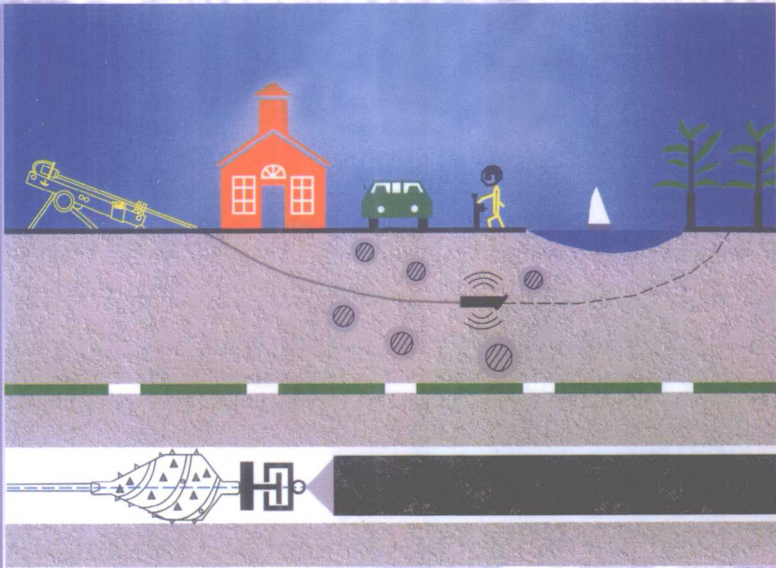


中国地质大学学术著作出版基金资助

导向钻进与 非开挖铺管技术

乌效鸣 胡郁乐 李粮纲 陈 劲 刘国华 王耀峰 编著



中国地质大学学术著作出版基金资助

导向钻进与非开挖铺管技术

乌效鸣 胡郁乐 李粮纲 编 著
陈 劲 刘国华 王耀峰

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

导向钻进与非开挖铺管技术/乌效鸣,胡郁乐,李粮纲等编著. —武汉:中国地质大学出版社,
2004. 10

ISBN 7-5625-1958-7

- I. 导…
II. ①乌…②胡…③李…④陈…⑤刘…⑥王…
III. 地下管线-施工技术-非开挖工艺
IV. TU475

导向钻进与非开挖铺管技术		乌效鸣 胡郁乐 李粮纲 编著 陈 劲 刘国华 王耀峰
责任编辑:徐润英		责任校对:胡义珍
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号) 邮编:430074		
电话:(027)87482760 传真:87481537 E-mail:cbb@cug.edu.cn		
经 销:全国新华书店		http://www.cugp.cn
开本:787毫米×1092毫米 1/16	字数:300千字 印张:11.5 图版:7	
版次:2004年10月第1版	印次:2004年10月第1次印刷	
印刷:武汉中远印务有限公司	印数:1—1500册	
ISBN 7-5625-1958-7/TU·34		定价:30.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

非开挖铺管技术是 20 世纪末全球兴起的新技术方法。它以不污染环境、不影响交通、对地层结构破坏小、施工安全可靠、周期短、社会效益与经济效益显著等技术优势受到了国内外相关行业的关注。从总体上看,我国对非开挖技术的应用研究仍处于起步阶段,与国外相比差距较大,但是随着我国经济的高速发展,非开挖技术已成为一个巨大的产业。本书作者在国家“211 工程”一期计划支持下,开展了大量的理论与应用研究,取得了一定的成绩,在国内相关书籍不多的状况下编著该书,旨在抛砖引玉,以期从事非开挖行业的相关人员共同努力,推动我国非开挖事业的发展。

作为地质工程专业重要前沿之一,本书作者多年来一直在从事非开挖技术方面的实践和研究,并结合我国的实际情况,在非开挖设备与机具、非开挖成孔液、非开挖导航仪、导航控制与规划软件以及工艺试验等方面作了不少具体的工作。在全国各地,包括湖北、广东、河南、湖南、内蒙古等地运用这一新技术,成功地完成了包括自来水、电力、通讯、热力、煤气、排污等管线的非开挖铺设。本书一方面取材于作者的研究成果,另一方面整理、收集了国内外最新资料和信息,融合了原理、设计方法、试验应用效果等诸方面的内容。

本书以导向钻进非开挖铺管技术为重点,包括了导向钻机设计的基本原理、扩孔、清孔与铺管技术、导向钻进导航仪研究以及导向钻进轨迹设计与控制等内容,还涵盖了非开挖铺管国内外信息,各类其他非开挖铺管方法,非开挖成孔液与孔壁稳定,管道的非开挖修复、更换与防腐方法,微型隧道铺管技术,非开挖地质条件勘察,地下管线探测技术以及技术经济评价和风险性分析等方面的内容。

本书的新颖之处主要反映在:①全面地整理了直至 21 世纪初的国内外最新的非开挖技术成果;②将非开挖铺管方法与它的重要支持技术紧密联系起来,对本质性问题进行了深入、细致的科学研究;③理论联系实际,素材源于生产实践,其中包括作者亲自从事的研究内容,对非开挖铺管有直接指导意义;④将地下三维解析方法、传感技术和特殊机具结构设计作为非开挖铺管的技术核心,是本书独特的学术观点和见解;⑤本书内容涉及非开挖铺管技术的全面范围,并以目前国内应用最为普遍的导向钻进非开挖铺管技术为核心内容,具有突出重点、以点带面、图文并茂的写作特点。

全书共十二章,由中国地质大学(武汉)的乌效鸣、李粮纲、陈劲、刘国华、王耀峰和华中科技大学博士后流动站研究人员胡郁乐等编著。其中第一章,第二章的三、四节,第四章,第六章的一、二节和第八章的一、二节由乌效鸣执笔;第三章的一至五节,第五章,第六章的三、四节,第八章的三、六、七节和第九章,第十一章的

四节由胡郁乐执笔;第三章的六、七节,第八章的四、五节和第十一章的一、二、三节由李粮纲执笔;第十章由陈劲执笔;第二章的一、二节和第十二章由刘国华执笔;第七章由王耀峰执笔。

本书可供地质工程及相关专业的研究人员、技术人员、管理人员使用,也可作为有关专业大学生和研究生的教学或研究参考书。

由于非开挖技术是一门发展中的技术,有许多理论和实践问题尚在探索之中,加之作者的水平有限,如有不当之处,敬请读者给予批评指正。

编著者

2004年3月于武汉

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 非开挖管线技术的特点与应用领域	(1)
第二节 世界非开挖技术发展概况	(2)
第三节 我国非开挖技术现状与前景	(4)
第四节 非开挖技术方法的分类	(6)
第五节 非开挖技术的发展趋势	(7)
第二章 导向钻进原理与轨迹设计、控制	(9)
第一节 导向钻进的原理与方法	(9)
第二节 导向钻头力学分析及理论模型	(10)
第三节 钻孔轨迹及三维模拟	(12)
第四节 导向钻进轨迹设计	(15)
第三章 扩孔、清孔与铺管	(18)
第一节 扩孔的基本原理和工艺方法	(18)
第二节 扩孔钻头的类型及适应性分析	(20)
第三节 扩孔中的弯曲问题	(24)
第四节 清孔	(25)
第五节 铺管	(26)
第六节 铺管阻力计算	(28)
第七节 复杂条件下铺管顶推力分析与计算	(40)
第四章 成孔液与孔壁稳定	(49)
第一节 成孔液的功用与类型	(49)
第二节 非开挖水平孔的稳定性分析	(50)
第三节 成孔液性能参数	(52)
第四节 针对砂、砾地层的配方	(59)
第五节 土层中使用的成孔液	(60)
第六节 硬岩土成孔液与润滑减阻技术	(63)
第七节 一些特殊地层的成孔液	(66)
第八节 成孔液的设计、用量计算与配制	(68)
第五章 导向钻机设计的基本原理	(70)
第一节 钻机的功能单元及实现方法	(71)
第二节 钻机铺管能力的衡量标准与设备的选择	(74)
第三节 液压泵与液压马达的设计与选择	(75)
第四节 执行油缸的设计计算	(78)
第五节 调速回路的设计计算	(79)
第六节 钻机的保护设计	(81)

第六章 导向钻进导航仪	(83)
第一节 功用与分类	(83)
第二节 有线式导航仪信号传输原理	(84)
第三节 国内外常用非开挖导航仪性能介绍	(86)
第四节 DXZJ-1 型非开挖导航仪的研究	(91)
第七章 微型隧道铺管技术	(97)
第一节 概述	(97)
第二节 基本原理介绍	(99)
第三节 施工工艺过程及关键技术介绍	(100)
第四节 盾构技术在微型隧道铺管中的应用	(108)
第五节 国外微型隧道铺管施工实例	(111)
第八章 其他非开挖技术方法	(115)
第一节 非开挖技术方法分类与适应性	(115)
第二节 冲击矛	(116)
第三节 夯管锤	(119)
第四节 振动法	(122)
第五节 顶管法	(123)
第六节 跟管钻进法	(124)
第七节 热钻法	(125)
第九章 管道的非开挖修复、更换与防腐	(126)
第一节 概述	(126)
第二节 管线的更换	(128)
第三节 管线的修复	(132)
第四节 管道的腐蚀、控制与选用	(138)
第十章 非开挖地质条件勘察	(144)
第一节 非开挖工程对地层的分类	(144)
第二节 岩土的物理力学性质	(147)
第三节 地下水的影响	(150)
第四节 勘察方法	(152)
第十一章 地下管线探测技术	(157)
第一节 地下管线探测方法综述	(157)
第二节 地下管线定位与定深	(159)
第三节 复杂条件下管线探测	(164)
第四节 导航接收机天线的定位原理	(166)
第十二章 技术经济评价和风险性分析	(169)
第一节 非开挖施工成本分析与经济评价	(169)
第二节 非开挖施工的风险分析	(172)
主要参考文献	(175)
图版	

第一章 概 述

地下管线是城市乃至更广泛区域基础设施的重要组成部分,它越来越如同人体内的“神经”、“血管”和“肠道”,日夜担负着传达信息、输送能量和流通物质的工作,已逐渐成为人们赖以生存和发展的一种基础条件。然而,随着全球经济的快速发展和人口数量的迅速增长,城市化进程不断加快,原有管线的设计容量和运行能力已不能满足发展的要求,管线需不断进行新建、改建和修复。如果采用传统的明挖法施工,将造成交通堵塞、绿地和园林毁坏,有时还因为河道、水网、铁道、机场及建筑物的存在,根本不允许开挖施工。上述诸多弊端和因挖挖填填造成的“马路拉链”现象,引起人们的不满。正是在这样的背景下,孕育和产生了地下管线建设的技术革命——非开挖技术。

非开挖技术,即非开挖地下管线施工技术,国外称 TT (Trenchless Technology) 或 “No-Dig”。它是指在不开挖地表的情况下,利用地质工程的技术手段,铺设、修复或更换各种地下管道和电缆的一种高科技实用新技术。

第一节 非开挖管线技术的特点与应用领域

目前国内外所采用的主要非开挖技术方法有水平定向钻进法、微型隧道法、导向钻进法、夯管法、水平螺旋钻进法、顶杆和顶管法、碎管与吃管法、内衬与喷涂法等。可用来铺设、更换和修复直径 40mm 至 2 500mm 的各种地下管线,距离可达上千米。

非开挖技术可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,对诸如供水、煤气、石油天然气、污水、电力、电信电缆、热力等地下管线的铺设、更换和修复。非开挖技术是对传统地下管线开挖建设方法的一次革命,自正式进入工程施工市场至今,在较短的时期内,以其独到的技术特征与优势,以其对环境、城镇交通的最小影响和危害,以其效率和成本等优势,日益受到人们的重视,取得了很好的社会效益和经济效益。

传统的地下管线施工方法是“挖槽埋管法”。这种被人们戏称为“开肠破肚”的施工方法的主要缺陷是对地上交通与环境的影响极大,使本来已经十分拥挤的城市交通“雪上加霜”,给市民的工作和生活带来诸多不便。人们给这种做法起了个幽默的名字“马路拉链”,虽然幽默,但却是人们对开挖式施工的无奈。另外,开挖施工使道路的质量变差,寿命变短,污染环境,而且地下管线被挖断的事故时有发生,经济损失巨大。与之相比,非开挖铺管技术具有不污染环境、不影响交通、对地层结构破坏小、施工安全可靠、周期短、无须运输和堆放杂土、成本低、社会效益与经济效益显著等优点,具体体现在以下几个方面:

(1) 解决了传统开挖施工对人们正常生活和工作的干扰,减少了对交通、环境、周边建筑物基础的破坏和不良影响。

(2) 在传统方法无法施工或不允许开挖施工场合(如穿越河流、高速公路、铁路、机场跑道、广场、绿地等),可用非开挖技术从其下方穿越铺设,并可将管线设计在工程量最少的最佳位置穿过。

(3)非开挖技术可以高精度地控制地下管线的铺设方向、埋深,并可使管线绕过未曾发现的地下障碍物(如巨石和地下构筑物)及原有地下管线。

(4)有较好的经济效益。在可比性相同的情况下,非开挖管线铺设、更换、修复的综合成本低于开挖法施工。从发展来看,由于原有的密集管网系统的存在,城市管线埋深有加大的趋势,而开挖施工的成本随埋深的加大急增,这时采用非开挖施工则更为经济。

实践证明,在大多数情况下,尤其是在繁华市区或管线埋设较深地带,非开挖施工是开挖施工的极好代替方法;在特殊的情况下,非开挖施工更是一种唯一经济可行的施工方法。

随着非开挖技术的不断成熟,施工技术和设备的不断完善,非开挖技术的应用领域也在不断拓宽。例如:

- (1)在受污染的地下水和地层中设置水平环境治理井的污染物防渗治理工程;
- (2)在地铁、地下人行过道、地下车库等工程中设置管棚,用以加固软土地基的管棚支护工程;
- (3)在大口径集水井钻进中水平辐射孔的水平降水工程;
- (4)对边坡、路基、大坝等钻进各种排渗孔、锚固孔和注浆孔的防护工程;
- (5)在基础施工中进行钢管(板)桩、微桩、土锚、土钉等的施工;
- (6)瓦斯的排放和煤层气的开采;
- (7)钻孔采盐。

水平环境治理井应用实例:在美国纽约市肯尼迪国际机场(JFK Airport)周边地区,由于存在空军基地的飞机燃料库、地下燃料储存库等,污染物在雨水的作用下向地下渗透,污染了地下水和土壤,为此在1996年,有关部门共钻进了53口水平环境治理孔,总长度达9000m,治理费近1700万美元。

为了证实水平环境治理井的有效性和经济性,美国能源部下属的桑迪亚国家实验室与一些工业部门合作,进行了一系列严格的试验,结果表明:

- (1)水平环境治理井对治理沿地层蔓延、深度相对较浅($<15\text{m}$)的污染层是最经济、最有效的方法;
- (2)在很多情况下,使用水平环境治理井比垂直井更为优越,而且不受地表障碍物(建筑物、水平体等)的限制;
- (3)治理效率高,一眼水平井相当于几眼垂直井;
- (4)费用低。

第二节 世界非开挖技术发展概况

非开挖技术虽然已有百余年的历史,但其重大的发展始于20世纪50年代。经历了初期徘徊和艰难起步后,随着技术与装备的不断改进和完善,非开挖以其独特的技术优势和广阔的市场前景受到世界各国的极大关注,最终在80年代中期被发达国家认可和接受。其标志是1986年在英国伦敦成立了国际非开挖技术协会(International Society for Trenchless Technology),简称ISTT。

1896年,美国首次施工顶管法,在铁路下顶进一根混凝土管,从那以后,顶管施工法被视为铁路、公路下铺设管线的标准施工法,其应用遍及美国各地。20世纪60年代后,随着液压技术的发展及大型千斤顶的采用,顶管施工法获得了迅速推广和应用。

微型隧道施工法,或称“小口径顶管法”,于20世纪70年代初在日本首次出现。1972年,

小松制作所研制出首台小口径顶管机。三和公司也于1977年研制成功螺旋式小口径顶管机,并在1984年以前一直处于领先地位,但这一领先地位很快又受到挑战。伊势机(ISHIDA)公司于1979年研制出第一台泥水加压式小口径顶管机,随后又相继推出适合在各种地层中(包括含地下水的地层和含卵砾石的地层)进行管线施工的一系列新型顶管机。至今,日本在小口径顶管施工方面占据主导地位。据不完全统计,日本生产小口径顶管机的厂家有30个,承包商4000家,市场上使用的小口径顶管机有1500~2000余台,每年的施工量约40~50km。

定向钻进和导向钻进施工法因其施工精度高、适用范围广,是发展最快的一种非开挖施工法。这种施工方法是石油工业受控定向钻进技术与管线技术相结合的一种特殊施工方法。20世纪70年代初在美国首先获得使用,随后迅速传到欧洲各国和亚洲部分国家。据报道,美国目前约有1500余台定向和导向钻机在各地使用。

自20世纪60年代初波兰研制成功第一台气动矛以来,气动矛和夯管施工法由于设备简单、操作方便、投资小、成本低而一直受到各国承包商的普遍青睐,至今一直是使用较广的一种非开挖施工法。随着气动矛性能的不断改进及可测式、可控式气动矛的相继出现,可以预见,气动矛施工法在地下管线施工中将进一步获得推广和使用。

由于地下管线的现状和地层条件不同,为了适应不同的地层条件,满足不同的施工要求,各国相继对施工方法和施工设备进行改进,使之可以满足距离更长、直径更大的管线施工要求,所使用的方法有所侧重。例如,日本主要用微型隧道施工法铺设市内污水管道;英国主要的需求在于修复和更换由于年久而被损的现有管道,因而发明和开发了许多非开挖管线更换和修复的方法,主要有:气动矛法、爆管法、软衬法、导向钻进等;美国由于石油天然气和通讯工业的发展,需要铺设大量的石油天然气输送管道和通讯电缆,其中要穿越一些地表障碍物(如河流、铁路、高速公路等),因而定向钻进和导向钻进施工法的发展极为迅速,并得到广泛的应用。

总体上看,在上述施工方法中,发展最快、使用量最多、适用性最强的是导向钻进铺管法和小口径顶管法,气动矛和夯管锤因其设备、机具简单,一次性投入少,也获得了较快的发展和应用。

目前,国外从事非开挖技术与开发的公司众多,如美国 Augers 公司、Vermeer 公司、Case 公司、Cms 公司、沟神 Ditch Witch 公司,德国 Herrenknechi 公司,英国的 ADDS 公司、Powermole 公司、Sevevick 公司、Radiodetection 公司、DCI 公司、PipeEquipment Specialists 公司,意大利的 Collidriu 公司等。在这些发达国家或地区,非开挖技术的应用已十分普遍,投入资金巨大。仅以1992年发达国家所铺设管线的估计值为例(表1-1),一年内的总计铺管长度达24.2万km,总投资达300亿美元。

表1-1 1992年发达国家所铺设管线的估计值

单位: km

国家(或地区)	重力(下水)管道	压力(水气)管道	电缆(通讯、动力)线
北美	15 000	30 000	30 000
西欧	11 000	50 000	90 000
日本	10 000	2 000	4 000
合计	36 000	82 000	12 4000
总计: 24.2 万 km, 总投资: 300 亿美元			

同时,发达国家政府对非开挖技术的科学研究与科学试验也相当重视,并给予大力支持。如美国克林顿政府于1994财政年度批准的七年期“先进的钻探和掘进技术国家计划”(NPA-DET—National Program for Advanced Drilling and Excavation Technologies),就将此技术列

入城市基础设施和建筑业发展规划中,以便解决自来水、污水、动力和通信等管线的非开挖铺设,以增强美国在该领域内的技术领先和市场竞争优势。此外,如英国曼彻斯特理工学院、美国路易斯安娜理工大学、德国波鸿大学等高等院校及时适应产业结构调整的需要,相继设立了非开挖技术专业和相应的研究机构,以培养该领域的专业技术人才,从而使非开挖技术成为企业参与、政府支持、社会提倡的一个新的应用技术领域。

第三节 我国非开挖技术现状与前景

从总体上看,我国非开挖工程起步较晚,非开挖技术装备的开发还不够成熟,相应的科学研究与试验尚处初期阶段,与国外先进国家相比差距较大。但近 20 年来我国的非开挖事业的发展速度较快(图 1-1)。中国非开挖施工技术的应用和发展进程,大致可分为三个阶段:1953—1985 年为第一阶段,即使用传统的非开挖技术阶段;1985 年至 1994 年为第二阶段,即引入国外现代非开挖技术与装备阶段。20 世纪 90 年代至今为第三阶段,即在引进的同时,自行研发非开挖装备与相应技术阶段。

我国最早使用的非开挖施工法是顶管法。1953 年,北京市在市政工程中首次使用顶管法,此后逐渐推广到全国。在这一时期,顶管施工技术的主要特征是:采用人工掘进,不能测斜纠偏,不适合在含水的地层中施工,一次顶进的距离较短等。从 1985 年开始,现代的非开挖技术开始引入中国。首先是顶管技术在中国有了较大的发展,引入了中继间顶管技术、触变泥浆技术、自动测斜纠偏技术以及土压平衡和水压平衡技术。顶管直径从 20 世纪 50 年代的 800mm 发展到 3m;一次顶进长度从几十米发展到几百米,甚至上千米,在含水层中施工也已成为可能。

1959 年,北京地质学院首次采用水平钻进法穿越刚完工的北京市三里河路,铺设了三条高压动力电缆,长度均为 48.5m。

20 世纪 80 年代初,导向钻进技术、夯管法等现代非开挖技术逐渐被引进中国,对我国非开挖技术进步起到推动作用。

中国石油天然气管道局自 1985 年起先后从美国引进大、中型水平定向钻机和水平螺旋钻机,并用于穿越黄河、黄浦江等大跨度河流,以及穿越公路、铁路,铺设石油天然气输送管道;上海市市政工程局 1985 年从日本引进小口径顶管机用于上海的污水治理工程;中国通讯建设总公司 1994 年以来先后从美国和瑞士引进数台导向钻机用于国家光缆干线工程。此外,北京市市政工程局、天津市市政工程局、南京市市政工程局、无锡市市政工程局、大连市市政工程局、上海煤气公司、北京城建三公司、铁道部第四工程局、首钢地质勘察院、武钢建工集团、武汉燃气热力公司等单位均先后从美国、德国、日本、瑞士引进非开挖施工设备。

在该时期,为满足不断扩大的国内市场需要,我国许多部门、单位先后研制开发了可用于非开挖管线施工的设备,以应工程急需。研制成功并投入应用的非开挖施工设备主要有原地

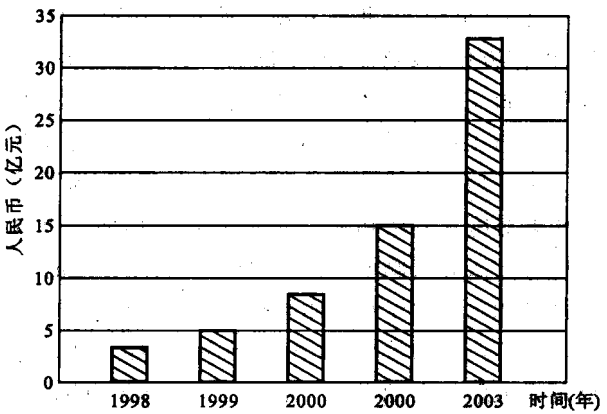


图 1-1 我国非开挖铺管工程费用增长图

矿部勘探所生产的 GBS-10 型导向钻机, M63、108 气动矛, M180、300、377 夯管锤; 原地矿部河北三队与宣化英格索兰公司合作研制的 DZ-290 型导向钻机; 首钢地质勘探公司研制的 FDP-15B 型导向钻机; 河南畅通管道电讯工程公司研制的 SYD 顶推钻机; 上海同济本肇和宝山山油钢厂研制的 PH 系列气动矛和夯管锤; 北京探矿厂的螺旋式小口径顶管机, 以及上海市市政工程研究所和上海隧道股份有限公司研制的 $\phi 1200$ 和 $\phi 1650 \sim 1800\text{mm}$ 土压平衡式盾构机等。此外, 原地矿部河北地质矿产开发局还研制了 GT-1A 导向探测仪。

90 年代中以来, 我国现代非开挖技术开发应用的速度明显加快, 用于非开挖施工的先进设备从无到有, 不仅填补了我国非开挖施工设备的空白, 也为我国非开挖施工技术的推广和应用奠定了基础。其中, 深圳钻通公司和北京土行孙公司的水平定向钻机 2003 年产量已达 300 余台, 市场占有率达 80%, 尤其是小型钻机(回拖力 18t 以下), 成为国产新增钻机的主体, 与国外同类型钻机相比, 具有较强的竞争力。

与此同时, 在非开挖成孔液和导航仪的研制上也取得了新的进展。例如中国地质大学(武汉)工程学院与湖北浠水润泉生化公司研发的“金卫士”系列非开挖工程专用浆液, 以含纤维素、精油和微胶团的复配水溶性植物粉为主要成分, 具有强抑制分散性、高润滑性和大造浆率的优点, 在复杂地层非开挖工程中得到了很好的应用。由中国地质大学(武汉)工程学院与杭州海博地基技术有限公司联合研制的 DXZJ-1 型非开挖导航仪以准确的钻具俯仰角、面向角和足够的探测深度为主要技术参数, 已通过专家组验收, 目前正在进行最后的改进, 准备投产。

另外, 我国在导向钻进轨迹模拟软件设计、导向理论探讨等方面也都取得了长足的进步。

1998 年 11 月, 中国工程院刘广志院士向国务院提出建议: “倡议大力推广非开挖铺设地下管线技术”, 呼吁我国尽快重视和发展非开挖技术, 加强该领域专门人才的培养。

我国非开挖技术协会于 1998 年 4 月正式成立, 当年成为 ISTT 的第 20 个正式成员国。中国非开挖技术协会多次组织国际、国内非开挖技术交流, 起到了引进新技术的桥梁作用, 同时, 该组织一直呼吁加速发展我国的非开挖技术产业, 建议国内相关部门着手技术前沿的研究, 为我国非开挖技术的快速发展和缩小与发达国家之间的差距起到了非常积极的作用。在他们的倡导下, 我国相继在北京、上海、武汉和广州成立了非开挖技术研究中心, 为我国相关技术的研究奠定了坚实的基础。

随着现代文明意识和环保意识的逐渐加强, 城市限制开挖施工的法规陆续出台。中华人民共和国国务院于 1996 年 10 月 1 日公布的《城市道路管理条例》规定, 新建道路 5 年内不准开挖; 修复道路 3 年内不准开挖。这对非开挖技术的推广应用无疑会产生极大的推动作用。

事实上, 现在我国经济处于高速发展阶段, 用非开挖技术铺管的各种工程的增长速度很快, 非开挖技术产业已成为一个潜在的宏大产业。虽然我国非开挖技术产业相对落后, 但就其发展的速度来看, 一个巨大的市场轮廓已经出现。

我国的非开挖技术市场前景十分广阔。从人均管线的现占有量来看, 我国远低于西方发达国家。据 1998 年的数据, 我国自来水和下水道的人均占有量仅分别为 0.18m 和 0.1m, 而欧洲地区人均拥有的上、下水道则为 12m, 分别是我国人均值的 66.6 倍和 120 倍。既然城市各类管网的地下化和城市交通、通讯的立体化是未来城市建设的重要发展方向, 那么随着城市化进程的加快, 我国管线数量和容量远远不能满足发展的要求, 这为非开挖技术提供了看好的用武之地。据国家统计局的资料, 截止到 1995 年 6 月, 我国共有 640 个城市。2000 年, 我国的城市化人口已达 4.5 亿。城市人口的增加, 将使市政基础设施的工程量大大幅度增加, 每年新增管线 4 万 km, 2000 年管线已达 20 万 km, 且有更快速增长之势。近几年来, 在国家西气东

输大工程的背景下,陕北、西南、新疆等地的油气管道、成品油输送管道、天然气输送管道的铺设均需要穿越公路、河流、铁路。另外,我国还有大量的电信管道、光缆线、燃气管道、城市集中供热管道、电力、有线电视网等管线有待铺设,还有更多的环境治理井、工程管棚、集水辐射井、边坡大坝排渗孔、煤层气和采盐井需要建设。无论从环境保护还是今后的市场需求来看,非开挖技术的应用前景都是令人鼓舞的。另一方面,我国已经拥有一个相当庞大的、需要不断更换和修复的地下管网系统。据调查,目前我国省会城市地下管线的总长度一般都在3 000km以上,中等城市的地下管线总长度也在1 000km以上,北京、上海、天津等大城市各种管线的总长度都在6 000km以上。而这些地下管线的寿命是有限的,这就意味着,随着现有地下管线的老化和损坏,每年将会有大量的地下管线需要更新和修复。如北京许多污水管道是20世纪50年代修建的,上海修建得更早,因而污水管塌陷以及自来水管漏水、煤气管漏气等现象时有发生,每年有大量的地下管线需要修复和更新。如此大规模的管线工程量将为非开挖技术提供巨大的市场,前景极为可观。

第四节 非开挖技术方法的分类

非开挖施工的分类方法较多,按用途可分为管线铺设、管线更换和管线修复三大类,如表1-2所示。

表1-2 非开挖施工方法分类

非开挖施工方法	管 线 铺 设	施工方法	典型应用	管 材	适用管径 (mm)	施工长度 (m)
		顶管法	各种大口径管道,跨越孔	混凝土,钢,铸铁	150~900	30~500
		隧道施工法	各种大口径管道		>900	
		导向钻进法	压力管道,电缆线,短跨越孔	钢,塑料	50~350	20~300
		螺旋钻进法	跨越孔	钢套管	100~1 500	20~130
		水平钻进法	跨越孔,水平降水井	钢管	50~300	20~50
		冲击矛法	压力管道,电缆线,跨越孔	钢,塑料	40~200	20~50
		夯管法	钢套管,跨越孔,管棚,打入桩	钢管	50~2 000	20~80
		冲击钻进法	跨越孔	钢管,混凝土管	100~1 250	20~80
		小口径顶管法	小口径管道,管棚,跨越孔	混凝土,钢,铸铁	150~900	30~300
	管 线 更 换	碎管法	各种重力和压力管道	PE,PP,PVC,GRP	100~600	230
		胀管法	各种重力和压力管道	PE,PP,PVC,GRP	150~900	200
		吃管法	各种重力和压力管道	PE,PP,PVC,GRP	100~900	180
		抽管法				
	管 线 修 复	内衬法	各种重力和压力管道	PE,PP,PVC,GRP	100~2 500	300
		改进的内衬法	各种重力和压力管道	HDPE,PVC,MDPE	50~600	450
		软衬法	各种重力和压力管道	树脂+纤维	50~2 700	900
		缠绕法	各种重力管道	PE,PP,PVC,PVDF	100~2 500	300
		喷涂法	各种重力和压力管道	水泥浆,树脂	15~4 500	150
		灌浆法	各种重力和压力管道	水泥浆,树脂	100~600	

注:PE—聚乙烯,PP—聚丙烯,PVC—聚氯乙烯,HD/MDPE—高/中密聚乙烯,GRP—玻璃纤维加强树脂(玻璃钢),PVDF—聚偏二氟乙烯

(1) 管线铺设。根据施工的管径分为两类:管径 $\geq 900\text{mm}$ 的可选大管线铺设方法,如顶管施工法、隧道施工法(即新奥法)等;管径 $< 900\text{mm}$ 的不进入管线铺设方法,主要有水平钻进法、水平定向钻进法、冲击矛法、夯管法、水平螺旋钻进法、顶推钻进法、冲击钻进法、微顶管施工法(微型隧道法)等等。

(2) 管线更换,有吃管法、碎管法、胀管法、挤管法等多种。

(3) 管线修复,有内衬法和局部修复等多种。

从学科领域看,作为一种新型的工程方法,非开挖铺管施工依托于必要的基础理论科学。尽管在非开挖铺管工作中有多种不同的具体技术方法,每种方法有其自身的特点和应用条件,但从总体上看都涉及到一些共性的、基础性的东西。这些相关工艺技术和理论科学包括:机械设备的设计制造、特殊工具的研制、地层岩土性质的分析研究、探测技术、力学分析、材料科学、流体与水力学理论和其他相关技术。结合不同的具体非开挖铺管技术方法,研究利用这些相关工艺技术和理论科学,是深入认识非开挖铺管技术和推动非开挖铺管技术发展的根本。

第五节 非开挖技术的发展趋势

(1) 非开挖的工程区域将有较大的拓宽。就世界范围来看,有待应用非开挖技术的国家和地区为数甚多;就中国来看,除了一些省会城市,绝大部分中、小城市和乡镇都还未开展非开挖工程,而现代化、城市化的进程势必使更广泛的地区很快接收这一新技术。美国 2003 年新建铺管管线中用非开挖铺设的占 11.7%,2004 年占 15.1%。若按这样的比例,我国非开挖铺管的工程量还需大幅度增加。

(2) 非开挖技术的工程服务目标会更多。事实上,非开挖已经把“浅地层水平钻进”纳入为自己的服务领地。这样,不仅前面提到的目前非开挖工程的一些主要目标,而且更多的地质工程或岩土工程项目也是非开挖技术的服务对象。与国外发达国家相比,我国还会在环境治理井、排渗孔、管棚工程、锚固与注浆、集水井辐射和对接孔、浅层气与浅层可溶性矿产开采等更广泛的领域展开非开挖技术的应用。

(3) 在我国,非开挖管道修复与更换技术刚刚起步,2003 年全国的工程量达 180km,比 2002 年的 35km 增加了 4 倍。正呈迅猛上升势头。据近期美国权威杂志报道,美国 2004 年在旧管线修复中用非开挖修复的占了 64%(污水管)和 20%(自来水管)。与之相比,我国在旧管线修复中非开挖技术的使用比例要低得多。从我国已有地下管线庞大的数量和非开挖管线修复与更换的技术经济效果分析,预计大量的旧管线的非开挖修复和更换工程将很快开展起来。

(4) 不同种类的非开挖设备的研发和生产,在少数发达国家已进入系列化,如美国的定/导向钻机和日本的微型隧道机等。我国近十年来非开挖设备的国产化速度显著加快,尤其在水平定/导向钻机的研发上十分突出,微型隧道顶管机也呈上升趋势,这对提高非开挖设备的性价比,促进我国非开挖事业蓬勃发展意义重大。但目前国产设备的系列化程度不高,表现为“中间大,两头小”。集国内优势企业力量,研发过江河与长距离穿越工程的大型设备是一个尖端方向。而微小型和可拆性好的设备更是国内市场看好的研发趋势,因为许多工程的场地受到严格限制,例如城市拥挤的街巷、陡峭的边坡和隐蔽的竖井等。另外,除定/导向钻机和微型隧道机外,其他非开挖工法设备(如夯管锤、气动矛、控向螺旋机、管道修复机、管道更换机等)的国产化进程需要加快,数量需要增多。

(5)现代非开挖工程的核心技术是导向测试与控制。由国外少数公司研制生产的一些专用于非开挖工程的测控仪器(如无线导向钻进仪、有线导向钻进仪、螺旋俯控向器、微速顶管可控向装置等)是近十几年来非开挖技术水平提高、非开挖工程量显著增加的关键所在。导向仪器的研制在我国初露端倪,今后一段时间是这方面技术继续发展的重要时期。从趋势上,①对于地下发射无线技术,需增大仪器的稳定性尤其是抗外界环境干扰的能力;②对于有线技术,将更侧重于便利施工操作的信号传输系统的研发;③地下器具参数的测试与随钻控制的智能化联系将提高到新水平;④某些更新的非开挖测控方法有望问世。

(6)钻具的研制。“工欲善其事,必先利其器”,非开挖钻具除在材料(钻头)、材质(钻杆)上有新的突破外,钻具的结构形式及与系统的接口形式也在不断拓展。近年来配套不同工艺方法的新型钻具,如可控冲击器、振动冲抓器、硬岩钻具和热熔钻具等相继问世。这些新型、高效的非开挖器具可以分别适应不同情况的复杂地层条件(如流沙、淤质土、硬岩层)或特殊的技术与施工环境条件。从趋势上看,钻具向多元化、特色化发展。

(7)非开挖成孔液在排碴、护孔、润滑、水力导向等诸多方面起重要作用。然而,目前非开挖工程中对成孔液的合理应用重视不够,尤其在一些复杂地段(如水敏粘土、流砂、坚硬层、高摩阻段、严重漏失层、长距离和陡曲段),往往造成垮孔、地面塌陷、铺管遇阻、施工速度很慢等严重后果。因此,需根据地层特点对症下药地研发、设计和调配相应的成孔液,以保障高效、安全的非开挖施工。

(8)与非开挖工程的施工和非开挖装备的开发相比,非开挖工程的科学理论分析与计算还相对滞后,主要靠经验施工是目前现状。一些相关的力学数理模型、量化计算公式以及软件程序的研究、开发和应用亟待跟上,例如导向头动力学分析方法、钻孔轨迹三维控制模型、水平孔孔壁稳定性分析公式、顶拉管阻力计算算法、施工综合优化软件程序等等。产生这些具有共性的科学理论指导,对实际非开挖施工的优化、提高效率和质量、保证安全具有重要意义。

第二章 导向钻进原理与轨迹设计、控制

第一节 导向钻进的原理与方法

非开挖导向钻进的成孔方式一般分为两种：干式和湿式。干式钻具由挤压钻头、探头室和冲击锤组成，靠冲击挤压成孔，不排土。湿式钻具由射流钻头和探头室组成，以高压水射流切割土层，有时辅以顶驱式冲击动力头以破碎大块卵石和硬土层，这是目前使用最多的成孔方式。两种成孔方式均以斜面钻头来控制钻孔方向。若同时给进和回转钻杆柱，斜面失去方向性，实现保直钻进；若只给进而不回转钻杆柱，作用于斜面的反力使钻头改变方向，实现造斜钻进。钻头轨迹的监视，一般由手持式地表探测器和孔底探头来实现。在非开挖导向施工过程中，由置于钻头内的探头将钻头所处的位置和工况状态（倾角、工具面角、电池电量、温度）等参数，通过无线信号发射给地面接收仪接收显示，这些信号可以同时传送到微机控制台的同步显示器上，以便操作人员及时修正和更改当前的操作，保证钻头按照设计的线路完钻施工。导航仪的具体工作情况和原理将在第六章中做详细的介绍。

一、导向钻头工作原理

大多数的导向钻进使用一种射流辅助切削钻头，钻头通常带有一个斜面，因此当钻杆不停地回转时则钻出一个直孔，而当钻头朝着某个方向给进而不回转时，钻孔发生偏斜。导向钻头内带有一个探头或发射器，探头也可以固定在钻头后面。当钻孔向前推进时，发射器发射出来的信号被地表接受器所接收和追踪，因此可以监视方向、深度和其他参数。

导向钻头匀速回转钻进时，在钻进推力的作用下，土层作用在造斜面上的反力的方向也沿圆周做均匀变化。如果钻头周围的土层硬度大致相同，在不考虑钻头本身质量的情况下，在一定时间内即可认为反力对钻头的作用互相抵消。与此同时，水射流在孔底切出相同深度的圆槽，导向钻头进行保直钻进，如图 2-1 所示。

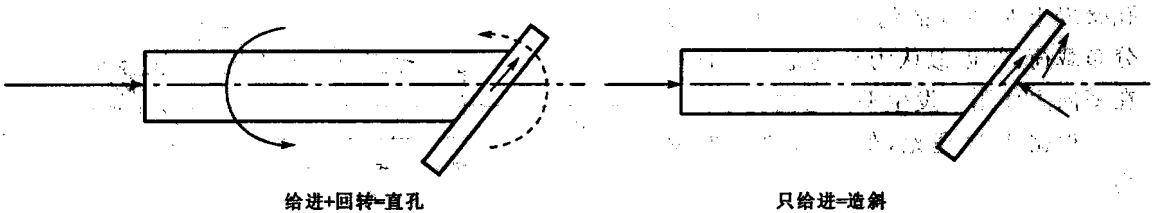


图 2-1 导向孔造斜原理示意图

钻杆只给进不回转时，即只有推力的作用时，则反力作用方向始终朝着某一方向，与此同时，水射流也只冲蚀该方向上的土层。因此，钻头将朝该方向前进，从而实现造斜钻进。由于钻头是靠土层对造斜面的反作用力而使钻孔变向，故土层较硬时，造斜效果较好；反之，造斜效果差。当钻头前方为空洞时将不能造斜。另外，给进速度对造斜效果也有影响。

二、导向孔施工

导向孔施工步骤主要为：探头装入探头盒内，导向钻头连接到钻杆上，转动钻杆，测试探头发射是否正常；回转钻进 2m 左右，完成导向孔，开始按设计轨迹施工。

根据每段铺管设计标高、地层及地形情况，进行导向孔轨迹设计，确定导向孔的施工方案。导向孔钻进是通过导向钻头的高压水射流冲蚀破碎、旋转切削成孔的。导向钻头前端为 15° 造斜面。该造斜面的作用是在钻具不回转钻进时，造斜面对钻头有个偏斜力，使钻头向着斜面的反方向偏斜；钻具在回转顶进时，由于斜面在旋转中斜面的方向不断改变，斜面周围各方向受力均等，使钻头沿其轴向的原有趋势直线前进。

导向孔施工多采用手提式地表导航仪来确定钻头所在的空间位置。导向仪器由探头、地表接收器和同步显示器组成。探头放置在钻头附近的钻具内。接收器接收并显示探测数据。同步显示器置于钻机旁，同步显示接收器探测的数据，供操作人员掌握孔内情况，以便随时调整。这类导向仪器的测量精度一般为 $3\% \sim 5\%$ ，测深能力在 10m 以内，最大可达 15m。在施工中导向钻头的准确位置状态和造斜面方向是通过安装在钻头腔室内的信号发射器及地面跟踪导航仪来测定的。导向钻进是按设计轨迹的参数；当发现偏离设计轨迹时，就通过调整钻头斜面的方向，进行造斜纠偏，直到钻头的位置回到设计轨迹时为止。这样就会钻出和设计轨迹重合或非常接近的导向孔。但应特别注意纠偏过度，即偏向原来方向的反方向，这种情况一旦发生，将给施工带来不必要的麻烦，会大大影响施工的进度和加大施工的工作量。为了避免这种情况的发生，钻进少量进尺后便进行测量，检验调整钻头方向的效果。所以，应考虑各种纠偏的可能性，根据偏离程度，确定纠偏进度。纠偏不能太急，应在几根钻杆内完成纠偏，不能在一根钻杆内就完成所有的纠偏工作。

导向孔完成后，即可以进行扩孔、清孔和铺管工作。在第三章中将详细介绍这些步骤的工艺。

第二节 导向钻头力学分析及理论模型

对导向钻具的受力分析如图 2-2 所示。钻具受顶推力 P 、摩阻力 F 、约束力 q ，钻头斜面处受岩土反作用力 N 。

在钻具造斜的初始阶段，假定上部孔壁岩土对钻具的约束力 q 为三角形分布载荷，并近似认为钻具是一等直杆在横向力作用下发生平面弯曲变形。

根据力学理论，钻具弯曲的曲率为：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EJ} \quad (2-1)$$

式中： $M(x)$ ——弯矩；

E ——弹性模量；

J ——惯性矩。

对于圆管截面的钻具：

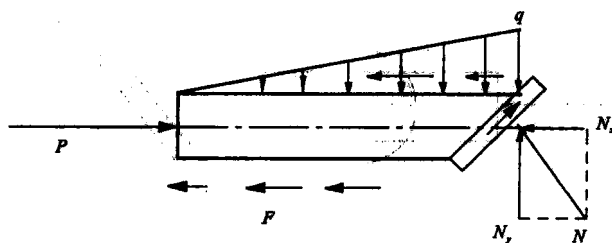


图 2-2 导向钻具受力分析图