DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.04.015

非等温条件下啮合同向双螺杆挤出过程数值模拟分析

Numerical simulation of meshing co-rotating twin screw extrusion process under non-isothermal conditions

赵玉莲[1,2] 李 鑫[1,2] 安 琪[1,2] 黄志刚[1,2]

ZHAO Yu-lian[1,2] *LI Xin*[1,2] *AN Qi*[1,2] *HUANG Zhi-gang*[1,2]

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院,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 Material and Mechanical Engineering, 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:采用 SolidWorks 建立啮合同向双螺杆三维物理模型,通过改变螺杆挤出机加工聚乳酸时的转速,在非等温的模拟条件下,通过 polyflow 软件对其进行相应的模拟分析,对比不同转速对聚乳酸加工时产生的影响。结果表明:在非等温条件下,温度在挤出方向上线性增加,并且温度在 Z 轴截面上沿径向向外逐渐增大。通过对比不同转速下的流场分析,发现随着转速的增大,螺槽内出现较大的温差,当转速达到 240 r/min 时,聚合物出现部分降解,对生产加工产生影响;对剪切速率场和黏度场的对比分析也进一步验证了两者的相关性。

关键词:同向双螺杆挤出机;非等温;转速;剪切速率;黏度;数值分析

Abstract: The SolidWorks 3D modeling software was used to construct the meshing co-rotating twin-screw physical model. By changing the rotational speed of the PLA processed by the screw extruder, the non-isothermal flow analysis was used to carry out the corresponding numerical simulation in the polyflow software. Compare the effect of speed on the processing of PLA. The numerical results show that under non-isothermal conditions, the temperature increases linearly in the direction from the inlet to the outlet, that is, in the extrusion direction. On the Z-axis section, the temperature gradually increases outward in the radial direction. By comparing the flow field analysis at different speeds, it can be concluded that with the increase of rotational speed, there is a large temperature difference in the groove. When the rotational speed reaches 240 r/min, the polymer is partially degraded, which is not conducive to production and processing. The correlation between the shear rate field and the viscosity field is further verified by the comparative analysis.

Keywords: co-rotating twin-screw extruder; non-isothermal; speed; rate of shear; viscosity; numerical analysis

聚乳酸(PLA)是一种以乳酸为原料且具有良好的生物降解性和生物相容性的环境友好型高分子材料,近年来的研究和应用[1]越来越广泛。啮合同向双螺杆挤出机作为 PLA 加工设备之一,被广泛应用于 PLA 的加工过程中[2]。而螺杆挤出机的加工工艺[3]参数的变化也影响着聚乳酸产品的质量,基于此对流道的分析就尤为重要,然而由于螺纹流道中真实流动情况复杂,因此多普遍采用数值法[4-6]进行分析求解。

目前在对啮合同向双螺杆的模拟分析研究中,多数是在等温流场[7]的前提条件下进行的假设,然而,实际的加工过程中非等温流场应用问题更多,更符合实际运行效果。本研究拟通过对挤出机流道的数值模拟,研究非等温条件下其剪切速率场、黏度场和温度场的变化趋势,通过改变双螺杆转速,对比分析转速对各个物理场带来的影响和规律[7-8],为 PLA 今后的加工生产提供一定的理论依据和指导。

基金项目:北京市自然科学基金—市教委联合资助项目(编号:KZ201810011017);国家重点研发计划(编号:2016YFD0400305)

作者简介:赵玉莲,女,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:2019-02-01

1　理论模型的建立

在运用 polyflow 进行模拟之前,需要通过 SolidWorks 对螺纹元件进行物理建模,螺纹元件的建模是依据啮合同向双螺杆几何学[9],由螺杆外圆半径、螺杆中心距以及螺纹头数确定双螺杆截面形状,选择合适的起始角和螺纹导程得到的。

1.1　几何模型建立

螺杆几何模型的建立,需要螺杆中心距、螺纹元件导程、螺纹元件长度和螺杆外径的参数(其具体参数值:螺杆中心距 18.2 mm;螺纹元件导程 21 mm;螺纹元件长度 21 mm;螺杆外径 22 mm),图 1 为根据各参数建模形成的双螺杆端面曲线图,图 2 为 SolidWorks 中螺杆的三维构型图。

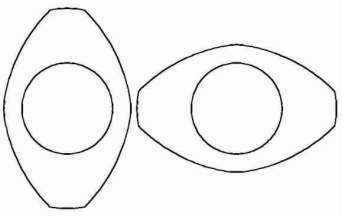


图 1　双螺杆端面曲线

Figure 1　Double screw end curve

图 2　螺杆构型

Figure 2　Screw configuration

1.2　数学模型建立

在非等温流动的模型的设置中,Bird-Carreau 模型[10]既能够反映高聚物熔体在较高或较低剪切速率下的牛顿流体特性,同样也能反映熔体在适中剪切速率下的剪切变稀特性,因此笔者通过采用 Bird-Carreau 模型,对高聚物剪切速率和黏度之间关系进行描述,物料的黏度、剪切速率和温度之间的关系如下[11]:

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

式中:

η_0 ——零剪切应力下物料的黏度,Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率,s^{-1};

n ——非牛顿指数;

λ ——时间常数,s;

η_∞ ——无穷大剪切应力下物料的黏度,Pa·s。

在此基础上,黏度的温度修正由近似 Arrhenius 定律来进行:

$$h(T) = \exp[-\alpha(T - T_\alpha)], \quad (2)$$

式中:

α ——温度系数;

T_α ——参考温度,K。

计算中,物料黏度为:

$$\eta = \eta_{bc}(\dot{\gamma})\,h(T)。 \quad (3)$$

模拟计算中,结果的准确性与参数的设置相关,在式(1)中无穷大剪切黏度 η_∞ 为 0 Pa·s、零剪切黏度 η_0 为 1 000 Pa·s、松弛时间 λ 为 1 s、非牛顿指数 n 为 0.4、温度系数 α 为 0.002 5、参考温度 T_α 为 463.15 K。

1.3　边界条件的设定

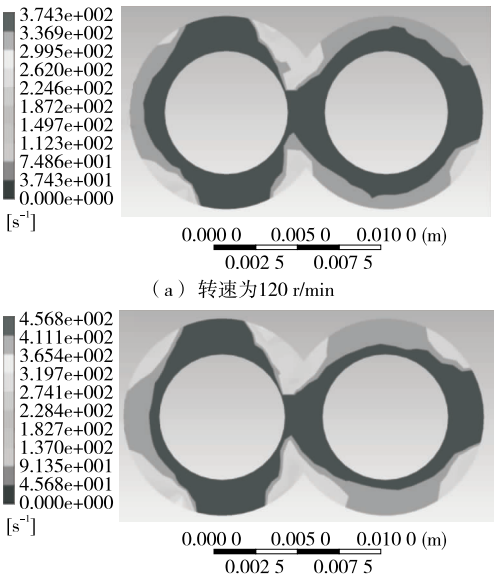
(1) 速度边界条件:入口处为自由流体,因此设边界的法向力和切向力均为 0;出口法向力的设置采用演变算法,切向力为 0;左右孔的设定与左右螺杆边界条件一致;机筒内壁无滑移,因此设定法向和切向速度均为 0。

(2) 热边界条件:在流体区域的入口及出口处,施加流体温度的边界条件,确定流速方向与挤出方向一致,温度不受限制,因 PLA 熔融温度为 190 ℃,设定入口温度为 463.15 K,出口温度为 473.15 K;左右孔壁面需设置相应的热流密度系数和温度;机筒壁面温度边界条件的温度值为 473.15 K。

2　仿真分析

2.1　剪切速率场分析

通过图 3 可以看出:2 种转速下入口截面剪切速率的变化趋势一致,2根螺杆的啮合区处剪切速率值均高于其



(a) 转速为120 r/min

(b) 转速为240 r/min

图 3　剪切速率场云图

Figure 3　Nephogram of shear rate field

他流道区域的值；通过对比图 3(a)和(b)可以看出：当转速较高时，高剪切速率对应的范围较低转速下的剪切速率范围明显增大，且最大剪切速率和最小剪切速率的值均有增大。

在螺杆啮合区，建立一条平行于螺杆轴线的直线，对线上的剪切速率值进行处理，对比 2 种转速下剪切速率值结果如图 4 所示。

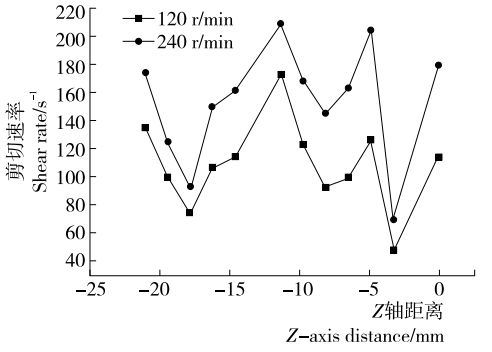


图 4　流道剪切速率场

Figure 4　Flow channel shear rate field

由图 4 可以得出：随着转速的增加，剪切速率值增大，其中啮合区因螺棱作用，其剪切速率值相对较高且变化梯度较大，螺槽处的剪切速率值相对较低且变化梯度较小。2 种转速下，其变化趋势一致，增大转速能明显提高剪切作用。与入口截面处剪切速率场的分析结果一致。

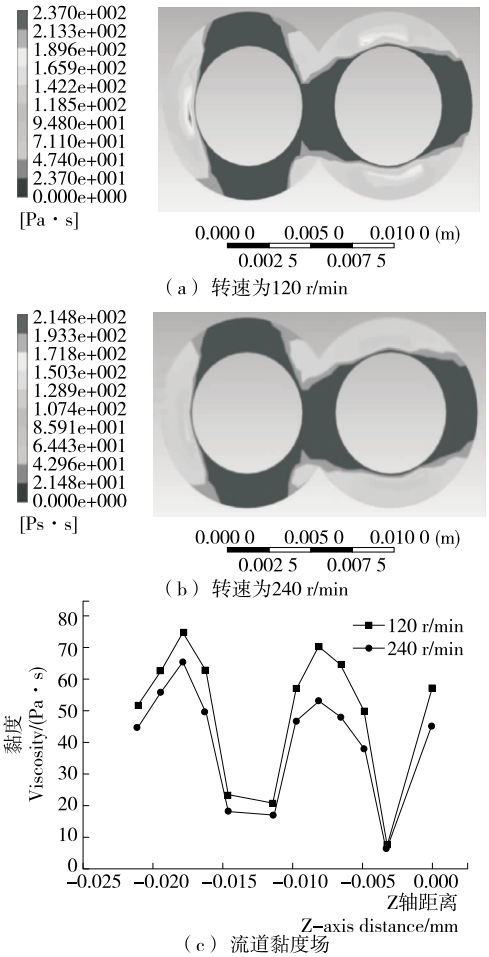
2.2　黏度场分析

聚合物的流动离不开黏度，而黏度受转速和温度影响，研究非等温条件下的黏度场很有必要。低转速的黏度值在近螺杆处明显高于高转速的黏度值，流道中整体黏度值较高，2 种转速下黏度的最值如图 5(c)所示，同剪切速率云图进行对比，相同区域的剪切速率值和黏度值变化趋势相反，对比黏度场云图和剪切速率场云图，剪切速率高的区域黏度值较低，黏度值较高的区域剪切速率值较低，根据黏度 η 的计算公式，黏度随剪切速率的增大而减小；同剪切速率，在螺杆啮合区，建立一条平行于螺杆轴线的直线，对线上的黏度值进行对照，结果如图 5(c)所示，对比图 5(c)流道处黏度值和图 4 的流道处剪切速率值变化趋势，两者曲线变化符合相反理论。

2.3　温度场分析

聚合物的受热，来源于机筒的热传导和聚合物的黏性耗散热，其中以机筒的热传导为主，因此温度沿径向由内向外逐渐升高，机筒壁上的温度以及啮合区的温度偏高；沿挤出方向物料经过剪切作用，由固态转变为熔融态，聚合物平均温度升高。

对比图 6 和图 7，转速为 120 r/min 时，径向温度变化小，分布较为均匀，Z 轴方向温度增加比较平缓；转速为



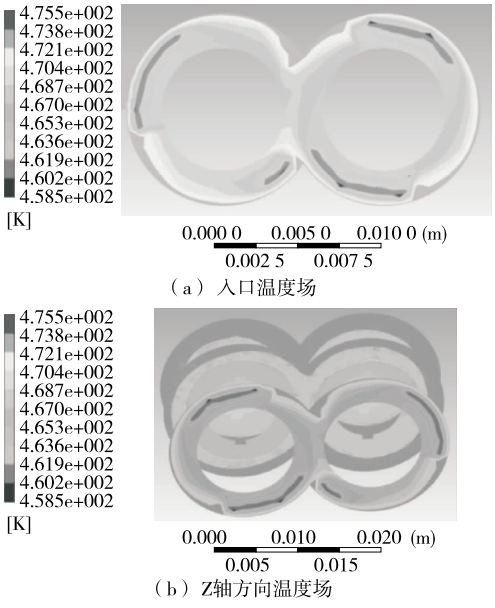
(a) 转速为120 r/min

(b) 转速为240 r/min

(c) 流道黏度场

图 5　黏度场云图

Figure 5　Nephogram of viscosity field

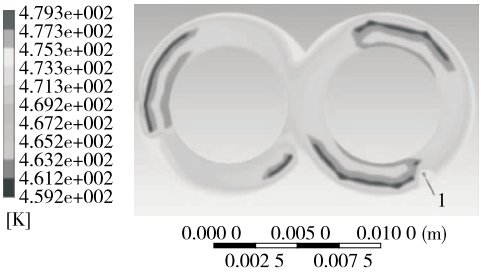


(a) 入口温度场

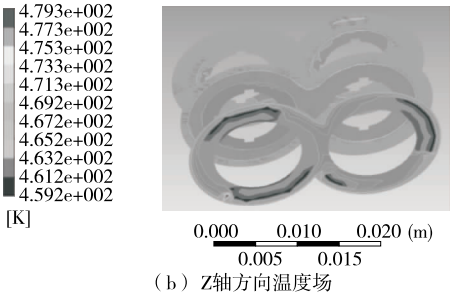
(b) Z轴方向温度场

图 6　转速为 120 r/min 温度场云图

Figure 6　Temperature field nephogram with rotating speed of 120 r/min



（a）入口温度场



（b）Z轴方向温度场

图 7　转速为 240 r/min 温度场云图

Figure 7　Temperature field nephogram with rotating speed of 240 r/min

240 r/min 时，径向的温度变化梯度大，螺槽内的温差较大，会出现局部温度过高，如图 7(a)中的 1 处；温差过大会导致被加工物料不均匀性，影响加工成品质量。而局部温度过高是因为转速较大时聚乳酸所受剪切力过大，导致 PLA 部分降解。在就此螺杆挤出机进行挤出试验时发现，试验过程中转速为 240 r/min 时聚乳酸挤出较稀，进一步验证了模拟结果的准确性。

3　结论

通过 polyflow 模拟分析了 PLA 在啮合同向双螺杆加工过程三维非等温流动条件下的各流场，并通过改变螺杆转速对比分析了剪切速率场、黏度场和温度场，可以得到以下结论：

(1) 螺杆转速影响 PLA 加工过程中的剪切速率和黏度等物理量，转速增大剪切速率明显增加，且啮合区的剪切速率最大值和最小值均有所增大，黏度变化趋势和剪切速率变化趋势相反，当转速为 240 r/min 时，黏度值大面积较低，理论上符合 PLA 剪切变稀的特性，同时与试验时出现的稀化难成型现象一致。

(2) 相较于等温模拟中温度的一致，非等温模拟条件下，螺杆转速对内部 PLA 的加工温度也产生了一定的影响，模拟发现当转速达到 240 r/min 时，内部有部分 PLA 加工温度过高出现降解现象。

(3) 本研究模拟的温度范围一定，未对其他温度范围进行对比研究，未来可以通过改变模拟温度范围进行模拟与试验，确定更加适合 PLA 加工的转速和温度。

参考文献

[1] 朱大勇，徐俊鹏，曹礼彬，等. PLA 热稳定性和降解性能研究及其应用[J]. 工程塑料应用，2018，46(1)：119-122.

[2] 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.

[3] 宁宁，高光涛. 加工工艺条件对聚乳酸耐热性的影响研究[J]. 塑料工业，2012，40(6)：53-56.

[4] 王琪，王秋，方海峰，等. 造纸废料单螺杆挤出机熔融输送流场数值模拟[J]. 机械设计与制造，2018(2)：171-174.

[5] 叶阳，成文凯，王嘉骏，等. 聚合物反应挤出过程数值模拟进展[J]. 高分子通报，2018(9)：1-7.

[6] 胡鹏，罗兵. 同向双螺杆支撑元件的流场模拟[J]. 塑料，2017，46(5)：13-17.

[7] 孙士强，罗兵，何敏. 啮合同向双螺杆螺纹元件几何参数对其在流场中受力关系的影响[J]. 橡塑技术与装备，2007(4)：1-6.

[8] 时俊峰，黄志刚，蒋卫鑫，等. 聚乳酸在啮合同向双螺杆挤出机机头过渡体的流场研究[J]. 食品与机械，2017，33(1)：72-75.

[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，2003：42-52.

[10] 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.

[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，2018：120-152.

(上接第 75 页)

[3] 赵静. 基于消费者认知的食品安全监管问题研究[J]. 山东社会科学，2018(12)：171-175.

[4] 竺乾威. 从新公共管理到整体性治理[J]. 中国行政管理，2008(10)：52-58.

[5] HOWARD A. SNYDER：The New Reform Agenda[M]. New York：Palgrave，2002：37.

[6] 韩兆柱，杨洋. 整体性治理理论研究及应用[J]. 教学与研究，2013(6)：80-86.

[7] 高建华，秦竟芝. 论区域公共管理政府合作整体性治理之合作监督机制构建[J]. 广西社会科学，2011(2)：132-135.

[8] 张志勋，叶萍. 论我国食品安全的整体性治理[J]. 江西社会科学，2013(10)：157-161.

[9] 杨有承. 食品企业做好食品安全监管的对策[J]. 轻工科技，2018(12)：102-103.

[10] 冯朝睿. 整体性治理视阈下的中国食品安全监管研究[D]. 昆明：云南大学，2015：178.

[11] 张科子. 宁波市镇海区食品安全网格化管理研究[D]. 宁波：宁波大学，2017：21.

[12] 李国荣. 大数据时代银川市食品安全监管的机遇与挑战[J]. 中国食品药品监管，2018(12)：62-66.