

# 水平定向穿越扩孔孔形沉降量预测\*

艾志久<sup>1</sup>, 秦浩<sup>1</sup>, 舒建华<sup>2</sup>, 刘旭<sup>1</sup>

(1.西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500; 2.中石化天然气川气东送管道分公司, 武汉 430000)

**摘要:**在非开挖水平定向穿越的扩孔过程中, 由于扩孔器自身重量, 扩孔孔眼的剖面通常不是理论上的圆形, 而是水滴形、梨形、葫芦形等多种形状, 这容易导致定向钻的实际轨迹与设计轨迹存在偏差, 出现孔眼垮塌和卡钻等现象, 严重影响正常的管道回拖。该文采用有限元方法对扩孔过程进行了数值模拟, 利用单齿正交切削岩土的分析解验证了模型的可靠性, 得到了扩孔器钻进速度, 旋转速度与其下沉量之间的关系, 结果表明扩孔器在扩孔施工中, 扩孔器会随着扩孔位移的增大而出现下沉现象, 钻头的钻进速度增大, 扩孔器的下沉量会增加, 在一定范围内, 扩孔器旋转速度增大, 扩孔器的下沉量将会减小。针对扩孔器不同的钻进速度与旋转速度, 合理选择两者之间的匹配关系, 可以使孔形得到优化。

**关键词:**水平定向钻; 扩孔; 数值模拟; 轨迹预测

中图分类号: TE929

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)02-0477-06

## Settlement Prediction of Hole Shape in Horizontal Directional Drilling and Reaming

Ai Zhijiu<sup>1</sup>, Qin Hao<sup>1</sup>, Shu Jianhua<sup>2</sup>, Liu Xu<sup>1</sup>

(1. Mechanical Electrical Engineering school, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R. China;

2. Sinopec Natural Gas Sichuan Gas Transmission Pipeline Branch, Wuhan 430000, P.R. China)

**Abstract:** In the reaming process under horizontal directional crossing, because of the self-weight of the reamer, the profile of the bore hole usually is not circular in theory, but the teardrop shaped, pear shaped, gourd shaped and a variety of shapes. It is easy to cause deviation of the actual trajectory and design trajectory in directional drilling, besides hole collapse, deviation and sticking could exist in that case, which seriously affects the pipeline dragging back. In this paper, the finite element method was used to simulate the reaming process, and single tooth orthogonal cutting rock and soil analytical solution was verified the reliability of the model, getting the relationship between reamer drilling speed, rotation speed and sinking. The results show that reamer will sink with the reamer displacement increases. Reamer sinks quicker with greater speed of the reamer. In a certain range, the reaming rotation speed is greater, the reamer sinking amount will decrease. The shape can be optimized, when choosing reasonable matching relationship between the reamer drilling rate and rotation speed.

**Keywords:** horizontal directional drilling; reaming; numerical simulation; trajectory prediction

\* 收稿日期: 2017-10-18(修改稿)

作者简介: 艾志久(1954-), 男, 河北昌黎人, 教授, 博士生导师, 主要从事石油天然气装备及油气井安全工程方面的研究与教学工作。E-mail: aizhijiu123@vip.sina.com

通讯作者: 秦浩(1990-), 男, 四川广安人, 硕士生, 主要从事石油天然气装备设计方面的研究。

E-mail: qinhaohao163@163.com

基金项目: 中石油管道建设课题(2011B-3303)

## 0 引言

现代地下管线非开挖施工技术是利用岩土钻掘等技术手段,在不挖地表的条件下进行管线的铺设、更换或修复的一项施工新技术<sup>[1]</sup>。在进行大口径管道的定向穿越施工中,在绝大多数土层、砂层等承载力较差地质条件下,水平定向扩孔孔眼的剖面不是理论上的圆形,而是水滴形、梨形、葫芦形等多种形状<sup>[2]</sup>,这容易导致定向钻的实际轨迹与设计轨迹存在偏差,出现孔眼垮塌和卡钻等现象,严重影响正常的管道回拖。

在关于定向穿越扩孔钻进的研究中,楼岱莹<sup>[2]</sup>、刘艳利等<sup>[3]</sup>、李山<sup>[4]</sup>和贾彦杰等<sup>[5]</sup>都只对扩孔后孔眼孔形进行了定性的说明,并没有对其进行定量的分析,并且在穿越工程中孔眼周围的岩土力学行为的研究中,几乎所有的研究者都是针对圆形孔眼进行的解析法、数值法和实验法分析,没有结合工程中孔眼为椭圆形的现状。对扩孔形状的研究,有利于孔形的控制和优化,为工程施工及后续研究提供理论依据。

本文采用数值模拟方法,对扩孔过程进行了有限元分析<sup>[6]</sup>,通过与现有单齿正交切削岩土的三维力学计算模型进行对比,验证了该有限元模型的准确性与可靠性,最后,运用该模型进行了不同工况下扩孔器沉降量的规律预测分析。

## 1 扩孔理论模型

在回拖扩孔过程中,扩孔器对岩土的切削性能对扩孔效率有很大的影响,图1为扩孔器工作时的受力简图,在分析扩孔钻进时岩土切削的力学特性时,贾彦杰等<sup>[5]</sup>综合考虑岩土与切削齿面之间的接触摩擦及岩土剪切区的剪切作用,推导了不同岩土材料下单齿正交切削岩土的解析解。

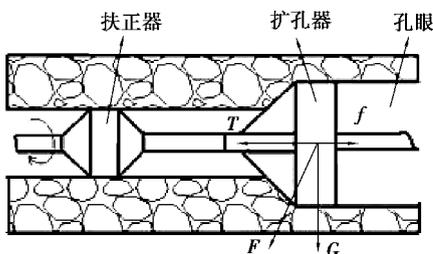


图1 扩孔器—岩土系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of reamer-rock system

如图2所示为单齿正交切削时的剪切平面。岩屑部分与切削齿面的接触面受到的正压力 $\vec{F}_{nj}$ 和摩擦力 $\vec{F}_f$ 的作用,其合力为 $\vec{F}_{jf}$ ,剪切平面上有正压力 $\vec{F}_{ns}$ 和剪切力 $\vec{F}_s$ ,其合力为 $\vec{F}_{ns}$ ;  $\varphi$ 为被切削岩土材料的剪切角。

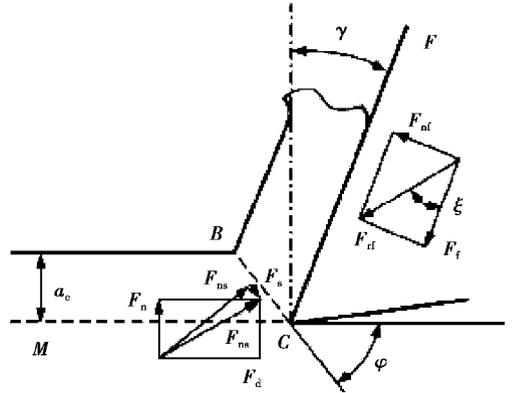


图2 剪切平面

Fig. 2 Shear plane

根据静力平衡和岩土材料修正的线性Drucker-Prager模型可以得到剪切平面上的剪切力,有:

$$F_{ns} = \frac{\tau_0 S_s \sin \Omega}{\cos \Omega - m \sin \Omega} \quad (1)$$

$$F_{jf} = \frac{\tau_0 S_s}{\cos \Omega - m \sin \Omega} \quad (2)$$

式中: $S_s$ 为剪切平面的面积, $\Omega = \gamma + \varphi + \xi$ ,其中, $\varphi$ 为被切削岩土材料的剪切角, $\gamma$ 为切削齿的齿前角; $\xi$ 为岩土切削与单齿切削表面之间的摩擦角; $m = -\sqrt{6}\alpha$ , $\alpha$ 是与岩土材料粘聚力和内摩擦角相关的参数。

将切削齿上的合力 $\vec{F}_{jf}$ 向切削速度方向和切削平面的法向方向投影,得到的分力分别为切削力 $\vec{F}_d$ 和切削平面的法向力 $\vec{F}_n$ :

$$F_d = F_{jf} \cos(\xi - \gamma) = \frac{\tau_0 S_s \cos(\xi - \gamma)}{\cos \Omega - m \sin \Omega} \quad (3)$$

$$F_n = F_{jf} \sin(\xi - \gamma) = \frac{\tau_0 S_s \sin(\xi - \gamma)}{\cos \Omega - m \sin \Omega} \quad (4)$$

## 2 数值模拟和验证

### 2.1 岩土-扩孔器模型

在岩土模型中,上一级的孔眼半径为0.46 m,

扩孔半径为 0.53 m。为了消除模型尺寸和回拖时孔形状对应力分布产生的影响,选取孔壁上下左右尺寸分别为回拖孔半径的 6 倍,故岩土模型横切面长、宽均为 3.4 m,纵向长度为 15 m。扩孔器与地层均采用显式 3D 应力缩减积分单元,该单元在求解地层岩土失效与岩土去除等高度非线性问题上优势明显<sup>[7-8]</sup>。为减小计算量,孔眼附近进行网格加密,图 3 为岩土模型。

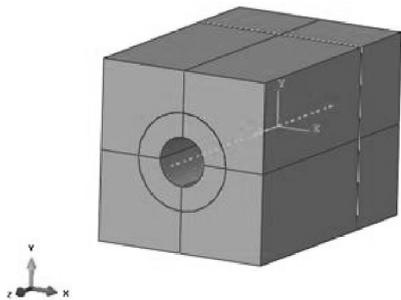


图 3 岩土模型

Fig. 3 Rock and soil model

常见的扩孔器有翼状扩孔钻头、螺旋形扩孔钻头、凹槽状扩孔器、牙轮式扩孔钻头、环刀型扩孔钻头、双向纺锤型扩孔钻头和粗径钻具型扩孔钻头。因为翼状扩孔钻头的旋转阻力低,扩孔速度快,保直能力好,适用于较硬土层<sup>[9]</sup>,故本文对翼状扩孔钻头中的板桶式扩孔钻头进行建模。扩孔器的最大外径为需扩孔眼直径,为 1.06 m,如图 4 所示为板桶式扩孔钻头模型。对于扩孔器上的切削齿,由于穿越深度一般在 0~100 m 之间<sup>[10]</sup>,穿越的深度非常浅,而工程施工中所遇岩土多为粉黏土或粉土,基本是新生代第四纪形成的地层,相对于这些岩土层而言扩孔器的硬度很大,故将扩孔器钻头处理成刚体,扩孔器前端为钻杆。

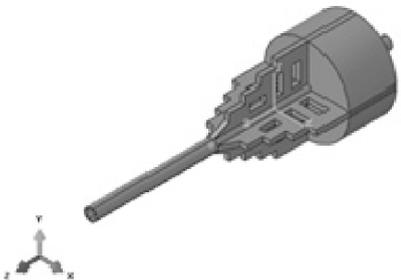


图 4 扩孔器模型

Fig. 4 Reamer model

## 2.2 材料定义

岩土层材料本构采用 Drucker-Prager 模型<sup>[11-13]</sup>。岩土的参数如表 1 和表 2 所示。将扩孔器与钻杆的材料等效为钢,其密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>。切削齿的弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3<sup>[6]</sup>。表 3 为扩孔器切削齿的参数。

表 1 岩土参数表

Table 1 Parameters of rock and soil

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	粘聚力 $c/\text{KPa}$	泊松比 $\nu$
2 700	4.137	47	0.15
内摩擦角 $\xi/(\text{°})$	膨胀角 $\varphi/(\text{°})$	摩擦系数 $f$	流动应力比 $i$
20	20	0.45	1

表 2 D-P 模型硬化参数

Table 2 Hardening parameters of D-P model

屈服应力/MPa	塑性应变
26.21	0
26.5	0.005
27	0.08

表 3 切削齿的参数

Table 3 Parameters of cutting teeth

齿前角 $\gamma/(\text{°})$	齿宽 $\alpha_w/\text{m}$	切深 $\alpha_c/\text{m}$
0	0.04	0.07

## 2.3 载荷与边界条件

### 2.3.1 分析步

Step1:模拟扩孔器初始状态和岩土初始地应力分布。对扩孔器和钻杆施加重力加速度 9.8 m/s<sup>2</sup>,模拟扩孔器和钻杆的自重;对岩土模型的前表面施加水平侧压 2.5 MPa,上表面施加方土体压力 1.65 MPa,模拟岩土初始地应力。

Step2:分析扩孔器钻进速度和自转速度对孔形下沉量的影响。岩土的初始地应力与扩孔器—钻杆重力加速度保持不变。设置钻杆端面在 Z 方向上的位移和角速度约束。

### 2.3.2 接触和边界条件

扩孔器前后连接钻杆,钻杆与扩孔器之间属于螺纹连接,钻杆的后端面与扩孔器的前端面位移保持一致,在扩孔器前端面上设置参考点,将钻杆后端面与该参考点耦合。为了减少运算量,采用边界约束的作用代替扶正器效果,因此,本模型中将扶正器简化为 $X$ 、 $Y$ 两个方向的位移约束。

岩土模型的底面设为固定约束,岩土模型的上表面和两侧面为自由表面,默认模型分析初始状为扩孔器已经进入孔内完成了部分扩孔,因此岩土内部尺寸右边为已扩直径,左边为上一级扩孔直径。图5为扩孔器岩土网格剖面模型。

对扩孔器和孔壁之间设置面面接触,切削齿的外表面为主接触面,在扩孔作用下将发生变形的物体为从接触面,并设定扩孔器和岩土之间的滑动摩擦系数为0.2。

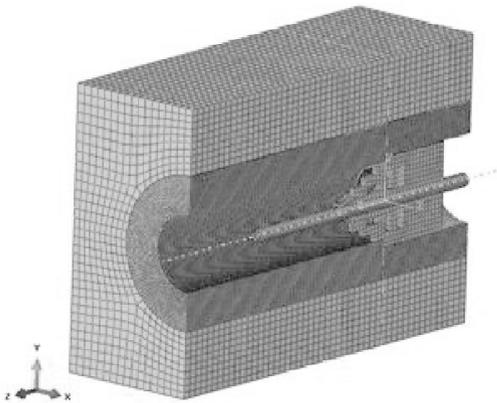


图5 扩孔器-岩土网格模型

Fig. 5 Mesh model of reamer-rock and soil

### 2.4 数值模拟结果验证

为了模拟单齿正交切削状态,将扩孔器的旋转速度设为 $\omega=0$  rad/s,当钻进速度 $v=0.01$  m/s时,扩孔器前进过程中的地层应力变化云图如图6所示,在此时扩孔器进入地层的最大应力为31.72 MPa。

对于切削齿切下的岩土碎片,预先设定失效准则的临界值,当材料退化到临界值时,软件则判断该单元已经失效,自动删除失效单元。在切削过程中,岩土单元由弹性阶段经塑性阶段到损伤阶段的变化过程中,切削齿会受到变载荷的作用,图7即为齿前角为 $0^\circ$ 时候的切削齿上主切削力随时间的

变化曲线和理论三维模型下的主切削力对比图。由图可以看出,仿真中的主切削力处于波动状态,其平均值为173 N,与理论解的186 N非常接近,相差仅为7%。这说明本岩土模型在一定程度上具有较高的可靠性。

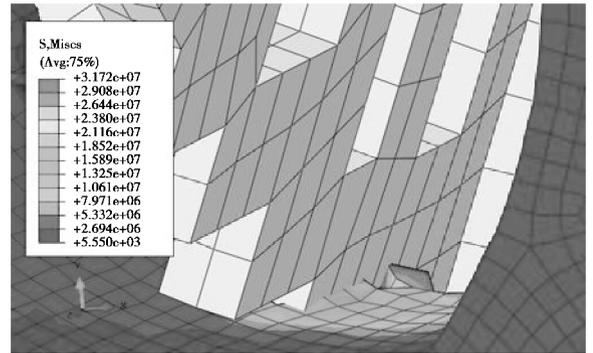


图6 扩孔器切削时岩石的应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of rock when reamer cutting

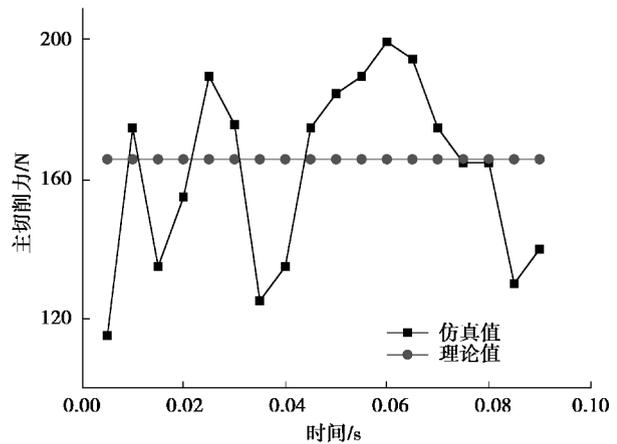


图7 仿真结果与理论值对比图

Fig. 7 Comparison of simulation results with theoretical values

## 3 孔形偏移影响规律分析

### 3.1 孔眼横向偏移和纵向偏移

当扩孔器转速 $v=0.01$  m/s、旋转速度为 $\omega=3$  rad/s时,如图8所示为扩孔器扩孔过程中钻头的纵向偏移和横向偏移随着扩孔器钻进位移变化出现的情况。扩孔过程中扩孔器与地层接触不连续,产生振动的同时,将会出现钻进中心偏移。由图8可以看出,最大纵向偏移距离达到了0.013 m,也即是扩孔器下沉了0.013 m,扩孔器的最大横向位移达到了0.009 m。

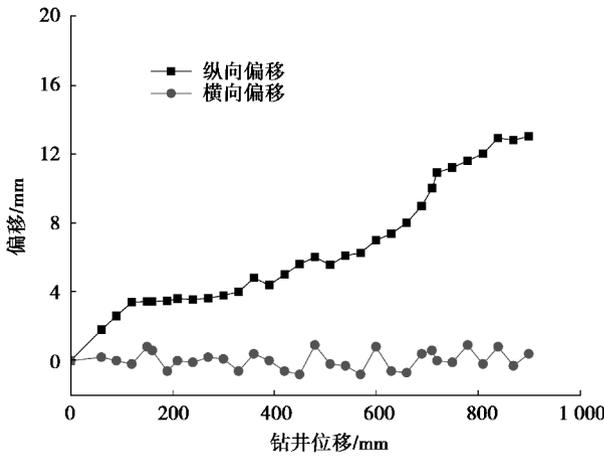


图8 横向与纵向位移-钻进位移曲线

Fig. 8 Curves of horizontal displacement and vertical displacement

### 3.2 扩孔器钻速和钻进速度对孔眼偏移的规律

(1)为了得到钻头钻进速度对扩孔器下沉量的影响,在数值模拟的工况中,将扩孔器旋转速度固定为  $\omega = 3 \text{ rad/s}$ ,通过改变扩孔器的钻进速度得到钻进速度与下沉量之间的关系。钻进速度分别取为  $4 \text{ mm/s}$ ,  $6 \text{ mm/s}$ ,  $8 \text{ mm/s}$ ,  $10 \text{ mm/s}$ ,  $12 \text{ mm/s}$ 。不同钻速下的沉降量曲线图如图9所示。

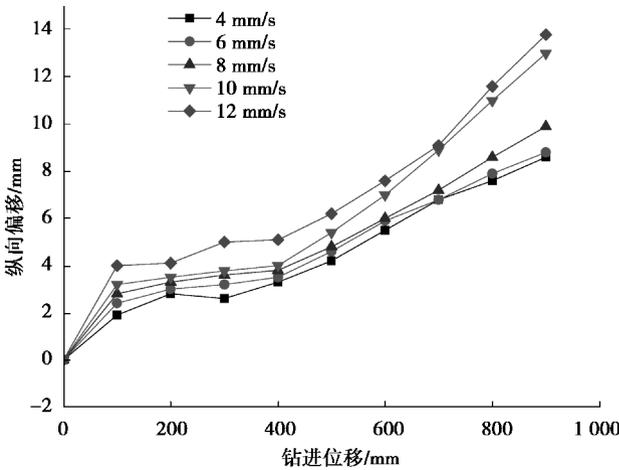


图9 不同钻进速度下扩孔器的下沉量

Fig. 9 Different subsidence of reamer under different speed

由图9看出,扩孔器钻进的速度越大,扩孔器振动的频率越高,增加了单位时间对穿越地层的切削作用,纵向位移将增大,扩孔器下沉量加剧。

(2)为了得到钻头旋转速度对扩孔器下沉量的影响,在数值模拟的工况中,将扩孔器钻进速度固定为  $\nu = 10 \text{ mm/s}$ ,通过改变扩孔器的旋转速度得到旋转速度与下沉量之间的关系,旋转速度分别取

为  $2 \text{ rad/s}$ ,  $2.5 \text{ rad/s}$ ,  $3 \text{ rad/s}$ ,  $3.5 \text{ rad/s}$ ,  $4 \text{ rad/s}$ 。不同旋转速度下的沉降量曲线图如图10所示。

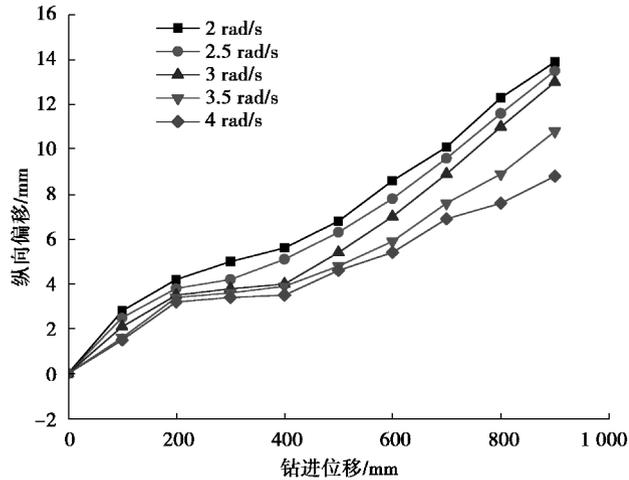


图10 不同旋转速度下扩孔器的下沉量

Fig. 10 Subsidence of the reamer under different rotation speed

由图10可以知道,扩孔器的旋转速度越大,孔眼在纵向上的位移越小,即在一定范围内提高扩孔器的旋转速度,有利于减小扩孔器的下沉量。

为了衡量扩孔器下沉量的大小,用单位位移沉降量的大小来表示下沉程度,图11即为不同钻进速度和不同旋转速度下,扩孔器在单位位移上的下沉量趋势图。由图11可以看出,单位位移上的沉降量随着扩孔器钻进速度的增大呈现出上升趋势;在旋转速度上,单位位移上的沉降量会随着扩孔器旋转速度的增大而减小。在两条曲线的交点处,可以作为施工中扩孔器扩孔时的速度控制的理论参考值,有利于控制孔眼形状。

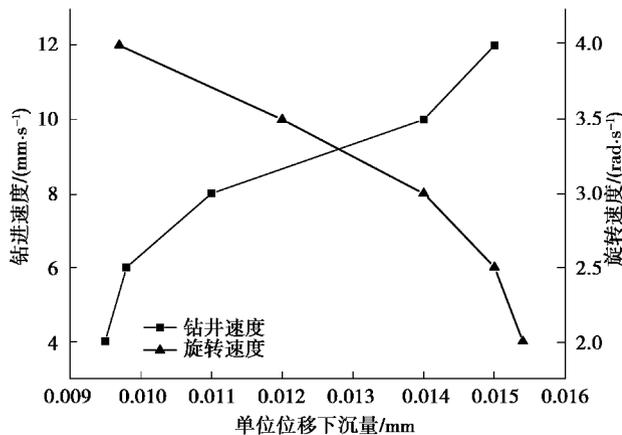


图11 单位位移下扩孔器的下沉量

Fig. 11 Subsidence under unit displacement of reamer

## 4 结论

水平定向扩孔的孔形问题是工程中经常遇到的又是必须考虑的实际问题。通过有限元数值模拟软件模拟了扩孔过程,得出了如下结论:

(1)通过单齿正交切削岩石的解析解验证了有限元模型的可靠性,充分说明了在求解地层岩石失效与岩石去除等高度非线性问题上,有限元方法具有一定的优势。

(2)在扩孔器扩孔的过程中,除扩孔器的自重外,扩孔器的钻进速度和旋转速度对孔形的下沉量有显著的影响。扩孔过程中,扩孔器的下沉量会随着其钻进速度的增大而增大,但随着扩孔器旋转速度的增大,下沉量反而会减小。

(3)在扩孔器钻进的单位位移上,下沉量会随着钻进速度的增加呈现上升趋势,下沉量会随着扩孔器自转速度的增加呈下降趋势,在上升趋势与下降趋势的交点处,可作为扩孔器运动参数的最优理论值。

### 参考文献(References)

- [1] 杨刚.油气管道定向穿越施工中钻杆的分析与应用研究[D].西安:西安石油大学,2014.(Yang Gang. A Study and analysis on drill rod in oil-gas pipeline HDD crossing[D]. Xian: Xi'an Shiyu University,2014.(in Chinese))
- [2] 楼岱莹.大口径管道定向钻穿越扩孔施工的技术探讨[J].非开挖技术,2009(4):13-16.(Lou Daiying. Large diameter pipeline directional drilling reaming technology study[J]. trenchless technology,2009(4): 13-16.(in Chinese))
- [3] 刘艳利,王宝忠,赵慧玲,等.西二线渭河水平定向钻孔洞剖面质量控制[J].油气储运,2014,33(4):433-436.(Liu Yanli, Wang baozhong, Zhao Huiling, et al. Quality control of hole profile of Weihe River crossing with horizontal [J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2014,33(4):433-436.(in Chinese))
- [4] 李山.水平定向钻进中的几个重要技术问题:兼谈《水平定向钻进管线铺设工程技术规范》[J].非开挖技术,2006(1):1-6.(Li Shan. Several important technical problems in horizontal directional drilling: horizontal directional drilling pipe laying on engineering technical specifications [J]. Trenchless Technology, 2006(1):1-6.(in Chinese))
- [5] 贾彦杰,蒋平,童华.基于Drucker-Prager准则的扩孔

- 器单齿正交切削岩石三维力学模型[J].岩土力学,2013(5):1429-1436.(Jia Yanjie, Jiang Ping, Tong Hua. 3D mechanical modeling of soil orthogonal cutting under a single reamer cutter based on Drucker-Prager criterion[J]. Rock and Soil Mechanics,2013(5):1429-1436.(in Chinese))
- [6] 彭旭,胡文礼,艾志久,等.软硬交接地层导向孔钻进轨迹预测[J].石油矿场机械,2013,42(7):19-22.(Peng Xu, Hu Wenli, Ai Zhijiu, et al. Prediction of guide hole drilling trajectory of hard and soft staggered formation[J]. Oil Field Equipment,2013,42(7):19-22.(in Chinese))
- [7] Abaqus Documentation. ABAQUS analysis user's manual[M].2012.
- [8] 温纪宏,陈国明,畅元江,等.隔水导管螺纹接头连接性能研究[J].石油矿场机械,2012,41(12):17-20.(Wen Jihong, Chen Guoming, Chang Yuanjiang, et al. Study on connection behavior of riser thread connector[J]. Oil Field Equipment,2012,41(12):17-20.(in Chinese))
- [9] 揣东明.水平定向钻进扩孔器结构设计方法及新产品设计[D].成都:成都理工大学,2011.(Chuai Dongming. Horizontal directional drilling reamer design method and new product design[D].Chengdu: Chengdu University of Technology,2011.(in Chinese))
- [10] 刘海龙.油气管道水平定向钻穿越大中型河流技术的研究[D].北京:中国地质大学,2009.(Liu Hailong. Research on the technology of horizontal directional drilling of oil and gas pipeline crossing large and medium-sized river[D]. Beijing: China University of Geosciences,2009.(in Chinese))
- [11] 艾志久,鲜勇,夏换,等.水平定向钻穿越扩孔器动态变化及其对扩孔形状的影响[J].科技导报,2014,32(16):54-57.(Ai Zhijiu, Xian Yong, Xia Huan, et al. The hole shape under horizontal directional drilling crossing [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(16):54-57.(in Chinese))
- [12] 赵明阶.岩石力学[M].北京:人民交通出版社,2011.(Zhao Mingjie. Rock mechanics [M]. Beijing: China Communications Press,2011.(in Chinese))
- [13] 龙江,夏换,周宝库,等.水平定向钻回拖速度对孔壁稳定性的影响[J].现代隧道技术,2013,50(5):135-139.(Long Jiang, Xia Huan, Zhou Baoku, et al. Impacts of HDD pullback speed on the stability of a drill-hole wall[J]. Modern Tunnelling Technology,2013,50(5): 135-139.(in Chinese))