

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

石油天然气工业管道 及装置腐蚀与控制

尹成先 付安庆 李时宣 袁军涛 韩文礼 著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

石油天然气工业管道及装置 腐蚀与控制

尹成先 付安庆 李时宣 袁军涛 韩文礼 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以石油天然气工业中不同生产环节——上游（油气田开采）、中游（油气输送）、下游（炼油化工）——的腐蚀与控制作为主线，系统阐述了各个生产环节中的腐蚀特征和控制技术。全书共分5章：第1章概述石油天然气工业中管道及装置的腐蚀危害、腐蚀特征及面临的腐蚀形势；第2~4章详细介绍我国油气田开采、油气输送、炼油化工中管道及装置的腐蚀类型、典型腐蚀案例及常用腐蚀控制技术；第5章介绍石油天然气工业中的腐蚀研究方法，包括常规小试样腐蚀试验方法、全尺寸实物腐蚀试验方法，以及现场腐蚀试验方法。

本书可供石油天然气行业腐蚀防护工作人员及相关科研人员和技术人员阅读，也可供材料腐蚀与防护专业大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油天然气工业管道及装置腐蚀与控制/尹成先等著. —北京：科学出版社，2017.6

（中国腐蚀状况及控制战略研究丛书）

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-053177-3

I. ①石… II. ①尹… III. ①石油管道—管道防腐—研究—中国 ②天然气管道—管道防腐—研究—中国 IV. ①TE973

中国版本图书馆CIP数据核字（2017）第109818号

责任编辑：顾英利 李丽娇 / 责任校对：杜子昂

责任印制：张 伟 / 封面设计：铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16

2018年1月第二次印刷 印张：13 3/4

字数：278 000

定价：88.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	孟 伟
郝吉明	胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪
翁宇庆	高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基
魏复盛					

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐卫迪

2015年9月

丛 书 前 言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”倡议的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

前 言

石油天然气工业历来是最受腐蚀问题困扰的工业领域之一，且几乎涵盖所有腐蚀类型，每年都因腐蚀问题造成巨大损失。“11·22”中国石油化工集团公司东黄输油管道因腐蚀失效导致重大管道爆炸事故，给石油天然气工业的安全生产和运行再次敲响了警钟。过去，腐蚀与防护领域在各行各业中属于“非主流”，本书作者认为，在石油天然气行业中腐蚀与防护工作产生三大效益：第一，腐蚀控制降低油气资源泄漏损失，缩短停产时间，从而产生经济效益；第二，腐蚀控制减少油气泄漏对周围土壤和大气环境的污染，从而产生环境保护效益；第三，腐蚀控制降低油气泄漏引起的火灾和爆炸次生灾害，从而产生生命财产安全效益。近年来，随着我国新《环境保护法》和《安全生产法》的颁布实施，环境执法和安全问责更加严格。腐蚀导致的石油管材及装备的“跑、冒、滴、漏”问题对生态环境和安全生产都造成极大的威胁；一旦发生此类问题，油气生产单位将承担严重的后果。因此，石油管道和装备的腐蚀与防护工作越来越受到重视和关注。

本书以石油天然气工业上、中、下游的生产顺序为主线，即上游的油气田、中游的石油天然气长输管道、下游的炼油化工。第1章概括阐述了石油天然气工业石油管材及装备的腐蚀危害、上中下游不同系统的腐蚀特征和面临的严峻腐蚀形势；第2~4章分别详细介绍了我国油气田开采及集输系统、油气长输管道、炼化管道及装置的腐蚀现状、主要腐蚀类型、典型腐蚀案例、常用的腐蚀控制技术；第5章全面总结了石油天然气工业腐蚀研究方法，主要包括常规小试样腐蚀试验方法、全尺寸实物腐蚀试验方法及现场腐蚀试验方法。

本书作者均为长期工作在石油管材研究机构、油气田、管道公司、炼化企业的科研工作者和技术研究人员，本书由中国石油集团石油管工程技术研究院主编，参与编写单位还有中国石油集团工程技术研究院、塔里木油田公司、长庆油田公司、大庆油田公司。本书各章的编写人员依次为：第1章，尹成先、付安庆、胡建国、王登海、林罡、黄伟、侯金晔、徐自强；第2章，李时宣、袁军涛、李发根、张娟涛、蔡锐、郑欣、张志浩、刘向斌、郭刚、薛岗、杨光；第3章，韩文礼、张贻刚、王志涛、张彦军、林竹、周冰、李玲杰、童辉、张小龙，何治武、李琼伟；第4章，尹成先、徐秀清、来维亚、吕乃欣、赵雪会、王远；第5章，付安庆、白真权、韩燕、袁军涛、杨向同、常泽亮、谢俊峰、宋文文、李先明、杨家茂。

感谢中国石油集团石油管工程技术研究院“石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室”和“石油管材及装备材料服役行为与结构安全陕西省重点实验室”研究团队为本书提供大量宝贵的第一手现场资料和统计数据。

本书部分内容是在国家自然科学基金委员会应急管理项目“基于超高温高压气井生命全周期的全尺寸管柱腐蚀损伤机理及评价方法研究(51641409)”、国家重点研发计划“油气长输管道及储运设施检验评价与安全保障技术——油气管道及储运设施损伤致灾机理与演化规律研究(2016YFC0802101)”、国家重点研发计划“石化装置关键静设备质量性能检测评价与控制技术研究——石化装置关键静设备监测预警综合平台研发(2017YFF0210406)”、国家科技重大专项“库车坳陷深层-超深层天然气田开发示范工程——极端工况下高温高压井油套管腐蚀及密封完整性研究(2016ZX05051)”、中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“长庆油田 5000 万吨持续高效稳产关键技术研究与应用——油气田稳产地面工艺技术优化与站场橇装化研究(2016E-0513)”、中国石油集团科学研究与技术开发项目“深层与复杂地层钻完井新技术新方法研究——苛刻服役条件油井管工程应用基础研究(2016A-3905)”、中国石油集团重大科技专项“塔里木油田勘探开发关键技术研究与应用——前陆冲断带超深井提产与井筒完整性技术(2014E- 2103(JT))”、中国石油集团科学研究与技术开发项目“炼厂加氢装置关键换热器腐蚀防控技术开发与应用(2017D-2307)”等项目的支持下完成的,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者的知识范围和水平有限,本书难免存在疏漏和不全面之处,敬请同行专家和广大读者批评指正!

作 者

2017 年 6 月

目 录

丛书序

丛书前言

前言

第 1 章 石油天然气工业腐蚀概况	1
1.1 石油天然气工业的腐蚀危害	1
1.2 石油天然气工业的腐蚀特征	2
1.3 石油天然气工业面临的腐蚀形势	3
1.3.1 油气勘探开发领域	3
1.3.2 油气输送领域	5
1.3.3 石油炼化领域	6
参考文献	7
第 2 章 油气田开采及集输系统腐蚀与控制	9
2.1 油气田腐蚀概况	9
2.1.1 酸腐蚀	10
2.1.2 二氧化碳腐蚀	11
2.1.3 硫化氢腐蚀	12
2.1.4 元素硫腐蚀	15
2.1.5 海水腐蚀	17
2.1.6 海洋大气腐蚀	18
2.1.7 微生物腐蚀	20
2.2 油气田的腐蚀案例	20
2.2.1 井下油套管的腐蚀及断裂	20
2.2.2 集输管线的内腐蚀	21
2.2.3 埋地管线的外腐蚀	22
2.2.4 脱硫装置塔底重沸器换热管束腐蚀穿孔失效	24
2.3 油气田的腐蚀控制措施	25
2.3.1 材料优化及选择	25
2.3.2 缓蚀剂应用	45
2.3.3 表面防腐技术	60

2.3.4 腐蚀监测与检测	67
2.3.5 阴极保护技术	71
参考文献	75
第3章 油气长输管道腐蚀与控制	81
3.1 我国油气长输管道概况	81
3.2 油气长输管道主要腐蚀类型	83
3.2.1 电化学腐蚀	83
3.2.2 应力腐蚀开裂	84
3.2.3 杂散电流腐蚀	85
3.3 油气长输管道存在的主要腐蚀问题	87
3.3.1 油气长输管道防腐层质量控制问题	87
3.3.2 油气长输管道阴极保护存在的问题	92
3.4 油气长输管道典型腐蚀案例	95
3.4.1 隧道穿越管道外防腐层及补口防腐失效	95
3.4.2 管道补口防腐失效	97
3.4.3 长输管道3PE防腐层剥离失效	98
3.5 油气长输管道的腐蚀控制措施	99
3.5.1 外涂层技术	99
3.5.2 补口防腐材料	109
3.5.3 阴极保护技术	110
3.5.4 防腐修复技术	113
3.5.5 外防腐检测技术	119
参考文献	123
第4章 炼化管道及装置腐蚀与控制	125
4.1 炼化管道及装置腐蚀类型	126
4.1.1 低温电化学腐蚀	126
4.1.2 高温硫腐蚀	130
4.1.3 高温环烷酸腐蚀	131
4.1.4 与氢有关的腐蚀	134
4.1.5 高温氧化、高温硫化、渗碳与脱碳	136
4.1.6 停工期间的连多硫酸腐蚀	137
4.1.7 高温烟气硫酸露点腐蚀	138
4.2 国内炼油企业的腐蚀与防护现状	139
4.2.1 国内炼油企业腐蚀现状	139

4.2.2 国内炼油企业腐蚀控制技术	143
4.3 我国炼化装置腐蚀案例分析	151
4.3.1 常减压装置的腐蚀及控制案例分析	151
4.3.2 催化裂化装置的腐蚀及控制案例分析	156
4.3.3 延迟焦化装置的腐蚀及控制案例分析	157
4.3.4 催化重整装置的腐蚀及控制案例分析	160
4.3.5 加氢装置的腐蚀及控制案例分析	161
4.4 炼化管道及装置腐蚀检测与评估	164
4.4.1 检测与评估现状	164
4.4.2 定点测厚技术	166
4.4.3 化学分析检测技术	166
4.4.4 在线腐蚀监测技术	166
4.4.5 RBI 风险评估技术	169
4.5 炼化管道及装置存在的腐蚀难题及防腐技术趋势	169
4.5.1 加工高硫原油与高酸原油引起的腐蚀问题	169
4.5.2 高硫原油与高酸原油加工的防腐对策与展望	170
参考文献	172
第5章 石油天然气管道及装备腐蚀研究方法	174
5.1 常规小试样腐蚀试验方法	174
5.1.1 浸泡试验	174
5.1.2 局部腐蚀试验方法	178
5.1.3 传统电化学试验方法	187
5.1.4 微区电化学试验方法	190
5.2 全尺寸实物腐蚀试验方法	195
5.2.1 实物油/套管柱拉伸应力腐蚀试验	195
5.2.2 实物管冲刷腐蚀试验方法	196
5.3 现场腐蚀试验方法	198
5.3.1 试片法	198
5.3.2 井下挂环法	199
5.3.3 现场试验段法	200
参考文献	202

第1章 石油天然气工业腐蚀概况

1.1 石油天然气工业的腐蚀危害

石油天然气工业历来是腐蚀最严重的几个行业之一，且几乎涉及各种腐蚀类型，每年均因腐蚀问题造成巨大经济损失和人员伤亡。腐蚀导致的石油管材及设备的“跑、冒、滴、漏”问题直接关系到油气生产安全和环境保护，甚至引起人员伤亡等灾难性事故。下面介绍两起因腐蚀导致石油天然气管道发生泄漏的重大事故。

2000年8月19日，美国El Paso天然气公司在新墨西哥州Carlsbad附近的天然气管道断裂，释放出的气体被引燃并持续燃烧55min，导致在事故发生地附近露营的12人死亡，3辆汽车被烧毁，直接损失约100万美元。断裂管道为X52材质，建于1950年，事故发生时管道运行压力约为最大允许运行压力的80%。事故调查认为：微生物、湿气、氯化物、氧气、二氧化碳和硫化氢等腐蚀性成分引起的管道内腐蚀使管壁严重减薄是造成该次事故的直接原因，管道内腐蚀最大深度达管道原壁厚的72%。管道发生内腐蚀的原因是多方面的：管道上游排液口局部堵塞，使得液体绕过排液管，在管道弯曲的低点处积聚并产生腐蚀；因设计原因，清管器不能通过事故发生处的管道，不能定期清出管内积水和其他固、液沉淀物；当时执行的美国联邦管道安全规章不能在减缓管道内腐蚀方面给管道运营商或工作人员提供适当的指导^[1]。

2013年11月22日，发生在我国山东省青岛经济技术开发区的东黄输油管道泄漏爆炸事故震惊国内外，该事故造成伤亡和直接经济损失7.5亿元人民币。据调查，造成东黄输油管道泄漏爆炸事故的直接原因是输油管道与排水暗渠交汇处的管道腐蚀减薄、管道破裂，原油泄漏，流入排水暗渠及反冲到路面；原油泄漏后，现场处置人员采用液压破碎锤在暗渠盖板上打孔破碎，产生撞击火花，引发暗渠内油气爆炸。管道腐蚀减薄、破裂的具体原因如下：与排水暗渠交叉段的输油管道所处区域土壤盐碱和地下水氯化物含量高，同时排水暗渠内随着潮汐变化，海水倒灌，输油管道长期处于干湿交替的海水和盐雾腐蚀环境，加之管道受到道路承重和振动等因素影响，导致管道加速腐蚀减薄、破裂，造成原油泄漏^[2]。

据统计，石油管材在油气勘探开发、输送储运、炼油化工各过程中的投资比

例占 50%以上，石油管材及装备在服役过程中因腐蚀导致的失效占总失效事故的 60%以上。我国因腐蚀造成的损失约占国内生产总值（GDP）的 4%，而石油石化行业约占 GDP 的 6%左右^[3]。随着石油天然气资源的日益减少，我国石油天然气开发和生产的工况愈发恶劣，“高温、高压、高酸、高矿化度”的油气工况使得腐蚀形势愈发严峻，腐蚀危害性也日益凸显。

1.2 石油天然气工业的腐蚀特征

石油天然气生产过程复杂，各环节的腐蚀环境差异较大，因此腐蚀特征具有复杂性和多样性^[4-6]。表 1-1 简单归纳了不同生产环节的腐蚀环境及腐蚀特征。

表 1-1 油气生产-储运-炼制中的腐蚀环境及腐蚀特征

生产系统	生产部件	腐蚀环境	腐蚀特征
井下系统	钻杆	环境介质：O ₂ 、水、钻井液、H ₂ S、CO ₂ 、氯化物等； 承受载荷：拉、扭、弯曲等交变载荷	冲蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳
	抽油杆	环境介质：采出水、H ₂ S、CO ₂ ； 承受载荷：拉、压等交变载荷	腐蚀疲劳、氢致开裂、应力腐蚀开裂
	油管	环境介质：酸化液、完井液、采出水、H ₂ S、CO ₂ 等； 承受载荷：恒载荷、交变载荷、弯曲载荷	均匀腐蚀、坑蚀、氢致开裂、应力腐蚀开裂
	套管	内部环境介质：环空保护液； 外部环境介质：地层水、硫酸盐还原菌	内部：均匀腐蚀、坑蚀、应力腐蚀开裂； 外部：均匀腐蚀、坑蚀、微生物腐蚀
油气储运	集输管线	内部环境介质：原油、地层水、H ₂ S、CO ₂ ； 外部环境介质：土壤（氧、细菌）、杂散电流	内部：均匀腐蚀、坑蚀、氢鼓泡、氢致开裂； 外部：均匀腐蚀、坑蚀、应力腐蚀开裂
	储油罐	内部环境介质：原油、采出水、H ₂ S、CO ₂ 、O ₂ ； 外部环境介质：大气、土壤（氧、细菌）、杂散电流	内部：均匀腐蚀、坑蚀、氢鼓泡、氢致开裂； 外部：大气腐蚀、氧腐蚀
	长输管道	内部环境介质：原油、天然气； 外部环境介质：土壤（氧、细菌）、杂散电流	内部：均匀腐蚀、坑蚀； 外部：均匀腐蚀、坑蚀、应力腐蚀开裂
	海底管道	内部环境介质：原油、天然气、采出水、H ₂ S、CO ₂ ； 外部环境：海水（氧、微生物）	内部：均匀腐蚀、坑蚀、氢鼓泡； 外部：均匀腐蚀、坑蚀

续表

生产系统	生产部件	腐蚀环境	腐蚀特征
石油化工	常压塔	环境介质: HCl 、 H_2S 、 H_2O	气液两相转变部位的“露点”腐蚀、碳钢全面腐蚀、不锈钢点蚀和应力腐蚀开裂
	液化石油气储罐	环境介质: 含硫液化石油气 (H_2S - H_2O)	氢鼓泡、应力腐蚀开裂
	催化裂解解吸塔	环境介质: HCN 、 H_2S 、 H_2O	坑蚀、氢鼓泡、氢致开裂、应力腐蚀开裂
	脱硫装置再生塔冷凝冷却系统	环境介质: CO_2 、 H_2S 、 H_2O	氢鼓泡、氢致开裂、应力腐蚀开裂
	脱硫装置再生塔底重沸器	环境介质: 乙醇胺、 CO_2 、 H_2S 、 H_2O	碳酸盐应力腐蚀开裂
	焦化分馏塔底部系统	环境介质: S 、 H_2S 、 RSH	高温硫腐蚀、均匀腐蚀

1.3 石油天然气工业面临的腐蚀形势

“11·22”中石化东黄输油管由于石油管道腐蚀失效导致原油泄漏，继而引发重大爆炸事故。给石油天然气工业的安全生产和运行敲响了警钟。加之近年来我国新《安全生产法》和新《环境保护法》的实施，腐蚀与防护工作受到了前所未有的重视和关注。下面按照石油天然气勘探开发、输送储运和炼油化工三大领域，系统阐述各领域存在的主要腐蚀难题和现有的防护技术，如图 1-1 所示。

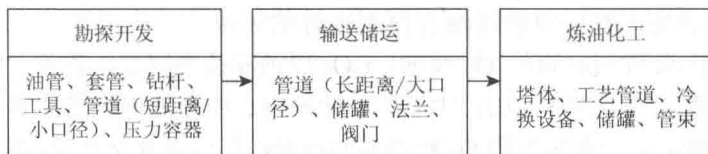


图 1-1 油气生产过程与腐蚀相关主要管道和设备

1.3.1 油气勘探开发领域^[7,8]

我国现有油气井约 40 万口，每年新钻油气井约 3 万口，使用各类管材超过 350 万 t，油套管损坏井已超过 3 万口，并且每年以 15%~20% 的速度增加。随着油气开采向着“超深、高温、高压、复杂工况”方向发展，油气井下管柱面临着前所未有的（超）高温高压、高含 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 、交变载荷、高流速、复杂作业工艺

等极端苛刻的服役环境带来的腐蚀难题,成为当今迫切需要解决的问题。

第一,高含硫油气田的应力腐蚀开裂问题。我国酸性高含硫气田主要分布在渤海湾盆地的赵兰庄气田,以及四川盆地的渡口河、罗家寨、中坝、威远、卧龙河、普光等气田。这些气田的天然气中含高达百分之十几的硫化氢,硫化氢导致井下油套管和地面集输系统面临极高的硫化氢应力腐蚀开裂风险,井下管柱及工具主要防腐方法为管材本质防腐,即采用 G3、G028、G825、G625 等镍基耐蚀合金。地面集输系统管道防腐主要采用抗硫碳钢+缓蚀剂的方式,即对管道在运行前进行预膜,然后定期定量地连续加注缓蚀剂。高级耐蚀管材的大量使用导致油气勘探开发成本大大增加,对于大部分的低产井使用高级耐蚀管材则存在技术性和经济性的矛盾问题。

第二,超高温高压气田的 CO_2 和酸化液腐蚀问题。新疆地区的塔里木油田库车山前区块是我国最具代表性的超深高温高压气田,其井下系统管柱腐蚀环境极端苛刻,具体表现为井底最高温度达到 200°C 、井底关井压力最高达 130MPa 、天然气中 CO_2 分压达 4MPa 、氯离子含量在 $100000\sim 200000\text{mg/L}$ 、地层水矿化度很高,加之部分井进行酸化压裂导致的酸液腐蚀和频发开关井引起的交变和振动载荷,其防腐方法主要为管材本质防腐(主要为超级 13Cr 马氏体不锈钢)和酸化缓蚀剂配合使用,目前局部点蚀问题仍然是导致管柱失效的主要因素之一。地面集输系统管线在过去几年腐蚀穿孔较为严重,自 2012 年起通过加强腐蚀综合治理,腐蚀穿孔得到有效控制。一些新的防腐技术和措施,如双金属复合管(碳钢基管+内衬 316L 不锈钢)、非金属管(玻璃钢、柔性复合管、聚乙烯、钢骨架复合管等)、内涂层管、缓蚀剂等 in 油田地面集输系统开始大量使用。但是这些技术均面临不同层面的技术瓶颈,如双金属复合管焊接接头的腐蚀开裂及内坍塌、非金属管接头连接频发失效、缓蚀剂缓蚀效果差、内涂层管焊缝处内补口问题等没有得到很好的解决。

第三,注水/注气井管柱 O_2 腐蚀、 CO_2 腐蚀和结垢问题。我国大庆油田、长庆油田、新疆油田、吉林油田、中石化西北油田、中原油田等老油田在开发中后期采用注气驱或混合驱导致的 O_2 和 CO_2 腐蚀及结垢问题非常严重。在油田注 CO_2 和注 N_2 驱油的过程中,注气井和生产井的管、杆、泵会发生以下几方面的腐蚀问题:①在高温高压井筒环境中,注气中的 O_2 对管柱造成严重的腐蚀,在同等条件下氧腐蚀的平均腐蚀速率是 CO_2 腐蚀的 80 倍;②生产井中含有较高浓度的 CO_2 和少量未参与氧化的 O_2 ,发生 CO_2 和 O_2 共存环境下的腐蚀;③若原油中含有 H_2S ,在采出过程中可能发生 O_2 、 CO_2 、 H_2S 三者共存引起的复杂腐蚀问题。除了腐蚀问题,结垢也是注气井面临的一大难题,油气井中常见的危害性较大的无机盐沉积物主要有碳酸盐垢(主要成分为 CaCO_3)、硫酸盐垢(主要成分为 CaSO_4 、 BaSO_4 、 SrSO_4 等)、铁化合物垢[主要成分为 Fe_2O_3 、 FeO 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$],还含有