

· 施 工 ·



# 高频破碎锤冲击作用下礁石损伤特性及影响规律\*

潘 剑<sup>1</sup>, 蒋国兴<sup>2</sup>, 韩亚峰<sup>2</sup>, 阿比尔的<sup>2</sup>

(1. 广西平陆运河建设有限公司, 广西南宁 530000; 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高频破碎锤水下破礁特征, 采用理论分析和数值模拟方法, 分析高频破碎锤冲击作用下礁石的损伤特性及影响规律。结果表明, 冲击钎杆周边岩体以剪切破坏为主, 远离钎杆处岩体则以拉破坏为主。凿入深度、破碎深度及破碎宽度随工作压力与冲击频率的增大而增大, 随礁石强度的增大而减小, 高频破碎锤不宜破碎强度太高的礁石; 大于临界冲击频率时, 破碎参数改善不显著。工作压力是影响高频破碎锤破礁效果的主控因素, 其次是冲击频率, 最后是礁石强度。建立了钎杆凿入深度与岩体破碎体积的数学关系, 提出了高频破碎锤破礁工效计算方法。研究成果对优化高频破碎锤破礁参数、提高破礁效率具有参考价值。

**关键词:** 环境敏感区清礁; 高频破碎锤; 礁石损伤特性; 影响规律

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0239-07

## Damage characteristics and influence rules of reef under impact of high-frequency crushing hammer

PAN Jian<sup>1</sup>, JIANG Guoxing<sup>2</sup>, HAN Yafeng<sup>2</sup>, ABI Erdi<sup>2</sup>

(1. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530000, China;

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

**Abstract:** To study the underwater reef damage characteristics of the high frequency hammer in the sensitive area of the Yangtze River channel, theoretical analysis and numerical simulation are used to analyze the damage characteristics and influence rules of the reef under the impact of the high-frequency hammer. The results show that the rock mass around the impact drill rod is mainly shear damage, while the rock mass away from the drill rod is mainly tensile damage. The penetration depth, crushing depth and crushing width increase with the increase of working pressure and impact frequency, and decrease with the increase of reef strength. The high-frequency crushing hammer should not break the reef with too high strength. When the impact frequency is greater than the critical frequency, the improvement of the crushing parameters is not significant. The working pressure is the main factor affecting the reef breaking effect of the high frequency crushing hammer, followed by the impact frequency, and finally the reef strength. The mathematical relationship between the drilling depth of drill rod and the volume of rock mass is established, and the calculation method of reef breaking efficiency of high-frequency hammer is put forward. The research results have reference value for optimizing reef breaking parameters and improving reef breaking efficiency.

**Keywords:** reef clearing in environmentally sensitive areas; high-frequency hydraulic breaking hammer; reef damage characteristics; influence laws

收稿日期: 2023-11-17

\*基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA23062023); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0913)

作者简介: 潘剑(1986—), 男, 高级工程师, 从事港口航道与海岸工程工作。

“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国家战略的实施迫切需要提升长江航运能力，而长江航道内分布的大量碍航礁石对船舶安全航行制造了大量隐患，成为长江航运能力提升的主要障碍之一。

水下钻爆法清礁是目前使用较为广泛的清礁方式之一<sup>[1]</sup>。因长江重庆段部分礁石位于“四大家鱼”核心保护区内，而水下钻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。其他破礁方式还有重锤凿岩、水下液压柱破礁以及高速水射流等，其中重锤凿岩效率较低，且对抓斗船的钢丝绳与制动系统损伤较大<sup>[2-5]</sup>；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<sup>[6-7]</sup>；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<sup>[8-10]</sup>。

高频破碎锤是一种适用于长江航道环境敏感区的安全、高效的非爆清礁方式<sup>[11]</sup>。但目前针对其水下破礁特征研究较少。本文采用理论分析和数值模拟方法，分析高频破碎锤冲击过程中礁石损伤特性和影响规律，并通过建立钎杆凿入深度与岩体破碎体积的数学关系，提出高频破碎锤清礁工效计算方法，旨在为优化高频破碎锤破礁参数、提高破礁效率提供参考。

## 1 高频破碎锤冲击下岩体损伤数值计算模型

### 1.1 模型参数与边界条件

数值模型含高频破碎锤钎杆模型和岩体模型2部分，其中钎杆模型尖端为圆锥形，直径17 cm，圆锥段长0.25 m，圆柱段长0.55 m；岩体模型为长宽高均为1 m的立方体。岩体模型顶部中心0.3 m×0.3 m×0.5 m区域块体进行加密，网格大小为0.02 m，未加密区网格大小设置为0.2 m。采用Rhino(犀牛)6软件建立模型并生成渐变网格。

对高频破碎锤室内试验所使用的岩石材料开展数值模拟<sup>[12]</sup>，其物理力学参数为密度2.532 t/m<sup>3</sup>，

单轴抗压强度28 MPa，弹性模量5.39 GPa，内摩擦角46.12°，黏聚力6.39 MPa，泊松比0.22。

高频破碎锤钎杆的材质为42 crmo钢，密度为7.950 t/m<sup>3</sup>，弹性模量为210 GPa，泊松比为0.3。

岩体模型四周设置黏性边界，模拟无临空面情况，同时降低边界的应力波反射，施加在岩体模型的节点上。模型底面固定，顶面为自由面。约束钎杆模型的x向和y向位移，使钎杆只能沿竖直z向移动，用于模拟高频破碎锤缸体对钎杆的约束作用，施加在钎杆模型的节点上。模型边界条件设置见图1。

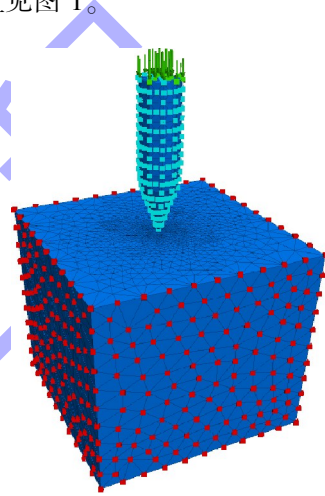


图1 计算模型边界条件设置

### 1.2 冲击荷载计算

高频破碎锤的活塞与钎杆的长度远大于直径，是典型的细长杆，活塞冲击钎杆过程可概化为弹性杆冲击弹性杆模型<sup>[13]</sup>，即将活塞和凿杆均视为细长弹性杆，并应用一维弹性动力学理论计算冲击力。当活塞以速度 $v_{\text{冲}}$ 冲击钎杆时，碰撞后从接触面向钎杆内输入强间断弹性波(矩形波)，依据波阵面上动量守恒定律可知：

$$\sigma_1 = -\rho c(v_1 - v_{\text{冲}}) \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \rho c v_2 \quad (2)$$

根据连续条件可知，在碰撞面上活塞和凿杆的质点速度应相等，作用力与反作用力也应相等，即： $v_1 = v_2$ ， $F_1 = F_2$ ， $\sigma_1 A_1 = \sigma_2 A_2$ 。

则式(1)、(2)可改写为：

$$\sigma_1 = \rho c v_{\text{冲}} \frac{A_2}{A_1 + A_2} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \rho c v_{\text{冲}} \frac{A_1}{A_1 + A_2} \quad (4)$$

$$F_1 = F_2 = \rho c v_{\text{冲}} \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \quad (5)$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$  为活塞和凿杆碰撞面产生的作用力和反作用力, N;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为活塞和凿杆中产生的初始应力, Pa;  $v_1$ 、 $v_2$  为活塞和凿杆的质点速度, m/s;  $c$  为钢的波速, 取 5 172 m/s;  $\rho$  为钢的密度, 取 7 850 kg/m<sup>3</sup>;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为活塞和凿杆的断面积, m<sup>2</sup>。

破碎锤设计时, 为提高活塞和钎杆使用寿命以及破岩效率, 通常活塞和钎杆的材料相同且直径相等。因此, 矩形波的波幅  $\sigma$  可简化为:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho c v_{\text{冲}} \quad (6)$$

矩形波的作用时间  $t$  为:

$$t = \frac{2L}{c} \quad (7)$$

式中:  $L$  为活塞长度, m。

活塞撞击钎杆后, 在活塞与钎杆接触面产生入射应力波并传入钎杆中, 而当应力波传递到钎杆与岩体界面会反射成拉力波, 当反射波传到钎杆自由面时又会产生反射而成为第 2 次入射波。由于极大部分能量传递是在第 1 次入射时完成, 故本文不考虑第 2 次应力波入射作用。因此, 活塞对钎杆的不断冲击可以看成是一个循环冲击荷载对钎杆顶端的作用。

室内试验破碎锤的参数即活塞长度取 1.1 m, 额定档位下的破碎锤工作压力为 18 MPa, 冲击频率约为 10 Hz, 活塞冲击钎杆的速度为 8.16 m/s。将上述参数代入式(6)、(7), 可求出冲击荷载幅值为 165.65 MPa, 作用时间为 425  $\mu$ s。由此可获得钎杆顶部受单次冲击荷载的时程曲线, 见图 2a)。重复输入单次冲击时荷载时程曲线可模拟多次冲击。模型中的冲击荷载以面力的方式施加在钎杆顶端, 见图 2b)。

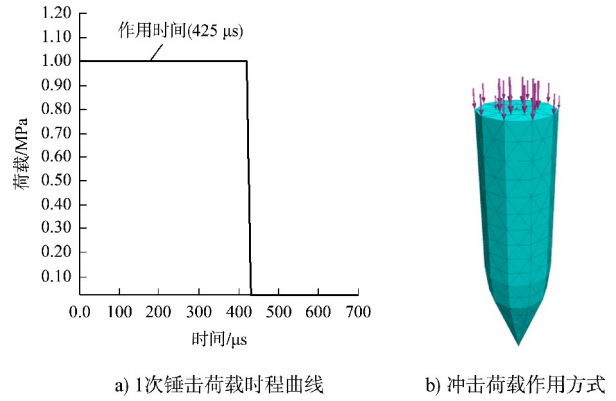


图 2 冲击荷载时程曲线及作用方式

### 1.3 模型验证

模拟中通过监测钎杆尖端上一点的位移可得到钎杆凿入岩体深度的时程曲线, 与室内试验所得结果进行对比, 如图 3 所示。

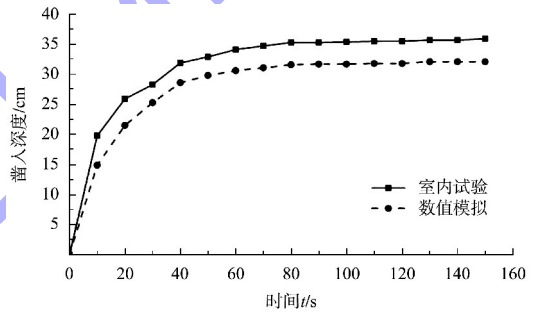


图 3 室内试验与数值模拟钎杆凿入深度时程曲线对比

图 3 直观地反应出, 数值模拟和室内试验所得到的钎杆凿入深度的变化趋势基本一致, 均呈现先迅速增加、后增速减缓、最后保持不变的趋势。室内试验和数值模拟所得的钎杆最大凿入深度分别为 35.3 和 31.5 cm, 相对误差为 10.9%, 这可能是因为数值分析中, 将岩体模型假设为均质各向同性, 而室内试验采用的混凝土属非均质材料, 内部存在一定缺陷, 导致室内试验的钎杆凿入深度偏大。总体而言, 数值计算模型与室内试验所得钎杆凿入深度的时程变化趋势基本一致, 最大凿入深度虽存在误差, 但误差值不大。因此, 采用所建立的数值模型开展后续数值分析是可行的。

### 2 高频破碎锤冲击过程中礁石损伤特性

图4为不同锤击次数时岩体典型位移和塑性区云图，分析可知：高频破碎锤冲击作用下岩体破坏形态呈漏斗状，且该漏斗的宽度大于深度。这是因为钎杆锤击时下方岩石受到挤压形成密实核，而只有当密实核下方的裂缝发展到一定程度时，岩石才被破碎、剥落，破碎深度才随之增加；岩石碎块剥落时，破碎宽度随之增加，且破碎宽度的增加值大于破碎深度的增加值。此外，钎杆周边岩体主要发生剪切破坏，远离钎杆岩体发生拉破坏。随着钎杆凿入岩体，破坏范围不断扩大，但扩大趋势减缓。

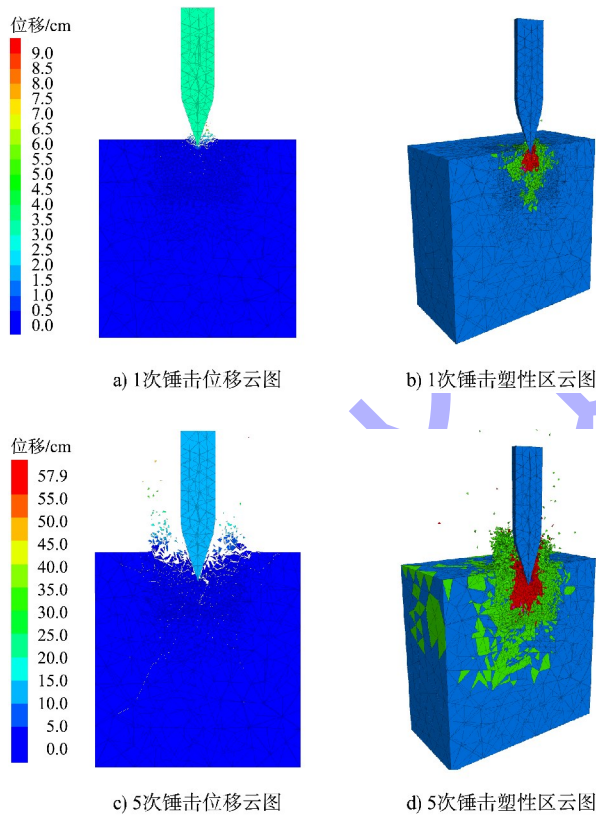


图4 高频破碎锤冲击过程中岩体的破碎范围

图5为模拟得到的高频破碎锤冲击过程中凿入深度 $h$ 、破碎宽度 $W$ 、破碎深度 $H$ 及破碎体积 $V$ 随冲击次数的变化曲线，分析可知， $h$ 、 $W$ 、 $H$ 及 $V$

均随冲击次数的增加而增大，且增大趋势均为先快后慢直至达到最大值。这主要是因为钎杆凿入深度逐渐加大过程中，岩体与钎杆的接触面积逐渐增大，钎杆所受阻力增强，在高频破碎锤提供给钎杆的最大冲击力不变时，钎杆也越难凿入岩体，导致岩体上述破碎参数的增加速率逐渐减小。

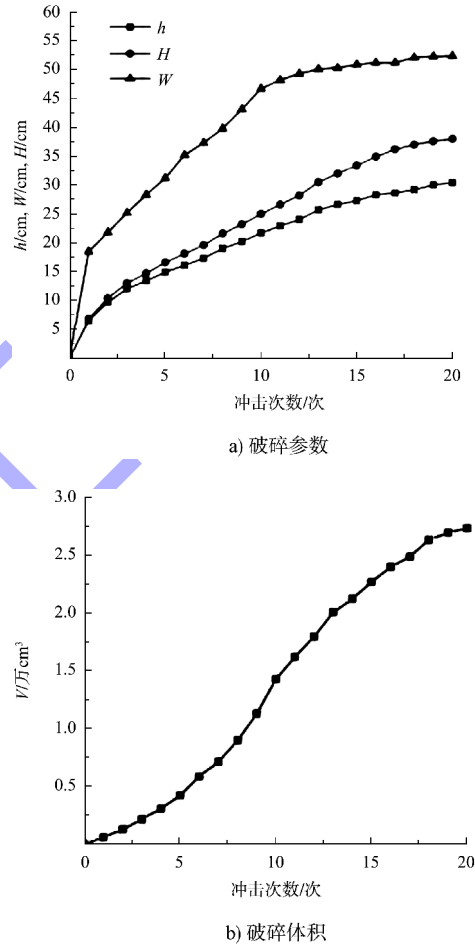


图5 破碎参数变化曲线

### 3 高频破碎锤冲击下礁石损伤特性影响规律

在高频破碎锤材料和几何尺寸一定的情况下，工作压力、冲击频率及礁石强度是高频破碎锤冲击作用下礁石损伤特性与破礁效率的重要影响因素。进一步采用3DEC模拟软件，讨论上述因素对高频破碎锤冲击下礁石损伤特性影响规律，模拟方案见表1。

表1 高频破碎锤冲击下礁石损伤特性影响规律模拟方案

| 工作压力 $N/\text{MPa}$                                  | 冲击频率 $M/\text{Hz}$                                   | 礁石强度 $T/\text{MPa}$                                  |
|--|--|--|
| 10、15、20、25、30 ( $M=10\text{ Hz}, T=30\text{ MPa}$ ) | 5、10、15、20、25 ( $N=20\text{ MPa}, T=30\text{ MPa}$ ) | 20、25、30、35、40 ( $N=20\text{ MPa}, M=10\text{ Hz}$ ) |

### 3.1 工作压力

模拟仅考虑工作压力对活塞在破碎锤缸体中运动过程的影响, 在活塞行程一定的情况下, 工作压力与冲击速度的平方成正比<sup>[14]</sup>。结合高频破碎锤参数可推算不同工作压力下活塞的冲击速度及对应的冲击荷载, 见表 2。

表 2 不同工作压力下的冲击荷载取值

| 工作压力/<br>MPa | 冲击速度/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 冲击荷载/<br>MPa | 作用时间/<br>$\mu s$ |
|--------------|-------------------------------|--------------|------------------|
| 10           | 6.08                          | 123.47       | 425              |
| 15           | 7.45                          | 151.22       | 425              |
| 20           | 8.60                          | 174.61       | 425              |
| 25           | 9.62                          | 195.22       | 425              |
| 30           | 10.53                         | 213.85       | 425              |

将表 2 中不同工作压力下的计算参数代入数值计算模型, 可得到不同工作压力下岩体破碎参数, 结果如图 6 所示。

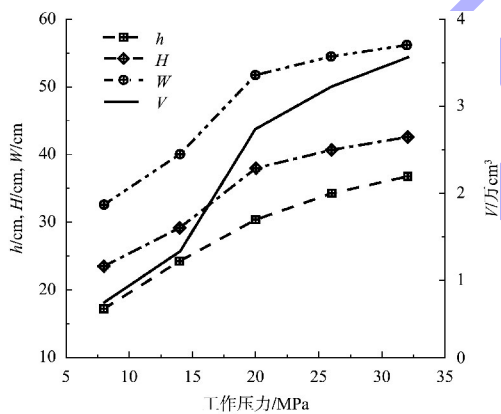


图 6 工作压力对礁石损伤特性的影响

分析图 6 可知,  $h$ 、 $H$  及  $W$  均随工作压力的增大呈非线性增加, 且  $H$  与  $W$  的增加速率先增大后减小, 凿入深度的增加速率逐渐减小, 这主要是由锤击过程中不断增大的礁石与钎杆接触面积与阻力引起的。

### 3.2 冲击频率

图 7 为冲击频率对礁石损伤参数的影响特征曲线。分析可知, 随冲击频率的增大,  $h$ 、 $H$  及  $W$  均先增加后几乎保持不变。当冲击频率大于 15 Hz 后, 冲击频率的变化几乎对破碎参数

值没有影响。这表明当冲击频率增大到一定值后, 继续提高冲击频率并不能产生使岩体持续破碎的冲击力, 破碎参数值不再变化, 因此工程中不能一味通过增大冲击频率来提高高频破碎锤的破岩效率。

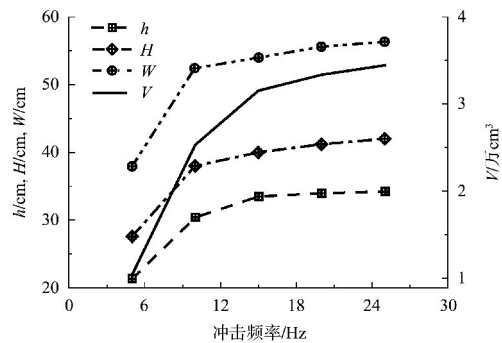


图 7 冲击频率对礁石损伤特性的影响

### 3.3 礁石强度

图 8 为礁石强度对自身损伤参数的影响特征曲线, 分析可知:  $h$ 、 $H$ 、 $W$  和  $V$  均随礁石强度的增大而减小, 且减小趋势越来越大。这主要是因为随礁石强度的增大, 岩体抵抗变形和破坏的能力增强, 高频破碎锤钎杆越难凿入岩体, 礁石破碎参数值减小。此外, 在高频破碎锤机械参数不变的情况下, 钎杆的最大破岩冲击力为一定值, 故礁石破碎参数值减小趋势越来越大。进一步分析可知, 随着礁石强度的增加, 高频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 的破碎体积的 0.29 倍, 高频破碎锤工作效能下降 71%, 故高频破碎锤不宜破碎强度太高的礁石。

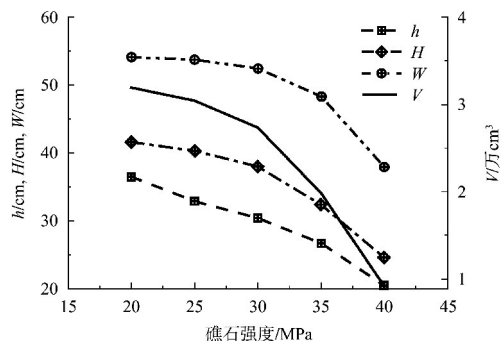


图 8 礁石强度对自身损伤特性的影响

### 3.4 礁石损伤特性敏感性分析

为定量研究工作压力(A)、冲击频率(B)及礁石强度(C)3个因素对高频破碎锤冲击作用下礁石损伤特性影响的重要程度,将3个因素各取3个水平,选取 $L_9(3^3)$ 正交表进行正交试验设计,共计9种工况,各工况损伤指标计算结果如表3所示。

表3 试验各工况计算结果

| A/MPa | B/Hz | C/MPa | h/cm | H/cm | W/cm | V/cm <sup>3</sup> |
|-------|------|-------|------|------|------|-------------------|
| 15    | 5    | 20    | 18.2 | 23.6 | 35.5 | 7 786             |
| 15    | 10   | 40    | 12.5 | 18.7 | 25.4 | 3 158             |
| 15    | 15   | 30    | 19.6 | 25.6 | 28.6 | 5 482             |
| 20    | 5    | 40    | 15.7 | 21.7 | 30.2 | 5 181             |
| 20    | 10   | 30    | 30.4 | 38.0 | 52.4 | 27 316            |
| 20    | 15   | 20    | 40.2 | 45.9 | 62.5 | 46 940            |
| 25    | 5    | 30    | 23.5 | 31.3 | 46.7 | 17 871            |
| 25    | 10   | 20    | 42.3 | 50.6 | 61.3 | 49 778            |
| 25    | 15   | 40    | 37.3 | 46.3 | 59.5 | 42 912            |

极差反映了各影响因素的水平变动时试验指标的变动幅度,极差越大,表明该因素对试验指标的影响越大。图9为计算得到的极差曲线。

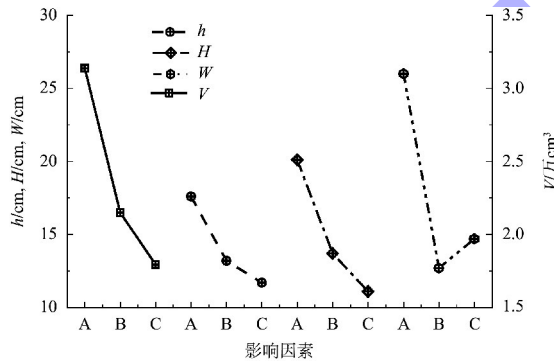


图9 极差计算结果曲线

影响 $h$ 、 $H$ 和 $V$ 的3个因素极差大小排序为:A(工作压力)>B(冲击频率)>C(礁石强度),影响 $W$ 的3个因素极差大小排序为:A(工作压力)>C(礁石强度)>B(冲击频率)。因此,对 $h$ 、 $H$ 和 $V$ 影响最大的因素是工作压力,其次是冲击频率,最后是礁石强度;对 $W$ 影响最大的因素是工作压力,其次是礁石强度,最后是冲击频率。又因 $V$ 是描述高频破碎锤破岩效果最为直接的参数,故

增大高频破碎锤冲击工作压力是提升水下高频破碎锤破礁效果最为有效的方法。

### 4 高频破碎锤水下破礁参数优化设计

高频破碎锤水下破礁作业时,每个锤击点位综合耗时可由下式计算:

$$t = t_1 + nt_2 + t_3 \quad (8)$$

式中: $t$ 为高频破碎锤在每个锤击点位综合耗时, $s$ ;  $t_1$ 为高频破碎锤在每个锤击点的锤击净耗时, $s$ ;  $t_2$ 为高频破碎锤的停顿耗时, $s$ ;  $n$ 为高频破碎锤在每个锤击点的停顿次数;  $t_3$ 为高频破碎锤由一个锤击点定位至下一个锤击点的平均耗时, $s$ ;

依据图5的破碎参数变化曲线可拟合得到钎杆凿入深度与岩体破碎体积关系式:

$$V = 37.56h^2 - 193.98h - 320.82 \quad (9)$$

其 $R^2 = 0.995$ 。

结合重庆朝涪段老鹰石现场清礁工程,每个台班工作取8h,可求出高频破碎锤破礁工效 $E$ 与凿入深度 $h$ 之间关系,见式(10)。同时依据现场清礁施工经验,取 $t_1 = 90s$ ,  $t_2 = 3s$ ,  $n = 8$ 次,  $t_3 = 45s$ 。依据式(8)可计算每个锤击点位总耗时约160s。由此可计算出不同高频破碎锤参数组合下的清礁效率,见表4。

$$E = \frac{1}{t} \times (1.08h^2 - 5.59h - 9.24) \quad (10)$$

表4 不同高频破碎锤参数组合下的清礁效率

| 工作压力/MPa | 冲击频率/Hz | 凿入深度/cm | 锤击点综合耗时/s | 清礁工效/(m <sup>3</sup> ·台班 <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------|---------|-----------|--|
| 15       | 5       | 15.5    | 160       | 1.02                                     |
| 15       | 10      | 17.9    | 160       | 1.48                                     |
| 15       | 15      | 19.6    | 160       | 1.85                                     |
| 20       | 5       | 17.6    | 160       | 1.42                                     |
| 20       | 10      | 29.2    | 160       | 4.68                                     |
| 20       | 15      | 32.9    | 160       | 6.10                                     |
| 25       | 5       | 28.5    | 160       | 4.43                                     |
| 25       | 10      | 34.6    | 160       | 6.81                                     |
| 25       | 15      | 37.2    | 160       | 7.99                                     |

从表4可知,当高频破碎锤的工作压力为25 MPa、冲击频率为15 Hz时清礁工效最高,可将此作为高频破碎锤的工作参数。

## 5 结论

1) 岩体塑性区范围随冲击次数的增加而逐渐增加,钎杆周边岩体以剪切破坏为主,远离钎杆岩体主要发生拉破坏。随着钎杆凿入岩体,破坏范围不断扩大,但扩大趋势减缓。

2) 凿入深度、破碎深度及破碎宽度均随冲击频率的增大而增大,但存在临界冲击频率,大于该临界值时,若继续提高冲击频率破碎参数值变化较小。 $h$ 、 $H$ 、 $W$ 和 $V$ 均随礁石强度的增大而减小,当礁石强度由20 MPa增至40 MPa时,破岩效率下降约71%,高频破碎锤不宜破碎强度太高的礁石。

3) 工作压力是高频破碎锤破礁效果的主控因素,其次是冲击频率,最后是礁石强度。故增大高频破碎锤的工作压力是提升锤破礁效果的最有效方法。

4) 建立了钎杆凿入深度与岩体破碎体积的数学关系,提出了高频破碎锤清礁工效计算方法,结合具体工程,确定工作压力为25 MPa、冲击频率为15 Hz为高频破碎锤最优清礁工作参数。

## 参考文献:

- [1] 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(上半月),2016(2):38-40.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 程刚.成孔液压涨裂破岩机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [7] LI G, LIAN C L, TANG C A. Study on the mechanisms of hydraulic fracturing crack initiation and propagating[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 1910 (376): 101-105.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 裴邦学,蒋国兴,钟润兵,等.高频破碎锤水下破礁特性的现场试验研究[J].水运工程,2023(9):198-202.
- [12] 王家豪.山区航道破碎锤清礁装备破岩效率试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [13] 刘德顺,李夕兵.冲击机械系统动力学[M].北京:科学出版社,1999.
- [14] 赵彦军,毛文亮.气液联合式碎石器建模与仿真分析[J].液压与气动,2022,46(9):149-157.

(本文编辑 王传瑜)

## · 消 息 ·

### 中交集团荣获3项国家科学技术奖

6月24日,2023年度国家科学技术奖励大会在北京召开。中交集团荣获国家科技进步奖一等奖2项、二等奖1项。其中,中国交建、公规院、一航局、二公局参与的《港珠澳大桥跨海集群工程》、三航局参与的《海上风电安全高效开发成套技术和装备及产业化》荣获国家科技进步奖一等奖,中国路桥参与的《高速公路交通状态智能感知与主动管控关键技术及应用》荣获国家科技进步奖二等奖。截至目前,中交集团累计获得国家科技进步奖57项、国家技术发明奖5项。

[https://www.ccccltd.cn/news/gsyw/202406/t20240627\\_214960.html](https://www.ccccltd.cn/news/gsyw/202406/t20240627_214960.html) (2024-06-27)