

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.011

不同流体介质对长玻纤增强聚丙烯流体驱动浮芯辅助注塑管件的影响

徐俊文¹, 匡唐清², 柳和生², 杨帆³, 黄友兵²

(1. 华东交通大学材料科学与工程学院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013;
3. 华东交通大学基础实验与工程实践中心, 南昌 330013)

摘要: 为探究不同流体介质对长玻纤增强聚丙烯(LGFR-PP)流体驱动浮芯辅助注塑(F-PAIM)成型过程的影响机制, 采用溢流法, 通过液态二氧化碳(LCO₂)驱动浮芯辅助注塑工艺(LCO₂-PAIM)、气体驱动浮芯辅助注塑工艺(G-PAIM)、水驱动浮芯辅助注塑工艺(W-PAIM)成型三种LGFR-PP管件, 研究各流体介质对管件玻纤取向、玻纤保留长度、管件壁厚及耐压性能的影响。结果表明, 三种流体介质成型管件的玻纤沿流动方向取向度越靠近模具越低, LCO₂在成型时会减弱玻纤沿流动方向的取向, W-PAIM管件的总体取向程度最高, LCO₂-PAIM管件的总体取向程度最低; 管件玻纤保留长度在各长度范围内分布不均, LCO₂-PAIM管件平均玻纤保留长度最长, G-PAIM管件平均玻纤保留长度最短; 三种流体介质沿流动方向残余壁厚逐渐变大, G-PAIM管件平均残余壁厚最大, W-PAIM管件平均残余壁厚最小; 三种流体介质成型管件中LCO₂-PAIM管件的耐压性能最好, W-PAIM管件的耐压性能最差。

关键词: 流体驱动浮芯辅助注塑; 长玻纤增强聚丙烯; 玻纤取向; 壁厚; 耐压性能

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0091-08

Effects of different fluid media on long glass fiber reinforced polypropylene pipe fittings with fluid-projectile-assisted injection molding

XU Junwen¹, KUANG Tangqing², LIU Hesheng², YANG Fan³, HUANG Youbing²

(1. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Center for Basic and Engineering Practice, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To explore the influence mechanism of different fluid media on the fluid-projectile-assisted injection molding (F-PAIM) process of long glass fiber reinforced polypropylene (LGFR-PP), using the overflow method, three LGFR-PP pipe fittings were fabricated through liquid carbon dioxide (LCO₂)-powered projectile-assisted injection molding (LCO₂-PAIM), gas-projectile-assisted injection molding (G-PAIM), and water-projectile-assisted injection molding (W-PAIM). The effects of each fluid medium on the fiber orientation, fiber retention length, pipe wall thickness, and pressure resistance performance of the fittings were studied. The results indicate that for the pipe fittings molded by the three fluid media, the degree of glass fiber orientation along the flow direction decreases as the position approaches the mould. LCO₂ weakens the glass fiber orientation along the flow direction during molding. The W-PAIM pipe fittings exhibit the highest overall orientation degree, while the LCO₂-PAIM pipe fittings show the lowest. The distribution of glass fiber retention lengths in the pipe fittings is non-uniform across different length ranges. The LCO₂-PAIM pipe fittings have the longest average glass fiber retention length, whereas the G-PAIM pipe fittings have the shortest. Along the flow direction, the residual wall thickness of the pipe fittings molded by the three fluid media gradually increases. The G-PAIM

基金项目: 国家自然科学基金项目(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)

通信作者: 匡唐清, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物成型工艺

收稿日期: 2026-02-28

引用格式: 徐俊文, 匡唐清, 柳和生, 等. 不同流体介质对长玻纤增强聚丙烯流体驱动浮芯辅助注塑管件的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 91-98.

XU Junwen, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Effects of different fluid media on long glass fiber reinforced polypropylene pipe fittings with fluid-projectile-assisted injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 91-98.

pipe fittings have the thickest average residual wall thickness, while the W-PAIM pipe fittings have the thinnest. Among the pipe fittings molded by the three fluid media, the LCO_2 -PAIM pipe fittings demonstrate the best pressure resistance, and the W-PAIM pipe fittings show the worst.

Keywords: fluid-projectile-assisted injection molding process; long glass fiber reinforced polypropylene; glass fiber orientation; wall thickness; pressure resistance

长玻纤增强聚丙烯(LGFR-PP)是一种基体为聚丙烯(PP)、增强相为长玻璃纤维的高性能热塑性复合材料^[1-3]。相较于短玻纤增强体系, LGFR-PP在力学性能、耐热性、尺寸稳定性及抗疲劳性能方面表现出显著优势,已成为汽车轻量化、结构件制造和工业部件中的关键材料^[4-5]。

传统的注射成型技术难以制造内部结构复杂的中空制品,而流体辅助注射成型(FAIM)技术,为复杂中空制件的生产提供了有效的解决方案。流体驱动浮芯辅助注塑工艺(F-PAIM)是在此基础上通过引入可移动浮芯而发展的一种新型成型方法,根据所采用流体介质的不同,该技术主要可分为三类:以液态二氧化碳(LCO_2)为驱动介质的 LCO_2 驱动浮芯辅助注塑(LCO_2 -PAIM)、以氮气为驱动介质的气体驱动浮芯辅助注塑(G-PAIM),以及以水为驱动介质的水驱动浮芯辅助注塑(W-PAIM)^[6-7]。玻纤增强体系中,不同流体介质在F-PAIM的穿透行为和制品质量等方面表现出显著差异。以水为驱动介质的研究中,王佳敏等^[8]通过实验探究工艺方法对LGFR-PP材料W-PAIM管件质量的影响;匡唐清团队^[9-10]通过模拟与实验探究了W-PAIM的穿透行为,结果表明浮芯穿透时的加速过程较为稳定,形成残余壁厚较均匀,并进一步明确工艺参数为外层为20%LGFR-PP、内层为PP的复合管件壁厚、内表面粗糙度、玻纤取向和耐压性能的影响机制;Zhang等^[11]则针对W-PAIM成型玻纤增强热塑性塑料管件,探明了成型过程中纤维取向的关键调控因素。针对以氮气为驱动介质的研究,Zhang等^[12]采用实验手段考察了G-PAIM过程中工艺参数对纤维取向的影响;Kuang等^[13]采用实验手段分析了成型方法与工艺参数对气体辅助注射成型管件壁厚均匀性的调控作用,完善了G-PAIM工艺的成型调控理论。作为一种极具潜力的新兴介质, LCO_2 因其独特的相变特性受到关注。金廷翁等^[14]采用了实验手段分析了工艺参数对液态二氧化碳辅助注塑(LCO_2 -AIM)管件的影响;杨帆等^[15]设计一套可通过高速摄像机采集型腔中熔体流动行为和流体穿透过程的可视

化模具,观测到了 LCO_2 在穿过程中相变为超临界二氧化碳(Sc-CO_2);彭杰等^[16]通过实验探究短玻纤质量分数对 LCO_2 -PAIM工艺成型管件质量的影响;邹泽莞等^[17]对 LCO_2 -AIM中 LCO_2 的穿透行为进行了数值模拟,结果表明在设定的工艺参数下 LCO_2 -AIM中 LCO_2 的穿过程中有少量的 CO_2 进入了超临界状态。

现有研究已分别针对W-PAIM、G-PAIM、 LCO_2 -PAIM的穿透行为、工艺调控与制品性能开展了大量卓有成效的工作,但多聚焦于单一介质体系的独立分析,缺乏在LGFR-PP复合材料体系、同等工艺边界下,不同流体介质成型效果的系统横向对比。基于此,本文通过实验研究,系统对比 N_2 、水及 LCO_2 作为流体介质对LGFR-PP复合材料F-PAIM管件成型质量的影响,分析管件壁厚均匀性、纤维取向与长度分布及耐压性能,为F-PAIM工艺中流体介质的优选与工艺调控提供实验依据与理论参考。

1 材料和方法

1.1 F-PAIM 工艺过程

F-PAIM依据熔体在流体介质注入前是否完全填充型腔,将其划分为短射法和溢流法两种工艺方法,为获得更均匀的管件残余壁厚^[10],本文使用溢流法进行管件成型,其工艺过程如图1所示:浮芯放置在流体注射单元喷嘴后合模;注入熔体至溢流口;经流体注射延迟时间后注射流体,浮芯在流体的驱动下穿透熔体,多余熔体进入溢料腔,保压时间结束泄压排尽流体。

1.2 主要原材料

LGFR-PP:GB301HP,长度约为12 mm,玻纤初始长度为12 mm,玻纤质量分数为10%,沙特沙伯基础公司。材料部分物理力学性能参数见表1,其中熔体流动速率测试标准为ASTM D1238-23a,测试条件为温度230 °C,负荷2.16 kg。

浮芯:本课题组采用机加工方式自行设计,材料为上海日晶公司生产的聚酰胺6(PA6),牌号B3GB1020,浮芯的结构如图2所示。

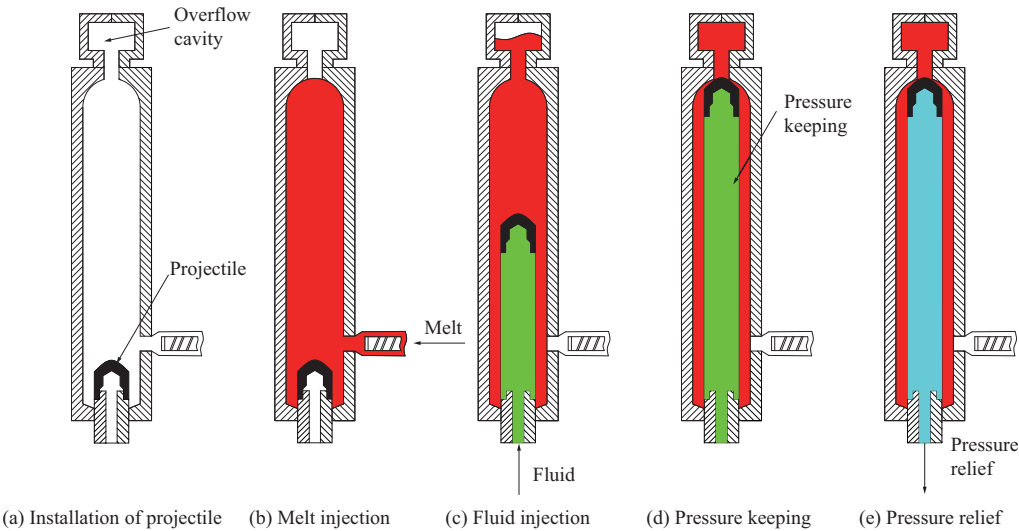


图1 F-PAIM工艺过程(溢流法)

Fig. 1 Schematic process sequence of F-PAIM (overflow method)

表1 LGFR-PP成型材料的部分物理力学性能参数

Tab. 1 Certain physical and mechanical property parameters of LGFR-PP molding materials

Parameters	Value
Tensile strength/MPa	66.4
Flexural modulus/MPa	3 790
Forming shrinkage rate/%	0.4~0.8
Melt flow rate/[g·(10 min) ⁻¹]	4
Distortion temperature/°C	149

1.3 成型实验平台与检测仪器

注塑机:MA1600M/380-E80,海天塑机集团有限公司;

模具:采用本课题组自行设计的直圆管模具,型腔直径16 mm,长245 mm,形状尺寸如图3所示;

空压机:V-0.6/8,浙江森隆机电有限公司;

模温机:BTM-09W,深圳博瑞克有限公司;

氮气气辅控制器:GPCFX-1,深圳亨容有限

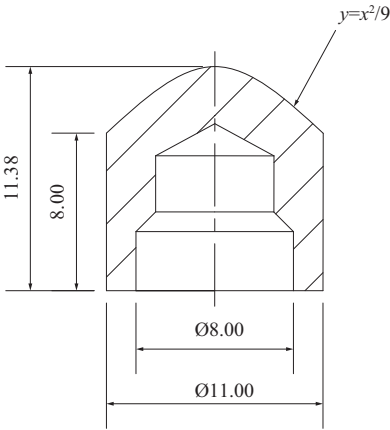


图2 浮芯结构示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of projectile structure (unit: mm)

公司;

二氧化碳气辅控制器:CPC-00,北京中拓模塑

科技有限公司;

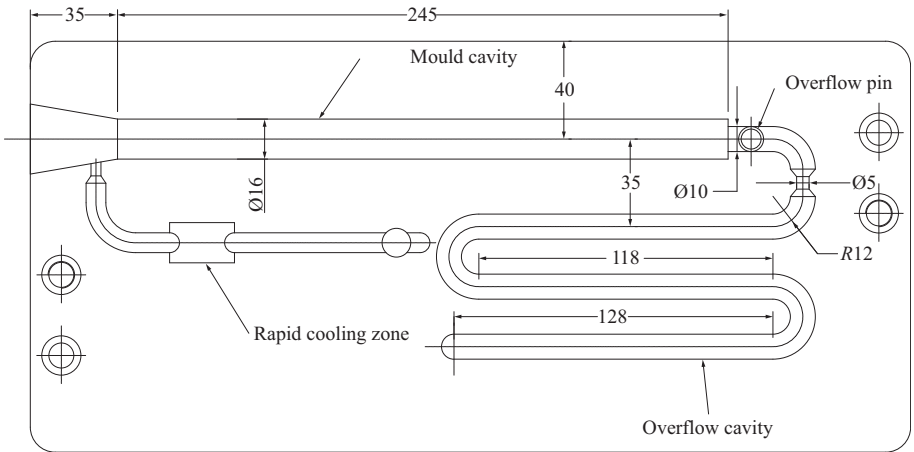


图3 模具结构示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of mould used in the experiments (unit: mm)

流体注射单元:本课题组自行设计,包括注气阀体和喷嘴;

扫描电子显微镜(SEM):SU8010,日本日立公司;

管材耐压试验机:MTSH-06,天津美特斯公司;

光学显微镜:BX53M,日本奥林巴斯公司。

1.4 LGFR-PP 材料的 F-PAIM 管件成型

三种流体介质的 F-PAIM 管件均通过溢流法成型,成型工艺参数见表 2。

表 2 F-PAIM 成型工艺参数

Process parameters	Value
Melt temperature/°C	260
Melt injection pressure/MPa	9
Fluid injection delay time/s	2
Fluid injection pressure/MPa	9
Pressure holding time/s	15
Mould temperature/°C	30

三种流体介质成型 F-PAIM 管件纵剖图如图 4 所示。

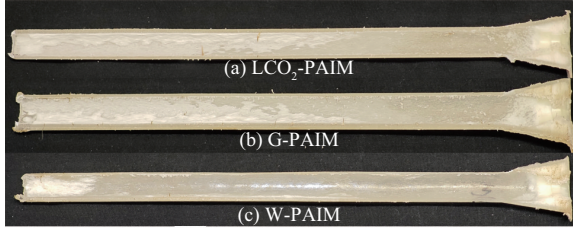


图 4 三类 F-PAIM 管件纵剖图
Fig. 4 Longitudinal section of F-PAIM pipe fittings

1.5 测试与表征

1.5.1 管件壁厚测试

每组实验选择三件管件样本进行壁厚测量,在熔体流动的方向上,于 P1 到 P6 这 6 个指定位置进行横向切割,如图 5a 所示,并在截断面每隔 90°设置一个壁厚测量位置,取 4 个位置(T1~T4)进行壁厚测量,如图 5b 所示,以总平均值作为管件的壁厚。

1.5.2 玻纤保留长度测量

玻纤保留长度是决定 LGFR-PP 管件性能的关键指标之一。在每个实验组成型管件中取 3 cm 管件试样,置于马弗炉中,600 °C 煅烧 2 h 使 PP 基体完全分解,得到纤维骨架,将部分玻纤分散于去离子水中,通过玻璃棒缓慢搅拌实现玻纤在水中的均匀分散,将所得悬浮液滴加于载玻片后静置至自然干燥,形成待观测样本,随后利用光学显微镜进行图像采集,利用 Image(Fiji)软件对图像中纤维的保留

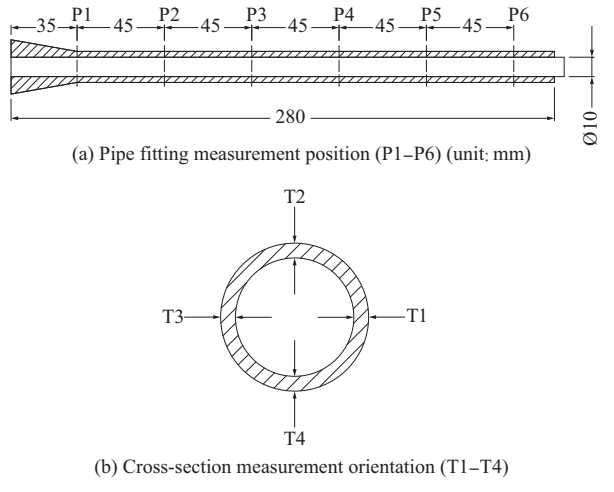


图 5 管件壁厚测量方案
Fig. 5 Wall thickness measurement of pipe fittings

长度进行统计分析,每组实验最少检测 300 根纤维。基于测量结果,将保留长度划分为若干区间,统计各区间内的纤维数量,并计算其相对于纤维总数的百分比,据此得到保留长度的分布规律。

1.5.3 SEM 试样制备与分析

在不同流体介质成型的 F-PAIM 管件 P4 位置截取 5 mm 圆环样本,置于液氮容器中进行 20 min 脆断处理,脆断面作为观测面;将观测面向上放置,在喷金仪中进行喷金处理,随后利用 SEM 进行形貌观察,试样的具体制备流程如图 6 所示。

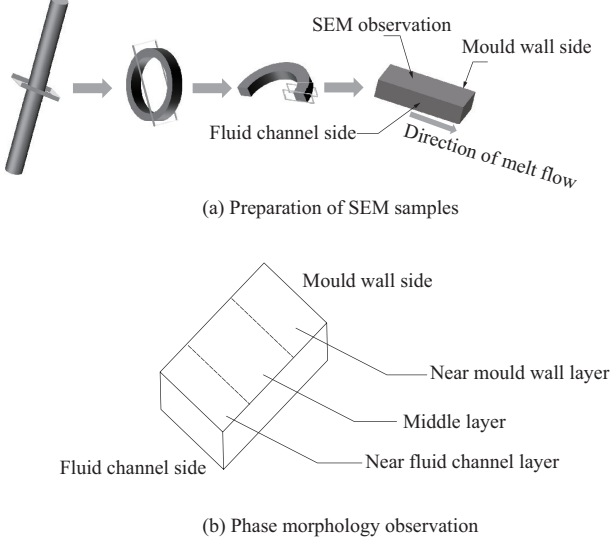


图 6 SEM 样品的制备与观察方法
Fig. 6 Preparation and observation methods of samples for SEM

1.5.4 耐压测试

耐压性能测试参考标准为 GB/T 15560-1995,在管件中段选用 150 mm 的直管作为测试对象。在管材耐压试验机中进行瞬时爆破试验时,连续均匀

且快速施加载荷,同时计时直至试样发生破裂,记录瞬时爆破的最大压力值。

2 结果与讨论

2.1 流体介质对F-PAIM管件玻纤取向的影响

流体介质在F-PAIM工艺中存在的穿透行为会对玻纤材料成型制件的玻纤取向产生影响,通过SEM对不同流体在其注射压力9 MPa下成型管件的P4位置进行观测,结果如图7、图8和图9所示。

由 LCO_2 -PAIM管件SEM图(图7)可知, LCO_2 在其注射压力为9 MPa时成型管件玻纤的分布不均匀,少部分沿着流动方向取向,大部分玻纤取向杂乱无章。在近流道层,存在着发泡现象(图7b),玻纤数量较少,一部分玻纤沿流动方向取向;中间层玻纤密度高于近流道层,多数玻纤高度取向于流动方向,少数呈一定角度;近模壁层玻纤数量较近流道

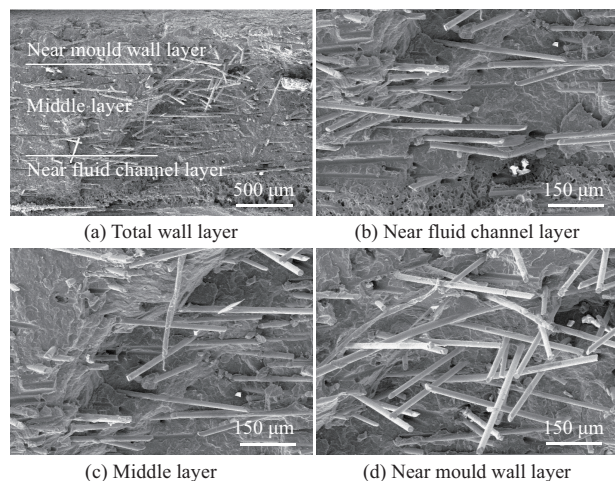


图7 LCO_2 -PAIM管件玻纤取向SEM观测图

Fig. 7 SEM images of LCO_2 -PAIM pipe fittings with glass fiber orientation observation

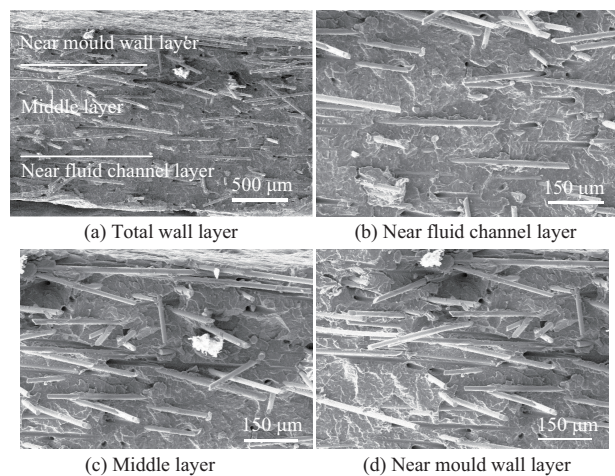


图8 G-PAIM管件玻纤取向SEM观测图

Fig. 8 SEM images of G-PAIM pipe fittings with glass fiber orientation observation

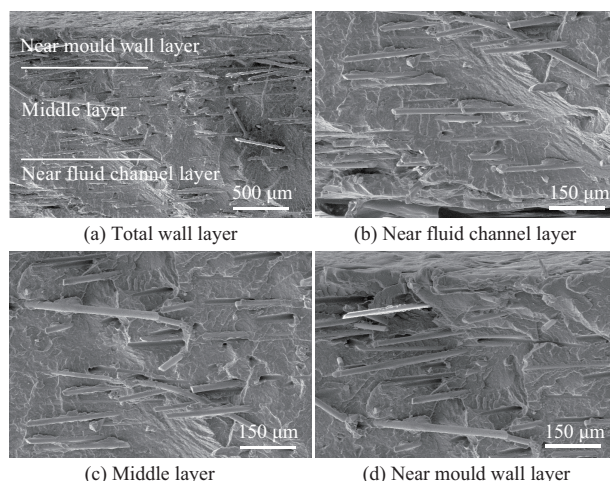


图9 W-PAIM管件玻纤取向SEM观测图

Fig. 9 SEM images of W-PAIM pipe fittings with glass fiber orientation observation

层和中间层更多,玻纤分布杂乱无章,出现玻纤团聚现象。图8是G-PAIM管件SEM图。在近流道层和中间层区域,大多数玻纤高度定向于流动方向,少数偏离该方向;而在近模壁层,沿熔体流动方向的取向程度显著低于前两层。由图9可知,W-PAIM管件在近流道层,玻纤沿熔体流动方向高度取向;在中间层,部分玻纤与熔体流动方向呈锐角取向分布;玻纤在近模壁层取向趋势与中间层相似。

由上述分析表明,不同流体介质制备的F-PAIM管件中,玻纤取向分布可划分为近模壁层、中间层和近流道层三个区域;沿熔体流动方向,管件不同区域的取向度呈现近流道层最高、中间层次之、近模壁层最低的分布规律。F-PAIM工艺中,熔体在注射过程中以喷泉流填充型腔,高温熔体与模具壁接触后迅速冷却,近模壁层的玻纤取向就此形成。而流体在驱动浮芯运动时,还会对近流道层熔体进行冷却,近流道层的玻纤经过浮芯穿透时的剪切以及流体的冷却,容易实现沿熔体流动方向的排列。中间层受流体和模具壁面冷却效果较弱,浮芯未直接接触导致剪切作用较弱,但温度较高熔体黏度低,玻纤在较弱的剪切作用下也可以获得一定沿熔体流动方向的取向,取向度较近流道层低。水的高表面张力和流动性特性使玻纤在熔体中分布更均匀,一定程度上减小了“浮纤”现象,水作为辅助流体具有不可压缩性、高黏度和高热导率的物理特性,这些特性共同作用,确保了熔体流动过程中的剪切应力分布均匀,从而实现了较高的玻纤取向度。 N_2 在熔体中形成气泡^[18]导致熔体流动不均匀,本质上是

气-液两相流对熔体流变特性的改变。气泡的存在使熔体流动路径发生改变,导致局部剪切力分布不均,进而使玻纤在流动过程中受到不均匀的剪切力,最终导致玻纤沿流动方向取向较差。在9 MPa注射压力下,部分 LCO_2 进入超临界状态,而 Sc-CO_2 具有类似气体的扩散性、低表面张力和高扩散系数特性^[19],导致熔体流动不均匀、玻纤分布不均,但由于压力较高,所以近流道层取向较好但出现发泡现象^[20-21],而玻纤中间层形成玻纤团聚,近模壁层的玻纤取向无序。W-PAIM管件的玻纤取向优于G-PAIM

和 LCO_2 -PAIM管件的玻纤取向, LCO_2 -PAIM管件玻纤取向最差,这表明 LCO_2 在9 MPa成型时相变成的 Sc-CO_2 会造成玻纤取向混乱。

2.2 流体介质对F-PAIM管件玻纤保留长度的影响

在LGFR-PP材料F-PAIM管件的制备过程中,流体介质对玻纤保留长度的分布具有关键影响,直接关系到管件的力学性能。在9 MPa流体注射压力下,对比三种流体介质成型的F-PAIM管件的玻纤保留长度,其结果见表3和图10。

表3 不同介质成型F-PAIM管件玻纤保留长度分布

Tab. 3 Fiber retention length distribution of F-PAIM pipe fittings shaped by three fluid media

Fluid medium	Proportion of glass fiber length range/%						
	0~<1 mm	1~<1.5 mm	1.5~<2 mm	2~<2.5 mm	2.5~<3 mm	3~<3.5 mm	≥3.5 mm
LCO_2	18.28	44.25	22.32	7.2	6.3	1.35	0.3
N_2	52.18	24.4	12.38	3.02	5.32	2.2	0.5
H_2O	43.65	21.83	17.39	13.37	2.18	1.38	0.2

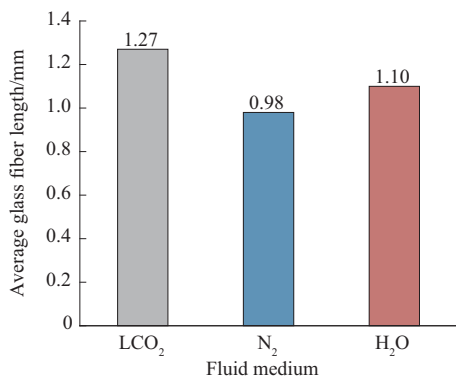


图10 流体介质对F-PAIM管件平均玻纤保留长度的影响

Fig. 10 Effect of fluid media on average glass fiber retention length of F-PAIM pipe fittings

由表3可知, LCO_2 -PAIM管件玻纤保留长度小于2 mm的占比84.85%;G-PAIM管件的玻纤保留长度小于2 mm的占比为88.96%,其中有52.18%的玻纤保留长度小于1 mm;W-PAIM的管件玻纤保留长度小于2 mm的占比为82.87%,其中65.48%的玻纤保留长度小于1.5 mm。

结合平均玻纤保留长度(图10),三种流体介质成型的管件的平均玻纤保留长度排序为: LCO_2 -PAIM>W-PAIM>G-PAIM。分析原因为水作为不可压缩流体,浮芯穿透时速度较快^[8],高剪切速率使得玻纤断裂严重,因此平均玻纤保留长度只有1.1 mm; N_2 作为可压缩流体,在成形过程中浮芯剪切速率比水慢,但是 N_2 会在近流道层引起发泡,气泡和浮芯剪切的综合作用会造成玻纤断裂严重,故而玻纤保留长度最短,平均玻纤保留长度在9 MPa流体

注射压力下仅为0.98 mm; LCO_2 在9 MPa流体注射压力下吸热到达超临界相变条件,部分 LCO_2 相变为 Sc-CO_2 ,流体黏度下降^[19],对流动侧熔体剪切变弱,因此成型时玻纤保留长度较长。

2.3 流体介质对F-PAIM管件残余壁厚的影响

三种流体介质成型的F-PAIM管件沿流动方向的残余壁厚分布如图11a所示。三种流体介质的F-PAIM管件残余壁厚沿熔体流动方向呈现逐渐增大的趋势。 LCO_2 -PAIM管件的残余壁厚在1.47~1.86 mm范围内波动,波动幅度最大,残余壁厚在管件中段(P3-P4)陡增。G-PAIM管件的残余壁厚在1.65~1.98 mm范围内波动。W-PAIM管件的残余壁厚在1.48~1.72 mm范围内波动,波动幅度最小。

管件的残余壁厚沿熔体流动方向都逐渐增大的原因是:在经延迟时间后注入流体介质驱动浮芯穿透,在穿透过程中浮芯运动引起的剪切流在近流道侧形成拖拽的同时,流体对近流道侧的熔体冷却,这会加大浮芯穿透截面,使得残余壁厚偏小,随着穿透时间的增加,后段熔体受模壁和流体冷却后黏度增大,浮芯穿透后段运动受阻,残余壁厚随之增加。 LCO_2 -PAIM管件沿流动方向残余壁厚在穿透前段(P1-P3)的变化趋势接近W-PAIM管件,在P4处残余壁厚陡增,而在穿透后段(P4-P6)则接近于G-PAIM管件。这是由于部分 LCO_2 在穿透过程中受热相变为 Sc-CO_2 ,获得更好的冷却效果,使得前段的穿透行为与水相近,随着穿透时间的增加, Sc-CO_2 的温度上升,其物理性质更接近气态 CO_2 ^[19],

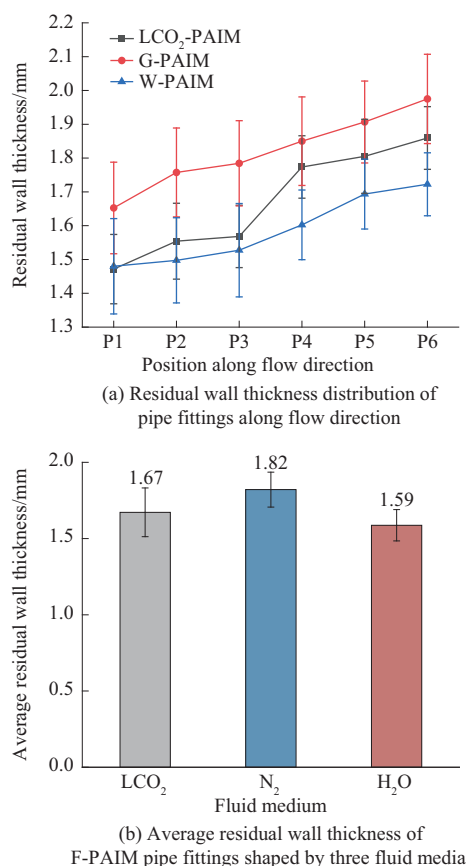


图 11 流体介质对 F-PAIM 管件残余壁厚的影响

Fig. 11 Effect of fluid media on residual wall thickness of F-PAIM pipe fittings

使得后段的穿透行为与 N₂ 相近。

各流体介质成型的 F-PAIM 管件的平均残余壁厚如图 11b 所示, G-PAIM 管件的残余壁厚最大, W-PAIM 管件的残余壁厚最小。在 W-PAIM 工艺中, 当浮芯穿过熔体后, 高压水流会充满新形成的中空腔道, 形成了一个极其高效的“内冷却”通道。这种来自内部的快速冷却, 与来自外部的模具冷却共同作用, 形成“双面冷却”效应。这极大地加速了整个制品的凝固速率, 显著缩短了从熔融态到固态所需的总时间, 凝固过程的急剧加速意味着在浮芯通过后, 残余的熔体没有足够的时间因内应力松弛或重力作用而发生形变或重新分布, 从而有利于形成更小、更稳定的壁厚。G-PAIM 成型工艺中的 N₂ 由于比热容低得多, 其带走热量的能力非常有限。N₂ 在穿过模具后, 自身温度会迅速升高, 与制品内壁的温差减小, 导致换热效率低下, 制品的冷却过程几乎完全依赖于从外侧模具壁进行的单面冷却。缓慢的冷却速率给了熔体更长的松弛时间, 靠近内壁的熔体有更多机会进行流动, 这往往导致最终凝固

时形成一个更厚的残余壁层; 当 LCO₂ 注入并开始驱动浮芯时, 其在浮芯后方的 LCO₂ 相变为 Sc-CO₂, 这会瞬间从浮芯本身和周围的熔体中吸走大量热量。这种冷却效应虽然可能不如 W-PAIM 中水流持续稳定地冷却, 但在浮芯穿透的瞬间, 其冷却强度非常高。这种强冷有助于在浮芯通过时快速稳定内壁, 从而形成比 G-PAIM 更小的壁厚。

2.4 流体介质对 F-PAIM 管件耐压性能的影响

三种流体介质成型的 F-PAIM 管件耐压性能如图 12 所示, LCO₂-PAIM 管件耐压性能最优, W-PAIM 管件最差。管件的耐压性能反映了管件的周向抗拉强度, 其受残余壁厚大小、玻纤取向程度及玻纤保留长度影响。由图 7、图 8、图 9 可知, LCO₂-PAIM 管件成型时部分 LCO₂ 在成型过程中相变成 Sc-CO₂, 弱化了玻纤沿熔体轴向流动方向的取向程度, 同时使玻纤在中间层富集形成紧密的三维交联结构, 提升了管件的环向强度; G-PAIM 管件玻纤轴向取向程度高于 LCO₂-PAIM 管件, W-PAIM 管件玻纤沿轴向的取向程度最高, 二者的高轴向玻纤取向会大幅降低管件环向承载能力, 对耐压性能存在不利影响。由表 3、图 10 可知, 不同介质的穿透剪切作用直接影响玻纤保留长度, G-PAIM 管件的平均玻纤保留长度较 LCO₂-PAIM 管件缩短 22.8%。从长玻纤增强机制来看, 更长的玻纤可形成更稳定的三维搭接网络, 理论上可提升管件力学性能, 但 G-PAIM 管件耐压性能仅较 LCO₂-PAIM 下降 2.9%, 说明玻纤保留长度对耐压性能的影响权重显著低于玻纤取向与残余壁厚。由图 11 和图 12 可知, W-PAIM 管件残余壁厚较 LCO₂-PAIM 管件低 4.8%, 对应耐压性能大幅下降 23.6%; G-PAIM 管件的玻纤轴向取向程度与 W-PAIM 接近, 但残余壁厚较 W-

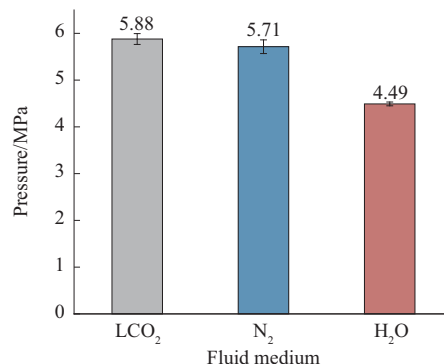


图 12 流体介质对 F-PAIM 管件耐压性能的影响

Fig. 12 Effect of fluid media on pressure resistance performance of F-PAIM pipe fittings

PAIM高14.5%,对应耐压性能提升27.2%,证实残余壁厚是决定管件耐压性能的核心宏观因素。在LGFR-PP体系F-PAIM管件的耐压性能调控中,管件残余壁厚与玻纤轴向取向为两大核心主控因素,玻纤保留长度为次要影响因素;LCO₂-PAIM管件兼具均匀适中的残余壁厚、弱化的轴向玻纤取向与紧密的三维交联网络结构,因此表现出最优的耐压性能。

3 结论

(1)不同流体介质制备的F-PAIM管件中,玻纤取向分布可划分为近流道层、中间层和近模壁层三个区域;沿流动方向,玻纤取向度呈现近流道层最强、中间层次之、近模壁层最弱的趋势。LCO₂在成型时会减弱玻纤沿流动方向的取向,W-PAIM管件的总体取向程度最高,LCO₂-PAIM管件的总体取向程度最低。

(2)管件玻纤保留长度在各长度区间内分布不均;LCO₂有利于保持较长的玻纤长度,N₂在成型时生成气泡会减小玻纤长度,平均玻纤保留长度排序为LCO₂-PAIM>W-PAIM>G-PAIM。

(3)三种流体介质成型管件沿流动方向的残余壁厚逐渐增大,LCO₂-PAIM管件的壁厚波动最大,G-PAIM管件的平均残余壁厚最大,W-PAIM管件的平均残余壁厚最小。

(4)三种流体介质成型管件的耐压性能排序为LCO₂-PAIM>G-PAIM>W-PAIM,管件的耐压性能受残余壁厚和玻纤取向影响较大。

参考文献

- [1] 侯旭秦,李桂丽,陈兴元,等.长玻纤增强塑料注射成型纤维断裂概述[J].高分子材料科学与工程,2019,35(5):179-183.
HOU Xuqin, LI Guili, CHEN Xingyuan, et al. Overview of the fracture of long glass fiber reinforced thermoplastics during injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5):179-183.
- [2] 孔小寅.长玻纤增强聚丙烯复合材料的研究进展[J].造纸装备及材料,2020,49(3):52,72.
KONG Xiaoyin. Research progress of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2020, 49(3):52,72.
- [3] BADIOLA J H, PINEDA D, LEKUBE B M, et al. Relation between injection molding conditions, fiber length and mechanical properties for highly reinforced long fiber polypropylene[J]. Polymer Composites, 2023, 44(4):2 153-2 160.
- [4] DU B, LI Z X, BAI H M, et al. Mechanical property of long glass fiber reinforced polypropylene composite:From material to car seat frame and bumper beam[J]. Polymers, 2022, 14(9). DOI: 10.3390/polym14091814.
- [5] 仇永宏.长玻纤增强聚丙烯复合材料结构与性能[J].石化技术, 2022, 29(6):1-3.
QIU Yonghong. Structure and properties of long glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(6):1-3.
- [6] 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. DOI: 10.1155/2020/6861216.
- [7] KUANG T Q, LIU T, FENG Q, et al. Fluid-powered projectile-assisted injection molding:Principles and developments[J]. International Polymer Processing, 2020, 35(1):2-15.
- [8] 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):2 436-2 444.
WANG Jiamin, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Process effects of long glass fiber reinforced polypropylene fluid assisted injection molding pipes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5):2 436-2 444.
- [9] 匡唐清,刘家豪,朱瑶瑶,等.水驱动弹头辅助注塑弹头的穿透行为[J].高分子材料科学与工程,2024,40(4):93-103.
KUANG Tangqing, LIU Jiahao, ZHU Yaoyao, et al. Projectile penetration behavior of water-projectile-assisted injection molding [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(4):93-103.
- [10] KUANG T Q, KONG C X, LIU H S, et al. Research on the quality of composite pipe components in fluid-powered projectile-assisted injection molding[J]. Polymers, 2025, 17(4). DOI: 10.3390/polym17040489.
- [11] ZHANG W, WANG M Z, KUANG T Q, et al. The investigation of overflow water-powered projectile-assisted injection molded short-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. Processes, 2024, 12 (11). DOI:10.3390/pr12112333.
- [12] ZHANG W, WU J W, KUANG T Q, et al. Flow-induced fiber orientation in gas-powered projectile-assisted injection molded parts[J]. e-Polymers, 2025, 25(1). DOI:10.1515/epoly-2024-0093.
- [13] KUANG T Q, WANG J M, LIU H S, et al. Effects of processing method and parameters on the wall thickness of gas-projectile-assisted injection molding pipes[J]. Polymers, 2023, 15(9). DOI: 10.3390/polym15091985.
- [14] 金廷翁,匡唐清,柳和生,等.液态二氧化碳辅助注射管件壁厚的工艺影响[J].高分子材料科学与工程,2025,41(1):91-98.
JIN Tingweng, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Process impact of wall thickness of liquid carbon dioxide-assisted injection molding pipes[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(1):91-98.
- [15] 杨帆,柳和生,匡唐清,等.基于可视化的液态二氧化碳辅助注塑工艺穿透过程的研究[J].材料导报,2025,39(21):39-45.