

易坍塌地层双管水平定向钻进工艺研究

孔令镨^{1,2}, 王 瑜^{1,2}, 刘宝林^{1,2}, 王志乔^{1,2}, 贺 佳^{3,4}, 杨 博^{1,2}, 胡茂兴^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.国土资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083;

3.中国农业机械化科学研究院,北京 100083; 4.北京天顺长城液压科技有限公司,北京 100083)

摘要:水平定向钻进技术已被广泛地用于铺设各种管线,具有施工速度快,对地面破坏小,不会影响已有管线的正常使用等优点。但是,在砂卵石和粉细砂类易坍塌地层中,常规的单钻杆水平定向钻进常会出现导向偏差和钻孔坍塌等事故。在已有技术的基础上,开发出了一套双管水平定向钻进系统,包括双回转动力头钻机、内外钻杆、双管导向节。通过现场应用证明了该双管系统具有导向精度高、调整方向灵敏等优点,能克服易坍塌地层带来的导向精度差和钻孔坍塌等难题。

关键词:易坍塌地层;水平定向钻进;双管导向节;辐射孔;高密度聚乙烯管

中图分类号:P634.7;TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0009-08

Dual rod horizontal directional drilling technology in collapsible formation

KONG Lingrong^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, LIU Baolin^{1,2}, WANG Zhiqiao^{1,2},

HE Jia^{3,4}, YANG Bo^{1,2}, HU Maoxing^{1,2}

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory on Deep Geo-Drilling Technology of the Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China;

3.Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China;

4.Beijing Tsun Greatwall Hydraulic R & D Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The horizontal directional drilling(HDD) technology has been widely used for laying various pipelines, and has the advantages of high construction speed, small damage to the ground, and no interference to the use of the existing pipelines. However, in collapsible formation such as sand pebbles and fine sand, conventional single-tube HDD technology often encounters accidents such as guiding deviation and borehole collapse. Based on the existing technology, a dual rod horizontal directional drilling system has been developed, including the double-rotary drilling rig, the inner and outer drill rods, and the dual rod guiding section. The field application proves that the dual rod system has the advantages of high guiding precision and sensitive adjustment direction, and can overcome the problems of poor guiding precision and borehole collapse caused by collapsible formation.

Key words: collapsible formation; horizontal directional drilling; dual rod guiding section; radial hole; high density polyethylene pipe

0 引言

水平定向钻进(horizontal directional drilling, HDD)是利用地面钻机驱动井底钻具进行导向钻进和管线回拖的一种非开挖技术。与传统开沟埋管相比,水平定向钻进具有施工速度快,对地面破坏小,不会干扰已有管线正常使用等优点^[1]。

水平定向钻进能在大多数地层中铺设各种管线,但当遇到砂卵石、粉细砂等易坍塌地层时,常规单管钻进技术已无法正常导向钻进^[2]。该类地层的主要特点是结构松散、胶结度差、自稳能力差、单块岩石强度高,故在砂卵石地层中进行水平定向钻进施工会有以下难题:第一,井壁稳定性难题,当松散

收稿日期:2018-07-31; 修回日期:2018-09-07 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.002

基金项目:国家重点研发计划课题“多分支水平井导向钻进与精准注入机具研发”(编号:2018YFC1802404)

作者简介:孔令镨,男,汉族,1993年生,中国地质大学(北京)地质工程专业博士研究生,主要从事水平定向钻进拓展应用研究,北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)国土资源部深部钻探技术重点实验室 207 室,lrkong@cugb.edu.cn.

引用格式:孔令镨,王瑜,刘宝林,等.易坍塌地层双管水平定向钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):9-16.

KONG Lingrong, WANG Yu, LIU Baolin, et al. Dual rod horizontal directional drilling technology in collapsible formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):9-16.

的砂卵石地层被钻开后,在冲洗液冲刷和钻具的扰动下孔壁极易发生坍塌;第二,导向难题,在软硬交错的砂卵石地层中用水平定向钻进(HDD)技术钻进,当遇到较大的漂石时钻孔的方向难以控制;第三,碎岩难题,不同于在岩层中钻进,在砂卵石地层中钻进时,卵石颗粒并不会被钻头破碎而是会随着钻头一起转动,这会导致地面传来的能量不能有效地用于破碎岩石^[3-9]。

在常规的单钻杆水平定向的基础上发展而来的双管水平定向钻进技术能很好地解决以上难题。双管水平定向钻进系统是由双动力头钻机驱动双层钻杆以相反的方向回转,内钻杆可连续钻进,而外钻杆可进行定向造斜和充当套管。

1 双管水平定向钻进研究现状

1.1 双管水平定向钻进造斜原理

水平定向钻进所用的钻头通常设计成斜面状且不对称(如图 1 所示),斜面所承受的力包括钻机推力(P)和地层阻力(F 、 q),而后者又可由垂直和平行于斜面的两个力表示。其中,垂直于斜面的分力被钻机推力抵消。由于钻机推力分力大于地层阻力,最终合成沿斜面方向的造斜力,在造斜力的作用下使钻孔朝着造斜力的方向偏转^[10-11]。

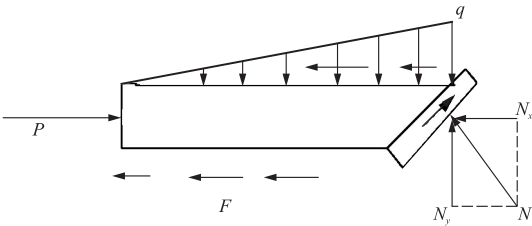


图 1 水平定向钻进钻头造斜机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the deflecting mechanism of horizontal directional drilling bits

与常规水平定向钻进造斜原理相同,但双管导向钻进时使用的是双壁钻杆,双壁钻杆通过导向短节和钻头相连,该导向短节带有造斜面,能保证钻进过程中外管和钻头同时旋转时钻杆轴线和钻头轴线产生的造斜力对钻进方向没有影响,即此时钻孔为直孔;当只有钻头旋转时,造斜力驱使钻头同水平方向呈一定角度钻进,即此时为定向造斜过程。钻进时,钻头埋深、钻孔倾斜角和造斜工具角等参数通过井底探棒发送到地面接收机,从而让司钻及时调整造斜工具角,使轨迹按预定方向钻进^[12]。

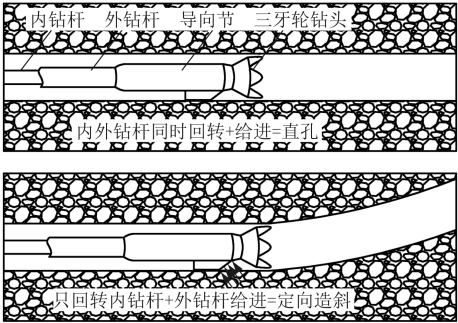


图 2 双管水平定向钻进造斜示意图

Fig.2 Deflecting schematic of dual rod horizontal directional drilling

1.2 国内外研究现状

国内外对双管水平定向钻进的理论研究比较少,一些水平定向钻机生产企业通过实践开发出了部分产品,归纳如下。

(1)美国沟神(Ditch Witch)公司。

20 世纪 90 年代,美国 Ditch Witch 公司研发了一套能用于岩石地层导向钻进的双管水平定向钻进系统,经过不断改进现已发展了 AT 系列(JT2720 AT 和 JT4020 AT)钻机,已被广泛地用于岩层、砂卵石层非开挖铺管。其核心部件双管导向短节结构如图 3 所示^[13]。

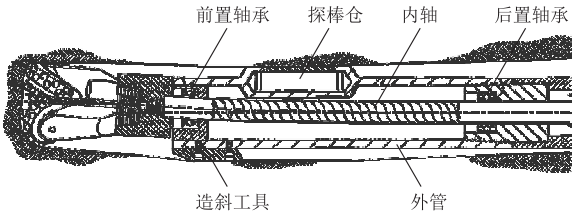


图 3 Ditch Witch 公司导向节结构^[13]

Fig.3 The structure of the Ditch Witch's guide section

导向节由内轴和外管组成,内轴通过前后轴承偏置悬挂于外管内,从而使内、外管轴线成一定角度相交。主要优点有:(1)长度比较短,造斜时曲率半径小,能缩短轨迹长度;(2)造斜工具面靠近钻头,有利于及时调整钻进方向;(3)地层适应性好,造斜工具面通过螺纹固定在外管上,根据不同的地层可更换不同能力的工具^[14]。

(2)无锡中地公司。

该公司开发的双管水平定向钻进系统由双回动力头钻机,双层钻杆,弯接头双管导向节和三牙轮钻头组成。其最大的特点是在于外钻杆接头处设置有台阶刚好能卡住内钻杆的接头,从而使内钻杆只能从外钻杆的一侧插入。双钻杆连接方式如图 4 所

示,外钻杆用螺纹连接,内钻杆用六方插接,内外钻杆可同时连接。

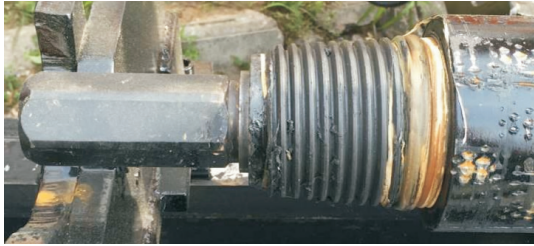


图 4 无锡中地公司双钻杆接头实物图
Fig.4 The joints of the dual rod produced by Wuxi Zhongdi company

导向节分为 3 段,从左至右第一段为悬挂段,用轴承将内杆悬挂在外管上;第二段为弯接头段,通过调整弯接头的方向来调节钻孔轨迹;第三段为探棒仓段,在该段开有容纳探棒的仓室。该导向节是利用第一段与第二段之间的弯接头进行造斜,弯接头的角度为 $1.5^{\circ}\sim 1.75^{\circ}$ 。

该系统的优点是钻杆连接方便,同时连接内、外钻杆,能减少辅助时间。但是存在以下的不足:(1)导向节长度过长,导致造斜段曲率半径增大;(2)内外钻杆不能在轴向发生相对运动,内外钻杆必须同时给进或回拖;(3)内钻杆接头为六方插接式接头处水口小,这会导致冲洗液流量小。

(3)深圳钻通公司。

该公司的双管水平定向钻进技术与无锡中地公司的导向节基本相同,整个导向节分为 3 段,只是将探棒仓向前移动。与无锡中地公司的导向节相比探棒更靠近钻头,在钻进时探测的数据更准确。参见图 5。



图 5 深圳钻通公司导向节实物图
Fig.5 DRILLTO Company's guide section

通过分析发现国内双管水平定向钻进系统存在的主要问题在于钻杆连接方式和导向节结构过长,针对这些问题开发出了一套新型的双管水平定向钻进系统。

2 新型双管水平定向钻进系统

2.1 系统组成

双管导向钻进系统由 3 部分组成:动力部分、探

测部分和变向部分。

2.1.1 动力部分

系统动力部分是天顺长城公司研制的双回转动力头水平定向钻机,为钻进提供扭矩、钻压和回拖力。钻机实物如图 6 所示,各项参数如表 1 所示。



图 6 双回转动力头水平定向钻机
Fig.6 Horizontal directional drilling rig with dual-rotary power head

表 1 双回转动力头水平定向钻机参数
Table 1 Parameters of the horizontal directional drilling rig with dual-rotary power head

名 称	单 位	参数
发动机功率	kW	194
发动机最高转速	r/min	2100
动力头最大输出扭矩	kN·m	28
动力头最高转速	r/min	80
最大给进力	kN	520
最大回拖力	kN	520
给进/回拖速度	m/min	0~10
单次最大给进行程	m	6.5

钻机通过齿轮齿条机构施加钻压和回拖力,图 7 是该水平定向钻机的齿轮齿条给进系统实物图,4 个同步液压齿轮马达驱动载有动力头的小车沿钻机大梁轴线移动实现给进和回拖。



图 7 双回转动力头水平定向钻机齿轮齿条给进系统
Fig.7 Rack and pinion feeding system of the horizontal directional drilling rig with dual-rotary power head

2.1.2 探测部分

探测部分由井底探棒、地面接收机和远程显示器组成,本系统选用的是 DCI 公司猎鹰 F2 导向仪(如图 8 所示)。工作时,探棒安置在井底双管导向

节的探棒仓中,能够将井底参数通过低频电磁波发送到地面,通过手持接收机可跟踪井底探棒的轨迹,从而预测钻进方向,同时可将工具面方位角和钻孔倾角等参数传送到远程显示器上。



图 8 DCI 公司猎鹰 F2 导向仪实物图
Fig.8 DigiTrak F2™ locator system

2.1.3 变向部分

变向部分主要是指双管导向节,可通过控制外钻杆的旋转与否来控制造斜,具体为:当内外钻杆同

时旋转时,钻孔为直线;外钻杆只给进不回转时,钻孔会朝着造斜工具面的 180°方向偏转。

2.2 井底钻具组合

井底钻具主要包括钻头、导向节和钻杆,外钻杆主要用来使内钻杆和滤水管从其中间穿过,由于现有的双管导向钻进系统无法达到这个目的,因此,通过进行设计和选型采用以下组合方式:Ø165 mm 三牙轮钻头+Ø150 mm 双管导向节+Ø144 mm 绳索取心外钻杆+Ø83 mm 非开挖钻杆。

2.2.1 钻头

水平定向钻进常用的钻头种类繁多(如图 9 所示),且不同类型的钻头地层适应性不同:鸭掌式和鸭掌式单牙轮钻头虽然都具有造斜能力,但前者在软土地层钻进效果更好而后者更适用于风化地层;双牙轮和三牙轮钻头均不具备造斜能力,双牙轮钻头可用于较硬地层钻进,而三牙轮钻头无论地层如何均具有较高的钻进效率;硬岩钻头虽具有造斜能力但钻进效率极低,通常应用于岩层导向钻进;鹰爪式钻头主要应用小直径硬质地层导向钻进。

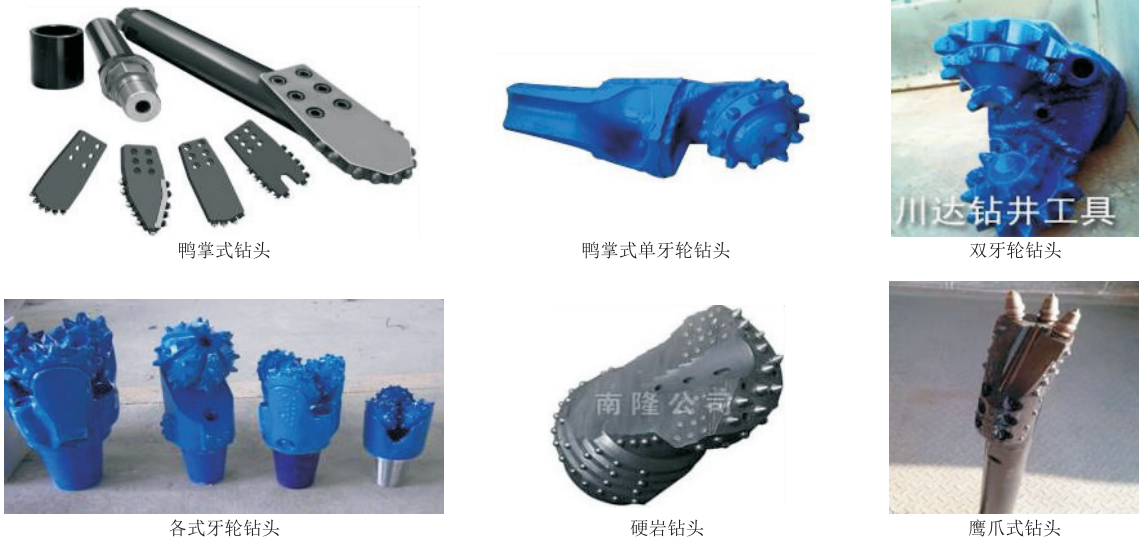


图 9 水平定向钻进常用的各式钻头

Fig.9 Various types of bits used for horizontal directional drilling

通过以上比较分析,拟采用三牙轮钻头进行本次钻进试验。该类型钻头由牙掌、牙轮、轴承、锁紧元件、储油密封装置、喷嘴装置等 20 多种零部件组成(如图 10 所示)。按照密封装置的不同可将其分为橡胶密封钻头和金属密封钻头,前者造价较低,但密封效果不好并且容易导致轴承磨损;后者凭借其优良的耐磨和耐高温性能很好地避免了上述问题,

但其造价较高。结合地层条件和使用寿命,本次试验选用 Ø165 mm 金属密封三牙轮钻头作为双管导向系统的钻头,并扩大了钻头水口以适应反循环排渣的需要。

2.2.2 导向节

导向节起到导向钻进的作用,在本次试验中需具备以下 5 方面的要求:(1)为防止钻进过程出现卡钻

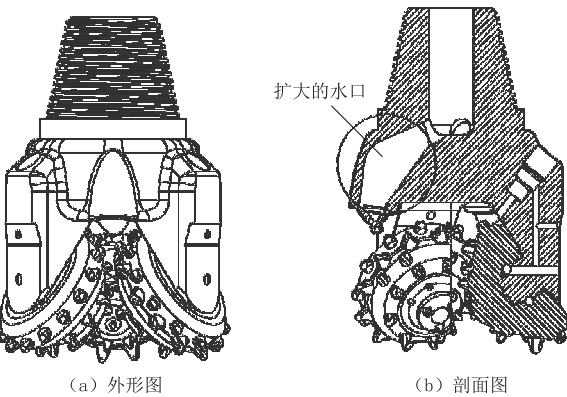
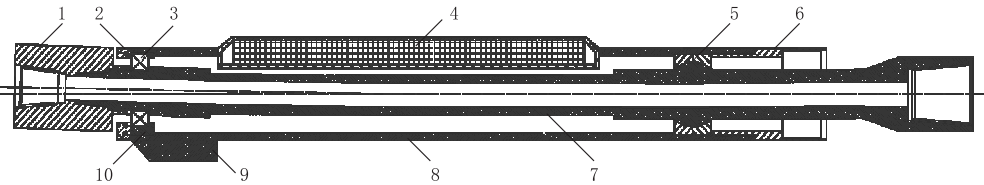


图 10 三牙轮钻头结构图
Fig.10 Structure of the tricone bit

现象,导向节杆体直径应小于钻头直径;(2)为减小钻进轨迹的曲率半径,导向节的长度应尽量短;(3)为避免穿过竖井护筒后钻头在悬空时出现下坠,导向节的质量应尽可能小;(4)为保证钻进结束之后顺利铺设滤水管,导向节应能在钻进时牢固连接双钻



1—转换接头;2—轴承挡圈;3—调心轴承;4—探棒仓;5—弧形支撑;6—异径接头;7—内轴;8—外管;9—造斜工具面;10—轴承座
图 12 直杆式导向节设计图
Fig.12 Straight casing type guide section

钻进过程中,钻杆主要起到 3 个方面的作用:(1)传递钻压和扭矩;(2)为冲洗液提供循环通道;(3)充当套管。

采用双管钻进时,若采用反循环钻进并能顺利回拖滤水管则内外钻杆需同时满足以下 3 个要求:(1)内钻杆的最大外壁直径小于外钻杆的最小内壁直径;(2)外钻杆内壁平整光滑且接头部分不能缩径;(3)钻杆抗拉强度高。根据以上要求,分别设计了内钻杆和外钻杆,具体参数见表 2。

表 2 内外钻杆参数 Table 2 Parameters of inner and outer drill pipe						
钻杆规格	外 径/ mm	壁 厚/ mm	内 径/ mm	接头 外径/ mm	抗拉 强度/ kN	抗扭强 度/(N· m)
Ø114 mm 绳索取心钻杆	114.3	6.4	101.5	127	1500	20000
Ø83 mm 非开挖钻杆	83.0	9.0	75.0	92	990	18000

3 冲洗液循环优化设计

粉细砂和砂卵石地层沉积时间短、埋深浅,没有

杆,之后可轻易拆卸;(5)为通过电磁探棒实时了解钻进轨迹,导向节需能储存探棒,并且在具有良好密封效果的同时保留不妨碍电磁波传输的通道。

双管导向节分为弯接头式和直杆式。如图 11 所示,弯接头式导向节一般较长,因此适合需要较大曲率半径的造斜钻进且造斜过程比较稳定。



图 11 弯接头导向节
Fig.11 Bent sub type guide section

自主开发一款直杆式导向节(图 12 是设计图),靠轴承偏置和造斜工具面来提供造斜力,整体长度比较短,造斜时曲率半径也较小。曲率半径越小,造斜能力就越强,所以在可能的条件下尽可能的选用直杆式导向节。

2.2.3 钻杆

经历成岩作用,是典型的不稳定地层。在其中钻进时井壁自稳能力差,极易坍塌造成卡钻、埋钻等事故。卵石颗粒之间只充填有砂粒,没有胶结物充填,钻进时冲洗液把砂粒带走后将增大卵石之间的间隙。一般用于维护岩石地层井壁稳定的方法都不适用于此地层,现在常用的方法是用跟管钻进,用外钻杆充当套管。在粉细砂、砂卵石等不稳定地层中钻进时,影响钻孔稳定的因素除了地层自身特性外,钻具与井壁之间的摩擦、冲洗液对井壁的冲刷都是不可忽略的。钻具与井壁之间的摩擦可通过优化钻具级配和施加合适的钻压来减轻,可优化冲洗液的循环通道来减小冲洗液对井壁的冲刷作用。

如图 13 所示,双管导向钻进时共有 3 个冲洗液流动通道,分别是:外钻杆与井壁之间的环空、内外钻杆之间的环空和内钻杆中心孔。各通道的尺寸分别为:外钻杆与井壁之间的环空间隙为 25.35 mm,面积为 11121.6 mm²;内外钻杆之间的环空间隙为 9.25 mm,面积为 2680.7 mm²;内钻杆中心孔直径

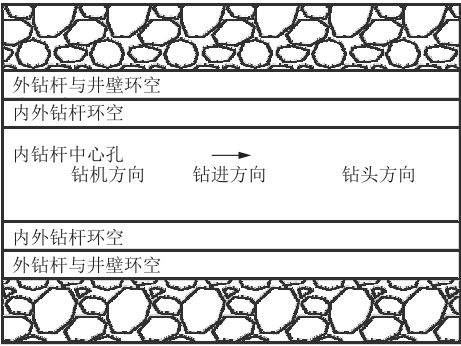


图 13 双管导向钻进时循环通道示意图

Fig.13 Diagram of circulation channel in dual rod guided drilling

表 3 6 种循环模式

Table 3 Six circulation patterns

序号	循 环 模 式	文 字 描 述
1	中心孔—井壁环空循环	冲洗液从内钻杆中心孔流入,从钻头流出后经外钻杆与井壁之间的环空返出
2	中心孔—内外钻杆环空循环	冲洗液从内钻杆中心孔流入,从钻头流出后经内外钻杆之间的环空返出
3	内外钻杆环空—中心孔循环	冲洗液从内外钻杆之间的环空流入,从钻头流出后经内钻杆中心孔返出
4	内外钻杆环空—井壁环空循环	冲洗液从内外钻杆之间的环空流入,从钻头流出后经外钻杆与井壁之间的环空返出
5	井壁环空—中心孔循环	冲洗液从外钻杆与井壁之间的环空流入,钻头流经内钻杆中心孔返出
6	井壁环空—内外钻杆环空循环	冲洗液从外钻杆与井壁之间的环空流入,钻头流经内外钻杆之间的环空返出

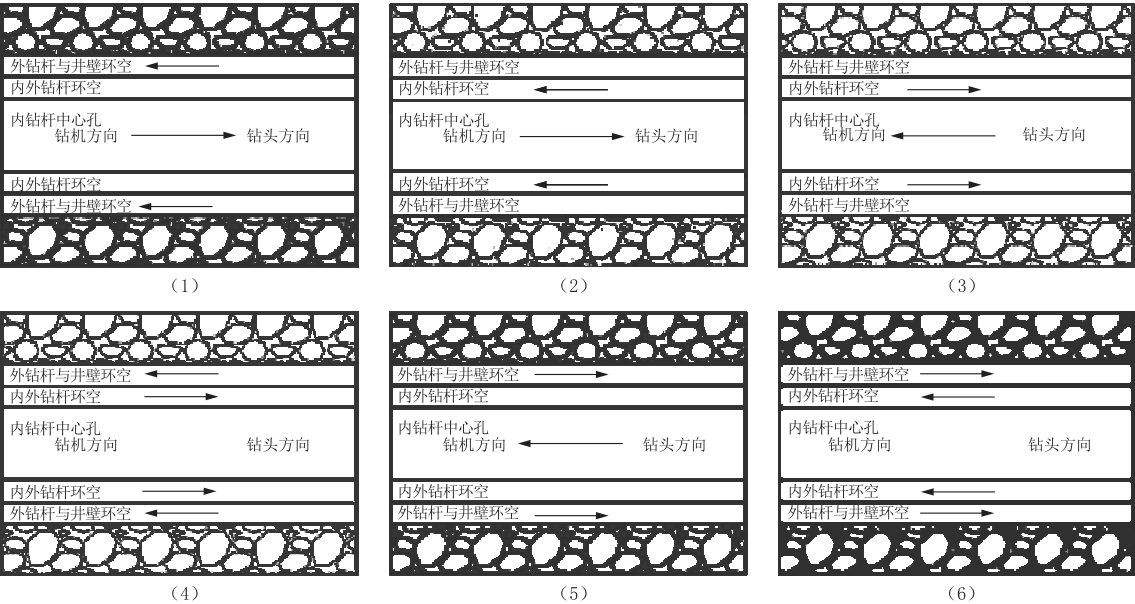


图 14 6 种循环模式示意图

Fig.14 Schematic diagrams of six circulation patterns

一中心孔循环”是反循环。进一步比较两种循环模式可以发现:内外钻杆环空的截面为不规则的圆环,而内钻杆中心孔的截面为规则的等直径的圆。规则的圆截面有利于井底钻屑的排出,所以双管导向钻进选择了第 2 种“中心孔—内外钻杆环空循环”的循环模式。

为 30 mm,面积为 3318.3 mm²。对比发现外钻杆与井壁之间环空面积最大,其次是内钻杆中心孔,内外钻杆环空的面积最小。在考虑正反循环的情况下—共有 6 种循环模式,如表 3 和图 14 所示。

通过对比 6 种循环模式发现,只有两种情况下外钻杆和井壁环空中的冲洗液是没有流动的,分别是第 2 种“中心孔—内外钻杆环空循环”和第 3 种“内外钻杆环空—中心孔循环”。这两种循环模式可以理解为中心孔和内外钻杆环空的正反循环,“中心孔—内外钻杆环空循环”是正循环,而“内外钻杆环空

4 现场应用

4.1 场地介绍

试验的地点选择在山东省东营市河口区孤岛镇,位于山东省北部的黄河三角洲地区。试验地土壤为滨海盐化潮土,上层是现代河流砂、壤质沉积物,下层是海相沉积盐渍母质,地下水水位高,土壤自稳性极差。图 15 显示的是在现场试钻一个直径

为 2 m 水坑随时间变化的状况,从图中可看出地层在钻开 1 h 后就已经坍塌很严重,当 5 h 后已经完

全坍塌,而被地下水灌满。

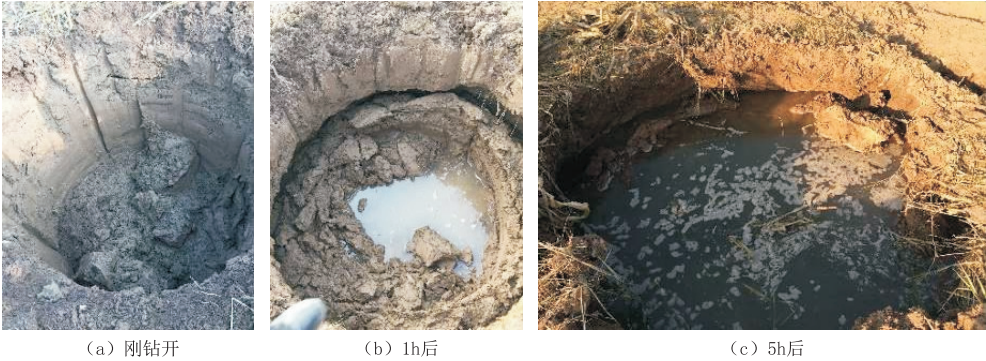


图 15 场地试钻坑随时间变化图
Fig.15 Changing chart of test pits over time at site

4.2 工程概况

为降低土壤中的盐碱,需要修建一口辐射半径为 50 m 的辐射井,该井的覆盖面积为 7854 m²。试验地埋深 4 m 以浅的地下水为淡咸水可用于灌溉,超过 4 m 的地下水含盐量比较高无法使用,所以本次辐射孔设置在 3~4 m 的深度。辐射管选用的是外径为 75 mm,厚度为 4.5 mm 的高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE)管,辐射管通过水平定向钻进的方法铺设到地层中。由于滤水管直径较小且包裹在外表面的土工布容易被划破,所以采用在外钻杆内回拖的方式铺设。

4.3 试验过程

在开始钻进前,需要对 HDPE 管打孔和套土工布,购买的 HDPE 管是盘状,一盘长度为 100 m。在管道上按 5 cm 的间隔布置有直径为 10 mm 的滤水孔,再在其外表套有一层尼龙材质的土工布(如图 16 所示)。

在做好准备工作后就可以开始钻进,由于地层较软且埋深浅,所以从入土点就开始造斜,水平钻进 10 m 后达到预定深度且钻进方向呈水平。钻进到距竖井 3 m 时停泵,当穿过竖井后再开泵。穿过竖井后钻进 20 m 就开始反向造斜,当导向节完全露出地面后,将其拧卸下来。将滤水管与内钻杆固定,通过内钻杆将其回拖到外钻杆中。当内钻杆已完全从地层中抽出后,滤水管也已铺设到位了,最后再起拔外钻杆,就完成了两个辐射管的铺设,施工过程如图 17 所示。

通过本次现场应用验证了双管水平定向钻进系统能正常工作,同时也创新了粉细砂地层铺设小直径

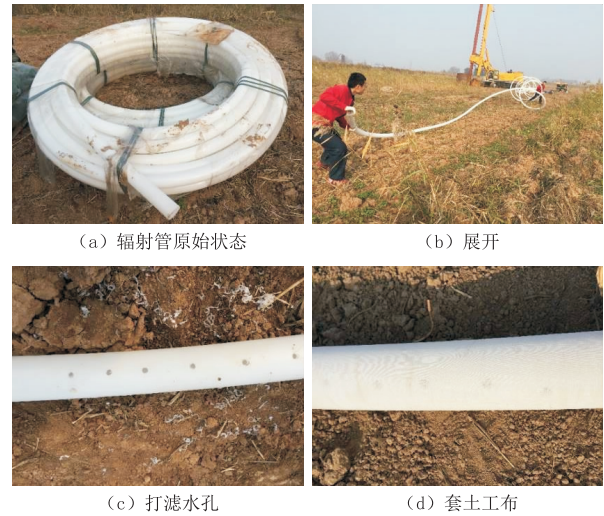


图 16 滤水管处理图
Fig.16 Processing of the filter pipe

管道的方法。通过 3 次钻进完成了 6 个辐射孔的施工,并且保证了滤水管外包裹的土工布是完好的。

5 结论

(1)开发出了一套适用于不稳定地层的双管水平定向钻进系统,包括双回转动动力头钻机、双壁钻杆、双管导向节和三牙轮钻头。

(2)在对比分析了 6 种循环模式后,发现“内外钻杆环空—中心孔循环”模式时井壁与外钻杆间冲洗液流速最小且排渣通道为规则的圆形截面,所以该循环模式在能有效维护井壁稳定的情况下最有利于岩屑的排除。

(3)通过现场试验验证了双管水平定向钻进系统能够在粉细砂这样的不稳定地层中完成管道铺设。



图 17 辐射孔施工过程

Fig.17 The construction process of the radial hole

参考文献 (References):

[1] ASTM F1962. American Standards for Testing and Materials (ASTM) International—(1999). Standard guide for use of maxi-horizontal directional drilling for placement of polyethylene pipe or conduit under obstacles, including river crossings [S].

[2] 王海. 高密度中细砂层的定向钻穿越技术[J]. 石油工程建设, 2010, 36(1): 23—26.
WANG Hai. Pipeline crossing technique with directional drilling in high compact medium-fine sand stratum[J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(1): 19—21.

[3] 赵自亮, 李瑞, 张可能, 等. 预加固砂卵石层水平定向钻进孔壁稳定性分析[J]. 广州建筑, 2010, 38(5): 14—16.
ZHAO Ziliang, LI Rui, ZHANG Keneng, et al. The stability analysis of the horizontal sand pebble hole wall after reinforced [J]. Guangzhou Architecture, 2010, 38(5): 14—16.

[4] 张汉跃. 非开挖定向钻技术在永春县砂砾层中铺设给水管的应用[J]. 能源与环境, 2011, (3): 109—111.
ZHANG Hanyue. Application of the trenchless directional drilling technology in laying water supply pipe in gravel stratum of Yongchun County[J]. Energy and Environment, 2011, (3): 109—111.

[5] 梁小强, 张可能, 赵自亮. 注浆技术在砂卵石地层水平(定)导向钻进工程中的应用研究[J]. 非开挖技术, 2011, (2): 24—29.
LIANG Xiaoqiang, ZHANG Keneng, ZHAO Ziliang. GROUTING technology in horizontal directional (guided) drilling pro-

ject under sand and gravel stratum[J]. Trenchless Technology, 2011, (2): 24—29.

[6] 邱永忠. 非开挖在砂卵石地层中铺设大口径 PE 管道的施工技术[J]. 中国科技博览, 2010, (23): 113.
QIU Yongzhong. Construction technology of trenchless laying large diameter PE pipeline in gravel stratum[J]. China Science and Technology Review, 2010, (23): 113.

[7] 柴希伟, 艾志久, 付彬, 等. 非开挖水平定向钻孔壁稳定性[J]. 科技导报, 2015, 33(3): 63—69.
CHAI Xiwei, AI Zhijiu, FU Bin, et al. On horizontal directional drilling wall stability[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(3): 63—69.

[8] 李琴, 徐果, 黄志强, 等. 管道水平定向钻穿越扩孔孔洞形成机理及孔壁稳定性分析[J]. 地质科技情报, 2017, 36(3): 249—254.
LI Qin, XU Guo, HUANG Zhiqiang, et al. Hole forming mechanism and hole-wall stability of pipeline HDD reaming [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(3): 249—254.

[9] 朱亚凯. 淤泥地质水平定向钻施工难点分析与应对措施[J]. 石化技术, 2017, 24(6): 54—55.
ZHU Yakai. Difficulties analysis and countermeasures in silt geology of horizontal directional drilling construction[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(6): 54—55.

[10] 车延岗. 导向钻进非开挖技术简介[J]. 市政技术, 2002, (4): 41—46.
CHE Yangang. Abstract of guiding drilling technic[J]. Municipal Engineering Technology, 2002, (4): 41—46.

[11] 曹侃. 非开挖定向铺管施工技术[J]. 市政技术, 2010, 28(4): 78—80.
CAO Kan. Construction technology of trenchless directional pipe laying[J]. Municipal Engineering Technology, 2010, 28(4): 78—80.

[12] 美国 Ditch. 双壁钻杆硬岩钻进技术[J]. 地质装备, 2005, 6(1): 12—13.
American Ditch Company. Horizontal directional drilling with double pipe system in rock[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2005, 6(1): 12—13.

[13] 刘振忠. 美国 DitchWitch 公司的导向钻机及其应用[J]. 非开挖技术, 1995, (1): 17—17.
LIU Zhenzhong. American Ditch Witch's directional drilling rig and its application[J]. Trenchless Technology, 1995, (1): 17—17.

[14] Brotherton J L, Layne R R, Sewell C L. Directional boring head with deflection shoe and method of boring; US, US5490569[P]. 1996.

[15] Baumert M E, Allouche E N, Moore I D. Drilling fluid considerations in design of engineered horizontal directional drilling installations[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 339—349.

(编辑 王建华)