

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.011

同向双螺杆和异向双螺杆对聚乳酸挤出过程的影响

徐珍^{1,2}, 王熙霖¹, 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:探讨了同向双螺杆和异向双螺杆对聚乳酸(PLA)挤出过程及挤出物性能的影响。在相同结构参数下建立同向双螺杆和异向双螺杆的端面曲线,由端面曲线生成的三维模型进行网格划分,将网格模型导入 Polyflow 软件中设定边界条件并添加示踪粒子后进行仿真分析,使用 Fieldview 后处理软件将仿真数据中的物理场进行可视化分析,并对示踪粒子在流道中的轨迹进行研究。结果表明,在对 PLA 的挤出过程中,同向双螺杆流道内的压力相对稳定,异向双螺杆流道内出现局部高压现象;PLA 在同向双螺杆挤出过程中示踪粒子的停留时间更短,分布指数、分离尺度更小,即分布混合能力更强,挤出料的拉伸强度高;异向双螺杆挤出过程中物料受到的剪切、拉伸作用更大,经历最大剪切应力的粒子占比较多,即分散混合能力更强,挤出料的冲击强度高,黏度更低。因此,同向双螺杆能提供相对稳定和高效的挤出过程,挤出过程快,分布混合更加均匀;异向双螺杆建压能力、剪切能力、分散混合能力更强,能够提高挤出物料的产品质量。

关键词: 双螺杆;同向啮合;异向啮合;有限元分析;示踪粒子

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0066-09

Effect of co-rotating twin screw and counter-rotating twin screw on polylactic acid extrusion process

XU Zhen^{1,2}, WANG Xilin¹, HUANG Zhigang^{1,2}

(1. School of Computer and 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)

Abstract : The influences of the co-rotating twin screw and counter-rotating twin screw on the extrusion process of polylactic acid and the properties of the extrudate were discussed. The end curves of the co-rotating twin screw and the counter-rotating twin screw were established with the relative motion method under the same structural parameters. The three-dimensional model generated by the end curve was meshed, and the mesh model was imported into Polyflow software to set boundary conditions and add tracer particles for simulation analysis. The Fieldview post-processing software was used to visually analyze the physical field in the simulation data, and the trajectory of the tracer particles in the flow channel was studied. The results show that the pressure in the flow channel of the co-rotating twin screw is relatively stable in the process of extrusion, and the local high pressure appears in the counter-rotating twin screw. In the process of poly-lactic acid extrusion in the co-rotating twin screw, the tracer particle retention time is shorter, the distribution index and separation scale are smaller, that is, the distribution mixing ability is stronger, and the extrusion material has high tensile strength. In the process of extrusion in the counter-rotating twin screw, the material is subjected to greater shear and tensile effects, and the particles experiencing the maximum shear stress account for more, that is, the dispersion mixing ability is stronger, and the impact strength of the extrusion material is higher, the viscosity is lower. It can be seen from the results that the co-rotating twin screw can provide relatively stable and efficient extrusion process, extrusion process is fast, distribution and mixing is more uniform, and the counter-rotating twin screw has stronger pressure building capacity, shear capacity and dispersion and mixing capacity, which can enhance the product quality of extruded materials.

Keywords : twin screw ; co-rotating ; counter-rotating ; finite element analysis ; tracer particle

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172277)

通信作者: 黄志刚,博士,北京工商大学教授,博士生导师,研究方向为食品机械

收稿日期: 2024-09-14

引用格式: 徐珍,王熙霖,黄志刚.同向双螺杆和异向双螺杆对聚乳酸挤出过程的影响[J].工程塑料应用,2024,52(10):66-74.

XU Zhen, WANG Xilin, HUANG Zhigang. Effect of co-rotating twin screw and counter-rotating twin screw on polylactic acid extrusion process[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 66-74.

聚乳酸(PLA)作为食品包装材料,具有生物降解、可回收利用、透明美观、阻隔性能良好和安全无害等多重优点^[1]。双螺杆挤出机通过两根相互啮合的螺杆旋转,对PLA颗粒进行剪切、混合和塑化,将熔融的PLA熔体通过模具挤成所需形状的制品。因此,双螺杆挤出机的设计和螺杆配置对最终产品的质量、性能和成本有重要影响^[2]。

双螺杆挤出机又分为同向双螺杆挤出机和异向双螺杆挤出机^[3],二者之间主要区别在于螺杆的旋转方向^[4]。许寒飞等^[5]根据同向双螺杆的结构特点,分析其在对物料挤出过程中发挥的作用和优缺点。赵玉程等^[6]使用可实时观测的同向双螺杆挤出机,通过实验研究物料在其中的流动规律。黄志刚等^[7]对啮合异向双螺杆挤出机进行仿真研究,得到物料在挤出过程中的物理场。吴冰清^[8]应用有限元方法对机筒内不可压缩黏性幂律流体的运动进行了等温稳态仿真分析,将流体分析的结果加载到静力结构模型中,对螺杆转子进行单向流固耦合仿真。

笔者重点分析了同向双螺杆和异向双螺杆在PLA挤出过程中的差异,探讨二者在加工过程中物料流动特性以及对最终成品质量等方面的异同。

1 建立理论模型

1.1 建立几何模型

在设计双螺杆挤出机的两根螺杆时,由于两者之间存在相互运动和配合,要考虑它们之间的相关性^[9]。流道是物料在双螺杆挤出机中流过的区域,为了确保螺杆能够自由旋转并有效地输送和压缩物料,在设计流道时,通常会使得机筒内径略大于螺杆外径^[10]。表1为螺杆元件和流道结构参数。

表1 螺杆元件和流道结构参数

Tab. 1 Screw element and flow channel structure parameters

R_s/mm	R_b/mm	R_f/mm	A/mm	L_f/mm	L_s/mm	N
25	16	26	21	25	25	2

Notes: R_s is outer diameter of screw; R_b is inner diameter of screw; R_f is outer diameter of flow channel; A is screw center distance; L_f is flow channel length; L_s is screw lead; N is number of screw heads.

1.1.1 建立端面曲线

将表1中的螺杆元件参数代入端面曲线方程^[11],得到同向双螺杆端面曲线(图1)和异向双螺杆端面曲线(图2)。

1.1.2 建立三维模型

将相关曲线数据导入到Solidworks软件中,通

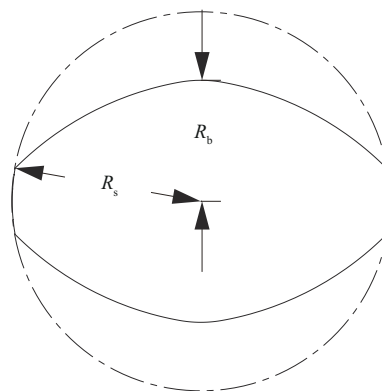


图1 同向双螺杆端面曲线

Fig. 1 End surface curve of co-rotating twin screw

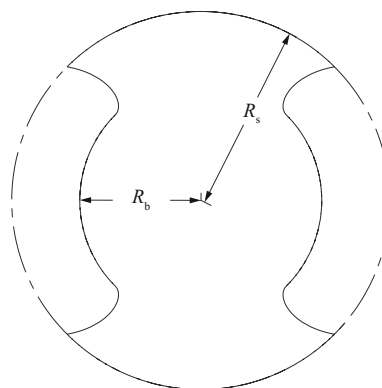


图2 异向双螺杆端面曲线

Fig. 2 End surface curve of counter-rotating twin screw

过相应工具创建、调整和验证模型,最终生成螺杆三维模型和流道三维模型,其中流道三维模型如图3所示^[12]。

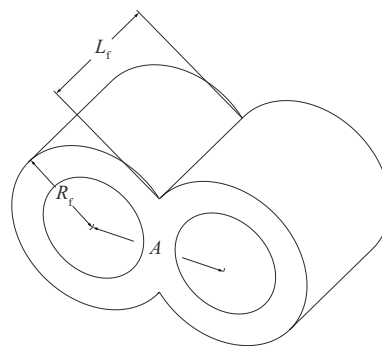


图3 流道三维模型

Fig. 3 3D model of flow channel

同向双螺杆和异向双螺杆主要区别在于螺杆相互作用过程,同向双螺杆的两个螺纹线推移物质时,它们的推力是叠加的,异向双螺杆的两个螺纹线推移物质时,它们的推力相互抵消。这决定了同向双螺杆和异向双螺杆的基本工作原理和性能特征^[13]。

同向双螺杆的配合方式如图4所示,由图4可

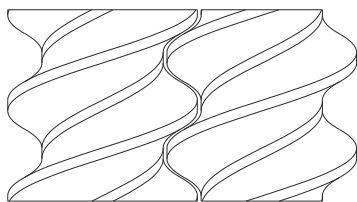


图4 同向双螺杆配合方式

Fig. 4 Extrusion fit of co-rotating twin screw

见,同向双螺杆的两根螺杆旋转方向相同,且螺杆的螺纹旋向均为右旋,物料输送方向的判定与单螺杆相同。

异向双螺杆的配合方式如图5所示,由图5可见,异向双螺杆的两个螺杆旋转方向相反,且两根螺杆的螺纹旋向相反,两螺杆向外旋转。即沿挤出方向上,右侧为左旋螺杆,顺时针旋转,左侧为右旋螺杆,逆时针旋转。

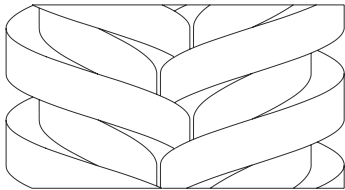


图5 异向双螺杆配合方式

Fig. 5 Extrusion fit of counter-rotating twin screw

1.2 建立数学模型

1.2.1 基本假设

为确保仿真的目标明确、结果准确,并在复杂系统分析中提高效率 and 可信度,合理的基本假设是在进行仿真前必不可少的步骤^[14],具体基本假设如下。

- (1)熔融体不可压缩并充满整个流道。
- (2)熔融体在流道内各位置温度相同且恒定。
- (3)忽略远小于黏性力的体积力。
- (4)熔融体呈现雷诺数较小的层流流动状态。
- (5)物料与机筒内壁面和螺杆表面均不发生滑移。

1.2.2 基本方程

在研究熔融体流动时,需要满足三大基本方程^[15-16]:质量守恒方程(也称为连续性方程)、动量守恒方程(也称为运动方程)、能量守恒方程。由于基本假设中要求熔融体在流道内各位置温度相同且恒定,因此只需考虑质量守恒方程和动量守恒方程;质量守恒方程即连续性方程的物理意义是流体在空间中的密度如何随时间变化以及如何与流体的速度场相关联;动量守恒方程即运动方程详细描

述了流体内部动量的变化与外部作用力之间的关系。

对于许多复杂的流体,特别是在高剪切速率下,黏度不再是一个简单的常数,而是随着剪切速率的增加而变化,Bird-Carreau本构方程能够通过参数化来描述这种剪切率依赖性^[17]。因此为了更准确地描述非牛顿流体的流变性质,采用的Bird-Carreau本构方程见式(1),其能够更准确地描述非牛顿流体的黏度随剪切速率变化的特性。

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

式中: η_0 为零剪切黏度; λ 为相关松弛时间, n 为非牛顿指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

将双螺杆挤出等温过程设定为190℃,190℃下的PLA熔融特性见表2。

表2 PLA在190℃下的熔融体特性参数

Tab. 2 Characteristic parameters of PLA melt at 190℃

$\eta_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	λ/s	n	η_∞/Pa
2 504.235	0.060 7	0.253	1

1.3 有限元模型

1.3.1 网格划分

将螺杆和流道的三维模型导入到网格划分软件中,并进行网格无关性检验。

1.3.2 边界条件的设定

将划分好的网格模型导入到Polyflow软件中进行仿真设定。将两螺杆中心距的中心点处设定为坐标原点, X 轴方向向左, Y 轴方向向上。 Z 轴方向与挤出方向相同。同向双螺杆的两螺杆转速设定为60 r/min,异向双螺杆中左螺杆逆时针旋转,转速为-60 r/min,右螺杆顺时针旋转,转速为60 r/min。

物料在流道的入口和出口可自由流动,因此边界条件为法向力(f_n)=0,切向力(f_s)=0。左右内孔内不存在物料,即物料不能贯穿该边界,因此边界条件为 $f_s=0$,法向速度(v_n)=0。在基本假设中,机筒内壁面不发生滑移,因此边界条件为 $v_n=0$,切向速度(v_s)=0^[18]。

1.3.3 设置示踪粒子

单从螺杆某一相位时的瞬态流场来判定双螺杆挤出机的混合性能有一定的局限性,采用示踪粒子分析法^[19],将示踪粒子作为观察目标,跟踪其运动来研究流体流动规律。在初始时刻,在流道入口处生成2 000个示踪粒子,这些粒子无质量且粒子间不存在相互作用力。

2 仿真结果分析

使用Fieldview软件对挤出过程中流道内物理场(如压力场、剪切速率场、黏度场)进行分析,得出物理场云图和变化曲线,进行可视化分析。

混合主要分为分布性和分散性混合^[20]。分布性混合用于描述物料的分布过程,该过程中物料在螺杆转子的推动下实现不断的重新排列和定向运动;分散性混合用于描述物料尺寸的变化过程,该过程中物料粒子被不断拉伸和剪切。运用示踪粒子法对沿轨迹参数如停留时间、分布指数、分离尺度、最大剪切应力分布进行数学统计,分析同向双螺杆和异向双螺杆混合性能的差异。

2.1 物理场

2.1.1 压力场

由压力云图(图6)和压力变化曲线(图7)可见,在同向双螺杆挤出过程中,流道内压力大小波动起伏,参照同向双螺杆配合后的结构(图4),发现压力

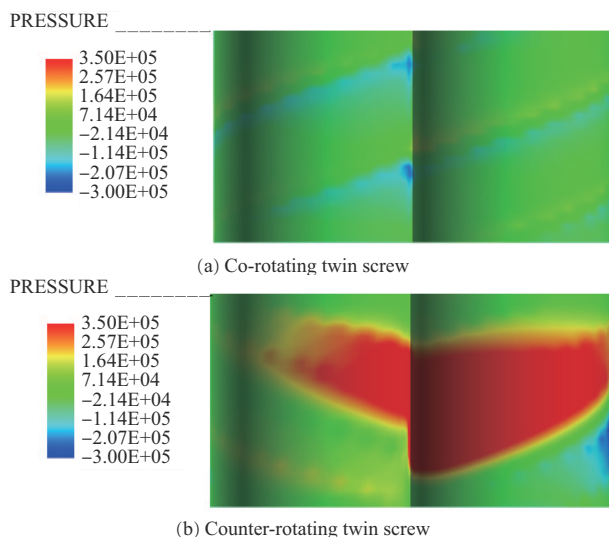


图6 挤出过程中流道内压力云图

Fig. 6 Pressure cloud diagram in flow channel during extrusion

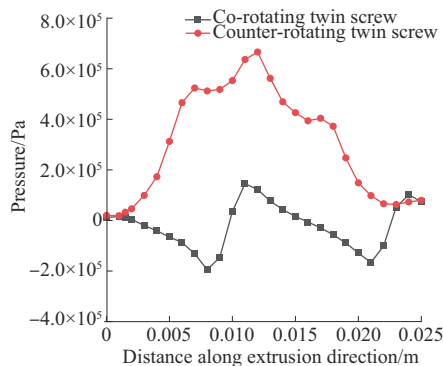


图7 压力变化曲线

Fig. 7 Pressure change curves

波动随着螺棱位置上下起伏,这是由于螺棱是螺杆表面的高凸部分,挤出物料在经过螺棱时会受到较强的挤压和剪切力作用,因此在螺棱位置处,压力往往会相对较高。在异向双螺杆挤出过程中,流道内压力大小沿挤出方向先升高后降低,在中间位置出现局部高压现象。参照异向双螺杆配合后的结构(图5),发现局部高压出现在啮合处沿挤出方向中间位置,这是由于两个螺杆的旋转方向相反,在挤出过程中的物料流动不均匀或者受到阻塞,在中间位置聚积,进而在流道内形成局部高压现象。

2.1.2 剪切速率场

由剪切速率云图(图8)和剪切速率变化曲线(图9)可见,在同向双螺杆挤出过程中和异向双螺杆挤出过程中,剪切速率都是螺棱处较大,螺槽处较小。出现该现象的原因是物料在狭小缝隙中流动速度会变快,螺棱与机筒内壁面间的间隙较小,因此剪切速率较高,而螺槽则与机筒内壁面间的间隙较大,因此剪切速率较低。异向双螺杆出现局部高剪切速率是漏流现象导致的。

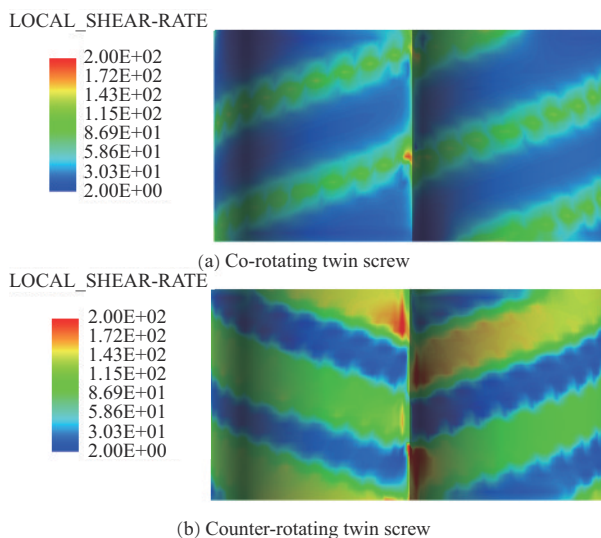


图8 挤出过程中剪切速率云图

Fig. 8 Shear rate cloud diagram in flow channel during extrusion

2.2 轴向混合性能

停留时间分布是衡量螺杆元件轴向混合性能的重要指标,描述了物料在双螺杆挤出机中停留的时间分布情况,有累积停留时间分布函数和停留时间分布函数两种描述形式,分别由概率函数和概率密度函数表述^[21]。

2.2.1 累积停留时间分布

累积停留时间分布曲线(图10)描述了在流体或物料在挤出机内停留的时间的累积概率分布。由

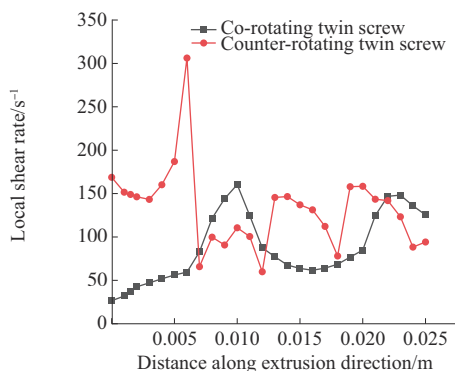


图9 剪切速率变化曲线

Fig. 9 Shear rate change curve

图10可见,同向双螺杆中示踪粒子最先流出流道的时间为1.00 s,完全流出流道的时间为54.82 s,停留时间分布宽度为53.82 s。异向双螺杆中示踪粒子最先流出流道的时间为1.48 s,完全流出流道的时间为59.80 s,停留时间分布宽度为58.32 s。同向双螺杆累积停留时间分布曲线在同异双螺杆累计停留时间上方,曲线靠上意味着在给定时刻流出流道的粒子多。

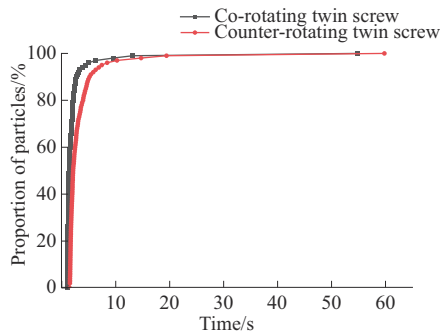


图10 累积停留时间分布

Fig. 10 Distribution of cumulative residence time

2.2.2 停留时间分布

停留时间概率密度分布曲线描述了在挤出机内物料停留时间在不同时间段内的概率分布情况。较高的概率密度意味着在该时间段内物料停留的概率较大,而较低的概率密度则表示相对较少的停留时间^[21]。由停留时间分布的概率密度函数(图11)可知,同向双螺杆中绝大部分粒子集中在1.00~1.99 s,异向双螺杆中绝大部分粒子集中在1.48~2.97 s,同向双螺杆对应的曲线更靠左侧,且峰更高,说明同向双螺杆输送能力较强。出现这种现象的原因可能是在同向双螺杆挤出过程中,物料沿“∞”形路径被螺杆强制运输,而在异向双螺杆挤出过程中,物料以“C”字型运动轨迹,在C型室内反复混合和

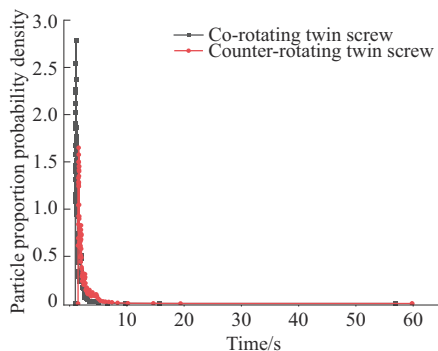


图11 停留时间分布

Fig. 11 Distribution of residence time

反应,导致了停留时间的延长。

2.3 分布混合性能

2.3.1 分布指数

分布指数描述挤出物料的流变特性和流动行为^[22]。由分布指数曲线(图12)可知,异向双螺杆的分布均匀性优于同向双螺杆。

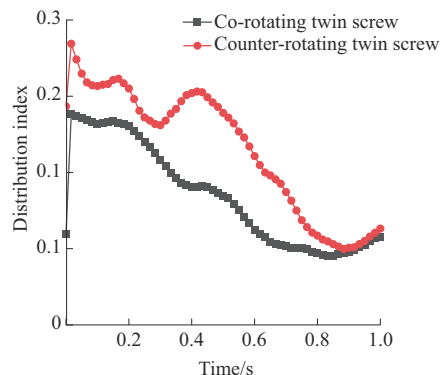


图12 分布指数

Fig. 12 Distribution index

2.3.2 分离尺度

Danckwerts^[23]提出使用分离尺度来表征分布混合过程。在分析时,在流道入口随机释放2 000个粒子,并在流道入口建立浓度场,流道下方浓度为0,上方浓度为1。对于相距 $r=\delta$ 的两个粒子点,其相关系数 $R(\delta, t)$ 变化范围为(0, 1),分离尺度 $S(t)$ 为 $R(r, t)$ 从0到 δ 的积分,表示混合物相同组分分离区域的平均尺寸值,即少组分未分开部分的大小,计算公式见式(2)。

$$S(t) = \int_0^\delta R(r, t) dr \quad (2)$$

图13为分离尺度曲线图,由图13可见,在初始时刻,两种粒子处于入口两侧,因此分离尺度数值较大,随着时间的增加,螺杆掺混作用下分离尺度减小,曲线下降,表面粒子的分布混合程度逐渐加

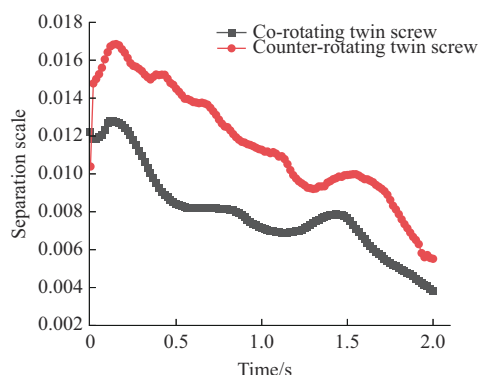


图 13 分离尺度

Fig. 13 Separation scale

深,过程中出现了波动现象,这是粒子在流动过程中发生了集聚现象导致的。同向双螺杆分离尺度曲线始终在异向双螺杆分离尺度曲线下方,说明其分布均匀能力更强。

同向双螺杆挤出过程中,两根螺杆以相同的方向旋转,并在啮合处形成强烈的剪切作用,物料在螺杆间多次交换,有助于实现均匀的分布混合。而异向双螺杆挤出过程中,物料大多被保存在C型室内,只有少量物料流出到间隙中受到剪切和拉伸作用,封闭性好,减少了物料在流道内的不规则流动,因此混合均匀性也会有所下降。

2.4 分散混合性能

分散混合过程是粒子尺寸不断减小的过程,该过程中物料粒子所承受的剪切作用和拉伸作用起到了重要作用。

示踪粒子经历最大剪切应力表示了示踪粒子在双螺杆挤出过程中经历的剪切过程。经历高剪切的示踪粒子占比越大,表明螺杆分散效果越好。图 14 为最大剪切应力概率曲线,由图 14 可见,异向双螺杆对应的曲线在同向双螺杆的上方。图 15 为最大剪切应力概率密度曲线,由图 15 可见,粒子承受的最大剪切应力集中在曲线凸起的峰值处。两

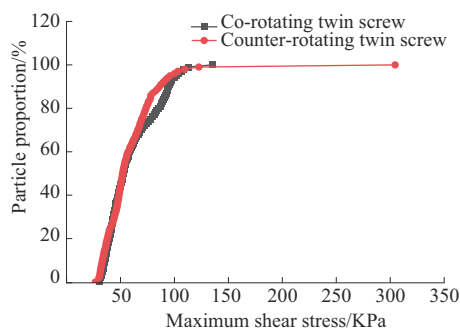


图 14 最大剪切应力概率

Fig. 14 Maximum probability of shear stress

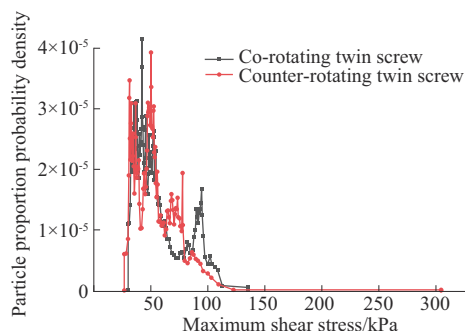


图 15 最大剪切应力概率密度

Fig. 15 Probability density of maximum shear stress

种曲线特征表明,异向双螺杆的分散能力更强,能提供比同向双螺杆更强的剪切作用和拉伸作用。

3 实验部分

3.1 主要原材料

PLA:4032D,美国 Nature Works 公司;

轻质碳酸钙粉末:npcc-201,400 nm,晋城市太行钙品有限公司。

3.2 主要仪器及设备

同向双螺杆挤出机:HK-53,南京科亚装备集团;

异向双螺杆挤出机:DT20/44,南京鼎天机械制造有限公司;

立式注塑机:YT-400,杭州大禹有限公司;

万能材料试验机:CMT6101,深圳新 SANS 有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):TESCAN VEGA II,捷克 Tescan S. R. O 公司;

平板旋转流变仪:MCR-502,奥地利 Anton Paar 公司。

3.3 测试与表征

3.3.1 SEM 分析

由于 PLA 分子不易观察,将 PLA 与轻质碳酸钙粉末以 19:1 的比例进行充分混合后,使用同向双螺杆挤出机和异向双螺杆挤出机进行挤出实验,对挤出料进行冲击得到断面,对断面表面用金溅射 2 min,然后将其放入样品箱中抽真空 10 min,在 10 kV 加速电压下分析断面的形貌。

3.3.2 拉伸与冲击性能测试

将纯 PLA 料使用同向双螺杆挤出机和异向双螺杆挤出机进行挤出实验,将 PLA 置于电热鼓风干燥箱内 80 °C,干燥 10 h,双螺杆挤出机熔融段温度设定为 190 °C,喂料速度为 3 r/min,螺杆转速为 60 r/min。将挤出料注塑制成标准拉伸、冲击试验样条。

分析试验所得的数据,对比同向双螺杆和异向双螺杆挤出料力学性能的影响。拉伸试验按照 GB 1040.2-2006 测试,冲击试验按照 GB/T 1843-2008 测试,在恒温 24.18 °C 和恒湿 30.81% 实验室内进行。

3.3.3 流变性能测试

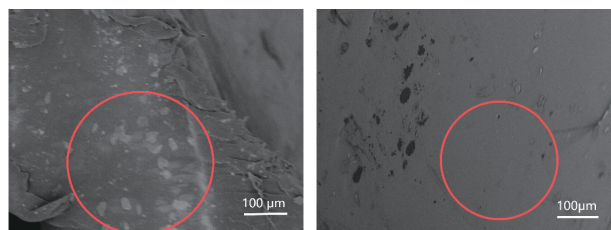
将纯 PLA 料使用同向双螺杆挤出机和异向双螺杆挤出机进行挤出实验,将挤出料注塑制成流变试验样片,进行流变性能测试。旋转流变仪的频率为 0.01~20.00 Hz,平板模式,温度为 185 °C,应变为 1%。

4 结果与讨论

4.1 SEM 分析

碳酸钙粉末颗粒在 PLA 基质中具有较高的对比度,在挤出料的断面中易于观察和识别。这种高对比度能够清晰地看到碳酸钙颗粒的分布情况,从而判断混合的均匀性。碳酸钙粉末在挤出过程中相对稳定,不易发生化学反应或显著变形,因此其分布状态能够较好地反映混合过程中的物理分散情况。如果混合不均匀,碳酸钙颗粒可能会以团块或聚集体的形式出现;而如果混合均匀,则碳酸钙颗粒会均匀分散在 PLA 基质中。碳酸钙粉末作为添加剂,其分布情况可以代表整个混合体系中各组分的分散情况。通过观察碳酸钙颗粒的分布,可以间接推断出 PLA 与其他添加剂(如其他填料、颜料等)的混合效果。

图 16 为挤出物料断面 SEM 照片,由图 16 可以看出,同向双螺杆挤出得到的物料断面上碳酸钙粉粒数量较多,分布更为集中,团聚效应更为明显,并且碳酸钙的粒径较不均匀,断面有较强的粗糙感。异向双螺杆挤出得到的物料断面上碳酸钙粉粒数量相对较少,分布不集中,粒径较小,断面较为平滑,说明异向双螺杆使碳酸钙在 PLA 中分布的更加均匀。



(a) Co-rotating twin screw (b) Counter-rotating twin screw

图 16 挤出物料断面 SEM 照片

Fig. 16 SEM photos of cross-section of extruded material

4.2 拉伸冲击试验分析

图 17 和图 18 分别为拉伸和冲击试验数据。由

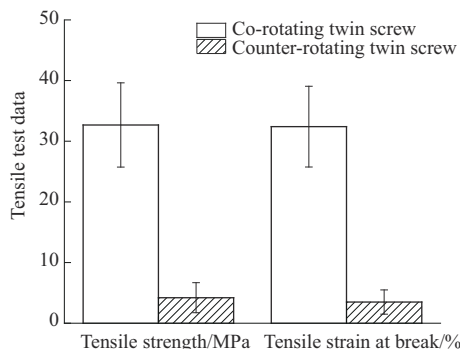


图 17 拉伸试验数据

Fig. 17 Tensile test data

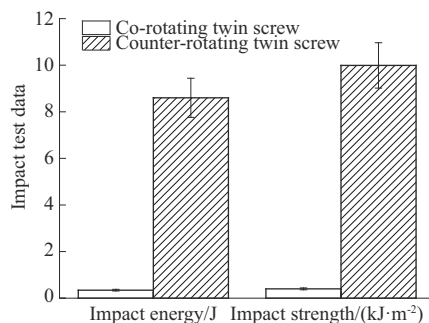


图 18 冲击试验数据

Fig. 18 Impact test data

图 17 和图 18 可知,同向双螺杆挤出的物料样条的拉伸强度和断裂拉伸应变都比异向双螺杆挤出的物料样条略高,异向双螺杆挤出的物料样条吸收冲击能和冲击强度都比同向双螺杆挤出的物料样条略高。

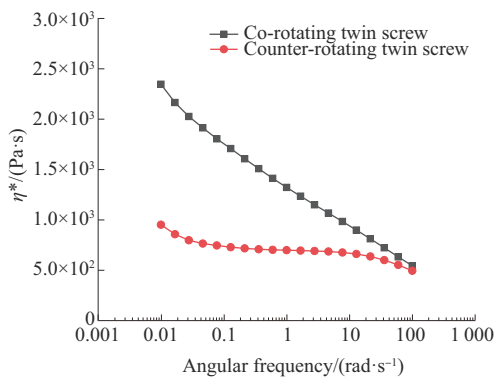
4.3 流变试验结果

聚合物的流变特性通常反映为储能模量(G')、损耗模量(G'')和复合黏度(η^*)^[24]。其中储能模量反映材料的弹性大小,损耗模量反映材料的黏性大小,而复合黏度反映分子量的高低。聚合物熔体的流动性取决于分子链段的运动能力,螺杆挤压改变 PLA 的分子结构,使其分子链断裂,降低其黏度。

图 19 为复合黏度 η^* 随角频率变化曲线,由图 19 可知, η^* 随着角频率的增加而减小。因为结构的差异性,异向双螺杆的分散混合能力更强,分子链断裂更充分,因此异向双螺杆挤出物料的 η^* 低于同向双螺杆的 η^* 。

5 结论

(1) 通过将仿真数据可视化分析,直观地了解到同向双螺杆和异向双螺杆挤出过程中的物理场变

图19 η^* 随角频率变化曲线Fig. 19 Curve of η^* as a function of angular frequency

化。同向双螺杆挤出过程中流道内物理场稳定,异向双螺杆对物料的挤压和剪切能力较强。

(2)使用示踪粒子分析法,结合数学方法对示踪粒子轨迹分析。同向双螺杆中示踪粒子停留时间较短、分布指数、分离尺度都较小,异向双螺杆示踪粒子停留时间较长,经历高剪切力的示踪粒子占比大。PLA在同向双螺杆挤出过程时间更短,自洁性更好,较短的停留时间可以避免物料在挤出过程中长时间暴露于高温条件下而导致材料的热降解或变性以及长时间的剪切和机械作用对材料的分子结构和性能造成的不利影响。而PLA在异向双螺杆挤出过程中反应时间更长,更多地接触并受到机器搅拌和剪切的影响,能够实现物料的高效混合,长时间的流动和混合改善挤出后产品的表面质量和一致性,减少流痕、气孔或结构不均匀性。

(3)通过对比同向双螺杆和异向双螺杆在挤出物料力学性能和流变性能上的差异,发现同向双螺杆由于剪切力和混合作用相对较弱,但连续性强,输送时间快,因此得到的挤出料拉伸性能略好。异向双螺杆则能够提供更强的剪切、拉伸效果,增加物料的破碎和分散程度,能够增强挤出料的冲击性能和结构均匀性。

参考文献

- [1] VIEIRA M G A, DA S M A, DOS S L O, et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review[J]. European Polymer Journal, 2011, 47(3):254-263.
- [2] GIGANTE V, GALLONE G, ALIOTTA L, et al. Twin-screw extrusion optimization and study of morphological, thermal, mechanical and fracture properties of sustainable Poly(lactic acid) (PLA) and Poly(butylene sebacate) (PBSe) blends[J]. Materials Today Sustainability, 2024, 28. DOI:10.1016/j.mtsust.2024.100953.
- [3] LE C A S, BRISSSET A. Twin-screw extrusion[J]. Manufacturing Confectioner, 2008, 88(3):62-64.
- [4] 杨华明. 双螺杆挤出机螺杆特性及其应用[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(9):70-73, 76.
YANG Huaming. Screw characteristics and application of twin-screw extruder[J]. China Manufacturing Information Technology, 2011, 40(9):70-73, 76.
- [5] 许寒飞, 李扬, 何煦, 等. 同向双螺杆挤出机常用螺纹元件及组合方式研究分析[J]. 信息记录材料, 2022, 23(7):23-27.
XU Hanfei, LI Yang, HE Xu, et al. Research and analysis of common thread components and combination methods of co-directional twin screw extruder[J]. Journal of Information Recording Materials, 2022, 23(7):23-27.
- [6] 赵玉程, 樊瑜瑾, 唐军, 等. 同向啮合双螺杆固体颗粒输送行为的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(8):9-14.
ZHAO Yucheng, FAN Yujin, TANG Jun, et al. Study on solid particle transport behavior of twin screw in the same direction[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2021, 59(8):9-14.
- [7] 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 Zhigang, JIANG Weixin, LI Xin, et al. Simulation research on meshing counterdirectional twin screw extruder[J]. Journal of Packaging, 2019, 11(3):9-15.
- [8] 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-structure coupling analysis of meshing heterodirectional twin screw[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [9] LEWANDOWSKI A, WILCZYNSKI K. Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials[J]. Polymers, 2022, 14(2). DOI: 10.3390/polym14020274.
- [10] WANG Y, XIONG L, FENG D, et al. Research progress on the manufacturing of screw-shaped parts in screw compressors[J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(5). DOI:10.3390/polym14020274.
- [11] 张雪晨, 张丽梅, 黄志刚, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆构型对其流场的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(4):99-103, 206.
ZHANG Xuechen, ZHANG Limei, HUANG Zhigang, et al. Influence of different screw configurations on flow field of twin screw extruder with meshing direction[J]. Food and Machinery, 2022, 38(4):99-103, 206.
- [12] WILCZYNSKI K, NASTAJ A, LEWANDOWSKI A, et al. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion[J]. Polymers, 2019, 11(12). DOI:10.3390/polym11122106.
- [13] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[J]. 中国塑料, 2005, 19(2). DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2005.02.018.
GENG Xiaozheng. Twin screw extruder and its application[J]. China Plastics, 2005, 19(2). DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2005.02.018.
- [14] 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. Simula-

- tion analysis of different screw flow fields in meshing co-directional twin screw extruders[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9):70–74.
- [15] WHITE J L, KEUM J, JUNG H, et al. Corotating twin-screw extrusion reactive extrusion-devolatilization model and software [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2006, 45(4): 539–548.
- [16] 代祥基, 刘子豪, 黄志刚. 啮合同向差速双螺杆挤出机挤出聚乳酸流场分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(4):59–64, 83.
DAI Xiangji, LIU Zihao, HUANG Zhigang. Flow field analysis of polylactic acid extrusion by meshing simultaneous differential twin screw extruder[J]. Food and Machinery, 2024, 40(4): 59 – 64, 83.
- [17] 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, 1999, 14(2):136–143.
- [18] HELMIG J, BEHR M, ELGETI S. Boundary-conforming finite element methods for twin-screw extruders: Unsteady-temperature-dependent-non-Newtonian simulations[J]. Computers & Fluids, 2019, 190:322–336.
- [19] 魏静, 孙旭建, 孙伟, 等. 双螺杆捏合机转子型线设计与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3):63–73.
- WEI Jing, SUN Xujian, SUN Wei, et al. Rotor profile design and numerical simulation of twin-screw kneader[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3):63–73.
- [20] YAN C, YAN J, ZHANG Z, et al. Screw extrusion process used in the polymer modified asphalt field: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.141592.
- [21] MERCIER M, HOPPE S, HU G H, et al. Local residence time distributions in an intermeshing corotating twin screw extruder[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2001, 73(6). DOI: 10.1002/1522-2640(200106)73:6<659::AID-CITE6592222>3.0.CO;2-X.
- [22] 马秀清, 劳志超, 李明谦, 等. 螺杆构型对 PLA/PTW 共混物性能影响的研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(11):127–134.
MA Xiuqing, LAO Zhichao, LI Mingqian, et al. Study on effect of screw configuration on properties of PLA/PTW blend[J]. China Plastics, 2023, 37(11):127–134.
- [23] DANCKWERTS P V. The Definition and measurement of some characteristics of mixtures[J]. Applied Scientific Research, 1952, 3 (4):279–296.
- [24] 顾书英, 任杰, 袁华. 聚乳酸及其共聚物、共混物的流变特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2005(4):224–227.
GU Shuying, REN Jie, YUAN Hua. Rheological properties of polylactic acid and its copolymers and blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005(4):224–227.