

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.10.014

工艺参数对水辅注塑弯管弯曲段偏心率影响的数值分析

叶海鹏¹, 柳和生^{1,2,3}, 张伟³, 刘林海¹, 江青松¹

(1. 东华理工大学机械与电子工程学院, 南昌 330013; 2. 南昌大学聚合物成型研究室, 南昌 330013; 3. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

摘要: 基于水辅注塑(WAIM)工艺, 通过数值分析研究工艺参数对双弯头弯管弯曲段偏心率的影响。研究发现, 熔体温度对弯管件弯曲段平均偏心率影响明显, 随着熔体温度的升高, 弯曲段平均偏心率逐渐减少, 但熔体温度变化对弯管件第二弯曲段中心截面处偏心率无明显影响; 注水压力对弯管件弯曲段平均偏心率的影响显著, 随着注水压力的增加, 弯曲段平均偏心率逐渐减少, 但第二弯曲段中心截面处偏心率仅当注水压力升至14 MPa时才出现较明显的下降; 注水延迟时间对弯管件弯曲段平均偏心率的影响较大, 随着注水延迟时间的增加, 弯曲段平均偏心率明显增大, 但注水延迟时间增加到2 s后, 两弯曲段中心截面处偏心率趋于稳定。正交试验结果表明, 注水压力对弯管件平均偏心率影响程度最大, 其次为熔体温度, 而注水延迟时间对平均偏心率影响程度最小。在熔体温度为250 °C、注水压力为8 MPa、注水延迟时间为2 s时, 弯管件平均偏心率最低, 表明该工艺参数组合为最优组合。

关键词: 水辅注塑; 双弯头弯管; 偏心率; 工艺参数; 数值分析

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)10-0092-08

Numerical Analysis of Influence of Process Parameters on Eccentricity of Bending Sections in Water-assisted Injection-Molded Double-Elbow Bent Pipes

Ye Haipeng¹, Liu Hesheng^{1,2,3}, Zhang Wei³, Liu Linhai¹, Jiang Qingsong¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Polymer Forming Research Laboratory, Nanchang University, Nanchang 330013, China; 3. School of Mechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract : Based on water-assisted injection molding (WAIM), the influences of key process parameters on the eccentricity of bending sections in double-elbow bent pipe components were investigated. The research results show that the melt temperature has a significant impact on the average eccentricity of the bending section. As the melt temperature increases, the average eccentricity of the bending section gradually decreases. However, the variation in melt temperature does not have a noticeable effect on the eccentricity at the center cross-section of the second bending section of the pipe. The injection water pressure has a significant impact on the average eccentricity of the bending section. As the injection water pressure increases, the average eccentricity of the bending section gradually decreases. However, the eccentricity at the center cross-section of the second bending section of the pipe only shows a significant decrease when the injection water pressure reaches 14 MPa. The injection water delay time has a significant influence on the average eccentricity of the bending section of the pipe. As the injection water delay time increases, the average eccentricity of the bending section significantly increases. However, after the injection water delay time reaches 2 s, the eccentricities at the center cross-section of two bending sections tend to stabilize. Orthogonal experimental results show that the injection water pressure has the greatest influence on the eccentricity of the pipe components, followed by the melt temperature, while the influence of the injection water delay time is the smallest. When the melt temperature is 250 °C, the injection water pressure is 8 MPa, and the injection water delay time is 2 s, the bending section of the pipe has the lowest average eccentricity, which indicates that the combination of this process parameters are the optimal combination.

Keywords : water-assisted injection molding ; double-elbow bent pipe ; eccentricity ; process parameters ; numerical analysis

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20203BBE53065)

通信作者: 柳和生, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子成型及制备研究

收稿日期: 2023-08-13

引用格式: 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.

水辅注塑(WAIM)是一种新型注塑技术^[1-2],该技术在气辅助注塑(GAIM)工艺的基础上,以水代替气体来穿透模腔内已充填的熔体。与气体相比,由于水的不可压缩性、较高的热导率和比热容,可减少制件的收缩不均和凹陷等缺陷,提高制件的成型品质^[3-4]。同时,能加快聚合物熔体的填充和冷却速度,缩短成型周期,提高生产效率^[5-7]。此外,WAIM还可以简化模具结构,降低废品率,实现生产的减排和低碳化,符合环保要求。WAIM技术已在多领域得到广泛应用,并推动了制造业的发展^[8-10]。

WAIM作为一种先进的成型技术,受到学者广泛关注。Sannen等^[11]研究了熔体参数和WAIM工艺参数对制件质量的影响,结果表明,熔体温度、注水延迟时间以及水压对制件缺陷的形成有显著影响。Huang等^[12]采用短射法比较了GAIM,WAIM以及弯曲角度对弯曲试样内侧和外侧残余壁厚偏差率的影响。研究表明,由于弯曲角度的增加,GAIM制备的试样内外残余壁厚偏差比WAIM更明显。Lin等^[13]以WAIM弯管为研究对象,通过改变模温来改善弯曲段残余壁厚分布的均匀性,并分析了弯曲段残余壁厚分布均匀性的影响因素。刘旭辉等^[14]探究了工艺参数对弯管件内径的影响,研究表明缩短注水延迟时间、增加水压、降低模温均使管件内径变大。

弯管件WAIM的研究主要集中在工艺参数对弯管件残余壁厚不均和内径的影响,而弯管件在水穿透过程中弯曲段发生偏心现象是导致该段残余壁厚不均和内径大小不一致的重要影响因素,为了研究主要工艺参数对弯管件偏心率的影响,笔者对比分析了不同熔体温度、注水压力以及注水延迟时间下的水穿透偏心特征,探讨了影响规律和影响机理,旨在为弯管件WAIM工艺的发展提供理论依据和指导。

1 模拟部分

1.1 材料选用

选用A. Sochulmanzh 制造商生产的牌号为POLYFORT FPP 20 GFC的聚丙烯复合材料。该复合材料具有优异的力学性能、良好的可加工性和流动性。

1.2 基本假设和控制方程

探讨选用聚丙烯复合材料的WAIM,考虑该材料熔体的黏弹性以及水(视为不可压缩牛顿流体)的

牛顿性质。基于WAIM特性,为了简化计算与符合实际成型状况,进行如下假设:①流体中的密度、热容量及热导率保持不变;②聚丙烯复合材料熔体与模具壁面间无滑移现象;③忽略表面张力、重力、惯性力及体积力;④不考虑聚丙烯复合材料熔体结晶过程中的相变热焓。基于上述假设提出了三维瞬态非等温流动行为三大控制方程,分别是连续性方程、动能方程和能量方程^[15]。基于上述假设提出了三维瞬态非等温流动行为控制方程,如下所示。

①连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; ∇ 为哈密顿算符; u 为速度矢量。

②动能方程:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u + \tau) = -\nabla P + \rho g \quad (2)$$

式中: τ 为应力张量; P 为压力; g 为重力加速度。

③能量方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

式中: T 为温度; η 为黏度; k 为热传导率; C_p 为比热容; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

Cross-WLF模型是一种延伸了Williams-Landel-Ferry (WLF)模型的时间、温度、应力相关模型。WLF模型是一种经验模型,用于描述非晶态聚合物的黏弹性行为随温度变化的关系。而Cross-WLF模型在WLF模型的基础上考虑了应力的影响,更贴近实际应变率和应力对聚合物动态黏弹性行为的影响。Cross-WLF模型的基本形式如式(4)所示。

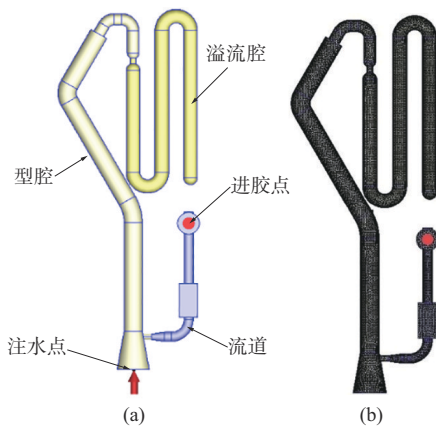
$$\eta(T, \gamma) = A(T) * \exp \left[\frac{B(T) * \gamma}{1 + C(T) * \gamma} \right] \quad (4)$$

式中: γ 为应变率; $A(T)$, $B(T)$, $C(T)$ 为温度相关的参数。

该模型通过引入应变率作为新的变量,允许将应力引入到非晶态聚合物的黏弹性模型中,从而更准确地预测材料的流动性能。应用Cross-WLF模型可以更好地理解聚合物材料在不同温度和应力条件下的流变性质。这对于聚合物加工过程中的模拟和优化具有重要意义,尤其是在工程应用中需要考虑动态应变率和应力对流变行为的影响时,Cross-WLF模型可以提供更准确的预测和分析结果。

1.3 几何模型与网格模型

采用的双弯头弯管几何模型如图1a所示,型腔直径为16 mm,总长度为280 mm。该模型由型腔、流道和溢流腔3个部分组成。网格模型如图1b所示,网格划分选择Moldex3D Solid分析的3维边界层网格模式(BLM)网格,其中模穴网格节点总数58 543,模穴网格元素总数191 429,流道网格节点总数13 830,流道网格元素总数38 591,此网格模型所划分的网格质量满足数值模拟分析要求。



a—几何模型; b—网格模型

图1 弯管几何与网格模型

1.4 偏心率的测量方法与计算

偏心率可反映WAIM过程中的水穿透行为,通过量化分析偏心率的大小,可更准确评估水穿透行为,图2为偏心距测量示意图,图2c中A点为圆管截面质心,B点为穿透截面质心,C为穿透截面的偏心距,R为弯管半径。通过Moldex3D获得的截面图矢量后导入AutoCAD中,利用AutoCAD分别计算出型腔和穿透截面的质心坐标,测量两质心坐标的距离,即为穿透截面的偏心距。为了研究水穿透过程中的偏心情况,以及工艺参数对偏心率的影响,偏心率可按式(5)计算。

$$e = \frac{C}{R} \quad (5)$$

式中: e 为偏心率; C 为偏心距; R 为型腔截面半径。

通过比较偏心率的大小,分析主要工艺参数对WAIM弯管件水穿透行为的影响,并将制件的偏心率作为评价制件质量的指标。制件由3个直通段和2个弯曲段组成,在其横截面上依次用 $P_1 \sim P_8$ 标记,如图3所示,由于 P_1 靠近注水口,有高压水穿透形成的不稳定水流干扰, P_8 位于水道末端,该段为积料的变化区,所以不考虑 P_1, P_8 截面处的偏心率。测量

选择对象: 找到 1 个

选择对象:

面域

面积: 34829.0000
周长: 662.7859
边界框: X: 2548.9642 -- 2759.9642
Y: 1517.8648 -- 1727.8648
质心: X: 2654.6225
Y: 1623.0418
惯性矩: X: 91845226138.0165
Y: 2.4554E+11
惯性积: XY: -1.5006E+11
旋转半径: X: 1623.8944
Y: 2655.1451
主力矩与质心的 X-Y 方向:
I: 96420973.7525 沿 [0.9960 -0.0896]
J: 96647657.0085 沿 [0.0896 0.9960]

(a)

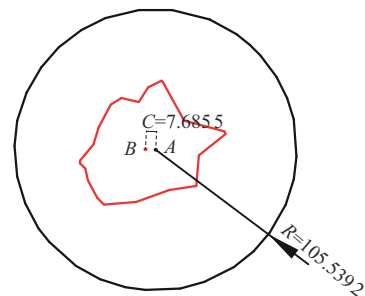
选择对象: 找到 1 个

选择对象:

面域

面积: 5832.5000
周长: 321.5605
边界框: X: 2597.9642 -- 2706.9642
Y: 1581.8648 -- 1674.8648
质心: X: 2646.9471
Y: 1623.4375
惯性矩: X: 15374420971.0581
Y: 40867630654.8187
惯性积: XY: -2.5064E+10
旋转半径: X: 1623.5737
Y: 2647.0513
主力矩与质心的 X-Y 方向:
I: 2291582.3355 沿 [0.8735 0.4869]
J: 3504611.0488 沿 [-0.4869 0.8735]

(b)



(c)

a—圆管截面质心A坐标; b—穿透截面质心B坐标; c—偏心距C

图2 偏心距的测量示意图

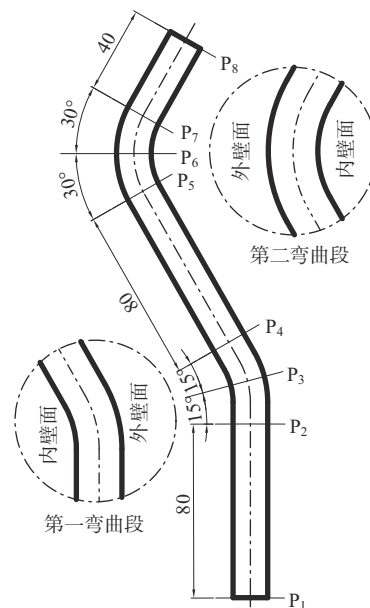


图3 截面位置的标定

$P_2 \sim P_7$ 各截面处的偏心率,并计算它们平均值,即得到整个弯管件弯曲段的平均偏心率,其计算公式如式(6)所示。

$$\bar{e} = \frac{1}{6} \sum_{i=2}^7 \frac{C_i}{R} \quad (6)$$

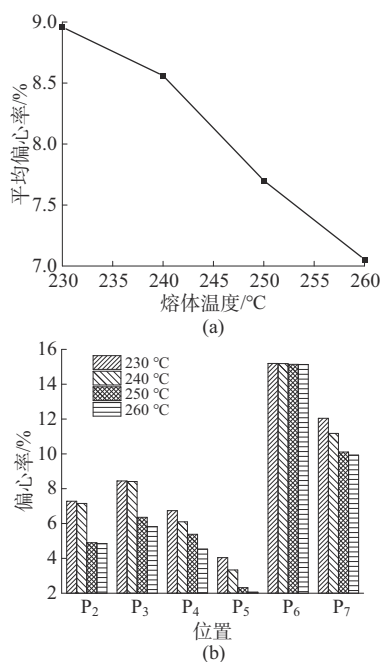
式中: $\bar{e}$ 为平均偏心率; C_i 为第*i* ($i=2,3,4,5,6,7$)个截面处的偏心距。

2 结果与讨论

2.1 熔体温度对偏心率的影响

(1)熔体温度对弯管件平均偏心率影响分析。

为探究熔体温度对弯管件弯曲段偏心率及其分布的影响,熔体温度分别设定为230,240,250,260℃,其余参数保持不变,所得结果如图4所示。图4a的数值模拟结果表明,熔体温度对弯管件弯曲段的平均偏心率的影响显著,随着熔体温度升高,弯管件弯曲段平均偏心率逐渐减少。其主要原因是,随着熔体温度升高,熔体黏度降低,其流动性能提高。当高压水进入弯曲段时,高压水流受到外壁面熔体的阻力相对减小,水流更容易挤压外壁面熔体前移。使得原本靠近内壁面的水流质心开始向型腔中心移动,致使偏心率降低。



a—弯曲段平均偏心率; b—弯曲段各截面位置偏心率

图4 不同熔体温度下的平均偏心率和偏心率分布

(2)熔体温度对弯管件偏心率分布影响分析。

如图4b所示,当高压水穿透熔体时,弯管件第一弯曲段测量位置为 P_2, P_3, P_4 ,偏率先增大后减小;第二弯曲段测量位置为 P_5, P_6, P_7 ,偏心率也先增

大后减小。从测量位置 P_3, P_6 可以看出,两弯曲段中心截面位置处偏心率为各自弯曲段最大值,并且第二弯曲段 P_6 截面较第一弯曲段 P_3 截面处偏心率出现激增现象。同时,随着熔体温度升高, P_3 截面处偏心率呈下降趋势,但熔体温度对 P_6 截面处偏心率基本无影响。主要原因是水流刚进入弯曲段时,就开始产生离心力,当水流到达弯曲段中心截面处时,离心力达到最大值,之后离心力又开始减小,如图5所示。由于型腔内填充有高分子熔体,水流在穿透熔体时会遇到较大阻力,高压水受到外壁面的阻力较大,而内壁面的阻力较小,所以高压水会向内壁面偏移。此外,根据伯努利定律,流体的流动速度增加时,压力会降低;流体的流动速度减小时,压力会增加。在弯曲段中,内壁面的曲率较小,水流速度相对较大,导致内壁面压力降低;而外壁面水流速度相对内壁面水流速度较小,导致外壁面压力增加。因此,在内、外壁面之间形成了一个压力差,使得水流向压力较小的内壁面移动。这种压力差进一步促使水流在穿透熔体时发生偏心现象。而 P_6 截面位于第二弯曲段中心处,距离注水口较远,高压水流需要更长时间才能到达,导致熔体冷却时间相对更长。随着熔体温度降低,型腔内熔体黏度也随之升高,使得水流阻力增大。同时,外壁面熔体受到腔体剪切阻力的影响,两者相互作用使得熔体容易在外侧面堆积,导致偏心率激增。

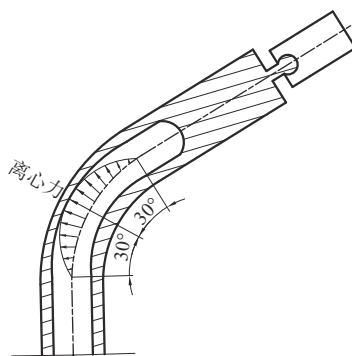
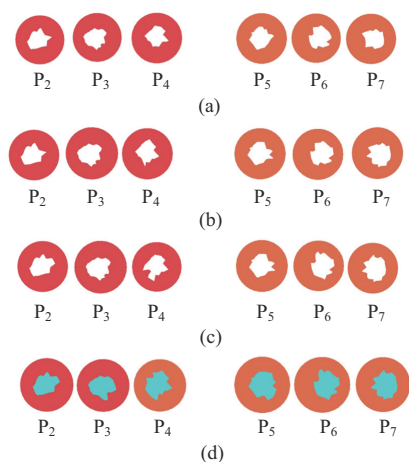


图5 离心力在弯曲段分布

图6为不同熔体温度下两弯曲段各截面形状。由图6可以看出,弯管件第一弯曲段3个测量位置(P_2, P_3, P_4),高压水流的穿透截面都向内壁面(第一弯曲段曲率半径较小的管件左侧)偏移;第二弯曲段3个测量位置(P_5, P_6, P_7),高压水流的穿透截面都向内壁面(第二弯曲段曲率半径较小的管件右侧)偏移。这主要是由于高压水进入弯曲段时,水流在穿透熔体的过程中,总是向压力小、流速高的一侧流动。



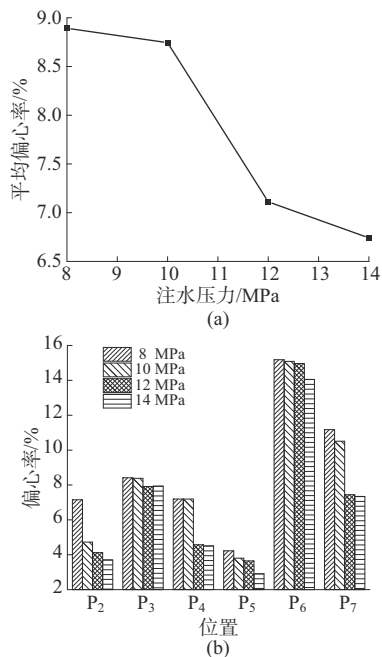
a—230 °C; b—240 °C; c—250 °C; d—260 °C

图6 不同熔体温度下两弯曲段各截面形状

2.2 注水压力对偏心率的影响

(1) 注水压力对弯管件平均偏心率影响分析。

注水压力值设为8, 10, 12, 14 MPa, 其余参数保持不变, 探究注水压力对弯管件弯曲段的平均偏心率和偏心率分布的影响, 结果如图7所示。图7a结果显示, 注水压力对弯曲段平均偏心率的影响明显, 随着注水压力的增加, 管件平均偏心率逐渐降低。高压水穿透熔体时, 由于注水温度远低于熔体温度, 与水流接触的熔体会迅速凝固形成薄膜层包裹住水流。当注水压力增加时, 水流进入弯曲段会产生更大的离心力, 在离心力的作用下, 水流会推动凝固层一起向外壁面移动, 挤压外壁面熔体, 使



a—弯曲段平均离心率; b—弯曲段各截面位置偏心率

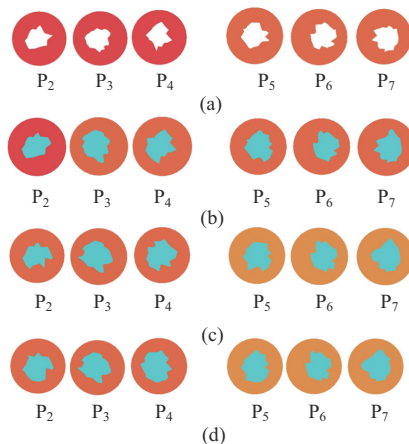
图7 不同注水压力下的平均偏心率和偏心率分布

原本靠近内壁面的水流质心开始向型腔中心移动, 导致偏心率减小。

(2) 注水压力对弯管件偏心率分布影响分析。

如图7b所示, 当高压水穿透熔体时, 弯管件第一弯曲段测量位置为P₂, P₃, P₄, 偏心率先增大后减小; 第二弯曲段测量位置为P₅, P₆, P₇, 偏心率同样先增大后减小。从测量位置P₃, P₆可以看出, 两弯曲段中心截面位置处偏心率为各自弯曲段最高值, 并且P₆截面较P₃截面处偏心率出现激增现象。同时, 随着注水压力的增大, P₃截面处偏心率总体呈下降趋势, 而当注水压力增加到14 MPa时, P₆截面处偏心率才出现较明显的下降。主要原因是, 增大注水压力, 使水流进入弯曲段产生更大的离心力, 而离心力会推动高压水流周围形成的凝固层一起向外壁面移动, 挤压外壁面熔体向型腔末端移动, 使原本偏向内壁面的水流质心向型腔中心移动, 导致偏心率减小。而P₆位于第二弯曲段中心截面处, 距离注水口较远, 熔体冷却时间相对更长, 高压水流穿透熔体时会遇到更大的阻力。同时, 由于水流通过第一弯曲段时水头压力损失巨大^[16], 水流进入第二弯曲段所产生的离心力减小巨大, 而当注水压力增加到14 MPa时, 进入第二弯曲段的水流能获得更多的压力补偿, 使离心力增大, 推动高压水流周围形成的凝固层一起向外壁面移动, 导致偏心率降低。

图8为不同注水压力下两弯曲段各截面形状。由图8可以看出, 弯管件第一弯曲段3个测量位置(P₂, P₃, P₄), 高压水流的穿透截面都向内壁面(第一弯曲段曲率半径较小的管件左侧)偏移; 弯管件第二弯曲段3个测量位置(P₅, P₆, P₇), 高压水流的穿透截面都向内壁面(第二弯曲段曲率半径较小的管件右侧)



a—8 MPa; b—10 MPa; c—12 MPa; d—14 MPa

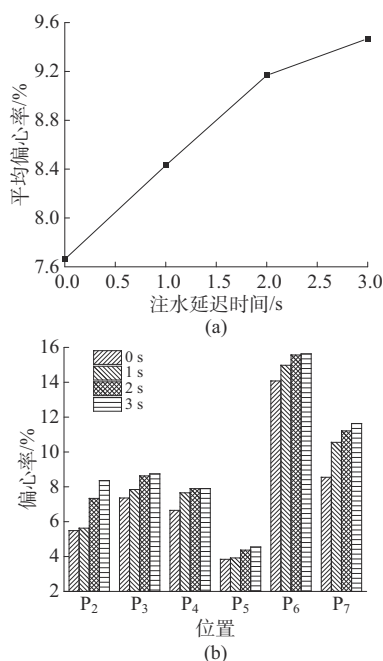
图8 不同注水压力下两弯曲段各截面形状

偏移。这主要是由于在弯管弯曲段中,内、外壁面之间存在压力差,而增加注水压力使内外壁面压力差增加,进一步促使水流在穿透熔体时向内壁面偏移。

2.3 注水延迟时间对偏心率的影响

(1)注水延迟时间对弯管件平均偏心率影响分析。

在其它参数不变的情况下,研究注水延迟时间对弯管件弯曲段平均偏心率及其分布的影响,结果如图9所示。图9a表明,注水延迟时间对弯曲段平均偏心率的影响较显著。随着注水延迟时间的增加,平均偏心率明显增大。由于注水延迟时间延长,熔体在型腔内部停留时间增加,导致熔体黏度增大,熔体黏度又会影晌熔体流动性,高黏度熔体在弯曲段中流动受阻,外壁面容易形成较大的弯曲压力,从而使得内、外壁面压力差增大,外壁面压力大于内壁面,水流受到由外壁面指向内壁面的推力作用,使水流向内壁面移动,导致偏心率增加。



a—弯曲段平均偏心率; b—弯曲段各截面位置偏心率

图9 不同注水延迟时间下的平均偏心率 and 偏心率分布

(2)注水延迟时间对弯管件偏心率分布影响分析。

如图9b所示,高压水穿透熔体时,弯管件第一弯曲段测量位置为 P_2, P_3, P_4 ,偏心率先增大后减小;第二弯曲段测量位置为 P_5, P_6, P_7 ,偏心率亦先增大后减小。从测量位置 P_3, P_6 可以看出, P_6 截面较 P_3 截面处偏心率出现激增现象。同时,随着注水延迟时

间的增加, P_3, P_6 截面处偏心率逐渐增大,当注水延迟时间继续增加到2 s后,两截面处偏心率趋于稳定。第二弯曲端偏心率急剧增大的原因除了冷却时间延长导致的熔体黏度增大外,还因水头压力损失严重,又无法得到压力补偿,所以水流经过 P_6 截面处,水流的离心力减小巨大,无法抵消外壁面压力,水流周围凝固层受到由外壁面向内壁面的压力并推动其向内壁面移动,使得偏心率增大。

图10为不同注水延迟时间下两弯曲段各截面形状。由图10可以看出,弯管件第一弯曲段3个测量位置(P_2, P_3, P_4),高压水流的穿透截面都向内壁面(第一弯曲段曲率半径较小的管件左侧)偏移;弯管件第二弯曲段3个测量位置(P_5, P_6, P_7),高压水流的穿透截面都向内壁面(第二弯曲段曲率半径较小的管件右侧)偏移。

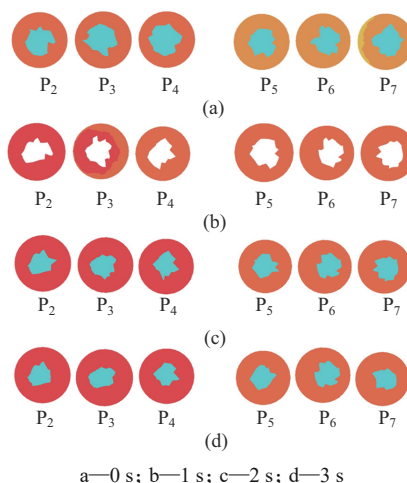


图10 不同注水延迟时间下两弯曲段各截面形状

2.4 工艺参数的正交优化

采用正交试验,选定弯管件两弯曲段的平均偏心率作为评价指标。运用三因素[熔体温度(A)、注水压力(B)、注水延迟时间(C)]四水平设计方案,共16组试验,试验方案及结果见表1。根据表1结果,发现在熔体温度为250 °C、注水压力为8 MPa、注水延迟时间为2 s时(即组合 $A_3B_1C_3$),弯管件两弯曲段的平均偏心率最低。

通过计算极差和均值可得出每个因素对弯管件弯曲段平均偏心率的影响程度,计算公式如式(7)至式(10)所示。

$$K_{xy} = \frac{S_{y_1} + S_{y_2} + \cdots + S_{y_n}}{n} \quad (7)$$

$$R_{lx} = \max \{k_{x_1}, k_{x_2}, k_{x_3}, \cdots\} \quad (8)$$

表1 正交实验试验方案及结果

实验编号	因素			平均偏心率
	熔体温度 (A)/°C	注水压力 (B)/MPa	注水延迟时 间(C)/s	
1	230 (A ₁)	8 (B ₁)	0 (C ₁)	8.345 2
2	230 (A ₁)	10 (B ₂)	1 (C ₂)	7.991 2
3	230 (A ₁)	12 (B ₃)	2 (C ₃)	8.469 4
4	230 (A ₁)	14 (B ₄)	3 (C ₄)	7.818 4
5	240 (A ₂)	10 (B ₂)	0 (C ₁)	7.858 8
6	240 (A ₂)	8 (B ₁)	1 (C ₂)	7.254 7
7	240 (A ₂)	14 (B ₄)	2 (C ₃)	7.452 0
8	240 (A ₂)	12 (B ₃)	3 (C ₄)	8.633 6
9	250 (A ₃)	12 (B ₃)	0 (C ₁)	7.757 2
10	250 (A ₃)	14 (B ₄)	1 (C ₂)	7.762 3
11	250 (A ₃)	8 (B ₁)	2 (C ₃)	7.069 8
12	250 (A ₃)	10 (B ₂)	3 (C ₄)	7.243 6
13	260 (A ₄)	14 (B ₄)	0 (C ₁)	8.312 3
14	260 (A ₄)	12 (B ₃)	1 (C ₂)	8.246 6
15	260 (A ₄)	10 (B ₂)	2 (C ₃)	7.340 1
16	260 (A ₄)	8 (B ₁)	3 (C ₄)	7.108 5

$$R_{ox} = \min \{k_{x_1}, k_{x_2}, k_{x_3} \dots\} \quad (9)$$

$$R_x = R_{1x} - R_{0x} \quad (10)$$

式中: K_{xy} 为因素 x 在水平 y 下的评价指标的平均值,评价指标即弯管件弯曲段的平均偏心率,每个指标用 S_{yn} 表示; R_{1x} 和 R_{0x} 表示在同一个因素下所有水平中的 K_{xy} 的最大值和最小值; R_x 则为每个因素下对应的极差值。

根据试验结果,计算出的评价指标结果见表2。表中极差表示各影响因素对评价指标影响程度,极差值越大则说明影响程度越大。由表2可知,熔体温度、注水压力和注水延迟时间3个因素对应的极差值分别为0.697 9、0.832 1和0.485 6,对弯管件弯曲段平均偏心率而言,注水压力影响程度最大,其次为熔体温度,而注水延迟时间对平均偏心率影响程度最小。根据16组试验数据,得出最优组合为 $A_3B_1C_3$ 。

表2 正交试验极差分析

项目	因素		
	熔体温度	注水压力	注水延迟时间
水平1	$K_{A1}=8.156 1$	$K_{B1}=7.444 6$	$K_{C1}=8.068 4$
水平2	$K_{A2}=7.799 8$	$K_{B2}=7.608 4$	$K_{C2}=7.813 7$
水平3	$K_{A3}=7.458 2$	$K_{B3}=8.276 7$	$K_{C3}=7.582 8$
水平4	$K_{A4}=7.751 9$	$K_{B4}=7.836 3$	$K_{C4}=7.701 0$
极差	0.697 9	0.832 1	0.485 6

为了研究不同因素对弯管件弯曲段平均偏心率的影响程度,制作了水平效应曲线图,如图11所示,将各因素的水平作为横坐标,评价指标的平均值作为纵坐标。图11可以直观地展示各因素对管

件偏心率的影响规律。此图显示了不同因素下的水平效应曲线图,根据不同水平下各因素的 K 值大小,可以看出每种因素对偏心率的影响程度,最优组合为 $A_3B_1C_3$,与正交试验结果相一致。

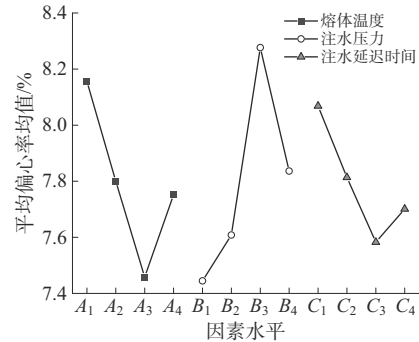


图11 因素水平与评价指标均值的关系

3 结论

(1)熔体温度对弯管件弯曲段平均偏心率影响明显,随着熔体温度的升高,弯管件平均偏心率逐渐减少。但熔体温度变化对弯管件第二弯曲段中心截面(P_6)处偏心率无明显影响。

(2)注水压力对弯管件弯曲段平均偏心率的影响明显,随着注水压力的增加,弯管件平均偏心率逐渐减少。注水压力在8~12 MPa区间对第二弯曲段 P_6 截面处偏心率影响不明显,而当注水压力增加到14 MPa时, P_6 截面处偏心率才出现较明显的下降。

(3)注水延迟时间对弯管件弯曲段平均偏心率的影响较大。随着注水延迟时间的增加,平均偏心率明显增大。当注水延迟时间增大到2 s后,弯管件弯曲段 P_3 、 P_6 截面处偏心率趋于稳定。

(4)正交试验结果表明,注水压力对弯管件弯曲段平均偏心率影响程度最大,其次为熔体温度,而注水延迟时间对平均偏心率影响程度相对最小。在熔体温度为250 °C、注水压力为8 MPa、注水延迟时间为2 s时,弯管件弯曲段平均偏心率最低,且该工艺参数组合为16组正交试验中的最优组合。

参考文献

- [1] Park H P, Cha B S, Park S B, et al. A study on the void formation in residual wall thickness of fluid assisted injection molding parts [J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2014, 2014(4): 1-6.
- [2] Li L, Peng Y G, Wei W. Recent advances on fluid assisted injection molding technique[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2014, 7(1):82-91.
- [3] Yuan H, Pan Y, Liu X. Large-scale formation of shish-kebab in

- water-assisted injection-moulded high-density polyethylene with a high-molecular weight[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2019, 42(1):40–45.
- [4] Yang J G, Yu S R. Prediction of process parameters of water-assisted injection molding based on inverse radial basis function neural network[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(12):3159–3169.
- [5] Liu S J, Lin C H J. An experimental study of water assisted injection molding of plastic tubes with dimensional transitions[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2007, 26(14):1441–1454.
- [6] 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. DOI: 10.1002/mame.201800035.
- [7] 张伟,柳和生,余忠,等.水辅助注射成型制品质量的缺陷及工艺优化研究概述[J]. *中国塑料*, 2018, 32(4):12–17.
- Zhang Wei, Liu Hesheng, Yu Zhong, et al. Overview of defects in quality of water-assisted injection molded products and process optimization research[J]. *China Plastics*, 2018, 32(4):12–17.
- [8] Knights M. Water injection molding it's all coming together[J]. *Plast Techn*, 2005, 51(9):54–61.
- [9] Yang J G, Zhou X H. Numerical simulation on residual wall thickness of tubes with dimensional transitions and curved sections in water-assisted injection molding[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128(3):1987–1994.
- [10] Liu S J, Chen W K. Experimental investigation and numerical simulation of cooling process in water assisted injection moulded parts[J]. *Plast Rubber Compos*, 2004, 33(6):260–266.
- [11] Sannen S, De Keyzer J, Van Puyvelde P. The influence of melt and process parameters on the quality and occurrence of part defects in water assisted injection molded tubes[J]. *International Polymer Processing*, 2011, 26(5):551–559.
- [12] Huang S, Wang W, Qi F, et al. Experimental analysis of fluid-assisted injection molding of pipe fittings with different angles by short-shot method[J]. *Engineering Reports*, 2023, 5(2). DOI: 10.1002/eng2.12571.
- [13] Lin K Y, Chang F A, 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(5):491–497.
- [14] 刘旭辉,黄汉雄.工艺参数对水辅助注塑弯曲圆管内径的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2011, 23(1):32–35.
- Liu Xuhui, Huang Hanxiong. Influence of process parameters on the inner diameter of water-assisted injection molded curved pipes[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2011, 23(1):32–35.
- [15] 曲杰,黄汉雄.水辅助注塑制件壁厚分析[J]. *高分子材料科学与工程*, 2008(7):20–23.
- Qu Jie, Huang Hanxiong. Analysis of wall thickness of product by water-assisted injection molding[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2008(7):20–23.
- [16] 夏鹏飞,李奇龙,岳生娟,等.90°竖直弯管内水力特性数值模拟研究[J]. *科技通报*, 2021, 37(5):7–12.
- Xia Pengfei, Li Qilong, Yue Shengjuan, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics inside a 90° vertical bend pipe[J]. *Science and Technology Bulletin*, 2021, 37(5):7–12.