

露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究^①

付俊^{1,2}, 周罕^{1,2}, 徐继刘³, 郁华嘉^{1,2}, 徐桥良^{1,2}, 黄英华^{4,5}

(1.中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051; 2.云南省岩土工程与地质灾害重点实验室, 云南 昆明 650051; 3.云南铜业股份有限公司, 云南 昆明 650051; 4.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 5.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 研究了爆破振动对石灰岩矿山边坡的影响, 通过现场爆破振动测试, 结合现场地质条件进行了爆破振动特性及规律研究。结果表明, 基于 M.A 萨道夫斯基拟合公式的 2 次现场爆破振动数据中质点振动速度具有明显的衰减趋势; 基于高程效应修正的 M.A 萨道夫斯基拟合公式的相关系数达到了 0.94, 比传统 M.A 萨道夫斯基公式拟合效果好; 采用本文得到的修正拟合公式, 结合靠帮设计起爆药量, 对石灰岩边坡各台阶最大振动速度进行预测时发现, 爆破设计应重点考虑振源临近台阶造成的影响。

关键词: 石灰岩边坡; 爆破振动; 高程效应; 影响预测

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.007

文章编号: 0253-6099(2023)01-0032-03

Study on Characteristics and Law of Blasting Vibration for Open-Pit Slopes in Limestone Mine

FU Jun^{1,2}, ZHOU Han^{1,2}, XU Jiliu³, YU Huajia^{1,2}, XU Qiaoliang^{1,2}, HUANG Yinghua^{4,5}

(1. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co Ltd, Kunming 650051, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Geohazards, Kunming 650051, Yunnan, China; 3. Yunnan Copper Industry (Group) Co Ltd, Kunming 650051, Yunnan, China; 4. Changsha Institute of Mining Research Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China; 5. State Key Laboratory of Safety Technologies for Metal Mines, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: The impact of blasting vibration on the open-pit slope in a limestone mine was explored. The characteristics and law of blasting vibration was investigated by performing field blasting vibration tests based on the consideration of geological conditions on site. Based on fitting with Sadowski formula, an obvious attenuation trend was found for the velocity of particle vibration in the data about two field blasting vibration. With Sadowski formula modified based on elevation effect, the correlation coefficient was up to 0.94, better than the fitting effect by the traditional Sadowski formula. The maximum vibration velocity on each bench of limestone slope was predicted by using the modified fitting formula in this paper, and considering the designed detonate charge for steep end-slope, showing that the impact of vibration source on the adjacent bench should be taken into consideration in blast design.

Key words: limestone slope; blasting vibration; elevation effect; impact prediction

在露天矿山边坡稳定性分析中,重力、地下水、爆破振动等通常是主要的载荷组合^[1]。矿山爆破振动是影响露天矿山边坡稳定性的最重要因素之一^[2]。某大型水泥建材矿山矿体为石灰岩,赋存范围大,在开采过程中常形成规模较大的高陡石灰岩边坡。石灰岩边坡易受大气降水、地下水侵蚀,不同埋深风化程度各

异,局部台阶可能形成落水洞,降低了边坡的自稳能力,不利于石灰岩边坡稳定性。因此,该类矿山生产中应重点关注爆破活动及其产生的动力对边坡的影响。

近年来学者对边坡爆破振动影响进行了大量研究^[3-14],但对露天矿山石灰岩边坡的爆破振动特性及规律研究相对较少。因而,进行石灰岩边坡的爆破振

① 收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 2021 云南省科技厅重点实验室科技计划项目(科技人才与平台计划 202105AG070006); 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司科技创新项目(2020YN10)

作者简介: 付俊(1986—),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,注册安全工程师,主要研究方向为矿山岩石力学、环境岩土工程及地质灾害防治。

动特性及规律研究,对大型水泥用石灰岩矿山的安全生产具有重要的参考价值。

1 研究背景

云南某石灰岩露天矿山生产规模 380 万吨/年,主要形成东部边坡,边坡最大高度 166 m,最终边坡高度达 306 m,台阶高度 15 m,台阶坡面角 61°~75°,边坡整体以灰岩为主,主要边坡优势结构面与坡面正交,岩石坚固性系数 6~14。矿体赋存于二叠系下统阳新组第二层(P₁y²)中,呈单斜层状坡产出,产状总体稳定。矿区内地质构造不发育,褶皱构造以单斜构造为主。

露天采场生产爆破所使用孔网参数为:孔排距 7 m×5 m,孔径 140 mm,孔深 17 m,装药长度 12 m,堵塞 5 m,底盘抵抗线 6.5 m,单孔装药量 273 kg,岩石单耗 0.4 kg/m³。炸药为 2# 岩石乳化炸药,正常采矿爆破采用排间微差起爆,距离最终边坡 40 m 左右时采取预裂爆破等减振工艺措施。

2 爆破振动试验

现场爆破测振试验采用 6 台 NUBOX-6016 振动监测仪进行测试。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014),运用 M.A 萨道夫斯基公式进行爆破分析和振速的预测。在综合分析采场使用爆破方法、未来采场布置、地质条件和岩层走向的基础上,根据采场实际地形及爆破位置,确定爆破测振设计参数,在现场共完成了 2 次爆破振动测试。第 1 次试验爆心位于+2 055 m 平台,测点位于+2 070 m 平台(2 个)及+2 085 m 平台(4 个);第 2 次试验爆心位于+2 070 m 平台,测点位于+2 085 m 平台(1 个)、+2 100 m 平台(1 个)、+2 115 m 平台(1 个)、+2 130 m 平台(1 个)、+2 145 m 平台(1 个)、+2 160 m 平台(1 个)。2 次爆破测振试验的药量及测试位置分别见表 1 和图 1。

表 1 各次试验爆破药量及测点布置

序号	炸药总量/kg	炸药类型	爆心位置	测点数
1	11 907	2# 岩石乳化炸药	+2 055 m 平台	6
2	1 827	2# 岩石乳化炸药	+2 070 m 平台	6

3 振动特性及规律分析

矿山边坡的爆破振动的特征通常以最大振动速度 (PPV) 来衡量,《爆破安全规程》(GB 6722—2014) 采用质点最大振动速度作为建构筑物产生不同程度破坏

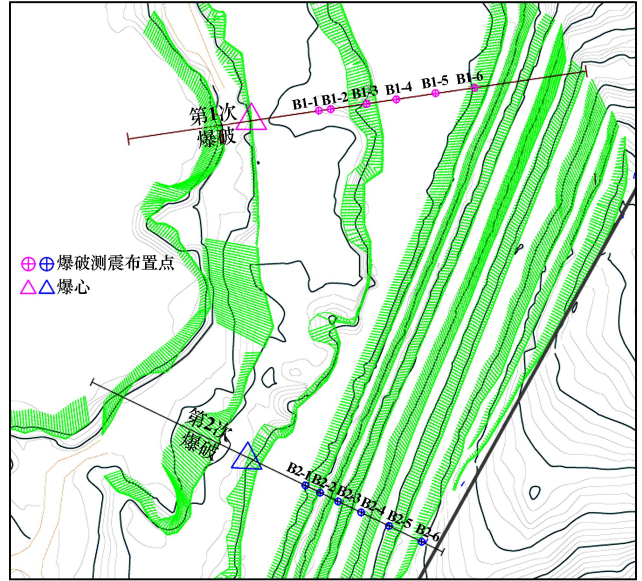


图 1 爆心与监测点布置平面图

的主要判据。本次试验基于 M.A 萨道夫斯基公式开展相关研究,公式如下:

$$V = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^a \tag{1}$$

式中 R 为爆破振动安全允许距离, m ; Q 为炸药量, 齐发爆破时为总药量, 延时爆破时为最大一段药量, kg ; V 为保护对象所在地质点振动安全允许速度, cm/s ; K 和 a 为与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

3.1 爆破振动传播规律分析

根据 2 次露天爆破振动原始测试结果, 分别对测试结果进行统计分析, 根据爆破地震波传递的衰减规律, 剔除异常点数据, 综合水平、垂直向采集数据, 令 $x = V$ 、 $y = R/Q^{\frac{1}{3}}$, 回归拟合出爆破质点振速 V 与比例药量 $R/Q^{\frac{1}{3}}$ 的关系式, 水平向和垂直向相关系数分别达到了 0.93 和 0.88, 修正后爆破地震波的传播规律见图 2。

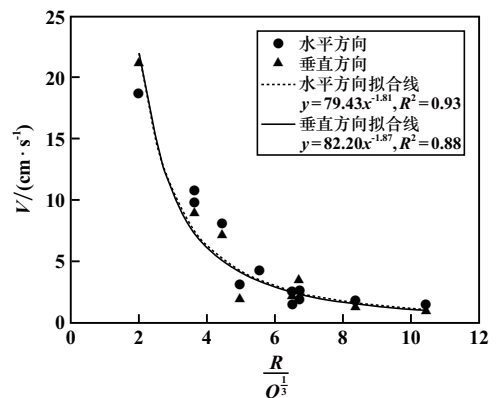


图 2 爆破振动波衰减规律

3.2 基于高程效应的爆破振动传播规律分析

考虑到第2次爆破6个数据采集点高差达到90 m,为了使拟合公式更加科学,能够精准反映该石灰岩边坡爆破振动规律,同时基于高程效应对拟合公式进行修正。矿山边坡爆破振动的衰减规律受到炸药量、测点与爆心的水平距离以及高程差等因素的影响。边坡岩体质点振动速度 V 可表示为:

$$V = \varphi(Q, S, H) \quad (2)$$

式中 Q 为炸药量; S 为测点与爆源的水平距离; H 为测点与爆源的高程差。得到其表达式为:

$$V = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{S} \right)^{\alpha} \left(\frac{H}{S} \right)^{\beta} \quad (3)$$

式中 K 为场地系数; α 为衰减系数; β 为高程差影响系数。该式两边分别取对数,得:

$$\ln V = \ln K + \alpha \ln \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{S} \right) + \beta \ln \left(\frac{H}{S} \right) \quad (4)$$

令 $Y = \ln V$, $C = \ln K$, $X_1 = \ln \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{S} \right)$, $X_2 = \ln \left(\frac{H}{S} \right)$, 则:

$$Y = C + \alpha X_1 + \beta X_2 \quad (5)$$

采用矩阵的形式可以表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} \\ x_{12} & x_{22} \\ \vdots & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据现场2次试验的数据,回归分析得到基于高程效应修正的 M.A 萨道夫斯基拟合公式,水平向和垂直向相关系数分别达到了 0.93 和 0.94,相关性比未考虑高程效应的 M.A 萨道夫斯基公式拟合效果好,具体结果见表 2。

表 2 考虑高程效应爆破振动结果拟合

方向	K	α	β	拟合公式	相关系数
水平	47.75	1.82	-0.38	$V = 47.75 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{S} \right)^{1.82} \left(\frac{H}{S} \right)^{-0.38}$	0.93
垂直	24.53	1.67	-0.84	$V = 24.53 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{S} \right)^{1.67} \left(\frac{H}{S} \right)^{-0.84}$	0.94

4 矿山靠帮边坡爆破影响预测

基于高程效应的拟合公式能够很好地反映露天矿山灰岩边坡台阶的爆破振动特征及规律,科学分析边坡台阶受生产爆破的影响程度。随着开采计划的推进,露天矿山边坡形态和高度都在发生变化,可以通过

本次研究的拟合公式,结合靠帮固定起爆药量,对水泥用石灰岩矿山边坡各台阶最大振动速度进行分析预测。

该矿山靠帮设计爆破药量为 1.8 t,距边坡 40 m 距离内开始采用预裂爆破等减振工艺,设计台阶高度 15 m、台阶宽度 4 m,最终边坡高度 306 m,共有 20 个台阶,基于高程效应修正的 M.A 萨道夫斯基拟合公式,预测临近爆心的各台阶爆破振动速度,进而得到设计靠帮爆破对各台阶(以台阶与爆心距离顺序编号)的影响,结果见表 3。

表 3 矿山靠帮边坡爆破影响预测结果

台阶	振速/(cm·s ⁻¹)	
	水平	垂直
1	30.26	26.13
2	20.27	13.49
3	15.33	8.93
4	12.24	6.56
5	10.11	5.11
6	8.54	4.14
7	7.34	3.45
8	6.39	2.93
9	5.63	2.53
10	5.00	2.22

从表 3 可以明显看出,该石灰岩矿山边坡在按爆破设计进行生产爆破后,水平振速和垂直振速均呈衰减趋势,仅台阶 1 处(高程差 15 m、水平距离 44 m)超过规程要求(24 cm/s),水平振速为 30.26 cm/s、垂直振速为 26.13 cm/s;台阶 10 处(高程差 150 m、水平距离 76 m)水平振速为 5.0 cm/s、垂直振速为 2.2 cm/s,远远低于规程要求,无明显“鞭梢效应”。因爆破设计参数对临近的台阶 1 影响超过规程要求值,在设计中应通过调整药量、距离及完善爆破工艺来消除生产爆破可能对矿山边坡产生的影响。

5 结 论

1) 通过 2 次现场爆破振动试验,采集了水泥用石灰岩矿山边坡的生产爆破振动数据,采用 M.A 萨道夫斯基公式对 2 组数据进行拟合分析,得出传统理论的爆破振动速度拟合公式。

2) 考虑到数据采集具有明显高程差,因而对传统 M.A 萨道夫斯基拟合公式进行高程效应修正,修正拟合公式水平向和垂直向相关系数分别达到了 0.93 和 0.94,比传统 M.A 萨道夫斯基公式拟合效果好。

3) 采用本次试验确定的修正拟合公式,结合靠帮固定起爆药量,对水泥用石灰岩矿山边坡各台阶最大

(下转第 39 页)

5 结 论

1) 孔隙水对隧道顶板、边墙位移量有较大影响,围岩富含的孔隙水越大,隧道竖直和水平位移量越大,隧道极易发生塌方及边墙破坏事故。因此,建议在富水隧道施工中采取降、排水措施及时处理孔隙水,并采用注浆、喷混凝土等措施加固隧道围岩,避免隧道发生塌方等突发性重大事故。

2) 随着隧道围岩孔隙水压力增大,隧道竖直应力、水平应力、剪切应力增大,隧道极易发生变形甚至破坏。

3) 将数值模拟结果应用到青岛8号线泥-砂岩富水暗挖隧道施工中,通过现场监测发现,3种孔隙水情况下隧道顶板围岩变形量均在10 mm以内、左右边墙变形量均在5 mm以内,隧道围岩得到了良好控制,达到了较好的施工效果。

参考文献:

- [1] 洪开荣,冯欢欢. 中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J]. 中国公路学报, 2020,33(12):62-76.
- [2] 汪学清,刘爽,李秋燕,等. 基于K折交叉验证的SVM隧道围岩分级判别[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):126-128.
- [3] 刘浩,武强,李万宝,等. 隧道工程全生命周期安全保障“24”字方针[J]. 隧道建设(中英文), 2021,41(S1):75-82.
- [4] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.

(上接第34页)

振动速度进行预测,结果表明,爆破设计应重点考虑振源临近台阶造成的影响。

4) 边坡岩体结构面是影响边坡岩体质量的重要因素,同时对爆破振动传播起到关键作用。研究矿山灰岩边坡的爆破振动影响时,应重点考虑岩体结构面、灰岩地区特殊地质条件的影响。

参考文献:

- [1] GB 51016—2014. 非煤露天矿边坡工程技术规范[S].
- [2] GB 6722—2014. 爆破安全规程[S].
- [3] 唐海,马谕杰,夏祥,等. 负高差地形爆破振动规律研究[J]. 工程爆破, 2021,27(5):16-25.
- [4] 叶明班,高文学,曹晓立,等. 爆炸荷载下岩质边坡动力响应规律研究[J]. 爆破, 2019,36(4):31-36.
- [5] 季金铭,高文学,曹晓立,等. 高陡边坡动力响应研究[J]. 爆破, 2020,37(2):1-7.
- [6] 安胜杰,易吉祥,池恩安,等. 爆破地震波传播规律试验研究[J]. 爆破, 2021,38(2):32-36.

- [5] 何川,刘四进,张玉春,等. 水下隧道衬砌结构服役安全及其保障对策思考[J]. 中国工程科学, 2017,19(6):44-51.
- [6] Goel M D, Verma S, Mandal J, et al. Effect of blast inside tunnel on surrounding soil mass, tunnel lining, and superstructure for varying shapes of tunnels[J]. Underground Space, 2021,6(6):619-635.
- [7] WANG F N, GUO Z B, QIAO X B, et al. Large deformation mechanism of thin-layered carbonaceous slate and energy coupling support technology of NPR anchor cable in Minxian Tunnel: A case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,117:104151.
- [8] 韩伟歌,崔振东,涂新斌,等. 不同层理面角度在层状岩体隧道围岩变形中的响应特征研究[J]. 工程地质学报, 2021,29(5):1267-1275.
- [9] 李照众,王浩,畅翔宇,等. 基于组合模型的高铁隧道围岩收敛变形预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021,51(5):851-858.
- [10] 彭鹏,张顶立,孙振宇. 含软弱夹层隧道围岩变形特性与加固参数设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(11):2260-2272.
- [11] 常刚,牌立芳,庞伟军,等. 深埋硬岩组合隧道围岩开挖变形影响研究[J]. 现代隧道技术, 2021,58(5):73-77.
- [12] 王伟星,盛斌,韩侃,等. 降雨对浅埋黄土隧道围岩沉降变形影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(4):1132-1136.
- [13] 刘平,刘池,王洪涛,等. 富水砂层影响下隧道围岩变形破坏机制的数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2020,57(4):74-81.
- [14] 王志杰,徐君祥,徐海岩,等. 第四系富水红砂岩地层隧道围岩变形特征研究[J]. 铁道工程学报, 2018,35(9):54-60.
- [15] JTG F60—2009, 公路隧道施工技术规范[S].

引用本文:周军强,凌涛,龙明华,等. 泥-砂岩混合地层隧道施工围岩稳定性数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):35-39.

- [7] 周后友,池恩安,欧阳天云,等. 爆破荷载作用下露天边坡稳定性分析[J]. 爆破, 2021,38(2):80-87.
- [8] 孙冰,罗志业,曾晟,等. 爆破振动影响因素及控制技术现状[J]. 矿业安全与环保, 2021,48(6):1-6.
- [9] 张袁娟,孔德增. 不同岩性对爆破振动效应影响研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):6-8.
- [10] 蒋楠,周传波,平雯,等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(1):237-243.
- [11] 何梦,陈金,张家兆,等. 岩石场地爆破振动衰减模型及减隔振效应研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):120-125.
- [12] 卢宏力. 大高差起伏地形露天爆破地震效应及其预测控制[D]. 湘潭:湖南科技大学土木工程学院, 2019.
- [13] 林海松. 高边坡爆破振动传播规律及其控制技术[J]. 工程爆破, 2020,26(2):69-74.
- [14] 张小军. 台阶爆破振动高程效应理论研究及应用[D]. 北京:北京科技大学土木与资源工程学院, 2021.

引用本文:付俊,周军,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.