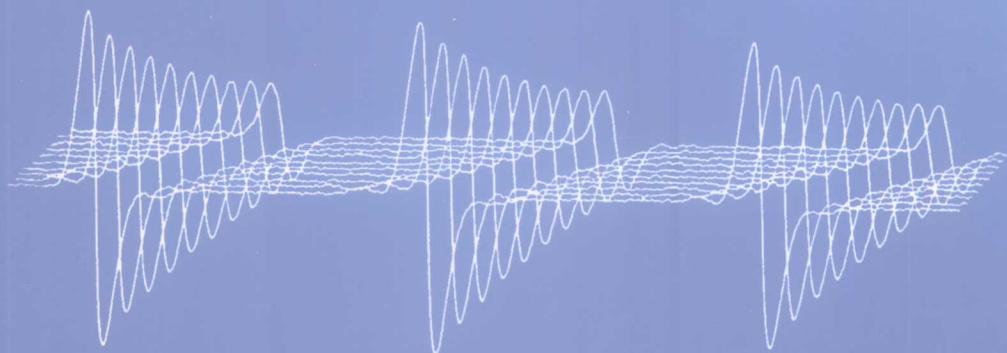


ADVANCED ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE
SPECTROSCOPY AND ITS APPLICATIONS

现代 电子顺磁共振波谱学 及其应用

主编 卢景雾



北京大学医学出版社

ADVANCED ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE
SPECTROSCOPY AND ITS APPLICATIONS

现代电子顺磁共振波谱学及其应用

主编 卢景雾

编委 (按章节顺序排列)

汪汉卿 卢景雾 刘 扬 杜立波 刘克建

殷俊杰 王兆慧 马万红 赵进才 段绍瑾

北京大学医学出版社

XIANDAI DIANZI SHUNCI GONGZHEN BOPUXUE JIQI YINGYONG

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电子顺磁共振波谱学及其应用/卢景雾主编.

—北京: 北京大学医学出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-5659-0313-7

I. ①电… II. ①卢… III. ①电子自旋共振—磁共振
波谱学 IV. ①O482.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 254466 号

现代电子顺磁共振波谱学及其应用

主 编: 卢景雾

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E - mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 北京佳信达欣艺术印刷有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 江 宁 责任校对: 金彤文 责任印制: 张京生

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 29.5 字数: 764 千字

版 次: 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5659-0313-7

定 价: 128.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

本书由
北京大学医学部科学出版基金
资助出版

参编人员名单*

- 汪汉卿 中国科学院兰州物理化学研究所研究员
whqwt@yahoo.com.cn
- 卢景雾 北京大学医学部研究员
zdsljf@bjmu.edu.cn
- 刘 扬 中国科学院化学研究所研究员
yliu@iccas.ac.cn
- 杜立波 中国科学院化学研究所助理研究员 博士
dulibo@iccas.ac.cn
- 王兆慧 中国科学院化学研究所、东华大学讲师 博士
zhaohuiwang@dhu.edu.cn
- 马万红 中国科学院化学研究所研究员 博士
whma@iccas.ac.cn
- 赵进才 中国科学院化学研究所研究员
jczhao@iccas.ac.cn
- 段绍瑾 北京广安门中医研究院研究员
shaojduan@yahoo.com

特邀参编人员名单

- 刘克建 美国新墨西哥大学博士 教授
kliu@salud.unm.edu
- 殷俊杰 美国食品药品监督管理局博士 高级研究科学家
Junjie.yin@fda.hhs.gov

* 按照章节顺序排列

内容简介

全书分上、下两篇共十七章和四个附录。上篇是理论和技术篇，内容主要包括电子顺磁共振（EPR）的基本原理、EPR 的实验方法以及现代的、各种各样的 EPR 新技术和新方法，如脉冲电-核双共振、表面自由基-EPR、自旋标记-EPR、瞬态-EPR、自旋捕捉-EPR、在体（活体）-EPR 和脉冲-EPR 等。在深入浅出地阐明理论概念的基础上讲述了 EPR 波谱的解析方法，结合在化学、生物化学、分子生物学等方面的应用课题，介绍了从中获得相关专业信息的方法。下篇是应用篇，进一步通过实例介绍了电子顺磁共振波谱学在自由基生物学、医药学、环境科学和工、农业生产等方面的应用，不仅证实了 EPR 技术在多种学科中应用的可能性，而且了解到电子顺磁共振和其他学科之间“连接”的途径。为了方便阅读，在附录中列出了符号缩写、公式转换和磁性核的波谱参数。本书可以作为电子顺磁共振波谱学领域的科学研究人员、工程技术人员、应用研究人员、高校的教育工作者和其他对该技术有兴趣者重要的参考书籍，也可以成为高等院校多个专业大学生、研究生的辅助教材。

前 言

自从 1945 年苏联科学家 Zavoisky 在固体中观察到电子顺磁共振 (EPR) 这一奇妙的物理现象以来, 电子顺磁共振波谱学已经经历了 60 多年漫长的发展历程。20 世纪 50 - 60 年代是 EPR 的基本理论、实验技术和实验方法迅速发展的时期, 世界上出现了生产 EPR 波谱仪的三个主要的比较大的公司, 即美国 Varian、德国 Bruker 和日本 JEOL 公司, 为 70 年代 EPR 技术在化学、生物学等其他学科的广泛应用提供了方便的条件。同时源自这些学科发展的需要及其应用研究的成果又反过来推动了 EPR 波谱学学科的进一步深入发展, 例如自旋标记、自旋捕捉和自旋成像等都是现代建立起来的 EPR 实验新技术和新方法。特别应该强调的是 80 - 90 年代兴起的多频-EPR、脉冲-EPR 和 20 世纪末开始的在体 (活体) - EPR 研究为顺磁共振波谱学的理论、技术及其应用的发展开拓了更加美好灿烂的前景。如果人们还记得核磁共振波谱学从连续波走向脉冲, 从频率域走向时间域 (ms) 之后给科学发展带来的巨大进步, 那么可以相信不久的将来, 电子顺磁共振波谱技术将在更加精确的时间刻度 (μs , ns) 上促进科学发展。预见到这点是很有价值的。

早年电子顺磁共振波谱学主要的研究内容是自由基和顺磁性的过渡金属离子, 以及它们和外环境的相互作用。现代由于新实验方法的建立, 顺磁共振波谱技术的应用已经扩大到非顺磁性的领域, 例如蛋白质、核酸和膜等生物大分子的结构和动力学研究方面, 而且有可能在揭示生命现象本质的同时服务于临床医学。我国电子顺磁共振波谱技术及其应用研究起步于 20 世纪 60 - 70 年代, 在不断的发展过程中已经初步建立了一支 EPR 的研究队伍, 但是对我们这样一个科学大国而言, 这个队伍仍显得比较渺小。原因是多方面的, 其中一个重要的原因是大家对电子顺磁共振波谱学知识的了解和普及还不够, 而且缺少相关的技术资料和专业教材。鉴于此, 本书拟全面地介绍电子顺磁共振波谱学的基本原理、实验技术、实验方法及其在多种学科特别是生物学学科领域中的应用实例。

本书的参编人员是一支老、中、青相结合的队伍, 大家来自不同的工作单位, 是“电子顺磁共振”让我们走到一起。其中有在电子顺磁共振波谱学领域从事四五十年研究和教学工作的老专家, 他们具有深厚的理论基础和丰富的实践经验, 有在国外相关实验室工作的经历, 书中很多内容正是他们从事教学和科研工作的总结; 还有那些正辛勤奋斗在教学和科研第一线的中年专家, 他们身负学科重担, 不断地迎接新的挑战, 在书中记载着他们的最新研究成果; 刚刚离开学校不久的年轻人以极大的热情、敏捷的思维投入电子顺磁共振波谱学领域, 洋溢着他们对知识的渴求和理解。在撰写这本书的过程中, 不但充分发挥了各位参编者的专长, 还参考了国内、外有关论著, 书中部分章节还特地聘请国外从事 EPR 研究的华人专家参与编写, 因而使得本书具有理论性、实用性、可读性和先进性相结合的特点, 也兼顾了多种学科对 EPR 技术的需求。在写作方法上, 本书强调理论与实际相结合, 深入浅出、图文并茂、章节清楚、文字简洁, 清晰易懂。虽然书中少数参考文献相对年代久远, 但它们确属代表 EPR 学科发展的经典之作, 并具有很强的实用价值。

本书内容广泛, 分上、下两篇共十七章和四个附录。其中上篇是理论和技术篇, 共十一

章,第一、二章是介绍电子顺磁共振波谱学的基本原理和核磁矩与电子磁矩的相互作用及相关波谱的解析方法,运用物理和数学的知识对深奥的 EPR 理论做了精辟的阐述。第三、四章讲的是电子顺磁共振的实验装置和操作方法,对复杂的 EPR 实验技术和实验方法进行了比较详细的介绍以扩充非物理和技术专业读者及初学者的知识面,增强书的实用价值。第五章到第十一章是电子顺磁共振的新技术和新方法,包括脉冲电子-核双共振,金属氧化物表面顺磁物种的电子顺磁共振,时间分辨(瞬态)-EPR,对非顺磁性物质实现 EPR 研究的自旋标记-EPR,检测短寿命自由基和非常微弱自由基的自旋捕捉-EPR,在体(活体)-EPR 和脉冲-EPR 等。这些新的实验技术和方法大大地拓宽了 EPR 的应用范围。为了体会这些方法的可应用价值,同时也列举了应用的实例,其中包括在化学、生物化学和分子生物学等方面的应用。下篇是应用篇,进一步结合具体的研究课题,讲解了电子顺磁共振波谱技术应用于自由基生物学、医学、药学、环境科学以及工、农业生产的研究思路、实验方法和获得的信息,目的是为了让更多非磁共振专业的工作者了解电子顺磁共振波谱技术的可应用性,让更多的人来关心和使用。一个学科,它在科学研究、国民经济、人民生活等方面发挥的作用愈大就愈有生命力。所以特别希望现在年轻的科研工作者敢于走出自己已经熟悉的专业,实现学科交叉,互相密切合作取长补短,建立创新的研究成果。书中的附录包括符号缩写、重要的常数和转换公式以及常见磁性核的磁特性,还有在每个章节之后附有的参考文献都是为了便于读者阅读和查询。

除了诚挚地感谢各位参编者辛勤的劳动而外,由衷地感谢北京大学医学部科学出版基金给予的出版资助。特别感谢美国新墨西哥大学刘克建博士为本书撰写第十章活体-EPR,美国 FDA 殷俊杰博士为第十一章饱和恢复脉冲-EPR 提供素材和写作指导。同时还要感谢总参祁伯豪高工,北京大学医学部董晓敏老师、冯雪芝老师在绘图和文字加工方面兢兢业业的工作,还有许多同行、老师和研究生给予了热情的鼓励和帮助,在此一并表示深深的感谢。

卢景雾

2011 年 8 月

目 录

上篇 理论及技术篇

1 电子顺磁共振的基本原理	3
1.1 电子的自旋和磁矩	3
1.2 磁偶极子在磁场中的能量	4
1.3 角动量的量子化	4
1.4 磁矩和角动量之间的关系	6
1.5 共振条件	6
1.6 自旋-晶格弛豫	9
1.7 线宽和线形	10
参考文献	11
2 电子顺磁共振信号的超精细分裂	12
2.1 核的磁性	12
2.2 自旋哈密顿 $\mathcal{H}$	13
2.3 超精细耦合相互作用的来源	14
2.4 各向同性超精细相互作用	14
2.4.1 具有一个未成对电子 $S=1/2$ 和一个 $I=1/2$ 的核体系的能级分裂	15
2.4.2 具有一个未成对电子 $S=1/2$ 和一个 $I=1$ 的核体系的能级分裂	17
2.5 超精细耦合的类型	20
2.5.1 α -型超精细耦合	20
2.5.2 β -型超精细耦合	21
参考文献	22
3 电子顺磁共振的实验装置	23
3.1 EPR 波谱仪的基本组成	23
3.1.1 设计依据和发展概况	23
3.1.2 微波系统	25
3.1.3 微波谐振腔	31
3.1.4 高频小调场和相敏检波器	38
3.1.5 磁场系统	40
3.1.6 计算机系统	41
3.1.7 高频小调场式 EPR 波谱仪	42

3.2 EPR 波谱仪的主要指标	43
3.2.1 灵敏度	43
3.2.2 分辨率	44
3.2.3 稳定性	44
3.2.4 多功能性	44
3.3 主要附件	45
3.3.1 变温装置	45
3.3.2 双共振	46
3.3.3 多种谐振腔	46
3.3.4 高斯计	46
3.3.5 场/频锁定器	47
3.3.6 转角器	47
3.3.7 停止-流动装置和电解池	47
3.3.8 光照装置	48
3.4 EPR 波谱仪的最新发展	48
3.4.1 脉冲 EPR 技术	48
3.4.2 多频共振	49
3.4.3 二维、三维及多维 EPR 波谱技术	53
3.4.4 强大的计算机软、硬件功能	54
参考文献	56
4 电子顺磁共振波谱仪的操作	59
4.1 操作理论	59
4.1.1 微波功率的选择	59
4.1.2 调制幅度和调制频率及相位选择	60
4.1.3 中心磁场 H_r 、场扫描宽度 ΔH 和场扫描速率 $\Delta H/t$	62
4.1.4 增益 G 以及滤波器时间常数 T 的选择	62
4.1.5 合理选择测量参数的考虑	64
4.2 操作方法	64
4.2.1 待测样品的准备	64
4.2.2 EPR 波谱仪的常规操作	65
4.3 特殊操作	67
4.3.1 高分辨波谱的检测	67
4.3.2 变温测量	67
4.3.3 自旋标记样品的测量	68
4.3.4 短寿命自由基的测量	68
4.3.5 含水样品的检测	70
4.3.6 ENDOR 测量	71
4.4 安全和维护	72

4.4.1 安全	72
4.4.2 维护	72
4.5 EPR 波谱参数的测量和定量方法	73
4.5.1 吸收波谱的基本类型	73
4.5.2 谱线宽度的测量及意义	74
4.5.3 谱线强度的测量及意义	74
4.5.4 g 值的测量及意义	75
4.5.5 超精细分裂和精细分裂常数的测量及意义	77
4.6 标准样品	78
4.6.1 对标准样品的要求	78
4.6.2 标准样品举例	79
参考文献	82
5 脉冲电子-核双共振波谱学及其应用	84
5.1 绪言	84
5.2 理论背景	85
5.2.1 自旋哈密顿算符	85
5.2.2 ENDOR 波谱学	86
5.3 从频谱到模型	87
5.4 应用	88
5.4.1 被捕捉的自由基	88
5.4.2 金属酶	91
参考文献	92
6 金属氧化物表面顺磁物种的电子顺磁共振	94
6.1 引言	94
6.2 聚多晶样品的 EPR 谱	94
6.2.1 单独由 g 张量表征 EPR 谱	95
6.2.2 由 g 与 A 张量因子共同表征 EPR 谱	95
6.2.3 由粉末 EPR 谱得到的磁性参数及相关信息	97
6.3 在固体表面上形成的自由基种类	99
6.3.1 表面自由基的产生机制	100
6.3.2 自由基与表面之间的化学键	100
6.4 表面离子 EPR 的实验方法	101
6.4.1 表面吸附位点的顺磁探针	101
6.4.2 固体表面吸附的分子运动	102
6.5 非均相光催化过程中的离子中间产物	103
6.6 异相催化中形成的自由基中间物的鉴定及其反应活性	104
6.7 含碳的无机自由基	104

6.7.1	CO ₂ ⁻ 负离子自由基	104
6.7.2	从 CO 产生的自由基	106
6.7.3	四原子和五原子含碳自由基	106
6.8	与氮、硫、氯相关的自由基	107
6.8.1	双原子物种: 双氮原子-阴离子自由基 N ₂ ⁻	107
6.8.2	双原子类: 一种表面探针 NO	108
6.8.3	N-三原子表面自由基	111
6.8.4	含硫和氯的自由基	112
	参考文献	113
7	时间分辨电子顺磁共振	117
7.1	TR-EPR 原理与电子极化	117
7.2	TR-EPR 实验技术	118
7.3	自由基电子自旋极化的机制	119
7.3.1	三重态机制	119
7.3.2	自由基对机制	120
7.3.3	自由基-三重态对机制	121
7.3.4	自旋相关的自由基对极化机制	122
7.4	TR-EPR 应用实例	123
7.4.1	光激发下的化学反应基本过程	123
7.4.2	短寿命激发三重态的 TR-EPR	125
7.4.3	分子内长寿命电荷转移激发态的 TR-EPR	126
7.5	小结	127
	参考文献	128
8	自旋标记电子顺磁共振	131
8.1	自旋标记的方法学	131
8.1.1	自旋标记的原理	131
8.1.2	自旋标记物	131
8.1.3	自旋标记的实验方法	133
8.1.4	双重自旋标记	134
8.1.5	自旋探针-自旋标记方法	137
8.1.6	定位自旋标记	139
8.2	自旋标记电子顺磁共振的波谱	139
8.2.1	氮氧自由基的 EPR 波谱	139
8.2.2	氮氧自由基 EPR 波谱的特性	140
8.3	自旋标记细胞膜的 EPR 波谱	142
8.3.1	细胞膜结构的模型	142
8.3.2	生物学信息参数	143

8.4 饱和转移电子顺磁共振	149
8.4.1 饱和转移电子顺磁共振的基本原理	149
8.4.2 饱和转移电子顺磁共振的实验技术	152
8.4.3 饱和转移电子顺磁共振波谱及 τ_c 的计算方法	156
8.5 对氮氧 (NO) 自旋标记物的再研究	157
8.5.1 自旋标记技术的新应用	157
8.5.2 现有的 NO 自旋标记物存在的问题	158
8.5.3 对 NO 氮氧自由基自旋标记物进一步发展的考虑	159
参考文献	160
9 自旋捕捉电子顺磁共振	163
9.1 自旋捕捉技术的基本原理	163
9.2 自旋捕捉技术的发展简史	164
9.2.1 自旋捕捉技术的起源	164
9.2.2 自旋捕捉剂的分类与特色	165
9.3 自旋捕捉反应的其他联用技术	171
9.3.1 自旋捕捉-NMR 技术	171
9.3.2 与 HPLC/EPR, LC/MS, LC/MS/MS 联用的 spin trapping 方法	172
9.3.3 免疫自旋捕捉方法	172
9.4 活性氧自由基的自旋捕捉及其 EPR 谱图解析	172
9.4.1 羟基自由基的捕捉	172
9.4.2 超氧阴离子自由基的捕捉	173
9.4.3 NO 自由基的捕捉	174
9.4.4 脂质过氧化自由基的捕捉	179
9.5 自旋捕捉技术的生物学应用实例	180
9.5.1 高等植物光系统中超氧阴离子自由基分子作用机制	180
9.5.2 光系统膜靶向自旋捕捉技术的研究	186
9.5.3 细胞透膜能力和细胞靶向作用研究	193
9.5.4 锚定在生物膜内指定局域位置的自旋捕捉剂	194
9.5.5 线粒体靶向功能的自旋捕捉剂的应用	195
参考文献	196
10 在体电子顺磁共振及应用	204
10.1 前言	204
10.2 用于体内研究的 EPR 波谱仪	204
10.2.1 实验设备	204
10.2.2 X-波段 EPR 检测	204
10.2.3 活体低频 EPR 检测	205
10.3 在体 EPR 在生物医药研究中应用	206

10.3.1	ROS/RNS 自由基的捕捉	206
10.3.2	氧化-还原态的活体检测	209
10.3.3	体内金属反应的检测	209
10.3.4	EPR 氧分压测量法	211
10.3.5	体内 EPR 检测的未来发展	213
10.4	结论	215
	参考文献	215
11	脉冲电子顺磁共振	217
11.1	引言	217
11.2	脉冲 EPR 的基本原理	218
11.2.1	自由感应衰减 (FID) 和回波信号 (echo signal)	218
11.2.2	弛豫与饱和效应	220
11.2.3	频率谱和时间谱	220
11.2.4	电子自旋回波包络调制的工作原理	221
11.2.5	饱和恢复实验的工作原理	223
11.3	电子自旋回波包络调制 (ESEEM) 脉冲顺磁共振的实验方法	224
11.3.1	微波系统	225
11.3.2	样品谐振腔	225
11.3.3	信号接收系统	225
11.3.4	计算机系统	225
11.4	饱和恢复 (SR) 的实验方法	226
11.4.1	微波桥	226
11.4.2	微波谐振腔	227
11.4.3	电子学线路的特点	228
11.5	ESEEM 波谱解析及应用举例	228
11.5.1	漆酶汞衍生物 (MDL) 的 ESEEM 波谱解析	229
11.5.2	ESEEM 方法的应用	233
11.6	SR 波谱解析及应用举例	238
11.6.1	一般的实验方法	238
11.6.2	SR 技术的应用	238
11.6.3	应用举例	239
11.7	脉冲 EPR 的新技术	246
11.7.1	二维 (2D) 脉冲 EPR 波谱学	246
11.7.2	谱的核调制效应	249
11.7.3	脉冲 ELDOR 及其他新技术方法和应用	251
	参考文献	257

下篇 应用篇

12 电子顺磁共振在自由基生物学中的应用	267
12.1 自由基概论	267
12.1.1 生物自由基及其特点	267
12.1.2 氧毒性的自由基学说	268
12.1.3 一氧化氮自由基和活性氮	270
12.2 活性氧物种对机体的作用: 利用和损伤	272
12.2.1 活性氧物种在生物体内的利用	272
12.2.2 活性氧物种对生物大分子的损伤	274
12.2.3 自由基与疾病	277
12.2.4 NO 双重的生理学功能	279
12.2.5 对自由基作用的全面评价及其研究的重要性	281
12.3 脂质过氧化和抗氧化剂	282
12.3.1 脂质过氧化的基本观念	282
12.3.2 抗氧化剂	283
12.4 自由基生物学研究方法	292
12.4.1 自由基的体外实验	292
12.4.2 组织氧自由基的低温 EPR 检测及波谱分析	297
12.4.3 在细胞和动物组织中 NO 自由基的捕捉	298
参考文献	300
13 氧浓度的测量	305
13.1 生物体系氧浓度的测量	305
13.1.1 测量氧浓度的重要性	305
13.1.2 EPR 测氧法的原理	305
13.1.3 EPR 测氧法的优点	305
13.1.4 与氧浓度相关的 EPR 波谱参数	306
13.2 顺磁性探针	308
13.2.1 含 NO 自由基的化合物	308
13.2.2 内源性探针和生物学方法	309
13.2.3 其他探针	310
13.3 应用 EPR 方法测量氧浓度的考虑	310
13.3.1 细胞外氧浓度的测量	310
13.3.2 细胞内氧浓度的测量	310
13.3.3 分离的器官或整体动物样品	312
13.3.4 EPR 成像技术的应用	313
13.4 EPR 氧分压测定法	313

13.4.1	EPR 氧分压测定法的优点	313
13.4.2	酞菁化锂探头及实验	314
13.4.3	现状、存在的问题及改进方向	315
	参考文献	316
14	电子顺磁共振在医药学基础研究中的应用之一	319
14.1	EPR 在疾病病理基础研究中的应用	319
14.1.1	自旋标记 (SL) EPR 在病理基础研究中的应用	319
14.1.2	自旋捕捉 (ST) EPR 在病理基础研究中的应用	326
14.1.3	与金属离子有关的疾病病理基础研究	337
14.2	EPR 用于药理及药物改造的基础研究	343
14.2.1	顺铂与细胞的相互作用	344
14.2.2	稀土离子的生物效应与潜在药用前景	349
	参考文献	354
15	电子顺磁共振在医药学基础研究中的应用之二	361
15.1	EPR 在临床医学中的应用	361
15.1.1	主要的困难所在	361
15.1.2	现代尝试的例子	361
15.1.3	体内 EPR 技术和临床应用的前景	363
15.2	EPR 在中医药研究中的应用	364
15.2.1	引言	364
15.2.2	虚证与自由基	364
15.2.3	自由基与中药药理基础研究	365
15.3	EPR 在运动医学中的应用	370
15.3.1	运动和自由基	371
15.3.2	运动试验模型	371
15.3.3	EPR 实验方法	372
15.3.4	其他的实验方法	374
15.3.5	研究进展	375
	参考文献	381
16	电子顺磁共振在环境化学上的应用	385
16.1	前言	385
16.2	EPR 在二氧化钛环境光催化研究方面的应用	385
16.2.1	光生电子和空穴中心的鉴定	385
16.2.2	光生电子或空穴与有机物间的电荷转移	386
16.2.3	Degussa P25 光催化活性增强的起因	388
16.2.4	光催化产生的活性自由基	388

16.2.5 掺杂和表面修饰的影响·····	390
16.2.6 光催化剂形貌的影响·····	391
16.3 EPR 在天然有机质性质研究方面的应用 ·····	392
16.4 EPR 在染料光反应研究方面的应用 ·····	392
16.5 EPR 在顺磁性过渡金属离子形态研究方面的应用 ·····	393
16.6 EPR 在环境污染物监测方面的应用 ·····	396
16.6.1 多环芳烃的测定·····	396
16.6.2 大气中的过氧自由基和硝酸根自由基的测定·····	396
参考文献·····	397
17 电子顺磁共振波谱技术在工农业生产中的应用·····	401
17.1 EPR 技术在食品工业中的应用 ·····	401
17.1.1 食品与自由基·····	401
17.1.2 方法和特点·····	402
17.1.3 应用举例·····	403
17.2 啤酒酿造过程中的质量控制·····	404
17.2.1 专业指标·····	404
17.2.2 样品制备和实验方法·····	405
17.2.3 数据分析·····	405
17.3 辐照剂量计·····	406
17.3.1 辐照剂量检测的意义·····	406
17.3.2 EPR 辐照剂量计的优点 ·····	407
17.3.3 EPR 辐照剂量计的发展 ·····	408
17.4 考古年代的测定·····	411
17.4.1 EPR 测定地质年代的原理 ·····	411
17.4.2 EPR 断代法的优点 ·····	412
17.4.3 EPR 断代的方法学 ·····	412
17.4.4 年代的计算方法 ·····	413
17.4.5 EPR 断代的新近发展 ·····	414
17.5 EPR 技术应用于检测烟草自由基 ·····	415
17.5.1 烟草自由基的 EPR 波谱 ·····	415
17.5.2 烟气中自由基的采集方法·····	416
17.6 EPR 用于种子和花粉最佳储藏条件的预测 ·····	417
17.6.1 前言·····	417
17.6.2 电子顺磁共振方法的应用·····	417
17.6.3 相变点 T_g (K) 曲线图 ·····	418
参考文献·····	420
附录 1 缩略语列表 ·····	422