

杨鸣皋 编著

金属结构及建筑物 防腐防水技术

中国石化出版社

金属结构及建筑物 防腐防水技术

杨鸣皋 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书从理论上阐述了材料的腐蚀机理,并对腐蚀进行了分类。按照材料的腐蚀分类介绍了相关的防护技术,内容涉及材料的表面镀覆、电化学保护、油漆涂装和耐蚀胶泥防护、建筑物及构筑物防腐防水等。

书中结合防腐防水工程实际,绘制和列出了大量的图表,分析了一些典型工程实例,对同类工程具有很高的参考价值。

该书实用性强,具有一定的操作性。可供防腐防水专业的设计人员、施工人员以及工程监理人员和业主单位的工程管理人员使用,也可供大专院校师生和科研人员使用与参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属结构及建筑物防腐防水技术/杨鸣皋编著.
—北京:中国石化出版社,2005
ISBN 7-80164-735-1

I.金… II.杨… III.①金属材料-防腐 ②金属材料-防水 ③建筑物-防腐 ④建筑物-防水
IV.TG17②TU761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 135520 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

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

850 × 1168 毫米 32 开本 9.875 印张 262 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

现在我国被称为“世界工厂”，遍布全国各地的工业企业和养殖业，在不断向世界提供工业、农业产品的同时，却把废气、废水、废渣留在了我们的周围。虽然我国治理“三废”的水平有所提高，但很难赶上“三废”排放量的迅猛增长。尤其是沿江沿海以及工业交通相对发达地区，工农业“三废”再加上高温高湿的自然环境，对设备、管道、钢结构、建筑物的腐蚀，其速率比污染少的地区快得多，严重得多。多年的实践证明，按照常规施工防腐层和防水层，已不能有效保护设备、管道、钢结构和建筑物、构筑物的正常使用。所以，设备、管道、钢结构、建筑物、构筑物防腐防水应从施工图设计及材料设备订货开始，施工、日常维护管理全过程一起抓，缺一不可。

对于工业企业和民用建筑基建及之后的改扩建，其设计图一般是由相应的设备、工艺专业和土建专业完成的，通常这些工程技术人员对本专业一丝不苟，而对防腐专业则重视不够，甚至是一笔带过。像“除锈后刷两道防锈底漆，两道×色调和漆”在防腐技术要求中经常看到，但照此防腐施工，涂层不到一年就会锈迹斑斑，失去防护作用。有的防腐设计虽然有较明确的规定和说明，但不一定经防腐专业人员会签会审，其防腐结构和选择的防腐材料常发生不应有的失误。例如原油罐底内防腐设计选择了价格十分昂贵的喷锌喷铝加涂料封闭，原油罐底沉积的含盐分的水—电解质渗透封闭层，锌、铝的电位比罐底钢板更负，在它们的界面就会发生电化

学反应，锌和铝作为阳极很快被牺牲掉了，含盐分的水便直接腐蚀罐底板。还有的原油罐底内防腐设计选择了掺有石墨的导静电涂料，由于石墨的电位比罐底钢板更正，在罐底沉积的含盐分的水—电解质的作用下，钢板作为阳极做出牺牲，保护了涂层，罐底板加快腐蚀。

有的业主单位对防腐不甚了解，如对除锈等级、涂料选择、防护层结构提不出正确要求。有的甚至认为只要“刷刷好看就行”。有的维修工程，只要眼前的油漆颜色对路，不管油漆品质如何，抓来就刷，其结果可想而知。北京有一处名胜古迹，几根高大的柱子，表面的红色油漆刷的挺厚却老不干，游客在上面贴满了硬币，笔者认为这并非是文物管理单位有意这么做来赚取游客们的硬币，而是选用油漆不当造成的。

据报道，防腐涂层过早丧失防护作用，其原因中除锈不好所占比例约为40%；涂料选择不当约占20%；涂层干膜厚度不够约占20%；施工条件和质量控制不当约占20%。有的施工单位不注重施工质量，除锈达不到要求，涂料涂刷不认真，甚至钻业主单位或监理单位管理不到位的空子偷工减料，这是防腐施工最需注意的问题。

非标设备、钢结构制造定额中包含刷一道底漆的工作内容，但并未明确除锈应达到什么等级刷什么漆。设备制造及钢结构厂为了节省工期和投资，毫无疑问地除锈和刷底漆都达不到使用要求。高温非标设备订货时应该明确喷砂除锈应达Sa2.5级，刷一道耐相应介质温度的高温底漆，安装后再补刷高温面漆才对。如果高温设备安装前外防腐只进行手工除锈刷一道油性调和底漆，安装后再补刷高品质的高温防腐面漆，投用后油性的底漆被烧蚀，面漆就会很快脱落。

在建筑物、构筑物的防腐、防水中，一些传统的材

料和结构已经被淘汰，有些设计人员图省事，照套十几年甚至几十年前的“重复利用图”，即使施工质量好，防水结构寿命短暂也是肯定的。

据报道，全世界每年生产的钢铁设备约 30% 因腐蚀而报废，其中 10% 成为无用的铁锈。我们从装置大检修工地看到拆下成批腐蚀报废的设备、管道、钢结构就可见腐蚀给国民经济造成的损失是多么巨大。这还没有将因腐蚀引起的爆炸、着火事故导致停工停产的间接损失计算在内。然而，我们的一些设计、施工、管理人员和使用单位对防腐、防水却不够重视。笔者结合多年防腐防水设计施工的实际经验，参照航空、化工、石化、海港行业防腐防水的相关技术规范和国内部分国有、合资、民营防腐防水涂料生产厂的产品说明书，编写成这本《金属结构及建筑物防腐、防水技术》供有关设计、施工、物资采购、管理及工程技术人员参考使用。笔者并不要求各行各业的人员都成为防腐防水的行家里手，但希望阅读过这本书的人们对腐蚀的一般原理有所了解，并能根据腐蚀环境选择合适的防腐防水材料，监督施工单位管好施工质量，从而达到延长产品的使用寿命，尽量减少经济损失，确保产品的使用安全和可靠运行。

在编著本书的过程中，得到熊信勇、郭琦龙、傅峻松等同志的大力支持；在初稿完成之后，其中的第四章由熊信勇审核和修改，其他章节由傅峻松审核和并作了许多修改。在此表示深深的感谢！

由于笔者的理论水平有限，存在一些错误在所难免，希望读者给予批评指正。

杨鸣皋

2004 年 10 月 1 日

第一章 材料腐蚀分类及防护的一般原则.....	(1)
第一节 腐蚀分类.....	(1)
一、按腐蚀作用过程分类.....	(1)
二、按腐蚀环境和破坏形式分类.....	(3)
第二节 材料腐蚀防护.....	(7)
一、合理选材.....	(7)
二、合理设计结构.....	(7)
三、采用合理的加工工艺.....	(8)
四、合理选用表面防护层.....	(9)
五、工艺防腐.....	(19)
六、电化学保护措施.....	(20)
第二章 金属镀覆.....	(21)
第一节 金属镀覆前的表面处理.....	(21)
一、钢铁的磷化.....	(21)
二、铝及铝合金的化学氧化.....	(33)
三、不锈钢的酸洗钝化.....	(39)
第二节 金属镀层.....	(44)
一、化学镀镍.....	(44)
二、喷锌、喷铝.....	(51)
第三章 油漆涂料防腐.....	(59)
第一节 油漆涂料防腐设计.....	(59)
一、表面处理.....	(59)
二、油漆涂料对除锈等级的要求.....	(66)

三、油漆涂料的选择	(66)
第二节 油漆涂料施工	(74)
一、地上设备、管道、钢结构外防腐	(75)
二、埋地设备、管道的外防腐防水施工	(78)
三、设备、管道内防腐	(86)
四、木制品的涂装	(107)
第三节 耐腐蚀胶泥	(116)
一、水玻璃胶泥	(118)
二、酚醛胶泥	(121)
三、呋喃胶泥	(124)
四、环氧胶泥	(127)
五、环氧呋喃胶泥	(130)
六、沥青胶泥	(132)
七、不饱和聚酯胶泥	(134)
八、玻璃鳞片胶泥	(137)
九、贝尔佐纳胶泥	(139)
第四章 电化学保护	(145)
第一节 外加电流阴极保护	(146)
一、外加电流阴极保护原理	(146)
二、阴极保护指标	(147)
三、辅助阳极	(149)
四、参比电极	(151)
五、检查片与腐蚀速率	(151)
六、直流电源(自控防腐仪)	(153)
七、施工及质量检查	(156)
八、维护管理	(157)
九、安全管理	(158)
十、外加电流阴极保护实例分析	(159)

第二节 牺牲阳极·····	(179)
一、牺牲阳极的基本原理和一般要求·····	(179)
二、常用阳极材料·····	(180)
三、牺牲阳极的种类及应用·····	(184)
第五章 建筑防水·····	(195)
第一节 建筑物防水·····	(195)
一、屋面防水·····	(195)
二、墙面防水及装饰·····	(235)
第二节 埋地构筑物防水·····	(241)
一、埋地构筑物防水等级与适用范围·····	(241)
二、结构性防水·····	(241)
三、埋地构筑物的柔性防水·····	(252)
第六章 防腐、防水施工安全·····	(257)
一、防腐、防水施工安全现状·····	(257)
二、业主和发包单位的安全职责·····	(258)
三、施工单位的安全职责·····	(258)
参考文献·····	(261)
附录 油漆涂料的技术性能及用途·····	(262)

第一章 材料腐蚀分类及 防护的一般原则

当材料生产出来并做成产品，投入使用直至报废，腐蚀就伴随它的全过程。腐蚀并不完全局限于金属，非金属材料同样存在腐蚀问题，例如混凝土、陶瓷、塑料、木材。总之，材料与周围环境作用引起的变质破坏都称为腐蚀。

第一节 腐蚀分类

对腐蚀进行分类有多种方法，下面仅介绍两种分类方法。

一、按腐蚀作用过程分类

(一) 化学腐蚀

材料与周围的氧气、二氧化硫、硫化氢、氯气等气体或汽油、润滑油等非电解质直接接触发生的纯化学反应使其腐蚀，叫做化学腐蚀。这种腐蚀是在没有电解液存在的情况下进行的，所以称为“干腐蚀”。

(二) 电化学腐蚀

金属电化学腐蚀是指金属表面与离子导电的介质发生化学作用而产生的破坏。电化学腐蚀与化学腐蚀的区别在于电化学腐蚀发生时，金属表面存在隔离的阴极和阳极，有微小的电流存在于两极之间，形成腐蚀微电池，而单纯的化学腐蚀则不形成微电池。

表1-1是部分金属及合金在海水中的电位序。两种不同金属置于电解液中，它们之间就存在电位差。如果把它们互相接触或用导线接通，就会形成一个原电池。这两种金属之间的电位差

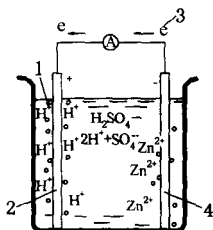


图 1-1 电化学
腐蚀原理图

1—氢气泡；2—铜棒；
3—电子；4—锌棒

就会驱动电子由电位低的金属阳极流向电位高的金属阴极。与此同时，在金属与电解液的界面发生电化学反应，电位较低的金属表面发生的是以氧化为主的反应，而在电位较高的金属表面发生的是以还原为主的反应。在电解液中，离子在电场的作用下，正离子向阴极迁移，负离子向阳极迁移，起到传递电荷的作用。电化学腐蚀是在有电解液存在的情况下进行的，所以也称“湿腐蚀”。其腐蚀原理可见图 1-1。

发生电化学腐蚀必须同时具备三个条件，即存在腐蚀电解液、不同电位的金属或非金属导体，并形成电连接。

1. 腐蚀电解液

这里所说的电解液是指凝聚在金属表面或浸泡金属的含有某些杂质的具有导电性的液体，例如含有氯化物、硫酸盐等的水膜或液体。电解液在腐蚀电池中起离子导电作用。

2. 不同腐蚀电位的金属或非金属导体存在

这里所说的腐蚀电位是指金属在海水中测得的真实电位（见表 1-1）。非金属导体主要指碳纤维复合材料和石墨制品。不同腐蚀电位的金属或非金属导体是电化学腐蚀主体。

3. 电连接

这里所说的电连接是指将两种不同金属直接接触或用其他导体连接，构成腐蚀电池的电子导电支路。即使同种金属材料含有杂质、构件焊接、冷热加工、超负荷运行都会使影响区的电位与其他区域出现差异，而发生电偶腐蚀现象。

(三) 物理腐蚀

材料由于单纯的物理溶解作用所引起的破坏称为物理腐蚀。例如许多金属在高温熔盐、熔碱及液体金属中均可发生物理腐蚀。

二、按腐蚀环境和破坏形式分类

材料腐蚀环境和破坏形式是多种多样的，但总的可以归为如下几类。

表 1-1 部分金属及合金在海水中的稳定电位序

金属和合金	E_H/V	金属和合金	E_H/V
镁(Mg)	-1.45	镍(Ni)(活态)	-0.12
镁合金(6% Al, 3% Zn, 0.5% Mn)	-1.2	青铜(5% ~ 10% Al)	-0.1
锌(Zn)	-0.8	铜锌合金(5% ~ 10% Zn)	-0.1
铝合金(10% Mg)	-0.74	铜(Cu)	-0.08
铝合金(10% Zn)	-0.7	铜镍合金(30% Ni)	-0.02
铝(Al)	-0.53	石墨	+0.02 ~ 0.3
镉(Cd)	-0.52	不锈钢(Cr13)(钝态)	+0.03
铁(Fe)	-0.5	镍 Ni(钝态)	+0.05
碳钢	-0.4	不锈钢(Cr18Ni9)(钝态)	+0.17
灰口铁	-0.36	不锈钢(Cr18Ni12Mo3)(钝态)	+0.12 ~ 0.2
不锈钢(Cr19Ni9)(活化态)	-0.3	银(Ag)	+0.12 ~ 0.2
铅(Pb)	-0.3	钛(ti)	+0.15
锡(Sn)	-0.25	铂(Pt)	+0.4

(一) 均匀腐蚀

材料表面由于接触腐蚀介质全部或大部发生比较均匀的腐蚀(一般用 $g/cm^2 \cdot a$ 来表达, 即每平方厘米每年腐蚀失重多少克)。均匀腐蚀是相对局部腐蚀而言的。均匀腐蚀的危险性比局部腐蚀要小, 因为产品设计所使用的材料都具有一定的厚度, 尝且还留有一定的厚度腐蚀余量。

(二) 局部腐蚀

腐蚀破坏集中于某些区域, 其他区域腐蚀相对较轻。一般情况下, 发生的腐蚀以局部腐蚀为主, 均匀腐蚀也常伴有局部腐蚀。局部腐蚀往往难于觉察, 一些严重的事故恰恰就是因此造

成的。

1. 电偶腐蚀

电偶腐蚀是电化学腐蚀的典型例子，即在有电解液存在的条件下不同电极电位的金属互相接触，在接触面的局部产生的腐蚀。电位较负的金属溶解速度快，而电位较正的溶解速度反而较慢。

2. 缝隙腐蚀

金属部件接触腐蚀介质，由于金属与金属或金属与非金属之间存在小的缝隙，介质滞留在这些小的缝隙中，使缝隙内的金属加速腐蚀，这种局部腐蚀称为缝隙腐蚀。

我们常常看到一些设备、钢结构的搭接处、垫片下、螺帽、铆钉下流淌有铁锈，这就是缝隙腐蚀现象。

3. 点腐蚀

在金属表面的局部出现向深处发展的腐蚀小孔，而其他部位却不腐蚀或腐蚀很轻微，这种腐蚀形态称为点腐蚀，也称为孔蚀。

具有自钝化特性的金属和合金，例如不锈钢、铝及铝合金、钛及钛合金以及碳钢的表面存在有氧化皮或锈层的情况下在含氯离子的介质中容易出现点腐蚀。

在有盐雾存在的沿海，金属构件的迎风面发生点腐蚀极为突出。

4. 晶间腐蚀

腐蚀沿着金属、合金的晶粒边界或它的邻近区域发展，晶粒本身腐蚀很轻微，这种腐蚀称为晶间腐蚀。

金属是由晶粒组成的，金属加工过程必然使稳定的结晶点阵受到一定程度的破坏，错位的晶粒界面就像缝隙那样容易发生腐蚀。金属尤其是合金，它们在高温状态下，晶粒因约束力减少而活泼起来，组成合金的各种金属晶粒之间以及它们与杂质之间形成电位差，这也引起腐蚀。所以，晶间腐蚀是一种由组织电化不均匀性引起的局部腐蚀。这种腐蚀使晶粒间的结合力大大削

弱，甚至使金属构件的机械强度完全丧失。

5. 磨损腐蚀

如果介质的运动速度大或构件与构件的相对运动速度大，会导致构件的局部遭受严重的腐蚀损坏，这种局部腐蚀称为磨损。由高速流体引起的磨损，其表现的特殊形式主要有湍流腐蚀和空泡腐蚀两种，冲刷腐蚀是高速流体的机械破坏与电化学腐蚀双重作用对金属的共同破坏的结果。输送高速流动的固态粒料、液体、气体的管道弯头内腐蚀减薄是其典型例子。磨损腐蚀的一种特殊形态是磨振腐蚀，它是两个以上构件承受一定的荷载、相互反复振动摩擦引起的破坏，例如两个以上零部件相互摩擦、振动使表面形成划道、麻点、坑洼等。

6. 应力腐蚀

应力腐蚀是在一定拉应力和腐蚀介质的共同作用下引起金属材料的破坏。应力腐蚀必须有两个条件：一是施加于构件的拉应力超过材料允许的值或是构件焊接、冷加工产生的残余应力；二是存在有腐蚀介质。

图 1-2 是一幅典型的钢材拉伸试验应力 - 应变图，横轴代表钢材在拉应力作用下伸长即应变，竖轴代表施加的应力。曲线从 O ~ A，应力与应变成正比例，A 点称为钢材的比例极限。过了 A 点，应力与应变的正比例关系不再存在了。A ~ B 点，应力增加不大应变却增加许多，这种现象被称为材料的屈服，B 点称为屈服点，对应应力称为屈服应力。过了 B 点，材料成塑性伸长，到达 C 点，材料开始应变硬化，应力增大，伸长量增加，D 点达到最大值，D 点的应力称为极限应力。超过这点，它继续伸长，而应力值却随之减少，到达 E 点，材料发生断裂破坏。在结构设计中，为使结构在加载时伸长，卸载后回弹至原状，不留下残余伸长量，要求结构中的最大应力低于比例极限，一般取 A 点应力值的 60% 作

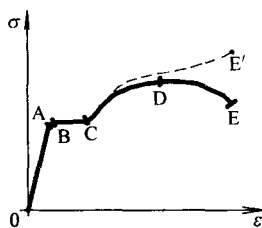


图 1-2 钢材应力应变图

钢结构设计容许应力。

如果我们在结构设计时，钢材强度取值超过 A 点值，或者在钢结构使用时超载，使材料出现塑性变形，其内部和表面会出现微裂纹，在环境的作用下就会发生腐蚀，这就是所谓的应力腐蚀。除了上述两个主要因素外，加工缺陷和加工工艺引起的裂纹或构件使用中出现应力集中、使用温度超高或冶金制造质量不好也会引起应力腐蚀。

7. 氢腐蚀

氢腐蚀是指钢暴露在高温、高压的氢气环境中，氢原子在设备表面或渗入钢内部与不稳定的碳化物发生反应生成甲烷，使钢脱碳，机械强度受到永久性的破坏。在钢内部生成的甲烷无法外溢而集聚在钢内部形成巨大的局部压力，从而发展为严重的鼓包开裂。

钢材发生氢腐蚀有两个阶段即氢脆阶段和氢浸蚀阶段。刚开始时，钢内部吸附的氢并未与钢材的组分发生任何化学变化，也没有改变钢材的组织状态，只是钢材吸附了氢，钢材变脆了，韧性降低了，此阶段称为氢脆阶段(暂时的氢脆是可逆的)；当浸入到钢材内部的氢与钢材中不稳定的碳化物发生反应生成甲烷使钢材脱碳、鼓包、开裂到钢材的强度和韧性大大降低，这个阶段称为氢浸蚀阶段(产生永久脆化，不可逆)。

钢材发生氢腐蚀的原因有许多，所选择的钢材本身防止氢渗入的性能不好、选择金属镀覆工艺不当使氢渗入或“消氢”工艺不完善是其主要原因。

8. 疲劳腐蚀

金属结构在环境腐蚀介质和外力的频繁反复作用下局部发生裂纹、断口破坏称为疲劳腐蚀。

(三) 高温氧化和热腐蚀

高温氧化是金属在高温环境中其表面与气体间的化学反应过程。这个过程使构件的表面金属转变为金属与气体的化合物，通常情况下多是金属氧化物。氧化物的不断剥落和生成导致金属构

件减薄直至破坏。

由于燃烧产物和气体中的杂质在金属表面沉积，沉积物与金属表面发生反应使金属逐步破坏，这种腐蚀称为热腐蚀。

(四) 细菌、微生物腐蚀

细菌本身并不直接腐蚀金属，而是细菌的生命活动间接地使金属发生电化学腐蚀。细菌腐蚀的显著特征就是在金属表面有粘泥的沉积，另一个特征是腐蚀部位总带有孔蚀的迹象。常见的腐蚀性细菌有喜氧菌和厌氧菌两大类。喜氧菌有铁细菌和硫氧化细菌。厌氧菌有硫酸根还原菌，硫酸根还原菌有氧或无氧都能生存。

冷却水塔及其管道、埋地管道以及海洋港口设施、船舶水线以下部分如果不加防护通常都会有生物、微生物、藻类依附在上面，它们的分泌物使细菌大量繁殖，导致腐蚀发生。

第二节 材料腐蚀防护

材料的腐蚀是不可避免的。但人们根据腐蚀环境合理选择材料，合理设计结构，通过合理的工艺条件设计和采用合理的加工工艺以及金属镀覆、非金属覆盖、介质处理、添加缓蚀剂、规范的油漆涂料施工和采用阴极保护、阳极保护等科学的防护措施，可以大大延缓腐蚀进程，减少经济损失。

一、合理选材

我们在制造产品选用材料时除了应掌握它们的理化力学性能、使用范围外，还应了解它们在特定环境条件下(温度、压力、介质及其流速)的耐蚀性能。根据不同的介质使用条件，选用合适的耐蚀金属或非金属材料。如何合理选材在许多著作中均有介绍，故本书不作赘述。

二、合理设计结构

在进行结构设计时，除了要考虑结构受力、刚度、稳定性和

经济性外，还应考虑如下几个问题：

(一) 尽量避免结构发生“缝隙腐蚀”

结构设计时应尽量避免能滞留腐蚀介质的缝隙存在，如果无法避免就应设置排水、排气孔疏导或密闭防渗等防护措施，防止缝隙内滞留腐蚀介质。

(二) 尽量避免发生“电偶腐蚀”

尽量采用同种材料，避免电位相差较大的不同金属接触使用，如果无法避免，就应在它们之间采用电位接近的金属件过渡或采用隔离绝缘措施。

(三) 防止发生“疲劳腐蚀”

处于腐蚀介质和交变荷载条件下的金属结构或杆件，设计强度应留有充分余量，使结构一直处于弹性受力阶段。

(四) 避免发生“磨蚀冲刷腐蚀”

要避免流体通道断面的不连续变化或急剧变化、避免流动方向的急剧变化、避免严重的湍流和涡流，减少固体夹带和降低流速。

(五) 减少“应力腐蚀”

在结构设计和施工中，应尽量避免应力集中或采用有效的加工工艺消除残余应力。

(六) 避免“浓差电化学腐蚀”

设计制造或选用设备时，应尽量避免形成溶液浓度差或形成局部高温区。

三、采用合理的加工工艺

合理选择金属件切割、滚压、焊接、热处理和产品组装工艺。避免产品在加工制造过程中产生不同形式的腐蚀倾向，使产品在使用中因腐蚀而提前报废。

(1) 对于要求抗应力腐蚀、抗疲劳腐蚀高的部件，应尽可能选用真空冶炼、真空重熔、真空热处理、多向锻造、喷丸、闪光焊或电子束焊加工的高强钢件，因为一般高强钢(抗拉强