

注塑成型工艺参数自动设置与优化技术

周华民, 高煌, 张云, 李德群

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 工艺参数是注塑制品质量的决定性因素之一,其设置与优化一直强烈依赖于工艺人员的经验与水平。工艺参数的自动设置与优化方法研究具有重要的意义,但需要克服工艺参数数量多,与制品、模具、材料耦合强,难以精确建模的难题。近年来,越来越多的研究,尝试采用计算机仿真技术在模拟计算方面的优势,以及智能技术在处理强经验、弱理论领域的优势,来解决该难题。按所采用技术方法的不同,可以分为基于仿真计算的优化、专家系统或实例推理以及实验设计与优化。对上述3类注塑工艺参数的自动设置与优化技术的研究现状进行了综述,介绍了3类注塑成型工艺的特点和局限性,并对今后的研究方向给出了建议。

关键词: 注塑成型; 工艺参数设置; 工艺参数优化; 智能技术

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.002

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)01-0007-07

Automatic Setting and Optimization of Injection Molding Process Parameters

ZHOU Hua-min, GAO Huang, ZHANG Yun, LI De-qun

(State Key Lab of Material Processing and Die & Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: Process parameters are one of decisive factors impacting the quality of injection-molded parts. Setting and optimization of them strongly rely on molding personal's experience and capability. Automatic setting and optimization of process parameters are significant. However, many efforts must take to overcome difficulties in dealing with so many process parameters, which are strongly coupled with characteristics of parts, molds and materials. In recent years, in order to solve those difficulties, a growing number of studies have attempted to use computer simulation and artificial intelligence technology, which is superior in computing and tackling strong-experience and weak-theory problems respectively. According to methods, there are three categories: optimization based on simulation and computation, expert systems or case-based reasoning, and Experiment design & optimization. This article focuses on studies of these methods for automatic parameter setting and optimization in injection molding.

KEY WORDS: injection molding; process parameters setting; process parameters optimization; intelligent techniques

注射成型是一种重要的塑料成型方法,可以制造出各种结构复杂、尺寸精密的制品,具有成型周期短,生产效率高,易于自动化生产等优点。影响注塑成型

制品质量的因素多而复杂,主要包括材料、注射机、模具和工艺参数四大方面^[1]。注塑成型工艺参数包括料筒温度、模具温度、注射速度、注射压力、注射位置、保

收稿日期: 2015-09-16

作者简介: 周华民(1974—),男,湖南人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为塑料成型模拟与智能装备。

压压力、保压时间、冷却时间、螺杆转速、背压等,种类繁多,且需要综合考虑材料、注射机与模具的影响,其设置与优化十分困难。

传统的注塑工艺参数设置主要采用尝试法^[2],依据工艺人员的经验或简单的计算公式进行初步设置后,通过试模的缺陷反馈对设置参数进行反复修正,通过上述不断的“试凑”过程,获得能够满足制品质量要求的最终工艺参数。这种“试凑”方法导致生产周期长、费用高,产品质量难以保障,不能满足日益提高的制品质量与生产效率的要求^[3]。此外,塑料制品在消费电子等领域的广泛应用,如导光板、摄像镜头等制品,尺寸精度、性能要求苛刻,属于精密成型,成型工艺窗口变得十分狭窄,用传统依赖经验的方法获得稳定成型的工艺参数更加困难。

注塑工艺参数设置是一个强经验、弱理论的领域,其精确的数学模型难以建立。计算机仿真通过模拟计算建立工艺参数与产品之间的函数关系,而计算机智能技术在处理强经验、弱理论方面具有一定的优势,数据拟合与优化方法则为工艺参数优化提供了更丰富的手段。应用上述计算机技术,实现工艺参数自动设置与优化,一直是国内外的研究热点,已经历20余年的发展^[4]。按照所采用技术方法上的差异可分为3类:基于仿真计算的优化、专家系统或实例推理、试验设计与优化。文中主要对上述3类注塑工艺参数自动设置与优化方法的研究现状进行综述。

1 基于仿真计算的优化

塑料注塑成型仿真方法综合高分子材料学、流变学、传热学、力学,借助有限元法、有限差分法、边界元法和有限体积法等数值计算,通过分析型腔中塑料的流动、冷却等过程,预测制品成型缺陷、翘曲变形与材料性能等。基于仿真计算的工艺参数优化是指利用塑料注塑成型仿真软件,对采用不同工艺参数的成型方案进行计算,通过对模拟结果的评估,获得工艺参数选取与优化的准则^[5]。如恽志东等人^[6]通过流动、填充、冷却和翘曲等数值模拟,分析注塑压力、熔接线分布、翘曲变形和气穴等情况,优化保压时间和保压压力,减小了塑件变形和注射缺陷。王小明等人^[7]以汽车副仪表装饰盖为例,运用Moldflow预测其翘曲变形,并分析模具温度和熔体温度对翘曲变形的影响,通过改变模拟工艺参数设置达到了缩小制品变形的目的。

此类方法试图通过注塑成型仿真软件的模拟计算建立工艺参数与制品质量之间的关系,并以此为依

据建立优化工艺参数的准则,优化结果严重依赖于仿真模拟方法与仿真软件计算的准确性。塑料注塑成型仿真的研究经历了从一维^[8-9]、二维中面^[10-11]、表面^[12-14]到三维实体模型^[15-16]的发展,仿真模型及相关的数值计算方法日趋成熟。国内外商业化软件,如Moldflow, HsCAE, Moldex3D^[17], Sigmasoft等,已在制品设计、模具优化等方面获得了广泛的应用,对工艺方案的可成型性分析较为准确,熔体流动形式,熔接线、短射缺陷等预测的可行性较高。然而,由于仿真模型上的假设与简化、对注射机性能考虑不充分,仿真软件对制品尺寸精度、残余应力与翘曲变形等的准确定量预测仍然十分困难。注塑成型过程的复杂性使其仿真与结构力学分析相比,计算精度存在较大的差距,因此,基于仿真软件建立的工艺参数与制品质量之间的关系可以认为以定性分析为主,通过仿真软件获得的优化工艺参数很难在注射机上直接应用。

为了减少仿真计算误差带来的影响,通过仿真对工艺参数的敏感性及其合理范围进行分析,从而达到优化的目的,是近年来研究的热点^[18-19]。一般在确定工艺参数的因素与水平后,通过正交、田口等实验优化设计方法来确定工艺参数组合,并实施仿真分析。然后依据建立的制品质量评价指标,如收缩值、翘曲值、入口最大压力等,对各组仿真计算结果进行极差分析、方差分析、信噪比分析等,获得工艺参数优化的原则与最优水平组合。如Ozcelik等人^[20]采用正交试验法设计工艺参数组合,并建立了模拟结果的评价体系优化工艺参数,减少了制品翘曲量。王丽霞等人^[21]结合田口方法和仿真技术研究了工艺参数对塑件体收缩率和缩痕的影响,并分别获得了最小体积收缩率和缩痕的工艺参数组合。高月华等人^[22-24]将Kriging代理模型应用于注塑成型工艺优化设计,同时发展了带有随动移动的网格取样方法,提高了模型求解精度,其实验结果表明该方法能够对注塑成型工艺参数进行优化,达到提高塑料产品质量的目的。以上研究结果表明,仿真计算与试验设计结合,可以揭示工艺参数与制品质量之间的关系,同时从定性和定量两个方面为工艺参数优化提供解决方案,降低对仿真计算精度的依赖性。

目前,仿真计算对工艺参数优化已具有重要的指导意义,可以确定制品质量对不同工艺参数的敏感程度、工艺参数优先调整的方向以及工艺窗口的大致范围。然而,该类方法严重依赖于仿真技术的发展与应用水平,在以下方面还有待进一步提高:

1) 仿真计算的精度。发展制品与模具瞬态耦合

冷却分析模型、聚合物力学本构模型、材料微结构演化模型,提高尺寸精度、材料性能的预测精度,特别是精密、微型制品,透镜等具有光学要求的制品以及采用纤维增强等复合材料的制品成型的仿真精度^[25-26]。

2) 仿真计算的效率。目前对于大型复杂制品,采用三维实体模型的计算时间长,往往都超过数小时,工程应用仍然存在效率低的问题^[27]。特别是当需要结合试验优化设计对若干组工艺参数进行分析时,需要进行多次计算,因此,研发面向工艺参数优化的快速仿真方法具有一定的意义。

3) 仿真软件与实际注射机工艺参数设置之间的衔接。仿真软件对注射机建模不够精确,特别是对注射机结构与控制的差异考虑不充分,如无法考虑熔体温度差异、注塑机压力、速度响应等,导致采用相同的工艺参数设置,仿真结果与实际成型过程存在较大的差异。

2 专家系统或实例推理

由于制品质量与工艺参数之间的关系很难用确定的表达式来描述,基于知识和经验的专家系统成为注塑制品工艺参数优化的一种重要方法。应用专家系统,可对注塑制品缺陷进行诊断,能够为工艺人员的工艺参数设置提供参考^[28-29],甚至优化工艺参数,提高制品质量。专家系统是人工智能的一个分支^[30],它是一类具有专门知识和经验的计算机智能程序系统,通过对人类专家的问题求解能力的建模,采用人工智能中的知识表示和知识推理技术来模拟通常由专家才能解决的复杂问题,达到具有与专家同等解决问题能力的水平。这种基于知识的系统设计方法是以知识库和推理机为中心而展开的,它把知识从系统中与其他部分分离开来。专家系统强调的是知识而不是方法。很多问题没有基于算法的解决方案,或算法方案太复杂,采用专家系统,可以利用人类专家拥有的丰富的知识,因此专家系统也称为基于知识的系统。一般说来,一个专家系统应该具备3个要素:具备某个应用领域的专家级知识;能模拟专家的思维;能达到专家级的解题水平。Liao^[30]将专家系统分成基于规则的推理、基于知识的推理、基于实例的推理等方面,并对其在各领域的应用进行了综述。

在注射成型领域,Bozdana等人^[31]开发了一个专家系统EX-PIMM,用来进行注塑机机型、材料、以及模腔数的选择。Pandelidis等人^[32]基于模糊集理论建立了一个基于知识的推理的专家系统,用来修正注塑成

型缺陷,从而获得优化的工艺参数。周华民等人^[33]开发了一个塑料成型缺陷诊断专家系统,可以根据制品缺陷进行原因诊断,提供参考方法,并调整工艺参数。Yang等人^[34]采用基于知识的优化方法来优化工艺参数,该方法用了先验知识来形成一个初始的工艺窗口,用来减少对试模的依赖。叶力等人^[35]建立了一个注塑专家系统,用来获取注塑工艺参数。赵梓年等人^[36]开发了一个注塑成型过程工艺参数设置的专家系统ES-IMPPTS。Stanek等人^[37]对Moldflow的注塑成型分析系统MPX进行了介绍,并用其进行缺陷修正,获得了优化的工艺参数。Chan等人^[38]研究了一个注塑成型监测专家系统,该系统能够预测注塑过程中参数的发展趋势,并且能够在制品出现缺陷之前提醒操作者进行适当的操作,避免缺陷的产生。

塑料材料特性的辨别、成型缺陷的诊断、工艺参数的优化等,都被认为是强烈依赖经验与专业知识的工作。理论上,专家系统比普通的工艺人员更具有优势,曾被认为是十分适合注塑成型工艺参数优化的方法。但是,目前为止,尚未见到采用此类方法成功解决复杂工程问题的报道,商业化软件MPX的应用效果也不甚理想。专家系统在实现与应用时存在以下两点瓶颈问题:

1) 专家知识表达困难。虽然规则库、模糊推理提供了一个貌似理想的专家知识框架,但注塑工艺知识的多样化、模糊性,使其非常难以转化为简单、确定的规则形式进行存储。

2) 专家知识的获取困难。专家系统必须拥有足够多、正确的专家知识,才能保证推理的正确性。专家系统知识库的构建通常通过与具有经验的工艺人员进行访谈获得,这个过程十分艰难。一方面由于工艺人员很难对其拥有的经验与知识进行系统、精确的表达;另一方面对所收集知识的正确性、完整性无法进行合理评估。

工艺人员还通常通过回忆、比较、借鉴过去类似的工艺方案,在既有方案的基础上进行适当修改作为新的工艺方案。基于实例的推理(Case-Based Reasoning, CBR)的思想正好符合工艺人员的这种思维方式。CBR是一种类比或相似推理的方法,实例本身包含了丰富的经验知识,可省去大量经验知识的获取与表达,也更符合专家的思维过程,适合对于很少或不能形成通用规则的问题领域。CBR系统通常由实例的组织与表达、实例的检索与匹配、实例的修改和实例库等组成。系统应用时,根据问题特征描述,从实例库中检索一个相似实例,对相似实例进行评

价、修改,从而获得新问题的解决方案,若成功,则作为实例存储到实例库中,丰富、扩充实例库。基于CBR的上述特点,Kwong等人^[39]提出了一种基于实例推理的系统来设置注塑成型工艺参数。Shelesh-Nezhad等人^[40]结合基于规则的推理和基于实例的推理方法建立了一个混合专家系统来优化注塑成型工艺参数,其中基于实例的推理用来获得初始的工艺参数,基于规则的推理用来进行缺陷修正,获得优化的工艺参数。周华民^[41]建立了一个注塑工艺参数智能系统,其中采用实例推理来获得初始工艺参数,采用模糊推理来修正制品缺陷,获得了优化的工艺参数。

CBR的核心包括实例组织与表示、实例检索与匹配、实例修正。针对塑料注塑成型,实例检索与匹配、实例修正是目前CBR应用的瓶颈,表现在以下两个方面:

1) 注塑实例需要描述制品及模具几何信息作为其成型特征,如何将复杂的三维空间形状转化为可用于相似度计算与可检索的特征参数成为了难题,目前通常采用制品体积、壁厚、流长等参数,实践证明,这些参数还不足以精确描述复杂制品与模具的成型性。

2) CBR系统需要根据源实例和目标实例之间的相似度找出匹配实例,实例库的规模与正确性直接影响到匹配的准确性,同样存在实例收集与整理的难题。此外,无法找到准确匹配实例的情况不可避免,此时仍缺乏行之有效的处置策略,目前通用的与专家规则系统结合的方法,对该问题实际上采用的是回避策略。

3 试验设计与优化

试验是建立工艺参数与制品质量之间关系模型的最准确、最直接的方法。此类方法包括3个步骤:通过试验优化设计、采样策略等确定试验的工艺参数组合;采用各种代理模型拟合工艺参数与制品质量指标的关系;通过优化算法获得一组优选的工艺参数。

常用的代理模型有人工神经网络(Artificial Neural Networks)、响应曲面法(Response Surface Method)、支持向量回归(Support Vector Regression)等。如:Yin等人^[42]采用人工神经网络方法来降低制品翘曲度;Chen等人^[43]采用人工神经网络,建立了工艺参数与制品质量之间的预测模型;Ozcelik等人^[37-38]经过测试选择三次响应曲面作为所需的替代函数进行了工艺参数和制件尺寸的优化设计;Chen等人^[44]利用响应曲面法来建立工艺参数与产品质量之间的关系模型;Behrooz Farshi等人^[45]用顺序单纯形法优化了熔体温度、模具温度、保压压力和保压时间等工艺参数,

减小翘曲变形和收缩。

模拟退火算法(Simulated Annealing Method)、遗传算法(Genetic Algorithms)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization)及其组合是常用的优化算法。如Kurtaran等人^[46]结合人工神经网络和遗传算法优化模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间和冷却时间等工艺参数,降低了汽车车顶灯座翘曲,随后又结响应曲面法和遗传算法来优化工艺参数,降低了该件的翘曲量,提高了制品的成型质量^[47]。Chen等人^[48-49]结合人工神经网络、模拟退火算法以及粒子群算法来优化工艺参数。Zhao等人^[50]结合Kriging模型和遗传算法来优化工艺参数,减少了制品翘曲量和注塑周期。申长雨等人^[51]采用人工神经网络和遗传算法获得优化的工艺参数,降低制品体积收缩。Ozcelik等人^[52]结合响应曲面法以及遗传算法,成功将一个薄壁制品翘曲量降低了40%。Chen等人^[53]采用人工神经网络和遗传算法优化了注塑成型工艺参数。Su等人^[54]结合人工神经网络和模拟退火算法优化了工艺参数。Shi等人^[55]集成人工神经网络和遗传算法,优化了工艺参数。Zhou等人^[56]结合支持向量回归和遗传算法来优化注塑成型工艺参数,其中支持向量回归用来建立工艺参数与产品质量之间的代理模型,遗传算法用来优化工艺参数。

试验设计与优化成功的关键在于构建代理模型是否可行与准确。目前,此类方法均仅选用少数几个工艺参数作为试验因素,如注射速度、保压压力、模具温度、熔体温度等,建立它们与一个或几个制品质量指标之间的关系,如关键尺寸精度、重量等。针对特定的零件,如果试验因素与水平选择正确,该类方法可以取得不错的效果;但是,此类方法也存在以下3点不足:

1) 注塑成型的工艺参数非常多,如大多数的制品均需采用三段或四段注射工艺,每段需要分别设置不同的注射速度、压力保障制品外观、尺寸和性能等多方面的质量要求,对于复杂的制品,即使是具有丰富经验的工艺人员,仍然难以确定开展试验的因素与水平。若在代理模型中将所有的工艺参数作为输入,会导致其训练需要非常多的样本,开展大量试验,这几乎是不可能完成的任务。此外,由于各参数之间存在耦合,导致试验因素需要考虑交叉影响,也增加了试验的数量。

2) 工艺参数与产品质量之间是显著的非线性关系,当选择较多的试验因素,或样本数量偏少时,代理模型训练会存在过拟合现象,拟合误差已经超过可置

信的范围,在此基础上开展的严格寻优已失去其意义所在。

3) 目前试验设计与优化更侧重于获得最优的工艺参数组合,这组工艺参数针对特定注射机、特定工况是有意义的,但是当这些条件发生变化时,如中试到量产过程,这些工艺参数必须经过修改与校正;因此,自动获得一个稳健的工艺区域(工艺窗口),在该区域内可容忍正常的外部条件变化而导致的扰动,保证稳成型的稳定性十分有必要。

4 总结

注塑工艺参数自动设置与优化在保障制品质量方面发挥出了越来越多的作用,经过多年发展,发展出了3种不同的技术方法:基于仿真计算的优化、专家系统或实例推理、以及试验设计与优化。这3种方法具有各自的特点与局限性,总结如下:

1) 基于仿真计算的优化可以利用仿真计算快捷与代价低廉的优势,在工艺设计阶段完成制品质量对不同工艺参数的敏感性分析,确定工艺参数调整与优化的方向;但是受仿真精度、效率的制约,此类方法定位于工艺参数的定性或半定量分析。

2) 专家系统或实例推理为工艺参数自动设置与优化提供了一个全面、系统的框架,但是存在知识的表达与获取、推理规则收集的瓶颈问题。此类方法可以完成简单零件全部工艺参数的自动设置与优化,但是难以满足精密、复杂制品的高质量要求。

3) 试验设计与优化与基于仿真计算的优化的基本思路与流程相似,区别在于前者采用物理试验,直接测量成型质量,因此工艺参数与制品质量的关系更为准确,基本可以实现定量分析;但是由于需要开展大量的试模工作,可以考虑的工艺参数数量少,难以确定可置信的工艺窗口,满足不同工况的要求。此外,此类方法也依赖于工艺人员对试验因素与水平的选择,对不同类型零件缺乏通用性。

综上所述,笔者认为基于仿真计算的优化方法可以在工艺方案设计阶段发挥优势,获得工艺参数可行的区域以及工艺参数的敏感性,为中试或量产阶段注射机上工艺参数的设置与优化提供参考。专家系统或实例推理方法与试验优化设计优势互补,两者有机结合可以实现中试或量产工艺参数的自动设置与优化。可以采用以下的实施框架:

- 1) 采用专家系统或实例推理确定初始工艺参数;
- 2) 通过顺序采样开展试模,逐步在线训练代理模

型,建立制品质量与工艺参数之间的关系;

3) 利用试模过程中已经获得的二者之间的关系,得到工艺参数的主要因素与敏感性分析;

4) 结合专家知识与规则对顺序采样过程进行优化,减少试模次数;

5) 基于试模过程的概率统计,逐步建立工艺窗口,在此基础上获得优选的工艺参数。上述方法的优势在于不再严格要求专家系统或实例推理获得的工艺参数具有高度的准确性,同时发挥试验优化方法精确、定量分析的优点,并通过专家知识的强归纳偏置假设降低试验设计的采样数量,提高工艺窗口附近的拟合精度。

为实现上述过程,建议在以下关键技术开展更多的研究:

1) 基于设计过程、试模过程数据的知识发现。实现工艺知识、推理规则的自动挖掘,以及基于统计规律的产品成型特征自动提取,避免传统经验、数据人工收集、整理的瓶颈问题。

2) 通过光学、压力、速度等传感信息实现对制品外观、尺寸、性能等关键质量指标的在线检测,构建“工艺参数-传感变量-制品质量”的关系模型,通过传感变量作为中间量衔接工艺参数与制品质量,模型可以更加精确,更利于数据挖掘与知识发现。

3) 发展以工艺窗口为目标的优化方法,以及基于工艺窗口的工艺参数优化算法,提高工艺参数优化的适用范围与成型过程的鲁棒性。

参考文献:

- [1] MOK S L, KWONG C K. Application of Artificial Neural Network and Fuzzy Logic in a Case-based System for Initial Process Parameter Setting of Injection Molding[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13(3): 165—176.
 - [2] LI De-qun, ZHOU Hua-min, ZHAO P, et al. A Real-Time Process Optimization System for Injection Molding[J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(10): 2031—2040.
 - [3] LAM Y C, ZHAI L Y, TAI K, et al. An Evolutionary Approach for Cooling System Optimization in Plastic Injection Moulding [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(10): 2047—2061.
 - [4] MOK S L, KWONG C K, LAU W S. Review of Research in the Determination of Process Parameters for Plastic Injection Molding[J]. Advances in Polymer Technology, 1999, 18(3): 225—236.
 - [5] 俞华英. 薄壁塑件注塑成型的数值模拟和成型工艺参数优化的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2008.
- YU Hua-ying. Numerical Simulation Research of the Injec-

- tion Molding for Thin-Wall Plastic Parts and Optimize of The Process Parameter[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008.
- [6] 恽志东, 薛兴, 魏德强, 等. 基于CAE技术的薄壁塑件注射成型分析与工艺优化[J]. 模具工业, 2009, 35(11): 9—12.
- YUN Zhi-dong, XUE Xing, WEI De-qiang, et al. Analysis on Injection Molding of Thin-Walled Plastic Part and Process Optimization Based on CAE Technology[J]. Die & Mould Industry, 2009, 35(11): 9—12.
- [7] 王小明, 赵明娟, 陈炳辉, 等. Moldflow在注塑成型翘曲优化中的应用[J]. 塑料工业, 2011, 39(4): 49—51.
- WANG Xiao-ming, ZHAO Ming-juan, CHEN Bing-hui, et al. Application of Moldflow in Warp Optimization of the Injection Molding[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(4): 49—51.
- [8] KAMAL M R, KENIG S. The Injection Molding of Thermoplastics Part I: Theoretical Model[J]. Polymer Engineering & Science, 1972, 12(4): 294—301.
- [9] WU P C, HUANG C F, GOGOS C G. Simulation of the Mold-filling Process[J]. Polymer Engineering & Science, 1974, 14(3): 223—230.
- [10] HIEBER C A, SHEN S F. A Finite-element/finite-difference Simulation of the Injection-molding Filling Process[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980, 7(1): 1—32.
- [11] SHEN SF. Simulation of Polymeric Flows in the Injection Molding Process[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1984, 4(2): 171—183.
- [12] ZHOU H, LI D. A numerical Simulation of the Filling Stage in Injection Molding Based on a Surface Model[J]. Advances in Polymer Technology, 2001, 20(2): 125—131.
- [13] ZHOU H, LI D. Computer Filling Simulation of Injection Molding Based on 3D Surface Model[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2002, 41(1): 91—102.
- [14] CUI S, ZHOU H, LI D. Numerical Simulation of Injection Molding Cooling Process Based on 3D Surface Model[J]. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 2004, 14(2): 64—70.
- [15] ILINCA F, H TU J-F. Three-dimensional Simulation of Multi-material Injection Molding: Application to Gas-assisted and Co-injection Molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2003, 43(7): 1415—1427.
- [16] TIE G, DEQUN L, HUAMIN Z. Three-dimensional Finite Element Method for the Filling Simulation of Injection Molding [J]. Engineering with Computers, 2006, 21(4): 289—295.
- [17] ERCER M, GODEC D, BUJANI B. Application of Moldex3D for Thin-wall Injection Moulding Simulation[J]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2007, 908(1): 1067—1072.
- [18] 张娜. 注塑制品缺陷诊断及工艺优化专家系统的研究开发[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- ZHANG Na. Research and Development of Expert System of Injection Molding Products Defect Diagnosis and Process Optimization[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [19] 尹飞. 基于神经网络技术和遗传算法的注塑成型工艺优化方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- YIN Fei. Research on Process Optimization Method for Plastic Injection Molding Based on Artificial Neural Network and Genetic Algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [20] OZCELIK B, ERZURUMLU T. Comparison of the Warpage Optimization in the Plastic Injection Molding Using ANOVA, Neural Network Model and Genetic Algorithm[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(3): 437—445.
- [21] 王利霞, 王蓓, 申长雨. 工艺参数对注塑制品质量的影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 9(3): 62—66.
- WANG Li-xia, WANG Bei, SHEN Chang-yu. Influence of Processing Parameter on Quality of Plastic Injection Molded Parts[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2003, 9(3): 62—66.
- [22] GAO Y, WANG X. An Effective Warpage Optimization Method in Injection Molding Based on the Kriging Model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(9—10): 953—960.
- [23] GAO Y, WANG X. Surrogate-based Process Optimization for Reducing Warpage in Injection Molding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1302—1309.
- [24] GAO Y, TURNG L-S, WANG X. Adaptive Geometry and Process Optimization for Injection Molding Using the Kriging Surrogate Model Trained by Numerical Simulation[J]. Advances in Polymer Technology, 2008, 27(1): 1—16.
- [25] CHEN Z, TURNG L-S. A Review of Current Developments in Process and Quality Control for Injection Molding[J]. Advances in Polymer Technology, 2005, 24(3): 165—182.
- [26] CHEN W C, LIOU P H, CHOU S C. An Integrated Parameter Optimization System for MIMO Plastic Injection Molding Using Soft Computing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9—12): 1465—1474.
- [27] WANG K K. CAE for Injection Molding—past, Present and the Future[C]. Proceedings of the Materials Processing and Design Modeling, Simulation and Applications NUMIFORM 2004 Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, USA, 2004.
- [28] JAN T-C, O' BRIEN K. A User-friendly, Interactive Expert System for the Injection Moulding of Engineering Thermoplastics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1993, 8(1): 42—51.
- [29] KAMEOKA S, HARAMOTO N, SAKAI T. Development of an Expert System for Injection Molding Operations[J]. Advances

- in Polymer Technology, 1993, 12(4):403—418.
- [30] LIAO S H. Expert System Methodologies and Applications— a Decade Review from 1995 to 2004[J]. Expert System Application, 2005, 28(1):93—103.
- [31] BOZDANA A T, EYERCI O LU. Development of an Expert System for the Determination of Injection Moulding Parameters of Thermoplastic Materials: EX-PIMM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128(1—3):113—122.
- [32] PANDELIDIS I, KAO J-F. DETECTOR: A Knowledge-based System for Injection Molding Diagnostics[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1990, 1(1):49—58.
- [33] 周华民, 李德群, 张宜生. 塑料成型缺陷诊断专家系统[J]. 塑料科技, 1997, 118(2):30—34.
- ZHOU Hua-min, LI De-qun, ZHANG Yi-sheng. A Polymer-Processing Faults Diagnosis Expert System[J]. Plastics Science & Technology, 1997, 118(2):30—34.
- [34] YANG D, DANAI K, KAZMER D. A Knowledge-Based Tuning Method for Injection Molding Machines[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 123(4):682—691.
- [35] 叶力, 杨继隆, 阮健, 等. 注射成型工艺参数的专家系统[J]. 浙江工业大学学报, 2001, 29(1):28—31.
- YE Li, YANG Ji-long, RUAN Jian, et al. Injection Molding Machine Expert System[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2001, 29(1):28—31.
- [36] 赵梓年, 于骊, 王潼. 塑料注射成型过程工艺参数设置专家系统[J]. 天津科技大学学报, 2005, 20(3):62—66.
- ZHAO Zi-nian, YU Li, WANG Tong. Expert System for Plastic Injection Molding Process Parameters' Setting[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2005, 20(3):62—66.
- [37] STANEK M, MANAS D, MANAS M, et al. Optimization of Injection Molding Process by MPX[C]//Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation, ACMOS' 11, May 27, 2011—May 29, 2011, Lanzarote, Canary Islands, Spain, F, 2011.
- [38] CHAN F T S, LAU H C W, JIANG B. In-line Process Conditions Monitoring Expert System for Injection Molding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1—3):268—274.
- [39] KWONG C K, SMITH G F, LAU W S. Application of Case Based Reasoning in Injection Moulding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1—3):463—467.
- [40] SHELESH-NEZHAD K, SIORES E. An Intelligent System for Plastic Injection Molding Process Design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1):458—462.
- [41] ZHOU Hua-min, ZHAO P, FENG W. An Integrated Intelligent System for Injection Molding Process Determination[J]. Advances in Polymer Technology, 2007, 26(3):191—205.
- [42] YIN F, MAO H J, HUA L, et al. Back Propagation Neural Network Modeling for Warpage Prediction and Optimization of Plastic Products during Injection Molding[J]. Materials & Design, 2011, 32(4):1844—1850.
- [43] CHEN W-C, TAI P-H, WANG M-W, et al. A Neural Network-Based Approach for Dynamic Quality Prediction in a Plastic Injection Molding Process[J]. Expert System Application, 2008, 35(3):843—849.
- [44] CHEN C C, SU P L, LIN Y C. Analysis and Modeling of Effective Parameters for Dimension Shrinkage Variation of Injection Molded Part with Thin Shell Feature Using Response Surface Methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(11—12):1087—1095.
- [45] FARSHI B, GHESHMI S, MIANDOABCHI E. Optimization of Injection Molding Process Parameters Using Sequential Simplex Algorithm[J]. Materials & Design, 2011, 32(1):414—423.
- [46] KURTARAN H, OZCELIK B, ERZURUMLU T. Warpage Optimization of a Bus Ceiling Lamp Base Using Neural Network Model and Genetic Algorithm[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2):314—319.
- [47] KURTARAN H, ERZURUMLU T. Efficient Warpage Optimization of Thin Shell Plastic Parts Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(5—6):468—472.
- [48] CHEN W C, FU G L, KURNIAWAN D. A Two-stage Optimization System for the Plastic Injection Molding with Multiple Performance Characteristics[J]. Automation Equipment and Systems, 2012, 468/471:386—390.
- [49] CHEN W C, KURNIAWAN D. Process Parameters Optimization for Multiple Quality Characteristics in Plastic Injection Molding Using Taguchi Method, BPNN, GA, and Hybrid PSO-GA[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8):1583—1593.
- [50] ZHAO J, CHENG G. An Innovative Surrogate-Based Searching Method for Reducing Warpage and Cycle Time in Injection Molding[J]. Advances in Polymer Technology, 2015.
- [51] SHEN C Y, WANG L X, LI Q. Optimization of Injection Molding Process Parameters Using Combination of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(2—3):412—418.
- [52] OZCELIK B, ERZURUMLU T. Determination of Effecting Dimensional Parameters on Warpage of Thin Shell Plastic Parts Using Integrated Response Surface Method and Genetic Algorithmic[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(8):1085—1094.

- acid) Foams with Controlled Cell Morphology and Crystallinity[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 75: 390—399.
- [39] MATUANA L M, DIAZ C A. Study of Cell Nucleation in Microcellular Poly (lactic acid) Foamed with Supercritical CO₂ through a Continuous-Extrusion Process[J]. Industry & Engineering Chemistry Research, 2010, 49: 2186—2193.
- [40] PILLA Srikanth, KIM Seong G, AUER George K, et al. Microcellular Extrusion Foaming of Poly (lactide)/Poly (butylenes adipate-co-terephthalate) Blends[J]. Materials Science and Engineering C, 2010, 30: 255—262.
- [41] 鲁德平, 王必勤. 模压法微孔发泡PET薄膜的性能研究[J]. 胶体与聚合物, 2002, 20: 21—23.
- LU De-ping, WANG Bi-qin. A Study of the Properties of Molded Microcellular PET Film Foams[J]. Colloid and Polymer, 2002, 20: 21—23.
- [42] 向帮龙, 管蓉, 方荃, 等. 模压法制备微孔发泡聚碳酸酯片材[J]. 材料科学与技术, 2007, 15: 233—236.
- XIANG Bang-long, GUAN Rong, FANG Quan, et al. The Preparation of Microcellular Foamed Polycarbonate Sheet in Molded Foaming[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15: 233—236.
- [43] LI Y, XIANG B, LIU J, et al. Morphology and Qualitative Analysis of Mechanism of Microcellular PET by Compression Moulding[J]. Materials Science and Technology, 2010, 26 (8): 981—987.
- [44] CHANDRA A, GONG Shao-qin, YUAN Ming-jun, et al. Microstructure and Crystallography in Microcellular Injection-Molded Polyamide-6 Nanocomposite and Neat Resin[J]. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(1): 52—61.
- [45] YUAN Ming-jun, TURNG Lih-sheng, GONG Shao-qin. Study of Injection Molded Microcellular Polyamide-6 Nanocomposites[J]. Polymer Engineering & Science, 2004, 44(4): 673—686.
- [46] GUO Ming-cheng, HEUZEY Marie-claude, CARREAU Pierre J. Cell Structure and Dynamic Properties of Injection Molded Polypropylene Foams[J]. Polymer Engineering & Science, 2007, 47(7): 1070—1081.
- [47] YUAN Ming-jun, SONG Qing, TURNG Lih-Sheng. Spatial Orientation of Nanoclay and Crystallite in Microcellular Injection Molded Polyamide-6 Nanocomposites[J]. Polymer Engineering & Science, 2007, 47(6): 765—779.
- [48] YUAN Ming-jun, WINARDI A, GONG Shao-qin, et al. Effects of Nano-and Micro-fillers and Processing Parameters on Injection-Molded Microcellular Composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(6): 773—788.
- [49] KRAMSCHUSTER A, CAVITT R, ERMER D, et al. Quantitative Study of Shrinkage and Warpage Behavior for Microcellular and Conventional Injection Molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2005, 45(10): 1408—1418.
- [50] CHANDRA A, GONG Shao-qin, TURNG Lih-Sheng, et al. Cell Development in Microcellular Injection Molded Polyamide-6 Nanocomposite and Neat Resin[J]. Journal of Cellular Plastics, 2004, 40(5): 371—382.
- [51] YUAN Ming-jun, TURNG Lih-Sheng, GONG Shao-qin, et al. Crystallization Behavior of Polyamide-6 Microcellular Nanocomposite[J]. Journal of Cellular Plastics, 2004, 40(5): 397—409.
- [52] YUAN Ming-jun, TURNG Lih-Sheng, CAULFIELD D F. Crystallization and Thermal Behavior of Microcellular Injection-Molded Polyamide-6 Nanocomposites[J]. Polymer Engineering & Science, 2006, 46(7): 904—918.
- [53] PILLA Srikanth, KRAMSCHUSTER Adam, YANG Li-qiang, et al. Microcellular Injection-Molding of Polylactide with Chain-Extender[J]. Material Science & Engineering C, 2009, 29: 1258—1265.
- [54] PILLA Srikanth, KRAMSCHUSTER Adam, LEE Jung-joo, et al. Microcellular Processing of Polylactide-hyperbranched Polyester-nanoclay Composite[J]. Material Science, 2010, 45: 2732—2746.
- [55] HWANG Shyh-Shin, HSU P P, YEH Jui-ming, et al. The Mechanical/thermal Properties of Microcellular Injection-Molded Polylactic-acid Nanocomposites[J]. Polymer Composites, 2009, 30: 1625—1630.

(上接第13页)

- [53] CHEN W C, FU G L, TAI P H, et al. Process Parameter Optimization for MIMO Plastic Injection Molding Via Soft Computing[J]. Expert System Application, 2009, 36(2): 1114—1122.
- [54] SU C-T, CHANG H-H. Optimization of Parameter Design: An Intelligent Approach Using Neural Network and Simulated Annealing[J]. International Journal of Systems Science, 2000, 31(12): 1543—1549.
- [55] SHI F, LOU Z L, ZHANG Y Q, et al. Optimisation of Plastic Injection Molding Process with Soft Computing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(9): 656—661.
- [56] ZHOU J, TURNG L S, KRAMSCHUSTER A. Single and Multi Objective Optimization for Injection Molding Using Numerical Simulation with Surrogate Models and Genetic Algorithms[J]. International Polymer Processing, 2006, 21(5): 509—520.