

# 凸轮型冲击旋压钻头成孔机理研究

博 坤<sup>1</sup>, 孙思远<sup>1</sup>, 张永光<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130000; 2. 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 挤密钻头是潜孔锤冲击挤密钻进技术的关键所在, 其结构形式直接影响着钻进效率、成孔质量和应用效果。应用非线性有限元理论, 对动载荷作用下土体的弹塑性和压缩性的变化规律进行了分析。研究发现, 常规钻头在冲击挤密钻进过程中产生的桩效应是导致钻进效率降低的主要原因。为了克服桩效应的影响, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对阶梯式钻头和凸轮旋压钻头的钻进过程进行数值模拟分析, 并通过实际试验进行验证。数值模拟分析和试验结果均表明: 凸轮旋压钻头能够有效避免钻进过程中土体回弹问题, 降低桩效应对钻进效率的影响。试验结果与模拟结果相吻合, 表明数值模拟的结果相对可靠。

**关键词:** 冲击挤密钻进; 桩效应; 阶梯钻头; 凸轮旋压钻头; 数值模拟

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)11-0077-06

## Study on pore forming mechanism of cam bit in percussive-rotary extruding drilling

BO Kun<sup>1</sup>, SUN Siyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yongguang<sup>2</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun Jilin 130000, China)

**Abstract:** The compact drill bit is the key of the DTH hammer percussion-compact drilling technology. Its structure directly affects drilling efficiency, pore-forming quality and application effect. Nonlinear finite element theory was used to analyze the changing laws of elastoplasticity and compressibility of soil under dynamic load. The result showed that: the phenomenon of piling effect is produced by conventional drill bits in the process of percussive compaction drilling is the main reason for the decrease in drilling efficiency. In order to overcome the influence of the pile effect, ANSYS/LS-DYNA was used to perform numerical simulation analysis on the drilling process of stepped drill bits and cam spinning drill bits, and verified by actual drilling experiment. Both the numerical simulation analysis and the experiment results showed that the cam bit can effectively avoid the rebound problem of the soil during the drilling process and reduce the influence of the pile effect on the drilling efficiency. The experimental results are in good agreement with the simulation results, indicating that the numerical simulation results are relatively reliable.

**Key words:** percussive compaction drilling; pile effect; step bit; cam bit; numerical simulation

## 0 引言

冲击挤密钻进法主要利用潜孔锤活塞产生的冲击力使钻头切入、破碎土层, 并将土体向周围挤压; 同时活塞作用于钻头的振动使土层液化, 破坏其原状结构形成钻孔。钻进过程中, 土体在冲击荷载作用下发生的弹塑性变形, 宏观表现为土体被挤压密

实, 该钻进方法有进尺快、不排土、孔壁稳定和环保等特点, 在非开挖管线铺设、桩基施工和锚固工程方面有较为广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。研究土体冲击载荷作用下的变形机理以提高钻进效率, 对于该项技术的推广应用是非常必要的。

曹品鲁和孙庆等人利用有限元软件 ANSYS 对

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-10-12 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.11.013

基金项目: 国家重点研发计划项目“特大滑坡应急处置与快速治理技术研究”课题三“特大滑坡防治大直径成孔钻具及施工机械小型化研究”(编号: 2018YFC1505303); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目“高压脉冲放电成桩土体瞬态动力响应与变形机理研究”(编号: JJKH20190132KJ)

作者简介: 博坤, 男, 蒙古族, 1981 年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 2013 年赴美国塔尔萨大学进修, 从事多工艺冲击回转钻进技术研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, bokun@jlu.edu.cn.

引用格式: 博坤, 孙思远, 张永光. 凸轮型冲击旋压钻头成孔机理研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11): 77-82.

BO Kun, SUN Siyuan, ZHANG Yongguang. Study on pore forming mechanism of cam bit in percussive-rotary extruding drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11): 77-82.

不同类型挤密钻头的挤土机理进行了模拟分析,分析可知:当钻进过程中钻头下方土体所受压力超过其抗剪强度时,土体将产生塑性流动并向下和侧向压缩,且钻进深度越深孔壁越紧密,产生桩效应,影响钻进效率<sup>[3-5]</sup>。宋勇军研究了挤密桩间土体的应力和挤密效果,得出了 Mohr - Coulomb 应力条件下计算挤密效应结果偏大和黄土地区有效挤密半径为  $1.5d \sim 2.5d$  ( $d$  为桩径)的结论<sup>[6-7]</sup>。孙荣军等人利用蛻螂为原型设计出仿生冲击挤密钻头,通过数值分析和室外试验证明了其单次冲击进尺大于常规钻头,并提升钻进效率,降低成本<sup>[8-9]</sup>。通过以上研究可知,改善土体的受力状态,减小桩效应对于提高钻进效率具有重要的意义。

## 1 冲击挤密作用下土体的变形机理

### 1.1 动载下土体的压缩性

土的压缩性是指土在压力作用下发生压缩形变体积减小的性能。由于土体内部的孔隙结构,其压缩形变通常包含 3 种情况:土颗粒自身的压缩形变;孔隙中气体和液体被压缩;孔隙中的气体和液体被挤出。通常情况下,土颗粒和水的压缩量极小,不及土体压缩量的  $1/400$ 。气体的压缩性虽较强,但是压力消失后体积基本恢复。因此,土的压缩变形主要是由于孔隙中水和气体被挤出,土颗粒之间相互移动靠拢,孔隙体积减少而引起的。这种压缩变形的过程与水和气体的排出速度有关,开始时变形速度较大,然后随着土颗粒之间接触点的增加,变形逐渐减弱<sup>[10-15]</sup>。

冲击挤密钻进过程中,在冲击荷载作用下,随着冲击次数的增加,土中的气相和液相很快排出,孔隙很快减小,土颗粒间接触点增加,土体被压缩,密实度增大,逐渐达到临界值,但动荷载作用是有一定范围的,距震源越远,受震动影响越小。

### 1.2 动载下土体的剪切强度

在施加动载荷后,土体由弹性形变发展至塑性形变直至最终破坏。对于土体来讲,其弹性形变阶段不明显<sup>[16-17]</sup>。为了接近真实情况,选用 Drucker - Prager 屈服准则作为土体的本构模型。该准则基于 Mohr - Coulomb 屈服准则进行优化,当材料某个平面上的剪应力  $\tau$  达到某个极限值时,材料发生屈服,其公式如下<sup>[18-20]</sup>:

$$\tau = c + \tan\varphi \quad (1)$$

式中: $\tau$ ——剪应力,kPa; $\varphi$ ——土的内摩擦角,(°); $\sigma_n$ ——受力面上的正应力,kPa; $c$ ——粘聚力,kPa。

将该准则推广至一般的情况,可改写为以下形式:

$$\sigma_1(1 - \sin\varphi) - \sigma_3(1 + \sin\varphi) - 2c \cos\varphi = 0 \quad (2)$$

在三维情况下其表达式为:

$$\frac{1}{3}I_1 \sin\varphi + \sqrt{J_2} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \sqrt{\frac{J_2}{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \cdot \sin\varphi - \cos\varphi = 0 \quad (3)$$

式中: $I_1$ ——应力张量第一不变量; $J_2$ ——应力偏张量第二不变量; $\theta$ ——应力洛德角。

Drucker - Prager 屈服准则基于 Mohr - Coulomb 准则,考虑了静水压力的作用,表示为:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = K \quad (4)$$

式中  $\alpha$  和  $K$  分别为土体的材料参数,可通过土体的粘聚力与内摩擦角计算而得:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin^2\varphi)} \quad (5)$$

$$K = \frac{6c \cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin^2\varphi)} \quad (6)$$

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型建立

在冲击挤密钻进过程中,钻头周围土层已被破坏并进入塑性变形阶段,土体的应力应变值很大,已达到其破坏应力。将土体视为有连续性的弹塑性材料,由于土体的抗屈服强度远大于其抗拉伸强度且在压缩时有剪胀性,故采用对 Mohr - Coulomb 屈服准则修正的 Drucker - Prager 屈服准则,且钻头和外套与土体之间的摩擦符合库仑摩擦<sup>[21]</sup>。取土层为粘土,其具体参数如表 1 所示。

表 1 软地层(粘土)和钻头的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soft formation (clay) and drill bit

名称	密度 $\rho$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	泊松比 $\mu$	变形模量 $E_0$ / MPa	粘聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)	原始侧向固结压力 $q$ /MPa
粘土	1960	0.30	36	15.4	30	2.876
钻头	7800	0.35	$2 \times 10^5$			

根据浙江大学龚晓南教授于文献[10]中推导出的公式可求出:

$$R = R_u \sqrt{\frac{G}{c \cos\varphi + q \sin\varphi}} \quad (7)$$

式中: $R$ ——最大有效挤密半径,mm; $R_u$ ——钻孔半径,mm;(钻孔直径  $d=2R_u$ ); $c$ ——土的粘聚力,kPa; $\varphi$ ——土的内摩擦角, $^\circ$ ; $q$ ——土的原始侧向固结压力,kN; $G$ ——土的剪切模量,kPa, $G=E_0/[2(1+\mu)]$ ; $E_0$ ——土的变形模量,MPa; $\mu$ ——泊松比。

将参数带入计算可得  $R \approx 2.82R_u$ 。为了方便模拟,设影响半径  $R=3R_u$ 。同时,竖直方向上的影响范围约为 2 倍钻具进入土体的深度<sup>[6]</sup>。故土体边界范围为:水平方向  $width=3R$ , 竖直方向  $Height=2L$ 。施加冲击载荷的参数如表 2 所示。

表 2 加载参数  
Table 2 Load parameters

名称	活塞行程/mm	活塞质量/kg	接触时间/ms	冲击功/J	冲击末速度/ $(m \cdot s^{-1})$	冲击频率/Hz
数值	230	16.46	29	200	5	12

将冲击挤密钻进问题中的钻具及其周围土体视为空间轴对称模型,定义钻头为刚体,土体为非线性材料,参数采用 LS-DYNA 的 K 文件自带参数模型,外管侵入土体采用二维拉格朗日法并使用 solid162 对二维实体进行网格划分,网格数为 583276。采用以 Y 轴为对称轴的轴对称算法,外管与土体的接触采用 CONTACT-2D-AUTOMATIC-SINGLE-SURFACE 算法<sup>[22]</sup>。几何模型和有限元模型分别见图 1 和图 2。

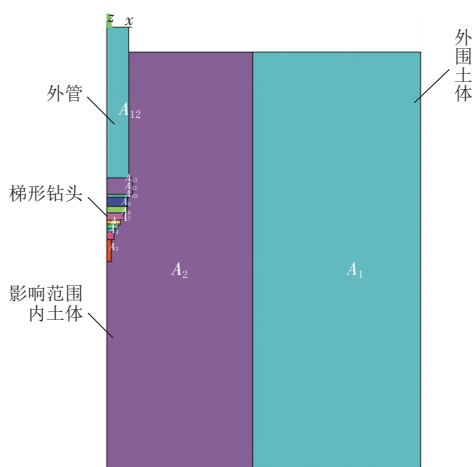


图 1 有限元分析几何模型

Fig.1 Geometric model for finite element analysis

## 2.2 凸轮旋压钻头结构设计

滚压挤土法是一种采用滚压器在钻进时将土体向径向挤密的钻进方式<sup>[23]</sup>。为解决桩效应对钻进

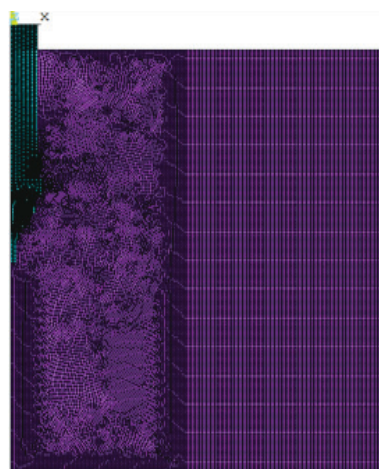


图 2 有限元模型网格划分

Fig.2 Grid model of finite element model

的影响,需要使钻头排开的土体尽量沿径向运动并减少轴向运动。结合滚压器成孔原理设计出凸轮旋压钻头,由最大外径为 130 mm 的 7 个不同直径的凸轮叠加而成。其结构见图 3。

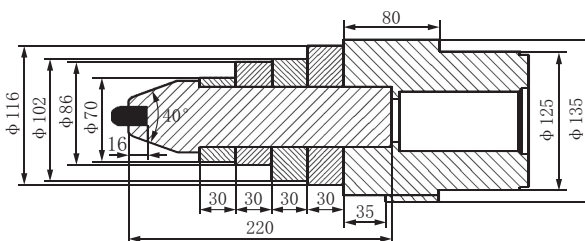


图 3 凸轮旋压钻头结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of cam spinning bit structure

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 桩效应形成机理分析

曹品鲁等人对普通圆锥形钻头的挤密过程进行数值模拟分析<sup>[3-5]</sup>,研究表明:在钻进过程中,钻具及圆锥形钻头周围土体的应力值大幅增加,形成了以钻头为中心的应力泡。同时,由于钻头的冲击作用,钻头外表面以下的土体被压缩并产生了较大的位移,因此在钻头的竖直下方产生了应力集中区域,该区域的应力达到一定值后,土体发生急剧变形并被破坏。此时,钻头外表面周围土体在钻头的作用下分别流向钻头的下部和两侧,应力泡中的轴向分量开始向下延伸,同时应力值不断减小。在高频冲击作用下,应力泡来不及消失,同时新的应力泡形成,应力的叠加造成钻头下方土体不断变得密实,强度不断增加,形成一个难以钻进的“硬块”。在冲击

载荷不变的条件下,随着钻进深度的增加,钻进速度会不断降低直至不进尺,该现象被称为桩效应。

### 3.2 阶梯钻头模拟结果分析

模拟计算钻进深度为 100 mm 过程中周围土体的应力应变及位移变化情况,并求解土体的轴向位移和径向位移。通过轴向位移图(图 4)可知,使用阶梯钻头进行冲击挤密钻进时,钻头前方的土体向下运动范围较大,同时有着较大的位移,这表明阶梯钻头钻进过程中的桩效应明显,大量的冲击功用于破坏钻头前方形成的坚硬土层,造成钻进效率低下。同时,根据轴向位移图可知,在钻头的末端处出现了位移最小值区域,这表明该区域的土体先向外侧位移后在围压的作用下产生了回弹,回弹是钻孔缩径的主要原因,回弹后的土体对外管的压力加大,造成土体和外管的摩擦增大,进而阻碍钻具的进尺,使钻进效率降低。

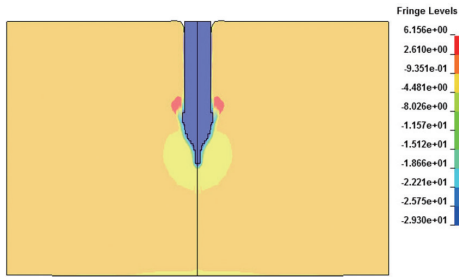


图 4 钻进深度 100 mm 阶梯钻头轴向位移云图  
Fig.4 Axial displacement cloud diagram of step drill bit with a drilling depth of 100mm

### 3.3 凸轮旋压钻头模拟结果分析

根据径向位移图(图 5)可知,采用凸轮旋压钻头模拟钻进深度达 100 mm 时,钻头两侧的土体位移明显不同,同时同层凸轮附近土体的位移也不同,因此在回转作用的每个周期内土体受力均不同。在回转作用下,径向通过逐层碾压形成钻孔,可以有效缓解土体回弹。根据轴向位移可知,土体在钻头前端形成了一个位移泡,这表明土体的轴向位移难以避免,但相对于阶梯钻头,凸轮旋压钻头前端土体的轴向位移已明显降低,故可大大增加桩效应的形成时间,在浅孔钻进中甚至可以避免桩效应产生,从而降低桩效应对钻进的影响。

为了全面了解钻进过程中土体的位移和应力应变情况,以钻头尖部为起点分别设置一条水平路径和竖直路径,观察凸轮钻头在不同路径上的位移和应力应变变化规律。

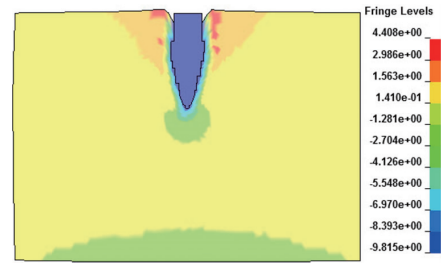


图 5 钻进深度 100 mm 凸轮钻头轴向位移云图  
Fig.5 Axial displacement cloud diagram of cam bit with a drilling depth of 100mm

由图 6 可知:沿水平路径方向,土体的轴向位移在钻头尖部达到最大值,随着距离钻头尖部的水平距离增加,轴向位移缓慢减小;土体的径向位移在距离钻头尖部水平距离 0~0.05 m 内是突然增大,然后逐渐减小,并在水平距离约 0.45 m 处趋于零。由图 7 可知:沿竖直路径方向,土体的轴向位移在不同深度处减少的幅度不同,在距离钻头尖部 0~0.1 m 内减小的幅度最大,在 0.5 m 处位移接近于零;

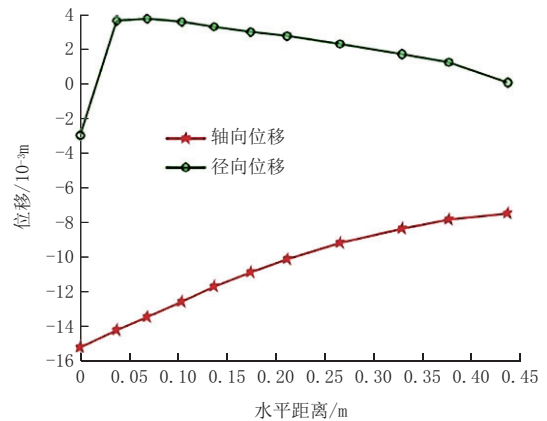


图 6 沿水平路径的位移曲线  
Fig.6 Displacement curve along the horizontal path

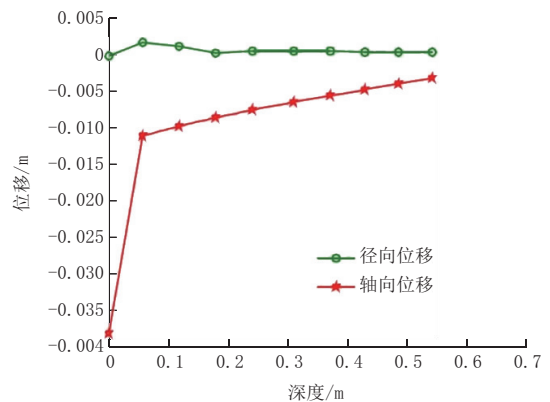


图 7 沿竖直路径的位移曲线  
Fig.7 Displacement curve along the vertical path

土体的径向位移距离钻头尖部竖向 0~0.05 m 内是逐渐增大的,然后逐渐减小,并在竖直距离约 0.5 m 处趋于零。

通过数值模拟可知,凸轮旋压钻头总位移云图与优化九阶梯钻头总位移云图有很大不同,其作用范围基本在  $3d$  左右,即钻头周围土体径向运动趋势更强,轴向运动减弱,对克服桩效应有很好的效果,可显著提高钻进效率。凸轮旋压钻头各方向上所对应的位移、应力和应变均大于阶梯型钻头。综合以上结论可知,凸轮钻头的钻进效果明显优于阶梯钻头。

## 4 实钻试验研究

### 4.1 试验条件

根据数值模拟分析,分别使用外径为 135 mm 的普通圆锥钻头及最大外径为 135 mm 的阶梯钻头和凸轮旋压钻头在相同的钻机转速、给进压力和地层条件下进行了对比试验<sup>[24-25]</sup>。实验条件如下:

(1) 试验地层:粘土层。

(2) 试验钻机:CD-3 型立轴式钻机。

(3) 钻头:凸轮旋压钻头、阶梯钻头以及普通圆锥钻头。

(4) 试验参数:给进压力 3 kN,钻机转速 67 r/min。

(5) 试验方法:通过冲击挤密潜孔锤外管、上接头与钻头和钻杆连接,在静压回转条件下进行挤密钻进。

### 4.2 试验数据和分析

在相同钻机转速、给进压力、地层条件和进尺下,普通圆锥钻头、阶梯钻头以及凸轮旋压钻头的钻进效果如表 3 所示。

表 3 三种钻头的钻进效果对比

Table 3 Comparison of drilling efficiency of three kinds of drill bits

钻头类型	总进尺/ m	纯钻进时间/ min	钻进速度/ ( $m \cdot h^{-1}$ )
凸轮旋压钻头	25	18.0	83.3
阶梯钻头	25	20.0	75.1
普通圆锥钻头	25	22.7	66.0

通过表 3 分析可知,三种钻头中凸轮旋压钻头钻进速度最快,阶梯钻头次之,普通圆锥钻头最慢。这表明在克服桩效应对钻进的影响中,理论模拟分析结果与实际钻进试验很好的吻合。

为分析上述 3 种钻头钻进速度随深度的变化,进行了第二组试验,并分别记录 3 种钻头钻进到 10、15、20、25 和 30 m 所需时间。由图 8 可知,在前 10 m 左右的进尺中,三种钻头的钻进时间几乎相同。这是由于钻进深度较浅,土层围压较小,桩效应不明显;同时因圆锥钻头的锥尖结构使其在较浅土层中的钻进速度略优于另两种钻头。随着钻进深度不断增加,土层围压不断增大,三种钻头的曲线斜率均有所增加,这表明随钻进深度增加,桩效应开始影响钻进的进行,造成单位进尺时间的增加。同时三者中凸轮钻头的曲线斜率相比阶梯钻头和圆锥钻头增幅较低,曲线相对平稳,由此可说明凸轮钻头相对于阶梯钻头及圆锥钻头可明显降低桩效应对钻进的影响,使钻速平稳,提升钻进效率。同时,试验结果也与模拟结果相吻合,表明数值模拟结果相对可靠。

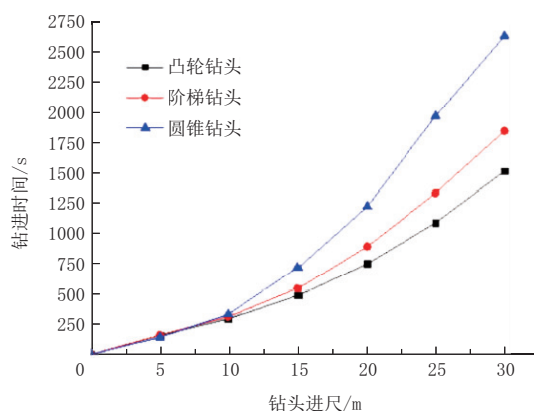


图 8 钻进深度和钻进时间关系图

Fig.8 Relationship between drilling depth and drilling time

## 5 结论

凸轮旋压钻头应用于冲击挤密钻进,可有效提高钻进效率,节约成本。通过理论分析和对阶梯钻头、凸轮旋压的数值模拟及对圆锥钻头、阶梯钻头和凸轮旋压钻头的试验研究得出了以下结论:

(1) 桩效应为冲击挤密钻进中钻头前方土体在冲击载荷作用下变得密实坚硬从而对钻进产生阻碍的现象。通过数值模拟可知该现象无法避免,但是可以通过调整钻头的结构来降低该现象对钻进的影响。

(2) 阶梯钻头钻进时存在土体回弹和钻头前土体的桩效应,需要二次扩孔并要大量的功率破碎钻头前的坚硬土体,因此钻进速度较低。而凸轮旋压钻头则可以避免钻进过程中的土体回弹问题,同时大幅减小钻头前土体的桩效应,从而提升钻进效率。

(3)对3种钻头的冲击挤密钻进进行了试验,试验结果与理论数值分析结果一致,证明了凸轮旋压钻头可有效提高冲击挤密钻进的钻进效率。

### 参考文献(References):

- [1] 李养平. 潜孔锤冲击挤密钻进成孔法的探讨[J]. 探矿工程, 1997(6):23-25.  
LI Yangping. Discussion on DTH hammer percussion compaction drilling method[J]. Exploration Engineering, 1997(6):23-25.
- [2] 马保松, D. Stein. 可控土层挤密非开挖管线铺设方法及应用[J]. 探矿工程, 2003(6):52-55.  
MA Baosong, D. Stein. Controllable soil displacement no-dig pipeline installing methods and their applications[J]. Exploration Engineering, 2003(6):52-55.
- [3] 曹品鲁. 潜孔锤冲击挤密钻进机理及挤密钻头的设计与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
CAO Pinlu. Penetration mechanism of DTH percussion compact drilling and experimental research on compact bit[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [4] CAO P, YIN K, PENG J, et al. Optimization design and finite element analysis of core cutter [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007,17(3): 399-402.
- [5] 孙庆, 曹品鲁, 殷琨. 冲击挤密作用下土体变形机理的有限元分析[J]. 煤田地质与勘探, 2009,37(2):36-38.  
SUN Qing, CAO Pinlu, YIN Kun. Finite element analysis on deformation mechanism of soils under percussion-compact[J]. Coal Geology & Exploration, 2009,37(2):36-38.
- [6] 宋勇军. 挤密桩挤土效应的理论分析与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.  
SONG Yongjun. Theory analysis and test study on the compaction effect of compaction piles[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [7] 时元玲, 孙友宏, 王清岩, 等. 砂卵石层旋冲挤密钻进机具研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(4):64-66,78.  
SHI Yuanling, SUN Youhong, WANG Qingyan, et al. Research and application of rotary-percussion-extruding drilling equipment in gravel with sand formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(4):64-66,78.
- [8] 孙荣军, 谷控成, 谢晓波, 等. 仿生冲击挤密钻头的研究[J]. 煤田地质与勘探, 2018,46(3):174-178,183.  
SUN Rongjun, GU Shuancheng, XIE Xiaobo, et al. Research on bionic impact compacting bits[J]. Coal Geology & Exploration, 2018,46(3):174-178,183.
- [9] 曹雪宁. 直推式取样钻具优化设计研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
CAO Xuening. Study on the optimum design of the direct push sampling drilling tool[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [10] 龚晓南, 等. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
GONG Xiaonan, et al. Ground treatment manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [11] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 土-界面-结构体系计算模型研究进展[J]. 岩土工程学报, 2020(9):1-10.  
KONG Xianjing, LIU Jingmao, ZOU Degao, et al. State-of-the-art: the computation model of soil-interface-structure system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020(9):1-10.
- [12] 周爱兆, 卢廷浩. 基于广义位势理论的接触面弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2008(10):1532-1536.  
ZHOU Aizhao, LU Tinghao. Elasto-plastic constitutive model of interface based on generalized potential theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(10):1532-1536.
- [13] 陈楷, 邹德高, 孔宪京, 等. 多边形比例边界有限单元非线性化方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017,51(10):1996-2004,2018.  
CHEN Kai, ZOU Degao, KONG Xianjing, et al. Novel non-linear polygon scaled boundary finite element method and its application[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017,51(10):1996-2004,2018.
- [14] 李波. 土体颗粒尺度对其变形特性的影响与孔隙尺度对其渗流固结特性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
LI Bo. Effect of particle scale on deformation and effect of pore scale on seepage and consolidation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [15] Dalzell T D. Environmental and direct push drilling technologies[J]. Pollution Engineering, 2012,18:18-20.
- [16] 鲁稳. Drucker-Prager 系列屈服准则在岩土稳定分析中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
LU Wen. Studies of application of Drucker-Prager yield criteria to stability analysis of rock and soil[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [17] A Benamar. Dynamic pile response using two pile-driving techniques[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20 (1-4):243-247
- [18] B. I. Dalmatov. Soil mechanics, footings and foundations: Geotechnika - selected translations of Russian geotechnical literature 3[M]. Boca Raton USA: CRC Press, 2020.
- [19] J. A. R. Ortigao. Soil mechanics in the light of critical state theories[M]. Boca Raton USA: CRC Press, 2020.
- [20] Hany Elost. Geotechnical engineering - advances in soil mechanics and foundation engineering[M]. London: IntechOpen, 2020.
- [21] 张红松, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 14.5/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
ZHANG Hongsong, HU Renxi, KANG Shiting. ANSYS 14.5/LS-DYNA example guide for nonlinear finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [22] Hallquist JO. LS-DYNA theory manual[Z]. 2006.
- [23] 李长明, 季伟峰. 滚压法成孔(桩)技术方法的研究与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001(S1):30-31.  
LI Changming, JI Weifeng. Research and test on the technology method of rolling hole (pile) [J]. Exploration Engineering, 2001(S1):30-31.
- [24] 张永光. 冲击挤密潜孔锤外表减阻结构优化设计及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
ZHANG Yongguang. Optimum design and experimental research on the external surface-drag reduction structure of percussion-compact DTH hammer[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [25] 罗春红. 凸轮型冲击回转挤压钻头成孔机理的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
LUO Chunhong. The pore-forming mechanism study of cam bit on percussive-rotary extruding DTH drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2009.