

啮合同向差速双螺杆挤出机挤出聚乳酸流场分析

Analysis of the flow field in a meshing and co-rotating differential twin screw extruder for extruding polylactic acid

代祥基^{1,2} 刘子豪¹ 黄志刚^{1,2}

DAI Xiangji^{1,2} LIU Zihao¹ HUANG Zhigang^{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:探究不同差速比的螺杆组在流道性能上的差异,明确差速对聚乳酸材料挤出性能的影响。方法:应用 Solidworks 软件建立 4 组差速双螺杆组,通过 Fluent 软件进行网格划分和有限元数值模拟,使用 CFD-post 软件分析计算结果,并对其性能进行验证。结果:当进出口压力分别为 0.2、0.5 MPa,单头基准转速为 30 r/min 时,差速比为 1:2 和 1:3 的螺杆在不同性能下各有优劣,螺杆的产量和机筒内压力在差速比为 1:2 时具有优势,螺杆的混合能力在差速比为 1:3 时具有优势。结论:对比传统双螺杆挤出机,差速双螺杆挤出机对聚乳酸材料的挤出性能为正向影响,可作为全新的聚乳酸改性设备。

关键词:聚乳酸;双螺杆挤出机;差速;啮合同向;有限元数值模拟;流道

Abstract: Objective: To explore the differences in runner performance of screw groups with different differential ratios, and to clarify the effects of differential speed on the extrusion performance of polylactic acid materials. **Methods:** Four groups of differential twin screw groups were established by Solidworks software, meshing and finite element numerical simulation were carried out by Fluent software, the calculation results were analyzed by CFD-post software, and the contours and discounted plots of various characterization parameters were combined, and they were verified by experiments. **Results:** Under the condition that the inlet and outlet pressures were 0.2 MPa and 0.5 MPa, and the reference speed of a single head was 30 r/min, the screws with a differential ratio of 1:2 and 1:3 had their own

advantages and disadvantages under different properties, and the screws with a difference ratio of 1:2 for output and pressure in the barrel had an advantage. In terms of mixing capacity, a screw with a differential ratio of 1:3 had an advantage. **Conclusion:** Compared with the traditional twin-screw extruder, the differential twin-screw extruder has a positive impact on the extrusion performance of polylactic acid materials, and can be used as a new polylactic acid production equipment.

Keywords: PLA; twin-screw extruders; differential speed; co-rotate meshing; finite element numerical simulation; flowchannel

聚乳酸(PLA)是一种环境友好型材料,同时也是一种具有完全可降解性、高生物相容性和优异机械性能的热塑性材料,可作为石油基塑料的替代品,已被广泛应用于包装、农业、纤维纺织等领域^[1]。

由于传统啮合同向双螺杆挤出机中对称的流道空间,限制了其在加工过程中对物料的拉伸剪切作用。Xu 等^[2]提出了差速螺杆的概念,以突破传统的空间对称。王克俭等^[3]通过 Polyflow 软件对转速比为 5:1,4:1,3:1 的异向差速螺杆进行了三维流动仿真分析,使用同一组出入口压差和转速等工艺参数进行了高密度聚乙烯(PE-HD)挤出数值模拟。Luo 等^[4]通过与传统双螺杆的对比,优化了聚氨酯和聚丙烯共混物的最佳挤出工艺条件。喻慧文等^[5]研究了转速比为 1:2 的啮合同向差速螺杆的挤出工艺条件。综上,差速双螺杆挤出机在混合能力和剪切能力方面具有更复杂的空间结构^[6]。在分散混合方面,差速双螺杆挤出机在剪切应力的基础上新增加了拉伸应力作为分散混合力,更有利于添加剂在熔融聚乳酸中的混合。在分布混合方面,因差速双螺杆挤出机复杂的非对称流道结构,可以有效提高挤出机的分布

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32172277)

作者简介:代祥基,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:2022-11-04 改回日期:2024-03-15

混合能力^[7]。

目前,有关差速双螺杆挤出机的研究主要集中在差速比为 1:2 的螺杆方面,而有关三头差速螺杆的研究尚未见报道。研究拟针对三头螺杆配合其他螺杆组建螺杆组进行仿真分析,应用 Solidworks 软件建立不同螺槽深度的螺杆元件三维模型^[8],利用 Fluent 流体仿真软件进行数值模拟,并采用粒子示踪法模拟粒子在流道内的运动轨迹,分析不同螺槽深度对聚乳酸流场中的压力场、剪切速率场和黏度场,以及轴向停留时间分布的影响,以期优化聚乳酸的改性生产工艺。

1 材料与方 法

研究主要通过有限元仿真的方式探究差速双螺杆挤出机中复杂的流道空间结构对流道内混合物料性能的影响,并通过样机试验进行验证。仿真试验首先需要通过 Solidworks 软件建立不同差速的螺杆模型^[8],以用于形成不同差速比的流道。使用 Fluent 软件对三维流道模型进行网格划分,并在非滑移条件下,给定边界条件。基于 Fluent 模块中的流体有限元算法对流道内流体进行运动学、能量学和 DPM 计算,运行仿真后得到计算结果。最后将计算结果导入 CFD-post 软件进行后处理,并通过云图、折线图等方式分析不同差速螺杆组对流道的影响^[9]。

1.1 几何模型

试验涉及到多种头数的螺杆,其端面方程各不相同,使用同一端面参数绘制螺杆,其导程、螺槽深度、螺棱厚度等均不同,为使其互相之间能够正确啮合,需要对两螺杆之间的间隙等做出相应的调整,以防止发生撞齿现象。

通过啮合同向双螺杆端面几何学的基本原理得出如表 1 所示的端面参数,利用 Solidworks 软件,以基本端面参数通过端面几何方程,并以左侧螺杆圆心为原点绘制端面形状草图。绘制完成后,通过不同的差速比对中心距、导程、转速比等做出调整,具体参数见表 2。对端面模型进行拉伸、扭转等三维操作,得到如图 1 所示的螺杆组三维模型。

1.2 数学模型

为确定设定边界条件的具体数值^[10],提出以下假设:

- (1) 熔融体为层流黏性流体。
- (2) 熔融体为不可压缩流体且充满流道。
- (3) 重力和惯性力远小于黏性力故忽略不计。
- (4) 机筒壁面无滑移。
- (5) 差速螺杆无装配公差,可以完美适配。

表 1 螺杆元件端面参数

中心距	螺杆外径	螺杆内径	螺杆元件与机筒间隙
20	21.6	18	0.2

表 2 差速螺杆参数

差速比	螺杆元件 导程	螺杆间 隙/mm	转速比	计算长 度/mm
1:2	10:20	0.2	20:40	60
1:3	10:30	0.5	20:60	60
2:2	20:20	0.2	40:40	60
2:3	20:30	0.3	40:60	60

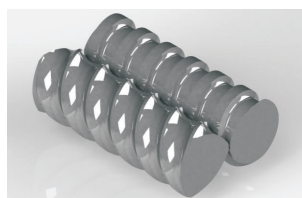


图 1 螺杆组三维模型

Figure 1 3D model of screw element

使用连续性方程和动量方程描述流体在机筒内的流动过程。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} = 0, \quad (1)$$

动量方程:

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

式中:

$\boldsymbol{\nu}$ ——速度矢量, m/s;

∇ ——哈密尔顿算子;

P ——流体静压力, Pa;

\boldsymbol{T} ——应力张量, Pa。

使用 Fluent 软件仿真聚乳酸挤出,其熔融流体属于非牛顿流体,挤出过程中,剪切速率会不断波动,故选择与剪切速率有关的黏度本构方程 Carreau^[11]:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{\alpha-1}{2}}, \quad (3)$$

式中:

η ——物料黏度, Pa·s;

η_0 ——零切黏度, Pa·s;

η_{∞} ——无穷大剪切速率下黏度, Pa·s;

λ ——松弛时间, s;

α ——模型指数;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹。

1.3 边界条件

将流道区域内的自由流体设置为入口边界和出口边界的法向速度和切向速度均为 0 m/s,入口压力设为 0.2 MPa,出口压力设为 0.5 MPa。以单头螺杆转速为基准,设定转速为 120 r/min,通过配合原理可知,双头螺杆转速为 60 r/min,三头螺杆转速为 40 r/min。各壁面温

度设定为 190 °C,液体回流温度为 230 °C。机筒内壁面无物料滑移。

1.4 材料参数

仿真流体材料为聚乳酸(PLA),对比传统的塑料,PLA 在生物降解等方面具有优势,被广泛运用于包装、食品等领域^[12]。在 PLA 挤出过程中,螺杆组的各项参数均会对挤出物性产生影响。不同的导程变化率会对应不同的流道性能,从而影响挤出料的材料性能。聚乳酸物性参数^[13]: $\eta_0=502.41 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta_\infty=0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda=0.0614 \text{ s}$, $\alpha=0.293$ 。

1.5 试验材料与设备

- 聚乳酸(PLA):4032D 型,浙江海正生物材料公司;
- 碳酸钙(CaCO₃):轻质碳酸钙,晋城太行钙品有限公司;
- 啮合同向双螺杆挤出机:DT-20-44 型,南京鼎天机械制造有限公司;
- 立式注塑成型机:YT-400 型,杭州大禹机械有限公司;
- 扫描电子显微镜:TESCANVEGA II 型,捷克泰思肯公司。

2 仿真结果与讨论

2.1 压力场

2.1.1 对流动性能的影响 通过有限元仿真并进行后处理,得到不同差速螺杆压力场的数据,并对其进行分析。低相对分子质量的流体由于可压缩性小,压力变化对其无显著影响。但挤出机往往加工的是聚合物,其分布着大量的分子链结构,机筒内过大的压力会使物料持续挤压,导致物料分子链的活动能力降低,黏度升高,物料流动性变差,物料的挤出过程变得困难,且不易成型,降低加工效率^[14]。

黏度与压强的关系为^[15]:

$$\eta_p = \eta_{p_0} \cdot e^{b(\rho - \rho_0)}, \quad (4)$$

式中:

- η_p ——压强 p 下的熔体黏度,Pa·s;
- η_{p_0} ——标准大气压 p_0 下的熔体黏度,Pa·s;

b ——压强系数(其值与聚合物空洞的体积和温度有关),MPa⁻¹。

通过查阅资料得知,聚乳酸材料的 b 值约为 $2.07 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$,当压强增大到 6 MPa 时,黏度上升为标准大气压下黏度的 110%,后续黏度随压力变化呈指数型增长,表明压强对黏度影响显著。

2.1.2 仿真数据分析 通过对螺杆挤出机的有限元数值模拟,仿真挤出机熔融段的挤出过程,通过后处理得到如图 2 所示的压力云图,并以 $X=10 \text{ mm}$, $Y=4.57 \text{ mm}$ 点沿挤出方向的直线生成 60 个数据点,绘制如图 3 所示的压力折线图。

挤出机工作时,喂料持续不断,出口由于口模的原因会产生较大的压强阻碍物料挤出,因此在仿真模拟中用进口压力表征持续喂料,用出口压力表征物料受口模阻碍难以挤出。由于出口压力的影响,持续加入流道的物料随挤出方向不断堆积,越接近出口处物料堆积越严重,在图 2 中表现为 4 种不同差速的螺杆组的压力均沿挤出方向逐渐增大,在图 3 中表现为数据曲线有上升趋势,且在出口处压力达到峰值。物料在挤出机内主要的前进动力是螺杆推力面提供的,推力面提供的推力迫使物料向前运动,而拖拽面主要引导物料旋转,迫使物料在前进的同时,还能顺利进入啮合区进行分散混合,所以在图 2 中显示为推力面压力大于拖拽面,图 3 中表现为折线呈规律波动,波峰位置为推理面,波谷位置为拖拽面。

差速螺杆在最初设计时,使用不同头数的螺杆进行组合以满足差速的需要,所以两螺杆需设计不同的端面形状,且在扭转建立三维模型时导程也需按照差速进行配比。不同的端面形状和导程使得两螺杆的螺槽深度、宽度、升角等不同,在旋转配合中,两螺杆的啮合度小于螺杆结构完全一样的等速螺杆,较低的啮合度意味着啮合区拥有更大的空间,在啮合区熔融物料可以混合移动的区域更大,被迫压缩的程度小,所受压力相对等速螺杆较小。将所有数据点取均值,得到不同差速螺杆的压力均值分别为 2.29×10^5 , 2.57×10^5 , 3.46×10^5 , $2.39 \times 10^5 \text{ Pa}$,与图 2 所示趋势相同,在图 3 中则显示为差速螺杆压力值整体低于等速螺杆。

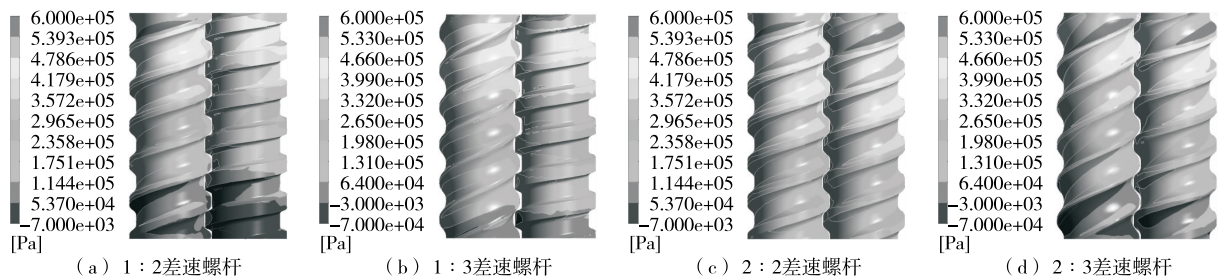


图 2 不同差速螺杆组的压力云图

Figure 2 Pressure contours of different differential screw sets

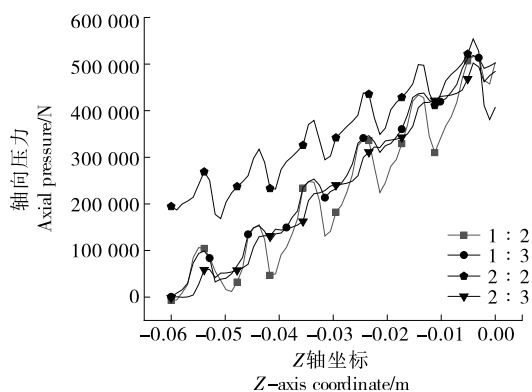


图 3 轴向压力折线图

Figure 3 Axial pressure broken line diagram

2.2 剪切应力分析

2.2.1 对流动性能的影响 聚合物在螺杆挤出机中加工时有明显的非牛顿行为,此类流体随着剪切应力的提高,在微观层面上各分子间持续产生位移导致分子链结构被部分破坏,分子链结构的欠稳定使得分子间的作用力降低,从而导致流体黏度降低^[16],该流体一般被称为“剪切

变稀流体”。螺杆挤出机加工过程中,挤出的主要目的是物料改性,一般实现的方式是高温处理并添加相应添加剂,物料黏度越低,添加剂就越容易在物料中被剪切和分散,更大的剪切应力有利于物料和添加剂的混合。

2.2.2 仿真数据分析 通过对螺杆挤出机的有限元数值模拟,仿真挤出机熔融段的挤出过程,通过后处理得到如图 4 所示的剪切应力云图,并选取上啮合区为观察区,以 $X=10\text{ mm}, Y=4.57\text{ mm}$ 点沿挤出方向的直线生成 60 个数据点,绘制如图 5 所示的剪切应力折线图。

双螺杆挤出机加工过程中,螺杆旋转连续不断,对物料的剪切发生在机筒内的每一个部位,螺杆的每一次转动都会对物料进行剪切。在机筒的不同区域,螺杆的表面积和转速基本相同,但在螺槽位置时,处于螺杆的内凹段,物料相对可活动的空间较大,对比螺棱处的小体积,单位物料受到的剪切应力相对较小^[17],且在螺槽位置,螺杆半径相对螺棱位置较小,所以线速度也会相对较小,对物料的剪切能力降低。在图 4 中表现为沿外壁出现呈螺旋线状的高应力带,图 5 中表现为剪切应力呈规律性波动,波谷对应螺槽区域,波峰对应螺棱区域。

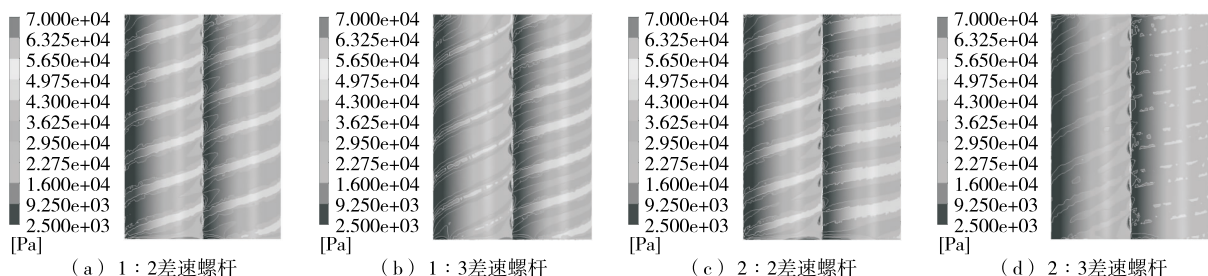


图 4 不同差速螺杆组的剪切应力云图

Figure 4 Shear stress contours of different differential screw groups

差速螺杆因为两螺杆的速度不同,慢速螺杆内的物料进入快速螺杆的啮合区会出现流体速度突变的现象,黏性物料由于速度突变会产生拉伸应力,物料在拉伸过程中会发生拉长形变,包含在物料中的添加剂团块同时被拉伸,由于添加剂的可塑性低于加工物料,所以在拉伸过程中较大的团块会断裂成小团块。拉伸是速度改变导致的,其发生位置在壁面和螺杆外表面之间,对物料的切割方向也类似于剪切,只是拉伸只在啮合区发生,所以其大小可以在剪切应力中体现。因波动点较小,仅在啮合点短暂发生,所以在图 4 中无明显体现,图 5 中,不同差速的峰值分别为 $5.18 \times 10^4, 6.56 \times 10^4, 3.66 \times 10^4, 4.43 \times 10^4\text{ Pa}$, 均值分别为 $3.77 \times 10^4, 4.72 \times 10^4, 2.81 \times 10^4, 3.28 \times 10^4\text{ Pa}$, 与图 5 的趋势一致,说明差速越大的螺杆组,其啮合区剪切应力整体较大。

2.3 停留时间分析

2.3.1 对流动性能的影响 混合能力是双螺杆挤出机的

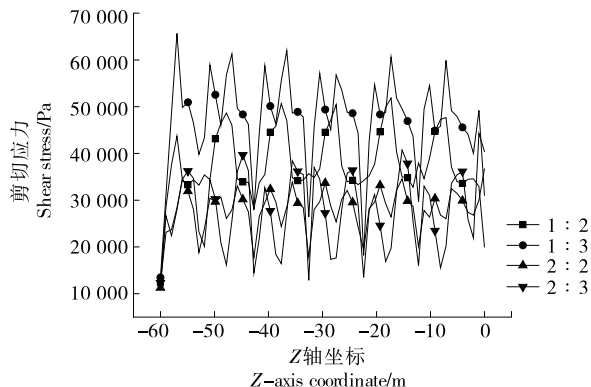


图 5 轴向剪切应力折线图

Figure 5 Axial shear stress line plot

重要性能参数之一。与分散混合不同,分布混合主要描述添加剂在物料各区域中均匀分布的能力,该过程中添加剂跟随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,在跟随运动过程中,添加剂不断地与物料相

互融合。在物料物性相同的情况下,混合时间越长,添加剂的分布情况越好。

2.3.2 仿真数据分析 取流道出口为切片,统计添加剂从添加到完全挤出所需的时间,并记录添加剂挤出概率,绘制如图6所示的停留时间分布曲线,并作为添加剂跟随物料挤出过程在机筒内的停留时间,用以表征该差速螺杆组的分布混合能力。等速螺杆挤出机流道的空间结构已被固定为对称结构,而差速螺杆挤出机的流道为非对称空间结构,空间结构拥有更多的组合方式,可以探究更复杂的空间结构。对于物料的挤出过程来说,越复杂的空间结构意味着物料从进口到出口的挤出路程更长,整体挤出耗时更长,更有利于物料和添加剂的充分混合。当挤出概率为90%时,视作示踪粒子已被完全挤出,不同差速螺杆下,物料分别在25.4,51.1,19.7,36.8 s时被完全挤出。图6中体现为差速比越大的螺杆组,对应曲线的斜率越缓,且达到100%概率渐近线所需时间越长。

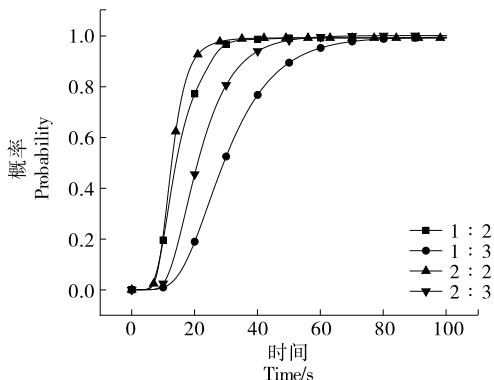


图6 停留时间分布曲线

Figure 6 Dwell time distribution curve

2.4 速度场分析

一般来说,头数较多的螺杆由于端面参数的限制,螺槽相对较浅,在相同的端面参数情况下,流体体积相差较小,多头螺杆由于螺杆部分占比较多导致流体体积略小。将模型导入Fluent软件进行流道填充后得到流道模型,并对其体积进行统计,得出差速螺杆的流体体积分别为 9.12×10^{-6} , 8.74×10^{-6} , 8.95×10^{-6} , $8.69 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。

在物料挤出过程中,物料自身无法产生动力,其向前移动的动力依托于螺杆,螺杆的圆周运动不断给予物料动力,所以物料越靠近螺杆表面所获得的动力越多,再依托黏性动力层层传输,直到机筒壁面。由于机筒壁面是静止的,所以物料从壁面流过时会受到阻碍,而壁面是流道内距离动力源螺杆最远的位置,因此靠近壁面的流场速度接近于零。由于螺杆结构不会产生变化,物料从外界获得的动力和阻力保持不变。由图7可知,流道的整体速度分布较为均匀,沿挤出方向的流场速度基本相同,且螺杆啮合区的速度相对较大。由图8可知,两螺杆均带动物料沿逆时针方向旋转,且越靠近螺杆物料的移动速度越快。

从CFD-post中计算流道整体的平均速度,得到不同差速螺杆的平均速度分别为 6.07×10^{-3} , 5.44×10^{-3} , 4.50×10^{-3} , $4.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,由于头数配置不同,流道平均速度随螺杆总头数的增加而变慢,这是因为头数多的螺杆转速相对较慢,较慢的转速在动力传递时可能损失更多的动力,且随着头数的增加,流道间隙逐渐减小,物料需要更大的动力才能够被挤出。

将平均速度和流体体积相乘得到不同差速比螺杆的产量系数分别为53.54,47.55,40.28,38.32。随着螺杆总

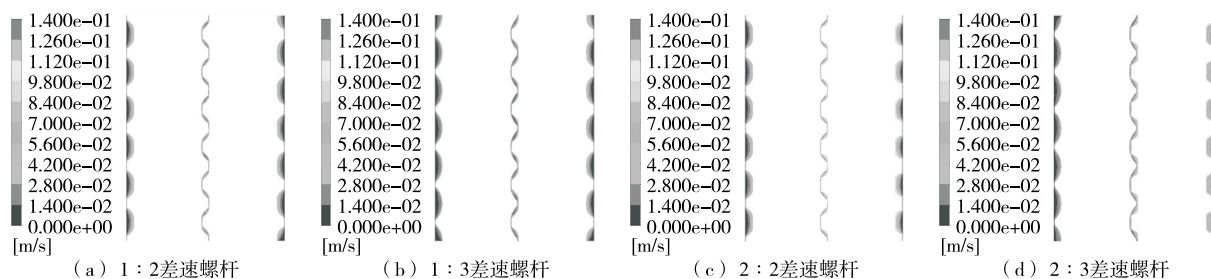


图7 流道速度云图

Figure 7 Runner velocity contour

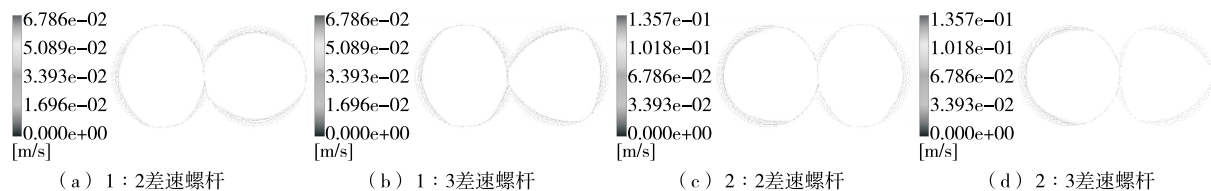


图8 速度矢量图

Figure 8 Velocity vector illustration

头数的增加,挤出机的流道体积下降,且流道速度也下降,因此挤出机的产量随头数的增加而下降。

3 验证实验

3.1 试验方案

按照仿真试验中的差速比为 2 : 2 的螺杆组所用的边界条件,设定试验机的各项加工条件。在 60 r/min 下进行共混加工,将聚乳酸粒料干燥处理后与轻质碳酸钙粉料以 $m_{\text{聚乳酸}} : m_{\text{碳酸钙}}$ 为 100 : 1 进行充分混合,将加工后的物料注塑成大小一致的棒材,并通过加工后的 PLA 挤出物进行力学性能测试,验证前期软件仿真试验结果的正确性。

3.2 性能测试

在生产过程中记录产量,将加工棒材进行拉伸力学和冲击力学实验验证其力学性能,并通过电镜对冲击断面进行观察,以验证挤出机加工过程的混合能力。表 3 为 60 r/min 工艺参数下聚乳酸材料经过共混后的力学性能参数,其断面扫描电镜图如图 9 所示。由表 3 可知,棒材的拉伸增长趋势拟合度达到 87%,验证了仿真试验数据的正确性。

由表 4 可知,在单项性能对比下,差速比为 1 : 2 和 1 : 3 的螺杆在不同性能下各有优劣。在产量需求的情况

表 3 拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties

螺杆转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	断裂拉伸 应变/mm	最大负 荷/kg	拉伸强 度/mPa	吸收的 能量/J	冲击强度/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
60	3.49	397.22	37.11	0.581 1	14.377 2

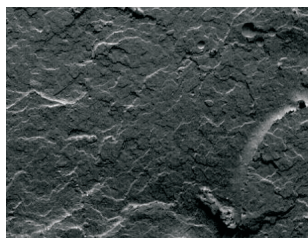


图 9 断面扫描电镜图

Figure 9 Cross section SEM

表 4 不同差速比下螺杆挤出机的流道性能

Table 4 Runner performance of a screw extruder at different differential ratios

差速比	压力均值/ ($\times 10^5 \text{ Pa}$)	剪切应力均 值/($\times 10^4 \text{ Pa}$)	停留时 间/s	产量 系数	加权评 估得分
1 : 2	2.29	3.77	25.4	53.54	63.33
1 : 3	2.57	4.72	51.1	47.55	96.67
2 : 2	3.46	2.81	19.7	40.28	56.00
2 : 3	2.39	3.28	36.8	38.32	73.42

下,应选择差速比为 1 : 2 的螺杆组;在挤出物性能需求下,应选择差速比为 1 : 3 的螺杆组。

4 结论

运用 Fluent 流体仿真软件对不同差速比的螺杆组流场进行了仿真研究,并借助 CFD-post 软件对后处理结果进行了分析。结果表明,两螺杆头数相差越大,其螺杆空间结构越复杂,可提供的剪切应力越强,停留时间越长。头数越小的螺杆,由于螺槽的空间更大,具有更高的产量。因此应根据不同的改性需求采用不同的差速螺杆组。后续应加入四头螺杆,研究四头螺杆与其他螺杆配合后对流道性能的影响。

参考文献

- [1] 陈仔君, 赵彧瑾, 苏婷婷, 等. 聚乳酸(PLA)降解微生物及其降解酶[J]. 塑料, 2022, 51(5): 126-130, 155.
CHEN Z J, ZHAO Y J, SU T T, et al. Polylactic acid (PLA) degrading microorganisms and the degrading enzymes[J]. Plastics, 2022, 51(5): 126-130, 155.
- [2] XU B P, WANG M G, HE L, et al. Self-cleaning plasticizing venting and extruding apparatus by co-rotating non-twin multi-screws and method thereof: US2013089634-A1[P]. 2010-06-12.
- [3] 王克俭, 郭冰. 差速双螺杆挤出机三维流动仿真分析[J]. 中国塑料, 2013, 27(6): 91-96.
WANG K J, GUO B. Simulation of three-dimensional flow in differential twin-screw extruders[J]. China Plastics, 2013, 27(6): 91-96.
- [4] LUO J, XU B P, YU H, et al. Thermoplastic polyurethane/polypropylene blends in a co-rotating non-twin screws extruder[J]. Fibers and Polymers, 2015, 16(1): 95-104.
- [5] 喻慧文, 徐百平, 吴宏武, 等. 差速双螺杆非充满输送粘弹流体的可视化[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(8): 79-87.
YU H W, XU B P, WU H W, et al. Visualization of flow patterns of partially filled viscoelastic fluid in A non-twin screw extruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(8): 79-87.
- [6] 王贺祥, 彭炯, 葛震, 等. 双螺杆挤出过程数值模拟研究进展[J]. 中国塑料, 2020, 34(9): 96-102.
WANG H X, PENG J, GE Z, et al. Research progress on numerical simulation of twin-screw extrusion process[J]. China Plastics, 2020, 34(9): 96-102.
- [7] 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 H J, HUANG Z G, LI M L, et al. Simulation analysis of different screw flow fields of meshing twin-screw extruder [J]. Engineering Plastics Applications, 2016, 44(9): 70-74.
- [8] 程洪伟. 关于双螺杆塑料挤出机螺杆参数化 CAD 的研究与分析[J]. 电子制作, 2016(16): 2.
CHENG H W. Research and analysis on the parametric CAD of twin screw plastic extruders[J]. Electronic Production, 2016(16): 2.

(下转第 83 页)

参考文献

- [1] 中国牡蛎产业发展报告[J]. 中国水产, 2021(6): 20-31.
China oyster industry development report [J]. Chinese Fisheries, 2021(6): 20-31.
- [2] 吴江春, 王虎虎, 徐幸莲. 基于机器视觉的鸡胴体断翅快速检测技术[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 253-261.
WU J C, WANG H H, XU X L. Rapid detection technology for broken-winged broiler carcass based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(22): 253-261.
- [3] 林艾光, 孙宝元, 矢田贞美. 基于机器视觉的虾夷扇贝分级检测方法研究[J]. 水产学报, 2006(3): 397-403.
LIN A G, SUN B Y, YADA S. Studies on the detecting method of scallop grading based on machine vision[J]. Journal of Fisheries of China, 2006(3): 397-403.
- [4] 郭常有, 曹广斌, 韩世成, 等. 基于图像处理技术的扇贝尺寸及位置自动识别[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(6): 578-582.
GUO Y C, CAO G B, HAN S C, et al. Automatic measurement of size and location in scallop based on image processing[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(6): 578-582.
- [5] 包振民, 王心园, 黄晓婷, 等. 一种自动化贝类表型分析系统: CN202110185624.5[P]. 2021-07-23.
BAO Z M, WANG X Y, HANG X T, et al. Automatic shellfish phenotype analysis system: CN202110185624.5[P]. 2021-07-23.
- [6] 李红. 海参等级自动分选系统设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 9.
LI H. Design and implementation of sea cucumber grade automatic selecting system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 9.
- [7] 曹先庆, 王志鹏, 吴富村. 基于机器学习算法的牡蛎肥满度分类[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5 511-5 517.
CAO X Q, WANG Z P, WU F C. Classification of plumpness in crassostrea gigas based on the machine learning[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(17): 5 511-5 517.
- [8] LEE D J, XU X Q, LANE R M, et al. Shape analysis for an automatic oyster grading system[J]. Proc Spie, 2004, 5 606: 27-36.
- [9] XIONG G, LEE D J, MOONK R, et al. Shape similarity measure using turn angle cross-correlation for oyster quality evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 178-186.
- [10] 申铨京, 刘翔, 陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 144-149.
SHEN X J, LIU X, CHEN H P. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 144-149.
- [11] 弋伟国. 基于机器视觉的枸杞分级分选机控制系统研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016: 28.
YI W G. Research on the control system of wolfberry sorting machine based on machine vision [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016: 28.
- [9] WANG C X, ZHU X Z. 3D numerical simulation of flow and mixing performances in novel tri-screw and four-screw extruders [C]// 2018 7th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (ICAMCS 2018). [S. l.]: Clausius Scientific Press, 2019: 178-183.
- [10] 赵玉莲, 李鑫, 安琪, 等. 非等温条件下啮合同向双螺杆挤出过程数值模拟分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 76-79.
ZHAO Y L, LI X, AN Q, et al. Numerical simulation analysis of meshing twin-screw extrusion process under non-isothermal conditions[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 76-79.
- [11] ZHANG X M, FENG L F, CHEN W X, et al. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder [J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(9): 1 772-1 783.
- [12] 朱晓旭, 刘福胜, 宋修艳. 聚乳酸材料的化学解聚研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(9): 176-181.
ZHU X X, LIU F S, SONG X Y. Research progress on chemical depolymerization of polylactic acid materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(9): 176-181.
- [13] 彭义波, 张玉清, 张旭浩, 等. 在特定温控系统下 PLA 和 PE-LD 吹膜过程的温度场研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(5): 46-51.
PENG Y B, ZHANG Y Q, ZHANG X H, et al. Study of the temperature field of PLA and PE-LD film blowing process under a specific temperature control system[J]. China Plastics, 2017, 31(5): 46-51.
- [14] 李成, 薛晓俊, 胡建树, 等. 啮合同向双螺杆挤出机结构参数对混合关键参量的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(10): 2 640-2 648.
LI C, XUE X J, HU J S, et al. Effect of structural parameters of meshing twin-screw extruder on key parameters of mixing[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(10): 2 640-2 648.
- [15] 韩海川. 螺杆挤出机螺杆结构对挤出流场影响的数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2020: 80.
HAN H C. Numerical simulation of the influence of screw structure on extrusion flow field of screw extruder[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 80.
- [16] 周彦豪. 聚合物加工流变学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 43-51.
ZHOU Y H. Fundamentals of rheology in polymer processing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 43-51.
- [17] 于森, 郭树国, 王丽艳. 二阶非对称双螺杆挤出机三维仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 111-114.
YU M, GUO S G, WANG L Y. Three-dimensional simulation of a second-order asymmetric twin-screw extruder [J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 111-114.

(上接第 64 页)