



油气管道科技丛书

5

油气管道腐蚀控制 实用技术

中国石油管道公司 © 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合科研和管道运行管理实际,介绍了目前国内外油气管道腐蚀与控制实用技术,详细阐述了腐蚀控制技术的发展状况、理论基础及腐蚀控制的重难点,并通过具体案例解释了各腐蚀控制技术在实际工程中的应用,最后介绍了管道防腐材料实验室测试的技术和方法、国内外有影响力的腐蚀控制标准组织及常用的腐蚀控制技术标准和规范。

本书可供管道设计、施工及运行维护人员使用,也可作为相关专业科研及管理人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气管道腐蚀控制实用技术/中国石油管道公司编.
北京:石油工业出版社,2010.7

油气管道科技丛书

ISBN 978-7-5021-7843-7

I. 油…

II. 中…

III. ①石油管道-防腐

②天然气管道-防腐

IV. TE988.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 103468 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523697 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.75

字数: 309 千字

定价: 56.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《油气管道科技丛书》编委会

主 任：姚 伟

副主任：崔 涛 杨祖佩 赵丑民 艾慕阳 张秀杰

委 员：刘玲莉 康力平 权忠舆 佟文强 刘广文

郝建斌 李 立 李 莉 刘建平 张一玲

张惠芬 王禹钦

《油气管道腐蚀控制实用技术》编写组

编写人：陈洪源 赵 君 薛致远 陈新华 张一玲

侯 宇 王晓梅 潘红丽 李荣光 罗 鹏

张 丰 滕延平 吴长访

审核人：刘玲莉

序

今年是“八三”管道建设40周年。40年前的8月3日，经党中央、国务院批准，大庆经铁岭至抚顺和秦皇岛输油管道工程建设领导小组召开了第一次会议，并将这项工程命名为“东北八三工程”。由此，拉开了我国长距离输油气管道建设的序幕，开创了油气管道运输的一个新的时代。40年来，中国的油气管道从小到大、由弱到强，特别是近10年来得到了突飞猛进的发展，现已成为国家能源重要战略基础设施，为国民经济和社会发展做出了巨大贡献。

回顾40年来我国油气管道的发展历程，既是一部艰苦创业史，更是一部科技创新史。自“八三”管道开始，几代管道人以敢为天下先的精神，以大无畏的英雄气魄，迎难而上，努力拼搏，使我国起步较晚的管道事业有了长足进步。其间，科技进步成为发展的助推器。当年在冻土带管道建设、严寒条件下管道防腐、三高原油工艺参数确定等方面开展了大量艰苦细致的科学试验，为管道的顺利建设提供了技术保障，建立了管道勘察、设计、施工及运营的技术标准，为中国管道运输业的发展奠定了基础。此后，在密闭输送、节能降耗、提高效率等技术改造过程中，科技进步始终发挥着支撑和引领作用。

历史表明，科技创新是推进企业发展的巨大动力。随着经济社会发展和国家油气资源战略的实施，油气管道正进入新一轮大发展时期。面对快速发展中的瓶颈技术和当前制约安全生产的难点问题，必须依靠科技进步加以解决。通过科技创新，加快经济发展方式的转变，提高全面协调可持续发展能力，实现管道事业又好又快发展。

为纪念“八三”管道建设40周年，梳理和总结40年来管道科技发展成果，中国石油管道公司组织编写了这套《油气管道科技丛书》。全套丛书共有9个分册，分别对油气管道运行工艺、化学添加剂、流动保障、完整性管理、腐蚀控制、安全预警与泄漏检测、地质灾害风险管理、检测与修复及国内外技术标准等进行了介绍。这套技术丛书，既是对以往管道运行管理技术的回顾和总结，也是对未来管道科技工作的规划和展望。期冀此套丛书成为管道科技发展的新起点，为管道安全运行提供支撑和保障。

前 言

为了纪念“八三”管道工程40周年,总结40年来管道科技成就,为科研、设计、运营管理、领导决策提供参考资料,中国石油管道公司组织专家学者和科技人员共计200余人,历时两年编制了这套油气管道科技丛书。全套丛书共分为9个分册,包括:《油气管道运行工艺》、《油气管道化学添加剂技术》、《油气管道流动保障技术》、《油气管道完整性管理技术》、《油气管道腐蚀控制实用技术》、《油气管道安全预警与泄漏检测技术》、《油气管道地质灾害风险管理技术》、《油气管道检测与修复技术》、《国内外油气管道标准对比分析》。本书是丛书的第5分册。

管道是重要的物料输送设施,管道腐蚀问题遍及国民经济和国防建设的各个部门,油气管道作为国民经济的大动脉,其腐蚀与防护一直受到各方高度重视。为加强长输油气管道腐蚀与防护研究成果的交流共享,推动油气管道腐蚀与防护应用性研究工作更好地服务于生产实际,本书编者对近几年从事的油气管道腐蚀与防护研究工作中的大量现场实践、室内实验成果及腐蚀与防护相关工作进行了集成汇总,重点介绍了管道防腐涂层保护技术、管道阴极保护技术、杂散电流腐蚀与防护技术、管道腐蚀检测评价技术、管道防腐材料实验室测试技术、油气管道腐蚀控制技术标准等内容,并附有较多的具体案例。本书理论和实践相结合,书中内容是著者多年科研和技术实践的总结,可供管道设计、施工及运行维护人员阅读使用、参考。

本书编者均为从事长输油气管道腐蚀与防护的研究人员,其中第一章由陈洪源编写,第二章由赵君、王晓梅、潘红丽、李荣光编写,第三章由薛致远、张丰、罗鹏编写,第四章由陈新华、吴长访编写,第五章由张一玲、罗鹏、滕延平编写,第六章由侯宇编写,第七章由赵君编写。全书由陈洪源统稿,刘玲莉审稿。

本书编写过程中同时参考了许多腐蚀专家、学者的著作和研究结果,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,敬请读者批评、指正。

编 者
2010年5月

目 录

第一章 管道的腐蚀	1
第一节 管道腐蚀分类	1
第二节 管道腐蚀控制方法	2
第三节 国内油气管道腐蚀与防护现状	3
参考文献	4
第二章 管道防腐涂层保护技术	5
第一节 管道常用防腐涂层	5
第二节 油气管道防腐涂层早期失效分析及对策	14
第三节 在役管道防腐涂层修复技术	24
第四节 热收缩带防腐补口施工专用机具	38
第五节 防腐大修喷涂施工机具	41
参考文献	48
第三章 管道阴极保护技术	49
第一节 阴极保护原理	49
第二节 线路阴极保护	53
第三节 区域性阴极保护	68
第四节 阴极保护数值模拟技术	71
第五节 阴极保护系统运行管理	76
第六节 某管道阴极保护异常及处理案例	83
参考文献	87
第四章 杂散电流腐蚀与防护技术	88
第一节 杂散电流干扰腐蚀	88
第二节 杂散电流干扰测试及评价	91
第三节 干扰减缓措施及效果评价	103
第四节 某管道杂散电流干扰与治理案例	106
参考文献	109
第五章 管道腐蚀检测评价技术	110
第一节 管道内腐蚀监测评价技术	110
第二节 管道外检测评价技术	116
参考文献	121

第六章 管道防腐材料实验室测试技术..... 122

 第一节 管道防腐材料检测实验室的认证..... 122

 第二节 管道防腐材料检测实验室的质量保证体系..... 123

 第三节 防腐材料实验室检测的标准方法..... 130

 第四节 实验室信息管理系统（LIMS） 173

第七章 油气管道腐蚀控制技术标准..... 182

 第一节 国内外的腐蚀控制标准组织..... 182

 第二节 国内技术标准..... 188

 第三节 国外技术标准..... 189

附录..... 193



第一章 管道的腐蚀

第一节 管道腐蚀分类

输送油气的管道大多处于复杂的土壤环境中，所输送的介质也或多或少地含有腐蚀性成分，因而管道内壁和外壁都可能遭到腐蚀。一旦管道腐蚀穿孔，即造成油气漏失，不仅使运输中断，而且会污染环境，甚至可能引起火灾，造成危害。因此，防止管道腐蚀是管道工程的重要内容。

腐蚀的一个广义定义是材料与环境相互作用而导致的失效，这个定义包含所有的天然和人造材料，包括塑料、陶瓷和金属。本书侧重于埋地长输油气管道用碳钢和低合金钢的腐蚀。按管道腐蚀部位，可分为内壁腐蚀和外壁腐蚀；按管道腐蚀形态，可分为全面腐蚀和局部腐蚀；从腐蚀机理来讲，油气管道所涉及的腐蚀均为电化学腐蚀。

一、管道内壁腐蚀

金属管道内壁因输送介质的作用而产生的腐蚀，主要有水腐蚀和介质腐蚀。水腐蚀是指输送介质中的游离水在管壁上生成亲水膜，由此形成原电池条件而产生的电化学腐蚀。介质腐蚀是指游离水以外的其他有害杂质（如二氧化碳、硫化氢等）直接与管道金属作用产生的化学腐蚀。

长输管道所输送的油气介质并不具有腐蚀性，但由于其中含有的水、氧、硫等腐蚀性成分构成了管道内壁的腐蚀环境。特别是在管道弯头、低洼积水处和气液交界面，由于电化学腐蚀异常强烈，管壁大面积减薄或形成一系列腐蚀深坑，这些深坑是管道易于内腐蚀穿孔的部位。

二、管道外壁腐蚀

管道外壁腐蚀视管道所处环境而异。架空管道易受大气腐蚀；土壤或水环境中的管道，则易受土壤腐蚀、细菌腐蚀和杂散电流腐蚀。

1. 大气腐蚀

大气中含有水蒸气会在金属表面冷凝形成水膜，这种水膜由于溶解了空气中的气体及其他杂质，可起到电解液的作用，使金属表面发生电化学腐蚀。影响大气腐蚀的自然因素除污染物外，还有气候条件。在非潮湿环境中，很多污染物几乎没有腐蚀效应。如果相对湿度超过80%，腐蚀速度会迅速上升。因此，敷设在地沟中的管道或潮湿环境的架空管道表面极易锈蚀。



2. 土壤腐蚀

土壤颗粒间充满空气、水和各种盐类，使它具有电解质的特征。管道金属在土壤电解质溶液中构成多种腐蚀电池。一类是由于钢管表面状态的差异形成的微腐蚀电池。另一类是由于土壤腐蚀介质的差异形成的宏腐蚀电池。如果管道各段落所处土壤透气性不同，土壤中氧的浓度也就不同，从而使腐蚀电池发育，腐蚀电池两极间的距离可达数千米。土壤腐蚀性常用土壤电阻率来表示，电阻率越小的土壤腐蚀性越强。

3. 细菌腐蚀

细菌腐蚀也称为微生物腐蚀。参与管道土壤腐蚀过程的细菌通常有硫酸盐还原菌、氧化菌、铁细菌、硝酸盐还原菌等，其中厌氧性硫酸盐还原菌最具代表性，它在 pH 值为 6~8、碱性和透气性差的土壤中繁殖，广泛地分布在海、河、湖泊、水田、沼泽的淤泥中。它利用自身的生息，将硫酸盐离子还原，同时促进阴极反应，生成硫化铁等腐蚀产物，覆于管道表面，形成二次的局部腐蚀（孔蚀）。在硫酸盐还原菌腐蚀的现场，土壤颜色发黑，有硫化氢臭味。

4. 杂散电流腐蚀

流散于大地中的电流对管道产生的腐蚀，又称为干扰腐蚀，是一种外界因素引起的电化学腐蚀。管道腐蚀部位由外部电流的极性和大小决定，其作用类似电解。杂散电流从管道防腐层破损处流入，在另一破损处流出，在流出处形成阳极区而产生腐蚀。杂散电流源有电气化铁路、阴极保护设施、高压输电系统等。直流杂散电流引起的腐蚀更严重，据统计，在我国较长的东北原油管道系统，有埋地钢质管道 2000 余千米，其中受到直流干扰的管段约 5%。管道投产后 20 余年内，共发生腐蚀穿孔事故 40 起，其中 80% 是由直流干扰腐蚀造成的。穿越某石棉矿区的管道，埋地三年就发生了干扰腐蚀穿孔，腐蚀速率 $2.0 \sim 2.5 \text{ mm/a}$ ；穿越某直流电气化铁路密集地区的管道，埋地仅半年就发生了腐蚀穿孔，腐蚀速率 $10 \sim 12 \text{ mm/a}$ 。交流电引起的腐蚀是在管道沿高压输电线敷设时，因电磁耦合在管道上感应的交流电所造成的，对人体和设备均有危害。

第二节 管道腐蚀控制方法

为了保证管道长期安全输送和防止管道泄漏，各国政府和管道企业都制定有管道防腐规程，作为管道防腐应遵循的准则。减缓地下管线腐蚀的主要方法是涂层和电法保护。

一、涂层防腐

涂层一般是电绝缘材料，通常它在金属表面形成一层连续的膜而起到保护作用。涂层的作用是将金属与周围的电解质溶液隔离（防止电解质溶液与金属接触），使两者之间增加一个很高的电阻，从而阻止电化学反应的发生。实际上，不管质量如何，所有涂层都存在漏点，即缺陷，它是在涂敷、运输和安装预制管线过程中形成的。管道服役过程中涂层的老化、土壤的应力、管线在地下的移动也会造成涂层缺陷。管道服役过程中涂层的老化还会导致其从金属表面剥离，导致金属暴露于地下环境。即使管道表面绝大多数可以得到保护，由



于缺陷或剥离处有较高的腐蚀速率，也会导致管线泄漏和破裂。因此，涂层很少单独用于埋地管线，一般与阴极保护系统联合保护，涂层的功能是减少金属管道裸露的面积，从而减少阴极保护所需要的电流。

二、电法保护

电法保护包括阴极保护和排流保护。

阴极保护是使金属表面成为电化学的阴极而减缓金属表面腐蚀速率的技术，它可运用外部电源（指强制电流阴极保护）或牺牲阳极，使金属的电位负方向偏移来实现。强制电流系统是通过电源和埋地阳极将电流加到被保护结构上；牺牲阳极系统是利用牺牲阳极如锌、镁与管线钢的电偶效应提供阴极保护所需要的电流。

在有杂散电流的环境中，利用排除杂散电流对被保护构筑物施加阴极保护称为排流保护，通常排流方法有 3 种，即直流排流、极性排流和强制排流。

第三节 国内油气管道腐蚀与防护现状

一、管道防护现状

1. 外腐蚀保护

国内油气管道干线大多采用防腐层与外加电流阴极保护进行外腐蚀控制；站场设施（储罐、管网等）大多只采用涂层保护。近两年来，中国石油新建管道站场基本上都施加了区域性阴极保护。

2. 内腐蚀保护

除部分油气田集输管道和储油罐外，大都没有采用内腐蚀控制措施；部分储罐内部安装了牺牲阳极阴极保护系统。

3. 腐蚀控制系统管理

管道干线阴极保护系统一般每月检测沿线保护电位；以前，涂层检测与维护则相对被动，一般在发现问题（如阴极保护电位异常、管体腐蚀）后，进行检测和维护。近年来，油气管道运营管理者逐渐关注腐蚀控制系统管理，已经开始系统地检测维护。

站场设施腐蚀控制系统除区域阴极保护系统定期检测外，基本不进行检测。一般是在发现腐蚀迹象后或随站场设施的改造进行涂层的更新。

二、腐蚀现状

尽管采取了相应的腐蚀控制措施，但管道系统的腐蚀事故仍时有发生，特别是管理相对薄弱的长输管道站场设施和油气田管网。即使是保护较好、管理较为规范的长距离输送管道干线，近年来也发生了多次腐蚀穿孔事故。在东北管网大修现场，发现管体表面发生了较为严重的外腐蚀现象。据不完全统计：目前在役油气管道腐蚀事故频次约为 0.875 ~ 1.375 次/(a · 1000km)，高于国外 0.08 ~ 0.16 次/(a · 1000km)。



参 考 文 献

- [1] A W 皮博迪, 等. 管线腐蚀控制. 吴建华, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 胡士信. 阴极保护工程手册. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [3] 郭庆茹, 等. 对管道直流杂散电流干扰腐蚀的防治方法. 油气储运, 2003, 22 (4) .
- [4] 陈敬和, 等. 抚顺地区管道直流杂散电流干扰腐蚀及防护的探讨. 管道技术与设备, 1999 (6) .
- [5] 刘玲莉, 王玉梅. 油气管道腐蚀控制中存在的问题分析及对策. 防腐保温技术, 2005 (1), 7-10.



第二章 管道防腐涂层保护技术

第一节 管道常用防腐涂层

一、概述

长输埋地油气管道采用防腐涂层和阴极保护联合的方式进行保护，其防腐涂层一般具有良好的绝缘性、抗渗透性、抗冲击性等，阻止周围环境中的水分和氧进入，达到防止腐蚀的目的。长输油气管道分为线路和站场两部分，线路管道防腐层一般采用性能优异、工厂预制的防腐涂层，例如三层聚乙烯防腐层、熔结环氧防腐层等；站场管道的管径大小不一、弯头众多，其防腐层无法全部工厂预制，一般选择易于现场施工的防腐涂层，例如无溶剂液态环氧防腐层、冷缠胶带防腐层等。管道补口防腐处理一般采用现场施工方式，补口防腐一般选择与主管道防腐层相似或性能相近且易于现场施工的材料，例如辐射交联聚乙烯热收缩带、无溶剂液态环氧等。

二、主管道防腐涂层

1. 沥青类

1) 石油沥青

沥青是防腐层的原料，分为石油沥青、天然沥青和煤焦油沥青。我国沥青防腐层以石油沥青用量最多。

石油沥青是沥青基或混合基石油炼制后的副产品经深度氧化制成的，软化点高。石油沥青防腐层的特点：（1）石油沥青属于热塑性材料，低温时硬而脆，随温度升高变成可塑状态，升高至软化点以上则具有可流动性，发生沥青流淌的现象。（2）沥青的密度为 $1.01 \sim 1.07 \text{g/cm}^3$ 。（3）沥青的耐击穿电压随硬度的增加而增加，随温度的升高而降低。（4）抗植物根茎穿透性能差。（5）不耐微生物腐蚀。

石油沥青防腐层主要应用在管道上，其结构为石油沥青 + 玻璃丝布，分为普通级（“三油三布”）、加强级（“四油四布”）和特加强级（“五油五布”），在沥青层中增加玻璃丝布有利于增强防腐层的机械性能。一般来说，对于地下水位低、地表植被较差的沙质土壤地段，较适合采用石油沥青防腐层。对一般构件可以用浸涂、浇涂和抹涂的方法施工。

我国从 20 世纪 50 年代起，开始使用石油沥青对管道进行防腐，20 世纪 80 年代中期以前建设的管道工程几乎无一例外地采用了加强级石油沥青防腐层。例如，我国著名“八三”管道石油沥青防腐层已经使用了 30 多年。石油沥青吸水率高，不宜在高水位或沼泽地带使



用。施工中现场的环境温度、熬制沥青的温度和涂敷时间间隔等因素控制不好，都会影响质量。此外，由于土壤应力的影响，管道防腐层表面会出现深浅不一的凹坑。由于新型管道防腐材料的出现及环境保护要求，20 世纪 90 年代起管道防腐已很少使用石油沥青防腐层。

2) 煤焦油瓷漆

煤焦油瓷漆是由高温煤焦油分馏得到的重质馏分和煤沥青，添加煤粉和填料，经加热熬制所得的制品。该材料的主要成分煤沥青呈芳香族性，是一种热塑性物质。其分子结构为环状双键型，碳氢比高（碳原子与氢原子的比为 1.4 : 1，而石油沥青为 0.9 : 1）。由于分子结构紧密，因而具有以下基本特点：（1）吸水率低，抗水渗透；（2）优良的化学惰性，耐溶剂和石油产品侵蚀；（3）用它生产的煤焦油瓷漆电绝缘性能好。煤焦油瓷漆主要的缺点是低温发脆，热稳定性能差。

煤焦油瓷漆防腐层分为普通、加强和特强三级，使用时根据不同的使用条件和土壤腐蚀性选择防腐层的等级与结构。煤焦油瓷漆比石油沥青吸水率低，粘结性优于石油沥青，抗植物根茎穿透和耐微生物腐蚀，且电绝缘性能好。由于它具有优良的防腐性能，又比较经济实用，特别是适用于穿越沙漠、盐沼地等特殊环境，20 世纪 90 年代初期和中期，我国曾大量使用煤焦油瓷漆作为埋地管道防腐涂层，例如，塔中—轮南的原油管道和天然气管道、轮南—库尔勒输油管道复线和天然气管道、靖边—西安天然气管道等。

煤焦油瓷漆防腐层对温度比较敏感，施工熬制和浇涂的过程中容易逸出有害物质，对环境和人体健康有影响。所以，它的应用受到了一定局限性，20 世纪 90 年代后期，由于环境保护因素，国内已经很少使用。

由于近年来新型、性能优异的防腐层出现以及环境保护要求逐渐严格，新建管道已基本上不再采用沥青类防腐层。

2. 聚烯烃类（三层 PE、2PE、聚乙烯胶带、聚丙烯胶带）

聚烯烃防腐层所用材料主要是聚乙烯（PE）塑料和聚丙烯（PP）塑料，塑料中可以加入增塑剂、抗老化剂、抗氧化剂、光稳定剂等助剂及适量填料。聚乙烯和聚丙烯均为结晶态的热塑性塑料，是一种非极性大分子，因此其机械强度较高。聚丙烯防腐层发展比聚乙烯防腐层发展晚，管道防腐上聚乙烯防腐层用量较聚丙烯防腐层大。

1) 复合结构聚烯烃防腐层

(1) 二层和三层聚乙烯防腐层。

聚乙烯是乙烯的高分子聚合物，根据聚合工艺条件的不同，聚乙烯可分为高压聚乙烯、中压聚乙烯和低压聚乙烯三类产品。高压聚乙烯的分子结构中含有较多的支链，结晶度较小，约为 65% ~ 75%，密度为 $0.92 \sim 0.93 \text{ g/cm}^3$ ，所以高压聚乙烯又称为低密度聚乙烯；低压聚乙烯中支链少，结晶度较大，约为 85% ~ 95%，密度为 $0.94 \sim 0.95 \text{ g/cm}^3$ ，低压聚乙烯又称为高密度聚乙烯。超高相对分子质量高密度聚乙烯基本上是线性结构，其性能比一般高密度聚乙烯优异，具有较高的抗冲击强度和长期耐疲劳性能，低温下（-50℃ 以下）使用性能也较好，120℃ 仍有一定的抗拉强度，是一种优良的工程材料。因此，结晶度大小对聚乙烯的熔点、软化点等物理机械性能有很大的影响。由于聚乙烯分子链主要是亚甲基（-CH₂-）构成，化学稳定性较好。常温下能耐一般的酸、碱、盐的腐蚀，特别能耐 60℃ 以下的浓氢氟酸的腐蚀，在室温下脂肪烃、芳香烃和卤代烃等能使之溶胀。聚乙烯的使用温



度在各个资料中所介绍的数据不同,有 50℃,也有 80℃,国内外有关聚乙烯的标准规范对其使用温度均限制在 70℃ 以内。复合结构聚乙烯防腐层的发展经历了二层结构和三层结构两个阶段。

二层结构聚乙烯防腐层是基于隔离的机理发展起来,底层为胶粘剂,一般为沥青丁基橡胶或乙烯共聚物,面层为聚乙烯挤出包覆或缠绕层。1965 年,原西德在欧洲首次使用挤出聚乙烯管道防腐层并很快在欧洲流行起来,使用量占第一位。挤出成型的聚乙烯有两种施工工艺,即纵向挤出包覆(筒状或十字头挤出)和侧向挤出缠绕两种方法。纵向挤出包覆只限于 600mm 以下的管道,而挤出缠绕法可适用于任意直径。挤出聚乙烯绝缘电阻高,能抗杂散电流干扰,突出的优点是机械性能好,能承受长距离运输、敷设过程以及岩石区堆放时的物理损伤,耐冲击性强。二层结构聚乙烯防腐层与管体的粘结性能稍差,随着管道运行条件的不断变化,逐渐暴露出易损坏、易剥离、屏蔽阴极保护电流等缺陷。

国内在油田小管径管网工程中采用过二层结构聚乙烯防腐层,在长输大管径油气管道中很少采用该类防腐层。

三层结构聚乙烯防腐层底层为环氧粉末,中间层为胶粘剂,面层为挤出聚乙烯。20 世纪 80 年代,由欧洲率先研制和推出的三层 PE 复合结构发展了 FBE 和 PE 的优点,使防腐层的性能更加完善。环氧粉末在三层结构中的主要作用是形成连续的涂膜,与钢管表面直接粘结,具有很好的耐化学腐蚀和抗阴极剥离性。环氧粉末不仅与基层金属有极优异的粘结性能,还可以与中间层有极强的粘结力。中间层粘结剂是通过线性聚烯烃接枝形成了部分极性基团,这些极性基团与环氧粉末的环氧基团反应形成化学键,使中间层和底层形成良好的粘结。面层聚烯烃是非极性物质,粘结剂中的非极性基团与面层聚烯烃由于是同一类材料,根据粘结理论中的相似相容的原理,在一定温度下达到充分熔融后,它们之间熔为一体,产生了极强的粘结力。高密度聚烯烃树脂具有极强的机械性能和优异的耐蚀性能,所以在最外层起机械保护作用以及隔水阻氧,防止各种介质的腐蚀作用。

对于复杂地域、多石区及苛刻的环境,选用三层结构聚乙烯具有重要意义。这种防腐层虽然一次投资较高,但其绝缘电阻值极高,管道的阴极保护电流密度只有 $3 \sim 5 \mu\text{A}/\text{m}^2$,1 座阴极保护站可保护上百千米的管道,可大幅度降低安装和维修费用。因此,从防腐蚀工程总体来说可能是经济的。

由于底层 FBE 提供了涂层系统对管道基体的良好粘结,而聚乙烯则有着优良的绝缘性能和抗机械损伤性能,使得三层结构聚乙烯成为世界上公认的先进涂层,很快得到广泛应用。我国自 20 世纪 90 年代中期开始应用以来,已有上万千米管道采用了三层 PE 防腐涂层,例如陕京输气管道、西气东输管道等,如今已成为新建大型管道工程防腐涂层的首选,近年来新建长输管道几乎无一例外地选用了三层结构聚乙烯防腐层。

(2) 三层聚丙烯防腐层。

聚丙烯是丙烯的高分子聚合物,根据 $-\text{CH}_3$ 在主链平面排列的不同,分为等规、间规和无规聚合物,等规和间规聚合物称为定向聚合物,结晶容易,在物理机械性能上优于无规聚丙烯。聚丙烯是结晶型高聚物,在熔点以下可以保持很好的结晶结构。在没有外力作用下,聚丙烯甚至在 150 ~ 160℃ 还能保持形状不变,推荐的聚丙烯最高使用温度为 110 ~ 120℃。未改性的聚丙烯耐寒性较聚乙烯差,当温度低于 0℃ 时,接近玻璃化温度 (-10°C) 时,就



开始变脆，耐冲击性能显著下降。聚丙烯经改性后低温性能得到改善，曾经有资料报道，在 $-30 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 时也可以获得较满意的效果。聚丙烯不仅具有优异的物理机械性能，而且具有优良的耐蚀性能，无机物除氧化性介质外，对聚丙烯都没有破坏作用。室温下，所有的有机溶剂都不能溶解聚丙烯。

三层聚丙烯防腐层借鉴了三层聚乙烯防腐的优点，即在底层（FBE 层）、中间层（胶粘剂层）不加改变的基础上，选择聚丙烯材料作为外防腐层。三层聚丙烯防腐层较三层聚乙烯防腐层有以下优点：耐高温性能好、耐腐蚀性能好、不易发生环境应力开裂。

以聚丙烯作为管道防腐层的特点是低温易脆，因此，聚丙烯防腐层不适用于严寒地区，这也限制了聚丙烯防腐层的应用。我国输油气管道工程中没有大规模采用三层聚丙烯防腐层的实例，仅在克拉 2 管道工程中有过应用实例。

2) 冷缠胶粘带类聚烯烃防腐层

冷缠胶粘带类聚烯烃防腐层自 20 世纪 60 年代推出以来已有 40 多年的历史，主要有聚乙烯冷缠胶带和聚丙烯冷缠胶带两种。

聚乙烯胶带是将聚乙烯塑料以薄片状挤出，并涂覆一层粘结剂（通常为丁基橡胶胶胶）制成。聚乙烯胶粘带防腐体系是由一道底漆、一层内防腐带、一层外保护带构成。具有极好的耐水性及抗氧化性能，吸湿率低；绝缘性好，抗阴极剥离，耐冲击，耐温范围广，在 $-30 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用性能稳定。聚乙烯胶粘带的防腐质量主要取决于胶—膜界面的粘结力。

聚乙烯胶带一般使用机械工具在现场自然温度下缠绕到管道上形成防腐层。就防腐层结构而言，聚乙烯胶带和二层结构聚乙烯是一样的，但是由于是冷缠施工，胶带防腐层对管体的粘结力小于二层结构，防腐层下存在气隙的可能性及数量增大；与挤出缠绕不同，胶带压边位置的防腐层不是一个整体，而压边粘结的紧密程度对防止水汽的渗透至关重要；胶带防腐层较软、较薄，抗外力损伤的能力小，此外抗土壤应力的能力不好，特别在高温下，因粘结力差和致密性好而产生阴极屏蔽。

聚丙烯冷缠胶带以聚丙烯增强纤维为背材，并涂敷一层橡胶改性沥青而制成。该防腐系统与聚乙烯胶带相比具有粘结力强、与背材粘结性好、抗冲击性好和与阴极保护匹配好等特点。由于聚丙烯冷缠胶带中增加了橡胶改性沥青，其防腐层耐高温性能差，在高温管段上应用，胶层会产生蠕变。另外，聚丙烯冷缠胶带易于吸水，在潮湿地段绝缘性能下降严重。

聚烯烃胶带防腐层在国内主要应用于管道防腐层的修复，例如，东北热油管道防腐层修复采用了聚乙烯冷缠胶带，常温输气管道防腐层修复采用了聚丙烯冷缠胶带。新建管道工程线路防腐很少采用胶带类防腐层，仅在站场防腐层现场施工时，采用这类防腐层作为外护带。

3. 环氧类（熔结环氧粉末、液态环氧）

环氧树脂中具有醚基（ $-\text{O}-$ ）、羟基（ $-\text{OH}$ ）和较为活泼的环氧基。醚基和羟基是高级性基团，会与相邻的基材表面产生吸力；环氧基能与多种固体物质的表面，特别是金属表面的游离键起化学反应，形成化学键，因而环氧树脂的粘结性特别强。环氧基官能团一般不会起化学反应，通常要借助于固化剂参与的固化反应将树脂中的环氧基打开，使环氧树脂的分子结构间接或直接地连接起来，交联成体形结构，所以，固化剂也称为交联剂。固化后的



环氧树脂由于含有稳定的苯环和醚键，分子结构紧密，化学稳定性好，表现出优异的耐蚀性能。虽然环氧树脂中含有亲水的羧基，但它与聚酯、酚醛树脂中的羟基不同，只要配方得当，通过交联结构的隔离作用，能获得良好的耐水性。

1) 熔结环氧粉末 (Fusion Bonded Epoxy, 简称为 FBE)

熔结环氧粉末是一种热固性材料，由环氧树脂和各种助剂制成，它通过加热熔化、胶化、固化，附着在金属基材的表面。它形成的表面涂层具有粘结力强、硬度高、表面光滑、不易腐蚀和磨损、抗阴极剥离等优点。

自 20 世纪 60 年代初问世以来，单层熔结环氧粉末防腐层发展很快，在国外管道上以北美地区应用最为广泛，曾连续多年占各类防腐层用量的第一位。FBE 防腐层硬而薄，与钢管的粘结力强，机械性能好，具有优异的耐蚀性能，其使用温度可达 $-60^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，适用于温差较大的地段，特别是耐土壤应力和阴极剥离性能最好。在一些环境气候和施工条件恶劣的地区，如沙漠、海洋、潮湿地带选用 FBE 防腐层有其明显的优势。但它也存在一些自身的缺点：如防水性较差，不耐尖锐硬物的冲击碰撞；施工运输过程中，很难保证涂层不被破坏；现场修补困难，且涂敷工艺严格。目前国内仅有少量管道单独采用环氧粉末，主要用作复合涂层的底层。

因单层熔结环氧防腐层存在耐机械撞击能力较弱、防水性较差等问题，双层熔结环氧防腐层体系逐步发展起来。双层熔结环氧防腐层是以单层熔结环氧为底层，以改性的熔结环氧粉末作外护层。这种双层熔结环氧粉末防腐体系，较大地提高了防腐层的机械性能，增强了防腐层的抗冲击能力、耐高温能力以及高温下的抗渗透性，同时保持了单层熔结环氧粉末防腐层与阴极保护的相容性能，不会产生阴极保护屏蔽。其整体防腐层的厚度为 $525 \sim 1000\mu\text{m}$ ，最高使用温度达 115°C ，适用于各种管径的钢管、弯头、异型件及补口等的防腐。

2) 液体环氧

液体环氧涂料分为溶剂型和无溶剂型两种，主要区别在于无溶剂环氧涂料在涂料制造及施工应用过程中不需要采用挥发性有机溶剂作为分散介质。无溶剂环氧涂料是采用低粘度环氧树脂、颜填料、助剂等经高速分散和研磨而制成漆料，以低粘度改性胺作为固化剂而组成的双组分反应固化型防腐涂料。与溶剂型环氧涂料相比，突出优点在于能够减少有机溶剂挥发对空气的污染。另外，无溶剂环氧涂料挥发少，在密闭系统中施工时可以大大减少通风量；反应固化过程中收缩率极低，具有一次性成膜较厚、边缘覆盖性好、内应力较小、不易产生裂纹等特点。

无溶剂液体环氧防腐涂层具有优异的物理机械性能，在交联固化后能够形成类似瓷釉一样的光洁涂层。由于交联密度高和分子链中的苯环结构，使涂层坚硬且柔韧性好、耐磨性优、抗划伤性好、耐冲击性优；具有优异的耐化学品性，能耐海水，中度的酸、碱、盐，各种油品，脂肪烃等化学品的长期浸泡；由于不含挥发性有机溶剂，在干燥成膜过程中不会形成因溶剂挥发留下的孔隙，且成膜厚，涂膜致密性极佳，能有效抵挡水、氧等腐蚀性介质透过涂层而腐蚀钢材。

油气管道上使用的无溶剂环氧防腐层分为普通级和加强级，其中普通级干膜厚度不小于 $400\mu\text{m}$ ，加强级不小于 $550\mu\text{m}$ 。无溶剂液体环氧既可以在工厂预制防腐层，也可以在野外施工，施工方法一般采用喷涂、刷涂、滚涂和刮涂。国内在东北管网防腐层大修部分管段就采



用了无溶剂液体环氧涂料。

4. 其他

粘弹体防腐材料是一种聚烯烃类单分子聚合物，对表面处理要求较低，可保持 30 年以上使用寿命，长期密封性能极好，可彻底阻断水分侵入被保护结构，进而达到防止腐蚀的目的。根据防腐构件的不同形状，粘弹体防腐材料有防腐胶带和防腐膏两种。

粘弹体防腐材料适用温度范围为 $-45^{\circ}\text{C} \sim 95^{\circ}\text{C}$ ，现场施工简单方便，表面处理要求较低，无需喷砂处理；无须底漆，可直接粘结于 3PE、PP、环氧、FBE、沥青等各种涂层上，粘结覆盖率大于 95%；无须现场烘烤，人工缠绕简单方便，受环境、人员技术水平影响小；轻微机械损伤可自我修复，特别适用于异型管件的防水密封。但由于粘弹体材料长期不固化，其抗机械性能较差，且剥离强度小，不能单独用作埋地管道的防腐。一般情况下，粘弹体防腐材料与其他具有较好抗冲击性能的外护胶带联用，例如，聚丙烯胶带、PVC 外护带、纤维复合材料外护带等。

粘弹体防腐材料可用于管道防腐补口、站场埋地管道、阀门、法兰、弯头、三通等构件的防腐。国内管道工程，如中俄原油管道、西气东输管道、陕京三线管道，近年开始采用这种材料作为管道防腐补口及站场非直埋管道的防腐。国外管道工程，如荷兰南北天然气管道、德国—英格兰 CALLANTSOOG BBL 管道，已开始应用这种防腐材料作为管道防腐补口及修复。

三、热煨弯管防腐涂层

油气长输管道由于受地形等条件的制约，在施工时应使用弯管进行连接。目前，国内热煨弯管的外防腐材料主要有五种，分别为液体环氧涂料、单层熔结环氧粉末（单层 FBE）、三层结构辐射交联聚乙烯热收缩套（带）、双层熔结环氧粉末（双层 FBE）、聚乙（丙）烯胶粘带。

国内西气东输部分管道就采用了液体环氧涂料防腐层用于弯管的外防腐。但其存在涂刷效果不稳定（人工涂敷对人员操作要求较高，机械涂敷则施工费用较高）、固化时间长、机械强度差等缺点，目前很少单独应用，多与聚烯烃胶带形成复合结构。

单层熔结环氧粉末（单层 FBE）从目前国内使用情况来看，采用这种防腐层的管道，其现场补伤工作量较大，综合效益并不理想，多与聚烯烃胶带联合形成复合防腐结构。采用多个收缩套（带）形成虾米弯状防腐结构，其最大优势是现场操作较为简便、对环境要求较低，但因热煨弯管外防腐表面较大，其投资偏高，且热收缩套（带）收缩成型过程中很难形成严格的防水密封结构，该种防腐结构应用较少。

双层熔结环氧粉末（双层 FBE）是目前国内长输管道上使用较多的热煨弯管外防腐层，防腐效果好，但抗冲击性能略低于三层结构辐射交联聚乙烯热收缩套（带），用于大口径管道上略显不足。

在陕京一线管道工程中，采用过 TEK-RAP 公司的胶粘带作为热煨弯管的外防腐材料，使用效果良好，但价格较高。胶粘带施工操作方便、灵活，综合费用相对较低；其缺点是耐机械划伤能力较差，并且在夏季温度较高时易变软，影响防腐质量。国内生产的胶带性能差异较大，施工时人为因素影响较大。