

新型混炼单螺杆植物蛋白挤出机的 仿真分析与参数优化

金子云, 郭树国

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 沈阳 110142)

摘要: 为了提高单螺杆挤出机中花生蛋白的挤出品质, 基于拉伸应力的破碎效应, 以传统单螺杆挤出机为参照, 利用有限元软件 CFX 计算了花生蛋白在流场中的运动情况, 通过压力场、速度流线场以及应变速率场, 分析新型混炼单螺杆挤出机的特性, 并以拉伸流变学理论对设计原理进行验证, 同时采用响应面法对新型混炼单螺杆挤出机的工艺参数进行优化。结果表明: 新型混炼单螺杆挤出机中混炼元件的分流作用使得沿挤出方向产生了压力降, 物料发生回流, 导致建压性能降低, 从而延长了停留时间, 此处因回流效果产生的局部高压也有利于压延, 物料在流经抛物线曲面时既能经历周向拉伸, 又能经历径向拉伸, 分散混合效果更好; 经模拟计算, 发现新型混炼单螺杆挤出机的平均应变速率相较于传统单螺杆挤出机提高了 16.5%, 使得挤出产品质量更优; 各因素对花生蛋白平均应变速率的影响顺序依次为螺杆转速、收敛比、分割棱厚度, 新型混炼单螺杆挤出机最优工艺参数为螺杆转速 128 r/min、收敛比 6.6、分割棱厚度 3.1 mm, 在此条件下花生蛋白的理论平均应变速率为 50.945 s^{-1} 。综上, 新型混炼单螺杆挤出机中由于拉伸流场的形成, 有效提高了花生蛋白的挤出品质。

关键词: 单螺杆挤出机; 花生蛋白; 拉伸流变学; 平均应变速率

中图分类号: TS229; TS223

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)11-0146-07

Simulation analysis and parameter optimization of new mixing single screw vegetable protein extruder

JIN Ziyun, GUO Shuguo

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

Abstract: In order to improve the extrusion quality of peanut protein in single screw extruder, based on the crushing effect of tensile stress, the traditional single screw extruder was used as a reference, the finite element software CFX was used to calculate the movement of peanut protein in the flow field, the characteristics of the new mixing single screw extruder was analyzed through the pressure field, velocity streamline field and strain rate field, the design principle with tensile rheological theory was verified, and the process parameters of the new extruder were optimized by response surface methodology. The results showed that the diversion effect of the mixing element in the new extruder made the pressure drop along the extrusion direction, and the material flows back, resulting in reduced pressure building performance, thereby prolonging the residence time, and the local high pressure generated by the reflux effect here was

also conducive to calendaring, the material could experience both circumferential stretching and radial stretching when flowing through the parabolic surface, and the dispersion mixing effect was better. After simulation calculation, it was found that the average strain rate of the new extruder was 16.5% higher than that of the

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2024-07-21

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2022-MS-288, 2021-MS-253, 2019-ZD-0085)

作者简介: 金子云(1999), 男, 硕士研究生, 主要从事螺杆挤出机设备研究(E-mail) jinziyunli@163.com。

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

traditional extruder, which made the quality of extrusion product better. The order of influence of each factor on the average strain rate of peanut protein was screw speed, convergence ratio, segmentation prism thickness, and the optimal process parameters of the new single screw extruder were screw speed 128 r/min, convergence ratio 6.6, and segmentation prism thickness 3.1 mm. Under the optimal conditions, the theoretical average strain rate of peanut protein was 50.945 s^{-1} . In conclusion, the extrusion quality of peanut protein is effectively improved due to the formation of tensile flow field in the new mixing single screw extruder.

Key words: single screw extruder; peanut protein; tensile rheology; average strain rate

花生作为一种食用、榨油兼用的经济作物,在农业生产与贸易中占据重要地位,是我国重要的油料作物之一。脱脂花生饼粕是花生仁经压榨或浸出提油后的副产物,其干基蛋白质含量达40%以上。伴随花生制油工艺的发展,花生蛋白的开发与利用越来越受到关注,其中通过挤压膨化生产组织化植物蛋白具有良好的发展前景^[1-2]。

挤出机是食品组织化加工的重要装备。螺杆构型与挤出产品的品质优劣直接相关。目前针对植物蛋白的挤压大多采用双螺杆挤出机,但双螺杆挤出机结构复杂、价格高,易引起生产成本提高。单螺杆挤出机相较双螺杆挤出机制造成本低廉,操作简单,具有一定性价比,但传统单螺杆挤出机中螺杆螺槽较深,剪切能力弱且无法产生回混,导致混炼性能尤其是分散混炼性能较差^[3]。在聚合物塑化领域,通常在挤出机中加入常规的混炼元件,如销钉型、屏障型(Maddock)、菠萝型(Pineapple)、DIS型混炼元件等,通过分流以及剪切分散作用,使团聚的颗粒破碎分散,从而达到稳定的混炼效果^[4]。这种方法存在一定的不足,首先分流次数过多对高黏弹性物料的混炼不好,且分流次数过多,压力降越大;其次高剪切分散混炼容易导致剪敏性物料分子链降解。大量研究表明,对提高颗粒熔融态的分散混合效果以及降低生热,拉伸力场都要优于剪切力场^[5]。徐文华等^[6]通过设计叶片挤出机来比较拉伸力场与剪切力场的能耗,发现拉伸力场中物料的混炼效果相较

于剪切力场更好,且能耗更低。以往对于拉伸力场的研究多存在于塑料加工领域,而在食品加工领域的研究相对较少。

本文在ANSYS/CFX模拟分析的基础上,设计了一种基于抛物线线型的渐收敛-渐发散新型混炼单螺杆挤出机,以传统单螺杆挤出机为参照,以黏性流体力学为基础,计算物料在流场的运动情况,并通过响应面法优化新型混炼单螺杆挤出机的相关参数,以期优化单螺杆挤出机的分散混合性能提供一定的理论依据,以此提高花生蛋白的挤出品质。

1 新型混炼单螺杆挤出机的结构设计

1.1 加工原理

单螺杆挤出成型过程中连续相的分散混合效果直接影响挤出产品品质和挤出机生产稳定性^[7]。拉伸破裂作为实现分散混合效果的主要过程,其原理是在拉伸应力的作用下,组成连续相的单向颗粒在应力方向上发生形变,颗粒由球状变为椭球状,随着粒子夹断区宽度的逐渐收缩,最终发生破裂,形成体积更小的粒子,这与杨威^[8]在液滴破碎动力学研究中的原理类似。

本文在上述原理的基础上设计了一款新型混炼元件,其原理(见图1)是采用渐收敛-渐发散的分流槽使流过的熔体被分割成数股料流,均匀化物料分布,由于抛物线曲面的形成,在径向和周向两个方向均受到强烈的拉伸力场作用。

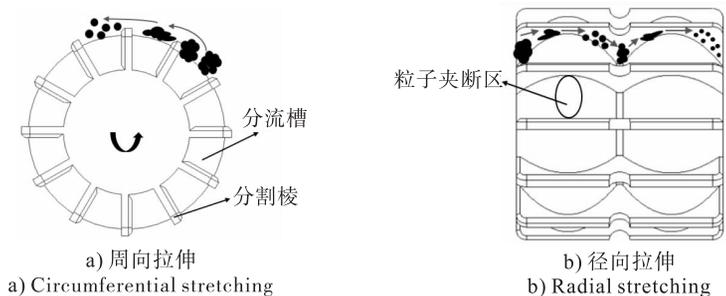


图1 新型混炼元件的工作原理

Fig. 1 Working principle of the new mixing element

物料反复经历发散、汇合,使物料在流道加速均化,其分割棱上的半圆槽使得大分子拉伸破裂后的小分子颗粒通过,从而使各个流道分布均匀的物料进一步分散均匀,并达到优异的分分散混合效果。考虑到分割棱折点处料流停留时间过长会引起过热烧焦,为减少料流阻力,在各折点位进行倒圆角。

新型混炼元件具备的优点:①拉伸力场沿径向以及周向持续分布,从而产生明显的拉伸应力场,增加物料的破碎细化。②由于分割棱的分流作用从而产生了压力降,有利于延长物料的停留时间,增加物料的分分散混合。

1.2 结构设计 Pro/E 模型与有限元模型

图2为本文设计的新型混炼元件抛物线曲面理论线型。

以轴心O为原点,图2中所述曲线a、b、c、d的参数方程如式(1)所示。

$$(a) \begin{cases} x = (-t)^2 \cdot 10 \\ z = -t \cdot 12.5 \\ y = 0 \end{cases} \quad (b) \begin{cases} x = t^2 \cdot 10 \\ z = t \cdot 12.5 \\ y = 0 \end{cases} \quad (c) \begin{cases} x = (-t)^2 \cdot 10 \\ z = -t \cdot 12.5 + 25 \\ y = 0 \end{cases} \quad (d) \begin{cases} x = t^2 \cdot 10 \\ z = t \cdot 12.5 + 25 \\ y = 0 \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (1)$$

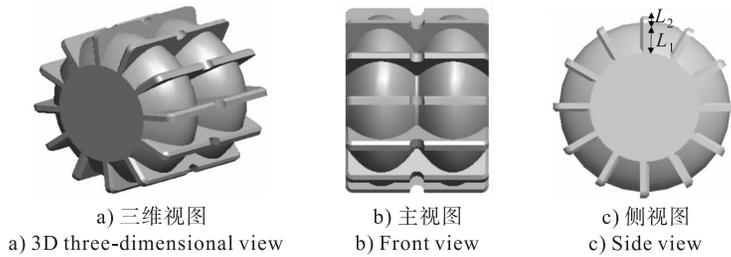


图3 新型混炼元件 Pro/E 模型
Fig. 3 Pro/E model of the new mixing element

假设黏结团聚颗粒为单相物质,则连续相在剪切流动与拉伸流动过程中所受最大作用力可修正如下^[9]。

$$\begin{cases} F_{SH-max} = 3\pi\eta\dot{\gamma}r^2 \\ F_{EX-max} = 6\pi\eta\dot{\epsilon}r^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_{SH-max} 为最大剪切力,N; F_{EX-max} 为最大拉伸力,N; η 为连续相黏度, $Pa \cdot s$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; $\dot{\epsilon}$ 为拉伸速率, s^{-1} ; r 为物料半径,m。

从式(2)可以明显看出,在应变速率(剪切速率和拉伸速率)相同的情况下,拉伸作用力是剪切作用力的2倍,验证了拉伸流动更有利于物料的分分散混合。

图4为新型混炼单螺杆挤出机 Pro/E 模型,其中螺杆全长 210 mm,螺杆外径 60 mm,根径 40 mm,导程 40 mm,单侧螺纹段长度 80 mm,螺纹旋向右旋。

通过参数方程编写的曲面线型来生成实体,新型混炼元件 Pro/E 模型如图3所示。混炼段直径为 60 mm,轴向长度为 50 mm,分割棱数目为 12 个,棱厚为 3 mm,棱上倒角为 1 mm,抛物线峰值面到棱顶间距为 2 mm,开槽半径为 2.5 mm,收敛比 $[(L_1 + L_2)/L_2]$,式中: L_1 为混炼段中抛物线曲面部分的长度, L_2 为混炼段中收敛部分的长度为 6。

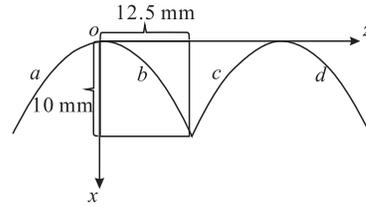


图2 抛物线曲面理论线型

Fig. 2 Theoretical line pattern of parabolic surface

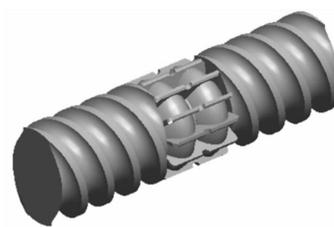


图4 新型混炼单螺杆挤出机 Pro/E 模型

Fig. 4 Pro/E model of the new mixing single screw extruder

图5为新型混炼单螺杆的有限元模型,通过导入 Mesh 模块来进行四面体网格划分。网格节点数 17 450,单元数 67 876。

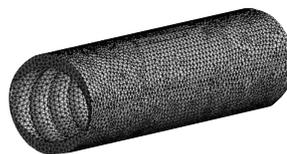


图5 新型混炼单螺杆有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the new mixing single screw

2 新型混炼单螺杆挤出机流场有限元模型分析

2.1 基本假设

由于花生蛋白在挤出过程中呈熔融态,此处可认定为幂律流体,物性参数^[10]为密度 665 kg/m³,黏度 1 620 Pa·s,机筒温度设置 140 ℃^[11],为方便流场的拟定,作出如下假设^[7]:①流道内熔体充满,且不可压缩,即密度(ρ)为定值;②熔体认定为层流;③分析段流场均为等温,稳态流场;④忽略体积力、惯性力;⑤机筒内壁与螺杆间无滑移。

根据上述假设条件,由于混炼段为拉伸流动,因此本构方程采用应力以及应变速率进行描述,又因温度恒定,故不求解能量方程。

连续性方程、运动方程、本构方程分别见式(3)、式(4)、式(5)。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau = k \cdot \dot{\delta}^n \quad (5)$$

式中: v 为速度矢量,m/s; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 、 z 轴上的速度分量,m/s; p 为静压力,Pa; τ_{ij} 为应力矢量(i 、 j 为直角坐标系上的 x 、 y 、 z 轴); $\dot{\delta}$ 为应变速率,s⁻¹; k 为稠度系数,Pa·s ^{n} ; n 为幂律指数,取 0.35。

联立式(3)~式(5)建方程组进行求解。

2.2 边界条件

参照苏州铁龙机械有限公司生产的 SJ-25 型单螺杆挤出机,将其实际工作条件作为模拟条件来进行具体分析,条件如下:螺杆转速 120 r/min;理想流体进口速度 0.03 m/s,出口压力 3 MPa;机筒无转速。

3 新型混炼单螺杆挤出机流场计算结果与分析

3.1 压力场

流场压力可以表征螺杆的建压性能,通常用进出口压差(Δp_z)判别,在进口流量一定的情况下 Δp_z 越大,螺杆的建压性能越好,物料的输送能力越佳^[12],但同时也会降低混合效果。图 6 为新型混炼单螺杆挤出机与传统单螺杆挤出机的流场压力分布。

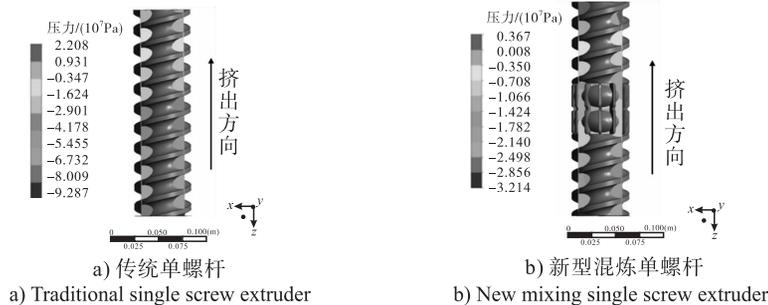


图 6 传统单螺杆挤出机和新型混炼单螺杆挤出机的流场压力对比

Fig. 6 Comparison on flow field pressure of two single screw extruders

由图 6 可知,两种单螺杆挤出机的流场出口压力均大于进口压力,表明两者均存在一定的建压能力。传统单螺杆挤出机的压力沿挤出方向基本均匀增加,物料只能被均匀挤出,混合效果不佳。而新型混炼单螺杆挤出机中由于混炼元件的加入,其分割棱的分流作用导致螺杆沿挤出方向产生压力降,混炼段 Δp_h 小于 0,相当于使物料沿挤出方向的相反方向进行建压,并造成回流,有利于物料的轴向混合,而此处产生的局部高压是由于混炼段本身没有运输能力,物料在此处的流动不畅,既延长了物料的停留时间,又有利于物料的压延。当进口流量一致时,新型混炼单螺杆挤出机与传统单螺杆挤出机的流道压差分别为 47、115 MPa,新型混炼单螺杆挤出

机的流道压差更小,说明物料在新型混炼单螺杆挤出机中的输送变慢,停留时间更长,分布分散混合效果更好,同时也与混炼段没有运输能力相吻合。

3.2 速度流线场

速度流线是流场中同一时刻不同流体质点组成的曲线,且曲线上每一点都与对应的速度矢量相切^[7]。速度流线的微分方程见式(6)。

$$\frac{dx}{v_x(x,y,z,t)} = \frac{dy}{v_y(x,y,z,t)} = \frac{dz}{v_z(x,y,z,t)} \quad (6)$$

将模拟出的速度流线场代入方程(6),通过积分可以得到任一质点的运动轨迹与速度,从而更直观分析物料在挤出机中的流动状态。传统单螺杆挤出机和新型混炼单螺杆挤出机流场速度流线图如图 7 所示。

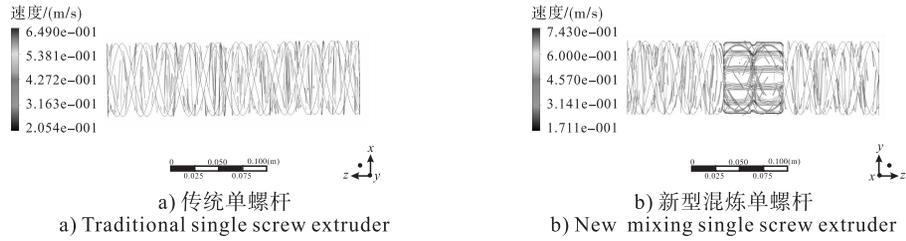


图7 传统单螺杆挤出机和新型混炼单螺杆挤出机的流场速度流线对比

Fig.7 Comparison on flow field velocity streamlines of two single screw extruders

由图7a可知,传统单螺杆挤出机中速度流线均匀连续,无间断,因此无法充分混合,挤出产品品质不佳。从图7b可以看出,物料在进入混炼段的速度流线在被收敛段沿径向拉伸收缩的同时,又被分割棱沿周向拉断,被拉断的速度流线在发散段充分混合、均化,其大分子破碎后的流线经开槽口流经各个分割流道,在降低剪切生热的情况下,有效地提高了分散混合性能,增加了花生蛋白的挤出品质,使其口感更佳。

3.3 拉伸流场验证

根据拉伸流变学理论,一般拉伸流场的速度场定义表达见式(7)^[13]。

$$\begin{cases} v_y = +\dot{\epsilon}y \\ v_x = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}(1-b)x \\ v_z = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}(1+b)z \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为沿 x 、 y 、 z 3个方向的速度, m/s; $\dot{\epsilon}$ 为拉伸速率, s^{-1} ; b 为流场参数($0 \leq b \leq 1$)。当 $b=0$ 、 $\dot{\epsilon} > 0$ 时,流场为双轴拉伸流场^[14]。

图8为新型混炼单螺杆挤出机混炼段沿 x 、 y 、 z 3个方向的速度变化。

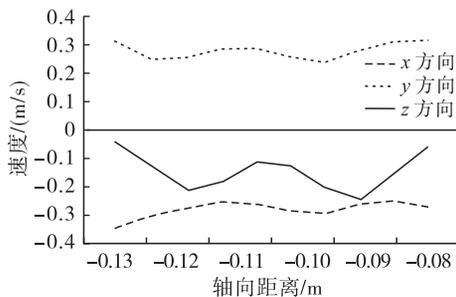


图8 新型混炼单螺杆挤出机混炼段沿 x 、 y 、 z 方向速度

Fig.8 Velocity distribution along x , y and z directions in the mixing section of the new mixing single screw extruder

由图8可知,新型混炼单螺杆挤出机混炼段沿 x 方向的速度范围在 $-0.345 \sim -0.245$ m/s,沿 y 方向的速度范围在 $0.238 \sim 0.315$ m/s,沿 z 方向的速度范围在 $-0.250 \sim -0.040$ m/s,根据本文设计的新型混炼拉伸流场表现为在 x 、 z 两个正交

方向同时拉伸而在 y 方向收缩,因此可认定为双轴拉伸流场,通过将 v_x 、 v_z 小于0, v_y 大于0的条件代入式(7)可知,流场满足拉伸流变学理论,符合本文设计原理。

3.4 应变速率场

在新型混炼单螺杆挤压中沿 z 轴设置一条监测线^[15-16],用来观察监测线上的应变速率。图9为新型混炼单螺杆挤出机的应变速率变化。

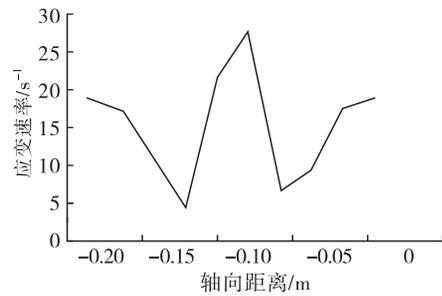


图9 新型混炼单螺杆挤出机的应变速率变化

Fig.9 Variation of strain rate in new mixing single screw extruder

由图9可知,应变速率在经过混炼段(轴向距离 $-0.13 \sim -0.08$ m)时迅速增大,说明物料在混炼段处的拉伸速率要大于螺纹段的剪切速率,由式(2)可知,当 $\dot{\epsilon} > \dot{\gamma}$,则 F_{EX-max} 是 F_{SH-max} 的2倍多,因此物料能在此处受到更大的拉伸应力,使物料的破碎更为充分,从而进一步改善挤出机的分散混合性能。

由于新型混炼单螺杆挤出机中混炼段以拉伸流场为主而螺纹段以剪切流场为主,因此本文用平均应变速率作为指标来评价两种单螺杆挤出机的分散混合性能。

平均应变速率的计算公式见式(8)。

$$\bar{\dot{\delta}} = \frac{\iiint_{\Omega_L} \dot{\gamma} d\Omega_L + \iiint_{\Omega_H} \dot{\epsilon} d\Omega_H}{\iiint_{\Omega_Z} d\Omega_Z} \quad (8)$$

式中: $\bar{\dot{\delta}}$ 为平均应变速率, s^{-1} ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; $\dot{\epsilon}$ 为拉伸速率, s^{-1} ; Ω_L 为螺纹段域; Ω_H 为混炼段域; Ω_Z 为整个流道域。

通过式(8)计算出新型混炼单螺杆挤出机与

传统单螺杆挤出机的平均应变速率分别为 49.88、42.83 s^{-1} , 新型混炼单螺杆挤出机的平均应变速率为传统单螺杆挤压机的 1.16 倍, 即平均应变速率提高了 16.5%, 物料在此条件下更容易分散混合, 使物料更佳均匀, 因此新型混炼单螺杆挤出机加工性能更好, 比传统单螺杆挤出机更具有优势。

4 新型混炼单螺杆挤出机参数响应面优化试验

4.1 试验方法

更改相关参数→Pro/E 三维建模→CFX 数值模拟→计算结果。

4.2 试验设计

由于径向与周向的拉伸分别依赖于收敛比和分割棱厚度, 两者的变化程度势必引起物料的形状大小。而螺杆转速的改变, 也会影响挤出机内部剪切、拉伸作用情况^[17]。因此, 本文采用响应面法来对新型混炼单螺杆挤出机的相关参数进行优化, 在单因素模拟试验的基础上根据实际情况合理选取一定范围的收敛比、分割棱厚度以及螺杆转速为自变量, 每个变量取 3 个水平, 各因素水平的设置及编码如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Response surface test factors and levels

水平	X_1 收敛比	X_2 分割棱厚度/mm	X_3 螺杆转速/(r/min)
-1	2.5	1	110
0	5.0	3	120
1	7.5	5	130

4.3 响应面试验设计及结果

本模拟试验采用 Design Expert 12.0 设计了三因素二次回归通用旋转组合设计, 共 17 个试验点的试验, 并以花生蛋白的平均应变速率 (Y) 为响应值, 将每一试验点的模拟结果按式 (8) 进行计算, 响应面试验设计及模拟结果如表 2 所示。

表 2 响应面试验设计及模拟结果

Table 2 Response surface test design and simulation results

试验号	X_1	X_2	X_3	Y/s^{-1}
1	0	-1	1	47.21
2	-1	0	-1	42.36
3	-1	1	0	41.51
4	1	0	1	50.74
5	-1	0	1	46.21
6	0	1	1	48.79
7	0	0	0	49.10
8	1	0	-1	45.67
9	-1	-1	0	46.08

续表 2

试验号	X_1	X_2	X_3	Y/s^{-1}
10	0	0	0	49.89
11	1	1	0	47.81
12	1	-1	0	45.13
13	0	0	0	50.91
14	0	-1	-1	45.64
15	0	0	0	49.90
16	0	1	-1	43.09
17	0	0	0	48.86

采用 Design Expert 12.0 软件对响应值与各因素进行回归拟合后, 得到回归方程: $Y = 49.73 + 1.65X_1 - 0.36X_2 + 2.02X_3 + 1.81X_1X_2 + 0.31X_1X_3 + 1.03X_2X_3 - 2.27X_1^2 - 2.33X_2^2 - 1.22X_3^2$ 。对回归模型进行方差分析, 结果见表 3。

表 3 方差分析

Table 3 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	129.53	9	14.39	26.36	0.000 1	**
X_1	21.75	1	21.75	39.83	0.000 4	**
X_2	1.02	1	1.02	1.87	0.213 5	
X_3	32.76	1	32.76	60.01	0.000 1	**
X_1X_2	13.14	1	13.14	24.07	0.001 7	**
X_1X_3	0.37	1	0.37	0.68	0.436 3	
X_2X_3	4.26	1	4.26	7.81	0.026 7	*
X_1^2	21.67	1	21.67	39.69	0.000 4	**
X_2^2	22.88	1	22.88	41.90	0.000 3	**
X_3^2	6.25	1	6.25	11.45	0.011 7	*
残差	3.82	7	0.55			
失拟项	1.22	3	0.41	0.63	0.635 0	
纯误差	2.60	4	0.65			
总离差	133.35	16				

注: ** 为差异极显著, $p < 0.01$; * 为差异显著, $p < 0.05$

Note: ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

由表 3 可知, 模型回归方程的 p 值小于 0.01, 表示该模型极显著。失拟项 p 值大于 0.05, 说明不存在失拟因子。模型的决定系数 (R^2) 为 0.971 3, 说明响应值的变化有 97.13% 是来源于所选变量, 因此回归方程拟合效果良好, 可以较好地描述各因素与响应值之间的实际关系。由表 3 还可看出, 收敛比与螺杆转速的 p 值小于 0.01, 说明二者对平均应变速率的影响极显著。3 个因素对平均应变速率的影响大小排序为螺杆转速 > 收敛比 > 分割棱厚度。研究表明, 平均应变速率越大, 物料的分散混合效果越好, 挤出质更佳^[18]。运用 Design Expert 12.0 软件分析模型得出新型混炼单螺杆挤出机的最佳工艺条件为螺杆转速 127.917 r/min、收敛比 6.598、分割棱厚度 3.127 mm, 考虑到实际加工以及

操作的便利,将其修正为螺杆转速 128 r/min、收敛比 6.6、分割棱厚度 3.1 mm,在此工艺条件下花生蛋白的理论平均应变速率为 50.945 s^{-1} 。

5 结论

(1)新型混炼单螺杆挤出机在混炼元件分流作用下产生了压力降,降低了螺杆的建压性能,产生一定的回流,从而延长了物料的停留时间,且此处的背压也有利于物料的压延。

(2)新型混炼元件的流场符合拉伸流变学理论中的双轴拉伸流场,因此相较于普通螺纹元件的剪切流场性能更优,分散混合性能更好。

(3)新型混炼单螺杆挤出机相较于传统单螺杆挤出机对花生蛋白的平均应变速率提高了 16.5%,说明新型混炼单螺杆挤出机在植物蛋白等相关食品加工领域中更具有优势。

(4)通过响应面试验分析,得出新型混炼单螺杆挤出机的最佳工艺参数为螺杆转速 128 r/min、收敛比 6.6、分割棱厚度 3.1 mm,在此条件下花生蛋白理论平均应变速率为 50.945 s^{-1} ,此时花生蛋白的挤出品质最佳。

参考文献:

- [1] 李振,相海,赵有斌,等. 植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(9): 67-74.
- [2] 李振,相海,任嘉嘉,等. 同向全啮合双螺杆植物蛋白挤出机不同螺杆元件的仿真分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 147-152.
- [3] 林祥,任冬云,王奎升. 基于拉伸破碎原理的单螺杆拉伸混炼元件的研究[J]. 中国塑料, 2011, 25(12): 90-94.
- [4] 高岗,谢林生,马玉录,等. 不同结构单螺杆屏障混炼元件混合特性研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(9): 85-91.
- [5] 徐百平,瞿金平. 双螺杆螺棱侧间隙纯拉伸力场效应研究[J]. 现代塑料加工应用, 2005, 17(4): 48-51.
- [6] 徐文华,杨智韬,殷小春,等. 拉伸形变作用下 PLA/PBS 增韧共混物力学性能研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(1): 34-38.
- [7] 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.
- [8] 杨威. 液滴破碎动力学特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [9] 黄磊,欧相麟,吴世见. 拉伸流场对聚合物填充体系的分散混合作用[J]. 中国塑料, 2006, 20(9): 53-58.
- [10] 郎珊珊. 双螺杆构型及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [11] 武建堂,董海洲,刘传富,等. 挤压膨化对脱脂花生粕组织化度的影响[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(8): 91-94.
- [12] 陶璵,闫宝瑞,信春玲,等. 三螺杆挤出机的建压能力与功耗特性[J]. 塑料, 2016, 45(3): 45-49.
- [13] BIRD R B, ARMSTRONG R C, HASSAGER O. Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1. Fluid mechanics [M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1987.
- [14] 刘双,黄茜,陈全,等. 流变技术在高分子表征中的应用: 拉伸流变测试[J]. 高分子学报, 2023, 54(2): 286-302.
- [15] 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.
- [16] 张洪才. ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] 余东泉. 三螺杆挤出机混炼性能评价及剪切-拉伸交变流场作用机制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [18] 张一惟,黄志刚,商嘉玮,等. 啮合异向双螺杆挤出机中螺杆端面结构参数对聚乳酸流场的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 71-76, 88.
- [19] 张克平,黄建龙,杨敏,等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 352-356.
- [20] 曾长女,田彦歌,宋飞如. 不同剪切速率下储仓内小麦剪胀特性的三轴实验研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 131-136.
- [21] 冯永,李萌. 改进颗粒组构力学模型模拟筒仓卸粮成拱细观机理[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 286-293.
- [22] 邵玉娴,施斌,高磊,等. 温度对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 213-217.
- [23] 李腾龙,曾长女,郭呈周. 大豆静力与动力剪切特性的试验研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 132-136.
- [24] 程绪铎,陆琳琳,石翠霞,等. 大豆内摩擦角的测定与实验研究[J]. 粮食储藏, 2010, 39(5): 12-15.
- [25] 静行,杨鹏飞,张楠,等. 大豆粮堆力学特性的直剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8): 189-193.
- [26] 张丰尧,刘克瑾,王世豪. 基于离散单元法的大豆力学特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 94-99.
- [27] 周星,王若兰,黄亚伟,等. 粮层压力对大豆堆压程度的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 1-6.

(上接第 145 页)