・施工・



摘要: 重锤冲击凿岩是解决生态受限条件下水下清礁任务的常用方法,为提高无临空面礁石的破碎效率,提出钻孔联 合冲击锤的水下冲击锤凿岩技术。通过水下钻孔-冲击锤破礁现场试验,考虑冲击锤在水中运动的水阻力效应和缆绳拉阻效 应,建立钻孔影响下的冲击锤碰撞侵彻模型,结合钻孔-冲击锤破礁的 3DEC 数值仿真,分析钻孔作用下冲击锤重复冲击礁 石的损伤演化规律。结果表明,钻孔对提高水下冲击锤侵彻深度的影响不明显,但10 m 以下低落距时可明显提高礁石的破 碎深度和宽度,清礁工效可提升 183%;冲击锤落距和钻孔深度是重锤破礁效率的主要控制因素。钻孔-冲击锤联合作用下 5 次冲击后的破碎体积约为第1次的 103.24 倍。钻孔和多次冲击均能有效提高冲击锤清礁的效率,且钻孔还能进一步提升多 次冲击下的冲击锤破礁效率。研究成果可为水下环保清礁的参数设计和现场施工提供借鉴。

关键词:钻孔联合冲击锤;侵彻深度;破碎体积;多次冲击;破礁工效

中图分类号: U616+.24 文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0207-08

### Damage evolution of rock mass under action of drilling combined impact hammer

CHEN Nirui<sup>1</sup>, ABI Erdi<sup>1</sup>, TAN Song<sup>1</sup>, LIU Mingwei<sup>1</sup>, CHEN Changbin<sup>2</sup>, HAN Yafeng<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Yangtze River Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Percussion hammer drilling is a common method to solve the underwater reef-clearing task under ecological constraints. To improve the crushing efficiency of the reef without a free surface, this paper put forward the underwater shock hammer drilling technology combining drilling with impact hammers. Through the underwater drilling and impact hammer reef breaking field test, considering the water resistance effect of impact hammer movement in water and the cable drag effect, the impact hammer collision and penetration model under the influence of drilling is established. Combined with the 3DEC numerical simulation of drilling and impact hammer reef breaking, the damage evolution law of repeated impact of the hammer on the reef under the action of drilling is analyzed. The results show that drilling has no obvious effect on increasing the penetration depth of the underwater impact hammer, but the breaking depth and width of the reef can be significantly improved when the drop distance is below 10 m, and the reef cleaning efficiency can be increased by 183%. Hammer drop distance and drilling depth are the main controlling factors of reef-breaking efficiency. Under the combined action of drilling and impact

收稿日期: 2024-10-15

<sup>\*</sup>基金项目:长江重庆航道工程局科技项目(cqjt-2021-204)

作者简介:陈霓锐 (1999—),女,硕士研究生,研究方向为水下清礁、岩石损伤。

通信作者: 阿比尔的 (1988—), 男, 博士, 副教授, 从事岩石损伤力学和数值极限分析方面的教学研究工作。 E-mail:abierdi@163.com

hammer, the crushing volume after 5 shocks is about 103. 24 times that of the first impact. Both drilling and multiple shocks can effectively improve the reef-clearing efficiency of the hammer, and drilling can further improve the reef-breaking efficiency of the hammer under multiple shocks. The research results can provide a reference for parameter design and site construction of underwater environmental protection reef clearing.

**Keywords:** drilling combined impact hammer; penetration depth; crushed volume; multiple shocks; efficiency of reef breaking

长江上游属于山区河流,存在大量的碍航礁 石。随着长江上游航运中心等战略的实施,船舶 大型化下急需开展水下碍航礁石的清理,提升航 道等级。为满足生态清礁需求,水下冲击锤凿岩 技术在航道建设中逐渐应用,解决在生态受限条 件下的水下礁石清除难题。为提高无临空面礁石 的破碎效率,提出了钻孔联合冲击锤锤击的水下 冲击锤凿岩技术,但钻孔对冲击锤凿岩效率的影 响尚不清楚<sup>[1]</sup>。

近年来,许多研究人员都对冲击荷载下岩石 的破坏规律进行了大量的试验研究。李晓锋等<sup>[2]</sup> 采用分离式霍布金森压杆试验系统对灰岩、白云 岩和砂岩3类岩石进行动态冲击试验,得到岩石 的动强度因子、耗散能密度及破碎尺寸与应变率 的变化关系。王春等<sup>[3]</sup>利用改进的动静组合加载 分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 试验系统开展高轴压卸荷频繁冲击 扰动试验。陆华等<sup>[4]</sup>采用 SHPB 冲击试验系统探 究循环荷载下不同孔隙率红砂岩的动力特征并得 出损伤规律。张丙吉等<sup>[5]</sup>开展不同干湿循环次数 下的三轴压缩试验,探究砂岩的力学特性和能量 损伤。张铁等<sup>[6]</sup>也以干湿循环次数和围压作为试 验工况,对粉砂岩进行常规三轴压缩试验,发现 干湿循环促进岩石的力学性能衰减劣化、峰值应 力降低。Zheng 等<sup>[7]</sup>采用 SHPB 结合高速摄像和数 字图像相关法 (digital image correlation, DIC) 技 术对砂岩试样进行冲击拉伸加载。Liu 等<sup>[8]</sup>结合 LS-DYNA 仿真和试验测试,分析高速弹丸撞击超 高性能混凝土时,速度对侵彻深度和岩石损伤发 育的影响。刘明维等<sup>[9]</sup>通过 3DEC 建立岩石损伤计 算模型并得出高频振动冲击作用下岩石的损伤规

律。Wang 等<sup>[10]</sup> 基于 SPH-FEM 耦合算法建立数值 模型,探讨含裂纹岩石在钢颗粒水射流作用下的 损伤机理。陈广云等<sup>[11]</sup> 采用 ABAQUS 仿真平台, 通过调整施工参数模拟分析水下液压锤对岩石冲 击的损伤影响。潘剑等<sup>[12]</sup> 采用理论分析和 3DEC 数值模拟方法研究高频破碎锤冲击作用下礁石的 损伤特性,发现工作压力是影响其效果的主控因 素,冲击频率次之。

从上述研究可知,目前针对岩石的冲击损伤 主要通过室内实验设备及数值仿真设计进行研究 分析,对超大吨位、低速度冲击重锤的破岩规律 研究不足。为此,本文通过水下钻孔-冲击锤破礁 现场试验,获得冲击重锤在水中的运动规律和碰 撞速度,基于 Young 公式建立水下钻孔-冲击锤的 侵彻模型,结合三维离散元数值仿真,分析钻孔 和多次冲击锤锤击下岩体损伤(侵彻深度、破碎 宽度、破碎深度和破碎体积)规律,得到钻孔-冲 击锤联合作用下岩体损伤演化规律,以期为钻孔-冲击锤破礁施工提供理论参考和依据。

#### 1 水下冲击重锤的碰撞侵彻模型

# 1.1 水下钻孔-冲击锤破礁试验研究

为了探究水下冲击重锤的运动模型和侵彻规 律,设计并实施水下钻孔-冲击锤破礁试验。试验 场地为长江上游朝天门至涪陵河段某清礁区。整个 区域长约17.1 m、宽约17.8 m、面积约185.81 m<sup>2</sup>, 通过测量得知试验时水流流速约为2.0 m/s,地区 水位为151.6~152.2 m。现场水下试验采用钻孔-冲击重锤联合清礁,即水上施工平台+机械破礁的 清礁技术方案,如图1所示,装置利用渝工排 1号的相关船体,拆除部分甲板结构,补强甲板, 以适应打桩设备的安装及移动装置的布设。试验 工况为:冲击重锤落距 10~12 m,冲击次数 5 次, 冲击间距 1 m,钻孔深度 1.5 m、直径 0.2 m、间 距 2.0 m,区域施工钻孔点布置见图 2,破礁效果 见图 3。



图 1 钻孔联合冲击锤清礁设备 Fig. 1 Reef clearing equipment of drilling combined impact hammer



图 2 区域施工钻孔点布置

Fig. 2 Layout of borehole points for regional construction



图 3 破礁效果 Fig. 3 Reef breaking effect

试验过程中记录冲击重锤释放后的运动速度、 水流状况、冲击重锤漂移情况、清渣方量和施工 时间;通过试验前后地形扫描船的地形扫测,得 到试验前后的清礁区高程。通过相关软件测算可 知,马腿滩清礁区域的清礁方量约为 500 m<sup>3</sup>,总 清礁面积 185.81 m<sup>2</sup>,且经过对比分析发现,最大 水下破坏深度达到 3.96 m,最小水下破坏深度 0.69 m,清礁区域的平均破碎深度约为 2.69 m。

1.2 冲击重锤的碰撞速度分析

水下钻孔-冲击重锤破礁试验期间通过相机记录重锤转轮的运动过程,然后借用录像处理软件 对录像中的转轮进行轨迹绘制、数据整理,得到 水下冲击重锤运动的速度-时间(v-t)曲线,如图 4 所示。



Fig. 4 The v-t curve of impact hammer fall

已知水下冲击重锤在重力、浮力、水阻力和 钢缆拉阻力的影响下,做加速度逐渐减小的向下 的加速运动:

$$F = mg - \rho_{w}Vg - F_{0} - \frac{1}{2}\rho_{w}CSv^{2} = ma = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \qquad (1)$$

式中:F为重锤所受总力,N;m为冲击锤的质量,

Ζ=

kg; V为冲击锤体积, m<sup>3</sup>; g为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\rho_w$ 为水的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $F_0$ 为冲击锤缆绳的拉阻力, N; C为水阻力系数; S为下落时迎水面面积, m<sup>2</sup>。

将式(1)积分可得:

$$t = \frac{m}{\rho_{w}CS \sqrt{\frac{2(mg - \rho_{w}Vg - F_{0})}{\rho_{w}CS}}} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{2(mg - \rho_{w}Vg - F_{0})}/\rho_{w}CS}{\sqrt{2(mg - \rho_{w}Vg - F_{0})}/\rho_{w}CS} + \nu\right)$$
(2)

在冲击锤下落前 1.5 s 内,速度极低,水阻力 极小,可忽略不计,即此时水下冲击锤受到的阻 力仅有钢缆拉阻力,同时分析 v-t 图可知,加速 度 a=1.526 8 m/s<sup>2</sup> 不变,则合力不变,已知固定 重力和浮力,缆绳的拉阻力便可近似视作一常数, 通过牛顿定律可算得 F<sub>0</sub>=246.173 kN。

随着冲击锤在水下继续运动,速度逐渐增大, 水阻力也会逐渐增大到无法忽视的程度,此时由 式(1)可知,未知数仅有 C,故通过计算绘制不同 C条件下的 v-t 曲线,并与所示实测值进行数据拟 合,得出当 C=0.68 时,数据曲线拟合情况较好, 即此时式(2)能较准确地描述低速冲击锤在水下的 运动速度随时间的变化过程。

# 1.3 水下钻孔-冲击锤的破礁侵彻模型

将式(1)通过公式变化积分可得冲击锤落距与 水下碰撞速度之间的关系:

$$m \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = m \frac{\mathrm{d}v \,\mathrm{d}H}{\mathrm{d}H} = mv \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}H}$$
(3)

$$v = \left[\frac{2(mg - \rho_{w}Vg - F_{0})}{\rho_{w}CS}(1 - e^{-\rho_{w}CSH/m})\right]^{0.5}$$
(4)

式中:H为重锤下落高度即落距,m。

由式(3)、(4)确定冲击锤接触水下礁石的碰 撞速度,之后在惯性作用下,冲击锤会侵入礁石 内部,直到在阻力作用下停止运动。冲击锤在礁 石中的侵彻深度主要与冲击锤质量、锤头形状和 礁石强度、碰撞速度等因素有关,参考混凝土和 岩石常用的 Petry、Young 侵彻模型<sup>[13-16]</sup>,水下冲 击锤的侵彻深度 h 可由下式计算:

 $h = 0.\ 256\ 6N_1N_2m\sigma_u^{-1.1}v^{0.\ 000\ 4\sigma_u^{+0.\ 964\ 8}}$ (5)

式中:  $N_1$  为弹头形状影响系数,参考 Young 公式 取锥形弹  $N_1 = 0.25l_n/d + 0.56$ ,其中  $l_n/d$  为弹头长 径比;  $N_2$  为礁石可侵彻系数,参考 Petry 公式取  $N_2 = 0.007$  99; m 为冲击锤质量,kg;  $\sigma_u$  为礁石强 度,MPa; v 为碰撞速度,m/s。

钻孔会影响水下冲击锤在礁石中的侵彻效果, 因此冲击锤的侵彻模型需要引入一个钻孔放大系 数 *N*<sub>3</sub>,该系数与钻孔的间距、深度和直径有关, 可通过试验数据给出,即:

$$h=0.256 \ 6N_1N_2N_3m\sigma_u^{-1.1}v^{0.0004\sigma_u^{+0.9648}}$$
(6)  
通过 3DEC 模拟钻孔间距  $l=2.0 \text{ m}$ 、钻孔深度  
=1.5 m、钻孔直径  $d=0.20 \text{ m}$ 不变,落距  $H=5$ 、

10、15 m 等工况下,无钻孔和有钻孔时水下冲击 锤冲击礁石的损伤情况,拟合得:

$$N_3 = l^{-0.5} z^{0.5} + d \tag{7}$$

将式(4)、(7)代入式(6),得到水下钻孔-冲 击锤的破礁侵彻模型:

$$h=0.256\ 6(0.25l_n/d+0.56)N_2(I^{-0.5}z^{0.5}+d)m\sigma_u^{-1.1}\cdot \left[\frac{2(mg-\rho_wVg-F_0)}{\rho_wCS}(1-e^{-\frac{-\rho_wCSH}{\sigma}})\right]^{0.000\ 2\sigma_u+0.482\ 4}$$
(8)

#### 2 钻孔-冲击锤冲击下岩体损伤仿真模型

2.1 数值模拟模型建立

借助 Rhino 6 软件建立一个钻孔礁石模型,并 进行网格划分,形成随机分布裂隙,然后导入 3DEC 离散元分析软件。边界条件采用无反射边 界,以便更好地解决动力分析问题。

模型建立完成后,为与现场试验条件更贴合, 先通过 gravity 命令对模型施加重力,使其达到自 重平衡,再运用 fish 函数编写浮力、水阻力和缆 绳拉阻力等水下冲击锤运动过程中所受阻力的命 令流,施加在冲击锤上,经过运算,得到损伤云 图,如图 5 所示。



图 5 钻孔-冲击锤清礁模型损伤云图 Fig. 5 Damage cloud map of drilling-impact hammer reef clearance model

# 2.2 模型参数与工况

模型参数与现场试验保持一致。重锤的各项 参数为: *m*=35 t, *ρ*=7.85 g/cm<sup>3</sup>, *V*=4.46 m<sup>3</sup>(其 中锥体高1 m,体积0.41 m<sup>3</sup>,圆柱体高3.5 mm, 体积4.05 m<sup>3</sup>),迎水面大圆半径 *R*=0.6 m,锤尖 小圆半径 *r*=0.05 m。

砂岩类礁石本构模型采用弹性、各向同性模型, 计算参数利用 RMT-150 岩石力学试验测得。礁石的 强度参数:岩石密度 *ρ* = 2.540 g/cm<sup>3</sup>,内摩擦角为 47.4°,黏聚力为 13.13 MPa,弹性模量为 8.36 GPa, 泊松比为 0.321,抗压强度为 51.47 MPa,抗拉强 度为 3.454 MPa。

考虑到机械设备限制和现场作业安全条件限制, 重锤落距 5~15 m,岩石的冲击间距 1.0~2.0 m,钻 孔直径 0.2 m,钻孔深度 0.5~1.5 m。

2.3 水下钻孔-冲击锤的破礁侵彻模型验证

图 6 为现场清礁的侵彻深度、数值计算结果 及侵彻模型计算的 *h*-*H* 对比曲线。





由图 6 可知,当 *l* = 2.0 m、*d* = 0.20 m、*z* = 0.5 m 时,现场试验获得的侵彻深度约为 4.6 cm,数值模拟和侵彻模型的计算结果约为 3.1 cm;当 *l*、*d*不变,将 *z* 提高到 1.5 m 时,现场试验获得的侵彻深度约为 8.9 cm,数值模拟和侵彻模型的计算结果仅为 4.7 cm。考虑到现场试验区前期进行水下爆破清礁的残余碎石量,且试验前后的水下声呐扫测获得的侵彻深度误差较大,因此需进一步结合数值模型进行对比分析。

图 7 中数值模拟和侵彻模型曲线极为接近, 当落距小于 10 m,侵彻模型计算结果略大于数值 模拟,计算得落距 5 m 时的误差约为 2.4%,且在 该范围内随着落距的提高,误差逐渐减小;当落 距大于 10 m 时,侵彻模型计算结果略小于数值模 拟,计算得落距 15 m 时的误差约为 1.7%,且随 着落距的继续增大,误差也逐渐增大,因此本文 提出的侵彻模型可以较好地评估水下钻孔-冲击锤 的侵彻深度。





Fig. 7 Camparison of penetration depths obtained by different methods under action of drilling-impact hammer

### 3 钻孔作用下岩体损伤讨论

由式(8)可知,影响水下钻孔-冲击锤侵彻的 因素除冲击锤质量、落距、礁石强度等参数外, 还受到钻孔参数和锤击次数的影响,为此,进一 步讨论两者对侵彻深度的影响。

3.1 钻孔对冲击锤破礁的破碎规律影响

侵彻深度为水下冲击锤冲击礁石后的侵入距 离,在数值模拟中即为冲击锤在竖直方向位移扣 除落距后的位移。由图8可知,水下冲击锤破礁 在无钻孔条件下的侵彻深度随着落距的增大而逐 渐增大,但增长速度随着落距的增大而逐渐减小, 侵彻深度与冲击锤落距呈幂函数关系。而钻孔影 响下冲击锤的侵彻深度大于无钻孔条件,其侵彻 深度近似等比例增大,倍率为1.059,但钻孔条件 下冲击锤破礁的侵彻深度增加不明显。



图 8 冲击锤作用下有无钻孔破坏程度对比 Fig. 8 Comparison of damage degree with or without drilling under action of impact hammer

破碎宽度表示冲击锤冲击后礁石产生的最大 裂隙扩展宽度,即经由水流冲刷和清渣施工后出 现的坑洼宽度。由图 8 可知,在一定范围内,冲 击锤冲击作用下礁石的破碎宽度均随着落距的增 大而逐渐增大,但无钻孔时破碎宽度随落距呈斜 率逐渐增大的幂函数曲线,而钻孔后破碎宽度随 落距呈直线增长;落距进一步增加时,由于冲击 锤锤头与礁石接触面的限制,破碎宽度的增长幅 度减小。相同条件下,钻孔-冲击锤联合破礁的破 碎宽度均大于无钻孔条件下的破碎宽度,约为无 钻孔条件下的1.523 倍,说明钻孔能有效提高水 下冲击锤破礁的破碎宽度。

破碎深度表示重锤冲击后礁石产生的最大裂隙扩展深度。由图 8 可知,冲击锤冲击下的礁石 破碎深度均随落距的增大而逐渐增大,呈幂函数 关系,但钻孔后的破碎深度基本大于无钻孔条件。 当落距小于 10 m 时,无钻孔条件下的破碎深度增 幅大于钻孔情况;当落距大于 10 m 时,无钻孔条件下的破碎深度增幅较小。分析认为:低落距下, 无钻孔条件下重锤的破碎能力有限,钻孔可以明 显提高冲击锤的破碎深度,但当落距较大时,钻 孔和无钻孔下的破碎深度接近,表明钻孔对冲击 锤的破碎深度贡献不大,冲击锤存在最大有效破 碎深度。相同条件下,钻孔-冲击锤联合作用的破碎深度约为无钻孔条件下的 1.204 倍,说明钻孔可以提高 20%左右的破碎深度。

破碎体积是以破碎宽度和破碎深度为基础, 将水下冲击锤冲击造成的坑洼视为一圆锥体,通 过计算得到的相应体积。破碎体积是冲击锤清礁 工效计算的重要依据。冲击锤在有无钻孔条件下 礁石破坏体积变化规律如图9所示,冲击锤破礁 在有无钻孔条件下,其破碎体积均随着落距的增 大而逐渐增大,同样呈幂函数曲线。钻孔后的破 碎体积均大于无钻孔条件,但落距较低时,钻孔 后破碎体积随落距的增幅明显,落距大于10 m 后,钻孔前和钻孔后的增长幅度逐渐接近。钻孔 后的平均破碎体积约为无钻孔的2.836 倍,可见 钻孔可以明显提高冲击锤破礁的体积,即不考虑 钻孔工耗时,钻孔作用下的重锤清礁工效可以提



3.2 多次冲击下钻孔-冲击锤破礁的破碎规律

前文所描述的均是冲击锤单次冲击破礁的规 律,在实际施工中,冲击锤主要通过重复冲击达 到累积破碎效果,冲击破礁的次数一般为4~5次。 为了进一步分析重复冲击对礁石损伤的影响,通 过建立的钻孔-冲击锤冲击下岩体损伤模型探究水 下冲击锤多次冲击过程中礁石的损伤变化规律。

多次冲击下礁石的破碎体积如图 10 所示,水 下冲击锤破碎体积呈随冲击次数增加而增大的幂 函数曲线,直接 5 次水下冲击锤冲击后的破碎体 积为第 1 次冲击破碎体积的 72.50 倍,钻孔影响 下 5 次冲击破礁后的破碎体积约为第 1 次冲击破 碎体积的103.24倍。可见钻孔后的多次冲击能有效提高水下冲击锤的破礁效果,且钻孔还能进一步提升水下冲击锤多次冲击的破礁效果。



Fig. 10 Relationship between broken volume and number of impacts

#### 4 结论

 考虑冲击锤在水下运动的水阻力效应和缆 绳拉阻力效应,建立钻孔影响下的冲击锤碰撞侵 彻模型,侵彻模型与数值模拟误差在5%以内,可 较好评估水下钻孔-冲击锤的侵彻深度。

2) 建立了钻孔-冲击锤冲击下岩体损伤仿真 模型,结合现场清礁试验分析得到钻孔条件下水 下冲击锤破礁的损伤规律:钻孔对提高水下冲击 锤侵彻深度的影响不明显,但10m以下低落距下 可明显提高礁石的破碎深度和宽度,钻孔-冲击锤 联合破礁的破碎宽度为无钻孔条件下的1.523 倍, 破碎深度达到1.204 倍;钻孔作用下,冲击锤清 礁工效可以提升183%。

3)水下冲击锤破碎体积呈随冲击次数增加而 增大的幂函数曲线。直接5次水下冲击锤冲击后的 破碎体积约为第1次冲击破碎体积的72.50倍,钻 孔联合冲击锤5次冲击后的破碎体积约为第1次冲 击破碎体积的103.24倍。

 4)钻孔后的多次冲击能有效提高水下冲击锤的破礁效率,且钻孔还能进一步提升水下冲击锤 多次冲击的破礁效果。

# 参考文献:

[1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-68. CAI M F. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1-68.

 [2] 李晓锋,李海波,刘凯,等.冲击荷载作用下岩石动态力 学特性及破裂特征研究[J].岩石力学与工程学报, 2017,36(10):2393-2405.

LI X F, LI H B, LIU K, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2017, 36(10): 2393-2405.

[3] 王春,程露萍,唐礼忠,等.高静荷载下卸载速率对岩石 动力学特性及破坏模式的影响[J].岩石力学与工程学 报,2019,38(2):217-225.

WANG C, CHENG L P, TANG L Z, et al. Effects of the unloading rate on dynamic characteristic and failure modes of rock under high static loads[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(2): 217-225.

[4] 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.

LU H, WANG J G, MA X T, et al. Study on dynamic response and damage of red sandstone with large porosity under cyclic loading [J]. Engineering blasting, 2021, 27(1):45-52.

[5] 张丙吉,辛全明,季铁军,等.干湿循环作用下砂岩力学
 特性及能量损伤演化[J].水运工程,2022(1):192-197,219.

ZHANG B J, XIN Q M, JI T J, et al. Mechanical properties and energy damage evolution of sandstone under dry-wet cycle[J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 192-197, 219.

[6] 张铁,李文良,罗刚,等. 粉砂岩干湿循环力学性能劣化 及统计损伤模型[J]. 水运工程, 2023(2): 29-36.
ZHANG T, LI W L, LUO G, et al. Deterioration of mechanical properties and statistical damage model of siltstone under dry-wet cycle [J]. Port & waterway engineering, 2023(2): 29-36.

- [7] ZHENG Q Q, XU Y, YIN Z Q, et al. Dynamic tensile behaviour under impact loading for rocks damaged by static precompression[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2023, 23(3): 199.
- [8] LIU J, WU C Q, SU Y, et al. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against

high-velocity projectile impacts [J]. Engineering structures, 2018, 173: 166-179.

- [9] 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.
- [10] WANG Z Z, LEI X B, ZHOU W D, et al. Numerical simulation of the damage process of rock containing cracks by impacts of steel-particle water jet[J]. Powder technology, 2023, 422: 118465.
- [11] 陈广云,单丹.基于 ABAQUS 仿真的水下液压破碎锤 凿岩施工参数设计[J].水运工程,2024(2):198-202.
  CHEN G Y, SHAN D. Design of construction parameters for underwater hydraulic fracturing hammer rock drilling based on ABAQUS simulation [J]. Port & waterway engineering, 2024(2):198-202.
- [12] 潘剑, 蒋国兴, 韩亚峰, 等. 高频破碎锤冲击作用下礁 石损伤特性及影响规律[J]. 水运工程, 2024(7):

#### (上接第149页)

- [8] 王伟,王建中,杨志,等.引江济淮工程派河口船闸通航 水流条件及改善措施[J].水运工程,2021(3):138-144. WANG W, WANG J Z, YANG Z, et al. Navigation flow condition and improvement measures of the Paihekou ship lock in water diversion project from the Yangtze River to the Huaihe River [J]. Port & waterway engineering, 2021(3):138-144.
- [9] 李华勇, 严秀俊, 徐进超, 等. 万安枢纽二线船闸上游通 航水流条件优化试验研究 [J]. 水运工程, 2023 (6): 120-124, 130.

LI H Y, YAN X J, XU J C, et al. Optimization test on navigable flow conditions of upstream at Wan'an second ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 120-124, 130.

[10] 祁永升.改善船闸引航道口门区流态的补流措施研 究:以湘江近尾洲枢纽二线船闸为例[D].重庆:重庆 交通大学,2021. 239-245.

PAN J, JIANG G X, HAN Y F, et al. Damage characteristics and influence rules of reef under high-frequency crushing hammer [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 239-245.

- [13] BROWN S J. Energy release protection for pressurized systems. part II: review of studies into impact/terminal ballistics[J]. Applied mechanics reviews, 1986, 39(2): 177-201.
- [14] YOUNG C W. Depth prediction for earth-penetrating projectiles [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1969, 95(3): 803-817.
- [15] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工 大学出版社, 1993.
  WANG R C, ZHAO G Z. Projectile end-point effect[M].
  Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.
- [16] ROSENBERG Z, DEKEL E. The penetration of rigid long rods-revisited [J]. International journal of impact engineering, 2009, 36(4): 551-564.

(本文编辑 王传瑜)

QI Y S. Study on compensation measures to improve the flow pattern at the entrance of ship lock approach channel: taking the second line lock of Xiangjiang Jinweizhou hub as an example [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

 [11] 肖钦,范红霞,邓伟,等.赣江龙头山枢纽一线船闸通 航水流条件及改善措施研究[J].水利水运工程学报, 2023(6):213-220.

> XIAO Q, FAN H X, DENG W, et al. Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River[J]. Hydroscience and engineering, 2023(6): 213-220.

[12] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2021.
 Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China

engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

(本文编辑 王璁)