

# 基于CFX的豆粕单螺杆挤出机的三维流场分析

郭树国, 张 召, 王丽艳, 徐文海

(沈阳化工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘 要:**运用CFX方法对具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机的流道进行流场分析,研究分析豆粕在其流道中的运动情况,包括速度矢量图、速度流线图、宏观压力图及挤出量,与具有普通机筒的单螺杆挤出机进行对比分析。结果表明:由于机筒具有反向螺纹及反向转动功能,使流场建压能力增强,挤出性能大幅度提高,速度流线产生涡运动,豆粕充分混合。研究结果可为单螺杆挤出机加工提供理论参考。

**关键词:**单螺杆挤出机;豆粕;CFX;有限元模拟

**中图分类号:**TS210

**文献标识码:**A

**DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2015.04.0699

## Three-dimensional Flow Field Analysis in Single Screw Extruder of Soybean Meal Based on CFX

GUO Shu-guo, ZHANG Zhao, WANG Li-yan, XU Wen-hai

(College of Machinery Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** Using CFX method to analyze material flow field of single screw extruder which with a rotating and spiral barrel, research and analyze the soybean meal movement. Including the velocity vector, velocity flow charts, pressure chart and extrusion capacity. Comparison with a single screw having a common barrel was conducted. The single screw extruder which with a rotating and spiral barrel has reverse thread and turning. It can enhance the ability to build pressure, improve extrusion capacity and produce vortex motion which was conducive to full mix. The research could provide references for the single screw extruder processing.

**Keywords:** Single-screw extruder; Soybean meal; CFX; Finite element simulation

单螺杆挤出机具有结构简单、高产量、低能耗等优点,在橡胶、饲料、陶瓷、食品、制药、化工等领域已经得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>,但由于单螺杆挤出机混合效果较差限制了其进一步发展。因此,研究单螺杆挤出机对物料的剪切混合,对研究单螺杆挤出机的挤压机理提高其性能具有重要意义。

目前传统的单螺杆挤出机已不能满足工业生产需求,为获得优良的混合分布能力,常引入不同混合元件<sup>[5]</sup>。但由于单螺杆混合元件结构的复杂性,很难用数学解析的方法求解,随着计算机在工程领域的不断应用,数值计算方法越来越普遍<sup>[6]</sup>,CFX是目前处于世界领先地位的计算流体力学软件之一,因其强大的三维模拟性和效果直观性,该软件广泛应用于模拟各种流体流动、传热、燃烧和化学反应等复杂流场。为此,本文以可转动的螺纹机筒和单螺杆为研究对象,以ANSYS软件为平台,以粘性流体力学为基础,以普通单螺杆为对照,讨论豆粕在具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机中的表现,模拟计算速度矢量、速度流线、宏观压力场,

挤出量重要性能。分析豆粕紊流流场的流动情况,为具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机的研发提供一定的理论依据。

### 1 模型及参数

#### 1.1 三维建模及流道CFD模型

图1a为单螺杆PRO/E模型,螺杆为右螺旋,螺杆根径为40 mm,外径为68 mm,螺距为26 mm。图1b为可转动的机筒,机筒的内螺纹为左螺旋,内径为50 mm,外径为64 mm,螺距为26 mm。螺杆与机筒异向转动,长度为140 mm。



a. 右螺旋单螺杆; b. 左螺旋螺旋机筒。

a. Right-hand single screw; b. Barrel with left-hand screw.

图1 螺杆与机筒的PRO/E模型

Fig.1 Screw and Barrel

收稿日期:2014-09-23

基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(L2011067)。

第一作者简介:郭树国(1978-),男,博士,副教授,主要从事农产品加工技术与设备研究。E-mail:guoshu\_guo@163.com。

图 2a 为将单螺杆与机筒组合后的模型,右螺旋的螺杆与左螺旋的机筒相互配合,螺杆顶部与机筒的螺纹顶部间隙为 1.6 mm,转动方向相反。图 2b 为剖面图,显示螺杆与机筒的配合情况。

图 3 为抽取的三维流道模型,运用 ANSYS CFX 对流道进行网格划分,网格为四面体,共有 46 258 个节点与 320 584 个元素。



a. 螺杆与机筒组合;b. 剖面图。  
a. Combination of screw and barrel; b. Profile diagram.

图 2 螺杆与机筒的组合模型

Fig. 2 The combination of screw and barrel



图 3 流道的 CFD 网格划分

Fig. 3 CFD grid model of flow channel

1.2 工程假设条件

流道中的物料为豆粕,属于幂律流体中的膨胀流体。流体存在于两个逆向转动的壁面之间,运动时质点相互掺杂渗透,由此认为紊流。流体是不可压缩的,流道壁面无滑移。豆粕密度为2 112 kg·m<sup>-3</sup>,粘度为 1 930 Pa·s,恒定温度为 80℃。

2 数学模型

模拟的边界条件为:

- (1) 螺杆的转速为常量( $n = 90 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ );
- (2) 螺纹机筒的转速为常量( $n = 60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ );
- (3) 进口的速度为常量( $u = 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),出口的压力设为 2 MPa;
- (4) 螺杆表面设定为无滑移,机筒表面设定为无滑移,同轴转动;
- (5) 紊流中采用时均值,忽略重力因素的影响。

该粘性流体的连续性方程为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

运动方程:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \tag{2}$$

时均流动能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho}{2} \bar{u}_i \bar{u}_i \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{u}_i \cdot \frac{\rho}{2} \bar{u}_i \bar{u}_i \right) = & - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i \bar{p} + \frac{\partial}{\partial x_j} \\ \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \bar{u}_i \right] - \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \\ \left[ \bar{u}_i \left( -\rho \overline{u_i' u_j'} \right) \right] - \left( -\rho \overline{u_i' u_j'} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \end{aligned} \tag{3}$$

由于螺杆与机筒逆向旋转局部形成涡运动<sup>[3]</sup>:

$$\tau_1 = \rho \nu \frac{d\bar{u}}{dy} \tag{4}$$

式中 $\bar{u}_i$ 为  $x$  轴方向某一段的平均速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\bar{u}_j$ 为  $y$  轴方向的平均速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\rho$ 为物料的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), $t$ 为时间(s), $\bar{p}$ 为此段的平均压强(Pa), $\mu$ 为粘度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), $u'$ 为扰动速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\tau_i$ 紊流中的切应力(N), $\nu$ 为涡运动粘度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

将粘性涡运动的剪切应力公式(4)代入(2)可以得到涡运动的雷诺方程。

3 模拟计算结果及分析

3.1 速度矢量场

为了更好地观察速度轴向的分布,在速度矢量场中取  $Y = 90 \text{ mm}$  处一截面,如图 4 所示,从图 4a 中可以看出,普通螺杆豆粕的质点运动是分层的,互不干涉,不利于物料的充分混合。而图 4b 具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机中豆粕的质点速度分层规律被打破,一部分区域出现了回流运动可看作涡运动。由式(4)可以计算这部分的剪切应力及雷诺方程,涡运动的存在能使豆粕反复搅拌混合<sup>[7]</sup>,有利于增加豆粕的混合均匀程度<sup>[3]</sup>,在图 4b 中螺杆与机筒最小间隙处相对速度几乎是图 4a 中的 2 倍,豆粕的扩散系数也随之增大。

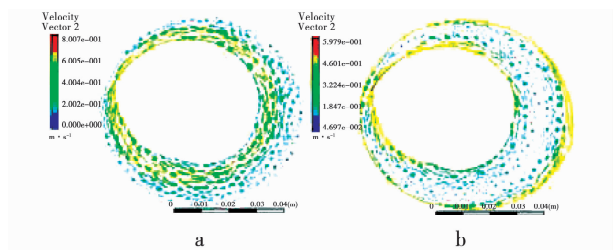
扩散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = D_m \nabla^2 c + F_c \tag{5}$$

由(5)可以推出  $D_m = \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c - F_c \right) / \nabla^2 c$

式中  $c$  为密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), $u$  为速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $F_c$  为物质产生率。

图 5 为具有转动螺纹机筒的单螺杆在  $Y = 90 \text{ mm}$  处的截面局部放大图,从图 5 中可以看出,豆粕发生了明显的螺杆棱槽内的涡运动也可以称为局部回流运动,有利于豆粕的再次挤压混合。



a. 普通螺杆;b. 具有转动螺纹机筒的单螺杆。  
a. General single screw; b. Single screw with rotating and spiral barrel.

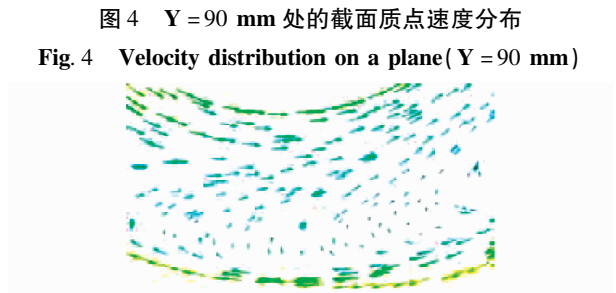


图 5 局部放大图  
Fig. 5 Partial enlarged view

3.2 宏观压力场的分析

流场宏观压力分布如图 6 所示。流域的宏观压力场可以说明螺杆的建压能力及输送物料的快慢,单螺杆为右螺旋,顺时针转动。螺纹机筒为左螺旋,逆时针转动。两者在挤出方向的压力进行叠加<sup>[5-6]</sup>,由于螺杆的建压作用,普通单螺杆与具有转动螺纹机筒的单螺杆的流域压力依次递增,图 6a 中最大压力差约为 1.15 MPa,而图 6b 中可以看出最大压力差约为 1.77 MPa,具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机的建压能力是普通螺杆的 1.4~1.6 倍。

总挤出量:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot H \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta}{2} + \left( \frac{\pi \cdot D \cdot H^3 \cdot \sin^2\theta}{12\mu} + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot \delta^3 \cdot \lg\theta}{10\mu \cdot b} \right) \frac{p}{L} \quad (6)$$

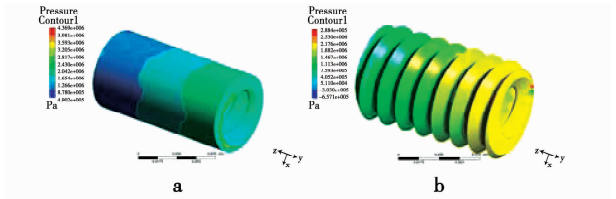
式中  $Q$  为挤出量(kg), $D$  为螺杆直径(m), $\theta$  为螺纹升角, $H$  计量段槽深(m), $n$  为转速( $\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\mu$  为粘度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), $L$  为计量段长度(m), $b$  为螺棱在轴向方向的宽度(m), $p$  为  $p_1 - p_2$  得到的, $p_2$  为计量段初的压力(Pa), $p_1$  为计量段末的压力(Pa)。

在式(6)中可以得到随着压力差  $p = p_1 - p_2$  的增加,挤出量也随着压力增加,螺纹机筒与单螺杆的建压相互叠加,有利于提高挤出机的挤出效率。

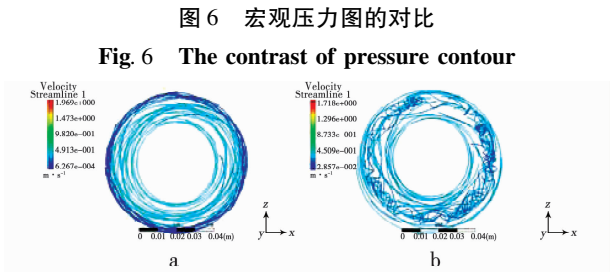
3.3 速度流线图

利用速度流线可以分析研究豆粕的运动速度及运动轨迹,从而了解豆粕的运动情况及分散情况。图 7 a 为普通单螺杆速度流线图,从图 7a 中可

以看出,豆粕的运动速度从螺杆表面到机筒表面依次减小,运动轨迹平滑无大的波动,属于层流运动,流场比较稳定,但不利于豆粕的充分混合。图 7b 为具有转动螺纹机筒的单螺杆速度流线图,可以看出豆粕的剪切速率增加,呈不规则运动,出现了涡运动,属于紊流运动,有利于增大分散系数,使豆粕充分混合<sup>[3]</sup>。



a. 普通单螺杆宏观压力场;b. 具有转动螺纹机筒的压力场。  
a. Pressure contour of general single screw; b. Pressure contour of rotating and spiral barrel.



a. 普通单螺杆速度流线图;b. 具有转动螺纹机筒的速度流线图。  
a. Velocity streamline of general single screw; b. Velocity streamline of rotating and spiral barrel.

图 7 速度流线图的对比  
Fig. 7 The contrast of velocity streamline

3.4 物料在流场中的运动规律

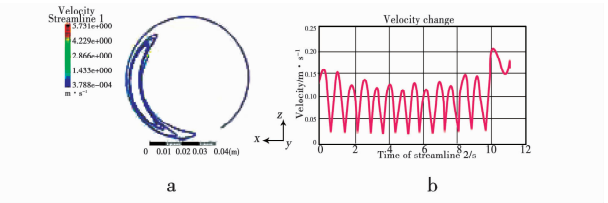
图 8a 为流道涡运动中一质点的速度流线,用它来代表豆粕中的一质点在涡运动区域的运动情况和运动规律从中可以看出,这一质点的速度流线在这一区域旋转,证明豆粕在此区域旋转、搅拌。图 8b 中为这一质点在此区域运动时的速度变化,质点速度来回震荡,说明豆粕在这个区域速度变化大,剪切力大。证明物料在这区域进行充分混合<sup>[4]</sup>。

3.5 挤出参数的对比

基于大量模拟得出 5 组转速与挤出质量的关系,如图 9 所示,普通单螺杆挤出机中挤出量随着转速的增大而增大,基本成正比。

对具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机进行挤出量分析,因其有两个变量:螺杆转速、机筒转速,设机筒的速率是螺杆的 2/3 且方向相反(例如螺杆速度为  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,机筒的转速为  $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ),图 9 中挤出量随着螺杆与转动机筒的速度增加而增大。

由于螺杆转速与机筒转速的配合关系,挤出量与螺杆的转速不成正比。在图9的转速内具有螺旋转动机筒的单螺杆挤出机的挤出量是普通螺杆挤出机挤出量的1.6~2.1倍。



a. 涡运动中质点的速度流线;b. 质点的速度变化。  
a. Velocity streamline of particle; b. Velocity change of particle.

图8 流场中一质点的运动情况  
Fig.8 Particle motion in the flow field

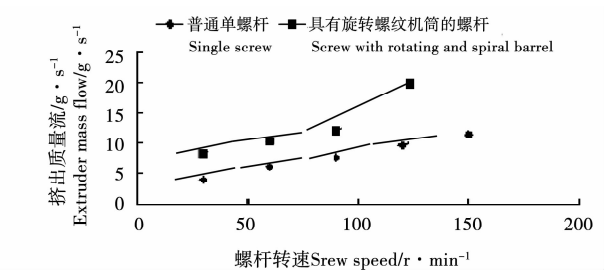


图9 两种螺杆挤出性能对比  
Fig.9 Comparison of two kinds of screw extruder performance

4 结 论

利用CFX方法研究了豆粕在具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机流场中的流动规律,重点研究分析其物料在流域中的运动情况、新型挤出机的建压能力、分散混合性能及挤出性能并与与常规单螺杆挤出机进行了比较,得到以下结论:

- (1)机筒的螺纹为左旋,螺杆螺纹为右旋,且转速异向,形成了涡运动,以利于豆粕的分散。
  - (2)由于机筒与螺杆的联合建压,使得具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机的建压能力强于普通单螺杆挤出机。
  - (3)由于机筒与螺杆异向转动和反向螺纹转动豆粕之间运动相对速度比较大,剪切力大,利于豆粕混合。
  - (4)具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机的挤出性能强于普通单螺杆挤出机。
- 具有转动螺纹机筒的单螺杆挤出机在分散性

能、建压性能、挤出性能方面有很大的优势,值得进一步研究开发。

参考文献

[1] 邢应生,朱复华,江顺亮. 单螺杆挤出过程固体输送段的数值模拟[J]. 中国塑料,2004,18(10):83-87. (Xing Y S, Zhu F H, Jiang S L. Numerical simulation for solid conveying section during single screw extrusion[J]. China Plastics,2004,18(10): 83-87. )

[2] 郭树国,王丽艳,刘强. 挤压参数对组织化大豆蛋白糊化度的影响[J]. 中国饲料,2011(11):26-28. (Guo S G, Wang L Y, Liu Q. Effect of extrusion parameters on the gelatinization degree of texturized soy protein[J]. China Feed, 2011(11):26-28. )

[3] 王会然,李宗军. 螺杆挤压机及其应用研究现状[J]. 食品工业,2011(10):99-102. (Wang H R, Li Z J. Research of screw extruder and its application[J]. The Food Industry,2011(10):99-102. )

[4] 潘龙,张玉霞,金志明,等. 单螺杆挤出机高速挤出技术研究进展[J]. 中国塑料,2009,23(8):1-6. (Pan L, Zhang Y X, Jin Z M, et al. Technological progress in high speed extrusion of single-screw extruders[J]. China Plastics,2009,23(8):1-6. )

[5] 荆轲. 双螺杆反应器组合螺杆的三维流场数值模拟[J]. 机械设计与制造,2008(5):85-87. (Jin K. Numerical simulation of 3-D flow characteristics in twin screw extruders with combined screws [J]. Machinery Design & Manufacture,2008(5):85-87. )

[6] 陈晋南,胡冬冬. 计算流体力学(CFD)及其软件包在双螺杆挤出中的应用[J]. 中国塑料,2001(12):12-16. (Chen J N, Hu D D. Applications of CFD and its software packages in twin - screw extrusion[J]. China Plastics,2001(12):12-16. )

[7] 杨凯,武凯,王以龙,等. 双螺杆挤压膨化机螺杆的力学模型及有限元分析[J]. 机械设计与制造,2013(1):175-177. (Yang K, Wu K, Wang Y L. Mechanical model and finite element analysis of screw in twin-screw extruder[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(1):175-177. )

[8] 王丽艳,郭树国. 玉米蛋白粉吸水性挤压膨化工艺的优化[J]. 贵州农业科学,2013,41(12):177-180. (Wang L Y, Guo S G. Process optimization for extrusion of corn gluten meal[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013,41(12):177-180. )

[9] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,1999. (Zhang Z X, Dong Z N. Viscous fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1999. )

[10] 张洪才. ANSYS14.0理论解析与工程应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2012:10. (Zhang H C. Theory and engineering application with ANSYS14.0 [M]. Beijing: China Machine Press,2012:10. )

[11] 耿孝正. 双螺杆挤出机原理及其应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2002:4. (Geng X Z. Twin screw extruders & its application[M]. Beijing: China Light Industry Press,2002:4. )