http://pmse.scu.edu.cn

流体辅助注射成型及其衍生工艺

杨 帆[1]，匡唐清[2]，柳和生[2]，梁健康[2]，金廷翁[3]，彭 杰[3]
（1.华东交通大学 基础实验与工程实践中心，江西 南昌 330013；2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院，江西 南昌 330013；
3. 华东交通大学 材料科学与工程学院，江西 南昌 330013）

摘要：流体辅助注射成型工艺(FAIM)是一项利用压力流体完成熔体充填、保压来获得复杂中空制件的聚合物一次成型工艺。文中简要概述了近年来FAIM工艺的国内外研究进展，涵盖了气体辅助注射成型、水辅助注射成型等常规工艺，以及硅油辅助注射成型、液气辅助注射成型、液态二氧化碳辅助注射成型、流体驱动弹头辅助注射成型、流体辅助共注射成型、流体驱动弹头辅助共注射成型等衍生工艺。首先介绍了不同流体的穿透过程并进行了对比，进而阐述了不同工艺成型制件结晶形态及纤维取向的影响机制及差别，最后通过数值模拟进一步分析了不同工艺的成型机理差异。另外，在此基础上展望了FAIM工艺的未来研究方向。

关键词：流体辅助注射成型；弹头注射；超临界二氧化碳；数值模拟
中图分类号：TQ320.66+2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）05-0159-10

注射成型是当前应用最为普遍的聚合物成型工艺，但传统注射成型易出现收缩变形严重、尺寸稳定性差等问题，且不适用于加工复杂中空管棒类零件。因此，一些新的注射成型应运而生，如流体辅助注射成型(Fluid-assisted injection molding, FAIM)。FAIM工艺是利用压力流体辅助完成熔体充填、保压来获得复杂中空制件的一次成型加工工艺[1]。为高效高质地成型高性能复杂中空制件，FAIM工艺不断衍生，包括流体介质与成型方法，如Fig.1所示。其中，压力流体除了早期的气体、水之外，后续还采用硅油、可相变的液-气等流体介质；FAIM工艺与共注射工艺的结合衍生出可成型多层复合结构的流体辅助共注射工艺（Fluid-assisted co-injection molding, FACIM）；FAIM工艺和FACIM工艺引入弹头则分别

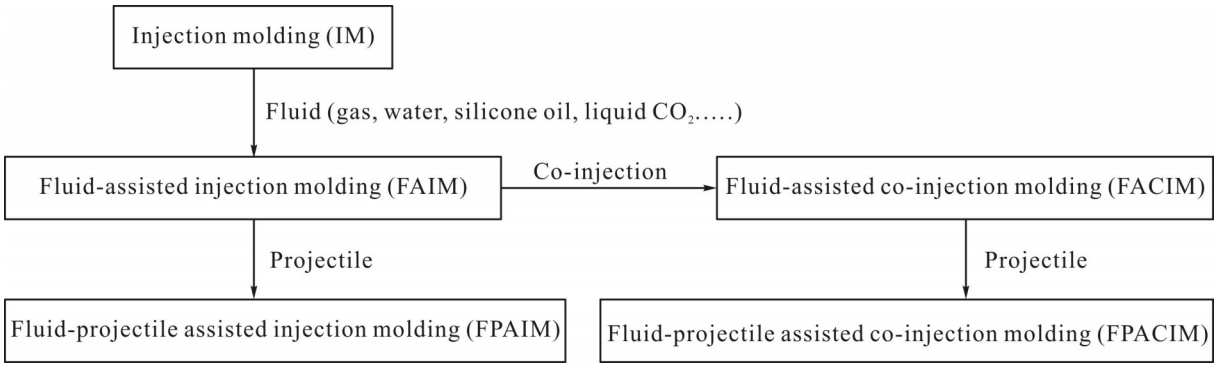


Fig. 1 Fluid-assisted injection molding and its derivatives

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0080
收稿日期：2024-04-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52273033，52163006）；江西省自然科学基金重点项目（20232ACB204004）；江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目（20223BBE51012）
通讯联系人：柳和生，主要从事交通工具轻量化研究，E-mail: hsliu@ecjtu.edu.cn；
匡唐清，主要从事聚合物成型工艺研究，E-mail: tkuang@ecjtu.edu.cn

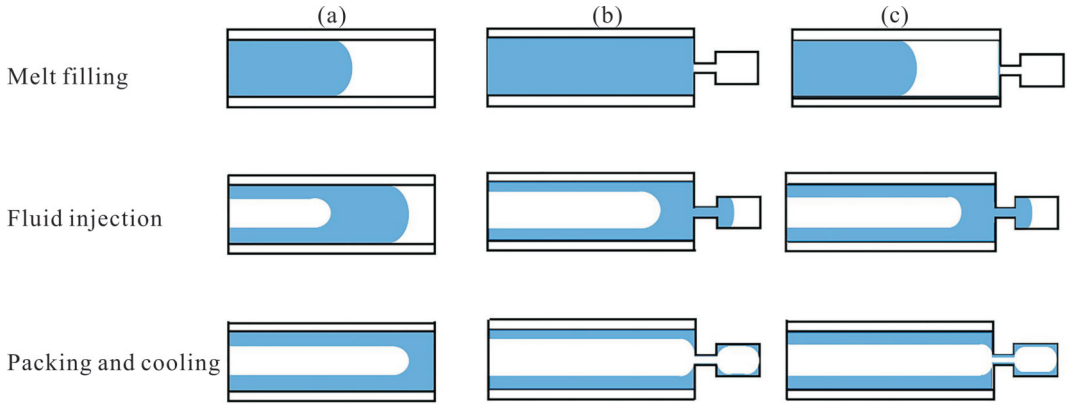


Fig. 2 Three methods with different injection practices: (a) short shot; (b) overflow; (c) overflow short-shot[2]

衍生出流体驱动弹头辅助注射工艺(Fluid-projectile assisted injection molding, FPAIM)和流体驱动弹头辅助共注射工艺(Fluid- projectile assisted co-injection molding, FPACIM)。本文对FAIM工艺的发展演化及研究现状进行了全面概述及分析,以期掌握该类工艺并明晰其研究、发展方向。

1 FAIM工艺方法

1.1 FAIM加工原理

FAIM工艺利用压力流体来驱动熔体完成充填及保压。压力流体可几乎无损地传递压力,因而能高效、低能耗地获得低残余应力、高表面质量的复杂中空管棒类制件。

根据压力流体注入前型腔中熔体的注入情况,FAIM工艺可分为短射法和溢流法。在短射法中,先精准控制熔体注射量填充部分型腔,再注射压力流体驱动熔体填满型腔,并持续保压到完全冷却,如Fig.2(a)所示。在溢流法中,熔体先完全填充整个型腔,再注入压力流体驱动熔体进入型腔末端预设的溢料腔,持续保压到完全冷却,如Fig.2(b)所示。相对溢流法,短射法能减少材料消耗、降低能耗,但表面会留下延迟注入流体产生的迟滞痕,且前后段壁厚不均,熔体注射量需精确调控;溢流法较易实施,表面质量好、壁厚均匀,但材料及能量消耗大。Zhang等综合短射法和溢流法开发了带溢流腔的短射法工艺,如Fig.2(c)所示。相比短射法,带溢流腔的短射法无需精确控制熔体注射量,改善了短射法熔体注射量过多时常出现的二次穿透缺陷;相比溢流法,减少了熔体注射量,降低了流体的穿透阻力,提高了纤维增强热塑性塑料的工艺成型性和制件质量[2]。

1.2 常规FAIM工艺

FAIM工艺中最常用的流体介质为氮气和水,相应的工艺分别称为气体辅助注射成型工艺(Gas-assisted injection molding, GAIM)和水辅助注射成型工艺(Water- assisted injection molding, WAIM)。GAIM将氮气作为压力流体注入到型腔内部推动熔体完成充填,工艺较为成熟,在塑料工业制品生产中广为应用。相比于传统注射成型,GAIM工艺表观质量及尺寸稳定性较好,但在高温高压环境中气体易溶解于熔体中,冷却降压时易过饱和析出发泡,使得制件内表面质量较差;单侧冷却使得厚壁制品的成型效率低;大尺寸中空件会因重力作用熔体下淌造成壁厚不均。德国Aachen大学研发的WAIM工艺能较好地克服GAIM工艺存在的以上缺陷。WAIM工艺通过注水喷嘴往熔体内部注入高压水得到中空制件[3]。相比于氮气,水具有不可压缩、高热传导率、高比热容等特点,提高了制件内部冷却过程的均匀性和高效性,使得WAIM工艺成型周期更短、内壁光亮不发泡、残余壁厚更薄。但该工艺适用材料较少,存在水泄漏造成废品率增加甚至模具损坏的风险,在制件内表面容易形成空隙缺陷;水的紊流也会导致残余壁厚不均等缺陷,降低制件的强度和刚度。

1.3 FAIM衍生工艺

常规的FAIM工艺实现了复杂中空制件的成型,但也存在固有缺陷,因此,从流体介质和工艺方法衍生出了系列新的FAIM工艺。

针对WAIM工艺残余壁厚不均匀等问题,Park等采用高黏度硅油替代水作为流体介质成型管件。

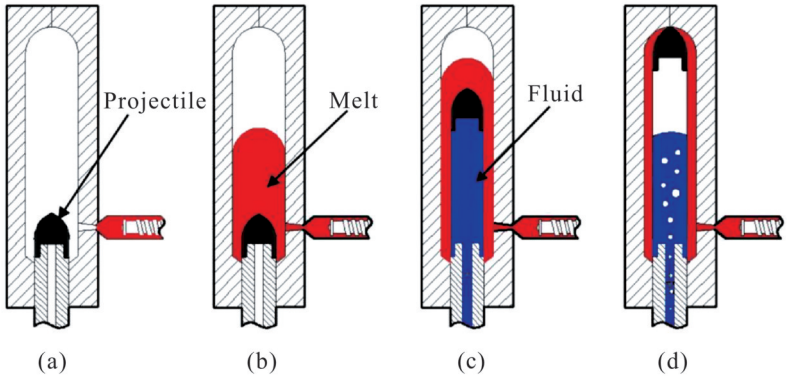


Fig. 3 Schematic process sequence of FPAIM: (a) inserting and fixing of the projectile; (b) melt injection; (c) fluid injection; (d) fluid extraction

硅油比水黏度高、沸点高、热容低、热导小,粘温特性独特且稳定。与WAIM工艺进行对比,发现硅油延迟了内壁凝固层的形成,减少了空隙缺陷和厚度方向上的体积收缩差[4];硅油辅助注射成型可获得更稳定的残余壁厚,对空心截面的同心度影响也大于水[5]。但是硅油价格较为昂贵,且粘度过高,会残留在制件内表面不易清除。

WAIM工艺和硅油辅助注射成型都存在流体介质的处理回收问题,Kim等提出的液气辅助注射成型工艺(Liquid gas assisted injection molding, LGAIM)可有效解决该问题。LGAIM是将沸点低于聚合物熔体温度的液体注入熔体中,液体在模具中蒸发变为气体并推动熔体得到中空制件的工艺。将以异丙醇(IPA)为介质的LGAIM工艺与GAIM工艺进行比较,发现前者使用的IPA不需要高压,且因涉及简单的液-气相变更易控制气体的压力及流量,形成更稳定的中空结构[6]。

2014年德国Linde公司与高压设备制造商Maximator合作提出了液态二氧化碳辅助注射成型工艺(Liquid carbon dioxide- assisted injection molding, LCO_2-AIM)[7]。LCO_2-AIM工艺与GAIM工艺相比,液态二氧化碳(Liquid carbon dioxide, LCO_2)的冷却能力大于氮气,可缩短成型周期;与WAIM工艺相比,卸压排气后无残留;与硅油及IPA相比,成本更低且无污染。但LCO_2-AIM工艺涉及CO_2复杂的相变过程,成型机理更为复杂;LCO_2在型腔内与熔体接触吸热后,在温度和压力同时高于其临界温度和临界压力时会进入超临界状态。超临界二氧化碳(Supercritical carbon dioxide, SC-CO_2)的密度类似于液体,易受压力和温度的影响,粘度与扩散性与气体相近,流动性和输运特性较好。

为克服GAIM和WAIM工艺残余壁厚不均匀及WAIM工艺适用材料少等问题,在FAIM工艺中引入弹头,衍生出流体驱动弹头辅助注射成型工艺,通过压力流体驱动固体弹头穿透熔体形成中空,如Fig.3所示[8]。FAIM工艺中压力流体直接在熔体中穿透形成中空;而FPAIM工艺中弹头在压力流体的驱动下穿透熔体形成中空,中空截面大小主要受弹头截面形状影响。FPAIM工艺在材料适用性、流体射嘴设计与制造、壁厚均匀性控制等方面相较于FAIM工艺具有显著的优势,且可定制中空截面大小及形状[9]。但因成型过程引入了弹头,需提前制造、放置弹头;局限于恒定截面的单通道管件成型。

柳和生等提出的液态二氧化碳驱动弹头辅助注射成型工艺(Liquid carbon dioxide-projectile assisted injection molding, LCO_2-PAIM)工艺,在保留LCO_2-AIM工艺优点的基础上利用弹头提高了工艺的材料适用性和壁厚的精准控制。

为综合多种材料的性能,成型能满足多方面使用需求的中空制件,FAIM工艺与共注射工艺(Co-injection molding, CIM)相结合衍生出了流体辅助共注射工艺[10]。在FACIM工艺中,先往型腔中顺序注入具有不同性能的熔体,再注入压力流体,可获得具有复合性能的多层包覆结构中空制件。将弹头引入FACIM中衍生出流体驱动弹头辅助共注射工艺。在这2种工艺中,皮层和芯层的层厚分布是重要性能指标,弹头的引入可对芯层的壁厚进行有效控制。

综上可知,传统FAIM工艺的衍生主要是采用具

有不同属性的流体介质或与其他成型工艺复合来实现的，可获得比传统FAIM工艺更高的成型效率、更可控的壁厚及更优异的综合使用性能。FAIM衍生工艺也因此变得更为复杂，成型过程中涉及流体介质的相变和复杂的多相分层流动。目前对上述几种FAIM衍生工艺的研究与应用还不充分，有些尚处于初步研究阶段。

2 研究现状分析

2.1 FAIM工艺流体穿透过程的研究

FAIM工艺中压力流体的属性、成型方法及工艺参数等对流体穿透过程及中空截面的形成有着直接的影响。

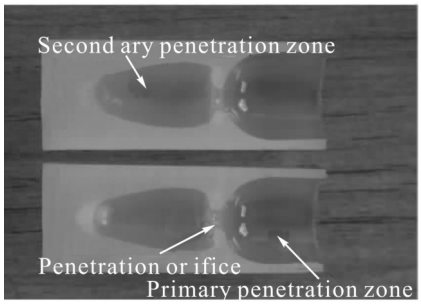


Fig. 4 Secondary penetration of water in WAIM

在非圆大截面弯管制件的FAIM工艺研究中发现，WAIM制件的穿透截面接近圆形，而GAIM制件穿透截面接近外部轮廓；在弯曲段，气体的穿透比水穿透能更快地转向阻力最小的方向，WAIM制件弯曲段的壁厚均匀性更优[11]。在圆直管件短射法FAIM工艺的研究中发现，因为水的冷却能力强，WAIM制件末端会出现较GAIM更为显著的二次穿透行为，如Fig.4所示；通过控制熔体注射量或添加溢料腔可显著改善因熔体冷却收缩引起的二次穿透，如Fig.5所示；提高注水压力或者保证注水时无空气混入可消除气泡缺陷[12,13]。笔者课题组在PP材料的溢流法LCO_2-AIM工艺实验研究中发现，LCO_2-AIM的穿透过程较为稳定，制件壁厚比GAIM和WAIM成型制件壁厚更薄更均匀，如Fig.6所示。

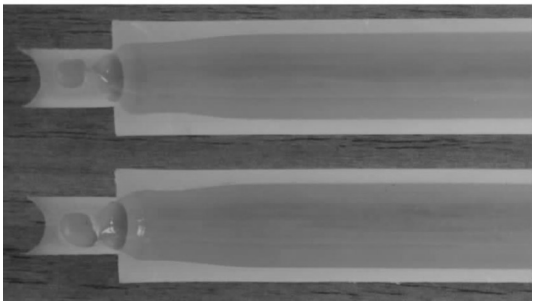
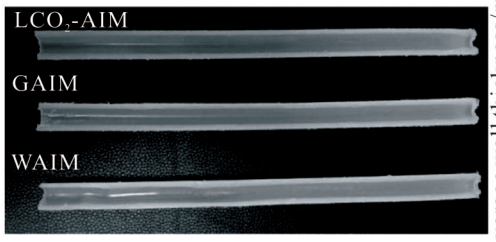


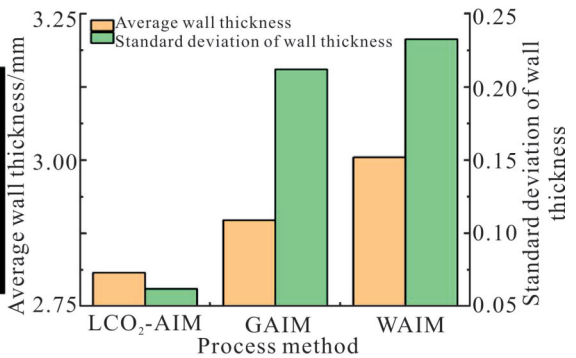
Fig. 5 Secondary penetration occurs at the affiliated structure locate at the end of specimen

不同的成型方法会导致工艺参数对残余壁厚的影响次序发生变化。在短纤维增强复合材料的短射法WAIM工艺研究中发现，影响水穿透长度的主要因素是熔体注射量，水的可穿透体积及穿透长度随熔体注射量递减；其次是注水延迟时间及注水压力[14]。而相同材料的溢流法WAIM工艺中，影响壁厚的主要因素是注水压力，注水压力增大可推动更多的熔体进入溢流腔；其次是注水延迟时间及注水温度[15]。

在FPAIM工艺中，弹头的材质会影响制件内表面质量，弹头形状和尺寸会影响制件的残余壁厚及其均匀性。在水驱动弹头辅助注射成型(Water-projectile-assisted injection molding ,WPAIM)实验中，选用不同材质的弹头成型PP管件，发现弹头材质和



(a) Longitudinal section diagram



(b) Average wall thickness and standard deviation of wall thickness

Fig. 6 Each process formed sample

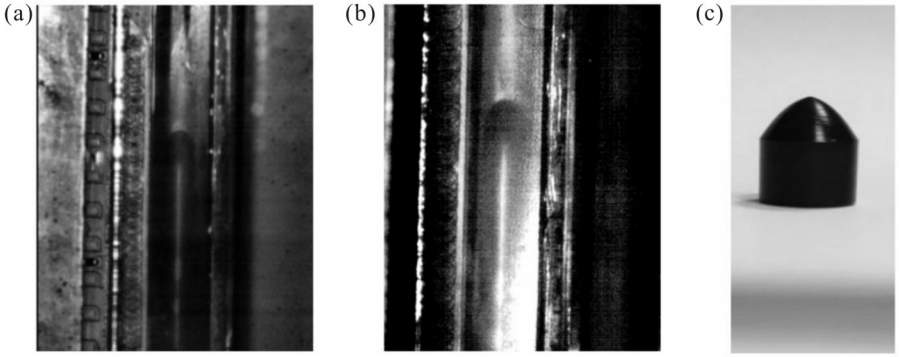


Fig. 7 Images of high-speed camera: (a) penetration process of LCO_2 in LCO_2-AIM; (b) penetration process of projectile in LCO_2-PAIM; (c) 10 mm diameter floating core

熔体材质相容性越好,穿透截面越大,残留壁厚越薄;弹头材质的热变形温度越大,残余壁厚越接近理想值;抛物线形弹头与熔体及水的穿透前沿较为相似,使得弹头穿透过程更平稳;适宜的弹头长度可避免出现翻转及在弯角处的偏转或卡滞现象,从而获得较好的壁厚均匀性,适宜的弹头截面直径可获得较好的内壁质量[16]。

制件的残余壁厚及内壁质量等主要受弹头的影响,但不可忽视模具设计、工艺参数等因素的影响。在弯管的WAIM和WPAIM工艺对比中,发现弹头穿透后水对弹头穿透边界熔体的推挤使得残余壁厚进一步减小,因此WPAIM的残余壁厚低于WAIM;弯管的弯曲段内外侧存在压力分差及速度差,使得弹头穿透运动时会向内侧偏移,弯曲内侧壁厚薄、外侧壁厚厚[17]。对WPAIM弯管的进一步研究发现,熔体温度、熔体注射压力、模具温度、注水延迟时间等参数对残余壁厚的影响显著,注水压力对其影响较小[18]。笔者课题组采用可视化模具及高速摄像机观察型腔内熔体和流体的流动过程以及弹头的运动过程,发现LCO_2-AIM工艺中流体穿透前沿与LCO_2-PAIM工艺中弹头穿透前沿相似,如Fig.7所示。且LCO_2-PAIM的弹头穿透前沿比LCO_2-AIM的更大,因此加入弹头后制件壁厚更薄。

在气辅共注射成型工艺(Gas-assisted co-injection molding ,GACIM)实验中发现,皮芯层材料相容性差易导致皮芯层分层剥离;皮芯层材料粘度比过高导致层厚分布不均,粘度比过低易发生芯层突破;皮芯层注射量影响芯层熔体的穿透长度[19]。在弯管的水辅共注射成型工艺(Water-assisted co-injection molding, WACIM)研究中发现,弯曲段总壁厚和FAIM弯管壁厚分布相似;内凹侧皮芯层的残余壁厚及均匀性随弯曲半径递增,外凸侧皮芯层的残余壁厚随弯曲角度递增;内凹/外凸侧皮芯层的残余厚度主要受工艺参数的影响[20]。

通过对上述不同工艺中残余壁厚等指标的分析,研究了FAIM工艺中流体的穿透过程及其影响机制。相比传统注射成型,FAIM工艺中流体的穿透过程不仅涉及熔体的工艺参数及模具设计,还涉及流体属性及注射压力等工艺参数,且弹头的引入使得穿透过程的影响机制更为复杂。

2.2　FAIM工艺结晶形态及纤维取向的研究

FAIM工艺中常用的微观性能指标包括结晶形态、纤维取向等,不同的成型工艺会影响成型制件的结晶形态、纤维取向。

结晶形态主要受冷却速率的影响,此外还受相对分子质量等因素影响。通过GAIM和传统注射成型制件的结晶形态对比,发现气体的穿透行为使得成型过程中的熔体剪切速率增强;GAIM的残余壁厚相对较小,冷却速率相对较大,可得到与传统球晶不一样的高度取向的串晶[21]。对不同相对分子质量的PA6材料成型的WAIM制件进行研究,发现低冷却速率下α晶型占主导地位,较高的冷却速率下γ晶型占主导地位;冷却速率使得相对分子质量对晶体结构的影响增大[22]。通过对FAIM制件内壁质量的比较研究发现,GAIM制件内壁形成球晶,且因内侧熔体冷却缓慢导致晶体变粗;WAIM制件因内侧熔体冷却速度较快,内壁形成细晶[23]。

在聚合物中添加定量的玻璃纤维有助于增强制

件的拉伸强度、抗蠕变性能及耐疲劳性能等。在短玻纤PP的WAIM方管研究中发现，剪切速率对纤维取向的影响较大，其次是冷却速率；在竖切面（对边中心点连线处切面）上沿流动方向的纤维取向度从表层到水道层逐渐减小；溢流法制件的纤维取向分布比短射法稳定[24]。在相同材料带溢流腔的短射法WAIM圆管的研究中发现，随着熔体注射量的增大，水的穿透阻力增大，残余壁厚减小，纤维沿流动方向的取向变高，纤维取向变化程度变低[25]。在不同流道截面型腔的水穿透行为研究中，发现残余壁厚越薄，沿熔体流动方向的纤维取向度越好；同一参数条件下，相比于方管和上圆下方管，圆管制件的残余壁厚最薄，且沿流动方向的纤维取向度最高[26]。

FPAIM制件纤维取向的影响机制与FAIM制件略有不同。在短玻纤增强PP的FAIM工艺研究中，对比了GAIM、气体驱动弹头辅助注射成型（Gas-projectile- assisted injection molding, GPAIM）、WAIM、WPAIM弯管制件的纤维取向分布，发现冷却能力越强，熔体与流体、熔体与模壁间的相对运动产生的剪切越强，因此，WAIM的纤维取向度高于GAIM，WPAIM的纤维取向度高于GPAIM；相同介质流体的情况下，因弹头的引入使得剪切作用更强，FPAIM的纤维取向度比FAIM的更高[27]。在长玻纤增强PP的FAIM工艺研究中，发现弹头加剧了玻纤断裂，因此，WPAIM工艺制件的壁厚最薄且壁厚均匀性最好，进一步证明了FPAIM玻纤取向程度好于FAIM，如Fig.8所示；高温熔体增加了气体分子在其中的溶解度，使得剪切流动加剧，因此，GAIM和GPAIM的平均玻纤断裂长度分别低于WAIM和WPAIM[28]。

FACIM制件同样与其他工艺纤维取向的影响机制存在差异。在不同质量分数的短玻纤增强PP为皮层、PP为芯层的WACIM工艺研究中，发现皮层熔体注射时近模壁层熔体迅速冷却导致取向度最低，芯层熔体注射时近界面层受到强烈剪切导致取向度最高；不同质量分数的玻纤取向特点与位置不同；制件的拉伸强度随玻纤质量分数的增大先增后减；WACIM和WAIM工艺剪切应力场存在较大差异，因此制件的玻纤取向分布及拉伸强度也存在差异[29]。通过调整玻纤含量和优化工艺参数，可改善WACIM制件的拉伸性能。

由此可见，制件的微观结构演变受成型工艺、熔体性能、玻纤含量等多方面因素的影响。研究结晶形态等微观性能指标，有利于实现对制件微观性能的有效调控。

2.3 FAIM工艺的数值模拟研究

数值模拟技术是研究成型机理的重要手段。传统注射成型常选用非牛顿流体非等温状态下广义的

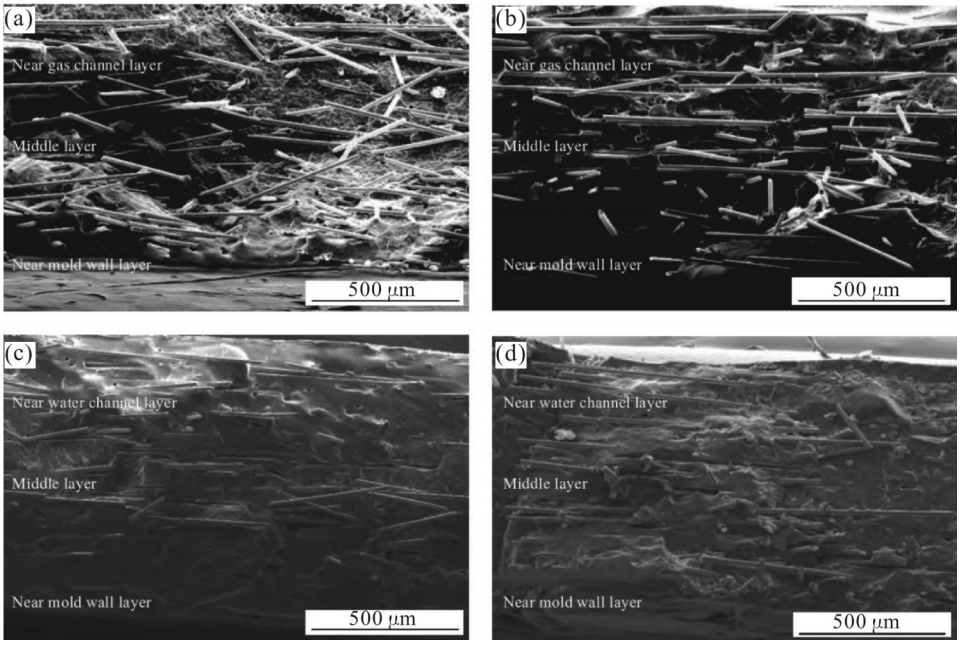


Fig. 8 SEM images of pipes molded by FAIM: (a) GAIM; (b) GPAIM; (c) WAIM; (d) WPAIM

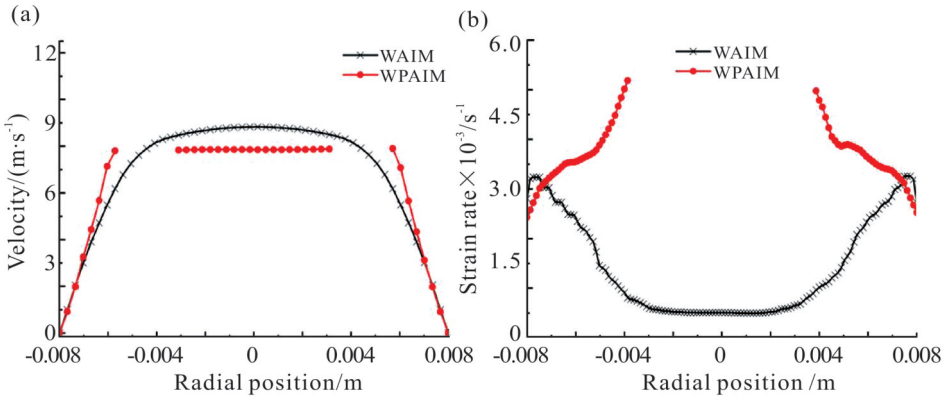


Fig. 9 Comparison of the velocity distribution and the strain rate distribution near the penetration front between WAIM and WPAIM
(a) Comparison of the velocity distribution in straight segments; (b) Comparison of the straight rate distribution in straight segments

Hele-Shaw模型，但Hele-Shaw模型适用于薄壁类零件，不能精确的描述FAIM工艺中流体、熔体的相互作用。考虑水的湍流特性，WAIM工艺采用雷诺平均的Navier-Stokes方程、Cross-WLF- Arrhenius模型对水穿透过程进行数值模拟，分析其拉伸场和剪切场，得到与实验结果较吻合的水穿透长度和中空率的模拟结果[30]。在FAIM工艺中，除了流体对熔体的轴向穿透，还存在流体对熔体的挤压，即径向穿透。在轴向穿透的基础上，结合对水的径向穿透行为的研究，建立描述径向穿透熔体流动数学模型，采用有限元法和有限差分法求解熔体流动问题和导热系数问题，可显著提高残余壁厚的预测精度[31]。

考虑到熔体的粘弹性，采用Giesekus粘弹本构方程进行数值求解，增加对衡量熔体粘弹性的第一法向应力差的分析研究，发现注水速度的增加可引起制件的残余壁厚和水的穿透长度的增加，该结果与Polynkin等相关实验所得结论一致[32]。在短玻纤PP圆管的成型模拟中，基于White-Metzner模型，采用有限体积法研究不同注水压力控制方式对制件的影响，发现折线式控制方式对偏心率的影响较大，阶跃式控制方式对残余壁厚产生的影响较大[33]。

在FPAIM工艺的数值模拟中还需考虑弹头的运动情况。在不考虑弹头与熔体之间热交换的前提下，设定弹头为刚体，选用动网格模拟弹头的复杂运动；采用VOF两相流模型模拟水与熔体的交互作用[34]。在WPAIM注水阶段弹头穿透行为的数值模拟中，与相同外径的WAIM制件进行了比较，发现WPAIM和WAIM的压力场非常相似，但在穿透前沿附近的速度场和应变率场存在较大差异，如Fig.9所示[35]。在Fig.9(a)中，WAIM穿透前沿的速度分布近似抛物线形，为压力流；WPAIM速度分布近似等腰梯形，表明弹头外侧的熔体流动为拖曳流；在Fig.9(b)中，WAIM的应变率峰值位于壁面附近，WPAIM的应变率峰值位于弹头表面附近。

在FACIM工艺的多相分层流动中，着重于层厚分布及其均匀性的模拟。在弯管的WACIM工艺研究中，忽略熔体的弹性行为，使用广义牛顿流体本构模型进行3D数值模拟，探讨了弯曲半径、弯曲角度及工艺参数对弯管残余壁厚的影响，发现芯层熔体和水的穿透始终靠近内凹侧[20]；在不同截面制件充填阶段的数值模拟中，探讨了截面型腔对温度场、穿透截面形状的影响与机理，模拟结果与实验一致[36]。此外，比较了WPACIM工艺和WACIM工艺注水阶段的穿透行为及残余壁厚的分布，发现弹头可改善湍流引起的壁厚波动，使得整体残余壁厚分布更均匀，皮芯层厚均更薄[37]。

纤维取向的实验研究通常依赖于电镜等仪器，操作繁琐且成本高昂。相比之下，采用数值模拟的方法可更便捷地预测和分析纤维取向在成型过程中的变化。在短射法WAIM工艺的研究中，结合White-Metzner黏弹性本构方程和iARD-RPR纤维取向模型，发现熔体注射量、注水延迟时间、注水压力对水的穿透长度及短玻纤取向的影响依次递减[38]；而带溢流腔的WAIM短射法中，影响次序为熔体注射量、注水压力、注水延迟时间[39]。在溢流法WAIM工艺的研究中，发现纤维取向和剪切速率分布与水

的流动状态相关；在层流状态下，沿流动方向的纤维取向随着注水压力的增加而增加，减少玻纤含量、注水延迟时间、熔体温度但增加注水压力可增加轴向的剪切速率和沿熔体厚度方向的剪切速率梯度；湍流状态下注水压力的效果相反[40]。

通过以上研究可知，采用数值模拟可观察到熔体在成型过程中的流动轨迹、速度分布及温度场的变化，发现不同的成型工艺在熔体流动行为、流体穿透过程及纤维取向等方面均存在显著差异。

3 结语

FAIM工艺可成型高性能、高质量的复杂中空制件，满足绿色发展及轻量化需求。本文综述了FAIM各种不同的工艺，从工艺特点到残余壁厚等宏观性能指标及纤维取向等微观性能指标的影响机制分析，并结合数值模拟，系统地介绍了各工艺的研究成果。从气体到超临界液体，从流体到固体弹头，针对现有工艺的缺点探索了新型FAIM工艺，发现LCO_2-PAIM工艺的壁厚均匀性高于其他FAIM工艺，但相关研究较少。后续将从LCO_2介质的相变、复杂的传质传热等多方面对LCO_2-PAIM工艺做全面深入的研究，进一步揭示LCO_2-PAIM工艺的影响规律和成型机理。

参考文献：

[1] Loren N S. Method and system for localized fluid- assisted injection molding and body formed thereby: EP, 0321117[P]. 1989-06-21.

[2] Zhang W, Kuang T Q, Liu H S, *et al.* Improved process moldability and part quality of short- glass – fiber- reinforced polypropylene via overflow short- shot water- assisted injection molding[J]. Journal of Polymer Engineering, 2022, 42: 362-373.

[3] Mikell K. Water injection molding makes hollow parts faster, lighter[J]. Plastics Technology, 2002, 48: 42-47.

[4] Pil H P, Soon B C, Bin S P, *et al*. A study on the void formation in residual wall thickness of fluid- assisted injection molding parts [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 2014: 1-6.

[5] Park H, Rhee B. Effects of the viscosity and thermal property of fluids on the residual wall thickness and concentricity of the hollow products in fluid- assisted injection molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 3255-3265.

[6] Hak D K, Hyun K A. Modeling of hollow formation and its dynamics in liquid gas assisted injection molding process[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2004, 16: 27-33.

[7] Linde L L C. Linde showcases solutions for injection molders and plastic manufacturers[EB/OL]. (2014-06-09) [2024-04-05].https://www.prnewswire.com/news- releases/linde- showcases- solutions-for-injection-molders- and-plastic-manufacturers-262353071.html.

[8] Isao I. Manufacture of hollow body: JP, 04208425[P]. 1992-7-30 .

[9] Kuang T Q, Liu T, Feng Q, *et al*. Fluid-powered projectile-assisted injection molding: principles and developments[J]. International Polymer Processing, 2020, 35: 2-15.

[10] Lang S, Parkinson M J. Two-component water assisted injection moulding[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2005, 34: 232-235.

[11] 陈英龙, 周华, 张增猛, 等. 水辅与气辅成型残余壁厚的对比研究[J]. 中国塑料, 2012, 26(6): 71-75.
Chen Y L, Zhou H, Zhang Z M, *et al*. Comparison research on residual wall thickness of water- assisted and gas- assisted injection molded parts[J]. China Plastics, 2012, 26(6): 71-75.

[12] 匡唐清, 余春丛, 邓洋, 等. 水辅助注塑气泡与二次穿透的分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(11): 112-116.
Kuang T Q, Yu C C, Deng Y. Analysis of air bubble and secondary penetration of water in water assisted injection molding process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(11): 112-116.

[13] Jackson J. Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 264: 24-40.

[14] Yu Z, Liu H S, Kuang T Q, *et al*. The study of short-shot water-assisted injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 1-12.

[15] 周海迎, 柳和生, 江青松, 等. 工艺参数对溢流法水辅注塑残余壁厚的影响[J]. 塑料, 2020, 49(3): 47-51.
Zhou H Y, Liu H S, Jiang Q S, *et al*. Effect of process parameters on residual wall thickness in overflow water- assisted injection molding[J]. Plastics, 2020, 49(3): 47-51.

[16] 王彦卿, 匡唐清, 赖家美, 等. 水驱动弹丸辅助注塑管件壁厚的弹丸影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(1): 60-66.
Wang Y Q, Kuang T Q, Lai J M, *et al*. Effect of projectile on residual wall thickness of water- projectile- assisted injection molded pipes[J]. China Plastics, 2021, 35(1): 60-66.

[17] 杨帆, 匡唐清, 刘文文, 等. 水驱动弹丸辅助注塑弯管的壁厚分布[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(11): 112-118.
Yang F, Kuang T Q, Liu W W, *et al*. Distribution of residual wall thickness of water- projectile- assisted injection molding pipes with curved sections[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(11): 112-118.

[18] Kuang T Q, Pan J Y, Feng Q, *et al.* Residual wall thickness of water- powered projectile- assisted injection molding pipes[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59: 295-303.

[19] 匡唐清, 柳和生, 周国发, 等. 气辅共注射成型工艺的实验研究[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(5): 22-25.
Kuang T Q, Liu H S, Zhou G F, *et al*. Experimental investigation on gas- assisted co- injection molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2006, 34(5): 22-25.

[20] Kuang T Q, Xu B P, Zhou G F, *et al*. Numerical simulation on residual thickness of pipes with curved sections in water-assisted co- injection molding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132: 42468.

[21] Zheng G H, Huang L, Yang W, *et al*. Hierarchical crystalline structure of HDPE molded by gas- assisted injection molding[J]. Polymer, 2007, 48:5486-5492.

[22] Huang H X, Wang B, Zhou W W. Polymorphism in polyamide 6 and polyamide 6/clay nanocomposites molded via water-assisted injection molding[J]. Composites Part B, 2012, 43: 972-977.

[23] Park H, Cha B S, Rhee B. Experimental and numerical investigation of the effect of process conditions on residual wall thickness and cooling and surface characteristics of water-assisted injection molded hollow products[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 1-11.

[24] 陈忠仕, 柳和生, 余忠, 等. 水辅注塑成型注射方法对方管纤维取向和收缩性的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(2): 112-119.
Chen Z S, Liu H S, Yu Z, *et al*. Influence of injection method of water- assisted injection molding on fiber orientation and shrinkage of square tubes[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(2): 112-119.

[25] Yu Z, Liu H S, Kuang T Q, *et al.* Numerical simulation during short- shot water- assisted injection molding based on the overflow cavity for short- glass fiber- reinforced polypropylene [J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 1-13.

[26] 黄益宾, 章凯, 余忠, 等. 不同流道截面型腔的水穿透行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(11): 82-92.
Huang Y B, Zhang K, Yu Z, *et al*. Water penetration behavior in different flow channel sections[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(11): 82-92.

[27] 钟罗浩, 匡唐清, 赖家美, 等. 成型工艺对短玻璃纤维增强聚丙烯注塑管件的壁厚分布及玻璃纤维取向的影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(5): 11-16.
Zhong L H, Kuang T Q, Lai J M, *et al*. Effect of molding process on wall residual thickness distribution and glass-fiber orientation of short- glass- fiber- reinforced polypropylene molded pipes[J]. China Plastics, 2021, 35(5): 11-16.

[28] 王佳敏, 匡唐清, 柳和生, 等. 长玻纤增强聚丙烯流体辅助注塑管件的工艺影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2436-2444.
Wang J M, Kuang T Q, Liu H S, *et al*. Process effects of long glass fiber reinforced polypropylene fluid assisted injection molding pipes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2436-2444.

[29] 匡唐清, 朱瑶瑶, 柳和生, 等. 玻纤质量分数对短玻纤增强聚丙烯水辅助共注塑管件的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4551-4560.
Kuang T Q, Zhu Y Y, Liu H S, *et al.* Effect of glass fiber mass fraction on the water assisted co-injection molding pipes of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4551-4560.

[30] 汪志泳, 黄汉雄, 汪斌. 水辅助注塑中高压水穿透过程的数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1170-1175.
Wang Z Y, Huang H X, Wang B. Numerical simulation of water penetration in water- assisted injection molding[J]. CIESC Journal, 2013, 64(4): 1170-1175.

[31] Zhang S, Cao W, Zheng G, *et al.* Model and numerical simulation for the second penetration in water-assisted injection molding[J]. International Polymer Processing, 2011, 26: 560-568.

[32] 章凯, 匡唐清, 柳和生, 等. 基于粘弹本构的水辅注塑充填过程的仿真分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(9): 93-96.
Zhang K, Kuang T Q, Liu H S, *et al.* Simulation and analysis of mold filling in water-assisted injection molding of viscoelastic polymers[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30 (9): 93-96.

[33] 上官元硕, 柳和生, 黄益宾, 等. 短玻纤聚丙烯水辅注塑中注水压力控制方式的数值模拟[J]. 中国塑料, 2019, 33(3): 62-67.
Shangguan Y S, Liu H S, Huang Y B, *et al*. Numerical simulation of water injection pressure control method in short - glass- fiber- reinforced polypropylene water- assisted injection molding[J]. China Plastics, 2019, 33(3): 62-67.

[34] 匡唐清, 潘俊宇, 刘文文, 等. 溢流法水驱动弹头辅助注塑管件残余壁厚的形成与工艺参数影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(4): 108-114.
Kuang T Q, Pan J Y, Liu W W, *et al.* Formation mechanism of residual wall thickness of overflow water- projectile- assisted injection molding pipe and the effects of processing parameters [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(4): 108-114.

[35] Kuang T Q, Feng Q, Liu T, *et al.* Numerical simulation on the penetration behavior of the projectile during the water injection stage of water- projectile- assisted injection molding process[J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 1-15.

[36] Kuang T Q, Xu P, Feng Q, *et al*. Water- assisted co- injection molding of non- circular tubes[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267: 042164.

[37] 匡唐清, 张庆伟, 柳和生, 等. 水驱动弹头辅助共注塑工艺相间穿透机理的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(4):

146-153.
Kuang T Q, Zhang Q W, Liu H S, *et al*. Numerical simulation of interphase penetration mechanism of water-projectile assisted co-injection molding process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(4): 146-153.

[38] Yu Z,Liu H S, Kuang T Q, *et al*. The study of short-shot water-assisted injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 1-12.

[39] Yu Z, Liu H S, Kuang T Q, *et al.* Numerical simulation during short- shot water- assisted injection molding based on the overflow cavity for short- glass fiber- reinforced polypropylene [J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020: 1-13.

[40] Huang D Y, Liu H S, Kuang T Q, *et al.* Fiber orientation analysis of overflow water- assisted injection molding with short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Advances in Polymer Technology, 2022, 2022: 1-13.

Fluid-Assisted Injection Molding and Its Derivatives

Fan Yang[1], Tangqing Kuang[2], Hesheng Liu[2], Jiankang Liang[2], Tingweng Jin[3], Jie Peng[3]

(*1. Fundamental Experiment and Engineering Practice Center, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechanical & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Materials Science & Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China*)

ABSTRACT: Fluid- assisted injection molding (FAIM) process is a polymer molding process that utilizes pressurized fluids to complete melt filling and pressure maintenance, enabling the one-time formation of complex hollow plastic parts. This article briefly summarized the research progress of FAIM processes both domestically and internationally in recent years, including conventional techniques such as gas- assisted injection molding (GAIM) and water-assisted injection molding (WAIM), as well as derivative processes like oil-assisted injection molding, liquid gas assisted injection molding, liquid carbon dioxide- assisted injection molding (LCO_2- AIM), fluid- projectile assisted injection molding (FPAIM), fluid- assisted co- injection molding (FACIM), and fluid-projectile assisted co- injection molding (FPACIM). First, the penetration processes of different fluids were introduced and compared. Subsequently, the mechanisms and differences in the crystallization morphology and fiber orientation of parts formed by various processes were elaborated. Finally, numerical simulation was used to further analyze the differences in molding mechanisms among different processes. Additionally, based on this overview, future research directions for the FAIM process were prospected.

Keywords: fluid- assisted injection molding; projectile assisted injection molding; supercritical carbon dioxide; numerical simulation