



中国科学院研究生教学丛书



化学修饰电极

(修订版)

董绍俊 车广礼 谢远武 著



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学院研究生教学丛书

化学修饰电极

(修订版)

董绍俊 车广礼 谢远武 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为《中国科学院研究生教学丛书》之一。

本书以化学和相关边缘科学为基础,结合现代电化学和电分析化学的最新进展,系统地介绍化学修饰电极的由来、表面分子设计与制备、表征方法、膜内的电荷传输、电极过程动力学、功能与效应及其在生物传感器、蛋白质的电子转移、流动体系和分析中的应用,展望了化学修饰电极的发展前景,并对近期受到关注的无机膜和聚合物膜修饰电极另列章节分别论述,结合21世纪科技发展,增加“分子自组有序膜”一章,反映现代有关研究的趋势和前沿。

本书可供电化学、电分析化学和相关边缘学科的研究工作者、教学人员及硕士生、博士生参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学修饰电极/董绍俊,车广礼,谢远武著. —修订版 —北京:科学出版社,2003. 2

(中国科学院研究生教学丛书)

ISBN 7-03-011004-8

I. 化… II. ①董… ②车… ③谢… III. 电化学分析 IV. O657. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第099889号

责任编辑:操时杰 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:安春生 / 封面设计:槐寿明

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>

西禄印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1995年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年2月修 订 版 印张:41 1/2

2003年2月第二次印刷 字数:1 000 000

印数:2 501—5 500

定价:62.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《中国科学院研究生教学丛书》总编委员会名单

主 任 白春礼

副主任 余翔林 师昌绪 杨 乐 汪尔康 沈允钢
黄荣辉 叶朝辉

委 员 朱清时 叶大年 王 水 施蕴瑜 冯克勤
冯玉琳 洪友士 王东进 龚 立 吕晓澎
林 鹏

《中国科学院研究生教学丛书》化学学科编委会成员名单

主 编 汪尔康

副主编 朱清时

编 委 蒋耀忠 庞文琴 袁倬斌 张玉奎 于德泉

《中国科学院研究生教学丛书》序

在 21 世纪曙光初露, 中国科技、教育面临重大改革和蓬勃发展之际, 《中国科学院研究生教学丛书》——这套凝聚了中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血的研究生教材面世了。相信这套丛书的出版, 会在一定程度上缓解研究生教材不足的困难, 对提高研究生教育质量起着积极的推动作用。

21 世纪将是科学技术日新月异, 迅猛发展的新世纪, 科学技术将成为经济发展的最重要的资源和不竭的动力, 成为经济和社会发展的首要推动力量。世界各国之间综合国力的竞争, 实质上是科技实力的竞争。而一个国家科技实力的决定因素是它所拥有的科技人才的数量和质量。我国要想在 21 世纪顺利地实施“科教兴国”和“可持续发展”战略, 实现邓小平同志规划的第三步战略目标——把我国建设成中等发达国家, 关键在于培养造就一支数量宏大、素质优良、结构合理、有能力参与国际竞争与合作的科技大军。这是摆在我国高等教育面前的一项十分繁重而光荣的战略任务。

中国科学院作为我国自然科学与高新技术的综合研究与发展中心, 在建院之初就明确了出成果出人才并举的办院宗旨, 长期坚持走科研与教育相结合的道路, 发挥了高级科技专家多、科研条件好、科研水平高的优势, 结合科研工作, 积极培养研究生; 在出成果的同时, 为国家培养了数以万计的研究生。当前, 中国科学院正在按照江泽民同志关于中国科学院要努力建设好“三个基地”的指示, 在建设具有国际先进水平的科学研究基地和促进高新技术产业发展基地的同时, 加强研究生教育, 努力建设好高级人才培养基地, 在肩负起发展我国科学技术及促进高新技术产业发展重任的同时, 为国家源源不断地培养输送大批高级科技人才。

质量是研究生教育的生命, 全面提高研究生培养质量是当前我国研究生教育的首要任务。研究生教材建设是提高研究生培养质量的一项重要基础性工作。由于各种原因, 目前我国研究生教材的建设滞后于研究生教育的发展。为了改变这种情况, 中国科学院组织了一批在科学前沿工作, 同时又具有相当教学经验的科学家撰写研究生教材, 并以专项资金资助优秀的研究生教材的出版。希望通过数年努力, 出版一套面向 21 世纪科技发展、体现中国科学院特色的高水平的研究生教学丛书。本丛书内容力求具有科学性、系统性和基础性, 同时也兼顾前沿性, 使阅读者不仅能获得相关学科的比较系统的科学基础知识, 也能被引导进入当代科学研究的前沿。这套研究生教学

丛书，不仅适合于在校研究生学习使用，也可以作为高校教师和专业研究人员工作和学习的参考书。

“桃李不言，下自成蹊。”我相信，通过中国科学院一批科学家的辛勤耕耘，《中国科学院研究生教学丛书》将成为我国研究生教育园地的一丛鲜花，也将似润物春雨，滋养莘莘学子的心田，把他们引向科学的殿堂，不仅为科学院，也为全国研究生教育的发展作出重要贡献。

钱南祥

序

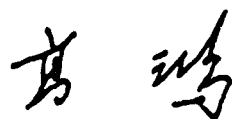
化学修饰电极是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一门新兴的、也是目前最活跃的电化学和电分析化学的前沿领域，它是中国科学院长春应用化学研究所电分析化学开放研究实验室的重要研究方向。化学修饰电极是在电极表面进行分子设计，将具有优良化学性质的分子、离子、聚合物设计固定在电极表面，使电极具有某种特定的化学和电化学性质，丰富了电化学的电极材料，扩展了电化学的研究领域。目前已应用于生命科学、环境科学、能源科学、分析科学、电子学以及材料科学等诸多方面。董绍俊研究员自 1980 年以来在国内最早开辟这一研究领域，着重研究了化学修饰电极的基础理论、设计、制备及应用。她培养了一批博士和硕士，形成了一支包括博士后、博士及研究生的中青年研究队伍，车广礼博士和谢远武博士便是其中的优秀代表。已发表论文 300 余篇，约占国际上这一研究领域公开发表论文总数的十几分之一，曾多次获国家、院部级奖励，在国际上颇有影响。电分析化学开放研究实验室也成为该研究领域的重要基地。

董绍俊研究员以亲身从事该领域研究 15 年的丰富经验和深刻体会，与车广礼和谢远武合作撰写成此书。该书主要以电分析化学开放研究实验室在此研究领域的成就为主线，穿插国内外著名的研究成果，主要囊括了化学修饰电极的分子设计与制备、研究方法、电极过程动力学和功能与效应等，系统地总结了国内外化学修饰电极的发展，跟踪了该领域的最新动向，展望了化学修饰电极的前景，引用文献 3000 多篇，对我国电化学、电分析化学的发展具有重要的学术价值和实际的指导意义。

本书的最大特点是它的创造性和深刻性，澄清了长期以来有些模糊不清的概念，注重基础理论和实验结果的一致性，对有些不同学者的研究结果和观点进行了统一，理顺了相互关系，更有利于促进这一学科的发展。这本书的出版将展示我国在化学修饰

电极这一领域的国际地位和丰硕成果,进一步促进这一领域的发展.这是一本重要的学术著作,可供从事电化学与电分析化学的教学与科研人员参考.

中国科学院院士
西北大学教授

Handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '石' (Shi) and '平' (Ping).

1994年7月18日

修订版前言

《化学修饰电极》一书于1995年出版以来，受到相关领域广大读者的欢迎。国内（包括香港、台湾地区）以及韩国诸多高等院校与研究所的电化学、电分析化学的专家和教授们高度评价这本书的质量、水平和对电化学及电分析化学研究发展的贡献，推荐为研究生教材，并希望尽快出版繁体字本和英译本。作者对此表示深切的谢意。

随着生命科学、材料科学和纳米科学的迅猛发展，将超分子化学、分子自组装技术引入化学修饰电极领域，推进其研究工作迈上一个更高的台阶，达到分子、原子水平。本实验室从1990年开始，展开了分子自组装修饰电极方面的研究，已发表有关论文近百篇。作者深感这方面研究的意义重大和前景开阔，结合国际上的前沿和我们的实践，《化学修饰电极》的修订版订正了第一版的疏漏、错误和不妥之处，增加了“分子自组有序膜”一章，希望对相关科技工作者和研究生们有所帮助。

修订版增加的第十五章重点论述了分子自组装的基本原理和实验方法，不同基底电极上单层膜、多层膜、双层磷脂膜以及纳米有序膜的制备、表征和应用。参加第十五章相关工作的有本实验室的刘建允博士、彭章泉和韩晓军博士研究生以及齐力副研究员。感谢他们的支持帮助。

由于本章涉及的研究领域面广，作者水平有限，不够完善和错误之处在所难免，欢迎批评指正。

董绍俊

2002年3月8日于长春

第一版前言

本书是作者以中国科学院长春应用化学研究所电分析化学开放研究实验室多年的化学修饰电极研究工作为基础写成的。化学修饰电极是电化学和电分析化学研究十分活跃的领域,目前已有 4000 多篇研究论文发表,涉及到生命科学、能源科学、分析科学、电子学以及材料科学等,为化学和相关边缘科学开拓了一个创新和充满希望的广阔研究领域。我们自 1980 年开始从事这一领域的研究,培养造就了一批包括博士后、博士和研究生的中青年研究队伍。在长期的研究工作中,对化学修饰电极的理论和应用积累了大量的实践经验和科研成果,我们把这些劳动的结晶倾注于本书之中,奉献给科学界的同仁。

本书共分十四章 80 多万字,从基本理论、基本方法出发,主要概括了 1993 年以前的最新成就和发展趋势,详尽地论述了化学修饰电极的由来、表面分子设计与制备、表征方法、膜内的电荷传输、电极过程动力学、功能与效应及其在生物传感器、流动体系、蛋白质的电子转移和分析中的应用,展望了化学修饰电极的发展前景,并对近期受到关注的无机膜和聚合物膜修饰电极另列章节分别论述。本书力求做到原理清楚、理论系统、方法具体、内容新颖充实,各章节配置合理,论述和分析深入,适于作电化学和电分析化学研究与教学的参考书。

本书由董绍俊研究员和车广礼博士、谢远武博士合著,汪尔康院士审校。在成稿与勘校等工作中得到了本实验室的牛建军博士、池其金博士、刘安华博士和博士研究生邓青、陈挺等的大力协助,李虹云同志承担了部分章节的文字打印工作,在此一并表示感谢。

本书的问世若能对我国电化学和电分析化学事业的发展有一定的促进作用,我们将为此感到欣慰。由于我们的水平所限,谬误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1994 年 7 月 18 日于长春

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 化学修饰电极的发展过程	(1)
1.1.1 化学修饰电极的来源	(1)
1.1.2 化学修饰电极的兴起	(3)
1.1.3 电极表面的化学修饰	(4)
1.2 IUPAC对化学修饰电极的命名和定义	(5)
1.2.1 命名和定义	(6)
1.2.2 有关聚合物薄膜的性质	(8)
1.3 有关化学修饰电极的几个方面	(8)
1.3.1 化学修饰电极的含义	(9)
1.3.2 化学修饰电极的安培检测	(9)
1.3.3 化学修饰电极电催化的类型和特点	(9)
1.3.4 化学修饰电极在分析化学中的意义	(10)
1.3.5 电极表面修饰与酶电极的发展	(11)
1.3.6 电极表面微结构呈现电学和光学的响应	(11)
1.3.7 化学修饰电极与立体有机合成	(12)
1.3.8 分子修饰半导体表面对能量转换的作用	(12)
1.4 化学修饰电极的研究、理论和应用	(13)
参考文献	(13)
第二章 化学修饰电极的制备和类型	(16)
2.1 固体电极表面的清洁处理	(17)
2.1.1 鉴定固体电极表面的方法	(17)
2.1.2 机械研磨和抛光	(18)
2.1.3 化学法和电化学法处理	(19)
2.2 共价键合法	(19)
2.2.1 碳电极为基的化学修饰	(19)
2.2.2 金属和金属氧化物为基的化学修饰	(22)
2.3 吸附法	(23)
2.3.1 化学吸附法	(23)
2.3.2 欠电位沉积法	(25)
2.3.3 LB (Langmuir-Blodgett) 膜法	(28)
2.3.4 SA (Self-Assembling) 膜法	(30)
2.4 聚合物薄膜法	(32)

2.4.1 从聚合物出发制备	(32)
2.4.2 从单体出发制备	(34)
2.5 组合法	(39)
2.5.1 化学修饰碳糊电极 (CMCPE) 的制备	(40)
2.5.2 CMCPE 的活化和再生	(40)
2.6 其他方法	(41)
2.6.1 混合价态化合物修饰	(41)
2.6.2 金属、金属氧化物和多酸类	(41)
2.6.3 沸石和黏土类	(43)
参考文献	(44)
第三章 化学修饰电极的表征	(52)
3.1 电化学方法表征化学修饰电极	(52)
3.1.1 循环伏安法	(52)
3.1.2 计时电流法	(58)
3.1.3 计时库仑法	(62)
3.1.4 计时电位法	(63)
3.1.5 脉冲伏安法	(67)
3.1.6 电化学交流阻抗谱 (EIS)	(67)
3.1.7 超微电极上的计时电流法	(70)
3.2 光谱法研究化学修饰电极	(72)
3.2.1 现场光谱电化学基本原理	(72)
3.2.2 紫外-可见光谱电化学法	(73)
3.2.3 红外光谱电化学法	(85)
3.2.4 激光光谱法	(90)
3.3 波谱法表征化学修饰电极——电子自旋共振 (ESR)	(92)
3.4 表面分析能谱法表征化学修饰电极	(95)
3.4.1 表面分析能谱的概述	(95)
3.4.2 XPS 和 AES 表征化学修饰电极	(98)
3.5 现场 X 射线衍射法表征化学修饰电极	(100)
3.5.1 现场 EXAFS 电化学池	(100)
3.5.2 表征化学修饰电极	(100)
3.6 石英晶体微天平 (QCM) 表征化学修饰电极	(102)
3.6.1 QCM 的基本原理	(102)
3.6.2 表征化学修饰电极	(103)
3.7 显微学表征化学修饰电极	(105)
3.7.1 扫描电子显微镜	(105)
3.7.2 扫描隧道显微镜	(107)
3.7.3 扫描电化学显微镜 (SECM)	(110)
参考文献	(114)

第四章 单分子层化学修饰电极的电极过程动力学	(121)
4.1 等温吸附理论	(121)
4.1.1 Langmuir 等温吸附	(121)
4.1.2 Frumkin 等温吸附	(122)
4.1.3 Temkin 等温吸附	(122)
4.2 单分子层化学修饰电极反应的总过程	(123)
4.3 理想单分子层化学修饰电极的电化学响应	(123)
4.4 非理想单分子层化学修饰电极的电化学响应	(126)
4.5 氧化还原型单分子层化学修饰电极表面反应异相动力学	(130)
4.5.1 理想氧化还原型单分子层化学修饰电极的异相动力学	(130)
4.5.2 非理想氧化还原型单分子层化学修饰电极的异相动力学	(133)
4.6 单分子层化学修饰电极电催化动力学	(134)
4.6.1 旋转圆盘电极的稳态伏安法	(135)
4.6.2 单分子层化学修饰电极不稳定电催化动力学的研究方法	(138)
4.6.3 单分子层化学修饰电极电催化过程的循环伏安理论	(143)
参考文献	(147)
第五章 聚合物膜内的电荷传输	(149)
5.1 电解质溶液中的电荷传输	(149)
5.1.1 离子的扩散	(149)
5.1.2 离子的电迁移	(150)
5.1.3 离子的对流扩散	(150)
5.1.4 离子间的电子自交换	(151)
5.2 聚合物薄膜内的电荷传输	(153)
5.2.1 电子跳跃(电子自交换)	(154)
5.2.2 氧化还原体在膜内的扩散	(155)
5.2.3 对离子的电迁移(静电效应)	(156)
5.2.4 伴随扩散	(156)
5.2.5 聚合物链在膜内的运动	(156)
5.2.6 导电聚合物的电荷传输	(157)
5.2.7 膜内电荷传输定律	(157)
5.3 电子转移理论	(159)
5.3.1 Marcus 的交叉反应电子转移理论	(159)
5.3.2 均相电子转移与异相电子转移速率常数的关系	(160)
参考文献	(161)
第六章 聚合物薄膜修饰电极的电极过程动力学	(166)
6.1 引言	(166)
6.2 聚合物膜修饰电极上的电极反应总过程	(166)
6.2.1 非氧化还原型聚合物膜修饰电极过程	(166)
6.2.2 氧化还原型聚合物膜修饰电极异相电极过程	(167)

6.2.3 氧化还原型聚合物膜修饰电极电催化过程	(167)
6.3 聚合物膜修饰电极的渗透过程	(168)
6.3.1 聚合物膜的渗透过程	(169)
6.3.2 聚合物膜的渗透理论	(170)
6.3.3 聚合物膜的渗透动力学研究	(173)
6.4 聚合物膜修饰电极的异相动力学过程	(179)
6.4.1 膜/溶液界面的异相动力学	(179)
6.4.2 膜/电极界面的异相动力学	(179)
6.5 聚合物膜内电子转移过程动力学	(181)
6.6 氧化还原型聚合物膜修饰电极电催化动力学	(181)
6.6.1 考虑双因素的电催化过程	(182)
6.6.2 考虑四因素的电催化过程	(184)
6.6.3 考虑五因素的电催化过程	(197)
6.6.4 考虑六因素的电催化过程	(202)
6.6.5 预活化电催化过程	(203)
6.6.6 电催化公式的应用	(204)
6.7 非氧化还原型聚合物膜修饰电极电催化动力学	(210)
6.7.1 微异相催化的宏观过程	(211)
6.7.2 微异相催化的微观过程	(212)
参考文献	(214)
第七章 化学修饰电极的功能与效应	(217)
7.1 化学修饰电极电催化	(217)
7.1.1 化学修饰电极电催化的一般原理及影响因素	(217)
7.1.2 化学修饰电极电催化氧还原	(220)
7.2 化学修饰电极的光电化学	(231)
7.2.1 光阳极腐蚀的防护	(231)
7.2.2 光电催化	(234)
7.2.3 化学修饰半导体电极的光敏作用	(235)
7.3 化学修饰电极的电化学发光	(237)
7.4 化学修饰电极用于有机电合成	(237)
7.4.1 氧化还原型化学修饰电极电催化在电合成中的应用	(237)
7.4.2 生成物选择的反应	(239)
7.4.3 基质选择的有机电合成	(242)
7.5 化学修饰电极的电色效应	(243)
7.5.1 染料化学修饰电极的电色效应	(244)
7.5.2 无机膜化学修饰电极的电色效应	(246)
7.5.3 聚合物膜化学修饰电极的电色效应	(247)
7.6 化学修饰电极作为分子电子器件	(248)
7.6.1 化学修饰电极的整流作用	(248)

7.6.2	化学修饰电极制备的电化学晶体管	(251)
7.6.3	化学修饰电极的离子门效应	(254)
7.6.4	化学修饰电极的人工肌肉功能	(254)
7.6.5	化学修饰电极的去离子化效应	(255)
7.7	化学修饰电极的电化学控制释放	(256)
7.7.1	化学修饰电极的共价键合负载	(257)
7.7.2	化学修饰电极的离子键合负载	(259)
	参考文献	(261)
第八章	无机化合物薄膜修饰电极	(267)
8.1	多核过渡金属氰化物薄膜修饰电极	(267)
8.1.1	过渡金属氰化物的结构和性质	(267)
8.1.2	过渡金属氰化物膜的制备	(268)
8.1.3	电化学行为	(269)
8.1.4	热力学和动力学因素	(273)
8.1.5	应用	(274)
8.2	黏土类薄膜化学修饰电极	(275)
8.2.1	黏土的基本结构与特性	(275)
8.2.2	修饰电极的制备与膜的定向	(276)
8.2.3	电中性物质通过黏土薄膜的扩散	(278)
8.2.4	荷正电的电活性物质的离子交换	(279)
8.2.5	荷负电的电活性物质的电化学行为	(282)
8.2.6	应用	(283)
8.3	分子筛薄膜修饰电极	(283)
8.3.1	分子筛的结构及性能	(283)
8.3.2	修饰电极的制备方法	(284)
8.3.3	修饰电极的分子识别	(288)
8.3.4	分子筛中的扩散与传输	(289)
8.3.5	分子筛修饰电极的应用	(290)
8.4	多酸化学修饰电极	(290)
8.4.1	多酸化合物的结构及特性	(290)
8.4.2	多酸修饰电极的制备方法	(292)
8.4.3	多酸修饰电极的电化学性质及电催化作用	(294)
8.4.4	金属取代杂多酸	(297)
	参考文献	(299)
第九章	聚合物薄膜修饰电极	(304)
9.1	惰性薄膜	(304)
9.2	电活性(氧化还原)聚合物薄膜	(305)
9.2.1	电化学行为	(305)
9.2.2	各种因素对伏安行为的影响	(307)

9.2.3 几种新型电活性聚合物薄膜举例	(309)
9.3 离子交换聚合物薄膜	(315)
9.3.1 阴离子交换剂	(315)
9.3.2 阳离子交换剂	(319)
9.4 导电聚合物薄膜	(329)
9.4.1 聚吡咯	(329)
9.4.2 聚噻吩	(338)
9.4.3 聚苯胺	(347)
参考文献	(362)
第十章 化学修饰电极在分析化学中的应用	(373)
10.1 用于分析的基本要求	(373)
10.2 选择性富集分离	(375)
10.2.1 富集、分离过程	(375)
10.2.2 检测与再生	(382)
10.3 电催化作用	(383)
10.3.1 单分子层修饰电极	(384)
10.3.2 多分子层修饰电极	(388)
10.3.3 碳糊化学修饰电极	(390)
10.3.4 金属氧化物修饰电极	(391)
10.4 选择性渗透	(394)
10.4.1 大小排阻	(395)
10.4.2 电荷排阻	(397)
10.4.3 极性排阻	(400)
10.4.4 混合控制	(402)
10.5 离子通道传感器	(406)
10.5.1 传感器原理	(406)
10.5.2 LB膜对被测物的识别	(406)
10.5.3 离子通道的放大作用	(407)
10.5.4 其他类型离子通道传感器	(407)
10.6 电位传感器	(410)
10.6.1 pH传感器	(410)
10.6.2 聚合物掺杂的阴离子传感器	(413)
10.6.3 其他类型的传感器	(415)
参考文献	(417)
第十一章 化学修饰电极在 FIA 和 HPLC 中的应用	(422)
11.1 基本原理	(422)
11.2 儿茶酚胺及其代谢产物	(424)
11.3 过氧化物、胍类化合物	(426)
11.3.1 过氧化物	(426)

11.3.2 胍类化合物	(427)
11.4 碳水化合物和多羟基酚	(428)
11.5 巯基化合物、醇和 α -酮酸	(434)
11.5.1 巯基化合物	(434)
11.5.2 醇	(436)
11.5.3 草酸、 α -酮酸和酚酸	(437)
11.6 NADH 和蛋白质	(440)
11.6.1 NADH	(440)
11.6.2 蛋白质	(441)
11.7 无机物质	(443)
11.8 非电活性离子	(444)
11.9 阳离子药物和局部麻醉剂	(448)
11.10 多组分分析	(449)
参考文献	(453)
第十二章 氧化还原蛋白质和酶的直接电化学	(456)
12.1 引言	(456)
12.2 细胞色素 c 在联吡啶类修饰金电极上的直接电化学	(456)
12.2.1 细胞色素 c 分子的基本化学结构	(456)
12.2.2 4-吡啶类化合物在金电极表面的吸附	(458)
12.2.3 实验的促进剂	(458)
12.2.4 细胞色素 c 的化学修饰	(466)
12.2.5 聚赖氨酸的影响	(467)
12.2.6 pH 的影响	(467)
12.2.7 表面取代、稀释	(469)
12.2.8 Hill 快速吸脱附模型	(470)
12.2.9 Niki 不可逆吸附模型	(471)
12.2.10 统一的机理	(471)
12.3 细胞色素 c 在其他电极上的直接电化学	(473)
12.3.1 细胞色素 c 在碳电极上的直接电化学	(473)
12.3.2 细胞色素 c 在金属氧化物电极上的直接电化学	(475)
12.3.3 细胞色素 c 在金属电极上的直接电化学	(478)
12.4 其他氧化还原蛋白质的直接电化学	(480)
12.4.1 肌红蛋白和血红蛋白的直接电化学	(480)
12.4.2 其他细胞色素类蛋白质的直接电化学	(487)
12.4.3 其他荷负电的蛋白质的直接电化学	(488)
12.5 酶的直接电化学	(492)
12.5.1 过氧化物酶的直接电化学	(492)
12.5.2 氧化酶的直接电化学	(492)
12.5.3 氢化酶和脱氢酶的直接电化学	(493)