

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.015

磷矿地下爆破随钻参数与 岩体可爆性关系模型研究*

盛益明¹, 柴修伟¹, 常志锋², 刘建², 李治全², 向彬²

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 武汉 430073; 2. 湖北宜化集团有限责任公司, 宜昌 443099)

摘要: 岩体可爆性分级是确定劳动定额、爆破方案设计和控制炸药单耗的先决条件。为实现岩体可爆性的实时分级, 针对宜昌磷矿目前采用的钻爆法施工, 以宜昌树岭坪磷矿作为研究背景, 基于 KJ212-1 型全液压掘进钻车, 开展了对树岭坪磷矿 Ph_1^3 矿体及巷道掘进过程中的含碳泥质白云岩原位随钻参数的测量。结合室内单轴抗压强度试验, 建立了单轴抗压强度 R_c 与钻进速度 V 、钻孔孔径 D 和回转压力 M 的关系模型, 并对关系模型进行了验证。最后, 将该模型代入坚固性系数 f 关系式中, 得出爆破钻孔随钻参数与岩体可爆性分级关系模型。研究表明: 通过该关系模型计算得出的单轴抗压强度与室内单轴压缩试验结果平均差异率为 5.5%, 说明其应用于实时预测岩体可爆性的合理性, 该模型为岩体可爆性实时分级预测提供了一种更为方便、快捷的方法。岩体可爆性分级结果为白云质条带磷块岩、泥质条带磷块岩和致密条带磷块岩为中等可爆, 含碳泥质白云岩为难爆, 分级结果可为爆破技术参数选择提供重要依据。

关键词: 钻探参数; 随钻测量; 岩体可爆性; 实时分级; 线性拟合

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)02-0120-07

Modelling of Relationship between Drilling Parameters of Underground Blasting with Rock Blastability in Phosphate Mines

SHENG Yi-ming¹, CHAI Xiu-wei¹, CHANG Zhi-feng², LIU Jian², LI Zhi-quan², XIANG Bin²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;
2. Hubei Yihua Group Limited Liability Company, Yichang 443099, China)

Abstract: Rock blastability classification is a prerequisite for determining labour quotas, designing blasting programmes and controlling the unit consumption of explosives. In order to realize a real-time grading of rock explosibility, a measurement of in-situ drilling parameters of carbon-bearing muddy dolomite during the excavation process of Ph_1^3 ore body and roadway in the Shukongping phosphorus mine has been carried out based on the KJ212-1 full-hydraulic boring drilling truck. Combined with the indoor uniaxial compressive strength test, the relationship model between the uniaxial compressive strength R_c and the drilling speed V , the drilling hole diameter D and the rotary pressure M was respectively established and verified. Finally, the model is substituted into the solidity coefficient f relationship equation to derive a model for the relationship between the blasthole drill-following parameters and the rock blastability classification. The results of the study show that the average rate of difference between the uniaxial com-

收稿日期 (Date of reception): 2023-09-30

网络首发日期 (Published online): 2024-01-05

作者简介: 盛益明 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为爆破安全技术, (E-mail) sym15212897167@163.com。

通讯作者: 柴修伟 (1980-), 男, 博士、教授、硕士研究生导师, 从事爆破理论与技术、岩土工程与安全监测技术研究, (E-mail) xwchai@wit.edu.cn。

基金项目: 2021 年湖北省安全生产专项资金科技项目 (SJZX20211004)

About the author: SHENG Yi-ming (1999-), male, master's degree, main research direction is blasting safety technology, (E-mail) sym15212897167@163.com.

Corresponding author: CHAI Xiu-wei (1980-), male, Ph. D, professor, master's degree supervisor, engaged in blasting theory and technology, geotechnical engineering and safety monitoring technology research, (E-mail) xwchai@wit.edu.cn.

Fund Programs: 2021 Hubei Province Safety Production Special Fund Science and Technology Project (SJZX20211004)

pressive strength calculated by the relational model and the results of the indoor uniaxial compression tests is 5.5%, which demonstrates the reasonableness of applying the model to the real-time prediction of rock blastability. This model provides a more convenient and fast method for real-time grading prediction of rock blastability. The results show that the dolomitic banded phosphorite, mud banded phosphorite and dense banded phosphorite are medium explosive, carbon-bearing mud dolomite is difficult to explode.

Key words: drilling parameters; measurement while drilling; rock blastability; real-time grading; linear fit

采用爆破方法使岩体发生破裂和损坏的难易程度称为岩体可爆性^[1]。在爆破前对岩体可爆性进行分级,是实现钻爆智能化^[2]、无人化远程操控的基础条件^[3],结合大数据技术和先进传感传输设备,进一步研究适应智慧矿山系统的矿岩体可爆性实时分级是极其迫切的。岩体可爆性分级方法主要分为单一指标法和多指标法两大类^[4],其中单一指标法主要有普氏系数法和可爆性指数法等^[5,6],多指标法主要有数学方法与人工智能算法等^[7,8]。但由于地下工程中岩体物理力学性质变化复杂,采用上述两类方法均无法实现矿岩体可爆性的实时分级,严重影响工程进度,而随钻测量技术很好的解决了这一问题。

随钻测量是一种通过解译钻机推力、扭矩、转速、钻速等随钻参数变化,评价岩体结构特征和力学性质的原位测量技术^[9],可以利用钻孔过程中的随钻参数表征围岩体力学性质,弥补传统测量方法在时间上的滞后性。王琦、江贝等利用能量守恒定律^[10,11],得出岩石单位切削能与随钻参数的关系式,建立了岩石单轴抗压强度与岩石单位切削能关系模型。KAHRMAN等建立了钻进速率与抗压强度及抗拉强度的关系式^[12],YANG等建立了转速、扭矩、推力、钻速、摩擦力与竖直线的夹角、钻头半径、刀具倾角及切削力倾角与岩石单轴抗压强度的关系^[13]。王玉杰等利用自主研发的数字钻进测试系统^[14],建立了岩石数字钻进参数与单轴抗压强度的关系方程。

众多学者已经在随钻参数与力学性质参数关系的研究中取得了一定的成就,证明了通过监测分析随钻参数来反演岩石的力学性质变化是可行的。以湖北宜昌树崆坪磷矿为工程背景,对 KJ212-1 型全液压掘进钻车凿岩时的钻进参数收集,通过软件进行线性拟合,建立了钻机回转压力 M 、钻进速度 V 、孔径 D 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程,将该关系方程代入坚固性系数 f 关系式中,根据普氏分级方法得到岩体的可爆性等级。

1 爆破钻孔试验

1.1 爆破钻孔试验设备

试验采用 KJ212-1 型全液压掘进钻车为树崆坪磷

矿广泛使用的凿岩台车,该钻机适用于采矿和隧道掘进,可用于 35 m² 断面的硬岩掘进作业,如图 1 所示。

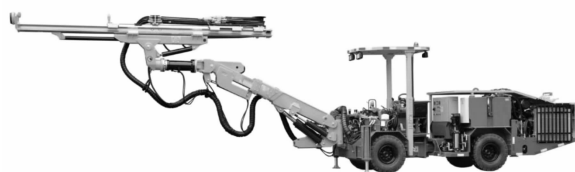


图 1 KJ212-1 型全液压掘进钻车

Fig. 1 KJ 212-1 type full hydraulic tunneling drilling vehicle

掘进钻车主要包括风水路系统、钻进系统及电动液压泵站三部分,其中最大冲击功率 13 kW,最大冲击压力 130 bar,最大回转压力 150 bar,最大扭矩 325 N·m。钻进系统可对冲击压力及推进压力进行调节与控制,回转压力等参数均由传感器监控。本次试验选用凿岩较为常用的 45 mm 及 76 mm 直径钎头具有钝化缓慢等优点,因此可不考虑钎头磨损造成的随钻参数变化。

单轴压缩试验采用电脑控制电液伺服万能试验机上加荷载作用下测得的结果,如图 2 所示,按照国际岩石力学学会试验规范 ISRM 开展岩石单轴抗压强度测试^[15]。

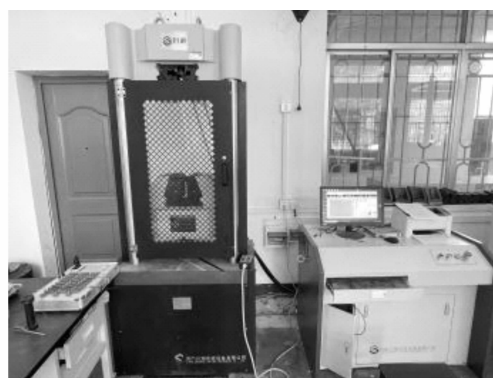


图 2 电脑控制电液伺服万能试验机

Fig. 2 Computer-controlled electro-hydraulic servo-universal test machine

1.2 掘进爆破试验方案

本次试验采用湖北宜昌树崆坪磷矿 Ph_1^3 矿体及含碳泥质白云岩, Ph_1^3 矿体整体上具有三分结构,从

上至下为上贫矿、中富矿和下贫矿。上贫矿位于矿层顶部,以白云质条带磷块岩为主;中富矿位于矿层中上部,以致密条带磷块岩为主;下贫矿位于矿层下部,主要为泥质条带磷块岩。

试验采用 45 mm 及 76 mm 钻头,对每类岩石进行 5 次钻进试验,记录钻进速度及回转压力,保持冲击压力及推进压力固定在 13 MPa 和 7 MPa,并对矿岩体进行取样,制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体。

2 钻探试验结果与分析

2.1 试验结果取值

试验采用控制冲击压力和推进压力,监测钻进速度 V 和回转压力 M ,以两组不同类型岩石中的其中一组钻探试验绘制回转压力与时间关系曲线,如图 3、图 4 所示。

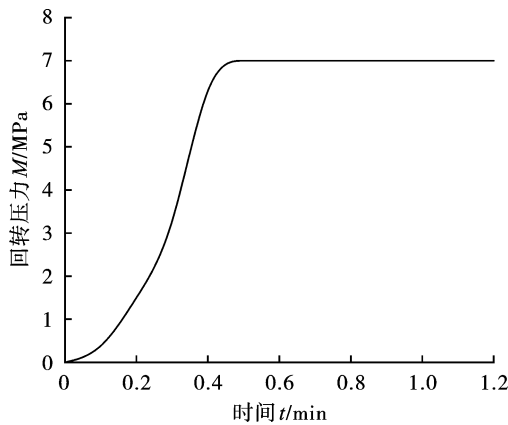


图 3 方案 S_1 回转压力随时间变化曲线

Fig. 3 Swing pressure curve over time of scheme S_1

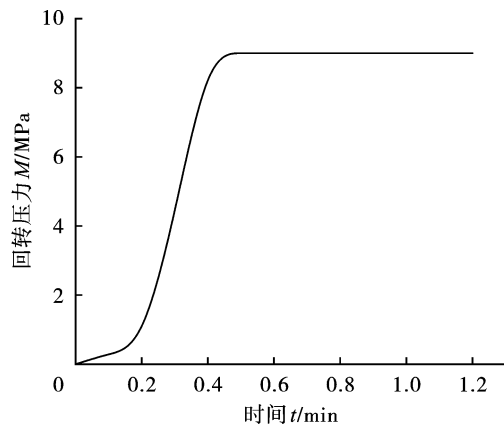


图 4 方案 S_6 回转压力随时间变化曲线

Fig. 4 Swing pressure curve over time of scheme S_6

从图 3、图 4 可以看出,回转压力 M 随时间变化规律主要分为 2 个阶段:①在钻头进入岩体较浅时,

钻机回转压力较小,但在短时间内会急剧上升,此段为上升阶段;②随着钻进深度的增加,回转压力进入稳定阶段,并不随着钻进深度的增加而发生变化。

通过试验,完成对回转压力 M 、冲击压力、推进压力、钻进速度 V 和孔径 D 等随钻参数的测量,回转压力选择稳定阶段的测量值。

2.2 钻探及室内试验结果

根据上述试验方案对现场展开系统性试验,得到各类岩石的随钻参数回转压力 M 、钻进速度 V 、孔径 D ,具体实验结果见表 1。

3 模型建立及分析

3.1 模型建立

基于钻探试验结果,结合室内单轴抗压试验得出的各试件单轴抗压强度 R_c ,首先建立钻进速度 V 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程,以钻进速度 V 为自变量,岩石单轴抗压强度 R_c 为因变量,绘制 V 与 R_c 散点图,并进行线性拟合,如图 5 所示。

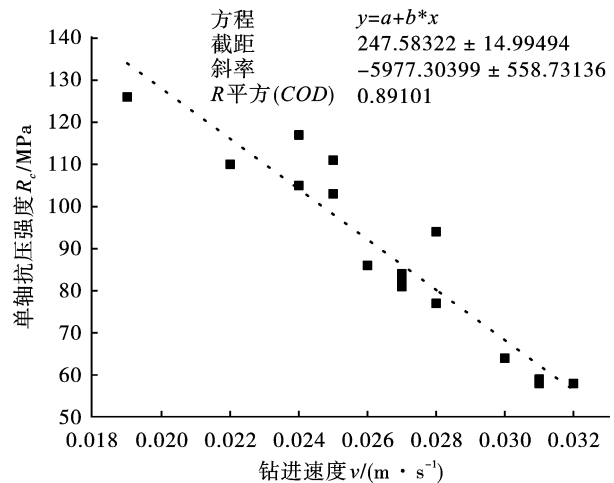


图 5 钻进速度 V 与岩石单轴抗压强度 R_c 关系分析

Fig. 5 Analysis of the relationship between drilling speed V and rock uniaxial compressive strength R_c

由图 5 分析可知,钻进速度 V 与单轴抗压强度 R_c 之间存在线性关系, R_c 整体呈现为随 V 增大而减小的趋势,关系式为

$$R_c = -5977.30399V + 247.58322 \quad (1)$$

但拟合度 $R^2 = 0.89101$,拟合度不佳,而钻进速度与钻孔孔径及回转压力密切相关,因此将钻进速度、钻孔孔径和回转压力与岩石单轴抗压强度进行多元线性拟合,建立了单轴抗压强度 R_c 与钻进速度 V 、钻孔孔径 D 和回转压力 M 的关系模型

$$R_c = 212.68985 + 0.69392M - 5796.42804V + 0.47542D \quad (2)$$

表 1 钻探试验及室内试验结果
Table 1 Drilling test and indoor test results

试件类型	编号	回转压力 M/MPa	冲击压力/ MPa	推进压力/ MPa	钻进速度 V / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	孔径 D / mm	抗压强度 R_c/MPa
白云质条带 磷块岩	S_1	7.0	13	7	0.031	45	58
	S_2	8.0	13	7	0.031	45	59
	S_3	12.0	13	7	0.032	45	58
	S_4	10.0	13	7	0.028	76	94
	S_5	9.0	13	7	0.036	76	51
致密条带 磷块岩	S_6	8.0	13	7	0.027	45	82
	S_7	10.0	13	7	0.027	45	84
	S_8	11.0	13	7	0.024	76	117
	S_9	10.5	13	7	0.025	76	111
	S_{10}	10.0	13	7	0.030	76	85
泥质条带 磷块岩	S_{11}	8.5	13	7	0.028	45	77
	S_{12}	7.0	13	7	0.030	45	64
	S_{13}	7.5	13	7	0.027	45	81
	S_{14}	7.0	13	7	0.026	45	86
	S_{15}	9.0	13	7	0.035	45	40
含碳泥质 白云岩	S_{16}	8.0	13	7	0.022	45	110
	S_{17}	7.5	13	7	0.019	45	126
	S_{18}	7.0	13	7	0.024	45	105
	S_{19}	7.5	13	7	0.025	45	103
	S_{20}	8.0	13	7	0.021	45	115

预测值与实际值误差如图 6 所示。

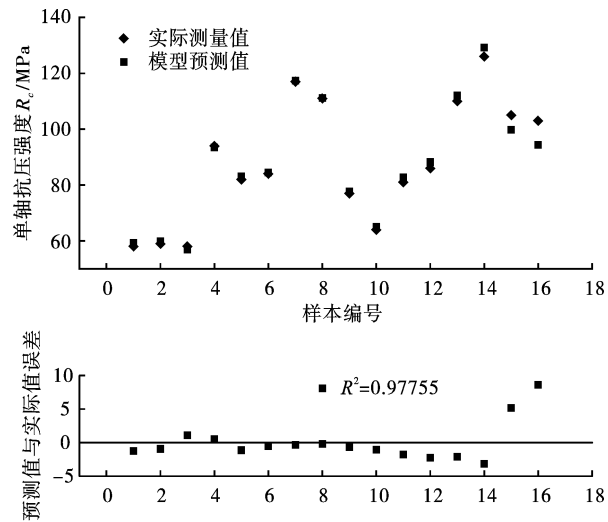


图 6 预测值与实际值误差
Fig. 6 Error of predicted and actual values

将钻进速度 V 、钻孔孔径 D 和回转压力 M 与岩石单轴抗压强度进行多元线性拟合,拟合度 $R^2 = 0.97755$,数据离散性较低,表明拟合度较好,且与钻进速度 V 与单轴抗压强度 R_c 线性拟合相比,拟合度更好。

3.2 模型验证分析

选出 S_5 、 S_{10} 、 S_{15} 、 S_{20} 四组试件对公式 2 的关系模型进行验证,计算结果与实际测量值对比见表 2。

为定量评价该模型预测结果与常规单轴抗压强度试验测定结果之间的差异^[10],定义 R'_c 与 R_c 之间的差异率 γ

$$\gamma = \left| \frac{R'_c - R_c}{R_c} \right| \times 100\%$$

(3)

式中: R'_c 为计算得到的模型预测值; R_c 为通过室内单轴压缩试验获得的试验值,绘制单轴抗压强度预测值与试验值对比如图 7 所示。

由图 7 可知: R'_c 与 R_c 之间的差异率较小,所选取的 4 组验证方案差异率均在 10% 以内,且平均值为 $\bar{\gamma} = 5.5\%$,证明该模型较为合理。

4 矿岩体可爆性分级

根据苏联学者 M M 普罗托季雅科诺夫曾提出了岩石按坚固性系数 f 进行岩体可爆性分级^[16]

$$f = \frac{R_c}{10}$$

(4)

式中: R_c 为岩石试块的静载极限抗压强度,MPa。将公式(2)代入公式(4)中,得到矿岩体可爆

性分级模型

$$f = \frac{212.68985 + 0.69392M - 5796.42804V + 0.47542D}{10} \quad (5)$$

f 值越大,则表明岩体越难爆,岩体可爆性分级表如表 3 所示。

表 2 预测值与实际值对比表
Table 2 Table of predicted values and actual values

试件类型	编号	回转压力 M/MPa	钻进速度 $V/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	孔径 $D/$ mm	预测抗压强度 R'_c/MPa	抗压强度 R_c/MPa
白云质条带磷块岩	S_5	9	0.036	76	46.40	51
致密条带磷块岩	S_{10}	10	0.030	76	81.87	85
泥质条带磷块岩	S_{15}	9	0.035	45	37.45	40
含碳泥质白云岩	S_{20}	8	0.021	45	117.91	115

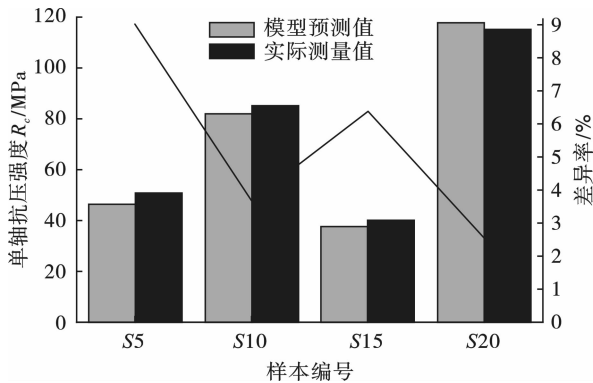


图 7 单轴抗压强度预测值与试验值对比图
Fig. 7 Comparison of predicted and tested uniaxial compressive strength values

表 3 岩体可爆性分级表^[17]
Table 3 The classification table of rock blastability

坚固性系数 f	可爆性级别	典型类别
≤ 2.5	极易爆	I
$2.5 < f \leq 6$	易爆	II
$6 < f \leq 10$	中等可爆	III
$10 < f \leq 18$	难爆	IV
> 18	极难爆	V

根据普氏分级方法,结合钻探试验所得到的岩石单轴抗压强度可完成矿岩体可爆性的实时分级,结论如表 4 所示。

表 4 岩石可爆性分级结果
Table 4 Classification results of rock blastability

试件类型	样本编号	实测抗压强度 R_c/MPa	预测抗压强度 R'_c/MPa	平均单轴抗压强度 $\overline{R_c}/\text{MPa}$	岩体可爆性 分级
白云质条带磷块岩	S_1	58	59.25	63.198	III
	S_2	59	59.95		
	S_3	58	56.93		
	S_4	94	93.46		
	S_5	51	46.40		
致密条带磷块岩	S_6	82	83.13	95.612	III
	S_7	84	84.52		
	S_8	117	117.34		
	S_9	111	111.20		
	S_{10}	85	81.87		
泥质条带磷块岩	S_{11}	77	77.68	70.230	III
	S_{12}	64	65.05		
	S_{13}	81	82.78		
	S_{14}	86	88.23		
	S_{15}	40	37.41		
含碳泥质白云岩	S_{16}	110	112.11	110.678	IV
	S_{17}	126	129.16		
	S_{18}	105	99.83		
	S_{19}	103	94.38		
	S_{20}	115	117.91		

根据表4得出的矿岩体可爆性分级结果表明白云质条带磷块岩、泥质条带磷块岩和致密条带磷块岩为中等可爆,含碳泥质白云岩为难爆。岩体可爆性普氏分级方法虽考虑因素不全面,但简单快捷,且结合随钻参数,可实现矿岩体可爆性的实时分级。

5 结论

(1)以湖北宜昌树崮坪磷矿作为研究背景,基于KJ212-1型全液压掘进钻车,开展了对树崮坪磷矿 Ph_1^3 矿体及巷道掘进过程中的含碳泥质白云岩原位随钻参数的测量,并结合室内试验,发现岩石单轴抗压强度 R_c 与钻进速度 V 成反比,但采用线性拟合效果不佳,因此选择建立单轴抗压强度 R_c 与钻进速度 V 、钻孔孔径 D 和回转压力 M 的关系模型。

(2)选取其中四组数据对建立的模型进行验证,通过该关系模型计算得出的单轴抗压强度与室内单轴压缩试验结果平均差异率为5.5%,说明该模型应用于预测单轴抗压强度是合理的。将建立的随钻参数与单轴抗压强度的关系模型代入坚固性系数 f 公式中,得到了矿岩体可爆性分级模型,矿岩体可爆性分级结果为白云质条带磷块岩、泥质条带磷块岩和致密条带磷块岩为中等可爆,含碳泥质白云岩为难爆。

(3)通过计算爆破钻孔过程中的随钻参数,可实现岩石单轴抗压强度的实时测量,在后续的研究中,随钻参数还可用来揭示抗拉强度、弹性模量、泊松比等其他力学性质,为方便、快捷、准确获得矿岩体可爆性等级提供了新的途径。

参考文献 (References)

- [1] 白玉奇,李振阳,李传增,等. 基于CRITIC-Vague模型的岩体可爆性评价[J]. 金属矿山,2020(12):27-32.
- [1] BAI Yv-qi, LI Zhen-yang, LI Chuan-zeng, et al. Assessment for rock mass blastability based on CRITIC-Vague model[J]. Metal Mine, 2020(12):27-32. (in Chinese)
- [2] 陆 锋,诸云强,张雪英. 时空知识图谱研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报,2023,25(6):1091-1105.
- [2] LU Feng, ZHU Yun-qiang, ZHANG Xue-ying. Spatiotemporal knowledge graph: Advances and perspectives[J]. Journal of Geo-information Science, 2023, 25(6):1091-1105. (in Chinese)
- [3] 李国锴,罗 超. 5G+全面赋能智慧矿山[J]. 中国工业和信息化,2023(3):24-29.
- [3] LI Guo-kai, LUO Chao. 5G + fully enables smart mines [J]. China's Industry and Information Technology, 2023(3):24-29. (in Chinese)
- [4] 丁小华,原文杰,解 祯,等. 基于综合赋权云模型的露天矿岩体可爆性分级识别[J]. 煤炭科学技术,2019,47(10):96-101.
- [4] DING Xiao-hua, YUAN Wen-jie, XIE Zhen, et al. Classification and identification of rock blastability in open-pit mine based on comprehensive weighted cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10):96-101. (in Chinese)
- [5] 史涵虚,周传波,蒋 楠,等. 魏家崮煤矿区深孔台阶剥离爆破施工岩体可爆性分析[J]. 爆破,2023,40(1):37-44.
- [5] SHI Han-xu, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan, et al. Analysis on rock mass explosibility during deep-hole bench stripping by blasting in weijiamao coal mine area[J]. Blasting, 2023, 40(1):37-44. (in Chinese)
- [6] 尚俊龙,胡建华,莫荣世,等. 可爆性分级的博弈论物元可拓预测模型及其应用[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1):86-92.
- [6] SHANG Jun-long, HU Jian-hua, MO Rong-shi, et al. Prediction model of game theory-matter-element extension for blastability classification and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1):86-92. (in Chinese)
- [7] 龚 剑. 岩体基本质量与可爆性分级[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [7] GONG Jian. Rock mass basic quality and blastability [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 赵国彦,龚梦龙,梁伟章,等. 岩体可爆性分级的PSM-CM方法[J]. 矿冶工程,2016,36(3):21-25.
- [8] ZHAO Guo-yan, GONG Meng-long, LIANG Wei-zhang, et al. Rock mass blastability classification using the combination of PSM and CM[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(3):21-25. (in Chinese)
- [9] 于庆磊,王宇恒,李 友,等. 基于随钻测量的岩体结构与力学参数表征研究进展[J]. 金属矿山,2023(5):45-58.
- [9] YV Qing-lei, WANG Yu-heng, LI You, et al. Research progress of rock mass structure and mechanical parameter characterization based on measurement while drilling technology[J]. Metal Mine, 2023(5):45-58. (in Chinese)
- [10] 王 琦,秦 乾,高 松,等. 数字钻探随钻参数与岩石单轴抗压强度关系[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1289-1295.
- [10] WANG Qi, QIN Qian, GAO Song, et al. Relationship between rock drilling parameters and rock uniaxial com-

- pressive strength based on energy analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1289-1295. (in Chinese)
- [11] 江 贝, 马凤林, 王 琦, 等. 基于切削理论的数字钻探参数与岩石单轴抗压强度关系研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1601-1609.
- [11] JIANG Bei, MA Feng-lin, WANG Qi, et al. Research of relationship between digital drilling parameters and rock uniaxial compressive strength based on cutting theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5): 1601-1609. (in Chinese)
- [12] KAHRAMAN S, BILGIN N, FERIDUNOGLU C. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 711-723.
- [13] YANG J, QIN Q, JIANG B, et al. Study on a digital drilling test-based rock uniaxial compressive strength measurement method [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(4): 1-8.
- [14] 王玉杰, 余 磊, 赵宇飞, 等. 基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1669-1678.
- [14] WANG Yu-jie, SHE Lei, ZHAO Yu-fei, et al. Experimental study on measurement of rock strength parameters based on digital drilling technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1669-1678. (in Chinese)
- [15] ISRM. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(1): 135-140.
- [16] 李雪峰. 深部煤岩截割理论与实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [16] LI Xue-feng. Theoretical and experimental study on rock cutting in deep mining [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 丁小华. 露天矿安全高效爆破智能化动态设计系统的研究与应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [17] DING Xiao-hua. Research and application of intelligent dynamic design for surface mine safety and efficient blasting [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)

(上接第 85 页)

- [18] LOW HY, HAO H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading [J]. Structural Safety, 2001, 23: 157-178.
- [19] 肖云亮, 韩 斌. 金川龙首矿下向进路充填采矿的进路稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 36-40.
- [19] XIAO Yun-liang, HAN Bin. Analysis on the drift stability of downward drift filling mining in Longshou mine [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(8): 36-40. (in Chinese)
- [20] 应金荣, 龙卫国, 王 瑛, 等. 化学外加剂对龙首矿充填料浆配合比优化的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(11): 33-38.
- [20] YING Jin-rong, LONG Wei-guo, WANG Ying, et al. Study on the effect of chemical admixtures on the optimization of the filling slurry proportion in Longshou mine [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(11): 33-38. (in Chinese)
- [21] BAUER A, CALDER P N. Open pit and blast seminar [R]. Kingston, Ontario, Canada: Department of Mining Engineering, Queens University, 1978.
- [22] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 利用 FLAC~(3D) 分析某边坡地震稳定性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004(16): 2730-2733.
- [22] LIU Chun-ling, QI Sheng-wen, TONG Li-qiang, et al. Stability analysis of slope under earthquake with FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(16): 2730-2733. (in Chinese)
- [23] BAUER A, CALDER P N. Open pit and blast seminar [R]. Kingston, Ontario, Canada: Department of Mining Engineering, Queens University, 1978.
- [24] MOJITABAI N, BEATTI S G. Empirical approach to prediction of damage in bench blasting [J]. Trans Inst Min and Metall Sect A, 1996, 105(1): 75-80.