

成功的注射成型

加工、设计和模拟

Successful Injection Molding

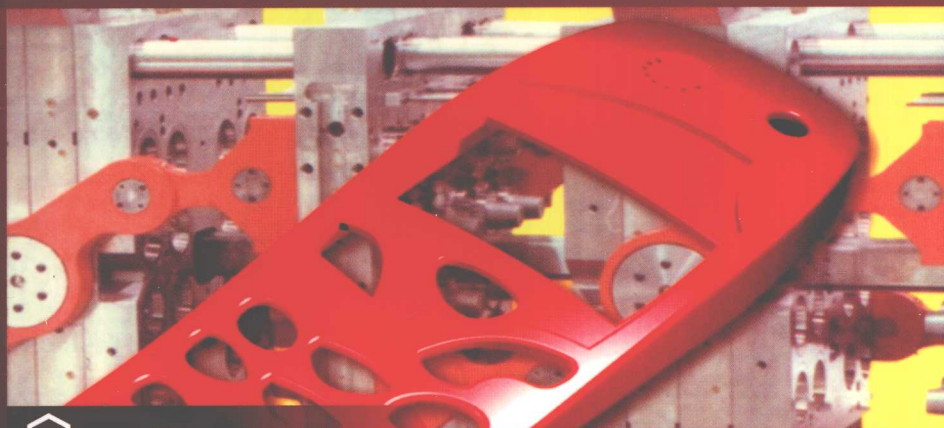
Process, Design, and Simulation

J.P.博蒙特 (J.P.Beaumont)

[美] R.内格尔 (R.Nagel) 著

R.舍曼 (R.Sherman)

黄汉雄 王喜顺 等译



化学工业出版社

成功的注射成型

加工、设计和模拟

Successful Injection Molding

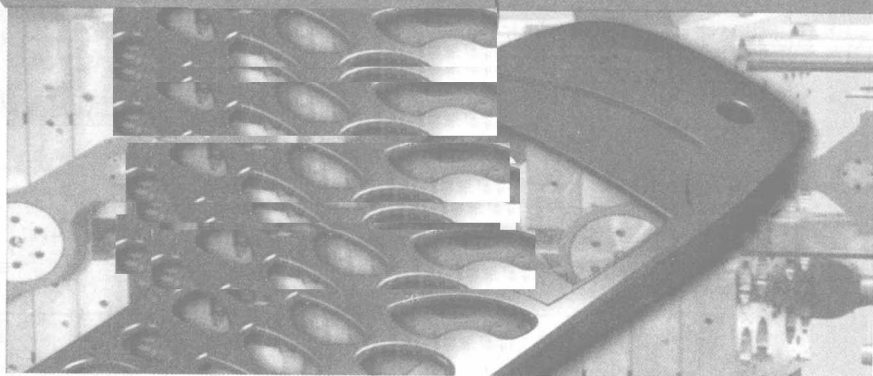
Process, Design, and Simulation

J.P.博蒙特 (J.P. Beaumont)

[美] R.内格尔 (R. Nagel) 著

R.舍曼 (R. Sherman)

黄汉雄 王喜顺 等译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在阐述塑料注塑过程及其采用的热塑性塑料的结构、性能、制品设计和模具设计的基础上,着重介绍了注塑机理以及注塑的计算机辅助工程(CAE)技术,以大量实例讲述了注塑过程中出现的各种问题和解决办法。本书内容全面,实用性强,技术先进,可供涉及注塑产品和模具开发或注塑过程的技术人员使用,还可为注塑 CAE 分析人员以及相关行业人士提供指导。

图书在版编目(CIP)数据

成功的注射成型:加工、设计和模拟/[美]博蒙特(Beaumont, J. P.), [美]内格尔(Nagel, R.), [美]舍曼(Sherman, R.)著;黄汉雄等译. —北京:化学工业出版社, 2009. 4

书名原文: Successful Injection Molding Process, Design, and Simulation
ISBN 978-7-122-04396-2

I. 成… II. ①博…②内…③舍…④黄… III. 注塑-技术 IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 200653 号

Successful Injection Molding Process, Design, and Simulation by J. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman.
ISBN 3-446-19433-9

Copyright © 2002 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:01-2003-3167

责任编辑:白艳云 李 胤
责任校对:陈 静

装帧设计:史利平

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:三河市延风印装厂
850mm×1168mm 1/32 印张12 3/4 字数340千字 2009年4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:39.00 元

版权所有 违者必究

译者前言

《成功的注射成型——加工、设计和模拟》(Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation)一书由 John P. Beaumont、Bob Nagel 和 Bob Sherman 三位专家共同撰写,他们有长期在塑料工业界尤其是注塑计算机辅助工程(CAE)技术的应用及其培训方面工作的经验。而且本书是按初学者和专家都能接受的方式撰写的,旨在提供实际注塑及其与 CAE 成功应用之间关系的基础。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计算机模拟的分析人员参考。

本书序由黄汉雄翻译,第 1 章由黄汉雄和钟桂龙翻译,第 2 章由邓艳红和黄汉雄翻译,第 3 章、第 6 章和第 13 章由周文管和王喜顺翻译,第 4 章由李开林翻译,第 5 章由黄耿群、梁碧珊、黄汉雄、王喜顺和杨灿翻译,第 7 章由苗延盛和黄汉雄翻译,第 8 章由尹沾松翻译,第 9 章和第 10 章由黄汉雄和尹沾松翻译,第 11 章由王建康和黄汉雄翻译,第 12 章由李冬和黄汉雄翻译,第 14 章由王会会和黄汉雄翻译,第 15 章由罗良清和黄汉雄翻译。文劲松、邹琳、孙建芳、吴舜英和曲杰等分别对部分译稿提出了修改意见。黄汉雄对全书译稿进行统一校阅和文字润色。

译稿中对原书多处错误和不妥之处做了改正。囿于译校者水平,加上原书个别句子晦涩难懂,曲译或其他不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

译者

2009 年 1 月
于华南理工大学

序

当 Hanser Gardner 出版公司与我商议撰写一本关于注塑的计算机辅助工程 (CAE) 的书时, 我表示我只对写一本以其实际应用为基础的书有兴趣。Hanser 公司接受了我的想法, 接着我就开始了工作, 于是就有了《成功的注射成型》这本书。

我做的第一件事情是补充两个我认识的 CAE 方面的专家来赞同我的意见, 即工业界需要实际指导。我也需要作者具有不同的经验。我的两个选择是 Bob Nagel 和 Bob Sherman。我们三人加起来共有 90 多年在塑料工业界工作的经验, 其中近 50 年涉及注塑 CAE 技术的使用及其培训。

于 1986 年进入 C-MOLD 公司前, Bob Nagel 已经在塑料工业界工作了近 30 年, 其间他从事制品的设计和加工。作为 C-MOLD 团队最早的成员之一, 在接下来的 20 多年中, Nagel 在开发和培训 C-MOLD 软件中起到了重要作用。Bob Sherman 于 1989 年进入 Moldflow 公司, 当时他已有近 13 年在航空工业界从事结构有限元分析 (FEA) 的经验。Sherman 的 FEA 经验使他正好适合于成为 Moldflow (美国) 公司在收缩和翘曲软件应用开发方面的领军人物。自 1995 年离开 Moldflow 公司后, Sherman 成为顾问和 RTP 公司的管理人员, 一直保持着他在工业界的 CAE 领导地位。我在塑料工业界的第一个 10 年从事传统产品和模具的设计以及加工和管理工作。1986 年, 我以设计经理的身份进入 Moldflow 公司, 后来成为技术经理, 负责北美业务。

Moldflow 公司是第一家向工业界提供注塑模拟技术的商业公司, 第一代软件由 Colin Austin (Moldflow 公司的创始人) 开发。直至 1983 年, 该软件仍没有图形界面。没有图形界面使得该 2 维

技术难以理解，许多人难以接受它所提供的信息。缺少培训和不良应用导致了和成功一样多的失败。1986 年，该软件仍处于其发展初期，就在此时的前三年刚推出第一代的 2½ 维模具填充分析软件。尽管这些软件具有潜在的优点，但工业界接受该技术的速度很慢；虽然 Moldflow 公司有近 95% 的注塑模拟软件的市场，然而我惊奇地发现 1986 年时仅有少数的用户；尽管工业界需要新技术，但当新技术出现时，其被接受的速度通常很慢。

在 Moldflow 公司工作仅 6 个月后，我发现该公司处于财政崩溃的边缘。不过，通过快速和战略性的重组，公司幸存下来。有多家公司（尤其是 C-MOLD 公司）开始竞争注塑 CAE 软件的市场。竞争推动了该技术的向前发展，短短几年，有多种注塑 CAE 软件推向了市场，不仅有充模分析软件，而且有 3 维模具冷却分析软件、新开发的多层有限元求解方法以及保压、收缩和翘曲分析软件。这些软件的用户界面变得更加友好，可视化程度的改善使其更易被市场接受。上述一切都发生于我在 Moldflow 公司工作的三年中。1989 年，因为有一个机会到伊利宾夕法尼亚州立大学帮助创办一个新的塑料工程技术专业，我离开了 Moldflow 公司。

目前，注塑 CAE 技术在继续发展，并将永远继续发展。计算机运行速度的提高改进了求解方法，在从表面传输文件和目前设计人员所使用的实体 CAD 建模模块上做了大量工作。这些与改进的用户界面一起，使软件越来越便于使用。然而，出现的问题是改进的模型传输方法和简化的用户界面给用户留下了一个错误的印象，就是这些软件几乎可驾驭他们自己；此外，软件可视化程度的明显提高使用户疏忽了这样的事实，即这些软件数学近似的模拟结果或这些结果的使用存在误差。

注塑模拟软件的成功应用总是需要而且继续需要注塑实践和理论两方面的均衡，成功的注塑需要塑料性能、制品设计、模具设计和注塑过程这些知识。有了这些知识，分析人员能够利用模拟软件提供的信息做出更有意义的决定。我总是把 CAE 软件的使用比作医生所用的 X 射线仪，这两种情况都要求一个熟练的技师来应用

所供给的信息。

《成功的注射成型》这本书是按初学者和专家都能接受的方式撰写的，旨在提供实际注塑及其与 CAE 成功应用之间关系的基础。本书可供涉及注塑产品和模具开发或注塑过程的人员使用，还能为许多注塑 CAE 分析人员或在分析时遇到问题的注塑工业界人员提供指导。

我要感谢 Colin Austin 和 Moldflow 公司，他们通过在注塑模拟应用方面所开展的开拓性工作，对注塑工业做出了重要贡献。该模拟技术使注塑工业发生了革命性的改变。Colin 所开发的应用准则和设计原理现已渗透到整个注塑工业界和本书中。

J. P. 博蒙特

目 录

第 1 章 注塑制品的成功开发和生产	1
1.1 注塑塑料制品的开发	2
1.2 设计过程	4
1.3 数据收集和产品技术规格	8
1.4 注塑塑料制品四大组成部分概述	16
1.4.1 材料	16
1.4.2 制品设计	19
1.4.3 模具设计与制造	21
1.4.4 加工	23
1.5 通过计算机辅助工程实现制品开发的集成	24
1.6 塑料特性和优缺点概述	26
1.6.1 塑料的优点	26
1.6.2 塑料的缺点	29
第 2 章 注塑用热塑性塑料	31
2.1 聚合物结构	31
2.1.1 热塑性塑料	32
2.1.2 无定形热塑性聚合物	33
2.1.3 半结晶热塑性聚合物	34
2.1.4 热固性塑料	34
2.2 熔体流变学：注塑中聚合物的流动	34
2.2.1 非牛顿流动	34
2.2.2 温度对黏度的影响	36

2.2.3	层流	37
2.2.4	喷泉流	37
2.2.5	流道横截面上速度和剪切速率分布	38
2.2.6	常用的黏度模型	39
2.2.7	分子量分布对黏度的影响	41
2.3	塑料的收缩	42
2.3.1	体积收缩	42
2.3.2	半结晶聚合物的体积收缩	44
2.3.3	模腔尺寸	45
2.4	力学性能	47
2.4.1	定义	47
2.4.2	模量	48
2.4.3	塑料的黏弹性	50
2.4.4	塑料模量的获得	51
2.4.5	其他的基本力学性能和测试方法	54
2.4.6	对设计有用的其他性能	56
2.4.7	材料数据误差的根源	57
2.5	CAE 分析人员材料准则	57
	参考文献	59

第3章 注塑过程 60

3.1	过程概述	60
3.2	注塑参数	62
3.3	充模	64
3.4	开始充模时的先决条件	66
3.5	过程的物理现象	67
3.6	压实和保压阶段	68
3.7	冷却阶段	70
3.8	塑化和熔体温度的控制	74
3.9	顶出	74

3.10	熔体压力的产生和分布	75
3.11	作用在注塑机上的力的产生和分布	76
3.12	实际注射参数和注塑过程分析的关系	77
第4章	注塑塑料制品设计准则	79
4.1	主壁设计	80
4.1.1	保持均匀壁厚	81
4.1.2	壁厚最小化	82
4.1.3	壁的形状	83
4.1.4	表面抛光	83
4.1.5	加强肋、角撑板和凸台	84
4.1.6	拐角、内圆角和倒圆半径	90
4.1.7	锥度和脱模角	91
4.1.8	倒陷和孔	91
4.1.9	模芯	95
4.1.10	避免画框特征	96
4.1.11	整体活页	97
4.2	制品设计实例	98
第5章	模具设计	103
5.1	模具装配	103
5.2	根据熔体输送系统(流道)的模具分类	106
5.2.1	冷流道模具	106
5.2.2	热流道模具	110
5.3	流道设计	126
5.3.1	冷流道设计	128
5.3.2	结构对称流道(冷与热流道)的流道平衡	130
5.4	浇口设计	140
5.4.1	浇口类型	140
5.4.2	浇口位置	148

5.5 长寿命和高刚度模具的结构设计	150
5.5.1 模具材料的选择	150
5.5.2 疲劳	152
5.5.3 阴模侧壁挠曲	152
5.5.4 模芯挠曲	153
5.5.5 支承板挠曲	154
5.6 模具冷却	156
5.6.1 实际要考虑的问题	157
5.6.2 热膨胀	159
5.6.3 并联和串联的冷却孔道	160
5.6.4 隔板和套管	162
5.7 模具顶出装置	163
5.7.1 顶出的基本问题	163
5.7.2 顶出方法	166
5.7.3 顶出要考虑的问题	168
5.7.4 顶出设计	170
5.8 排气设计	174
参考文献	177

第6章 充模及其对制品和材料的影响..... 178

6.1 塑料熔体的流动	178
6.1.1 模腔内的熔体流动	178
6.1.2 注塑过程中压力的形成	179
6.1.3 冻结层的隔热作用	184
6.1.4 充模速率和充模压力的影响	185
6.2 保压阶段	187
6.2.1 塑料冷却时的热收缩	187
6.2.2 用于抵消热收缩的补偿流动	188
6.2.3 补缩阶段低流率产生的结果	189
6.2.4 补缩阶段的压力分布	189

6.2.5	浇口冻结	191
6.3	浇口冻结后的冷却	192
6.4	流动对收缩的影响	192
6.4.1	剪切诱导取向	192
6.4.2	瞬态流动诱导取向	194
6.4.3	延伸流动诱导取向	196
6.4.4	纤维增强塑料的收缩	196
6.4.5	颗粒填充塑料的收缩	200
6.5	翘曲和残余应力	200
6.5.1	收缩对翘曲和残余应力的影响	200
6.5.2	冷却对收缩和翘曲的影响	203
6.5.3	残余应力	204
6.5.4	注塑制品的退火	205
6.6	加工对制品质量的影响	205
6.6.1	力学性能	205
6.6.2	熔接缝	210
6.7	加工和模具设计引起的缺陷	212
6.7.1	凹陷与孔隙	212
6.7.2	喷射	213
6.7.3	“流动”痕迹	214
6.7.4	困气	214
6.7.5	烧焦	215
	参考文献	216

第7章 设计和加工策略..... 217

7.1	保持均匀的制品壁厚	217
7.2	慎用注塑制品的通用设计准则	220
7.3	建立模腔内简单、合适的流动模式	221
7.4	整个模腔内的均衡充模	225
7.4.1	模腔内的浇口位置	225

7.4.2 多腔模具	230
7.5 保证均匀的模具和熔体温度	232
7.6 消除、合理设置或调节熔接缝	233
7.7 避免熔体滞留	234
7.8 控制熔体的摩擦热	235
7.9 尽量减小冷流道的体积	236
7.10 避免过高的剪切速率	237
7.11 避免过大剪切应力和保持均匀的剪切应力	238
参考文献	239

第8章 原型制品成型 **240**

8.1 何时成型原型制品	240
8.2 原型制品成型方法	242
8.2.1 计算机辅助设计与工程	242
8.2.2 棒材的机加工	244
8.2.3 立体光刻成型	246
8.2.4 液态树脂浇注	246
8.2.5 热成型	247
8.2.6 注塑	248

第9章 计算机辅助工程介绍 **252**

9.1 CAE 技术及其应用概述	252
9.1.1 背景	253
9.2 成功应用注塑模拟存在的问题	255
9.3 影响准确性的求解方法和假设	256
9.3.1 常用简化及相关误差	259
9.3.2 迭代解法	265
9.4 2 维分析	267
9.4.1 可行性研究 (条状充模)	268
9.4.2 流道分析	271

9.5	中平面 2½ 维壳分析	272
9.6	双域建模与分析	275
9.7	建模产生的误差	276
9.8	材料数据的缺陷	280
9.9	过程关系产生的误差	282
9.10	非技术方面	285
9.10.1	模拟的必要性	285
9.10.2	公司环境和策略	285
9.10.3	培训	286
9.10.4	程序运行	286
9.10.5	结果解释	287
9.10.6	沟通	287
第 10 章	计算机辅助工程分析过程	289
10.1	注塑分析需求概述	289
10.1.1	第 1 阶段: 制品开发与制品设计人员	289
10.1.2	第 2 阶段: 模具设计	293
10.1.3	第 3 阶段: 生产人员	294
10.2	注塑模拟过程概述	295
10.3	实验设计与 CAE 相结合优化设计和加工参数	306
第 11 章	计算机辅助工程中热塑性塑料的表征	308
11.1	用于模拟的性能表征	308
11.2	灵敏度分析	308
11.2.1	加工条件	312
11.2.2	模拟结果	312
11.2.3	结果分析	314
11.2.4	小结	317
11.3	实验室和生产	317

11.4	确定熔体黏度的流变测试	318
11.4.1	ASTM D3835, 使用毛细管流变仪测量热塑性塑料的流变性能	318
11.5	热性能	319
11.5.1	热导率	319
11.5.2	比热容	320
11.5.3	密度与 PVT 的关系	321
11.5.4	转变温度	322
11.6	结构性能	324
11.7	力学性能	324

第 12 章 注塑分析中的几何建模 326

12.1	2 维分析	328
12.2	薄壳体有限元模型 (2½ 维)	330
12.2.1	网格密度确定准则	331
12.2.2	模型细节的考虑	336
12.2.3	充模和保压分析的网格密度	337
12.2.4	冷却分析所需的网格	337
12.2.5	收缩和翘曲分析	337
12.3	薄壳体分析的 3 维模型转变成 2½ 维模型	338
12.4	3 维分析	339

第 13 章 充模和保压分析 340

13.1	理论和假设	340
13.1.1	流体动力学和层流	340
13.1.2	喷泉流	341
13.1.3	流动初步近似——中平面对称假设	342
13.1.4	模壁与中心之间的温度梯度	343
13.1.5	比容 ($v \sim 1/\rho$) 与温度和压力相关	343

13.1.6	比热容 (C_p) 与温度相关	345
13.1.7	热导率 (k) 与转变相关	345
13.1.8	转变温度和不流动温度	346
13.1.9	熔体黏度与温度、压力和剪切速率相关	346
13.2	分层离散方法	348
13.3	过程优化	348
13.3.1	优化对象	348
13.3.2	制品品质	353
第 14 章	模具冷却分析: 计算机辅助工程和边界元法	360
14.1	均匀冷却及其对翘曲的影响	361
14.2	冷却过程的优化	362
14.3	建模问题	367
第 15 章	收缩和翘曲分析	369
15.1	翘曲产生的原因	369
15.1.1	制品厚度方向的收缩率不均匀	370
15.1.2	制品面积收缩率的不均匀: 2 维收缩	373
15.1.3	取向效应产生的收缩率不均匀	373
15.2	翘曲稳定性与预测	374
15.2.1	小翘曲分析	375
15.2.2	弯曲分析	375
15.2.3	大翘曲分析	376
15.3	翘曲分析	377
15.3.1	沿制品厚度方向收缩不均匀的分析	378
15.3.2	面积收缩不均匀的分析	382
15.3.3	取向诱导收缩不均匀的分析	383
15.4	残余应力	384
15.4.1	残余应力的形成	384

15.4.2	短期效应与长期效应·····	384
15.4.3	应力松弛·····	384
15.5	精密制品的收缩率预测·····	385
15.5.1	各向同性收缩与各向异性收缩·····	385
15.5.2	体积收缩率与线性收缩率·····	385
15.6	解释与应用·····	386
15.6.1	翘曲结果解释·····	387
15.6.2	翘曲分析——确定原因·····	388
15.6.3	尽量减小翘曲——一种方法·····	389