Las Bambas 露天矿矿岩分离控制爆破技术与块度预测研究*

唐鸣东[1,2]，符洲云[1,2]，陈学松[3]，任清霖[1,2]，甯瑜琳[3]，孙裕喆[3]

（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；
3.五矿有色金属股份有限公司， 北京 100044）

摘要：Las Bambas 铜矿矿岩交错分布，各区硬度不一，岩性丰富，单一爆破参数难以适用复杂的地质条件。为在矿山爆破过程中控制矿石块度适中和降低废石混入，开展了露天台阶爆破矿岩分离控制爆破技术及块度预测研究。基于岩体指数（*RMI*）对岩体可爆性进行分级，提出采用原位堆滞爆破和抛掷爆破来分区爆破岩石和矿石，从而达到破碎矿、岩分区堆积。设计了差异化孔网参数多点起爆与密集空孔爆破方案。基于 XGBoost 模型对 Ferrobamba 矿区爆破数据进行训练，预测 25 组样本数据矿石爆破块度，并进行了现场试验。结果表明：采用差异化孔网参数多点起爆方案，在孔深为 16.5 m、岩石区孔网参数为 9.0 m×8.0 m、矿石区孔网参数为 6.5 m×5.5 m 的条件下，爆破后形成明显矿、岩分界沟，矿、岩分别成堆。块度分布特征参数 D_{80} 为 127 mm，模型预测的 D_{80} 为 124 mm，误差仅约 2.36%，其中块度 25.6 mm 的占比为 36.7%，可满足选矿厂要求。

关键词：露天台阶爆破；爆破参数；岩体指数；XGBoost 模型；块度预测

中图分类号：TD235 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0062-09

Study on Ore-Rock Separation Controlled Blasting Technology and Fragmentation Prediction for the Las Bambas Open-Pit Mine

Tang Mingdong[1,2], *Fu Zhouyun*[1,2], *Chen Xuesong*[3], *Ren Qinlin*[1,2], *Ning Yulin*[3], *Sun Yuzhe*[3]

(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.China Minmetals Nonferrous Metals Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Ore and rock are distributed alternately in Las Bambas Copper Mine, with varying hardness and diverse lithology across zones. Single blasting parameters are hardly applicable to the complex geological conditions. To achieve proper ore fragmentation and reduce waste rock dilution during blasting, research was conducted on ore-rock separation controlled blasting technology and fragmentation prediction for open-pit bench blasting. Rock mass blastability was classified based on the Rock Mass Index (*RMI*). In-situ retention blasting and cast blasting were proposed to distinguish between ore and rock, thereby achieving zoned accumulation of broken materials. Schemes of multi-point initiation with differentiated borehole pattern parameters and dense empty hole blasting were designed. Blasting data of Ferrobamba mining area were used for training based on XGBoost model, and ore blasting fragmentation of 25 sample groups was predicted and verified through field tests. The results show that with the multi-point initiation scheme using differentiated borehole pattern parameters, a hole depth of 16.5 m, borehole pattern parameters of 9.0 m×8.0 m for rock area and 6.5 m×5.5 m for ore area, distinct ore-rock boundary grooves are formed after blasting, and ore and rock accumulate separately. The characteristic parameter D_{80} of blasting fragmentation distribution is 127 mm, while the predicted D_{80} value is 124 mm with an error of only about 2.36%. The proportion of fragments sized smaller than 25.6 mm reaches 36.7%, which satisfies the requirements of the concentrator.

Key words: Open-pit bench blasting, Blasting parameter, Rock Mass Index, XGBoost model, Fragmentation prediction

---

* **收稿日期**：2025-04-28
基金项目：中国五矿科技专项计划项目(2022ZXB04)
作者简介：唐鸣东(1992—)，男，湖南邵阳人，硕士，工程师，主要从事采矿技术工程、爆破工程技术研究工作。E-mail：593287947@qq.com
通信作者：符洲云(1997—)，男，湖南龙山人，硕士，工程师，主要从事矿山采矿技术、爆破工程技术等方面的研究工作。E-mail：fzy4001@163.com

0 引言

爆破是露天矿山广泛采用的高效破岩手段[1-2]，其原理是利用炸药爆炸产生的应力波和高压气体破碎矿岩体和推动矿岩碎块移动。然而，随着开采的不断进行，简单易采的资源不断被开发殆尽，随之而来的是各类矿岩彼此交连断续的复杂赋存条件[3]。此类露天采场以常规爆破手段开采矿岩体时，在满足生产能力的条件下，如何保障回采效率、分离矿岩，降低矿石贫损，以及满足选矿入选块度要求，已成为当今大型露天矿山面临的主要难题之一。

目前，已有学者针对露天矿矿岩分离爆破及爆破块度控制开展了一系列研究。宋德林等[4-5]通过穿孔取样划定矿、岩边界，针对巴润矿提出矿岩分离爆破技术，并依据混合爆堆区域精准铲装技术分离矿岩，现场实践结果表明，矿、岩分离效果好。李顺波等[6]通过分析爆破应力波作用关系，控制爆破毫秒延期时间，在矿岩分界线处形成明显拉沟。严立德[7]基于毫秒延期爆破技术，分析矿岩分离爆破技术作用机理，并推导出了矿岩分离爆破延期时间的理论公式。张衍昊等[8]建立了爆破应力场解析式，确定露天台阶深孔爆破关键参数，通过 LS-DYNA 建模计算，分析爆破应力大小和破碎范围，实现多宝山露天矿合理矿石块度及松散度的有效控制。安龙等[9]采用数值模拟手段，分析各爆破参数下的爆破效果，进行参数寻优，实现爆破精细化控制，精准控制爆破边界与矿石块度。陈莎莎等[10]构建 ACO-BP 模型，实现了对现场爆破块度的精准预测。

国内外对于矿岩分离机理已有颇多研究，对于爆破块度控制也开展了诸多理论研究和实践，但尚未依托工程实践，综合控制爆破理论与块度预测理论，在保证矿岩分离的前提条件下，控制爆破块度。因此，本文以 Las Bambas 铜矿为研究对象，提出矿岩分离爆破技术方案，并对破碎矿岩块度进行预测，以期给同类矿山提供技术参考。

1 工程概况

Las Bambas 为一超大型露天开采铜矿，矿山位于秘鲁中南部的高原地区，海拔 3 600～4 600 m。Las Bambas 铜矿包含 Ferrobamba、Chalcobamba 和 Sulfobamba 3 个矿区。目前主要开采 Ferrobamba 矿区铜矿体。该矿区生产能力为 5 000 万 t/a，采剥总量超过 2.0 亿 t，剥采比约 3.0，台阶高度 15.0 m，使用重铵油炸药进行爆破，日爆破量 100 万 t。

Ferrobamba 矿区属矽卡岩型铜矿床，矿石及岩石整体单轴抗压强度取值范围大。矿体主要分为斑岩矿体和矽卡岩矿体，不同区域矿岩的硬度差异性大，软岩、中硬岩、硬岩均有，矿区范围内节理、构造发育，地质条件中等。受成矿条件影响，矿体与岩石彼此交错分布，同一台阶位置存在多处矿岩交连断续，形成矿岩过渡分界区域。

2 基于岩体指数 *RMI* 的可爆性分级

2.1 岩体指数 *RMI* 的计算方法

岩石的可爆性反映其受爆炸应力波作用时发生破碎的难易程度，是爆破孔网参数研究、爆破方案设计、现场装药施工等的重要依据。目前国内外常用的岩石可爆性分级方案主要有普氏系数法、Broch-Bonde 分级法及爆破性指数分级法。上述 3 种方法主要通过获取岩石硬度、岩石弹性纵波速度、岩石爆破最小抵抗线等参数，计算该岩石的可爆性指数，以判断岩石的爆破难易程度。岩石的爆破破碎难易程度不仅与其固有物理力学性质有关，还受到岩体结构面发育程度的影响。上述分级方法仅能评价完整岩体的可爆性特征，对于节理、裂隙发育，岩体完整性不一的现场实际而言，指导意义不大。

本文选用岩体指数 *RMI*，其综合了岩体硬度及岩体结构面特征，充分考虑了岩体的节理数目、粗糙度、风化情况等多种特性以及岩体 *RQD* 值等数据，能够较为全面地反映待爆区域内的岩体特征[11]。具体评估方法如下。

(1) 计算块体体积 V_b。在待爆区域进行岩体取芯工作，计算其 *RQD* 值，依据 *RQD* 值反映出的结构面密集度特征，计算岩体体积节理数 J_v(见式(1))，根据节理组交角，节理间距等计算区域内的三维块体体积 V_b(见式(2))。

$$J_v = 115/RQD \tag{1}$$

$$V_b = 1/J_v^3 \tag{2}$$

(2) 计算节理条件因子 J_c。根据节理面性质，查表获取节理风化程度因子 J_A，考虑区域内不连续面起止情况，计算节理长度因子 J_L，并适当进行修正。根据现场边坡状态选取节理粗糙度因子 J_R，一般为 0.5～4。根据 J_R、J_L 和 J_A，按下式计算 J_c：

$$J_c = J_R \cdot J_L / J_A \tag{3}$$

(3) 计算节理参数 J_P。依据节理条件因子 J_c 计算变量 D，节理参数 J_P、变量 D、节理条件因子

J_c 及块体体积 V_b 满足如下关系：

$$D=0.37\cdot J_c^{-0.2} \tag{4}$$

$$J_P=0.2\cdot\sqrt{J_c}\cdot V_b^D \tag{5}$$

(4) 计算岩体指数 *RMI*。通过现场取样，实验室试验获取矿山典型岩性区域的单轴抗压强度 σ_c，按式(6)计算岩体指数 *RMI*。

$$RMI=J_P\cdot\sigma_c \tag{6}$$

2.2 Las Bambas 矿的岩体可爆性分级

矿山典型岩性的单轴抗压强度试验结果见表1，共有10种主要岩性，共进行了3 701次试验。从表1可以看出，Las Bambas 矿山岩性众多，受节理、裂隙等结构的影响，同类岩性的强度及不同类岩性的强度变化极大，强度值最低的岩性为 SHL，平均强度仅 2.0 MPa，而强度值最大的岩性为 EPG，平均强度高达 12.23 MPa。综合各岩性单轴抗压强度试验结果，结合现场调查获得的岩体结构面特征，基于 *RMI* 数据对 Las Bambas 矿的岩体可爆性进行分级，结果见表2，由极易爆至极难爆共划分5级。

表 1 Las Bambas 典型岩体单轴抗压试验结果

Table 1 Test results of uniaxial compressive strength of typical rock in Las Bambas mine

岩性	样本数	抗压强度/MPa		
		最小值	最大值	平均值
SHL	211	0.46	3.36	2.00
MBL	303	1.89	17.80	5.90
EGT_MZM	264	5.13	21.31	10.26
EGT_MZQ	106	3.78	24.91	10.53
MZH	202	5.04	21.91	10.69
EPG	232	5.18	29.13	12.23
ESK	392	2.04	18.76	5.52
GSK	1 114	2.27	20.89	7.86
MSK	427	2.53	23.23	9.10
PSK	450	2.22	22.52	8.62

注：SHL 为页岩、MBL 为大理岩、EGT_MZM 为始新世花岗闪长岩矿化带、EGT_MZQ 为始新世花岗闪长岩石英脉带、MZH 为泥灰岩、EPG 为斑状花岗岩、ESK 为绿帘石角岩、GSK 为石榴石角岩、MSK 为磁铁矿角岩、PSK 为辉石角岩。

表 2 Las Bambas 矿的岩体可爆性分级

Table 2 Blastability classification of rock mass in Las Bambas mine

岩体指数 *RMI*	可爆性分级	描述	岩性
>70	极难爆	最坚固、最致密的岩石，岩体完整。	EPG、MZH
30～70	难爆	很坚固的岩石，结构面不发育。	EGT_MZM、EGT_MZQ
10～30	中等	致密的岩石，结构面一般发育。	GSK、PSK、MSK
3～10	易爆	软岩，结构面发育。	MBL、ESK
<3	极易爆	软岩，结构面极其发育。	SHL

3 矿岩边界控制理论及方法

在露天采场爆破过程中，自由面的留设是台阶爆破破岩成功的关键条件。炮孔装药重心到自由面之间最短距离的连线方向即为最小抵抗线方向，是爆破能量释放最剧烈的方向，也是岩石运动速度最大的方向。因此，通过自由面控制最小抵抗线方向，是实现精准控制矿岩边界爆破的基础。基于以上原理，提出矿岩原位堆滞爆破和抛掷爆破概念(见图1)，用以精准控制矿岩边界，实现露天采矿矿岩分离，提高开采效率、降低矿石贫化率。

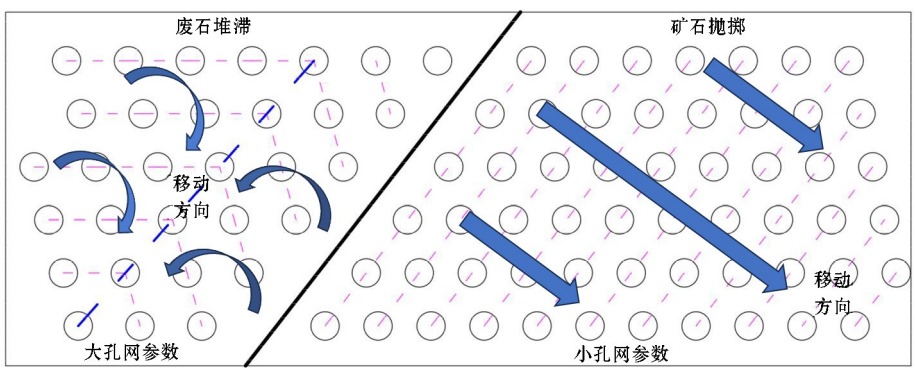


图 1 矿岩原位堆滞及抛掷爆破示意

Fig.1 Schematic of in-situ heaping and throwing blasting of ore rock

(1) 矿岩原位堆滞爆破。通过对露天台阶爆破最小抵抗线、底盘抵抗线、孔网参数、布孔方式、装药量、装药结构及起爆网路结构等的设计，实现爆破后矿岩小幅移动并整合，使矿岩爆堆往设计预期方向

集中堆积,减少矿岩前铺及离散。

(2) 抛掷爆破。通过设计合适的爆破参数(装药量、装药密度及孔间距等),控制爆破后矿岩尺寸,增大爆破能量释放程度,实现爆破后矿岩大幅移动,形成分离界限,并减少铲运距离。

4 Ferrobamba 矿区东部矿岩分离爆破设计

4.1 矿岩爆破参数的确定

(1) 延期时间。

以岩体动态抗拉强度为依据,根据爆破应力波强度值比对确定最终延期时间。延期时间的合理设计,能够保证后续炮孔起爆具有充足的自由面,最大限度降低爆破过程中岩石的夹制作用,从而充分破岩。

为使应力波在炮孔间叠加以控制矿岩破碎块度,根据以下经验公式计算同排孔的孔间起爆延期时间 Δt_1:

$$\Delta t_1=(1\sim2)Q^{\frac{1}{3}}+(10.2\rho_e v_D/\rho_r C_p-1.78)Q^{\frac{1}{3}}+S/V_a \quad (7)$$

式中:Q 为单孔装药量,kg;ρ_e 为炸药密度,g/cm^3;ρ_r 为岩石密度,g/cm^3;v_D 为炸药爆速,m/s;C_p 为岩石纵波波速,m/s;S 为孔后部裂槽宽度;V_a 为岩石移动平均速度,m/s。

为保证爆破过程中矿岩抛掷效果及爆堆形态,依据段海峰等[12]提出的推墙说和回弹假说,把前、后排炮孔分别划分为回弹和主动位移区,根据其位移函数曲线,计算最佳排间延期时间 Δt_2:

$$\Delta t_2=1\ 000b(\rho-1)\sqrt{(2h_1/g)}/s \quad (8)$$

式中:b 为排间距,m;ρ 为爆堆松散系数;h_1 为底板上装药高度,m;g 为重力加速度,m/s^2;s 为前冲距离,m。

(2) 底盘抵抗线。

底盘抵抗线与矿岩硬度、炸药性质、炮孔尺寸等参数有关,其合理的设计能够降低根底和大块率。常根据钻孔作业安全条件经验公式及钻孔直径经验公式计算底盘抵抗线。

$$W_d\geqslant H\cot\alpha+B \quad (9)$$

$$W_d=(25\sim35)d \quad (10)$$

式中:W_d 为底盘抵抗线,m;α 为台阶坡面角,(°);H 为台阶高度,m;B 为钻孔中心至坡顶线的安全距离,对于大型钻机,$B\geqslant2.5\sim3$ m;d 为炮孔直径,m。

(3) 孔间距与孔深。

设计采用等边三角形布孔形式,可按式(11)计算孔间距:

$$a=mW_d \quad (11)$$

式中:a 为孔间距;m 为炮孔密集系数。

炮孔深度由台阶高度和超深确定。通过设计超深,可以降低台阶底部的爆破阻力,爆破后形成规整的底面。合理的堵塞长度能够降低爆破能量损失,较好的堵塞质量能够减少爆破飞石、冲击波等危害。孔深与堵塞长度可根据文献[13]中的经验公式计算。

Las Bambas 铜钼矿单孔装药量约为 800 kg,采用重铵油炸药,炸药密度为 1.3 g/cm^3,炸药爆速为 4 200 m/s,矿石密度为 2.7 g/cm^3,岩体纵波波速约为 5 000 m/s,台阶高度为 15 m,炮孔直径为 310 mm,爆破后爆堆松散系数取 1.4。根据上述公式计算得到的矿岩爆破参数取值范围见表 3。

表 3 孔网参数及爆破参数推荐值

Table 3 Recommended values of hole network parameters and blasting parameters

岩性	炮孔直径/mm	孔间距/m	孔排距/m	底盘抵抗线/m	超深/m	堵塞长度/m	延期时间/ms	
							孔间	排间
矿石	310	6.0～7.6	5.2～6.6	8.0～9.5	1.2～3.3	5.6～7.6	31～40	59～89
岩石	310	8.0～10.4	7.0～9.5	8.0～9.5	1.2～3.3	5.6～7.6	31～40	84～126

4.2 差异化孔网参数多点起爆方案

(1) 方案设计及评价。针对矿、岩区域设计不同的爆破参数,分两个起爆点起爆,通过在岩石区域增大起爆延期时间,实现块度上的明显区分,控制矿岩移动距离,分离矿石与岩石。因多起爆点的设计,矿、岩爆堆向各自起爆点方向集中,在交界面处形成明显的分界,进而指导现场铲装施工,提升铲装效率,减少废石混入,降低矿石贫化率。

(2) 实施方案。如图 2 所示,以矿岩交界区域台阶爆破为例,左侧为岩石区,右侧为矿石区,中部存在明显矿岩界限。矿、岩区域的爆破参数见表 4。矿石区域设计采用较小的孔距、排距和低段延期时间,在其中部设置起爆点,向左右两侧逐孔起爆,实现小块度矿石向区域中部堆积。岩石区域设计采用较大

的孔距、排距和高段延期时间,在左侧设置起爆点,从左至右依次起爆,实现大块度岩石向左侧移动堆积。

表 4 差异化孔网参数多点起爆方案的爆破参数

Table 4 Blasting parameters of multi-point initiation scheme with differentiated hole network parameters

岩性	炮孔直径/mm	炮孔深度/m	排距/m	孔距/m	底盘抵抗线/m	堵塞长度/m	延期时间/ms	
							孔间	排间
矿石	310	16.5	5.5	6.5	9.0	7.0	31	59
岩石	310	16.5	8.0	9.0	9.0	7.0	35	105

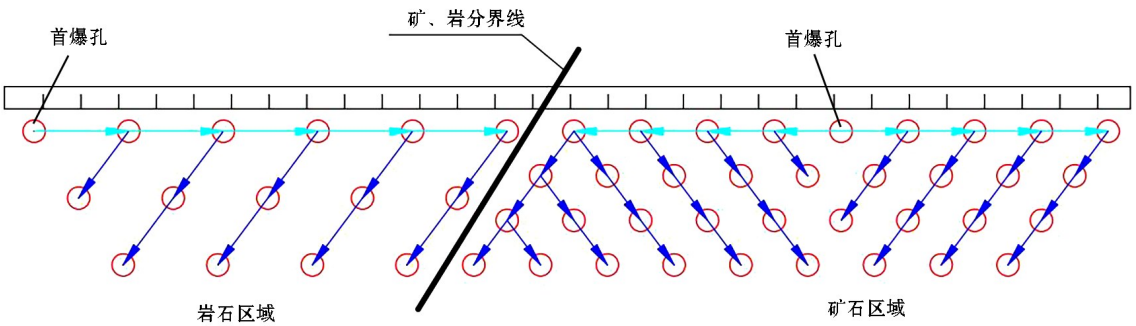


图 2 多起爆点起爆方案示意

Fig.2 Schematic of multi-detonation initiation scheme

4.3 密集空孔方案

于矿、岩分界位置钻凿一排密集空孔,矿、岩区域设计同差异化孔网参数方案。空孔能够吸收两侧爆破能量,减少爆轰波传播强度,在分界处产生大块或裂缝。同时,两侧装药孔距离空孔有一定距离,能够精确控制爆破能量的过度集中,避免岩石过度粉碎。密集空孔可以引导爆炸波在矿、岩分界区域产生拉应力,从而形成裂缝带,有效切割矿、岩区域,避免废石混入矿石。空孔深度一般为装药孔的 2/3。

(1) 空孔参数的计算。

依照弹性力学中厚壁筒受压作用模型计算空孔间距[14]。炮孔炸药爆炸后产生压强 p,爆生气体使炮孔周围一定范围内产生一个均匀应力场,其切向应力 σ_θ 为:

$$\sigma_\theta = pR_0^2/r^2 \tag{12}$$

式中:R_0 为炮孔半径;r 为应力分析点距离孔中心的距离。

当 $\sigma_\theta > [\sigma_{td}]$ 时,岩石产生裂纹,直至 $\sigma_\theta \leqslant [\sigma_{td}]$ 时,裂纹停止发育,此时炮孔周边的初始裂纹半径为 r_0。初始裂纹形成后,在静态压力 p_1 作用下裂纹进一步扩展,使裂纹贯穿形成裂缝的必要条件见式(13),综合考虑现场偏差及岩体的不均匀性等因素,赋予保障系数以加密炮孔,则推导出空孔间距 s 的计算公式为:

$$\begin{cases} r_0 = R_0\sqrt{p/[\sigma_{td}]} \\ 2R_0 p_1 = (s-2r_0)[\sigma_t] \end{cases} \tag{13}$$

$$s = (2R_0\sqrt{p/[\sigma_{td}]} + 2p_1R_0/[\sigma_t])/z \tag{14}$$

式中:$[\sigma_{td}]$ 为岩石的动态抗拉强度;p_1 为炮孔内静态压力,$p_1 = K_f p'_1$;p'_1 为爆生气体膨胀压力,MPa;K_f 为压力增大系数,一般为 1.1～1.5;z 为保障系数,一般为 1.1～1.3;$[\sigma_t]$ 为岩石抗拉强度,MPa。

矿区岩石抗拉强度为 5～15 MPa,动态抗拉强度 $[\sigma_{td}]$ 为 10～30 MPa。根据炸药性能参数计算得到 p'_1 为 120 MPa、p 为 144 MPa、p_1 为 90 MPa。在保障系数取 1.1～1.3 的条件下,计算得到 s 的取值范围为 1.9～2.5 m。

(2) 方案设计。

岩石区抛掷、矿石区堆滞的矿岩分离密集空孔方案如图 3 所示,在矿岩分界位置按 2.0 m 的孔间距均匀布设一排深度为 11.0 m 的密集空孔,孔径为 127 mm,矿、岩的爆破参数依照差异化孔网参数多点起爆方案设计(见表 4)。在岩石区域左侧设计一个起爆点,使得爆破的大块岩石向左后方依次抛掷。在矿石区域中部设计起爆点,通过设计起爆网络,中间挤压爆破矿石。因密集空孔的布设,最终于矿岩交连处形成明显分离带。

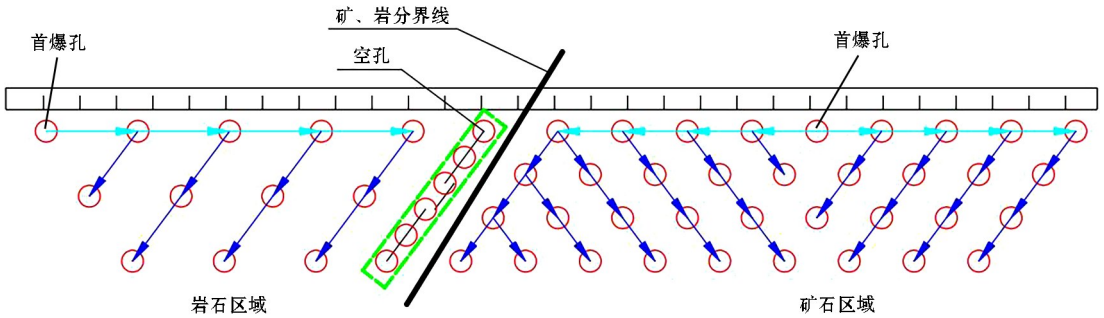


图 3 爆破设计方案示意

Fig.3 Design scheme schematic of blasting

5 基于 XGBoost 模型的矿石块度预测

5.1 算法概述及原理

采用差异化孔网参数、多起爆点爆破、分界线布置密集空孔等方式能在爆破过程中使得矿、岩块度不一，同时形成两个爆堆。爆破块度的预测可为后续的铲装、运输提供决策依据。在爆破方案施工前进行爆破块度预测能够验证爆破方案设计的合理性，并可为矿岩分离控制效果预测评价提供基础。

本文选用极限梯度提升算法(XGBoost)构建矿岩爆破块度预测模型[15-16]，XGBoost 算法在非线性问题分析中具有输入数据要求低、样本量小、计算简便等优势，常在模型中引入正则化项，通过二阶导数有效提高预测速度和准确率。一般在构建 XGBoost 模型时，需依据所研究对象的特征确定对应的集成树 k 和数据集 A，具体满足如下关系。

$$\hat{j}_i=\psi(\boldsymbol{M}_i)=\sum_{k=a}^{K}f_k(\boldsymbol{M}_i) \tag{15}$$

$$f_k()\in R,R=\{f(\boldsymbol{M})=\xi_q(\boldsymbol{M})\},$$
$$(A=\{(\boldsymbol{M}_i,j_i)\},q:\boldsymbol{Z}^u\to Y,\xi\in\boldsymbol{Z}^Y) \tag{16}$$

式中：$\hat{j}_i$ 为样本预测值；f_k 为基学习器；Y 为叶子节点的个数；R 为集成树的函数空间，集成树上各叶节点的分值为对应的 $f_k()$ 中的函数值；q 为数据集 A 中样本点的映射函数；ξ_q 为第 q 个叶节点的分值；j_i 为样本值；k 为树的数量；$\boldsymbol{Z}^u$ 为 u 维实向量；$\boldsymbol{Z}^Y$ 为 Y 维实向量；$\boldsymbol{M}_i$ 为第 i 个数据的特征向量；$\psi()$ 为 XGBoost 集成模型的整体映射函数。

通过引入正则化项，构建模型的目标函数，目标函数由评估模型预测性能的损失函数及控制模型复杂度以防止过度拟合的正则化项目构成，在函数经过 i 轮迭代后，模型目标函数 $L^{(i)}$ 满足如下关系。

$$L^{(i)}=\sum_i l[(\hat{j}_i,j_i)+f_i(\boldsymbol{M})]+\Phi(f_i) \tag{17}$$

式中：$(\hat{j}_i,j_i)$ 为样本训练误差；$f_i(\boldsymbol{M})$ 为当前学习器样本的预测值；$\Phi(f_i)$ 为第 i 个学习器的正则项；l 为损失函数。

当函数进行二阶泰勒展开时，可得到最优解下的目标函数 $\widetilde{L}^{(t)}$，设 X_j 为第 j 个叶节点中的样本，表达式为 $X_j=\{i\mid q(\boldsymbol{M}_i)=j\}$，对 $\boldsymbol{M}_i\in X_j$，有 $\xi_q(\boldsymbol{M}_i)=\xi_j$，此时最优解下的目标函数 $\widetilde{L}^{(t)}$ 为：

$$\widetilde{L}^{(t)}=\sum_j^Y[W_j\xi_j+\frac{1}{2}(O_j+\lambda)\xi_j{}^2]+\gamma Y \tag{18}$$

式中：$q(\boldsymbol{M}_i)$ 为每棵树的结构；ξ_j 为样本 j 所处的某叶子节点的分数；λ，γ 为调整系数，防止函数过度拟合；$W_j=\sum_{i\in X_j}w_i$ 为叶子结点 j 所包含样本的一阶偏导数累加之和；$O_j=\sum_{i\in X_j}o_i$ 为叶子结点 j 所包含的二阶偏导数累加之和。

当偏导为零时，有 $\xi_j^*=-W_j/(O_j+\gamma)$，可进一步计算 $\widetilde{L}^{(t)}$，信息增益见式(20)。

$$\widetilde{L}_{\min}=-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{Y}\left(\frac{W_j^2}{O_j+\gamma}\right)+\lambda Y \tag{19}$$

$$W_{\min}=-\frac{1}{2}\left[\frac{W_L^2}{O_L+\gamma}+\frac{W_Z^2}{O_Z+\gamma}+\frac{(W_L+W_Z)^2}{O_L+O_Z+\gamma}\right] \tag{20}$$

式中：W_L、O_L 为分裂点左侧子树的梯度值；W_Z、O_Z 为分裂点右侧子树的梯度值；$\frac{W_L^2}{O_L+\gamma}$ 和 $\frac{W_Z^2}{O_Z+\gamma}$ 分别为左、右子树划分后各自产生的增益值；$\frac{(W_L+W_Z)^2}{O_L+O_Z+\gamma}$ 为不分裂的增益值。

每次迭代计算，均会输出最优的信息增益，并同步优化对应的决策树结构，以实现目标函数的最优解，最终迭代完成，构建出所需的计算模型。

5.2 模型建立及结果分析对比

选取 Ferrobamba 矿区典型的 230 个爆破数据

作为训练样本,取客观性强、影响占比大、关联性密切的 7 个主要影响因素构建 Las Bambas 矿爆破块度预测模型,主要因素分别为最小抵抗线(w)、炮孔间距(a)、炮孔深度(L)、孔径与最小抵抗线比值(c)、炸药单耗(q)、最大段药量(Q)、岩体指数(RMI)及块度分布特征参数 D_{80}。模型完成相关训练后,另选 25 个爆破数据验证预测数据,详细样本数据见表 5。

表 5 爆破数据样本

Table 5 Blasting data samples

序号	w/m	a/m	L/m	c	q/(kg·m^{-3})	Q/kg	RMI	D_{80}/mm
1	5.36	5.62	16.68	0.047	1.23	1 090.0	85.0	107.3
2	5.73	6.73	15.94	0.047	0.90	1 558.0	2.5	137.3
3	5.69	6.57	15.88	0.062	0.96	1 023.0	6.0	132.5
4	5.61	6.68	16.11	0.047	0.96	1 071.0	2.5	130.2
5	5.73	6.55	16.62	0.062	0.96	965.0	2.5	133.9
6	5.34	6.06	15.81	0.062	1.23	1 591.0	20.0	128.2
7	5.53	6.28	15.61	0.047	1.13	1 876.0	20.0	118.6
8	5.56	6.32	16.37	0.062	1.08	1 876.0	20.0	120.2
9	5.77	6.69	15.69	0.062	1.05	1 878.0	6.0	121.3
10	5.72	6.50	15.51	0.047	0.88	992.0	2.5	136.6
11	5.22	5.85	16.35	0.047	1.35	1 084.0	85.0	103.4
12	5.60	6.67	16.29	0.062	1.05	1 481.0	6.0	132.7
13	5.14	5.88	16.67	0.062	1.17	1 271.0	50.0	113.7
14	5.36	5.82	16.19	0.047	1.38	1 391.0	85.0	107.5
15	5.28	6.36	16.27	0.047	1.07	1 012.0	20.0	115.4
16	5.78	6.78	15.52	0.047	1.09	1 913.0	6.0	125.6
17	5.37	6.48	15.85	0.062	1.24	1 262.0	20.0	127.8
18	5.54	6.16	16.62	0.047	1.04	1 635.0	20.0	123.4
19	5.67	6.35	15.67	0.062	1.04	1 421.0	6.0	134.9
20	5.76	6.67	15.93	0.062	1.05	1 152.0	6.0	130.5
21	5.42	6.11	16.11	0.062	1.32	1 401.0	50.0	123.7
22	5.74	6.62	16.57	0.062	1.06	1 205.0	6.0	131.9
23	5.61	6.35	16.06	0.047	1.04	1 451.0	6.0	120.5
24	5.11	5.8	16.49	0.062	1.21	1 232.0	85.0	100.6
25	5.05	5.76	16.25	0.062	1.38	902.0	85.0	103.2

为避免量纲对模型预测精度的影响,对 7 个主要影响因素的数据进行归一化处理,使数据值在0～1 的范围内,随后代入模型进行迭代计算。将 XGBoost 算法预测结果与 PNN 神经网络、随机森林(RF)、粒子群(PSO)及 BP 神经网络预测结果进行对比,分析不同预测算法的预测精度及 XGBoost 算法模型的可靠性,预测结果见表 6 和图 4。

表 6 不同模型预测结果对比

Table 6 Comparison of prediction results of different models

序号	实际值/mm	不同模型得到的预测值/mm				
		XGBoost	RF	PNN	PSO	BP
1	107.3	101.5	95.5*	98.6	104.0	103.4
2	137.3	131.2	128.8	143.0	126.9*	133.9
3	132.5	127.7	128.7	124.9	122.5	148.1*
4	130.2	139.9	123.7	125.8	118.1*	112.2*
5	133.9	127.9	115.9*	129.4	116.1*	143.3
6	128.2	134.1	141.8*	138.4*	139.6*	112.0*
7	118.6	128.0	111.8	111.3	110.7	102.5*
8	120.2	115.4	109.2*	116.7	110.2	108.1*
9	121.3	125.0	129.1	127.0	128.4	125.7
10	136.6	129.0	151.6*	139.8	152.5*	126.9
11	103.4	95.9	94.5	115.6*	98.4	98.9
12	132.7	124.5	140.6	128.9	136.1	117.3*
13	113.7	107.7	119.5	108.3	119.9	117.0
14	107.5	101.6	99.6	98.4	112.8	96.5*
15	115.4	122.4	108.8	121.3	119.7	121.9
16	125.6	117.3	135.5	113.3*	131.3	141.8*
17	127.8	122.4	136.8	141.2*	142.5*	122.6
18	123.4	126.7	132.1	132.0	128.9	116.5
19	134.9	122.3*	125.5	126.8	152.8*	131.3
20	130.5	138.4	122.2	136.1	133.7	117.2*
21	123.7	126.8	131.7	116.6	118.5	130.1
22	131.9	138.3	115.7*	122.4	139.1	123.6
23	120.5	115.1	128.4	115.8	124.6	113.0
24	100.6	106.6	109.9	92.3	104.1	96.1
25	103.2	92.7*	97.2	98.5	112.8	110.5

注:* 数据为错误数据。

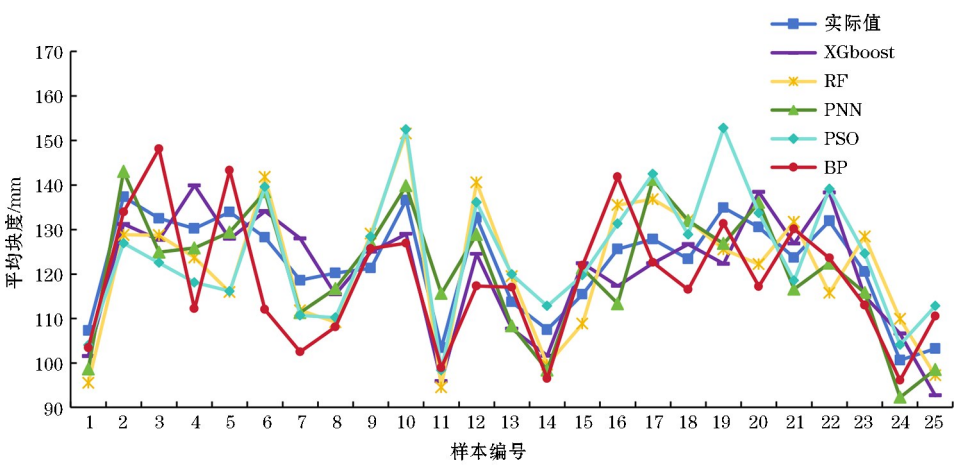


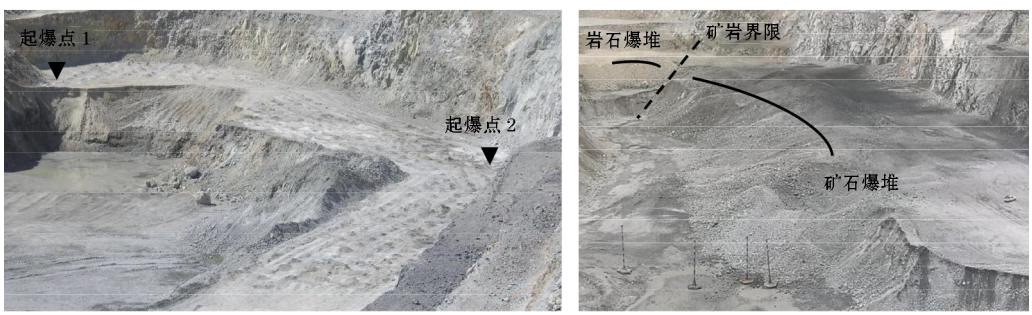
图 4 不同模型预测的结果

Fig.4 The results predicted by different models

从表 6 和图 4 可以看出，XGBoost 的预测结果与实际结果最为接近，25 个样本中，仅 2 个错误预测结果，预测准确率为 92%。其次为 PNN 神经网络，准确率为 84%，而随机森林(RF)模型在预测过程中出现 6 个错误数据，PSO 和 BP 神经网络预测准确率均不足 75%，无法满足现场预测精度需求。综上可知，XGBosst 模型在小样本训练预测中，准确度较好，适合用于 Las Bambas 铜矿现场爆破的块度预测。

6 现场工业试验

在 Las Bambas 铜矿某台阶位置开展现场工业试验，如图 5 所示。图 5(a)中左前方为岩石区域，右侧为矿石区域。设计岩石区域的爆破孔网参数为 9.0 m×8.0 m，孔深为 16.5 m，设计起爆网络控制破碎岩石向左侧抛移。设计矿石区域的孔网参数为 6.5 m×5.5 m，孔深为 16.5 m，设计起爆网络控制破碎矿石向中部堆积。由图 5(b)可知，起爆后在矿岩交界位置形成明显矿岩分界沟，并且矿石形成明显的堆积区，岩石被抛掷在台阶左侧角落，爆破后对矿石块度进行图像识别分析，其块度分布特征参数 D_{80} 值为 127 mm，其中 25.6 mm 的矿石块度占比为 36.7%，满足选矿厂对于 25.6 mm 矿石块度占比 35%的要求。此外，XGBoost 预测模型预测本次爆破的块度分布特征参数 D_{80} 为 124 mm，相对误差约 2.36%，预测结果与实际相符，证明该爆破块度预测模型具有较好的工程应用价值。



(a) 爆破前　　(b) 爆破后

图 5 差异化孔网参数多点起爆爆破技术的现场应用

Fig.5 On site application of blasting technology with differentiated hole network parameters and multi-point initiation

7 结论

通过理论分析矿岩边界控制的原理，提出原位堆滞爆破和抛掷爆破概念，同时依照理论与经验公式初步确定爆破参数，并基于此进行矿岩分离爆破方案设计，最终于 Las Bambas 铜矿进行现场试验，得到以下结论。

(1) 根据爆破过程中能量释放及最小抵抗线控制爆破方向原理，提出矿岩原位堆滞爆破和抛掷爆破的概念，用以精准控制矿岩边界，提高开采效率、降低矿石贫化率。

(2) 考虑岩体结构面对爆破效果的重要影响，依据矿山地质特征，建立相关的结构面参数，通过大量试块的单轴抗压试验，获取不同种类岩石的单轴抗压强度，构建了基于岩体指数 *RMI* 的矿岩可爆性分级系统，将矿岩可爆性分为由极难爆至极易爆共 5 个等级。

(3) 根据露天台阶爆破相关理论与经验公式，计算得到矿石区孔网参数为(6.0～7.6) m×(5.2～6.6) m，孔间延期为 31～40 ms，排间延期为 59～89 ms；岩石区孔网参数为(8.0～10.4) m×(7.0～9.5) m，孔间延期为 31～40 ms，排间延期为 84～126 ms；矿岩区域爆破时底盘抵抗线为 8.0～9.5 m，超深为 1.0～3.3 m，堵塞长 5.6～7.6 m。

(4) 依照原位堆滞爆破及抛掷爆破原理，设计差异化孔网参数、多点起爆及密集空孔的矿岩分离爆破方案，并确定差异爆破参数，通过弹性力学中厚壁筒受压作用模型计算出空孔间距为 1.9～2.5 m。

(5) 利用 XGBoost 算法构建爆破块度预测模型，并与 RF、PNN、PSO、BP 4 种爆破块度预测模型进行预测对比。结果表明，25 个验证样本中，XGBoost 算法模型的误差率最低，预测准确率达 92%，远高于其他预测模型。

(6) 通过现场工业试验，对差异化孔网参数多点起爆方案的矿岩分界效果进行验证，成功实现了矿石堆积与岩石抛掷，大幅降低了矿岩混合区域爆破时废石的混入，同时提高了后续铲装效率。

参考文献(References):

[1] 陈晶晶,林万青,刘翼.露天矿山高陡边坡安全爆破施工技术[J].爆破,2025,42(2):105-110.
Chen Jingjing, Lin Wanqing, Liu Yi. Safety blasting construction technology of high and steep slope in open-pit mine[J]. Blasting,2025,42(2):105-110.

[2] 杨琳,付天杰,郭华杰.紧靠电厂高危边坡的深孔控制爆破技术研究[J].爆破,2021,38(4):68-74.
Yang Lin, Fu Tianjie, Guo Huajie. Study on deep hole controlled blasting technology close to high-risk slope of power plant[J]. Blasting,2021,38(4):68-74.

[3] 张乐,颜景龙,张宪玉,等.露天采矿矿岩分离爆破技术探索[J].工程爆破,2011,17(3):77-80.
Zhang Le, Yan Jinglong, Zhang Xianyu, et al. Exploration of open-pit mining ore-rock separation blasting technology [J]. Engineering Blasting,2011,17(3):77-80.

[4] 宋德林,张浩,王德胜,等.巴润矿矿岩混合爆区爆破分离技术研究[J].金属矿山,2021(12):149-153.
Song Delin, Zhang Hao, Wang Desheng, et al. Study on blasting separation technology of ore-rock mixed blasting zone in Baobarun Mine[J].Metal Mine,2021(12):149-153.

[5] 宋德林,王春旺,郭建新,等.巴润矿露天开采贫化控制技术研究及应用[J].矿冶工程,2024,44(2):18-21+26.
Song Delin, Wang Chunwang, Guo Jianxin, et al. Research and application of dilution control technology in open-pit mining of Barun mine [J]. Mining and Metallurgy Engineering,2024,44(2):18-21+26.

[6] 李顺波,李泽华,杨军,等.矿岩分离露天爆破毫秒延时间隔研究[J].爆破器材,2019,48(3):55-58.
Li Shunbo, Li Zehua, Yang Jun, et al. Study on millisecond delay interval of open-pit blasting for ore-rock separation[J]. Blasting Equipment,2019,48(3):55-58.

[7] 严立德.云山石墨矿露天开采矿岩分离爆破延期时间优化研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
Yan Lide. Delay time optimization of ore-rock separation blasting in open-pit mining of Yunshan graphite mine[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2022.

[8] 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.
Zhang Yanhao, Liu Shaoguang, Lou Xiaoming. Optimization research and application of hole-by-hole detonation parameters of deep hole bench blasting in open-pit mine[J]. Blasting,2024,41(2):104-111+252.

[9] 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.
An Long, Fu Zhouyun, Zhang Jiahua, et al. Method for fine control and parameter optimization of downward fan-shaped deep hole blasting in low-grade thick and large ore bodies [J]. Metal Mines,2025(5):89-98.

[10] 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.
Chen Shasha, He Li, Li Tengfei, et al. Prediction of rock blasting fragmentation based on ACO-BP model[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2024,44(5):12-16+21.

[11] 申艳军,徐光黎,朱可俊.RMI 岩体指标评价法优化及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(5):1375-1383.
Shen Yanjun, Xu Guangli, Zhu Kejun. RMI rock mass index evaluation method optimization and its application[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2011,42(5):1375-1383.

[12] 段海峰,侯运炳.露天矿微差爆破的机理及微差时间的选取[J].有色金属(矿山部分),2023,55(6):24-26.
Duan Haifeng, Hou Yunbing. The mechanism of millisecond blasting and the selection of millisecond delay time in open-pit mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,55(6):24-26.

[13] 刘雅弟.基于长九神山露天矿山深孔台阶爆破参数优化与应用研究[D].淮南:安徽理工大学,2023.
Liu Yadi. Research on parameter optimization and application of deep hole step blasting in Changjiu Shenshan open-pit mine[D]. Huainan:Anhui University of Science and Technology,2023.

[14] 陈超.含水炮孔边坡预裂爆破应用研究[D].唐山:河北理工学院,2001.
Chen Chao. Study of pre-splitting blasting application in water-bearing borehole slope[D]. Tangshan:Hebei University of Technology,2001.

[15] 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.
Zhao Ying, Yue Zhongwen, Xue Kejun, et al. GS-KCV-XGBoost open-pit metal mine blasting fragmentation prediction model based on feature selection[J]. Engineering Blasting,2024,30(6):168-177.

[16] 谢学斌,李德玄,孔令燕,等.基于 CRITIC-XGB 算法的岩爆倾向等级预测模型[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):1975-1982.
Xie Xuebin, Li Dexuan, Kong Lingyan, et al. Prediction model of rockburst tendency grade based on CRITIC-XGB algorithm[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(10):1975-1982.