

SHUIPING DINGXIANGZUAN GUANDAO PUSHE  
SHUZHIFANGZHEN LILUN YU JISHU

# 水平定向钻管道铺设 数值仿真实理论与技术

夏 换 焦如义 著  
胡 坤 白世武



中国地质大学出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

# 水平定向钻管道铺设 数值仿真实理论与技术

SHUIPING DINGXIANGZUAN GUANDAO PUSHE  
SHUZHIFANGZHEN LILUN YU JISHU

夏 换 焦如义 著  
胡 坤 白世武

## 内容简介

本书围绕大口径油气管道水平定向钻穿越施工过程中的一些实际问题,开展了力学建模及有限元仿真方面的研究工作。在广泛收集相关的国内外文献的基础上,对水平定向钻管道穿越过程中的力学过程进行了精细建模,包括导向孔钻进过程中的钻头轨迹偏移效应、孔壁稳定性力学建模及仿真、管道回拖过程力学模型构建及仿真计算,并通过典型的工程案例对所构建的力学模型及仿真计算结果进行了验证。通过这些力学模型的构建及数值仿真计算过程,读者可以从中领悟工程问题力学模型的提炼过程及解决方法。

本书在一定程度上体现了从事水平定向钻管道穿越的工程技术人员如何进行专业学习与职业培训的努力方向,以及在穿越施工设计中所采用的独特思路,不仅可为即将从事水平定向钻管道穿越设计及施工的年轻技术工作者提高专业素质提供可借鉴之处,还可为该领域的高等院校师生提供真实素材。既可用于课堂教学,也可用于相关的案例讨论,有助于提高学生解决工程问题的能力。

## 图书在版编目(CIP)数据

水平定向钻管道铺设数值仿真实理论与技术/夏换,焦如义,胡坤,白世武著. —武汉:中国地质大学出版社,2014. 10

ISBN 978-7-5625-3512-6

I. ①水…

II. ①夏…②焦…③胡…④白…

III. ①定向钻进-石油管道-管道铺设-数值分析-计算机仿真②定向钻进-天然气管道-管道铺设-数值分析-计算机仿真

IV. ①TE973. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 198286 号

水平定向钻管道铺设数值仿真实理论与技术

夏 换 焦如义 胡 坤 白世武 著

责任编辑:徐润英

责任校对:戴 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:300 千字 印张:11.75

版次:2014 年 10 月第 1 版

印次:2014 年 10 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3512-6

定价:50.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 前 言

水平定向钻管道铺设技术是一种典型的非开挖管道穿越施工工艺,其被广泛地应用于石油天然气管道在穿越河流、公路等特殊情况下的穿越工程。水平定向穿越技术对环境和交通的危害和影响较小,铺管效率高,施工成本低,在社会应用中取得了较好的社会效益和经济效益。

水平定向穿越铺管技术源于油田定向钻井技术。近几年随着定向钻井设备、钻井工艺、泥浆设计以及相关配套设备的发展和进步,水平定向穿越技术应用的范围和领域越来越广,现在已经能够在粗砂、卵石和岩石等复杂地质条件下施工,最长的施工长度可以达到 2 800m 以上,管道直径达到 1 219mm。基于上述因素,水平定向穿越技术逐渐受到人们的重视,对其研究也逐渐增加。水平定向穿越技术在我国近 20 年得到了迅速的发展,并且得到了广泛的应用,但是与发达国家相比还存在很大的差距,因此加强水平定向穿越技术科学理论研究,对国内定向穿越技术的长远发展具有重要的意义。

力学数值仿真是一门集合了力学、数值计算、数学等多学科的边缘科学,其可以通过对从现实物理现象中抽象出的力学模型,通过计算机数值计算求解,获取物理场的时空分布。在水平定向钻管道铺设施工过程中,由于地下情况复杂,管道穿越过程中力学状态复杂,难以建立完善的数学模型进行力学求解,而采用数值仿真计算的方法则成为研究这些力学行为的良好手段。

本书从现阶段水平定向钻管道铺设工艺出发,针对一些对工程施工质量及高风险作业过程进行力学建模,采用数值仿真技术进行研究,研究成果可用作今后工程施工的数据参考。

在本书的撰写过程中,得到刘宝琛院士、艾志久教授的悉心指导,没有他们的指导就没有此书的出版。同时,该书的出版获得了中国石油天然气管道局管道科学研究院和西南石油大学机电工程学院的大力支持,在此表示衷心的感谢。最后,对为本书提供帮助的马保松、江勇、李国辉、李贵华、吴益泉、马晓成、吴江桥、杨天冰、尹刚乾、刘厚平、刘旭、孙玉高、汪爽、肖尊群、张倩、曾聪、韩涛、魏秦文、胡文礼、付必伟、王希、龙江、张攀等在此一并表示感谢!

著 者

2014 年 6 月

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| <b>1 水平定向钻施工法概述</b> .....       | (1)  |
| 1.1 发展历史与现状 .....               | (1)  |
| 1.2 穿越工艺简介 .....                | (2)  |
| 1.3 水平定向穿越管道铺设施工参数 .....        | (7)  |
| 1.4 施工事故原因分析 .....              | (8)  |
| 1.5 发展趋势 .....                  | (10) |
| <b>2 力学问题与本构模型</b> .....        | (13) |
| 2.1 接触动力学 .....                 | (13) |
| 2.2 应力状态的描述 .....               | (17) |
| 2.3 材料本构模型 .....                | (18) |
| <b>3 多地层导向孔钻进轨迹预测</b> .....     | (26) |
| 3.1 概 述 .....                   | (26) |
| 3.2 导向孔钻进工艺过程 .....             | (27) |
| 3.3 基础理论 .....                  | (27) |
| 3.4 多地层水平定向钻进数值模拟计算 .....       | (28) |
| 3.5 小 结 .....                   | (40) |
| <b>4 回拖入土猫背吊装过程力学分析</b> .....   | (41) |
| 4.1 概 述 .....                   | (41) |
| 4.2 仿真计算目标 .....                | (43) |
| 4.3 主要仿真内容 .....                | (43) |
| 4.4 现场作业状态分析 .....              | (43) |
| 4.5 管道吊装理论分析模型 .....            | (44) |
| 4.6 有限元分析基本假设和简化 .....          | (50) |
| 4.7 猫背吊装实验 .....                | (57) |
| <b>5 水平定向钻弯曲段管道回拖仿真研究</b> ..... | (67) |
| 5.1 工况简介 .....                  | (67) |
| 5.2 计算参数 .....                  | (67) |
| 5.3 计算模型 .....                  | (69) |
| 5.4 出土造斜段仿真研究 .....             | (70) |

|           |                       |              |
|-----------|-----------------------|--------------|
| 5.5       | 入土造斜段仿真分析             | (80)         |
| 5.6       | 小 结                   | (84)         |
| <b>6</b>  | <b>台阶穿越数值模拟计算分析</b>   | <b>(85)</b>  |
| 6.1       | 概 述                   | (85)         |
| 6.2       | 国内外研究现状及发展趋势          | (87)         |
| 6.3       | 理论基础                  | (87)         |
| 6.4       | 阶梯孔穿越理论分析及数值计算        | (90)         |
| 6.5       | 结 论                   | (107)        |
| <b>7</b>  | <b>水平定向钻管道回拖力仿真研究</b> | <b>(108)</b> |
| 7.1       | 管道回拖力计算               | (108)        |
| 7.2       | 水平定向钻管道穿越绞盘效应仿真研究     | (118)        |
| 7.3       | 结 论                   | (127)        |
| <b>8</b>  | <b>管道回拖降浮减阻技术研究</b>   | <b>(128)</b> |
| 8.1       | 工艺过程理论分析              | (128)        |
| 8.2       | 力学理论研究                | (132)        |
| 8.3       | 案例计算与分析               | (141)        |
| 8.4       | 案例总结与分析               | (145)        |
| <b>9</b>  | <b>回拖速度对孔壁稳定性的影响</b>  | <b>(146)</b> |
| 9.1       | 孔壁稳定性判据               | (146)        |
| 9.2       | 仿真计算                  | (147)        |
| <b>10</b> | <b>钻杆螺纹粘扣分析</b>       | <b>(158)</b> |
| 10.1      | 概 述                   | (158)        |
| 10.2      | 国内外研究现状及发展趋势          | (158)        |
| 10.3      | 基础理论                  | (158)        |
| 10.4      | 仿真计算                  | (160)        |
| 10.5      | 结 论                   | (167)        |
|           | <b>参考文献</b>           | <b>(170)</b> |

# 1 水平定向钻施工法概述

## 1.1 发展历史与现状

非开挖施工技术(Trenchless Technology)是20世纪70年代末在西方发达国家兴起并逐渐走向成熟的新技术,是指利用岩土钻掘的技术手段,以最少的开挖量或不需开挖的条件下铺设、更换或修复各种地下管线的一种施工新技术。它可以广泛用于穿越高速公路、铁路、建筑物、河流、湖泊、古迹保护区、农作物或植被保护区,进行污水、自来水、暖气、煤气、电力、电讯、石油、天然气等地下管线的施工。水平定向钻进技术是非开挖施工技术的一种,在众多非开挖施工方法中,水平定向钻(Horizontal Directional Drilling, HDD)施工法因为其施工精度高、适用范围广,是应用最广、发展最快的一种非开挖施工方法。这种施工方法是石油工业的受控定向钻进技术与管线铺设施工技术相结合的一种特殊工法。

水平定向钻进技术于20世纪70年代初在美国首先获得使用,并迅速得到环保方面的重视,开始不断发展和完善。20世纪80年代后,随着石油工业的复苏及电信工业突飞猛进的发展,水平定向钻进技术在各应用领域开始飞跃发展。由于地面随钻测量技术(MWD)的诞生、钻机设备可靠性的提高以及其他一些技术革新,使得水平定向钻进施工技术日益完善,导向精度大为提高,施工成本也大幅度下降。到20世纪90年代初,水平定向钻进技术已成为优选的非开挖管线施工技术手段。

近几年由于市场需求的进一步扩大和科技的日新月异,使得水平定向钻进设备技术行业也迅速发展。据统计,国外大约有30多家水平定向钻进钻机设备制造商,还有几十家公司提供相关辅助设备和材料。国外水平定向钻机主要生产厂家有美国沟神公司(Ditch Witch)、威猛公司(Vermeer)、凯斯公司(Case)、奥格公司(Augers)等。其中,奥格公司主要生产大型水平定向钻机。国外水平定向钻机多有全自动的钻杆装卸存取装置、钻杆自动润滑、快速锚固定位装置、防触电系统,而且生产有各种不同类型的钻具,能适应不同管径、不同岩层的施工。水平定向钻进导向仪著名的产品有美国DCI(Digital Control Inc.)公司的DigiTrakMark、Eclipse系列,英国雷迪(Radiodetection)公司的RD385、DrillTrack系列,美国McLaughlin公司的SpotTek系列以及美国Ditch Witch公司的Subsite系列等。

随着我国国民经济的快速发展和城市现代化建设的加快,水平定向钻机投入市场的数量逐年稳定增加。大型和特大型钻机的增长速度及所占比例明显增加,并能生产回拖力达600t的超大型钻机。国内进口钻机的数量大幅度减少,而出口数量不断增加,主要出口国家为东南亚国家(马来西亚、印度尼西亚、泰国等)和俄罗斯、韩国等。随着西气东输、南水北调等国家重点管线工程的建设,水平定向钻进施工技术也在不断完善和发展。

## 1.2 穿越工艺简介

### 1.2.1 导向孔钻进

在采用水平定向钻穿越河流、建筑和山体等障碍物施工中,钻导向孔是关键问题。成孔时泥浆由钻杆钻头内空进入孔内,钻头通过钻杆推动破土钻进,携着岩屑的泥浆从钻杆和孔洞形成的环空返回。钻头是定向钻的重要工具之一,对于不同的地层应选用合适的钻头。通常的选择方式为:

(1)淤泥质黏土。采用狗腿度为10的钻头或大钻头,可实现钻孔变向。

(2)干燥的软黏土。采用中等尺寸钻头效果最佳。

(3)硬土层。采用较小的钻头效果最佳。

(4)钙质层。采用最小的钻头效果最佳,采用特殊切削技术来实现钻孔方向的改变。

(5)细砂层。采用中等尺寸狗腿度钻头效果最佳,镶焊硬质合金钻头耐磨性最好,钻机的锚固和钻进液是成败的关键。

(6)砂质淤泥层。采用中等到大尺寸钻头效果较好。有时需要高扭矩来驱动钻头。

(7)致密砂层。采用小尺寸锥形钻头效果最好,但钻头的尺寸必须大于探头外筒的尺寸,这种土质中向前推进较难,可较快实现控向,钻机锚固是钻孔成功的关键。

(8)砾石层。采用镶焊小尺寸硬质合金的钻头效果最佳,对于大粒径卵石层,钻进难度大,不过若卵石层间有足够的胶结性土,钻进还是可行的。在砾石层中,回扩难度最大。

(9)固结的岩层。使用孔内动力钻具钻进效果最佳。采用标准钻头钻到硬质岩时,钻机可在无明显方向改变的条件下完成施工。

钻导向孔即是沿设计曲线钻进施工,实际穿越曲线必须符合设计参数(出入土角度、长度、曲率半径、深度等)。钻导向孔轨迹设计根据设计标高、地层及地形情况,以及钻杆曲率半径、工作场地、地下管线分布等情况,确定定向钻进过程中钻头的顶角、方位角、工具面向角,计算出测定空间坐标,设计定向钻的轨迹图及制定特殊地层、地段的特殊施工方案,并且要准备常用的施工应急材料,以保证施工任务的顺利完成。

导向孔钻进目前常采用射流辅助钻进方法,一般以 $15^{\circ}$ 角斜面钻头来控制钻头方向。钻头内的发射器可以发射钻头的位置、顶角、深度、钻头温度、面向角和发射器内电池状态等参数,并由地面手持定位示踪仪接收以供操作人员及时准确地确定钻头的具体位置和深度,并随时通过钻机调整钻机参数,以控制钻头按设计轨迹钻进,同时记录示踪仪上的原始数据,以便对工程质量评定提供依据。

斜面纠偏地面示踪仪测量精度一般为 $3\% \sim 5\%$ ,测量深度为20m左右,当发现定向钻进偏离设计轨迹时,通过调整钻头斜面的方向进行纠偏。纠偏不能过急,应按照钢管的曲率半径来完成纠偏工作,纠偏过急,容易在拖管过程中出现拖不动的问题。

钻头入土后,开始向下造斜;钻头出土时,需要向上造斜。因此,钻头应有良好的造斜能力。一般通过高压射流对周围岩土进行冲蚀破碎,实现钻进。而射流和钻头有一定的角度,如



果钻头不回转,高压射流仅冲蚀孔侧一个方向的岩土,这样在钻头前部斜面上将产生偏向力,使钻孔方向改变,实现钻孔的造斜。

如果钻头偏离了预定轨迹,就要进行纠偏,即在钻头偏离的反向造斜,迫使钻头回到预定轨迹。纠偏时钻头很容易沿老轨迹前进,应在相反方向用高压射流多冲蚀一段时间,冲烂老路线,继续沿设计轨道前进,实现纠偏。

钻头是否偏离预定轨迹应根据钻头的钻进距离和深度、俯仰角、左右偏角来判断。钻进距离用卷尺测量,而深度、俯仰角和左右偏角通常使用专用无线测量仪进行测量,能够及时反馈钻头的信息,以便司钻判断下一步应该采用的钻进方法。导向孔的钻进是通过不断地直线钻进、造斜和纠偏来完成的。因此,在导向孔钻进时,如何控制造斜、测斜和纠偏是导向孔钻进的关键技术。在导向孔钻进过程中,应尽量与设计轨迹一致,避免水平和竖直剖面上的偏离,减少回拖抗力。

## 1.2.2 扩孔

扩孔就是钻头出土以后,扩孔钻具将钻完的孔径分级扩大至需要的尺寸,同时扩完的孔径应成孔良好,无塌方、缩径现象。扩孔的作用是扩大钻孔,使孔道能容纳回拖的管道,扩孔的主要目的是混合钻屑和泥浆,以制成泥浆排出孔外,使回拖的管道有进入的空间。

扩孔的工艺原理是:扩孔时把钻头卸下,将回扩头连接在钻杆上,然后由钻机旋转回拉扩孔。为了保证按照钻杆轨迹回扩,在回扩过程中不断卸下回扩头后的钻杆,直到扩至钻机同一侧的工作场地,完成一级扩孔。采用不同直径的扩孔器反复进行扩孔,直至达到设计的扩孔孔径为止。对于回拉力、扭矩较大的钻机,在扩孔时可以将两种不同直径的回扩头连接在一起,一次完成扩孔施工,甚至同时完成扩孔和铺管施工。

该工序是整个穿越的中间工序,起着“承上启下”的作用,根据管径大小、地层的差异、钻具的配套等方面要求进行预扩孔工序的施工。扩孔工艺包括扩孔器系列的组合、扩孔次数的确定、扩孔速度的选择等。

### 1.2.2.1 扩孔器的选择

合理组合扩孔器系列,采用板式扩孔器和桶式扩孔器同时搭配使用,确保了孔道成形质量。预扩孔时,如发现某次扩孔的扭矩过大或摆动幅度过大,可适当增加扩孔次数,用相同尺寸的扩孔器重新扩孔1~2次。

对于不塌方的地层,如稳定均匀的黏土层、板结连续的砂层等,孔道主要依靠扩孔器的回扩切削成形,切削下来的钻屑由泥浆携带排出孔外。这种情形下,通常对于扩孔直径为 $1.5D$ 的铺管工程须外排钻屑量达到50%,对于扩孔直径为 $1.35D$ 的铺管工程须外排钻屑量达到60%,这样才能满足管道回拖的要求。这说明对于不塌方的地层,在泥浆携带能力有限的情况下,扩孔直径愈大愈好。最小扩孔直径与穿越管径关系如表1-1所示。

表 1-1 最小扩孔直径与穿越管径关系表

| 穿越管段直径    | 最小扩孔直径   |
|-----------|----------|
| <219mm    | 管径+100mm |
| 219~610mm | 1.5 倍管径  |
| >610mm    | 管径+300mm |

注:管径小于 400mm 的管线,在钻机能力许可的情况下,可以直接扩孔回拖。

对于易塌方的地层,如流砂、淤泥以及疏松的黏质粉土和粉质黏土等,“孔道”与周围地层没有严格的界限,由“孔道”的中心线向四周分布为泥浆与钻屑混合的流塑状态物,在垂直于轴线方向上,分布范围的大小取决于泥浆压力与地层压力差以及地层的含水情况等,泥浆的悬浮能力保证了“孔道”的稳定。当然,这种情形下,并不排除在采用桶式扩孔器时局部地段会间或出现由于泥浆滤饼的构成而形成孔道,但这时的滤饼环空尽管充满泥浆,却依然很脆弱,容易垮塌,最终还是以边界模糊的“孔道”占主导地位。这种稳定的受泥浆保护的“孔道”也是定向钻孔道的一种。在这样的地层中,要想形成满足管道顺利回拖的条件,十分关键的一点就是在扩孔时要提高泥浆排量,增加扩孔次数,加大扩孔直径,从而在尽量大的范围内构建“孔道”。

对于介于上述二者之间的地层,如可塑的黏土、黏质粉土、粉质黏土、粉土以及卵砾石含量少于 10% 的卵砾石地层,除上述切削和泥浆护壁成孔外,同时,挤扩成孔是十分有效的成孔手段。在这样的地层中,有时出现局部的塌方,钻屑不能有效地外排,但经过桶式扩孔器的挤扩孔壁以及对孔壁的旋转“抹光”作用,可以有效地清除孔内钻屑而形成光滑的孔道。而在保证孔道曲线的“平顺性”(即横向成形、纵向连续圆滑)方面,可在两个相差一个扩孔级差(级差因钻机能力大小有所变化,通常为 6~12in)的桶式扩孔器之间安装一根刚性良好的麻花钻进行扩孔。飞旋式扩孔器的角度十分陡直,切割刀口的长度非常短,因此其阻力和旋转所需的能量小,但切削能力较强。它比较适用于不塌方且不易形成泥包的地层。

板式扩孔器具有较好的切削能力,同时又能极好地混合钻屑和泥浆,并且能让泥浆自由流过,但对于大直径扩孔,由于扩孔器自身重量过重而导致扩孔时扩孔器有逐渐下沉的趋势,从而使孔道成形情况恶化。所以大尺寸扩孔时,应与桶式扩孔器同时配套使用,此时桶式扩孔器起到扶正器的作用。桶式扩孔器对地层的挤压作用使其十分适用于易塌方和可塑地层,同时它具有良好的清孔能力,因而应用十分广泛。

对于不同的地层应采用不同的扩孔器,这是保证回扩成孔的关键。

(1)快速切削型扩孔器。这种类型的扩孔器,对粘性大的土层及砂土层较有效,但这种扩孔器无法破碎坚硬的岩石。

(2)拼合型钻头通孔器。它由剖开的牙轮锥形体组成,并将其焊接到金属板和短的间接构件上。拼合型钻头通孔器是一种通用的、经济的扩孔工具。易定做,有多种切削具类型和规格,制造时必须进行特别焊接、热处理以及采取其他的保护措施,以免损坏后牙轮失落于孔内。

(3)锥形牙轮扩孔器。这种扩孔器应用广泛,适用于除岩石地层外的硬度在 40MPa 以内的各种地层。

(4)YO-YO 型扩孔器。这种扩孔器非常适用于非开挖施工,它在岩石崩落的地层中可以向前或向后钻进。这种平衡式的牙轮是稳定的,而且能够自动跟踪先导孔。大型牙轮和密

封式轴承的应用延长了其在孔内的寿命。

### 1.2.2.2 扩孔次数

扩孔可分多级扩孔和一次性扩孔铺管两种方式,最终扩孔直径与铺管直径之间的最佳间隙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道的间隙过小,会增加拉管阻力。因此,在设计和施工时,要综合考虑两个方面的影响,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。

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为扩孔的终孔直径、扩孔的级数(次数)和每级扩孔的直径。

扩孔时的终孔直径(成功扩孔后形成的钻孔最终直径)一般取决于以下几个因素: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,最终扩孔直径按下式计算:

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

式中: $D$ ——适合成品管铺设的钻孔直径(mm);

$D_0$ ——成品管外径(mm);

$K$ ——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。

### 1.2.2.3 扩孔速度

成功扩孔不仅需要使用适当性能指标的钻进泥浆,同时也要使用足量的泥浆以便在孔内可流动。确定合理的扩孔速度,使泥浆和钻屑的比例达到不小于 1:1,从而降低回拖力和扭矩,扩孔的速度须按这个原则确定。

穿越距离长、管径较大,在预扩孔施工工序中,由于分级扩孔的级数较多,钻具自身所产生的扭矩极大,加之其他因素(如地层、泥浆性能、扩孔钻具的选配等),为保证扩成的孔径能通畅无阻,把握住以下两方面非常重要:

(1)大口径穿越必须控制泥浆性能,配置适宜于穿越地层的泥浆,尤其是在易液化的中砂、细砂和粉砂等地层中,要提高泥浆的性能。这样大的孔径,泥浆必须护住孔壁而不坍塌,所以在穿越工程时要做到及时调整导向孔和扩孔时的泥浆配方,添加护壁剂来适应工序和地层,从而使钻完的孔径通畅无阻,减小扭力,保证以后管道回拖能顺利进行。

(2)大口径穿越由于预扩级数较多,为提高工效,降低成本,选用适宜于地层的扩孔钻具非常关键。一般情况下,穿越地层以硬黏土为主时,应采用中心定位器+飞旋切割刀+扩孔器的组合形式,如图 1-1 所示。中心定位器主要是为保证扩孔的圆心度,完成扩孔后防止形成椭圆形孔洞。在粉质黏土和砂层扩孔时以板式切割刀为主,以提高工效。合理的钻具选用、组合,增强了降低扭力的效果,有助于成功完成预扩孔,为管线回拖打下坚实的基础。

扩孔工序包括以下步骤:

(1)在管线预场地,当钻头出土后,卸下钻头。

(2)安装切割刀、扩孔器,切割刀直径宜比扩孔器直径大 150mm,扩孔器直径宜比穿越管道直径大 150mm,这样可以减少拖拉力,保护防腐层。

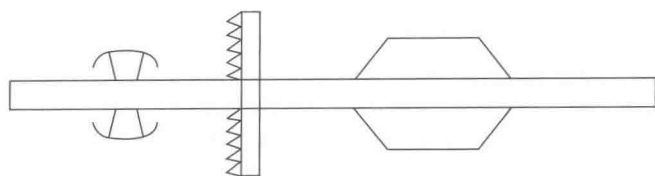


图 1-1 回扩器结构示意图

(3)全部连接完后,应送泥浆冲洗,试喷泥浆,检查切割刀和扩孔器水嘴是否通畅、泥浆压力是否正常,各泥浆喷嘴正常后才能进行扩孔施工。

(4)在扩孔时,根据现场情况,要使用中心定位器。

(5)根据地质情况,进行 6~7 次预扩孔。预扩孔过程中,如发现某次扩孔的扭矩过大,应用相同尺寸的扩孔器重新扩孔 1~2 次。

(6)在钻机场地卸钻杆,在管线场地装钻杆,按程序进行钻杆、钻具的清洗和连接;根据穿越长度及预扩孔次数,在钻机场地、管线场地之间进行钻杆倒运。

### 1.2.3 管道回拖

管道回拖是定向钻施工工艺中的最后环节。回拖就是用钻具将预制完成的成品管道回拖到已扩完的孔径中,从而完成整个穿越工程。回拖过程中,成品管道通过旋转接头与扩孔器连接,并随着钻杆的回拖拉入扩大了孔径中;回拖可与最后一次扩孔同时进行,也可以单独进行。该工序是整个穿越的最后工序,也是整个穿越的关键,减小回拖阻力是管道回拖的重点。管道在回拖作业中作无旋转匀速运动,并且管壁四周与钻孔壁之间的环形空间都充满泥浆。管道回拖顺序包括准备管线、连接钻具、管道起吊、管道回拖、管道入孔、回拖结束,如图 1-2 所示。



图 1-2 管道回拖

管道回拖作业完成后,管道与钻孔壁之间的环形空间应填充,如果不进行填充,很容易造成地表塌陷。填充物质是掺混稀灰浆或石膏的泥浆。然后对钻孔两端进行夯填,这种方法可有效防止地面塌陷。

## 1.3 水平定向穿越管道铺设施工参数

### 1.3.1 穿越管段埋深

按《油气输送管道穿越工程施工规范》(GB 50424—2007)规定,水平定向穿越管道埋深应该在河流最大冲刷线 2.5m 以下,而且管道顶部距河床最低点的距离应大于穿越管径的 10~15 倍,但是考虑到管顶覆土压力,覆土厚度最好不要超过 6m。如果遇到特殊地层,应根据不同的地质情况适当地增加管道埋深。如果在满足埋深的条件下有更适宜的地层进行穿越,那么应尽量选取该地层,这样不仅可以增加穿越成功率,而且可以保证管道穿越质量。

### 1.3.2 入、出土角

《油气输送管道穿越工程施工规范》(GB 50424—2007)规定,入、出土角的大小要根据穿越地质条件、管道材料以及管径确定。根据多项施工经验,在大多数穿越工程中入土角一般选取  $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ,出土角一般选取  $4^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 。如果遇到特殊情况可以适当调整入土角和出土角的大小,但要保证管道在回拖作业中经过弯曲段时能安全通过。

### 1.3.3 穿越轨迹曲率半径

穿越轨迹曲率半径要综合考虑管道外径以及管道材料进行确定。大口径钢质管道的穿越轨迹曲率半径一般为管道外径的 1 200~1 500 倍,同时穿越轨迹的最小曲率半径应大于管道最小曲率半径。管道最小曲率半径  $R$  的计算公式为:

$$R=2\frac{rE}{\sigma} \quad (1-2)$$

式中: $r$ ——管材半径(mm);

$E$ ——管材材质的弹性模量(MPa);

$\sigma$ ——管材材质的屈服强度(MPa)。

### 1.3.4 穿越管段壁厚设计

钢管壁厚计算公式为:

$$\delta=\frac{P \cdot D}{2\sigma_s \cdot F \cdot \phi \cdot t} \quad (1-3)$$

式中： $\delta$ ——钢管壁厚(m)；

$P$ ——设计压力(MPa)；

$\sigma_s$ ——管道屈服强度(MPa)；

$F$ ——钢管焊缝系数，取 1.0；

$\phi$ ——强度设计系数，输油管道取 0.6，输气地区等级为一、二、三、四级地区分别取 0.6、0.5、0.4、0.4；

$t$ ——温度折减系数，温度小于 1 200℃时取 1.0。

### 1.3.5 管道施加的泥浆压力计算

管道回拖作业中，要注意泥浆压力的控制，不可盲目地提高泥浆压力。泥浆压力可按以下经验公式计算：

$$P_{cr} = 2.2E\left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (1-4)$$

式中： $P_{cr}$ ——弹性变形临界压力(MPa)；

$E$ ——钢材的弹性模量(MPa)；

$t$ ——管道的公称壁厚(mm)；

$D$ ——管道外直径(mm)。

当需考虑管道椭圆度的临界外压时，可按下式计算：

$$P_{YP}^2 - \left[\frac{\sigma_{YP}}{m} + (1 + 6mn)P_{cr}\right]P_{YP} + \frac{\sigma_{YP}P_{cr}}{m} = 0 \quad (1-5)$$

$$m = \frac{R}{h}, n = \frac{u_0}{R}, u_0 = \frac{Rf_0}{2}, P_{cr} = \frac{Eh^3}{4(1-\nu^2)R^3} \quad (1-6)$$

式中： $P_{YP}$ ——临界外压力(MPa)；

$\sigma_{YP}$ ——管材的屈服强度(MPa)；

$P_{cr}$ ——弹性变形临界压力(MPa)；

$E$ ——钢材的弹性模量(MPa)；

$h$ ——管道壁厚(mm)；

$R$ ——管道半径(mm)；

$f_0$ ——初始椭圆度；

$u_0$ ——管道初始偏差(mm)；

$\nu$ ——泊松比，取 0.3。

## 1.4 施工事故原因分析

水平定向钻进施工中的事故原因大致可分为钻具折断，钻杆埋钻、卡钻，管道回拖时管道拉扁、拉不动，损坏原有地下建筑物等。钻具折断的原因：①钻具经长期使用后，磨损过大；②钻杆疲劳，打导向孔时，选用曲率半径偏小，钻杆在反复的剪切作用力下疲劳折断。预防措施：经常检查钻具，不用磨损超限钻具。当采用弹性弯曲铺设管道时，其曲率半径不宜小于管

道外径的1 000~1 500倍。钻杆埋钻、卡钻的原因主要是孔洞坍塌。管道回拖时管道拉扁、拉不动的原因,大部分是因在非黏性地层施工中泥浆使用不合适而造成的。

预防措施:在非黏性地层施工,泥浆性能的好坏直接关系到施工的成败。在非黏性地层施工中,要求泥浆具有一定的黏度、良好的流变性、较高的携带钻屑能力、较强的护壁能力,从而维护孔壁稳定,防止泥浆流失。泥浆具有良好的润滑性能,保证施工和回拖管道的摩擦阻力系数最小。非黏性地层施工需选用优质膨润土及合适的泥浆添加剂、处理剂。

### 1.4.1 导向孔施工卡钻事故

某水平定向钻穿河工程,其河面宽约150m,地层上部为亚黏土,往下依次为亚砂土和粉砂。施工设备为21T钻机,250/40泥浆泵,管径 $\phi 73\text{mm}$ 、长3m钻杆。

事故发生经过:设备安装好后,开始打导向孔,钻进60多根钻杆,开始向上调向时,发现顶不动,机手又向前钻了20几根钻杆,还是不行,这时已经过了河中心线不能再向前钻了,只能回撤钻杆,以期能按设计轨迹施工。不料,只卸了5、6根钻杆,回拖压力直线上升。又强行拉了1根钻杆后,就出现了拉不动、转不动的现象。这时钻孔内还有73根钻杆。

卡钻原因:钻进中没有使用泥浆,钻孔坍塌,造成卡钻。

处理此类事故的思路:使用优质泥浆,平行于原孔内钻杆进行冲孔,解除卡钻。

### 1.4.2 管道回拖受阻事故

某河水平定向钻穿越工程穿越段水平长度约为1 600m。穿越处勘探深度内共划为10个工程地质层:①素填土;②淤泥质粉质黏土;③粉质黏土;④黏土;⑤粉质黏土;⑥黏土混砾砂;⑦黏土;⑧黏土;⑨粉砂;⑩角砾。施工单位顺利完成通讯套管穿越和主管道扩孔工程后,在回拖剩余160m时遇阻。施工单位临时采取措施:摆正未回拖管道,失败后采取向管道注水增加管道重量,减少上摩擦力继续回拖,仍失败。

事故原因分析:由于穿越距离长,在回拖过程中出现阻力增加的情况,遇阻点的位置为回拖抬头段,造成穿越回拖受阻的可能情况是塌孔或者清孔不净。

事故处理:采取先开挖14m后下8m深的沉井方案,利用设备探测管道回拖端部,找到遇阻管道后,剩余管道采用沟埋方式完成穿越工程。根据确定的方案,施工单位请当地的水利部门进行开挖,开挖到预定位置发现地质情况良好、地下水量少,改变了下沉井的方案,直接开挖到遇阻点。经过1个多月的施工完成了穿越工作。

### 1.4.3 钻杆断裂事故

某河水平定向钻穿越工程实际长度约1 240m,管径 $\phi 1 219\text{mm}$ ,主要穿越地层为中粗砂层,局部含砾砂和圆砾透镜体。该工程的导向孔钻进及前五级扩孔作业基本正常,在第六级扩孔到74根至103根钻杆时,扭矩摆动大,钻进时间长,几次卡钻,当扩到104根时钻杆脆性折断,而后调派HK250钻机回抽钻杆,共抽出37根,其余钻杆无法旋转拔出,又利用HK250钻机进行套洗,套洗至17根钻杆时推力增大,退出套洗钻杆发现第7根钻杆断裂,最后采用切割

方式取出孔内钻杆,但孔洞也因此报废。

事故原因分析:中粗砂地层大级别扩孔风险极大,本工程采用的泥浆体系可能护壁性、稳定性不够,导致塌孔、卡钻;应急预案不细不实,效力不强。

某水平定向钻穿越工程穿越长度约 1 000m,管径  $\phi 1\ 219\text{mm}$ ,穿越经过的地层中间为泥质粉砂岩层,两端为粉质黏土层、粉细砂层交互层。工程顺利完成了导向孔和七级扩孔作业,回拖前考虑到软硬地层交接面易形成台阶孔,进行了多次修孔、洗孔才实施回拖。当回拖至第 4 根钻杆时,因穿越孔洞流沙堆积和管道刚性过高,造成钻杆断裂。

事故原因分析:在“软硬软”地层使用普通岩石扩孔器扩孔,由于钻具自重大,扩孔沉降严重,形成台阶曲线孔,孔洞曲率半径不能满足管线回拖要求。

#### 1.4.4 管道回拖力过大事故

某水平定向钻穿越工程设计穿越长度约 850m,管道规格  $\phi 1\ 016\text{mm}$ ,设计给出的主要穿越地层为粉砂岩层,出入土两端为砾砂层。该工程经过导向孔、四级扩孔作业后,在回拖过程中至第 20 根钻杆(设计图中为砾砂地段),拖拉力骤增至 300t,采取夯管锤助力措施继续回拖,管道仍无法前行。而后利用滑轮组和夯管锤进行反回拖,拖出入洞管线,首次穿越失利。

事故原因分析:设计提供的地质资料失准,通过施工图纸显示的主要地层为砾砂层,实际穿越的却是圆砾层,导致实施方案出现偏颇。

### 1.5 发展趋势

#### 1.5.1 滩海穿越

滩海表层一般地质承载能力低,采用普通的管道铺设办法,埋深很难达到技术要求,管线运行后,将产生不均匀沉降,对管线的运行安全将造成严重影响;另外,滩海的登陆段堤防一般不能破坏,很难进行开挖施工。如果采用定向钻穿越施工,管道既可以铺设在较深的稳定地层,又可以不破坏地表环境,是一举多得的施工方案。目前对接穿越技术已经能够解决滩海穿越中超长距离的施工。

#### 1.5.2 煤气层开发

国外公司成功地把定向钻穿越技术应用于煤层气采集领域,并取得成功。该项技术为中国煤炭工业瓦斯气采集提供了安全的煤炭开采环境,在减小或杜绝瓦斯爆炸事故方面具有非常大的市场潜力,可以扩展定向钻施工领域,目前该项技术需要进一步研究。



### 1.5.3 硬岩穿越

目前世界上应用定向钻技术穿越岩层最大硬度可达到 200MPa,我国穿越的岩层最硬为 108MPa,还有可深入开拓的市场。国际上某些公司通常应用正扩技术穿越坚硬岩石,这种工艺技术需要我们进一步研究。

### 1.5.4 钻 机

水平定向钻机的主要功能是为钻杆提供足够大的扭矩和推拉力,以实现导向钻进和回拉扩孔铺管。与之相匹配的辅助功能为:钻机的钻进架与水平面之间的夹角可调,以满足不同入射角的要求。钻机入射角的大小也是衡量钻机性能的主要指标,与钻机的总体布置及结构设计有关,将直接影响到成孔轨迹设计。钻机技术的发展趋势为:

(1)多功能。钻机同时具备土壤和硬岩层钻进施工功能,且能干、湿钻进,增强其适应性和作业能力。

(2)集成化。将动力系统、泥浆泵送系统、钻杆装卸系统、地锚系统、行走系统、监控系统等集成于钻机一体,便于集中控制。

(3)自动化。主要体现在地锚自动安装与卸拆、钻进架角度调节、支腿调节、自动更换钻杆、自动润滑钻杆前后端丝扣、更换钻杆时钻液泵送系统自动启闭控制、自动钻进与回拉扩孔作业等。提高自动化程度将大大减轻工人的劳动强度,提高作业质量和作业效率。

钻机的自行驶功能对钻机转移工作场地、快速就位非常必要。主要有履带式和轮胎式底盘两种形式。履带式底盘钻机具有爬坡能力强、接地比压小、机动灵活、地面适应性强等特点,是今后的发展方向。

(4)标准化、系列化、模块化。钻机的标准化、系列化、模块化设计,使钻机的零部件通用性和互换性增强,适用范围更加广泛。随着科学技术和非开挖施工技术的不断发展,钻机的各项技术性能也在不断改进和提高,而且不断向微型化和大型化两个方向发展。

### 1.5.5 钻杆与钻具

钻杆是钻进中的关键部件,可提供作用在钻头上的推拉力、旋转扭矩、输送钻液等。就钻杆两端内外螺纹部位与杆体的结构而言,有整体锻造式和焊接式两种。钻杆的发展趋势是重量轻、强度高、柔韧性好。钻杆两端的螺纹结构非常重要,将直接影响钻杆间的连接强度、密封性和可拆卸性能。国外钻杆螺纹形式多样,主要有 API 标准扣型、90°牙形角扣型锥扣、不对称尖齿锯齿扣型锥扣、不对称锥扣等。

导向钻进钻头分软地层钻头和硬岩层钻头,有刮板式和牙轮式钻头等。其技术研究的主要内容为不同地层条件下的钻进能力、钻进效率以及变向与控制方式。

回扩器一般采用流线形结构。这种钻头以切削和挤压双重作用成孔,具有回转阻力小、形成的孔壁稳定和有助于排屑的特点。

旋转接头和拉管头的作用也十分重要,在施工前特别要检查旋转接头和拉管头的性能和