http://pmse.scu.edu.cn

# 不同流道截面型腔的水穿透行为

黄益宾[1]，章 凯[1]，余 忠[1]，李 厅[1]，柳和生[2]，匡唐清[2]，应 忠[3]
（1.上饶师范学院 江西省塑料制备成型重点实验室，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.上饶市聚微星科技有限公司，江西 上饶 334001）

**摘要：**纤维取向分布直接影响水辅注塑成型制品的使用性能，如冲击强度、屈服强度及拉伸强度等。多样化的流道截面型腔用于满足水辅制品在不同场合中的应用，不同的流道截面型腔势必会影响水辅制品中纤维取向分布。文中旨在研究圆形、上圆下方形及方形的截面流道型腔中短玻纤增强聚丙烯复合材料的水辅助注射成型过程。结果发现，随着熔体温度的升高、注水压力的增大及注水延迟时间的缩短，3种流道截面型腔制品的中间端处残余壁厚减薄及短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度提高，且在相同加工变量下，圆形截面流道型腔制品的中间端处残余壁厚最薄及短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度最高，其次是上圆下方形，最后是方形。综合制品的中间端1处及2处残余壁厚可知，聚合物熔体温度在210~230 ℃、注水压力7~10 MPa及注水延迟时间1~5 s时，上圆下方形截面型腔制品的中间端处残余壁厚及短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度更趋近于圆形。

**关键词：**型腔截面；溢流法；残余壁厚；水辅助注射成型；纤维取向
**中图分类号：**TQ320.66+2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2023）11-0082-11

水辅助注射成型技术，相较于气体辅助注射成型技术，其成型原理相同，都是借助喷嘴将高压流体注入预先部分填充熔体的型腔内，形成中空制品。然而，水辅助注射成型技术所使用的水在物性参数及获取方面相较于氮气等惰性气体具有优势。例如，水易获取及可循环使用，从而在成本上大大节省；水的不可压缩性使得成型制品表面更加光滑、残余壁厚更加均匀[1,2]，生产中空直径较大及厚薄相结合的制品更容易[3,4]；水的热导率和比热容分别是氮气的40倍和4倍，这使得冷却时间得以减短，极大地缩短了成型周期，进一步降低了生产成本[2,5~7]。

在水辅注塑模的型腔方面，Wu等研究了带有加强筋的水辅注射成型零件的中空形状，发现熔温、熔体注射量及注水延迟时间是中空形状的主要影响因素，还发现水辅注射成型中空形状类似于模具型腔结构，而气体辅助注射成型中空形状趋向于圆形[8]。匡唐清等研究了型腔截面对水穿透行为的影响，研究发现水穿透截面形状逼近于型腔截面形状，且型腔截面越趋近于圆形残余壁厚越均匀[9,10]。同时，随着截面面积越大残余壁厚越厚。黄淑慧等分析了几个典型型腔截面对溢流法水辅助注射中水穿透的影响，研究发现在型腔截面面积相近时，水穿透的中空率随截面圆率提升而增大；然而，在型腔截面圆率一定时，水穿透的中空率受截面面积大小影响甚微[11]。

在纤维增强聚合物复合材料方面，Liu等研究了质量分数15%的玻璃纤维（玻纤）增强聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）水辅助注射成型制品中玻纤的取向分布，研究结果显示，与传统注射成型相比，水辅助注射成型制品中玻纤的取向分布存在显著差异[12]。传统注射成型制品中的玻纤取向分布呈现出壳层及芯层，而在水辅助注射成型制品中玻纤的取向分布呈现壳层、芯层及水道层。Huang等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）沿厚度方向纤维的取向[13]。通过扫描电子显微镜

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0248
收稿日期：2023-02-22
基金项目：国家自然科学基金地区资助项目（52163006）；江西省教育厅科研技术研究项目（GJJ2201810，GJJ2201815，GJJ190894）；
江西省重点研发计划项目（20203BBE53065）
通讯联系人：黄益宾，主要从事聚合物加工成型技术研究，E-mail: hyb126@126.com

(SEM)观察,得知近水端纤维沿流动方向的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的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的区域。张伟等针对短纤维增强聚丙烯水辅助注射成型中纤维沿熔体流动方向的取向进行了数值模拟,得知在注水口附近的水道层处,纤维沿熔体流动方向的取向呈现无序状,而在距离注水口中部及末端处,纤维沿熔体流动方向的取向更加有序[14]。周海迎等研究了工艺参数对短玻璃纤维(短玻纤)沿熔体流动方向取向度及其优化的影响,得知在制品的皮层和芯层处,短玻纤主要沿熔体流动方向取向,而在水道层处,由于受到高压水的影响,短玻纤沿流动方向取向呈现自由取向[15~17]。陈忠仕等研究了水辅注射成型方法对方管制品纤维沿熔体流动方向取向的影响,得知溢流法相对于短射法,制品在整个型腔段纤维沿熔体流动方向的取向分布更稳定[18]。此外,在短射法成型制品中,后段的纤维沿熔体流动方向取向的有序性区域要大于前段。匡唐清等研究了玻纤含量对其水辅注射成型制品中纤维取向的影响,得知在制品的皮层及水道层处,玻纤沿熔体流动方向的取向度较高[19]。然而,当玻纤的质量含量过高时,易出现玻纤折断的现象,进而影响其沿熔体流动方向的取向分布。

综上所述,前人在截面型腔方面只研究了水穿透形状及残余壁厚;而在纤维增强聚合物复合材料方面只研究了流道不同位置及工艺参数的纤维取向分布。在文献调研中,并未有研究涉及不同截面型腔下流道的纤维取向分布。因此,本文旨在针对这一研究现状,深入研究不同流道截面型腔的水穿透行为。

## 1　实验部分

### 1.1　主要原料

本文实验所用材料是出自于利安巴赛尔公司生产的短玻纤质量分数为10%的短玻纤增强聚丙烯,其牌号为SB224-1,其信息如Tab.1所示。

### 1.2　实验装置

水辅助注射成型实验平台由注塑机、模具、注水系统及控制系统构成,其实物图如Fig.1所示。该平台的主要装置包括由东华机械有限公司制造的型号为TTI-250FT的注塑机。该注塑机具有最大锁模力为250 T,最高注射压力为170 MPa以及最大注射量为452 g(注射物料为PS)等特性。

### 1.3　模具

实验所用的模具包括直圆管件模具、直方管件模

**Tab. 1　Characteristics of the short glass fiber reinforced PP composite**

| Property | ASTM | 10%GF/PP |
|---|---|---|
| Density/(g·cm$^{-3}$) | D-792 | 0.960 |
| Melt flow index(230 ℃/2.16 kg) /(g·(10 min)$^{-1}$) | D-1238 | 6.0 |
| Tensile strength, yield/MPa | D-638 | 36.0 |
| Izod impact, notched/(J·cm$^{-1}$) | D-256A | 1.70 |




**Fig. 1　Experimental platform**

具和直上圆下方管件模具，其具体实物图如Fig.2所示。直圆管件的主型腔长度为245 mm、直径为16 mm；直方管件的主型腔长度为245 mm、正方形截面为16 mm×16 mm；直上圆下方管件的主型腔长度为245 mm，上圆为直径16 mm、下方为8 mm×16 mm；所有这些模具的溢流腔直径都是10 mm。

**Tab. 2 Processing parameters as well as the values used in the experiment**

| Melt temperature /℃ | Water injection delay time/s | Water injection pressure/MPa |
|---|---|---|
| 210 | 0 | 4 |
| 230 | 1 | 6 |
| 250 | 3 | 8 |
| 270 | 5 | 10 |

note: the numerical bolding in the table is the basic parameter

### 1.4 实验工艺

首先，使用传统注射成型机将熔体注入主型腔。在此过程中，执行相应的熔体温度工艺参数。其次，注水系统通过喷嘴将高压水注入主型腔中。这个步骤将推动熔体前移至溢流腔。在此过程中，执行注水延迟时间和注水压力工艺参数。最后，等待制品凝固成型，且利用重力将制品中的水通过喷嘴排出。整个实验过程，采取单因素法进行实施。工艺参数的详细信息如Tab.2所示。

### 1.5 喷金及电子扫描显微镜观察

在水辅注射过程中，由于水针喷嘴处持续被聚合物熔体包裹，导致装置延伸至主型腔处。为消除潜在影响，在近水端取样时需保持一定距离。在近水端、中间端及末水端处，按相同的距离截取一个5 mm高度的圆环，并将圆环根据不同参数和位置进行编号，然后将其放置在装有液氮的容器中保持45 min。之后，沿着聚合物熔体的流动方向进行脆断，其示意图如Fig.3所示；截取脆断面放入喷金设备进行喷金，喷金前后实物图如Fig.4所示；最后将喷金的脆断面置于SU8010型扫描电子显微镜（日本日立，加速电压为

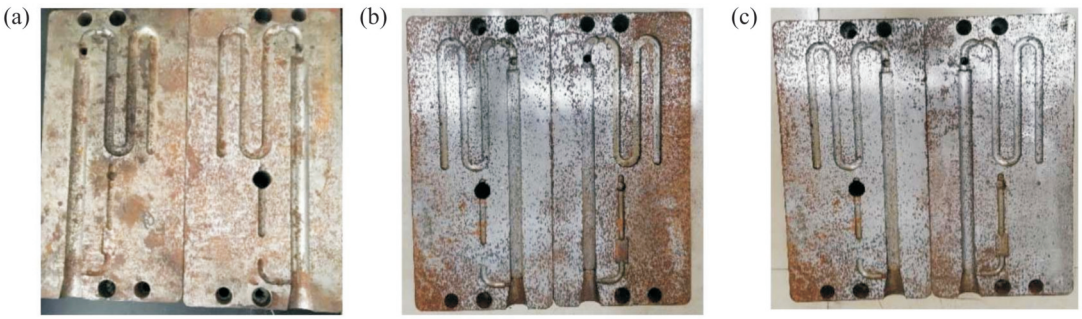



**Fig. 2 Experimental mold**
(a): round pipe; (b): square pipe; (c): upper round and lower square pipe

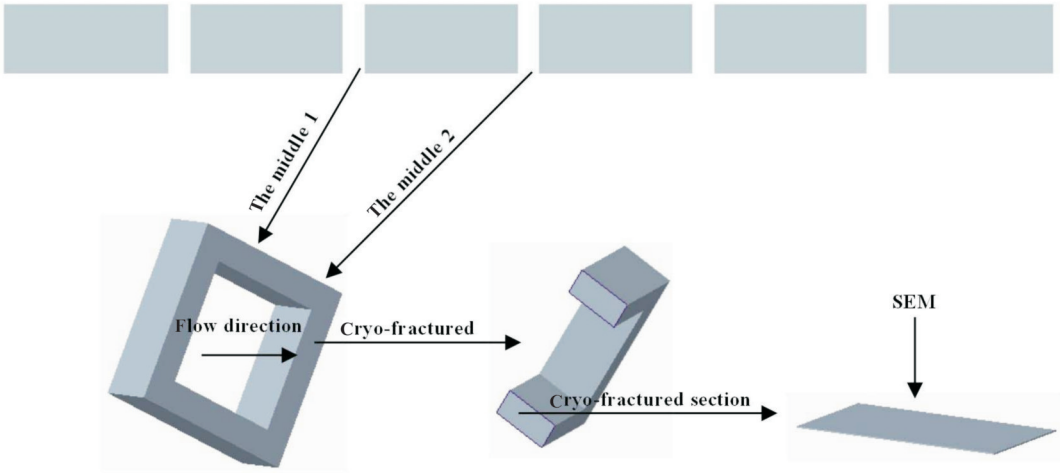



**Fig. 3 Sampling diagram**

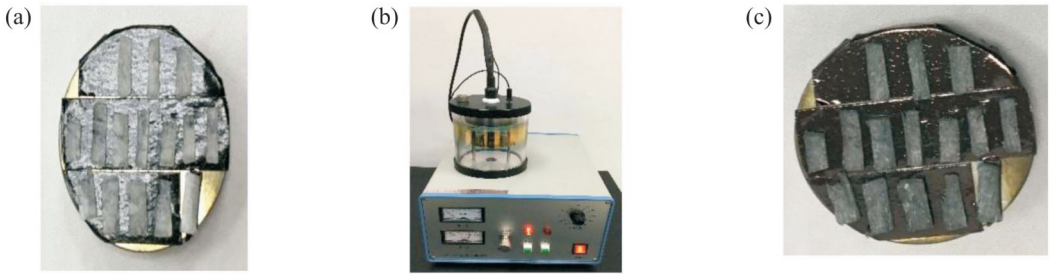


**Fig. 4 Gold spraying**
(a): spray gold before; (b): in the spray gold; (c): spray gold after

3.0 kV）中进行观察，其观察实物图如Fig.5所示。

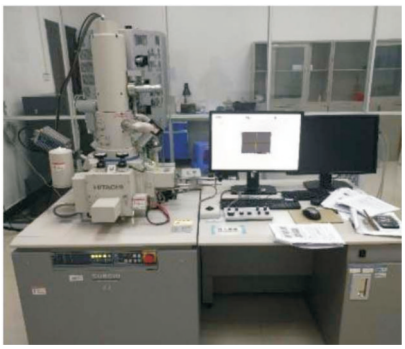


**Fig. 5 SEM observation**

## 2 模拟程序

### 2.1 数学模型

短玻纤增强聚丙烯水辅助注射成型是一种涉及黏弹性熔体与牛顿流体的先进塑料加工技术。为了使计算收敛并符合实际成型状况，故对数学模型进行了简化处理，如：(1)假设流体中的密度、热容量及热导率保持不变；(2)考虑到熔体与模具壁面间的莫灿，假设它们之间无滑移现象；(3)忽略了表面张力、重力、惯性力及体积力；(4)不考虑熔体结晶过程中的相变热焓。基于以上简化处理，因此得到了三维非等温流动行为控制方程

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot\rho\boldsymbol{u}=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\boldsymbol{u})+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{\tau})=-\nabla p+\rho\boldsymbol{g} \tag{2}$$

能量方程：

$$\rho C_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k\nabla T)+\eta\dot{\gamma}^{2} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{u}$——速度矢量；$T$——温度；$t$——时间；$p$——压力；$\boldsymbol{\tau}$——应力张量；$\boldsymbol{g}$——重力加速度矢量；$\rho$——密度；$\eta$——黏度；$k$——热传导率；$C_{\mathrm{p}}$——比热容；$\dot{\gamma}$——剪切速率。

为了准确地描述聚合物熔体在模具型腔流道中的流变特性，本文采用反映短玻纤增强聚合物复合材料的经典本构方程—White-Metzner本构方程。该方程的数学表达式如下

$$\boldsymbol{\tau}+\lambda\left(\frac{\partial \tau}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{\tau}-\nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{\tau}\cdot\nabla\boldsymbol{u}\right)=\eta\left(\nabla\boldsymbol{u}+\nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\right) \tag{4}$$

$$\lambda(T,\dot{\gamma})=\frac{\eta(T,\dot{\gamma})}{G} \tag{5}$$

$$\eta=\frac{\eta_{0}}{1+\left(\frac{\eta_{0}\dot{\gamma}}{\boldsymbol{\tau}}\right)^{1-\mathrm{n}}} \tag{6}$$

$$\eta_{0}=D_{1}\exp\left(\frac{-A_{1}(T-T_{\mathrm{c}})}{A_{2}+(T-T_{\mathrm{c}})}\right) \tag{7}$$

$$T_{c}=D_{2}+D_{3}p \tag{8}$$

$$A_{2}=\tilde{A}_{2}+D_{3}p \tag{9}$$

式中：$T$——聚合物熔体温度；$G$——剪切模量，其值为1~$10^{2}$ N/cm$^{2}$，通常在剪切速率为100~1000 s$^{-1}$试验研究时其值接近于10 N /cm$^{2}$；$\eta_{0}$——零剪切黏度；$\tau^{*}$——在零剪切速率和黏度曲线幂律区域之间过渡区域的参数；$n$——幂律指数；$D_{1},D_{2},D_{3},A_{1},\tilde{A}_{2}$——材料常数。

在纤维取向模拟中，通常使用取向概率分布函数和取向张量来描述纤维的取向。取向分布函数能够直接描述纤维的取向状态，由于其复杂性，应用上受到了一定的限制。而取向张量则以取向分布函数矩阵的形式描述纤维的取向状态，为实际应用提供了便利。在以往的研究中，结合流体动力学IRD模型的标

**Tab. 3 Physical parameters of short glass fiber reinforced polypropylene composites**

| Physical parameters | Fiber content of 10% |
|---|---|
| Thermal conductivity | $k$=0.1776 W/(m·K) |
| Specific heat capacity | $C_p$=0.1776 J/(kg·K) |
| Parameters of White-Metzner constitutive equation | $n$=0.20426, $\tau^*$=33086.7 Pa, $D_1$=4.58 E+20 Pa·s, $D_2$=263.15 K, $D_3$=0 K/Pa, $A_1$=40.388, $\widetilde{A}_2$ = 51.6 K, $G$=2.1 E+05 Pa |
| Parameters of fiber orientation model iARD-PRP | $C_I$=0.005, $C_M$=0.005,$\alpha$=0.7 |

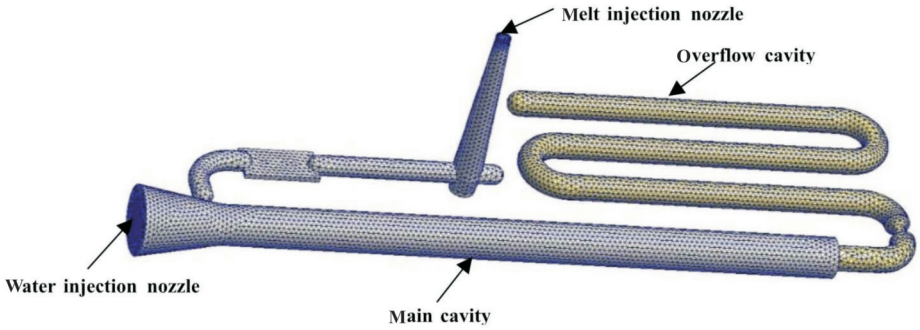



**Fig. 6 Water assisted injection model of circular section cavity channel**

准Folgar-Tucker取向模型是理论上确定悬浮液中各向同性纤维取向的有效方法。然而，与相关实验观测进行定量比较时，该模型表现出过渡预测的不准确性。近年来，Phelps-Tucker ARD模型已经证明了其在处理主各向异性纤维取向方面的能力，但依赖于HD张量的ARD张量在实际应用中往往较为困难。为解决这一问题，iARD-RPR定向模型应运而生[20]。该模型不仅考虑了纤维之间的相互作用，还考虑了纤维在三维空间中的旋转阻力。其数学表达式为

$$\dot{\boldsymbol{A}} = \dot{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{HD}} + \dot{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{iARD}}\left(C_{\mathrm{I}}, C_{\mathrm{M}}\right) + \dot{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{RPR}}\left(\alpha\right) \quad (10)$$

$$\dot{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{HD}} = \left(\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{W}\right) + \xi\left(\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{D} - 2\boldsymbol{A}_4 : \boldsymbol{D}\right) \quad (11)$$

式中：$C_I$——纤维间相互作用参数；$C_M$——纤维与熔体相互作用参数。

结合实验所用材料及上述模型，其主要物性参数如Tab.3所示。

### 2.2 熔体前言追踪

引入体积函数来描述熔体前沿位置及流体穿透关于时间的演变。此处，$f$=0被定义为流体相，$f$=1作为塑料熔体相，然而，熔体前沿位于0<$f$<1单元内。从运动学过程体积分数的提升受下面平流方程所控制

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\boldsymbol{u}f\right) = 0 \quad (12)$$

式中：$f$——体积分数；$\boldsymbol{u}$——速度矢量。

### 2.3 模型结构及过程参数

在本文的理论分析中，采用了基于实验的水辅注射模具的结构模型，其模型如Fig.6所示。在模拟分析过程中，始终保持理论参数与实验参数的一致性。

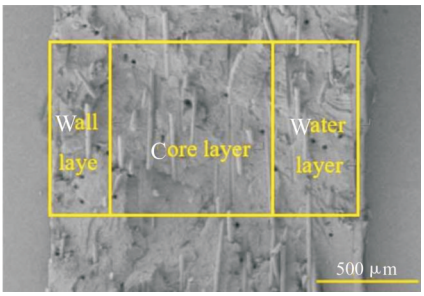



**Fig. 7 Fiber orientation distribution during water-assisted injection molding**

## 3 结果与讨论

Fig.7为水辅注塑成型制品中短玻纤的取向分布，从图中可知，短玻纤在整个制品壁厚中，沿着熔体流动方向呈现出明显的取向分布。这种取向分布被划分为3个区域：皮层、芯层和水道层，这与Liu[13]的研究结果一致。为了进一步分析不同流道截面型腔的制品状况，将从残余壁厚和短玻纤取向分布2个方面进行对比研究。

### 3.1 熔体温度

从Fig.8(a)可知，随着聚合物熔体温度的提升，3种

型腔截面流道的中间端1处、2处残余壁厚减薄,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品残余壁厚最薄,其次是上圆下方形,最后是方形。另外发现,聚合物熔体温度在210~240 ℃时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端1处的残余壁厚更趋近于圆形,而聚合物熔体温度在240~270 ℃时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端1处的残余壁厚更趋近于方形;而在流道中间端2处,整个加工温度范围上圆下方形型腔截面流道制品的残余壁厚更趋近于方形。究其缘由在于,随着聚合物熔体温度升高,聚合物熔体黏度下降,从而高压水在径向更易穿透聚合物熔体促使其前移。在相同加工工艺时,方形型腔受低温模壁冷却的面积最大,其次是上圆下方形型腔,最后是圆形型腔,从而导致方形型腔内的聚合物熔体最易凝固。在聚合物熔体温度提升的过程中,上圆下方形型腔在低温210~240 ℃时,聚合物熔体在圆形与方形相交处及其附近的温度差较小,而在高温240~270 ℃时温度差较大,从而导致由温度差所引起的水道壁面不光滑,降低了高压水的推动力。在流道中间端2处,此处聚合物熔体较1处离注水口更远,从而其冷却时间较长导致聚合物熔体黏度提升,高压水到达此处无法将圆形与方形相交处的熔体推动前移。

从Fig.8(b, c)中可以看出,随着聚合物熔体温度升高,3种型腔截面流道中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度提高,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向取向度最高,其次是上圆下方形,最后是方形。同时,聚合物熔体温度在230~270 ℃时,上圆下方形型腔截面流道制品中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度更趋近于方形。究其缘由在于,随着聚合物熔体温度的升高,其黏度下降,导致高压水更易将径向的熔体推动前移,使得3种型腔截面中间端处残余壁厚减薄。在相同的加工过程中,由上述可知圆形型腔截面残余壁厚最薄,其次是上圆下方形型腔截面,最后是方形型腔截面;同时,综合上述流道中间端1处及2处残余壁厚可知,聚合物熔体温度在230~270 ℃时,上圆下方形型腔截面流道制品的残余壁厚更趋近于方形;结合水辅注射成型中沿壁厚方向纤维取向分布特点可知,残余壁厚与短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度呈反比关系。

### 3.2　注水压力

从Fig.9(a)中可知,随着注水压力的增大,3种型腔截面流道制品中间端1处、2处残余壁厚变薄,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品的残余壁厚最薄、其次是上圆下方形,最后是方形;另外发现,注水压力在4~10 MPa时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端1处的残余壁厚更趋近于圆形;而注水压力在5~10 MPa时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端2处的残余壁厚更趋近于方形,其余段注水压力时上圆下方形型腔截面流道制品在中间端2处的残余壁厚更趋近于圆形。究其缘由在于,随着注水压力增大,高压水更易在径向、轴向推动聚合物熔体前移;在相同加工工艺时,方形型腔受低温模壁冷却的面积最大,其次是上圆下方形型腔,最后是圆形型腔,从而导致方形型腔内的聚合物熔体最易凝固。在注水压力的增压过程中,中间端1处较2处离注水口较近,从而此处聚合物熔体受低温模壁的冷却时长较短,聚合物熔体黏度较低,高压水更易将径向的聚合物熔体推动前移。在中间端2处,随着注水压力的增加,上圆下方形型腔在圆形与方形相交处及其附近易产生温度差,从而导致水道壁面不光滑,使得注水压力的不断增压该处越易造成湍流现象,最终高压水径向聚合物熔体不易推动前移。

从Fig.9(b, c)中可以看出,随着注水压力的增压,3种型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度升高,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向取向度最高,其次是上圆下方形,最后是方形。同时,注水压力在7~10 MPa时,上圆下方形型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度更趋近于圆形。究其缘由在于,随着注水压力的增压,高压水更易将径向聚合物熔体推动前移,使得3种型腔截面流道制品的中间端处残余壁厚减薄。在相同的加工过程中,由上述可知圆形型腔截面残余壁厚最薄,其次是上圆下方形型腔截面,最后是方形型腔截面;同时,综合上述流道中间端1处及2处残余壁厚可知,注水压力在7~10 MPa时,上圆下方形型腔截面流道制品的残余壁厚总体上更趋近于圆形;结合水辅注射成型中沿壁厚方向纤维取向分布特点可知,残余壁厚与短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度呈反比关系。

### 3.3　注水延迟时间

从Fig.10(a)可知,随着注水延迟时间延长,3种型腔截面流道制品中间端1处、2处残余壁厚增厚,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品的残余壁厚最薄,其次是上圆下方形,最后是方形;另外发现,注水延迟时间在0~3 s时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端1处的残余壁厚更趋近于圆形;注水延迟时

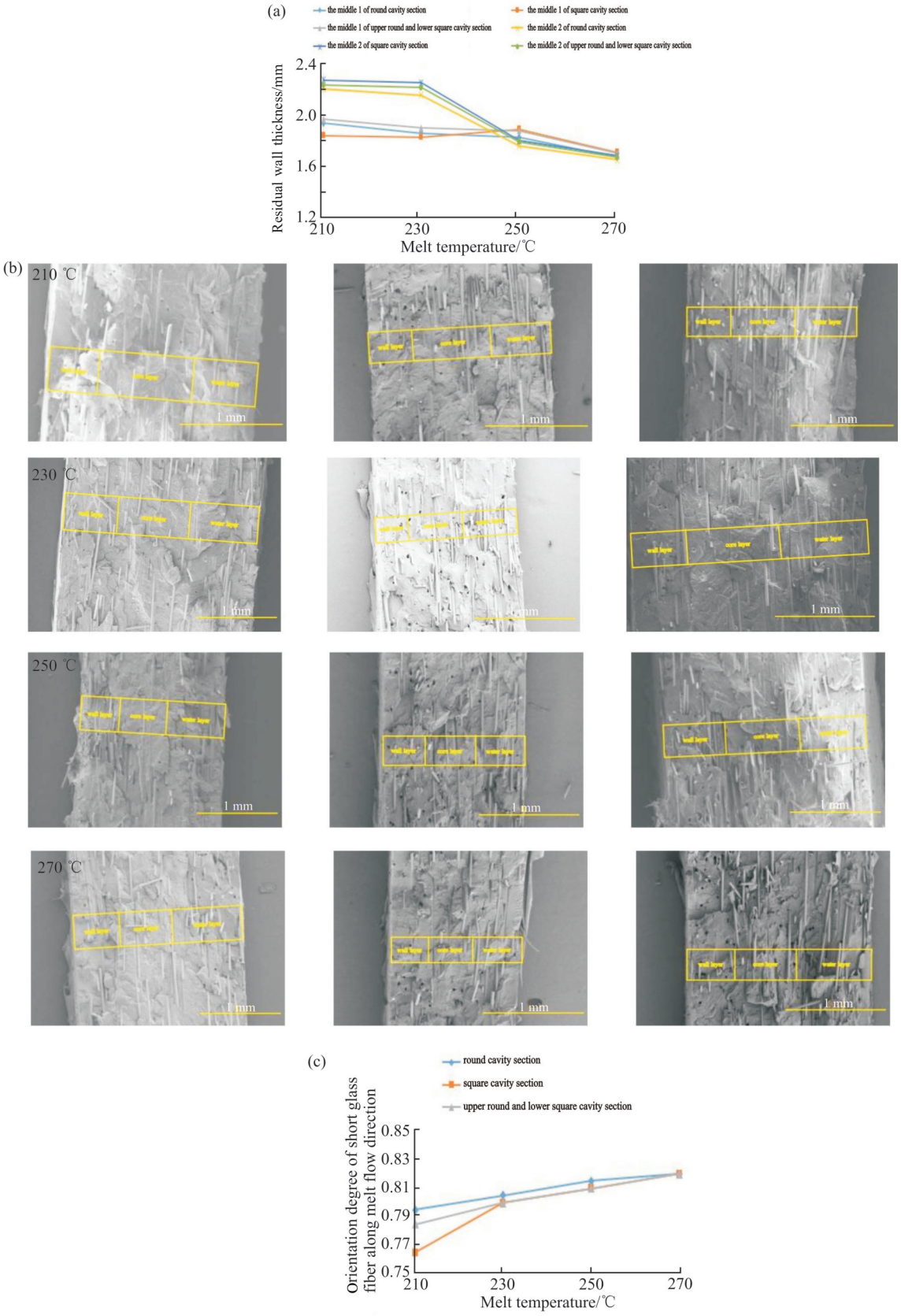



**Fig. 8 Influence of melting temperature on water penetration behavior**

(a): residual wall thickness (b): SEM image of fiber orientation, where each row from left to right is round, upper round, lower square and square cavity section (c): numerical analysis of fiber orientation

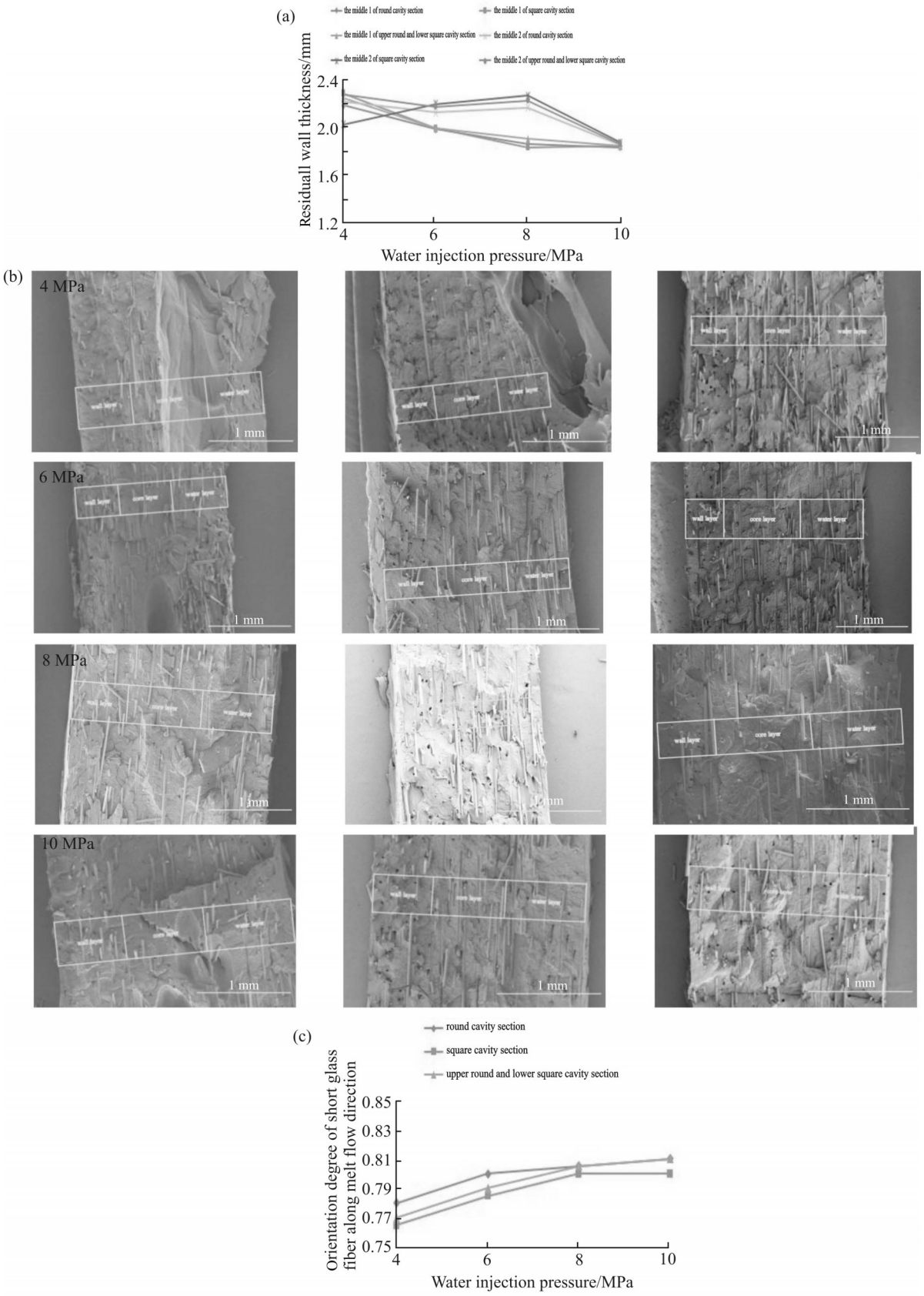



**Fig. 9 Influence of water injection pressure on water penetration behavior**

(a): residual wall thickness (b): SEM images of fiber orientation, where each row from left to right is round, upper round, lower square and square cavity section(c): numerical analysis of fiber orientation

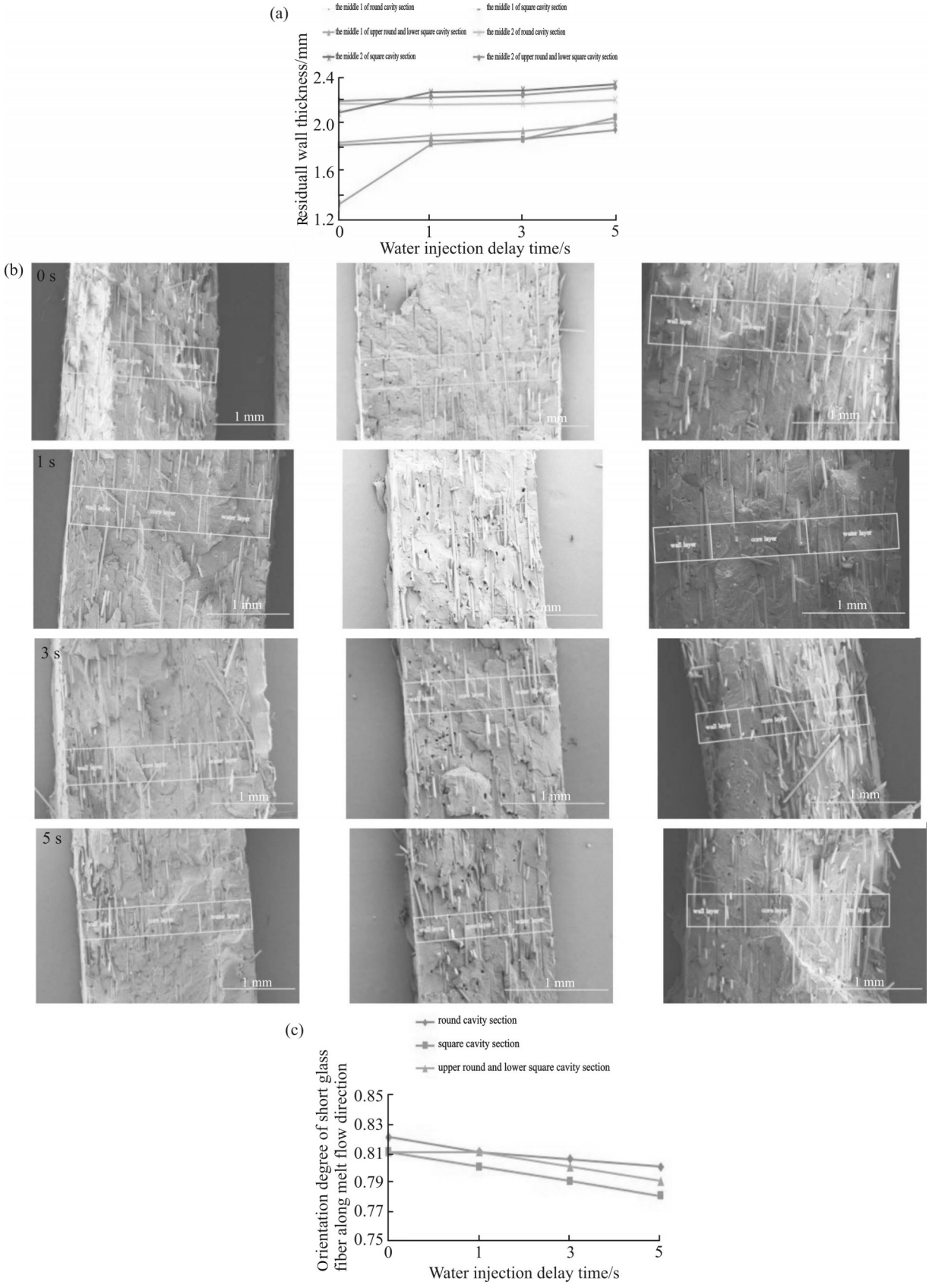



**Fig. 10 Influence of water injection delay time on water penetration behavior**

(a): residual wall thickness (b): SEM images of fiber orientation, where each row from left to right is round, upper round, lower square (c): numerical analysis of fiber orientation

间在0~5 s时,上圆下方形型腔截面流道制品在中间端2处的残余壁厚更趋近于方形。究其缘由在于,随着注水延迟时间延长,低温模壁对高温聚合物熔体的冷却时间更长,从而使得凝固层加厚,导致3种型腔截面在中间端处残余壁厚增厚;在相同加工工艺时,方形型腔受低温模壁冷却的面积最大,其次是上圆下方形型腔,最后是圆形型腔,从而导致方形型腔内的聚合物熔体最易凝固。在注水延迟时间延长的过程中,中间端1处较2处离注水口更近,此处聚合物熔体的黏度更低,且在较短的延迟时间0~3 s时,高压水更易将径向聚合物熔体推动前移;而在中间端2处聚合物熔体受低温模壁冷却时间更长,此处聚合物熔体黏度高,从而高压水无法将径向聚合物熔体推动前移。

从Fig.10(b,c)可以看出,随着注水延迟时间的延长,3种型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度降低,且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向取向度最高,其次是上圆下方形,最后是方形。同时,注水延迟时间在1~5 s时,上圆下方形型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度更趋近于圆形。究其缘由在于,随着注水延迟时间延长,低温模壁对聚合物熔体的冷却时间更长,从而促使凝固层的加厚以及聚合物熔体黏度升高,使得3种型腔截面流道制品的中间端处残余壁厚增厚。在相同的加工过程中,由上述可知,圆形型腔截面残余壁厚最薄,其次是上圆下方形型腔截面,最后是方形型腔截面;结合水辅注射成型中沿壁厚方向纤维取向分布特点可知,残余壁厚与短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度呈反比关系。然而,在注水延迟时间1~5 s时,上圆下方形型腔截面在中间端处的残余壁厚更靠近方形截面,这是由于低温模壁对聚合物熔体冷却所导致的结果,但是从另一方面更加剧了高压水推动水道及其附近处的纤维沿流动方向取向。

## 4　结论

本文的研究工作将进一步推动纤维增强聚合物复合材料水辅助注射成型工艺向实际生产迈进,同时也可为该工艺提供技术指导,其研究结果如下。

(1)随着聚合物熔体温度升高、注水压力增压及注水延迟时间缩短,3种型腔截面流道制品的中间端处残余壁厚减薄及短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度提高;且在相同加工过程中,圆形型腔截面流道制品的残余壁厚最薄及短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度最高,其次是上圆下方形,最后是方形。

(2)随着聚合物熔体升高、注水压力增大及注水延迟时间延长,综合流道中间端1处及2处残余壁厚可知,聚合物熔体温度在210~230 ℃,注水压力在7~10 MPa及注水延迟时间在1~5 s时,上圆下方形型腔截面流道制品的中间端处短玻纤沿聚合物熔体流动方向的取向度更趋近于圆形型腔截面。

**参考文献:**


[1] Liu X H, Pan Y M, Zheng G Q, *et al*. Overview of the experimental trends in water- assisted injection molding[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303: 1800035.

[2] Yang J, Yu S, Yu M. Study of residual wall thickness and multiobjective optimization for process parameters of water-assisted injection molding[J]. Advances in Polymer Technology, 2020,2020: 3481752.

[3] Liu S J. Water assisted injection molding: a review[J]. International Polymer Processing, 2009, 24: 315-325.

[4] 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.

[5] 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: 21746.

[6] 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.

[7] Huang S H, Wang W W, Qi F W, *et al*. Experimental analysis of fluid- assisted injection molding of pipe fittings with different angles by short- shot method[J]. Engineering Reports, 2023, 5: e12571.

[8] Wu Y C, Chen K M, Liu S J. Core out geometries in water channels of water assisted injection moulded parts[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2006, 35: 425-431.

[9] 匡唐清,余春丛,邓洋,等.型腔截面对水辅助注塑成型水穿透的影响[J].化工学报,2014, 65(10): 4176-4182.
Kuang T Q, Yu C C, Deng Y, *et al*. Influence of cross section of cavity on water penetration during overflow water- assisted injection molding process[J]. CIESC Journal, 2014, 65(10):4 176-4182.

[10] 匡唐清,黄淑慧,余春丛.圆管件溢流法流体辅助注塑实验分析[J].塑料工业,2015,43(2):45-48.
Kuang T Q, Huang S H, Yu C C. Experimental study of overflow fluid-assisted injection molding circular tubes[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(2): 45-48.

[11] 黄淑慧,林军,匡唐清,等.不同截面型腔的溢流法流体辅助注

塑工艺的实验分析[J]. 塑料工业，2016，44(4): 54-58.
Huang S H, Lin J, Kuang T Q, *et al*. Experimental study of the penetration interfaces in the overflow fluid- assisted injection molding process of cavities with different cross-section[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(4): 54-58.

[12] Liu S J, Lin M J, Wu Y C. An experimental study of the water-assisted injection molding of glass fiber filled poly- butylene-terephthalate (PBT) composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 1415-1424.

[13] 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.

[14] 张伟，柳和生，黄兴元，等. 短玻纤增强聚丙烯水辅助注射成型纤维取向数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程，2019,35(8): 105-111.
Zhang W, Liu H S, Huang X Y, *et al*. Numerical simulation of fiber orientation in water- assisted injection molding of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(8): 105-111.

[15] 周海迎，柳和生，那兵，等. 短纤维增强聚丙烯水辅注射成型短纤维取向的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程，2019,35(11): 109-115.
Zhou H Y, Liu H S, Na B, *et al*. Numerical simulation of short fiber orientation in short fiber reinforced polypropylene water-assisted injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(11): 109-115.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 陈忠仕，柳和生，余忠，等. 水辅注塑成型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.

[19] 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 P, *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.

[20] Tseng H C, Chang R Y, Hsu H C. Phenomenological improvements to predictive models of fiber orientation in concentrated suspensions[J]. Journal of Rheology, 2013, 57: 1597-1631.

# Water Penetration Behavior in Different Flow Channel Sections

Yibin Huang[1], Kai Zhang[1], Zhong Yu[1], Ting Li[1], Hesheng Liu[2], Tangqing Kuang[2], Zhong Ying[3]
(*1.Jiangxi Province Key Laboratory of Polymer Preparation and Processing, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China; 2. School of Mechanical & Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Shangrao Juweixing Technology Co., Ltd. Shangrao 334001, China*)

**ABSTRACT:** The effects of various processing variables on the residual wall thickness and orientation of short glass fibers along the polymer melt flow direction in the middle of flow channel were studied for different cavity sections. It is found that with the increase of polymer melt temperature and water injection pressure, and the decrease of water injection delay time, the residual wall thickness is thinned and the orientation of short glass fibers along the flow direction of polymer melt is increased at the middle of the flow channel for the three cavity sections; under the same processing variable, the residual wall thickness at the middle of flow channel of the circular cavity section is the thinnest, and the orientation of short glass fibers along the flow direction of polymer melt is the highest, followed by the upper circle and lower square cavity section, and the last is the square cavity section. It can be known that when the polymer melt temperature is 210~230 ℃, the water injection pressure is 7~10 MPa, and the water injection delay time is 1~5 s, at the middle of the upper circular and lower square cavity section, the water penetration behavior is closer to the circular cavity section.

**Keywords:** cavity section; overflow; residual wall thickness; water-assisted injection molding; fiber orientation