

Polymer Mixing
Technology and Engineering

聚合物混炼 技术与工程

詹姆斯 L. 怀特 (James L. White)

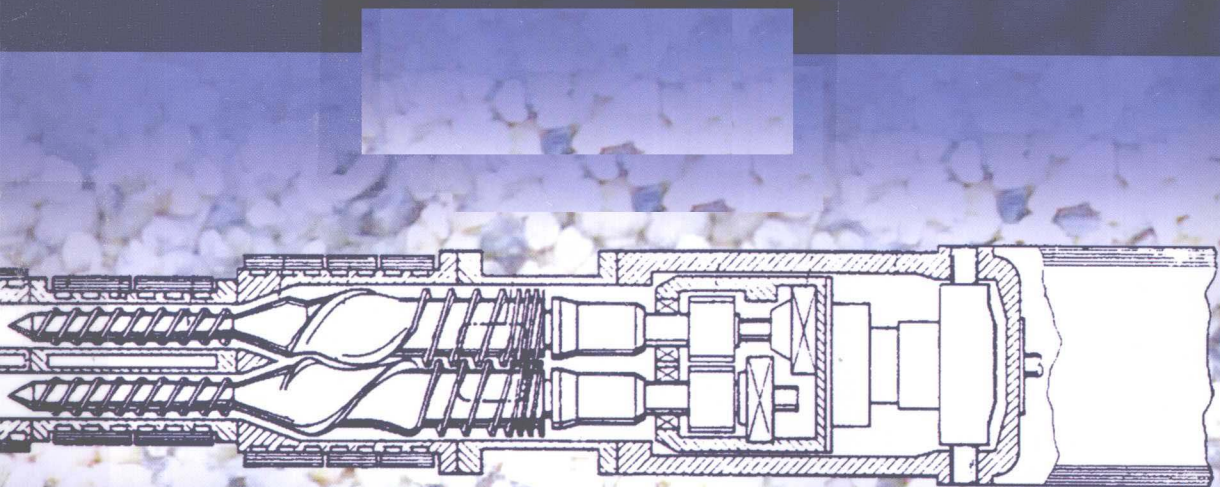
[美]

奥贝特 Y. 科朗 (Aubert Y. Coran)

编著

阿卜杜勒萨米·莫埃 (Abdelsamie Moet)

黄汉雄 等译



化学工业出版社

**Polymer Mixing
Technology and Engineering**

聚合物混炼 技术与工程

詹姆斯 L. 怀特 (James L. White)
[美] 奥贝特 Y. 科朗 (Aubert Y. Coran) 编著
阿卜杜勒萨米·莫埃 (Abdelsamie Moet)

黄汉雄 等译



化学工业出版社

· 北京 ·

该书对聚合物混炼技术和机械进行了较完整的论述,尤其是对各种混炼机械的发展和历史、技术进展和结构演变进行了详细的描述,为混炼机械的创新设计提供了基础。其中包括各种类型的间歇式和连续式混炼机械以及喂料器;其次是对各种类型混炼机械的发展历史、技术进展和结构演变进行了详细的描述,这在其他同类书中是鲜见的;第三,兼顾技术和基础知识两方面。本书可供从事高分子材料加工和应用的工程技术人员以及从事高分子材料加工和相关专业的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物混炼技术与工程/[美]怀特(White, J. L.),
[美]科朗(Coran, A. Y.),[美]莫埃(Moet, A.)编
著;黄汉雄等译. —北京:化学工业出版社,2010.8

书名原文: Polymer Mixing Technology and Engineering
ISBN 978-7-122-09193-2

I. 聚… II. ①怀…②科…③莫…④黄… III. 高聚物-
混炼 IV. TQ330.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第140196号

Polymer Mixing Technology and Engineering by James L. White,
Aubert Y. Coran, Abdelsamie Moet.

ISBN 3-446-18495-3

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:01-2003-3170

责任编辑:白艳云
责任校对:宋 玮

装帧设计:韩 飞

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张13 字数240千字 2010年9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

前言

Preface

间歇式和连续式混炼机械以及单螺杆和双螺杆挤出机可追溯至 19 世纪 90 年代, 它们最初应用于食品工业和用于输送润滑油。20 世纪的前 20 年, 与汽车用充气轮胎制造相关的现代橡胶工业得到了发展, 而现代密炼机正是始于这个时期。真正的合成聚合物工业诞生于 20 世纪 20 年代, 并于 20 世纪 30 年代和 40 年代开始得到快速发展, 单螺杆和啮合反向旋转双螺杆挤出机也于这一时期开始被广泛采用, 但主要用作泵送机械。德国的 I. G. Farbenindustrie 公司于 20 世纪 30 年代和 40 年代开展了一些研发计划, 包括各种啮合同向旋转和反向旋转双螺杆挤出机这类连续式混炼机械等, 但只在 20 世纪 50 年代和 60 年代, 随着双螺杆挤出机和捏合机积木式结构的发展, 才出现现代的混合技术与工程。然而, 直至约 1980 年才开始对间歇式和连续式混炼机械中的流动和混炼机理开展基础研究。

工程师为了解决混炼问题, 可采用各种各样的混炼机械, 包括分离(或相切)转子和啮合转子间歇式密炼机以及结构范围宽得多的许多连续式混炼机械, 后者又包括单螺杆挤出机和积木式单螺杆 Buss 往复捏合机以及带有一系列不同混炼元件的积木式啮合同向旋转和反向旋转双螺杆挤出机, 其中反向旋转双螺杆挤出机的结构有啮合和相切两种。这些混炼机械的每种结构均有其优缺点, 与其他结构相比更适用于某些用途。目前的趋势似乎是对每一种用途均采用积木式啮合同向旋转双螺杆挤出机, 但这看来更多是非技术的管理人员而非富有创新意识的工程师的决定。

阿克隆大学聚合物工程学院的 EPIC-Hanna 聚合物共混和混合研究中心是在爱迪生聚合物创新公司和 M. A. Hanna (目前的 PolyOne) 公司的资助下于 1989 年成立的, 其试图为工业界提供技术服务, 并开发共混和混合过程以及混炼机械操作的知识数据库。该中心最早的工作人员是 J. L. White (中心主任) 和 S. Lim (首席科学家, 1990~1992 年); 1992 年, A. Y. Coran 担任经理职务, 直至 1996 年; 之后, S. H. Lee (1996 年), M. Y. Lyu (1996~1997 年), D. Chang (1997~2000 年) 和 B. H. Lee (2000~2001 年) 继任该职务; K. Gissinger 曾任总技术人员, M. Jackson 曾任秘书。

阿克隆大学开展了与该研究中心相关的研发工作, 包括开发了密炼机和连续式混炼机械的分析和设计方法, 进行了相关的实验研究工作。多位研究人员 (K. Min, A. Morikawa, J. K. Kim, D. Setua, B. Hu, P. S. Kim 和 C. Kooliha-ran) 对密炼机进行了研究; White 及其合作者开发了预测下述各种混炼机械中

填充因子分布以及压力和温度分布的程序：①积木式同向旋转双螺杆挤出机（W. Szydlowski, Y. Wang, S. Montes, Z. Chen, S. Bawiskar, E. K. Kim, J. M. Keum 和 H. Jung）；②相切反向旋转双螺杆挤出机（M. H. Kim 和 D. S. Bang）；③啮合反向旋转双螺杆挤出机（M. H. Hong）以及④连续式混炼机械（M. H. Kim, D. S. Bang 和 F. Galle）和 Buss 捏合机（R. Brzoskowski 和 M. Y. Lyu）。积木式同向旋转双螺杆挤出机的流动模拟软件已以“Akro co Twin Screw”为商品名实现了商业化，并已发行了多个改进版本。还开展了与 EPIC Hanna 实验室相关的许多其他研发工作，包括：①自由基接枝反应挤出（T. Nagy, G. Samay, B. J. Kim, J. Cha 和 D. Chang）；②自由基聚合反应挤出（H. Kye, S. K. Ha, B. H. Lee, B. J. Kim 和 S. Y. Kim）；③反应混炼（S. Montes, S. Lim, J. W. Cho, S. H. Lee, F. Galle, K. Shon 和 B. H. Lee）。

本书编者认为把与 EPIC 和 EPIC-Hanna 研究中心相关的研发工作汇编成书应该是有益的，以描述聚合物混炼科学与技术和聚合物共混物。本书即为这方面的第一本书。已有多种专著论述连续混炼和双螺杆挤出机，但这些专著一般未包括各种类型的间歇式密炼机，或未包括喂料器技术，因而是不够完整的。本书试图弥补这方面的不足。本书第 1 章概述高黏性流体混炼的理论和基础研究工作，第 2 章对各种混炼机械进行分类，第 3 章主要论述密炼机技术，第 4 章专门论述单螺杆挤出机，第 5 章介绍往复螺杆式 Buss 捏合机，第 6 章论述积木式啮合同向旋转双螺杆挤出机，第 7 章论述啮合和相切反向旋转双螺杆挤出机，第 8 章论述连续混炼机，第 9 章概述各种喂料器和喂料中出现的问题。各章的内容较为均衡，并兼顾技术和基础知识两方面。

James L. White
Aubert Y. Coran
Abdelsamie Moet

译者前言

在过去的 30 余年中, 聚合物共混物和混合物的开发和生产得到了快速发展, 相关的研发人员急需更深入了解聚合物混炼的科学与技术, 由 James L. White 教授等三位专家编写的《聚合物混炼 技术与工程》(Polymer Mixing Technology and Engineering) 一书正好可满足这方面的需求。译者认为此书有三方面特点: 首先是对聚合物混炼技术和机械进行了较完整的论述, 包括各种类型的间歇式和连续式混炼机械以及喂料器; 其次是对各种类型混炼机械的发展历史、技术进展和结构演变进行了详细的描述, 这在其他同类书中是鲜见的; 第三, 兼顾技术和基础知识两方面。因此, 本书可供从事高分子材料加工和应用的工程技术人员以及从事高分子材料加工和相关专业的研究人员参考, 尤其是其中对各种混炼机械技术进展和结构演变详细的描述无疑为混炼机械的创新设计提供了基础, 这也正是译者翻译此书的主要目的。

就在本书的翻译过程中, White 教授于 2009 年 11 月 26 日在德国去世。White 于 1938 年 1 月 3 日出生在美国布鲁克林, 于 1965 年在美国特拉华大学获得化学工程博士学位, 当时他与 A. B. Metzner 教授共同提出了目前仍被聚合物加工模拟时广泛应用的 White-Metzner 本构模型。White 教授最初 (1963~1967 年) 在工业界从事橡胶科学与工程的研究工作。1967 年, White 教授进入美国田纳西大学任副教授, 因其学术成就突出而很快晋升为教授, 并成为聚合物科学与工程学科硕士和博士学位课程的创始人。当时他的研究兴趣很广泛, 包括填充聚物流变学、加工诱导聚合物结构与性能、纤维纺丝、吹膜、双轴拉伸成型、注塑和液晶聚合物成型等。1983 年, White 教授到美国阿克隆大学创办聚合物工程系, 并担任研究中心主任和系主任。此时他的研究兴趣转向橡胶加工与混合以及密炼机、销钉机筒挤出机和双螺杆挤出机内的流动, 并实现了模拟双螺杆挤出机内流动的软件 (Akro co Twin Screw) 的商业化。1985 年, 以 White 教授为主创办了国际聚合物加工学会 (Polymer Processing Society)。White 教授先后创办了 *Journal of Polymer Engineering* 和 *International Polymer Processing* 两种杂志, 在国际杂志上发表了 500 多篇论文, 出版了 8 本专著 (涉及流变学、双螺杆挤出、橡胶加工、聚烯烃、聚合物混合物和热塑性弹性体)。White 教授被认为是聚合物工程学科的创始人, 他对橡胶塑料工业的诸多贡献获得了全世界各个聚合物学会、大学、研究机构和工业界的认可。译者谨以此中译本表达对这位被他的中国学生亲切地称为“老白”的学界前辈之敬仰。

本书前言、第 2 章和第 4 章由黄汉雄翻译, 第 1 章由蒋果和黄汉雄翻译, 第

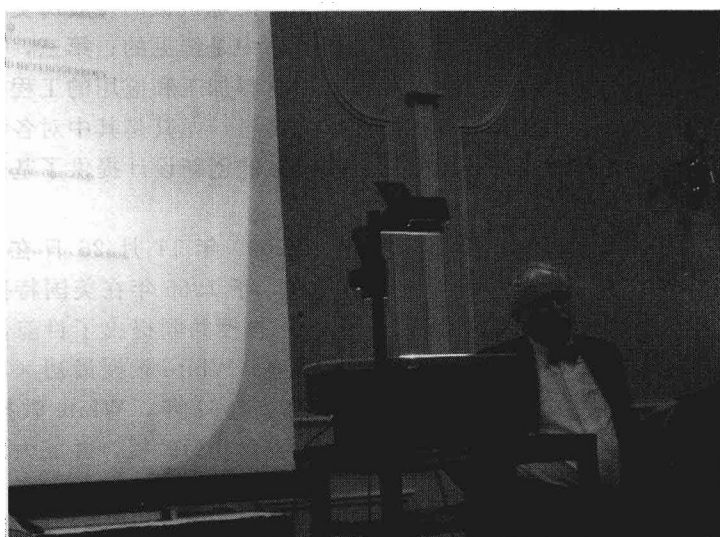
3 章由黄汉雄和李炯城翻译，第 5 章由黄有发和黄汉雄翻译，第 6 章由蒋果翻译，第 7 章由毛善强、蒋果和李晓静翻译，第 8 章由王泉杰和黄汉雄翻译，第 9 章由黄汉雄和谢格峰翻译。黄汉雄对全书译稿进行统一校阅和文字润色。

译稿中对原书的印刷错误和不妥之处做了改正。囿于译校者水平，不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

译者

2010 年 6 月

于华南理工大学



2004 年，White 教授在第 20 届国际聚合物加工学会学术年会上做大会报告

目 录

Contents

第 1 章 混炼和分散机理	1
1.1 概述	1
1.2 混合状态的表征	1
1.3 界面和界面张力	2
1.4 混炼概述	4
1.5 界面面积增长的建模	5
1.6 共混时相的破裂	9
1.6.1 聚合物熔体相的初始破裂	9
1.6.2 空气中液态丝状物的破裂	9
1.6.3 液态基体中液态丝状物的破裂	10
1.6.4 液滴的形变	13
1.6.5 对机械混炼聚合物共混物的研究	15
1.6.6 聚集	17
1.7 聚合物混炼中粒子团聚体的破裂	17
参考文献	18
第 2 章 聚合物混炼机械概述	21
2.1 简介	21
2.2 混炼机械的分类	21
2.3 混炼技术发展的历史回顾	25
2.3.1 第一时期——开炼机	25
2.3.2 第二时期——密炼机	25
2.3.3 第三时期——连续混炼机械	26
参考文献	27
第 3 章 间歇混炼机和密炼机	29
3.1 简介	29

3.2	间歇混炼机和密炼机的分类	30
3.3	技术发展概述	31
3.3.1	开炼机辊筒与开放式混炼室	31
3.3.2	分离转子密炼机	33
3.3.3	相切转子	35
3.3.4	啮合转子	35
3.3.5	串联式密炼机	37
3.3.6	密炼机制造公司现状	37
3.4	总体机械结构:机械和混炼过程	37
3.4.1	机械结构	37
3.4.2	混炼周期	38
3.5	分离转子密炼机	41
3.5.1	转子结构	41
3.5.1.1	最早的结构	41
3.5.1.2	四棱转子	41
3.5.1.3	新型转子结构	45
3.5.2	流动和混炼机理的实验研究	47
3.5.3	数值模拟	49
3.6	啮合转子密炼机	51
3.6.1	转子结构	51
3.6.2	流动和混炼机理的实验研究	51
3.6.3	数值模拟	54
	参考文献	56

第4章 单螺杆挤出机 60

4.1	概述	60
4.2	混合中的应用	62
4.3	发展历史概述	63
4.4	单螺杆挤出机的结构	63
4.5	螺杆结构和功能	68
4.5.1	固体输送	68
4.5.2	熔融	70
4.5.3	熔体输送	72
4.5.4	两阶螺杆	74

4.5.5 混炼	75
4.6 附加式混合器	81
4.7 按比例放大	84
4.8 操作	84
4.9 不良现象及其排除方法	86
4.10 结论	88
参考文献	88

第5章 捏合机

5.1 发展概述	89
5.2 工作原理	89
5.3 新型的捏合机	95
5.3.1 捏合机特性	95
5.3.2 停留时间	95
5.3.3 新型的螺杆结构	95
5.3.4 齿形销钉	96
5.3.5 造粒/建压	99
5.3.6 加热/冷却	99
5.4 应用/配置	99
参考文献	103

第6章 积木式同向旋转双螺杆挤出机

6.1 简介	104
6.2 技术进展	104
6.3 几何形状	110
6.4 积木式同向旋转双螺杆挤出机的元件和结构	112
6.4.1 右旋螺纹元件	112
6.4.2 左旋螺纹元件	115
6.4.3 捏合块	115
6.4.4 特殊的分布混炼元件	117
6.4.5 转子和六棱柱元件	118
6.4.6 调压阀	119
6.4.7 积木式结构	120

6.5 流动机理和实验研究 121

6.5.1 螺纹元件中的流动机理 121

6.5.2 捏合块中的流动机理 121

6.5.3 积木式双螺杆挤出机的流动机理 122

6.5.4 固体输送机理 122

6.5.5 熔融机理 122

6.5.6 停留时间分布 123

6.5.7 共混物相形态的演变 123

6.6 单个元件中的流动模拟 126

6.6.1 螺纹元件 126

6.6.2 捏合块 130

6.6.3 熔融模拟 133

6.6.4 共混物相形态演变的模拟 135

6.7 整台积木式双螺杆挤出机性能的模拟 135

6.8 应用 138

参考文献..... 139

第 7 章 积木式啮合和非啮合异向旋转双螺杆挤出机 142

7.1 概述 142

7.2 积木式异向旋转双螺杆挤出机的分类 142

7.3 技术发展概述 143

7.3.1 啮合异向旋转双螺杆挤出机 143

7.3.2 非啮合异向旋转双螺杆挤出机 147

7.4 积木式啮合异向旋转双螺杆挤出机 149

7.4.1 元件和结构 149

7.4.1.1 螺纹元件 149

7.4.1.2 混炼元件 150

7.4.1.3 积木式结构 150

7.4.2 流动机理 151

7.4.2.1 积木式啮合异向旋转双螺杆挤出机 151

7.4.2.2 固体输送机理 151

7.4.2.3 熔融机理 152

7.4.2.4 停留时间分布 152

7.4.2.5 共混机理 153

7.4.3 单个元件的流动模拟	153
7.4.3.1 宽螺棱螺纹元件	153
7.4.3.2 Leistritz 公司的螺纹元件	154
7.4.4 整台双螺杆挤出机的流动模拟	155
7.4.5 螺杆弯曲的影响	155
7.4.6 应用	156
7.5 非啮合异向旋转双螺杆挤出机	156
7.5.1 元件和结构	156
7.5.2 流动机理	157
7.5.2.1 积木式非啮合异向旋转双螺杆挤出机内的流动机理	157
7.5.2.2 螺纹元件中的流动机理	157
7.5.2.3 固体输送机理	157
7.5.2.4 停留时间分布	158
7.5.3 单个元件的流动模拟	158
7.5.4 整台双螺杆挤出机的流动模拟	160
7.5.5 应用	162
7.6 啮合/非啮合组合式异向旋转双螺杆挤出机	162
参考文献	163

第8章 连续混炼机

8.1 概述	166
8.2 连续混炼机的分类	166
8.3 连续混炼机技术的发展概述	166
8.4 非啮合异向旋转连续混炼机	172
8.4.1 结构	172
8.4.2 流动机理的实验研究	173
8.4.2.1 输送和熔融	173
8.4.2.2 停留时间分布	173
8.4.2.3 共混	175
8.4.3 流动模拟	176
8.4.4 应用	178
8.5 自扫式同向旋转连续混炼机	178
8.5.1 结构	178
8.5.2 应用	178

参考文献..... 179

第 9 章 喂料和喂料器 180

9.1 概述 180

9.2 影响喂料的参数 180

9.3 储料仓 181

9.4 喂料器的类型 186

 9.4.1 简介 186

 9.4.2 单螺杆式喂料器 186

 9.4.3 双螺杆式喂料器 187

 9.4.4 旋转式喂料器 188

 9.4.5 带式喂料器 189

 9.4.6 振动式喂料器 190

 9.4.7 盘式或台式喂料器 191

 9.4.8 叶片式喂料器 191

9.5 体积喂料器与重力喂料器的比较 192

参考文献..... 196

第 1 章

混炼和分散机理

James L. White

1.1 概述

本书论述聚合物体系混炼的技术与工程，因此将主要涉及工业用间歇式和连续式聚合物加工机械的发展、设计和流动特性，首先介绍混合物的特性和聚合物熔体的混炼过程。

本章首先介绍混合状态的各种表征方法；其次概述混炼过程以及整体均化与微观混炼之间的差别；接着讨论界面张力的重要内容；最后介绍各种微观混炼，包括：①无界面张力体系中等黏度不相容流体的混炼；②相的破裂和实际不相容聚合物熔体的混炼；③液态基体中固态粒子团聚体的破裂。

1.2 混合状态的表征

对混合状态表征的研究已有很长的历史。混合状态的一种很重要的表征方法是采用少组分的平均体积（或质量）分数，如下式所示：

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i \quad (1-1)$$

式中，总和是指从整个混合物所取的 N 个试样中少组分体积（或质量）分数之和。混合物的不均匀性可采用如下式定义的试样中少组分浓度方差 s^2 来表示：

$$s^2 = (x - \bar{x})^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1-2)$$

若 x 处处相同，则 s^2 为 0；若体系中有两种不相容相，则各处的 x 或者是 0 或者是 1，式(1-2) 可变为：

$$s^2 = \bar{x}(1 - \bar{x}) \quad (1-3)$$

1952 年，Danckwerts 针对化学工业问题而未必是聚合物体系提出了混合状态的一种表征方法^[1]。他采用“分离尺度”和“分离强度”这两种统计学度量来表征混合状态。其中分离尺度是与两点相关函数有关的长度，用以描述混合物不同区域的尺寸，Danckwerts 将其定义为：

$$S = \int_0^{\beta} R(r) dr \quad (1-4)$$

式中, r 是两点 (浓度分别为 x' 和 x'') 之间的距离, $R(r)$ 是相关函数, 定义为:

$$R(r) = \frac{(x' - \bar{x})(x'' - \bar{x})}{(x - \bar{x})^2}(r) = \frac{1}{Ns^2} \sum_{i=1}^N (x' - \bar{x})(x'' - \bar{x})(r) \quad (1-5)$$

式中, $\bar{x}$ 是平均浓度, N 是点的总对数, s^2 是浓度方差, 即如式(1-2) 所示。一般来说, $R(r)$ 是 r 的递减函数, 当 r 取很大值时, $R(r)$ 趋向于 0。

Danckwerts 定义的分选强度用来表征混合物中不相似区域的浓度偏差, 他将其定义为:

$$I = \frac{s^2}{\bar{x}(1-\bar{x})} \quad (1-6a)$$

应该指出, 从式(1-3) 可知, 未混合状态的方差是 $\bar{x}(1-\bar{x})$, 这样, 分离强度是指混合状态的方差与未混合状态的方差之比值。因此, I 与相容性和扩散有关。对于两种不相容聚合物或粒子填充聚合物的混合物, I 值等于 1, 即:

$$I = 1 \quad (1-6b)$$

其他作者如 Tadmor 和 Gogos^[2] 以及 Tucker^[3] 也提出过如前述的表征方法。应该再次指出, 由于所有两相非均质体系的 I 都取相同值, 即 $I=1$, 因此, 为表征这类体系混炼的“优良”程度, 式(1-6a) 是没有用的。

聚合物与聚合物或聚合物与粒子填充物构成的混合物通常是非均质的, 是指一相不均匀地分散在另一相中, 或指两种不均匀的相。这种混合物或共混物的混合状态通常由少组分的平均分数 $\bar{x}$ 和平均尺寸 d 来表征, 尤其是体系为稀溶液时。通常采用数均、重均和 z 均尺寸来表征尺寸分布:

$$d_n = \frac{\sum N_i d_i}{\sum N_i} \quad (1-7a)$$

$$d_w = \frac{\sum N_i d_i^2}{\sum N_i d_i} \quad (1-7b)$$

$$d_z = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2} \quad (1-7c)$$

对于各向异性分布的相, 如椭球状、丝状等相, 还需要给出长厚比。对于共连续相的情况, 通常采用相域或条纹厚度来表征。

1.3 界面和界面张力

与低分子质量化合物的情况不同, 聚合物混合物通常是不相容的, 必须考虑这类混合物中出现的非均匀特性。

聚合物混合物的多相结构特性会引起界面问题。一般必须考虑下面这些体系

的界面：①聚合物体系与空气之间；②互不相容的不同聚合物之间；③包含悬浮粒子的聚合物之间。液体表面的张力即表面张力这个概念的出现已有很长历史。200年前，英国科学家 Thomas Young^[4] 仔细论述了表面张力的特性。19 世纪末，J. W. Strutt (Lord Rayleigh)^[5] 的研究表明了表面张力对把液态丝状物破裂成液滴时所起的作用。1878 年，J. C. Maxwell^[6] 撰写了一篇关于表面张力的详尽的综述。

19 世纪时还对液体之间的界面张力 κ 进行研究。Young 研究了液体间的界面张力，但第一位进行深入研究的是 G. Quincke^[7]，Maxwell^[6] 也分析了界面张力。20 世纪 30 年代，G. I. Taylor^[8,9] 研究了乳液的流动和流动过程中液滴的破裂。S. Tomotika^[10] 将 Strutt (Lord Rayleigh) 的理论推广到液态丝状物浸渍在另一种液体中时由于界面张力而破裂的情况。1938 年，Andreas 等人^[11] 发表的论文中详细地描述了采用悬滴技术测量界面张力的方法。

两种液体之间界面张力的大小可用来衡量两者之间的不相容性。当两种液体之间的界面张力为 0 时，它们可相互溶解；当界面张力增大时，从热力学意义上说，两种液体之间的不相容性逐渐增大。

20 世纪 60 年代首次测量了聚合物熔体的界面张力^[12]。至 20 世纪 60 年代末，特别由于 Dupont 公司的 S. Wu^[13~15] 和 Bell 实验室的 R. J. Roe^[16] 的研究工作，使界面张力的测量方法尤其是 Andreas 等人^[11] 提出的悬滴法较为成熟。尽管 70 年代初期在继续这方面的研究工作^[17~19]，但这一领域并没有取得更明显的进展，部分原因看来是当时聚合物共混科学尚未充分发展。不过，当时还是取得了一定的成果。如发现，两种均聚物熔体之间界面张力很大程度上取决于结构单元的极性差，界面张力与分子质量和温度没有很大关系，存在小的负温度系数。自 20 世纪 80 年代中叶始，人们对界面张力的研究又产生了兴趣^[20~29]，这部分与对聚合物熔体共混中相形态了解的逐步感兴趣有关。

多年来，提出了多种实验技术来测量界面张力，其中应用最广的是悬滴技术，但对于熔融聚合物细丝断裂法也越来越有兴趣。界面张力的各种测量方法归纳于表 1-1 中。

表 1-1 聚合物熔体界面张力的测量方法

测量方法	研究 人 员
悬滴法	Andreas 等 ^[11] , Chappellear ^[12] , Wu ^[13,14,19] 以及 Roe ^[16] Anastasiadis 等 ^[21] , Escudie 等 ^[22] , Chen 和 White ^[28] , Yoon 和 White ^[29] 以及 Ihm 和 White ^[30]
细丝断裂法	Chappellear ^[12] , Elmendorp ^[20] , Elemans 等 ^[25] , Yoon 和 White ^[29] 以及 Ihm 和 White ^[30]
旋转液滴法	Patterson 等 ^[17] 以及 Wu ^[19]
纤维形状演变法(嵌入纤维回缩法)	Carriere 等 ^[24] , Carriere 和 Cohen ^[24] 以及 Sammler 等 ^[27]

表 1-2 概括了不同聚合物熔体对的界面张力的值。涉及聚乙烯 (PE) 的界

面张力的值随聚合物的极性差的增加而增大。极性差的排序为：聚丙烯(PP)＜聚苯乙烯(PS)＜聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)＜聚砜(PSU)＜聚苯硫醚(PPS)＜聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)＜聚碳酸酯(PC)＜聚酰胺 6(PA6)。极性差越大，界面张力就越大。因此，如表 1-2 中所示，PE 与 PA6 两种塑料之间的界面张力最大。

表 1-2 聚合物熔体对之间的界面张力值

聚合物熔体对	熔体温度/℃	界面张力/($\times 10^{-5}$ N/cm)	参考文献
聚乙烯-聚丙烯	—	1.2	20
聚乙烯-聚苯乙烯	180	4.1	13
聚乙烯-聚苯乙烯	290	4.0~5.0	29
聚乙烯-聚苯乙烯	—	4.9	20
聚乙烯-聚砜	290	6.5~7.0	29
聚乙烯-聚苯硫醚	290	7.2~7.9	29
聚乙烯-聚甲基丙烯酸甲酯	180	9.0	13
聚乙烯-聚对苯二甲酸乙二醇酯	290	9.2~9.4	29
聚乙烯-聚碳酸酯	290	12.5~13.0	24
聚乙烯-聚酰胺 6	290	12.8~13.2	13
聚乙烯-聚酰胺 6	—	10.6	20
聚丙烯-聚苯乙烯	220	5.8	22
聚丙烯-聚苯乙烯	250	3.7	
聚苯乙烯-聚甲基丙烯酸甲酯	180	1.2	13

20 世纪初期的研究发现，低分子质量的化合物如有机酸、酯和肥皂会聚集在水和有机液体之间的界面处。这些亲水性和亲液性的化合物的界面张力都很低^[30~32]。近年的研究发现，嵌段和接枝共聚物会在不相容聚合物共混物的相界面聚集，降低聚合物相之间的界面张力。1971 年，Dupont 公司的 Patterson 等人^[17]对两种本体聚合物体系的研究首次发现了这一结果。本章作者研究室的研究发现，将苯乙烯-乙烯-丁烯三嵌段共聚物 (SEBS) 加入 PE/PS 共混物中，可使界面张力从 5.0×10^{-5} N/cm 降低至 1.1×10^{-5} N/cm^[28]。在该论文^[28]中还包其他一些例子。

1.4 混炼概述

将不同的聚合物混合形成混合物时，主要涉及两种情况。其中一种是形成整体层面的均相混合物，混炼过程中混合物的均匀性可通过分布混炼来获得；另一种是尽可能使各组分分散得细小，混炼中分散相尺寸的减小被称为分散混炼。描述混炼过程时，首先需要区分被混合的物料是完全相容、部分相容还是完全不相容的，大多数情况下，比较关注的是完全不相容的体系；然后需确定被混合的物