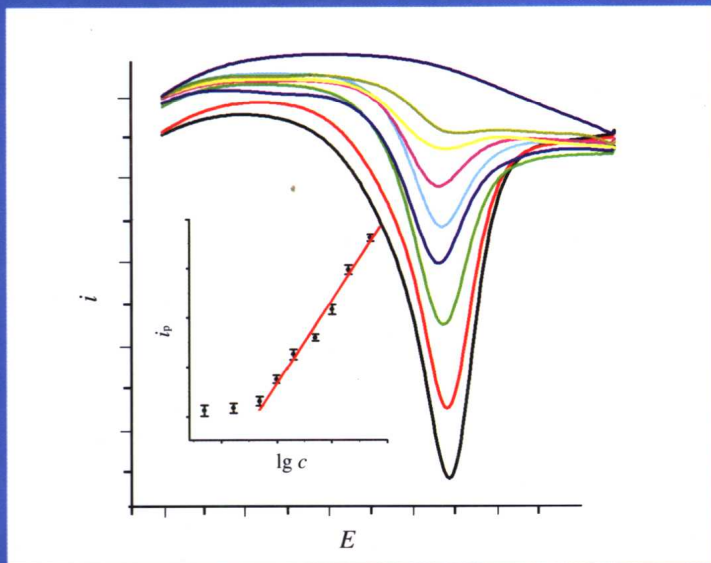


分析化学 新方法新技术丛书

电分析化学 与生物传感技术

鞠焜先 著



科学出版社

“十五”国家重点图书出版规划项目

分析化学 新方法
新技术 丛书

电分析化学与生物传感技术

鞠焯先 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者十多年来在电分析化学与生物传感领域中的教学实践和科学研究经验及成果,对电分析化学的基本原理和方法以及生物传感新技术进行了深入浅出的阐述,并对其在生物分析领域中的应用进行了较详细的叙述和介绍。

本书内容包括电化学基础知识、电分析化学基本方法与超微电极电分析化学、酶促反应与生物膜基生物电分析化学、凝胶膜生物传感器、蛋白质与纳米电分析化学、超分子电分析化学与电化学免疫分析、DNA 电分析化学与序列识别、电致化学发光分析、细胞电化学与细胞传感以及化学电分析化学联用技术等。

本书可供化学(包括化学生物学)、生命科学、环境科学及材料科学等领域科技工作者参考,同时也可作为大专院校化学专业高年级学生和分析化学专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电分析化学与生物传感技术/鞠熷先著. —北京:科学出版社, 2006

(分析化学新方法、新技术丛书)

ISBN 7-03-016912-3

I. 电… II. 鞠… III. ①电化学分析-研究②生物传感器-研究 IV. ①O657.1 ②TP212.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 011897 号

责任编辑:黄 海/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年4月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2006年4月第一次印刷 印张:19 1/8

印数:1—2 500 字数:585 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

分析化学 **新方法** 丛书
新技术

编 委 会

- 顾 问 周同惠 (中国科学院院士,中国医学科学院药物研究所
研究员,博士生导师)
- 汪尔康 (中国科学院院士,中国科学院长春应用化学研
究所研究员,博士生导师)
- 主 编 程介克 (武汉大学化学系教授,博士生导师)
- 副主编 陈洪渊 (中国科学院院士,南京大学化学系教授,博士
生导师)
- 常文保** (北京大学化学系教授,博士生导师)
- 邹汉法 (中国科学院大连化学物理研究所研究员,博士
生导师)

前 言

21 世纪将是科学技术迅猛发展的新世纪,被称为“生物工程时代”和“高度信息化时代”。科学技术将成为经济和社会发展的首要动力。“人类有科技就有化学,化学始于分析化学。”

21 世纪分析化学将面临巨大的挑战和机遇。分析化学不断吸取化学、生物、物理和数学等传统学科的最新成就,新兴的纳米技术中微电子学、显微光学及微工程学等微加工技术,正在对分析化学带来巨大的冲击。

21 世纪分析化学将处于广泛的、深刻的、激烈的巨大变革时期,不断向微型化(纳米芯片、生物芯片及芯片实验室)、仿生化(电子鼻和电子舌等传感器)、自动化(原位及体内实时在线监测)、信息化(临床、环境及生产过程监测的网络化)的方向发展。现代分析化学已成为科学技术和经济发展的重要基础,也是衡量一个国家科学技术发展水平的主要标志之一。

1979 年以来,为了适应我国生产、教学和科学研究的需要,科学出版社已陆续出版了一套比较系统、完整的《分析化学丛书》,深受广大读者喜爱和好评,有力地推动了我国分析化学的发展。

十多年来,科学技术日新月异,分析化学新方法和新技术不断推陈出新,分析化学整个面貌已发生了巨大的变化。为了更好地适应我国生产、教学和科学研究工作的需要,及时总结国内外的最新成就和研究成果,科学出版社计划组织出版一套《分析化学新方法新技术丛书》。为此,专门成立了编委会,确定了撰写这套丛书的方针和任务;推荐高等院校和科学研究单位的分析化学专家分头撰写,由科学出版社陆续出版。

本丛书突出一个“新”字,旨在反映新方法、新技术、新进展、新应用,鼓励学科之间交叉及渗透,不拘一格,充分体现 21 世纪分析化学的先进性、前沿性、创见性和代表性。力求选题新颖,立论严谨;论据充足,结构合理;兼收并蓄,着意创新;深入浅出,文字通顺;科学性和实用性并重。使生产、教学和科研战线上的广大读者,都能获得新理论、新知识和新技能,对工作有所帮助,以推动我国分析化学的新发展。

由于编者水平所限,经验不足,本丛书各分册中难免有缺点和错误,诚恳欢迎读者批评指正,以使这一套丛书越出越好。

《分析化学新方法新技术丛书》
编委会

序 言

电分析化学利用物质的电学和电化学性质进行表征与测量，是电化学及分析化学的重要组成部分。它不仅能进行组成和形态分析，而且对电极过程的理论研究和生命科学、信息科学、环境科学的发展具有重要的作用。

电分析化学的历史悠久，作为一类分析方法在 18 世纪即开始得到发展，其中电解和库仑分析最早被提出。在 19 世纪，电导分析、电位分析、高频滴定等方法得到发展。1922 年极谱法的问世使电分析化学的发展进入一个崭新的阶段，其测定范围也由常量扩展到痕量。在随后的 40 年中各种电分析方法的提出使其测定灵敏度和准确度得到进一步的提高。出现于 20 世纪 60 年代的离子选择性电极、固定化酶电极和氧电极，70~80 年代的电化学生物传感器、微伏安电极和化学修饰电极以及近十多年来各种新技术和新材料特别是生命科学、信息科学与电分析化学方法的交叉与联用，大大扩展了电分析化学研究的测定范围，使电分析化学迅速发展成为一类快速、灵敏、简便的分析方法，具有测量精度高、自动化程度好、应用范围广的特点，可在分子和原子水平探讨电化学生物界面的组成和结构，实现实时、现场、活体甚至单分子监测。高灵敏度和高选择性的分析方法是电分析化学研究追求的目标之一，生命科学的发展又向分析化学提出了新的挑战。这些挑战与目标催生了不少新型的电极体系与生长点，使电分析化学在方法与技术上得到了长足发展。

本书从电分析化学研究涉及的电化学基础知识出发，总结了现代电分析化学研究常用方法的基本原理，概括了作者十多年来在电分析化学与生物传感领域中教学实践与科学研究的经验及成果，并吸收国内外有关参考文献和近年来该领域发展的新成就，阐述了当代电分析化学及其在生命分析化学特别是生物电化学生物研究中的应用与发展，对电分析化学与生物传感新技术的原理、方法进行了深入浅出的描述，并对各方面的应用进行了详细的介绍。

全书分 13 章，综述了电分析化学及其与材料科学、信息科学、生

命科学等学科的交叉、渗透，内容涉及电分析化学的各前沿领域，包括生物技术和纳米材料科学以及医疗卫生、临床检验等领域，对生物物质的电子传递、电极过程、能量交换和物种变换等重要的化学、物理和生物过程研究具有重要的参考价值。博士生吴洁（第四章）、吴丽娜（第五章）、吴硕（第六章）、郝臣（第八章）、陈进（第九章）、李建国（第十一章）、牡丹博士（第十二章）和邹桂征博士（第十三章）分别结合其研究工作参加了本书的编写，在此，对他们的贡献表示衷心感谢！

在此书出版之际，我要感谢我的导师陈洪渊院士！是陈先生言传身教，将我带入分析化学的学术殿堂。是陈先生的长期培养和不断的鼓励与支持，使我对电分析化学及其相关前沿领域有了认识，并以此作为我一生的事业。感谢我的另一位导师高鸿院士和研究生任课老师张祖训教授的指导与帮助！国家自然科学基金委员会对相关研究工作给予了资助，本书的出版得到中国科学院科学出版基金的资助，谨在此一并表示衷心感谢！

展望 21 世纪，随着纳米、生命、信息和表面科技的进步，超分子体系及新材料的应用，电分析化学将向超高灵敏和超高选择方向迈进，为解决生命科学、环境科学、能源科学、医学和药学领域中的重要问题做出贡献，并将本身理论和应用水平提高到新的层次。

由于笔者水平有限，经验不足，且该领域的发展极快，错误及不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

鞠焜先

2005 年 8 月 28 日于南京

目 录

前言

序言

第一章 电化学基础知识	1
§ 1.1 电化学的含义	1
§ 1.2 非法拉第过程	2
§ 1.3 电极反应的实质——法拉第过程及其影响因素	3
§ 1.4 电解过程中物质的扩散及电迁移	8
第二章 电分析化学基本方法	11
§ 2.1 平面电极上的扩散电流及计时安培法	11
§ 2.1.1 Fick 扩散定律	11
§ 2.1.2 Laplace 变换在求解 Fick 第二定律中的应用	12
§ 2.1.3 计时安培法	15
§ 2.1.4 平面电极上一般扩散电流方程 (恒电势伏安法)	16
§ 2.1.5 电流-电势方程 (采样伏安法)	17
§ 2.1.6 平面电极上的扩散层	18
§ 2.2 球面电极和柱面电极上的扩散与一般扩散电流公式	19
§ 2.2.1 半无限球面扩散	19
§ 2.2.2 球面电极上一般扩散电流公式	22
§ 2.2.3 柱状电极上的扩散电流	23
§ 2.3 滴汞电极上的扩散电流	25
§ 2.3.1 滴汞电极	25
§ 2.3.2 滴汞电极上物质的传递及 Fick 第二扩散定律	26
§ 2.3.3 Ilković 方程式	27
§ 2.3.4 Ilković 方程式的修正	28
§ 2.3.5 Ilković 方程式所预示的性质	29
§ 2.4 直流极谱的可逆波、不可逆波和动力波	30
§ 2.4.1 简单金属离子的可逆极谱波	31
§ 2.4.2 不可逆极谱波	33

§ 2.4.3	准可逆极谱波	35
§ 2.4.4	配合物极谱波	36
§ 2.4.5	极谱动力波和催化波	40
§ 2.4.6	吸附波和配合吸附波	44
§ 2.4.7	直流极谱技术的一些发展	45
§ 2.5	线性变位伏安法与循环伏安法	47
§ 2.5.1	可逆过程线性变位伏安法——Randles-Sěvćik 方程式	48
§ 2.5.2	双电层电容与溶液阻抗的影响	52
§ 2.5.3	完全不可逆过程的线性变位伏安法	52
§ 2.5.4	平行催化过程	54
§ 2.5.5	导数示波极谱(伏安)法	55
§ 2.5.6	薄层溶液的电流-电势关系	55
§ 2.5.7	循环伏安法	57
§ 2.6	交流伏安分析	64
§ 2.6.1	交流电路	65
§ 2.6.2	可逆体系的交流极谱电流方程	66
§ 2.6.3	准可逆和不可逆体系的交流响应	72
§ 2.6.4	伴随有化学反应的 AC 电极过程	74
§ 2.6.5	循环交流伏安法	75
§ 2.6.6	相敏及二次谐波的交流极谱法分析	77
§ 2.6.7	张力电流法	79
§ 2.7	电极体系的交流阻抗	80
§ 2.7.1	理想极化电极	80
§ 2.7.2	无浓差极化时电极的阻抗	81
§ 2.7.3	浓差极化不可忽略	83
§ 2.7.4	电极表面状态不可忽略	84
§ 2.8	方波和脉冲技术	85
§ 2.8.1	方波极谱法	85
§ 2.8.2	方波技术的新进展	91
§ 2.8.3	脉冲伏安法	92
§ 2.9	半微积分极谱法	100
§ 2.9.1	半积分电分析方法	101
§ 2.9.2	半微分电分析方法	105
§ 2.9.3	多阶半微分电分析方法	107
§ 2.9.4	平行催化半微分和多阶半微分电分析方法	110

§ 2.10 溶出伏安分析	111
§ 2.10.1 线性扫描阳极溶出伏安法	112
§ 2.10.2 方波及脉冲技术的阳极溶出分析法	113
§ 2.10.3 阳极溶出新极谱法	115
§ 2.11 流体动力学伏安法	117
§ 2.11.1 对流体体系的理论处理	118
§ 2.11.2 旋转圆盘电极	121
§ 2.11.3 旋转球形电极	127
§ 2.11.4 管状电极	128
§ 2.11.5 旋转环-盘电极	130
§ 2.11.6 旋转圆盘薄膜电极上的扩散与异相电催化研究	133
§ 2.12 控制电流的电分析方法	134
§ 2.12.1 控制电流方法的一般原理	135
§ 2.12.2 计时电位曲线	137
§ 2.12.3 交流示波极谱	139
§ 2.12.4 阳极溶出示波极谱法	143
§ 2.12.5 示波极谱滴定	144
参考文献	144
第三章 超微电极电分析化学	147
§ 3.1 微电极的类型及制备	148
§ 3.2 微电极的基本特性	150
§ 3.3 超微电极上的扩散及电流方程	155
§ 3.3.1 微球电极上的扩散	156
§ 3.3.2 微柱球电极上的扩散	157
§ 3.3.3 微盘球电极上的扩散	158
§ 3.3.4 微带电极上的扩散	160
§ 3.3.5 微环电极上的扩散	161
§ 3.3.6 球、盘、柱及带电极在稳态或准稳态条件下扩散的相关性	161
§ 3.4 超微电极阵列	165
§ 3.4.1 所有电极置于同一电势	166
§ 3.4.2 阵列电极置于发生-收集模式	168
§ 3.4.3 均相动力学常数的测定	169
§ 3.4.4 双带电极上电化学发光	170

§ 3.5 超微电极的应用	172
参考文献	175
第四章 酶促反应电分析化学	178
§ 4.1 酶促反应	179
§ 4.1.1 酶促反应特性	179
§ 4.1.2 酶促反应动力学	180
§ 4.1.3 影响酶促反应的因素	182
§ 4.2 酶促反应的电化学研究	184
§ 4.2.1 酶促反应动力学分析	184
§ 4.2.2 酶促反应电化学研究方法	185
§ 4.2.3 固定化酶酶促反应动力学研究	186
§ 4.3 酶促反应的电化学生物传感	187
§ 4.3.1 酶电极	188
§ 4.3.2 酶的固定化	192
§ 4.3.3 酶电极研究的趋势	197
§ 4.4 基于酶促反应发展的其他电化学生物传感器	197
§ 4.4.1 酶免疫分析	198
§ 4.4.2 核酸分析	199
§ 4.4.3 糖类分析	200
参考文献	200
第五章 生物膜基生物电分析化学	203
§ 5.1 Langmuir-Blodgett (LB) 膜技术	204
§ 5.1.1 LB膜制备装置与制备	204
§ 5.1.2 LB膜的材料	206
§ 5.1.3 LB膜的类型与特点	206
§ 5.1.4 LB膜在生物传感器中的应用	207
§ 5.2 脂双层膜	210
§ 5.2.1 脂质体	211
§ 5.2.2 传统的平板BLM	211
§ 5.2.3 介质支撑平板双层磷脂膜 (s-BLM)	213
§ 5.2.4 水凝胶上的BLMs (sb-BLMs)	215
§ 5.2.5 固体载体支撑的混和双层类脂膜	215
§ 5.2.6 脂双层膜在生物传感器中的应用	215

§ 5.3 多层磷脂膜	222
§ 5.3.1 多层磷脂浇铸膜	222
§ 5.3.2 磷酸盐沉积的自组装膜	225
参考文献	226
第六章 凝胶膜生物传感器	230
§ 6.1 溶胶-凝胶过程	231
§ 6.1.1 凝胶的制备	231
§ 6.1.2 反应参数的影响	233
§ 6.1.3 电化学生物传感器制备中的凝胶过程	233
§ 6.2 溶胶-凝胶的特点	238
§ 6.3 生物分子的溶胶-凝胶固定与膜电极	239
§ 6.3.1 生物分子的溶胶-凝胶固定	239
§ 6.3.2 溶胶-凝胶电化学生物传感器	241
§ 6.4 溶胶-凝胶电化学生物传感器的应用	244
§ 6.4.1 溶胶-凝胶电化学生物传感器的发展	244
§ 6.4.2 几种重要的溶胶-凝胶电化学生物传感器	245
§ 6.5 有机相生物传感器	255
参考文献	257
第七章 蛋白质电化学与纳米电分析化学	262
§ 7.1 蛋白质在电极上的直接电化学	263
§ 7.1.1 电极材料的选择	263
§ 7.1.2 电极的表面修饰	264
§ 7.1.3 重要氧化还原蛋白质的直接电化学	265
§ 7.2 固定化蛋白质的直接电化学研究方法	280
§ 7.2.1 蛋白质表面覆盖度测定	280
§ 7.2.2 质子参与的蛋白质直接电化学过程	284
§ 7.2.3 蛋白质直接电化学的动力学研究	287
§ 7.3 纳米粒子修饰电极上蛋白质固定与直接电子传递	290
§ 7.3.1 金胶纳米粒子仿生界面的构建与蛋白质的直接电子传递	290
§ 7.3.2 微孔与介孔分子筛上蛋白质的直接电子传递	302
§ 7.3.3 蛋白质在二氧化锆纳米粒子上的直接电化学	312
§ 7.4 纳米粒子在传感器制备中的应用	316
§ 7.4.1 金胶纳米粒子用于电化学传感器的构建	316
§ 7.4.2 其他金属与二氧化锆纳米粒子构建无试剂电化学传感器	328

§ 7.4.3 分子筛纳米粒子构建无试剂电化学传感器	329
参考文献	335
第八章 超分子电分析化学	342
§ 8.1 超分子化学的基本性质——识别和催化	343
§ 8.1.1 分子识别	343
§ 8.1.2 催化作用	344
§ 8.1.3 超分子分析化学	345
§ 8.2 电化学传感器中的超分子化学	346
§ 8.2.1 冠状化合物	346
§ 8.2.2 环糊精	349
§ 8.2.3 杯芳烃	351
§ 8.2.4 卟啉和酞菁	352
§ 8.2.5 分子自组装膜	354
§ 8.3 超分子电化学研究	356
§ 8.3.1 1:1 包络物的形成常数	356
§ 8.3.2 多主体包络物的形成常数	360
§ 8.3.3 包络物形成对电催化氧化的影响	361
§ 8.3.4 主体自组装单层表面包络物的形成	363
§ 8.4 超分子化学在化学修饰电极中的应用	368
参考文献	373
第九章 电化学免疫分析与免疫传感器	377
§ 9.1 免疫分析概述	377
§ 9.1.1 抗体的基本结构	378
§ 9.1.2 单克隆抗体和多克隆抗体	379
§ 9.1.3 抗体碎片	380
§ 9.1.4 免疫分析方法	380
§ 9.2 电化学免疫分析	382
§ 9.2.1 电化学免疫分析中常用标记物	382
§ 9.2.2 电化学免疫分析方法	384
§ 9.3 均相电化学免疫分析	385
§ 9.4 毛细管电化学酶联免疫分析法	388
§ 9.5 免疫传感器	389
§ 9.5.1 质量检测免疫传感器	390
§ 9.5.2 热量检测免疫传感器	391

§ 9.5.3	光学免疫传感器	391
§ 9.5.4	电化学免疫传感器	396
§ 9.6	电化学免疫传感器在临床诊断中的应用	403
§ 9.6.1	化学修饰电极免疫分析	403
§ 9.6.2	免分离电化学免疫传感器	405
§ 9.6.3	竞争性电化学免疫传感分析	407
§ 9.6.4	一次性电化学免疫传感芯片	409
	参考文献	411
第十章	DNA 电化学分析与序列识别	414
§ 10.1	DNA 的结构和性质	415
§ 10.1.1	DNA 的组成与结构	415
§ 10.1.2	DNA 的性质	417
§ 10.1.3	DNA 的变性与复性	418
§ 10.1.4	DNA 电化学性质	419
§ 10.1.5	DNA 结构对电化学响应的影响	421
§ 10.2	DNA 浓度的电化学检测	422
§ 10.3	DNA 电化学传感器	425
§ 10.3.1	基本原理	425
§ 10.3.2	DNA 探针的固定	426
§ 10.3.3	DNA 杂交指示剂	429
§ 10.3.4	DNA 电化学传感器	431
§ 10.3.5	直接电化学 DNA 生物传感	432
§ 10.3.6	DNA 电化学传感器的选择性	435
§ 10.4	PCR 技术-电化学检测联用	437
§ 10.4.1	PCR 技术	437
§ 10.4.2	PCR 技术-电化学检测联用	440
§ 10.5	酶联放大 DNA 电化学生物传感	444
§ 10.6	DNA 序列电化学分析中的纳米技术	445
§ 10.7	电化学 DNA 传感器的应用	447
§ 10.7.1	DNA 损伤与损伤剂检测	447
§ 10.7.2	环境污染监控	449
§ 10.7.3	病原基因检测和基因疾病诊断	450
§ 10.7.4	药理分析	450
	参考文献	451

第十一章 电致化学发光分析	459
§ 11.1 电致化学发光过程	459
§ 11.1.1 ECL 基本原理	459
§ 11.1.2 电致化学发光的实验装置	464
§ 11.1.3 电致化学发光分析法的特点	465
§ 11.2 电致化学发光反应主要类型及应用	466
§ 11.2.1 聚芳香族碳氢化合物 (PAHs) 及有机物的电致化学发光	466
§ 11.2.2 酰肼类化合物	468
§ 11.2.3 无机物及金属有机络合物的 ECL	470
§ 11.2.4 氧化物修饰的阴极发光	474
§ 11.3 电致化学发光传感器及其应用	475
§ 11.3.1 基于固定化 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 的电致化学发光及酶传感器	475
§ 11.3.2 基于鲁米诺 ECL 的酶传感器	478
§ 11.3.3 ECL 免疫传感器与 DNA 探针	478
§ 11.3.4 量子点电致化学发光传感器	479
§ 11.4 ECL 联用技术	482
§ 11.4.1 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ ECL 与 HPLC、FIA 联用	483
§ 11.4.2 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ ECL 与 CE 联用	485
§ 11.4.3 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ ECL 与微芯片联用	490
§ 11.5 电致化学发光成像法	492
§ 11.5.1 ECL 成像技术	492
§ 11.5.2 电极表面活性分布的表征	494
§ 11.5.3 电极表面粗糙度的表征	494
§ 11.5.4 流体动力学研究	494
§ 11.5.5 固态电子传输和电子转移机理研究	495
§ 11.5.6 反应动力学研究	496
§ 11.6 电致化学发光的发展前景	497
参考文献	498
第十二章 细胞电化学与细胞传感	506
§ 12.1 细胞电化学意义	506
§ 12.1.1 细胞电化学研究意义	506
§ 12.1.2 细胞内电子传递的统一性	508
§ 12.1.3 肿瘤细胞电化学行为及其应用	509

§ 12.2	细胞的介电行为与电化学性质	509
§ 12.3	细胞电泳及肿瘤组织检测	511
§ 12.3.1	细胞电泳的基本原理及其意义	511
§ 12.3.2	单细胞凝胶电泳检测	512
§ 12.3.3	毛细管电泳单细胞分析	514
§ 12.4	细胞在新型仿生界面的增殖与固定技术	515
§ 12.4.1	细胞固定技术	515
§ 12.4.2	细胞在新型仿生界面的增殖与细胞传感器	518
§ 12.4.3	细胞在新型医用材料界面的增殖与电化学表征	521
§ 12.5	细胞膜上蛋白质的电化学免疫分析	530
§ 12.5.1	细胞膜组分及肿瘤细胞表面特性的改变	530
§ 12.5.2	细胞膜表面抗原与免疫分析	530
§ 12.5.3	肿瘤标志物及细胞膜表面蛋白质电化学免疫分析	531
§ 12.6	电化学药敏检测方法	535
§ 12.6.1	细胞电化学伏安响应	535
§ 12.6.2	肿瘤细胞生长及药物抑制作用的分析	537
§ 12.7	电场对肿瘤细胞的电化学疗法	543
§ 12.8	细胞电化学发展思路	544
	参考文献	545
第十三章	电分析化学联用技术	552
§ 13.1	液相色谱/毛细管电泳-电化学检测	552
§ 13.1.1	液相色谱/毛细管电泳-电化学检测技术	552
§ 13.1.2	液相色谱/毛细管电泳-电化学检测联用技术的设计	554
§ 13.1.3	液相色谱/毛细管电泳-电化学联用技术的应用	556
§ 13.2	光谱电化学法	557
§ 13.2.1	光谱电化学分析法的产生及分类	557
§ 13.2.2	光谱电化学池的特点与分类	559
§ 13.2.3	光谱电化学研究法的优缺点	559
§ 13.2.4	光谱电化学的研究应用	560
§ 13.3	石英晶体微天平-电化学系统	564
§ 13.3.1	石英晶体微天平的基本原理	564
§ 13.3.2	石英晶体微天平-电化学系统	566
§ 13.3.3	EQCM的应用研究	568