DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.60118

滑移条件对啮合同向双螺杆挤出过程的影响

徐 珍[1,2] 刘子豪[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:[**目的**]探讨物料在机筒内壁面和螺杆表面发生的滑移现象及对同向双螺杆挤出过程的影响。[**方法**]利用相对运动法设计三维模型,设定不同的滑移边界条件并进行有限元模拟,通过仿真分析得到相关物理场数据,并计算其体积流率。[**结果**]与无滑移时相比,螺杆滑移条件下流道内压力减小,剪切速率减小,黏度增加;壁面滑移条件下,在螺杆与机筒间隙处压力减小,剪切速率减小,黏度增加,在螺杆啮合处则相反,即压力增加,剪切速率增加,黏度减小。螺杆滑移条件下的产量提升了28%,壁面滑移条件下的产量下降了62.5%。[**结论**]壁面滑移现象的发生有助于提升螺杆在螺杆啮合处的剪切能力,而螺杆滑移现象的发生则有利于提高同向双螺杆的挤出产量。

关键词:螺杆挤出机;同向啮合;滑移现象;有限元分析

Influence of slip conditions on the extrusion process of meshing co-direction twin screw

XU Zhen[1,2] *LIU Zihao*[1] *HUANG Zhigang*[1,2]

（1. *School of Computer and Artificial Intelligence*, *Being Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*;
2. *Plastic Beijing Municipal Key Laboratory of Health and Safety Quality Evaluation Technology*, *Beijing* 100048, *China*）

Abstract: [**Objective**] To investigate the influence of material slip on the inner wall of the barrel and the surface of the screw on the extrusion process of the co-rotating twin screw. [**Methods**] The 3D model is designed by the relative motion method, and different slip boundary conditions are set and simulated by the finite element method. The relevant physical field data are obtained by simulation analysis, and the volume flow rate is calculated. The physical field of the extrusion process is studied. [**Results**] Compared with the non-slip condition, the pressure in the flow channel decreases, the shear rate decreases, and the viscosity increases under the screw slip condition. Under the condition of wall slip, the pressure decreases, the shear rate decreases, and the viscosity increases at the gap between the screw and the barrel. On the contrary, the pressure increases, the shear rate increases, and the viscosity decreases at the screw engagement. The analysis of the volume flow rate in the extrusion process showed that the yield increased by 28% under the screw slip condition, and the yield decreased by 62.5% under the wall slip condition. [**Conclusion**] The occurrence of the wall slip phenomenon helps to improve the shear ability of the screw at the screw engagement, and the occurrence of the screw slip phenomenon is beneficial to improve the extrusion yield of the co-directed twin screw.

Keywords: screw extruder; simultaneous meshing; slip phenomenon; finite element analysis

草莓采摘后易受损伤和氧化影响,降低其口感和保质期[1]。使用高韧性、高透过性的聚乳酸(PLA)薄膜进行包装可有效延长草莓的保鲜期[2]。同向双螺杆挤出机作为PLA制备和加工的主要设备,具有优异的混合、剪切和加工能力,对保持PLA材料的性能和改善其加工流动性至关重要[3]。

Malik等[4]研究表明,PLA在同向双螺杆挤出过程中不会始终黏附在机筒内壁面和螺杆表面上,会发生滑移现象。张超等[5]在同向双螺杆的螺杆表面设定临界滑移应力,并通过改变该值分析了物料在螺杆上的滑移程度对挤出过程的影响。张迅等[6]研究了三螺杆挤出机在不

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:2022-12-08 **改回日期:**2024-04-11

同滑移系数下中心区和螺槽区的混合指数变化，以及不同滑移系数对分离尺度、对数拉伸效率、瞬时混合效率和平均时间混合效率的影响。秦升学等[7]在滑移条件下模拟了UHMWPE挤出螺杆计量段流道内三维等温流场，分析了不同壁面滑移条件对挤出过程的影响。当挤出过程中出现滑移现象时，若只关注其中一种滑移现象可能会片面理解挤出过程。实际挤出过程中，物料与机筒内壁和螺杆表面均发生接触并有可能产生滑移现象，综合考虑不同的滑移现象才能更全面地评估其对挤出过程的影响。研究拟分析物料在机筒内壁面和螺杆表面发生的滑移现象对同向双螺杆挤出过程的影响，及两种滑移现象的异同，揭示其对制品质量的影响机制，优化挤出工艺参数，为后续的研究和工艺优化提供依据。

1　理论模型的建立

1.1　建立几何模型

1.1.1　端面曲线的建立　螺杆在旋转过程中，螺纹相互交错形成端面曲线，通过相对运动原理推导出相应螺杆几何曲线[8]，得到极坐标表示的双头同向双螺杆的端面曲线方程[式(1)]，并根据方程得到相应的同向双螺杆端面曲线，如图1所示，设立极点O_1，O_1X_1与极轴重合。

$$\rho(\theta)=\begin{cases}R_f:-\dfrac{\alpha}{2}\leqslant\theta\leqslant\dfrac{\alpha}{2}\text{或}\pi-\dfrac{\alpha}{2}\leqslant\theta\leqslant\pi+\dfrac{\alpha}{2}\\ \sqrt{C_L^2-R_\alpha^2\sin^2(\theta-\dfrac{\alpha}{2})}-R_a^2\cos(\theta-\dfrac{\alpha}{2})\\ \dfrac{\alpha}{2}<\theta<\dfrac{\pi}{2}-\dfrac{\alpha}{2}\\ R_a:\dfrac{\pi}{2}-\dfrac{\alpha}{2}\leqslant\theta\leqslant\dfrac{\pi}{2}+\dfrac{\alpha}{2}\text{或}\dfrac{3\pi}{2}-\dfrac{\alpha}{2}\leqslant\theta\leqslant\dfrac{3\pi}{2}+\dfrac{\alpha}{2}\\ \sqrt{C_L^2-R_\alpha^2\sin^2(\pi-\dfrac{\alpha}{2}-\theta)}-R_a\cos(\pi-\dfrac{\alpha}{2}-\theta)\\ \dfrac{\pi}{2}+\dfrac{\alpha}{2}<\theta<\pi-\dfrac{\alpha}{2}\\ \sqrt{C_L^2-R_\alpha^2\sin^2(\theta-\dfrac{\alpha}{2}-\pi)}-R_a\cos(\theta-\dfrac{\alpha}{2}-\pi)\\ \pi+\dfrac{\pi}{2}<\theta<\dfrac{3\pi}{2}-\dfrac{\alpha}{2}\\ \sqrt{C_L^2-R_\alpha^2\sin^2(2\pi-\dfrac{\alpha}{2}-\theta)}-R_a\cos(2\pi-\dfrac{\alpha}{2}-\theta)\\ \dfrac{3\pi}{2}+\dfrac{\alpha}{2}<\theta<2\pi-\dfrac{\alpha}{2}\end{cases},\quad(1)$$

$$C_L=R_a+R_f,\quad(2)$$

式中：

R_a——螺杆外圆半径，mm；

R_f——螺杆根圆半径，mm；

θ——极角，rad；

ρ——极半径，mm。

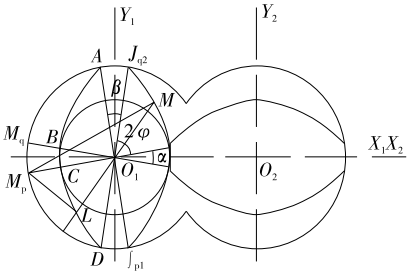


图1　同向双螺杆端面曲线

Figure 1　End surface curve of the same direction twin screw

1.1.2　端面曲线的修正　由端面曲线方程推导出的同向双螺杆端面曲线(图1)，是在理论条件下得出的最佳情况，但实际生产中，由于制造精度的限制，无法使螺杆和机筒之间间隙为0，即使间隙无限接近0也会存在一定的生产安全隐患，这就要求根据实际情况修正理论曲线。其修正的主要内容是对螺槽表面形状的调整，目前常见的修正方法包括中心距修正、轴截面曲线修正和法面曲线修正[9]。

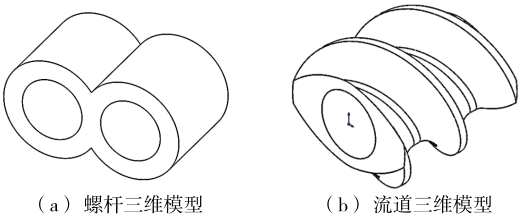
试验采用中心距修正法[10]。首先根据修正后的中心距和修正后的螺杆外径来计算和加工螺槽曲线，再在实际装配过程中按照理论的中心距进行安装。这样既能使设计出的螺杆顺利配合从而正常工作，也能够在两螺杆之间、螺杆与机筒之间留有间隙，以应对装配过程中的微小变化，并确保设备的稳定性和长期可靠性。

1.1.3　几何模型的建立　按表1使用Solidworks三维建模软件[11]，对端面曲线沿y轴进行螺旋扫描，从而形成一个完整的螺杆元件，绘制出如图2所示的同向双螺杆及其流道的三维模型。

表1　螺杆元件和流道区域建模参数

Table 1　Modeling parameters of screw element and flow channel area

螺杆外径/mm	螺杆内径/mm	机筒内径/mm	中心距/mm	长度/mm	导程/mm	头数/个
25	16	26	21	25	25	2



（a）螺杆三维模型　　（b）流道三维模型

图2　螺杆元件和流道区域三维模型

Figure 2　3D model of screw element and flow channel area

1.2　建立数学模型

1.2.1　基本假设　仿真前,考虑到实际情况和环境等众多影响因素,为简化问题并提供一个合理的初始框架,以便更准确地模拟和理解双螺杆挤出过程中的流体行为,在此基础上进行仿真分析[12]。

(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)忽略重力与惯性力等体积力。

1.2.2　基本方程　熔融体流动必须满足流体力学的质量守恒方程(也称连续性方程)、动量守恒方程(也称运动方程)和能量守恒方程三大基本方程[13]。

由于基本假设中要求等温条件,因此能量守恒方程不必求解。

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的表现方式,即空间范围内任意体积中流量等于该体积内流体质量的增长速率:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0, \tag{3}$$

简化为:

$$\nabla \cdot v=0, \tag{4}$$

式中:

v_x、v_y、v_z——x、y、z方向上的速度,m/s;

ρ——流体密度,kg/m^3。

动量守恒方程即单位时间控制体内流体总动量等于流入控制体的流体动量与外界的力产生的动量增量之和。

$$\begin{cases}-\dfrac{\partial \rho}{\partial x}+\dfrac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\dfrac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}=0\\ -\dfrac{\partial \rho}{\partial y}+\dfrac{\partial xy}{\partial x}+\dfrac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}=0\\ -\dfrac{\partial \rho}{\partial z}+\dfrac{\partial xz}{\partial x}+\dfrac{\partial \tau_{zz}}{\partial y}+\dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}=0\end{cases}, \tag{5}$$

简化为:

$$-P+\nabla \cdot T=0, \tag{6}$$

式中:

τ_{ij}——剪切应力,N/m^2;

τ_{ii}——法向应力,N/m^2;

∇——哈密尔顿算子;

P——流体静压力,Pa;

T——应力张量,N/m^2。

使用Bird-Careau本构方程进行数值模拟计算,展现高聚物熔融体在任意剪切速率下的广义牛顿流体的特性,旨在探究聚乳酸在挤出过程中剪切速率与黏度之间的关系[14]。

$$\eta(\dot{\gamma})=\eta_0(1+\lambda^2\dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}。 \tag{7}$$

由于选择的聚乳酸在同向双螺杆挤出等温过程的温度设定为190 ℃,式(7)中相关参数取值见表2。

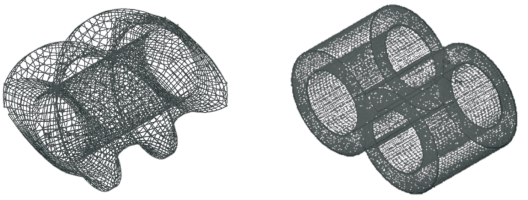
表2　聚乳酸在190 ℃下的熔融体特性参数

Table 2　Characteristic parameters of PLA melt at 190 ℃

零剪切黏度 η_0/(Pa·s)	相关松弛时间 λ/s	非牛顿指数 n	无穷剪切黏度 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　对螺杆和流道的几何模型使用Gambit软件进行网格划分和边界设定,为了方便后续计算,对螺杆元件进行TGrid网格划分,划分好网格的螺杆如图3(a)所示,对流道模型整体使用Hex和Map网格划分方式,网格划分如图3(b)所示。



(a)螺杆网格模型　　(b)流道网格模型

图3　螺杆元件和流道区域的网格模型

Figure 3　Mesh models of screw elements and flow channel regions

1.3.2　边界条件的设定　将仿真模型分为两组,分别进行不同的边界设定,并进行有限元仿真模拟。由于物料流动时在螺杆和机筒内壁面上会有剪切应力,使其黏附,如果该剪切应力超过其能承受的最大剪切应力,物料便会发生滑移。此处采用的方法是在机筒内壁面和螺杆表面上设定不同的最大剪切应力,以模拟不同的滑移现象。

第一组模拟物料在机筒内壁面上发生滑移现象[15],即壁面滑移条件。首先设定边界条件,由于流道入口和出口的物料是可任意流动的,因此流道入口和出口处的边界设定为不存在法向力f_n和切向力f_s;物料在流道中流动时,无法沿径向向里穿透两个内孔的边界,因此将两个内孔处的边界设定为无法向速度v_n和无切向力f_s。然后模拟物料在机筒内壁面发生滑移现象,在机筒内壁面即流道外壁面设定最大剪切应力τ^{sk}。

采用广义Navier's定律,取式(8)中$n_k=1$,讨论壁面滑移系数f_k从0到10^1最后到10^6指数级逐级增加对挤出过程的影响。

$$\tau^{sk}=f_k(v_w-v_{sk})|v_{sk}-v_w|n_k-1。 \tag{8}$$

第二组模拟物料在螺杆表面上发生滑移现象[16],即螺杆滑移条件。首先设定边界条件,入口和出口处的物料自由流动,由于螺杆元件端面与流体区域端面重合,因此$f_n=f_s=0$左右内孔无流体能够贯穿该边界,因此$f_s=v_n=0$机筒内壁面即流道外壁面不发生滑移,故$v_n=v_s=$

0。然后模拟物料在螺杆表面发生滑移现象，使用演变算法[式(9)]将螺杆滑移系数δ与$f(s)$的乘积模拟螺杆表面的最大剪切应力，通过改变滑移系数δ从0到10^1最后到10^6指数级逐级增加，分析其变化对挤出过程的影响。

$$f(s)=1\cdot\exp\cdot(18.421\cdot S)+0+0\cdot S。\tag{9}$$

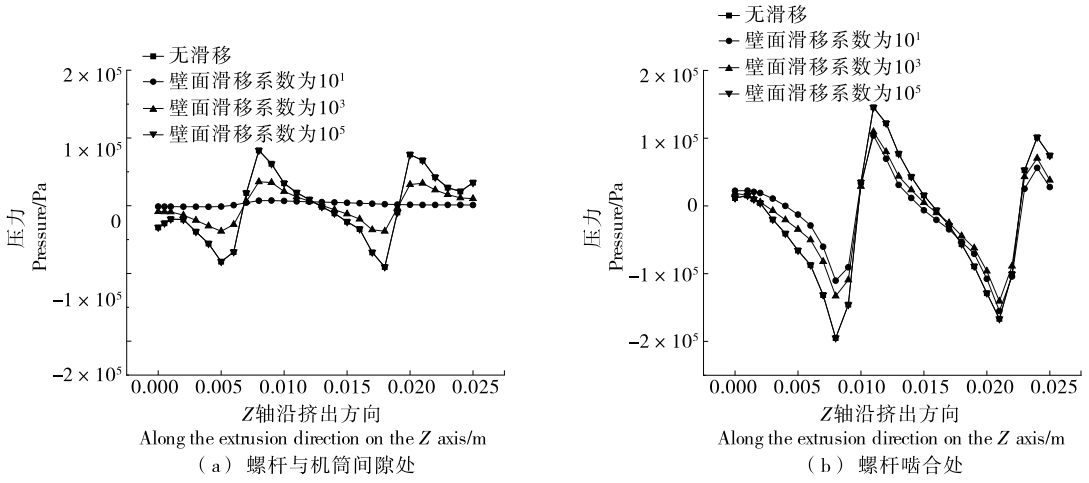
2　仿真结果分析

分别在螺杆与机筒间隙处即直线[(0.023 5，0，0)，(0.023 5，0，0.025 0)]和螺杆啮合处即直线[(0，−0.007 66，0)，(0，−0.007 66，0.025 0)]方向上平均取26个点的物理场数值，绘制成各物理场变化曲线，以分析物料在机筒内壁面发生滑移时和物料在螺杆表面发生滑移时两种不同滑移条件下对同向双螺杆挤出过程的影响。

2.1　压力场

由图4可知，在螺杆与机筒间隙处和螺杆啮合处，发生滑移现象后压力变化曲线极差减小，随着壁面滑移系数的增加，压力变化曲线极差增大，直到壁面滑移系数为10^5时，与无滑移时的压力变化曲线重合，不再发生滑移现象。

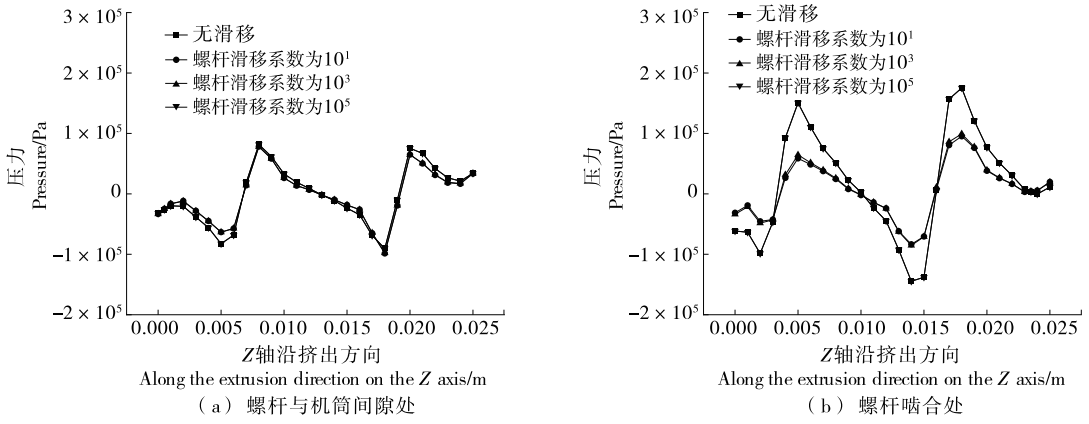
由图5(a)可知，在螺杆与机筒间隙处，与无滑移时相比，发生滑移现象后，压力变化曲线极差减小，随着螺杆滑移系数的增加，压力变化曲线极差增大，直到螺杆滑移系数为10^5时，与无滑移时的压力变化曲线重合，不再发生滑移现象。由图5(b)可知，在螺杆啮合处，与无滑移时相比，发生滑移现象后，压力变化曲线极差减小，随着螺杆滑移系数的增加，压力变化曲线极差增大，直到螺杆滑移系数为10^5时，与无滑移时的压力变化曲线重合，不再发生滑移现象。



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图4　壁面滑移条件下流道内压力变化曲线

Figure 4　Pressure change curve in the flow channel under the condition of wall slip



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图5　螺杆滑移条件下流道内压力变化曲线

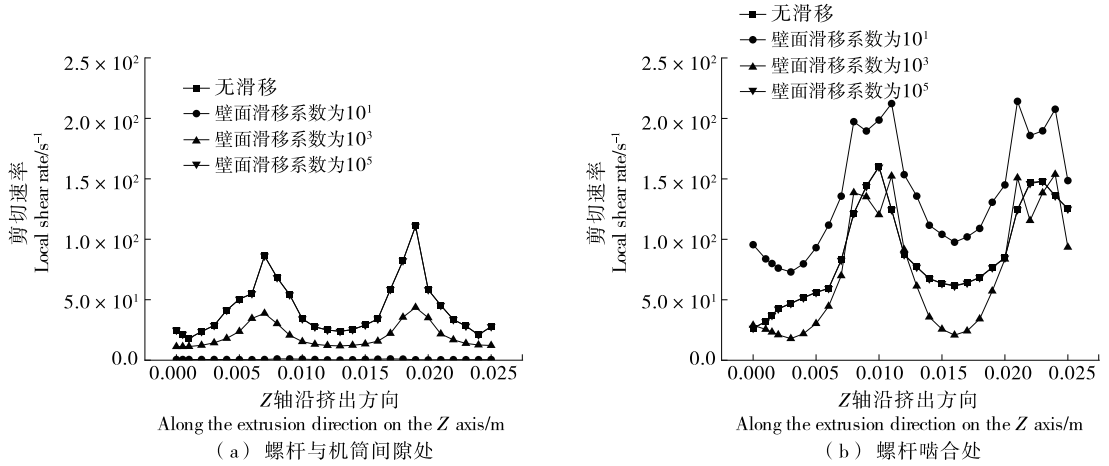
Figure 5　Pressure change curve in the flow channel under screw slip condition

2.2　剪切速率场

由图6(a)可知，在螺杆与机筒间隙处，与无滑移时相比，发生滑移现象后，流道内剪切速率减小，随着壁面滑移系数的增加，剪切速率增加，直到壁面滑移系数为10^5时，与无滑移时的剪切速率变化曲线重合，不再发生滑移现象。由图6(b)可知，在螺杆啮合处，与无滑移时相比，

发生滑移现象后,流道内剪切速率增加,随着壁面滑移系数的增加,剪切速率降低,在壁面滑移系数增加到10^3时,流道内剪切速率降到最低,之后又随着壁面滑移系数的增加而增加,直到壁面滑移系数为10^5时,与无滑移时的剪切速率变化曲线重合,不再发生滑移现象。

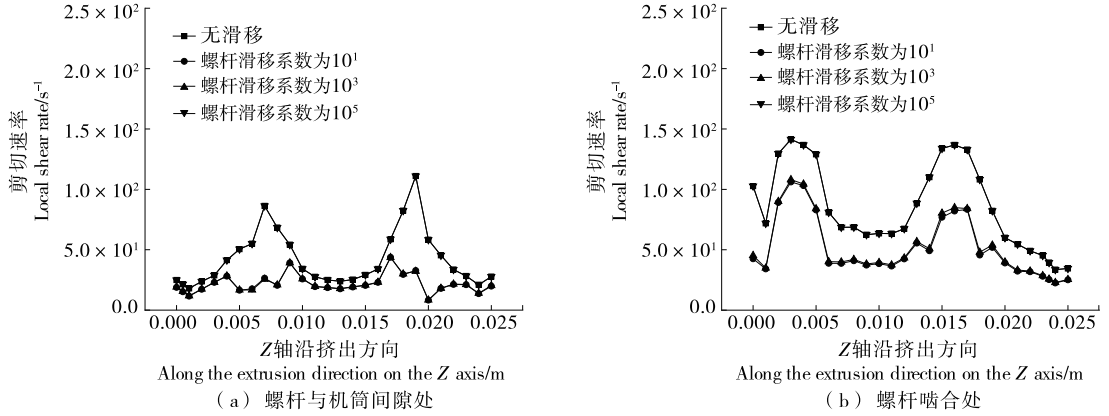
由图7可知,在螺杆与机筒间隙处和螺杆啮合处,与无滑移时相比,发生滑移现象后,流道内剪切速率减小,随着螺杆滑移系数的增加,剪切速率增加,直到螺杆滑移系数为10^5时,与无滑移时的剪切速率变化曲线重合,不再发生滑移现象。



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图6　壁面滑移条件下流道内剪切速率变化曲线

Figure 6　Shear rate change curve in the flow channel under the condition of wall slip



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图7　螺杆滑移条件下流道内剪切速率变化曲线

Figure 7　Shear rate change curve in the flow channel under screw slip condition

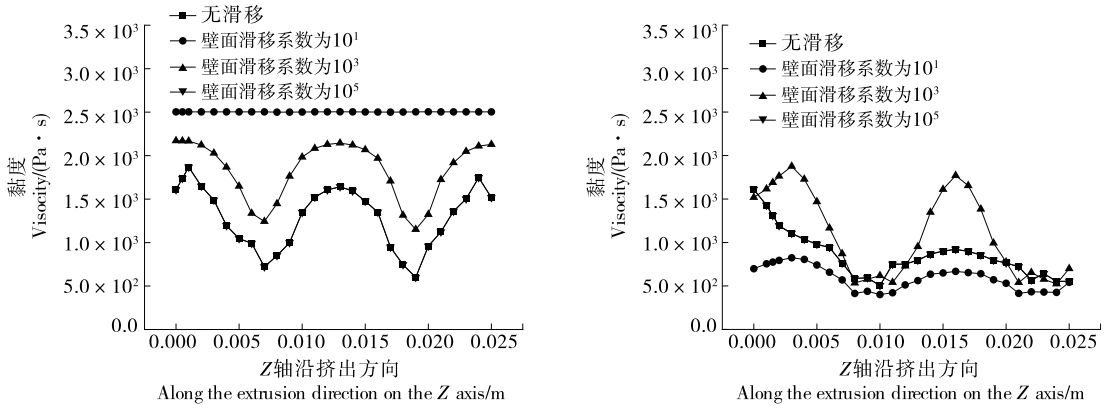
2.3　黏度场

由图8(a)可知,在螺杆与机筒间隙处,与无滑移时相比,发生滑移现象后,流道内黏度增加,随着壁面滑移系数的增加,黏度减小,直到壁面滑移系数为10^5时,与无滑移时的黏度变化曲线重合,不再发生滑移现象。由图8(b)可知,在螺杆啮合处,与无滑移时相比,发生滑移现象后,流道内黏度减小,随着壁面滑移系数的增加,黏度升高,在壁面滑移系数增加到10^3时升到最高,之后又随着壁面滑移系数的增加而减小,直到壁面滑移系数为10^5时,与无滑移时的黏度变化曲线重合,不再发生滑移现象。

由图9可知,在螺杆与机筒间隙处和螺杆啮合处,与无滑移时相比,发生滑移现象后,流道内黏度增加,随着螺杆滑移系数的增加,黏度减小,直到螺杆滑移系数为10^5时,与无滑移时的黏度变化曲线重合,不再发生滑移现象。

2.4　体积流率

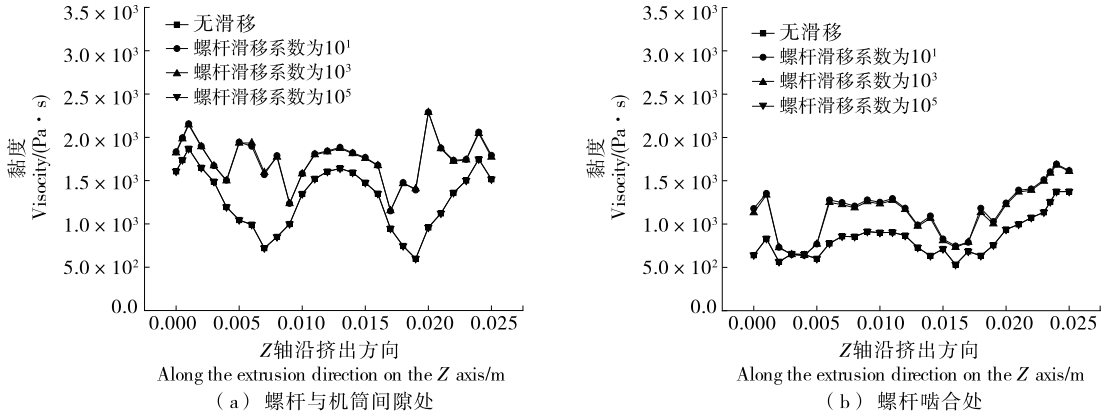
由图10(a)可知,在壁面滑移条件下,发生滑移现象后,体积流率显著降低,随着壁面滑移系数的增加,体积流率增加,直到壁面滑移系数增加到10^5时,与无滑移时的体积流率相同。由图10(b)可知,在螺杆滑移条件下,发生滑移现象后,体积流率显著提升,随着螺杆滑移系数的增加,体积流率减小,直到螺杆滑移系数增加到10^5时,与无滑移时的体积流率相同。这可能是由于同向双螺杆的挤出是靠物料与机筒内壁面之间的摩擦向前推进的,当物料与机筒内壁面发生滑移时,会导致部分物料不往前推进,体积流率下降,而物料与螺杆表面的摩擦会阻碍物料的输送,当物料与螺杆表面发生滑移时,会有利于物料输送。



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图 8　壁面滑移条件下流道内黏度变化曲线

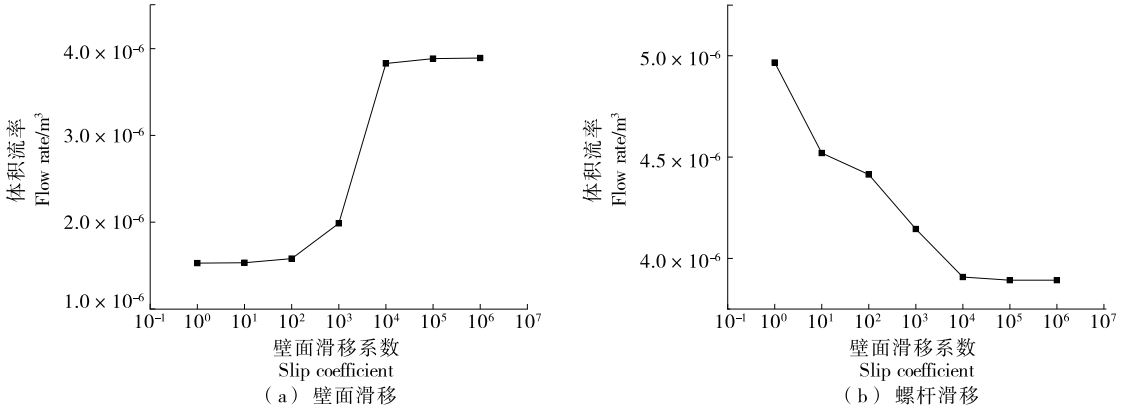
Figure 8　Viscosity change curve in the flow channel under the condition of wall slip



（a）螺杆与机筒间隙处　　（b）螺杆啮合处

图 9　螺杆滑移条件下流道内黏度变化曲线

Figure 9　Viscosity change curve in the flow channel under screw slip condition



（a）壁面滑移　　（b）螺杆滑移

图 10　流道内体积流率变化曲线

Figure 10　Flow rate variation curve in the flow channel

3　试验验证

3.1　试验仪器

可拆卸式同向双螺杆挤出机：ZSK MEGAlab 型，德国 Coperion 公司；

激光粒度分析仪：Partica LA-960V2 型，日本 HORIBA 公司。

3.2　试验原料

聚乳酸：4032D，美国 Nature Works 公司；

陶瓷微珠示踪粒子:日本HORIBA公司;

挤出机专用润滑油:英国Castrol公司。

3.3　试验条件

第1组:向机筒内壁面和螺杆表面喷洒润滑油,使物料在挤出过程中不发生滑移。第2组:向螺杆表面喷洒润滑油,机筒内壁面不喷洒,使物料在机筒内壁面上发生滑移,在螺杆表面不发生滑移。第3组:向机筒内壁面喷洒润滑油,螺杆表面不喷洒,使物料在螺杆表面发生滑移,在机筒内壁面不发生滑移。同向双螺杆挤出机熔融段温度190 ℃,喂料速度3 r/min,螺杆转速60 r/min。

3.4　试验方法

将1 000个陶瓷微珠示踪粒子与PLA原料充分混合后添加至挤出机的进料口,确保其均匀分布在挤出机的材料流中。以预定参数运行挤出机,自开始出现挤出物时起,每隔一秒截取一段,直至不再挤出。使用激光粒度分析仪检测每段挤出物中的示踪粒子个数和颗粒分布,以确定示踪粒子在出口处的停留时间分布特征。使用统计方法计算停留时间的概率分布函数和概率密度分布函数,并进行数据可视化和解释。

3.5　结果与分析

由图11可知,当已挤出粒子占全部粒子比例为1:1时,示踪粒子被完全挤出。出现螺杆滑移现象时,示踪粒子被完全挤出的时间最长;出现壁面滑移现象时,示踪粒子被完全挤出的时间最短;不发生滑移时,示踪粒子被完全挤出的时间在前两者之间。说明壁面滑移条件下同向双螺杆挤出过程中体积流率减小,螺杆滑移条件下同向双螺杆挤出过程中体积流率增加。

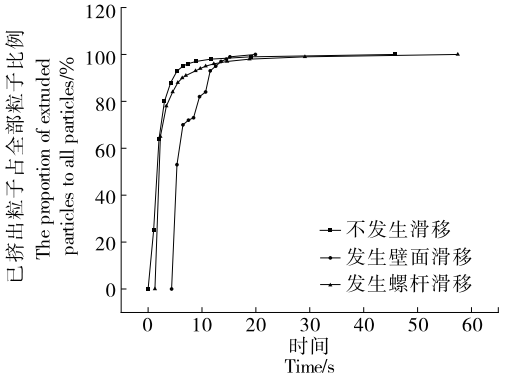


图11　示踪粒子挤出曲线

Figure 11　Extrusion curve of tracer particles

4　结论

(1)发生螺杆滑移后,流道的整个区域内压力减小,剪切速率减小,黏度增加;发生壁面滑移后,在螺杆与机筒间隙处压力减小,剪切速率减小,黏度增加,在螺杆啮合处则相反,即压力增加,剪切速率增加,黏度减小。因此,壁面滑移条件有助于提高螺杆在螺杆啮合处对物料的剪切能力。

(2)壁面滑移条件下同向双螺杆挤出过程中体积流率减小,螺杆滑移条件下同向双螺杆挤出过程中体积流率增加,但在相同滑移系数下壁面滑移条件对挤出过程的体积流率的影响程度更大。

(3)该研究的研究过程仅局限在挤出机的熔融段,且在等温状态下进行探讨,接下来可对挤出机其他区段以及非等温情况进行深入研究。

参考文献

[1] 程丽丽. 草莓保鲜运输中强制通风预冷与温度分布的相关性[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 151-154.
CHENG L L. Correlation between forced ventilation precooling and temperature distribution in strawberry preservation and transportation[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 151-154.

[2] KANATT S R. Pectin from fruit peel waste: a sustainable source for production of active packaging films[J]. Packaging Technology and Science, 2024, 37(6): 487-501.

[3] 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 X J, LIU Z H, HUANG Z G. Flow field analysis of polylactic acid extrusion by meshing simultaneous differential twin screw extruder[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 59-64, 83.

[4] MALIK M, KALYON D M, GOLBA J C. Simulation of co-rotating twin screw extrusion process subject to pressure-dependent wall slip at barrel and screw surfaces: 3D FEM analysis for combinations of forward- and reverse-conveying screw elements[J]. International Polymer Processing, 2014, 29 (1): 51-62.

[5] 张超, 樊瑜瑾, 田野. 啮合同向双螺杆挤出机滑移条件下的仿真分析[J]. 塑料科技, 2019, 47(8): 71-75.
ZHANG C, FAN Y J, TIAN Y. Simulation analysis of meshing co-direction twin-screw extruder under slip condition[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(8): 71-75.

[6] 张迅, 朱向哲, 王阁. 滑移边界条件对同向啮合三螺杆挤出机混合性能的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(4): 68-72, 76.
ZHANG X, ZHU X Z, WANG G. Effect of slip boundary conditions on mixing performance of co-meshing three-screw extruder[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25(4): 68-72, 76.

[7] 秦升学, 陈海明, 刘杰, 等. 壁面滑移条件下UHMWPE单螺杆挤出过程有限元模拟[J]. 塑料科技, 2014, 42(6): 85-88.
QIN X S, CHEN H M, LIU J, et al. Finite element simulation of UHMWPE single screw extrusion process under wall slip condition[J]. Journal of Plastics Science and Technology, 2014, 42(6): 85-88.

(下转第144页)

Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2024, 38 (5): 369-374.

[30] 刘潇聪, 张玉苗, 潘亚磊 . 天麻素药理作用及临床应用研究进展[J]. 中南药学, 2024, 22(6): 1 615-1 620.
LIU X C, ZHANG Y M, PAN Y L. Research progress on pharmacological effects and clinical application of *Gastrodin* [J]. Zhongnan Pharmacy, 2024, 22(6): 1 615-1 620.

[31] 李光美, 王朝群, 唐超, 等 . 天麻多糖对阿尔茨海默症小鼠焦虑行为及记忆功能的影响[J]. 遵义医科大学学报, 2023, 46 (3): 227-233, 285.
LI G M, WANG C Q, TANG C, et al. Effects of *Gastrodia* polysaccharides on anxiety behavior and memory function in Alzheimer's disease mice[J]. Journal of Zunyi Medical University, 2023, 46(3): 227-233, 285.

[32] 刘智, 李诚秀, 李玲 . 天麻粉不同粒径的镇静镇痛作用研究[J]. 中国现代应用药学, 2002(5): 383-385.
LIU Z, LI C X, LI L. Tranquil and analgesic studies on different particle diameters of *Gastrodia elata* Bl.[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2002(5): 383-385.

[33] 周雪, 陈婷婷, 蒋朝晖, 等 . 基于镇静催眠作用的天麻超微粉生物活性限值测定方法研究[J]. 中药药理与临床, 2018, 34 (5): 132-136.
ZHOU X, CHEN T T, JIANG C H, et al. Determination of biological activity limits of *Gastrodia elata* Bl ultrafine powder based on sedative and hypnotic effects[J]. Pharmacology and Clinical Medicine of Traditional Chinese Medicine, 2018, 34(5): 132-136.

[34] 王维刚, 刘震泽, 吴文婷, 等 . 旷场实验在小鼠行为分析中的应用[J]. 中国细胞生物学学报, 2011, 33(11): 1 191-1 196.
WANG W G, LIU Z Z, WU W T, et al. The use of open field test in the behavior analysis of mice[J]. Chinese Journal of Cell Biol, 2011, 33(11): 1 191-1 196.

[35] 范晖, 王丽华, 刘琪琳, 等 . 建昌帮姜天麻中苯丙素类对小鼠抗晕眩作用的影响[J]. 实用中西医结合临床, 2020, 20(16): 157-159.
FAN H, WANG L H, LIU Q L, et al. Effect of phenylpropancin in Jianchangbang ginger gastrodia on anti-dizziness effect in mice[J]. Clinical Practice of Practical Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2020, 20 (16): 157-159.

[36] 赵欣, 刘雨彤, 于佳池, 等 . 防治晕动症中药天麻巴布贴的制备和疗效研究[J]. 中国医药指南, 2020, 18(1): 12-13.
ZHAO X, LIU Y T, YU J C, et al. Preparation and efficacy of *Gastrodia* Babu patch, a traditional Chinese medicine for the prevention and treatment of motion sickness[J]. Chinese Medicine Guide, 2020, 18(1): 12-13.

[37] 刘辉 . 渗透泵控释给药系统研发及头痛抗晕药物基础与临床试验[Z]. 湖北省, 广州军区武汉总医院, 2014.
LIU H. Development of osmotic pump controlled-release drug delivery system and basic and clinical trials of headache anti-motion sickness drugs[Z]. Hubei Province, Wuhan General Hospital of Guangzhou Military Region, 2014.

（上接第 105 页）

[8] LEWANDOWSKI A, WILCZYNSKI K. Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials[J]. Polymers, 2022, 14 (2): 274.

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

[10] 徐贤发 . 全啮合同向双螺杆挤出机螺杆齿形设计及其加工方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 44.
XU X F. Study on screw tooth profile design and machining method of full-meshing co-direction twin screw extruder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 44.

[11] WILCZYNSKI K, NASTAJ A, LEWANDOWSKI A, et al. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion[J]. Polymers, 2019, 11(12): 102-106.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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 Z G, JIANG W X, LI X, et al. Simulation research on meshing contrastive twin-screw extruder[J]. Journal of Packaging, 2019, 11(3): 9-15.

[15] HU D D, CHEN J N. Numerical simulation of twin-screw extrusion with wall slip[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 13(1): 85-89.

[16] KUMAR P S R, ARUMUGAM S K. Non-Newtonian and non-isothermal numerical modelling of a twin screw hydrogen extruder with slip imposed boundary condition on the screw surface[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 161: 11-18, 96.