

基于CFX的新型豆粕单螺杆挤出机数值模拟分析

郭树国, 韩进, 王丽艳

(沈阳化工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要:单螺杆挤出机是加工以豆粕为原料的膨化食品行业中使用的关键设备。普通单螺杆挤出机存在混合不充分、比能耗低的缺点,为了提高其性能,运用ANSYS/CFX软件对具有三角屏障混炼元件以及反向螺纹元件的新型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,并和具有普通单螺杆元件挤出机进行对比分析,结果表明:新型组合式单螺杆挤出机的建压能力较好,可切断重排豆粕的速度流线,有利于豆粕更好地混合。研究结果可为单螺杆挤出机设计提供参考。

关键词:单螺杆挤出机;三角屏障混炼元件;反向螺纹;流场分析

中图分类号:TS210 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.02.0300

Numerical Analysis of New Type of Single Screw Extruder Based on CFX

GUO Shu-guo, HAN Jin, WANG Li-yan

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

Abstract: Single screw extruder is the most widely used tools for the production of expanded food with soybean meal as raw material. In order to improve the production performance, this paper using ANSYS/CFX software to analyze material flow field of single-screw extruder which with a triangle groove barrier mixers and counter screw, study and analyze the movement of soybean meal in its channel. Including the velocity vector, velocity flow charts, macroscopic pressure field. And then these were compared with ordinary screw. Results indicate that the new type screw of single screw extruder has better ability to build pressure, cut off and refresh the velocity vector, it benefits for materials mixing. The research can provide references for designing the single screw extruder.

Keywords: Single-screw extruder; Triangle groove barrier mixers; Counter screw; Flow field analysis

单螺杆挤出机因其自身结构简单、设备能耗低、生产应用领域广等突出优点,在农业饲料、食品工业、生物制药、橡胶塑料、陶瓷加工等领域被广泛使用^[1-4]。因在诸多行业内螺杆挤出机的使用频率和范围不断增加,使得螺杆挤出机在理论研究和技术创新上日趋完善。螺杆挤出机的螺杆根数由单螺杆发展到双螺杆,三螺杆以及多螺杆形态^[5],螺杆根数的增加会在一定程度上提升设备的挤出性能,但会使其能耗增加,设备成本也会成倍增加,且后期维修难度也会加大。多螺杆挤出机最大的缺陷是由于自身结构复杂导致存在中心区域^[6],在此区域内豆粕会由于过长的停留时间导致糊化,影响产品性能。因此研究设计新型单螺杆挤出机,使其在混炼效果上最大程度接近多螺杆挤出机,避免多螺杆挤出机的缺陷,进一步扩大单螺杆挤出机的应用范围。

有关单螺杆挤出机方面,国内外近年来主要的研究成果有: Domingues 使用数值模拟手段对单螺杆挤出机在不同工作状态下的混合进行分析,对混合效果的最终表述形式作出新的定义^[7]。何红和

朱复华^[8]对单螺杆挤出机的混炼元件类型进行分析,提出了最适合于单螺杆挤出机的方案。祝卫国等^[9]在单螺杆挤出机上设置混炼元件,达到提高整体混炼效果的目的。

以上研究均只涉及单一混炼元件对螺杆挤出机挤出性能的影响,并未考虑分布混合能力的改善。针对于目前传统的单螺杆挤出机已经不能满足工业生产需求,而多螺杆挤出机存在的不足,在充分考虑分散混合能力以及分布混合能力因素下本文设计了一款新型的单螺杆挤出机,它在引入三角屏障混炼元件的同时增设反向螺纹元件,通过两种功能元件与普通螺杆的组合构成新的螺杆构型。

本文以 ANSYS 软件为平台,使用 ICEM CFD 划分网格工具,以粘性流体力学为基础^[10-11],将普通单螺杆挤出机作为参照对象^[12-13],用 CFX 软件对流场进行后期处理,探究豆粕物料在新型单螺杆挤出机内的运动规律,模拟计算宏观压力场,局部压力场,速度流线图,速度矢量图以及压力差等重要性质,同时分析了豆粕在紊流流场的运动情况。

1 模型及参数

1.1 新型螺杆模型及 ICEM CFD 流场模型

图 1 为新型螺杆的 SolidWorks 三维模型,三维模型尺寸基于德国亚琛工业大学开发研制的 IKV 单螺杆挤出机,其中反向螺纹段各参数与普通输送段各参数均相同。螺杆分为 4 部分,由进料口向出口依次排列。各部分具体参数如下:1)普通输送段长 70 mm,螺杆根径 30 mm,外径为 50 mm,螺距 20 mm,螺纹旋向向右;2)三角屏障混炼段轴向长度 40 mm,外径为 50 mm,流道外径均值为 5.5 mm;3)反向螺纹段长 40 mm,除旋向为向左以外与普通输送段参数相同;4)普通输送段长 60 mm,参数与 1)相同。图 2 为新型螺杆中三角屏障混炼元件立体视图。

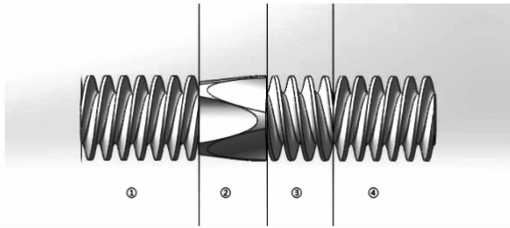


图 1 新型螺杆的 SolidWorks 模型

Fig. 1 SolidWorks model of a new type screw extruder

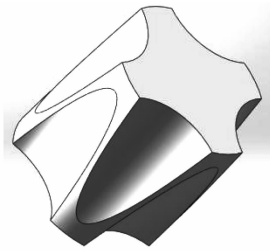


图 2 三维屏障混炼元件三维图

Fig. 2 Three dimensional barrier mixing element

图 3 为新型螺杆与机筒组合后的剖视图模型,螺杆与机筒之间的配合间隙为 1.0 mm。

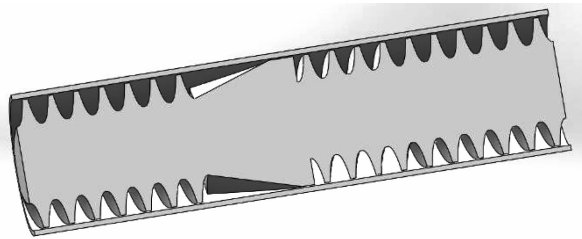


图 3 新型挤出机的剖视图

Fig. 3 Sectional view of the new type screw extruder

图 4 为在 ANSYS 环境下使用 Geometry 提取的流道模型,并运用 ICEM CFD 对流场进行网格划分,为了保证网格质量,使用二次四面体单元进行对流道进行多次划分^[14],处理完毕后的网格节点为

498 732,元素个数为898 945。

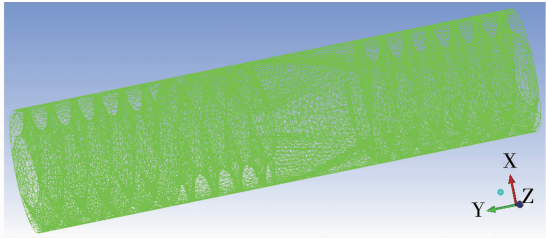


图 4 流道的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of channel

1.2 模拟条件设定

豆粕归类于膨胀流体,当受压挤出时其内部水分会产生蒸发分流现象,本试验以低温豆粕为原材料,假定低温豆粕在流道中完全填充,流道所处流场假定为温度恒定、层流状态的流场。低温豆粕的物理状态为:密度参数设定值为 $2\,112\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏度参数设定值为 $1\,930\text{ Pa}\cdot\text{s}$,试验环境温度值设定为 80°C ^[12]。

1.3 工况条件

采用济南朗正机械设备有限公司生产的 LZ3000-100 单螺杆食品挤出机实际工作条件作为试验的模拟条件:

- 1)挤出机螺杆的转速设定为 $n = 130\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;
- 2)进料口的填料速度设定为 $u = 0.08\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- 3)出口的压力设定为 3 MPa ;
- 4)假定低温豆粕在螺杆表面与机筒内表面均不产生滑移现象,螺杆表面与机筒表面的粗糙度均设定为 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

物料在普通输送段和反向螺纹段的运动可以视为等温层流模型,对于等温层流不可压缩的幂律流体,若忽略其体积力,则连续性方程可以简化为:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

运动方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \tag{4}$$

幂律流体本构方程为:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n \tag{5}$$

式中: P 表征静压力,单位为 Pa; μ 表征物料的粘度,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; V_x, V_y, V_z 表征笛卡尔坐标系下沿 x, y, z 3 个轴线方向上的速度分量,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V 表征速度矢量,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; γ 表征剪切速率,单位为 s^{-1} ; τ_{ij} 表征处于笛卡尔标系下剪切应

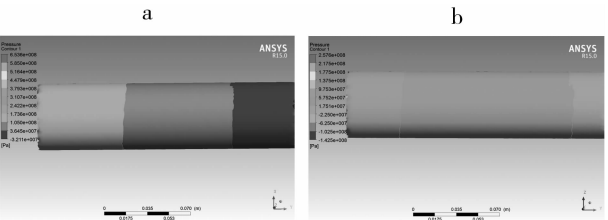
力的分量,下角标 i,j 分别表示为 $x,y,z;n$ 表征幂律指数。

由式(1) ~ (5)联立计算即得到流道内豆粕的压力场分布和速度场分布。

2 模拟结果与分析

2.1 宏观压力场的分析

宏观压力场主要用来分析单螺杆挤出机在沿物料输送轴线方向上的建压能力及螺杆原件对豆粕的输送能力。图 5a 为普通单螺杆挤出机的全局宏观压力场,图 5b 为新型单螺杆挤出机的全局宏观压力场。由图 5a 与图 5b 可知,在螺杆的建压作用下流域的压力分布呈现一定规律性,即沿豆粕运动方向压力逐层递增状态,通过模拟实验获得以下数据:普通螺杆的最大压力差为 4 MPa,新型螺杆的最大压力差为 6.85 MPa,在建压能力上相比较于普通螺杆挤出机,新型螺杆挤出机的建压能力能够达到其 1.71 倍。

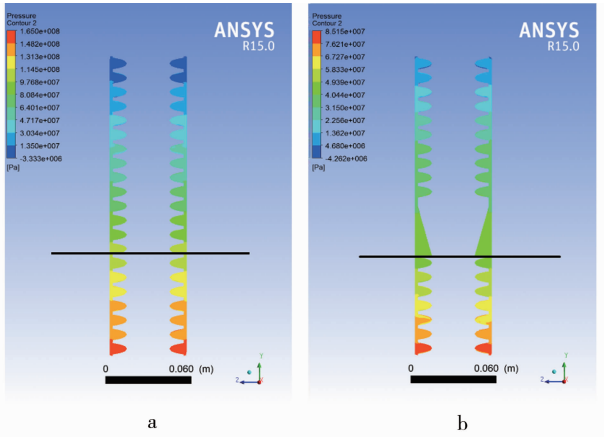


a: 普通单螺杆挤出机; b: 新型单螺杆挤出机。
a: General single-screw extruder; b: The new type single-screw extruder.

图 5 单螺杆挤出机全局宏观压力场
Fig. 5 The pressure contour of single-screw extruder

在 YZ 平面取 $X = 25\text{ mm}$, 观察压力的轴向分布,如图 6 所示,图 6a 为普通螺杆挤出机流道,图 6b 为新型单螺杆挤出机流道。在新型螺杆的普通输送段,三角屏障混炼段以及反向螺纹段(位于黑线上方)的压力均高于普通螺纹段,建压紧凑,整个流场压力增速快于普通螺杆,有利于豆粕的快速向前推进。当进入到 $Y = 150\text{ mm}$ 后(位于黑线下方),相对于普通螺杆,新型螺杆加压能力较弱,建压分散,物料的流动速度较低,有利于豆粕的分散混合。

为了更好地说明新型螺杆中物料在反向螺纹区内流动时压力的变化,在混炼屏障原件与反向螺纹原件交界处设立监测点,图 7 为检测点运动的压力变化。从图 7 可以看出在此区域内压力沿运动方向递减,在达到反向螺纹元件末尾处压力再次增加。这是由于豆粕流经反向螺纹区域受到拖拽流,形成背压区域,豆粕在背压区域内反复挤压,增加停留时间,其分散混合效果得以加强^[9]。



a: 普通螺杆; b: 新型螺杆。
a: General single screw; b: The new type single screw.

图 6 螺杆流道压力轴向分布
Fig. 6 Axial Pressure contour of screw flow channel

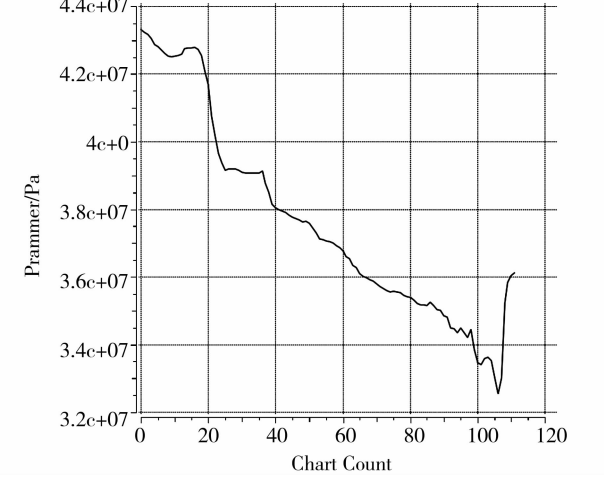


图 7 检测点运动时压力变化
Fig. 7 The pressure change during the motion of detection point

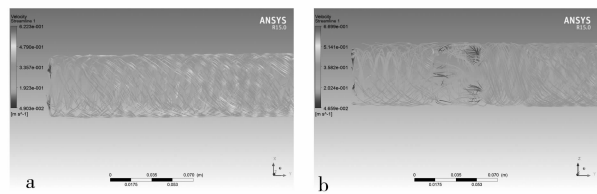
2.2 速度场的分析

图 8a 和图 8b, 分别为普通螺杆挤出机和新型螺杆挤出机全局的速度流线图,从图 8a 中可以看出,普通螺杆挤出机内流道流场的速度流线图存在全局连续、无断点的形态,原料豆粕由进料口进入到从出料口流出分布状态均匀这会产生豆粕无法混合完全,造成分布效果较小的现象。

从图 8b 中可以看出,由于三角屏障混炼元件的存在豆粕流经此区域时候被充分打散,稳定的速度流线被切断,在此区域会受到更大的剪切力的作用,在流经反向螺纹区域时速度流线会发生逆向变化,速度方向与之前相反,有利于豆粕分散系数的增加。

为更好地观察三角屏障混炼元件中豆粕的流动情况,取豆粕在三角槽的始末位置分析其速度流线的规律,可明显观察到物料在进料槽和出料槽横

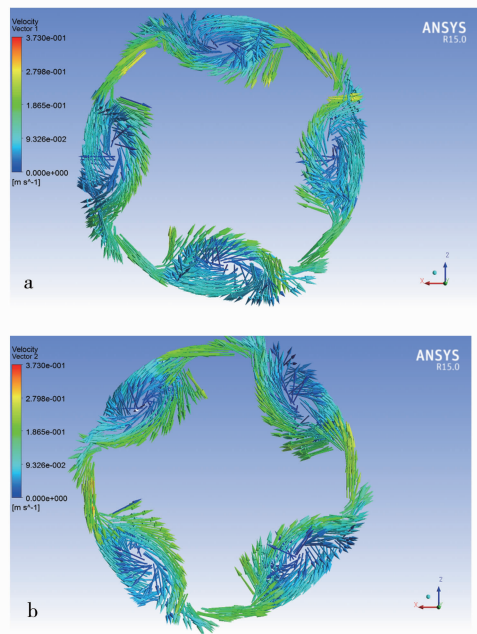
截面上都有一定程度上的涡运动,此时属于紊流状态。图 9a 表示物料在进料槽处的速度矢量图,图 9b 表示物料在出料槽处的速度矢量图。



a: 普通单螺杆挤出机; b: 新型单螺杆挤出机。
a: General single-screw extruder; b: The new type single-screw extruder.

图 8 螺杆挤出机全局的速度流线图

Fig. 8 The velocity streamline of screw extruder



a: 物料在进料槽处速度矢量图; b: 物料在出料槽处的速度矢量图。
a: Velocity vector of material in feed chute; b: Velocity vector of the material in the outlet.

图 9 物料在混炼区速度矢量图

Fig. 9 Velocity vector of the material in the mixing zone

原料豆粕在流经三角屏障混炼元件所在流场区域内会产生紊流过程,在此期间采取时均值,排除重力带来的干扰,此粘性流体的方程表达形式为^[8]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

运动方程:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (6)$$

时均流动能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho}{2} \overline{u_i u_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_i} \cdot \frac{\rho}{2} \overline{u_i u_i} \right) \\ &= - \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_i \rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \overline{u_i} \right] - \\ & \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\overline{u_i} (- \rho \overline{u_i' u_j'}) \right] - (- \rho \overline{u_i' u_j'}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (7)$$

所形成的涡运动处:

$$\tau_t = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad (8)$$

其中: t 表征物理量为时间,单位为 s ; ρ 表征试验材料豆粕的物理密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ 表征试验材料豆粕的物理粘度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\overline{u'}$ 表征受混炼区影响豆粕扰动速度,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; \bar{p} 表征材料在混炼段中的压强平均值,单位为 Pa ; ν 表征为处于混炼曹出入口时涡运动粘度,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ_t 表征为处于紊流中实验材料收到的切应力,单位为 N ; $\overline{u_i}$ 与 $\overline{u_j}$ 分别表征在笛卡尔坐标系下沿着 x 与 y 轴轴线方向上处于混炼区的速度平均值,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

联立式(6) - (8)可以获得涡运动的雷诺方程。

物料豆粕在经过三角屏障混炼区域时候的速度分量:

$$u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = U l'(\eta) \quad (9)$$

$$u_x = - \sqrt{\frac{m+1}{2}} \nu C x^{m-1} \left\{ f + \frac{m-1}{m+1} \eta l' \right\} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{2m}{m+1} \pi \quad (11)$$

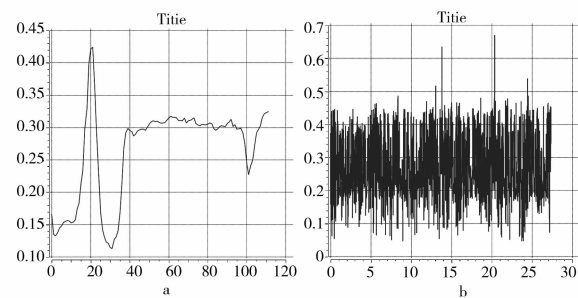
式中: m 为螺杆系统选定的参数值; u_x 表征试验材料在混炼区域内沿笛卡尔坐标系 x 轴方向上的速度分量,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_z 表征试验材料在混炼区域内沿笛卡尔坐标系 z 轴方向上的速度分量,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; f 表征单位质量力,单位为 N ; l 表征在此区域内速度的分布函数形式, φ 表征粘性应力对剪切变形所做的功,单位为 W ; β 为常规区域内螺杆螺棱边缘与挤出方向轴线的夹角度数。

将式(1) - (5)代入到式(9) - (11)可求得三角屏障区的速度场。

图 10a 为物料在普通螺杆挤出机内 $Y = 100 \text{ mm}$ 处截面上豆粕的速度分布,速度变化规律有序。

图 10b 为物料在新型螺杆挤出机内 $Y = 100 \text{ mm}$ 使用粒子追踪手段分析实验材料豆粕的微观速度分布形态,从图 10b 中可知在三角屏障混炼元件的影响下,豆粕在沿挤出方向上同一平面内不同位置处矢量速度差异极其明显,由此可知此区域内剪切速率效果最为明显。特别是豆粕由一个槽流向另

一个槽时速度会达到峰值,这种速度的剧烈变化有利于分散混合。



a:普通螺杆;b:新型螺杆。
a:General extruder;b:The new type extruder.

图 10 Y = 100 mm 处螺杆速度矢量变化
Fig. 10 Velocity vector variation on the plane of 100 mm

3 结论与讨论

利用 ICEM CFD 工具划分流道网格,采用 CFX 分析方法对豆粕在新型单螺杆挤出机内的流动进行分析,重点研究了流域中豆粕的流动状况,新型单螺杆挤出机的建压特点,混合性能并与普通单螺杆挤出机对比,得出以下结论:

1)螺杆增设了反向螺纹元件,相比于常规螺纹,使得流道区域存在背压区,豆粕在此区域内可以被反复挤压,增加了豆粕的停留时间,从而增加了分布混合性能。

2)螺杆增设了三角屏障混炼元件,使得豆粕在此区域内产生螺旋运动,物料的流动状态由层流转换为紊流,有利于豆粕的熔融混合。且在剪切棱处产生较大的拖拽流,有效地促进分散混合。

3)将三角屏障混炼元件与反向螺纹元件组合使用,相比于普通螺杆挤出机,其建压能力提高 1.7 倍。在建压以及分布混合方面,相较于普通单螺杆挤出机,新型单螺杆挤出机的具有明显优势。但对于反向螺纹元件与三角屏障混炼元件在其它螺杆尺寸下还需要进一步研究。

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,张召,王丽艳. 基于 ANSYS 的豆粕双螺杆膨化机的三维流场分析[J]. 中国农机化学报,2014,35(6): 213-216,240.

(Guo S G, Zhang Z, Wang L Y. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal twin-screw extruder based on ANSYS [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2014, 35(6):213-216,240.)
[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. 单螺杆挤压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] 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.)
[6] 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.)
[7] Domingues N, Gaspar C A, Covas J A. Global mixing indices for single screw extrusion[J]. International Journal of Material Forming,2008,1 (S1):723-726.
[8] 何红,朱复华. 单螺杆挤出机的混合及应用[J]. 塑料,2001,30(2):28-32. (He H, Zhu F H. Mixing and application of single screw extruder[J]. Plastics,2001,30(2):28-32.)
[9] 祝卫国,汪传生. 单螺杆挤出机分散混炼的改进[J]. 特种橡胶制品,2003,24(4):31-35. (Zhu W G, Wang C S. Improvement of dispersion mixing in single screw extruder[J]. Special Purpose Rubber Products,2003, 24(4): 31-35.)
[10] 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.)
[11] 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.)
[12] 郭树国,张召,王丽艳,等. 基于 CFX 的豆粕单螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 大豆科学,2015,34(4):699-702. (Guo S G, Zhang Z, Wang L Y, et al. Three-dimensional flow field analysis in single screw extruder of soybean meal based on CFX [J]. Soybean Science,2015,34(4):699-702.)
[13] 杜德鑫. 关于单螺杆塑料挤出机的节能分析和设计[J]. 机械设计与制造工程,2013,42(7):59-62. (Du D X. The energy saving analysis and design for plastics single-screw extruder[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2013, 42(7): 59-62.)
[14] 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. (Zhang H C. Theory and engineering application with ANSYS14.0 [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.)