

· 施工 ·



高频振动冲击作用下礁石损伤演化规律研究^{*}

刘明维¹, 蒋国兴¹, 裴邦学², 钟润兵², 杜健如²

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 山区公路水运交通地质减灾实验室, 重庆 400074;
2. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010)

摘要: 破碎锤破岩法作为一种生态环保的清礁方法, 在工程建设及航道整治开挖中得到越来越广泛的使用, 但关于高频振动冲击作用下礁石损伤演化规律研究较少, 破碎锤冲击参数对礁石损伤破碎的影响研究不足。基于水下破碎锤清礁现场试验数据, 建立破碎锤冲击下岩体损伤数值计算模型, 探究不同参数下的破碎锤破礁规律, 并运用极差分析法分析破碎锤破礁的主控因素。结果表明: 随着工作油压的增大, 礁石破碎参数非线性增加, 破碎体积线性增加; 随着冲击频率的增大, 礁石破碎参数值先增加后保持不变; 随着礁石强度增加, 礁石破碎参数值均减小; 工作油压是破碎锤破礁效率的主控因素, 其次是冲击频率, 最后是礁石强度。

关键词: 水下清礁; 破碎锤; 3DEC 模拟; 破礁参数; 敏感性分析

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0151-08

Evolution rule of reef damage under high-frequency vibration impact

LIU Mingwei¹, JIANG Guoxing¹, PEI Bangxue², ZHONG Runbing², DU Jianru²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China)

Abstract: As an ecological and environmentally friendly method for reef cleaning, the rock breaking method by a breaking hammer is increasingly widely used in engineering construction and waterway regulation and excavation. However, there are few studies on the evolution rule of reef damage under high-frequency vibration impact, and insufficient studies are conducted on the impact parameters of a breaking hammer on reef damage. Based on the field test data of underwater reef cleaning by a breaking hammer, this paper establishes a numerical calculation model for rock damage under the impact of a breaking hammer, explores the rules of reef breaking by a breaking hammer under different parameters, and analyzes the main controlling factors of reef breaking by a breaking hammer by using the range analysis method. The results show that with the increase in operating oil pressure, the reef breaking parameters increase nonlinearly, and the reef breaking volume increases linearly. With the increase in impact frequency, the value of the reef breaking parameters first increases and then remains unchanged. With the increase in reef strength, the value of the reef breaking parameters decreases. The operating oil pressure is the main controlling factor for the efficiency of reef breaking by a breaking hammer, followed by the impact frequency, and finally the reef strength.

Keywords: underwater reef cleaning; breaking hammer; 3DEC simulation; reef breaking parameters; sensitivity analysis

收稿日期: 2023-03-02

*基金项目: 长江重庆航道工程局科技项目 (cqjt-2021-202)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论方面的教学与研究。

“一带一路”倡议及长江经济带、交通强国、长江上游航运中心等战略的实施，迫切需要提升长江航运能力。提升河道航运能力较为有效的方法是通过工程措施，提高工程河段的航道尺度，改善工程河段的航道条件。近年来，国家提倡生态环保的建设开发思路，清礁工程中炸药的使用受到了更严格的管控，在此背景下，大量学者对非爆破岩技术进行了研究^[1-3]。随着破碎锤制造工艺的提高，破碎锤防水性能的大力提升，使其逐渐用于水下清礁破岩工程^[4-5]。破碎锤冲击下礁石的损伤破碎演化规律对于研究破碎锤破岩效果、清礁效率及适应性具有重要意义。

研究礁石在破碎锤冲击下的损伤演化本质是研究岩石在受到循环冲击荷载作用下的损伤演化。岩石在循环冲击荷载作用下，会产生累积损伤效应^[6]。林大能等^[7]研究岩石在循环冲击荷载作用下的损伤规律，得到关于围压、荷载冲量大小和冲击次数对岩石损伤程度的影响关系；陆华等^[8]使用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验装置，分析不同孔隙率红砂岩在循环冲击荷载作用下的动力特性和损伤，探讨孔隙率对岩石峰值应力、峰值应变和损伤的影响；Wang 等^[9]对深埋花岗闪长岩进行一系列的循环加载试验，提出一种岩石损伤演化模型，很好地描述了岩石在循环加载阶段和围压卸载阶段的损伤演化过程；姚吉康等^[10]对花岗岩开展单轴和三轴循环加卸载试验，分析花岗岩在循环荷载作用下的强度变化、变形和声发射特征；Rukhaiyar 等^[11]对石灰岩进行了不同加载速率下的单轴循环压缩试验，量化研究加载过程中的岩石的损伤破坏演变过程；凌志强等^[12]基于能量变化的岩石破坏理论，开展砂岩等加载单循环加载试验，证明岩体损伤是影响能量耗散的重要因素。

综上所述，对于岩石的动力损伤规律研究，主要采用岩石 SHPB 试验系统进行小圆柱试件循环加载试验，或进行室内岩石三轴循环加卸载试验研究；关于高频振动冲击作用下礁石损伤演化规律研究较少，高频冲击参数对礁石损伤的影响

研究不足。因此，本文基于水下破碎锤清礁现场试验，运用三维块体离散元软件 3DEC，建立破碎锤冲击下岩体损伤数值计算模型，分析不同机械参数及礁石强度下的礁石破碎参数值变化情况，探究不同参数下的破碎锤破礁规律及破碎锤破礁影响因素敏感性，对水下清礁工程中提高破碎锤工作效能具有重要的参考价值。

1 破碎锤冲击下岩体凿入深度试验研究

1.1 破碎锤破岩技术原理

破碎锤主要构件包括缸体、活塞、钎杆等，见图 1。它的主要原理是：冲击活塞在油压的作用下，在油缸内迅速作周期运动，从而将液压能转化为活塞的冲击能；钎杆一般为特殊合金钢材制成，刚度较大，作为中间介质，钎杆在获得冲击能量后迅速冲击岩石，将冲击能转化为破碎岩石的能量，达到破碎岩石的目的^[13]。

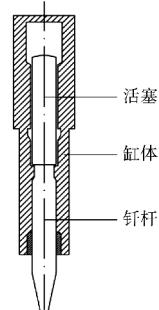


图 1 破碎锤构造

1.2 破碎锤清礁参数及方案

为探究破碎锤对水下礁石的凿入过程，设计并实施了水下破碎锤清礁现场试验。现场试验场地为老鹰石清礁区，位于重庆市涪陵区蔺市镇。整个试验区长约 9 m，宽约 7 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。对现场试验取得的礁石岩样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，单轴抗压强度为 33.74 MPa，密度为 2 540 kg/m³，内摩擦角为 46.40°，黏聚力为 6.75 MPa，泊松比为 0.22。

现场试验使用型号为 HB3600 破碎锤，其详

细性能参数为: 工作质量 3.6 t, 工作流量 240~300 L/min, 冲击频率 280~560 击/min, 工作油压 16~18 MPa, 主机质量 35~63 t。现场试验中破碎锤所使用的钎杆直径为 17 cm, 钎杆工作段的长度为 0.8 m, 尖端渐变段的长度为 25 cm。破碎锤钎杆的材质为 42crmo 钢, 屈服强度为 930 MPa, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比 0.3, 密度 7 850 kg/m³。

在试验区内选取 a、b、c 点进行锤击试验。锤击试验时, 将破碎锤的档位设置为额定档位, 锤击至各点达到最大凿入深度。试验过程中记录各试验点不同时间段的钎杆凿入深度。

1.3 破碎锤的岩体凿入规律

各试验点钎杆的凿入深度随时间的变化曲线如图 2 所示。可以看出, 各试验点钎杆凿入深度随时间的变化趋势基本一致, 即先快后慢, 直至凿入深度基本不再随时间变化。凿入深度的变化主要与钎杆所受岩体的阻力和破碎锤能提供给钎杆的冲击力相关: 随着凿入深度的增加, 钎杆与岩体的接触面积增大, 钎杆所受岩体阻力也就增加, 凿入深度增速减缓; 当钎杆所受的阻力与破碎锤提供给钎杆的最大冲击力相等时, 凿入深度就基本不再变化, 钎杆达到最大凿入深度。进一步分析可知, 对于试验区强度为 33.74 MPa 的礁石, 试验点 a、b、c 的破碎锤钎杆的平均最大凿入深度为 34.5 cm。

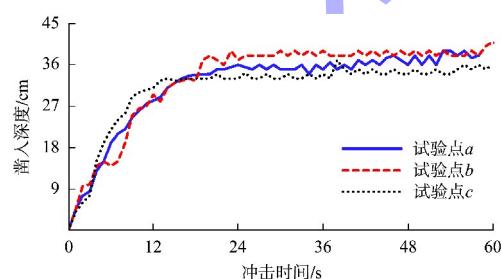


图 2 各试验点凿入深度随时间变化曲线

2 破碎锤冲击下岩体损伤数值计算模型

2.1 模型的建立及边界条件的设置

基于现场试验数据, 建立破碎锤冲击下岩体损伤数值计算模型, 进一步分析不同参数下的破碎锤破礁规律。

用 Rhino 6 软件建立破碎锤破岩模型, 模型分

为破碎锤钎杆模型和岩体模型两部分。钎杆模型尖端为圆锥形, 直径为 17 cm, 圆锥段长为 0.25 m, 圆柱段长 0.55 m; 根据在无临空面情况下现场试验数据及模型试算结果, 将岩体模型取边长均为 1 m 的立方体; 钎杆在岩体上的凿击位置为顶面中心。为了减小最后软件运算时的计算量, 同时考虑到破碎锤实际可能的凿入深度, 将模型块体顶部中心 0.3 m×0.3 m×0.5 m(边长×边长×高)的区域网格进行局部加密, 加密区四面体网格边长为 0.02 m, 非加密区四面体网格边长最大为 0.2 m, 整个模型共有 21 807 个块体。破碎锤破岩模型如图 3 所示。

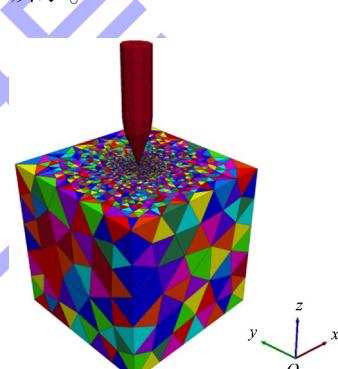


图 3 破碎锤破岩模型

模型的边界条件设置为: 岩石模型顶面不设约束, 为自由面; 岩石模型四周设置黏性边界, 模拟无临空面情况, 同时减小边界产生的应力波反射; 岩石模型底面固定。约束钎杆模型的 x 和 y 向位移, 使钎杆只能沿 z 向(竖向)移动。

2.2 模型参数选取

基于 1.2 节中礁石和破碎锤钎杆的力学参数, 设置模型参数。其中岩体本构模型取为弹塑性模型, 屈服条件符合摩尔库仑破坏; 岩石节理本构模型为面接触-库仑滑移模型。钎杆采用线弹性模型, 并在 3DEC 中用 join on 命令将钎杆模型合并成为一个整体。岩体节理的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s , 可以取周围最硬相邻区域等效刚度的 10 倍^[14], 用以下公式计算:

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中: K 为体积模量, GPa; G 为剪切模量, GPa; Δz_{\min} 为接触面法向方向上连接区域上最小尺寸, m。

计算模型的参数取值见表 1。

表 1 岩体与钎杆参数取值

类别	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	K /GPa	G /GPa	泊松比 μ	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)	抗拉强度 σ_t /MPa	k_n /(GPa·m ⁻¹)	k_s /(GPa·m ⁻¹)
岩体	2 540	3.44	2.37	0.22	6.75	46.40	2.00	6 600	6 600
钎杆	7 950	172.00	79.20	0.30	-	-	-	-	-

2.3 循环冲击荷载的施加

破碎锤锤击工作时, 钎杆不断受到活塞的撞击进行破碎作业。因此在进行数值模拟分析时, 在钎杆的顶部施加循环荷载模拟活塞撞击钎杆过程。活塞和钎杆的长度均远大于其直径, 是典型的细长杆, 活塞在油压作用下冲击钎杆的过程可以看成弹性杆冲击弹性杆模型。应用一维弹性动力学理论, 活塞与钎杆碰撞后从接触面向钎杆中传出矩形波^[15]。冲击荷载时程曲线如图 4 所示。

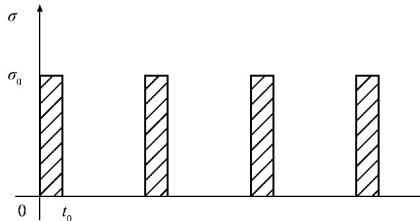


图 4 冲击荷载时程曲线

通常破碎锤的活塞和钎杆所使用的材料相同且断面面积相等, 活塞和钎杆中产生的初始应力大小 σ_0 和矩形波的作用时间 t_0 可由以下公式计算:

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} \rho c v_{\text{冲}} \quad (2)$$

$$t_0 = 2L/c \quad (3)$$

式中: ρ 为钢的密度, kg/m³, 取 7 850 kg/m³; c 为钢的波速, m/s, 取 5 900 m/s; $v_{\text{冲}}$ 为活塞冲击钎杆的速度, m/s, 在额定档位下取 8.16 m/s; L 为活塞的长度, m, 取 1.1 m。

2.4 模型计算结果与验证

由于在 3DEC 计算软件中用 join on 命令将破碎锤钎杆合并为一个整体, 故计算过程中可以通过监测钎杆尖端上一点的位移反映整个钎杆的位移, 从而得到钎杆凿入岩体的深度变化情况。模型计算的位移云图见图 5, 钎杆位移时程曲线见图 6。

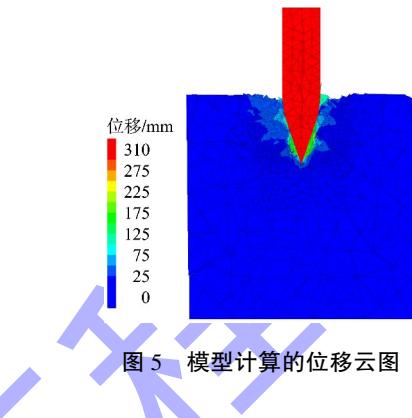


图 5 模型计算的位移云图

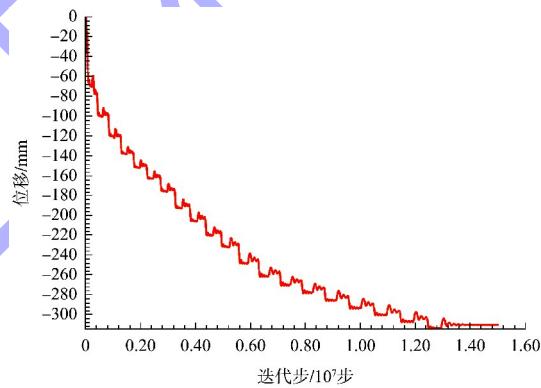


图 6 钎杆位移时程曲线

由图 6 可知, 破碎锤钎杆位移的变化趋势呈阶梯状增大, 直至达到最大位移, 这与模型中对钎杆施加的矩形荷载是密切相关的。破碎锤钎杆最大的位移为 -304 mm, 即破碎锤最大的凿入深度为 304 mm。结合前文中破碎锤清礁试验所得的破碎锤钎杆的平均最大凿入深度为 345 mm 可知, 数值模拟和现场试验的凿入深度相差 41 mm, 误差为 11.9%, 主要是现场试验的岩石存在一定的裂隙, 因此凿入深度略大, 可见数值计算模型可以合理模拟岩石损伤全过程。

3 破碎锤冲击下礁石损伤规律分析

在破碎锤材料和几何尺寸一定的情况下, 影响破礁效果的因素有破碎锤的工作油压、冲击频

率以及礁石强度。工作油压影响活塞冲击钎杆的速度, 从而影响冲击荷载的幅值; 冲击频率直接影响单位时间内活塞冲击钎杆的频率, 即岩体受到钎杆打击的次数; 礁石强度是礁石抵抗变形和破坏的能力。以下探讨这 3 个因素对破碎锤破礁效果的影响情况。

通过以下参数描述模型计算结果中礁石的损伤破碎情况: 1) 凿入深度 h , 即破碎锤钎杆尖端凿入岩体的最大深度; 2) 破碎体积 V , 即破碎锤锤击所破碎的岩体体积。破碎体积 V 可通过破碎深度 H (岩体裂缝在竖直方向发展的最大深度) 和破碎宽度 W (岩体裂缝在水平方向发展的最大宽度) 计算获得。由图 5 可知, 破碎的岩体在三维空间中的形状为漏斗形, 可近似看作是一个圆锥, 故破碎体积可由以下公式计算:

$$V = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{W}{2} \right)^2 H \quad (4)$$

式中: W 为破碎宽度, m; H 为破碎深度, m。

3.1 工作油压对破碎锤破礁规律的影响

为了探究破碎锤不同工作油压作用下的礁石破碎规律, 设计 5 种工况, 运用 3DEC 软件模拟不同工况下的礁石破坏过程。工况具体设置为: 礁石强度 30 MPa 和冲击频率 10 Hz 保持不变, 将破碎锤的工作油压设置为 10、15、20、25、30 MPa。软件中, 通过改变荷载时程曲线中荷载峰值的大小, 模拟不同的工作油压。在破碎锤工作过程中, 活塞在破碎锤缸体内的受力情况十分复杂。为简化计算, 本文仅考虑工作油压对活塞运动过程的影响, 活塞获得的动能由工作油压提供。在活塞行程一定的情况下, 工作油压与冲击速度的二次方成正比, 据此结合实际破碎锤参数推算不同工作油压下的活塞冲击速度, 再将冲击速度代入式(2)便可计算对应的冲击荷载峰值取值礁石破碎参数(h, H, W)随工作油压变化的曲线见图 7a), 破碎体积 V 随工作油压变化的曲线见图 7b)。

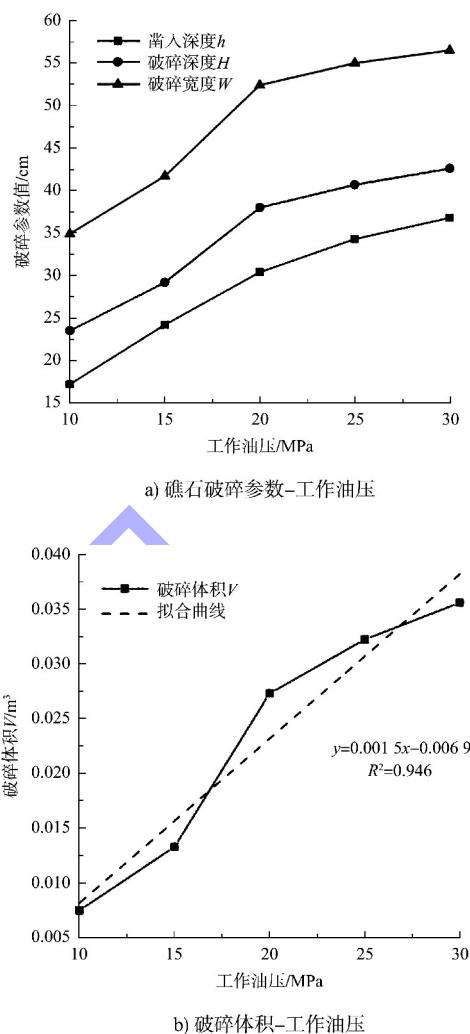


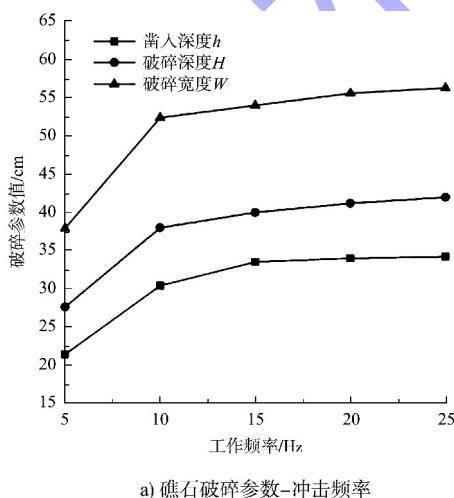
图 7 礁石破碎参数和破碎体积随工作油压变化曲线

由图 7a) 可知, 随着工作油压的增大, 凿入深度、破碎深度及破碎宽度均会非线性增加, 破碎深度和破碎宽度增加速率先增大后减小, 凿入深度的增加速率逐渐减小。原因是随工作油压加大, 钎杆的凿入深度越大, 礁石与钎杆的接触面积就越大, 钎杆受到礁石的嵌固作用加强, 钎杆所受的阻力就加大, 从而使凿入深度的增加速率逐渐减小。模型中破碎锤钎杆渐变段圆锥长度为 25 cm, 故当凿入深度小于 25 cm 时钎杆对岩体表面水平方向的挤压力较大, 促进岩体表面裂缝发展, 破碎宽度增加较快; 当凿入深度大于 25 cm 时, 岩体表面位置所受钎杆的挤压力减弱, 岩体表面附近裂缝发展速度减缓, 破碎宽度增加减缓。破碎深度

的变化主要与钎杆的冲击力和岩体抵抗开裂的能力有关，当凿入深度较小时，随工作油压的增加，钎杆冲击力的增加占主导地位，破碎深度增加较快；当凿入深度较大时，随工作油压的增加，岩体抵抗开裂的能力增强占主导地位，破碎深度增加减缓。通过分析图 7b) 可知，随着工作油压的增加，岩体破碎体积增大，破碎锤破岩效率加快。工作油压为 30 MPa 时的破碎体积是工作油压为 10 MPa 的破碎体积的 4.75 倍，增加工作油压能有效提升破碎锤的工作效能。

3.2 冲击频率对破碎锤破礁规律的影响

冲击频率直接影响单位时间内岩体受到钎杆打击的次数，在很大程度上会影响破碎锤作用下岩体的破碎情况。试验参数设置为：礁石强度为 30 MPa，破碎锤的工作油压为 20 MPa，冲击频率分别为 5、10、15、20、25 Hz。软件中，通过改变荷载时程曲线中两相邻冲击荷载峰值之间的时间间距，模拟不同的冲击频率。控制各工况下的冲击荷载总的作用时间相同，根据数值模型计算结果分析在各参数作用下的礁石破碎锤参数值。礁石破碎参数和破碎体积随冲击频率变化曲线见图 8。



a) 破碎参数-冲击频率

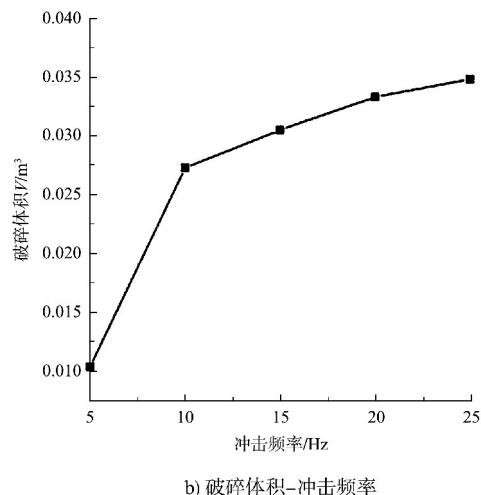


图 8 破碎参数和破碎体积随冲击频率变化曲线

由图 8a) 可知，随着冲击频率的增大，凿入深度、破碎深度及破碎宽度均先增加后几乎保持不变，且当冲击频率大于 15 Hz 时，冲击频率的变化几乎对破碎参数值没有影响。其原因为：当冲击频率增大到一定值后，冲击频率的增加并不能产生足够的冲击力使岩体再次破碎，破碎参数值不再变化。由图 8b) 可知，随着冲击频率的增加，岩体破碎体积增加速率逐渐减小，故当冲击频率小于 15 Hz 时，增大冲击频率可有效提升破碎锤效能。

3.3 破碎锤参数对破碎锤破礁规律的影响

为探究不同礁石强度下的破碎锤破礁规律，将破碎锤的工作油压设置为 20 MPa，冲击频率设置为 10 Hz，礁石的抗压强度分别设置为 20、25、30、35、40 MPa。礁石破碎参数和破碎体积随礁石强度变化曲线见图 9。可以看出，礁石破碎参数值均随礁石强度的增大而减小，且减小趋势越来越大。原因是随着礁石强度的增大，岩体抵抗变形和破坏的能力增强，破碎锤钎杆越难凿入岩体。随着礁石强度的增加，破碎锤破岩效率降低，且降低趋势加大。礁石强度为 40 MPa 时的破碎体积是礁石强度为 20 MPa 的 29%，破碎

锤工作效能大幅下降, 故破碎锤不宜破碎强度太高的礁石。

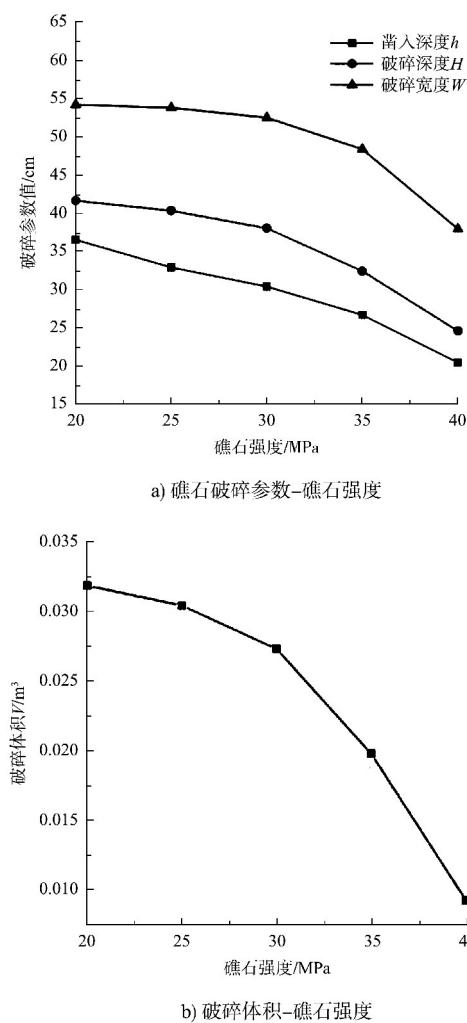


图 9 礁石破碎参数和破碎体积随礁石强度变化曲线

3.4 破碎锤破礁影响因素敏感性分析

破碎锤破礁效果的主要影响因素有破碎锤的工作油压、冲击频率和礁石强度。为减少数值模拟计算工况, 采用正交试验, 根据各影响因素极差大小的次序, 分析各因素对结果影响大小的次序。每个影响因素考虑 3 个水平, 选用 $L_9(3^3)$ 正交表设计试验。试验的因素水平见表 2, 试验各工况计算结果与各因素极差分析见表 3、4。

表 2 因素水平

水平	因素 A		因素 B		因素 C	
	工作油压/MPa	冲击频率/Hz	礁石强度/MPa			
1	15	5	20			
2	20	10	30			
3	25	15	40			

表 3 各工况计算结果

工况	因素 A	因素 B	因素 C	h/cm	H/cm	W/cm	V/m^3
1	1(15)	1(5)	1(20)	18.2	23.6	35.5	0.008
2	1(15)	2(10)	3(40)	12.5	18.7	25.4	0.003
3	1(15)	3(15)	2(30)	19.6	25.6	28.6	0.006
4	2(20)	1(5)	3(40)	15.7	21.7	30.2	0.005
5	2(20)	2(10)	2(30)	30.4	38.0	52.4	0.027
6	2(20)	3(15)	1(20)	40.2	45.9	62.5	0.047
7	3(25)	1(5)	2(30)	23.5	31.3	46.7	0.018
8	3(25)	2(10)	1(20)	42.3	50.6	61.3	0.050
9	3(25)	3(15)	3(40)	37.3	46.3	59.5	0.043

表 4 各因素极差分析结果

参数	因素 A	因素 B	因素 C
h	17.6	13.2	11.7
H	20.1	13.7	11.1
W	26.0	12.7	14.7
V	0.031	0.022	0.018

由极差分析法原理可知, 极差反映了因素的水平变动时, 试验指标的变动幅度。极差越大, 说明该因素对试验指标的影响越大, 因此也就越重要^[16]。分析表 4 可知, 影响凿入深度、破碎深度和破碎体积的 3 个因素极差大小排序为 A(工作油压) > B(冲击频率) > C(礁石强度), 影响破碎宽度的 3 个因素极差大小排序为 A > C > B。因此, 对凿入深度、破碎深度和破碎体积影响最大的因素是工作油压, 其次是冲击频率, 最后是礁石强度; 对破碎宽度影响最大的因素是工作油压, 其次是礁石强度, 最后是冲击频率。又因破碎体积是描述破碎锤破岩效果最为直接的参数, 故增大破碎锤工作油压是提升水下破碎锤破岩效果最为有效的方法。该结论可为破碎锤的设计制造提供一定的指导。

4 结论

1) 随着工作油压的增大, 礁石破碎参数(凿入深度、破碎深度、破碎宽度)都非线性增加, 破碎体积线性增加, 增大工作油压能有效提高破碎锤破岩工作效能。

2) 当冲击频率小于 15 Hz 时, 随着冲击频率的增大破碎参数均增加; 当冲击频率大于 15 Hz 时, 冲击频率的变化对破碎参数值影响不大。破

碎锤的冲击频率不宜小于 15 Hz，但不断增大冲击频率并不能增加破碎锤施工效益。

3) 随着礁石强度的增大，岩体抵抗变形和破坏的能力增强，破碎锤钎杆越难凿入岩体，破碎锤工作效能下降，破碎锤不宜破碎强度太高的礁石。

4) 通过正交试验设计开展因素敏感性分析发现：工作油压是破碎锤破岩效果的主控因素，其次是冲击频率，最后是礁石强度。故提高水下破碎锤工作效能的最有效的方法是增大破碎锤的工作油压。

参考文献：

- [1] 张伯友. 超高硬度礁石水下凿岩除礁施工技术[J]. 水运工程, 2017(8): 53-56.
- [2] 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.
- [3] 王少锋, 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.
- [4] 韦昌方. 液压破碎法在右江航道整治工程中的应用及质量控制探讨[J]. 西部交通科技, 2022(6): 198-200.
- [5] 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.
- [6] 单仁亮, 黄博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 289-296.
- [7] 林大能, 陈寿如. 循环冲击荷载作用下岩石损伤规律的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005 (22): 4094-4098.
- [8] 陆华, 王建国, 马肖彤, 等. 循环荷载下大孔隙红砂岩的动力响应及损伤研究 [J]. 工程爆破, 2021, 27 (1): 45-52.
- [9] WANG Y, HAN J Q, LI P, et al. Effect of prior cyclic damage on rock failure exposed to triaxial multistage unloading confining pressure and cyclic loads [J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2022, 46(3): 1140-1158.
- [10] 姚吉康, 王志亮, 何爱林, 等. 循环加卸载下花岗岩强度变形及声发射特征 [J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 74-81.
- [11] RUKHAIYAR S, SAMADHIYA N K. Strength behavior of rocks under cyclic loading [J]. Indian geotechnical journal, 2018, 48(1): 176-187.
- [12] 凌志强, 张天军, 王建辉. 单循环加载过程中砂岩能量演化规律 [J]. 西安科技大学学报, 2021, 41 (5): 879-885.
- [13] 胡彦龙. 挖掘机破碎锤工况延长主泵使用寿命分析 [J]. 液压气动与密封, 2022, 42(7): 76-78, 82.
- [14] 石崇, 褚卫江, 郑文棠. 块体离散元数值模拟技术及工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] 陈昊博. 液压破碎锤破岩机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [16] 郑禄文, 张佳强, 任泉, 等. 双排地连墙深基坑对邻近船闸的多因素影响分析 [J]. 水运工程, 2021 (7): 192-198.

(本文编辑 王璁)

· 消息 ·

广西防城港防钢基地专用码头通过竣工验收

近日，一航局承建的广西防城港企沙港区赤沙作业区 13#~16#泊位及工作船泊位工程通过竣工验收。该项目建设内容为 2 个 2 万吨级件杂货泊位、2 个 1 万吨级件杂泊位，泊位长度为 733 m，年设计通过能力 416 万 t。项目建成后，将极大缓解防城港钢铁基地货物吞吐紧张局面，显著降低成品钢材的装船外发成本，促进我国钢产品辐射整个东盟商圈经贸发展。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202311/t20231123_211754.html (2023-11-23)