

材料科学与工程研究生教学用书

高分子凝聚态物理 及其进展

吴其晔 编著



华东理工大学出版社

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

材料科学与工程研究生教学用书

高分子凝聚态物理及其进展

吴其晔 编著

 华东理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高分子凝聚态物理及其进展/吴其晔编著. —上海:华东理工大学出版社,2006.8
(材料科学与工程研究生教学用书)
ISBN 7-5628-1912-2

I. 高... II. 吴... III. ①高聚物物理学—研究生—教材②高聚物—凝聚态—研究生—教材 IV. O631.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 055918 号

材料科学与工程研究生教学用书

高分子凝聚态物理及其进展

.....

编 著 / 吴其晔

责任编辑 / 胡 景

封面设计 / 赵 军

责任校对 / 金慧娟

出版发行 / 华东理工大学出版社

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:www.hdlgpress.com.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 787×1092 1/16

印 张 / 20.5

字 数 / 454 千字

版 次 / 2006 年 8 月第 1 版

印 次 / 2006 年 8 月第 1 次

印 数 / 1—4050 册

书 号 / ISBN 7-5628-1912-2/TQ·104

定 价 / 36.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社储运部调换)

**本书由中国科学院徐僖院士
审定编写大纲**

序

材料是现代科学技术和社会发展的物质基础。高分子材料具有许多其他材料不可比拟的突出性能,在尖端技术、国防建设和国民经济等领域已成为不可缺少的支柱材料之一。高分子材料科学与化学、物理、信息、能源、生物、医学、环境、机械等众多学科相互交叉、相互融合、交相辉映。随着新技术、新原理不断出现,高分子材料科学派生出许多新的学科增长点。高分子材料新品种层出不穷,产品性能精益求精,同时市场的需求也不断提高,高分子材料科学迎来了黄金发展时期。

学科的发展需要大批高级专业技术人才,研究生教育无疑是培养高级人才的重要途径。华东理工大学出版社整合国内相关院校的优质师资力量,组织撰写了高分子材料学科研究生教学丛书。丛书共有7个分册:《高聚物的结构与性能》、《聚合物分子设计及制备方法》、《高分子材料流变学》、《受控聚合反应原理及进展》、《聚合物加工原理及进展》、《功能高分子材料》、《高分子凝聚态物理及其进展》。执笔人各自结合多年来从事教学、科研的感受,论述了当前高分子材料学科现状和发展趋势。这套教学丛书的面世,有利于提高高分子材料专业研究生的培养质量,希望有助于诸多青年学者步入高分子材料科学的研究殿堂,夯实基础,开拓创新,铸就辉煌。

颜纯岳

前 言

早在1987年,笔者刚从国外学习归来,在武汉全国高分子科学论文报告会上,得知国家自然科学基金会将资助重大基金项目“高分子凝聚态物理”,眼前不由为之一亮。一方面为近年来高分子科学的进步、创新感到兴奋,另一方面也为基金会的远瞩高举感到鼓舞。从那时起,笔者就留心跟踪国内外在高分子凝聚态物理方面的研究报道,整理汇集相关的资料。近年来我国高分子科学家,包括华裔学者,在高分子凝聚态物理的诸多方面取得令人惊奇的研究成果;许多兄弟院校和研究所相继开始招收高分子凝聚态物理方向的研究生;众多现代凝聚态物理学的新概念、新理论、新思想、新实验方法纷纷引入高分子科学的研究之中,与高分子材料和高分子科学的特点相结合,用以说明、理解高分子材料复杂的结构、形态、分子运动、各种特殊的聚集态及其相态转变,令人耳目一新。在这股大潮推动下,为提升研究生培养质量,开拓学生眼界,加速知识更新,我们在2000年为高分子方向的研究生开设了“高分子凝聚态物理及其进展”,编写了部分讲义,将收集的历年资料梳理成章,形成本书第一稿。结果课堂效果非常好,深受学生欢迎。从学生课后写作的学习心得可以看出,通过本课程的学习,学生已触摸到高分子学科的前沿,提高了学习兴趣和动力,主动查阅了大量资料,学习心得内容丰富,颇具水平。

坦率地讲,撰写一本介绍高分子凝聚态物理的书,难度是很大的。这一方面因为个人知识的深度和宽度有限,掌握的资料不够齐全;另一方面高分子凝聚态物理发展至今仍不能算一门成熟的学科,高分子凝聚态物理的范式迄今并未完全确定。目前国内尚未有一本系统介绍高分子凝聚态物理学的教材和专著出版。甚至可以说,高分子凝聚态物理究竟应该包括哪些内容,高分子凝聚态物理的基本概念、基本理论和基本研究方法到底有哪些,迄今也无权威性的论述。

因此,由笔者来承担国内首本高分子凝聚态物理的编写颇有“任重力微”之嫌。但是一则由于笔者在大学原本攻读理论物理专业,对固体物理学和凝聚态物理学的基本概念和理论有特殊的喜爱和兴趣;另外在开设高分子凝聚态物理课的过程中,一直有心寻求课程的系统性和科学性。在精选编写内容时,一方面要求起点高,水平高,要介绍高分子科学最新研究成果和发展前沿;另一方面也在探索高分子凝聚态物理的基本内容、理论和方法,希望能形成一个科学合理的体系。

经过反复增删、殚精竭虑,逐步理出以下的纲要:绪论中首先介绍凝聚态物理和高分子凝聚态物理的基本概念和研究内容。第2、3章按照 de Gennes 的标度理论和钱人元院士对高分子溶液的分类,分别按极稀溶液、稀溶液、亚浓溶液、浓溶液、极浓溶液的顺序,介绍了大

分子从单链到多链凝聚过程中相态和性质的变化,介绍了大量高分子科学的新概念、新理论。如高分子单链凝聚态、单链单晶、接触浓度、关联长度、关联函数、链滴概念、串滴模型、缠结浓度、长程缠结、高分子的软物质特性和多尺度性等。第4章从对称性出发,深化对物质的相态和相态变化(相变)的定义,提出对称破缺、序参量和临界现象等极为重要的概念,和软物质中的相变及熵致相变等特殊现象;重点介绍了相变中的亚稳定性、亚稳定态及在高分子材料中亚稳定态的丰富实例和重要性。为阐明物质形成相态和相态发生变化的微观物理本质,第5章系统介绍了各种分子间相互作用力,以及它们在形成物质相态和发生相变时的作用;介绍人们掌握和控制分子间作用力而开辟的新科学领域:超分子化学、分子组装、超分子组装、自组装和组织化物质。在基本概念介绍清楚之后,第6~8章分别选择了高分子材料几种特殊的有代表性的凝聚态进行介绍,分别是高分子液晶态(第6章)、高分子激发态(第7章)、高分子非均质态(共聚态、共混态;第8章)。这些章节中,关注的焦点仍然是物质的凝聚态特点,如液晶的软物质特征;导电聚合物的派尔斯(Peierls)相变和掺杂激发;以及在处理非均质的具有随机几何结构特征的体系中经常采用的数学方法——逾渗理论、分形维数和标度律方程等。

以上纲要也是对本书的一个简介,其中内容的选取和体系安排是否恰当,敬请高分子界及凝聚态物理界的同行批评。需要声明的是,本书选取了大量国内外专家学者的专著及论文中的数据图表,未曾一一面询允肯,敬请海涵。另一方面,书中有些内容的筛选是由作者的熟悉程度而定,不能包括高分子凝聚态研究的各个领域,其中我国学者的许多非常出色的工作也遗憾地不能全部包括在内,敬请各位朋友体谅。鉴于作者水平所限,书中不当和错误之处在所难免,敬请各位批评指正。撰写本书的主要目的是希望通过这样一个渠道,向我国青年高分子学者和广大研究生介绍高分子科学发展的若干新概念、新理论、新思想,扩大知识面,加快知识更新,提升知识高度和创新能力。如果能通过本书,实现上述目的之一二,即达到作者的初衷。

本书第7章由王存国博士撰写,其余章节由吴其晔教授撰写,全书由吴其晔教授统稿。编写过程中,得到国内许多高分子物理前辈和同行的支持,江明院士、吴世康教授、殷敬华教授等提出若干有价值的意见,得到国家自然科学基金会(基金项目号:50390090,50573037)、青岛科技大学教务处的关心帮助;青岛科技大学的研究生陈骁、熊忠、陶雪钰、李鹏、魏琦、慕晶霞、张娜、范海军等也给予作者许多帮助,谨此一并表示由衷感谢。

吴其晔^①

2005年12月于青岛高科园石老人国家旅游度假区科大花园

^① E-mail: qywu@public. qd. sd. cn

符号说明

第 1 章

a	分子链重复结构单元的长度
D	管道直径
F	Helmholtz 自由能
G	Gibbs 自由能
h	均方根末端距
H	热焓
N	整链的重复结构单元数目
p	压强
R_0	无扰尺寸
S	熵
T	绝对温度
U	内能
V	容积
ξ	链滴尺寸
ν	特征指数

第 2 章

a	扩张因子或溶胀因子
\mathbf{A}	Rouse 张量
\mathbf{B}	Rouse 对角矩阵
c	质量浓度 ($\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$)
c_e	缠结浓度
c_s	动态接触浓度
c^*	接触浓度
$\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{x}, t, t')$	Finger 形变张量
f_{ela}	分子链上的弹性力
$G'(\omega), G''(\omega)$	动态模量函数
h	流体动力学相互作用参数
$\bar{h}^2, \langle h^2 \rangle$	分子链均方末端距
$\bar{h}_0^2, \langle h_0^2 \rangle$	无扰状态下分子链均方末端距
\mathbf{I}	单位张量
k	Boltzmann 常数
l	分子链重复单元长度
	Rouse、Debey 模型中链段的大小

(步长)

$m_p(t-t')$	记忆函数
M	大分子相对分子质量
n	数量浓度(单位体积溶液中的分子链数量)(ml^{-1})
N	分子链重复单元数
	Rouse、Debey 模型中链段数目
N_A	阿佛加德罗常数
\mathbf{Q}	正交张量
\bar{R}_g^2	分子链均方回转半径
\bar{R}_0^2	无扰状态下分子链均方回转半径
T	绝对温度
\mathbf{T}	应力张量
T_{of}^0	Oseen 张量
u	排斥体积
V_2	大分子在溶液中的体积
\mathbf{v}	速度矢量
β'	Rouse 张量的本征矢量
$\dot{\gamma}$	剪切速率
ζ	小球与溶剂的摩擦系数
η	剪切黏度
η_0	溶液的零剪切黏度
$\eta'(\omega)$	动态黏度
η''	溶剂黏度
$[\eta]$	特性黏数
Θ	Θ 温度
λ_p	各运动模式的松弛时间
μ	链段弹簧的弹性系数
$\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_N$	Rouse 张量的本征值
σ_{xy}	剪切应力
σ_p	各运动模式的应力贡献
σ_{polym}	偏应力张量
ψ	概率密度
ψ_1	焓参数
ψ_1, ψ_2	第 1、第 2 法向应力差系数

∇	Hamilton 算符
第 3 章	
a	分子链链节长度
A_2, A_3	第 2、第 3 维利系数
c	溶液浓度
c_c	缠结浓度
c^{**}	浓溶液和极浓溶液(熔体)的分界浓度
D_l	简化链沿管道的扩散率
E	弹性模量
\mathbf{E}	形变梯度张量
f	摩擦阻力
g	链滴范围内的链节数
g_i	第 i 个链段中的单体单元数
$g(r)$	关联函数
$g_D(r)$	Debye 函数
$g_{\text{self}}(r)$	一条标记链内部的关联函数
h	末端距矢量
h_i	第 i 个链段的末端距矢量
L	分子链长度, 简化链长度
M	相对分子质量
M_c	临界缠结相对分子质量
n	单位体积的高分子数(即数量浓度)
N	整链的重复结构单元(链节)数
N_0	Avogadro 常数
N_B	支链包含的单体单元数
N_s	简化链的链段数
q	散射波矢
$Q(t')$	形变历史张量
R	气体常数
\bar{R}_g^2	分子链均方回转半径
s	弧长
$S^2(t)$	大分子链的均方位移
u	排斥体积
$\mathbf{u} = \partial \mathbf{h} / \partial s$	单位矢量
U	相互作用势
ν	排斥体积参数
v	简化链移动线速度
ν_{ip}	一根分子链占据的空间内相互穿透

	的其他分子链数目
\tilde{V}_1	溶剂的摩尔体积
η	剪切黏度
η_0	溶液零剪切黏度
θ	散射角
λ	波长
λ_0	小分子热运动的松弛时间
λ_a	卷曲运动的松弛时间
λ_m, λ_d	最大松弛时间
λ_p	对应于第 p 个本征值的松弛时间
μ_1	简化链在管中的迁移率
$\mu(t-t')$	记忆函数
ξ	关联长度, 链滴尺寸, 简化链的步长, 统计链段的长度
ζ_E	Edwards 关联长度
π	渗透压
ρ_1	虚拟的非晶态密度
ρ_2	聚合物的密度
ρ_a	实测的非晶态高分子材料密度
$\sigma(t)$	偏应力张量
χ_{12}	高分子-溶剂相互作用参数
ψ_1, ψ_2	第 1、第 2 法向应力差系数
第 4 章	
Δc_p	比热容
F	Helmholtz 自由能
\mathbf{g}	坐标变换操作
G	Gibbs 自由能
ΔG_m	共混体系的混合自由能
ΔH	晶体熔融热
ΔH_m	混合焓
\mathbf{k}	倒矢量, Fourier 空间的任意矢量
l	片晶厚度
\mathbf{M}	非平移操作(如定轴转动、镜面反射及中心反演)
n_1, n_2	两种高分子的摩尔数
$\langle n(\mathbf{r}) \rangle$	平均密度(密度算符的总平均)
N	聚合物的分子数
\mathbf{r}	位置矢量
ΔS_m	混合熵
\mathbf{t}	平移操作

T_c	临界温度	∇	Hamilton 算符
T_i	各向同性转变温度	第 6 章	
T_m, T_m^0	分别为片晶的熔点和平衡熔点($l \rightarrow \infty$ 时的熔点)	d	近晶型液晶的层间距
v	体积分数	L	胆甾型液晶的螺旋周期
v_1, v_2	两种高分子的体积分数	\bar{n}	空间指向矢
V_M	两种高分子混合后的总体积	$P_l(\cos \theta)$	第 l 项 Legendre(勒让德)多项式
V_r	一个链节的体积, 参考体积	z	分子重心的坐标
W_{12}	两种不同链节的相互结合能	θ, ϕ, ψ	三个 Euler 角
Z	一个链节的配位数	ϕ	描写刚性棒状分子定向排列的序参量
γ	聚合物分子体积比	τ	描述取向分子层平移序的序参量
δ	溶解度参数	σ	序参量
μ	化学势	第 7 章	
$\rho(\mathbf{r})$	密度函数	a, a'	晶格参数
σ_c	片晶底面(折叠面)的表面自由能	c	光在真空中的传播速度
Φ	序参量	E	光子能量
χ'_{12}	聚合物-聚合物相互作用参数	E_p	极化子的激发能
第 5 章		E_s	孤子的激发能
e	电子电荷	I	电流强度
E	分子动能	$k_B^{(1)}$	第一布里渊区的边界
\hbar	Planck 常数	k_F	费密能级的位置
H	Hamilton 量	L	链长
I	分子电离能	n	载流子的浓度, 介质的折射率
k	Boltzmann 常数	P	电子动量
m	分子、电子质量	q	载流子所带的电量
$p_i (i = 1, 2, 3, \dots, r)$	广义动量	R	电阻
$q_i (i = 1, 2, 3, \dots, r)$	广义坐标	S	电子自旋
S	熵	U	电压
T	绝对温度	Δ_0	电子或空穴的激发能
$U(r)$	分子间相互作用能	λ	光波、电荷密度波的波长
$V(\mathbf{r})$	势函数	λ_0	光在真空中的波长
α	分子极化率	μ	载流子的迁移率
ϵ_0	真空介电常数	ν	光波频率
μ	分子永久偶极矩	ξ_0	孤子长度参量
ρ	分布函数	ρ	电阻率
ψ	电子波函数	σ	电导率
Ψ	多粒子系统的波函数	第 8 章	
		d	空间维数, Euclid 维数
		d_T	拓扑维数

f	分形维数	s	集团大小
F	分形维数, 也称 Hausdorff 维数	$s_{av}(p)$	集团平均大小
G	凝胶百分率	u_i	单体 i 相对其平衡位置(即点阵座位 置 i) 的位移
h_{rms}	均方根末端距	ν	填充因子
k_{ij}	键(ij)的力常数	$\nu \cdot p_c^{site} = \phi_c$	临界分数体积
$l_{av}(p)$	平均跨越长度	z	配位数, 作用度
$n(s)$	集团分布函数	$z \cdot p_c^{bond}$	临界键数
p	联键百分率, [已]占座百分率	γ, ν, β 和 t	统称临界指数
$P(p)$	逾渗概率	$\sigma(p)$	连通率(或电导率等)
p_c	逾渗阈值	τ	临界指数
p_c^{bond}	键逾渗阈值		
p_c^{site}	座逾渗阈值		

内 容 提 要

本书提出了高分子凝聚态物理的基本框架,介绍了该门新学科的基本概念、理论、部分研究热点和成果,主要有:高分子从单分子链到多分子链的凝聚过程,高分子软物质特性,软物质中的相变及聚合物相变的亚稳定性;分子间相互作用与超分子组装;以及高分子的几种特殊凝聚态(液晶态、激发态、非均质态)等。本书可作为材料类研究生教学用书,也可供材料类高年级本科生和相关专业的科技工作者参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 凝聚态物理基本概念	1
1.2 高分子凝聚态物理的提出及研究兴趣	4
1.3 学习高分子凝聚态物理的几点建议	7
1.3.1 接受新观点、新理论、新方法,重新审视、体会原有的知识结构	7
1.3.2 关注相邻学科的最新成果,结合了解高分子科学研究前沿	8
1.3.3 善于学习、运用凝聚态物理中的计算方法和思维方法	10
1.4 高分子科学的学科前沿与展望	10
1.4.1 高分子化学	10
1.4.2 高分子物理	11
1.4.3 高分子工程(聚合反应工程和聚合物成型)	11
1.4.4 功能高分子及新技术研究	12
思考题	12
参考文献	13
第 2 章 高分子极稀溶液与单链凝聚态	14
2.1 高分子极稀溶液的性质	14
2.1.1 接触浓度和动态接触浓度	14
2.1.2 孤立分子链的黏弹性理论	17
2.2 高分子单链凝聚态和单链高分子试样的制备	25
2.2.1 高分子单链凝聚态	25
2.2.2 单链高分子试样的制备	27
2.3 大分子单链单晶	29
2.3.1 单链单晶的制备	29
2.3.2 单链单晶的形态	29
2.3.3 影响大分子单链结晶的因素	35
2.3.4 单链单晶的结构表征	37
2.4 单链玻璃态颗粒和单链高分子的高弹拉伸行为	41
2.4.1 单链玻璃态颗粒	41

2.4.2 单链高分子的高弹拉伸行为	43
思考题	44
参考文献	45
第3章 高分子浓厚体系的分子模型和软物质特征	47
3.1 高分子亚浓溶液的性质	47
3.1.1 从单链凝聚态到多链凝聚态的转变	47
3.1.2 高分子亚浓溶液的渗透压	48
3.1.3 亚浓溶液的关联长度	51
3.1.4 链滴概念的提出	52
3.2 高分子浓厚体系的性质	54
3.2.1 亚浓溶液和浓溶液的特征分界浓度	54
3.2.2 关联函数与屏蔽效应	55
3.2.3 分子链聚集状态随溶液浓度的变化	58
3.2.4 浓厚体系中高分子链的相互覆盖穿越	59
3.2.5 分子链串滴模型和长程缠结的概念	61
3.3 缠结高分子的模型化——蠕动模型	63
3.3.1 de Gennes 的蠕动模型	63
3.3.2 熔体黏度 η_0 与相对分子质量 M 的关系	65
3.3.3 Doi-Edwards 管道模型	66
3.3.4 Doi-Edwards 理论的初步评价	70
3.4 软物质概念和高分子材料的软物质特性	71
3.4.1 软物质概念	71
3.4.2 高分子材料的软物质特性	73
3.5 高分子材料的时空多尺度性	76
3.5.1 多尺度性概念	76
3.5.2 研究高分子多尺度性的焦点和挑战性	77
思考题	80
参考文献	81
第4章 相态、相变及聚合物相变中的亚稳定性	83
4.1 关于相态的描述	83
4.1.1 对称性及对称操作	83
4.1.2 对称群	85
4.1.3 物质结构函数及其 Fourier 变换	86
4.2 相变的定义	87

4.2.1	不连续相变、连续相转变或临界现象	88
4.2.2	对称破缺及序参量	89
4.2.3	软物质中的相变	91
4.2.4	熵致相变	92
4.2.5	二级相变	95
4.3	相变中的亚稳定性	98
4.3.1	亚稳定性与亚稳定态	99
4.3.2	高分子相变中亚稳定态的复杂性	101
4.4	高分子结晶中的亚稳定态现象	102
4.4.1	结晶高分子中的整数折叠链和非整数折叠链	103
4.4.2	不同晶型结构的亚稳定性	106
4.4.3	晶体尺寸对晶体稳定性的影响	108
4.5	高分子液晶的亚稳定性	109
4.6	共混聚合物相分离中的亚稳定态现象	111
4.6.1	聚合物共混热力学	112
4.6.2	关于吸热混合过程讨论	115
4.6.3	相图与相分离	118
4.6.4	相分离与玻璃化转变和结晶过程的关系	122
	思考题	124
	参考文献	125
第5章	分子间相互作用和超分子组装	127
5.1	物质状态的微观描述与宏观描述	127
5.1.1	微观描述与宏观描述的方法及物理量	127
5.1.2	微观描述与宏观描述的联系	129
5.2	分子间相互作用	131
5.2.1	分子间相互作用的重要性	131
5.2.2	常见的分子间相互作用	132
5.3	超分子化学、超分子组装	140
5.3.1	超分子化学概念	140
5.3.2	高分子包含化合物	141
5.3.3	两亲化合物及其有序聚集体	147
5.3.4	超分子液晶高分子	148
5.3.5	超分子组装及超分子器件	151
5.3.6	超分子热力学	156
5.4	超分子自组装及自组织	157

5.4.1	自组装及自组织	157
5.4.2	通过氢键形成的自组装	158
5.4.3	由分子识别引导的自组装	159
5.4.4	超分子聚合物化学	162
5.5	从凝聚态物质到组织化物质	163
	思考题	164
	参考文献	164
第6章	高分子液晶态	166
6.1	液晶的分类与凝聚态性质	166
6.1.1	液晶的分类	166
6.1.2	液晶的软物质特征	170
6.1.3	高分子液晶的主要类型和结构特点	174
6.2	高分子液晶的结构及性能特点	179
6.2.1	高分子液晶的化学结构	179
6.2.2	高分子液晶的织态结构及缺陷	183
6.2.3	高分子液晶的特性	186
6.2.4	影响高分子液晶形态与性能的因素	187
6.3	高分子液晶的应用及发展方向	191
6.3.1	高分子液晶的应用	191
6.3.2	生物性液晶高分子	193
6.3.3	高分子液晶的发展方向	196
	思考题	197
	参考文献	197
第7章	有机高分子的激发态	199
7.1	引言	199
7.2	导电聚合物的基本特征	200
7.2.1	电导率	200
7.2.2	掺杂与电导率的关系	200
7.2.3	聚乙炔的本征态	202
7.2.4	派尔斯相变	203
7.2.5	电荷密度波与自旋密度波	205
7.3	导电聚合物的激发态	206
7.3.1	一维固体的元激发——孤子态	206
7.3.2	聚合物的基态和简并态	208

7.3.3	反式聚乙炔中的孤子态	210
7.3.4	导电聚合物的极化子态	212
7.3.5	聚合物的双极化子态	215
7.4	聚合物掺杂导电机理	218
7.4.1	“孤子间跃迁”(ISH)机理	218
7.4.2	“掺杂剂振动辅助孤子间的电子跃迁”模型	219
7.4.3	可变范围跳跃机理	220
7.4.4	高聚物掺杂导电的双向机制	220
7.5	导电聚合物在二次电池中的应用	223
7.5.1	电池的定义及结构	223
7.5.2	电池的发展	228
7.5.3	锂离子电池的概念及特点	229
7.5.4	锂离子电池的充放电原理	230
7.5.5	聚合物热解碳阳极材料	231
7.6	有机固体的激发态和发光	236
7.6.1	发光现象和定义	236
7.6.2	表征发光现象的几个物理量	236
7.6.3	光的波粒二象性特征	238
7.6.4	半导体中的激发态和复合发光机理	239
7.6.5	有机电致发光	240
7.6.6	有机小分子发光材料	243
7.6.7	有机聚合物发光材料	243
7.6.8	聚合物电致发光机理	244
	思考题	244
	参考文献	245

第8章	非均质体系,逾渗和分形理论	247
8.1	凝聚态物质的非均质性	247
8.1.1	共聚物的非均质性	248
8.1.2	两相高分子共混体系的非均质性	251
8.1.3	高分子填充体系的非均质性	253
8.1.4	非均质性材料的微结构特征	257
8.2	逾渗理论,主要物理量和主要逾渗函数	258
8.2.1	典型例子	258
8.2.2	键逾渗,座逾渗,联键百分率,逾渗阈值	261
8.2.3	集团平均大小 $s_{av}(p)$,逾渗概率 $P(p)$	263