

水平定向钻顶管结合工法的可行性分析

贾春磊¹, 潘月宇², 袁 勇², 付 超²

(中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要:水平定向钻工法和顶管工法都具有高效、环保、不影响交通、不开挖地表等优点,但对于穿越距离长、地形地质条件复杂等具有挑战性的工况,单一穿越形式由于其自身工艺的局限性很难满足工程实施要求,如果采用联合穿越,可充分利用各种穿越方式的技术优势,有效降低施工难度、节省投资、更有利于工程安全顺利实施。目前国内外对于这种联合穿越结构形式应用较少,理论研究较为匮乏,未形成成熟的理论和施工技术,针对水平定向钻和顶管工法结合的可行性进行了分析,并且针对最关键的管道曲率半径和顶管始发井长度进行了定量的分析。计算结果表明,钢管不适合直接从顶管始发坑中回拖,而PE管道在直径较小和深度不大时能直接通过顶管始发井进行回拖,节省工程成本。

关键词:水平定向钻;顶管;非开挖;复杂地层

中图分类号:U175

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2016)02-0015-05

水平定向钻和顶管是目前市政、石油、电力、通信、燃气热力管道工程领域最常用的非开挖管道铺设技术,两种工法都具有高效、环保、不影响交通、不开挖地表等优点^[1]。水平定向钻工法(horizontal directional drilling)是采用安装于地表的钻机设备,以相对于地面较小的入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的一项技术^[2]。顶管工法(pipe jacking)则是在工作坑内借助于顶进设备产生的顶力,克服管道与周围土壤的摩擦力,将管道在地下逐节顶进的工程技术^[3]。水平定向钻工法因为不需要工作坑因此施工速度快,综合成本低;然而顶管工法由于掘进机头和铺设管道的一体式的紧凑结构,因此具有更好的地层适应性和更高的施工精度。

随着非开挖领域在设计理论和计算技术的进步,新材料、新工艺的不断开发以及施工技术的改进,定向钻和顶管工艺已经应用到越来越具有挑战性的大型工程中,中石油西气东输、中贵线、中缅线,中石化川气东送、川东北-川西联络线等工程管道穿越长江、黄河及一些大的河流均采用上述工艺;但是当遇到某些穿越距离长、地形地质条件复杂等情况时,单一穿越形式由于其自身工艺的一些限制可能导致工程投资大或根本无法实施,如果采用联合穿越,可充分利用各种穿越方式的适用条件和技术优势,有效降低施工难度、节省投资、更有利于工程安全顺利实施。其中水平定向钻和顶管两种工艺的联合穿越技术能很好地将两种工法的优势结

合,起到取长补短的作用,有效地解决在一些不稳定地层或施工精度要求较高的工程问题,并能大幅减少施工成本。目前国内外对于这种联合穿越结构形式应用较少,理论研究较为匮乏,未形成成熟的理论和施工技术,因此该研究课题具有前沿性,对大口径、大跨度、长距离管道穿越工程具有重要指导意义。

水平定向钻和顶管结合的方式分为2种,可以理解为工艺上的嫁接和对接,第一种是指采用水平定向钻的轨迹设计形式和顶管的掘进铺管方式来进行管道铺设,这样可以将水平定向钻和顶管两种工艺的优势全部结合在一起,这种结合的主要难点是设备的要求,目前德国海瑞克已经进行了相关的研究并且推出了这种施工工艺;第二种是指水平定向钻和顶管工艺的对接,也就是根据地层情况来同时选择这2种工艺,并在交汇处进行对接,最大程度上发挥2种工艺的的优点^[4],这种结合在实际工程中,特别是在大直径水平定向钻具有重大的意义,水平定向钻在穿越河流相地层时卵砾石层和砂层是无法避免的,一般通过在出入土段安装钢套管的方式进行处理,但是钢套管的施工长度由于其工艺原因一般很短,如果能将顶管和水平定向钻进行结合在卵砾石和砂层采用顶管,而黏土和岩层则采用水平定向钻将不仅能提高施工效率而且可以减少工程成本。笔者将针对第二种结合方式从设计轨迹上进行深入的分析。

收稿日期:2015-09-20

编辑:杨 勇

作者简介:贾春磊(1980—),男,高级工程师,主要从事长输油气管道工程研究。E-mail:sleccjia@sina.com

1 曲率半径的设计问题

水平定向钻和顶管属于 2 种完全不同的非开挖工法,如果要考虑 2 种工法结合的可行性,应首先考虑管道材料 and 设计轨迹这 2 个因素。首先,从 2 种工法的工艺特征上决定了 2 种工艺铺设的管材特征不同。水平定向钻工法采用连续回拖的方式进行管道铺设,因此需要采用连续的具有一定抗拉强度的连续管道,如钢管、PE 管和可溶性 PVC 管道;而顶管工法采用顶进的方法将管节顶入,因此需要采用具有一定抗压强度的管节作为管道,如钢筋混凝土管道、球墨铸铁管和钢管。随着材料和工艺的发展,目前钢管和球墨铸铁管在水平定向钻和顶管 2 种工法中都能够得到很好的应用,为 2 种工法的结合提供了条件。

水平定向钻和顶管铺设管道的轨迹具有非常大的差异,前者由 2 个曲线段和 1 个直线段组成,后者则是通过 2 个工作井和 1 个直线段组成,因此在水平定向钻工法中不仅需要考虑管材连接形式,还需要严格验算管道的最小曲率半径,而顶管工艺中则无需考虑管道的最小曲率半径。如图 1 所示,水平定向钻通过设计 2 个曲线段而减少了工作坑的施工,因此 2 种工艺在施工中的对接方式应该是水平定向钻曲线段和顶管工艺的竖井位置的对接,而能进行工法对接 2 种形式分别是同向和异向的 2 种方式,如图 2 所示,但是无论哪种方式,管道的最小曲率半径和顶管工作坑的长度是决定这 2 种工法结合可行性的关键问题,一方面,如果水平定向钻工法设计的最小曲率半径过大,则需要增加顶管工作坑的尺寸,从而增加工程成本;另一方面,如果顶管工作坑过小,不仅会增大管道回拖力还会导致管道破坏。因此,笔者将从理论上分析 2 种工法结合时的曲率半径和工作坑大小的关系。

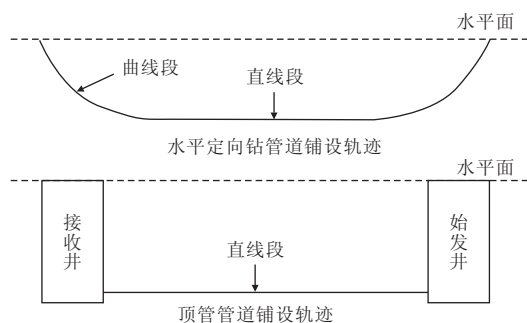


图 1 水平定向钻工法和顶管工法的轨迹对比

Fig.1 Comparison between horizontal directional drilling and pipe jacking tracks

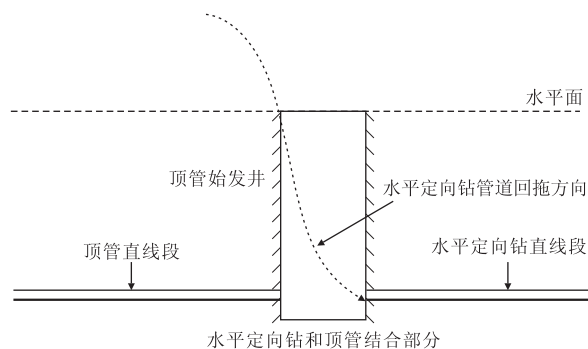


图 2 水平定向钻和顶管工艺结合示意图

Fig.2 Sketch showing the combined horizontal directional drilling and pipe jacking technology

2 根据水平定向钻设计顶管工作坑

水平定向钻工法和顶管工法的设计都是根据自身工艺特点来完成的,其曲率半径主要考虑管道在曲线段是否能满足自身弯曲强度和抗拉强度极限,顶管在设计时一般根据管节和顶进油缸的长度来确定,因此,顶管始发井的尺寸一般较小,水平定向钻的曲率半径问题是制约 2 种工艺结合的关键因素,应根据水平定向钻管道回拖时的最小曲率半径来计算合适的顶管工作坑。此处首先假设管道的最小曲率半径已知。

顶管工作坑设计一般考虑顶管机和管段长度、千斤顶的长度、后背墙的厚度,根据中国建设标准化协会的标准,其最小长度计算公式为:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + m \quad (1)$$

式中: L 为工作井的最小长度(m); L_1 为顶管机或管段长度,取两者中大值(m); L_2 为千斤顶长度(m); L_3 为后背墙厚度(m); m 为考虑顶进管道后退、顶铁的厚度及安装富余量,可取 1.5 m。

采用式(1)进行粗略的计算,常用顶管管段长度为 2~6 m,千斤顶油缸长度和后背墙厚度为 2~4 m,这样一般顶管工作坑长度小于 12 m,如果从工程成本考虑,当顶管工作坑长度过大则会增加工程成本。

上述顶管工作坑长度的计算是从单工艺角度来考虑的,如果要和水平定向钻进行结合,就需要满足水平定向钻管道回拖时管道能从顶管的工作坑中顺利通过,如图 3 所示。实际工程中的管道在通过顶管工作坑时应满足其几何条件,此处为了将计算简化,首先进行如下假设:①水平定向的管道回拖过程中管道从顶管工作坑进入,顶管工作坑不做任何尺寸和结构上的特殊处理;②管道在地面为平行于水平面的直线段,管道在钻孔中也为平行于水平面的直线段;③管道在工作坑中由 2 个相切的曲线段组成。

应该满足设计深度 H 和最小曲率半径下的工作坑长度 L 的计算公式如下:

$$L = \begin{cases} \sqrt{H(2R-H)}, & H < R \\ R, & H \geq R \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为管道铺设的管底深度(m); R 为管道的最小曲率半径(m)。

从式(2)中可以发现,顶管工作坑的最小长度与铺设管道的深度和管道的最小曲率半径相关。

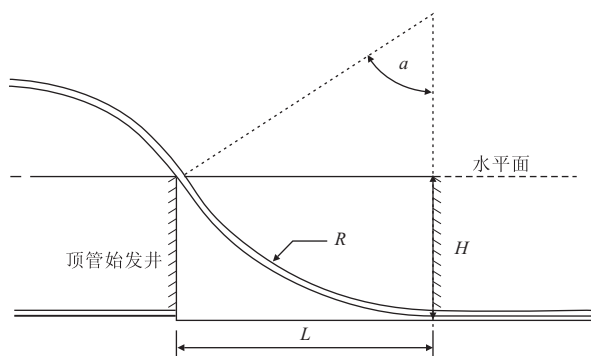


图3 水平定向钻和顶管结合部分的始发井长度计算图示

Fig.3 Length of the portion of the originating wells of the horizontal directional drilling and pipe jacking

3 根据水平定向钻轨迹曲率半径计算工作坑长度

3.1 水平定向钻进的最小设计曲率半径设计

穿越轨迹的最小曲率半径是指为满足管道的力学特征而对入土段和出土段弯曲部分曲率半径的极限值的要求。水平定向钻铺设的穿越管道,一般采用弹性曲线敷设。若弹性敷设的穿越轨迹曲线的曲率半径合适,管道回拖就可以在泥浆中顺利进行,既不会损伤防腐涂层,也能保证管道有足够的强度安全余量;若弹性敷设曲线的曲率半径选择过小,不仅会增加回拖过程中的摩擦力,还会在施工过程中破坏防腐层,严重时会造成整个水平定向钻进穿越工程失败。考虑到实际工程应用,笔者首先根据现行的国家或行业标准来计算水平定向钻工程设计中轨迹的最小曲率半径。实际工程中管道的最小曲率半径除了考虑理论计算外,还考虑了工程的综合因素,首先是管道的安全,其次为了减少管道回拖过程中管道与孔壁的摩擦力,因此采用了大量钻井工程经验推导的经验公式,如 GB-50423 和 CECS-382 中都要求曲线段的最小曲率半径取安装管道的直径乘以 $1200 \sim 1500D$ 的值作为经验值,而 PE 管道和 PVC 管道的最小曲率半径要比钢管小得多,一般,塑料管道的最小曲率半径是由管道制造商提供的。表 1 分别给出了常用钢管和 PE 管道设计轨迹选用的最小弯曲半径值。

表 1 水平定向钻通用管道的最小曲率半径经验值

Table 1 Horizontal directional drilling pipeline common minimum radius of curvature experience

管道直径/mm	钢管/m	PE 管/m
406	488	102
457	549	114
508	610	127
610	732	152
762	914	191
914	1 097	229
1 067	1 280	320
1 219	1 463	366

注:该表根据中国工程建设协会标准《水平定向钻法管道穿越工程技术规程(CECS382)》计算)

3.2 顶管工作坑设计

根据图 3 和式(2)的计算可知,当始发井的底部深度 H 小于管道设计轨迹的最小曲率半径 R 时,始发井的工作坑长度 L 随管道铺设管底深度 H 的增加而增加,因此为了简化问题,首先考虑较小的设计深度,一般顶管设计的埋深应该大于管道直径的 1.5 倍,并且不小于 1.5 m,因此,笔者选择最小的管底深度 H 3 m 进行可行性分析,由式(2)计算不同直径管道的钢管和 PE 管对应的顶管始发井的工作坑最小长度值,结果见表 2。

表 2 根据钢管和 PE 管曲率半径经验值计算得到的顶管工作坑最小长度

Table 2 Minimum length of the pipe jacking work pit calculated according to steel and PE pipes radius of curvature experience

通用管道直径/mm	钢管/m	PE 管/m
406	54	25
457	57	26
508	60	27
610	66	30
762	74	34
914	81	37
1 067	88	44
1 219	94	47

注:假设顶管始发坑的管底深度为 3 m

从表 2 可以发现,如果采用我国现行的水平定向钻工法行业规范对最小曲率半径的设计要求,计算得到 2 种工法结合后顶管始发井的工作坑长度即便是最小直径的管道,也大于 12 m,如果不对顶管工作坑进行变更和特殊处理,则很难在实际工程中进行应用。然而,我国水平定向钻的规范中推荐的水平定向钻轨迹的最小曲率半径因为考虑了管道回拖过程中与周围土体的摩擦力而比管道管材的最小曲率半径要大很多,而在水平定向钻工法和顶管工

法结合的工作坑设计中可以通过滑轮等方法来减小曲线段与工作坑的摩擦力,因此可以采用管道材料的最小曲率半径进行计算。

4 根据管道最小曲率半径来计算工作坑长度

这里只考虑管道管材参数决定的管道最小曲率半径,根据材料力学理论可知,管道曲率半径的计算是根据管道的允许应力和弹性模量来进行计算的:

$$R = \frac{3 \times E \times D}{4 \times S_a} \quad (3)$$

式中: E 为管道的弹性模量 (kPa); I 为钢管的截面惯性矩 (m^4); Z 为断面系数 (m^3); S_a 为规范中给出的允许应力 (kPa); D 为管道直径 (m)。

为分析计算顶管工作坑提供依据,本文根据该公式对直径从 0.406 m (16 英寸) 到 1.219 m (48 英寸) 的通用钢管进行计算,PE 管道的曲率半径理论计算则根据 PE 的相关规范进行,计算中对于钢管的弹性模量和允许应力都使用 X70 钢管的参数进行计算,详细数据见表 3,从计算结果来看,相同直径的 PE 管的曲率半径要比钢管小的多。

表 3 水平定向钻常用管道的最小曲率半径理论计算值

Table 3 Theoretical value of horizontal directional drilling pipe-line common minimum radius of curvature

通用管道 直径/mm	钢管最小曲率 半径/m	PE 管 ($SDR < 13.5$) 曲率半径/m	PE 管 ($SDR > 13.5$) 曲率半径/m
406	190	8	12
457	214	9	14
508	237	10	15
610	285	12	18
762	356	15	23
914	427	18	27
1 067	498	21	32
1 219	569	24	37

这里依然采用最小的顶管始发井深度 3 m,由式(3)计算不同直径管道对应的工作坑长度值,计算结果如表 4 所示。

从表 4 可知,对于钢管,即使采用钢管的理论最小曲率半径进行计算,对应顶管工作坑长度仍然远大于 10 m,因此如果是水平定向钻和顶管结合所铺设的管道是钢管则很难直接使用顶管始发坑进行管道回拖,必须对顶管的始发井进行一定的处理,使其满足钢管最小曲率半径的要求,或者使用球墨铸铁管道。

对于 PE 管道,表 4 的计算结果表明直接采用顶管的工作坑进行管道回拖大部分管径在深度为 3 m 的情况下是可行的,如果我们假设当顶管工作坑长度小于 10 m 在经济上可行,则管道直径小于 900 mm ($SDR < 13.5$) 和 610 mm ($SDR > 13.5$) 的管道是可行的,为了更确切地分析深度增加时的可行性,这里

再通过进一步的计算,结果见表 5。从表 5 可知,随着管道铺设深度的增加,顶管工作坑的长度也增加,当深度达到 9 m 时,大部分 PE 管道也不适合直接从工作坑中直接进行回拖。

表 4 根据钢管和 PE 管曲率半径理论值计算得到的顶管工作坑最小长度

Table 4 Minimum length of the pipe jacking work pit calculated according to the theoretical value of the steel and PE pipes of curvature

通用管道直径/ mm	PE 管 $SDR < 13.5$	PE 管 $SDR > 13.5$	钢管
406	6	8	34
457	7	9	36
508	7	9	38
610	8	10	41
762	9	11	46
914	10	12	51
1 067	11	14	55
1 219	12	15	58

表 5 根据钢管和 PE 管曲率半径理论值计算得到的顶管工作坑最小长度

Table 5 Minimum length of the pipe jacking work pit calculated according to the theoretical value of the steel and PE pipes of curvature

通用管道 直径/mm	深度 $H = 6$ m		深度 $H = 9$ m	
	PE 管 $SDR < 13.5$	PE 管 $SDR > 13.5$	PE 管 $SDR < 13.5$	PE 管 $SDR > 13.5$
406	8	11	8	12
457	9	11	9	13
508	9	12	10	14
610	11	14	12	16
762	12	15	14	18
914	14	17	16	20
1 067	15	19	17	22
1 219	16	20	19	24

5 结 论

对水平定向钻和顶管结合工艺可行性的讨论认为这种结合方式从工艺上是完全可行的,并且联合 2 种工艺不仅能有效地解决河流相区域管道穿越的瓶颈问题,而且可以大幅降低工程成本,然而,在实际工程设计中需要详细考虑顶管工作坑尺寸与铺设管道的曲率半径、管道回拖力大小和工程成本之间的关系。

(1) 顶管工作坑的大小需要综合考虑铺设管道的最小曲率半径、管道铺设深度和工程成本多个方面。

(2) 我国水平定向钻的规范中推荐的水平定向钻轨迹的最小曲率半径因为考虑了管道回拖过程中与周围土体的摩擦力而比管道管材的最小曲率半径要大很多,而在水平定向钻工法和顶管工法结合的工作坑设计中可以通过滑轮等方法将曲线段与工作

坑的摩擦力减小,因此可以通过管道材料的最小曲率半径进行计算。

(3)通过理论计算和分析,管径小于 900 mm ($SDR < 13.5$) 和 600 mm ($SDR > 15$) 的 PE 管道可以直接通过顶管的工作坑进行水平定向钻回拖。

(4)而对于钢管和管径较大的 PE 管道考虑到顶管工作坑的施工成本,应该采用其他方法对工作坑进行处理以满足钢管的最小曲率半径要求,或采用球墨铸铁管和可熔接 PVC 管道来代替钢管和 PE

管道能很好地进行 2 种工艺的联合。

参考文献:

- [1] 马保松.非开挖工程学[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 曾聪,马保松.水平定向钻进理论与技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
- [3] Birch S M.Flow and filtration into HDD wells in river bottom sediments for potable water[D].[S.l.]:University of Alberta,2003.
- [4] Ho P J.Construction of horizontal wells in municipal solid waste using a directional drill[D].[S.l.]:University of Waterloo,2007.

Feasibility Analysis on Combining Work of Horizontal Directional Drilling and Pipe Jacking

Jia Chunlei¹, Pan Yueyu², Yuan Yong², Fu Chao²

(Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Both of horizontal directional drilling (HDD) and pipe jacking(PJ) are highly efficient and, environmentally friendly with no traffic interdiction and no open cut, but when involved into some long distance, complicated topographic and geological conditions, the single method will be challenged due to the technology limitation which may lead to serious engineering problems. Hence, the joint technology between HDD and PJ was taken into account to address the applicable conditions and technical advantages, reduce the difficulty of construction, and save investment. This paper focuses on the feasibility of this combined method by analyzing the most critical radius of curvature. The results show that steel is not suitable for direct pullback originating from pipe jacking pit, while the smaller diameter PE pipe with small diameter and depth can be pullback directly through pipe jacking pit and save engineering costs.

Key words: HDD; pipe jacking; trenchless technology; complex soil

(上接第 14 页)

Development of the System for Measuring Directional Drilling Profiles

Liu Quanli, Zhou Guangyan, Bai Shiwu, Xue Yan, Li Jia, Gao Jing

(Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang Hebei 065000, China)

Abstracts: In complex geological conditions, horizontal directional drilling would be hard to be implemented. Many technical problems appear, such as the bore collapsing and the drill pipe fracturing. Through the study of the ultrasound propagation in the mud, Pipeline Research Institute of CNPC has established a ultrasound model for measuring the directional drilling profiles, and further research measurement system on embedded control platform to figure out the bore shape and the trajectory geological conditions. By the detecting software, the cross trajectory can be displayed in 3D. This system is capable of conducting horizontal directional drilling in complex geological conditions to reduce the risk of crossing.

Key words: horizontal directional drilling; measuring the directional drilling profile; ultrasound propagation