

# 啮合异向双螺杆挤出机仿真研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2019.03.002

黄志刚<sup>1,2</sup> 蒋卫鑫<sup>1,2</sup>  
李鑫<sup>1,2</sup> 王少峰<sup>1,2</sup>

1. 北京工商大学  
材料与机械工程学院  
北京 100048
2. 北京工商大学  
塑料卫生与安全质量  
评价技术北京市  
重点实验室  
北京 100048

**摘要:** 采用 Solidworks 三维建模软件建立了啮合异向双螺杆螺纹元件与啮合同向双螺杆螺纹元件的物理模型。运用 Polyflow 软件对聚乳酸流体进行三维流体仿真,从聚乳酸流体的剪切速率、黏度、压力和速度等4个方面,对比研究啮合异向双螺杆挤出机螺纹元件与啮合同向双螺杆挤出机螺纹元件对聚乳酸流体的加工效果。研究结果表明,聚乳酸流体在啮合同向双螺杆挤出机螺纹元件中,受到的剪切速率大、轴向运动速度慢而获得了较好的混合效果;聚乳酸流体在啮合异向双螺杆挤出机螺纹元件中,轴向流动速度较快,挤出效果好。

**关键词:** 同向双螺杆;异向双螺杆;剪切速率场;黏度场;压力场;速度场

**中图分类号:** TQ320.5<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2019)03-0009-07

**引文格式:** 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.

20世纪80年代,我国开始引进双螺杆挤出机。双螺杆挤出机对黏性流体有良好的输送与混炼能力,除了在食品和药品领域被广泛使用外<sup>[1]</sup>,在高分子材料加工方面也有较好的应用。W. S. Holdaway<sup>[2]</sup>分析了双螺杆优良的输送能力,王远<sup>[3]</sup>、胡鹏<sup>[4]</sup>、王鹄<sup>[5]</sup>、王蓉<sup>[6]</sup>等分别对多种螺杆元件进行研究,探究挤出机螺杆元件对物料混炼效果的影响。啮合双螺杆挤出机有多种型号<sup>[7]</sup>,根据螺杆的基本运动形式,啮合双螺杆挤出机可以分为异向和同向两种机型。由于特殊的结构,啮合异向双螺杆机筒内部型腔形成了许多封闭的C型室<sup>[8]</sup>,使得加工材料在此封闭区域中流动。在啮合同向双螺杆机筒内部型腔中,加工材料是绕螺杆进行“∞”形流动。上述两种结构的机型根据其各自的特点,被广泛应用于高分子材料的加工和改性。聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)作为生物可降解的高分子材料,具有优良的加工性<sup>[9]</sup>,可以通过双螺杆

挤出机实现高产量连续生产。

本文先建立啮合异向双螺杆螺纹元件与同向双螺杆螺纹元件的三维模型,再利用 Polyflow 软件从 PLA 流体的剪切速率场、黏度场、压力场和速度场等4个方面,研究这2种元件对 PLA 流体加工的效果。

## 1 模型的构建

建立螺纹元件端面的几何形状是分析高分子材料挤出过程的基础。本文根据双螺杆几何学,使用 Solidworks 建立啮合异向双螺杆螺纹元件和啮合同向双螺杆螺纹元件的物理模型。Polyflow 是一款针对高分子流体动力学仿真分析模拟的 CFD 软件,其中一些流动模型可以帮助分析实际生产过程中许多难以解答的问题<sup>[10]</sup>。在物理模型建立后,使用 Polyflow 熔融段 PLA 流体进行仿真分析,具体步骤如下:

收稿日期:2019-04-02

基金项目:北京市自然科学基金-市教委联合资助项目(KZ201810011017)

作者简介:黄志刚(1966-),男,上海人,北京工商大学教授,博士,主要从事包装材料加工等方面的研究,

E-mail: huangzg@btbu.edu.cn

1) 建立螺杆元件的物理模型。使用 Solidworks 建立啮合异向双螺杆螺纹元件和啮合同向双螺杆螺纹元件的几何结构, 并保存为 .iges 文件。

2) 模拟任务的设定。将 .iges 文件导入 Polyflow 进行网格划分并保存为 .msh 文件; 在 polydata 中输入模型的材料性质并根据任务进行模型边界条件设定。

3) 求解模拟问题。对设定的任务进行求解, 通过观察求解过程, 确定求解过程是否存在问题。若求解错误, 则需要对模拟分析任务修改并重新求解。

4) 查看分析结果。模拟分析任务求解成功后, 运行 Field View, 在特定的位置设定特征面, 观察 PLA 流体的流场云图结果。

5) 结果分析及后处理。将仿真结果导出为 excel 格式, 使用 Origin 软件作图, 并对仿真结果进一步解释说明。

### 1.1 几何模型的建立

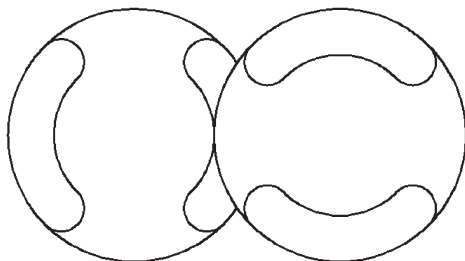
通常按照螺杆上螺纹的头数, 双螺杆挤出机的螺杆可以分为单头螺杆, 双头螺杆和多头螺杆。单头螺杆的输送能力优良但混炼能力差, 一般使用较少。多头螺杆由于螺纹沟槽的深度较小, 其输送能力差, 并且多头混炼部分局部产热较高, 容易使塑料产生热分解, 所以使用较少。而双头螺杆的加工能力介于单头螺杆与多头螺杆之间, 因此使用较多<sup>[11]</sup>。

对模型坐标的设定如下: 原点为左螺杆端面的中心点,  $x$  轴正方向向右,  $y$  轴正方向向上,  $z$  轴正方向为螺杆轴向。因此, 若模拟结果中的轴向速度为正值, 表明 PLA 流体往前输送; 若为负值, 表明 PLA 流体往回输送。根据双螺杆几何学<sup>[12-15]</sup>并按照表 1 中数据, 建立啮合异向双螺杆螺纹元件与啮合同向双螺杆螺纹元件的物理模型, 如图 1 和图 2 所示。

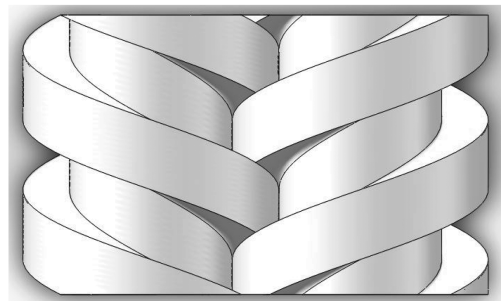
表 1 螺纹元件建模参数

Table 1 Screw element modeling parameters mm

螺杆中心距	螺纹元件导程	螺纹元件长度	螺杆外径
18	24	24	22



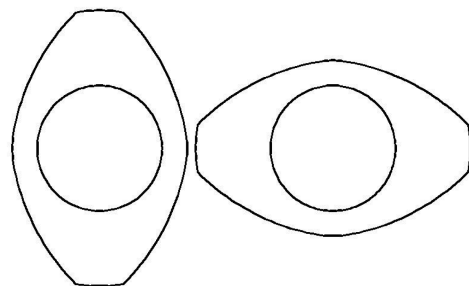
a) 主视图



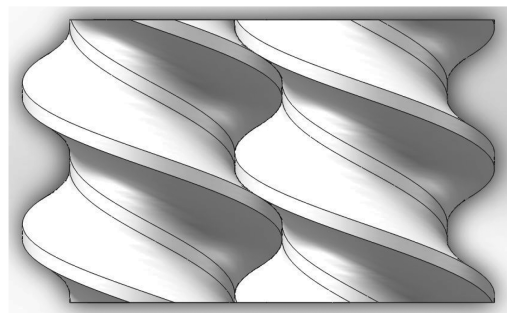
b) 俯视图

图 1 异向双螺杆螺纹元件模型

Fig. 1 Screw element of counter-rotating twin screw model



a) 主视图



b) 俯视图

图 2 同向双螺杆螺纹元件模型

Fig. 2 Screw element of co-rotating twin screw model

### 1.2 数学模型的建立

在双螺杆仿真时, 考虑到复杂的流体运动、物料的性质与流场几何形状, 可作如下假定<sup>[16]</sup>:

- 1) 熔体为不可压缩的流体;
- 2) 流场为稳定、等温流场;
- 3) 雷诺数较小, 流动为层流流动;
- 4) 惯性力、重力等体积力远小于黏滞力;
- 5) 熔体在流道中全充满;
- 6) 熔道壁面无滑移;
- 7) 流体为非牛顿流体, 其本构方程为 Bird-Carreau 模型。

在上述条件下, 通过连续性方程和动量方程对

PLA 流体的流动过程进行说明<sup>[17]</sup>。

连续性方程:

$$\nabla \cdot u = 0;$$

动量方程:

$$-\nabla \cdot P + \nabla \cdot T = 0。$$

式中:  $\nabla$  为哈密顿算子;  $u$  为流体流速度;  $P$  为流体静压力;  $T$  为流体偏应力。

PLA 流体为非牛顿流体, 本构方程采用 Bird-Carreau 模型:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda_c^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}, \quad (1)$$

式中:  $\eta_0$  为物料在零剪切应力下的黏度, Pa·s;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $n$  为非牛顿指数;  $\lambda_c$  为时间常数, s。

材料参数对 ANSYS 计算十分重要, 数学模型的计算精度除了与网格划分大小、模型近似程度以及计算方法有关外, 还与材料参数的设置有关。Bird-Carreau (BC) 模型, 它可以很好反映 PLA 流体的非牛顿流体特性<sup>[18]</sup>, 当温度为 190 °C 时, PLA 流体的 Bird-Carreau 本构方程参数如表 2 所示。

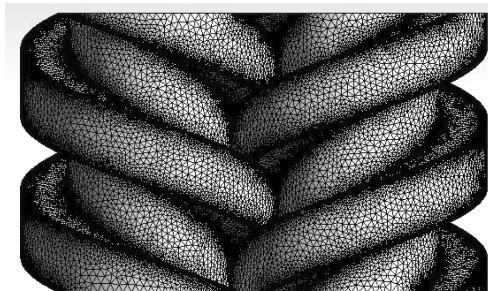
表 2 190 °C 时 PLA 的本构方程模型参数

Table 2 Parameters of constitutive equation model of PLA at 190 °C

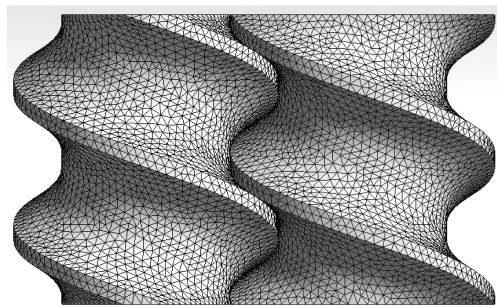
温度 / °C	$\eta_0$ / (Pa·s)	$\lambda_c$ / s	$n$
190	2 504.235	0.060 7	0.253

### 1.3 网格的划分

为研究双螺杆转动对 PLA 流体加工过程的影响, 当数学模型建立后, 应建立模拟任务并进行求解, 因此需要对不同时刻的双螺杆模型进行多次网格划分。通过 Polyflow 的网格重叠技术, 可以在不同的时间节点自动将流道与双螺杆螺纹元件自动组合, 并进行网格划分, 结果如图 3 所示。通过上述有限元方法求解上述连续性方程、动量方程和本构方程。基于等温假设, 不考虑能量方程<sup>[19]</sup>。



a) 啮合异向双螺杆螺纹元件



b) 啮合同向双螺杆螺纹元件

图 3 模型网格划分

Fig. 3 Model grid partition

### 1.4 边界条件的设定

网格划分后, 要设置挤出机内部流道边界条件。

螺杆外表面处 PLA 流体的运动速度  $v(r)$  设置为

$$v(r) = 2\pi r \cdot N, \quad (2)$$

式中:  $r$  为螺杆外表面到其中心的距离;

$N$  为螺杆转速。

由于机筒静止, 则在机筒内表面处 PLA 流体的速度  $v(b)$  设置为零, 即:

$$v(b) = 0。 \quad (3)$$

在笛卡尔坐标系下, 速度分量包括  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的分量:

$$\begin{cases} v_x = -2\pi y \cdot N, \\ v_y = 2\pi x \cdot N, \\ v_z = 0. \end{cases} \quad (4)$$

使用压力传感器检测双螺杆挤出机熔融段不同位置的压强, 因此采用进出口压强的差值为边界条件, 以接近实际情况<sup>[20]</sup>:

$$\Delta P = P_2 - P_1, \quad (5)$$

式中:  $P_1$  为入口端面压强;  $P_2$  为出口端面压强。

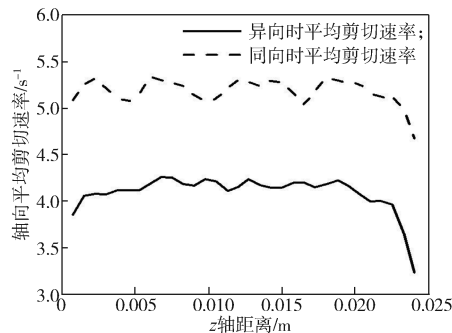
## 2 模拟结果分析

### 2.1 PLA 流体的剪切速率分析

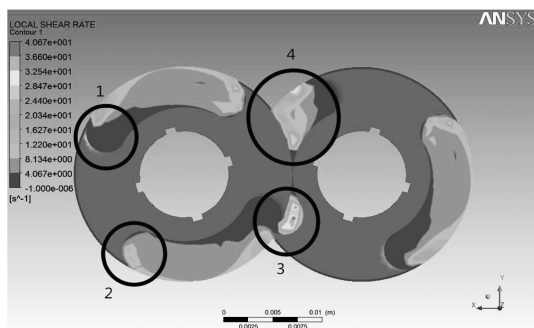
PLA 流体的剪切速率模拟结果如图 4 所示。由图 4a 中轴向平均剪切速率折线可知: 随着轴向距离的增加, 啮合同向与啮合异向 PLA 流体平均剪切速率曲线呈先上升后下降的抛物线型变化, 并随着螺槽呈规律性变化。啮合同向双螺杆平均剪切速率为啮合异向双螺杆平均剪切速率的 1.27 倍。由图 4b 中啮合异向双螺杆入口截面 PLA 流体剪切速率场可知: 由于左螺杆顺时针转动, 在位置 2 螺棱处流体受到的剪切速率大于位置 1。位置 3 为下啮合区, 该位置的高



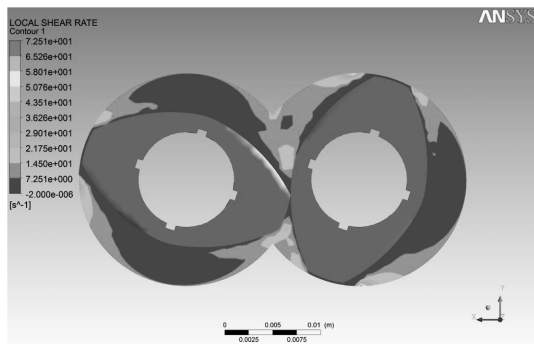
剪切速率主要是由于右螺杆逆时针旋转产生,并且由于 PLA 流体在封闭的 C 型室内流动,在位置 3 的左螺杆区域剪切速率较低。位置 4 为上啮合区,该位置的高剪切速率主要是由于两螺杆的转速不同的压延作用产生。由图 4c 中同向双螺杆入口截面 PLA 流体剪切速率场可知:入口处的最大剪切速率比异向入口截面的最大剪切速率更大,并且在螺棱两边对 PLA 流体产生了较好的剪切作用。



a) 轴向平均剪切速率折线图



b) 啮合异向双螺杆入口截面



c) 啮合同向双螺杆入口截面

图 4 PLA 流体剪切速率

Fig. 4 PLA fluid shear rate

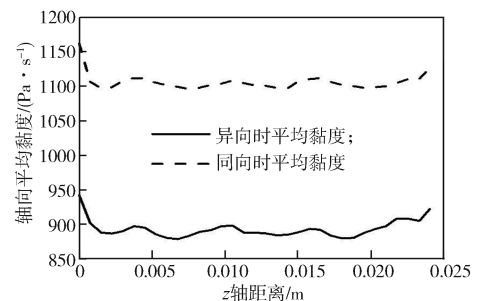


彩图

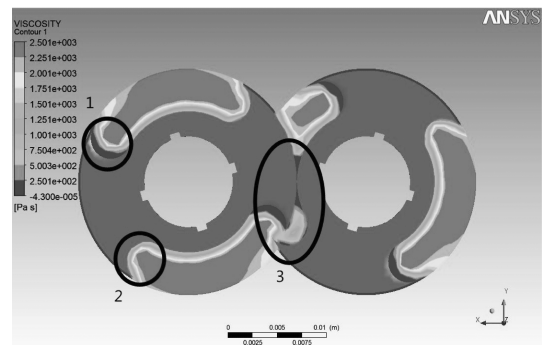
## 2.2 PLA 流体的黏度分析

PLA 流体的黏度模拟结果如图 5 所示。由图 5a 中轴向平均黏度折线可知:随着轴向距离的增加,不论是啮合异向还是啮合同向双螺杆模型,PLA 流体

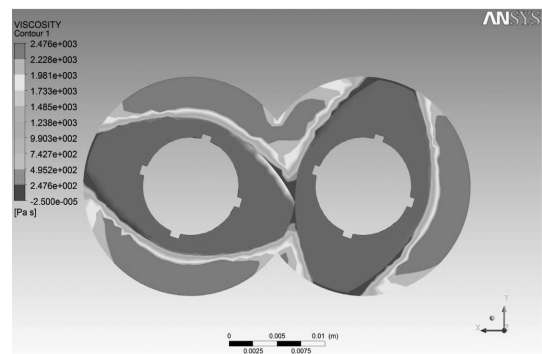
的平均黏度曲线整体呈先下降后上升的抛物线型变化,并随着螺槽呈规律性变化。啮合同向双螺杆模型 PLA 流体黏度为异向双螺杆模型的 1.24 倍。由图 5b 中啮合异向双螺杆入口截面 PLA 流体黏度场可知:由于左螺杆顺时针转动,位置 1 处的 PLA 流体经受了螺棱的剪切作用而黏度较低。位置 2 处的 PLA 流体即将受到螺棱的剪切作用,因此比位置 1 的黏度更高。位置 3 处的 PLA 流体受到的剪切作用最为强烈,该位置的低剪切区面积最大。由图 5c 啮合同向双螺杆入口截面 PLA 流体黏度场可知:啮合同向双螺杆与啮合异向双螺杆入口处的最大黏度差距小。



a) 轴向平均黏度折线图



b) 啮合异向双螺杆入口截面



c) 啮合同向双螺杆入口截面

图 5 PLA 流体黏度

Fig. 5 PLA fluid viscosity



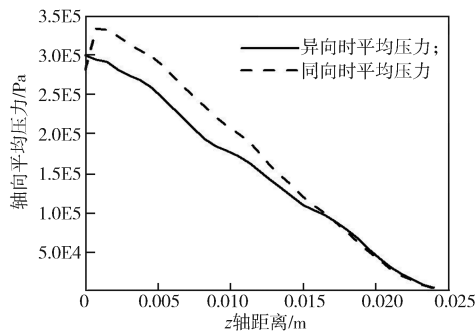
彩图

## 2.3 PLA 流体的压力分析

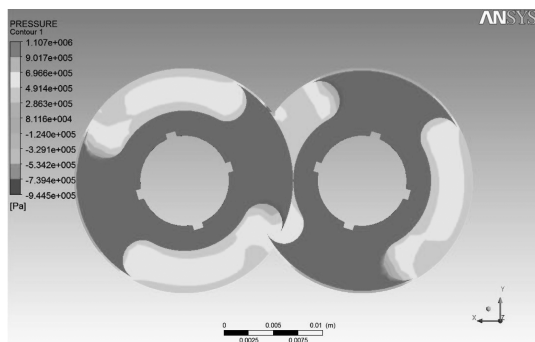
PLA 流体的压力模拟结果如图 6 所示。由图 6a



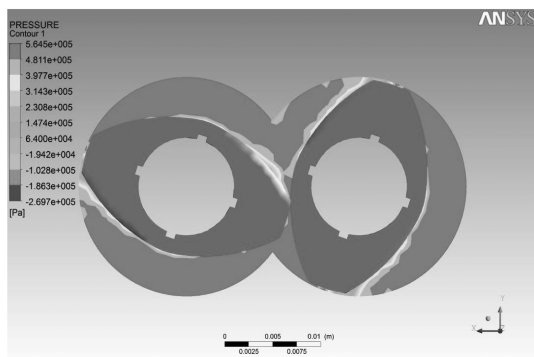
可知: 由于边界条件设定入口压力高于出口压力, 啮合异向与啮合同向双螺杆的平均压力, 随着轴向距离的增加呈不断下降的变化规律。由图 6b 可知: 截面压力分布相对均匀。由图 6c 可知: 啮合异向双螺杆入口截面的最大压力是啮合同向双螺杆入口截面的最大压力的 1.95 倍。



a) 轴向平均压力折线图



b) 啮合异向双螺杆入口截面



c) 啮合同向双螺杆入口截面

图 6 PLA 流体压力

Fig. 6 PLA fluid pressure

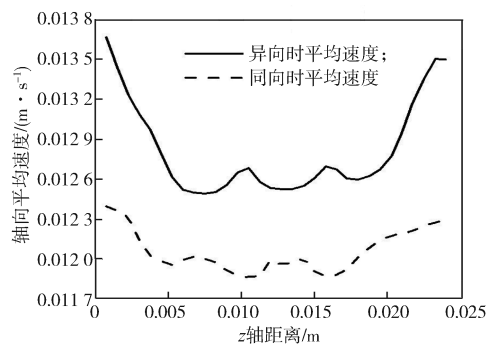


彩图

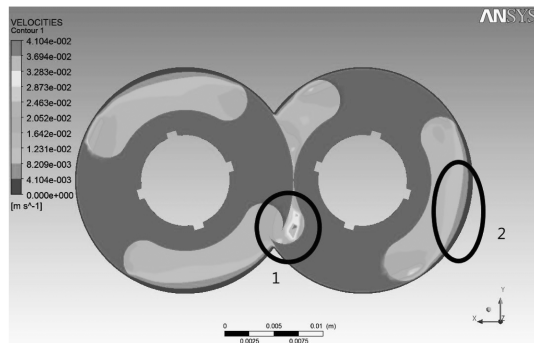
## 2.4 PLA 流体的速度分析

PLA 流体的速度模拟结果如图 7 所示。由图 7a 可知: 随着轴向距离的增加, 不论是啮合同向还是啮合异向双螺杆, PLA 的平均速度曲线呈先下降后上升的抛物线形变化规律, 并随着螺槽呈规律性变

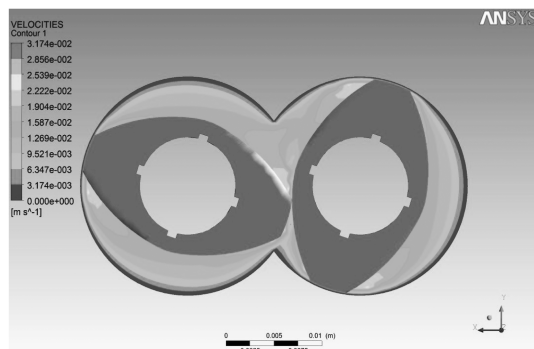
化。啮合异向双螺杆中 PLA 流速为啮合同向双螺杆中的 1.1 倍。由图 7b 可知: 由于左螺杆顺时针转动, 右螺杆逆时针转动, 位置 1 处为下啮合区, 区域面积减少使 PLA 具有高的流动速度。位置 2 的 PLA 粘附在机筒壁面, 因而使 PLA 流动速度较低; 与此位置相对的是螺棱位置, 该位置由于螺杆的驱动作用, 使 PLA 的运动速度较高。由图 7c 啮合同向双螺杆入口截面 PLA 流体速度场可知: 啮合同向双螺杆入口处的 PLA 运动速度的变化规律与啮合异向双螺杆相同, 但啮合异向双螺杆入口截面的最大速度高于啮合同向双螺杆入口截面的最大速度。



a) 轴向平均速度折线图



b) 异向双螺杆入口截面



c) 同向双螺杆入口截面

图 7 PLA 流体速度

Fig. 7 PLA fluid velocity



彩图

### 3 结论

综上所述,可得如下结论:

1) 在同样的螺杆直径与螺杆中心距的条件下,啮合同向双螺杆挤出机螺纹元件与啮合异向双螺杆挤出机螺纹元件的端面曲线差异较大,对 PLA 流体的加工效果也存在差异。

2) 啮合同向双螺杆挤出机螺纹元件与啮合异向双螺杆挤出机螺纹元件相比,具有较大的剪切速率,并且轴向运动速度慢,有利于 PLA 流体在加工过程中的混合。

3) 啮合异向双螺杆挤出机加工的 PLA 流体黏度较低,轴向运动速度较快,有利于提高产量。

#### 参考文献:

- [1] 王多勇. 双螺杆挤出机的关键技术[J]. 塑料工业, 2012, 40(4): 118-122.  
WANG Duoyong. Key Technology on the Twin-Screw Extruder[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(4): 118-122.
- [2] HOLDAWAY W S. Pump; U. S. Patent 1,218,602[P]. 1917-03-06.
- [3] 王 远, 马秀清. 新型捏合盘元件不同螺杆构型混合性能的数值模拟[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(12): 63-67.  
WANG Yuan, MA Xiuqing. Numerical Simulation of Mixing Performance for Different Screw Configuration of New Kneading Disc Element[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(12): 63-67.
- [4] 胡 鹏, 罗 兵. 同向双螺杆支撑元件的流场模拟[J]. 塑料, 2017, 46(5): 13-17.  
HU Peng, LUO Bing. Flow Field Simulation on Bearing Elements of Co-Rotating Twin-Screw Extruder[J]. Plastics, 2017, 46(5): 13-17.
- [5] 王 鹄. 同向双螺杆构型对聚丙烯发泡影响的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.  
WANG Hu. Study on the Effect of Co-Rotating Twin Screw Configuration on Polypropylene Foaming[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [6] 王 蓉, 耿孝正. 同向旋转双螺杆挤出机捏合盘元件的熔体输送特性及混合机理的研究[J]. 中国塑料, 1990, 4(1): 65-75.  
WANG Rong, GENG Xiaozheng. The Investigation on Melt Pumping and Mixing Mechanism of Kneading Discs in Co-Rotating Intermeshing Twin Screw Extruder[J]. China Plastics, 1990, 4(1): 65-75.
- [7] ANGADI G, MURTHY H N N, RAMAKRISHNA S, et al. Effect of Screw Configuration on the Dispersion of Nanofillers in Thermoset Polymers[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(8): 815-825.
- [8] 张其东. 异向旋转平行双螺杆设计要点及挤出工艺[J]. 塑料科技, 2014, 42(2): 73-78.  
ZHANG Qidong. Design Main Points and Extrusion Process of Counter Rotating Parallel Twin Screw[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(2): 73-78.
- [9] 时俊峰, 黄志刚, 蒋卫鑫, 等. 聚乳酸在啮合同向双螺杆挤出机机头过渡体的流场研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 72-75.  
SHI Junfeng, HUANG Zhigang, JIANG Weixin, et al. Study on Flow Field of Polylactic Acid in the Nose Transition Body of Co-Rotating Twin-Screw Extruder[J]. Food and Machinery, 2017, 33(1): 72-75.
- [10] 吴冰清. 啮合异向双螺杆参数化造型与流固耦合分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.  
WU Bingqing. Parametric Modeling and Fluid-Solid Coupling Analysis of Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruders[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [11] 李彦辉. 啮合异向双螺杆混合功能区的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.  
LI Yanhui. Study on the Mixing Section of Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [12] 郎珊珊. 双螺杆构型及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州理工大学, 2014.  
LANG Shanshan. Modelling and Experimental Study on Twin-Screw Configuration and Extrusion Parameter[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [13] 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 Long, DONG Liqun, ZHANG Yajun, et al. Parametrical Design of Counter-Rotating Twin-Screws Based on SolidWorks API[J]. China Plastics, 2018, 32(1): 120-124.
- [14] 于游洋, 刘 慧. 啮合异向双螺杆非常规螺杆元件端面曲线设计研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(12): 79-82.  
YU Youyang, LIU Hui. Design of Unconventional Screw Elements of Intermeshing Twin-Screw Extruders[J]. China Plastics, 2003, 17(12): 79-82.
- [15] 魏 静, 梁新龙, 陈大兵, 等. 异向啮合型双螺杆捏合机转子型线演化及其混合性能[J]. 机械工程学报,

- 2014, 50(15): 34-44.
- WEI Jing, LIANG Xinlong, CHEN Dabing, et al. Rotor Profiles Evolutionary Design and Evaluation of the Mixing Performance for Intermeshing Counter-Rotating Twin-Screw Kneader[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 34-44.
- [16] 黄志刚, 刘凯, 李梦林, 等. 单螺杆挤出机计量段模拟研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 63-67.
- HUANG Zhigang, LIU Kai, LI Menglin, et al. Simulation of Measurement Section of Single Screw Extruder for PLA[J]. Food & Machinery, 2016, 32(1): 63-67.
- [17] 施丰, 马秀清, 耿孝正. 啮合异向双螺杆挤出过程熔体输送段常规螺纹元件3D流场分析[J]. 中国塑料, 2002, 16(5): 80-85.
- SHI Feng, MA Xiuqing, GENG Xiaozheng. 3D Flow Field Analysis of Common Flight Elements in Counter-Rotating Twin Screw Extrusion[J]. China Plastics, 2002, 16(5): 80-85.
- [18] 张宏建, 黄志刚, 李梦林, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆流场仿真分析[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9): 70-74.
- ZHANG Hongjian, HUANG Zhigang, LI Menglin, et al. Intermeshing Co-Rotating Twin-Screw Extruder with Different Screw of Flow Field Simulation Analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9): 70-74.
- [19] 武学伟, 马秀清, 李彦辉, 等. 波状双螺杆元件混合性能的研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(7): 98-101.
- WU Xuewei, MA Xiuqing, LI Yanhui, et al. Study on Mixing Performance of Wave Twin-Screw Elements[J]. China Plastics, 2010, 24(7): 98-101.
- [20] 刘湘河, 彭涛, 马永寿. 异向双螺杆S型元件混炼效果的数值研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(4): 51-55.
- LIU Xianghe, PENG Tao, MA Yongshou. Numerical Study on the Mixing Performance of Different S Screw Elements of Counter-Rotating Twin Screw Extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(4): 51-55.
- (责任编辑: 邓光辉)

## Simulation Study of Meshing Counter-Rotating Twin-Screw Extruder

HUANG Zhigang<sup>1,2</sup>, JIANG Weixin<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1,2</sup>, WANG Shaofeng<sup>1,2</sup>

( 1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;  
2. Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology,  
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China )

**Abstract:** Solidworks 3D modeling software was used to establish the physical model of co-rotating twin-screw and counter-rotating twin-screw. By using Polyflow, polylactic acid fluid was analyzed in 3D fluid simulation. The processing effects of screw elements of counter-rotating and co-rotating twin-screw extruder on polylactic acid fluid were studied by comparing shear rate field, viscosity field, pressure field and velocity field of polylactic acid fluid. The results showed that with high average shear rate and slow axial motion of polylactic acid fluids in screw elements of co-rotating twin screw extruder, a better mixing effect was achieved, while the faster axial velocity of polylactic acid fluid in screw element of counter-rotating twin-screw extruder led to a better extrusion effect.

**Keywords:** co-rotating twin-screw; counter-rotating twin-screw; shear rate field; viscosity field; pressure field; velocity field