析。

2.1 连续装药振动信号分析

对连续装药结构方案现场爆破试验所监测到的振动信号提取质点振速峰值,基于萨道夫斯基公式^[14-15],使用 Matlab 软件对质点振速峰值数据进行拟合,最终得到 x、y、z 3 个方向的质点振速峰值曲线,如图 2 所示。

$$PPV = K(SD)^{-\alpha} \tag{1}$$

$$SD = \frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \tag{2}$$

式中:PPV 为质点振速峰值(cm/s);K 为与爆破场地条件有关的参数;SD 为比例距离(m/kg^{1/3});α 为爆破振动质点速度衰减系数;R 为爆心距(m);Q 为最大单段药量(kg),逐孔起爆时选取单孔药量。

从图 2 可以看出:①一级台阶 z 方向的质点振速峰值在 3 个方向上数值最大,x 方向和 y 方向的数值大小接近,原因是一级台阶的振动能量向自由面法向方向传递更多,但随着振动能量向上一级台阶进一步传递,振动能量在岩土体内发生透反射衰减。②二级台阶 x 方向和 y 方向的质点振速峰值比 z 方向的数值稍

速峰值又稍大于 x 方向和 y 方向数值,也可以从侧面验证高程放大效应这一观点。④整体上 z 方向质点振速峰值衰减速率最大,原因是 z 方向的 K 和 α 的绝对值均最大。

2.2 间隔装药振动信号分析

为研究该露天矿山深孔爆破装药结构与孔内延期对爆破振动的影响,将间隔装药结构方案现场爆破

试验所监测到的振动信号提取质点振速峰值进行整理,结果分别如图3和图4所示。

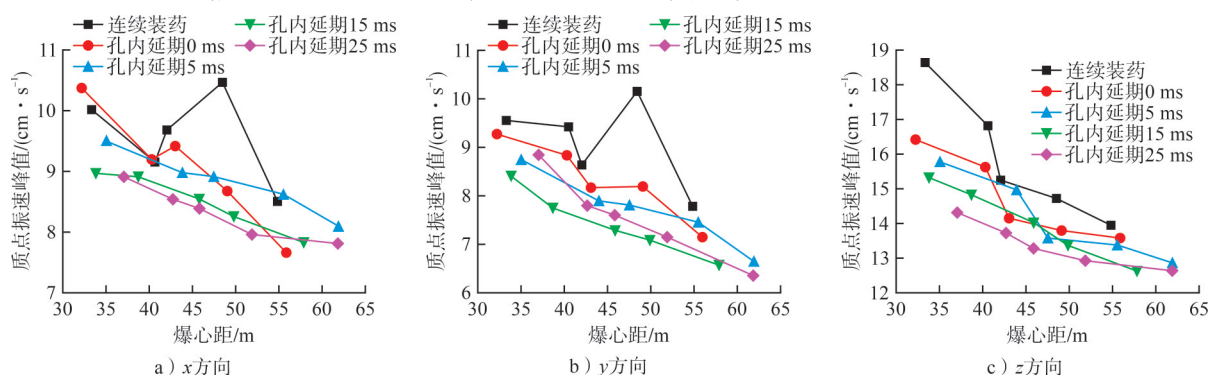


图3 一级台阶不同爆破方案的质点振速峰值对比

Fig. 3 Comparison of peak particle velocity for different blasting schemes at the first step

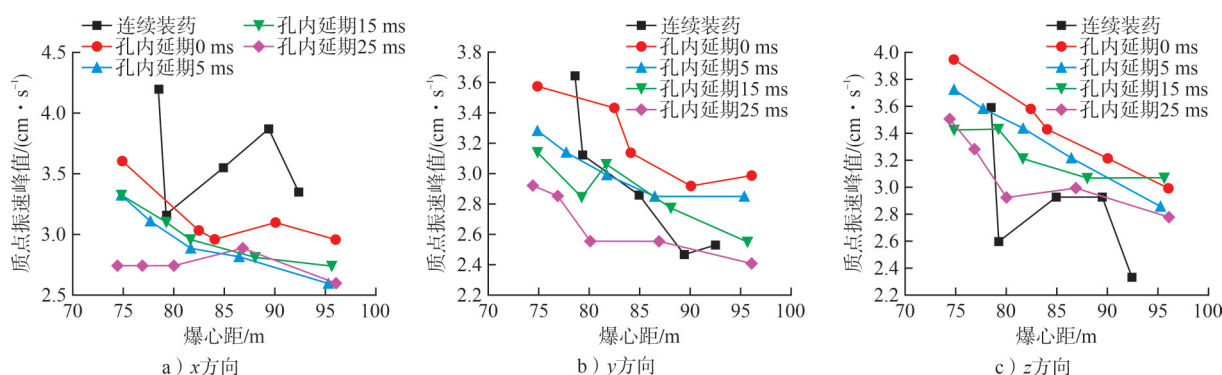


图4 二级台阶不同爆破方案的质点振速峰值对比

Fig. 4 Comparison of peak particle velocity for different blasting schemes at the second step

从图3和图4可以看出:①连续装药的爆破质点振速峰值整体最大,间隔装药能够将爆破振动强度适当降低;②间隔装药结构方案中孔内延期时间设置为25 ms所诱发的 x 方向和 z 方向相对于 y 方向的质点振速峰值较小;③孔内延期时间设置为15 ms时, y 方向相对于其他2个方向的质点振速峰值较小。说明孔内延期时间设置为15 ms和25 ms的间隔装药结构有助于控制台阶爆破振动强度。

对比图3和图4可以得出:①二级台阶相对于一级台阶由于振动传播过程的复杂性,振动信号衰减规律随之复杂,整体上间隔装药也在多个测点数据中体现出了一定的减振效果,但 z 方向效果不明显,这与前面分析的结论相吻合,即振动能量传播方向出现改变后,各方向振速大小变化较为明显;②间隔装药结构孔内延期时间设置为15 ms和25 ms的间隔装药爆破方案同样有助于降低二级台阶的爆破振动强度^[16]。

3 结论

1)对多级台阶振动信号监测与质点振速峰值数据拟合处理,基于萨道夫斯基公式,得到连续装药结构所诱发的不同方向质点振速峰值衰减公式;连续装药结构一级台阶 z 方向质点振速峰值最大,且 z 方向

振速衰减速率最快,其余台阶3个方向质点振速峰值与衰减速率接近。

2)爆破振动信号在传播过程中所携带的振动能量在岩土体中发生透反射衰减,使爆破振动信号传播方向发生改变,导致某一方向振动能量衰减速率减慢,出现高程放大效应。

3)连续装药结构相对于间隔装药结构所诱发的爆破振动强度较大,间隔装药结构孔内延期时间设置为15 ms和25 ms时,对多级台阶控制爆破振动强度的效果较好,在实际生产中可结合不同爆破需求进行合理选择。

[参考文献]

- [1] SAHELI R, SAHA D. Ground vibration attenuation relationship for underground blast: A case study [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2019, 100(4): 763-775.
- [2] ROY M P, SINGH P K, SARIM M, et al. Blast design and vibration control at an underground metal mine for the safety of surface structures [J]. Rock Mech, 2016, 38(4): 7-115.
- [3] 史灵杰. 安家岭露天煤矿爆破振动实测研究 [J]. 露天采矿技术, 2021, 36(3): 107-110.
- [4] 李胜林, 方真刚, 杨瑞, 等. 浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析 [J]. 爆破, 2019, 36(2): 111-116, 130.
- [5] 张爱华, 赵昕普. 露天煤矿爆破振动速度峰值衰减规律研究 [J]. 露天采矿技术, 2022, 37(6): 6-10.

- [6] 张锁珠.露天矿山爆破振动危害与防治措施探讨[J].山西冶金, 2023,46(5):254-256.
- [7] 付俊,周罕,徐继刘,等.露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J].矿冶工程,2023,43(1):32-34,39.
- [8] 李继业.露天矿山爆破振动影响因素研究[J].世界有色金属, 2022(12):156-158.
- [9] 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.
- [10] 张士科,方宏远,耿勇强.基于遗传BP神经网络的煤矿爆破振动特征参量预测[J].煤炭科学技术,2018,46(9):133-139.
- [11] 张波.岩体及充填体爆破振动速度衰减规律研究[J].黄金, 2024,45(5):14-18.
- [12] 费鸿禄,关福晨,包士杰,等.海底爆破振动强度衰减规律及中华白海豚保护措施研究[J].海洋通报,2019,38(4):405-414.
- [13] 张西良,仪海豹,辛国帅,等.高程对某露天矿边坡爆破振动传播规律的影响[J].金属矿山,2017(7):55-59.
- [14] 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.
- [15] 张紫哈.基于波动理论的露天采场爆破振动高程放大效应分析[J].黄金,2020,41(3):36-39,44.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.

Study on the influence of charge structure and in-hole delay on blasting vibration in open-pit long-hole blasting

Xin Pengfei¹, Guan Fuchen^{2,3}, Hao Chunhui², Gu Siyi², Zhang Xin²

(1. Wujiaata Open-pit Coal Mine, Shendong Tianlong Group Co., Ltd.;

2. Liaoning Agricultural Vocational and Technical College;

3. Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University)

Abstract: To investigate the influence of charge structure and in-hole delay on blasting vibration in open-pit long-hole blasting, the Sadovsky formula was applied with Matlab software to fit peak particle velocity (PPV) data from multi-level benches under continuous charge structures. Attenuation formulas for PPV in 3 directions were derived. Analysis reveals that vertical PPV attenuates fastest, while horizontal PPV exhibits similar trends. At secondary benches, horizontal PPV slightly exceeds vertical PPV, attributed to elevation amplification effects. Comparative analysis of in-hole delay structures in interval charge demonstrates that delay times of 15 ms and 25 ms significantly reduce blasting vibration, providing practical references for similar engineering projects.

Keywords: open-pit mining; blasting vibration; Sadovsky formula; attenuation laws; charge structure; in-hole delay