

管道防腐蚀技术

秦国治 丁良棉 田志明 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

管道防腐蚀技术

秦国治 丁良棉 田志明 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

管道防腐蚀技术/秦国治, 丁良棉, 田志明编著.
北京: 化学工业出版社, 2003.7
ISBN 7-5025-4664-2

I. 管… II. ①秦…②丁…③田… III. 管道
防腐 IV. U177

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059389 号

管道防腐蚀技术

秦国治 丁良棉 田志明 编著

责任编辑: 段志兵

文字编辑: 王清颢

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 12 字数 326 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4664-2/TQ·1774

定价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版者的话

管道是重要的基础设施，是主要的物流渠道之一。大型输油管道、输气管道、输水管道、化工管道以及其他各种管道，在社会经济生活中承担着重要的物流任务。工业的发展，尤其是石油工业的发展，要以先进、高效的管道系统为依托。因此必须重视管道的建设和管理。我国管道近 20 年来发展很快，到 1995 年，仅长输油气管道就有 17882 km，其中输油管道 9272 km。正在建设的“西气东输”工程就是天然气管道，全长 4122 km，工程浩大，投资巨大，是我国重大工程项目，建成后对我国西部资源的充分利用、加速西部的开发和发展将发挥重大作用。

管道，尤其是长输油气埋地管道，由于往往处在不同的地理环境中，如通过江河、湿地、各种性质的土壤，或者处于腐蚀性大气环境之中，而必须施加防腐蚀措施。在设计和施工阶段，应充分估计环境和管内介质对管道的腐蚀作用，采用实用的耐蚀材料、积极的防护措施；在使用和维护阶段，要对管道的腐蚀状态做准确的测试和评估，对管道进行适当的清理，对失效的防护层进行适当的修复，保证管道正常的运营。

我国的管道防腐蚀技术也发展很快，尤其是在管道外壁的涂装和包覆、管道的腐蚀状况检测、管道的修复和管道内部清理方面，研究和开发了许多新型材料、装备和技术。本书反映了当前管道防腐蚀的发展和应用现状，并围绕管道防腐蚀工程向读者介绍了管道常用涂料涂装、管道表面处理、管道防腐蚀施工、管道防腐保温、管道检测和清理以及管道防腐蚀工程安全等实用技术，书中展示了许多可供参考的工程实例。

本书作者都是石油化工企业从事防腐蚀工作的工程技术人员。他们将多年工作实践的经验和收集的资料结合起来，整理编写成此

书，献给管道建设、使用和维护工作的读者，以期为我国管道防腐蚀技术的普及和发展贡献一些力量。如发现书中有不当之处，或有新的建议，欢迎提出来，以备我们改进。

化学工业出版社

2003 年 7 月

内 容 提 要

管道是重要的物料输送设施。管道腐蚀问题遍及国民经济和国防建设的各个部门，其中，石油、化工用管道的腐蚀与防护尤为重要。

本书共分七章。详细介绍了管道防腐蚀材料，防腐蚀技术，防腐保温、保冷技术，管道检测技术，以及施工安全技术等。并附有较多的工程实例，实用性强。本书的出版有望为我国的管道防腐蚀，尤其是正在进行的西气东输工程的防腐蚀工作，提供一点帮助。

本书可供化工、石化及其他行业管道防腐蚀工作者参考阅读。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 管道防腐的意义	1
1.2 管道腐蚀的分类和类型	2
1.2.1 金属管道腐蚀的分类	2
1.2.2 金属管道腐蚀的破坏形式	3
1.3 管道腐蚀的原理及影响因素	3
1.3.1 输油、气钢质埋地管道的腐蚀现状	3
1.3.2 输油、气钢质埋地管道腐蚀原理及影响因素	4
1.4 管道腐蚀与防护对策	11
1.4.1 管道外防腐技术	11
1.4.2 管道、油管、钻杆内防腐技术	12
1.4.3 管道阴极保护技术	13
1.4.4 地上管道防腐技术	13
第 2 章 管道防腐蚀常用涂料	15
2.1 概述	15
2.1.1 涂料的分类	15
2.1.2 涂料命名原则	16
2.2 常用防腐蚀涂料	17
2.2.1 环氧树脂防腐蚀涂料	17
2.2.2 环氧改性树脂防腐蚀涂料	36
2.2.3 环氧树脂导静电涂料	55
2.2.4 橡胶及其改性防腐蚀涂料	59
2.2.5 漆酚改性防腐蚀涂料	75
2.2.6 聚氨酯防腐蚀涂料	84
2.2.7 有机硅耐高温防腐蚀涂料	97
2.2.8 氟碳树脂涂料	102
2.2.9 塑料防腐蚀涂料	107

2.2.10	富锌涂料	114
2.2.11	玻璃鳞片衬里涂料	116
2.2.12	高氯化聚乙烯防腐涂料	118
2.3	管道防腐用其他品种涂料	124
2.3.1	有阻垢性能的防腐涂料	124
2.3.2	有阻燃防火性能的防腐涂料	126
第3章	管道表面处理	128
3.1	表面处理的目的	128
3.1.1	表面特性	128
3.1.2	表面处理方法	128
3.2	金属管道的表面处理	129
3.2.1	机械除锈处理	129
3.2.2	化学与电化学处理	132
3.2.3	钢铁表面的化学转化	137
3.2.4	管道旧涂层处理	139
3.2.5	金属表面处理的等级标准	142
3.3	管道的非金属表面处理	145
3.3.1	水泥制品的表面处理	145
3.3.2	木材表面处理	145
3.3.3	玻璃和陶瓷表面的处理	147
3.3.4	橡胶表面处理	147
3.3.5	塑料表面处理	148
3.4	涂层寿命的影响因素	149
第4章	管道防腐蚀技术	151
4.1	概述	151
4.1.1	管道内、外防腐蚀的要求	151
4.1.2	钢质管道防腐涂料配套推荐方案	151
4.2	钢质管道防腐蚀技术	156
4.2.1	埋地钢质管道防腐涂装技术	156
4.2.2	高温蒸汽管道直埋铺设技术	180
4.2.3	钢质管道阴极保护	184
4.3	非金属塑料耐腐蚀管道	197
4.3.1	玻璃钢管道	197

4.3.2	耐酸陶管管道	201
4.3.3	塑料管道	207
4.3.4	加筋耐压新型塑料输水管道	215
4.4	耐腐蚀复合材料管道	217
4.4.1	预应力钢筒混凝土给水管道	217
4.4.2	球墨铸铁环氧内衬外涂复合管道	219
4.4.3	钢骨架高密度聚乙烯塑料复合管道	220
4.4.4	增强塑料复合管道	224
4.5	管道衬里防腐技术	230
4.5.1	聚合物砂浆衬里管道	230
4.5.2	陶瓷树脂衬里复合钢质管道	232
4.5.3	钢衬玻璃管道	234
4.5.4	塑料衬里管道	237
4.5.5	橡胶衬里管道	249
第5章	管道防腐保温、保冷技术	252
5.1	概述	252
5.1.1	定义	252
5.1.2	管道防腐保温、保冷层结构	252
5.2	常用输油输气管道铺设方式	253
5.2.1	直埋铺设	253
5.2.2	管沟铺设	253
5.2.3	架空铺设	253
5.3	硬质聚氨酯泡沫塑料	254
5.3.1	硬质聚氨酯泡沫塑料的主要性能	254
5.3.2	硬质聚氨酯泡沫塑料原料的性质、规格与选择	255
5.3.3	硬质聚氨酯泡沫塑料配方	257
5.3.4	施工方法	259
5.4	管道防护层材料	262
5.5	防水外防护层	264
5.6	补口结构形式	266
5.7	保温层厚度计算	268
5.7.1	保温层经济厚度法	268
5.7.2	直埋管道保温热力计算	270

5.7.3	管道多层绝热层厚度计算	270
5.7.4	在允许温降条件下输送液体管道的保温层厚度	271
第 6 章	管道检测维修及清洗除垢技术	273
6.1	防腐蚀管道检测	273
6.1.1	管道防腐蚀中常用的检测工具及仪器	273
6.1.2	管道防腐层缺陷检测技术	274
6.1.3	涂料及涂层的性能检测方法	286
6.2	清管技术	289
6.2.1	高压水射流清洗技术	289
6.2.2	Pig 清管技术	293
6.2.3	清管技术在油田中的应用	298
6.2.4	清管技术在煤气管道中的应用	301
6.2.5	凝胶清管器组合物理化学清洗	306
6.2.6	管道化学清洗除垢技术	311
6.3	管道维修技术	319
6.3.1	管道泄漏的形式分类	320
6.3.2	带压堵漏技术	323
6.3.3	带压黏结堵漏技术	331
6.3.4	带压焊接堵漏技术	332
6.3.5	埋地钢质管道内衬修复技术	340
第 7 章	管道防腐蚀工程安全技术	348
7.1	管道防腐蚀工程现场安全管理	348
7.2	管道防腐蚀涂装的安全技术	352
7.2.1	防火、防毒安全技术	352
7.2.2	粉末喷涂的安全技术	360
7.3	管道防腐蚀衬里安全技术	363
7.3.1	玻璃钢衬里施工安全技术	363
7.3.2	氟塑料加工安全技术	365
7.4	管道化学清洗安全技术	367
7.4.1	化学清洗安全措施	367
7.4.2	化学清洗废液处理	368
7.5	动态带压堵漏技术施工安全	369
参考文献		372

第 1 章 概 论

1.1 管道防腐蚀的意义

管道防腐蚀技术，主要研究开发管道在环境和使用条件下，腐蚀破坏的原因与防护方法。涉及的领域广，交叉的学科多，是一门新兴的边缘学科。

管道腐蚀问题遍及国民经济和国防建设的各个部门，大量的管道、构件和阀门等因腐蚀而损坏报废，既给国民经济带来巨大损失，也给生产和生活造成极大的困难。

根据统计，全世界每年由于腐蚀而报废的金属管道、设备和材料，相当于金属年产的 $1/3$ 。现在全世界金属产量约 8×10^8 t，因腐蚀而损失达 8×10^7 t。我国钢铁年产量 16×10^7 t，每年因腐蚀而损耗 6×10^6 t，差不多等于上海宝钢钢铁总厂的年产量。腐蚀对自然资源是极大的浪费。

腐蚀不仅是金属资源的浪费，还对金属结构造成腐蚀破坏，使金属管道、设备提前退役，而不得不更换新的金属管道、设备。而金属管道、设备的造价费用远远超过金属材料本身的价格，这就增加了管道、设备的使用费用，提高了生产成本，降低了经济效益。金属管道、设备腐蚀直接和间接的经济损失是巨大的。

腐蚀产物形成垢层，影响传热和介质流速。美国每年因腐蚀要多耗 3.4% 的能源。1975 年美国由于腐蚀造成的经济损失约为 700 亿美元，为当年国民经济生产总值的 4.2%，而 1986 年高达 1260 亿美元，1995 年升高到 3000 亿美元。我国每年因腐蚀造成的经济损失高达 2800 亿元，比每年风灾、水灾、地震、火灾等自然灾害的总和还要多，仅“九五”期间，管道腐蚀造成的损失若能降低一个百分点，每年就可减少经济损失数百亿元。石油化工系统使用的

工业管道，平均 4~5 年就因腐蚀而更换，造成每年有大量的钢管因腐蚀而报废。

由于金属管道、设备的腐蚀，引起生产企业停工停产，产品质量下降。影响生活供水、供燃料气、供采暖蒸汽或热水，给人民生活带来很多困难。埋地输油、气、水等管道、管网的泄漏、企业炼油、化工、化纤、化肥、制药等管道、设备的跑、冒、滴、漏，将损失大量有用的物质，污染环境，甚至造成火灾、爆炸等重大事故，损失比金属本身的价值要大得多，严重得多。

为了防止腐蚀，人们研究开发了各种防腐蚀技术，促进新技术、新工艺、新材料、新管道设备的推广应用，延长管道设备使用寿命，节省资金，保证安全生产。

1.2 管道腐蚀的分类和类型

1.2.1 金属管道腐蚀的分类

由于金属管道腐蚀的现象与机理比较复杂，腐蚀分类方法多种多样。常用的分类方法如下。

(1) 按腐蚀环境分类。可以分为化学介质腐蚀、大气腐蚀、海水腐蚀和土壤腐蚀等。

(2) 根据腐蚀过程的特点和机理分类。

① 化学腐蚀 金属管道与介质发生的化学反应，特点是在反应过程中没有电流产生。化学腐蚀有以下两种。

a. 气体腐蚀 金属管道在干燥气体中，表面上没有湿气冷凝的腐蚀，叫气体腐蚀。

b. 非电解质溶液中的腐蚀 金属管道在不导电的非电解质溶液中的腐蚀。

② 电化学腐蚀 金属管道与介质发生反应的过程中有电流产生。腐蚀反应有一个阳极反应和一个阴极反应。电化学腐蚀是最普遍和常见的腐蚀。

③ 物理腐蚀 金属管道由于单纯的物理溶解作用而引起的腐蚀。

1.2.2 金属管道腐蚀的破坏形式

按照腐蚀破坏形式，有均匀腐蚀和局部腐蚀两大类。

(1) 均匀腐蚀 整个金属管道表面均匀地发生腐蚀。均匀腐蚀一般危险性较小。

(2) 局部腐蚀 整个金属管道仅局限于一定的区域腐蚀，而其他部位则几乎未被腐蚀。局部腐蚀可分为如下类型。

① 小孔腐蚀 又称点蚀，在金属管道某些部位，被腐蚀成一些小而深的孔，严重时发生穿孔。

② 斑点腐蚀 腐蚀形态像斑点一样分布在金属管道表面上，所占面积较大，但不深。

③ 电偶腐蚀 两种不同电极电位的金属相接触，在一定的介质中发生的电化学腐蚀。

④ 应力腐蚀破裂 金属材料在拉应力和介质的共同作用下所引起的腐蚀破裂，英文缩写为 SCC。

⑤ 晶间腐蚀 腐蚀发生在金属晶体的边缘上，晶粒间的结合力减小，内部组织变得很松弛，从而机械强度大大降低。

⑥ 选择性腐蚀 多元合金中的某一组分，由于腐蚀优先溶解到溶液中去，从而造成其他组分富集在合金表面上。

⑦ 氢脆 金属在某些介质溶液中，因腐蚀或其他原因而产生的氢原子渗入金属内部，使金属变脆，并在应力的作用下发生脆裂。

⑧ 磨损腐蚀 介质运动速度大或介质与金属管道相对运动速度大，而使金属管道局部表面遭受严重的腐蚀损坏的一种腐蚀形式。

⑨ 细菌腐蚀 指在细菌繁殖活动参与下发生的腐蚀。

⑩ 除上述腐蚀类型外，还有缝隙腐蚀、穿晶腐蚀、垢下腐蚀、微振腐蚀、浓差电池腐蚀、丝状腐蚀等。

1.3 管道腐蚀的原理及影响因素

1.3.1 输油、气钢质埋地管道的腐蚀现状

我国随着石油、天然气的勘探开发进展，含硫化氢、二氧化碳、氯离子及含水等多种腐蚀介质的油、气田出现，输油、气钢质

埋地管道腐蚀严重。根据调查统计,我国东部几个油田各类管道因腐蚀穿孔达2万次/年,更换管道数量400 km/a。河南中原油田8.7 km/a,原油集输管道投产一年就开始穿孔,其中最严重第43天就出现孔蚀,一年换管两次。胜利油田一座新建污水处理站,站内管道投产79天开始穿孔,全站投资570万元,运行一年零一个月就因腐蚀严重被迫停产大修。四川天然气管道,1971年5月~1986年5月的15年间,由于腐蚀导致的爆炸和燃烧事故就达83起,经济损失达6亿多元。腐蚀损失了油、气田大量财富,降低了油、气田的综合经济效益。现在我国油、气田开发进入中、高含水期,输送油、气管道、管网的腐蚀越来越严重,腐蚀穿孔次数越来越多。腐蚀干扰油、气田的正常生产,阻碍了油、气田工艺技术的发展 and 开发水平的提高。所以,要保证油、气田安全生产和提高经济效益,必须搞好油、气田输送管道、管网的腐蚀与防护工作。

1.3.2 输油、气钢质埋地管道腐蚀原理及影响因素

油、气田生产的输送钢质管道,常遇到的腐蚀介质是硫化氢、二氧化碳、有机硫化物、盐、地层水、矿物质及氧等。暴露于空气中埋地的钢质管道,还要遭受大气、土壤的腐蚀。

油、气田生产中遇到的腐蚀,绝大多数都是电化学腐蚀。埋地钢质管道与电解质溶液接触时,由于表面的不均匀性(如金属种类、组织、结晶方向、内应力、表面光洁度、表面处理状况等的差别),或埋地钢质管道不同部位接触的电解液种类、浓度、温度、流速等差别,从而在表面出现阳极区和阴极区。阳极区和阴极区通过埋地钢质管道本身互相闭合而形成许多腐蚀微观电池和宏观电池。埋地钢质管道电化学腐蚀就是一个发生阳极和阴极反应的过程。

由于常见的埋地钢质管道表面和介质的不均一性,如在介质溶液里碳钢中的铁碳化合物阴极,而铁是阳极;表面膜有微孔时,孔内金属是阳极,表面膜是阴极;受到不均匀应力时,应力较大的集中部分为阳极;表面温度不均匀时,温度较高区域为阳极;溶液中氧或氧化剂浓度不均匀时,浓度较小的地方为阳极等。因而形成了

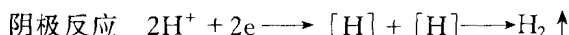
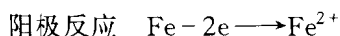
腐蚀电池。腐蚀电池有些是大电池（宏观电池），而更多出现的是微电池（微观电池）。

(1) 含硫天然气的钢质管道腐蚀。含有水和硫化氢、二氧化碳的天然气，对钢质管道产生内腐蚀。硫化氢、二氧化碳在水溶液中，发生去氢极化腐蚀。

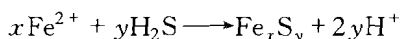
① 硫化氢的腐蚀原理 硫化氢是弱酸，在水溶液中按下式分步离解



在硫化氢溶液中，含有 H^+ 、 HS^- 、 S^{2-} 和 H_2S 分子，它们对钢质管道的腐蚀是氢去极化过程，反应式如下



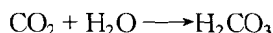
Fe^{2+} 和溶液中的 H_2S 反应



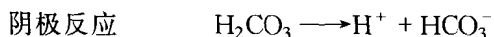
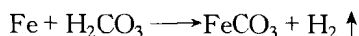
Fe_xS_y 为各种结构的硫化铁的通式，随着溶液中 H_2S 含量及 pH 值的变化，硫化铁组成及结构不相同，其对腐蚀过程的影响也不相同。

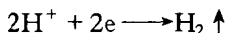
② 影响硫化氢腐蚀的因素 影响硫化氢腐蚀的因素有硫化氢浓度、pH 值、温度、压力、液体烃类等。同时在硫化氢腐蚀性介质存在的情况下，烃-水相和汽-液相界面对钢质管道产生严重的局部腐蚀。含硫天然气腐蚀性的决定因素是天然气中硫化氢的分压，而不仅是硫化氢的含量。

③ 二氧化碳腐蚀原理 天然气中的二氧化碳，在没有水存在时，对钢质管道不发生腐蚀，当出现游离水时，二氧化碳溶于水生成碳酸

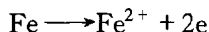


碳酸使水的 pH 值下降，钢质管道将发生氢去极化腐蚀





阳极反应

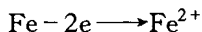


④ 影响二氧化碳腐蚀的因素 主要有压力、温度及水的组成。在一定温度下，随着二氧化碳分压增加，溶液 pH 值下降。随着温度的升高，二氧化碳溶解度下降，溶液 pH 值上升。天然气中的二氧化碳引起的腐蚀类型是深坑型腐蚀和冲蚀，随着二氧化碳分压的增加腐蚀加剧。含硫天然气中的二氧化碳会加速硫化氢对钢质管道的腐蚀。

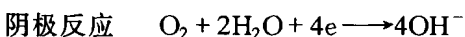
(2) 氧腐蚀原理。氧腐蚀是最普通的一种腐蚀，凡有空气、水、水蒸气存在的场合均会发生氧腐蚀。

氧腐蚀的电化学过程如下

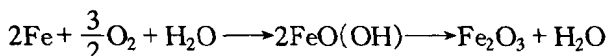
阳极反应



阴极反应



化学反应式



这是氧去极化腐蚀，腐蚀过程中铁、氧和水化合形成铁锈。氧腐蚀的速率受水中溶解氧含量影响，随着水中溶解氧含量的增加腐蚀速率也增加。

(3) 大气腐蚀原理。暴露在大气中的钢质管道表面，由于水和氧等的作用产生的腐蚀称大气腐蚀。原因是大气中含有水蒸气，冷凝在管道表面形成水膜，水膜溶解大气中的氧及其他杂质，发生电化学腐蚀。水膜层很薄，阻力小，空气中的氧不断地供给，所以阴极过程主要是氧的去极化作用。

大气中钢质管道的腐蚀，受大气条件、金属成分、表面形状、朝向、水滴流动、工作条件等因素影响。

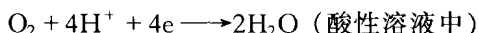
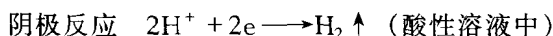
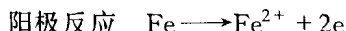
(4) 土壤腐蚀原理。土壤腐蚀是指埋地钢质管道，在土壤介质作用下引起的腐蚀。属于电化学腐蚀。土壤是多相物质组成的复杂混合物，颗粒间充满空气、水和各种盐类，使土壤具有电解质的特征。

① 土壤腐蚀电池大致可分两类

a. 微腐蚀电池是因埋地钢质管道表面状态的影响所形成的腐蚀电池。由于管道的缺陷，可能夹杂有不均匀物质，不均匀钢质管道与土壤接触时，在有差异的部位上，由于电极电位差而构成腐蚀电池。

b. 宏腐蚀电池是因土壤性质差异引起的腐蚀电池。埋地钢质管道经过物化性质差异很大的土壤时，可形成较大的电位差，构成的腐蚀电池两极间的距离较远，故称宏腐蚀电池。

土壤的酸碱度、氧化还原电位、电阻率、含水量、密实度、含盐种类、湿度、杂散电流等，均会直接或间接地影响对埋地钢质管道的腐蚀。该腐蚀是电化学腐蚀，反应式如下



② 土壤腐蚀的影响因素 土壤腐蚀性不是由单一指标决定的，必须综合考虑多种因素。影响埋地钢质管道腐蚀速度的因素是多方面的，而且各种因素的交互作用也比较复杂。

a. 使用材料通常为碳钢 碳钢的成分对土壤腐蚀的影响不大，但材料本身的相结构和组织变化，如焊缝及热影响区对土壤腐蚀则比较敏感。

b. 土壤电阻率 是一个综合性因素，它反映了土壤介质的导电能力。一般来说，电阻率低的土壤腐蚀性强，反之腐蚀性弱。大庆油田土壤腐蚀性分级标准见表 1-1。钢铁腐蚀程度与土壤电阻率的关系见表 1-2。

表 1-1 大庆油田土壤腐蚀性分级标准

土壤电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	< 20	20 ~ 50	> 50
土壤腐蚀程度	强	中	弱