

# 旋挖机钻进过程的力学响应特征及地层强度确定

张立君<sup>1</sup>, 刘先珊<sup>2,3</sup>, 牛万保<sup>2,3</sup>, 郝梓宇<sup>2,3</sup>

(1. 湖北省漳河工程管理局, 湖北 荆门 448156; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;  
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 旋挖机的现场钻进参数表明随钻参数如钻进率、钻杆钻速、动力头压力及扭矩等实时改变可定性入岩判别, 由此建立切削力与压力的关系, 为地层辨识及终孔设计提供依据。以某输电变电站场址为研究对象, 建立旋挖钻机全钻头的三维数值模型, 模拟钻进过程中的给进力、扭矩实时变化及地层响应特征。结合地层物性特征与钻机随钻参数的关联性, 建立多因素协同控制的地层强度模型, 基于三维数值模型获得各工况的给进力及地层强度, 与地勘及监测计算的地层强度吻合, 说明三维数值模拟表征地层强度的合理性。最后, 基于该三维模型计算不同钻进深度的地层强度并进行持力层辨识, 实际与设计的入岩深度一致, 表明数值模拟地层强度确定持力层的可行性。其成果可为不同物性地层的旋挖机终孔设计提供理论支持。

**关键词:** 旋挖钻机; 钻进过程; 数值模拟; 力学响应; 地层强度模型

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0677-10

## Characteristic of mechanical response for drilling fragmentation by rotary drilling rigs and determination of the strata strength

ZHANG Lijun<sup>1</sup>, LIU Xianshan<sup>2,3</sup>, NIU Wanbao<sup>2,3</sup>, HAO Ziyu<sup>2,3</sup>

(1. Zhanghe Administration Bureau, Hubei Jingmen 448156, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area(Chongqing University),  
Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** According to the drilling monitoring data, the socketed depth can be determined based on the real-time variation of the drilling parameters such as drilling rate, rotation rate, force and torque of the power head. And also, the relationship of the axial force and cutting force was derived and applied for the strata and final drilling depth. And a transmission transformer station as a case study, a 3-Dimensional numerical modal including all the drilling bits was proposed to simulate the axial force and torque variation and mechanical response of the strata. And then, combined with the strata properties and real-time drilling parameters, a strata strength model considering multi-factors was proposed and calculated the strata strength, the comparison with the real geological strength and the strength based on real-time monitoring or simulating drilling parameters was proved the rationality of the proposed method. Finally, the proposed 3-D numerical model was applied to calculate the strata strength with different drilling depth, and the geological strength and real-time measuring strength were also compared to identify the bearing strata and verify the consistency of real depth and designed depth, indicating the feasibility of bearing strata determination based on the strata strength using the numerical simulation. The achievements can provide theoretical support for final depth design of the drilling hole by the rotary drilling rigs.

**Key words:** rotary drilling rigs; drilling process; numerical simulating; mechanical response; strata strength model

收稿日期: 2022-08-13 修回日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279094); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0069)

第一作者: 张立君(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工结构、岩土工程、水库等方面的应用研究。E-mail: lzmoumou@163.com

通信作者: 刘先珊(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土工程渗流、多场耦合理论及数值方法等方面的研究与教学工作。E-mail: liuxianshan@163.com

桩基础作为大型建筑结构、铁路、公路等工程的优选,合理可行的桩基设计方法和施工关键技术亟待解决和优化<sup>[1]</sup>。近年发展起来的旋挖机,相较于传统桩孔的施工方式,具有多种钻进方式、钻进效率高、成桩质量好等优点,适用于各类地层结构,优势明显且效果显著。但随着高、大、重建结构的增多,基础桩的直径和深度也不断增加,合理的终孔设计是关键,如绍兴国际大酒店桩基工程的设计孔深37 m,钻到孔深34 m就遇到中风化基岩,而施工以设计为准,只好慢慢“啃”下去,后经多方研究,确定终孔深度34.5 m。重庆地区的地层多为砂泥岩互层,旋挖机钻孔施工,但实际旋挖钻孔也存在上述问题,如重庆市某110 kV输变电工程,桩基最浅5 m,最深12.5 m,实际钻孔最浅6.6 m,最深29.7 m,远远超过桩深设计值,现场统计核算桩基超深231.4 m,增加费用约35万元,说明合理的终孔设计尤为重要。而实际地层赋存环境复杂,设计桩位与勘测孔并非一一对应,常出现钻孔深度与设计桩深不吻合或差异显著,合理有效的入岩深度确定亟待解决<sup>[3]</sup>。

根据当前的研究成果,旋挖钻进过程中的入岩判定仍由经验决定:1)地勘资料估算;2)钻出的岩屑或岩块辨识;3)对比相邻钻孔的持力层深度;4)钻机振动的程度。由于地勘不能一桩一勘,实际旋挖钻孔中或遇到孤石,或地层差异导致相邻桩孔持力层深度不同,或钻机振动剧烈程度的主观性,基于经验的入岩判定还不够准确。然而,根据旋挖机钻进不同物性特征地层的受力特性可知,随钻参数如进尺阻力、回转阻力矩、钻速、钻进率等会实时改变,均与地层物性特征显著关联,用以辨识地层类型有一定的实践依据<sup>[4]</sup>。

近年,旋挖机的破岩机理、旋挖中的持力层辨识、嵌岩深度的控制等方面均有了相应的进展,主要成果着重单一截齿的破岩过程,全钻头钻进过程的描述较少,且持力层确定的精度不够,实际钻深与终孔设计有差距。为了更好地描述旋挖机的整体钻进过程,以重庆市某输电变电站场址<sup>[5-7]</sup>为研究对象,建立全钻头的三维数值模型,分析旋挖钻进中的给进力及扭矩时程及地层响应,结合地层物性特征与钻机随钻参数的关联性,建立多因素协同控制的地层强度模型,对比实际地勘的地层强度值,验证地层强度确定方法的可行性及合理性,确定实际入岩深度,其研究可为不同

地层的旋挖钻机终孔设计提供科学依据。

## 1 旋挖机钻进过程的三维数值模型

### 1.1 工程概况

如图1所示的某输变电站场地长约96.0 m、宽约51.8 m,位于重庆市江津区。岩层产状 $245^{\circ}/\angle 8^{\circ}$ ,属中等复杂场地,由上至下为第四系全新统素填土、粉质黏土、泥砂岩互层、强风化及中等风化基岩,层状结构。地质勘测中,确定5个勘探孔及10根桩孔,设计为嵌岩桩,采用旋挖钻机完成桩孔施工。选择Z5勘测孔1#及Z6勘测孔1#钻孔桩位,地层分层如表1所示,表明两地层孔深5.2 m及10.54 m为中风化泥岩层,可以作为设计持力层深度,测得中风化泥岩层的天然抗压强度平均值分别为6.6 MPa及5.8 MPa。

表1 桩孔处的地层分层

Tab. 1 The elevation of the pile stratum

钻孔号	地层分类	地层深度/m	地层标高/m	厚度/m
Z5	素土层	3.1	301.18	3.1
勘测	强风化泥岩	5.2	299.08	2.1
孔1#	中风化泥岩	13.8	290.48	8.6
Z6	素土层	6.5	296.85	6.5
勘测	粉质黏土	8.1	295.25	1.6
孔1#	强风化泥岩	10.54	292.81	2.44
	中风化泥岩	15.5	287.85	4.96



图1 出露地层及旋挖钻机施工现场

Fig. 1 The stratum characteristic and construction site by the rotary drilling rigs

### 1.2 旋挖机钻进地层的作用力

现场旋挖钻机的破岩过程<sup>[8]</sup>表明,钻头入岩的主要作用力为轴向压力和水平切削力,通过钻机的动力头总压力(给进力)和扭矩来体现。根据机械原理,可得到动力头总压力和扭矩的表达式。

动力头的总压力为

$$P = P_1 + G \quad (1)$$

式中:  $P_1$  为液压缸加压力, N;  $G$  为最后一节钻杆和钻头的总自重, N。

动力头扭矩为

$$T = \frac{P_P \cdot \eta \cdot 60 \cdot 1\,000}{6.28 \cdot n} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为旋挖钻机工作中的机械效率;  $P_P$  为动力头输入功率, kW; 液压马达转矩,  $N \cdot m$ ;  $n$  为液压马达的转速, r/min.

### 1.2.1 旋挖机钻头破岩时的轴向力

旋挖钻进动力头压入过程中, 施加的轴向力使得岩体形成破碎坑, 截齿破坏地层岩土体的计算模型如图 2(a) 所示. 钻头破岩要满足单位面积上的压力超过岩石的单轴抗压强度, 即

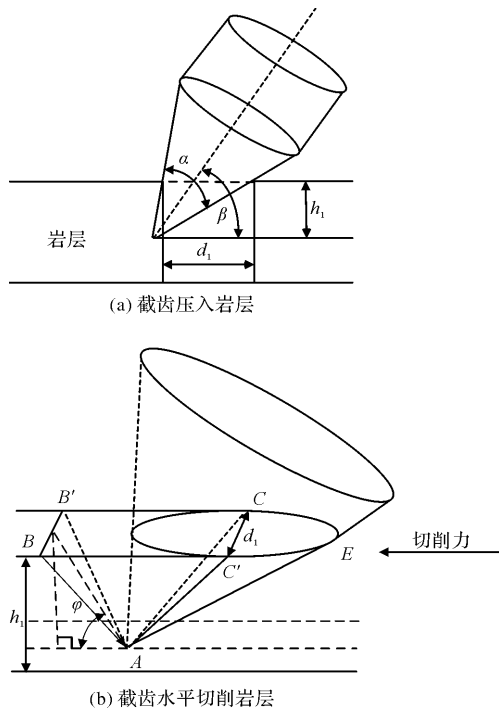


图2 旋挖机钻头破岩的受力示意图

Fig. 2 The diagram of the fragmentation force by a pick

$$P \geq S_1 \sigma_m \quad (3)$$

式中:  $P$  为单截齿施加的轴向压力, N;  $\sigma_m$  为地层岩土体的单轴抗压强度, Pa;  $S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ ,  $d_1$  为钻进中截齿合金头的水平投影直径, m.

$$d_1 = \frac{\pi \sigma_m}{4} h_1^2 \left[ \tan\left(\frac{\alpha + \pi}{2} - \beta\right) + \tan\left(\frac{\alpha - \pi}{2} + \beta\right) \right]^2 \quad (4)$$

式中:  $h_1$  为旋挖钻进的侵深, m;  $\alpha$  为截齿齿角, °;  $\beta$  为截齿倾角, °. 可见, 选定旋挖机时, 动力头压力主要与地层岩土体强度和侵深相关.

### 1.2.2 旋挖机钻头破岩时的切削力

截齿斜向侵入地层时产生相对滑动, 截齿切削形成剪切过程中需要克服的力如图 2(b) 所示, 形成剪切破坏时, 即可求得切削力  $P_x$  为

$$P_x = \frac{\left( \frac{d_1 \cdot h_1}{2 \sin \varphi} + 2 \frac{h_1}{2} \left( \frac{d_1}{2} + \frac{h_1}{\tan \varphi} \right) \right) \tau_m - P f f_1 \sin \varphi + P f \cos \varphi}{\cos \varphi - f_1 \sin \varphi}$$

$$= \frac{\left( \frac{d_1 \cdot h_1}{2 \sin \varphi} + 2 \frac{h_1}{2} \left( \frac{d_1}{2} + \frac{h_1}{\tan \varphi} \right) \right) \tau_m}{\cos \varphi - f_1 \sin \varphi} + P f \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为切削锥面与水平面的夹角, °;  $\tau_m$  为地层岩土体抗剪强度, Pa;  $f$  为截齿合金钻头与地层岩土体的摩擦系数;  $f_1$  为地层岩土体内摩擦系数. 可见, 选定旋挖机时, 旋挖机扭矩产生的切削力与动力头压力及地层抗剪强度密切相关.

### 1.3 旋挖机全钻头钻进的三维数值建模

为了描述旋挖钻机钻进过程的力学响应, 基于单一截齿的破岩机理研究<sup>[9-12]</sup>, 可采用三维数值方法<sup>[13-16]</sup>建立整体旋挖机钻筒, 模拟整个钻进过程的力学响应. 选用如图 3(a) 所示的捞沙式旋挖机钻筒为研究对象, 考虑截齿固定在沿钻筒径向的一根横梁上(图 3(b)), 截齿 9 个, 圆心处截齿倾角为 0°, 其他截齿倾角 30°, 偏斜角 0°, 相邻截齿间距 65 mm.

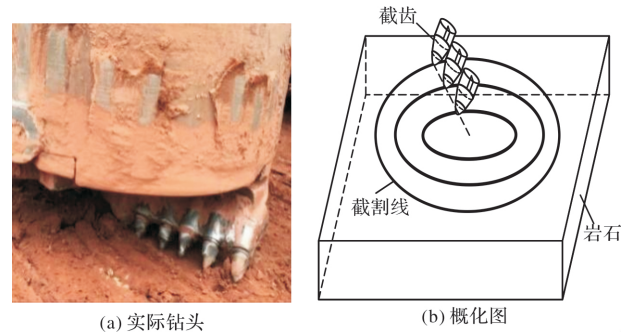
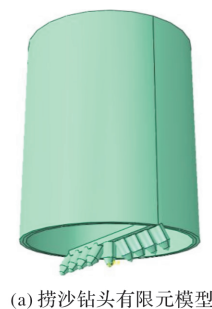


图3 捞沙式钻头图

Fig. 3 The description of the dredging rigs

基于 ABAQUS 软件<sup>[16]</sup>建立如图 4 所示的旋挖机全钻头三维数值模型, 钻筒直径 500 mm, 筒壁厚度 20 mm, 岩土体尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 300 mm, 划分单元尺寸 10 mm, 单元总数 300 000 个. 数值计算中, 截齿不考虑磨损, 简化为刚体, 选用弹性本构模型, 力学参数如表 2 所示; 地层岩土体选用扩展 Drucker-Prager 本构模型; 截齿与岩土体设置为表面与节点接触方式, 切向摩擦系数 0.3, 地层围压 10 MPa.



(a) 捞沙式钻头有限元模型

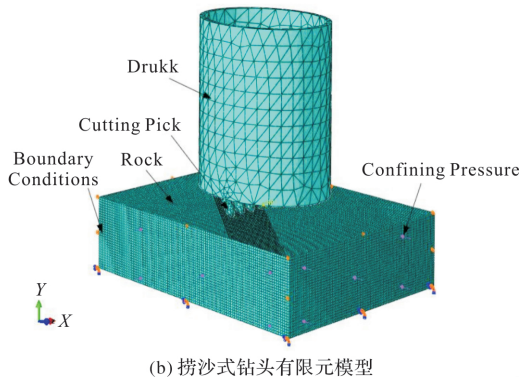


图 4 捞沙式钻头的三维数值模型

Fig. 4 The FEM numerical model of the dredging rigs

表 2 截齿力学参数表

Tab. 2 The mechanical parameters of the pick

材料参数	数值
弹性模量/GPa	576
泊松比	0.1
密度/kg · m <sup>-3</sup>	7 900
摩擦系数	0.3

## 2 旋挖机钻进过程中的力学响应特征

### 2.1 旋挖钻进中的钻头给进力与扭矩

旋挖机钻头与地层岩土体相互作用时, 主要产生竖向动力头压力和水平面内扭矩, 竖向动力头压力由旋挖机液压泵产生, 压入岩体, 后者水平面内扭矩由旋挖机液压马达产生<sup>[17-19]</sup>, 旋转切割岩体. 两个重要的作用力描述了旋挖机钻头的工作状态, 不同物性特征的地层实施钻进时, 两个参数的变化趋势也会不同, 由此阐明给进力和扭矩与地层物性特征的重要关联性.

基于第二节的三维数值模型, 计算得到钻进率 0.6 m/min、转速 10 r/min 的钻头给进力与扭矩时程变化, 如图 5 所示(黑色线为变化趋势线). 其结果表明, 钻进 0~1.0 s 时, 该阶段主要为动力头压入地层, 属于单一的侵入段, 此阶段无扭矩作用, 钻头不旋转, 则给进力单调增大, 最大值 370 kN, 扭矩近似为 0; 钻进 1.0~4.0 s 时, 动力头压入与扭矩共同作用, 给进力突然减小, 得到平均值 125.21 kN 及最大值 391.06 kN; 而扭矩突然增大, 得到平均值 53.95 kN · m 及最大值 275.25 kN · m. 如上数值模拟的给进力和扭矩变化规律与旋挖钻机实际钻进过程基本一致.

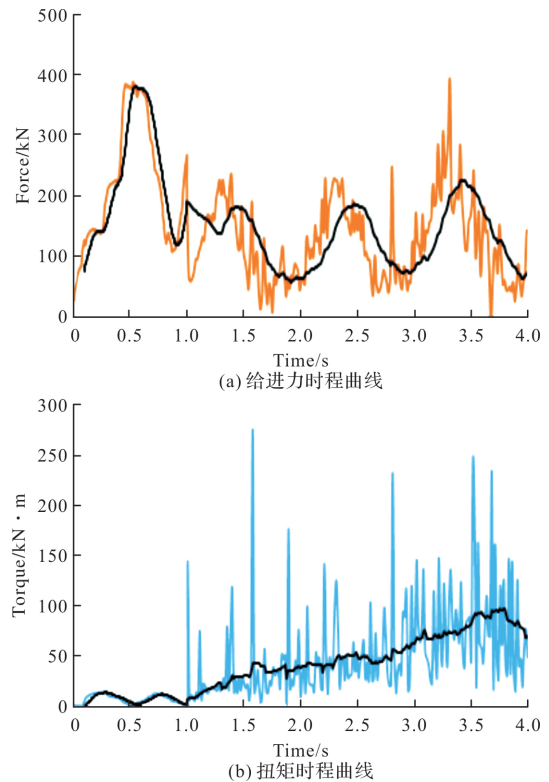


图 5 捞沙式钻头钻进中的作用力时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of the forces for the dredging fragmentation

#### 2.1.1 转速影响的钻头给进力及扭矩

转速也即钻头转速, 是旋挖机钻进过程中的重要参数, 其大小表征了钻头旋挖的难易程度, 同一旋挖机钻进地层时, 钻速越小, 则旋挖地层的难度越大, 说明地层越坚硬. 基于上述的三维数值模型, 获得不同工况组合的给进力和扭矩数值, 并分析其变化规律.

考虑旋挖钻进率 0.6 m/min 组合转速  $n = 7$  r/min、10 r/min、15 r/min 及 20 r/min 时, 如图 6 所示的数值模拟钻头给进力和扭矩曲线. 其结果表明, 旋挖钻进过程中的钻进率保持不变, 钻进 0~1.0 s 时, 主要为单一的动力头压入地层, 扭矩为 0, 表现为给进力大小逐渐增大; 钻进 1.0~4.0 s 时, 动力头压力与扭矩共同作用, 给进力逐渐波动式减小, 扭矩逐渐增大. 对比可知, 转速为 7 r/min、10 r/min、15 r/min 对应的最大轴力约为 400 kN, 20 r/min 对应的最大轴力约为 500 kN, 表明随着钻速的增大, 给进力增大; 转速为 7 r/min、10 r/min、15 r/min、20 r/min 对应的最大扭矩分别为 250 kN · m、300 kN · m、400 kN · m、600 kN · m, 阐明转速增大表征转速增大, 此时扭矩也增大, 地层被切割剥落的速度越快, 与实际钻进过程是基本吻合.

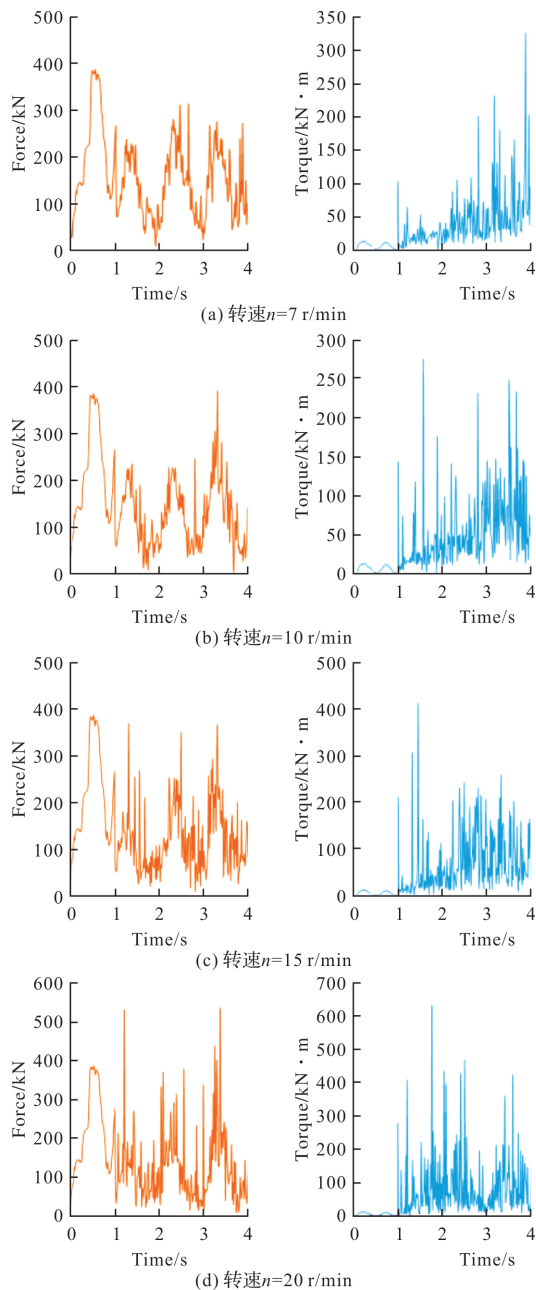


图6 转速影响的捞沙式钻头作用力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of the forces for the dredging fragmentation considering the rotation rate

### 2.1.2 钻进率影响的钻机给进力及扭矩

钻进率是旋挖机钻进中另一重要的随钻参数,其大小也表征了钻头旋挖的难易程度,同一旋挖机钻进不同的地层,钻进率越小,表明单位时间内钻深越小,地层越坚硬。基于如上的三维数值模型,模拟同一钻头转速组合不同钻进率的钻头给进力和扭矩响应。

当旋挖钻机的钻头转速为 10 r/min, 钻进率  $V = 0.2$  m/min、0.4 m/min、0.6 m/min 及 0.8 m/min 时,得到不同工况下的钻头给进力和扭矩时程曲线,如图 7 所示。

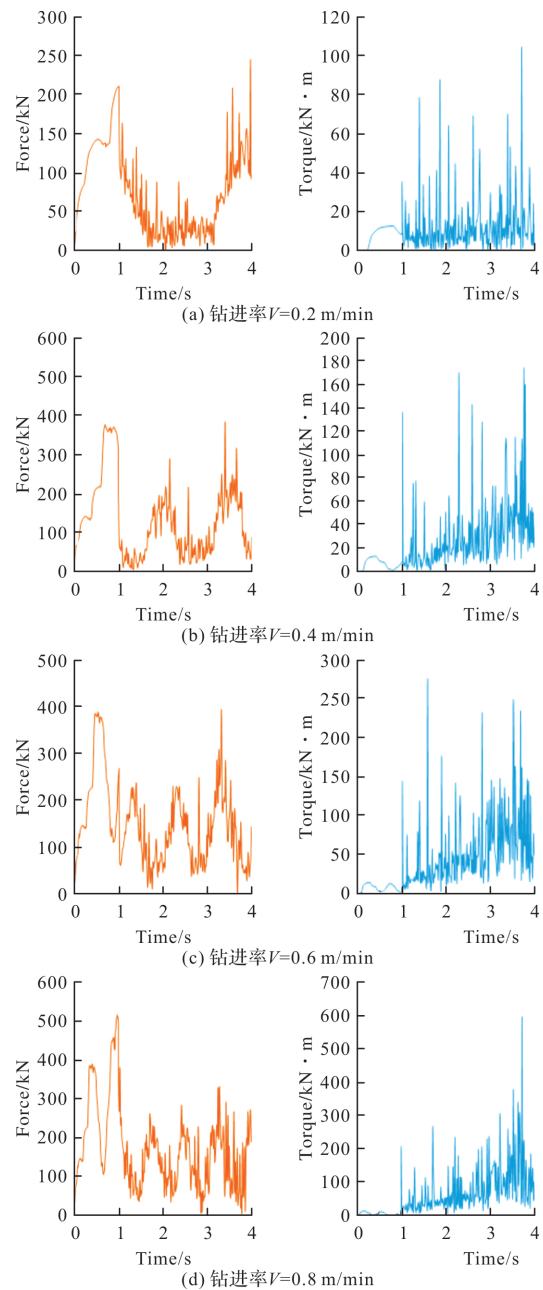


图7 钻进率影响的捞沙式钻头作用力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of the forces for the dredging fragmentation considering the drilling rate

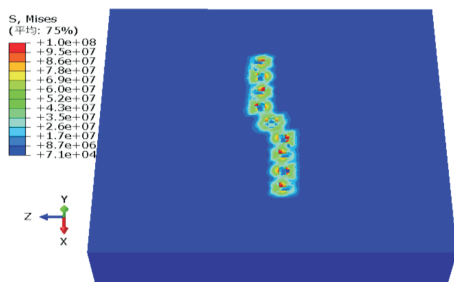
其结果表明:钻进 0~1.0 s 时,主要为动力头压入地层,此时为单一的给进力作用阶段,给进力随钻进率的增加而增大,由于初始阶段还未施加扭矩,此时的扭矩近似为 0;钻进 1.0~4.0 s 时,动力头压力与扭矩开始共同作用,此时给进力随着钻进过程而减小再增大的波动变化,而扭矩表现为波动式增大。当钻进率  $V = 0.2$  m/min、0.4 m/min、0.6 m/min 及 0.8 m/min 时,对应的最大给进力分别为 200 kN、386 kN、400 kN、520 kN;对应的最大扭矩分别为 100 kN·m、180 kN·m、275 kN·m、600 kN·m,表明随着

钻进率的增大,最大给进力及最大扭矩均逐渐增大。进一步通过钻进率增大后的最大给进力及最大扭矩变化规律可知,两者到达最大值的时间越短,主要在于动力头压入地层时,给进力达到最大值,则钻进深度是一定的,由于钻进率不同,则给进力达到最大对应的时间点也就不同,当钻进时间1.0~4.0 s时,随着钻进率的增大,给进力和扭矩的循环波动频率逐渐增大,其数值也逐渐增大,与实际旋挖钻进过程基本吻合。

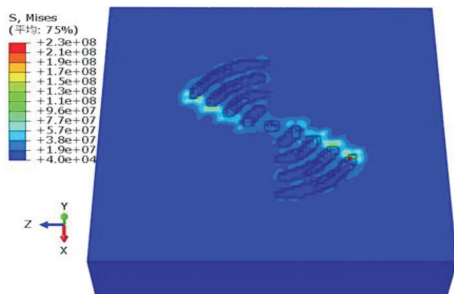
## 2.2 旋挖钻进过程中的地层力学响应

旋挖机施工时,钻头钻进的初始阶段,钻筒底部的截齿与地层岩土体接触,在动力头压入时产生弹性变形,随着钻进深度的增大,施加钻头扭矩切削岩土体,此时的给进力和扭矩均较大,作用在岩土体的力学效应越来越明显,产生塑性变形,应力也逐渐增大逼近岩土体的抗压强度和抗剪强度,岩土体的损伤累积越来越来,当应力达到并超过岩土体强度时,钻头破岩成功。

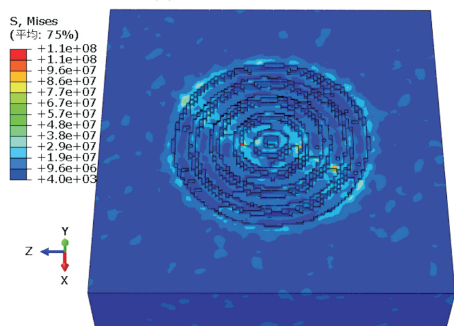
为了真实再现全钻头的钻进全过程,基于数值模型模拟捞沙式钻筒的破岩过程,如图8所示。



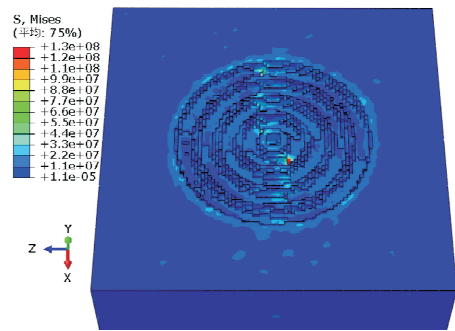
(a) 钻进时间 $t=1.0$  s



(b) 钻进时间 $t=2.0$  s



(c) 钻进时间 $t=3.0$  s



(d) 钻进时间 $t=4.0$  s

图8 不同钻进时间的地层应力响应

Fig. 8 Stress distribution considering different drilling time

其结果表明:0~1.0 s,动力头压力压入地层,钻头只有单一的侵入作用,捞沙式钻头在岩土体上产生径向压痕;当钻进1.0~4.0 s时,动力头压入的同时旋转切割岩石,切割面积为钻筒直径处的切割线,由于截齿存在偏斜角,切痕大于截齿齿刃宽度。随着钻进时间的增大,切削深度随之增大,地层岩土体的应力逐渐增大,当应力达到地层岩土体屈服强度时,岩土体破坏;进行下一轮的動力头压入,给进力与扭矩共同作用的阶段,如此循环完成整个桩孔的施工。可见,钻头破岩过程中,旋挖机钻头的不断加载和卸载,与2.1的作用力时程曲线基本一致,形成了地层岩土体的跃进破坏过程。

## 3 旋挖钻进过程中的地层强度确定

上述研究表明,旋挖机钻进过程中随钻深改变的随钻参数<sup>[20-21]</sup>主要是实时监测的旋挖机机械参数,如钻进深度、钻杆转速、发动机负载、辅泵压力、主泵压力、发动机扭矩等,基于实测参数计算钻进率、给进力、地层比功等指标,用以表征整个钻进过程中的地层特征。鉴于实际工程的桩基设计数量较多,典型勘测桩的地层强度不能完全代表其他桩基参数,需结合实测力学参数及旋挖钻进数值模型,分析钻进过程中的地层强度变化规律,为持力层确定提供科学依据。

基于文献[22-23]的比功法,获得钻进过程中的机械参数素,实现旋挖机的实时控制及最优施工控制。进一步考虑切削力与轴向力的理论关系、地层比功建立原则及工程实践经验,综合考虑旋挖钻进过程中的主要作用力,建立多因素协同控制的地层强度模型<sup>(6)</sup>,描述钻进过程中的地层强度变化规律<sup>[24-26]</sup>。

$$R=0.8 \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot n \cdot P}{V \cdot A} \quad (6)$$

式中:  $d$  为桩孔直径, mm;  $n$  为钻杆转速, r/min;  $P$  为动力头总压力, N;  $V$  为钻进率, m/min;  $A$  为钻孔面积, mm<sup>2</sup>.

### 3.1 给进力分析

基于现场监测采集的旋挖机钻进参数(钻进速度和钻头转速), 进行钻进过程的数值模拟, 计算得到给进力. 同时, 根据机械设计和液压油缸工作原理, 由旋挖机直测参数计算给进力. 对比两者给出的给进力, 即可分析不同随钻参数的给进力变化规律.

根据实际桩基设计, 选用 Z5 勘测桩 1# 及 Z6 勘测桩 1# 作为研究对象, 开展旋挖钻进过程中的随钻参数及强度参数研究, 以验证地层强度模型的可靠性. 如图 9(a) 中 Z5 勘测桩 1# 的数值模拟数据和监测计算数据, 对比显示数值模拟的给进力与现场监测计算的给进力差异较小: 如岩体强度 5.651 4 MPa, 钻机的钻进速度 1.09 m/min, 钻头转速 9.56 r/min 时, 监测计算和数值模拟的给进力分别为 107.44 kN 和 103.69 kN. 而 Z6 勘测桩 1# 的数值模拟数据和监测计算数据, 对比显示数值模拟的给进力与现场监测计算的给进力接近: 如岩石强度 5.501 6 MPa, 钻机的钻进速度 0.39 m/min, 钻头转速 8.67 r/min 时, 监测计算和数值模拟的给进力分别为 34.32 kN 和 32.27 kN. 其结果表明, 数值模拟得到的给进力接近基于监测计算的给进力, 表明数值模拟获得给进力可行, 可用于后续地层强度的辨识及持力层深度确定.

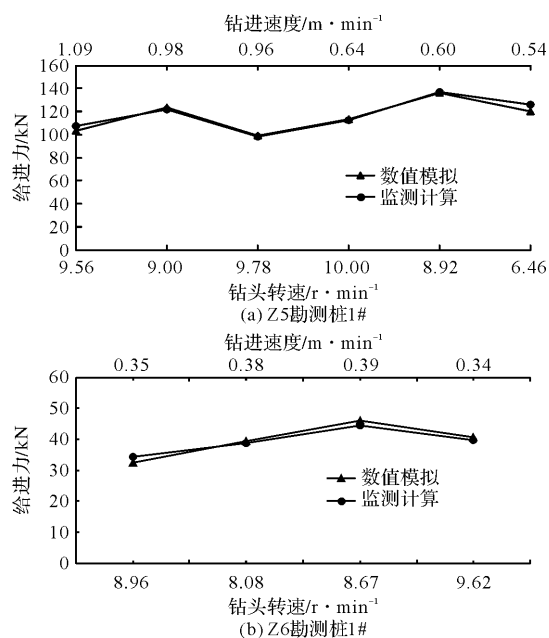


图 9 考虑随钻参数的给进力对比

Fig. 9 Comparison of intrusive force variation considering the drilling parameters

### 3.2 地层强度分析

基于钻机不同随钻参数的给进力, 与钻进速度和钻头转速代入式(6)中, 得到数值模拟的地层强度曲线, 如图 10 所示. 对比地勘及监测计算的地层强度表明, 数值模拟的地层强度与两者的数值吻合, 阐明上述数值模拟确定地层强度的可靠性.

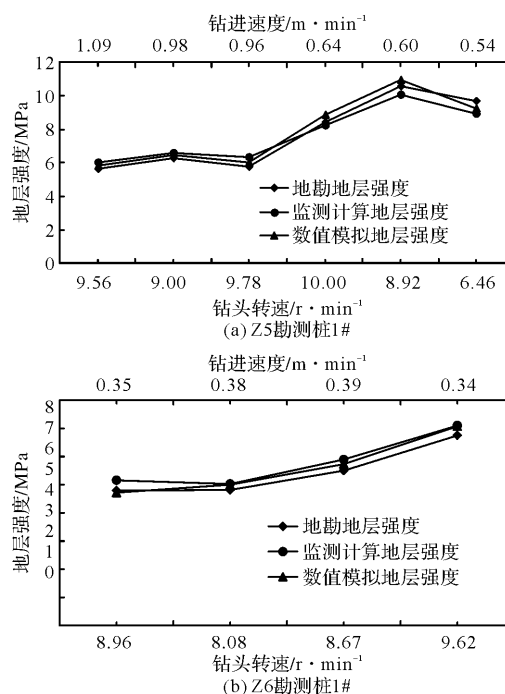


图 10 考虑随钻参数的地层强度对比

Fig. 10 Comparison of stratum strength variation considering the drilling parameters

### 3.3 持力层辨识

地勘报告显示, Z5 勘测孔 1# 及 Z6 勘测孔 1# 的单轴抗压强度平均值分别为 6.6 MPa 及 5.8 MPa, 钻孔深度分别达到 5.2 m、10.54 m 时进入持力层. 结合论文提出的三维数值模型及式(6)的地层强度辨识模型, 引入实时监测的随钻参数, 获得数值模拟钻进过程中的地层强度变化规律, 如图 11 所示, 将数值模拟结果与实测各地层强度、理论计算地层强度进行对比, 表明地层强度随钻深增加而增大, 与地勘地层强度的变化趋势相同, 且数值也基本吻合, 进一步验证了数值模拟确定地层强度特征值的合理性.

另外, 数值模拟结果显示, Z5 勘测桩 1# 及 Z6 勘测桩 1# 分别在 5.2 m、10.54 m 时达到并超过持力层单轴抗压强度, 桩嵌入持力层深度分别为 2.8 m、0.46 m. 根据《建筑地基基础设计规范》

(GB50007-2011)“嵌岩灌注桩的周边嵌入微风化或中等风化岩体的最小深度不宜小于 0.5 m。”其结果表明, Z5 勘测桩 1# 的设计桩长满足要求, 但 Z6 勘测桩 1# 的设计桩长不能满足, 还需增加桩长以满足桩承载力。

以上研究表明基于数值模拟获得的地层强度与理论计算及地勘的地层强度吻合, 表明多因素协同控制的数值模拟表征钻进过程中地层强度变化的合理性。可见, 为了获得更准确的终孔深度或桩基长度, 数值分析旋挖钻进参数以计算地层强度是可靠的, 可用于确定不同地层的旋挖机钻进深度, 为终孔设计提供理论依据。

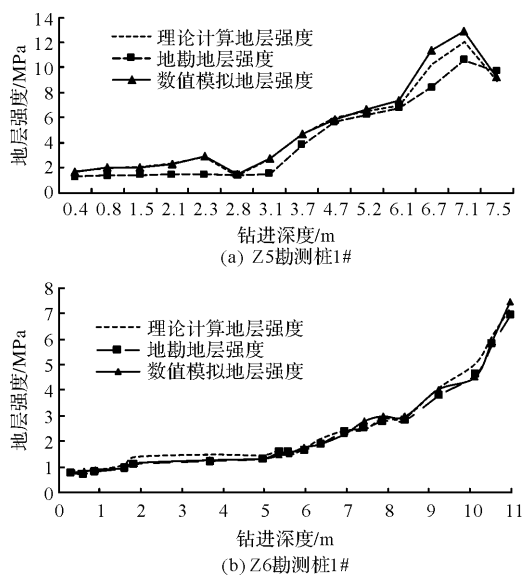


图 11 持力层辨识

Fig. 11 Determination of the bearing stratum

## 4 结论

论文构建了全钻头捞沙式旋挖机钻机的三维数值模型, 阐明了地层物性特征的准确辨识才是终孔设计的关键。其结论如下:

(1) 建立全钻头捞沙式旋挖机的三维数值模型, 模拟钻进过程中转速改变时的给进力及扭矩实时变化, 转速为 7 r/min、10 r/min、15 r/min 对应的最大轴力约为 400 kN, 20 r/min 对应的最大轴力约为 500 kN; 转速为 7 r/min、10 r/min、15 r/min、20 r/min 对应的最大扭矩分别为 250 kN·m、300 kN·m、400 kN·m、600 kN·m, 表明转速增大, 最大给进力及最大扭矩增大, 说

明转速越快, 地层岩土体被切割剥落的速度越快, 揭示了旋挖钻进的地层响应特征;

(2) 进一步研究钻进率  $V = 0.2$  m/min、0.4 m/min、0.6 m/min 及 0.8 m/min 时的旋挖钻机钻进过程中的给进力及扭矩变化规律, 对应的最大给进力分别为 200 kN、386 kN、400 kN、520 kN; 对应的最大扭矩分别为 100 kN·m、180 kN·m、275 kN·m、600 kN·m, 表明随着钻进率的增大, 最大给进力和最大扭矩的循环波动频率逐渐增大, 与实际旋挖钻进过程基本吻合, 进一步验证了三维数值模型的可行性;

(3) 提出多因素协同控制的地层强度模型, 监测计算和数值模拟对应工况的给进力分别为 107.44 kN 和 103.69 kN, 验证数值模型的可靠性; 并获得不同随钻参数的地层强度特征值, 对比实测值及监测计算值, 验证地层强度模型的可行性及数值模拟表征地层强度的可靠性;

(4) 基于旋挖钻进三维数值模型分析不同钻进深度的地层强度, 得到 Z5 勘测桩 1# 及 Z6 勘测桩 1# 分别在 5.2 m、10.54 m 时达到并超过持力层单轴抗压强度, 桩嵌入持力层深度分别为 2.80 m、0.46 m, 对比阐明数值模拟实际与设计入岩深度的一致性, 再次验证数值模拟确定地层强度及持力层的合理性, 为实际钻孔的桩长设计提供了科学依据。

## 参考文献 References

- [1] 樊华真. 旋挖钻施工钻孔灌注桩施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 9-12.  
FAN Huazhen. Construction of bored pile by auger drill [J]. Construction Technology, 2014, 43(1): 9-12.
- [2] 余鹏程. 灌注桩旋挖成孔与冲孔的对比分析研究[J]. 建筑施工, 2015, 37(8): 11-13.  
YU Pengcheng. Comparative and analytic study on cast-in-place pile by using rotary drilling or punching formed hole[J]. Building Construction, 2015, 37(8): 11-13.
- [3] 张国平, 乔杰. 建筑工程中岩土勘察技术分析[J]. 科

- 技与企业,2014(10): 357-358.
- ZHANG Guoping, QIAO Jie. Investigation technical analysis of geotechnical in construction engineering [J]. Technology and Enterprise, 2014(10): 357-358.
- [4] XING Haofeng. Centrifuge tests of super large-diameter rock-socketed piles and their bearing characteristics [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 6(19): 1-10.
- [5] 邹泓荣. 复杂地层中钻(冲)孔桩终孔误判的可能性分析[J]. 建筑技术, 2002, 33(4): 263-264.
- ZOU Hongrong. Wrong judgement probability analysis of final hole in boring hole piling in complicated strata[J]. Architecture Technology, 2002, 33(4): 263-264.
- [6] 国家电网基建部. 输电线路专用旋挖钻机:Q/GDW 11388-2015[S]. 北京:国家电网公司, 2015.
- Infrastructure Department of State Grid Corporation of China. Special rotary drilling rig in transmission line: Q/GDW 11388-2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.
- [7] 国家电网基建部. 专用旋挖钻机应用标准化手册[R]. 北京:国家电网公司, 2015.
- Infrastructure Department of State Grid Corporation of China. Standard manual for application of special rotary drilling rig[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.
- [8] 黎中银,夏柏如,吴方晓. 旋挖钻机高效入岩机理及其工程应用[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 121-126.
- LI Zhongyin, XIA Boru, WU Fangxiao. Mechanism of efficient rock cracking and its engineering application of rotary drilling rig[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 121-126.
- [9] 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.
- [10] 黄会荣,贺明辉,张希. 旋挖钻机桅杆瞬态动力学与疲劳研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 445-452.
- HUANG Huirong, HE Minghui, ZHANG Xi. Transient dynamics and fatigue analysis of the mast of rotary drilling rigs [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 445-452.
- [11] 刘春生,李德根. 不同截割状态下镐型截齿侧向力的实验与理论模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2359-2366.
- LIU Chunsheng, LI Degen. Experimental research and theoretical model on lateral force of conical pick under different cutting conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2359-2366.
- [12] YASAR E, RANJITH P G, VIETE D R. An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material[J]. J. Petrol. Sci. Eng., 2011, 76: 185-193.
- [13] 周子龙,刘玉良,赵云龙. 不同围压与不同截齿侵入角作用下镐形截齿破岩数值模拟分析[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(3): 598-603.
- ZHOU Zilong, LIU Yuliang, ZHAO Yunlong. Numerical analysis on breaking rock by pick-shaped cutter at different confining pressure and invasion angle [J]. World SCI-TECH R&D, 2016, 38(3): 598-603.
- [14] SAKSALA T, GOMON D, HOKKA M, et al. Numerical and experimental studies of percussive drilling with a triple-button bit on Kuru granite[J]. Int J Impact Eng, 2014, 72: 56-66.
- [15] LIU Xianshan, XU Ming, QIN Pengwei. Joints and confining stress influencing on rock fragmentation with double disc cutters in the mixed ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 461-474.
- [16] 戴珊珊. 基于 ABAQUS 模拟镐形截齿截割脆性煤岩 [J]. 煤矿机械, 2012, 33(5): 46-48.
- DAI Shanshan. Simulation of brittle coal cutting by conical pick based on ABAQUS [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(5): 46-48.
- [17] 杨世平,余浩. 液压挖掘机动力系统功率匹配及其节能控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 152-160.
- YANG Shiping, YU Hao. Research on power matching and energy saving control of power system in hy-

- draulic excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5):152-160.
- [18] 彭天好,杨华勇. 液压挖掘机全局功率匹配与协调控制[J]. 机械工程学报, 2011, 37(11): 50-53.  
PENG Tianhua, YANG Huayong. Hydraulic excavator overall power match harmony control[J]. Chinese Journal Of Mechanical Engineering, 2011, 37(11): 50-53.
- [19] 邵春,张杰,鄢泰宁. 一种基于全液压力头钻机的钻进参数检测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(3): 77-80.  
SHAO Chun, ZHANG Jie, YAN Taining. A drilling parameter detection method based on hydraulic top-driving rig[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(3): 77-80.
- [20] 焦阳,凌振宝,王君,等. 基于单片机的钻机参数监测仪的研制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(1): 172-176.  
JIAO Yang, LING Zhenbao, WANG Jun, et al. Development of minitor for driller parameters based on single chip microcomputer[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2008, 38(1): 172-176.
- [21] 刘银,曹国宏,鲍亮,等. 微扭矩检测传感器的研究与实践[J]. 煤矿机械, 2012, 33(7): 92-94.  
LIU Yin, CAO Guohong, BAO Liang, et al. Research and practice on sensor of detecting micro torque[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(7): 92-94.
- [22] 赵大军,李文华,孙友宏,等. 工程地球物理勘探随钻测量钻机的研制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1):144-149.  
ZHAO Dajun, LI Wenhua, SUN Youhong, et al. Research on engineering geophysical exploration MWD drilling rig[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(1):144-149.
- [23] 许明,刘先珊,周泽宏,等. 旋挖钻机钻进入岩判定与地层识别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12):3344-3350.  
XU Ming, LIU Xianshan, ZHOU Zehong, et al. Formation identification method based on embedding judgment of rotary drilling rig[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3344-3350.
- [24] WEI M, LI G, SHI H, et al. Theories and applications of pulsed-jet drilling with mechanical specific energy[J]. SPE J. 2016, 21:303-310.
- [25] FENG S, WANG Y, ZHANG G, et al. Estimation of optimal drilling efficiency and rock strength by using controllable drilling parameters in rotary non-percussive drilling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193. 107376.
- [26] CHEN J, YUE Z Q. Ground characterization using breaking-action-based zoning analysis of rotary-percussive instrumented drilling[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2015, 75: 33-43.

(编辑 桂智刚)