

研究生精品教材系列
中国地质大学研究生院资助项目

水平定向钻理论与技术

Horizontal Directional Drilling Theory and Technology

曾聪 马保松 编著



研究生精品教材系列

中国地质大学研究生院资助项目

水平定向钻理论与技术

Horizontal Directional Drilling Theory and Technology

曾聪 马保松 编著



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

内 容 提 要

本书共分为8章,系统介绍了水平定向钻技术的线路轨迹设计、孔壁稳定性分析、扩孔极差和扭矩计算、管道回拖力的主要影响因素和常用的计算方法以及管道回拖过程中的极限应力分析相关的理论知识和计算方法,并结合多个实际工程案例进行了详细的计算分析。此外,本书还对水平定向钻工艺的流程和研究现状、导向原理和常用导向设备、钻井液理论和常用计算模型进行了简单的介绍。本书强调水平定向钻的理论与技术结合,将理论与其在工程中的应用放在同等重要的位置予以介绍。

本书除作为地质工程、市政工程和油气储运工程的研究生专业课教材外,也可以作为相关专业本科生或从事水平定向钻研究和设计工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水平定向钻理论与技术/曾聪,马保松编著. —武汉:中国地质大学出版社,2015.1

ISBN 978 - 7 - 5625 - 2746 - 6

I. ①水…

II. ①曾… ②马…

III. ①水平钻井-定向钻进

IV. ①P634.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 005383 号

水平定向钻理论与技术

曾聪 马保松 编著

责任编辑:徐润英

责任校对:周 旭

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:11.50

版次:2015 年 1 月第 1 版

印次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—1000 册

ISBN 978 - 7 - 5625 - 2746 - 6

定价:42.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

非开挖水平定向钻技术涉及土力学、岩石力学、结构力学、流体力学多方面的基础知识,我国目前现有的水平定向钻书籍主要介绍技术工艺和相关设备,缺少系统的基础理论教材。本书基于中国地质大学(武汉)中美联合非开挖工程研究中心近 10 年来承担的相关科研课题,详细介绍了水平定向钻技术勘察、设计、施工以及事故处理涉及到的基础理论,并结合我国多个大型水平定向钻工程,以实例分析的方式将理论和工程实践相结合,书中引用了 10 多个我国西气东输管道穿越工程和市政管道铺设工程作为实例,结合本书所介绍的理论和计算公式进行详细的分析计算,引导学生根据理论知识对实际水平定向钻管道铺设工程中的扭矩、回拖力、管道受力验算等关键问题进行计算分析,培养学生对实际工程问题的研究和设计能力。

本书共分为 8 章。第 1 章介绍了水平定向钻工艺的流程和研究现状;第 2 章讨论了水平定向钻穿越轨迹设计和悬曲线设计;第 3 章以土力学和流体力学作为基础理论对孔壁稳定性问题进行了深入分析;第 4 章介绍了扩孔扭矩计算和极差设计方法;第 5 章分别讨论了钢管和塑料管道的回拖力影响因素和计算方法;第 6 章在回拖力计算的基础上讨论了钢管和塑料管道的极限应力状况分析与验算方法;第 7 章介绍了导向原理和常用设备;第 8 章介绍了水平定向钻工程中常用的钻井液理论和计算模型。本书的第 1 章、第 2 章、第 7 章由马保松编写,第 3 章、第 5 章和第 6 章由曾聪编写,第 4 章由博士研究生兰海涛编写,第 8 章由博士研究生孔耀祖编写。

在本书的编写过程中,中国地质大学(武汉)中美联合非开挖工程研究中心给予了大力支持和帮助,研究生闫雪峰、王福芝和董顺绘制了大部分章节的插图,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,本书难免存在缺点和不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2014.12

目 录

第 1 章 概 述	(1)
§ 1.1 水平定向钻技术简介	(1)
§ 1.2 水平定向钻技术的研究现状	(3)
第 2 章 穿越线路和轨迹设计	(8)
§ 2.1 工程地质条件	(8)
§ 2.2 水平定向钻穿越轨迹设计	(11)
§ 2.3 悬曲线设计	(18)
第 3 章 孔壁稳定性分析	(21)
§ 3.1 概 述	(21)
§ 3.2 孔壁稳定性的影响因素	(22)
§ 3.3 孔壁坍塌理论分析	(25)
§ 3.4 钻孔压裂冒浆分析	(43)
第 4 章 扩孔扭矩计算与极差设计	(55)
§ 4.1 扩孔的基本原理和工艺方法	(55)
§ 4.2 扩孔扭矩的计算	(57)
§ 4.3 扩孔级差的设计	(63)
§ 4.4 实例分析	(65)
第 5 章 管道回拖力分析计算	(77)
§ 5.1 回拖力影响因素	(77)
§ 5.2 钢管回拖力计算	(89)
§ 5.3 塑料管道回拖力计算	(103)
§ 5.4 经验计算方法	(112)
第 6 章 水平定向钻穿越管道力学分析	(115)
§ 6.1 管道力学参数	(115)
§ 6.2 钢管回拖的受力分析	(129)
§ 6.3 塑料管道回拖的受力分析	(142)

第7章 水平定向钻导向系统	(151)
§ 7.1 导向钻头的基本原理	(151)
§ 7.2 导向系统的测量原理	(153)
§ 7.3 信号传输原理	(160)
§ 7.4 导向孔轨迹计算方法	(164)
第8章 钻井液理论与技术	(166)
§ 8.1 钻井液在水平定向钻穿越施工中的作用	(166)
§ 8.2 粘土的化学特性	(167)
§ 8.3 流变学	(169)
§ 8.4 水平定向钻钻井液的设计与配制	(174)
参考文献	(177)

第1章 概述

水平定向钻工法(horizontal directional drilling)是采用安装于地表的钻孔设备,以相对于地面的较小的人射角钻入地层形成导向孔,然后将导向孔扩径至所需大小并铺设管道(线)的一项技术。水平定向钻技术起源于石油钻井工业,20世纪70年代,结合水井工业和公用设施建设方面的技术,经演变之后广泛用于市政、油气等管道建设行业。它不仅应用于河流、水道和湖泊区域的穿越,同时还广泛应用于高速公路、铁路、机场、海岸、岛屿、山体、热带雨林以及密布建筑物、文物保护区、管道密集区等的穿越。目前,该技术还被应用于煤田的煤层气开采、地源热泵等领域,并取得了较好的效果。与其他非开挖铺管技术相比,水平定向钻技术具有施工速度快、施工成本低、环境扰动小等优点。水平定向钻技术正式进入工程施工市场至今,以其特有的技术特点和环境友好、地面扰动小、施工效率高、综合成本低等优势,日益受到政府部门的重视,取得了良好的社会效益和经济效益。

§ 1.1 水平定向钻技术简介

水平定向钻技术是采用水平定向钻机按设计线路和穿越曲线钻进一个口径较小的导向孔,然后将钻头更换为扩孔器进行一次或多次回拉扩孔,当钻孔孔径扩至设计尺寸后,回拖敷设成品管道。对于穿越距离较长的工程,多采用双钻机对接技术进行导向孔施工。该技术是集多学科、多技术、多种设备于一体的系统工程,任何一个环节出现问题,都将影响整个工程进度或增加工程成本,甚至造成工程的失败。水平定向钻技术可以细分为前期设计和准备工作、导向孔施工、回拖扩孔、管道回拖及现场清理和恢复五个步骤。

1.1.1 前期设计和准备工作

水平定向钻的前期设计工作包括线路初勘、详勘、线路设计、轨迹设计和钻机选型;前期的准备和检查工作包括场地测量、钻机定位、施工现场布局、工程场地的出入口通道设置、交通锥标布设、施工标志悬挂和粘贴。准备和检查工作属于工程组织管理内容,本书不具体讨论,读者可以查阅水平定向钻的施工指导或管理类参考书了解相关内容,水平定向钻的线路和轨迹的设计内容涉及到较多的理论知识,在第二章中将对其进行详细的讨论。

1.1.2 导向孔施工

导向钻孔施工是采用水平定向钻机和导向仪按照设计的线路、轨迹、出入土点等参数钻进导向孔的过程。其主要步骤包括:锚固钻机,安装和标定导向探头,连接钻杆和导向钻头,测试探头发射,检查钻头喷嘴处的钻孔泥浆流动是否通畅,导向钻进,钻进成孔,检测并调整钻进斜度和深度使钻进轨迹符合设计要求。整个钻进轨迹首先为造斜段,然后从造斜段进

入到水平段,直到钻头进入出土坑造斜段。导向孔施工原理如图 1-1 所示。

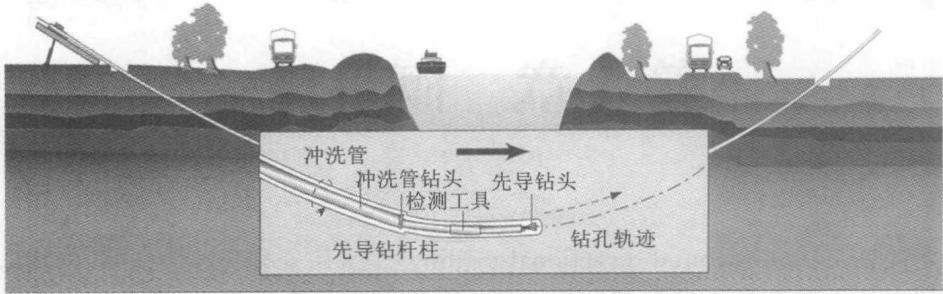


图 1-1 导向孔施工原理

整个导向孔钻进过程中都需要采用导向仪对钻头进行定位和导向。导向仪通过安装在钻头容纳腔中的信号发射器发射电磁信号,地表信号接收器接收信号并监测钻头位置实现导向,导向仪可以确定钻头位置并计算得到钻头深度、钻头俯仰角、钻具面向角和钻孔的方位角。导向孔相关的技术和理论将在第七章中详细介绍。

1.1.3 回拖扩孔

回拖扩孔是采用扩孔器在水平定向钻机回拉作用下将导向孔扩径至设计直径的过程,如图 1-2 所示。其主要步骤包括连接扩孔头与钻杆、回拉扩孔和清孔。对于孔径较大的工程,扩孔级数需要根据终孔直径、地质条件和钻进性能参数来确定。因此扩孔阶段的扩孔扭矩、扩孔极差设计以及孔壁的稳定都是需要考虑的重要因素,这部分内容将分别在第三章和第四章中进行详细的讨论。

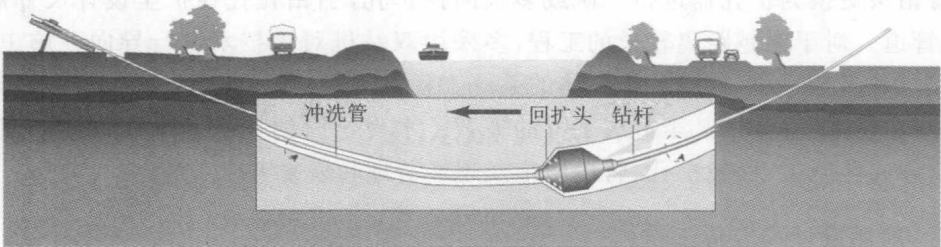


图 1-2 钻孔回拖扩孔过程

1.1.4 管道回拖

管道回拖是扩孔后将成品管道回拉拖入孔洞中并完成铺设的过程,管道回拖原则上要求最后一级扩孔与铺管同步进行,以减少因钻孔暴露时间过长而引起孔壁垮塌的危险。管道回拖时首先在成品管道前端安装一个回拉头。回拉头与扩孔器之间安装分动器,避免回拉头带动成品管道回转。成品管道进入钻孔前需要进行合适的固定和支撑。对未拖入的成品管道进行支撑,避免管道回拖过程中管道外壁的磨损和擦伤。水平定向钻铺管工艺中,一般采用顶推或回拉的方法将待铺的管线就位。在导向孔平直度差、铺管阻力大的情况下,采用顶推与回拉相结合的方法可取得好的效果。管道回拖阶段管道的力学分析计算和铺管工艺选择是水平定向钻设计的两个重要问题。只有计算出当前工艺条件下的铺管阻力后,再

根据实际情况,选择正确的铺管方法才是成功的关键,这部分内容将在第五章中详细介绍。管道铺设过程如图 1-3 所示。

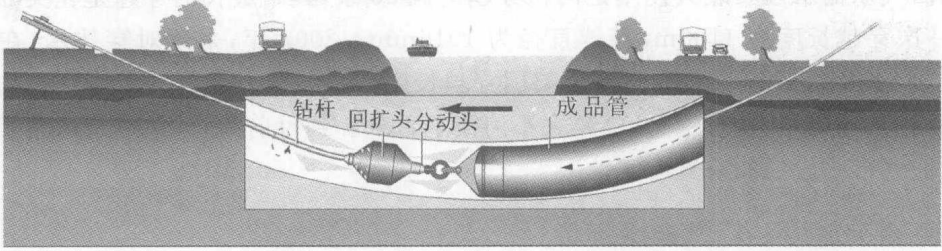


图 1-3 管道铺设过程

1.1.5 现场清理和恢复

管道回拖安装完成后,需要将出土端和入土端的废弃泥浆和渣土进行清理并采用原土壤或选定的土体进行回填压实,最后对地表废弃物、破损工具和设备必须进行清理。对未开发区域进行地表平整、播种、绿化恢复;对开发区域,地表修复包括更换、人行道基础压实、压实材料和人行道铺砌等。

§ 1.2 水平定向钻技术的研究现状

1.2.1 水平定向钻应用研究

现代水平定向钻技术由钻井技术演变而来,用于在城区内铺设地下线缆和管道。据文献记载,1971年水平定向钻技术在美国被首次应用于穿越河流施工,美国 Pacific Gas and Electric Co. 铺设一条直径为 101.6mm、长约 187.5m 的钢管,穿越位于 California Watsonville 附近的 Rajaro 河。

Martin Cherrington 于 1971 年引进了水平定向钻技术,该技术提供了一种新的管线铺设方法,可以考虑不再使用开挖法铺设管线,解决了使用开挖法不能在城区内或在大型天然障碍下铺设地下管线的问题。随着石油钻井技术、现代探测和导向技术的不断发展,今天水平定向钻工艺已成为铺设地下管线最受欢迎的方法,既可穿越河流铺设大直径管道,也可铺设小直径线缆。

早期的水平定向钻技术仅用于河流、海湾等穿越工程,后来在公路、山体和市区建设中也广泛采用。随着设备、工具制造、穿越技术、钻井液性能及配套装备的发展和进步,水平定向钻已经能够在粗砂、卵砾石、冰碛和岩石等复杂地层中进行铺管施工。现在水平定向钻技术已经广泛应用于穿越公路、铁路、建筑物、河流,以及在闹市区、古迹保护区、农作物和植被保护区等不允许或不能开挖条件下进行供水、煤气、天然气、污水、电力、热力、电信电缆、光缆等公用事业管线的铺设。

油气管道领域的应用方面,我国从 1985 年由中国石油天然气管道局首次从美国引进定向钻用于长输管道黄河穿越施工。近 30 年来,水平定向钻铺管技术在我国发展迅速。目前已经有专业的研究机构、专业化的设备制造公司、专业化的施工工程公司。在技术上日臻成

熟,我国已有相关的国家设计施工规范、相应设计标准和质量验收标准。通过多项大型施工的实践,总结了较多的施工经验,发表了大量的专业论文。

我国西气东输工程一线共使用定向钻穿越河流 36 条,其中最长的穿越是在吴淞江的穿越,平均一次穿越长度为 1150m,穿越直径为 1016mm。2007 年,采用对穿技术,在钱塘江穿越长度为 2456m。2008 年,在珠海磨刀门穿越长度达 2630m。在西气东输二线几乎所有河流都采用了穿越方式进行铺管,穿越大小河流上百条。到目前为止,水平定向钻工艺已经成为铺设油气市政管道的首选方案。

1.2.2 水平定向钻孔壁稳定性研究

孔壁稳定性不仅在石油钻井工程中受到重视,在水平定向钻穿越工程中一样也受到高度重视。Westergard 早在 20 世纪 40 年代就已经发表了第一篇关于井壁稳定性的文章,作者在假设液柱压力为零和水平应力等于垂直应力的情况下,描述了直井周围弹—塑性井眼的应力分布情况。在此基础上,Hubbert 和 Willis 于 1957 年引入液柱压力和垂直应力与两个大小不同的水平应力的作用。Fairhurs 考虑了倾斜地层、倾斜井眼、三向不均匀地应力场下的线弹性的应力状态解。Terzaghi 于 1943 年提出了有效应力原理后,许多研究者对有效应力进行修正,并运用到井壁稳定分析中以修正孔隙压力的影响。Carroll 于 1980 年总结了以前的各种有效应力原理,给出了统一的表达式:有效应力等于总压应力减去有效应力常数与孔隙流体压力之积。Biot 于 1955 年提出了多孔弹性介质理论,随后人们很快将该理论用于井壁稳定的研究中。Bowen 在 Biot 的理论基础上,采用将多孔介质等效为连续介质的方法,提出了可压缩的多孔介质模型。Lubinski 则采用了热弹性相似比拟法来研究多孔介质,并给出了含有孔隙压力、孔隙度、基质压缩性和流体压缩性在内的多孔材料弹性本构方程。此后许多研究者多孔介质的本构关系方面进行了一系列研究,建立了弹塑性、粘弹性等本构方程,并将这些本构方程引入井壁稳定性研究中。国内一些学者也对非线性弹性本构方程进行了一系列的研究。

冒浆是孔内泥浆压力过高高压裂地层,连通地层中的天然孔隙和裂缝,在上覆地层中形成新的泥浆通道,泥浆从地表涌出。泥浆压裂地层的过程,即为泥浆对地层的渗透破坏过程。因此,渗流力学是研究地面冒浆原理的基础。渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学,渗流力学是一门流体力学与岩石力学、土力学、多孔介质理论、表面物理学交叉渗透而形成的学科。渗流力学作为渗流学科的核心理论,在 20 世纪受到国际学术界和工程界的高度重视,随着各相关学科的不断发展和生产实践中提出的渗流问题日益广泛复杂,渗流已逐渐发展成为具有自己的理论、方法和应用范围的独立学科。1856 年,法国工程师达西(Herri Darcy)通过试验提出了线性渗流理论,为渗流理论的发展奠定了坚实的基础。邵龙潭、王助贫等(2000)采用孔隙介质力学分析方法,把土体骨架、孔隙水和孔隙气分别作为独立的研究对象,结合孔隙水和孔隙气在气液交界面上满足的力学条件建立耦合方程,求解非饱和土中孔隙水的入渗和孔隙气体的排出过程。对标准砂进行了一维有压水流入渗的试验和计算,并用数值模拟方法进行对比,得出在研究水流入渗问题时,对一些导气率较低的土类,考虑气相的压缩和运动的影响是必要的结论。邓英尔、刘慈群等(2003)基于三参数非线性渗流运动定律、质量守恒定律及椭圆渗流的概念,建立了低渗透介质中两相流体椭圆非线性渗流数学模型,运用有限差分方法与外推法求解,导出了两相流体椭圆非线性渗流条件下

油井见水前后开发指标的计算公式,并进行了实例分析。骆祖江、王增辉在1999年以多相渗流理论为基础,从水气两相渗流的连续性方程和达西定律出发,推导了非饱和带水气两相渗流的耦合动力学模型,讨论了模型求解方法的原理和步骤。刘昌军(2005)推导了降雨入渗下的饱和-非饱和水气两相渗流耦合数学模型,并对该模型采用了有限差分 and 全隐式联立求解方法进行了求解。从算例结果可以看出,采用水气两相渗流理论研究降雨入渗饱和-非饱和和渗流更能反映非饱和土体渗流场的变化和入渗机理。

自20世纪80年代以来,国内在引进和发展井壁稳定性技术方面进展很快,许多油田都不同程度地开展了地层破裂压力的计算和预测方法的研究。在国内井壁稳定性研究中以黄荣博等(1985)为代表的研究工作者做了大量而卓有成效的工作,并针对各油田实际,通过大量的实验研究了各种地层岩石的力学特性,还对地层破裂压力提出了适当的预测模型。其中比较有代表性的有冯启宁(1983)、黄荣博(1985)、谭廷栋(1990)、姜子昂(1994)等人的研究成果及他们各自的预测模型。

1.2.3 水平定向钻孔内流场和力学研究

水平定向钻技术源于石油钻井工程,虽然该领域针对钻井液的携砂能力与排屑效率的相关研究非常多,但水平定向钻与传统石油钻井和地质钻探区别较大,特别是大直径和长距离水平定向钻穿越工程。首先,多级扩孔过程中孔内钻井液流场方向与岩屑重力方向正交(图1-4),流场在孔内垂直速度分量为零。岩屑在垂直方向只受到重力作用,因此不同比表面积的岩屑由于沉降速度不同而在孔内分层分布;其次,钻孔直径是钻杆直径的10倍以上,在泥浆泵有限的压力情况下,钻孔环空区域钻井液浓度高并且返速非常低,当孔径到1219mm时,钻井液返速仅为0.015~0.012m/s,整个水平定向钻扩孔过程中钻井液都处于层流状态。随着扩孔头与入土点距离的增加,岩屑会不断沉降并聚集在底部形成岩屑床,由于岩屑床的清洗困难,使得岩屑床的运移也出现分层现象,这在许多研究者进行的实验中都已经观察到。如图1-5所示,岩屑床在贴近下孔壁的部分出现一层基本不移动的岩屑堆积层,称之为固定岩屑床层,固定岩屑床的存在,不仅极大地影响了扩孔过程中的排屑效率,而且增加了下一级扩孔时所需扭矩或铺管回拖力。因此,上述大直径水平定向钻工艺特征导致的钻井液携砂能力差、岩屑运移效率低成为目前大直径水平定向钻穿越技术急需解决的技术瓶颈。

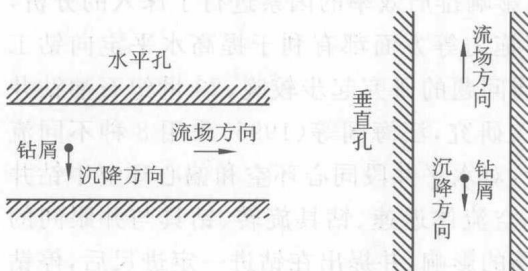


图 1-4 水平定向钻孔内岩屑运移与垂井的区别

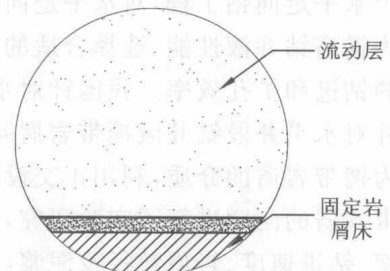


图 1-5 大直径水平定向钻孔内钻屑分布图

为解决上述问题,水平定向钻技术人员和研究者一直以寻求粘度高、携砂能力强、流动性好的钻井液为研究方向,通过降低岩屑在孔内的沉降速度、提高钻井液的流动性,在其完全沉降或形成固定岩屑床前排出钻孔。然而,钻井液的携砂能力和岩屑运移效率不仅与其

粘度和流动性相关,而且与孔内钻井液流场的动力学特征密切相关。因此研究人员开始研究大直径水平孔内流场的动力学特征,揭示流场对岩屑运动特征的影响规律,并评价流场对水平定向钻钻孔内岩屑运移效率的影响程度,为解决大直径水平定向钻穿越技术中的技术瓶颈提供新技术途径,为研发新设备和工艺、为我国西气东输工程的顺利完成以及在市政给排水管道铺设工程中推广水平定向钻技术提供理论基础。

早在 20 世纪,钻井领域的专家和学者就认为大斜度井和水平井的岩屑输送是一个大难题,孔内环空清洗不干净易导致各种孔内问题的发生。石油大学、中国地质大学、中国石油天然气集团钻井研究院等研究机构一直致力于通过提高钻井液性能、泥浆泵输送能力、钻具等多种途径来解决岩屑输送问题。中小直径水平定向钻工艺借助于油气大斜度钻井和水平井方面的成熟经验和钻进技术,岩屑输送不存在技术瓶颈。然而,大直径水平孔内岩屑的运动特征与小直径水平孔和油气钻井区别较大,因此水平定向钻技术在该领域的应用和推广一直受到技术瓶颈的限制。美国土木工程协会管道分会以及欧洲的水平定向钻技术规范 and 标准都认为直径大于 1219mm、长度大于 1524m 的水平定向钻穿越工程施工将会非常困难,而最大的难题就是岩屑运移和钻机动力瓶颈。刘盛兵、向启贵等(2008)对多个水平定向钻穿越工程的案例进行分析并认为大直径水平定向钻穿越在目前的技术条件下依然属于高风险工程,其中孔壁稳定、岩屑输送等技术问题是诱发风险的主要因素。李骁晔、李树雷(2010)在分析和总结了“大口径水平定向钻穿越水阳江工程”后,也将其归结为风险非常大的工程,并将钻井液配比和扩孔施工的技术难题归为产生风险的主要因素。然而水平定向钻技术以其工期短、环境扰动少、相对成本低等优点依然是目前大直径管道铺设工程中的首选方案。

针对上述的大直径水平定向钻技术岩屑运移瓶颈问题,国内外的专家认为提高钻井液性能是解决问题的有效手段,并针对钻井液的各种性能进行了大量的研究和研发。Allouche 和 Baumert 2005 年在总结大量文献的基础上,通过室内实验对钻井液环空流体压力、摩擦角等因素进行分析,提出突破水平定向钻在直径和施工距离上的瓶颈问题不能将研究思路只停留在增加钻机吨位上,而应该综合考虑扩孔过程中其他的相关因素,如钻井液的性能、孔内压力等,才能有效地解决大直径水平定向钻的技术瓶颈,并通过理论研究和实验室测试推导出水平定向钻和扩孔过程中的排屑计算公式。此外,Allouche(2001)还结合美国多个水平定向钻工程,对水平定向钻工艺中其他影响排屑效率的因素进行了深入的分析,并认为提高钻井液性能、选择合适的孔内压力和回拖力等方面都有利于提高水平定向钻工程中的钻进和扩孔效率。我国针对水平定向钻排屑问题的研究起步较晚,20 世纪石油钻井领域针对水平井段钻井液携带岩屑问题进行了相关研究,汪海阁等(1995)采用 8 种不同流体作为携带岩屑的介质,利用正交设计法安排实验,对水平井段同心环空和偏心环空中钻井液携带岩屑的问题进行了实验研究,全面考虑了环空流体返速、钻具旋转、钻具与井眼间的偏心度、钻进速度、岩屑粒径及泥浆性能对岩屑运移的影响,并提出在钻进一定进尺后,停钻循环一段时间,以彻底清洗井内的岩屑来提高下一阶段的钻进效率,该研究内容和结论与水平定向钻的岩屑运移规律具有一定的相关性。21 世纪初,随着水平定向钻工艺在我国的迅速推广,我国对于水平定向钻工艺的相关研究不断增加,张得煊和晁东辉(2007)对现场混合泥浆的粘性、失水性和稳定性因素进行了试验,确定了在两个试验段中形成的混合泥浆的流体类型;通过泥浆性能模型试验测定了传统泥浆和优化泥浆在不同土质中的各种性能的

表现情况,但研究主要对钻进过程进行数值分析,研究不同种泥浆造成的地表沉降和孔壁稳定性,而针对排屑效率的研究内容较少。乌效鸣(2002)也一直从事非开挖钻井液方面的研究,开发了针对水平定向钻的高性能钻井液。

然而,仅靠提高钻井液性能来试图解决大直径水平定向钻孔内岩屑运移难题在实际工程应用中并不理想,甚至无法解决长距离水平定向钻施工的技术瓶颈。根据穿越现场数据以及相关工程的经验,大直径水平定向钻穿越扩孔过程中多以增加钻井液粘度、添加大量促流变剂使泥浆的粘度增加(达到 70s 以上)并采用“活塞效应”的方式进行排屑,这种方式虽然能解决排屑问题,但效率非常低。Ariaratnam(2003)收集美国各地的土样进行水平定向钻室内模拟试验,研究结果表明,高粘度的钻井液虽然有利于大直径水平定向钻的排屑效率,但是降低了钻井液的清孔、润滑、冷却扩孔头与钻头等功效,增加了泥浆泵压和钻机扭矩。不仅如此,高粘度钻井液需要大量的膨润土来进行调制,西气东输一线水平定向钻管道穿越工程中,平均铺设 1000m 的 D1016mm 管道需要的钻井液高达 40 000m³,膨润土用量超过 1000t。因此,要提高大直径水平定向钻的岩屑运移效率,突破大直径水平定向钻排屑技术瓶颈,不能只局限于钻井液性能的研究上,还应该通过研究影响岩屑的运动规律的其他因素,寻求解决问题的新方向。

钻孔内部流场不仅能改变岩屑的运移速度,而且还能改变岩屑在孔内的分布特征和扩散浓度,因此能直接影响岩屑的运移效率。然而,根据现有的文献资料,国内外对于钻孔内部流场问题的研究主要集中在石油钻井领域,目前鲜有大直径水平定向钻工艺特征的钻井液相关研究。国外 20 世纪中叶对石油钻井孔内的流场特征进行深入的研究,我国汪海阁(1993)也针对水平段偏心环空中非流体层流流场进行过相关研究,汪志明、张政(2004)针对水平井钻井过程中由于排屑不良而造成的钻头早期磨损、钻速降低等问题,分析了水平井段岩屑运移的主要影响因素以及岩屑床中流体流动对环空水力学的影响,总结了岩屑在石油钻井水平井内的传输规律。此外,龙芝辉等(2005)以岩屑颗粒单元为研究对象,通过分析偏心环空区域中岩屑颗粒的主要受力,预测岩屑颗粒的运移趋势,认为钻进中钻杆旋转产生的流场能提高岩屑的运移行程,并通过研究结果证明增大钻井液返速和钻杆旋转是避免岩屑下滑的主要措施。这些研究在基础流体理论和研究方法上对于研究和分析水平孔的孔壁稳定性具有一定的指导作用。

第2章 穿越线路和轨迹设计

水平定向钻线路和轨迹设计是整个管道穿越工程中最重要的一部分,合理的线路和轨迹设计不仅能减少施工中潜在的风险,提高工程施工效率,而且能有效降低工程成本和对生态环境的负面影响。水平定向钻穿越线路设计需要综合考虑岩土体特征、地层基本组成、水文资料、穿越的水道宽度及流量、周围地下基础设施埋深、环境敏感性因素、通航、施工空间大小、下游用水户、施工季节和管道直径等因素,为水平定向钻穿越工程选择合适的穿越位置和地层,线路设计的指导思想是在以上因素中取得平衡,确定最实用的解决方案,首选的方案一般是选用成本最低并满足岩土工程可行性和环境保护要求的方案。轨迹设计不仅需要上述的工程地质条件、水文地质条件、区域环境等因素,还需要进一步考虑施工空间、管道设计埋深、钻具最小曲率半径、岩土体特征、安装角度、钻机最大扭矩和拉力以及铺设管线允许的曲率半径等因素,并验算钻杆和成品管道在施工中受到的弯曲应力是否满足其设计强度。本章将讨论轨迹设计涉及的参数及其相关的理论知识和设计方法,包括最小覆土深度、出入土角、剖面轨迹设计和悬曲线设计。

§ 2.1 工程地质条件

水平定向钻线路和轨迹设计都需要充分了解工程区域的工程地质条件,岩土工程勘察是获取工程地质条件及岩土体性质的重要方法,因此岩土工程勘察也是水平定向钻穿越工程设计和施工的基础。

2.1.1 岩土工程勘察

岩土工程勘察工作是所有管道工程设计和施工的基础。不同类型和不同规模的工程活动会给地质环境带来不同程度的影响;反之不同的地质条件又会给工程建设带来不同的效应。岩土工程勘察的目的主要是查明工程地质条件,分析影响水平定向钻穿越铺设管道潜在的地质问题,对工程区域做出工程地质评价。岩土工程勘察按照不同勘察阶段的要求,正确反映场地的工程地质条件及岩土体性质的影响,并结合工程设计、施工条件以及地基处理等工程的具体要求,进行技术论证和评价,提交处理岩土工程问题及解决问题的决策性具体建议,为设计、施工提供依据,服务于水平定向钻穿越铺设管道工程的全过程。岩土工程勘察一般是分阶段进行,可分为可行性研究勘察(选址勘察)、初步勘察和详细勘察三个阶段,其中可行性研究勘察应符合场地方案确定的要求;初步勘察应符合初步设计或扩大初步设计的要求;详细勘察应符合施工设计的要求。

岩土工程勘察的内容主要有:工程地质调查和测绘、勘探及采取土试样、原位测试、室内试验、现场检验和检测,最终根据以上几种或全部手段,对场地工程地质条件进行定性或定量分析评价,编制满足水平定向钻穿越工程各阶段所需的资料文件。

2.1.2 岩土工程问题

为避免或减轻不良地质条件对水平定向钻穿越工程带来的负面影响,线路和轨迹设计首先需要根据水平定向钻穿越工艺的特点来考虑地层岩土体的工程适应性。水平定向钻穿越是采用水平定向钻机先进行先导孔钻进,然后将钻孔扩至设计的孔径,最后将管道回拖完成管道铺设,所有不利于钻孔导向、成孔或固孔的岩土体都可能对水平定向钻穿越工程造成负面影响。学者和工程师根据已有的钻进工程理论和经验,将负面影响较大的地层定义为不适合水平定向钻工程施工地层,将有一定负面影响但可以通过其他处理方法或技术手段消除或减少其影响的地层定义为中等适应性地层,而将负面影响较小的地层定义为适应性地层。表2-1中列出了水平定向钻工艺常见地层的适应性,这些适应性关系是选择和设计线路和轨迹的重要参考。中硬—硬质粘土和淤泥、硬粘土和强风化页岩、中—致密砂层、风化岩层或强胶结地层的成孔和固孔性都比较好,因此都是理想的穿越层,在设计时应该尽量将线路和轨迹置于上述地层;而松散—密实砂砾石层,松散—密实卵砾石层,含有大量孤石、漂石或障碍物地层固孔性较差,存在较大的孔壁失稳风险,属于不利于水平定向钻穿越的地层,在设计线路和轨迹时应该尽量避免。

表 2-1 水平定向钻和地层条件的适应性关系

地层条件	适用	可行但有难度	困难极大
软至极软粘土、淤泥和有机堆积物		√	
中硬—硬质粘土和淤泥	√		
硬粘土和强风化页岩	√		
非常松散至松散砂层(砾石含量重量比<30%)		√	
中—致密砂层(砾石含量重量比<30%)	√		
松散—密实砂砾石层(30%<砾石含量重量比<50%)		√	
松散—密实砂砾石层(50%<砾石含量重量比<85%)			√
松散—密实卵砾石层			√
含有大量孤石、漂石或障碍物地层			√
风化岩层或强胶结地层	√		
弱风化—未风化地层		√	

注:“适用”意味着施工经验丰富的施工方采用合适的施工机具可以较容易完成穿越工程;“可行但有难度”意味着需要对常规的钻进过程和施工设备进行调整或改进;“困难极大”意味着不适合进行水平定向钻穿越。

地表沉积覆盖物的分布状况及其特性、高塑性粘土、膨润性页岩基岩物质、以及结构复杂的硬质或者研磨性基岩地层也可能增加水平定向钻工程施工的风险,这些地层在水平定向钻工程中可能出现的岩土工程和水文地质问题如下。

2.1.2.1 地表沉积覆盖物

地表沉积覆盖物一般包括粘土、粉砂质粘土、粉质粘性粘土、砂土、碎石、卵石等,一般来说,粘土、粉质粘土、粉质粘性粘土属于粘性土层,这些地层在成孔后都能通过自身的结构特

性保持孔壁的稳定;粘质粉砂、粉砂、细砂、中粗砂都属于弱胶结地层,这些地层内部粘聚力很小,当钻头或扩孔头通过上述地层时,只要钻孔内充满泥浆,也可以很好地维持孔壁稳定。但是,如果在水平定向钻施工过程中涉及到粗的颗粒状物质(碎石、卵石、大卵石),则会导致系列的工程问题,潜在的风险包括:

- (1) 钻进过程中钻孔失稳或者坍塌,以及随后导致的卡钻;
- (2) 钻井液漏失到地层;
- (3) 钻井液泄漏并且在地表出现冒浆。

鉴于上述的工程风险,不宜将整个穿越管道铺设于卵石层中,若仅穿越轨迹的出入土段有一定厚度的卵石层时,可采取套管、地质改良、开挖等措施处理后进行水平定向钻管线铺设。此外,还可以根据勘察资料确定不良地层的位置,通过在钻井液中增加应急的添加剂来保证这部分地层的稳定性。

2.1.2.2 高塑性粘土及膨润性页岩

随着粘土和页岩地层的可塑性从低到中的增加,其低电位也相应增加,这是导致水平定向钻施工中渗透的风险增加的主要原因。然而,在导向孔、洗孔和管道回拉过程中高塑性粘土和膨润土页岩的膨胀会发生钻孔部分或完全缩径,从而导致钻孔压裂形成渗流通道造成地面冒浆。因此在设计线路和轨迹时应尽可能避开高塑性土层、膨润土页岩地层,保持设计钻进路径,使得接触到上述地层的可能最小。此外,高塑性粘土和膨润性页岩还会改变钻井液粘度,影响钻进速度。

2.1.2.3 基岩地层

在基岩中钻进不仅施工成本高而且效率低,但从工程地质角度来看,优质基岩是长距离大直径水平定向钻的首选穿越层。大部分工程案例分析也表明,良好的钻孔稳定性能保证孔壁在施工过程中的各个阶段维持稳定。如果基岩地层具有如下的一些特征,也可能增加水平定向钻施工的风险。

2.1.2.3.1 基岩岩体结构复杂,尤其是褶皱和断层基岩沿钻进路径分布

如果水平定向钻轨迹位于基岩结构褶皱和断层复杂的地层环境中,从层理和节理的角度来看,钻进路径中的岩体不仅不连续而且软硬相交,钻头可能在钻进过程中受到岩层的影响而偏离设计轨迹,当导向孔以低角度钻入到地层交互面时,就会产生偏离问题。因此在设计水平定向钻线路和轨迹时应该尽量避开这种复杂的基岩层,如果不可避免要穿越坚硬的基岩,则要尽可能将钻进轨迹与基岩面的夹角调整到最大,有效地减小软硬交互面对导向产生的不利影响。

2.1.2.3.2 基岩岩体不连续构造工艺(如节理和裂缝)

基岩岩体的节理和裂缝会增加钻井液的漏失量,这种影响在水平定向钻的导向孔和扩孔过程中也是不稳定的重要因素之一。钻井液漏失是这类地层需要处理的主要问题。工程实践中常采用添加剂加固岩体和减少节理及裂缝渗透性。

2.1.2.3.3 设计轨迹沿线的岩性和基岩性质变化快

如果水平定向钻的设计轨迹沿线的岩性和基岩性质变化快,会使导向孔的导向控制非常困难。此外,抗压强度高的坚硬基岩或者耐磨性高的基岩也会影响进度和成本,在某些情况下,水平定向钻可能会由于忽略上述问题而导致成本超过预期计划。因此,在设计水平定向钻线路和轨迹时应尽量避开抗压强度高的基岩或者尽量使钻进路径遇到这类地层的可能

性最小。如果钻进过程中不可避免遭遇这类地层,可选用气动锤和冲击矛技术。

2.1.2.3.4 孔隙率较大的地层与岩溶地层

孔隙率较大的地层,如煤层,在很多情况下都存在节理和裂缝,因此在类似的地层中进行水平定向钻施工时泥浆循环损失是增加风险和成本的主要因素,此外,煤颗粒还可以堵塞泵和减少泥浆回收率。石灰岩和白云岩地层常常存在岩溶空洞,类似的情况也可发生在石膏、盐和钾盐组成的基岩地层中。

2.1.3 水文地质

水文地质问题主要和承压条件有关。这些问题通常发生在透水层、含碎石、砂石层之上的粘土层或页岩基岩等不透水层中,透水层会形成一个承压含水层。如果上述含水层有大容量地下水和较高的地下水压,当钻孔与承压含水层交叉并破坏不透水层进入到含水层时,地下水会进入钻孔内部并破坏孔内的泥浆体系,从而导致严重的工程事故。避免上述问题的方法通常采用套管或灌浆来隔离承压含水层。此外,泥浆与含水层交叉影响也会对整个区域的地下水环境造成严重的污染,尤其是当水平定向钻的穿越轨迹设计较深时。

§ 2.2 水平定向钻穿越轨迹设计

通过对上述章节内容的学习和了解,作为一名水平定向钻设计工程师,我们已经掌握并明确了线路设计需要考虑的因素,并且能根据上述的知识在地形图上选择合理的穿越线路。下面将详细地介绍如何在已经选择的穿越线路上设计合适的水平定向钻穿越轨迹。除了上述章节讨论的岩土工程条件,还需了解拟铺设管道的类型、设计参数等信息,并根据它们来设计穿越轨迹。轨迹的设计首先根据管道的最小弯曲半径和钻进禁区来设计穿越截面图,然后根据拟铺设管道、钻机类型等条件设计出土点和入土点的角度和场地布设。

2.2.1 穿越轨迹的设计准则

水平定向钻的设计准则将讨论穿越轨迹的危险区域、最小和最大覆土深度、出入土角度等基本参数以及其相应的计算方法。

2.2.1.1 河流

河流穿越相比其他穿越工程需要考虑更多的影响因素。设计河流穿越的基础信息是河流最新的截面图,尽量选用一年以内河流的截面图。因为河流的深度、河床位置都是随时间而变化的,如果无法在有关部门获取最新的河流截面图,则需要对其进行详细的勘察以确定最新的河流截面数据。河流的冲刷线是截面图中关系到轨迹设计的一个重要参数,但是在很多情况下我们都无法获得河床底部的深度,特别是在河床遭受到持续冲刷的情况下。因此,河流的冲刷线应根据河流的水文数据记录来进行分析和评估。除此之外,河岸的具体位置也需要进行确定,因为河岸和河床深度一样并不是不变的。河岸的位置经常在洪水之后会发生较大的位移,在这种情况下,新的河岸线一般受到浸水区域的影响,所以在设计水平定向钻穿越轨迹的时候需要把河岸线定义在河流冲刷不会使管道外露的区域。河床底部经常会有一些不利于水平定向钻施工的障碍物,如桥墩等。当河道水位非常高的时候,这些障碍物可能导致很严重的工程事故。此外,河流的航道或已规划的航道都需要引起设计人员