

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.027

# 微孔发泡注射成型塑件表面质量控制研究进展

任建平<sup>1,2</sup>, 符立华<sup>1,2</sup>, 蒋晶<sup>3,4</sup>, 李倩<sup>3,4</sup>, 胡卫民<sup>5</sup>, 霍思奇<sup>6</sup>

(1. 台州科技职业学院, 浙江台州 318020; 2. 台州市模具智能制造重点实验室, 浙江台州 318020;  
3. 郑州大学微纳成型技术国际联合研究中心, 郑州 450001; 4. 郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001;  
5. 浙江星泰模塑科技股份有限公司, 浙江台州 318020; 6. 南昆士兰大学未来材料中心, 澳大利亚斯普林菲尔德 4300)

**摘要:** 本文从微孔发泡注射成型塑件表面缺陷的形成机理出发, 系统阐述了表层-芯层结构演化动力学、气泡稳定性与熔体流变特性之间的内在关联, 剖析了关键工艺参数(如温度、压力、超临界流体注入量)对表面质量的多尺度调控机制。在此基础上, 重点评述了快速热循环模具、气体反压、注射压缩成型、模具表面微纳结构、模内装饰与界面调控等前沿表面质量控制技术的原理、效果与局限性, 并探讨了工艺参数协同优化与智能控制策略在提升表面质量中的潜力。最后, 总结了当前技术在成本控制、材料适应性及理论预测方面面临的瓶颈, 展望了面向智能化、绿色化及多功能集成化的未来发展方向。本文可为微孔发泡注射成型表面质量控制的进一步研究和技术创新提供参考。

**关键词:** 微孔发泡注射成型; 表面质量控制; 热传导梯度调控; 模内装饰; 气体反压

**中图分类号:** TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0241-07

## Research progress on surface quality control of microcellular foam injection molded plastic parts

REN Jianping<sup>1,2</sup>, FU Lihua<sup>1,2</sup>, JIANG Jing<sup>3,4</sup>, LI Qian<sup>3,4</sup>, HU Weimin<sup>5</sup>, HUO Siqi<sup>6</sup>

(1. Taizhou Vocational College of Science and Technology, Taizhou 318020, China; 2. Key Laboratory of Mold Intelligent Manufacturing of Taizhou, Taizhou 318020, China; 3. International Joint Research Center for Micro Nano Forming Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. School of Mechanical & Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 5. Zhejiang Xingtai Molding Technology Co., Ltd., Taizhou 318020, China; 6. Centre for Future Materials, University of Southern Queensland, Springfield Central 4300, Australia)

**Abstract:** Based on the formation mechanisms of surface defects in microcellular foam injection molded plastic parts, the evolutionary dynamics of the skin-core structure, as well as the intrinsic correlations among bubble stability and melt rheological properties, were systematically elaborated. The multi-scale regulatory mechanisms of key process parameters (temperature, pressure, and supercritical fluid dosage) on surface quality were analyzed. On this basis, the principles, effectiveness, and limitations of advanced surface quality control technologies, including rapid heat cycle molding, gas counter pressure, injection compression molding, mold surface micro/nano structuring, in-mold decoration, and interface regulation, were highlighted. Furthermore, the potential of process parameter collaborative optimization and intelligent control strategies in improving surface quality was discussed. Finally, the current technical bottlenecks in cost control, material adaptability, and theoretical prediction were summarized, and future development directions toward intelligent, green, and multi-functional integrated approaches were prospected. A reference for further research and technological innovation in surface quality control of microcellular foam injection molding can be provided by this article.

**Keywords:** microcellular foaming injection molding; surface quality control; thermal conduction gradient regulation; in-mold decoration; gas backpressure

**基金项目:** 2024年度高校国内访问工程师项目(FG2024359), 国家自然科学基金面上项目(52575462), 2021年浙江省自然科学基金公益性项目(LGG21E050001)

**通信作者:** 蒋晶, 博士, 副教授, 主要从事聚合物微孔发泡行为研究

**收稿日期:** 2026-06-04

**引用格式:** 任建平, 符立华, 蒋晶, 等. 微孔发泡注射成型塑件表面质量控制研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 241-247.

REN Jianping, FU Lihua, JIANG Jing, et al. Research progress on surface quality control of microcellular foam injection molded plastic parts [J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 241-247.

微孔发泡注射成型技术自20世纪80年代问世以来,尤其在轻量化、节能减排和减少制品内应力等方面的独特优势,在汽车、航空航天、消费电子等领域获得了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。该技术通过超临界流体,如超临界二氧化碳流体(SC-CO<sub>2</sub>)、超临界氮气(SC-N<sub>2</sub>)在聚合物熔体中形成大量微米级泡孔,使制品质量可降低10%~30%<sup>[4]</sup>。然而,在成型过程中,由于模具冷壁面附近的“喷泉流动”效应以及熔体/模具界面处的热力学不稳定性,气泡在表层区域易被拉伸、破裂,形成漩涡状气痕、粗糙表层及光泽不均等缺陷,严重影响了制品的外观质量和后续涂装性能<sup>[5-7]</sup>。

近年来,随着消费电子和汽车行业对部件轻量化与高外观品质要求的不断提升,微孔发泡塑件的表面质量控制已成为学术界和产业界关注的焦点<sup>[8-9]</sup>。传统通过调整工艺参数,如注射速度、熔体温度等,该方法虽能在一定程度上改善表面质量,但效果有限,且常以牺牲泡孔结构或力学性能为代价<sup>[10-12]</sup>。因此,开发创新性的表面质量控制技术,揭示其内在作用机制,对于推动微孔发泡技术在高附加值产品中的应用具有重要意义。

本文系统综述了微孔发泡塑件表面缺陷的形成机理、影响因素及控制策略的最新研究进展。重点分析了模内装饰技术、气体反压技术、快速热循环及材料改性等前沿表面质量控制方法的原理、效果与局限性。最后总结了现有技术的不足,并展望了未来向智能化工艺优化、多技术协同及绿色可持续方向的发展趋势。

## 1 表面缺陷的形成机理与理论基础

微孔发泡注塑成型一般由四个阶段组成:塑料和超临界流体均相、泡孔形核、泡孔长大和塑料冷却固化<sup>[13]</sup>。

### 1.1 表层-芯层结构演化动力学

微孔发泡注塑成型过程中表面缺陷的形成本质上是复杂的多物理场耦合作用结果,其演化贯穿于四个关键阶段:塑料-超临界流体均相体系形成、泡孔形核、泡孔长大和最终固化定型<sup>[14-15]</sup>。Goel等<sup>[16]</sup>研究发现当塑料/超临界流体均相熔体经浇口注入模腔时,体系经历从高压环境至常压环境的急剧转变,这一压力降速率( $\partial P/\partial t$ )可达 $10^2\sim 10^3$  MPa/s量级,直接诱发体系的热力学失稳。Zhu等<sup>[17]</sup>研究发现在熔体前沿区域,由于模腔阻力与压力梯度的共同作用,形成显著的剪切流场与喷泉流场耦合效应。任建平<sup>[18]</sup>研究发现,在此过程中,气泡的演化行为呈现典型的时空异质性:在熔体核心区域,气泡主要经历各向同性的自由长大;而在近壁面区域,气泡则受到复杂的流场-温度场协同调控。特别值得关注的是,在模具冷壁面附近形成的黏弹性边界层内,气泡受到强烈的拉伸形变与剪切拖曳作用。当韦伯数( $We$ )超过临界值时,气泡表面张力与聚合物熔体黏弹性之间的动态平衡被打破,导致气泡壁发生界面失稳,最终引发气泡破裂与气体逃逸。

上述文献揭示了微孔发泡注射成型过程中表面缺陷形成的多物理场耦合机理,具有重要的理论价值。Goel等<sup>[16]</sup>率

先指出压力降速率高达 $10^2\sim 10^3$  MPa/s所引发的热力学失稳是气泡行为失控的根本诱因;Zhu等<sup>[17]</sup>进一步明确了熔体前沿区域剪切流场与喷泉流场的耦合效应,丰富了人们对流动诱导缺陷的认识;任建平<sup>[18]</sup>则深入揭示了气泡在核心区与近壁区截然不同的时空异质性演化规律,并创新性地引入 $We$ 作为判断气泡界面失稳的定量指标,阐明了黏弹性边界层内气泡拉伸、破裂直至气体逃逸的完整力学过程。然而,现有研究仍存在不足<sup>[19-20]</sup>:一是对 $We$ 临界值的具体范围及其与材料物性(如熔体强度、黏弹谱)的定量关系尚未建立;二是多物理场(压力-温度-剪切)耦合作用下的气泡破裂相图仍不完整;三是机理分析多停留在定性描述层面,与后续工艺调控策略(如气体反压参数的设定)之间缺乏直接的定量桥梁。今后应重点构建基于无量纲数的气泡稳定性判据,并发展跨尺度的数值模型,以实现从缺陷形成机理到工艺参数逆向设计的贯通。

### 1.2 关键工艺参数对表面质量的影响机制

工艺参数通过调控熔体流变特性与热传导行为,深刻影响微孔发泡塑件的表面质量形成过程,其作用机制可通过多尺度物理场耦合模型进行解析<sup>[21-23]</sup>。

在热力学调控维度,熔体温度与模具温度共同决定了体系的气体溶解度参数与扩散系数。根据Arrhenius方程,熔体温度升高可显著降低气体在聚合物基体中的传质阻力,但过高的温度会引发气体过早逸散与泡孔合并。模具温度的提升,如从60℃升至100℃,可显著延缓聚合物熔体的非等温结晶动力学过程,使表层区域的气泡有充分时间完成界面弛豫,从而将聚丙烯(PP)微孔发泡体系的表面粗糙度Ra值从2.1 μm优化至1.5 μm,降幅达28.6%。这一优化机制可归因于温度梯度的降低,有效抑制了气泡在固化前沿的Marangoni效应<sup>[24]</sup>。

孙俊威等<sup>[25]</sup>研究了发泡温度对PP基复合材料泡孔形貌的调控机制。研究结果显示,当发泡温度达到158℃时,纯PP体系因熔体强度低于临界阈值,其泡孔结构呈现明显的不稳定性特征。在此热力学条件下,泡孔壁的黏弹响应特性显著减弱,导致孔壁破裂和泡孔联通现象,继而引发气体逃逸和结构塌陷。值得注意的是,在相同温度条件下,PP/PET复合材料展现出截然不同的泡孔演化行为。通过电镜分析证实,PET纳米纤维在PP基体中形成了三维网络结构,这种拓扑约束效应使复合体系的储能模量提升约2个数量级,显著改变了材料的应变硬化行为。该增强机制有效抑制了泡孔生长过程中的边界迁移,使泡孔密度提升至 $1.2\times 10^9$  cells/cm<sup>3</sup>,同时将平均孔径控制在 $(25\pm 3)$  μm的优化区间。该研究的重要意义在于揭示了纳米纤维网络对聚合物发泡行为的双重调控机制:一方面通过增强熔体强度延缓泡孔粗化动力学过程,另一方面通过异相成核作用优化泡孔尺寸分布。这种协同效应不仅实现了泡孔密度的数量级提升,更将PP的有效发泡区间拓宽了15℃以上,为开发宽温域高性能微孔发泡材料提供了新的设计思路。

在流体动力学层面,注射速度与注射压力通过改变熔体的剪切稀化行为与气泡受力状态影响表面质量。高注射速度虽能维持熔体前沿的黏热一致性,但会导致壁面滑移系数显著增大,诱发气泡在喷泉流区域发生毛细管破裂。实验数据显示,当 $We$ 超过临界值0.5时,气泡破裂概率呈指数增长。而采用低压注射与气体反压的协同策略,可通过提升熔体中的气体溶解度极限,将表层气泡的成核势垒提高约40%,从而形成厚度达100~200  $\mu\text{m}$ 的致密表层<sup>[26]</sup>。

在热物理化学领域,超临界流体(SCF)注入量直接调控体系的自由体积分数与成核密度<sup>[27]</sup>。根据经典成核理论,当SC-CO<sub>2</sub>注入量从质量分数0.5%增至质量分数0.8%时,聚苯乙烯体系的气泡成核密度理论值可从 $10^9$  cells/cm<sup>3</sup>提升至 $10^{11}$  cells/cm<sup>3</sup>,但实际观测值受限于气泡粗化动力学而仅达到 $10^8$ ~ $10^9$  cells/cm<sup>3</sup>量级。这种理论与实践的偏差源于过量SCF引发的气泡奥斯特瓦尔德熟化效应,导致表面气痕面积比例从15%激增至45%。通过引入修正的Zeldovich因子分析发现,当无量纲浓度参数超过1.25时,气泡速率将超越成核速率,造成表面质量的急剧恶化<sup>[28]</sup>。

上述工艺参数的相互作用可通过构建无量纲 $\pi$ 群进行全局优化<sup>[29]</sup>。Cai等<sup>[30]</sup>研究表明,维持适度的雅各布数( $Ja \approx 0.8$ )、德博拉数( $De \approx 1.2$ )与傅鲁德数( $Fr \approx 0.3$ )的协同匹配,可实现气泡动力学与熔体固化动力学的理想平衡,在塑料内部制造出数十亿个极其微小的气泡,同时还能让成品的外表面保持光滑如镜。Cai等<sup>[30]</sup>基于无量纲 $\pi$ 群( $Ja$ 、 $De$ 、 $Fr$ )提出的工艺协同优化策略,标志着微孔发泡注射成型从经验试错向相似理论指导的重要跨越。该方法通过维持雅各布数、德博拉数与傅鲁德数的特定匹配( $Ja \approx 0.8$ 、 $De \approx 1.2$ 、 $Fr \approx 0.3$ ),实现了气泡动力学与熔体固化动力学的理想平衡,可同时获得内部微细均匀的泡孔结构与光滑如镜的外表面。该技术的核心优势在于为多参数交互作用提供了定量的全局优化目标,显著提升了工艺设计的科学性与可迁移性。但目前仍存在三点局限:无量纲数在不同材料体系中的最优窗口尚未建立,从无量纲目标到实际工艺参数的逆向设计方法缺失,以及表面质量的定量表征不够充分。未来应重点构建材料-工艺-无量纲数的通用映射数据库,并开发嵌入该准则的智能工艺优化系统。

## 2 表面质量控制的策略与前沿技术

### 2.1 模具成型技术与调控策略

#### 2.1.1 快速热循环模具技术

快速热循环模具技术作为一种先进的表面质量控制方法,其核心在于通过精准的时序调控实现模具温度场的非等温过程管理<sup>[31]</sup>。该技术采用“高温注射-快速冷却”的动态热管理策略:在聚合物/超临界流体均相体系注入阶段,将模具温度维持在聚合物玻璃化转变温度( $T_g$ )以上甚至接近其结晶温度( $T_c$ ),此举可显著延缓熔体表层固化动力学过程,为气泡界面弛豫提供充分时间;当充模过程完成后,迅速将模温降至聚合物固化温度以下,通过强化热传导速率有效控制成型

周期<sup>[32]</sup>。

Lee等<sup>[33]</sup>研究表明,采用饱和蒸汽为传热介质的快速热循环系统可实现极高的热通量密度( $q'' > 100 \text{ kW/m}^2$ ),使模具在30 s内完成从160  $^{\circ}\text{C}$ 至60  $^{\circ}\text{C}$ 的温度跃迁。这种急剧的非稳态热传导过程产生了双重积极效应:一方面,高温模腔显著降低了熔体在充模过程中的表观黏度与剪切应力,使微孔发泡PP制件的表面光泽度提升至85 GU以上;另一方面,快速冷却阶段有效抑制了气泡在固化前沿的奥斯特瓦尔德熟化现象,基本消除了流痕与气痕等表面缺陷。

该技术体系在工程应用中面临设备成本高、热疲劳致模具寿命缩短、密封要求严苛及能耗较高等多重挑战,严重限制了其在成本敏感型产品中的规模化应用<sup>[34]</sup>。最新研究正致力于通过多层纳米复合涂层技术增强模具表面抗热疲劳性能,并开发基于模型预测控制的智能温控策略以优化能耗效率,为突破上述技术瓶颈提供了新的解决路径<sup>[35]</sup>。

#### 2.1.2 气体反压技术

气体反压技术作为一种精密的成型过程调控手段,其核心机理在于通过建立可控的气相压力场来调节聚合物/超临界流体均相体系的热力学状态<sup>[3]</sup>。该技术在注射前向密闭模腔内注入高压惰性气体,通常为N<sub>2</sub>或CO<sub>2</sub>,并在注射-发泡-固化全过程维持预设的反压压力梯度,通常为2~20 MPa,以此提高泡孔成核势垒,抑制表层气泡的过度生长与粗化<sup>[3]</sup>。

围绕该技术的机理与效能,已有研究从多角度进行了深入探索。文献[36]至文献[38]基于Clausius-Clapeyron方程与经典成核理论,揭示了气体反压的双重协同机制:一方面,外压提升气体在聚合物熔体中的溶解度,延缓热力学失稳;另一方面,外压提高气泡成核的临界吉布斯自由能,推动成核模式从均相主导向异相主导转变。实验表明,15 MPa氮气反压可使PP体系的气泡成核密度从 $10^7$  cells/cm<sup>3</sup>跃升至 $10^9$  cells/cm<sup>3</sup>,轮廓的算术平均偏差( $Ra$ )从3.2  $\mu\text{m}$ 降至0.8  $\mu\text{m}$ ,降幅达75%。滑海涛<sup>[39]</sup>则聚焦工程实现难点,指出高精度压力伺服系统与特殊模具密封结构显著增加了系统复杂性与初始投资,且反压参数存在严格过程窗口:压力小于2 MPa时抑制气泡效果不足,压力大于20 MPa则导致熔体充填不良或致密皮层过厚,使轻量化优势从20%~30%降至10%以下。

上述研究为气体反压技术的优化指明了方向:未来应着力开发基于机器学习的自适应反压控制系统,通过实时监测熔体前沿压力与温度场分布动态优化反压曲线;同时探索低压多级反压与新型模具密封结构,在保证表面质量的前提下拓展工艺窗口、降低系统成本,实现高表面质量与显著轻量化的协同目标。

#### 2.1.3 注射压缩成型技术

注射压缩成型技术是一种通过主动调控模腔容积与压力分布来优化泡孔结构的先进成型方法。其核心在于发泡过程中精确控制模内压力与腔体体积,抑制气泡的失控长

大,从而有效调控泡孔尺寸分布并增强泡孔结构强度<sup>[40]</sup>。

围绕该技术的开发与应用,已有研究进行了深入探索。Zhang等<sup>[40]</sup>系统阐述了ICM在发泡过程中的调控机制,指出通过控制模内压力与腔体体积可有效抑制气泡的无序长大,进而优化泡孔尺寸分布并提升泡孔结构强度。在此基础上,Das等<sup>[41]</sup>将微孔发泡与注射压缩技术相融合,提出了微孔发泡-注射压缩成型技术(MICM)。该技术通过调控泡孔形貌、分布与结构强度之间的内在关联,实现了泡孔尺寸可控、力学性能优异、减重效果明显且表面质量良好的PP制件。MICM能够在较低的注塑压力、熔体温度和较短成型周期下完成制备,其模板压缩过程类似于“core-back”发泡技术,均匀的压力促进了泡孔沿流动方向和厚度方向的双向均匀分布与生长。同时,模板压缩与气体保压的双重作用有效减小了制品翘曲变形。通过调节压缩与充填的先后次序,还可增大熔体与模具内壁的温度梯度,加速表面冷凝层形成,抑制气体逃逸,改善表现质量。

当前MICM技术虽展现出显著优势,但在工艺窗口精确界定、复杂结构件适应性及批量化生产稳定性等方面仍面临挑战。未来应重点发展基于在线感知的闭环控制系统,实现对压缩时序与压力曲线的动态优化;同时探索MICM与气体反压、模内装饰等技术的协同集成,并建立材料-工艺-结构-性能的多尺度预测模型,以推动该技术在高附加值精密制品中的规模化应用。

#### 2.1.4 模具表面微纳结构

模具表面微纳结构技术通过界面工程手段在模具型腔表面构建具有特定几何特征微纳级拓扑结构,利用其空间约束效应调控气泡动力学行为,是实现微孔发泡塑件表面质量创新的前沿方向<sup>[42]</sup>。该技术的核心机理在于微纳结构产生的三维物理屏障效应与界面能调控作用的协同:当聚合物/超临界流体均相体系在充模过程中与微结构表面接触时,结构单元通过界面锚定效应有效抑制气泡核的迁移与合并,同时通过增大成核基底面积显著提升异相成核密度。

Wang等<sup>[43]</sup>实验研究表明,采用飞秒激光加工技术在模具表面制备的微锥阵列,特征尺寸5~20 μm,深宽比0.8~1.5,可使PP微孔发泡体系的表面粗糙度参数Ra值从基准组的2.8 μm降至1.4 μm,降幅达50%。这种改善归因于微结构诱导的界面能梯度场对气泡长大的空间限制作用,以及结构单元对熔体固化过程中体积收缩的补偿效应。同步辐射X射线断层扫描结果显示,微结构界面处的气泡尺寸分布变异系数从无结构表面的0.52降至0.21,且表层泡孔形态呈现明显的各向异性排列。

然而,该技术在实际应用面临若干关键挑战:首先,微纳结构的大面积均匀制备存在技术瓶颈,特别是在复杂曲面模具上难以保证结构单元的空间一致性,尺寸偏差 $\geq \pm 15\%$ ;其次,结构表面显著增大了塑件脱模过程中的黏附功,当脱模力超过材料的屈服强度时可能导致结构损伤;更为严峻的是,在长期服役条件下,微纳结构尖角区域易产生应力集中,

在循环机械-热载荷作用下出现磨损与塑性变形,导致表面功能退化。此外,微纳结构的优化设计严重依赖于特定聚合物体系的发泡特性,如熔体强度、结晶动力学等,缺乏普适性设计准则。

当前研究前沿正致力于开发基于仿生原理的多级复合结构设计,通过模拟生物表面的智能润湿特性,实现气泡行为的主动调控。同时,新型表面工程技术的引入,如类金刚石纳米涂层的应用,为提升微纳结构服役寿命提供了创新解决方案。

#### 2.1.5 模内装饰与界面调控技术

模内装饰(IMD)与微孔注射成型(MIM)的跨尺度集成代表着表面工程领域的重大突破,该技术通过引入功能性界面层实现了对泡孔演化和表面质量的全新调控维度<sup>[22]</sup>。其核心创新在于利用装饰膜的物理阻隔效应与热传导各向异性,构建非对称的温度梯度场,从而精确引导气泡的时空分布行为。

何利楠等<sup>[44]</sup>通过系统研究铜箔(Cu)与聚对苯二甲酸乙二酯(PET)装饰膜的界面热力学行为,揭示了截然不同的调控机制。高热导率( $\lambda$ )的铜箔( $\lambda \approx 400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )在界面处建立陡峭的温度梯度( $\nabla T \approx 10^3 \text{ K/m}$ ),显著加速薄膜侧的熔体固化动力学过程,使局部泡孔尺寸减小38%,泡孔密度提升至 $1.2 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ 。这种急剧的温度变化同时诱导熔体内部产生马朗戈尼对流,推动芯层泡孔结构向非薄膜侧发生定向迁移。相反,低热导率的PET薄膜( $\lambda \approx 0.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )则形成缓和的温度场,延缓了固化前沿的推进速率,导致泡孔粗化与芯层结构的反向分布。

这种“热传导梯度调控”机制不仅有效抑制了表面气泡缺陷的形成,更重要的是诱导了独特的界面结晶行为。广角X射线衍射(WAXD)分析表明,铜箔界面处形成了高度取向的 $\beta$ 晶相,其赫尔曼取向因子达到0.85,显著增强了界面区域的力学性能。而等温结晶动力学研究显示,PET薄膜界面则促进了球晶的径向对称生长,形成了互锁的晶体网络结构。

值得注意的是,PP装饰膜展现出优异的综合性能,其Ra值可降至0.244 μm,拉伸强度提升至22.37 MPa,缺口冲击强度达到6.8 kJ/m<sup>2</sup>。这种卓越的性能提升源于其与基体材料完美的热力学相容性:二者的溶解度参数差( $\delta$ )小于1.0 (J/cm<sup>3</sup>)<sup>0.5</sup>,且线性热膨胀系数匹配度高达92%。差示扫描量热(DSC)分析证实,PP装饰膜界面处形成了独特的横晶结构,晶体尺寸分布变异系数从普通成核的0.45降至0.18,显著改善了应力传递效率<sup>[45]</sup>。

该技术的前沿发展正致力于开发具有智能响应特性的多功能装饰膜,如温致变色材料与形状记忆聚合物的集成,以及在装饰膜/基体界面构建微纳复合结构以进一步增强界面黏结强度。这些创新方向将为微孔发泡制品的表面功能化开辟新的技术路径。

## 2.2 工艺参数优化与智能控制

### 2.2.1 多参数协同优化

在微孔发泡注射成型过程中,多参数协同优化被视为实现表面质量精确调控的核心方法论。该体系通过建立工艺参数与成型质量之间的非线性映射关系,采用系统化的实验设计与统计分析方法,实现对关键工艺窗口的精准界定。朱大韶等<sup>[46]</sup>在聚苯乙烯化学发泡体系中的研究表明,注射动力学参数,特别是注射速度与发泡状态,对熔体流长比的影响显著高于化学发泡剂浓度变化产生的作用,这一发现揭示了注射阶段流场控制对泡孔结构演化的主导地位。

张天锋<sup>[47]</sup>通过引入田口方法中的信噪比(S/N ratio)特性分析,研究证实最优工艺参数组合(注射速度85%、熔体温度215℃、模具温度45℃、SCF注入量0.6%)可使微孔发泡塑件的表面粗糙度参数降低约35%。该优化结果得益于参数间的协同效应:适中的注射速度在维持熔体前沿稳定性的同时避免了过度的剪切稀化;精确控温的熔体-模具系统确保了理想的气体溶解度与固化速率匹配;而优化的SCF注入量则在成核密度与气泡粗化风险间建立了平衡。

进一步采用响应面法(RSM)建立的二阶多项式模型显示,工艺参数对表面质量的交互影响呈现显著的非线性特征。方差分析(ANOVA)表明,注射速度与模具温度的交互项( $p$ 值=0.023<0.05)对表面粗糙度的贡献率达到18.7%,证实了热-流耦合场在表面形成过程中的关键作用。这种基于统计模型的参数优化方法,不仅提升了表面质量的批次间稳定性(变异系数从15.2%降至6.8%),更为实现工艺窗口的稳健设计提供了理论依据。

当前研究前沿正致力于将传统的统计优化方法与人工智能技术相融合,通过深度学习算法建立更高精度的工艺-性能预测模型,为突破传统实验设计的局限性开辟新的技术路径。

### 2.2.2 先进过程控制

基于工业4.0框架的先进过程控制技术正在重塑微孔发泡注射成型的质量控制范式,其核心在于通过数据驱动的智能算法实现工艺参数的自适应优化。该技术体系通过分布式传感器网络实时采集熔体压力、温度场分布、注射速度等关键过程变量,并借助数字孪生技术构建过程参数的动态映射关系,最终通过机器学习算法建立工艺参数与表面质量的非线性预测模型。

王国栋等<sup>[48]</sup>研究表明,采用深度神经网络(DNN)架构的表面质量预测系统,通过包含注塑机状态参数、材料特性与工艺设置的多维特征工程,可实现预测精度超过90%的突破性表现,较传统响应面方法的预测误差降低约20%。这种预测能力的提升源于神经网络对高维非线性关系的卓越拟合能力,特别是对气泡成核密度与表面粗糙度之间复杂关联的准确捕捉。

在控制策略层面,基于强化学习的自适应控制系统通过构建包含状态空间、动作空间与奖励函数的三元组模型,实

现了对注射曲线与气体反压参数的动态优化<sup>[49]</sup>。该系统通过Q-learning算法不断探索最优控制策略,能够针对材料批次差异引起的熔体流变特性变化、设备状态波动导致的压力控制偏差等扰动因素,自主调整控制参数。实验验证表明,该智能控制系统在应对不同批次的PP材料时,可将表面粗糙度的批次间变异系数从基准组的12.3%稳定控制在4.5%以内。

当前的研究前沿正致力于开发具有时序预测能力的长短期记忆网络(LSTM)与卷积神经网络(CNN)的混合架构,以进一步提高对动态过程的质量预测精度<sup>[50]</sup>。同时,基于联邦学习的分布式智能控制系统正在探索中,该系统通过多个生产单元的数据协同训练,在保证数据隐私的前提下持续优化控制模型,为构建新一代智能微孔发泡成型系统提供技术支撑。

## 2.3 材料体系创新与改性策略

### 2.3.1 熔体强度增强剂

在微孔发泡体系中,聚合物熔体的应变硬化行为对气泡稳定性具有决定性影响。通过引入特定拓扑结构的链延长剂或纳米尺度填料,可显著改变聚合物的黏弹性弛豫谱,从而抑制气泡粗化与破裂。张爱敏等<sup>[51]</sup>开创性地将动态硫化技术与SC-CO<sub>2</sub>发泡工艺相结合,通过构建可控的交联网络结构,实现了泡孔结构的精准调控。该多功能绿色微孔材料展现出卓越的结构稳定性,其泡孔收缩率低于5%,压缩回弹率超过92%,且具备持久的隔热性能(导热系数<0.045 W/m·K)。

深入的研究表明,马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)作为反应型相容剂,不仅能有效改善聚酰胺6(PA6)与PP基体的界面相容性,更可通过诱导PA6原位成纤形成纳米纤丝增强结构。扫描电子显微镜(SEM)分析显示,这些纳米纤丝的平均直径从微米级降至200 nm,降幅达70%。这种纳米复合体系显著改变了聚合物的结晶动力学,使结晶起始温度提高8.3℃,晶体成核密度增加两个数量级。与纯PP发泡体系相比,该复合泡沫的芯层泡孔尺寸分布更为集中[(61±8) μm],泡孔密度达到 $5.8 \times 10^5$  cells/cm<sup>3</sup>,同时Izod缺口冲击强度从3.2 kJ/m<sup>2</sup>提升至6.5 kJ/m<sup>2</sup>,实现了力学性能的跨越式提升。

### 2.3.2 成核剂与结晶调节剂

高效成核剂通过提供异相成核位点,显著降低气泡成核的吉布斯自由能势垒,是实现泡孔结构精细调控的关键添加剂。韩翔宇等<sup>[52]</sup>,有机磷酸盐类成核剂(如NA-11)在添加量为质量分数0.8%时,可使PP微孔发泡体系的泡孔密度从 $4.2 \times 10^5$  cells/cm<sup>3</sup>提升至 $6.3 \times 10^5$  cells/cm<sup>3</sup>,增幅达50%。这种成核密度的提升直接转化为表面质量的改善, $Ra$ 值从1.8 μm降至1.35 μm。其作用机理在于成核剂颗粒与聚合物基体间形成的界面能差,为气泡核的形成提供了低能垒路径。

结晶调节剂则通过改变聚合物的结晶行为间接影响泡孔形态。山梨醇类衍生物(如DBS)作为高效的结晶促进剂,

可使PP的结晶温度从118℃提升至128℃,结晶半衰期缩短40%。这种加速的结晶动力学促进了细微球晶的形成,球晶尺寸从50 μm降至15 μm以下。更细小的球晶结构不仅为气泡成核提供了更多的异相位点,更重要的是在熔体固化过程中形成了更致密的晶体网络,有效阻碍了气泡的迁移与合并,从而获得表面光滑度更高的发泡制品。

当前研究前沿正致力于开发具有多重功能的复合型添加剂体系,如兼具成核与增强效应的纳米纤维素晶体,以及能够响应外部刺激(温度、剪切)的智能结晶调节剂,这些创新材料将为下一代高性能微孔发泡制品的发展提供新的解决方案。

### 3 挑战与展望

#### 3.1 当前技术瓶颈

微孔发泡注射成型表面质量控制仍面临三重核心挑战:在技术经济性方面,先进控制策略所需的高压温控系统与精密模具显著提升制造成本,制约了在成本敏感领域的应用拓展。在材料适应性层面,现有基于聚烯烃体系优化的工艺窗口对工程塑料与生物基材料普遍性不足,其迥异的黏弹弛豫特性与结晶动力学要求开发个性化解决方案。在理论预测维度,当前数值模型难以实现从分子链运动到宏观缺陷的跨尺度精准模拟,商业软件对表面形貌的预测误差仍超过30%。

#### 3.2 未来发展方向

面向下一代表面质量控制技术,智能化与功能化将成为核心发展方向。基于数字孪生的虚拟工艺优化系统可实现参数自主寻优,结合机器学习算法建立工艺-结构-性能的精准映射。绿色化路径重点开发生物可降解材料的专用控制策略,推动物理发泡剂全面替代与制品闭环回收。技术融合创新通过模内功能化装饰实现电磁屏蔽/导热等多功能集成,而梯度泡孔结构设计则可协同优化表面质量与隔热/吸声性能。

### 4 结论

本文系统解析了微孔发泡注射成型表面质量控制的关键科学技术问题:表面缺陷形成源于喷泉流动与界面热力学不稳定性共同作用的气泡破裂机制;模内装饰技术通过热传导梯度调控可实现表面粗糙度 $Ra < 0.25 \mu\text{m}$ 的优质表面;现有技术体系亟需突破成本约束与材料适应性瓶颈。未来研究应聚焦智能控制算法开发、绿色材料工艺创新与多功能集成技术突破,通过多学科交叉推动该技术在高附加值领域的规模化应用。

#### 参考文献

- [1] 曹贤武,等.石油化工,2025,54(10):1 466-1 476.  
CAO Xianwu, et al. Petrochemical Technology, 2025, 54(10): 1 466-1 476.
- [2] 任建平,等.塑料科技,2024,52(1):23-27.  
REN Jianping, et al. Plastics Science and Technology, 2024, 52(1): 23-27.
- [3] 田思战,等.合成树脂及塑料,2026,43(1):83-86.  
TIAN Siqiang, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2026, 43(1):83-86.
- [4] 许家杰,等.材料导报,2024,38(10):307-316.  
XU Jiajie, et al. Materials Reports, 2024, 38(10):307-316.
- [5] 匡唐清,等.高分子材料科学与工程,2023,39(5):153-163.  
KUANG Tangqing, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(5):153-163.
- [6] NGUYEN D T, et al. Journal of Cleaner Production, 2024, 452. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.142229.
- [7] CAMPUZANO J F, et al. Express Polymer Letters, 2020, 14(7): 673-684.
- [8] 任建平.气体反压微孔发泡射出压缩成型注塑工艺:CN116277734A[P]. 2023-06-23.  
REN Jianping. Injection molding process of gas counterpressure microcellular foam injection compression molding: CN202310151189.3[P]. 2023-06-23.
- [9] 迟文凯,等.塑料,2020,49(1):143-146, 151.  
CHI Wenkai, et al. Plastics, 2020, 49(1):143-146, 151.
- [10] KUZMANOVIĆ M, et al. Advanced Materials, 2020, 32(52). DOI:10.1002/adma.202003938.
- [11] GÓMEZ-MONTERDE J, et al. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(8):2 707-2 720.
- [12] BLEDZKI A K, et al. Journal of Cellular Plastics, 2004, 40(6): 489-496.
- [13] PARK C B, et al. Polymer Engineering & Science, 1997, 37(1): 1-10.
- [14] YOON J D, et al. Cellular Polymers, 2004, 23(1):39-48.
- [15] TSIVINTZELIS I, et al. Polymer, 2007, 48(20):5 928-5 939.
- [16] GOEL S K, et al. Polymer Engineering & Science, 1994, 34(14): 1 137-1 147.
- [17] ZHU M, et al. The Journal of Supercritical Fluids, 2023, 200. DOI: 10.1016/j.supflu.2023.106002.
- [18] 任建平,等.工程塑料应用,2021,49(1):75-80.  
REN Jianping, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):75-80.
- [19] WANG G L, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5):1 293-1 310.
- [20] SUN J W, et al. Polymers, 2023, 15(1). DOI: 10.3390/polym15010227.
- [21] 沈超,等.现代塑料加工应用,2024,36(5):57-60.  
SHEN Chao, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2024, 36(5):57-60.
- [22] 金鑫,等.塑料工业,2025,53(4):161-168.  
JIN Xin, et al. China Plastics Industry, 2025, 53(4):161-168.
- [23] KARAGÖZ İ, et al. Polymer Bulletin, 2021, 78(5):2 627-2 644.
- [24] MARK L H, et al. Polymers, 2022, 14(14). DOI: 10.3390/polym14142958.
- [25] 孙俊威.原位微纤化聚丙烯复合泡沫材料的制备及力学强化研究[D].郑州:郑州大学,2023.

- SUN Junwei. Fabrication of in-situ microfibrillated polypropylene-based composite foams and research on mechanical strengthening and toughening[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.
- [26] WANG G L, et al. Chemical Engineering Journal, 2020, 390. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124520.
- [27] CREMA L, et al. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109:462–469.
- [28] LI S, et al. Journal of Cellular Plastics, 2021, 57(5):659–674.
- [29] CHEN H L, et al. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(8):991–994.
- [30] CAI B Z, et al. Macromolecular Research, 2022, 30(3):163–171.
- [31] 刘锋,等.实验室研究与探索, 2025(9):54–58.  
LIU Feng, et al. Research and Exploration in Laboratory, 2025(9): 54–58.
- [32] 赵建蕾. FDM与微孔发泡联合构筑轻量化复杂结构TPU构件及其力学性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
ZHAO Jianlei. Study on lightweight complex structure TPU components and its mechanical properties by FDM and microcellular foaming[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [33] LEE R E, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155:286–292.
- [34] 杨华光. 石墨烯镀层辅助快速热循环注射成型研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.  
YANG Huaguang. Research and applications of graphene-coating-assisted rapid heat cycle molding[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [35] 张晓芳,等.塑料科技, 2021, 49(1):10–13.  
ZHANG Xiaofang, et al. Plastics Science and Technology, 2021, 49(1):10–13.
- [36] 王凯. 纤维增强聚合物模内表面装饰微孔发泡复合成型中泡孔结构、纤维取向及力学性能[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2024.  
WANG Kai. The cell structure, fiber orientation and mechanical properties of in-mold decoration combined with fiber-reinforced polymer microcellular injection molding[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2024.
- [37] 任建平,等.工程塑料应用, 2021(3):71–76.  
REN Jianping, et al. Engineering Plastics Application, 2021(3): 71–76.
- [38] 董桂伟,等.高分子材料科学与工程, 2020, 36(1):89–98.  
DONG Guiwei, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(1):89–98.
- [39] 滑海涛. 化学物理复合发泡注射成型聚合物泡孔结构与力学性能及其优化研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2025.  
HUA Haitao. Study on cell structure and mechanical properties of polymer injection molded by chemical-physical composite foaming and its optimization[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2025.
- [40] ZHANG X L, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(40):17 885–17 893.
- [41] DAS A, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(2): 911–921.
- [42] BALDWIN D F, et al. Polymer Engineering & Science, 1996, 36 (11):1 446–1 453.
- [43] WANG G L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 119 (2):902–921.
- [44] 何利楠. 微孔发泡双侧面模内装饰复合成型中纤维增强聚合物产品熔接痕注塑性能的研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2025.  
HE Linan. Study on injection performance of fiber-reinforced polymer product weld line in microcellular foaming double-sided in-mold decoration composite molding[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2025.
- [45] MIHALIC M, et al. Journal of Composites Science, 2023, 7(4). DOI:10.3390/jcs7040144.
- [46] 朱大韶,等.中国塑料, 2025, 39(8):41–46.  
ZHU Dashao, et al. China Plastics, 2025, 39(8):41–46.
- [47] 张天锋. 微孔发泡模内表面装饰复合成型工艺泡孔形态结构演变规律的研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2020.  
ZHANG Tianfeng. Study on the evolution law of cell morphology and structure in the composite molding process of inner surface decoration of microcellular foaming die[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2020.
- [48] 王国栋,等.塑料科技, 2020, 48(8):48–52.  
WANG Guodong, et al. Plastics Science and Technology, 2020, 48 (8):48–52.
- [49] 迟佳瑞. 基于强化学习-迭代学习的注塑过程鲁棒控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.  
CHI Jiarui. Injection molding process robust control based on reinforcement learning-iterative learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.
- [50] 徐智伟,等.工程塑料应用, 2025, 53(9):126–134.  
XU Zhiwei, et al. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 126–134.
- [51] 张爱敏,等.高分子材料科学与工程, 2023, 39(9):62–70.  
ZHANG Aimin, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(9):62–70.
- [52] 韩翔宇,等.高分子材料科学与工程, 2021, 37(3):106–113.  
HAN Xiangyu, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(3):106–113.