

# 非开挖铺管施工中扩孔直径的优化设计与计算

王海, 乌效鸣

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**扩孔在非开挖铺管施工中十分重要,扩孔质量的好坏直接影响到整个非开挖铺管施工的成败。在建立数学模型的基础上,根据等扭矩原理,推导出了扩孔直径计算公式,编制了扩孔优化设计软件,并对扩孔设计提出了合理的建议。

**关键词:**非开挖铺管;扩孔直径;优化设计;数学模型

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2007)04-0021-03

**Optimization and Calculation for Diameter of Back-reaming Hole in Pipe Paving/WANG Hai, WU Xiao-ming** (China University of Geoscience, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Back-reaming is a very important step in pipe paving construction with method of trenchless technology. The quality of back-reaming will determine the result of the hole construction. Based on equal-torque principle, the thesis established a mathematical model, and deduced the formula to calculate the diameter of back-reaming. The author also programmed software that can carry out the optimum design, and gave out some rational suggestion.

**Key words:** pipe paving; back-reaming; diameter of back-reaming hole; optimum design; mathematical model

## 1 扩孔的基本原理及其目的

### 1.1 基本原理

扩孔施工是导向钻进非开挖铺管施工中的关键技术环节之一,它直接关系到铺管的成败。在导向孔施工结束后,换上扩孔钻头对导向孔进行扩大施工,根据钻孔长度、直径和设备能力选择适合地层的扩孔钻头对导向孔进行扩大施工,待扩、清孔工序完成后实施管线铺设。

### 1.2 目的

扩孔的目的是将钻孔直径扩大至铺设管线的要求,减小拉管时的阻力。对于直径较小的待铺管线可不进行专门的扩孔钻进,即在钻导向孔后就可将管道拉入。对于直径较大的铺管工程,需要进行多级扩孔。进行多级扩孔的目的在于:

(1)在设备能力许可的基础上,通过多级扩孔,达到所需求的口径要求。

(2)可达到把弯孔修直的目的,以减小铺管阻力<sup>[1]</sup>。

## 2 扩孔的基本方法

根据地层情况,设备种类、能力以及周边施工环境,可将扩孔分为:反拉回转扩孔、正向回转扩孔和反拉切割扩孔 3 种基本工艺方法。在实际的非开挖

施工中,使用最广泛的扩孔方法是反拉回转扩孔法。

扩孔可分多级扩孔和一次性扩孔铺管 2 种方式,最终扩孔直径与铺管直径之间的最佳间隙问题关系到扩孔工作量与拉管阻力。最终扩孔直径过大会影响地表安全;最终扩孔直径过小,则会导致孔壁与待铺管线的间隙过小,会增加拉管阻力。因此,在设计和施工时,要综合考虑两方面的影响,选择合理的终孔直径和扩孔级数以及各级扩孔的环状厚度。

## 3 扩孔孔径级配的优化设计与计算

### 3.1 扩孔孔径级配优化设计的目的与意义

确定合理的终孔直径以及各级扩孔的直径,有利于减少由于扩孔直径选择不当而造成钻机回拖力不足,从而导致扩孔失败;另外,还有利于延长钻杆的使用寿命。

扩孔时需要确定的主要参数是扩孔的终孔直径、扩孔的级数(次数)和每级扩孔的直径。

### 3.2 终孔直径和所扩级数的确定

扩孔时的终孔直径(成功扩孔后形成的钻孔的最终直径)一般取决于以下几项因素:管材直径、钻杆长度、地层属性、管材类型和曲率半径等。

一般情况下,推荐最终扩孔直径按下式计算:

$$D = KD_0 \quad (1)$$

收稿日期:2006-12-01

作者简介:王海(1983-),男(汉族),安徽池州人,中国地质大学(武汉)在读硕士,地质工程专业,研究方向为非开挖技术,湖北省武汉市鲁磨路中国地质大学硕 1200531 班,13476015828,(027)67883142,kusea007@163.com。

式中: $D$ ——适合成品管铺设的钻孔直径; $D_0$ ——成品管外径; $K$ ——扩孔级配比率,一般取 $K = 1.2 \sim 1.5$ ,当地层均质完整时 $K$ 取小值,当地层复杂时, $K$ 取大值。

根据实际施工经验,以下是一组推荐使用的扩孔级配比率:

- (1)  $L \leq 50$  m,  $K = 1.2$ ;
- (2)  $50$  m  $< L \leq 100$  m,  $K = 1.3$ ;
- (3)  $100$  m  $< L \leq 300$  m,  $K = 1.4$ ;
- (4)  $L > 300$  m,  $K = 1.5$ 。

其中 $L$ 为管线铺设长度。

### 3.3 扩孔孔径级配优化设计模型的建立

#### 3.3.1 现有模型的缺陷

目前确定扩孔级配运用到的模型有2种,即等值扩孔和等面积扩孔。

模型一:等值扩孔即每级扩相同的厚度。如要将一个 $\varnothing 100$  mm的导向孔扩至 $\varnothing 400$  mm,则可以采取 $\varnothing 200$  mm、 $\varnothing 300$  mm和 $\varnothing 400$  mm的选择进行3级扩孔。这是施工中使用比较多的一种方法,但该方法并不合理,尤其是在地层情况较为复杂的条件下扩孔时,随着扩孔级数的增加,扩孔阻力会迅速增大。

模型二:等面积扩孔认为扩孔器受到的阻力与其切削土体截面积成正比,当每级所扩土体截面积相等时,认为钻杆承受相等扭矩。此方法与等值扩孔法类似,随着孔径的增大,钻头所需的扭矩仍然增大,而且越来越明显。因此,本模型仍存在不合理性,从而提出了本文的新模型。

#### 3.3.2 新模型的提出与建立

该模型(称模型三)建立的依据是依照等扭矩原理,使钻头在进行每一级扩孔时,钻杆所需承受的扭矩相等。

如图1所示,假设在 $dA$ 的切削面积上扩孔钻头所需的剪切力为一恒定值 $P_0$ ,则在环面 $r_0 \rightarrow R$ 内,

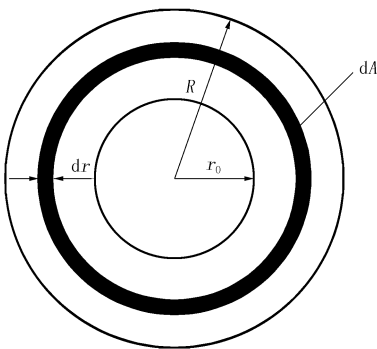


图1 钻孔截面示意图

钻头所需的扭矩为:

$$T = \int_{r_0}^R P_0 dA r = \int_{r_0}^R P_0 \times 2\pi r dr \times r = 2\pi P_0 \int_{r_0}^R r^2 dr$$

$$\text{即: } T = (2/3)\pi P_0 (R^3 - r_0^3) \quad (2)$$

若钻孔原始孔径为 $r_0$ ,第1、2、3、 $\dots$ 、 $n$ 级孔半径为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $\dots$ 、 $r_n$ 则欲使 $T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n$ ,应有:

$$r_1^3 - r_0^3 = r_2^3 - r_1^3 = \dots = r_n^3 - r_{n-1}^3$$

$$\text{即: } r_2^3 = 2r_1^3 - r_0^3$$

$$r_3^3 = r_1^3 + r_2^3 - r_0^3 = 3r_1^3 - 2r_0^3$$

...

$$r_n^3 = r_1^3 + r_{n-1}^3 - r_0^3 = nr_1^3 - (n-1)r_0^3$$

由于初始孔径 $r_0$ 和终孔孔径 $R$ 均可认为已知,又上式中包含了 $n-1$ 个等式,应用数学归纳法,解出 $r_i$ 如下( $i$ 为整数, $0 < i < n$ ):

$$r_i = \{ [iR^3 + (n-1)r_0^3] / n \}^{1/3} \quad (3)$$

根据习惯,将(3)式中半径用直径替换可得公式如下:

$$d_i = (1/2) \{ [iD^3 + (n-1)d_0^3] / n \}^{1/3} \quad (4)$$

由(4)式可以计算各级扩孔的直径。

#### 3.3.3 算例

假设 $d_0 = 110$  mm,  $D = 560$  mm,为形象地表达扩孔直径随孔径增大的变化趋势,不妨令 $n = 5$ ,即扩5级。

由(4)式得: $d_1 = 331$  mm,  $d_2 = 414$  mm,  $d_3 = 473$  mm,  $d_4 = 520$  mm,  $d_5 = 560$  mm。

于是,各级扩孔的切削厚度为: $\Delta d_{1,0} = 221$  mm,  $\Delta d_{2,1} = 83$  mm,  $\Delta d_{3,2} = 59$  mm,  $\Delta d_{4,3} = 47$  mm,  $\Delta d_{5,4} = 40$  mm。

利用模型三的思路,同样可以计算出模型一和模型二的各级扩孔直径。仍取 $r_0 = 110$  mm,  $R = 560$  mm,现略去公式的推导及计算过程,直接得出各级孔径如下:

由模型一计算得各级扩孔直径: $d_1 = 200$  mm,  $d_2 = 290$  mm,  $d_3 = 380$  mm,  $d_4 = 470$  mm,  $d_5 = 560$  mm;各级扩孔的实际切削厚度为: $\Delta d_{1,0} = \Delta d_{2,1} = \Delta d_{3,2} = \Delta d_{4,3} = \Delta d_{5,4} = 90$  mm。

由模型二计算得各级扩孔直径: $d_1 = 269$  mm,  $d_2 = 364$  mm,  $d_3 = 439$  mm,  $d_4 = 503$  mm,  $d_5 = 560$  mm;各级扩孔的实际切削厚度为: $\Delta d_{1,0} = 159$  mm,  $\Delta d_{2,1} = 95$  mm,  $\Delta d_{3,2} = 75$  mm,  $\Delta d_{4,3} = 64$  mm,  $\Delta d_{5,4} = 57$  mm。

如图2所示,根据模型三所得的各级扩孔半径,可以更加直观地了解扩孔半径的优化选择。图3是将相同条件下,由3种模型分别求得的各级扩孔厚

度,以进行比较。

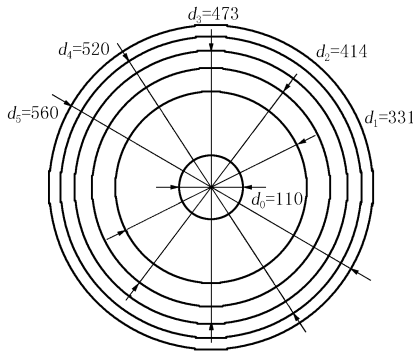


图 2 扩孔半径级配示意图

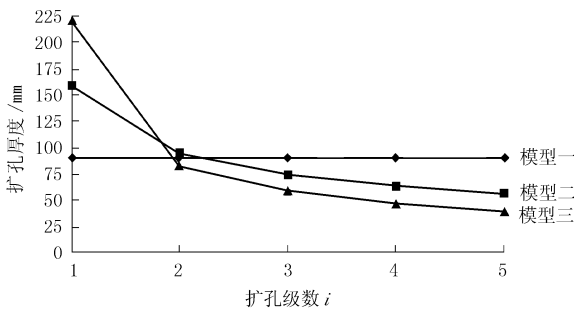


图 3 三种模型各级扩孔厚度对比图

图 2 表明:随着扩孔直径的增大,钻头每一次扩孔时切削厚度  $\Delta r$  逐渐减小,且最后一级扩孔的切削厚度比第一级小得多(本例中相差高达 5 倍)。

图 3 表明:在开始阶段,模型三中每一级扩孔切削土体的厚度大于模型一和模型二;随着扩孔级数的增加,模型三每级对应的扩孔厚度小于模型一和模型二。在工程实践中,情况的确如此,实际施工中,每次扩孔直径增量宜逐渐减小,否则在复杂地层条件下,就会出现扩不动的情况。

综上所述,模型三是 3 种模型中最优的,尤其适合于在扩孔阻力较大或地下条件复杂的情况下进行非开挖施工的扩孔直径的优化设计。

### 4 施工实例

2006 年 4 月,笔者亲自参与的一项在北京市东

四环北路东风北桥下施工的非开挖铺设再生水管工程。该铺管工程总铺设长度 150 m,拟铺设管材为  $\varnothing 400$  mm 再生水 PE 管。

该非开挖铺管施工采用  $\varnothing 110$  mm 的导向钻头,可认为  $r_0 = 120$  mm。根据铺设管线长度及地层情况,扩孔级配比率  $K$  取 1.4;计划分 5 级进行扩孔,即扩孔级数  $n = 5$ 。根据模型三,计算得到各级扩孔直径为: $d_1 = 330$  mm,  $d_2 = 414$  mm,  $d_3 = 473$  mm,  $d_4 = 520$  mm,  $d_5 = 560$  mm。实际施工过程中,由于受现有扩孔钻头尺寸及其它客观条件的限制,实际施工时的扩孔直径与设计直径有轻微出入,但基本相符。施工过程中,第一级到第五级扩孔时,反映扭矩的钻机回转系统液压力为:6 ~ 9、9 ~ 10、9 ~ 10、10 ~ 12、11 ~ 13 MPa。整个扩孔过程的钻机回转系统显示的平均液压力约为 10 MPa,且各级扩孔时回转系统液压力基本保持恒定,变化很小。这表明利用模型三设计的扩孔直径比较合理,可以使得每级扩孔时钻杆承受的扭矩基本相等,确保施工顺利完成。

### 5 结语

非开挖扩孔施工的关键在于如何确定各级钻孔的直径。本文通过一定的假设条件,建立了扩孔直径的优化设计模型,并推导出了各级扩孔直径的计算公式:

$$d_i = (1/2) \{ [iD^3 + (n-1)d_0^3] / n \}^{1/3}$$

经实践验证,该公式对非开挖工程中扩孔孔径级配的合理确定具有一定的指导作用。

本文所建立的孔径优化设计模型是建立在理想条件的基础之上,钻头和钻杆的实际受力情况比模型更加复杂,要利用等扭矩原理进行扩孔设计,尚需要进一步开展各项研究与实践工作。

### 参考文献:

[1] 乌效鸣,胡郁乐,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.

## 青海工业项目建设 2007 年新增增加值 10 亿元

**新华网** 青海省加快盐湖资源、油气资源开发利用以及有色、煤化工等领域的项目实施,工业项目建设目前取得新成绩。2007 年青海省一批投产项目预计将新增工业产值 31 亿元,新增工业增加值 10 亿元。

在工业经济发展中,近年来,青海省大力发展循环经济,以柴达木循环经济试验区建设为契机,在盐湖资源综合利用、有色金属精深加工、新型建材、电力接续、农畜产品加工等领域,谋划布局了德令哈两碱工业园、格尔木盐湖天然气化工工业园、钾肥产品综合利用项目

一期和二期、东西台盐湖提锂综合利用等一批新的特色工业项目。同时,针对青海省出现电力富余情况,在大量调研的基础上,提出了发展硅产业的思路,目前,年产 1000 t 单晶硅项目已开工建设,黄河水电和亚洲硅业两个多晶硅项目前期工作进展顺利,预计 2007 年开工建设。

据了解,仅 2006 年青海省实施的盐湖资源开发、盐湖天然气化工、煤化工、有色金属等工业项目就有 13 个,投资达 40.2 亿元;高新技术产业化项目 14 个,投资 5.8 亿元。