

管道外防腐涂层技术研究与应用进展

魏玉珍（中海油能源发展装备技术有限公司设计研发中心，天津 300451）

摘要：本文介绍了国内管道外防腐涂层的发展历程和应用现状，重点介绍了针对3PE防腐层及其配套补口技术的研究和应用的最新进展，包括3PE防腐层技术方面的应用问题调查研究、低温涂敷技术、粉末喷涂型3PE技术、热煨弯管3PE防腐技术、聚乙烯粉末涂层和石夹克技术等；以及配套补口技术方面的热收缩带技术规范的完善、热收缩带技术改进研究、喷涂液体聚氨酯涂料、双组分无溶剂环氧涂料、粘弹体防腐系统等，以供大家参考。

关键词：管道；防腐涂层；应用；聚乙烯

中图分类号：TE988.2 文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）020-0010-03

Research and application progress of anti-corrosion coating technology on pipeline exterior

WEI Yuzhen (Design & R&D Center, CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: This paper introduces the development process and application status of anti-corrosion coating for pipelines in China, and focuses on the latest progress in the research and application of 3PE anti-corrosion layer and its supporting joint repair technology, including the investigation and research of the application of 3PE anti-corrosion layer technology, low-temperature coating technology, powder coating 3PE technology, 3PE anti-corrosion technology for hot simmering elbows, polyethylene powder coating and stone jacket technology, etc. As well as the improvement of the technical specifications of heat shrinkable tape in terms of supporting joint repair technology, the research on the improvement of heat shrinkable belt technology, the spraying of liquid polyurethane coatings, two-component solvent-free epoxy coatings, viscoelastic anti-corrosion systems, etc., for your reference.

Keywords: pipeline; anti-corrosion coatings; Apply; polyethylene

1 我国管道防腐涂层的发展历程和现状

从目前管网工程项目现状来看，埋地钢质管道防腐技术主要采用涂敷、阴极或阳极保护等。其中，涂敷防腐材料应用最为广泛。从钢管腐蚀产生工作原理上看，切断钢制管道金属与周围环境直接接触将无法产生金属电子流动，不产生腐蚀。据此，涂层和保护措施的选择、使用能够极大解决管道腐蚀控制问题，再加上其他工艺材料技术的应用则可以实现更高层级保护。

1.1 发展历程

国内的管道防腐涂层是从煤焦油沥青加麻布开始的，我国第一条油气长输管道—克拉玛依至独山子输油管道就采用了石油沥青马蹄脂做外防腐层，之后借鉴国外的管道防腐涂层技术，逐步开展了胶粘带和瓷漆等管道防腐材料的技术研究开发，突破原有沥青基础防腐的被动局面。后来相继出现挤压聚乙烯防腐层（2PE）技术、三层结构聚乙烯（3PE）防腐涂层技术。近年来，开始引进环氧粉末熔结涂层技术和聚丙烯防腐涂层技术，随着NACE标准出台，相继出现了熔结涂层、冷缠胶带、聚烯烃涂层等一些新材料和新技术的开发和应用。

1.2 应用现状

目前，国外管道防腐涂层技术标准有NACE、AWWA、API等。其中，NACE标准最为广泛认可，从业人员须取得证书资质。国内针对油气管道外防腐涂层技术陆续制定了一系列的行业技术标准。中国石油制定的企业标准有双层熔结环氧粉末涂层技术，国家标准有聚乙烯防腐层，这些标准的制定和颁布实施，促进了行业内防腐涂层技术的应用，确保管道外防腐的长期质量和使用寿命。

2 聚乙烯防腐层技术主要应用领域研究

2.1 3LPE防腐层应用存在的主要问题

聚乙烯防腐层是国内油气长输管道工程的首选，其应用广度、深度受到普遍的重视和关注，应用效果得到较好评价，但从实际生产应用反馈来看，问题不少，如：翘边、剥离、防护层层减薄、保护屏蔽等。

端翘边和气泡产生原因为工艺控制不当，通过提高工艺解决。防腐层剥离产生原因是施工管理不当，通过加强管理解决。3PE防腐层剥离原因有：防腐层涂敷施工质量、原材料的质量问题、运行温度的作用、防腐层内应力影响、阴极保护电位的作用等。随着3PE防腐层技术的日渐成熟和广泛应用，逐步出台《埋

地钢质管道聚乙烯防腐层》《埋地钢质管道聚乙烯防腐层》等国家标准。防腐层结构方面,粉末底层厚度,由原来的 $\geq 80\text{m}$ 调整为 $\geq 120\text{m}$,取消胶粘剂厚度规定。在原材料性能方面,增加热特性、抗弯曲和阴极剥离温度等指标,控制产品的耐热老化性能和机械性能。在涂敷工艺流程方面,提高表面预处理的作业要求,灰尘度不低于2级、盐份度不超过 $20\text{mg}/\text{m}^2$ 等。

2.2 3LPE 防腐层低温涂敷应用技术研究

埋地管道主要发展趋势是提高钢制管道的强度水平,降低管道建设和集输成本,美国等较为发达国家已将X80钢级作为天然气钢制输送管线的首选。防腐层涂敷前期准备,首先对钢管表面加热至 $200\sim250\text{ }^\circ\text{C}$ 后,涂覆防腐层。但温度过高会对钢管产生热应力,导致钢的韧性和延性降低。为此国内科研机构实验室,研发低温涂敷技术。

低温涂敷技术主要是突破温度指标,在较低的预热温度下实现涂层胶化、固化性能,达到规范要求。3PE防腐层低温涂敷技术在西气东输二线、中贵联络线等重点管道工程中得到了有效应用,低温涂敷技术不仅满足了防腐层涂敷需要,还具有显著的节能降耗效果,应用前景非常广阔。

2.3 3PE 喷涂型防腐层应用技术研究

传统涂敷工艺主要是喷涂防腐底层,使用化学胶合剂和粘着剂,通过压填方法使其紧密压实,但同时会在焊缝处形成孔穴和腐层被不断减薄等一系列问题,降低了钢制管道的耐腐蚀性。为此,CNPC等国家重点防腐实验室对管道防腐技术应用进行反复试验,成功研制3PE复合防腐层技术,该技术与传统防腐工艺流程变化不大,主要采用外层防腐材料涂覆,采用改良后的化学胶粘剂填充,通过静电喷涂涂覆在钢管表面,此工艺无明显界线分层,无毛刺产生,促使防腐层紧密相连,形成分级结构连续致密,粘结力强,消除空穴和焊缝减薄等不良影响,内部应力影响可以忽略不计。

喷涂型防腐层产生的主要问题:防腐层厚度获得比较困难,力学性能相对较差。为解决上述问题,CNPC重点实验室研发出粉末胶粘剂喷涂新技术技术,解决孔穴和管道焊道减薄等问题,提高了防腐层的耐冲击韧性等。

2.4 3PE 防腐层涂敷在弯管中的技术应用研究

弯管在埋地管道施工中因地形变化大量出现,常规生产线涂敷作业无法进行,弯管搭扣处防腐技术处理为整条管道防腐处理过程中最容易出现问题的部分。目前,国内油气田管道外弯管搭扣处防腐层处理工艺主要采用喷涂双层环氧粉末或者现场人工涂敷液

体涂料、热收缩带、胶带等方式,因此弯管与直线管道防腐搭扣处理匹配度不强。

为应对上述问题,研发应用冷带缠式弯管防腐层技术,主要原理为:利用弯管专用热烘传动线,先对钢管表面进行预处理,涂覆环氧底漆粉末,在胶化状态下缠绕胶粘剂,利用热熔性进行胶合,形成致密的防腐层,另外,通过弯管粉末涂装三层PE成型技术,按照不同的涂敷方式逐层涂在加热的管道表面,依靠温度熔融三种粉末一次成膜,具有很好的推广前景。

2.5 聚乙烯粉末防腐涂层应用技术研究

聚乙烯粉末防腐涂层主要是在加热钢管表面对防腐涂层进行均匀涂覆,等待温度降低后,能够形成结构致密的防腐涂层。与传统防腐涂层相比,此工艺不采用静电喷涂工艺,主要适用于火焰喷涂、滚塑浸涂和流化床浸涂等工艺流程。与挤压聚乙烯防腐层相比,聚乙烯粉末的涂敷不需要挤出设备,也不需要辅以底层的环氧涂层和胶粘剂层,而是靠其自身与钢管直接粘结,形成完整的防腐涂层。

3 聚乙烯防腐层补口应用技术的研究进展

3.1 规范的不断完善与提高

国内管道工程主要执行《埋地钢质管道聚乙烯防腐层》标准。是对《埋地钢质管道聚乙烯防腐层技术标准》的基础上对管道防腐技术进行的必要的补充、调整和完善。

在结构上方面,采用三层复合结构。在施工要求中的湿膜厚度应不小于 $120\text{ }\mu\text{m}$ 。在热收缩带的性能指标方面,增加了热冲击($225\text{ }^\circ\text{C}$, 4h),和设计温度要求。在国内外工程技术规范中目前已增加了防腐层基础材料含量和阴极剥离性能要求。

国际管道施工过程中对管道搭扣施工的规定更严格、苛刻,对加热温度、胶层融化状态、施工环境条件等进行了严格条件限制;强化了施工质量的控制和管理。

3.2 应用技术的研究改进

热收缩搭扣防腐工艺技术存在缺陷,除进一步完善改进工艺技术标准、加强施工过程管理外,国内一些研发机构对施工技术应用和工艺进行了改良和提升,如胶粘剂和专用机具改进研制等。

胶粘剂性能改进方面,在保证耐温性、提高施工性能、改善熔融效果的基础上,对主题聚合物进行增稠剂、调节剂、填料和抗氧剂的筛选,满足不同使用温度下系列胶粘剂材料。近年来,机具补口技术应用受到广泛关注,现场试验数据反馈,加热机具受外界自然条件影响很小,且加热面均匀,操作时间短,补扣效果好,有效避免人工操作对防腐质量的影响,应

用前景较好。

3.3 喷涂聚氨酯/聚脲弹性体涂料补口技术

喷涂弹性体技术使用扩链剂作为活泼氢组分与基体组分的反应活性高，在室温状态下就可以实现较好的反应。该技术特点：不污染环境、反应速度极快、不产生流挂、可反复喷涂，同时对钢管表面具有良好的着附力。该工艺简单易操作、施工方便，已在部分施工中得到应用，但该技术需要配套快速极化处理技术、过渡粘结剂施工、补口涂料优化等方面持续改进。

喷涂无溶剂液体聚氨酯涂料在国外得到广泛应用，国内近几年逐步开展技术引进并配套喷涂设备研发，目前国内已配套制定专项施工技术规定，并在一些重点管道工程进行工业试验应用。

3.4 双组份液体环氧涂料补口技术

双组份液态环氧涂料应用替代3PE防腐层是今年来防腐行业重点研发方向，但因涂层与PE层粘接问题没有在大型管线工程应用。目前国内外出现3PE防腐层补口专用涂料。主要是通过无气喷涂工艺，将防腐涂料在搭接部涂覆，形成有效的防腐层。该技术增加了防腐系统的严密性和整体性，密封性明显提高。在格鲁吉亚和阿塞拜疆两条3PE管线大规模使用双组份液体环氧涂料，使用效果有待进一步检验。

采用双组份液体环氧涂料补口施工缺陷主要为涂料基础材料与PE层粘结力不够致密，涂层的柔韧性差，不能长时间在露天下放置。为解决粘结力差问题，另外一种新型涂料补口技术正在推广应用，该技术增加对钢管表面极化处理，通过塑料膜和胶带将表面处理区域进行密封，同时注入气体处理剂至密封处，保持密封10分钟，达到厚度和固化要求。

3.5 粘弹性防腐新技术研究应用

粘弹性腐蚀在青海油田仙翼输气管线水淹段测试桩防腐层修复中得到应用，该材料既具有PE的固体特性和常规的液态特性，同时具有粘结性、抗剥离性等。粘弹性防腐主要采用专利树脂，专利树脂阻断水份和空气，同时具有冷流特性，永不固化，水密与气密性较好。专利树脂可直接粘接基底表面，无需使用底漆，在遭受外力破坏时还具有自我修补的功能。用粘弹性防腐补口，对表面预处理要求低，只需除锈、缠绕即可。该技术已在长庆油田和广东大鹏LNG工程等3PE管道的补口上应用，取得了较好的效果。

3.6 喷涂3PE粉末涂料补口技术应用研究

喷涂3PE粉末涂料采用火焰喷塑方法对防腐管道进行补口，该材料与钢管粘接强度好，共聚物胶粘剂和聚乙烯通过火焰熔融，强度较好。

采用火焰喷塑工艺，主要使用送粉器和火焰喷枪，通过火焰产生热量和压缩空气喷射焰流，将3PE防腐层粉末喷涂在搭接处形成防腐涂层，该技术在西气东输管道工程的施工中进行了一定验证，效果良好。

4 结语

目前管道防腐涂层技术种类繁多，具有较好的技术特性和适用范围，但尚未研发适用于所有环境条件的外防腐层技术。国内管道工程主要采用3PE防腐层技术，研发机构在归纳总结实际案例基础上，进行了完善和改进，提高多种工况下的使用性能，积极探索满足各种条件下管道防腐需求，提高防腐技术水平。

参考文献：

- [1]Richard N.Sloan. 埋地管道用防腐蚀涂层[J]. 全面腐蚀控制,2004,18(2):6-12.
- [2]林竹,范云鹏,张其滨. 无溶剂环氧煤沥青涂料在PCCP工程中的应用研究[J]. 保温技术,2009,017(1):22-25.
- [3]张其滨,刘金霞,赫连建峰,等. 管道3LPE防腐层技术的研究与应用进展[J]. 石油工程建设,2010,36(3):1-5.
- [4]张其滨,韩文礼,林竹,等. 管道外防腐涂层技术研究与应用进展[C]//2009年全国石油和化学工业腐蚀与防护技术论坛论文集,2009:36-44.
- [5]韩文礼,唐燕青,张其滨,等. 环氧煤沥青涂层防腐蚀失效的原因分析与改进措施[J]. 石油工程建设,2004,30(6):49-51.
- [6]张其滨,林竹,王雪莹,等. 新型系列环氧煤沥青涂料的研制[C]//1999中国国际腐蚀控制大会论文集.北京:中国石油学会,1999:416-419.
- [7]中华人民共和国建设部.CJJ95-2003/J273-2003城镇燃气埋地钢质管道腐蚀控制技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [8]龚树鸣. 油气管道外防腐现状和发展方向[J]. 防腐保温技术,2003,11(3).
- [9]冯少广. 管道防腐涂层进展及若干问题探讨[C]//2016年中国涂料工业协会防腐涂料分会年会、第七届国际海洋与重防腐涂料及涂装技术研讨会暨第五届中国涂料技术创新高峰论坛论文集,2016:21-36.
- [10]景喜林,曾琛. 埋地钢管道外防腐技术应用与发展概况[C]//06全国(上海)塑料管道应用技术推广暨长三角地区管道经济发展研讨会论文集,2006:104-109.
- [11]李异,李建三,李荣福. 浅谈地下管道防腐涂层的技术进展[C]//2009穗港澳科技·产业(腐蚀防护)发展论坛论文集,2009:34-38.