

DIXIA GUANDAO FUSHI

YU FANGHU JISHU

地下管道腐蚀 与防护技术

冯拉俊 沈文宁 翟哲 李善建 编著



化学工业出版社

DIXIA GUANDAO FUSHI
YU FANGHU JISHU

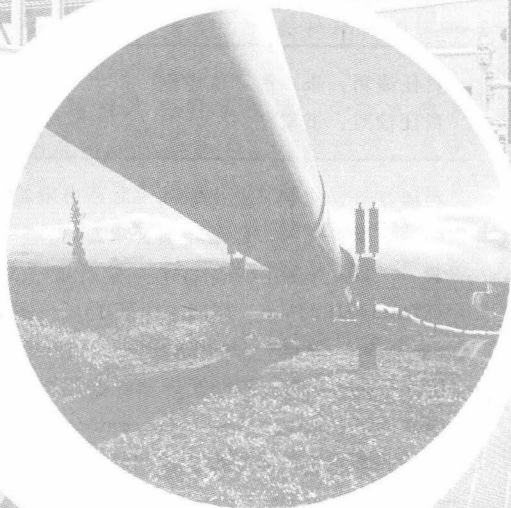
地下管道腐蚀 与防护技术

冯拉俊 沈文宁 翟哲 李善建 编著



化学工业出版社

· 北京 ·



本书系统阐述了地下管道的腐蚀现状、土壤性质及土壤腐蚀评价方法、杂散电流腐蚀、表面防腐技术、电化学保护和其他防护方法以及地下管道的检测与维护等理论与技术，特别是对土壤的腐蚀评价、杂散电流腐蚀、管道内涂层的制备、新型添加稀土牺牲阳极、管道内缝隙腐蚀防护、地下管道的腐蚀检测与维护等进行了重点论述。本书还结合大量工程实践对已运行的石油管道腐蚀及防护效果进行了全面分析，给出了完善的整改方案，对新的研究成果和发展趋势也进行了综述。

本书涉及多学科领域，内容丰富，知识面广，可作为石油、化工、冶金、制药、电力等行业相关专业高校本科和研究生教材或教学参考书使用，也可供广大从事腐蚀防护的市政人员以及地下管道设计、施工、维护人员和电力设计科研人员、工程技术人员等参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地下管道腐蚀与防护技术/冯拉俊等编著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-122-33016-1

I. ①地… II. ①冯… III. ①地下管道-防腐
IV. ①TU990. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 214063 号

责任编辑: 朱 彤 仇志刚
责任校对: 王素芹

文字编辑: 向 东
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 356 千字 2019 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

管道和管线是国民经济建设、人们生活的重要基础设施，是保障供应的主要通道。随着我国经济的快速发展，管道和管线运输已广泛应用于石油、化工、冶金、制药、电力、能源等行业。近年来，我国地下输油管线、天然气输送管线、输水管线、热力管线、排污管线，甚至包括输煤管线、电力通信管线等高速发展，在推动经济发展、造福民生的同时，如果管理和使用不当，造成的事故也屡有发生。管道安全运行事关国家经济安全，事关人民群众生命安全与健康。

地下管道服役环境苛刻，造成的危害往往比人们预想的大得多，如早在1977年4月沙特阿拉伯东部阿卜凯克的油井管线就发生了腐蚀爆裂，油气泄漏发生大火，造成巨大损失。在我国，此类现象也时有发生，地下管线往往会出现多种腐蚀同时发生或交错发生的状况，使地下管线的腐蚀更加严重，即使对于采取防护措施的管线，仍会出现地下输气管线爆炸、输水管线爆裂、热力管线漏气等事故。这主要是由于地下管道的腐蚀比普通介质腐蚀机理复杂，防腐蚀难度大。例如，地下管道内壁受输送介质的腐蚀，而外壁受土壤腐蚀，输送介质性质差异大，土壤环境复杂；地下管道杂散电流又加速了腐蚀，甚至有些常规防护手段在杂散电流的干扰下成为加速腐蚀的措施；地下管道的使用年限一般较长，检测困难，很多腐蚀只有在事故后才被发现，甚至有些腐蚀规律人们至今还没有完全掌握，导致常规的腐蚀防护技术难以达到防护要求。因此，做好管线腐蚀防护，及时采取有力的预防控制措施，有助于保障管线安全平稳运行。

本书以编著者多年研究为基础，将近年来地下管道腐蚀与防护的研究成果及实践经验进行总结和整理，主要包括对影响地下管道腐蚀的因素、腐蚀机理进行系统分析；对地下管道的防护技术、检测技术进行补充和完善，特别是对土壤的性质及腐蚀评价进行了讨论；还专门对已经运行多年的石油输送管道腐蚀防护效果进行解析和探讨。本书还结合大量工程实践对已运行的石油输送管道腐蚀及防护效果进行了全面分析，给出了完善的整改方案，对新的研究成果和发展趋势也进行了综述，以满足更多读者的实际需要。

本书在编写时还针对管道特点及地下管道腐蚀机理、土壤性质及腐蚀评价、杂散电流腐蚀、管道表面防护、电化学防护、其他防护技术、腐蚀检测及防护维护等内容顺序编写，层次清楚，希望能为石油、化工、冶金、制药、电力、能源等行业从事管道风险研究、运行监管及相关从业人员提供依据和参考。本书在编写过程中，作者的研究生进行了资料整理，并对书中插图进行了绘制。本书还得到了西安理工大学材料科学与工程学院、陕西省腐蚀与防护重点实验室的支持，在此表示感谢。

鉴于地下管道腐蚀的复杂性，防护技术的多样性，实验室研究的局限性，工程实践资料的不全面性以及作者知识水平所限，书中疏漏与不当之处在所难免，敬请读者批评、指正。

目录



CONTENTS

第一章 地下管道腐蚀概述	001
第一节 地下管道基本概念.....	001
一、管道常用材料.....	001
二、管壁粗糙度.....	002
三、管子直径.....	003
四、管道长度与直径设计.....	005
第二节 地下管道的腐蚀.....	007
一、输水管道的腐蚀.....	007
二、污水管道的腐蚀.....	010
三、热力管道的腐蚀.....	011
四、石油管道的腐蚀.....	018
五、天然气输送管道的腐蚀.....	022
六、地下管道的土壤腐蚀.....	024
第三节 地下管道腐蚀分类.....	024
一、按腐蚀反应机理分类.....	024
二、按腐蚀形态分类.....	025
三、按腐蚀介质分类.....	027
四、地下管道外腐蚀分类.....	027
五、均匀腐蚀速率表示方法.....	028
参考文献.....	030
第二章 土壤性质及对地下管道的腐蚀影响	031
第一节 土壤性质及腐蚀评价.....	031
一、土壤的物理、化学性质.....	031
二、土壤理化分析.....	032
三、土壤腐蚀性评价方法.....	034
第二节 土壤性质对地下钢铁管道的腐蚀速率影响.....	039
一、土壤含水量对地下钢铁管道的腐蚀速率影响.....	039
二、土壤 pH 值对地下钢铁管道的腐蚀速率影响.....	039
三、土壤中 SO_4^{2-} 浓度对地下设备的腐蚀速率影响.....	040
四、土壤中 Cl^- 浓度对地下钢铁管道的腐蚀速率影响.....	041
五、总含盐量对土壤中钢铁管道的腐蚀速率影响.....	041

参考文献	042
第三章 地下管道杂散电流腐蚀	043
第一节 直流杂散电流腐蚀基本理论	043
一、产生直流杂散电流的干扰源	043
二、直流杂散电流产生原因	044
三、直流杂散电流腐蚀机理	046
四、杂散电流腐蚀的危害	047
五、直流杂散电流的调查	047
第二节 直流杂散电流的防护	050
一、干扰源侧的措施	050
二、被干扰侧的防护措施	051
三、排流保护的设计	053
第三节 交流杂散电流腐蚀理论	058
一、交流杂散电流产生的原因	058
二、交流腐蚀的特点	059
三、交流杂散电流腐蚀的影响因素	059
四、交流杂散电流腐蚀机理	060
五、交流杂散电流腐蚀的危害	062
六、国内外交流腐蚀研究现状	063
七、杂散交流电压对 Q235 钢电化学行为的影响	064
八、交流电流频率对 Q235 钢电化学行为的影响	068
参考文献	071
第四章 地下管道的表面防护	072
第一节 表面防护前处理	072
一、机械除锈	072
二、化学处理	073
三、火焰除锈	073
四、表面处理的标准	073
第二节 表面热浸镀	074
一、热浸镀的定义及基本原理	075
二、热浸镀的工艺	076
三、热浸镀的要求	077
四、合金成分对镀层质量的影响	077
五、多元合金热浸镀层对油田油管的防护	078
第三节 地下管道有机涂层防护	079
一、有机涂层概述	079
二、管道外涂覆有机涂层	082
三、管道内涂覆有机涂层	088
四、管道内涂耐磨防腐涂层	091
五、地下石油天然气输送管管外 3PE 防腐	098

第四节 管道的化学镀	103
一、化学镀的优缺点	103
二、化学镀原理	103
三、化学镀工艺	107
四、化学镀的质量检验	108
参考文献	109
第五章 地下管道的电化学保护	111
第一节 牺牲阳极阴极保护	111
一、土壤介质对牺牲阳极的要求	112
二、牺牲阳极的设计	113
三、牺牲阳极常见问题	116
四、地下管道用牺牲阳极材料研究	116
第二节 外加电流阴极保护	121
一、阴极保护设计	121
二、深井阳极及参比电极设计	131
三、阴极保护参数设定	133
第三节 地下管道外加电流阴极保护的研究及应用	135
一、埋地输油管道的外加电流阴极保护	135
二、克乌复线阴极保护现状与改进	141
参考文献	143
第六章 地下管道的其他防护方法	145
第一节 地下管道的选择	145
一、正确选用材料	145
二、结构设计中的腐蚀控制	146
三、实施合理的工艺设计	146
第二节 地下水管的水泥防腐	147
一、防腐原理	147
二、制备方法	148
三、质量标准	149
第三节 缓蚀剂防腐	150
一、缓蚀剂分类	150
二、缓蚀剂的作用机理	151
三、缓蚀剂防腐优缺点	153
四、清水管道的缓蚀剂防护	154
五、石油管道的缓蚀剂防护	158
第四节 缓蚀剂对石油管道的局部腐蚀防护	163
一、缓蚀剂对缝隙腐蚀的防护	163
二、缓蚀剂成膜速率	167
参考文献	173

第七章 地下管道的检测及维护	174
第一节 地下管道的腐蚀检测	174
一、地下管道腐蚀检测的主要内容	174
二、地下管道腐蚀检测的主要方法	177
第二节 地下钢质管道腐蚀防护评价	186
一、基于层次分析法的模糊综合评价	186
二、基于专家打分法的模糊综合评价	193
第三节 地下管道维护	194
一、管道垢层清理	194
二、外管道的防腐涂层修复	198
三、管道带压堵漏技术	204
四、管道内除垢防腐实例分析	207
参考文献	207

地下管道腐蚀概述

仅仅是几十年前，大多数农村人还挑水、做饭、洗衣，许多人还早晨倒马桶；即使生活在城市的人，能够使用液化气已是一项福利；许多化工厂、炼油厂采用油罐车拉油、运输石油产品；煤矿企业门前运煤车排长队，成为企业兴旺的标志。然而发展到今天，农村基本通了自来水，安装了下水道；城市用上了天然气；化工厂、炼油厂不再采用油罐车运输，而是采用了输油、输气管道；煤炭也被制成水煤浆输送到各大化工厂、发电厂。通过西气东输工程的建设，新疆的油气不仅通到北京，甚至输送到广州、上海等城市和地区。除此之外，还建设了中国和国外几个国家和地区之间的油气输送管网，使国外的油气直接输送到中国。这一切的一切，使国民经济建设的效率大大提高，人民的生活幸福指数倍增。然而输送管道越来越多，出现的问题也越来越多，特别是输送油气管线必须在城市地下铺设，一旦发生腐蚀破裂，将带来灾难性的事故。近年来，国内外油气管线破裂的事故时有发生，为此，减少地下管道的腐蚀、延长管道的使用寿命、减少灾难性事故的发生不仅是政府部门，而且是科技工作者必须面对的问题。要研究地下管道的防腐，首先必须了解地下管道的特征、腐蚀介质的特性以及腐蚀的类型。本章首先介绍地下管道的特征，然后介绍地下管道的腐蚀状况，为地下管道的防腐奠定基础。

第一节 地下管道基本概念

管道由于用途不同，制备的材料、加工工艺也是不同的。一般提及管道的特征参数是指材料、管径、厚度、粗糙度、长度、管件，更严格的还可分为无缝管、有缝管、螺旋管、压力管等。材料是管子的第一特征，它不仅关系到管子的使用寿命，而且关系到管子的耐压能力以及安装方式。管件是将管子连接构成管道的主要部件，涉及管子的连接、分叉、拐弯以及输送流体的控制。因此，它属于管道的一部分，一般管道都有相对应的管件。

一、管道常用材料

大多数金属材料、高分子材料、无机材料都可以加工成不同尺寸的管子，但为了通用性和互换性，没有特殊要求时，常用的地下管子有规范的尺寸和材料。常用的地下管道主要有以下五种。

1. 普通碳钢管

标准的碳钢管长度一般为 6m，为普通低碳钢材料，主要用于自来水管网、热力管道、煤

气的进户管网等。为了防止腐蚀，常在管子表面进行镀锌防护。

碳素钢是指含碳量小于 1.35%，并含有少量的硅、锰、镍等其他合金元素的铁碳合金。按钢中碳的质量分数分类，碳素钢可分为碳含量 $\leq 0.25\%$ 的低碳钢、碳含量在 0.25%~0.6%的中碳钢和碳含量大于 0.6%的高碳钢。合金元素中锰含量小于 0.8%，硅含量小于 0.5%，镍、铬含量小于 0.3%。碳素钢按杂质硫、磷的质量分数可分为：硫含量 $\leq 0.055\%$ 、磷含量 $\leq 0.045\%$ 的普通碳素钢，硫含量 $\leq 0.040\%$ 、磷含量 $\leq 0.040\%$ 的优质碳素钢，硫含量 $\leq 0.030\%$ 、磷含量 $\leq 0.035\%$ 的高级优质钢。

2. 地下水管

地下水管道主要分为供水管道和排水管道。目前市售地下供水管道系统中，采用灰口铸铁、球墨铸铁及不锈钢材质的管道占了我国供水管道的大部分。灰口铸铁是碳含量在 2.7%~4.0%之间的铸铁管道，可在高压下使用，并具有耐腐蚀、成本低等优点，但灰口铸铁也存在硬而脆的缺点，且质量大、施工难度较高。球墨铸铁是由灰口铸铁铁水经球化处理获得的，析出的石墨呈球状，具有较高的强度、韧性和塑性，已逐渐取代传统的灰口铸铁，但其价格较高。对于城市给水管道，在使用过程中为了保证水质，管道内部会使用水泥砂浆作衬里，外壁用沥青等防腐材料进行涂刷。

3. 输油管

目前，我国国内用于输送含硫原油的管线材质通常是 16Mn 钢，其化学成分为：碳含量 0.12%，硅含量 0.33%，硫含量 0.017%，锰含量 1.27%，磷含量 0.020%。16Mn 钢的屈服强度为 341MPa，拉伸强度为 490MPa，断裂伸长率为 293%。

4. 天然气输送管

由于早期天然气的输送动力仅靠天然气井口的压力，所以对输送管道的抗压要求不高，早期采用的管道为竹木管，后改为铸铁管。随着输送压力的逐渐提高，19 世纪 90 年代，天然气管道开始采用钢管。由于输送距离越来越长，以及世界对天然气需求量的日益增加，输送管道朝大口径、高压力方向发展。西气东输工程中主要使用的是我国试制的 X70 螺纹钢，管径为 1016mm，壁厚为 14.6~26.3mm，输送压力为 10MPa。X70 管线钢中碳含量 $\leq 0.16\%$ ，硅含量 $\leq 0.45\%$ ，锰含量 $\leq 1.70\%$ 。在西气东输二线工程中已经成功使用 X80 管线钢，其管径为 1219mm，壁厚为 22mm，输送压力为 12MPa。而对于更高级别的 X90、X100 管线钢和管线焊管仍处于实验研究阶段。2012 年，我国立项了“X90、X100 高强度管线钢（管）技术开发及应用”的专项课题，旨在“西气东输”三期工程中进行该级别管线的试验铺设。

5. 高分子管

高分子管材与传统的金属、水泥管道相比，具有质轻、耐腐蚀、热导率小、绝缘性能好、内部不易结垢、流动阻力小、易加工、施工安装和维修方便等优点。发达国家早在 20 世纪 30 年代就开始生产应用，目前已经广泛用于住宅建筑、市政工程、农业和工矿企业等各个领域。其中，硬聚氯乙烯（UPVC）管是各种高分子管道中消费量最大的品种，它可用于非压力管网，例如给水管道、市政排污管、工业下水管、电工穿线管等。聚乙烯（PE）管则主要用于给水管和燃气管。除此之外，无规共聚聚丙烯（PPR）管也被大量使用，主要用于冷、热水管道及工业上的腐蚀性气体、液体、固体粉末的工艺管和排放管。

二、管壁粗糙度

铺设管道按其材质的性质和加工情况，大致可分为光滑管与粗糙管。通常把玻璃管、黄铜管、塑料管等列为光滑管；把钢管和铸铁管等列为粗糙管。实际上，即使是采用同一材质管子铺设的管道，由于使用时间的长短与腐蚀、结垢的程度不同，管壁的粗糙度也会产生很大的差异。

管壁粗糙度可用绝对粗糙度与相对粗糙度来表示。绝对粗糙度是指壁面凸出部分的平均高度，以 ϵ 来表示。表 1-1 列出了某些工业管道的绝对粗糙度数值。在选取管壁的绝对粗糙度 ϵ 值时，必须考虑到流体对管壁的腐蚀性、流体中的固体杂质是否会黏附在壁面上以及使用情况等因素。相对粗糙度是指绝对粗糙度与管道直径的比值，即 ϵ/d 。

表 1-1 某些工业管道的绝对粗糙度数值

管道类别		绝对粗糙度/mm
金属管	无缝黄铜钢管、不锈钢管及铝管	0.01~0.05
	新的无缝钢管或镀锌铁管	0.1~0.2
	新的铸铁管	0.3
	具有轻度腐蚀的无缝钢管	0.2~0.3
	具有显著腐蚀的无缝钢管	0.5 以上
	旧的铸铁管	0.85 以上
非金属管	干净的玻璃管	0.0015~0.01
	橡皮软管	0.01~0.03
	木管	0.25~1.25
	陶土排水管	0.45~6.0
	很好整平的水泥管	0.33
	石棉水泥管	0.03~0.8

三、管子直径

管子直径的表示方法分为公称直径、平均直径、管子内径、管子外径乘壁厚等几种表示方法。

1. 水煤气管

水煤气管用于输水、输煤气等时，大多采用公称直径表示管子直径。公称直径既不是管子的内径，也不是管子的外径。它是管子内径的数字取整后的一种表示方法。这种表示方法工程上被长期采用，并一直延续下来，一般用 in (1in=0.0254m) 表示。例如，1"管子，其管子的外径为 33.5mm，厚度为 3.25mm，则内径为 27mm，内径接近 1"，因此人们称为 1"水管。水煤气管规格如表 1-2 所列。

表 1-2 水煤气管规格

公称直径		外径 mm	壁厚/mm	
mm	in		普通管	加厚管
6	1/8	10	2	2.5
8	1/4	13.5	2.25	2.75
10	3/8	17	2.25	2.75
* 15	1/2	21.25	2.75	3.25
* 20	3/4	26.75	2.75	3.5
25	1	33.5	3.25	4
* 32	5/4	42.25	3.25	4
* 40	3/2	48	3.5	4.25
50	2	60	3.5	4.5
* 70	5/2	75.5	3.75	4.5
* 80	3	88.5	4	4.75
* 100	4	114	4	5
125	5	140	4.5	5.5
150	6	165	4.5	5.5

注：1. YB 234《水、煤气输送管》适用于输送水、煤气及采暖系统和结构零件用的钢管。

2. “*” 为常规规格，目前 1/2"、3/4" 供应很少（符号 “” 表示 in）。

3. 依表面情况分镀锌的白铁管和 不镀锌的黑铁管；依是否带螺纹分带螺纹的锥形或圆柱形螺纹管与不带螺纹的光滑管；依壁厚分普通钢管、薄壁钢管和加厚钢管。

4. 无螺纹的黑铁管长度为 4~12m；带螺纹的黑铁管和白铁管长度为 4~9m。

2. 无缝钢管

无缝钢管大多采用外径乘壁厚的方法表示管子直径。例如， $\phi 108\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，表示管子的外径为 108mm，壁厚为 4mm；无缝钢管厚度变化较多，适用于不同的高压场合，因此必须给出管子的壁厚。普通热轧无缝钢管规格和常用冷轧无缝钢管规格如表 1-3、表 1-4 所列。

表 1-3 普通热轧无缝钢管规格

外径/mm	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm
32	2.5~8	140	4.5~36
38	2.5~8	152	4.5~36
45	2.5~10	159	4.5~36
57	3~(13)	168	5~(45)
60	3~14	180	5~(45)
63.5	3~14	194	5~(45)
68	3~16	203	6~50
70	3~16	219	6~50
73	3~(19)	245	(6.5)~50
76	3~(19)	273	(6.5)~50
83	3.5~(24)	299	(7.5)~75
89	3.5~(24)	325	8~75
95	3.5~(24)	377	9~75
102	3.5~28	426	9~75
108	4~28	480	9~75
114	4~28	530	9~75
121	4~30	560	9~75
127	4~32	600	9~75
133	4~32	630	9~75

注：1. 壁厚 (mm) 有 2.5、2.8、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、(6.5)、7、(7.5)、8、9、(9.5)、10、11、12、(13)、14、(15)、16、(17)、18、(19)、20、22、(24)、25、(26)、28、30、32、(34)、(35)、36、(38)、40、(42)、(45)、(48)、50、56、60、63、(65)、70、75。

2. 括号内的尺寸不推荐使用。

3. 钢管长度为 4~12.5m。

表 1-4 常用冷轧无缝钢管规格

外径/mm	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm
5	0.25~1.6	63	1.0~12
8	0.25~2.5	70	1.0~14
10	0.25~3.5	75	1.0~12
16	0.25~5.0	85	1.4~12
20	0.25~6.0	95	1.4~12
25	0.40~7.0	100	1.4~12
28	0.40~7.0	110	1.4~12
32	0.40~8.0	120	(1.5)~12
38	0.40~9.0	130	3.0~12
44.5	1.0~9.0	140	3.0~12
50	1.0~12.0	150	3.0~12
56	1.0~12.0		

注：1. 壁厚 (mm) 有 0.25、0.30、0.40、0.50、0.60、0.80、1.0、1.2、1.4、(1.5)、1.6、1.8、2.0、2.2、2.5、2.8、3.0、3.2、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10、12、(13)、14。

2. 钢管长度：壁厚 $\leq 1\text{mm}$ ，长度为 1.5~7m；壁厚 $> 1\text{mm}$ ，长度为 1.5~9m。

3. 铸铁管

铸铁管常用于城市下水管道，有些也用于低压供水管。铸铁管一般用管子内径表示管径，例如 $\phi_{\text{内}} 75\text{mm}$ ，也被称为公称直径为 75mm 的铸铁管。部分铸铁管规格如表 1-5 所列。

表 1-5 部分铸铁管规格

公称直径/mm	内径/mm	壁厚/mm	有效长度/mm
75	75	9	3000
100	100	9	3000
125	125	9	4000
150	151	9	4000
200	201.2	9.4	4000
250	252	9.8	4000
300	302.4	10.2	4000
(350)	352.8	10.6	4000
400	403.6	11	4000
450	453.8	11.5	4000
500	504	12	4000
600	604.8	13	4000
700	705.4	13.8	4000
800	806.4	14.8	4000
900	908	15.5	4000

注：括号内的尺寸不推荐使用。

4. 塑料管

塑料管是近些年发展起来的，为了与现有钢铁管相匹配，因此，一般的塑料管的管径没有特别说明，与钢铁管的规格是相同的，常采用无缝钢管的表示方法，即管子外径乘壁厚。

5. 管件

管件是管道的重要部分，管件包括活接头、变径接头、阀门、弯头、三通、四通、堵头、流量计等，它的管径一般与所连管道的直径相同时，才便于安装。即使管道材料与管件材料不同，但其连接部位的管径是相同的。例如，水煤气管道中使用的连接活接头，若水煤气管直径为4"，连接活接头也为4"，但4"活接头的内径和外径显然与主管道不同，但仍称为4"活接头，是指它可以把4"管子连接起来，方便工程施工和安装。

四、管道长度与直径设计

1. 管道长度设计

管道直径设计与管道的长度、管道的流量是密切相关的。一般来讲，工业生产的标准管子长度为6m，而管道是一节一节管子连接而成的。管道设计得长，不仅浪费材料，而且由于流体在管道内产生阻力，使同样管径的管道流速变小，达不到预期流量。因此，在管道设计时，应尽可能使管道长度变短；若管道长度变短，同样流量下管道的直径也可能变小。在化工设计中，为了节约钢材，化工设备中使用的列管一般以6m、3m、2m、1m的长度为宜，这样一根6m的管子截下部分也可以作为另一列使用。列管换热的长度如图1-1所示。

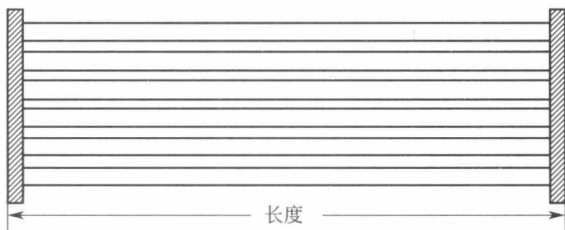


图 1-1 列管换热的长度

2. 经济管径设计

经济管径是指管道投资费用和管道内流体流动需要的动力费用均为最低时的管道直径。一般来讲，管道直径小，需用的钢材少，则投资低，但要完成一定的流体输送量时，管道直径小，流体在管内的流速高，高流速消耗的动力大，则日常用于动力的消耗费用高。两者之和为

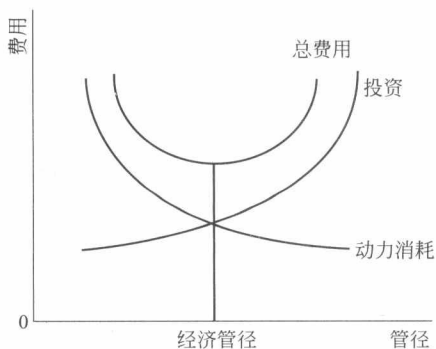


图 1-2 管径与费用关系

最低时的管径为经济管径，如图 1-2 所示。

经济管径取决于管道内的经济流速，根据物料守恒定律：

$$V = \frac{\pi}{4} d_{\text{内}}^2 u \quad (1-1)$$

式中， V 为体积流量； $d_{\text{内}}$ 为管子直径； u 为管内平均流速。

$$d_{\text{内}} = \sqrt{\frac{4V}{\pi u}} \quad (1-2)$$

根据经验，管道内经济流速的范围见表 1-6。

表 1-6 某些流体在管道内的经济流速的范围

液体的类别及情况	流速范围/(m/s)	液体的类别及情况	流速范围/(m/s)
自来水(3×10^5 Pa 左右)	1~1.5	一般气体(常压)	10~20
水及低黏度流体($1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ Pa)	1.5~3.0	鼓风机吸入管	10~15
高黏度液体	0.5~1.0	鼓风机排出管	15~20
工业供水(8×10^5 Pa 以下)	1.5~3.0	离心泵吸入管(水一类液体)	1.5~2.0
锅炉供水(8×10^5 Pa 以下)	>3.0	离心泵排出管(水一类液体)	2.5~3.0
饱和蒸汽	20~40	往复泵吸入管(水一类液体)	0.75~1.0
过热蒸汽	30~50	往复泵排出管(水一类液体)	1.0~2.0
蛇管、螺旋管内的冷却水	<1.0	液体自流速度(冷凝水等)	0.5~1.0
低压空气	12~15	真空操作下的气体流速	<10
高压空气	15~25		

经济管道的计算方法如下所示。

【例】 某输水管道要求输水 50000 kg/h，水的密度取 1000 kg/m³，试选一合适的输水管。

解 根据物料守恒定律

$$\omega = V\rho$$

式中， ω 为质量流量，kg/h； V 为体积流量，m³/h； ρ 为密度。

计算出体积流量

$$V = \frac{50000}{1000 \times 3600} = 0.0139 (\text{m}^3/\text{s})$$

又因为

$$V = \frac{\pi}{4} d_{\text{内}}^2 u$$

所以

$$d_{\text{内}} = \sqrt{\frac{4V}{\pi u}}$$

由表 (1-6) 可知，水的经济流速为 1.5~3.0 m/s，因此选择供水的流速为 2 m/s，

$$d_{\text{内}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0139}{3.14 \times 2}} = 0.094 (\text{m})$$

查水煤气管规格表，所选的管径与 $\phi 108 \text{mm} \times 4 \text{mm}$ 相近，则选用 $\phi 108 \text{mm} \times 4 \text{mm}$ 。

由于所选管径与计算的管径不相同，因此必须重新核定管内的流速，只有管内流速在经济流速范围内，所选的管径才是经济管径。选 $\phi 108 \text{mm} \times 4 \text{mm}$ 无缝钢管，管内径为 $d_{\text{内}} = 108 - 2 \times 4 = 100 (\text{mm})$ ，则

$$u = \frac{0.0139}{\frac{\pi}{4} \times 0.1^2} = 1.77 (\text{m/s})$$

管内流速在 1.5~3m/s 的经济流速范围内, 因此, 所选管径为经济管径。

第二节 地下管道的腐蚀

地下管道腐蚀的最大特点是管道内、外同时腐蚀。一般提到的地下管道腐蚀是指管道内、外腐蚀最严重的一侧腐蚀, 腐蚀较轻的一侧腐蚀往往放在次要位置。例如自来水管道的腐蚀, 由于自来水的 pH 值在 7 附近, 视为中性, 自来水对管道的腐蚀较轻, 因此, 自来水管道的腐蚀主要以管道外的土壤腐蚀为主; 而对于采油管道, 管道内的 CO_2 、 H_2S 、 NaCl 等腐蚀远高于管道外的土壤腐蚀, 这时一般强调管道内腐蚀, 而管道外腐蚀与自来水管管道外腐蚀相同。对于地下管道的腐蚀, 应该同时考虑管道内、外的腐蚀。管道外的土壤腐蚀将在第二章土壤性质对地下钢铁管道的腐蚀速率影响一节中专门讨论, 本节主要讨论管道内介质对地下管道的腐蚀影响。

一、输水管道的腐蚀

1. 清水管道的腐蚀

我国城市供水管道中金属管道占 90%, 无论是铸铁还是碳钢管道, 长期运行均会产生腐蚀和结垢。随着使用年限的增加, 金属管道内的腐蚀越来越严重, 腐蚀、结垢后的管道常会引起“红水”“黑水”等二次污染的现象, 给人们的日常生活带来安全隐患。此外, 管道的腐蚀和管垢的生成还会降低管道的有效过水截面, 增加水头损失, 提高供水成本; 同时会使水质恶化, 水内微生物含量增加, 从而进一步恶化水质并加速管网的腐蚀, 服务年限超过 60 年的 100mm 铸铁管道有效过水截面已不到初始时的 30%。

对于给水管管道内铁的腐蚀, 金属铁作为阳极, 发生氧化反应, 释放电子, 生成亚铁离子:



电子受体可以是溶解氧、氯或氢离子。大多数清水管道中的水呈中性, 当溶解氧存在时, 氧气的还原反应作为主要的阴极反应:



饮用水中的消毒剂 HOCl 和 NH_2Cl 也可以作为电子受体参与阴极反应, 但通常情况下, 这些物质的浓度远低于溶解氧的浓度。

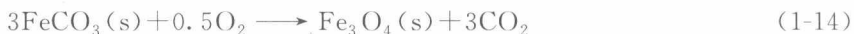
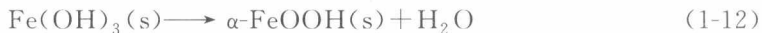


在无氧或无消毒剂的情况下, 析氢反应作为阴极反应:



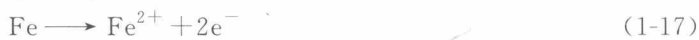
从热力学可行性分析, 此反应只有在水的 pH 值小于 4 时才会发生。但也有研究表明, 在缺氧和中性溶液中, 伴随着金属氧化, 有氢气生成。电化学反应生成的亚铁离子溶解释放到水中, 或进一步发生化学反应沉淀在金属表面形成管垢, 部分反应式如下所示:



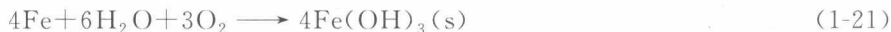


一方面,铁的腐蚀产物沉淀导致管垢的形成,降低铁腐蚀速率;另一方面,铁的腐蚀产物也会溶解到水中,加速铁腐蚀。此外,给水管网中还会发生微生物腐蚀,导致腐蚀的两类微生物分别为好氧类细菌(如铁细菌)和厌氧类细菌(如硫酸盐还原菌)。由于给水管道内的特殊环境,这两类细菌均存在并得以繁殖,其代谢过程与电化学腐蚀过程同时发生,这些微生物可直接参与并干扰电化学腐蚀过程,从而导致了微生物腐蚀的发生。虽然水体消毒剂 HOCl 和 NH_2Cl 能够杀死铁细菌和硫细菌等微生物,但是微生物腐蚀仍然会在管网末端和死角盲区发生。

铁细菌会将低价铁氧化为高价铁,并排出大量沉积物积累在管壁上,促进铁的阳极溶解过程,有时会堵塞管道;铁细菌又会在管道内壁附着生长形成结瘤,导致氧浓差局部腐蚀。铁细菌可分为自养型、异养型以及兼性型三种。存在于给水管道中的铁细菌多为自养型铁细菌,这种铁细菌利用自身新陈代谢作用将亚铁离子氧化为铁离子时有催化作用,促进了阳极去极化作用。同时,反应中生成的铁离子与体系中的氢氧根离子作用,生成大量氢氧化铁;这些氢氧化铁沉积物积累在管壁上,促进铁的阳极溶解过程,有时会堵塞管道。除此之外,生成的沉积物比较疏松,这些疏松的微孔使金属管道形成小阳极点,它与水中高浓度氧存在的大范围阴极区形成原电池,发生局部点蚀。其反应式如下:



总反应式为:



硫酸盐还原菌是一种厌氧菌,革兰氏阴性,在无氧条件下,促进了阴极去极化过程,即将硫酸盐还原成硫化物,加快管道的腐蚀结垢速率。硫酸盐还原菌造成的腐蚀常为点蚀,腐蚀产物为黑色硫化物。机理反应式如下:



由于微生物腐蚀的机理是一个复杂过程,这个过程涉及化学学科、腐蚀学科、生命学科等,所以目前对于金属的微生物腐蚀机理尚不明确,虽可以用阴极去极化理论、浓差电池理论、沉积物下的酸腐蚀理论、阳极区固定理论、局部电池作用理论、代谢产物腐蚀理论等来解释微生物腐蚀,但都是对特定条件的分析,因此本节不再讨论。

2. 影响清水管道腐蚀的因素

清水管道的腐蚀过程受很多因素影响,如管道的材质、水力条件、pH值、溶解氧浓度、碱度、温度、硫酸盐浓度、氯离子浓度、消毒剂种类及含量、天然有机物含量等。

(1) pH 值

pH 值是管网中铁的释放和管网腐蚀的重要影响因素,我国 2006 年颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定,出厂水的 pH 值应不小于 6.5 且不大于 8.5。由于管网中的二次污染,给水管道中的 pH 值可能略大于或略小于此值。有研究表明,低 pH 值可能增加腐蚀速率以及氧化剂浓度,高 pH 值可能有利于形成金属表面钝化膜,控制管网腐蚀及铁的释放。pH 值变化还会影响铁的各种氧化物和氢氧化物形成,进而影响铁的腐蚀速率和铁的释放。硫酸盐还原菌在 pH 值为 5.5~9.0 的环境下可以生存,最佳 pH 值为 7.0~7.5;铁细菌在 pH 值为 5.4~8.0 之间可以生存,最佳 pH 值为 5.4~7.2。调节清水 pH 值是控制管网腐蚀、微生物含量和铁的释放较为简便且有效的方法之一。较适宜的 pH 值应控制在 7.5~8.5 之间。

(2) 碱度

增加水体的碱度可以提高其缓冲能力,进而能够辅助控制水体 pH 值变化,并影响 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的存在。 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的浓度会影响很多铁腐蚀反应,如形成碳酸层的保护膜和由 FeCO_3 和 CaCO_3 组成的钝化膜。提高碱度通常还会降低管道失重和腐蚀速率,也会增加水中的离子强度和电导率,提高水体缓冲能力,降低“红水”现象的出现概率。

(3) 溶解氧浓度

溶解氧是金属铁腐蚀的主要电子受体。因此,溶解氧浓度对管网腐蚀具有重要的影响作用,增加溶解氧浓度可能会加快铁的腐蚀速率。也有研究发现,钢管在水流静止时的腐蚀速率是其在水流流动时的 13 倍左右,这主要是由于流动水使溶解氧在管道表面形成钝化层,溶解氧浓度较高时会氧化二价铁,进而形成具有更强保护性能的氧化膜,如 Fe_3O_4 和 FeOOH 等物质。此外,溶解氧还会影响水体中缓冲离子的作用。例如,当水中溶解氧浓度小于 1mg/L 时,会大幅度降低磷酸盐对管网腐蚀的抑制作用;而当溶解氧浓度在 $1\sim 6\text{mg/L}$ 之间时,趋势正好相反。另外,溶解氧也为微生物的生存代谢提供了条件:一方面,由于引起腐蚀的铁细菌属于好氧菌,溶解氧的存在对铁细菌的生存有利;另一方面,由于硫酸盐还原菌是一种厌氧菌,溶解氧的存在对其生长有不利影响;故溶解氧浓度对管道的电化学腐蚀及微生物腐蚀都有重要意义。因此,一般在锅炉热力管道中都要进行除氧,特别是热力管道,即使在夏季,也要在管网中注入清水。注水后氧主要溶解在水中,显然,溶解在水中的氧要比空管道中空气的含氧量低,把这种注水降低腐蚀的方法称为水保护。

(4) 硫酸盐浓度和氯离子浓度

氯离子和硫酸根离子会干扰钙、铁保护层的形成,能够取代钝化层金属离子内相互连接的氢键,从而破坏钝化膜,与管垢发生化学反应,生成溶解态的亚铁离子,使附着在管垢上的钝化层被铁锈取而代之,从而加快管道腐蚀速率,也增加管网铁的释放。



此外,硫酸根离子还会参与管网中的微生物反应。当水体中含有大量的硫酸根离子时,硫酸盐还原菌会发生硫酸盐的还原反应。



具有侵蚀性的氯离子,会加快铁的腐蚀速率,引起点蚀。氯离子浓度较大时,水体中离子活性增大、离子强度增加、离子迁移速率增大、腐蚀电流的电阻减小,加速了腐蚀反应,导致水中总铁含量增加。同时,水中余氯可杀灭参与腐蚀反应的细菌,这间接地影响了腐蚀速率,