

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2021.12.014

某锡矿地下采场爆破参数优化研究

马俊杰^{1,2}, 黄永辉³, 张智宇^{1,2}, 李洪超⁴

- (1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;
2. 云南省中一德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室, 昆明 650093;
3. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500;
4. 昆明理工大学 城市学院, 昆明 650051)

摘要: 云南省某锡矿由于爆破参数不合理, 导致炸药单耗过高, 并且大块较多, 在一定程度上对矿山的经济效益造成影响。为通过优化爆破参数改变此现状, 基于利文斯顿爆破漏斗原理, 在该矿 1660 中段某采场按照不耦合装药的形式, 进行单孔爆破漏斗试验、变孔距爆破漏斗试验、斜面台阶爆破漏斗试验。得到该种锡矿的最佳炸药单耗、爆破漏斗最大体积、最佳爆破漏斗半径、最小抵抗线和最佳孔间距。基于爆破漏斗理论对采场爆破参数进行优化, 最终得出采场的合理爆破参数、孔间距和排距。按照此参数在该矿山进行应用, 取得了良好的效果。

关键词: 爆破漏斗试验; 空气不耦合装药; 最佳埋深; 柱状药包; 参数优化

中图分类号: TD235.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1744(2021)12-0093-07

Optimization Study of Blasting Parameters in an Underground Mining Site of a Tin Mine

MA Junjie^{1,2}, HUANG Yonghui³, ZHANG Zhiyu^{1,2}, LI Hongchao⁴

- (1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Key Laboratory of Sino-German Blue Mine and Special Underground Space Development and Utilization, Yunnan Province, Kunming 650093, China;
3. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
4. School of Urbanism, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: A tin mine in Yunnan province has a high explosive unit consumption and a high number of large blocks due to unreasonable blasting parameters, which to a certain extent affects the economic efficiency of the mine. In order to change this status quo by optimizing blasting parameters, a single-hole blasting funnel test, a variable-hole-spacing blasting funnel test and a sloping step blasting funnel test were carried out in a quarry in the middle section of 1660 in this mine according to the form of uncoupled charging, based on the Livingston blasting funnel principle. The optimum explosive unit consumption, maximum blast funnel volume, optimum blast funnel radius, minimum resistance line and optimum hole spacing were obtained for this type of tin ore. The blasting parameters of the quarry were optimised based on the blast funnel theory to give reasonable blasting parameters, hole spacing and row spacing for the quarry. The parameters were applied in this mine, and good results were achieved.

Key words: blast funnel test; air uncoupled charge; optimum burial depth; column pack; parameter optimisation

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52064025, 52164009, 52164010)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52064025, 52164009, 52164010)

作者简介: 马俊杰(1995—), 男, 硕士研究生, 矿业工程专业, 主要从事爆破参数优化的研究。

通信作者: 李洪超(1984—), 男, 博士, 讲师, 从事爆破技术理论研究。

引用格式: 马俊杰, 黄永辉, 张智宇, 等. 某锡矿地下采场爆破参数优化研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 93-99.

MA Junjie, HUANG Yonghui, ZHANG Zhiyu, et al. Optimization Study of Blasting Parameters in an Underground Mining Site of a Tin Mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(12): 93-99.

目前,在地下矿山开采中,爆破仍然是主要技术手段。炸药单耗为控制爆破成本的一个重要因素,若其过高,会造成炸药的浪费及部分矿石过粉;若其过低,会导致爆破效果差、大块率过高,甚至无法将矿体崩落,进一步影响接下来的回采运输。

20世纪50至60年代,利文斯顿(C. W. LIVINGSTON)在大量的漏斗实验中,总结归纳出了爆破漏斗理论,由于其简单有效,众多学者依据此理论对各种地下矿山进行爆破参数的设计与优化^[1]。吴春平等^[2-4]将爆破漏斗实验的步骤、基本类型、数据的采集与分析方法进行总结,并在会泽铅锌矿进行了一系列单孔、变孔距爆破漏斗实验,对优化会泽铅锌矿的爆破参数起到了一定的指导作用。张康康等^[5]通过系列爆破漏斗试验,对中深孔爆破的炸药单耗、孔间距、孔底距等参数进行了优化。杨福波^[6]在沙溪铜矿进行了单孔、同段变孔距双孔爆破漏斗实验,优化了该矿的大直径深孔爆破的爆破参数。曾普海等^[7]在驰宏下属某铅锌矿进行了45°和30°斜面台阶爆破漏斗试验,通过对试验参数的分析得到了该矿山的炮孔最大抵抗线参数。张立新^[8]通过在李楼铁矿采场进行系列爆破漏斗试验得到了不同孔径的中深孔凿岩爆破的推荐参数。韩增增^[9]对曼家寨露天采场三种主要的岩性分别进行了爆破漏斗试验,研究了不同孔径不同岩性的孔网参数,并采用逐孔起爆技术对此孔网参数与单耗进行优化。

云南某锡矿于2014年用一号岩石乳化炸药更换了原来使用多年的粉状乳化炸药,由于依然沿用原来使用多年的爆破参数,导致大块率上升。在一定程度上影响了该矿山的经济效益。为此,决定在该矿地下某采场进行爆破漏斗系列试验,对该矿山上向扇形孔爆破进行参数优化。

1 爆破漏斗试验原理

利文斯顿通过进行大量的漏斗试验,并对漏斗试验数据进行分析研究,发现炸药爆炸后,其爆炸的能量传递给岩石,传递的效率、速度与岩石以及炸药的相关参数有关。从对岩石造成破坏的角度来讲,传递给岩石的能量随埋深逐渐变小,传递给空气的能量逐渐增加。当埋深较小时,以钻孔为中心的岩石会被抛出,形成漏斗形状的破坏。在装药量(Q)一定时,漏斗的体积(V)随着药包埋深的减小呈现出一定的规律,体积从形成之后逐渐达到最大然后逐渐减小。当药包埋深达某一深度,其爆炸作用可

以使表面处的岩石开始产生破坏,这时的药包埋深称为临界埋深(L_c);随药包埋深的逐渐减小,当产生爆破漏斗体积最大时,此时的药包埋深被称为最佳埋深(L_j)。

利文斯顿通过此现象提出了弹性变形方程^[1]:

$$L_c = E_b(Q)^{1/3} \quad (1)$$

式中, L_c 为临界埋深,m; E_b 为弹性变形系数,对于特定岩石和炸药为常数; Q 为药包质量,kg。

对于最佳埋深 L_j 有^[1]:

$$L_j = \Delta_0 E_b(Q_0)^{1/3} \quad (2)$$

式中, L_j 为最佳埋深,m; Δ_0 为最佳埋深比,对某一特定岩石为一定值; E_b 为弹性变形系数,对于特定岩石和炸药为常数; Q_0 为最佳药包质量,kg。

如果认为药包最佳埋深 L_j 为此状态下的最小抵抗线 W 。则可得出药包质量 Q 与最小抵抗线 W 成一定比例关系,即当药包质量为 Q_1 时,最小抵抗线为 W_1 ,药包质量改变为 Q_2 时,最小抵抗线改变为 W_2 ,可得式(3)^[10]。

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{Q_1^{1/3}}{Q_2^{1/3}} \quad (3)$$

若假设 Q_1 、 Q_2 为同种炸药并且均为球形药包时,此时炸药密度 ρ 相同,可得式(4)。

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\left(\frac{4}{3}\rho\pi r_1^3\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{4}{3}\rho\pi r_2^3\right)^{\frac{1}{3}}} = \frac{r_1}{r_2} \quad (4)$$

式中, r_1 为漏斗试验球形药包半径,m; r_2 为采场深孔爆破实际球形药包半径,m。

由于采场深孔爆破在实际中不采用球状药包,所用药包基本为柱状药包,以上理论需要考虑两种不同装药形式下参数的相互转化。部分研究表明,柱状药包的破坏作用与球状药包的破坏作用不完全相同,在可以得到相似的爆破效果时,柱状药包的抵抗线大于球状药包的抵抗线,并有如下关系^[10](式5)。

$$W_z = K_w W_q \quad (5)$$

式中, W_z 为柱状药包抵抗线,m; W_q 为球状药包抵抗线,m; K_w 为系数, $K_w=1.2\sim 1.6$ 。

根据上述理论,可以设计通过在一个较小的装药量下进行单孔爆破漏斗试验,确定在此药量下的最佳埋深。孔底距 a 可参考单孔爆破漏斗的半径,根据在最佳埋深条件下进行的变孔距爆破漏斗试验,即在不同的孔间距下,按最佳埋深进行同段爆破试验,通过爆破效果求得最佳的孔间距。

药包的破坏作用具有一定的范围,若抵抗线大于药包的破坏半径,则无法对此范围以外的岩石进行破坏。为确定最小抵抗线 w ,需设计进行斜面台阶爆破漏斗试验,试验可通过由小变大连续变化抵抗线确定最小抵抗线。

综上,可通过上述三种系列试验确定采场深孔爆破的参数。

2 试验方案

爆破漏斗试验要求试验地点的岩性要与采场的岩性近似甚至相同,因此本次试验选择在 1660 中段某采场,爆破漏斗系列试验分为三组进行,所采用的乳化炸药以及炮孔孔径均与采场深孔爆破一致。

2.1 单孔爆破漏斗试验

炮孔直径为 $d=60$ mm,所采用的炸药为一号岩石乳化炸药($\Phi=45$ mm, $L=28$ cm, $m=0.5$ kg/卷)。炮孔使用手扶气腿式凿岩机,在距底板 1.2 m 即沿巷道腰线、垂直于巷道壁布置,孔深由小到大分别为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7 m,炮孔间距设计为 2.5 m。每孔装药量均为 1.0 kg,理论装药长度为 56 cm,即乳化炸药 2 卷。每个炮孔均要求使用炮泥填塞至孔口。

选用导爆管雷管逐孔起爆,装药结构为连续不耦合装药。具体炮孔布置如图 1 所示。

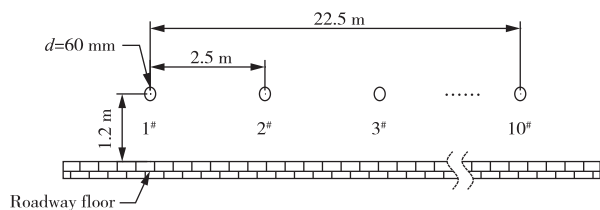


图 1 不耦合单孔爆破漏斗试验炮孔布置示意图

Fig. 1 Diagram of the uncoupled single-hole blast funnel test hole arrangement

2.2 变孔距爆破漏斗试验

在不耦合单孔爆破漏斗试验的基础上,保持装药量以及药包埋深不变,共设计 6 个炮孔,第 1~6 号炮孔距离依次为单孔爆破漏斗最佳漏斗半径(R)的 1.5 倍、1.8 倍、2.1 倍、2.4 倍、2.7 倍。所采用的乳化炸药($\Phi=45$ mm, $L=28$ cm, $m=0.5$ kg/卷)与同段单孔爆破漏斗试验一致,每孔装药 2 卷。每个炮孔均要求使用炮泥填塞至孔口。

炮孔起爆时采用同段导爆管雷管一次起爆,具体炮孔布置如图 2 所示。

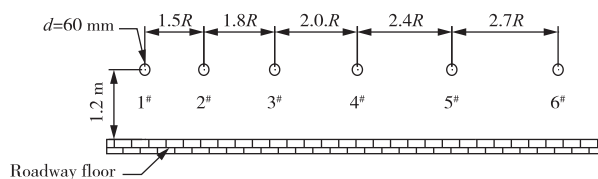


图 2 不耦合变孔距爆破漏斗试验炮孔布置示意图

Fig. 2 Diagram of the uncoupled variable pitch blast funnel test hole layout

2.3 斜面台阶爆破试验

在采场岩壁上使用气腿式凿岩机凿钻两个与岩壁深度为 1.8 m 的钻孔,并保证两个炮孔之间留有足够的距离,炮孔为与岩壁分别成 45° 与 55° 角的水平孔。所采用的乳化炸药($\Phi=45$ mm, $L=28$ cm, $m=0.5$ kg/卷)与同段单孔爆破漏斗试验一致,每孔装药 4 卷。每个炮孔均要求使用炮泥填塞至孔口。炮孔起爆时采用导爆管雷管逐孔起爆,具体炮孔布置参数如图 3 所示。

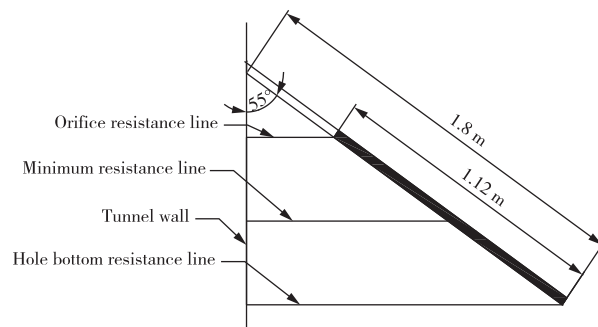


图 3 不耦合斜面台阶爆破漏斗 55° 试验炮孔布置示意图

Fig. 3 Diagram of the 55° test hole layout of the uncoupled sloped step blast funnel

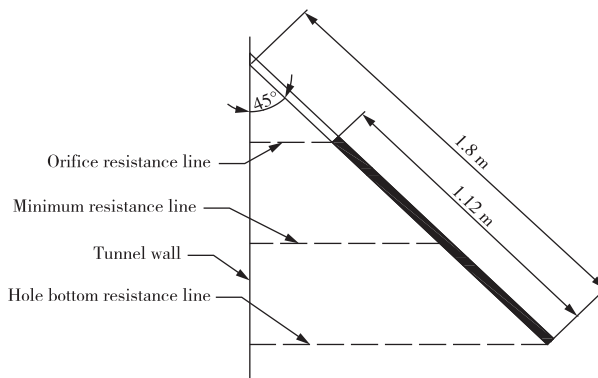


图 4 不耦合斜面台阶爆破漏斗 45° 试验炮孔布置示意图

Fig. 4 Diagram of the 45° test hole layout of the uncoupled sloped step blast funnel

2.4 漏斗体积的测量

漏斗试验爆破结束,待炮烟散去后,用撬杠清理漏斗表面的浮石,量取漏斗各点参数。在漏斗基面上每隔 45° 选取一个点,该平面选取 8 个点,量取每个点到漏斗装药中心的垂直距离,量取漏斗深度;在漏斗深度 $1/2$ 处选取一个平面,每隔 45° 选取一个点,共选 8 个点,量取每个点到装药中心的垂直距离,再选 1 个漏斗的顶点,共计 17 个点,如图 5 所示,计算各点在三维直角坐标系中的具体坐标 (x, y, z) 。在 3DMine 软件通过坐标,利用软件中的网格算法生成整个漏斗的模型,最后通过内置算法得到该漏斗的体积,如图 6 所示。



图 5 爆破漏斗体积测量特征点选取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the selection of characteristic points for blast funnel volume measurement

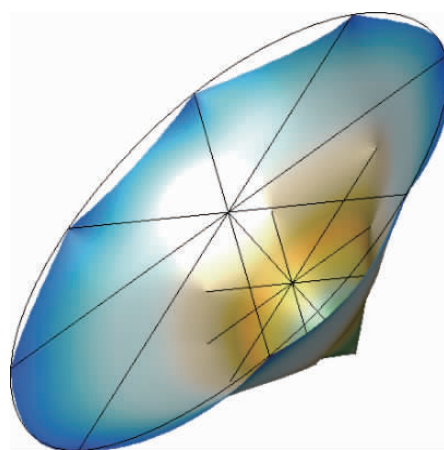
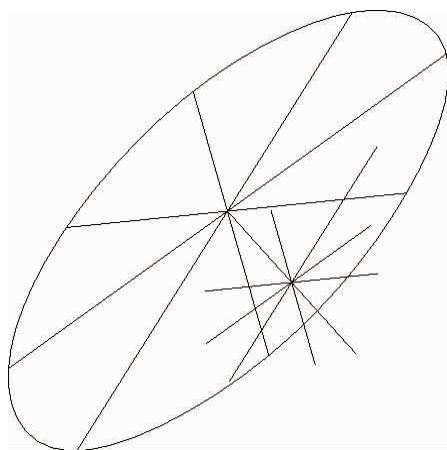


图 6 漏斗体积计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram for calculating the volume of the funnel

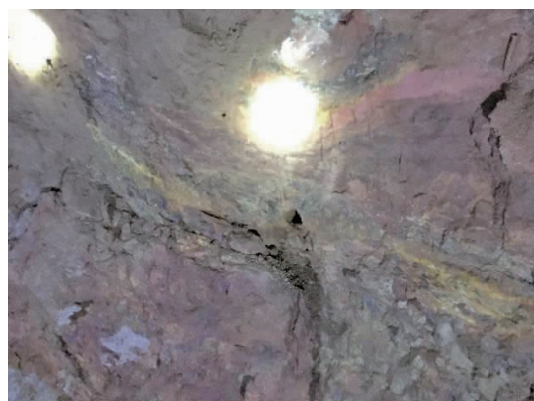
3 试验结果分析

3.1 单孔爆破漏斗试验

通过统计 9 个炮孔的炮孔深度、药包埋深、漏斗

体积等参数计算炸药单耗,得出最佳埋深。爆前、爆后现场情况如图 7 所示。

不耦合单孔爆破漏斗试验相关参数统计见表 1,不耦合单孔爆破漏斗试验数据拟合见图 8。



(a) Before blasting



(b) After blasting

图 7 不耦合单孔爆破漏斗试验

Fig. 7 Uncoupled single hole blast funnel experimental site

表 1 不耦合单孔爆破漏斗参数统计($d=60\text{ mm}$)Table 1 Statistics of uncoupled single hole blast funnel parameters($d=60\text{ mm}$)

N	L_1/m	h_1/m	h_2/m	R/m	L_2/m	V/m^3	$q/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1	0.8	0.56	0.52	0.78	0.80	0.48	2.08
2	0.9	0.56	0.62	0.75	0.90	0.55	1.82
3	1.0	0.56	0.72	0.73	1.00	0.55	1.80
4	1.1	0.56	0.82	0.78	1.10	0.66	1.52
5	1.2	0.56	0.92	1.02	1.20	1.23	0.82
6	1.3	0.56	1.02	1.16	1.30	1.62	0.62
7	1.4	0.56	1.12	1.16	1.40	1.46	0.69
8	1.5	0.56	1.22	0.81	1.50	0.95	1.05

Note: N—Hole number; L_1 —Borehole depth; h_1 —Explosive length; h_2 —Depth of explosives; R —Blasting funnel radius; L_2 —Blasting funnel depth; V —Blasting funnel volume; q —Unit consumption of explosives

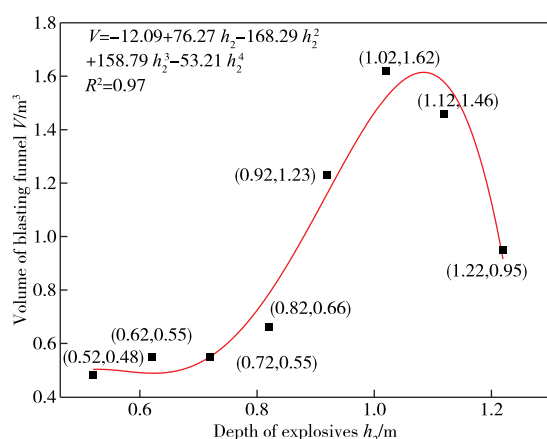


图 8 不耦合单孔爆破漏斗试验数据拟合

Fig. 8 Uncoupled single hole blast funnel experimental data fit

对单孔爆破漏斗试验数据使用最小二乘法进行四次线性回归,拟合出炸药埋置深度与漏斗体积表达的关系式:

$$V = -12.09 + 76.27h_2 - 168.29h_2^2 + 158.79h_2^3 - 53.21h_2^4 \quad (7)$$

式中, V 为爆破漏斗体积, m^3 ; h_2 为药包埋深, m 。对此公式求一阶导可得:

$$V' = 76.27 - 336.58h_2 + 476.37h_2^2 - 212.88h_2^3 \quad (8)$$

对此方程求解可得此方程在 0.5 到 1.2 之间存在最大值 $V=1.61\text{ m}^3$, 此时 $h_2=1.08\text{ m}$ 。根据几何关系可得 $R=1.24\text{ m}$ 。

3.2 变孔距同段爆破漏斗试验

在单孔漏斗试验的基础上,按照药包最佳埋深 1.02 m,孔深为 1.3 m,每孔装 2 卷乳化炸药 ($\Phi=45\text{ mm}$, $L=28\text{ cm}$, $m=0.5\text{ kg/卷}$), 1[#]~6[#] 炮孔间距依次为漏斗半径的 1.2、1.5、1.8、2.1、2.4 倍。爆前、爆后现场如图 9 所示。

变孔距同段爆破漏斗试验相关参数统计见表 2。

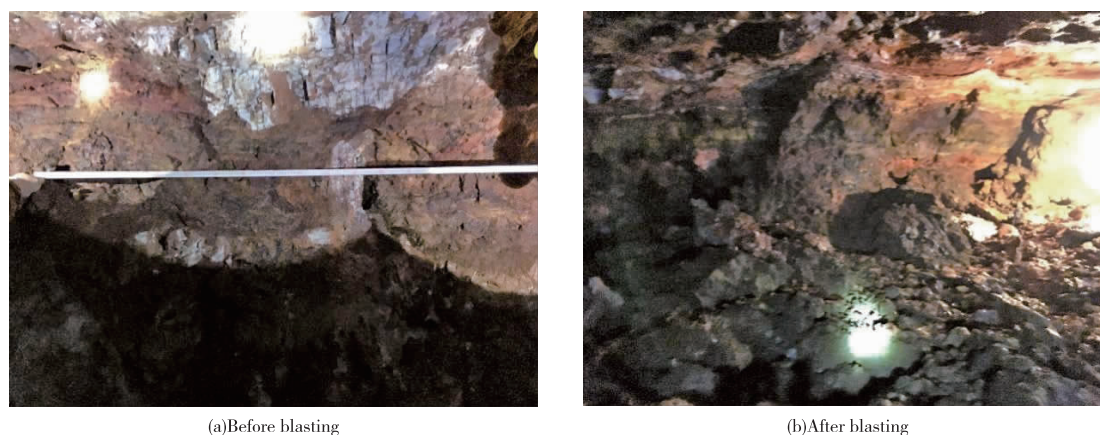


图 9 不耦合变孔距爆破漏斗试验

Fig. 9 Uncoupled variable pitch blast funnel experiment

表 2 变孔距同段爆破漏斗参数统计

Table 2 Statistics for variable spacing co-blast funnel parameters

N	Q/kg	a/m	h_2 /m	m	Blasting effect
1#~2#	1.0	1.4	1.02	1.2	No bottom between two holes
2#~3#	1.0	1.8	1.02	1.5	There is basically no bottom between the two holes
3#~4#	1.0	2.2	1.02	1.8	There is a root between the two holes
4#~5#	1.0	2.5	1.02	2.1	Forming two independent funnels
5#~6#	1.0	2.9	1.02	2.4	Forming two independent funnels

Note: N—Hole number; Q—Drug loading; a—Borehole spacing; h_2 —Depth of explosive; m—Ratio of hole spacing to optimum blasting funnel radius

3.3 斜面台阶爆破漏斗试验

斜面台阶漏斗试验爆前、爆后现场如图 10

所示。

斜面台阶爆破漏斗试验相关参数统计见表 3。

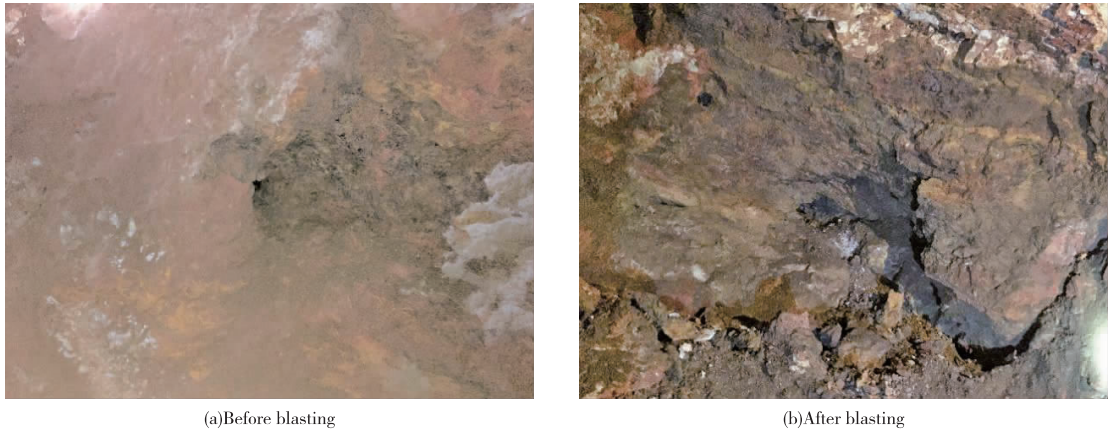


图 10 斜台阶爆破漏斗试验

Fig. 10 Sloping step blast funnel experiment

表 3 氧化矿斜面台阶爆破试验数据统计表

Table 3 Oxide mine slope step blast test data statistics

Drilling number	Location	Theoretical hole depth/cm	Actual hole depth/cm	Drilling type	Borehole diameter/mm	Charge length/cm	Length of hole packing/cm	Explosion place resistance line length/cm
1	Section A14 of line 1660(Φ40)	180	170	Horizontal hole, 45° angle to roadway wall	60	112	58	114
2			170	Horizontal hole, angle 55° to roadway wall	60	112	58	106

3.4 上向扇形孔孔网参数推算及工业试验

通过对单孔爆破漏斗试验数据进行分析,可以得到最佳爆破漏斗体积为 1.61 m³,从而得知最佳炸药单耗为 0.62 kg/m³。通过试验可得最佳孔间距为 1.4~1.8 m 时爆破效果最好。由于试验使用的药包长径比 $n>6$,并且采场深孔爆破

装药量远大于试验药量,所以取试验 $K_w=1.2$,采场深孔爆破 $K_w=1.6$,则孔底距为 1.8~2.3 m。通过变孔距爆破漏斗试验可得最小抵抗线为 1.1 m,考虑到采场深孔时的装药量远大于试验药量,故按上述理论进行转换,取最小抵抗线为 1.43 m。

表 4 孔网参数汇总

Table 4 Summary of hole network parameters

Blast hole diameter/mm	Hole spacing/m	Resistance line (row spacing)/m	Specific charge/(kg·m ⁻³)
60	1.8~2.3	1.4	0.62

通过在该矿山进行工业试验,发现上述孔网参数可以明显改善炸药单耗高、大块率高的现象。

4 结论

在该矿山进行的系列爆破漏斗试验,通过分析试验数据,并给出采场深孔爆破参数,可得出如下结论:

1)通过爆破漏斗试验确定了该种锡矿在此系列试验参数下的最佳炸药单耗为 0.62 kg/m^3 ,漏斗最大体积为 1.61 m^3 ,最佳漏斗半径为 1.24 m ,最小抵抗线为 1.1 m 。

2)通过爆破漏斗试验理论,将试验参数转化为采场深孔爆破参数,其具体参数为 $q=0.62 \text{ kg/m}^3$,孔底距 $a=1.8\sim 2.3 \text{ m}$,排距 $b=1.4 \text{ m}$ 。

3)通过工业试验验证该参数可以明显改善爆破效果。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
WANG Xuguang. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [2] 吴春平. 地下爆破漏斗实验方法研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(7): 155-158.
WU Chunping. Experimental method of underground blasting funnel [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(7): 155-158.
- [3] 吴春平,滕高礼,张长洪,等. 深部开采单孔爆破漏斗实验[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 11-13.
WU Chunping, TENG Gaoli, ZHANG Changhong, et al. Funnel experiment of single hole blasting in deep mining[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4): 11-13.
- [4] 吴春平,滕高礼,张长洪,等. 会泽铅锌矿多孔距同段爆破漏斗实验[J]. 中国矿业, 2017, 26(增刊 2): 352-354.
WU Chunping, TENG Gaoli, ZHANG Changhong, et al. Experiment of multi hole blasting funnel in Huize lead zinc mine[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S2): 352-354.
- [5] 张康康,付玉华,罗道清,等. 某铁矿单孔爆破漏斗实验及其应用[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(10): 9-12.
ZHANG Kangkang, FU Yuhua, LUO Daoqing, et al. Single hole blasting funnel experiment and its application in an iron mine[J]. Chemical Minerals and Processing, 2019, 48(10): 9-12.
- [6] 杨福波. 沙溪铜矿爆破漏斗工业试验研究[J]. 采矿技术, 2018, 18(5): 102-105.
YANG Fubo. Industrial experimental study on blasting funnel in Shaxi copper mine[J]. Mining Technology, 2018, 18(5): 102-105.
- [7] 曾普海,解联库,吴顺江,等. 驰宏某铅锌矿斜面台阶爆破漏斗实验[J]. 有色金属工程, 2018, 8(3): 125-127.
ZENG Puhai, XIE Lianku, WU Shunjiang, et al. Funnel experiment of inclined bench blasting in a lead zinc mine in Chihong[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(3): 125-127.
- [8] 张立新. 基于爆破漏斗试验的中深孔凿岩爆破参数研究[J]. 采矿技术, 2018, 18(3): 78-81.
ZHANG Lixin. Study on medium length hole drilling and blasting parameters based on blasting funnel test [J]. Mining Technology, 2018, 18(3): 78-81.
- [9] 韩增增. 逐孔起爆条件下曼家寨采场爆破参数设计与优化[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.
HAN Zengzeng. Design and optimization of blasting parameters in Manjiazhai stope under hole by hole initiation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [10] 江天生,蒋跃飞,郑长龙,等. 爆破漏斗试验确定扇形深孔爆破参数的应用研究[J]. 价值工程, 2016, 35(17): 136-138.
JIANG Tiansheng, JIANG Yuefei, ZHENG Changlong, et al. Application research on fan shaped deep hole blasting parameters determined by blasting funnel test [J]. Value Engineering, 2016, 35(17): 136-138.