

文章编号:1000-582X(2012)07-025-07

新型双螺杆捏合机流场动力学特性数值模拟

魏 静,孙旭建,孙 伟

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:针对一种新型双螺杆捏合机流场动力学特性进行数值模拟,建立双螺杆捏合机流场数值仿真模型,依据计算流体动力学(CFD)理论,对非牛顿流体进行三维、等温稳态数值分析,研究其不同转速及中心距条件下压力场分布、速度场分布、最大剪切应力、物料流动速率等特性。研究表明:随着转速不断提高,流场最大压力、流量流动速率、最大剪切应力都会随之增大;螺杆转子对流场的最大剪切应力值随中心距的增加先增大后减小,而流动速率随中心距的增加不断增加,但当中心距增加到一定值后,流动速率会出现负值,物料出现严重回流,导致捏合机无法正常工作。研究结果为双螺杆捏合机结构参数的设计优化以及性能预测提供理论依据。

关键词:双螺杆捏合机; 计算流体动力学; 非牛顿流体; 数值方法

中图分类号: TG156

文献标志码: A

Numerical simulation of flow field dynamics characteristics for a novel twin-screw kneader

WEI Jing, SUN Xujian, SUN Wei

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The numerical simulation for dynamic characteristics of the flow field of a novel twin-screw kneader is carried out. The numerical simulation model of twin-screw kneader is established, and the three-dimensional, isothermal and steady numerical analyses of non-newtonian fluid are presented based on computational fluid dynamics(CFD) theory, and the characteristics under the conditions of different speeds and center distances, such as the distribution of pressure and velocity field, the maximum shear stress, the mass flow rate and so on, are studied. The research results show that, with increasing speed, the maximum flow pressure, the mass flow rate and the maximum shear stress increase; the maximum shear stress increases first and then decreases with increasing of center distance of the screw rotors, while the mass flow rate increases with increasing of center distance; but when the center distance reaches a certain degree, the mass flow rate is negative and the material appears serious reflux which can make the kneader stop working. The results provide a theoretical basis for performance prediction and reasonable designing for the novel twin-screw kneader.

Key words: twin-screw kneader; computational fluid dynamics (CFD); non newtonian liquids; numerical methods

收稿日期: 2012-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905023); 中国博士后科学基金面上资助项目(20100471443); 中国博士后基金特别资助项目(201104560)

作者简介: 魏静(1978-), 男, 大连理工大学副教授, 博士后, 主要研究方向: 传动机械学、机械系统动力学等。
(E-mail) weijing@dlut.edu.cn.

捏合机广泛用于产品注塑加工、挤出成型中,亦可用于化工、橡胶、塑料、制药、食品等行业,是一种高性能的、对高黏度及超高黏度的物料进行混合、搅拌及塑化等操作的机械设备。近 30 年来随着高分子工业飞速发展,作为生产高分子材料核心设备的聚合反应器中有 85% 以上是捏合搅拌设备^[1]。现代高分子材料领域的进步促进了高黏度流体搅拌捏合设备的进一步发展,给成型和混合工艺提出越来越多和更高的要求。

双螺杆捏合机工作特性主要表现在:输送、混合、剪切、辊压及自清理作用等几个方面,可连续工作,是一种高效的聚合物加工反应器。双螺杆捏合机核心部件是一对相互啮合的螺杆转子,如何有效地设计螺杆捏合机螺杆转子是提高双螺杆捏合机性能的关键。螺杆元件作为双螺杆捏合机的关键部件得到充分的重视并不断得以发展,从最初简单的平行、整体式双螺杆发展到平行、锥形组合式两大类,螺杆元件类型日益增多。目前众多厂商不断开发一些特殊的新型混炼组件,如 FTX polygon 元件(六棱柱元件)、FTX CME 元件(S 型元件)、WPTME 元件、ZME/SME 和 LCMAX 元件等^[2]。其他新型双螺杆捏合机有美国 LIST 公司生产的 APP 型双螺杆捏合机、Baker Perkins 生产的 MP 系列双螺杆捏合机、美国 Werner & Pfleiderer 公司生产的 ZKS 双螺杆捏合机^[3]等。

物料流动对双螺杆捏合机有很大影响。张宇昕等^[4]建立双螺杆挤出机预热启动时包括机筒、高聚物和螺杆在内的非稳态传热模型,用于预测挤出机的温度变化和分布以及螺槽中的高聚合物融化情况;Khalifeh 等^[5]应用有限容积方法对单螺杆挤出机稳态非等温流动进行了数值模拟,数值计算结果表明机筒的温度分布和高聚物流变特性对高聚物熔体的流场有显著影响。

目前,主要有两种方法被广泛采用来分析物料在流场内流动,一种是解析法^[6],另一种是数值计算法^[7],文献[6-7]分别用解析法和数值计算法对流体进行分析。由于螺杆转子结构和物料流道的复杂性,采用解析法来求解三维流场相当困难;此外,因为加工过程中通过实验方法测定物料所受的应力、应变、滞留时间分布、温度和压力等物理参数比较困难,迫切需要通过借助计算机辅助工程技术掌握这些参数。运用专业流体仿真软件研究捏合机内部流场的特性是一种有效的方法。数值模拟方法不仅具有成本低、速度快等较显著的优点,还能解决由于实验技术所限难以进行测量的问题。

笔者对一种新型双螺杆捏合机进行研究^[8-10],建立捏合机流道实体模型,运用 FLUENT 软件对流道流场进行数值模拟。通过分析,研究物料在捏合机工作时压力场、速度场分布,以及螺杆转子间隙大小、转速等参数对流道流场的影响。利用数值计算方法,揭示流道流场内部流动规律,为新型双螺杆捏合机螺杆转子合理设计及试验提供理论依据。

1 双螺杆捏合机结构设计

1.1 螺杆转子的结构设计

新型双螺杆捏合机阴、阳螺杆转子的端面截型如图 1 所示^[11]。

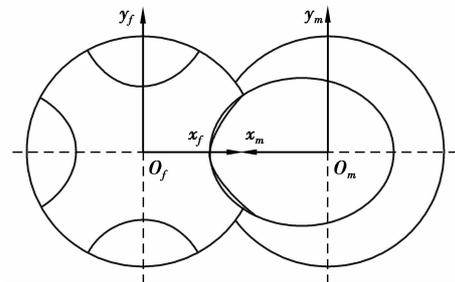


图 1 转子端面型线

阴、阳转子的端面型线方程分别以各自的中心轴线作螺旋旋转运动,就可得到对应的螺杆转子三维螺旋齿面。右旋螺旋面的参数方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= x(t) \cos \tau - y(t) \sin \tau, \\ y &= x(t) \sin \tau + y(t) \cos \tau, \\ z &= p\tau, \\ p &= T/2\pi. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 为螺杆转子端面截型; τ 为参变数,表示端面型线从起始绕 Z 轴转过的角度,以顺时针方向转动为正; T 为螺杆导程。对于左旋螺旋面,只需把 $p\tau$ 前面的正号改为负号即可。

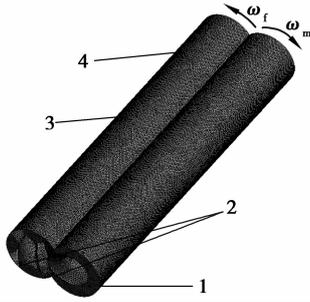
根据螺杆转子端面型线方程、螺旋面方程得到的双螺杆捏合机阴、阳螺杆转子三维实体模型如图 2 所示。



图 2 螺杆转子实体模型

1.2 流场有限元模型

根据双螺杆捏合机样机的实际尺寸建立“∞”机筒的三维几何模型,通过布尔运算把机筒中的双螺杆转子实体模型切除,得到双螺杆捏合机三维流道实体模型。对流道流场采用四面体单元进行网格划分,得到24.625 1万个节点、122.381 8万个单元,双螺杆捏合机流道流场有限元模型如图3所示。



1—入口;2—内壁;3—外壁;4—出口;
ω_f—阴转子转速;ω_m—阳转子转速

图3 流场有限元模型

2 物料流动模型及边界条件

2.1 物料数学模型

双螺杆捏合机中的加工物料为高黏度非牛顿流体,可采用幂律流体模型^[12-14]进行计算。考虑到物料输送具体条件及流场特性,作以下假设:1)流场稳定、等温;2)流体的雷诺系数较小,为层流流动;3)忽略惯性力、重力等体积力影响;4)流体不可压缩;5)流道的壁面没有滑移。物料模型的本构方程、连续性方程和动量方程分别为式(2)~(5)。

本构方程:

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (2)$$

$$\tau = m \dot{\gamma}^n. \quad (3)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

动量方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \mathbf{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x, \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \mathbf{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y, \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \mathbf{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(2)~(5)中: n 为幂律指数; η 为表现黏度,Pa·s;

τ 为剪切应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; ρ 为密度, $kg \cdot m^{-3}$; ∇ 为哈密顿算子; \mathbf{u} 为速度矢量, $m \cdot s^{-1}$; p 为静压力,Pa。

模拟所使用物料是抚顺石化生产的PP粉料^[15],该物料在473 K时具体物理参数如下:密度 ρ 为735 $kg \cdot m^{-3}$,熔体粘稠度为3 802 Pa·s,幂律指数 n 为0.38,在某温度下的热导率为0.15 W/(m·K),比热容为2 100 J/(kg·K)。因为是等温流场,在仿真分析中不考虑温度的变化,所以不求解能量方程。

2.2 边界条件

考虑物料在流道中的流动特性,对流场施加压力和速度边界条件。流场外壁面静止,对流场外壁面施加无滑移边界条件;在捏合机工作时,阴、阳螺杆转子分别以不同角速度 ω_f 、 ω_m 旋转,带动物料在机筒内部运动,流道内壁面物料运动的速度与螺杆转子表面的运动速度相同,即阴、阳螺杆转子表面施加速度边界条件,其速度为

$$\left. \begin{aligned} v_f(r) &= \omega_f \cdot r_f, \\ v_m(r) &= \omega_m \cdot r_m. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在整体笛卡尔坐标系下,速度矢量可分成3个分量 v_x 、 v_y 、 v_z ,在建立流道模型时,坐标原点在阳转子中心轴线处的入口处。设阴转子轴线入口处点位置为 (x_0, y_0, z_0) ,则阴、阳转子表面速度边界为

$$\left. \begin{aligned} v_{fx} &= \omega_f \cdot (y - y_0), \\ v_{fy} &= -\omega_f \cdot (x - x_0), \\ v_{fz} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{mx} &= -\omega_m \cdot y, \\ v_{my} &= \omega_m \cdot x, \\ v_{mz} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

物料从捏合机的入料口进入流道,流道入口处的压力 P_1 很小,几乎为零,物料经过螺杆转子工作区域到达出料口,由于物料的挤压,在流道出口处会有一定压力 P_2 ,所以流道的压力边界条件为沿挤出方向的压力差值,取为 $\Delta P = P_2 - P_1$ 。

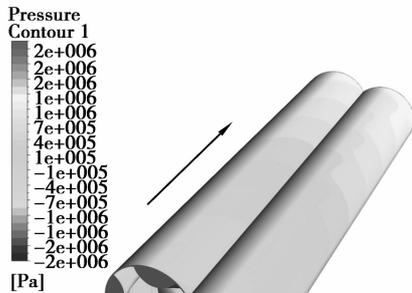
流场有限元模型的入口边界、速度边界、外壁边界以及出口边界设置如图3所示。

3 流场数值模拟及结果分析

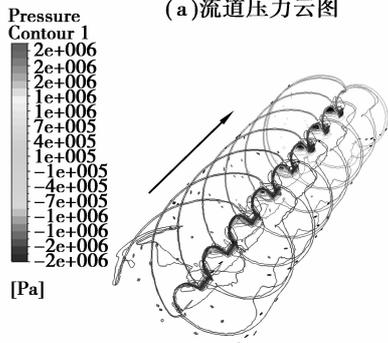
3.1 压力场分布数值模拟

采用流体专用分析软件Fluent对双螺杆捏合机内部流场进行仿真分析。流场整体压力值及等值线图如图4所示。从图4(a)可知,捏合机流道沿入口到出口压力值逐渐递增,压力值明显增大,位置发生在螺棱顶端,而螺槽底部的压力值较小。在同一

轴向截面上,右侧流道的压力值要略大于左侧流道,这表示在输送物料方面阳螺杆转子承受的压力要大于阴螺杆转子。从图 4(b)可以看出,整个流道中啮合区域的压力值较大,表明在阴、阳螺杆转子啮合区域更有利于物料的混合。



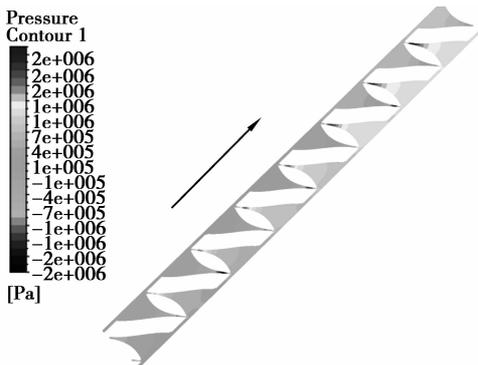
(a) 流道压力云图



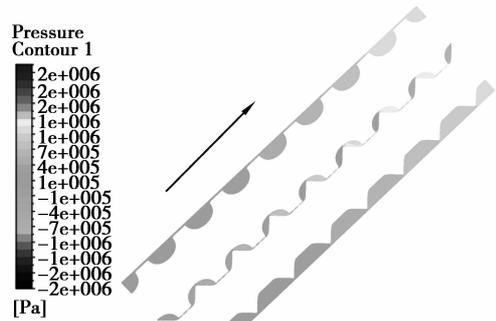
(b) 流道压力等值线图

图 4 流道压力场

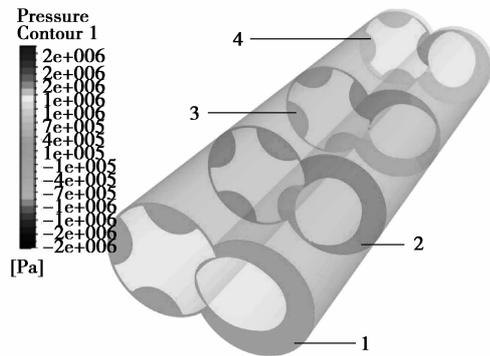
图 5(a)和(b)为流道啮合区正视剖面区域和上视剖面区域的压力云图。从图 5 可以看出流道下部压力值要大于上部压力值,而啮合区域的压力值明显大于其他位置;图 5(c)为不同轴向截面处的压力值,从 5(c)可知,在不同界面位置处流场呈现不同流动状态;在相同截面位置处左、右流道的压力也是不同的,这样更有利于物料的流动与混合。



(a) 流道啮合区正视剖面压力云图



(b) 流道啮合区上视剖面压力云图



(c) 流道轴向各截面位置压力云图

1—入口截面处;2—110 mm 截面处;
3—230 mm 截面处;4—390 mm 截面处

图 5 流道沿轴向不同截面及轴向各截面处压力场

图 6 为流道啮合区上下壁面沿轴向方向的压力曲线。从图 6 可知,压力值沿轴向方向呈阶梯状上升,且流道啮合区下部压力值要大于上部压力值,由于该类型螺杆转子在啮合区域是开放的^[11],开放区域以及上下壁面压力差的存在更加有利于物料在该区域的充分混合。

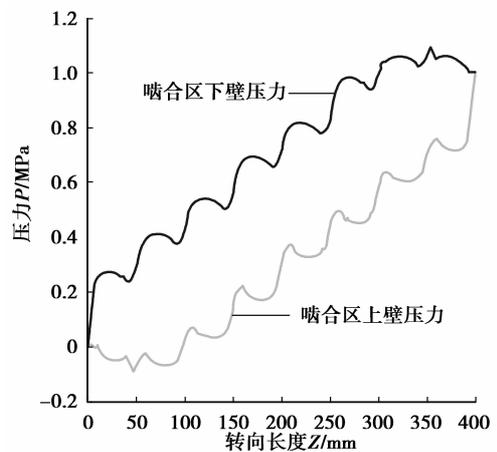


图 6 流道啮合区上下壁面压力曲线图

3.2 速度场分布数值模拟

图 7 所示为流道速度场分布云图。从图 7(a)可以看出,流道外壁面速度基本为零,这是由于机筒静止采用无滑移边界条件造成的;从图 7(b)可以看出阴、阳转子螺棱处的速度较大,阳转子螺棱处的速度值远大于阴转子螺棱处速度值;而转子螺棱处的速度明显大于螺槽处的速度;图 7(c)为入口处的轴向方向速度云图,图中 A 点处轴向速度为负值,表示物料在在螺棱与机筒的间隙中有回流,这种回流现象的出现对物料的混合是有利的。图 7(d)为入口处速度矢量图,从图中可以看出,在阳转子螺棱顶部速度矢量较大,而其他区域速度矢量较小,螺棱顶部较大的速度矢量对物料的混合以及剪切均是有利的;图 7(e)为整体流道速度矢量图,从图 7(e)中也可以看出,螺棱处的速度值较大,而流道螺槽处速度普遍较低。

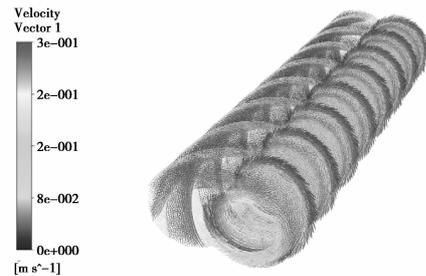
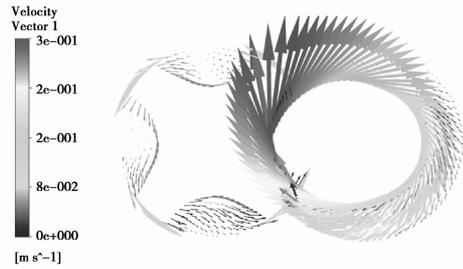
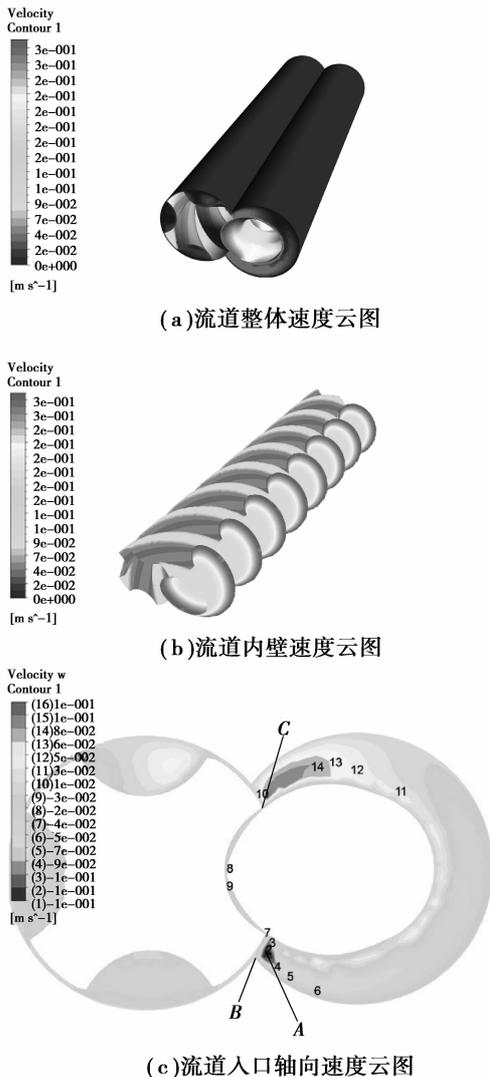


图 7 流道速度场

3.3 转子中心距与转速对流场影响

螺杆转速与中心距是捏合机中非常重要的参数,为进一步研究双螺杆捏合机流场的性能,当双螺杆转子的齿廓参数给定后,改变双螺杆的转速、中心距大小,分析其对捏合机流道的压力场、速度场、剪切应力、流量流动速率等性能的影响,其中,阳转子转速分别取 20、40、60、80、100 r/min。

分析不同转速与不同中心距条件下流场最大压力值可知:随着转速的不断提高,流场的最大压力值不断增大;在相同的转速条件下,最大压力值随着中心距增加先增加后减小,在中心距 50.15 mm 附近压力值最大。中心距与流道最大压力值的关系曲线如图 8 所示。

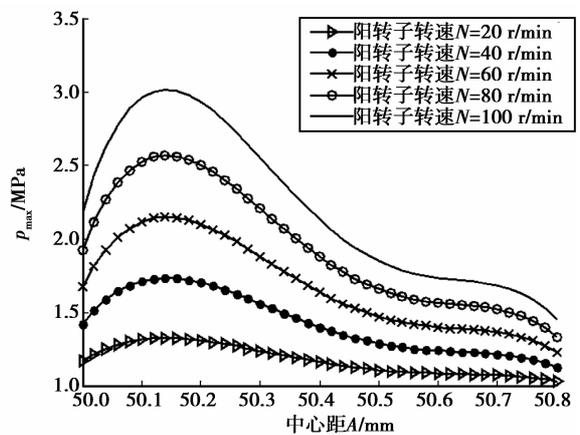


图 8 中心距与流道压力值曲线

转子中心距变化与流场最大剪切应力值之间关系如图 9 所示。从图 9 可知,转速越高,剪切应力值越大;最大剪切应力值随着中心距的增大先增大后减小,在中心距 50.15 mm 附近剪切应力值最大。

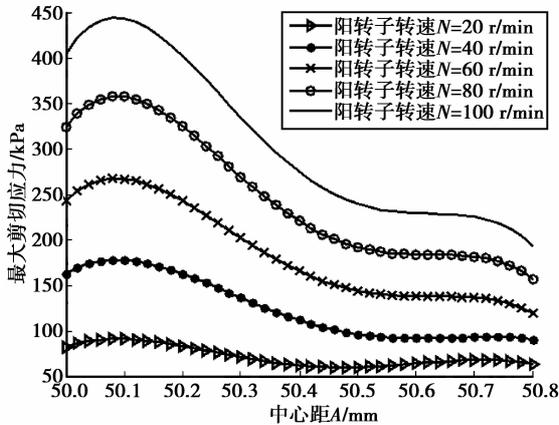


图 9 中心距与流场最大剪切应力曲线

在双螺杆捏合机加工过程中,物料流动速率决定着生产效率,研究转子转速和中心距对物料流动速率的影响是十分必要的。图 10 为不同转子转速、中心距条件下物料流动速率曲线。根据图 10 可知,流场流动速率随中心距的增加而增大,随着转速增加流场流动速率也同样增大;但当转子中心距增加到 50.8 mm 时,物料流动速率出现负值,如表 1 所示,表明在当前中心距条件下双螺杆捏合机已经无法完成输送物料的工作,因此螺杆转子中心距必须保持在合理范围之内。

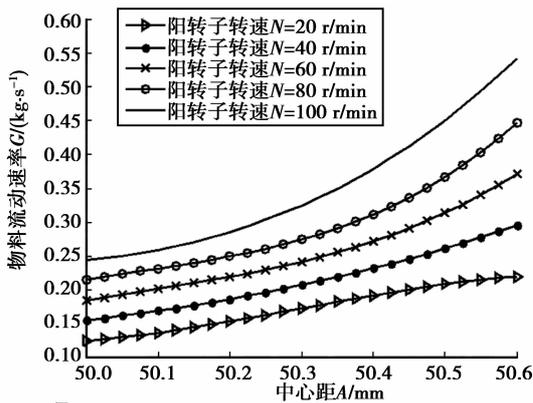


图 10 中心距与物料流动速率的曲线

表 1 中心距为 50.8 mm 时的物料流动速率

阳转子转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	20	40	60	80	100
物料流动速率/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.078	-0.115	-0.151	-0.188	-0.210

在分析过程中,在图 7(c)中选取关键点 B 点和 C 点作为监测点,检测这两点在不同中心距和转速

条件下各项参数的变化。图 11 所示转子转速与 B 点压力值曲线。从图 11 中可以看出,随着中心距增大,B 点压力值先减小后增大;随着转速增大,B 点压力值不断增大。

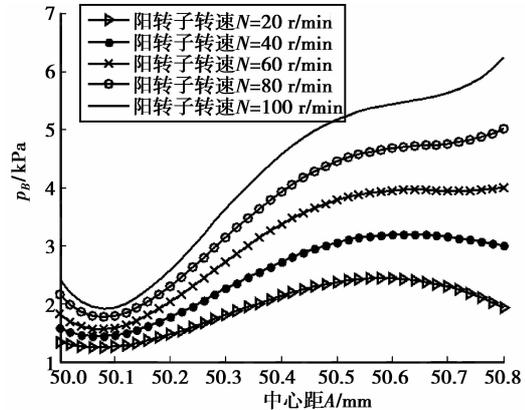


图 11 中心距与监测点 B 处的压力值曲线

图 12 为监测点 C 速度值与中心距关系曲线,从图 12 可以看出,随着中心距的增大,监测点 C 的速度随之减小,最后趋于平稳。在同一中心距下,转速越高,C 点速度值越大。

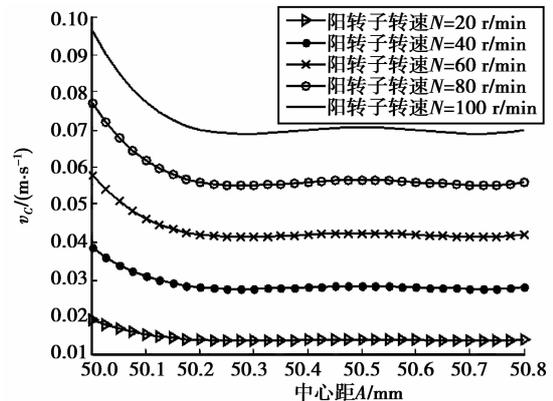


图 12 转速与监测点 C 的速度值曲线

图 13 所示为监测点 C 处剪切应力与中心距的关系曲线。

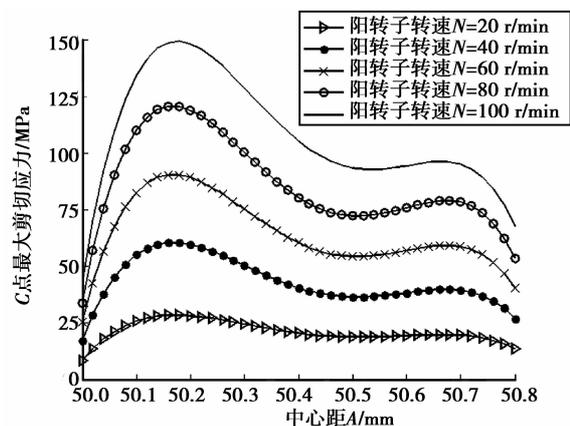


图 13 中心距与监测点 C 处的剪切应力值曲线

C点的剪切应力值随着转速的增大而增大;在同一转速条件下,随中心距增大先增大后减小,在50.15 mm附近出现最大值。

4 结论

基于计算流体动力学(CFD)方法,以Fluent数值仿真软件为载体,对某新型双螺杆捏合机流道流场动力学特性进行分析与研究。由于螺杆转子的特殊结构使得该双螺杆啮合区存在开放区域,开放区域及上下壁面压力差的存在有利于物料在该区域的充分混合;转子中心距和转速对双螺杆捏合机的流道压力、速度、流动速率等流场流动特性有很大影响,选择合理的中心距及转速可有效提高捏合机混合、剪切、输送等性能;研究结果对双螺杆捏合机结构参数的设计和优化具有理论指导意义。在后续研究中,将通过研制的双螺杆捏合机样机进行性能实验研究,并将实验结果与理论分析及模拟分析结果进行对比分析,为进一步的优化分析和设计提供数据支持。

参考文献:

- [1] 耿孝正. 塑料混合及连续混合设备[M]. 北京:中国轻工业出版社,2008.
- [2] Fleury P A. Bulk polymerisation or copolymerisation in a novel continuous kneader reactor [J]. *Macromolecular Symposia*,2006,243(1):287-298.
- [3] Seck O,Maxisch T,Wamecke H J,et al. Investigation of the mixing- and devolatilization behavior in a continuous twin-shaft kneader [J]. *Macromolecular Symposia*,2010,289(1):155-164.
- [4] 张宇昕,卢涛,江波,等. 高聚合物在双螺杆挤出机中预热融化过程的数值模拟[J]. *机械工程学报*,2009,45(4):46-49.
ZHANG Yuxin, LU Tao, JIANG Bo, et al. Numerical simulation of polymer melting during preheating in twin-screw extruder [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2009,45(4):46-49.
- [5] Khalifeh A, Clermon J R. Numerical simulations of non-isothermal three-dimensional flows in an extruder by a finite-volume method [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*,2005,126(1):7-22.
- [6] Liao S J. A short review on the homotopy analysis method in fluid mechanics [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*,2010,22(5):882-884.
- [7] Fukuoka T, Min K. Numerical nonisothermal flow analysis of non-newtonian fluid in a nonintermeshing counter-rotating twin screw extruder [J]. *Polymer Engineering and Science*,1994,34(13):1033-1046.
- [8] 杨涛,张光辉. 差速窄间隙捏合机螺杆齿形及刀具设计[J]. *重庆大学学报:自然科学版*,2006,29(12):18-31.
YANG Tao, ZHANG Guanghui. Design of cross section curves of counter intermeshing twin screw kneader and milling cutters blade profiles [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*,2006,29(12):18-31.
- [9] 魏静. 差速双螺杆捏合机型线设计理论及螺旋面高效高精度加工研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [10] 魏静,张光辉,李凤吉,等. 新型差速双螺杆混炼机最优型线设计参数研究[J]. *中国机械工程*,2008,19(7):787-792.
WEI Jing, ZHANG Guanghui, LI Fengji, et al. Study on parameter optimization of profile curve design on a novel differential twin screw kneader [J]. *China Mechanical Engineering*,2008,19(7):787-792.
- [11] Wei J, Guo L, Zhang G H. Profiles design, optimization and geometric analysis of rotors of a novel continuous kneader reactor [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*,2010,29(15):2279-2295.
- [12] 冯英龙. 双螺杆泵螺杆型线理论研究及性能模拟[D]. 西安:西安石油大学,2007.
- [13] Zhang H, Zhang X X, Zheng L C. An analysis of the characteristics of the thermal boundary layer in power law fluid [J]. *Journal of Thermal Science*,2008,17(3):233-237.
- [14] Zheng L C, Zhang X X. On energy boundary layer equations in power law non-newtonian fluids [J]. *Journal of Central South University of Technology*,2008,15(Sup):5-8.
- [15] 陈晋南,王鸳鸯,彭炯. 螺杆转速和机筒温度对加工聚丙烯的影响[J]. *北京理工大学学报*,2010,30(1):109-113.
CHEN Jinnan, WANG Yuanyang, PENG Jiong. Influence of the screw rotating speed and barrel temperature on polypropylene injection [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2010,30(1):109-113.

(编辑 张 苹)