

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.016

浮芯材料对水驱动浮芯辅助成型制品性能的影响

张伟¹, 王凡¹, 刘邦雄², 王翰霖¹, 柳和生¹, 匡唐清¹, 江青松³

[1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013; 2. 景德镇学院机械电子工程学院, 江西景德镇 333000;
3. 东华理工大学电子与电气工程学院(智能制造学院), 南昌 330013]

摘要: 为系统研究浮芯材质对水驱动浮芯辅助注塑(WFCAIM)制品性能的影响, 依托课题组自主构建的WFCAIM实验平台, 系统考察了尼龙6(PA6)、碳纤维增强丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物及丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)三种物理性质不同的塑料浮芯对短玻纤增强聚丙烯 WFCAIM 制品性能的作用。研究结果表明, 成型制品的壁厚大小及其均匀性与浮芯材料的维卡软化温度(VST)存在显著关联, 浮芯材料的 VST 越低, 成型制品的壁厚越小且越均匀。制品残余壁厚上的纤维取向呈现出典型的“壳层无序取向-芯层过渡取向-水道层高度取向”多层次分布特点, 浮芯材料对这种多层次分布虽无影响, 但对沿轴向和径向各位置处的纤维取向影响显著, 且浮芯材料的 VST 越低, 在相同成型条件下成型制品沿轴向和径向同一位置处的纤维取向度越高。此外, 还发现浮芯材料的 VST 越低, 成型制品的拉伸性能越优, 采用 VST 仅为 94 °C 的 ABS 浮芯成型的制品比采用 VST 为 170 °C 的 PA6 浮芯成型的制品的拉伸强度提高了 17.0%。研究结果揭示了浮芯材料对制品性能的影响机制, 可为短纤维增强聚合物 WFCAIM 工艺中浮芯材料的选择提供理论基础与实验支撑。

关键词: 水驱动浮芯辅助注塑; 浮芯材料; 残余壁厚; 纤维取向; 拉伸强度

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0140-08

Influence of floating core materials on properties of injection molded parts by water-driven floating core assisted molding

ZHANG Wei¹, WANG Fan¹, LIU Bangxiong², WANG Hanlin¹, LIU Hesheng¹, KUANG Tangqing¹, JIANG Qingsong³

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen University, Jingdezhen 333000, China;

3. School of Electronics and Electrical Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: To systematically investigate the influence of floating core material on the performance of parts by water-driven floating core-assisted injection molding (WFCAIM), the lab-developed WFCAIM experimental platform was used to comprehensively evaluate how three plastic floating cores with distinct physical properties, namely nylon 6 (PA6), carbon fiber-reinforced acrylonitrile-styrene-acrylate copolymer and acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS), affected the performance of WFCAIM parts of short glass fiber-reinforced polypropylene. The results show that there is a significant correlation between the wall thickness and its uniformity of the molded products and the Vickers softening point temperature (VST) of the floating core materials. The lower the VST of the floating core, the smaller and more uniform the wall thickness of the molded products. The fiber orientation on the residual wall thickness of the product exhibits a typical multi-layer distribution characteristic of "disordered orientation in the shell layer-transitional orientation in the core layer-highly oriented orientation in the water channel layer". Although the floating core material has no effect on this multi-layer distribution, it significantly affects the fiber orientation at various positions along the axial and radial directions. The lower the VST of the floating core, the higher the orientation degree of fibers at the same positions along the axial and radial directions under the same process conditions. Besides, it is also found that the lower the VST of the floating core material, the better the tensile properties of the molded products. Compared with products molded by PA6 floating core with a VST

基金项目: 国家自然科学基金项目(52303038)

通信作者: 张伟, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为聚合物成型加工工艺

收稿日期: 2026-04-15

引用格式: 张伟, 王凡, 刘邦雄, 等. 浮芯材料对水驱动浮芯辅助成型制品性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 140-147.

ZHANG Wei, WANG Fan, LIU Bangxiong, et al. Influence of floating core materials on properties of injection molded parts by water-driven floating core assisted molding [J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 140-147.

of 170 °C, the tensile properties of products molded by ABS floating core with a VST of only 94 °C are improved by 17.0%. The findings reveal the influence mechanism of floating core materials on product performance and can provide a theoretical basis and experimental support for the selection of floating core materials in WFCAIM process for short fiber-reinforced polymers.

Keywords: water-driven floating core-assisted injection molding; floating core material; residual wall thickness; fiber orientation; tensile strength

水驱动浮芯辅助注射成型(WFCAIM)技术是近年来基于水辅注射成型(WAIM)技术的基础上发展而来的一种生产复杂中空制品的先进聚合物成型新技术,其成型过程由图1b中所示的四个部分组成,即:合模前将浮芯置于注水喷嘴前,合模后向型腔内注射聚合物熔体,随后高压水注入型腔后推动浮芯向前穿透熔体形成中空截面,最后继续注射高压水进行冷却保压直到熔体完全固化后停止注射并排出高压水,完成复杂形状的高性能中空塑料制品一次成型^[1-3]。相较于WAIM,两种技术的最大差异在于WFCAIM额外增加了一个固体浮芯,如图1所示;而浮芯的引入使WFCAIM的优势更为凸显,如:成型制品的尺寸精度更高、制品的质量更轻、制品的残余壁厚更均匀、材料使用性更广等^[4-5]。

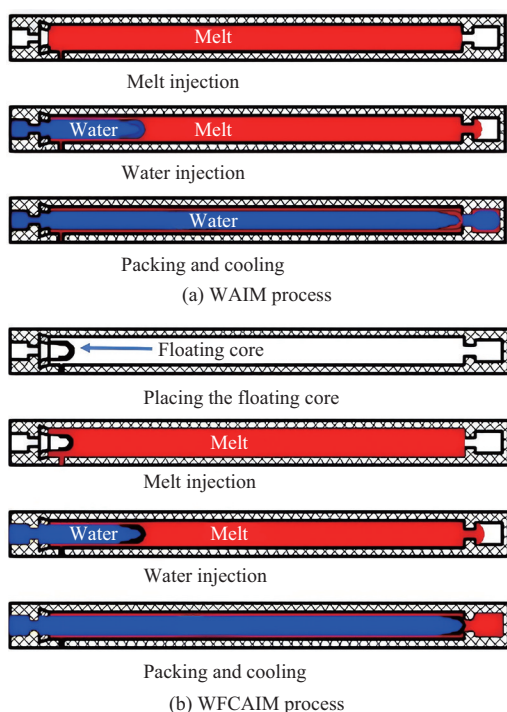


图1 两种工艺成型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two processes

短纤维增强聚合物复合材料(SFRPC)以其质量轻、强度高为独特性能,在汽车、飞机、火车等交通装备领域展现出巨大的应用潜力^[6-7]。注射成型是制备SFRPC制品的主要方法之一,且SFRPC的成

型优势与注射成型密切相关。目前,众多学者对SFRPC的WAIM和WFCAIM工艺进行了研究。Liu等^[8]通过实验探究了工艺参数和纤维含量参数对WAIM制品残余壁厚的影响。Huang等^[9]通过实验研究了水压和熔体温度对短射法WAIM制品中纤维取向的影响。Yu等^[10]通过实验研究了工艺参数对短射法WAIM中高压水穿透长度和纤维取向的影响。匡唐清等^[11]通过实验研究了短纤维含量对WAIM制品纤维取向分布的影响机制。江青松等^[12]通过正交实验探究了工艺参数对短纤维增强聚丙烯(PP)WAIM制品残余壁厚大小和均匀性的影响。Zhang等^[13]通过数值模拟和实验相结合的方式发现高压水穿透产生的强流场和高压水穿透行为共同决定了WAIM制品中短纤维的取向分布。在短纤维增强聚合物复合材料WFCAIM方面,钟罗浩等^[14]通过对WAIM和WFCAIM工艺对比发现,浮芯的穿透可以促使WFCAIM制品中更多的纤维沿流动方向形成有序取向。Zhang等^[4]通过实验发现延迟时间是影响WFCAIM制品中纤维取向分布的主要工艺参数。然而,现有的相关研究主要集中于工艺参数和工艺方法对复合材料WAIM和WFCAIM制品中的穿透行为和纤维取向分布的影响,尚未探究浮芯材料对复合材料WFCAIM制品性能的影响。浮芯在穿透进程中直接受到水压与熔体温度的协同作用,其材料的物理特性必然会对穿透行为造成影响,进而影响制品的最终性能。因此,开展浮芯材料对制品性能影响的研究对促进WFCAIM工艺的产业化进程具有重要意义。

考虑到课题组前期做的纯树脂浮芯对纯PP的WFCAIM制品中浮芯变形的影响因素,在此基础上选择了强度更高的纤维增强料的浮芯来探讨其对制品性能的影响。本研究借助自主研发的复合材料WFCAIM实验平台,探究了三种浮芯材料对短玻纤增强PP复合材料(SFRPP)制品残余壁厚、纤维取向以及拉伸性能的影响,旨在为高性能SFRPP的WFCAIM制品生产过程中的浮芯材料选型提供理论基础与实验支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SFRPP (20%SGF): Hostacom SB224-2, 荷兰利安德巴塞尔公司, 熔体流动速率(MFR)为 9.0 g/10 min (235 °C/2.16 kg);

浮芯材料 PA6: 1010C2, 荷兰帝斯曼集团;

浮芯材料碳纤维增强丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物(ASA-CF): 46101, 深圳拓竹科技有限公司;

浮芯材料 ABS: 40100, 深圳拓竹科技有限公司。

除 PA6 浮芯采用切削加工工艺外, 其余材料均采用 3D 打印工艺。表 1 为浮芯材料的物性参数。

表 1 浮芯材料的物性参数

Tab. 1 Physical properties of materials used in floating core

Materials	Vickers softening point temperatures	Melting point	Thermal deformation temperature
PA6	170	220	160
ASA-CF	108	210	110
ABS	94	200	87

1.2 仪器及设备

WFCAIM 实验平台主要由注塑机、模具、注水系统组成, 其实物如图 2 所示。



图 2 WFCAIM 实验平台

Fig. 2 WFCAIM experimental platform

注塑机: MA1600M/E, 海天塑机集团有限公司;
注水系统(包括高压水泵、蓄能器、水压控制系统、针阀及水针): 自制;

模温机: BTM-09W, 深圳博瑞克有限公司;

模具: 自制, 是一个主型腔直径 16 mm、长 245 mm 的长直圆管, 其实物图如图 3 所示;

拉伸试验机: PWG-250KN, 日本岛津株式会社岛津制作所;

差式扫描量热(DSC)仪: DZ-DSC300C, 南京大展检测仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): SU8010, 日立高新技

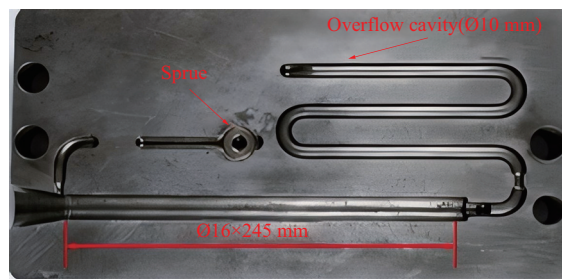


图 3 模具实物图

Fig. 3 Physical picture of mold

术公司。

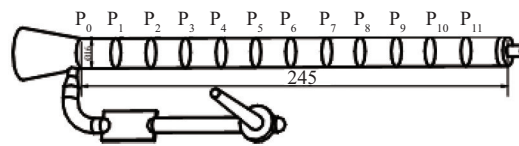
1.3 SFRPP 材料的 WFCAIM 管件成型

根据前期的实验研究和生产厂家推荐的材料参数范围, 确定了本实验的工艺参数组合, 即熔体注射压力 80 MPa、水压 6 MPa、注水延迟时间 3 s、熔体温度 230 °C、水温 and 模具温度为当时室温 20 °C。

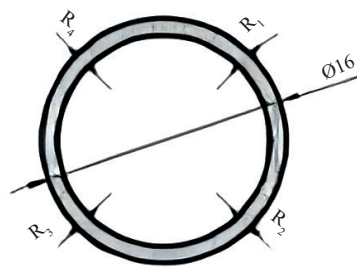
1.4 测试与表征

1.4.1 壁厚测试

在 WFCAIM 过程中, 由于高压水的非稳态流动行为, 浮芯在高压水的推动下穿透聚合物熔体的过程中会导致沿熔体流动方向不同位置处的残余壁厚呈现出均匀分布^[4,13,15]。为了准确分析浮芯材料对制品残余壁厚(RWT)的影响, 按照图 4 所示的方法沿制品流动方向每隔 20 mm 横剖, 并将横剖样品沿四个特定方向进行壁厚测量, 分别记作 $R_i (i=1, 2, 3, 4)$, 这四个壁厚值的平均值 $\bar{R}$ 则为此位置处的残余壁厚。



(a) Transverse plane position



(b) Measurement point on cross-section

图 4 残余壁厚测量

Fig. 4 Measurement of residual wall thickness

此外, 为进一步定性对比制品沿流动方向残余壁厚分布的均匀性, 引入变异系数(F_v)作为评价指标, 其表达式见式(1)^[12]。

$$F_v = \frac{\sigma}{R} \quad (1)$$

式中: σ 为图4a所示12个位置处的壁厚标准差。

1.4.2 SEM测试

为了明晰浮芯材质对制品沿流动方向不同位置处的纤维取向的影响规律,在制品前中后段三个位置(如图5所示)沿熔体流动方向各取下一段长5 mm的小圆环,随后将取下的小圆环样品放入液氮中冷却1 h,并沿流动方向进行脆断获得用于SEM检测的断面;最后将制备好的冷冻断裂表面镀金以使其具有导电性,并在3 kV加速电压下通过SEM进行测试。

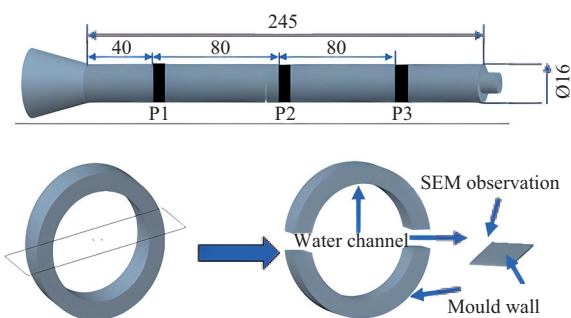


图5 SEM观测样品制备示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sample preparation for SEM observations

1.4.3 DSC测试

在样品中间位置取下一小段,利用锉刀和小刀分别在近模壁、近水道以及中间位置分别取下粉末状样品放在氮气保护环境下,以10 °C/min的升温速率从20 °C加热至210 °C后恒温保持3 min,随后以30 °C/min冷却至20 °C,同步采集降温数据并计算样品结晶度。

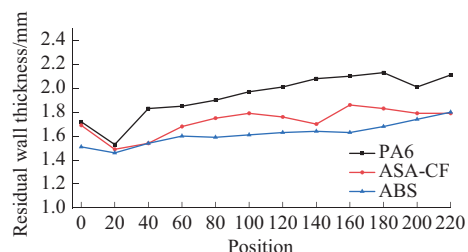
1.4.4 拉伸强度性能测试

制品的前段和后段壁厚受到模具型腔结构和高压水不稳定穿透的影响(如图4所示),因此,截取中间段150 mm长度样品切割成片材,参照GB/T 1447-2005测试标准进行拉伸强度实验。

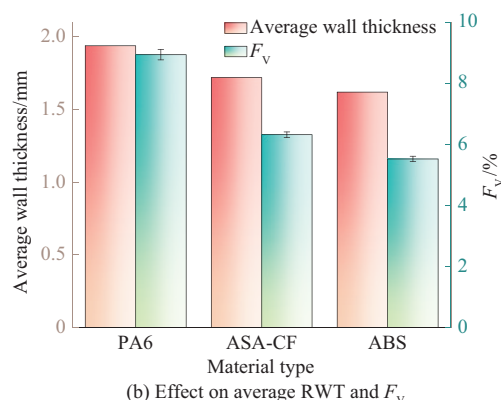
2 结果与讨论

2.1 浮芯材料对制品残余壁厚的影响

浮芯材料对制品残余壁厚的影响如图6所示。从图6a中可以发现所有成型管件的壁厚都比设计的理论值2.5 mm小很多(管件外径16 mm,浮芯外径11 mm),这一发现与之前文献关于纯树脂WFCAIM的实验结论相一致^[15-16]。这种现象产生的原因主要是:在浮芯向前穿透熔体时,浮芯除了以柱塞流的形式推动其前面的熔体向前,其侧面还以



(a) RWT at different positions along flow direction



(b) Effect on average RWT and F_v

图6 浮芯材料对产品RWT、平均RWT和 F_v 的影响

Fig. 6 Effect of floating core material on RWT, average RWT and F_v of products

拖曳流的形式带动两侧的熔体向前,导致穿透截面大于浮芯截面^[16];其次,高压水推动浮芯穿透熔体后还会进一步径向挤压熔体,导致制品的残余壁厚进一步变小^[16];因此,WFCAIM制品的壁厚远远小于理论值。此外,从图中还可以发现在WFCAIM制品初始段和末端段出现了与WAIM制品相同的壁厚不均匀现象;这主要归因于高压水经由直径为5 mm的注水口进入熔体时,在制品初始段产生了紊流现象,进而导致浮芯在制品初始段出现不稳定的穿透行为,最终造成制品初始段壁厚不均匀^[17];而制品末端位置是一个由Ø16 mm截面骤变为Ø10 mm的区域,熔体在3 s的延迟时间内被模具壁面冷却,使得高黏度熔体在此处大量堆积,一方面导致高压水推动浮芯穿透后段熔体的阻力变大,另一方面此处产生了涡流现象,从而导致制品后段壁厚不均匀^[18]。

从图6b中可以进一步发现,浮芯材料对成型制品壁厚的尺寸大小及均匀性均具有显著影响。其中,采用ABS浮芯成型制品的残余壁厚和 F_v 值最小,其次为使用ASA-CF浮芯和PA6浮芯的制品,这表明采用ABS浮芯成型的制品壁厚最小且最为均匀。此现象的产生原因可能与浮芯的物理性质相关,ABS材料的维卡软化温度最低(94 °C),其在推动熔体向前的过程中,极易软化并被高压水挤压变

粗,进而导致其穿透截面增大,即制品的壁厚变小^[18]。而ASA-CF浮芯比PA6浮芯的表面更粗糙,故在穿透熔体的过程中其侧面可以带动更多的熔体向前,从而形成更大的穿透截面,故使用ASA-CF浮芯成型制品的壁厚比PA6浮芯成型的更薄。图7为不同材质生产的浮芯在完成穿透过程后的图片。从图7中也可以发现,ABS浮芯产生了较大的变形,而其他两种浮芯几乎没有变形。此外,高压水在穿透过程中的初始压力值低于预设量,且高压水的初始穿透阻力与浮芯推动截面的面积呈正相关关系^[4,9],即:浮芯穿透截面越大,高压水达到预定压力值所需的时长越短,且浮芯完成穿透时间很短,故ABS浮芯比ASA-CF浮芯和PA6浮芯的穿透过程更平稳,成型制品壁厚也越均匀,FV值越小^[16]。

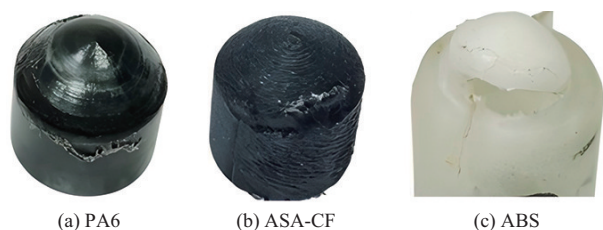


图7 不同材质生产的浮芯在完成穿透过程后的图片

Fig. 7 Images of floating cores produced from different materials after completing penetration process

2.2 浮芯材料对纤维取向的影响

浮芯材质对制品沿流动方向不同位置处、整个壁厚上的纤维取向分布如图8~图10所示。从图中可以发现,使用不同材质浮芯成型制品壁厚上的纤维取向分布呈现出与之前报道的WAIM制品中相同的“壳层-芯层-水道层”多层次分布,但是纤维在具体区域的取向分布不同。在WFCAIM制品中,纤维取向呈现出“壳层无序取向-芯层过渡取向-水道层有序取向”的多层级分布特征,即:位于壳层的大多数纤维沿流动方向呈现出杂乱无章的取向;而位于水道层的纤维,尤其是靠近水道附近的纤维,大多数沿流动方向呈现出高度取向;芯层区域是一个过渡区域,此区域中靠近模具层的纤维少数倾向于无序取向,而靠近水道层的纤维倾向于有序取向。而在之前关于WAIM工艺的研究中发现,经延迟注水后,成型的WAIM制品纤维取向呈现出“壳层无序-芯层有序-水道无序”的分布特征,即:芯层区域的纤维沿流动高度取向,而其它两个区域的纤维呈现出无序的取向^[13]。这种现象产生的主要原因与浮芯穿透过程产生的强剪切有关。WAIM和

WFCAIM两个工艺都包含熔体填充过程和高压水辅助填充过程。在熔体填充阶段,由于使用的WAIM和WFCAIM型腔直径都较大,且远远大于传统注射成型制品的壁厚,故纤维在此阶段受到的剪切作用很弱;此外,两种工艺中的熔体接触模具后会被迅速冷却,且冷却层厚度随着延迟时间的增加而变厚,所以两种工艺成型制品的壳层纤维倾向于无序取向。在浮芯穿透过程中,浮芯前沿的穿透过程和WAIM工艺中高压水的穿透过程相似,是一个典型的柱塞流,即最大和最小的熔体流动速度分别位于靠近固化壳层的芯层和靠近水道区域。此外,浮芯在穿透其前沿位置处的熔体后,其侧边也会带动周围的熔体向前,从而在浮芯侧边形成一个强大的拉伸流^[16]。图6和图7中得出的制品壁厚远小于理论值以及浮芯侧边黏着的熔体也进一步说明了浮芯侧边在穿透过程中产生强大的拉伸流,促使更多靠近水道区域的熔体沿流动方向形成有序的取向。而WAIM工艺中的高压水在穿透过程中难以带动其周边的熔体向前,故水道层附近的纤维取向最低。因此,WAIM和WFCAIM制品中各区域的纤维取向存在明显的区别。

为了进一步定量对比浮芯材质对制品不同位置处壁厚上的纤维取向的影响,纤维相对有序区域和无序区域被采用^[9],如图8~图10所示。从图中可以发现,ABS浮芯成型制品壁厚上的纤维取向相对有序区域厚度最厚,其次是使用ASA-CF浮芯和PA6浮芯的,这一趋势与浮芯材质对制品壁厚均匀性影响的趋势一致。这是因为纤维取向主要与浮

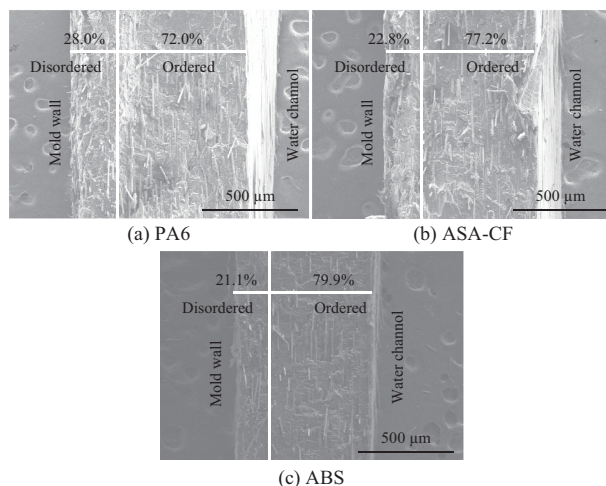


图8 浮芯材质对制品前段P1位置处纤维取向的影响

Fig. 8 Effect of floating core material on fiber orientation at P1 position in the front section of the product

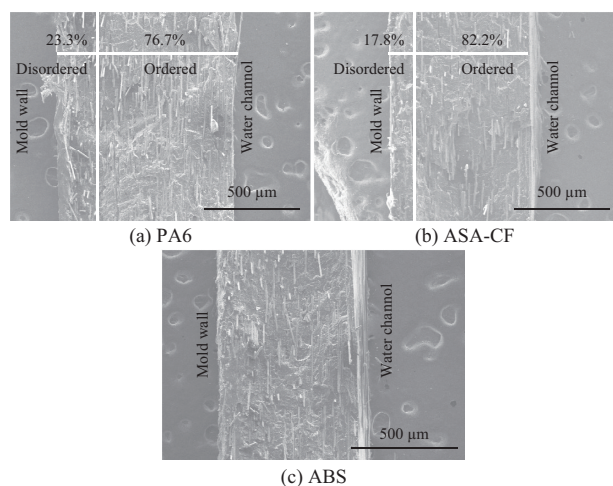


图9 浮芯材质对制品中间段P2位置处纤维取向的影响

Fig. 9 Effect of floating core material on fiber orientation at P2 position in the front section of the product

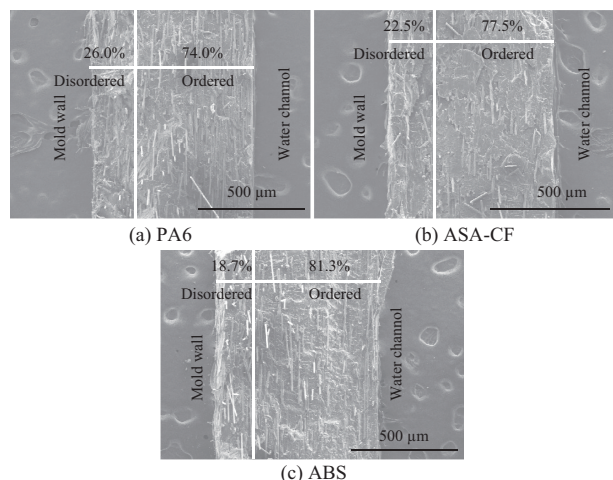


图10 浮芯材质对制品后段P3位置处纤维取向的影响

Fig. 10 Effect of floating core material on fiber orientation at P3 position in the front section of the product

芯的穿透行为有关,浮芯穿透越平稳,对侧边熔体产生的持续稳定剪切和拉伸作用越强,从而促进更多区域的纤维沿流动方向形成有序取向。实验中使用的ABS材料的维卡软化温度最低,使得高压水推动ABS浮芯向前穿透230℃熔体时容易被挤压变粗,穿透截面增大(即制品壁厚小),不仅让高压水升压更快、穿透过程更平稳,速度梯度也会显著增加,使得作用于熔体的流场作用更强,从而促使更多的纤维沿熔体流动方向形成有序的取向;而PA6材质的热变形温度最高,在穿透过程中PA6浮芯的尺寸稳定性高且穿透截面小,高压水升压慢,穿透稳定性相对差,速度梯度也相对更小,导致作用在熔体上的流场强度更低,因此有序区域厚度最小。ASA-CF浮芯的维卡软化温度和热变形温度介于

ABS和PA6之间,浮芯变形程度和穿透稳定性也介于两者之间,因此纤维取向有序区域的相对厚度也处于两者之间。此外,对比三种浮芯在制品不同位置的有序区域厚度变化可以发现:不管使用哪种材质的浮芯,制品前段、中间段及后段三个位置处壁厚上的纤维取向有序区域相对厚度都呈现出先增大后减小的趋势,且不同材质浮芯之间的厚度差值在制品中间段最为明显,其中ABS浮芯成型制品此段壁厚上的纤维几乎都沿流动方向形成有序取向;前段和后段的差值相对更小。这是因为在制品前段,高压水的压力值小于预设量,此时浮芯受到的挤压作用也比较小,且不同浮芯之间的变形差异不大,对纤维取向的影响差异也就更小^[17];而到了制品后段,熔体受到模具壁面冷却的时间较长,严重的熔体堆积导致穿透阻力相对较大,进而使得浮芯穿透过程的稳定性和剪切强度相对较弱^[18];而在制品中间段,高压水已经稳定在设定值,熔体温度也较高,不同浮芯的热变形特性差异也充分体现出来,最终表现为不同浮芯成型的制品,纤维有序区域厚度的差异在中间段最为显著。从图6中的制品壁厚大小及其均匀性也能印证浮芯材料的热变形特性差异在制品中间段位置体现出来,从而影响浮芯的穿透行为和流场强度,进而影响了纤维取向。

2.3 浮芯材料制品结晶度的影响

图11展示了不同浮芯成型制品残余壁厚壳层、芯层以及水道层切片的DSC熔融曲线。由图11可见,芯层样品的DSC熔融峰温度略高于其余两个区域,这一发现与Huang等关于WAIM聚丙烯制品的结晶行为规律一致^[9]。这主要归因于WFCAM成型过程中的热交换作用。壳层熔体在注射时与冷模腔接触的熔融层迅速冷却;水道层熔体在高压水注入阶段与水发生剧烈热交换;而芯层熔体因聚合物热导率较低,冷却较慢,因而熔融峰温度略高。

表2展示了浮芯材料对制品结晶度的影响。由表2可知,三种浮芯成型制品的结晶度存在明显差异:ABS浮芯成型制品结晶度最高,PA6浮芯次之,ASA-CF浮芯成型制品结晶度最低。该差异同样与浮芯变形特性及穿透过程中的流场作用密切相关:ABS浮芯在穿透时变形更大、过程更平稳,对熔体施加的剪切与拉伸作用更强,强流场有助于聚合物分子链有序排列,从而诱导结晶,提升整体结晶度。同时,剪切产生的内摩擦热可提高熔体局部温度,

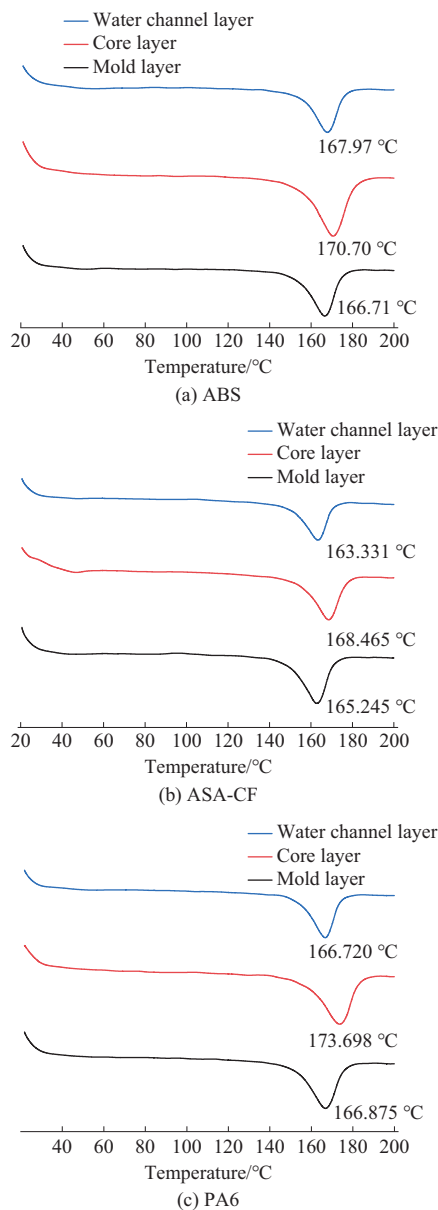


图11 不同浮芯成型制品的熔融曲线

Fig. 11 Melting curves of different floating core molded products

表2 利用不同浮芯成型制品的结晶度

Tab. 2 Crystallinity of products formed with different floating cores

Materials	Mold layer	Core layer	Water channel layer
PA6	52.65%	53.11%	45.97%
ASA-CF	47.12%	48.25%	43.91%
ABS	57.94%	63.35%	48.28%

为分子链运动与重排提供有利条件,进一步促进结晶。相比之下,ASA-CF浮芯穿过程产生的流场虽略强于PA6浮芯穿过程产生的,但PA6浮芯成型制品的壁厚比ASA-CF浮芯成型制品的壁厚相对更厚,熔体的冷却温度梯度更小,从而导致熔融温度和结晶度略高一些。此外,无论使用何种浮芯材料,从制品的壳层到芯层再到水道层,结晶度均呈

现先上升后下降的变化趋势,该结果和已有文献报道的WAIM制品结晶行为规律一致^[9]。这一现象的产生主要与不同区域冷却速率及流场作用的差异有关:壳层熔体因接触冷模具而迅速冷却,分子链尚未来得及规整排列即被固化,故结晶度较低;芯层熔体冷却较慢,且受浮芯穿透所产生的剪切拉伸作用充分,分子链有足够时间有序堆叠,因此结晶度最高;水道层虽承受最强的流场作用,但持续注入的常温高压水引发的极速冷却使分子链重排迅速终止,最终结晶度最低^[9]。

2.4 浮芯材料对制品拉伸性能的影响

不同浮芯材质成型制品的拉伸强度如图12所示。由图12可知,ABS浮芯成型制品的拉伸强度最高,其次为ASA-CF浮芯和PA6浮芯样品;且ABS浮芯制品相较PA6浮芯制品,其拉伸强度提高了17.0%。这主要归因于ABS浮芯成型制品中纤维取向更为有序、相对有序厚度最大且结晶度最高,因而拉伸强度最大;尽管ASA-CF浮芯制品的结晶度略低于PA6浮芯制品,但其纤维取向有序厚度更大,且制品壁厚更均匀,Tseng等^[19]通过实验验证,更多纤维沿流动方向形成有序取向、可提升注塑制品的拉伸弹性模量,从而增强拉伸强度。进一步结合前

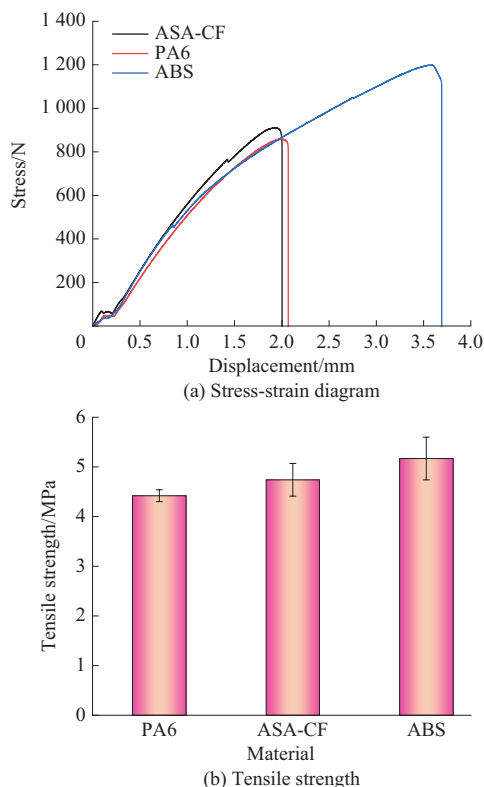


图12 浮芯材料对制品拉伸性能的影响

Fig. 12 Effect of floating core material on tensile properties of part

文规律可知,浮芯材料对拉伸性能的影响趋势,与对残余壁厚均匀性、纤维取向有序区域厚度及结晶度的影响趋势基本一致,表明浮芯通过自身热变形特性改变穿透过程中的流场状态,进而影响制品结构与结晶行为,最终直接决定拉伸性能。

3 结论

(1)依托自主构建的WFCAIM实验平台,系统研究了浮芯材料对制品性能的影响。浮芯材料的物理性能是决定成型制品性能的关键因素,维卡软化温度较低的ABS浮芯所制得制品壁厚最小且最为均匀。

(2)WFCAIM制品沿壁厚方向呈现“壳层无序取向-芯层过渡取向-水道层有序取向”的多层级分布特征,明显区别于水辅助注射成型(WAIM)“壳层无序-芯层有序-水道无序”的结构;浮芯材料对WFCAIM制品沿壁厚方向的多层次分布特征影响不显著,但会改变整个壁厚中纤维取向有序区域的相对厚度。

(3)采用ABS浮芯成型的制品,其纤维有序取向区域相对厚度最大,ASA-CF浮芯居次,PA6浮芯最小,且不同浮芯造成的差异在制品中段最为突出,前段与后段差异相对较小。

(4)ABS浮芯成型制品的拉伸强度最高,其次为ASA-CF浮芯、PA6浮芯制品;其中,ABS浮芯制品的拉伸强度较PA6浮芯制品提升了17.0%。

参考文献

- [1] OLIVEIRA D, MATEUS A, CARREIRA P, et al. Water assisted injection molding for single and multi-branched tubular components[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 12:141–149.
- [2] 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.
- [3] 杨建根, 曾祥瑞, 于盛睿. 水辅助注射成型技术研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(12):170–175.
YANG Jiagen, ZENG Xiangrui, YU Shengrui. Advances in water-assisted injection moulding technology[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(12):170–175.
- [4] 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): 2 333–2 344.
- [5] 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.
- [6] 管涛, 李元庆, 郭方亮, 等. 基于纤维取向分布图像处理技术的短纤维增强聚合物基复合材料力学性能预测方法[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9):4 826–4 836.
GUAN Tao, LI Yuanqing, GUO Fangliang, et al. A method for predicting the mechanical properties of short fiber reinforced polymer composites based on fiber orientation distribution image processing technique[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9):4 826–4 836.
- [7] LIU J C, CAI J F, FANG R J, et al. A refined analytical model incorporating fiber length, orientation, and loading-angle effects for predicting the Young's modulus of short fiber composites[J]. *Polymer Composites*, 2026, 47(12):10 922–10 931.
- [8] LIU S J, CHEN Y S. The manufacturing of thermoplastic composite parts by water-assisted injection-molding technology[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(2):171–180.
- [9] HUANG H X, ZHOU R H, YANG C. Fiber orientation propelled by high-pressure water penetration in water-assisted injection molded fiber-reinforced thermoplastics part[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47(2):183–190.
- [10] 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(47). DOI:10.1002/app.49555.
- [11] 匡唐清, 冯强, 徐盼, 等. 玻纤含量对短玻纤增强聚丙烯复合材料水辅注射制品壁厚与微观形态的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(2):105–111, 119.
KUANG Tangqing, FENG Qiang, XU Pan, et al. Influence of glass fiber contents on the residual wall thickness and microscopic morphology of water-assisted injection molding pipes of short-glass-fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(2):105–111, 119.
- [12] 江青松, 刘林海, 柳和生, 等. 水辅注射成型方形管件残余壁厚及其分布优化[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(9):119–125.
JIANG Qingsong, LIU Linhai, LIU Hesheng, et al. Residual wall thickness and its distribution optimization in water-assisted injection-molded square pipe fittings[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(9):119–125.
- [13] ZHANG W, LIU H S, JIANG Q S, et al. Formation mechanism of high-pressure water penetration induced fiber orientation in overflow water-assisted injection molded short glass fiber-reinforced polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(38):50 960–50 976.

(下转第 158 页)