

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.011

白马铁矿田家村南采区爆破测振 及村民房屋影响研究*

胡方强¹,张春阳²,谭海²,姜婷婷²,KABILA Kevin Mbuyu²

(1.攀钢集团矿业有限公司,攀枝花 617000;2.武汉理工大学资源与环境工程学院,武汉 430070)

摘要:为弄清白马铁矿田家村南采区露天台阶爆破振动对村民房屋的影响,结合房屋位置、露天采场现状、地质地貌特征、岩土体非均质特性,采用L20系列智能爆破测振仪进行爆破测振研究。测试结束后,采用最小二乘法对数据进行回归分析,获取了对应的 K, α 值,得出了各方向爆破振速的衰减规律,验证结果反映了 K, α 回归值的可靠性。对2019年7月—2020年10月田家村南采场1525 m、1540 m、1555 m台阶爆破振速进行反算,其中最大振速位于Z方向,值为0.33 cm/s,为田家村房屋爆破振动影响评估提供了依据。结果表明:村内测点爆破振速均不超过《爆破安全规程(GB6722—2014)》中“土窑洞、土坯房、毛石房屋”和“一般民用建筑物”爆破振动安全允许标准范围,但需考虑爆破振动对土坯房的长期影响,以及砖混房屋装饰、外瓷砖、灰抹层等非承重结构的长期影响,并以现场调查为准,对砖混房屋承重结构不构成安全影响。此外,结合设计资料,预测了将来的爆破振速,最大值位于Z方向,为0.54 cm/s,超过了土坯房的安全振速标准(0.45 cm/s, $f \leq 10$ Hz),但仍低于“一般民用建筑物”爆破振动安全允许标准(2.0 cm/s, $f \leq 10$ Hz)。最后,提出了降低单孔药量及推进数码电子雷管应用等相关建议。

关键词: 台阶爆破; 村民房屋; 爆破测振; 爆破振速; 露天采场

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0073-07

Study on Blasting Vibration Measurement and Influence on Villagers' Houses Safety in South Mining Area of Tianjiacun South Stope in Baima Iron Mine

HU Fang-qiang¹, ZHANG Chun-yang², TAN Hai², JIANG Ting-ting², KABILA Kevin Mbuyu²

(1. Pangang Group Mining Co., Ltd, Panzhihua 617000, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to ascertain the impact of vibration on the villagers' houses caused by bench blasting in south mining area of Tianjiacun south stope in Baima Iron Mine, combined with location of the houses, current situation of open-pit, geology and geomorphology characteristics, and the heterogeneity of rock and soil mass, the blasting vibration measurement was studied with the L20 series intelligent blasting vibration measuring instrument. After that, the least square method was used to carry out regression analysis on the data to obtain the corresponding values K, α values and the attenuation law of blasting vibration velocity in each direction, respectively. It can be seen that the validation results reflect the reliability of regression values of K and α . Furthermore, the vibration velocity of 1525 m, 1540 m and 1555 m Benches in south stope of Tianjiacun village from July 2019 to October 2020 were calculated in reverse. Among them, the maximum vibration velocity is 0.33 cm/s located in the Z direction, which provided a basis for evaluating the impact of blasting vibration on the houses. The results show that the blasting vibration velocities of the measuring points are no more than the permissible safety blasting vibration range of "earth cave, adobe house,

stone house" and "general civil buildings" in 《blasting safety regulations(GB672—2014)》. However, it is necessary to consider the long-term impact of blasting vibration on adobe house, as well as the decoration, exterior wall tiles, plaster layer, and other non-load-bearing structures of brick-concrete buildings, and take the field investigation as the criterion. However, it does not affect the safety of the load-bearing structure of brick-concrete buildings. In addition, combined with the design data, the blasting vibration velocity in the future is predicted, the maximum value is 0.54 cm/s in the Z direction, which exceeds the safety vibration standard of "earth cave, adobe house, stone house" (0.45 cm/s, $f \leq 10$ Hz). However, it is still lower than the safety allowable blasting vibration standard of "general civil buildings" (2.0 cm/s, $f \leq 10$ Hz). Finally, some suggestions are proposed, such as reducing single hole charge and promoting the application of digital electronic detonator.

Key words: bench blasting; villagers' houses; blasting vibration measurement; blasting vibration velocity; open pit stope

爆破是矿山开采和工程施工常见的作业方式,不可避免给周围环境带来干扰甚至安全隐患。为弄清爆破振动的影响程度,测振在爆破作业过程中具有重要意义。黄磊和何祥采用 NUBOX-8016 型智能振动测试仪确定了金宝铁矿爆破峰值振动速度衰减规律^[1],论证了金宝铁矿爆破振动对边坡稳定性的影响。随着计算机技术发展,数值模拟可以弥补爆破测振的不足。梁琨等结合现场爆破振动监测及 ANSYS/LS-DYNA,分析小净距隧道爆破开挖中,后行洞上台阶爆破对先行洞的动力响应^[2];程平等通过 LS-DYNA 得到了爆破振动下围岩应力分布、位移变化规律^[3],以及地震波沿隧道轴向及衬砌环向的速度衰减规律。此外,试验也是有效的研究手段,黄锡琴等通过混凝土模型爆破试验研究露天矿爆破振动规律^[4],爆破振动高程效应与炸药量间的关系。总之,他们的研究为爆破振动危害防控提供了理论依据。

目前爆破振动危害防控的措施较多,例如,数码电子雷管的使用实现了延期精准调控,使爆破震动大幅度降低^[5];孙颖等提出了相应的爆破振动控制标准及措施,用于葛洲坝3号船闸爆破拆除作业^[6];张袁娟等采用预裂缝进行防振减振^[7];余红兵和赵明生提出了覆盖防护、减震沟隔离、钢管排架防护^[8],最大单响药量控制、爆破网路优化等防控措施。

以白马铁矿田家村南采场为研究对象,自生产以来,采场爆破振动已引起当地村民关注,并担心对

房屋造成安全隐患。参考已有研究成果,本文通过爆破振速监测、数据处理和振速反算,结合相关规程评估爆破振动对房屋的影响,并提出相应减振建议。

1 工程概况及测点布置

白马铁矿是攀钢集团重要的钒钛磁铁矿生产基地,田家村属于二期新开采场,位于四川省攀枝花市米易县境内。采场矿体走向近南、北,长度约3000 m,倾向西,倾角 $60^\circ \sim 65^\circ$,121b、122b基础储量(B+C级)为1.98亿t。二期设计开采规模为500万t/a,于2010年10月开始基建,2011年投产,2012年达到500万t/a,2019年为计算年,采剥总量2250万t/a,生产剥采比3.50,服务年限约33a,其中稳产时间约30a。采场台阶高度15m,目前采用C150mm型液压钻穿孔,孔网参数岩石5m×5m,矿石4m×5m。矿山环境及现状见图1所示。



图1 露天采场开采现状

Fig. 1 Mining status in the open stope

考虑到房屋位置、露天采场现状、地质地貌特征、岩土体非均质性,以及当前矿山开采现状,爆破测振爆源位置选为1600m、1570m、1555m、1525m平台,它们离村庄的距离最近,爆源与测点相对位置如图2所示。

收稿日期:2021-03-16

作者简介:胡方强(1982-),男,湖南岳阳人,工程师、硕士,主要从事露天矿开采与管理方面的研究,(E-mail)36432321@qq.com。

通讯作者:张春阳(1981-),男,湖南怀化人,副教授、博士,主要从事矿山开采及岩石力学方面的研究,(E-mail)zhangchy@whut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51804236)



图2 爆源与测点位置及村庄分区

Fig. 2 The location of explosion sources, measuring point and village division

2 采区爆破设计

该矿山采用混装炸药爆破,导爆管雷管反向起爆。设计台阶高度 15 m,炮孔孔径 160 mm,孔深约 17.5 m,堵塞长度约 5 ~ 8 m。在 10 月 10 日,1570 台阶采用三角形布孔,总数 94 个,孔距 5 ~ 6 m,排距 4 m,最小抵抗线 3 m;1600 台阶布孔 71 个,孔距 5.5/6 m,排距 4 m,孔深 17.1 ~ 18.2 m,填塞长度大于等于 5 m,超深 2.5 m,最小抵抗线 3 m。在 10 月 12 日,1555 台阶布孔 112 个(三角形布孔),孔距 5.5/6 m,排距 4 m,最小抵抗线 3 m,孔深 15.8 ~ 17.8 m,填塞长度大于 5 m,超深 2.5 m。在 10 月 14 日,1525 台阶布孔 37 个,孔距 5.5 m,排距 4 m,最小抵抗线 3 m,填塞长度大于等于 5 m,超深 2.5 m,孔深 16.7 ~ 17.3 m。采用连续装药结构,岩粉堵塞炮孔。典型的台阶切面如图 3 所示。

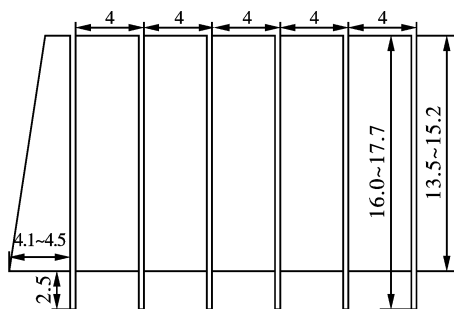


图3 典型的爆区切面图(单位:m)

Fig. 3 Typical section of blast zone(unit:m)

采用导爆管雷管起爆,典型孔间延时、起爆顺序见图 4 所示,为确保起爆炮孔的爆破振动峰值最大,降低其他炮孔干扰,将设计的单孔起爆调整为前两孔同时起爆,因此对于 1570 m、1600 m、1555 m 和 1525 m 台阶,单孔最大药量分别为 520 kg、280 kg、520 kg、530 kg。

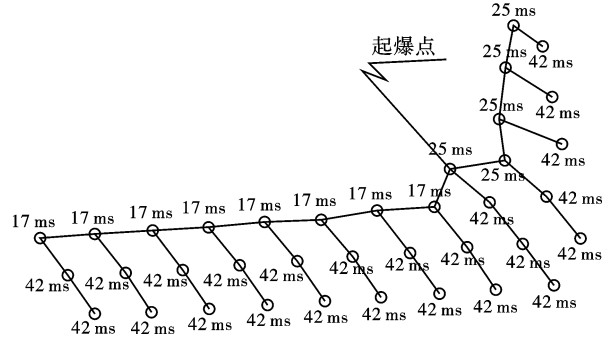


图4 典型的起爆网路

Fig. 4 Typical detonating network

3 爆破振动测试及数据分析

3.1 测点布置原则

为了获得更多测振数据,每条测线上布置 5 ~ 6 个测点,各测点振速传感器尽可能位于同一直线上。根据爆破破岩机理,振动波在爆源近区衰减快、远区衰减慢,呈幂指数衰减规律。考虑到爆破测试单段最大药量均为 520 kg 左右,因此,测点遵循近密远疏布置,测线范围在 1000 m 以内。为了全面反映爆破地震波衰减规律,并保证测量仪器安全,在各测线上,测点 1(图 2)的爆心距选取为 120 ~ 250 m。相邻测点间的距离取为 20 ~ 50 m,根据实际地形情况合理布置,确保在近区、中远区均能采集到振动数据。现场典型的爆破振动监测点如图 5 所示,对于村庄外测点,测振仪多安装在地表坚硬稳固的基岩上,而对于村内测点,测振仪可安装在居民院中的水泥地面上。



(a) 村外测点
(a) Measuring points outside the village

(b) 村内测点
(b) Measuring points in the village

图5 现场典型测点

Fig. 5 Typical measuring points on site

3.2 数据处理与特征分析

在爆破结束确认安全后,方可收装仪器,并及时进行数据整理。现场一共布置了三条测线(图 2),典型的爆破振动波形如图 6 所示,它显示了测线 1 上测点 2 的爆破振动波形,其中 X、Y、Z 分别代表测点指向爆源方向(水平径向)、垂直于 X 方向(水平

切向)、竖直方向。该点位于采场内,振动速度相对较大,其中 X 轴振速达到了 1.75 cm/s ,而 Y 和 Z 轴的振速相对小一些,但也分别为 1.1 cm/s 和

1.01 cm/s 。当然随着离爆心距离增大,振速逐渐减小。此外,从图6中还可以看出,爆破振动的持续时间大概为 0.5 s 。

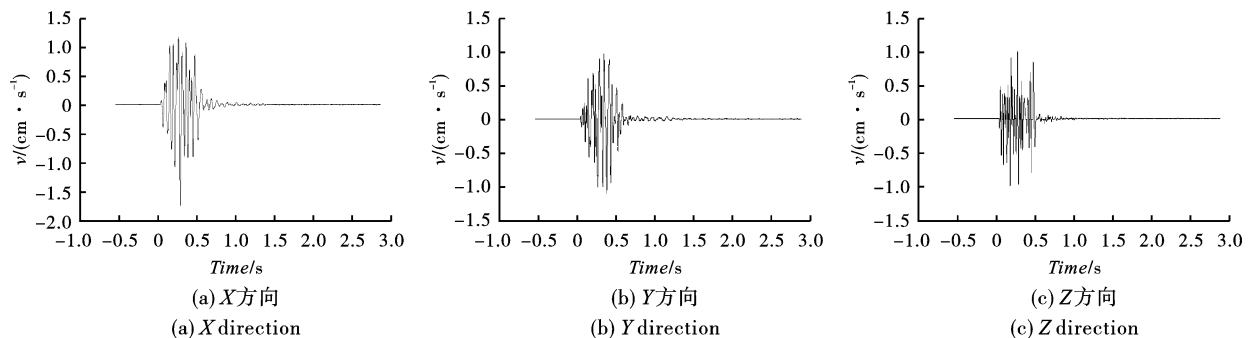


图6 测线1上测点2的爆破振动波形图(1570台阶)

Fig. 6 Blasting vibration waveform of line 1 measuring point 2(1570 bench)

为了分析爆破振动的衰减规律,以测线1上1570台阶爆破为例,整理后的数据如表1所示。表中 Q 代表单响最大药量(kg), V_p 为爆破振动峰值速度(cm/s), f 为峰值振速的频率(Hz), X 、 Y 、 Z 分别

为水平径向、水平切向、竖直方向, D 为测点到爆源的距离(m)。各测点位置及编号见图2所示,其中测点5、6位于田家村内,且测线3的5号测点位于离采场境界300 m范围以内。

表1 爆破振动数据表(1570台阶1号测线)

Table 1 Blasting vibration data sheet(No. 1 line of 1570 bench)

单响大药量 Q/kg	测点编号	测点距爆源距离 D/m	测点海拔高程 H/m	坐标轴	质点振动速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	频率 f/Hz
520	测点 1	122	1522	x 轴	3.96	22.40
				y 轴	0.02	32.60
				z 轴	1.25	24.20
	测点 2	169	1519	x 轴	1.75	11.50
				y 轴	1.10	17.30
				z 轴	1.01	32.30
	测点 3	271	1515	x 轴	0.91	16.30
				y 轴	1.34	14.90
				z 轴	0.68	18.40
	测点 4	349	1516	x 轴	0.37	20.60
				y 轴	0.32	12.00
				z 轴	0.33	13.80
	测点 5	979	1416	x 轴	0.06	7.30
				y 轴	0.07	7.70
				z 轴	0.06	41.90
	测点 6	1017	1413	x 轴	0.09	20.20
				y 轴	0.05	16.30
				z 轴	0.08	13.70

测线上爆破振动速度的峰值基本对应于最先起爆的炮孔。测线1上的测点1、2安装在下一个平台基岩上,离震源最近,故振动速度较大;测点3、4刚

好位于开采境界之外,与测点1、2间有一小土坡,会加快爆破振速衰减,测点5、6位于村内水泥地面上,距离起爆点高差大,距离远,且有水沟隔开,因此振

速衰减最大,其值均小于 0.10 cm/s。此外,由于地震波在传播过程中发生了叠加,个别通道采集的峰值不在波的前端。

爆源与民宅间地质条件复杂,有岩石、土、破碎带、沟渠等,地震波衰减较岩体快。爆区与民宅间的高程差约 70 多 m,回归需要考虑高差影响。根据国家爆破安全规程及国内外研究成果,一般采用萨道夫斯基经验公式分析爆破振动传播与衰减规律

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

式中:K 为与地质、爆破方法等因素有关的系数; α 为与地质条件有关的地震波衰减系数;Q 为与振速 V 值相对应的最大一段起爆药量,kg;R 为测点与爆心之间的距离,m。

采用最小二乘法对实测数据进行回归分析,获取对应 K、 α 值,它们在各方向的差异,由断层分布、节理裂隙发育、地形地貌等因素决定。对比发现,在测线 2 上,X、Y 和 Z 方向的 K 和 α 值为最不利组合,它们对应的爆破振速相对最大,因此,采用测线 2 上 K、 α 值进行爆破振速反算更为合理。三条测线的 K、 α 值如表 2 所示。

表 2 各测线 K、 α 回归值
Table 2 K and α values obtained from regression of each measuring line

测线编号	坐标轴	K	α
测线 1	x	209.1	1.6
	y	251.8	1.6
	z	141.9	1.5
测线 2	x	255.9	1.5
	y	274.3	1.6
	z	274.3	1.5
测线 3	x	181.0	1.5
	y	222.9	1.7
	z	128.9	1.5

3.3 回归结果验证与爆破评估

村内测点振速反算结果表明:爆破振速反算值与实测值较为接近,反算值总体上稍大于实测值,如表 3 所示,这是由于振动波离开露天坑后,进入土质坡面,振动速度衰减相对加快,此外,还受到地形地貌、沟等因素影响,可见,K、 α 的回归值稍微偏大。不过,为了提高评估的可靠性,需考虑最不利状况,因此,本文采用测线 2 的 K、 α 组合。

表 3 村内测点振速实测值与反算值对比

Table 3 Comparison of measured value and back-calculation value of vibration velocity of measuring points in the village

最大起爆药量 Q/kg	测点编号	测点与爆心的距离 R/m	坐标轴	α	K	反算测点振动速度/实测测点振动速度	
						$V_1/(cm \cdot s^{-1})$	$V_2/(cm/s^{-1})$
520	测线 1 上测点 5 (1570 台阶)	979	X	1.6	209.1	0.10	0.06
			Y	1.6	251.8	0.12	0.07
			Z	1.5	141.9	0.11	0.06
280	测线 1 上测点 5 (1600 台阶)	1166	X	1.6	209.1	0.05	0.06
			Y	1.6	251.8	0.06	0.06
			Z	1.5	141.9	0.06	0.09
520	测线 1 上测点 6 (1570 台阶)	1017	X	1.6	209.1	0.09	0.09
			Y	1.6	251.8	0.11	0.05
			Z	1.5	141.9	0.10	0.08
280	测线 1 上测点 6 (1600 台阶)	1206	X	1.6	209.1	0.05	0.08
			Y	1.6	251.8	0.06	0.05
			Z	1.5	141.9	0.06	0.06
520	测线 2 上测点 5 (1555 台阶)	860	X	1.5	255.9	0.23	0.09
			Y	1.6	274.3	0.10	0.16
			Z	1.5	274.3	0.16	0.16
520	测线 3 上测点 6 (1525 台阶)	603	X	1.5	181.0	0.28	0.13
			Y	1.7	222.9	0.14	0.12
			Z	1.5	128.9	0.20	0.23

根据测线 2 的 K、 α 值,对矿山 2019 年 7 月—2020 年 10 月的爆破作业进行反算验证,考虑到爆

区与住宅的距离、沟等因素,将田家村划分为三个典型区域(图 2)。反算结果表明:村内各测点 X、

Y和Z方向的爆破振速均不超过《爆破安全规程》GB6722—2014中13.2.2条规定的安全允许振速范围($0\text{ Hz} < f < 50\text{ Hz}$)。考虑到测试结果存在小于10 Hz的波频率,因此,以 $f \leq 10\text{ Hz}$ 作为评估标准;对于土坯房,一般认为振速小于 0.45 cm/s 时,主要表现为长期影响,因此,以 0.45 cm/s 作为判断依

据。最大振速反算值如表4所示,其中Z方向爆破振速衰减最慢。由于田家村各区域房子距离近,地质地形条件相似,因此,各区域房子以此振速为参考。当然,2019年7月—2020年10月期间的爆破振速反算值仅有参考价值,实际评估需要结合实测值和现场调查科学确定。

表4 爆破振速最大反算值分布范围(Z方向)

Table 4 Distribution range of maximum back-calculation value of blasting vibration velocity(Z direction)

爆破台阶/日期	Q/kg	α	K	位置	R/m	$V/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1525/2020-5-21	260	1.7	274.3	1区	580	0.32
				2区	630	0.28
				3区	710	0.23
1525/2020-6-18	290	1.7	274.3	1区	580	0.33
				2区	630	0.30
				3区	710	0.25
1525/2020-6-29	290	1.7	274.3	1区	580	0.33
				2区	630	0.30
				3区	710	0.25
1525/2020-9-15	280	1.7	274.3	1区	590	0.32
				2区	630	0.29
				3区	710	0.24

3.4 未来爆破振速预测与评估

预测台阶如图7所示,在台阶上选取靠近村庄的参考点共3个,单孔药量分别为:260 kg、270 kg、280 kg、290 kg(目前爆破常用单孔药量)。反算结果表明:最终境界各台阶爆破作业时,村庄内测点振速反算值总体大于当前振速;对于1435 m(参考点2)和1465 m(参考点1)台阶最靠近村庄处,Z方向

爆破振速(分别对于区域1和区域2)可能会超过或接近《爆破安全规程(GB6722—2014)》中“土窑洞、土坯房、毛石房屋”规定的安全允许标准,但仍低于《爆破安全规程(GB6722—2014)》中“一般民用建筑物”爆破振动安全允许标准,Z方向典型爆破振速反算值如表5所示。

表5 典型的爆破振速最大预测值范围(Z方向1435 m平台)

Table 5 Distribution range of typical maximum prediction values of blasting vibration velocity(1435 m bench in Z direction)

爆破台阶	Q/kg	α	K	位置	R/m	$V/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1435	260	1.5	274.3	1区	420	0.51
				2区	450	0.46
				3区	540	0.35
1435	270	1.5	274.3	1区	420	0.52
				2区	450	0.47
				3区	540	0.36
1435	280	1.5	274.3	1区	420	0.53
				2区	450	0.48
				3区	540	0.37
1435	290	1.5	274.3	1区	420	0.54
				2区	450	0.49
				3区	540	0.37

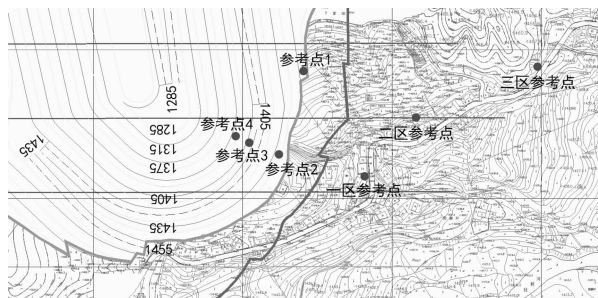


图7 采场最终境界爆破振速预测参考点位置

Fig. 7 Location of reference point for prediction of blasting vibration velocity at final boundary of slope

此外,为了使最终境界各台阶爆破振速与当前爆破振速接近,必须降低单孔药量,优化爆破方案;对于靠近村庄处,最大单孔药量应小于199 kg(以 $V < 0.45$ cm/s计算)。考虑到最终境界图的精度问题,以及今后开采调整,因此,反算结果和允许最大单孔药量仅作为参考。

4 结论

田家村内测点爆破振速均低于《爆破安全规程(GB6722—2014)》中“土窑洞、土坯房、毛石房屋”和“一般民用建筑物”爆破振动安全允许标准。

选取最不利条件下各坐标轴 K 、 α 值,反算村内测点振速,结果表明:反算值总体上大于实测值,这是由于 K 、 α 依据露天坑内矿岩区测点反算得出,坑外地表为土层,且受到地形、沟等不利因素影响;此外,反算验证了 K 、 α 值的可靠性。

考虑最不利因素、爆破的长期作用,当前逐孔起爆单孔药量不应超过384 kg(以离爆破点最近房屋计算);以目前逐孔起爆设计的最大单孔药量290 kg计算,爆破点离房屋最近距离应大于288 m($V < 0.45$ cm/s)。建议矿山继续采用逐孔起爆技术,加快电子数码雷管的应用,实现精准延时,进一步降低爆破振速。根据最终境界爆破振速预测值,今后的爆破方案需适当调整,以便控制爆破振速不超过当前水平。

以上结论只适用当前矿区开采范围,当爆区位置变动较多后建议复核,而最终境界各台阶爆破振速反算值只能作为参考。

参考文献 (References)

[1] 黄磊,何祥. 新疆金宝铁矿露天爆破振动速度安全允许值研究[J]. 矿业工程, 2021, 19(1): 24-27.
 [1] HUANG Lei, HE Xiang. Research on safety allowable value of open-pit blasting vibration velocity in Xinjiang Jinbao Iron Ore Mine [J]. Mining Engineering, 2021,

19(1): 24-27. (in Chinese)
 [2] 梁琨,王树欣,张宪堂,等. 大跨度小净距隧道爆破振动响应研究[J]. 爆破, 2021-01-04. <https://doi.org/10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.001>.
 [2] LIANG Kun, WANG Shu-xin, ZHANG Xian-tang, et al. Research on blasting vibration response of large-span and small spacing distance tunnel [J]. Blasting, 2021-01-04. <https://doi.org/10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.001>. (in Chinese)
 [3] 程平,王林峰,郑志伟,等. 隐伏岩溶区小净距隧道爆破振动规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 10017-10024.
 [3] CHENG Ping, WANG Lin-feng, ZHENG Zhi-wei, et al. Blasting vibration effect of small clear distance tunnel in hidden Karst Areas [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24): 10017-10024. (in Chinese)
 [4] 黄锡琴,张小军,孙俊山,等. 炸药量对爆破振动高程效应影响的模型试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1): 16-21.
 [4] HUANG Xi-qin, ZHANG Xiao-jun, SUN Jun-shan, et al. Model test study on influence of explosive amount on elevation effect of blasting vibration [J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2021, 73(1): 16-21. (in Chinese)
 [5] 王波,郭迅,郭嘉源,等. 隧道爆破振动对地表建筑的影响—以京张高铁怀来段某隧道为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(25): 10452-10458.
 [5] WANG Bo, GUO Xun, GUO Jia-yuan, et al. Influence of vibration caused by tunnel blasting on buildings; a case study [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(25): 10452-10458. (in Chinese)
 [6] 孙颖,苏利军,陈明,等. 葛洲坝3号船闸爆破拆除方案及爆破振动控制研究[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 184-190.
 [6] SUN Ying, SU Li-jun, CHEN Ming, et al. Study on blasting demolition scheme and blasting vibration control of No. 3 ship lock in Gezhouba hydro-junction [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 184-190. (in Chinese)
 [7] 张袁娟,王幸荣,可杰. 不同深度预裂缝对减震效果影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(8): 68-69, 74.
 [7] ZHANG Yuan-juan, WANG Xing-rong, KE Jie. Study on shock absorption effect of pre-splitting crack with different depth [J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(8): 68-69, 74. (in Chinese)
 [8] 余红兵,赵明生. 复杂环境废弃烟囱爆破拆除及安全控制措施研究[J]. 爆破, 2020, 37(2): 69-74.
 [8] YU Hong-bing, ZHAO Ming-sheng. Study on blasting demolition of abandoned chimney in complex environment and safety control measures [J]. Blasting, 2020, 37(2): 69-74. (in Chinese)