

# 隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析

赵大军, 吴金发

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:**川藏铁路隧道工程勘察水平孔工作量大, 钻具阻力大、施工深度大、难度大、孔内事故率高, 现有技术不能满足其隧道工程勘察水平孔施工要求。在充分调研石油、煤炭、地质勘探行业现有水平孔施工技术现状的基础上, 分析了隧道工作勘察绳索取心钻进水平孔钻具的回转及振动的运动规律, 确定了钻杆处于临界弯曲状态下极限弯矩及钻杆失稳变形的临界荷载计算公式, 通过数值模拟的方法初步研究了钻杆所承受的摩阻力。

**关键词:**工程勘察; 水平孔钻进; 绳索取心钻具; 运动与受力分析; 隧道工程; 川藏铁路

**中图分类号:** P634.7; U452.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)11-0012-07

## Analysis of movement and force of horizontal drilling tools for tunnel engineering investigation

ZHAO Dajun, WU Jinfa

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130061, China)

**Abstract:** Many problems were encountered in tunnel engineering investigation for the Sichuan - Tibet Railway project, such as large workload, great resistance to drilling tools, large drilling distance, great drilling difficulty and high down hole incident rate. The existing technology cannot meet the requirements of horizontal hole drilling of the tunnel project. Based on full investigation of the present status of horizontal hole drilling technology in petroleum, coal and geological exploration industries, this paper analyzes the movement law of rotation and vibration of the wire-line core drilling tool for horizontal hole drilling in tunnel exploration, and the critical load calculation formula is developed for the ultimate bending moment with the drill pipe at both the buckling and the critical bending state. The friction resistance on the drilling tool is studied by numerical simulation.

**Key words:** engineering investigation; horizontal hole drilling; wire-line coring tool; movement and force analysis; tunnel engineering; Sichuan - Tibet Railway

### 0 引言

随着我国公路、铁路建设的快速发展,近年来,我国隧道累计总长度年增长率超过 15%<sup>[1]</sup>,2019 年 在建铁路隧道 4281 座,总长 8979 km;至 2019 年 底,我国规划铁路隧道 9603 座,总长 24301 km<sup>[2]</sup>。我国西部大开发战略已进入加速发展阶段<sup>[1]</sup>,西南部山区的隧道数量将会越来越多,西南部山区地理地质环境复杂,受地质构造影响,西南地区的长大隧道数量也会越来越多。限于地质勘探的局限性,隧道掘进线路地质构造不清,隧道施工安全风险较大。在隧道掘进过程中,若不充分重视工程地质条件的

复杂性、多变性、不确定性并及时采取相应预测措施,往往会引发隧道涌水、涌泥甚至塌方等事故,导致隧道阻断,给国民生命财产安全造成巨大的危害。根据国资委数据统计<sup>[3]</sup>,2018 年,全国央企隧道施工中共发生较大事故 22 起,其中有一家企业就占了 8 起,而 7 起就发生在西南地区。沿隧道轴线的水平或近水平孔勘探是探明隧道掘进线路最有效的方法。与垂直孔相比,水平孔钻进施工难度更大<sup>[4]</sup>,具体体现在:(1)水平孔钻进时,钻具重力方向与钻进方向成 90°,易产生孔斜;(2)水平钻孔只能由钻机通过钻杆向钻头施加钻压,钻杆受力大易产生弯曲;

收稿日期:2020-08-31 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.11.003

**作者简介:**赵大军,男,汉族,1964 年生,实验中心主任,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事钻探工程专业的教学、复杂地层钻探技术的研究与科技开发管理工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号,1729333689@qq.com;吴金发,男,汉族,1994 年生,在读博士,地质工程专业,吉林省长春市吉林大学朝阳校区,1549021630@qq.com。

**引用格式:**赵大军,吴金发.隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):12-18,24.

ZHAO Dajun, WU Jinfa. Analysis of movement and force of horizontal drilling tools for tunnel engineering investigation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):12-18,24.

(3) 冲洗液排粉不利, 易在钻孔下部形成岩屑床, 钻机的回转扭矩和给进力大, 长水平孔钻进时钻压不足; (4) 钻孔稳定性差, 卡、埋钻具事故率高; (5) 钻具运动形式复杂, 钻杆折断事故率高。水平孔钻探中, 因钻杆承受的扭矩和给进力过大、排除岩粉不利、易孔斜, 常造成钻杆屈曲、磨损过快、疲劳断裂等问题<sup>[5]</sup>。

由于我国的现有管材规格及材质、机加工精度及热处理水平、钻探设备状况、钻探工艺水平等实际情况<sup>[5]</sup>, 我国水平孔钻探深度较浅, 一般不超过 400 m。2013 年中煤科工集团西安研究院使用 ZDY1000G 型全液压高转速钻机和  $\varnothing 75$  mm 坑道用绳索取心钻具在金大矿完成了一个终孔直径 78.5 mm、终孔深度 401.8 m 的水平取心钻孔的现场试验, 为当时国内水平绳索取心钻孔深度记录<sup>[5]</sup>; 2019 年 10 月, 川藏铁路洛隆段察达隧道勘察钻探中, 西北有色 713 队使用陕西西探地质装备有限公司 XDQ-1200 轻便型钻机施工的水平超前地质预报钻探孔, 75 mm 口径 (NTW 规格) 钻至 750.5 m, 创轻便岩心钻机水平钻探孔当时的国内最深纪录<sup>[6]</sup>。2020 年 1 月 4 日, 四川地矿局 402 队金钻公司在西南某隧道勘察中顺利完成一眼 903.28 m (75 mm 口径) 水平取心钻孔, 创造了目前国内工勘同类钻孔最高孔深纪录。

新建川藏铁路雅安至昌都段, 线路总长 725.84 km, 工程地质钻探孔中, 水平及倾斜钻探工作量占 17707 m, 很多孔深超过 1000 m<sup>[1]</sup>, 设计单位甚至提出了钻探深度超过 2000 m 的要求。为满足铁路隧道长水平孔勘探的需要, 有必要深入分析钻具在孔内的运动及受力情况, 为优化钻探工艺参数、优化钻具结构、提高水平孔钻探深度提供理论基础。

石油钻井行业在管柱力学方面的研究比地质岩心钻探行业成熟先进得多<sup>[7]</sup>。在石油钻井行业, 刘建华<sup>[8]</sup>将水平井钻柱简化为水平旋转梁, 通过实验分析了水平井钻柱的非线性动力学状态, 得出了钻压和转速对水平井钻柱动力学状态的影响规律。范永涛等<sup>[9]</sup>根据相似理论, 模拟研究了钻压和转速对井斜力、方位力、钻头合侧向力及其方向角的影响规律。Wei Li 等<sup>[10]</sup>通过数值模拟与实验研究的方法得出水平井中钻具组合的运动状态分为圆弧式、“8”形和点状圆弧式 3 种。Xianzhi Song 等<sup>[11]</sup>对岩屑床与管体之间的滑动摩擦进行了室内实验研究, 得

到了无量纲埋深和岩屑平均尺寸对管道与岩屑床层间综合滑移摩擦系数的影响规律。Jialin Tian 等<sup>[12]</sup>对钻柱的振动特性进行了分析和实验研究, 得出了井筒随机摩擦力作用下钻柱的动态特性。Dou Xie 等<sup>[13]</sup>开发了一个具有 6 个自由度的水平井钻柱动态模型, 分析了水平井管柱的复杂旋流现象及驱动转速和动摩擦系数对旋流的影响规律。史玉才等<sup>[14]</sup>应用下部钻柱运动状态模拟实验装置, 验证分析了下部钻柱的涡动机理及运动规律。辛亮<sup>[15]</sup>通过模拟研究了水平井钻进中钻具的摩阻问题, 研究得出钻具易发生正弦屈曲、螺旋屈曲、托压效应和井眼不清洁等现象。狄勤丰等<sup>[16]</sup>提出在现有钻具材质及结构条件下, 减少钻柱疲劳破坏的最有效途径是优化钻柱结构和工作参数, 使钻柱保持在低动态应力水平下工作。高德利等<sup>[17]</sup>利用有限差分法和 Newton 迭代法, 计算了斜直井段管柱螺旋屈曲临界力、沿螺旋段分布的管柱与井壁接触力以及后屈曲平均侧向接触力, 分析了钻杆接头对水平井段钻柱屈曲临界力和弯曲应力的影响, 提出了计算钻柱正弦屈曲临界力的新方法。

地质勘探、煤田钻探行业在水平孔钻进钻杆受力的研究方面, 郝世俊<sup>[18]</sup>分析了钻进参数、孔内岩屑对近水平孔轨迹的影响机理。伍增强<sup>[19]</sup>提出为确保煤矿水平孔钻进深度, 应从机具设备选型、钻机功率、钻进工艺参数、钻杆强度及级配、岩石性质、钻头类型等方面进行综合研究。李占锋<sup>[20]</sup>分析了绳索取心钻杆接头直径对钻杆摩擦阻力及钻杆磨损的影响。魏欢欢<sup>[21]</sup>从钻杆结构设计、螺纹设计和材料选择方面进行研究, 开发了坑道水平孔用高强度绳索取心钻杆。姜英健<sup>[22]</sup>对超深井中的钻柱横向振动进行了理论分析, 总结了钻柱横向振动的产生方式、力学规律、影响因素, 并推导出了振动频率方程, 确定了钻柱的共振规律。张明明<sup>[7]</sup>对岩心钻探中钻杆柱的扭转振动形成机理进行了分析, 确定了钻杆在交变弯曲应力、径向周向应力等复合载荷下的裂纹扩展速率, 估算了钻杆的疲劳寿命。艾春娟<sup>[5]</sup>针对我国金刚石绳索取心钻探技术在复杂地层深部钻探中存在的问题, 结合我国现有的实际情况, 制定了适合我国国情的中深孔钻探技术方案。苏继军<sup>[23]</sup>针对绳索取心钻具, 通过结构静力学研究确定了制约钻杆寿命的主要因素, 通过仿真优化设计出了高强度改进型钻具。Lingrong Kong 等<sup>[24]</sup>对双钻杆

反循环水平定向钻井的排粉过程进行了数值模拟和实验研究,确定了双钻杆的水力参数,验证了刀具设计和分级选择的合理性。金新<sup>[25]</sup>借鉴石油钻探、地质钻探方面的先进技术,在钻机选型、钻具选型与改进等方面进行深入研究,形成一套复杂煤层瓦斯抽采近水平孔有效的钻进工艺。王红波<sup>[26]</sup>对铁路深孔勘探钻杆柱的磨损机理与折断形式、钻杆受力进行了深入研究,提出了接头与钻杆、钻杆与孔径的合理比值。王清峰等<sup>[27]</sup>从理论上分析了煤矿用坑道钻杆的加工质量问题和产生断裂的原因、规律及影响最大应力的因素,分析了材质、加工工艺及钻进工艺等因素对钻杆断裂的影响。刘勇等<sup>[28]</sup>分析了水平孔绳索取心钻进时排粉的过程及岩屑对钻具和孔壁的磨损机理。方鹏<sup>[29]</sup>对不同钻进情况下的钻杆柱进行了整体的受力与变形分析,总结了受力与变形的一般性规律,确定了振动固有频率的变化规律。潘德元<sup>[30]</sup>从绳索取心钻杆管柱力学、孔身结构和管柱结构方面进行探讨分析,提出了深孔钻探复合管柱方案。

地质勘探行业在水平孔绳索取心钻进钻杆的运动和受力方面研究较少,在粗径钻具运动规律、钻杆的运行形式、振动规律、钻杆受孔壁和岩屑的摩阻方面还应进一步深入研究,确定出影响钻具摩阻的原因。石油钻井与地质钻探在地层、钻进方法、钻具级配等方面相差较大。石油钻井的环空间隙(钻孔直径与钻杆直径的差值)较大,而地质钻探绳索取心钻探的环空间隙较小。环空间隙对钻杆的运动状态、受力、排粉等影响很大,故可借鉴石油钻井作业的研究成果对地质钻探水平孔绳索取心钻杆的受力进行专门的深入研究。

## 1 水平孔绳索取心钻具的运动分析

钻杆在孔内的运动状态是钻具、孔壁、孔底、冲洗液、岩屑、钻压、转速等相互作用的结果。水平孔钻进中,钻具除承受重力外,还承受回转扭矩、压力、弯曲应力、离心力、涡动力、孔壁的摩擦力、孔底的碎岩阻力、岩屑偏心力、摩擦力、反作用力和反扭矩、冲洗液的压力等。在这些力的综合作用下,钻杆在孔内的运动状态有回转和振动。回转运动包括自转、公转、自转与公转相结合,振动包括横向振动、纵向振动、扭转振动、涡动及其相互之间的耦合振动;钻具在给进压力作用下会发生正弦屈曲或螺旋屈曲。

水平孔钻进中,在重力作用下,钻具、岩屑、冲洗液在钻孔横截面内不对称,如图1所示。钻具的回转运动形式与重力、钻具转速、孔内岩屑量、孔壁与钻具的摩擦力等有关。

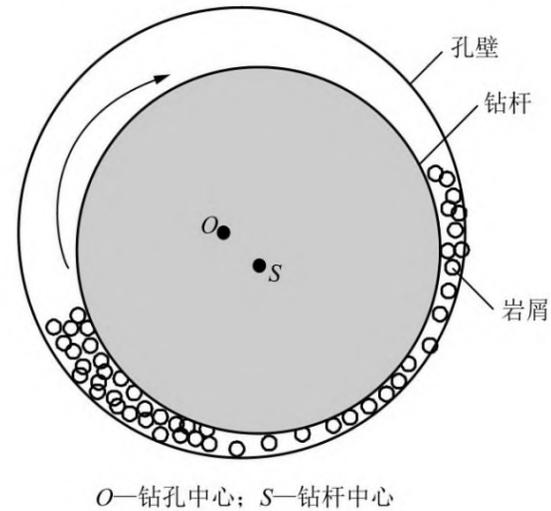


图1 水平孔钻进示意

Fig.1 Schematic diagram of horizontal hole drilling

### 1.1 钻具的回转运动

底部粗径钻具比较短(一般为3 m),排粉比较彻底,在钻头和扩孔器的限位作用下,由于转速不同,钻具回转运动状态可出现圆弧式、“8”字形和圆周式3种。圆弧式运动是在孔壁右下侧左右摆动,主要出现在粗径钻具中段,是重力和孔壁摩擦力共同作用的结果;圆周式,是沿钻孔圆周运动,主要出现在近钻头和近稳定器区域;“8”字形摆动主要出现在交叉区域,是通过其他两种运动的共同扰动而发生的。

上部钻杆在给进压力作用下,会产生正弦屈曲和螺旋屈曲,如图2所示,其半波长从孔口到孔底会逐渐变小。钻杆在孔壁摩擦力作用下会产生与钻杆回转方向相同的涡动。

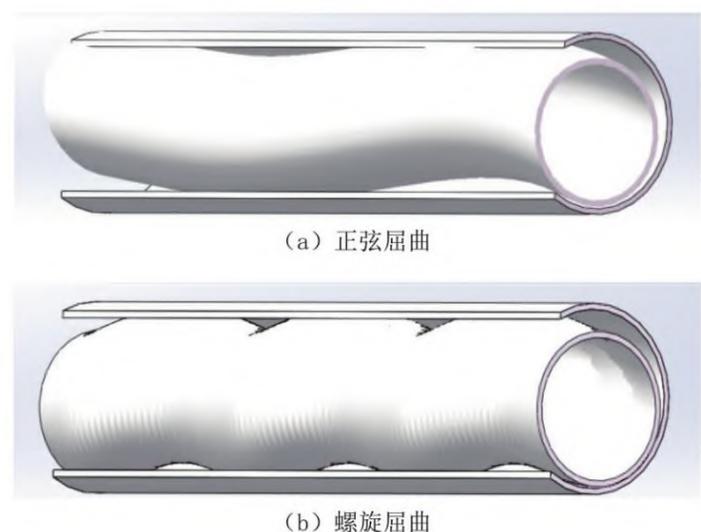


图2 水平孔钻杆的屈曲形式

Fig.2 Buckling form of the drill rod in horizontal holes

一般地,钻具在低转速和高转速时,转动稳定。在转动频率与钻杆固有频率接近时,易产生振动。

## 1.2 钻杆的振动

水平孔钻进中,钻杆在钻头、扩孔器、孔壁、孔底、岩屑的约束下,将水平孔钻杆沿轴线离散为多个空间梁单元,由结构动力学可导出空间杆件振动的有限元方程为:

$$[M]\{\ddot{y}\}+[C]\{\dot{y}\}+[K]\{y\}=[F] \quad (1)$$

式中:[ $M$ ]、[ $C$ ]、[ $K$ ]——分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;{ $\ddot{y}$ }、{ $\dot{y}$ }、{ $y$ }——分别为加速度、速度和位移列阵;[ $F$ ]——载荷列阵。

通过该式可推导计算出钻杆各种振动的固有频率谱。

### 1.2.1 横向振动

从钻杆失效统计上看,横向振动产生的危害要比扭转和纵向振动大很多。影响钻杆横向振动的因素主要有钻杆的横向摆动、屈曲和涡动等,而钻头与孔底和钻杆与孔壁间的作用是钻杆产生横向振动的主要因素。钻杆横向振动的振幅与钻杆固有频率有关,共振时振幅最大。绳索取心钻杆横向振动的各阶固有频率间隔较小,共振区较宽,较低转速时容易产生横向共振。随着钻杆规格、水平孔长度及钻杆轴向压力的增加,钻杆的横向振动固有频率减小。

### 1.2.2 纵向振动

沿钻杆轴线方向的振动为纵向振动。孔底处的纵向振动以波的形式沿钻杆向地面传播,振动达到地面后再沿钻杆回传。在传播过程中,由于钻杆与孔壁的摩擦、冲洗液的阻尼作用等,振幅会逐渐减小。钻杆产生纵向共振与钻杆的材质、几何特性及转速有关,在钻杆的转速与钻杆的固有频率接近时就会产生共振,振幅会大幅增加。随着水平孔长度、钻杆压力的增大,纵向振动的固有频率显著下降。钻杆的曲率半径和钻杆规格对钻杆的纵向振动影响不大。

### 1.2.3 扭转振动

沿钻杆自身轴线回转方向产生的振动为扭转振动,扭转振动主要源于钻头与地层的摩擦及钻杆与孔壁的“粘-滑”。当钻杆发生扭转振动时,钻杆内会产生剪切交变应力,强烈的扭转振动会使钻杆很快破坏。同时也会引起钻头切削齿断裂,是金刚石-硬质合金复合片钻头破坏的主要原因。钻杆的曲率

半径和钻杆规格对钻杆的扭转振动影响不大,随着水平孔长度和压力的增大,扭转振动的固有频率显著下降。

## 2 水平孔钻进钻杆受力数值模拟研究

### 2.1 钻杆临界荷载理论分析

在图 3 中,水平钻杆左端施加恒定钻压  $F_1$ 、恒定转速  $\Omega$  和主动扭矩  $T_1$ ,由于钻柱与孔壁的相互作用,钻柱受到与运动方向相反的摩擦力  $f_1$ 、径向冲击力  $F_2$  和反扭矩  $T_2$ ,由于钻柱与孔底的相互作用,钻柱受到孔底反作用力  $F_3$  和反扭矩  $T_3$ ,钻柱在自身重力  $G$  的作用下,会产生弯曲,贴近孔壁下部。

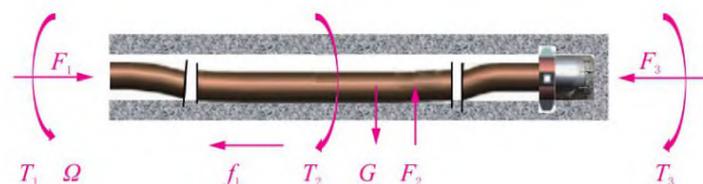


图 3 水平孔钻柱受力分析

Fig.3 Force analysis of the drill string in horizontal holes

水平钻杆在受压之前,在自重的作用下,产生了初弯曲。因此,一开始就处于弯曲平衡状态,失稳时其平衡形式没有发生变化,而其弯曲变形迅速增大。当钻杆处在弯曲平衡状态时,如果钻杆中的最大应力达到其材料的屈服极限时,首先在钻杆的边缘处开始发生塑性变形。若载荷继续增加,则塑性区域不断扩大,弯曲变形也迅速增大,进而出现失稳。因此,为了保证钻杆于弯曲承压状态下正常工作,应将其最大应力达到屈服极限作为判断钻杆工作在临界状态的依据。

临界状态时,钻杆所承受的最大弯矩等于极限弯矩时,钻杆上的极限弯矩  $M_c$  为:

$$M_c = 2I\sigma_s/D \quad (2)$$

式中: $I$ ——截面惯性矩; $\sigma_s$ ——钻杆极限强度; $D$ ——钻杆外径。

临界状态下的临界钻压  $P_{cr}'$  为:

$$P_{cr}' = \left(1 - \frac{EDf_0\pi^2}{2\sigma_s l^2}\right) P_{cr} \quad (3)$$

式中: $E$ ——弹性模量; $f_0$ ——初始变形中点挠度; $l$ ——钻杆长度; $P_{cr}$ ——欧拉临界载荷, $P_{cr} = EI\pi/l^2$ 。

### 2.2 钻杆受摩擦阻力的数值模拟分析

钻杆所受孔壁的摩擦阻力是影响孔底钻压及钻

进深度的关键因素,故现对钻杆所受孔壁的摩擦阻力进行数值模拟研究。

### 2.2.1 建立模型

选取常规  $\text{O}75\text{ mm}$  绳索取心钻具,钻杆端部为平端。结构参数如表 1 所示。

表 1  $\text{O}75\text{ mm}$  绳索取心钻具参数

Table 1 Parameters of  $\text{O}75\text{ mm}$  wire-line core drilling tools

钻杆 单根有效 长度/mm	钻杆体 外径/ mm	钻杆体 内径/ mm	内螺纹 长度/ mm	外螺纹 长度/ mm	接头 外径/ mm	螺纹 锥度
3000	71	61	45	45	71	1 : 27.72

装配体采用 3 根钻杆来模拟钻柱,钻柱外有孔壁。装配体部分剖面如图 4 所示。



图 4 钻柱装配体部分剖面

Fig.4 Partial sectional view of the drill string assembly

将装配体导入 ANSYS Workbench 仿真平台进行模拟。ANSYS Workbench 仿真平台能对复杂机械系统的结构静力学、结构动力学、刚体动力学、流体动力学、结构热、电磁场以及耦合场等进行分析模拟。为计算方便,采用结构静力学进行模拟。钻杆材料为 45MnMoB,孔壁岩石为花岗岩,性能参数如表 2 所示。

表 2 钻杆材料性能参数

Table 2 Property parameters of drill rod material

名称	弹性模量/( $10^{11}\text{ Pa}$ )	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
45MnMoB	2.05	0.29	7800
花岗岩	1.50	0.20	3000

接触定义为 Bonded 和 Frictional,为减小计算量,将螺纹接触全部设置为 Bonded;将钻杆与孔壁的接触全部设置为 Frictional,摩擦系数设置为 0.3。

### 2.2.2 划分网格

为计算方便,采用网格自动划分法,软件根据导入的几何模型自动进行四面体或者扫掠网格划分。设置孔壁单元尺寸为 0.1 m,其余钻头和钻杆采用

单元尺寸为 0.01 m。网格划分后模型部分如图 5 所示。

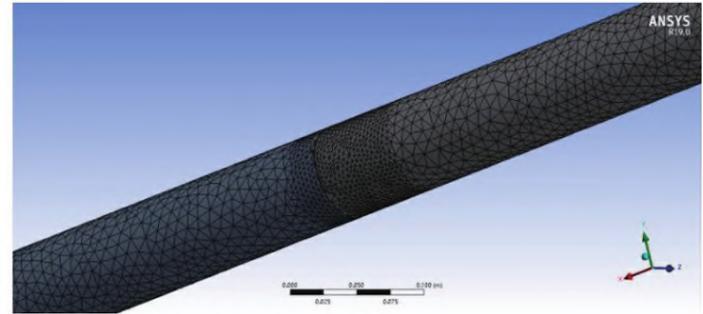


图 5 钻杆模型网格划分

Fig.5 Model meshing of the drill rod

### 2.2.3 荷载和边界条件

水平孔钻杆受到的力包括轴向力、扭矩、离心力、钻杆与孔壁的摩擦力等。为了简化模型只考虑主要的轴向力、扭矩和钻杆与孔壁的摩擦力作用。因此对模型施加恒定钻压  $F_1$  和转速,查看孔底反作用力  $F_3$ ,可得钻杆与孔壁的摩擦阻力  $f_1$ ,即:

$$f_1 = F_1 - F_3 \quad (4)$$

其中孔底反作用力  $F_3 = \sigma m$ ,  $\sigma$  为孔底钻杆前段应力,可由模拟求解,  $m$  为钻杆孔底面积,  $m = 0.001037\text{ m}^2$ 。

图 6 为模型约束和其荷载施加树,由于摩擦系数设置超过 0.2, Analysis Settings 中牛顿迭代法选择非对称收敛;Standard Earth Gravity 的施加说明是考虑重力的;Rotational Velocity 为钻杆转速,水平孔钻进转速一般为 400 ~ 800 r/min; Fixed Support 为对孔壁进行固定,使其无法移动和旋转; Force 为施加钻杆的轴向力,实际隧道勘探水平孔钻进时钻压一般为 8.5 ~ 17.5 kN。

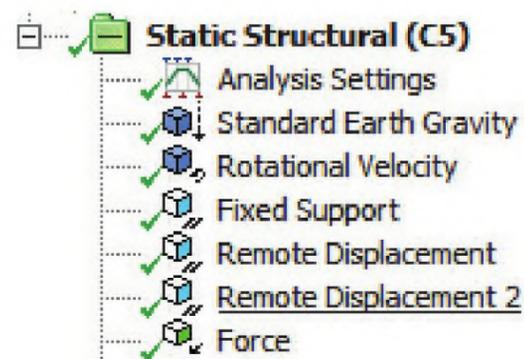


图 6 约束和其荷载施加树

Fig.6 Constraint and its load application tree

### 2.2.4 求解项目

在求解项中添加 Directional Deformation 求解钻杆在  $z$ (重力)方向的运动;添加 Equivalent Stress 求解钻孔底部的应力,从而计算孔底反作用力,即孔

底实际钻压,得出钻杆在钻进过程中受到的摩擦阻力。

### 2.2.5 结果分析

对钻杆施加轴向力和转速后,钻杆在自身重力和周围环境的影响下进行运动,如图 7 为施加 10 kN 轴向力和 600 r/min 转速后,钻杆在  $z$  (重力) 方向的变形,可以看出钻杆产生了弯曲。

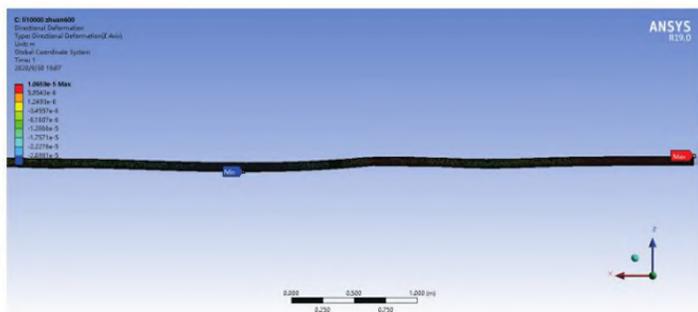


图 7 施加 10 kN 轴向力和 600 r/min 转速后,钻杆在  $z$  (重力) 方向的变形

Fig.7 Deformation of the drill rod in the  $z$  (gravity) direction at 10kN axial force and 600r/min

图 8 为施加 10 kN 轴向力和 600 r/min 转速时的孔底钻杆端面应力图,平均应力为 6.31 MPa,钻杆孔底面积为 0.001037  $\text{m}^2$ ,计算得孔底实际钻压为 6.53 kN,因此摩擦阻力为 3.47 kN。平均每米钻杆承受的摩擦阻力达到 385 N,说明钻杆承受摩擦阻力很大。

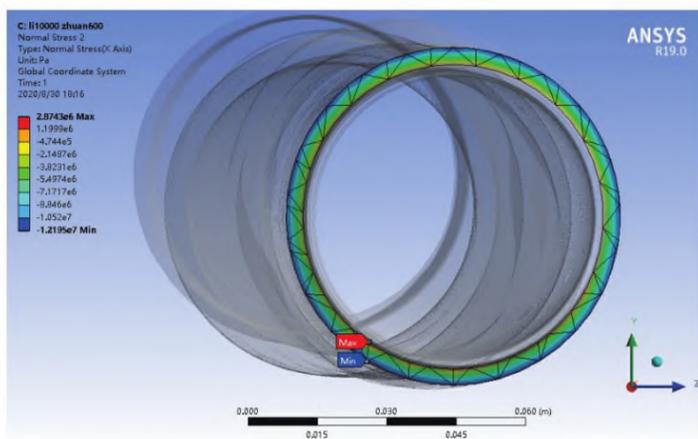


图 8 施加 10 kN 轴向力和 600 r/min 转速后,孔底钻杆端面应力图

Fig.8 End face stress diagram of the drill rod at the bottom of the hole at 10kN axial force and 600r/min

改变轴向力和转速,得到不同钻进参数(给进力、转速)下钻杆受到的摩擦阻力,如表 3 所示。可以看出,给进力对钻杆的摩擦力影响较大。

### 3 结论

(1)隧道工程勘察水平孔施工存在的主要问题:由于孔内岩粉排除困难,孔内易形成岩屑床,岩屑对

表 3 不同钻进参数下钻杆受到的摩擦阻力

Table 3 Frictional resistance on the drill rod at different drilling parameters

给进力/N	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	摩擦阻力/N	给进力/N	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	摩擦阻力/N
8500	600	3187.30	10000	400	3465.50
10000	600	3465.71	10000	500	3465.60
11500	600	3736.24	10000	600	3465.71
13000	600	3969.55	10000	700	3465.81
15500	600	4270.38	10000	800	3466.02

钻杆产生卡阻,增大了钻杆的回转扭矩和给进压力;钻杆重力与钻孔轴线垂直,只能通过钻机施加给进力,钻杆承受压力大;钻杆与孔壁接触压力大,孔壁对钻杆的摩擦阻力大;钻杆易产生屈曲、钻孔易偏斜等;在钻头与孔底、钻杆与孔壁非均匀作用力下,钻杆的振动大,钻具寿命低;由于钻杆强度及钻机能力不足,水平孔钻进深度受限。

(2)水平孔钻进中,由于绳索取心粗径钻具的钻头和扩孔器的导向作用,岩心管在孔内回转运动较稳定,但也存在左右摆动和周向运动现象。钻杆在孔内除有回转运动外,还伴有横向振动、纵向振动和涡动。在与钻杆固有频率相近的转动频率下,钻杆的振幅大幅度增加,会引起钻杆的快速损坏。

(3)给出了绳索取心钻具水平孔钻进的钻具受力模型,确定了钻杆处于临界弯曲状态下钻杆的极限弯矩及钻杆失稳变形的临界荷载计算式。

(4)运用计算机数值模拟的方法,在简化边界条件下初步确定了水平孔钻进  $\text{O}75 \text{ mm}$  绳索取心钻杆所承受的摩擦力及影响的主要因素。

水平孔钻进绳索取心钻具在孔内的运动和受力非常复杂,钻具受到许多不确定性因素的影响,本文只是初步进行了研究。下一步应结合试验手段做进一步的深入研究。

### 参考文献 (References):

- [1] 蒋树屏. 中国公路隧道数据统计[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 643-644.  
JIANG Shuping. China's highway tunnel data statistics[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 643-644.
- [2] 田四明, 巩江峰. 截至 2019 年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 292-297.  
TIAN Siming, GONG Jiangfeng. Statistics of railway tunnels in China as of end of 2019[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 292-297.
- [3] 孟凡滨. 西南山区隧道非煤系地层超前地质钻探预报[J]. 居舍, 2019(4 上): 184, 20.

- MENG Fanbin. Advance geological drilling forecast of non-coal stratum in tunnels in southwest mountain area[J]. House Magazine, 2019(4):184,20.
- [4] 王光明,熊德全.金沙江其宗水电站水平孔钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):49-52.  
WANG Guangming, XIONG Dequan. Study on drilling technology for horizontal hole in Qizong Hydropower Station of Jinsha River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):49-52.
- [5] 艾春娟.复杂地层中深部绳索取心钻杆及钻具的改进研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.  
AI Chunjuan. Research on improvement of wier-line core drilling rod and drilling tool in the middle and deep part of complex stratum[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.
- [6] 董朝晖,朱格涛,罗帅训,等.在世纪工程川藏铁路建设中,便携式钻机不断刷新着纪录[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):13.  
DONG Chaohui, ZHU Getao, LUO Shuaixun, et al. In the construction of the Sichuan-Tibet Railway, a century project, portable drilling rigs constantly set new records[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):13.
- [7] 张明明.岩心钻探中钻杆扭转振动特性分析及其应用[D].成都:成都理工大学,2006.  
ZHANG Mingming. Analysis of torsional vibration characteristics for the drill pipe in core drilling and related applications [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [8] 刘建华.管内水平旋转梁动力学试验装置研制与实验分析[D].大庆:东北石油大学,2016.  
LIU Jianhua. Development and experimental analysis of a dynamics testing apparatus of horizontal rotating beam in pipe [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [9] 范永涛,高德利,张辉,等.底部钻具组合力学特性模拟试验研究[J].石油钻探技术,2013,41(3):80-84.  
FAN Yongtao, GAO Deli, ZHANG Hui, et al. Simulation and experimental research on mechanical properties of bottom hole assembly[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3):80-84.
- [10] Wei Li, Genlu Huang, Hongjian Ni, et al. Modeling and experimental study on motion states of laboratory-scale bottom hole assembly in horizontal wells[J]. Energies, 2020,13(4): 1-16.
- [11] Xianzhi Song, Zhaoyu Pang, Zhengming Xu, et al. Experimental study on the sliding friction for coiled tubing and high-pressure hose in a cuttings bed during microhole-horizontal-well drilling[J]. SPE Journal, 2019,24(5):2010-2019.
- [12] Jialin Tian, Yinglin Yang, Lin Yang. Vibration characteristics analysis and experimental study of horizontal drill string with wellbore random friction force[J]. Arch. Appl. Mech., 2017,87(9):1439-1451.
- [13] Dou Xie, Zhiqiang Huang, Yachao Ma, et al. Nonlinear dynamics of lump mass model of drill-string in horizontal well [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020,174: 105450.
- [14] 史玉才,王军,管志川.下部钻柱涡动机理及规律的实验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2007,32(2):126-129.  
SHI Yucui, WANG Jun, GUAN Zhichuan. Research on whirling mechanism of bottom drill string and its rules by inner simulated experiments[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2007,32(2):126-129.
- [15] 辛亮.致密砂岩油藏水平井低摩阻导向钻具组合优选[D].西安:西安石油大学,2017.  
XIN Liang. Optimization of low drag-steering hole assembly for horizontal wells in tight sandstone reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [16] 狄勤丰,王文昌,胡以宝,等.钻柱动力学研究及应用进展[J].天然气工业,2006,26(4):57-59.  
DI Qinfeng, WANG Wenchang, HU Yibao, et al. Progress in research and application of drilling string dynamics[J]. Natural Gas Industry, 2006,26(4):57-59.
- [17] 高德利,高宝奎.水平井段管柱屈曲与摩阻分析[J].石油大学学报(自然科学版),2000,24(2):1-3.  
GAO Deli, GAO Baokui. Effects of turular buckling on torque and drag in horizontal well[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2000, 24(2):1-3.
- [18] 郝世俊.近水平孔轨迹受控方法及受控机理[D].北京:煤炭科学研究总院,2001.  
HAO Shijun. Method and mechanism of near-horizontal hole trajectory control[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2001.
- [19] 伍增强.MC-DF29断层探测孔水平定向钻进技术研究[D].西安:西安科技大学,2014.  
WU Zengqiang. Study on horizontal directional drilling in the MC-DF29 fault detection hole[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [20] 李占锋.地表近水平孔绳索取心工艺钻探实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):48-50.  
LI Zhanfeng. Drilling practice of wire-line core drilling in quasi-horizontal hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(1):48-50.
- [21] 魏欢欢.坑道高强度绳索取心钻杆研制及应用[J].煤炭技术, 2019,38(8):181-183.  
WEI Huanhuan. Development and application of high strength wire line drill rod[J]. Coal Technology, 2019, 38(8):181-183.
- [22] 姜英健.超深井中钻柱横向振动特性分析[D].北京:中国地质大学(北京),2011.  
JIANG Yingjian. The research & analysis of the drill string's lateral vibration in ultra-deep well[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [23] 苏继军.金刚石绳索取心钻杆接头螺纹的优化研究[D].长春:吉林大学,2005.  
SU Jijun. The optimization study of the joint-thread of diamond wire-line taking-coring drill pipe[D]. Changchun: Jilin University, 2005.

- [8] 庞茂安.适用于孔缝漏失地层防漏水泥浆体系研究等[D].成都:西南石油大学,2013.  
PANG Maoan. Study on antileakage cement slurry for porosity-fracture type leak formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [9] 陈晓华,邱正松,杨鹏,等.基于 ABAQUS 的裂缝性漏失过程动态模拟研究[J].钻井液与完井液,2019,36(1):15-19.  
CHEN Xiaohua, QIU Zhengsong, YANG Peng, et al. Dynamic simulation of mud losses into fractured formations using ABAQUS software[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019,36(1):15-19.
- [10] 李砚智,张长茂,张平.漏失量较大地层“戴帽”固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):41-45,50.  
LI Yanzhi, ZHANG Changmao, ZHANG Ping. Top fill cementing technology for large loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):41-45,50.
- [11] 李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,7(22):47-50.  
LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,7(22):47-50.
- [12] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.  
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin. Drilling fluid and slurry in geotechnical engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [13] 周亮.煤系地层护壁堵漏钻井液配制技术探讨[J].中国煤炭地质,2009,21(S2):120-122.  
ZHOU Liang. Discussion on preparation of borehole wall protecting and leak plugging drilling fluid in coal measures strata[J]. Coal Geology of China, 2009,21(S2):120-122.
- [14] 汪荣鑫.数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,1986.  
WANG Rongxin. Mathematical statistics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [15] 李炜,李瑾,陈英,等.正交实验法优选沙棘果油的提取工艺[J].西北药学杂志,2017,32(4):49-52.  
LI Wei, LI Jin, CHEN Ying, et al. Optimization of the extraction process of sea buckthorn pulp oil from Hippophae rhamnoides L. by orthogonal test[J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2017,32(4):49-52.
- [16] 伍永平,罗宇恩,贺圣林.基于正交实验法的坡体安全系数影响因素分析[J].煤炭技术,2019,38(12):76-79.  
WU Yongping, LUO Yuen, HE Shenglin. Analysis of factors affecting slope safety factor based on orthogonal experimental method[J]. Coal Technology, 2019,38(12):76-79.

(编辑 韩丽丽)

## (上接第 18 页)

- [24] Lingrong Kong, Yu Wang, Bohong Wu, et al. Simulation and experimental study on cuttings-carrying for reverse circulation horizontal directional drilling with dual drill pipes [J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 6262308.
- [25] 金新.两淮矿区复杂煤矿瓦斯抽采 PVC 筛管完孔技术研究 [D].成都:成都理工大学,2012.  
JIN Xin. Study on the technology of gas drainage PVC sieve pipe hole in complex coal mine in Two Huai Mining Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [26] 王红波.铁路深孔勘探钻进钻杆柱的磨损与折断研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2007.  
WANG Hongbo. Research on wear and fracture of drill strings for railway deep hole exploration drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2007.
- [27] 王清峰,陈松林.煤矿用坑道钻机钻杆断裂原因分析及采取的措施[J].煤矿机械,2007,28(6):148-150.  
WANG Qingfeng, CHEN Songlin. Analysis on cause and prevention measures of drilling pipe rupture of coal roadway drilling machine[J]. Coal Mine Machinery, 2007,28(6):148-150.
- [28] 刘勇,常江华.某金矿水平绳索取心钻进钻头选型及试验分析 [J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):73-75.  
LIU Yong, CHANG Jianghua. Selection of horizontal wire-line coring bit in a gold mine and the test analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(7):73-75.
- [29] 方鹏.勘查钻进钻杆的实验模型与仿真分析[D].武汉:中国地质大学(武汉),2007.  
FANG Peng. Experimental model and simulation analysis on drill pipe of the reconnaissance drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2007.
- [30] 潘德元.绳索取心钻杆管柱的力学分析与优化设计[D].武汉:中国地质大学(武汉),2011.  
PAN Deyuan. The mechanical analysis and optimization design of wire-line coring drill string[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2011.

(编辑 周红军)