



高频破碎锤清礁的凿入规律研究^{*}

张俊峰¹, 王玮栋¹, 裴邦学², 钟润兵², 汤德颖³, 王家豪³, 张露², 文成跃²

(1. 长江航道整治中心, 湖北 武汉 330039; 2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010;

3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 高频破碎锤是一种符合生态航道整治要求的新型除礁技术。为探究高频破碎锤清礁的凿入规律, 通过高频破碎锤凿击模型试验, 以凿入深度为衡量破岩效率的主要参数, 研究钎杆凿入深度随时间变化的规律, 分析不同岩体强度和不同工作档位对凿入深度的影响, 在此基础上拟合不同工况下凿入深度分别与凿击时间和岩体强度的经验公式。研究结果表明: 凿入深度随凿击时间呈非线性正增长关系, 增长幅度随时间增大而减小; 凿入深度随岩体强度增大而减小; 凿入效率随工作档位变大而提高, 其中 3 档为最佳工作档位。

关键词: 破碎锤; 凿入深度; 工作档位; 破岩效率

中图分类号: TU45; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0203-06

Gouging law of high-frequency breaker reef cleaning

ZHANG Junfeng¹, WANG Weidong¹, PEI Bangxue², ZHONG Runbing², TANG Deying³, WANG Jiahao³, ZHANG Lu², WEN Chengyue²

1. Changjiang Waterway Regulation Center Wuhan 330039 China

2. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China

3. College of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract High-frequency breaker is a new type of reef removal technology that meets the requirements of ecological waterway remediation. To explore the gouging law of high-frequency breaker reef clearing the high-frequency breaker gouging model test is conducted and the gouging depth is taken as the measurement standard of rock breaking efficiency. The law of the change of drill rod gouging depth with time is studied and the influence relationship of different rock mass strength and different working gears on the gouging depth is analyzed. Based on this the empirical formulas of gouging depth chiseling time and rock mass strength under different working conditions are fitted. The results show that the chiseling depth has a nonlinear positive growth relationship with the chiseling time and the increase amplitude decreases with the increase of time. The gouging depth decreases with the increase of rock mass strength. The gouging efficiency increases with the increase of the working gear with gear 3 being the optimal working gear.

Keywords: breaker; chiseling depth; working gear; rock-breaking efficiency

为提升长江上游河段的航道等级, 需对该河段进行航道整治, 其中清礁工程在航道整治工作中占据重要地位。因此迫切地需要一种兼顾效率和生态的清礁方式。目前水下钻爆法清礁是使用较为广泛的清礁方式之一^[1-3]。而由于长江重庆段部分礁石位于“四大家鱼”核心保护区内, 水下爆破清礁将对水生物及水环境造成严重破坏。为了

适应生态航道整治的节能减排和绿色保护要求, 本文提出了一种破岩除礁的新方法, 即高频破碎锤清礁法。该方法由挖机液压系统提供液压能驱动液压马达, 通过齿轮传动带动偏心轮转动, 形成一种激振力使破碎锤产生高频振动^[4-5], 并通过钎杆对礁石进行振动破碎, 从而达到除礁效果^[6]。相比于传统的水下钻爆法, 该方法避免了大面积

收稿日期: 2023-06-12

*基金项目: 长江重庆航道工程局科技项目(cqjt-2021-202)

作者简介: 张俊峰 (1981—), 男, 高级工程师, 从事航道工程技术研究与管理工作。

水体污染和对水体生物的损伤^[7]；相比于重锤凿岩、液压胀裂、水射流清礁以及铣挖清礁等传统机械清礁方法，该方法具有噪声较小、效率较高优点^[8]。但是由于水下礁石非常复杂，为了进一步开发高频破碎锤技术的除礁潜能，促进该技术在实际工程的应用和发展，研究高频破碎锤除礁的机理十分必要。

目前对凿岩规律的相关研究主要采用现场试验的方法。赵伏军等^[9]得出随着凿入荷载的增加，岩石的破坏体积和钎杆的凿入深度均随之增加；赵金昌等^[10]利用三轴试验机研究花岗岩在高温高压状态下的冲击凿岩规律，结果表明凿岩速度随着温度和冲击功率的增大而增大；王权等^[11]采用正交试验方法研究不同因素对清礁厚度的影响规律，得出清礁厚度与不同因素的相关关系。然而，目前关于高频破碎锤凿岩规律的研究较少。

本文通过破碎锤凿击预制钢筋混凝土模块的模型试验，模拟高频破碎锤对无临空面礁岩的凿击过程，并以凿入深度为衡量破岩效率的主要参数，研究凿入深度与工作档位、凿击时间和岩体强度之间的关系，分析高频破碎锤的最佳工作档位，为提高高频破碎锤在航道清礁中的施工效率提供理论依据。

1 试验模型比尺推求

对试验模型的选择，需要对原型和模型的比尺进行推导，将原型的参数按照比尺缩小后得到模型参数，并根据模型参数对相应的设备进行选择。破碎锤在破碎过程中整体的工作可以分为两部分：一部分是破碎锤钎杆对岩体的破碎；另一部分是挖机的发动机给整个系统输出动力。由于两部分结构不同，因此需要使用不同的相似准数来推导。

在破碎锤模型设计中，试验采用的钎杆直径为 45 mm 的破碎锤，原型破碎锤钎杆的直径为 180 mm，因此整体模型的几何比尺采用 1:4 的比例，模型与原型采用同样的材质，因此原型与模型的几何比尺 λ_l 为：

$$\lambda_l = \frac{l_p}{l_m} = 4 \quad (1)$$

式中： l_p 为原型的几何长度，m； l_m 为模型的几何长度，m。

密度比尺 λ_ρ 为：

$$\lambda_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} = 1 \quad (2)$$

式中： ρ_p 为原型的密度，kg/m³； ρ_m 为模型的密度，kg/m³。

弹性模量比尺 λ_E 为：

$$\lambda_E = \frac{E_p}{E_m} = 1 \quad (3)$$

式中： E_p 为原型的弹性模量，GPa； E_m 为模型的弹性模量，GPa。

1.1 钎杆主要参数比尺推求

钎杆的凿入过程由钎杆对岩体的作用力主导，而钎杆在工作时始终处于弹性范围内，因此需要满足原型和模型的弹性力相似，即满足柯西数相等，表达式为：

$$\frac{\rho_p v_p^2}{E_p} = \frac{\rho_m v_m^2}{E_m} \quad (4)$$

式中： v_p 为原型的钎杆运动速度，m/s； v_m 为模型的钎杆运动速度，m/s。

由此推导出钎杆的运动速度比尺 λ_v 为：

$$\lambda_v = \frac{v_p}{v_m} = 1 \quad (5)$$

取钎杆对岩体的凿入深度比尺 λ_h 与几何比尺 λ_l 相同，即：

$$\lambda_h = \lambda_l = 4 \quad (6)$$

则时间比尺 λ_t 为：

$$\lambda_t = \frac{\lambda_h}{\lambda_v} = 4 \quad (7)$$

根据牛顿第三定律，钎杆凿入岩体时钎杆对岩体的作用力与岩体对钎杆的反力大小相同方向相反，由冲量定理 $Ft=mv$ 可得：

$$\lambda_F \lambda_t = \lambda_m \lambda_v \quad (8)$$

推出作用力 F 的比尺 λ_F 为 16。

1.2 挖机功率比尺推求

由于发动机通过油压管道输出给整个系统提

供动力, 油管中的液体运动是压力为主导作用的流体运动, 因此原型和模型的油压管道中需要满足欧拉相似准则, 即原型和模型的欧拉数相等, 表达式为:

$$\frac{P_p}{\rho_p v_p^2} = \frac{P_m}{\rho_m v_m^2} \quad (9)$$

式中: p_p 为原型的挖机功率, kW; p_m 为模型的挖机功率, kW。

原型和模型采用相同的油液, 因此 $\lambda_v = 1$, 符合国标的挖机即使大小和型号不同, 在额定功率下挖机油压管中的压强基本相同, 即压强比尺 $\lambda_p = 1$, 由此可以推导出油压管中油液流速比尺 λ_v 为:

$$\lambda_v = \frac{v_p}{v_m} = 1 \quad (10)$$

油压管道的管径比尺 λ_d 为几何比尺, 即:

$$\lambda_d = 4 \quad (11)$$

因此流量比尺 λ_Q 为:

$$\lambda_Q = \lambda_v \lambda_d^2 = 16 \quad (12)$$

挖机输出的功率比尺 λ_P 为:

$$\lambda_P = \lambda_p \lambda_Q = 16 \quad (13)$$

2 试验设计及方案

2.1 模型材料

凿击试件为预制混凝土试块, 预制模具大小为 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, 内部布设钢筋和箍筋以防止击打过程中混凝土试块向两侧开裂, 以此模拟击打无临空面岩体的情况。浇筑的混凝土配合比分别按照 C20、C25、C30、C35、C40 等 5 种强度混凝土设计。各制作 2 块不同强度的钢筋混凝土预制块, 共 10 块, 养护 28 d, 制作完成的试件见图 1。经抗压强度检测, 5 种钢筋混凝土的强度分别为 13.5、16.2、17.0、27.0、28.0 MPa。



图 1 预制钢筋混凝土试块

2.2 试验设备

高频破碎锤凿击试验采用挖机-高频破碎锤设备, 该机由挖机拆下铲斗换装破碎锤组成。挖机主体为立派 R328 型挖机, 额定功率为 20 kW, 质量为 1.6 t。破碎锤为惊天 GT10 型破碎锤, 钺杆直径为 45 mm。根据惊天 GT10 型破碎锤的性能参数, 其工作档位分为 5 个, 峰值击打压力分别为 63、71、78、84、86 MPa, 通过对 1~5 档的峰值击打压力进行测试, 不同档位下活塞对钎杆的击打力大小不同。

测试系统以凿入深度测量和时间测量为主, 深度测量使用精度 0.02 mm、量程 50 cm 的游标高度尺, 时间测量使用精度为 0.1 s 的秒表。

2.3 试验方案

试验主要测试高频破碎锤在不同工况下对不同强度试块的凿击效果。在 5 种不同强度的试块上分别设置 5 个击打点, 第 1 块设置 4 个击打点, 第 2 块设置 1 个击打点, 5 个击打点分别对应高频破碎锤的 5 种工作档位。每个击打点距离试块边缘 28 cm, 相邻两个击打点位置距离 49 cm, 击打点位置见图 2。在整个试验过程中并未出现混凝土沿临空面裂开或相邻击打位之间裂缝贯通的情况, 而单次击打下水泥的最大破坏半径约 12 cm, 按照 3 倍影响范围, 单个击打点的影响范围在 36 cm 以内, 而试验中 4 个打击点的间隔为 49 cm, 此外, 每次仅对 1 个击打点进行击打试验, 可认为击打点不会对相邻击打点的凿入深度产生影响。

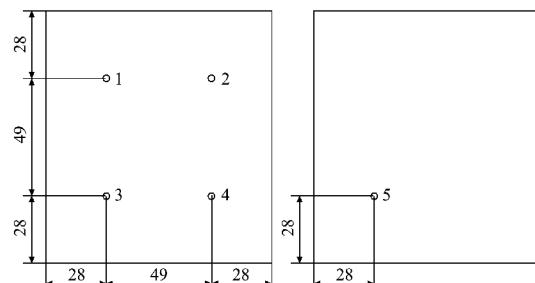


图 2 混凝土尺寸及击打位置 (单位: cm)

为了控制变量相同, 击打前统一破碎锤高度, 每个击打位置的击打时间固定为 150 s, 分 15 次击打, 每次击打时间为 10 s, 具体试验现场见图 3, 试验流程见图 4。

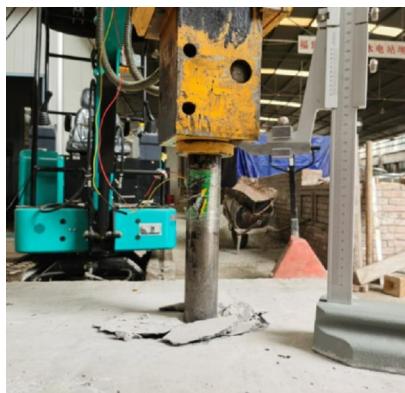


图 3 试验过程

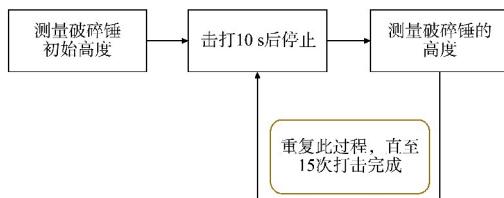


图 4 试验流程

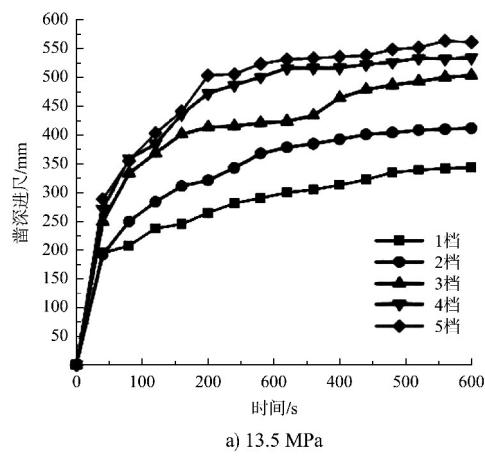
3 试验数据及分析

3.1 时间和档位对凿深的影响规律

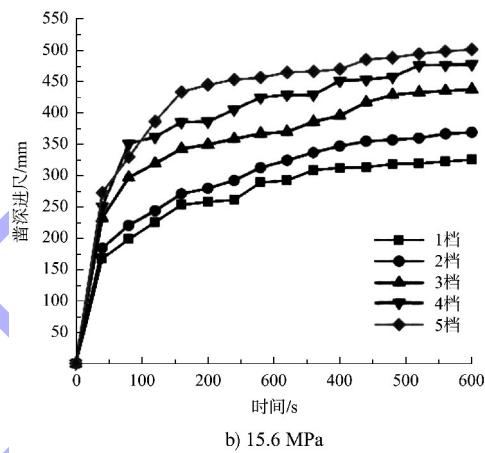
由于试验钎杆与实际工程所用钎杆尺寸呈 1:4 的比例关系, 经过比尺推导, 时间比尺和凿入深度比尺均为 4, 因此, 所得数据为试验数据的 4 倍。

采用不同工作档位, 对 5 种不同强度的试件进行凿击的情况下, 得出凿入深度与凿击时间的关系见图 5。

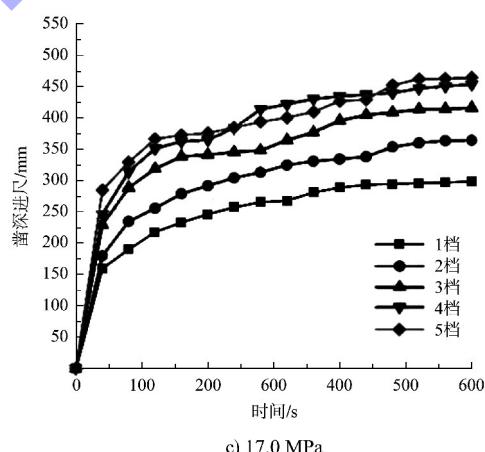
由图 5 可知: 在其他参数相同时, 凿入深度随凿击时间的增大持续增大, 增长幅度总体呈先快后慢的趋势, 且第 1 个回次增长最快, 随后增长缓慢, 最后趋于平缓。究其原因, 钎杆的尖端部分为椎体结构, 在钎杆凿入过程中, 钎杆与岩体的接触面积逐渐增大, 使得破岩阻力增大。此外, 冲击荷载产生的应力波在竖直方向上衰减率减小, 使应力波的影响范围增大, 进而对这些范围的岩体产生硬化作用。此外这部分岩体的屈服应力也相应增大, 导致凿入效率较慢。在凿击过程中, 孔内产生的残渣和粉末也会吸收部分破碎锤的冲击能量, 从而减小钎杆对岩体的破坏效果。



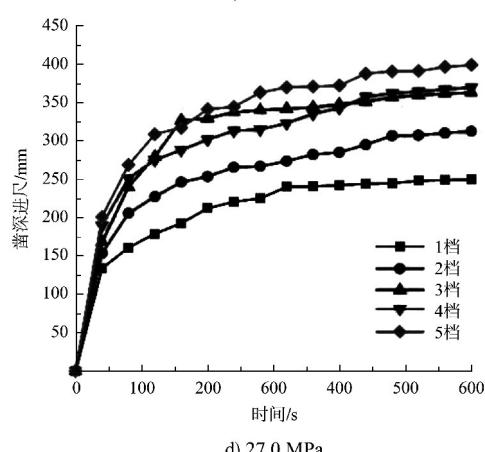
a) 13.5 MPa



b) 15.6 MPa



c) 17.0 MPa



d) 27.0 MPa

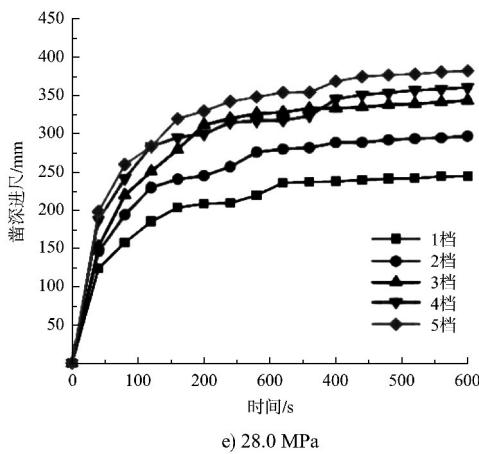


图 5 工作档位与时间对凿入深度的影响

根据凿入深度过程图像可知, 虽然档位的提升使凿入深度增加, 但是增加的效果并不是线性的, 在从1档增加至3档的过程中, 凿入深度增加较为明显; 由3档增加至5档的过程中, 凿入深度增长幅度减小较多, 因此, 从破岩效率而言, 3档为最佳工作档位。

3.2 岩体强度对凿入深度的影响规律

取各强度试件的凿入深度最大值, 对数据进行整理, 凿入深度与岩体强度的关系曲线见图6。由图可知: 随着岩体强度的增大, 5种工作档位下的凿入深度均逐渐减小, 岩体强度与凿入深度整体呈非线性负相关。因为在钎杆各项参数均一致的情况下, 岩体强度越大, 其屈服应力也相应增大, 当岩体的屈服应力大于冲击荷载产生的应力时, 钎杆将达到凿入极限, 无法再获得凿入深度, 此时岩体的动态响应主要呈现线弹性特点, 能量主要耗散在弹性和阻尼振动中^[12]。

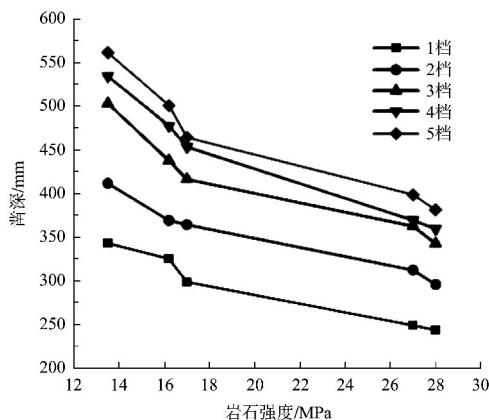
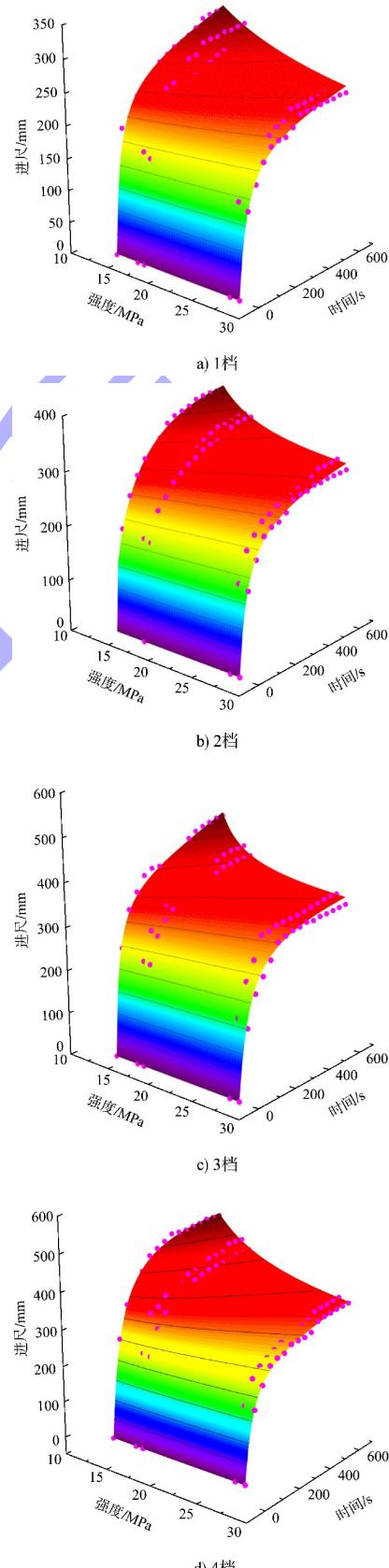


图 6 岩体强度对凿入深度的影响

采用Origin的非线性曲面拟合中的泰勒函数对数据进行回归拟合, 以x轴为岩体强度, y轴为凿击时间, z轴为凿入深度, 拟合曲面见图7。



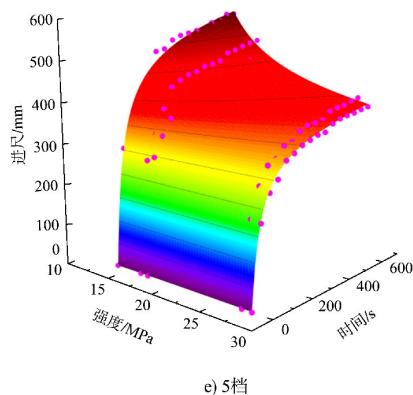


图 7 不同击打工况的拟合曲面

以凿入深度为函数，档位为定量，强度和时间为自变量，拟合出凿入深度与时间和岩体强度的函数关系，得出模拟高频破碎锤的凿入深度与时间和强度关系的经验公式：

1 档：

$$z = \frac{(3.004 - 0.123x + 5.245y + 0.003y^2 + 0.299xy)}{(1 - 0.046x + 0.007y + 0.003x^2 - 0.0000025y^2 + 0.002xy)} \quad (14)$$

2 档：

$$z = \frac{(67.271 - 5.132x - 1593.557y + 1.93y^2 + 123.85xy)}{(1 - 7.376x - 5.448y + 0.551x^2 + 0.004y^2 + 0.449xy)} \quad (15)$$

3 档：

$$z = \frac{(396.68 - 29.234x - 1389.007y + 0.19y^2 + 144.17xy)}{(1 - 6.712x - 4.09y + 0.666x^2 - 0.00018y^2 + 0.404xy)} \quad (16)$$

4 档：

$$z = \frac{(0.931 - 0.056x - 6.18y + 0.012y^2 + 0.691xy)}{(1 - 0.113x - 0.026y + 0.004x^2 + 0.000027y^2 + 0.0024xy)} \quad (17)$$

5 档：

$$z = \frac{(-374.306 + 27.033x - 980.585y + 0.889y^2 + 126.758xy)}{(1 - 1.168x - 3.67y + 0.343x^2 + 0.00124y^2 + 0.376xy)} \quad (18)$$

4 结论

1) 凿入深度随时间增大而逐渐增大，但在凿击过程中，由于钎杆与岩体接触面积增大，冲击荷载应力波衰减导致岩体局部硬化，以及孔内残渣及粉末吸收冲击能等方面的影响，凿入深度的

增大幅度随着时间增大会逐步衰减。

2) 工作档位与凿入深度呈非线性正相关，在从1档增加至3档的过程中，凿入深度增加较为明显，从3档增加至5档的过程中，凿入深度增长幅度减小较多，因此3档破岩效率最高。

3) 岩体强度越大，相应工况下的凿入深度越小，此时岩体的屈服应力大于冲击荷载产生的应力，钎杆将达到凿入深度极限，无法再进一步凿入。

参考文献：

- [1] 杨金锋. 航道整治水下疏浚清礁施工工艺研究[J]. 珠江水运, 2020(23): 86-87.
- [2] WANG S F, LI X B, YAO J R, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. International Journal of rock mechanics and mining sciences, 2019, 122: 104063.
- [3] 丁群. 水下钻孔爆破技术在水运工程建设中的应用[J]. 珠江水运, 2022(15): 22-24.
- [4] 程刚. 成孔液压涨裂破岩机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [5] LI G, LI L C, TANG C A. Study on the Mechanisms of Hydraulic Fracturing Crack Initiation and Propagating[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 1910 (376): 101-105.
- [6] 王开乐, 杨国平, 胡凯俊, 等. 高频破碎锤的发展现状与研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 1-4.
- [7] 王忠康, 杨仕教, 王富林, 等. 港口航道水下炸礁工程实践[J]. 爆破, 2016, 33(2): 123-127.
- [8] 杨胜发, 杨威, 李睿哲, 等. 一种水下礁石破碎实验装置及其实验方法: CN201910663963.2[P]. 2019-10-15.
- [9] 赵伏军, 李夕兵, 冯涛, 等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1315-1320.
- [10] 赵金昌, 李义, 赵阳升, 等. 花岗岩高温高压条件下冲击凿岩规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 904-909.
- [11] 王权, 蒋文杰. 基于多因素试验的凿岩参数影响规律研究[J]. 水运工程, 2022(7): 252-258.
- [12] MÜLLER L. Rock Mechanics [J]. Rock mechanics, 1972, 6(1): 1-2.

(本文编辑 赵娟)