



塑料精密注射成型 原理及设备

杨卫民 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

塑料精密注射成型 原理及设备

杨卫民 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了塑料精密注射成型核心原理及精度控制方法,并在此基础上介绍了精密注射成型加工设备方面的新技术,包括新型二板式精密注塑机、全电动及混合驱动精密注塑机、超高速精密注塑机、熔体微分精密注塑机等,此外,还介绍了改善注射成型制品缺陷的新技术和实用方法。

本书在篇章结构上兼顾学术参考和工业应用两方面的需要而进行详略取舍,在内容上力求比较系统地反映塑料精密注射成型加工领域的核心原理及设备,可作为高等院校相关专业的教材,也可供从事塑料加工的工程技术人员和经营管理者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

塑料精密注射成型原理及设备/杨卫民著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-045745-5

I. ①塑… II. ①杨… III. ①注塑-塑料成型-研究 IV. ①TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225260 号

责任编辑:牛宇锋 陈 婕 / 责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:430 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着高分子材料的快速发展,塑料已成为现代制造业重要的基础材料,广泛应用于汽车、电子信息、家用电器、生物医学、航空航天和国防军工等诸多领域。例如,手机零部件、液晶屏导光板、光纤连接件、光学透镜等精密塑料制品,由于具有很高的表面质量、尺寸形位公差和光学性能要求,采用普通注塑机和传统注射成型工艺根本无法实现,从而引出了精密注射成型的概念。

众所周知,金属材料主要采用切削成形,依靠边加工边测量,逐步逼近的方法控制零件的加工精度。但是,塑料主要采用注射模塑成型,在数秒之内高效率充模成型完成零件的加工制造,不能沿用切削加工的精度控制方法,而是基于材料PVT特性的模具设计与充模成型的过程控制。因此,需要从材料成型加工特性出发,深入研究塑料充模成型规律和脱模变形规律,掌握精度控制的原理和方法,发展先进的工艺和装备,从而推动塑料精密注射成型技术的进步。

本书围绕塑料精密注射成型原理和工艺装备的主题,从成型过程压力 P 和温度 T 对塑料比容积 V 的影响规律,即PVT特性这一模塑成型精度控制的核心原理出发,试图比较系统地阐明塑料精密注射成型所涉及的科学技术和相应解决方案。全书共7章:第1章主要介绍塑料精密注射成型的概念、意义和核心原理等基础知识;第2章主要介绍塑料精密注射成型PVT关系精度控制技术,重点阐述高分子材料的PVT特性在精密注射成型中的应用;第3章为可视化精密注射成型工艺,从加工过程工艺切入,系统介绍塑料注射成型充模过程可视化研究成果,从注射成型典型缺陷的产生成因和解决方案角度说明可视化技术对精密成型工艺的指导作用;第4~7章介绍精密注射成型装备方面的几项创新成果,分别为新型二板式精密注塑机、全电动及混合驱动精密注塑机、超高速精密注塑机、熔体微分精密注塑机。目前,微分注塑机仍处于原理样机研发初期阶段。

本书内容在参阅国内外公开发表研究论文和技术资料的基础上,主要取材于作者从2002年以来带领团队指导博士和硕士学位研究生所取得的阶段性研究成果。对本书原创研究成果有重要贡献的团队老师有杨卫民、关昌峰、张有忱、谢鹏程、焦志伟、丁玉梅、阎华、何雪涛、安琪、谭晶等,直接以本书内容为研究课题的博士研究生有谢鹏程、王建、焦志伟、张攀攀;硕士研究生有郭峰霞、苟刚、郭小龙、苗利蕾、邵珠娜、王诗强、杜彬、吴廷、周宏伟等。在读研究生鉴冉冉协助作者完成了本书编撰整理的主要工作,此外,参与本书资料整理的学生还有戴坤添、杨优生、褚凡忠、姜李龙、傅雪磊、方春平等。《中国塑料橡胶》高级编辑段庆生先生对本书

初稿进行了全面的修改和补充,并在附录中增加了塑料精密成型模具的相关内容。

本书研究成果是在北京化工大学王兴天教授的指导下取得的,实验研究工作得到了宁波海天集团张建国、傅南红、高世权等高级工程师的支持和帮助;相关科研工作得到了国家自然科学基金和科技支撑计划重点项目的资助;本书的出版获得了国家科学技术学术著作出版基金的资助,并得到美国威斯康星大学童立生教授、清华大学于建教授和北京航空航天大学詹茂盛教授等国内外同行专家的支持和鼓励。在此一并向他们表示衷心的感谢!

作者在本书著述过程中反复斟酌,数易其稿,力求系统深入地介绍塑料精密注射成型原理与设备创新知识,特别注意了兼顾学术参考和工业应用两方面的需要,但是因水平所限,书中不妥之处在所难免,还请读者批评指正。

杨卫民

2014年12月于北京

目 录

前言

第 1 章 塑料精密注射成型的核心原理	1
1.1 塑料精密注射成型的概念和意义	1
1.2 高分子材料的 PVT 关系特性规律	3
1.3 塑料精密注射成型的核心原理	4
1.4 塑料 PVT 关系特性的离线测试方法与仪器	8
1.5 塑料 PVT 关系特性的在线测试方法与仪器	10
参考文献	12
第 2 章 塑料精密注射成型的精度控制	14
2.1 基于塑料 PVT 特性的精密注射成型模具设计	14
2.2 基于塑料 PVT 特性的精密注射成型过程控制	17
2.2.1 塑料注射成型过程控制技术概况	17
2.2.2 塑料 PVT 特性在精密注射成型过程控制中的作用	18
2.2.3 利用熔体压力进行 V/P 转压控制的实验研究	27
2.2.4 利用熔体温度进行 V/P 转压控制的实验研究	36
2.2.5 塑料注射成型保压结束点控制方式的实验研究	43
2.2.6 基于塑料 PVT 特性的在线控制实验研究	48
2.3 塑料精密注射成型多参数组合控制	55
2.3.1 塑料精密注射成型多参数组合式控制概述	55
2.3.2 塑料精密注射成型常规信号参数组合控制	55
2.3.3 塑料精密注射成型熔体压力参数组合控制	57
参考文献	60
第 3 章 塑料精密注射成型的缺陷分析	63
3.1 塑料精密注射成型过程的可视化方法	63
3.2 塑料精密注射成型熔体充填规律研究	67
3.2.1 流动不平衡的理论分析	68
3.2.2 流动不平衡的假想模型	70
3.2.3 多型腔不平衡充填可视化分析	71
3.2.4 多型腔不平衡充填问题的解决方案	75
3.3 塑料精密注射成型典型缺陷产生机理的可视化分析	76

3.3.1 塑料精密注射成型制品的常见缺陷	76
3.3.2 塑料精密注射成型典型缺陷的产生机理	77
3.4 塑料精密注射成型工艺优化	80
参考文献	81
第4章 新型三板式精密注塑机	84
4.1 精密注塑机合模机构的主要类型及性能分析	84
4.1.1 三板式合模机构	84
4.1.2 二板式合模机构	89
4.2 新型内循环二板式合模机构及其锁模刚度模型	93
4.2.1 内循环二板式合模机构的结构及工作原理	93
4.2.2 内循环二板式合模机构的锁模刚度模型	101
4.3 内循环二板式合模机构液压系统仿真及优化	105
4.3.1 内循环二板式合模机构液压系统的仿真分析	105
4.3.2 内循环二板式合模机构锁模泄压油回路优化	111
4.4 内循环二板式合模机构节能机理	118
4.5 内循环二板式合模机构锁模特性	133
4.5.1 锁模均匀性的研究	133
4.5.2 锁模重复性的研究	147
4.6 内循环二板式注塑机的样机试制及性能评测	151
4.6.1 内循环二板式注塑机的样机试制与性能评测	151
4.6.2 内循环二板式注塑机的系列化	157
参考文献	162
符号说明	165
第5章 全电动及混合驱动精密注塑机	169
5.1 全电动精密注塑机概述	169
5.1.1 全电动精密注塑机的优缺点	169
5.1.2 全电动精密注塑机的应用	171
5.1.3 全电动注塑机的发展状况	174
5.2 混合驱动式合模机构的研究进展	175
5.2.1 混合驱动式合模机构的设计	176
5.2.2 混合驱动式合模机构的性能仿真分析	178
5.2.3 混合驱动式合模机构的性能优化	187
5.2.4 合模系统模板的结构优化分析	190
5.3 精密注塑机模板设计优化	201
5.3.1 模板设计优化系统	201

5.3.2 弹性模板	209
参考文献	211
第6章 超高速精密注塑机	214
6.1 超高速注射成型进展	214
6.1.1 超高速注射成型概述	214
6.1.2 超高速注射成型研究现状	215
6.1.3 全电动超高速注塑机	221
6.2 超高速注射成型工艺研究	237
6.2.1 超高速注塑机螺杆特性	238
6.2.2 微结构表面导光板超高速注射成型工艺研究	241
6.2.3 塑料超高速注射成型 PVT 关系特性的研究	248
参考文献	252
第7章 熔体微分精密注塑机	254
7.1 高分子材料加工成型的微积分思想	254
7.2 微分注射成型系统及其理论模型	257
7.2.1 微分注射成型系统的结构及工作原理	257
7.2.2 微分注射成型机虚拟样机的建立	263
7.2.3 微分注射成型系统的注射量模型	265
7.3 微分泵内塑料熔体流动行为的理论研究	271
7.3.1 微分泵的动力学仿真模型	271
7.3.2 微分泵内塑料熔体的流动行为研究	274
7.3.3 微分泵内熔体流动模拟结果及讨论	278
7.4 典型制品的微分注射成型理论研究	283
7.4.1 微螺旋制品微分注射成型的模拟	283
7.4.2 微型齿轮微分成型模拟	288
7.4.3 微型芯片微分成型模拟	291
7.5 微分注射成型压力特性及工艺参数的试验研究	293
7.5.1 微分注射成型压力测试平台搭建	294
7.5.2 微分注射成型的压力特性	295
7.5.3 微分注射成型各微分出口注射量研究	297
7.5.4 微分注射工艺参数正交实验研究	300
7.6 微分注塑机样机试制及成型实验评测	302
7.6.1 微分注塑机的样机试制	303
7.6.2 微分注塑机的性能测试	306
7.6.3 微分注射成型的实验研究	308

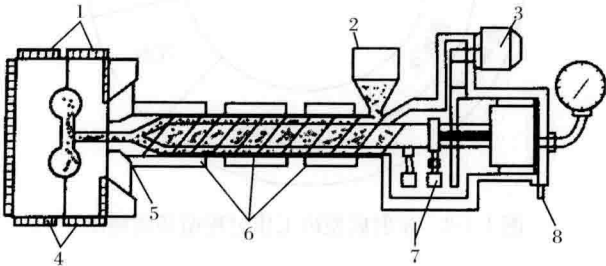
7.6.4 微分注塑机的特点	314
参考文献	316
符号说明	318
附录	320
附录1 《精密塑料注射成型机》标准	320
附录2 注射模具值得关注的24个特色技术	331

第 1 章 塑料精密注射成型的核心原理

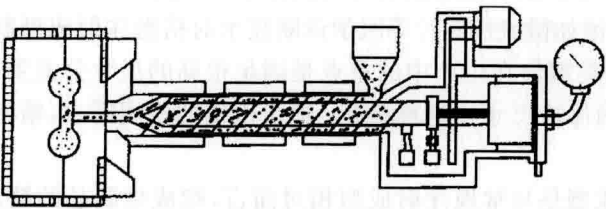
1.1 塑料精密注射成型的概念和意义

随着宏观经济的发展,我国塑料行业迅速发展。注射成型是所有塑料成型方法中最重要的一种,是一种注射兼模塑的成型方法。注射成型作为塑料制品成型最主要的加工方式,其产品具有重量轻、结构稳定和价格便宜等优点,因而在各个领域均得到了越来越广泛的应用。

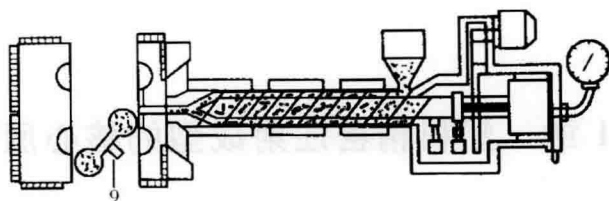
注射成型是一种以高速高压将塑料熔体注入已闭合的模具型腔内,经冷却定型,得到与模腔相一致的塑料制品的成型方法。从注射成型机(又称注塑机)的单元操作来看,其动作大致可以表示成如图 1-1-1 所示的基本动作。按照时间的先后顺序可绘制出如图 1-1-2 所示的注射成型机工作过程循环周期图。



(a) 塑化充模



(b) 保压固化



(c) 开模脱出

图 1-1-1 注射成型机基本动作

1-模具加热片;2-加料系统;3-驱动电机;4-模具;5-注射成型机喷嘴;
6-料筒加热冷却装置;7-行程开关;8-注射油缸;9-成型制品



图 1-1-2 注射成型机工作过程循环周期图

二十年来,随着信息技术和自动控制技术的爆发式增长,市场对于注塑件的要求越来越高,需求量也在迅速增加,注射成型因廉价灵活的加工技术受到广泛关注。近年来,诸如微流控芯片等医学诊断技术对精密注射成型制件也提出了新的迫切需求,此类塑件在生产中的重点是满足很高的尺寸公差要求,并在制品的实际使用周期内保持尺寸公差的稳定。迫于市场的使用需求,精密注射成型技术问世。

精密注射成型是与常规注射成型相对而言,指成型制品的精度要求很高,使用通用的注塑机和常规注射工艺都难以达到要求的一种注射成型方法^[1]。一般地,精密注塑机有两个指标:一个是制品的尺寸重复误差;另一个是制品的重量重复误差。前者由于尺寸大小和制品厚薄不同难以比较。而后者代表了注塑机的综合水平,一般普通注塑机的重量重复误差在1%左右,较好的机器可达到0.8%;

重量重复误差低于0.5%为精密注塑机,小于0.3%为超精密注塑机。目前普遍采用精密电子秤测量塑件重量的方法,间接测量出塑件重复精度。但是重量重复性只是塑件重复精度的一个侧面,采用该方法测量重复精度忽略了塑件形状、力学性能等因素的重复精度。而聚合物的PVT(压力-比容-温度)关系能够提供聚合物在加工过程的一些信息数据,以便于从制品成型过程中检测、控制塑件精度。

聚合物的PVT关系特性是进行制品注塑成型流动分析、注塑成型制品模具设计和注塑成型过程控制及工艺分析的重要依据。

1.2 高分子材料的PVT关系特性规律

高分子材料的PVT关系特性描述了高分子材料比容随温度和压力的改变而变化的情况,它作为高分子材料的基本性质,也用来说明制品加工中可能产生的翘曲、收缩、气泡、疵点等缺陷的原因,在分子聚合物的生产、加工以及应用等方面有着十分重要的作用。高分子聚合物的PVT数据提供了注射成型过程中熔融或固态的聚合物在温度和压力范围内的压缩性和热膨胀性等信息。以高分子聚合物PVT关系特性为核心的注射成型过程计算机模拟与控制为我国精密注塑机的研制提供了数据、检测、控制等多方面的依据,引领着精密注射成型的发展方向。

图1-2-1是无定型聚合物和半结晶型聚合物的PVT关系特性曲线图^[2]。从图中可以看出,当材料温度增加时,比容由于热膨胀也随之增加;压力升高时,比

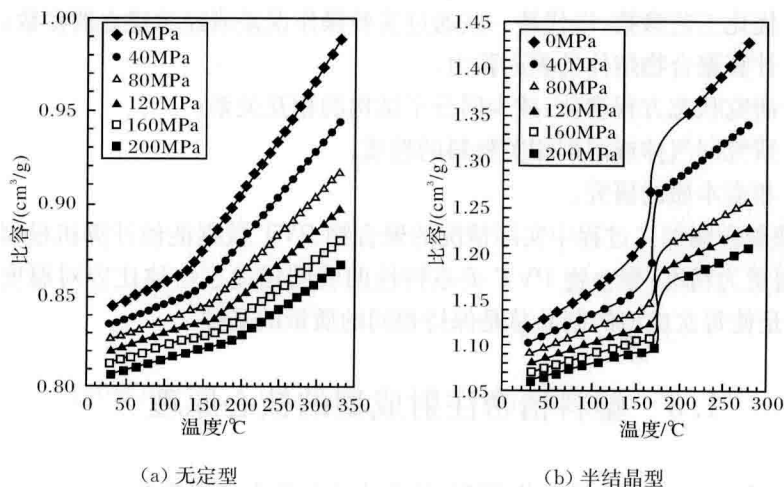


图 1-2-1 聚合物的 PVT 曲线

容由于可压缩性而随之降低。在玻璃化温度点,由于分子具有更多的自由度而占据更多的空间,比容的增加速率变快,图中可以看到曲线斜率的明显变化,因而也可以通过聚合物的 PVT 关系特性曲线发现体积出现突变时的转变温度。在温度变化过程中,无论是无定型聚合物还是半结晶型聚合物都会由于分子热运动发生结晶转变或玻璃化转变而产生明显的体积变化,而半结晶型聚合物由于在结晶过程中质点的规整排列,体积会有较大变化。因此,可以看到无定型聚合物和半结晶型聚合物的 PVT 关系存在很明显的不同。在更高的温度下,半结晶型聚合物在进入熔融状态时,比容有一个突升,这是由于原来结构规则且固定的结晶区受到温度的影响而变得可以随意自由移动造成的。

聚合物 PVT 曲线图通过比容的变化,给出了塑料在注射成型过程中的收缩特性,由图可看出聚合物的温度、压力对比容的影响,并获得聚合物密度、比容、可压缩性、体积膨胀系数、PVT 状态方程等方面的信息^[3,4]。对聚合物 PVT 关系特性的研究,不仅可以用来说明注射成型过程中与压力、密度、温度等相关的现象,分析制品加工中可能产生的翘曲、收缩、气泡、疵点等缺陷的原因,获得聚合物加工的最佳工艺条件,更快捷方便地制定最佳工艺参数,还可以用来指导注射成型过程控制,提高注射成型装备的控制精度,以制得高质量的制品^[5,6]。

聚合物 PVT 关系的应用领域可以归结为以下几个方面^[7,8]:

- (1) 预测聚合物共混性;
- (2) 预测以自由体积概念为基础的聚合材料及组分的使用性能和使用寿命;
- (3) 在体积效应伴随反应的情况下,估测聚合物熔体中化学反应的变化情况;
- (4) 优化工艺参数,以代替一些通过实验操作误差或经验建立的参数;
- (5) 计算聚合物熔体的表面张力;
- (6) 研究状态方程参数,减少同分子结构的相互关系;
- (7) 研究同气体或溶剂相关材料的性质;
- (8) 相变本质的研究。

反映聚合物加工过程中实际情况的聚合物 PVT 数据能使计算机模拟的粗略结果变得更为精准;聚合物 PVT 关系特性曲线图描述了熔体比容对温度和压力的关系,是使每次成型的制品总是保持相同的质量的基础。

1.3 塑料精密注射成型的核心原理^[9~11]

1. 注射成型过程中聚合物 PVT 关系特性与压力变化情况

为了保证成型制品质量就需要保证模具中聚合物材料的比容变化。材料成

型过程中的最佳压力变化途径能通过 PVT 曲线图得到。聚合物 PVT 关系特性曲线图也能通过一系列不同的数学表达式(聚合物 PVT 状态方程)来表述。以下针对注射成型过程,结合聚合物材料的压力变化情况,对聚合物 PVT 关系特性在整个注射成型加工过程中的变化进行详细的描述。

图 1-3-1 描述了聚合物 PVT 关系特性和模具型腔压力曲线。点 A 是注射成型过程开始的起始点,此时聚合物以熔融状态停留在注塑机机筒中螺杆前端部分。A—C 是注射阶段。点 B 是模具型腔压力信号开始点(此时,模具型腔中的压力传感器首次接触到熔体),之后压力开始增加。点 C 时刻,注射阶段完成,熔融的聚合物材料自由地填充模具型腔,后进入压缩阶段(C—D),模具型腔压力迅速上升至最高值(点 D)。此时,注射压力转为保压压力,进入保压阶段(点 D)。有更多的聚合物熔体压入模具型腔中以继续补充先进入的熔体由于比容减小冷却收缩而产生的间隙。此过程一直到浇口冻结时(点 E)结束,在点 E 时熔体不再能够进入模具型腔。点 E 是保压结束点,也就是浇口冻结点。剩下的冷却阶段(E—F),模具型腔中的熔体保持恒定体积继续冷却,压力也快速降低到常压。这个等体积冷却阶段尤其重要,因为需要通过体积的恒定来获得最小的取向、残余应力和扭曲变形;这个阶段对于成型的尺寸精度具有决定性作用。在点 F 时,模具型腔中制品成型,成型不再受到任何限制,可以顶出脱模,并进一步自由冷却至室温(F—G)。成型制品在 F—G 阶段经历自由收缩的过程。

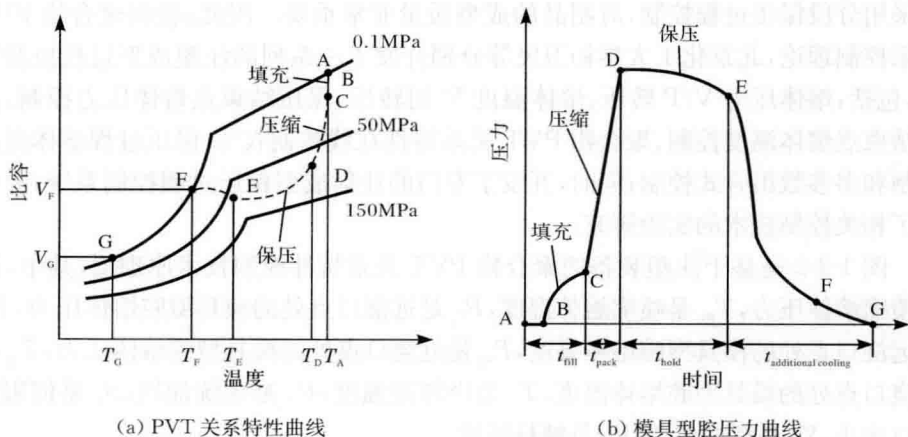


图 1-3-1 典型聚合物 PVT 关系特性曲线和模具型腔压力曲线

可见,决定最终制品尺寸和质量的就是注射成型过程中保压过程的控制,这也是注射成型过程控制的核心内容。保压过程的控制主要是 E—F 阶段的控制,其对于最终制品的质量有很大影响。由于点 F 在注射成型过程中是不可直接控

制的变量,对于点 E 的控制成为注射成型中聚合物 PVT 关系特性控制的核心点。点 E 的控制受到点 D 及 D—E 阶段控制(即转压点和保压过程的控制)的影响。为此,将注射成型过程控制的重点放在保压过程控制上。

2. 基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制技术原理

目前,现有的注塑机的控制方式中,都是针对压力(注射压力、喷嘴压力、保压压力、背压、模具型腔压力、系统压力、合模力等)和温度(机筒温度、喷嘴温度、模具温度、模具型腔温度、液压油温等)这两组变量的单独控制,而在提高控制精度方面也是主要集中在压力和温度两个变量的单独控制精度的提高上,并没有考虑到对材料压力和温度之间关系的控制。

基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制技术原理,主要是通过控制聚合物材料的压力(P)和温度(T)的关系来控制材料比容(V)的变化,从而得到一定体积和重量的制品。因此,在保证压力和温度两个变量的单独控制精度的条件下,再保证压力和温度之间关系的控制精度,即可在整体上进一步提高注塑成型质量的控制精度。由此即可将“过程变量控制”提高到“质量变量控制”的等级。

注射成型过程保压阶段的控制可分为三个部分,包括注射阶段到保压阶段的 V 用转压点的控制、保压结束点的控制及整个保压过程的控制。正确设定转压点和采用分段保压过程控制,对制品的成型质量非常重要。因此,根据聚合物 PVT 关系控制理论,北京化工大学杨卫民等分别开发了一系列的注塑成型过程控制技术,包括:熔体压力 V/P 转压、熔体温度 V 用转压、保压结束点熔体压力控制、保压结束点熔体温度控制、聚合物 PVT 关系特性在线控制技术-保压过程熔体温度控制和多参数组合式控制;同时,开发了专门的注射成型保压过程控制系统,并进行了相关控制技术的实验研究。

图 1-3-2 是基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制技术原理图,其中, P_n 是喷嘴熔体压力, T_m 是喷嘴熔体温度, P_{c_1} 是远浇口点处的模具型腔熔体压力, T_{c_1} 是远浇口点处的模具型腔熔体温度, P_{c_2} 是近浇口点处的模具型腔熔体压力, T_{c_2} 是近浇口点处的模具型腔熔体温度, T_c 是冷却液温度, P_h 是系统油压, S_o 是伺服阀开口大小, Y_r 是螺杆位置, V_r 是螺杆速度。

图 1-3-3 是基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制系统流程图。PVT 关系特性控制技术主要集中在注塑成型保压过程控制上,包括 V/P 转压、保压过程、保压结束点、时间信号、螺杆位置信号、压力/温度信号的选择程序等。

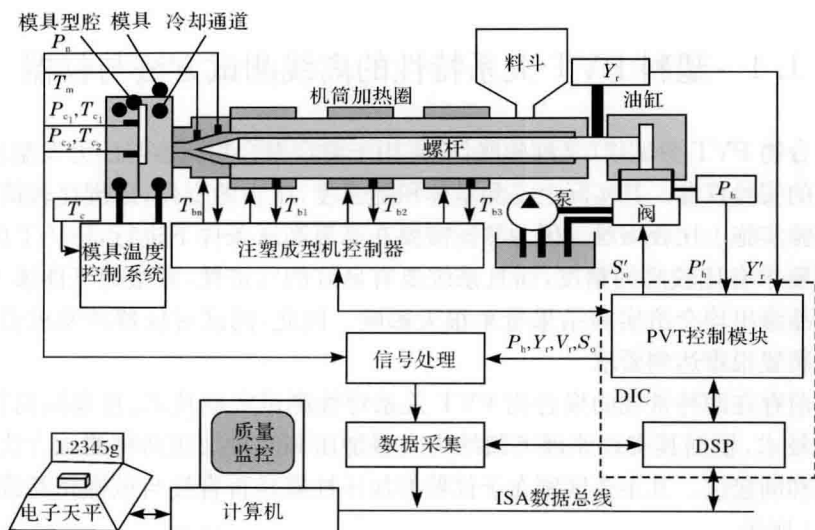


图 1-3-2 基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制技术原理图

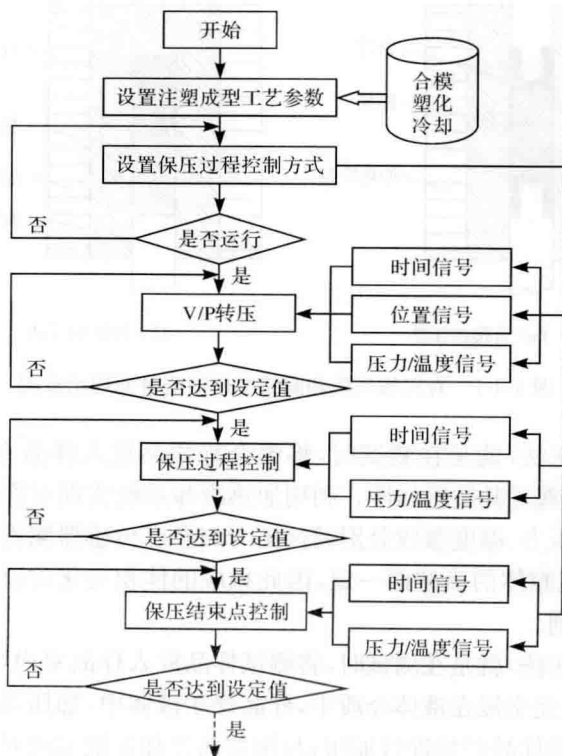


图 1-3-3 基于注塑装备的聚合物 PVT 关系特性控制系统流程图

1.4 塑料 PVT 关系特性的离线测试方法与仪器

聚合物 PVT 测试仪(又称膨胀计)是用于测定聚合物比容与压力及温度的函数关系的实验仪器。其实际上是测量体积随温度、压力的变化,原理比较简单,但是在实验实施上比较困难。因为测试需要在高温高压条件下进行,P-V-T 的测量和控制要求有比较高的精度,而且系统要有良好的气密性,微量的气体渗入或微量的样品渗出均会给实验结果带来很大影响。因此,测试对仪器的要求很高,一般实验装置很难达到要求。

目前存在两种常规的聚合物 PVT 关系特性测试实验技术:柱塞圆筒技术和封闭液技术,根据其实现原理可归结为直接加压和间接加压两种测试方法,简称直接法和间接法。其主要区别在于仪器的加压柱塞是否直接与试样相互接触,如图 1-4-1 所示。

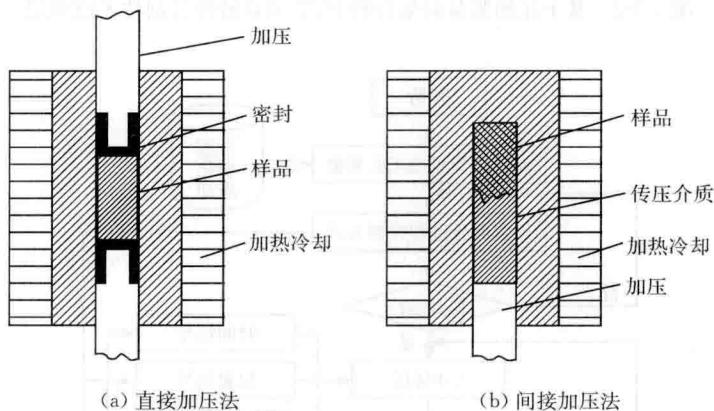


图 1-4-1 直接加压法和间接加压法测量原理示意图

所谓直接加压法,就是在测试时,将聚合物样品放入样品室中,将其上下密封,密封后通过柱塞对其进行加压。利用加热冷却系统实现对样品室中样品的加热和冷却操作。压力、温度参数分别通过压力和温度传感器测得。对于被测样品的体积,由于测试腔体的横截面一定,因此相应的体积变化可通过柱塞的直线位移变化而计算得到。

所谓间接加压法,就是在测试时,将测试样品放入样品室内,在样品室内充入液体介质,使样品完全浸在液体介质中,样品浮于液体中,加压动力系统驱动柱塞通过液体对聚合物样品间接进行加压,利用加热冷却系统实现对样品室中样品的加热和冷却操作,压力、温度分别通过压力和温度传感器测得。体积的变化通过