

## 目 录

## 前言

第一章 总论	1
第一节 金属腐蚀的定义	1
第二节 金属腐蚀的分类	1
第三节 金属腐蚀速度的表示方法	4
第四节 金属腐蚀防护的重要性	6
第五节 金属腐蚀防护方法概述	8
习题	11
第二章 金属电化学腐蚀的热力学原理	12
第一节 电极和电极电位	12
第二节 腐蚀原电池	16
第三节 腐蚀过程中发生的反应类型	21
第四节 水的电位—pH 值平衡图	24
第五节 金属—水体系的电位—pH 值平衡图	26
第六节 金属—水体系的电位—pH 值平衡图在金属腐蚀研究中的应用	31
第七节 电位—pH 值平衡图的局限性和某些发展	34
习题	36
第三章 金属电化学腐蚀的动力学原理	38
第一节 极化现象与极化曲线	38
第二节 电极过程的特征和极化的类型	41
第三节 浓度极化	43
第四节 活化极化	47
第五节 复合极化	53
第六节 腐蚀电位与腐蚀电流密度	54
第七节 活化极化控制的均匀腐蚀动力学	56
第八节 阴极过程为浓度极化控制的均匀腐蚀动力学	60
第九节 金属腐蚀速度的电化学测定方法	61
第十节 腐蚀极化图	65
习题	67
第四章 析氢腐蚀和耗氧腐蚀	68
第一节 析氢腐蚀的必要条件	68
第二节 析氢腐蚀的控制过程	69
第三节 析氢过电位	71
第四节 耗氧腐蚀	74

第五节	氧过电位和阴极极化曲线 .....	75
第六节	耗氧腐蚀的特点及影响因素 .....	76
	习题 .....	80
<b>第五章</b>	<b>实验极化曲线和复杂腐蚀电极系统 .....</b>	<b>81</b>
第一节	理想极化曲线和实验极化曲线 .....	81
第二节	从实验极化曲线求理想极化曲线 .....	82
第三节	复杂腐蚀电极系统 .....	83
第四节	阴极保护 .....	85
	习题 .....	89
<b>第六章</b>	<b>金属的钝化 .....</b>	<b>91</b>
第一节	钝化现象 .....	91
第二节	阳极钝化曲线 .....	92
第三节	佛莱德电位、击穿电位和保护电位 .....	93
第四节	金属的自钝化 .....	95
第五节	阳极保护 .....	97
第六节	钝化理论 .....	100
	习题 .....	103
<b>第七章</b>	<b>金属的化学腐蚀 .....</b>	<b>104</b>
第一节	金属氧化的可能性 .....	104
第二节	生成保护性氧化膜的条件 .....	105
第三节	金属氧化的动力学 .....	106
第四节	钢铁高温气体腐蚀的几种形式 .....	107
	习题 .....	110
<b>第八章</b>	<b>电站热力设备概况及其腐蚀与防护特点 .....</b>	<b>112</b>
第一节	热力设备所接触介质的水汽流程和烟气流程 .....	112
第二节	热力设备所接触水、汽介质的特点 .....	113
第三节	热力设备金属材料的特性 .....	115
第四节	热力设备腐蚀的类型和特点 .....	116
第五节	热力设备腐蚀防护的必要性和特殊性 .....	118
	习题 .....	120
<b>第九章</b>	<b>热力设备的氧腐蚀与防止 .....</b>	<b>121</b>
第一节	热力设备的运行氧腐蚀与防止 .....	121
第二节	热力设备的停用腐蚀与停用保护 .....	135
第三节	锅炉基建期间的氧腐蚀及其防止 .....	145
	习题 .....	146
<b>第十章</b>	<b>热力设备的酸性腐蚀与防止 .....</b>	<b>147</b>
第一节	热力设备水汽系统中酸性物质的来源 .....	147
第二节	水汽系统中的二氧化碳腐蚀 .....	148
第三节	给水 pH 值的调节 .....	151

第四节	成膜胺处理	157
第五节	锅炉的酸性腐蚀	157
习题		158
<b>第十一章</b>	<b>热力设备的应力腐蚀与防止</b>	<b>159</b>
第一节	应力腐蚀破裂的条件、特点和机理	159
第二节	锅炉的碱脆与防止	164
第三节	热力设备不锈钢部件的应力腐蚀破裂	169
第四节	热力设备的腐蚀疲劳	171
第五节	热力设备的氢脆	174
习题		176
<b>第十二章</b>	<b>锅炉介质(锅炉水)浓缩腐蚀与防止</b>	<b>177</b>
第一节	锅炉介质(锅炉水)浓缩腐蚀的部位、特征和危害	177
第二节	锅炉介质(锅炉水)浓缩腐蚀的机理	178
第三节	锅炉介质(锅炉水)浓缩腐蚀的影响因素	182
第四节	锅炉介质(锅炉水)浓缩腐蚀的防止方法	183
习题		185
<b>第十三章</b>	<b>水化学工况与水汽品质监督</b>	<b>186</b>
第一节	水化学工况概述	186
第二节	中性水处理(NWT)	189
第三节	联合水处理(CWT)或加氧处理(OT)	192
第四节	汽包锅炉的锅炉水处理	197
第五节	水汽质量监督	214
习题		228
<b>第十四章</b>	<b>热力设备结垢与锅炉化学清洗</b>	<b>230</b>
第一节	水垢的形成与防止	230
第二节	锅炉的化学清洗	236
习题		258
<b>第十五章</b>	<b>锅炉烟气侧的腐蚀与防护</b>	<b>259</b>
第一节	熔盐腐蚀	259
第二节	低温腐蚀	262
习题		266
<b>第十六章</b>	<b>汽轮机的积盐、腐蚀与防止</b>	<b>267</b>
第一节	蒸汽污染	267
第二节	过热器和汽轮机中的沉积物	271
第三节	汽包锅炉获得纯净蒸汽的方法	275
第四节	汽轮机的腐蚀及其防止	279
习题		283
<b>第十七章</b>	<b>凝汽器的腐蚀与防护</b>	<b>285</b>
第一节	凝汽器铜合金管的腐蚀与防护	285

177	第二节	凝汽器不锈钢管的腐蚀与防护	310
178	第三节	凝汽器钛管的腐蚀与防护	314
181	第四节	凝汽器管及管板的选择	317
187	第五节	凝汽器的化学清洗及成膜	322
189	习题		329
190	<b>第十八章</b>	<b>发电机内冷水系统的腐蚀与防护</b>	<b>330</b>
191	第一节	概述	330
197	第二节	发电机空芯铜导线的腐蚀机理	331
198	第三节	影响空芯铜导线腐蚀的因素	332
199	第四节	发电机内冷水处理与空芯铜导线防腐	335
207	习题		341
208	<b>参考文献</b>		<b>342</b>
178		.....汽轮机内冷水系统(水轮机)内冷水防腐	第二章
182		.....多内腔铜管内冷水系统(水轮机)内冷水防腐	第三章
183		.....立式水轮机内冷水系统(水轮机)内冷水防腐	第四章
185		.....	第五章
186		.....管状空芯铜导线内冷水系统(水轮机)内冷水防腐	第三十章
187		.....	第三十一章
188		.....	第三十二章
189		.....(TWT)内冷水防腐	第二章
191		.....(TWT)内冷水防腐	第三章
197		.....内冷水防腐	第四章
213		.....内冷水防腐	第五章
228		.....	第六章
230		.....	第四十章
236		.....内冷水防腐	第二章
238		.....	第三章
278		.....	第四章
279		.....	第五章
280		.....	第六章
285		.....	第七章
286		.....	第八章
287		.....	第九章
287		.....	第十章
287		.....	第十一章
287		.....	第十二章
287		.....	第十三章
287		.....	第十四章
287		.....	第十五章
287		.....	第十六章
287		.....	第十七章
287		.....	第十八章
287		.....	第十九章
287		.....	第二十章
287		.....	第二十一章
287		.....	第二十二章
287		.....	第二十三章
287		.....	第二十四章
287		.....	第二十五章
287		.....	第二十六章
287		.....	第二十七章
287		.....	第二十八章
287		.....	第二十九章
287		.....	第三十章
287		.....	第三十一章
287		.....	第三十二章
287		.....	第三十三章
287		.....	第三十四章
287		.....	第三十五章
287		.....	第三十六章
287		.....	第三十七章
287		.....	第三十八章
287		.....	第三十九章
287		.....	第四十章
287		.....	第四十一章
287		.....	第四十二章
287		.....	第四十三章
287		.....	第四十四章
287		.....	第四十五章
287		.....	第四十六章
287		.....	第四十七章
287		.....	第四十八章
287		.....	第四十九章
287		.....	第五十章
287		.....	第五十一章
287		.....	第五十二章
287		.....	第五十三章
287		.....	第五十四章
287		.....	第五十五章
287		.....	第五十六章
287		.....	第五十七章
287		.....	第五十八章
287		.....	第五十九章
287		.....	第六十章
287		.....	第六十一章
287		.....	第六十二章
287		.....	第六十三章
287		.....	第六十四章
287		.....	第六十五章
287		.....	第六十六章
287		.....	第六十七章
287		.....	第六十八章
287		.....	第六十九章
287		.....	第七十章
287		.....	第七十一章
287		.....	第七十二章
287		.....	第七十三章
287		.....	第七十四章
287		.....	第七十五章
287		.....	第七十六章
287		.....	第七十七章
287		.....	第七十八章
287		.....	第七十九章
287		.....	第八十章
287		.....	第八十一章
287		.....	第八十二章
287		.....	第八十三章
287		.....	第八十四章
287		.....	第八十五章
287		.....	第八十六章
287		.....	第八十七章
287		.....	第八十八章
287		.....	第八十九章
287		.....	第九十章
287		.....	第九十一章
287		.....	第九十二章
287		.....	第九十三章
287		.....	第九十四章
287		.....	第九十五章
287		.....	第九十六章
287		.....	第九十七章
287		.....	第九十八章
287		.....	第九十九章
287		.....	第一百章



## 第一章 总 论

### 第一节 金属腐蚀的定义

腐蚀是指材料在其周围环境的作用下发生的变质或破坏现象。

一些学者曾对腐蚀下过其他定义,例如:腐蚀是材料与环境反应而发生的损坏或变质;腐蚀是除了单纯机械破坏之外的一切破坏;腐蚀是冶金的过程;腐蚀是材料与环境的有害反应等。以上定义除了第三个外,其所指的材料包括金属材料和非金属材料,即各种金属与合金、陶瓷、塑料、橡胶和其他非金属材料。

本书只讨论金属腐蚀,不涉及非金属腐蚀。考虑到金属腐蚀的本质,通常把金属腐蚀定义为金属与周围环境(介质)之间化学或电化学反应所引起的变质或破坏。

金属腐蚀是发生在金属与介质界面上的复杂多相反应,破坏总是从金属表面逐渐向内部深入的。因此,金属在发生腐蚀时,一般同时发生外貌变化,如溃瘍斑、小孔、表面有腐蚀产物或金属材料变薄等;金属的机械性能、组织结构也发生变化,如金属变脆、强度降低、金属中某种元素的含量发生变化或金属组织结构发生相变等。要特别指出的是,金属还没有腐蚀到严重变质或破坏的程度,已足以造成设备损坏或事故。

金属材料在使用过程中常见的破坏形式除了腐蚀外,还有断裂和磨损。断裂是指金属构件受力超过其弹性极限、塑性极限而发生的破坏。断裂使构件失效,但金属材料还可重新熔炼再用。磨损是指金属表面与其相接触的物体或周围环境发生相对运动(摩擦)而产生的损耗或破坏(有时磨损了的零件可以修复)。腐蚀与磨损经常同时存在,甚至难以区分。

金属腐蚀是在金属学、物理化学、电化学、工程力学等学科基础上发展起来的、融合了多门学科的新兴边缘学科。金属腐蚀的主要研究内容如下:

(1) 研究和了解金属材料与环境介质作用的普遍规律,既要从事热力学角度研究金属腐蚀进行的可能性,还要从事动力学角度研究腐蚀进行的速度和机理。

(2) 研究在各种条件下控制或防止设备腐蚀的措施。

(3) 研究和掌握金属腐蚀测试技术,探寻腐蚀的现场监控方法等。

从热力学的角度看,金属腐蚀是一个自发过程(因为  $\text{Me} - n\text{e} \longrightarrow \text{Me}^{n+}$  的  $\Delta G < 0$ ),是难以避免的。因此,无论是人们的日常生活用具,还是生产设备或设施,都普遍存在着腐蚀问题。可以说有金属存在的地方,就有可能发生腐蚀。金属腐蚀问题遍及国民经济的各个领域,各行各业,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,都存在腐蚀。如经常听说的石油、化工、电力等行业的跑、冒、漏、滴现象,许多就是金属被腐蚀而产生的后果。电力系统经常说的“四管爆漏”、凝汽器泄漏,许多也与金属被腐蚀有关。

### 第二节 金属腐蚀的分类

因为金属腐蚀是一个十分复杂的过程,所以金属腐蚀的分类方法也是多样的,这里只介

绍几种常用的分类方法。

### 一、按腐蚀机理分类

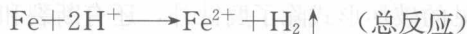
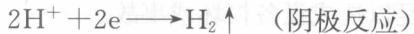
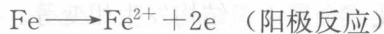
按腐蚀机理不同,金属腐蚀可分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

#### 1. 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。其反应历程的特点是,在一定条件下,金属表面的原子与非电解质中的氧化剂直接发生氧化还原反应,形成腐蚀产物。腐蚀过程中,电子的传递是在金属与氧化剂之间直接进行的,因而没有电流产生。单纯化学腐蚀的例子是较少见到的,例如温度在露点以上的锅炉烟气侧腐蚀为化学腐蚀。

#### 2. 电化学腐蚀

电化学腐蚀是指金属表面与通过离子导电的介质发生电化学作用而产生的破坏。任何以电化学机理进行的腐蚀反应,都至少包含有一个阳极反应和一个阴极反应,并以流过金属内部的电子流和介质中的离子流形成回路。阳极反应是金属离子从金属转移到介质中并放出电子的氧化过程;阴极反应是介质中的氧化剂组分吸收来自阳极的电子的还原过程。例如,碳钢在酸液中腐蚀时,在阳极区铁被氧化为  $\text{Fe}^{2+}$ ,所放出的电子由阳极(Fe)流至钢中的阴极( $\text{Fe}_3\text{C}$ )上,被  $\text{H}^+$  吸收而还原成氢气,即



由此可见,电化学腐蚀的特点在于:其腐蚀历程可分为两个相对独立并同时进行的过程;在被腐蚀的金属表面上一般有隔离的阳极区和阴极区;腐蚀反应过程中电子通过金属从阳极区流向阴极区,有电流产生。电化学腐蚀所产生的电流与反应物质的转移,可通过法拉第定律定量地联系起来。

金属的电化学腐蚀实质上是短路的原电池作用的结果,这种原电池称为腐蚀电池。电化学腐蚀是最普遍、最常见的腐蚀,如锅炉在水侧的腐蚀即是电化学腐蚀。

### 二、按腐蚀形态分类

按腐蚀形态不同,金属腐蚀可分为全面腐蚀和局部腐蚀。

#### 1. 全面腐蚀

金属表面几乎全面遭受的腐蚀,称为全面腐蚀。腐蚀分布可以是均匀的(称为均匀腐蚀),也可以是不均匀的。

#### 2. 局部腐蚀

金属表面只有一部分遭受腐蚀而其他部分基本上不腐蚀的,称为局部腐蚀。局部腐蚀又可分为:

(1) 电偶腐蚀。电偶腐蚀是由两种腐蚀电位不同的金属在同一介质中相互接触而产生的一种腐蚀。腐蚀电位较正的金属为阴极,较负的为阳极。阳极金属的溶解速度较其原来的腐蚀速度有所增加,阴极金属的则有所降低。这种腐蚀是由不同金属组成阴、阳极,因此称为电偶腐蚀,又称为双金属腐蚀;因其在两金属接触处发生,所以也称为接触腐蚀。它是由宏观电池引起的局部腐蚀,如凝汽器的铜管及其花板、不同材质管道连接处都可能发生这种腐蚀。

(2) 点蚀。点蚀又称小孔腐蚀，是一种极端的局部腐蚀形态。蚀点从金属表面发生后，向纵深发展的速度不小于横向发展的速度，腐蚀的结果是在金属上形成蚀点或小孔，而大部分金属则未受腐蚀或仅轻微腐蚀，这种腐蚀形态称为点蚀或小孔腐蚀。它常发生在金属表面钝化膜不完整或受损的部位。

(3) 缝隙腐蚀。金属在介质中，在有缝隙的地方或被其他物覆盖的表面上发生的较为严重的局部腐蚀，称为缝隙腐蚀，有时也称沉积腐蚀或垫衬腐蚀。这类腐蚀与金属表面上有少量积滞溶液有关。当金属重叠或金属表面有沉积物或垫衬，或金属上有孔隙时，都会造成少量溶液的积滞。

(4) 晶间腐蚀。在金属晶界上或其邻近区存在剧烈腐蚀，而晶粒的腐蚀则相对很小，这种腐蚀称为晶间腐蚀。腐蚀的结果是合金的强度和塑性下降或晶粒脱落、金属碎裂、设备过早损坏。晶间腐蚀是由于晶界区有新的相形成，金属中某一合金元素增多或减少，晶界变得非常活泼而造成的。这种腐蚀不易检查，设备会突然损坏，造成较大的危害。工程技术上用的许多合金都会发生晶间腐蚀，如铁基合金，特别是各种不锈钢（Fe-Cr、Fe-Ni-Cr、Fe-Mn-Ni-Cr 等）、镍基合金（Ni-Mo、Ni-Cr-Mo）及铝基合金（Al-Cu、Al-Mg-Si）等。

(5) 选择性腐蚀。合金中的某一组分由于腐蚀优先地溶解到电解质溶液中去，从而造成另一组分富集于金属表面上，这种腐蚀称为选择性腐蚀。例如，黄铜的脱锌、铝黄铜在酸中脱铝都属这类腐蚀。

(6) 磨损腐蚀。金属如果对周围环境发生相对运动，便会因摩擦而产生磨损，假如介质有腐蚀作用，则腐蚀和摩擦便对金属共同产生破坏作用。腐蚀与摩擦协同作用而引起的金属破坏现象称为磨损腐蚀。与金属摩擦的物质不同、金属与物质之间相对运动的方式和速度不同，则磨损腐蚀的表现形式不一样。有氧存在时，两构件沿着受载荷的接触面有轻微的振动或相对运动，从而使接触面出现小坑或细槽的现象，称为微振腐蚀。它是在大气而不是水溶液中进行非电化学过程。由高速流体引起的磨损腐蚀主要有湍流腐蚀和空泡腐蚀。在设备或部件的某些特定部位，如凝汽器、换热器的入口端，介质流速急剧增大而形成湍流，这种由湍流导致的磨损腐蚀称为湍流腐蚀。除了流体的很高流速作用外，如果还有液体或固体粒子、气泡对金属表面的冲击或冲刷造成的机械损伤作用，则称这种湍流腐蚀为冲击腐蚀（简称冲蚀）或冲刷腐蚀。它是高速流体的机械破坏与电化学腐蚀对金属共同作用的结果。由于金属表面附近的液体中有气泡产生和破灭，造成材料表面粗化，最终有可能丧失使用性能的破坏，称为空泡腐蚀，也称气蚀。它是电化学腐蚀和气泡破灭的冲击波对金属联合作用造成的，常常发生在高速流体流经形状复杂的金属表面、液体压强变化的场合，如汽轮机叶片、船用螺旋桨、泵叶轮等。

(7) 应力腐蚀破裂和腐蚀疲劳。

1) 应力腐蚀破裂常称为 SCC (Stress Corrosion Cracking)，是由应力和特定的腐蚀介质共同引起的金属破裂。这种破裂开始只有一些微小的裂纹，然后发展为宏观裂纹。裂纹穿透金属或合金，其他大部分表面实际不受腐蚀。裂纹因受许多因素的综合影响而有不同的形态，微裂纹有穿晶、沿晶和混合型三种。穿晶裂纹穿越晶粒延伸；沿晶裂纹沿晶界延伸；混合型裂纹穿晶和沿晶两种延伸同时存在。这种破裂除主干裂纹之外，还有许多分支同时存在。

2) 腐蚀疲劳是指金属在腐蚀介质和交变应力同时作用下产生的破坏。汽轮机处于湿蒸汽区的叶片可能产生腐蚀疲劳。

(8) 氢损伤。金属中存在氢或与氢反应引起的机械破坏, 统称为氢损伤。氢损伤有氢鼓泡、氢化物氢脆、氢腐蚀和可逆氢脆。

### 三、按腐蚀环境分类

按腐蚀环境不同, 金属腐蚀可分为干腐蚀和湿腐蚀。

#### 1. 干腐蚀

干腐蚀可分为失泽和高温氧化两种。

失泽是指金属在露点以上的常温干燥气体中腐蚀(氧化), 生成很薄的表面腐蚀产物, 从而使金属失去光泽。该腐蚀为化学腐蚀机理。

#### 2. 湿腐蚀

湿腐蚀可分为大气腐蚀、土壤腐蚀、海水腐蚀、微生物腐蚀、电解质溶液中的腐蚀和非电解质溶液中的腐蚀。

本书重点介绍金属在水溶液中的腐蚀, 也就是说以介绍电化学腐蚀为主。

## 第三节 金属腐蚀速度的表示方法

金属受到腐蚀后, 金属的外形、厚度、质量、机械性能、金相组织都会发生变化。这些性能的变化率都可用来表示金属腐蚀的程度。

(1) 对于均匀腐蚀速度, 常用单位时间内单位表面耗损金属的质量和厚度来表示。

1) 以质量表示腐蚀速度。这种表示方法是把腐蚀耗损的金属质量计算成单位时间内单位金属表面质量的变化值。失重的差值是金属腐蚀前的质量与清除腐蚀产物后质量间的差值; 增重的差值是金属腐蚀后带有腐蚀产物的质量与腐蚀前质量间的差值。一般均用失重表示腐蚀速度, 但当腐蚀产物牢固附着在金属表面而不易去除时, 也用增重表示。

$$\bar{v} = (m_0 - m_1) / At$$

式中  $\bar{v}$ ——腐蚀速度(以失重表示),  $g/(m^2 \cdot h)$ ;

$m_0$ ——金属腐蚀前的初始质量,  $g$ ;

$m_1$ ——金属腐蚀后已去除腐蚀产物的质量,  $g$ ;

$A$ ——金属的表面积,  $m^2$ ;

$t$ ——腐蚀进行的时间,  $h$ 。

或  $v^+ = (m_2 - m_0) / At$

式中  $v^+$ ——腐蚀速度(以增重表示),  $g/(m^2 \cdot h)$ ;

$m_2$ ——金属腐蚀后带有腐蚀产物的质量,  $g$ 。

2) 以厚度表示腐蚀速度。这种表示方法是将金属耗损的质量换算成厚度, 即

$$v_t = \bar{v} \times 365 \times 24 \times 10 / (100^2 \rho) = \bar{v} \times 8.76 / \rho$$

式中  $v_t$ ——以厚度表示的腐蚀速度,  $mm/a$ ;

$\rho$ ——金属的密度,  $g/cm^3$ 。

对于均匀腐蚀, 当用厚度表示腐蚀速度时, 可粗略分为 3 级, 以评定金属材料在介质中的耐蚀性, 见表 1-1。注意, 这不能用来评定局部腐蚀。



表 1-1 金属材料均匀腐蚀的等级

耐蚀性评定	耐蚀性等级	腐蚀厚度 (mm/a)
耐蚀	1	<0.1
一般 (可采用)	2	0.1~1.0
不耐蚀 (不可采用)	3	>1.0

(2) 对于电化学腐蚀, 腐蚀速度除可用单位时间里单位面积上金属被腐蚀的质量, 或用被腐蚀的厚度来表示外, 通常还可用电流密度 (单位面积上通过的电流强度) 来表示, 即以电流密度表示电化学腐蚀速度。

在金属的电化学腐蚀过程中, 被腐蚀的金属作为阳极, 发生氧化反应而不断被溶解, 同时释放出电子。释放出的电子数量越多, 即输出的电量越多, 意味着金属被溶解的量越多。因此, 金属电极上输出的电量显然与金属电极的溶解量之间存在定量关系, 这个定量关系就是法拉第 (Faraday) 定律。

根据法拉第定律, 当电极上有  $1F$  电量 ( $1F=96\,484.6\text{C/mol}$ ) 通过时, 电极上参加反应的物质质量恰好是  $1\text{mol}$  (以 Na 计)。例如当电极通过  $1F$  的电量时, 电极上阳极溶解或阴极沉积的金属量就正好是  $1\text{mol}$  (以 Na 计); 如果电极上发生的是  $\text{H}^+$  的阴极还原过程, 那么就有  $1\text{mol}$  (以 Na 计) 的氢气析出。因此, 根据通过的电量, 就可以算出溶解或析出的物质质量, 即

$$m = QM/Fn \quad (1-1)$$

式中  $m$ ——电极上溶解或析出的物质质量, g;

$Q$ ——电极上流过的电量, C;

$M$ ——反应物质的摩尔质量, g/mol;

$n$ ——反应物质的得失电子数;

$F$ ——法拉第常数, 为  $96\,484.6$ , C/mol。

又有

$$Q = It \quad (1-2)$$

式中  $I$ ——电流强度, A;

$t$ ——反应时间 (通电时间), s。

将式 (1-1) 代入式 (1-2) 得

$$I = nFm/Mt \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可以看出, 流过电极的电流强度正比于单位时间内电极上溶解或析出物质的摩尔数。然而, 电化学反应的速度是用单位时间单位电极表面上溶解或析出的物质摩尔数来表示的, 因此更为实用的是用电流密度来表示金属腐蚀的速度, 即

$$i = I/A = nFm/AMt \quad (1-4)$$

式中  $i$ ——电流密度 (单位表面上通过的电流强度),  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;

$A$ ——金属腐蚀部位的面积,  $\text{cm}^2$ 。

根据以上讨论, 可推导出金属电化学腐蚀速度的电流指标、质量指标和厚度指标之间的关系:

因为

$$v^- = m/At, \quad v_t = v^- / \rho$$

所以

$$i = nFv^- / M$$

$$\bar{v} = iM/nF \quad (1-5)$$

$$v_t = iM/nF\rho \quad (1-6)$$

如果上述各式中的参数采用的单位不同,则具体表达式中的系数也不一样。如  $\bar{v}$  的单位还可以用  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  或  $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ ;  $v_t$  的单位可以用  $\text{mm}/\text{a}$ , 也有用  $\text{in}/\text{a}$  的;  $i$  的单位可以用  $\text{A}/\text{m}^2$  或  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。当  $i$  用  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  表示时,其表达式为

$$\bar{v} [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})] = 8.95 \times 10^{-3} iM/n$$

$$v_t [\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})] = 8.95 \times 10^{-2} iM/n$$

表 1-2 列出了几种常用腐蚀速度单位之间的换算关系。使用时,只需将给定的单位乘以换算系数,就可以把给定的单位变换为换算单位。

因此,利用式 (1-5)、式 (1-6) 和表 1-2,可以很方便地在表示金属腐蚀速度的电流指标、质量指标及厚度指标之间进行单位换算。

表 1-2 几种常用腐蚀速度单位之间的换算关系

换算系数 给定单位	换算单位	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$	$\text{mm}/\text{a}$	$\text{in}/\text{a}$
$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$		1	24	240	$8.76/\rho$	$0.345/\rho$
$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$		0.042	1	10	$0.365/\rho$	$0.0144/\rho$
$\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$		0.0042	0.1	1	$0.0365/\rho$	$0.00144/\rho$
$\text{mm}/\text{a}$		$\rho/8.76$	$2.74\rho$	$27.4\rho$	1	0.0394
$\text{in}/\text{a}$		$2.9\rho$	$69.6\rho$	$696\rho$	25.4	1

例如,已知锌板面积  $A$  为  $15\text{cm}^2$ , 锌原子量  $M$  为 65.38, 锌板密度  $\rho$  为  $7.13\text{g}/\text{cm}^3$ , 锌板在酸中的腐蚀反应为



如测得腐蚀过程的阳极溶解电流强度  $I$  为  $1500\mu\text{A}$ , 则

$$i = I/A = 1500/15 = 100 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

$$\bar{v} = 8.95 \times 10^{-3} iM/n$$

$$= 8.95 \times 10^{-3} \times 100 \times 65.38/2 = 29.26 [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

$$v_t = 0.365\bar{v}/\rho = 0.365 \times 29.26/7.13 = 1.50 (\text{mm}/\text{a})$$

若  $\bar{v}$  以  $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$  为单位,则根据表 1-2,  $\bar{v} [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$  与  $\bar{v} [\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})]$  之间的换算系数为 10, 即  $29.26\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \times 10 = 292.6\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$ 。

#### 第四节 金属腐蚀防护的重要性

腐蚀问题不仅极其广泛,而且所造成的危害非常严重,主要表现在以下几个方面。

##### 一、巨大的经济损失

腐蚀造成的经济损失可分为直接损失和间接损失。直接损失包括更换被腐蚀的设备、构件,以及为防止腐蚀所进行的阴极保护、向水中添加缓蚀剂、选用耐蚀合金代替碳钢等防腐蚀措施的费用;间接损失包括设备停用的利润损失和腐蚀泄漏引起的产品流失、腐蚀破损或腐蚀产物积累引起的效率降低、腐蚀产物导致的产品污染等所带来的损失。间接损失远大于

直接损失，例如发电厂锅炉的一根水冷壁管只值几百元，而腐蚀引起爆管、导致停电，甚至大批工厂停工的间接损失是十分严重而又难以估计的。

据世界上工业发达国家的调查统计，腐蚀造成的经济损失占当年国民生产总值（GNP）的1.5%~4.2%。如美国1975年腐蚀造成的经济损失为700亿美元，为美国当年GNP的4.2%；而美国全年水灾、火灾、地震和飓风所造成的损失，据估算也不过123亿美元。因此，腐蚀损失远远大于上述各项自然灾害损失的总和。我国2003年出版的《中国腐蚀调查报告》表明，2000年我国的年腐蚀损失为人民币5千多亿元（相当于600多亿美元），约占GNP的6%，其中直接损失2278亿元，包括电力工业腐蚀损失16.5亿元、化学工业腐蚀损失300亿元、运输行业腐蚀损失303亿元、油气田腐蚀损失100亿元、煤炭行业腐蚀损失55.6亿元、建筑行业腐蚀损失1000亿元、机械工业腐蚀损失512.4亿元，损失之巨，令人触目惊心。随着国民经济的发展，这种损失还在继续增长，但其中1/4~1/3可以通过采取防腐蚀措施来避免。

## 二、资源和能源的严重浪费

很显然，由于腐蚀，大量得之不易的有用材料变成了废料。就腐蚀的量而言，据估计，全世界每年冶炼的金属中，约有1/3由于腐蚀而报废，即使其中2/3可以通过重新冶炼而回收，也仍有占总量10%以上的金属由于腐蚀而白白耗损了，其数量在1亿t以上。另外，冶炼这部分金属所耗费的人力、物力、能源也都白白浪费了，并且重新冶炼金属也需要耗费大量的人力、物力、能源（如电力、石油和煤炭等），一般炼制1t钢所需的能源可供一个普通家庭用3个月，虽然这些不是白白耗损，但也是腐蚀造成的资源浪费。就腐蚀速度而言，全世界每90s就有1t钢腐蚀成铁锈，全世界每生产1t铁，就有大约50%被用来补充生成铁锈的那一部分。

因此，腐蚀造成金属资源和能源的大量浪费。在不可再生资源 and 能源日趋短缺的当今世界，这是一个令人忧心的严重问题。

## 三、引发灾难性事故

腐蚀不仅引起严重的经济损失、资源和能源的严重浪费，而且给人民生活、生命财产也带来严重威胁。尽管腐蚀引起的灾难性事故和导致的伤亡人数尚无完整的统计数字，但腐蚀引起的灾难性事故确实屡见不鲜，像油气田起火、生产设备爆炸、桥梁断裂、舰船沉没、飞机坠毁等，不胜枚举，后果都极为严重。例如，1966年，某天然气井套管因硫化物应力腐蚀开裂而发生井喷，造成特大爆炸和人员伤亡事故，日产百万立方米的高产气井报废；1968年，威远至成都的输气管泄漏爆炸，死亡20余人；1971年，某天然气管线腐蚀断裂、爆炸，仅第一次爆炸的直接经济损失就达7000万元；1979年由于环境敏感断裂，引起某液化气罐爆炸，当场炸死30余人，重伤50多人；四川某气田因一个阀门腐蚀破裂漏气，造成大火持续22天，损失达6亿多元；1985年，一架日航波音747客机由于腐蚀断裂而坠毁，死亡500余人；1988年元旦，我国某电厂由于水冷壁管腐蚀，导致发生1人烫死、6人烫伤的重大事故；1997年6月27日，北京某化工厂18个乙烯原料储罐发生火灾（因硫化物腐蚀），停产达半年，直接经济损失达2亿多元，间接损失更大；2000年6月16日，广东某石化厂的焦化装置由于高温管线硫化物腐蚀，发生重大火灾，大火烧了25min。

灾难性事故严重地威胁着人们的安全，破坏经济建设的顺利进行，无法单纯用经济损失计算。

#### 四、污染人类生存的环境

化学、石油、农药等工业中，腐蚀造成生产过程中的“跑、冒、滴、漏”，可能使许多易燃、易爆、有害、有毒物质泄漏，即使不引发爆炸、起火、急性中毒等恶性事故，也会污染大气、土壤和水源，直接危害人们的健康，而且环境污染的后果往往难以在短期内消除，因而还可能殃及子孙，后患无穷。

#### 五、阻碍新技术的应用和发展

由于腐蚀现象的普遍性，许多新技术的应用和发展往往都会遇到腐蚀问题。如果腐蚀问题解决得好，则能起促进作用，例如不锈钢的发明和应用，促进了硝酸和合成氨工业的发展；反之，如果不能妥善解决腐蚀问题，则新技术的应用就会受到阻碍，甚至无法实现。众所周知，美国阿波罗登月飞船储存  $N_2O_4$  的高压容器曾发生应力腐蚀破裂，若不是及时研究出加入 0.6%NO 解决这一腐蚀问题，登月计划将会推迟若干年。又如煤的气化和液化转化技术的发展长期受阻，其所遇到的麻烦之一便是高温还原性环境中的腐蚀磨损问题。我国的发电机组正发展为超临界、超超临界压力机组，若不对热力设备的腐蚀问题采取对策，机组便无法安全经济运行。在国民经济发展中，类似的问题还有很多。

因此，金属的腐蚀防护对现代科学技术的发展有极为重要的意义。随着科学技术的发展，金属腐蚀防护越来越引起人们的关注。

所以说，腐蚀问题遍及各行各业，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、环境保护及人类社会的科技进步。腐蚀不会停止，但可降低其范围和程度。据专家们估计，如果将已掌握的防腐蚀技术在生产实践中推广应用，则可以使现有的腐蚀损失降低  $1/4 \sim 1/3$ 。由此可见，普及和加强腐蚀与防护知识教育、采取防腐蚀措施是极其重要的。

### 第五节 金属腐蚀防护方法概述

腐蚀破坏随处可见，腐蚀事故频频发生，这除了是腐蚀本身所具有的自发性外，很大程度上还是因为人们对腐蚀的危害性估计不足，对腐蚀与防护的重要意义认识不深，对腐蚀与防护科学缺乏应有的知识。

腐蚀防护是一项系统工程，它包括防腐蚀设计、合理选材、环境（介质）处理、防护工艺及设备腐蚀监测等。目前，获得广泛应用的腐蚀防护技术主要有以下四种，即合理选材、表面保护技术、环境（介质）处理和电化学保护技术。

#### 一、合理选材

为了保证设备的长期安全运行，必须将合理选材、正确设计、精心施工制造及良好的维护管理等几方面的工作密切结合起来，其中合理选材是首要环节。

合理选材主要是根据材料所接触介质的性质和条件、材料的耐蚀性能及价格，选择在介质中比较耐蚀、满足设计和经济性要求的材料。例如有的凝汽器在空冷区采用 BFe30-1-1 白铜管代替黄铜管来防止氨腐蚀。

#### 二、表面保护技术

表面保护技术是指利用覆盖层，尽量避免金属和腐蚀介质直接接触而使金属得到保护。金属表面的保护性覆盖层可分为金属镀层和非金属涂层。金属镀层的制造方法主要有热镀

(镀锌钢管)、渗镀(也称表面合金化)、电镀等;非金属涂层可分为无机涂层(包括搪瓷、橡胶、玻璃涂层和化学转化涂层,化学转化涂层如金属表面的氧化膜和磷化膜等)和有机涂层(包括塑料、涂料和防锈油等)。在火电厂,表面保护技术常用于热力设备的外部防护,例如用有机涂层和电镀层防止设备外表面的大气腐蚀、对水冷壁管外壁渗铝防止高温腐蚀等;另外,表面保护技术还常用于一些工作温度较低的热力设备的内部防护,例如炉外水处理设备及管道内壁的衬胶保护等。

### 三、环境(介质)处理

环境(介质)的特性显著地影响着设备的腐蚀破坏。环境(介质)处理即改变环境(介质)的特性。对热力设备来说,因腐蚀介质多为高温高压的水或蒸汽,所以主要通过水质调节,对介质的特性进行人为处理、控制,降低介质的腐蚀性,促使金属表面发生钝化而形成稳定、致密、完整、牢固的氧化物膜来防止高温介质的侵蚀,有效地减轻介质对设备的腐蚀程度。

改变环境(介质)的特性一般有两条途径:一是控制现有介质中的有害成分;二是添加少量物质降低介质的腐蚀性。

#### 1. 控制环境(介质)中的有害成分

介质的成分、浓度、pH值、湿度、压力、温度、流速等均影响金属在介质中的腐蚀,对这些因素进行恰当的控制可使设备的腐蚀速度大幅度下降。例如,当盐酸中无氧时,铜不发生腐蚀;在有氧条件下,铜就会发生腐蚀。在含氧情况下, $\text{Cl}^-$ 浓度只要有 $10\mu\text{g/g}$ ,奥氏体不锈钢就会发生应力腐蚀破裂;在无氧情况下,即使 $\text{Cl}^-$ 含量超过 $1000\mu\text{g/g}$ ,也不发生应力腐蚀破裂。为了控制直流锅炉机组水汽系统热力设备的氧腐蚀,不仅可采取给水除氧的方法,也可采取给水加氧(钝化)的方法。锅炉酸洗过程中,为了抑制 $\text{Fe}^{3+}$ 的腐蚀作用,可向酸洗液中添加适量的还原剂以控制 $\text{Fe}^{3+}$ 的浓度。这些例子都说明控制环境(介质)中的有害成分,特别是控制其中的关键性有害成分,对防止金属设备的腐蚀是极其重要的。通常使用的几种控制环境(介质)中有害成分的方法如下。

(1) 除去介质中的有害成分。从腐蚀电化学原理可知,凡是能抑制腐蚀原电池阴、阳极过程的措施都能达到防腐的目的。在中性水溶液中,如锅炉给水,当其电导率较高时,其有害成分是溶解在水中的氧,此时的阴极反应是 $2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}+\text{O}_2\rightarrow 4\text{OH}^-$ ,该阴极反应速度的快慢,决定着作为阳极的金属发生活性溶解的快慢。实验证明:在 $\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$ 体系中,在 $4<\text{pH}<10$ 的范围内,Fe的腐蚀速度几乎与pH值无关,只与其中的溶氧量有关。因此除氧是改善耐蚀性的有效措施,除氧方法有两种,即加热除氧法和化学除氧法。

(2) 控制介质的pH值。常用金属的腐蚀速度与介质pH值的关系如图1-1所示。由此可知,贵金属在强酸、强碱性介质中耐腐蚀;两性金属在强酸、强碱性介质中不耐蚀;其他金属在 $\text{pH}>10$ 时,耐蚀性大幅度提高(但pH值过高,耐蚀性又会下降,如Fe在碱浓度更高的介质中,腐蚀加快)。为减少腐蚀,应控制介质的pH值在适当的范围内。

控制pH值的方法是在介质中加入化学药品。例如锅炉给水和工业用冷却水中若有酸性物质,则应向其中加入碱性物质,如氨水等。

氨可以中和水中的 $\text{CO}_2$ ,提高溶液的pH值,使溶液呈碱

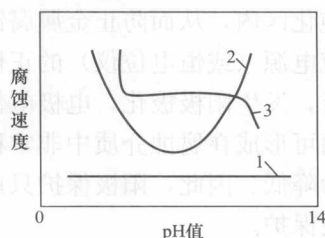


图1-1 pH值对金属腐蚀速度的影响

1—Au、Pt; 2—Al、Zn、Pb;  
3—Fe、Cd、Mg、Ni等

性,促进金属的钝化。加氨处理可能导致黄铜的腐蚀开裂,但若水中无氧,则不会发生腐蚀开裂现象。因此加氨处理的水应先进行脱氧处理,当难以进行脱氧处理时,可用有机胺代替氨来调整 pH 值,如吗啉( $C_4H_8ONH$ )和环己胺( $C_6H_{11}NH_2$ )等。因为这类胺具有碱性,能中和水中的酸,又不会腐蚀黄铜,但药品价格太贵。

(3)降低气体介质的湿度。当气体介质中含水多,其水蒸气的压力达到饱和蒸汽压时,水蒸气就从大气中凝结出来,慢慢地沉积在材料表面上,形成水膜,加速材料腐蚀。如潮湿大气比干燥大气的腐蚀性强,且腐蚀速率随气体湿度的增加而增加,因而降低气体的湿度是减缓腐蚀的有效措施之一。降低湿度的方法有以下几种:采用干燥剂吸收气体中的水分,如在热力设备干法停用保护过程中,使用干燥剂吸收空气中的湿分;采用冷凝法从气体中除去水分或采用提高温度的方法降低湿度,使水蒸气不能凝结。

#### 2. 向介质中添加缓蚀剂

在腐蚀介质中加入少量就能大大降低金属腐蚀速度的物质,称为缓蚀剂,例如锅炉酸洗缓蚀剂。

### 四、电化学保护

电化学保护是利用外部电流使金属的电极电位发生改变,从而防止金属腐蚀的一种方法,包括阴极保护和阳极保护两种方法。

#### 1. 阴极保护

阴极保护是在金属表面上通入足够大的外部阴极电流,使金属的电极电位负移、阳极溶解速度减小(此时腐蚀电池阴极反应所需要的电子绝大部分由外部阴极电流提供),从而防止金属腐蚀的一种电化学保护方法。这种保护方法又可分为牺牲阳极保护和外加电流阴极保护两种方法。牺牲阳极保护是在被保护金属上连接一个电位较负的金属(称为牺牲阳极),使被保护金属成为其与牺牲阳极所构成的短路原电池的阴极,从而以牺牲阳极的溶解为代价来防止被保护金属的腐蚀。外加电流阴极保护是将被保护金属与直流电源(或恒电位仪)的负极相连,该电源的正极与在同一腐蚀介质中的另一种电子导体材料(辅助阳极)相连,这样被保护金属在其与辅助阳极构成的电解池中作为阴极,发生阴极极化,电极电位被控制在阴极保护的电位范围内,从而以消耗电能为代价来防止被保护金属的腐蚀。凝汽器水侧管板和管端部、地下取水管道外壁等均可采用牺牲阳极或外加电流阴极保护。

#### 2. 阳极保护

阳极保护是在金属表面上通入足够大的阳极电流,使金属的电极电位正移达到并保持在钝化区内,从而防止金属腐蚀的一种电化学保护方法。阳极保护通常是将被保护的金属与直流电源(或恒电位仪)的正极相连,这样被保护金属在它和辅助阴极构成的电解池中作为阳极,发生阳极极化,电极电位被控制在钝化区的电位范围内而得到保护。此时,由于金属表面可形成在腐蚀介质中非常稳定的保护膜(金属表面发生钝化),从而使金属的腐蚀速度大为降低。因此,阳极保护只适用于可能发生钝化的金属,如碳钢或不锈钢制浓硫酸贮槽的阳极保护。

一台设备或一项工程设施要获得良好的腐蚀防护效果,必须根据设备或工程设施的工作状况、环境条件来相应地采取适宜的腐蚀防护技术,切不可简单地生搬硬套。只有正确理解腐蚀的基本原理,掌握腐蚀过程的基本规律,才能因地制宜、灵活应用现有的腐蚀防护技术,并积极开发新的腐蚀防护技术,保证设备能长期安全运行,取得最佳的经济效益。良好







无穷远处移入相 (I) 内所做的总电功是这两项电功之和, 即  $\phi^{(I)} = \phi^{(I)} + \chi^{(I)}$ 。  $\phi^{(I)}$  称为相 (I) 的内电位或伽伐尼电位。如果进入相 (I) 的是电量为  $Q$  的正电荷, 则需做电功  $Q\phi^{(I)}$ 。正如上面指出的, 并不存在脱离质量的电荷, 因此当使带有电荷的物质越过相 (I) 表面进入相 (I) 内部时, 除了须对表面层做电功  $\chi^{(I)}$  外, 还必须考虑携带电荷的物质与相 (I) 内原有物质之间的化学作用力所做的化学功, 这就是荷电物质在相 (I) 中的化学位  $\mu_i^{(I)}$ 。由于这一步骤涉及电学和化学的联合作用问题, 无法区分其中有多少是电学作用, 多少是化学作用, 而且即使只考虑电学作用的表面电位  $\chi^{(I)}$ , 它也是不能测量的, 所以相 (I) 的内电位  $\phi^{(I)}$  是不可测量的。

因此, 将  $1\text{mol Me}^{n+}$  从无穷远处移入相 (I) 内部时, 它所涉及的全部能量变化就是正离子  $\text{Me}^{n+}$  需做的化学功与电功之和。在这里, 正离子  $\text{Me}^{n+}$  所做的化学功是  $\text{Me}^{n+}$  在相 (I) 中的化学位  $\mu_{\text{Me}^{n+}}^{(I)}$ , 所做的电功是  $1\text{mol Me}^{n+}$  携带的电量与相 (I) 的内电位  $\phi^{(I)}$  的乘积。  $1\text{mol Me}^{n+}$  共携带  $nF$  正电荷的电量, 其相应的电功为  $+nF\phi^{(I)}$ , 所以

$$\mu_{\text{Me}^{n+}}^{(I)} + nF\phi^{(I)} = \bar{\mu}_{\text{Me}^{n+}}^{(I)}$$

$\bar{\mu}_i$  在电化学中定义为电化学位, 故  $\bar{\mu}_{\text{Me}^{n+}}^{(I)}$  是  $\text{Me}^{n+}$  在相 (I) 中的电化学位, 它具有能量的量纲。

以上讨论的是一个物质相的电位和电化学位问题。在电化学中经常遇到的是两种或两种以上的不同物质相互接触的情况。对于两种不同物质相之间的电位差将涉及电极和电极电位问题。

### 三、电极与电极反应

在电化学中, 电极可能有下面两种不同的含义: 第一种含义是指电子导体 (主要是金属) 和离子导体 (主要是电解质溶液) 相接触而组成的体系, 常用“金属|电解质溶液”来表示, 如“ $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$ ”表示金属铜与  $\text{CuSO}_4$  溶液接触所组成的电极体系, 称为铜电极; 第二种含义是仅对电子导体而言, 此时铜电极仅指金属铜, 常说的铂电极、汞电极和石墨电极也都是这种含义。

电极反应是在电极两相界面上发生的得失电子的电化学反应。一般情况下, 它可表示为



式中 O——可以得到电子、被还原的氧化态物质;  
R——可以失去电子、被氧化的还原态物质;  
 $n$ ——反应的得失电子数。

上述反应式表示, 同一个电极反应有两个反应方向, 其中反应物得到电子的反应称为还原反应, 反应物失去电子的反应称为氧化反应。氧化反应与还原反应速度相等时, 电极反应达到平衡状态。此时, 反应体系不仅保持电荷平衡, 即还原态物质失去的电子恰好为氧化态物质所吸收, 而且保持物质平衡, 即氧化态物质和还原态物质的数量不变。

很多情况下, 电极反应是构成电极体系的金属的溶解 (失去电子而变成金属离子溶解于电解质溶液中) 及其逆反应, 如  $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$  体系的电极反应可表示为  $\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$ , 这类电极称为金属电极。