

油气管道 腐蚀与防护

寇杰 梁法春 陈婧 编著

中国石化出版社

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

油气管道腐蚀与防护

寇 杰 梁法春 陈 晴 编著

图书在版编目(CIP)数据

油气管道腐蚀与防护 / 寇杰, 梁法春, 陈晴编著. — 北京: 中国石化出版社, 2008
ISBN 978-7-80259-613-1

I. ①油… II. 寇… III. 梁… IV. ①TQ628.3
②TQ628.3③TQ628.3④TQ628.3⑤TQ628.3⑥TQ628.3⑦TQ628.3⑧TQ628.3⑨TQ628.3⑩TQ628.3⑪TQ628.3⑫TQ628.3⑬TQ628.3⑭TQ628.3⑮TQ628.3⑯TQ628.3⑰TQ628.3⑱TQ628.3⑲TQ628.3⑳TQ628.3㉑TQ628.3㉒TQ628.3㉓TQ628.3㉔TQ628.3㉕TQ628.3㉖TQ628.3㉗TQ628.3㉘TQ628.3㉙TQ628.3㉚TQ628.3㉛TQ628.3㉜TQ628.3㉝TQ628.3㉞TQ628.3㉟TQ628.3㊱TQ628.3㊲TQ628.3㊳TQ628.3㊴TQ628.3㊵TQ628.3㊶TQ628.3㊷TQ628.3㊸TQ628.3㊹TQ628.3㊺TQ628.3㊻TQ628.3㊼TQ628.3㊽TQ628.3㊾TQ628.3㊿TQ628.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第078791号

中国石化出版社

787×1092毫米 1/32 25.5印张 631千字
2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷
定价: 68.00元

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电化学腐蚀理论、金属腐蚀形态、金属在各种环境下的腐蚀及其影响因素和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取得的进展也进行了总结和回顾。

本书可作为石油院校油气储运工程专业课程教材，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气管道腐蚀与防护/寇杰,梁法春,陈婧编著. —北京:中国石化出版社,2008
ISBN 978-7-80229-612-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 078791 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

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 25 印张 621 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

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、金属的极化和去极化、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线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网络站点、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,书中难免疏漏和不恰当之处,敬请读者批评指正。

编者

目 录

绪论	(1)
第一章 电化学腐蚀基础	(16)
第一节 腐蚀原电池	(16)
一、腐蚀原电池	(16)
二、腐蚀电池的化学反应	(17)
三、宏观电池与微观电池	(18)
第二节 双电层结构	(20)
一、双电层结构	(20)
二、双电层理论	(21)
第三节 电极电位	(22)
一、电极电位	(22)
二、绝对电极电位	(23)
三、平衡电极电位	(23)
四、非平衡电极电位	(24)
五、参比电极	(24)
第四节 金属腐蚀倾向判据	(27)
第五节 $E-pH$ 图	(29)
一、水的 $E-pH$ 图	(29)
二、Fe 的 $E-pH$ 图	(29)
三、 $E-pH$ 图在腐蚀中的应用	(32)
第六节 极化与去极化	(33)
一、极化现象	(33)
二、极化的原因	(34)
三、极化规律和极化曲线	(35)
四、极化过电位的计算	(38)
五、腐蚀极化图	(41)
六、金属的去极化	(44)
第七节 金属的钝化	(51)
一、钝化现象	(51)
二、金属钝化的影响因素	(51)
三、钝化的特性曲线	(52)
四、钝化理论	(52)
五、钝化膜的破坏	(53)
第二章 金属腐蚀形态	(55)
第一节 全面腐蚀和局部腐蚀	(55)

一、全面腐蚀/均匀腐蚀	(55)
二、局部腐蚀	(56)
三、全面腐蚀和局部腐蚀区别	(56)
第二节 电偶腐蚀	(57)
一、电偶腐蚀特征	(57)
二、电偶腐蚀发生条件	(57)
三、电偶电流及电偶腐蚀效应	(57)
四、影响电偶腐蚀的因素	(58)
五、电偶腐蚀控制措施	(59)
第三节 小孔腐蚀	(60)
一、小孔腐蚀特征	(60)
二、点蚀发生条件	(61)
三、点蚀机理	(61)
四、点蚀影响因素	(63)
五、控制点蚀的措施	(64)
第四节 缝隙腐蚀	(65)
一、缝隙腐蚀特点	(65)
二、缝隙腐蚀产生条件	(65)
三、缝隙腐蚀特征	(65)
四、缝隙腐蚀机理	(65)
五、缝隙腐蚀影响因素	(66)
六、缝隙腐蚀控制措施	(67)
七、缝隙腐蚀与点蚀的比较	(67)
第五节 晶间腐蚀	(68)
一、晶间腐蚀特征	(68)
二、发生条件	(68)
三、晶间腐蚀机理	(68)
四、影响因素	(70)
五、晶间腐蚀控制措施	(71)
第六节 选择性腐蚀	(71)
一、选择性腐蚀定义	(71)
二、黄铜脱锌	(72)
三、石墨化腐蚀	(73)
第七节 应力腐蚀	(74)
一、应力腐蚀开裂现象	(74)
二、应力腐蚀发生条件	(74)
三、应力腐蚀特征	(75)
四、应力腐蚀发生机理	(76)
五、影响 SCC 的因素	(79)
六、防止 SCC 的措施	(79)

七、点蚀与应力腐蚀的关系	(80)
第八节 腐蚀疲劳	(80)
一、腐蚀疲劳现象	(80)
二、腐蚀疲劳的分类	(80)
三、腐蚀疲劳特征	(81)
四、腐蚀疲劳机理	(81)
五、影响因素	(83)
六、控制措施	(83)
第九节 磨损腐蚀	(84)
一、磨损腐蚀分类	(84)
二、湍流腐蚀	(84)
三、冲击腐蚀	(85)
四、空泡腐蚀	(87)
第十节 氢损伤	(88)
一、概念和分类	(88)
二、氢的来源	(88)
三、氢的存在形式	(88)
四、氢鼓泡	(89)
五、氢脆	(89)
第三章 环境腐蚀性	(91)
第一节 大气腐蚀	(91)
一、大气腐蚀类型	(91)
二、大气环境腐蚀性分类	(93)
三、大气腐蚀机理	(94)
四、影响大气腐蚀的因素	(96)
五、控制大气腐蚀的方法	(99)
第二节 淡水腐蚀	(100)
一、淡水腐蚀的特点	(100)
二、影响淡水腐蚀的主要因素	(100)
三、防止淡水腐蚀的途径	(102)
第三节 海水腐蚀	(102)
一、海水腐蚀现象	(102)
二、海水腐蚀因素	(104)
三、海水腐蚀特点	(107)
四、海水腐蚀机理	(109)
五、防止海水腐蚀的措施	(111)
第四节 土壤腐蚀	(113)
一、土壤腐蚀性影响因素	(113)
二、土壤腐蚀特点	(120)
三、土壤腐蚀机理	(121)

08 四、土壤腐蚀的分类	(123)
08 五、土壤腐蚀的评价	(125)
08 六、土壤腐蚀防护	(126)
第五节 酸性油气环境下的管道腐蚀	(126)
18 一、硫化氢的腐蚀与防护	(127)
18 二、二氧化碳的腐蚀与防护	(138)
第六节 多相流腐蚀	(143)
48 一、油气混输管内的多相腐蚀现象	(143)
48 二、油气混输管内的流型	(144)
48 三、多相腐蚀的影响因素	(144)
48 四、混输管线中的流动腐蚀机理	(146)
28 五、多相流腐蚀的控制	(150)
第四章 油气管道腐蚀防护	(153)
第一节 合理选材和优化设计	(153)
88 一、正确选用金属材料和加工工艺	(153)
88 二、结构设计	(154)
88 三、强度设计	(156)
08 四、其他防腐设计	(157)
第二节 电化学保护	(157)
10 一、阴极保护概述	(157)
10 二、强制电流法阴极保护	(167)
10 三、牺牲阳极法阴极保护	(174)
80 四、阳极保护	(181)
40 五、直流杂散电流腐蚀的防护	(183)
第三节 覆盖层保护	(190)
00 一、概述	(190)
00 二、埋地管道防腐层的使用情况	(192)
00 三、选择防腐层的原则	(199)
00 四、覆盖层的涂装技术	(201)
第四节 管道内防腐层保护	(215)
50 一、常用管道内防腐涂层材料	(216)
50 二、管道防腐层涂装工艺技术	(216)
40 三、管道内防腐层失效的原因和提高防腐寿命的措施	(218)
70 四、管道内防腐层补口技术	(219)
00 五、结论	(220)
第五节 缓蚀剂保护	(220)
11 一、概述	(220)
61 二、缓蚀剂分类	(220)
05 三、缓蚀剂工作机理	(222)
15 四、缓蚀剂的选用原则	(228)

五、缓蚀剂的测试和评定	(230)
六、缓蚀剂的应用	(230)
第五章 腐蚀测量实验	(231)
第一节 腐蚀实验的目的和分类	(231)
一、实验目的	(231)
二、实验分类	(231)
第二节 极化曲线的测量	(232)
一、恒电流法测量阴极极化曲线	(232)
二、恒电位法测量阳极极化曲线	(234)
第三节 临界孔蚀电位的测定	(235)
第四节 极化曲线法评选缓蚀剂	(236)
第五节 阳极接地电阻和土壤电阻率的测定	(239)
一、阳极接地电阻测定	(239)
二、“四极法”测土壤电阻率	(240)
第六节 “极化曲线法”测定土壤腐蚀性	(241)
第七节 管地电位差的测量	(242)
第六章 管道腐蚀检测技术	(244)
第一节 腐蚀检测技术的分类	(244)
一、局部开挖检测技术	(244)
二、不开挖检测技术	(244)
第二节 局部开挖检查方法	(244)
第三节 管中电流法	(247)
一、检测原理	(247)
二、PCM 管道电流检测法特点	(248)
三、现场应用	(248)
第四节 变频选频法	(249)
一、变频选频法原理	(249)
二、变频选频电阻测量方法	(249)
第五节 直流电压梯度法	(252)
一、工作原理	(252)
二、测量方法	(252)
三、特点	(253)
四、现场应用	(253)
第六节 密间隔电位检测技术	(254)
一、测量原理	(254)
二、CIPS 测量仪器	(255)
三、技术特点	(255)
四、现场应用	(255)
五、DCVG 和 CIPS 综合检测技术	(256)
第七节 电化学暂态检测技术	(257)

一、防腐层缺陷的电化学本质	(257)
二、电化学暂态技术测试原理	(258)
第八节 瞬变电磁检测法	(259)
一、测试原理	(259)
二、检测仪器	(259)
三、测量方法	(260)
四、应用情况	(260)
第九节 红外成像管线腐蚀检测技术	(260)
一、红外成像技术的发展	(260)
二、红外成像原理	(261)
三、红外热成像仪的组成	(261)
四、热像仪的选用原则	(262)
五、在缺陷检测中的应用	(263)
六、红外检测的技术特点	(264)
第十节 内腐蚀清管智能检测	(264)
一、检测方法	(265)
二、智能检测装置	(267)
三、特点	(269)
四、智能清管在腐蚀检测中的实际应用	(269)
第十一节 管道腐蚀检测其他技术	(269)
一、水压实验	(269)
二、电指纹法	(270)
第七章 腐蚀管道适用性评价	(272)
第一节 管道的腐蚀评价	(272)
一、腐蚀管道的定性评价	(273)
二、管道腐蚀状况的定量评价	(275)
第二节 腐蚀管线的剩余强度评价	(276)
一、BS 7910 腐蚀管道平面缺陷评价	(276)
二、新 R6 失效评定曲线法	(283)
三、ASMEB31G 评价方法	(285)
四、腐蚀管道 DNV 评价方法	(291)
五、许用应力法	(298)
六、SY/T 6151—1995 管道腐蚀评价方法	(300)
七、基于有限元法的剩余强度分析	(303)
第三节 基于裂纹发展模型的腐蚀管线剩余寿命预测	(305)
一、管线寿命预测的裂纹发展模型	(305)
二、估算疲劳裂纹的扩展速率	(305)
三、临界裂纹深度 a_c 的计算	(308)
四、缺陷无明显裂纹时的初始裂纹深度 a_0 的确定	(310)
第四节 最大腐蚀坑深的极值统计处理及使用寿命估测方法	(311)

一、方法概述	(311)
二、最大腐蚀坑深度估算	(311)
第五节 人工神经网络及腐蚀管线剩余寿命预测	(312)
一、人工神经网络概论	(312)
二、神经网络在腐蚀管线剩余寿命预测中的应用	(313)
第八章 腐蚀管线泄漏检测及抢修	(316)
第一节 泄漏检测方法分类及选型要求	(316)
一、泄漏检测的意义	(316)
二、泄漏检测系统的分类	(316)
三、管道泄漏检测与定位系统的性能指标	(317)
第二节 直接检漏法	(317)
一、人工巡线方法	(317)
二、检漏电缆法	(317)
三、光纤检漏法	(318)
四、红外成像检漏	(319)
五、其他的泄漏检测方法	(322)
第三节 间接检漏法	(323)
一、负压波检测法	(323)
二、其他间接泄漏检测方法	(326)
第四节 油气管线泄漏损失估算	(330)
一、液体管线泄漏量估算	(330)
二、输气管线泄漏量估算	(331)
三、油气两相流管线泄漏估算	(332)
第五节 腐蚀管线泄漏抢修技术	(332)
一、夹具堵漏	(332)
二、木楔堵漏法	(333)
三、夹具注胶堵漏	(333)
四、封堵器堵漏	(334)
五、顶压堵漏	(337)
六、缠绕堵漏	(339)
七、低温冷冻堵漏	(340)
附录1 与腐蚀相关的主要期刊和网络站点	(341)
附录2 常用材料标准电极电位表	(343)
附录3 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法	(346)
附录4 国内外常用防腐蚀标准	(377)
参考文献	(383)

绪 论

人类的文明进步都是与应用和发展日新月异的材料分不开的。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。控制腐蚀涉及各行各业，因而，它必然吸引并推动着许许多多科学工作者、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。

一、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 所示。

表 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。图 1 和图 2 分别为钢管和出土夏代的青铜酒器——铜爵的腐蚀。我们看到的锈迹实际上是因为腐蚀生成了腐蚀产物，铁的腐蚀通常生成棕黄色的“铁锈” $[\text{FeO}(\text{OH}) \text{ 或 } \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ ，铜腐蚀通常生成“铜绿” $[\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2]$ 。



图 1 钢管的腐蚀

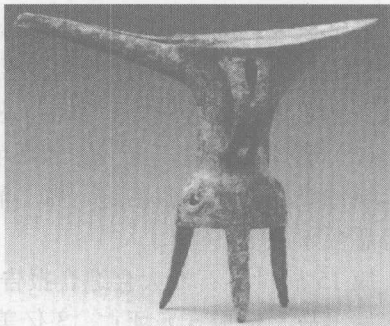


图 2 铜爵(夏代)腐蚀

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约相当于年产量的 30%，假如其中的 2/3 可回炉再生，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 2 列举了一些国家的年腐蚀损失。

表 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	3500 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	39376.9 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。

腐蚀造成的间接损失比较难统计，一般是直接损失的几倍。如一台发动机某零件因镀层用错了，造成腐蚀，零件价值可能是几十元，但引起的后果却不堪设想，损失可能是该零件的成百上千倍，如造成电厂停工，从而使所有用电厂矿停产，造成损失难以设想。

(2) 腐蚀易引发安全问题和环境危害

腐蚀极易造成设备的跑、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。

第 15 届世界石油大会综合报告中提到，1992 年国外某炼油厂因腐蚀导致液化石油气管道泄漏事故，造成 6 人死亡、3 亿美元的财产损失。汽车、轮船、飞机许多事故也或多或少和腐蚀有关。1986 年 1 月 28 日，美国“挑战者”号航天飞机在佛罗里达的卡那维拉尔角发射

升空，起飞 73s 后随着强烈爆炸声，7 位太空人，其中一名是中学女教师，连同价值 12 亿美元的飞船，全部葬身大西洋底。爆炸是一个 O 形密封环低温环境下失效所致(发脆、变黏是橡胶在环境作用下损伤的主要表现形式)。这个密封环位于右侧固体火箭推进器的两个低层部件之间。失效的密封环使炽热的气体点燃了外部燃料罐中的燃料。

每年因腐蚀引发的事故更是不胜枚举，例如 1967 年 12 月，美国的 West. Virginia 与 Ohio 州间的 Ohio 桥突然塌入河中，死亡 46 人，原因是钢梁因应力腐蚀开裂加上腐蚀疲劳，产生裂缝所致；1965 年 3 月 4 日，美国 Lousiana 州输气管线因应力腐蚀破裂而失火，造成 17 人死亡；1979 年，吉林市液化气罐腐蚀发生穿孔引起火灾，原因是球罐发生应力腐蚀；1980 年 8 月北海油田的采油平台发生腐蚀疲劳破坏，致使 123 人丧生；1985 年 8 月 12 日，日本一架波音 747 客机因应力腐蚀断裂而坠毁，死亡 500 余人，等等。

(3) 自然资源的巨大消耗

腐蚀使金属变成了无用的、无法回收的散碎氧化物等。例如，每年花费大量资源和能源生产的钢铁，有 40% 左右被腐蚀，而腐蚀后完全变成铁锈不能再利用的约为 10%。按此计算，我国每年腐蚀掉的不能回收利用的钢铁达 1000 多万吨，大致相当于宝山钢铁厂一年的产量。因而腐蚀会加速自然资源的损耗，这是不可逆转的。

腐蚀重要性的第三个领域来自节约资源、能源，保护环境等方面考虑。地球上矿产、能源资源有限而腐蚀浪费了大量宝贵资源。有人统计全世界金属资源日趋枯竭，即使按 10 倍现有储量再加上 50% 再生利用的乐观估计，可维持年代也不会很长。浪费材料的同时也是浪费了能源，因为从矿石中提炼金属需消耗大量能源。表 3 的数据提供了某些大概轮廓。

表 3 地球上重要金属资源的估计储量

金 属	储量/ 10 ⁶ t	年消耗 增加率/%	可用 年数/a	乐观计算 年数/a	每千克材料能 耗/kW·h
Fe	10 ⁶	13	109	319	16 ~ 30
Al	1170	51	35	91	约 80
Cu	308	34	24	95	30 ~ 40
Zn	123	25	18	101	15 ~ 20
Ti	147	27	51	152	约 200

地球上资源有限，珍惜资源是人类的战略任务，若腐蚀控制得好，可延长产品的使用寿命，从而节省大量的原材料和能源。

在“保护地球 - 我们赖以生存环境”的呼声日益高涨的今天，对生态环境考虑已逐渐大于经济方面考虑。可以预料，在 21 世纪走持续可发展道路的战略格局中，材料的防腐蚀将占重要地位。

(4) 阻碍新技术的发展

一项新技术、新产品的产生过程，往往会遇到需要克服的腐蚀问题，只有解决了这些问题，新技术、新产品、新工业才得以发展。比如，不锈钢的发明和应用大大促进了硝酸和合成氨工业的发展。又比如，当年美国的阿波罗空间计划中，氧化剂 N₂O₄ 的储罐是用高强度钛合金制造的，这是通过应力腐蚀试验选出的。但在运行前的模拟试压(压力为规定值的 1.5 倍)中很快发生破裂，原因是腐蚀试验中使用的 N₂O₄ 是不纯的，含有 NO，而模拟实际使用的 N₂O₄ 纯度高，不含 NO。经分析研究加入 0.6% NO 之后才得以解决。美国著名的腐蚀学专家方坦纳认为，如果找不到这个解决办法，登月计划会推迟若干年。

法国的拉克气田 1951 年因设备发生了应力腐蚀开裂得不到解决,不得不推迟到 1957 年才全面开发。

在我国四川石油天然气开发初期,要是没有我国腐蚀工作者努力,及时解决钢材硫化氢应力开裂问题,我国天然气工业不会如此迅速发展。同样,由于缺乏可靠技术(包括防腐蚀技术),我国有一批含硫 80%~90% 的高硫化氢气田至今仍静静地埋在地下,无法开采利用。

当然,腐蚀如同其他许多现象一样,也是一种双刃剑,腐蚀现象也可以用来为人类造福。随着人们对腐蚀现象认识的不断深化,腐蚀不再是总和人类作对的捣乱者,有目的地利用腐蚀现象的代表性例子有:电池工业中,利用活泼金属腐蚀获得携带方便的能源;半导体工业中,利用腐蚀对材料表面进行间距只有 0.1mm 左右的精细蚀刻等。

3. 油气管道的腐蚀现状

1865 年美国建成世界第一条原油管道($\phi 50\text{mm} \times 9.65\text{km}$),大规模发展为“二战”后,1948~1998 建成 80.2 万 km。建国后,我国的管道事业也迅猛发展,目前已建成四个长距离管道输送系统,分别为集大庆、吉林、辽河三大油区原油管道输送为一体,以东北“八三”管道和秦京线为主体的东北大型原油管道输送系统;集胜利、华北二大油区原油管道输送为一体,以鲁宁线、东黄线和东临线为主体的华东地区大型原油管道输送系统;新疆北疆地区将克拉玛依、火烧山等油田与独山子和乌鲁木齐炼厂相连的北疆原油管网系统;连接塔里木和吐哈油区的原油长输管线。

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。油气勘探开发的油井管(油管、套管、钻杆等)和油气集输管线(长距离输油管、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,主要腐蚀介质有 H_2S 、 CO_2 、 O_2 、硫酸盐还原菌(SRB)等。

例如,在 1977 年完成的美国阿拉斯加一条长约 1287km、管径 1219.2mm 的原油输送管道,一半埋地一半裸露,每天输送原油约 200×10^4 桶,造价 80 亿美元,由于对腐蚀研究不充分和施工时采取防腐措施不当,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。

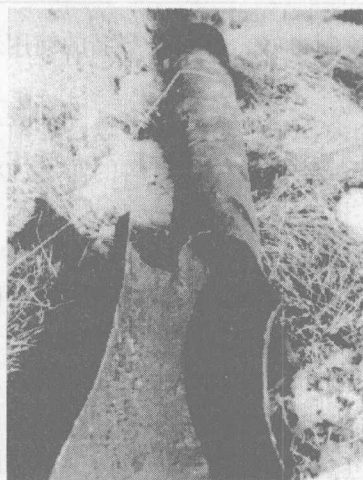


图 3 含硫输气管线沿着焊缝开裂失效

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% CO_2 及 6%~8% 的 Cl^- ,同时由于海洋飞溅区的腐蚀,投产仅 2 个月,立管就被腐蚀的薄如纸张,导致了严重的爆炸、燃烧和伤亡事故。1988 年英国的帕尔波-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%。

中国大部分油田进入高含水开发期,有的新油管下井一年即发生腐蚀穿孔,3 年后就得全部更换。注水井套管的使用寿命一般在 6 年左右,油井套管使用寿命一般在 8 年左右。

四川酸性气田特别是磨溪气田,天然气中含有 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 、硫酸盐还原菌(SRB)的地层水,对油套管集输

管线的腐蚀十分严重，特别是井下油管，最短在2年左右发生腐蚀断裂，造成内部堵塞，压力下降，产量下降。图3显示的是含硫输气管线因应力腐蚀沿焊缝开裂失效。

胜利油田进入高含水开发期，采出污水中含有溶解氧、硫酸盐还原菌、 CO_2 、 H_2S 、 Cl^- ，对钢管管材腐蚀相当严重，平均腐蚀速度为 $1 \sim 7\text{mm/a}$ ，应力作用下的点蚀速度 14mm/a 。胜利油田现有地面管线 20000km ，每年至少更换 400km ，损失达6000万元。

二、腐蚀定义和本质

1. 什么是腐蚀

腐蚀 Corrosion 来自拉丁文“Corrode”，意为“损坏”、“腐烂”。日常生活所见到的铁生锈就是铁及铁基合金生成水合氧化铁为主的腐蚀。腐蚀最初只局限于金属材料。H. H. Hhlig 在《腐蚀科学与腐蚀工程 - 腐蚀科学与腐蚀工程导论》一书中指出，腐蚀是金属和周围环境起化学或电化学反应而导致的破坏性侵蚀。国际标准化组织 ISO 6044—1999 和我国国标 GB/T 10123 将腐蚀定义为“金属和环境间的物理 - 化学相互作用，其结果是使金属性能发生变化，导致金属、环境及其构成的技术体系功能受到损伤”。

狭义的腐蚀只是指金属的腐蚀，然而随着时代进步和科技发展，金属之外其他材料，如非金属材料、高分子材料和复合材料等应用越来越广泛，这些材料在使用过程中同样会因环境作用发生功能损伤现象。广义的腐蚀包含所有的天然材料和人造材料，因此腐蚀的广义定义是“材料和环境发生化学或电化学反应而导致材料功能损伤的现象”。

这个定义明确指出了金属腐蚀是包括金属材料和环境介质两者在内的一个具有反应作用的体系。这个反应包括化学反应、电化学反应以及物理溶解作用等。金属要发生腐蚀必须有外部介质的作用，而且这种作用发生在金属与介质接触的界面上，不包括因单纯机械作用引起的金属磨损破坏。这个定义包含以下几个含义：

(1) 腐蚀研究着眼点在材料。腐蚀既导致材料损伤，又造成环境破坏。例如，食品或酒类生产、储运过程的容器材料，因腐蚀造成容器壁厚减薄、强度降低，但同时也可能导致食品或酒类受腐蚀产物污染而品质恶化。后者虽因腐蚀引起，但介质环境的变化一般称为污染，而不称为腐蚀。

(2) 腐蚀是一种材料和环境间的反应，大多数是电化学反应，这是腐蚀和摩擦现象的分界线。实际条件下腐蚀和磨损往往密不可分、同时发生。强调化学或电化学反应时称为腐蚀，强调力学或机械作用时则称为摩擦磨损。如两者作用相当，习惯上称为腐蚀磨损或磨损腐蚀，它们不仅包含腐蚀及磨损作用，还会产生复杂交互作用。这些在讨论实际腐蚀体系时再展开讨论。根据习惯，部分化学反应及少数物理过程也被当作腐蚀。如，铝在非电解质 CCl_4 中的腐蚀属于纯化学反应；金属在某些高温熔盐或液态金属中的腐蚀属于纯物理溶解等，如合金在液态金属中的物理溶解（存放熔解锌的钢容器，铁在高温下被液态锌熔解，使容器壁变薄）。现代的金属腐蚀理论主要以电化学腐蚀（即以电化学反应为特征的腐蚀）为对象。

(3) 腐蚀是材料的损伤。宏观上可表现为材料质量流失、强度等性质退化等；微观上可表现为材料相、价态或组织改变，主要靠这些变化来发现腐蚀或评价腐蚀程度。腐蚀一般指材料坏的变化，强化过程或好的变化习惯不称为腐蚀，如钢铁在一定气氛中热处理、材料表面三束（粒子束、电子束、激光束）改性等过程。这层含义有时比较含糊，例如，铝、不锈钢材料表面氧化；半导体硅片蚀刻等，虽称为腐蚀，但其后果是我们希望的。