

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.04.014

基于正交设计的露天含水炮孔冲孔效应敏感度分析

李 恒^{1,2}, 张智宇^{2,3}, 李祥龙^{2,3}, 雷 振⁴

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;

2. 云南省中-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 国土资源与工程学院, 昆明 650093;

4. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵阳 550000)

摘 要:露天水孔冲孔效应影响因素繁多,研究各因素对冲孔效应敏感度控制意义重大。基于正交设计原理,在曼家寨采场进行9次现场爆破试验,以冲孔率、堵塞体平均冲孔高度和堵塞体平均冲孔加速度为试验指标,利用SPSS统计学软件在极差分析基础上引入方差分析,研究炸药单耗、堵塞长度、堵塞粒径和孔距等4个可能影响试验指标的因素控制冲孔效应敏感度大小。结果表明:仅有堵塞粒径和堵塞长度对冲孔率有显著影响,且最为显著的因素为堵塞粒径;堵塞长度对堵塞体平均冲孔高度有显著影响;堵塞粒径和炸药单耗对堵塞体平均冲孔加速度有显著影响,且堵塞粒径为最关键影响因素。得出开采时最优爆破参数组合,炸药单耗取0.35 kg/m³、堵塞长度取5 m、堵塞粒径取5~10 mm、孔距取7 m,将参数代入现场生产爆破后冲孔率下降了79.75%,对采场后续生产爆破和类似工程实践具有指导性意义。

关键词:含水炮孔;冲孔效应;现场试验;正交设计;敏感度分析

中图分类号:TD235.4

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)04-0091-09

Sensitivity Analysis of Punching Effect of Water-bearing Blast Hole in Open Air Based on Orthogonal Design

LI Heng^{1,2}, ZHANG Zhiyu^{2,3}, LI Xianglong^{2,3}, LEI Zhen⁴

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Lab of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China;

3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

4. School of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550000, China)

Abstract: There are many factors influencing the punching effect of open-air water holes, and it is of great significance to study each factor to control the sensitivity of the punching effect. Based on the principle of orthogonal design, 9 on-site blasting tests were carried out in Manjiazhai stope. Punching rate, average punching height of packing body and average punching acceleration of packing body were used as test indicators, and SPSS statistical software was used to introduce range analysis. With analysis of variance, four factors, including explosive unit

收稿日期:2021-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064025)

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

作者简介:李 恒(1997—),男,硕士研究生,从事爆破参数优化与安全理论方面的研究。

通信作者:张智宇(1973—),男,副教授,主要从事工程爆破及岩石破碎方面的研究。

引用格式:李恒,张智宇,李祥龙,等.基于正交设计的露天含水炮孔冲孔效应敏感度分析[J].有色金属工程,2022,12(4):91-99.

LI Heng, ZHANG Zhiyu, LI Xianglong, et al. Sensitivity Analysis of Punching Effect of Water-bearing Blast Hole in Open Air Based on Orthogonal Design[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 91-99.

consumption, packing length, packing particle size and hole spacing, which may affect the test index, are studied to control the sensitivity of the test index. The results show that only the packing particle size and packing length have a significant influence on the punching rate, and the most significant factor is the packing particle size. The packing length has a significant influence on the average punching height of the packing body, and the packing particle size and the unit consumption of explosive have a significant effect on the packing. The average punching acceleration of the volume has a significant impact, and the packing particle size is the most critical influencing factor. The optimal blasting parameter combination during mining in Manjiazhai stope is obtained. The unit explosive consumption is 0.35 kg/m^3 , the packing length is 5 m, the packing particle size is 5—10 mm, and the hole spacing is 7 m. The parameters are substituted into the on-site production blasting. The post-punching rate dropped by 79.75%, which is of guiding significance for subsequent production blasting and similar engineering practices in the stope.

Key words: water-bearing blast hole; punching effect; field test; orthogonal design; sensitivity analysis

受降雨与地下水影响露天采场岩层裂隙渗水量及含水量不断增多,致使露天炮孔积水日益严重,炮孔积水深度分布范围不等,积水孔的冲孔现象较为突出。水孔冲孔对于评判爆后效果是一种极其严重的劣化现象,会导致岩体大块率高、飞石危害和炸药能量流失严重等效应,目前对水孔冲孔现象的主流看法为^[1-4]:爆后冲击波的作用使填塞体抗剪强度整体或局部丧失致使发生液化失去填塞作用;其次是填塞体粒径的差异,粒径过小的填塞体堵塞水孔时容易使得岩屑等填塞料浮于孔面致使填塞料空虚。孙英翔^[5]以某含水铁矿为例基于能量密度理论分析了填塞物对爆破效果的影响,得出了填塞物长度和炸药单耗对冲孔速度的运动规律影响;刘博^[6]基于MATLAB块度分析系统和FM-AHP综合评判试验,研究出了不同介质炮泥长度的填塞作用机理;张毕书^[7]基于级配比原理,利用高速摄影仪监测得到了水孔填塞物冲孔处孔口运动规律;雷海鑫^[8]利用对比分析法和控制变量法研究堵塞物材料的冲孔效应,得出了混合填塞料能有效降低冲孔现象发生;LESKOVAR等^[9]基于人工神经网络,得出了黏土爆破中最佳填塞长度和炸药单耗;XIANG等^[10]基于核电站一系列现场爆破试验,得出爆破能量随填塞长度与装药长度的增加而增大;露天矿爆破参数大多都由经验公式或理论公式推导获取,由于现场爆破的复杂性,往往参数选取存在误差较大等问题,爆后效果和安全性较差,因而需要进行大量现场试验来研究不同参数影响爆后效果的敏感程度,考虑到社会安全问题,国家对爆破器材和炸药管控越来越严格,进行大量的现场试验爆破难度较大且不太可能实现,只可跟随生产爆破进行。而正交设计作为科学合理安排因素-试验结果的一种数学方法,可以最大程度地减少试验次数并选出代表性强的少数试验方案^[11],通过结果比较分析得出因素敏感度

主次顺序和最优水平组合,大大降低试验成本并提高了试验效率。国内许多学者基于正交设计法研究了因素对参数的敏感程度和对参数进行优化设计,陈宏涛等^[12]利用正交试验法优化了深孔爆破振动参数;尹岳降等^[13]利用正交试验法对爆破块度影响因素进行了敏感度分析,得出了影响块度分布的因素主次和最优水平组合;李磊等^[14]基于正交设计、数值模拟和现场试验对双锥罩结构研究得出了优化度最好的设计参数。

综上,基于正交设计原理,对曼家寨采场进行现场试验,分析影响冲孔效应因素的敏感程度,利用极差分析得出因素-冲孔效应主次顺序和最优水平组合,结合显著性方差分析二次优化,得到了炸药单耗、填塞长度、填塞粒径和孔距的最优参数组合,有效降低了水孔冲孔率和冲孔效应带来的劣化现象,对后续采场生产爆破具有指导性意义。

1 现场及正交试验设计

1.1 工程概括

曼家寨采场开采平台高程为880~1410 m,台阶高度为15 m,矿区年爆破量约为9万t。采场向西南一带主要为岩溶地况,矿区轴向断层群发育较充分,其岩层含水量较大,采场常年雨季频繁,矿区排水系统效果明显,但对采场内部积水以及岩层排水作用甚微。受降雨及地下水影响,采场孔内积水现象较为严重,水孔分布范围无规律,干孔与水孔交错共存,年平均降雨量达1345~1776.2 mm,年平均降雨天数为186 d,炮孔积水深度分布范围从0 m到孔口不等,采场年均水孔率高达约35%,年均水孔爆破冲孔率高达27%,造成爆破质量差、能量流失严重和飞石破坏开采设备等一系列劣化现象,大大增加了矿区的生产成本和生产安全隐患,采场冲孔现象全貌见图1。



图1 采场填塞体冲孔现象

Fig. 1 Punching phenomenon of stope packing body

1.2 正交试验设计

露天矿含水炮孔爆破作业时,水孔发生冲孔时会导致大量的能量作用于孔口或是溢散在空气中,从而作用于岩体的有效功会大大降低,水孔冲孔机理十分复杂,炸药单耗、起爆位置、孔径、孔距、排距、孔深、台阶高度、超深、抵抗线、填塞长度和填塞种类等都是造成冲孔的主要原因。综合前人对露天矿山冲孔效应的研究,基于正交设计原理,研究露天含水炮孔冲孔效应的敏感因素,因受设备环境和台阶边坡宽度限制,选取炸药单耗、填塞长度、填塞体粒径和孔距4个具代表性因素,各因素取3个水平进行研究,因素水平表如表1所示,本研究不考虑因子之

间的交互效应,仅考虑主效应,选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,正交试验设计表见表2,其余爆破参数固定不变,具体技术路线见图2。

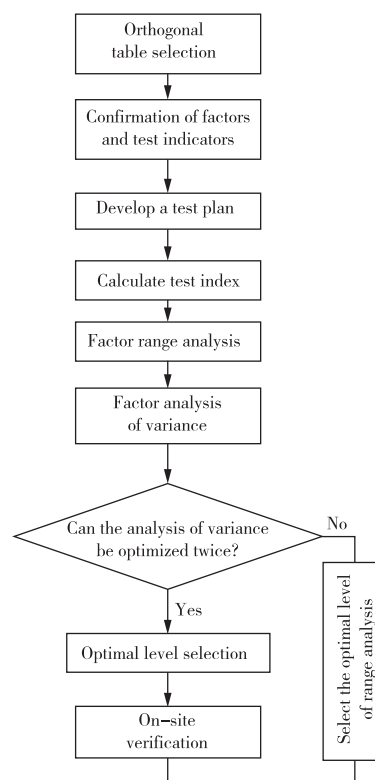


图2 试验技术路线图

Fig. 2 Test technology roadmap

表1 正交设计各因素水平值

Table 1 Level of each factor in the orthogonal design

Level	Factor			
	A(Unit consumption)/(kg · m ⁻³)	B(Packing length)/m	C(Packing particle size)/mm	D(Hole distance)/m
1	0.35	4.0	1—3	5.0
2	0.38	4.5	3—5	6.0
3	0.43	5.0	5—10	7.0

表2 正交试验设计表 $L_9(3^4)$ Table 2 Orthogonal experimental design table $L_9(3^4)$

Test number	Factor			
	A(Unit consumption)/(kg · m ⁻³)	B(Packing length)/m	C(Packing particle size)/mm	D(Hole distance)/m
1	0.35	4.00	1—3	5.0
2	0.35	4.50	3—5	6.0
3	0.35	5.00	5—10	7.0
4	0.38	4.00	5—10	6.0
5	0.38	4.50	1—3	7.0
6	0.38	5.00	3—5	5.0
7	0.43	4.00	3—5	7.0
8	0.43	4.50	5—10	5.0
9	0.43	5.00	1—3	6.0

1.3 现场试验设计

现场试验所需主要材料包括:测量杆、卷尺、

填塞体颗粒料、钻机、筛子、炸药、雷管、高速摄影仪等。根据采场实际开采情况和出于安全考虑,

为最大程度减少不同岩石混合给敏感度分析造成较大误差,综合平台边坡高度宽度,最终选取了对试验结果影响最小的 NW 帮 1060~1135 平台作为试验爆区,而试验只需进行 9 次,综上依次选取 1060~1105 平台作为试验爆区。试验 1~2 在 1060 平台进行,试验 3~5 在 1075 平台进行,试验 6~7 在 1090 平台进行,试验 8~9 在 1105 平台进行,试验爆区全貌见图 3(a),冲孔高度和加速度测量根据高速摄影仪自带 Motion Studio 运动控制器调适软件得到,具体见式(3)~(6),炸药选用 2# 岩石乳化炸药,每次试验采用 4 排方形布孔合计

20 个孔,钻机型号为 DI500 潜孔钻,由于炮孔水深注入后难以测量(注入深度难以把握和测量工具贫乏)并且存在测量误差较大的问题,考虑后试验设置的每个炮孔水深一致为 11.5 m,孔径为 148 mm,不耦合装药,起爆方式为整体起爆,填塞料选用爆区常见的岩屑物,爆区岩性主要为大理岩和矽卡岩,具体岩石基本物理参数见表 3。为防止填塞料掉入不耦合缝造成填塞料作用失效或各个孔内填塞料分布不均匀对试验造成影响,拟用堵漏不耦合缝装置绑在药卷顶端,可将装药顶端与填塞段隔开,即隔药柱填塞。

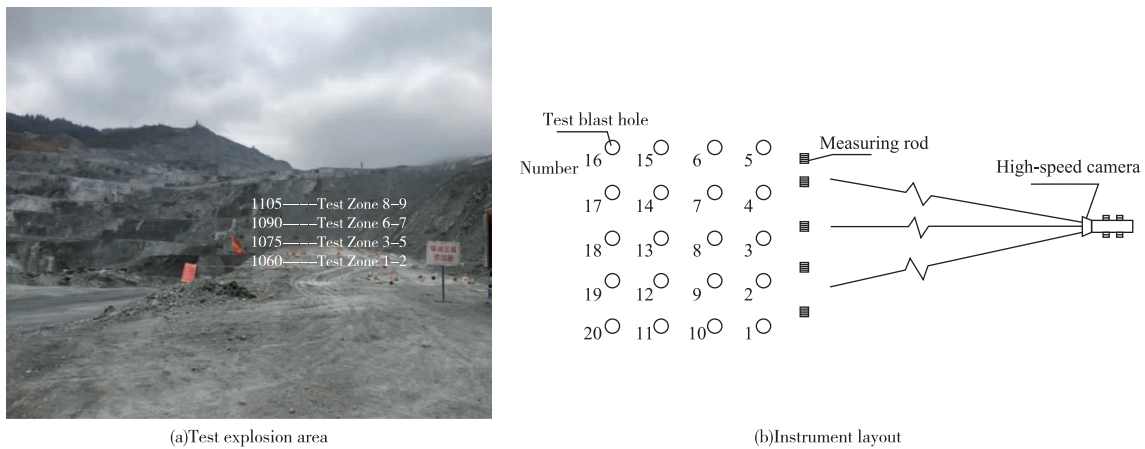


图3 试验爆区及仪器布置

Fig. 3 Test explosion area and instrument layout

表3 采场试验区岩体基本力学参数表

Table 3 Table of basic mechanical parameters of rock mass in stope test area

Lithology	Degree of weathering	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
Marble	Apoplexy	2.70	46.75	2.28	55.00	0.19
Skarn	Apoplexy	3.21	44.26	2.16	0.19	0.20

1.4 试验指标

由能量守恒定律式(1)和牛二定律式(2)可知,冲孔高度越高炸药作用于岩体的有效功 W_1 越小,能量的耗散越严重,填塞体的加速度 α 越大,炸药作用于填塞体冲孔的合外力和能量越大,炸药作用于岩体的有效功 W_1 越小。因而研究炮孔冲孔率、填塞体冲孔高度和填塞体加速度对于露天含水炮孔参数优化具有指导意义。故本研究拟选取炮孔冲孔率 Q 、填塞体平均冲孔高度 H_A 和填塞体平均加速度 α_A 作为试验结果指标。 Q 、 H_A 和 α_A 分别根据式(4)~(6)求得。

$$W_e = W_1 + W_2 + mgH_m \quad (1)$$

$$F = ma \quad (2)$$

式中, W_e 为炸药爆炸释放的总能; W_1 为炸药用于破坏岩体的能量; W_2 为损耗在空气与水中的耗散能; mgH_m 为填塞体克服自身重力所做的功,本研究假设各试验的 W_2 定量不变; F 为炸药作用于填塞体冲孔的合外力; m 为填塞体质量; α 为填塞体加速度。

$$\alpha = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} \quad (3)$$

式中, α 为填塞体加速度; v_1 为最大冲孔高度时的速度; v_0 为填塞体冲出孔口时的瞬时速度,通过高速摄影仪逐帧选取; t_1 为到达最大冲孔高度时所需时间; t_0 为填塞体冲出孔口时的所需时间。

$$Q = n/20 \quad (4)$$

式中, Q 为冲孔率; n 为冲孔个数;20为每次试验炮孔数。

$$H_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (5)$$

式中, H_A 为平均冲孔高度; H_i 为冲孔高度; n 为冲孔个数。

$$\alpha_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (6)$$

式中, α_A 为冲孔平均加速度; α_i 为堵塞体加速度; n 为冲孔个数。

2 试验指标敏感度分析

根据表2设计的正交试验设计表,求得九组试验的三个试验指标值见表4,表4中 A 为炸药单耗, B 为堵塞长度, C 为堵塞粒径, D 为孔距, Q 为冲孔率, H_A 为平均冲孔高度, α_A 为平均冲孔加速度。利用极差分析本研究试验指标结果,可以较为直观地比较出来此次试验的主次因素,并通过简单的对比找出最优水平的搭配^[11],极差 R 计算公式^[11]为:

$$\begin{cases} k_{ij} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} K_{ij} \\ R = \max\{k_{ij}\} - \min\{k_{ij}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_{ij} 为第 i ($i=1,2,3,4$)列中水平为 j ($j=1,2,3$)的3个试验结果之和; k_{ij} 为因子所在列对应水平试验之和的平均值; n_j 为水平数; $\max\{k_{ij}\}$ 和 $\min\{k_{ij}\}$ 分别为对应列的最大值与最小值。

极差 R 反应因子对试验指标的影响程度, R 越大因子对试验指标的敏感度和影响就越强,反之则敏感性较弱,由此可根据 R 大小确定因素主次顺序和最优水平组合。但极差分析仅从直观表面分析各因子的主次关系,当试验台阶发生变化,变量因子增加了不同台阶岩层岩性变化的不可控因素,而在极差分析基础上引入方差分析可以最大程度规避不同台阶岩层岩性变化不可控因素的影响和进一步确定各因子对试验指标有无显著影响,因此利用SPSS统计学软件进行显著性方差二次分析,分别研究各试验指标 Q 、 H_A 和 α_A 影响因素的敏感度。

表4 正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results

Test number	Factor				Test results of each index		
	$A/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	B/m	C/mm	D/m	$Q/\%$	H_A/m	$\alpha_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
1	0.35	4.00	1—3	5.0	25.0	3.40	338.52
2	0.35	4.50	3—5	6.0	15.0	2.25	322.14
3	0.35	5.00	5—10	7.0	5.0	1.48	291.55
4	0.38	4.00	5—10	6.0	10.0	4.22	311.45
5	0.38	4.50	1—3	7.0	20.0	2.67	351.68
6	0.38	5.00	3—5	5.0	10.0	1.84	329.61
7	0.43	4.00	3—5	7.0	15.0	3.95	345.16
8	0.43	4.50	5—10	5.0	10.0	1.95	329.33
9	0.43	5.00	1—3	6.0	20.0	2.45	378.64

2.1 冲孔率影响因素敏感度分析

对正交设计结果中影响冲孔率的各因子求极差与均值,具体结果见表5,由表5可知,因子 C (堵塞粒径)的极差最大,其次是因子 B (堵塞长度),再者是因子 A (炸药单耗)最后是因子 D (孔距),因而各因子对 Q (冲孔率)的敏感度控制由大到小排序为 $C-B-A-D$,且关键因子为 A ,说明了 A 因子对 Q 的敏感度控制起决定性作用。根据上文分析 Q 越小能量利用率越高爆破效果也就越好,最优水平的选取标准为 Q 最小时,根据极差分析得到的最优水平组合为 $C_3B_3A_2D_3$ 。

为进一步确定各因素和误差对冲孔率有无显

著影响,进一步优化最佳水平组合,对 Q (冲孔率)进行显著性方差分析,结果见表6。查 F 表得, $F_{0.05}(2,3)=9.55$,方差分析中 F 值越大对试验结果的显著性影响就越大,根据分析结果得因素 C 和因素 B 对 Q 有显著影响,且关键因素为 C ,因素 A 和因素 D 对 Q 无显著性影响,为不关键因素。综上方差分析二次优化得,可优化的因素为 A ,由原 A_2 优化为 A_1 ,在保证 Q 最低的情况下减少了装药量,降低了矿山生产成本,因而考虑 Q 为最低时,经方差分析二次优化后的最优水平组合选取为 $C_3B_3A_1D_3$ 。表6中,/为无此项,*为有显著性影响,—为无显著影响, $F_{0.05}(2,3)$ 为查 F 表临界值所得表示分析的可靠性为95%。

表 5 冲孔率影响因素极差分析

Table 5 Range analysis of factors affecting punching rate

Test index	K_{ij}	A	B	C	D
$Q/\%$	K_{i1}	45	50	65	45
	K_{i2}	40	40	40	45
	K_{i3}	50	35	25	40
	k_{i1}	15.00	16.67	21.67	15.00
	k_{i2}	13.33	13.33	13.33	15.00
	k_{i3}	16.67	11.67	8.33	13.33
	Range	3.44	5.00	13.34	1.67
	Factor order	CBAD			
	Optimal level combination	$C_3B_3A_2D_3$			

表 6 冲孔率显著性方差分析

Table 6 Significant variance analysis of punching rate

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	F	$F_{0.05}(2,3)$	Sig [*]
A	7.86	2.00	1.41	9.55	—
B	66.76	2.00	12.02	9.55	—
C	272.23	2.00	49.13	9.55	*
D	15.58	2.00	0.05	9.55	—
Error	5.56	2.00	/	/	/
Optimal level combination after variance optimization	$C_3B_3A_1D_3$				

2.2 平均冲孔高度影响因素敏感度分析

对正交设计结果中影响平均冲孔高度的各因子求极差与均值,具体结果见表 7,由表 7 可知,因子 B (堵塞长度)的极差最大,其次是因子 A (炸药单耗),再者是因子 D (孔距),最后是因子 C (堵塞粒径),因而各因子对 H_A (平均冲孔高度)的敏感度控

制由大到小排序为 $B-A-D-C$,且关键因子为 B ,说明了 B 因子对 H_A 的敏感度控制起决定性作用。根据上文分析, H_A 越小能量利用率越高,爆破效果也就越好,最优水平的选取标准为 H_A 最小时,其余两个因子 A 和 D 和 H_A 关系不是特别明显,因而根据极差分析得到的最优水平组合为 $B_3A_1D_1C_3$ 。

表 7 平均冲孔高度影响因素极差分析

Table 7 Range analysis of influencing factors of average punching height

Test index	K_{ij}	A	B	C	D
H_A/m	K_{i1}	7.13	11.57	8.55	7.19
	K_{i2}	8.73	6.87	8.04	8.62
	K_{i3}	8.35	5.77	7.65	8.10
	k_{i1}	2.38	3.86	2.85	2.40
	k_{i2}	2.91	2.29	2.68	2.87
	k_{i3}	2.78	1.92	2.55	2.70
	Range	0.53	1.94	0.30	0.47
	Factor order	BADC			
	Optimal level combination	$B_3A_1D_1C_3$			

为进一步确定各因素和误差对 H_A (平均冲孔高度)有无显著影响,进一步优化最佳水平组合,对 H_A 进行显著性方差分析,结果见表 8。根据分析结果只有因素 B 对 H_A 有显著影响,其余三个因素对 H_A 无显著性影响,为不关键因素。综上方差分析二

次优化得,可优化的因素有 D 由原 D_1 优化为 D_3 ,在保证 H_A 最低的情况下使用宽孔距,减少了钻孔数量,降低了矿山经济成本,因而考虑 H_A 为最小时,经方差分析二次优化后的最优水平组合选取为 $B_3A_1D_3C_3$ 。

表8 平均冲孔高度显著性方差分析

Table 8 Significant variance analysis of average punching height

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	F	$F_{0.05}(2,3)$	Sig*
A	0.47	2.00	0.96	9.55	—
B	6.33	2.00	12.92	9.55	*
C	0.13	2.00	0.27	9.55	—
D	0.21	2.00	0.42	9.55	—
Error	0.49	2.00	/	/	/
Optimal level combination after variance optimization			$B_3A_1D_3C_3$		

2.3 平均冲孔加速度影响因素敏感度分析

对正交设计结果中影响 α_A (平均冲孔加速度) 的各因子求极差与均值, 具体结果见表 9, 根据分析结果, 因子 C (堵塞粒径) 的极差最大, 其次是因子 A (炸药单耗), 再者是因子 D (孔距), 最后是因子 B (堵塞长度), 因而各因子对 α_A 的敏感度控制由大到小排序为 C-A-D-B, 且关键因子为 C, 说明了 C 因子对 H_A 的敏感度控制起决定性作用。根据上文分析, α_A 越小作用于堵塞体冲孔的合外力和能量就越小, 能量利用率越高爆破效果也就越好, 最优水平的选取标准为 α_A 最小时, 因而根据极差分析得到的最优水平组合为 $C_3A_1D_3B_1$ 。

为进一步确定各因素和误差对 α_A (平均冲孔加速度) 有无显著影响, 进一步优化最佳水平组合, 对 α_A 进行显著性方差分析, 结果见表 10。根据分析结果因素 C 和因素 A 对 α_A 有显著影响, 且因素 C 为最关键影响因素, 因素 A 为次要关键因素, 其余两个因素对 α_A 无显著性影响, 为不关键因素。综上方差分析二次优化得, 可优化的因素为 B, 由原 B_3 优化为 B_1 , 但冲孔率 Q 是平均冲孔加速度 α_A 的必要条件, 且 B 为 Q 的第二影响因素, 不可牺牲冲孔率而追求微小成本的节省, 故此处不做优化, 最优水平组合选取依旧为 $C_3A_1D_3B_3$ 。

表9 平均冲孔加速度影响因素极差分析

Table 9 Range analysis of influencing factors of average punching acceleration

Test index	K_{ij}	A	B	C	D
$\alpha_A / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	K_{i1}	952.21	999.85	1 068.84	997.46
	K_{i2}	992.74	1 003.15	996.64	1 012.23
	K_{i3}	1 053.13	995.13	932.33	988.39
	k_{i1}	317.40	333.28	356.28	332.49
	k_{i2}	330.91	334.38	332.21	337.41
	k_{i3}	351.04	331.71	310.78	329.46
	Range	33.60	2.67	45.50	7.95
Factor order		CADB			
Optimal level combination		$C_3A_1D_3B_3$			

表10 平均冲孔加速度显著性方差分析

Table 10 Significant variance analysis of average punching acceleration

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	F	$F_{0.05}(2,3)$	Sig*
A	1 719.39	2.00	17.81	9.55	*
B	10.82	2.00	0.11	9.55	—
C	3 108.83	2.00	32.21	9.55	*
D	35.22	2.00	0.37	9.55	—
Error	96.53	2.00	/	/	/
Optimal level combination after variance optimization			$C_3A_1D_3B_3$		

2.4 最优水平选取

根据上述对三个试验指标的分析, C (堵塞粒径) 是冲孔率 Q 和平均冲孔加速度 α_A 的主要影响因

素, C 取水平 3 时 Q 和 α_A 最低, 故 C 应取 5~10 mm 最优。B (堵塞长度) 是平均冲孔高度 H_A 的主要影响因素, 冲孔率 Q 的次要因素, B 取水平 3 时 H_A 最

低,故 B 取 5 m 时最优。 A (炸药单耗)为平均冲孔加速度 α_A 的次要因素, A 取水平 1 时 α_A 最低,故 A 取 0.35 kg/m³ 时最优。 D 对各试验指标无显著影响,取水平 3 孔距最大,可减少钻孔数量节省采场装药成本,故 D 取 7 m 时最优。综上,综合冲孔效应各试验指标,其他爆破参数不变时,得到了最优参数组合为单耗取 0.35 kg/m³、填塞长度取 5 m、填塞粒径取 5~10 mm 和孔距取 7 m。

3 现场验证

为了验证正交设计得到的最优爆破参数水平组合,将上述优化后最优水平组合运用于曼家寨采场

生产爆破 1015 平台,由于生产爆破过程中打孔数量较多,填塞体冲孔高度和加速度的测量存在较大困难或者测量偏差较大,因此这里只选取冲孔率作为验证指标,选用单耗取 0.35 kg/m³、填塞长度取 5 m、填塞粒径取 5~10 mm 和孔距取 7 m 的最优水平组合,结果见表 11,得到的冲孔率为 4.67%,相比优化前冲孔率降低了 79.75%,冲孔率降低效果明显,试验效果较好。需要注意的是,正交设计虽可以极大减少试验次数并从中获得最优水平组合,但露天矿山现场爆破是一个复杂而又繁琐的系统工程,因此需要结合生产实际和现场对参数进行调整,从而获得最佳参数水平组合。

表 11 优化前后冲孔率统计表

Table 11 Punching rate statistics before and after optimization

Production platform	Test combination	Number of blast holes	Number of water holes	Number of punching holes	Water hole punching rate/%
1000	Before optimization	95	39	9	23.07
1015	$A_1 B_3 C_3 D_3$	105	43	2	4.67

4 结论

基于正交设计试验原理,结合极差分析和显著性方差分析,对曼家寨采场露天含水炮孔冲孔效应敏感度分析得到如下主要结论:

1)不同因素对冲孔效应敏感度控制主次不同。填塞粒径是冲孔率和填塞体平均冲孔加速度的主要影响因素,平均冲孔高度主要受填塞长度影响控制,且是冲孔率的次要因素。

2)根据对冲孔效应综合分析,将试验指标最优参数组合代入现场生产爆破,冲孔率得到了明显下降,对采场后续生产爆破和类似工程实践具有指导性意义。

3)对曼家寨采场露天含水炮孔冲孔效应敏感度分析,仅考虑了各因素的主效应作用,而各因子间交互作用对冲孔效应敏感度分析有待进一步研究。

参考文献:

[1] 邵龙潭. 有效应力新解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
SHAO Longtan. A new solution to effective stress[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press,2014.

[2] 张兆顺. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
ZHANG Zhaoshun. Fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2015.

[3] 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.

[4] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州:浙江大学出版社,1996.
GONG Xiaonan. Advanced soil mechanics [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press,1996.

[5] 孙英翔. 露天深孔爆破炮孔填塞长度及填塞物运动规律的研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
SUN Yingxiang. Study on the length of blasthole packing and the law of packing movement in open-air deep-hole blasting [D]. Shenyang: Northeastern University,2011.

[6] 刘博. 水炮泥堵塞作用机理模型试验及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
LIU Bo. Model test and application research on blocking mechanism of water cannon mud [D]. Changsha: Central South University,2014.

[7] 张毕书. 岩屑粒径及其级配对水孔爆破填塞效果影响的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.
ZHANG Bishu. Research on the effect of cuttings particle size and its gradation on the filling effect of water hole blasting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2020.

[8] 雷海鑫. 不同炮孔堵塞材料对矿山露天爆破效果的影响[J]. 爆破器材,2017,46(4):51-54.
LEI Haixin. The effect of different blast hole blocking

- materials on mine open blasting effect[J]. Explosive Materials, 2017, 46(4): 51-54.
- [9] LESKOVAR K, TEŽAK D, MESEC J, et al. Influence of meteorological parameters on explosive charge and stemming length predictions in clay soil during blasting using artificial neural networks[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 52-69.
- [10] XIANG X, CHONG Y, BO L, et al. Experimental Study on the seismic efficiency of rock blasting and its influencing factors [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 1-11.
- [11] 唐佳丽, 徐章韬. 正交试验中的极差分析与方差分析[J]. 中学数学, 2017(9): 31-34.
- TANG Jiali, XU Zhangtao. Analysis of range and analysis of variance in orthogonal test [J]. Middle School Mathematics, 2017(9): 31-34.
- [12] 陈宏涛, 程贵海, 蒙海霖, 等. 正交试验法在深孔爆破振动优化中的应用[J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 38-43.
- CHEN Hongtao, CHENG Guihai, MENG Hailin, et al. Application of orthogonal test method in vibration optimization of deep hole blasting [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 38-43.
- [13] 尹岳降, 李瑞泽, 陈明, 等. 基于正交试验法的爆破块度分布影响因素敏感性分析[J]. 爆破, 2019, 36(4): 37-42.
- YIN Yuejiang, LI Ruize, CHEN Ming, et al. Sensitivity analysis of factors affecting blasting fragmentation distribution based on orthogonal test method [J]. Blasting, 2019, 36(4): 37-42.
- [14] 李磊, 马宏昊, 沈兆武. 基于正交设计方法的双锥罩结构优化设计[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 567-573.
- LI Lei, MA Honghao, SHEN Zhaowu. Optimal design of double cone structure based on orthogonal design method[J]. Explosion and Shock, 2013, 33(6): 567-573.

(编辑 郭文晶)