

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.013

灰岩爆破块度控制与爆破参数优化研究*

鲁臣¹, 赵凯轩², 王俊青¹, 贺五一³, 高晶¹, 张锦华²

(1. 中国非金属材料南京矿山工程有限公司, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 土木与机场工程系, 南京 210016;
3. 江西荣达爆破新技术开发有限公司, 南昌 330038)

摘要: 针对邓家山灰岩矿区复杂节理发育条件下爆堆块度分布不均、影响后续加工效率与成本的问题, 通过量化分析关键爆破参数对块度均匀性的影响规律, 为精细化爆破参数优化提供依据。采用正交试验设计方法, 选取孔网参数、延期时间、超深及装药间隔4个因素进行现场爆破试验, 并以8 cm、3 cm、0.5 cm筛下累积率作为块度分布评价指标。试验结果表明: 装药间隔通过形成空气缓冲层, 有效调节爆炸应力波分布与能量传递效率, 显著降低8 cm筛下累积率, 主导大块率控制; 孔网参数直接影响能量密度分布, 较小规格孔网能获得更细的块度, 而过大孔网易导致大块增多; 延期时间通过精确控制爆破时序影响应力波叠加效果, 短排间延时显著降低8 cm筛下率, 并主导中、细颗粒的调控; 超深在2.5~2.8 m范围内增加有助于减少根底, 但超过此范围且孔网过大时效果减弱。极差与方差分析进一步量化了各因素的影响程度: 装药间隔与孔网参数是控制粗颗粒的关键因素, 延期时间对中、细颗粒调控起决定性作用。最终确定最优参数组合为孔网参数6.0 m×3.5 m、孔网延时20 ms、排间延时33 ms、超深2.8 m、装药间隔2.0 m。该研究量化了邓家山灰岩关键爆破参数对爆堆块度的影响规律, 有效解决了块度分布不均问题, 提升了后续加工效率并降低了加工成本。

关键词: 灰岩爆破; 正交试验; 块度分布规律; 爆破参数

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)02-0130-10

Optimization of Fragmentation Control and Blasting Parameters for Limestone Blasting

LU Chen¹, ZHAO Kai-xuan², WANG Jun-qing¹, HE Wu-yi³, GAO Jing¹, ZHANG Jin-hua²

(1. China Non Metallic Materials Nanjing Mining Engineering Co., Ltd., Nanjing 210016, China;
2. Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Jiangxi Rongda Blasting New Technology Development Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: This research focuses on addressing fragmentation heterogeneity in the Dengjiashan limestone mining area, which is exacerbated by complex joint development conditions and affects downstream processing productivity and economic performance. Through systematic quantification of the effects of critical blasting parameters on fragmentation consistency, this research establishes a foundation for optimizing precision blasting using orthogonal experimen-

收稿日期 (Date of reception): 2025-06-05

网络首发日期 (Published online): 2025-12-11

作者简介: 鲁臣 (1975-), 男, 高级工程师, 主要从事矿山开采、爆破施工与防护技术研究, (E-mail) 649897026@qq.com。

通信作者: 赵凯轩 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸冲击与爆破技术研究等, (E-mail) zhkx0811@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178190) 强动载下混凝土高压状态方程及细观破坏机理

About the author: LU Chen (1975-), male, senior engineer, mainly engaged in research on mining, blasting construction, and protection technology, (E-mail) 649897026@qq.com.

Corresponding author: ZHAO Kai-xuan (1999-), male, master student, mainly engaged in research on explosive shock and blasting technology, (E-mail) zhkx0811@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52178190)

tal methodology. The cumulative rates of 8 cm, 3 cm, and 0.5 cm sieving were used as the evaluation indices for fragmentation distribution to examine four key variables, including hole network parameters, delay time, subdrilling, and charge interval, in on-site blasting tests. Test results indicate that establishing an air buffer layer between explosive columns effectively modulates stress-wave propagation and energy-transmission efficiency, substantially reducing the 8 cm sieve undersize accumulation while predominantly regulating boulder yield, with drilling-pattern parameters exerting direct control over explosive energy concentration patterns. Meanwhile, reduced blasthole spacing configurations produce finer fragmentation patterns, whereas expanded spacing configurations result in coarser fragmentation. The delay time affects the stress-wave superposition effect by precisely controlling the blasting timing, effectively lowering the percentage of 8 cm oversize fragments in adjacent rows while primarily determining the medium and fine particle-size distribution characteristics. Optimizing subdrilling depth between 2.5 m and 2.8 m can help reduce the foundation, but the effect weakens when blasthole spacing exceeds the optimal range. Furthermore, range and variance analyses quantitatively assessed parameter influences, revealing charge spacing and blasthole patterns as dominant controls on coarse fragments, while delay timing critically governed the distribution of medium and fine particles. The optimized parameter combination comprised 6.0 m $\times$ 3.5 m hole spacing, 20 ms interhole delays, 33 ms interrow delays, 2.8 m subdrilling depth, and 2.0 m charge intervals. This study systematically evaluated the effects of critical blasting parameters on fragmentation characteristics in Dengjiashan limestone, successfully addressing fragmentation non-uniformity while enhancing downstream processing efficiency and reducing operational expenses.

Key words: limestone blasting; orthogonal experiment; fragmentation distribution; blasting parameters

在灰岩骨料矿山爆破作业中,爆堆块度分布直接影响矿石的后续加工效率与成本,是衡量爆破效果的关键指标。针对灰岩爆破块度控制难题,通过开展爆破参数正交试验研究,旨在量化各参数对块度均匀性的影响程度,最终获得了不同爆破参数组合对爆破块度的影响规律,在此基础上通过开展爆破参数优化研究,为灰岩爆破参数与块度分布的关联性研究提供科学依据。针对本研究的研究目的,国内外开展了大量的研究工作,为本研究奠定了重要的基础,详细来讲主要包括以下几个方面。

在爆破参数优化研究领域,学者们围绕块度控制、振动抑制与能量效率等目标,逐步形成了理论建模^[1,2]、工程试验与数值模拟相结合的系统研究方法。其中,正交试验设计因其在有限试验次数下解析多参数耦合效应的优势,被广泛应用于爆破参数敏感性分析与优化。崔雪峰、章逸峰等学者通过正交试验结合极差与方差分析^[3,4],分别实现了对矿石贫化率、大块率等关键指标的量化调控;Yu等人进一步以块度分布为核心评价指标^[5],明确了多因素协同作用下最优参数组合的选取路径;李祥龙等人则通过模型试验^[6],验证了正交方法在爆破振动控制方面的适用性。这些研究一致表明,正交试验法能够系统揭示孔网参数、装药结构及起爆时序等变量对爆破效果的独立与交互影响,为复杂地质条件下的爆破参数精细化设计提供了有效方法论支撑。

基于正交试验等方法所揭示的参数敏感性,研

究向爆破参数与块度分布的关联机制深化,形成了从参数确定、机理揭示到综合优化的系统研究体系。在爆破参数优化与块度分布影响因素研究方面,现有成果已形成从参数阈值确定、机理揭示到综合优化的系统研究体系。在参数确定方面,郭鸿德等通过爆破漏斗试验明确了矽卡岩铜矿中深孔爆破的合理孔网范围^[7],金鑫与谷亚洲则借助数值模拟分别优化了露天台阶与扇形孔的爆破损伤范围及块度均匀性^[8,9]。在机理研究层面,尤元元综合运用空气间隔装药、新型起爆技术与多场耦合算法^[10],系统揭示了装药结构与起爆方式对块度分布及岩体损伤的调控机制;王明君进一步将参数优化延伸至露天矿边坡稳定性领域^[11],证明合理控制炮孔排距与装药量可有效抑制爆破震动对岩体的损伤;骆浩滔团队与马泗洲团队则分别从工程应用与破碎理论出发^[12,13],建立了基于现场试验的块度预测模型,并揭示了不耦合装药条件下块体尺寸的分布规律,贯通了宏观工艺与微观破碎之间的关联。在技术集成方面,岳志坤、何建元等人通过图像分析、装药结构改进及工艺创新^[14,15],验证了开挖方法、装药密度等对块度分布的精细化调控效果。尹岳降、彭磊与安龙的研究进一步拓展了正交设计、数值模拟与新型填塞工艺在参数敏感性分析与优化中的应用^[16-18]。这些研究共同推动了爆破参数优化从单一因素控制向多环节协同调控的发展,为复杂条件下爆破块度的精准控制奠定了理论与技术基础。

国内外学者对参数影响规律的深入研究,推动

了爆破块度预测模型转变。在爆破块度预测模型研究领域,机器学习方法的应用正推动预测模式由传统经验模型向数据驱动范式转变。陈莎莎、刘英与赵颖等学者通过集成智能优化算法与机器学习模型^[19-21],显著提升了爆破块度预测的精度与适应性。具体而言,相关研究通过蚁群算法、粒子群算法等优化神经网络结构与参数,有效增强了模型对爆破参数与块度分布间复杂非线性关系的拟合能力;极端梯度提升树等算法的引入,则进一步实现了基于关键参数的爆破前块度预判。这些研究成果共同印证了融合优化算法的机器学习模型在爆破块度预测中的有效性,也为爆破效果的精准预控开辟了新的技术途径。值得指出的是,高质量预测模型的构建高度依赖于系统、科学的爆破参数数据集,而正交试验设计恰好能为模型训练提供结构完整、代表性强的参数样本来源。

综上所述,现有研究通过正交试验、数值模拟与智能算法等多种手段,在爆破参数优化与块度预测方面取得了显著进展,构建了较为完善的方法体系与技术框架。然而,当前研究多聚焦于煤矿或金属矿等特定场景,对于灰岩骨料矿山这一特定范畴,尤其在复杂节理发育地质条件下,爆破参数与块度分布的关联机制尚不明确,缺乏针对性的系统试验数据与量化规律。为此,本文针对邓家山灰岩矿区复杂节理发育导致的爆破块度分布不均问题,采用正交试验设计方法,选取关键爆破参数,开展爆破参数正交试验,并以筛下累积率作为块度分布的评价指标,旨在揭示关键参数对灰岩爆破块度分布的影响规律,确定最佳参数组合,填补该领域的研究空白,为灰岩矿山的精细化爆破提供直接依据。

1 工程背景介绍

邓家山骨料矿区位于江西省九江市瑞昌市黄金乡,属国内前列的大型露天开采矿山。矿区地质条件复杂,呈倒转单斜构造,发育 5 条断层及密集节理,矿体以微晶灰岩为主,此类复杂地质构造导致岩石可爆性差异显著,爆破能量在岩体内传播时易因裂隙发育和岩性不均发生散射或能量集中,进而加剧了爆堆块度分布的不均匀性。

邓家山矿区当前爆破工艺存在块度分布不均、大块率偏高的问题,具体表现为:大粒径岩石占比过高,需频繁进行机械破碎,导致设备损耗增加、作业效率降低;中小粒径岩石分布离散,影响后续筛分和骨料加工的稳定性。优化爆破参数以实现块度精细化控制,成为提升矿山生产效率与经济效益的关键

技术瓶颈。此外,爆破参数会直接影响爆破能量的分布与传递效率,从而对块度形成过程产生关键作用,为系统探究爆破参数组合对爆破块度的影响规律,结合工程实际条件开展正交试验设计。

2 试验研究方案

邓家山骨料矿区采用露天深孔爆破方式开采,已形成多个开采平台,现场爆破设计的基础参数包括台阶高度 15 m、钻孔直径 115 mm、孔距 5.5 m、排距 3.8 m、超深 2~2.5 m 等,且使用空气间隔器进行不耦合装药,以改善粉矿率等爆破效果。

8 cm 是矿山骨料加工中大块的临界值,大于 8 cm 的岩石还需进行破碎,这一指标直接关联破碎成本与效率。因此,将爆堆中大于 8 cm 的岩石界定为“大块”,此类块体无法直接进入破碎流程,必须进行破碎。这一临界值的确定直接关系到破碎的成本与整体生产效率。3 cm 对应混凝土骨料的常用粒径范围,其筛下累积率可反映后续筛分环节有效原料的占比;0.5 cm 则是粉矿的临界值,小于 0.5 cm 的颗粒会增加筛分损耗,影响筛分效率。尽管爆破后的块度分布范围较宽,但上述三个临界粒径的筛下累积率能够有效表征大块、有用骨料和粉矿等关键组分的含量,从而系统反映爆破块度分布的整体特征及其对后续加工流程的综合性影响。同时,前期取样数据显示,不同粒径区间的颗粒分布存在明显差异,这些指标能全面反映爆破块度对加工流程的影响。因此采用 8 cm、3 cm、0.5 cm 筛下累积率作为评价指标,研究不同爆破参数对爆破块度的影响规律。

2.1 试验工况设计

爆破块度分布受多种因素影响,不同工程中的影响因素的主次关系各不相同。因此,影响矿岩爆破块度分布的因素主要包括:节理裂隙间距和迹长、岩体强度、岩体波阻抗、炸药波阻抗、炸药单耗、台阶高度、超深、炮孔直径、孔网参数、空气间隔长度、延期时间、起爆位置等。鉴于试验区域选定在 +375 m 平台(如图 1),该区域岩性为白云质灰岩,岩体强度与波阻抗在前期勘测中表现较为均匀,平均抗压强度 55.9 MPa,波阻抗差异系数 <5%,且该区域节理发育相对均匀,前期取样与地质雷达探测结果显示裂隙间距与迹长在试验范围内变异系数低于 10%。因此,在本次正交试验的小范围区域内,可认为岩体强度、岩体波阻抗、炸药波阻抗、炸药单耗、台阶高度等因素对爆破块度分布的影响基本一致,故将其作为固定因素处理。



图 1 现场试验场地
Fig. 1 Testing site

基于正交试验原理^[22,23],根据现场试验条件,选取孔网参数、延期时间、超深及装药间隔四个影响因素设计正交试验,从而可进行对比分析。各因素各取 3 个水平进行试验,试验因素及水平见表 1,不考虑因素间的交互作用,选取 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验。正交试验设计表见表 2。

表 1 正交试验因素水平表
Table 1 Orthogonal experimental factor level

水平 Level	因素 Factor			
	A(孔网参数) A(Mesh parameters)	B(延期时间) B(Delay time)	C(超深) C(Subdrilling)	D(装药间隔) D(Interval between charges)
I	5.5 m × 3.8 m	孔间延时 70 ms Inter hole delay 70 ms 排间延时 33 ms Inter row delay 33 ms	2.5 m	1.5 m
II	6.0 m × 3.5 m	孔间延时 20 ms Inter hole delay 20 ms 排间延时 33 ms Inter row delay 33 ms	2.8 m	2.0 m
III	6.5 m × 3.2 m	孔间延时 50 ms Inter hole delay 50 ms 排间延时 77 ms Inter row delay 77 ms	3.0 m	2.5 m

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

试验序号 Test	因素 Factor			
	A(孔网参数) A(Mesh parameters)	B(延期时间) B(Delay time)	C(超深) C(Subdrilling)	D(装药间隔) D(Interval between charges)
1	I	II	I	I
2	II	III	I	II
3	III	I	I	III
4	I	III	II	III
5	II	I	II	I
6	III	II	II	II
7	I	I	III	II
8	II	II	III	III
9	III	III	III	I

根据表 1 和表 2 进行了 9 次爆破块度分布影响规律分析试验。试验均选用散装膨化硝酸炸药,每次试验呈梅花形布置 4~5 排炮孔,采用空气间隔装药结构,通过新型气体间隔器实现药柱分段隔离。

通过优化爆破参数,预期可显著改善爆堆块度分布均匀性,同时,通过空气间隔器应用及参数调整,粉矿率较现有工艺有望进一步下降,优化生产流程经济性。此外,试验将明确各参数对块度分布的影响规律,筛选出超深、孔网参数、延期时间、间隔长

度的最优组合,为邓家山矿区的灰岩矿山提供精细化爆破的技术依据。

2.2 试验步骤

正交试验场地选定在 +375 m 平台,如图 1 所示,该区域岩性为白云质灰岩,平均抗压强度 55.9 MPa,且避开断层交叉带,以确保岩性均一性,减少地质变量干扰。筛分场地位于 +360 m 平台东侧,每次爆破后从爆堆底部靠近炮孔位置取样,单次取样约 70 t,累积取样 11 批次。取样后先过磅称重,再通过两次

重力式筛分和 0.5 cm 细筛进行三次筛分, 计算 8 cm、3 cm、0.5 cm 筛下累积率及各粒径区间分布比例。

在正交试验前开展空气间隔器单因素试验, 在 +390 m 以上平台应用间隔长度 1.5 ~ 2.0 m 的不耦合装药, 孔网参数 5.5 m × 3.8 m、延期时间 70 ms。试验结果显示使用间隔器后粉矿率较未使用时下降 1.36%, 且 6 粉矿率在一个月內下降 2.98%, 验证了不耦合装药对降低粉矿率的有效性, 为正交试验提供参数优化方向。

布孔与钻孔环节按正交表参数在 +375 m 平台布置炮孔, 台阶高度 15 m, 孔径 110.5 cm, 采用梅花形布孔方式, 前排孔角度 85°、最后一排孔 75°, 超深根据试验设计调整为 2.5 ~ 3.0 m, 孔深随超深变化为 17.5 ~ 18 m。

装药与起爆采用轴向不耦合装药, 间隔长度按试验水平填充空气间隔器 1.5 ~ 2.5 m, 填塞长度固定 4 m, 主装药为散装膨化硝铵炸药, 起爆体为 ϕ 70 mm 乳化炸药置于孔底。起爆采用电子雷管逐孔起爆网路, 孔间延时 20 ~ 70 ms, 排间延时 33 ms 或 77 ms。

爆后检测时每次爆破后观察爆堆形态, 记录大块率即大于 8 cm 粒径占比, 并对取样筛分数据进行统计, 重点分析粉矿率即 0.5 cm 筛下累积率与各爆破参数的相关性。

2.3 爆破块度分析方法

爆堆块度分布的评价旨在量化岩石破碎后的块度大小及分布特征, 为爆破参数优化提供科学依据^[24, 25]。常用评价方法以筛分试验为核心, 通过选取一系列不同孔径的筛网对爆堆矿石进行分级, 经称重后计算各粒级矿石质量占总质量的比例, 从而表征块度分布情况。其中, 筛下累积率是最直观的评价指标, 它表示小于某一粒径的矿石质量占总质量的百分比, 能清晰反映不同粒径范围的块度组成。

考虑到实际爆堆的块度分布范围广泛, 为系统表征其分布特征并聚焦于对后续加工效率与经济性影响最大的关键粒径区间, 本研究结合矿山工程实际及试验条件, 选取 8 cm (大块临界值)、3 cm (常用骨料粒径) 和 0.5 cm (矿粉临界值) 作为特征粒径, 以其筛下累积率作为爆堆块度分布的核心评价指标。

(1) 8 cm 筛下累积率

$$\frac{G_2}{G_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G_1 为爆堆取样总重量, t; G_2 为 8 cm 筛网筛分后筛下矿石重量 $G_2 = G_1 - 8$ cm 以上矿石重量, t。

(2) 3 cm 筛下累积率

$$\frac{G_4 \times G_2}{G_3 \times G_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: G_3 为从 8 cm 筛下矿石中取出的部分样品重量, t; G_4 为 3 cm 筛网筛分后筛下矿石重量, t; G_1 、 G_2 同 8 cm 筛下累积率参数。

(3) 0.5 cm 筛下累积率

$$\frac{G_4 \times G_2 \times G_5}{G_3 \times G_1 \times 24} \times 100\% \quad (3)$$

式中: G_5 为从 3 cm 筛下矿石中去 0.024 t 样品经 0.5 cm 筛网筛分后的粉矿重量, t; G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 同 8 cm、3 cm 筛下累积率参数。

(4) 大块率 G

$$G = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: G_1 为爆堆取样总重量, t; G_2 为 8 cm 筛网筛分后筛下矿石重量。

对爆堆矿石进行取样, 取样后依次经过 8 cm、3 cm、0.5 cm 的重力式筛网进行筛分。具体操作如下: 首先将样品过 8 cm 筛网, 得到 8 cm 以下矿石重量, 计算 8 cm 筛下累积率, 即 8 cm 以下矿石重量与样品总重量的比值; 然后从 8 cm 以下矿石中选取部分样品过 3 cm 筛网, 计算 3 cm 筛下累积率, 需考虑样品选取的比例关系; 最后从 3 cm 以下矿石中选取 24 kg 样品过 0.5 cm 筛网, 计算 0.5 cm 筛下累积率。通过对不同试验条件下这三个粒径筛下累积率的对比分析, 可系统研究孔网参数、延期时间、超深、装药间隔等爆破参数对爆堆块度的影响规律, 为爆破工艺优化提供数据支撑。

3 试验结果与分析

通过正交试验设计与现场爆破试验, 获得了不同参数组合下的爆堆块度分布数据。表 3 给出了 8 cm、3 cm、0.5 cm 筛下累积率, 本章通过极差分析与方差分析, 量化各因素对不同粒径块度的影响程度, 揭示装药间隔、孔网参数等因素在块度控制中的主导作用, 最终给出提升爆堆块度均匀性的最优参数组合, 为邓家山矿区的灰岩矿山爆破工艺优化提供理论支撑。

3.1 试验结果讨论

本节基于试验数据, 对装药结构、孔网参数、延期时间及超深等关键变量进行分析, 旨在揭示其对爆堆块度分布的影响机制。

装药间隔通过改变炸药在炮孔轴向的空间分布形态, 实现对爆破能量释放过程的精准调控, 是改善

块度分布的核心因素。试验数据显示,空气间隔器的应用使各粒径筛下累积率显著降低,其中 8 cm 筛下累积率平均降幅达 8.32%。其作用机制可从能量传递与岩石破碎力学角度解析:空气间隔形成的气柱缓冲层通过介质阻抗突变,使爆轰波前沿压力梯度趋于平缓,避免了传统连续装药中孔底能量过度集中导致的“冲炮”现象即孔底岩石被过度粉碎

而孔口出现大块。这种能量分布优化使爆炸应力波在岩体内呈现均匀衰减特征,一方面减少孔口区域因应力集中产生的飞石,另一方面增强孔中部位岩石的层间剪切作用。当应力波传播至空气间隔界面时,反射拉伸波与入射压缩波叠加,促进岩石内部原生裂隙扩展并形成贯通网络,最终实现大块率降低与中小块占比提升的协同效应。

表 3 不同尺寸矿石筛下累积率
Table 3 Accumulation rate under sieving for ores of different sizes

试验 Test	8 cm 筛下累积率 Accumulation rate under 8 cm sieve/%	3 cm 筛下累积率 Accumulation rate under 3 cm sieve/%	0.5 cm 筛下累积率 Accumulation rate under 0.5 cm sieve/%
1	29.39	4.02	2.41
2	40.43	8.44	4.06
3	43.93	7.21	3.35
4	34.98	6.94	3.22
5	31.47	7.52	3.71
6	28.69	4.05	1.69
7	25.07	5.25	2.80
8	40.31	5.17	2.95
9	37.97	11.24	5.99

孔网参数决定炮孔空间布局,直接影响单位体积岩体的能量分配密度,对块度分布起主导性调控作用。试验结果呈现规律如下:采用小规格孔网 5.5 m×3.8 m 并配合空气间隔时,8 cm 筛下累积率平均为 27.91%,3 cm 筛下累积率平均为5.35%,块度最细;中规格孔网 6.0 m×3.5 m 对应指标分别升至 37.40%和 8.44%;大规格孔网6.5 m×3.2 m 虽平均为 36.86%,但试验 4 因参数超限导致 8 cm 筛下率达 43.93%,为全试验最高值,由此可知,孔网参数与单位体积岩石获得的爆炸能量呈反比。孔距与排距扩大时,炸药单耗降低,相邻炮孔产生的应力波叠加效应减弱,岩石破碎主要依赖单个炮孔的能量输出,易在炮孔周围形成以径向主裂隙为主的破碎区域,导致大块颗粒生成。同时,大孔网条件下,爆生气体过早从自由面逸散,未能充分参与岩石内部微裂隙的扩展过程,进一步加剧块度不均匀性。

延期时间通过精准控制相邻炮孔爆破的时间差,实现对爆破应力场时空叠加效应的调控,进而协同优化块度均匀性。20 ms 短延时在小规格孔网中可使 8 cm 筛下率降至 29.39%,但在大规格孔网中仅降至 28.69%,表明其对能量叠加的抑制作用在小孔网环境中更显著;70 ms 长延时在小孔网中使 8 cm 筛下率进一步降至 25.07%,其机理在于前序

炮孔破碎岩石充分位移形成新自由面后,后续炮孔的应力波可针对性作用于松散介质,提升破碎效率。而排间延时 33 ms 短排间延时工况的 8 cm 筛下率平均为 31.18%,显著低于 77 ms 长延时组的 37.80%。这是由于短延时条件下,前后排爆破形成的应力波在时间域内叠加,破碎后的岩石颗粒在惯性作用下发生相互碰撞挤压,产生动态破碎;而长延时条件下,前排岩石已脱离爆破作用区,后排爆破失去碰撞破碎的介质条件,导致块度均匀性下降。

超深通过调整炮孔底部与台阶开挖面的相对位置,实现对孔底岩石破碎能量范围的精准控制。试验数据显示,超深从 2.5 m 增至 2.8 m 时,8 cm 筛下率平均从 35.09%降至 31.71%,表明适当增加超深可有效减少底部根底。其核心原理是超深段炸药的能量输出使应力波作用范围覆盖至开挖面以下,克服了台阶底部岩石的夹制作用。当超深不足时,孔底岩石处于三维约束状态,应力波衰减过快导致破碎不充分;而超深合理时,应力波在孔底形成反射叠加,促进裂隙向深部扩展,确保底部岩石充分破碎。但当超深进一步增至 3.0 m 时,大规格孔网工况的 8 cm 筛下率反弹至 37%以上,这是由于孔网参数过大导致单位体积岩石能量密度不足,超深段的能量分散使孔口区域能量密度进一步降低,反而

加剧了块度不均匀性。由此可知,超深参数的调控需与孔网参数协同匹配,在保证孔底能量充足的前提下避免过度分散,才能实现底部块度的优化。

通过上述分析表明,装药结构、孔网参数、延期时间及超深等参数并非孤立作用,而是通过协同控制爆炸能量的时空分布与释放效率,共同主导岩体的破碎过程。

3.2 极差分析

极差是评估各因素对试验指标影响程度的关键参数,其计算方法为各因素不同水平平均值中的最大值与最小值之差,见式(5),极差 R 的大小则反映了试验中各因素作用的大小,极差大表明该因素对指标的影响大,为主要因素,极差小为次要因素。

$$R = \max(k_i) - \min(k_i) \quad (5)$$

式中: k_i 表示因素第 i 水平的指标均值。

图2为不同尺寸矿石在各因素下的极差。8 cm筛下累积率反映大块度分布,其中装药间隔和孔网参数的极差分别为8.343和7.59,显著大于延期时间的4.996与超深的6.204。这表明在控制大块物料产生方面,装药间隔与孔网参数起着主导作用。3 cm筛下累积率反映中颗粒分布,其中延期时间的极差达到4.46,明显高于其他因素。孔网参数、超深和装药间隔的极差分别为2.097、1.05和1.68,远不及延期时间的影响幅度。0.5 cm筛下累积率反映细颗粒分布,其中延期时间的极差为2.073,高于装药间隔的1.187、孔网参数的0.867与超深的1.04。这说明在细颗粒生成过程中,延期时间和装药间隔起到关键作用。

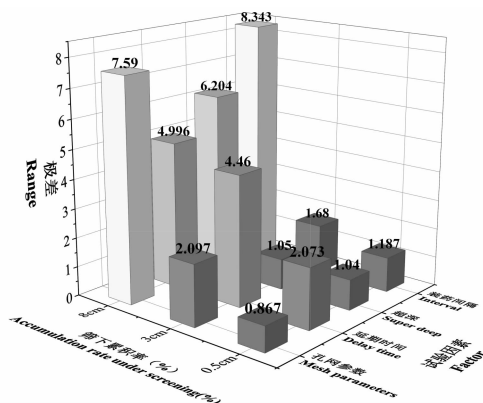


图2 不同尺寸矿石在各因素下的极差

Fig. 2 Range of ores of different sizes under various factors

综合极差分析可见,装药间隔与孔网参数主导粗颗粒控制,延期时间在中、细颗粒调控中起决定性作用,超深的影响相对较弱。

3.3 方差分析

方差分析是深入探究各因素对试验指标影响显著性的重要手段,其通过计算数据离散程度来衡量因素水平变化对指标的影响差异,见式(6)。方差值越大,表明该因素水平变化对试验指标的影响越显著。

$$V = \frac{\sum (k_i - \bar{k})^2}{n - 1} \quad (6)$$

式中: k_i 表示因素第 i 水平的指标均值; $\bar{k}$ 为因素各水平平均值的总平均; n 为水平数。

图3为不同尺寸矿石在各因素下的方差,8 cm筛下累积率中,装药间隔的方差59.25与孔网参数的方差53.85显著高于延期时间的方差21.97与超深的方差28.99。这一数据差异充分表明在大块度分布方面,装药间隔和孔网参数占据主导地位。3 cm筛下累积率中,延期时间的方差值14.9较为明显,远超孔网参数、超深和装药间隔的方差水平。这一结果充分印证延期时间是影响中颗粒破碎程度的关键变量。0.5 cm筛下累积率中,延期时间的方差值3.23与装药间隔的方差值1.14高于孔网参数和超深。这一数据揭示延期时间和装药间隔在细颗粒生成过程中发挥着决定性作用。

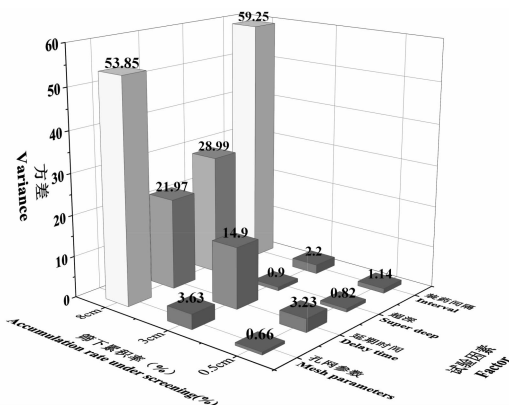


图3 不同尺寸矿石在各因素下的方差

Fig. 3 Variance of ores of different sizes under various factors

综上所述,装药间隔与孔网参数是粗颗粒控制的核心要素,延期时间在中、细颗粒调控中起主导作用,超深的影响相对有限。

4 现场应用

基于正交试验所确定的最优爆破参数组合:孔网参数6.0 m×3.5 m、孔间延时20 ms、排间延时33 ms、超深2.8 m、装药间隔2.0 m,在邓家山矿区+375 m平台进行了三阶段现场试验,共计进行了11组爆破试验,对13个爆区进行取样,累计取样

2622.55 t,系统验证了优化参数对爆破块度分布与粉矿率的实际调控效果。

试验结果表明,采用优化参数后,爆破块度均匀性显著改善,具体体现在以下方面:

(1)大块率显著降低。优化后8 cm以上大块占比平均下降约12%,减少了机械破碎频率,提高了挖装效率。

(2)3 cm左右颗粒占比提升。3 cm筛下累积率趋于合理区间,为后续骨料分级提供了更稳定的原料来源。

(3)粉矿率得到控制。0.5 cm以下粉矿率平均降幅达1.8%~2.5%,尤其在节理发育区段,空气间隔器的使用使粉矿率进一步下降,有效降低了筛分损耗与环境污染。

图4给出了采用优化参数前后爆堆块度分布的对比情况。图中横坐标为大块率与粉矿率,橙色代表优化前的参数所得出的大块率与粉矿率,蓝色代表优化后的参数所得出的大块率与粉矿率。由图可知,优化后的大块率由9.27%降至5.22%,粉矿率由15.32%降至8.85%,效果显著。优化前块度分布极不均匀,大块集中、粉矿散布,优化参数实施后的爆堆,块度级配明显改善,大块减少,中间粒径占比提高,整体均匀性增强。

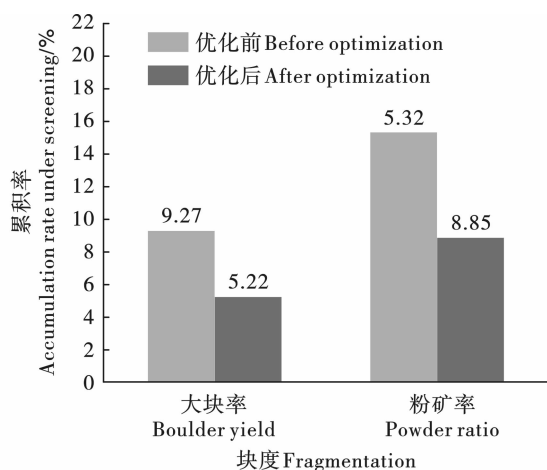


图4 优化参数前后爆堆块度分布对比

Fig. 4 Comparison of optimized fragmentation distribution of explosive piles

为进一步验证优化参数的泛化性,在白云质灰岩区段选取4个典型爆区进行取样筛分,结果显示矿粉率分别为8.86%、7.25%、4.79%和10.18%。综合判断,在未使用空气间隔器的爆破中,白云质灰岩区段的实际矿粉率普遍不高于7%;而在采用空气间隔器并配合优化参数后,矿粉率可进一步控制在5%以内,降幅显著。

通过现场应用结果可知,优化后的爆破参数不仅提升了爆破块度质量,降低了破碎成本,也为同类灰岩矿山的精细化爆破设计与块度控制提供了技术指导。后续将在持续验证并优化,以实现爆破经济性与环境效益的协同提升。

5 结论

针对邓家山灰岩矿区复杂节理发育导致的爆破块度分布不均、大块率偏高问题,本研究通过正交试验,系统量化了爆破参数对爆堆块度分布的影响规律,显著改善了块度均匀性,为解决实际工程难题提供了关键技术支撑。主要结论如下:

(1)通过正交试验设计与极差、方差分析,筛选出提升邓家山矿区灰岩爆破块度均匀性的相对最优参数组合:孔网参数6.0 m×3.5 m、孔间延时20 ms、排间延时33 ms、超深2.8 m、装药间隔2.0 m。

(2)极差与方差分析结果表明,延期时间是影响中颗粒(3 cm)与细颗粒(0.5 cm)分布的最显著因素。

(3)孔网参数是主导粗颗粒(≥ 8 cm)控制的核心因素之一。试验结果明确表明,在节理发育的灰岩中,较小的孔网参数能获得更细的块度,而过大的孔网参数会显著增加大块率风险。

参考文献 (References)

- [1] 康小庆. 露天煤矿爆破参数对爆破块煤率及个别飞散物控制的试验研究[J]. 科学技术创新, 2025(4): 169-172.
- [1] KANG Xiao-qing. Experimental study on the control of blasting block coal rate and individual flying debris by blasting parameters in open-pit coal mines[J]. Scientific and Technological Innovation, 2025(4): 169-172. (in Chinese)
- [2] 阮国府. 面板堆石坝级配料块度分布控制爆破技术研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(3): 118-123.
- [2] RUAN Guo-fu. Research on blasting technology for controlling the distribution of batching blocks in concrete face rockfill dams[J]. Mining Technology, 2024, 24(3): 118-123. (in Chinese)
- [3] 崔雪峰, 陈宝光, 汪文也. 基于正交试验法的爆破参数优化[J]. 世界有色金属, 2024(2): 194-197.
- [3] CUI Xue-feng, CHEN Bao-guang, WANG Wen-ye. Blasting parameter optimization based on orthogonal test method[J]. World Nonferrous Metals, 2024(2): 194-197. (in Chinese)

- [4] 章逸锋,李洪超,张智宇,等. 基于正交试验的小断面巷道掏槽爆破参数确定[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(2):331-339.
- [4] ZHANG Yi-feng, LI Hong-chao, ZHANG Zhi-yu, et al. Determination of blasting parameters for excavation and cutting of small section roadways based on orthogonal experiments [J]. Gold Science and Technology, 2023, 31(2):331-339. (in Chinese)
- [5] YU Kun-peng, LIN Peng, CHITOMBO Gideon, et al. Study on the optimization of blasting parameters and blastholes charging structure for broken orebody[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024(152):105948.
- [6] 李祥龙,杨长辉,王建国,等. 基于模型试验的预裂孔爆破参数优选[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2):190-196.
- [6] LI Xiang-long, YANG Chang-hui, WANG Jian-guo, et al. Parameter optimization of presplitting blasting based on model test[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(2):190-196. (in Chinese)
- [7] 郭鸿德,曹 聪,万串串,等. 基于爆破漏斗试验的某铜矿中深孔采矿爆破参数优化研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(S1):465-471.
- [7] GUO Hong-de, CAO Cong, WAN Chuan-chuan, et al. Investigation on the optimization of blasting parameters for medium length hole mining in a copper mine based on blasting crater test [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(S1):465-471. (in Chinese)
- [8] 金 鑫. 基于岩石爆破内部作用的爆破参数优化研究[J]. 露天采矿技术, 2025, 40(3):30-34.
- [8] JIN Xin. Research on optimization of blasting parameters based on internal effects of rock blasting [J]. Opencast Mining Technology, 2025, 40(3):30-34. (in Chinese)
- [9] 谷亚州,李 闯,陈南海,等. 扇形中深孔爆破孔网参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(4):96-103.
- [9] GU Ya-zhou, LI Chuang, CHEN Nan-hai, et al. Optimization study on hole network parameters of fan-shaped medium-deep hole blasting[J]. Mining R & D, 2025, 45(4):96-103. (in Chinese)
- [10] 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.
- [10] 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)
- [11] 王明君. 露天铜矿爆破参数优化对边坡稳定性的影响分析[J]. 世界有色金属, 2025(3):133-135.
- [11] WANG Ming-jun. Analysis of the impact of optimization of blasting parameters on slope stability in open pit copper mines [J]. Mine Engineering, 2025(3):133-135. (in Chinese)
- [12] 骆浩浩,杨仁树,马鑫民,等. 石碌铁矿扇形中深孔爆破块度分布特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2):371-378.
- [12] LUO Hao-hao, YANG Ren-shu, MA Xin-min et al. Study on the distribution characteristics of deep hole blasting in the fan-shaped hole of Shilu Iron Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2):371-378. (in Chinese)
- [13] 马泗洲,刘科伟,杨家彩,等. 不耦合装药下岩石爆破块体尺寸分布特征[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(4):122-140.
- [13] MA Si-zhou, LIU Ke-wei, YANG Jia-cai, et al. Size distribution characteristics of blast-induced rock fragmentation under decoupled charge structures [J]. Explosive and Shock Waves, 2024, 44(4):122-140. (in Chinese)
- [14] 岳志坤,李瑞泽,李福千,等. 爆破方法对岩石爆破块度分布影响的试验研究[J]. 爆破, 2019, 36(3):9-15.
- [14] YUE Zhi-kun, LI Rui-ze, LI Fu-qian, et al. Experimental study on influence of excavation method on rock blasting fragmentation distribution [J]. Blasting, 2019, 36(3):9-15. (in Chinese)
- [15] 何建元,马国虎,梁 博,等. 破碎矿体条件下扇形孔爆破块度优化措施研究与实践[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(12):24-28.
- [15] HE Jian-yuan, MA Guo-hu, LIANG Bo, et al. Research and practice on optimization measures of ore block sizes in fan-shaped blasting under the condition of broken ore body [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12):24-28. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] YIN Yue-jiang, LI Rui-ze, CHEN Ming, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of blasting fragmentation distribution based on orthogonal experiment method [J]. Blasting, 2019, 36(4):37-42. (in Chinese)
- [17] 彭 磊,王建国,彭 鑫,等. 富水矿岩区域爆破参数优化数值模拟研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(8):149-163.
- [17] PENG Lei, WANG Jian-guo, PENG Xin, et al. Numerical simulation study of blasting parameters optimization in rich water mine area [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(8):149-163. (in Chinese)

- [18] 安 龙,符洲云,张家华,等.低品位厚大矿体下向扇形深孔爆破精细控制与参数寻优方法[J].金属矿山,2025(5):89-98.
- [18] AN Long, FU Zhou-yun, ZHANG Jia-hua, et al. Fine control and parameter optimization method of deep hole blasting in low-grade thick orebody sublevel fan shape [J]. Metal Mine, 2025(5): 89-98. (in Chinese)
- [19] 陈莎莎,何 理,李腾飞,等.基于 ACO-BP 模型的岩石爆破破碎块度预测[J].矿冶工程,2024,44(5):12-16,21.
- [19] CHEN Sha-sha, HE Li, LI Teng-fei, et al. Prediction of blasting-induced rock fragmentation based on ACO-BP Model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5): 12-16, 21. (in Chinese)
- [20] 刘 英,毛 羽,徐士超,等.基于 PSO-BPNN 模型的爆破块度预测[J].爆破,2024,41(2):136-142.
- [20] LIU Ying, MAO Yu, XU Shi-chao, et al. Blasting fragmentation prediction based on PSO-BPNN Model[J]. Blasting, 2024, 41(2): 136-142. (in Chinese)
- [21] 赵 颖,岳中文,薛克军,等.基于特征选择的 GS-KCV-XGBoost 露天金属矿爆破块度预测模型[J].工程爆破,2024,30(6):168-177.
- [21] ZHAO Ying, YUE Zhong-wen, XUE Ke-jun, et al. Prediction model of GS-KCV-XGBoost open pit metal mine blasting fragmentation based on feature selection[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(6): 168-177. (in Chinese)
- [22] 白朝阳,刘拴平,邓 朋.基于矿岩可爆性分级的中深孔爆破参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(4):88-95.
- [22] BAI Chao-yang, LIU Shuan-ping, DENG Peng, et al. Study on optimization of medium-deep hole blasting parameters based on classification of ore-rock blastability [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(4): 88-95. (in Chinese)
- [23] 金 鑫,高佳明,苏宏伟,等.露天矿深孔台阶爆破间隔装药爆破试验研究[J].爆破,2023,40(2):42-47.
- [23] JIN Xin, GAO Jia-ming, SU Hong-wei, et al. Experimental study on interval charging blasting of deep hole bench blasting in open pit mine [J]. Blasting, 2023, 40(2): 42-47. (in Chinese)
- [24] 夏岸雄,张建华,张 鹏,等.露天矿层状岩体爆破抛掷方向及参数优化[J].金属矿山,2014(3):40-43.
- [24] XIA An-xiong, ZHANG Jian-hua, ZHANG Peng, et al. Blasting throwing direction of the layered rock in open-pit mine and its parameter optimization[J]. Metal Mine, 2014(3): 40-43. (in Chinese)
- [25] 邓 飞,程秋亭,陈艳红,等.中深孔爆破参数优化试验研究[J].有色金属科学与工程,2015,6(1):66-69.
- [25] DENG Fei, CHENG Qiu-ting, CHEN Yan-hong, et al. Experimental study on the optimized blasting parameters for medium-depth hole [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(1): 66-69. (in Chinese)

(上接第 100 页)

- [11] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等.含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J].煤炭学报,2020,45(S2):791-800.
- [11] ZHANG Zhao-ran, CHEN Hua-yi, JIAO Wei-gang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 791-800. (in Chinese)
- [12] 哈努卡耶夫,著.矿岩爆破物理过程[M].刘殿中,译.北京:冶金工业出版社,1980:33-34.
- [12] HANUKAEV. Physical process of rock blasting [M]. translated by LIU Dian-zhong. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980: 33-34. (in Chinese)
- [13] 聂铮玥.三种典型岩石材料的 RHT 模型参数研究[D].长沙:国防科技大学,2021.
- [13] NI Zheng-yue. Experimental study on RHT model parameters of three typical rock materials [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 冷振东.岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D].武汉:武汉大学,2017.
- [14] LENG Zhen-dong. Explosion energy release and transmission mechanism in rock blasting [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [15] 蒋克文,王海亮,郭 建,等.大空孔直眼掏槽有效应力分布规律模拟研究[J].煤炭技术,2023,42(7):30-34.
- [15] JIANG Ke-wen, WANG Hai-liang, GUO Jian, et al. [J]. Numerical simulation of effective stress distribution law of large hollow hole straight hole cutting [J]. Coal Technology, 2023, 42(7): 30-34. (in Chinese)
- [16] 王 勉,王建国,马 军,等.小断面巷道精确延时逐孔起爆技术[J].兵工学报,2025,46(3):245-256.
- [16] WANG Mian, WANG Jian-guo, MA Jun, et al. Research on precise delay hole-by-hole detonation technology in small section roadway [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(3): 245-256. (in Chinese)