

锥形双螺杆挤出过程菠萝型混合元件三维流场分析(I)

张志莲, 董力群

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 应用 ANSYS 有限元软件对锥形双螺杆菠萝型混合元件进行了三维等温非牛顿流场的模拟分析, 并与常规螺纹元件的流场分析结果进行了对比, 得出了菠萝型混合元件比常规螺纹元件生产率高, 分布混合能力强, 其分散混合能力稍弱于常规螺纹元件的结论。

关 键 词: 锥形双螺杆挤出机; 菠萝型混合元件; 流场模拟

中图分类号: TQ320.5 文献标识码: B 文章编号: 1001-9278(2003)03-0097-05

Analysis for Three-Dimensional Flow Field of Pineapple-Like Mixing Element in Conical Twin Screw

ZHANG Zhi-lian, DONG Li-qun

(Mechanical & Electrical Institute, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A three-dimensional flow field simulation of a new element pineapple-like component in a conical twin-screw extruder has been carried out by the ANSYS FEM package. A comparison has been made between the flow field in pineapple-like component and conventional screw component, and the result can be concluded as: pineapple-like component has higher output, higher distributive ability and the dispersive mixing ability of pineapple-like component is lower than that of the conventional screw component.

Key words: conical twin-screw extruder; pineapple-like mixing element; simulation for flow field

锥形双螺杆挤出机是在平行啮合异向旋转双螺杆挤出机的基础上发展起来的, 它解决了平行双螺杆挤出机传动系统中传动轴和轴承布置的难题。它具有加料量大、适用粉料加工、螺杆直径渐变而有利于物料所受热损伤危险性小等特点, 已成为挤出成型领域的重要机型, 并得到越来越广泛的应用。近年来为了改善常规锥形双螺杆挤出机的混炼效果, 使其适用于高效高速的发展要求, 国内外异向双螺杆厂家竞相研制新型非常规螺杆元件, 从而出现了一些新型螺杆元件, 菠萝型混合元件就是其中之一^[1]。为了深入研究这种混合元件的性能, 本文对它进行了几何造型和三维流场分析, 并将其结果和常规螺纹元件的流场分析进行了对比。

1 几何造型

锥形双螺杆由于内外锥角的存在, 引起沿螺杆轴

向内外直径、槽深、两螺杆中心距以及啮合区各尺寸都发生变化, 其几何造型远比平行双螺杆难得多。平行双螺杆只需绘制一个截面形状, 并将其拷贝、移动、旋转就可完成螺杆的几何造型, 而锥形双螺杆因沿螺杆轴向的几何参数都是变量, 必须根据不同螺杆轴向位置处的不同内外直径和中心距尺寸全部绘制出它们的截面形状, 并按一定角度连起来, 最后进行实体化, 才能形成一对锥形双螺杆。本文所研究的菠萝型混合元件正是应用锥形双螺杆的螺纹成型原理, 首先成型正向多头螺纹, 然后成型反向多头螺纹, 两组螺纹相交的地方, 形成凸起, 不相交的地方, 构成凹陷, 从而形成了菠萝型混合元件的几何造型, 如图 1 所示。

2 理论模型

2.1 物理模型

本文所建立的物理模型如图 2 所示, 它是没有经过任何简化的真实流道模型。它包括了机筒和混合元件的间隙、左右螺杆混合元件的间隙。计算中采用迪

卡尔坐标系, 0 为坐标原点, 如图 3 所示。

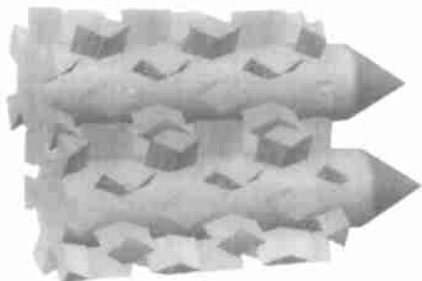


图 1 菠萝型混合元件几何造型

Fig. 1 Configuration of pineapple-like mixing element

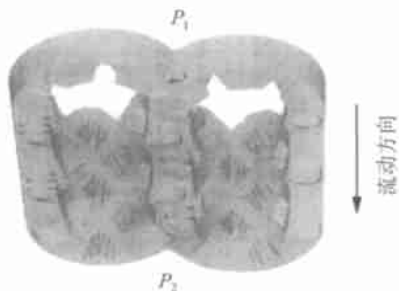


图 2 菠萝型混合元件流道模型

Fig. 2 Physical model for pineapple-like mixing element

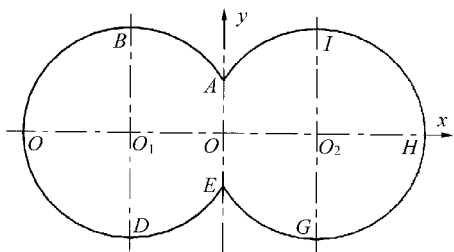


图 3 建立的坐标系

Fig. 3 The adoptive coordinate system

为了拟定流场, 并考虑融体输送的具体条件及高聚物的特性, 做如下假设:

- (1) 熔体为不可压缩的幂律流体;
- (2) 流场为稳定的等温流场;
- (3) 雷诺数较小, 流动为层流;
- (4) 惯性力、重力等体积力远小于粘滞力, 可忽略不计;
- (5) 熔体在流道中全充满;
- (6) 熔体对流道壁面无滑移。

2.2 数学模型

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0 \quad (1)$$

运动方程为:

$$\begin{cases} \rho \left[\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right] = \\ - \frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] + \rho g_x \\ \rho \left[\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right] = \\ - \frac{\partial P}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] + \rho g_y \\ \rho \left[\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + \rho g_z \end{cases} \quad (2)$$

幂律流体的本构方程:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = m \dot{\gamma}^{n-1} \dot{\gamma} \quad (3)$$

2.3 边界条件

边界条件包括压力边界条件和速度边界条件。

压力边界条件为沿挤出方向的压力差值 ΔP :

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (4)$$

式中 P_1 ——计算域入口处压力值, 如图 2 所示

P_2 ——计算域出口处压力值, 如图 2 所示

速度边界条件为螺杆和机筒表面的速度, 由机筒静止、螺杆旋转及流道壁面无滑移的假设确定。对于锥形双螺杆, 由于螺杆元件的径向尺寸沿轴向是个变量, 因此其速度边界需要通过编程进行处理。

3 有限元方法的应用

使用单位有限元分析软件 ANSYS 进行流场模拟计算, 采用六面体八节点单元, 整个流道的有限元模型如图 4 所示。为了与菠萝型混合元件左比较, 本文对常规螺纹元件也进行了分析计算, 其有限元模型如图 4 所示。

4 菠萝型混合元件的工作原理

啮合异向旋转双螺杆的挤出段在挤出物料时, 物料是从螺杆的“C”型腔室一个个非连续排出, 这必然产生机头压力的波动。此外, 物料在“C”型腔室中的环流流动状态也决定了物料的各点温度不可能完全一致, 在挤出过程中会造成物料的温度波动。机头的压力波动和物料的温度波动直接影响到制品的质量。如果在挤出段末端设置菠萝型混合元件, 因混合元件无螺纹存在, 且物料流经它时要被分成多股料流, 之后又汇合到一起, 经过反复的分流、汇合, 物料会得到进一步均化。所以, 菠萝型混合元件减小了机头压力波动和物料温度波动, 从而提高了制品质量。



(a)菠萝型混合元件 (b)常规螺纹元件

图 4 混合元件流道有限元模型

Fig. 4 Finite element model for the channels of mixing element

5 模拟计算及后处理结果

本文利用 ANSYS 求出了物料在菠萝型混合元件的速度场、粘度场和压力场, 又通过 C 语言编程计算出了物料的流量、回流量、剪切速率和剪切应力, 并利用它们分析菠萝型混合元件的混合特性。

设物料在菠萝型混合元件完全充满, 且各横断面内的质量流率恒定。在横断面内对轴向速度 V_z 进行积分, 可以求得流量 Q , 即:

$$Q = \iint V_z ds \quad (5)$$

在横断面内对轴向负值速度 V_{back} 进行积分而求得回流量。回流量是判断分布性混合能力的一个重要指标。

$$Q_{back} = \iint V_{back} ds \quad (6)$$

混合元件的分散性混合能力可通过物料的剪切应力来判断^[2]。剪切应力 τ 可由剪切粘度 η 和剪切速率 γ 表示:

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (7)$$

得到剪切应力后, 进一步可计算出加权平均剪切应力 $\bar{\tau}$:

$$\bar{\tau} = \frac{\iint \tau^{(e)} d\Omega}{\iint d\Omega} \quad (8)$$

5.1 流量和回流量与各参数的关系

挤出机的生产能力是螺杆设计的一个重要指标。同一规格的螺杆, 在相同的螺杆转速下, 加工同一物料时, 由于螺杆结构和参数的差异, 其生产能力也各不相同。下面分别讨论挤出机的流量和回流量与螺杆转速、计算域两端压差、螺杆和机筒间间隙之间的关系。

5.1.1 流量和回流量与螺杆转速的关系

两种螺杆元件的流量和转速的关系如图 5 所示。由图中可以看出它们的流量都随着转速的增大而增

大, 但螺纹元件的增大幅度比菠萝型混合元件的大, 这是因为菠萝型混合元件对物料不但无输送能力, 反而还阻碍物料的流动; 而螺纹元件对物料具有很强的输送能力。

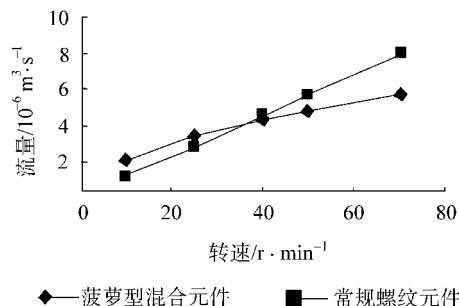


图 5 流量与螺杆转速的关系

Fig. 5 Relationship of flow rate and screw rotation speed

两种螺杆元件的回流量和螺杆转速的关系如图 6 所示。由图中可以看出它们的回流量都随着螺杆转速的增大而增大, 但是菠萝型混合元件的回流量在相同的转速下明显高于普通螺纹元件, 几乎大一个数量级; 这充分说明了菠萝型混合元件具有较强的分布混合能力。

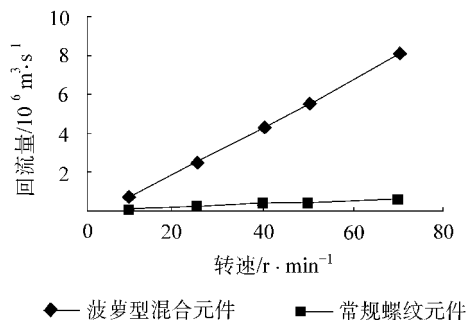


图 6 回流量与螺杆转速的关系

Fig. 6 Relationship of back flow rate and screw rotation speed

5.1.2 流量和回流量与压差的关系

由图 7(a)可以看出, 对于菠萝型混合元件, 当 $\Delta p \geq 0$ 时, 即机头阻力大于或等于螺杆产生的压力, 挤出机的流量为零; 当 $\Delta p < 0$ 时, 即机头阻力小于螺杆产生

的压力, 挤出机的流量大于零; 这是因为菠萝型混合元件没有输送能力的结果。对于常规锥形双螺杆, 因为它属于全啮合异向型双螺杆, 螺纹的纵横向封闭性非常好, 正位移输送能力很强, 所以, 螺纹元件在 $\Delta p \leq 1$ 时, 挤出机的流量均为正值, 见图 7(b)。

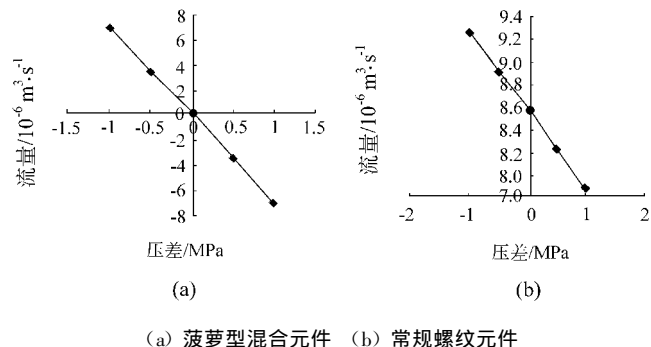


图 7 流量和压差的关系

Fig. 7 Relationship of flow rate and pressure difference

两种螺杆元件的回流量与压差的关系如图 8 所示。从图中可以看出, 两种螺杆元件的回流量都随压差的增大而增大。这是因为随着压差的增大, 压力反流具有呈指数增大的趋势; 压差越大, 物料越难向前输送。菠萝型混合元件的回流量比常规螺纹元件的回流量大近一个数量级, 这也是因为菠萝型混合元件没有输送能力的结果, 但它恰恰表明了菠萝型混合元件的较强的分布混合能力。

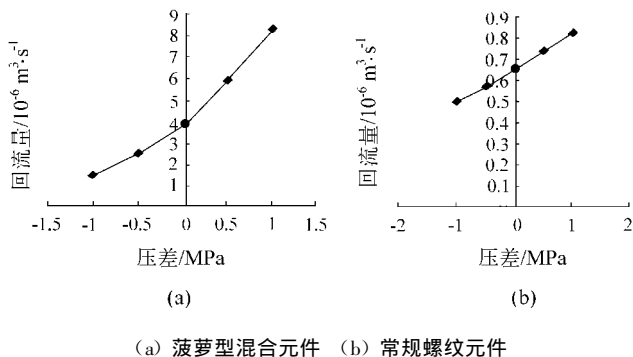


图 8 回流量和压差的关系

Fig. 8 Relationship of back flow rate and pressure difference

5.1.3 流量和回流量与机筒螺杆间隙的关系

两种螺杆元件的流量和螺杆与机筒间隙的关系如图 9 所示。菠萝型混合元件没有输送能力, 物料需要强制加压才能正向输送, 它的正流属于压力流, 故流量随着螺杆与机筒间隙的增大而增大。对于螺纹元件, 压差产生的压力流是反流, 螺杆与机筒间隙越大, 压力反流就越大, 净流量就越小, 从而使流量随着螺杆与机筒间隙的增大而减小。

回流量和螺杆与机筒间隙的关系如图 10 所示。菠萝型混合元件的回流量随着螺杆与机筒间隙的增大

而减小, 常规螺纹元件的回流量随着螺杆与机筒间隙的增大而增大, 这是输送机理不同造成的。菠萝型混合元件的回流量远远大于螺纹元件的回流量, 这又一次充分说明了菠萝型混合元件具有较强的分布混合能力。

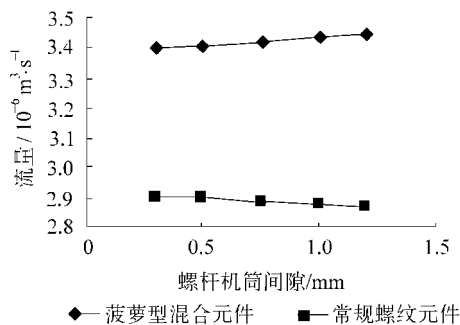


图 9 流量和螺杆与机筒间隙的关系

Fig. 9 Relationship of flow rate and barrel clearance

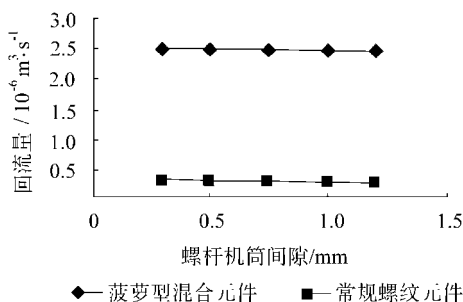


图 10 回流量和螺杆机筒间隙的关系

Fig. 10 Relationship of back flow rate and barrel clearance

5.2 剪切速率、剪切应力与各参数之间的关系

5.2.1 剪切速率和剪切应力与转速的关系

两种螺杆元件的剪切速率都随着螺杆转速的增大而增大, 如图 11 所示。这是因为剪切速率与流场各点的速度呈线性关系, 而各点的速度又与螺杆转速呈线性关系。在相同转速下, 常规螺纹元件比菠萝型混合元件剪切速率大, 这是因为常规螺纹元件的高剪切区比菠萝型混合元件多一倍。所以, 常规螺纹元件的分散混合性能比菠萝型混合元件好。

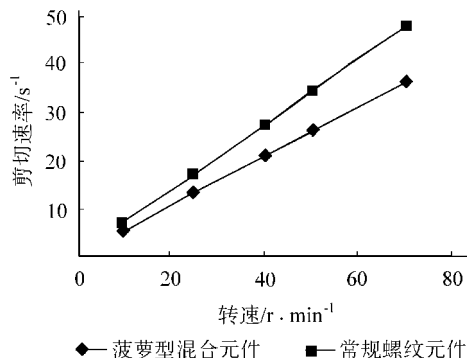


图 11 剪切速率和螺杆转速的关系

Fig. 11 Relationship of average shear rate and screw rotation speed

两种螺杆元件的剪切应力与螺杆转速的关系如图 12 所示。剪切应力也是随着螺杆转速的增大而增大, 两种螺杆元件的增大幅度近似。

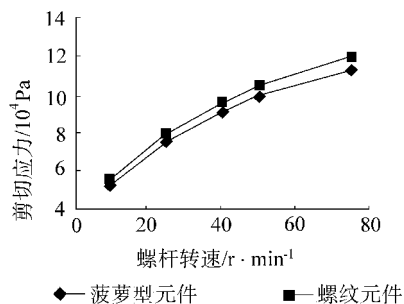


图 12 剪切应力和螺杆转速的关系

Fig. 12 Relationship of average shear stress and screw rotation speed

5.2.2 剪切速率和剪切应力与压差的关系

图 13、图 14 分别为两种螺杆元件的剪切速率、剪切应力与压差之间的关系。由图中可以看出, 两种螺杆元件的剪切速率和剪切应力几乎不受压差的影响。

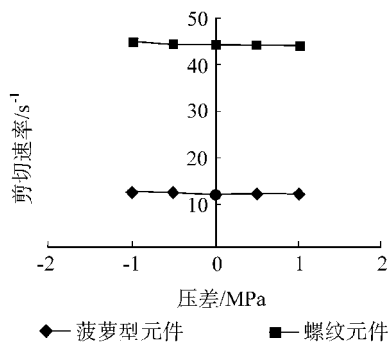


图 13 剪切速率和压差的关系

Fig. 13 Relationship of average shear rate and pressure difference

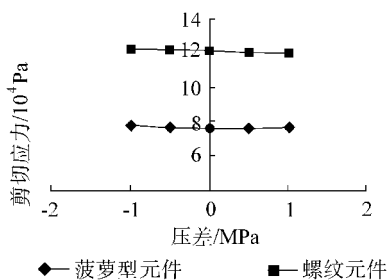


图 14 剪切应力和压差的关系

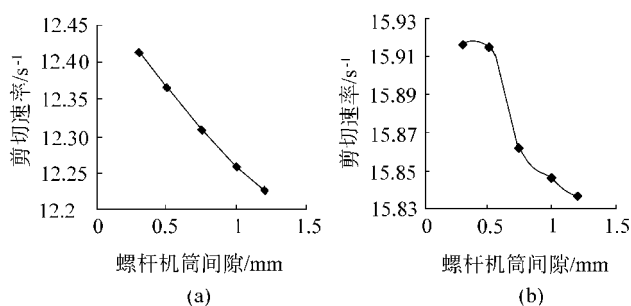
Fig. 14 Relationship of average shear stress and pressure difference

5.2.3 剪切速率剪切应力与螺杆机筒间隙的关系

图 15、16 分别显示了剪切速率和剪切应力与螺杆、机筒间隙的关系。两种螺杆元件的剪切速率和剪切应力都随着螺杆机筒间隙的减小而增大, 即它们的分散混合能力都随着此间隙的减小而增大。

6 结论

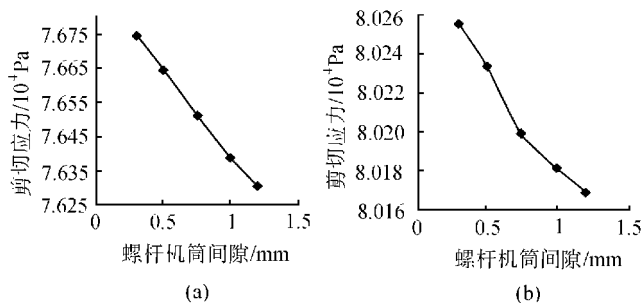
通过上述对菠萝型混合元件的三维流场分析及与



(a) 菠萝型混合元件 (b) 常规螺纹元件

图 15 剪切速率和螺杆机筒间隙的关系

Fig. 15 Relationship of average shear rate and barrel clearance



(a) 菠萝型混合元件 (b) 常规螺纹元件

图 16 剪切应力和螺杆机筒间隙的关系

Fig. 16 Relationship of average shear stress and barrel clearance

常规螺纹元件流场分析结果的对比可得到如下结论:

(1) 在相同的压差、转速和相同的螺杆与机筒间隙的条件下, 菠萝型混合元件的回流量远远大于常规螺纹元件, 近似大于一个数量级, 说明菠萝型混合元件具有较强的分布混合能力;

(2) 在相同的螺杆转速下, 菠萝型混合元件的剪切速率、剪切应力小于常规螺纹元件, 说明菠萝型混合元件的分散混合能力不如常规螺纹元件;

(3) 菠萝型混合元件和常规螺纹元件的输送机理完全不同, 菠萝型混合元件的净流量随着正向压差、螺杆机筒间隙的减小而减小;

(4) 菠萝型混合元件较强的分布混合能力可减小机头压力波动和物料温度波动, 从而可提高制品质量。

参考文献:

- [1] 董力群, 等. 一种锥形双螺杆[P], 专利号 9824166. O, 1995, 5.
- [2] 耿孝正, 张沛. 塑料混合及设备[M], 北京: 轻工业出版社, 220.
- [3] 刘志芳, 冯连勋, 董力群. 新型锥形双螺杆混合元件三维流场分析[J], 中国塑料, 2002, 15, 95.
- [4] 塑料机械设计, 北京化工学院、华南工学院[M]. 北京: 轻工业出版社.