

· 综合 ·



水下振动冲击破岩影响因素 数值模拟分析与研究*

黄湘¹, 赵俊先², 卢裕哲², 庄宁², 江朝华²

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029; 2. 河海大学, 江苏南京 210024)

摘要: 针对水下振动冲击破岩技术破岩效率的影响因素尚未明确的问题, 进行不同因素对岩石的破碎效应影响效果研究。采用有限-离散元(FDEM)法和耦合的欧拉-拉格朗日(CEL)法, 在ABAQUS软件中建立水下振动冲击破岩的三维数值模型, 对水下振动破岩问题进行模拟, 研究不同因素对岩石破碎的影响。结果表明, 在岩石破裂过程中, 静水压的出现会使得脆性状态的破岩过程向延性状态转变。刀头所施加静压力的增加会显著提升刀头侵入能力, 但过高压力会加剧应力振荡, 需要结合工程实际优化荷载组合。岩石抗压强度的增加使刀头进入岩石的难度增加。水深与刀头的侵入能力呈现明显的负相关性: 浅水(5~6 m)环境下, 静水压力对岩石强度的约束效应较弱, 刀头能量损耗低; 深水(8~9 m)条件下, 刀头侵入效率下降。刀头侵入深度随刀头振动频率增加呈现增长率先增后减的特征。

关键词: 生态航道; 水下振动冲击破岩; 水深影响; 数值模拟

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0031-10

Numerical simulation analysis and investigation of influencing factors in underwater vibratory percussive rock fragmentation

HUANG Xiang¹, ZHAO Junxian², LU Yuzhe², ZHUANG Ning², JIANG Chaohua²

(1. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In view of the problem of the unclear influencing factors of rock-breaking efficiency in underwater vibrational impact rock-breaking technology, the impact effects of various factors on rock fragmentation are investigated. By the finite-discrete element method (FDEM) and coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, a three-dimensional numerical model of underwater vibrational impact rock-breaking built in ABAQUS software to simulate the rock-breaking process and study the influence of different factors on rock fragmentation. The results indicate that the presence of hydrostatic pressure promotes a transition from brittle to ductile states during rock failure. Increasing the static pressure applied by the cutterhead significantly enhances its penetration capability. However, excessively high pressure exacerbates stress oscillations, necessitating optimized load combinations on the basis of engineering practice. Higher rock compressive strength increases the difficulty of cutterhead penetration. A clear negative correlation exists between water depth and penetration capability: in shallow water (5–6 m), the constraining effect of hydrostatic pressure on rock strength is weaker, resulting in lower energy loss of the cutterhead, whereas in deep water (8–9 m), penetration efficiency decreases. The penetration depth of the cutterhead exhibits a characteristic of first increasing and then decreasing with higher vibrational frequency.

Keywords: ecological waterway; underwater vibratory percussive rock fragmentation; water depth influence; numerical simulation

收稿日期: 2025-08-06 录用日期: 2025-08-29

*基金项目: 广西重点研发计划项目(2024AB08080)

作者简介: 黄湘(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程勘测、设计及科技创新研究工作。

传统的水下钻孔爆破方式清除碍航礁石，是航道整治的主要手段和常用施工方法，但是水下爆破往往会危及周围建筑物和重要设施的安全，还会对生态环境造成一定影响，如何在保证爆破清礁效果和维护航道生态安全基础上合理清除碍航礁石，成为航道工程中亟待解决的技术难题。近年来，生态清礁的研究及应用引起广泛关注，并提出高压水射流、水下液压胀裂、冲击锤凿岩、液态 CO_2 相变致裂破岩技术，以及水下聚能爆破等生态清礁等方法。水下液压破碎法适用于浅水区域，施工灵活、噪声小，但效率低、成本高，且受水深限制。覃巫黄^[1]研究西江航运干线贵港—梧州航道整治工程中液压胀裂法应用，得出结论：用于航道整治施工后期的零星浅点处理以及对孤立礁石的破碎效率更高；液态 CO_2 相变致裂破岩技术利用液态 CO_2 瞬间气化膨胀产生高压破岩，安全性高、环保，但施工步骤繁琐。YANG 等^[2]的研究集中在爆破压力、裂缝形态及优化参数等方面。水下聚能爆破通过特殊形状药包增强爆破效果，工艺简单、灵活，周迪峰等^[3]的研究集中在爆破过程模拟及射流侵彻等方面。但以上方法总体存在效率低下的问题，如何在兼顾生态和效率的基础上清除碍航礁石，成为航道工程中亟待解决的技术难题。

移动式高频/低频破岩是一种新型生态清礁技术，高频/低频破碎装置见图 1。该技术利用高频/低频破碎装置对水下岩礁进行破碎，破岩机通过高频/低频振动使破岩刀头破碎岩石，由于行走台架是在轨道左右移动，能单刀破岩，也能牵引连续破岩，破碎效率高、作业水深大且施工安全环保。Wiercigroch 等^[5]对不同岩石材料应用高频轴向振动，发现高频振动对岩石具有强烈的非线性影响。这引起更多科学家对高/低频破岩的兴趣。Wang 等^[6]模拟双刀头动态荷载作用下岩体破坏的全过程，并对破坏过程具体情况做出假设；Tian 等^[7]基于弹性力学和机械振动原理建立钻头刀具的切削机理模型，并指出岩石系统的响应特性，发

现当刀头振动频率接近岩石的固有频率的破岩效率是普通破岩机的 3 倍；裴邦学等^[8]利用现场试验数据与 Rhino 软件进行分析，得出高频破碎锤水下清礁的单个最优锤击时间以及最优锤击间距；潘剑等^[9]探究出高频破碎锤具有临界冲击频率 (15 Hz)，且提高冲击效率的关键在于增大工作压力，最佳为 25 MPa。

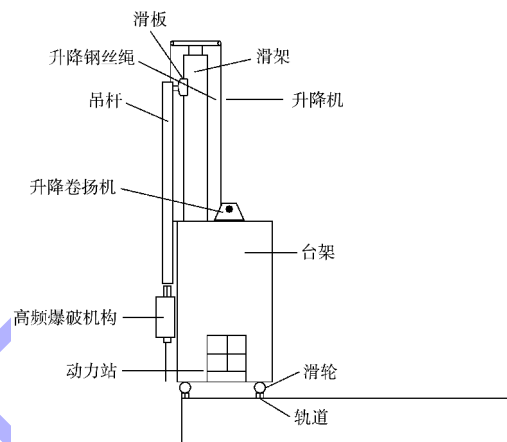


图 1 高频/低频破碎装置

Fig. 1 High-frequency/low-frequency fragmentation device

尽管已有一些关于高/低频振动破岩试验的研究，但其破碎机理、影响因素以及优化方案的研究较少。鉴于此，本文利用有限-离散元法 (finite-discrete element method, FDEM) 和耦合的欧拉-拉格朗日 (coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 法，在 ABAQUS 软件中建立水下振动冲击破岩的三维数值模型，探讨岩石抗压强度、刀头静压力、水深及刀头振动频率等因素对刀头破岩效果的影响。研究成果可为水下振动冲击破岩技术的优化及工程应用提供基础。

1 水下振动冲击破岩数值模型

1.1 有限元模型建立

本文通过有限元分析软件 ABAQUS，采用 FDEM 和 CEL 法对岩石材料进行三维建模，并仿真水下振动冲击破岩装置刀头的水下破岩过程。其中建立岩石模型的尺寸设置为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (长×宽×高)。在模拟时将刀头受力进行简

化,将整个过程分为两个分析步:分析步1中刀头仅受到压力 F_N 以及确定频率的冲击荷载;分析步2中刀头不仅受到静压和冲击荷载还受到水平方向的拉力 F_T 。建立的水下振动冲击破岩模型见图2。

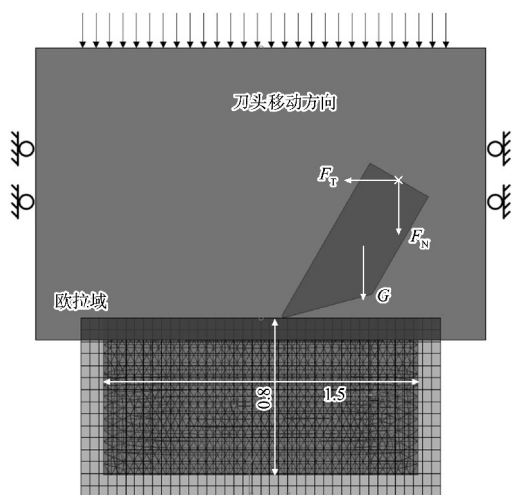


图2 水下破岩 FDEM-CEL 模型(单位:m)

Fig.2 Underwater rock breaking FDEM-CEL model (unit:m)

1.2 材料参数确定

本文对花岗岩进行单轴压缩试验、巴西劈裂试验和剪切试验^[10],得到岩石的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度等宏观参数,通过对上述3个试验进行数值模拟,并通过试错法得到了岩石I型断裂能、II型断裂能等细观参数。花岗岩的FDEM输入参数为:基本单元的弹性模量12.7 GPa,泊松比0.24,密度2.7 g/cm³,抗压强度74.1 MPa,黏聚力7 MPa,内摩擦角46°;离散单元的法向刚度1500 N/m³,切向刚度610 N/m³,抗拉强度4.13 MPa,抗剪强度15.6 MPa,I型断裂能0.135 N/mm,II型断裂能0.756 N/mm。

1.3 模型网格划分与单元设置

为保证模拟的精确性,模型在岩石与刀头接触区域对网格进行了局部加密。网格划分的具体方法如下:岩石网格划分采用六节点母性三棱柱单元(C3D6),刀头接触区域的单元尺寸为0.015 m,其他区域单元尺寸为0.03 m。将零厚度的内聚力单元插入岩石的基体单元之间,通过对零厚度的

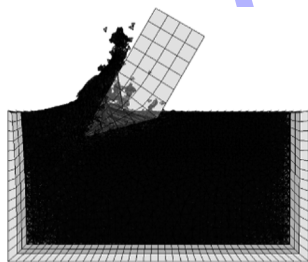
内聚力单元的损伤情况的监测反映岩石变形、断裂和破坏所导致的裂缝。在岩石外围使用一层无限元单元进行包裹,避免模型太小时应力波在传递到边界时会产生反射效应,影响到裂纹的萌生扩展,从而影响模拟结果的准确性。在岩石模型中共有42.1008万个基体单元,共有83.3914万个内聚力单元。刀头的边界条件是约束刀头在x和y方向上的位移,允许其在z方向(竖直方向)自由移动,模拟刀头依靠自重贴合岩石表面的真实状态。采用通用接触模型定义刀头与岩石之间、岩石内部裂面之间的接触行为。其中法向行为选取“硬接触”模式,确保加载过程中接触力的准确传递。切向行为使用罚函数法定义摩擦行为,各向同性摩擦系数设定为0.1。静水压力主要通过在水面上施加荷载实现,水域使用欧拉域进行模拟,为避免在压力作用下水域向两侧流动,在水域的四周进行了相应的限制。该模型实现了裂纹发展路径和岩石破碎机制的模拟。

1.4 岩石破碎特征

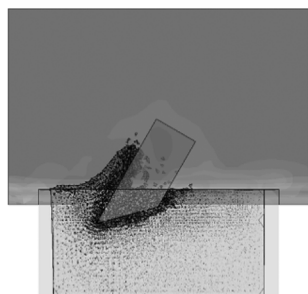
破岩装置主要用于水下礁石的清除工作,所以会在不同的水深条件下工作,静水压力对破岩效果也会产生影响。金解放等^[11]基于自主研发的高静水压高地应力岩石动力学试验装置研究砂岩的动态力学特性,结果表明外界静水压力及红砂岩裂隙面中水的Meniscus效应、Stefan效应及牛顿内摩擦效应抑制裂隙的萌生扩展,进而提高红砂岩的抗压强度及抵抗变形能力;方士正等^[12]利用分离式霍普金森杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验系统,开展静水压力作用下深部岩石的动力学测试,试验中岩石的能量吸收率随静水压的增加而减小,表明静水压力对岩石变形具有约束作用;Liu等^[13]基于自主开发的深海静水压试验装置研究静水压对凿齿切削力、比能耗及碎屑粒径参数的影响,分析岩石延-脆性转变机理,并建立碎屑粒径参数与比能耗的关系。

其余参数相同时,不同水深下岩石破碎情况模拟结果见图3。可以看出,随着刀头深入岩体,

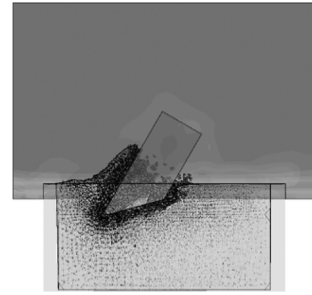
刀头与岩体的接触面积逐渐增大，这直接导致破岩阻力的增加。在实际的破岩过程中，会产生大量的岩屑和粉末，这些物质会在凿入过程中吸收部分刀头的冲击能量，从而减少刀头对岩体的破坏效果。当刀头凿入达到一定深度后，岩体在这一范围内的屈服应力超过了冲击荷载所产生的应力，导致刀头无法继续深入岩体，此时凿入过程达到了极限。静水压的出现也会使得脆性状态的破岩过程向延性状态转变，分别对比 0、5 和 8 m 水深结果可以发现，常压下的刀齿破岩过程会产生大块度碎屑并伴随着裂纹的扩展。但是，在静水压增大的过程中，岩石碎屑数量和块度逐渐减少，裂纹也逐渐收缩，并且在水压的作用下，更加地贴合刀具。当处于浅水时（静水压较小），刀尖处产生挤压破坏后，剪切破坏向岩石表面传递，但岩石的剪切强度较高而岩石抗拉强度较低，剪切破坏在距离岩石较远处转换成了拉伸破坏，进而产生了大面积剥离，产生大块碎屑。因此低静水压下以脆性破坏为主。相反，随着静水压继续增大到一定值后，岩石剪切强度降低，这使得剪切破坏更加靠近岩石表面，随后产生较少的拉伸破坏，进而产生了大面积剥离，产生大块碎屑。



a) 0 m水深



b) 5 m水深



c) 8 m水深

图 3 不同水深下的岩石破碎情况

Fig. 3 Condition of rock fragmentation at different water depths

2 影响因素分析

2.1 刀头静压力

基本工况为振动冲击频率为 30 Hz，刀头倾斜角为 25°，刀头静压力为 200 kN，岩石强度为 30 MPa，水深为 0 m。分别修改岩石强度、刀头静压力、水深 3 个因素，进行单个因素的影响研究。

破岩装置通过破岩机进行振动，施加“刀头静压力+冲击振动荷载”使破岩刀头破碎岩石。分别采用 200、240、280、320 和 360 kN 共 5 种静压力进行模拟。

不同刀头静压下的侵入深度变化见图 4。可以看出，在 0.00~0.80 s，刀头随着每一次刀头振动所下降；在 0.00~0.25 s，刀头侵入深度增长率逐渐减小；在 0.25~0.80 s，刀头侵入深度变化很小。在 200 kN 刀头静压力下，刀头的侵入深度增长缓慢，且变化较为平稳；在 240 kN 的刀头静压力下，刀头的侵入深度有所增加，曲线的斜率比 200 kN 时有所提高；在 280 kN 刀头静压力下，刀头的侵入深度继续增加，并且增长趋势更加明显，侵入深度的变化速度较前两种压力有所加快；在 320 kN 的刀头静压力下，刀头的侵入深度明显加快，曲线增长更加陡峭；在 360 kN 静压力下，刀头的侵入深度持续增加，并且增长速度最为显著。刀头静压力增加时，刀头的侵入深度逐渐增大，说明刀头静压力对破碎过程有显著的促进作用。随着刀头静压力的增大（从 200~360 kN），刀头的侵入深度加速增长，尤其是在 320 和 360 kN 压

力下, 刀头能够更有效地深入岩石, 从而提高破碎效率。

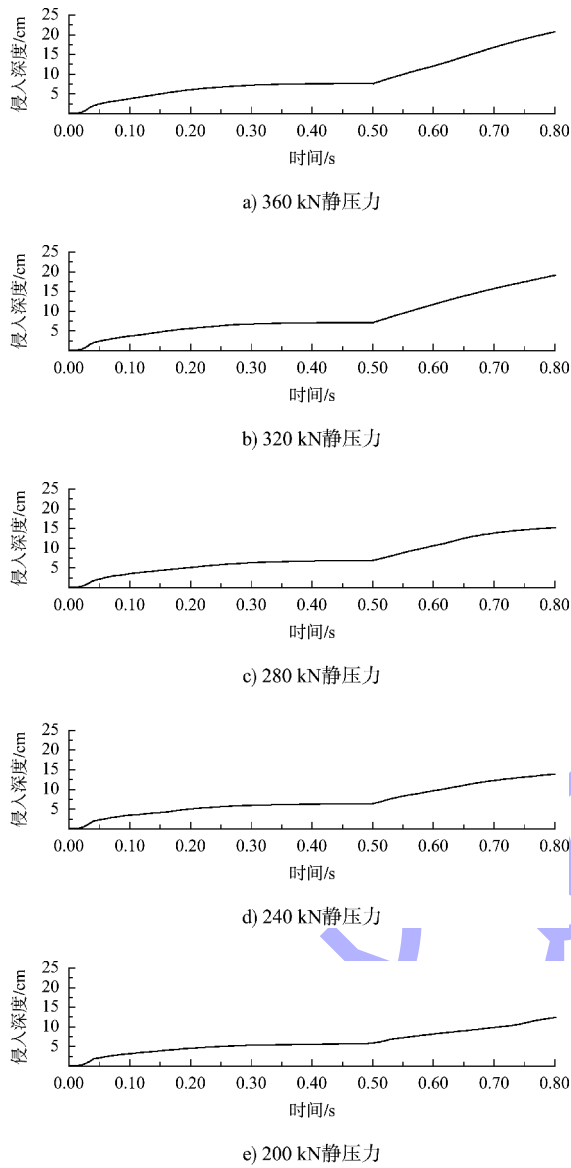


图 4 不同刀头静压力下侵入深度变化

Fig. 4 Penetration depth changes under different static pressure of cutter head

分析步 1 和 2 阶段结束后刀头侵入深度对比见图 5。在分析步 1 阶段, 侵入深度先随着刀头静压力的增长而增长; 对于分析步 2 阶段, 侵入深度也是在 360 kN 时达到最大, 并且在分析步 2 中, 刀头静压力对侵入深度影响更大。初步认为该影响与刀头受力有关, 故对刀头侵入过程中, 刀头受到应力数据进行提取, 不同静压力作用下刀头应力变化曲线见图 6。可以看出, 低静压力

(200 和 240 kN) 时应力波动相对较小, 刀头的工作状态较为平稳, 但破碎效果较弱。随着刀头静压力的增加, 应力波动开始增大, 表明刀头的受力更为集中, 破碎效率有所提高。中等刀头静压力(280 和 320 kN) 时刀头应力的波动逐渐增大, 尤其在 320 kN 时, 应力变化较为剧烈。随着刀头静压力的增加, 刀头的破碎效果得到明显改善, 但波动较大的应力可能对刀头稳定性产生一定影响。高刀头静压力(360 kN) 时应力波动最大, 表明刀头在最大静压力下施加的力最强, 破碎效果最为显著。但较大的波动也意味着刀头可能面临较大的反作用力和不稳定因素。

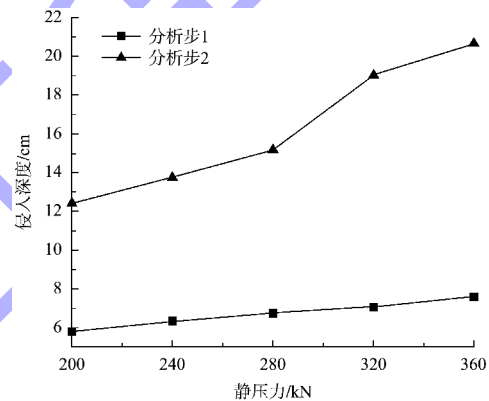
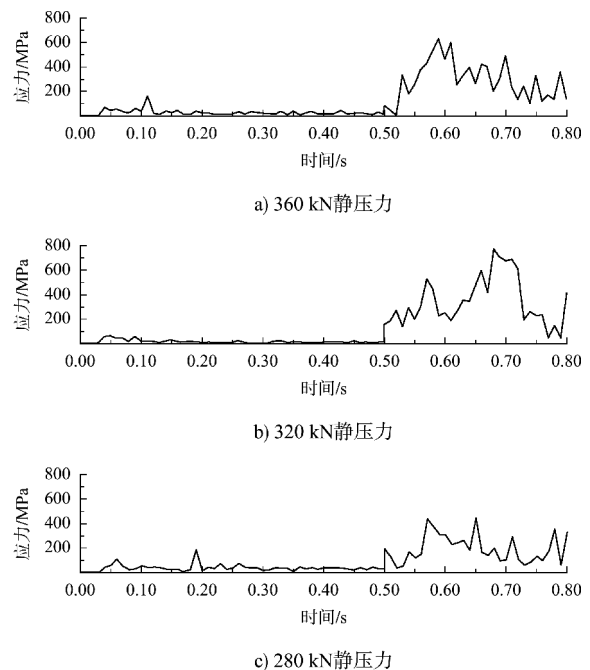


图 5 不同刀头静压力下两阶段结束后侵入深度
Fig. 5 Penetration depth after two stages under various cutter static pressures



c) 280 kN 静压力

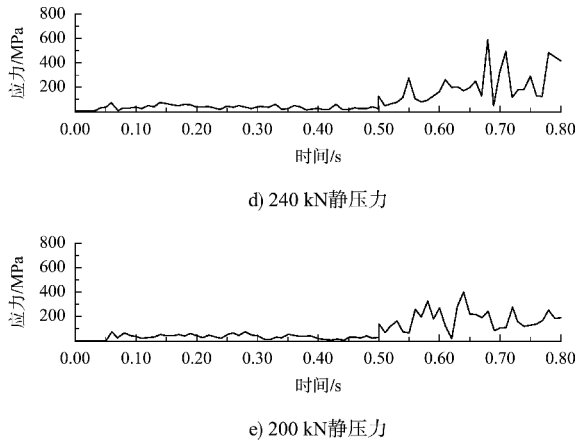


图 6 不同刀头静压力下应力变化

Fig. 6 Stress changes under different static pressures of cutter head

2.2 刀头振动频率

在 ABAQUS 中采用循环荷载的方法模拟刀头破碎岩石时的振动冲击，设置刀头施加的垂直向下静压为 200 kN，冲击荷载为 155 kN，分别采用 10、20、30、40、50 和 60 Hz 的频率进行模拟。

不同频率下的刀头侵入深度见图 7。可以看出，在 0.00~0.80 s 之间（即分析步 1 阶段），在频率较小时如 10、20 Hz，能够明显地看到刀头随着每一次刀头振动所下降的，而当频率变高，刀头深度变化的曲线逐渐变的平滑。

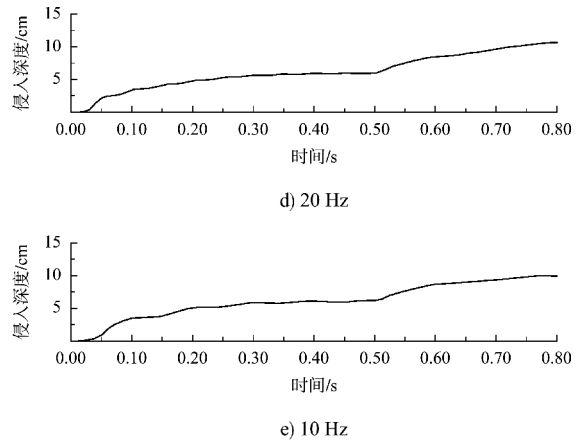
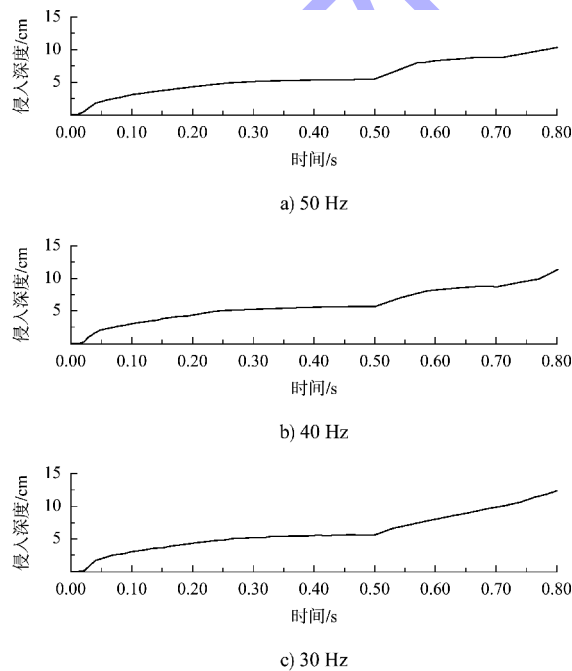


图 7 不同频率下刀头侵入深度变化

Fig. 7 Variation of cutter head penetration depth at different frequencies

分析步 1 和分析步 2 阶段结束后刀头侵入深度对比见图 8。在分析步 1 阶段，侵入深度先随着频率的增长而增长，30 Hz 作为一个分水岭，在 30 Hz 后侵入深度随着频率的增加而降低；对于分析步 2 阶段，侵入深度也是在 30 Hz 时达到最大。初步认为该影响与刀头受力有关，故对刀头侵入过程中，刀头受到应力数据进行提取。

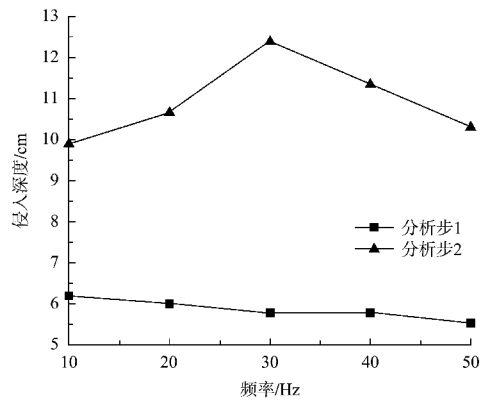


图 8 不同刀头振动频率下两阶段结束后侵入深度

Fig. 8 Penetration depth at two stages termination under varying cutter head vibration frequencies

刀头在侵入过程中的受力曲线见图 9。可以看出，在所有频率的曲线中，初始阶段(0.00~0.30 s)应力均呈现出快速上升的趋势，尤其是在最初的接触瞬间。不同频率的曲线应力峰值略有不同，较低频率的应力曲线相比高频率曲线显示出更为

明显的波动和快速升高。这表明在较低频率下刀头与岩石的接触和应力响应更加剧烈。随着时间的推移, 图中不同频率的曲线显示出一定的波动, 在 0.30~0.80 s, 高频率的曲线波动次数较多, 波动幅度小于低频率的波动幅度, 在较高频率下刀头对岩石的作用力更加平稳。30 Hz 频率的曲线的应力高于其他的频率的曲线, 这说明在频率为 30 Hz 时刀头对岩石的作用力要大于其他频率。

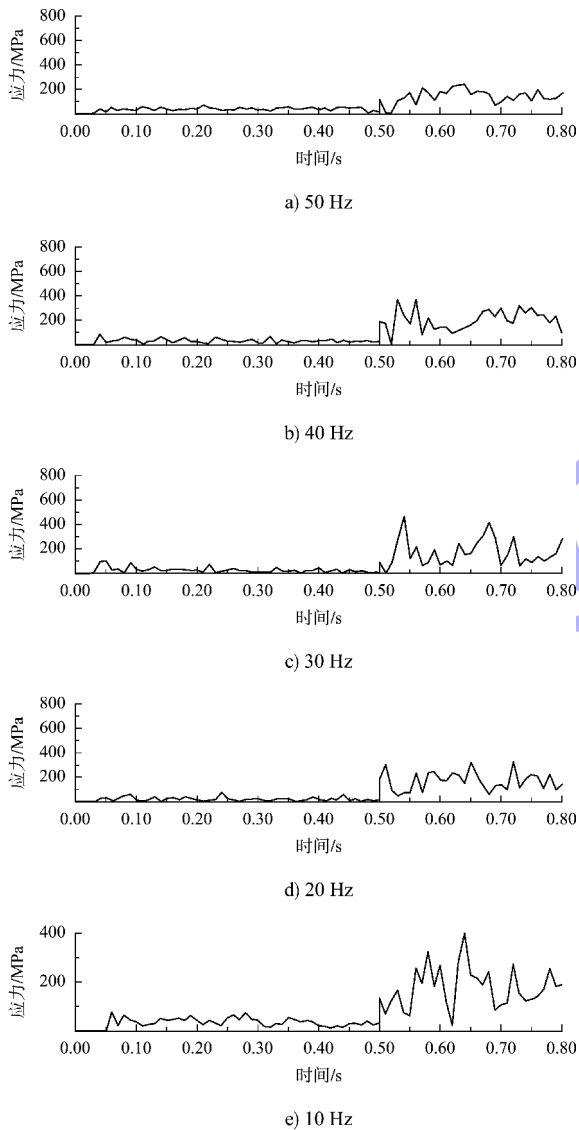


图 9 不同频率下应力变化

Fig. 9 Stress variation at different frequencies

2.3 水深

不同阶段结束后的侵入深度见图 10, 刀头在侵入过程中的受力曲线见图 11。由图 10 可知, 刀头在浅水(5 和 6 m)条件下工作效率最高, 初始切

入速率快, 持续侵入能力强, 最终侵入深度大; 在深水(8 和 9 m)条件下, 初始切入速率低, 持续侵入能力弱, 最终侵入深度小。表明浅水环境有利于刀头高效破碎, 深水则导致效率显著降低。由图 11 可知, 5 m 水深时刀头应力变化平稳, 工作稳定, 破碎效率高; 6 m 水深时应力波动开始明显, 破碎阻力增加; 7 m 水深时应力波动进一步增大, 稳定性受影响; 8 m 水深时应力波动剧烈, 破碎效率显著下降; 9 m 水深时应力波动最大, 破碎效率最低, 工作不稳定。表明浅水(5 和 6 m)利于刀头稳定破碎, 而深水(8 和 9 m)则导致破碎效率和稳定性大幅下降。

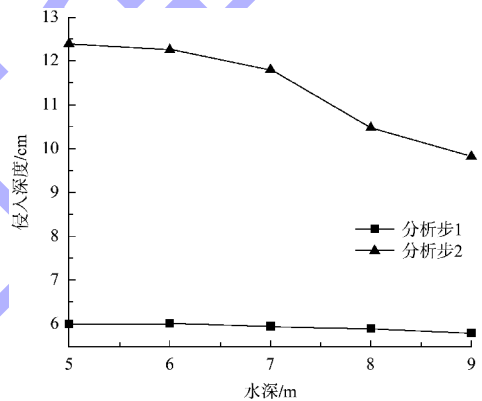
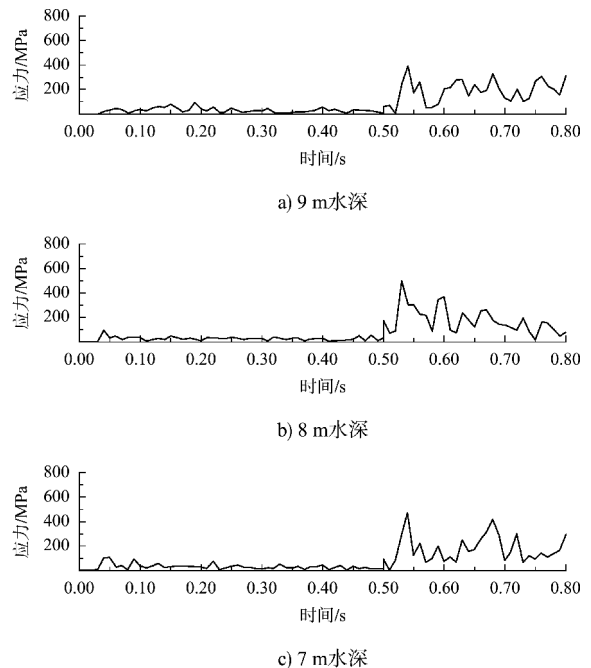


图 10 不同水深下两阶段结束后侵入深度

Fig. 10 Penetration depth after two stages under varying water depths



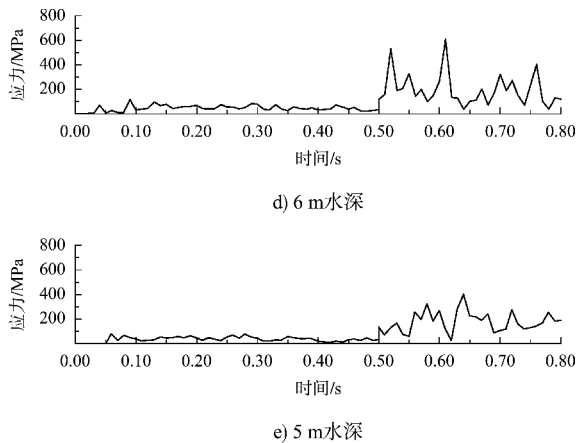


图 11 不同水深下应力变化
Fig. 11 Stress changes under different water depths

2.4 岩石抗压强度

不同抗压强度下的刀头侵入深度见图 12。可以看出，在 20 MPa 抗压强度下，刀头的侵入深度相对较深，增长较快。初期侵入速度较快，但随着时间的推移，增长趋于平缓。由于抗压强度较低，岩石相对容易被切割。在 30 MPa 抗压强度下，刀头的侵入深度较 20 MPa 时有所减少。相比于 20 MPa 抗压强度，30 MPa 时岩石的抗压强度增加，刀头的推进受到一定阻力，导致刀头的侵入速度放缓，但总体而言侵入深度还是有显著增加。在 40 MPa 抗压强度下，刀头的侵入深度明显增大。相比 30 MPa，随着抗压强度的增加，刀头需要施加更多的压力才能进一步深入岩石，因此曲线趋于平缓，增长速度减慢。总体侵入深度较 30 和 20 MPa 时更浅，显示出抗压强度对破碎效率的直接影响。在 50 MPa 抗压强度下，刀头的侵入深度进一步增加，但增长速率依然较为缓慢。这说明岩石抗压强度的增加使刀头进入岩石的难度增加，但刀头依然能够继续深入。随着抗压强度的提升，刀头的工作效率逐渐降低，增加了能量消耗并减缓了进度。在 60 MPa 抗压强度下，刀头的侵入深度增长最为缓慢，几乎接近饱和状态。岩石的抗压强度较高，刀头无法有效地深入岩石，进而使得破碎效率大幅下降。随着抗压强度进一步增加，刀头的入岩深度显著减缓，几乎达到停滞状态。

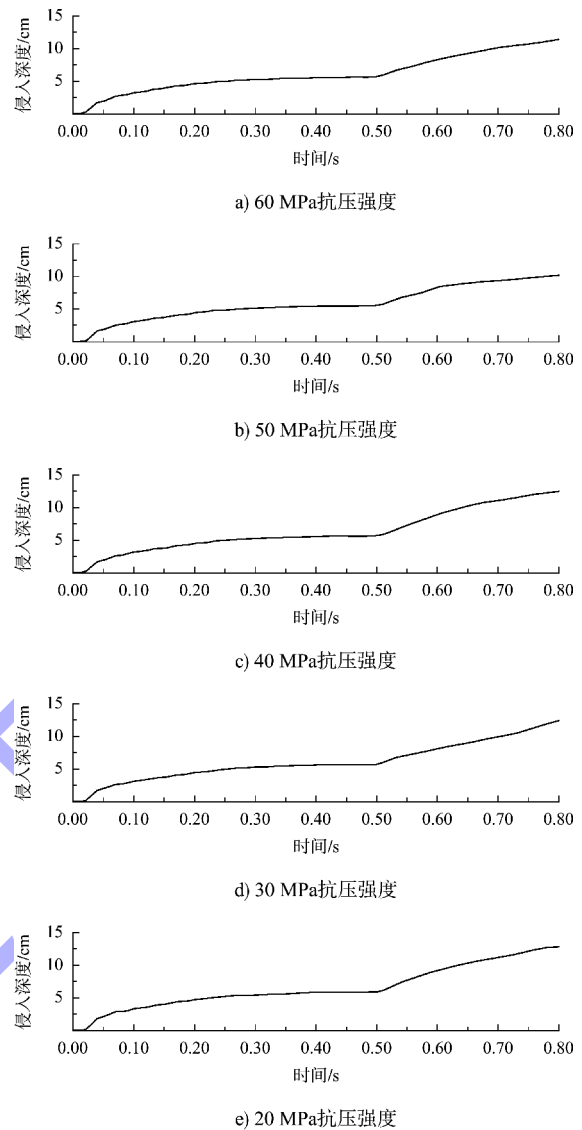


图 12 不同岩石强度下刀头侵入深度变化
Fig. 12 Penetration depth of cutter head changes under different rock strengths

分析步 1 和 2 阶段结束后刀头侵入深度对比见图 13。可以看出，随着岩石抗压强度的增加，刀头的侵入深度呈现出逐渐减缓的趋势。刀头在侵入过程中的应力变化见图 14。可以看出，在 20 MPa 抗压强度下，刀头的应力变化最为平稳且波动幅度较大。初期刀头进入岩石时应力波动较大，随着时间推移，应力波动有所减小。在 30 MPa 抗压强度下，刀头的应力波动幅度略有减小。与 20 MPa 相比，岩石的抗压强度的增加使得刀头的侵入速度减缓，应力的波动较为平缓，且应力的峰值开始出现较为明显的下降。抗

压强度为 30 MPa 时, 刀头的破碎效率有所降低, 且由于岩石的抗压能力更强, 刀头在切削过程中面临更大的阻力。在 40 MPa 抗压强度下, 应力波动进一步减小。40 MPa 条件下, 刀头的破碎效果和效率较低, 侵入深度逐渐减小, 应力波动更为平缓, 表现出岩石的较强抗压性对破碎过程的限制。

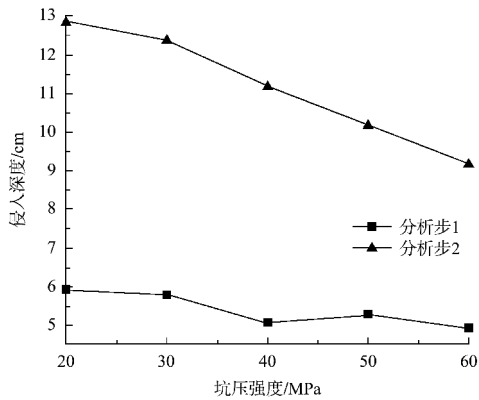


图 13 不同抗压强度下两阶段结束后侵入深度
Fig. 13 Penetration depth after two stages under varying rock uniaxial compressive strengths

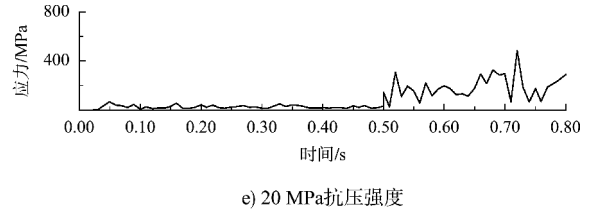
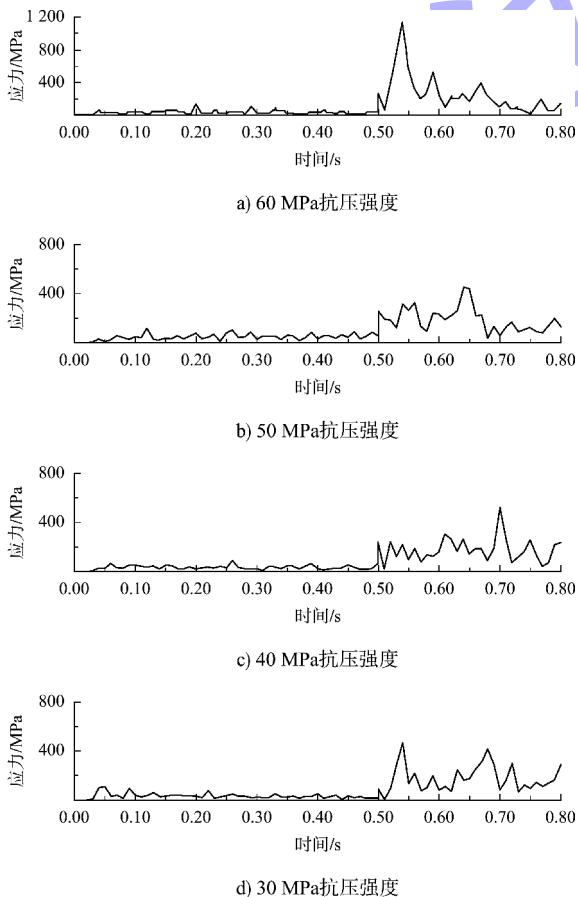


图 14 不同岩石强度下应力变化

Fig. 14 Stress variation under different rock strengths

3 结论

- 1) 随着水深的增加, 静水压力促使岩石由脆性破坏向延性破坏转变, 表现为碎屑块度减小、裂纹扩展受限, 岩石更贴合刀具。
- 2) 静压力增大可有效提升刀头侵入深度与破岩效率, 但过高的静压力(如 360 kN)会引发强烈应力振荡, 可能影响刀头工作稳定性, 需要结合实际工况优化静压与动载组合。
- 3) 刀头侵入深度随刀头振动频率增加呈现增长率先增后减的曲线特征。在 30 Hz 附近达到最优破岩效果。低频(如 10~20 Hz)下应力响应剧烈但效率有限, 高频(如 40~60 Hz)下作用力更平稳但侵入能力下降。
- 4) 浅水环境(5~6 m)下静水压力约束作用较弱, 刀头能量损耗低、侵入效率高; 深水环境(8~9 m)下破岩阻力显著增大, 刀头侵入深度与工作效率明显下降。
- 5) 随着岩石抗压强度的提高, 刀头侵入阻力增大, 侵入深度增长趋缓, 破岩效率逐步降低。

参考文献:

[1] 覃巫黄. 液压分裂机在特殊航道整治工程施工中的应用[J]. 西部交通科技, 2012(5): 72-75.
QIN W H. Application of hydraulic splitting machine on the construction of special waterway regulation engineering [J]. Western China communications science & technology, 2012(5): 72-75.

[2] YANG Z B, ZHOU Y J, XU X D, et al. Numerical modeling of liquid CO₂ phase transition blasting based on smoothed particle hydrodynamics algorithm[J]. Thermal science, 2019, 23: 693-702.

- [3] 周迪锋,唐娟,赖建云.水下聚能爆破技术研究[J].四川兵工学报,2013,34(2):45-47.
ZHOU D F, TANG J, LAI J Y. Research of shaped underwater blasting technology [J]. Journal of Sichuan ordnance, 2013, 34(2): 45-47.
- [4] 赵伏军,谢世勇,潘建忠,等.动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(8):1290-1295.
ZHAO F J, XIE S Y, PAN J Z, et al. Numerical simulation and experimental investigation on rock fragmentation under combined dynamic and static loading [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33 (8): 1290-1295.
- [5] WIERCIGROCH M, WOJEWODA J, KRIVTSOV A M. Dynamics of ultrasonic percussive drilling of hard rocks[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 280(3/5): 739-757.
- [6] WANG S Y, SLOAN S W, LIU H Y, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by two drill bits subjected to static and dynamic (impact) loading[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2011, 44: 317-332.
- [7] TIAN J L, FAN C Y, ZHANG T J, et al. Rock breaking mechanism in percussive drilling with the effect of high frequency torsional vibration[J]. Energy sources(part A: recovery, utilization, and environmental effects), 2022, 44(1): 2520-2534.
- [8] 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.
PEI B X, JIANG G X, ZHONG R B, et al. Field test of underwater reef breaking characteristics of high frequency hydraulic breaking hammer [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 198-202.
- [9] 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):239-245.
Pan J, Jiang G X, Han Y F, et al. Damage characteristics and influence rules of reef under impact of high-frequency crushing hammer [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 239-245.
- [10] 邓鹏海.深部软弱地层TBM掘进挤压变形卡机及防控过程FDEM数值模拟研究[D].武汉:武汉大学,2019.
DENG P H. FDEM numerical simulation study on the TBM jamming and prevention-control process due to squeezing deformation in deep soft ground [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [11] 金解放,孙俊涛,杨洪灏.高水压对红砂岩动态强度和变形特性影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10):2372-2384.
JIN J F, SUN J T, YANG H H. Experimental investigation of the influence of high water pressure on dynamic strength and deformation characteristics of red sandstone [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023, 42(10): 2372-2384.
- [12] 方士正,李炜煜,杨阳,等.静水压状态下深部岩石动态压缩力学行为及能量耗散特征试验研究[J].振动与冲击,2023,42(6):280-288.
FANG S Z, LI W Y, YANG Y, et al. Experimental study on the dynamic mechanical behavior and energy dissipation characteristics of deep rock under coupled impact loading and hydrostatic pre-stress[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(6): 280-288.
- [13] LIU Z H, LYU R, KONG C Y, et al. Experimental study on rock breaking by single chisel pick under deep-sea hydrostatic pressure [J]. Ocean engineering, 2023, 285: 115262.

(本文编辑 王璁)