



高频破碎锤水下破礁特性的现场试验研究^{*}

裴邦学¹, 蒋国兴², 钟润兵¹, 韩亚峰², 杜建如¹

(1. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 为研究长江航道环境敏感区生态清礁技术, 通过开展高频破碎锤水下清礁现场试验, 研究高频破碎锤水下清礁特性, 优化破礁参数。试验结果表明: 高频破碎锤锤击过程中钎杆嵌入礁石的速度随钎杆和礁石接触面的增大而逐渐降低。钎杆嵌入深度随锤击时间的增大依次经历陡增、缓增及恒定 3 个阶段, 依次对应高频破碎锤的高效破岩、低效破岩和无效破岩阶段。高频破碎锤水下清礁的单次最优锤击时间为 20 s, 最优锤击间距为 0.3 m。研究成果对丰富环境敏感区水下生态清礁技术具有重要的参考价值。

关键词: 环境敏感区; 水下清礁; 高频破碎锤; 破岩特性; 破礁参数

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0198-05

Field test of underwater reef breaking characteristics of high frequency hydraulic breaking hammer

PEI Bangxue¹, JIANG Guoxing², ZHONG Runbing¹, HAN Yafeng², DU Jianru¹

(1. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China;

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

Abstract: To study the ecological reef clearing technology in the environmentally sensitive area of the Yangtze River channel, the field test of underwater reef clearing with high frequency hydraulic breaking hammer is carried out to study the underwater reef clearing characteristics of high frequency hydraulic breaking hammer and optimize the reef breaking parameters. The test results show that the speed of the drilling rod embedded in the reef gradually decreases with the increase of the contact surface between the drilling rod and the reef. With the increase of strike time, the embedment depth of the drilling rod experiences three stages in turn: steep increase, slow increase and constant, corresponding to the high efficiency rock breaking, low efficiency rock breaking and ineffective rock breaking stages of the high frequency hydraulic breaking hammer in turn. The single optimal strike time of high frequency hydraulic breaking hammer is 20 seconds and the optimal strike distance is 0.3 meters. The research results have important reference value for enriching underwater ecological reef clearing technology in environmentally sensitive areas.

Keywords: environmentally sensitive area; underwater reef clearing; high frequency hydraulic breaking hammer; rock breaking property; reef breaking parameters

长江航运能力的提升在服务“一带一路”倡议及长江经济带、交通强国、长江上游航运中心

建设中发挥着重要作用。而长江航道内分布的大量碍航礁石对船舶安全航行造成了大量隐患, 阻

收稿日期: 2022-12-29

*基金项目: 国家自然科学基金项目(42302332), 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0913)

作者简介: 裴邦学(1973—), 男, 高级工程师, 从事航道疏浚工程等方面的工作。

碍了长江航运能力的提升。

航道整治中的礁石清理方法主要包括机械破礁和化学爆破两大类, 其中机械破礁主要包括重锤凿岩、液压致裂、铣挖和水射流等, 化学爆破主要包括水下裸露爆破、微差爆破等^[1-5]。水下钻爆法清礁是目前使用较为广泛的清礁方式之一^[6-8]。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。因此, 在环境敏感区不宜采取爆破法清礁。其他破礁方法如: 重锤凿岩效率较低, 对抓斗船的钢丝绳、制动系统损伤较大^[9-13]; 水下液压柱破礁法对存在临空面的礁石破碎效果良好, 而对于无临空面的大块礁石破岩效率明显降低^[14-15]; 高速水射流破岩法则因水中能量衰减快、切割缝隙窄小等缺点, 不适用于河流礁石切除^[16-18]。

针对目前长江航道环境敏感区缺乏安全、高效的水下清礁技术这一问题, 本文提出采用高频破碎锤进行水下清礁。通过开展高频破碎锤水下破礁现场试验, 研究高频破碎锤的水下清礁特性, 优化破礁参数。旨在为扩展环境敏感区水下生态清礁技术提供参考。

1 工程概况

1.1 现场清礁区域和清礁设备

破碎锤清礁试验地点为老鹰石清礁区, 位于重庆涪陵蔺市。老鹰石清礁试验区设计水位为 145.72 m, 开挖底高程为 144.00 m。现场试验期间, 试验区的水位为 150.15~152.65 m, 水流流速为 1.81~2.17 m/s。老鹰石孤礁长约 9 m, 宽约 7 m。清理礁石厚度 0.25~4.50 m。老鹰石试验区见图 1。图 2 为现场试验所用的高频破碎锤, 其型号为 HB3600, 性能参数为: 工作质量 3.6 t, 工作流量 240~300 L/min, 冲击频率 280~560 次/min, 工作油压 16~18 MPa, 钺杆直径 170 mm, 主机质量 35~63 t。

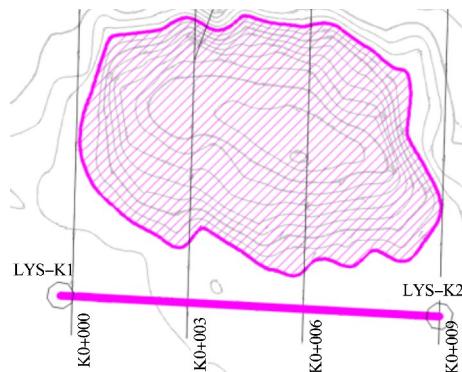


图 1 老鹰石试验区



图 2 高频破碎锤

破碎锤钎杆类型为锥四边形钎杆。钎杆直径 17 cm, 钎杆总长 100 cm, 钎杆尖端近似为边长为 4 cm 的正方形, 尖端渐变段长 25 cm。破碎锤钎杆的材质为 42crmo 钢, 其性能参数为: 屈服强度 930 MPa, 弹性模量 210 GPa, 泊松比 0.3, 密度 7.85 t/m³。

1.2 清礁区礁石力学参数

现场挖泥船清渣时, 获得较完整的岩样, 将岩样取回到实验室制取成直径为 50 mm、高为 100 mm 的标准圆柱试件。对试件进行岩石单轴压缩试验和常规三轴试验, 得到现场清礁试验区礁石的岩性为砂岩, 其力学参数为: 密度 2.540 t/m³, 单轴抗压强度为 33.74 MPa, 内摩擦角 46.40°, 黏聚力 6.75 MPa, 泊松比 0.22。

2 现场清礁试验方案

现场分别进行单点和多点锤击试验。单点锤击试验目的在于得到破碎锤在额定档位下的最优

锤击时间，随后采用得出的最优锤击时间进行多点锤击试验，锤击间距分别取 1.0 m(区域 I)、0.3 m(区域 II) 和 0.5 m(区域 III)。通过计算不同间距下的清礁量，确定最优的锤击间距。

试验中首先开展单点锤击试验，为避免前一锤击点的锤击对下一点的锤击效果产生影响，锤击点间的最小距离为 2 m，各试验点坐标见表 1。每个锤击点进行破碎锤额定档位下的单点锤击试验，直至各点达到最大嵌入深度。试验过程中记录不同时间段额定档位下的钎杆嵌入深度。

表 1 单点锤击试验各点坐标

试验点	x	y
a	422 542.90	3 284 046.91
b	422 544.60	3 284 047.97
c	422 546.30	3 284 049.02

注：采用 2000 国家大地坐标。

开展多点锤击试验时，利用测量船对破碎锤冲击前后的水下地形进行测量，并通过三维重构的方法得到清礁前后礁石的高程。此外，试验时记录每个试验区试验所花费的时间，以便计算不同锤击间距下的清礁功效。

3 试验结果分析

3.1 高频破碎锤水下破岩特征

按试验方案依次对 3 个试验点进行破碎锤单点锤击试验，得到各点破碎锤钎杆嵌入深度随时间的变化曲线。现以试验点 a 的锤击结果为例分析高频破碎锤的水下破岩特征，见图 3。

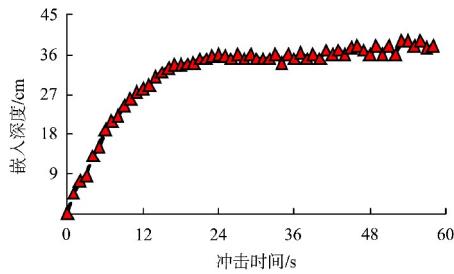


图 3 钎杆嵌入礁石深度随时间变化曲线

由图 3 可知，试验点 a 的锤击总时长为 58 s，最大嵌入深度为 39 cm，最大深度对应的锤击时间为 53 s。1) 从锤击开始至锤击时间 14 s 期间破碎

钎嵌入深度随时间快速增大。钎杆嵌入深度的变化特征与锤击过程中钎杆受到岩石的阻力密切相关。钎杆在锤击初期嵌入礁石的深度较小，钎杆与岩石的接触面积小，所受阻力较小，钎杆相对较容易打入礁石之中。因此，此时间段为高频破碎锤的高效破岩阶段。2) 14~22 s 期间钎杆嵌入深度随时间的增速减缓。这主要是因为随嵌入深度增大，钎杆与岩石接触面积增大，钎杆所受到的阻力增强，钎杆打入岩石就越困难，嵌入深度随锤击时间的增大而减缓，破碎锤由高效破岩阶段逐渐向低效破岩阶段转变。3) 22 s 之后，钎杆所受阻力增至最大，破碎锤提供的动力难以使钎杆嵌入深度进一步增大，嵌入深度随锤击时间基本不再变化，此时间段为无效破岩阶段。

3.2 最优锤击时间

单点试验时，各点周围无临空面，忽略锤击过程中岩体的开裂和飞溅，可将破碎锤钎杆打入岩体中的形状近似看为一圆洞。依据嵌入礁石深度的不同，可将钎杆嵌入礁石的过程分为 3 个过程(图 4)。假设锤击过程中破碎锤钎杆与岩石紧密接触，则锤击时钎杆与岩石的接触面积 S 与钎杆的嵌入深度 h 之间的关系可由式(1)的分段函数表示。

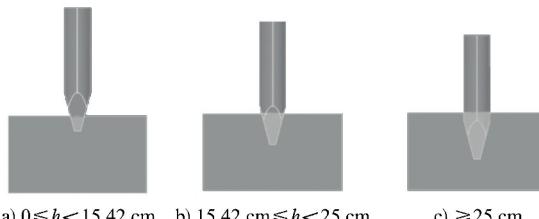


图 4 钎杆嵌入礁石过程

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \left(\frac{h^2}{\sin^2 75.43 \times \tan 75.88} + \frac{4h}{\sin 75.43} \right) \times 4 + 16 \\ \quad (0 \leq h < 15.42 \text{ cm}) \\ S = 52.55h - 287.52 \quad (15.42 \text{ cm} \leq h < 25 \text{ cm}) \\ S = 17\pi h - 308.95 \quad (h \geq 25 \text{ cm}) \end{array} \right. \quad (1)$$

将不同时刻的嵌入深度代入式(1)，可得到钎杆与岩石的接触面积随锤击时间的变化曲线，结果如图 5 所示。由图 5 可知，锤击过程中，钎杆与岩石接触面积的最大值为 1 773.93 cm²，对应时

间为 56 s。锤击开始时, 破碎锤尖端与岩石接触, 接触面积为 16 cm^2 ; 14 s 时钎杆与岩石的接触面积为 1346.67 cm^2 ; 22 s 时钎杆与岩石的接触面积为 1560.30 cm^2 。钎杆与岩石接触面积的时程变化特征与嵌入深度随时间的变化特征基本一致, 表明从接触面积增大导致钎杆所受阻力增强的角度解释钎杆破岩特征是合理的。

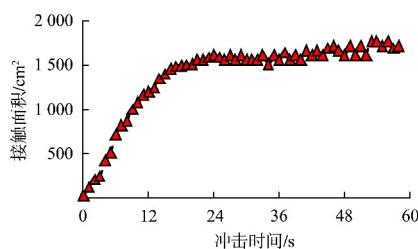


图 5 钎杆与岩石接触面积随时间的变化曲线

将 3 个试验点钎杆的嵌入深度随时间的变化曲线汇总, 见图 6。

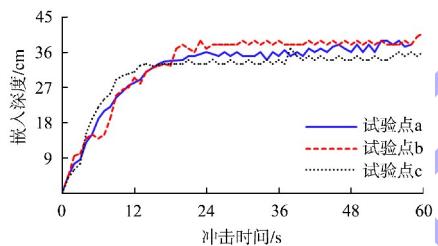


图 6 各试验点嵌入深度随时间变化曲线

由图 6 可知, 各试验点钎杆嵌入深度随时间的变化趋势基本一致, 即先快后慢, 直至嵌入深度基本不再随时间变化, 这也与客观实际相符。单点最优锤击时间的选取应当同时兼顾嵌入深度和破岩效率。试验点 a 的总锤击时间为 58 s, 最优锤击时间为 18 s, 对应的破碎锤嵌入深度为 32.5 cm; 试验点 b 的总锤击时间为 70 s, 最优锤击时间为 23 s,

对应的破碎锤嵌入深度为 38 cm; 试验点 c 的总锤击时间为 65 s, 最优锤击时间为 17 s, 对应的破碎锤嵌入深度为 33 cm。

将各试验点的最优锤击时间取平均值作为破碎锤的最优锤击时间, 得出破碎锤的最优锤击时间为 19.3 s, 对应的钎杆嵌入深度为 34.5 cm。为便于现场操作, 实际应用中取破碎锤的最优锤击时间为 20 s。

3.3 最优锤击间距

依据单点锤击试验得到的最佳锤击时间开展多点锤击试验。试验前后通过扫测船测得清礁区的高程, 将高程图中清礁区内各点的高程信息导入到 Rhino 软件中绘制清礁区清礁前后的三维形态图, 见图 7。

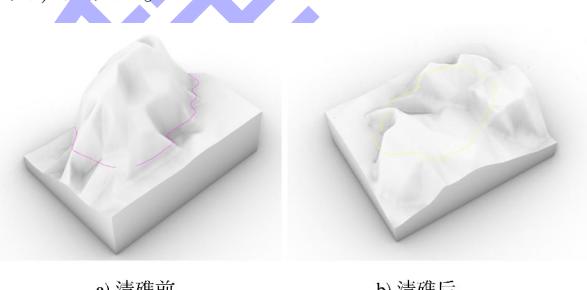
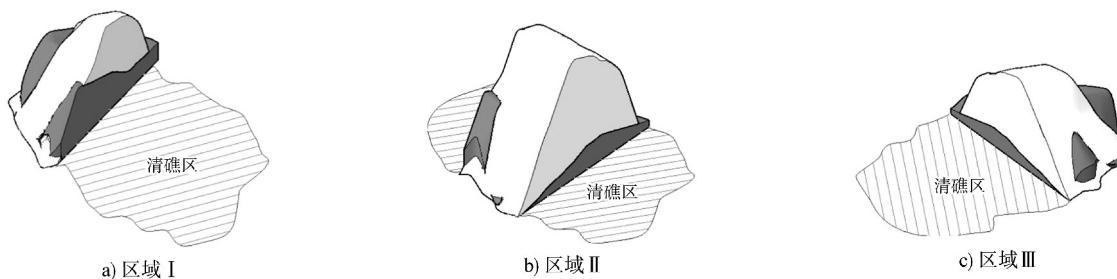


图 7 清礁前后礁石三维形态

由图 7 可知: 清礁前礁石最高处高程为 148.51 m, 距设计底高程(144.00 m)4.51 m。清礁后清礁区域高程较清礁前明显减小, 清礁效果明显。将 Rhino 软件中礁石三维实体单元导出为 CAD 可读取的 .dwg 格式, 并在 CAD 中将清礁前后的地形实体放在一个 CAD 文件中。通过对实体单元进行布尔运算, 可得清礁前后 3 个区域内礁石的三维形态对比图, 结果如图 8 所示。使用 CAD 中的 MASSPROP 命令, 统计得到各清礁区域的清礁量, 见表 2。



注: 白色为清礁前的礁石, 灰色为清礁后剩余的礁石。

图 8 不同区域清礁前后礁石三维形态

表 2 多点试验各区域清礁情况

试验区域	区域面积/ m^2	平均清礁深度/m	最大清礁深度/m	清礁量/ m^3
I	13.32	0.63	3.21	8.41
II	18.00	1.62	3.70	29.23
III	16.33	1.07	3.38	17.51
总计	47.65	-	-	55.15

现场破碎锤清礁有效总工作时间总计 68.28 h, 其中区域 I 清礁耗时 11.38 h, 区域 II 清礁耗时 34.14 h, 区域 III 清礁耗时 22.76 h。由表 2 可知, 区域 I 的清礁效率为 $0.74 m^3/h$, 区域 II 的清礁效率为 $0.86 m^3/h$, 区域 III 的清礁效率为 $0.77 m^3/h$ 。多点锤击试验各区域的清礁效率依次为区域 II > 区域 III > 区域 I。因区域 II 的锤击间距为 0.3 m, 因此, 老鹰石破碎锤清礁的最优锤击间距为 0.3 m。

4 结论

1) 高频破碎锤锤击过程中钎杆的嵌入礁石的深度随时间的变化特征与钎杆和礁石的接触面积密切相关, 钎杆嵌入速度随接触面积的增大而逐渐降低。

2) 钎杆的嵌入深度随锤击时间的增大依次经历陡增、缓增及恒定 3 个阶段, 各阶段分别对应高频破碎锤的高效破岩、低效破岩和无效破岩 3 个阶段。

3) 高频破碎锤水下清礁的单次最优锤击时间为 20 s, 最优锤击间距为 0.3 m。

参考文献:

- [1] 王少峰, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883-3912.
- [2] 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.
- [3] 龙友立, 朱永坚. 某内河航道整治工程关键问题探讨[J]. 中国水运, 2016(2): 38-40.
- [4] 秦玲. 内河航道水下炸礁工程施工技术[J]. 智能城市, 2021, 7(10): 137-138.
- [5] 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: 1-14.
- [6] 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.
- [7] 袁宝来, 钟瑞. 水下炸礁爆破施工工艺探讨[J]. 交通建设与管理, 2010(8): 99-100.
- [8] 李东, 张玥. 舟山港马香港区公共航道整治项目炸礁施工工艺及质量控制[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(9): 146-147.
- [9] 张涛. 水下凿岩施工在封开西江大桥清礁区的应用[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(7): 148-149.
- [10] 黄力衡, 李志豪. 水下重锤冲击凿岩法在港池加深清礁工程中的应用[J]. 港口科技, 2014(10): 1-4.
- [11] 杨金锋. 超高硬度礁石水下凿岩除礁施工技术探索[J]. 珠江水运, 2019(19): 93-94.
- [12] 黄继义, 隋海凤. 锤击法清除水下礁石在航道整治或码头建设工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(6): 25-26.
- [13] 陈开堤, 石全贵, 林文电. 凿岩棒在禁爆项目中的应用[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 31-33.
- [14] 程刚. 成孔液压涨裂破岩机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [15] 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, 910 (188): 101-105.
- [16] FORMAN S E, SECOR G A. The mechanics of rock failure due to water jet impingement [J]. Society of petroleum engineers journal, 1974, 14(1): 10-18.
- [17] 葛兆龙, 赵汉云, 卢义玉, 等. 高压水射流冲击作用下煤-砂岩-页岩损伤破裂特征[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 174-181, 209.
- [18] 张庆良. 水射流技术特点及其应用[J]. 邯郸职业技术学院学报, 2021, 34(4): 42-45.

(本文编辑 王传瑜)