

# 导向钻进非开挖铺管的导向强度研究

张晓静, 李粮纲

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**初步探讨、分析了影响钻孔轨迹设计的重要参数——导向强度(单位钻进长度钻孔顶角的变化量,  $^{\circ}/\text{m}$ )。通过对导向钻具进行整体受力分析, 建立了导向强度模型, 得出了造斜初始阶段在岩土阻力和钻具弯曲影响下导向强度的计算公式, 并根据所得公式对影响导向强度的主要因素进行了分析, 得出了一些结论。还通过室内实验对连续钻进导向强度的规律作了定性说明。

**关键词:**非开挖; 导向钻具; 导向强度; 力学模型

**中图分类号:** P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)01-0068-05

**Classification of Build-up Intensity in Trenchless Technology for Pipe Laying/ZHANG Xiao-jing, LI Liang-gang**  
(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** The paper discussed and analyzed an important parameter — build-up intensity (the drift angle's change of drilling hole in one meter length drilling, degree/meter) which influences the hole section designed. It has established the build-up intensity model through the whole stress analysis on drilling tool and has obtained the formula of build-up intensity affected by the resistance of soil and the curve of drilling tool in the preliminary stage of angle building. Then it analyzes the primary factors that affect the build-up intensity in the basis of formula and has got some conclusions. This paper also gives qualitative explanation on the rule of continuous build-up intensity by indoor tests.

**Key words:** trenchless technology; steering drilling tool; build-up intensity; stress model

## 0 引言

导向强度<sup>[1]</sup>即单位钻进长度钻孔顶角的变化量, 单位为( $^{\circ}$ )/m, 它是非开挖导向钻进工艺中至关重要而又相当难量化确定的一个参数, 涉及到导向孔轨迹的设计和导向钻进施工中的导向控制等方面, 是合理设计钻孔轨迹和精确控制导向孔的前提。研究导向强度的意义在于: 为精确控制钻孔轨迹提供理论依据; 为高性能的钻具设计提供理论依据; 为正确选择施工工艺提供依据; 为三维设计软件的升级优化提供依据。

由于影响导向强度的因素多且较难确定, 故目前能够量化确定导向强度的理论还很少见。通过查阅书籍资料发现, 这一理论尚属空缺状态, 需要相关人士进行深入研究。本文通过建模计算对导向强度进行了初步分析。

## 1 导向钻头的作用机理<sup>[2]</sup>

导向钻头采用的是带斜面的非对称式结构。这类钻头在孔内实现方向改变的力学机理是从钻杆获得的推力克服地层阻力使钻头前进。以斜面钻头为

分析对象, 通过钻杆传来的钻机推力与地层阻力共同作用于钻头斜面上, 2个力各自分解为垂直于斜面的分力和平行于斜面的分力, 垂直于斜面的2个分力大小相等, 方向相反, 相互抵消; 平行于斜面的2个分力则由于钻机推力的分力大于地层阻力的分力, 最终的合力指向沿斜面的方向, 使钻头顺着斜面前进, 如图1所示。

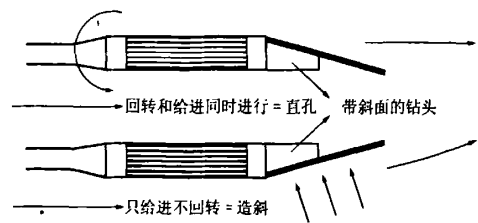


图1 土层中导向板钻头的作用机理示意图

具体操作时表现为, 当钻机回转动作与给进动作同时进行时, 钻孔轨迹呈直线; 当钻机只给进不回转时, 钻孔轨迹沿钻头斜面方向转弯, 从而实现方向改变。但当所钻地层为岩层时, 钻机推力无法有效克服地层阻力, 因而无法实现只推不转改变方向的

收稿日期: 2008-10-06

作者简介: 张晓静(1983-), 女(汉族), 河南新乡人, 中国地质大学(武汉)硕士研究生在读, 地质工程专业, 研究方向为勘查及地质工程, 湖北省武汉市鲁磨路中国地质大学(武汉)1200723班, jingercug@126.com; 李粮纲(1961-), 男(汉族), 湖南长沙人, 中国地质大学(武汉)教授, 地质工程专业, 博士(后), 从事地质工程、钻井工程教学及研究工作。

功能,即使只是在卵石层或含石土层中钻进,也会由于硬石的存在,造成孔内导向板钻头受力不均匀,很难实现有效的方向控制。

## 2 导向钻具力学模型的建立

根据上节导向钻头作用机理,钻头受力分析见图 2。

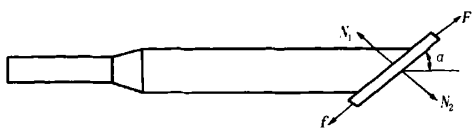


图 2 导向钻头受力分析

$F$ ——钻压在钻头斜面上的分力; $f$ ——岩土对钻头斜面的摩擦力; $N_1$ ——岩土对钻头斜面的压力; $N_2$ ——钻头斜面对岩土的作用力; $\alpha$ ——钻头的面向角

造斜阶段,钻具引起的轨迹变化有 2 部分:钻头所受合力作用下产生的偏转和钻具在横向力作用下发生的平面弯曲变形(近似认为钻具是一端固定的等直杆)。所以可分别对这 2 部分进行计算,然后相加求出总变化。

### 2.1 合力作用下钻头的偏转计算

经分析,建立力学方程如下。

沿斜面方向:

$$F_1 = F - f \quad (1)$$

在沿斜面垂直方向上受力平衡:

$$F_{\text{合}} = 0 = N_1 - N_2 \quad (2)$$

造斜时,是在钻头斜面切线方向上的合力  $F_1$  作用下进行的,位移图见图 3。由位移轨迹可列如下方程:

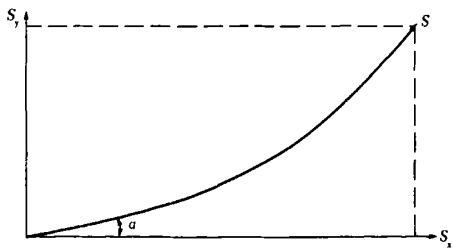


图 3 造斜钻进钻孔轨迹

$$S_x = v_0 t + (1/2) a_x t^2 \quad (3)$$

$$S_y = (1/2) a_y t^2 \quad (4)$$

$$a_x = F_1 \cos \alpha / m \quad (5)$$

$$a_y = F_1 \sin \alpha / m \quad (6)$$

式中: $S_x$ —— $t$  时间内钻头的横向位移; $S_y$ —— $t$  时间内钻头的纵向位移。

由三角函数公式得:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{S_y}{S_x} = \frac{(1/2) a_y t^2}{v_0 t + (1/2) a_x t^2} = \frac{a_y t}{2v_0 + a_x t} \quad (7)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{a_y t}{2v_0 + a_x t} = \operatorname{arctg} \frac{t F_1 \sin \alpha}{2v_0 m + t F_1 \cos \alpha} \quad (8)$$

### 2.2 钻杆弯曲引起的转角变化

根据力学理论,钻具弯曲的曲率为<sup>[3]</sup>:

$$1/\rho = M(x)/(EJ) \quad (9)$$

式中: $M(x)$ ——弯矩; $E$ ——弹性模量; $J$ ——惯性矩,对于圆管截面的钻具, $J = (\pi D^4/64)(1 - \alpha^4)$ ,其中  $\alpha = d/D$ 。

设钻具的弯曲线函数为:

$$y = y(x)$$

则钻具的曲率  $1/\rho$  可写成:

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{d^2 y}{dx^2} / [1 + (\frac{dy}{dx})^2]^{3/2} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)得:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} / [1 + (\frac{dy}{dx})^2]^{3/2} = \frac{M(x)}{EJ} \quad (11)$$

式(11)即为钻具弯曲挠度的微分方程。

在小挠情况下:

$$\theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{dy}{dx} \leq 1$$

将式(11)进行简化,忽略高阶微量  $(\frac{dy}{dx})^2$ , 得:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ} \quad (12)$$

对式(12)式进行一次积分可以得到钻具的顶角计算公式:

$$\theta(x) = \frac{dy}{dx} = \int \frac{M(x)}{EJ} dx + c \quad (13)$$

对式(12)进行二次积分可以得到钻具弯曲的曲线方程:

$$y(x) = \iint \frac{M(x)}{EJ} dx^2 + cx + D \quad (14)$$

在计算钻具顶角和弯曲挠度时,先分别计算由钻杆所受合力  $F_{\text{杆}}$  和钻头所受合力  $F_1$  产生的弯矩  $M_1$  和  $M_2$ , 然后用叠加法求和。

钻杆合力  $F_{\text{杆}}$  在截面上产生的弯矩为:

$$M_1(x) = F_{\text{杆}} [(1/2)l - x] \quad (15)$$

钻头合力  $F_1$  在截面上产生的弯矩为:

$$M_2(x) = F_1 (l - x) \quad (16)$$

根据叠加法得到钻具转角的计算式为:

$$\theta' = \int \frac{[M_1(x) + M_2(x)]}{EJ} dx \quad (17)$$

将式(15)、(16)代入式(17)并进行定积分就得

到钻头的造斜角:

$$\theta' = \int \frac{[M_1(x) + M_2(x)]}{EJ} dx = \frac{l^2(F_{\text{杆}} + 4F_1)}{8EJ} \quad (18)$$

$$F_{\text{杆}} = (F_1/m)m_{\text{杆}} \quad (19)$$

式中: $m$ ——钻头质量; $m_{\text{杆}}$ ——钻杆质量。

将式(19)代入式(18)得:

$$\theta' = (m_{\text{杆}} + 4m)F_1 l^2 / (8mEJ) \quad (20)$$

### 2.3 导向强度公式的建立

将前面造斜角变化的两部分进行叠加,由导向强度定义(单位钻进长度钻孔顶角的变化量)可得:

$$M = (\theta + \theta') / S_x$$

$$= \frac{\arctg \frac{tF_1 \sin \alpha}{2v_0 m + tF_1 \cos \alpha} + \frac{(m_{\text{杆}} + 4m)F_1 l^2}{8mEJ}}{2mv_0 t + F_1 t^2 \cos \alpha} \cdot 2m$$

$$= \frac{2m \arctg \frac{tF_1 \sin \alpha}{2v_0 m + tF_1 \cos \alpha} + \frac{(m_{\text{杆}} + 4m)F_1 l^2}{4EJ}}{2mv_0 t + F_1 t^2 \cos \alpha} \quad (21)$$

在式(21)中,在钻具确定条件下,只有力 $F_1$ 为未知量。

根据太沙基公式计算钻头受力 $N^{[4]}$

$$N_1 = [(1/2)\gamma BN_y + cN_c + qN_q]gA \quad (22)$$

$$F_1 = F - \mu[(1/2)\gamma BN_y + cN_c + qN_q]gA \quad (23)$$

## 3 导向强度实验室测试研究及公式验证

### 3.1 试杆刚度和钻头结构对导向强度的影响<sup>[6]</sup>

#### 3.1.1 试验装置及试验方法

模拟试验装置由水平给进系统、导向试杆和土样箱组成(如图4所示)。

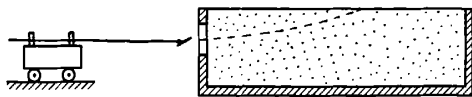


图4 导向钻进模型试验装置

为了研究导向试杆的刚度和导向钻头的结构对导向轨迹的影响,选取了4种不同的导向试杆,具体的结构参数列于表1。

表1 导向杆结构参数表

试杆代号	试杆直径/mm	斜面尺寸		
		长/mm	宽/mm	角度/(°)
A	2.5	14	9	15
B	2.5	12	6	15
C	5	33	19	15
D	5	21	10	15

选取土样时首先考虑的是它的均质性,并能够便于重复性试验。因此本试验选取细砂和粘土粉配

制的土样。采用直剪仪(见图5)测定土样的土力参数粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ (见表2)。

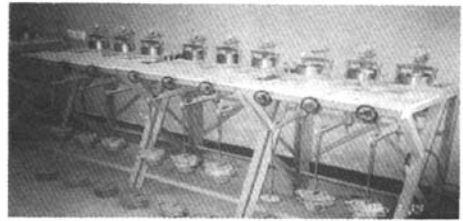


图5 直剪试验装置

表2 土样的粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$

荷载	50kPa	100kPa	200kPa	300kPa	$c/kPa$	$\varphi/(^\circ)$
K1 抗剪强度	4.8	3.2	11.8	13.7	2.8	4.9
K2 抗剪强度	2.3	-	5.8	6.4	3.8	1.9

用不同结构参数的导向试杆分别在砂样和土样中进行连续顶进,并测量顶角的变化,得到顶进孔的轨迹线。

#### 3.1.2 试验数据(见表3)

实验数据分析见图6、图7、图8。

#### 3.1.3 试验结果分析

(1)试杆A、B、C、D在砂层中顶进时,它们弯曲的角度变化率分别为0.09、0.06、0.03、0.02。结果表明当试杆的斜面面积相同时,试杆直径越大,试杆弯曲的角度变化率越小;同一试杆(即试杆的抗弯刚度相同时),斜面面积越大,试杆弯曲的角度变化

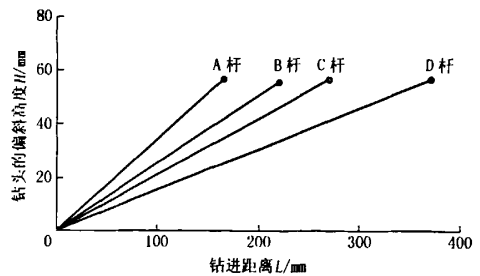


图6 不同的导向杆在砂样中的导向角

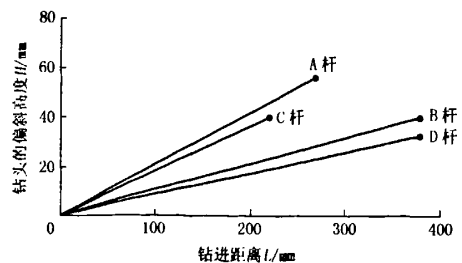


图7 不同的导向杆在土样中的导向角

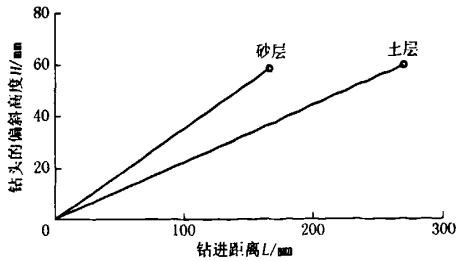


图8 同一导向杆在不同土样中的导向角

表3 导向杆试验数据

地层	导向杆	次数	钻头偏斜高度 H/mm	钻进距离 L/mm	角度 变化率	
砂层	大面积细杆(A)	1	58	180	0.09	
		2	58	190		
		3	58	185		
		4	58	180		
	小面积细杆(B)	1	58	225	0.06	
		2	58	225		
		3	58	220		
		4	58	215		
	土层	大面积粗杆(C)	1	55	285	0.03
			2	55	260	
			3	55	275	
		小面积粗杆(D)	1	55	360	0.02
2			53	355		
3			54	370		
土层		大面积细杆(A)	1	63	290	0.045
			2	58	270	
			3	60	270	
			4	59	270	
	5		39	200		
	小面积细杆(B)	1	35	400	0.01	
		2	35	430		
		3	36	460		
		4	40	400		
		5	25(60~35)	440		
土层	大面积粗杆(C)	1	35	190	0.046	
		2	40	220		
		3	40	220		
		4	45	295		
		5	44	300		
	小面积粗杆(D)	1	35	400	0.013	
		2	38	400		
		3	36	410		
		4	35	380		
		5	35	390		

率越大。与所得导向强度公式获得的结论一致。

(2)在软土层中顶进时,C杆(大面积粗杆)弯曲的角度变化率为0.046,而B杆(小面积细杆)弯曲的角度变化率为0.01,前者数值大于后者数值;而在砂层中顶进时,C杆弯曲的角度变化率为0.03,而B杆弯曲的角度变化率为0.06,前者数值

小于后者数值。说明根据地层情况,杆的抗弯刚度与斜面面积的取值存在优化设计问题。

在实际导向钻进中,当选定某种钻杆后,其抗弯刚度就固定不变了,因此主要是根据地层情况合理设计导向钻头的结构尺寸。

### 3.2 岩土硬度对导向强度影响的实验室研究

#### 3.2.1 试验装置及试验方法

试验装置:模拟导向钻杆、土试样、盛满100 mL水的试管、钢丝等。

试验方法:模拟导向钻进钻具制作了钻头镶焊角为25°的导向钻杆;选取粘土粉和水泥为原料,通过配置比和加水量的不同,来调节所制作土样的硬度,制作出硬度有一定区分度的适合非开挖导向钻进用土样;通过100 mL水试管加载,测出细钢丝在土样中的刺入度(见图9),以作为衡量硬度的指标;通过施力(力要均匀)使钻杆顶进,观察钻进轨迹,测出钻杆在不同硬度土样中的高长比。进而得出土硬度对导向强度的影响,以便定性分析验证导向强度。



图9 测土样刺入度

#### 3.2.2 试验数据(见表4)

表4 试验数据

土样	刺入度/mm	钻距 L/mm	高差 H/mm	比值 a
1	19	67	11	0.16
2	12	100	25	0.25
3	8	74	23	0.31
4	5	70	25	0.36
5	3	60	22	0.37

注:刺入度越小表明土样硬度越大。

#### 3.2.3 试验结果分析

由图10可明显看出,土样硬度越大,比值a也越大,即导向强度越大。在非开挖导向钻进适应地层,且钻压足够大,可钻的前提下,导向强度与土硬

度呈线性关系:土越硬,导向强度越大。

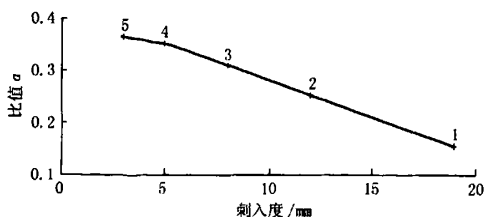


图10 导向强度与土硬度关系图

#### 4 结论

(1) 得出了导向强度的基本理论公式,由公式得:钻具的导向强度与地层的岩土性质( $c, \varphi, \mu$ )、钻具的抗弯刚度( $EJ$ )以及斜面钻头的结构形状质量( $A, \alpha, m$ )等因素有关。

(2) 本文分析钻具受力时,是令钻头所受合力沿导向面斜面方向的。事实上,钻头导向角 $\alpha$ 存在一个最优化设计<sup>[5]</sup>,而这个优化依据正是当钻头所受合力沿斜面方向时,最利于钻进造斜。本文所得

公式也验证了这一点。

(3) 钻进过程中钻具受力是极其复杂的,应进一步研究;钻进过程中,钻具受力是变化着的,因此导向强度也在变化,本文只研究了造斜初始状态,且假设受力不变,是具有局限性的,应进一步研究;对导向强度公式的计算比较复杂,可以借助计算机,通过编程来实现。

#### 参考文献:

- [1] 乌效鸣,胡郁乐,李粮纲,等.导向钻进与非开挖铺管技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [2] 周道崇,刘国华,乌效鸣.非开挖施工中钻孔弯曲规律及控制方法研究[J].非开挖技术,2004,(2-3).
- [3] 孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学(I)[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 代树林.非开挖导向钻进摩擦和扭矩研究[D].长春:吉林大学,2005.
- [5] 史晓亮.复杂地层条件下导向钻头最佳导向角计算[J].地质装备,2000,1(2).
- [6] 李粮纲,赵辉,曾继田.非开挖导向钻具力学分析与试验[J].非开挖技术,2004,(2-3).

### 南京2009年将投600亿元扩内需

新华网江苏频道消息 在2009年1月13日举行的南京市“两会”上,南京市市长蒋宏坤表示,2009年南京市将力争完成政府主动性项目投资600亿元以上,并带动全社会投资2500亿元,从而推进一批基础设施工程和民生工程的实施。

在国际国内不利的经济形势下,2008年南京市的国民经济还是保持了较为平稳的健康发展:预计实现地区生产总值3775亿元,增长12.1%;完成财政总收入742.4亿元,增长18%。

据了解,为了应对当前的经济危机,南京市响应中央政府扩内需、保增长的政策,在2009年的工作规划中,进一步加大对民生工程和基础设施项目的投入力度,以拉动经济增长。

蒋宏坤在《政府工作报告》中表示,600亿投资将主要用于以下几方面的工作:以铁路、机场、港口等建设为重点,加快推进南京铁路南站、过江通道等重大基础设施建设;新建南京火车站北枢纽站等20座公交场站,建成一批公交专用道,新增和更新公交车1200辆;引进国外风险投资、私募股权投资,拓展中小企业融资渠道,出台鼓励担保公司为优质成长型企业提供担保的优惠政策,成立再担保公司;竣工经济适用房250万 $m^2$ 、中低价商品房30万 $m^2$ 以上;推进金陵大报恩寺遗址、明城墙风光带等历史文化保护工程建设,启动江苏大剧院等重点文化标志性工程,建成渡江胜利纪念馆新馆等。

### 沈阳地铁一号线2009年年底将全线通车

新华网辽宁频道消息 沈阳地铁一号线2009年年底前将全线具备通车条件,铁西广场以西将是地铁率先通车的标段。

在沈阳地铁2009年誓师动员会上,沈阳地铁建设指挥部副总指挥张振邦介绍,2009年沈阳地铁工程建设将完成投资35亿元,一号线年内达到通车条件,二号线土建工程完成60%以上。

2009年,地铁一号线将完成投资20亿元,年底前车站和区间主体全部竣工,附属工程基本完成。17列车辆到货,2列车辆完成本地组装,所有设备系统到货;完成十三号街站

至铁西广场站及黎明广场站等13座车站的信号、供电、通信、设备监控、自动售检票、防灾报警、安全门、电扶梯、公安视频等9个设备系统安装调试等任务,同时,完成一号线主要街路的路面恢复、管线回迁及绿化恢复工作。此外,地铁二号线也将完成工程投资15亿元。

会上,沈阳市副市长邢凯强调,2009年地铁建设工程项目多,资金紧张,不仅要保证速度,更要保证质量和安全,沈阳地铁不能留下隐患。地铁建设指挥部安全生产监督管理处还表示,各施工单位要建立24小时路面巡视制度。