



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

电镀溶液与镀层性能测试

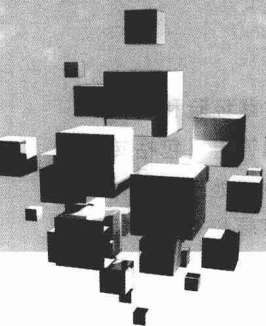
第二版

曹立新 石金声 石磊 梅晓宏 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

电镀溶液与镀层性能测试

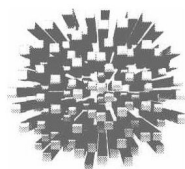
第二版

曹立新 石金声 石磊 梅晓宏 编著
张景双 主审



化学工业出版社

· 北京 ·



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。

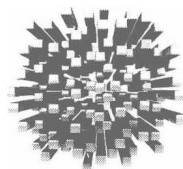
电镀技术属于生产技术性学科。在学科发展上它有别于基础理论。一般说来，基础理论性学科的发展比较缓慢，它有一定的相对稳定性，而生产工艺性学科则不然，它的发展变化是相当快的。自《实用电镀技术丛书》开始出版至今已七年有余，在此期间有关电镀的新工艺、新技术、新材料、新设备会不断涌现。这些革新自然

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。

郭砬桐

中国表面工程协会电镀分会名誉理事长

2010年5月



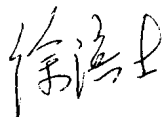
第一版序言

电镀（包括一些与液相中化学表面成膜反应有关的过程）既能赋予各种金属和非金属器件美丽的外观和优异的耐腐蚀性能、耐磨损性能，又能使器件表面获得多种特殊的功能，使之成为新型的功能材料，甚至还可作为形成某些金属基复合结构材料的手段。因此，电镀在各工业生产部门中应用范围之广，实属罕见。改革开放以来，随着信息、电子、航空、航天、能源、核工业等高新技术领域的飞速发展，中国的电镀技术也取得了大量的令人瞩目的新成就。在当前，新产品、新思路、新目标不断地被提出，新工艺、新设备、新材料源源被开发，特别是在我国加入 WTO 后，我国的机电产品和电镀行业更是面临着前所未有的机遇和挑战。为了更好地为我国的经济建设服务，中国表面工程协会电镀分会特地组织国内一些从事电镀教学与科研的专家、学者以及富有实践经验的高级工程技术人员联合编写《实用电镀技术丛书》，以期电镀企业提升质量、提高效率、降低成本、革新技术、解决难题提供有益的帮助，并供有关的科研人员及大专院校师生在工作学习中参考。

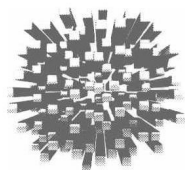
本套丛书包括《实用电镀添加剂》、《现代功能性镀层》、《防护装饰性镀层》、《电镀溶液与镀层性能测试》、《电镀溶液分析技术》、《电镀设备的设计与选用》、《电镀清洁生产工艺》、《化学镀实用技术》等分册。编写过程中，编写人员坚持以“简明实用、选材新

颖、特色鲜明、通俗易懂、保护环境”为主导思想，精益求精，力求丛书内容能满足广大读者的需求。通过作者的辛勤劳动和创新构思，本套丛书将以新颖的内容、实用的技术、准确的论述和完整的资料，奉献给广大读者，为新世纪我国电镀事业的发展做出新贡献。

中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '徐海士' (Xu Haisi), written in a cursive style.

2003 年 2 月



第二版前言

本书第一版出版后，受到了同行专家和读者的关注和好评。近年来，随着电化学测试及仪器分析领域科学技术的发展，电镀溶液与镀层性能测试水平也得到了很大提高。应化学工业出版社的要求，修订本书。

本书的修订保持了该书原有的简明、扼要、通俗易懂的风格，并对原有的内容进行了调整、充实和增加。将原第四章现代电化学分析仪器及表面分析技术在镀层、镀液性能研究方面的应用分为第4章电化学测量技术在镀层与镀液性能研究中的应用和第5章现代分析技术在镀层与镀液性能研究中的应用；将原第二章中第八节电镀液极化曲线的测定和第九节电镀液微分电容曲线的测定调整至第4章；对第4章和第5章的原测量技术进行了充实；在第4章中增加了电化学测量系统的基本组成、电化学扫描探针显微技术。在第5章现代分析技术中增加了纳米压痕技术。本书还对第1章的镀层孔隙、镀层延展性和耐磨性的测量技术等内容进行了充实，在第2章增加了镀液表面张力的测定。本次修订还对附录中的电镀标准进行了更新。

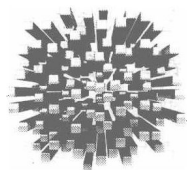
本书的第1章和第3章由山东建筑工程学院石金声和石磊修订；第2章、第4章和第5章由中国农业大学梅晓宏和哈尔滨工业大学曹立新修订，主审为哈尔滨工业大学的张景双教授，全书由曹立新教授统稿。在本书的修订过程中，哈尔滨工业大学的屠振密教授对书稿提出了很好的建议，范鹏和王潇咪同学也做了许多工作，

在此一并表示谢意。

限于编著者的水平，错误及不妥之处在所难免，衷心欢迎读者批评指正。

编著者

2010 年 12 月



第一版前言

电镀层的质量检查,是评定电镀产品优劣的重要手段,是鉴定、考查电镀工艺性能的必要措施,而电镀液的性能又直接影响电镀层的质量,因此掌握电镀溶液性能与镀层性能的测试技术,是电镀工作者应有的非常重要的基本技能。

根据实践经验和现在常用的测试方法,并参考国内有关部级标准,本书遴选了电镀液和镀层的主要检测方法,通过学习可掌握这些检验方法,以便了解国际国内电镀质量标准,为努力提高产品质量做出贡献。

本书是根据中国表面工程协会电镀分会教育与培训工作委员会于1998年12月10日,在杭州召开的第十次工作会议的决议,为在全国电镀行业培养提高镀层和镀液性能测试人员的基础理论和技术水平所制定的《电镀溶液与镀层性能测试技术》一书的编写大纲和化学工业出版社《实用电镀技术丛书》编委会再次审定的编写大纲而编写的。本书可供从事质量检验、电化学测试及电镀生产的技术人员和工人参考,也适合用作大、中专院校、高级职业学校电镀专业教材。

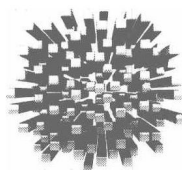
参加本书编写的有山东建筑工程学院石金声、石磊(第一章、第三章);哈尔滨工业大学曹立新、张景双(第二章、第四章)。本书由张景双教授、石金声高级讲师为主编。武汉大学左正忠教授为主审。在编写过程中参考了原济南电镀协会编写的《金属与非金属覆盖层检测方法》、张允诚等编写的《电镀手册》、曾华梁等编写的

《电镀工艺手册》、屠振密编写的《电镀合金原理与工艺》第九章、张景双编写的《电化学综合实验讲义》、全国金属与非金属覆盖层标准化技术委员会编著的《覆盖层标准应用手册》、李国英等编写的《表面工程手册》、《电镀用材料和设备手册》编写组的《电镀用材料和设备手册》等。在编写过程中哈尔滨工业大学的屠振密教授和天津大学郭鹤桐教授对书稿多次审阅指导，哈尔滨工业大学翟淑芳同志参与了本书稿的整理和制图等工作。在2000年11月由中国表面工程协会电镀分会教育与培训工作委员会召开的审稿会上，与会的同志对本书提出了许多宝贵意见。特别是在2002年此书列入化学工业出版社的《实用电镀技术丛书》后，丛书编委会对该书稿又进行了审定，在此一并表示谢意。

限于编著者的水平，错误及不妥之处在所难免，衷心欢迎读者批评指正。

编著者

2003年2月



目录

1 电镀层性能的测试技术	1
1.1 电镀层外观检验	1
1.1.1 外观质量	1
1.1.2 表面粗糙度的测定	4
1.1.3 表面光亮度的测定	7
1.2 镀层附着强度的测试方法	9
1.2.1 摩擦抛光试验	10
1.2.2 喷丸试验	10
1.2.3 拉伸剥离试验	12
1.2.4 锉刀试验	14
1.2.5 磨、锯试验	15
1.2.6 凿子试验	15
1.2.7 划线、划格试验	15
1.2.8 弯曲试验	16
1.2.9 缠绕试验	16
1.2.10 拉力试验	17
1.2.11 热震试验	18
1.2.12 深引试验	18
1.2.13 阴极试验	19
1.2.14 刷光法试验	19

1.2.15	试验方法的选择	20
1.3	镀层厚度的测量	21
1.3.1	计时液流法	21
1.3.2	点滴测厚法	25
1.3.3	称量法	30
1.3.4	库仑测厚法	32
1.3.5	金相显微镜法	42
1.3.6	扫描电子显微镜法	47
1.3.7	磁性测厚仪法	49
1.3.8	涡流测厚仪法	52
1.3.9	β 射线反向散射法	55
1.3.10	X射线光谱测定法	56
1.3.11	双光束显微镜法	56
1.4	镀层孔隙的测量	58
1.4.1	贴滤纸法	58
1.4.2	涂膏法	60
1.4.3	浸渍法	61
1.4.4	电解法	62
1.4.5	气体暴露法	65
1.4.6	微观技术	65
1.5	镀层显微硬度的测量	65
1.5.1	方法原理	66
1.5.2	影响硬度准确度的因素	66
1.5.3	测量中的注意事项及步骤	68
1.5.4	硬度的计算	70
1.6	镀层内应力的测量	71
1.6.1	投影法	71
1.6.2	电阻应变仪法	72
1.6.3	螺旋收缩仪法	73

1.7 镀层延展性的测量	74
1.7.1 拉伸试验	75
1.7.2 虎钳弯曲试验	76
1.7.3 心轴弯曲试验	76
1.7.4 三点、四点弯曲试验	77
1.7.5 杯突试验	78
1.7.6 测微计弯曲试验	79
1.7.7 试验方法的选择	79
1.8 镀件氢脆性的测量	80
1.8.1 延迟破坏试验	80
1.8.2 缓慢弯曲试验	81
1.8.3 挤压试验	82
1.8.4 应力环试验	82
1.8.5 镀件渗氢量的测定	82
1.8.6 慢速推进试验	83
1.9 镀层钎焊性的测试	83
1.9.1 流布面积法	84
1.9.2 润湿时间法	84
1.9.3 蒸汽考验法	84
1.10 镀层的耐蚀性试验	85
1.10.1 不同环境的腐蚀条件	85
1.10.2 静置户外暴晒腐蚀试验	88
1.10.3 人工加速腐蚀试验	90
1.10.4 金属镀层及化学处理层腐蚀试验结果的评 定和鉴定	98
1.11 镀层耐磨性的测量	100
1.11.1 泰伯 (Taber) 磨耗试验	100
1.11.2 法莱克斯 (Falex) 润滑试验测试	100
1.11.3 销盘式耐磨性试验	101

1.11.4	往复划痕测试	101
1.11.5	阿尔法磨损试验	101
1.11.6	几种磨耗试验机	102



2 电镀液性能的测试技术 104

2.1	电镀液电导率的测定	104
2.1.1	电镀液的电导率	104
2.1.2	电导仪法	104
2.1.3	交流电桥法	105
2.1.4	电压、电流法测溶液电导率	106
2.2	电镀液 pH 值的测定	107
2.2.1	用 pH 试纸测 pH 值	108
2.2.2	pH 计法测 pH 值	108
2.3	电镀液阴极电流效率的测定	111
2.3.1	电镀液的阴极电流效率	111
2.3.2	库仑计法测量阴极电流效率	112
2.3.3	安时法测量阴极电流效率	115
2.4	电镀液分散能力的测定	116
2.4.1	基本原理	117
2.4.2	远近阴极法测量镀液的分散能力	123
2.4.3	弯曲阴极法测量镀液的分散能力	125
2.4.4	霍尔槽法测量镀液的分散能力	126
2.5	电镀液覆盖能力的测定	127
2.5.1	电镀液的覆盖能力	127
2.5.2	直角阴极法	129
2.5.3	内孔法	130
2.5.4	凹穴法	132
2.5.5	平行阴极法测镀液的覆盖能力	133
2.6	电镀霍尔槽试验	134

2.6.1	霍尔槽的结构	134
2.6.2	霍尔槽试验的基本原理	135
2.6.3	试验方法	137
2.6.4	霍尔槽的用途	140
2.7	电镀液整平能力的测定	141
2.7.1	基本原理	141
2.7.2	假正弦波法	142
2.7.3	粗糙度仪法	144
2.7.4	电化学模拟法	144
2.8	镀液表面张力的测定	147
2.8.1	最大气泡法	147
2.8.2	扭力法	150



3 转化膜性能的测试技术 152

3.1	外观检验	152
3.1.1	铝及其合金(硫酸及铬酸)阳极氧化膜	152
3.1.2	铝及其合金硬质阳极氧化膜	152
3.1.3	铝及其合金铬酸化学氧化膜	152
3.1.4	镁及其合金氧化膜	153
3.1.5	黑色金属氧化膜	154
3.1.6	黑色金属磷化膜	154
3.1.7	铜及其合金氧化膜	154
3.1.8	铜零件钝化膜	154
3.2	厚度测量	155
3.2.1	电压击穿法	155
3.2.2	质量法	155
3.3	耐蚀性试验	156
3.3.1	黑色金属化学保护层的点滴试验方法	156

3.3.2	黑色金属化学保护层的浸渍试验·····	156
3.3.3	铝和铝合金与镁合金化学保护层的点滴 试验·····	157
3.4	耐磨性试验·····	158
3.4.1	钢铁氧化膜·····	158
3.4.2	有色金属氧化膜·····	159

4 电化学测量技术在镀层与镀液性能研究中的应用····· 160

4.1	电化学测量系统的基本组成·····	160
4.1.1	电解池·····	160
4.1.2	研究电极·····	161
4.1.3	辅助电极·····	161
4.1.4	参比电极·····	162
4.1.5	盐桥·····	163
4.1.6	测量装置·····	163
4.2	经典法测极化曲线·····	166
4.3	线性电位扫描伏安法·····	166
4.3.1	单程线性伏安法·····	167
4.3.2	循环伏安曲线法·····	173
4.4	塔菲尔曲线法·····	179
4.4.1	基本原理·····	179
4.4.2	应用·····	180
4.5	微分电容曲线法·····	182
4.5.1	双电层微分电容及电解池的等效电路·····	182
4.5.2	交流电桥法测双电层微分电容·····	185
4.6	交流阻抗法·····	189
4.7	电化学与其他表征方法连用技术·····	195
4.7.1	电化学石英晶体微天平技术 (EQCM) ·····	195
4.7.2	电化学扫描探针显微技术·····	197

5 现代分析技术在镀层与镀液性能研究中的应用 199

5.1 概述.....	199
5.2 镀层微观结构和形貌分析.....	199
5.2.1 电子显微分析技术.....	199
5.2.2 扫描探针显微技术 (SPM)	206
5.3 镀层成分分析.....	211
5.3.1 X射线光电子能谱 (XPS) 分析法	212
5.3.2 X射线荧光光谱分析法 (XRF)	215
5.3.3 电子探针和离子探针微区分析法.....	217
5.3.4 俄歇电子能谱分析法 (AES)	221
5.3.5 二次离子质谱分析法 (SIMS)	223
5.4 X射线衍射分析法 (XRD)	227
5.4.1 仪器的基本原理与结构.....	228
5.4.2 应用.....	228
5.5 纳米压痕技术.....	230
5.5.1 基本原理和结构.....	231
5.5.2 应用.....	233

附录 235

I 电镀标准目录	235
II 镀层的硬度	254
III 某些元素的理论析出量	255
IV 某些元素的密度	256

参考文献 257