

不同螺杆接触状态下异向双螺杆挤出机的 流道分布规律

Study on flow channel distribution of different twin screw extruder
under different screw contact state

商嘉玮^{1,2}

张丽梅^{1,2}

黄志刚^{1,2}

SHANG Jia-wei^{1,2} ZHANG Li-mei^{1,2} HUANG Zhi-gang^{1,2}

张一惟^{1,2} 李 贺^{1,2}

ZHANG Yi-wei^{1,2} LI He^{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, Beijing 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:探索聚乳酸在异向双螺杆挤出机不同螺杆接触状态下的流道分布规律。方法:用 Solidworks 软件建立啮合螺杆、部分啮合螺杆和非啮合螺杆 3 种几何模型;运用 POLYFLOW 流体仿真软件进行数值模拟;对 3 种螺杆不同接触状态下聚乳酸流体的压力场、剪切速率场与黏度场进行对比研究。结果:部分啮合状态下的异向双螺杆挤出机对聚乳酸有较好的建压能力与分散混合能力。结论:聚乳酸在部分啮合状态下的挤出效果优于其他 2 种螺杆接触状态。

关键词:啮合异向双螺杆挤出机;聚乳酸;数值模拟;等温

Abstract: Objective: In order to explore the distribution law of the flow channel of polylactic acid in different screw contact states of the counter-rotating twin-screw extruder. **Methods:** Partially meshing screw and non-meshing screw were established by Solidworks software. Numerical simulation was carried out using POLYFLOW fluid simulation software. The pressure field, shear rate field and viscosity field of polylactic acid fluid under different contact states of three screws were compared. **Results:** The counter-rotating twin-screw extruder in the partially meshed state has better pressure-building ability and dispersing and mixing a-

bility for polylactic acid. **Conclusion:** The extrusion effect of polylactic acid in the partially meshed state is better than the other two screw contact states.

Keywords: meshing counter rotating twin screw extruder; polylactic acid; numerical simulation; isotherma

聚乳酸作为一种高聚物,主要以淀粉为原料合成,具有良好的生物可降解性和生物相容性等特点^[1],被广泛应用于食品领域,如食品保鲜膜、快餐饭盒等。双螺杆挤出机是聚合物加工成型的主要设备之一,对聚合物的加工有着不可替代的作用。双螺杆挤出机具有螺杆种类多、组合相对比较灵活多变等独特的配混加工优势^[2]。胥伟伟等^[3]研究了在啮合同向双螺杆挤出机中的 6 种不同螺杆构型对聚丙烯/聚酰胺 6 共混物相态结构和性能的影响,选出了对共混物流动性能最优的螺杆元件组合。周晔等^[4]通过对聚乳酸添加不同配比的聚己二酸与对苯二甲酸丁二酯用微型双螺杆挤出机进行熔融共混,并利用 X 射线衍射,选出了一种使聚乳酸综合性能最好的配比。

迄今对聚乳酸的研究大多是利用同向双螺杆挤出机探究其共混性能^[5],而异向双螺杆挤出机由于螺杆特殊的构型,产生了 C 型室,聚乳酸物料被封锁在相互分开的 C 型室中,其不随螺钉旋转,而是沿着螺钉的轴线在正方向上移动,因此异向双螺杆挤出效率比同向双螺杆高。以往探究异向双螺杆加工聚乳酸挤出效果主要通过改变螺杆转速,加工温度等工艺参数来实现。研究拟在等温条件下,以不同螺杆接触状态为机械参数,数值求解模拟过程中压力场、黏度场、剪切速率场,分析 3 种螺杆接触

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32172277);北京市教委科研计划项目(编号:KM201910011002);北京市自然科学基金—市教委联合资助项目(编号:KZ201810011017)

作者简介:商嘉玮,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:2021-12-30

状态对聚乳酸挤出特性的影响,以期选出对聚乳酸挤出效果最好的螺杆接触状态。

1 数值模拟过程

1.1 几何模型的建立

首先根据双螺杆几何学的基本原理,通过表 1 数据在 Solidworks 软件中绘制如图 1 所示的螺杆元件端面线形图,将左螺杆的中心点设定为坐标原点, X 轴方向向右, Y 轴方向向上,而 Z 轴的方向可以根据右手定则来确定,同时要确保 Z 轴方向与挤出方向相同。然后通过端面线形图建立如图 2 的三维模型。其中左螺杆为右旋螺杆,右螺杆为左旋螺杆。模拟双螺杆运动过程,确保螺杆之间转动不存在物理干涉。构建好螺杆元件后,根据两螺杆的中心距建立三组流道。

将建立好的螺杆和三组流道导入 Gambit 软件中进行划分网格,螺纹元件使用非规则型四面体网格进行划分^[6],网格数为 16 192;流道使用六面体规则性网格进行划分,网格数为 237 600。

1.2 数学模型的建立

1.2.1 基本假设^[7]

- (1) 熔融体是不可压缩的且充满整个流道。
- (2) 熔融体在流场中的各个位置温度都是相同的。

表 1 螺纹元件的建模参数

Table 1 Modeling parameters of threaded components
mm

螺杆接触类型	螺杆元件 件外径	螺杆元件 中心距	流道的 长度	螺杆原件与机 筒间的距离
啮合双螺杆	22	18.5	24	0.5
部分啮合双螺杆	22	20.0	24	0.5
非啮合双螺杆	22	22.0	24	0.5

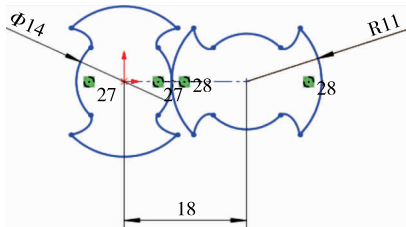


图 1 螺杆元件端面线形

Figure 1 End face alignment of screw element

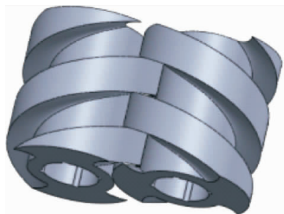


图 2 螺杆元件三维模型

Figure 2 3D model of screw element

(3) 机筒壁面是无滑移的。

(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 控制方程 以等温假设为前提,并且不考虑能量方程的情况下,由上述基本假设条件,给出下列流体控制方程:

连续性方程^[8-9]:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

动量方程:

$$-\mathbf{P} + \nabla \cdot \mathbf{T} = 0, \quad (2)$$

式中:

∇ ——哈密尔顿算子;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, m/s;

$\mathbf{P}$ ——流体静压力, Pa;

$\mathbf{T}$ ——应力张量, Pa。

其中 Bird-Carreau 模型^[10]就是该流体的实际本构公式:

$$\dot{\gamma}(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}, \quad (3)$$

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。

在使用仿真软件 POLYFLOW 进行模拟分析时,挤出的聚乳酸流体属于非牛顿流体,所以在 POLYFLOW 软件选择与剪切速率有关的黏度本构方程 Bird-Carreau-law,由 Bird-Carreau-law 本构方程来描述聚乳酸的流变特性,所选择的聚乳酸参数^[11]:等温过程温度设定为 190 ℃、零剪切黏度设定为 2 504.235 Pa·s、该物料的相关松弛时间设定为 0.060 7 s、流体的非牛顿指数设定为 0.253,无穷剪切黏度设定为 0 Pa·s。

1.3 边界条件的设定

流道区域的流体是自由流动的,故设定入口边界与出口边界的法向力和切向力均为 0 Pa;机筒内部的内壁上没有物料发生滑动或者移动,将法向速度和切向速度均设定为 0 m/s;左右孔的边界法向速度设为 0 m/s 和切向力设定为 0 Pa。螺杆转速设定为 60 r/min^[12]。

2 仿真分析

2.1 压力场

如图 3 所示,3 种螺杆接触形式下的螺杆压力分布普遍不均匀,螺棱间隙处出现了高压带,且啮合区出现了局部高压。

从图 3 可以看出,在相同的条件下,熔融段流道压力值的高低是按照螺棱分布交替出现的,压力集中在螺棱

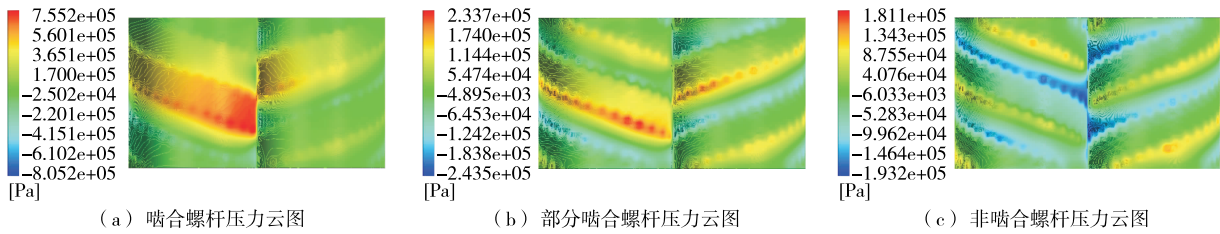


图3 不同螺杆接触状态下的压力云图

Figure 3 Pressure nephogram under different screw contact states

处,随着两侧尺寸的变化,压力分布向两侧衰减成条状,与螺槽内分布的低压力形成鲜明的对比。异向螺杆结构复杂所以会出现压力值突变的现象^[13]。为了更直观地分析3种流道的压力分布情况及其平均压力,在螺杆挤出方向建立压力参考轴线^[14],绘制出图4所示的轴向压力折线图。由图4可知,啮合螺杆曲线轴向压力差比部分啮合螺杆与非啮合螺杆大,对物料的压延有利,非啮合异向双螺杆挤出机建压能力较差,聚乳酸在螺槽内停留时间长。

2.2 剪切速率场

图5为螺杆转速60 r/min时聚乳酸熔体在双螺杆挤出机中剪切速率的分布。由图5可知,在聚乳酸熔体流场中,剪切速率的分布很不均匀,且剪切速率的梯度较大,最高的剪切速率出现在螺杆啮合区与机筒内壁的狭小缝隙处。由于剪切速率梯度的存在,聚乳酸熔体可以充分地混合。

图6给出了3种螺杆接触形式螺杆运动时,起点和终点分别在流道出口和入口,与螺杆轴线平行,在距离入

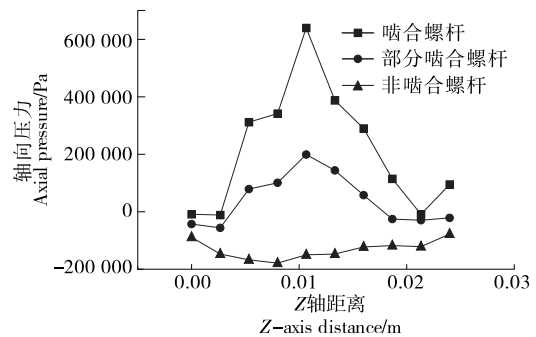


图4 轴向压力折线图

Figure 4 Axial pressure broken line diagram

口位置(XY平面上)0~24 mm的Z轴取均匀的横截面的平均剪切速率流场特征量的变化情况。由图6可以看出,两螺杆啮合区间隙处聚乳酸的流动速度快,间隙尺寸小,产生了较高的速度梯度,因此剪切速率高,当两螺杆中心距增大时,剪切速率会变小。

异向双螺杆挤出机的剪切速率与螺杆接触形式有

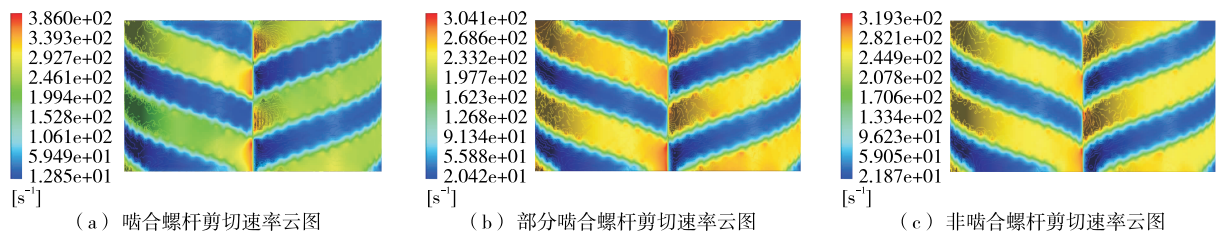


图5 不同螺杆接触状态下的剪切速率云图

Figure 5 Nephogram of shear rate under different screw contact conditions

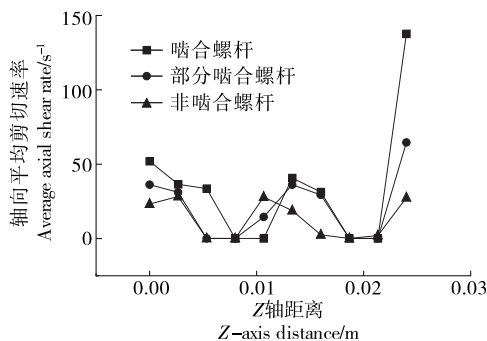


图6 轴向剪切速率折线图

Figure 6 Broken line diagram of axial shear rate

关。在相同转动速度情况下,啮合异向双螺杆挤出机的剪切速率要高于非啮合同向双螺杆挤出机的,部分啮合异向双螺杆挤出机的剪切速率介于二者之间。

2.3 黏度场

由图7可知,在双螺杆挤出机中异向双螺杆的转动下,聚乳酸熔体产生了周向运动^[15],在流动速度较大处剪切作用较好,聚合物熔体的黏度较小;在流动速度较小处剪切作用较差,聚合物熔体的黏度较大。

异向双螺杆挤出机的黏度与螺杆接触形式有关。在相同转动速度的情况下,非啮合异向双螺杆挤出机的黏度要比啮合异向双螺杆挤出机的稍大,部分啮合双螺杆挤出机的黏度介于二者之间。

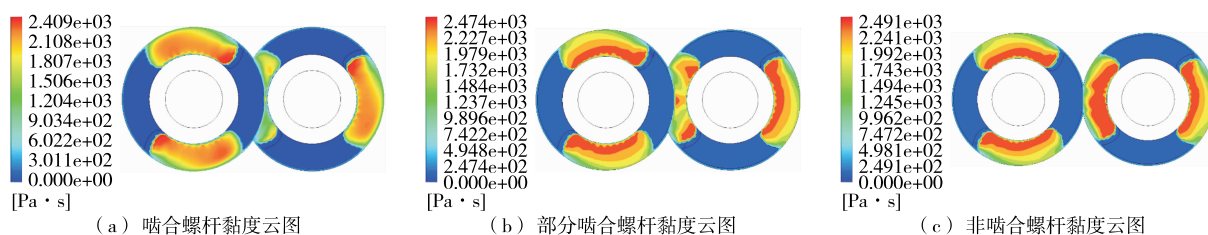


图 7 不同螺杆接触状态下的黏度云图

Figure 7 Viscosity nephogram under different screw contact states

3 结论

(1) 非啮合异向双螺杆相较于其他两种接触形式的螺杆,对聚乳酸有较好的分布混合能力,但是其分散混合能力有限。啮合异向双螺杆挤出机建压能力最强。

(2) 部分啮合异向双螺杆挤出机相较于其他两种接触形式的螺杆,对聚乳酸既具有一定的混合能力,物料输送能力也未损失过多,保持了良好的输送能力与压力建立能力。

(3) 研究进行数值模拟时,假定的为恒温流场,但实际生产中温度会出现波动,因此后续将对变温流场进行研究。

参考文献

- [1] 黄晶晶, 赵英虎, 高莉, 等. 天然物质改性聚乳酸研究进展[J]. 功能材料, 2021, 52(3): 3 075-3 080.
HUANG Jing-jing, ZHAO Ying-hu, GAO Li, et al. Research progress of polylactic acid modified by natural substances [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(3): 3 075-3 080.
- [2] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 167-168.
GENG Xiao-zheng. Twin-screw extruder and its application [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003: 167-168.
- [3] 胥伟伟, 马秀清, 王小武, 等. 螺杆构型对 PP/PA6 共混物性能和相态结构的影响[J]. 中国塑料, 2009, 23(8): 95-100.
XU Wei-wei, MA Xiu-qing, WANG Xiao-wu, et al. Effect of screw configuration on mechanical properties and phase morphology of PP/PA6 blends[J]. China Plastics, 2009, 23(8): 95-100.
- [4] 周晔, 罗付洪, 任杰. 熔融共混立构复合聚乳酸的制备及其性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(2): 164-169.
ZHOU Ye, LUO Fu-hong, REN Jie. Preparation and properties of melt blend stereo composite polylactic acid[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(2): 164-169.
- [5] HONG M H, WHITE J L. Simulation of flow in an intermeshing modular counter-rotating twin screw extruder: Non-Newtonian and non-isothermal behavior [J]. International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 1999, 14(2): 136-143.
- [6] 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 Hong-jian, HUANG Zhi-gang, LI Meng-lin, et al. Inter-meshing co-rotating twin-screw extruder with different screw of flow field simulation analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9): 70-74.
- [7] 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 Shao-feng, ZHANG Yuan, LIU Mei-lian, et al. Flow pattern distribution of meshing counter rotating twin screw extruders at different temperatures[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.
- [8] 马秀清, 林群章, 李晓卫. 捏合块元件混合含能材料的安全性分析[J]. 塑料, 2019, 48(1): 88-91.
MA Xiu-qing, LIN Qun-zhang, LI Xiao-wei. Safety analysis of kneading block elements mixed energetic materials [J]. Plastics, 2019, 48(1): 88-91.
- [9] 张磊, 薛凯, 李海明. 同向双螺杆挤出机下落机头的流道设计[J]. 橡塑技术与装备, 2021, 47(12): 51-53.
ZHANG Lei, XUE Kai, LI Hai-ming. Runner design of drop head of co-rotating twin screw extruder[J]. China Rubber/ and Plastics Technology and Equipment, 2021, 47(12): 51-53.
- [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 Wei-xin, HUANG Zhi-gang, ZHAO Yu-lian, et al. Extrusion analysis of Tianzi-shaped tray of food based on Polyflow[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 Zhi-gang, JIANG Wei-xin, LI Xin, et al. Simulation study of meshing counter-rotating twin-screw extruder [J]. Packaging Journal, 2019, 11(3): 9-15.
- [12] 安琪, 黄志刚, 胡淑珍, 等. 适应性网格技术在异向双螺杆挤出机中的仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 91-97.
AN Qi, HUANG Zhi-gang, HU Shu-zhen, et al. Simulation in counter-rotating twin screw extruder by adaptive grid technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 91-97.
- [13] 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.
- [14] 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): 82-87.
SHI Feng, MA Xiu-qing, GENG Xiao-zheng. 3D flow field analysis of common flight elements in counter-rotating twin screw extrusion[J]. China Plastics, 2002, 16(5): 82-87.
- [15] 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 Li-qun, ZHANG Ya-jun, et al. Parametrical design of counter-rotating twin-screws based on SolidWorks API[J]. China Plastics, 2018, 32(1): 120-124.