快速热循环注塑成型技术

赵国群 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

快速热循环注塑成型技术

Rapid Heat Cycle Injection Molding Technology

赵国群　著

机 械 工 业 出 版 社

本书从理论和实践两个方面，较为系统地介绍了快速热循环注塑成型工艺的理论与技术体系。全书共 11 章，详细介绍了快速热循环注塑技术原理与特点、注塑模具温度动态控制方法、注塑模具结构特点与设计方法、注塑过程传热分析、注塑模具加热与冷却系统设计、注塑模具疲劳寿命分析、塑件翘曲变形与表面质量控制方法、纤维增强塑料快速热循环注塑工艺、快速热循环注塑用材料及其改性、快速热循环注塑过程数值建模方法、生产线构建技术、快速热循环注塑技术应用、快速热循环注塑技术发展趋势等。

本书可作为高等院校机械类和材料加工类专业本科与研究生教学的教材和参考书，同时也可供企业界相关专业工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

快速热循环注塑成型技术/赵国群著. —北京：
机械工业出版社，2014.6
ISBN 978-7-111-46866-0

Ⅰ.①快… Ⅱ.①赵… Ⅲ.①注塑—塑料成型—热成型 Ⅳ.①TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 111139 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑：周国萍 责任编辑：周国萍 孙 阳
版式设计：赵颖喆 责任校对：樊钟英
封面设计：路恩中 责任印制：乔 宇
北京铭成印刷有限公司印刷
2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 19.5 印张 · 474 千字
0001—2000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-46866-0
定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
策划编辑：(010)88379733

电话服务	网络服务
社 服 务 中 心：(010)88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	
策 划 编 辑：(010)88379733	**封面无防伪标均为盗版**

前　言

注塑(塑料注射)成型技术广泛应用于家电、汽车、电子、航空等领域，工程塑料成型加工中绝大多数采用注塑成型。但注塑成型的塑件易产生熔接痕、银线、白点等缺陷，影响塑件的外观质量和力学性能。高品质外观塑件必须通过打磨、喷涂、罩光等二次加工过程来弥补外观质量不足，然后才能用于整机装配。由此产生了一系列问题，例如，生产流程长、效率低、能耗和成本高，塑料可回收性差，存在苯系气体和重金属排放，污染严重。取消塑件的打磨、喷涂、罩光等二次加工过程，研发注塑后可直接用于装配的高品质塑件注塑成型技术，是注塑行业急需解决的问题。

快速热循环(高光无熔接痕)注塑成型新技术是目前国际上最前沿的注塑成型技术之一。该技术使塑件表面高光、无熔接痕、无流痕、无流线等，可取消罩光、喷涂等后续加工工序，消除因喷涂等造成的环境污染，明显改善劳动环境。在家电、汽车、电子、通信、计算机等行业具有广泛的应用前景，是外观塑件注塑成型制造技术的一个重要发展方向。

快速热循环注塑技术的概念最早由日本小野和三井株式会社于2004年提出，美国、韩国和我国等也相继进行了研究。作者所在单位自2005年开始进行该技术的研究开发，并于2006年与海信集团有限公司合作，在国家科技支撑计划项目、国家杰出青年科学基金、山东省高新技术自主创新项目以及有关企业的资助和支持下，系统地开展了快速热循环注塑成型技术的研究开发与推广应用工作，相继自主建成了系列快速热循环注塑生产线，开发了几十种快速热循环高光注塑产品，逐步实现了产业化应用，在电视机、音箱、空调等电器外观塑件注塑成型方面获得了广泛应用，取得了显著的经济、社会和环境效益。

快速热循环注塑技术具有广阔的发展前景和应用领域，在与多色多组分注塑技术、微孔发泡注塑技术、反压注塑技术等结合方面也将具有很好的发展应用前景。

作者所在单位对该技术开展了大量的基础研究、应用研究和推广应用等工作，积累了许多有价值的研究成果和经验。同时，作者及其团队相继培养了多名博士研究生和硕士研究生，开展了快速热循环注塑成型技术的研究生与本、专科生的教学工作，在研究开发、工程应用和传授该项技术过程中积累了较多的文献资料。

本书是根据作者及其研究团队近年来在从事快速热循环注塑成型技术研究与应用基础上积累编写而成的，内容包括快速热循环注塑技术原理及其优势、注塑模具温度动态控制方法、注塑模具结构特点与设计制造方法、注塑过程传热分析、注塑模具加热与冷却系统设计、注塑模具疲劳寿命分析、塑件翘曲变形与表面质量控制方法、纤维增强塑料快速热循环注塑工艺、快速热循环注塑用材料及其改性、快速热循环注塑过程数值建模方法、注塑生产线构建技术、快速热循环注塑技术应用、快速热循环注塑技术发展趋势等。

本书的主要内容是作者及其研究团队成员共同努力的结果。在本书编写过程中，得到了作者所在单位的管延锦教授、李辉平教授，作者指导培养的博士生王桂龙博士、李熹平博士、刘继涛博士、张爱敏博士和青岛海信模具有限公司有关技术人员的大力支持。没有团队成员们多年来的鼎力合作，就没有本书体现出来的内容。

由于时间仓促和水平有限，书中内容难免有不恰当之处，敬请读者批评和指正。

作者

2014 年 6 月

目　录

前言

第 1 章　概论 …… 1

1.1　引言 …… 1

1.2　注塑成型技术 …… 1

1.2.1　注塑机 …… 1

1.2.2　注塑模具 …… 3

1.2.3　注塑成型工艺过程 …… 4

1.2.4　注塑成型周期 …… 6

1.2.5　注塑工艺变量 …… 7

1.3　注塑产品的主要缺陷 …… 10

1.4　注塑成型技术的发展趋势 …… 14

1.5　本书的内容 …… 15

第 2 章　快速热循环注塑工艺 …… 16

2.1　引言 …… 16

2.2　快速热循环注塑技术原理 …… 17

2.3　快速热循环注塑技术的特点与优势 …… 18

2.4　快速热循环注塑技术的分类 …… 21

2.5　快速热循环注塑技术的发展与应用 …… 22

第 3 章　快速热循环注塑模具温度动态控制技术 …… 25

3.1　引言 …… 25

3.2　常用快速热循环注塑模具温度动态控制方法 …… 26

3.2.1　对流加热 …… 28

3.2.2　电阻加热 …… 30

3.2.3　高频感应加热 …… 31

3.2.4　辐射加热 …… 34

3.2.5　火焰加热 …… 35

3.2.6　热管、均热板加热技术 …… 35

3.2.7　其他主动加热技术 …… 36

3.2.8　被动加热技术 …… 37

3.3　蒸汽加热动态模具温度控制系统 …… 39

3.3.1　温控系统结构组成 …… 39

3.3.2　阀门管路转换装置 …… 41

3.3.3　控制与监控单元 …… 41

3.3.4　监控单元硬件设计 …… 41

3.3.5　监控单元软件设计 …… 43

3.3.6　多点动态模具温度控制技术 …… 44

3.4　电加热模具温度控制系统 …… 46

3.4.1　系统结构与原理 …… 46

3.4.2　加热系统 …… 47

3.4.3　冷却系统 …… 50

3.4.4　控制与监视系统 …… 50

第 4 章　快速热循环注塑模具设计与制造 …… 53

4.1　引言 …… 53

4.2　蒸汽加热快速热循环注塑模具设计方法 …… 54

4.2.1　蒸汽加热快速热循环注塑模具结构设计 …… 54

4.2.2　蒸汽加热快速热循环注塑模具加热冷却系统设计 …… 56

4.2.3　蒸汽加热快速热循环注塑模具热响应评估 …… 58

4.3　电加热快速热循环注塑模具设计方法 …… 61

4.3.1　电加热快速热循环注塑模具结构设计 …… 62

4.3.2　电加热快速热循环注塑模具热响应评估 …… 64

4.3.3　浮动型腔式电加热快速热循环注塑模具 …… 67

4.4　随形加热冷却快速热循环注塑模具结构设计 …… 70

4.4.1　蒸汽加热快速热循环注塑模具 …… 70

4.4.2　电加热快速热循环注塑模具 …… 72

4.5　快速热循环注塑模具制造技术 …… 74

4.5.1　快速热循环注塑模具材料 …… 74

4.5.2　快速热循环注塑模具抛光技术 …… 75

4.5.3　快速热循环注塑模具技术要求

与检测方法 …… 77
4.6 快速热循环注塑产品结构设计 …… 79
第 5 章 快速热循环注塑过程传热分析 …… 83
5.1 引言 …… 83
5.2 快速热循环注塑过程传热分析基本理论 …… 84
5.2.1 传热学基本理论 …… 84
5.2.2 模具与加热系统之间的热交换 …… 87
5.2.3 模具与塑件之间的热交换 …… 89
5.2.4 模具与冷却系统之间的热交换 …… 89
5.2.5 模具与周围环境间的热交换 …… 91
5.3 快速热循环注塑过程热平衡分析 …… 92
5.3.1 蒸汽加热快速热循环注塑过程热平衡分析 …… 92
5.3.2 电加热快速热循环注塑过程热平衡分析 …… 95
5.4 快速热循环注塑模具热响应分析 …… 98
5.4.1 分析模型 …… 99
5.4.2 初始条件与边界条件 …… 100
5.4.3 结果分析与讨论 …… 101
5.4.4 能量消耗 …… 105
5.5 影响模具热响应效率的因素分析 …… 108
5.5.1 加热和冷却介质 …… 110
5.5.2 加热和冷却介质温度 …… 112
5.5.3 加热和冷却系统布局 …… 114
5.5.4 模具材料 …… 115
5.5.5 塑件厚度 …… 117
第 6 章 快速热循环注塑模具的疲劳寿命分析 …… 120
6.1 引言 …… 120
6.2 模具疲劳寿命分析 …… 121
6.2.1 瞬态传热分析 …… 121
6.2.2 热结构分析 …… 126
6.2.3 疲劳分析 …… 128
6.3 影响蒸汽加热模具寿命的因素分析 … 129
6.3.1 分析评估模型 …… 129
6.3.2 模具温度的影响 …… 130
6.3.3 锁模压力的影响 …… 131
6.3.4 型腔板固定方式的影响 …… 131
6.3.5 加热冷却管道规格与布局的影响 …… 132
6.3.6 加热介质温度的影响 …… 133
6.4 影响电加热模具寿命的因素分析 …… 134
6.4.1 分析评估模型 …… 134
6.4.2 模具温度的影响 …… 134
6.4.3 锁模压力的影响 …… 135
6.4.4 型腔板固定方式的影响 …… 135
6.4.5 电加热元件布局的影响 …… 136
6.4.6 电加热元件规格的影响 …… 137
第 7 章 快速热循环注塑模具加热冷却系统优化设计 …… 139
7.1 引言 …… 139
7.2 响应曲面法 …… 140
7.3 回归模型的显著性检验 …… 141
7.3.1 拟合优度检验 …… 141
7.3.2 *F* 检验 …… 142
7.3.3 *P* 值检验 …… 142
7.4 粒子群优化算法 …… 142
7.5 蒸汽加热模具加热冷却管道优化设计 …… 143
7.5.1 有限元分析与优化模型 …… 143
7.5.2 Box-Behnken 试验设计 …… 145
7.5.3 响应曲面模型的拟合 …… 146
7.5.4 模型的评估与验证 …… 147
7.5.5 响应曲面分析 …… 150
7.5.6 优化目标函数 …… 151
7.5.7 优化结果与应用实例 …… 153
7.6 电加热模具加热冷却管道优化设计 … 156
7.6.1 有限元分析与优化模型 …… 156
7.6.2 中心复合试验设计 …… 157
7.6.3 响应曲面模型的拟合 …… 158
7.6.4 模型的评估与验证 …… 159
7.6.5 响应曲面分析 …… 162
7.6.6 优化目标函数 …… 163
7.6.7 优化结果与应用实例 …… 165
第 8 章 快速热循环注塑工艺分析与优化 …… 168
8.1 引言 …… 168
8.2 快速热循环注塑与常规注塑工艺

对比分析 …… 169
8.2.1 熔体流长 …… 170
8.2.2 形状和尺寸精度 …… 171
8.2.3 缩痕 …… 172
8.2.4 冷却时间 …… 174
8.2.5 双折射 …… 176
8.3 快速热循环塑件翘曲变形 …… 176
8.4 保压对塑件翘曲变形的影响 …… 178
8.4.1 分析模型 …… 179
8.4.2 单段保压 …… 179
8.4.3 多段保压 …… 182
8.5 冷却对塑件翘曲变形的影响 …… 187
8.5.1 冷却时机 …… 187
8.5.2 冷却速度 …… 189
8.6 工艺优化与翘曲变形控制 …… 190
8.6.1 试验方案 …… 190
8.6.2 工艺变量分析与讨论 …… 190
8.6.3 模型拟合与分析 …… 191
8.6.4 优化目标函数 …… 193
8.6.5 优化结果与验证 …… 195
第 9 章 快速热循环注塑件表面质量与力学性能 …… 196
9.1 引言 …… 196
9.2 快速热循环注塑试验系统 …… 197
9.2.1 试验装置 …… 197
9.2.2 热响应分析 …… 200
9.3 工艺参数对熔体充填能力的影响 …… 203
9.3.1 试验设计 …… 203
9.3.2 试验结果 …… 204
9.4 型腔温度对塑件表面质量的影响 …… 206
9.4.1 表面粗糙度 …… 207
9.4.2 表面光泽度 …… 212
9.4.3 熔接痕 …… 214
9.5 型腔温度对塑件力学性能的影响 …… 218
9.5.1 拉伸强度 …… 218
9.5.2 冲击强度 …… 221
9.6 快速热循环注塑技术的应用 …… 224
第 10 章 快速热循环注塑材料的物理改性 …… 227
10.1 引言 …… 227
10.2 聚合物共混改性方法 …… 228
10.3 ABS/PMMA 共混改性 …… 229
10.4 助剂对 ABS/PMMA 合金性能的影响 …… 230
10.4.1 抗氧剂对 ABS/PMMA 合金性能的影响 …… 230
10.4.2 润滑剂对 ABS/PMMA 合金性能的影响 …… 230
10.4.3 相容剂对 ABS/PMMA 合金性能的影响 …… 231
10.5 ABS/PMMA 合金的增韧改性 …… 231
10.5.1 力学性能 …… 232
10.5.2 应变速率的影响 …… 233
10.6 纳米碳酸钙改性 ABS/PMMA 合金 … 235
10.6.1 纳米碳酸钙 ABS/PMMA 合金 … 235
10.6.2 纳米碳酸钙表面改性 …… 239
10.7 陶瓷晶须改性 ABS/PMMA 合金 …… 244
10.8 ABS/PMMA 合金快速热循环注塑成型性能 …… 247
第 11 章 快速热循环注塑过程数值模拟方法 …… 254
11.1 引言 …… 254
11.2 计算流体力学基本理论 …… 255
11.3 数值方法和求解过程 …… 255
11.3.1 求解域的离散 …… 256
11.3.2 控制方程的离散 …… 256
11.3.3 代数方程组的求解 …… 257
11.4 快速热循环注塑加热过程模具热响应模型 …… 258
11.4.1 热响应分析的控制方程 …… 258
11.4.2 边界条件 …… 259
11.4.3 数值方法实现技术 …… 260
11.5 快速热循环注塑熔体充填流动过程建模 …… 260
11.5.1 熔体流动过程的控制方程 …… 261
11.5.2 熔体与模具间的瞬态传热 …… 262
11.5.3 快速热循环注塑熔体充填过程的数学模型 …… 263
11.5.4 边界条件 …… 263
11.5.5 数值方法实现技术 …… 265
11.6 快速热循环注塑保压过程建模 …… 265

11.6.1 快速热循环注塑保压过程的数学模型 …… 266
11.6.2 熔体的可压缩性 …… 266
11.6.3 边界条件 …… 267
11.6.4 数值方法实现技术 …… 268
11.7 快速热循环注塑冷却过程建模 …… 268
11.7.1 快速热循环注塑冷却过程的热交换分析 …… 269
11.7.2 快速热循环注塑冷却过程的数学模型 …… 270
11.7.3 边界条件 …… 270
11.7.4 数值方法实现技术 …… 271
11.8 多循环快速热循环注塑过程建模 …… 272
11.9 算例分析 …… 274
11.9.1 蒸汽加热式快速热循环注塑过程数值模拟 …… 274
11.9.2 电加热式快速热循环注塑过程数值模拟 …… 281
参考文献 …… 286

第 1 章　概　　论

1.1　引言

塑料是由聚合物和某些助剂结合而成的高分子化合物，在一定的温度和压力下具有流动性，可以被成型为具有一定几何形状和尺寸的制品。塑料加工是将塑料原材料转换为塑料制品的关键环节。注塑成型(也称塑料注射成型)是塑料制品最主要的加工方法，在塑料制品生产中占有非常重要的地位。注塑成型是一种注射兼模塑的成型方法。该技术将塑料的粒料或粉料置入注塑机料筒内，经过输送、压缩、剪切、拉伸、混合等作用，使物料熔融和均化，此过程又称为塑化；然后借助柱塞或螺杆向已熔化的聚合物熔体施加注射压力，经过喷嘴和模具浇道系统注入锁好的模具型腔中，再经过保压、冷却、开启、顶出，便得到具有一定几何形状和精度的塑料制品[1]。

由于具有成型精度高、自动化程度高、生产效率高、加工柔性化程度高、可成型复杂形状产品等一系列优点，注塑成型已成为一种应用最为广泛的塑料材料加工方法，广泛应用于家用电器、汽车、通信工程、医疗卫生、航空航天、日用品等国民经济的各个领域，具有巨大的市场需求和广阔的发展前景。据国家统计局最新公布的统计数据显示，我国 2012 年塑料制品规模以上企业总产量达 5781 万 t，2012 年塑料制品工业总产值达 1.7 万亿元，已成为世界上最大的塑料制品生产和消费国家，注塑制品约占整个塑料制品总量的 30%。我国塑料工业更大的消费市场和应用领域还在开发之中，随着塑料工业区域的结构优化，塑料工业在我国发展空间巨大。

1.2　注塑成型技术

注塑成型是塑料成型中仅次于挤出成型的重要成型方法。除大尺寸的管、棒、板等型材外，注塑成型可一次成型各种形状和尺寸的塑料制品。注塑成型技术适用于除氟塑料以外的绝大多数热塑性塑料和多种热固性塑料。要想取得合格的塑料制品，必须要有设计合理、制造精良的注塑模具，还要有和该模具配套的先进的注塑机以及合理的加工工艺。因此，人们常将注塑机、注塑模具以及注塑工艺称为注塑过程得以顺利进行的三个基本要素[2]。

1.2.1　注塑机

注塑成型技术最主要的设备是注塑成型机，简称注塑机。注塑机是一种利用注塑成型工艺将塑料材料加工成不同形状制品的塑料成型加工设备。图 1-1 所示为近代注塑机的普通机型结构。注塑机主要由注塑部件、合模部件、机身、液压系统、加热系统、冷却系统、润滑系统、电气控制系统、加料装置等组成，如图 1-2 所示。

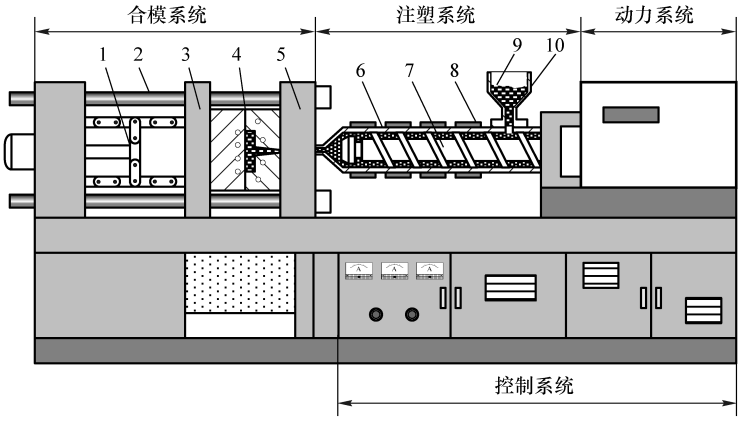


图 1-1　注塑机的普通机型结构

1—锁模机构　2—导柱　3—动模板　4—模具　5—定模板　6—料筒　7—螺杆　8—加热圈　9—原料　10—料斗

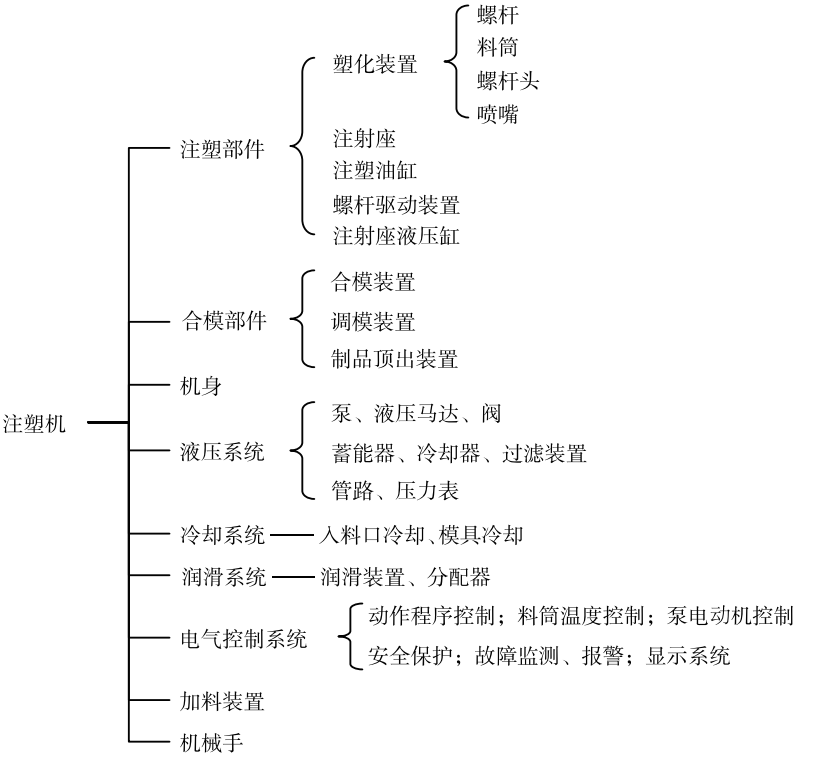


图 1-2　注塑机组成示意图[3]

1. 注塑部件

注塑部件的作用是“吃进”塑料，高效塑化，在高压、高速下将熔体射入型腔。注塑部件由塑化装置、螺杆驱动装置、注射装置等组成。

2. 合模部件

合模部件的作用是固定模具，使动模板作开闭模运动，锁紧模具，保压冷却定型，并顶出制品落下。

3. 液压系统

液压系统是注塑机的循环系统，为各执行机构(工作油缸)提供压力、速度的回路，由压力、流量主回路和执行机构的分回路组成。

4. 加热/冷却系统

加热系统用于加热料筒和喷嘴，其上装有加热圈，用热电偶分段检测。

冷却系统则用来冷却液压油、料口及模具，将冷却水分配到几个独立的回路并对流量进行调节，通过检测温度，对冷却水流量进行闭环调节。

5. 润滑系统

润滑系统对动模板、调模装置、连杆铰链等处具有相对运动的部位提供润滑的回路，减少能耗，提高零件寿命。

6. 电气控制系统

电气控制系统是注塑机的“中枢神经”系统，用于控制注塑机的各种程序及其动作，电控、机械、液压系统相结合对注塑机的工艺程序及其参数实行精确、灵敏、稳定的控制与调节。

7. 安全装置与监测系统

安全装置是保护人、机和模具安全的装置，由安全门、行程阀、限位开关、光电检测元件等组成，实现电-机-液的连锁低压保护。

监测系统对注塑机油温、料温、超载、工艺、设备故障进行监测，在发生异常时进行指示和报警。

1.2.2　注塑模具

在注塑过程中，塑料熔体的流动和最终成型全部是在注塑模具中完成的。因此，注塑模具对于最终成型的塑料产品质量具有极其重要的影响。模具结构设计是获得合格注塑产品的关键，它直接关系着模具开发工作的成败。注塑模具由动模和定模两个部分组成。动模安装在注塑机的移动模板上，定模安装在注塑机的静止模板上。注塑成型时，在合模机构的作用下，动、定模紧密闭合，构成浇注系统和型腔。当密闭型腔中的熔体冷却定型后，分离两侧模具，以取出塑件。

注塑模具一般由以下几部分组成：成型零部件、浇注系统、导向与定位机构、脱模机构、侧向分型与抽芯机构、固定安装部件、模具温度调节系统、排气机构及其他辅助机构[4]。

1. 成型零部件

赋予成型材料形状和尺寸的零件。通常由型芯、凹模或型腔以及螺纹型芯或型环、镶块等构成。

2. 浇注系统

将熔融塑料由注塑机喷嘴引向闭合的模具型腔。通常由主流道、分流道、浇口和冷料井等组成。

3. 导向与定位机构

为了保证动模与定模闭合时能准确对准而设计的导向部件。通常由导柱和导套组成。

4. 脱模机构

实现塑件脱模的装置。脱模机构的结构形式较多，最常用的有推杆、推管和推件板等脱模机构。

5. 侧向分型与抽芯机构

对于有侧孔或侧向凹模的塑件，在被推出之前必须先进行侧向抽芯或分开凹模拼块(分型)方能顺利脱模。

6. 模具温度调节系统

为了满足注塑成型工艺模具温度的要求，需要由模具温度调节系统对模具温度进行调节。

7. 排气机构

为了将模具型腔内的气体顺利排出，防止塑件产生气穴等缺陷，常在模具分型面处开设排气槽；对于小型塑件，因排气量不大，可直接利用分型面排气。许多模具的推杆或型芯与模板的配合间隙均可以起到排气的作用，可不必另开设排气槽。

8. 其他辅助机构

包括支承、固定零件，定位或限位零件等。

图 1-3 所示为一种典型的注塑模具结构。

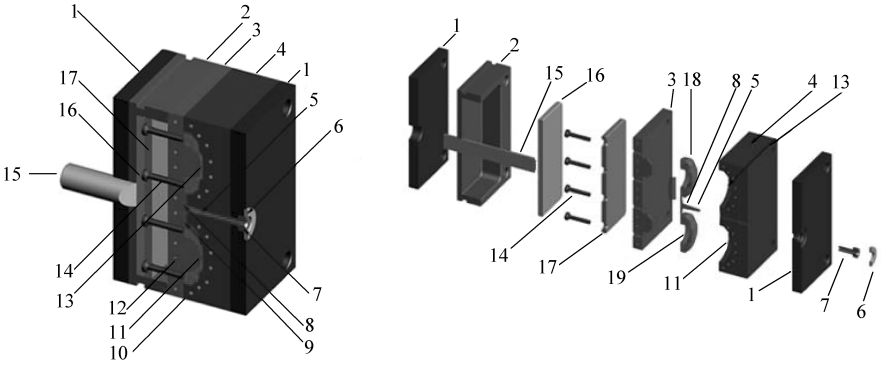


图 1-3　一种典型的注塑模具结构

1—支承板　2—顶杆框　3—模具型芯板　4—模具型腔板　5—主流道　6—定位圈　7—主流道衬套　8—分流道　9—浇口　10—分型面　11—型腔 *B*　12—冷却管道　13—型腔 *A*　14—顶针　15—顶杆　16—顶板　17—顶针固定板　18—塑件 *A*　19—塑件 *B*

1.2.3　注塑成型工艺过程

注塑成型过程的实质就是塑料材料在注塑机和注塑模具的作用下从颗粒或粉末状态转化为塑料制品的过程。一个完整的注塑成型工艺过程包括：成型前准备、注塑机上成型以及制品后处理三大阶段[5]。

1. 成型前准备

成型前准备的内容随原料情况与性质、制品结构及使用要求等不同而略有变化，主要包括原料与处理以及设备与模具的准备。

（1）原料与处理　注塑成型的物料一般使用粒料，也可以是粉料。对于多组分物料，成型前还需进行配制、混合或造粒等工序；对于易吸湿或含挥发物的物料，通常还需进行干燥除去水分及挥发物，以满足注塑工艺要求等。

（2）设备与模具准备　更换物料品种、调换颜色或成型过程中发现物料分解（或降解）等变质情况时，需要对注塑机机筒进行清洗。制品中有嵌件或模具存在型芯时，应对嵌件或型芯预热，以防止因成型物料与嵌件或型芯之间收缩相差悬殊，而造成嵌件或型芯周围产生收缩内应力甚至出现裂纹。预热嵌件或型芯的温度一般取 110 ~ 130℃。注塑成型时，为了保证制品顺利脱模，生产上还常在模具内喷涂脱模剂，常用的脱模剂有硬脂酸锌、液状石蜡、硅油等。

2. 注塑机上成型

物料在注塑机上的注塑成型是一个间歇的、周期性的循环过程，包括加料塑化、注射充模、保压、冷却定型和脱模等阶段。

（1）加料塑化过程　塑化是指物料在机筒内受热达到熔融流动状态且具有良好流动性的全过程，它不仅是注塑成型的准备过程，而且是注塑成型的关键过程之一。从时间上看，它是在上一次注塑周期保压完成后，螺杆或柱塞后退至下一次注射开始前的这段时间进行的。

注塑成型工艺对塑化过程的基本要求是：物料在进入型腔前应得到充分塑化，既要达到设定的成型温度，又要使熔体各处温度尽量均匀一致；塑化过程应不发生或极少发生热降解；两次注射时间间隔内能提供足够量的熔体以保证生产顺利进行。

物料的塑化质量主要由物料的受热情况和所受的剪切作用所决定。物料的受热情况主要取决于机筒温度，相对较高的机筒温度使物料因热传导作用而受热熔融塑化，机筒温度的控制主要通过机筒外部的加热器来调节和保证。而物料受到的剪切作用将会因剪切摩擦生热而强化塑化过程。同时，因机械混合作用使物料组成均匀和物料各处温度分布均匀，因而剪切作用有利于提高塑化质量。同柱塞式注塑机相比，螺杆式注塑机能够充分发挥螺杆的剪切作用，其塑化效率更高，塑化质量更好。因此，目前应用比较广泛的是移动螺杆式注塑机。

（2）注射充模过程　注射充模是指通过螺杆或柱塞的挤压作用将塑化均匀的塑料熔体经喷嘴、流道及浇口注入闭合型腔的过程。这一过程的时间虽然很短，但熔体却在这个时间段发生多方面的变化，是注塑成型最重要和最复杂的阶段之一，对制品质量有重要影响。

熔体在模具内的充填流动方式主要有喷射流和扩展流两种，如图 1-4 所示。具有高黏度充填物的聚合物熔体，如热固性塑料以及橡胶类的熔体，当浇口与型腔厚度方向尺寸相差较悬殊时，将形成喷射流的充模形式，如图 1-4a 所示。高黏度熔体从浇口射出和壁面接触，形成蛇形堆积，直至和对面接触后再逐渐地整体填实。一般的热塑性塑料熔体，对类似平板型腔充模，多形成扩展流动，如图 1-4b 所示。其特点是型腔厚度与长度方向尺寸相差较悬殊，且浇口与型腔厚度方向尺寸接近而在宽度方向上相差大，熔体从浇口流出后，不断地形成波前锋，后面高温熔体不断地推进前面的熔体，发生扩展流动直至充满为止，当前沿熔体和型腔壁接触后，由于模壁温度低于熔体的玻璃化转变温度，故逐渐形成冷凝层。随着充模时间的延长，冷凝层厚度不断地增加

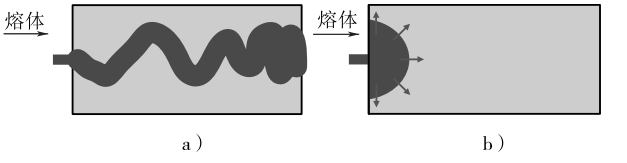


图 1-4　充模形式

a）喷射流　b）扩展流

使得流动通道变小，流动阻力不断地增加，直至全部充填完毕。

在喷射流或湍流状态下充模，很难得到很好的制品，因为不规则的流动容易在熔体中掺杂气体，影响制品的内部质量、表观质量和使用性能。大多数情况下，希望把充模过程控制在扩展流条件下充模。

（3）保压过程　当高温熔体充满型腔后，柱塞或螺杆在最大的前进位置处再停留一段时间，并对腔内熔体施加一定的压力，这就是保压补缩阶段。保压过程是从型腔完全充满开始，直至浇口凝固、柱塞或螺杆后退时为止。保压阶段的特点是：熔体充满型腔，但在浇口封冻之前必须继续保持压力，熔体受到压缩以补偿因熔体冷却造成的体积收缩，防止型腔内物料倒流，充分压实物料，确保制品形状和尺寸。

实现保压补缩必须具备一定的条件。一方面是充模阶段结束后机筒前端仍有足够量的熔体，同时注塑机喷嘴及模具浇注系统尚未冷凝，这是保压补缩的必要条件；另一方面，应有足够高的保压压力和足够长的保压时间，这是保压补缩过程得以实现的充分条件。保压过程是熔体压实增密的过程，因此保压压力和持续时间对熔体的定型过程及其制品质量具有重要影响。

（4）冷却定型过程　当浇口冷凝后，外面的熔体再无法通过浇口进行补缩，保压过程就此终止，螺杆或柱塞预塑退回。这时，在型腔脱模力的作用下，会有少部分熔体倒流引起型腔压力下降，同时熔体因冷却而黏度升高，因而倒流的流速逐渐减小，直至通过浇口的熔体有充分的时间冷却而使型腔浇口彻底冷凝为止。

冷却过程应该从保压终止开始一直持续到制品被顶出型腔为止。型腔内成型塑件的冷却过程，是其内部熔体将其热量先传导给外面的冷凝层，冷凝层再将热量传给型腔壁，最后由模具向外传热。由于聚合物材料的导热性远小于金属模具的导热性，故塑件在型腔内的冷却速度主要受聚合物材料导热性的制约。

塑料制品从型腔中脱出之前必须具有足够高的刚性，以免脱模顶出时产生变形，并可使制品有较好的结构和尺寸稳定性。因此，在冷却定型过程中，只有塑件温度下降到塑料的玻璃化转变温度(或热变形温度)以下，并且型腔压力下降到与大气压平衡时，才是制品脱模和抽芯的最佳时机。

3. 制品后处理

由于注塑成型过程中熔体物料的流变行为非常复杂，同时注塑成型的熔体物料通常存在塑化不均以及充模后冷却不匀等问题，塑料制品内部经常存在不均匀的结晶、取向和收缩，导致制品存在内应力，影响制品的使用性能，严重时还可能造成制品报废。因此，注塑制品通常需要进行退火处理，特别是对那些具有金属嵌件、分子刚性大、制品使用温度范围大、尺寸要求高、壁厚大的制品。而对于吸湿性制品通常还需进行调湿处理。此外，对于某些制品必须进行适当的修整或装配等，以满足制品表观质量要求。

1.2.4　注塑成型周期

注塑成型周期即为完成一次注塑成型操作所需要的时间，它直接影响注塑生产效率。根据注塑成型过程中注塑机的动作及操作，一个典型的注塑成型周期可分为合模、注射、保压、冷却、开模、顶出、取件 7 个操作过程。相应地，注塑成型周期就是合模时间、注射时间、保压时间、冷却时间、开模时间、顶出时间、取件时间的总和。

合模时间、开模时间、顶出时间和取件时间为辅助操作时间，它们的数值大小主要取决于注塑机及其辅助机构本身的动作时间或操作人员的操作时间。辅助操作时间的值相对比较稳定，在整个成型周期中所占的比例较小，它们不影响塑料熔体的充填成型和最终产品的质量。注射时间、保压时间和冷却时间为塑料熔体的成型时间。它们对塑料熔体充填过程中的状态及最终成型产品质量有重要影响。

注射时间反比于熔体的注射速率。注射时间短，则熔体充填速率高，此时充填过程中型腔内熔体温度均匀性较好，靠近型腔壁的塑料冷凝层较薄，熔体压力传递性较好，故成型的制品具有较好的形状和尺寸精度，但是易出现飞边、毛刺、喷射痕及气穴等缺陷。注射时间长，则注射速率低，填充过程中型腔内熔体的冷却时间长，靠近型腔壁的塑料熔体冷凝层较厚，熔体温度分布不均匀，熔体压力传递性差，从而导致塑料制品易出现短射、较大的残余应力、严重的翘曲变形等缺陷。注射时间的长短可根据塑料制品的材料和形状来确定。对于熔体黏度高、冷却速率快的塑料材料和产品形状复杂的大型、薄壁或具有微细精密结构的塑件，应当减小注射时间，利用高注射速率保证熔体完全充满型腔；而对于黏度低的塑料材料或流长比小的塑件，则可适当增加注射时间，采用低速注射，以减小熔体流动过程中的剪切应力，从而减轻聚合物熔体内高分子链或填充物的取向程度，最终减小产品的残余应力和翘曲变形。

保压时间占整个成型周期的比例较大，对成型产品的形状和尺寸精度有重要影响。保压时间短，制品收缩大，产品尺寸偏小，易出现缩孔等缺陷；保压时间长，产品内应力大，翘曲变形严重，且产品脱模困难。如果流道系统设计合理，且注塑工艺正常，理想的保压时间应当保证保压阶段结束时浇口处塑料熔体恰好完全冷凝。在这种条件下，保压时间取决于浇口的尺寸。浇口尺寸越大，保压时间越长，反之亦然。

冷却时间约占整个成型周期的 50% ~75%，其对注塑生产效率的影响最大。冷却时间过短，产品脱模时容易产生较大变形；冷却时间过长，则会降低生产效率，同时还会导致脱模困难。合理的冷却时间应当保证塑件脱模时其变形控制在合理范围内。由于冷却时间在整个成型周期中所占比例最大，因此确定一个最优的冷却时间对提高注塑生产效率具有非常重要的意义。对于正常的注塑工艺，如果模具结构和冷却系统设计合理，冷却时间主要取决于塑料产品的厚度、模具温度和塑料材料的热物理性能。对于特定的塑料产品，具有确定的原材料和厚度，故其冷却时间主要取决于模具温度。在保证产品质量的前提下，应当尽量采用低的模具温度，以期缩短成型周期和提高生产效率。

1.2.5　注塑工艺变量

在确定了注塑机、塑料材料和模具结构之后，塑件产品的质量将主要取决于注塑工艺参数设定的合理性。影响注塑工艺的参数有很多，并且具有非线性和高度耦合的特征，这决定了注塑工艺参数设定的复杂性。通过综合考虑各注塑工艺参数的特点及其与产品品质关系的紧密程度，它们可以被分为三个层次：第一层次是机器参数，第二层次是熔体参数，第三层次是产品质量参数，见表 1-1。

机器参数指的是可以通过注塑机及其他辅助设备(模温机、热流道温度控制器、气辅设备等)设定的工艺参数。根据参数物理性质的不同，机器参数可分为温度、压力和时间(或速率)三大类。由于注塑过程的实质就是塑料熔体流动充填与冷却定型的过程，所以第二层次

注塑工艺变量的熔体参数将直接影响最终成型产品的质量(第三层次工艺参数)，第三层次的产品质量参数又大致分为加工精度、外观性能、力学性能和光学性能四大类。图 1-5 所示为三个层次注塑工艺参数之间的关系。从表面上看，注塑成型过程就是一个塑料材料熔融、填充和冷却定型的简单过程。但实际上，它是一个相当复杂的非线性动态过程，成型过程中塑料材料将经历复杂的热力耦合作用。其复杂性不仅体现在注塑工艺参数繁多，而且还体现在各工艺参数间的交互影响和作用。为了实现对注塑工艺的精确控制，获得合格的塑件产品，有必要研究建立各层注塑工艺参数的关系。对于机器参数，当前注塑机及相关辅助设备的控制系统或单元已可实现对所有机器参数的全闭环实时全过程控制，并具有较高的控制精度和稳定性。而对于熔体参数，由于注塑过程中熔体的流动成型是在密闭的模具型腔中进行的，并且熔体充填过程通常是在很短的时间内完成的，因此很难实现对注塑过程熔体参数的实时监测和控制。实现对第三层次注塑工艺参数——塑件产品质量参数的控制是注塑工艺控制的最终目标。然而，由于受到当前实时质量检测评价技术的限制以及塑件质量评价本身的不确定性，故很难实现对注塑生产过程中塑件质量参数的实时在线控制。鉴于以上原因，当前注塑工艺控制主要是通过调节控制机器参数以间接控制产品的质量参数。为此，许多研究人员利用注塑试验、计算机模拟等手段，并结合试验设计、回归分析、方差分析、人工神经网络、专家系统、遗传算法等数据统计、分析与优化技术，以研究机器参数对产品质量参数的影响规律，构建它们之间的对应关系，为机器参数的调节与控制提供依据。下面将简要介绍几个主要机器参数对产品质量的影响规律及设定原则。

表 1-1　三个层次的注塑工艺参数

第一层次(机器参数)	第二层次(熔体参数)	第三层次(产品质量参数)
温度：	熔体温度	加工精度：
料筒温度	浇口处熔体温度	翘曲与收缩
喷嘴温度	流动前沿温度	重量与密度
冷却液温度(模具温度)	熔体压力	形状与尺寸精度
热流道温度	熔体压力分布	外观性能：
压力：	熔体流动形态	表面光泽度
最大注射压力	最大切应力	表面色差
保压压力	熔体冷凝层厚度	熔接痕位置与形态
熔胶/背压压力	熔体流动速率	凹陷与缩痕
锁模压力	熔体冷却速率	表面形貌
时间：		力学性能：
时间或速率：		拉伸/弯曲/冲击强度
注射时间		表面硬度
保压时间		熔接痕强度
冷却时间		光学性能：
注射速率		透光率等光学属性
螺杆转速		

温度是机器参数中最重要的工艺变量之一，主要包括料筒温度、喷嘴温度、模具温度等。其中，料筒温度与喷嘴温度直接影响塑料熔体进入流道系统前的温度。适当提高料筒温度和喷嘴温度，可以提高熔体温度，降低其黏度，增强其流动性能和熔体充填过程中的压力