

# 大直径嵌岩斜桩冲击钻头冲击齿破岩数值模拟研究

胡培强<sup>1</sup>, 王志明<sup>2</sup>, 周伏萍<sup>1</sup>, 谭松成<sup>\*2</sup>, 尧在雨<sup>1</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>

(1. 江西省地质工程(集团)公司, 江西南昌 330029; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**大直径嵌岩斜桩的冲击成孔过程非常复杂,常规冲击钻头在钻进过程中存在效率低、磨损快、使用寿命低和成孔质量不高等问题,而钻头底部的冲击齿的类型和排布方式是解决这些问题的关键因素之一。基于此,本文采用数值模拟的方法,利用ANSYS LS-DYNA软件分析了三角棱柱齿、楔形齿和双锥形齿等3种冲击齿在不同冲程条件下冲击破坏不同抗拉强度砂岩的过程。研究表明,在岩石强度较低时,可以优先选择楔形齿,而受施工条件限制需要在低冲程条件下钻进较高强度岩石时,可优先采用三角棱柱齿。研究成果可为大直径嵌岩斜桩的冲击成孔施工选择钻头冲击齿提供一定的理论依据。

**关键词:**嵌岩桩;斜桩;冲击成孔;冲击齿;齿形;数值模拟

**中图分类号:**TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)04-0116-07

## Numerical simulation of rock breaking efficient caused by the teeth of impact bit during the large diameter rock socketed inclined piles drilling

HU Peiqiang<sup>1</sup>, WANG Zhiming<sup>2</sup>, ZHOU Fuping<sup>1</sup>, TAN Songcheng<sup>\*2</sup>, YAO Zaiyu<sup>1</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Geo-engineering (Group) Corporation, Nanchang Jiangxi 330029, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** The percussive drilling of large diameter rock socketed inclined piles is very complicated. During the drilling process, common percussion bits have some shortages such as low hole forming efficiency, fast wear, short service life, and poor hole forming quality etc., while the type of impact teeth on bits' bottom, as well as its arrangement are key factors to solve the aforementioned problems. Based on this, the impact process of three kinds of impact teeth, i.e. triangular prism teeth, wedge teeth and double conical teeth were analyzed under different impact strokes and varied tensile strengths of sandstone. Results show that wedge-shaped teeth can be selected preferentially to drill soft formation, while triangular prism teeth should be selected if short impact strokes have to be used to drill relatively harder formations. The results in this study is meaningful to the teeth selection of impact bits in large diameter rock-socketed inclined piles construction by percussive drilling.

**Key words:** rock socketed pile; inclined pile; percussive drilling; impact tooth; tooth type; numerical simulation

## 0 引言

随着我国海域经济的高速发展,多功能码头,跨江、跨海大桥等一系列基础设施已成为我国水运

交通基础建设的重要组成部分<sup>[1-4]</sup>。这些建筑物多采用水上桩基础,但由于地理位置特殊,对桩基础的承载能力提出了很高的要求<sup>[5-6]</sup>。大直径嵌岩斜

收稿日期:2020-10-21; 修回日期:2020-12-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.04.016

基金项目:国家自然科学基金项目“液动冲击回转作用下热压WC-Cu基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:41972327);江西省地质工程(集团)公司地基与基础新技术集成研究项目“嵌岩斜桩冲击钻进成孔关键技术研究”(编号:2020056101)

作者简介:胡培强,男,汉族,1979年生,总工程师,主要从事地基与基础工程承包施工、地质勘查、页岩气调查开发等工作,江西省南昌市西湖区176号。

通信作者:谭松成,男,汉族,1986年生,副教授,主要从事岩土钻掘材料和机具与岩石的相互作用过程研究,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,wstansongcheng@cug.edu.cn。

引用格式:胡培强,王志明,周伏萍,等.大直径嵌岩斜桩冲击钻头冲击齿破岩数值模拟研究[J].钻探工程,2021,48(4):116-122.

HU Peiqiang, WANG Zhiming, ZHOU Fuping, et al. Numerical simulation of rock breaking efficient caused by the teeth of impact bit during the large diameter rock socketed inclined piles drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):116-122.

桩基础因为其相比于同尺寸和埋深的直桩有更强的承载力,在工程中得到了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>。在采用冲击成孔的方式进行大直径嵌岩斜桩施工时,冲击钻头的质量大小、冲程(冲击频率)和桩孔斜度是影响其成孔效率的主要因素。然而,在上述3个因素已经确定的情况下,冲击钻头底部的冲击齿类型及其排列方式是决定成孔效率的关键因素<sup>[9-11]</sup>。因此,对大直径嵌岩斜桩施工用冲击钻头的冲击齿破岩过程进行研究具有十分重要的意义。

钻头冲击齿在孔底破岩的过程十分复杂,国内外学者做了大量的破岩研究工作<sup>[12-14]</sup>。在油气钻井方面,朱海燕等<sup>[15]</sup>建立了单个冲击齿和12¼ in(1 in=25.4 mm,下同)全尺寸平底钻头与岩石的冲击动力学模型,并将钻头破岩分成了5个破碎阶段;杨迎新等<sup>[16]</sup>对牙轮钻头的牙齿形状评价技术以及牙齿优选进行了探讨。在桩基工程施工方面,彭伟等<sup>[17]</sup>从碎岩机理出发,总结了Ø800 mm潜孔锤钻头的柱齿选型方法,并提出了2种钻头的设计方案;赵多苍等<sup>[18]</sup>结合平潭某大桥的桩基施工过程,总结了Ø2.5~3.0 m的冲击钻头在不同地层冲击钻进时宜采用的工艺参数。沈孝芹等<sup>[19]</sup>利用有限元软件对Ø2.5 m的钻头冲击破岩过程进行了模拟,研究了不同岩石、不同冲程下钻头的破岩情况。综上所述,受物理模型试验条件的限制,目前针对冲击钻头破岩过程的研究仍然是以定性分析和经验总结为主,但采用数值模拟技术对单个冲击齿、或全尺寸钻头进行破岩过程模拟已经成了一种发展趋势。

对于大直径嵌岩斜桩冲击成孔施工而言,不论桩径如何变化,决定其成孔速度的关键因素始终是冲击钻头底部的冲击齿类型和排列方式,而桩孔斜度对成孔速度的影响则主要是斜度会影响冲击钻头接触孔底岩石时的冲击速度。同时,大直径嵌岩斜桩施工用的冲击钻头与地质勘探和油气井钻头所采用的冲击齿在类型和尺寸上均存在显著差异。因此,本文利用数值模拟技术对用于大直径嵌岩斜桩冲击施工的不同冲击齿在单、双齿模式下对不同强度的砂岩进行冲击破岩过程模拟研究,从而为嵌岩斜桩施工过程中遇到不同强度基岩时的钻头冲击齿选型和配套工艺参数优选提供依据。

## 1 冲击破岩数值模型

### 1.1 冲击齿与岩石建模

以温州港状元岙港区化工码头项目施工时所采用的冲击钻头(图1)为基础<sup>[20]</sup>,建立冲击齿破岩模型。该钻头的总质量为8 t,直径为1.5 m,采用三角棱柱齿作为破岩单元。



图1 现场冲击钻头

Fig.1 Impact bit

为研究齿形对岩石的冲击破碎效果,本文选用3种形状的冲击齿(三角棱柱齿、楔形齿、双锥形齿),并分别以单齿和双齿模式对其破岩过程进行模拟。冲击齿模型如图2所示,齿形底面大小为150 mm×75 mm,高75 mm;对于双齿,两齿中心间距为单齿的长度。为对比单、双齿破岩效果,2种条件下的岩石模型大小保持一致。

### 1.2 材料选择与模拟参数设置

本研究采用ANSYS Workbench中LS-DYNA模块进行模拟求解。模拟过程中不考虑冲击齿的破坏,即冲击齿定义为刚体模型,弹性模量 $5.88 \times 10^{10}$  Pa,泊松比0.22;岩石采用软件集成的砂岩模型。为了研究冲击齿形对不同强度砂岩的破坏效果,本次实验选择以砂岩的最大拉应力来判定岩石的破坏,并通过改变砂岩的极限抗拉强度来间接调整岩石的强度等级。因此,本研究中的模拟变量除了齿形外,还包括砂岩的最大破坏拉应力(6、8、10 MPa)和冲程(0.8、1、1.2 m)。

钻头在下落至接触岩石的过程中遵守能量守恒定律。因此,无论是直桩还是斜桩的冲击成孔过程,从能量转化角度来看都是钻头的重力势能转化为动能的过程。然而,在斜桩施工过程中,钻头的一部分势能在下落过程中被钻头与孔壁的摩擦所损耗,造成钻头接触岩石时的最终冲击速度降低。

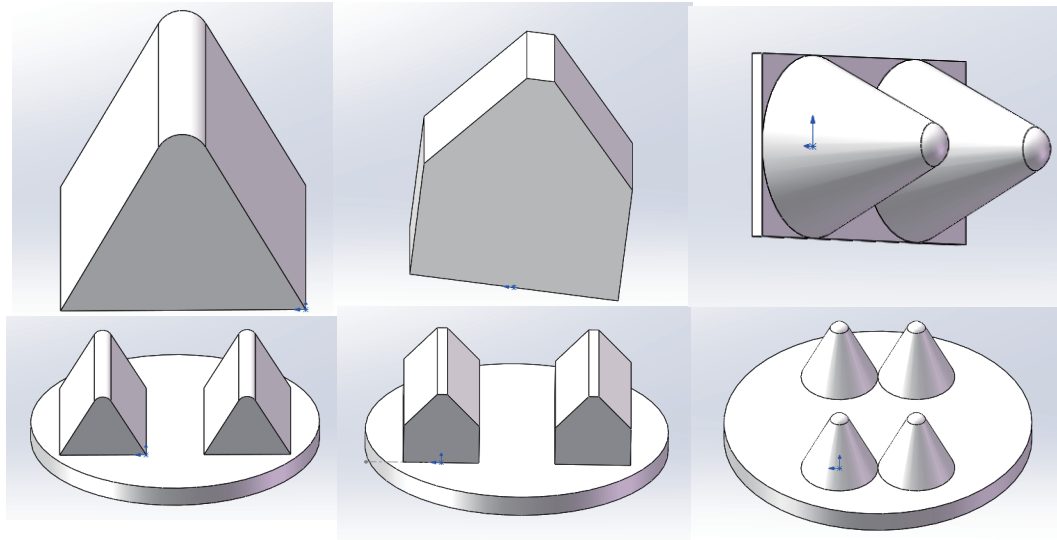


图2 冲击齿模型

Fig.2 Impact tooth model

因此,为提高模拟效率,本文通过理论计算模型(如式(1)所示)获得桩孔斜度为 $1/6$ 时不同冲程条件下的冲击齿最终速度 $v_d$ ,并以此作为模拟研究的初始变量之一。

$$v_d = \sqrt{2gh(1 - \frac{\rho_l}{\rho_s})(\cos\theta - \mu\sin\theta)} \quad (1)$$

式中, $g$ ——重力加速度, $9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $h$ ——冲程, $\text{m}$ ;  $\rho_l$ ——孔内液体的密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_s$ ——钻头钢体的密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $\theta$ ——斜孔与竖直方向的夹角, $(^\circ)$ ;  $\mu$ ——钢护筒与冲锤之间的摩擦系数,无量纲。

为与实际冲击钻进过程保持一致,在对单、双齿进行模拟设定时,双齿的冲击荷载为单齿时的2倍,且冲击齿与岩石的接触关系设置为面与面侵蚀接触。在实际钻进过程中,由于钻头上部结构的影响,冲击齿自身几乎无转动,因此在模拟时对冲击齿施加转动约束。同时,为模拟岩石在地下半无限体状态,设置岩石模型侧面和底面为无反射边界,这样在冲击过程中产生的能量波在到达界面时便不会产生反射波,很好地模拟了实际情况。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 单齿冲击砂岩过程

如图3所示为不同冲程和砂岩强度条件下,不同类型的单个冲击齿破岩情况。由图3可知,在入岩深度上,双锥形齿 $>$ 三角棱柱齿 $>$ 楔形齿。3种冲击齿在冲击岩石时,其入岩深度随砂岩强度增大

而减少,但减少的程度非常小,反之亦然。一定程度上,这是因为在定义岩石时所选择的模型没有改变,而只是通过改变岩石极限抗拉强度所致。同时,因为大直径嵌岩斜桩施工时钻遇的岩层多为风化后的基岩,因此本研究中所取的岩石强度等级范围都相对较低。

由图3可知,相同条件下的双锥形齿破岩深度显著大于其他2种齿形。然而,本研究中双锥形齿的入岩深度大并不代表其破碎效果好,因为大直径冲击钻头的冲击齿破岩效果与其入岩深度并不线性相关。图4为单个冲击齿在不同冲程条件下对不同强度砂岩的体积破碎百分数。图3中双锥形齿入岩深度最大,但图4(a)中相对楔形齿和三棱柱齿其总破碎岩石体积较小,而楔形齿入岩深度小,但其破岩体积较大。总体而言,随着冲程的增加,三棱柱齿与楔形齿的破岩体积都增大,而双锥形齿的破岩效果提升不明显。

砂岩拉伸破坏强度为 $6 \text{ MPa}$ 时,3种冲程条件下单个冲击齿对砂岩的破坏体积均为楔形齿 $>$ 三角棱柱齿 $>$ 双锥形齿,且当冲程由 $0.8 \text{ m}$ 提升到 $1 \text{ m}$ 时,三棱柱齿与楔形齿的提升效果明显。砂岩拉伸破坏强度为 $8 \text{ MPa}$ ,且冲程 $< 1 \text{ m}$ 时,单个双锥形齿对砂岩的破坏体积最大,三角棱柱齿次之,楔形齿的破坏体积最小,而冲程 $> 1 \text{ m}$ 时,楔形齿的破坏效果更好。在砂岩拉伸破坏强度为 $10 \text{ MPa}$ 时,楔形齿的破坏体积最小,三角棱柱齿的破岩效果与冲程

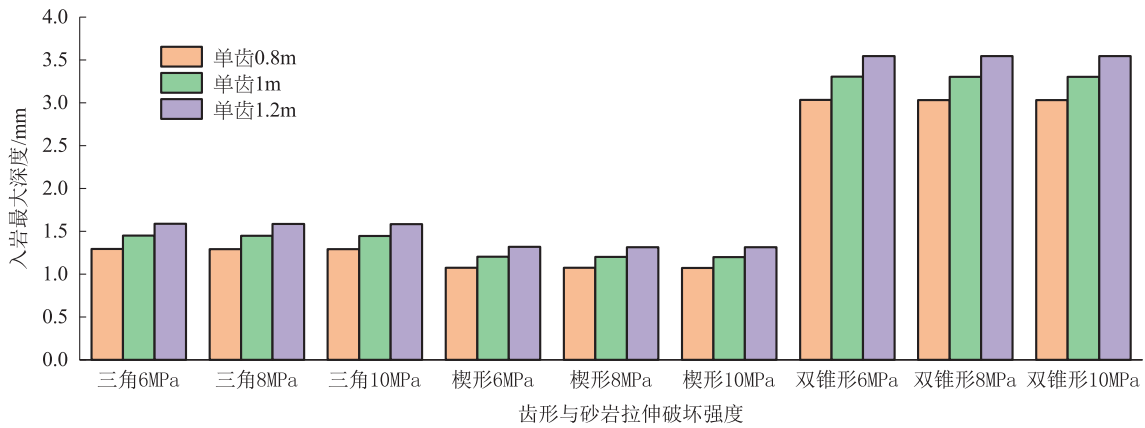


图 3 单个冲击齿的冲击入岩深度

Fig.3 Rock penetration depth of single impact tooth

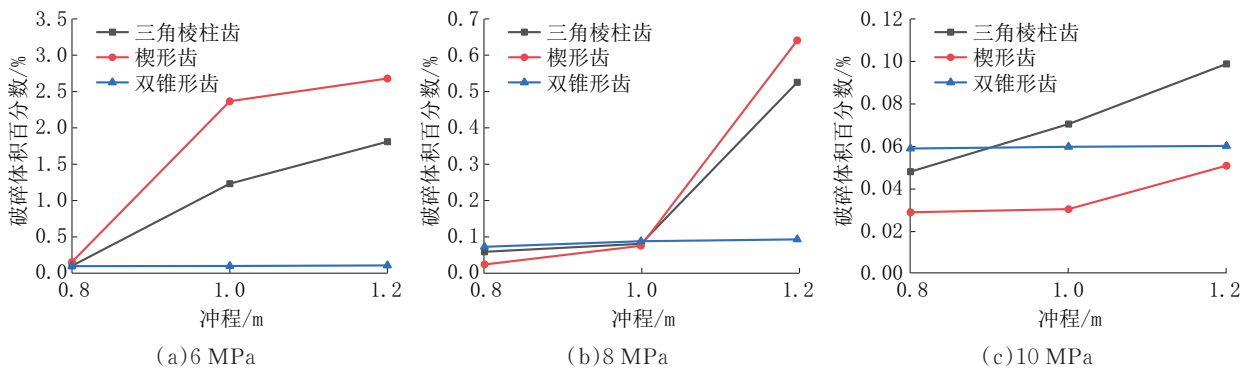


图 4 单齿冲击不同强度砂岩时的岩石体积破碎百分数

Fig.4 Volume fraction of sandstone with different tensile strength by single impact tooth

密切相关,双锥形齿的破岩效果大于楔形齿,但受冲程的影响不明显。

图 5 为相同条件下 3 种单齿冲击岩石过程中,某一时刻的岩石表面应力分布图。对于 3 种齿形来说,在冲击荷载相同的条件下,楔形齿的作用范围最广,三角棱柱齿次之,双锥形齿的影响范围最小。

在低强度岩石破碎中(拉伸破坏强度为 6 MPa),楔形齿具有更好的破岩效果;当岩石强度较高时,即拉伸破坏强度为 10 MPa 时,当冲程 > 1 m 时,三角棱柱齿有着好的破岩效果,增大冲程也是一种提高破岩效率的方法。

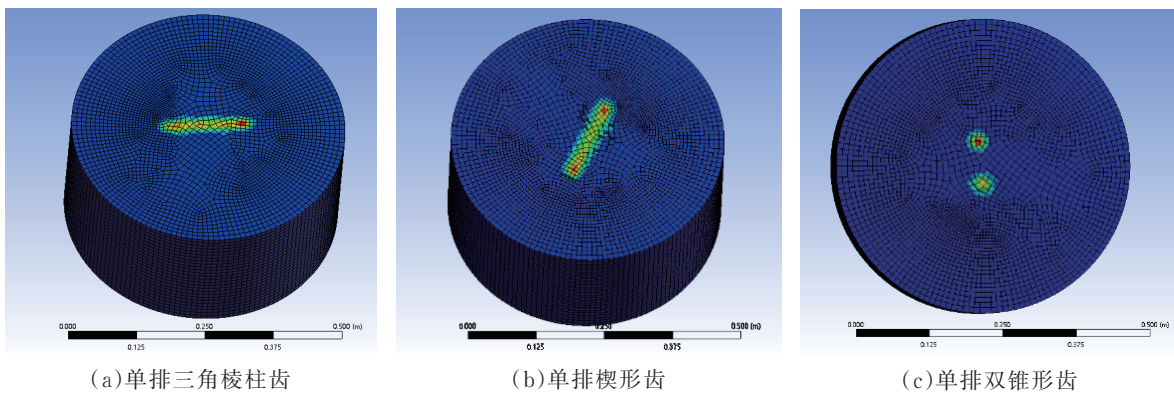


图 5 单齿冲击后岩石表面应力分布

Fig.5 Stress distribution on rock surface after single tooth impact

### 2.2 双排齿冲击砂岩过程

在双排齿的冲击破岩过程中,如图6所示,不同冲程和砂岩条件下入岩深度均为双锥形齿>三角

棱柱齿>楔形齿。其整体趋势与单齿相似,但深度略低于单齿冲击。

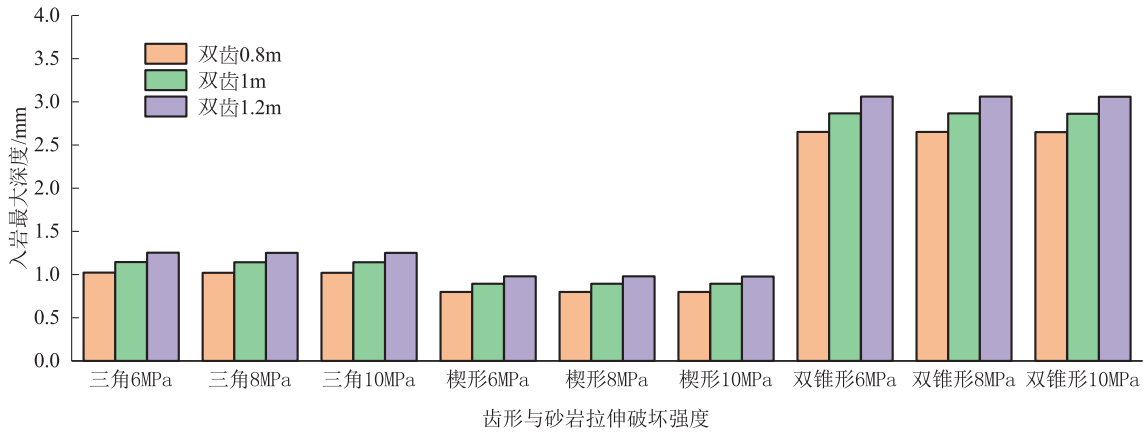


图6 双排齿冲击入岩深度

Fig.6 Rock penetration depth of double impact teeth

图7所示为双排齿冲击不同抗拉强度砂岩时的岩石破碎体积百分数。由图7可以看出,在3种条件下,楔形齿的破岩体积均为最高。此外,对比双

齿与单齿冲击破岩效果可知,在砂岩抗拉强度较低(6 MPa)时,其破坏效果的提升不仅仅是“2”倍的关系,此现象在楔形齿中尤为明显。

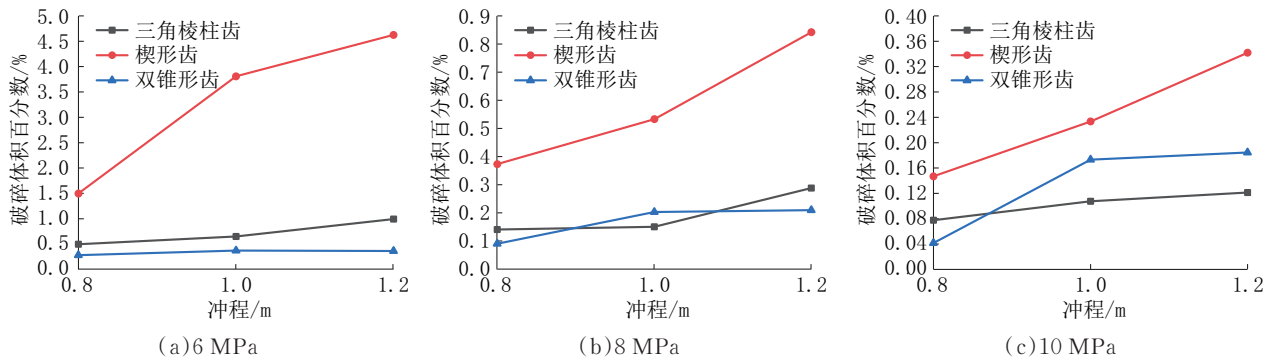


图7 双排齿冲击不同强度砂岩时的岩石体积破碎百分数

Fig.7 Volume fraction of sandstone with different tensile strength under double impact teeth

在砂岩抗拉强度为6 MPa时,3种冲程条件下的砂岩破坏体积分别为楔形齿>三角棱柱齿>双锥形齿。随着冲程增加,双锥形齿破坏体积变化很小,三棱柱齿破坏体积略微增加,而楔形齿的破坏体积明显增大;在砂岩拉伸破坏强度为8 MPa时,楔形齿有着高的破坏体积,三棱柱齿与双锥形齿破坏体积变化较小;在砂岩拉伸破坏强度为10 MPa时,楔形齿依旧有着良好的破岩效果,而三角棱柱齿与双锥形齿的破坏效果则与冲程相关。

图8为同一条件下3种双排齿冲击岩石时,某

一时刻的岩石表面应力云图。图8表明,楔形齿的两齿间产生了明显的裂纹,导致其破岩效果大幅度提升,从而优于其他2种齿型。

### 2.3 冲击齿齿形与地层和冲击参数的匹配

在冲击钻进过程中,冲程是影响冲击成孔效率的主要因素之一。冲程越大,冲击钻头的势能越大,在冲击岩石的瞬间所获得初始动能也越大,即冲击功越大。相应地,破碎岩石的效果则会越好。对于3种齿形,不论单齿还是双排齿作用模式,在冲击相同强度的砂岩石时,冲击齿的入岩深度均会随

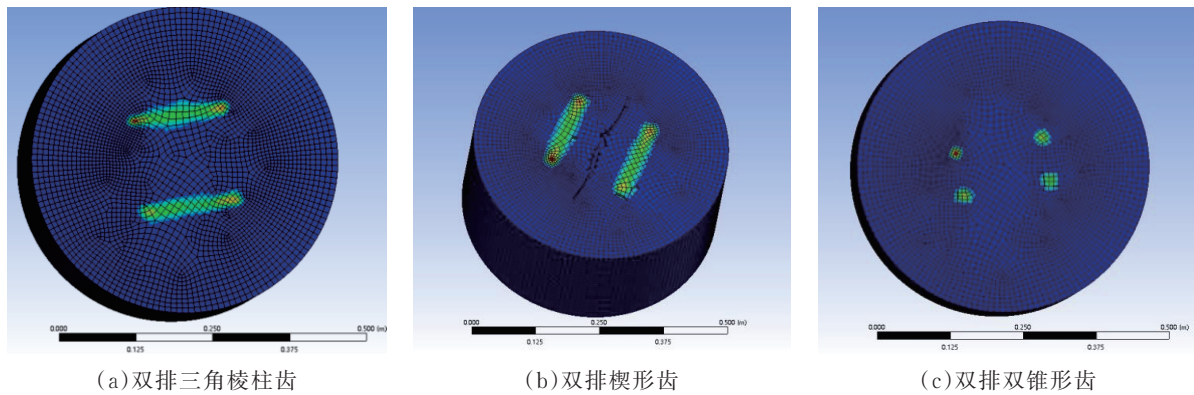


图8 双排齿冲击后岩石表面应力分布

Fig.8 Stress distribution on rock surface after double tooth impact

着冲程的增加而增大,总破岩体积也会相应增大。理论上而言,在冲击齿不破坏的情况下,冲程越大破岩效果越好。但实际施工中,冲击频率与冲击高度会相互制约,冲程的增加会导致冲击频率降低,反之亦然。此外,不同齿形针对每种强度的岩石都会有各自的临界冲程。因此,冲击齿的选择脱离不了地层因素与钻进参数。例如,采用单齿在冲程为0.8 m时冲击低强度砂岩(6 MPa),则楔形齿的破碎效果最优,而在冲击较高强度(8 MPa)岩石时三角棱柱齿与锥形齿的破碎效果明显优于楔形齿;但同时,在砂岩抗拉强度为8 MPa时,随着冲程的增大,楔形齿的破碎效果提升程度会大于其他2种齿。此外,双排齿在本研究所采用的参数条件下,楔形齿的破岩效果最优。

### 3 结论

利用有限元方法对大直径斜桩冲击钻头冲击齿破岩过程进行数值模拟研究,结果表明:

(1) 单次冲击过程中,3种冲击齿的入岩深度依次是双锥形齿>三角棱柱齿>楔形齿。随着冲程的增加,入岩深度增加,岩石破碎体积也增加。

(2) 在破碎低强度岩石时,可优先选择楔形齿,其次是三角棱柱齿,最后是双锥形齿。

(3) 在破碎高强度岩石时,在冲程受到一定限制时可优先采用三角棱柱齿;或者采用楔形齿并相应地提高其冲程。

(4) 在大冲程施工中,楔形齿的组合有着较好的破岩效果,高进尺的双锥形齿与高破碎效果的楔形齿组合可能会产生更好的破碎效果。

### 参考文献(References):

- [1] 张利强. 薄壁桥台嵌岩桩基础斜桩与直桩设计方案的比较[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(11): 75-77.  
ZHANG Liqiang. Comparison of design schemes of inclined pile and vertical pile in embedded rock pile of thin walled abutment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 75-77.
- [2] 叶春, 杨韬. 潜孔钻+冲击钻组合施工方法在倾斜硬质岩层桩基施工中的应用[J]. 科技创新与应用, 2020(11): 131-132.  
YE Chun, YANG Tao. Application of combined construction method of subsurface drill and impact drill in construction of inclined hard rock pile foundation [J]. Technology Innovation and Application, 2020(11): 131-132.
- [3] 邹明, 胡培强. 温州港状元香港区二期工程斜桩冲击钻钻孔嵌岩施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(24): 80-82, 113.  
ZOU Ming, HU Peiqiang. Drilling and rock-socketed technology of inclined piles for Wenzhou Port Zhuangyuanao Phase II Project [J]. Construction Technology, 2015, 44(24): 80-82, 113.
- [4] CAI Yuanqiang, XU Bin, CAO Zhigang, et al. Solution of the ultimate bearing capacity at the tip of a pile in inclined rocks based on the Hoek-Brown criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125.
- [5] 金勤胜, 赵江, 姚院峰, 等. 旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数控制与现场试验[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 250-255.  
JIN Qinsheng, ZHAO Jiang, YAO Yuanfeng, et al. Control and field tests of the concrete filling coefficient of cast-in-place piles dug by rotary drilling rig [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 250-255.
- [6] 车永红, 陈杰明. 大直径钢管嵌岩斜桩成孔工艺技术研究[J]. 港工技术, 2014, 51(5): 53-56.  
CHE Yonghong, CHEN Jieming. Pore-forming technology of rock-socketed raking steel-pipe pile in large diameter for 300000 DWT crude oil terminal [J]. Port Engineering Technology, 2014, 51(5): 53-56.

- [7] 童康民. 大直径钢管斜桩全断面冲击成孔嵌岩桩的工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(4): 65-68.  
TONG Kangmin. Application of whole section compact-shock borehole building technology for large diameter inclined steel-pile [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(4): 65-68.
- [8] XING Haofeng, MENG Minghui, LONG Wanxue, et al. Research on the construction technique of super-large diameter rock-socketed piles in karst areas [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1615.
- [9] 田嵩山. 空气潜孔锤反循环钻头球齿碎岩机理及布齿探讨[J]. 江西建材, 2019(2): 90-91.  
TIAN Songshan. Discussion on the mechanism of the ball-crushing of the air-drilling hammer counter-circulation drill bit and tooth placement explore [J]. Jiangxi Building Materials, 2019 (2): 90-91.
- [10] 朱丽红, 殷琨, 黄勇. 气动潜孔锤球齿碎岩机理研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2009(3): 24-27.  
ZHU Lihong, YIN Kun, HUANG Yong. Research and application on rock broken mechanism of pneumatic DTH hammer spherical tooth [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2009(3): 24-27.
- [11] 李华, 孙友宏. 球齿钻头布齿的优化方法探讨[J]. 探矿工程, 2001(2): 39-40, 43.  
LI Hua, SUN Youhong. Optimization of the insert arrangement for button bits [J]. Exploration Engineering, 2001(2): 39-40, 43.
- [12] 廖昊, 侯志强, 刘晓东. 岩石冲击破碎关键影响因子研究[J]. 工程机械, 2020, 51(4): 36-42, 7.  
LIAO Hao, HOU Zhiqiang, LIU Xiaodong. Research of key impact factors in rock impact crushing [J]. Construction Machinery and Equipment, 2020, 51(4): 36-42, 7.
- [13] 平琦, 骆轩, 马芹永, 等. 冲击载荷作用下砂岩试件破碎能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4197-4203.  
PING Qi, LUO Xuan, MA Qinyong, et al. Broken dissipation characteristics of sandstone specimens under impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 4197-4203.
- [14] 蔡灿, 伍开松, 廉栋, 等. 单齿冲击作用下破岩机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.  
CAI Can, WU Kaisong, LIAN Dong, et al. Study of rock-breaking mechanism under single-tooth impact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1659-1666, 1675.
- [15] 朱海燕, 刘清友, 邓金根, 等. 冲旋钻井条件下的岩石破碎机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 622-631.  
ZHU Haiyan, LIU Qingyou, DENG Jingen, et al. Rock-breaking mechanism of rotary-percussive drilling [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 622-631.
- [16] 杨迎新, 张文卫, 李斌, 等. 牙齿破岩效率的评价及牙齿优选探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 110-113.  
YANG Yingxin, ZHANG Wenwei, LI Bin, et al. Effect evaluation on insert penetration to rock and optimization of insert shape [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 110-113.
- [17] 彭伟, 何龙飞. Ø800 mm 潜孔锤钻头布齿设计及理论探讨[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(6): 314-317, 340.  
PENG Wei, HE Longfei. Tooth arrangement design of Ø800mm DTH hammer bit and theoretical discussion [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019, 33(6): 314-317, 340.
- [18] 赵多苍, 纪尊众, 白玉川, 等. 跨海桥梁大直径钻孔桩冲击钻进参数研究[J]. 施工技术, 2018, 47(19): 89-92.  
ZHAO Duocang, JI Zunzhong, BAI Yuchuan, et al. Study on percussion drilling technology parameters of large diameter bored piles of sea crossing bridge [J]. Construction Technology, 2018, 47(19): 89-92.
- [19] 沈孝芹, 田雪冬, 李坤, 等. 大直径反循环冲击钻头破岩数值模拟[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(6): 29-32.  
SHEN Xiaoqin, TIAN Xuedong, LI Kun, et al. Numerical simulation of rock breaking of large diameter reverse circulation percussion bit [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(6): 29-32.
- [20] 尧在雨, 周伏萍, 胡培强, 等. 嵌岩斜桩冲击钻进成桩施工工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 84-88.  
YAO Zaiyu, ZHOU Fuping, HU Peiqiang, et al. Construction technology for slant rock-socketed piles [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 84-88.

(编辑 周红军)