



基于 ABAQUS 仿真的水下液压破碎锤凿岩施工参数设计

陈广云，单丹

(中交广州航道局有限公司，广东 广州 510220)

摘要：针对液压破碎锤水下凿岩施工无法可视化、施工参数难确定的问题，采用ABAQUS仿真平台进行水下液压破碎锤凿岩模拟，对凿岩施工参数设计进行理论研究。不同型号破碎锤的冲击能大小对凿岩速度的影响很大，为获得理想的施工效率，需根据岩石参数选择破碎锤型号。研究发现3个自由面条件下凿岩产生2个方向的劈裂效果，随着凿岩布孔间距少量增大，凿入深度变化不大，但劈裂效果产生的深度变化较大。对于航道疏浚平整度要求高的情况下，选择凿入深度和产生劈裂效果深度相当的布孔参数，施工效率和施工质量均能达到理想的效果。

关键词：液压破碎锤；凿岩；施工参数；ABAQUS 软件

中图分类号：U616

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)02-0198-05

Design of construction parameters for underwater hydraulic fracturing hammer rock drilling based on ABAQUS simulation

CHEN Guangyun, SHAN Dan

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: Aiming at the problems that underwater drilling construction of hydraulic hammer can not be visualized and construction parameters are difficult to determine, ABAQUS simulation platform is used to simulate underwater hydraulic hammer drilling, and the design of drilling construction parameters is theoretically studied. The impact energy of different types of hammer has a great influence on the drilling speed. To obtain the ideal construction efficiency, the hammer type should be selected according to the rock parameters. It is found that the splitting effect in two directions is produced under the condition of three free faces. With a small increase in the spacing of drilling holes, the penetrating depth does not change, but the depth produced by the splitting effect changes greatly. When the requirement of the channel dredging smoothness is high, the construction efficiency and quality can achieve the ideal effect by selecting the hole layout parameters corresponding to the depth of penetration and the depth of the splitting effect.

Keywords: hydraulic crushing hammer; rock drilling; construction parameters; ABAQUS software

内河航道整治疏浚工程中，礁石开挖的方法一般有钻爆法、凿岩等，钻爆法产生的地震波和冲击波对水生生物、邻建(构)筑物会造成一定的影响^[1-2]，而且在航道上进行爆破作业还需要封航

施工。随着施工安全和环保意识的提高，钻爆法在当前的航道礁石开挖施工中有很大的局限性，因此国内很多采用凿岩施工方法。凿岩方法有重锤冲击法、钩状破石法、液压柱破裂钻法、铣挖

收稿日期：2023-06-14

作者简介：陈广云（1979—），男，高级工程师，从事港口航道施工技术与管理。

法和液压破碎法等^[3], 其中液压破碎法仅需挖掘机(挖斗改为破碎锤)、船舶平台、空压机等, 该类设备社会资源丰富, 设备调遣方便灵活, 陆运或水路调遣均可, 非常适用于内河水深不大的工况条件。

液压破碎锤是目前应用最广的一类破碎锤, 它是以液压为动力源, 直接或间接驱动活塞往复运动, 靠活塞冲程时的动能冲击钎杆, 对物体产生破碎作用的机械设备。液压破碎锤由锤体、钎杆和机架3部分组成^[4]。

陈昊博^[5]对液压破碎锤凿岩机理进行研究, 参考埃文楔形刃拉伸破坏模型对破碎锤劈落破岩模型进行理论论证; 韩科等^[6]在临空面对破碎锤冲击破岩效果方面进行研究, 提出为达到最优破岩比能耗, 临空面距离应选取能使岩石经1次冲击即可完成劈裂破坏时的最大值。

对于航道疏浚施工, 除考虑破岩效率外, 还需综合考虑施工质量和施工效率两方面因素。疏浚工程验收规范要求航道为硬底质时不允许出现浅点, 如单纯追求凿岩效率, 施工平整度控制不好, 势必会产生许多废方, 综合效益反而下降。因此从施工质量、施工效率、施工成本上考虑, 需要合理选择破碎锤凿岩冲击能、凿击时间、排距、位距、凿深等施工参数, 以达到施工效益最大化。

1 仿真模型建立

1.1 几何建模和边界条件

岩石几何模型尺寸为800 mm×800 mm×1 500 mm(长×宽×高); 钎杆几何模型直径155 mm, 尖头40×40 mm。岩石网格划分采用C3D8R(八结点线性六面体单元, 线性减缩积分), 单元失效删除; 钎杆网格划分采用C3D4(四结点线性四面体单元), 如图1所示。钎杆硬度远大于岩石, 为加快计算速度, 钎杆设置为刚体^[7]。接触类型选择面-面接触, 切向罚接触, 钢材与石灰岩摩擦系数0.3。边界条件为岩石底部全固定约束。

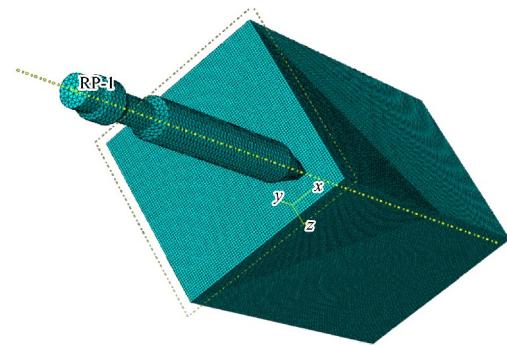


图1 模型网格划分

1.2 岩石材料参数

Holmquist-Johnson-Cook(HJC)模型^[8]是针对混凝土、岩石类材料提出的一种综合考虑应变率效应、损伤演化效应、围压效应和压碎压实效应影响的本构模型, 能较好地描述混凝土类材料在大变形、高应变率和高静水压力下的力学行为, 并且形式简单, 参数物理意义明确^[9-11], 因此该本构模型适用于液压破碎锤凿岩的过程模拟。

HJC本构模型包括屈服面方程、状态方程和损伤演化方程3个部分。

屈服面方程采用无量纲等效应力描述, 并考虑材料损伤和应变率效应的影响, 其表达式为:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (1)$$

$$\text{其中: } \sigma^* = \sigma / f_c \quad (2)$$

$$P^* = P / f \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0 \quad (4)$$

式中: σ^* 为无量纲等效应力; P^* 为静水压力; σ 为实际等效应力; f_c 为材料准静态圆柱体单轴抗压强度; P 为实际静水压力; $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲应变率; $\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; A 为特征化黏聚强度参数; B 为特征化压力硬化系数; N 为特征化压力硬化指数; D 为损伤变量; C 为应变率效应系数。

状态方程采用三段式表示静水压力 P 和体积应变 μ 之间的关系。

1) 第1阶段为线弹性阶段, 该阶段静水压力 P 与体积应变满足线性关系, 其表达式为:

$$P = K\mu \quad (P < P_{crush}) \quad (5)$$

其中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ (6)

式中: K 为体积模量, P_{crush} 为弹性极限压力, ρ 为压力 P 下的材料密度, ρ_0 为初始材料密度。

2) 第 2 阶段为过渡阶段, 该阶段岩石开始生成破碎裂纹, 逐渐产生塑性变形, 但还没有被完全破坏, 其表达式为:

$$P = P_{\text{crush}} + K_{\text{lock}}(\mu - \mu_{\text{crush}}) \quad (7)$$

其中: $K_{\text{lock}} = (P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}})/(\mu_{\text{lock}} - \mu_{\text{crush}})$ (8)

式中: P_{lock} 为压实静水压力, μ_{lock} 为对应于 P_{lock} 的体积应变, μ_{crush} 为弹性极限体积应变。

3) 第 3 阶段为压实阶段, 该阶段岩石已被完全压碎。

加载时:

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (9)$$

其中: $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{\text{lock}})/(1 + \mu_{\text{lock}})$ (10)

式中: $\bar{\mu}$ 为修正后的体积应变, K_1 、 K_2 、 K_3 为压

力常数。

卸载时:

$$P = K_1 \bar{\mu} \quad (11)$$

材料损伤通过等效塑性应变和塑性体积应变的累积描述, 其损伤演化方程为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (12)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq EF_{\min} \quad (13)$$

其中: $T^* = T/f_c$ (14)

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为一个积分循环内的等效塑性应变和塑性体积应变, $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ 为常压下材料破碎的塑性应变, $T^* = T/f_c$ 为材料的最大特征化等效拉应力, T 为材料的最大拉伸应力, D_1 和 D_2 为模型的损伤参数, EF_{\min} 为使材料断裂的最小塑性应变。

岩石本构模型参数见表 1。

表 1 岩石本构模型参数

| $\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | f_c / MPa | T / MPa | G / GPa | A | B | C | 特征化等效应力最大值 S_{\max} | N | D_1 | D_2 |
|--|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 2 650 | 45.6 | 4.19 | 12.4 | 0.28 | 1.85 | 0.006 | 15 | 0.84 | 0.04 | 1 |
| EF_{\min} | $P_{\text{lock}} / \text{GPa}$ | μ_{lock} | $P_{\text{crush}} / \text{MPa}$ | μ_{crush} | K_1 / GPa | K_2 / GPa | K_3 / GPa | ε_0 | 等效塑性应变失效下线阈值 F_s | |
| 0.01 | 1.21 | 0.16 | 15.2 | 7×10^{-4} | 12 | 135 | 698 | 1×10^{-5} | 0.035 | |

1.3 荷载

以爱德特三角型 EDT3200 破碎锤为例, 其主要参数: 液压油压力 1.8~2.4 GPa, 打击频率 300~450 次/m, 钻杆直径 155 mm, 额定单次冲击功 7 900 J。由于能量在活塞和钻杆传递中存在能量损失, 能量效率 η 按 58% 计^[12], 频率 6 Hz, 冲击力加载时间 7 ms^[13], 采用应力波法^[14]即式(15)求得钻杆轴向应力峰值为 57.5 MPa, 见图 2。

$$E = \frac{Ac}{K} \int_0^T \sigma_x^2 dt \quad (15)$$

式中: E 为钻杆轴向应力, A 为钻杆截面积, c 为钻杆中的声速, K 为钻杆材料的弹性模量, σ_x 为钻杆的轴向应力, t 为轴向力持续时间。

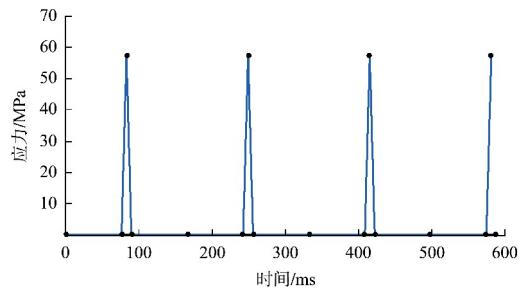


图 2 钻杆轴向应力

2 仿真结果分析

2.1 破碎锤类型选择

以 EDT3200、EDT2200、EDT1600 等 3 种破碎锤进行仿真模拟, 它们的额定单次冲击功分别为 7 900、4 200、2 900 J, 钻杆直径分别为 155、140、125 mm。模拟结果如图 3 所示, EDT1600 破

碎锤凿击岩石因冲击能不足, 前2.5 s凿深很小, 效率较低。EDT3200、EDT2200破碎锤分别在0.25 s(1次凿击)、0.80 s(5次凿击)后凿入深度呈正比增加, 凿岩速率分别为315、204 mm/s。两种破碎锤均能胜任该类岩石, 但从工程直接

和间接费用考虑总体施工成本, 优先选择冲击能较高的EDT3200破碎锤; 而且考虑岩石的不均匀性, 实际施工过程中可能会碰到强度更高的岩石, 因此选择冲击能高一些的破碎锤是合适的。

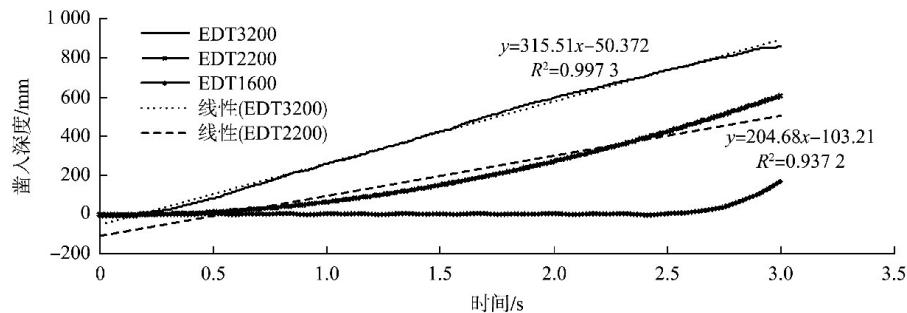


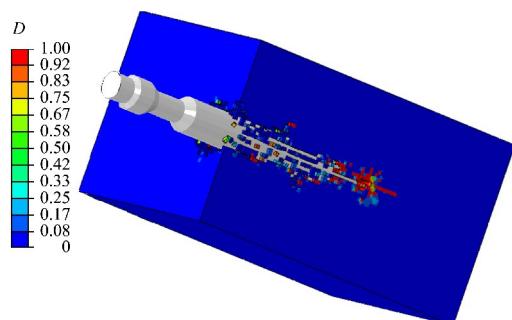
图3 不同类型破碎锤凿入深度对比

2.2 自由面对凿岩效率的影响

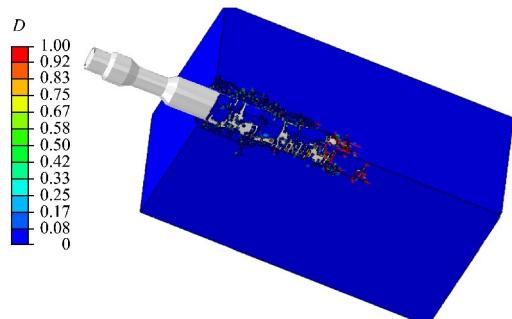
自由面为与空气接触的表面, 1个自由面的条件下凿岩仅有靠近钎杆附近很小范围的岩石被凿除, 凿岩效率最低。通过对2、3个自由面凿岩模拟, 凿岩效果如图4所示, 2、3个自由面均有劈裂效果出现。对2、3个自由面凿岩, 并取钎杆中心与自由边不同距离进行模拟, 统计数据见表2。通过对凿入深度、凿坑直径、劈裂效果深度及凿岩工程量的数据对比分析, 得出如下结论: 1) 自由面数量、钎杆距离对凿坑直径影响不大。2) 3个自由面较2个自由面凿入深度少8%, 但劈裂深度平均多14%, 凿岩工程量平均多17%。3) 3个自由面的条件下, 钎杆距离对凿入深度、劈裂深度和凿岩工程量均有较大影响, 钎杆距离180 mm时凿岩工程量少40%, 与其它两组比较显然是最不经济的。4) 钎杆距离140 mm与120 mm比较, 工程量相差很小, 凿入深度与劈裂深度之间的差值后者最小, 从施工质量方面考虑, 钎杆距离不大于120 mm平整度最佳, 而且水下定位精度较差的条件下, 如钎杆距离选择120 mm, 在40 mm误差范围内仍能保证260 mm的平整度, 施工质量是可控的。

表2 各工况条件下凿岩情况

| 工况 | 自由面数量/个 | 钎杆中心与自由边距离/mm | 凿入深度/mm | 凿坑直径/mm | 劈裂深度/mm | 工程量/m ³ |
|----|---------|---------------|---------|---------|---------|--------------------|
| 1 | 3 | 180 | 775 | 180 | 170 | 0.0278 |
| 2 | 3 | 160 | 780 | 180 | 520 | 0.0391 |
| 3 | 3 | 140 | 795 | 180 | 660 | 0.0378 |
| 4 | 3 | 120 | 860 | 180 | 860 | 0.0379 |
| 5 | 2 | 160 | 855 | 190 | 375 | 0.0313 |
| 6 | 2 | 140 | 870 | 190 | 540 | 0.0308 |
| 7 | 2 | 120 | 885 | 190 | 885 | 0.0327 |



a) 2个自由面



b) 3个自由面

图4 不同自由面数量的凿岩效果

3 应用实例

京杭运河枣庄段(马兰大桥以下)二级航道整治工程航道疏浚设计水深 4.0 m, 设计航槽宽 70 m, 施工过程中发现 12K+500—14K+500 段河床为硬底质, 经补勘后确认土质为岩石, 岩性为中风化灰岩, 单轴抗压强度 45.6 MPa, 疏浚岩石厚度约 0.3~1.1 m。京杭运河枣庄段航道繁忙, 使用钻爆法开挖需要封航施工, 钻爆施工方案不适合, 因此选用液压破碎法进行施工。

该工程投入施工设备为 PC330 挖掘机、爱德特三角型 EDT3200 破碎锤、6 000 L/min 空压机。施工中凿点布置如图 5 所示, 位距和排距均为 210 mm, 每个凿点凿入时间按水深测图计算的凿岩厚度确定, 并以挖机大臂上的深度指示标控制凿深。施工中选取 50 m×70 m 作为试验区域, 试验段凿岩工程量 2 832 m³, 施工时间 11 d, 每天工作 10~11 h, 凿岩作业时间 83.6 h, 施工效率达到 33.9 m³/h。经水深测量显示, 除少量浅点外, 平整度达到 0.21 m, 施工质量和效率均达到了比较理想的效果。

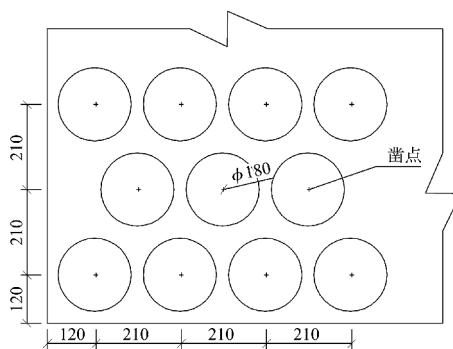


图 5 凿点布置 (单位: mm)

4 结论

1) 破碎锤的冲击能对凿岩速度有很大的影响, 施工前根据岩石强度等指标选取较合适的凿岩速度, 综合考虑施工总成本等因素, 合理选择凿岩设备。

2) 凿岩施工需要考虑自由面对凿岩效果的影响, 施工中要尽量创造在 3 个自由面的条件下进行凿岩。

3) 凿岩施工位距和排距等参数的确定, 需结合凿入深度、产生劈裂效果的深度进行对比, 如

两者相差大, 平整度较差, 质量难保证, 因此应尽量选取两者相差较小时的位距和排距以获得施工效率与施工质量的平衡。

参考文献:

- [1] 黄梓荣, 于杰, 范江涛, 等. 桂山牛头岛出坞航道水下爆破对游泳生物的影响评估 [J]. 南方水产科学, 2014, 10(5): 68-74.
- [2] 陈春晖, 吴立, 赵均文, 等. 水下钻孔爆破对紧邻建(构)筑物安全性影响研究 [J]. 爆破, 2016, 33(2): 117-122.
- [3] 何瑞峰, 洪钧, 陈昌斌, 等. 硬臂抓斗挖泥船增设岩石破碎装置改造应用 [J]. 中国港湾建设, 2022, 42 (9): 70-74.
- [4] 北京科技大学, 浙江创路机械有限公司. 液压破碎锤: JB/T 10844—2008[S]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 陈昊博. 液压破碎锤破岩机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [6] 韩科, 叶阳, 曾亚武. 临空面对破碎锤冲击破岩效果的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38(2): 41-48.
- [7] 李勇, 邓嵘, 刘云胜. 基于 ABAQUS 的 PDC 钻头切削齿温度场分析与仿真 [J]. 现代制造技术与装备, 2012(2): 1-3.
- [8] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strain, high strain rates, and high pressure [C]// The 14th International Symposium on Ballistic. Quebec: [s. n.], 1993: 591-600.
- [9] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 9-16.
- [10] 凌天龙, 吴帅峰, 刘殿书, 等. 砂岩 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数确定 [J]. 煤炭学报, 2018, 43 (8): 2211-2216.
- [11] 毕程程. 华山花岗岩 HJC 本构参数标定及爆破损伤数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [12] 连萌. 液压挖掘机破碎锤钎杆的冲击特性分析 [J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2017, 29(1): 46-50.
- [13] 蒋世应, 刘家伦, 王振华, 等. 液压破碎锤系统参数优化的仿真研究 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (14): 122-124.
- [14] 周志鸿, 许同乐, 高丽稳. 液压破碎锤冲击能检测方法分析 [J]. 建筑机械, 2004(8): 54-55.

(本文编辑 王传瑜)



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。