

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.011

深水基槽开挖中水下重锤破岩规律研究

王环玲¹,马行生¹,傅星凯²,詹锐彪³,廖曾平³

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098; 2.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098;
3.中交广州航道局有限公司,广东 广州 519000)

摘要: 基于深中通道水下沉管隧道基槽凿岩工程,采用数值模拟方法研究了重锤凿岩棒受力状态和凿岩棒下落过程的速度变化规律以及凿岩棒凿击岩石的损伤发育特征,分析了不同水深、不同冲击速度、不同凿击次数对岩石破坏和损伤的影响规律。结果表明:凿岩棒下落过程中速度先线性增加然后增加幅度逐渐降低,最终趋于稳定的收尾速度;在凿岩棒凿击岩石过程中,其速度不断下降并伴随着岩石损伤的累积;水深与岩石的损伤呈负相关关系,而冲击速度和凿击次数与岩石的损伤呈正相关关系。

关键词: 重锤斧式凿岩棒;水下凿岩;岩石损伤;水深;冲击速度;凿击次数;深中通道工程

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0085-07

Study on the underwater rock breaking characteristics by heavy hammer in the process of base slot excavation

WANG Huanling¹, MA Hangsheng¹, FU Xingkai², ZHAN Ruibiao³, LIAO Zengping³

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 519000, China)

Abstract: The stress state and the variation law of velocity in the falling process of rock breaking hammer are studied according to the immersed tunnel foundation trench in the Shenzhen-Zhongshan passage project. The FEM method is used to simulate the process of rock drilling, study the damage development characteristics of rock and analyze the influence law of water depth, impact velocity and drilling times on the rock failure and damage development. The results show that during the falling process, the velocity of rock breaking hammer increases linearly first, then decreases gradually, and finally tends to a stable ending velocity. The speed of the hammer decreases and the damage accumulates in the process of drilling. In addition, the water depth is negatively correlated with the rock damage, while the impact velocity and impact times are positively correlated with the rock damage.

Key words: axe rock breaking hammer; underwater drilling; rock damage; water depth; falling velocity; drilling times; Shenzhen-Zhongshan passage project

凿岩工艺是将凿岩棒提升一定高度后自由下落,将重力势能转化为动能对岩石进行冲击破碎的一种物理清礁工艺。目前对凿岩棒水下破岩过程的研究很少,且受试验场地和监测手段的限制,主要集中在数值模拟研究以及与破岩机理类似的压头、切削齿、钢粒的破岩过程或子弹的穿靶过程研究。杨岳峰等^[1-2]通过模拟压头冲击岩石的过程,研究了冲击过程中岩石应力场分布和裂纹扩展情况;He 等^[3-4]模拟了切削齿切削岩石的过程,以此确定了岩石破坏与切削齿侵入深度的关系;邢大伟等^[5-6]模拟了钢粒冲击岩石的过程,探讨了粒径和速度对岩石破碎效果的影响;Liu 等^[7]使用有限元 LS-DYNA 进行模拟弹丸冲击混凝土板的试验,研究了不同速度对侵彻深度和岩石损伤发育的影响。目前数值模拟研究主要集中于冲击速度对岩石的裂纹和损伤发育情况的影响。

深圳至中山跨江通道(深中通道)工程凿岩过程受诸多因素的影响,如水深、凿击次数、凿击点布设方式

基金项目: 国家自然科学基金(11772116);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX21_0499)

作者简介: 王环玲(1976—),女,教授,博士,主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: wanghuanling@hhu.edu.cn

引用本文: 王环玲,马行生,傅星凯,等.深水基槽开挖中水下重锤破岩规律研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):85-91.

WANG Huanling, MA Hangsheng, FU Xingkai, et al. Study on the underwater rock breaking characteristics by heavy hammer in the process of base slot excavation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 85-91.

等。深中通道沉管隧道基槽岩石开挖处为 40 m 水深条件,并且在实际实施过程中,凿岩棒冲击凿岩点一般需要冲击多次才能取得较好的破岩效果,目前尚未发现考虑水深和冲击次数对岩石损伤破坏影响规律的研究。随着深中通道工程的不断推进,亟须系统研究凿岩工艺的特点和深水破岩的规律。本文使用有限元 LS-DYNA 对凿岩过程进行数值模拟,研究不同因素对凿岩效果的影响,重点分析凿岩破坏过程及不同因素对凿岩效果的影响规律,为后续凿岩实施提供参考。

1 深中通道简介

深中通道工程是国家“十三五”重大工程,作为粤东通往粤西乃至大西南的便捷通道,是我国迈向交通强国新征程的标杆工程。深中通道位于虎门大桥下游约 30 km,港珠澳大桥上游约 38 km,项目采用东隧西桥方案(图 1)。在东部沉管隧道基槽设计标高范围内存在大量的中风化花岗岩,其分布范围广、埋藏深、强度大,给基槽开挖带来了严峻的挑战。一般情况常使用水下爆破工艺解决硬质基槽的清礁问题,但爆破对环境的影响大、施工许可要求高,同时深中通道工程对环境保护要求较高,深水深槽清礁工程中有禁爆要求,且施



图 1 深中通道地理位置
Fig.1 Location of the Shenzhen-Zhongshan passage project

工区域通航压力较大,因此深中通道工程现场采用了物理方式的凿岩工艺技术对硬岩岩体进行动力破碎处理,从而达到清礁的目的。

2 数值模型建立

2.1 几何模型

深中通道工程现场使用的凿岩棒为斧式凿岩棒,其形状如图 2 所示。凿岩棒质量约为 35 t,高度约为 5.0 m,棒尖角度约为 53°。在有限元 LS-DYNA 中建立对应的几何模型如图 3 所示,模型中凿岩棒尺寸与现场凿岩棒尺寸相同。岩石尺寸为 4 m × 4 m × 2 m,凿岩棒与岩石均采用三维实体应力单元。由于斧式凿岩棒几何形状较为复杂,采用四面体网格划分;岩石采用六面体网格划分,模型共有节点数 115 959,单元数 323 165。

2.2 边界条件

为了模拟实际工程环境,对岩石模型的底面及 4 个侧面进行法向位移约束,并设置为无反射边界以模拟无限空间,对凿岩棒和岩石施加重力加速度,同时设置与水深相适应的静水压力。现实环境中岩石赋存于海底,处于饱和状态,长期受静水压力的作用,因此对岩石进行初始应力平衡计算后,再对凿岩棒施加初始速度,进行凿岩棒凿击过程模拟。



图 2 斧式凿岩棒形状
Fig.2 In-situ shape of
axe rock breaking hammer

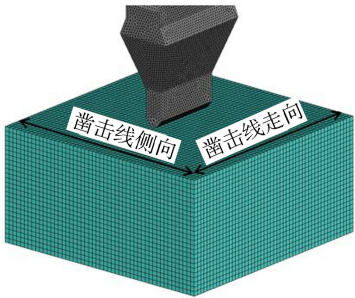


图 3 凿岩几何模型与网格划分
Fig.3 Geometric modeling and
meshing of rock drilling

2.3 材料参数

将斧式凿岩棒视为刚体,密度为 7850 kg/m^3 ,岩石材料使用 JH-2 模型进行表征。JH-2 模型是一种弹塑性损伤模型,由强度方程、损伤演化方程、状态方程三部分共同构成^[8-10]。根据三轴压缩试验和 SHPB 动态压缩试验的结果,并结合 Johnson 等^[11-12]对模型参数取值的研究,确定了典型中风化花岗岩的主要参数:岩石密度 $\rho_1 = 2600\text{ kg/m}^3$;体积模量 $K_1 = 28.7\text{ GPa}$;方程参数 $K_2 = 147.3\text{ GPa}$, $K_3 = 7210\text{ GPa}$;剪切模量 $G = 14.2\text{ GPa}$;弹性极限 $H_{el} = 4.5\text{ GPa}$;抗拉极限 $T = 10.0\text{ MPa}$;完整指数 $N = 0.64$;完整强度 $A = 0.61$;破碎强度 $M = 0.59$;破碎指数 $B = 0.22$;应变系数 $C = 0.006$;损伤常数 $D_1 = 0.006$, $D_2 = 0.7$;参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0$;删除准则 $F_s = 0$ 。

3 斧式凿岩棒下落过程速度变化规律

凿岩棒在下落凿击整个过程中完全处于水下,在下落过程中受到重力、浮力、水阻力的共同作用。根据流体力学理论,一般认为凿岩棒下落过程中水阻力主要指压差阻力,其大小与水的密度、物体垂直运动方向的横截面积、速率的二次方成正比。凿岩棒下落过程中受到的阻力可表示为

$$F = \frac{1}{2}R\rho Sv^2 \tag{1}$$

式中: R 为阻力系数,通过深中通道工程现场实测凿岩棒下落速度标定,为 2.0 ; ρ 为水的密度; S 为凿岩棒在其运动方向上的投影面积,为 1.07 m^2 ; v 为凿岩棒下落过程的速度。

根据牛顿第二定律,凿岩棒下落过程的受力情况可表示为

$$mg - \rho vg - \frac{1}{2}R\rho Sv^2 = m \frac{dv}{dt} \tag{2}$$

对式(2)求数值解,并考虑初始状态下落速度为 0 ,可以得到速度随时间的变化规律,如图 4 所示。从图 4 可以看出,凿岩棒下落过程的速度变化大致可以分为 3 个阶段:第一阶段($0 \sim 2\text{ s}$),凿岩棒速度近似线性增加,水阻力较小,凿岩棒主要在重力作用下加速下落;第二阶段($2 \sim 6\text{ s}$),凿岩棒速度持续增加,但水阻力越来越大,因此增加幅度逐渐降低;第三阶段(6 s 以后),水阻力与浮力之和与重力相当,凿岩棒处于平衡状态,加速度为零,趋于一个稳定的速度。

现场主要通过改变凿岩棒提升高度施加不同的冲击速度,显然冲击速度越大凿岩效果越好。将凿岩棒下落速度对时间积分,可以进一步获得提升高度与冲击速度的关系,如图 5 所示。从图 5 可以看出,对于深中通道工程现场 40 m 的水深环境,凿岩棒提升高度的变化对冲击速度有较大的影响,因此增加提升高度会明显提高凿岩效果。而在水深更大的工况下,增加提升高度对提高冲击速度的作用并不明显,此时需要考虑增加凿击次数或通过动力装置施加外力来提高凿岩效果。

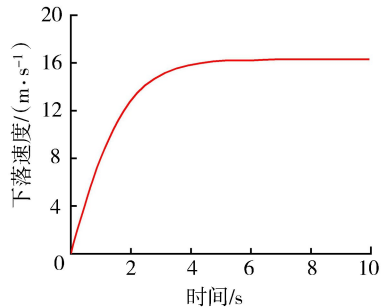


图 4 凿岩棒下落过程速度随时间的变化规律
Fig. 4 Variation of impact velocity of rock breaking hammer with time

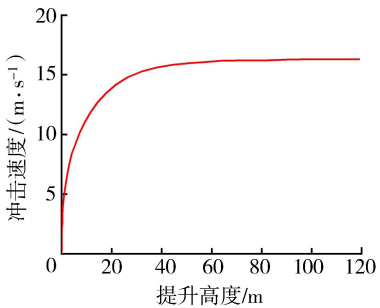


图 5 凿岩棒冲击速度与提升高度的关系
Fig. 5 Relationship between impact velocity and lifting height of rock breaking hammer

4 典型工况下岩石损伤发育过程

JH-2 模型中岩石的损伤通过等效塑性应变来表征,当一个单元的塑性变形累积到某个阈值时,材料会发生破坏并失去强度,损伤累积过程和损伤阈值的计算公式为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}$$

(3)

其中

$$\varepsilon_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为一个计算周期内的等效塑性应变; ε_p^f 为岩石破坏时的等效塑性应变(即阈值); P^* 、 T^* 为归一化静水压力和归一化最大静水拉力。

凿岩棒从接触岩石表面开始凿击岩石,到凿击过程结束,持续时间很短。根据对岩石损伤的定义,以典型工况水深 40 m、冲击速度 14 m/s、凿击次数 1 次为例,分析整个凿击过程中岩石损伤程度。不同时刻沿凿击线侧向的岩石损伤如图 6 所示。

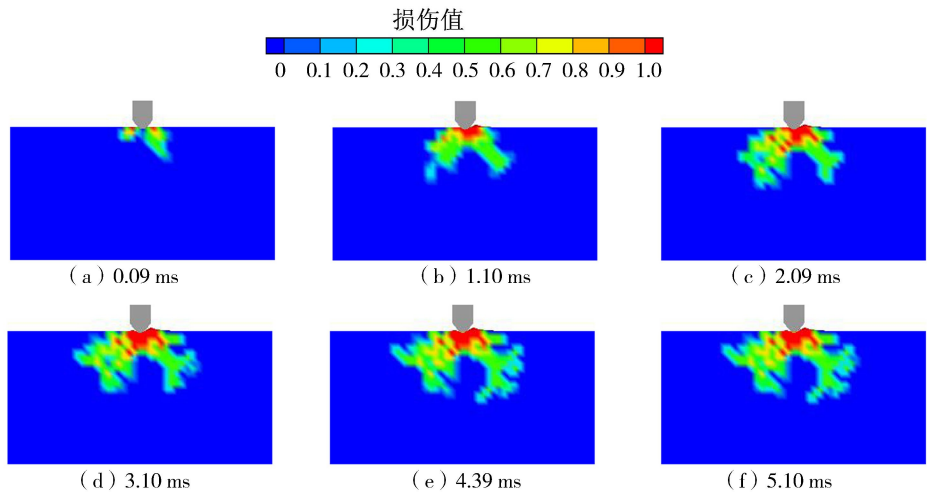


图 6 不同时刻岩石损伤

Fig. 6 Rock damage at different time

图 7 为凿岩棒凿击过程速度变化曲线。结合图 6 岩石的损伤发育情况可以看出, $t=0.09\text{ ms}$ 时,凿岩棒与岩石接触,岩石受到凿岩棒的冲击产生了少量的塑性变形,损伤开始累积,此时凿岩棒速度缓慢下降; $t=1.10\text{ ms}$ 时,凿岩棒与岩石充分接触,其蕴含的动能快速作用于岩石上,使岩石进一步产生塑性变形,损伤迅速增加,并向岩石内部扩展,此时凿岩棒速度进入快速下降阶段; $t=4.39\text{ ms}$ 时,岩石受到的损伤基本保持稳定,不再继续增加,凿岩棒速度下降到趋近于零; $t=5.10\text{ ms}$ 时,岩石损伤不再变化,而其积累的一部分弹性应变能逐渐释放转化为凿岩棒的动能,使得凿岩棒反方向运动,速度由零缓慢增加到一个较小值。

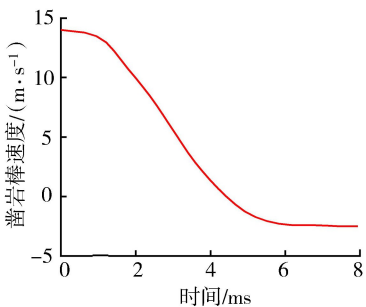


图 7 凿岩棒凿击过程速度变化曲线

Fig. 7 Velocity variation curve of rock breaking hammer during drilling process

5 不同因素对岩石损伤的影响规律

5.1 水深影响

采用控制变量法,即保持凿岩棒冲击岩石的速度 14 m/s、凿击次数 1 次不变,分别考虑水深为 20 m、40 m、60 m 和 80 m 的情况,研究不同水深条件下凿岩棒破岩损伤情况。不同水深岩石损伤等值面图(左图)和沿凿击线侧向损伤云图(右图)如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着水深的增加,岩石内的损伤扩展逐渐受到抑制,损伤的程度和范围均逐渐减小,凿岩棒与岩石直接接触的高损伤区域范围有一定程度的减小,中、低损伤区域的扩展范围减小程度较大。对比凿击线侧向和凿击线走向的损伤发育情况,随着水深的增加,凿击线侧向损伤扩展范围的减小程度要稍大于凿击线走向损伤扩展范围的减小程度。

提取不同水深条件下岩石的损伤扩展范围,绘制不同水深条件下岩石损伤扩展范围变化曲线,如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着水深的增加,岩石在深度方向、凿击线侧向、凿击线走向 3 个方向的损伤扩展范围均呈减小趋势,凿击线走向减小值最大,为 0.24 mm,深度方向减小值最小,为 0.12 mm。总体而言,水深的增

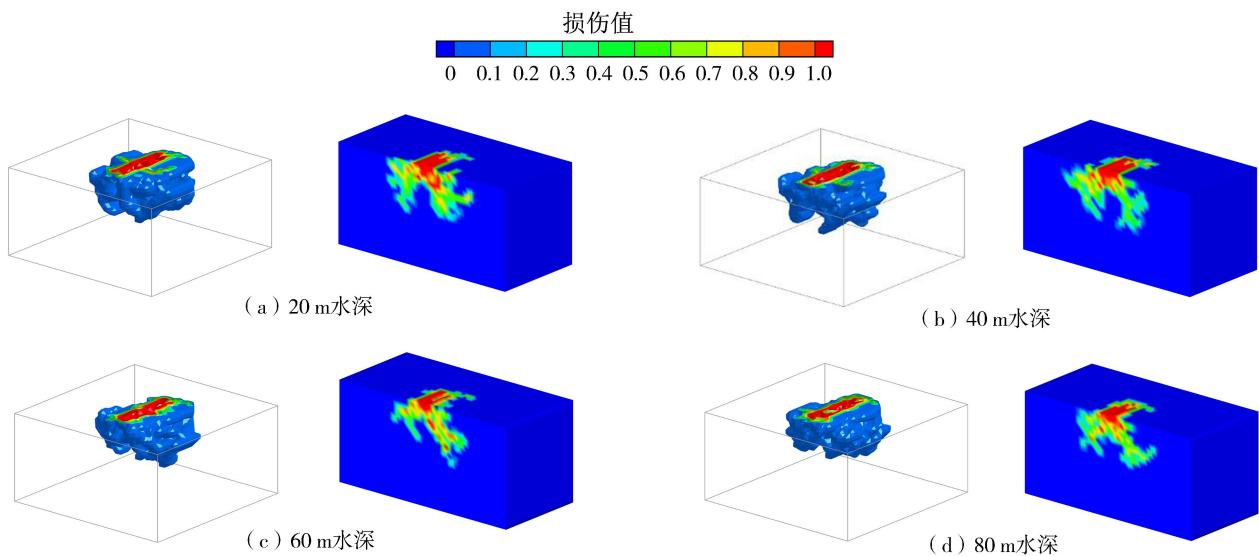


图 8 不同水深条件下岩石损伤

Fig.8 Rock damage under different water depth

加对岩石的损伤和破坏有抑制作用,减小了岩石的损伤程度和扩展范围,但水深变化对损伤扩展范围变化的影响程度有限。

5.2 冲击速度影响

保持水深 40 mm、凿击次数 1 次不变,分别考虑冲击速度为 12 mm/s、14 mm/s、16 mm/s 和 18 mm/s 情况下的岩石损伤,损伤等值面图(左图)和沿凿击线侧向的损伤云图(右图)如图 10 所示。

从图 10 可以看出,随着冲击速度的增加,岩石内的损伤总体呈逐渐增加的趋势,损伤程度和扩展范围逐渐增加,高损伤区域的范围有一定程度的增加,主要分布在与凿岩棒直接接触的凿击线附近,而中、低损伤区域的扩展范围显著增加。对比凿击线侧向和凿击线走向的损伤扩展范围,凿击线侧向损伤扩展范围增加幅度显著,而凿击线走向损伤扩展范围增加幅度相对较小。

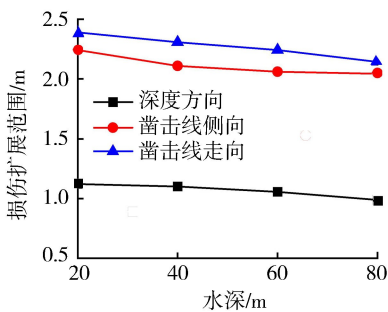


图 9 不同水深条件下岩石损伤扩展范围

Fig.9 Damage extension range of rock under different water depth

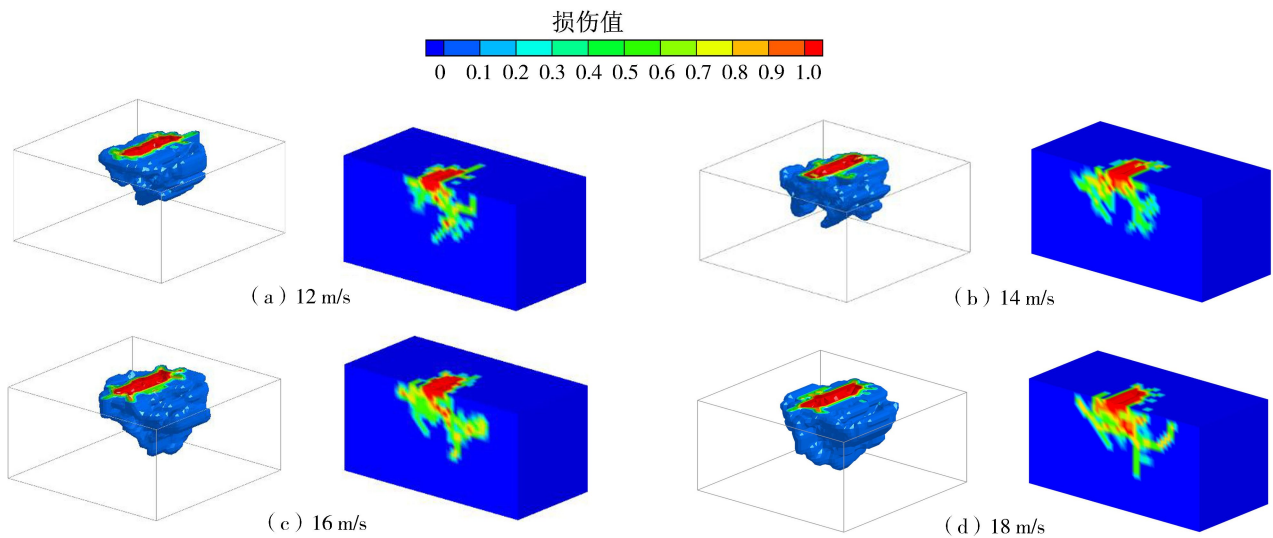


图 10 不同冲击速度下岩石损伤

Fig.10 Rock damage under different impact velocity

不同冲击速度下岩石损伤扩展范围如图 11 所示。由图 11 可以看出,随着冲击速度的增加,岩石在各方向的损伤扩展范围均有增加。对比深度方向、凿击线走向和凿击线侧向的岩石损伤扩展范围,凿击线侧向增

加值最大,为 0.56 mm,凿击线走向增加值最小,为 0.20 mm。整体而言,相比水深,冲击速度对岩石损伤程度和损伤扩展范围的影响更明显。

5.3 凿击次数

保持凿岩棒冲击岩石的速度 14 mm/s、水深 40 mm 不变,分别考虑凿击次数为 1 次、2 次、3 次和 4 次的情况,不同凿击次数下岩石损伤等值面图(左图)和沿凿击线侧向的损伤云图(右图)如图 12 所示。

对比不同凿击次数下岩石的损伤情况,从图 12 可以看出,随着凿击次数的增加,岩石的损伤程度持续增加,高损伤区域的范围增

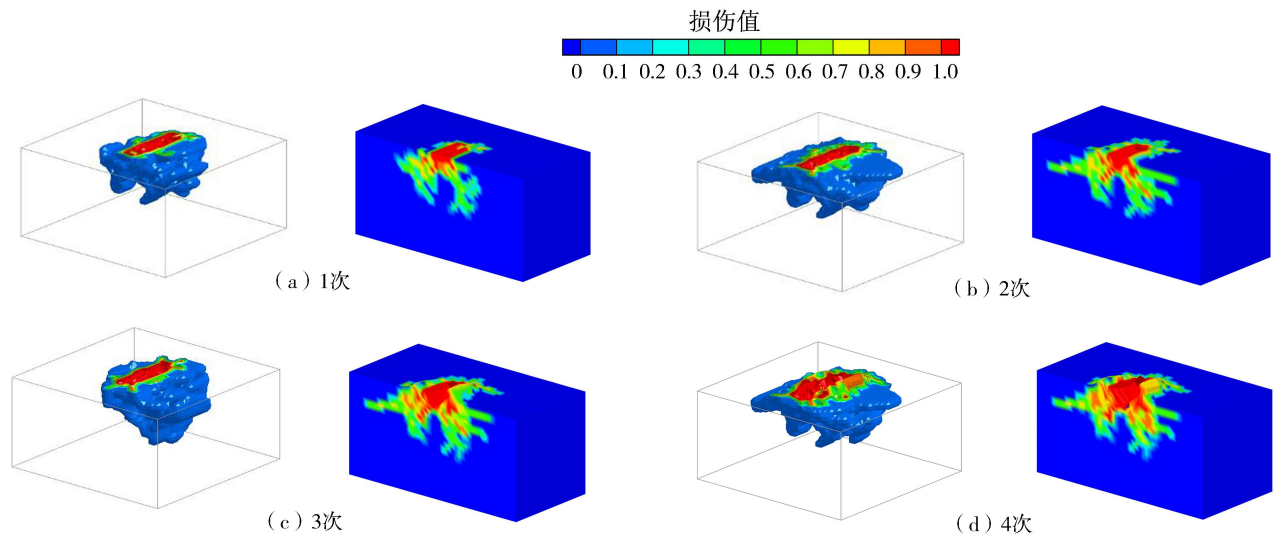


图 12 不同凿击次数下岩石损伤
Fig. 12 Rock damage under different drilling times

加较为明显,主要沿着凿击线向外侧扩展,中、低损伤区域的损伤程度逐渐增加,但损伤扩展范围先增加后基本保持稳定。对比凿击线侧向和凿击线走向的损伤扩展范围,凿击线侧向岩石损伤扩展范围增加幅度远大于凿击线走向的增加幅度。

不同凿击次数下岩石的损伤扩展范围如图 13 所示。从图 13 可以看出,随着凿击次数的增加,沿着深度方向的岩石损伤扩展范围基本保持不变,凿击线侧向损伤扩展范围增加值最大,达 1.08 mm,而凿击线走向增加值为 0.32 mm。与冲击速度对岩石损伤扩展范围的影响规律不同,随着凿击次数的增加,损伤扩展范围并不是持续增加,而是先增加后保持稳定,凿击次数达到 2 次时,损伤扩展范围已经基本保持不变。结合图 12 可以发现,此时增加凿击次数只是增加了高损伤区的损伤范围,整个损伤区域并没有表现出明显的扩展趋势。

6 结 论

- a. 凿岩棒在水中下落的速度先线性增加,随着水阻力越来越大,凿岩棒速度增加的幅度越来越小,最终趋于一个稳定的收尾速度。
- b. 针对深中通道工程现场凿岩 40 m 的水深环境,改变凿岩棒提升高度对凿岩棒冲击速度有明显的影响。
- c. 凿岩棒凿击岩石的过程中速度逐渐降低,岩石的损伤不断累积,岩石的损伤扩展情况与凿岩棒冲击

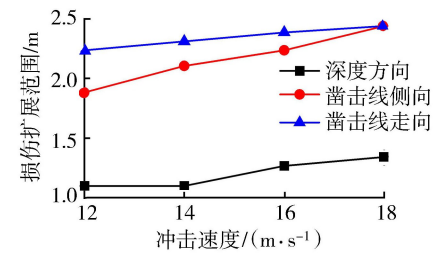


图 11 不同冲击速度下岩石损伤扩展范围
Fig. 11 Damage expansion range of rock under different impact velocity

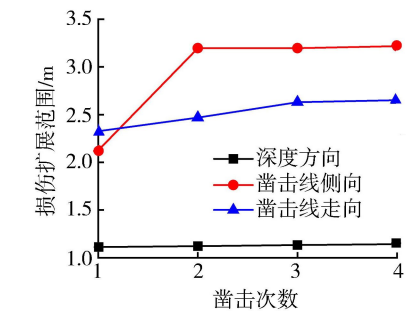


图 13 不同凿击次数下岩石损伤扩展范围
Fig. 13 Damage expansion range of rock under different drilling times

速度变化关系密切。

d. 不同因素对岩石损伤扩展情况影响不同,增加水深会降低岩石的损伤程度和损伤范围,但影响程度相对较小;增加冲击速度和凿击次数会增大岩石的损伤程度和损伤范围,增加冲击速度对损伤扩展范围的增加更明显,而增加凿击次数对高损伤区范围的增加更明显,但整个损伤区域没有表现出明显的扩展趋势。

参考文献:

[1] 杨岳峰,梁正召,唐春安. 冲击作用下的压头破岩机制研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1775-1785. (YANG Yuefeng, LIANG Zhengzhao,TANG Chunan. Rock fragmentation mechanism induced by a drill bit subjected to dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(6):1775-1785. (in Chinese))

[2] LI X F,LI H B,LIU Y,et al. Numerical simulation of rock fragmentation mechanisms subject to wedge penetration for TBMs[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,53:96-108.

[3] HE X,XU C. Discrete element modelling of rock cutting:from ductile to brittle transition[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2015,39(12):1331-1351.

[4] MOON T J. A study of optimal rock-cutting conditions for hard rock TBM using the discrete element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2011,45(5):837-849.

[5] 邢大伟. 石灰石颗粒离散元模型构建及主动冲击破碎特性研究[D]. 泉州:华侨大学,2017.

[6] 徐依吉,赵红香,孙伟良,等. 钢粒冲击岩石破岩效果数值分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(5):68-71. (XU Yiji,ZHAO Hongxiang,SUN Weiliang,et al. Numerical analysis on rock breaking effect of steel particles impact rock[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2009,33(5):68-71. (in Chinese))

[7] LIU J,WU C,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.

[8] BANADAKI M D,MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering,2012,S 40-41(2):16-25.

[9] WANG J,YIN Y,LUO C. Johnson-Holmquist- II (JH-2) Constitutive model for rock materials:parameter determination and application in tunnel smooth blasting[J]. Applied Sciences,2018,8(9):1675.

[10] ISLAM R I,ZHENG J,BATRA R C. Ballistic performance of ceramic and ceramic-metal composite plates with JH1,JH2 and JHB material models[J]. International Journal of Impact Engineering,2020,137:103469.

[11] JOHNSON G,HOLMQUIST T. Response of Boron carbide subjected to large strains,high strain rates,and high pressures[J]. Journal of Applied Physics,1999,85:8060-8073.

[12] 王志亮,李允忠,黄佑鹏. JH-2 模型参数确定及花岗岩重复侵彻数值分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(11):127-136. (WANG Zhiliang,LI Yunzhong,HUANG Youpeng. Parameter determination of JH-2 model and numerical analysis of repeated penetration of granite[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2020,52(11):127-136. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 01 - 13 编辑:胡新宇)