

http://pmse.scu.edu.cn

## 溢流法工艺参数对短玻纤增强聚丙烯复合材料水穿透行为的敏感度

上官元硕<sup>1</sup>, 余忠<sup>1</sup>, 刘志清<sup>1</sup>, 许哲晨<sup>1</sup>, 黄益宾<sup>1</sup>, 章凯<sup>1</sup>, 柳和生<sup>2,3</sup>, 匡唐清<sup>2</sup>

(1. 上饶师范学院 高分子复合材料研究中心, 江西 上饶 334001; 2. 华东交通大学 机械与车辆工程学院, 江西 南昌 330013;  
3. 南昌大学 聚合物成型研究室, 江西 南昌 330031)

**摘要:**短玻纤增强聚丙烯复合材料水辅注射成型工艺有效地结合了纤维增强聚合物复合材料和水辅注射成型技术的优点, 目前已成为人们关注的焦点。残余壁厚是衡量溢流法水辅注射成型工艺制品的重要指标, 用来描述水穿透行为。文中研究了溢流法水辅注射成型的主要工艺参数对水穿透行为的敏感性。结果表明, 短玻纤质量分数对水穿透行为最为敏感, 短玻纤质量分数为 30% 时, 残余壁厚沿轴向的变化幅度为 0.87 mm; 其次是注水延迟时间和熔体温度, 注水延迟时间为 0 s 时, 残余壁厚沿轴向的变化幅度为 0.76 mm, 熔体温度为 270 °C 时, 残余壁厚沿轴向的变化幅度为 0.75 mm; 最后是注水压力, 注水压力为 4 MPa 时, 残余壁厚沿轴向的变化幅度为 0.39 mm。

**关键词:**敏感性; 溢流法; 水穿透; 残余壁厚

**中图分类号:** TQ327.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-7555(2026)03-0022-07

流体辅助注射成型 (Fluid-assisted injection molding, FAIM) 始于 20 世纪 70 年代, 该技术通过高压流体穿透高温聚合物熔体, 制造出中空或部分中空的塑料制品。流体辅助注射成型主要由水辅助注射成型和气体辅助注射成型, 2 种成型方法都能有效克服传统注射成型中出现的翘曲、收缩、成型周期长等问题<sup>[1,2]</sup>。水辅助注射成型 (Water-assisted injection molding, WAIM) 是 FAIM 的重要分支, 相较于气体辅助注射成型 (Gas-assisted injection molding, GAIM), WAIM 由于水的热导率和比热容分别是氮气的 40 倍和 4 倍, 能极大地缩短成型周期, 降低生产成本<sup>[3,4]</sup>, 且所制得的管件内壁光滑及更薄<sup>[5]</sup>。

在宏观性能研究方面, 工艺参数对制品残余壁厚和空心率等关键指标的影响备受关注。Yang 等<sup>[6]</sup>运用流体仿真学 (Computational fluid dynamics, CFD) 方法对 WAIM 工艺短射管件的残余壁厚进行

了模拟研究, 得到注水压力、熔体注射量和熔体温度是影响残余壁厚的关键参数。Yu 等<sup>[7,8]</sup>基于有无溢流腔研究了短射法水辅助注射成型主要工艺参数对水穿透行为的影响, 发现熔体注射量对水穿透行为的影响最为显著, 其次是注水延迟时间、熔体温度和注水压力。此外, Yu 等<sup>[9]</sup>基于短玻纤增强聚丙烯复合材料研究了短射法水辅助注射成型主要工艺参数对水穿透行为的敏感性, 发现熔体注射量对水穿透行为最为敏感。黄益宾等<sup>[10]</sup>研究了不同流道截面型腔的水穿透行为, 发现圆形截面流道型腔制品的残余壁厚最薄, 短玻纤沿流动方向的取向度最高, 其次是上圆下方形, 最后是方形。随后, 匡唐清等<sup>[11-13]</sup>利用高压水作为动力, 驱动预置在模腔一端的固体弹头穿透塑料熔体形成中空制品, 该工艺为水驱动弹头辅助注射成型, 研究了弹头、工艺参数和空腔几何形状对管件残余壁厚的影响。

在微观性能研究方面, 纤维取向作为影响制品

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0036

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金地区项目 (52163006); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ190894, GJJ2201810, GJJ2201815); 上饶市科技项目 (2023AB018)

通讯联系人: 余忠, 主要从事高分子改性及成型研究, E-mail: goldfish518@126.com

力学性能的关键因素之一,成为学者们研究的焦点。Huang 等<sup>[14]</sup>通过扫描电子显微镜观察分析了水辅助注射成型纤维增强聚丙烯复合材料在不同位置处(近水端、末水端)沿厚度方向的纤维取向,发现近水端纤维沿流动方向取向区域的厚度远远小于末水端,而近水端纤维沿流动方向取向区域的厚度远远大于传统注射成型制品纤维沿流动方向取向区域。周海迎等<sup>[15,16]</sup>研究了工艺参数对短玻纤沿熔体流动方向取向度及其优化,得知皮层和芯层处短纤维主要沿熔体流动方向取向,水道层处短纤维受高压水影响沿流动方向呈自由取向。陈忠仕等<sup>[17]</sup>研究了水辅注射成型方法对方制品纤维沿熔体流动取向的影响,得知溢流法相对于短射法,在整个型腔段纤维沿熔体流动方向的取向分布更为稳定。匡唐清等<sup>[18]</sup>聚焦于玻纤含量对水辅注射成型制品中纤维取向的影响,结果表明,在皮层及水道层处,玻纤沿熔体流动方向的取向度较高。Zhang 等<sup>[19]</sup>研究了流动诱导纤维取向机制,得知纤维取向不仅取决于其在径向和流动方向上的位置,还与成型工艺参数有关。

综上所述,基于聚丙烯材料或纤维增强聚丙烯复合材料,在宏观性能方面,主要是针对残余壁厚、水穿透长度、及空心率等方面,研究了水辅助注射成型的主要工艺参数对此性能的影响。在文献调研中,只有文献[9]研究了短射法水辅助注射成型主要工艺参数对水渗透行为的敏感性。然而,短射法水辅注射成型只是水辅注射成型的主要成型工艺,且

研究中并未将玻纤质量分数纳入主要工艺参数中。因此,本文针对溢流法水辅助注射成型的短玻纤质量分数、熔体温度、注水延迟时间和注水压力等主要工艺参数,研究了其对水渗透行为的敏感性,从而为后续水辅助注射成型中工艺参数的影响性问题提供了科学依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

溢流法水辅注射成型的实验平台由注塑机、方管注塑模、注水系统及控制系统构成,其现场实物如图1所示。注塑机由东华机械有限公司制造,其型号为 TTI-250FT,用于执行熔体温度及短玻纤质量分数;实验室自制的注水系统,其注水最大压力为 20 MPa,用于执行注水压力及注水延迟时间;控制系统由气动控制系统完成,用于执行注塑模中封针及水针的开关。

### 1.2 工艺参数

实验所用的短玻纤增强聚丙烯复合材料购置于利安巴塞尔公司,其短玻纤质量分数分别为 10%、20% 及 30%,牌号分别为 SB224-1, SB224-2 及 SB224-3。为了考察溢流法水辅注射成型的主要工艺参数,如:熔体温度、注水压力、注水延迟时间及短玻纤质量分数,对残余壁厚及其均匀性等水渗透行为的影响,对这些主要工艺参数做了前期实验,以最后高压水穿透注射模主型腔聚合物熔体为基准得到

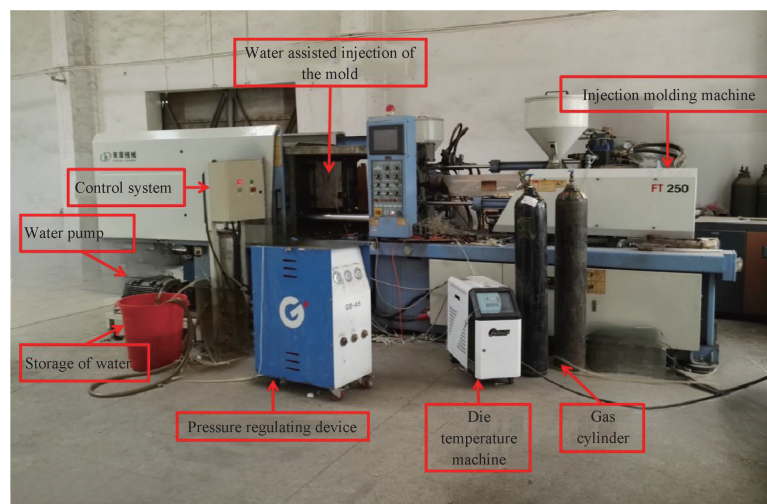


Fig. 1 Experimental platform

Tab. 1 Details of process parameters

Melt temperature/°C	Water injection pressure/MPa	Water injection delay time/s	Short glass fiber mass fraction/%
210	4	0	<b>10</b>
<b>230</b>	6	<b>1</b>	20
250	<b>8</b>	3	30
270	10	5	

note; the bolded numbers in the table are the basic parameters

了这些成型参数的数据,如 Tab.1 所示,以单因素法考察这些成型参数对水穿透行为的敏感性。

### 1.3 注塑模结构

溢流法水辅注射成型的注塑模采用方管注塑模,如 Fig.2 所示。方管注塑模主要有主型腔和溢流腔构成,其中主型腔长度为 245 mm,横截面尺寸为 16 mm×16 mm,溢流腔为直径 10 mm 的圆管。

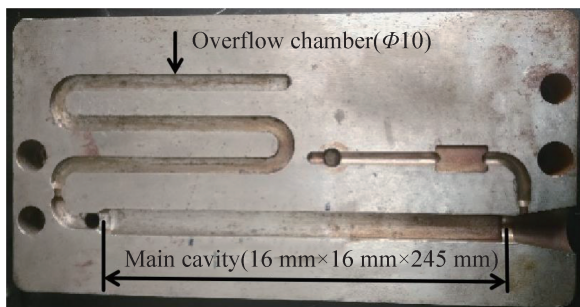


Fig. 2 Square pipe die

### 1.4 测量

残余壁厚是溢流法水辅注射成型制品的重要衡量指标。每组参数做 5 组实验,去除最高及最低值,取中间 3 组实验的每个位置的残余壁厚厚度,求其平均值。为消除水针喷嘴延伸至主型腔始端的影响,须截除主型腔初始段 5 mm;同时每隔 80 mm 截取 1 个 5 mm 高度的环,以横纵向在环的 4 个位置测量壁厚,取平均值,残余壁厚的测量示意图如 Fig.3

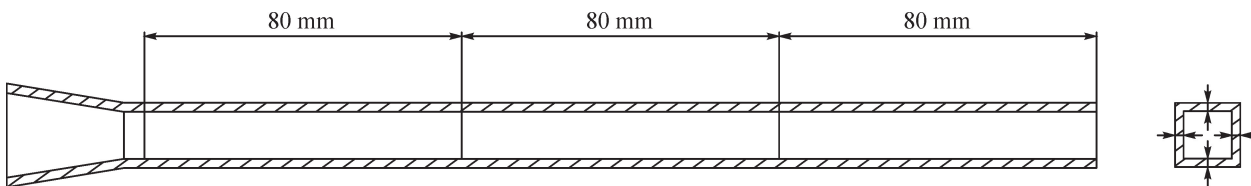


Fig. 3 Schematic representation of residual wall thickness measurements

所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 熔体温度

Fig.4 为熔体温度分别为 210 °C, 230 °C, 250 °C 及 270 °C 时,水穿透主型腔熔体后制品沿轴向的残余壁厚分布情况。从 Fig.4(a)可知,随着熔体温度升高,残余壁厚沿轴向的变化程度呈两头大中间小,如 Fig.4(b)所示,熔体温度为 210 °C 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 1.85 mm 至 2.46 mm,熔体温度为 230 °C 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 1.84 mm 至 2.27 mm,造成这一现象主要是因为熔体温度偏高会造成主型腔前半部分段的熔体易于被高压水推动,以致有更多的熔体留置于主型腔末端;熔体温度偏低则会造成主型腔整段熔体不易被高压水推动,但相对于进水端及中间端 1 处熔体温度相对于其他段高些,一旦被高压水穿透,会使得离进水端较近的中间段 1 处有更多的熔体被高压水推动。由此得知,熔体温度增加,残余壁厚沿轴向的变化程度并不呈现线性减小或增加。对于残余壁厚沿轴向的敏感性来说,熔体温度为 270 °C 最为敏感。

### 2.2 注水压力

Fig.5 为注水压力分别为 4 MPa, 6 MPa, 8 MPa 及 10 MPa 时,水穿透主型腔熔体后制品沿轴向的残余壁厚分布情况。从 Fig.5(a)可知,随着注水压力增

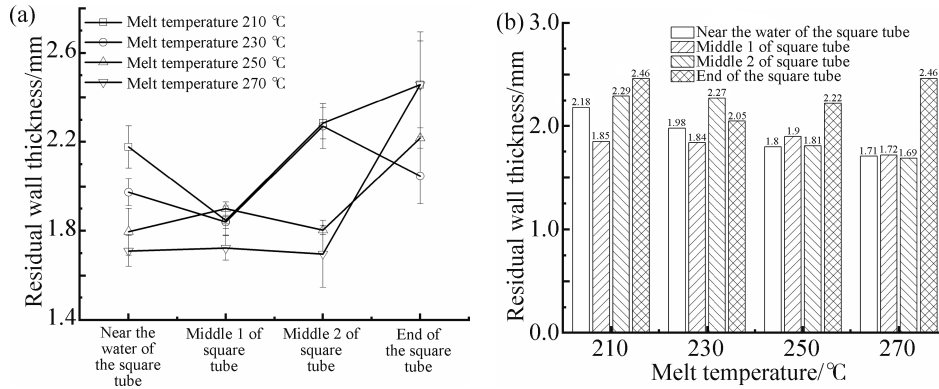


Fig. 4 Residual wall thickness distribution along the axial direction for different melt temperature  
(a):curve graph; (b):bar graph

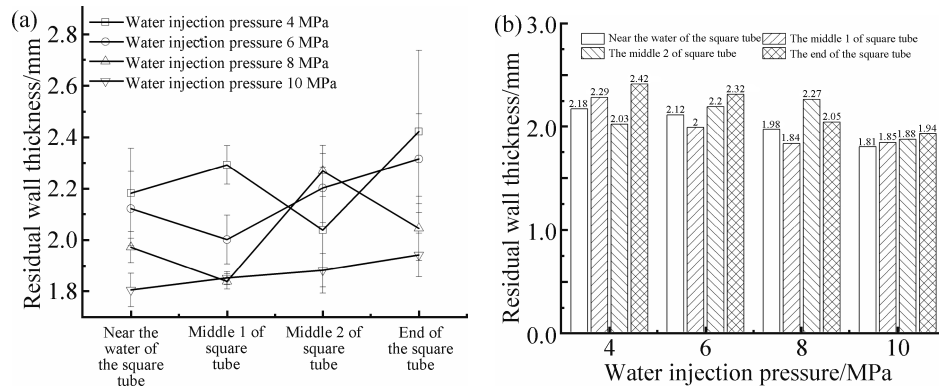


Fig. 5 Residual wall thickness distribution along the axial direction for different water injection pressure  
(a):curve graph; (b):bar graph

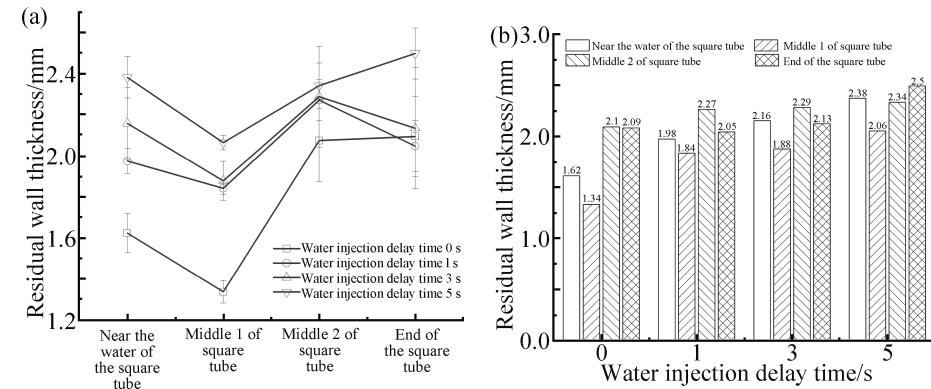


Fig. 6 Residual wall thickness distribution along the axis for different water injection delay time  
(a):curve graph; (b):bar graph

大,残余壁厚沿轴向的变化程度趋于逐渐减小,如图5(b)所示,注水压力为 4 MPa 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 2.03 mm 至 2.42 mm,注水压力为 10 MPa 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 1.81 mm 至 1.94 mm,造成这一现象主要在于注水压力增大,高

压水就有更多的能量推动熔体至溢流腔处,在此过程中高压水的波动会减小。由此得知,注水压力的增大,残余壁厚沿轴向变化程度呈线性减小。对于残余壁厚沿轴向的敏感性来说,注水压力为 4 MPa 敏感度最大。

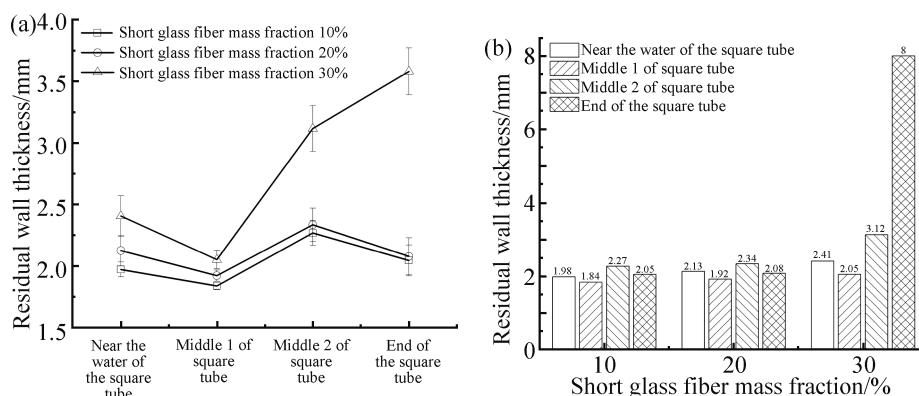


Fig. 7 Residual wall thickness distribution along the axial direction for different short glass fiber content

(a): curve graph; (b): bar graph

### 2.3 注水延迟时间

Fig.6 为注水延迟时间分别为 0 s, 1 s, 3 s 及 5 s 时,水穿透主型腔熔体后制品沿轴向的残余壁厚分布情况。从 Fig.6(a)可知,随着注水延迟时间延长,残余壁厚沿轴向的变化程度逐渐减小,如 Fig.6(b)所示,注水延迟时间为 0 s 时,残余壁厚沿轴向分布从 1.34 mm 至 2.1 mm,注水延迟时间为 5 s 时残余壁厚沿轴向分布从 2.06 mm 至 2.5 mm,造成这一现象主要在于注水延迟时间的延长,使得低温主型腔壁厚有更多的时间凝固高温熔体,从而导致高压水只能推动少量熔体,由此高压水的波动就变得更小。由此得知,注水延迟时间的延长,残余壁厚沿轴向变化程度呈现线性减小。对于残余壁厚沿轴向的敏感性来说,注水压力为 0 s 尤为敏感。

### 2.4 短玻纤含量

Fig.7 为短玻纤质量分数分别为 10%, 20% 及 30% 时,水穿透主型腔熔体后制品沿轴向的残余壁厚分布情况。从 Fig.7(a)可知,随着短玻纤质量分数的增加,残余壁厚沿轴向的变化程度逐渐增大,如 Fig.7(b)所示,短玻纤质量分数为 10% 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 1.84 mm 至 2.27 mm,短玻纤质量分数为 30% 时,残余壁厚沿轴向分布大小从 2.05 mm, 2.27 mm 至未穿透,造成这一现象主要是因为短玻纤质量分数的增加一方面使得熔体的黏度加大,另一方面会加剧高压水穿透熔体时的波动性。由此得知,短玻纤质量分数的增加,残余壁厚沿轴向变化程度呈现线性增大。对于残余壁厚沿轴向的敏感性

来说,短玻纤质量分数为 30% 最为敏感。

## 3 结论

基于溢流法水辅注射成型的主要工艺参数,研究了其对水穿透行为的敏感性。研究结果得知,熔体温度从 210 °C 升高至 270 °C,残余壁厚沿轴向变化幅度呈现两头大中间下,分别为 0.61 mm, 0.43 mm, 0.42 mm 及 0.75 mm;注水压力从 4 MPa 加压至 10 MPa,残余壁厚沿轴向的变化幅度大致呈现减小态势,分别为 0.39 mm, 0.32 mm, 0.33 mm 及 0.13 mm;注水延迟时间从 0 s 延长至 5 s,残余壁厚沿轴向的变化幅度大致呈现减小趋势,分别为 0.76 mm, 0.43 mm, 0.41 mm 及 0.44 mm;短玻纤质量分数从 10% 增加至 30%,残余壁厚沿轴向的变化幅度大致呈现增大趋向,分别为 0.43 mm, 0.42 mm 及 0.87 mm。从而进一步得知,短玻纤质量含量对水穿透行为最为敏感,其次是注水延迟时间和熔体温度,最后是注水压力。

### 参考文献:

- [1] Olley P. An approximation to the PTT viscoelastic model for gas assisted injection moulding simulation[J]. Journal of Nonnewtonian Fluid Mechanics, 2020, 278: 104246.
- [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] Sannen S, Puyvelde P, Keyzer J. Defect occurrence in water-assisted injection molded products: definition and responsible

- formation mechanisms[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2015, 34: 701-708.
- [4] 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: 161938.
- [5] Czepiel M, Bankosz M, Sobczak K A. Advanced injection molding methods: review[J]. *Materials*, 2023, 16: 5802.
- [6] Yang J, Yu S, Yu M. Study of residual wall thickness and multi objective optimization for process parameters of water-assisted injection molding[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 2020: 3481752.
- [7] 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: 3718670.
- [8] 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: 49555.
- [9] Yu Z, Huang Y B, Liu H S, *et al.* The sensitivity of the behavior of water penetrating polypropylene matrix composites on short-shot process parameters[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2022, 62: 2855-2862.
- [10] 黄益宾, 章凯, 余忠, 等. 不同流道截面型腔的水渗透行为[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.
- [11] 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.
- [12] 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: 1985.
- [13] 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): 2448-2456.
- 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): 2448-2456.
- [14] 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: 183-190.
- [15] Zhou H Y, Liu H S, Jiang Q S, *et al.* Effect of process parameters on short fiber orientation along the melt flow direction in water-assisted injection molded part[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 7201215.
- [16] Zhou H Y, Liu H S, Kuang T Q, *et al.* Simulation and optimization of short fiber circumferential orientation in short-fiber-reinforced composites overflow water-assisted injection molded tube[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 2019: 6135270.
- [17] 陈忠仕, 柳和生, 余忠, 等. 水辅注塑成型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.
- [18] 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塑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.  
Kuang T Q, Feng Q, Xu Q, *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 and Engineering*, 2020, 36(2): 105-111.
- [19] Zhang W, Kuang T, Liu H S, *et al.* Numerical and experimental investigations on the mechanism of flow - induced fiber orientation in short-shot water-assisted injection-molded short-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139: 52359.

## Sensitivity of the Behavior of Water Penetrating Short Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites on Overflow Process Parameters

Yuanshuo Shangguan<sup>1</sup>, Zhong Yu<sup>1</sup>, Zhiqing Liu<sup>1</sup>, Zhechen Xu<sup>1</sup>, Yibin Huang<sup>1</sup>, Kai Zhang<sup>1</sup>  
Hesheng Liu<sup>2,3</sup>, Tangqing Kuang<sup>2</sup>

(1. *Polymer Composites Research Center, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China;*

2. *School of Mechanical & Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;*

3. *Polymer Processing Laboratory, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

**ABSTRACT:** Water-assisted injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene composite effectively combines the advantages of fiber reinforced polymer composite and water-assisted injection molding technology, and has become the focus of attention. Residual wall thickness is an important index to measure the products of water assisted injection molding of overflow method, and it is used to describe the water penetration behavior. In this paper, the sensitivity of water penetration behavior on the main process parameters of the overflow water-assisted injection molding was studied. It is found that the mass fraction of short glass fiber is most sensitive to water penetration behavior. For example, when the mass fraction of short glass fiber is 30%, the residual wall thickness varies by 0.87 mm along the axial direction. The second is the water injection delay time and melt temperature. For example, when the water injection delay time is 0 s, the axial direction variation range of the residual wall thickness is 0.76 mm, and when the melt temperature is 270 °C, the axial direction variation range of the residual wall thickness is 0.75 mm. The last is the water pressure. For example, when the water pressure is 4 MPa, the residual wall thickness varies by 0.39 mm along the axial direction.

**Keywords:** sensitivity; overflow; water penetration; residual wall thickness