

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.026

微挤出成型及其数字孪生技术发展

李志熠, 赵南阳, 苏铭洋, 许忠斌
(浙江大学能源工程学院, 浙江杭州 310027)

摘要: 微挤出成型是由传统挤出成型朝着微型化发展而来的新型制造技术,其在微创医疗、信息通信等行业的制品生产中占重要地位。回顾了气体辅助微挤出、超声辅助微挤出和微共挤 3 个微挤出成型技术的研究进展,指出数字孪生技术的应用为微挤出成型在产品质量控制、成型缺陷预测及生产效率提升等方面带来了突破性进展。介绍了微挤出数字孪生体的构建流程,包括数据采集与硬件部署、设备混合模型搭建、孪生平台开发、校准与验证等关键环节。系统分析了微挤出成型的数字孪生体表达、工艺参数优化、质量与效率提升及产品研发辅助等方面的应用案例,阐明了数字孪生技术在微挤出成型加工领域的广阔应用前景。

关键词: 微制造;挤出成型;数字孪生体;参数优化;缺陷预测

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0181-07

Current developments in micro extrusion molding and advances in digital twin technology

LI Zhiyi, ZHAO Nanyang, SU Mingyang, XU Zhongbin
(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract : Micro-extrusion molding, an emerging manufacturing technology developed from the miniaturization of conventional extrusion molding, occupies a pivotal position in the production of components for minimally invasive medical applications, telecommunications, and related industries. This study reviews the research progress of three micro-extrusion molding technologies, namely gas-assisted micro-extrusion, ultrasonic-assisted micro-extrusion and micro co-extrusion, and points out that the application of digital twin technology has brought breakthrough progress to micro-extrusion molding in terms of product quality control, molding defect prediction and production efficiency improvement. It introduces the construction process of the micro-extrusion digital twin, including key links such as data acquisition and hardware deployment, construction of hybrid models for micro-extrusion equipment, development of twin platforms, and calibration and verification. By systematically analyzing the application cases in aspects like digital twin expression, process parameter optimization, quality and efficiency improvement, and product development assistance in micro-extrusion molding, it expounds the broad application prospects of digital twin technology in the field of micro-extrusion molding processing.

Keywords : micro manufacturing ; extrusion molding ; digital twin ; parameter optimization ; defect prediction

挤出成型技术是指借助螺杆或柱塞的挤压作用,使受热熔化的高分子材料在压力的推动下,强行通过挤出口模成型为具有恒定截面的连续制品的一种成型方法。该技术起步于 19 世纪 40 年代中期,并随着 20 世纪 50 年代高分子材料工业的成熟而得以高速发展。挤出成型制品的产量占中国塑料制品总产量的 1/3 以上^[1],在塑料加工工业中具有极其重要的地位。为了解决挤出产品的挤出胀大、熔体破裂和“鲨鱼皮”等缺陷,剑桥大学 Mackley 教授团队的 Liang 等和华南

理工大学的瞿金平院士团队分别发明了气体辅助挤出^[2]和超声辅助挤出技术^[3],有效提高了挤出制品的成型质量。近年来社会对微型化、高精度、复杂结构产品的需求快速增加,挤出制品也趋于微型化和精密化^[4],微挤出成型技术应运而生。然而在微尺度效应下,一些宏观挤出过程中可以忽视的因素,如壁面滑移、表面张力、对流换热、熔体本身的黏弹性等^[5],将对微挤出制品质量产生不可忽视的影响,导致当前微挤出成型存在工艺参数优化困难、缺陷实时监测困难等问

基金项目: 浙江省高层次人才特殊支持计划(No.2023R5218),宁波市“科创甬江 2035”重点研发计划项目(No.2024Z108)。

通信作者: 许忠斌,博士,教授,博士生导师,研究方向为微结构塑料制品的成型加工及应用

收稿日期: 2025-05-03

引用格式: 李志熠,赵南阳,苏铭洋,等.微挤出成型及其数字孪生技术发展[J].工程塑料应用,2025,53(7):181-187.

LI Zhiyi, ZHAO Nanyang, SU Mingyang, et al. Current developments in micro extrusion molding and advances in digital twin technology [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 181-187.

题。近年来,新兴的数字孪生技术能够以更低的成本实时监控和优化复杂系统^[6],有助于解决微挤出成型面临的难题。

笔者聚焦于微挤出成型及其数字孪生技术的发展,介绍了微挤出成型技术的发展现状和面临的挑战,指出了将数字孪生技术应用于微挤出成型的必要性和优势,详细介绍了数字孪生体的构建流程和研究现状,指出了微挤出领域数字孪生技术的研究现状和发展趋势。

1 微挤出成型技术进展

微挤出成型的工艺流程包含熔融、塑化、微挤出、冷却固化、脱模、后处理等阶段,其核心设备是微挤出机。与传统宏观挤出成型相比,采用小直径螺杆或精密柱塞,并且配有限制压力和挤出速度波动的控制系统,例如德国 Thermo Fisher

公司的实验室级微挤出机 Haake Minila 和瑞士 Bühler 的公司的工业微米级挤出生产线。其过程是一个复杂的非牛顿流体三维流动过程。与传统宏观挤出成型不同,在微尺度效应下,微结构会对材料整体产生巨大影响,造成制品尺寸和精度产生波动,易形成挤出胀大和熔体破裂等缺陷^[7]。为解决这一问题,微挤出成型往往采用气体辅助和超声辅助挤出技术^[8],提升成型制品的质量。此外为改善单一材料的性能,拓展聚合物材料的应用范围,往往采用共挤成型技术^[9]。图1为几种微挤出成型技术的实际应用场景,这些技术是微挤出高效精密成型方法的重要组成部分,以下对各技术的发展现状进行简要介绍。



图1 微挤出成型技术

Fig. 1 Micro extrusion molding technology

气体辅助挤出技术是在口模内壁和高分子熔体之间注入低速流动气体以形成气垫膜层的一种技术^[10],该技术能够使口模内熔体的速度场趋于均匀一致,口模出口处剪切速率趋近于零,熔体呈柱塞状挤出,最终改善甚至消除挤出胀大和熔体破裂等问题。鄢超、黄兴元等首次将气辅挤出技术应用于微挤出成型过程^[11-12],黄楚晔、蔡圳南则针对塑料微管的挤出过程进行数值模拟实验^[13-14],发现气体辅助能基本消除微孔塑料和微管的挤出胀大,对挤出制品尺寸和形状的控制性更好,不易产生“鲨鱼皮”和熔体破裂等缺陷。任重等^[15]针对微管成型首次提出了双层气辅挤出技术,将一定压力的气体导入到微管挤出口模的环形熔体与口模内壁面和芯棒外壁面之间,形成内外双层的稳定气辅层,使得塑料微管熔体以完全柱塞状的方式挤出,进一步消除了微管挤出过程中的熔体破裂、挤出变形和挤出胀大等问题。Liu等^[16]在此基础上研究了双气体层的形成机理,结合数值模拟方法,探究了入口气体压力对熔体流变性能的影响,提出了一种稳定形成双气体层并易于控制微管尺寸的方法。Chen等^[17]则研究了进气狭缝宽度对气辅微管挤出的影响,结果表明,进气狭缝尺寸会影响形成气垫层的厚度,从而改变微管制品的形状和尺寸。

超声辅助挤出技术是在挤出过程中向料筒、螺杆或模具施加可控周期性振动的一种技术^[18],使聚合物熔体在振动力

场中实现充模流动和冷却凝固,能够提高制品内在质量,消除外观缺陷。该技术由华南理工大学的瞿金平教授提出^[3],其开发的电磁动态塑化挤出设备能够在螺杆旋转的同时施加高频振动,降低熔体黏度,增强混合效果并减少能耗,显著提高高分子材料的加工效率和制品性能。Bunget等^[19]首次将超声振动引入微挤出成型,设计了超声微挤出设备并进行了试验,结果表明在超声振动下成型载荷显著下降,制品表面质量得到了充分改善,证明超声辅助能够克服挤出成型微型化所带来的缺陷。魏灵娇^[20]针对超声波辅助挤出成型进行了数值分析与实验研究,设计了超声辅助挤出毛细管模头,针对该模头进行了数值模拟和实验,结果表明超声振动可显著降低口模入口压力和熔体黏度,促进熔体流动,降低挤出胀大率,提高挤出制品的尺寸精度和产量。赵越等^[21]研究了超声辅助挤出对尼龙6 (PA6)性能的影响,在PA6的熔融挤出过程中引入500w的超声振动外场,结果表明,采用超声辅助挤出制备的PA6结晶度提高,稳定晶型比例提高;黏度降低,流动性增强;力学性能基本不变。傅志红等^[7]使用超声波辅助聚丙烯五腔导管的微挤出成型,研究了超声功率、挤出机头温度、挤出速率对挤出制品截面各部位尺寸的影响,仿真和实验的结果均表明超声功率较高时,导管的尺寸偏差可在较低机头温度下达到最小值,超声辅助能够有效提高挤出导管的尺寸精度。

共挤出技术是指使用数台挤出机分别供给不同的熔体料流,在一个复合机头内汇合共同挤出得到多层复合制品的一种技术,能够使多层具有不同特性的物料在挤出过程中彼此复合在一起,使制品兼有几种不同材料的优良特性^[22]。朱钰婷等^[23-24]使用微纳层叠共挤技术制备了聚丙烯(PP)/PA6/碳纳米管(CNTs)原位微纤复合膜和聚乳酸(PLA)/聚己内酯(PCL)可降解微层薄膜,并通过实验得到了综合性能最佳的材料配比。黄益宾^[25]提出了气辅共挤成型技术,建立了气辅共挤出实验装置,能够发挥共挤成型和气辅挤出成型的各自优点,气辅共挤出的挤出胀大率和黏性包围率相比传统共挤出分别减少32%和30%以上,实现了高聚物共挤型材的高速、高质量、稳定挤出。李志彪等^[26]进一步研究了气辅微共挤技术,在完全滑移壁面条件下,熔体在离开口模后层间界面趋于稳定,无偏移、胀大和变形,能够有效改善微共挤制品尺寸和形状精度,提高制品质量。潘建武^[27]针对TPU医用微管的共挤出进行了研究,依据TPU的流变性能优化了挤出模具,结合数值模拟和挤出成型实验探究了关键参数对共挤微管截面形状和尺寸精度的影响,结果表明注气压力增大能够降低内外圆轮廓的椭圆度,牵引速度增大会使微管直径减小,流率增大会使微管向黏度大的一侧偏移。张广冬等^[28]通过数值模拟方法研究了三层共挤过程中界面偏移和挤出胀大的影响因素,当内外层入口流率比为1时,层厚的均匀性最佳;熔体零剪切黏度比增大时界面偏移和挤出胀大减小;流道压缩角为30°时共挤界面最为稳定。

综上所述,气体辅助挤出和超声辅助挤出技术较好地解决了微尺度效应下制品尺寸和精度出现波动的问题,共挤出技术则拓展了微挤出成型材料的应用范围,提高了产品质量。但目前微挤出成型仍面临着一些挑战。例如,辅助挤出

技术引入了如气体压力、振动频率等与材料流动特性耦合的参数,为工艺参数的优化和动态调控带来了困难;温度、压力、速度等决定成型制品质量的参数的调试高度依赖经验且耗时耗力;挤出制品的微结构缺陷难以在线检测,无法对可能产生的缺陷进行快速规避。在微挤出制造的全过程中建立实时反馈和自适应控制系统,精确调节工艺参数,确保产品的高精度和高质量,满足人的多样需求,是值得研究的课题。近年来兴起的数字孪生技术对于攻克这些难题具有很大的潜力。

2 微挤出成型数字孪生体的发展

面对微挤出制造领域日趋复杂的装备,传统的被动式管理和控制方法存在数据传输延滞、参数优化困难的技术瓶颈,数字孪生技术为实现微挤出过程的实时监测、实时反馈和主动优化提供了可行的方案^[29]。

针对微挤出制造流程中数据传输延滞的问题,目前发展出了基于数字孪生的数据采集技术和实时数据库技术,能够将压力、温度、位移等传感器的数据实时同步至数字孪生平台,存储在数据库内的历史数据可用于此后的工艺参数优化和建议;针对微挤出参数优化困难的问题,目前发展出了基于数字孪生的多参数协同优化技术,可通过构建质量预测模型快速预测产品缺陷并通过机器学习算法自动迭代优化参数组合,快速找到最优解并对设备进行参数控制^[30]。本节对微挤出数字孪生体的构建流程、应用、未来发展趋势进行了详细的论述。

2.1 微挤出数字孪生体构建流程

为了实现微挤出过程实时监测、实时反馈和主动优化功能,微挤出数字孪生体的构建主要包括数据采集与硬件部署、建立微挤出设备混合模型、开发数字孪生平台、校准和验证等步骤,如图2所示。

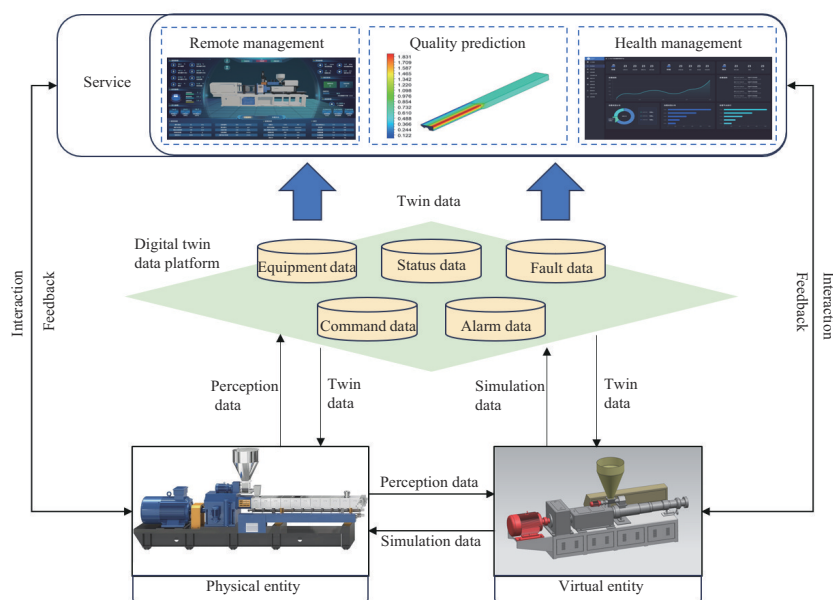


图2 微挤出数字孪生体构建

Fig. 2 Micro-extrusion digital twin construction

数据采集与硬件部署旨在实现车间内边缘数据的采集、传输、处理、存储、互联通信等功能^[31]。针对需要采集的关键数据安装传感器,如负责监测机筒各段温度以及熔体温度的温度传感器,安装在机头和口模入口处的压力传感器,用于测量挤出速率的流量计等。数据采集系统分为车间采集硬件和车间采集软件,前者可以选用集成可编程逻辑控制器(PLC)或自行设计专用通讯板,后者可以采用工业网关或边缘计算设备。PLC能够直接连接挤出设备的传感器和执行器,实时采集设备运行状态,并可根据数字孪生平台得到的优化参数反向控制执行器完成相应操作。对于车间内非PLC控制的设备,可自行设计用于边缘服务器数据采集、传输的硬件通信板。工业网关负责连接现场设备(传感器、PLC、执行器)与上层系统(云端、数字孪生平台)^[32],比如可将温度传感器采用的Modbus协议和压力传感器采用的Profibus协议通过工业网关统一转换为消息队列遥测传输(MQTT)协议,传输至云端数字孪生平台,用于处理需要长期分析的数据。边缘计算设备部署在物理车间,承担本地化数据处理任务,适用于处理高频数据,具备高实时性的特点。

对于建立微挤出设备的物理与数据驱动混合模型^[33]这一环节,物理模型可以使用计算机辅助设计(CAD)软件(如SolidWorks)建立挤出机、螺杆和模具的3D结构,将其导入计算机辅助工程(CAE)工具(如ANSYS、COMSOL)进行网格划分,完成几何模型的建立;对微挤出设备模型进行多物理场的仿真分析,使用计算流体动力学(CFD)工具模拟熔体在螺杆和模具内的非牛顿流体流动,结合热力学分析加热区传热与熔体温度分布,结合结构力学预测螺杆受力变形或模具磨损。数据驱动模型则需要引入机器学习方法^[34],基于温度、剪切速率等实时数据和历史数据训练神经网络,替代复杂流变方程;通过视觉数据训练卷积神经网络模型识别挤出产品表面缺陷;使用强化学习动态调整螺杆转速和加热温度,以最小化能耗并最大化产量。

在上述步骤的基础上,进一步开发数字孪生平台,其核心功能是实现实时数据可视化、控制与交互、报警与自动化^[35]。实时数据可视化可使用Unity3D展示挤出机动态模型和熔体流动动画;使用Grafana构建实时监控仪表盘,将温度和压力等关键参数的热力图叠加在挤出机3D模型上,实时显示各区域状态;数据看板显示关键指标,如各工艺参数随时间的变化、产量、能耗、缺陷率等。数字孪生平台需要具备控制与交互功能,允许用户通过人机交互界面反向控制物理设备,进行参数调整等操作。这一功能可以通过特定的应用程序接口(API)设计实现,如使用REST API进行非实时控制,使用WebSocket进行实时指令的传输,同时也需要合理设计人机交互界面,满足用户手动输入目标值进行控制的需求。报警与自动化的功能可以通过开源工具实现,进行规则管理、编排自动化 workflow,保证参数出现异常时实时响应并记录事件,工艺参数的自动寻优和调整则可以借助机器学习方法,快速得到最优参数并及时响应。

完成微挤出数字孪生体的初步构建后,还需要对模型进行校准和验证^[36]。校准是指通过调整模型参数,使数字孪生的输出与实际物理系统的观测数据达到最佳匹配的过程,其数据需要覆盖全工况的不同工艺条件。验证是指检验校准后的模型在独立数据集上的表现,确保能准确预测新场景下的系统行为。校准和验证直接决定虚拟模型能否替代高成本的试错实验,是工艺优化与预测性维护的基础步骤。

2.2 微挤出数字孪生体应用案例

在微挤出成型领域,目前的研究主要集中在数字孪生体的表达、基于数字孪生的工艺参数设置和优化、基于数字孪生的产品质量控制和生产效率提高、数字孪生辅助产品研发、基于数字孪生的环境影响评估等方面。

在数字孪生体的表达方面,Yao等^[37]提出挤出机数字孪生系统的四维模型,包括物理实体、虚拟模型、孪生连接及孪生服务,以实现挤出设备生产状态的实时监控,解决了挤出过程中过度依赖人工经验、信息处理滞后的问题。该数字孪生系统的构建过程分为三步:挤出机模型构建、数据采集和映射、孪生平台搭建。该系统能够让管理员全面了解挤出机的状态,并及时调整生产参数以提高生产效率。Hammer等^[38]使用过程数字孪生对非牛顿流体的分层共挤出预测模型进行了实验验证,对挤出机和共挤模头配置传感器,获取压力、温度等关键数据,对双层共挤模头和两台输送熔体流的单螺杆挤出机进行了建模,结果证明模型具备较高的预测能力。

在基于数字孪生的工艺参数设置和优化方面,Sarishvili等^[39]利用基于数据的数字孪生技术优化塑料的挤出工艺。基于数据的数字孪生建模需要大量试验以生成足够大的数据库,为克服这一难题,他们提出了一种混合方法,利用少量试验数据即可校准物理化学过程模型,并通过模拟器生成数据云。借助该技术开发了数字孪生平台,可集成到设备控制系统中,智能识别相互制约的工艺指标,实现工艺参数的动态优化。Hammer等^[40]对共挤工艺条件下聚合物间的扩散行为进行了研究,结果表明,共挤出流动加速了相互扩散过程,而界面剪切应力对扩散速率无显著影响,熔体温度和界面接触时间是影响扩散速率的主要参数。该实验借助软传感器建立了数字孪生模型,并根据所需工艺参数快速调整挤出机的螺杆转速。

在基于数字孪生的产品质量控制和生产效率提高方面,Bovo等^[41]开发了基于软传感器的数字孪生系统,用于缩短塑料管材生产启动时间并实现产品质量的实时监测。采用不同材料和不同工艺参数对管材挤出成型开展了实验,通过机器学习回归算法训练并测试了数字孪生所依托的挤出机和挤出模头模型。将其开发的数字孪生系统应用于单层管材生产的启动阶段,仅需数分钟即可满足客户指定的厚度与重量要求,并且具有较高的精度,证明该方案能有效缩短设备调试时间,显著提升产线效率。

在数字孪生辅助产品研发方面,Gumerov等^[42]建立了低

密度聚乙烯长丝生产系统的数字孪生模型。根据挤出机的设计特征和尺寸进行建模,描述单螺杆挤出机中的流体动力学过程。开展了聚乙烯黏度全流程测定实验,从流体动力学角度计算了聚合物熔体从挤出机喷嘴流出的流速,所得数据与实验测量值的误差仅为0.6%,证明该数字孪生模型的合理性,可用于预测低密度聚乙烯复合材料的黏度和流体动力学特性,并辅助设计挤出产品研发的技术方案。

在基于数字孪生的环境影响评估方面,Burr等^[43]基于堆叠自编码分类机逆向建模优化塑料挤出工艺,这一算法可以基于预设的能耗区间与制品性能区间,推荐最优运行参数,从而在降低生产能耗、成本与保证制品质量之间取得平衡。在基于该算法的神经网络训练过程中,使用了挤出机的数字孪生模型进行数据增强。Piron等^[44]将基于软传感器的数字孪生技术与生命周期评估(LCA)相结合,借助数字孪生技术可视化、数据同步、数据分析、模拟和优化等功能,构建了实

时环境分析模型,依据螺杆转速、材料硬度和黏度准确预测挤出机的比能耗,提供了动态实时的环境影响评估与优化方案。

笔者团队联合浙江某制造公司和浙大城市学院开展了挤注一体化装备的攻关,发明了基于数字孪生的挤注一体工艺调控及产品缺陷规避系统^[45]。通过建立挤注一体设备的三维模型并使用力与力矩取代电气系统与液压系统进行简化,提高了设备运行时的计算速率,数字孪生体运算结果基本符合实际设备参数,从而实现了挤注一体设备与其数字孪生体的双向实时通信。利用训练好的神经网络模型对挤出产品进行快速缺陷预测,提前调控工艺参数,并通过数字孪生体操控实体的挤注一体设备对缺陷进行合理规避,见图3。该项科技成果的提出和应用是微挤出成型行业数字化、智能化的重要突破。

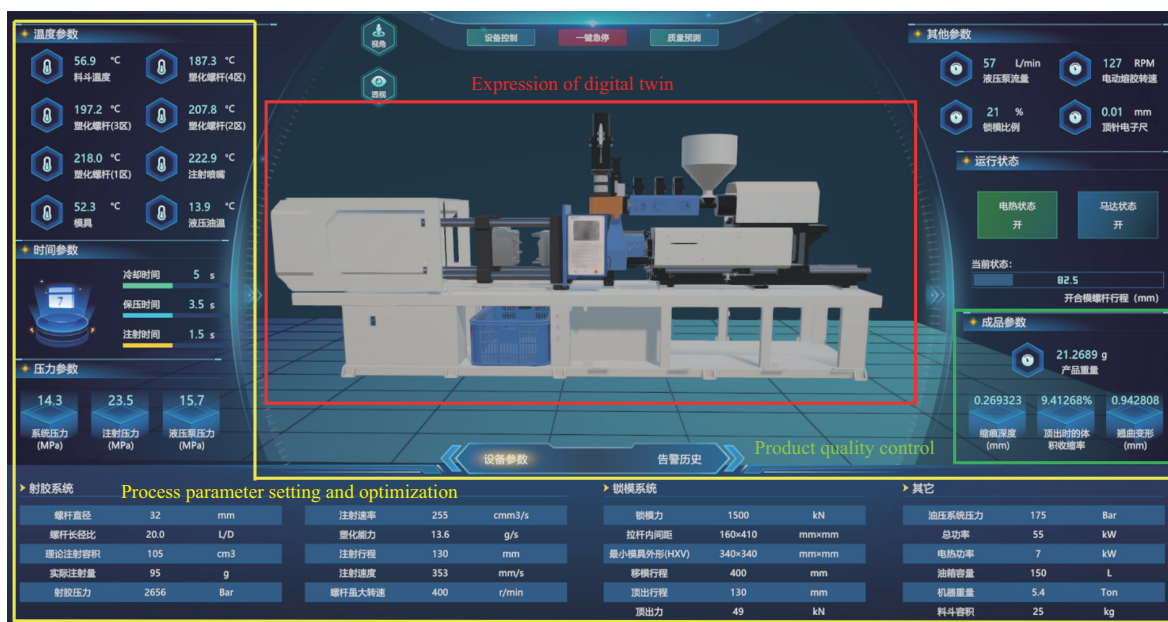


图3 微挤出数字孪生体应用案例

Fig. 3 Micro-extrusion digital twin implementation cases

2.3 发展趋势

数字孪生技术在微挤出成型领域的未来发展方向将围绕模型与算法深度创新、应用场景全生态扩展、系统架构全生态协同等方面。

(1)模型与算法深度创新:突破传统仿真模型对微观流动、相变、材料-结构耦合的简化假设,结合计算流体力学、分子动力学和相场模拟,构建从微观分子运动到宏观结构成型的跨尺度模型,最终建立多尺度-多物理场耦合的高保真模型;解决传统数字孪生依赖离线仿真、响应速度慢的问题,使用轻量化的AI代理模型,加快工艺参数优化速度;在挤出设备端部署边缘计算节点,采用轻量化数字孪生模型,加快决策速度,实现低延迟、高可靠性的实时控制。

(2)应用场景全生态扩展:开发定制化微器件,比如针对

医疗微针、柔性电子器件等定制化需求,构建“设计-工艺-性能”一体化数字孪生平台,便利定制化设计;扩展微挤出工艺的适配范围,探索微挤出工艺在新型材料上的加工潜力;通过数字孪生实现微挤出过程的资源效率最大化,降低能耗、碳排放,提高材料利用率,平衡资源消耗与产品质量,实现可持续制造和循环经济。

(3)系统架构全生态协同:通过数字孪生工厂的垂直整合,打通微挤出设备、上游材料供应与下游检测系统的数据孤岛,使挤出产品的全制造过程透明可追溯;构建开放式数字孪生生态,推动跨企业、跨行业的知识共享与协同创新,为数字孪生技术在微挤出领域的发展注入活力。

3 结语

聚焦微挤出成型及其数字孪生技术的发展,介绍了微挤

出成型技术的发展现状和面临的挑战,指出了将数字孪生技术应用于微挤出成型的必要性和优势;详细介绍了数字孪生体的构建流程和研究现状,指出了微挤出领域数字孪生技术的研究现状和发展趋势。将数字孪生技术应用于微挤出成型有利于解决传统微挤出工艺参数优化困难、缺陷实时监测困难等问题,显著提升挤出生产效率和稳定性。未来数字孪生技术在微挤出领域的应用将围绕高精度、更快响应、更全生态和更广协同展开,通过多学科融合和全生产链数字化,推动微挤出成型技术从“制造工具”向“智能创造平台”跃迁,最终服务于高端制造、精准医疗、绿色能源等战略需求。

参考文献

- [1] 熊熙,等.塑料挤出成型[M].北京:化学工业出版社,2024.
XIONG Xu, et al. Plastic extrusion molding[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [2] LIANG R F, et al. Journal of Rheology, 2001, 45(1):211–226.
- [3] 瞿金平,等.现代塑料加工应用, 2025, 7(1):1–8.
QU Jinping, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2025, 37(1):1–8.
- [4] 侯成龙,等.精密成形工程, 2023, 15(6):209–221.
HOU Chenglong, et al. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(6):209–221.
- [5] CHEN D, et al. Advanced Materials, 2022, 34(52). DOI: 10.1002/adma.202200903.
- [6] 陶飞,等.计算机集成制造系统, 2018, 24(1):1–18.
TAO Fei, et al. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1):1–18.
- [7] 傅志红,等.工程塑料应用, 2018, 46(4):52–57.
FU Zhihong, et al. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):52–57.
- [8] 邓小珍,等.橡塑技术与装备, 2017, 43(10):28–32.
DENG Xiaozhen, et al. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(10):28–32.
- [9] 印可桢.橡胶工业, 2024, 71(3):232–239.
YIN Kezhen. China Rubber Industry, 2024, 71(3):232–239.
- [10] 邓小珍,等.高分子材料科学与工程, 2022, 38(3):151–158.
DENG Xiaozhen, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(3):151–158.
- [11] 鄢超,等.中国塑料, 2003, 17(11):15–18.
YAN Chao, et al. China Plastics, 2003, 17(11):15–18.
- [12] 黄兴元,等.中国塑料, 2005, 19(3):17–19.
HUANG Xingyuan, et al. China Plastics, 2005, 19(3):17–19.
- [13] 黄楚晔,等.塑料工业, 2015, 43(10):44–47.
HUANG Chuye, et al. China Plastics Industry, 2015, 43(10):44–47.
- [14] 蔡圳南,等.工程塑料应用, 2022, 50(2):83–90, 105.
CAI Zhennan, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):83–90, 105.
- [15] 任重,等.材料导报, 2020, 34(20):20 193–20 198.
REN Zhong, et al. Materials Reports, 2020, 34(20): 20 193 – 20 198.
- [16] LIU T K, et al. Polymers, 2020, 12(2). DOI: 10.3390/polym12020355.
- [17] CHEN S Q, et al. Processes, 2023, 11(7). DOI: 10.3390/pr11072025.
- [18] 万炜强,等.机械工程学报, 2024, 60(18):89–115.
WAN Weiqiang, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(18):89–115.
- [19] BUNGET C, et al. Ultrasonics, 2011, 51(5):606–616.
- [20] 魏灵娇.超声波辅助挤出成型的数值分析与实验研究[D].长沙:中南大学, 2014.
WEI Lingjiao. Numerical analysis and experimental study of extrusion assisted by ultrasonic vibration[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [21] 赵越,等.工程塑料应用, 2015, 43(3):72–75.
ZHAO Yue, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(3):72–75.
- [22] 甄竹云,等.高分子通报, 2022(10):33–40.
ZHEN Zhuyun, et al. Polymer Bulletin, 2022(10):33–40.
- [23] 朱钰婷,等.中国塑料, 2021, 35(10):1–7.
ZHU Yuting, et al. China Plastics, 2021, 35(10):1–7.
- [24] 谷琳,等.中国塑料, 2021, 35(11):7–14.
GU Lin, et al. China Plastics, 2021, 35(11):7–14.
- [25] 黄益宾.聚合物气体辅助共挤成型的理论和实验研究[D].南昌:南昌大学, 2011.
HUANG Yibin. Theoretical and experimental study on polymer gas-assisted co-extrusion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [26] 李志彪,等.塑料工业, 2023, 51(10):108–113.
LI Zhibiao, et al. China Plastics Industry, 2023, 51(10):108–113.
- [27] 潘建武. TPU共挤微管的模具设计与成型工艺研究[D].湘潭:湘潭大学, 2022.
PAN Jianwu. Mold design and molding process research of TPU co-extruded microtubes[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [28] 张广冬,等.工程塑料应用, 2023, 51(12):86–91.
ZHANG Guangdong, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):86–91.
- [29] 吴轶凡.注塑车间数字孪生系统关键技术研究[D].西安:长安大学, 2022.
WU Yifan. Study on key technologies of digital twin system in injection molding workshop[D]. Xi'an: Changan University, 2022.
- [30] 刘大同,等.仪器仪表学报, 2018, 39(11):1–10.
LIU Datong, et al. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11):1–10.
- [31] 柳林燕,等.计算机集成制造系统, 2019, 25(6):1 536–1 545.
LIU Linyan, et al. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6):1 536–1 545.
- [32] 丁凯,等.计算机集成制造系统, 2019, 25(6):1 491–1 504.
DING Kai, et al. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6):1 491–1 504.

- [33] 王鹏,等.系统工程与电子技术,2020,42(12):2 779–2 786.
WANG Peng, et al. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42 (12):2 779–2 786.
- [34] 卢阳光.面向智能制造的数字孪生工厂构建方法与应用[D].大连:大连理工大学,2020.
LU Yangguang. Intelligent manufacturing oriented digital twin factory establishment method ang applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [35] 肖静华,等.北京交通大学学报(社会科学版),2019,18(2):69–77.
XIAO Jinghua, et al. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2019, 18(2):69–77.
- [36] 陶飞,等.计算机集成制造系统,2021,27(1):1–15.
TAO Fei, et al. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1):1–15.
- [37] YAO S, et al. Digital twins for rubber extruder state monitoring [C]//2024 14th Asian Control Conference (ASCC). Dalian, China: IEEE, 2024:2 551–2 555.
- [38] HAMMER A, et al. Polymer Engineering & Science, 2022, 62 (12):3 902–3 922.
- [39] SARISHVILI A, et al. Chemie Ingenieur Technik, 2021, 93(12): 1 949–1 954.
- [40] HAMMER A, et al. An experimental study of polymer-polymer interdiffusion under co-extrusion processing conditions[C]// Proceedings of the 38th International Conference of the Polymer Processing Society(Pps-38). St. Gallen, Switzerland: AIP Publishing, 2024.
- [41] BOVO E, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(11):5 517–5 529.
- [42] GUMEROV I I, et al. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2024, 60(1):37–42.
- [43] BURR J, et al. Chemie Ingenieur Technik, 2023, 95(10): 1 555–1 562.
- [44] PIRON M, et al. Journal of Cleaner Production, 2025, 498. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145192.
- [45] 许忠斌,等. CN117140894A[P]. 2023-12-01.
XYU Zhongbin, et al. CN117140894A[P]. 2023-12-01.

~~~~~

(上接第 49 页)

- [5] 童晓鹏,赵中华,张维芳,等.高发泡聚氯乙烯材料性能和泡孔结构影响因素的研究[J].聚氯乙烯,2024,52(8):10–16.  
TONG Xiaopeng, ZHAO Zhonghua, ZHANG Weifang, et al. Study on the factors influencing the properties and cell structure of highly foamed polyvinyl chloride materials[J]. Polyvinyl Chloride, 2024, 52(8):10–16.
- [6] 张薇,张师军,尹华.不同填料在聚氯乙烯树脂发泡过程中的行为研究[J].聚氯乙烯,2000,28(6):39–42,58.  
ZHANG Wei, ZHANG Shijun, YIN Hua. Studies on the behaviors of different filler in the foaming process of PVC resin[J]. Polyvinyl Chloride, 2000, 28(6):39–42, 58.
- [7] 谢君,王杰,王静,等.改性气相法二氧化硅在负电磁性墨粉中的应用[J].有机硅材料,2022,36(2):41–45.  
XIE Jun, WANG Jie, WANG Jing, et al. Application of modified fumed silica in electronegative magnetic toner[J]. Silicone Material, 2022, 36(2):41–45.
- [8] 吴泽,王杰,王静,等.气相法二氧化硅在高透明鞋底橡胶中的应用[J].有机硅材料,2023,37(3):37–41.  
WU Ze, WANG Jie, WANG Jing, et al. Application of fumed in high transparent sole rubber[J]. Silicone Material, 2023, 37(3):37–41.
- [9] YEOP J, HONG S W, KOH W G, et al. Enhanced mechanical and thermal properties of polyimide films using hydrophobic fumed silica fillers[J]. Polymers, 2024, 16(2): 297. DOI: 10.3390/polym16020297.
- [10] KIM K M, KIM H, KIM H J. Enhancing thermo-mechanical properties of epoxy composites using fumed silica with different surface treatment[J]. Polymers, 2021, 13(16). DOI: 10.3390/polym16020297.
- [11] 朱耿增,李文静,王晓明,等. KH550 改性微米二氧化硅的条件优化[J].中国粉体技术,2020,26(4):33–37.  
ZHU Gengzeng, LI Wenjing, WANG Xiaoming, et al. Condition optimization of KH550 modified micron silica[J]. China Powder Science and Technology, 2020, 26(4):33–37.
- [12] 单芙蓉,于志明,罗丽丝,等.硅烷偶联剂 KH550 表面改性纳米  $Al_2O_3$  的研究[J].化工新型材料,2013,41(5):169–170,185.  
SHAN Furong, YU Zhiming, LUO Lisi, et al. Study on surface modification of nano-alumina by silane coupling agent KH550[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(5):169–170, 185.
- [13] 李先铭,张宁. KH550 改性稀土类水滑石的制备及对 PVC 性能的影响[J].工程塑料应用,2023,51(11):149–154.  
LI Xianming, ZHANG Ning. Preparation of KH550 modified rare earth hydrotalcite and its effect on PVC properties[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):149–154.
- [14] 张震,胡应模,庞宝宝,等.硅烷偶联剂 KH570 表面改性绢云母的制备与表征[J].化工新型材料,2022,50(增刊1):241–245,251.  
ZHANG Zhen, HU Yingmo, PANG Baobao, et al. Preparation and characterization of sericite surface modified by silane coupling agent KH570[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(S1): 241 – 245, 251.
- [15] CONRADI M, ZORKO M, JERMAN I, et al. Mechanical properties of high density packed silica/poly(vinyl chloride) composites [J]. Polymer Engineering & Science, 2013, 53(7):1 448–1 453.
- [16] CONRADI M. Nanosilica-reinforced polymer composites[J]. Materiali in Tehnologije, 2013, 47(3):285–293.