

---

# 塑料薄膜加工技术

[日] Toshitaka kanai

[美] Gregory A. Campbell

王建伟 孙小青 左秀琴 译

---



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

# 塑料薄膜加工技术

[日] Toshitaka Kanai

[美] Gregory A. Campbell

王建伟 孙小青 左秀琴 译

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

塑料薄膜加工技术/[日]敏隆叶,[美]坎贝尔著;  
王建伟,孙小青,左秀琴译.北京:化学工业出版社,  
2003.9

书名原文: Film Processing

ISBN 7-5025-4693-6

I. 塑… II. ①敏… ②坎… ③王… ④孙… ⑤左…  
III. 塑料薄膜-加工 IV. TQ320.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 061450 号

Film Processing/by Toshitaka Kanai, Gregory A. Campbell  
ISBN 3-446-17882-1

Copyright© by Carl Hanser All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版由 Carl Hanser 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。

未经出版者许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-0630

---

### 塑料薄膜加工技术

[日] Toshitaka Kanai [美] Gregory A. Campbell

王建伟 孙小青 左秀琴 译

责任编辑: 龚浏澄 邢涛

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘峰

\*

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) 64982530

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 13½ 字数 360 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4693-6/TQ·1786

定 价: 30.00 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

## 原书作者

Cakmak, Prof. M. , Polymer Engineering Center, College of Polymer Eng. & Sci. , University of Akron, Akron, OH 44325, USA

Campbell, Prof. C. A. , Department of Chemical Engineering, Clarkson University, Potsdam, New York 13676, USA

Finch, Ph. D. C. R. , 1280 E. Chippewa River Rd. , Midland, Michigan 48640, USA

Ishihara, Dr. H. , Film Research Laboratory, Toyobo Co. , Ltd, 2-1-1 Katata, Otsu, Shiga 520-02, Japan

Kanai, Dr. T. , Polymer Research Laboratory, Idemitsu Petrochemical Co. Ltd. , 1-1 Anesaki-kaigan, Ichihara, Chiba, 299-01 Japan

Miki, Mr. T. , Nagoya Research Laboratory, Mitsubishi Heavy Industries Ltd. , Iwatsuka-cho, Nakamura-ku, Nagoya 453 Japan

Nonomura, Mr. S. , Katata Research Institute, Toyobo Co. , Ltd. , 2-1-1 Katata, Ohtsu, Shiga 520-02 Japan

Perdikoulis, Dr. J. , Compuplast Canada Inc. , Mississauga, Ontario L5M 5A7, Canada Predöhl, Prof. Ing. W. , Krupp Corpoplast, Maschinenbau GmbH, 22145 Hamburg, Germany Takashige, Mr. M. , Packaging Products R&D Center, Idemitsu Petrochemical Co. , Ltd. , 841-3 Kou, Shira-hama-cho, Himeji, Hyogo 672 Japan

Takeuchi, Mr. N. , Nagoya Research Laboratory, Mitsubishi Heavy Industries Ltd. , Iwatsukacho, Nakamura-ku, Nagoya 453 Japan

Tobita, Mr. K. , Plastics & Textile Machinery Dept. , Nagoya Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries Ltd. , Iwatsuka-cho, Nakamura-ku, Nagoya 453 Japan

Tsunashima, Dr. K. , Film Research Laboratory, Toray Industries Inc. , 1-1-1 Sonayama, Otsushi City, Shiaga 520, Japan

Vlachopoulos, Prof. J. , Department of Chemical Engineering,

McMaster University, Hamilton, Ontario, L8S 4L7, Canada

White, Prof. J. L., Polymer Engineering Center, College of Polymer  
Eng. & Sci., University of Akron, Akron, OH 44325, USA

Yamada, Prof. T., Dept. of Chemistry and Chemical Engineering, Fac-  
ulty of Technology, Kanazawa University, 40-20 Kadatsuno 2-chome, Kana-  
zawa, Ishihawa 920, Japan

## 前 言

当前，聚合物薄膜行业正发生着重大的转变，薄膜的基础树脂从仅仅依赖于常用树脂发展到使用应用范围更明确的原料和生产工艺。就树脂方面而言，现在已经开发出了茂金属催化的聚合物，且聚合物的结构现在可以改造得有助于改进和完善薄膜的工艺设计。工程塑料，例如聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET），聚碳酸酯和聚酰胺已经成为当前广泛使用的树脂，满足了薄膜对高温的要求。取向聚丙烯和取向PET薄膜生产的线速度每分钟可达到400m。另外，用拉幅机生产结晶聚苯乙烯的技术也得到工业开发。高速生产和采用替代原料方面取得的成绩随着机器设备的不断更新，聚合物原料性能的改善和加工技术的优化而得到提高。未来需要更复杂的多层的薄膜用于各种包装用膜，我们必须设计出更加复杂的模具和控制系统以保持所要求的薄膜厚度和成分。

这本书想要阐述在以往聚合物加工文献中没有记载过的信息。在我们努力对聚合物的基本原理和薄膜从业人员的实际需求进行了解的时候，我们发现，在聚合物薄膜的生产和评价方面没有精简的科技文献供参考。我们尽力为聚合物薄膜加工的业内人士提供一本书籍，在本书的作者们完成这本书时将成为了解薄膜的生产技术和理论状况的起点。

在聚合物加工的工业化生产技术中，薄膜挤出工艺是最普通的工艺技术之一，使所生产的薄膜产品广泛地用于我们的日常生活。近年来，由于其他材料的竞争，薄膜生产的经济要素已使薄膜的生产移向有更高效率的方向；要求有高速生产线，可重复生产出高质量的薄膜以减少成本，获得高附加值。经济促进技术发展的例子有：生产超薄电容器用薄膜、非常薄并且要求尺寸稳定性好的录像带膜、用于食品保鲜的多层膜。为了达到这些要求，我们必须具有

广泛的技术基础，不仅需要能左右薄膜工业的传统经验知识，而且还要对影响薄膜性能的化学、物理和工程学有基本的了解。这本书介绍给读者的专题有：聚合物的结构、聚合物的流变性能；从理论上分析了薄膜的加工工艺、结构和薄膜制品的形态；最后介绍了薄膜的物理性能。

遗憾的是此书不可能包容所有的有关薄膜挤出的科学和技术。这本书介绍了下述专题：挤出模头的设计和分析、吹膜工艺的理论和技术、流延薄膜工艺、多层薄膜技术；对拉幅机生产法和双膜泡管膜法两种双向拉伸薄膜的分析。我们首先呈现给读者的是关于薄膜挤出的工艺及生产情况的简要述评，然后向读者简要介绍薄膜工艺分析涉及的流变学，随后介绍的是平模头及环形模头设计。书中着重介绍了薄膜的双向拉伸工艺。我们在此书中所介绍的内容较在这方面的其他著作通常都有更详细的介绍。较详细讨论的专题中除了模头、薄膜的结构、薄膜的物理性能之外还有薄膜挤出的理论分析，以及这些专题之间的关系。薄膜生产技术所覆盖的范围广泛。

我们对所有编写这本书的作者所做的巨大努力表示感谢。在他们所论述的章节中汇入了他们在所从事的特殊技术领域中新和近开发的技术成果。在聚合物工艺方面，国际聚合物加工协会陆续出版了一系列丛书。在此我们要感谢丛书出版过程中做出贡献的编辑华伦·贝克教授。我们希望本书能够帮助读者对薄膜挤出方面有一个初步认识。通过每一章节的参考文献得到原始文献可以对薄膜挤出有更深入的了解，原始文献当然会有更深入的介绍，这在像本书这样的一本书中是不可能完全精述得到的。

**Toshitaka Kanai (Ichihara, 日本)**

**Gregory A. Campbell (Clarkson, 美国)**

## 译者前言

聚合物薄膜在塑料产品中名列前茅，因而可参考的文献相当多。《塑料薄膜加工技术》一书中介绍的内容就是在这之前聚合物加工文献中没有记载过的一些信息。阅读本书有助于我们了解 20 世纪末期在世界上围绕聚合物薄膜有关的聚合物基本原理、成型加工、所用设备及产品的一些新信息，掌握全世界的发展水平与动态。同时，每章节后还附有相当数量的参考文献，便于我们调查研究聚合物薄膜在全世界的发展趋势，发展我们自己的聚合物薄膜工业。

这本书的第 3 章由左秀琴翻译，王建伟校对；第 6 章由孙小青翻译，王建伟校对；其他各章节由王建伟翻译。在翻译中力求专业名词统一，但我国在这方面的术语译法也很不一致，且书中作者较多，表述用语也较丰富。

本书涉及很多较新技术内容，译者水平有限，错误难免，欢迎读者批评指正。

译者

2003 年 6 月



## 内 容 提 要

本书主要介绍有关塑料薄膜挤出的科学和技术。介绍了挤出模具设计、吹膜工艺理论和技术、流延薄膜工艺、多层薄膜技术、双向拉伸薄膜分析等内容。

本书力求对聚合物薄膜的生产和评价方面的知识全面系统地阐述，是从事薄膜加工的业内人士的实用参考书。

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>1 薄膜加工：综述和流变学基础</b> .....     | 1  |
| 1.1 引言 .....                     | 1  |
| 1.2 流延薄膜 .....                   | 1  |
| 1.3 吹塑薄膜 .....                   | 2  |
| 1.4 拉幅法 .....                    | 3  |
| 1.5 双膜泡法 .....                   | 4  |
| 1.6 本书内容 .....                   | 5  |
| 1.7 流变原理 .....                   | 5  |
| 1.7.1 剪切流变学 .....                | 6  |
| 1.7.2 拉伸流变学 .....                | 7  |
| 1.7.3 文献回顾 .....                 | 8  |
| 1.7.4 单向和双向流动 .....              | 10 |
| 参考文献 .....                       | 12 |
| <b>2 模头分析</b> .....              | 14 |
| 2.1 扁平模头分析 .....                 | 14 |
| 2.1.1 引言 .....                   | 14 |
| 2.1.2 模内简单流动 .....               | 14 |
| 2.1.2.1 圆管式模头 .....              | 14 |
| 2.1.2.2 平行板式模头 .....             | 16 |
| 2.1.2.3 不同形状的模头 .....            | 17 |
| 2.1.3 扁平模头的一维理论分析 .....          | 17 |
| 2.1.3.1 分析法和数字法 .....            | 19 |
| 2.1.3.2 数学式 .....                | 20 |
| 2.1.3.3 一维预测数据和实验结果的比较 .....     | 24 |
| 2.1.3.4 根据解析方程设计简单实用的衣架式模头 ..... | 26 |
| 2.1.4 扁平模头二维数字分析 .....           | 29 |
| 2.1.5 多层扁平模头 .....               | 35 |

|          |                              |           |
|----------|------------------------------|-----------|
| 2.1.5.1  | 供料头式模头 .....                 | 35        |
| 2.1.5.2  | 多集料管式模头 .....                | 36        |
|          | 参考文献 .....                   | 36        |
| 2.2      | 螺旋模头分析 .....                 | 37        |
| 2.2.1    | 引言 .....                     | 37        |
| 2.2.2    | 环隙流几何形状 .....                | 37        |
| 2.2.3    | 基本设计依据 .....                 | 41        |
| 2.2.4    | 数学模型 .....                   | 44        |
|          | 参考文献 .....                   | 53        |
| 2.3      | 薄膜厚度分布的模头控制 .....            | 54        |
| 2.3.1    | 引言 .....                     | 54        |
| 2.3.2    | 流延薄膜 .....                   | 55        |
| 2.3.2.1  | 厚度变化和薄膜质量 .....              | 55        |
| 2.3.2.2  | 厚度变化的形成 .....                | 55        |
| 2.3.2.3  | 薄膜厚度的影响 .....                | 56        |
| 2.3.2.4  | 活模唇的调节 .....                 | 56        |
| 2.3.2.5  | 控制系统和控制对策 .....              | 57        |
| 2.3.2.6  | 操作结果 .....                   | 57        |
| 2.3.2.7  | 多层薄膜 .....                   | 58        |
| 2.3.3    | 吹塑薄膜 .....                   | 58        |
| 2.3.3.1  | 厚度变化和薄膜质量 .....              | 58        |
| 2.3.3.2  | 厚度变化的形成 .....                | 59        |
| 2.3.3.3  | 对薄膜厚度的影响 .....               | 59        |
| 2.3.3.4  | 控制系统和控制对策 .....              | 64        |
| 2.3.3.5  | 操作结果 .....                   | 64        |
| 2.3.4    | 远景展望 .....                   | 66        |
|          | 参考文献 .....                   | 66        |
| <b>3</b> | <b>薄膜的性能 .....</b>           | <b>68</b> |
| 3.1      | 熔融聚合物挤出薄膜的动力学、热力学和结构进展 ..... | 68        |
| 3.1.1    | 引言 .....                     | 68        |
| 3.1.2    | 流变测量 .....                   | 69        |
| 3.1.2.1  | 剪切流动 .....                   | 69        |
| 3.1.2.2  | 拉伸流动 .....                   | 70        |

|            |                           |     |
|------------|---------------------------|-----|
| 3.1.3      | 局部动力学 .....               | 73  |
| 3.1.4      | 温度分布 .....                | 77  |
| 3.1.5      | 热传递 .....                 | 78  |
| 3.1.6      | 结晶速率 .....                | 82  |
| 3.1.7      | 理论分析 .....                | 84  |
| 3.1.8      | 无量纲分析 .....               | 86  |
| 3.1.9      | 模型预测 .....                | 88  |
| 3.1.10     | 高分子量 HDPE 管形薄膜的物理性能 ..... | 91  |
| 3.1.11     | 高分子量 HDPE 的按比例扩大 .....    | 95  |
| 3.1.12     | 加工性 .....                 | 102 |
| 参考文献 ..... |                           | 105 |
| 3.2        | 吹胀薄膜的运动学、动力学和物理性能 .....   | 106 |
| 3.2.1      | 引言 .....                  | 106 |
| 3.2.2      | 单相模型动力学 .....             | 108 |
| 3.2.2.1    | 黏性模型 .....                | 108 |
| 3.2.2.2    | 黏弹性模型 .....               | 110 |
| 3.2.2.3    | 冷固线以上部位的 Maxwell 模型 ..... | 111 |
| 3.2.2.4    | 其他文献的模型 .....             | 111 |
| 3.2.2.5    | 空气动力学 .....               | 113 |
| 3.2.3      | 液-固模型 .....               | 113 |
| 3.2.3.1    | 黏塑模型 .....                | 113 |
| 3.2.3.2    | 黏-塑-弹性模型 .....            | 114 |
| 3.2.3.3    | 两相液体模型 .....              | 115 |
| 3.2.3.4    | 两相结晶模型 .....              | 116 |
| 3.2.3.5    | 基本关系式 .....               | 117 |
| 3.2.3.6    | 能量平衡方程 .....              | 118 |
| 3.2.3.7    | 两相关系曲线 .....              | 119 |
| 3.2.3.8    | 液相厚度减少 .....              | 119 |
| 3.2.3.9    | 结晶相的形变 .....              | 120 |
| 3.2.3.10   | 数值图解 .....                | 120 |
| 3.2.4      | 吹胀薄膜的性能开发 .....           | 121 |
| 3.2.4.1    | 引言 .....                  | 121 |
| 3.2.4.2    | 理论 .....                  | 122 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 3.2.4.3 实验 .....                | 123        |
| 3.2.4.4 结果 .....                | 125        |
| 3.2.5 结束语 .....                 | 131        |
| 参考文献 .....                      | 132        |
| 3.3 膜泡的不稳定性: 实验评价 .....         | 133        |
| 3.3.1 引言 .....                  | 133        |
| 3.3.2 理论 .....                  | 135        |
| 3.3.3 定性实验分析 .....              | 136        |
| 3.3.4 定量稳定性分析 .....             | 137        |
| 3.3.4.1 设备 .....                | 137        |
| 3.3.4.2 膜泡稳定性直径分析 .....         | 140        |
| 3.3.4.3 材料和加工工艺敏感性的 ANOVA ..... | 142        |
| 3.3.4.4 图表分析 .....              | 144        |
| 3.3.4.5 傅里叶转变分析 .....           | 146        |
| 3.3.5 小结 .....                  | 146        |
| 参考文献 .....                      | 146        |
| 3.4 管形膜的光学性能和结构特性 .....         | 147        |
| 3.4.1 引言 .....                  | 147        |
| 3.4.2 基础知识 .....                | 148        |
| 3.4.2.1 结构特性 .....              | 148        |
| 3.4.2.2 电磁理论和光学特性 .....         | 148        |
| 3.4.2.3 介电理论 .....              | 152        |
| 3.4.2.4 取向 .....                | 153        |
| 3.4.2.5 表面与电磁波的相互作用 .....       | 156        |
| 3.4.3 测量方法 .....                | 158        |
| 3.4.3.1 结晶度的测量 .....            | 158        |
| 3.4.3.2 薄膜取向的测量 .....           | 160        |
| 3.4.3.3 雾度的测量 .....             | 161        |
| 3.4.4 玻璃化中的管状膜的取向发展 .....       | 162        |
| 3.4.5 结晶过程中管状膜的结构发展 .....       | 163        |
| 3.4.6 雾度的机理 .....               | 167        |
| 参考文献 .....                      | 169        |
| <b>4 薄膜流延性能分析 .....</b>         | <b>174</b> |

|          |                                      |            |
|----------|--------------------------------------|------------|
| 4.1      | 薄膜流延时形变的理论分析 .....                   | 174        |
| 4.1.1    | 引言 .....                             | 174        |
| 4.1.2    | 在稳定状态下薄膜形变的分析 .....                  | 175        |
| 4.1.2.1  | 垂直流延模型 .....                         | 175        |
| 4.1.2.2  | 松垂流延模型 .....                         | 177        |
| 4.1.3    | 薄膜温度的分析 .....                        | 185        |
| 4.1.3.1  | Michaeli 和 Menges 介绍的挤出材料冷却的模型 ..... | 185        |
| 4.1.3.2  | Billon 等人介绍的流延薄膜在骤冷辊筒上冷却的模型 .....    | 189        |
| 4.1.4    | 缩幅现象和卷边现象的分析 .....                   | 191        |
| 4.1.4.1  | 缩幅现象 .....                           | 191        |
| 4.1.4.2  | 卷边现象 .....                           | 193        |
| 4.1.5    | 加工因素对薄膜性能的影响 .....                   | 198        |
| 4.1.6    | 结束语 .....                            | 200        |
|          | 参考文献 .....                           | 200        |
| 4.2      | 薄膜流延过程中牵伸共振不稳定性的分析 .....             | 202        |
| 4.2.1    | 引言 .....                             | 202        |
| 4.2.2    | 薄膜工业中问题的关键 .....                     | 203        |
| 4.2.3    | 牛顿流体的牵伸共振 .....                      | 204        |
| 4.2.4    | 非牛顿流体的牵伸共振 .....                     | 208        |
| 4.2.4.1  | 幂律流体 .....                           | 208        |
| 4.2.4.2  | 黏弹流体 .....                           | 211        |
| 4.2.5    | 牵伸共振的机理 .....                        | 214        |
| 4.2.6    | 结论 .....                             | 216        |
|          | 参考文献 .....                           | 216        |
| <b>5</b> | <b>多层薄膜 .....</b>                    | <b>218</b> |
| 5.1      | 引言 .....                             | 218        |
| 5.2      | 单层流延薄膜挤出 .....                       | 218        |
| 5.3      | 单层吹塑薄膜挤出 .....                       | 219        |
| 5.4      | 流延膜/片的共挤出 .....                      | 220        |
| 5.5      | 共挤出供料头和集料管式模头 .....                  | 221        |
| 5.6      | 软(质)流延薄膜的共挤出 .....                   | 228        |
| 5.7      | 吹塑薄膜的共挤出 .....                       | 229        |
| 5.8      | 共挤出设备要考虑的因素及辅助设备 .....               | 233        |

|          |                                  |            |
|----------|----------------------------------|------------|
| 5.8.1    | 共挤出用挤出机螺杆 .....                  | 233        |
| 5.8.2    | 共挤出用混合器 .....                    | 233        |
| 5.8.3    | 共挤出用齿轮泵 .....                    | 234        |
| 5.8.4    | 共挤出片材和薄膜用的厚度控制器 .....            | 235        |
| 5.8.5    | 共挤出工艺控制 .....                    | 235        |
| 5.9      | 共挤出涂覆与层合 .....                   | 236        |
| 5.10     | 结束语 .....                        | 237        |
|          | 参考文献 .....                       | 237        |
| <b>6</b> | <b>双向拉伸薄膜分析 .....</b>            | <b>239</b> |
| 6.1      | 双向拉伸薄膜 .....                     | 239        |
| 6.1.1    | 简介 .....                         | 239        |
| 6.1.2    | 拉幅机概述 .....                      | 239        |
| 6.1.3    | 聚合物处理 .....                      | 242        |
| 6.1.4    | 挤出工艺 .....                       | 243        |
| 6.1.4.1  | 单螺杆挤出机性能的改善 .....                | 244        |
| 6.1.4.2  | 用串联挤出机增加产量 .....                 | 246        |
| 6.1.5    | 过滤器和模头 .....                     | 248        |
| 6.1.6    | 流延工艺 .....                       | 252        |
| 6.1.7    | 拉伸及退火工艺 .....                    | 258        |
| 6.1.8    | 牵引和卷取过程 .....                    | 264        |
| 6.1.9    | 加工工艺控制 .....                     | 265        |
| 6.1.9.1  | 功能 .....                         | 265        |
| 6.1.9.2  | 特点 .....                         | 265        |
| 6.1.9.3  | 系统配置 .....                       | 266        |
| 6.1.9.4  | 薄膜厚度变化情况自动控制系统 .....             | 266        |
| 6.1.10   | 结束语 .....                        | 269        |
|          | 参考文献 .....                       | 269        |
| 6.2      | 加工条件对双向拉伸热塑性工程塑料结构及物理性能的影响 ..... | 270        |
| 6.2.1    | 聚酯的化学性质及其在加工中的重要性 .....          | 270        |
| 6.2.2    | PET 的固态相特征 .....                 | 270        |
| 6.2.3    | PET 薄膜技术 .....                   | 272        |
| 6.2.4    | 应力引发结晶化 .....                    | 273        |
| 6.2.5    | 结构随形变的变化 .....                   | 274        |

|         |                                     |     |
|---------|-------------------------------------|-----|
| 6.2.5.1 | $T_g$ 温度以下的 PET 拉伸 .....            | 274 |
| 6.2.5.2 | $T_g$ 温度以上的 PET 拉伸 .....            | 274 |
| 6.2.5.3 | 橡胶区域 PET 的形变行为及其与厚度均匀性的关系 ...       | 275 |
| 6.2.5.4 | 双向拉伸 PET 的结构和形态学 .....              | 276 |
| 6.2.5.5 | 退火对 PET 的影响 .....                   | 285 |
| 6.2.5.6 | 结晶性和热性能 .....                       | 286 |
| 6.2.5.7 | 由牵引和退火造成的构象变化 .....                 | 287 |
| 6.2.5.8 | 用小角度 X 射线 (SAXS) 研究拉伸和退火的 PET ..... | 289 |
| 6.2.6   | 动态和静态机械性能 .....                     | 295 |
| 6.2.6.1 | 动态机械性能 .....                        | 295 |
| 6.2.6.2 | 静态机械性能 .....                        | 295 |
| 6.2.6.3 | 单向拉伸薄膜 (宽度恒定) .....                 | 296 |
| 6.2.6.4 | 一步 (同时) 双向拉伸薄膜 .....                | 298 |
| 6.2.6.5 | 两步双向拉伸薄膜 .....                      | 298 |
| 6.2.6.6 | 长期蠕变行为 .....                        | 300 |
| 6.2.7   | 气体渗透性及形态 .....                      | 301 |
|         | 参考文献 .....                          | 302 |
| 6.3     | 双向拉伸薄膜的拉伸条件、取向及物理性能 .....           | 306 |
| 6.3.1   | 简介 .....                            | 306 |
| 6.3.2   | 薄膜制造工艺概况 .....                      | 307 |
| 6.3.3   | 分步拉伸 (LD→TD) .....                  | 309 |
| 6.3.3.1 | 流延 .....                            | 309 |
| 6.3.3.2 | 纵向拉伸 .....                          | 310 |
| 6.3.3.3 | 横向拉伸 .....                          | 313 |
| 6.3.3.4 | 热固化 .....                           | 313 |
| 6.3.4   | PET 薄膜的主要性能 .....                   | 315 |
| 6.3.4.1 | 机械性能 .....                          | 315 |
| 6.3.4.2 | 热性能 .....                           | 318 |
| 6.3.4.3 | 光学性能 .....                          | 319 |
| 6.3.4.4 | 耐化学药品性 .....                        | 321 |
| 6.3.4.5 | 电性能 .....                           | 322 |
| 6.3.5   | PET 薄膜的质量改善 .....                   | 322 |
| 6.3.5.1 | 弓曲现象 .....                          | 322 |



|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.3.5.2 | 热稳定性 .....                                | 327 |
| 6.3.5.3 | 厚度均匀性 .....                               | 327 |
| 6.3.5.4 | 拉伸薄膜 .....                                | 328 |
| 6.3.5.5 | 薄膜的薄化 .....                               | 332 |
| 参考文献    | .....                                     | 334 |
| 6.4     | 拉幅过程的理论分析 .....                           | 336 |
| 6.4.1   | 简介 .....                                  | 336 |
| 6.4.2   | 薄厚不均匀的薄橡胶薄膜伸长的数学模型 .....                  | 336 |
| 6.4.2.1 | 基本方程推导 .....                              | 336 |
| 6.4.2.2 | 橡胶薄膜伸长的数学分析 .....                         | 344 |
| 6.4.3   | 用有限元法 (FEM) 对薄膜伸长进行数学分析 .....             | 349 |
| 6.4.3.1 | 二维平面应力或应变问题的分析方法 .....                    | 349 |
| 6.4.3.2 | 在拉幅机中观察形变行为 .....                         | 355 |
| 6.4.3.3 | 拉幅机加工中弓曲现象的模拟 .....                       | 357 |
| 6.4.3.4 | 拉伸测试的有限元法 (FEM) 模拟 .....                  | 362 |
| 参考文献    | .....                                     | 369 |
| 7       | 双膜泡管形薄膜 .....                             | 370 |
| 7.1     | 双膜泡管形吹塑薄膜加工系统和应力推导的理论分析和<br>按比例放大规则 ..... | 370 |
| 7.1.1   | 引言 .....                                  | 370 |
| 7.1.2   | 技术发展趋势和典型的应用 .....                        | 371 |
| 7.1.3   | 实验和理论背景情况 .....                           | 372 |
| 7.1.3.1 | 双膜泡管形吹塑薄膜加工概述 .....                       | 372 |
| 7.1.3.2 | 加工条件和薄膜拉伸应力之间的关系 .....                    | 373 |
| 7.1.3.3 | 双膜泡管形吹塑薄膜加工的按比例放大规则 .....                 | 373 |
| 7.1.4   | 结果与讨论 .....                               | 374 |
| 7.1.5   | 关于非结晶性树脂 (PS) 的适用性 .....                  | 382 |
| 7.1.6   | 薄膜拉伸加工及其物理性能 (同时拉伸与多级拉伸) .....            | 383 |
| 7.1.7   | 热定形技术 (生产收缩薄膜) .....                      | 386 |
| 7.1.8   | 双膜泡管形膜双轴拉伸法辅助技术的发展 .....                  | 388 |
| 7.1.9   | 双膜泡管膜双轴拉伸的未来发展方向 .....                    | 389 |
| 7.1.9.1 | 多层膜拉伸法 .....                              | 389 |
| 7.1.9.2 | 共混物膜拉伸技术 .....                            | 391 |