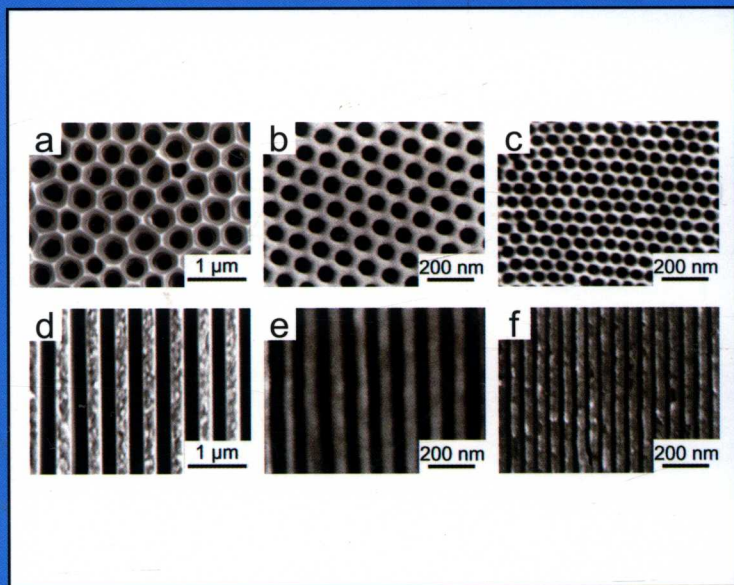


# 高分子结晶和结构

莫志深 等 著



21 世纪科学版化学专著系列

# 高分子结晶和结构

莫志深 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一本全面系统阐述高分子结晶和结构的专著。全书除“概述”外共分16章,概述简要回顾高分子科学建立的艰苦历程;第1章重点介绍晶态聚合物定义和特征及熔融热力学;第2章简明介绍X射线衍射和几何晶体学的基础理论和概念,以及小分子、高分子晶体结构测定的步骤和方法;第3~5章分别介绍红外光谱、NMR和热分析等现代物理方法在聚合物结晶和结构研究方面的应用;第6章叙述晶态聚合物结构形态;第7章介绍高分子从熔体和浓溶液结晶生成的高分子球晶结构,以及形成不同球晶形态的机理;第8章详细讨论聚合物异构现象;第9、10章重点讨论聚合物结晶动力学以及不同外场性质对高分子结晶形成和结构的影响;第11、12章综述迄今高分子结晶理论和模拟研究,以及受限体系中的聚合物结晶;第13、14章阐述一些重要天然高分子和生物降解高分子的结晶和结构;第15、16章综述重要高分子品种聚酰胺及晶性共轭聚合物的晶体结构。

本书可作为高分子化学与物理、材料科学与工程及相关专业的本科生教学用书,以及硕士生、博士生的参考书,对从事高分子的科研和生产技术人员来说也是一本有价值的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高分子结晶和结构 / 莫志深等著. —北京: 科学出版社, 2017.3

(21世纪科学版化学专著系列)

ISBN 978-7-03-051748-7

I. ①高… II. ①莫… III. ①高分子材料-晶体学 IV. ①TQ317

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第027085号

责任编辑: 周巧龙 / 责任校对: 张小霞 张凤琴

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年3月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017年3月第 一 次印刷 印张: 32 1/4

字数: 650 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 作者名单

(以姓氏笔画为序)

石彤非	朱诚身	乔秀颖	任敏巧
刘浩	刘结平	苏朝晖	吴慧
何素芹	宋剑斌	张吉东	张会良
张庆新	姚心侃	莫志深	高瑛
黄绍永	蒋子江	蒋世春	曾广赋
温慧颖			

## 前 言

《高分子结晶和结构》(以下简称本书)是一本全面系统阐述高分子结晶和结构的专著。

各章作者在相关领域从事科研教学工作多年,对所涉及领域的前沿和热点有较全面深刻的了解,有丰富的科学积累,从而保证了本书的质量。本书除部分汇集了作者的科研成果外,还注意吸收当今国内外文献及专著的精华,从而保证了本书的深度和广度。

我十分荣幸地邀请到各章作者惠允与我合作编写本书,通过各位作者的不懈努力,使本书终于完成,我向各位作者谨致以衷心的感谢和崇高的敬意。

衷心感谢闫寿科教授、陈学思研究员、刘振海研究员、那辉教授、门永锋研究员、邱兆斌教授、刘天西教授、陈文启研究员、肖学山教授、张建国研究员、李晓晶研究员等对书稿的审阅付出了辛勤劳动。

特别感谢张斌主任、孙小红研究员、张志杰博士、彭波博士,他们对本书的编排、技术加工做了大量工作。

衷心感谢中国科学院长春应用化学研究所高分子物理与化学国家重点实验室提供了良好的工作环境,使作者能安心愉快顺利完成本书的编撰工作。

衷心感谢科学出版社周巧龙高级编辑、杨震主任的关心和支持,使我们增加了勇气和毅力,完成了本书的编撰工作。

限于作者的学识水平,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

莫志深

2016年5月于中国科学院长春应用化学研究所  
高分子物理与化学国家重点实验室

# 目 录

概述	1
参考文献	3
第 1 章 晶态聚合物定义和特征	5
1.1 晶态聚合物定义	5
1.2 晶态聚合物熔融热力学	5
1.2.1 聚合物晶体的熔融与熔点	5
1.2.2 影响熔点的因素	7
1.2.3 共聚物的熔点	13
1.3 晶态聚合物的特征	14
1.3.1 晶胞由链段构成	14
1.3.2 结晶区由微晶组成	16
1.3.3 折叠链	16
1.3.4 聚合物晶体的晶胞结构重复单元	16
1.3.5 结晶不完善	16
1.3.6 结构的复杂性及多重性	16
1.3.7 聚合物晶体的空间群	17
参考文献	17
第 2 章 晶体结构测定	18
2.1 引言	18
2.2 X 射线相干散射的基本理论概念	20
2.2.1 单电子相干散射公式	20
2.2.2 X 射线被一个电子密度分布体所散射的基本公式	20
2.2.3 Ewald 球及衍射图	22
2.2.4 电子密度分布与衍射图的傅里叶变换关系	23
2.2.5 一个原子对 X 射线的散射	24
2.3 几何晶体学基础	25
2.3.1 晶体的宏观对称性和点群	25
2.3.2 晶体的七个晶系	27

2.3.3	晶体的空间点阵、空间群	29
2.4	晶体对 X 射线的散射	35
2.4.1	布拉格方程	35
2.4.2	倒易点阵	37
2.4.3	结构因子	41
2.4.4	结构因子在复数平面上的表示及其矢量表达式	41
2.4.5	结构因子的电子密度函数表达式	43
2.4.6	中心对称晶体的结构因子	44
2.4.7	Friedel 定律	44
2.4.8	结构因子和衍射强度	45
2.4.9	系统消光和微观对称元素	46
2.5	晶体结构解析	48
2.5.1	帕特森法	49
2.5.2	直接法	50
2.5.3	电子密度函数法	53
2.5.4	最小二乘方法结构精修	55
2.5.5	晶体结构的表达	56
2.6	多晶法测定聚合物晶体结构	59
2.6.1	概述	59
2.6.2	聚合物晶体衍射特点	59
2.6.3	聚合物晶体结构测定原理	60
	参考文献	71
<b>第 3 章</b>	<b>晶态聚合物的红外光谱分析</b>	<b>72</b>
3.1	晶型结构的确定	73
3.2	结晶度分析	74
3.2.1	聚乙烯	75
3.2.2	间规聚苯乙烯	76
3.2.3	聚己内酯	76
3.2.4	纤维素	77
3.3	晶体的熔融过程	77
3.3.1	等规聚丙烯	77

3.3.2 聚噻吩	78
3.4 结晶动力学	81
3.4.1 聚对苯二甲酸丙二醇酯	82
3.4.2 双酚 A 癸烷共聚醚	83
3.4.3 多嵌段聚氨酯	84
3.5 聚合物晶体的相转变	86
3.5.1 烷基化聚乙烯亚胺侧链	87
3.5.2 聚甲醛晶体	88
3.5.3 间规聚苯乙烯晶体	88
3.6 晶体的取向	90
3.7 显微红外分析	92
3.7.1 显微红外成像	93
3.7.2 间规聚苯乙烯纳米棒	95
3.7.3 等规聚苯乙烯/聚苯醚纳米棒	97
参考文献	99
<b>第 4 章 晶态聚合物的核磁共振研究</b>	<b>102</b>
4.1 晶态聚合物核磁共振技术和分析方法	102
4.1.1 晶态聚合物核磁共振特征	102
4.1.2 固态聚合物核磁共振分析方法	102
4.2 聚合物晶区结构分析	106
4.2.1 聚烯烃	106
4.2.2 聚乳酸	110
4.3 晶态结构与分子运动	114
4.3.1 聚酰胺	114
4.3.2 聚醚	119
4.4 晶态聚合物分子结构表征	124
4.4.1 纤维素	124
4.4.2 淀粉	130
参考文献	134
<b>第 5 章 热分析研究聚合物的结晶和结构</b>	<b>137</b>
5.1 热分析简介	137



5.1.1	热分析定义及发展历程	137
5.1.2	热重分析法	138
5.1.3	差示扫描量热法	139
5.1.4	热机械分析法	143
5.1.5	动态热机械分析法	144
5.2	聚合物结晶和结构的差示扫描量热法研究	146
5.2.1	实验的设计原则	146
5.2.2	聚合物的玻璃化、结晶和熔融过程研究	147
5.2.3	热固性聚合物样品研究	156
5.2.4	嵌段共聚物、不相容共混物的成核与结晶特性研究	157
5.3	聚合物结晶和结构的动态热机械法研究	161
5.3.1	实验的设计原则	161
5.3.2	聚合物的玻璃化、结晶与熔融研究	164
	参考文献	165
<b>第 6 章</b>	<b>晶态聚合物结构形态</b>	<b>166</b>
6.1	高分子链的构造和基本堆砌	166
6.1.1	高分子链的构造	166
6.1.2	高分子链的基本堆砌	174
6.2	晶态聚合物结构物理图像	180
6.2.1	缨状胶束模型	180
6.2.2	高分子单晶	181
6.2.3	折叠链模型	184
6.2.4	凝固模型	187
6.2.5	Hosemann 次晶结构模型	187
6.2.6	高分子中间相结构——晶态高分子三相模型	188
	参考文献	196
<b>第 7 章</b>	<b>高分子球晶</b>	<b>198</b>
7.1	球晶的结构特点和种类	198
7.1.1	一般球晶的结构特点	198
7.1.2	常见聚合物球晶的种类	199
7.2	球晶的生长过程和形成机理	200

7.2.1	球晶的生长过程	200
7.2.2	黑十字消光的形成	203
7.2.3	环状消光的光学原理	205
7.2.4	光率体的取向与球晶光性	205
7.3	环带球晶及其形成机理	207
7.3.1	环带球晶的发现	207
7.3.2	可以形成环带球晶的聚合物	207
7.3.3	环带球晶的形成机理	208
7.4	异常光性球晶	211
7.4.1	两瓣形放射状球晶	211
7.4.2	不对称四瓣形放射状球晶	212
7.4.3	六瓣形放射状球晶	212
7.4.4	带正环的负球晶	212
7.4.5	彩色球晶	213
7.4.6	异常光性球晶结构单元的半径不等效性	213
7.5	一些常见聚合物的球晶形态	216
7.5.1	均聚物	216
7.5.2	共混聚合物	224
7.5.3	嵌段共聚物	227
7.5.4	高分子薄膜和超薄膜	227
	参考文献	232
<b>第 8 章</b>	<b>聚合物的异构现象</b>	<b>235</b>
8.1	偏振光的产生和应用	235
8.1.1	偏振光的产生	235
8.1.2	旋光度和比旋光度	235
8.2	聚合物异构现象	236
8.2.1	聚合物构造异构(或同分异构)	237
8.2.2	聚合物的立体异构	238
	参考文献	260
<b>第 9 章</b>	<b>聚合物结晶动力学</b>	<b>262</b>
9.1	引言	262

9.2	聚合物结晶的成核	263
9.2.1	成核的分类	263
9.2.2	成核热力学	264
9.2.3	成核速率	265
9.2.4	成核动力学	266
9.3	聚合物晶体的 L-H 成核生长理论	268
9.4	聚合物结晶动力学的理论基础	270
9.4.1	Avrami 理论	271
9.4.2	Evans 理论	271
9.4.3	Mandelkern 理论	272
9.5	聚合物等温结晶动力学方程	272
9.6	聚合物等温结晶动力学实验数据	273
9.7	聚合物等温结晶动力学方程的改进	275
9.7.1	考虑结晶后期球晶的相互挤撞	275
9.7.2	考虑晶体生长过程中晶核体积的影响	276
9.7.3	考虑晶体生长过程中线生长速率的变化	276
9.7.4	两步结晶模型	276
9.8	聚合物非等温结晶动力学方程	277
9.8.1	经典 Ozawa 法	278
9.8.2	Jeziorny 法	278
9.8.3	一种新的方法	279
9.8.4	微分方程法	283
	参考文献	284
<b>第 10 章</b>	<b>外场性质对高分子结晶形成和结构的影响</b>	<b>286</b>
10.1	重力场对高分子的结晶与结构的影响	286
10.1.1	重力场在 高分子材料研究中的应用	286
10.1.2	微重力下高分子的合成、结晶与结构	287
10.1.3	高真空静电减重力下高分子的结晶与结构	289
10.2	应力、热、溶剂诱导下高分子的结晶与结构	295
10.2.1	应力、热、溶剂诱导结晶对聚芳醚酮类高分子结构的影响	295
10.2.2	应力和热诱导结晶对尼龙 11 结构的影响	303

10.2.3	晶态高分子的应力-形变机理	308
10.3	电场对高分子的合成、结晶与结构的影响	309
10.3.1	电场对高分子的合成和结构的影响	310
10.3.2	电场对高分子的结晶和结构的影响	310
10.4	压力场对高分子的结晶与结构的影响	312
10.4.1	压力场对聚乙烯的结晶与结构的影响	312
10.4.2	压力场对烷基取代聚噻吩的结晶与结构的影响	314
10.4.3	压力场对其他高分子的结晶与结构的影响	316
10.5	剪切场对高分子的结晶与结构的影响	319
10.5.1	剪切场对聚丙烯的结晶与结构的影响	319
10.5.2	剪切场对其他高分子的结晶与结构的影响	323
	参考文献	326
<b>第 11 章</b>	<b>高分子结晶理论和模拟研究</b>	<b>328</b>
11.1	高分子结晶特征	328
11.2	成核理论	329
11.2.1	经典成核理论	330
11.2.2	“超越”经典成核理论	334
11.2.3	成核理论概述	336
11.3	高分子结晶经典理论	336
11.3.1	经典成核动力学结晶理论	337
11.3.2	非成核动力学结晶理论——粗糙表面生长理论 (SG 理论)	340
11.3.3	高分子经典理论问题和挑战	341
11.4	高分子结晶理论新进展	341
11.4.1	旋节线相分离诱导成核理论	342
11.4.2	中介相多步生长理论	343
11.5	高分子总结晶动力学	346
11.5.1	等温结晶过程的 Avrami 方程处理	347
11.5.2	非等温结晶动力学	347
11.5.3	总结晶速率及其复杂性	349
11.6	高分子结晶的计算机模拟研究	350
11.6.1	高分子结晶的主要模拟方法	351

11.6.2	高分子结晶模拟研究进展 .....	354
11.7	高分子结晶理论模拟研究展望 .....	358
	参考文献 .....	359
<b>第 12 章</b>	<b>受限体系中的聚合物结晶 .....</b>	<b>362</b>
12.1	聚合物受限体系的构筑 .....	363
12.1.1	嵌段共聚物模板 .....	363
12.1.2	多孔模板 .....	364
12.1.3	电纺丝纳米线 .....	366
12.1.4	纳米球 .....	366
12.2	一维受限结晶 .....	367
12.2.1	嵌段共聚物体系 .....	367
12.2.2	聚合物薄膜 .....	368
12.3	二维受限结晶 .....	372
12.3.1	嵌段共聚物体系 .....	372
12.3.2	径迹蚀刻模板 .....	373
12.3.3	AAO 模板 .....	374
12.3.4	纳米压印模板 .....	380
12.3.5	电纺丝体系 .....	381
12.3.6	其他受限方式 .....	382
12.4	三维受限结晶 .....	383
12.4.1	嵌段共聚物体系 .....	383
12.4.2	去润湿的微米液滴 .....	383
12.4.3	微乳液法制备纳米液滴 .....	384
12.4.4	无机杂化体系 .....	384
12.5	结语 .....	385
	参考文献 .....	385
<b>第 13 章</b>	<b>聚乳酸结晶和结构 .....</b>	<b>388</b>
13.1	乳酸的来源和结构 .....	388
13.1.1	乳酸的来源 .....	388
13.1.2	乳酸的结构 .....	389
13.2	聚乳酸的合成和分子链结构 .....	389

13.2.1 聚乳酸的合成 .....	389
13.2.2 聚乳酸的分子链结构 .....	391
13.3 聚乳酸的结晶和结构 .....	391
13.3.1 聚乳酸的结晶 .....	392
13.3.2 聚乳酸的晶体结构转变 .....	396
13.3.3 聚乳酸的单晶 .....	406
13.4 聚乳酸立构复合结晶 .....	408
13.4.1 聚乳酸立构复合物的结构 .....	408
13.4.2 聚乳酸的立构复合结晶 .....	410
13.5 聚乳酸的冷结晶 .....	413
13.5.1 玻璃态冷结晶 .....	413
13.5.2 薄膜-溶剂诱导冷结晶 .....	415
13.6 展望 .....	420
参考文献 .....	420
<b>第 14 章 纤维素和淀粉 .....</b>	<b>424</b>
14.1 葡萄糖、淀粉和纤维素的生成和结构 .....	424
14.2 纤维素晶体结构 .....	426
14.3 淀粉 .....	428
14.3.1 淀粉的基本组成单元 .....	428
14.3.2 淀粉的分子结构式 .....	429
14.3.3 淀粉的分类 .....	430
14.3.4 淀粉的理化性能 .....	431
14.3.5 淀粉粒凝聚态结构 .....	432
14.3.6 淀粉的结晶结构 .....	435
14.3.7 淀粉结晶 X 射线衍射 .....	437
14.3.8 A 型淀粉 .....	438
14.3.9 B 型淀粉 .....	438
参考文献 .....	439
<b>第 15 章 聚酰胺 (尼龙) .....</b>	<b>441</b>
15.1 概述 .....	441
15.2 聚酰胺品种 .....	441

15.3	聚酰胺的结构特征 .....	454
15.3.1	平面锯齿形构象 .....	454
15.3.2	聚酰胺晶体结构 .....	458
15.3.3	聚酰胺晶型转变 .....	462
15.4	聚酰胺结晶和熔融 .....	467
15.4.1	聚酰胺结晶 .....	467
15.4.2	外场对尼龙结晶的影响 .....	470
15.4.3	聚酰胺熔融 .....	472
	参考文献 .....	473
<b>第 16 章</b>	<b>晶性共轭聚合物 .....</b>	<b>475</b>
16.1	共轭聚合物简介 .....	475
16.2	共轭聚合物的结晶结构 .....	476
16.2.1	共轭聚合物的晶体结构 .....	476
16.2.2	共轭聚合物结晶的特点 .....	481
16.2.3	共轭聚合物晶体的取向 .....	482
16.3	聚噻吩类晶性共轭聚合物 .....	485
16.3.1	均聚噻吩 .....	485
16.3.2	聚噻吩衍生物 .....	487
16.4	聚芴类晶性共轭聚合物 .....	488
16.4.1	均聚芴类共轭聚合物的结晶结构 .....	488
16.4.2	聚芴衍生物 .....	493
16.5	其他晶性共轭聚合物 .....	494
16.5.1	聚乙炔类材料 .....	494
16.5.2	聚苯胺类材料 .....	495
16.5.3	聚苯类材料 .....	496
16.5.4	非晶性共轭聚合物 .....	496
	参考文献 .....	496

## 概 述

1920年,德国科学家施陶丁格(H.Staudinger, 1881—1965)在系统研究了許多聚合物的结构性质之后,提出了大分子假设,并在其划时代的“论聚合”一文中,提出聚苯乙烯、聚甲醛、天然橡胶等聚合物具有线形长链结构式,这在今天看来仍然是正确的。几乎同时,科学家第一次报道了高分子结晶的X射线证据,当时研究的高分子是纤维素及其衍生物等<sup>[1, 2]</sup>。第一个被X射线衍射测定的结晶高分子是天然多糖纤维素(polysaccharide cellulose),它的结晶单元是纤维二糖(cellobiose)。但由这些证据获得的高分子晶体晶胞尺寸远比高分子链长小得多,为正常晶胞尺寸大小。于是人们发问施陶丁格,高分子长链应该在高分子晶胞中有所表现,高分子由长链组成,它是如何排入这个“小晶胞”内的?这种高分子晶体密度应该是正常晶胞的50倍大。

1926年在德国杜塞尔多夫(Duesseldorf)举行的学术会议上<sup>[3]</sup>,一方是高分子概念的倡导者施陶丁格,另一方是很多著名科学家,他们仍然反对高分子存在,坚持所谓“胶束缔合论”,认为纤维素、羊毛、橡胶等一类物质是由小分子通过强相互作用,如氢键等聚集在一起的结果。施陶丁格在讲演中告诉听众,有数以百计的有机化学家,已确认高分子化合物的存在,这些高分子化合物数千倍大于他们正在研究的有机化合物。在场科学家有人提出评论意见:“施陶丁格先生,我们感到太震惊了,就像动物学家在非洲旅行发现了一头1500英尺<sup>①</sup>长300英尺高的大象”。“大分子学说”当时受到了激烈围攻。此次会议更像是低分子学说获胜的庆祝会,只有施陶丁格孤军奋战。但他坚持自己发现的大分子观点,坚持认为高分子大小和其晶胞尺寸大小无关的观点,并和高分子学说坚持者继续进行了大量基础性工作。1927年施陶丁格用端基法测定了聚甲醛 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 的分子量,并用X射线衍射确定聚甲醛晶体结构属正交晶系,在每个晶胞中仅含有4个 $(\text{CH}_2\text{O})$ 单元的事实,这说明晶胞内仅含有聚甲醛部分链段。1930年施陶丁格导出了聚合物稀溶液黏度与分子量的关系式,使人们多了一种观察大分子的有力工具。期间,施陶丁格与辛格(R.Singer)合作,设计出简单设备,用流动双折射技术测定了大分子形状——长链分子的近似长宽比。同期,X射线晶体学家证实沿纤维轴拉伸方向,纤维素结晶长度即长周期远大于单个晶胞尺寸,甚至超过单个微晶区尺寸,这进一步支持了施陶丁格坚持的高分子大小与晶胞大小无关的观点。此时,美国的卡罗瑟斯(W.H.Carothers)通过缩合反应得到分子量为20 000的聚合物等,这

<sup>①</sup>英尺为非法定单位,1ft=0.3048m。



样高分子概念及其存在就无可争辩地得到了实验事实的论证。1930年，在德国法兰克福（Frankfurt）有机化学与胶体化学年会上，施陶丁格高分子学说得到了普遍接受，坚持纤维素等是低分子的人成了孤家寡人。1932年，施陶丁格出版了他的第一部专著《有机高分子化合物橡胶与纤维素》，同年在法拉第学会上施陶丁格学说得到了普遍认同。施陶丁格是高分子科学的奠基人，为了表彰他的卓越贡献，1953年72岁的施陶丁格被授予诺贝尔化学奖<sup>[3, 4]</sup>。

高分子科学确立已有近百年历史了，但高分子是如何结晶的，它的结晶和结构还是常常使人疑惑。高分子链非常长，在熔体（或玻璃态）情况下链之间常常是缠结卷曲的，乍看起来这样的体系结晶是相当困难的，或者根本不可能结晶，即使结晶也是相当不规则的。然而，事实却并非如此，大多数聚合物的晶体内部具有实实在在的规则结晶结构，更加令人惊奇的是，有些聚合物结晶速率之快，常常是低分子材料不可能相比的。直至20世纪末，人们对高分子结晶和结构问题似乎才有了一些共识<sup>[5-12]</sup>：①当熔体冷却到平衡熔点以下（或玻璃态加热升温至 $T_g$ 以上），具有线形或规整结构的高分子链在结晶时是通过链段一个接一个有序并排到晶体表面，此时所有高分子链段选择同一种螺旋构象，所有螺旋平行排列取向，然后高分子链段从侧面规则排列起来，堆砌成晶体。此时，热力学是一个驱动力，动力学因素起决定作用，在特定温度下，具有最大发展速率，形成折叠链片层结晶结构，此时晶体将不能及时解开缠结链，链末端缺陷等被排斥至非晶区。②晶态下分子链段是相互平行排列的。③晶胞重复单元是组成分子链的化学重复单元（单体）或晶体结构重复单元。④聚合物从熔体或浓溶液结晶时，产品具有结晶及非晶微区，结晶及非晶微区具有相同组分。⑤因为聚合物链长比微晶尺寸大得多，引起这个领域革命性的链折叠概念被提出：邻位规则折叠链模型和非邻位无规则折叠链模型（或称插线板模型，the switchboard model），后者聚合物链可以进出晶区和非晶区若干次，因此经典缨状胶束模型（fringed micelle model）仍然可以很好地解释这种现象。⑥聚合物从熔体或浓溶液结晶常常是生成球晶结构，分子链与球晶成正切方向，而不是沿着径向方向。聚合物单晶一般在稀溶液情况下才能生成。目前，主导聚合物结晶成核的Lauritzen-Hoffman（LH）<sup>[13]</sup>经典理论受到了质疑<sup>[14-19]</sup>，几种新的结晶理论和概念已被提出<sup>[7, 8, 20, 21]</sup>，并引起人们广泛关注，但争论尚在进行中，要被人们广泛接受尚需时日。有关聚合物加工条件（温度、压力、应力形变等）如何影响产品结构性能仍缺乏从工艺理论设计的定量描述。

本书中指出：结晶（crystallization）包含着高分子从不同始态形成高分子晶体的过程（crystallization procedure），内容可以包括高分子结晶成核、生长、终止等热力学和动力学过程。而结构（structures）或晶体结构（structures of crystal）更强调的是研究晶体内部原子、分子、离子等（对高分子而言，即链段或结晶基