DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90259 [文章编号] 1003-5788(2023)03-0066-06

正向螺纹元件组合对反向螺纹元件熔体输送特性的影响

Effcets of forward threaded element combination on melt transfer characteristics of reverse threaded element

刘忠尧[1,2] 黄志刚[1,2] 代祥基[1,2]

LIU Zhong-yao[1,2] *HUANG Zhi-gang*[1,2] *DAI Xiang-ji*[1,2]

杨亚楠[1,2] 张一明[1,2]

YANG Ya-nan[1,2] *ZHANG Yi-ming*[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:探究熔体输送段正向螺纹元件间的不同组合对反向螺纹元件的熔体输送特性的影响。**方法:**通过改变导程构建两种不同模型,使用 SolidWorks 软件建立三维模型,使用 Polyflow 软件对两种模型在熔体输送段的挤出过程进行数值模拟,分析不同导程下螺纹元件的螺槽宽度及螺棱厚度对流场的影响及不同转速下流场的变化,通过实验验证转速对物料混合效果的影响。**结果:**所构建的模型均可使熔体通过反向螺纹元件;在相同螺杆转速下,由大导程螺纹元件构建的模型一建压能力和输送能力强于由小导程构建的模型二;模型一在分散混合能力上优于模型二,在分布混合能力上弱于模型二;在两端压差相同的情况下,增加转速可以提高物料的分散混合效果。**结论:**在聚乳酸改进加工过程中采用模型一且提高螺杆转速可进一步破碎物料,提高挤出物的质量。

关键词:聚乳酸;组合螺杆;导程;熔体输送段;转速

Abstract: Objective: Explore the effects of different combinations of forward screw elements in the melt conveying section on the melt conveying characteristics of reverse screw elements. **Methods:** Two different models were constructed by changing the lead, using SolidWorks software to establish a three-dimensional model, and using Polyflow software to numerically simulate the extrusion process of the two models in the melt conveying section. The effects of the screw groove width and screw edge thickness of the screw elements on the flow field under different lead lengths and the changes in the flow field at different rotational speeds were analyzed, and the effects of rotational speed on the material mixing were verified through experiments. **Results:** The constructed model can allow the melt to pass through the reverse threaded element. At the same screw speed, the pressure building capacity and conveying capacity of model one constructed from large lead screw elements were stronger than that of model two constructed from small lead screw elements. Model one was superior to Model two in terms of decentralized mixing ability, and weaker than Model two in terms of distributed mixing ability. Under the same pressure difference at both ends, increasing the rotational speed could improve the dispersion and mixing effects of materials. **Conclusion:** Using model one in the improved processing of polylactic acid and increasing the rotational speed of the screw can further crush the material and improve the quality of the extrusion.

Keywords: polylactic acid; combined screw; lead; melt conveying section; speed

聚乳酸是一种环境友好型材料,是从可再生的植物资源(玉米、小麦)中提取淀粉制成的。因其无毒及生物可降解性被用于各种食品包装中,是能够代替一次性塑料饭盒等的环保材料[1-2]。同向双螺杆挤出机由于其繁多的元件种类、灵活的积木组合已成为聚乳酸改性加工的主要设备。在挤出机加工聚乳酸的过程中,不同的螺杆元件组合对熔体的输送特性不同,进而影响聚乳酸的挤出质量。周炳斌等[3]研究发现,在齿形盘下游放置反向元件可以增强其分布混合能力,挤出物的性能好。韩海川等[4]研究发

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:32172277)

作者简介:刘忠尧,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:2021-11-02 **改回日期:**2023-03-17

现,组合螺杆的混合效果优于常规螺杆,带反向螺纹的组合螺杆有更好的分散混合能力。陈键等[5]研究了组合螺杆对聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙塑料合金材料力学性能的影响,发现在均化段减少输送元件,适当增加剪切元件,可以增强混合,提升合金材料的弯曲性能。

目前对同向双螺杆挤出机的研究多为分析不同组合螺杆的混合性能[6-8]。而在挤出机的熔体输送段,为了使物料能够顺利通过口模挤出样条,或通过反向螺纹元件进一步均化,都需要上游元件建立足够的压力。正向螺纹元件是输送元件,有良好的建压能力,但在挤出过程中,仅在反向元件或口模前端放置一段正向螺纹元件,输送效果较差,存在熔体未充满螺槽的情况。因此,实际生产过程中,在该区段前放置导程递减的正向螺纹元件组合,使第二段元件内熔体充满螺槽,从而在组合螺杆末端形成高压[9]。目前有关聚乳酸挤出过程中正向螺纹元件组合的合适导程区间研究尚未见报道。

研究拟将 3 种正向螺纹元件与反向螺纹元件进行组合,构建两种不同的螺杆模型,通过 SolidWorks 软件构建三维模型,采用实验室聚乳酸的熔体参数[10],使用 Polyflow 软件[11]模拟聚乳酸熔体在模型中的挤出过程,根据不同模型各场量的变化,对比分析不同导程组合的正向螺纹元件对反向螺纹元件的熔体输送特性的影响;并进一步改变螺杆转速,研究转速对模型场量的影响,从而研究出合适的螺纹元件组合方式,以期为同向双螺杆挤出机生产聚乳酸提供依据。

1　理论模型

鉴于螺杆设计经验,在熔体输送段螺纹元件的螺槽深度不变,螺杆区段属于等深变距螺杆。故根据啮合同向双螺杆几何学[12],由给定的螺纹头数,螺杆外圆半径及中心距可以确定螺杆端面形状,再选择起始角,变更导程即可完成三维模型的构造。

1.1　物理建模

根据等深变距螺杆区段螺槽由宽变窄的原则,设计模型时,将导程分别取 40,30,20 mm,由大到小两两组合同时在正向螺纹元件的末端增加反向螺纹元件,由此完成模型设计,反向螺纹元件导程为 25 mm,模型分为由大导程元件组合而成的模型一以及由小导程元件组合而成的模型二。经中心修正的螺纹元件端面参数见表 1。

模型结构图如图 1 所示,模型参数见表 2。

1.2　数学模型

考虑到熔体输送段双螺杆挤出过程的实际工况和聚合物的物料特性,做出假设:

(1) 流道中熔体为不可压缩的非牛顿流体。

(2) 流道中的熔体雷诺数小,为稳定层流且充满流道。

(3) 流道内为稳定的等温流场。

(4) 流道中流体的惯性力和重力忽略不计。

(5) 流道壁面无滑移。

基于上述假设,计算聚乳酸流体的连续性方程、动量方程,本构方程可简化为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\mu}=0, \tag{1}$$

$$-\nabla \cdot P+\nabla \cdot T=0, \tag{2}$$

式中:

∇——哈密顿算子;

$\boldsymbol{\mu}$——速度矢量, m/s;

P——流体静压力,Pa;

T——偏应力张量。

本构方程选取 Bird-Carreau 模型,该模型能较好反映聚乳酸熔体在不同剪切速率下的非牛顿流体特性。

$$\eta(\dot{\gamma})=\eta_0\,(1+\lambda_c^2\dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}。 \tag{3}$$

式中:

η_0——熔体在零剪切下的黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$——剪切速率,s^{-1};

n——非牛顿指数;

λ_c——松弛时间,s。

采用实验室内 190 ℃的聚乳酸为模拟材料,其物性参数为:$\eta_0=2\ 504.235$、$\lambda_c=0.060\ 7$,$n=0.253$。

1.3　有限元模型

为提高计算精度,降低收敛困难度,采用 Gambit 软

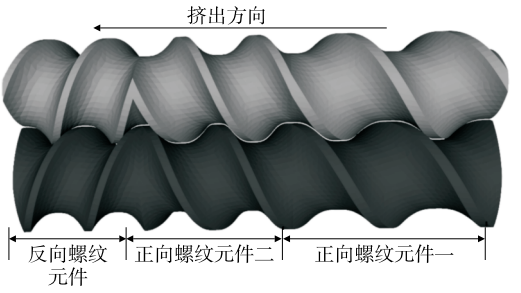


图 1　螺杆模型结构图

Figure 1　Structure diagram of screw model

表 1　端面参数

Table 1　End face parameters　　mm

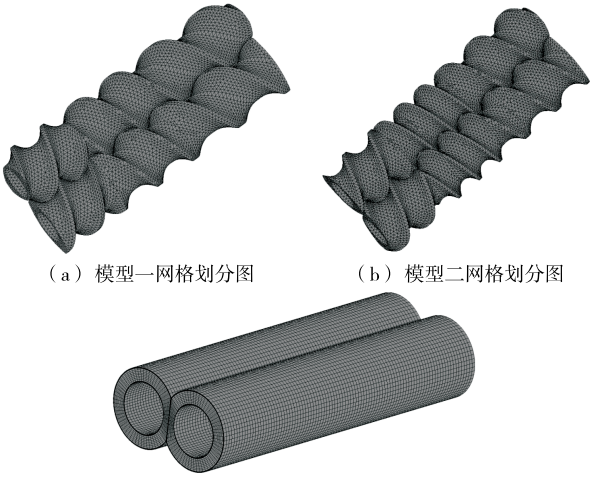
螺杆外径	螺杆内径	中心距	间隙
10.8	7	17.8	0.2

表 2　模型几何参数

Table 2　Model geometric parameters

组合螺杆	头数	第一段螺纹元件/mm	第二段螺纹元件/mm	第三段螺纹元件/mm	流道长度/mm
模型一	2	SE22/40/40	SE22/30/30	SE22/25/25L	95
模型二	2	SE22/30/40	SE22/20/30	SE22/25/25L	95

件对螺杆模型和流道进行单独网格划分，对于螺杆模型部分采用非规则四面体单元进行网格划分；对于流道部分，为提高软件在螺杆啮合区和螺杆与流道间隙的计算准确度，采用六面体单元对其进行局部网格加密[13]。两种模型及流道的网格划分如图 2 所示，其网格数和节点数见表 3。



（a）模型一网格划分图　（b）模型二网格划分图

（c）流道网格划分图

图 2　两种模型及流道的网格划分

Figure 2　Mesh division of two models and flow channels

表 3　两种模型和流道的网格、节点数

Table 3　Mesh and node number of two models and runners

项目	模型 A	模型 B	螺杆流道区域
网格数	35 291	35 431	182 400
节点数	9 670	9 804	194 784

1.4　边界条件

（1）压力边界条件：流道的出入口边界压力设置为零，即出入口压差为零，流体自由流动。

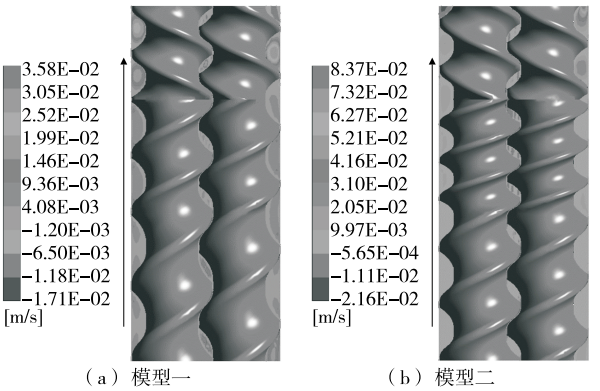
（2）速度边界条件：机筒静止，流道壁面无滑移，螺杆逆时针旋转，转速为 60 r/min。

2　仿真分析

使用 Polyflow 软件计算不同模型在相同转速及出入口压差下熔体输送段内挤出聚乳酸熔体的三维等温流场，从而统计分析不同结构的模型混合挤出聚乳酸熔体的性能。并取距螺杆轴心正上方 6.22 mm 的直线为参考线，该线位于螺杆与机筒内壁的间隙中，用来详细讨论流道内各流场的变化，进一步分析两种模型的输送特性。

2.1　速度场分析

由图 3 可知，两种模型皆可以在反向螺纹元件处建立足够的压力使聚乳酸熔体通过，虽然两个模型转速相同，但在正向螺纹元件区段上模型一的轴向速度高于模型二，且模型一仅在啮合区的螺棱处以及机筒和螺杆间隙的螺棱处存在数值较小的负轴向速度即漏流，而模型二除模型一所述情况外在第二段正向螺纹元件处明显看出啮合区存在较大面积的负轴向速度即回流，所以模型二的分散混合能力高于模型一。



（a）模型一　（b）模型二

图 3　$Y=0$ mm 截面处轴向速度云图

Figure 3　Axial velocity cloud diagram at $Y=0$ mm section

为更清楚地分析模型速度场的整体情况，取参考线处的轴向速度值作啮合区轴向速度曲线图，由图 4 可知，两个模型的轴向速度随聚乳酸熔体沿挤出方向流动不断波动，在正向螺纹元件区段波峰为螺槽段，波谷为螺棱段，反向螺纹元件段则相反，其中模型一轴向速度波动程度、速度峰值及波峰波谷宽度均大于模型二，是因为模型一的螺槽宽以及螺棱厚度均大于模型二，流体在运动过程中的速度梯度变化大，持续时间长。通过计算，模型的出口体积流率分别为 1.98×10^{-6}，1.8×10^{-6} m^3/s，与图 3 的情况相吻合，即模型二在流体速度上小于模型一。

由图 5 可知，随着转速的增加，两模型的出口体积流率不断增加，其中由大导程组成的模型一在数值上明显高于模型二，将两模型的出口体积流率折线图拟合可得，模型一、二的直线方程分别为 $y=1.652\text{E}-07+3.257\text{E}-08x$，$y=1.842\text{E}-07+2.708\text{E}-08x$，模型一的出口体积

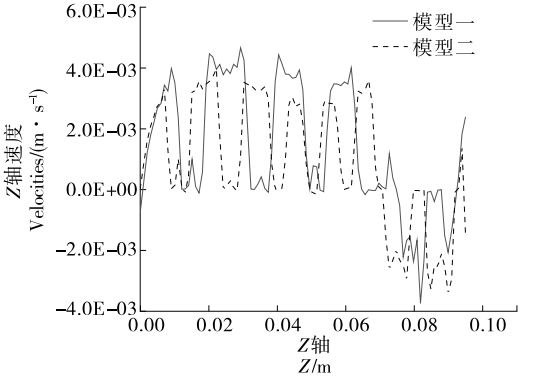


图 4　啮合区轴向速度曲线图

Figure 4　Axial velocity curve in meshing area

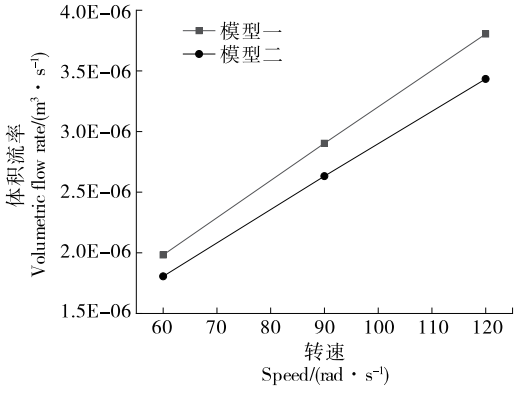


图 5　不同转速下的模型出口体积流率

Figure 5　Model outlet volume flow rate at different speeds

流率直线方程斜率大于模型二,由此可得大导程元件的输送能力在相同速度下强于小导程元件的,与文献[14]的研究结果相符。

2.2　压力场分析

由图 6 可知,模型一和模型二在正向螺纹元件区段中压力梯度为负,在反向螺纹元件区段中压力梯度为正,压力曲线在上升过程中随螺棱和螺槽的交替振荡而上升,压力在正向螺纹区段和反向螺纹区段之间达到最大,其中模型二的流道压力上升程度高于模型一,但在正向螺纹元件和反向螺纹元件的相交截面处压力低于模型一,这是由于螺纹元件导程不同,在该截面处的端面形状不一致导致的。

由图 7 可知,模型二的推力面在 Y 轴下方,故高压位于下啮合区,模型一的高压在上啮合区,该截面处的平均压力为 2.04 MPa,模型二的为 2.17 MPa。

由图 8 可知,模型二的压力曲线大致上高于模型一,但模型一的压力最大值高于模型二,且模型一的压力梯度变化也高于模型二。由于模型二的螺槽宽度小于模型一,在相同的螺杆速度下流体在模型二流道的充满速度高于模型一,螺槽压力上升快,由此可得模型二在流道内

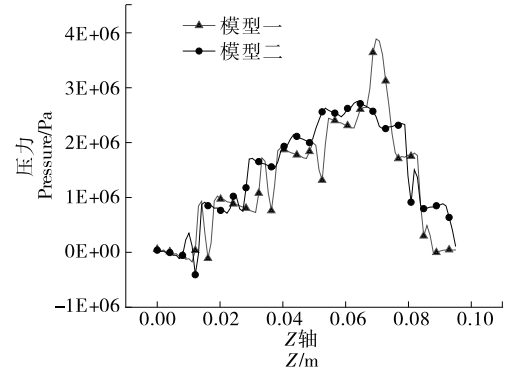


图 6　啮合区压力变化曲线图

Figure 6　Curve of pressure change in meshing area

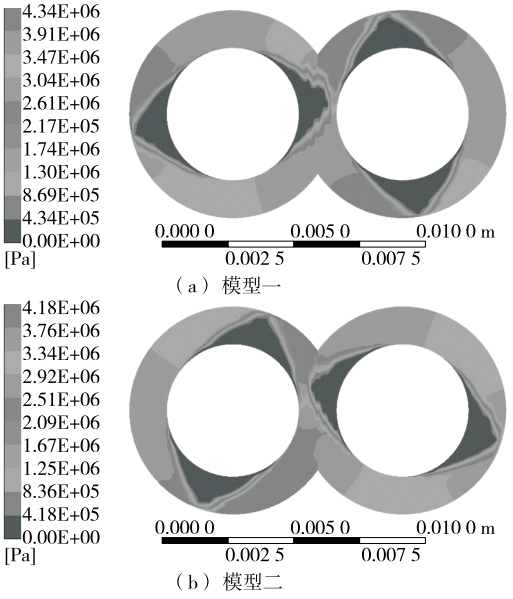


图 7　Z=70 mm 处截面压力云图

Figure 7　Sectional pressure cloud diagram at Z=70 mm

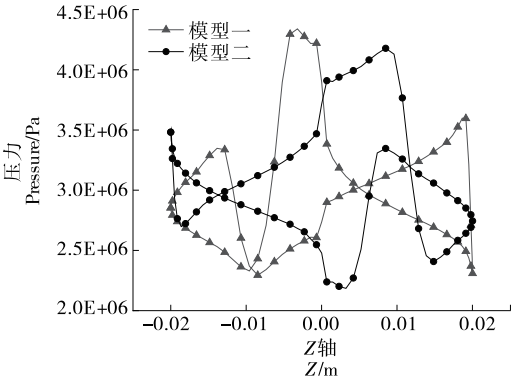


图 8　截面压力展开曲线图

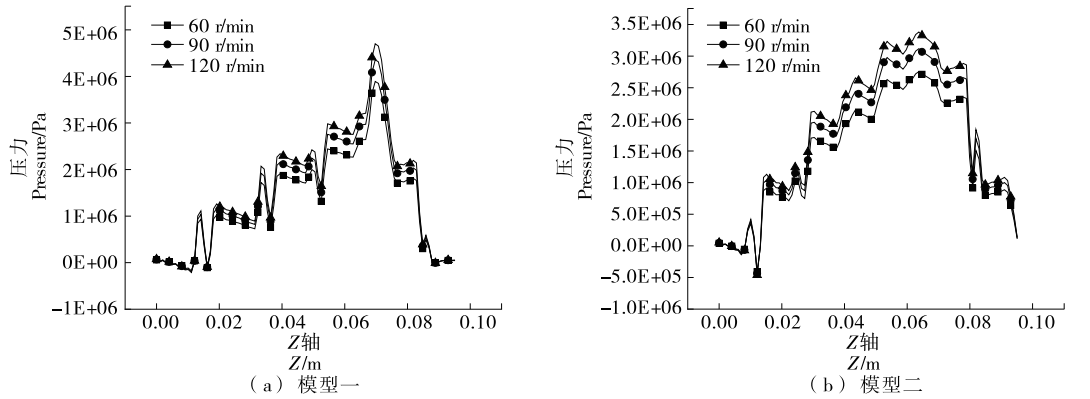
Figure 8　Sectional pressure development curve

平均压力大于模型一。模型一对于反向螺纹元件的建压能力高于模型二,与速度场分析一致,因为反向螺纹元件没有正向输送能力,只有在螺纹元件上游建立足够的压力才能使物料通过反向螺纹元件,建压能力大,输送能力就强,所以大导程元件的建压能力高于小导程元件,即模型一的建压能力高于模型二。

由图 9 可知,在两端压差不变的情况下,流道内的压力随转速的增加而增加,其中流道压力数值的上升速度在转速从低速到中速这一过程中上升快,由中速向高速变化时上升较小,由此表明流道压力值并不随转速的增大而一直增大。此外,由小导程组成的模型二在速度变化时流道压力变化大于模型一,说明小导程螺纹元件的流道压力受转速影响较大。

2.3　剪切速率场分析

由图10可知,模型一与模型二在啮合区的剪切速率



（a）模型一　　（b）模型二

图 9　不同转速下两模型啮合区压力变化曲线图

Figure 9　Pressure change curve of meshing area of two models at different speeds

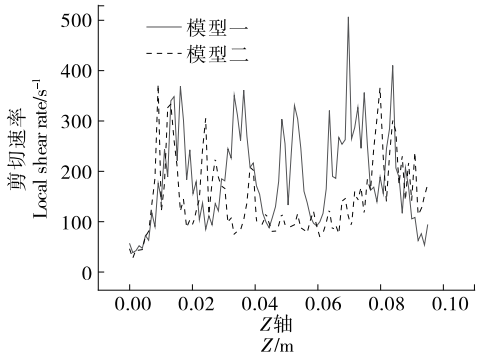
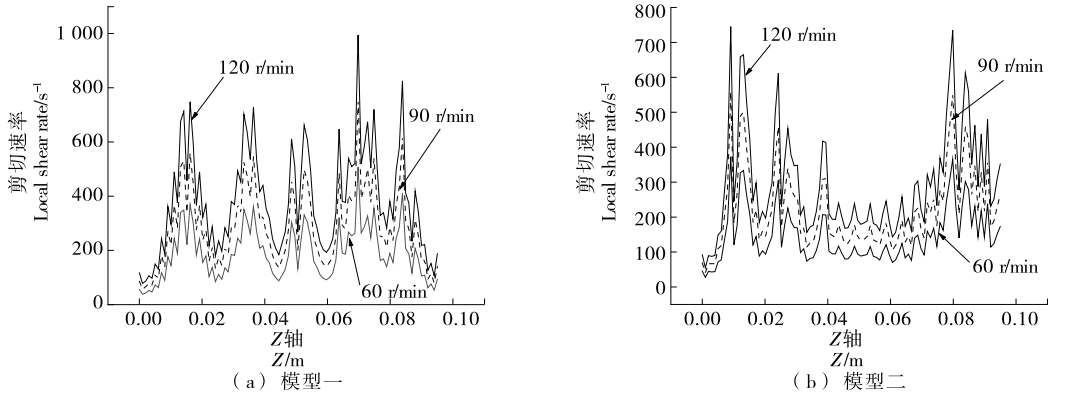


图 10　啮合区剪切速率曲线图

Figure 10　Shear rate curve in meahing zone

变化非常剧烈，在正向螺纹元件区段剪切速率波动及数值呈下降趋势，剪切速率在螺棱处增大，在螺槽处下降。其中模型二的剪切数值下降非常明显，且模型二的剪切速率数值在整体上低于模型一，这是因为模型二的螺棱较短，速度波动幅度及梯度均小于模型一，故模型二的剪切速率低。因此，模型一的分散混合能力强于模型二。

由图 11 可知，两模型的剪切速率均随转速的增加而增加，表明转速的提高可以增加物料在挤出机中的分散混合效果，其中模型一的剪切速率值随转速的增加程度远高于模型二，说明转速对大导程螺纹元件的剪切速率影响较大。



（a）模型一　　（b）模型二

图 11　不同转速下啮合区剪切速率曲线图

Figure 11　Shear rate curve of meshing area under different rotational speeds

2.4　黏度场分析

由图 12 可知，模型二的黏度数值高于模型一，剪切速率较小处，聚乳酸熔体的黏度偏大；剪切速率较高处，聚乳酸熔体的黏度偏小，符合聚乳酸熔体剪切变稀的特性[15]，说明黏度随剪切速率的增大而减小。

3　实验验证

3.1　试验材料及设备

聚乳酸 4032D：清料，上海郡冉塑料有限公司；

轻质碳酸钙粉末：晋城市太行钙品有限公司；

啮合同向双螺杆挤出机：DT-20-44 型，南京鼎天机械制造有限责任公司；

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：TESCANVEGAⅡ型，捷克泰思肯公司。

3.2　试验方法

将聚乳酸粒料干燥处理后与轻质碳酸钙粉料以 $m_{聚乳酸}$ ∶ $m_{碳酸钙}$ 为 100 ∶ 1 进行充分混合，在螺杆转速分

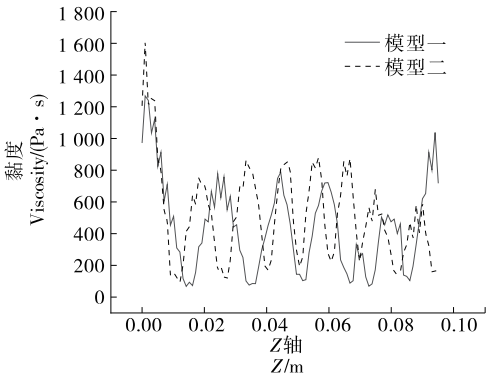


图 12　啮合区黏度变化曲线图

Figure 12　Viscosity change curve in meshing area

别为 60,90,120 r/min 下挤出物料,将挤出物料通过破碎机破碎成小颗粒状,然后使用注塑机将小颗粒制成标准的力学样条,将力学样条进行冲击脆断并对该试样断面做喷金处理,通过扫描电子显微镜观察冲击断面表面的形貌。

3.3　试验结果与分析

由图 13(a)可知,断面出现明显孔洞,孔洞尺寸不一且分布杂乱无章,说明低速下聚乳酸和碳酸钙的相容性较差,使得碳酸钙分散相从基体相中析出;图 13(b)中,断面上较大空洞已消失,剩余孔洞较小且分布较宽,相区界面模糊;图 13(c)中,断面更加细腻,相畴尺寸更小,说明提高转速可以提高螺杆的剪切效果,增强物料的混合程度,促进材料均化,减小碳酸钙的分散相尺寸。

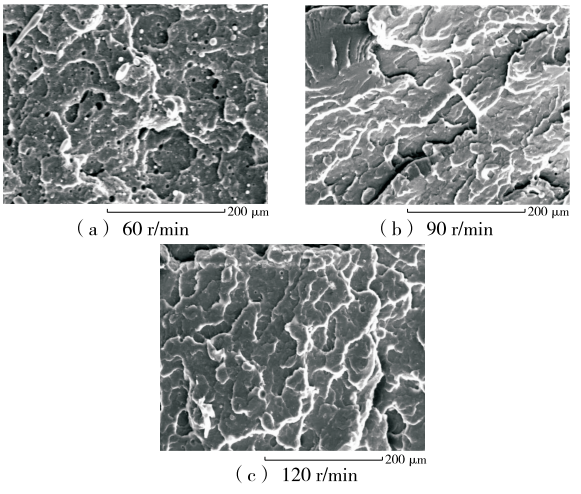


图 13　断面扫描电镜图

Figure 13　Cross section SEM

4　结论

使用 Polyflow 软件对不同正向螺纹元件组合的反向螺纹元件在熔体输送段挤出过程进行数值模拟,并进行不同转速下螺杆混合试验。结果表明,下游放置相同导程的反向元件时,大导程的正向螺纹元件组合的建压和输送能力优于小导程的,且具有较好的分散混合能力,而小导程的正向螺纹元件组合具有较好的分布混合能力。螺杆转速的提高可以有效增加物料的混合效果,提高聚乳酸和碳酸钙的相容程度,增强螺杆的剪切能力。研究选取了 3 种不同的转速参数,但对于聚乳酸挤出加工而言,过高的转速会导致部分聚乳酸加工温度过高产生降解,研究未给与最合适的挤出机工作参数,未来可进行多次模拟与试验,反复对比,以期获得更准确的工艺参数。

参考文献

[1] 孟志芬. 聚乳酸类材料的性能与应用[J]. 河南职业技术师范学院学报, 2004(1): 51-53.
MENG Z F. The properties and applications of polylactides materials[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2004(1): 51-53.

[2] 贾世玲. 聚乳酸的增韧改性及其耐低温性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022: 2-5.
JIA S L. Study on toughening modification of poly(lactic acid) and its low temperature resistance [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022: 2-5.

[3] 周炳斌, 马秀清, 黄凤春, 等. 回流对不相容体系共混物分布混合效果的影响[J]. 中国塑料, 2021, 25(8): 94-98.
ZHOU B B, MA X Q, HUANG F C, et al. Effect of backflow on the distributive mixing performance of incompatible polymer blends[J]. China Plastics, 2011, 25(8): 94-98.

[4] 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.
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.

[5] 陈健, 梁全才, 刘小林, 等. 挤出加工工艺对 PC/ABS 合金力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(2): 59-62.
CHEN J, LIANG Q C, LIU X L, et al. Effects of extrusion processing technology on mechanical properties of PC/ABS alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2): 59-62.

[6] 贾世魁, 董林福. 销钉双螺杆挤出机的结构研究与流场分析[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(1): 57-60.
JIA S K, DONG L F. Structure research and flow field analysis of pin twin screw extruder[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(1): 57-60.

[7] 罗京科, 李志杰. 同向双螺杆挤出机螺杆组合对 EPS 再生造粒的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3): 55-60.
LUO J K, LI Z J. Effects of co-rotating twin-screw extruder combination on recycling and granulation of EPS[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3): 55-60.

[8] 高可正, 胡蝶, 丁筠, 等. 挤出机螺杆结构对 PET 纤维母粒分散性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5): 100-104.
GAO Z K, HU D, DING Y, et al. Effect of extruder on pet fiber masterbatch mixing performance [J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5): 100-104.

(下转第 174 页)

Sciences, 2014, 53(13): 3 156-3 159.

[9] 王娜, 张昊宇, 宁灿灿, 等. 艾草黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 174-179, 240.
WANG N, ZHANG H Y, NING C C, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of mugwort flavonoids [J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 174-179, 240.

[10] 乌日娜, 钟秋平, 李雯. 不同酵母发酵的火龙果酒抗氧化活性及颜色变化[J]. 中国酿造, 2017, 36(1): 102-106.
WU R N, ZHONG Q P, LI W. Antioxidant activity and color change of dragon fruit wine fermented with different yeasts[J]. China Brewing, 2017, 36(1): 102-106.

[11] MARXEN K, KLOUS H V, EBASTIAN L S, et al. Determination of DPPH radical oxidation caused by methanolic extracts of some microalgal species by linear regression analysis of spectrophotometric measurements[J]. Sensors, 2007, 7(10): 2 080-2 095.

[12] 刘平怀, 刘洋洋, 时杰, 等. ASE 联合 DPPH 法比较研究 13 种热带水果的抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(11): 9-12.
LIU P H, LIU Y Y, SHI J, et al. A Comparative study of antioxidant activities of 13 tropical fruits by ASE combined with DPPH method[J]. Food Research and Development, 2010, 31(11): 9-12.

[13] 白永亮, 林柔敏, 吴采瑛, 等. 基于黄酮积累的苦荞萌发工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 广东农业科学, 2022, 49(4): 135-142.
BAI Y L, LIN R M, WU C Y, et al. Optimization of buckwheat germination process based on flavonoid accumulation and its antioxidant activity[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(4): 135-142.

[14] 张新振, 杨涛, 蒋依婷, 等. 蓝莓渣复合籼米膨化工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 194-200.
ZHANG X Z, YANG T, JIANG Y T, et al. Optimization and antioxidant activity of blueberry residue[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 194-200.

[15] 冯俊旗, 张永生, 魏新军. 杜康酒香气成分的 GC/MS 分析[J]. 光谱实验室, 2013, 30(2): 847-849.
FENG J Q, ZHANG Y S, WEI X J. GC/MS analysis of aroma components of Dukang wine[J]. Spectroscopic Laboratory, 2013, 30(2): 847-849.

[16] 张锦程, 余佶, 麻成金, 等. GC-MS 结合 ROAV 分析评价加工工艺对藤茶香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 20-25, 31.
ZHANG J C, YU J, MA C J, et al. GC-MS was combined with ROAV analysis to evaluate the influence of the processing process on the aroma composition of rattan tea[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 20-25, 31.

[17] 马晓斌, 陈露, 刘颖, 等. 白酒中己酸乙酯检测方法研究进展[J]. 酿酒, 2022, 49(2): 54-55.
MA X B, CHEN L, LIU Y, et al. Research progress on detection method of ethyl caproate in liquor[J]. Brewing, 2022, 49(2): 54-55.

[18] 郭燕, 邓杰, 任志强, 等. 响应面优化酿酒酵母与窖泥酯化细菌协同发酵产丁酸乙酯和己酸乙酯[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 209-217.
GUO Y, DENG J, REN Z Q, et al. Response surface optimization Saccharomyces cerevisiae and cellar slurry esterification bacteria synergistic fermentation of ethyl butyrate and ethyl caproate[J]. Food Science, 2021, 42(10): 209-217.

[19] 江锋, 赵振宇, 聂叶, 等. 高效液相色谱法对白酒中的 *L*-乳酸和 *D*-乳酸的手性分离和测定[J]. 酿酒科技, 2019(9): 93-97.
JIANG F, ZHAO Z Y, NIE Y, et al. Chiral Separation and determination of *L*-lactic acid and *D*-lactic acid in liquor by high performance liquid chromatography [J]. Brewing Science and Technology, 2019(9): 93-97.

(上接第 71 页)

[9] 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: 90-102.
GENG X Z. Twin screw extruders and its application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003: 90-102.

[10] 李梦林, 刘凯, 黄志刚, 等. 聚乳酸用单螺杆挤出机熔体输送数值模拟研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(11): 102-107.
LI M L, LIU K, HUANG Z G, et al. Numerical simulation of conveying sections of a special single screw extruder for PLA[J]. China Plastics, 2015, 29(11): 102-107.

[11] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 10-74.
BI C. Polyflow software fundamentals and its application to twin screw extrusion simulation processes[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 10-74.

[12] 张杨. 双螺杆挤出机螺杆参数化 CAD 的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2006: 15-18.
ZHANG Y. The study on screw's parametric CAD of twin-screw plastic extruder[D]. Suzhou: Soochow University, 2006: 15-18.

[13] 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 Q, HUANG Z G, HU S Z, et al. Simulation in counter-rotating twin screw extruder by adaptive grid technology [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 91-97.

[14] 董中华, 江波, 郭建, 等. 同向双螺杆挤出机中不同导程螺纹元件的流动和混合模拟[J]. 橡塑技术与装备, 2005(7): 1-5.
DONG Z H, JIANG B, GUO J, et al. Varied flow and blended simulation of guiding screw thread component in the same direction twin screw extruder [J]. Plastics Technology and Equipment, 2005(7): 1-5.

[15] 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 of meshing co-rotating twin screw extrusion process under non-isothermal conditions[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 76-79.