

http://pmse.scu.edu.cn

高聚物注塑成型工艺过程智能化技术进展

马艺涛¹, 李景¹, 傅南红², 焦晓龙³, 谢鹏程^{1,4,5}, 杨卫民^{1,4}

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 宁波长飞亚塑料机械制造有限公司, 浙江 宁波 315830;
3. 海天塑机集团有限公司, 浙江 宁波 315801; 4. 北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029;
5. 北京化工大学人工智能交叉研究中心, 北京 100029)

摘要: 针对聚合物注塑成型高精度、高效率、零缺陷的高性能制造要求, 传统工艺参数设定方法和生产过程中存在投产周期、生产成本和质量控制等方面缺乏精准优化的问题, 文中综述了当前注塑成型工艺的智能化应对策略和解决方案。针对工艺参数智能设定, 从专家系统、案例推理和机器学习三方面总结了当前主流的研究思路; 针对过程扰动自适应补偿, 从基于机器学习的代理模型和基于在线监测和物理模型两方面简述了当前研究进展, 最后对未来注塑产业智能化发展趋势进行了总结。

关键词: 注塑成型; 工艺参数; 人工智能; 智能设定; 扰动补偿

中图分类号: TQ320.66² **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2023)11-0165-07

随着材料科学的发展, 高分子材料因其具备轻量化、易成型和功能化的优势, 目前已在航空航天、电子通讯和高铁交通等领域获得了广泛的应用。作为高分子材料加工成型最主要的方式之一, 当前约有40%的高聚物采用注塑成型加工^[1], 注塑成型装备也被称为现代制造业的重要工业母机。

在注塑成型工艺参数设定方面, 当前仍采用依托工人经验的试凑法来寻找最优工艺参数, 这导致尤其针对大型复杂结构制品产生大量试模成本, 直接影响产品的投产周期。在注塑生产过程工艺稳定性方面, 由于传统控制技术基于固定和刚性控制逻辑, 当生产过程中出现诸如原料黏度波动、环境湿度变化等外界扰动时, 装备无法实现在线监测和工艺补偿响应, 最终影响产品质量重复精度。注塑成型过程中工艺参数与制品质量之间存在明显的强耦合、非线性和时变性特征关系^[2,3], 传统工艺参数设定方法和生产过程控制逻辑在投产周期、生产成本和质量控制等方面缺乏精准优化策略。因此, 在当前全球制造业智能化转型

升级的行业浪潮和中国制造2025战略实施的关键阶段, 针对注塑工艺参数的与智能设定和自适应补偿成为国内外学者和注塑机厂商的研究热点。

1 注塑成型工艺参数的智能设定

当前, 注塑成型过程变量主要分为3级: 设备参数、过程参数和质量参数^[4], 设备参数和过程参数共同影响最终的制品质量参数, 如图1所示。设备参数即为注塑成型工艺参数, 在注塑工艺开始前完成设定。传统流程下, 新产品需要由经验丰富的工程人员进行反复调试才能确定最优工艺参数, 造成了较大的试模成本。因此, 研究人员结合人工智能算法与模拟仿真技术, 致力于通过数字化技术有效降低甚至消除试模成本。

当前, 人工智能技术在注塑成型工艺参数智能设定方面主要分为专家系统、实例推理和机器学习3大类别。

1.1 专家系统

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0252

收稿日期: 2023-02-19

基金项目: 宁波市科技创新2025重大专项(2021Z044); 宁波市企业创新联合体(2021H002)

通讯联系人: 谢鹏程, 主要从事高聚物加工成型研究, E-mail: xiepc@mail.buct.edu.cn

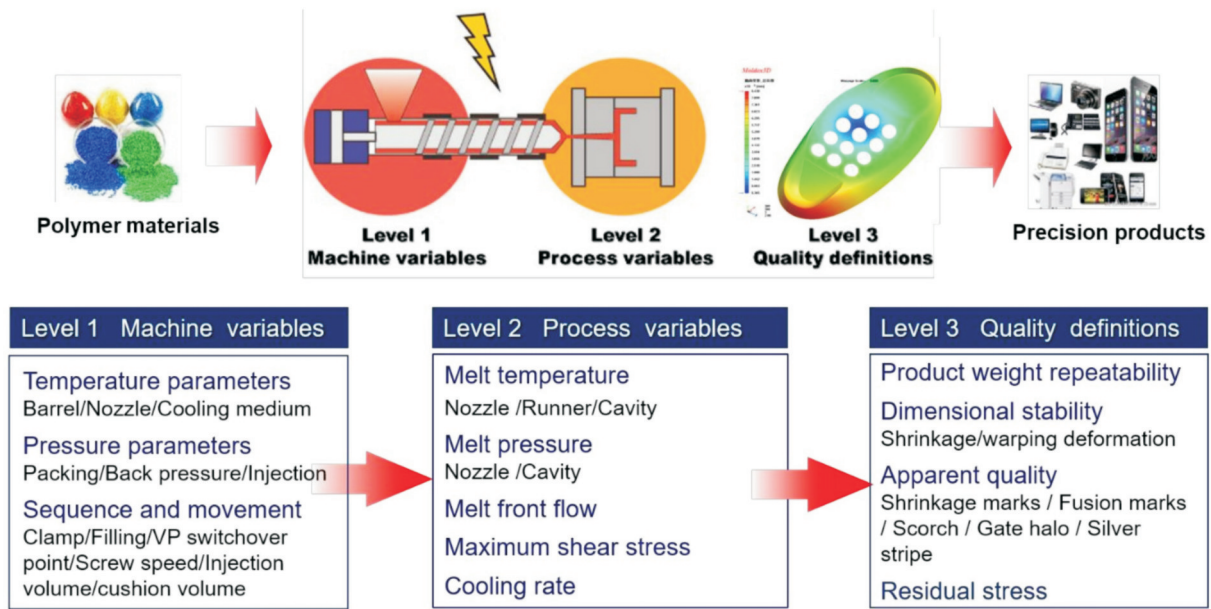


Fig. 1 Process variables of injection molding

专家系统主要采用知识表达和知识推理技术来解决复杂问题,其核心由知识库和推理机组成。根据知识的表征方式可以将专家系统分为基于知识推理、基于规则推理和模糊推理3大类。

Pandelidis等提出的基于知识推理的专家系统通过模糊矩阵的方式来分析注塑缺陷的产生原因,实现了对多种缺陷的近似推理并提出不同优先级的解决方案^[5]。Jan等开发的专家系统可以使用户通过交互式操作来解决制品缺陷,其系统逻辑以解决缺陷方法的简易性为第一优先级,最终通过分层次的专家系统来实现制品缺陷的逐步优化^[6]。Kameoka等通过多维矩阵构建了一个基于知识的专家系统,可以实现熔接纹、缩痕、翘曲等缺陷的修正^[7]。Shelesh-Nezhad等提出了基于案例推理和规则推理的混合专家系统,其首先基于案例推理获得初始工艺参数的设定,再利用基于规则推理的子系统实现工艺参数的优化,有效提升了注塑成型工艺参数设定的效率和准确性^[8]。

然而,由于基于知识和基于规则推理算法都缺乏对制品缺陷程度的描述,只是提供工艺参数的调整方向,无法对参数进行精确量化调整。因此研究人员通过模糊推理中的模糊语义值来对制品缺陷进行定义,实现工艺参数的精确修正。吕永锋提出的模糊推理方法通过把复杂的多种性能特性转化为单一的灰色模糊推理等级优化,大大简化了多特征优化过程的复杂性^[9]。周华民等建立了集成实例推理和模糊推理的工艺参数优化系统,首先通过实例推理实现初始工艺

参数的设定,再利用模糊推理解决制品短射和收缩痕等缺陷^[10]。Chaves等提出的基于模糊推理的专家系统能够将制品缺陷的定性表征转化为定量表征并实现工艺参数的优化,结果表明该系统比传统人工调节约用时40%^[11]。

1.2 实例推理

实例推理亦称为案例推理,是以实例作为知识单元,根据其目标问题特征在实例库中检索相似案例,通过修改相似实例来获得目标案例的解决方案^[12]。在注塑成型工艺参数设置中,技术人员会借鉴过往试模经验来完成工艺参数调试,实例推理系统的工作逻辑与人工调模的工作思路类似。Kwong最早尝试将实例推理技术应用在注塑成型工艺参数的设定,并将其作为专家系统的补充来实现更高效的参数预测^[13]。周华民等提出的基于成型特征案例推理的注塑成型工艺参数智能设定系统,其通过计算案例库中目标案例与源案例注射压力曲线的相似性,找出相似度最高的案例并根据修改策略将其过程参数作为目标案例的解,该方法的检索精度和灵敏度均高于传统工艺参数优化方法^[14]。相比其他智能算法,实例推理法随着实例库中案例的增加,推理效率和正确性会不断提升,但其效果同时也受到实例库样本数量和检索算法的制约。

1.3 机器学习

机器学习是包含决策树^[15]、随机森林^[16]、支持向量机^[17]、高斯过程^[18]和人工神经网络^[19,20]等多种人工智能

算法的数据拟合优化技术,主要分为对样本数据的采样、数据模型的拟合以及针对数据关系模型迭代寻优3个过程。

人工神经网络在映射复杂数据关系方面的优势使其可以用来表征注塑成型工艺参数与制品质量参数之间的耦合效应。目前,业内一般采用计算机数值模拟和现场实验的方式来获得预训练数据用以神经网络学习,并搭配优化算法来对数据模型进行迭代优化,最终实现工艺参数智能预测。Kwong等通过C-MOLD模流软件验证了其构建的神经网络和遗传算法混合系统能有效减少初始工艺参数的调整时间,并将该系统成功应用于手机外壳的生产,证明了神经网络在注塑工艺参数初始设定领域的潜在应用前景^[21]。Lee等将神经网络和随机搜索相结合,以数值模拟结果和实验结果作为模型训练数据,引入迁移学习来降低模型预测误差,最终预测系统的制品质量预测相对误差仅为0.662%^[22]。粒子群优化算法(PSO)因其更快的收敛速度和更广泛的检索维度,也被应用于神经网络模型的迭代寻优过程。Xu等构建了BP-PSO预测模型,该模型可根据工艺需求预测最优组合解,有效帮助工艺人员在多响应条件下确定最优注塑工艺参数^[23]。Chen等构建了ANOVA-BP-PSO混合预测模型,首先通过田口实验和信噪比确定初始工艺预测模型,利用BP神经网络和PSO将质量预测器和信噪比预测器相结合得到最优工艺参数^[24]。郑方莉在构建的工艺窗口内对LSTM神经网络进行预测模型的训练,验证了LSTM神经网络在注塑制品质量预测方面的可靠性和准确性,并利用科学试模工艺避免了无效训练数据,提升了模型的训练效率和准确率^[25]。然而,由于神经网络的最终预测结果受到训练数据集、模型节点数和超参数等限制,同时其“黑匣”结构伴随的可解性差也使得预测结果缺乏科学理论的支撑。研究人员通过引入迁移学习来解决实验样本数据不足的问题。Hopmann等采用诱导网络迁移学习对零件结构相似度进行分析,通过整体迁移的方法使训练数据量最高减少88%,有效提高了神经网络的实用价值^[26]。

相比人工神经网络,支持向量机中的径向基函数(RBF)可以实现连续函数的最佳逼近,其逼近精度和收敛速度都优于传统BP神经网络。Hashimoto等通过径向基函数网络对注射速度进行优化,最终在产品熔接痕和生产循环周期之间实现了平衡^[27]。Kitayama等通过RBF对高相似度数值模拟结果进行分析,以循环周期和制品翘曲为优化目标,获得了随形冷却流道预测数值,有效降低了生产周期和产品翘曲变形^[28]。

Yang等在水辅注射成型工艺中建立了工艺参数和制品质量的RBF预测模型,通过该模型实现了制品空心率和壁厚差的精确预测,平均误差均小于5%^[29]。然而由于RBF的预测结果与基函数中心选取密切相关,导致模型效果在工业应用中受到较大的人工干预影响。

相比人工神经网络,高斯过程回归更适合处理小样本复杂数据。Turng等首次将高斯过程用于注塑工艺参数的优化,该方法可以同时进行结果预测和置信度评估,为模型训练提供明确方向,证实了高斯预测在注塑工艺优化领域的适用性^[18]。许方敏等利用高斯过程回归建立代理模型,结合多目标优化方法实现了注塑成型工艺参数的快速预测,成功应用于车灯导光条生产质量的调控^[30]。马俊燕等采用高斯过程建立了注塑过程代理模型并结合遗传算法进行工艺预测和优化,实现了塑料齿轮翘曲变形的注塑工艺优化^[31]。高斯过程主要适用于处理高维、小样本数据,针对大规模数据处理能力较差,这也限制了其在注塑工艺参数预测领域的工业化应用。

2 注塑成型工艺参数的自适应补偿

由于设备响应状态波动、零件磨损程度变化、环境温度湿度变化和原料批次波动等外界扰动的存在,即使在最优工艺参数设定的条件下,大批量、连续化注塑生产过程中制品质量仍然会出现波动,对精密零件的高性能服役造成了极大的影响。根据聚合物PVT理论,模塑加工能场中压力、温度、速度的变化将直接影响成型制品的比容;工艺环境波动和原料含水量变化会引起熔体黏度波动进而影响制品质量、翘曲率及机械强度等服役性能^[32]。由于传统注塑机闭环控制系统无法对非工艺参数扰动进行即时监测和在线响应以维持注塑制品成型高重复精度,工艺人员通常采用停机调试参数的方式来改善制品质量,严重影响了产品的生产效率和良品率。因此,研发面向非工艺扰动下注塑制品高重复精度成型成为当前高性能模塑成型领域向智能化、高端化转型的关键技术问题。建立工艺过程参数与制品质量参数的映射关系是实现聚合物熔体一致性充填的前提,目前研究人员主要通过基于机器学习的代理模型和基于在线检测的物理模型来进行熔体质量参数的定量表征。

2.1 基于机器学习的代理模型

基于机器学习的代理模型指利用大量的模拟和实验数据构建“黑匣”式代理模型来反映过程参数和质量参数之间复杂的映射关系,研究人员通过构建模型进行工艺预测控制进而确保在外部扰动下工艺轨

迹的高重复执行精度。根据非牛顿流体流动规律,熔体充模速度与加工场压力、温度和熔体黏度存在直接关联,进而影响注塑制品成型质量,因此注射速度的工艺轨迹一致性和响应性成为提升制品质量一致性的关键因素。梁宏伟等通过模型预测算法得到当前采样时刻注射速度控制量以及下一时刻的控制量,实现了注射速度的精确跟踪控制^[33]。Gao等建立了基于广义预测控制的自适应控制器来实现注射速度的跟踪控制,结果显示控制模型对射速调控具有良好的稳定性^[34]。李茜等提出了模型预测和迭代学习的复合控制算法,其预测步长的迭代学习方法对注射速度的控制性能优于传统PID控制系统^[35]。王茂霖提出了基于修正项自适应实时优化的注射速度迭代学习控制方法,该方法可以利用历史批次数据对下一批次的射速控制进行指导,有效解决不确定性对控制效果的影响^[36]。代理模型虽然可以通过控制注塑装备过程参数的一致性可以确保设备执行的高重复精度,但是大量的训练数据需求也限制了其工业化应用。

2.2 基于在线检测的物理模型

非工艺扰动或原料批次变化均会引起熔体黏度波动,进而导致在预设工艺参数下设备响应状态发生变化。研究人员通过设置高精度传感器检测温度、压力、形变等信号变化来建立软测量物理模型,实现成型过程扰动监测和工艺自适应补偿。赵朋等通过超声波技术构建了型腔压力无损检测方法,通过锁模力的调节实现型腔压力控制从而提升制品质量一致性^[37]。他们还通过磁悬浮技术实现了聚合物熔体密度的检测,为成型过程熔体质量监测提供了新的表征方法^[38]。Ricardo等提出通过调控模具温度以补偿注射压力变化的方法,结果显示该方法可以明显提升产品高表面质量的稳定性。因此研究人员提出了针对充模过程中设备响应参数的调控策略^[39]。Hopmann等^[26]考虑到充模速度和充模压力的相关性,研究发现注射速度和制品质量存在明显的相关性,并结合聚合物PVT特性提出了注射速度补偿产品质量的调控策略。由于注射速度的实时调节和高精度响应对设备控制和能耗平衡带来了极大的挑战,转保压调控策略逐渐成为业内更具应用前景的研究方向。

Chen等利用注塑过程的胀模特性,通过监测模具分型面微米级胀模信号建立了胀模量和制品质量的表征模型,并在成型过程依据胀模信号动态调节转压点位置进而有效提高了制品质量的稳定性^[40]。王建等建立了注塑过程熔体PVT在线监测系统并更新了引入冷却速率因子的双域Tait方程,通过监测熔体充模

时的温度和压力数据调整转压点和保压压力,有效提高了产品的质量和尺寸稳定性^[41]。Hwang等在喷嘴和拉杆上设置传感器,通过监测注塑过程峰值压力和峰值锁模力动态调整转压点位置和锁模力,该方法可以在材料黏度变化时有效提高产品质量的稳定性^[42]。Huang等建立了拉杆应变率和产品质量的关系模型,通过在成型过程中监测拉杆形变信号实时调整转压点位置有效实现了制品质量的一致性控制^[43]。此外,Huang等详细研究了转压点位置、注射速度和保压压力对零件质量稳定性的影响规律,通过在型腔内设置压力传感器的方式,提出了调节保压压力以提升产品质量一致性的方法^[44]。然而,外置传感器一定程度上限制了以上方法的大规模产业应用,因此研究人员通过建立螺杆注射压力和制品成型质量关系模型,实现了无外置传感器情况下制品质量的一致性控制。周循道通过螺杆压力-位置积分建立了外界扰动下的注射量表征模型,通过调节转压点位置和保压压力实现了注射物量的动态补偿,依托该方法制品质量波动由1.2%下降至0.19%^[45]。许宇轩等提出了基于泊肃叶流动规律的注射成型熔体黏度定量表征及在线补偿方法,依托构建的多子时段下熔体黏度和充填量表征模型实现了转压点和保压压力的成型周期内实时调控,该技术方案下制品质量重复精度可提升50%~70%^[46]。G·皮尔韦恩基于螺杆压力-位置曲线提出了注射压力动态调整策略,通过调控注射压力提升成型周期压力轨迹高重复执行精度来实现熔体充填量的一致性调节,该技术在Engel公司实现全球首次量产应用^[47]。

3 结语

随着航天军工、交通电子等重点关注领域技术的逐步发展,产业链相关塑料制品制造要求、服役性能将不断提升,这对注塑成型装备与工艺提出更高的智能化、数字化技术要求,面向复杂塑料零件的高精度、高效率、低成本和零缺陷的注塑成型技术及装备将成为未来市场的核心竞争因素。未来研究人员可以生产过程中注塑装备关键零件耗损或动作失准等故障的在线监测识别以及预维护、自治愈等技术开发,进一步提升装备运维的高效化和智能化水平,最终推动我国智能制造产业的整体腾飞。

参考文献:

- [1] 马艺涛,谢金钊,武高健,等. 电磁屏蔽特种工程塑料制备及应

- 用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(10): 183-190.
- Ma Y T, Xie J Z, Wu G J, *et al.* Progress in preparation and application of electromagnetic shielding special engineering plastics [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37 (10): 183-190.
- [2] 傅厦龙, 胡夏夏. 基于响应曲面和遗传算法的工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(4): 123-126.
- Fu X L, Hu X X. Process parameters optimization based on response surface methodology and genetic algorithm [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2014, 30(4): 123-126.
- [3] 王梦寒, 董晶晶, 周杰, 等. 基于响应面法的异型腔模具顺序注塑成型工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(2): 178-181.
- Wang M H, Dong J J, Zhou J, *et al.* Optimization of parameters in sequential injecting molding process for family mold using response surface methodology [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2013, 29(2): 178-181.
- [4] Chen Z, Turng L S. A review of current developments in process and quality control for injection molding [J]. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 2005, 24: 165-182.
- [5] Pandelidis I O, Kao J F. Detector: a knowledge-based system for injection molding diagnostics [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1990, 1: 49-58.
- [6] Jan T C, O'Brien K T. A user-friendly, interactive expert system for the injection moulding of engineering thermoplastics [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1993, 8: 42-51.
- [7] Kameoka S, Haramoto N, Sakai T. Development of an expert system for injection molding operations [J]. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 1993, 12: 403-18.
- [8] Shelesh-Nezhad K, Siores E. An intelligent system for plastic injection molding process design [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63: 458-462.
- [9] 吕永锋. 基于模糊推理的薄壁类零件注射模工艺优化设计[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(3): 77-79.
- Lü Y F. Fuzzy reasoning-based optimization design of injection mold process for thin-walled parts [J]. *Mechanical Design and Research*, 2013, 29(3): 77-79.
- [10] Zhou H, Zhao P, Feng W. An integrated intelligent system for injection molding process determination [J]. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 2007, 26: 191-205.
- [11] Chaves M L, Márquez J, Pérez H, *et al.* Intelligent decision system based on fuzzy logic expert system to improve plastic injection molding process[C]// *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Spain: International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, 2017.
- [12] Hsiao C C, Chuang C C, Jeng J T. A hybrid case base reasoning system for forecasting[C]. Kanazawa, Japan: 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2017.
- [13] Kwong C K, Smith G. A computational system for process design of injection moulding: combining a blackboard-based expert system and a case-based reasoning approach [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, 14: 350-357.
- [14] Yu S, Zhang T, Zhang Y, *et al.* Intelligent setting of process parameters for injection molding based on case-based reasoning of molding features [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 33: 77-89.
- [15] 崔亚华. B公司保险杠注塑质量控制研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- Cui Y H. Study on quality control of bumper injection molding in Company B [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [16] 余炳圳. 基于数值模拟的注塑机能耗与制品质量多目标优化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- Yu B Z. Multi-objective optimization study of energy consumption and product quality of injection molding machine based on numerical simulation [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [17] Silva B, Sousa J, Alenya G. Machine learning methods for quality prediction in thermoplastics injection molding[C]. Cape Town, South Africa: 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), 2021.
- [18] Zhou J, Turng L S. Process optimization of injection molding using an adaptive surrogate model with Gaussian process approach [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2007, 47: 684-694.
- [19] Yang D, Lee J, Yoon K, *et al.* A study on the prediction of optimized injection molding condition using artificial neural

- network (ANN) [J]. Transactions of Materials Processing, 2020, 29: 218-228.
- [20] Chen J C, Guo G, Wang W N. Artificial neural network-based online defect detection system with in- mold temperature and pressure sensors for high precision injection molding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110: 2023-2033.
- [21] Mok S, Kwong C K, Lau W. A hybrid neural network and genetic algorithm approach to the determination of initial process parameters for injection moulding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18: 404-409.
- [22] Lee C, Na J, Park K, *et al.* Development of artificial neural network system to recommend process conditions of injection molding for various geometries [J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2: 2000037.
- [23] Xu G, Yang Z T, Long G D. Multi- objective optimization of MIMO plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58: 521-531.
- [24] Chen W C, Liou P H, Chou S C. An integrated parameter optimization system for MIMO plastic injection molding using soft computing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 1465-1474.
- [25] 郑方莉. 注塑成型工艺参数智能设置及优化 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- Zheng F L. Intelligent setting and optimization of injection molding process parameters [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [26] Lockner Y, Hopmann C. Induced network-based transfer learning in injection molding for process modelling and optimization with artificial neural networks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 3501-3513.
- [27] Hashimoto S, Kitayama S, Takano M, *et al.* Simultaneous optimization of variable injection velocity profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing weldline and cycle time [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2020, 14: JAMDSM0029.
- [28] Kitayama S, Miyakawa H, Takano M, *et al.* Multi- objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 1735-1744.
- [29] Yang J, Yu S. Prediction of process parameters of water-assisted injection molding based on inverse radial basis function neural network [J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60: 3159-3169.
- [30] 许方敏, 许忠斌, 朱科, 等. 基于高斯过程回归的注塑质量多目标优化方法 [J]. 塑料工业, 2022, 50(4): 94-98.
- Xu F M, Xu Z B, Zhu K, *et al.* A multi-objective optimization method for injection molding quality based on Gaussian process regression [J]. Plastic Industry, 2022, 50(4): 94-98.
- [31] 马俊燕, 廖小平, 夏薇, 等. 基于高斯过程机器学习的注塑过程建模及工艺参数优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2013(3): 17-19.
- Ma J Y, Liao X P, Xia W, *et al.* Injection molding process modeling and process parameter optimization design based on Gaussian process machine learning [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2013(3): 17-19.
- [32] Kuram E, Timur G, Ozcelik B, *et al.* Influences of injection conditions on strength properties of recycled and virgin PBT/PC/ABS [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29: 1260-1268.
- [33] 梁宏伟, 刘海燕. 注塑机注射速度的模型预测控制及其仿真 [J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(1): 77-80.
- Liang H W, Liu H Y. Model predictive control of injection speed of injection molding machine and its simulation [J]. Synthetic Resin and Plastic, 2020, 37(1): 77-80.
- [34] Yang Y, Gao F. Adaptive control of the filling velocity of thermoplastics injection molding [J]. Control Engineering Practice, 2000, 8: 1285-1296.
- [35] 李茜, 夏伯锴. 注塑机注射速度的模型预测迭代学习控制 [J]. 控制工程, 2009, 16(4): 429-431.
- Li X, Xia B K. Model predictive iterative learning control of injection speed for injection molding machines [J]. Control Engineering, 2009, 16(4): 429-431.
- [36] 王茂霖. 注塑机注射速度迭代学习控制研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- Wang M L. Research on iterative learning control of injection speed of injection molding machine [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [37] Zhang J, Zhao P, Zhao Y, *et al.* On-line measurement of cavity pressure during injection molding via ultrasonic investigation of

- tie bar [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 285: 118-126.
- [38] Zhang C, Zhao P, Xie J, *et al.* Enlarging density measurement range for polymers by horizontal magneto-Archimedes levitation [J]. *Polymer Testing*, 2018, 67: 177-182.
- [39] Correia L, Brito A M, Faria L, *et al.* Dynamic temperature control influence on pressure during injection molding of plastic parts to improve part quality [J]. *International Journal for Quality Research*, 2020, 14:635-646.
- [40] Chen Z, Turng L S, Wang K K. Adaptive online quality control for injection - molding by monitoring and controlling mold separation [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2006, 46: 569-580.
- [41] Wang J, Mao Q. A novel process control methodology based on the PVT behavior of polymer for injection molding [J]. *Advances in Polymer Technology*, 2013, 32: E474-E85.
- [42] Su C W, Su W J, Cheng F J, *et al.* Optimization process parameters and adaptive quality monitoring injection molding process for materials with different viscosity [J]. *Polymer Testing*, 2022, 109: 107526.
- [43] Chen J Y, Liu C Y, Huang M S. Tie-bar elongation based filling-to-packing switchover control and prediction of injection molding quality [J]. *Polymers*, 2019, 11: 1168.
- [44] Huang M S, Nian S C, Lin G T. Influence of V/P switchover point, injection speed, and holding pressure on quality consistency of injection - molded parts [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138: 51223.
- [45] 周循道. 塑料注射成形过程动态补偿与产品一致性控制 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
- Zhou X D. Plastic injection molding process dynamic compensation and product consistency control [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [46] Xu Y, Xie P, Fu N, *et al.* Self-optimization of the V/P switchover and packing pressure for online viscosity compensation during injection molding [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62: 1114-1123.
- [47] G·皮尔韦恩. 量化注塑机的喷射过程中的过程波动的方法和注塑机: 中国, 103112138[P]. 2015-04-08.

Progress in Intelligent Technology of Polymer Injection Molding Process

Yitao Ma¹, Jing Li¹, Nanhong Fu², Xiaolong Jiao³, Pengcheng Xie^{1,4,5}, Weimin Yang^{1,4}

(1. College of Mechatronics Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Ningbo Zhafir Plastic Machinery Manufacturing Co., Ltd, Ningbo 315830, China; 3. Haitian Plastics Machinery Group Co., Ltd., Ningbo 315801, China; 4. State Key Laboratory of Organic Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 5. Interdisciplinary Research Center for Artificial Intelligence, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: In view of the high precision manufacturing requirements of polymer injection molding with high precision, high efficiency and zero defects, the traditional process parameter setting methods and production process lack precise optimization in terms of production cycle, production cost and quality control, etc. The current intelligent response strategies and solutions of injection molding process were reviewed. For the intelligent setting of process parameters, the current mainstream research ideas were summarized from three aspects: expert system, case inference and machine learning; for the adaptive compensation of process disturbances, the current research progress was briefly described from two aspects: the agent model based on machine semester and physical model based on online monitoring. Finally, the future trend of intelligent development in injection molding industry was summarized.

Keywords: injection molding; process parameters; artificial intelligence; intelligent settings; disturbance compensation