

带有反向螺纹的同轴变速单螺杆三维流场分析

左晓甜, 郭树国, 金子云

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 沈阳 110142)

摘要: 为了改善单螺杆挤出机混炼性能, 设计了一种装配内嵌式摆线齿轮减速器和反向螺纹元件的新型螺杆。使用 Solid works 软件建模, 利用 ANSYS 和 CFX 软件分析新型同轴变速单螺杆挤出机的流道内三维流场变化, 根据流道内的压力、速度矢量、截面速度等变化, 探究物料在其流道内的剪切和混合情况。结果表明: 在外部情况相同时, 新型螺杆建压能力弱于传统螺杆, 即新型螺杆的挤出效率较低; 新型螺杆因为装配内嵌式摆线齿轮减速器使其混炼区域的速度降为传统螺杆的 1/6, 引起物料对流, 加快压力场变化, 使其速度流线更加混乱; 新型螺杆因为装配有反向螺纹元件, 使其混炼区域出现反向建压能力, 在此作用下物料出现反向速度, 出现回流现象。综上, 摆线齿轮减速器和反向螺纹元件均延长了物料在流道内的停留时间, 增加了物料的挤压剪切次数, 从而增强了挤出机的混合分布能力和挤压剪切效果。

关键词: 摆线齿轮减速器; 反向螺纹; 单螺杆挤出机

中图分类号: TS203; TS228

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2025)01-0147-06

Three dimensional flow field analysis of coaxial variable speed single screw with reverse thread

ZUO Xiaotian, GUO Shuguo, JIN Ziyun

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: In order to improve the mixing performance of a single - screw extruder, a new screw assembled with an embedded cycloidal gear reducer and reverse thread was designed. Solid works software was used for modeling and ANSYS/CFX software was used to analyze the change of three dimensional flow field in the flow channel of the new coaxial variable - speed single - screw extruder, and to explore the shear and mixing of the material in its flow channel according to the change of pressure, velocity vector, and cross sectional velocity in the flow channel. The results showed that in the same external situation, the new screw pressure building capacity was weaker than the traditional screw, i. e., the extrusion efficiency of the new screw was lower. Because of the assembly of embedded cycloidal gear reducer, the speed of the new single - screw extruder in its mixing region decreased to 1/6 of the conventional screw, causing material convection, accelerating the pressure field changes, so that the speed of the flow more chaotic. Because of the assembly of the reverse thread, the reverse pressure building capacity appeared in the mixing region, under which the material appeared to reverse the speed of the phenomenon of reflux. In summary, the cycloidal gear reducer and reverse thread can prolong the

residence time of the material in the flow channel, increase the number of the extrusion and shear of material, thus enhancing the mixing and distribution capacity, and the extrusion and shear effect of the extruder.

Key words: cycloidal gear reducer; reverse thread; single - screw extruder

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-09-06

基金项目: 2022 年辽宁省自然科学基金项目(2022-MS-288)

作者简介: 左晓甜(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为螺杆挤出机结构性能优化(E-mail)1123243187@qq.com。

通信作者: 郭树国, 教授, 博士(E-mail)guoshuguo@126.com。

随着我国大豆种植面积和进口量的增加,大豆加工副产品也随之增加,如何高效利用这些副产品是目前所面临的新问题^[1]。大豆粕是大豆加工副产品之一,可在饲料、食品加工、造纸、涂料等工业生产中得到应用,但受目前加工技术的限制,大豆粕的利用率较低^[2]。

目前对大豆粕加工的主要方式是挤压膨化^[3-4],螺杆挤出机是实现该过程的主要设备,其可分为单螺杆、双螺杆和多螺杆挤出机^[5-6]。单螺杆挤出机虽然具有应用范围广、自洁性高等优点^[7-9],但是现有的单螺杆挤出机已不能满足工业生产要求,如:因为螺杆根数少,单螺杆挤出机挤压剪切能力低,效果不好;单螺杆挤出机排气效果差,物料在挤出过程中易出现焦糊的情况。为了提高大豆粕资源的利用率,改善螺杆挤出机的混合能力和剪切性能成为必然。

螺杆为螺杆挤出机的重要组成部分,改变螺杆结构和装配适当螺纹元件可以增强挤出机的性能,提高物料混合效果。例如:李垚^[10]、金子云^[11]、汤霖森^[12]等研究发现,内嵌式减速器能实现同轴异速,通过改变物料在流道内不同阶段的速度,可提高挤出机的混炼能力;班董董^[13]、邹思雨^[14]等研究发现,不同类型螺纹元件的建压能力和剪切能力不同,安装不同螺纹元件可以改变挤出机的混合能力和剪切能力;韩海川^[15]、郭树国^[16]、刘忠尧^[17]等研究发现,反向螺纹元件可以增加挤出机流道内物料回流量,延长物料在流道内停留时间,从而使混合效果和剪切效果更好。总结上述的研究经验得知:反向螺纹元件可使螺杆出现背压,物料出现回流现象,增强螺杆的剪切效率;减速可以降低螺杆混炼区域速度,改变物料的输送速度使其产生对流现象,从而增强挤出机的混合能力。通过前人研究发现,在螺杆挤出机内部嵌入减速装置可以实现挤出机混炼部分的减速,提高物料的混合效果,如摆线齿轮减速器,其具有结构简单、外形尺寸小、减速比大的特点。因此,本研究设计了带有反向螺纹、内部嵌入摆线齿轮减速器的组合式单螺杆挤出机,并通过相应仿真探究大豆粕在新型单螺杆挤出机流道内的停留时间,分析其剪切拉伸性能和混合效果。运用 ANSYS 和 CFX 软件对带有反向螺纹和内嵌摆线齿轮减速器的新型单螺杆挤出机流道进行数值模拟,以黏性流体力学为基础,与传统单螺杆挤出机压力图、速度流线图、速度矢量图进行对比,以期单螺杆挤出机性能优化提供理论依据。

1 模型与参数

1.1 物理模型

摆线齿轮减速器可通过内外齿轮的偏心啮合达到减速效果,当滚圆在导圆外作纯滚动时,滚圆上任意点滚动轨迹可称为外摆线^[18],其原理如图 1 所示,其参数方程见式(1)。

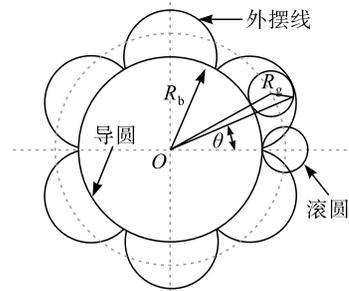


图 1 摆线齿轮减速器的外摆线形成原理

Fig. 1 Principle of external cycloid formation in a cycloidal gear reducer

$$\begin{cases} x = (R_b - R_g) \cos\theta - R_g \cos(R_b/R_g + 1)\theta \\ y = (R_b + R_g) \sin\theta - R_g \sin(R_b/R_g + 1)\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_b 为导圆半径,mm; R_g 为滚圆半径,mm; θ 为滚圆转动的角位移($0 \sim 2\pi$)。

在滚圆平面内与滚圆固定相连一点的滚动轨迹曲线叫做次摆线^[19],其参数方程见式(2)。

$$\begin{cases} x = (R_b + R_g) \cos\theta - e \cos(R_b/R_g + 1)\theta \\ y = (R_b + R_g) \sin\theta - e \sin(R_b/R_g + 1)\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: e 为偏心距,mm。

因 $e < R_g$, 所以摆线齿轮齿廓线形由短幅外摆线而来,以 a 为半径作圆,以短幅外摆线任意点为圆心,该圆上动点的滚动轨迹,为短幅外摆线的内等距线,即内齿轮齿廓线^[20],如图 2 所示。

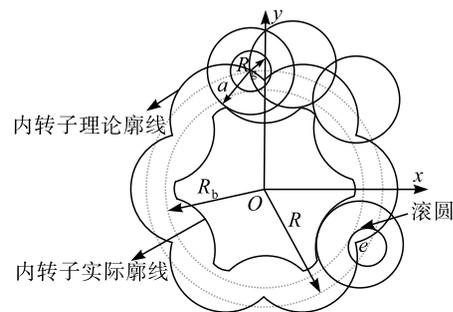


图 2 内齿轮齿廓线

Fig. 2 Internal gear tooth profile

由图 2 可以看出,当导圆半径为滚圆半径的整数倍时,可得内齿轮齿廓线参数方程,见式(3)。

$$\begin{cases} x = R \cos\theta - e \cos(Z_2\theta) \\ y = R \sin\theta - e \sin(Z_2\theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 为外摆线内等距圆半径($R = R_g + R_b$),

mm; Z_2 为外齿轮齿数。

通过公式(1)~(3)编写曲线公式,利用 Solid works 软件生成实体,图3为摆线齿轮减速器生成线形图。

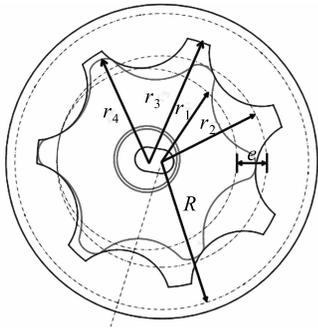


图3 摆线齿轮减速器生成线形图

Fig.3 Generated linear diagram of the cycloidal gear reducer

由图3可知,摆线齿轮减速器主要由内齿轮和外齿轮构成,外齿轮基圆半径(r_3)为24 mm,内齿轮基圆半径(r_4)为15 mm,并装有偏心轮实现减速,偏心轮固定在内齿轮上,外齿轮与内齿轮相对运动,实现减速比(i)为1:6。减速器各部分参数如下:内齿轮齿数(Z_1)6个,外齿轮齿数(Z_2)7个,内齿轮轨迹圆半径(r_1)13 mm,外齿轮轨迹圆半径(r_2)15.5 mm,外摆线内等距圆半径(R)22.5 mm,偏心距(e)2.5 mm,模数(m)2.5。

利用 Solid works 软件建立传统螺杆和新型螺杆螺纹元件模型及新型螺杆装配图,如图4所示。

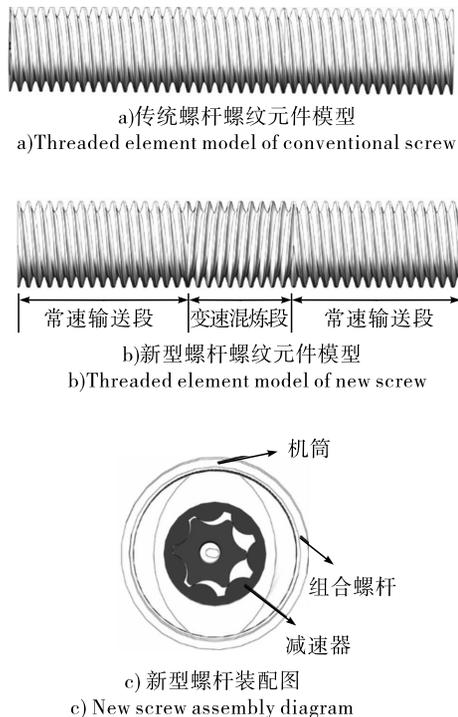


图4 传统螺杆和新型螺杆螺纹元件模型及新型螺杆装配图
Fig.4 Threaded element model of conventional and new screws and assembly diagram of new screw

传统单螺杆和新型单螺杆挤出机参数如下:螺纹均为右旋,螺杆总长420 mm,螺杆根径55 mm,外径65 mm,导程20 mm,螺旋升角 17° ,螺槽深度15.7 mm,螺纹宽度5 mm,新型螺杆由常速输送段和变速混炼段组成,常速输送段长均为160 mm,变速混炼段装有反向螺纹,长100 mm,混炼段内部装配摆线齿轮减速器。因双头螺纹正推力大于单螺杆螺纹,可增加挤出机产量,所以选用双头螺纹。另外,螺杆与机筒间隙过小会导致螺杆与机筒磨损严重,而间隙过大会使漏流量增加,产量减小,考虑两者因素,将螺杆与机筒间隙选为0.5 mm。

图5为新型螺杆的流道有限元模型,通过 CFX 软件划分网格后得到51 645个节点,2 081 111个元素。

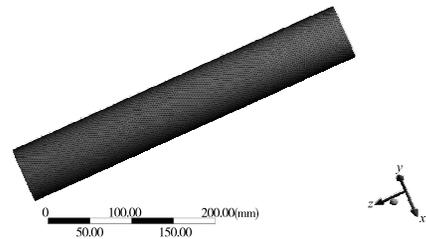


图5 新型螺杆网格划分图

Fig.5 Mesh division of the new screw

1.2 模拟条件假设

选取大豆粕作为填充物料,大豆粕密度为 730 kg/m^3 ,黏度为 $1930 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。因大豆粕在剪切挤压过程中变得黏稠,故其属于幂律流体。根据理论条件假设流场为恒温恒压层流状态,流体不可压缩且充满流道^[21]。在挤出机工作过程中,温度过高或过低、挤出压力过小都会使螺杆表面与机筒内壁之间产生滑移现象,使物料无法输送出挤出机,因此将挤出机温度设置为 100°C ,挤出机出口压力设置为1 MPa,以此保证螺杆表面与机筒内壁无滑移现象,确保物料能够被有效输送。

1.3 数学模型

以实验室 SJ-65/25 小型单螺杆挤出机的实际工作效果以及边界基础假设对新型单螺杆挤出机进行定义:①进口速度 0.05 m/s ;②螺杆转速 120 r/min ;③摆线齿轮转速 20 r/min ;④忽略惯性力、重力等体积力;⑤机筒速度0。

根据上述假设,通过查阅文献[22],得其黏性流体方程如式(4)所示。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 、 z 不同方向的速度, m/s 。

根据上述理想化假设和牛顿第二定律,可推出

其运动方程如式(5)。

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P 为静压力,Pa; τ_{ij} 为直角坐标系下剪切应力分量(i,j 为 x,y,z)。

物料的黏度随着挤出机剪切速率的增大而增大,在达到峰值后逐渐趋近于常数值,因此可推出幂

律流体的本构方程如式(6)所示。

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

式中: μ 为物料黏度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为幂律指数。

2 模拟分析

2.1 宏观压力场分析

在物料挤出过程中,挤压压力会逐渐增大,最大压力与最小压力之间的压力差代表螺杆的建压能力,建压能力越强,物料被挤出时间越短,挤出机效率越高。传统螺杆和新型螺杆的宏观压力对比图如图6所示。

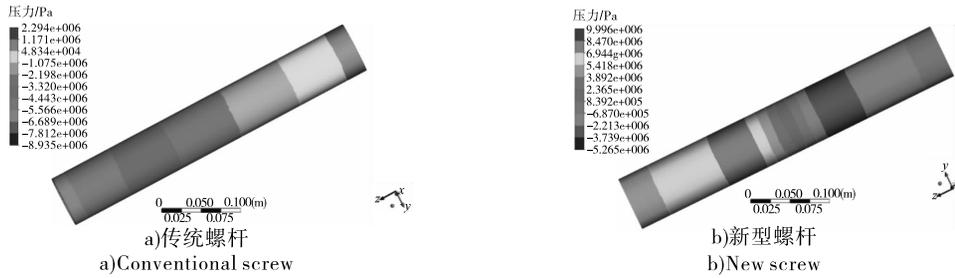


图6 传统螺杆和新型螺杆宏观压力图

Fig.6 Macro - pressure diagrams for conventional and new screws

单螺杆挤出机左侧为进料口,右侧为出料口。由图6可以看出:传统螺杆各段压力变化均匀,区域大小几乎相同,边界平整,压力由进料口到出料口逐渐增大,在出料口压力达到最大,传统螺杆的各段压力变化明显大于新型螺杆,输入端和输出端的压力差更大,建压能力强,物料输送快,物料在流道内停留时间短,使其混合、剪切效果不好;而新型螺杆压力先由小到大,进入混炼段后由大到小,通过混炼段后又由小到大变化,这是由于混炼段装配有反向螺纹元件,使螺杆具有反向建压能力,在这一条件下,物料在混炼段呈现反向流动,使物料能够被多次挤压、剪切,提高了挤出机的挤压剪切效果。新型螺杆混炼段压力变化更加迅速,这是由于新型螺杆装配了减速装置使混炼段速度骤然降低,物料无法被及

时输送出去,进入混炼段的物料相互挤压,形成对流现象,使物料的混合更加均匀,增强了挤出机的混合能力。经计算新型螺杆压力差为10.54 MPa,传统螺杆压力差为13.25 MPa,可见传统螺杆建压能力为新型螺杆的1.26倍。因物料在混炼区域挤出速度降低,在反向螺纹元件作用下产生回流现象,物料被反复剪切、挤压,使其密度降低,同时,新型螺杆压力差小于传统螺杆,在其他条件相同时,经文献[22]的挤出效率公式计算可知,新型螺杆挤出效率低于传统螺杆。

2.2 速度场分析

图7为传统螺杆和新型螺杆流道内速度矢量变化情况。

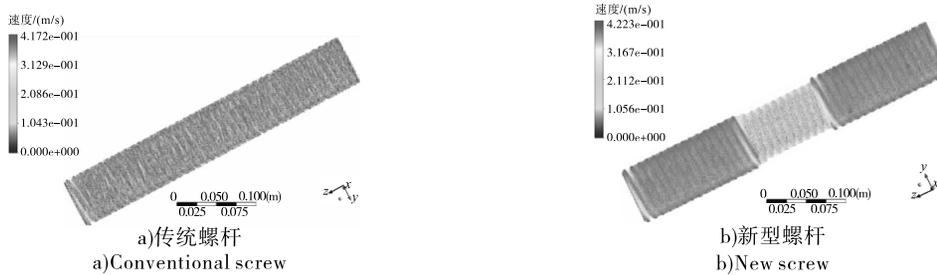


图7 传统螺杆和新型螺杆速度矢量图

Fig.7 Vector plot of speed for conventional and new screws

由图7可以看出:物料在传统螺杆中全程高速被挤出,这虽然保证了挤出效率,却使其混合、剪切

性能降低;而新型螺杆速度矢量普遍偏低,在混炼区域达到最低,这是因为新型螺杆在混炼区域装配有

摆线齿轮减速器,使其速度降为原来的1/6,使物料通过此段的时间延长,挤压剪切次数增多,提高了物料的挤压剪切性能。新型螺杆平均速度为0.25 m/s,而传统螺杆从进入到挤出平均速度高于0.4 m/s,是新型螺杆的1.6倍左右;新型螺杆以低速挤出,且速度变化相较于传统螺杆更加频繁,这是由于反向螺纹元件的存在使物料出现反向回流,使物料速度先降低再上升,这种剧烈的速度变化更加有利于物

料的混合。

2.3 速度流线分析

在速度场中每一点的速度矢量都可视为与该速度流线相切,在物料经过混炼区域,因其产生反向速度矢量,产生回流现象,根据速度流线方程查阅文献[22],可知物料在流场中的速度流线分布情况。传统螺杆和新型螺杆的速度流线图如图8所示。

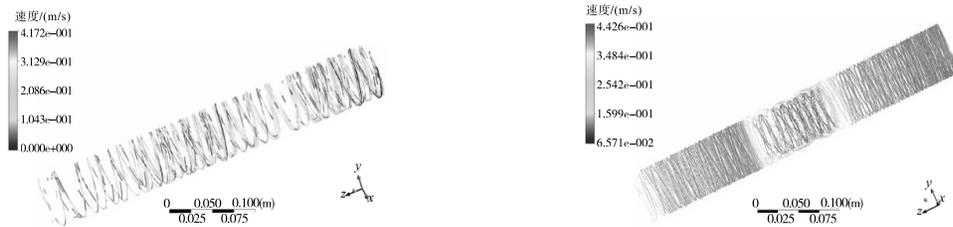


图8 传统螺杆和新型螺杆的速度流线图

Fig.8 Speed flow diagram of conventional and new screws

由图8可知:物料在传统螺杆中分布均匀、连续,螺杆分布性能较低,物料无法充分混合;而在新型螺杆中速度流线更加混乱,这是因为在摆线齿轮减速器的作用下,不同区域物料输送速度不同,物料

产生对流现象,使物料在挤出机内分布更加分散,提高了挤出机的混合分布效果。

图9为新型螺杆轴向距离 $z = 160$ mm截面速度流线图。



图9 轴向距离 $z = 160$ mm处传统螺杆和新型螺杆的速度流线图

Fig.9 Speed flow diagram of conventional and new screws at an axial distance z of 160 mm

由图9可以看出:传统螺杆速度流线速度较大且相同时间内输送距离更长;新型螺杆速度流线速度明显降低,存在被切断的现象,同时出现反向的速度流线,这是由于新型螺杆装配的反向螺纹元件和摆线齿轮减速器使物料速度降低,物料出现回流现象,使物料能够被多次挤压、剪切,说明物料在此处停留时间延长且得到充分剪切,使螺杆剪切性能增强。

3 结论

为了提高传统单螺杆挤出机的混合性能和挤出效率,设计了装配反向螺纹元件和内嵌摆线齿轮减速器的新型单螺杆挤出机,利用CFX和ANSYS软件对新型单螺杆流道进行数值模拟分析,通过与传统单螺杆进行对比,得出以下结论。

(1)新型螺杆由于内部嵌入摆线齿轮减速器使其混炼段速度降低,降为传统螺杆的1/6,物料产生对流现象,使压力变化速度加快,速度流线分布更加

混乱,增强了挤出机的混合性能。

(2)新型螺杆混炼段因装有反向螺纹元件,螺杆出现反向建压能力和反向速度矢量,使物料产生回流,增加物料的挤压剪切次数,增强了挤出机的剪切性能。

(3)新型螺杆虽然提升了混合分布效果,但其建压能力减弱,降低了螺杆的挤出效率。

参考文献:

- [1] 邵孟雅,袁岐山,杨欣玲,等.大豆加工副产物资源化利用研究进展[J].中国酿造,2023,42(1):21-26.
- [2] 王金成,孔凡强,刘红梅.豆粕的指标、加工与利用[J].养殖技术顾问,2011(7):273.
- [3] 乔高明.饲料加工中的挤压膨化技术[J].中国饲料,2001(14):24-25.
- [4] 陶婷,潘迪,马挺军.双螺杆挤压膨化对大豆豆粕-红小豆混合冲调粉品质特性的研究[J].河北农业大学学报,2019,42(4):49-55.
- [5] 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.
- [6] 孙建辉, 王平. 螺杆挤出机优化设计的现状及发展[J]. 现代制造工程, 2009(12): 9 - 12.
- [7] 刘平. 同向双螺杆挤出机浅析[J]. 农民致富之友, 2017(15): 123.
- [8] 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(2): 68 - 71, 76.
- [9] 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.
- [10] 李垚, 王丽艳. 基于摆线针轮传动的同轴异速单螺杆挤出机的仿真分析[J/OL]. 中国油脂: 1 - 10 [2024 - 01 - 07]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230485>.
- [11] 金子云, 郭树国, 左晓甜, 等. 新型变速单螺杆挤出机中熔体流动特性的数值模拟[J]. 饲料工业, 2024, 45(2): 31 - 37.
- [12] 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.
- [13] 班董董, 王丹华, 李亚楠, 等. 偏心距对波状单螺杆元件混合性能的影响[J]. 塑料, 2023, 52(2): 145 - 150.
- [14] 邹思雨, 任建民, 朱向哲. 新型单螺杆挤出机组合螺杆混合特性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(1): 54 - 60.
- [15] 韩海川, 刘谨, 李开国, 等. 双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场影响的仿真[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6): 74 - 77, 87.
- [16] 郭树国, 于淼, 王丽艳, 等. 带有开槽中性捏合块和反向螺纹双螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 沈阳化工大学学报, 2020, 34(4): 358 - 362.
- [17] 刘忠尧, 黄志刚, 代祥基, 等. 正向螺纹元件组合对反向螺纹元件熔体输送特性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 66 - 71, 174.
- [18] 杜凤娇, 刘建刚. 基于 ANSYS 摆线齿轮设计研究与 UG 制造分析[J]. 新余学院学报, 2018, 23(1): 14 - 18.
- [19] 曹娟. 摆线轮的建模与仿真[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(23): 111 - 113.
- [20] 陈俊, 何克龙, 沈磊, 等. 摆线转子泵的设计计算及参数化建模[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(5): 103 - 107.
- [21] 郭树国, 王丽艳, 刘强. 结构参数对单螺杆挤压机生产率影响的研究[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3): 56 - 57.
- [22] 赵学端, 廖其奠. 粘性流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

(上接第 134 页)

- [7] 陈子茜, 陈耀兵, 黄秀芳, 等. 采收期对“鄂选2号”山桐子果实成分及脂肪酸组成变化影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 96 - 103.
- [8] 咎鹏, 张琳, 祖元刚, 等. 山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim) 果实多酚的抗炎、抗菌活性研究[J]. 植物研究, 2016, 36(6): 955 - 960.
- [9] 闻乐嫣, 毛建梅, 安小风, 等. 毛叶山桐子果实化学成分及脂肪酸动态分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 198 - 207.
- [10] 宋明发, 杨芸, 白冉冉, 等. 不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 28 - 32, 38.
- [11] 张红霞, 沈祥震, 卢克刚, 等. 气相色谱法同时测定植物油脂中的脂肪酸和角鲨烯含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(1): 72 - 78.
- [12] 林树真, 龙婷, 段明慧, 等. HPLC 法同时测定油茶籽油中的 γ -生育酚、 β -谷甾醇和角鲨烯[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 218 - 223.
- [13] 董聪慧, 董文江, 程金焕, 等. 咖啡豆烘焙过程中油脂脂肪酸组成、挥发性风味及活性成分的演变规律[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 210 - 222.
- [14] LI N, SUN Y R, HE L B, et al. Amelioration by *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels. of oleic acid - induced nonalcoholic fatty liver in HepG2 cells through antioxidant and modulation of lipid metabolism [J/OL]. *Oxid Med Cell Longev*, 2020, 2020: 1208726 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1155/2020/1208726>.
- [15] YUAN G, GUAN Y, YI H, et al. Antibacterial activity and mechanism of plant flavonoids to gram - positive bacteria predicted from their lipophilicities [J/OL]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 10471 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90035-7>.
- [16] 张欢. 山桐子果实表型多样性与优树生长性状研究[D]. 四川南充: 西华师范大学, 2021.
- [17] 曹子伦, 雷芬芬, 郑竟成, 等. 不同产地南瓜籽油组成及氧化稳定性的差异[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 283 - 289.
- [18] ZHANG W, ZHAO C, KARRAR E, et al. Analysis of chemical composition and antioxidant activity of *Idesia polycarpa* pulp oil from five regions in China [J/OL]. *Foods*, 2023, 12(6): 1251 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.3390/foods12061251>.
- [19] 刘海, 王进, 许杰, 等. 贵州不同油茶物种及产地对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 145 - 152.
- [20] 田朝杰, 孙婵婵, 陈宁, 等. 主成分分析在蛋清蛋白基脂肪模拟物综合评价中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 69 - 74.