基于岩体可爆性分级的精细化爆破技术研究①

刘滨[1], 朱兆文[1], 冯连伟[1], 鲁鑫[1], 陈鹏宇[1], 薛瑞敏[1], 任基[2], 彭康[2]
(1.山东黄金矿业股份有限公司新城金矿, 山东 莱州 261400; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 针对新城金矿采场爆破进尺不足、炸药单耗过高等问题,开展基于岩体可爆性分级的精细化爆破技术研究。通过分析岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数及岩石密度等指标,构建多参数融合的可爆性分级模型,提出修正的 BQ 指数公式,将岩体可爆性划分为 5 级。结果表明,新城金矿矿岩以Ⅲ级(中等可爆)和Ⅳ级(难爆)为主。基于分级结果,对中等可爆与难爆岩体分别进行爆破参数优化。工业试验表明,优化后采场进路炮孔利用率从 87.3%提升至 93.9%,超宽由 17.5%降至 1.25%,超高由 25.0%降至 3.3%,实现了光面爆破与围岩扰动精准控制。

关键词: 岩体可爆性; 可爆性分级; 精细化爆破; 相关性; 爆破参数; 超挖; 欠挖; BQ 指数; 炮孔利用率
中图分类号: TD235 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.006
文章编号: 0253-6099(2026)01-0037-07

Precision Blasting Technology Based on Classification of Rock Mass Blastability

LIU Bin[1], ZHU Zhaowen[1], FENG Lianwei[1], LU Xin[1], CHEN Pengyu[1], XUE Ruimin[1], REN Ji[2], PENG Kang[2]
(1.*Xincheng Gold Mine*, *Shandong Gold Mining Co.*, *Ltd.*, *Laizhou* 261400, *Shandong*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: Precision blasting technology was studied based on classification of rock mass blastability aiming at slow drift advance by blasting in stope and high unit consumption of explosive in Xincheng Gold Mine. By analyzing indices such as uniaxial compressive strength, rock mass integrity coefficient and rock density, a blastability classification model with multi-parameters was established, and the rock mass blastability was divided into 5 levels based on the proposed modified BQ index formula. It is found the ore rocks in Xincheng Gold Mine are mainly rated as level Ⅲ (intermediate) and level Ⅳ (difficulty) in terms of ore blastability, for which blasting parameters were then optimized respectively. Industrial experiments show that after optimization, the blasthole utilization rate for stope drifts was increased from 87.3% to 93.9%, and overbreak was reduced, including the over-width down from 17.5% to 1.25% and the over-height down from 25.0% to 3.3%. It is shown that smooth blasting and precise control of surrounding rock disturbance can be actualized.

Key words: rock mass blastability; blastability classification; precision blasting; correlation; blasting parameters; overbreak; underbreak; BQ index; blasthole utilization rate

在采矿、交通隧道及地下工程等领域,爆破效率与安全性是制约工程施工进度、成本与质量的关键因素[1]。岩体作为一种天然地质体,其非均质性[2]、各向异性[3-4]等特性,使得基于传统经验公式设计的爆破作业常面临爆破块度过大、根底残留、轮廓面超欠挖以及围岩损伤加剧等问题[5]。岩体可爆性分级作为评估与预测岩石爆破难易程度的核心理论,是实现精细化爆破设计的基础[6]。

近年来,随着数值模拟[7]、智能算法及多学科交叉方法的深入应用,精细化爆破技术研究取得了显著进展。国内外学者先后引入了基于实验数据的修正模型[8]、集对分析[9]、博弈论组合赋权[10]、神经网络优化[11]及三维激光扫描[12]等技术手段,致力于建立更准确的可爆性分级模型,并据此优化爆破参数。尽管

① **收稿日期**: 2025-08-12
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2907400)
作者简介: 刘滨(1979—),男,山东莱州人,高级工程师,从事金属矿山采矿技术研究及工程管理工作。E-mail:Liubin@sd-gold.com
通信作者: 任基(2001—),男,甘肃天水人,博士研究生,主要从事金属矿床地下开采理论与技术研究。E-mail:255501005@csu.edu.cn

研究成果丰硕,但现有研究仍存在一定局限性:一方面,影响矿岩可爆性的因素复杂多样,若评价指标选取不当或指标间存在多重相关性,会直接影响分级模型的准确性与可靠性[13-14];另一方面,当前部分方法未能充分剥离指标间的信息重叠,导致所建立的分级体系与实际情况存在偏差,造成爆破参数应用误差[15-16]。

针对复杂岩体条件下的爆破设计,本文采用相关性分析法对初选评价指标进行独立性检验,筛选出关键独立指标,构建一个多参数融合的矿岩可爆性分级模型。在此基础上,针对不同的可爆性等级,系统优化炮孔布置、装药结构及起爆网络等关键爆破参数,旨在形成一套能够自适应不同岩体条件的精细化爆破技术体系。

1 岩体可爆性分级

1.1 工程概况

新城金矿作为典型的深部硬岩矿,岩性主要为花岗岩,其矿体赋存条件复杂且岩性空间变异性显著,导致岩体可爆性存在明显差异。矿山采用传统经验公式或均质化假设进行爆破设计,不仅造成爆破能量利用率低下、破碎块度分布不达标,还可能诱发围岩损伤累积及边坡稳定性劣化等工程隐患;且深部开采环境中的高地应力条件进一步增大了爆破效果的可控难度。

因此,新城金矿急需开展基于岩体可爆性分级的精细化爆破技术研究,对采场爆破参数进行优化,提高爆破效率、降低爆破成本。通过现场调研、室内试验和岩石力学试验,并收集巷道掘进及采场回采过程中爆破单位体积岩体所消耗的炸药量(炸药单耗),得到了新城金矿现场试样参数,见表1。

表1 新城金矿现场试样参数

Table 1 Parameters of Xincheng Gold Mine specimen

试样编号	抗压强度/MPa	岩石密度/($g \cdot cm^{-3}$)	岩体完整性系数	炸药单耗/($kg \cdot m^{-3}$)
1	64.7	2.89	0.64	2.8
2	61.6	2.68	0.72	2.7
3	53.3	2.71	0.63	2.7
4	68.2	2.77	0.64	2.8
5	45.7	2.64	0.52	2.4
6	66.1	2.60	0.78	2.7
7	73.2	2.74	0.65	2.6

1.2 分级指标的确定

综合分析国内外岩体可爆性分级体系及其评价指标,发现大量学者选用岩石单轴抗压强度[17]、岩体完整性系数[18]及岩石密度[19]等参数表征岩石的可爆性。为量化各个指标的相关程度,基于新城金矿现场实测数据,采用相关分析法对岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数、岩石密度及炸药单耗4个指标之间的相关性进行系统分析,如表2所示。

表2 相关分析数据表

Table 2 Correlated analysis data

指标	试样						
	A_1	A_2	…	A_j	A_k	…	A_m
1	x_{11}	x_{12}	…	x_{1j}	x_{1k}	…	x_{1m}
2	x_{21}	x_{22}	…	x_{2j}	x_{2k}	…	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	x_{i1}	x_{i2}	…	x_{ij}	x_{ik}	…	x_{im}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	x_{n1}	x_{n2}	…	x_{nj}	x_{nk}	…	x_{nm}
平均	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	…	$\bar{x}_j$	$\bar{x}_k$	…	$\bar{x}_m$
标准差	S_1	S_2	…	S_j	S_k	…	S_m

采用相关系数表征各指标之间的相关性,相关系数的计算过程如下。

1)用x_{ij}表示第i个指标的第j个变量,$\bar{x}_j$和S_j分别表示第j个变量的平均值和标准差。计算各变量的平均值:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} x_j \tag{1}$$

2)计算各变量的方差:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \tag{2}$$

3)计算各变量的标准差:

$$S_j = \sqrt{S_j^2} \tag{3}$$

4)计算x_{ij}与x_{ik}两个变量的协方差:

$$S_{jk} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k) \tag{4}$$

5)计算相关系数r:

$$r_{jk} = \frac{S_{jk}}{S_j \cdot S_k} \tag{5}$$

式中$0 \le |r| \le 1$。$|r|$越靠近1,两者相关性越强;$|r|$越靠近0,两者相关性越弱。

对表1数据进行相关性分析,得到表3。从表3可以看出,炸药单耗与岩石单轴抗压强度、岩石密度、岩体完整性系数之间的$|r|$相差不大,表明岩石单轴抗压强度、岩石密度、岩体完整性系数对岩体可爆性的影响程度相当,且具有较好的独立性。相关系数均小于0.8,判断均未达到显著水平,说明3个指标之间不存在简单的线性关系,也从侧面反映了矿山仅采用普氏

系数进行岩体可爆性分级的局限性。

表 3　相关性分析

Table 3　Correlation analysis

指标	单轴抗压强度	岩石密度	岩石完整性系数	炸药单耗
单轴抗压强度	1			
岩石密度	0.36	1		
岩石完整性系数	0.60	−0.22	1	
炸药单耗	0.59	0.55	0.57	1

基于爆破工程特性及各指标相关性的综合分析,最终确定将岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数和岩石密度作为岩体可爆性分级的评价指标。综合考虑国家工程岩体可爆性标准[20]、东北大学可爆性分级标准[21]、长沙矿山研究院分级标准[22],最终采用 5 级分类方案,具体分级标准详见表 4,其推算的炸药单耗均适用于采场爆破及巷道掘进中。

表 4　地下工程岩体可爆性分级

Table 4　Blastability classification for underground rock mass

爆破性分级指数 BQ	爆破分级	爆破性	炸药单耗/(kg·m^{-3})
≤250	Ⅰ	极易爆	0.3~0.5
251~350	Ⅱ	易爆	0.5~1.3
351~450	Ⅲ	中等可爆	1.3~2.2
451~550	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
>550	Ⅴ	极难爆	3.0~3.5

1.3　复合指标的确定

基于爆破工程的特性要求,通过统计分析大量工程实测数据,对岩体基本质量指标 BQ 进行了针对性修正。结合表 1 与表 3,建立岩体可爆性分级标准,如表 5 所示。

表 5　岩体可爆性分级标准

Table 5　Blastability classification criteria for rock mass

试样编号	单轴抗压强度/MPa	岩石密度/(g·cm^{-3})	岩体完整性系数	分级指数 BQ
1	64.7	2.89	0.64	454.1
2	61.6	2.68	0.72	464.8
3	53.3	2.71	0.63	417.4
4	68.2	2.77	0.64	464.6
5	45.7	2.64	0.52	367.1
6	66.1	2.60	0.78	493.3
7	73.2	2.74	0.65	482.1

多元线性回归数学模型的矩阵表达式为:

$$\boldsymbol{Y} = \alpha\boldsymbol{X} + \boldsymbol{\beta} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{Y}$ 为 n 个已知观察值的响应值,表示表 5 中分级指标 BQ 数据,$\boldsymbol{Y}=[Y_1,Y_2,Y_3,\cdots,Y_7]=[454.1,464.8,417.4,\cdots,482.1]$;α 为待回归系数;$\boldsymbol{\beta}$ 为误差向量;$\boldsymbol{X}$ 为不同试样条件下多个参数指标的对应值,为表 5 中不同试样所对应的各指标值。

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} 1 & 64.7 & 2.89 & 0.64 \\ 1 & 61.6 & 2.68 & 0.72 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 73.2 & 2.74 & 0.65 \end{bmatrix}$$

由统计学理论知道,α 的最小二乘法估计为:

$$\alpha = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B} \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{A}^{-1}$为系数矩阵 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X}$ 的逆矩阵;$\boldsymbol{B}$ 为正规方程组的常数项矩阵。

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{X}'\boldsymbol{Y} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{A}^{-1} = \begin{bmatrix} SS_{X_1} & SS_{X_1X_2} & SS_{X_1X_3} \\ SS_{X_2X_1} & SS_{X_2} & SS_{X_2X_3} \\ SS_{X_3X_1} & SS_{X_3X_2} & SS_{X_3} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} SP_{X_1Y} \\ SP_{X_2Y} \\ SP_{X_3Y} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中:SS_X指矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的离均差平方和;SS_{XY}指矩阵 $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{Y}$ 的离均差乘积和。

通过对 α 进行求解,可知:

$\alpha=[-271.5 \quad 3.82 \quad 62.7 \quad 305.4]$。

BQ 修正后的计算公式为:

$$BQ_{(I)} = 3.82\sigma_c + 62.7K_v + 305.4\rho - 271.5 \tag{11}$$

式中:σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa;K_v 为岩体完整性系数;ρ 为岩石密度,g/cm^3。

对回归方程进行可靠性检验,检验的方法是:当 $BQ_{(I)}$满足式(12)时,说明其通过可靠性检验。

$$\frac{|BQ - BQ_{(I)}|}{BQ} < 5\% \tag{12}$$

将 7 种试样数据代入式(12),发现全部试样通过可靠性检验,检验结果为 100%,表明采用式(11)进行可爆性分级是可靠的。

1.4　新城金矿可爆性分级

在新城金矿进行现场取样,开展岩石力学试验,并对岩石的完整性及密度进行了调查和计算,调查数据如表 6 所示。

将表 6 数据代入式(11),对新城金矿矿岩可爆性进行分级,结果如表 7 所示。结果表明,新城金矿矿岩可爆性级别主要分为两类,大多为Ⅳ级,属于难爆矿

岩,预估爆破该区域所需炸药单耗为 2.2~3.0 kg/m^3;少部分为Ⅲ级,为中等可爆岩体,预估爆破该区域所需炸药单耗为 1.3~2.2 kg/m^3。

表 6 新城金矿调查区域可爆性调查数据

Table 6 Blastability classification for surveyed area of Xincheng Gold Mine

分段	岩石单轴抗压强度/MPa	岩石密度/(g·cm^{-3})	岩体完整性系数
038(Ⅰ)	75.57	2.70	0.55
038(Ⅰ)	77.86	2.75	0.65
038(Ⅰ)	49.29	2.71	0.53
038(Ⅰ)	56.03	2.70	0.64
067(Ⅴ)	87.68	2.65	0.71
067(Ⅴ)	47.53	2.68	0.63
065(Ⅴ)	85.52	2.71	0.57
074(Ⅴ)	78.87	2.72	0.45
089(Ⅴ)	64.80	2.81	0.60
089(Ⅴ)	65.43	2.75	0.62

表 7 新城金矿调查区域可爆性分级结果

Table 7 Blastability classification for rocks in surveyed area of Xincheng Gold Mine

分段	可爆性分级指数 $BQ_{(Ⅰ)}$	爆破分级	爆破性	预估炸药单耗/(kg·m^{-3})
038(Ⅰ)	458.2	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
038(Ⅰ)	500.1	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
038(Ⅰ)	366.3	Ⅲ	中等可爆	1.3~2.2
038(Ⅰ)	429.8	Ⅲ	中等可爆	1.3~2.2
067(Ⅴ)	544.2	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
067(Ⅴ)	383.5	Ⅲ	中等可爆	1.3~2.2
065(Ⅴ)	494.8	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
074(Ⅴ)	427.2	Ⅲ	中等可爆	1.3~2.2
089(Ⅴ)	454.5	Ⅳ	难爆	2.2~3.0
089(Ⅴ)	467.5	Ⅳ	难爆	2.2~3.0

2 精细化爆破技术研究

2.1 Ⅲ级岩体爆破参数设计

2.1.1 孔网参数

设计采用微楔形掏槽,可有效形成初始自由面。巷道断面规格为 4.0 m×4.0 m,掏槽孔布置和尺寸如图 1 所示,图中环形孔为掏槽孔Ⅰ,中间两个孔为掏槽孔Ⅱ。炮孔深度 2.5 m,中间掏槽孔超深 0.2 m。优化后的炮孔布置如图 2 所示。

Ⅲ级岩体设计辅助孔(Ⅲ号孔)孔间距 0.9~1.0 m、排间距 0.9~1.0 m,并根据具体施工情况进行适当调整;光爆孔(Ⅳ号孔和Ⅵ号孔)孔间距 0.55 m,光爆层厚度 0.7 m;底孔(Ⅴ号孔)孔间距 1 m,底眼距下部充填体 0.5 m,防止爆破对充填体造成损伤。

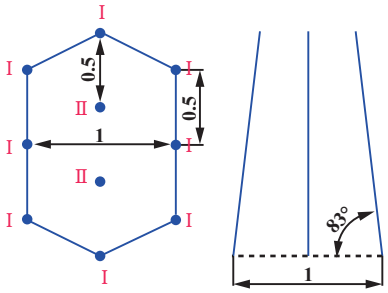


图 1 微楔形掏槽(单位:m)

Fig. 1 Micro-wedge cutting

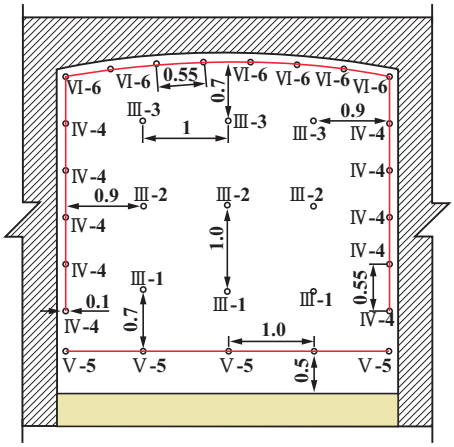


图 2 Ⅲ级岩体优化后的炮孔布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of holes for Ⅲ level rock mass

2.1.2 装药量

在常规光面爆破工程中,线装药密度参数通常设为 0.1~0.3 kg/m。鉴于本工程矿岩属于中等可爆性岩体,故线装药密度选取 0.3 kg/m。光爆孔爆破选用岩石膨化硝铵炸药,经计算确定单孔装药量为 0.75 kg,药卷 5 卷。辅助孔爆破采用乳化炸药,设定装药系数为 0.7,计算可得辅助孔单孔装药量为1.8 kg,药卷 6 卷。为了便于出渣作业,底孔采用乳化炸药,装药量与辅助孔一致,即单孔装药量为 1.8 kg,折合标准药卷 6 卷。Ⅲ级岩体区域爆破参数见表 8,合计乳化炸药总装药量 29.4 kg,膨化硝铵炸药总装药量 13.5 kg,总炮孔数 34 个,总雷管数 34 个,炸药单耗 1.07 kg/m^3,循环挖方量 40 m^3。

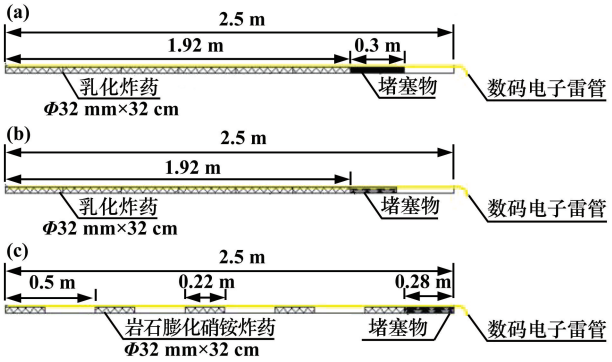
表 8 Ⅲ级岩体区域爆破参数

Table 8 Blasting parameters for Ⅲ-level rock mass

孔类	间距/m	孔深/m	单孔装药量/kg	炮孔数/个	总装药量/kg
掏槽孔	1.00	2.7	2.10	2	4.2
辅助孔	1.00	2.5	1.80	9	16.2
底孔	1.00	2.5	1.80	5	9.0
光爆孔	0.55	2.5	0.75	18	13.5

2.1.3　爆破工艺

Ⅲ级岩体爆破器材选型如下:2 号岩石乳化炸药(Φ32 mm×320 mm),单卷质量 0.3 kg;毫秒延期数码电子雷管;导爆索。光爆孔采用间隔装药,将药卷按设计间距固定于导爆索并绑扎在竹制传爆件上,采用正向起爆的起爆方式。其余炮孔均采用耦合连续装药,反向起爆。Ⅲ级岩体区域装药结构如图 3 所示。



(a) 辅助孔;(b) 底孔;(c) 光爆孔

图 3　Ⅲ级岩体区域装药结构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of blasting charge structure for Ⅲ-level rock mass

起爆顺序为掏槽孔→辅助孔→周边孔。具体起爆顺序如图 2 所示,其中数字 1~6 表示各炮孔的起爆顺序。全部炮孔完成装药后,孔口部位必须采用炮泥进行密实封堵。炮泥材料应选用细颗粒含量符合标准的黏土(或黄土)制备,含水率以手捏成形不散为宜。实施炮泥堵塞作业时,需采取有效措施确保爆破网络不受损坏。

2.2　Ⅳ级岩体区域爆破参数设计

2.2.1　孔网参数

巷道断面规格为 4.0 m×4.0 m,采用微楔形掏槽,确定掏槽孔Ⅰ采用倾斜布置,掏槽孔Ⅱ采用垂直布置,掏槽孔深度 2.7 m(超深 0.2 m)。辅助孔长 2.5 m,孔间距 0.55~0.65 m,排间距 0.5 m。光爆孔与底孔均采用垂直钻孔,深 2.5 m。为实现进路顶部及侧帮轮廓控制爆破的最佳效果,其中光爆孔孔间距设定为 0.5 m,最小抵抗线 0.55 m;底孔孔间距 0.55 m,排间距 0.6 m。为最大限度降低充填体扰动并控制尾砂混入导致的贫化问题,将底孔与充填体间距设定为 0.3 m,确保充填体得到有效保护。炮孔布置如图 4 所示。

2.2.2　装药量

Ⅳ级岩体区域光爆孔选取膨化硝铵炸药,线装药密度 0.3 kg/m,经计算确定单孔装药量为 0.75 kg,折合标准药卷 5 卷。

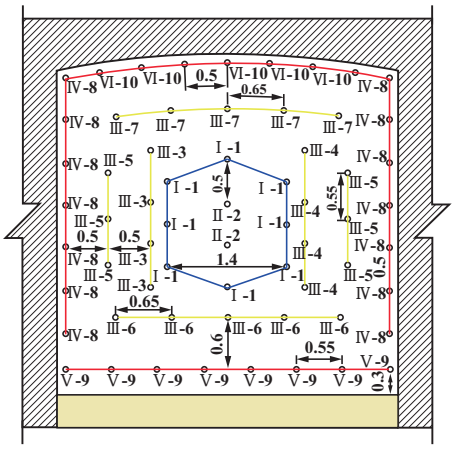


图 4　Ⅳ级岩体炮孔布置(单位:m)

Fig. 4　Layout of holes for Ⅳ-level rock mass

辅助孔爆破采用乳化炸药,设定装药系数 0.7,计算得出单孔装药量为 1.8 kg,相当于标准药卷 6 卷。底孔装药量与掏槽孔Ⅰ一致,采用乳化炸药,即单孔装药量 2.1 kg,折合标准药卷 7 卷。

掏槽孔Ⅰ采用乳化炸药,设定装药系数 0.9,经计算确定单孔装药量为 2.1 kg,相当于标准药卷 7 卷。掏槽孔Ⅱ采用乳化炸药,装药系数取 0.4,计算得出单孔装药量 0.9 kg,折合标准药卷 3 卷。

Ⅳ级岩体区域爆破参数见表 9。合计乳化炸药总装药量 78.6 kg,膨化硝铵炸药总装药量 15.75 kg,总炮孔数目 63 个,总雷管数目 63 个,炸药单耗 2.36 kg/m^3,循环挖方量 40 m^3。

表 9　Ⅳ级岩体区域爆破参数

Table 9　Blasting parameters for Ⅳ-grade rock mass

孔类	间距/m	孔深/m	单孔装药量/kg	炮孔数/个	总装药量/kg
掏槽孔Ⅰ	0.50	2.7	2.10	8	16.80
掏槽孔Ⅱ	0.50	2.5	0.90	2	1.80
光爆孔	0.50	2.5	0.75	21	15.75
辅助孔	0.65	2.5	1.80	24	43.20
底孔	0.55	2.5	2.10	8	16.80

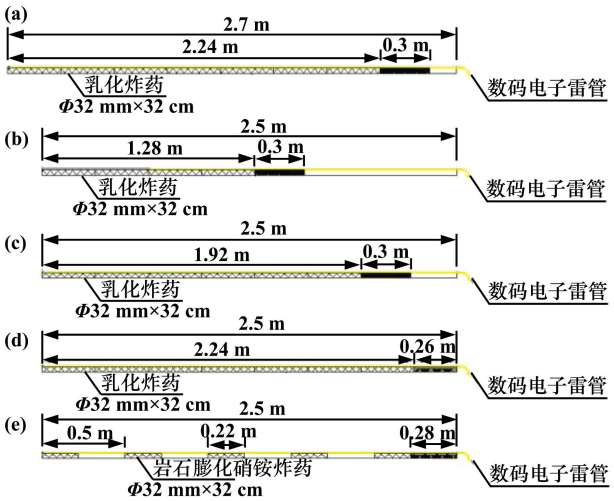
2.2.3　爆破工艺设计

Ⅳ级岩体区域爆破材料及爆破工艺与Ⅲ级岩体区域方案基本一致。Ⅳ级岩体区域装药结构如图 5 所示。

3　现场工业试验

3.1　采场原有爆破工艺

爆破试验地点选在上向进路采场,设计进路断面规格为 4.0 m ×4.0 m,基于提出的岩石可爆性分级新方法对该区域进行可爆性分级,发现该区域为难爆岩



(a) 掏槽孔Ⅰ;(b) 掏槽孔Ⅱ;(c) 光爆孔;(d) 辅助孔;(e) 底孔

图 5 Ⅳ级岩体区域装药结构示意

Fig. 5 chematic diagram of blasting charge structure for Ⅳ-level rock mass

体。采场底部为充填体,两侧为原岩。采用 CYTJ45B 型凿岩台车凿岩,孔深最大可达 2.7 m,炮孔直径 43 mm。采用膨化硝铵炸药,断面共布置 37 个炮孔,其中掏槽孔 9 个,采用间距不等的菱形掏槽,4 个掏槽孔为大直径空孔。进路回采实际炮孔布置如图 6 所示。采用数码电子雷管起爆网路,分 8 段起爆,总装药量为 46.95 kg。

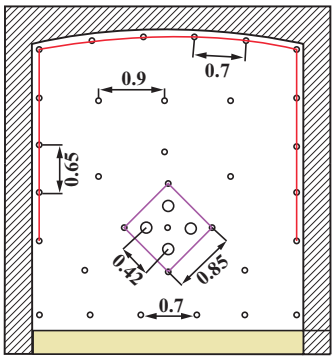


图 6 进路回采实际炮孔布置图(单位:m)

Fig. 6 Actual layout of holes for drift stoping

采场爆破后与设计相比,进路超宽 17.5%,超高 25.0%,超挖严重;爆破效率 87.3%,爆破效率较低,且光爆效果不明显。

3.2 优化后爆破试验结果

采用优化后的难爆区域爆破方案对采场进行爆破试验,爆破效果如图 7 所示。与设计相比,进路爆破后巷道超宽 1.25%,超高 3.3%,爆破效率 93.9%,炸药单耗为 2.36 kg/m^3。试验结果表明,优化后的方案大幅提高了爆破效率,有效降低了超挖,实现了光面控制爆破。



图 7 优化后爆破效果

Fig. 7 Optimized blasting effect

4 结论

1) 通过整合岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数和岩石密度 3 个关键指标,建立了修正的 BQ 可爆性分级模型。该模型将岩体划分为 5 个可爆性等级,并通过相关性分析验证了各指标的独立性。采用该模型对新城金矿岩体可爆性进行评价,发现新城金矿主要为中等可爆(Ⅲ级)和难爆(Ⅳ级)岩体。

2) 针对不同可爆性等级的岩体,提出了针对性的爆破参数优化方案。中等可爆(Ⅲ级)岩体采用宽孔距和低装药密度设计,炸药单耗降至 1.07 kg/m^3;难爆(Ⅳ级)岩体采用微楔形掏槽和密孔网设计,炸药单耗控制在2.36 kg/m^3。现场试验表明,优化后炮孔利用率提高至 93.9%,超宽、超高分别降至 1.25%、3.3%,保证了良好光面爆破效果的同时,显著提升了爆破效率和经济性。

参考文献(References):

[1] 李龙福,江东平,仪海豹,等. 地下矿山进路式采矿爆破参数优化研究及控制措施[J]. 中国矿业, 2023,32(5):118-123.
LI Longfu, JIANG Dongping, YI Haibao, et al. Study on optimization of blasting parameters and control measures for drift mining in underground mines[J]. China Mining Magazine, 2023,32(5):118-123.

[2] 王元民,由松江,马章印,等. 进路充填采场爆破损伤深度计算及爆破参数优化[J]. 现代矿业, 2023,39(3):55-60.
WANG Yuanmin, YOU Songjiang, MA Zhangyin, et al. Calculation of blast damage depth and optimization of blasting parameters in drift backfilled stopes[J]. Modern Mining, 2023,39(3):55-60.

[3] 侯胜心,马晶晶,唐虹靖,等. 基于随机森林算法的隧(巷)道光面爆破参数选择模型研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):34-37.
HOU Shengxin, MA Jingjing, TANG Hongjing, et al. Parameter selection model based on random forest algorithm for smooth blasting in tunnel(roadway) excavation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):34-37.

[4] 田宝华,张彪,余龙文,等. 水平缓倾岩层隧道爆破参数优化研

究[J]. 爆破, 2023,40(3):52-58.
TIAN Baohua, ZHANG Biao, YU Longwen, et al. Optimization of tunnel blasting parameters in horizontal layered sand-shale stratum[J]. Blasting, 2023,40(3):52-58.

[5] 王文军,李润然,纪旭波,等. 黑沟矿区露天开采矿岩可爆性分级研究[J]. 金属矿山, 2021(4):64-69.
WANG Wenjun, LI Runran, JI Xubo, et al. Blastability classification of open pit mining in Heigou mining area[J]. Metal Mine, 2021(4):64-69.

[6] 郑位,武旭阳. 某矿矿岩可爆性分级研究[J]. 云南冶金, 2023,52(1):36-40.
ZHENG Wei, WU Xuyang. Study on explosiveness classification of one ore-bearing rock[J]. Yunnan Metallurgy, 2023,52(1):36-40.

[7] 陈帮洪,陈星明,武尚荣,等. 基于 LS-DYNA 的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):47-53.
CHEN Banghong, CHEN Xingming, WU Shangrong,et al. Numerical simulation of blasting with wedge cut based on LS-DYNA software and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):47-53.

[8] 马建博,王仲琦,杨恩. 基于 KUZ-RAM 修正模型的矿山爆破精度评估研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(7):51-56.
MA Jianbo, WANG Zhongqi, YANG En. Research on mine blasting accuracy evaluation based on KUZ-RAM modified model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(7):51-56.

[9] 韩晓飞,余睿,郝江海,等. 核桃峪煤矿斜穿性断层硬岩深孔爆破参数研究[J]. 矿业研究与开发, 2023,43(3):70-76.
HAN Xiaofei, YU Rui, HAO Jianghai, et al. Study on parameters of deep hole blasting in hard rock of oblique penetrating fault in Hetaoyu coal mine[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3):70-76.

[10] 郭勇,阳富强. 基于博弈论组合赋权的硫化矿山炸药自爆危险性 GRA-TOPSIS 评价模型[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):13-17.
GUO Yong, YANG Fuqiang. Evaluation model of self-explosion risk of explosives in sulfide mines based on game theory and GRA-TOPSIS[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):13-17.

[11] 文兴,赵亮,朱青凌,等. 基于爆破漏斗试验的采场凿岩爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2021,41(7):28-31.
WEN Xing, ZHAO Liang, ZHU Qingling, et al. Optimization study on rock drilling blasting parameters based on blasting funnel test[J]. Mining Research and Development, 2021,41(7):28-31.

[12] 高峰,李新,罗增武,等. 爆破漏斗体积测量方法比较与应用研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):38-41.
GAO Feng, LI Xin, LUO Zengwu, et al. Comparison of different ways of volume measurement for explosion-produced crater[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):38-41.

[13] 卢磊芬,林杰,刘怀宇,等. 某矿二步骤爆破参数优化及空区边界控制技术[J]. 现代矿业, 2025,41(1):50-53.
LU Leifen, LIN Jie, LIU Huaiyu, et al. Two-step blasting parameter optimization and goaf boundary control technology in a mine[J]. Modern Mining, 2025,41(1):50-53.

[14] 李雷,窦鹏,王炳珊. 四方金矿掘进爆破参数的优化与实践[J]. 云南冶金, 2024,53(4):45-51.
LI Lei, DOU Peng, WANG Bingshan. Optimization and practice of tunneling blasting parameter of Sifang gold mine[J]. Yunnan Metallurgy, 2024,53(4):45-51.

[15] 刘淑鹏,李祥龙,简锡明,等. 基于损伤的光面爆破参数优化数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2023,32(11):116-125.
LIU Shupeng, LI Xianglong, JIAN Ximing, et al. Numerical simulation study on parameter optimization of smooth blasting based on damage[J]. China Mining Magazine, 2023,32(11):116-125.

[16] 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.
ZHANG Yifeng, LI Hongchao, ZHANG Zhiyu, 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.

[17] 魏可心,徐振洋,王雪松,等. 填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):16-21.
WEI Kexin, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Influence of stemming length on damage effect of rock blasting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):16-21.

[18] 楼晓明,唐志恒,牛明远,等. 深孔轴向多段间隔装药孔壁冲击压力分布[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):6-11.
LOU Xiaoming, TANG Zhiheng, NIU Mingyuan, et al. Distribution of impact pressure on hole wall in deep-hole blasting with multi-stage axial air deck[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):6-11.

[19] 闫祎然,徐振洋,刘鑫,等. 基于改进麻雀搜索算法的爆破参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):11-14.
YAN Yiran, XU Zhenyang, LIU Xin, et al. Optimization of blasting parameters based on improved sparrow search algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):11-14.

[20] 住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体分级标准:GB 50218—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard foe engineering classification of rock mass:GB 50218—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[21] 钮强,龙凌霄,王明林. 我国岩石爆破性分级的试验研究[J]. 金属矿山,1984(12):2-8.
NIU Qiang, LONG Lingxiao, WANG Minglin. Experimental study on the classification of rock blastability in China [J]. Metal Mines, 1984(12):2-8.

[22] 黄苹苹. 论岩体的可爆性[J]. 长沙矿山研究院季刊, 1989,11(4):58-62.
HUANG Pingping. On the blastability of rock masses[J].Changsha Mining Research Institute Quarterly, 1989,11(4):58-62.

引用本文:刘滨,朱兆文,冯连伟,等. 基于岩体可爆性分级的精细化爆破技术研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):37-43.
LIU Bin, ZHU Zhaowen, FENG Lianwei, et al. Precision blasting technology based on classification of rock mass blastability [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):37-43.