

双螺杆挤出机转子螺棱角度对聚乳酸挤出过程的影响

孙晨昊^{1,2} 王熙霖¹ 吴运涛^{1,2} 黄志刚^{1,2}

(1. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 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)

摘要: [目的] 探究异向双螺杆挤出机螺杆转子端面的螺棱角度, 对聚乳酸(PLA)挤出效果的影响。[方法] 试验组螺棱角度分别为 70° 和 80°, 对照组为标准螺杆(螺棱角度 90°), 通过 Gambit 软件对元件进行分网处理后, 使用 Polyflow 流体仿真软件计算, 对比 3 组螺杆流道的压力场、剪切速率的差异, 通过后处理统计模块 Polystat 得出示踪粒子停留时间与分布状态, 绘制曲线, 得到 3 组螺杆挤出能力与分布混合特性。[结果] 在相同转速的情况下, 螺棱角度变小使得局部高压效果减弱, 3 组螺杆中, 70° 螺棱角度的剪切效果最好, 标准螺杆次之, 较小的螺棱角度的挤出机输送能力较强, 螺杆面积利用系数较高, 具有较好的分布混合能力。[结论] 挤出机螺杆转子端面螺棱角度对聚乳酸挤出过程的流场特性、输送能力与混合效果具有显著的调控作用; 适当减小螺棱角度可在降低流动局部高压的同时, 同步提升螺杆的物料输送效率与分布混合性能, 其中 70° 螺棱角度结构的螺杆综合挤出性能最优。

关键词: 异向双螺杆挤出机; 螺棱角度; 聚乳酸; 仿真; 流场分析

Effects of the rotor screw edge angle of twin-screw extruder on the extrusion process of polylactic acid

SUN Chenhao^{1,2} WANG Xilin¹ WU Yuntao^{1,2} HUANG Zhigang^{1,2}

(1. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Municipal Key Laboratory of Plastic Health and Safety Quality Evaluation Technology, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of the flight edge angle at the end face of the screw rotor in a counter-rotating twin-screw extruder on the extrusion performance of polylactic acid (PLA). [Methods] Experimental screws with flight edge angles of 70° and 80° were compared with a standard screw (90° flight edge angle) as the control. Mesh generation of the screw elements was conducted using Gambit software, followed by numerical simulations in Polyflow to compare the differences in pressure fields and shear rates within the flow channels of the three screws. The residence time and distribution of tracer particles were obtained via the Polystat post-processing statistical module, and corresponding curves were plotted to evaluate the extrusion capacity and distributive mixing characteristics of the three screw designs. [Results] At the same screw rotation speed, reducing the flight edge angle weakened the local high-pressure effect in the flow channel. Among the three screws, the 70° flight edge angle presented the optimal shearing performance, followed by the standard screw. Screws with smaller flight edge angles exhibited stronger material conveying capacity, higher screw area utilization, and superior distributive mixing performance. [Conclusion] The flight edge angle at the end face of the extruder screw rotor significantly regulates the flow field characteristics, conveying capacity, and mixing performance during PLA extrusion. Appropriately reducing the flight edge angle can simultaneously lower local high pressure in the flow channel and enhance material conveying efficiency and distributive mixing. Among

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 32172277)

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: 2026-01-03 **改回日期:** 2026-03-12

引用格式: 孙晨昊, 王熙霖, 吴运涛, 等. 双螺杆挤出机转子螺棱角度对聚乳酸挤出过程的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 57-62.

Citation: SUN Chenhao, WANG Xilin, WU Yuntao, et al. Effects of the rotor screw edge angle of twin-screw extruder on the extrusion process of polylactic acid[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 57-62.

the tested designs, the screw with a 70° flight edge angle demonstrates the best comprehensive extrusion performance.

Keywords: anisotropic twin-screw extruder; flight edge angle; polylactic acid; simulation; flow field analysis

聚乳酸是一类来源于生物物质的高分子聚合物,凭借其良好的生物相容性与可降解特性,在包装材料与纺织等众多领域中得到了广泛应用。而挤出机在聚乳酸的加工过程中起到至关重要的作用。

近年来,国内外有大量研究人员对挤出机进行了研究。贾明印等^[1]对比分析了近年来国内外螺杆挤出机常用的放大系数和应用范围,对相似放大理论进行了探索和优化,为挤出机的发展和进步提供了一定的理论指导。郭传燕^[2]以聚乳酸为基体,搭配环氧大豆油增塑剂与丙交酯接枝沸石填料制备改性 PLA 薄膜,测试分析薄膜的力学、热降解、水降解性能与食品安全性,结果表明改性过后的聚乳酸薄膜具有更好的热稳定性和力学性能,可安全用于大多数食品包装。李振等^[3]通过量化同向全啮合双螺杆挤出机齿形元件、螺旋元件、啮合元件三类核心螺杆元件对剪切速率、混合指数及物料停留时间的影响程度,实现了物料更换场景下挤出机挤出特性的合理化调整。王颢霖等^[4]利用软件模拟对比了普通锥型与两种双锥型螺杆挤出机的固体输送段,发现双锥形螺杆挤出机具有较高的体积填充和建压能力,以及较小的轴向速度变化,适合加工剪敏性材料。Matsushita 等^[5]研究表明,颗粒间的黏附力随着填充水平的增加而增加,而且高填充水平会使得产物有较高的硬度。

目前,关于异向双螺杆挤出机的研究主要集中在工艺参数以及螺杆结构等,对于螺棱角度的调整未见相关研究,螺棱角度是螺杆的重要参数,对挤出机的压缩与建压能力、剪切能力和输送功能等挤出特性起到决定性作用。研究旨在探究螺杆转子端面螺棱角度的大小,对聚乳酸在异向双螺杆挤出机中挤出特性的影响。通过仿真对比,找出适合聚乳酸挤出的螺棱角度,提高聚乳酸产品性能。

1 理论模型的建立

1.1 几何模型

异向双螺杆端面曲线的生成分为包络法和相对运动法两种^[6],包络法通常设计头数不同或端面线性复杂的螺杆,而试验研究的螺杆由标准螺杆演化而来,故采用相对运动法,将左右螺杆看作一对相互啮合的齿轮,使用 Solidworks 绘图软件绘制标准异向双螺杆挤出机螺杆端面曲线。对于异向双螺杆挤出机,螺杆存在两种旋转方式,即向内旋转与向外旋转,为保障物料在异向啮合双螺杆挤出机内的稳定正向输送,行业通用的方案为向外旋转,即以挤出机进料口为基准平面、机头端为物料挤出方向,左侧螺杆配置右旋螺纹元件并沿逆时针方向旋转,右侧螺杆配置左旋螺纹元件并沿顺时针方向旋转,该方案

可有效避免物料在流道上部发生滞流堆积,进而防止螺杆与机筒间出现异常摩擦与磨损^[7]。根据表 1 绘制螺杆的几何模型如图 1 所示。

表 1 不同螺棱角度螺杆数据

Table 1 Data of screws with different flight edge angles				
螺棱角度 (α)/(°)	长度(L)/ mm	内径(D_b)/ mm	外径(D_s)/ mm	中心距(C_L)/ mm
90	60	14	22	18.5
80	60	14	22	18.5
70	60	14	22	18.5

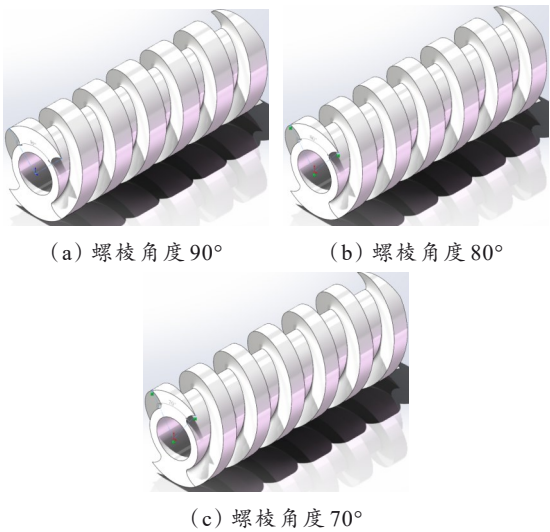


图 1 不同螺棱角度螺杆几何模型

Figure 1 Geometric models of screws with different flight edge angles

根据表 2 绘制挤出机流道模型如图 2 所示。

表 2 流道部件建模参数

Table 2 Flow channel assembly modeling parameters			
mm			
内径	外径	长度	中心距
14	22.5	60	20

1.2 有限元模型

1.2.1 网格划分 在 Polyflow 前处理阶段,通过 Gambit 软件对螺杆和流道元件计算域进行网格化处理。由于螺杆几何元件形态复杂,为保证网格划分的准确性同时兼顾计算资源的限制,采用非结构化的四面体网格进行划分;而流道元件形态规则,故采用计算效率相对较高的结构化六面体网格进行划分^[8],结果如图 3 所示。

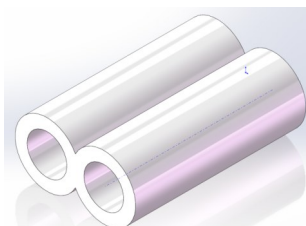
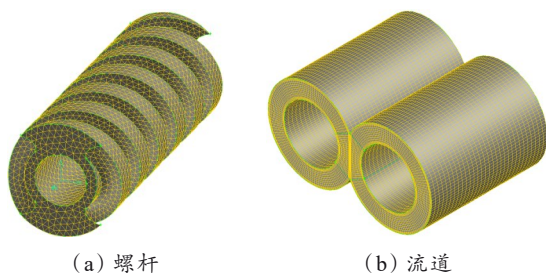


图2 挤出机流道部件三维模型

Figure 2 3D model of extruder flow channel component



(a) 螺杆 (b) 流道

图3 挤出机元件网格划分结果图

Figure 3 Diagram of extruder component mesh division

1.2.2 挤出机流道边界条件设定

(1) 流道的入口及出口处,物料流动自由,其应力边界为:法向力和切向力均为0,即 $f_n=f_s=0$ 。

(2) 流道外壁面施加无滑移约束,满足 $v_n=v_s=0$ 。

(3) 挤出机流道的左右内孔采用滑移边界条件,流体无法贯穿($v_n=0$)且表面切向力为零,即 $f_s=0$ 。

(4) 幂律指数 $n<0.75$,熔体的本构关系呈现高度非线性,表现出较强的非牛顿特性。为确保计算过程的稳定性和收敛性,选用Picard迭代算法进行求解。

1.3 建立数学模型

1.3.1 基本假定 在进行仿真分析前,为了简化计算模型并提高仿真效率,基于实际物理过程,做出以下假设:

(1) 聚乳酸充满整个流道,不可被压缩且运动状态为层流。

(2) 流道内各处位置温度恒定。

(3) 忽略重力、惯性力的影响^[9]。

1.3.2 基本方程 聚乳酸在挤出过程中需要满足流体力学方程,基于1.3.1中对挤出机恒温挤出过程的设定,系统的能量变化可忽略,因此无需求解能量守恒方程,只需要关注质量守恒与动量守恒方程即可^[10],质量守恒方程可以看作为,在笛卡尔坐标系中的一小立方体单元中流入与流出材料质量相等,由于聚乳酸为剪切变稀的非牛顿流体,故选用Bird-Careau本构方程^[11]计算熔体的剪切速率与黏度关系,方程如式(1)所示。

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

式中:

n ——流动指数;

λ ——松弛时间,s;

η_0 ——零剪切黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} 。

2 仿真结果分析

2.1 压力场

由于左右螺杆向外异向旋转,加入挤出机的聚乳酸随着螺杆旋转被带入下啮合区并在此处堆积,随后在穿过两螺杆间的压延间隙时被剧烈挤压。此过程使物料向上啮合区输送,并在下啮合区流道内产生局部高压,可以看出下啮合区压力明显高于上啮合区,由于螺棱角度变小,导致压延间隙增大,物料堆积挤压效果变弱,局部高压现象不明显,如图4所示。

2.2 剪切速率场

沿流道中心线(Z轴正方向,即挤出方向)设置一条剪切速率参考轴线,并以1 cm为间隔选取参考点^[12],绘制了挤出方向距离与剪切速率的关系曲线,如图5所示。结果表明,剪切速率的高值区域集中分布于螺棱所在区间,而螺槽区域内的剪切速率则呈现出更为平缓的变化特征。螺棱角度为70°的螺杆由于极强的输送能力,导致物料在螺槽内填充不充分,当C形室啮合时,剪切速率瞬间飙升至峰值,离开啮合时,空间迅速扩大,剪切速率又骤降至谷值,90°的螺杆剪切速率的波动来源于周期性的回流现象,每当啮合区形成高压腔时,就会产生回流现象^[13],导致剪切速率出现高峰,但由于啮合区始终充满物料,其波动的程度要小于70°的螺杆,而80°的螺杆剪切速率较为平稳,波动最小。

2.3 粒子停留时间分布

停留时间指聚乳酸从进入挤出机到从模头排出的全过程所经历的时间,分为累计停留时间与停留时间两种。通过示踪粒子轨迹跟踪方法,对挤出机内物料的停留时间特性与混合性能进行分析,将2 000个示踪粒子置于流道入口,利用Polyflow的Polystat模块统计其运动轨迹^[14],由此获取的累积停留时间分布曲线,如图6所示。可以看出大约80%的聚乳酸粒子停留时间集中在较短的范围内,从局部放大图来看,螺棱角度为70°的螺杆所需时间要小于另外两组,说明螺棱角度为70°的螺杆拥有较好的运输能力。图7为3种螺杆的停留时间对比图,聚乳酸粒子停留时间主要集中在曲线突起的部分,80°和90°螺杆的曲线峰值比较靠右,意味着这两种螺杆挤出时具有较高的平均停留时间,而70°螺杆的曲线峰值最高,表明较多粒子的停留时间短^[15],正向输送能力强,与图6一致。

2.4 粒子分布混合特性

2.4.1 示踪粒子分布指数 基于Polyflow的后处理模块Polystat,计算并绘制了分布指数曲线。由图8可知,3条

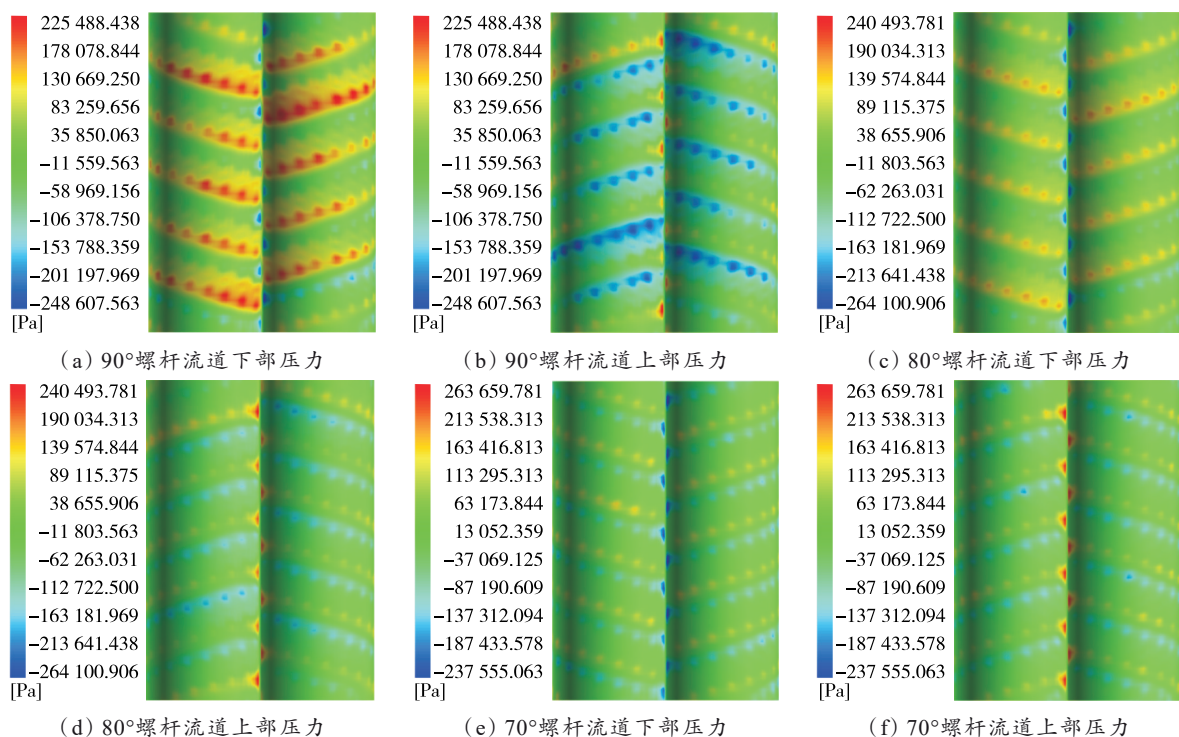


图4 流道的压力场云图

Figure 4 Cloud map of pressure field in the flow channel

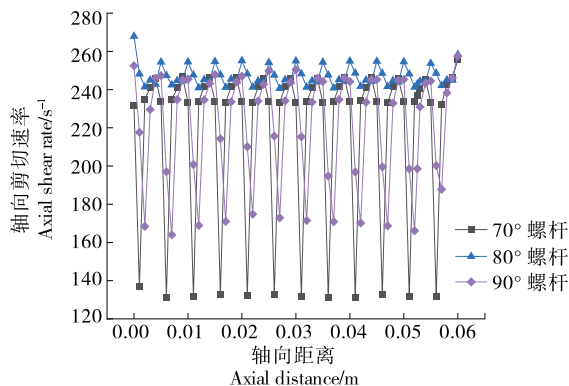


图5 不同螺棱角度剪切速率对比图

Figure 5 Comparison chart of shear rates for different flight edge angles

曲线的前半段均呈现不规则波动,这主要归因于挤出机入口处存在的回流现象所引发的流动不稳定性^[16]。随着螺杆的挤出作用,粒子均匀分布在流道内,瞬态分布与最优分布之差逐渐减小,因为螺棱角度减小,接触面积增大,故螺棱角度为70°和80°的两组螺杆曲线的峰值要小一些,随着螺杆的转动,分布指数曲线达到最小值,螺棱角度为90°的螺杆值最低,70°的次之,说明螺棱角度为90°的螺杆分布均匀性较好。

2.4.2 示踪粒子分离尺度 如图9所示,在10~50 s的时间序列区间内,3种螺杆的曲线均呈现出一致的下降趋

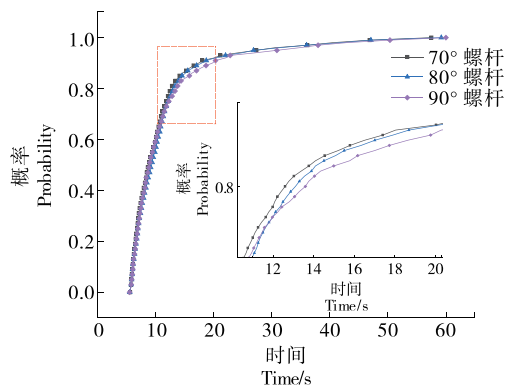


图6 不同螺棱角度累计停留时间对比

Figure 6 Comparison of cumulative residence time for different flight edge angles

势,表明聚乳酸粒子的分布均匀性在此期间持续提升,混合过程不断深化,随着螺杆转动,掺混作用使得粒子再次分散,曲线又呈现上升趋势并逐渐趋于平稳。在80~120 s的时间序列区间中,80°的曲线出现了明显的波动,说明粒子在挤出机流道中发生集聚现象,从而使得分离尺度增加^[17]。总体而言,螺棱角度为70°的螺杆面积利用系数较高,具有较好的分布混合能力。

3 试验验证与分析

3.1 主要仪器与材料

异向双螺杆挤出机:DT20/44型,南京鼎天机械制造有限公司

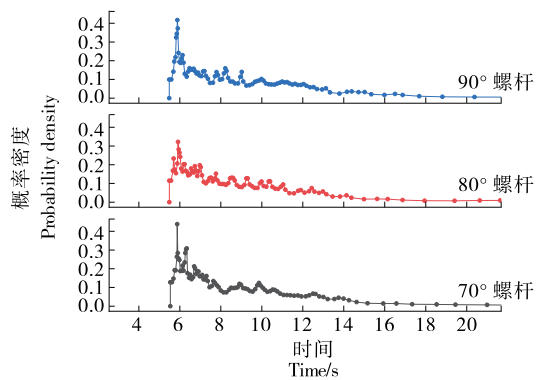


图7 不同螺棱角度停留时间分布曲线

Figure 7 Distribution curve of residence time for different flight angles

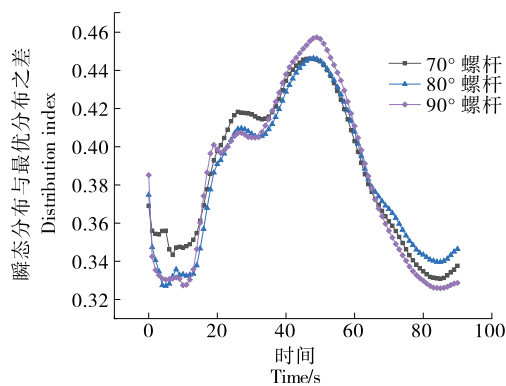


图8 不同螺杆示踪粒子分布指数曲线

Figure 8 Different screw tracer particle distribution index curves

有限公司;

扫描电子显微镜:TESCAN VEGA II型,捷克TESCAN S.R.O公司;

聚乳酸颗粒:4032D型,美国Nature Works公司;

轻质碳酸钙粉末:npcc-201型,粒径400 nm,太行钙品(晋城市)有限公司。

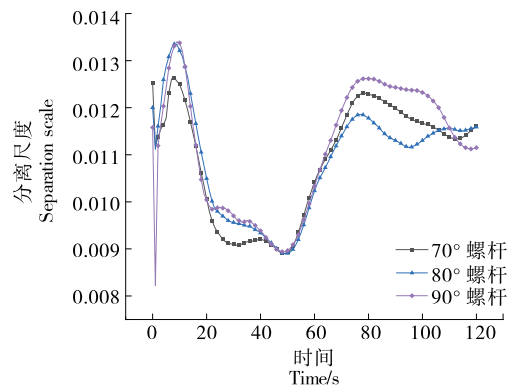


图9 不同螺杆示踪粒子分离尺度曲线

Figure 9 Different screw tracer particle separation scale curves

3.2 试验方案

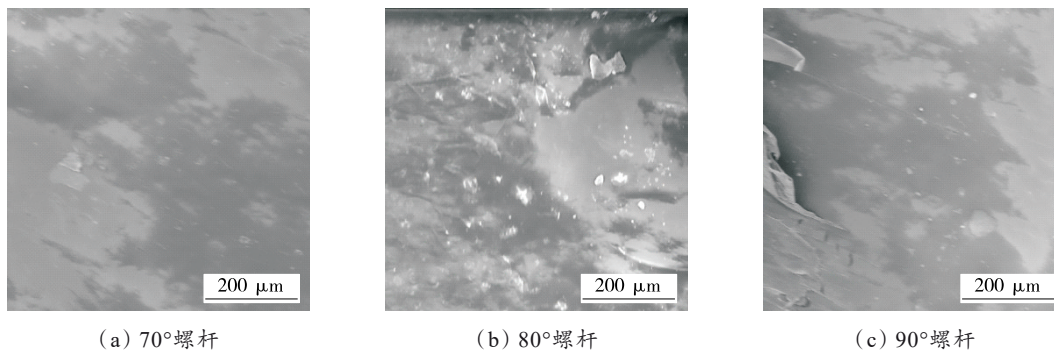
为观察聚乳酸的分布混合特性,将轻质碳酸钙粉末按质量比1:19与聚乳酸基体共混,随后采用3种不同螺棱角度的挤出机进行挤出试验。对所得挤出样条进行冲击断口制备,并对断面进行喷金处理。将处理后的样品置于样品室中抽真空10 min,随即在10 kV加速电压下观察其断面形貌^[18]。

3.3 结果分析

由图10可知,螺棱角度为70°和90°的螺杆挤出的物料断面碳酸钙粉末分布较为均匀,断面平滑,而螺棱角度为80°的螺杆相较于另外两组,碳酸钙粉末团聚现象明显。综上,螺杆螺棱角度大小对挤出物料的分散效果具有显著影响,70°的螺棱角度设计可有效改善异向双螺杆挤出机的分散均匀性,抑制材料团聚,同时获得成型质量更好的挤出制品。

4 结论

使用Polyflow流体仿真软件进行仿真分析后,结果表明:减小螺棱角度减弱了流道下表面的局部高压现象,由于压延间隙增大,降低了挤出机的建压能力,3组螺杆



(a) 70°螺杆

(b) 80°螺杆

(c) 90°螺杆

图10 不同螺杆电镜试验断面图

Figure 10 Different screw SEM experimental section images

中,螺棱角度为 70° 的螺杆剪切速率波动最大,剪切效果最好。螺棱角度减小使螺棱更倾斜,提高了螺杆的运输能力,缩短了物料的停留时间。在分布混合特性方面,标准螺杆的分布均匀性较好,而螺棱角度为 70° 的螺杆面积利用系数较高,具有较好的分布混合能力。该研究主要针对聚乳酸以及螺杆的运输段进行研究,实际生产过程中可根据物料特性和螺杆的不同功能段,选择或变化螺棱角度,以实现整体挤出性能的最优解。

参考文献

- [1] 贾明印,徐文一,任浩宇,等. 螺杆挤出机相似放大理论的研究进展[J]. 中国塑料, 2024, 38(1): 106-111.
JIA M Y, XU W Y, REN H Y, et al. Research progress in similarity amplification theory of screw extruders[J]. China Plastics, 2024, 38(1): 106-111.
- [2] 郭传燕. 聚乳酸包装薄膜的降解性和食品安全性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024: 16.
GUO C Y. Degradability and food safety studies of polylactic acid packaging films[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024: 16.
- [3] 李振,相海,任嘉嘉,等. 同向全啮合双螺杆植物蛋白挤出机不同螺杆元件的仿真分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 147-152.
LI Z, XIANG H, REN J J, et al. Simulation analysis of different screw elements of co-rotating full-meshing twin-screw vegetable protein extruder[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(3): 147-152.
- [4] 王颢霖,朱向哲. 双锥型螺杆挤出机固体输送离散元分析[J]. 中国塑料, 2022, 36(4): 83-88.
WANG H L, ZHU X Z. Discrete element analysis of solid conveying section of double-cone screw extruder[J]. China Plastics, 2022, 36(4): 83-88.
- [5] MATSUSHITA M, OHSAKI S, NARA S, et al. Effect of fill level in continuous twin-screw granulator: a combined experimental and simulation study[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(11): 103822.
- [6] 朱孝录. 齿轮传动设计手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 32.
ZHU X L. Handbook of gear design[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 32.
- [7] WILCZYNSKI K, NASTAJ A, LEWANDOWSKI A, et al. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion[J]. Polymers, 2019, 11(12): 2 106.
- [8] 张洪才. ANSYS 14. 0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 54.
ZHANG H C. ANSYS 14. 0 theoretical analysis and engineering application examples[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013: 54.
- [9] 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 pattern distribution of meshing counter rotating twin screw extruders at different temperatures[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.
- [10] 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, 87.
HAN H C, LIU J, LI K G, et al. Simulation of influence of twin-screw meshing element and anti-thread element on flow field[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6): 74-77, 87.
- [11] 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. Extrusion analysis of Tianzi-shaped tray of food based on Polyflow[J]. Food & Machinery, 2017, 33(12): 86-90.
- [12] 张国才,韩海川,陈占春. 剪刀式单螺杆螺棱头数和螺棱与机筒间隙对挤出流场影响的计算机模拟[J]. 机械设计, 2021, 38(1): 97-101.
ZHANG G C, HAN H C, CHEN Z C. Computer simulation of the effect of the number of screw edges and the gap between screw edges and barrel edges on the flow field of extrusion[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1): 97-101.
- [13] PELEG M. Temperature-viscosity models reassessed[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(15): 2 663-2 672.
- [14] 魏静,张兆辉. 双螺杆捏合机螺纹元件型线设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 160.
WEI J, ZHANG G H. Design of thread element profile of twin screw kneader[M]. Beijing: Science Press, 2018: 160.
- [15] 徐文海,陈安柱,苏宏林. 开槽三头啮合块双螺杆挤出机数值模拟[J]. 饲料工业, 2017, 38(15): 9-12.
XU W H, CHEN A Z, SU H L. Numerical simulation of the extrusion machine in Tri-screw with groove[J]. Feed Industry, 2017, 38(15): 9-12.
- [16] 吴运涛,孙晨昊,王熙霖,等. 同向双螺杆不同螺杆接触状态对聚乳酸挤出过程的影响[J]. 塑料工业, 2025, 53(3): 77-84, 109.
WU Y T, SUN C H, WANG X L, et al. Effects of different contact states of co-directional twin screws on the polylactic acid extrusion processes[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(3): 77-84, 109.
- [17] 陈峰峰,李浩杰,王一飞,等. 基于 Polyflow 的反螺纹元件对粒子分散性仿真研究[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9): 82-86.
CHEN F F, LI H J, WANG Y F, et al. Simulation study on particle dispersion of anti-thread element based on Polyflow[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9): 82-86.
- [18] 徐珍,刘子豪,黄志刚. 滑移条件对啮合同向双螺杆挤出过程的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 99-105, 144.
XU Z, LIU Z H, HUANG Z G. Influence of slip conditions on the extrusion process of meshing co-direction twin screw[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 99-105, 144.