

# 不同布孔间距下凿岩锤冲击海底极坚固岩石 破岩效果研究\*

陶宗恒<sup>1</sup>,唐 伟<sup>1</sup>,李 川<sup>1</sup>,张文豪<sup>2</sup>,李兴凌<sup>2</sup>,党文刚<sup>2</sup> (1. 中交广州航道局有限公司,广东广州 510290; 2. 中山大学 土木工程学院,广东珠海 519082)

摘要:针对采用钻孔+凿岩的破岩工艺处理某锚地海底极坚固岩石时存在破岩效率低、锤头磨损严重等问题,开展不同 布孔间距下极坚固岩石破岩效果模拟和工程试验,分析岩体内部应力损伤发育过程、不同布孔间距下破碎效果。结果表明: 钻孔+凿岩的破岩工艺清除海底极坚固岩石时,采用 35 t 斧头型凿岩锤破碎 0.4 m×0.5 m(宽×长)布孔间距下的岩体破岩效 果最佳; 受锤头形状及临空面的影响,岩体内部应力多向锤头两端、临空面以及深部扩散,形成以张拉破坏和拉剪破坏为 主的损伤区域;相较于方形布孔方案、矩形布孔方案显著扩大了破坏范围、具有更好的破岩效果。

关键词:组合式破岩;孔间距;损伤区域;应力分布 中图分类号:U616+.24 **文献标志码:**A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0169-08

## Effect of rock drill hammer impacting on seabed extremely solid rock breaking under different drilling spacing

TAO Zongheng<sup>1</sup>, TANG Wei<sup>1</sup>, LI Chuan<sup>1</sup>, ZHANG Wenhao<sup>2</sup>, LI Xingling<sup>2</sup>, DANG Wengang<sup>2</sup>

(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** In view of problems of low breaking efficiency and serious wear of hammer head when using drilling + rock drilling (DRD) rock breaking process to deal with extremely solid rock on the seabed of a certain anchorage, simulation and engineering tests on the effect of rock breaking on extremely solid rock under different drilling spacing are carried out. The development process of internal stress damage and the breaking effect under different pore placement parameters are analyzed. The results show that when DRD removes extremely solid rock from the seabed, the best rock breaking effect is achieved by using a 35 t axe type rock drill hammer to break the rock mass at a 0.4 m×0.5 m(width×length)drilling spacing. Influenced by the shape of the hammer head and the airspace, the internal stress of the rock mass spreads to the two sides of the parallel hammer head, the side of the airspace, and the deep part, forming a damage area dominated by tensile and tension-shear damages. Compared with the square hole placement scheme, the rectangular hole placement scheme significantly enlarges the damage range and has better rock-breaking effect.

Keywords: combined rock breaking; drilling spacing; damage area; stress distribution

近年来,随着海运船舶的发展,港口航道不 断拓宽和加深,为航运建设和经济发展做出重要 贡献。然而,碍航礁石的存在为船舶的安全航行 带来隐患,制约了海洋航运能力的提升。为了解 决航道礁石问题,常采用化学爆破方法清除海底 礁石,但该方法产生的水下冲击波和噪声严重破 坏生态环境,阻碍绿色发展战略的实施<sup>[1-2]</sup>。

目前,除钻爆法外,重锤凿岩法在航道治理

收稿日期: 2024-07-19

<sup>\*</sup>基金项目:广东省自然科学基金项目(2022A1515240009)

作者简介: 陶宗恒 (1987—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程施工管理。

工程中得到了广泛应用,其利用凿岩锤的冲击动 能撞击岩石,使其膨胀错动从而破岩<sup>[3]</sup>。但该方 法存在锤头磨损严重、成本高等问题,且当岩石 单轴抗压强度大于 35 MPa 时,破岩效果显著降 低<sup>[45]</sup>。组合破岩作为一种综合性破岩工艺,利用 多种破岩手段和技术实现高效、经济的岩石破碎。 杨金锋<sup>[6]</sup>、张伯友<sup>[7]</sup>采用钻孔+钢锭+凿岩的方法 清除海底超高硬度岩石,降低了对周围环境的影 响;丁有鹏<sup>[8]</sup>利用钻孔+劈裂+凿岩的方法清除高强 度微风化花岗岩,解决了极坚固岩石破岩技术难题; 陈昌斌<sup>[9]</sup>通过现场试验,分析钻孔+锤击的方法下岩 石的损伤规律,确定了破礁规律及施工工效。

组合式破岩在一定程度上可以提升破岩效率, 缩短生产周期。但关于该工艺的研究相对较少,参 数布置多以经验为主,导致破岩效果不够理想。基于 此,本文依托某锚地改扩建工程,开展不同布孔间距 下海底极坚固岩石破岩效果的数值模拟和工程试验, 分析不同布孔间距下岩石损伤机理和破岩效果演化趋 势,总结最优布孔参数,为类似工程提供参考。

## 1 数值模拟概况

#### 1.1 工程概况

某锚地改扩建工程采用钻孔+凿岩的工艺清除 0.91万m<sup>3</sup>岩石。但施工过程中,发现该区域岩石 为微风化花岗岩,单轴饱和抗压强度高达193 MPa, 清除难度极大。由于布孔参数主要依赖传统经验, 导致锤头断裂和岩石难破碎等问题频发。因此, 为提升海底极坚固岩石的破岩效率、减少设备损 耗,有必要对其工艺参数进行优化。

## 1.2 模拟概况

为研究钻孔+凿岩的工艺下不同布孔间距对海 底极坚固岩石破岩效果的影响,基于 LS-DYNA 仿 真平台,开展不同布孔间距下破岩效果模拟,以探 讨随着布孔间距的变化,海底极坚固岩石在冲击作 用下的应力和损伤演化规律。布孔参数设置见表 1。

不同布孔参数破岩模拟试验通过 SolidWorks、 HyperMesh 和 LS-DYNA 软件实现。首先,采用 SolidWorks 等比例构建斧头型凿岩锤和部分岩体模 型,其中锤质量 35.75 t,孔径 120 mm,模型尺寸 见图 1。然后,利用 HyperMesh 进行精细网格划 分。最后,在 LS-DYNA 中为锤体和岩石分别赋予 硬化塑性模型和 RHT 模型,并设置无反射边界和 仿真控制参数。材料参数根据现场取样和室内试 验测试所得,锤体材料参数为:密度 7 850 kg/m<sup>3</sup>, 杨氏模量 200 GPa,切线模量 6.16 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 450 MPa,接触速度 10 m/s;岩体 材料参数为:密度 2 600 kg/m<sup>3</sup>,剪切刚度 20 GPa, 抗压强度 200 MPa,抗剪强度 100 MPa,抗拉强度 20 MPa, 泊松比 0.35。

> 表 1 不同布孔参数模拟方案 Tab. 1 Simulation schemes





#### 2 结果分析

## 2.1 损伤演化分析

凿岩锤冲击后不同布孔方案岩石内部应力和 损伤扩散过程相似。以布孔间距 0.4 m×0.5 m (宽×长)岩体为例,岩石内部应力波动和损伤过程 随时间的变化见图 2 和 3。由图 2 可知,凿岩锤冲 击岩石后,冲击力转变为压应力和环向拉应力, 并以波的形式向四周辐射形成应力腔<sup>[10]</sup>。当应力 辐射至临空面时,由于边界约束改变,应力在落 锤两侧不对称扩散,临空面一侧出现应力集中。

和环向拉应力快速辐射,但受锤头形状及临空面 影响,应力向锤头两端、临空面及深部扩散,导 致区域内岩石膨胀错动,最终形成以张拉破坏和 拉剪破坏为主的损伤区域<sup>[11-12]</sup>。



## 2.2 应力、损伤分析

不同布孔间距下岩体应力、损伤云图见图4、5。 由图4可知,凿岩锤冲击不同布孔间距岩体时, 应力集中位置大致相同,均分布在落锤位置附近、 岩体深部及临空面一侧。随着布孔间距增大,岩 体内部高应力区域减小,表面及临空面高应力区 域从集中到分散再到集中变化。布孔间距增大时, 凿岩锤破碎坑增大,但裂纹损伤范围减小(图5)。 其中,0.4 m×0.4 m 布孔方案下的岩石的损伤区 域长度和深度最大。



当布孔间距小时,布孔数量增多,导致岩体在 钻孔过程中扰动严重,力学性质及抗冲击能力显著 降低。凿岩锤冲击后,应力快速扩散,形成大面积 高应力区域;裂纹拓展并连接形成损伤集中区域。 当布孔间距增大时,钻孔扰动对岩体力学性质的影 响减小。凿岩锤冲击后,部分应力沿孔壁向内释 放,更多应力在孔壁周围集中,导致整体应力集中 区域分散,损伤区域无法完全连接。当布孔间距进 一步增大时,由于孔间距过大,凿岩锤冲击后应力 多在完整岩体内部传递并快速衰减,导致损伤仅在 较小区域发生并难以扩展。因此,对比不同布孔间 距下岩石破碎情况发现,35 t 斧头型凿岩锤破碎 0.4 m×0.4 m 布孔方案下的岩体破岩效果相对最好。 2.3 应力扩散分析

为了量化凿岩锤在不同布孔方案下的破岩效 果. 在落锤两侧 20、60、140 和 260 mm 处设置监 测点监测应力变化,见图 6。可以看出,由于落锤 位置固定,布孔方式不同导致钻孔位置差异,使 得不同布孔间隔下监测点应力演化规律不一致。 随着布孔间隔增大, 岩体峰值应力整体逐渐减小, 表明孔间距越大, 凿岩锤冲击后应力传播损耗越 大。其次, 岩体应力随时间推移均出现先增后减, 且远离临空面一侧应力峰值大于另一侧。当凿岩 锤冲击岩体时,应力波的波峰经过导致监测点处 应力先增后减。靠近临空面一侧由于缺乏边界约 束, 岩石在单向受力状态应力减小导致该侧应力 相对较小<sup>[13-14]</sup>。此外, 0.4 m×0.4 m 布孔方案下 的岩石应力出现多个波峰,表明破岩过程中监测 点附近岩体破坏严重,应力传递经历多次反射叠 加。因此,该布孔方案破岩效果最佳。



a) 布孔间距0.4 m×0.4 m





2.4 布孔形状影响分析

对比不同方形布孔间距破岩效果,发现0.4 m× 0.4 m 布孔方案效果最佳。但凿岩锤的锤头形状 影响应力扩散和破岩效果。因此,在该基础上进 一步研究布孔形状对破岩效果影响。

不同形状布孔方案下岩体应力云图见图 7。 0.4 m×0.5 m 矩形布孔方案受锤头几何形状的影

响,应力波扩散方式与岩体布孔位置耦合作用, 使得高应力在临空面处显著增多且分散。同时, 对比不同布孔间距下的岩石损伤云图见图 8,发现 稳定阶段时岩石的损伤大致相同。不同矩形布孔 方案下落锤两侧岩体应力扩散见图 9。可以看出, 0.4 m×0.4 m 和 0.4 m×0.5 m 布孔方案下, 监测 点应力均出现多个波峰。但后者岩石临空面一侧 监测点波峰数量和幅值显著多于前者,表明后者 临空面一侧破坏更加显著。



0.2

0.1 0.0

-0.1

0

5

10

应力/MPa

3.5

3.2

2.9

2.6

2.3

2.0

1.7

1.4

11 0.8 0.5

应力/MPa

3.5

3.2

2.9

2.6

23

2.0

1.7

1.4

1.1 0.8

0.5

应力/MPa 3.5

3.2

2.9

2.6

2.3

2.0

1.7

1.4

1.1

0.8 0.5



a) 0.3 m×0.4 m矩形布孔

b) 0.4 m × 0.4 m方形布孔

图 7 不同形状布孔方案下岩体 12 ms 时应力云图 Fig. 7 Stress nephogram of rock at 12 ms for hole layout by different shape schemes

时间/ms a) 0.3 m × 0.4 m矩形布孔

15

20

25

30









综上所述,采用 35 t 斧头型凿岩锤破碎极坚 固岩石时,选取 0.4 m×0.5 m 矩形布孔方案能形 成最大损伤区域,破岩效果最好。

## 3 工程验证

## 3.1 试验概况

为进一步研究不同布孔间距下极坚固岩石实 际破岩效果,选择施工现场岩石地貌特征相似且 范围大致相同的5个钻孔区域,开展破岩效果现 场对比试验,方案设置见表2。

表 2 钻孔方案 Tab. 2 Drilling schemes

Tab. 2 Drining schemes				
区域名称	弥 孔间	距长 <i>l/</i> m	孔间距宽 b/m	
钻孔11	X	0.4	0.3	
钻孔 2	X	0.4	0.4	
钻孔3	X	0.5	0.4	
钻孔4	X	0.6	0.6	
钻孔 5	X	0.8	0.8	

## 3.2 效果分析

不同布孔间距下单层凿岩深度和钻孔+凿岩效 率见图 10,其中单层凿岩深度是在保持其他变量 不变的情况下,钻孔+凿岩工艺一次破碎岩石的平 均深度;而钻孔+凿岩效率则是破岩量与钻孔+凿 岩所用总时间的比值。可以看出,随着钻孔间距 的增大,钻孔数量逐渐减少,钻孔效率提升,钻 孔+凿岩效率先增加后趋于稳定,而单层凿岩深度 则先增加后减小,并在钻孔间距为 0.4 m×0.5 m 时达到峰值。



图 10 不同布孔方案下破岩效率和破岩深度对比 Fig. 10 Comparison of rock breaking efficiency and depth for hole layout by different shape schemes

钻孔1区钻孔效率最低,钻孔时间和凿岩厚 度表现不佳。主要原因在于该区域布孔密度大, 容易出现钻孔偏移或重孔现象,导致凿岩效果不 佳且增加施工周期,从而降低了钻孔+凿岩效率。 钻孔4区和5区由于布孔密度低,单周期凿岩循 环时间(一次钻孔和凿岩总时间)短,相同时间内 破岩量大,因而钻孔+凿岩效率相对较高。但由于 孔间距较远,凿岩结束后出现孔与孔之间未贯通, 导致单层凿岩深度降低、大块率高,被迫对大块 岩石进行二次破碎。且在破碎过程中,重复使用 凿岩锤增大了锤头磨损和维修时间,严重拖延工 期进度。相比之下,钻孔3区的钻孔方案虽然钻 孔+凿岩效率略有降低,但其凿岩深度和施工过程 均优于其他方案。

综上所述,当钻孔间距过小时,受钻孔数量 和施工环境影响,钻孔效率低,极大降低钻孔+凿 岩效率,影响工程进度,且破碎后的岩石以小块 或粉末状为主,存在过度破岩问题。而随着钻孔 间距的增大,整体钻孔效率提升,减少了单周期 的钻孔凿岩时间,但存在破岩效果差、清礁难度 大和设备磨损等问题。综合考虑,针对海底极坚 固礁石难清除问题,基于钻孔+凿岩的破岩工艺, 采用 35 t 斧头型凿岩锤破碎 0.4 m×0.5 m 布孔间 距下岩体破岩效果最佳。该结果与数值模拟结果 基本一致。

## 4 结论

 1)数值模拟与现场试验结果表明,在钻孔+ 凿岩的破岩工艺中,采用35t斧头型凿岩锤破碎
 0.4 m×0.5 m布孔间距下极坚固岩石破岩效果最
 佳,且随着布孔间距的增大,破岩效果降低。

2)受锤头形状及临空面的影响,凿岩锤冲击 岩石后产生的压应力和环向拉应力多向平行锤头 两端、临空面以及深部扩散,最终形成以张拉破 坏和拉剪破坏为主的损伤区域。

3)相较于方形布孔方案,矩形布孔方案不仅 能减小布孔密度、缩短工期,还能显著增加临空 面处损伤程度和损伤范围,有效提升破岩效率。

## 参考文献:

 肖建国. 一种水下破碎礁石施工技术[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 104-107.

XIAO J G. A construction technology for breaking underwater reef [J]. Port engineering technology, 2021, 58(4): 104-107.

- [2] 刘明维,蒋国兴,裴邦学,等. 高频振动冲击作用下礁石 损伤演化规律研究[J].水运工程,2023(12):151-158.
  LIU M W, JIANG G X, PEI B X, et al. Evolution rule of reef damage under high-frequency vibration impact [J].
  Port & waterway engineering, 2023(12):151-158.
- [3] 张俊锋,王玮栋,裴邦学,等.高频破碎锤清礁的凿入规 律研究[J].水运工程,2024(2):203-208.
  ZHANG J F, WANG W D, PEI B X, et al. Gouging law of high-frequency breaker reef cleaning[J]. Port & waterway

engineering, 2024(2): 203-208.

[4] 梁锦垣. 锤击法清除水下礁石在航道整治中的应用[J].
 珠江水运, 2017(14): 70-71.
 LIANG J Y. Application of the hammering method for removing underwater reefs in channel dredging operations[J]. Pearl

River waterway transport, 2017(14): 70-71.

[5] 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.
WANG J H. Experimental study on rock-breaking efficiency of reef-clearing equipment with breakers in mountain waterways[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong

University, 2022.

[6] 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.

YANG J F. Exploration of underwater rock drilling and reef removal construction technology for ultra-high hardness reefs [J]. Pearl River waterway transport, 2019(19):93-94.

[7] 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.

ZHANG B Y. Underwater drilling and removing construction techniques for super-hard reefs [J]. Port & waterway engineering, 2017(8): 53-56.

[8] 丁有鹏.液压破碎法及凿岩法在榕江航道整治工程清 礁施工中的综合应用及效果[J].珠江水运,2018(7): 38-41.

DING Y P. Comprehensive application and effectiveness of hydraulic fracturing and rock drilling methods in reef removal for the Rongjiang River channel improvement project [J]. Pearl River waterway transport, 2018 (7): 38-41.

[9] 陈昌斌, 谭松, 李春军, 等. 钻孔-重锤锤击式水下破礁
特性的现场试验研究 [J]. 科技与创新, 2023 (20):
64-67.

CHEN C B, TAN S, LI C J, et al. Field experimental study on the characteristics of underwater reef breaking using drilling and heavy hammer impact method[J]. Science and technology & innovation, 2023(20): 64-67.

(下转第206页)