



普通高等教育“十二五”规划教材

# 金属腐蚀及 防护效益分析

谢学军 付 强 廖冬梅 邹品果 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 金属腐蚀及 防护效益分析

编著 谢学军 付 强  
廖冬梅 邹品果  
主审 李宇春



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书紧紧围绕金属腐蚀危害、防腐蚀方法及防腐蚀带来的效益组织内容,主要内容包括腐蚀的定义、腐蚀的特点、腐蚀的分类、腐蚀速度、腐蚀危害和防腐蚀效益分析,介绍了防腐蚀意识的培养和常见的防腐蚀方法,重点介绍了腐蚀、防护及其效益分析实例,如锅炉停用腐蚀、停用保护及其效益分析,发电机空心铜导线腐蚀与防护及其效益分析,凝汽器管腐蚀与防护及其效益分析。

本书可作为普通高等院校本科相关专业腐蚀与防护方面通识课程的教材,也可作为企、事业单位管理人员和相关专业技术人员的防腐蚀意识培养读本。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属腐蚀及防护效益分析/谢学军等编著. —北京:  
中国电力出版社, 2015. 3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 7057 - 9

I. ①金… II. ①谢… III. ①腐蚀—高等学校—教材②金属—防腐—高等学校—教材 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 003640 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 6 印张 76 千字

定价 15.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

本书是武汉大学通识课程材料防护与资源效益的配套教材。

腐蚀是材料与周围环境发生化学或电化学反应而引起的材料的变质或破坏。腐蚀遍及各行各业，导致巨大的经济损失、资源浪费、环境损害、社会危害，阻碍新技术的应用和发展，因此，腐蚀防护关系着国民经济的健康发展、自然资源的有效利用、人身和设备的安全、环境保护以及人类社会的科技进步。换句话说，腐蚀会带来危害，而腐蚀防护可带来效益，这就要求工程技术人员必须有防腐蚀意识。在此基础上，武汉大学开设了材料防护与资源效益通识课。

材料防护与资源效益这门课程自 2005 年在武汉大学开设以来，受到了武汉大学文、理、工、管、医各学科学生的欢迎。在教学过程中，编者通过定期总结国内外腐蚀与防护方面最新的科研成果，特别是把编者在腐蚀与防护方面取得的科研成果融入教学中，不断完善讲义、教案，最终形成本教材。

本书由武汉大学谢学军教授、广东电网公司电力科学研究院付强高级工程师、武汉大学廖冬梅高级工程师、中国电力工程顾问集团中南电力设计院邹品果编著。全书由谢学军统稿，长沙理工大学李宇春教授主审。

本书在编写过程中，参阅了有关研究人员的著作、教材和学术论文等资料，特别是参考了《中国腐蚀调查报告》、《热力设备的腐蚀与防护》、《热力发电厂水处理（第四版）》，编者在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏与不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2014 年 12 月

# 目 录

## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 腐蚀概述 .....                | 1  |
| 第一节 腐蚀的定义 .....               | 1  |
| 第二节 腐蚀的特点 .....               | 3  |
| 第三节 腐蚀的分类 .....               | 5  |
| 第四节 腐蚀速度 .....                | 25 |
| 第二章 腐蚀危害和防腐蚀效益分析 .....        | 29 |
| 第一节 腐蚀危害 .....                | 29 |
| 第二节 防腐蚀效益分析 .....             | 35 |
| 第三章 防腐蚀意识、思想、方法 .....         | 37 |
| 第一节 防腐蚀意识与思想 .....            | 37 |
| 第二节 防腐蚀方法 .....               | 44 |
| 第四章 腐蚀、防护及其效益分析实例 .....       | 74 |
| 第一节 锅炉停用腐蚀、停用保护及其效益分析 .....   | 74 |
| 第二节 发电机空心铜导线腐蚀与防护及其效益分析 ..... | 76 |
| 第三节 凝汽器管腐蚀与防护及其效益分析 .....     | 81 |
| 参考文献 .....                    | 89 |

## 第一章 腐 蚀 概 述

### 第一节 腐 蚀 的 定 义

“腐蚀”一词源自拉丁文“Corrdere”，原意是“腐烂”、“损坏”的意思。目前，国际上公认的腐蚀定义是：腐蚀是材料与周围环境发生化学或电化学作用而引起的材料的变质或破坏。

为准确掌握腐蚀定义，要把握下面五点：

(1) 发生腐蚀的是材料或者被腐蚀的是材料。发生腐蚀的材料包括金属材料和非金属材料，其中以金属材料的腐蚀为主、也最常见。最常见的是金属材料的腐蚀，如钢铁在自然环境中生锈（见图 1-1）；铜在潮湿空气中慢慢形成铜绿，铜绿的主要成分是  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ；银在空气中受到微量硫化物作用在表面生成硫化银薄层而逐渐失去光泽等。非金属材料包括非金属无机材料和非金属有机材料（即高分子材料）。水泥或混凝土、陶瓷、玻璃等非金属无机材料的主要成分是  $\text{SiO}_2$ ，并含有多种碱金属或碱土金属氧化物，具有很好的耐酸性，但耐碱性相对较差，也就是在碱性环境下易遭受腐蚀。木材等天然高分子材料和塑料、橡胶、纤维等人工合成的高分子材料的腐蚀，包括：在介质中的溶解；活性基团与特定的介质发生水解、氧化、取代和交联等化学反应，造成材料的老化或者裂解破坏；微生物（包括真菌、霉菌及细菌）作用引起的腐蚀；应力腐蚀等。

(2) 材料的腐蚀是由周围环境引发的。引发材料腐蚀的环境包括自然环境（大气、土壤、海洋、生物和微生物等）、酸、碱、盐溶液、工业水等与水有关的环境以及熔盐、燃气、四氯化碳溶液、苯、醚等与水无关的环境。

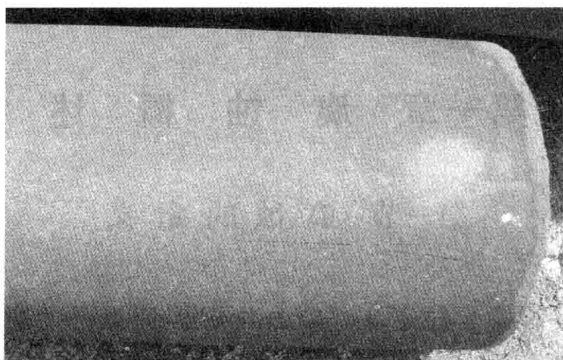


图 1-1 大气中腐蚀的碳钢管外壁

非电解质溶液引发的腐蚀，如铝在极性溶剂乙醇中、镁和钛在极性溶剂甲醇中的腐蚀，这是由于醇中的—OH 是极性键，它能解离出一定的  $H^+$ ，因此醇与水类似，可与活泼的金属镁、铝等作用生成醇镁和醇铝，同时放出氢气，就像金属钠和水反应一样。再如：镁在非极性有机溶剂四氯化碳、三氯甲烷等卤代烃中的腐蚀。这是金属镁原子与卤代烃的碳卤键进行插入反应生成高活性的金属有机镁的卤化物（ $CCl_4 + Mg \longrightarrow Cl_3C-Mg-Cl$ ）。金属有机镁的卤化物是一类非常有用的有机合成中间体，称为格氏试剂。这个反应的最先发现者法国化学家维克多·格林尼亚因此获得了 1912 年的诺贝尔化学奖。

（3）周围环境引发材料腐蚀的根本原因是材料与周围环境发生了化学反应或电化学反应。当然，物理作用、生物活动以及机械载荷等也可能成为腐蚀发生的诱导因素。如微生物生命活动的结果直接或间接地对金属腐蚀过程产生影响，并加速材料的腐蚀。

要注意的是，这里把化学反应和电化学反应并列了。化学包括无机化学、分析化学、有机化学、物理化学或结构化学，电化学仅仅是物理化学的一个分支。这里将化学反应与电化学反应并列，是基于化学反应的分类。一般化学反应的分类是：按反应前后反应物和生成物组成的变化将化学反应分为化合反应、分解反应、置换反应、复分解反应；按反

应过程中电子得失与否，将化学反应分为氧化还原反应和非氧化还原反应。为了突出腐蚀过程中是否有电流产生，将腐蚀过程中有电流产生的反应称为电化学反应，腐蚀过程中无电流产生的反应称为化学反应，这样化学反应和电化学反应就并列了。

(4) 腐蚀会造成破坏性后果。腐蚀最直接的后果是材料的变质或破坏，严重时会给人类带来巨大的经济损失、资源浪费、环境损害和社会危害。如 2001 年，四川省宜宾市城区南门大桥的钢铁吊索因生锈而造成大桥断裂。

(5) 腐蚀与断裂、磨损的区别。断裂是金属构件受力超过其弹性极限而发生的破坏，单纯由受力引起，无环境介质引起的化学或电化学作用。磨损是金属表面与其相接触的物体或环境介质发生相对运动，因摩擦而产生的损耗或破坏，单纯由摩擦引起，无环境介质引起的化学或电化学作用。

## 第二节 腐 蚀 的 特 点

金属腐蚀的特点可归纳为四点。

(1) 金属材料的腐蚀一般进行得很慢，通常难以觉察，往往出了事故才发现。当然，有的腐蚀进行的速度并不慢，如盐酸溶液中碳钢的腐蚀，肉眼就可看出来。

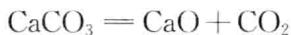
(2) 金属材料的腐蚀往往是自发进行的。从表面上看，自发反应就是不需要人为干预，也不需要人为提供能量就自动发生的反应，有些看得到，没什么危险，但有危害，如铁生锈；有些是看到时已悔之晚矣，如由于腐蚀泄漏而导致的氢氧混合物的爆炸。本质上，一个反应是不是自发反应，可根据理论判断。一是自然界自发发生的反应，包括腐蚀的自发发生，都符合熵增原理。二是等温等压条件下反应是否自发发生，可根据吉布斯自由能变和电动势从理论上进行判断：等温等压条件下吉

布斯自由变  $\Delta G < 0$  的反应是自发的。由于腐蚀反应往往在等温等压条件下发生，而且通过计算可得知其  $\Delta G < 0$ ，所以腐蚀反应是自发进行的。三是等温等压条件下电动势  $\Delta E > 0$  的反应是自发进行的。腐蚀反应大多是电化学反应，对于等温等压条件下发生的腐蚀电化学反应，通过计算可知其  $\Delta E > 0$ ，这也说明腐蚀反应是自发进行的。

(3) 金属材料的腐蚀是冶金的过程。冶金过程是通过人为提供能量，将金属由其化合态（大多为氧化态）转变为金属单质的过程，而腐蚀是不需要人为提供能量，金属由单质转变为化合态（大多是氧化态）的过程。如铁的冶炼与腐蚀，铁的腐蚀是单质铁变成氧化物的过程，而铁的冶炼需要还原剂和高温，将氧化铁转变为单质铁。

下面介绍一个实验。在实验室用一氧化碳通过酒精喷灯加热还原氧化铁，加热一段时间后，会看到氧化铁固体由暗红色变成黑色，这是氧化铁变成了铁。石灰水中通入尾气后石灰水变混浊，尾气排入大气前用酒精灯再点燃尾气，作用是防止一氧化碳污染空气。

我国早在春秋战国时期，就已经开始生产和使用铁器了，从公元 1 世纪起，铁便成了一种最主要的金属材料。现代工业炼铁，采用的设备是高炉，原料是铁矿石、焦炭、石灰石，利用焦炭与氧气反应生成一氧化碳在高温下把铁从铁矿石里还原出来。那石灰石做什么用呢？因为铁矿石中有二氧化硅，碳酸钙会和二氧化硅反应生成硅酸钙和二氧化碳，所以石灰石的作用是充当助熔剂，通过造渣除去铁矿石中含有的二氧化硅、少量脉石（脉石的成分也是二氧化硅），炉渣为硅酸钙，造渣反应为



另外，铁矿石中还含有硫、磷等杂质，炉渣也有一定的脱硫作用。

添加焦炭的作用是：和氧气反应生成二氧化碳；和生成的二氧化碳反应生成一氧化碳。一氧化碳再作为还原剂和铁矿石（三氧化二铁或氧

化亚铁或四氧化三铁)反应生成铁和二氧化碳。

(4) 腐蚀普遍发生,可以说有金属存在的地方,就有可能发生腐蚀。时间上,自古就有;空间上,各行各业都存在腐蚀,包括冶金、化工、能源、矿山、交通、机械、航空航天、信息、农业、食品、医药、海洋开发和基础设施等。如经常听说的石油、化工、电力等行业中,其设备、管道、开关等的跑、冒、漏、滴现象,许多就是金属被腐蚀了而产生的后果。再如在电力系统经常听说的“四管爆漏”、凝汽器泄漏,许多就是金属被腐蚀产生的后果,四管指省煤器管、水冷壁管、过热器管、再热器管。

### 第三节 腐 蚀 的 分 类

由于腐蚀的发生具有自发性、普遍性等特点,所以腐蚀涉及的领域极为广泛,导致腐蚀的分类方法有很多,下面介绍金属腐蚀的常用分类方法。

#### 一、按腐蚀环境分类

根据腐蚀环境不同,金属腐蚀可分为干腐蚀、湿腐蚀、熔盐腐蚀和有机介质中的腐蚀。

##### 1. 干腐蚀 (dry corrosion)

干腐蚀是金属在干燥气体介质中发生的腐蚀,主要是指金属与环境介质中的氧反应而生成金属氧化物,所以又称为金属的氧化。例如,煤粉在炉膛内燃烧产生的干燥烟气使水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管外壁发生的高温氧化,就是干腐蚀。

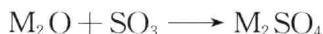
##### 2. 湿腐蚀 (wet corrosion)

湿腐蚀是金属在潮湿环境和含水介质中发生的腐蚀,包括自然环境和工业介质中的腐蚀。自然环境中的腐蚀,如大气腐蚀 (atmosphere

corrosion)、土壤腐蚀 (soil corrosion)、海水腐蚀 (corrosion in sea water) 等; 工业介质中的腐蚀, 如酸、碱、盐溶液和工业水中的腐蚀等。

### 3. 熔盐腐蚀

熔盐腐蚀是金属在熔融盐中发生的腐蚀, 如锅炉烟气侧的高温腐蚀, 也就是锅炉烟气侧碳钢的熔融硫酸盐腐蚀。因为煤燃烧时炉膛水冷壁管外壁会由于高温氧化而形成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  层, 煤中的碱金属元素 K、Na 等会形成碱金属氧化物  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  凝结在管外壁上, 并与烟气中的  $\text{SO}_3$  反应生成  $\text{K}_2\text{SO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 用  $\text{M}_2\text{SO}_4$  表示, 即



当燃煤锅炉炉膛水冷壁管处于  $310 \sim 420^\circ\text{C}$  的温度范围时,  $\text{M}_2\text{SO}_4$  有黏性, 呈熔融状态, 可捕捉灰粒, 黏结成灰层。于是灰表面温度上升, 外面形成渣层, 最外层为流层。

烟气中的  $\text{SO}_3$  穿过灰渣层, 在管壁与  $\text{M}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  反应, 生成  $\text{M}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ , 反应式为



这样, 水冷壁管外壁继续高温氧化形成新的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  层。这就是水冷壁管外壁受到的硫酸盐熔盐腐蚀。

### 4. 有机介质中的腐蚀

有机介质中的腐蚀是指金属在无水的有机液体和气体 (非电解质) 中的腐蚀, 如前面所说的铝在四氯化碳、三氯甲烷等卤代烃中的腐蚀, 铝在乙醇中、镁和钛在甲醇中的腐蚀等。

显然, 腐蚀按环境分类虽然只考虑了环境这一个方面, 但可帮助我们大体上按照金属材料所处的周围环境去认识腐蚀规律。

## 二、按腐蚀机理分类

根据腐蚀机理, 即根据腐蚀过程中发生的反应是化学反应还是电化学反应, 把金属腐蚀分为电化学腐蚀和化学腐蚀。

腐蚀过程中发生的反应都是氧化还原反应，都有电子得失，其中金属失电子被氧化发生氧化反应、氧化剂如  $O_2$  或  $H^+$  等得电子被还原发生还原反应。得失电子产生电流的反应称为电化学反应，产生的腐蚀称为电化学腐蚀；得失电子但不产生电流的反应称为化学反应，产生的腐蚀称为化学腐蚀。

### 1. 电化学腐蚀

金属腐蚀时发生氧化还原反应、得失电子，怎么会产生电流呢？是因为形成了原电池。

原电池是把化学能转化为电能的装置，如铜锌原电池（见图 1-2）。铜锌原电池的工作过程是，锌失去电子、被氧化，变成  $Zn^{2+}$ ，是原电池的负极（阳极），铜是原电池的正极（阴极），硫酸电离产生的氢离子（ $H^+$ ）得电子、被还原成氢原子（ $H$ ）。这样，在原电池工作期间，作为负极的锌片不断被腐蚀，而溶液中的  $H^+$  则不断被还原；流过金属内部的电子流和流过电解质的离子流形成电流回路。这样，通过金属腐蚀发生氧化还原反应、得失电子，产生电流，原电池的化学能转化为电能。

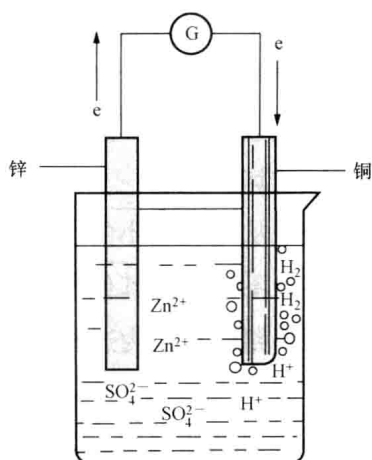


图 1-2 铜锌原电池示意

构成原电池的条件：一是有活泼性不同的两个电极，如活泼性不同的金属或金属和导电非金属；二是两电极都接触酸、碱、盐、工业水等电解质溶液；三是形成闭合回路。也就是说活泼性不同的两种金属或一种金属和一种导电非金属在酸、碱、盐、工业水等电解质溶液中接触，形成闭合回路，活泼的金属就会失电子、遭受腐蚀，并有别的物质，如氧、 $H^+$ 得电子，电子、离子定向移动就形成了电流，构成了原电池。

综上所述，金属的电化学腐蚀是指不纯的金属或合金接触到电解质溶液后发生原电池反应，比较活泼的金属失电子而被氧化的过程。

电化学腐蚀的特点在于它的腐蚀过程可分为两个相对独立、并且同时进行的阴极反应和阳极反应过程；阳极反应和阴极反应在被腐蚀金属表面上不同区域（阳极区和阴极区）进行，腐蚀反应过程中电子的传递是通过金属从阳极区流向阴极区而产生电流的。

这种因电化学腐蚀而产生的电流与反应物质的转移（金属被腐蚀的物质的量）可通过法拉第定律定量地联系起来，即对于金属腐蚀而言，金属被腐蚀的物质的量与其腐蚀过程中失电子而形成的电量成正比。

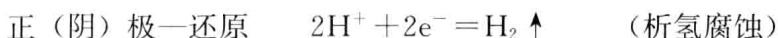
但实际发生电化学腐蚀时，其产生的电流一般都不可利用。也就是说，电化学腐蚀实际上是短路原电池反应的结果，这种电池又称为腐蚀原电池。在腐蚀过程中腐蚀原电池反应所释放出来的化学能，刚转化为电能，马上就全部以热能形式散失了，不能产生任何有用功，电池反应的结果只是导致金属被腐蚀破坏。

通常实际的电化学腐蚀是从无数微小的原电池开始发生的；作为负极的较活泼金属不断被腐蚀，不活泼的其他材料则被保护，并伴有微电流产生。但这些原电池都是短路的，因为这些原电池的阴极和阳极，即正极和负极都直接相连在一起。

电化学腐蚀是最普遍、最常见的腐蚀，自然环境中金属的腐蚀大部分属于此类。金属本身既是阳极，又是阴极，其中电位较低的部位是阳极，电位较高的部位是阴极，阳极上的金属失电子被氧化形成金属离

子，水溶液中的氢离子或溶解在水中的氧气在阴极上得电子被还原，其中阴极是氢离子得电子被还原的，称为析氢腐蚀，阴极是氧气得电子被还原的，称为吸氧或耗氧腐蚀。

自然环境中金属（用  $M$  表示，化合价为  $+n$ ）的电化学腐蚀可表示为

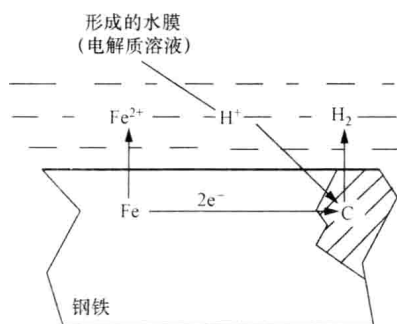


注意： $n$  有确定值后，得失电子数要相等。

如钢铁在自然环境中的电化学析氢腐蚀、吸氧或耗氧腐蚀。

由于钢铁中含有少量的碳等杂质，在潮湿空气中，钢铁表面会形成一层电解质溶液的薄膜。金属接触电解质溶液后，较活泼的金属铁被氧化而腐蚀（ $Fe \rightarrow Fe^{2+}$ ），溶液中的氢离子或水和氧气则在碳（阴极）上得到电子被还原，分别发生析氢和吸氧腐蚀。

发生析氢腐蚀，是因为钢铁处在潮湿空气形成的酸性环境中。图 1-3 所示为钢铁处于潮湿空气形成的酸性环境中，即钢铁表面形成的水膜，发生腐蚀。水膜之所以呈酸性，是因为空气中的二氧化碳、二氧化硫等溶入水膜中电离产生了氢离子，反应式为



条件：钢铁处在潮湿空气形成的酸性环境中。

特点：有氢气产生，如酸雨环境中。

图 1-3 析氢腐蚀

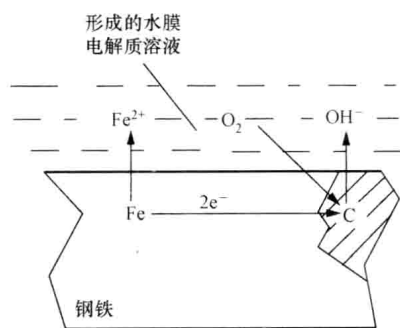
析氢腐蚀的负极反应、正极反应和总的反应式为

负极上的电极反应式为  $\text{Fe} - 2\text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$

正极上的电极反应式为  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2 \uparrow$

总反应式为  $\text{Fe} + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2 \uparrow$

发生吸氧腐蚀的原因是处在潮湿空气中的钢铁表面所形成的水膜中溶有空气中的氧,如图 1-4 所示。



条件: 钢铁在弱酸性或中性有氧环境中。

特点: 有氧气参加反应。

图 1-4 吸氧腐蚀

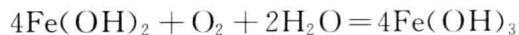
吸氧腐蚀的负极反应、正极反应及总反应式为

负极上的电极反应式为  $2\text{Fe} - 4\text{e}^- = 2\text{Fe}^{2+}$

正极上的电极反应式为  $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$

总反应式为  $2\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^-$  或  $4\text{Fe}(\text{OH})_2$

后续反应可能形成橙色的  $\gamma\text{-FeOOH}$ 、黄色的  $\alpha\text{-FeOOH}$ 、黑色的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、砖红色的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 反应式为



这是由铁的不同腐蚀产物的物理性质决定的。因为  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  在有氧的环境中不稳定,一方面,在室温下可变为橙色的  $\gamma\text{-FeOOH}$  或黄色的  $\alpha\text{-FeOOH}$  或黑色的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;另一方面,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  可继续被氧化为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  再失水变成砖红色的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 橙色的  $\gamma\text{-FeOOH}$ 、

黄色的  $\alpha$ -FeOOH、黑色的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、砖红色的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，都是铁锈。

一般开始看到的是黄色或橙色的铁锈，过一些时间则看到表面的是砖红色的铁锈，表层往里是黑色的。

一个有趣的吸氧腐蚀实验是：将腐蚀液  $\{\text{NaCl} + \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + \text{酚酞}\}$  滴在光滑碳钢片上，碳钢片中央变蓝，边缘变红。碳钢片中央变蓝是因为中央液层厚，扩散进来的  $\text{O}_2$  少，此处铁作为阳极失电子变成亚铁离子，即  $\text{Fe} - 2\text{e} = \text{Fe}^{2+}$ ， $\text{Fe}^{2+}$  遇  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$  变蓝；碳钢片边缘变红是因为边缘液层薄，扩散进来的  $\text{O}_2$  多，此处铁为阴极， $\text{O}_2$  在此处得电子变成  $\text{OH}^-$ ，即  $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e} = 4\text{OH}^-$ ，生成的  $\text{OH}^-$  使酚酞变红。

比较钢铁的析氢腐蚀和吸氧腐蚀，发现两者的差异主要是水膜的性质不同和阴极得电子发生还原反应的物质不同，析氢腐蚀的水膜呈酸性，氢离子得电子，吸氧腐蚀的水膜呈中性，氧得电子；析氢腐蚀和吸氧腐蚀的共同点是阳极反应都是铁失电子被氧化成二价铁离子，析氢腐蚀和吸氧腐蚀的联系是实际上两种腐蚀通常同时存在，但吸氧腐蚀更普遍，因为呈酸性的水膜中往往溶有氧。

## 2. 化学腐蚀

化学腐蚀是指金属表面与非电解质直接发生纯化学作用而引起的破坏。

化学腐蚀的特点，一是化学腐蚀在非电解质中发生，二是腐蚀过程中没有电流产生。既然化学腐蚀在非电解质中发生，当然不可能产生电流，因为非电解质不导电。但金属化学腐蚀过程中发生的也是氧化还原反应，也有电子的得失，只是电子的传递在金属与氧化剂之间直接进行。

实际上，单纯化学腐蚀的例子是较少见的。一般认为金属在干燥气体中的腐蚀，如高温氧化、过热蒸汽腐蚀；金属在有机介质中的腐蚀，如石油输送管部件的腐蚀、天然气管腐蚀、金属钠在氯化氢气体中的腐

蚀等，都属化学腐蚀。但这些腐蚀往往因介质中含有少量水分而使化学腐蚀转变为电化学腐蚀。

### 3. 电化学腐蚀与化学腐蚀的比较

可从化学腐蚀与电化学腐蚀发生的条件、产生的现象、主要影响因素和本质以及它们的联系来比较化学腐蚀与电化学腐蚀。

化学腐蚀和电化学腐蚀的不同之处：化学腐蚀发生的条件是金属跟非电解质直接接触，电化学腐蚀发生的条件是不纯金属或合金跟电解质溶液接触；化学腐蚀无电流产生，电化学腐蚀有微弱电流产生；化学腐蚀受温度影响较大；电化学腐蚀受电解质影响较大；化学腐蚀的本质是金属被氧化，电化学腐蚀的本质是较活泼金属被氧化。化学腐蚀和电化学腐蚀的联系是两者往往同时发生，电化学腐蚀更普遍，腐蚀速率更快。

## 三、按腐蚀形态分类

按腐蚀形态分类，是指根据金属被腐蚀之后的外观特征，即金属被破坏的特征对腐蚀进行分类。一般根据金属被破坏的基本特征可把腐蚀分为全面腐蚀和局部腐蚀两类。

### （一）全面腐蚀

全面腐蚀是腐蚀作用发生在整个金属表面上，它可能是均匀的，如图 1-5（a）所示，也可能是不均匀的，如图 1-5（b）所示。其特征是腐蚀分布在整个金属表面，结果是金属构件截面尺寸减小，直至金属构件完全被破坏。

纯金属和成分、组织均匀的合金在均匀的介质环境中表现出全面腐蚀形态，如碳钢在非氧化性盐酸溶液中通常发生均匀腐蚀。均匀腐蚀的危险性相对而言比较小，因为若知道了金属材料的腐蚀速度和设备的使用寿命之后，可估算出材料的腐蚀容差，并在设计时将其考虑在内，也就是加大厚度。