

油气管道 腐蚀与防护

(第二版)

◎ 寇杰 梁法春 陈婧 主编

YOUQI GUANDAO FUSHI YU FANGHU



中國石化出版社

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

油气管道腐蚀与防护

(第二版)

寇 杰 梁法春 陈 婧 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书较全面系统地阐述了油气管道腐蚀的基本理论及腐蚀防护的基本原理和应用技术。详细介绍了金属材料的腐蚀原理、腐蚀形态、影响因素以及油气管道腐蚀控制方法等；另外，对近年来在油气管道腐蚀检测、腐蚀状态评价以及腐蚀管线抢修上取得的进展进行了总结和回顾。

本书可供从事油气管道工程设计、检测、施工和管理的技术人员使用，也可作为高等院校油气储运等相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

油气管道腐蚀与防护 / 寇杰, 梁法春, 陈婧主编. —2 版.
—北京: 中国石化出版社, 2016. 3
ISBN 978-7-5114-3838-6

I. ①油… II. ①寇… ②梁… ③陈… III. ①石油管道-腐蚀-基本知识 ②石油管道-防腐-基本知识 ③天然气管道-腐蚀-基本知识 ④天然气管道-防腐-基本知识 IV. ①TE988.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044720 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

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

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 30 印张 695 千字

2016 年 3 月第 2 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定价:88.00 元

第二版前言

本书 2008 年问世以来,深得各方好评。腐蚀与防腐是一个动态发展过程,近年来,随着腐蚀机理研究不断深入,防腐技术也不断取得新的突破。对本书第一版进行重新修订,既是当前科技发展的迫切要求,也是学科逐步完善的必经步骤。

此次再版主要是根据读者反馈,对部分内容进行了删减、合并调整,对腐蚀相关规范、标准进行了梳理,删除了废止规范,增加了新颁布标准。新增了近几年涌现的腐蚀控制新技术,全书更加系统完整。

第 2 章“电化学腐蚀基础”部分,增加了金属腐蚀倾向的热力学判据、金属电化学腐蚀的电极动力学内容,增加极化曲线的实验;第 3 章“金属腐蚀形态”部分,删除了油气管道较少出现的缝隙腐蚀、晶间腐蚀、黄铜脱锌腐蚀以及石墨化腐蚀内容,将氢损伤与应力腐蚀进行了合并,增加了微动腐蚀磨损介绍,在点蚀控制措施中增加定期清管技术;第 4 章“环境腐蚀性”部分,将海水腐蚀和淡水腐蚀合并为水腐蚀;第 5 章“油气管道腐蚀防护”部分,合并了直流杂散电流排流保护中的排流种类和排流方法,增加了交流杂散电流腐蚀防护,液态聚氨酯防腐涂料(PU),无机非金属防腐层,纳米改性材料涂层相关防腐方案,增加了缓蚀剂在腐蚀控制中的应用描述,以及缓蚀剂的测试评定方法;第 6 章“管道腐蚀检测技术”部分,增加了超声导波检测技术、标准管/地点位检测技术(P/S)、皮尔逊监测技术(PS)以及射线检测技术等新型腐蚀检测方法;第 7 章“腐蚀管道适用性评价”部分,新增剩余寿命预测方法、灰色理论、概率统计方法、可靠度函数分析法;第 8 章“腐蚀管线泄漏检测及抢修”部分,增加了管道应力波法、小波变换法以及神经网络模式识别方法。

本书第一、二、三、五、六章由寇杰整理,共 35 万字;第四、七、八章由梁法春整理,共计 20 万字;附录由陈婧整理,共计 10 万字。

在本书整理过程中,付禹、尹雪明做了大量的查阅资料、格式排版和文字录入工作,在此向她们表示感谢。

本书在整理的过程中也参考了许多腐蚀专家、学者的著作和研究成果，在此表示衷心的感谢。

油气管道腐蚀与防腐涉及多个交叉学科，由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不恰当之处，敬请读者批评指正。

编者

第一版前言

管道作为五大运输方式之一，已经有 100 多年的历史。由于市场对能源的需求，管输事业发展迅猛。目前，世界长距离输送管道约 200 万 km 以上。发达国家原油管输量占总输量的 80%，天然气管输量占 95%。腐蚀是引起管道系统可靠性和使用寿命的关键因素，腐蚀破坏引起的恶性突发事件，往往造成巨大的经济损失和严重的社会后果。世界各国每年因管道腐蚀造成的经济损失，美国约 20 亿美元，英国约 17 亿美元，德国和日本约 33 亿美元。作为油气勘探开发和储运的油气管道(包括油管、套管、长距离输油气管、出油管、油田油气集输管，注水注气、注二氧化碳、注聚合物管等)，其失效形式主要表现为腐蚀失效。此外，腐蚀还极易造成管线内介质的跑、冒、滴、漏，污染环境而引起公害，甚至发生中毒、火灾、爆炸等恶性事故。大量的研究表明，尽管腐蚀很难完全避免，但可以控制。因此了解油气管道的腐蚀机理、影响因素和控制方法具有重要的意义。

本书较全面地介绍了金属材料的腐蚀原理、腐蚀形态、影响因素、腐蚀控制方法等，还对近年来在腐蚀检测以及腐蚀状态评价和腐蚀管线抢修取得的进展进行了总结和回顾。本书主要内容分为八章，第一章为金属腐蚀的电化学原理，主要介绍腐蚀电池、金属的极化与去极化、金属钝化、金属 $E-pH$ 图及其应用等腐蚀科学基本理论；第二章描述了金属腐蚀形态，重点介绍小孔腐蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀、应力腐蚀等常见局部腐蚀的特征、腐蚀机理及控制方法；第三章对环境腐蚀性和影响因素进行了概括，主要介绍了常见腐蚀环境(土壤、大气、水)下的金属腐蚀，同时也对特殊环境(酸性环境，多相流动环境)下的金属腐蚀机理和预防措施进行了介绍；第四章详细叙述了油气管道腐蚀防护的方法，即通过选择耐腐蚀材料和优化结构，以及采用电化学保护、覆盖层保护及缓蚀剂进行防腐保护；第五章对主要的腐蚀实验测试作了简单的概述；第六章除介绍了油气管道常见腐蚀检测技术外，还对近年来新出现的新型检测技术，如红外腐蚀检测方法也进行了简单介绍；第七章介绍管线腐蚀评

价，重点介绍了腐蚀管道剩余强度评估和剩余寿命预测这两种常见评价方法；第八章介绍了腐蚀穿孔管道的泄漏检测及修复技术，给出了气体管路、液体管路以及气液混输管路泄漏量计算方法，同时对堵漏等事故抢修措施也进行了描述。本书在附录中给出了常用腐蚀期刊及相关站点、常见材料的电极电位、含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法以及国内外常用腐蚀标准，以方便学习和研究参考。

本书绪论、第一、二、四、六章共约 35 万字由寇杰编写，第三、七、八章共约 20 万字由梁法春编写；第五章及附录共约 10 万字由陈婧编写和整理。全书由寇杰统稿。

在本书编写过程中，李英存、陈丽娜、宫莎莎做了大量图表绘制和文字录入工作，在此向他们表示感谢。

本书在编写过程中参考了许多腐蚀专家、学者的著作和研究成果，在此表示衷心的感谢。

油气管道腐蚀与防腐涉及多个交叉学科，由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不恰当之处，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 腐蚀现象及危害	(1)
1.2 腐蚀定义和本质	(6)
1.3 腐蚀分类	(8)
1.4 腐蚀速度表征	(13)
1.5 腐蚀科学的任务与内容	(16)
第 2 章 电化学腐蚀基础	(19)
2.1 腐蚀原电池	(19)
2.1.1 腐蚀原电池	(19)
2.1.2 腐蚀电池的化学反应	(21)
2.1.3 宏观电池与微观电池	(21)
2.2 双电层结构	(24)
2.2.1 双电层结构	(24)
2.2.2 双电层理论	(26)
2.3 电极电位	(27)
2.3.1 电极电位	(27)
2.3.2 绝对电极电位	(28)
2.3.3 平衡电极电位	(28)
2.3.4 非平衡电极电位	(29)
2.3.5 参比电极	(30)
2.4 金属腐蚀倾向的热力学判据	(33)
2.5 E -pH 图	(35)
2.5.1 水的 E -pH 图	(35)
2.5.2 Fe 的 E -pH 图	(36)
2.5.3 E -pH 图在腐蚀中的应用	(40)
2.6 金属电化学腐蚀的电极动力学	(41)
2.6.1 极化现象	(41)



2.6.2	极化的原因	(42)
2.6.3	极化规律和极化曲线	(43)
2.6.4	极化过电位的计算	(48)
2.6.5	腐蚀极化图	(52)
2.6.6	金属的去极化	(55)
2.7	金属的钝化	(62)
2.7.1	钝化现象	(62)
2.7.2	金属钝化的影响因素	(63)
2.7.3	钝化的特性曲线	(64)
2.7.4	钝化理论	(64)
2.7.5	钝化膜的破坏	(65)
第3章	金属的腐蚀形态	(67)
3.1	全面腐蚀和局部腐蚀	(67)
3.1.1	全面腐蚀/均匀腐蚀	(67)
3.1.2	局部腐蚀	(68)
3.1.3	全面腐蚀和局部腐蚀区别	(68)
3.2	电偶腐蚀	(69)
3.2.1	电偶腐蚀简介	(69)
3.2.2	电偶腐蚀发生条件	(70)
3.2.3	电偶电流及电偶腐蚀效应	(70)
3.2.4	电偶腐蚀的影响因素	(70)
3.2.5	控制电偶腐蚀的措施	(73)
3.3	小孔腐蚀	(74)
3.3.1	小孔腐蚀简介	(74)
3.3.2	点蚀发生条件	(74)
3.3.3	点蚀机理	(75)
3.3.4	点蚀的影响因素	(77)
3.3.5	控制点蚀的措施	(78)
3.4	应力腐蚀与腐蚀疲劳	(79)
3.4.1	应力腐蚀	(79)
3.4.2	腐蚀疲劳	(88)
3.5	磨损腐蚀	(92)
3.5.1	磨损腐蚀分类	(92)
3.5.2	湍流腐蚀	(93)
3.5.3	冲击腐蚀	(93)

3.5.4 空泡腐蚀	(96)
3.5.5 微动腐蚀磨损	(97)
3.6 其他常见的腐蚀类型	(97)
3.6.1 缝隙腐蚀	(97)
3.6.2 晶间腐蚀	(100)
3.6.3 选择性腐蚀	(102)
第 4 章 环境腐蚀性	(103)
4.1 大气腐蚀	(103)
4.1.1 大气腐蚀类型	(104)
4.1.2 大气环境腐蚀性分类	(105)
4.1.3 大气腐蚀机理	(107)
4.1.4 影响大气腐蚀的因素	(110)
4.1.5 控制大气腐蚀的方法	(112)
4.2 水环境腐蚀	(114)
4.2.1 淡水腐蚀	(114)
4.2.2 海水腐蚀现象	(117)
4.2.3 海水腐蚀因素	(119)
4.2.4 海水腐蚀特点	(122)
4.2.5 海水腐蚀机理	(126)
4.2.6 防止海水腐蚀的措施	(128)
4.3 土壤腐蚀	(130)
4.3.1 土壤腐蚀性及其影响因素	(130)
4.3.2 土壤腐蚀特点	(139)
4.3.3 土壤腐蚀机理	(139)
4.3.4 土壤腐蚀的分类	(142)
4.3.5 土壤腐蚀的评价	(144)
4.3.6 土壤腐蚀防护	(145)
4.4 酸性油气环境下的管道腐蚀	(146)
4.4.1 硫化氢的腐蚀与防护	(147)
4.4.2 二氧化碳的腐蚀与防护	(160)
4.5 多相流腐蚀	(166)
4.5.1 油气混输管内的多相腐蚀现象	(166)
4.5.2 油气混输管内的流型	(167)
4.5.3 多相腐蚀的影响因素	(167)
4.5.4 混输管线中的流动腐蚀机理	(169)



4.5.5 多相流腐蚀的控制	(174)
第5章 油气管道腐蚀防护	(178)
5.1 合理选材和优化设计	(179)
5.1.1 正确选用金属材料和加工工艺	(179)
5.1.2 结构设计	(179)
5.1.3 强度设计	(182)
5.2 电化学保护	(183)
5.2.1 阴极保护概述	(183)
5.2.2 强制电流法阴极保护	(193)
5.2.3 牺牲阳极法阴极保护	(203)
5.2.4 阳极保护	(210)
5.2.5 直流杂散电流腐蚀的防护	(213)
5.2.5 交流杂散电流腐蚀的防护	(220)
5.3 管道外防腐层保护	(224)
5.3.1 概述	(224)
5.3.2 埋地管道外防腐层的使用情况	(227)
5.3.3 选择外防腐层的原则	(236)
5.3.4 外防腐层的涂装技术	(238)
5.4 管道内防腐层保护	(256)
5.4.1 常用管道内防腐涂层材料	(256)
5.4.2 管道防腐层涂装工艺技术	(257)
5.4.3 管道内防腐层失效的原因和提高内防腐层寿命的措施	(259)
5.4.4 管道内防腐层补口技术	(260)
5.5 缓蚀剂保护	(261)
5.5.1 概述	(261)
5.5.2 缓蚀剂分类	(262)
5.5.3 缓蚀剂工作机理	(264)
5.5.4 缓蚀剂的选用原则	(270)
5.5.5 缓蚀剂的测试和评定	(272)
5.5.6 缓蚀剂的应用	(274)
第6章 管道腐蚀检测技术	(277)
6.1 腐蚀检测技术的分类	(277)
6.1.1 局部开挖检测技术	(277)

6.1.2 不开挖检测技术	(277)
6.2 局部开挖检查方法	(278)
6.3 管中电流法	(280)
6.3.1 检测原理	(280)
6.3.2 特点	(281)
6.3.3 现场应用	(282)
6.4 变频选频法	(283)
6.4.1 检测原理	(283)
6.4.2 检测方法	(283)
6.4.3 特点	(285)
6.4.4 现场应用	(286)
6.5 直流电压梯度法	(286)
6.5.1 检测原理	(287)
6.5.2 检测方法	(287)
6.5.3 特点	(288)
6.5.4 现场应用	(289)
6.6 密间隔电位检测技术	(289)
6.6.1 检测原理	(289)
6.6.2 检测方法	(290)
6.6.3 特点	(291)
6.6.4 现场应用	(291)
6.6.5 DCVG 和 CIPS 综合检测技术	(292)
6.7 电化学暂态检测技术	(293)
6.7.1 防腐层缺陷的电化学本质	(293)
6.7.2 检测原理	(294)
6.8 瞬变电磁检测法	(295)
6.8.1 检测原理	(295)
6.8.2 检测方法	(296)
6.8.3 特点	(296)
6.8.4 现场应用	(297)
6.9 红外成像管线腐蚀检测技术	(297)
6.9.1 检测原理	(297)
6.9.2 红外热成像仪的组成	(298)
6.9.3 热像仪的选用原则	(299)



6.9.4	特点	(300)
6.9.5	现场应用	(300)
6.10	内腐蚀清管智能检测	(302)
6.10.1	检测方法	(302)
6.10.2	智能检测装置	(305)
6.10.3	特点	(307)
6.10.4	智能清管在腐蚀检测中的实际应用	(308)
6.11	超声导波检测技术	(308)
6.11.1	检测原理	(308)
6.11.2	检测方法	(309)
6.11.3	特点	(309)
6.11.4	现场应用	(310)
6.12	管道腐蚀检测其他技术	(310)
6.12.1	水压试验	(310)
6.12.2	电指纹法	(311)
6.12.3	标准管/地点位检测技术(P/S)	(312)
6.12.4	皮尔逊监测技术(PS)	(312)
第7章	腐蚀管道适用性评价	(313)
7.1	管道的腐蚀评价	(313)
7.1.1	腐蚀管道的定性评价	(314)
7.1.2	管道腐蚀状况的定量评价	(317)
7.2	腐蚀管线的剩余强度评价	(318)
7.2.1	BS 7910 腐蚀管道平面缺陷评价	(318)
7.2.2	新 R6 失效评定曲线法	(327)
7.2.3	ASME B31G 评价方法	(329)
7.2.4	腐蚀管道 DNV 评价方法	(336)
7.2.5	许用应力法	(346)
7.2.6	SY/T 6151—2009 管道腐蚀评价方法	(348)
7.2.7	基于有限元法的剩余强度分析	(352)
7.3	基于裂纹发展模型的腐蚀管线剩余寿命预测	(360)
7.3.1	管线寿命预测的裂纹发展模型	(360)
7.3.2	估算疲劳裂纹的扩展速率	(360)
7.3.3	临界裂纹深度 a_c 的计算	(363)

7.3.4	缺陷无明显裂纹时的初始裂纹深度 a_0 的确定	(366)
7.4	最大腐蚀坑深的极值统计处理及使用寿命估测方法	(367)
7.4.1	方法概述	(367)
7.4.2	最大腐蚀坑深度估算	(367)
7.5	人工神经网络及腐蚀管线剩余寿命预测	(369)
7.5.1	人工神经网络概论	(369)
7.5.2	BP 神经网络	(371)
7.5.3	径向基函数网络	(374)
7.5.4	神经网络在腐蚀管线剩余寿命预测中的应用	(375)
7.6	灰色理论的腐蚀管线剩余寿命预测	(377)
7.7	概率统计方法的腐蚀管线剩余寿命预测	(378)
7.8	可靠度函数分析法的腐蚀管线剩余寿命预测	(379)
第8章	腐蚀管线泄漏检测及抢修	(381)
8.1	泄漏检测方法分类及选型要求	(381)
8.1.1	泄漏检测的意义	(381)
8.1.2	泄漏检测系统的分类	(381)
8.1.3	管道泄漏检测与定位系统的性能指标	(381)
8.2	直接检漏法	(382)
8.2.1	人工巡线方法	(382)
8.2.2	检漏电缆法	(383)
8.2.3	光纤检漏法	(383)
8.2.4	红外成像检漏	(384)
8.2.5	其他的泄漏检测方法	(388)
8.3	间接检漏法	(389)
8.3.1	负压波检测法	(389)
8.3.2	其他间接泄漏检测方法	(394)
8.4	油气管线泄漏损失估算	(399)
8.4.1	液体管线泄漏量估算	(399)
8.4.2	输气管线泄漏量估算	(401)
8.4.3	油气两相流管线泄漏估算	(402)
8.5	腐蚀管线泄漏抢修技术	(402)
8.5.1	夹具堵漏	(402)
8.5.2	木楔堵漏法	(403)



8.5.3 夹具注胶堵漏	(403)
8.5.4 封堵器堵漏	(405)
8.5.5 顶压堵漏	(411)
8.5.6 缠绕堵漏	(414)
8.5.7 低温冷冻堵漏	(415)
附录1 与腐蚀相关的主要期刊和网络站点	(417)
附录2 常用标准电极电位表	(419)
附录3 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法(SY/T 6477—2014)	(423)
附录4 国内外常用腐蚀标准	(452)
参考文献	(459)

第1章 绪 论

人类的文明进步与应用和发展日新月异的材料是分不开的。历史学家甚至用材料的名称标记不同的时代，如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。然而目前工业用的材料，无论是金属材料还是非金属材料，几乎没有一种材料是绝对不腐蚀的。

腐蚀科学是一门涉及大量现实工程问题的学科，包括冶金、石油、化工、轻工、交通、通讯、电子、海洋工程、航空、核电等领域。可以说世界上一切产品都有一个在环境作用下被腐蚀及控制腐蚀的问题。腐蚀科学之所以成为一门迅速发展的科学，是因为它的宗旨是控制腐蚀、造福于人类。控制腐蚀涉及到各行各业，因而，它必然吸引并推动着许许多多科学工作者和工程技术人员关心腐蚀、研究腐蚀、探求控制腐蚀理论以及相应的工艺、技术和措施。

1.1 腐蚀现象及危害

1. 腐蚀现象

众所周知，材料、能源和信息是现代文明的三大支柱。腐蚀是材料研究重要组成部分。一般来说，材料在环境中服役时有三种基本失效形式，腐蚀是较重要的一种。另两种失效形式分别是磨损和断裂。它们的特性归纳如表 1-1 所示。

表 1-1 材料在环境中失效的基本形式

失效形式	腐蚀	磨损	断裂
作用因素	电化学、化学	机械运动、力学	力学
变化方式	渐变		突变
相应学科	腐蚀科学	摩擦学、磨损理论	断裂力学

人们对腐蚀的认识，最早是从腐蚀产物感性地认识到腐蚀的存在。在日常生活中，人们常常会遇见这样的现象：打开长时间未使用的水龙头时，水管里流出的常常是黄色的锈水；铁锅如果前一天没有清洗干净，第二天早上就会看见一些黄色斑点。这些就是我们常说的生锈。



2. 腐蚀危害

金属腐蚀现象遍及国民经济和国防建设各个领域，危害十分严重。

(1) 腐蚀会造成重大的经济损失

腐蚀的重要性首先来自经济方面，这是腐蚀学科最初发展的原动力。腐蚀给国民经济带来巨大损失，据估计，全世界每年因腐蚀报废的钢铁产品大约相当于年产量的 30%，假如其中的 2/3 可回炉再生，则约有 10% 的钢铁将由于腐蚀而一去不复返了。损失除材料本身的价值外，还应包括设备的造价；为控制腐蚀而采用的合金元素、防腐涂层、镀层、衬层等；为调节外部环境而加入的缓蚀剂、中和剂；进行电化学保护、监测试验费用等等。表 1-2 列举了一些国家的年腐蚀损失。

表 1-2 一些国家的年腐蚀损失

国家	时间	年腐蚀损失	占国民经济总产值
美国	1949 年	55 亿美元	
	1975 年	820 亿美元(向国会报告为 700 亿美元)	4.9% (4.2%)
	1995 年	3000 亿美元	4.21%
	1998 年	2757 亿美元	
英国	1957 年	6 亿英镑	
	1969 年	13.65 亿英镑	3.5%
日本	1975 年	25509.3 亿日元	
	1997 年	39486.9 亿日元	
前苏联	20 世纪 70 年代中期	130140 亿卢布	
	1985 年	400 亿卢布	
前联邦德国	1968 ~ 1969 年	190 亿马克	3%
	1982 年	450 亿马克	
瑞典	1986 年	350 亿瑞典法郎	
印度	1960 ~ 1961 年	15 亿卢比	
	1984 ~ 1985 年	400 亿卢比	
澳大利亚	1973 年	4.7 亿澳元	
	1982 年	21 亿美元	
捷克	1986 年	15×10^9 捷克法郎	

我国每年腐蚀造成的直接经济损失也十分可观，有人统计，腐蚀造成的直接经济损失大约占国民经济净产值(GNP)的 3% ~ 4%，这和其他国家数据相仿。2004 年我国 GNP 为 13.7 万亿元，由腐蚀造成损失多达 5480 亿元。

腐蚀造成的间接损失比较难统计，一般是直接损失的几倍，如我国中原油田，1993 年度管线、容器穿孔 8345 次，更换油管总长 590km，直接经济损失 7000 多万元，而产品流