

渤海湾海缆深埋技术研究与实践

前德门¹ 李鹏²

1. 前德门 152222198504286613

2. 李鹏 23230219850724075X

【摘要】海底电缆在铺设施工时，通常采用挖沟埋深的方式对其进行保护，以免受到船锚钩挂或落物砸伤。在海上油气田或风电场中，平台间海底电缆一般埋设深度为1-1.5米，即可满足安全要求，但在特殊情况下，如由海上铺设至陆地的登陆电缆，或海缆路由穿越航道的海底电缆，其埋设深度要求往往更高。本文以渤海湾某工程项目为案例，研究分析海底电缆超深埋设的施工技术。

【关键词】海底电缆；埋设；超深

1 工程简介

该工程油田位于渤海中部，油田范围内年平均水深约为20米。工程计划铺设一条平台间海底电缆，路由长度约6.4公里。因海缆设计路由距离西侧30万吨级船舶锚地较近，为避免船舶走锚钩挂风险，海缆施工采用在锚泊船舶作业同时拖拽埋缆机挖沟埋设，缆沟自然回填的方案，埋设深度要求达到3.5米，为当时渤海湾埋深最大记录。

如此超深埋设的作业，对埋缆机的自身机械强度、水泵破土能力、连续作业稳定性等关键指标都提出了严格的要求，如果所有必要条件不能同时达成，将会对整个工程造成进度延误，甚至存在对海底电缆造成损伤或断裂的风险。

2 海缆路由地质分析及埋缆设备改造

针对该工程的高标准、严要求，项目团队在前期阶段即通过以下两个方面进行了充分的分析研究与技术准备。

(1) 海缆路由地质环境调查分析

通过对海缆设计路由地质钻孔取样，获取土壤分层情况和各层土壤剪切力，得出结论如下：

I层：非常软的褐灰色粉质粘土，设计不排水抗剪强度一般为4~20kPa，该层平均粒径(D50)一般为0.01~0.12mm，其中在1号平台井位0-0.7m为松散的细砂，平均粒径(D50)为0.18mm。该层层底埋深一般在1.3~1.8m。另外，PL8孔1.2m-2.6m和PL10孔0.5m-2.1m为稍硬的粉质粘土，设计不排水抗剪强度为30~34kPa。2号平台孔在2.0m到2.6m范围内最大不排水抗剪强度为50kPa。

II层：松散到中密实的砂性土层，主要由褐灰色粘质砂、粘质砂质粉土、砂质粉土、粉质细砂和细砂土组

成。设计有效内摩擦角为15°~25°，平均粒径(D50)为0.01~0.19mm。其中PL5和PL6孔1.3m-5.0m为稍硬的粉质粘土，设计不排水抗剪强度为20~40kPa，平均粒径(D50)为0.006-0.048mm。

另外，PL3孔在2.5m到3.0m范围内最大不排水抗剪强度为57kPa；PL5孔在1.5m到4.0m范围内最大不排水抗剪强度为50kPa；PL6孔在2.5m到5.0m范围内最大不排水抗剪强度为55kPa；1号平台井位在3.2m到5.4m范围内最大不排水抗剪强度为100kPa。

(2) 埋缆设备选型及升级改造

针对该工程海缆设计路由段地质钻孔取样和土壤强度分析结果，经过精密的计算和工况模拟，并对比预开沟后铺缆、边铺边埋及先铺缆后挖沟三种技术方案的费用成本：

方案一预开沟后铺缆：首先采用绞吸式挖泥船或抓斗船进行海缆路由预挖沟，因挖沟工期较长，为了防止在挖沟过程中缆沟随潮汐作用自然回填，挖沟要求沟底宽度为3米，沟顶宽度为5米，沟深为4.5。挖沟结束后进行海缆铺设，铺缆完成后，调查缆沟回填情况，如回填状况不好，还要使用水下抓斗进行机械回填，此方案工期较长，费用较高。

方案二先铺缆后挖沟：此方案是先将海缆铺设至海床上面，再使用大型挖沟机进行水下吹埋作业。此方案难度极大，对海缆铺设精度及路由海缆冗余量要求极高，容易造成沟深不均匀，海缆弯折损坏的风险，且综合对比国内以及国际上的后挖沟设备，虽有埋缆设备能够达到3.5米沟深，但动复员费用极高。

最终项目团队决定使用水力式埋缆机进行海底电缆的同步铺设和埋深的作业方案，并制定了埋缆机升级

改造规格参数如下表:

表 1 水力式埋缆机机械参数

项目	规格参数	功能介绍
总重量	45 吨	
主体尺寸	10x7.2x3.5 米	
作业能力	埋深 0~4.3m, 适用泥质 100kpa 以内	
铺缆直径	50~200mm	
喷射泵	流量 400m ³ /h@ 扬程 400m	水流喷射、破土
喷射泵	流量 700m ³ /h@ 扬程 200m	水流喷射、破土
泥浆乳化泵 X2	流量 5000m ³ /h@ 扬程 11m,	将破土乳化成悬液状, 利于抽吸
抽吸泵 X2	流量 2500m ³ /h@ 扬程 22m	用于抽吸泥浆并喷至两侧沟沿
总配电功率	2000KW	

考虑到埋设深度高达 3.5 米, 在缆沟的中下部, 仅靠喷射臂的水流很难将泥沙向两侧开挖, 该埋缆机还同时配备了两台泥浆乳化泵和两台抽吸泵。

三种型号泵配合工作原理为: 海底电缆穿过埋缆机喷射臂, 并随埋缆机下放至海床上, 在打开喷射臂时, 喷射泵的水流将泥沙穿破并冲散, 开出一道缆沟, 泥沙块在重力作用下向缆沟底部沉降; 这时, 乳化泵可以将块状泥沙打散并乳化成悬浊液, 而后抽吸泵将沟底的悬浊液抽离并喷射至两侧沟沿外。

此时海底电缆在自重和埋缆机喷射臂的限位作用下, 顺利下降到缆沟底部。

3 埋缆机海试检验

(1) 过程监控方法

海底电缆的铺设是一个连续的、不可中断的过程, 否则将会对海缆造成损伤或者折断, 发生工程事故, 因此升级改造后的埋缆机必须经过海试检验, 以验证其埋深能力和连续工作能力。

因海试结果无法像实际工程项目一样, 铺缆完工后通过海缆埋深后调查方法证明沟深, 因此埋缆机还需配备如下监控设备, 实时监控其挖沟结果。

表 2 埋缆机监控设备

设备名称	功能介绍
纵横姿态仪	监控埋缆机横摇、纵倾角度
喷射臂角度仪	监控喷射臂打开角度
沟型探测声呐	扫测开挖沟型
缆道压力传感器	监控海缆所受挤压力在允许范围内
喷嘴压力传感器	显示喷嘴处水压力, 监控各喷嘴工作状态
USBL 信标	埋缆机实时定位

纵横姿态仪主要监控埋缆机的水下姿态, 反馈埋缆机的

横摇、纵倾角度是否在设计允许范围内; 喷射臂角度仪负责监控喷射臂打开角度, 防止因地质原因造成喷射臂回首, 导致沟深不达标; 沟型探测声呐主要监控埋缆机开出的沟型轮廓以及海缆是否顺利进入缆沟; 压力传感器负责监控海缆水下受挤压状态和喷嘴是否在正常压力下工作; USBL 信标利用定位系统保证埋缆机行走路线满足海缆铺设路由精度。

经过计算, 埋缆机两个滑橇着泥时, 根据勾股定理计算, 喷射臂在打开角度为 40° 时, 埋缆机可开沟深度为 3.8 米, 示意图如下:

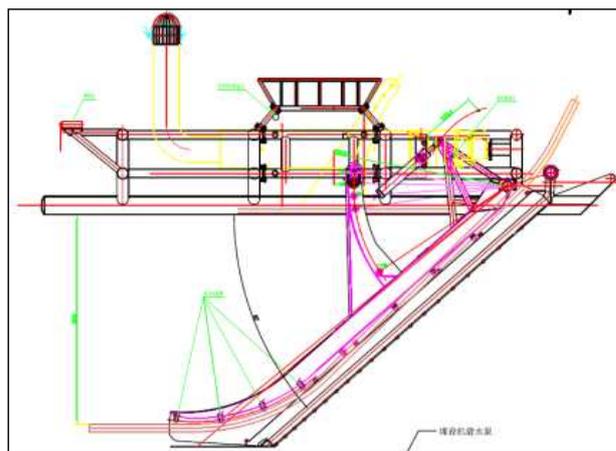


图 1 埋缆机喷射臂角度与埋深示意

本项目海底电缆设计埋深为 3.5 米, 为防止因海床的不平整引起埋缆机轻微摇倾, 造成沟深不均匀, 海试标准按照沟深 3.8 米制定, 预留 30 厘米的余量。

(2) 海试成果验证

为保证海试地质环境与工程实际工况无限接近, 项目团队特别向海事部门及油田作业区申请在油田外围海域进行海试, 其水文环境和地质条件基本吻合。同时, 邀请甲方技术代表、油田作业区总监以及第三方机构见证整个海试的全过程和海试结果, 并出具相应的报告、埋缆机海试证明、沟深结果证明。

海试期间, 作业船每个操作步骤均按照施工方案中设计标准进行, 按照方案中的铺缆速度移船前进, 下放埋缆机至海床, 保证双滑橇平稳着泥; 开启埋缆机并下放喷射臂至 40° 位置, 启动水下泵进行开沟并乳化、吸泥; 期间, 实时监测埋缆机水下姿态、喷射臂喷嘴出口压力、水下泵工作状态和声呐显示的沟型, 验证开沟深度满足既定目标, 即 3.8 米深要求; 同时, 整个海试连续进行约 60 小时, 充分验证了该埋缆机的连续作业能力满足铺设 6.4 公里海缆要求, 海试圆满完成。



图2 埋缆机海试结束出水

4 结束语

在预开沟后铺缆、边铺边埋和先铺缆后挖沟三种海底电缆埋深保护方法中，边铺边埋的方案最有利于进度和成本的控制。第一，此方案减少了船舶资源的投入，仅使用铺缆船一次即可完成铺设和挖沟工作，节约工期

和成本；第二，边铺边埋的作业方式，开出的缆沟宽度较小，在埋缆机携带海底电缆通过后，沟型受挤压以及潮汐作用，会在短时间内完成自然回填，无需动用额外的船舶进行机械回填，节约成本；第三，此方案在完成铺设后，海缆已经进入缆沟底部，缆沟几乎同步完成回填，对海缆的安全起到强有力的保障。

但受制于常规埋缆机作业能力限制，海底电缆的超深埋设需要针对不同海域、作业区的地质条件，经过周密的地质钻孔取样和剪切力计算来针对性的升级改造埋缆机。在地质结构复杂的海域，钻孔密度还应相应增加。在海床上开沟，每增加1米的深度，对埋缆机性能和稳定性的考验都大大增加。通过实际工程项目的成功案例，结合本文的分析，边铺边埋的海底电缆深埋设施技术方案是切实可行的。

【参考文献】

- [1] 刘德博. 探究复杂水文地质条件下矿井防治水技术[J]. 山东煤炭科技, 2017(07): 163-164+166.
- [2] 崔瑜科. 大采深高承压矿井水文地质条件及防治水技术[J]. 机械管理开发, 2016, 31(09): 124-126.