

异向平行啮合型双螺杆挤出机熔体输送段 三维流场分析

李金莎 许澍华

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

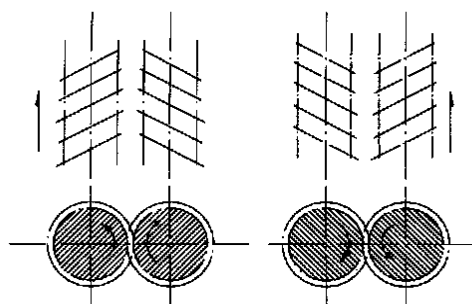
摘 要: 建立了高聚物熔体在异向平行啮合型双螺杆挤出机熔体输送段的三维等温流动模型, 利用 ANSYS 有限元分析软件对流场进行了分析, 求出了熔料在螺槽内的速度场、压力场和粘度场的分布。通过流率计算, 分析了不同的啮合间隙及操作条件对此类挤出机工作特性的影响。

关键词: 异向双螺杆挤出机; 流场分析; 非牛顿流体

中图分类号: TQ 320.52

引 言

目前, 关于双螺杆挤出过程的研究主要集中在熔体输送段。这是因为此区段物料的输送特性更明显地影响着双螺杆挤出机的工作特性, 并且熔料流动过程的求解可借鉴流体力学的研究成果。为确保物料从加料口加入后能往机头方向输送, 螺杆转动方向和螺纹旋向之间必须保持一定的关系。对于异向啮合双螺杆挤出机来说, 为保证物料正常输送, 此关系有如图 1 所示的两种情况: 其中图 1(a) 所示较常用; 图 1(b) 所示由于螺杆吃料能力差, 并且受力不好而较少使用。



(a) 向外旋转

(b) 向内旋转

图 1 螺杆旋向

Fig. 1 Rotating direction of screws

为了充分了解和优化挤出过程, 人们对异向双

螺杆挤出机挤出过程中的熔体输送过程进行了一系列研究。国内外关于熔体在流道内的流动分析主要采用两种方法: 解析法和数值计算法。由于螺杆形状复杂使得物料的流动呈三维状态, 因此用解析法求解其流场几乎是不可能的。此外, 因为加工过程中, 熔料的压力和温度较高, 通过实验方法测定熔料所受的应力、应变、滞留时间分布、温度和压力经历等物理参数比较困难, 迫切希望借助计算机辅助工程 (CAE) 技术掌握这些参数, 为挤出机的合理设计和工艺条件的科学设定提供依据。因而近年来随着计算机在工程计算领域的飞速发展, 使得 CAE 技术和数值计算方法越来越得到广泛应用。在高聚物加工过程中应用的数值解法主要有有限差分法 (FDM)、有限单元法 (FEM) 和网格法 (FAN) 等 3 种, 其中用得最多的是有限单元法。J. T. Lindt 等人用 FEM 方法对异向平行非啮合双螺杆挤出机进行了流动模拟^[1]; F. Kazumori 等人进行了异向旋转非啮合连续混炼机中非等温流动的数值模拟和实验验证^[2]; 船津和守等人对异向啮合双螺杆挤出机内的非牛顿流动进行了数值模拟^[3,4]。

1 理论模型

1.1 物理模型

研究对象为熔体在异向平行啮合型双螺杆挤出机熔体输送段的三维流动。物理模型采用实际应用的螺杆几何形状和尺寸, 如图 2 所示。螺杆直径 34.8 mm, 机筒直径 35.4 mm, 中心距 30 mm, 导程 44 mm, 螺纹头数 2, 螺棱宽度 8.84 mm。一般来

说,熔体输送段的物料已经完全熔融,因此可以认为流场内各点熔体的温度是相等的,熔体在螺槽内是全充满的。在此条件下,可以根据连续性方程、动量方程以及本构方程来求解速度场和压力场。

如图2所示,将坐标系原点建立在两根螺杆中心线连线的中点处,并选用直角坐标系。根据双螺杆几何学原理计算出模型各节点坐标并给出各单元的组成节点,单元采用八节点的六面体单元,节点总数为13 770,单元数为11 260。单元划分如图3所示。

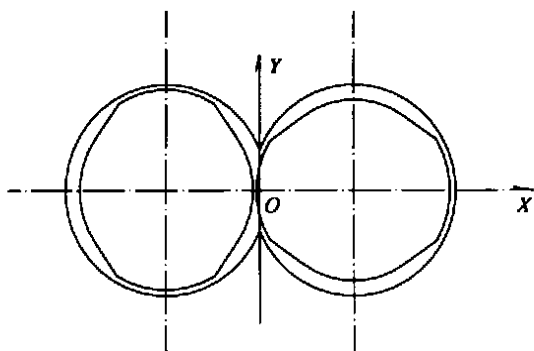


图2 螺杆横截面

Fig. 2 Cross section of screws

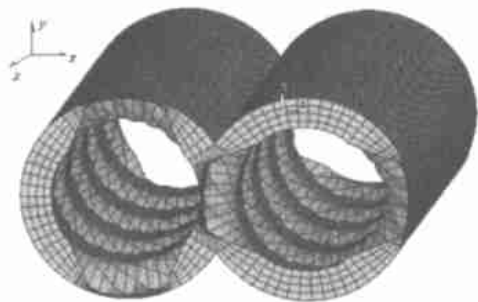


图3 螺纹元件流道网格划分

Fig. 3 Finite element mesh of the flow field

数理模型基本假设:

- (1) 高聚物熔体为纯粘性非牛顿流体,应力和形变关系服从幂率流体本构方程;
- (2) 流场内各点的熔体温度不变;
- (3) 流场内熔体速度、压力、温度的分布与时间无关;
- (4) 忽略惯性力和重力的影响;
- (5) 熔体在螺杆和机筒壁面无滑移,流道内全充满熔体。

1.2 数学模型

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

(1)

式中: \mathbf{v} 为速度矢量, m/s ; ∇ 为哈密顿算子。

动量方程

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

式中: p 为静压力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切应力张量, Pa 。

本构方程

$$\boldsymbol{\tau} = 2 \eta \mathbf{D} \quad (3)$$

式中: η 为剪切粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \mathbf{D} 为形变速率张量, s^{-1} 。

其中

$$\mathbf{D} = m \left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T] \quad (5)$$

式中: v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向的速度分量, m/s ; $\nabla \mathbf{v}$ 为速度梯度张量, s^{-1} ; $(\nabla \mathbf{v})^T$ 为转置速度梯度张量, s^{-1} ; m 为稠度, $(\text{N} \cdot \text{s}^n) / \text{m}^2$; n 为幂律指数。

1.3 边界条件

按照挤出机的实际运转条件即机筒不动,螺杆旋转以及边界无滑移的假设,可得出流道的速度边界:紧贴机筒表面的物料速度为0,螺槽内物料速度为螺杆角速度 ($\omega = 2\pi n$, n 是螺杆转速)与螺杆边界半径 r 的乘积。在熔体输送段入口压力为 p_2 ,出口压力为 p_1 ,流道出口和入口的压差 $p = p_1 - p_2$ 为压力边界条件。

2 模拟计算结果与讨论

2.1 速度场

横截面内的速度矢量如图4所示。图5为流道内的速度分布。

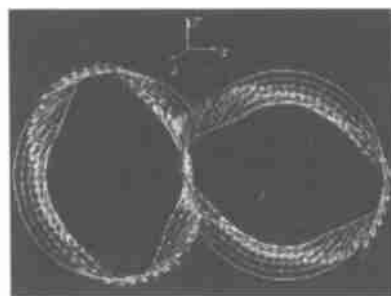


图4 横截面内的速度矢量

Fig. 4 Velocity vectors at the cross section

在图4和图5中分别用不同的颜色代表不同的数值,颜色越深代表速度值越大。由图4可见在啮合区内由于两螺杆旋转方向相反,因此物料在这

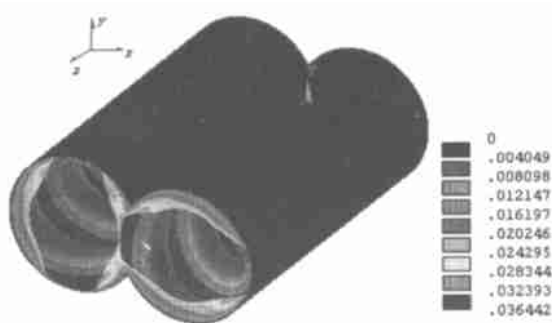


图 5 流道内的速度分布

Fig. 5 Velocity profiles in the flow field

一区域受到剪切速率范围变化很大,有利于物料的混合。由图 5 可见在螺棱处物料的速度明显大于螺槽内物料的速度值。

2.2 压力场、粘度场

压力分布如图 6 所示,图中用颜色的深浅变化代表压力值的大小,由图 6 可见,压力分布很有规则。沿挤出方向即 z 轴方向压力值逐渐增大,相邻

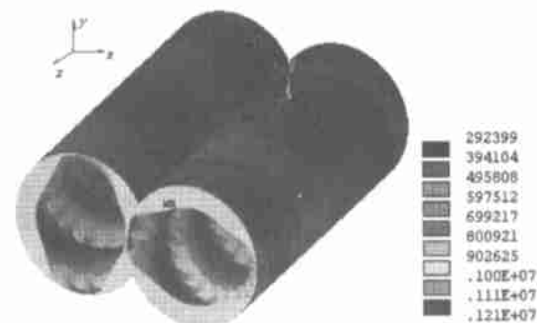


图 6 压力分布

Fig. 6 Pressure profiles

螺槽压力变化较大;压力的最大值出现在下啮合区。这是由于异向啮合双螺杆向外旋转造成物料在下啮合区堆积而引起的。

流道内物料粘度分布示意如图 7 所示(颜色深

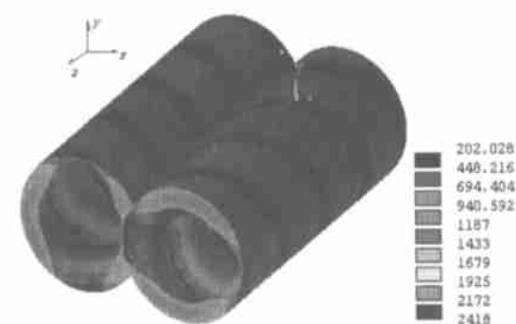


图 7 粘度分布

Fig. 7 Viscosity profiles

浅不同代表粘度值不同),由图 7 可以看出在螺棱处粘度值较小,这是由于螺棱处物料流速大,受到的剪切也较大,从而引起物料剪切变稀。

2.3 产量计算

流场计算的主要目的是为了分析异向平行双螺杆挤出机的工作特性,而挤出产量或体积流率 Q (m^3/s) 是反映挤出机性能的一个主要参数。 Q 等于物料在螺槽任意横截面上单位微元面积 dS (m^2) 与挤出速度分量 v_z 乘积之总和即:

$$Q = \int_S v_z dS \quad (6)$$

计算结果显示:在同一螺杆转速 n 下,啮合间隙越大,螺杆的 Q 越小(见图 8),这是由于漏流量 Q_L 的增大引起的。此处的 δ 是指一根螺杆的螺棱与另一根螺杆的螺槽之间的间隙。

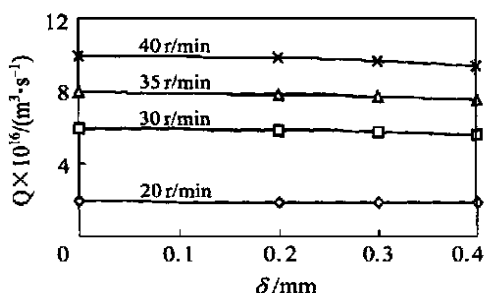


图 8 螺杆转速和啮合间隙与产量的关系

Fig. 8 Relation of the output with screw speed and intermeshing clearance

2.4 螺杆特性线族

当挤出稳定后,体积流率 Q 和压差 p 成直线关系,称这种关系为螺杆特性。在不同螺杆转速下得到的一组互相平行的螺杆特性线,称为螺杆特性线族,如图 9 所示。由图可见,在恒定的螺杆转速 n 下, Q 随 p 的增大而减少。在不同的啮合间隙下得到的螺杆特性线族如图 10 所示。由图 10 可见

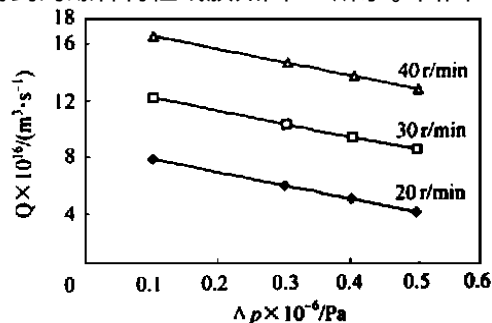


图 9 螺杆特性线族

Fig. 9 Characteristics curves of the screw

随着啮合间隙的增大,螺杆特性线逐渐变陡,即螺杆特性逐渐变软。

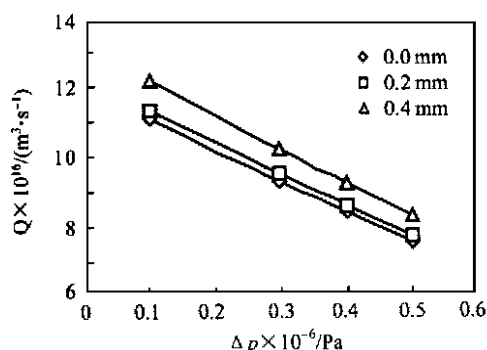


图 10 啮合间隙对螺杆特性的影响

Fig. 10 Relationship of the screw characteristics with the intermeshing clearance

3 结 论

(1) 建立了高聚物熔体在异向平行啮合型双螺杆挤出机熔体输送段中流动的三维模型,利用 ANSYS 有限元软件求出了螺槽内的速度场、压力场和粘度场。

(2) 根据已求解出的压力场以及速度场,计算出不同操作条件及几何形状下螺杆的流量和漏流量。

(3) 分析了螺杆转速和啮合间隙对螺杆特性的影响:由于啮合间隙增大,漏流量增加,物料在螺杆中的停留时间增长,因此螺杆的输送能力降低,但对物料的混合效果却增强,从而使挤出物的质量得到提高。

参 考 文 献

- [1] Nguyen K T, Lint J T. Finite element modeling of a counter-rotating non-intermeshing twin screw extruder. *Polymer Engineering and Science*, 1989, 29(11): 709
- [2] Kazumori F. Numerical simulation and experimental verification of non-isothermal flow in counter-rotating non-intermeshing continuous mixers. *Polymer Engineering and Science*, 2000, 40(2): 365 ~ 375
- [3] Kazumori F. Numerical Study of twin-screw extruders by 3-D flow analysis—development of analysis technique and evaluation of mixing performance for full flight screws. *Polymer Engineering and Science*, August 1996, 36(16): 2142 ~ 2152
- [4] 吉永诚, 船津和守. 二轴押出机 に関する流动 シミュレーションソフト開発の現状と将来. *プラスチックステージ*, 1997(8): 108 ~ 115

Three-dimensional flow field analysis of the melt conveying zone in an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder

LI Jin-sha XU Shu-hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A three-dimensional isothermal flow field model was established for the power-law fluid in the melt conveying zone in an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder. The flow field was simulated by FEM (finite element method) package of ANSYS obtaining the profiles of the velocity, pressure and viscosity of the melt fluid in the extruder. The effect of the different geometrical variables and operational conditions on the operating characteristics of the extruder was analyzed.

Key words: counter-rotating twin-screw extruder; analysis of flow field; non-Newtonian fluid