

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.005

低碳目标下多工序协同的爆破参数优化研究^{*}

张聪瑞^{1,2,3}, 白佳霖¹, 王浩宇¹, 陈 诚⁴, 李吉民⁴, 邱 浪¹, 郑 重⁵, 任高峰^{1,2,3}, 赵 亮¹

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070;

2. 关键非金属材料资源绿色利用教育部重点实验室, 武汉 430070;

3. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070;

4. 武钢资源集团程潮矿业有限公司, 鄂州 436051;

5. 中南财经政法大学 信息工程学院, 武汉 430073)

摘 要: 面对矿山行业绿色低碳转型的迫切需求, 爆破环节的减碳已成为关键。爆破效果直接决定了矿石块度的分布, 进而对后续工艺环节的能耗产生决定性影响。针对程潮铁矿开采现状, 构建出矿山采场各生产工艺碳排放模型, 分析了凿岩耗电量、爆破耗药量、铲装与运输设备耗电量与爆破中位数块度(D_{50} 块度)之间的定量关系, 并结合相应能源与材料的碳排放因子, 实现了从块度到生产全程碳排放的系统性拟合与量化评估, 计算确定的最低碳排放 D_{50} 块度为32.55 cm。通过改变炮孔长度、堵塞长度、孔底距参数设计了16组正交实验, 采用ANSYS/LS-DYNA分析了不同方案下的爆破裂隙分布, 并结合Canny算法提取岩块与裂隙边界, 统计出了正交实验各方案的大块率、粉矿率以及 D_{50} 块度, 计算出各方案的碳排放量。采用PSO-ELM算法在正交实验数据基础上构建出块度预测模型, 并引入NSGA-II进行爆破参数优化, 得到最低碳排放和最适宜块度双重约束下的爆破参数为: 炮孔长度166 m、堵塞长度21.6 m、孔底距2.0 m。结果表明: 所提出的协同优化方法能够保障生产效率的同时, 显著降低矿山采场生产碳排放, 为“双碳”目标下的绿色、智能开采提供了可量化的技术路径与实践依据。

关键词: 矿石块度; 爆破参数; 碳减排; 多目标优化; 正交实验

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0044-14

Optimization of Blasting Parameters based on Multi-process Collaboration under Low-carbon Objectives

ZHANG Cong-rui^{1,2,3}, BAI Jia-lin¹, WANG Hao-yu¹, CHEN Cheng⁴, LI Ji-min⁴,
QIU Lang¹, ZHENG Zhong⁵, REN Gao-feng^{1,2,3}, ZHAO Liang¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology,

收稿日期(Date of reception): 2025-12-15

网络首发日期(Published online): 2026-01-20

作者简介: 张聪瑞(1991-), 男, 浙江绍兴人, 副教授、博士、硕士研究生导师, 主要研究方向为矿山智能开采、工程安全与风险管控, (E-mail) zcrwhut@163.com。

通信作者1: 郑 重(1982-), 女, 湖北武汉人, 副教授、博士, 主要研究方向为环境安全管理、智能开采、工程安全与风险管控, (E-mail) zheng zhong@zuel.edu.cn。

通信作者2: 任高峰(1979-), 男, 湖北武汉人, 教授、博士、博士研究生导师, 主要研究方向为矿床开采理论与技术、智能开采、工程安全与风险管控, (E-mail) rgfwhut@163.com。

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2026AFB126); 湖北省技术创新专项重大项目(2022BEC040); 国家自然科学基金面上项目(52174087)

About the author: ZHANG Cong-rui (1991-), male, born in Shaoxing city, Zhejiang province, associate professor, Ph. D., master's supervisor, mainly engaged in intelligent mining, engineering safety, and risk management, (E-mail) zcrwhut@163.com.

Corresponding author 1: ZHENG Zhong (1982-), female, born in Wuhan city, Hubei province, associate professor, Ph. D., mainly engaged in environmental safety management, intelligent mining, engineering safety and risk management and control, (E-mail) zheng zhong@zuel.edu.cn.

Corresponding author 2: REN Gao-feng (1979-), male, born in Wuhan, Hubei Province, professor, Ph. D., professor and doctoral supervisor, mainly engaged in mining theory and technology, intelligent mining, and engineering safety, (E-mail) rgfwhut@163.com.

Fund Programs: Natural Science Foundation of Hubei Province of China(2026AFB126), Hubei Provincial Major Project of Technical Innovation Special Fund(2022BEC040), General Program of the National Natural Science Foundation of China(52174087)

Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Green Utilization of Key Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment of Hubei Province, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4. Chengchao Mining Company of WISCO Resources Group, Ezhou 436051, China; 5. School of Information Engineering, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

Abstract: Given the pressing demand for eco-friendly and low-carbon development in mining operations, decarbonizing the blasting techniques has emerged as a pivotal challenge. The effectiveness of rock fragmentation critically determines the ore size distribution, thereby exerting a decisive influence on the energy requirements of subsequent processing stages. Using Chengchao Iron Mine as a case study, this study developed a stope production carbon emissions model that quantitatively correlates D_{50} particle size with critical operational parameters, including drilling power consumption, blasting explosive usage, and haulage equipment energy demand. By integrating carbon emission coefficients for associated energy and materials, the research systematically quantified process-wide carbon emissions influenced by fragmentation performance, ultimately determining 32.55 cm as the optimal D_{50} particle size for minimizing carbon emissions. Subsequently, sixteen groups of orthogonal experiments were designed by varying blasthole length, stemming length, and toe spacing. A fluid-solid coupling algorithm was implemented to characterize the dynamic constitutive behavior of formations. Building on this foundation, ANSYS/LS-DYNA simulations were conducted to analyze the distribution of blast-induced fractures across various design schemes. Grayscale processing and binarization were applied to simulated fracture patterns to enhance rock block boundary contrast, followed by an adaptive multi-scale Canny algorithm for precise extraction of fragment-fracture interfaces. Finally, the boulder yield, fines fraction, and D_{50} particle-size distribution for each experimental configuration were statistically analyzed to enable precise calculation of associated carbon emission intensities. Simulation data analysis reveals that carbon emissions across the 16 schemes range from 1.4391 kg CO₂/t to 1.6296 kg CO₂/t, with a pronounced inverse relationship between the oversize fragment proportion and fine ore generation efficiency. Subsequently, a fragmentation prediction model was developed using a PSO-ELM algorithm based on the experimental datasets. The NSGA-II optimization method was employed to refine blasting parameters, yielding an optimal configuration that simultaneously minimizes carbon emissions and enhances fragmentation performance: a 166 m blasthole length, a 21.6 m stemming length, and a 2.0 m toe spacing. This configuration achieves a carbon emission intensity of 1.43617 kg CO₂/t, with an oversize fragment ratio of 18.83926% and a fine ore production rate of 17.28788%. The results confirm that the developed collaborative optimization approach substantially reduces whole-process carbon emission intensity during stope production while maintaining consistent operational efficiency. This research provides both a measurable technical framework that combines sustainable transformation with intelligent control to achieve the “dual carbon” target and actionable implementation guidelines for industrial practice.

Key words: rock fragmentation; blasting parameter optimization; carbon emission reduction; multi-objective optimization; orthogonal experiment

在全球能源消费持续增长与温室气体排放加剧的严峻形势下,推动低碳转型已成为国际社会的普遍共识^[1,2]。我国“碳达峰、碳中和”战略目标的提出,正在深度驱动包括采矿业在内的高碳行业向绿色可持续发展模式转型^[3,4]。采矿业作为国民经济的基础产业,其能源消费量约占全国总量的5.25% (2021年数据),面临着巨大的节能减排压力。

当前,采矿行业的减碳研究主要聚焦于结构调整、技术创新与管理优化三大路径^[5]。其中,技术路径因其能直接干预生产过程且具备源头调控潜力

而备受关注。爆破作为矿山生产中能量集中释放的源头工序,其破碎效果直接决定了后续铲装、运输及破碎环节的作业效率与能耗水平。因此,矿石块度不仅是衡量爆破效果的关键指标,更是关联爆破参数与系统能耗的纽带^[6,7]。现有研究已广泛探讨了块度与能耗的耦合关系;王凤林等利用图像分析技术揭示了爆堆块度与机械能耗间的近似线性关系,并指出了工况差异对能耗结构的显著影响^[8];过江等引入“耗量比”指标,构建多目标粒子群优化模型(MOPSO),量化分析了爆破参数与破碎能耗的映射

机制^[9];郑超等则通过灰关联度法建立了基于炸药单耗的爆破能耗评价模型^[10]。

在爆破参数调控与优化方面,相关技术手段不断演进。一方面,空气间隔装药^[11]、小直径装药等新型工艺被广泛应用以改善破碎质量^[12];另一方面,随着计算科学的发展,数值模拟与人工智能成为参数优化的主流工具^[13-16]。例如,茜梦轩等针对梅山铁矿扇形中深孔爆破的大块率问题,采用 AN-SYS/LS-DYNA 模拟确定了最优孔网参数^[17];金庆雨等基于集成深度学习开发了岩巷爆破参数智能设计系统,实现了炮孔布置的自动化与可视化^[18];张万至等则通过改进深度学习算法与现场监测结合,实现了光面爆破参数的智能识别与精准优化^[19]。

综上所述,以爆破块度为切入点进行源头调控,是实现矿山系统节能的高效路径。然而,现有研究多局限于爆破单一环节的能量利用或局部工序的能耗分析,缺乏贯穿“钻孔-爆破-铲装-运输”全流程的系统性能耗模型,难以实现采矿作业整体碳排放的源头协同控制。为此,本研究以程潮铁矿为工程背景,融合块度-能耗关联机制与数值模拟方法,构建采场生产全工序碳排放模型,系统识别最低系统能耗对应的爆破参数组合,旨在为矿山“双碳”目标下的绿色智能开采提供理论支撑与实践依据。

1 采矿流程能耗与碳排放量化分析

1.1 工程背景

程潮铁矿属典型的接触交代型矽卡岩矿床,目前回采作业主要集中在 -500 m 及 -517 m 水平。矿山采用无底柱分段崩落法开采,主要结构参数为:分段高度 17.5 m,进路间距 15 m。采场落矿选用 Simba H252 台车施工单排扇形中深孔,孔径 ϕ 80 mm,崩矿步距控制在 1.8 ~ 2.5 m。

矿山采场生产碳排放主要源于凿岩、爆破、铲运及运输等环节^[20]。实际生产监测表明,现行爆破方案(图 1)存在明显的破碎质量问题,大块率长期维持在 25% 左右。这一现象导致后续铲运环节效率低下,设备空载与磨损增加,进而使得采场综合能耗与碳排放成本显著上升。因此,亟需针对该矿山工况开展低碳导向的爆破参数优化研究。

1.2 采场生产全流程碳排放模型构建

为了进一步分析矿石块度对后续工艺能耗的影响关系,通过现场调研的方式,同步监测各工序的生产能耗与对应的矿石块度特征,构建了块度-能耗拟合函数,进而建立了采场生产全流程碳排放数学模型。

基于无底柱分段崩落法工艺特点,界定采场生产系统的碳排放边界为:凿岩(E_1)、爆破(E_2)、铲装(E_3)及运输(E_4)四个环节。总碳排放量 E (kg CO₂/t) 可表示为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (1)$$

凿岩碳排放通过监测台车耗电量进行核算。首先根据其工作时间与功率统计总能耗,再结合爆破后的出矿量,最终核算出特定块度下的单位矿石能耗。

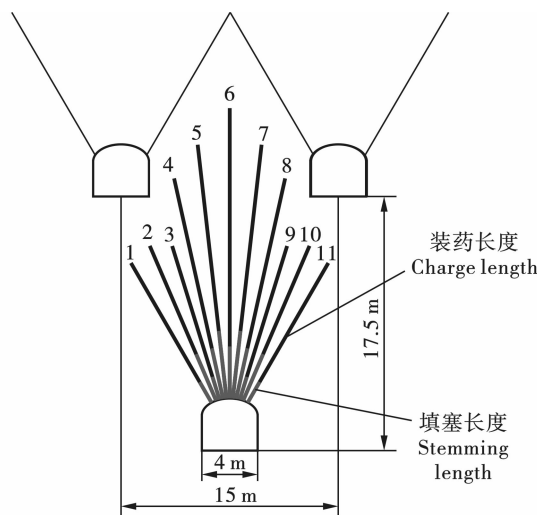


图 1 炮孔装药标准方案图

Fig. 1 Standard blasting hole charging scheme

数据分析表明,凿岩工序的单位矿石耗电量与岩石块度呈负相关关系,即岩石块度越大,单位能耗越低。这主要源于大块岩石在破碎过程中形成的裂隙网络更少,所需的总破碎功相应降低。具体数据如表 1 所示。

表 1 D_{50} 块度与凿岩耗电量
Table 1 D_{50} particle size and rock drilling power consumption

D_{50} 块度 D_{50} particle size/cm	吨矿石凿岩耗电量 Power consumption for rock drilling per ton of ore/(kWh · t ⁻¹)
29.2	0.63
30.8	0.60
31.4	0.59
32.0	0.58
32.8	0.55
33.8	0.53
35.2	0.52
35.8	0.51
36.6	0.50
38.4	0.48

根据分析结果,得出吨矿石凿岩耗电量(y_1)与 D_{50} 块度(x)的拟合关系表达式

$$y_1 = 0.462 + \frac{0.225}{1 + \left(\frac{x}{31.99}\right)^{12.29}} \quad (2)$$

根据矿山统计资料,分析得出了爆破单位矿石耗药量与 D_{50} 块度之间的关系,具体结果如表 2 所示。该关系表明,爆破参数(尤其是耗药量)对矿石块度分布具有显著影响。

表 2 D_{50} 块度与爆破耗药量
Table 2 D_{50} particle size and explosive consumption for blasting

D_{50} 块度 D_{50} fragment size/cm	爆破吨矿石耗药量 Explosive consumption per ton of ore/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
29.2	0.529
30.8	0.507
31.4	0.495
32.0	0.465
32.8	0.454
33.8	0.444
35.2	0.449
35.8	0.424
36.6	0.394
38.4	0.386

同上,得到爆破单位矿石的耗药量(y_2)与 D_{50} 块度的拟合关系表达式如下

$$y_2 = -0.036 + \frac{4.375}{1 + \left(\frac{x}{6.07}\right)^{1.21}} \quad (3)$$

本研究关注的铲运碳排放,主要来源于铲运机运行过程中产生的电力碳排放。以程潮铁矿为例,其采用的出矿设备为电动铲运机。本次研究中,铲运碳排放的计算主要基于电动铲运机的用电量及其相应的碳排放因子。

通过分析矿山近期 D_{50} 块度与铲运过程耗电量的统计数据,选取运距相同且比较有代表性的一组数据进行线性分析。根据矿山统计资料,得到了 D_{50} 块度与铲运耗电量之间的关系,如表 3 所示。这种关系揭示了块度变化对铲运能耗及碳排放的影响,为优化爆破参数及后续铲运环节的碳减排措施提供了参考。

通过分析表 3,得出铲装单位矿石的耗电量(y_3)与 D_{50} 块度的拟合关系表达式

$$y_3 = 2.422 + \frac{-0.488}{1 + \left(\frac{x}{35.63}\right)^{34.34}} \quad (4)$$

表 3 D_{50} 块度与铲运耗电量
Table 3 D_{50} block size and shovel-truck electricity consumption

D_{50} 块度 D_{50} fragment size/cm	吨矿石铲运耗电量 Power consumption for shoveling and transporting per ton of ore/($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)
29.2	1.980
30.8	1.944
31.4	1.926
32.0	1.908
32.8	1.944
33.8	2.016
35.2	2.142
35.8	2.196
36.6	2.268
38.4	2.394

地下开采中,由于运输过程的复杂性和不确定性,目前尚未形成完全通用的运输碳排放计算公式。因此,在实际生产中,只能根据每个矿山的具体生产情况,通过统计数据对运输过程中产生的碳排放进行估算。

本次研究的运输碳排放主要是电机车运行过程中产生的间接碳排放。采场铲装的矿石倒入溜井,经由振动放矿机装入 6 m^3 底卸式矿车,再由 14 t 架线式电机车牵引运至井底车场。本研究重点分析运输过程中电机车的用电消耗所导致的碳排放。通过分析矿山近期平均矿石块度与矿车运输过程碳排放的统计数据,选取具有代表性的多组数据进行拟合。根据矿山的统计资料,可以得出矿石 D_{50} 块度与运输耗电量的关系,如表 4 所示。

通过分析表 4,得出运输单位矿石的耗电量(y_4)与 D_{50} 块度的拟合关系表达式

$$y_4 = 0.668 + \frac{-0.149}{1 + \left(\frac{x}{35.83}\right)^{26.43}} \quad (5)$$

通过该表可以看出: D_{50} 块度越小,运输单位吨矿石所需消耗的电量越少,说明较小的矿石块度能够提高矿车的满载率,从而减少每单位矿石运输所需的运行时间和次数,降低电机车的总能耗与相应的碳排放。反之,较大的矿石块度会降低运输效率,增加电力消耗,导致更高的碳排放。因此,在优化块

度和运输工艺的同时,能够显著降低运输过程中的碳排放,为矿山实现低碳生产奠定基础。

表 4 D_{50} 块度与运输耗电量
Table 4 D_{50} Particle Size and transport electricity consumption

D_{50} 块度 D_{50} fragment size/cm	吨矿石运输耗电量 Power consumption for transporting per ton of ore/($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)
29.2	0.528
30.8	0.510
31.4	0.531
32.0	0.522
32.8	0.531
33.8	0.549
35.2	0.576
35.8	0.594
36.6	0.612
38.4	0.648

根据湖北省 2022 年电力平均二氧化碳排放因子为 $0.4364 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ 以及 2 号岩石硝铵炸药碳排放因子为 0.2222 t/t , 可得矿山采场生产碳排放(y)表达式

$$y = 1.542 + \frac{0.098}{1 + \left(\frac{x}{31.99}\right)^{12.29}} + \frac{0.972}{1 + \left(\frac{x}{6.07}\right)^{1.21}} - \frac{0.213}{1 + \left(\frac{x}{35.63}\right)^{34.34}} - \frac{0.065}{1 + \left(\frac{x}{35.83}\right)^{26.43}} \quad (6)$$

由图 2 可知,当矿山 D_{50} 块度为 32.55 cm 时,矿山采场生产碳排放量为最低。

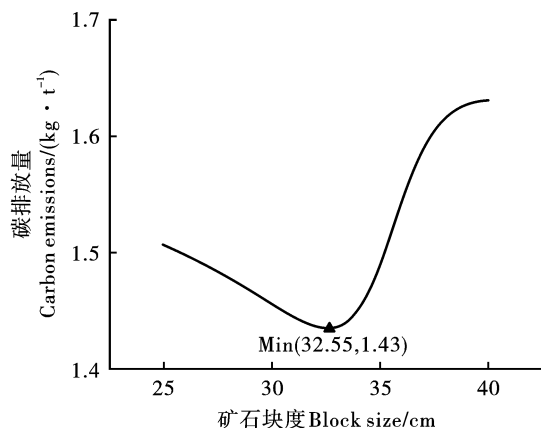


图 2 矿石 D_{50} 块度与总碳排放局部关系图

Fig. 2 Local relationship between D_{50} particle size of ore and total carbon emissions

2 基于 LS-DYNA 的爆破块度预测模型

为深入揭示不同爆破参数组合对岩体破碎块度的非线性调控机制,克服现场实验难以定量观测裂隙扩展过程的局限性,本研究采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学软件进行数值模拟分析。

2.1 采场模型构建

依据程潮铁矿采场的实际地质赋存条件与几何参数,结合现行扇形中深孔爆破设计方案(含钻孔长度、装药结构及孔倾角等参数),建立了准二维有限元计算模型,如图 3 所示。

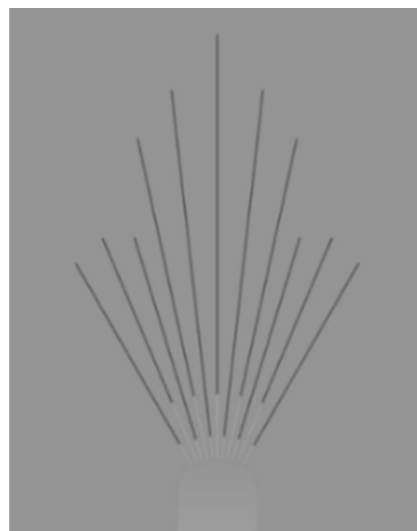


图 3 LS-DYNA 数值模型

Fig. 3 LS-DYNA numerical model

模型整体尺寸设定为 $2000 \text{ cm} \times 3000 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 。为兼顾计算精度与效率,采用全映射均匀网格划分,单元尺寸控制为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$,能够满足应力波传播模拟的精度要求。炮孔直径设定为 8 cm ,起爆方式设置为孔底起爆。

为真实还原深部岩体的受力环境并消除模型尺寸效应,在模型的底部及左右两侧施加无反射边界条件,以消除应力波在边界的反射效应;模型顶部则设定为自由边界,以表征爆破产生的自由面效应及岩石抛掷特征。

2.2 模型材料参数

(1) 炸药

在数值计算中,炸药材料选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (MAT_008) 本构模型进行描述。该模型通过引入状态方程(EOS),能够精确模拟炸药起爆后的化学反应区传播过程,实现对爆轰波形成、能量瞬态释放及产物压力演化的全过程表征。

针对爆轰产物在高温高压环境下的非线性膨胀

特性,采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程来定义炸药爆轰压力与相对比容及内能之间的函数关系。该方程能够准确描述爆轰产物的做功过程,从而真实反映爆炸荷载对周围岩体的动态冲击作用。其数学表达式如下^[21]

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}\tag{7}$$

式中: P 为压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药常数; V 是爆炸产物的相对体积, m^3 ; E_0 为初始内能密度。乳化炸药的材料参数及状态方程参数如表 5 所示。

表 5 炸药材料及状态方程参数表

Table 5 Explosive materials and equation-of-state parameters

参数 Parameter	密度 ρ Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	A/kPa	B/kPa	R_1	R_2	ω	爆速 D Detonation Velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	爆压 P Explosion pressure/ kPa	初始内能密度 E_0 Initial Internal energy density/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
取值 Value	0.931	4.95e^7	1.89e^6	3.907	1.118	0.333	4160	5.15e^6	2.484e^6

(2)矿岩

采用 JH-2 本构模型模拟岩体在爆破冲击下的动态损伤行为。该模型专为脆性材料设计,综合考虑了围压增强效应、应变率效应以及损伤累积导致的材料软化。

依据现场测试数据,矿岩被等效为各向同性脆

性材料,主要参数包括:密度 3088 kg/m^3 、剪切模量 15 GPa 及泊松比 0.25 (完整参数详见表 6)。此外,模拟中将填塞材料的力学性质等效为与围岩一致,以避免材料突变引起的数值不稳定性,从而提升模型的计算收敛性与结果准确性。

表 6 矿岩基本参数表

Table 6 Fundamental rock and ore parameters

参数 Parameter	密度 ρ Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量 K Bulk modulus/ GPa	剪切模量 G Shear modulus/GPa	弹性模量 E Elastic modulus/GPa	泊松比 μ Poisson's ratio	A
取值 Value	3088	32	15	39	0.25	0.86
参数 Parameter	N	B	M	C	D_1	D_2
取值 Value	0.63	0.29	0.63	0.006	0.006	0.8

2.3 正交实验设计

为系统探究各爆破参数对破碎块度及碳排放的敏感性,选取炮孔长度(A)、填塞长度(B)及孔底距(C)作为关键考查因素。

考虑到各因素取值范围的差异,设计中因素 A 设定为 4 个水平,因素 B 与 C 设定为 3 个水平。为适配标准正交表并实现混合水平设计,本研究引入

“拟水平法”对部分列进行处理。具体而言,将因素 B 的中间水平 (27.1 m) 与因素 C 的基准水平 (2.0 m) 分别作为其第四个虚拟水平填入正交表,见表 7。这既保证了实验设计的正交性,又在有限的 16 组试验中涵盖了不同参数组合的代表性工况。具体正交实验设计方案详见表 8。

表 7 不同因素各水平取值

Table 7 Values of different factors at each level

因素 Factor	炮孔长度(因素 A) Blasthole length (Factor A)/m	堵塞长度(因素 B) blockage length (Factor B)/m	孔底距(因素 C) Hole bottom distance (Factor C)/m
各水平取值 Value at each level	153、160、170、177	21.6、27.1、32.6	2.0、2.2、2.4

表 8 正交实验参数设置
Table 8 Orthogonal experimental parameter setup

编号 Number	因素 A Factor A		因素 B Factor B		因素 C Factor C	
	水平 Level	值 Value	水平 Level	值 Value	水平 Level	值 Value
1	1	153	1	21.6	1	2.0
2	1	153	2	27.1	2	2.2
3	1	153	3	32.6	3	2.4
4	1	153	4	27.1	4	2.0
5	2	160	1	21.6	1	2.2
6	2	160	2	27.1	2	2.0
7	2	160	3	32.6	3	2.0
8	2	160	4	27.1	4	2.4
9	3	170	1	21.6	1	2.4
10	3	170	2	27.1	2	2.0
11	3	170	3	32.6	3	2.0
12	3	170	4	27.1	4	2.2
13	4	177	1	21.6	1	2.0
14	4	177	2	27.1	2	2.4
15	4	177	3	32.6	3	2.2
16	4	177	4	27.1	4	2.0

2.4 模拟计算结果处理与分析

数值计算直观再现了不同爆破参数下的岩体破碎形态。为定量分析破碎效果,本研究构建了一套基于 Python 的图像后处理框架。首先,对模拟输出的裂隙分布图进行灰度化与二值化处理,以增强岩块边界的对比度;随后,采用 Canny 边缘检测算法识别裂隙网络,分离出独立的岩石碎块;最后,通过统计各连通域的像素数量,并结合模型网格尺寸进行空间映射,计算得出每个岩块的几何尺寸。该方法能够快速输出大块率、粉矿率及 D_{50} 等关键指标,为后续参数优化提供量化依据。以上只列举出方案 1 到方案 4 的模拟结果与块度分布图(图 4)。其中爆破后大于 600 mm 的矿石为大块,爆破后小于 50 mm 的为粉矿。

方案 1 的爆破块度分布呈现相对分散特征,粉矿率为 17.11% (占比处于合理区间),大块率达 20.76% (偏高),中值块度 D_{50} 为 36.13 cm,整体破碎效果一般,过量大块将对后续铲装作业效率产生不利影响;依据矿山采场生产碳排放计算模型,该方案单位矿石碳排放为 1.5503 kg CO₂/t。

方案 2 的块度分布状态与方案 1 类似,仍表现为分散性特征,粉矿率 16.09% (较方案 1 略有降低),大块率升至 21.38%, D_{50} 为 36.96 cm,破碎效果未得到显著改善,大块占比的进一步增加可能导致后续工序作业效率的持续下降,其单位矿石碳排放为 1.5876 kg CO₂/t。

方案 3 的爆破效果较差,具体表现为大块率显著升高至 27.72%,整体块度偏粗,粉矿率仅 12.58%, D_{50} 达 39.47 cm,该块度特性预计将对后续铲装、运输一体化作业效率产生显著负面影响,单位矿石碳排放为 1.6296 kg CO₂/t。

方案 4 的爆破块度分布相对均匀,粉矿率 17.03% (占比适中),大块率 21.24%, D_{50} 为 36.03 cm,破碎效果优于方案 3,对后续作业效率的不利影响较小,且单位矿石碳排放更低,为 1.5451 kg CO₂/t。

方案 5 至方案 16 的具体指标(大块率、粉矿率、 D_{50} 及单位矿石碳排放)详见表 9。

根据 16 组爆破参数方案的模拟与统计结果(见表 10),不同参数组合对单位矿石碳排放、岩体破碎效果及块度分布具有显著影响。碳排放方面,16 组方案的碳排放范围为 1.4391 ~ 1.6296 kg CO₂/t,其中方案 11(1.4391 kg CO₂/t)碳排放量最低,而方案 3(1.6296 kg CO₂/t)碳排放量最高,表明炮孔长度和孔底距的变化是影响碳排放的关键参数。破碎效果方面,16 组方案的大块率与粉矿率呈现显著反向关联特征:大块率整体波动于 11.57% ~ 27.72%,粉矿率对应分布在 12.58% ~ 29.92%。其中,方案 13 表现为大块率最低,粉矿率最高,反映该参数组合下岩体破碎过度;方案 3、2、4、1 的大块率均超过 20%,尤其是方案 3 大块率高达 27.72%,存在局部岩块偏大问题,破碎效果欠佳,其粉矿率较低,表明该爆破参数下装药过少,炸药能量不足。

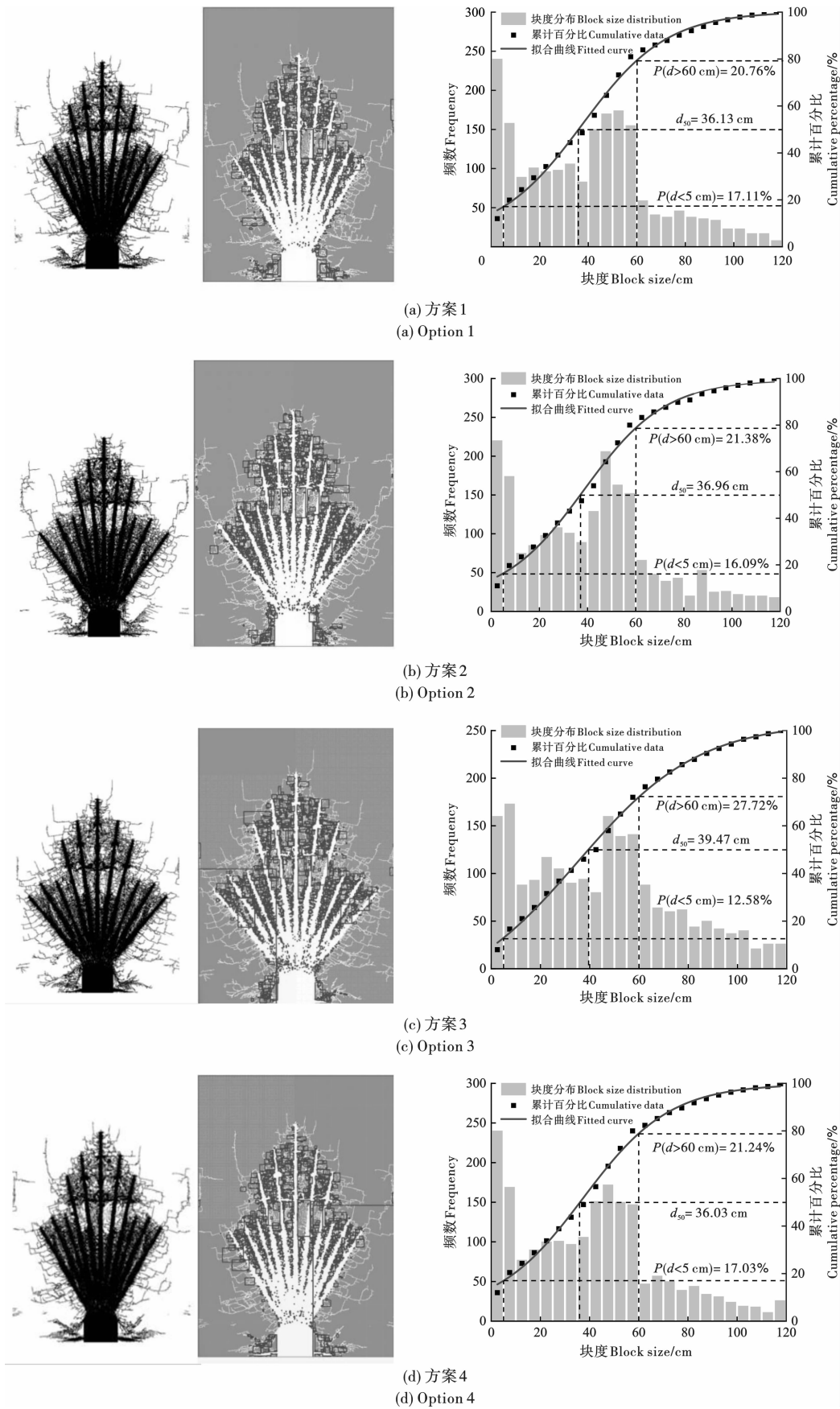


图 4 各方案模拟结果及块度分布图

Fig. 4 Simulation results of each scheme and particle size distribution

表 9 爆破效果及碳排放统计

Table 9 Blasting performance and carbon emission statistics

编号 Number	粉矿率 Fine Ore Rate/%	大块率 Oversize ratio/%	D_{50} 块度 D_{50} particle size/cm	碳排放 Carbon Emission/(kg CO ₂ /t)
1	17.11	20.76	36.13	1.5503
2	16.09	21.38	36.96	1.5876
3	12.58	27.72	39.47	1.6296
4	17.03	21.24	36.03	1.5451
5	18.33	18.98	34.60	1.4722
6	18.67	17.28	34.63	1.4734
7	19.37	19.88	36.41	1.5642
8	21.52	18.35	34.25	1.4592
9	22.34	18.58	30.80	1.4465
10	19.37	18.56	34.14	1.4557
11	20.98	17.79	31.57	1.4391
12	22.23	18.69	35.23	1.5020
13	29.92	11.57	28.23	1.4761
14	29.30	13.29	30.09	1.4546
15	22.23	15.84	28.83	1.4694
16	25.85	15.10	31.05	1.4439

3 基于碳排放的爆破参数优化

3.1 基于 PSO-ELM 的块度预测模型

(1) 数据处理

根据现有数值模拟方案可得到如表 10 所示数据集,该数据集包含了预测模型的特征变量(炮孔

长度、堵塞长度、孔底距)与目标变量(大块率、粉矿率、 D_{50} 块度)。

对所得 16 组数据以随机划分的方式将其中 80%作为训练集,20%作为测试集,训练集为 12 组数据,测试集为 4 组数据。对所有数据进行归一化处理

表 10 数据集

Table 10 Dataset

编号 Number	炮孔长度 Blasthole length/m	堵塞长度 Stemming length/m	孔底距 Hole bottom distance/m	大块率 Boulder yield/(%)	粉矿率 Fines fraction/%	D_{50} 块度 D_{50} fragment size/cm
1	153	21.6	2.0	20.76	17.11	36.13
2	153	27.1	2.2	21.38	16.09	36.96
3	153	32.6	2.4	27.72	12.58	39.47
4	153	27.1	2.0	21.24	17.03	36.03
5	160	21.6	2.2	18.98	18.33	34.60
6	160	27.1	2.0	17.28	18.67	34.63
7	160	32.6	2.0	19.88	19.37	36.41
8	160	27.1	2.4	18.35	21.52	34.25
9	170	21.6	2.4	18.58	22.34	30.80
10	170	27.1	2.0	18.56	19.37	34.14
11	170	32.6	2.0	17.79	20.98	31.57
12	170	27.1	2.2	18.69	22.23	35.23
13	177	21.6	2.0	11.57	29.92	28.23
14	177	27.1	2.4	13.29	29.30	30.09
15	177	32.6	2.0	16.05	23.05	29.20
16	177	37.1	2.2	15.10	25.85	31.05

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中: X_n 为归一化后的无量纲值; X 为原始数据; $X_{\min}$ 为原始数据的最小值; $X_{\max}$ 为原始数据的最大值。进行归一化处理能够使特征数据实现无量纲转换,并将其数值范围约束在 0 ~ 1,这有助于显著提升模型的预测性能,加快其训练过程中的收敛速率,同时提高预测的准确性。

(2) 模型构建

本研究使用粒子群优化算法对 ELM 算法中的权重矩阵和偏置向量进行寻优,以均方误差 MSE 作

为粒子群优化算法的适应度函数,在参数空间中寻找最优参数组合。

(3) 预测结果

本研究选取了 4 种不同的评价指标来评估预测模型的性能:准确率 (AR)、均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、决定系数 (R^2)^[22]。将训练集输入模型进行训练后,再将测试集输入至模型进行预测,最后得到模型的预测值与 4 个评价指标。图 5 展示了模型的预测值与预测误差。表 11 展示了 4 个评价指标。

表 11 模型的评价指标

Table 11 Evaluation metrics of the model

目标变量 Target variable	AR	MSE	RMSE	R^2
大块率 Boulder yield	0.9787	0.2293	0.4788	0.9577
粉矿率 Fines fraction	0.9573	0.9591	0.9794	0.8221
D_{50} 块度 D_{50} fragment size	0.9912	0.1093	0.3306	0.9892

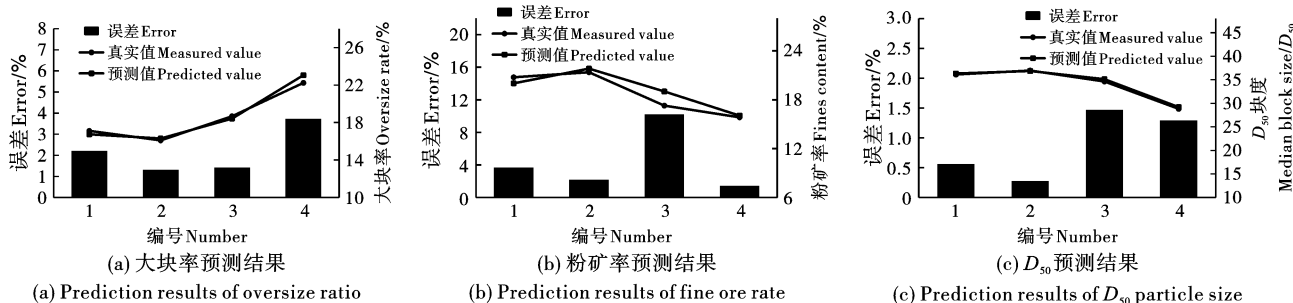


图 5 模型的预测值与误差

Fig. 5 Predicted values and errors of the model

由图 5 中预测结果可知,在测试集中,所有样本误差未超过 11%,这表明 PSO-ELM 预测模型性能良好,预测精准。已知 AR 和 R^2 越接近 1 预测效果越好,而 MSE、RMSE 越小预测结果越好,由表可知,PSO-ELM 模型的 AR 与 R^2 均接近 1,这表明模型的拟合能力与泛化能力强,MSE 与 RMSE 都较小,这表明模型预测结果精准,误差小。

3.2 基于 NSGA-II 的爆破参数优化

为实现大块率、粉矿率、碳排放为最低的目标,可构建多个目标函数用以建立优化模型^[23]。

(1) 目标函数

1) 大块率最小,如下式

$$\min f_{\delta}(L, L_d, d) \quad (9)$$

式中: $f_{\delta}(L, L_d, d)$ 为大块率; L 为钻孔长度; L_d 为堵塞长度; d 为孔底距。通过已经建立的 PSO-ELM 预测模型即可通过钻孔长度,堵塞长度,孔底

距得到大块率。

2) 粉矿率最小,如下式

$$\min f_{\varepsilon}(L, L_d, d) \quad (10)$$

式中: $f_{\varepsilon}(L, L_d, d)$ 为粉矿率。

3) 碳排放最小,如下式

$$\min f_E(L, L_d, d) \quad (11)$$

式中: $f_E(L, L_d, d)$ 为碳排放。通过已经建立的 PSO-ELM 预测模型即可通过钻孔长度,堵塞长度,孔底距得到 D_{50} 块度,再由公式 6 计算得碳排放。

(2) 约束条件

在求解最优目标时,应当保证碳排放,大块率,粉矿率均大于 0,钻孔长度,堵塞长度,孔底距应当处于参数优化范围内,即

$$f_{\delta}(L, L_d, d) > 0$$

$$f_{\varepsilon}(L, L_d, d) > 0$$

$$f_E(L, L_d, d) > 0$$

$$L \in [153, 177], L_d \in [21.6, 32.6], d \in [2.0, 2.4]$$

为保证爆破设计参数试验结果的准确性,以表 7 中 16 次爆破试验的取值范围为依据设计爆破设计参数试验, L 间隔 1 m 取值, L_d 间隔 0.5 m 取值, d 间隔 0.1 m 取值,表 12 为各参数取值的数量,共组成 2875 组爆破设计方案。

表 12 各个参数取值个数

参数 Parameter	L	L_d	d
最小值 Minimum value	153	21.6	1.7
最大值 Maximum value	177	32.6	2.1
个数 Number	25	23	5

将 2875 组爆破设计方案的数据依次代入到上述训练的 PSO-ELM 中对爆破方案的大块率和粉矿率以及 D_{50} 块度进行预测,然后依据 D_{50} 块度计算碳排放。按照以上方法即可得出 2875 组爆破设计方案的碳排放、大块率和粉矿率。

以上述 2875 组爆破设计方案为优化空间,采用 NSGA-II 求解所建模型。NSGA-III 参数设置种群大小为 100,最大迭代次数为 100,交叉为 0.9,变异概率为隐式概率,交叉、变异分布指数为 15、20, 并得

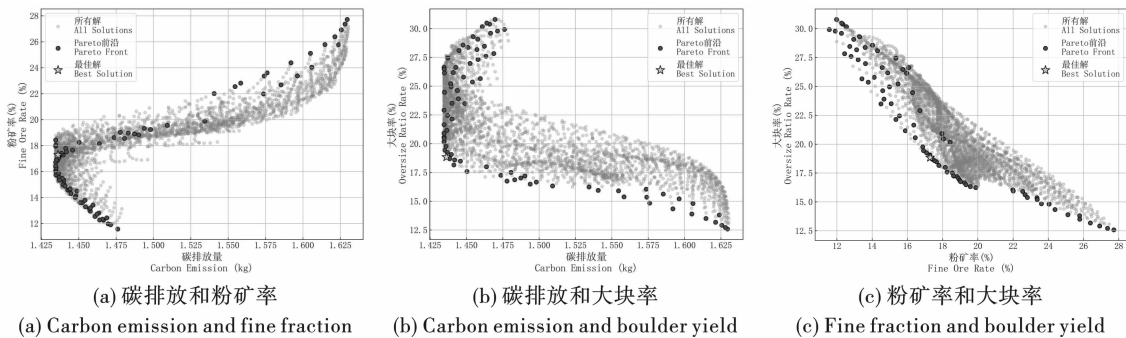


图 7 各个目标间的关系
Fig. 7 Relationship between different objectives

为进一步从现有 Pareto 前沿的 100 个解中找到最优解,使用加权和法对多个目标函数进行结合,从而找到最优解。加权和法 (Weighted Sum Method), 是将多个目标函数只通过赋予不同的权重值相加形成一个单一的目标函数。具体来说,现有三个目标函数,以此可以构建一个新的目标函数 $F(x)$ 如下

$$\min F(x) = \omega_1 f_{\delta}(L, L_d, d) + \omega_2 f_{\varepsilon}(L, L_d, d) + \omega_3 f_{\eta}(L, L_d, d) \quad (12)$$

式中, ω_i 表示第 i 个目标函数的权重, $i = 1, 2, 3$, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。在此问题中由于碳排放目标是本研究考虑的主要问题,因此将直接碳排放的权重

到 100 个位于 Pareto 前沿的解。绘制出 Pareto 散点图 (见图 6)。由图可知,碳排放、大块率和粉矿率存在一定竞争关系,即一个目标改变会导致其他两个目标的改变。

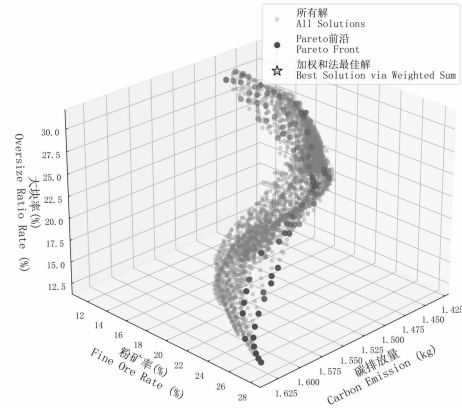


图 6 Parto 散点图
Fig. 6 Pareto scatter plot

为进一步分析碳排放、大块率和粉矿率目标之间的竞争关系,将 Pareto 散点图投影至各坐标轴对应的二维平面,见图 7。当大块率较小时,会取得较大的粉矿率,当大块率较大时,会取得较小的粉矿率,粉矿率和大块率存在明显的竞争关系。

设置为 0.4;在满足碳排放最小时,由于大块率和粉矿率存在竞争关系,因此需要取得相同的权重,均设置为 0.3。

由于三个目标函数的量纲不同,在使用加权和法之前还要使用归一化方法将所有候选值进行归一化处理,从而使得候选值均在 0 ~ 1 的范围内。

在将 100 个 Pareto 前沿的 100 个解进行归一化处理,而后使用加权和法求得对应解的加权得分,见图 8。在这 100 个解中最优解的得分为 0.2126。此解对应的爆破参数及碳排放、大块率和粉矿率见表 13。

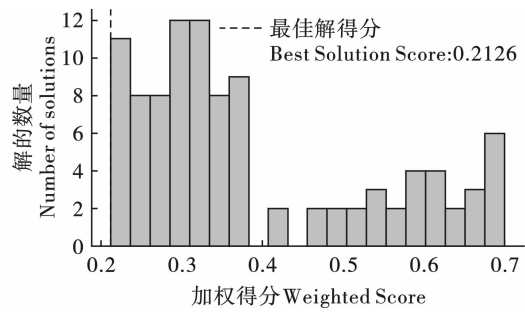


图 8 加权得分分布图
Fig. 8 Weighted score distribution

表 13 最优爆破参数及指标
Table 13 Optimal blasting parameters and metrics

L	L_d	d	碳排放 Carbon emission	大块率 Boulder yield	粉矿率 Fines frction
166.0 m	21.6 m	2.0 m	1.43617 kg CO ₂ /t	18.83926%	17.28788%

(2)采用 LS-DYNA 数值模拟结合正交试验设计,建立了基于粒子群优化算法(PSO)改进的极限学习机(ELM)预测模型,实现对爆破大块率与粉矿率以及 D_{50} 的高精度预测。

(3)进一步通过 NSGA-II 多目标优化算法,综合权衡碳排放、大块率与粉矿率的竞争关系,最终确定最优爆破参数组合。该方案有效降低了生产碳排放,有效控制矿石块度分布,提升了开采安全性,为高品位矿体高效绿色开采提供了理论支撑。

参考文献 (References)

[1] 付 允,马永欢,刘怡君,等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境,2008(3):14-19.

[1] FU Yun,MA Yong-huan,LIU Yi-jun,et al. Development patterns of low carbon economy[J]. Chinese Journal of Population,Resources and Environment,2008(3):14-19. (in Chinese)(无英文对照)

[2] 罗城鑫,吕彦龙,张海珍,等. 基于热泵技术的低碳排冷热电联供系统的热力学性能研究[J]. 工程热物理学报,2025,46(11):3526-3536.

[2] LUO Cheng-xin, LV Yan-long, ZHANG Hai-zhen, et al. Study on the thermodynamic performance of a low-carbon emission CCHP system based on heat pump technology [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(11):3526-3536. (in Chinese)

[3] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.

[3] HU An-gang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3):1-15. (in Chinese)(无英文对照)

4 结论

通过建立数学模型与优化算法,深入探讨了矿山生产过程中的碳排放及其影响因素,为实现绿色采矿提供了新的思路和方法,得到以下结论:

(1)通过构建块度-能耗拟合函数,结合碳排放因子,建立出凿岩、爆破、铲装、运输的矿山采场生产全流程碳排放数学模型,以此得到了矿山在最低碳排放时的 D_{50} 块度。

[4] 巨 有. 基于品位对铁矿石力学特性影响的地下采场工程参数优化研究[D]. 北京:北京科技大学,2025.

[4] JU You. Research on underground stope engineering parameter optimization based on the influence of ore grade on mechanical properties of iron ore[D]. Beijing :University of Science and Technology Beijing, 2025. (in Chinese)

[5] 王运敏,张松波,代碧波,等. 金属非金属矿业减碳路径与工程科技[J]. 金属矿山,2023(1):1-7.

[5] WANG Yun-min,ZHANG Song-bo,DAI Bi-bo,et al. Carbon reduction path and engineering technology in metal and nonmetal mining industry[J]. Metal Mine,2023(1):1-7. (in Chinese)

[6] 奚灵智,葛双双,李 晨,等. 基于深度学习及多目标优化的隧道爆破参数[J]. 科学技术与工程,2025,25(21):8841-8850.

[6] XI Ling-zhi. GE Shuang-shuang, LI Chen, et al. Tunnel blasting parameters based on deep learning and multi-objective optimization[J]. Seience Technology and Engineering, 2025, 25(21):8841-8850. (in Chinese)

[7] 黄 磊,刘玉龙,陶 明,等. 露天台阶爆破块度智能分析平台研发与应用[J]. 金属矿山,2025(4):164-173.

[7] HUANG Lei, LIU Yu-long, TAO Ming, et al. Research and application of intelligent analysis platform for open-pit bench blasting fragmentation[J]. Metal Mine, 2025(4):164-173. (in Chinese)

[8] 王凤林,陈 超,李洪宝,等. 采场爆破块度分布对铲装运输工艺能耗影响[J]. 现代矿业,2016,32(4):254-256.

[8] WANG Feng-lin, CHEN Chao, LI Hong-bao, et al. Impact of bench blasting fragmentation distribution on energy consumption of loading and haulage operations[J]. Modern Mining, 2016, 32(4):254-256. (in Chinese)

- [9] 过江,赵培东,张琛,等.能耗控制视角下的 MOPSO 爆破参数优化研究[J].工程爆破,2022,28(5):9-16,51.
- [9] GUO Jiang, ZHAO Pei-dong, ZHANG Chen, et al. Research on optimization of MOPSO blasting parameters from the perspective of energy consumption control[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(5): 9-16, 51. (in Chinese)
- [10] 郑超,李祥龙,左庭,等.基于炸药单耗的地下采场爆破能耗模型[J].有色金属(中英文),2025,15(9):1613-1618.
- [10] ZHENG Chao, LI Xiang-long, ZUO Ting, et al. Predictive modeling of energy consumption of quarry blasting in energy saving and consumption reduction[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(9): 1613-1618. (in Chinese)
- [11] 杨明,张锦华,赵凯轩,等.基于空气间隔技术的灰岩爆破粉矿率优化方法研究[J].爆破,2025,42(3):95-105.
- [11] YANG Ming, ZHANG Jin-hua, ZHAO Kai-xuan, et al. Optimization method for powder ore rate in limestone blasting based on Air-decking technology[J]. Blasting, 2025, 42(3): 95-105. (in Chinese)
- [12] 叶海旺,李亚伟,路东,等.基于小直径装药技术骨料矿山爆破粉矿率控制研究[J].爆破:1-20. [2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251031.1844.008>.
- [12] YE Hai-wang, LI Ya-wei, LU Dong, et al. Blasting powder rate control in aggregate mine based on Small-Diameter column charge technology[J]. Blasting: 1-20. [2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251031.1844.008>. (in Chinese)
- [13] 张衍昊,刘少光,楼晓明.露天矿深孔台阶爆破逐孔起爆参数的优化研究与应用[J].爆破,2024,41(2):104-111,252.
- [13] ZHANG Yan-hao, LIU Shao-guang, LOU Xiao-ming. Optimization and application of blasting parameters of deep hole bench blasting in open pit mine[J]. Blasting, 2024, 41(2): 104-111, 252. (in Chinese)
- [14] 曹泽铭,杨建华,叶志伟,等.地应力对岩体爆破块度分布特征的影响研究[J].岩土工程学报,2024,46(10):2202-2211.
- [14] CAO Ze-ming, YANG Jian-hua, YE Zhi-wei, et al. Influences of in-situ stress on distribution characteristics of rock blasting fragmentation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(10): 2202-2211. (in Chinese)
- [15] 张飞天,高海清.石灰岩爆破参数与块度分布的 BP 神经网络双向预测与实践[J].价值工程,2025,44(33):108-110.
- [15] ZHANG Fei-tian, GAO Hai-qing. Bidirectional prediction and practice of limestone blasting parameters and block size distribution using BP neural network[J]. Value Engineering, 2025, 44(33): 108-110. (in Chinese)
- [16] 尤元元,杨仁树,左进京,等.基于相似模型和 PBM-FEM-DEM 耦合算法的大结构采场爆破参数优化[J].中国矿业大学学报,2025,54(4):796-810.
- [16] YOU Yuan-yuan, YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, et al. Optimization of blasting parameters in large structure mining sites based on similarity models and PBM-FEM-DEM coupling algorithm[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4): 796-810. (in Chinese)
- [17] 茜梦轩,侯克鹏,孙华芬.梅山铁矿上向扇形中深孔爆破参数优化数值模拟研究[J].有色金属(中英文),2025,15(12):2298-2306.
- [17] QIAN Meng-xuan, HOU Ke-ping, SUN Hua-fen. Numerical simulation on optimization of parameters of upward Fan-Shaped Medium-Deep hole blasting in Meishan iron mine[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(12): 2298-2306. (in Chinese)
- [18] 金庆雨,岳中文,薛克军,等.基于深度学习的岩巷爆破参数智能设计系统开发与工程实践[J].煤炭科学技术,2025,53(9):447-458.
- [18] JIN Qing-yu, YUE Zhong-wen, XUE Ke-jun, et al. Development and engineering practice of intelligent design system for rock cavern blasting parameters based on deep learning[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 447-458. (in Chinese)
- [19] 张万志.岩质隧道炮孔图像识别算法及光面爆破参数优化研究[D].济南:山东大学,2019.
- [19] ZHANG Wan-zhi. Research on blasthole image recognition algorithms and optimization of smooth blasting parameters of rock tunnel[D]. Ji'nan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [20] 冯俊,党帅珂,任高峰,等.非煤矿山地下开采碳排放核算系统研究[J].矿业研究与开发,2025,45(2):226-234.
- [20] FENG Jun, DANG Shuai-ke, REN Gao-feng, et al. Research on carbon emission accounting system of Non-Coal mine underground mining[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(2): 226-234. (in Chinese)
- [21] MA Guo-wei, AN Xin-mei. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(6): 966-975.
- [22] 徐琛,李其乐,邱浪,等.融合粒子群优化与集成学习的爆破振动峰值预测研究[J].爆破:1-18. [2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251022.0841.002>.
- [22] XU Chen, LI Qi-le, QIU Lang, et al. Research on prediction of blast-induced vibration peak particle velocity integrating particle swarm optimization and ensemble

- learning[J]. Blasting: 1-18. [2026-01-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251022.0841.002>. (in Chinese)
- [23] 顾清华,高松,李萍丰,等. 基于NSGA-II算法的某矿采场爆破参数优化[J]. 有色金属(矿山部分), 2023,75(6):51-65.
- [23] GU Qing-hua, GAO Song, LI Ping-feng, et al. Optimization of blasting parameters in a mine stope based on NSGA-II[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(6):51-65. (in Chinese)
-
- (上接第33页)
- [10] 陈名英,刘建程,熊峻巍,等. 长九神山灰岩矿爆破开采滚石控制研究[J]. 爆破,2021,38(3):113-119.
- [10] CHEN Ming-ying, LIU Jian-cheng, XIONG Jun-wei, et al. Research on rockfall control in blasting mining of Changjiushen Mountain Limestone Mine[J]. Blasting, 2021,38(3):113-119. (in Chinese)
- [11] 王文韬,王尹军,吴春平,等. 某大型露天铀矿压渣爆破数值模拟研究[J]. 工程爆破,2024,30(6):79-86.
- [11] WANG Wen-tao, WANG Yin-jun, WU Chun-ping, et al. Numerical simulation study on pressure muck pile blasting of a large-scale open-pit uranium mine[J]. Engineering Blasting, 2024,30(6):79-86.
- [12] 刘玉龙,黄磊,谢烽,等. 湖山露天铀矿多排孔大区块压渣爆破效果评价[J]. 爆破,2024,41(1):92-97.
- [12] LIU Yu-long, HUANG Lei, XIE Feng, et al. Evaluation of muck pile blasting effect of multi-row hole large block in Hushan Open-pit Uranium Mine[J]. Blasting, 24, 41(1):92-97. (in Chinese)
- [13] 谢烽,刘玉龙,常剑,等. 多排孔大区块爆破压渣厚度对电铲铲装效率的影响研究[J]. 爆破,2022,39(4):85-91.
- [13] XIE Feng, LIU Yu-long, CHANG Jian, et al. Research on the influence of multi-row hole large-block blasting slag pressing thickness on the loading efficiency of electric shovel[J]. Blasting, 2022,39(4):85-91. (in Chinese)
- [14] 黄磊,刘玉龙,张怀峰,等. 露天矿复杂矿体大方量压渣爆破试验[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(3):50-54.
- [14] HUANG Lei, LIU Yu-long, ZHANG Huai-feng, et al. Test on large-scale muck pile blasting for complex ore bodies in open-pit mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022,74(3):50-54. (in Chinese)
- [15] 徐海声,张智宇,李煜程,等. 基于模糊数学法的露天深孔预裂爆破效果综合评价[J]. 有色金属(中英文), 2025,15(2):307-314.
- [15] XU Hai-sheng, ZHANG Zhi-yu, LI Yucheng, et al. Comprehensive evaluation of open-pit deep hole pre-splitting blasting effect based on fuzzy mathematics method[J]. Nonferrous Metals, 2025,15(2):307-314.
- [16] 闫大洋. 露天矿台阶预裂爆破参数优化的研究与应用[D]. 淮南:安徽理工大学,2014.
- [16] YAN Da-yang. Research and application on optimization of blasting parameters for step pre-cracking in open-pit mines[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 陈超,甘德清,张立国,等. 预裂爆破效果的模糊综合评价研究[J]. 金属矿山,2004(11):8-10,14.
- [17] CHEN Chao, GAN De-qing, ZHANG Li-guo, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation of pre-cracking blasting effect[J]. Metal Mine, 2004(11):8-10, 14. (in Chinese)
- [18] YE Zhi-wei, YANG Jian-hua, YAO Chi, et al. Attenuation characteristics of shock waves in drilling and blasting based on viscoelastic wave theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 171:105573.
- [19] 任猛,岳中文,周星源,等. 柱状药包不同位置起爆爆生气体演化规律[J]. 煤炭学报,2025,50(7):3441-3449.
- [19] REN Meng, YUE Zhong-wen, ZHOU Xing-yuan, et al. Evolution patterns of detonation gas under different initiation positions in cylindrical charges[J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(7):3441-3449.
- [20] 李潜,李海波,傅帅旻,等. 高地应力下双孔爆破成缝最优孔间距研究[J]. 岩石力学与工程学报,2025, 44(3):678-690.
- [20] LI Qian, LI Hai-bo, FU Shuai-yang, et al. Research on the optimal hole spacing for double-hole blasting seam formation under high ground stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025,44(3):678-690. (in Chinese)
- [21] 杜俊林,罗强,宗琦. 空气不耦合装药爆破孔壁冲击压力分析[J]. 西安科技大学学报,2005(3):306-310.
- [21] DU Jun-lin, LUO Qiang, ZONG Qi. Analysis of impact pressure on the hole wall of air-uncoupled charge blasting[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005(3):306-310. (in Chinese)
- [22] 王基禹,赵明生. 混装炸药的能量与岩石性质匹配研究[J]. 爆破,2022,39(4):138-143,200.
- [22] WANG Ji-yu, ZHAO Ming-sheng. Research on energy matching of mixed explosives with rock properties[J]. Blasting, 2022,39(4):138-143,200. (in Chinese)