

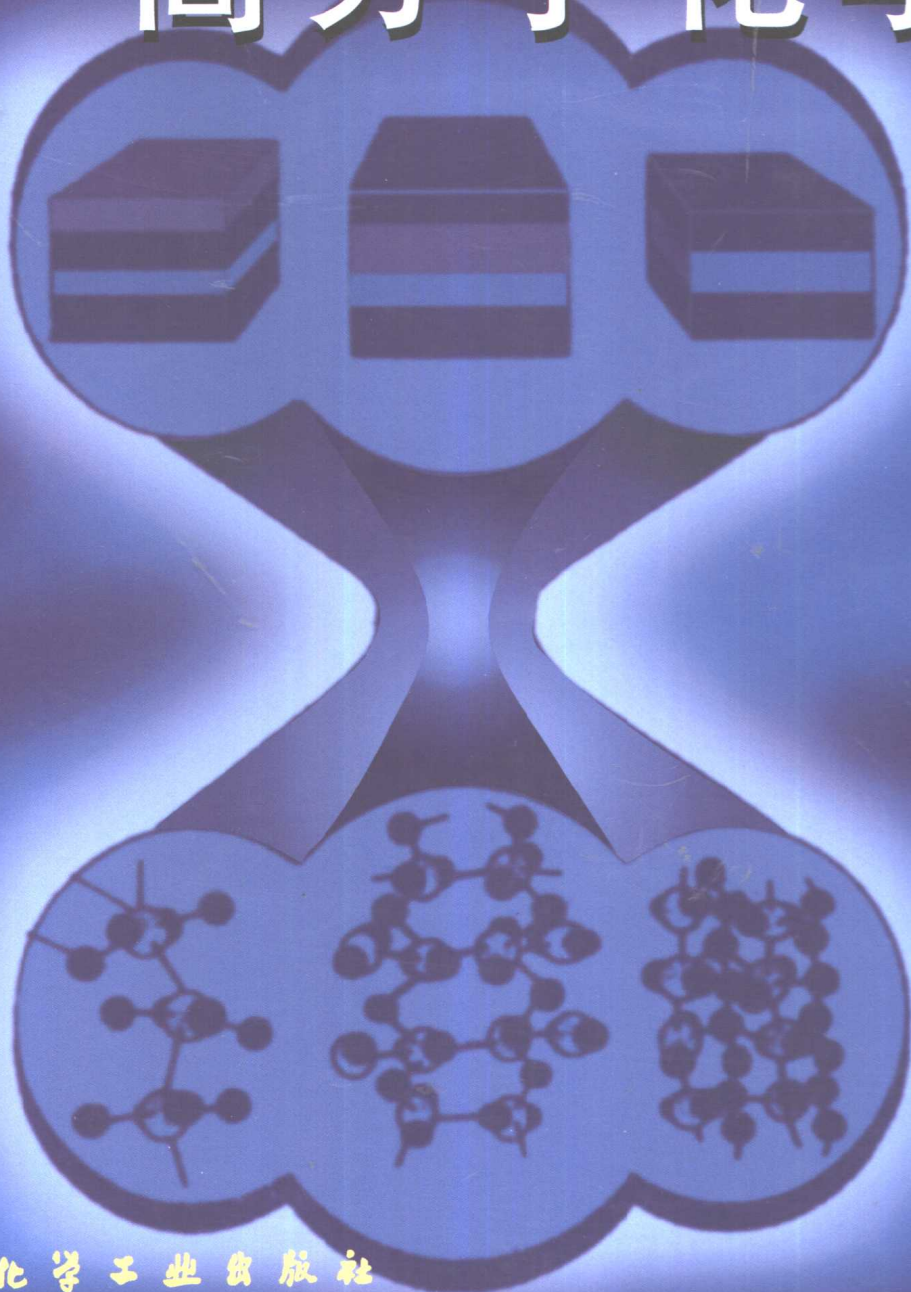
跨世纪的
高分子科学

国家自然科学基金委员会 委内出版基金资助出版

Polymer Chemistry

周其凤 胡汉杰 主编

高分子化学



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

跨世纪的高分子科学

高 分 子 化 学

周其凤 胡汉杰 主编

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

• 北 京 •

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

高分子化学 / 周其凤, 胡汉杰主编. —北京:
化学工业出版社, 2001.5
(跨世纪的高分子科学)
ISBN 7-5025-3119-X

I. 高… II. ①周… ②胡… III. 高分子化学-研究-中国 IV. 063

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 027067 号

跨世纪的高分子科学

高分子化学

周其凤 胡汉杰 主编

责任编辑: 叶 露

责任校对: 凌亚男

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 33½ 字数 821 千字

2001 年 10 月第 1 版 2001 年 10 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—3000

ISBN 7-5025-3119-X/TQ · 1348

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《跨世纪的高分子科学》丛书

主 编: 胡汉杰

副主编: 周其凤 杨玉良 瞿金平 何天白

《高分子化学》分册

顾 问: 冯新德 王佛松

主 编: 周其凤 胡汉杰

编 委 (以姓名汉语拼音为序):

曹淑桂	陈国强	陈杰谿	陈 捷	陈天禄	封麟先
府寿宽	胡汉杰	胡友良	金关泰	姬相玲	李 弘
罗 宁	潘才元	丘坤元	伍 青	武冠英	徐 闻
薛 奇	杨万泰	应圣康	张连生	张 希	

编写人员:

- | | | |
|--------|------------------------------|---------------------|
| 第 1 章 | 胡汉杰 | 国家自然科学基金委员会 研究员 |
| | (胡汉杰、周其凤、瞿金平、何天白共同讨论, 胡汉杰执笔) | |
| 第 2 章 | 丘坤元 | 北京大学化学与分子工程学院 教授 |
| 第 3 章 | 杨万泰 | 北京化工大学聚合物科学系 教授 |
| 第 4 章 | 陈 捷 | 上海大学化工系 研究员 |
| 第 5 章 | 徐 闻 | 四川大学高分子研究所 教授 |
| | 张爱民 | 四川大学高分子研究所 副教授 |
| 第 6 章 | 陈杰谿 | 西安交通大学环境与化学工程学院 教授 |
| 第 7 章 | 薛 奇 | 南京大学化学化工学院 教授 |
| | 万晓波 | 南京大学化学化工学院 博士 |
| 第 8 章 | 张兆斌 | 华东理工大学材料工程学院 博士 |
| | 应圣康 | 华东理工大学材料工程学院 教授 |
| 第 9 章 | 胡友良 | 中国科学院化学研究所 研究员 |
| | 封麟先 | 浙江大学高分子科学与工程系 教授 |
| 第 10 章 | 金关泰 | 北京化工大学材料科学与工程学院 教授 |
| | 程 珏 | 北京化工大学材料科学与工程学院 副教授 |
| 第 11 章 | 武冠英 | 北京化工大学材料科学与工程学院 教授 |
| | 吴一弦 | 北京化工大学材料科学与工程学院 教授 |
| 第 12 章 | 李 弘 | 南开大学高分子化学研究所 教授 |
| 第 13 章 | 陈天禄 | 中国科学院长春应用化学研究所 研究员 |

- | | | | |
|--------|-----|-----------------|------|
| | 潘才元 | 中国科学技术大学高分子系 | 教授 |
| 第 14 章 | 曹淑桂 | 吉林大学酶工程国家重点实验室 | 教授 |
| | 董 桓 | 吉林大学酶工程国家重点实验室 | 副教授 |
| | 刘 伟 | 吉林大学酶工程国家重点实验室 | |
| 第 15 章 | 陈国强 | 清华大学生物系 | 教授 |
| 第 16 章 | 府寿宽 | 复旦大学高分子科学系 | 教授 |
| 第 17 章 | 张连生 | 黑龙江大学化学系 | 教授 |
| 第 18 章 | 罗 宁 | 华东理工大学材料工程学院 | 教授 |
| | 伍 青 | 中山大学高分子研究所 | 教授 |
| | 金关泰 | 北京化工大学材料科学与工程学院 | 教授 |
| | 张兴英 | 北京化工大学材料科学与工程学院 | 教授 |
| 第 19 章 | 丘坤元 | 北京大学化学与分子工程学院 | 教授 |
| | 姬相玲 | 中国科学院长春应用化学研究所 | 副研究员 |
| | 逢杰斌 | 北京大学化学与分子工程学院 | 博士 |
| | 姜炳政 | 中国科学院长春应用化学研究所 | 研究员 |
| | 蒋世春 | 中国科学院长春应用化学研究所 | 博士 |
| 第 20 章 | 张 希 | 吉林大学分子结构与谱学实验室 | 教授 |
| | 崔树勋 | 吉林大学化学系 | 博士 |

本书由国家自然科学基金委员会资助出版

序

中国的高分子科学已经走过了近 50 年的发展历程。早在 20 世纪 50 年代,中国高分子科学的先驱者们带领着屈指可数的几个研究小组,走上了高分子科学的创业之路。在他们的辛勤努力下,中国的高分子科学在密切结合国民经济发展中迅速成长壮大。不少研究成果有力地支持了国民经济的发展和国防建设;一批有为的年轻高分子学者迅速成长;高分子科学的研究内容也在和其他学科的相互交叉、相互渗透下不断深入及拓展。时至今日,中国的高分子科学已成为包括高分子化学、高分子物理、高分子工程三个分支学科,研究队伍达万余人的一个最有活力的化学研究分支领域。它的研究触角已伸展到众多基础学科领域和众多国民经济的重要领域,在国家发展中扮演着重要的角色。值此世纪之交之际,国家自然科学基金委员会化学部在王夔院士的倡议和部署下,由高分子学科主任胡汉杰出面组织国内在第一条线从事高分子科研工作的优秀中青年研究人员共同撰写《跨世纪的高分子科学》丛书,实为我国高分子学术界的一件大事,相信本丛书的出版一定会对我国高分子科学的进一步发展起到促进作用。

国家自然科学基金委员会本着总结过去、探讨未来的思路,期望为社会提供一套既反映我国高分子科学发展的全貌,又能体现未来发展端倪的高分子科学丛书,以便为今后高分子科学的发展提供借鉴。主要参与本书组织、编撰工作的周其凤、杨玉良、瞿金平、何天白等同志是我同高分子学术界的新一代杰出学者,国家自然科学基金委员会也希望在丛书的编撰工作中为他们提供一个提高自己对高分子不同分支学科掌握能力的机会,以期他们在今后我国高分子科学的发展中更好地发挥中坚作用。

《跨世纪的高分子科学》丛书共有 4 个分册,即《高分子化学》、《高分子物理》、《聚合物成型原理及成型技术》和《功能高分子与新技术》。整套丛书的内容以高分子科学基础研究的发展为线索,总结了学科基础研究派生出来的对国家发展产生了重要作用的新技术、新材料方面的成果,从而展现了我国高分子科学形成、发展的历程及在国家发展中的作用。丛书的内容包括了高分子化学、高分子物理、高分子工程、功能高分子及高分子新材料等高分子科学的主要分支领域,为我国高分子学术界、高分子产业界以及其他想了解高分子科学的专业人员,提供了可供参考的丰富素材。

我国的高分子科学水平和国外先进水平相比还有差距,高分子科学在我国经济建设中的重要作用还未充分发挥出来。我们期望,在未来的新世纪里,我国的高分子科学工作者尤其是青年学者,不负历史赋予的重任,努力工作,继续开拓,为我国高分子科学事业的发展创出更辉煌的成就。

中国化学会高分子学科委员会 主任

中国科学院院士

2000 年 5 月

于北京

王 伟 书

前 言

高分子化学作为一门现代科学，很有它的特征也是它的魅力所在。

首先，虽然 Polymerization（聚合反应）这个概念德人 Staudinger 早在 20 世纪 20 年代已经提出，直到 30 年代特别是他发表了《高分子有机化合物》这本论著以及随后的高分子的分子量测定和美人 Carothers 的尼龙（Nylon）66 的合成，高分子化学作为 30 年代的一门新兴科学才得到化学界的确认。

其次，事隔仅 20 多年，聚 α -烯烃（包括聚乙烯与聚丙烯）的工业规模生产已经迅速发展 to 年产 10 万吨的大厂，从而对整个化学工业而言也是绝无仅有。原因何在？其一是高分子的合成、高分子的结构与性能以及高分子应用这三个方面，始终是互相交叉、相辅相成和互相促进的，故而 1972 年诺贝尔奖获得者 P.Flory 教授说，高分子化学既是一门基础科学，又是一门应用科学。此外，高分子这门科学一直与时代特征联系着。20 世纪的时代特征有三，是能源、材料与环保健康，三者互相联系。作为材料，它在金属、陶瓷与有机高分子三大材料中越来越显重要性，而且由于它的密度小，也间接节省能源。到 21 世纪，环保的重要性突出，随着就出现“绿色”高分子与“绿色”反应，可见高分子进展总是紧跟时代脉搏。

有鉴于此，国家自然科学基金会协同中国化学会高分子委员会组织编写《跨世纪的高分子科学》丛书是十分及时与必要的。而《高分子化学》作为此丛书之一共 20 章，因为不是教科书而是参考书，其中有交叉章节在所难免，也是合适的。此书都由近年来在高分子化学领域内作出卓有成效的科研项目中的青年科学家为主的写作班子来完成。

为此，本人祝贺这个写作班子的组成，并期望能及早出版此书，得以服务于高分子各界人士，展示高分子化学既是一门基础科学又是一门应用科学的风采。写此作为序。

北京大学教授
中国科学院院士
2000 年 8 月 15 日
于北京大学畅春园

冯新德

内 容 提 要

《跨世纪的高分子科学》丛书以高分子科学的发展为线索,总结了 50 年来我国高分子科学发展的成果和经验,反映了我国高分子学科的发展脉络、现状及未来。本丛书包括《高分子化学》、《高分子物理》、《聚合物成型原理及成型技术》和《功能高分子与新技术》四个分册,其内容基本覆盖了现代高分子科学的研究领域,反映出高分子学科的全貌。

《高分子化学》分册分别以聚合反应的引发体系、聚合反应及聚合方法、共聚物的合成等方面为线索,介绍了我国在分子合成领域的研究现状及取得的成果。由于高分子化学和石油化学工业密切联系,本书也涉及到了聚合物的工业合成技术;对于近些年国际上出现的一类非共价键新“聚合物”体系研究领域——“超分子聚集体”领域,本书也从前瞻高分子发展的角度予以简单介绍。读者可以从本书内容体会、探索高分子化学今后的发展趋势。

本书可以作为从事高分子科研与教学的专业人员、研究生,高分子产业部门的工程技术人员,对高分子感兴趣的其他领域专业人员的专业参考书。

目 录

第 1 章 中国高分子科学的发展概况与趋势	1
1.1 历史的回顾	1
1.2 中国高分子科学研究的概况	3
1.2.1 一般情况	3
1.2.2 学科概况	3
1.2.3 学科特点	4
1.2.4 目前存在的问题	5
1.3 中国高分子化学的研究	6
1.4 中国高分子物理的研究	7
1.5 中国高分子工程的研究	8
1.6 中国功能高分子与新材料的研究	9
1.7 高分子科学发展趋势与展望 ^[9~12]	11
参考文献	12
第 2 章 自由基聚合新引发体系	13
2.1 含胺氧化还原引发体系 ^[4, 5]	13
2.1.1 有机过氧化物-芳叔胺体系 ^[9]	13
2.1.2 有机过氧化氢物-胺体系 ^[17~20]	15
2.1.3 过硫酸盐-脂肪胺体系 ^[21~24]	16
2.2 铈(IV)离子氧化还原引发体系 ^[25~27]	17
2.2.1 铈(IV)离子-乙酰甲苯胺	17
2.2.2 铈(IV)离子-1,3-二羰基化合物体系	18
2.2.3 铈(IV)离子-乙酰基乙酰苯胺体系	19
2.2.4 铈(IV)离子-N-酰基-N'-4-甲基苯基脲体系	19
2.2.5 铈(IV)离子氧化还原体系的引发机理	19
2.3 Ce(IV)离子引发接枝聚合 ^[25~27]	22
2.3.1 PEU 以铈(IV)离子引发的接枝反应	22
2.3.2 含有功能侧基高分子以铈(IV)离子引发接枝	22
2.4 铈(IV)离子引发纤维素、甲壳胺接枝机理与接枝点	25
2.5 用光引发转移终止剂进行“活性”自由基聚合	26
2.5.1 新的光引发转移终止剂(photoiniferter)	26
2.5.2 大分子光引发转移终止剂的合成及其嵌段共聚合反应	27
2.5.3 可聚合光引发转移终止剂	28
参考文献	28
第 3 章 光引发与表面改性	31
3.1 光引发与光聚合	31

3.2	表面光接枝的化学原理	32
3.2.1	引发	32
3.2.2	单体	34
3.2.3	接枝链组成及形状	35
3.3	实施方法	37
3.3.1	气相法	37
3.3.2	液相法	37
3.3.3	连续液相法	38
3.4	用途	38
3.4.1	薄膜的表面改性	38
3.4.2	纤维的表面改性	39
3.4.3	塑料、橡胶制品的表面改性	39
3.4.4	特种材料的表面改性	40
3.4.5	光接枝固化技术	40
3.5	表面光接枝最新进展	40
	参考文献	41
第4章	核辐射、电子束引发及改性	43
4.1	辐射聚合	43
4.1.1	辐射聚合的基本原理及特点	43
4.1.2	应用现状及研究成果	44
4.1.3	发展趋势	46
4.2	辐射交联与裂解	46
4.2.1	辐射交联与辐射裂解的基本原理及特点	47
4.2.2	应用现状及研究成果	47
4.2.3	发展趋势	49
4.3	辐射接枝	50
4.3.1	辐射接枝的常用方法及基本原理	50
4.3.2	应用现状及研究成果	52
4.3.3	发展趋势	52
4.4	辐射混合效应	52
4.4.1	涂料的辐射固化及应用	53
4.4.2	辐射制备复合材料及应用	53
4.4.3	发展趋势	53
4.5	展望	53
	参考文献	54
第5章	微波引发化学反应及用于高分子改性的技术	58
5.1	微波与微波吸收	58
5.1.1	微波场中不同微波吸收材料的分类	58
5.1.2	微波场中不同微波吸收材料的极化机理及微波吸收机理 ^[2]	60
5.1.3	微波引发及改性技术适用的研究领域	60

5.2	微波引发化学反应及用于高分子改性的理论及技术研究进展	61
5.2.1	微波的非热效应 ^[14-19]	61
5.2.2	橡胶的微波硫化与脱硫 ^[20-31]	61
5.2.3	热固性树脂及其复合材料的微波固化反应	62
5.2.4	微波引发其他方面的几种化学反应	64
5.2.5	聚合物的微波加工	65
5.3	展望	65
5.3.1	高分子共混及复合材料的微波物理化学改性	66
5.3.2	互穿聚合物网络	66
5.3.3	高分子的微波化学和物理改性	67
5.3.4	微波辐照在皮革改性上的应用	67
	参考文献	67
第6章	等离子体引发聚合及改性	70
6.1	低温等离子体与高分子化学	70
6.2	等离子体反应装置	72
6.2.1	辉光放电装置	72
6.2.2	电晕放电装置	73
6.2.3	溅射法装置 ^[30]	73
6.2.4	离子镀敷法 ^[30]	73
6.2.5	等离子体 CVD 装置	74
6.3	低温等离子体反应条件的基本参数	74
6.4	低温等离子体表面处理	74
6.4.1	低温等离子体表面处理的机制	74
6.4.2	表面自由基的生成	75
6.4.3	表面交联层的形成	76
6.4.4	极性基团的导入	78
6.4.5	表面氟化	80
6.4.6	刻蚀与粗面化	82
6.4.7	接枝聚合	82
6.5	等离子体聚合	83
6.5.1	等离子体聚合反应机理与特征 ^[2,103]	83
6.5.2	碳氢化合物的等离子体聚合	83
6.5.3	碳氟化合物的等离子体聚合	85
6.5.4	有机硅化合物的等离子体聚合	86
6.6	等离子体引发聚合	86
6.6.1	等离子体引发聚合的原理与特征 ^[120, 121]	86
6.6.2	乙烯基单体的等离子体引发聚合	87
6.7	等离子体 CVD 法制备薄膜	91
6.8	溅射法制备薄膜	91
6.9	离子镀敷法制备薄膜	91

6.10 等离子体化学的发展前景	91
参考文献	91
第7章 芳杂环导电高分子的电化学聚合	96
7.1 电化学聚合的一般性条件与机理	96
7.1.1 导电高分子电化学聚合的一般性条件 ^[5]	96
7.1.2 电化学氧化聚合的机理	96
7.1.3 导电高分子的成膜过程	97
7.2 简单芳杂环单体的电化学聚合	97
7.2.1 聚噻吩的合成	97
7.2.2 聚吡咯的电化学合成	98
7.2.3 聚呋喃的电化学合成	99
7.3 功能化导电高分子的电化学聚合	99
7.4 导电高分子与非导电高分子的电化学共聚	100
7.5 导电高分子的电化学性质	101
7.6 展望	101
参考文献	102
第8章 活性自由基聚合	105
8.1 可控自由基聚合的理论基础	105
8.1.1 活性聚合的发现与概念的创立	105
8.1.2 可控自由基聚合的症结及对策	105
8.2 无金属的可控自由基聚合	107
8.2.1 Iniferter 法	107
8.2.2 TEMPO 体系	109
8.2.3 RAFT 过程	111
8.3 过渡金属催化原子转移自由基聚合 (ATRP)	112
8.3.1 ATRP——分子设计的有力工具	113
8.3.2 ATRP 体系的发展	120
8.3.3 ATRP 的活性种本质问题	126
8.3.4 ATRP 潜在的商业化价值及其面临的挑战	128
8.4 活性自由基聚合的发展展望	130
参考文献	131
第9章 配位聚合	134
9.1 负载型 Ziegler-Natta 催化剂及烯烃聚合	134
9.1.1 概述	134
9.1.2 负载型 Ziegler-Natta 催化剂	134
9.1.3 聚乙烯	143
9.1.4 聚丙烯	153
9.2 茂金属催化剂 (含“茂后”催化剂) 及相关的烯烃聚合	165
9.2.1 茂金属催化剂及“茂后”催化剂	165
9.2.2 乙烯聚合反应	175

9.2.3	丙烯聚合反应	180
9.2.4	苯乙烯聚合	184
9.3	稀土催化剂在分子合成中的应用	186
9.3.1	稀土催化双烯烃聚合	186
9.3.2	稀土催化苯乙烯聚合	188
9.3.3	稀土催化极性单体聚合	188
9.3.4	稀土催化乙烯聚合	189
9.3.5	稀土催化开环聚合	189
9.4	展望	191
9.4.1	超冷凝技术在烯烃聚合中的应用	191
9.4.2	超临界技术在烯烃聚合中的应用	191
9.4.3	丙烯高温聚合催化剂	191
9.4.4	茂金属催化剂(含“茂后”催化剂)催化体系	191
9.4.5	稀土催化剂	192
	参考文献	193
第 10 章	阴(负)离子聚合	197
10.1	阴离子活性聚合	197
10.1.1	阴离子活性聚合在分子化学中的地位与作用	197
10.1.2	阴离子活性聚合的特点	197
10.2	有机锂的缔合与解缔	198
10.2.1	锂和碳锂键的特点	198
10.2.2	有机锂在非极性溶剂中的缔合	198
10.2.3	LB 对有机锂的络合与解缔作用	201
10.3	二烯烃的聚合机理	204
10.3.1	丁二烯阴离子聚合机理	204
10.3.2	异戊二烯聚合机理	208
10.4	聚二烯烃的微观结构	210
10.4.1	聚二烯烃微观结构的调节	210
10.4.2	聚二烯烃微观结构含量的定量关系式	212
10.5	聚合反应动力学	213
10.5.1	苯乙烯的聚合反应动力学	213
10.5.2	二烯烃的聚合反应动力学	215
10.5.3	活性种的相对活性	220
10.6	溶剂极性经验参数的应用	220
10.6.1	溶剂极性经验参数 (E_T) 的导出	220
10.6.2	E_T 的应用	221
10.7	阴离子活性聚合在聚合物合成中的应用	223
10.7.1	极性单体的聚合	223
10.7.2	侧基官能化聚合物	227
10.7.3	端基官能化聚合物	229

10.8	阴离子聚合的其他进展	230
10.8.1	引发剂	230
10.8.2	大分子单体	232
10.8.3	用转换反应合成聚合物	233
10.8.4	国内其他单位对阴离子聚合研究的贡献	234
10.9	展望和存在的问题	235
10.9.1	展望	235
10.9.2	存在的问题	235
	参考文献	236
第 11 章	现代碳阳离子聚合	244
11.1	碳阳离子聚合发展简史	244
11.2	碳阳离子聚合体系中主要组分及其特点	244
11.2.1	单体	244
11.2.2	引发体系	246
11.3	阳离子活性种与聚合反应特征的关系	246
11.4	单体结构与引发体系的关系	247
11.4.1	乙烯基醚类单体	247
11.4.2	异丁烯单体	249
11.4.3	苯乙烯及其衍生物单体	250
11.4.4	二烯烃单体	250
11.4.5	环烯烃单体	251
11.4.6	单体结构与引发剂结构的关系	251
11.5	聚合反应热力学、动力学及工艺特征	252
11.5.1	从热力学能量观点看碳阳离子聚合反应	252
11.5.2	从动力学观点看碳阳离子聚合反应	253
11.5.3	碳阳离子聚合反应的工艺特点	253
11.6	碳阳离子聚合的基元反应及其特点	253
11.6.1	引发反应	253
11.6.2	增长反应	254
11.6.3	链终止反应	254
11.7	现代碳阳离子聚合机理研究进展及大分子设计	255
11.7.1	可控引发反应	255
11.7.2	可控增长反应	265
11.7.3	可控终止反应	272
11.8	碳阳离子聚合展望	277
	参考文献	277
第 12 章	开环歧化(易位)聚合反应	283
12.1	开环歧化聚合反应简介	283
12.2	主要研究进展	284
12.3	开环歧化聚合反应在聚合物分子结构设计与裁制方面的应用	285

12.3.1	合成恒份共聚物	285
12.3.2	合成理想交替共聚物	285
12.3.3	全顺式及全反式主链双键聚合物	286
12.3.4	全同立构全顺式主链双键聚合物	286
12.3.5	间同立构全反式主链双键聚合物	287
12.3.6	合成具有受控组成和结构的嵌段及接枝共聚物	287
12.3.7	合成规整结构梳形聚合物	290
12.3.8	合成规整结构星形、柱形聚合物	292
12.4	开环歧化聚合在优异性能材料合成方面的成就	295
12.4.1	新型功能高分子材料	295
12.4.2	合成优异性能工程材料	299
12.5	展望	301
	参考文献	302
第 13 章	开环聚合反应	305
13.1	环醚和环缩醛的开环聚合反应	305
13.1.1	阳离子开环聚合反应	305
13.1.2	自由基开环聚合	315
13.2	螺环原酸酯和螺环原碳酸酯的阳离子开环聚合反应	319
13.2.1	阳离子开环聚合	319
13.2.2	不饱和螺环原酸酯的开环聚合	324
13.3	膨胀聚合反应及其应用	326
13.3.1	理论考虑	326
13.3.2	热固性树脂的改性	327
13.4	芳香环状低聚物的制备与开环聚合	328
13.4.1	芳香环状低聚物	329
13.4.2	质谱法表征芳香环状低聚物	335
13.4.3	开环聚合	340
13.5	展望	344
	参考文献	344
第 14 章	酶催化聚合	349
14.1	酶催化合成	349
14.2	酶在合成可生物降解高分子材料上的应用	349
14.2.1	可生物降解高分子材料	349
14.2.2	聚酯类可生物降解高分子的酶促合成	351
14.2.3	聚糖酯类可生物降解高分子的酶促合成	353
14.2.4	酶促合成法与化学合成法的联合使用	354
14.2.5	酶催化内酯开环聚合反应的机制	355
14.3	辣根过氧化物酶在光电功能高分子材料合成方面的应用	361
14.3.1	辣根过氧化物酶催化酚及芳香胺类物质的聚合	361
14.3.2	合成方法	363

14.3.3 聚酚胺类物质的应用前景	366
参考文献	368
第 15 章 微生物聚合	370
15.1 微生物合成的原理	370
15.1.1 聚羟基脂肪酸酯在细胞中的积累过程及原理	371
15.1.2 PHA 的生物合成	373
15.2 PHA 生物合成的分子生物学	375
15.2.1 PHA 合成的酶学	375
15.2.2 从相关底物中合成 PHA	377
15.2.3 从非相关底物中合成 PHA	380
15.3 PHA 在细胞内外的降解	382
15.3.1 短链 PHA 可降解性能的研究	382
15.3.2 中链 PHA 的生物降解性能	383
15.3.3 胞内解聚酶	383
15.4 PHA 结构对材料性能的影响	383
15.4.1 短链 PHA 的性能	384
15.4.2 PHA 颗粒结构	385
15.4.3 中链 PHA	385
15.4.4 含官能团的 mcl PHA 的性质	386
15.5 其他微生物合成的聚合物	387
15.5.1 蛋白质	387
15.5.2 聚乳酸	387
15.5.3 从生物合成的顺二羟基环己二烯合成的聚合物——聚酚	387
15.5.4 生物合成聚合物前体	388
参考文献	388
第 16 章 乳液聚合	392
16.1 乳液聚合理论基础 ^[47]	392
16.1.1 乳液聚合理论	392
16.1.2 粒子成核和增长动力学	404
16.2 乳液聚合反应进展	404
16.2.1 无皂乳液聚合	404
16.2.2 细乳液聚合	407
16.2.3 微乳液聚合	408
16.2.4 超浓乳液	414
16.2.5 物理场作用下的乳液聚合	415
16.2.6 其他	416
16.3 乳液聚合方法的应用	417
16.3.1 单分散聚合物微球的制备和应用	417
16.3.2 聚合物分散体系的表面功能化	419
16.3.3 聚合物复合胶乳	421