

Moldflow 设计指南▶

Moldflow Design Guide

第一版

[美] Jay Shoemaker 著
傅建 姜勇道 赵国平 译



四川大学出版社

TQ320.66-39
XMK

Moldflow 设计指南

Moldflow Design Guide

第一版

[美] Jay Shoemaker 著
傅建 姜勇道 赵国平 译

本书翻译人员

傅建：西华大学，fujian@mail.xhu.edu.cn

姜勇道：欧特克软件（中国）有限公司，jiangyongdao@163.com

赵国平：上海汽车集团股份有限公司乘用车分公司，pingguo_zhao@yahoo.com.cn



四川大学出版社

责任编辑:廖庆扬
责任校对:曾 鑫
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

Moldflow 设计指南 / 傅建, 姜勇道编译. —成都:
四川大学出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-5614-5055-0

I. ①M… II. ①傅…②姜… III. ①注塑—塑料模具—
计算机辅助设计—应用软件, Moldflow—程序设计—指南
IV. ①TQ320.66-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 203516 号

内容提要

《Moldflow 设计指南》是一本融合《Moldflow 设计原则》、《Moldflow 翘曲设计原则》与《C-Mold设计指南》之精髓,并且汇集作者多年来在注射模塑领域的研究成果和实践经验的实用性技术书籍。本书内容涉及注射模塑的基本理论与基本过程,产品结构、模具开发和工艺条件与成型质量的关系,Moldflow的设计理念、技术思路、应用流程与实现方法,常见注射制件缺陷和补救措施,以及附录部分的注射模塑基础知识(如:注射成型方法、注射机系统、注射过程控制和常用注射塑料)等。由浅入深、通俗易懂、面向应用、针对性强是本书的一大特色。

本书既可作为Moldflow应用工程师、模具设计工程师和模塑生产工艺师的技术操作指南,又可作为大专院校相关专业的教学参考资料和相关人员的实践培训教材。

书名 Moldflow 设计指南(第一版)

著 者 (美) Jay Shoemaker
译 者 傅 建 姜勇道 赵国平
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段24号(610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-5055-0
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 15.25
字 数 354 千字
版 次 2010年10月第1版
印 次 2010年10月第1次印刷
印 数 0 001~3 000 册
定 价 30.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电 话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

序 言

Moldflow 公司自 25 年前成立以来,一直致力于将推动快速、可靠和成本/效益俱佳的塑料制造业发展作为公司的唯一目标。

这个初衷促使我们将许多新颖且令人激动的 CAE 工具引入市场,无论是为降低生产成本而减少材料消耗或成型时间,还是为缩短模具交付周期而使其设计制造的返工率最小,以及为确保可靠供货而增强按计划生产高质量制件的能力,每一种工具都在一定程度上为实现我们的目标作出了贡献。

借助应用 Moldflow 早期开发的熔体充模和流道平衡软件,在 20 世纪 70 年代末、80 年代初我们就实现了如今最常见的人工平衡流道系统以及多模腔模具和家族模具的设计与制造。随着 CAE 技术的发展,我们又实现了熔体流动类型和熔接线分布的可视化与控制。到 21 世纪初,基于复杂技术的翘曲控制、传热计算、型芯偏移预测,以及适应新成型工艺的一系列 CAE 工具又被开发出来。从传统的中性面模拟到全三维模拟,所有的解决方案都能很好地整合到基于实体建模的设计环境中。

技术的进步开拓了 CAE 应用的深度与广度。引进 Moldflow 模拟技术的初衷是为了找寻对注射成型潜在问题的补救途径。实践证明,通过在设计阶段应用 Moldflow 软件,可以“先期”解决制件成型中的潜在问题。这种称之为“问题先期避免”的方法论是 Moldflow 技术早期开发与应用的基础。

向产品设计师和模具设计师开放“制造世界”是 Moldflow 面临的一个史无前例的挑战。对于经验丰富的制造工程师而言,只要追溯一下模具的使用过程,就能很快找到造成无效设计的根源。但是,对于没有 20 来年制造经验的设计工程师而言,如何借助 CAE 工具事先可视化观察、诊断和解决同样的问题?制造工程师又如何根据软件模拟获得在实际成型过程中无法直接看到的信息作出下一步决策呢?

打开这个疑团的钥匙就是《Moldflow 设计学》,《Moldflow 设计学》是 Moldflow 最重要的出版物,由此派生出一系列相关主题的文献及著作。《Moldflow 设计学》不但揭示了模拟软件的工作原理,而且还阐明了不针对任何专业软件应用的一般设计原则,其结果同 20 年前一样,这些原理和原则使得 Moldflow 在高级模拟产品的开发与应用中所占据的领先地位一直持续到今天。

近几年全球降低制造成本的趋势,使成型模拟成为成本优化的工具,而不仅仅是避免问题的工具。塑料工业及其交叉行业更大范围的变化与需求促进了 Moldflow 用户数的增加。广义设计理念将导致对塑料设计优化原则的更大依赖。

尽管在技术前沿领先近半个世纪,但是,随着塑料工业更广泛地把 CAE 技术融入

到管理产品生命周期，我们面对的将是一个 CAE 的黄金时代。Moldflow 为历史而自豪，并将一如既往地专注于开发耦合有实践设计原则的创新技术，为制造业带来更加丰厚的利润！



Roland Thomas

Moldflow 公司总裁兼首席执行官

Moldflow 公司自 1983 年成立以来，一直致力于开发耦合有实践设计原则的创新技术，为制造业带来更加丰厚的利润。我们的目标是为客户提供最先进、最可靠、最易使用的 CAE 软件，帮助他们提高生产效率，降低生产成本，缩短产品上市时间。我们坚信，通过我们的努力，CAE 技术将成为制造业不可或缺的一部分，为制造业带来更加丰厚的利润。

在过去的几十年里，我们见证了 CAE 技术的飞速发展。从最初简单的应力分析，到如今复杂的流体动力学、热力学、电磁学等多物理场耦合分析，CAE 技术的应用范围越来越广，精度也越来越高。这主要得益于计算机技术的进步和算法的不断优化。然而，我们也面临着一些挑战，如数据量的爆炸式增长、计算资源的有限性等。为了应对这些挑战，我们需要不断创新，开发出更高效、更智能的 CAE 软件。

Moldflow 公司始终走在 CAE 技术的前沿。我们投入了大量的研发资源，致力于开发下一代 CAE 软件。我们的研发团队由来自世界各地的顶尖专家组成，他们拥有深厚的专业知识和丰富的实践经验。我们相信，通过我们的持续努力，Moldflow 将成为全球领先的 CAE 软件供应商，为制造业带来更加丰厚的利润。

在今天的制造业中，CAE 技术已经成为产品开发过程中不可或缺的一部分。它可以帮助工程师在设计阶段就发现潜在的问题，避免昂贵的试错成本。同时，它还可以优化产品设计，提高产品的性能和可靠性。对于企业来说，采用先进的 CAE 软件可以显著提高竞争力，赢得更多的市场份额。因此，我们鼓励企业积极采用 CAE 技术，为制造业的繁荣做出更大的贡献。

译者序

Moldflow 是当今注射模塑行业的主流计算机辅助工程 (CAE) 软件之一。Moldflow 具有强大的数值计算、可视化前后处理和用户项目管理功能, 可对注射产品的整个成型过程进行分析模拟 (包括充模、保压、冷却、收缩、翘曲、纤维取向和残余应力等), 以优化注射工艺、制件结构和模具设计方案, 同时可辅助相关专业技术人员解决现场生产中遇到的实际问题。

伴随 Moldflow 在国内企业的推广应用及用户数的增加, 市面上同 Moldflow 相关的出版物或培训资料逐年多了起来, 但这些出版物和培训资料多半侧重于软件操作或软件的某个具体应用。系统地将 Moldflow 技术基础与注射模塑的基本原理和基本方法, 以及注射实践经验有机结合起来, 用通俗易懂的语言全面论述注射模塑过程的专业书籍并不多见, 以致于一些现场人员不知道怎样有效地应用 Moldflow 解决产品设计、模具设计和模塑生产中的实际问题。由此, 我们引进并翻译了这本 Moldflow 公司的内部出版物, 以期 为模塑生产和模具开发第一线的工程技术人员提供一些帮助, 同时也为有志从事该领域工作的其他专业人员 (包括在校学生) 提供综合技术应用入门。

考虑到国内行业生产实际与行业标准, 译者在把握原文真谛的基础上, 对原书中的个别描述及其相关术语做了变通处理, 力求将原汁原味的《Moldflow 设计指南》奉献给读者。由于译者水平有限, 在译文中难免有不当之处, 敬请国内外同行批评指正。

译者

2008 年 4 月于成都

前言

关于本书

本书内容不仅包括 Moldflow 设计原则，而且还包括 Moldflow 翘曲设计原则，以及 C-Mold 设计指南。多年来，作者在注射成型理论研究与应用实践方面的经验积累全部体现在本书之中。

Moldflow 设计指南编写的目的旨在帮助现场工程师解决在产品设计和模具设计，以及塑料制件注射生产过程中频繁遇到的问题。本书也可作为本专业工业应用与教育培训的参考资料。

如何使用本书

本书各章节分别涉及 Moldflow 整个设计流程的不同阶段，附录部分给出的是注射成型和塑料材料的背景知识。

- 第 1~3 章介绍注射成型中聚合物熔体如何充填模腔，以及成型条件如何影响塑料制件的成型过程。

- 第 4 章讨论 Moldflow 设计原则和设计原则与制件成型质量之间的关系。

- 第 5 章介绍 Moldflow 采用的有限元网格技术和网格划分如何影响 Moldflow 的分析质量。

- 第 6~9 章介绍 Moldflow 的产品、浇口、流道和冷却系统设计思想。

- 第 10 章介绍同收缩和翘曲相关的概念，以及怎样应用 Moldflow 预测制件的收缩与翘曲，并分析翘曲产生的原因。

- 第 11 章讨论用于分析制件注射成型的设计流程。

- 第 12 章讨论注射制件的常见缺陷、起因及补救途径。

- 最后四个附录讨论各种注射成型方法、注射机系统与操作、注射过程控制，以及常用塑料材料。

应用 CAE 技术的好处

注射模塑业普遍认为：计算机辅助工程（CAE）会增强工程师在处理注射成型问题、提高生产力、保证产品质量、缩短供货周期和降低运行成本等方面的能力。注射模塑工业中越来越丰富的 CAE 文献和与日俱增的 CAE 软件用户就是 CAE 技术应用的最好明证。

借助 CAE 预测过程行为

理想情况下，CAE 分析可以帮助用户收集、洞察和分析产品设计、模具设计和注射成型过程中的相关信息（例如：聚合物熔体充模类型、熔接线位置和困气位置、需要的注射压力和锁模力、纤维取向、成型周期、制件最终形状和变形、成型制件的机械性能，等

等)；否则，这些信息就只能依靠传统的经验、直觉、原型，或者通过试模来获取。如果没有 CAE 技术的帮助，一些重要的设计数据（例如：压力、温度、剪切速率、剪切应力和熔体流动速率的空间分布）就很难获得，即使利用先进检测仪器来采集模塑过程的信息也照样如此。借助 CAE 技术预测过程行为可以帮助初级工程师克服自身经验的缺乏，辅助有经验的工程师发现容易被忽略的细节因素。通过 CAE 分析，还可以迭代和评估制件成型的各种备选方案与备选材料，以便相对快速、高效、低成本地建立起指导工程实践的设计流程。

用户熟练程度决定 CAE 应用效益

CAE 技术帮助用户节约时间、金钱和原材料，以及减少回收料，降低注射速率，改善制件质量，让新产品更快地推向市场。但是，这并不意味着 CAE 将成为解决所有成型问题的灵丹妙药。必须清醒地认识到，CAE 分析实际上是一种用于辅助工程师工作而不是接管工程师职责或代替工程师的技术工具。同其他许多工具一样，CAE 技术的应用效益将取决于用户掌握该技术的熟练程度，只有合理地使用 CAE 工具才能体现出它的真正价值。更专业地讲，CAE 分析的精确度在很大程度上依赖于用户输入的数据。此外，CAE 分析产生的结果需要用户专业而灵活地加以理解，才能做出合理判断和正确推理；否则，用户将会被大量的分析数据淹没，而得不到任何有用的信息。

致 谢

如果没有 Ken Welch 的卓越洞察,《Moldflow 设计指南》不可能完成。多年来, Ken 和我一直在酝酿将《Moldflow 设计原则》、《Moldflow 翘曲设计原则》和《C-Mold 设计指南》的精彩内容融合到一本书中。最终, Ken 将这项光荣的工作交给了 Steve Thompson 培训小组(我是小组成员之一)。Steve 的同事们帮助我收集和整理编写本书的必备资料,如果没有 Steve 小组的帮助与指导,我绝不可能做好这项工作。

内容校阅是《Moldflow 设计指南》编写的一个重要组成部分,包括 Peter Kennedy、Rong Zheng、Zhongshuang Yuan 和 Xiaoshi Jin 在内的 Moldflow 开发者们认真校阅了本书的所有章节。部分 Moldflow 应用工程师和技术人员也参与了本书的校阅,他们是 Chad Fuhrman、Matt Jaworski、Christine Roedlich、Eric Henry、Olivier Anninos、Paul Larter 和 Ana Maria Marin。特别感谢 Mike Rogers,他不但校阅了全书,而且还对书中相关内容的编写和组织提出了建设性意见。我也非常感谢西密歇根州立大学的 Kurt Hayden 校阅附录“注射工艺控制”部分,他多年来在成型工艺设计和优化方面的经验使该部分增辉不少。

最后,我还要感谢 Moldflow 技术转化组的多位成员对我编写本书的大力支持,这些成员包括 Marcia Swan、Caroline Dorin、Robert Ashley、Melissa Haslam、Darren Seamons 和 Gregory Brown。

作为个人原因,我非常感激和感谢西密歇根州立大学工业与制造工程系的 Paul Engelmann 教授,我职业生涯的良师益友。正是因为有了 Paul 的帮助,我才可能在西密歇根州立大学参与注射模塑成型及工艺研究,并讲授该方面的课程。我发现,同 Paul 在一起的工作经历,使我最终成为一名合格的 Moldflow 用户和知道怎样应用 Moldflow 解决注射模塑实际问题的工程师。

作者: Jay Shoemaker

目 录

1 聚合物在注射模塑中的流动行为	(1)
1.1 注射阶段	(1)
1.2 塑料熔体怎样流动	(6)
2 成型条件与注射压力	(12)
2.1 注射压力概述	(12)
2.2 影响注射压力的因素	(13)
2.3 数学关系	(14)
2.4 成型条件的影响	(15)
2.5 应用 Moldflow 优化成型工艺	(18)
3 熔体充模图	(23)
3.1 充模图简介	(23)
3.2 熔体在结构复杂的模腔内流动	(23)
3.3 前沿流动速率与前沿流动区	(28)
3.4 应用 Moldflow 确定熔体充模方式	(30)
3.5 应用 Moldflow 获得恒定的熔体前沿流动速率	(31)
4 Moldflow 设计原则	(33)
4.1 产品设计与 Moldflow	(33)
4.2 分析流程	(33)
4.3 Moldflow 流动观	(35)
5 Moldflow 的网格技术	(43)
5.1 Moldflow 使用的网格类型	(43)
5.2 网格要求	(45)
5.3 建立几何模型	(49)
5.4 输入几何模型	(49)
5.5 使用不同的网格类型	(49)
6 产品设计	(51)
6.1 产品设计的材料性质	(51)
6.2 强度设计	(60)

6.3	制件壁厚	(62)
6.4	应用加强筋提升整体结构	(63)
6.5	装配设计	(65)
7	浇口设计	(74)
7.1	浇口设计概述	(74)
7.2	浇口类型	(75)
7.3	浇口设计准则	(81)
7.4	Moldflow 在浇口设计中的应用	(88)
8	浇注系统设计	(92)
8.1	浇注系统定义	(92)
8.2	浇注系统设计原则	(94)
8.3	浇注系统类型	(98)
8.4	浇注系统设计	(99)
8.5	初始流道尺寸	(103)
8.6	流道平衡	(107)
8.7	Moldflow 在流道平衡设计中的应用	(109)
9	冷却系统设计	(112)
9.1	冷却系统概述	(112)
9.2	冷却水道布局	(114)
9.3	其他可选冷却组件	(115)
9.4	冷却系统公式	(118)
9.5	冷却系统设计准则	(119)
9.6	Moldflow 在冷却系统设计中的应用	(122)
10	收缩与翘曲	(126)
10.1	注射成型与收缩	(126)
10.2	收缩与翘曲的基本原因	(128)
10.3	考虑翘曲的精密制件设计	(133)
11	Moldflow 设计流程	(139)
11.1	确定分析任务	(139)
11.2	Moldflow 分析步骤框架	(140)
11.3	应用 Moldflow 评价一个初始设计	(150)
11.4	应用 Moldflow 优化设计	(154)
12	制件缺陷	(157)
12.1	困气	(157)
12.2	黑斑与黑纹	(158)
12.3	脆化	(159)

12.4 焦痕	(161)
12.5 分层	(162)
12.6 尺寸变化	(163)
12.7 变色	(164)
12.8 鱼眼	(165)
12.9 飞边	(165)
12.10 流痕	(167)
12.11 迟滞	(167)
12.12 喷射	(169)
12.13 波纹	(170)
12.14 短射	(172)
12.15 银纹	(173)
12.16 缩痕与空洞	(174)
12.17 熔接线与汇熔线	(176)
附录 A 注射成型	(179)
A.1 注射成型概述	(179)
A.2 注射机的发展	(180)
A.3 注射成型的发展	(180)
A.4 其他注射成型工艺	(180)
附录 B 注射机系统与操作	(188)
B.1 注射机	(188)
B.2 注射机组件	(189)
B.3 制件成型系统	(192)
B.4 注射机运转流程	(193)
B.5 螺杆运动	(194)
B.6 二次操作	(194)
附录 C 注射过程控制	(196)
C.1 工艺条件的重要性	(196)
C.2 设置成型工艺条件	(196)
附录 D 塑料材料	(203)
D.1 什么是塑料	(203)
D.2 塑料的分类	(205)
D.3 热塑性塑料	(206)
D.4 热固性塑料	(208)
D.5 热塑性塑料的性能及其应用	(209)

1 聚合物在注射模塑中的流动行为

- 注射阶段
- 塑料熔体怎样流动

1.1 注射阶段

每一位注射模塑生产者和注射模具设计制造者都能证明，本章讨论的所有影响制件质量的因素在注射成型过程中确实存在。尽管借助已掌握的专业知识可以在某种程度上改善制件质量，但是，如果能在设计初期利用 Moldflow 优化注射成型方案和模具设计方案，就能有效地控制各种影响因素，从而获得更大的经济效益。

流动技术用于揭示塑料熔体在充模过程中的流动行为。塑料制件的性能取决于成型条件，即使两件制件的结构、尺寸和材料完全相同，但只要注射工艺不同，其内部应力和收缩程度就不一样，应用场合也就不相同，意味着这实际上是两种不同的制件。

塑料熔体进入模具的方式对制件质量有着至关重要的作用，通过预测压力、温度和应力可以清楚地分析、了解熔体的充模过程。

1.1.1 塑料熔体怎样充模

现以注射成型图（见图 1-1）所示的中心进浇且外边缘较厚的西餐大盘为例，说明塑料熔体充模的三个阶段，见图 1-2 和图 1-3。

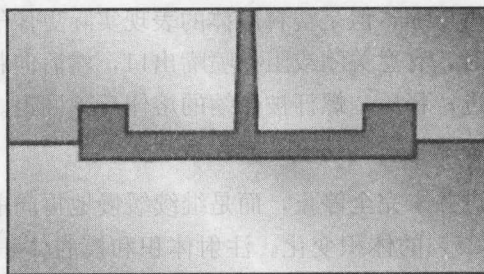


图 1-1 用于研究熔体流动行为的西餐盘模具截面

1.1.1.1 充填

随着注射机螺杆的向前（轴向左）推进（图 1-2），塑料熔体首先以稳定的流速注入模腔。充填阶段将持续到模腔刚好被熔体充满为止。

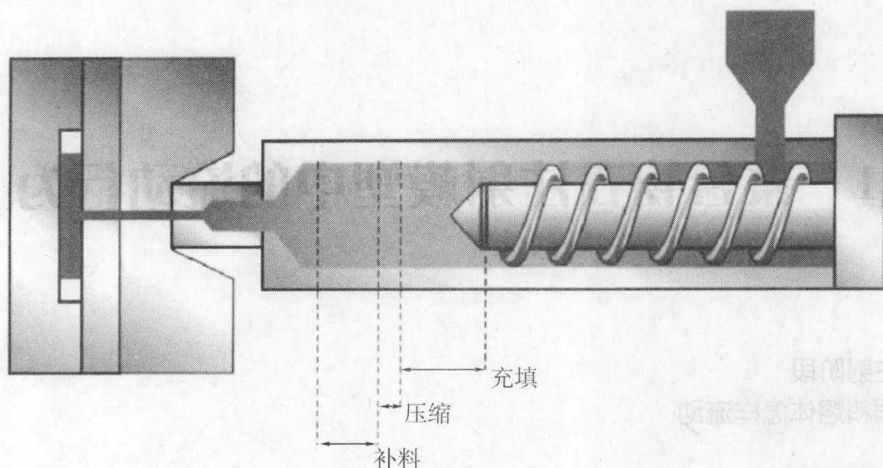


图 1-2 注射模塑过程

1.1.1.2 压缩

充填结束后，螺杆继续向前推进，模腔压力提高，熔体压缩开始。此时，螺杆的推进速度略有下降。由于塑料熔体的压缩性非常好，所以在注射压力的作用下，又有约 15% 的额外熔体被压入模腔。

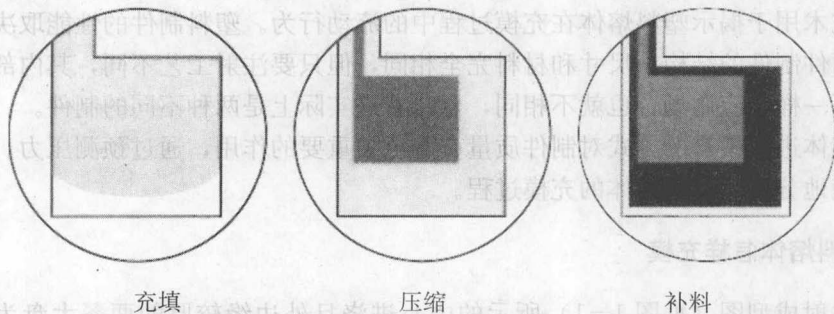


图 1-3 熔体充模细节

尽管通常假设流体不可压缩，但是塑料熔体的表现实际更像气体。塑料熔体的可压缩性可以在清理注射机料筒时，有意关闭或阻挡喷嘴出口，然后向料筒内的残料施加压力来进行证实：加压，螺杆前进；释压，螺杆被压缩的熔体反弹回退。

1.1.1.3 补料

压缩结束，螺杆的推进并未完全停止，而是继续缓慢地再向前移动一段距离。塑料从熔融态转化成固态大约有 25% 的体积变化。注射体积和模腔体积之间的差距是造成熔体短射的原因之一。螺杆继续将过量的熔体压进模腔，以补偿成型制件熔-固转化的体积变化，这个阶段称之为补料。由于制件熔-固转化的体积变化高达 25%，而最多只有 15% 的塑料熔体能够在熔体压缩阶段进入模腔，所以，补料阶段是必不可少的。

译者注：国内模塑界将注射过程中的压缩和补料统称为保压补缩，即在熔体充填模腔结束后，继续施压并伴有过量的熔体注射，以达到压实物料、补偿熔-固收缩之目的。

1.1.2 充模过程

利用双色料注射技术能够很好地展示塑料熔体充填模腔的过程。即首先向模腔中注射少量红色塑料，然后注入绿色塑料，同时观察其间两种熔体在模腔内的流动情况。

熔体在模具内的流动始于注射机喷嘴出口，经主流道、分流道和浇口进入模腔。首先进入模腔的小股熔体同冷模腔壁接触，其表层很快被冻结，而中心层还处于熔融状态。随后进入模腔的熔体沿中心层流动，取代原有物料，形成新的流动前沿。这种不

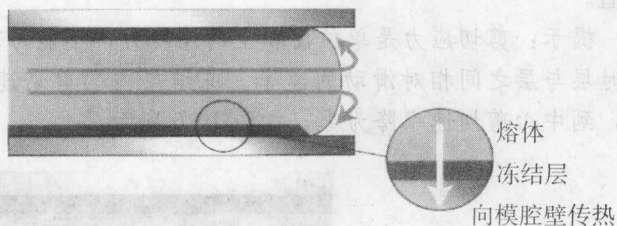


图 1-4 喷泉流动和热传递

断替代物料的流动方式由熔体向前和向外流动两部分组成。向外流动的熔体接触模腔壁，冷却形成新的冻结表层，而向前流动的熔体却形成新的流动中心层，后续进入模腔的熔体沿冻结层形成的通道流动，见图 1-4。

熔体在模腔内的这种流动方式通常被称为喷泉流动，因为熔体的流动前沿像泉水一样不停地从熔融中心层涌出。冻结层由中心层涌流出的熔体前沿形成，承受较低的剪切应力，分子取向较弱。熔体一旦冻结，其内部分子就无法再取向，所以，注射制件表层的分子取向程度一般较低。

熔体在模腔中流动的同时，也向模腔输入随其传入的外部热、凝固热和因内摩擦产生的剪切热，这些热量透过冻结层向模腔壁散发。起初冻结层较薄，热量散发快，从而导致更多的熔体冻结。当冻结层达到一定厚度时，通过热传导散失的热量将等于熔体流动及其剪切产生的热量，于是，两者之间就建立了一个热平衡。

人们感兴趣的是：达到上述热平衡究竟需要多长时间。同冻结层塑料的热容相比，熔体的流动热（含带入的外部热、凝固热和剪切热等）非常大，导致往往只需要几十分之一秒便达到热平衡。注意：熔体的充模周期是以秒计算，而冻结层附近的热平衡早在该周期结束之前就建立了。

考虑冻结层厚度如何变化也是很有意义的。如果降低熔体注射速率，则沿流动路径产生的摩擦热和熔体流动带入的热量也将随之减少。在相同的热传导条件下，冻结层厚度将增加。反之，如果提高注射速率，则冻结层厚度会变薄，见图 1-5。同理，较高的熔体温度和（或）模具温度会使冻结层变薄。这些现象均可通过双色料注射实验观察到。

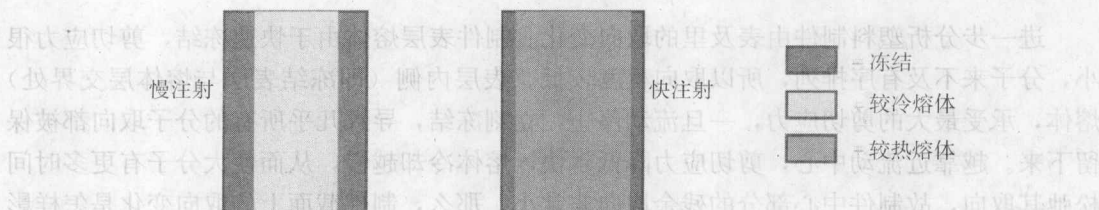


图 1-5 注射速率对冻结层厚度的影响

聚合物的应力与取向之间的关系容易让人混淆。塑料熔体流动时所承受的剪切应力被称为流动剪切应力（简称剪切应力）。剪切应力能够使聚合物分子产生取向，即沿流动方向进行自我有序排列。

剪切应力在平行流动方向截面上的变化很大，由流动外层的最高值逐渐降到中心层的零值。

提示：剪切应力是单位面积上的作用力，不能与剪切速率混淆。剪切速率是指熔体流动时层与层之间相对滑动的速率。冻结层内的剪切速率为零，熔体层外侧的剪切速率最大，到中心剪切速率降为零，如图 1-6 所示。

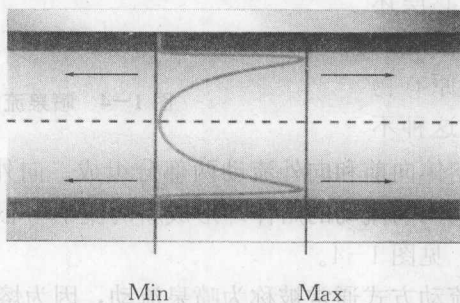


图 1-6 剪切速率分布

如果熔体流动停止后聚合物能够缓慢冷却，则分子取向就有时间得到充分松弛，其残余取向程度就较低。另一方面，如果熔体在应力作用下快速冻结，则大部分取向将残留在冻结的塑料件内，见图 1-7。

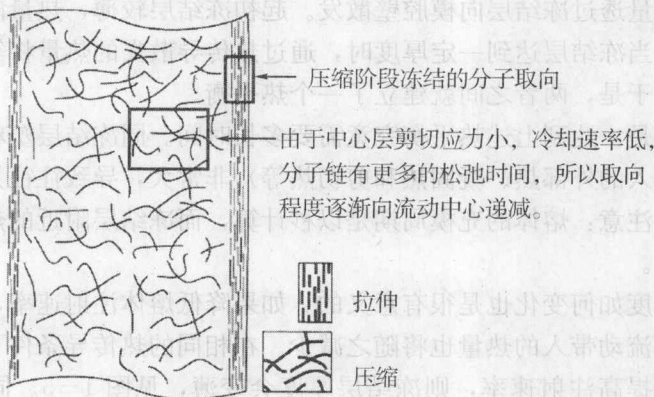


图 1-7 制件截面分子取向分布示意

进一步分析塑料制件由表及里的取向变化。制件表层熔体由于快速冻结，剪切应力很小，分子来不及有序排列，所以取向程度较低。表层内侧（即冻结表层与熔体层交界处）熔体，承受最大的剪切应力，一旦流动停止，立刻冻结，导致几乎所有的分子取向都被保留下来。越靠近流动中心，剪切应力降低越快，熔体冷却越慢，从而使大分子有更多时间松弛其取向，故制件中心部分的残余取向非常小。那么，制件截面上的取向变化是怎样影响制件残余应力的呢？制件内部的取向区域通常比非取向区域收缩大。在最初冻结层的内

侧,高度取向区域的收缩倾向非常大,而冻结的较低取向区域会阻滞这种剧烈收缩。最终,高取向区将处于拉伸状态,而低取向区处于压缩状态,这就形成了注射制件内的残余应力。

译者注:熔体凝固和制件冷却过程中的不均匀传热与收缩等因素也会引发残余应力。制件翘曲通常是由于残余应力超过材料屈服强度所致。

提示:熔体充填模腔过程中的剪切应力(亦称流动应力)和最终制件内的残余应力可以通过分子取向这条纽带联系起来,意味着在 Moldflow 分析结果图中显示的剪切应力数据,能够作为一个设计参数加以应用。

1.1.3 压缩过程

从流动行为的角度讲,熔体压缩过程与熔体充模过程非常类似。当模腔压力建立起来后,熔体流速会稍微降低,造成冻结层厚度增加。当然,压缩过程与充填过程之间还是有差异的,主要表现在:压缩阶段的模腔净水压(即等向压强)将升高。读者将在本书的 2.4 节看到,净水压本身并不在制件内留下任何残余应力。

1.1.4 补料过程

补料阶段的熔体流动是一种不稳定的流动。回过头来再研究一下西餐盘的模塑成型(见图 1-1)。不少人可能认为塑料熔体在模腔内呈环状、由中部薄壁区向边缘厚壁区均匀流动。实际上,补料阶段的塑料熔体流动更像河流一样,呈三角形向外扩散,如图 1-8 所示。这种现象一开始似乎难以理解,但可以通过温度变化的不稳定性给予解释。

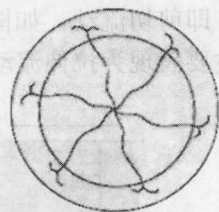


图 1-8 河流状流动

1.1.4.1 温度变化

来自注射机喷嘴的熔体温度总有某些变化,有人利用高速热电偶,测得这种温度变化高达 40℃。

1.1.4.2 熔体流动的不稳定性

无论熔体温度变化多么微小,熔体流动的不稳定性都将会放大这种变化。例如,假若某一区域的熔体温度相对于其他区域偏高,那么熔体在这个区域的流动将会更快,从而引来更多的热熔体进入该区域,以维持其高温。反之,若某一区域的温度较低,则进入该区域的熔体量就会减少,输入的热量也会随之减少,从而导致该区域的熔体更快冷却,直到冻结。

无论初始状态下的流动和传热怎样平衡,这种熔体流动的自然不稳定性都会带来河流状的补料流动。这种补料流动形式必须高度重视。首先冻结的熔体在补料初期就开始收缩了,当河流状的补料流开始冻结时,制件主体已快冻结和收缩完毕,于是,河流状补料流将相对于制件主体进行收缩,加之该料流的取向大,所以其收缩量非常高。结果造成制件整体的应力拉伸成分增加,从而引发制件翘曲。