DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60143 [文章编号] 1003-5788(2023)10-0093-07

螺距变化对异向双螺杆挤出机流场影响的仿真分析

Simulation analysis of influence of pitch variation on flow field of twin screw extruder with different direction

张一明[1,2] 黄志刚[1,2] 徐 珍[1,2] 程媛媛[1,2]

ZHANG Yiming[1,2] *HUANG Zhigang*[1,2] *XU Zhen*[1,2] *CHENG Yuanyuan*[1,2]

(1. 北京工商大学人工智能学院，北京 100048；2. 塑料卫生与安全质量评价技术北京市重点实验室，北京 100048)

(1. *School of Artificial Intelligence*, *Being Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*; 2. *Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology*, *Beijing* 100048, *China*)

摘要:目的:以聚乳酸(PLA)为例,研究螺距变化下的异向双螺杆挤出流道的分布规律。**方法:**在 Solidworks 中根据理论端面曲线方程并修正,绘制变螺距与不变螺距两种三维模型,使用 Workbench 软件对两种螺杆构型使用扫略网格方法生成所需要的分析模型,再使用 Polyflow 流体仿真软件进行实际情况的模拟得到后处理结果,使用 FieldView 软件进行最终结果分析;研究聚乳酸流体在模拟条件下的压力、剪切速率以及黏度。同时使用 Polystat 统计模块对停留时间分布曲线 RTD 进行分析。**结果:**在其他条件相同的情况下,相比于不变螺杆,变螺距螺杆的压力变大,剪切速率和黏度波动增加,轴向混合性能提高,但自清洁能力降低。**结论:**螺距变化对聚乳酸来说存在一定的影响,但过大的螺距变化往往产生不利的影响,因此,需要结合实际情况具体设计合适的变螺距螺杆以提高产量和质量。

关键词:螺杆挤出机;异向啮合;螺距变化;数值模拟;流场分析

Abstract: Objective: Taking polylactic acid (PLA) as an example, the flow channel distribution of twin-screw extrusion under different pitch was studied. **Methods:** In Solidworks, two 3D models with variable pitch and constant pitch were drawn according to the theoretical end curve equation and modified. Workbench software was used to generate the required analysis models with the swept mesh method for the two screw configurations, and then Polyflow fluid simulation software was used to simulate the actual situation. After obtaining the post-processing results, FieldView software was used to analyze the final results. The pressure, shear rate and viscosity of polylactic acid fluid under simulated conditions were studied. Meanwhile, the residence time distribution curve RTD was analyzed by Polystat statistical module. **Results:** Under the same conditions, the pressure, shear rate and viscosity fluctuation of the screw with variable pitch increased, and the axial mixing performance improved, but the self-cleaning ability decreased. **Conclusion:** The change of pitch has a certain effect on polylactic acid, but too large change of pitch often produces adverse effects. Therefore, it is necessary to design suitable variable pitch screw according to the actual situation to improve the yield and quality.

Keywords: screw extruder; different meshing; pitch variation; numerical simulation; the flow field analysis

聚乳酸(PLA)因其成本低、效率高、产出高等优点,被广泛应用于食品包装、农业等领域[1]。

对比单螺杆挤出机,双螺杆挤出机加料性能更方便,挤出性能更稳定,混炼性能更完善,但清洁性能不是很完美。针对异向双螺杆挤出机,杆在机筒内的运行方式为“C”字型,而非同向双螺杆的“8”字型,正向运输能力更好,且封闭性好,减少了物料在流道内的不规则流动,同时提高了螺杆的自清洁能力,因此其成为现行的主流产品,被广泛应用于挤出成型和配料造粒等方面[2]。

孙瑾亭等[3]通过研究变螺距单螺杆转子的温度场和热变形场发现,螺槽的改变能缓和温度场和热变形场,使其分布更均匀。Wang 等[4]对双螺杆泵变螺距螺杆转子间隙分布及热变形进行了研究,发现新型螺杆转子的间隙分布优于传统方法的,在优化截面轮廓的圆渐开线下,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32172277)

作者简介:张一明,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:黄志刚(1966—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: huangzg@btbu.edu.cn

收稿日期:2023-07-26 **改回日期:**2023-10-12

分布更加合理，极限真空度显著提升，具有更好的密封性能。

目前，有关单螺杆和同向双螺杆螺距变化对螺杆挤出机混合效果的影响已有报道，但有关异向双螺杆螺纹元件螺距变化对聚乳酸流道内流场的影响尚未见报道。研究拟在 Solidworks 中根据双螺杆的理论端面曲线，绘制变螺距与不变螺距两种三维模型，使用 Workbench 软件对两种螺杆构型使用扫略网格方法生成所需要的分析模型，再使用 Polyflow 流体仿真软件进行实际情况模拟得到后处理结果，使用 FieldView 软件进行最终结果分析；研究聚乳酸流体在模拟条件下的压力、剪切速率以及黏度，同时使用 Polystat 统计模块对停留时间分布曲线 RTD 进行分析[5]，以期得到一种变螺距异向双螺杆，在原来异向双螺杆的基础上，提高轴向混合能力，提高产品性能。

1　理论模型的建立

1.1　建立几何模型

1.1.1　端面曲线的建立　双螺杆的理论端面曲线包括包络法和相对运动法，试验采用相对运动法。根据几何学的基本原理，在 Solidworks 上建立方程驱动曲线，绘制出端面曲线。

理论端面曲线包括圆弧曲线和摆线两部分，方程为[6]：

(1) 圆弧曲线：规定圆弧曲线 de 段为第一段圆弧，逆时针旋转对应的圆弧依次为 2、3、4 段圆弧，其中 $1\leqslant n\leqslant 4$，n 为奇数时：

$$\begin{cases}x=R_b\cdot\cos wt\\ y=R_b\cdot\sin wt\end{cases}[(-\pi/4)+(n-1)\pi/2\leqslant wt\leqslant(\pi/4)+(n-1)\pi/2]。\tag{1}$$

n 为偶数时：

$$\begin{cases}x=R_s\cdot\cos wt\\ y=R_s\cdot\sin wt\end{cases}[(-\pi/4)+(n-1)\pi/2\leqslant wt\leqslant(\pi/4)+(n-1)\pi/2]。\tag{2}$$

(2) 摆线：规定 cd 段为第一段摆线，顺时针旋转对应的摆线依次为 2、3、4 段摆线，$1\leqslant n\leqslant 4$，方程为：

$$\begin{cases}x=C_L\cdot\cos wt-R_s\cdot\cos[(2n-1)\pi/4-2wt]\\ y=-C_L\cdot\sin wt-R_s\cdot\sin[(2n-1)\pi/4-2wt]^{\circ}\end{cases}\tag{3}$$

其中，参数区间因为 n 的取值有所不同，当 n 为奇数时：

$$[(2n-1)\pi/4-\arccos(C_L/2R_s)\leqslant wt\leqslant(2n-1)\pi/4],\tag{4}$$

当 n 为偶数时：

$$[(2n-1)\pi/4\leqslant wt\leqslant(2n-1)\pi/4+\arccos(C_L/2R_s)],\tag{5}$$

式中：

R_s——螺杆外径，mm；

R_b——螺杆内径，mm；

$C_L=R_s+R_b$。

取 $n=2$，螺杆头数为 2∶2 的异向双螺杆端面曲线如图 1 所示。

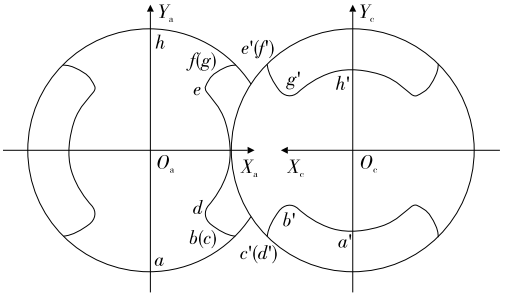


图 1　螺杆头数为 2∶2 的理论端面曲线

Figure 1　The theoretical end curve of the number of screw heads of 2∶2

1.1.2　端面曲线的修正　得到全啮合的端面曲线方程后，如果完全按照理论曲线加工，那么螺杆之间完全没有间隙，这对螺杆材料的要求非常高，且在螺杆转动过程中，高温会使螺杆膨胀，存在极大的安全隐患，同时螺杆存在死角，清理十分不便，因此需对螺杆进行端面修正。使两螺杆螺棱侧面之间有一定侧间隙[7]，修正后螺槽角 $\alpha=90°$，螺棱角 $\theta=80°$(图 2)。

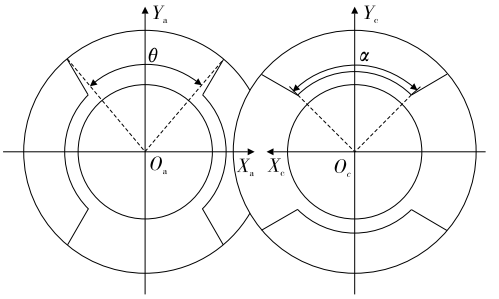


图 2　修正端面曲线

Figure 2　End face correction curve

1.1.3　几何模型的建立　根据表 1、表 2，在 Solidworks 软件中绘制仿真用异向双螺杆三维模型，选择两根螺杆的中心为坐标系原点，两个螺杆为一个整体，挤出方向为 Z 轴正方向。面向入料口面，X 轴正方向向左，Y 轴正方向向上。为了提高螺杆的使用寿命，规定螺杆上部分为出料口，下半部分为进料口，因此，X 轴正方向螺杆为逆时针旋转，负方向螺杆为顺时针旋转。根据设计的三维模型规定，对两组三维模型分别命名为 AC1 和 AC2。图 3 为AC1 和 AC2 的异向双螺杆三维模型右视图的纵向截面图。由图 3 可知，两种模型的螺槽间距不同。

表 1　螺杆元件建模参数

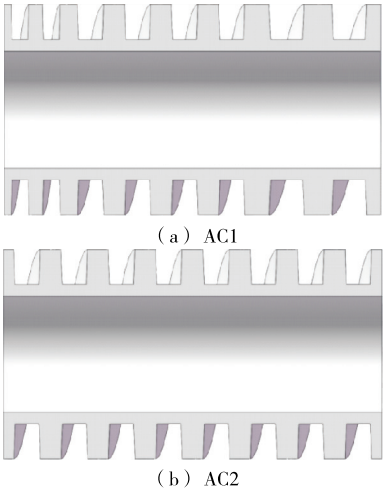
Table 1　Screw element modeling parameters　　mm

名称	长度	内径	外径	中心距	螺槽深度	螺杆间距
AC1	60	12	18	30	6	5.0,7.5,10.0
AC2	60	12	18	30	6	7.5

表 2　流道区域建模参数

Table 2　Channel area modeling parameters　　mm

长度	内径	外径	中距
60	10	18.5	31



(a) AC1　　(b) AC2

图 3　异向双螺杆三维模型截面图

Figure 3　Cross section of the three dimensional model of the opposite direction twin screw

1.2　建立数学模型

1.2.1　基本假设　在进行异向双螺杆仿真前,考虑到实际情况和环境等因素影响,做出假设[8],并在此基础上进行仿真分析。

(1) 熔融体不可压缩且充满整个流道。

(2) 熔融体在流场中的各个位置温度相同。

(3) 机筒壁面无滑移。

(4) 重力与惯性力忽略不计,且远远小于黏性力的体积力。

(5) 熔融体为雷诺系数较小的层流流动。

1.2.2　基本方程　溶体流动必须满足流体力学的三大基本方程:质量守恒方程(也称连续性方程)、动量守恒方程(也称运动方程)和能量守恒方程。因为在等温条件下进行,所以能量守恒方程不必求解。基于上述条件,基本方程为[9]:

(1) 连续性方程:

$$\nabla \cdot \nu = 0。 \tag{6}$$

(2) 运动方程:

$$-P + \nabla \cdot T = 0, \tag{7}$$

式中:

∇——哈密尔顿算子;

ν——速度矢量,m/s;

P——流体静压力,Pa;

T——应力张量,Pa。

其中选用 Bird-Careau 本构方程[10]进行模拟数值计算,探究聚乳酸剪切速率与黏度之间的关系。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1+\lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}, \tag{8}$$

式中:

η_0——零剪切黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$——剪切速率,s^{-1};

λ——松弛时间,s;

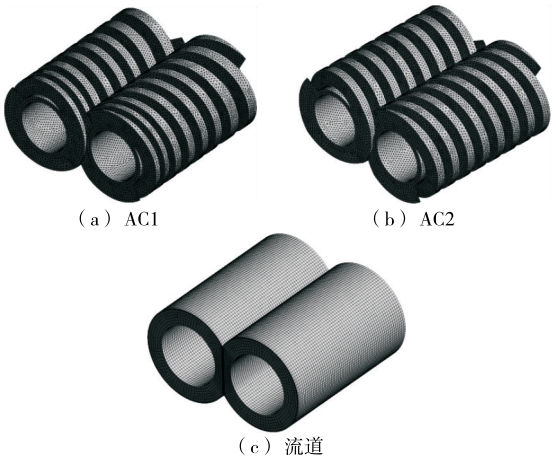
η_∞——无穷剪切黏度,Pa·s;

n——流动指数。

模拟过程设定为等温条件,所以温度设为 190 ℃;聚乳酸材料在 190 ℃下的零剪切黏度为 2 504.235 Pa·s、松弛时间为 0.060 7 s、流体指数为 0.253、无穷剪切黏度为 1 Pa·s[11]。

1.3　有限元模型

1.3.1　网格划分　使用 Workbench 软件进行网格划分,两种螺杆组合元件和对应的流体区域使用扫略规则性网格进行划分[12]。划分后的螺杆元件和流体区域如图 4 所示。



(a) AC1　　(b) AC2

(c) 流道

图 4　螺杆元件及流道的有限元模型

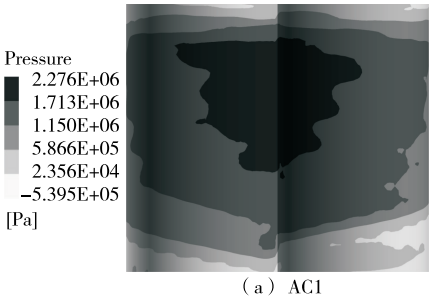
Figure 4　Finite element model of screw element and flow channel

1.3.2　边界条件的设定　流体区域入口流体和出口流体为自由流动，因此法向力和切向力设为 0 Pa；左右内孔属于滑移边界，没有流体能贯穿边界，因此切向力设为 0 Pa，法向速度设为 0 m/s；流道内壁面无滑移，因此法向速度和切向速度设为 0 m/s，螺杆转速设为 60 r/min。

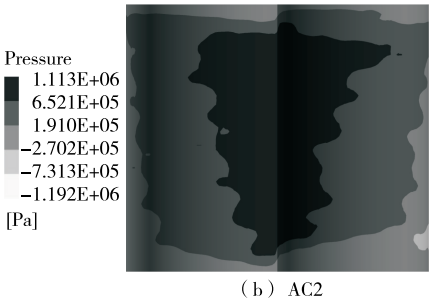
2　仿真结果与分析

2.1　压力场

图 5 为不同螺距压力分布云图，由于异向双螺杆结构复杂性及流场复杂性，且因为流道设计时，螺棱和流道之间的间隙较小，当螺杆转动时，物料会在间隙处堆积，所以啮合区出现局部高压情况，这种情况被称为压力突变[12]。为进一步分析两种螺杆对应的流道的压力分布情况，在螺杆入料位置啮合区沿挤出方向建立压力参考轴线，得出挤出方向距离和压力的关系如图6所示。当聚



（a）AC1



（b）AC2

图 5　不同螺距下的压力云图

Figure 5　Pressure cloud diagram under different screw groove depths

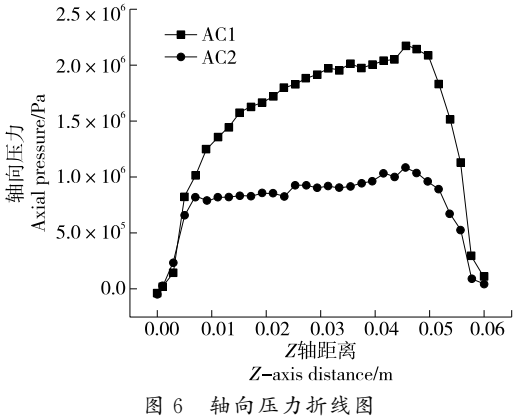


图 6　轴向压力折线图

Figure 6　Axial pressure line diagram

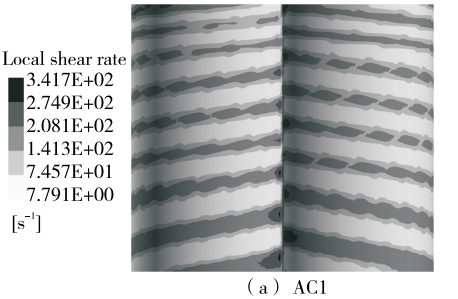
乳酸进入异向双螺杆时，因为压力梯度的存在，在入口处到第一个螺棱时从 0 Pa 开始逐渐增加，但是 AC1 模型的螺槽宽度逐渐减小，因此接触面积逐渐减小，到达最后时，压力值也达到了最大值，随着聚乳酸的流出，压力重新回到 0 Pa；AC2 模型因为螺槽宽度不变，因此压力处在一个相对稳定值。

2.2　剪切速率场

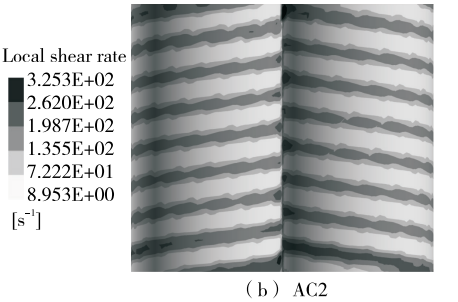
由图 7 可知，通常情况下，双螺杆在螺杆啮合区和机筒内壁的间隙处出现最高的剪切速率。剪切速率的峰值点出现在螺棱位置，由于剪切速率梯度的存在，聚乳酸熔融体可以充分混合。螺槽宽度影响着剪切速率的变化，螺槽变宽，螺棱变窄，使得流道与螺棱的接触面积减小，剪切速率波动变大，剪切作用更强，分散混合效果更好。为进一步分析两种螺杆对应的流道的剪切速率分布情况，在螺杆啮合区沿挤出方向建立剪切速率参考轴线，得出挤出方向距离和剪切速率的关系如图 8 所示。由图 8 可知，当挤出方向距离为 0～20 mm 时，AC1 模型相对于 AC2 模型来说螺槽宽度更宽，因此剪切速率波动比 AC2 模型小；当挤出方向距离为 20～50 mm 时，两种螺杆的螺槽宽度相同，因此剪切速率的波动大体相同；当挤出方向距离为 50～60 mm 时，AC1 模型相对于 AC2 模型来说螺槽宽度更窄，因此其剪切速率波动比 AC2 的更大，AC2 模型在沿挤出方向上的 35，60 mm 附近处出现突变值，说明此处产生了漏流现象。

2.3　黏度场

由图9可知，靠近螺棱位置的黏度较小，螺槽中间



（a）AC1



（b）AC2

图 7　不同螺距下的剪切速率云图

Figure 7　Shear rate nematogram at different depths of spiral grooves

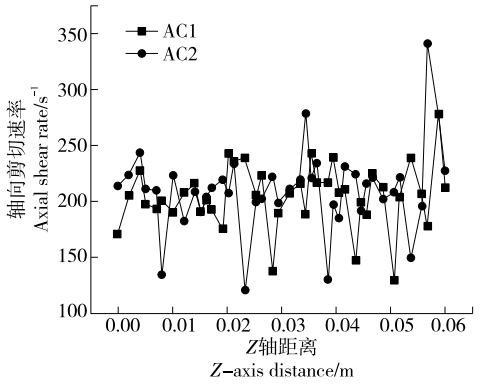


图 8　轴向剪切速率折线图

Figure 8　Line chart of axial shear rate

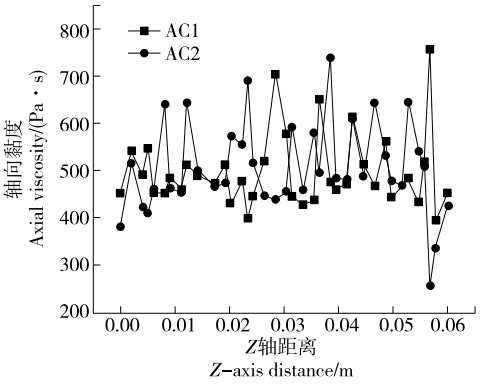


图 10　轴向黏度折线图

Figure 10　Line chart of axial viscosity

位置的较大,是因为"剪切变稀"现象的存在[13],即流动速度较大处剪切作用较大而黏度较小;流动速度较小处剪切作用较小而黏度较大。聚乳酸(PLA)属于剪切变稀流体,符合这种现象。为进一步分析两种螺杆对应的流道的瞬时黏度分布情况,在螺杆啮合区沿挤出方向建立黏度参考轴线,得出挤出方向距离与黏度的关系如图 10 所示,聚乳酸在螺槽内流动,在两个螺杆的螺棱和螺槽处发生挤压剪切。由图 10 可知,轴向黏度峰值点与螺槽一一对应,因为螺杆向前输送,剪切作用并不是很大,因此整体黏度值较大。当挤出方向距离为 0～20 mm 时,AC1 模型相对于 AC2 模型来说螺槽宽度更宽,拥有更大的接触面积,物料堆积,因此黏度相对于 AC2 模型来说变化不大;当挤出方向距离为 20～50 mm 时,两种螺杆的螺槽宽相同,因此黏度的波动大体相同;当挤出方向距离为50～60 mm 时,AC1 模型相对于 AC2 模型来说螺槽宽度更窄,接触面积更小,物料不会在此堆积,因此剪切黏度波动比 AC2 的更大,AC1、AC2 模型在沿挤出方向上的 55 mm 处出现突变值,说明此处产生了漏流现象。

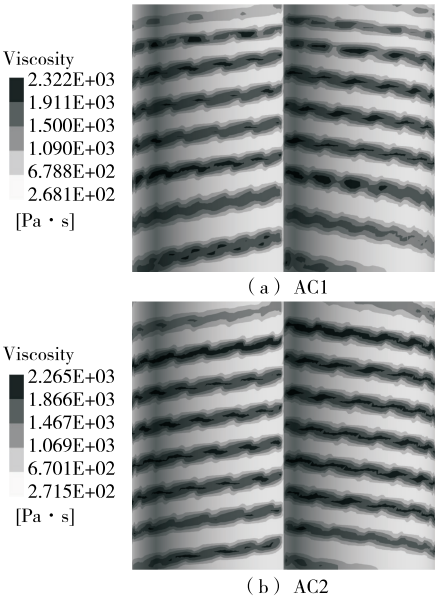


图 9　不同螺距下的黏度云图

Figure 9　Viscosity nematogram at different depths of screw grooves

2.4　停留时间分布

停留时间分布是衡量螺杆元件轴向混合性能的重要指标[14]。试验采用示踪粒子轨迹跟踪法(PTA),将 2 000 个示踪粒子布置在流道入口处,利用 Polystat 统计模块计算分析示踪粒子在流道内的运动轨迹,以时间为切片,根据时间切片建立出口切片,创建概率密度函数:

$$E(t)=c(t)/\int_0^{\infty}c(t)\mathrm{d}t\cong c(t)/\sum_0^{\infty}c(t)\Delta t\ 。\quad(9)$$

绘制停留时间分布曲线如图 11 所示。

根据停留时间分布曲线,创建概率函数:

$$F(t)=\int_0^{t}E(t)\mathrm{d}t\cong\sum_0^{t}c(t)\Delta t/\sum_0^{\infty}c(t)\Delta t\ 。\quad(10)$$

绘制累积停留时间分布曲线如图 12 所示。

由图 11、图 12 可知,累积停留时间分布曲线趋势大体一致,但在达到稳定点时存在先后顺序,选取概率密度为 0.8时,AC1模型的停留时间比AC2的长。虽然螺距

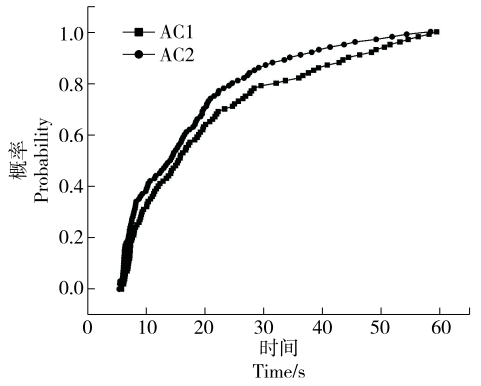


图 11　累积停留时间分布曲线

Figure 11　Cumulative residence time distribution curve

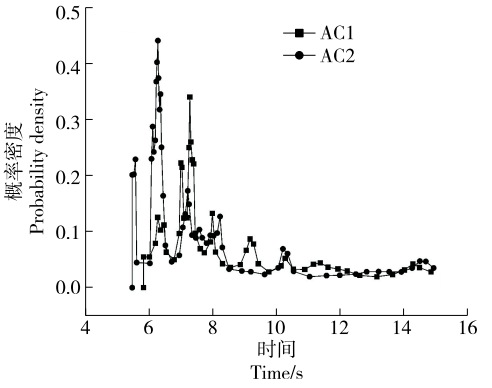


图 12　停留时间分布曲线

Figure 12　Residence time distribution curve

变化趋势是使螺槽宽度越来越小，但在开始阶段增加了接触面积，停留时间也变长，因此聚乳酸可以充分混匀。随着螺杆的转动，示踪粒子在螺杆内的停留时间延长，轴向混合能力更好；AC2 模型比 AC1 模型更快地出现拐点，但其拐点间的距离比 AC1 模型的要小，轴向混合能力变弱，螺槽接触面积随转动时间的延长而增加，聚乳酸在螺杆内的停留时间延长，不利于螺杆的自清洁。因此选择合适的螺杆结构有利于提高聚乳酸材料的性质，同时也能提高螺杆的自清洁能力。

3　试验结果的验证与分析

3.1　试验方法

3.1.1　试验原料

PLA：4032D，美国 NatureWorks 公司。

3.1.2　试验设备

同向双螺杆挤出机：HK-53 系列，南京科亚装备集团；

异向双螺杆挤出机：DT20/44 型，南京鼎天机械制造有限公司；

注塑机：YT-400 型，杭州大禹机械有限公司；

平板旋转流变仪：MCR-502 型，奥地利 Anton Paar 公司。

3.1.3　试验条件设定　聚乳酸（PLA）于电热鼓风干燥箱内 80 ℃干燥 10 h。同向双螺杆挤出机和异向双螺杆挤出机转速均为 60 r/min。注塑机的融融温度为 185 ℃；注塑温度 125 ℃。旋转流变仪的范围频率为 0.01～20.00 Hz，平板模式，温度为 185 ℃，应变为 1%。

3.2　试验结果与分析

3.2.1　复合黏度　如图 13 所示，随着角频率的升高，复合黏度（η^*）逐渐减小，分子链之间的纠缠得以释放[15]，符合“剪切变稀”现象。异向双螺杆的复合黏度比同向双螺杆的更高，是因为异向双螺杆是“C”型腔室的正位移输送，而同向双螺杆是“8”型的正位移输送，物料相同时，更

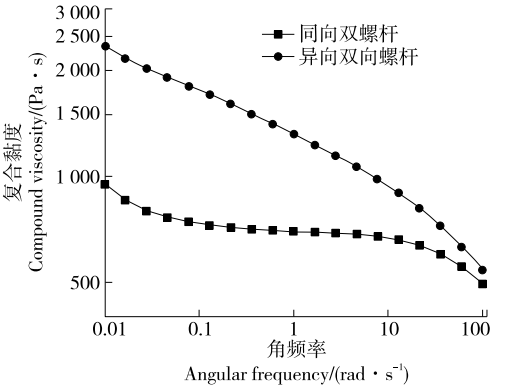


图 13　不同螺杆构型下的 PLA 材料的复合黏度

Figure 13　Composite viscosity of PLA material under different screw configurations

容易充满同向双螺杆，因此其混合程度更高，分子链更容易被打碎，黏度降低。

3.2.2　储能模量与损耗模量　由图 14、图 15 可知，储能模量（G'）和损耗模量（G''）随角频率（ω）的增加而增加。低剪切频率下，分子链有足够的时间解开，导致链松弛，

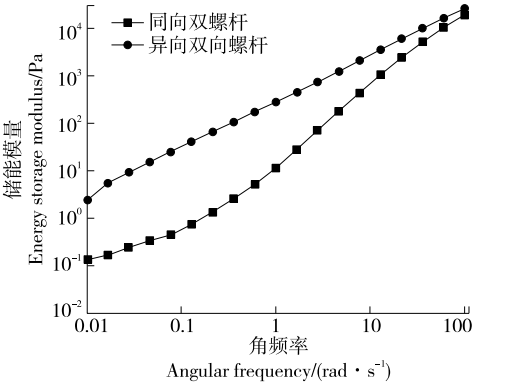


图 14　不同螺杆构型下的 PLA 材料的储能模量

Figure 14　Energy storage modulus of PLA material under different screw configurations

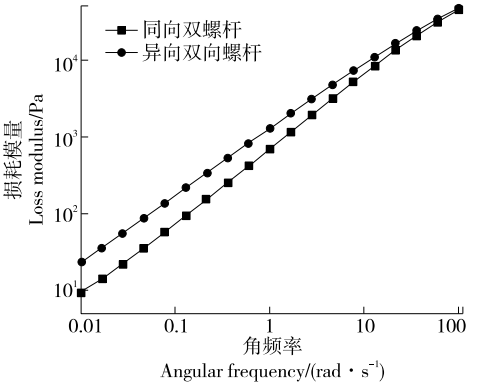


图 15　不同螺杆构型下的 PLA 材料的损耗模量

Figure 15　Energy storage modulus of PLA material under different screw configurations

因此材料在低频区具有较低的 G' 和 G''。随着 ω 的增加,分子链的弛豫时间大于外力变化,使得 G' 和 G'' 增加。因为结构的差异性,异向双螺杆的储能模量和损耗模量高于同向双螺杆的,随着加工的进行,最后逐渐趋于一致[16]。

4 结论

研究运用 Polyflow 流体仿真软件进行数值模拟,借助 FieldView 软件对后处理结果进行数值分析;并对两种不同螺杆构型的异向双螺杆挤出机的聚乳酸流体的压力场、剪切速率场和黏度场,以及停留时间分布曲线 RTD 进行了对比研究。结果表明:在其他条件相同的情况下,相比于不变螺杆,变螺距螺杆的压力变大,剪切速率和黏度波动增加,轴向混合性能提高,但其自清洁能力降低。螺杆构型的不同会对聚乳酸的复合黏度、储能模量与损耗模量产生影响,同时随着频率的升高,"剪切变稀"现象也可以得到证明,符合仿真规律。试验仿真环境为等温环境,其他条件相同情况下,实际条件下并不成立,因此可根据实际情况具体选择合适的螺杆结构进行生产。

参考文献

[1] 刘玲, 任国庆, 潘鑫, 等. 聚乳酸生产技术及市场分析[J]. 化学工业, 2021, 39(3): 87-90.
LIU L, REN G Q, PAN X, et al. Production technology and market analysis of polylactic acid[J]. Chemical Industry, 2021, 39(3): 87-90.

[2] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[J]. 中国塑料, 2005(2): 73.
GENG X Z. Twin screw extruder and its application[J]. China Plastics, 2005(2): 73.

[3] 孙瑾亭, 王庆生, 王国栋, 等. 变螺距螺杆真空泵转子温度场和热变形的有限元分析[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(8): 791-795.
SUN J T, WANG Q S, WANG G D, et al. Finite element analysis of rotor temperature field and thermal deformation of variable pitch screw vacuum pump[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(8): 791-795.

[4] WANG J, ZHAO X, ZHAO L, et al. Clearance distribution design and thermal deformation analysis of variable-pitch screw rotors for twin-screw vacuum pumps[J]. Vacuum, 2023, 211: 111936.

[5] 许国智. 粒子示踪法研究胶体悬浮液在复合外场下的动态[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 19-21.
XU G Z. Study on the dynamics of colloidal suspension under composite external field by particle tracer method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 19-21.

[6] 陈龙, 董力群, 张亚军, 等. 基于 SolidWorks API 的异向双螺杆的参数化设计[J]. 中国塑料, 2018, 32(1): 120-124.
CHEN L, DONG L Q, ZHANG Y J, et al. Parametric design of double screw based on SolidWorks API[J]. China Plastics, 2018, 32(1): 120-124.

[7] 宋俊全, 冯连勋. 啮合导向旋转双螺杆三维实体造型研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(3): 92-96.
SONG J Q, FENG L X. Research on 3D solid modeling for the intermeshing counter-rotating twin-screw[J]. China Plastics, 2003, 17(3): 92-96.

[8] 王少峰, 张媛, 刘美莲, 等. 不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 71-74.
WANG S F, ZHANG Y, LIU M L, et al. Flow channel distribution of meshing dissimilar twin-screw extruder under different temperature conditions[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.

[9] 韩海川, 刘谨, 李开国, 等. 双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场影响的仿真[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6): 74-77.
HAN H C, LIU J, LI J G, et al. Simulation of influence of twin-screw meshing element and reverse screw element on flow field[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6): 74-77.

[10] 蒋卫鑫, 黄志刚, 赵玉莲, 等. 基于 Polyflow 田字形网格食品托盘挤出成型分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 86-90.
JIANG W X, HUANG Z G, ZHAO Y L, et al. Analysis of extrusion molding of food tray based on Polyflow field pattern Grid[J]. Food & Machinery, 2017, 33(12): 86-90.

[11] 黄志刚, 蒋卫鑫, 李鑫, 等. 啮合异向双螺杆挤出机仿真研究[J]. 包装学报, 2019, 11(3): 9-15.
HUANG Z G, JIANG W X, LI X, et al. Simulation study on meshing dissimilar twin-screw extruder[J]. Journal of Packaging and Processing, 2019, 11(3): 9-15.

[12] FORMELA K, CYSEWSKA M. Efficiency of thermomechanical reclaiming of ground tire rubber conducted in counter-rotating and co-rotating twin screw extruder[J]. Polimery, 2014, 59(3): 231-238.

[13] 杨明山, 赵明. 塑料成型加工工艺设备[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2010: 14-16.
YANG M S, ZHAO M. Plastic forming processing technology equipment[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2010: 14-16.

[14] 张先明. 挤出过程停留时间分布的实验研究和数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 10-18.
ZHANG X M. Studies on residence time distribution in twin-screw extruders using experimental method and numerical simulation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 10-18.

[15] 雷雁洲, 王少伟, 吕秦牛, 等. 碳纤维/聚乳酸复合材料的结晶性能和流变特性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1 402-1 406.
LEI Y Z, WANG S W, LU Q N, et al. Crystallization and rheological properties of carbon fiber/polylactic acid composites[J]. Chinese Journal of Composites, 2018, 35(6): 1 402-1 406.

[16] 孙苗苗, 孙小杰, 王荣, 等. 扩链剂对 PGA/PBS 共混体系结构及性能的影响[J]. 塑料科技, 2022, 50(4): 5-9.
SUN M M, SUN X J, WANG R, et al. Effect of chain extender on the structure and properties of PGA/PBS blends[J]. Plastic Science and Technology, 2022, 50(4): 5-9.