

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.015

基于炮孔钻进参数的水下岩石单轴抗压强度估算与 炸药单耗预测*

李红旗¹, 肖山¹, 盛益明², 吕韵鹏¹, 周元果¹, 王家飞¹, 谭啸谨², 吴立², 余山¹

(1. 长江重庆航道工程局, 重庆 400011; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为解决水下钻孔爆破炸药单耗的实时调整问题, 提出了一种基于炮孔钻进参数的岩石单轴抗压强度估算与炸药单耗预测方法。以钻进压力 F 、回转压力 N 和钻进速度 V 作为炮孔钻进参数, 与岩石单轴抗压强度进行线性拟合, 得到了关系方程。根据炸药单耗与岩石坚固性系数对应表, 并结合修正系数, 得到相同水深条件下, 砂岩和页岩的炸药单耗相同, 在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时, 炸药单耗分别为 0.65 ~ 1.00、0.88 ~ 1.36、0.93 ~ 1.43 和 0.94 ~ 1.45 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 粉砂岩和泥岩的炸药单耗相同, 在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时, 炸药单耗分别为 0.25 ~ 0.65、0.34 ~ 0.88、0.36 ~ 0.93 和 0.36 ~ 0.94 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。提出的实时调整方法能够实现炸药单耗的动态调整, 可供水下钻孔爆破降低炸药单耗及优化爆破设计参考。

关键词: 水下钻孔爆破; 炮孔钻进参数; 单轴抗压强度; 炸药单耗

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0133-07

Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Underwater Rock and Prediction of Powder Factor Using Blast Hole Drilling Parameters

LI Hong-qi¹, XIAO Shan¹, SHENG Yi-ming², LV Yun-peng¹,
ZHOU Yuan-guo¹, WANG Jia-fei¹, TAN Xiao-jin², WU Li², YU Shan¹

(1. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400011, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the challenge of real-time adjustment for unit explosive consumption in underwater drilling and blasting operations, this study proposes a predictive approach for estimating the uniaxial compressive strength (UCS) of rock and determining the optimal explosive unit consumption based on borehole drilling parameters. Utilizing drilling pressure (F), rotational pressure (N), and drilling rate (V) as principal borehole drilling parameters, a linear regression analysis was performed to derive a predictive equation correlating these variables with the rock's UCS. Based on the correspondence between explosive unit consumption and rock firmness coefficient, and incorporating depth correction factors, the analysis reveals consistent consumption patterns under identical water depth conditions. For sandstone and shale formations, explosive consumption remains consistent across different depths; 0.65 ~

收稿日期 (Date of reception): 2025-01-06

网络首发日期 (Published online): 2025-06-15

作者简介: 李红旗 (1972-), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要从事水下钻孔爆破施工与管理, (E-mail) vdpai@163.com。

通信作者: 吴立 (1963-), 男, 湖南株洲人, 教授、博士生导师, 主要从事爆破与岩石动力学方面的教学和科研工作, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (41672260)

About the author: LI Hong-qi (1972-), male, born in Chongqing city, senior engineer, mainly engaged in underwater drilling blasting construction and management, (E-mail) vdpai@163.com.

Corresponding author: WU Li (1963-), male, born in Zhuzhou city, Hunan province, professor, Ph. D, supervisor, primarily engaged in teaching and research on blasting and rock dynamics, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (41672260)

1.00 kg/m at 0 meters, 0.88 ~ 1.36 kg/m at 10 m, 0.93 ~ 1.43 kg/m at 20 m, and 0.94 ~ 1.45 kg/m at 50 m. Similarly, siltstone and mudstone exhibit identical consumption rates: 0.25 ~ 0.65 kg/m at 0 m, 0.34 ~ 0.88 kg/m at 10 m, 0.36 ~ 0.93 kg/m at 20 m, and 0.36 ~ 0.94 kg/m at 50 m. The proposed real-time adjustment method facilitates dynamic optimization of explosive specific charge, offering practical guidance for minimizing explosive consumption and enhancing blast efficiency in underwater drilling and blasting operations.

Key words: underwater rock drilling and blasting; drilling parameters; uniaxial compressive strength; powder factor

单轴抗压强度在工程实践中常被用来体现岩体的整体强度特性,其准确获取对于岩体可燃性分级和炸药单耗调整具有重要意义^[1]。单轴抗压强度除采用室内单轴压缩和点荷载试验获取外,通过钻进过程中的随钻炮孔钻进参数也可反映其数值大小^[2]。在钻孔过程中碰到不同类型岩体结构及岩层时,岩石的物理力学性质会发生突变,导致钻机的推力、扭矩、转速、钻速等钻进参数表现出特征响应。通过剖析钻头在钻孔过程中的动力学响应,能够用来评价岩体构造特征和物理力学性质,将这种方法与钻爆法施工相结合,具有显著优势^[3]。

岳中琦、王琦等利用自主研发的钻孔过程监测系统^[4-7],收集钻头钻进过程的推力、扭矩等随钻参数,通过线性回归方法,构建了用于预测岩石等效单轴抗压强度的模型,模型预测结果与室内试验结果误差较小。Lakshminarayana 等利用机器的推力、扭矩等运行变量和机头处采集的声振动参数建立岩石强度模型^[8],应用经验方法可以在较小的误差下确定强度特性。Rodgers 等引入钻进比能的概念^[9],构建了岩体强度模型,可通过使用该模型来调节每个炮孔内的炸药量。Ruijie Zhao 等应用能量守恒原理和赫兹接触理论^[10],建立了随钻数据与岩石 UCS 之间的理论关系,形成了基于随钻数据的隧道岩石单轴压力三维可视化评价方法,并验证了该方法的可靠性,为隧道施工和设计提供了科学依据。

上述试验研究均是对地表岩体进行的,而对于水下钻孔爆破工程,炮孔中由于水的存在,钻孔过程中水深会对钻进过程及钻进参数产生影响,且单耗相较于地表爆破更大。本文以长江上游涪陵至丰都河段水下钻孔爆破工程为背景,通过对液压潜孔钻机水下钻进参数收集,分析了钻进深度与速度的关系,完成了四类岩石的现场取样和单轴抗压强度量测,建立了钻机钻进速度 V 、钻进压力 F 、回转压力 N 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程,可通过该关系方程完成对单轴抗压强度的估算。根据岩石坚硬程度分类,并结合修正系数,完成了对砂岩、粉砂岩、页岩和泥岩四种不同岩性的炸药单耗预测,为方便、快捷、准确获得水下岩石单轴抗压强度和炸药单耗动

态调整提供了新途径。

1 水下钻孔爆破炮孔钻进参数的选择与确定

在当前国内钻凿水下礁石领域中,SWDW165 型液压潜孔钻机是最先进的液压潜孔钻机,这种器械装备高效的高压潜孔钻进系统,使得高精度和高效率的爆破孔钻凿成为可能^[11]。该型器械为冲击回转式凿岩机械,按工作机构可以分为推进机构、回转机构和冲击机构三部分(图 1)。

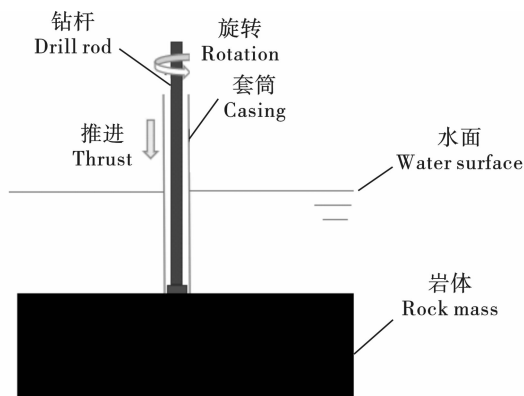


图 1 水下钻孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater drilling

根据该类型潜孔钻机工作原理及所安装的监测系统,选择钻进过程中的回转压力、钻进压力和钻进速度 3 项指标作为炮孔钻进参数,对其进行现场量测,其中钻进速度通过凿岩航道钻智能显示系统所监测的钻进深度除以时间得出,如下图 2、图 3 所示。

2 水下钻孔爆破炮孔钻进参数及单轴试验量测结果与分析

2.1 炮孔钻进方案

为了保证潜孔钻机在钻凿岩石过程中的炮孔钻进参数的有效性,将钻进过程中由于钻杆提升、钻杆下降但未接触岩石、更换钻头和钻杆及卡钻等情况时的量测数据视为无效数据。

炮孔钻进现场如图 4 所示,采用 115 mm 锥形钮扣钻头,如图 5 所示,对现场砂岩、粉砂岩、页岩和

泥岩四种不同岩性进行钻进试验,记录钻进速度 V 稳定时,钻机的钻进压力 F 和回转压力 N 。

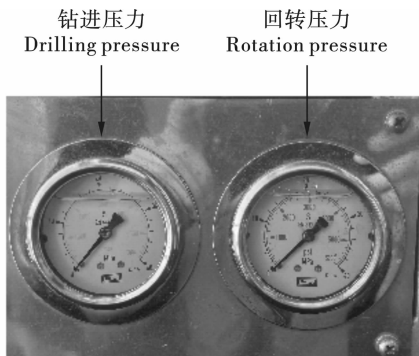


图 2 山河智能 SWDW165H 电动航道钻机仪表
Fig. 2 Instrumentation of shanhe intelligence SWDW165H electric waterway drilling rig



图 3 凿岩航道钻智能显示系统
Fig. 3 Intelligent display system for chiseled channel drilling



图 4 现场钻进试验
Fig. 4 Field drilling test

2.2 炮孔钻进参数量测结果及分析

根据试验方案对水下岩体进行原位炮孔钻进试验,获取钻进过程中的炮孔钻进参数,每钻进 50 cm 记录一次钻进时间,计算钻进平均速度,以一次试验

中 4 类岩石钻进时的深度与速度变化,绘制钻进深度与钻进速度变化曲线如图 6 所示。



图 5 锥形钮扣钻头
Fig. 5 Tapered Button Drill

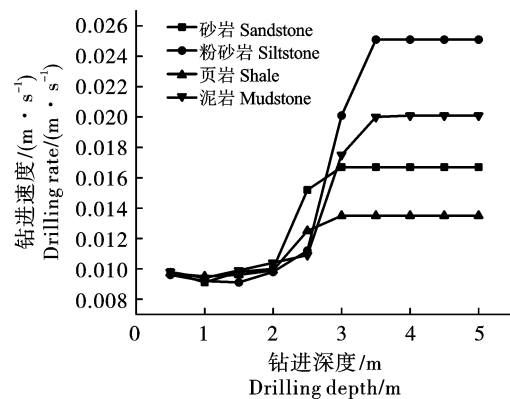


图 6 钻进深度与钻进速度变化曲线
Fig. 6 Variation curve of drilling depth and drilling speed

通过分析变化曲线,可将钻头切削岩石的过程划分为 3 个阶段,一是短暂下降阶段,即钻头刚开始接触到江底表面时,由于存在江底淤泥,钻进速度呈下降趋势。二是上升阶段,钻头钻进岩石一定深度后,由于岩体表面存在裂隙发育,钻进速度出现波动,但整体呈现上升趋势。三是稳定阶段,钻机进入完整岩体后,钻进速度不再发生变化。钻进速度取最终速度稳定时的结果。

2.3 现场取样与室内试验

为建立钻进参数与岩石单轴抗压强度之间的关系,实现岩石单轴抗压强度的快速估算,将现场爆破清渣时的大块进行取样,如图 7 所示,将岩石试样制作成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体,如图 8 所示。获得砂岩、粉砂岩、页岩和泥岩四种不同岩性标准岩样,使用电液伺服万能试验机来测定岩石单轴抗压强度,如图 9 所示。

根据钻进方案对现场展开系统性试验,由于水下岩体取样复杂,现场无法做到钻进速度、钻进压力和回转压力与岩石单轴抗压强度的一一对应关系,为减小测量误差,采用多次测量计算平均值的方法,各类岩石的炮孔钻进参数及室内单轴抗压强度量测

结果见表1。



图7 现场爆破清渣

Fig. 7 On-site blasting slag removal



图8 标准岩样

Fig. 8 Standard rock samples

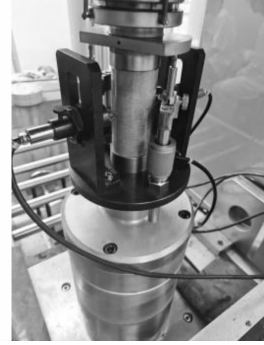


图9 单轴抗压试验

Fig. 9 Uniaxial compression test

3 单轴抗压强度预测模型建立

基于钻进试验结果,绘制钻进速度与单轴抗压强度关系图如图10所示,由图可知钻进速度 V 与单轴抗压强度 R_c 呈增大而减小的趋势,拟合方程见公式(1),拟合度 R^2 为0.94。

而根据潜孔钻机工作原理,钻进速度 V 与钻进压力 F 和回转压力 N 密切相关,将钻进速度 V 、钻进压力 F 和回转压力 N 与岩石单轴抗压强度 R_c 进行多元线性拟合,如图11所示,建立了单轴抗压强度 R_c 与钻进速度 V 、钻进压力 F 和回转压力 N 的关系方程,拟合方程见公式(2),拟合度 R^2 为0.98。

表1 钻进试验及室内试验结果

Table 1 Drilling test and indoor test results

试件类型 Specimen type	钻进速度 Drilling rate $V/(m \cdot s^{-1})$	钻进压力 Drilling pressure F/MPa	回转压力 Rotation pressure N/MPa	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength R_c/MPa
砂岩 Sandstone	0.0135	2.3402	9.5192	45.50
	0.0124	1.8920	10.2513	50.22
	0.0124	3.9236	10.7420	51.74
页岩 Shale	0.0155	3.2747	10.1333	42.33
	0.0162	2.8747	9.9914	41.31
	0.0161	1.2758	10.1006	35.50
粉砂岩 Siltstone	0.0246	7.0118	10.3217	25.12
	0.0248	1.5538	7.9896	18.20
	0.0249	5.4131	9.5220	24.03
泥岩 Mudstone	0.0281	5.3506	10.2511	14.17
	0.0257	4.2927	10.2997	12.56
	0.0258	1.8496	10.2084	13.09

$$R_c = -2388.52V + 78.92, R^2 = 0.94 \quad (1)$$

$$R_c = -2720.25V + 2.08F - 1.95N + 97.83, \\ R^2 = 0.98 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,式(2)的拟合度($R^2 =$

0.98)大于式(1)的拟合度($R^2 = 0.94$),即式(2)的拟合度更好,因此选择式(2)作为现场岩石单轴抗压强度的预测公式。

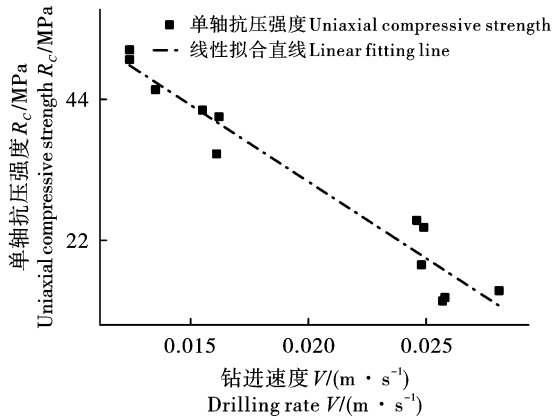


图 10 钻进速度与单轴抗压强度拟合图

Fig. 10 Fitting diagram of drilling speed and uniaxial compressive strength

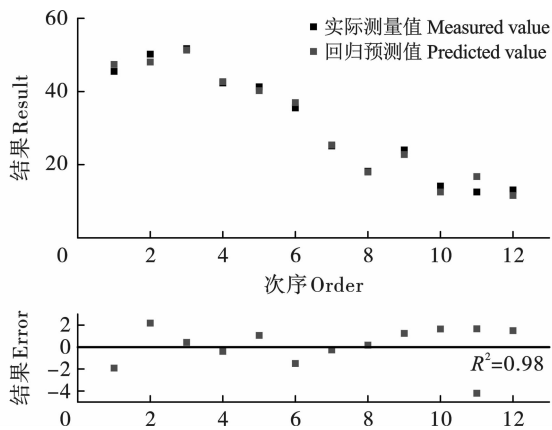


图 11 预测值与实际值误差

Fig. 11 Error between predicted and actual values

4 水下岩体爆破炸药单耗预测

爆破每立方米岩体所需的炸药量 q 通常要根据不同岩石的坚固性系数 f 进行调整^[12], 坚固性系数 f 为单轴抗压强度 (MPa) 的十分之一^[13], 具体如表 2 所示。

表 2 炸药单耗与岩石坚固性系数^[12]
Table 2 Powder factor and rock soundness coefficient of explosive^[12]

f	$q / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0 ~ 4	0.25 ~ 0.65
4 ~ 8	0.65 ~ 1.00
8 ~ 10	1.00 ~ 1.60
10 ~ 15	1.60 ~ 2.60
> 15	> 2.60

表 2 中的爆破炸药单耗没有考虑水深对单耗的影响, 实际上当水深变化时, 尤其在长江流域水深变化较大时, 水深对单耗的影响较明显。文献 [14,

15] 提出水下炸药单耗 K 值按陆地爆破单耗乘上水深修正系数 μ 进行计算, 即

$$K = \mu q \quad (3)$$

式中: K 为水下爆破炸药单耗, kg/m^3 ; q 为陆上爆破炸药单耗; μ 为水深影响修正系数; 对上述修正系数进行分析, 水深 H 分别等于 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时, 计算该修正系数, 见表 3。

表 3 水深与修正系数对应表^[14,15]

Table 3 Corresponding table of water depth and correction coefficient

水深 H/m Water depth H/m	0	10	20	50
修正系数 μ Modification coefficient μ	1.00	1.36	1.43	1.45

根据表 1、表 2 和表 3, 计算得到不同水深条件下, 砂岩、粉砂岩、页岩和泥岩四类岩石的炸药单耗, 见表 4。

表 4 不同类型岩石在不同水深条件下炸药单耗

Table 4 Powder factor of different types of rocks under different water depth conditions

试件类型 Specimen type	水深 Water depth H/m	炸药单耗 Explosive consumption $K / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
砂岩 Sandstone	0	0.65 ~ 1.00
	10	0.88 ~ 1.36
	20	0.93 ~ 1.43
	50	0.94 ~ 1.45
页岩 Shale	0	0.65 ~ 1.00
	10	0.88 ~ 1.36
	20	0.93 ~ 1.43
	50	0.94 ~ 1.45
粉砂岩 Siltstone	0	0.25 ~ 0.65
	10	0.34 ~ 0.88
	20	0.36 ~ 0.93
泥岩 Mudstone	50	0.36 ~ 0.94
	0	0.25 ~ 0.65
	10	0.34 ~ 0.88
	20	0.36 ~ 0.93
	50	0.36 ~ 0.94

由表 4 可知, 相同水深条件下, 砂岩和页岩的炸药单耗相同, 在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时, 炸药单耗分别为 0.65 ~ 1.00、0.88 ~ 1.36、0.93 ~ 1.43 和 0.94 ~ 1.45 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 粉砂岩和泥岩

的炸药单耗相同,在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时,炸药单耗分别为 0.25 ~ 0.65、0.34 ~ 0.88、0.36 ~ 0.93 和 0.36 ~ 0.94 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

炸药单耗推算结果与文献[16]所提出的水下炸药单耗结果接近,进一步验证了结果的科学性。通过表2、3结合公式(2)即可通过钻进速度 V 、钻进压力 F 和回转压力 N 三项钻进参数得到所在水深岩石的炸药单耗,便于对水下钻孔爆破时炸药单耗的实时调节。

5 结论

通过对液压潜孔钻机水下钻进参数收集,分析了钻进深度与速度的关系,完成了四类岩石的现场取样和单轴抗压强度量测,建立了钻机钻进速度 V 、钻进压力 F 、回转压力 N 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程。通过该关系方程完成了对单轴抗压强度的估算,完成了对砂岩、粉砂岩、页岩和泥岩四种不同岩性的炸药单耗预测,实现了炸药单耗的实时调整。得出的主要结论如下:

1)通过分别建立钻进速度 V 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程和钻机钻进速度 V 、钻进压力 F 、回转压力 N 与岩石单轴抗压强度 R_c 的关系方程,发现拟合度 R^2 分别为 0.94 和 0.98,后者拟合度更高,因此采用后者作为预测单轴抗压强度更加可靠;

2)根据炸药单耗与岩石坚固性系数对应表,并结合修正系数,得到相同水深条件下,砂岩和页岩的炸药单耗相同,在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时,炸药单耗分别为 0.65 ~ 1.00、0.88 ~ 1.36、0.93 ~ 1.43 和 0.94 ~ 1.45 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;粉砂岩和泥岩的炸药单耗相同,在水深 H 分别为 0 m、10 m、20 m 及 50 m 时,炸药单耗分别为 0.25 ~ 0.65、0.34 ~ 0.88、0.36 ~ 0.93 和 0.36 ~ 0.94 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。现场可根据随钻参数变化和水深不同对炸药单耗进行实时预测和调整。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] YU 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)
- [2] 郝世俊,褚志伟,李泉新,等.煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势[J].煤田地质与勘探, 2023,51(9):10-19.
- [2] HAO Shi-jun, CHU Zhi-wei, LI Quan-xin, et al. Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine[J]. Coal Field Geology and Exploration, 2023,51(9):10-19. (in Chinese)
- [3] 盛益明,柴修伟,常志锋,等.磷矿地下爆破随钻参数与岩体可爆性关系模型研究[J].爆破,2024,41(2):120-126.
- [3] SHENG Yi-ming, CHAI Xiu-wei, CHANG Zhi-feng, et al. Modelling of the relationship between the parameters of underground blasting with drilling and rock blastability in phosphate mines[J]. Blasting, 2024,41(2):120-126. (in Chinese)
- [4] 岳中琦.钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):1977-1996.
- [4] YUE Zhong-qi. Drilling process monitoring for refining and upgrading rock mass quality classification methods[J]. Journal of rock mechanics and Engineering, 2014,33(10):1977-1996. (in Chinese)
- [5] 岳中琦,李焯芬,罗锦添,等.香港大学钻孔数字监测仪在土钉加固斜坡工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1685-1690.
- [5] YUE Zhong-qi, LI Chao-fen, LUO Jin-tian, et al. Application of digital monitor of University of Hong Kong in slope engineering[J]. Journal of rock mechanics and Engineering, 2002,21(11):1685-1690. (in Chinese)
- [6] 岳中琦.钻孔过程数字自动监测(DPM)以现场连续测试各种软硬岩土力学强度和空间分布[C]//第二届全球华人岩土工程论坛.南京:河海大学,2005:85-90.
- [6] YUE Zhong-qi. Digital automatic monitoring (DPM of drilling process) continuously tests the mechanical strength and spatial distribution of various soft and hard rock and soil [C]// The second Global Chinese Geotechnical Engineering Forum. Nanjing: Hohai University, 2005:85-90. (in Chinese)
- [7] 王琦,高红科,蒋振华,等.地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):301-310.
- [7] WANG Qi, GAO Hong-ke, JIANG Zhen-hua, et al. Research and development and application of digital drilling test system for surrounding rock in underground engineering[J]. Journal of Rock mechanics and Engineering, 2020,39(2):301-310. (in Chinese)
- [8] LAKSHMINARAYANA R C, TRIPATHI K A, PAL K S. Rock strength characterization using measurement while drilling technique[J]. Indian Geotechnical Journal, 2020,50(6):1-12.
- [9] RODGERS M, Mc Vay-M, HORHOTA D, et al. Assess-

- ment of rock strength from measuring while drilling shafts in Florida limestone [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 55(8):1154-1167.
- [10] ZHAO Rui-jie, SHI Shao-shuai, YAO Ru-bing, et al. Application of relationship model for the measurement while drilling data to predict rock uniaxial compressive strength for tunneling [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(9):7187-7203.
- [11] 赵宏强, 高斌, 李美香. SWD165 型全液压潜孔钻机推进与回转液压系统分析 [J]. 工程机械, 2008(1):34-36, 7.
- [11] ZHAO Hong-qiang, GAO Bin, LI Mei-xiang. Analysis of the propulsion and rotary hydraulic system of type SWD165 full hydraulic submersible hole drill [J]. Construction Machinery, 2008, (1):34-36, 7. (in Chinese)
- [12] 汪旭光. 爆炸设计与施工 [M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2011:303-305.
- [12] WANG Xu-guang. Explosion design and construction [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011:303-305. (in Chinese)
- [13] 谷拴成. 应用灰色系统理论进行岩体可爆性分级的探讨 [J]. 爆破, 1991(4):61-64.
- [13] GU Shuan-cheng. Discuss the classification of rock mass by using gray system theory [J]. Blasting, 1991(4):61-64. (in Chinese)
- [14] 赵坤. 册子岛航道 AB 段水下炸礁及爆破安全监理 [J]. 爆破, 2010, 27(2):74-76.
- [14] ZHAO Kun. Underwater explosion and safety supervision in AB-section of Ce-zi island waterway [J]. Blasting, 2010, 27(2):74-76. (in Chinese)
- [15] 刘殿中. 工程爆破实用手册 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1999.
- [15] LIU Dian-zhong. Practical manual for engineering blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [16] 梁禹, 吴立, 左清军. 长江航道水下炸礁工程炸药单耗优化研究 [J]. 爆破, 2012, 29(2):95-98, 106.
- [16] LIANG Yu, WU Li, ZUO Qing-jun. Optimizing research on explosive specific charge of underwater reef blasting engineering in yangtze waterway [J]. Blasting, 2012, 29(2):95-98, 106. (in Chinese)

(上接第 103 页)

- [11] ZHANG Hao, LI Ting-chun, WU Shuai, et al. A study of innovative cut blasting for rock roadway excavation based on numerical simulation and field tests [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119:104233.
- [12] 周传波. 深孔爆破一次成井模拟优化与应用研究 [D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2004.
- [12] ZHOU Chuan-bo. Research on optimization and application of one time well formation simulation for deep hole blasting [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2004. (in Chinese)
- [13] 单杰, 李志鑫, 张文元. 大规模三维城市建模进展 [J]. 测绘学报, 2019, 48(12):1523-1541.
- [13] SHAN Jie, LI Zhi-xin, ZHANG Wen-yuan. Recent progress in large-scale 3D city modeling [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12):1523-1541. (in Chinese)
- [14] 刘强, 施富强, 汪旭光, 等. 基于三维激光点云的爆破块度统计预测方法 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2):781-790.
- [14] LIU Qiang, SHI Fu-qiang, WANG Xu-guang, et al. Statistical estimation of blast fragmentation based on point cloud of muckpile [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2):781-790. (in Chinese)
- [15] FAKHIMI A, LANARI M. DEM - SPH simulation of rock blasting [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55:158-164.
- [16] CHUZEL-MARMOT Y, ORTIZ R, COMBESCURE A. Three dimensional SPH-FEM gluing for simulation of fast impacts on concrete slabs [J]. Computers & structures, 2011, 89(23-24):2484-2494.
- [17] XU Xiao-ding, HE Man-chao, ZHU Chun, et al. A new calculation model of blasting damage degree-based on fractal and tie rod damage theory [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 220:106619.
- [18] FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3):197-204.
- [19] BUSCH C L, AIMONE-MARTIN C T, TAREFDER R A. Experimental evaluation of cratering and ground vibration in clay soils subjected to explosive airblast loading [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2015, 43(2):414-424.
- [20] KONESHWARAN S, THAMBIRATNAM D P, GALLAGE C. Blast response of segmented bored tunnel using coupled SPH FE method [C] // Structures, Elsevier, 2015, 2:58-71.