

## 注射成型工艺过程中的应力研究概述

李海梅<sup>1,2</sup>, 李瑞波<sup>1</sup>, 陈金涛<sup>1</sup>, 张亚飞<sup>1</sup>, 曹方杰<sup>1</sup>, 罗飞<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 注射成型过程中的应力对成型质量、制品性能有重要的影响, 尤其对于医疗、光学等高附加值的塑料制品。控制并量化成型过程中的应力, 对成型机理的研究、成型质量的控制意义重大, 因此一直是注射成型加工的研究热点。现阶段注射成型过程中的应力量化是通过对注塑产品的实验测量和数值模拟实现的。实验测量的方法包括: 光弹法、剥层法、钻孔法、超声波及化学探针技术, 但这些测量须在制品成型加工结束后才能实施, 在线检测的研究较少。数值模拟利用流动充填、冷却不同的数学物理模型, 分别求解制品的流动应力、热应力, 二者叠加作为制品的应力值, 不考虑脱模机械力可能带来的应力, 对成型过程总应力的预测有一定的局限性。成型过程的应力测量及监测是发展趋势之一。

**关键词:** 注射成型; 成型应力; 在线测量; 数值模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.003

**中图分类号:** TQ320.66

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2016)01-0014-07

## Introduction to Stresses During Injection Molding Process

LI Hai-mei<sup>1,2</sup>, LI Rui-bo<sup>1</sup>, CHEN Jin-tao<sup>1</sup>, ZHANG Ya-fei<sup>1</sup>, CAO Fang-jie<sup>1</sup>, LUO Fei<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering at Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 China;

2. The State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment at DLUT, Dalian 116023, China)

**ABSTRACT:** Stresses induced by injection molding process have significant effects on processing quality and products final performance, especially on the properties of biomedical- and optical- injection molded parts with higher prices. Controlling and minimizing the negative processing-induced stresses values is one of the research hot spots, which is important for scientific theory and injection-processing. Nowadays residual stresses values of injection-molded parts, instead of the processing-induced stresses, are obtained by experiments or numerical simulation. The current methods for stress measurement include birefringence measurement, layer-removal method, hole-drilling method, ultrasonic technology and chemical probe technique. However, the above mentioned methods can only be conducted after the parts are manufactured. There are rare research job for online stress measurement during injection molding processing. The simulated residual stresses results of injection-molded parts are the linear combination of flow-induced stresses and thermal-induced stresses based on different mathematical, physical model of filling and cooling stage, respectively. But the prediction results, regardless the ejection induced mechanical stresses, are restrictive validation for processing-induced stresses. Stresses real-time measurement during injection molding processing is a kind of emerging technology and a new fields which will attach more and more attention.

**KEY WORDS:** injection molding processing; processing-induced stresses; real-time measurement; numerical simulation

收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(11372285); 工业装备结构分析国家重点实验室开放课题(GZ1203)

作者简介: 李海梅(1969—), 女, 河南淮阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料加工工程。

注射成型能一次成型形状复杂、尺寸精确的制品,适合高效率、大批量的生产方式,已成为热塑性塑料和部分热固性塑料最主要的成型加工方法。注塑成型中,聚合物材料经历了相当复杂的物理(化学)过程,非牛顿的高温熔体通过流道、浇口向较低温度的模具型腔充填,熔体一方面由于模具传热而快速冷却,另一方面因高速剪切而产生热量,同时伴有熔体固化、体积收缩、取向、结晶(相态转变)等过程。成型过程中,高分子聚合物伴随外场(热、力场)的作用,经历了高温熔融的粘流态、大变形的高弹态及结构稳定的玻璃态(晶态)。高分子材料状态转变的过程中,由于材料自身的变形恢复受到约束,在赋形过程中产生了应力。目前对成型机理的理解有限,成型工艺过程的评价和表征主要是通过注塑制品完成的,如以制品的外观质量(气穴、凹痕、银纹等)、尺寸精度(与模具的尺寸差异和变形)和制品性能(力学性能、光学性能等)来分析注射成型的成型质量。

“应力”控制是生产高附加值塑料制品的关键,同时具有重要的工程意义,对提升塑料工业的加工水平、促进产业结构调整有积极作用。文中以注塑成型为例,总结注塑成型应力研究的主要成果,包括实验、数值方法,及其在线测量的意义与难点。

## 1 注塑制品残余应力

注塑成型制品经历了充填、保压、冷却和顶出等工艺过程,该过程中高分子材料在短时间内完成了从黏流态、高弹态到玻璃态的转变。加工材料具有黏弹性,其分子链在熔体流动过程中发生了变形、取向,分子链的这些变化若不能在制品冷却定型前充分稳定,便会在制品中形成残余应力。

注塑制品的残余应力分析源于无机玻璃的急冷,主流理论将其分为流动引入应力(流动残余应力)和温差引起的热应力(热残余应力)两类;总的残余应力是流动残余应力和热残余应力共同作用的结果,但二者耦合的机理仍处于研究阶段。通常是将流动残余应力与热残余应力分开处理,然后二者进行线性叠加。一些学者的研究表明温差应力比流动应力大1~2个数量级<sup>[1-4]</sup>,因此,塑件残余应力的研究多以温差热应力为主。

流动残余应力是塑料熔体在型腔内作非等温流动形成的剪切应力和法向应力,由于温度迅速下降而不能完全松弛,被“冻结”在固体中的应力。数值模拟分析代表性的研究有: Isayev 等人<sup>[1-2]</sup>用 Leonov 本构模

型,研究了充模过程应力的建立和冷却过程应力的松弛,但未考虑熔体的可压缩性,同时测量了自由淬火和注塑无定型聚合物薄壁件的各个双折射分量,发现虽然热应力比流动应力大一个数量级,但淬火试样的双折射比注塑试样的双折射小一个数量级,即流动应力对分子取向的贡献占主导因素。Baaijens<sup>[3]</sup>先用广义牛顿流体模型计算出了模腔内的速度场各参数,然后将其代入可压缩的 Leonov 本构模型,分析了充模和保压过程的流动残余应力。Kim 等人<sup>[5]</sup>用可压缩的黏弹性本构关系研究了注-压成型工艺条件下,中心进料厚 1 mm 的 PC 和 PS 塑料制品的残余应力,结合工艺特点构建了相关的数学模型; Lee 等人<sup>[6]</sup>用不可压缩 Leonov 本构模型计算了中心浇口圆盘注塑和注压过程中的流动残余应力、双折射。文献<sup>[7]</sup>给出了熔体充填和保压阶段由于冻结的分子取向引起的流动残余应力的发展过程,建立了相关的分析模型和数学方程。郑州大学的陈静波等<sup>[8]</sup>建立了可压缩粘弹性聚合物熔体在薄壁型腔中充模/保压过程中非等温、非稳态流动的数学模型,用数值方法实现了注塑成型过程中流动应力和取向,完成了松弛过程的数值模拟,取得了与实验相符的结果。

热应力的研究相对于塑料制品的流动应力较为成熟。热弹性本构关系下的注塑制品模内残余应力计算,美国 Cornell 大学 K. K. Wang 研究小组在 1992 年前后率先推出了商品化的分析软件 C-mold/Warpage,能计算注射制品残余应力的商品化软件有: Moldflow 公司的 MF/stress,日本针对汽车用纤维增强塑料制品的 IMAP,中国台湾地区 Moldex 软件。共同特点是在流动、保压、冷却模拟集成的基础上,用有限元/有限差分法研究了弹性本构关系下制品因温差、压力等引起的应力、翘曲,以预测塑件的成型尺寸为主<sup>[5,9]</sup>。粘弹性本构关系下的热残余应力研究,主要是在热流变简单材料的粘弹本构关系下(多以积分形式表示),结晶、非晶平板类制品的残余应力,并讨论了压力、成型温度对残余应力影响,计算中可考虑模具变形量等边界条件的变化<sup>[10-12]</sup>。Kamal 等人<sup>[13]</sup>用黏弹性本构方程研究了流动、保压、冷却整个成型过程的数学模型和算法。数值模拟获得的应力数据多用于翘曲变形的预测,进而完成尺寸精度、形状精度的预测<sup>[14-15]</sup>,且数值算法融合了优化算法,如基因算法结合数值模拟<sup>[14-16]</sup>。

在试验方面,残余应力的测量主要包括以下方法:双折射测量法<sup>[17]</sup>,剥层法<sup>[18]</sup>,钻孔法<sup>[19]</sup>,化学探针测量法<sup>[19]</sup>,基于超声波技术的方法<sup>[20]</sup>。其中,双折射测量

只适于透明塑料制品;剥层法、钻孔法、化学探针法需要对原试样进行切割破坏;超声波技术对制品的形状尺寸有要求。此外这几种方法多是在制品注射成型工艺完成后才进行量测,且测量的结果是应力的综合结果,无法区分流动引入应力、热应力或机械应力。一些研究人员通过数值模拟或退火技术完成了各种来源应力的区分<sup>[21-25]</sup>,以便于更好地优化成型工艺,提升制品的性能和加工质量。

## 2 注塑成型过程应力的在线测量

塑料加工成型是物料在热机械作用下的形变过程,通过热能以及机械能的转化将塑料熔融塑化并经特定的模具形成制品,因此,如何最大限度地提高能量转化效率,即提高传热传质效率、缩短热机械作用历程,成为塑料加工节能降耗的关键所在。注塑成型的在线检测及监测技术,是研究注塑成型质量、成型效率的有效手段。

“眼见为实”的习惯,是注塑成型过程“可视化技术”发展的动力之一。可视化技术通过透明装置和图像处理技术,使得加工过程不再是“黑盒子”,能再现塑料融化、输送、充填、固化的全过程,可理解为一种广义的在线测量<sup>[26-29]</sup>。可视化技术始于1951年,因具有可见、直观的优点,利于理解注塑成型的过程及加工机理。可视化实验所取得的数据为注射成型熔融模型的建立和验证提供了依据,同时也是注射螺杆优化设计的基础数据。根据动态观察和记录物料在螺杆内的熔融和输送过程的可视化成果,北京化工大学、华南理工大学完成了注塑螺杆的革新<sup>[30-32]</sup>,通过螺杆截面与运动方式的变化,提高了螺杆的塑化能力(如图1所示)。图1a是传统螺杆塑化运输机理,图1b是振动剪切变形为主的塑化输送机理。二者在流场的速度梯度不一样,振动剪切有拉伸流动,正是拉伸流动提高了图1b中的传热传质效率;图1c,d说明了如何更充分利用拉伸流动完成塑化运输。德国IKV研究所、日本东京大学、大连理工大学、北京化工大学的研究人员,利用透明模具,通过型腔内的可视化技术,观察了型腔内熔体的流动过程,并记录了成型过程中的短射、缩痕、喷射、银纹、熔接痕、取向、剪切生热等形成过程,为优化工艺参数,研究成型机理,改善、消除成型缺陷,提高成型质量,提供了理论依据<sup>[29,33,34]</sup>。

现阶段,温度、压力的在线测量技术较为成熟。温度、压力传感器及相关应用多见于中高端注塑机上,是

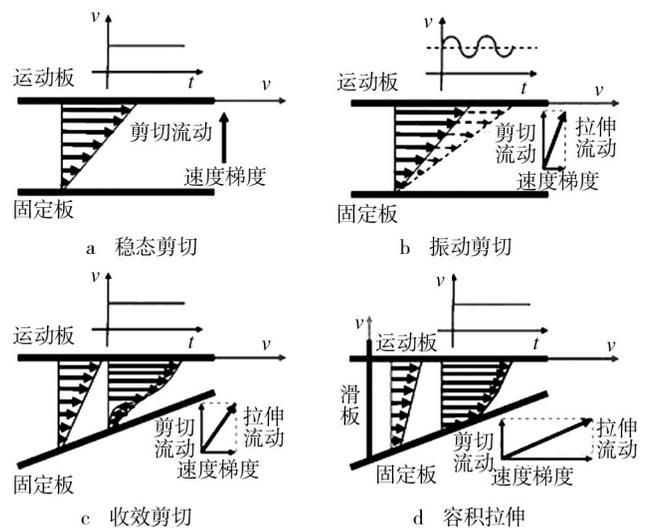


图1 塑料塑化运输机理与方法的演变<sup>[32]</sup>

Fig.1 The evolution of plastics plasticating and conveying mechanism<sup>[32]</sup>

设备的重要组成部分。如何准确合理获得注塑机温度、压力实时测量数据,科学地应用实时数据,以保证设备输入的压力、温度等工艺参数能让塑料熔体有效地进入型腔,高效率地完成赋形,是研究的重点。加拿大McGill大学、美国UW-Madison大学、香港科技大学高福荣团队等研究人员,利用实时监控的温度压力曲线,结合控制理论,完成相应硬件及软件编写,先后完成了型腔充填长度预测、成型制品重量控制、熔体温度均匀性、注射速度及注塑压力稳定性控制、成型缺陷诊断等工作<sup>[35-38]</sup>,建立了工艺条件(如喷嘴压力、注射速度等)、设备(如螺杆几何参数等)、目标参数(如熔体温度、制品重量、速度等)之间的关系模型,为注塑质量提升提供了理论与硬件保障。

随着塑料制品在医疗行业应用的日益广泛,无缺陷(无损伤)注塑成型的要求也越来越迫切。所谓无缺陷成型,就是在保证尺寸形状精度的基础上,消除制品的裂纹、条纹、斑点和云纹,降低或消除应力、应力集中,保证塑件的使用性能,并满足后续的清洗、净化、高温干燥,溶剂或超声波热合等技术装配的要求。所以如何实施应力控制、减少/消除应力,是塑料成型过程中所要解决的关键问题。由于应力的形成涉及因素较多,与材料、工艺、设备都有关系,故在线测量装置各有不同。类似于金属成形加工(如焊接、铸造)中的无损探伤,“超声波”在塑料成型加工中也有应用<sup>[20,39-42]</sup>。在超声检测中,速度与衰减常用来表征材料的性质,因此根据超声回波信号计算量化速度、衰减至关重要。结合材料表征手段(如扫描电镜、小角衍射等),可实现超声技术对具有不

同相容性和相形态结构的聚合物共混体系、以及不同取向结构的共混物的检测<sup>[39-41]</sup>。研究表明:①超声纵波的速度可表征聚合物共混物的相容性,对于相容体系,声速与组分含量呈线性关系,而对不相容体系、非晶的体系或部分相容体系,声速与组分含量呈非线性关系。②超声衰减可表征聚合物共混物的相容性及相态结构。对于相容体系,声衰减与组分含量呈直线关系,对于不相容体系,声衰减与组分含量呈非线性关系,曲线的拐点处对应于共混体系的相转变点。③横波沿不同方向的速度差、时间差可以表征介质分子链取向程度的大小,大的时间差对应着大的取向程度。此外,超声技术可研究温度、压力等工艺参数对塑料熔体冷却固化的影响(如图2所示)<sup>[39,42]</sup>。图2a是超声波在型腔内应用示意图,图2b给出了超声衰减与压力变化的关系,图2c是结晶料的超声信号响应,由于结晶导致声波传播不均匀,进而声波散射衰减,信号峰值缓慢下降;图2d是无定型料的超声波响应,与结晶料明显不同。由于声波的信号变化影响因素多,超声信号的识别、去噪等是该技术能准确应用的关键。

在线应力测量系统,预期功能与压力传感器(Pressure transducer)、温度热电偶(Thermal couple)类似,通过置于型腔内的应力传感器装置(Sensor rosette),一方面可以实现与成型周期对应的工艺过程实时监测;另一方面,可以和数值模拟的数值结果相互验证,完善数学模型和求解方法,并证明测量结果的合理性与有效性,是研究的前沿与热点。美国学者Shekl和Peng研究发现,利用材料的“应力-介电”关系(Stress-dielectric relationships)可以完成平面传感器的制作,通过介质变形、材料介电性能变化获取相应条件下的应力<sup>[43-44]</sup>,随后Pengd和其他研究人员又拓展了此传感器及测量方法的工程应用,把此传感器理论,用于高分子材料溶液<sup>[44,48]</sup>(包括血液<sup>[47]</sup>、食品花生酱<sup>[49]</sup>)、高分子材料成型加工<sup>[45-46,50]</sup>等领域,较早地实现了注塑成型过程的在线应力测量。图3a示意性地说明了在线测量系统的构成及建立的应力、电压关系表达式;图3b-d分别是结晶料聚丙烯、无定型料聚碳酸酯、聚苯乙烯注塑成型过程测量的在线压力数据。从图3中可知,整个曲线可以清晰地反映注塑成型过程,图中AB段是模具合模阶段;BCDE是塑料熔体接触到传感器,熔体充填保压阶段;EF是冷却阶段;FG是开模阶段。测量信号有较好的重复性和可靠性,为直观实时研究注塑成型加工过程产生的应力提供了一个新的测试方法与手段。

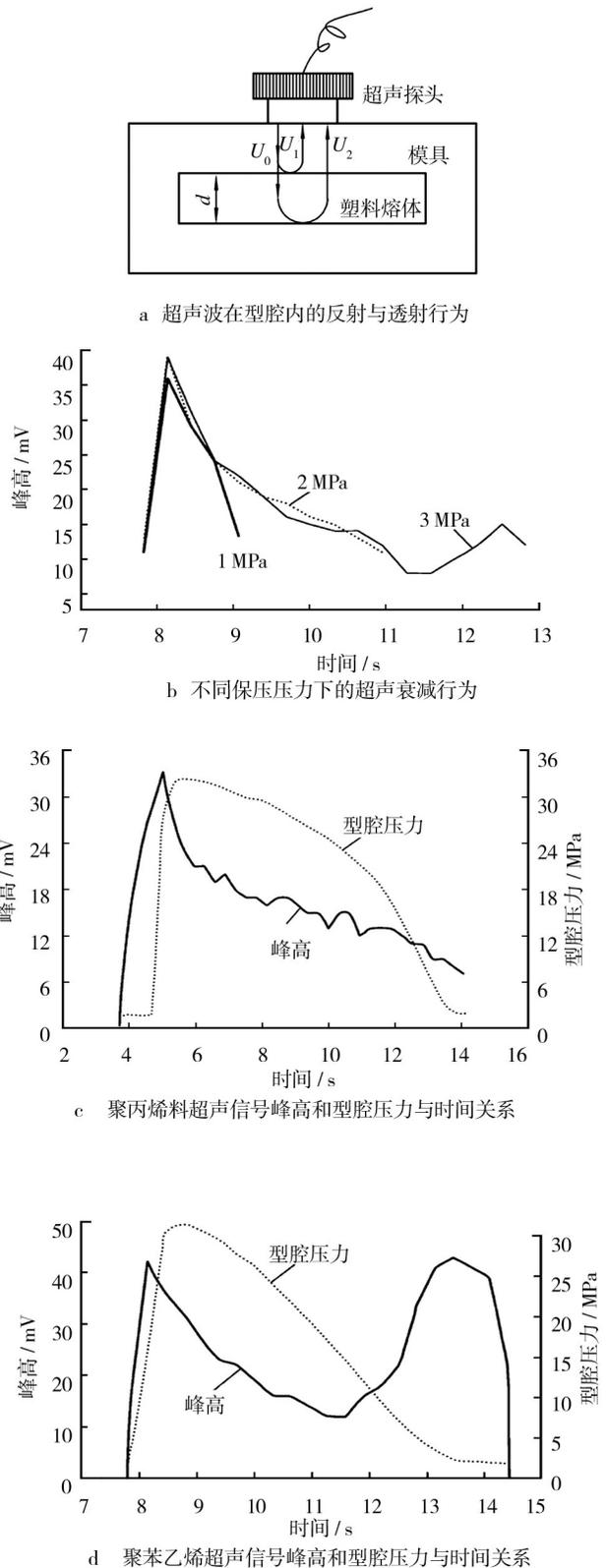


图2 注塑成型超声测量信号响应图<sup>[42]</sup>

Fig.2 Measurement results of ultrasonic technology during injection molding<sup>[42]</sup>

### 3 结论

现阶段的注射成型工艺的应力研究,多以注塑制

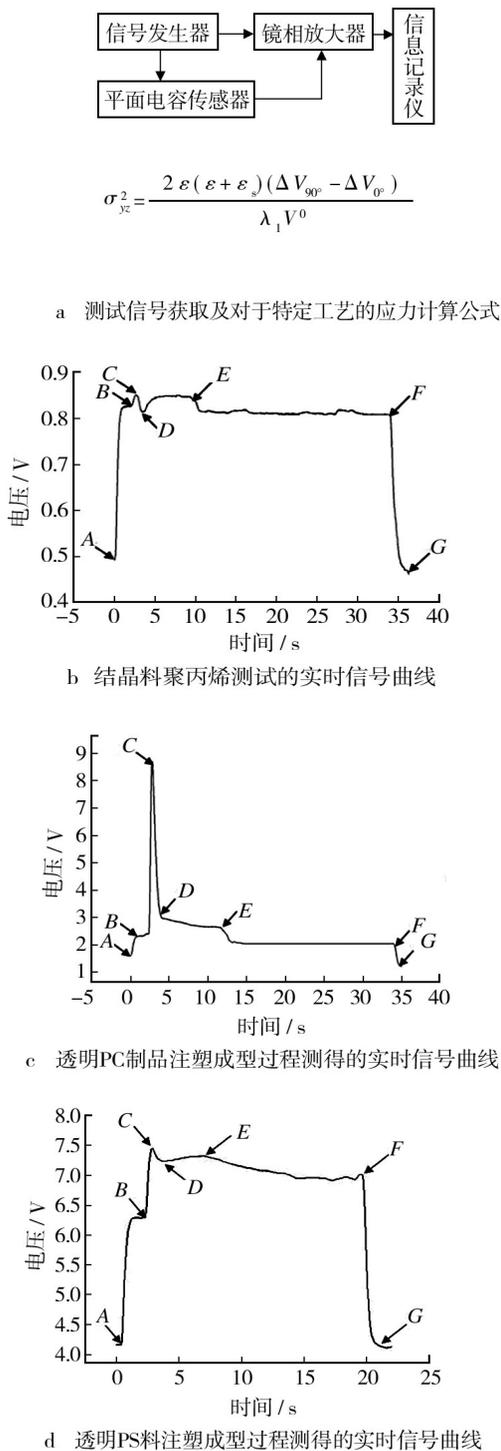


图3 应力在线测量系统及其测得的不同材料注塑过程的信号曲线<sup>[50]</sup>

Fig.3 Stress on-line measurement system and its application results of injection molding<sup>[50]</sup>

品的残余应力为主,并有如下特点:

1) 在数值模拟方面,用统一的数学模型,集成环境下完成注塑成型过程的模内残余应力计算是发展趋势。其中分子取向、结晶对材料形态、本构方程、成型温度场、压力场的影响,复杂数学关系模型的求解

算法是关键。由于数学模型和计算网格、计算方法的区别,流动残余应力、热残余应力分别计算的情况将会持续一段时间。

2) 实验测量塑件的残余应力方面,测量位置(测量点)的数据读取、量化仍是研究的重点。相较于破坏性的测量方法,无损方法测量的研究及应用将更有优势。

3) 注射成型过程中的应力在线测量技术及装置研究刚起步,尚处于探索阶段。通过测量信号和数据直接量化成型过程的应力,并将测量结果和数值计算、光弹测力结果比较,验证其测量的合理与准确性;结合结晶、微观形貌等表征手段,把测量信号的物理意义更进一步清晰化,以及测量方法的适用性研究方面,仍然有大量工作待完善。

#### 参考文献:

- [1] ISAYEV A I. Orientation Development in the Injection Molding of Amorphous Polymers[J]. Polymer Engineering and Science, 1983, 23(51): 271—284.
- [2] ISAYEV A I, CROUTHAMEL D L. Residual Stress Development in the Injection Molding of Polymers[J]. Polymer-plastics Technology and Engineering, 1984, 22(2): 177—232.
- [3] BAAIJENS F P T. Calculation of Residual Stresses in Injection Molded Products[J]. Rheology Acta, 1991, 30(1): 84—299.
- [4] CHANG R Y, CHIOU S Y. A Unified K-BKZ Model for Residual Stress Analysis of Injection Molded Three-dimensional Thin Shapes[J]. Polymer Engineering and Science, 1995, 35(22): 1733—1747.
- [5] KIM H, PARK S J, CHUNG S T, et al. Numerical Modeling of Injection/compression Molding for Center Gated Disk. Part 1: Injection Molding with Viscoelastic Compressible Fluid Model[J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(10): 1930—1942.
- [6] LEE Y B, KWON T H. Modeling and Numerical Simulation of Residual Stresses and Birefringence in Injection Molded Center-gated Disks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(3): 214—218.
- [7] WIMBERGER R F. The Assessment of Orientation, Stress and Density Distribution in Injection Molded Amorphous Polymers by Optical Techniques[J]. Progress in Polymer Science, 2002, 20(4): 369—401.
- [8] 陈静波, 申长雨, 刘春太. 聚合物注射成型流动残余应力的数值分析[J]. 力学学报, 2005, 37(3): 272—279.  
CHEN Jing-bo, SHEN Chang-yu, LIU Chun-tai. Numerical Analysis of Flow-induced Residual Stresses in Injection Molding for Polymer[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 37(3):

- 272—279.
- [9] CHOI D S, INN Y T. Prediction of Shrinkage and Warpage in Consideration of Residual Stress in Integrated Simulation of Injection Molding[J]. *Composite Structures*, 1999, 47 (4) : 655—665.
- [10] 李海梅, 顾元宪, 申长雨. 注塑件残余热应力的数值计算[J]. *化工学报*, 2000, 51(3) : 308—312.  
LI Hai-mei, GU Yuan-xian, SHEN Chang-yu. Numerical Calculation of Thermal Residual Stress of Injection Molded Parts[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2000, 51(3) : 308—312.
- [11] CHEN X, LAN Y C, LI D Q. Analysis of Thermal Residual Stress in Plastic Injection Molding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 101(3) : 275—280.
- [12] KABANEMI K K, CROCHET M J. Thermoviscoelastic Calculation of Residual Stresses and Residual Shapes of Injection Molded Parts[J]. *Internal Polymer Processing*, 2002, 7 (1) : 60—70.
- [13] KAMAL M R, LAIFOOK R A, HERNANDEZ A J R. Residual Thermal Stresses in Injection Moldings of Thermoplastics: a Theoretical and Experimental Study[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(5) : 1098—1114.
- [14] 高月华, 王希诚. 注塑制品的翘曲优化及影响因素分析[J]. *化工学报*, 2007, 58(6) : 1575—1580.  
GAO Yue-hua, WANG Xi-cheng. Warpage Optimization and Influence Factor Analysis of Injection Molding[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2007, 58 (6) : 1575—1580.
- [15] 高月华. 基于Kriging代理模型的优化设计方法及其在注塑成型中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
GAO Yue-hua. Optimization Methods Based on Kriging Surrogate Model and Their Application in Injection Molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [16] 刘文娟, 王新宇, 李征, 等. 基于Kriging代理模型的注塑件残余应力优化分析[J]. *塑料工业*, 2015, 41(1) : 53—57.  
LIU Wen-juan, WANG Xin-yu, LI Zheng, et al. Residual Stress Optimization of Injection-Molded Parts Based on Kriging Surrogate Model[J]. *China Plastics Industry*, 2015, 41 (1) : 53—57.
- [17] ISAYEV A I. *Injection and Compression Molding Fundamentals*[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1987.
- [18] JANSEN K M B, ORIJ J J W. Comparison of Residual Stress Predictions and Measurements Using Excimer Laser Layer Removal[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1999, 39 (10) : 2030—2041.
- [19] ZOETELIEF W F, DOUVEN L F D, INGEN H A J. Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1996, 36(14) : 1886—1896.
- [20] 唐胜德. 基于超声波技术的聚合物薄板表面内应力测量方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.  
TANG Sheng-de. The Research of Measuring Method of Polymer Sheet Surface Internal Stress Based on Ultrasonic Technology[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [21] 李海梅, 申长雨, 徐文莉, 等. 塑料制品残余应力的光弹测量和数值模拟[J]. *塑胶工业*, 2007(4) : 12—16.  
LI Hai-mei, SHEN Chang-yu, XU Wen-li, et al. Residual Stresses Photoelastic Measurements and Numerical Simulation of Injection Molded Parts[J]. *Plastics Industry*, 2007(4) : 12—16.
- [22] KIM N H, ISAYEV A I. Birefringence and Interface Distribution in Sequential Co-injection Molding of Amorphous Polymers: Simulation and Experiment[C]. *SPE ANTEC Technical Paper*, 2008, 54: 1494—1498.
- [23] CHANG Y R, YANG W H, HSU C H, et al. Integrated Numerical Simulations of Birefringence Prediction in Injection Molded Parts[C]. *SPE ANTEC Technical Paper*, 2008, 54: 1499—1503.
- [24] LAI H E, WANG P J. Experimental Verifications of CAE Predictions on Birefringence of Injection Molded Lenses[C]. *SPE ANTEC Technical Paper*, 2008, 54: 421—425.
- [25] 王鑫, 李海梅, 彭一燕, 等. 退火对注射成型PC制品力学性能的影响[J]. *化工学报*, 2010, 61(6) : 1555—1559.  
WANG Xin, LI Hai-mei, PENG Yi-yan, et al. Effects of Annealing on Mechanical Properties of Injection Mold Polycarbonate Parts[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2010, 61(6) : 1555—1559.
- [26] 金志明, 朱复华, 高福荣. 塑料注射成型熔融过程中的固相破碎现象[J]. *中国塑料*, 2003, 7(2) : 96—99.  
JIN Zhi-ming, ZHU Fu-hua, GAO Fu-rong. Solid-bed Break-up in Injection Moulding[J]. *China Plastics*, 2003, 7 (2) : 96—99.
- [27] 金志明, 朱复华, 高福荣. 注射成型塑化过程的可视化研究( I ) [J]. *中国塑料*, 2003, 7(4) : 88—92.  
JIN Zhi-ming, ZHU Fu-hua, GAO Fu-rong. Visualization Study of the Plastication during Injection Molding ( I ) [J]. *China Plastics*, 2003, 7(4) : 88—92.
- [28] 金志明, 马艳娥, 高福荣. 注射成型塑化过程的可视化实验研究[J]. *中国塑料*, 2005, 9(9) : 73—76.  
JIN Zhi-ming, MA Yan-e, GAO Fu-rong. Experimental Study of Melting Behavior for Injection Molding by a Reciprocating Screw[J]. *China Plastics*, 2005, 9(9) : 73—76.
- [29] 姜开宇, 横井秀俊. 注射成型过程熔体前沿充填不平衡现象的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2) : 294—300.  
JIANG Kai-yu, YOKOI H. Experiment Study on Filling Imbalance Phenomenon of Melt Front during Injection Molding Process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2) : 294—300.

- [30] 金志明,高福荣. MADDOCK 注塑螺杆性能研究[J]. 塑料, 2005, 34(5):77—80.  
JIN Zhi-ming, GAO Fu-rong. Performance of Maddock Injection Screw[J]. *Plastics*, 2005, 34(5):77—80.
- [31] 金志明,高福荣. 新型注塑螺杆性能研究[J]. 塑料工业, 2007, 35(6):23—25.  
JIN Zhi-ming, GAO Fu-rong. Study of Performance of Novel Injection Screw[J]. *China Plastics Industry*, 2007, 35(6):23—25.
- [32] 瞿金平. 塑料加工成型技术的最新研究进展[J]. 中国工程科学, 2011, 13(10):58—68.  
QU Jin-ping. The Latest Progress in Research of Plastics Processing Technology[J]. *Engineering Science*, 2011, 13(10):58—68.
- [33] 李维. 注射成型过程可视化研究及缺陷分析[D]. 北京:北京化工大学, 2008.  
LI Wei. Visualization Research on Injection Molding Process and Analysis of Injection Molding Defects[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.
- [34] 田净娜. 薄壁注射成型熔体充填型流动行为的可视化实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.  
TIAN Jing-na. Visualization Experiment Study on the Melt's Filling Behavior in Thin-wall Injection Molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [35] 陈曦,钱积新,高福荣. 注塑过程熔体充填长度的动态神经网络软测量模型[J]. 化工自动化及仪表, 2002, 29(2):43—46.  
CHEN Xi, QIAN Ji-xin, GAO Fu-rong. Modeling of Melt-flow-length during Injection Filling Stage Based on Dynamic Neural Network Soft-sensor[J]. *Control and Instruments In Chemical Industry*, 2002, 29(2):43—46.
- [36] 陈曦,高福荣,钱积新. 基于质量的注塑保压过程建模方法研究:最优保压压力曲线设定[J]. 中国塑料, 2002, 6(4):53—56.  
CHEN Xi, GAO Fu-rong, QIAN Ji-xin. Research on Quality Model of Packing Stage: Relationships between Part Quality and Cavity Pressure[J]. *China Plastics*, 2002, 6(4):53—56.
- [37] 金志明,朱复华,高福荣. 注射成型中的熔体温度均匀性研究[J]. 中国塑料, 2003, 7(3):88—91.  
JIN Zhi-ming, ZHU Fu-hua, GAO Fu-rong. Study on Melt Temperature Homogeneity in Injection Molding[J]. *China Plastics*, 2003, 7(3):88—91.
- [38] 赵春晖,王福利,姚远,等. 基于时段的间歇过程统计建模、在线监测及质量预报[J]. 自动化学报, 2010, 36(3):366—374.  
ZHAO Chun-hui, WANG Fu-li, YAO Yuan, et al. Phase-based Statistical Modeling, Online Monitoring and Quality Prediction for Batch Processes[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(3):366—374.
- [39] 何波冰. 超声技术在聚合物形态结构表征及注射成型过程在线检测中应用的基础研究[D]. 成都:四川大学, 2006.  
HE Bo-bing. Characterizing of Polymer Morphologies & In-situ Monitoring of Injection Molding Process Using Ultrasonic Techniques[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [40] BRUCKMOSER K, RESCH K, KISLINGER T. Measurement of Interdiffusion in Polymeric Materials by Applying Raman Spectroscopy[J]. *Polymer Testing*, 2015, 46(1):122—133.
- [41] ZHAO Peng, PENG Yi-yan, YANG W M, et al. Crystallization Measurements Via Ultrasonic Velocity: Study of Poly (lactic acid) Parts[J]. *Journal of Polymer Science Part B—Polymer Physics*, 2015, 53(10):700—708.
- [42] 赵朋,傅建中,李阳,等. 基于超声技术的塑料注射成型过程在线检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7):29—30.  
ZHAO Peng, FU Jian-zhong, LI Yang, et al. On-line Detection of Plastic Injection Molding Process by Ultrasonic Technology[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(7):29—30.
- [43] LEE H Y, PENG Yi-yan, SHKEL Y M. Strain-dielectric Response of Dielectrics as Foundation for Electrostriction Stresses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(7):74—104.
- [44] PENG Yi-yan, SHKEL Y M, KIM G H. Stress Dielectric Response in Liquid Polymers[J]. *Journal of Rheology*, 2005, 49(1):297—311.
- [45] PENG Yi-yan, LI Hai-mei, TURNG L S. Development of Dielectrostrictive Sensors for On-line Shear Stress Measurement during the Injection Molding Process[C]// SPE ANTEC, 2009.
- [46] PENG Yi-yan, LI Hai-mei, TURNG L S. Development of a Rheo-dielectric Sensor for Online Shear Stress Measurement during the Injection Molding Process[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2010, 50(1):61—68.
- [47] PENG Yi-yan, TURNG L S, CUI Z X, et al. Viscoelastic Properties of Blood Studied through Piezo-resistance Measurements[J]. *Biorheology*, 2011, 48(3—4):161—172.
- [48] PENG Yi-yan, TURNG L S, LI Hai-mei, et al. A Study of the Relationship between the Rheo-Dielectric Effect and the Elasticity of Viscoelastic Materials[J]. *Journal of Rheology*, 2011, 55(2):301—311.
- [49] PENG Yi-yan, ELLINGHAM T, JIN N, et al. Stress-dielectric Relationships in Nutella[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 154(6):25—29.
- [50] 江玉龙. 薄壁注塑制品残余应力在线检测研究[D]. 郑州:郑州大学, 2013.  
JIANG Yu-long. Research on Residual Stresses Measurement of Injection Molded Thin Parts[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.