

长输管道补口专业化施工发展现状及探讨

陈洪源¹ 张文² 冯少广³ 李东阳⁴ 赵君⁴ 郑安升⁵

1 国家管网集团北方管道有限责任公司

2 中油管道检测技术有限责任公司

3 中国大唐集团科技创新有限公司

4 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司

5 中国石油天然气管道工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20251

[摘要] 当前,长输管道广泛采用工厂预制的高性能防腐层系统(如环氧粉末涂层、3LPE、3PP等),其质量可控且满足设计要求。然而,现场补口防腐层作为管道防腐系统的关键衔接环节,受多种因素制约,已成为制约管道整体防腐效果、影响管线长期安全运行的薄弱环节。近年来,国内外管道建设领域针对补口防腐质量问题开展了大量研究与实践。本文通过系统梳理国外管道补口专业化施工的发展历程、技术演进与典型企业案例,深入剖析国内新建管道补口在施工中存在的问题,结合我国长输管道建设的实际需求与发展趋势,提出了国内长输管道建设中成立专业化补口施工队伍、推行补口专业化施工的建议,旨在为提升我国长输管道补口防腐质量、保障管线安全稳定运营提供参考。

[关键词] 长输管道; 补口防腐; 专业化施工

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A

Current status and discussion on the professional construction of joint coating for long-distance pipelines

Hongyuan Chen¹ Wen Zhang² Shaoguang Feng³ Dongyang Li⁴ Jun Zhao⁴ Ansheng Zheng⁵

1 PipeChina North Pipeline Co., Ltd.

2 China Petroleum Pipeline Inspection Technology Co., Ltd

3 China Datang Technology Innovation Co., Ltd

4 PipeChina Institute of Science and Technology

5 China Petroleum Pipeline Engineering Corporation

[Abstract] Currently, long-distance pipelines widely adopt factory-fabricated high-performance anti-corrosion coating systems (such as epoxy powder coating, 3LPE, 3PP, etc.), which are quality controllable and meet design requirements. However, as a key connecting link in the pipeline anti-corrosion system, on-site joint coating has become a weak link that restricts the overall anti-corrosion effect of pipelines and affects their long-term safe operation due to various factors. In recent years, the pipeline construction field at home and abroad has conducted extensive research and practice on the quality issues of joint coating. This paper systematically reviews the development history, technological evolution, and typical enterprise cases of professional joint coating construction in foreign pipelines, deeply analyzes the problems existing in the construction of new pipeline joint coating in China, and proposes suggestions for establishing a professional joint coating construction team and promoting professional joint coating construction in the construction of long-distance pipelines in China, based on the actual needs and development trends of China's long-distance pipeline construction. The aim is to provide reference for improving the quality of joint coating anti-corrosion in China's long-distance pipelines and ensuring the safe and stable operation of pipelines.

[Key words] long-distance pipeline; joint coating and corrosion prevention; professional construction

引言

随着我国经济建设的飞速发展,石油、天然气的需求市场越来越大,管道建设也将快速地发展,根据《中长期油气管网规划》^[1]中明确指出,2025年全国油气管网规模要达到24万公里,到2030年,全国油气管网基础设施将较为完善。

目前国内长输管道防腐层主要以三层结构聚乙烯(3PE)防腐层为主,尽管3PE管道具有优异的防腐及机械保护性能,但由于聚乙烯结晶度高、存在弱边界层、分子链呈非极性以及表面能很低的结构特点,导致大多数涂层材料无法与聚乙烯形成良好粘接,从而产生了现场补口与工厂涂敷主管线涂层之间的粘接问题。目前,国内外普遍使用辐射交联聚乙烯热收缩带(HSS)作为3PE管道的补口材料,然而受施工环境复杂性、操作规范性、材料适配性等多种因素制约与影响,现场补口防腐涂层往往很难达到与工厂预制管道防腐涂层相同的质量,往往是整条管道防腐系统的薄弱环节。在对近十多年在役管道的调研发现,当前3PE管道补口失效问题严峻、不容乐观。“十三五”期间,虽然密闭式喷砂、机械化补口等新技术的开发在一定程度上推动了热收缩带防腐补口防腐质量的提升,但仍存在补口材料质量、工艺控制和外部环境等因素的制约^[2-4]。为解决补口防腐这一行业痛点,国内外相关企业与科研机构在补口工艺优化、装备研发、材料创新等方面投入了大量资源。国内研发的“大口径管道机械化防腐补口技术”已在多条主要油气管道建设工程中大规模应用,实现了管道补口从传统人工操作向机械化施工的跨越式发展,施工效率与质量稳定性得到显著提升。但客观来看,该技术与真正意义上的自动化补口仍存在一定差距,补口质量的全面可控仍面临诸多挑战。

热收缩带补口工艺的质量影响因素较为复杂,涵盖管道表面处理质量、补口材料初始规范安装、加热温度控制、外部环境参数(温度、湿度、风速)、钢管直径规格、材料自身性能波动等多个方面。这些因素相互交织、相互影响,使得通过自动化装备实现补口质量全流程精准控制的难度极大。在此背景下,构建专业化的补口施工体系显得尤为迫切。当前,国内补口施工队伍多作为管道施工的辅助力量,普遍存在不受重视、施工人员专业技能水平参差不齐、作业装备自动化程度低、质量责任划分不清晰等问题,严重制约了补口质量的提升。因此,改变传统补口施工模式,推行“让专业人干专业事”的管道补口新模式,成立专业化补口施工队伍,采用专业化装备开展补口作业,实现补口质量可控制、过程可追溯、责任可划分,已成为提升我国长输管道补口防腐质量、保障管线长期安全运行的必然选择。

1 国内外长输管道补口专业化施工发展现状

1.1 国外现状。随着全球长输管道工业的不断发展,工厂预制防腐涂层技术持续升级,对防腐性能、使用寿命、环境适应性等方面的要求日益提高。在此背景下,国外管道现场补口材料与施工技术同步实现了快速发展与迭代。补口施工已从传统的管线焊接附属环节中脱离出来,形成了独立的专业化施工模式,涌现出一批技术先进、经验丰富、规模较大的国际知名专业化防腐补口企业,这些企业在补口材料研发、施工装备创新、施工工艺优化等方面

处于行业领先地位,其业务范围覆盖陆地、海洋、深海等多种复杂场景,为全球各类管道工程提供了高质量的补口防腐服务。

国外专业化补口企业的发展历程,大致经历了从单一补口材料供应到“材料+施工+技术服务”一体化解决方案提供的转型过程。早期,补口材料主要以沥青、煤焦油、简单热收缩套为主,材料性能单一,防腐效果有限;随着材料科学与防腐技术的进步,补口材料逐渐向多类型、高性能、高可靠性方向发展,环氧粉末、无溶剂多组份液体涂料、改性聚丙烯/聚乙烯粉末、高密度聚氨酯泡沫等先进材料得到广泛应用。同时,施工装备也实现了从人工操作向机械化、自动化、集成化的跨越,极大地提升了施工效率与质量稳定性,降低了对操作人员技能水平的依赖和劳动强度,同时更加注重施工过程的环境友好性。

以下将选取几家具有代表性的国外专业化补口企业,详细介绍其业务特点、核心技术与施工模式,为国内补口专业化施工发展提供参考。

1.1.1 EUPEC international补口业务部。EUPEC international是世界知名的管道涂敷商,成立40多年来已成功完成了几千公里的管道涂敷业务。其业务范围涵盖陆地及海洋的各种类型管道涂层业务。1993年,EUPEC成立专业补口事业部,通过技术研发,配备了高机动性、集成化、环境友好型补口装置,能够高质量完成陆地至海洋管线的防腐及保温补口,其核心补口防腐层类型包括火焰喷涂聚丙烯(PP)防腐补口、无溶剂多组份液体涂层防腐补口、海洋管线高密度聚氨酯泡沫(HDPUF)填充层补口、保温补口、模具浇注式聚丙烯保温补口等。

1.1.2 PIH补口公司。自20世纪80年代起,PIH就为陆地、海洋管线提供补口防腐服务,以“保障补口质量与整个涂层系统完整性”为核心理念。其采用高度机械化、自动化补口设备,提升了施工质量一致性与效率,同时降低了环境破坏与劳动强度。PIH专业的补口施工队伍经过多年的内部培训,具有丰富的野外补口施工经验。其核心补口服务类型包括复合型补口防腐系统(针对3层聚乙烯层补口,主要工艺包括除锈-中频加热-FBE粉末喷涂-改性PP/PE粉末喷涂-PP/PE缠带机械缠绕)、环氧粉末防腐补口(FBE)、多组份液体涂料防腐补口(无溶剂聚氨酯液体涂料、无溶剂环氧液体涂料)、模具浇注式聚氨酯保温补口系统(IMPU)、模具浇注式聚丙烯保温补口系统(IMPP)、高密度聚氨酯泡沫补口填充系统(主要针对水泥配重涂层的补口)、聚丙烯火焰喷涂补口系统、焊口中频加热处理系统(焊前预热、焊接层间加热、焊后热处理)等。





图1 EUPEC international补口业务部典型施工图片

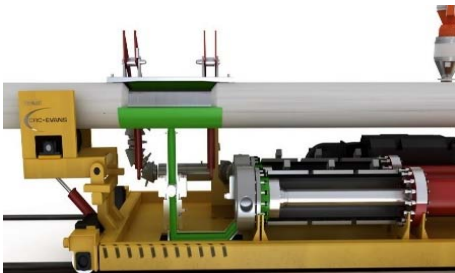


图2 PIH补口公司典型施工图片

1.1.3 CCSI公司。CCSI (Commercial Coating Services International) 成立于1983年, 目前隶属于Aegion Coating Services 公司, 是全球规模较大的管道补口专业企业, 拥有适用于各种管道规格的高机动性补口专用设备, 能够进行各种形式的补口施工作业。成立20余年来, 已完成超200万道补口施工, 业务覆盖陆

地与铺管船补口。其核心补口类型包括单层/双层环氧粉末 (FBE/D-FBE) 防腐补口、高密度聚氨酯泡沫 (HDPUF) 填充补口、固体聚氨酯补口、热收缩带防腐补口、多组份无溶剂涂料补口等, 同时可提供野外在建管线下沟前涂层检测与破损修复服务。



图3 CCSI公司典型施工图片

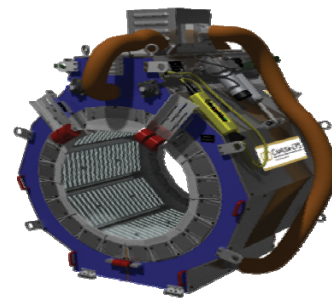


图4 CANUSA-CPS公司典型施工图片及装备

1.1.4 CANUSA-CPS公司。该公司目前隶属于汉高集团, 是一家专注于管道补口材料研发、生产、施工及技术研究的专业化企业, 业务覆盖陆地与海洋管线, 可提供工厂级质量的补口服务, 其核心补口装备为IntelliCOAT™补口系统, 采用“补口材料+施工服务”的模式为业务提供专业化补口作业。2013年, 该公司承接了俄罗斯至保加利亚穿越黑海的海洋管线补口项目, 管线总长900余公里、管径32英寸, 合同总额3000万美元, 采用其独有的IntelliCOAT™补口系统, 于2014年启动施工。

1.1.5 国外补口施工特点。从上述企业案例可见, 国外管道

补口施工呈现三大核心特点:一是专业化程度高,补口施工已从管线施工中独立出来,形成专业企业与队伍;二是技术与材料多样化,能够适配陆地、海洋、深海等不同场景需求;三是设备机械化与标准化,保障了施工质量的一致性与效率,同时注重环境友好与人员健康保护。

1.2国内现状。(1)施工模式与队伍。国内尚未形成成熟的管道补口专业化施工市场与标杆企业,管道建设多由管道施工承包商统筹,各焊接机组分别开展补口作业。一方面,补口施工队伍素质参差不齐,人员对施工工艺的理解、质量要求的把控及责任心存在显著差异^[5-6];另一方面,承包商更关注管道焊接质量,对补口涂层防腐的重要性认知不足,为管道长期安全运行埋下隐患^[7]。(2)补口防腐层类型与质量。国内长输管道补口防腐以热收缩带为主,仅少量采用无溶剂液态环氧、无溶剂液态聚氨酯等材料,防腐层形式相对单一。随着在役管线运营时间增加,补口涂层质量问题逐渐暴露。开挖检测显示,热收缩带补口失效、管体腐蚀现象频发,其原因主要包括补口表面处理不达标、热收缩带烘烤不到位、底漆涂敷缺陷、材料质量问题、环境影响等,其中施工因素导致的缺陷占70%^[8]。(3)与国外的差距。尽管国内在个别管线尝试了专业化补口队伍作业及机械化、智能化补口设备应用,但与国外相比仍存在显著差距:一是补口失效机理研究不足;二是补口防腐层类型单一,难以适配复杂场景;三是施工人员专业素质、设备机械化程度较低;四是质量保证体系不完善,专业化补口施工队伍建设滞后^[9-10]。

2 成立专业化补口施工队伍的必要性

(1)专业化是补口技术发展的必然趋势。干线管道防腐技术升级推动补口技术革新,3PP(3PE)火焰喷涂补口、Wehcoat补口机器人、自愈合粘弹体补口、深海浇注式PP保温补口等新技术不断涌现,对施工设备与人员专业素质提出了更高要求。国内现有补口施工模式已无法适应技术发展需求,技术更新倒逼补口向专业化方向发展。(2)专业化是补口涂层质量的核心保障。当前油气输送管线多途经严寒、高温、沙漠、深海等复杂环境,需根据场景调整施工工艺。编制专项技术规程、配置适配设备、开展人员专业培训、强化全过程质量控制(如编制《补口施工程序规范》(APS)、实施施工程序评定试验(PQT)、制定《检验和测试计划》(ITP)等)是提升补口质量的关键。专业化施工队伍能够实现上述标准化操作,而国内现有“各队伍各自为战”的模式难以形成统一规范,补口质量难以得到稳定保障。此外,专业补口企业专注于防腐技术,对标准理解更透彻、对失效危害认知更深刻,能够进一步保障施工质量。(3)专业化可降低管线建设总体投资成本。国内现有模式下,各承包商需单独购置补口设备,导致设备重复投资与规格不统一,造成资源浪费;专业化补口企业可按统一标准定制设备,根据工程需求统筹调度资源,减少设备投资。同时,专业企业可同步开展补口作业与管线涂层检测、修复,无需额外配置检测修复队伍,有助于降低整体建设成本。(4)专业化推动补口技术创新与发展。国外补口材料、技术、装备的研发主体多为专业化补口企业与生产商,而国内现有施工模式因聚焦焊接环节,难以形成规模化、专业化的技术研发能

力。只有建立专业化补口施工队伍,才能集中资源开展技术创新,推动国内补口技术与国际接轨。

3 结论及建议

随着国内长输管道建设规模的持续扩大,管线途经的地理与气候环境日趋复杂,补口防腐作为管道防腐系统的薄弱环节,其质量直接关系到管线的整体安全运行。当前,国内长输管道补口施工存在施工模式落后、队伍专业素质不高、补口材料类型单一、质量保证体系不完善等问题,补口失效现象频发,严重影响了管道的安全稳定运营。国外管道补口施工已形成成熟的专业化模式,涌现出一批技术先进、经验丰富的专业化补口企业,其在施工队伍建设、技术创新、设备研发、质量管控等方面具有显著优势,补口施工呈现出专业化程度高、技术材料多样化、设备机械化标准化等特点,为国内补口专业化施工发展提供了宝贵的借鉴经验。成立专业化补口施工队伍是补口技术发展的必然趋势,是提升补口涂层质量的核心保障,能够有效降低管线建设总体投资成本,推动补口技术创新与发展。推行管道补口专业化施工,改变现有施工模式,与国际接轨,已成为解决国内长输管道补口质量痛点、保障管线安全运营的必然选择。未来应加快专业化补口企业培育、完善质量标准体系、升级机械化设备,通过专业化路径解决补口质量痛点,为长输管道安全运营提供支撑。

【参考文献】

- [1]国家发展改革委国家能源局关于印发《中长期油气管网规划》的通知.https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201707/t20170712_962238.
- [2]乔军平.管道涂装涂层保护技术[M].北京:化学工业出版社,2025.
- [3]王玉石,白天阳,刘诗茵,等.长输管道热收缩带补口失效分析及优化改进技术[J].石油和化工设备,2022,25(3):45-50.
- [4]王卓.机械化补口技术在长输管道工程中的应用[J].化工设计通讯,2020,46(08):20-21.
- [5]雷阳.长输管道防腐补口施工质量控制策略[J].全面腐蚀控制,2023,37(2):100-102.
- [6]陈诚.长输油气管道防腐补口质量的控制策略[J].全面腐蚀控制,2022,36(02):123-124.
- [7]蒋林林,那骥宇,韩冰,等.热收缩带防腐补口质量控制[J].石油工程建设,2025,51(03):67-72.
- [8]孙典昊,王宏召,牛志勇,等.长输管道防腐补口失效分析及技术进展[J].全面腐蚀控制,2022,36(03):25-27.
- [9]徐可.管道防腐补口存在问题与措施[J].全面腐蚀控制,2021,35(05):32-33.
- [10]张闯.管道防腐补口材料及施工技术现状分析[J].全面腐蚀控制,2020,34(08):54-55.

作者简介:

陈洪源(1975--),男,汉族,四川南充人,工程硕士,高级工程师,现就职于国家管网北方管道有限责任公司,主要从事油气管道腐蚀控制及智能化相关研究工作。