

[德] G.W. 埃伦斯坦 (Gottfried W. Ehrenstein)

张萍 赵树高 译

聚合物材料

—— 结构 · 性能 · 应用

Polymeric Materials

Structure - Properties - Applications



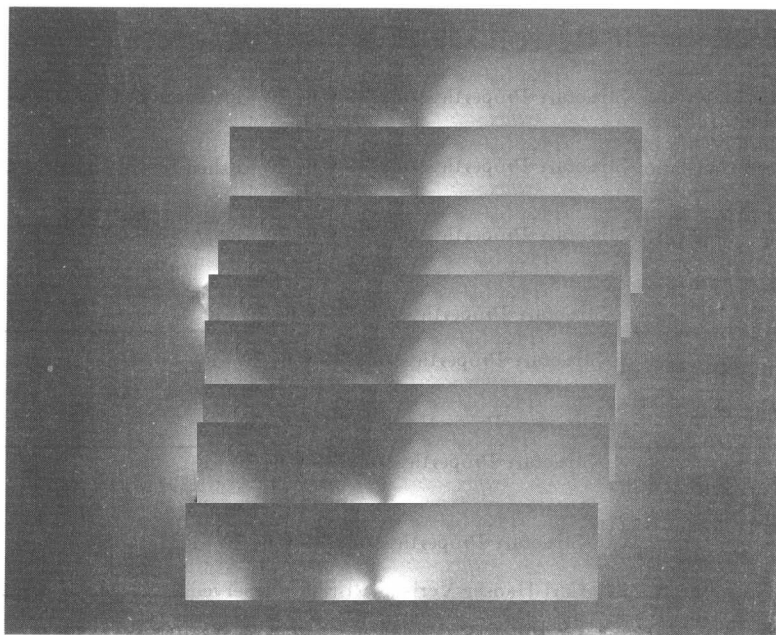
化学工业出版社

聚合物材料

——结构·性能·应用

[德] G. W. 埃伦斯坦 (Gottfried W. Ehrenstein)

张 萍 赵树高 译



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书自问世以来,曾先后出版了德语版、英语版、法语版和西班牙语版,书中以聚合物材料的结构、性能、加工、应用为主线,以工程实践为依托,探讨了各因素之间的相互关联和相互制约关系。内容主要包括聚合物材料的结构、常规性能、力学性能、热机械性能、老化性能等,书中大量引用了具有国际水平的科技和工程专家的研究成果,实践性、指导性较强。

本书除了适合从事聚合物材料研究的工程技术人员参考外,还可作为本科生、研究生教材或教学参考书来使用。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物材料——结构·性能·应用/[德]埃伦斯坦(Ehrenstein, G. W.); 张萍, 赵树高译. —北京: 化学工业出版社, 2007. 6

书名原文: Polymeric Materials——Structure-Properties-Applications
ISBN 978-7-122-00352-2

I. 聚… II. ①埃…②张…③赵… III. 高分子材料-研究 IV. TB324

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第059253号

Polymeric Materials; Structure-Properties-Applications/by Gottfried W. Ehrenstein
ISBN 3-446-21461-5

Copyright © 2001 by Carl Hanser Verlag. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Carl Hanser Verlag.

本书中文简体字版由 Carl Hanser Verlag 授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-0963

责任编辑: 宋向雁 赵卫娟

装帧设计: 潘 峰

责任校对: 凌亚男

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张15½ 字数282千字 2007年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

译者前言

人类社会进入 21 世纪后, 聚合物即高分子材料的广泛应用已成为当代文明的重要标志之一。然而, 伴随人类社会数百万年的演变, 如果说传统的金属和无机非金属材料科学技术已经成长为参天大树, 那么聚合物材料科学及其工业化应用不啻幼苗新蕾。正因为如此, 近年来, 这一新兴材料领域生机勃勃, 有关的新理论、新材料、新工艺、新产品的探索方兴未艾, 论述和介绍最新学术和技术成就的专著不时涌现。作为一名高分子科学与工程专业的科技工作者, 译者时刻关注本专业领域的每一项新进展, 喜好专业新书则是多年的职业习惯, 而与本书更有一段职业生涯中的不解之缘。

当初我们在课堂聆听老师传授高分子化学、高分子物理、聚合物结构与性能等专业基础知识, 面对一连串全新的抽象概念和复杂理论, 似乎难以马上与我们日常生活中随处可见的塑料、橡胶、纤维制品建立起有机的联系。只有当有了一定的实际工作经历以后, 才真正感受到聚合物材料从科学概念到实际应用之间的巨大跨度, 才深刻认识到聚合物材料的结构、性能、加工和应用之间多因素交叉制约的复杂性, 由此也激励着我们以极大的热情去探讨其中的无穷奥妙。1990 年, 赵树高教授在德国埃尔兰根-纽伦堡大学高分子材料工程研究所 (LKT, Institute of Polymer Technology, Universität Erlangen-Nürnberg) 聆听 Ehrenstein 教授 (原著作者) 的讲座“聚合物材料结构与性能——加工与应用”, 听毕耳目为之一新。这是当时 Ehrenstein 教授为该校材料学和机械工程专业高年级研究生开设的专业基础讲座, 课程内容以聚合物材料的结构-性能-加工-应用为主线, 以工程实践为依托, 针对各因素之间的相互关联、相互制约规律, 论述深入浅出, 简明扼要, 工程特色鲜明, 实践性强。尤其难能可贵的是, 讲授内容大量引用了本研究所或其他来源的最新科研成果, 基础理论密切联系工程实际, 内容构思和编排思路独树一帜。后来德国 Hanser 出版社出版了以该讲座讲义为基本架构的《聚合物材料》(即本书的德语版)。近年来, 本书又先后出版了英语版、法语版以及西班牙语版, 其内容也随着时间的变迁不断更新, 其中英语版 2001 年获美国优秀学术选题奖。至今成为 Ehrenstein 教授众多著作中读者最多的一本。

鉴于本书的上述特色, 对比目前国内高分子材料领域林林总总的教材和专著, 我们感到有必要把本书介绍给国内读者, 以期给从事聚合物材料科学与工程

研究的同仁们带来些许借鉴或有益的启发。在此期间，本书译者之一张萍教授在给青岛科技大学高分子材料与工程专业讲授高分子物理的过程中，试探性地引用了本书中的部分资料，结果深受学生好评，这也进一步增强了将本书译成中文的信心。译者在 2004 年回 Erlangen 大学 LKT 短期工作期间，向 Ehrenstein 教授表达了我們翻译此书的想法，并得到他的支持。

在本书中译本的成书过程中，得到了青岛科技大学高分子科学与工程学院于广水、程俊梅和翟俊学等同事的热情帮助，在此致以衷心感谢！

一度误以为将外文著作翻译成我们的母语应该易于自主撰写，然而一旦着手，尽管我们两位译者协力，又有英语版和德语版相互参照，却每每因为难以准确理解和令人满意的表达原义而煞费苦心。此时尤其痛感自己语言水平和专业知识的不足，同时也更对那些翻译大师们精彩的传世之作由衷的感佩。值此译稿交付出版之际，面对其中的不妥之处，歉疚之余，谨乞读者赐教。

张 萍 赵树高

2007 年 4 月

于青岛科技大学

中译本前言

聚合物材料是科学研究和工业开发的综合成果，也是一类成长最快的工业材料。聚合物材料的化学结构一般来说简明易懂，但是其性能却与材料内部的化学、物理作用、大分子的链状结构、各种各样改性处理及其成型加工过程密切相关；而且在制件设计过程中还必须考虑到材料复杂的力学特性。没有哪一类重要的材料像聚合物材料这样，其最终制件的性能如此强烈地依赖于材料本体性能、成型加工过程及其状态。

因此，一本关于聚合物材料的专著就不能不以材料的加工和应用为背景而展开论述。当然，若使这类材料得到成功的应用，前提则是充分掌握有关聚合物材料结构与性能的专业知识。我的中国朋友，也是我在爱尔兰根-纽伦堡大学高分子材料工程研究所的同事赵树高教授和张萍教授，曾给我提出过许多有益的重要建议，对此我十分高兴并心存感激，本书中文版的出版就是一个例证。



Gottfride W. 埃伦斯坦
教授，工学博士，名誉博士
2007 年 4 月
爱尔兰根

前 言

《聚合物材料——结构·性能·应用》一书是作者在塑料材料领域多年来工程实践和应用研究的工作积累。要使塑料作为一种工程材料得到成功的应用，首先就要认识其性能。历史证明，塑料材料的应用及其产品的数量一度达到不可思议的高水平，而且这种工程材料的超常规发展预计将来还会持续下去。聚合物材料之所以能在需要的场合得到创新性的工业化应用，归因于在制件设计技术、加工成型技术以及加工条件对材料性能影响的评价等方面的技术进步。没有哪一种工程材料像塑料这样其使用性能与加工技术和制件设计如此密切相关。因此，面对大量的有关信息，例如实践经验、感性知识以及为促进技术进步而进行的新的科学探索等，这样一本关于聚合物材料的科学著作必须保持各种知识分布的适当平衡。

在本书成书期间，不少同事给予了热情帮助，谨向他们表示衷心感谢。其中要特别感谢的是，Josef Kabelka 教授帮助撰写了关于填充与增强材料以及多轴加载等几节的内容；Richard P. Theriault 博士对撰写本书提出了许多重要建议，收集了基础资料，并完成了本书第 1、2、5、6 和 8 章的翻译工作；Ed. Immergut 博士翻译了本书其余章节，并审阅和校对了全书；Fabiene Montagne 博士筹备了本书的法文版；A. Wilhelm Neumann 教授和理学硕士 Norbert Müller 先生也对本书提出了重要意见。我还要感谢 Gabriela Riedel 和 Pia Trawiel 两位女士，她们为本书的出版提供了卓越的后勤和组织保障。

本书历经数年成书，信息来源复杂多样，其中既包括科技和工程专家们的实际工作成果，也引用了各种文献资料。本书希望能向读者就聚合物材料的结构、加工和应用之间的相互关系提供一个简明的概括。当然，要充分了解本学科的基本内容，仅凭一本教科书难以包罗全部重要的细节，因此书末还给出了相关的补充参考文献。

Gottfried W. Ehrenstein

专用符号

常用度量

A_{surf}	表面积	mm^2, m^2
A_{xsec}	横截面积	mm^2, m^2
V	体积	mm^3, m^3
d	直径	$\mu\text{m}, \text{nm}, \text{mm}$
f	频率	$1/\text{s}, \text{Hz}$
k	热导率	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$
L	长度	$\mu\text{m}, \text{mm}$
m	质量	g, kg
n, j	流水号	-
p	压力	$\text{bar}, \text{MPa}, \text{N}/\text{mm}^2$
r	半径	$\mu\text{m}, \text{nm}, \text{mm}$
t	时间	$\text{s}, \text{min}, \text{h}, \text{d}$
t'	加载时间	$\text{s}, \text{min}, \text{h}, \text{d}$
v_{H}	加热速率	$^{\circ}\text{C}/\text{min}, \text{K}/\text{min}$
v_{K}	冷却速率	$^{\circ}\text{C}/\text{min}, \text{K}/\text{min}$
v_{x}	流动速率	$\text{m}/\text{s}, \text{mm}/\text{s}, \text{mm}/\text{min}$
v	速度	$\text{m}/\text{s}, \text{mm}/\text{s}, \text{mm}/\text{min}$
ΔL	长度变化	$\mu\text{m}, \text{mm}$
$\alpha(T)$	局部热膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}, \text{K}^{-1},$ $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}), \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$\bar{\alpha}(\Delta T)$	平均热膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}, \text{K}^{-1},$ $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}), \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$
β	热体积膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}, \text{K}^{-1}$
ν	比容	cm^3/g
ρ	密度	g/cm^3
ρ_{e}	电阻率	$\Omega \cdot \text{cm}$
τ	松弛时间	$\text{s}, \text{min}, \text{h}, \text{d}$
φ	填料/纤维体积分数	%
Ψ	填料/纤维质量分数	%
ω_{t}	角速度	$1/\text{s}^2$

温度

T	温度	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_0	基准温度	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
T_{M}	熔融温度	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$

T_E	环境温度	$^{\circ}\text{C}$, K
ΔT	温度差	$^{\circ}\text{C}$, K
T_g	玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{mg}	中点温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{ig}	初始温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{eig}	外推初始温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{fg}	结束温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{efg}	外推结束温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{GA}	根据 2% 偏移量确定的玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_w	根据切线法确定的玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{g^0}	完全未固化热固性树脂的玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
$T_{g_{gel}}$	固化的热固性树脂的玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
$T_{g^{\infty}}$	热固性树脂的最大玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_m	熔融温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_m^0	平衡熔融温度	$^{\circ}\text{C}$, K
$T_{m(p)}$	压力决定的熔融温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{im}	初始熔融温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{eim}	外推初始熔融温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{pm}	熔融峰温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{fm}	熔融结束温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{efm}	外推熔融结束温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_c	结晶温度	$^{\circ}\text{C}$, K
T_{vcmax}	最大结晶速度的温度	$^{\circ}\text{C}$, K

能量学量度

K	结晶度	$\%$, -
K_w	质量结晶度	$\%$, -
K_v	体积结晶度	$\%$, -
K_{crit}	临界成核尺寸	nm^3
K_{η}	聚合物相关常数	-
L_m	长周期	nm , μm
L_k	折叠链微晶区域	nm
L_a	折叠链微晶间的无定形区域	nm
$\overline{M}_n$	数均分子量	g/mol
$\overline{M}_w$	重均分子量	g/mol
P	聚合度	-
W_R	开裂能	Ws , J, $\text{N} \cdot \text{m}$
W_{el}	弹性能	Ws , J, $\text{N} \cdot \text{m}$
W_D	破坏能	Ws , J, $\text{N} \cdot \text{m}$

W_{tot}	总断裂能	$W_s, J, N \cdot m$
a	溶剂相关参数	-
c_p	比热容	$J/g \cdot K, J/(g \cdot ^\circ C)$
L_{crit}	临界纤维长度	mm
ΔG	自由焓变化	$J, J/g$
ΔH	焓变	$J, J/g$
ΔS	熵变	$J/K, J/^\circ C$
ΔU	内能变化	$J, kJ/mol$
γ_{mn}	熔体和晶核间界面张力	$mJ/mm^2, mN/m$

下标

a	无定形
c	结晶
g	玻璃化转变
k	结晶
m	熔融

力学尺度

A	磨损, 磨蚀	g
A_1-A_6	刚性系数	MPa^{-1} 或 MPa^{-2}
E	弹性模量/E-模量	$MPa, N/mm^2$
E^*, G^*	复合 E-模量, G-模量	$MPa, N/mm^2$
E', G'	贮能模量 (实数部分)	$MPa, N/mm^2$
E'', G''	损耗模量 (虚线部分)	$MPa, N/mm^2$
E_C	蠕变模量	$MPa, N/mm^2$
E_K	晶粒模量	$MPa, N/mm^2$
E_M	宏观基体模量	$MPa, N/mm^2$
E_S	正割模量	$MPa, N/mm^2$
E_T	正切模量	$MPa, N/mm^2$
F	力	N
F_S	收缩力	N
F_{S-RT}	冷却到室温的收缩力	N
F_{S-W}	加热引起的收缩力	N
F_S	初始开裂的力	N
G	剪切模量	$MPa, N/mm^2$
L, Q, T	正交轴 (纤维增强)	-
M	弯曲力矩	$N \cdot m$
R_z	平均粗糙度	μm
W	惯性力矩	mm^3

a_n	冲击强度	$\text{kJ/m}^2, \text{N} \cdot \text{mm/mm}^2$
a_k	缺口冲击强度	$\text{kJ/m}^2, \text{N} \cdot \text{mm/mm}^2$
f	摩擦系数	-
f_ϵ	膨胀部分	%
L_s	初始开裂形变	%
m	压缩/拉伸强度比率	-
$\tan\delta$	损耗角正切	-
$\dot{\gamma}$	剪切速率	$1/\text{s}$
δ	相位角	$^\circ, \text{rad}$
ϵ	应变/形变	%, $\mu\text{m}, \text{mm}$
ϵ_f	断裂应变/形变	%, $\mu\text{m}, \text{mm}$
ϵ_Y	屈服应变/形变	%, $\mu\text{m}, \text{mm}$
ϵ'	非弹性形变部分	%
η	黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
μ	泊松比	-
σ	应力	$\text{MPa}, \text{N/mm}^2$
σ_f	断裂应力	$\text{MPa}, \text{N/mm}^2$
σ_Y	屈服应力	$\text{MPa}, \text{N/mm}^2$
τ	剪切应力	$\text{MPa}, \text{N/mm}^2$

角标

A	振幅
B	弯曲载荷
C	蠕变
C	压缩载荷
F	断裂
F	纤维
M	基体
S	剪切
T	拉伸
T	拉伸载荷
V	参考
Y	拉伸, 屈服
axi	轴向
bs	界面
in	内部
ind	个体
lv	线性黏弹性
max	最大的

out	表面
rad	径向
rec	恢复
rel	松弛
sct	割线
tan	切线
tot	全部的
v	黏性的
$x\%$	加 $x\%$ 载荷
0	弹性的
-	平均值
	与链、纤维和加工方向平行
⊥	与链、纤维和加工方向垂直

聚合物名称缩写

ABS	丙烯腈/聚丁二烯/苯乙烯接枝物
A(N)	丙烯腈
ASA	丙烯腈/苯乙烯/丙烯酸酯接枝聚合物
B	丁二烯
BR	顺丁橡胶
CA	乙酸纤维素
CAB	乙酸丁酸纤维素
COC	环烯共聚物
EP	环氧树脂
EPDM	乙丙橡胶
EPS	发泡聚苯乙烯
EVAC	乙烯/乙酸乙烯酯塑料
LCP	液晶聚合物
MF	三聚氰胺/甲醛
mPE	金属催化聚乙烯
NR	天然橡胶
PA	聚酰胺
PA 46	聚酰胺 46
PA 6	聚酰胺 6
PA 610	聚酰胺 610
PA 66	聚酰胺 66
PA 6-GF	玻璃纤维增强聚酰胺 6
PA 66/6	聚酰胺 66/6
PA 6-3-T	聚酰胺 6-3-T
PAI	聚酰亚胺

PAN	聚丙烯腈
PAR	聚丙烯酸酯
PB	聚丁烯
PBI	聚苯并咪唑
PBT	聚对苯二甲酸丁二醇酯
PBT+PC	聚对苯二甲酸丁二醇酯+聚碳酸酯
PBT-GF	玻璃纤维增强聚对苯二甲酸丁二醇酯
PC	聚碳酸酯
PC+ABS	聚碳酸酯+丙烯腈/聚丁二烯/苯乙烯接枝共聚物
PE	聚乙烯
PE-LD	低密度聚乙烯
PE-LLD	线性低密度聚乙烯
PE-HD	高密度聚乙烯
PE-UHMW	超高分子量聚乙烯
PEEK	聚醚醚酮
PEI	聚醚酰亚胺
PEK	聚醚酮
PES	聚醚砜
PET	聚对苯二甲酸乙二醇酯
PF	酚醛树脂
PI	聚酰亚胺
PIB	聚异丁烯
PMMA	聚甲基丙烯酸甲酯
POM	聚甲醛
PP	聚丙烯
PPE	聚苯醚
PP-GF	玻璃纤维增强聚丙烯
PPO+PS	聚苯醚/聚苯乙烯共混物
PPS	聚苯硫醚
PPSU	聚苯砜
PS	聚苯乙烯
PS-HI	高抗冲聚苯乙烯
PS-S	间规聚苯乙烯
PS-I	抗冲聚苯乙烯
PSU	聚砜
PTFE	聚四氟乙烯
PUR	聚氨酯
PVC	聚氯乙烯
E-PVC	乳液法聚氯乙烯
S-PVC	悬浮法聚氯乙烯

PVAC	聚乙酸乙烯酯
PVDF	聚偏二氟乙烯
S	苯乙烯
SAN	苯乙烯-丙烯腈共聚物
SB	苯乙烯-丁二烯共聚物
SEBS	苯乙烯-乙烯/丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物
SI	聚硅氧烷
TPE	热塑性弹性体
TPO	烯烃类热塑性弹性体
TPU	热塑性聚氨酯弹性体
UF	脲醛聚合物
UP	不饱和聚酯
VE	乙烯酯基树脂

增塑剂

DIDA	己二酸二异癸酯
DIDP	邻苯二甲酸二异癸酯
DOP	邻苯二甲酸二辛酯
DOS	癸二酸二辛酯
TCP	磷酸三甲苯酯

低分子量物质的化学结构

Ar	氩气
CaCO ₃	碳酸钙
CCl ₄	四氯化碳
CH ₄	甲烷
CO ₂	二氧化碳
H ₂ O	水
H ₂ SO ₄	硫酸
HCl	盐酸
HCN	氢氰酸
HNO ₃	硝酸
KMnO ₄	高锰酸钾
N ₂	氮气

其他缩写

A-Fiber	芳纶纤维
CAMPUS	计算机辅助材料预选统一标准
C-Fiber	碳纤维

DMA	动态力学分析（模量作为温度的函数）
DSC	差示扫描量热法
E-glass	E 玻璃纤维
E-modulus	弹性模量
Fb	纤维破坏
GF	玻璃纤维
G-fiber	玻璃纤维
G-modulus	剪切模量
GMT	玻璃毡热塑性塑料
GTI	一般温度系数
HALS	受阻胺类光稳定剂
HTS	高拉伸强度
HT	高拉伸
HM	高模量
HMH-criteria	HMH 破坏临界值
Mass-%	质量分数
MFR	熔体流动速率
OIT	氧化诱导时间/温度（热氧化降解起始点）
RTI	相对温度指数
SEM	扫描电子显微镜
SMC	片状模压材料
std	标准条件（23℃，50％相对湿度）
sat	饱和的
TEM	透射扫描电镜
TEP	耐热材料
TI	温度指数
TMA	热机械分析（热膨胀系数）
UD	单向的（例如纤维取向）
UL	美国保险业研究室
Vol.-%	体积分数
Wt-%	质量分数

目 录

第 1 章 聚合物材料的经济地位——市场概论	1
1.1 材料性能的提高	6
1.2 新型成型加工技术开发	8
1.3 科技知识的推广与提升	8
1.4 价格趋向	8
1.5 聚合物材料在各行业中的应用进展	9
第 2 章 聚合物材料的常规性能	12
2.1 结构原理	12
2.1.1 热塑性塑料	13
2.1.2 热固性塑料	14
2.1.3 弹性体	15
2.1.4 热塑性弹性体	15
2.2 聚合物材料的力学状态和转变区域	15
2.3 形变特性	19
参考文献	21
第 3 章 聚合物的分子结构与合成	22
3.1 大分子结构	22
3.2 主价键和次价键	26
3.2.1 主价键	27
3.2.2 次价键	28
3.3 聚合反应——从单体到聚合物	31
3.3.1 链式聚合反应	34
3.3.2 逐步聚合反应	36
3.3.3 聚合方法	39
3.3.4 链式聚合反应和逐步聚合反应的对比	42
3.3.5 分子量	42
第 4 章 聚合物材料的聚集态结构	50
4.1 均质聚合物材料	50

4.1.1 无定形状态	50
4.1.2 结晶状态	52
4.1.3 交联聚合物材料	76
4.2 非均相聚合物材料	81
4.2.1 橡胶改性苯乙烯聚合物	82
4.2.2 增塑作用	92
4.3 非均相复合材料	95
4.3.1 纤维增强复合材料	95
4.3.2 填充体和增强体 (与 J Kabelka 教授合作)	100
4.3.3 纳米复合材料	114
4.3.4 导电复合材料	115
参考文献	116
第 5 章 热机械性能	117
5.1 玻璃态或能弹性区域	119
5.2 橡胶态或熵弹性区域	122
5.3 玻璃化转变区域	125
5.4 流动区域	128
5.5 软化温度和熔融温度对分子结构的依赖性	130
参考文献	135
第 6 章 力学性能	136
6.1 常规形变性能	136
6.1.1 力学性能	138
6.1.2 长期形变性能	156
6.1.3 非线性形变特性	160
6.1.4 多轴向负载 (与 Kabelka 教授合作)	167
6.2 取向与残余应力	175
6.2.1 取向	175
6.2.2 残余应力	181
参考文献	186
第 7 章 老化与稳定化	188
7.1 老化	188
7.2 热暴露	190
7.2.1 热变形温度	190
7.2.2 耐热性	191
7.2.3 温度-时间极限	192