



油气管道工程技术丛书

油气管道防腐蚀工程

YOUQI GUANDAO
FANGFUSHI GONGCHENG

石仁委 龙媛媛 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油天然气工业技术丛书

油气管道防腐蚀工程

石仁委 龙媛媛 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书从油气管道腐蚀特点、油气管道腐蚀监测技术、油气管道腐蚀控制技术几个方面出发,重点介绍了油气管道的内外腐蚀与控制、埋地管道外防腐层地面检测、管体腐蚀检测及管道腐蚀监测技术、药剂防腐蚀技术、工程防腐蚀技术、阴极保护技术等。

本书可供油气管道工程设计、施工技术人员及管理人员阅读,也可供相关专业的大中专院校师生学习参考,亦可作为企业管道腐蚀与防护培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

油气管道防腐蚀工程/石仁委,龙媛媛编著. —北京:
中国石化出版社,2008
(油气管道工程技术丛书)
ISBN 978-7-80229-634-3

I. 油… II. ①石…②龙… 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(2008)第 091167 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京密云红光制版公司排版

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 17 印张 426 千字
2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
定价:45.00 元

前言

腐蚀往往给油气田造成重大经济损失、灾难事故和环境污染。中国腐蚀与防护学会、中国石油学会和中国化工学会联合调查的数据表明,对于各行各业来说,腐蚀造成的损失平均约占国民生产总值的3%,对于石油与石化行业尤其严重,约占产值的6%。根据中国科学院对全国腐蚀调查提供的典型事例资料:中原油田1993~1999年腐蚀穿孔28012次,直接经济损失5.7亿元;四川天然气管线一次腐蚀爆裂着火经济损失7000万元;新疆某天然气井由于管线腐蚀开裂,井喷着火76天,直接经济损失7000多万元;胜利油田因腐蚀问题造成的金属管道提前报废更换率为2.5%,每年至少需要更换或大修400km左右的管线才能确保安全生产。因腐蚀提前更换管线造成年少产原油1.6万吨,因原油减产和更换管线增加的生产成本近亿元;在注水方面,因腐蚀穿孔原因造成的经济损失也在亿元左右。随着原油开发进入中后期,越来越多的腐蚀问题已显现出来,因此,腐蚀已成为制约油田安全生产、降本增效的重要问题之一。

由于腐蚀的复杂性和多变性,任何防腐蚀技术都不是万能的,腐蚀是绝对的,防护是相对的。这就要求我们在全面深入地了解腐蚀环境特点的基础上,通过合理的选材与设计预防腐蚀;利用精确可靠的腐蚀监检测技术预测腐蚀;采取适宜的防护技术与措施控制腐蚀。只有将预防、预测与控制三者有机结合才能将油气管道的腐蚀损失降至最低程度。

由于油气管道常常服役于高温、高压、高含水、高矿化度、高溶解氧、高含 H_2S 和 CO_2 以及恶劣的土壤环境中,因而使油气管道的腐蚀较其他领域更为严重,给油田生产乃至国民经济带来的损失与危害更为巨大。虽然有关金属材料腐蚀与防护方面的相关书籍屡见不鲜,但迄今为止还没有一本针对油田特定腐蚀环境比较系统、深入地介绍油气管道腐蚀与防护知识的书籍。本书编写正是从这个角度出发,结合胜利油田腐蚀与防护研究所多年来从事油田管道腐蚀与防护检测、评价与控制技术研究的实践经验,对油气管道腐蚀与防护的基础理论、监检测技术与控制技术等作了较为全面的阐述。

毫无疑问,在未来相当长的时间内,油气管道腐蚀检测、评价与控制技术的研究和开发将是一个非常重要的基础。本书有助于油气技术人员、管道管理人员及时了解油气集输系统的运行状况及腐蚀情况,并采取措施减少腐蚀油气田生产带来的损失,这对于保障油气田安全生产、降本增效具有重要意义。

本书由中国石油大学(华东)的王引真教授担任审阅工作,同时参与本书编写的还有王遂平、刘超、杨为刚等同志,另外,李永年、隋国勇、柳言国、姬杰、许卫国等同志也参与了本书的讨论,在此一并表示感谢。

中国石化出版社管道类图书及行业标准

书 名	定 价/元
石油管道输送技术	80(估)
提高输油(气)管道综合效率技术研讨会论文集	70
油气管道工程	38
石油化工安全技术与管理丛书——油气管道安全工程	45
缺陷管道适用性评价技术	45
管道工程设计与施工手册	128
地下管线检测技术	80
管道完整性管理与技术	50
甬沪宁进口原油管道工程	150
石油化工装置工艺管理安装设计手册 第一篇 设计与计算(第三版)	150
第二篇 管道器材(第三版)	140
第三篇 阀门(第三版)	100
第四篇 相关标准(第三版)	125
第五篇 设计施工图册	50
石油化工管道设计安装便查手册(第二版)	160
石油化工工艺管道设计与安装(第二版)	78
石油化工厂设备检修手册 第十分册 工艺管线	60
石化工艺管道安装设计实用技术问答(第二版)	30
全国压力管道设计审批人员培训教材	66
压力管道应力分析	30
压力管道技术(第二版)	65
管道安全运行与管理	18
塑料管道及管件加工与应用	38
[英]管道风险评价管理手册(第二版)	60
[美]装置管道系统配置手册(第二版)	158
[美]配管数据手册	125
[美]管道手册(第七版)	280
SH/T 1758—2007 给水管道系统用聚乙烯(PE)专用料	15
SH 3010—2000 石油化工设备和管道隔热技术规范	33.5
SH 3012—2000 石油化工企业管道布置设计通则	16
SH/T 3019—2003 石油化工仪表管道线路设计规范	17
SH 3022—1999 石油化工设备和管道涂料防腐技术规范	28
SH 3034—1999 石油化工给水排水管道设计规范	15.5
SH/T 3035—2007 石油化工企业工艺装置管径选择导则	70
SH/T 3039—2003 石油化工非埋地管道抗震设计通则	13
SH/T 3040—2002 石油化工管道伴管和夹套管设计规范	23
SH/T 3041—2002 石油化工企业管道柔性设计规范	12
SH 3043—2003 石油化工设备管道钢结构表面色和标志规定	21
SH/T 3051—2004 石油化工配管工程术语	56
SH/T 3052—2004 石油化工配管工程设计图例	28
SH/T 3054—2005 石油化工厂区管线综合设计规范	15
SH/T 3055—2007 石油化工管架设计规范	25
SH 3059—2001 石油化工企业管道设计器材选用通则	29
SH 3073—2004 石油化工管道支吊架设计规范	41
SH/T 3122—2000 炼油装置工艺管道流程设计规范	21
SH/T 3129—2002 加工高硫原油重点装置主要管道设计选材导则	17
SH 3401~3410—91 石油化工管道器材标准(合订本)	120
SH/T 3412—1999 石油化工管道用金属软管选用、检验及验收	15
SH/T 3413—1999 石油化工石油气管道阻火器选用、检验及验收	12
SH/T 3501—2001 石油化工剧毒、可燃介质管道工程施工及验收规范	26
SH 3502—2000 钛管道施工及验收规范	14.5
SH/T 3517—2001 石油化工钢制管道工程施工工艺标准	64
SH 3518—2000 阀门检验与管理规程	10.5
SH 3533—2003 石油化工企业给水排水管道工程施工及验收规范	30
SH/T 3902—2004 石油化工配管工程常用缩写词	11
SH/T 3905—2007 石油化工企业地下管网管理工作导则	38

目 录

第一章 概论	(1)
一、油气管道防腐蚀的意义	(1)
二、油气管道分类及作用	(3)
三、油气管道腐蚀的分类	(3)
四、油气管道腐蚀原理及影响因素	(5)
五、油气管道腐蚀与防护通用技术	(5)
第二章 油气管道的腐蚀特点与防护对策	(8)
第一节 油气管道的内腐蚀与防护	(8)
一、油气管道内腐蚀的环境介质特点	(8)
二、油气管道内腐蚀的典型腐蚀类型	(10)
三、油气管道的内腐蚀防护技术	(16)
第二节 油气管道的外腐蚀与防护	(23)
一、大气腐蚀	(23)
二、土壤腐蚀	(29)
三、油气管道的外腐蚀防护技术	(37)
第三章 油气管道腐蚀监测与修复技术	(39)
第一节 油气管道腐蚀监测的意义和作用	(39)
一、油气管道运行及其管理现状	(39)
二、油气管道腐蚀监测的意义与作用	(39)
第二节 埋地管道探测技术	(40)
一、金属管线探测	(40)
二、非金属管线探测	(41)
三、埋地管线探测应注意的几点原则	(41)
第三节 埋地管道外防腐层检测技术	(42)
一、埋地管道外防腐层破损点检测技术	(42)
二、埋地管道防腐层性能检测评价技术	(43)
第四节 埋地管道管体腐蚀检测技术	(50)
一、埋地管道管体腐蚀直接检测技术	(50)
二、埋地管道管体腐蚀内检测技术	(54)
三、埋地管道管体腐蚀不开挖地面检测技术	(56)
第五节 埋地管道非开挖在线检测技术应用实例	(59)
一、检测技术与评价方法简介	(59)
二、在线全面检测工作组织	(60)
三、检测成果	(62)
四、腐蚀原因分析	(63)

五、检测结论	(63)
六、检测准确性与意义	(64)
第六节 埋地管道泄漏检测技术	(64)
一、检测方法概述	(64)
二、检测原理及分类	(65)
三、泄漏检测应用实例	(66)
第七节 管道特征点与风险点高精度卫星定位技术	(67)
一、GPS-RTK 坐标测绘技术简介	(67)
二、GPS 的特点	(67)
三、RTK 系统的组成	(68)
四、RTK 的作业方法	(69)
第八节 数字化油田集输管网建设技术	(71)
一、数字化油田集输管网建设的必要性	(71)
二、基于 GIS 的油田地面管网检测评价信息系统简介	(72)
三、系统功能与操作	(73)
四、系统建设及应用实例	(75)
第九节 油气管道腐蚀在线监测技术	(78)
一、油气管道设备腐蚀监测方法概述	(78)
二、油气管道设备腐蚀监测的物理方法	(80)
三、油气管道设备腐蚀监测的电化学方法	(82)
四、油气管道设备监测方法的选择、布点及监测准确性	(85)
五、油气管道腐蚀监测新技术——旁路管线中试评价法	(87)
第十节 油气管道选择性修复技术	(90)
一、管道防腐层修复技术	(91)
二、管体补强技术	(96)
三、其他管道修复技术	(97)
第四章 油气管道腐蚀防护技术	(99)
第一节 管道设备的防腐蚀设计	(99)
一、选材	(99)
二、防腐蚀结构设计	(100)
三、防腐蚀强度设计	(103)
第二节 药剂防腐蚀技术	(104)
一、缓蚀剂	(104)
二、阻垢剂	(115)
三、杀菌剂	(119)
第三节 材料防腐蚀技术	(124)
一、耐蚀金属材料	(124)
二、耐蚀非金属材料	(139)
第四节 表面处理技术	(155)
一、钢铁表面锈蚀等级和除锈等级	(155)

二、除锈技术	(159)
三、化学表面处理技术	(160)
四、镍-磷化学镀技术	(165)
五、表面镀锌技术	(171)
六、氮化防腐技术	(171)
七、镀钨合金技术	(172)
第五节 涂层防腐蚀技术	(173)
一、概述	(173)
二、防腐蚀涂料	(175)
三、容器与储罐内防腐涂层技术	(189)
四、管道内防腐涂层技术	(194)
五、架空管道与储罐外防腐涂层技术	(206)
六、埋地钢质管道外防腐层技术	(208)
第六节 管道与储罐电化学保护技术	(221)
一、电化学保护概述	(221)
二、管道与储罐外加电流阴极保护	(225)
三、牺牲阳极阴极保护	(245)
四、排流保护	(253)
参考文献	(263)

第一章 概 论

一、油气管道防腐蚀的意义

油气管道防腐蚀技术,主要研究管道在一定腐蚀环境和使用条件下腐蚀破坏的原因,开发相应的腐蚀检测技术与防护方法。涉及的领域广,交叉的学科多,是一门新兴的边缘学科。

石油天然气工业是遭遇腐蚀破坏严重的行业之一,随着原油开发进入中后期,采出液综合含水率逐渐上升,由于采出液矿化度高,氯离子含量大,含有二氧化碳、硫化氢、溶解氧、泥沙和硫酸盐还原菌等微生物,加之高温、高压、流速及流态变化等相互作用,对油气管线、设备造成严重腐蚀,加之土壤、杂散电流、微生物等对埋地管道造成的外腐蚀,油气管道腐蚀问题遍及油气开采、储运、炼化等油气田生产的各个环节,已成为制约油气田安全生产与降本增效的重要因素之一。

腐蚀破坏引起突发的恶性事故,往往造成巨大的经济损失和严重的社会后果。据美国国家运输安全局对 1969~1978 年发生的管道事故报告的统计结果,管道失效原因中腐蚀占 43.6%。世界各国每年仅管道腐蚀就造成巨大的经济损失:美国约 20 亿美元,英国约 17 亿美元,德国和日本约为 33 亿美元。作为油气勘探开发的油井管(油管、套管、钻杆等)和油气水输送的管线管(长距离油气输送管、出油管、油田油气水集输管及注水注汽、注 CO_2 、注聚合物管等),其失效主要表现为腐蚀失效,主要的腐蚀介质有 H_2S 、 CO_2 、 O_2 和硫酸盐还原菌(SRB)等。腐蚀破坏导致的损失巨大,例如 1975 年,挪威艾柯基斯克油田阿尔法平台 API X52 高温立管,由于原油中含有 1.5%~3% 的 CO_2 及 6%~8% 的 Cl^- ,同时由于飞溅区的腐蚀,投产仅两个月,立管就被腐蚀得薄如纸张,导致了严重的爆炸、燃烧和人身伤亡事故;1988 年,英国帕尔波·阿尔法平台油管因 CO_2 腐蚀疲劳造成断裂引发突然爆炸燃烧,死亡 166 人,使英国北海油田原油产量减少 12%;1977 年完工的美国阿拉斯加一条长约 1287km、管径 $\phi 1219.2\text{mm}$ 的原油输送管道,一半埋地一半外露,每天输送原油约 $2.31 \times 10^6 \text{m}^3$,造价 80 亿美元,由于对腐蚀研究不充分和施工时采取的防腐蚀措施不当,12 年后发生腐蚀穿孔达 826 处之多,仅修复费用一项就耗资 15 亿美元。由于不可预见的管道外部腐蚀,维护与修理费用有所增加,美国用于研究、实验、服务、监测、修理、维护及新项目建设方面的年度总费用预计超过 100 亿美元。其中,石油天然气工业腐蚀费用预计占其维护、修理及新项目建设费用的 40%。

在中国,管道因腐蚀造成失效也占有相当高的比例。据某油气田的统计,1970~1980 年间输气干线共发生 100 起较重大的管道失效事故,其中腐蚀失效占 22.5%。1971 年 5 月,中国某油田天然气管网因脱硫净化气中的 CO_2 及残留的 H_2S 的腐蚀破坏引起爆炸和燃烧,直接经济损失 7000 万元,伤亡 24 人。

目前中国部分油田进入高含水期开发,有的新油管下井一年后即发生穿孔,3 年就得全部更换(图 1-1)。据初步分析与统计,注水井套管的腐蚀速率约为每年 0.5~0.6mm(图 1-2),维护费逐年增大,油管、抽油杆、泵等设备的更换每年约为 2.5 亿元。注水井套管寿命一般在 6 年左右,油井套管使用寿命一般在 8 年左右。



图 1-1 油管腐蚀穿孔形貌



图 1-2 套管腐蚀穿孔形貌

四川酸性气田特别是磨溪气田, 由于天然气中含有带 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 与硫酸盐还原菌 (SRB) 的地层水, 对油、套管和集输管线腐蚀十分严重。特别是井下油管, 最短在两年左右发生腐蚀断裂, 造成内部堵塞, 压力下降, 产量下降。胜利油田已进入特高含水开发期, 采出污水中含有溶解氧、硫酸盐还原菌和 H_2S 、 CO_2 与 Cl^- , 对集输管线腐蚀相当严重(图 1-3), 腐蚀速度达到 $1 \sim 7\text{mm/a}$, 应力作用下的点蚀速度可以达到 14mm/a 。胜利油田现有地面管约 20000km , 其中原油集输、污水、注水管线占 85% , 钢管年更换率为 2.5% , 每年至少更换 400km , 更换管线费用达 6000 万元。中原油田因水质偏酸性且极不稳定, 引发腐蚀造成的直接经济损失每年约 7000 万元, 间接经济损失约 2 亿元。大庆油田现有地面管线约 40000km , 平均寿命 9 年, 年更换率 12.9% ; 油管柱约 50000km , 平均寿命 3 年。中国石油天然气股份有限公司所属油田管道腐蚀、老化严重, 穿孔、漏油事故频繁发生。

腐蚀造成的损失不仅是金属资源的浪费, 而且腐蚀产物形成垢层将影响传热和介质流速, 增加能源消耗; 同时由于腐蚀穿孔或腐蚀失效引起的管道泄漏, 轻则造成能源浪费和环境污染(图 1-4), 重则还会引起火灾、爆炸、急性中毒等恶性事故, 威胁人民的生命安全。

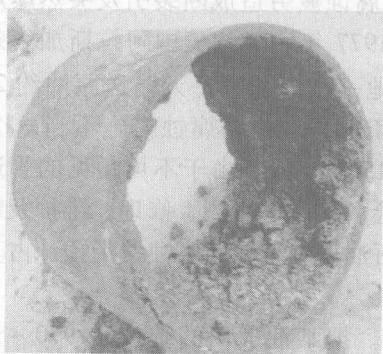


图 1-3 集输管线腐蚀形貌



图 1-4 某输油管线因腐蚀破裂造成原油泄漏污染

油气管道, 尤其是长输油气埋地管道, 由于处在不同的地理环境中, 如通过江河、湿地、各种性质的土壤, 或者处于腐蚀性大气环境之中, 必须施加防护措施。在设计和施工阶段, 应充分估计环境和管内介质对管道的腐蚀作用, 采用实用的耐蚀材料、积极的防护措施; 在使用和维护阶段, 要对管道的腐蚀状况定期做准确的检测和评估, 对管道进行适当的清理, 对失效的防护层进行及时的修复, 保证管道正常运行。

为适应油气管道日益迫切的腐蚀防护要求,保证油气田安全生产,我国的管道防腐蚀技术正在快速发展,尤其是在管道外壁的涂装和包覆、管道的腐蚀状况检测、管道的修复和管道内部清理方面,研究和开发了许多新型材料、装备和技术,促进新技术、新工艺、新材料、新管道设备的推广及应用,延长管道设备使用寿命,节约资金,保证安全生产。普及腐蚀与防护科学知识,了解油气管道常用的选材、设计、检测及防护技术,对于石油天然气工业控制腐蚀和进行腐蚀管理,减少腐蚀造成的巨大损失,具有重要意义。

二、油气管道分类及作用

管道运输是石油及天然气最主要的运输方式,与铁路、公路、水运相比,它具有运输量大、密闭安全、便于管理、易于实现远程集中监控等优点,在全世界得到了广泛应用和迅速发展。天然气由于密度小、体积大,陆上运输时管道是惟一的运输方式。

按管道运输的介质不同,油气管道可分为输油管道、输气管道、油气混输管道等。输油管道又可分为原油管道与成品油管道两类。

按输送距离和经营方式不同,油气管道可分为两大类:一类是输送距离较短,属于企业内部经营的管道,如油田内短距离的油气集输管道,炼厂、油库内部管道,油田、炼厂到附近企业的输油管道等,其长度一般较短,不是独立的经营系统;另一类是长距离输送油气的、独立经营的长输管道,如油田将原油送至较远的炼厂或码头、转运油库的外输管道等。长距离输油管道一般管径大、运输距离长,有各种辅助配套工程。这种输油管道运营企业,有自己完整的组织机构,进行独立的经营管理。

输气管道可分为油气田内部的输气管道、干线输气管道及城市输配气管道(通常称矿场天然气集输管线)、长距离输气管道和城市输配气管网。天然气从气井开采出来后,通过矿场集输—净化处理—长输管道—城市输配气管网,供用户使用。

干线输气管道是连接净化处理厂与城市门站之间的输气管道,它把经过净化处理后的天然气送到城市,输送距离长(从几百 km 至几千 km)、管径大(一般在 400mm 以上)、压力高(4.0~10.0MPa),是陆上天然气远距离运输的主要工具。

城市输配气管道是天然气的分配管网,它遍布整个城市和近郊,一般成环形布置,且根据压力高低区分高、中、低压管网。天然气从高压管网经过调压装置降低压力后,方可输入到低压力等级的管道内。

值得特别指出的是,目前国内大部分传统主力油田都进入了开发中后期,通过注水提高油层压力,是各油田提高采收率普遍采用的方法之一;同时油井采出液经三相分离后,分离出的污水也需管道输送。与油气采输过程相关的注水管道与污水管道,虽不属于油气集输管道范畴,但其腐蚀机理和特点与油气集输管道相同,且在相同工况条件下,由于介质作用,其内腐蚀程度甚至远远高于输油及输气管道,因此本书介绍的油气管道腐蚀检测技术及腐蚀防护技术均将注水及污水管道考虑在内。

三、油气管道腐蚀的分类

1. 油气金属管道腐蚀的分类

由于金属管道腐蚀的现象与机理比较复杂,故腐蚀分类方法多种多样。常用的分类方法如下:

(1) 按照腐蚀环境分类,可分为化学介质腐蚀、大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等。

(2) 根据腐蚀过程的特点和机理分类,可分为化学腐蚀、电化学腐蚀、物理腐蚀。

1) 化学腐蚀

金属管道与非电解质直接发生纯化学作用而遭受破坏,叫做化学腐蚀。其特点是反应过程中没有电流产生,单纯化学腐蚀的过程是非常少的。化学腐蚀有以下两种:

(1) 气体腐蚀

金属管道在干燥气体中,表面上没有湿气冷凝的腐蚀叫气体腐蚀。

(2) 非电解质溶解中的腐蚀

金属管道在不导电的非电解质溶液中的腐蚀。

2) 电化学腐蚀

金属管道与介质发生反应的过程中有电流产生而引起的腐蚀,叫做电化学腐蚀。其腐蚀反应有一个阳极反应和一个阴极反应。电化学腐蚀是最普遍和常见的腐蚀,金属在各种化学介质、大气、海水中的腐蚀皆属此类。

3) 物理腐蚀

金属由于单纯的物理溶解作用而引起的腐蚀,叫做物理腐蚀。如许多金属在高温熔盐、碱液及液态金属中可发生物理腐蚀。

2. 油气金属管道腐蚀的破坏形式

按照腐蚀破坏形式,油气金属管道的腐蚀可分为均匀腐蚀(全面腐蚀)和局部腐蚀两大类。

1) 均匀腐蚀

均匀腐蚀是指整个金属管道表面均匀地发生腐蚀。均匀腐蚀的危险性相对较小,因为若知道了腐蚀的速度,即可推知材料的使用寿命与其腐蚀容差,并在设计时将此因素考虑在内。

2) 局部腐蚀

局部腐蚀是指整个金属管道仅局限于一定的区域腐蚀,而其他部位则几乎未被腐蚀。局部腐蚀可分为如下类型:

(1) 小孔腐蚀 又称点蚀,在金属管道某些部位,被腐蚀成一些小而深的孔,并向深处发展,严重时发生穿孔。

(2) 电偶腐蚀 具有不同电极电位的金属互相接触,并在一定的介质中所发生的电化学腐蚀,电位相对较负的金属被腐蚀。如两种不同材质管道的连接处及管道基体与焊缝之间。

(3) 氢脆 金属管道在某些介质溶液中,因腐蚀或其他原因所产生的氢原子渗入金属管道内部,使管道变脆,并在应力的作用下发生脆裂。如含硫化氢(H_2S)的油、气输送管线中常发生这种腐蚀。

(4) 应力腐蚀破裂(SCC) 金属管道在拉应力和介质的共同作用下所引起的腐蚀破裂。如含 H_2S 井的油管腐蚀。

(5) 晶间腐蚀 腐蚀发生在金属晶体的边界上,并沿晶界向纵深处发展,晶粒间的结合力减小,内部组织变得很松弛,从而机械强度大大降低。例如奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢管道常出现这种腐蚀。

(6) 选择性腐蚀 多元合金管道中的某一组分,由于腐蚀优先溶解到溶液中去,从而造成其他组分富集在合金表面上。如黄铜脱锌。

(7) 磨损腐蚀 介质运动速度大或介质与金属管道相对运动速度大,而使金属管道局部表面遭受严重的腐蚀损坏的一种腐蚀形式。

(8) 细菌腐蚀 在细菌繁殖活动参与下发生的腐蚀。油气集输介质中常见的细菌包括硫酸盐还原菌(SRB)、腐生菌(TGB)和铁细菌(FB)等,其对管道的腐蚀作用和控制腐蚀的方法将在有关章节作相关介绍。

(9) 垢下腐蚀 由于管道结垢,而垢层比铁的电位高,形成电偶电池引起垢下腐蚀。垢下腐蚀均为孔蚀,严重时造成管线穿孔。垢下腐蚀的原因及控制方法将在有关章节作相关介绍。

(10) 除上述腐蚀类型外,还有缝隙腐蚀、穿晶腐蚀、微振腐蚀、浓差电池腐蚀等。

四、油气管道腐蚀原理及影响因素

1. 油气管道的腐蚀现状

随着我国石油、天然气的勘探开发进展,含硫化氢、二氧化碳、氯离子及含水等多种腐蚀介质的油、气田出现,油气管道腐蚀问题日益严重。腐蚀造成了大量能源浪费和经济损失,降低了油气田的综合经济效益。目前我国油、气田开发已进入中、高含水期,集输管网的腐蚀越来越严重,腐蚀穿孔次数越来越多。腐蚀干扰油、气田的正常生产,阻碍了油、气田工艺技术和开发水平的提高。因此,要保证油、气田安全生产和提高经济效益,必须做好油、气田集输管道的腐蚀防护工作。

2. 油气管道腐蚀原理及影响因素简介

油、气田生产中的集输管道,常遇到的腐蚀介质是硫化氢、二氧化碳、有机硫化物、盐、地层水、矿物质及氧等。暴露于空气中和埋地的钢质管道,还要遭受大气、土壤的腐蚀。

油、气田生产中遇到的腐蚀,绝大多数是电化学腐蚀。埋地钢质管道与电解质溶解接触时,由于表面的不均匀性(如管道材质种类、组织、结晶方向、内应力、表面粗糙度、表面处理状况等的差异),或埋地钢质管道不同部位接触的电解液种类、浓度、温度、流速等有差别时,就会在表面出现阳极区和阴极区。阳极区和阴极区通过埋地钢质管道本身互相闭合而形成许多腐蚀微观电池和宏观电池。埋地钢质管道电化学腐蚀就是一个发生阳极和阴极反应的过程。如在介质溶液里碳钢中的铁碳化合物是阴极,而铁是阳极;表面膜有微孔时,孔内金属是阳极,表面膜是阴极;受到不均匀应力时,应力集中较大的部分为阳极;表面温度不均匀时,温度较高区域为阳极;溶液中氧或氧化剂浓度不均匀时,浓度较小的地方为阳极等。因而形成了腐蚀电池。腐蚀电池有些是大电池(宏观电池),而更多出现的是微电池(微观电池)。油气生产中集输管道常见的内外腐蚀特点与防护对策将在第二章详细介绍。

五、油气管道腐蚀与防护通用技术

1. 油气管道外防腐技术

埋地长输油气管道可长达几千公里,穿越不同类型的土壤、河流、湖泊,由于土壤的多相性,冬、夏季的冻结、融化,地下水位变化、植物根系对地穿透、微生物、杂散电流等复杂的埋地条件给管道造成复杂的腐蚀环境。我国不同地区的腐蚀性相差很大,最小腐蚀速率为 0.004mm/a ,最大可达 1mm/a 或更大,有杂散电流或微生物时,几个月可使 7mm 厚的钢管穿孔。

石油沥青防腐层是最古老的防腐层,在大多数干燥地带使用良好,环氧沥青和煤焦油磁漆具有较好的抗细菌腐蚀和植物根系穿透能力,施工工艺也较成熟,应用最广、量最大,取得了良好的效果。

聚乙烯黏胶带具有较好的防腐性和施工工艺方便、价格便宜、质量容易控制等优点,国内有很多成功的应用实例。我国已建成年产 3000t 的共挤型聚乙烯黏胶带生产线,质量达到国外先进水平,可以满足市场需求,应用前景看好。熔结环氧粉末涂层具有很好的黏结力、防腐蚀性较好的耐高温性能。其优异的抗阴极剥离性和涂层屏蔽作用,能很好地与阴极保

护相配合,近年来在我国已得到大规模应用。我国建立了多条生产线,可生产直径为 48 ~ 720mm 的管道。国产环氧粉末涂层质量达到石油行标 SY/T 0315—1997《钢质管道熔结环氧粉末外涂层技术标准》要求,基本上可达到国外同类标准。国产环氧粉末大口径管道在苏丹应用 1000 多千米,应用前景和发展趋势看好。

包覆聚乙烯和聚乙烯泡沫夹克是我国 20 世纪 80 年代开发的新技术,随着底胶和夹克材料的不断改进和提高,其整体性能也在不断提高。20 世纪 90 年代引进了三层 PE 作业线,三层 PE 夹克防腐层是由环氧粉末、共聚物黏结剂和聚乙烯互熔为一体,并与钢质管道牢固地结合,形成优良的防腐层,它克服了双层 PE 热熔胶黏性不好的缺点,也克服了单层环氧粉末涂层的脆性缺点,成为一个完美理想的涂层。该技术的引进推动了我国管道防腐技术进步,促进了我国防腐材料的发展。环氧粉末、共聚物底胶和外包聚乙烯实现了国产化,质量达到加拿大、德国、意大利的标准;我国石油行标 SY/T 4013—1995《埋地钢质管道聚乙烯防腐技术标准》,其涂层抗环境应力开裂指标 $F_{50} \geq 1000\text{h}$,断裂伸长率 $\geq 600\%$,抗热老化指标达到了德国标准要求。国内三条作业线已生产防腐管道 1000 多千米,为陕-京输气管道提供了优良的防腐管道,阴极保护站的间距达到 300km,同时使用了国产辐射交联热收缩补口带,成为世界一流的防腐蚀工程。

2. 管道、油管、钻杆内防腐技术

随着油田开发进入高含水期,注采系统、集输系统腐蚀愈来愈严重,腐蚀穿孔日益频繁,与此相适应,管道内防腐技术也逐渐得到发展。涂层管道和非金属管道因优良的耐磨和防腐性能而在较为苛刻的腐蚀环境中得到了广泛应用。20 世纪 90 年代初采用了环氧液体涂料内挤涂工艺以及环氧粉末涂装作业线。大庆建材公司 1996 年从美国引进环氧粉末(兼液体涂料)内喷涂作业线,年喷涂能力 1000km,广泛用于油田污水管道。配套使用的内涂层补口技术有:管头涨口内衬短节、钢质记忆合金接头、机械压接、机械速接接头,可满足 DN 60 ~ 325mm 钢制管道内防腐要求,内防腐补口机可满足 DN 114 ~ 168mm 管道内防腐要求。实现了内防腐层连续性施工,保证了喷涂质量。胜利油田孤岛采油厂自 1998 年以来,大规模应用非金属管线作为混输管线,目前已使用 5 种非金属管线:塑料合金双复合管、玻璃钢缠绕管、钢管架增强塑料复合管、连续复合增强塑料管、玻璃钢复合管,均取得了较好的应用效果。

对腐蚀严重的旧管道进行返修,采用涂敷固化法、塑料管穿插法、软管翻转法、预成型二次固化法等工艺技术,使管道恢复正常使用,具有较好的经济效益。

随着油气开发向深层发展,井筒和钻杆腐蚀越来越严重,涂层油管、涂层钻杆成为人们重视的对象。华北油田 1993 年从美国艾克公司引进钻杆、油管内涂作业线,年涂装能力 600km,涂层钻杆可延长寿命 1 ~ 2 倍。钻杆涂装由华北油田设计研究院研制成功。在喷涂工艺及主要性能上(150℃、70MPa、pH = 12 浸泡),达到国外同类涂料产品性能指标。经近十万米的钻井考验,结果与进口产品相当。在针对特定腐蚀环境的防腐技术研究方面,我国也取得了长足进步,我国天津钢管公司根据四川气田天然气中硫化氢含量高、硫化氢应力腐蚀现象极其严重的特点,提出了达到世界先进水平的抗硫化氢应力腐蚀套管的技术指标,运用实验室的套管硫化氢应力腐蚀的机理研究成果,实现了该产品系列的独立设计:运用纯净钢冶炼和夹杂物变性技术,解决了 P、S 等有害元素和长条状 MnS 对套管硫化氢应力腐蚀极为不利的影响问题;运用适当的热处理工艺和选择合适的淬火介质,解决了长钢管淬火弯曲变形和易产生裂纹的质量问题;运用独特的钢管二次定径、热矫直和去除应力处理技术,解

决了在硫化氢应力腐蚀敏感区,高强度抗硫化氢套管抗硫化氢应力腐蚀门槛值低的技术难题。先后研制开发成功了 TP90S、TP90SS、TP95S 和 TP80SS 抗硫化氢应力腐蚀石油套管系列产品。经测试,所研制的抗硫化氢套管的化学成分、机械性能、夹杂物、晶粒度、抗硫化氢应力腐蚀性能和其他使用性能均满足 API SPEC 5CT 和中国石油物资装备总公司《套管订货补充技术条件》的要求。通过油田下井试验结果表明,所研制的抗硫化氢套管可替代进口产品,现已在国内油田推广使用,并出口到加拿大。研制出了具有自主知识产权的抗硫化氢套管制造技术,并生产出了抗硫化氢应力腐蚀石油套管系列产品。

3. 管道阴极保护技术

近年来我国的阴极保护技术发展较快,阳极材料、保护参数的遥控遥测、保护电源等技术日趋完善。在保护电源方面完善提高了恒电位仪设备,采用开关电源、信号传输接口技术、计算机技术实现了无 IR 降管地电位测量技术,从而实现了自动化控制管理,提高了管理水平。管道阴极保护在陕-京线、吐哈油田和青海输气管道得到推广应用。

4. 地上管道防腐技术

地上管道常采用特种钢材、塑料、玻璃钢、衬里、金属喷涂、涂料等防护保护。

随着石油、天然气开采越来越多,我国管道输送任务越来越大,输送管道对防腐蚀技术要求越来越苛刻,促使石油、天然气防腐蚀技术得到飞速发展。现有完整的配套防腐蚀工艺技术,如环氧粉末涂层、煤焦油磁漆涂层、环氧沥青涂层、共挤型聚乙烯黏胶带、聚乙烯夹克聚氨酯泡沫防腐保温复合结构涂层、三层 PE 夹克涂层等管道外防腐预制作业线生产体系。钢管的内防腐涂层技术也形成了聚合物水泥砂浆衬里技术、溶剂型和环氧粉末涂料涂敷技术、整体管道涂敷和衬里技术,配套使用的内涂层补口技术,实现了内防腐涂层连续性施工技术。玻璃钢管、钢骨架增强塑料复合管、塑料合金双复合管等非金属管线由于其优异的耐磨和防腐性能而得到了日益广泛的应用。



图 1-5 管道内涂层结构示意图

第二章 油气管道的腐蚀特点与防护对策

第一节 油气管道的内腐蚀与防护

油气管道包括钻柱、油套管柱、集输管线和长输管线，油气管道的腐蚀普遍存在于油气开采、集输和长输的整个工艺过程中。油气管道的腐蚀分为内腐蚀和外腐蚀，外腐蚀主要是管体外部遭受的土壤腐蚀和地下水腐蚀，以及杂散电流腐蚀和宏观电池腐蚀等，过去研究较多；内腐蚀主要是管体内部由于介质所导致的腐蚀，近年来日趋成为研究的热点。

一、油气管道内腐蚀的环境介质特点

油气管道内腐蚀的介质环境有三个显著特点：气、水、烃、固共存的多相流腐蚀介质；高温和(或)高压环境； H_2S 、 CO_2 、 O_2 、 Cl^- 和水分是主要腐蚀介质。

1. 多相流

石油工业的多相流指气相、液相(包括水相和烃相)和固相(固体砂粒)多相共存且流动的多相流。与单相介质腐蚀相比，多相介质腐蚀情况比较复杂，以水烃两相存在的情况为例，当油水比大于70%时，一般存在油包水的情况，腐蚀速率较低；但当油水比小于30%时，则会出现水包油的情况，腐蚀速率较高。水包油时，会出现两种情况：一是油中含有可

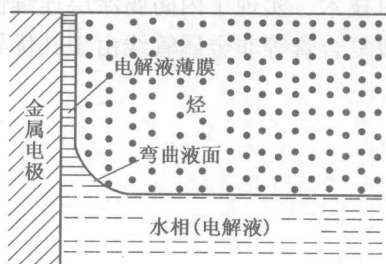


图2-1 水包油时水油两相
对金属腐蚀作用的界面图

起缓蚀剂作用的物质，这时油水两相介质腐蚀由于受到缓蚀作用，其腐蚀速率比单相水介质的腐蚀速率要低；另一种情况是当油中不含缓蚀作用物质时，由于各相间的互相促进，其腐蚀性有时会比单相介质强得多。图2-1所示为水油两相共存且水包油时金属的腐蚀情况。众所周知，金属在水中的腐蚀速率取决于气体在水中的溶解度。由图可见，有两个因素促进了金属的腐蚀，一是气体在烃相中的溶解度远大于气体在水相中的溶解度，二是在烃相和金属电极之间形成了厚度约为 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 的电解液薄膜，使得烃相中的气体可以很快到达金属电

极表面，这两种因素的共同作用使得上述水油两相系统的腐蚀速率比单独水相时大出1个数量级。

多相流的腐蚀行为不同于单相介质，而且流动会造成多相流冲刷腐蚀，而多相流冲刷腐蚀的行为又与液体流型、流速以及腐蚀反应物质和腐蚀产物在流体中的传质过程有关。

2. 高温和(或)高压环境

在油气生产中，油气管道多在高温高压的环境中服役。随着石油工业的发展，打井的深度越来越深，例如塔里木油气田的井深达到6000~7000m，井下温度多在120~140℃，压力多在1000atm以上。地面集输管线和油气长输管线往往都在较高压力下工作。高温高压条件下材料的腐蚀规律和机理往往不同于常温常压下的情况。温度和压力是影响材料腐蚀行为的重要因素，例如对于 CO_2 腐蚀，由于腐蚀产物膜对材料的保护性与温度和压力有关，因此在一定温度和一定 CO_2 分压下，材料的腐蚀速率将达到最大值，如图2-2所示。所以尽管