

地下管道 腐蚀与漏损控制

DIXIA GUANDAO FUSHI YU LOUSUN KONGZHI

袁厚明 主编



中國石化出版社

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

地下管道腐蚀与漏损控制

袁厚明 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了地下管道腐蚀与漏损基础知识及管道测腐、测漏、腐蚀与漏损控制等方面知识。全书共9章,主要内容包括管道腐蚀与漏损控制分析方法、防腐层隔离法控制地下管道内外壁腐蚀、外加电流法阴极保护控制地下管道腐蚀、牺牲阳极法阴极保护控制地下管道腐蚀、排流保护法控制地下管道杂散电流干扰腐蚀、多种方法综合运用控制管道内壁腐蚀、地下管道腐蚀控制措施评价、地下管道漏损检测与控制、地下管道堵漏与抢维修等,内容紧密结合现场实际,具有很强的实用性和可操作性。

本书可供地下管线检测、管道设计、管道施工、管道工程监理、管道安全监督、管道运行维护、管线管理等人员使用,也可作为企业职工培训教材及高等院校相关专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地下管道腐蚀与漏损控制 / 袁厚明主编. —北京:
中国石化出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-5114-3037-3

I. ①地… II. ①袁… III. ①地下管道-防腐②地下
管道-防漏 IV. ①U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223950 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

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 507 千字

2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

定价:60.00 元

《地下管道腐蚀与漏损控制》

编辑委员会

主 编 袁厚明

副主编 王 强 胡士信

编 委 赵麦群 王志昌 秦国志 张清玉 孙祖岭

吴建华 孙建斌 吴荫顺 俞蓉蓉 茹慧灵

汪东红 王俊奇 黄春芳 董绍华 肖祥正

周 律 张奇敏 郑金祥 李春桥 夏于飞

姚 伟 王明生 花景新 杨印臣 谭伟强

雷林源 汪 翔 刘隧庆 施哲雄 张宝宏

张清玉 朱 勇 齐 伟 袁洪波 刘风章

候祥东 肖国俊

主 审 李兆华

前 言

管道运输在国民经济运输中的比重，是衡量一个国家文明发达程度的重要标志。作为五大运输方式之一的管道运输，近年来迅速发展。随着西气东输一线、二线、俄气南供、陕京复线、忠武线、兰成渝成品油管线、西南成品油管线、甬沪宁成品油管道、冀鲁宁管线、仪长管线等重大工程的实施，我国油气管道干线联网的雏形已经形成。

早期兴建的东北输油管线、鲁宁线、环川天然气管线以及各油田内部的集输管线，各城市的供水、供气、供热管线，已经到了运行寿命的中后期，不少管线已因腐蚀发生穿孔，引起泄漏。随着油价的上升，社会上一些不法分子铤而走险，滚滚原油成了他们眼中没有成本的致富之门，打孔盗油在我国各主要油田均有发生。油、水、气管线泄漏引起的管线修复费用、介质损失费用、环境污染费用、气体爆炸造成人身伤亡医疗赔偿费用等，使得管道运输企业的成本居高不下，严重影响了正常生产，并给国民经济及人民生命财产造成极大危害。

因此，加强对管道的腐蚀检测工作，加强管道的腐蚀与漏损控制，对延长管道使用寿命、减少管道输送介质漏损、确保管道的安全运行，至关重要。

鉴于此，编写一本有关管道腐蚀与漏损控制方面的图书很有必要。笔者从事了三十多年有关管道教学、技术培训、工程检测实践、仪器测试交货等工作，有机会在管道现场与各方面人员进行技术交流，解决了各类地下管线腐蚀检测与漏损控制的许多难题。在总结多年来的实践经验基础上，并参考了大量资料 and 标准、规范，最终编写而成本书。

本书全面、系统地介绍了地下管道腐蚀与漏损基础知识及管道测腐、测漏、腐蚀与漏损控制等方面知识。全书共9章，主要内容包括管道腐蚀与漏损控制分析方法、防腐层隔离法控制地下管道内外壁腐蚀、外加电流法阴极保护控制地下管道腐蚀、牺牲阳极法阴极保护控制地下管道腐蚀、排流保护法控制地下管道杂散电流干扰腐蚀、多种方法综合运用控制管道内壁腐蚀、地下管道腐蚀控制措施评价、地下管道漏损检测与控制、地下管道堵漏与抢维修等，内容紧密结合现场实际，具有很强的实用性和可操作性。可供地下管线检测、管道设计、管道施工、管道工程监理、管道安全监督、管道运行维护、管线管理等人员使用，也可作为企业职工培训教材及高等院校相关专业教学参考书。

在本书编写过程中,湖北大学、襄阳震柏地下管线检测有限公司提供了参考资料、管道检测研发设备以及多年的教学培训资料等,为本书的编写奠定了理论基础。

北京、武汉、长沙、太原、乌鲁木齐、温州、襄阳、大同、吉林、大冶、济宁、惠州、黄陂、江夏、新洲、南阳等城市燃气公司;大庆采油一厂、二厂、六厂,大庆天然气公司,辽河油田高升采油厂,沈阳采油厂,胜利、吉林、大港、华北、中原、长庆、冀东、江汉、塔里木、吐哈、新疆等油气田单位;钢铁总院青岛海洋腐蚀研究所、七二五所、北京永逸舒克防腐蚀技术有限公司、大庆油田设计院、武汉材保所等阴极保护设计施工单位;西气东输、西南成品油、陕京管线、川气东送、忠武线、襄樊输油处、邹城输油处等长输管线管理单位;上海、镇海、大庆、扬子、齐鲁、安庆、福建、岳阳、昌邑等石化炼厂;国家特检院、湖北省十堰特检所、浙江省特检院、江苏省特检院等单位提供了近万公里的现场检测机会,为本书的编写夯实了实践基础。

湖北大学、襄阳震柏地下管线检测有限公司提供了查阅资料、仪器试验、编写时间、人员协助、外出调研、资金赞助等便利,为本书的编写提供了物质经济基础。

中石油、中石化、中腐协会、中国城建协会、中国城市规划协会地下管线专业委员会、中国石油工程建设防腐保温技术专业委员会、中国城市燃气协会等主管单位、管道检测仪器设备添置单位提供了培训和交流的机会……。如果没有众人的劳动成果和引导,本书将无法写成,可以说编者是最大的受益者,特此表示感谢!

由于编者水平有限,经验不足,书中一定有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。联系咨询电话:0710-3628388,18627124769,13972229202;QQ:1430319705。

编者

目 录

第 1 章 管道腐蚀与漏损控制概述	(1)
1.1 管道运输的意义与发展趋势	(1)
1.2 管道腐蚀与漏损控制的意义	(2)
1.3 地下管道外腐蚀环境分析	(6)
1.4 地下管道内腐蚀因素分析	(12)
1.5 地下管道腐蚀分类与表示方法	(17)
1.6 地下管道腐蚀与漏损控制方法简介	(20)
参考文献	(25)
第 2 章 防腐层隔离法控制地下管道内外壁腐蚀	(26)
2.1 管道常用防腐层种类与技术参数	(26)
2.2 管道防腐层涂敷技术	(29)
2.3 管道防腐层质量检测	(33)
2.4 管道埋土后防腐层破损点检测	(37)
2.5 管道防腐层破损点 100% 全线检测	(43)
2.6 地下管道防腐层破损点定位	(48)
2.7 地下管道外防腐层绝缘电阻检测	(54)
2.8 管道内壁防腐层检测	(57)
参考文献	(59)
第 3 章 外加电流法阴极保护控制地下管道腐蚀	(60)
3.1 管道外加电流法阴极保护原理	(60)
3.2 管道外加电流法阴极保护系统的构成	(62)
3.3 管道外加电流法阴极保护系统的设计	(69)
3.4 管道外加电流法阴极保护系统的安装	(75)
3.5 管道外加电流法增大保护范围的措施	(83)
3.6 管道密集地区深井阳极阴极保护	(87)
3.7 管道外加电流法阴极保护应用	(94)
3.8 管道外加电流法阴极保护系统运行管理	(102)
参考文献	(106)
第 4 章 牺牲阳极法阴极保护控制地下管道腐蚀	(107)
4.1 管道牺牲阳极法阴极保护原理	(107)
4.2 牺牲阳极法阴极保护材料性能	(109)
4.3 牺牲阳极法应用环境与填包料	(114)
4.4 管道牺牲阳极法阴极保护系统的设计	(118)

4.5	管道牺牲阳极法阴极保护系统的安装	(124)
4.6	油气站区管道储罐牺牲阳极法阴极保护	(130)
4.7	牺牲阳极法阴极保护应用	(136)
4.8	牺牲阳极法阴极保护系统运行管理	(141)
	参考文献	(144)
第5章	排流保护法控制地下管道杂散电流干扰腐蚀	(145)
5.1	管道杂散电流概述	(145)
5.2	直流杂散电流对埋地金属管道的腐蚀	(149)
5.3	管道直流杂散电流干扰的调查与测定	(151)
5.4	管道直流杂散电流干扰的排除	(158)
5.5	管道交流杂散电流干扰的调查与测定	(165)
5.6	管道交流杂散电流干扰的排除	(169)
5.7	管道交直流排流保护管理与应用实例	(175)
	参考文献	(178)
第6章	多种方法综合运用控制管道内壁腐蚀	(179)
6.1	地下管道内壁腐蚀检测	(179)
6.2	防腐层涂敷法控制管道内壁腐蚀	(189)
6.3	缓蚀剂法控制管道内壁腐蚀	(195)
6.4	加药杀菌法控制管道内壁腐蚀	(200)
6.5	脱硫法控制管道内壁腐蚀	(205)
6.6	干燥法控制管道内壁腐蚀	(208)
6.7	清管清洗与吹扫法控制管道内壁腐蚀	(213)
6.8	阴极保护法控制管道内壁腐蚀	(219)
	参考文献	(223)
第7章	地下管道腐蚀控制措施评价	(224)
7.1	管道防腐层质量检测与评价	(224)
7.2	管道阴极保护效果评价	(227)
7.3	管道排流措施评价	(230)
7.4	管体腐蚀损伤评价	(234)
7.5	管道腐蚀预测与评价	(237)
7.6	管道完整性与剩余寿命评价	(243)
	参考文献	(246)
第8章	地下管道漏损检测与控制	(247)
8.1	地下管道泄漏检测的意义	(247)
8.2	地下管道位置、深度探测	(249)
8.3	输油管道漏损检测与控制	(257)
8.4	输气管道漏损检测与控制	(272)
8.5	输水管道漏损检测与控制	(276)
8.6	管道阴极保护电流漏损检测与控制	(282)
	参考文献	(285)

第 9 章 地下管道堵漏与抢维修 (286)

9.1 管道泄漏封堵 (286)

9.2 管道抢维修 (293)

9.3 管道防腐层补口与补伤 (303)

9.4 泄漏油品的回收处理 (308)

参考文献 (314)

第1章 管道腐蚀与漏损控制概述

1.1 管道运输的意义与发展趋势

作为国民经济五大运输方式之一的管道运输,近年来迅速发展,随着西气东输二线、俄气南供、陕京复线、忠武线、兰成渝成品油管线、西南成品油管线、甬沪宁成品油管线、冀鲁宁管线、仪长管线等重大工程的实施,我国油气管道干线联网的雏形已经形成。管道运输在国民经济运输中的比重,是衡量一个国家文明发达程度的重要标志。

管道运输是一种大规模的石油和天然气的输送方式。管道运输的特点是经济、安全和不间断。由于管道运输的有效性,管道不只是用来输送石油和天然气,目前,它还作为煤和其他固体物质的重要输送手段。管道与铁路、公路、水路和航空并列为现代五大交通运输方式。

管道运输具有悠久的历史。世界上管道运输最早的文字记录可追溯到我国公元前的秦汉时期,当时我国四川省就开始用竹管输送卤水,随后又用于输送天然气。

然而,真正的工业性管道输送始于19世纪早期。继1806年在英国伦敦安装了第一条铅制管道和1825年在美国的宾西法尼亚州敷设了第一条输气管道之后,1843年铸铁管开始用于天然气管道。在之后的近半个世纪内,管道输送经历了一个缓慢的发展时期。在这一时期,管道通常采用铸铁管和丝扣连接。

20世纪20年代焊接方法在管道上的应用,开创了管道运输史上崭新的一页。自1925年在美国建成第一条焊接天然气管道之后,管道的直径和管道长度都在不断扩大,许多地区的管道网络初具规模,并初步具备了向近海和极地延伸的能力。

然而,真正具有现代规模的长距离管道建设开始于第二次世界大战期间。当时,沿海油轮交通被摧毁,由于战争的刺激,美国由政府投建了两条从西南至东海岸的长距离管道,一条是管径610mm、全长2011km的原油管道,另一条是管径508mm、全长2365km的成品油管道。战后管道工业继续得到蓬勃发展,引人注目的是加拿大管线网的建立和从波斯湾至地中海的泛阿拉伯管道的建立,其中标志性工程包括1958年加拿大Alberta至Onario的3000km的天然气长输管道和1967年伊朗至阿塞拜疆的跨国天然气长输管道。20世纪70年代以后,由于一些边远地区大型油、气田的相继发现,长输管道进入了一个新的建设高潮,期间世界上每年用于管道建设工程的投资大都在100亿美元以上。

自20世纪90年代至今,由于一些超大型油、气田的相继发现,使世界管道工业进入了一个新的发展时期。在这一时期,以高新科学技术为引领,新理念(如管道的极限状态设计和基于应变的设计方法等)、新工艺(如管道的高压输送和富气输送等)和新材料(如超高强度管线钢和玻璃纤维复合管等)不断涌现。以高压、大管径和面对恶劣环境为特征的管道工业与以微合金化、超纯净冶炼和现代控轧控冷技术为特征的冶金工业相互促进,共同发展,把管道工业推向了一个新的发展时期。

管道工业发展的巨大动力来源于其他工业和社会日益增长的能源需要。自20世纪70年

代以来,世界的能源需求呈现一个稳定的增长趋势。按此估算,未来 20 年世界范围内石油和天然气的需求将分别增长 40% 和 60% 以上。因此,世界范围内的管道工业将出现一个蓬勃发展的态势。据 Douglas-Westwood 资料预计,2011~2015 年世界范围内管道建设的工程投资每年近 400 亿美元,规划和在建管道超过 $20 \times 10^4 \text{ km}$,管道总长度比前 5 年增加 11%,其中 68% 以上为天然气管道。目前,全世界管道的总长度已超过 $280 \times 10^4 \text{ km}$,并以每年 $5 \times 10^4 \text{ km}$ 左右的速度增长。

我国近代管道建设开始于 1949 年。1958 年建成了第一条长输原油管道——新疆克拉玛依至独山子管道,管径 168mm,压力 8.5MPa,全长 147km。1966 年建成了第一条长输天然气管道——四川威远至内江管道,管径 529mm,压力 4.0MPa,全长 96.5km。20 世纪 60 年代至 80 年代期间,由于以大庆油田和四川气田为代表的油、气田的开发,我国的管道工业得到了较快发展。

20 世纪 90 年代初,中国西部的油气藏获得重大发现,由此推动了我国管道工业的快速发展。以西气东输管道和西气东输二线管道为代表的长距离管道建设,标志着我国管道建设进入了一个新的发展时期。西气东输二线管道以高强度 X80 为管材,管径 1219mm,压力 12MPa,主干线全长 4895km,已跻身于世界先进管道的行列。目前,我国已初步形成横跨东西、纵贯南北、覆盖全国、连通海外的能源管网。2010 年底的统计资料显示,我国已建成原油管道 $1.9 \times 10^4 \text{ km}$,天然气管道 $3.3 \times 10^4 \text{ km}$,成品油管道 $1.6 \times 10^4 \text{ km}$,油、气管道的总里程已达 $6.8 \times 10^4 \text{ km}$,2020 年有望达到 $20 \times 10^4 \text{ km}$ 。同时,与我国的能源需求和先进国家的管道水平相比,我国管道建设还有巨大的需求和潜力。近期和未来,我国管道工业仍有稳定的发展。

1.2 管道腐蚀与漏损控制的意义

1.2.1 腐蚀的危害与管道腐蚀现状

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. 腐蚀的危害

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,则约有 10% 的钢铁将由于腐蚀而一去不复返。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、中和剂等;进行电化学保护、监测试验费用等。

美、英、日等经济发达国家统计表明,因腐蚀造成的经济损失,其数值约占国民生产总值的 4%,其中的 1/4 可通过现有腐蚀控制技术予以避免。最近美国公布的涉及 26 个行业腐蚀调查结果,平均每年直接经济损失高达 2760 亿美元。

我国每年因腐蚀造成的损失,估计约为 4000 亿人民币,损耗钢材 1500 多万吨。其中石油石化行业是腐蚀的重灾户,其腐蚀造成的损失约占行业总产值的 6%,每年损失约 700 亿人民币。这些惊人的数字说明了腐蚀造成的损失之大。

随着我国经济的高速发展,石油天然气的需求与日俱增,覆盖全国的原油、成品油和天然气干线和管网建设步伐加快;为应对国家能源安全的要求,商品储备油库建设方兴未艾。随着石油石化行业油气田生产装置、长输油气管道、油气库等资产规模越来越大,因腐蚀问题造成的危害必然也会越来越大,腐蚀问题的严重性必须引起我们高度重视。

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。爆炸是由一个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1965年3月4日,美国Louisiana州输气管线因应力腐蚀破裂而失火,造成17人死亡;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;1989年前苏联的西伯利亚地区,一条与铁路并行的天然气管道因土壤腐蚀开裂而泄漏,天然气云被途经的两列对开列车的电火花引燃爆炸,造成600余人死亡和数千公顷原始森林被毁;2013年11月22日,东黄输油管道因腐蚀而导致的原油泄漏引发市政管道爆炸,造成62人死亡、136人受伤,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1500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。

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。例如,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 N_2O_4 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 N_2O_4 是不纯的,含有 NO ,而模拟实际使用的 N_2O_4 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。

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。

2. 油气管道的腐蚀现状

1865 年美国建成世界第一条原油管道 $\phi 50\text{mm} \times 9.65\text{km}$,大规模发展期为“二战”后,1948~1998 年建成 $80.2 \times 10^4\text{km}$ 。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,往往会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。

1975 年挪威艾柯基斯克油田阿尔法平台 APIX52 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,立管就被腐蚀得薄如纸张,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%。

目前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 年左右即发生腐蚀断裂,造成内部堵塞,压力下降,产量下降。含硫输气管线因应力腐蚀沿焊缝开裂而失效。

胜利油田目前已进入高含水开发期,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 1~7mm/a,应力作用下的点蚀速度为

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。

1.2.2 管道泄漏的主要危害

管道泄漏造成的危害是巨大的，主要有下面几个方面。

1. 油气物料和能量损失

泄漏首先流失了有用油气物料和能量，这是不言而喻的。泄漏增加了油气物料消耗，使企业成本上升，效益下降。价格昂贵的物质泄漏所造成的经济损失是显而易见的，而像水、蒸汽这些便宜的物质则容易被人忽视，但是积累起来却是惊人的。据建设部 1996 年统计，我国城市供水损失的 60% 以上为管网漏失，损失惊人。2012 年供水年鉴统计，全国平均漏损率为 16.2%。

泄漏还会降低生产装置和机器设备的产出力率和运转率，严重的泄漏还会导致生产无法正常运行，装置被迫停车抢修，造成更为严重的经济损失。如今现代化的炼油联合生产装置停产 1 天将损失百万元以上。开停车不仅经济损失大，而且对装置本身的损坏也大，发生事故的可能性增大。

2. 引发事故灾害

油气泄漏是导致石油石化企业发生火灾、爆炸事故的主要原因。一是因为生产物料几乎都是易燃易爆物质；二是空气无处不在；三是由于生产工艺、安装、检修等过程的需要，离不开火源。因此，在生产过程中，一旦物料泄漏到周围大气中，或由于负压操作、系统串气，空气窜入生产装置内，都极有可能发生着火、爆炸、中毒等事故，造成厂毁人亡。如炼油厂减压塔渣油温度高达 370℃，一旦泄漏就极易自燃；减压塔内为负压操作，若空气漏入塔内，与高温油气混合极易发生爆炸，后果不堪设想。

3. 环境污染

泄漏使生产环境恶化，是造成环境污染的重要根源。泄漏到环境中的物质一般难以回收，严重污染了空气、水以及土壤。如很多化工厂区气味难闻，烟雾弥漫，对环境造成严重污染，严重危害了职工的身体健康。油井、污水系统的泄漏和油罐伴生气挥发就是油田的主要污染源。溢油已成为水体特别是海洋的最大的一个污染源，被称为海洋的“超级杀手”。据统计，近 30 年来，近海油井事故泄漏达 $100 \times 10^4 \text{t}$ 。泄漏进海洋中的石油对生态环境和海洋生物造成极大的威胁。人们永远也不应该忘记电视屏幕上海豹艰难地浮上布满石油的海面换气的镜头。盖有石油的海水严重缺氧，使海洋生物窒息死亡。海鸟的羽毛沾上石油后，就再也飞不起来，最后冻饿而死。在石油污染的环境中，鱼类产下的卵不能孵化，即使孵化成鱼也会很快夭折。

天然气管道泄漏事故的后果基本上是急性危害。若形成的天然气云没有遇到火源，则随着气云逐渐扩散，浓度降低，危害性下降；若遇到火源，发生火灾爆炸，人员伤亡及财产损失巨大。

1.2.3 泄漏事故实例

据日本对石化联合企业灾害事故统计的 768 起事故中，由泄漏引起的多达 332 起，占事故总数的 42%。产生泄漏的部位最多的是配管，包括阀门和法兰，约 137 起，占泄漏总数的 41%。

1989 年 6 月，前苏联乌拉尔山隧道附近由于对天然气管道维护不当，造成天然气泄漏，

随后引起大爆炸，烧毁了两列铁路列车，死伤 800 多人，成为震惊世界的灾难性事故。

1999 年 2 月 9 日，Colonial 管道公司运营的成品油管道在位于田纳西州(Tennessee)东部的诺克斯维尔发生了一起破裂溢油事故，泄漏了 1785t(2027m³)的高硫燃料柴油，财产损失达 700 万美元。

1999 年 6 月 10 日在华盛顿州以及 2000 年 8 月 9 日在新墨西哥州发生的两起油气管道事故，导致 15 人死亡，财产及其他损失合计达 4600 万美元。前者造成向 Whatcom 河泄漏 763t 汽油和 3 人死亡，为此 Olympic 管道公司被华盛顿州和美国运输部罚款 300 万美元。而后者则造成 12 人死亡，爆炸后留下长达 26.2m 的大坑。Eipaso 天然气管道公司由于违反安全规定而遭受 252 万美元的处罚。两家公司及其 3 名雇员受到刑事起诉。

据了解，目前美国每年要花费 7 亿美元用于输气管道的腐蚀控制上，而这些支出都被均摊到了气价中。不仅给国家带来了损失，同时也增加了普通百姓的负担。表 1-1 为美国 2001 年油气管道因腐蚀造成的事故及资产损失情况。

表 1-1 2001 年美国气、液管道因腐蚀造成的事故及资产损失统计

事故率及损失	危险液体管道	输气管道
腐蚀导致事故率/%	28.9	17.85
内腐蚀导致事故率/%	12.5	9.52
外腐蚀导致事故率/%	14.06	8.33
非典型腐蚀导致事故率/%	2.34	—
造成资产损失金额/万美元	643.62	496.255
占管道事故损失总金额/%	25.17	21.71

俄罗斯干线管道运输的事故率也居高不下，例如 2012 年干线管道运输发生的事故为 43 起。其中，9 起为死亡事故(比 2001 年多 1 起)，3 起为成品油管道死亡事故。为此，成品油管道运输股份公司完成了经俄联邦矿山和工业监督局同意的提高干线成品油管道运行可靠性的措施计划。仅用于开发技术诊断设备的资金就达 5971 万卢布，相当于 2001 年的 279%。

近年来，我国西安发生了天然气泄漏事故，大庆油田原油储罐泄漏污染黑龙江流域事故，渤海浅海管道不法分子盗油引起管道泄漏污染渤海海水事故，青岛黄岛至潍坊的输油管道泄漏爆炸引起的重大事故等。其中 2013 年青岛黄岛油库至潍坊输油管道泄漏引发市政管道爆炸，死亡人数达 62 人，136 人受伤住院治疗，污染环境、财产损失巨大。

1.3 地下管道外腐蚀环境分析

影响管道腐蚀速度的因数很多，本节主要讨论土壤腐蚀性、杂散电流腐蚀性、细菌腐蚀性、大气腐蚀性。

1.3.1 地下管道土壤腐蚀性分析

1. 影响土壤腐蚀的因素

影响土壤腐蚀的因素很多，其中主要有土壤的导电性、酸碱性、溶解盐的类型及土壤微生物、杂散电流、气候条件等。下面简单介绍对土壤腐蚀的影响较大的几个因素。

1) 土壤的导电性

一般来说,对于宏观腐蚀电池起主导作用的地下腐蚀,特别是阴极与阳极相距较远时,为电阻(欧姆)控制,导电性的好坏直接关系到腐蚀速度。此时,导电性强,腐蚀速度大,导电性差,腐蚀速度低。但土壤导电性对微电池腐蚀影响不大。

土壤的导电性主要与土壤含盐量、土壤组成、温度、含水量等因素有关。含盐量增加、细黏粒土、高水含量及温度升高等使土壤的导电性提高。

2) 土壤含气量

通常金属在土壤中的腐蚀,阴极主要是氧去极化反应:



氧的来源主要是空气的渗透,因此,土壤的透气性好坏直接与土壤的空隙度、松紧度、土粒结构有密切的关系,特别是大小空隙比例显著地影响土壤的透气性能。在干燥的沙土中,由于气体容易渗透,所以含氧量多;在潮湿而致密的土壤中,气体传输比较困难,含氧量很少。在不同的土壤中,含氧量相差可达几百倍。

土壤中的含气量是通过改变电化学过程进度,从而影响土壤腐蚀速度的。

3) 土壤 pH 值

大部分土壤水的抽取液,其 pH 值为 6.5~7.5,即呈中性。但也有 pH 值为 7.5~9.5 的盐碱土,例如新疆、内蒙古有的土壤 pH 值高达 9~10,还有 pH 值为 3~6 的酸性土,如广东南部有的土壤 pH 值低到 3.6~3.8。就全国而言, pH 值为中性土壤的面积还不到全国面积的 1/3。

金属在酸性较强的土壤中,腐蚀性比较强。中性、碱性土壤对金属的腐蚀影响不大。由于土壤具有较强的缓冲能力,即使在 pH 值为中性的土壤中,有的土壤腐蚀也较强,这可能与土壤中的总酸度有关。总酸度是指单位质量的土壤中吸附氢离子的总量,它反映土壤中无机酸性物质及有机酸性物质的综合效应。

4) 土壤盐分

土壤中的盐分对材料腐蚀的影响,从电化学角度来讲,除了对土壤腐蚀介质的导电过程起作用外,还参与电化学反应,从而对土壤腐蚀性产生影响。土壤中可溶性盐的含量一般在 2% 以内。土壤含盐量愈高,土壤导电性愈强,土壤腐蚀性愈强。含盐量高,氧的溶解度下降,减弱了腐蚀的阴极过程。

土壤中的阴离子对金属的腐蚀影响很大,因为阴离子对土壤腐蚀电化学过程有直接的影响, Cl^- 对金属材料的钝性破坏很大,促进土壤腐蚀的阳极过程,并能穿透金属钝化层,与钢铁反应生成可溶性腐蚀产物,所以土壤中 Cl^- 含量愈高,土壤腐蚀性愈强。

土壤中阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 等主要起导电作用,对土壤腐蚀性影响不大。而 Ca^{2+} 比较特殊,它在中、碱性土壤中,尤其是在含有丰富碳酸盐的土壤中,能形成不溶性碳酸钙,从而阻止电化学阳极过程,降低土壤腐蚀性。

5) 土壤含水量

水分是使土壤成为电解质,造成电化学腐蚀的先决条件。如果土壤含水量极低,土壤腐蚀受化学反应控制。随着含水量的增加,回路电阻减小,腐蚀性增加,直到某一临界值,土壤中可溶性盐全部溶解,回路电阻达到最小;进一步提高含水量,土壤胶粒膨胀,孔隙度缩小,透气能力下降,氧的去极化作用减慢,土壤腐蚀性降低。

土壤的含水量不仅依赖于降水量,而且还取决于土壤保持水分的能力,例如蒸发和渗漏等。土壤含水量不是固定不变的,它是一个时间函数,并受季节的影响。一般来说,含水量交

替变化也会使土壤腐蚀性增强。可见土壤含水量对土壤腐蚀性影响是很复杂的，也很重要。

2. 土壤腐蚀性评价方法

1) 土壤电阻率法

从管道外部推断土壤腐蚀性主要是以测试土壤电阻值为主、其他一些因素为辅的方法来推断腐蚀速率，如表 1-2 所示。

表 1-2 裸管的腐蚀速率与土壤电阻率的关系

电阻率/(Ω·cm)	水类型	腐蚀性	腐蚀速率/(mm/a)
<100	海水盐水	极强	1.0
100~1000	海底水	强	0.5
1000~5000	轻度含盐水	中等	0.2
5000~20000	淡水河底水	轻微	0.1
20000~50000		轻微	0.05
>50000			≤0.05

测试方法：测试从地表面至深度为 a 的平均土壤电阻率。

使用仪表：接地电阻测试仪。

技术要求：

- (1) 在被测地区沿直线插入地下 4 根彼此相距为 a 的接地棒，铁棒的插入深度不超过 a 的 $1/20$ 。
- (2) 四根探针(即铁棒)分别与仪器相连接，摇动发电机(按测量接地电阻的方法摇动发电机)，读出仪表指示的电阻值 R 。
- (3) 计算方法：

$$\rho=2\pi aR$$

式中 ρ ——被测区的土壤电阻率， $\Omega\cdot\text{m}$ ；

a ——探针与探针间的距离， m ；

R ——接地电阻测试仪的读数， Ω 。

- (4) ZC-8 接地电阻测量仪的使用接线如图 1-1 所示。

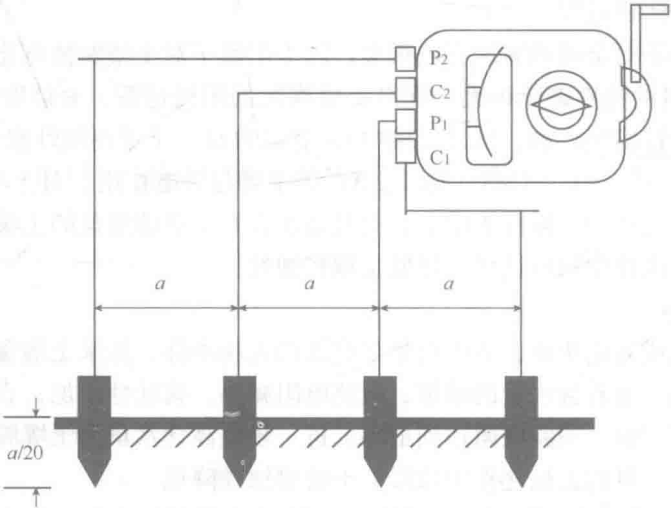


图 1-1 土壤电阻率测量