

“一字”型排列三螺杆挤出机三维流场分析^{*}

朱向哲 谢禹钧

苗 一

(辽宁石油化工大学机械工程学院, 抚顺 113001) (华东理工大学化工机械研究所, 上海 200237)

摘要 利用 ANSYS 软件包分析了聚乙烯在“一字”型排列三螺杆挤出机常规螺纹元件中的流动情况, 讨论了整个流道的速度分布、压力分布、粘度分布, 并和双螺杆挤出机常规螺纹元件的挤出特性进行了比较。结果表明, 三螺杆挤出机的物料输运能力、分散性混合能力以及分布性混合能力都好于双螺杆挤出机。

关键词 “一字”型排列 三螺杆挤出机 挤出特性 ANSYS

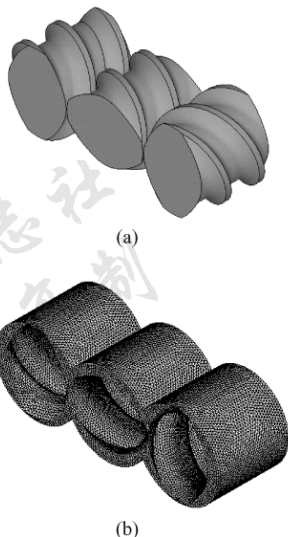
螺杆挤出机是聚合物加工的主要设备之一, 已广泛应用于化工、医药、食品等多个领域。由于螺杆结构以及聚合物熔体流变的复杂性, 螺杆挤出机的许多理论研究仍不能很好地指导实际生产。为了解决实际生产中螺杆的选型、设计及螺杆组合等问题, 辽宁石油化工大学和中油抚顺石化公司联合对双螺杆反应器多种螺纹元件和组合螺杆进行了一系列的研究, 在此基础上, 又对三角型排列三螺杆挤出机常规螺纹元件进行了理论分析^[1], 以期对实际生产有所指导。笔者以“一字”型排列的三螺杆挤出机常规螺纹元件为研究对象, 采用大型有限元软件 ANSYS 为平台对三螺杆挤出过程的压力场、速度场和粘度场进行了初步探讨, 并和双螺杆挤出机的挤出特性进行了比较。

1 模型几何参数及网格处理

图 1a 所示为三螺杆常规螺纹元件的几何模型。模型几何参数为: 螺杆外径 45 mm, 螺杆根径 35 mm, 相邻两螺杆的中心距 41 mm, 机筒内径 46 mm, 两螺杆的间隙 0.4 mm, 机筒和螺杆的间隙为 0.5 mm; 螺纹导程 45 mm, 螺纹头数为 2, 左螺杆和中间螺杆逆时针旋转, 右螺杆顺时针旋转。利用 ANSYS 前处理功能从机筒中减去三螺杆, 所得实体即为流道的三维几何模型。选用 3DFLUID142 的四面体单元进行网格划分, 对于流道的中心区以及螺棱顶端小间隙处进行网格细化。为了保证求解精度, 由粗到细进行了多次有限元网格的划分, 并在相应的情况下进行了计算, 取各监测曲线波动最小的网格为最终有限元计算网格。图 1b 为流道有限元模型, 其中网格数为 248 426 个, 结点数为 54 781 个。

2 数学方程

假设流道内流体为幂律流体; 流场为等温、稳定流场; 雷诺系数较小, 可认为流动为层流流动; 由于惯性力、重力等远小于粘滞力, 忽略不计; 流体为不



a—三螺杆物理模型; b—流道有限元模型

图 1 三螺杆物理模型和有限元模型

可压缩流体; 流道壁面无滑移。在以上假设条件下, 流体的基本方程为^[2]:

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

ANSYS 中 CFD 分析模块提供的幂律流体粘度模型为:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 k D^{n-1} & D > 0 \\ \mu_0 k D_0^{n-1} & D \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: ——哈尔米顿算子;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, m/s;

P ——静压力, Pa;

$\boldsymbol{\tau}$ ——剪切应力张量;

μ_0 ——表观粘度, Pa·s;

* 中油中青年科技创新基金资助课题 (2001CX-30)

收稿日期: 2004-07-08

k ——粘稠度系数;

n ——流动指数;

D_0 —— D 的截面指数。

数值模拟采用低密度聚乙烯(LDPE)作为挤出物料,其物性参数为: $\mu_0 = 4\,200\text{ Pa} \cdot \text{s}$, $k = 10$, $n = 0.4$, $D_0 = 35$, 密度 $\rho = 954\text{ kg/m}^3$ 。

3 边界条件

按照实际运转条件及边界无滑移假设给出速度边界条件为机筒静止、螺杆旋转,即机筒内壁速度 $V_b = 0$,在螺杆外表面其速度 $V_r = N_s \cdot 2\pi \cdot R$,其中螺杆转数 N_s 为 60 r/min , R 为螺杆外表面半径。压力边界条件采用计算域两端的压力差 $\Delta P = P_1 - P_2 = 0\text{ MPa}$, P_1 为出口端压力, P_2 为入口端压力。

4 计算结果与分析

图2为流道分析段压力等值线。在左、中、右三个流道,每经过螺棱顶端,压力梯度明显增大,而螺槽中的压力等值线密度较小。这说明螺棱顶端的物料流动情况较复杂,螺槽中的物料流动相对比较平稳。



图2 分析段压力等值线

图3为距出口轴向距离 $Z = 15\text{ mm}$ 处的截面压力分布。由图3可以看出,同一截面的压力分布很不均匀,螺棱的推力面压力值大于拖拽面的压力值,在左右两啮合区的压力梯度明显大于螺槽区的压力梯度,这有利于提高物料的混合效果。

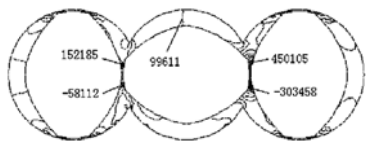


图3 截面压力分布 ($Z = 15\text{ mm}$)

图4给出了流道端面平均速度分布。由图4可以看出,机筒内壁的速度为0,从机筒内壁到螺槽速度值逐渐增大。在啮合区和机筒内壁附近的速度梯度较大,说明该区域的物料流动情况较复杂。

图5为流道轴截面轴向速度分布。由图5可知,在截面的大部分区域轴向速度为负值,即沿挤出

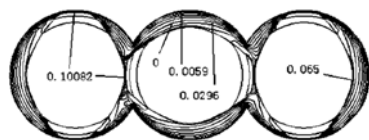


图4 端面平均速度分布

方向流动。在螺棱顶端小间隙处轴向速度为正值(正值表示与挤出方向相反),物料在该处有回流,回流最大速度出现在啮合区。

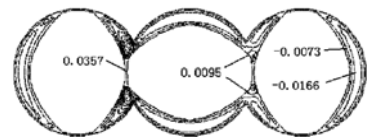
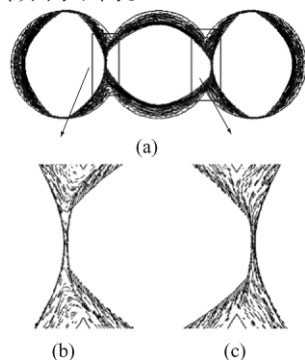


图5 截面轴向速度分布

图6为流道截面速度矢量图。由图6a可以看到,物料在流经三个螺杆时,经过两个啮合区,啮合区具有较大的压力梯度和速度梯度,因此,相对于双螺杆挤出机,三螺杆挤出机更有利于物料的混合。从图6b可以看到,左螺杆的一部分物料直接流向中间螺杆,而另一部分物料流向左啮合区。从图6c可以看到,中间螺杆和右螺杆的物料绝大部分都流向右啮合区。左右两啮合区速度矢量的差异主要是因为螺杆的旋转方向不同。



a—总体; b—左啮合区; c—右啮合区

图6 流道截面速度矢量图

图7示出流道端面粘度分布。由图7可以看出,螺棱顶端小间隙,特别是两个啮合区的螺棱顶端的物料粘度值较小,而螺槽中的物料粘度值最大。这是因为螺棱顶端的物料压力梯度最大,流动速度最快,所受的剪切应力较大,物料剪切变稀,所以粘

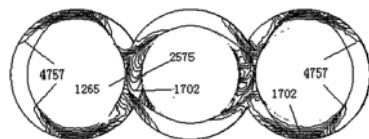
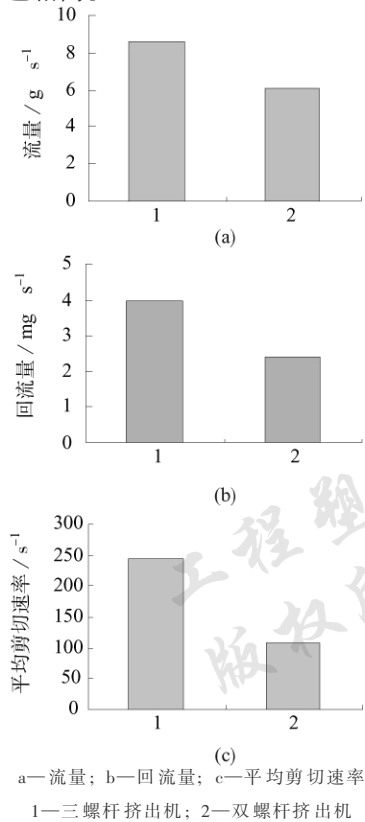


图7 流道端面粘度分布

度值最小。而螺槽中的物料压力梯度较小, 流动缓慢, 所受的剪切应力较小, 所以粘度值较大。

图 8 为双螺杆和三螺杆挤出机挤出特性的比较。为了便于挤出特性的比较, 双螺杆挤出机常规螺纹元件的螺杆基本尺寸、两螺杆中心距及螺杆和机筒间隙值和三螺杆均相同, 双螺杆流道网格密度和三螺杆也相同。



流量 (Q) 是衡量螺纹元件挤出能力最主要的技术参数, 通过对任意截面内和挤出方向相同的轴向速度 V_z 进行积分, 可求得流量, 即: $Q = \int V_z ds$ 。由图 8a 可以看到, 虽然三螺杆比双螺杆在结构上只多出了一个螺杆, 但三螺杆常规螺纹元件的挤出量几

乎是双螺杆常规螺纹元件挤出量的 1.5 倍。

回流量 (Q_{back}) 是衡量分布性混合能力的主要标志, 回流量越大, 其分布性混合能力越强, 回流量即对任意横截面内和挤出方向相反的轴向速度 V_{back} 进行积分, 即: $Q_{back} = \int V_{back} ds$ 。由图 8b 可以看到, 三螺杆常规螺纹元件的回流量大于双螺杆常规螺纹元件的回流量, 因此三螺杆的分布性混合能力强于双螺杆。

平均剪切速率 ($\dot{\gamma}$) 是比较螺纹元件分散性混合能力的主要技术指标, 平均剪切速率按照如下公式计算: $\dot{\gamma} = \frac{n}{d} \frac{d\Omega}{dt}$, $\dot{\gamma} = 2(\dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2)$ 。由图 8c 可知, 三螺杆的平均剪切速率大于双螺杆, 为双螺杆的 2 倍多。

5 结论

(1) 三螺杆挤出机具有两个啮合区, 在啮合区具有较大的压力梯度、速度梯度, 有利于物料的充分混合。物料在流道轴截面内, 从一根螺杆流向另一根螺杆, 共流经两个啮合区, 因此, 其混合性能好于双螺杆挤出机。

(2) 物料在螺棱顶端小间隙处有回流现象, 促进了物料的轴向混合。

(3) 在流道的螺棱区, 物料粘度值较小; 在螺槽区, 物料粘度值较大。

(4) “一字”型排列三螺杆挤出机在物料的输运能力、分散性混合能力和分布性混合能力方面都好于双螺杆挤出机, 因此, 三螺杆挤出机更适于聚合物加工。

参考文献

1 朱向哲. 双螺杆反应器挤出过程的数值模拟: [硕士学位论文]. 辽宁: 辽宁石油化工大学, 2004. 35
2 翟金平, 胡汉平. 聚合物成型原理及成型技术. 北京: 化学工业出版社, 2001. 125

THREE DIMENSIONAL FLOW FIELD ANALYSIS IN TRI-SCREW EXTRUDER OF “—” TYPE

Zhu Xiangzhe, Xie Yujun

(School of Mechanical Engineering, Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, Fushun 113001, China)

Miao Yi

(Institute of Chemical Machinery, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT The flow of polyethylene in tri-screw extruder of “—” type is analyzed by ANSYS. The pressure, velocity and viscosity distribution is discussed, and the extrusion characteristics of twin screw and tri-screw extruders are compared. The results show that tri-screw extruder has good material transportation, dispersive mixed ability and distributive mixed ability, comparing with those of twin screw extruder.

KEYWORDS “—” type array, tri-screw extruder, extrusion characteristic, ANSYS