

注射成型工艺控制技术的研究进展

王 蓓 王利霞 李 倩 申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002)

摘要 综述了注射成型过程工艺控制技术的研究进展。介绍了工艺控制技术对工艺参数优化选择的影响。回顾了工艺控制技术发展过程中各个阶段的重要研究成果。重点阐述了压力控制与温度控制技术的发展,以提高最终制件的质量。

关键词 注射成型 工艺参数 控制

目前,世界上 80% 的工程塑料制品采用注射成型加工。注射成型制品的质量主要取决于模具的设计与加工、材料的性能、成型过程的控制三个方面。提高塑料制品质量的传统方法,主要是改进模具设计和采用性能较好的树脂:一方面,随着计算机技术在塑料成型领域中的应用,可以很方便地用 CAE 技术对模具的设计与加工进行改进,以避免代价昂贵的机械失误并缩短生产周期,但是模具设计的改进仍然受到很多条件的制约;另一方面,材料性能的改进通常也动摇不定,这使加工很难达到稳定的状态。而且,即使采用最佳的模具设计和最优的材料,有时仍然很难获得令人满意的制品,这是由于成型过程的工艺参数直接决定了熔体在模腔中的流动状态,对制品质量有着最直接最重要的影响,因此寻找制件成型的最优工艺条件,对成型过程进行工艺控制,是提高塑料制品质量的有效途径。而近年来微电子技术 with 计算机控制技术的进步为注射成型过程的工艺参数控制提供了技术保证。

1 注射成型工艺控制技术

注射成型工艺控制就是对注射成型过程中的工艺参数进行控制。其主要步骤包括:(1)从工艺参数中选取最佳控制变量;(2)利用相应算法确定控制变量的最优值;(3)根据选用的控制变量选取最佳控制方式;(4)采用控制方式对变量进行控制,使其保持能够得到最佳制品质量的最优工艺条件。

1.1 控制变量的选择

注射成型是一个多变量的过程,其中影响制品质量的因素可以分为 4 类:机器参数、材料参数、工艺参数及工艺参数的扰动。机器参数是同注塑机直接相关的用以表征机器机械特征的参数,包括料筒温度、喷嘴温度、液压系统背压、螺杆转速、模具温度及注塑机和模具的几何特征等;材料参数为注塑材料的一些典型特征,一般由材料供应商提供,包括材料的流变性、密度、分子组成、分子量等;工艺参数反映了成型过程中材料的状态,其值受机器参数、材料参数的影响,在注射成型过程中的典型工艺参数有熔体温度、熔体压力、熔体在型腔中的分布、熔体注射速率、模具内的热流分布等;扰动是指在生产过程中外部环境变化对制品质量造成的影响,这些因素往往是无法进行人工干预和控制的。要对制品

的质量进行控制,需要给出衡量制品质量的量化指标,通常衡量制品质量的指标有:表面质量、几何特征及稳定性、力学性能、形态性能及光学性能等。

这 4 类参数相互影响、相互作用,决定最终制品的质量。对注射成型过程的 4 个主要阶段进行分析可知,不同阶段中各个参数对制件质量所起的影响也不同。由于扰动不属于可控制范围,所以控制变量只能在其它 3 种参数中进行选择。塑化阶段可选用的控制变量为熔体温度、螺杆转速、背压等。填充阶段可选用的控制变量有喷嘴压力、型腔压力或注射速率、粘度、熔体温度等。保压阶段可选用的控制变量有保压压力、保压时间、熔体温度等。冷却阶段可选用的控制变量主要是冷却时间等。可见,某些参数只在某个阶段存在并可作为控制变量,而另一些参数则贯穿整个成型过程,对制件质量起决定性的影响,可作为整个成型周期的控制变量。由于受到控制条件的约束,在这些参数中只能有一部分可以直接进行控制并作为可供选用的控制变量。

由以上分析可知,在注射成型的各个阶段,温度和压力都是决定制品质量优劣的至关因素,是过程控制的首选控制变量。主要的温度参数包括料筒温度、喷嘴温度、熔体温度、模具温度等。熔体温度直接反映了材料的状态,在整个成型周期都应将其作为控制变量。模具温度会显著影响充模、冷却和保压过程。

主要压力参数包括注塑压力、型腔压力、喷嘴压力等。对于不同的工艺要求和不同的控制目的,应对工艺参数做细致的分析,确定出最佳控制参数。例如:在保压阶段,应选用型腔压力或喷嘴压力作为控制变量,两者的选择由模具和成本决定。因为尽管型腔压力直接反映材料在型腔中的状态,但却存在模具是否允许安装压力传感器的问题,安装压力传感器还会增加产品成本;喷嘴压力虽不能直接反映型腔内的材料状态,但能很好地反映了浇口冻结之前模内压力的整体趋势^[1]。

1.2 控制方式的选择

注射成型工艺控制方式包括开环控制、闭环控制和计算机实时控制。根据具体要求,可选择不同的控制方式。

2 注射成型工艺控制技术发展

2.1 控制技术发展的几个阶段

注射成型是一个多变量、非线性、时变且具有周期性的非稳态过程。

早期的注射成型过程控制主要针对机器参数,但对制件产生决定作用的是高聚物材料的各个参数,由于机器参数只是对成型外部环境进行间接控制,不能直接影响高聚物参数,因此机器控制的效果并不理想。随后,注射成型控制的重点转向对工艺参数和制件质量指标的控制,并取得了较好的效果。

初期的工艺控制主要针对单个变量,选用对整个成型周期或对某个阶段影响最大的工艺参数,例如熔体温度或型腔压力,或者针对某个特定目标选择单个工艺参数作为控制变量,而不考虑工艺参数之间的相互影响。注射成型过程中各个工艺参数之间的影响程度相当大,控制单一变量很容易使对整个成型过程的控制失去平衡。

后来,研究者们逐渐将研究重点放在了多变量的控制方法上,同时选用对某个阶段或整个成型周期影响较大的几个参数,并尽可能的考虑到所选控制变量之间的相互影响。1987年,A. R. Agrawal等提出研究多变量控制方法的必要性,建议把研究焦点继续集中在高聚物参数上。他还提出了一种对注射成型过程中控制变量的分类方法^[2,3]。利用该分类方法,可对注射成型进行全阶段、阶段、周期控制,即:①全阶段控制:在整个周期中监控变量;②阶段控制:仅在特定阶段控制起决定性作用的变量;③周期控制:利用上个周期中得到的信息调节控制本周期中的变量,往复不断。

贯穿于整个成型过程的温度和压力直接决定了成型过程中高聚物熔体性能及在模腔中的流动行为,在注射成型的各个阶段,它们都是决定制品质量优劣的至关因素,因此多年来压力控制和温度控制一直都是研究者们关注的“热点”。

2.2 压力控制技术的发展

初期的压力控制研究采用了传统的控制方法。1984年,M. R. Kamal等利用比例积分(PI)和比例积分微分(PID)结合增益控制的方法控制喷嘴压力和型腔浇口压力,其中增益控制方法用来克服成型过程的非线性特征,并获得了较好的结果。但这种方法很难扩展用于不同的模具和机器。1987年,M. H. Costing等研究了一种液压控制系统,采用自适应调节器(STR)和PI控制系统来实现控制的。从对两种材料的试验结果可以看出,STR的控制功能要好于PI,但两者都存在一些明显的误差^[4]。1991年C. Chiu等利用PI和自适应模型跟踪控制器(AFMC)控制填充阶段的型腔压力。结果表明,在跟踪设定点的能力方面AFMC较好^[5]。同年,K. Srinivasan等建议在填充阶段采用学习控制法控制型腔压力或喷嘴压力^[6]。

一些学者还把开环和闭环控制用于压力控制。1974年,Carl Ma描述了第一台由计算机控制的注塑机,他为每一

个成型阶段确定出关键的工艺参数并设计出控制系统,把现代控制系统的技术引入了注塑机中,并把闭环控制用于螺杆转速和注塑压力^[7]。传统的注塑机自动控制采用开环控制,即一旦确定工艺参数的最优值就使注塑机在注射成型周期保持不变,其控制方法简单,但抗干扰性能差,控制精度低。

闭环控制根据在线测量值与已计算出的工艺参数最优值之间的偏差进行控制,采用负反馈电路,当各个工艺参数因干扰出现偏差时,自适应控制系统将对干扰进行自动修正。闭环控制的方法相对复杂,但抗干扰性能好,控制精度高。1990年D. A. Fara等针对保压阶段研究了一种闭环型腔压力控制系统^[8,9]。1994年,F. Gao等采用现代控制技术实现了对模腔内指定位置的型腔压力进行的闭环控制^[10]。

计算机在注塑中的应用使注射成型的控制水平提高到一个崭新的阶段。计算机实时控制是更高级的控制方法,它是利用静态工艺模型确定了工艺参数最优值之后,对注射成型过程进行闭环控制,利用在线测量值与最优值之间的偏差进行调节,以保持各个工艺参数值的相对稳定。计算机还根据实时在线测量值对当前工艺参数最优值进行适当调整,使静态工艺参数最优值变为动态工艺参数最优值,实现了真正意义上的工艺参数最优值。人工智能(AI)的问世极大地改进了原有的控制方法和控制性能,在注射成型的控制研究中人工智能也已显示出它的优越性能和发展潜力。1991年,J. L. Wu等分析了型腔压力轨迹与机器参数和制件质量之间的关系,把型腔压力轨迹转变为代表轨迹显著特征的离散数据模式,建立起一个基于特征数据的专家系统^[11]。1996年,S. L. B. Woll等把人工神经网络(ANN)的模式识别能力用于分析型腔压力数据模式,作为评判制件质量好坏的依据,设计了一个基于模式的在线制件质量控制系统,对成型过程进行实时监控^[12]。1997年,他们同样利用ANN的模式分析能力实现了基于模式的闭环质量控制系统,在ANN对型腔压力模式分析的基础上更新内环机器控制的设定点^[13]。

2.3 温度控制技术的发展

在早期以机器参数为重点对成型过程进行控制的技术研究中,温度控制主要侧重于料筒温度、喷嘴温度和模具温度的控制。近年的新型控制技术研究表明,在温度参数中,熔体温度是注射成型过程的基本变量,需要对其进行连续控制。熔体温度的变化会影响到熔体流动速率、喷嘴压力、型腔压力等多个变量的变化,对制品质量具有决定性的影响。多年来,温度控制也一直倍受研究者的关注,分别采用过传统的PID算法、多变量自适应算法、模糊控制和专家系统等,各种算法用于控制料筒加热器从而达到间接控制熔体温度的目的^[14,15]。1972年,R. S. Chandra在螺杆头部安装热电偶以测定熔体温度^[16]。1986年,M. R. Kamal等也采用类似的装置观测熔体和料筒温度的动态变化并对几个熔体温度控制方法作了评价^[17,18]。1991年,N. Dontula等使用红外线温度传感器测量位于喷嘴的熔体温度,发现螺杆转速

和背压会对熔体温度产生很大的影响^[19]。

2.4 其它控制技术

除了典型的压力、温度控制之外, 注射成型过程工艺控制中的其它控制还有速度控制、粘度控制等。1978 年, A. Shankar 首次采用离散重复控制方法研究了基于模型的非线性控制系统, 以此优化螺杆转速^[20]。1987 年, I. O. Pandelidis 等建议使用一个专为螺杆转速控制设计的指示器对螺杆转速进行自适应控制^[21]。

2.5 控制算法的发展

随着控制方式的发展, 寻找最优值的算法也在不断改进。通常, 注射成型工艺的最优值是根据连续性方程、能量方程、动量方程建立工艺模型计算得出, 也可利用相关的 CAE 软件进行模拟, 这种方法在很大程度上减轻了试模负担, 但它却更多地依赖于设计人员的经验且无法直接得出最优工艺参数值。确定工艺参数最优值的算法还有统计工艺控制法 (SPC)、统计质量控制法 (SQC)、回归分析以及基于工艺数据库的专家系统和 ANN 等。由工艺模型得到的最优值精度高于各种算法得出的最优值, 而由 ANN 和专家系统得出最优值的速度却快于由工艺模型得出最优值, 同时在减少成本方面这两种算法要远好于 SPC 和 SQC 算法。

基于工艺数据库的专家系统是人工智能算法的一种, 根据要生产制件的尺寸、材料等条件, 从现有的工艺数据库中匹配出最接近的算例, 并把数据库中算例的工艺条件输出作为要生产制件的工艺条件。如果在现有工艺数据库中找不出匹配的算例, 那么专家系统的计算就失败了。当然, 专家系统基于的工艺数据库要不断地补充和更新。

ANN 是新兴的算法, 它具有很强的非线性逼近性和实时性, 并且已经广泛地应用于很多领域的自动控制, 因此采用 ANN 作为工艺控制的参数最优值算法较之以前使用的算法具有很大的优越性。目前, 在 ANN 中使用最多的为前馈 (BP) 网络。BP 算法属于 ANN 中的经典算法, 其算法比较容易, 结构为三层的 BP 网络却可以逼近几乎所有的非线性函数。BP 网络的局限性为训练时间较长和容易陷入局部最小值。可以采用变化或自适应的学习速率来改进。另外还可以采用如遗传算法、模拟退火法等来提高算法的速度和精确性。当用 BP 网络计算工艺参数最优值时, 应先得到相应制件的一批工艺数据, 用这批数据训练 BP 网络, 确定出相

应的输入输出关系, 调节输入工艺条件, 网络可预测出输出。ANN 计算速度快, 解决了注塑周期时间远小于用工艺模型计算工艺参数值时间的矛盾, 为实现在线实时控制提供了算法基础。

3 结语

注射成型工艺控制经历了多年的发展, 分别采用过传统的 PI 和 PID 控制方法、自适应控制、闭环控制、在线实时控制等控制方式, 同时控制算法也由最初的 SPC、SQC 发展至专家系统、ANN 算法等。精密的控制方式与高效的控制算法的有机结合可以使整个注射成型过程动态地处于最佳成型工艺条件之下, 以确保生产出尺寸稳定性好、表面质量佳及力学性能好的塑料制品, 从而满足现代工业对塑料制品越来越高的要求。

参考文献

- 1 Gao F, et al. ANTEC, 1997, 41: 480
- 2 Agrawal A R, et al. Polymer Engineering and Science, 1987, 27: 18
- 3 Smud S M, et al. Polymer Engineering and Science, 1991, 31: 15
- 4 Costin M H, et al. Proceeding of American Control Conference, 1987, 33: 711
- 5 Chiu C, et al. Polymer Engineering and Science, 1991, 31: 1 123
- 6 Srinivasan K, et al. SPE ANTEC Tech, 1991, 37: 343
- 7 Patterson W I, et al. Society of Plastics Engineers, 1996, 36(19) : 2467
- 8 Fara D A, et al. SPE ANTEC Tech, 1990, 36: 239
- 9 Fara D A, et al. SPE ANTEC Tech, 1987, 33: 221
- 10 Gao F, et al. Advances in Polymer Technology, 1994, 13: 111
- 11 Wu J L, et al. SPE ANTEC Tech, 1991, 37: 444
- 12 Woll S L B, et al. Polymer Engineering and Science, 1996, 36: 1 477
- 13 Woll S L B, et al. Polymer Engineering and Science, 1997, 37: 5
- 14 Lu C H, et al. Industry Applications, 1998, 34: 310
- 15 Dubay R, et al. Polymer Engineering and Science, 1997, 37: 1 550
- 16 Chandra R S. SPE ANTEC Tech, 1972, 18: 831
- 17 Kamal M R, et al. Polymer Engineering and Science, 1986, 26: 854
- 18 Gomes V G, et al. Polymer Engineering and Science, 1986, 26: 867
- 19 Dontula N, et al. Polymer Engineering and Science, 1991, 31: 1 674
- 20 Shankar A. Doctoral dissertation. Pittsburgh: Carnegie-Melon University, 1978.
- 21 Pandelidis I O, et al. SPE ANTEC Tech, 1987, 33: 235

ADVANCE IN THE RESEARCH OF THE PROCESS CONTROL TECHNOLOGY FOR THE INJECTION MOLDING

Wang Bei, Wang Lixia, Li Qian, Shen Changyu

(NERC of Mold and Die, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT The advance in the research of the process control technology for the plastic injection molding is summarized. The influence of the process control technology on the optimum choice of the technical parameters is introduced. Meanwhile, a review of the most important contribution of every period in the development of the process control technology of plastic injection molding is made. The developments of the pressure control and the temperature control technology are mainly expounded to improve the quality of the final parts.

KEYWORDS injection molding, technical parameter, control