

钛电极学导论

张招贤 赵国鹏 罗小军 徐永海 编著

冶金工业出版社

钛电极学导论

张招贤 赵国鹏 编著
罗小军 徐永海

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书详细介绍了水溶液电解用各种电极材料,重点讲述了近这些年来一直活跃在电解工业中的涂层钛电极,并介绍了钛电极制造工艺、研究方法、科研成果及应用范围,还用了一定篇幅就与钛电极相关的电极学,包括电极热力学、电极过程动力学和电极反应工程学以及电催化等相关的知识予以论述。

本书可供从事化工、冶金、环保、电镀、电解工业的工程技术人员阅读,也可供电极生产企业以及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钛电极学导论/张招贤等编著. —北京:冶金工业出版社,
2008.9

ISBN 978-7-5024-4513-3

I. 钛… II. 张… III. 钛—金属电极—电化学反应
IV. 0646.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 112538 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4513-3

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 9 月第 1 版, 2008 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 46.75 印张; 1132 千字; 726 页; 1-2000 册

128.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

钛电极诞生整整40年了。

钛阳极亦称DSA，在经济发展中发挥了巨大作用。对钛电极的研究和普及应用，推动了相关学科的发展，如电催化科学、电极学、电极反应工程学等学科的相继建立。可以说水溶液电解领域已进入到了钛电极时代。

电催化，即通过电极材料的精心选择，以达到电化学工艺的最优化，是电极学研究的最终目的。

一种新型高效电极的诞生，能巨大地改变生产面貌，甚至可誉为一场技术革命。现代电解工业中规模最大的部门之一的氯碱工业，隔膜槽电解的阳极材料原采用的是石墨，工作电流密度 $900\text{A}/\text{m}^2$ ，槽电压为4.4V；后普遍使用离子膜槽，阳极为涂层钛电极，工作电流密度提高到 $4000\text{A}/\text{m}^2$ ，而槽电压只有3.75V。离子膜槽可使电流密度提高4倍，而槽电压反而降低，使电能消耗大幅度降低，大大优化了氯碱的生产。在石墨电极时代，离子膜工艺是不可能实施的，只有进入钛电极时代，先进的离子膜技术才得以实现工业化。

本书第一篇系统讲述了电催化、电催化剂、电催化作用、电催化类型、电催化性能、电催化原理、电催化过程、电催化反应、电催化方法、电催化活性等电催化知识。介绍了金属电极的电催化、涂层钛电极的电催化、化学修饰电极的电催化、有机电合成的电催化，并讲述了将电催化原理应用到有机物废水降解中，这是电催化应用的一个重要领域，对环境保护有着重大意义。

现代工业的发展，要求电极科技领域不断创新。而电极材料的进步，反过来有力地促进工业的发展，同时也促进了科学理论的发展。

进入钛电极时代后，对电极材料的研究更深刻、更系统，对电极材料的应用更广泛，因此非常有必要把电极学单独作为一门学科提出来。

电化学是物理化学的一个分支，以水溶液电化学为基础。电极学属电化学学科的一个分支。电化学反应产生电及其逆过程，即施加电力而引起电化学反应，也就是电解质反应或电解作用，研究这两种电化学过程的学科就称为电极学。

第二篇主要论述了电极学，其内容包括：电极学基础、电极反应热力学、电极过程动力学、电极反应工程学。电极电位是电极学的基础，电极的性能

与电极电位密切相关。本篇就电极的名称, 电极电位的产生, 各种电极标准电极电位值, 电极电位的测量等进行了讲述。热力学是研究能量相互转化的科学。电极反应热力学研究电化学体系在发生化学变化时所产生(或接受)的能量和自由焓之间的关系。电极反应热力学不断有学者进行论述, 已逐渐为人们所认识。电极过程动力学是电极学中研究最为深刻的, 有关这方面的论文发表不少, 还出版过专著, 本书只讲述电极过程动力学中经典的内容。将电极反应热力学、电极过程动力学的知识应用到电解工程中, 探讨如何充分发挥电极反应过程特点和长处, 改善电解过程环境, 争取以最小的投入, 获得最大的经济利益, 这是电极反应工程学的任务。电极反应工程学的建立, 向人们介绍了电极材料与电解工程的密切关系, 电极在电极反应中的重大作用, 从而解释了为什么新型高效电极的问世, 可大大促进电解工业的发展这个问题。电极反应工程学中讲述各种类型工业电解槽, 及石墨电极、铅基合金电极、金刚石膜电极、气体扩散电极等 18 种工业电解用电极。

涂层钛电极在水溶液电解应用的四大电极材料中最有作为, 它以金属钛作电极基体, 表面涂敷以铂族金属氧化物为主要组分的活性涂层。

钛电极虽然问世只有 40 年, 但钛电极事业蓬勃发展, 方兴未艾, 制造钛阳极的厂家遍布全国各地, 金属阳极在许多领域的使用势头不断上升。

第三篇为钛电极工学篇, 主要向读者介绍金属电极发展过程、涂层钛电极的优点及其制造工艺、与钛电极有关的钛化学、铂族元素和其他元素化学的知识。讲述了钛基二氧化锰电极、钛基二氧化铅电极、钛基氧化钨电极、钌系涂层钛电极(析氯电极)、铌系涂层钛电极(析氧电极)、非钌系涂层钛电极, 特别是详细地讲述了近年来非常热门的铌钽涂层钛电极、烧结铂电极及纳米涂层钛电极等, 并以很大篇幅介绍涂层钛电极的应用。最后讲述了钛电极测试方法、废旧钛电极的修复。

作者衷心希望本书能对广大从事钛电极研究、生产、应用的工程技术人员、高等院校师生有所启发和帮助, 并为他们所喜爱, 本书的出版如能在钛电极事业发展的长河中起到推波助澜的作用, 作者将感到极大欣慰。

由于作者水平有限, 书中错漏之处, 敬请读者批评指正。

仅以此书献给 2008 年北京奥林匹克运动会。

作 者

2008 年 8 月

目 录

第一篇 电催化科学

第1章 电催化科学概论	1
1.1 电催化理论	1
1.1.1 电催化	1
1.1.2 电催化与化学催化	2
1.1.3 电催化剂	3
1.1.4 电催化作用	3
1.1.5 电催化类型	4
1.1.6 电催化性能影响因素	5
1.1.7 电催化性能评价方法	7
1.2 金属电极的电催化	13
1.2.1 金属电极的交换电流密度	13
1.2.2 电催化反应	15
1.3 涂层钛电极的电催化	17
1.3.1 单个铂族金属氧化物电极的电催化活性	17
1.3.2 二元铂族金属氧化物电极的电催化活性	20
1.3.3 多元铂族金属氧化物电极的电催化活性	25
1.3.4 $\text{IrO}_2 \cdot \text{Ta}_2\text{O}_5$ 涂层钛电极的电催化活性	31
1.4 化学修饰电极的电催化	35
1.4.1 化学修饰电极发展史	36
1.4.2 化学修饰电极的制备	37
1.4.3 化学修饰电极电催化	41
1.4.4 化学修饰电极电催化过程机制	41
1.4.5 化学修饰电极电催化类型	43
1.4.6 化学修饰电极电催化原理及影响因素	44
1.4.7 化学修饰电极的研究	46
1.4.8 化学修饰电极在燃料电池的应用	48

1.5 有机电合成的电催化	51
1.5.1 有机电合成发展史	51
1.5.2 有机电合成的特征	53
1.5.3 有机电合成的电催化反应	55
1.5.4 电极材料对有机电合成反应的作用	56
1.5.5 有机电合成用涂层钛阳极	59
1.5.6 有机电合成用化学修饰电极	66
1.5.7 有机电合成中用 Ti/PbO_2 电极	69
1.5.8 有机电合成用石墨电极	72
1.5.9 有机电合成用铅基合金电极	74
1.5.10 有机电合成用铂电极	76
参考文献	78
第2章 电催化氧化法处理废水	79
2.1 水的污染	79
2.2 电催化氧化法处理废水	82
2.3 电化学法处理废水原理	86
2.3.1 直接电解	87
2.3.2 间接电解	90
2.4 电极材料对电解法处理废水的作用	93
2.4.1 电极材料的选择	93
2.4.2 提高电催化氧化降解速率的措施	94
2.4.3 不同催化能力的电极与有机污染物在电极上氧化历程的关系	95
2.5 电催化氧化法处理废水实例	98
2.5.1 有机废水的降解处理	98
2.5.2 氧化物电极电催化降解有机污染物	100
2.5.3 电催化法处理芳香化合物废水	103
2.5.4 电化学法处理苯酚废水	104
2.5.5 电解法处理萘酚废液	116
2.5.6 $\text{Ti/IrO}_2 \cdot \text{Ta}_2\text{O}_5$ -石墨电芬顿降解硝基酚	116
2.5.7 电催化降解硝基苯	117
2.5.8 电催化氧化降解苯胺	118
2.5.9 电催化降解 1, 4-苯醌	120
2.5.10 电解处理含醇废水	121
2.5.11 印染废水处理	121

2.5.12	电催化氧化法处理垃圾渗滤液	135
2.5.13	粪便污水的处理	141
2.5.14	含油废水的处理	142
2.5.15	工厂矿山含氰废水的处理	144
2.5.16	电解法从废水中回收有用金属	146
2.5.17	电渗析法处理废水	151
2.5.18	动物制药废水的电解降解	153
2.5.19	电催化氧化法处理化肥厂外排废水	154
2.5.20	电解法处理酵母废水	155
2.5.21	废水的脱氮处理	155
2.5.22	选矿药剂生产废水的处理	156
2.5.23	墨水生产的污水处理	156
2.5.24	医院污水处理	156
2.5.25	餐饮废水的处理	156
2.5.26	电极-生物滤池法处理城市污水	157
2.5.27	电解法处理回用水	157
2.5.28	电化学法降解棉浆黑液	158
参考文献		159

第二篇 电 极 学

第3章	电极学基础	163
3.1	电化学发展史	163
3.2	电化学和电极学	164
3.3	电极和电极反应	166
3.3.1	可逆电极	166
3.3.2	多重电极	167
3.3.3	金属电极	167
3.3.4	氧化还原电极 (简称氧还电极)	167
3.3.5	气体电极	168
3.3.6	参比电极	168
3.3.7	玻璃电极	168
3.3.8	离子选择电极	169
3.4	电动势	170
3.5	电极电位	172

3.5.1 铜-锌自发电池	172
3.5.2 电极电位的产生	172
3.5.3 平衡电极电位	174
3.5.4 电极电位的测定	189
参考文献	191
第4章 电极反应热力学	192
4.1 金属电极反应热力学	192
4.2 电化学反应热力学	193
参考文献	197
第5章 电极过程动力学	198
5.1 电极与溶液界面的性质	198
5.1.1 电极与溶液界面的电位差	198
5.1.2 双电层结构模型	200
5.1.3 零电荷电位	201
5.1.4 电毛细现象	201
5.1.5 双电层的微分电容	203
5.2 电极的极化	203
5.2.1 电化学极化	204
5.2.2 浓度极化	205
5.3 电极过程及过程速度控制步骤	206
5.3.1 电极过程	206
5.3.2 电极过程的特征	207
5.3.3 电极过程速度表示的方法	207
5.3.4 电极过程速度控制步骤	207
5.4 电极反应级数	208
5.5 气体电极过程	211
5.5.1 氢电极过程	211
5.5.2 氧电极过程	212
5.5.3 氯电极过程	214
5.6 金属电极过程	215
5.6.1 金属阴极过程	216
5.6.2 金属阳极过程	218
5.7 半导体电极过程	221

5.7.1 半导体电极特点	221
5.7.2 半导体电极上氧化还原反应	222
参考文献	224
第6章 电极反应工程学	225
6.1 电极在电极反应中的作用	225
6.2 电极反应工程生产中主要技术经济指标	228
6.2.1 电流效率	228
6.2.2 电化学反应器工作电压	230
6.2.3 直流电耗	231
6.3 电解工程对电极材料的要求	231
6.4 气泡效应	235
6.4.1 电极析气对溶液电导率的影响	236
6.4.2 析气电极的电流分布	236
6.5 电极表面的电位及电流分布	236
6.5.1 一次电流分布	237
6.5.2 二次电流分布	237
6.5.3 三次电流分布	238
6.6 工业电解槽	238
6.6.1 电解槽的分类	238
6.6.2 电解槽的连接与组合	243
6.7 工业电解用电极	245
6.7.1 石墨电极	245
6.7.2 铅及铅基合金电极	248
6.7.3 反应性金属电极	254
6.7.4 SPE 复合电极	257
6.7.5 金刚石膜电极	259
6.7.6 气体扩散电极	263
6.7.7 使用金属氧化物电极的电化学电容器	264
6.7.8 酶电极	265
6.7.9 分子修饰半导体电极	265
6.7.10 充填式电极	266
6.7.11 粒子床电极	267
6.7.12 旋转圆筒电极	268
6.7.13 三维电极	269

6.7.14 填充床电极	269
6.7.15 流动床电极	270
6.7.16 回流床电极	270
6.7.17 金属-炭复合电极	271
6.7.18 陶瓷电极	271
参考文献	272

第三篇 钛电极工学

第7章 钛电极发展历史	273
7.1 金属电极的发展史	274
7.2 钛阳极的40年	275
7.2.1 钛阳极在氯碱生产中的应用	277
7.2.2 其他析氯电解用钛阳极	278
7.2.3 析氧电解用钛阳极	279
参考文献	281
第8章 涂层钛电极的优点及其制造工艺	282
8.1 涂层钛电极的优点	282
8.2 钛阳极制造工艺过程	283
8.2.1 基体金属的选用	283
8.2.2 阳极几何结构形状的合理设计	284
8.2.3 阳极基体的焊接加工	284
8.2.4 去油污	285
8.2.5 酸蚀刻	285
8.2.6 涂液的配制	286
8.2.7 涂敷涂层	287
参考文献	288
第9章 钛的化学	289
9.1 钛的发现	289
9.2 钛的性质	290
9.2.1 物理性质	290
9.2.2 化学性质	292
9.2.3 机械加工性能	294
9.2.4 耐腐蚀性能	296
9.3 钛的化合物	306
9.3.1 钛的氧化物	306

9.3.2 钛的氯化物	309
9.3.3 其他化合物	310
9.4 钛的生产	311
参考文献	314
第10章 铂族元素化学	315
10.1 钌的化学	315
10.1.1 钌的电极电位及氧化态	315
10.1.2 钌的化合物	316
10.2 铑的化学	317
10.2.1 铑的电极电位及氧化态	317
10.2.2 铑的化合物	317
10.3 钯的化学	318
10.3.1 钯的电极电位及氧化态	318
10.3.2 钯的化合物	318
10.4 铱的化学	320
10.4.1 铱的电极电位及氧化态	320
10.4.2 铱的化合物	320
参考文献	321
第11章 其他元素化学	322
11.1 钽与铌的化学	322
11.1.1 铌、钽的物理性质	322
11.1.2 铌、钽的化学性质	322
11.1.3 铌、钽的化合物	323
11.2 锆与铪的化学	324
11.2.1 锆、铪的物理性质	324
11.2.2 锆、铪的化学性质	325
11.2.3 锆、铪的重要化合物	326
参考文献	327
第12章 钛基涂层电极	328
12.1 钛基二氧化锰电极 (Ti/MnO ₂)	328
12.1.1 钛基二氧化锰涂层电极的制备方法	328
12.1.2 二氧化锰涂层的特性	329
12.1.3 Ti/MnO ₂ 电极的研究	332
12.1.4 Ti/MnO ₂ 电极的应用	340
12.2 钛基二氧化铅电极 (Ti/PbO ₂)	342
12.2.1 二氧化铅电极的发展	342

12.2.2	二氧化铅电极早期的改进	343
12.2.3	新型钛基二氧化铅电极	345
12.2.4	新型钛基二氧化铅电极的制备	350
12.2.5	新型钛基二氧化铅电极的特性	351
12.2.6	二氧化铅电极的优越性	353
12.2.7	使用二氧化铅电极的注意事项	354
12.2.8	二氧化铅电极的应用	354
12.2.9	二氧化铅电极的研究	357
12.3	钛基氧化钨电极 (Ti/WO_3)	364
12.4	金属氧化物涂层钛电极	365
	参考文献	365
第13章	金属氧化物涂层钛电极	367
13.1	钌系涂层钛电极 (析氯电极)	367
13.1.1	钌钛涂层配方	367
13.1.2	钌钛涂层钛阳极工作原理	368
13.1.3	钌钛涂层钛阳极的失效原因	371
13.1.4	钌钛涂层的改进	376
13.1.5	钌系涂层钛电极的研究	381
13.2	非钌系涂层钛电极	396
13.2.1	锡铈氧化物涂层	396
13.2.2	钴尖晶石涂层	402
13.2.3	钨氧化物涂层	403
13.3	铱系涂层钛电极 (析氧电极)	405
13.3.1	涂层钛阳极析氧反应机理	405
13.3.2	金属氧化物电极析氧电催化理论	407
13.3.3	氧化铱涂层	411
13.3.4	铱钴涂层	413
13.3.5	铱锡涂层	414
13.3.6	铱铌涂层	416
13.3.7	铱钌钛涂层	417
13.3.8	铱钌钨钛涂层	417
13.4	$\text{IrO}_2 \cdot \text{Ta}_2\text{O}_5$ 涂层钛电极	421
13.4.1	最佳析氧涂层钛电极	421
13.4.2	IrTa 涂层钛电极的制备	425
13.4.3	IrTa 涂层钛电极的研究	442
13.4.4	IrTa 涂层钛电极恶化的原因	447
13.4.5	IrTa 涂层钛阳极的应用	456
13.4.6	铱钽锡涂层	462

13.4.7 铌钽锰涂层	464
13.4.8 铌钽钴涂层	466
13.4.9 铌钽铂涂层	466
13.4.10 铌钽钛涂层	467
参考文献	469
第 14 章 纳米涂层钛电极	473
14.1 纳米科学技术	473
14.2 纳米材料制备方法	474
14.2.1 气相法制备纳米材料	474
14.2.2 液相法制备纳米材料	474
14.2.3 固相法制备纳米材料	479
14.3 金属氧化物纳米涂层钛电极的制备	480
14.3.1 一元纳米晶金属氧化物涂层	480
14.3.2 二元纳米晶金属氧化物涂层	487
14.3.3 三元纳米晶金属氧化物涂层	495
14.3.4 多元纳米晶金属氧化物涂层	496
参考文献	501
第 15 章 钛电极测试方法	503
15.1 物理测试法	503
15.1.1 电极涂层表面形貌表征	503
15.1.2 电极涂层组分分析	503
15.1.3 活性涂层剖面分析	503
15.1.4 活性涂层纳米晶体分析	503
15.1.5 X 射线衍射结构分析 (XRD)	503
15.1.6 光电子能谱分析 (XPS)	504
15.1.7 Raman 散射光谱分析	504
15.1.8 X 射线荧光分析 (XRF)	504
15.1.9 热重分析 (TG)	504
15.1.10 涂层中钒含量的测定	504
15.1.11 阳极涂层电导类型的测量	505
15.1.12 阳极活性涂层电阻的测量	505
15.2 强化寿命试验法	506
15.2.1 涂层钛阳极工作寿命的预测	506
15.2.2 强化寿命试验法	509
15.3 钛电极电化学研究方法	511
15.3.1 稳态和暂态	511
15.3.2 极化曲线	512
15.3.3 循环伏安法	532
15.3.4 交流阻抗法	533

15.3.5 阳极涂层表面积测定	539
参考文献	540
第16章 涂层钛阳极的应用	541
16.1 氯碱工业	542
16.1.1 氯碱生产工艺	542
16.1.2 盐水电解主要反应	548
16.1.3 涂层钛阳极	550
16.1.4 新烧碱生产技术	551
16.1.5 金属阳极涂层技术指标	552
16.2 将副产物硫酸钠回收成硫酸和烧碱	552
16.3 氯酸盐生产	553
16.4 次氯酸盐生产	555
16.4.1 电解法制造次氯酸钠的原理	556
16.4.2 次氯酸钠发生器	556
16.4.3 次氯酸钠发生器用电极材料	558
16.4.4 次氯酸钠发生器的应用	558
16.5 高氯酸盐生产	559
16.6 过硫酸盐电解	560
16.7 重铬酸制备	561
16.7.1 电极的制备	562
16.7.2 Cr^{3+} 电化学氧化生成 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的机理	562
16.7.3 不同阳极下的极化曲线	563
16.7.4 $\text{Ti}/\text{SnO}_2 \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3/\text{PbO}_2$ 和 PbO_2 阳极的抗腐蚀性	563
16.7.5 超声对 Cr^{3+} 电化学氧化过程瞬时电流效率的影响	563
16.8 电解法制备过氧化氢	564
16.8.1 电解法制过氧化氢的基本原理	564
16.8.2 生产过氧化氢的生产工艺	565
16.9 有机电合成	565
16.10 水电解	565
16.11 电解功能水	567
16.11.1 电位-pH 图和活性化学物质的关系	567
16.11.2 电极材料的选择	568
16.11.3 电解功能水	569
16.12 电解杀菌处理水	570
16.12.1 间接杀菌	570
16.12.2 直接杀菌	570
16.13 臭氧的制取	573
16.13.1 电生臭氧用阳极材料	574

16.13.2	支持电解质对臭氧生成的影响	575
16.13.3	臭氧生成与高分子固体电解质	575
16.13.4	电生臭氧在水处理中的应用	575
16.14	电解法制取离子水(碱性离子水、酸性离子水)	576
16.14.1	离子水生成装置	577
16.14.2	离子水生成原理及应用	577
16.15	二氧化氯的制取	578
16.16	水处理	580
16.16.1	生活用水和食品用具的消毒	580
16.16.2	高层建筑水箱水处理	580
16.17	工业用水的处理	581
16.17.1	电子水处理器	581
16.17.2	发电厂冷却循环水的处理	582
16.17.3	化工厂冷却循环水的处理	582
16.18	电解法处理废水	582
16.19	电解提取有色金属	583
16.19.1	氯化物溶液电解提取金属	583
16.19.2	硫酸盐溶液电解提取金属	584
16.19.3	氯化物硫酸盐混合溶液电解提取金属	587
16.19.4	氨络合物体系电积镍	588
16.19.5	电催化浸出硫化锌精矿新工艺	589
16.20	电解银催化剂的生产	589
16.21	人造金刚石生产中回收镍、钴、锰	590
16.21.1	人造金刚石生产概述	590
16.21.2	从人造金刚石触媒酸洗废液中回收镍、钴、锰	591
16.21.3	膜电解法回收人造金刚石废水中的镍	592
16.21.4	人造金刚石生产废水的回收处理	593
16.22	电溶解法回收废残 WC-Co 硬质合金	595
16.23	二氧化锰生产	596
16.23.1	石墨阳极	597
16.23.2	纯钛阳极	597
16.23.3	钛合金阳极	597
16.23.4	涂层钛阳极	598
16.23.5	钛系列阳极在 EMD 生产中各项指标对比	598
16.24	废旧电池回收处理	599
16.25	蓄电池生产	600
16.26	电解制造铜箔	601
16.26.1	电解铜箔分类	601
16.26.2	铜箔产业发展史	601

16.26.3	我国铜箔行业现状	601
16.26.4	印刷电路板行业与铜箔产业的关系	603
16.26.5	电解铜箔发展趋势	605
16.26.6	电解铜箔生产工艺	606
16.26.7	电解铜箔生产用钛阳极	610
16.27	铝箔电化成	614
16.28	生产负极箔	615
16.29	钢板镀锌	615
16.29.1	铅阳极	616
16.29.2	钛阳极	617
16.30	钢板镀锡	620
16.31	三价铬电镀	622
16.31.1	电镀三价铬的环保意义	622
16.31.2	镀铬历史	623
16.31.3	三价铬镀铬特点	624
16.31.4	氯化物体系电镀三价铬	625
16.31.5	硫酸盐体系电镀三价铬	628
16.31.6	三价铬镀铬的研究	635
16.32	镀铬	643
16.33	镀铜	645
16.33.1	$\text{IrO}_2 \cdot \text{SnO}_2 \cdot \text{Pd}$ 涂层电极的阳极特性	645
16.33.2	$\text{IrO}_2 \cdot \text{SnO}_2 \cdot \text{Pd}$ 涂层电极在酸性 CuSO_4 溶液中的工业化应用	646
16.34	镍包钢滚镀生产	647
16.35	镀金	648
16.35.1	亚硫酸盐镀金	648
16.35.2	低氰化物镀金	648
16.35.3	氰化物镀金	649
16.36	镀铈	649
16.37	镀钼	650
16.38	镀钨	651
16.39	镀铱和铱铂	652
16.40	阴极保护	653
16.40.1	阴极保护工作意义	653
16.40.2	阴极保护原理	653
16.40.3	地下金属结构物阴极保护用阳极	655
16.40.4	船舶阴极保护用阳极	659
16.40.5	海水钢结构物阴极保护用 IrTaTi 涂层阳极	661
16.40.6	海水电解抗 Mn^{2+} 离子污染用金属氧化物电极	662
16.40.7	电化学法除掉海水中附着的海洋生物用 Ti/Pt/IrTa 涂层电极	664