

上海研究生教育丛书

同步辐射 应用概论



马礼敦 杨福家 主编

■ 复旦大学出版社

本教材得到上海市研究生教育专项经费资助

同步辐射应用概论

马礼敦 杨福家 主编

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

同步辐射应用概论/马礼敦,杨福家主编. —上海:复旦大学出版社,
2001.2
ISBN 7-309-02768-X

I. 同… II. ①马…②杨… III. 同步辐射-核技术应用-概论
IV. TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 03296 号

出版发行 复旦大学出版社

上海市国权路 579 号 200433

86-21-65102941(发行部) 86-21-65642892(编辑部)

fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

经销 新华书店上海发行所

印刷 复旦大学印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 33.25

字数 832 千

版次 2001 年 2 月第一版 2001 年 2 月第一次印刷

定价 64.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书是同步辐射应用的一本入门书。包括三篇十七章：第一篇三章主要介绍同步辐射的发生、加工与引出，是全书的技术基础；第二篇八章主要介绍了八种比较通用的同步辐射实验方法。包括各种方法的原理、实验装置、数据处理与在一些方面的应用实例（包括一些最近、最新的发展），其中许多工作是常规实验室设备无法做出的；第三篇六章介绍了同步辐射在一些研究方面的应用简况。同步辐射装置是一种可供多学科开展高水平研究活动的大科学装置。它可从事的实验代表了当前一些科学技术可达到的顶尖水平，广泛应用于科学和技术的各个领域。本书可作为科学和技术各学科研究生的通用教材，也可作为初涉足于同步辐射人员的参考书。

序 言

1947年,在美国纽约州 Schenectady 市的通用电气公司实验室的一台能量为 70MeV 的电子同步加速器上,观察到一种强烈的辐射,从此这种辐射便被称为“同步辐射”。同步辐射是速度接近光速的带电粒子在磁场中作变速运动时放出的电磁辐射,一些理论物理学家早些时候曾经预言过这种辐射的存在。

同步加速器是为了得到高能量粒子而发展起来的。它的出现,开创了从 20 世纪 50 年代开始的粒子物理的黄金时代,在世界各国建造起能量越来越高的加速器。长期以来,同步辐射不受高能物理学家欢迎,因为它消耗了加速器的能量,妨碍粒子能量的提高,但它又是个不得不接受的存在。不过即使在发现同步辐射的早期,已经有人预见到它在非核物理中的可能的重要应用。

同步辐射应用的可行性研究工作是在 20 世纪 60 年代初期在欧洲、美国和日本开始的,其初步结果极为令人鼓舞。从此,人们认识到它作为一种新光源极为优越的性质,改变了对它的看法。虽然在最初,作为高能物理研究的副产物同步辐射应用只在很小的规模上开始,但是到后来,在几乎所有高能电子同步加速器上都建造了同步辐射光束线和各种应用同步光的实验装置。特别是在 1965 年,随着世界上第一个电子储存环在意大利 Frascati 的建成,人们立即看到它可以作为一种强大的同步辐射光源的前景。从 20 世纪 70 年代开始,同步辐射应用便步入了它的现代阶段。至今,同步辐射装置的建造及在其上的研究、应用,经历了三代的发展。

第一代同步辐射光源是在为高能物理研究建造的电子加速器和储存环上“寄生地”运行的。虽然第一代同步辐射光源不是为同步辐射应用而专门特殊设计的,但是它的高强度和从远红外到 X 射线的宽阔的光谱已经使它具有空前的能力:很短的数据采集时间、连续可调的波长变化和高的能量分辨率等等,从而开创了许多新的研究应用领域,例如,在固体和液体中某些特定的元素的近邻环境的研究、微电子学中的软 X 射线光刻技术,甚至对许多成熟的领域,如 X 射线晶体学、光与物质相互作用后的二次发射的谱学等,都因同步辐射光源的应用带来新的活力和新的机遇。很快地,不仅物理学家,而且化学家、生物学家、冶金学家、材料科学家、医学家和几乎所有的学科的基础研究及应用研究的专家,都从这个新出现的光源看到巨大的机会,它使许多研究者长久以来所追求的研

究梦想变成现实。而且,在这些第一代光源上还展示了一些非常重要的工业及社会应用的可行性,如使用同步辐射 X 射线的亚微米光刻、非插入性的心血管造影等。到了 20 世纪 70 年代中期,第一代同步辐射装置的数目迅速增加。然而,在对储存环性能的要求上,同步辐射的用户与高能物理学家是矛盾的,这使同步辐射的用户们不满足于第一代同步光源,要求建造不是作为高能物理的“寄生”应用,而是专门为同步辐射应用设计的第二代同步光源。在欧、美、日,建造新一代同步光源的潮流是差不多都在这个期间开始的。

第二代同步光源是专门为同步辐射的应用而设计的。为改进所产生的同步辐射的质量,需要将储存环的结构作最优化的设计。高能对撞物理用的储存环的发射度都较大,通常都达几百 $\text{nm}\cdot\text{rad}$,而在同步辐射的应用中,许多尖端的实验要求高的亮度,这就要求作为光源的储存环的发射度小。也就是说,高能物理与同步辐射应用对储存环的要求是矛盾的。为了减小发射度以提高同步辐射光源的亮度,美国 Brookhaven(布鲁克海文)实验室的两位加速器物理学家却斯曼(R. Chasman)与格林(K. Green)发明了一种把加速器上的各种使电子起弯转、聚焦、散焦等作用的磁铁按特殊的序列组装的方法。这种组装序列后来被称为却斯曼-格林阵列(Chasman-Green lattice),却斯曼-格林阵列的采用标志着第二代同步辐射光源的出现。世界上大部分第二代同步辐射源都是在 20 世纪 80 年代前后建成的。它们的发射度大约为 $100\text{nm}\cdot\text{mrad}$ 。第二代同步辐射源的投入使用大大促进了科学技术的研究和发展,出现了在一个实验设施上聚集着来自极为众多的学科的科技人员川流不息地工作的空前景象。

第二代同步辐射装置对科技研究与工业应用的巨大推动,促使世界各国政府支持建造更新一代、具有更高亮度的同步辐射光源,这就是目前在许多国家中正在建造的第三代同步辐射光源。

推动建造第三代同步辐射光源的动力是科技上要求有更好的空间分辨、更好的时间分辨、更好的动量分辨、更好的能量分辨的手段。保证这些“更好”必须以更高的光源亮度为前提。这就要求更进一步降低储存环的发射度。达到这个目的的方法是采用插入件。

第三代同步辐射光源的特征是为大量使用插入件而设计的低发射度储存环。这些环的发射度一般都小于 $10\text{nm}\cdot\text{rad}$ 。它们所发出的同步辐射光源的亮度比最亮的第二代光源至少高 100 倍,比通常实验室用的最好的 X 光源要亮 1 亿倍以上!从 1994 年起到 20 世纪结束,世界上已经有 11 个第三代同步辐射光源投入运行,还有多个第三代辐射光源在建造中。

我国在 20 世纪 90 年代初在北京和合肥建成了两个同步辐射装置,它们分别属于第一代和第二代的装置。和世界各地的同步辐射装置一样,它们对我国的科技研究带来了强大的推动,并且显示出非常重要的工业应用的前景。经过

10 年的运转,目前这两个光源无论在机时或者在光束质量上已经不能满足广大用户越来越高的需求。为了解决这个矛盾,国家决定在上海建造一个更先进的第三代同步辐射光源——上海光源,这是在 21 世纪初期我国科技界的一件大事。它的建成,将对我国,特别是上海地区的科技发展和工业应用带来巨大的推动。

在一个先进的大装置上能否做出一流的工作,完全取决于在这个装置上的用户群体的水平和使用此装置的准备。上海是我国许多科技领域发展的中心,有着我国最优秀的人才,剩下来的关键问题是在装置建成前就作好准备,以期一旦设备投入使用便尽快得到优秀的成果。应当看到,同步辐射应用对国内的大多数科技专家来说毕竟是件新的、陌生的事物,为了应用,必须补充有关这方面的必要知识,对于广大的年轻科技工作者和学生,就更加有学习的必要了。复旦大学的老师们在这两年中为此开了一系列的课程,是十分有战略眼光的。现在这些课程的教材经整理后出版,是一件值得祝贺的事。一方面,对于各行专家来说,它将帮助专家们掌握这种先进的手段用于他们从事的研究发展中,因而有着可贵的参考价值;另一方面,对于有志进入同步辐射应用领域的年轻人来说,它将带领他们穿过浩如烟海的文献,尽快进入这个领域,是一部很好的入门书籍。为此,我谨向我的复旦大学同事们表示我的敬意。

洗鼎昌

2000. 2. 18

前言

同步辐射装置是一种可供开展多学科研究活动的大科学装置。它的建造和运行可以在很大程度上代表一个国家的综合科学技术发展水平。我国继 1991 年在中国科学院高能物理研究所建成储存环电子能量为 2.2GeV 的兼用型(第一代)装置,1990 年在中国科学技术大学建成能量为 0.8GeV 的专用型(第二代)装置之后,在新千年开始之际,又要在当今中华大地上极具经济发展活力的上海浦东地区建造能量为 3.5GeV 的、以大量应用插入件为主要标志的第三代同步辐射装置。这对于我国广大科学技术工作者来说,既是一个喜讯,又是一个极大的挑战。要用好这个能量指标位居世界第四的尖端科学装置,真正做出国际一流水平的研究工作,尚需我们付出艰辛的努力。培养一支高素质的用户队伍,是其中最重要的环节之一。为此,复旦大学从 1997 年开始,为全校研究生开设了与本书同名的公共选修课,由我们这些来自不同系科的教师结合自身的专长,联合授课。并以个人的讲稿为蓝本,汇编成一本试用教材。三年内,此教材经过两轮试用和修改,最终形成了本书。在编著和修改的过程中,我们力求内容准确和全书连贯,但受自身学术水平的限制,加上各人的经历和对同步辐射的了解程度也不尽相同,错误在所难免。亟盼广大读者,特别是同行专家不吝赐教,予以指正。

全书共分三篇十七章。第一篇主要介绍同步辐射的发生及同步辐射装置,包括三章:发生装置、光束线及控制,为以后各章之基础。第二篇介绍一些重要的实验方法,共有八章,各章均介绍了该种实验技术的原理、实验方法、数据处理、应用方面及目前的一些发展。第三篇六章,介绍六个领域的应用情况。第二、第三篇是一纵一横地交叉介绍同步辐射的应用,希望读者能对这些技术有一基本了解,能知道它们是怎么回事,可在什么时候应用。由于同步辐射应用面十分广阔,不同方面差异不小,我们每个人都只熟悉其中的一个或两个方面,因此此书不可能包括同步辐射技术与应用的所有方面,挂一漏万在所难免,特别是一些新发展的技术与应用领域,有待今后再做补充。

本书各章的编写人员为:绪论,杨福家;第一章,顾元壮;第二章,沈元华;第三章,李宗葛;第四章及第十四章,胡家骢;第五章,郑培菊、马礼敦;第六章、第十五章、第十六章,马礼敦;第七章,姚惠英;第八章,丁训民;第九章,金承志;第

十章,陈良尧;第十一章,戴宁;第十二章,张志鸿;第十三章,袁元勋;第十七章,包宗明。

本书的编著出版得到了上海市学位委员会的大力支持,将其列入“研究生教材建设项目”;中国科学院高能物理研究所的冼鼎昌院士和合肥国家同步辐射实验室主任张新夷教授分别在百忙中审阅了初稿,充分肯定了我们的工作,并提出了中肯的修改意见;本书出版还得到了学校领导王生洪、徐明稚及王迅院士的关怀帮助。在此一并致谢。

本书封面上采用的图案——上海光源中心规划草案,系由中国建筑西南设计研究院设计并得到上海光源中心的特许用于本书封面,以飨读者,特此专表谢意。

编 者

2000 年

目 录

绪 论.....	1
----------	---

第一篇 同步辐射装置

第一章 同步辐射源.....	5
第一节 同步辐射的发展与现状.....	5
一、同步辐射理论的发展	5
二、同步辐射技术的发展	6
三、同步辐射装置的现状	10
第二节 同步辐射源的构造	13
一、总体介绍	13
二、电子储存环	14
三、注入器	20
四、附属设备	22
第三节 同步辐射的重要物理参数与特性	23
一、弯转磁铁的发射	23
二、插入件的发射	30
参 考 文 献.....	33
第二章 同步辐射装置中的光路和光学元件	34
第一节 同步辐射装置中的光路	34
一、前端区	34
二、光束线	37
第二节 同步辐射装置中的光学元件	40
一、透光元件(窗)	41
二、反光元件(镜)	42
三、聚光元件	44
四、分光元件	46
五、偏光元件	47
参 考 文 献.....	48
第三章 同步辐射装置的计算机控制	50

第一节 同步辐射装置的计算机控制系统	50
一、同步辐射装置计算机控制系统的任务和功能	50
二、同步辐射装置计算机控制系统的体系结构	53
三、同步辐射装置计算机控制系统的软件结构	55
四、几个实例	58
第二节 同步辐射装置中电子束和光束线参数的测量和控制	62
一、同步辐射装置的束流测量和诊断系统	62
二、同步辐射装置中电子束团的反馈控制系统	65
三、同步辐射装置中同步光束线的监测和控制	68
参 考 文 献	69

第二篇 同步辐射的实验方法

第四章 同步 X 射线散射	73
第一节 前 言	73
一、国际上建有 X 射线散射线站的同步辐射装置	74
二、同步 X 射线散射线站的科学目标	74
三、同步 X 射线散射线束的布置	75
第二节 X 射线散射的物理学基础	77
一、汤姆逊散射	78
二、康普顿散射	82
三、荧光 X 射线散射	83
四、粒子体系的散射	84
五、二相体系的散射	85
六、热漫散射	87
七、X 射线拉曼散射	87
八、X 射线磁散射	88
九、X 射线核共振散射	88
第三节 同步 X 射线实验线站与应用举例	88
一、同步 X 射线散射实验线站举例	89
二、同步 X 射线散射应用举例	91
参 考 文 献	108
第五章 同步 X 射线衍射	110
第一节 X 射线衍射原理基础	110
一、晶体的周期性与对称性	110
二、晶体衍射 X 射线的基本公式	115
第二节 X 射线衍射测定晶体结构	117
一、测定晶体结构的任务	117
二、X 射线单晶体衍射	117

三、粉末衍射从头测定晶体结构	120
第三节 多晶体衍射表征多晶体材料	124
一、可从多晶体衍射图上得到的物理量	124
二、利用衍射线的位置和衍射线数量可进行的工作	124
三、利用衍射线强度可进行的工作	125
四、利用衍射线形可进行的研究	126
第四节 同步 X 射线衍射的实验设备与基本方法	127
一、基本实验设备	127
二、基本实验方法	129
第五节 同步 X 射线特殊衍射技术与应用	130
一、高分辨 X 射线衍射	130
二、能量色散与时间分辨衍射	136
三、显微衍射	138
四、掠射和表面衍射	141
五、在位衍射与极端条件衍射	144
六、联合技术	146
参 考 文 献	147
第六章 同步 X 射线吸收精细结构	149
第一节 X 射线吸收精细结构	149
一、X 射线吸收光谱与精细结构	149
二、XAFS 的发展历程	151
第二节 XAFS 的单电子理论解释与表式	152
一、低能 XANES——边前区	152
二、XANES——近边区	153
三、EXAFS——广延区	159
第三节 实验装置与数据处理	163
一、X 射线吸收谱实验装置	163
二、EXAFS 谱的数据处理	167
第四节 XAFS 技术应用举例	173
一、非晶态材料与溶液	173
二、催化剂与催化作用	176
三、生物大分子结构研究	180
四、表面与吸附结构	184
五、缺陷与杂质的结构	187
六、环境和地球化学	188
七、用 XANES 作不同价态元素的定量分析	190
第五节 XAFS 的一些发展	191
一、X 射线发射光谱与非弹性散射	191
二、联合在位测量与复合光谱	191

三、X 射线磁圆二色谱	193
四、极端条件下的 XAFS	195
五、时间分辨 XAFS	195
六、显微 XAFS	197
七、NEXAFS 扫描透射 X 射线显微镜	198
参 考 文 献	199
第七章 同步 X 射线荧光分析	202
第一节 X 射线荧光分析基础知识简介	202
一、特征 X 射线的产生	202
二、特征 X 射线强度	205
三、X 射线荧光谱的本底来源	206
第二节 同步辐射光源是 X 射线荧光分析最理想的激发源	209
一、荧光产生截面比较	210
二、X 荧光分析灵敏度比较	210
三、不同激发源对样品的损伤比较	212
四、单色 X 射线可对元素进行特征激发	212
五、同步辐射 X 荧光法可作微量元素化学态分析	214
第三节 同步辐射 X 射线荧光分析实验装置	215
一、SXRF 对光束线的要求	215
二、SXRF 实验站	216
三、X 射线谱仪	217
第四节 同步 X 射线荧光分析	219
一、谱 的 采 集	219
二、谱 的 分 解	220
三、SXRF 谱的归一化	221
四、SXRF 定量分析方法	222
第五节 X 射线荧光分析技术新进展	225
一、同步辐射微探针	225
二、全反射 X 荧光分析	227
三、同步辐射 X 荧光图像分析	229
第六节 同步 X 射线荧光分析应用	232
一、SXRF 在生物医学方面的应用	232
二、SXRF 在地矿研究中的应用	234
三、SXRF 在环保方面的应用	235
四、SXRF 在考古中的应用	236
参 考 文 献	237
第八章 同步辐射光电子能谱	239
第一节 引 言	239
第二节 基 本 原 理	240

一、光电发射的基本物理过程	240
二、光电离截面和电子逃逸深度	242
三、光电发射中的守恒量和选择定则	244
第三节 实 验 装 置	245
一、光电子能谱仪的基本构成方式	245
二、常规光电子能谱仪中的光源	246
三、能量分析器和电子倍增器	248
第四节 价带光电子能谱	249
一、态密度和能量分布曲线	249
二、固体的能带色散及其确定方法	250
三、偏振选择定则在价带光电子能谱中的应用	253
四、共振光电发射	255
第五节 芯态光电子能谱	257
一、结合能和化学位移	257
二、谱峰的退卷积	259
三、固体样品的成分分析	260
第六节 同步辐射光电子能谱的特殊工作模式	262
一、几种工作模式的比较	262
二、恒定初态谱 CIS	262
三、恒定末态谱 CFS 和部分产额谱 PYS	267
第七节 自旋分辨的光电子能谱	270
一、电子的自旋极化及其测量	270
二、自旋和角度分辨的 EDC	270
三、非磁性固体的自旋极化光电发射	272
第八节 空间分辨的光电子能谱——光电子显微术	273
一、进行空间分辨测量的意义和困难所在	273
二、两种工作方式:成像和扫描	274
三、应 用 实 例	276
四、结 束 语	277
参 考 文 献	278
第九章 软 X 射线显微术	279
第一节 软 X 射线显微术概述	279
第二节 活细胞的原位高分辨的结构研究与软 X 射线显微术	284
第三节 软 X 射线接触显微成像	285
一、SXCM 简史	285
二、SXCM 与软 X 射线吸收	286
三、软 X 射线接触显微成像条件的优化	288
四、活细胞成像中的几个问题	293
五、SXCM 图像的读出	294

第四节 透射式 X 射线显微镜	296
一、Göttingen 透射式 X 射线显微镜	296
二、波带片特性简述	298
三、相衬 X 射线显微镜实验	300
四、振幅衬度与相位衬度	301
五、辐射剂量和基于相位衬度的 X 射线显微图像	303
六、透射式 X 射线显微镜的图像显示	305
第五节 扫描透射式 X 射线显微镜	307
一、简 史	307
二、STXM 装置	307
三、成像的时间及对 X 射线源的要求	308
四、酶原颗粒的 STXM 实验	310
第六节 软 X 射线全息显微术	310
一、全息术的基本原理	310
二、低分辨率的软 X 射线全息显微术是可以实现的	313
三、软 X 射线全息显微术实验系统	314
第七节 细胞的 X 射线显微图例和结语	317
参 考 文 献	318
第十章 同步辐射红外光谱	320
第一节 同步辐射红外光源的产生及其特点	320
一、同步辐射红外光源的优点	320
二、红外光束强度随出射角和波长的分布关系	321
三、弯转磁铁边红外辐射光谱的特点	321
四、红外光束的引出及其与真空系统的隔离	324
五、红外光子能量和波长选择器	324
六、红外光子探测器	326
第二节 同步辐射光源在固体红外光学性质研究等领域的应用	326
一、光 学 常 数	326
二、实 验 方 法	329
三、同步辐射红外光源的多种应用领域	332
参 考 文 献	334
第十一章 软 X 射线磁圆二色	336
第一节 X 射线磁圆二色的基本原理	337
一、X 射线吸收磁圆二色	337
二、光电子发射 X 射线磁圆二色	339
三、指定元素的磁性	341
第二节 实验原理和主要实验条件	342
一、实 验 原 理	342
二、主要实验条件和要求	343

三、提高测量灵敏度的有效途径——调制光谱技术	346
第三节 软 X 射线磁圆二色在科学研究中的应用	347
一、X 射线吸收磁圆二色	347
二、光电子发射磁圆二色	351
第四节 同步辐射 X 射线磁圆二色工作站	358
一、美 国	359
二、欧 洲	360
参 考 文 献	361

第三篇 同步辐射在一些学科领域中的应用

第十二章 同步辐射在生命科学中的应用	367
第一节 生物大分子的三维结构分析	368
一、同步辐射和结构生物学	368
二、蛋白质的基本结构	369
三、蛋白质的三维结构与生物学功能	371
第二节 药物的分子设计	375
一、基 本 原 理	375
二、设 计 实 例	376
第三节 生命过程的分子动态“电影”	377
一、基 本 原 理	377
二、实例和进展	378
第四节 生命科学其他研究领域中的应用	379
一、蛋白质工程	379
二、生物大分子的 X 射线吸收波谱学	379
三、蛋白质折叠	380
四、生物膜结构	381
五、活细胞的软 X 射线显微术	381
参 考 文 献	382
第十三章 同步辐射在医学研究中的应用	384
第一节 基于同步辐射的医学应用研究项目	384
一、经静脉冠状动脉造影	385
二、同步辐射支气管造影	385
三、单色 X 射线 CT	385
四、乳腺癌诊断	386
五、肿瘤的微束放射治疗 MRT	386
六、光子活化放射治疗	387
七、同步辐射相衬成像	387
第二节 冠状动脉血管造影的医学背景	387

第三节 双色减影冠状动脉造影	389
第四节 同步辐射冠状动脉心血管造影系统	390
一、扭摆器	392
二、单色器	393
三、探测成像系统	397
四、计算机系统	399
五、病人辐照座椅控制系统	400
六、安全系统	401
第五节 同步辐射冠状动脉血管造影医学临床应用现状和前景	402
参考文献	404
第十四章 同步辐射在聚合物科学中的应用	407
第一节 聚合物结构简述	407
第二节 同步 X 射线散射在聚合物研究中的应用	408
一、相干 X 射线散射斑纹谱研究嵌段聚合物二维海岛结构	408
二、磁场诱导聚合物侧链型液晶(MAPB、APB、MPB)的凝聚态结构	409
三、流动场中氧化乙烯-氧化丙烯嵌段共聚物的 SAXS	413
四、应力场中高密度聚乙烯(HDPE)与线形低密度聚乙烯(LLDPE)的 响应	414
五、聚乙烯(PE)熔体在结晶初期折叠链片晶的整数倍增厚	417
六、低分子量聚氧化乙烯(PEO)非整数折叠向整数折叠链的结晶转变	420
七、实时 RT-SR-WAXS 与 SAXS 测量聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)的膨 胀率	422
八、流动场中聚乙烯(PE)相结构的在场研究	424
九、微量催化剂对聚对苯二甲酸乙二酯(PET)结晶速率与晶格畸变的 影响	427
十、温度场诱发聚氨酯(PU)仿肌纤结构的变化	431
十一、微区衍射研究 BIOPOL 聚合物的球晶结构	432
十二、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)的时分 TR-SAXS 研究	432
十三、水凝胶微球内部结构的 TR-SAXS 研究	434
十四、互贯聚合物网络(IPN)的相态与结构分析	435
十五、偏振 XANES 研究经摩擦聚合物(PI)表面链的排布	436
十六、聚-L-谷氨酸- γ -苯甲酯(PBLG)在空气/水界面上浮置膜的掠入射 衍射(GID)研究	437
十七、软 X 射线光降解聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)机制的研究	439
十八、嵌段共聚物在振动切应变过程中的 TR-SAXS 研究	440
参考文献	441
第十五章 同步辐射在非晶态材料中的应用	442
第一节 非晶态材料简介	442
第二节 研究非晶态的实验方法	444