

浅谈穿越水道沉管施工技术的研究与应用

夏志聪

中国一冶集团有限公司，湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026090038

摘 要： 本文使用的穿越水道和沉管技术相结合的技术，与此做法相似的施工方法主要有盾构法、围堰内开挖法、顶管法、钢架跨河法，很好解决传统管道工程在穿越水道施工中进行水中围堰、降排水以及设置架空支架等措施影响河面航道的施工技术难题。该技术相之围堰内开挖法比较，沉管施工开挖土方量少且无需降排水，大大降低措施费，对周边环境和通航影响小，施工工期可控；与顶管和盾构等施工方法相比较，不用投入大型施工设备，技术要求比较低，是工期紧张的情况下最适宜的施工方法；与钢架跨河法施工方法相比较，投入材料少、对通航河道影响。跟传统的穿越水道的其它技术相比较，它很适合于稳定的砂质水道和水流缓慢河床上穿越给排水管道。

关 键 词： 沉管；水道；浮运；水下软基

A Brief Discussion on the Research and Application of Immersed Tube Construction Technology for Crossing Waterways

Xia Zhicong

China First Metallurgical Group Co.,Ltd. Wuhan, Hubei 430081

Abstract： This article combines the techniques of crossing waterways and sinking pipes. Similar construction methods include shield tunneling, excavation inside cofferdams, pipe jacking, and steel frame river crossing. These methods effectively solve the technical difficulties of traditional pipeline engineering in crossing waterways, such as water cofferdams, dewatering and drainage, and the installation of overhead supports, which affect the construction of river channels. Compared with the excavation method inside the cofferdam, this technology requires less excavation and does not require drainage during immersed tube construction, greatly reducing the cost of measures and having minimal impact on the surrounding environment and navigation. The construction period is controllable; Compared with construction methods such as pipe jacking and shield tunneling, it does not require the use of large construction equipment and has lower technical requirements, making it the most suitable construction method under tight schedule; Compared with the steel frame cross river construction method, it requires less material input and has an impact on navigable waterways. Compared with other traditional techniques for crossing waterways, it is very suitable for crossing water supply and drainage pipelines on stable sandy waterways and slow-moving riverbeds.

Keywords： immersed tube; waterway; floating transportation; underwater soft foundation

前言

管道穿越水道工程的施工方法常见的有盾构、顶管和围堰基坑法等，盾构和顶管法适用于管径较大，管线地基基本不穿越岩层、孤石、漂石层的工程，围堰内开挖基坑法则适合河流基本无通航要求、河水不太深、导流工程不复杂的情况^[2]。而沉管施工是穿越水深较深、围堰施工困难、有通航要求的水域的主要方法之一，它相比架空铺设、盾构法施工或者顶管法施工，具有工艺简单，造价低廉的优点，目前在水利工程和市政工程中经常遇到此类的施工条件。

本文结合鱼梁洲污水处理厂过江排污管穿越汉江水下管道安装工程为实例，通过充分论证襄阳市鱼梁洲四面环水的沙洲环境，施工需要穿越较深的汉江水域和道路的水文地质、环境条件等方面，将管道穿越水道的沉管施工方法作为沉管技术的发展与延伸，通过试验将管道运用沉管技术穿越水道，解决传统管道工程在穿越水道施工中采用水中围堰、施工排水或架空横过水道支架而影响河面航道、管道变形严重、加固措施缺乏等施工技术难题，实现了传统的穿越水道和沉管的两种方法完美结合，使其在泥沙类河床质的河道中顺利实施和运用^[3]。

一、工程概况

鱼梁洲污水处理厂过江排污管穿越汉江水下管道安装工程位于湖北省襄阳市鱼梁洲开发区，排污管采用整体沉放施工技术，过江管道为 $2 \times \phi 2000 \times 20$ 压力钢管，跨度为620米，管道承压1.2Mpa，输送介质为处理后污水。河床地形复杂，属于沙洲地质，淤泥层厚0.5~4m，附近存在2跟1.2米运行20年的老旧钢管，施工水深10~18米。



图2 现场施工图

二、研究思路

目前，穿越水道的管道施工技术主要有盾构、顶管、围堰开挖及架空横过等几种施工方法，这几种施工工艺技术成熟，但是盾构适用于直径3米以上的管道施工，顶管和盾构一样具有施工成本高的缺点，对于一般的小型穿越水道的管道工程经济技术上不可行，围堰开挖施工土方量巨大、且切断航道，施工工期长，实际使用并不多，架空横过则只能用于无通航要求的河道^[2]。

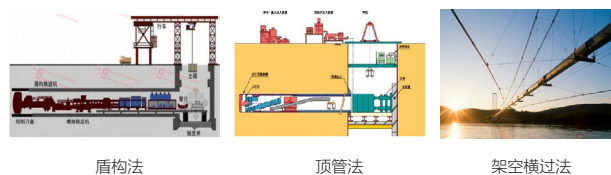


图3 传统穿越水道工艺

（一）现状分析

通过现场探查和勘察报告，主要现状如下：

- 1) 部分居住区污水接入泵站及污水处理厂需要跨水域，水深均超过4m，水域底沉泥厚高达1~3m，跨水域宽度超350m。
- 2) 现有跨水域管网施工技术有架空、拖拉、顶管、沉管、盾构等，而针对不影响航线和超350m水域，仅沉管、盾构适用。
- 3) 沉管施工段四周无加工空地，两边均有通行道路，坡岸落差 ≥ 2 m。

经过分析，涉及超长跨水域主管网采用沉管施工较为经济，其工艺主要考虑水上作业平台、水上加工对接、管道抗倾覆平稳沉落、管网加固保护，等等。

（二）研究方案思路

通过现状分析，寻找病痛点，依次从以下几个方面开展研究：

（1）水上作业平台

经过对资源分析，在鱼梁洲环岛景观带项目水上临岸固结悬浮在水边装运连砂石平台可以使用，但其箱体自拼接不够牢固，无法实现水上随定位随挖随移动。通过研究可加强箱体间连接方

式，自加锚定装置，实现挖机等机械操作平台的水上精确定位和稳定施工。

（2）水上加工对接

跨水域两边可利用空地较少，且施工对陆路交通将造成很大影响，且其施工区域为内湖水系，水深较深。经过研究发现，可通过汉江水运进入内湖，实现水上对接，需着重研究实现管道水上对接、水上合拢、浮运过程中不会因存在偏心使管道在水中翻滚的装置^[3]。

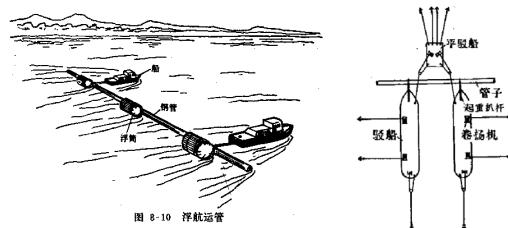


图3.2-1 水上拼接、浮运、定位下管设想示意图

（3）管道抗倾覆平稳沉落

因跨水域长度较长，管道下沉受力不均易出现弯折、变形等问题，通过多船吊装又将受到船体晃动、无法统一调度下沉、管道注水倾覆翻滚的问题^[3]。经过研究发现，通过悬浮自下沉是最为稳定可靠，同时加强牵引，可实现精准就位，如同潜艇。

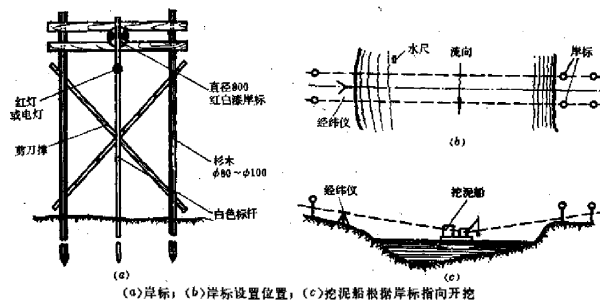


图3.2-2 岸标设想示意图

（4）管网加固保护

因沉管水域底沉泥较厚，且旁边有原围堰降水支架管网，管道直接安放，因管底泥浆厚度不均均有下挠变形风险，全部清除换填将对原有管网产生影响^[1]。通过调查和研究分析，下抛石挤淤法可以实现挤淤和加强地基承载力，但无法实现基槽定位固结、减少河床淘沙和流沙侧移等变形问题，且无法满足过路延伸段堆石路基的受荷挤压，需进一步研究水下自固结保护方法。

三、具体实施方式

（一）水上作业平台及水下沟槽开挖施工

通过对资源和需求分析，受水位、河床影响不宜采用抽沙船、水上抓斗船或挖掘船，在内陆水塘河滩地段水深较浅部分多采用水上挖掘机挖掘，运泥船运走。通过研究，水上作业平台采用装配式构造，运抵现场进行拼装，整个平台由六块钢制浮箱组成，浮箱长向侧边有连接扣，连接扣通过长销钉连接成一体，组

合成宽阔的水上作业平台。装配式构造,方便拆卸和拼装,根据不同作业量大小,可拼装成各不同尺寸的作业平台,适合在施工单位的不同项目的运输和使用。

一台挖掘机站位于在三块浮箱上,挖掘机站们的下方的浮箱下凹一个工字钢厚度,保证铺完工字钢后的表面基本平整,凹槽宽度比挖掘机的履带宽,槽内铺装一排工字钢,工字钢两端头伸出平台边缘,用钢丝绳固定住,工字钢承受挖掘机重量,并将荷载分散到三块浮箱上面,工字钢与浮箱之间的连接销扣两者共同作用,保证三块浮箱受压不均后在浮力作用下不会翻转,保证作业平台整体吃水承重,防止作业平台因受力不均而翻倒在施工过程中可做施工过程中平衡桅杆使用。

在对角设置有两根定位桩,在到达指定水域后,利用挖机起吊将之压入水下淤泥中,来对平台进行平面方向的固定,保证挖掘机作业时平台不会在水面上漂移,影响水下沟槽开挖精度,需要移动平台到下一个施工点时,利用挖掘机拔出钢管定位桩。定位桩仅在平面位置上固定,高度方向可随挖掘机的工作上下升降,相比配备定位桩的抓斗船,其定位桩三维方向固定,在挖掘机工作受到较大冲击力作用而损坏。

作业平台在水上的移动,通过平台上的挖掘机的挖斗在河床的顶推作用下向前移动,整个平台的定位桩和移动工作需要挖掘机的配合完成。

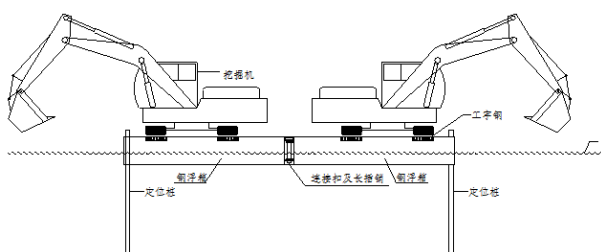


图 4.1 挖机水上施工用装配式作业平台示意图

(二) 浮管、拖管及水上拼接

可控浮箱制作: 钢制可控浮箱的直径为 2m, 三角板支撑托为的板厚为 0.12m, 隔舱钢板厚度为 $t = \frac{1}{20}D$, 则其制作长度 L 按下列公式确定。

$$G_{\text{总}} = G_{\text{管}} + G_{\text{配重}}$$

$$G_{\text{浮}} = \frac{\pi}{4} [D^3 - (D-2t)^3] \times 7.85 \times L + \frac{1}{6} \times \pi [D^3 - (D-2t)^3] \times 7.85$$

$$F_{\text{浮}} = \frac{\pi}{4} D^2 \times L \times 1 + \frac{1}{6} \times \pi D^3$$

$$(F_{\text{浮}} - G_{\text{浮}}) \times N - G_{\text{总}} \geq [\text{允许值}] \times N$$

式中: $G_{\text{总}}$ 为可控浮箱承载重物的总重量; $G_{\text{配重}}$ 为三角板支撑托、H 型钢的总重量; $G_{\text{浮}}$ 为每个可控浮箱的重量; $G_{\text{总}}$ 为可控浮箱要承载的总重量; $F_{\text{浮}}$ 为重力与可控浮箱的浮力相等的物体重量;

N 为可控浮箱的个数; 所述允许值 ≥ 1 吨。

管段采用浮力可控浮箱浮运, 可控浮箱两个为一组, 每 200m 管段下面搁置两组可控浮箱, 吊入河中采用船吊吊起放置于特制的可控浮箱上面, 管段与浮箱连接 (管段位于浮箱的上方) 并采用浮箱浮运, 每段长度为 200 米为限, 水上拖船将管段拖至原位管道接长位置处, 将管段放置在临时搁置横梁上, 然后依次进行水上对齐接装和焊接接长。

最终在水面上形成两大段, 沟槽两端均安装有钢管桩、钢梁及起重卷扬机组成的水上支撑平台。将大管段放置在支撑平台下面临时搁置横梁上。在浮箱和支撑平台起吊作用下控制住两大管段, 运用船吊调整两大段钢管的直线对齐, 然后在水上完成最后的焊接合龙, 形成一整段钢管。有效减少地面拖拉对焊对管道造成的刮擦损坏, 同时合理利用水上广阔空间, 减少对路面交通影响。



图 4.2-1 可控浮箱、浮运示意图

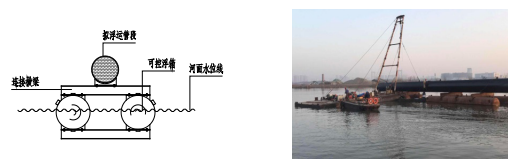


图 4.2-2 浮运、水上拼接示意图

(三) 浮箱式水浮法管道沉管施工 [4]

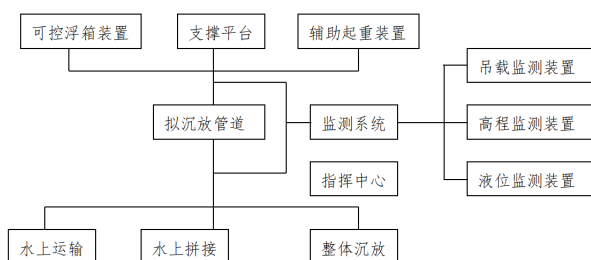


图 4.3-1 浮运和沉放流程图

在统一指挥下将钢管横管成形水平浮在管中基槽上的河面, 将管道在水上调节成就位基槽时的姿态, 打开两管端的排气阀。然后, 打开进水口, 向管道进水管用水泵强制灌水。待管段半浮状态时, 人工将拆除管段与浮箱连接, 改变浮箱与输水管之间的位置关系, 将管段安装在两浮箱之间上横梁下跨中, 将浮箱和输水管设计在同一水平面上, 通过对浮箱内注水或加压来实现浮箱浮力和姿态的调整, 在支撑平台、辅助起重装置的共同作用下对已经接好的输水管进行沉放, 沉放时, 支撑平台和辅助起重装置控制管段的水平位置, 调整可控浮箱的浮力来控制管道的下沉的空间位置。根据管道两端排气口的排气情况, 分多次协调指挥各辅助起重装置, 并同步往可控浮箱中注水, 缓慢分梯次放松钢丝绳, 使钢管随着水不断灌入缓慢下沉, 每次下沉 0.2m。管道下沉

过程中,各吊点应同步不断进行调整,以保证各吊点受力的合理分布。

期间不断复测管体高程和轴线坐标,如超出偏差值,应及时启动辅助起重装置,配合可控浮箱移动以纠正管体。最后,选择水性较好的潜水员下水检查管底与枕梁、沟底接触情况,确保管体顺直、平稳。检查合格后,紧固进水口处的法兰封板,安放好楔块及固定好沉管两端端头,以稳定管体。潜水员拆除管道上附着的可控浮箱,调整其浮力,使其浮出水面,完成管道的沉放。

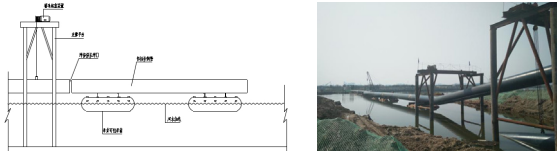


图 4.3-2 钢支撑平台及浮箱共同作用下的管道拼接状态



图 4.3-3 沉放前钢管与浮箱状态

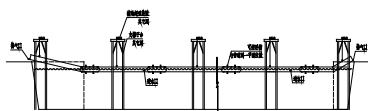


图 4.3-4 钢管整体吊起沉放示意图

管道沉放到底后进行管道水压试验,试验前检查钢管位置是否符合设计要求。确认后无误后,由潜水员下水栓紧进水管法兰盘螺丝的作业。水压试验时,打开排气阀,逐步升压至试验压力 1.0MPa,升压过程中安排专人负责观察检查,及时掌握压力表的变化情况。随后,恒压,检查接口、管身无破损及漏水现象,且 10 分钟降压小于等于 0.05MPa,试验结果合格。如果降压大于 0.05MPa 时,由潜水员下水检查进水管封板,并依次检查螺母紧固,两岸人员同时检查两端试压管件有无泄漏并及时处理,直至试压验收达到合格要求。



图 4.3-5 钢管沉放、水压试验示意图

其中,监测系统设有指挥中心,包括起重测量监测装置、高程监测装置和液位监测装置,起重监测装置是设置在支撑平台上的力传感器,用于测量钢管重力变化;高程监测用于测量钢管沉

放下降的位移,液位监测为设置在钢管内部的投入式液位计,用于测量钢管相对水面的高度。另外,在可控浮箱上安装有传感器,监控可控浮箱的液位以及浮力的下沉速度。

钢管自身的应力应变监测及分析,钢管应力监测各监测点分布间距 ≤ 30 米,在管道弯头部位适当增加监测点位,测点布置如图示:

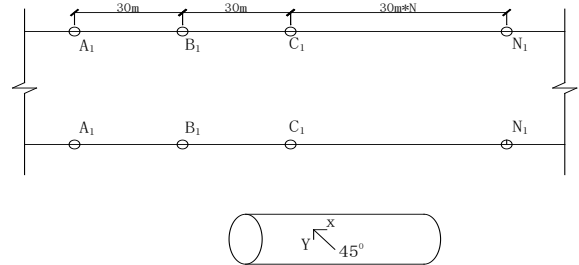


图 4.3-6 测点布置示意图

应力分析采用管道应力跟踪监测专用软件,实现自动循环采样,自动传输,自动计算应变、应力、合成应力及合成应力增量,能绘制出合成应力随时间的变化曲线。合成应力达到一定数值时,分三级填入预警、报警结果表中($\sigma_i > 180\text{MPa}$ 为预警, $\sigma_i > 210\text{MPa}$ 为报警, $\sigma_i = 235\text{MPa}$ 为极限应力),钢管整个沉放过程中对测点的应力应变情况作自动跟踪监测,电脑随时显示监测结果,测取数据实时自动存入电脑硬盘中。

(四) 沉管下方悬空软基水下抛石吸泥压浆加固

根据放坡坡度,放出坡脚边线,进行物探,确定抛石范围和下水管道的位置并做出标记,对水下管道进行标记和保护,用运输配合挖掘机械进行水下抛石,挤出水沟底淤泥,抛石过程中在抛石层靠近底部预埋压浆钢管,待抛石到顶面距管底 20cm 后改用石屑进行管道周围的回填,直至填平水沟下面的管道水下开挖水槽,其表面覆盖一层防渗土工布,这样就形成了水下沟槽管道下方的底部为抛石挤淤层、堆石层及上面缓冲层三层构造,防渗土工布再往上回填砂砾,接长压浆管到岸上,分别在两侧端头接上压浆泵进行压浆,沿压注方向在距离压浆点一定距离接上吸泥泵进行真空抽泥,将抛石层挤出的存在于块石间隙间的淤泥和水抽出,同时在负压驱动下,压注的水泥浆能很好的渗透到整个堆石层和部分的抛石挤淤层,由于防渗土工布下面的水随淤泥一起被抽走,压注的水泥浆形成压注通道,水泥浆不会被水所稀释而影响其性能,同时通过吸泥管也可以监测到压浆的在水下堆石层中的充盈情况,控制水下堆石较好地形成堆石混凝土整体,使管道下方不能碾压的块石的承载力满足设计要求^[1]。

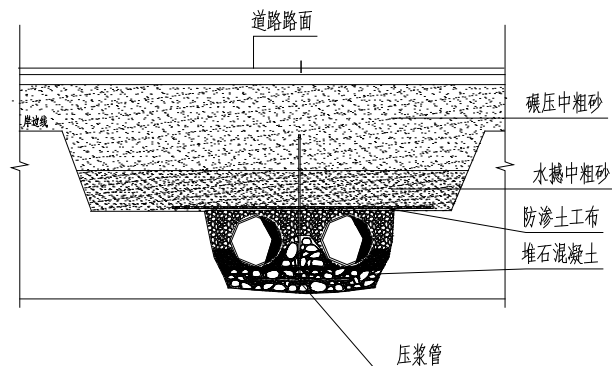




图4.4 抛石吸泥压浆加固示意图

压浆完成后,从两通接头处拆除压浆立管及外露水平管,由于管道上方采用的是具有排水功能砂砾回填,采用水撼法施工,回填8:2砂砾混合料,砂砾混合料在水中处于饱和状态,接着使用插入式振动器插入土中震撼,使其振捣密实。插入式振动器具体插入深度根据填土厚度调整,一般振动棒头离填料底面15cm左右,振动停留时间为20s左右。

四、实施效益分析

(一) 经济效益

(1) 过江管道采用整体沉放施工技术,与围堰明挖施工、吊装法沉管、配重法沉管、拖管过河等技术措施相比,管道的稳定性好,节约陆地占用面积,减少机械设备的使用量和水下作业时长,具有施工速度快、工期可控、降低施工成本的优点。通过项目实践应用,工期共节约14天,节约节约人工费10%,节约机械费30%。

(2) 沉管下方悬空软基水下抛石吸泥压浆加固中,块石的大量使用大大减少了混凝土的使用量,每立方堆石混凝土仅需40%~45%的混凝土,相应地可节省45%水泥用量。

(二) 社会效益

(1) 应用整体沉入技术,与盾构、顶管等施工方法相比,穿越水道沉管施工技术具有工效高、改善作业环境、减少不安全因素的优点。不需要大型施工设备,避免了沟槽开挖和管道沉放过程倾覆危险,不占用陆地空间,减少陆地环境的污染。水上浮筒便于运输和组装,大大节约施工工期。

(2) 沉管下方悬空软基水下抛石吸泥压浆加固,采用吸泥和压浆同步进行,在防渗土工布隔离作用下水无法进入堆石层,形成负压和注浆压力两者作用力,按设计意图在堆石中形成压浆通道,使水泥浆完全的挤满堆石间隙,水泥浆不会被水稀释,形成致密的堆石混凝土整体。通过压浆法施工,可有效解决抛石挤淤受管道影响不能碾压,仍能使松散的堆石固结成混凝土整体。其施工工艺简单流畅,提高了施工效率,缩短了工期,相比箱涵方案,更是节省了工程造价。

(3) 水上作业平台在使用过程中,充分利用挖掘机的功能,完成定位桩和作业平台的水上移动,相比抓斗船等专业作业船而言,无需配备船体动力设备和电源提供动力,操作十分简单,拆卸简易,便于长距离运输,使用成本低廉。定位桩仅在平面向上固定,高度方向可随挖掘机的工作力变化在水面上上下升降。其构造简单,就地取材加工成型,特别适合施工单位。

五、实施效果评价

穿越水道沉管施工技术,顺利通过实践检验,实现了传统的穿越水道和沉管的两种方法完美结合。施工过程沉放平稳,管道对接在支撑平台、可控浮箱对管道的水平及竖向位置准确控制下进行原位拼接高效、精准,未出现管道弯折,比传统的投入大量船吊进行控制明显安全性高,沉放的施工成本降低40%。沉放时钢管能通过可控浮箱的提供的可变浮力进行,在可控浮箱及钢支撑平台上的辅助起重装置的控制下能做到大直径刚性管道缓慢、均速、均衡下沉,注水下沉时管道没有发生推移翻滚。横穿道路的钢管下方悬空软基水下抛石压浆加固基础,使管道基础稳定,使软基础得到很好的解决,很好保障管道上方后期修路通行。软基处理稳定,修路后地基承载力及完成检测合格,管道无影响。

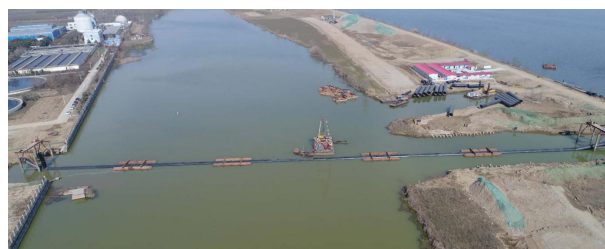


图6 实施航拍图

六、结语

本文在分析了将传统的穿越水道和沉管的两种方法相结合形成穿越水道沉管施工技术,成功解决在大跨度钢管沉管施工面临的水上作业平台、水上加工对接、管道抗倾覆平稳沉落、管网加固保护等方面问题,使泥沙类河床质的河道中进行穿越水道沉管顺利实施,通过这一工程实例得到以下几点启示:

1. 由于管道为 $\phi 2000 \times 20$ 压力钢管、跨度620米,沉放时宜受风浪影响,使用的助沉浮箱不仅需要满足固定平衡管体,且须具备一定抗风浪的平稳能力,如大体积潜水艇式浮箱,避免出现倾覆侧翻事故,保证沉放关键阶段的安全、质量。

2. 沉管采用陆上焊管、接管、涂刷、吊装,宜遇到施工场地受限、管道多次周转吊装对管道的刮蹭、长距离吊装受力不均变形、水边软弱地基架设起重设备倾覆安全和水上投入大型吊装设备等问题。沉管中焊管、接管、涂刷、吊装等工序应采取水上施工,可进一步提高施工质量和安全。

3. 受水位、河床影响,在内陆水塘河滩地段水深较浅部分多采用水上挖掘机挖掘,近年来出现挖机倾覆掉入水中问题层出不穷。为确保稳定性,水上挖掘机平台通常体积大、水上定位困难、稳定性较差,采用装配式在确保稳定性基础上实现平台小吨位吊装、自由拼接;采用自插杆不仅可以作为稳定性船桅,也可自行定位操作,具有良好的使用性能。

4. 管道沉放常规采用多吊点 + 注水下沉, 多节点吊装不仅要多节点测算吊点受力, 还需要精准统一的吊放水平, 操作工水准要求高, 管道受力薄弱点多、破坏的防锈防腐无法水下修复。采用可控浮箱和支撑平台及辅助起重装置来完成, 不需要大量起重船、吊点, 不仅能实现管道下潜式稳定沉放、沉放过程中管道位置和吊点应力同步监控量测, 还能确保管道的挠度、弯曲半径、抗扭、抗剪、抗折应力在安全值内。

5. 针对江河地下沙土流动宜对长期水下浅埋的管道造成一定冲刷损坏, 目前多采用调节埋深或直接浇筑水下混凝土包裹, 其常常遇到开挖深度受限、积存泥浆难以清理干净、水体污染难以控制、软基无法清淤换填承载等问题。将泵吸、注浆、抛石挤

淤三种技术相结合的沉管下方悬空软基水下抛石吸泥压浆加固技术, 不仅成功解决上述问题, 还大大简洁了操作工序、缩短了工期、减少大型机械设备等使用成本。

6. 该工程的技术研究与应用效果, 间接证明了穿越水道与沉管技术的结合适用性, 也为类似工程提前提供了平稳沉放和水下加固的依据。其特别适用于市政给排水、供气、输气输油钢管材质管道的穿越江河安装工程, 具有流速 $\leq 3.0\text{m/s}$ 、水深 $\leq 6\text{m}$ 、水面宽度在 1Km 以内的平坦的砂质河床区域^[1]。

7. 因各处施工环境不同、难点不同, 项目研究和实施应用过程中应及时调动方案, 以保证项目实施的高效、高质量、安全、经济, 力求达到最佳的综合效益。

参考文献

[1] 《给排水管道工程施工及验收规范》GB50268-2008.
[2] 刘灿生. 给排水施工手册 [M]. 中国建筑工业出版社, 2002.
[3] 刘敏林. 沉管施工技术在过河管道中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2004, (9): 165-166.
[4] 赵超祥. 过江管道沉管施工技术的应用 [J]. 水利电力机械, 2007, (10): 129-131.