

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.016

水辅注射成型方形管件残余壁厚及其分布优化

江青松¹, 刘林海¹, 柳和生², 张伟²

[1. 东华理工大学电子与电气工程学院(智能制造学院), 南昌 330013; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013]

摘要: 为提升水辅注射成型短纤维增强聚合物中空制品质量的一致性, 基于Moldex3D软件平台, 采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表设计试验, 通过极差分析法量化各参数影响程度, 并引入残余壁厚(RWT)变异系数(CV)作为均匀性归一化评价指标, 探究了熔体温度、模具温度、注水压力、注水温度、注水延迟时间对方形管件残余壁厚及其分布均匀性的影响。结果表明, 注水压力是影响RWT及其分布均匀性的主导因素, 其对RWT的极差最高达4.97 mm, CV值的极差23.2%, 均显著高于其他工艺参数; 当注水压力从4 MPa升至10 MPa时, 整体残余壁厚(ORWT)从6.3 mm降至3.1 mm, 降幅近51%; 熔体温度和模具温度通过调节熔体黏度产生次要影响, 而注水温度和注水延迟时间的影响相对较弱。以最小化ORWT为目标, 最优工艺条件组合为熔体温度270 °C、模具温度70 °C、注水压力10 MPa、注水温度40 °C、注水延迟时间3 s; 以最大化RWT分布均匀性为目标, 最优工艺条件组合为熔体温度210 °C、模具温度60 °C、注水压力8 MPa、注水温度50 °C、注水延迟时间1 s。研究结果揭示了工艺参数对RWT的调控机制, 为水辅注射成型短纤维增强聚合物制品工艺优化提供了理论依据。

关键词: 水辅注射成型; 方形管件; 残余壁厚; 分布均匀性; 变异系数

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0119-07

Residual wall thickness and its distribution optimization in water-assisted injection-molded square pipe fittings

JIANG Qingsong¹, LIU Linhai¹, LIU Hesheng², ZHANG Wei²

[1. School of Electronics and Electrical Engineering (School of Intelligent Manufacturing), East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China]

Abstract : To improve the quality consistency of short-fiber-reinforced polymer hollow parts in water-assisted injection molding(WAIM), the effects of melt temperature, mold temperature, water-injection pressure, water-injection temperature, and water-injection delay time on the residual wall thickness (RWT) and its distribution uniformity of square pipe fittings were investigated. The study was conducted based on Moldex3D software platform, using an $L_{16}(4^5)$ orthogonal array to design experiments. The range analysis method was employed to quantify the influence of each processing parameter, and the coefficient of variation (CV) of RWT was introduced as a normalized evaluation index for distribution uniformity. The results indicate that water-injection pressure is the dominant factor affecting RWT and its distribution uniformity. The maximum range of RWT caused by water-injection pressure reaches 4.97 mm, and the range of CV value is 23.2%, both significantly higher than those of other processing parameters. When water-injection pressure increases from 4 MPa to 10 MPa, the overall residual wall thickness (ORWT) decreases from 6.3 mm to 3.1 mm, with a reduction of nearly 51%. Melt temperature and mold temperature have secondary effects by regulating melt viscosity, while the influences of water-injection temperature and water-injection delay time are relatively weak. To minimize ORWT, the optimal combination of processing conditions is that melt temperature is 270 °C, mold temperature is 70 °C, water-injection pressure is 10 MPa, water-injection temperature is 40 °C, and water-injection delay time is 3 s. For maximizing the distribution uniformity of RWT, the optimal processing conditions are that melt temperature is 210 °C, mold temperature is 60 °C, water-injection pressure is 8

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200723), 国家自然科学基金项目(52303038)

通信作者: 江青松, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为高分子加工成型

收稿日期: 2025-08-11

引用格式: 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.

MPa, water-injection temperature is 50 °C, and water-injection delay time is 1 s. The results reveal the regulation mechanism of processing parameters on RWT and provide a theoretical basis for the processing optimization of short-fiber-reinforced polymer parts molded via WAIM.

Keywords : water-assisted injection molding ; square pipe fittings ; residual wall thickness ; distribution uniformity ; coefficient of variation

水辅助注射成型作为一种先进的聚合物成型技术,利用高压水在熔融聚合物中的穿透作用,在制品内部形成中空或半中空结构,可显著减轻制品重量、减小残余应力并改善整体成型质量,已广泛应用于汽车零部件、医疗器械和管道系统等应用领域^[1-5]。对于水辅注射成型短玻纤增强聚丙烯等复合材料管件,残余壁厚及其分布均匀性很大程度上决定了其力学性能、尺寸稳定性和服役可靠性,因此成为成型工艺参数优化的核心目标之一^[6-8]。在水辅注射成型过程中,熔体温度、模具温度、注水温度、注水压力及注水延迟时间等主要工艺参数的变化,可能对高压水穿透动力学和水-熔体界面的行为产生显著影响,进而导致成型管件残余壁厚分布的非均匀性缺陷,如残余壁厚局部过大或过小等,从而降低成型管件质量的一致性^[9-12]。

然而,现有研究主要聚焦于圆管或方管水辅注射成型过程,侧重分析水穿透行为及其对中空形状或局部残余壁厚的影响,未深入探究水穿透过程对整体残余壁厚(ORWT)的影响,难以全面反映管件ORWT特征;此外,多数研究以最小化残余壁厚为单一优化目标,忽视了残余壁厚大小及其分布均匀性的协同调控,而实际应用中两者对制品性能均具有关键影响^[9,11,13]。尽管也有研究引入标准差评价残余壁厚分布均匀性,但该指标仅能反映残余壁厚分布的绝对离散程度,未结合ORWT进行归一化分析,因而不同成型条件下难以量化残余壁厚分布均匀性的差异^[14]。

针对上述不足,笔者以水辅注射成型短玻纤增强聚丙烯方形管件为研究对象,基于数值模拟和正交试验设计相结合的方法,探究熔体温度、模具温度、注水压力、注水温度及注水延迟时间对残余壁厚及其分布的影响规律。通过极差分析确定各因素的影响主次,并引入变异系数对残余壁厚分布均匀性进行归一化定量评价,以获得优化的工艺条件组合,为短纤维增强聚合物制品的高效水辅注射成型工艺优化提供理论依据和数据支持。

1 数值模型及材料参数

注塑件为方形管件,长度为245 mm,截面边长

为16 mm(图1)。鉴于采用溢流法水辅注射成型工艺,模具结构主要由冷流道、模腔和溢流腔三部分构成。数值模拟基于Moldex3D软件平台开展,通过对模具结构进行流体域抽取并划分网格,边界层区域选用三棱柱单元,每层厚度设定为0.5 mm,共设置5层,其余区域采用四面体单元离散。生成的网格模型包含节点数74 197和单元数204 193,各项网格质量指标均符合计算要求(图1)。在数值模拟中,熔体入口采用流量入口边界,设定为80 cm³/s;水入口采用压力边界,具体数值通过工艺参数设定;模腔壁面采用无滑移边界条件;熔体流动前沿为自由边界条件。

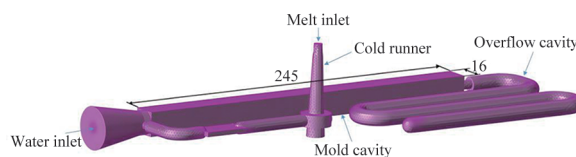


图1 网格模型

Fig. 1 Mesh model

材料选用短玻纤增强聚丙烯(制造商:Lyondell-Basell公司;牌号:Hostacom SB224-2),玻纤质量分数为20%,纤维长径比为20,熔体流动速率为6 g/10 min (230 °C/2.16 kg)。

2 残余壁厚表征方法

在水辅注射成型过程中,由于高压水的非稳定穿透行为,以及熔体温度场、压力场的空间非均匀分布,注塑件残余壁厚沿环向和轴向通常呈现非均匀分布特征。为分析工艺参数对注塑件残余壁厚及其分布的影响规律,沿方形管件轴向以20 mm等间距设置12个横向切割测量位置,依次记为 P_i ($i=1, 2, 3, \dots, 12$)(图2a)。在每一位置完成横向切割后,在 P_i 横截面上四个特定方位分别测量壁厚,分别记为 t_{ij} ($j=1, 2, 3, 4$)(图2b)。将四个测量值的算术平均作为该截面位置处的残余壁厚($\bar{t}_i$),计算公式见式(1)。

$$\bar{t}_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 t_{ij} \quad (1)$$

式中: $\bar{t}_i$ 表示 P_i 截面位置的残余壁厚($i=1, 2, 3,$

$\dots, 12)$; t_{ij} 表示 P_i 截面上第 j 个测量点的壁厚值($j=1, 2, 3, 4$)。

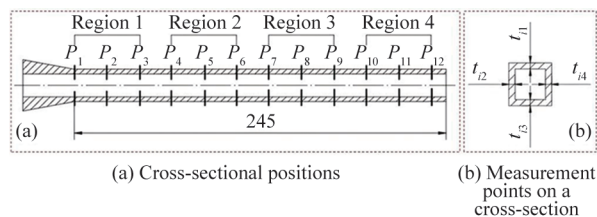


图2 残余壁厚测量

Fig. 2 Measurement of residual wall thickness

由于残余壁厚在各横截面上存在一定程度的随机波动,单一横截面上的测量结果难以全面反映其整体分布特征。为此,将方形管件轴向划分为四个等长区域(图2a),先计算各区域内所有横截面残余壁厚的均值,记为 T_k ($k=1, 2, 3, 4$),代表各区域残余壁厚水平;再以四个区域残余壁厚均值为基础,计算ORWT(简称为 W),表征ORWT水平,其表达式见式(2)。

$$W = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 T_k = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{t}_i \quad (2)$$

式中: T_k 表示区域 k 的残余壁厚均值($k=1, 2, 3, 4$)。

为进一步量化残余壁厚沿轴向的分布均匀性,引入残余壁厚变异系数(CV, 简称为 C)作为评估指标,其综合反映了不同试验条件下残余壁厚的离散程度,可定义为式(3)^[15]。

$$C = \frac{\sigma}{W} \times 100\% \quad (3)$$

式中: σ 为 T_1, T_2, T_3, T_4 的标准差,反映了四个区域残余壁厚均值与ORWT的偏离程度,可由式(4)给出。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (T_k - W)^2} \quad (4)$$

由于CV在评估残余壁厚离散程度的同时兼顾了ORWT的影响,因此可用于不同成型条件下残余壁厚分布均匀性的对比分析。CV值越小,意味着四个区域残余壁厚均值与ORWT的差异越小,即沿轴向残余壁厚分布越均匀,离散程度越低;反之,均匀性则越差。

3 基于正交试验的残余壁厚及其分布优化

3.1 正交试验设计

正交试验设计是一种基于正交表的多因素多水平试验优化方法,其核心在于通过科学筛选代表性试验组合,在显著减少试验次数的同时,探寻

最佳水平组合并揭示各因素对指标的影响规律^[16]。针对水辅注射成型过程中影响残余壁厚及其分布的多个工艺参数,结合成型特性与实际可控变量,选取5个关键因素开展正交试验研究,即熔体温度(A)、模具温度(B)、注水压力(C)、注水温度(D)、注水延迟时间(E)。每个因素均设置4个水平,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行试验安排,具体因素与水平设置见表1。其余主要工艺参数,包括熔体充填时间(1 s)、水保持时间(8 s)、冷却时间(20 s),均保持恒定。

表1 因素与水平设置

Tab. 1 Factor and level settings

Level	Factor				
	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	$D/^{\circ}\text{C}$	E/s
1	210	40	4	20	1
2	230	50	6	30	3
3	250	60	8	40	5
4	270	70	10	50	7

为明确各因素的最优水平组合,并判断其对指标的影响主次,采用极差分析法对试验结果进行定量分析。首先,计算某一因素 j 在水平 m ($m=1, 2, 3, 4$) 下对应试验指标的均值($\bar{T}_{jm}$), 见式(5)。

$$\bar{T}_{jm} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 T_{jmk} \quad (5)$$

式中: $\bar{T}_{jm}$ 表示因素 j 在水平 m 下的平均响应值($m=1, 2, 3, 4$); T_{jmk} 为第 k 次试验的指标值($k=1, 2, 3, 4$)。随后,计算该因素 j 的极差(R_j), 即因素 j 在各水平下指标的最大值与最小值之差, 见式(6)。

$$R_j = \max(\bar{T}_{j1}, \bar{T}_{j2}, \bar{T}_{j3}, \bar{T}_{j4}) - \min(\bar{T}_{j1}, \bar{T}_{j2}, \bar{T}_{j3}, \bar{T}_{j4}) \quad (6)$$

式中: $j=A, B, C, D, E$ 。根据 $\bar{T}_{jm}$ 的大小可判断各因素的最优水平, R_j 则用于衡量因素 j 的水平变动时其指标的变动幅度, R_j 越大, 说明该因素水平变化对指标的影响越显著。

3.2 工艺参数对残余壁厚的影响

根据 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排试验, 共获得16组工艺参数组合及其对应指标数据, 每组数据均包含方形管件四个区域的残余壁厚均值(T_1, T_2, T_3, T_4), 试验结果见表2。

在水辅注射成型过程中, 高压水穿透行为受到各工艺因素共同影响, 使高压水在熔融聚合物中的穿透路径及其界面作用表现出复杂性, 并最终导致成型管件不同区域的残余壁厚存在差异。该现象与流体动力学参数、模具结构特征、熔体流变特性等因素密切相关^[17]。

表2 $L_{16}(4^5)$ 正交试验结果
Tab. 2 Results of $L_{16}(4^5)$ orthogonal experiments

No.	A/°C	B/°C	C/MPa	D/°C	E/s	T_1 /mm	T_2 /mm	T_3 /mm	T_4 /mm
1	1	1	1	1	1	3.91	6.89	8.00	8.00
2	1	2	2	2	2	3.61	3.72	3.90	5.60
3	1	3	3	3	3	3.46	3.57	3.43	3.80
4	1	4	4	4	4	3.16	3.08	3.08	3.47
5	3	4	2	1	3	3.71	3.73	3.60	6.06
6	3	3	1	2	4	3.87	5.65	8.00	8.00
7	3	2	4	3	1	2.99	2.71	2.87	3.25
8	3	1	3	4	2	3.02	2.90	2.96	3.25
9	4	2	3	1	4	3.19	3.21	3.39	3.76
10	4	1	4	2	3	2.81	2.39	2.80	3.15
11	4	4	1	3	2	3.79	5.35	8.00	8.00
12	4	3	2	4	1	3.43	3.60	3.56	3.79
13	2	3	4	1	2	3.42	3.25	3.34	3.78
14	2	4	3	2	1	3.42	3.59	3.46	3.80
15	2	1	2	3	4	3.31	3.60	3.58	6.77
16	2	2	1	4	3	3.84	4.21	8.00	8.00

基于正交试验数据,获得工艺参数对方形管件各区域残余壁厚的影响(图3),其反映了 T_1, T_2, T_3, T_4 受不同工艺参数的影响规律。可以看出,在所有工艺参数中,注水压力对各区域残余壁厚的影响最为显著。随着注水压力由4 MPa升至10 MPa,四个区域的残余壁厚均明显减小。其中,区域1由3.9 mm降至3.1 mm,降幅约21%;区域2由5.5 mm降至2.8 mm,降幅约49%;区域3由8.0 mm降至3.0 mm,降幅达63%;区域4由8.0 mm降至3.4 mm,降幅近58%。这种显著下降趋势表明,高注水压力有助于增强高压水的轴向穿透与径向挤压能力,推动更多熔体流入溢流腔,并扩大管件中空区域,从而显著减小各区域的残余壁厚。

此外,随着熔体温度和模具温度的升高,同样表现出残余壁厚减小的趋势。当熔体温度从210 °C升至270 °C时,区域1残余壁厚由3.5 mm降至3.3 mm,区域2由4.3 mm降至3.6 mm,各区域残余壁厚平均降幅约10.5%;模具温度从40 °C升至70 °C时,各区域残余壁厚也有0.2~0.8 mm的减小。其原因在于,熔体温度或模具温度的升高会降低熔体黏度,进而减小高压水穿透过程中的流动阻力,使高压水更易于轴向穿透和径向挤压熔体,推动更多熔体流入溢流腔,提升中空结构的形成效率,最终导致残余壁厚减小。

图4描述了不同工艺参数对方形管件ORWT的影响规律。可以看出,注水压力对ORWT的影

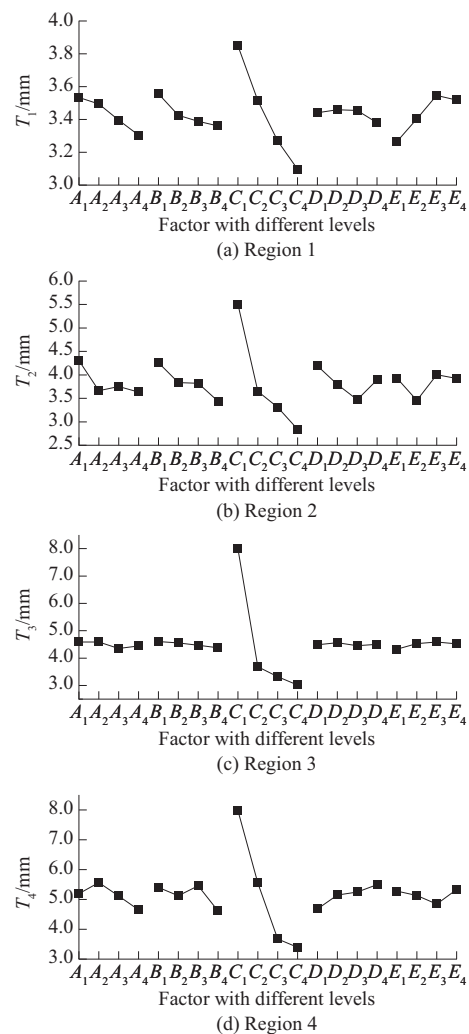


图3 工艺参数对各区域残余壁厚的影响

Fig. 3 Influence of processing parameters on residual wall thickness in each region

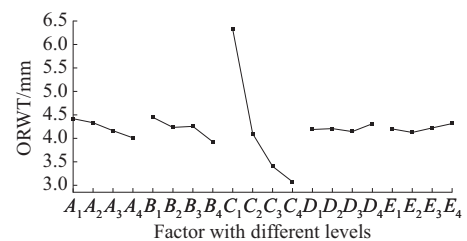


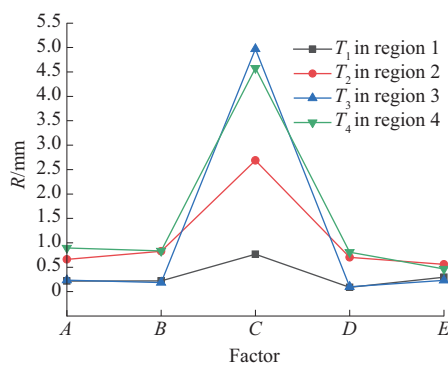
图4 工艺参数对ORWT的影响

Fig. 4 Influence of processing parameters on ORWT

响最为显著,当注水压力从4 MPa升至10 MPa时,ORWT由6.3 mm显著降至3.1 mm,降幅近51%。相比之下,模具温度和熔体温度的影响次之,模具温度升高时,ORWT从4.4 mm降至3.8 mm,降幅约14%;熔体温度从210 °C升至270 °C时,ORWT从4.4 mm降至3.9 mm,减少约11%。而注水温度与注水延迟时间的变化对ORWT的影响均不足0.2

mm,作用相对较弱。以最小化 ORWT 为优化目标,依据图 4 可得最优工艺条件组合为 $A_4B_4C_4D_3E_2$,即熔体温度 270 °C、模具温度 70 °C、注水压力 10 MPa、水温 40 °C、注水延迟时间 3 s。

为明确各因素对残余壁厚的影响主次,通过极差分析量化工艺参数的影响程度。图 5 给出了各区域残余壁厚和 ORWT 的极差(R)分布,表 3 则给出了极差量化值。由图 5a 可以看出,各区域中注水压力的极差显著高于其它工艺参数。结合表 3 可知,在区域 3,注水压力的极差达 4.97 mm,而熔体温度、模具温度、注水温度、注水延迟时间的极差仅为 0.24, 0.19, 0.10, 0.23 mm;即便对比极差最小的区域 1,注水压力的极差为 0.77 mm,也远超熔体温度(0.21 mm)、模具温度(0.22 mm)、注水温度(0.09 mm)、注水延迟时间(0.29 mm),表明注水压力对残余壁厚的区域性调控作用最为突出。图 5b 进一步验证了注水压力在 ORWT 调控中的主导地位,其极差为 3.25 mm,远高于其它工艺参数(0.41, 0.52, 0.17, 0.19 mm)。综合区域和整体分析,可得各工艺参数对残余壁厚的影响主次为 $C > B > A > E > D$ 。



(a) Residual wall thickness in each region

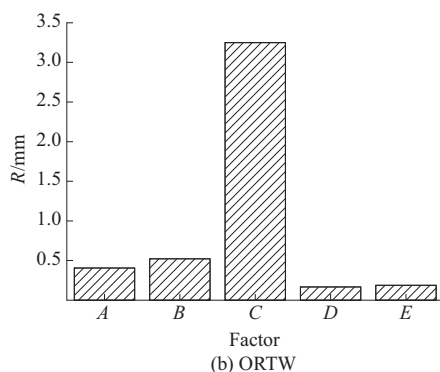


图 5 工艺参数对残余壁厚极差的影响

Fig. 5 Influence of processing parameters on R of residual wall thickness

表 3 各工艺参数影响残余壁厚的极差量化值

Tab. 3 Range values of residual wall thickness under each processing parameter

Factor	Range/mm				ORWT
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	
A	0.21	0.66	0.24	0.89	0.41
B	0.22	0.82	0.19	0.84	0.52
C	0.77	2.69	4.97	4.58	3.25
D	0.09	0.70	0.10	0.81	0.17
E	0.29	0.56	0.23	0.46	0.19

3.3 工艺参数对残余壁厚分布均匀性的影响

在水辅注射成型过程中,高压水穿透行为的动态不稳定性、熔体流变性质的空间非均质性,以及受模具结构的复杂约束作用,使方形管件沿轴向残余壁厚分布易出现显著非均匀性^[18]。

基于正交试验所得数据以及引入的残余壁厚变异系数指标,计算得到不同试验条件下方形管件的残余壁厚变异系数,结果如图 6 所示。由图可知,试验编号为 16 (CV 值 33.1%), 15 (CV 值 33.0%), 11 (CV 值 28.7%), 6 (CV 值 27.2%), 1 (CV 值 25.0%), 5 (CV 值 24.1%), 2 (CV 值 19.3%) 的残余壁厚 CV 值显著偏高,表明这些试验条件下轴向残余壁厚分布均匀性较低,成型稳定性较差;而试验编号为 12 (CV 值 3.6%), 3 (CV 值 4.1%), 8 (CV 值 4.4%), 14 (CV 值 4.2%), 4 (CV 值 5.0%), 13 (CV 值 5.8%), 7 (CV 值 6.7%), 9 (CV 值 6.8%), 10 (CV 值 9.7%) 的残余壁厚 CV 值相对较小,表明其残余壁厚沿轴向分布更加一致,具有较好的成型稳定性。

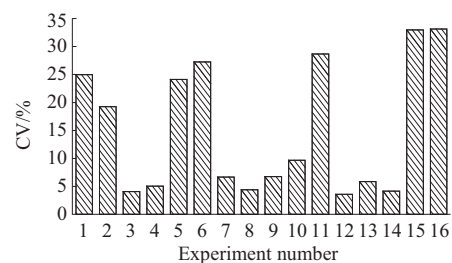


图 6 不同试验条件下残余壁厚变异系数

Fig. 6 CV of residual wall thickness under different experiments

为明确各工艺参数对方形管件残余壁厚分布均匀性的影响程度,结合极差分析法对残余壁厚 CV 值进行统计处理,结果如图 7 所示。由图 7 可知,注水压力 CV 值的极差达 23.2%,显著高于其它工艺参数;而熔体温度、模具温度、注水温度、注水延迟时间的极差经计算分别为 5.6%, 6.0%, 4.1%, 6.9%, 数值较小且接近。这表明注水压力是影响残余壁厚分布均匀性的主导因素,而其余工艺参数的

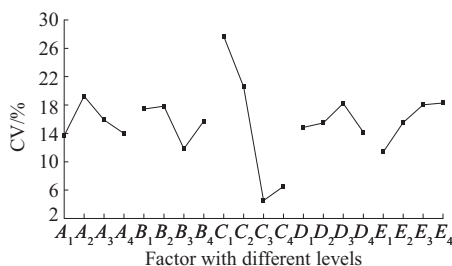


图7 工艺参数对残余壁厚CV值的影响

Fig. 7 Influence of processing parameters on CV of residual wall thickness

影响相对较弱且差异不显著。

以最小化残余壁厚CV值(最均匀的残余壁厚分布)为目标,依据图7残余壁厚CV值进行极差分析,确定最优工艺条件组合为 $A_1B_3C_3D_4E_1$,即熔体温度210℃(CV值13.7%)、模具温度60℃(CV值11.8%)、注水压力8 MPa (CV值4.5%)、注水温度50℃(CV值14.2%)、注水延迟时间1 s (CV值11.4%)。从水-熔体界面传热角度看,适中的注水压力(8 MPa)既提供了足够驱动力推动熔体流入溢流腔,又避免了过高水压导致剧烈扰动和界面不稳定问题,有助于提升高压水推动熔体的稳定性和对称性,从而保持水-熔体界面的平衡形态;较低的熔体温度(210℃)和适中的模具温度(60℃)使熔体保持适度黏度,避免熔体过度松弛或过早固化,有助于抑制高压水推进过程中的偏移,提升水-熔体界面的稳定性;较短的注水延迟时间(1 s)确保高压水进入模腔前熔体尚未出现显著冷却或固化,提升高压水穿透的导向性和一致性;此外,较高的注水温度(50℃)减小了水-熔体界面处的温度差,从而抑制界面冷却导致的熔体黏度骤降和界面形态扰动,有助于提升界面推进过程的稳定性。

4 结论

(1)注水压力是影响残余壁厚及其分布均匀性的主导因素,其影响显著高于其它因素;熔体温度和模具温度的影响次之,其主要通过调节熔体黏度影响高压水穿透行为;而注水温度和注水延迟时间对残余壁厚的影响则相对较弱。

(2)以最小化ORWT为优化目标,获得最优工艺条件组合为:熔体温度270℃、模具温度70℃、注水压力10 MPa、注水温度40℃、注水延迟时间3 s。在该条件下,熔体黏度降低,高压水驱动力增强,高压水的轴向穿透和径向挤压效率提高,有助于推动更

多熔体流入溢流腔,从而减小ORWT。

(3)以最大化残余壁厚分布均匀性为目标,获得最优工艺条件组合为:熔体温度210℃、模具温度60℃、注水压力8 MPa、注水温度50℃、注水延迟时间1 s。在该条件下,高压水穿过程更加稳定,轴向穿透和径向挤压更加均衡,有助于减小不同区间的壁厚波动,实现更高的尺寸一致性和成型稳定性。

参考文献

- [1] 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 Jiangen, ZENG Xiangrui, YU Shengrui. Advances in water-assisted injection moulding technology[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):170-175.
- [2] ZHANG W, KUANG T Q, 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(24). DOI:10.1002/app.52359.
- [3] 李方舟,许忠斌,黄兴,等. 水辅助注射成型工艺及其技术进展[J]. 上海塑料, 2022, 50(6):1-5.
LI Fangzhou, XU Zhongbin, HUANG Xing, et al. Water-assisted injection molding process and its technical progress[J]. Shanghai Plastics, 2022, 50(6):1-5.
- [4] HUANG D Y, LIU H S, KUANG T Q, et al. Shrinkage and warpage mechanism of overflow water-assisted injection molding short fiber-reinforced polymers[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(1). DOI:10.1155/2022/6596464.
- [5] 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(8). DOI: 10.1002/mame.201800035.
- [6] 袁知焕,匡唐清,赖家美,等. 工艺参数对聚丙烯/聚酰胺6共混物水辅助共注塑管壁厚及性能的影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(11):77-83.
YUAN Zhihuan, KUANG Tangqing, LAI Jiamei, et al. Influence of processing parameters on wall thickness and properties of water-assisted co-injection molding pipes of polypropylene/polyamide 6 blends[J]. China Plastics, 2021, 35(11):77-83.
- [7] 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.
- [8] 匡唐清,朱瑶瑶,柳和生,等. 玻纤质量分数对短玻纤增强聚丙烯水辅助共注塑管壁厚的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10):4 551-4 560.
KUANG Tangqing, ZHU Yaoyao, LIU Hesheng, et al. Effect of glass fiber mass fraction on the water assisted co-injection molding

- pipes of short glass fiber reinforced polypropylene[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10):4 551–4 560.
- [9] 黄微,柳和生,黄兴元,等. 方管短玻璃纤维增强聚丙烯高压水穿透行为研究[J]. *中国塑料*, 2022, 36(2):82–88.
HUANG Wei, LIU Hesheng, HUANG Xingyuan, et al. Study on high-pressure water penetration behavior of square cross-sectional pipes based on short-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. *China Plastics*, 2022, 36(2):82–88.
- [10] 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(5):528–540.
- [11] 刘林海,柳和生,叶海鹏,等. 短玻纤增强PP溢流法水辅注塑水穿透行为影响分析[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(8):85–90.
LIU Linhai, LIU Hesheng, YE Haipeng, et al. Analysis on water penetration behavior of overflow water-assisted injection molding of short-glass-fiber-reinforced PP[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(8):85–90.
- [12] 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(4):362–373.
- [13] 叶海鹏,柳和生,张伟,等. 工艺参数对水辅注塑弯管弯曲段偏心率影响的数值分析[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(10):92–99.
YE Haipeng, LIU Hesheng, ZHANG Wei, et al. Numerical analysis of influence of process parameters on eccentricity of bending sections in water-assisted injection-molded double-elbow bent pipes[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(10):92–99.
- [14] 钟罗浩,匡唐清,赖家美,等. 成型工艺对短玻璃纤维增强聚丙烯注塑管件的壁厚分布及玻璃纤维取向的影响[J]. *中国塑料*, 2021, 35(5):11–16.
ZHONG Luohao, KUANG Tangqing, LAI Jiamei, et al. Effect of molding process on wall residual thickness distribution and glass-fiber orientation of short-glass-fiber-reinforced polypropylene molded pipes[J]. *China Plastics*, 2021, 35(5):11–16.
- [15] JIANG Q S, ZHANG W, WAN Z H, et al. Experimental and numerical investigations on formation mechanisms of hollow structures in overflow water-assisted injection-molded parts of short-glass-fiber-reinforced polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(36). DOI:10.1002/app.55916.
- [16] 薛东,陈嘉豪. 基于Moldflow分析的汽车外后视镜基座翘曲变形解决方案[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(4):89–94.
XUE Dong, CHEN Jiahao. Solution of warpage deformation of automobile rearview mirror mount based on Moldflow analysis[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(4):89–94.
- [17] 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(1). DOI: 10.1155/2015/161938.
- [18] PARK H, RHEE B. Effects of the viscosity and thermal property of fluids on the residual wall thickness and concentricity of the hollow products in fluid-assisted injection molding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9):3 255–3 265.