基于凿岩—爆破—铲运直接作业成本耦合的地下铅锌矿经济块度确定*

王陆洋[1],尹贤刚[1,2],林卫星[1,2],李小元[3],刘晓明[3],黄燕华[3],赵开平[3],喻海根[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.深圳市中金岭南有色金属股份有限公司, 广东 深圳市 518024)

摘要:针对地下金属矿山爆破块度对凿岩、爆破铲运综合生产成本的影响,以某铅锌矿15个大直径深孔采场为研究对象,基于实测爆破块度和同期生产成本,构建凿岩—爆破—铲运直接作业成本耦合模型,并采用敏感性分析和现场工业试验进行验证。结果表明,综合成本随平均块度增大呈先降后升的趋势,经济最优块度为24.99 cm,对应综合直接作业成本为7.501元/t。炸药单耗和孔网参数分别扰动±10%时,最优块度保持在23~27 cm,建议将25 cm作为现场爆破块度设计目标。与Kuznetsov模型预测的32.2 cm基准块度相比,模型预测最优块度的对应成本降低3.09%。现场试验平均块度为246.5 mm,相较于对比采场的爆破块度降低10.1%,大于600 mm的块体比例由10.33%降至5.48%。该模型适用于地质条件、采矿方法和装备配置相近的矿山,其结果仅反映凿岩、爆破和铲运3个工序的直接作业成本。

关键词:爆破块度;地下金属矿山;多工序综合成本;爆破参数

中图分类号:TD235.33 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0098-09

Determination of Economic Fragmentation Size for Underground Metal Mines Based on Coupling of Direct Operation Costs of Drilling-Blasting-Loading Haulage

Wang Luyang[1], *Yin Xian'gang*[1,2], *Lin Weixing*[1,2], *Li Xiaoyuan*[3], *Liu Xiaoming*[3], *Huang Yanhua*[3], *Zhao Kaiping*[3], *Yu Haigen*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518024, China)

Abstract: To address the influence of blasting fragmentation size on the comprehensive production costs of drilling, blasting and loading haulage in underground metal mines, 15 large-diameter long-hole stopes of a lead-zinc mine were taken as the research object. Based on measured blasting fragmentation size and production costs over the same period, a coupling model of direct operation costs of drilling-blasting-loading haulage was constructed, and sensitivity analysis and field industrial tests were conducted for verification. The results show that the comprehensive cost first decreases and then increases with the increase in average fragmentation size. The economic optimal fragmentation size is 24.99 cm, corresponding to a comprehensive direct operation cost of 7.501 yuan/t. When the explosive consumption per unit and blast hole pattern parameters are respectively perturbed by ±10%, the optimal fragmentation size remains within the range of 23 to 27 cm, and it is recommended to take 25 cm as the design target for on-site blasting fragmentation. Compared with the reference fragmentation size of 32.2 cm predicted by the Kuznetsov model, the predicted cost corresponding to the model's optimal fragmentation size is reduced by 3.09%. The average fragmentation size in the field test is 246.5 mm, which is 10.1% lower than that of the comparison stope, and the proportion of blocks larger than 600 mm decreases from 10.33% to 5.48%. The model is applicable to mines with similar geological conditions, mining methods, and equipment configurations, and its results only reflect the direct operation costs of

* **收稿日期**:2026-05-18
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC2910002)
作者简介:王陆洋(2002—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事爆破方面的研究。E-mail:1300624034@qq.com

the three processes of drilling, blasting and loading haulage.

Key words: Blasting fragmentation size, Underground metal mine, Multi-process comprehensive cost, Blasting parameter

0 引言

在地下金属矿山爆破作业中,爆后矿石块度分布既是评价爆破质量的重要指标,也是影响后续生产效率的关键因素[1]。矿石块度直接关系到铲装效率、运输系统运行状态、二次破碎工作量及溜井通过能力,进而影响矿山生产全过程的成本。大直径深孔爆破具有装药结构复杂、影响因素多等特点,爆后块度离散性较大,容易出现大块率偏高和爆堆粒度分布不均等问题,制约了采场连续生产。

刘欢等[2]综述了岩石爆破块度理论预测方法,分析了 Kuznetsov 公式和 Kuz-Ram 模型的工程适用性与局限。吴荣高等[3]针对梅山铁矿爆破块度难以快速识别的问题,结合图像处理与人机交互方法建立了块度自动识别系统。栾辉[4]分析了矿石块度对采选系统能耗的影响。孙光华等[5]将采矿与碎矿环节作为整体,建立了露天矿山矿石块度-成本优化模型。上述研究在块度预测、识别和参数优化方面取得了较多成果,但多聚焦爆破单一环节或露天矿山,对地下采场中块度变化在凿岩、爆破、铲装和运输等连续工序间的成本传递关注不足。

综上,现有研究已从爆破参数优化、块度预测及钻爆—铲装成本协调等方面开展了较为系统的探索,但对地下大直径深孔采场中凿岩、爆破、铲装与运输等连续生产环节之间的经济耦合关系仍考虑不足。同时,理论预测块度、实际生产成本与现场工业试验尚缺乏统一验证。基于此,本文以某地下铅锌矿大直径深孔采场为工程背景,选取地质条件和生产组织方式相近的 15 个采场,建立平均块度与凿岩、爆破及铲运直接作业成本之间的定量关系,并以多工序最小综合成本为目标确定经济合理的块度。在此基础上,将成本优化结果与 Kuznetsov 模型预测值进行对比,并通过现场工业试验验证目标块度的工程可行性。本文旨在从采场连续生产过程出发,协调爆破质量与后续作业成本,为地下金属矿山爆破块度的合理控制提供量化决策依据。

1 矿山概况

1.1 矿体赋存条件与开采方式

某铅锌矿位于广东省北部韶关地区,区域上处于南岭有色金属成矿带,是一座以铅、锌资源开发为主,并综合回收银、镓、锗等伴生有价元素的大型地下多金属矿山。矿床主要赋存于碳酸盐岩地层中,具有沉积成矿并经后期构造改造的特征,最终形成受地层层位控制的黄铁矿-铅锌矿床,按工业类型可划归碳酸盐岩型黄铁铅锌矿床。矿石以块状黄铁铅锌矿石为主,主要金属矿物包括黄铁矿、闪锌矿和方铅矿,并伴有少量黄铜矿、毒砂等矿物,具有矿物组成复杂、伴生有价组分较多及综合利用价值较高等特点。矿山采用地下开采方式,已形成竖井-斜坡道联合开拓与充填采矿相结合的生产体系,主要采用无底柱后退式深孔爆破嗣后充填采矿法和机械化上向分层充填采矿法开采,采矿、选矿、尾砂充填及资源综合回收系统较为完善。

研究采场所在区域的工业矿体赋存标高为 90～－650 m,沿走向最大延展长度约 686 m,沿倾向最大延伸距离约 340 m,最大厚度可达 98 m,具有规模较大、空间形态变化明显等特征。矿体产状、厚度及边界形态受地层岩性、褶皱和断裂构造共同控制,局部连续性与完整性存在差异,增加了矿体三维圈定、采场边界划分及结构参数确定的复杂性。同时,受长期构造活动和岩溶作用的影响,矿区岩体发育节理、裂隙、断层及溶蚀面等多类结构面,围岩稳定性受岩石力学性质、结构面组合特征、地下水活动及水岩相互作用等因素共同制约。因此,采场设计与回采应充分考虑矿体空间赋存特征和工程地质条件,合理优化采场结构参数、回采顺序及支护充填方案。

1.2 爆破工艺

该铅锌矿采用垂直深孔下向漏斗后退式爆破工艺采矿,孔间距和排距均为 1.8～2.2 m,爆破材料选用 2 号岩石乳化炸药。现场采用人工向炮孔内吊装直径 90 mm 的药卷,孔内设置长度为 1.0～1.2 m 的竹筒间隔,并采用细砂堵塞,配合导爆索和两发电子数码雷管起爆,装药结构见图 1。爆破前先形

成切割槽作为自由面,随后以后退方式实施侧向崩矿。

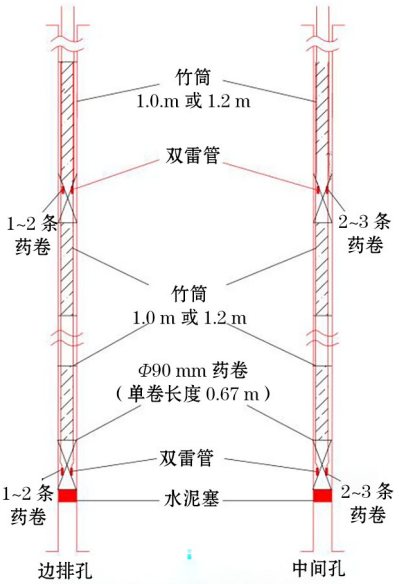


图 1 装药结构示意

Fig.1 Schematic of charging structure

1.3 大块对生产的影响

爆破产生的大块矿石对地下采场生产的影响主要体现在作业效率、生产成本和安全风险三个方面[6]。在作业效率方面,大块会降低铲运设备的满斗系数并影响生产连续性;在生产成本方面,大块需进行机械破碎或二次爆破,增加设备调度、人工和材料消耗;在生产安全方面,大块在搬运与破碎过程中存在滚落风险,可能对人员和设备造成威胁[7-8]。

现场调查结果见图 2。由图 2 可知,采场大块尺寸主要集中在 60~70 cm,局部超过 100 cm,已超出溜井顺畅放矿所允许的块度上限,容易引发溜井堵塞和放矿中断。

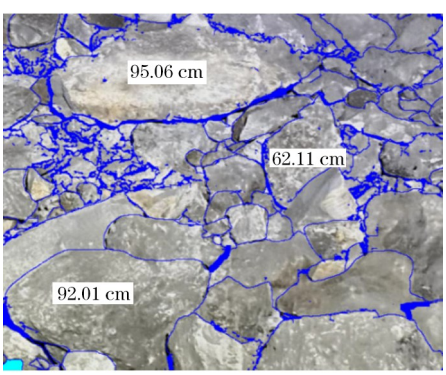


图 2 现场大块

Fig.2 Oversize rocks from on-site blasting

2 传统块度预测模型与现场测量方法

2.1 传统块度预测模型

2.1.1 Harries 模型

Harries 模型由澳大利亚学者 Harries 于 20 世纪 70 年代提出[9],适用于均质连续的弹性介质。该模型能够定量计算爆破碎块尺寸,但仅考虑爆炸荷载的准静态压力作用,未涉及应力波传播和动态损伤演化等动力效应,因此在复杂工况下具有一定的局限性。

距炮孔轴线 r 处的裂隙数量 N_f 可表示为[10]:

$$N_f=\frac{b\cdot K_b}{r\cdot T} \tag{1}$$

式中,N_f 为裂隙数量;K_b 为孔壁应变;b 为炮孔半径,m;r 为距炮孔轴线的距离,m;T 为岩石动态拉伸破坏应变。

2.1.2 Kuz-Ram 模型

Kuz-Ram 模型由南非学者 Cunningham 提出,采用 Rosin-Rammler 分布函数描述爆破块度分布特征,可根据爆破工艺参数计算特征块度和均匀性指数[11]。

Kuznetsov 方程为:

$$X=A\cdot\frac{V^{0.8}}{E_s^{0.8}}\cdot(E_s)^{\frac{1}{6}} \tag{2}$$

式中:X 为平均碎块尺寸,cm;A 为岩石系数,用于表征岩体特性和强度,通常取 0.8~22.0,具体取值与岩石硬度有关;E_s 为单孔炸药装药量,kg;V 为单孔爆破岩石体积,m^3。

Cunningham 在 Kuznetsov 公式的基础上引入 Rosin-Rammler 分布,以描述爆破碎块的粒径分布[12]。Kuz-Ram 模型既可估算平均碎块尺寸,也可预测粒度分布。相较于 Kuznetsov 模型,Kuz-Ram 模型对岩性、炸药类型和装药结构变化具有更好的适应性,该模型计算平均碎块尺寸 X 的公式为:

$$X=A\cdot\frac{V^{0.8}}{E_s^{0.8}}\cdot(E_s)^{\frac{1}{6}}\cdot\left(\frac{115}{N}\right)^{\frac{19}{30}} \tag{3}$$

式中,N 为炸药相对质量威力,无量纲。

Kuznetsov 模型形式简洁,仅需基础参数即可快速估算平均碎块尺寸,因而在工程中得到广泛应用。但该模型只能输出平均尺寸,难以准确表征复杂条件下的粒度分布规律,不能满足精细化生产需

求[13]。传统模型虽具有参数少、计算便捷等优点,但其输出主要为块度或粒级分布,无法直接给出可使生产系统经济性最优的合理块度。因此,本文不对传统预测公式进行经验修正,而是将实测块度作为连接凿岩、爆破和铲运成本的状态变量,建立成本驱动的经济合理块度确定方法。

2.2 矿石块度特征提取方法选择

当前,爆破块度信息的获取方法主要分为直接测量法和间接分析法。

直接测量法是在爆破作业结束后对爆堆矿岩进行现场测定,以获得碎块的尺寸及其分布规律。该方法能够较准确地反映实际块度,但现场工作量较大,且存在一定安全风险。间接分析法则借助实测参数、经验关系式或摄影图像等技术手段获取爆堆表层岩块的尺寸信息,主要包括经验公式法和摄影测量法等[14-15]。

综合考虑作业安全性和数据可靠性,本文采用间接测量法获取采场爆堆图像。拍摄时应尽量避免将地面、边帮等非目标区域纳入画面,以减少无效信息并提高后续图像处理效率[16]。

2.3 现场块度信息收集

在保证作业安全的前提下,应尽可能靠近爆堆拍摄,使破碎岩块轮廓清晰可辨,现场爆堆图像如图3所示。



图3 现场爆堆照片

Fig.3 Photographs of blasting pile on site

图像采集完成后,矿块识别通常存在两类问题:一是完整岩块可能被误分割为多个独立区域,需要删除错误边界并重新勾绘真实轮廓;二是泥土、砂粒等非目标物可能被误识别。因此,需对识别结果进行人工校正,以提高图像分析的准确性和可靠性,人工校正后的图像如图4所示。

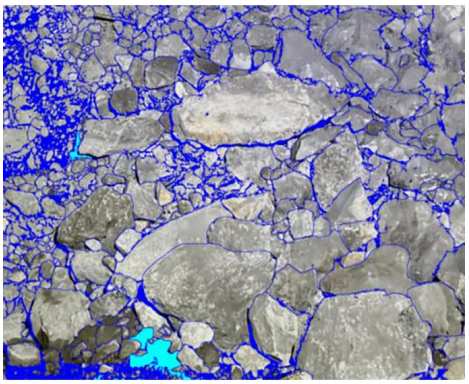


图4 人工处理后爆堆图

Fig.4 Manually processed blasting pile image

图像处理后得到爆破块度分布结果,如图5所示。由图5可知,粒径不超过150 mm的矿石占比最高,为29.94%;粒径超过750 mm的矿石占比最低,为17.31%。

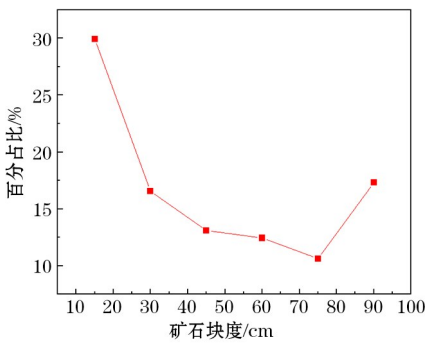


图5 爆破块度分布曲线

Fig.5 Rock fragmentation size distribution curve

2.4 规律分析

对−455 m、−600 m和−650 m分段的代表性采场进行跟踪,3个分段的采场爆破平均块度分别为34.47 cm、31.99 cm和32.19 cm,差异较小。为降低地质条件差异对成本关系的干扰,后续样本限定为采矿方法、岩性和主要装备配置相近的采场。所建立模型反映的是该生产系统内部的统计关联,应用于其他矿山时需重新标定。

3 多工序直接作业成本模型构建

本文选取15个相互独立的生产采场作为分析样本。各采场的采矿方法、主要岩性和装备配置基本一致,但孔深、孔网参数、炸药单耗、运输距离及生产组织条件存在一定差异。各采场平均块度均采用统一的图像分析流程获得;依据同期生产记录中的钻孔进尺、爆破器材消耗、设备台班、人工工时、出矿

量和运输距离,将凿岩、爆破和铲运成本折算为单位矿石直接生产成本。本文所建立的函数反映多因素共同变化条件下平均块度与成本之间的统计关联,不应解释为平均块度对成本的单因素因果关系。

为保证成本预测值为正并便于解释参数弹性,本文采用二参数幂函数进行非线性最小二乘拟合。该函数在样本区间内连续可微,便于后续开展极值求解和敏感性分析。

3.1 凿岩成本函数构建

凿岩成本主要由设备折旧、能耗和人工费用构成。在爆破设计中,平均块度与孔网参数密切相关。当目标块度减小时,通常需缩小孔距和排距,提高单位体积钻孔密度;当目标块度增大时,孔网面积相应增大,单位矿石钻孔工作量下降。实际设计需结合孔深、装药结构和爆破质量要求进行综合调整[17]。

凿岩成本计算公式如下:

$$C_1=\frac{kL}{HS\gamma} \tag{4}$$

式中:C_1 为凿岩直接作业成本,元/t;k 为单位钻孔成本,元/m;L 为孔深,m;H 为分段高度,m;S 为单孔控制面积,m^2;γ 为矿石容重,t/m^3。

根据式(4),结合各采场的实际孔深、孔网面积、分段高度、矿石容重及单位钻孔成本,对 15 个采场的凿岩直接作业成本进行同口径核算,结果见表 1。

表 1 各采场的平均块度与凿岩、爆破和铲运成本

Table 1 Average fragmentation size and drilling, blasting and loading-haulage costs of each stop

采场编号	平均块度/cm	凿岩成本/(元/t)	爆破成本/(元/t)	铲运成本/(元/t)
1	32	3.06	3.79	0.85
2	25	2.68	4.04	0.68
3	27	2.71	3.93	0.71
4	37	3.15	3.53	0.93
5	24	2.59	4.16	0.66
6	22	2.56	4.35	0.64
7	33	3.09	3.65	0.87
8	29	2.74	3.82	0.76
9	25	2.69	4.11	0.70
10	30	2.84	3.77	0.82
11	33	3.02	3.71	0.91
12	39	3.21	3.38	0.96
13	34	3.12	3.69	0.89
14	20	2.48	4.44	0.62
15	17	2.32	4.79	0.60

对表 1 数据进行回归分析,建立平均块度与凿岩成本之间的函数关系,拟合曲线如图 6 所示。

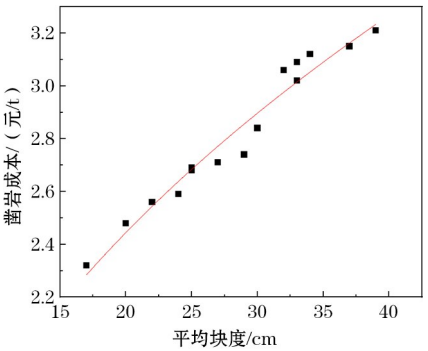


图 6 平均块度与凿岩成本拟合关系曲线

Fig.6 The fitting curve of average fragmentation size and drilling cost

非线性最小二乘拟合方程为:

$$C_1=0.697\ 85x^{0.418\ 5} \tag{5}$$

式中,x 为平均块度,cm。

统计检验结果表明,模型决定系数 $R^2=0.958\ 9$,说明该函数对样本范围内凿岩成本变异具有较高的解释能力。

残差均值接近零,且在零值附近随机分布,未见明显系统性趋势,表明模型拟合不存在显著偏差。由此可认为,所建立的凿岩成本函数能够较好描述样本范围内平均块度与凿岩成本之间的统计关系。回归结果显示,凿岩成本随平均块度增大而上升,但增幅逐渐减缓。

3.2 爆破成本函数构建

本文核算的爆破直接成本主要包括炸药、起爆器材和相关人工投入[18]。一般而言,为获得较小块度,需要提高炸药单耗并采用更密集的装药结构;随着目标块度增大,爆破能量需求和炸药单耗相应降低。

$$C_2=ak_1q+\frac{k_2L}{HS\gamma} \tag{6}$$

式中:C_2 为爆破直接成本,元/t;a 为折算系数,无量纲;k_1 为炸药单价,元/kg;q 为炸药单耗,kg/t;k_2 为单位炮孔长度爆破器材消耗费用,元/m。

依据式(6),结合各采场的炸药单耗、器材消耗和相关成本参数,对不同工况下的爆破直接作业成本进行定量核算,并与前期获得的平均块度数据对应整理,结果见表 1。

得到平均块度与爆破成本之间的非线性最小二

乘拟合关系曲线,如图 7 所示。图中各散点代表单个采场的核算值,曲线为拟合结果。

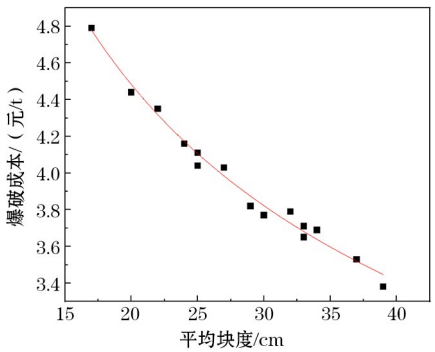


图 7　平均块度与爆破成本的拟合关系曲线

Fig.7　The fitting curve of average fragmentation size and blasting cost

非线性最小二乘拟合方程为:

$$C_2 = 14.551\ 09x^{-0.393\ 45} \tag{7}$$

统计检验结果表明,模型决定系数 $R^2=0.987$,可解释样本范围内 98.7%的爆破成本变异,具有较高的拟合优度;回归系数显著性检验结果为 $P<0.01$,表明回归关系具有统计显著性。

残差在零值附近随机分布,未见明显系统性偏差,表明模型能够较好描述样本范围内平均块度与爆破成本之间的统计关系,具有一定工程适用性。

回归结果表明,平均块度与爆破成本呈负相关关系;随着块度增大,爆破成本逐渐降低,但降幅逐渐趋缓。

3.3　铲运成本函数构建

铲运成本主要受装载效率和运输效率影响。在合理块度范围内,矿石松散性较好,铲运设备装载阻力较小,满斗系数和作业效率较高;随着块度增大,大块比例上升,装载阻力和循环时间增加,设备利用效率降低。在放矿过程中,大块还容易引发溜井卡堵,进一步影响矿山生产效率[19]。

考虑地下矿山多水平生产中运输距离和设备调度存在波动[20],本文根据各采场实际设备台班、能耗、人工和出矿量核算单位矿石铲运成本,并以平均块度建立统计代理函数。该处理可反映现场综合工况,但不等同于固定运距条件下的单因素试验。

平均块度与铲运成本之间的非线性最小二乘拟合关系如图 8 所示,拟合方程见式(8)。

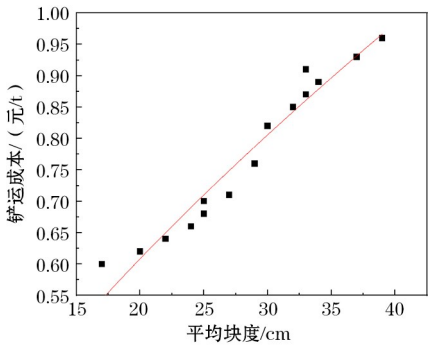


图 8　平均块度与铲运成本的拟合关系曲线

Fig.8　The fitting curve of average fragmentation size and loading-haulage cost

$$C_3 = 0.076\ 41x^{0.692\ 63} \tag{8}$$

统计检验结果表明,模型决定系数 $R^2=0.941$,说明该模型能够解释样本范围内 94.1%的铲运成本变异;显著性检验结果为 $P<0.01$,表明回归关系具有统计显著性。

残差在零值附近随机分布,未见明显趋势性偏差,说明模型能够较好描述样本范围内平均块度与铲运成本之间的统计关系。

回归结果表明,铲运成本与平均块度呈明显的正相关关系。

3.4　模型假设与适用条件

为明确模型的理论边界,本文建立的综合成本耦合模型基于以下假设:

(1) 研究区域矿体赋存条件、岩石力学性质及爆破工艺基本一致,不考虑岩性剧烈变化、结构面等因素对块度分布的影响;

(2) 凿岩、爆破及铲运成本均以单位矿石成本表示,且成本统计周期内市场价格及设备折旧参数保持稳定;

(3) 平均块度能够代表爆堆整体破碎效果,其对生产成本的影响可采用回归函数进行表征;

(4) 模型适用于与研究矿山地质条件、采矿方法及设备配置相近的大直径深孔爆破作业条件。

本文模型的平均块度样本范围为 17～39 cm,所有拟合评价、极值求解和工程解释原则上均限定在该区间。对小于 17 cm 或大于 39 cm 的块度进行成本预测属于区间外外推,其不确定性明显增大,不宜直接用于定量经济比较。在其他矿山、采矿方法或装备条件应用该模型时,应利用实际条件下的生产数据重新标定。

3.5 三工序直接作业成本模型与基准对比

综合考虑凿岩、爆破和铲运成本,可建立块度-综合成本函数。凿岩和铲运成本随块度增大而上升,爆破成本则随块度增大而下降,综合成本函数如式(9)所示:

$$C=0.697\ 85x^{0.418\ 5}+14.551\ 09x^{-0.393\ 45}+0.076\ 41x^{0.692\ 63} \tag{9}$$

式中,C 为凿岩—爆破—铲运综合直接作业成本,元/t。

综合考虑凿岩、爆破和铲运成本后,综合成本随平均块度增大呈"先下降、后上升"的变化趋势,因而存在对应经济最优块度的成本极小值点,如图 9 所示。

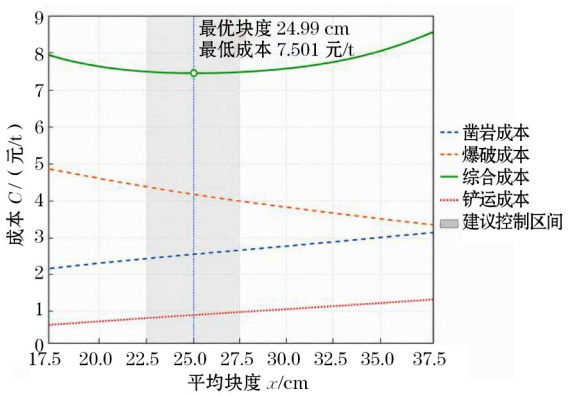


图 9 成本曲线、数学最优点及建议控制区间

Fig.9 Cost curves, mathematical optimum and recommended control interval

当 $x=24.99$ cm 时,综合直接作业成本达到最小值 7.501 元/t。根据炸药单耗和孔网参数分别扰动±10%的敏感性分析,并综合考虑设备允许块度、溜井通过能力、大块率控制及现场参数可实现性,最优块度区间为 23～27 cm。因此,建议将 25 cm 的块度作为现场爆破设计目标,将 23～27 cm 的块度作为工程控制区间。该区间由参数扰动分析确定,并非主观给定。对应的基准设计参数为炸药单耗 0.26 kg/t、孔网面积 4.4 m^2、孔深 21.9 m。

采用 Kuznetsov 方程计算该地下矿山的理论爆破块度,结果为 32.2 cm。在所建立的成本模型下,32.2 cm 基准块度对应的预测成本为 7.740 元/t,块度 25.00 cm 对应的预测成本为 7.501 元/t,模型预测成本降低了 3.09%。该差异仍需通过现场实际成本统计进行验证。

3.6 敏感性分析

为定量评估模型对关键爆破参数变化的响应,并验证综合成本模型的稳定性和可靠性,选取炸药单耗 q 与孔网面积 S(间距×排距)作为主要敏感性参数进行扰动分析。

(1) 分析方法。

在经济最优块度对应工况下,分别对炸药单耗 q 和孔网面积 S 施加±10%扰动,即 $q=q_0(1\pm10\%)$、$S=S_0(1\pm10\%)$。将扰动参数代入块度预测模型,得到新的最优块度,并进一步代入综合成本函数求取成本极小值。

(2) 参数敏感性分析。

炸药单耗提高 10%至 0.29 kg/t 时,平均块度减小,大块率降低,最优块度由 25 cm 降至 23 cm;炸药单耗降低 10%至 0.23 kg/t 时,最优块度升至 27 cm。孔网面积增加 10%时,单孔控制体积增大、爆破作用减弱,最优块度升至 27 cm;孔网面积降低 10%时,最优块度降至 24 cm。

(3) 综合敏感性评价。

为定量评价各参数的敏感程度,引入式(10)所示的敏感性系数。

$$s_i=\frac{(x_i^*-x_0^*)/x_0^*}{(p_i-p_{i0})/p_{i0}} \tag{10}$$

式中:s_i 为第 i 个影响参数的敏感性系数,无量纲;x_0^* 为各参数取基准值时的经济最优块度,cm;p_{i0} 为第 i 个参数的基准值;x_i^* 为第 i 个参数扰动后重新计算得到的经济最优块度,cm;p_i 为第 i 个参数的扰动值。

经过敏感性系数计算后,得到表 2。

表 2 敏感性系数结果

Table 2 Sensitivity coefficient results

参数	扰动	最优块度/cm	相对变化	敏感性系数
炸药单耗 q	+10%	23	−0.08	−0.8
炸药单耗 q	−10%	27	+0.08	−0.8
孔网面积 S	+10%	27	+0.08	+0.8
孔网面积 S	−10%	23～24	−0.04～−0.08	+0.4～+0.8

敏感性分析结果表明,炸药单耗与最优块度呈负相关,敏感性系数约为 0.8;孔网面积与最优块度呈正相关,敏感性系数约为 0.6～0.8。两类参数的敏感性系数均小于 1,说明最优块度对参数变化的响应较为平稳。总体而言,炸药单耗的影响略高于孔网面积的影响,但两类参数均未改变 23～27 cm 的最优块度范围,表明模型具有较好的稳定性和工程适用性。

4 现场工业试验

前文已建立块度-综合成本函数模型,并通过敏感性分析验证了模型的稳定性。为检验目标块度的工程可实现性,选取-600 m 分段采场开展现场工业试验,并选择同分段、地质类型和主要装备相近且采用原经验参数设计的采场进行对比。试验采场孔间距为 2.0 m、排距为 2.2 m、孔深为 21.9 m,炸药设计单耗为 0.26 kg/t。

爆破后采场爆堆形态见图 10。块度统计结果为:$x \leqslant 150$ mm 占 33.13%;$150 < x \leqslant 300$ mm 占 26.53%;$300 < x \leqslant 450$ mm 占 23.85%;$450 < x \leqslant 600$ mm 占 11.01%;$600 < x \leqslant 750$ mm 占 4.76%;$x > 750$ mm 占 0.72%。综合计算得到爆堆平均块度为 246.5 mm,与模型确定的经济合理块度基本一致。



图 10 试验采场的爆堆

Fig.10 Blasting pile in the test stope

选取地质类型相近的-600 m 三分段采场进行对比调查。该采场采用矿山原经验参数设计,爆破块度的跟班统计结果为:$x \leqslant 150$ mm 占 31.17%;$150 < x \leqslant 300$ mm 占 20.42%;$300 < x \leqslant 450$ mm 占 23.06%;$450 < x \leqslant 600$ mm 占 15.02%;$600 < x \leqslant 750$ mm 占 8.34%;$x > 750$ mm 占 1.99%。综合计算得到爆堆平均块度为 274.2 mm。

现场试验平均块度为 246.5 mm,与模型计算的经济块度 24.99 cm 基本一致,较对比采场的 274.2 mm 降低约 10.1%,说明在相近地质条件、采矿方法和装备配置下模型计算得出的目标块度具有工程可实现性。由于本次试验尚未系统核算两类采场的凿岩、爆破和铲运实际成本,因此现场结果主要验证目标块度的可实现性,尚不能单独证明综合直接作业成本已经降低。

5 结论

针对地下金属矿山大直径深孔爆破块度不均及其对生产成本的影响,本文基于现场实测数据和多工序成本分析构建块度-成本耦合模型,并通过理论分析和现场工业试验进行验证,得到以下结论。

(1) 基于 15 个生产采场的爆后块度及同期成本数据,建立了平均块度与凿岩、爆破和铲运直接作业成本之间的幂函数模型,并构建三工序直接作业成本耦合函数。该模型反映实例研究矿山特定生产条件下块度与成本之间的统计关系,核算范围不包括通风、排水和提升等间接成本,因此,该模型中计算的成本不等同于矿山生产的完全成本。

(2) 在块度为 17~39 cm 的样本范围内,成本函数的成本极小点块度为 24.99 cm,对应的综合直接作业成本为 7.501 元/t。炸药单耗和孔网面积分别扰动±10%时,最优块度保持在 23~27 cm,因此推荐以 25 cm 为爆破块度的设计目标。Kuznetsov 模型预测的 32.20 cm 基准块度所对应的同口径成本为 7.740 元/t,模型预测降幅为 3.09%,该结果并非现场实测成本。

(3) 现场工业试验平均块度为 246.5 mm,与模型计算的经济最优块度基本一致,较比于对比采场的爆破块度 274.2 mm 降低约 10.1%,表明目标块度在相近地质条件和相同的采矿方法和装备配置下具有工程可实现性。由于试验阶段尚未完整核算两类采场的凿岩、爆破和铲运实际成本,模型的经济效果仍需通过多采场、多爆次的连续成本统计进一步验证。

参考文献(References):

[1] 孟佳乐.白马铁矿露天松动爆破爆堆形态与块度分布规律研究[D].昆明:昆明理工大学,2024.
Meng Jiale. Study on blasting muckpile shape and fragmentation distribution of open-pit loose blasting in Baima Iron Mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2024.

[2] 刘欢,潘城.岩石爆破块度预测方法研究现状及展望[J].建井技术,2025,46(3):73-81.
Liu Huan, Pan Cheng. Research status and prospect of rock blasting fragmentation prediction methods[J]. Mine Construction Technology,2025,46(3):73-81.

[3] 吴荣高,彭建宇,江学.梅山铁矿爆破块度自动识别系统研究[C]//中国采选技术十年回顾与展望.北京:冶金工业出版社,2012:640-642+647.

Wu Ronggao, Peng Jianyu, Jiang Xue. Study on automatic identification system of blasting fragmentation in Meishan iron mine[C]//Ten-Year Review and Prospect of Mining and Mineral Processing Technology in China. Beijing: Metallurgical Industry Press,2012:640-642+647.

[4] 栾辉.基于爆破块度指标的采选能耗研究分析[J].世界有色金属,2021(24):106-108.
Luan Hui. Analysis of mining and mineral processing energy consumption based on blasting fragmentation index[J]. World Nonferrous Metals,2021(24):106-108.

[5] 孙光华,吕广忠,郭瑞和,等.王官营石灰石矿南采区矿石块度与成本优化研究[J].矿业快报,2007(7):11-12+41.
Sun Guanghua, Lyu Guangzhong, Guo Ruihe, et al. Study on ore fragmentation and cost optimization in south mining area of Wangguanying limestone mine[J]. Mining Express, 2007(7):11-12+41.

[6] 赵胜.地下矿山爆破块度智能识别与参数动态优化[D].沈阳:东北大学,2021.
Zhao Sheng. Intelligent identification of blasting fragmentation and parameter dynamic optimization of blasting in underground mine[D]. Shenyang: Northeastern University,2021.

[7] 龚臻,左琳,粟登峰,等.破碎矿体扇形孔爆破大块产生原因及处理措施研究[J].矿业研究与开发,2025,45(12):57-63.
Gong Zhen, Zuo Lin, Su Dengfeng, et al. Research on the causes and treatment measures of large blocks produced by fan-shaped hole blasting in broken ore-body[J]. Mining Research and Development,2025,45(12):57-63.

[8] 杨晓妤.基于图像的岩体裂隙识别及爆破块度预测研究[D].天津:天津大学,2020.
Yang Xiaoyu. Research on rock fracture identification and blasting fragmentation prediction based on images[D]. Tianjin: Tianjin University,2020.

[9] Harries G. A mathematical model of cratering and blasting[C]//Proceedings of National Symposium on Rock Fragmentation. Adelaide: Adelaide, Australia,1973:41-54.

[10] Kuznetsov V M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock[J]. Soviet Mining Science,1973,9(2):144-148.

[11] 宋家威,郇宝乾,秦涛,等.基于 IGWO-CatBoost 模型的岩石爆破块度预测[J].爆破器材,2024,53(2):56-64.
Song Jiawei, Huan Baoqian, Qin Tao, et al. Prediction of rock blasting fragmentation based on IGWO-CatBoost model[J]. Explosive Materials,2024,53(2):56-64.

[12] Rosin P, Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal[J].Journal of the Institute of Fuel,1933(7):29-36.

[13] 董武俊.台阶法隧道岩体爆破特性研究及岩石碎片块度预测[J].爆破,2023,40(2):80-87+152.
Dong Wujun. Study on rock mass blasting characteristics and rock fragment size prediction in bench method tunnel[J]. Blasting,2023,40(2):80-87+152.

[14] 官旭晖,项江波,曾令峰,等.基于爆破块度的地下金矿钻爆及铲装成本优化[J].有色金属(矿山部分),2022,74(3):31-35+49.
Guan Xuhui, Xiang Jiangbo, Zeng Lingfeng, et al. Optimization of drilling-blasting and loading costs in underground gold mines based on fragmentation[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2022,74(3):31-35+49.

[15] 题正义,衣东丰.爆堆矿岩块度分布测试方法概述[J].辽宁工程技术大学学报,2003(增刊1):1-3.
Ti Zhengyi, Yi Dongfeng. Overview of testing methods for fragmentation distribution of blasted rock mass[J]. Journal of Liaoning Technical University,2003(Suppl.1):1-3.

[16] 周谊.缓冲爆破装药结构优化及应用[D].贵阳:贵州大学,2017.
Zhou Yi. Optimization and application of charge structure in cushion blasting[D]. Guiyang:Guizhou University,2017.

[17] 叶海旺,余梦豪,刘聪,等.基于爆破块度控制的空气间隔装药台阶爆破参数优化[J].爆破,2024,41(4):84-90+100.
Ye Haiwang, Yu Menghao, Liu Cong, et al. Optimization of bench blasting parameters with air interval charging based on blasting fragmentation control[J]. Blasting,2024,41(4):84-90+100.

[18] 程伟.矿山爆破成本影响因素及控制措施研究[J].现代矿业,2025,41(7):11-14+51.
Cheng Wei. Study on influencing factors and control measures of blasting cost in mines[J]. Modern Mining, 2025,41(7):11-14+51.

[19] 张强.程潮铁矿采场爆破质量分析及参数优化研究[D].武汉:武汉科技大学,2017.
Zhang Qiang. Study on blasting quality analysis and parameter optimization in Chengchao Iron Mine[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology,2017.

[20] 伍碧涓.某矿山开采方式与井下设备升级改造[J].工矿自动化,2024,50(增刊2):230-233.
Wu Bijuan. Mining mode and underground equipment upgrading in a mine[J]. Journal of Mine Automation,2024, 50(Suppl.2):230-233.