

铜绿山矿中深孔爆破参数优化研究

Research on Optimization of Blasting Parameters for Medium and Long Holes in Tonglvshan Mine

尹东升¹, 熊国雄¹, 贾 贝^{2,3}, 王怀勇^{2,3}, 杨志国^{2,3}

(1. 大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿, 湖北 大冶 435100;

2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

3. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要:铜绿山铜铁矿采用中深孔爆破落矿,为了得到铜绿山高阶段采场的中深孔爆破参数,本文基于利文斯顿爆破漏斗理论,推导了适用于中深孔爆破的柱状药包理论公式,并在一定的矿岩和炸药性能条件下进行了一系列爆破漏斗试验。结果表明:药包的最佳中心埋深为0.42 m,最佳爆破漏斗体积为0.016 m³,最佳爆破漏斗半径为0.45 m,最小抵抗为0.79 m;铜绿山铜铁矿同段爆破漏斗试验最佳孔底距为0.8~0.9 m;基于柱状药包爆破漏斗推导公式,得到现场中深孔爆破的最佳回采炮孔排距为1.62 m,最佳孔底距为1.65~1.85 m。

关键词:爆破漏斗试验;中深孔爆破;线性柱状药包;采场爆破参数

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)01-0008-05

Abstract: In order to obtain the parameters of medium and long hole blasting in Tonglvshan Copper Iron mine, based on Livingston blasting funnel theory, this paper deduces the theoretical formula of cylindrical charge suitable for medium and long hole blasting, and carries out a series of blasting funnel tests under certain conditions of ore, rock and explosive properties. The results show that the best central depth of charge is 0.42 m, the best volume of blasting funnel is 0.016 m³, the best radius of blasting funnel is 0.45 m, and the minimum resistance is 0.79 m. The optimum hole base distance of Tonglvshan Copper Iron Mine is 0.8~0.9 m in the same section blasting funnel test. Based on the derivation formula of cylindrical charge blasting funnel, the optimal hole row spacing and hole bottom spacing are 1.62 m and 1.65~1.85 m respectively.

Key words: blasting funnel test; medium and long hole blasting; linear cylindrical charge; stope blasting parameters

1 前言

对于金属矿山,凿岩爆破参数的选取采矿工艺爆破设计的基础,其对后续矿山的生产效率、运营成本有着重要的影响能力^[1-2]。爆破漏斗试验作为确定凿岩爆破参数最直接有效的方法,自二十世纪中期提出后,一直被广泛应用于各类矿山^[3-4]。

为了通过爆破漏斗试验得到合理的凿岩爆破参数,国内外学者对比进行了大量的研究。文兴^[5]等对深部采场大直径深孔爆破的参数进行了分析和优化,按照优化后的采场爆破参数进行了工业试验,得到的参数成功应用于阿舍勒铜矿;张兵^[6]等基于利文斯顿爆破漏斗理论开展了单孔系列、变孔距多孔

同段爆破漏斗试验,并以试验结果为基础设计了中深孔爆破工业试验,最终确定了有利于降低炸药单耗、改善爆破效果的合理爆破参数;为了解决施工中存在的巷道成形不规整,炮孔利用率低的问题,彭锦浩^[7]等在铁矿巷道开展爆破漏斗试验,并结合理论计算优化设计一次成巷爆破方案。

基于以上研究,为了确定铜绿山高阶段采场的中深孔爆破参数,本文依据利文斯顿爆破漏斗理论^[8],推导了适用于中深孔爆破的柱状药包理论公式,并在一定的矿岩和炸药性能条件下进行了一系列爆破漏斗试验,从而得到了合理的爆破参数。

2 工程概况

铜绿山铜铁矿位于大冶市城区西南约3 km,行政区划隶属大冶市金湖街道办事处管辖。矿区地形可分为低山、丘陵残丘和湖盆地区三种,西面有小河—青山河、北部有红旗渠流过,并紧邻大冶湖。

目前,铜绿山铜铁矿已全面进入深部开采,深部

[作者简介] 尹东升(1990—),男,高级工程师,主要从事金属矿资源开发技术与管理工作。

[引用格式] 尹东升,贾贝,熊国雄,等.铜绿山矿中深孔爆破参数优化研究[J].中国矿山工程,2025,54(1):8-12+19.

矿体和上部中段矿体相比有较大的变化,厚大矿体所占比例缩小很多,矿体倾角变化大,矿岩稳固性变差。上部中段使用的VCR高效采矿方法、分段凿岩嗣后充填采矿方法适用于形态规整的厚大矿体,已不适合深部矿体的开采。根据深部矿体赋存条件及开采技术条件,对分段凿岩嗣后充填法采矿工艺进行改进,并通过试验采场进行现场爆破试验。为了使试验采场爆破效果达到最佳效果,需开展系列小型爆破漏斗试验来优化爆破参数。

3 爆破漏斗理论

3.1 利文斯顿爆破漏斗理论

C. W. Livingston 统计了大量的爆破漏斗试验,其发现当药包的长径比不超过 10,漏斗爆破机理与真正的球形药包相似,每次爆破传递给岩石的能量大小与速度取决于岩性、炸药性能和药包的重量,并提出了利文斯顿爆破漏斗理论。该理论将自由面岩石仅有裂隙或微量片落发生的药包埋深定义为临界埋深,提出了以下弹性变形能方程。

$$L_e = EQ^{1/3} \quad (1)$$

$$L_j = \Delta_j EQ^{1/3} \quad (2)$$

式中, L_e 为临界埋深,m; E 为应变能系数,对于特定的岩石和炸药为常数; Q 为球形药包重量,kg; L_j 为最佳埋深,m; Δ_j 为最佳埋深比, $\Delta_j = L_j/L_e$,对于特定的岩石和炸药为常数。

根据 C. W. Livingston 弹性应变方程的演变过程可知,在同一种岩体中,采用同一种炸药爆破时,小型爆破漏斗试验和实际单孔爆破,两者的爆破参数满足如下关系。

$$\frac{L_{j0}}{L_{j1}} = \frac{R_{j0}}{R_{j1}} = \left(\frac{Q_0}{Q_1}\right)^{1/3} = \left(\frac{V_{j0}}{V_{j1}}\right)^{1/3} \quad (3)$$

式中, Q_0 、 R_{j0} 、 L_{j0} 、 V_{j0} 分别为爆破漏斗试验的药包质量、漏斗半径、最佳埋深和漏斗体积; Q_1 、 R_{j1} 、 L_{j1} 、 V_{j1} 分别为实际深孔爆破的药包质量、漏斗半径、最佳埋深和漏斗体积。

3.2 柱状药包爆破漏斗理论

由利文斯顿爆破漏斗理论可知,其是在球形药包的基础上进行推导的,而中深孔爆破属于柱状药包,直接利用式(3)进行推导得到的结果存在一定的误差^[9]。因此,为了提高现场参数的准确性,需要推导出适用于柱状药包的关系式。

式(3)的量纲可用式(4)表示,即:

$$L_d = K_{bd} Q^{1/3} \quad (4)$$

式中, L_d 为球形药包埋深; K_{bd} 为药包的比值深度; Q 为球形药包重量。

由式(4)可知, K_{bd} 的量纲可表示为:

$$K_{bd} = [L^3/Q]^{1/3} \quad (5)$$

根据爆破理论,柱状装药的药包埋深可表示为:

$$[L_x] = [K_{bx}]^m [Q/L]^n \quad (6)$$

式中, L_x 为线性柱状药包埋深; K_{bx} 为药包的比值深度; q 为单位长度装药量, $q = Q/L$ 。

根据量纲原理,等式两边的量纲相同,可得到 $m = n = 1/2$,式(7)可表示为:

$$[L_x] = [K_{bx}]^{1/2} [q]^{1/2} \quad (7)$$

由此可知柱状药包的爆破漏斗的推导公式为:

$$\frac{L_{j0}}{L_{j1}} = \frac{R_{j0}}{R_{j1}} = \left(\frac{q_0}{q_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{V_{j0}}{V_{j1}}\right)^{1/2} \quad (8)$$

式中, q_0 、 q_1 分别为爆破漏斗试验和实际现场中深孔爆破的单位长度装药量,kg/m。

4 现场试验

本次爆破漏斗试验场地位于 -605 m 中段第一分段北部的 6109 号采场凿岩巷道的两帮,该处场地矿石为矽卡岩含铜铁矿,其矿石岩性与试验采场相同。试验的炮孔直径为 42 mm,均采用 YT-28 型气动凿岩机进行钻凿。试验所使用的炸药为卷状铵油炸药,其单卷长度为 200 mm,单卷重量为 150 g,采用的起爆方式为孔底起爆。

4.1 单孔爆破漏斗实验

本次单孔爆破试验设置了两组参数相同的平行试验,每组试验包含 8 个炮孔,其深度分别为 0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m、0.8 m、0.9 m、1.0 m、1.1 m。为了保证试验的顺利进行,炮孔垂直布置在巷道壁平整的地方,且间距均设置为 2.0 m。炮孔布置如图 1 所示。

爆破后,扣除漏斗口周围岩石片落部分,圈定漏斗口边界,然后以炮孔为中心,间隔 45°,直接量取 4 个不同方位的漏斗直径,然后取其平均值即漏斗直径。依据辛卜生法的原理,利用 100 mm × 100 mm 的网度求得各个爆破漏斗对应的体积。单孔爆破漏斗试验结果见表 1。

单孔爆破漏斗试验的两组试验的孔号分别为 11# ~ 19# 及 21# ~ 29#,其中 17#、18# 和 28# 三个炮孔因埋深过大,未能形成有效的爆破漏斗。

基于表 1 中的数据,根据最小二乘法原理,对单孔爆破漏斗试验数据进行多次项回归,得到试验条

件下药包中心埋深与爆破漏斗体积、爆破漏斗半径的多项表达式为:

$$V = 2.789l_4 + 7.241l_3 + 6.829l_2 + 2.73l + 0.375 \tag{9}$$

$$R = 49.88l_4 + 129.2l_3 + 121l_2 + 47.95l + 6.319 \tag{10}$$

式中, V 为试验条件下的单孔爆破漏斗体积, 10^{-3} m^3 ; R 为试验条件下的单孔爆破漏斗半径, m ; l 为试验条件下的药包中心埋深, m 。

由试验结果及回归多式可得单孔爆破漏斗试验爆破漏斗体积、爆破漏斗半径与药包中心埋深之间的特征曲线图,具体如图 2 和图 3 所示。

研究表明最大爆破体积 V 所对应的药包埋深为该次试验的最佳药包埋置方案,此时爆破炸药单耗最小,爆破能量利用率最高。为此采用最小二乘法求解上述两个多项回归式极值,可得到,最佳药包中心埋深 $L_j = 0.42 \text{ m}$;最佳爆破漏斗体积 $V_j \approx 0.016 \text{ m}^3$;最佳爆破漏斗半径: $R_j \approx 0.45 \text{ m}$ 。

表 1 单孔爆破漏斗试验结果

孔号	设计孔深/ m	施工孔深/ m	药包中心埋深/ m	漏斗半径/ m	爆破漏斗体积/ 10^{-3} m^3	单位炸药爆破量/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	崩落矿石总重量/kg
11	0.4	0.435	0.335	0.420	7.810	0.052	31.51
12	0.5	0.555	0.455	0.456	15.657	0.104	63.18
13	0.6	0.705	0.605	0.271	6.500	0.043	26.23
14	0.7	0.75	0.65	0.322	3.600	0.024	14.53
15	0.8	0.88	0.78	0.310	5.000	0.033	20.18
16	0.9	0.94	0.84	0.324	1.894	0.013	7.64
17	1.0	1.17	1.07	/	/	/	/
18	1.1	1.11	1.01	/	/	/	/
21	0.4	0.435	0.335	0.362	11.919	0.079	48.09
22	0.5	0.735	0.635	0.379	6.000	0.040	24.21
23	0.6	0.535	0.435	0.522	15.919	0.106	64.23
24	0.7	0.655	0.555	0.373	9.700	0.065	39.14
25	0.8	0.815	0.715	0.277	2.918	0.019	11.77
26	0.9	0.905	0.805	0.346	2.559	0.017	10.33
27	1.0	0.985	0.885	0.317	0.800	0.005	3.23
28	1.1	1.14	1.04	/	/	/	/

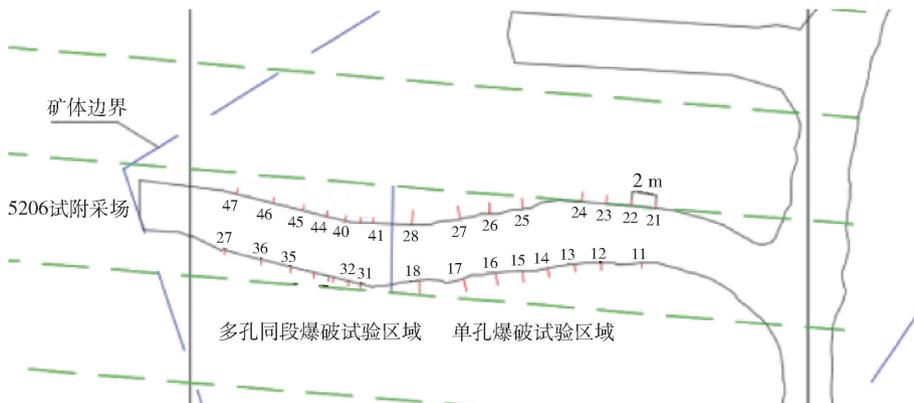


图 1 单孔爆破和多孔同段爆破试验位置图

4.2 变孔距多孔爆破漏斗实验

基于单孔爆破漏斗试验结果,在凿岩巷道中布

置了 2 组变孔距多孔同段爆破试验,每组包含 7 个炮孔。试验的孔深为 0.52 m,药包中心埋深为 0.42

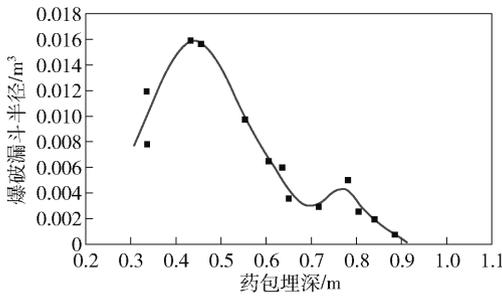


图 2 试验条件下 V—I 特征曲线

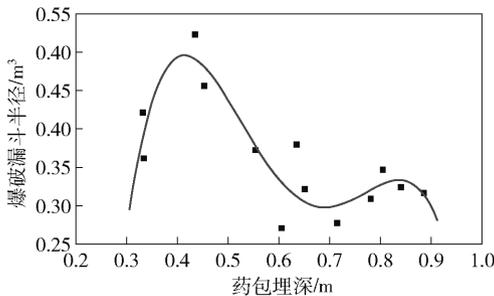


图 3 试验条件下 R—I 特征曲线

m。炮孔间距分别为 0.54 m、0.63 m、0.72 m、0.81 m、0.90 m、0.99 m。

各炮孔采用同段微差数码电子雷管齐发爆破,爆破后对炮孔间的爆破漏斗的形态进行了现场圈定测量,爆破漏斗轮廓现场圈定与块度情况调查,具体如图 4、图 5 所示。试验结果见表 2。



(a) 1号试验组爆破漏斗轮廓现场圈定



(b) 2号试验组爆破漏斗轮廓现场圈定

图 4 多孔同段两组炮孔爆破漏斗轮廓

根据多孔同段爆破漏斗试验的结果观察,爆破后沿炮孔中心连线形成条形爆破沟槽。垂直炮孔及其连线方向上,铜绿山铜铁矿试验沟槽的发育半径在 0.45 m 左右,沟槽深度小于药包中心埋深,与单孔爆破漏斗试验时类似。



图 5 爆破块度情况调查

36# ~ 37# 孔以及 46# ~ 47# 孔间留有较明显的孔间脊柱,35# ~ 36# 孔以及 45# ~ 46# 孔间开始出现少许脊间残留,31# ~ 35#、41# ~ 45# 孔间没有孔间脊柱,多孔同段爆破试验破碎块度比单孔爆破漏斗试验时好,大块少。爆破体积比单孔爆破漏斗试验时大,且随孔间距的增加而增加,但其增加速度逐步变缓,炸药单耗随孔间距的增加而减少。

上述结果表明,孔间距较小时,炸药爆破能相互迭加,爆破效果好,基本没有孔间脊柱,随着孔间距的增加,炸药爆破能相互迭加逐步削弱,爆破效果逐步变差,孔间脊柱逐步出现,当孔间距增加到某一数值时,炮孔中心连线不再沟通形成条形爆破沟槽,而是在两孔之间三角脊柱,发展成独立的爆破漏斗。

综上所述,综合爆破效果、爆破体积及孔间脊柱的变化,在试验条件下,铜绿山铜铁矿同段爆破漏斗试验最佳孔底距以 0.8 ~ 0.9 m 为宜。

4.3 斜面台阶爆破漏斗实验

试验设计斜面台阶爆破试验,通过对斜面台阶最小抵抗线从小到大的连续变化所对应岩石破坏情况的研究,确定合适的最小抵抗线。斜面台阶爆破试验原理如图 6 所示。试验采用炮孔孔径 $\phi 42$ mm, $\phi 38$ mm 的炸药卷连续装药,孔口堵塞,孔底起爆,共爆破 2 个炮孔,现场试验结果见表 3。取表 3 中斜 1 孔、斜 2 孔的平均值,得到药包爆开处的抵抗线,即最小抵抗为 0.79 m。从斜 1 孔、斜 2 孔台阶爆破试验情况观测,爆破块度均匀,无明显大块产生。

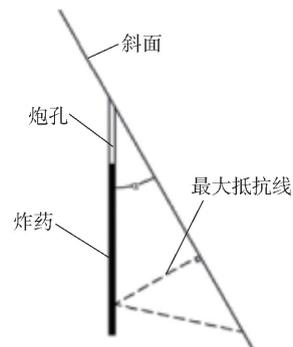


图 6 斜面台阶爆破试验示意图

表2 铜绿山铜铁矿多孔同段爆破试验结果

组数	序号	炮孔编号	药包埋深/ m	炮孔间距/ m	槽沟/脊柱 形成情况	爆破块度情况描述	
						现场块度分布	定性描述
第一组	1	31 [#] ~32 [#]	0.42	0.54	形成槽沟	块度较小,均匀	
	2	32 [#] ~33 [#]	0.418	0.63	形成槽沟	块度较小,均匀	
	3	33 [#] ~34 [#]	0.419	0.72	形成槽沟	块度较小,均匀	
	4	34 [#] ~35 [#]	0.407	0.81	形成槽沟	块度均匀,有大块	
	5	35 [#] ~36 [#]	0.413	0.90	形成槽沟	块度较均匀,有大块	
	6	36 [#] ~37 [#]	0.414	0.99	形成脊柱	块度不均匀,较大	
第二组	7	41 [#] ~42 [#]	0.422	0.54	形成槽沟	块度较小,均匀	
	8	42 [#] ~43 [#]	0.417	0.63	形成槽沟	块度较小,均匀	
	9	43 [#] ~44 [#]	0.413	0.72	形成槽沟	块度均匀,有大块	
	10	44 [#] ~45 [#]	0.413	0.81	形成槽沟	块度均匀,有大块	
	11	45 [#] ~46 [#]	0.41	0.90	形成槽沟	块度较均匀,有大块	
	12	46 [#] ~47 [#]	0.42	0.99	形成脊柱	块度不均匀,较大	

表3 斜面台阶爆破试验结果

孔号	实测孔深/ m	实测倾角/ (°)	装药长度/ m	装药量/ kg	每米孔装药量/ kg·m ⁻¹	堵塞长度/m	计算爆开处 抵抗线/m
1	1.91	32	1.4	1.05	0.75	0.51	0.77
2	1.85	43	1.4	1.05	0.75	0.45	0.82

5 采场爆破参数推荐

5.1 炮孔排距计算

深孔爆破的炮孔排距即为爆破的最小抵抗线,根据斜面台阶爆破试验,铜绿山铜铁矿在孔径 $\phi 42$ mm, $\phi 38$ mm的炸药连续装药,装药量为1.05 kg,装药密度为 0.75 t/m^3 ,孔底起爆条件下,爆破抵抗线约为0.79 m。

根据目前铜绿山铜铁矿使用的炸药密度及炮孔孔径等计算,得到铜绿山铜铁矿采用粉状乳化炸药时中深孔 $\phi 76$ mm的炮孔每米装药量为 3.17 kg/m 。

将铜绿山铜铁矿斜面台阶爆破试验所得的最小抵抗线、每米装药量以及实际生产中采用粉状乳化炸药的每米装药量代入公式(1)计算,得到铜绿山铜铁矿中深孔回采炮孔排距为1.62 m。

5.2 炮孔孔底距计算

根据多孔同段爆破漏斗试验,获得的最佳孔底距分别为 $0.8 \sim 0.9 \text{ m}$ 。分别将铜绿山铜铁矿多孔同段爆破漏斗试验所得的最佳孔底距、每米装药量以及前述计算所得实际生产中采用粉状乳化炸药的每米装药量代入公式(1)计算,得到铜绿山铜铁矿实际生产爆破时的孔底距为 $1.65 \sim 1.85 \text{ m}$ 。

6 结论

为了确定铜绿山高阶段采场的中深孔爆破参数,本文基于利文斯顿爆破漏斗理论,推导了适用于中深孔爆破的柱状药包理论公式,并在一定的矿岩和炸药性能条件下,进行了一系列爆破漏斗试验,从而得到合理的爆破参数,主要的结论如下:

(1)基于爆破漏斗理论开展了单孔和斜面台阶爆破漏斗试验,分析得到最佳药包中心埋深为 0.42 m ,最佳爆破漏斗体积为 0.016 m^3 ,最佳爆破漏斗半径为 0.45 m ,最小抵抗为 0.79 m 。

(2)基于单孔爆破漏斗试验结果进行了变孔距多孔爆破漏斗实验,得到铜绿山铜铁矿同段爆破漏斗试验最佳孔底距为 $0.8 \sim 0.9 \text{ m}$ 。

(3)根据柱状药包爆破漏斗推导公式,得到现场中深孔爆破的最佳回采炮孔排距为 1.62 m ,最佳孔底距为 $1.65 \sim 1.85 \text{ m}$ 。

[参考文献]

- [1] 尹东升,熊国雄,张少杰,等.某铜铁矿充填法不同回采高度稳定性分析研究[J].中国矿山工程,2024,53(06):6-12.