

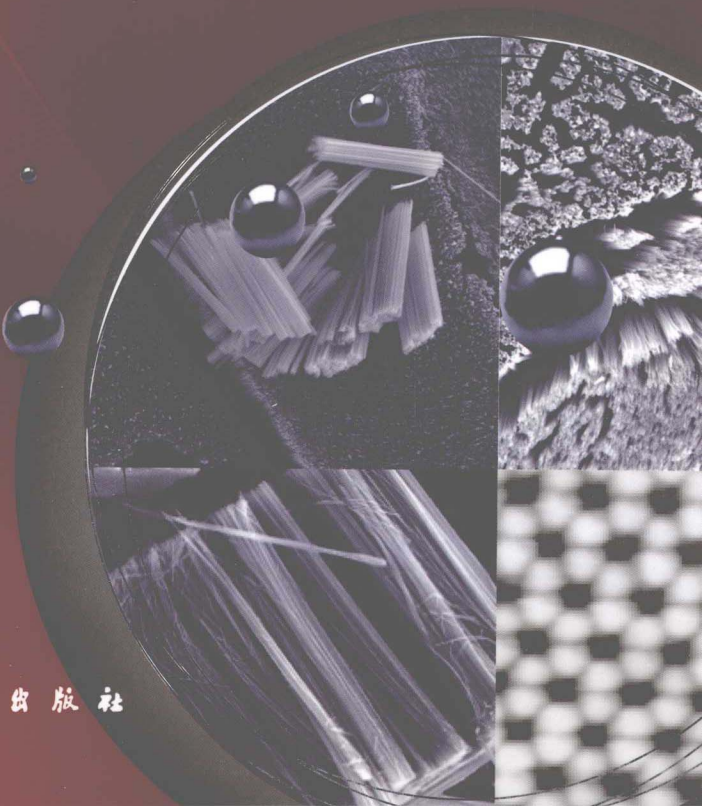


实用电镀技术丛书 **第二版**

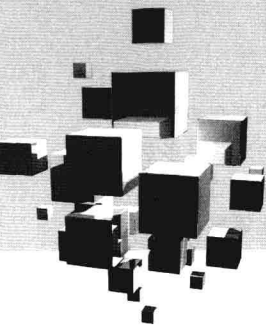
中国表面工程协会电镀分会 组织编写

现代功能性镀层

姚素薇 张卫国 王宏智 编著



化学工业出版社



实用电镀技术丛书 **第二版**

中国表面工程协会电镀分会 组织编写

现代功能性镀层

姚素薇 张卫国 王宏智 编著



化学工业出版社

·北京·

本书是《实用电镀技术丛书》(第二版)之一。它着重介绍利用电镀和化学镀制备各种功能性镀层,其中包括纳米多层膜、颗粒膜,纳米线及多层线(阵列)等,它们具有巨磁电阻、超高磁记录密度和光电响应等特性。共分八章,内容包括:耐腐蚀性镀层,耐磨、减摩镀层,高温抗氧化镀层,磁性镀层,抗菌镀层,具有光学性能的镀层,电接触镀层和具有催化活性的镀层。书中较详细地介绍了这些镀层的制备工艺、性能及其应用,有的还对特殊功能的作用机制进行了讨论。

本书适合于从事电化学和材料科学工作的科技人员使用,也可以作为相关专业的大学生、研究生和电镀工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代功能性镀层/姚素薇等编著. —北京:化学工业出版社, 2012.9
(实用电镀技术丛书)
ISBN 978-7-122-15098-1

I. ①现… II. ①姚… III. ①镀层 IV. ①TQ153

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第192371号

责任编辑:杜进祥

文字编辑:孙凤英

责任校对:宋夏

装帧设计:尹琳琳

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)

印装:三河市延风印装厂

850mm×1168mm 1/32 印张13¼ 字数377千字

2013年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

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: 48.00 元

版权所有 违者必究

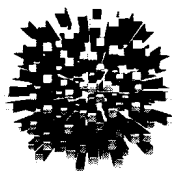
《实用电镀技术丛书》(第二版)编委会

主任:郭鹤桐 胡铁骑

副主任:姚素薇 屠振密

委员:(以姓名笔画排序)

王锡春	冯绍彬	朱立群	向荣	李宁
李异	李新华	旷亚非	何生龙	宋华
张允诚	张立茗	张宏祥	张景双	陈春成
陈钧武	胡如南	胡铁骑	姚素薇	秦宝兴
袁国伟	徐红娣	郭鹤桐	曹立新	屠振密
嵇永康	黎樵桑			



序言

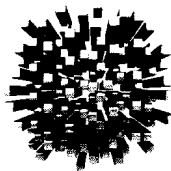
《实用电镀技术丛书》自2003年陆续问世以来，一直受到广大电镀工作者的热烈欢迎。在相同类型书籍已琳琅满目的今天，仍能取得如此好的成绩，绝不是偶然的。这首先是因为电镀技术面对的应用对象极其广泛，对专业书籍的需求量的确很大。通过电镀能达到保护金属基体免遭腐蚀、能使金属与非金属器件表面获得美丽的外观、可赋予器件表面机械物理与化学的各种特殊功能、得以用较薄的镀层来取代实体的贵重金属材料等。在各行各业中为实现这些目的，自然要极大地关注它。其次，应得益于丛书选定的各册内容都比较系统而且全面。它既包括了各个镀种的重点工艺，又有镀液与镀层的检测手段，还对大家十分关心的清洁生产及添加剂的选用问题列出专册加以论述。另外还有一个原因就是参加编写的人员均系国内知名的专家学者。他们不但学识渊博，而且有着相当好的生产实践经验。在编写过程中注意到了理论与实际的结合，并在选材上认真贯彻了这部丛书的实用二字。

电镀技术属于生产技术性学科。在学科发展上它有别于基础理论。一般说来，基础理论性学科的发展比较缓慢，它有一定的相对稳定性，而生产工艺性学科则不然，它的发展变化是相当快的。自《实用电镀技术丛书》开始出版至今已七年有余，在此期间有关电镀的新工艺、新技术、新材料、新设备会不断涌现。这些革新自然

应当在书中有所体现，才能使之紧紧跟随上科学技术前进的步伐。显然，丛书经修改后的再版很有必要。此外，任何一部书出版后，无论是学术内容上，还是文字叙述上总会存在一些令作者本人感到不够满意的地方，也就是说，总会存在一些令人遗憾之处。同时，还会有热心的读者提出一些理应修改的建设性意见，也需要有个改正的机会。这是个很普遍的现象。这也正是丛书再版时应当完成的任务。经过作者们的努力，我们期待着再版后的新书，会受到更多读者的欢迎。

郭砢桐

中国表面工程协会电镀分会名誉理事长



前言

近年来随着科学技术的迅猛发展，特别是电子工业的不断进步，现代工业对电镀或化学镀镀层的性质和功能，提出越来越多与传统装饰性、防护性镀层不同的要求，有些要求是十分苛刻的。

为了满足这种需求，在原有电镀和化学镀的基础上，涌现出许多合金镀层（包括非晶及纳米晶镀层）、复合镀层、纳米多层膜及纳米颗粒膜等功能性镀层。特别是进入 21 世纪以来，随着纳米科学与技术的飞速发展，电镀和化学镀已成为制备纳米材料的重要方法之一。例如，人们利用 AAO 模板，在纳米孔内电沉积金属或半导体，可获得各种金属纳米线、多层纳米线及半导体纳米线（阵列）等。这些纳米材料具有超高磁记录密度、巨磁电阻和光电响应等特性，成为制作微纳米器件的主要材料。为此，将国内外发展较快、工业应用意义重大以及近年发展起来的前沿电镀技术和功能镀层，并结合作者多年的科研工作撰写成书，希望能够对读者有参考价值。

本书在撰写过程中参阅和引用了大量国内外文献，有些内容所涉及的技术已经得到实际的应用，而有些内容特别是有关纳米材料和技术的还处于研究阶段，虽然尚未普遍应用于生产实际，但却有着重要的应用前景，所以也用了较大篇幅予以介绍。

功能镀层的制作方法分为干法和湿法两种，干法是指物理方法和物理化学方法，如真空蒸镀法、离子注入法、CVD 和等离子体技术等；湿法包括电镀、化学镀、熔融盐电镀和铝阳极氧化等。本书只介绍用电化学方法即电镀和化学镀法制备的功能性镀层。

本书共分八章，包括耐腐蚀性镀层，耐磨、减摩镀层，高温抗氧化镀层，磁性镀层，抗菌镀层，具有光学性能的镀层，电接触镀层，具有催化活性的镀层；其中第一章、第三章、第四章、第五章、第六章、第七章由姚素薇编写，第二章由王宏智编写，第八章由张卫国编写。

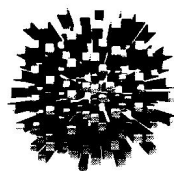
书中的许多内容是本研究室的教师和研究生多年来共同完成的科研成果；其他部分是国内、外同仁的研究成果。如果本书对读者的工作有所助益，我们首先应该感谢各章所列文献的作者们。同时还要感谢化学工业出版社对本书给予的关切和辛勤劳动。

此外，在本书编写的过程中，本室的研究生在资料搜集和整理方面做了大量的工作，在此一并对他们表示感谢。

本书涉及学科范围较广，尽管我们做了许多努力，但受专业面限制，书中定会存在许多不妥之处，希望专家和读者不吝指正。

姚素薇

2012年7月



目录



第一章 耐腐蚀性镀层	1
第一节 金属腐蚀与测试方法	1
一、金属镀层的腐蚀	1
二、金属腐蚀的测试方法	2
第二节 非晶态合金镀层	10
一、非晶态镀层的结构特点	10
二、非晶态电镀的种类	14
三、电镀法制备非晶材料的优点	15
第三节 Ni-P 合金镀层的性能及其应用	15
一、Ni-P 合金的发展状况	15
二、Ni-P 合金镀层的优良性能	19
第四节 化学镀非晶态 Ni-P 合金	30
一、化学镀镍液的工艺配方及工艺流程	30
二、化学镀镍液的组成和各成分的作用	31
三、化学镀镍液的使用寿命和维护	35
第五节 电镀 Ni-W 非晶态合金	36
一、Ni-W 非晶态合金的耐腐蚀性能	37
二、Ni-W 非晶态合金的制备	43
三、Ni-W 电沉积过程与反应机理	48
第六节 电镀 Ni-W-P 非晶态合金镀层	49
一、Ni-W-P 非晶态合金的制备方法	50
二、Ni-W-P 非晶态合金的腐蚀行为	54
第七节 Fe-W 非晶态镀层的制备及其耐腐蚀性能	56

一、电镀 Fe-W 非晶态镀层	56
二、Fe-W 非晶态镀层的腐蚀行为与耐腐蚀机理	57
参考文献	67



第二章 耐磨减摩镀层

69

第一节 电镀耐磨性镀层	69
一、概述	69
二、镍基耐磨复合镀层	70
三、钴基耐磨镀层	85
四、铬基耐磨复合镀层	90
第二节 化学镀耐磨复合镀层	93
第三节 自润滑镀层	98
一、概述	98
二、电镀 Ni/PTFE 复合镀层	99
三、化学镀自润滑复合镀层	104
参考文献	109



第三章 电镀耐高温抗氧化镀层

112

第一节 电沉积 Ni/ZrO ₂ 梯度功能镀层	112
一、梯度功能镀层	112
二、电沉积 Ni/ZrO ₂ 梯度功能镀层	114
三、Ni/ZrO ₂ 梯度镀层的高温抗氧化性能	116
四、Ni/ZrO ₂ 梯度镀层的韧性及延展性研究	121
第二节 电镀 Ni-W 合金梯度镀层	126
第三节 非晶态 Ni-P 与 Ni-W 合金镀层的高温氧化性能	133
一、化学镀非晶态 Ni-P 合金镀层的高温氧化性能	133
二、非晶态 Ni-W 合金镀层的高温氧化性能	136
三、电刷镀 Ni-W 合金镀层及耐高温与高温磨损特性	137
第四节 金属/陶瓷微粒复合镀层的高温氧化性能	141
一、Ni/SiC 纳米复合镀层耐高温氧化性能	141

二、Ni-W/ZrO ₂ 纳米复合镀层	141
三、脉冲法制备 RE-Ni-W-P/SiC 复合镀层的抗高温氧化性能	144
参考文献	149

第四章 磁性镀层

第一节 绪论	150
一、概述	150
二、电镀磁记录介质材料	153
三、电镀纳米磁性材料	155
四、在磁头材料中的应用	162
第二节 磁学基础知识	164
一、物质的磁性	164
二、磁性材料的分类	168
三、磁记录原理和磁记录材料	169
四、磁致电阻效应	172
第三节 电镀巨磁电阻材料——纳米金属多层膜	173
一、Cu/Co 纳米金属多层膜的制备	174
二、Ni ₈₀ Fe ₂₀ /Cu 纳米金属多层膜的制备	183
第四节 电镀纳米金属颗粒膜	188
一、电镀纳米金属颗粒膜	189
二、纳米金属颗粒膜的 X 射线衍射分析 (XRD)	190
三、纳米金属颗粒膜的透射电镜分析 (TEM)	191
四、Co 含量对巨磁电阻效应的影响	192
五、退火温度对巨磁电阻效应的影响	193
六、颗粒膜样品的磁性能	194
第五节 高度有序铝阳极氧化膜——AAO 模板	196
一、概述	196
二、高度有序铝阳极氧化膜——AAO 模板的制备工艺	198
三、多孔铝阳极氧化膜 (AAO 模板) 的表征	201
四、纳米孔的自组织过程	203
五、AAO 模板的纳米力学性能研究	206

六、AAO 模板的实际应用	207
第六节 高度有序纳米线(棒)阵列的电沉积方法	208
一、模板电沉积法制备一维纳米材料	208
二、Co/Cu 纳米多层线(阵列)的制备	208
三、多层纳米线的应用	217
第七节 电镀巨磁电阻材料——自旋阀多层膜	
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$	218
一、 $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$ 自旋阀多层膜的制备	219
二、自旋阀多层膜的 XRD 表征	221
三、自旋阀多层膜的磁性能	223
第八节 电沉积一维巨磁电阻材料——自旋阀纳米	
多层线 $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$	227
一、 $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$ 自旋阀多层线的制备	228
二、 $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$ 纳米多层线的表征	230
三、 $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_n$ 纳米多层线的巨磁电阻	
性能	234
第九节 磁光记录镀层	238
一、第一代磁光记录介质——稀土-过渡族金属(RE-	
TM) 非晶态合金薄膜	238
二、第二代磁光记录介质——Pt(Pb)/Co 超晶格多	
层膜	239
三、超高密度磁光记录介质——纳米线阵列	240
参考文献	241



第五章 抗菌镀层

245

第一节 绪论	245
一、引言	245
二、表面抗菌处理技术	249
第二节 抗菌铝阳极氧化膜	253
一、铝阳极氧化多孔膜的制备	253
二、电沉积 Cu 的抗菌铝阳极氧化膜	254
三、电沉积银的抗菌铝阳极氧化膜	257
第三节 Ni 与 Ni-P 基抗菌复合镀层	259

一、Ni-P/（载 Ni ²⁺ 白炭黑）复合镀层	259
二、Ni-P/载银沸石复合镀层及抗菌性能	262
第四节 Ni/TiO ₂ 与 Ni-P/TiO ₂ 复合镀层及其抗菌性能	265
一、Ni/TiO ₂ 复合镀层的制备及抗菌性能	265
二、Ni-P/TiO ₂ 复合镀层的制备	269
参考文献	271

第六章 具有光学性能的镀层

第一节 基础知识	274
一、半导体的能级结构与导电性能	274
二、半导体的 p-n 结	276
三、光电效应	277
四、半导体/电解质溶液界面处空间电荷的形成和能带弯曲	278
五、半导体/溶液界面光生电压的产生	280
第二节 具有光学特性薄膜镀层简介	281
一、光反射镀层	281
二、防光反射镀层（增透膜）	281
三、光的选择性吸收镀层	282
四、具有光电响应特性的薄膜镀层	283
第三节 具有光电响应特性薄膜镀层的制备及应用	286
一、高度有序铝阳极氧化膜（AAO）的应用	287
二、二氧化钛纳米管阵列电极	290
三、模板合成法制备光电转化薄膜及其光电性能	302
四、模板合成光致发光纳米材料——氧化锌纳米线阵列	306
五、光（电）催化析氢电极材料	313
参考文献	315

第七章 电接触镀层

第一节 概述	320
一、电接触材料的发展概况	320

二、电接触与电接触材料	321
三、电接触材料的性能	322
四、接触电阻	323
第二节 电接触镀层	326
一、铂基电接触镀层	327
二、金基电接触镀层	329
三、银基电接触镀层	337
四、展望	356
参考文献	357

第八章 具有催化活性的镀层 359

第一节 电催化析氢和光电催化析氢电极材料	359
一、引言	359
二、具有电催化析氢活性的镀层	365
第二节 镍基合金析氢活性阴极	367
一、Ni-S 合金催化析氢电极	367
二、Ni-Mo 合金催化析氢电极	371
三、Ni-W-P 合金催化析氢电极	375
四、复合型析氢活性阴极	380
第三节 光(电)催化析氢电极材料	389
一、金属/半导体纳米微粒复合电极及其光(电) 催化析氢性能	389
二、半导体上沉积纳米金属镀层及其光电催化 析氢性能	395
三、半导体修饰纳米金属镀层及其光电催化析氢 性能	404
第四节 具有析氧催化活性的镀层	410
一、具有析氧催化活性的电极	410
二、析氧反应的机理研究	415
参考文献	417

第一章 耐腐蚀性镀层

第一节

金属腐蚀与测试方法

一、金属镀层的腐蚀

1. 腐蚀微电池

当金属基体上镀覆一层金属时，由于两种金属具有不同的电极电位，它们在腐蚀介质中会形成腐蚀微电池。在腐蚀微电池中，电极电位负的金属发生溶解，称作腐蚀微电池的阳极，而电极电位较正的金属受到保护，称作腐蚀微电池的阴极。

2. 阳极镀层与阴极镀层

如果镀层金属的电极电位比基体金属的电极电位负，那么在腐蚀微电池中镀层为阳极，基体金属为阴极，此时镀层称为阳极镀层。反之，镀层金属的电极电位比基体金属的正，在形成微电池时，遭到腐蚀的就是作为阳极的基体金属，而镀层金属受到保护，该镀层称为阴极镀层。

例如在铁上镀锌时，由于锌的标准电极电位 ($\varphi_{\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}}^{\ominus} = -0.762\text{V}$) 比铁的标准电极电位 ($\varphi_{\text{Fe}/\text{Fe}^{2+}}^{\ominus} = -0.44\text{V}$) 负，所以锌镀层溶解，发生 $\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-}$ 的氧化反应，锌作为阳极镀层受到腐蚀。基体铁为腐蚀微电池的阴极，腐蚀介质中的 H^{+} 就会在铁上得电子发生 $2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} \longrightarrow \text{H}_2$ 的还原反应， H_2 在铁上析出，铁不受腐蚀。

如果阳极镀层如钢铁上的镀锌层致密无孔，那么它对钢铁具有机械保护作用。但是，一旦镀层存在针孔或划痕等缺陷时，再加上外部环境潮湿，大气中又含有 SO_2 、 CO 、 CO_2 等工业废气时，锌、铁和腐蚀介质就会形成腐蚀微电池，此时锌镀层就会溶解，受到腐蚀，而基体金属受到保护。所以，阳极镀层对基体还起到电化学保护作用。为了提高镀层对基体金属的防腐蚀能力，应当尽量选择阳极镀层。

阴极镀层则不然，阴极镀层只有在致密无孔时，才能够对基体起到机械保护作用；一旦存在针孔或被划伤，基体金属与腐蚀介质接触，会加速基体金属腐蚀的发生。例如，锌压铸件镀镍属于阴极镀层，锌的标准电极电位 ($\varphi_{\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}}^{\ominus} = -0.762\text{V}$) 比镍的标准电极电位 ($\varphi_{\text{Ni}/\text{Ni}^{2+}}^{\ominus} = -0.23\text{V}$) 负，锌压铸件为阳极，而镍镀层为阴极。镍镀层如果致密无孔，会对基体起到机械保护作用；当镍镀层存在缺陷，又与腐蚀介质接触时，基体金属锌溶解，发生 $\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ 的氧化反应，而镍镀层上析出 H_2 ，镍不受腐蚀。

3. 阳极镀层与阴极镀层的判定

表 1-1 给出常用金属的标准电极电位 φ^{\ominus} 值，当两种金属相互接触形成腐蚀微电池时，从它们的标准电极电位 φ^{\ominus} 值可以判断镀层是属于阴极镀层还是阳极镀层。但是，金属在不同腐蚀介质中的电极电位是变化的，例如前面所说的钢铁上的镀锌层，在一般条件下是典型的阳极镀层，但是在 $70\sim 80^\circ\text{C}$ 的热水中，锌的电极电位变得比铁正了，因而锌变成了阴极镀层。又如，锡镀层对钢铁而言在一般条件下为阴极镀层，但是它在有机酸中却变成了阳极镀层。所以，是阴极镀层还是阳极镀层，应由具体情况来定。

二、金属腐蚀的测试方法

金属腐蚀分为均匀腐蚀和局部腐蚀。对于均匀腐蚀，用重量法可以表征其腐蚀速率；局部腐蚀又可分为电偶腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等八类，电化学测试方法是均匀腐蚀和局部腐蚀的通用测试方法。

工业发达国家有自己的腐蚀标准测试体系，我国也制定了许多

表 1-1 在 25℃ 的水溶液中金属的标准电极电位

电极反应	标准电位/V	电极反应	标准电位/V
$\text{Li}^+ + e \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.045	$\text{CrO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} + 3e \rightleftharpoons$	-0.12
$\text{K}^+ + e \rightleftharpoons \text{K}$	-2.925	$\text{Cr}(\text{OH})_3 + 5\text{OH}^-$	
$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.90	$\text{Fe}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.036
$\text{Ca}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.87	$2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.000
$\text{Na}^+ + e \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.714	$\text{Sn}^{4+} + 4e \rightleftharpoons \text{Sn}$	+0.05
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.37	$\text{Sn}^{4+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}$	+0.15
$\text{Ti}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1.63	$\text{Cu}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	+0.167
$\text{Be}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Be}$	-1.70	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0.34
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.56	$2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{气}) + 4e \rightleftharpoons$	+0.401
$\text{Mn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1.18	4OH^-	
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.763	$\text{Cu}^+ + e \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0.521
$\text{Cr}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0.74	$\text{Hg}_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	+0.789
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44	$\text{Fe}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+0.771
$\text{Cd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.403	$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0.799
$\text{In}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{In}$	-0.35	$\text{Pd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pd}$	+0.83
$\text{Tl}^+ + e \rightleftharpoons \text{Tl}$	-0.34	$\text{Hg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0.854
$\text{Co}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Co}$	-0.277	$\text{Pt}^{4+} + 4e \rightleftharpoons \text{Pt}$	+0.86
$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.25	$\text{Pt}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pt}$	+1.19
$\text{Mo}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Mo}$	-0.22	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6e \rightleftharpoons$	+1.36
$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.136	$2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	
$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.126	$\text{Au}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Au}$	+1.50
		$\text{Au}^+ + e \rightleftharpoons \text{Au}$	+1.68

腐蚀测试方法的国家标准，如人造气氛腐蚀试验（盐雾试验），标准号为 GB/T 10125—1997；黑色金属室外大气暴露试验，标准号为 GB/T 14165—93。需要时应该查阅有关国家标准。

这里重点介绍常用的两种金属腐蚀测试方法：电化学测试方法和重量法。

1. 电化学测试方法^[1]

(1) 阳极极化曲线的测试

极化曲线可以采用控制电位（恒电位）和控制电流（恒电流）两种方法测量。对于阳极极化曲线特别是具有钝化行为的阳极极化曲线，应采用恒电位法测试。例如图 1-1 为不锈钢在 0.5mol/L 硫酸溶液中的阳极极化曲线，图中的横坐标为电极电位（V），纵坐标为腐蚀速度 $i(\text{mA}/\text{cm}^2)$ 。当腐蚀速度变化的范围很宽如钝化电