

基于 CFX 的同轴变速双螺杆挤出机 三维流场分析

Three-dimensional flow field analysis of coaxial variable speed twin-screw extruder based on CFX

汤霖森 郭树国 王丽艳 韩彦林

TANG Lin-sen GUO Shu-guo WANG Li-yan HAN Yan-lin

(沈阳化工大学机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

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

摘要:目的:分析物料在改良后的同轴变速优化双螺杆挤出机流道中的工作状态。方法:运用 ANSYS/CFX 模拟分析双螺杆挤出机流道数值,得到物料的运动情况,并与传统双螺杆进行对比,通过宏观压力场、宏观速度场、速度流线图、速度矢量图对比分析两种螺杆的性能。结果:同轴变速优化双螺杆的建压能力、混合性能明显优于传统双螺杆,通过中段的减速输送可有效延长物料运输时间。结论:新型优化双螺杆在保留传统双螺杆优势的情况下,额外提升了建压能力和混合性能。

关键词:同轴变速;CFX;双螺杆;流场分析

Abstract: **Objective:** This research aims to analyze the working condition of the material in the flow channel of the improved coaxial variable speed optimization twin-screw extruder. **Methods:** Used ANSYS/CFX to simulate and analyze the flow channel value, obtained the movement of the material, and compared it with the traditional screw twin screw. The performance of the two types of screws was compared and analyzed through the macro pressure field, macro speed field, velocity streamline diagram, and velocity vector diagram. **Results:** After the study, it was found that the pressure building capacity and mixing performance of the coaxial variable speed optimized twin screw were significantly better than that of the traditional twin screw, and the material transportation time could be effectively extended through the decelerated conveying in the middle section. **Conclusion:** The new optimized twin-screw, while retaining the advantages of the

traditional twin-screw, additionally improves the pressure building capacity and mixing performance.

Keywords: coaxial variable speed; CFX; twin-screw; flow field analysis

螺杆挤出机在食品工业中占据重要地位,集混合、搅拌、加热、蒸煮、杀菌、膨化于一体,具有应用广、产品种类多、生产效率高、能耗低、产品营养损失少且不易回生等优点,被广泛应用于谷物产品、饲料、酿造、油脂、医药等领域^[1-3]。而双螺杆挤出机在原有的优势上,还具备输送效率高、分散混合能力强、自洁性能好、物料在机筒内停留时间分布均匀、适应性良好等特点^[4-6]。

徐文海等^[7]研究表明,双螺杆加上反向螺纹元件后在建压性能、混合性能上较传统双螺杆有所改进,但由于反向螺纹固定的转速对物料的剪切模式相对固定。研究拟采用同轴变速的设计理念,在传统双螺杆的中间部分内部加上由行星轮元件组成的变速输送段。使用 ANSYS/CFX 的 Mesh 模块对流道进行网格划分^[8-9],并与传统双螺杆进行对比,从宏观压力场、速度矢量图、速度流线图等方面进行分析^[10],模拟轴向挤出速度与轴向挤出压力,通过记录挤出时间来验证模拟数据的可靠性,旨在为双螺杆挤出机的研究和优化设计提供理论支撑。

1 模型与参数

1.1 SolidWorks 三维模型及流道有限元模型

图 1 为同轴变速优化双螺杆的三维模型,双螺杆总长为 520 mm,同向啮合,单根螺杆采用单线螺纹,由两段普通输送段和一段变速输送段构成。其中两段普通输送段长度均为 200 mm,变速输送段长度为 120 mm,根径 60 mm,外径 80 mm,导程 40 mm,两螺杆中心距 72 mm,

基金项目:辽宁省自然科学基金(编号:2019-ZD-0085, 20170540719)

作者简介:汤霖森,男,沈阳化工大学在读硕士研究生。

通信作者:郭树国(1978—),男,沈阳化工大学副教授,博士。

E-mail:guoshuguo@126.com

收稿日期:2021-06-15

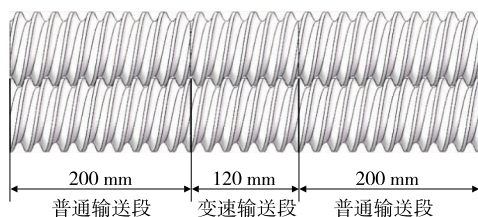


图 1 同轴变速优化双螺杆 SolidWorks 模型

Figure 1 Coaxial variable speed optimized twin-screw SolidWorks model

螺纹右旋,两螺杆参数一致,同向啮合。

图 2 为变速输送段中行星轮元件的三维模型图,行星轮各部分零件的尺寸根据螺杆尺寸设计,零件参数见表 1,两根螺杆中的行星轮参数一致。



图 2 变速段中行星轮元件 SolidWorks 模型

Figure 2 SolidWorks model of planetary gears in the gearshift section

表 1 行星轮元件参数

Table 1 Parameters of planetary gear components

名称	齿数	模数/mm
中心大齿轮	20	1
周边小齿轮	10	1
外圈齿轮套	40	1

为便于更换螺杆、节约成本,普通段与变速段均采用中空套筒设计。螺杆内部结构如图 3 所示,前后普通段中轴与行星轮中心大齿轮中轴采用同轴一体设计,电机驱动普通段中轴与变速段中心大齿轮一起转动,从而带动行星轮整体运动,实现同轴不同速。

图 4 为整体组合的流道有限元模型,运用 ANSYS 对模型分析前要进行网格划分,调整格式采用四面体单元^[11],得到节点数 563 328,元素个数 2 783 826。

1.2 原始状态假设

选取豆粕为物料,由于豆粕随剪切速率增加而变得黏

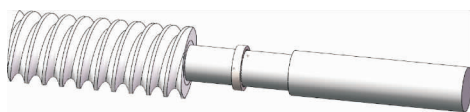


图 3 螺杆内部结构

Figure 3 The internal structure of the screw

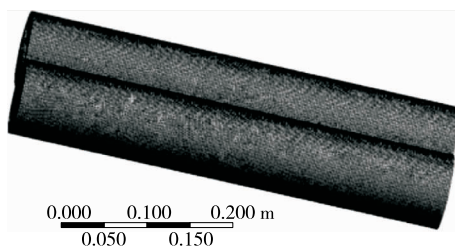


图 4 新型优化双螺杆流道的有限元图

Figure 4 The finite element diagram of the new optimized twin-screw runner

稠,故将其定为幂律流体中的胀塑性流体。流道内可以看作是稳态、等温流场,流体相对于螺杆表面和机筒内壁无滑动^[12]。豆粕参数:黏度为 $1\,930\text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度为 $2\,112\text{ kg/m}^3$,恒定温度选择 $80\text{ }^\circ\text{C}$ ^[13]。

1.3 数学模型

根据 SYSLG30-IV 双螺杆挤出机的实际工作效果以及边界无滑移的假设,对同轴变速优化双螺杆进行以下定义:

- (1) 双螺杆普通段转速 n 为 120 r/min 。
- (2) 由于行星轮的齿轮传动比,变速输送段螺杆转速为普通输送段的 $1/2$,故 $n=60\text{ r/min}$ 。
- (3) 物料进口速度为常数 $u=0.05\text{ m/s}$,出口压力设置 1 MPa 。
- (4) 双螺杆普通段和变速段的表面均无滑移。
- (5) 机筒内壁无滑移,且机筒无转速^[14]。

对于等温层流的幂律流体,如果忽略物料的体积力,则连续方程可简化为^[15]:

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

运动方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \quad (4)$$

幂律流体本构方程为:

$$\tau = \mu \gamma^n, \quad (5)$$

式中:

V ——速度矢量, m/s ;

V_x, V_y, V_z —— x, y, z 3 个方向的轴向速度分量, m/s ;

P ——静压力, Pa ;

τ_{ij} ——直角坐标系下剪切应力矢量(i, j 为 x, y, z);

γ ——剪切速率, s^{-1} ;

μ ——物料黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

n —— 幂率指数。

联立式(1)~式(5)后可求出流体域的压力场和速度场。

2 模拟结果计算

2.1 宏观压力场分析

宏观压力场可以反映螺杆的建压能力,压力差越大,建压能力越强,输送物料的性能越高^[16]。由图5可知,新旧两种双螺杆的出口压力均大于进口压力。其中传统双螺杆压力场逐步递增,而新型优化双螺杆带有变速输送段的螺杆压力场先减后增,且每个压力区域分界出现表征回流现象的波浪状线条;前者是因为物料从正常转速的普通段进入了转速减半的变速段,导致压力先减小,回到普通段速度回升后,压力也随之增加,后者是因为行星轮元件使得变速段旋向与普通段相反,相当于增加了反向螺纹,使物料出现回流。

由图6可知,带有变速段的新型双螺杆压力在0.108~0.144 m处出现明显的先下降后上升的情况。新型优化双螺杆压力曲线整体位于传统双螺杆上方,说明前者的建压能力更高。因此,新型优化双螺杆相较于传

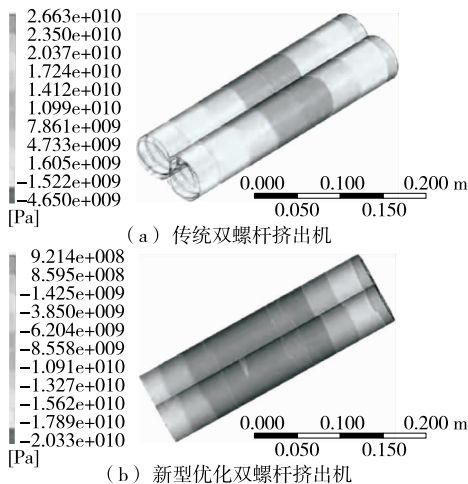


图5 宏观压力场对比

Figure 5 Macro pressure field comparison

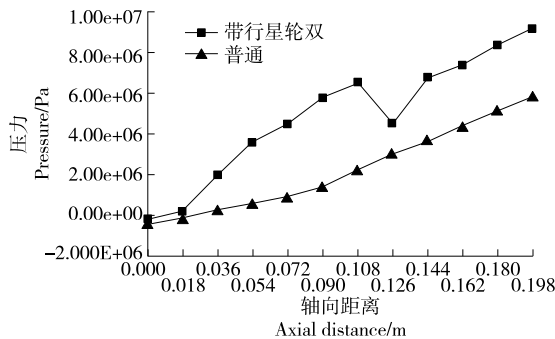


图6 轴向压力数据图

Figure 6 Axial pressure data graph

统双螺杆,其建压性能和对物料的混合性能更为优秀。

2.2 速度场分析

速度场相较于压力场,能够更直观地反映出物料在流道中的运输速度。由图7(a)可知,物料在流道中的速度表现为均匀缓慢上升的状态,此状态下螺杆的剪切模式不变,故混合性能较为一般;而图7(b)中,物料在变速段出现明显的减速情况。这是由于变速段转速仅为普通段的1/2,效果等同于增加了两倍的运输距离,故物料在新型螺杆中的停留时间更长,能够被充分剪切与混合^[13]。

2.2.1 轴向速度模拟 由图8可知,由于新型优化双螺杆的普通输送段与普通双螺杆并无差异,二者在初始段的曲线几乎重合;在0.108~0.144 m处,新型优化双螺杆中的物料均出现减速现象,说明加入变速段能显著提高双螺杆的混合与剪切性能。

2.2.2 速度流线图对比 在图9(a)的速度流线中,每层流线之间作横向滑移,无混杂情况,故物料进行层流运动,混合性能较为一般;在图9(b)的速度流线中,由于变速段提供反向螺纹的作用,物料回流导致流线杂乱无序且呈漩涡状,故物料进行湍流运动,具有较强的混合性能。普通双螺杆啮合区速度流线大多呈点状,无交织情况;而新型优化双螺杆啮合区速度流线大多呈线状,互相

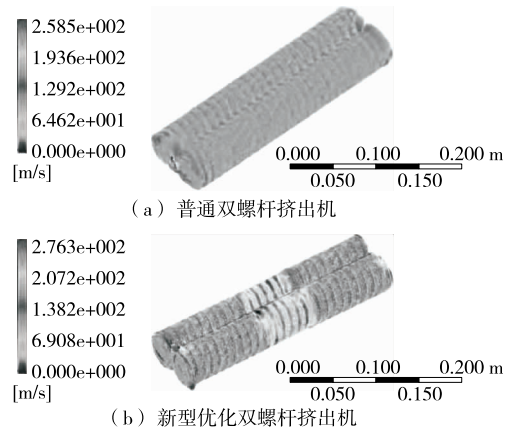


图7 流道速度矢量图

Figure 7 Runner speed vector diagram

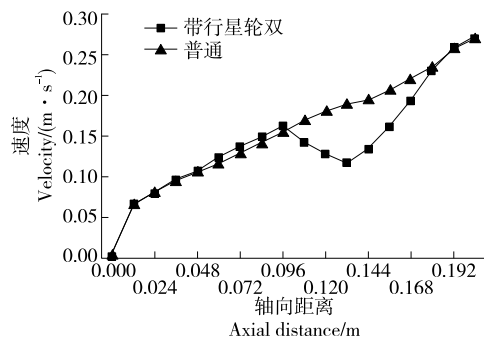


图8 轴向速度数据图

Figure 8 Axial velocity data graph

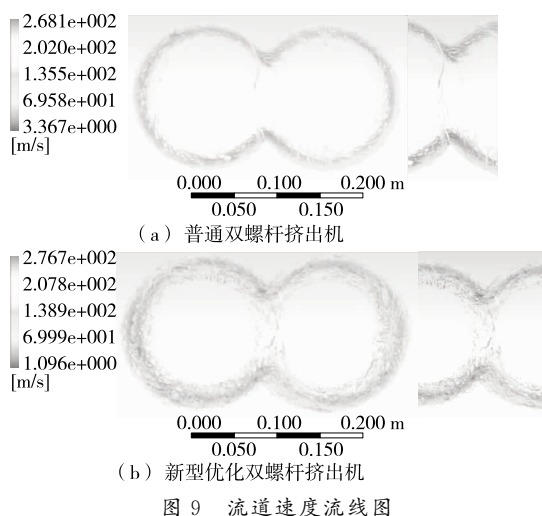


Figure 9 Runner velocity streamline diagram

交错,说明物料新型优化双螺杆的啮合区中有明显的交换过程,混合与剪切性能更高。

3 实验验证

为验证模拟结果的可靠性,通过试验记录不同螺杆在不同转速下的挤出时间来进行佐证。以豆粕为研究对象,采用 SYSLG30-IV 型双螺杆挤出机进行试验。试验时将机筒温度设定为 80 ℃,并设定 80,100,120,140,160 r/min 5 组转速,规定目标挤出量为 5 kg,记录新旧两种双螺杆的完成规定挤出量所需要的挤出时间,并进行对比。由表 2 可知,不同转速下,新型优化双螺杆的挤出时间相较于普通双螺杆能够延长 20% 左右,能有效提高物料混合性能且保证挤出机的产量。通过试验,进一步证明新型优化双螺杆弥补了普通双螺杆混合性能较弱的缺陷。

表 2 不同转速下新旧双螺杆的挤出时间

Table 2 Extrusion time of new and old twin screws at different speeds

螺杆转速/(r · min ⁻¹)	普通双螺杆/min	新型优化双螺杆/min
80	29.8	34.3
100	23.1	27.7
120	18.9	22.7
140	12.4	16.8
160	9.3	12.3

4 结论

利用 SolidWorks 建模,运用 ANSYS 对同轴变速优化双螺杆进行数据模拟,可以实际模拟出物料在流道内的运动状态。与传统双螺杆相比,新型优化双螺杆中所加的变速输送段,既能够增加流道行程,又能够起到反向螺纹的作用;前者增加物料停留时间,后者使物料回流能够被反复挤压,使得物料能够被充分剪切,并增强了混合

性能。但变速输送段所设位置选择以及其能否被应用于更多螺杆挤出机中,还需进一步研究。

参考文献

- [1] 张裕中,王景.食品挤压加工技术与应用[M].北京:中国轻工业出版社,1998:13-17.
ZHANG Yu-zhong, WANG Jing. Food extrusion processing technology and application [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 13-17.
- [2] 王会然,李宗军.螺杆挤压机及其应用研究现状[J].食品工业,2011,32(10):99-102.
WANG Hui-ran, LI Zong-jun. Screw extruder and its application research status[J]. Food Industry, 2011, 32(10): 99-102.
- [3] VAN DEN EINDE R M, KROON P, VAN DER GOOT A J, et al. Local mixing effects of screw elements during extrusion[J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45(3): 271-278.
- [4] 刘平.同向双螺杆挤出机浅析[J].农村致富之友,2017(15):123.
LIU Ping. Analysis of the co-rotating twin-screw extruder [J]. Friends of the Country to Become Rich, 2017(15): 123.
- [5] 付昱东,何东,杨庆余,等.挤压膨化技术在玉米深加工产业中研究现状及应用[J].农产品加工,2020(4):68-71,76.
FU Yu-dong, HE Dong, YANG Qing-yu, et al. Research status and application of extrusion technology in corn deep processing industry[J]. Agricultural Products Processing, 2020(4): 68-71, 76.
- [6] MARTIN R, CLEARY P W. Effect of geometry and fill level on the transport and mixing behaviour of a co-rotating twin screw extruder[J]. Springer International Publishing, 2019, 6(2): 240.
- [7] 郭树国,徐文海,王丽艳,等.基于 ANSYS 的豆粕组合螺杆挤出机三维流场模拟分析[J].食品工业,2014,35(11):225-227.
GUO Shu-guo, XU Wen-hai, WANG Li-yan, et al. Simulation analysis of three-dimensional flow field of soybean meal combined screw extruder based on ANSYS[J]. Food Industry, 2014, 35(11): 225-227.
- [8] 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,2012:40-72.
ZHANG Hong-cai. ANSYS14.0 theoretical analysis and engineering application examples[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012: 40-72.
- [9] 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 Jin-nan, HU Dong-dong. Application of computational fluid dynamics (CFD) and its software package in twin screw extrusion[J]. China Plastics, 2001(12): 12-16.
- [10] 石兆东,王伟,张康.基于 CFD 的非啮合并列型双螺杆挤出机三维流场数值模拟[J].煤矿机械,2007(1):30-32.
SHI Zhao-dong, WANG Wei, ZHANG Kang. Numerical simulation of three-dimensional flow field of non-intermeshing parallel twin-screw extruder based on CFD[J]. Coal Mine Machinery, 2007(1): 30-32.

(下转第 192 页)

- QI Lin, TANG Xi-shu, WANG Shi-hong, et al. Determination of cut stem content in cut filler by chromatic aberration method[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2020, 35(6): 1 023-1 028.
- [9] 赵科文, 陈实, 蒋浩, 等. 基于近红外光谱技术的烟丝掺配均匀度测定[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 183-188.
- ZHAO Ke-wen, CHEN Shi, JIANG Hao, et al. Determination of blending uniformity of cut tobacco based on near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 183-188.
- [10] 徐安传, 胡巍耀, 王超, 等. 应用近红外技术直接检测烟丝常规化学成分的研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 393-398.
- XU An-zhuan, HU Wei-yao, WANG Chao, et al. Study on direct prediction of chemical components of tobacco cut by NIRS[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 393-398.
- [11] 李瑞丽, 刘玉叶, 李文伟, 等. 利用近红外光谱技术快速检测配方烟丝掺配均匀性[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 83-87.
- LI Rui-li, LIU Yu-ye, LI Wen-wei, et al. Study on rapid determination of tobacco blending uniformity by near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 83-87.
- [12] 方开泰, 贺曙东. 含有线性约束及线性非负回归系数的回归模型[J]. 计算数学, 1985, 7(3): 237-246.
- FANG Kai-tai, HE Shu-dong. A regression model with linear constraints and linear non-negative regression coefficients[J]. Mathematica Numerica Sinica, 1985, 7(3): 237-246.
- [13] 李雪莹, 束茹欣, 梁丽丽, 等. 近红外光谱结合线性非负回归系数回归法(配方回归)解析混合样品的组成比例[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 63-67.
- LI Xue-ying, SHU Ru-xin, LUAN Li-li, et al. Study on the analysis of the proportion of mixed samples with near infrared spectroscopy and non-negative coefficients regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 63-67.
- [14] 云南省质量技术监督局. 烟草及烟草制品 主要化学成分指标的测定 近红外漫反射光谱法: DB53/T 497—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 3-4.
- Yunnan Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Determination of major chemical components of tobacco and tobacco products by near-infrared diffuse reflectance spectrometry: DB53/T 497—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 3-4.
- [15] 邝格灵, 李树, 宁甜甜, 等. 基于 GC-MS 指纹图谱和多元统计学区分四川保宁醋和山西老陈醋的挥发性差异代谢产物[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 227-232.
- KUANG Ge-ling, LI Shu, NING Tian-tian, et al. Differential volatile metabolites between sichuan baoning vinegar and Shanxi aged vinegar determined by GC-MS fingerprint and multivariate statistics[J]. Food Science, 2020, 41(16): 227-232.
- [16] 王俊, 许多宽, 肖勇, 等. 基于化学指标的烟叶产区正交偏最小二乘判别分析[J]. 中国烟草科学, 2017(1): 91-96.
- WANG Jun, XU Duo-kuan, XIAO Yong, et al. The OPLS-DA model of tobacco producing areas based on chemical measurements[J]. Chinese Tobacco Science, 2017(1): 91-96.
- [17] 刘旭, 王耀峰, 余广宏, 等. 高温介导 N 基因对 TMV 免疫丧失的代谢轮廓分析[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(2): 84-92.
- LIU Xu, WANG Yao-feng, YU Guang-hong, et al. Metabolic profiling analysis of immune deficiency of TMV by high temperature mediated gene N[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(2): 84-92.
- [18] 颜鸿飞, 彭争光, 李蓉娟, 等. GC-TOF MS 结合化学计量学用于安化黑茶的识别[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 34-37, 65.
- YAN Hong-fei, PENG Zheng-guang, LI Rong-juan, et al. Discrimination of Anhua dark tea by gas chromatography-time of flight mass spectrometry combined with chemometrics[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 34-37, 65.
- (上接第 80 页)
- [11] 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 Shu-guo, ZHANG Zhao, WANG Li-yan, et al. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal single screw extruder based on CFX[J]. Soybean Science, 2015, 34(4): 699-702.
- [12] 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 Shu-guo, ZHANG Zhao, WANG Li-yan. Three-dimensional flow field analysis of soybean meal double-seed extruder based on ANSYS[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry, 2014, 35(6): 213-216, 240.
- [13] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 107-110.
- TANG Lin-sen, GUO Shu-guo, WANG Li-yan. Three-dimensional flow field analysis of coaxial variable speed single screw extruder with planetary gears based on ANSYS[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 107-110.
- [14] 王少峰, 张媛, 刘美莲, 等. 不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 71-74.
- WANG Shao-feng, ZHANG Yuan, LIU Mei-lian, et al. Flow channel distribution of intermeshing counter-rotating twin-screw extruder under different temperature conditions[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 71-74.
- [15] 章梓雄, 董曾南. 黏性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 749-751.
- ZHANG Zi-xiong, DONG Zeng-nan. Viscous fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 749-751.
- [16] 唐庆菊, 李纪强, 周平. 基于 ANSYS 的食品双螺杆挤出机流场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 94-95.
- TANG Qing-ju, LI Ji-qiang, ZHOU Ping. Numerical simulation of flow field of food twin-screw extruder based on ANSYS[J]. Machine Design and Manufacturing, 2007(12): 94-95.