http://pmse.scu.edu.cn

水驱动弹头辅助注塑弹头的穿透行为

匡唐清[1]，刘家豪[2]，朱瑶瑶[1]，胡礼彬[1]，柳和生[1]，王 禹[3]

（1.华东交通大学 机电与车辆工程学院，江西 南昌 330013；2.华东交通大学 材料科学与工程学院，江西 南昌 330013；
3.江西联塑科技实业有限公司，江西 南昌 330199）

摘要：残余壁厚(RWT)是表征水驱动弹头辅助注塑成型(WPAIM)管件质量的一个重要指标，直接受弹头的穿透行为影响。为了研究WPAIM过程中弹头的穿透行为及相应的RWT分布规律，文中基于计算流体动力学(CFD)方法对WPAIM过程进行了数值模拟，模拟结果与实验结果吻合较好。研究结果表明，WPAIM管在直线段的RWT相对均匀，而在曲线段，外凸侧RWT大于内凹侧RWT，两者之间的RWT差值小于水辅助注射成型(WAIM)管。通过对WPAIM中弹头穿透行为与WAIM中水的穿透行为分析发现：穿透前沿附近的压力分布WPAIM较WAIM更均匀，穿透两侧的速度差也更小，弹头能更好地沿型腔中心穿透，提高管件壁厚的均匀性；无论是在直段或是弯曲段，两者的穿透过程都是在不断加速的，WAIM穿透速度更快，而WPAIM的加速过程较稳定。

关键词：水驱动弹头辅助注塑；数值模拟；残余壁厚；穿透行为
中图分类号：TQ320.66+2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）04-0093-11

水辅助注射成型(WAIM)工艺是一种创新型的注塑成型技术，最早由德国发展起来，用于成型中空或部分中空的塑料零件[1,2]。WAIM和气体辅助注塑成型(GAIM)统称为流体辅助注塑成型(FAIM)。与采用氮气作为辅助流体的GAIM工艺相比，WAIM工艺具有成型周期时间短、残余壁厚(RWT)分布更均匀、冷却效果好、节省材料等独特优点[3,4]。目前汽车行业的一些塑料零件，如发动机冷却水管、空调管道、脚踏板等都是通过WAIM工艺制造的[5]。

水驱动弹头辅助注塑成型(WPAIM)工艺在WAIM的基础上引入了固体弹头，1992年首次在日本专利[6]中提出。在WPAIM过程中，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[7,8]。WPAIM的成形过程如Fig.1所示：在水针的入口处预置固体弹头；合模后，高温聚合物熔体从注塑机的喷嘴注入模具型腔；随后，在短暂延迟时间后注入高压水推动弹头向前运动；同时熔体经过水冷保压后迅速凝固；最后排水，形成中空制件。由于是以水驱动弹头作为穿透介质，WPAIM制品的RWT主要由弹头的尺寸控制，可以解决WAIM工艺中存在的RWT较厚、RWT波动、材料选择存在局限性等问题。此外，由于弹头固定在流体注射单元上，WPAIM还可以解决在熔体注射阶段时，熔体进入流体注射单元阻塞高压注水的问题[9]。WAIM的研究主要集中在装置开发、实验研究和仿真分析3个方面：刘旭辉等[10,11]利用示踪技术观察了WAIM中熔体和水的流动填充过程，分析了工艺参数对熔体流动的影响。张增猛[12]和汪志泳等[13]通过实验模拟研究了高压水在WAIM注水阶段的穿透行为。Pudpong[14]和Lin等[15]研究了弯曲截面WAIM管道的RWT分布。据笔者所知，只有德国亚琛工业大学、华东交通大学和浙江大学[16~19]对

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0078
收稿日期：2023-06-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52163006，52273033）；江西省自然科学基金重点项目（2023ACB204004）；江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目（20223BBE51012）
通讯联系人：柳和生，主要从事聚合物成型工艺研究，E-mail: hsliu@ecjtu.edu.cn

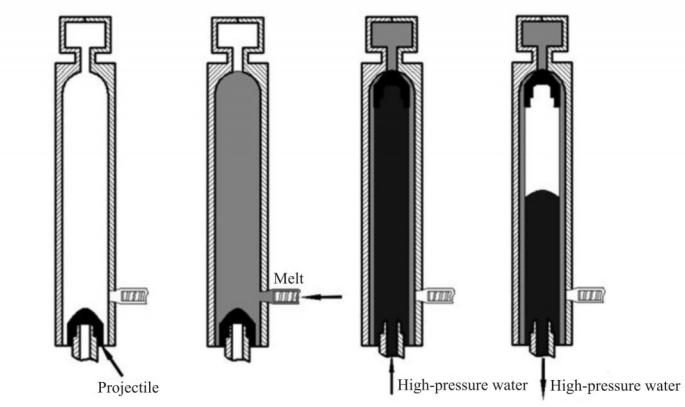


Fig. 1 Forming process diagram of the WPAIM process

WPAIM过程进行了研究：杨帆等[19]探讨了弯曲半径和弯曲角度对WPAIM管件RWT的影响。匡唐清等[20,21]研究了弹头、工艺参数和空腔几何形状对WPAIM管件RWT的影响。丁加新等[22]通过实验和模拟研究了WPAIM管件的成型过程及其RWT的分布规律。

为了分析在WPAIM过程中弹头的穿透行为及RWT的分布和相间穿透机理，开发了基于WAIM的WPAIM实验平台，用于生产WPAIM中空管件，并且采用计算流体动力学(CFD)的方法对WPAIM工艺过程进行了仿真模拟。将WPAIM模拟结果与实验结果的管件RWT分布进行比较，验证了模拟结果的准确性，并分析了WAIM与WPAIM不同工艺中，弹头穿透行为的差异及其成因。

1 数学模型

1.1 基本控制方程

WPAIM充填穿透过程本质上是液-固-熔耦合作用下的流体动力学问题，包括熔体的非牛顿层流和高雷诺数的水的湍流流动[23]。为提高计算效率，基于CFD对WPAIM模型进行了如下简化和假设：(1)将聚合物熔体和水的充填流动视为非等温不可压缩过程；(2)将熔体的比热容、导热系数等性质视为常数；(3)不考虑熔体的结晶相变焓；(4)忽略水流前端的表面张力；(5)在初始阶段，高温熔体在模具型腔内均匀分布，型腔内各处温度相等；(6)聚合物熔体流动具有无滑移边界；(7)树脂弹头与高温熔体在穿透过程中不产生热交换。

在上述假设和简化的基础上，同时考虑高压水湍流特性，对描述流体流动的控制方程，包括连续性方程、运动方程和能量方程进行了如下改进。式中：u_i，u_j及u_l——速度分量；ρ——密度；μ——动态黏度；p——压力；δ_{ij}——克罗内克函数；$-\rho\overline{u_iu_j}$——雷诺应力；E——总能量；λ_{eff}——有效传热系数；$(\tau_{ij})_{eff}$——偏应力张量：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_iu_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{\rho u_i'u_j'}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E+p))=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}+u_i(\tau_{ij})_{eff}\right) \tag{3}$$

式(2)表示考虑高压水湍流特性的雷诺时均动量方程。基于Bossiness涡粘性假设，雷诺应力项$-\overline{\rho u_i'u_j'}$可以得到式(4)。式中：$\mu_t$——湍流黏度；$k$——湍流动能：

$$-\overline{\rho u_i'u_j'}=u_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+u_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \tag{4}$$

通过引入Bossiness涡粘性假设，可以通过计算湍流粘性系数(μ_t)来求解湍流模型。由张增猛等[13]的研究可知，k-ω模型比k-ω模型更能准确地预测WAIM产物的RWT和两相流的热传导过程。因此，高压水的流动采用k-ω模型进行模拟。式中：k——湍流动能；ω——比耗散率；α^*——低雷诺数的修正系数：

$$u_t = a^* \frac{\rho k}{\omega} \tag{5}$$

可以通过求解以下输运方程来计算变量 k 和 ω。式中：G_k 和 G_ω——湍流动能的产生项；Y_k 和 Y_ω——湍流耗散项；D_ω——正交耗散项：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - Y_k \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega})\frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \tag{7}$$

1.2　本构方程与黏度模型

在填充过程中，高温熔体主要受到剪切应力的影响，因此将熔体视为广义牛顿流体，不考虑熔体的弹性行为。广义牛顿流体本构方程如下所示。式中：T——温度；$\dot{\gamma}$——变形速度张量：

$$(\tau_{ij})_{eff} = \eta(p,T,\dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{8}$$

WPAIM中有明显的冷却效果，因此适用温度范围更宽的Cross-WLF黏度模型表示聚合物熔体的熔融凝固状态。式中：η_0——零剪切黏度；τ^*——牛顿行为，和幂律行为之间转换时的临界剪应力；n——高剪切速率下的非牛顿指数；T^*——玻璃化转变温度；A_1,$\overline{A}_2$,D_1,D_2和D_3——材料常数：

$$\eta(\dot{\gamma},T,p) = \frac{\eta_0(T,p)}{1+(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*})^{1-n}}$$

$$\eta_0(T,p) = D_1\exp(-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)}) \tag{9}$$

$T^*(p) = D_2 + D_1 p$，$A_2 = \overline{A}_2 + D_3 p$

模拟成型材料采用聚丙烯（PP），Cross-WLF模型的参数如Tab.1所示。

1.3　体积分数方程

流体体积（VOF）模型用于追踪水/熔体的两相界面的移动，自由界面通过包含 φ_i 的连续性方程求解。式中：φ_i 在0到1之间变化，表示单元网格中第 i-th 相的体积分数，称为第 i-th 相前沿：

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + u_i\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_t} = 0 \qquad \sum_{i=1}^{n}\varphi_i = 1 \tag{10}$$

1.4　模拟与实验

模拟分析采用的计算域模型与实验中使用的模具几何形状一致，截面为圆形，外径为16 mm，弯曲半径为20 mm，2个偏转角分别为30°和60°，其水平放置图如Fig.2所示。

实验所用弹头采用聚酰胺6树脂材料。为了形成圆形截面的中空部分并减少弹头的穿透阻力，将

Tab. 1　Cross-WLF viscosity model parameters for PP

n	τ^*/Pa	D_2/K	D_1/(Pa·s)	A_1	$\overline{A}_2$/K	D_3/(K·Pa^{-1})
0.2921	24075	263.15	2.02e+15	33.242	51.6	0

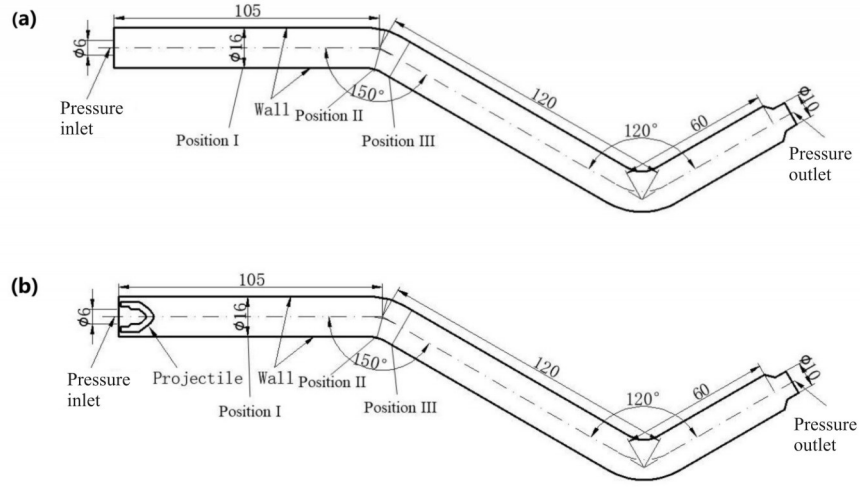


Fig. 2　Schematic diagram of CFD model of (a) WAIM and (b) WPAIM process for the simulations

弹头的尾部和头部分别设计为圆柱形和抛物线形，对其进行机加工[24]。弹头内部设计为中空阶梯结构，既能减小弹头质量，又能保证弹头穿透的稳定性[25]。弹头的尺寸和结构如Fig.3所示。

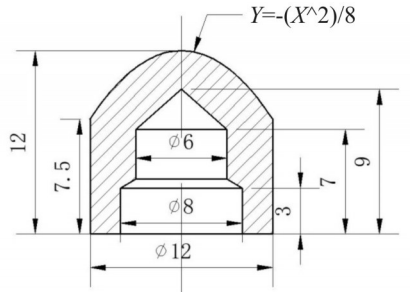


Fig. 3 Projectile for the experiment of WPAIM process

首先，利用ANSYS Design Modeler和ANSYS mesh等预处理软件分别进行几何建模和网格划分。考虑到计算效率和计算资源的消耗，采用二维模型进行仿真分析。虽然有别于三维管道，但仍然可以定性地反映弹头在对称平面上的穿透行为。WAIM和WPAIM模型均采用网格边长为0.3 mm的三角形网格进行离散。WAIM和WPAIM的CFD模型如Fig.4所示。

随后将网格模型导入FLUENT16.0平台进行数值求解。对控制方程进行离散化，选择PISO算法求解压力-速度耦合方程，PRESTO!格式离散动量项，其他项使用First-Order Upwind。此外，利用VOF两相流模型模拟了水与熔体的耦合流动。采用6DOF模型模拟实体弹头的运动轨迹和形态，采用弹簧平滑法和网格重划分法更新网格节点位置，其控制方程中：v——弹头的平动速度；ω——弹头的转动速度；m——弹头的质量；J——弹头的转动惯量：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\dfrac{F}{m}\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{M}{J}\end{cases}\tag{11}$$

将用户自定义函数(UDFs)加载到FLUENT中进行计算，UDFs包括材料黏度模型、边界条件、注入阶段判断以及不同注射阶段的时间步长。为了提高求解过程的收敛性和效率，注水阶段的时间步长设为1×10^{-5} s，弹头穿透熔体的时间步长也相应延长。

规定的边界条件如下：进口处的压力值和温度值分别取决于注水压力和水温；由于溢流腔相对于主腔足够大，所以将出口处的压力值指定为大气压力；对壁面施加无滑移定温边界条件，壁面温度等于模具温度；将弹头视为一个没有热特性和变形的固体(刚体)。成型方法为溢流法，即在注水前将熔体完全充满型腔。因此，在初始阶段，计算区域的流场分布如下：熔体和水的体积分数分别为1和0；速度和压力均为0；温度为熔体注射温度；弹头的空心部分标记为水。

利用Tab.2中的工艺参数进行模拟计算和成型实验。WAIM工艺与WPAIM工艺参数相同，只是WPAIM工艺的基础上引入了固体弹头，利用水泵产生的高压水推动弹头穿透熔体，同样可用于成型中空管件[21]。将管件沿纵向对称面切割，在流动方向A1~A3，B1~B3，C1~C4，D1~D3，E1等14个特定位置测量管件的RWT，如Fig.5所示。重复5次实验取平

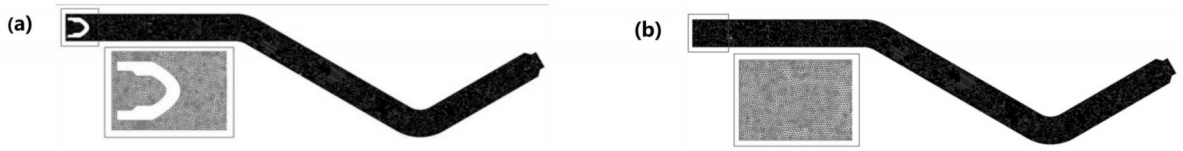


Fig. 4 CFD models of (a) WPAIM and (b) WAIM

Tab. 2 Process parameters used in experiments and simulations

Molding method	Melt injection temperature /°C	Melt injection pressure /MPa	Water delay time /s	Water temperature /°C	Water pressure /MPa	Holding time/s	Mold temperature /°C
Overflow	210	6	3	30	5	10	30

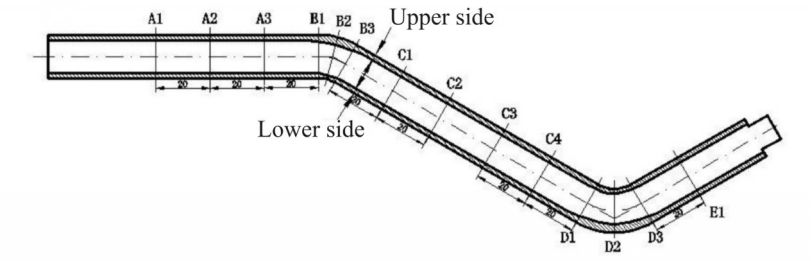


Fig. 5 Schematic diagram of positions and method for measuring RWTs

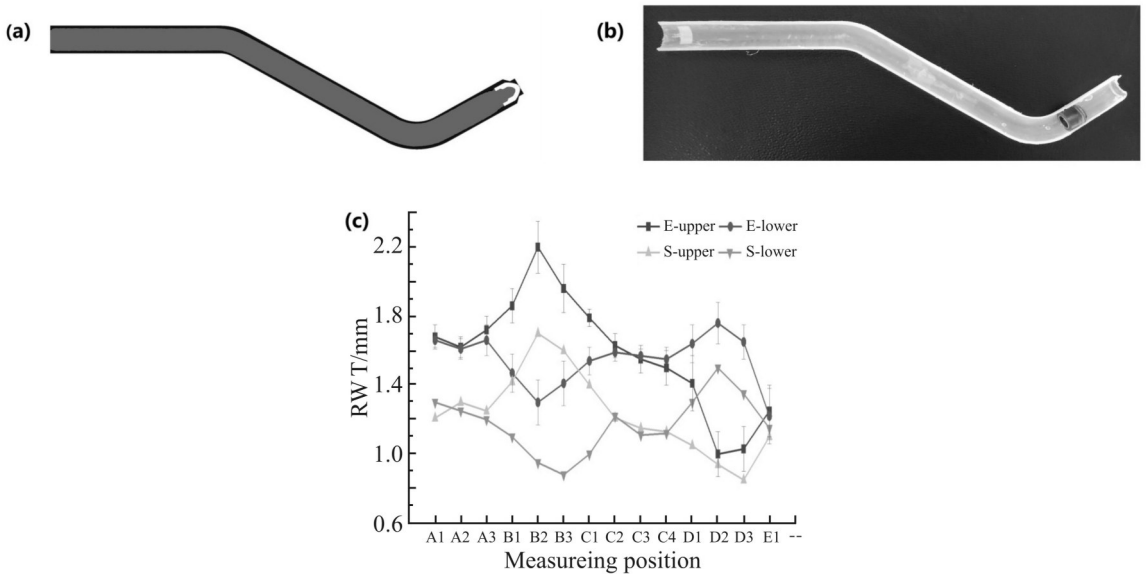


Fig. 6 RWT distribution at various positions of WPAIM pipe fittings obtained from simulation and experiment. E and S represent the experimental and simulation results, respectively
(a): simulation results; (b): experimental result; (c): distribution diagram of RWT

均值作为测量结果。

2　结果与分析

2.1　RWT结果

Fig.6(a)为模拟所得的相分布，Fig.6(b)为实验所得试样的纵剖照片。为便于比较，对模拟结果与试验试样在指定位置测量RWT，得到RWT沿流动方向的分布结果，如Fig.6(c)所示。由此可知，管件直段壁厚较均匀，而弯曲段外侧（B1，B2，B3位置Upper侧与D1，D2，D3位置Lower侧）更厚，弯曲段内侧（B1，B2，B3位置Lower侧与D1，D2，D3位置Upper侧）更薄。模拟结果与实验结果的RWT分布趋势一致，但模拟所得各位置的RWT均比实验结果对应位置要更薄。

WPAIM管件沿流动方向的RWT分布规律说明弹头在直段上沿型腔中心穿透，而在弯曲段则更靠近内凹侧运动。这主要是因为：当高压水注入模具型腔时，弹头会在高压水的驱动下沿着阻力最小的路径穿透熔体；一般来说，熔体温度越高，黏度越低，流动阻力越小；低温模具与高温熔体间的热交换使得熔体黏度增大，越靠近模具壁面，熔体黏度越大，与模具壁面接触的熔体迅速冷却形成凝固层，这使得弹头只能在模具型腔中间的高温熔体中穿透进而形成中空。在管件直段部分，凝固层在管径方向上均匀分布，因此弹头穿透后形成了截面恒定、RWT均匀的中空通道。在管件弯曲段，由于内凹侧的流线长度比外凸侧更短，这使得靠近内凹侧的熔体与模具壁之间的热交换更少，导致内凹侧熔体冷却较慢，因此内凹侧熔体阻力更低，弹头会靠近阻力小的内凹侧运动。WPAIM管件的RWT模拟结果相较实

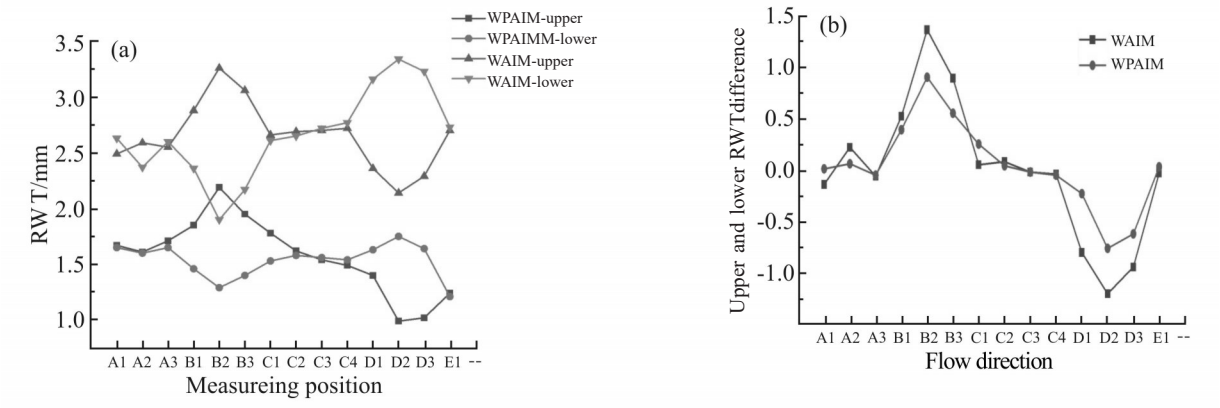


Fig. 7 Comparison of (a)RWT wall thickness distribution (experimental results) and (b) difference between upper and lower RWT of WAIM and WPAIM pipe fittings

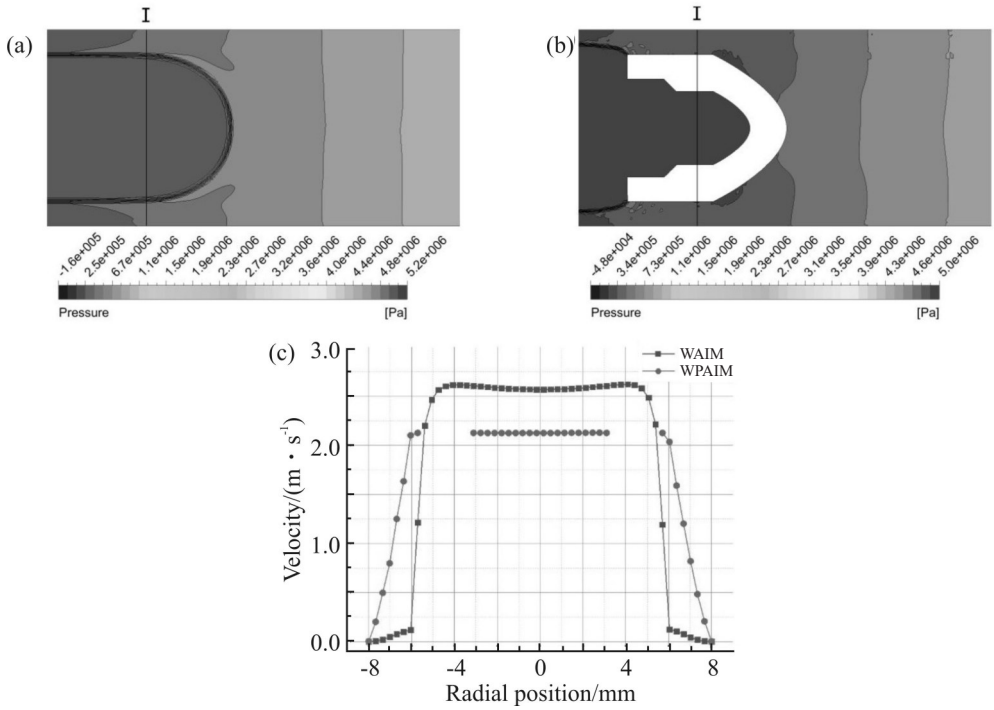


Fig. 8 Simulation result at the first straight segment at 50 mm from the entrance

(a): pressure contours of WAIM; (b): pressure contours of WPAIM; (c): velocity distribution of WAIM and WPAIM in the radial direction of position I

验结果要偏小，主要因为在模拟中，模具型腔初始状态为充满熔体，忽略了熔体充填时与模具的热交换，因此模拟过程中的熔体温度高于实验过程中的熔体温度，黏度更低，穿透阻力更小，导致实验结果的RWT偏厚，此外，冷却阶段存在着收缩问题，内部保压能保证外观尺寸，但熔体的收缩体现在内部穿透截面的增大，这也是导致实验结果RWT偏厚的原因之一。

为比较WPAIM与WAIM管件壁厚的差异，将同等成型条件所得的WAIM管件纵剖，测量RWT，2种工艺成型的管件RWT分布如Fig.7(a)所示，Fig.7(b)为2种工艺管件沿流动方向的两侧壁厚差（上侧与下侧RWT之差）分布。由Fig.7(a)可知，WAIM管件沿流动方向的RWT分布与WPAIM相似，弯曲段外侧更厚，内侧更薄，且各位置RWT要比WPAIM更厚。由Fig.7(b)可知，2种工艺在直管段壁厚较均匀，在弯曲段WAIM管件的内外侧壁厚差大于WPAIM。由此说明，相对WAIM工艺，WPAIM工艺能获得壁厚更薄更均匀的管件。

此外，由Fig.6(c)可知，无论是在直段还是在弯

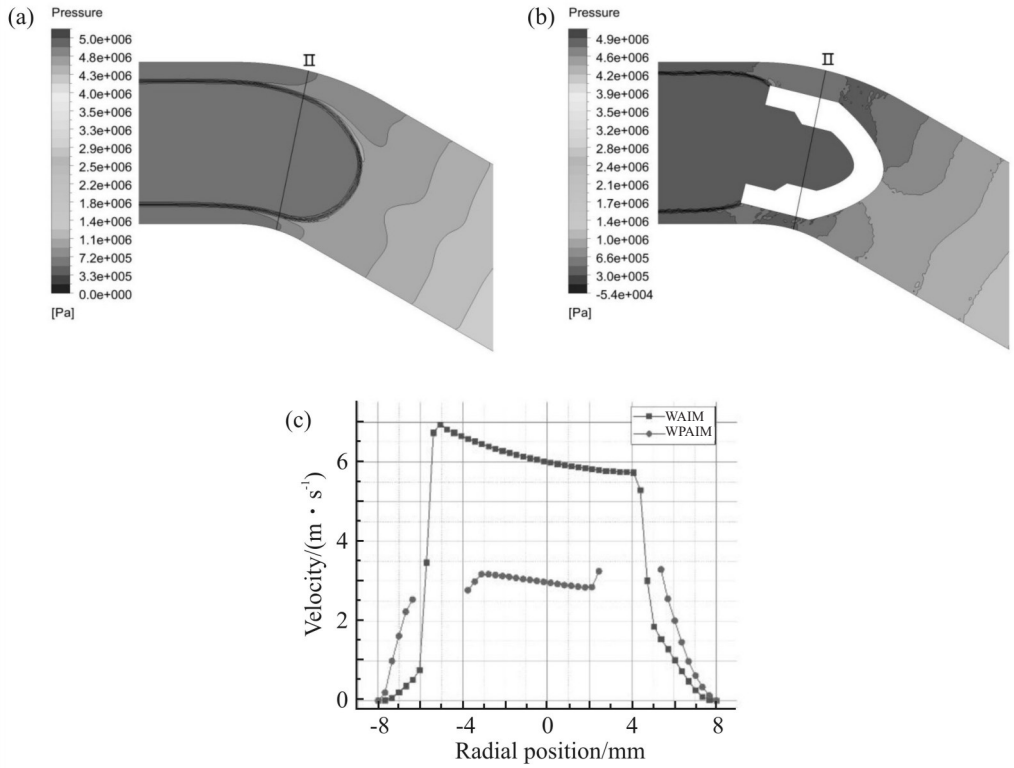


Fig. 9 Simulation results at the first curve segment

(a): pressure contours of WAIM; (b): pressure contours of WPAIM; (c): velocity distribution of WAIM and WPAIM in the radial direction of position II

曲段,WPAIM管件的RWT随着弹头的穿透进程有减小的趋势。这是因为随着弹头不断地向前推动熔体流进溢流腔,弹头前方熔体量逐渐减少,阻力减小,导致弹头的穿透速度加快(Fig.8(c),Fig.9(c)和Fig.10(c)可对比说明),弹头前端与侧边的熔体剪切加剧,黏度降低,其阻力也进一步降低。更多的熔体在水的驱动下随弹头向前流动,因此管件RWT沿穿透方向逐渐减小。

2.2　弹头穿透行为分析

WPAIM工艺管件沿流动方向的RWT分布特点、与WAIM的RWT差异均是由成型过程中弹头特有的穿透行为导致,为此基于模拟结果对弯曲段前后弹头的穿透行为进行分析。

在WPAIM工艺过程中,弹头在高压水驱动下稳定沿着型腔中心穿透熔体,这使得WPAIM管件的RWT在直线段较为均匀。如Fig.8(a)和Fig.8(b)所示,在WPAIM工艺中第1个直线段中间位置(即Fig.8(b)中位置I处)穿透前沿附近的压力云图可以看出,穿透前沿附近的WPAIM和WAIM压力分布非常均匀,两侧几乎没有压力差。同时由Fig.8(c)中位置I处沿径向方向的WPAIM及WAIM速度图可知,WPAIM的速度剖面类似于等腰梯形,其中中间段等速截面的范围约等于弹头的直径,WPAIM管件上侧(水平轴正方向)的速度与下侧(水平轴负方向)沿型腔中心高度对称,弹头侧到壁面速度呈线性分布,为典型的拖曳流,且速度基本对称,这表明WPAIM工艺过程中的固体弹头在直线段沿型腔中心稳定穿透,从而形成均匀的RWT。WAIM在位置I处的速度也沿型腔基本对称,但由于水与熔体黏度的巨大差异,前端的高黏度熔体使得水穿透前沿的速度曲线不呈牛顿流体的抛物线形,而是呈柱塞流特点,低黏度水穿透时对侧边高黏度熔体的剪切力也极小,在水-熔界面处速度突变。

如Fig.9(b)所示,在WPAIM的第1个弯曲段中部位置(即Fig.9(b)中位置II处)穿透前沿附近的压力云图中可以看出,外凸侧的高压区面积明显大于内凹侧,两侧的压力差驱动弹头向压力小的内凹侧穿透,所以外凸侧的RWT较大,管件弯曲段的RWT均匀性差。由Fig.9(c)可知,WPAIM在外凸侧(水平轴正方向)的速度大于内凹侧(水平轴负方向),而WAIM

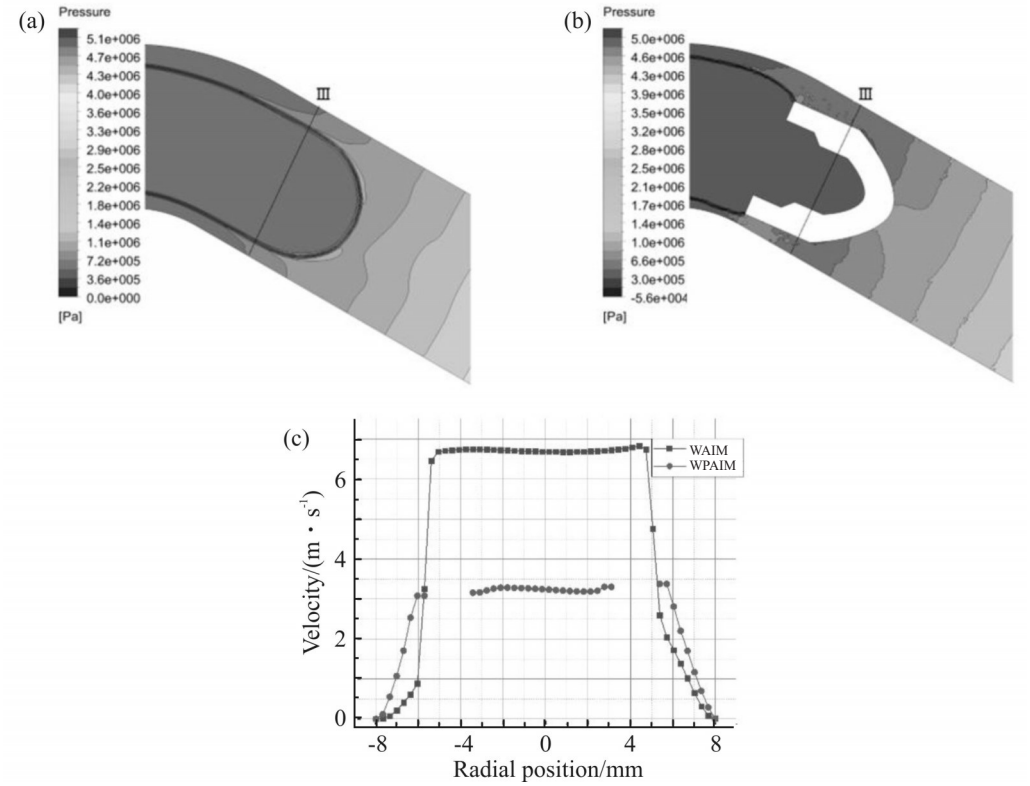


Fig. 10 Simulation result near the exit of the first curve segment

(a): pressure contours of WAIM; (b): pressure contours of WPAIM; (c): velocity distribution of WAIM and WPAIM in the radial direction of position III

的速度分布与之相反，说明WAIM高压水和WPAIM弹头在弯曲段的穿透行为存在差异。在WPAIM工艺过程中，固体弹头在其前部外凸侧熔体的挤压和后端高压水的驱动共同作用下发生旋转，完成弯曲段的转向穿透，因而其外凸侧的速度要高于内凹侧，而在WAIM中，水沿阻力最小、压力梯度最大的内凹侧穿透，内凹侧速度高于外凸侧。同时从Fig.9(c)中可以看出，WPAIM内凹侧与外凸侧的速度差为0.75 m/s，小于WAIM的1.65 m/s，这表明弹头在弯曲段的运动更为平滑、稳定，导致WPAIM内凹侧和外凸侧的RWT差小于WAIM，即WPAIM管件弯曲段的RWT均匀性比WAIM好。

当弹头从弯曲段进入第2个直线段（C1~C4）时，弯曲段产生的压差逐渐减小并最终消失，因此高压水和弹头逐渐向型腔中心移动。由Fig.10(b)可知，在通过弯曲段后弹头及熔体两侧的压力差和速度差都减小了。这表明，WPAIM中的弹头离开弯曲段后都能快速回归到模具型腔中心进行穿透，管件的上、下RWT差逐渐减小，即管件RWT逐渐均匀。由Fig.10(c)可知，在刚进入第2个直线段时，WPAIM中两侧熔体流动速度基本对称，迅速回复到拖曳流的状态，但是WAIM两侧熔体流动仍存在一定速度差，这说明在经过弯曲段过后，WPAIM相较WAIM能更快地回复到稳定的穿透状态。

对比Fig.8(c)，Fig.9(c)和Fig.10(c)可知，WAIM的穿透速度始终高于WPAIM，且差距越来越大，2种工艺的穿透速度均随穿透的进行而加快。这主要是因为前端熔体长度缩短，压力梯度增大，导致WPAIM中弹头的穿透速度和WAIM工艺中水的穿透速度均有提升。WAIM工艺水穿透速度提升明显，而WPAIM工艺弹头穿透速度提升相对平稳。这主要是因为在WPAIM工艺中，弹头除了受前端熔体的阻力外，还受侧边熔体的剪切力，由于弹头截面较大，侧边熔体厚度较薄黏度较高，导致剪切力增大，因而弹头穿透速度提升较慢。

3 结论

根据高压水和高温熔体在WPAIM充填和穿透

过程中的流动特性,建立了高压水穿透的数学模型。利用模流分析软件对WPAIM工艺进行了数值模拟,模拟结果与实验结果吻合较好。为了揭示WPAIM过程中RWT分布规律的影响因素,分析了WPAIM过程中管件的RWT分布和弹头的穿透行为,并与WAIM进行了比较。通过这些工作得出的主要结论如下。

(1)WPAIM管件和WAIM管件的RWT在直段上分布相对均匀,而弯曲段外凸侧的RWT大于内凹侧。与WAIM管件相比,WPAIM管件沿流动方向的RWT更均匀。

(2)在直线段,弹头穿透前沿附近的压力场和速度场分布均匀,弹头能够沿空腔中心稳定穿透,因此在管件直线段的RWT较为均匀。

(3)在弯曲段,外凸侧的冷却效果大于内凹侧,因此外凹侧具有更大的穿透阻力。此外,内凸侧和外凹侧之间还存在压力差和速度差。这2个因素导致弹头向内凹侧移动的距离较短,穿透阻力较低,导致外凸侧RWT大于内凹侧RWT。

(4)弹头离开弯曲段后,穿透前沿附近的压力和速度差迅速减小,导致弹头向型腔中心移动,RWT逐渐均匀。

(5)在整个穿透过程中,WAIM整体穿透速度都要高于WPAIM,在弯曲段时两者速度差值高于直线段,且两者的穿透速度不断提升,WPAIM穿透速度的提升较为平稳。

参考文献:

[1] Liu S J. Water assisted injection molding: a review[J]. International Polymer Processing: the Journal of the Polymer Processing Society, 2009, 24: 315-325.

[2] Michaeli W, Brunswick A, Pohl T. A comparison of gas and water injection moulding of hollow articles by fluid-assisted injection [J]. Kunststoffe Plast Europe, 1999, 89: 18-20.

[3] Protte R, Bangert H. Water-assist injection molding-an innovative process technology for productivity improvement developments in processing, equipment and materials[C]. Nashville, Tennesse: Society of Plastics Engineers 61st Annual Technical Conference (ANTEC 2003), 2003.

[4] Knights M. Water injection molding makes hollow parts faster, lighter[J]. Plastics Technology, 2002, 48: 42.

[5] Knights M. Water injection molding: it's all coming together[J]. Plastics Technology, 2005, 51: 54-61.

[6] Isao I. Manufacture of hollow body: JP, H04208425[P].1992-07-30.

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

[8] Tangqing K, Jiamin W, Hesheng L, *et al.* Effects of processing method and parameters on the wall thickness of gas-projectile-assisted injection molding pipes[J]. Polymers, 2023, 15:1985.

[9] 匡唐清, 刘文文, 吴丽旋, 等. 流体驱动弹头辅助注塑技术[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(11): 184-190.
Kuang T Q, Liu W W, Wu L X, *et al.* Review of fluid-projectile-assisted injection molding technology[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2016, 32(11): 184-190.

[10] 刘旭辉,黄汉雄. 水辅助熔体充模流动的熔体流痕[J]. 化工学报, 2010, 61(10): 2523-2528.
Liu X H, Huang H X. Melt flow patterns in water-assisted melt filling[J]. CIESC Journal,2010, 61(10): 2523-2528.

[11] 刘旭辉, 黄汉雄. 工艺参数对水辅助熔体充模流动的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(2): 520-524.
Liu X H, Huang H X. Effects of processing conditions on melt flow of water assisted melt filling[J]. CIESC Journal, 2011, 62 (2): 520-524.

[12] 张增猛, 周华, 高院安, 等. 水辅助注射成型充模流动的仿真与分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 140-146.
Zhang Z M, Zhou H, Gao Y A, *et al.* Simulation and analysis on cavity filling process in water-assisted injection molding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 140-146.

[13] 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.

[14] Pudpong T, Buahom P, Areerat S, *et al*. The effects of processing parameters on the residual wall thickness distribution at the sharp angle corner of water assisted injection molded parts[J].

International Polymer Processing, 2013, 28: 528-540.

[15] Lin K, Chang F, Liu S J. Using differential mold temperatures to improve the residual wall thickness uniformity around curved sections of fluid assisted injection molded tubes[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36: 528-540.

[16] Michaeli W, Hopmann C, Gründler M, *et al*. Process development of the projectile injection technique (PIT) [C]. Marrakech, Morocco: Proceedings of Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2011 (ANTEC 2011), 2011:1706-1710.

[17] Behmenburg C, Hopmann C, Recht U. Manufacturing of elastomeric hollow bodies using the projectile injection technique [C]. Cincinnati: Proceedings of Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2013 (ANTEC 2013), 2013: 282-285.

[18] Hopmann C, Recht U. Manufacturing of fibre- reinforced, elastomeric parts using the injection molding process[C]. Orlando, Florida: Proceedings of Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2015 (ANTEC 2015), 2015: 1728-1732.

[19] 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.

[20] 匡唐清, 赖德炜, 潘俊宇, 等. 水驱动弹头辅助注塑管件壁厚的工艺影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(12):106-111.
Kuang T Q, Lai D W, Pan J Y, *et al.* Residual wall thickness of water- powered projectile- assisted injection molding pipes[J]. Polymer Materials Engineering & Science, 2018,34(12):106-111.

[21] 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.

[22] 丁加新, 陈英龙, 周华. 水辅成型浮动芯注射对制品残余壁厚的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 937-945.
Ding J X, Chen Y L, Zhou H. Effect on residual wall thickness of parts with floating core injection of water- assisted injection molding[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5): 937-945.

[23] 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.

[24] 胡礼彬, 匡唐清, 赖家美, 等. 弹头材料对溢流法水驱动弹头辅助注塑制件的影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5):87-91.
Hu L B, Kuang T Q, Lai J M, *et al.* Influence of projectile material on overflow water- projectile assisted injection molding pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 87-91.

[25] 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 in water driven warhead assisted co injection molding process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39 (4): 146-153.

Projectile Penetration Behavior of Water-Projectile-Assisted Injection Molding

Tangqing Kuang[1], Jiahao Liu[2], Yaoyao Zhu[1], Libin Hu[1], Hesheng Liu[1], Yu Wang[3]

（*1. School of Mechanical & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;*

2. School of Materials Science & Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013,China;

3. Jiangxi Lesso Technology Industry Co., Ltd, Nanchang 330199, China）

ABSTRACT: Residual wall thickness (RWT) is an important indicator that characterizes the quality of water-projectile-assisted injection molding (WPAIM) pipe fittings, which is directly affected by the penetration behavior of warhead. In order to study the penetration behavior of projectile and corresponding RWT distribution law in WPAIM process, the WPAIM process was numerically simulated based on computational fluid dynamics (CFD) method, and the simulation results are in good agreement with the experimental results. The research results indicate that the RWT of WPAIM pipes is relatively uniform in the straight section, while in the curved section, the RWT on the convex side is greater than that on the concave side, and the difference in RWT between the two is smaller than that of water assisted injection molding (WAIM) pipes. By comparing and analyzing the penetration behavior of warheads in WPAIM with that of water in WAIM, it is found that the pressure distribution near the penetration front is more uniform in WPAIM compared to WAIM, and the velocity difference between the penetration sides is also smaller. The projectile can better penetrate along the center of cavity, improving the uniformity of pipe wall thickness; the penetration process of both is continuously accelerating, whether in the straight or curved section. WAIM penetration speed is faster, while the WPAIM acceleration process is more stable.

Keywords: water-projectile-assisted injection molding; numerical simulation; residual wall thickness; penetration behavior