

# 同向双螺杆挤出植物蛋白肉过程特性研究

袁方洋<sup>1,2,3</sup>, 田文马<sup>1,2</sup>, 王东祥<sup>1,2</sup>, 杨新俊<sup>1,2</sup>, 杜继芸<sup>1,2</sup>, 于伟<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 无锡市通用机械厂有限公司, 江苏 无锡 214028)

**摘要:**旨在采用湿法挤压组织化技术生产植物蛋白肉制品,以缓解动物蛋白的供应压力和保证人体需要的蛋白质来源。基于同向双螺杆挤压机制备高质量拉丝蛋白,测量了植物蛋白肉物料的流变特性,建立模型并采用 ANSYS Fluent 对挤压机内流场进行全过程数值模拟,并验证数值模拟的可靠性,以及分析了挤出过程中流道内压强、速度、温度、剪切速率和剪切应力等关键参数的变化规律。结果表明:挤压机出口流量、螺杆扭矩和机头压强都随着螺杆转速的增加而增大,试验值与模拟值相对误差较小,验证了数值模拟的有效性,但高螺杆转速下过高的剪切应力会降低植物蛋白肉成型质量,其中螺杆转速为 290 r/min 时产品品质最佳;在螺杆转速 290 r/min 条件下,通过螺杆元件的排布和机筒壁面温度的控制,螺杆段流道的压强逐渐波动上升;物料温度随着壁面温度先升高后降低,靠近机筒的物料升温 and 降温都要更快,导致一定程度的壁面速度滑移;物料达到相分离临界温度的停留时间是螺杆转速的幂律函数,由此可确定双螺杆的适宜转速,以保证充分熟化和拉丝质量的工艺要求;剪切速率随螺杆转速的增加而增大,在啮合块处达到最大值;剪切应力在螺杆间隙处达到最大值。综上,可以通过数值模拟的方法指导植物蛋白肉的实际生产。

**关键词:**同向双螺杆;植物蛋白肉;挤出过程;数值模拟;传热传质

中图分类号:TS229;TS221

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)08-0066-08

## Characteristic of co-rotating twin-screw extrusion process for plant-based protein meat

YUAN Fangyang<sup>1,2,3</sup>, TIAN Wenma<sup>1,2</sup>, WANG Dongxiang<sup>1,2</sup>,  
YANG Xinjun<sup>1,2</sup>, DU Jiyun<sup>1,2</sup>, YU Wei<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. Wuxi General Machinery Works Co., Ltd., Wuxi 214028, Jiangsu, China)

**Abstract:** The purpose is to produce plant-based protein meat products by using wet extrusion texturing technology, to alleviate the supply pressure of animal protein and to ensure the protein source for daily life needs. High-quality pultruded proteins can be prepared using a co-rotating twin-screw extruder. The rheological properties of the plant-based protein meat were measured, and a model was developed for full-scale numerical simulation of the flow field in the extruder using ANSYS Fluent. The reliability of the numerical simulation was verified by comparing it with the experimental data. The changes of key parameters such as pressure, velocity, temperature, shear rate and shear stress in the flow channel during the extrusion process were analyzed. The results showed that the outlet flow, screw torque and head

pressure increased with the increase of rotating speeds, and the relative error between experimental and simulated values was lower, which verified the validity of numerical simulation. However, the higher shear stress at high rotating speed reduced the plant-based

收稿日期:2024-05-07;修回日期:2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金(12172152);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题(FMZ202305);江南大学通识精品课程建设项目(202308)

作者简介:袁方洋(1990),男,副教授,硕士生导师,研究方向为食品机械与流体力学(E-mail)fyuan@jiangnan.edu.cn。

protein meat's molding quality. Among them, the product quality was the best when the rotating speed was 290 r/min. With the combined effect of screw elements design and wall temperature regulation at this rotating speed(290 r/min), the pressure of the flow channel in the screw section fluctuated and rose, and the material temperature first rose and then decreased with the wall temperature. Material closer to the barrel heated up and cooled down more quickly, resulting in wall velocity slip. The residence time for the material to reach the critical temperature for phase separation was a power law function of the rotating speed, by which the suitable rotating speed of the twin screw could be determined to ensure that the process requirements of full maturation and pultruding quality. The shear rate increased with the increase of screw rotating speed and reached its maximum at the kneading block. The shear stress reached its maximum value at the screw clearance. In conclusion, numerical simulation can be used to guide the actual production of plant-based protein meat.

**Key words:** co-rotating twin-screw; plant-based protein meat; extrusion process; numerical simulation; heat and mass transfer

蛋白质是生命的物质基础,是人们日常生活中不可或缺的营养物质。动物蛋白对环境污染和能源消耗影响较大,而植物蛋白由于其可持续性和健康属性,越来越受到消费者的欢迎,预计全球植物蛋白市场将从 2020 年的 103 亿美元增加到 2026 年的 156 亿美元<sup>[1]</sup>。植物蛋白肉是以植物蛋白为主要原料,通过特定加工工艺制成的肉类替代品,具有类似动物肉类的质构、口感和风味,但不含动物肉成分。植物蛋白肉可缓解动物蛋白的供应压力和保证人体所需蛋白质来源,具有较大的发展潜力。

植物蛋白肉的加工方法主要有静电纺丝、3D 打印和螺杆挤压组织化技术,其中螺杆挤压组织化技术最为常用。同向双螺杆挤压机是螺杆挤压组织化生产植物蛋白肉的主要设备,主要由螺杆、模头和冷却模具等组成,如图 1 所示。挤压机入口到出口共经过 5 个阶段,包括粉料喂料、粉水混合、熔融蒸煮、挤出成型和冷却,最终实现植物蛋白肉成型<sup>[2]</sup>。挤压工艺对组织化蛋白的品质影响很大<sup>[3]</sup>,其中物料含水量、挤压机温度、螺杆转速和进料量等是需要重点关注的工艺参数<sup>[4]</sup>。

植物蛋白肉的主要原料为大豆分离蛋白(SPI)。大豆分离蛋白在挤压机内的塑化过程呈现非牛顿流体的特征,其表观黏度随着剪切速率、温度、含水量等的变化而改变。挤压剪切蒸煮过程中发生的生化反应很大程度上改变了物料的流变性。Cornet 等<sup>[5]</sup>探讨了机械热加工对蛋白质和蛋白质混合物的理化性质和相行为的影响,发现生产植物蛋白肉需要高水分挤压蒸煮和剪切单元加工。通过构建物料的流变模型设计新颖的挤压工艺,有利于生产植物蛋白肉。

双螺杆挤出工艺是目前植物蛋白肉主流的生产方式,通过数值模拟方法研究螺杆段挤出过程的特性,有利于优化植物蛋白肉生产过程。Sun 等<sup>[6]</sup>采用数值模拟的方法探究不同螺杆转速和组合下熔融大豆分离蛋白的质量优化情况,发现提高螺杆转速可以增加剪切速率、减少大豆分离蛋白流体表观黏度和停留时间,生产出结构均匀、表面光滑、色泽好的挤出物。然而,从同向双螺杆挤压机生产植物蛋白肉的实际工况出发,目前对该过程进行“热-流-固”耦合的全场数值模拟的研究较少。

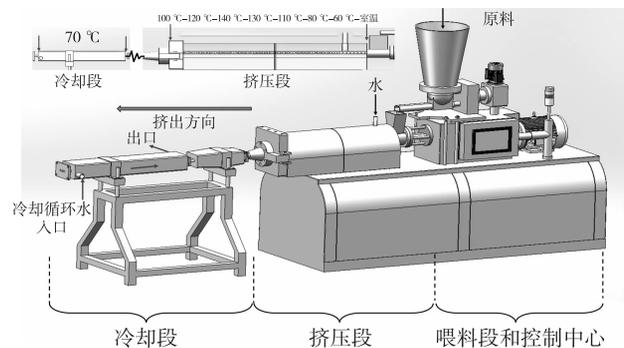


图 1 同向双螺杆挤压机的主要结构及功能分区示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of the main structure and functional partition of the co-rotating twin-screw extruder<sup>[2]</sup>

本文对同向双螺杆挤出植物蛋白肉的过程建立流道模型并展开数值模拟,通过与试验数据对比验证数值模拟的可靠性,并分析该生产过程中流场特性,以期提高植物蛋白肉的品质和生产效率,降低生产动物蛋白引起的高能源消耗。

## 1 模型建立与数值模拟

### 1.1 模型建立

#### 1.1.1 基本假设和控制方程

双螺杆挤出植物蛋白肉过程具有跨尺度的挤出流道、非等温流动和非牛顿流体特征,因此需在模拟时作出如下假设:①粉状物料和水为连续相,物料充满整个流道且不可压缩,非等温流动和传热稳定;②挤压过程化学反应对流动过程产生的影响忽略不计;③混合物料黏度高,为雷诺数较小的层流流动<sup>[7]</sup>;④忽略远小于黏性力的重力影响。由此,则植物蛋白肉非等温流动的连续性方程、动量方程和能量方程<sup>[6]</sup>分别如式(1)、式(2)、式(3)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = f_b - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu_1}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为物料密度,kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为时间,s; $\mathbf{u}$ 为速度矢量,m/s; $f_b$ 为单位质量的体积力,m/s<sup>2</sup>;  $p$ 为压强,Pa; $\mu_1$ 为动力黏度,Pa·s; $T$ 为温度,K; $k$ 为热导率,W/(m·K)。

#### 1.1.2 几何模型

试验所用同向双螺杆挤压机的流道建模如图2所示,其主要包括螺杆段、过渡段和冷却段三部分。图3为同向双螺杆的组合结构,螺杆段包括喂料段、混合段、蒸煮段和计量段,为4种螺纹元件和2种啮合元件的组合。螺杆与机筒间隙为1 mm,全啮合螺杆的螺杆间间隙为0.5 mm,螺杆外径为35 mm。



图2 同向双螺杆挤压机的流道模型

Fig. 2 Flow channel model of co-rotating twin-screw extruder

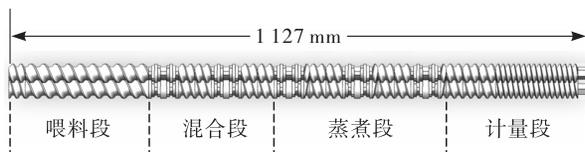


图3 同向双螺杆的组合结构

Fig. 3 Combination structure of co-rotating twin-screw

## 1.2 数值模拟

### 1.2.1 物性参数

#### 1.2.1.1 物料成分

植物蛋白肉原料由大豆分离蛋白粉、谷朊粉和

水混合而成。其中大豆分离蛋白粉成分为蛋白质90%、水分6.1%、脂肪0.8%、碳水化合物2%和钠1.1%,谷朊粉成分为蛋白质80.6%、水分6%、脂肪0.8%、碳水化合物12.5%和钠0.1%。大豆分离蛋白粉和谷朊粉以质量比7:3混合,混合物密度为418 kg/m<sup>3</sup>。混合物与去离子水(密度为998.2 kg/m<sup>3</sup>)按照质量比1:1.1混合得物料,物料密度按照平均混合体积法计算,比热容( $C_p$ )为3 320 J/(kg·K),热导率为0.45 W/(m·K)。

#### 1.2.1.2 物料黏度特性

使用高转矩流变仪(RPA Elite, TA Instruments, New Castle, DE, USA)测量物料的表现黏度。将物料温度从60℃以8℃/min分别升温至70、80、90、100、110、120、130、140℃,在频率1 Hz、剪切速率0~70 s<sup>-1</sup>下进行扫描,获得70~140℃下物料表现黏度随剪切速率变化情况,结果如图4所示。

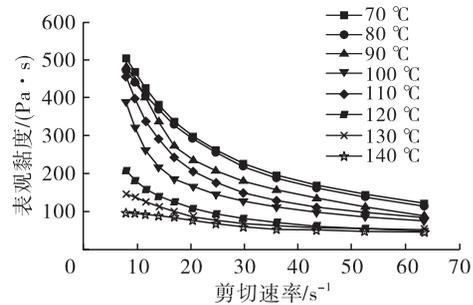


图4 不同剪切速率下物料的表现黏度

Fig. 4 Apparent viscosity of materials at different shear rates

由图4可知,随着剪切速率的增加,物料的表现黏度逐渐下降,体现出剪切变稀的假塑性流体特征。随着温度由70℃升高到100℃,物料表现黏度下降,在温度由100℃升高到110℃时表现黏度升高,之后随温度继续升高表现黏度又下降。110℃时物料处于蛋白质变性阶段,分子键断裂重组黏度跃升,从而导致表现黏度升高。因此,后续未研究此温度条件下黏度的变化。

使用非牛顿流体幂律模型对不同剪切速率下物料的表现黏度进行拟合。通过 Arrhenius Law 模型建立非等温植物蛋白肉的表现黏度( $\mu$ )关系式,见式(4)。

$$\mu = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot e^{\alpha \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right)} \quad (4)$$

式中: $m$ 为稠度系数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,s<sup>-1</sup>;  $n$ 为幂律指数; $\alpha$ 为活化能与热力学常数的比值,K<sup>-1</sup>;  $T$ 为物料温度,K; $T_a$ 为参考温度,K。

对等式两端取对数,得式(5)。

$$\ln \mu = \ln m + (n-1) \ln \dot{\gamma} + \alpha \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right) \quad (5)$$

在  $m = 1\ 212$ 、 $n = 0.34$ 、 $\alpha = 2\ 955.6\ K^{-1}$  时, 绘制表观黏度对数 ( $\ln \mu, y$ ) 随剪切速率对数 ( $\ln \dot{\gamma}, x$ ) 变化拟合图, 见图 5。

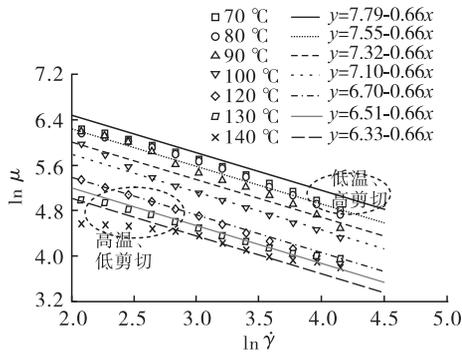


图 5 表观黏度对数随剪切速率对数变化关系的拟合图

Fig. 5 Fitting the relationship between  $\ln \mu$  and  $\ln \dot{\gamma}$

由图 5 可知, 100、120 °C 和 130 °C 拟合的黏度数据和试验数据比较吻合, 70 °C 拟合的黏度数据较试验数据偏高, 80 °C 和 90 °C 拟合的黏度数据较试验数据偏低, 140 °C 拟合的黏度数据较试验数据先偏高再吻合后偏低。整体而言, 拟合的模型方程已最大程度地贴合试验过程测量的物料结果, 该非牛顿流体幂律模型基本可用于描述植物蛋白肉挤出过程中的物料黏度。

### 1.2.2 边界条件

同向双螺杆挤压机机筒设置 8 段不同的壁面温度, 分别为室温 (27 °C) 和 60、80、110、130、140、120、100 °C [2]。机筒壁面设置为滑移边界条件, 滑移方向为螺杆挤出方向。目前没有明确的理论公式定义不同物料和接触面的滑移程度, 通常来说滑移速度与温度、壁面应力条件和结构材料是相关联函数 [8-9]。双螺杆同向、同转速旋转, 采用壁面旋转设置, 螺杆转速分别设置为 240、265、290、315、340 r/min。

同向双螺杆挤出植物蛋白肉的过程中, 依靠螺杆段的作用形成高压流场。设置入口表压为 0。先以出口流速为 0 进行计算, 得到出口的最大压强值 ( $P_{max}$ ), 一般取  $P_{max}$  的 50% 作为出口压强值 [10]。在试验螺杆转速范围 (240 ~ 340 r/min) 内, 监测到同

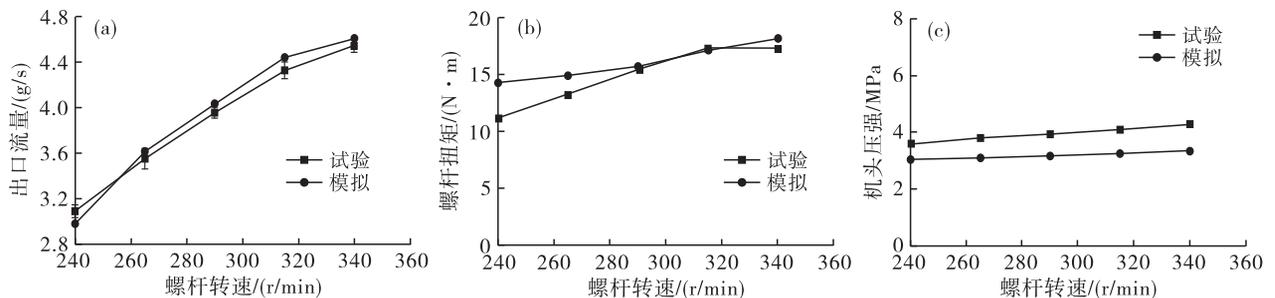


图 7 不同螺杆转速下模拟与试验的出口流量、螺杆扭矩和机头压强

Fig. 7 Simulated and tested outlet flow, screw torque and head pressure at different rotating speeds

向双螺杆挤压机机头压强在 3 ~ 4 MPa 范围内, 综合考虑压强损失情况, 流道出口压强取 2 MPa 进行后续计算。

### 1.2.3 网格划分与无关性验证

采用 ANSYS Meshing 软件进行流体计算域网格划分, 考虑到全尺寸模型的跨尺度特征, 使用四面体和六面体网格相结合的方式。螺杆段旋转域曲面较多, 采用四面体网格; 过渡段和冷却段整体形状规整, 使用六面体网格。为避免网格对模拟结果产生较大影响, 分别对模型划分不同数量 ( $1.68 \times 10^7$ 、 $2.01 \times 10^7$ 、 $2.29 \times 10^7$ 、 $2.51 \times 10^7$ 、 $2.73 \times 10^7$  个) 的网格, 考察螺杆转速为 290 r/min 时不同网格方案获得的出口流量, 结果见图 6。

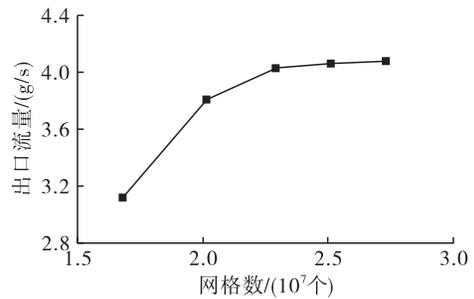


图 6 双螺杆段不同网格方案获得的出口流量

Fig. 6 Outlet flow obtained by different mesh schemes in twin - screw section

由图 6 可知, 当网格数增加到  $2.29 \times 10^7$  个后, 继续增加网格数, 出口流量变化不大。为了增加计算准确度和节省计算资源, 选用网格数  $2.29 \times 10^7$  个进行数值计算。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 模拟结果有效性验证

模拟与试验采用相同的结构和工况, 试验机器为 FMHE36 - 40 型同向双螺杆挤压机 (湖南富马科食品工程技术有限公司), 数值模拟采用 ANSYS Fluent 2022。不同螺杆转速 (240、265、290、315、340 r/min) 下模拟与试验的出口流量、螺杆扭矩和机头压强见图 7。

由图 7a 可知,模拟与试验时,挤压机出口流量随螺杆转速的增加而增大,且出口流量的增速随着螺杆转速的增加逐渐降低。另外,数值模拟能很好地预测试验的出口流量变化,螺杆转速为 240 ~ 340 r/min 时,模拟与试验的出口流量相对误差较小,在 -1.39% ~ 3.56%,满足工程预测的需求。

挤压机工控屏读取的是传动轴扭矩,模拟得到的是主副螺杆相加的扭矩。由图 7b 可知,随着螺杆转速的增加,试验和模拟的螺杆扭矩均逐渐增大。在较低螺杆转速(240 ~ 260 r/min)时,试验与模拟的螺杆扭矩相差较大,且模拟数据大于试验数据。其他条件不变的情况下,螺杆转速较低,物料在机筒的停留时间较长,导致物料温度偏高,剪切速率较低,结合图 5 可知,高温、低剪切速率的区域模型对黏度的预测值偏大,导致模拟的螺杆扭矩比试验的螺杆扭矩大。在螺杆转速为 290 r/min 和 315 r/min 时,模拟与试验螺杆扭矩的相对误差较小,分别为 -0.98% 和 1.30%,是模型适合的预测工况。在螺杆转速为 340 r/min 时,试验与模拟的螺杆扭矩的相对误差又增大,且模拟值大于试验值。其他条件不变的情况下,螺杆转速较高,物料在机筒内的停留时间缩短,其温度低于小螺杆转速下的,螺杆剪切速率较大,结合图 5 可知,低温、高剪切速率的区域模型对黏度的预测值偏大,导致模拟的螺杆扭矩比试验的螺杆扭矩大。因此,植物蛋白肉挤出过程的螺杆扭矩(或轴功率)受物料黏性的影响,黏度模型对螺杆扭矩的预测精度有重要影响。

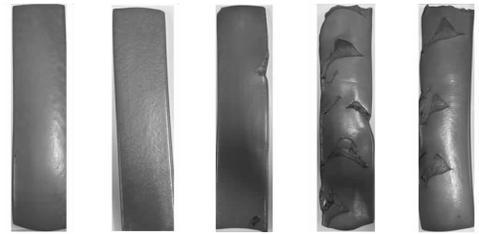
由图 7c 可知,随着螺杆转速的增加,试验和模拟的机头压强均增大,且模拟与试验的机头压强相对误差增大。螺杆转速为 240 ~ 340 r/min 时,模拟与试验的机头压强相对误差在 15.3% ~ 22.1%。在螺杆转速为 240 ~ 340 r/min 范围内,模拟的机头压强均小于试验的机头压强,这可能是因为实际的粉状物料在经过高温高压时会发生膨化效应<sup>[11-12]</sup>,但在模拟假设时为了简化予以忽略。

综上,建立的模型可较好地描述双螺杆挤出植物蛋白肉过程,数值模拟有效。

图 8 为同向双螺杆挤压机在不同螺杆转速下所制得的植物蛋白肉成品。

随着螺杆转速的增加,出口流量增大,植物蛋白肉生产效率有所提高,但由图 8 可知,随着螺杆转速增加植物蛋白肉成型质量变差,这是因为较大的剪切应力会使产品出现断裂。因此,综合出口流量、螺杆扭矩、机头压强、生产效率和成型质量,选择最佳螺杆转速为 290 r/min。后续如不是分析螺杆转速

对流场特征的影响,均为对该螺杆转速下同向双螺杆挤出植物蛋白肉过程的流场特性展开分析。



240 r/min 265 r/min 290 r/min 315 r/min 340 r/min

图 8 不同螺杆转速下的植物蛋白肉成品

Fig. 8 Plant-based protein meat products at different rotating speeds

## 2.2 同向双螺杆挤出植物蛋白肉过程特性分析

### 2.2.1 压强

图 9 为同向双螺杆挤压机流道的压强云图。

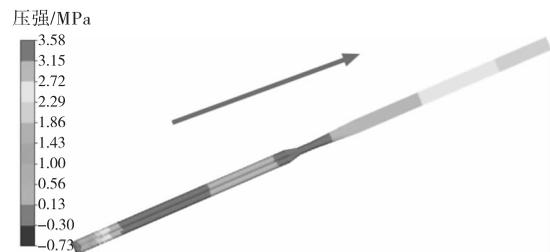


图 9 双螺杆挤压机流道的压强云图

Fig. 9 Pressure contour of the flow channel of twin-screw extruder

由图 9 可知,螺杆段的压强先上升至 3.5 MPa 左右,然后下降至 3 MPa。这是因为第一次建压是由螺杆喂料段到螺杆混合段,螺杆混合段有啮合块,致使压强逐渐增加。此时水和物料刚进入,处于混合阶段,且吸热不足、温度不高,导致黏度较大。随着物料向前流动,混合物料进入蒸煮段,物料温度迅速升高,物料黏度下降,流动性增强,加之反向螺纹元件的作用,压强逐渐降低。物料进入计量段即均化段,此处螺纹导程较小,建压能力强,压强又一次增大。并且由蒸煮段出来的物料进入计量段后温度下降,黏度增加,流动性减小,压强也会因此继续增加。由此,在螺纹元件和温度调控的同步配合下,螺杆段流道的压强呈现波动状态,数次的建压为物料熟化成均一的植物蛋白肉提供了良好的压力场。总体来看,由机头挤出的物料由螺杆段进入过渡段和冷却段,压强逐渐降低。

双螺杆挤压植物蛋白肉过程会产生高压流场,试验一般使用压强计测量单点的压强值,无法获得流场域内所有点的压强数据。而数值模拟能够获得流道内压强分布,获得每个螺杆部件的建压能力,从而指导实际生产。

2.2.2 速度

为便于分析比较,从螺杆段选取挤出(Z轴)方向上4处不同的位置。图10为模型挤出方向的截面位置。

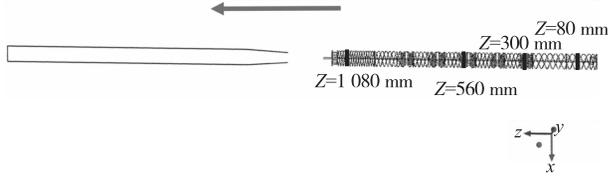


图10 模型挤出方向的截面位置

Fig. 10 Cross section positions of model extrusion direction

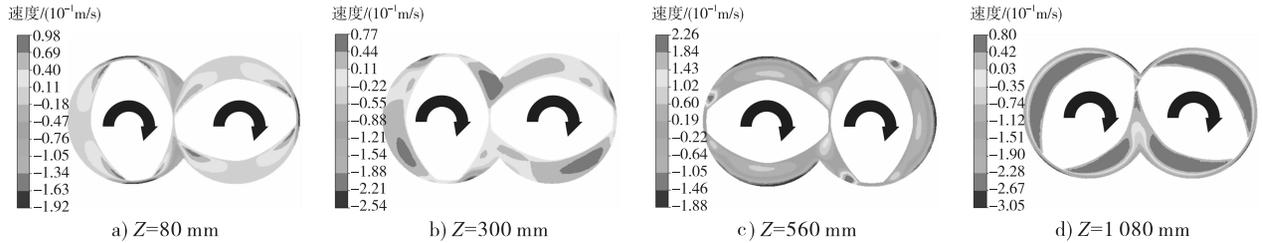


图11 不同截面处物料的速度云图

Fig. 11 Axial velocity contours of material at different cross sections

2.2.3 温度

图12为挤出方向上不同截面处物料的温度云图。

由图12可知,当物料刚进入机筒即80 mm截面处时,物料温度和室温接近。在300 mm截面处,物料在靠近机筒壁面处的温度达到353.0 K,从机筒壁面到螺杆壁面温度逐渐降低,螺杆附近温度达到341.7 K。在560 mm截面处(蒸煮段),物料的温度是全螺杆段最高的,机筒壁面与螺杆壁面温差达到15.3 K。在1 080 mm截面处,物料处于螺杆计量段,壁面温度低于物料温度,高温物料向低温壁面传递热量。受机筒壁面温控的影响,靠近机筒壁面的物料的升温和降温都要更快。因此,为保证内外侧植物蛋白肉成型的一致性,高湿挤出工艺需考虑强化物料在挤出流道内的混合。

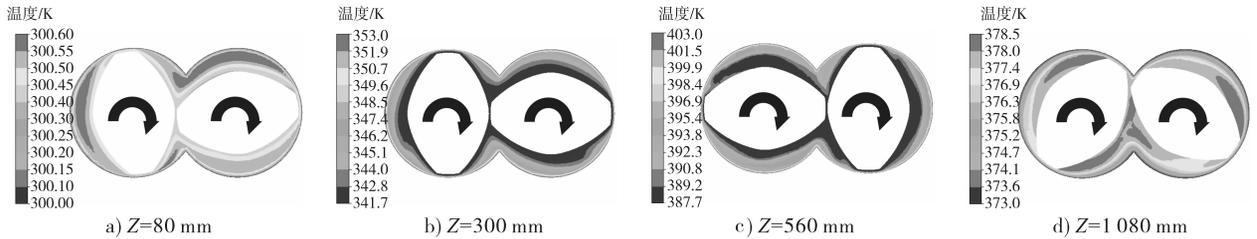


图12 不同截面处物料的温度云图

Fig. 12 Temperature contours of material at different cross sections

图13为挤出方向上不同截面处物料的平均温度曲线。

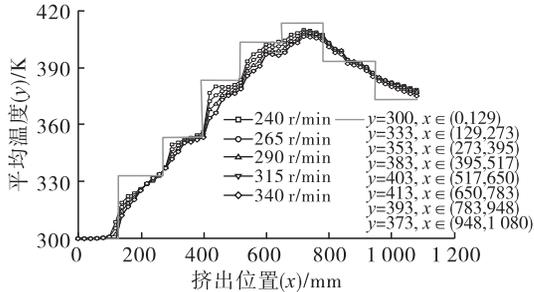


图13 不同截面处物料的平均温度

Fig. 13 Average temperatures of material at different cross sections

图11为挤出方向上不同截面处物料的速度云图。

由图11可知,物料刚进入机筒即80 mm截面处时,螺棱两侧的速度最大,螺槽处速度较小。在300 mm截面处螺杆推进侧速度较小,螺杆拖曳侧速度较大。在560 mm(蒸煮段)和1 080 mm(计量段)截面处时速度相对均匀,原因是这两段物料混合较为均匀,截面位置轴向速度衰减平缓,此时离机筒近的物质温度较高导致黏度小,会出现“打滑”现象,速度相对较小。

度是全螺杆段最高的,机筒壁面与螺杆壁面温差达到15.3 K。在1 080 mm截面处,物料处于螺杆计量段,壁面温度低于物料温度,高温物料向低温壁面传递热量。受机筒壁面温控的影响,靠近机筒壁面的物料的升温和降温都要更快。因此,为保证内外侧植物蛋白肉成型的一致性,高湿挤出工艺需考虑强化物料在挤出流道内的混合。

由图13可知,沿着挤出方向物料的总体温度趋近于壁面温控值。当挤出位置在0~700 mm范围时,随着挤出的进行,物料平均温度逐渐增加,但是均小于各段壁面温度。这是因为热量传递具有延时性。当挤出位置在700~1 080 mm范围时,物料平均温度处于下降趋势,但其温度高于各段壁面温度,同样是由于热量传递需要一定时间。

当螺杆转速从240 r/min增大到340 r/min时,物料达到发生相分离的临界温度(110℃)<sup>[13]</sup>。蒸煮段不同螺杆转速(n)下物料的平均停留时间(D<sub>RT</sub>)如图14所示。

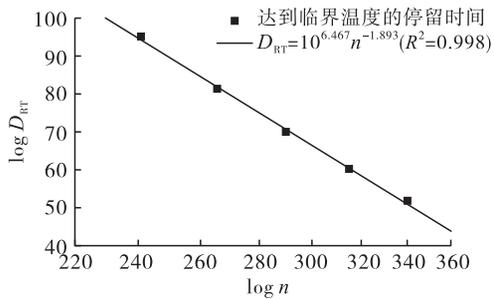


图 14 不同螺杆转速下物料的平均停留时间分布  
Fig. 14 Average residence time distribution of materials at different rotating speeds

由图 14 可知,在双对数坐标下物料停留时间与螺杆转速呈现线性关系,意味着停留时间是螺杆转速的幂律函数。拟合曲线的  $R^2$  达到 0.998,表明两者的幂律关系较为明确,与 Sun 等<sup>[6]</sup>报道的结果一致。

不同的螺杆组合和工艺条件下,停留时间与螺杆转速幂律函数的系数和指数值不同。相分离是大豆蛋白高度组织化的重要条件,可使植物拉丝蛋白形成畜禽肉的纤维质地,也是植物肉高湿挤压技术最显著的特点之一。在确定的设备结构和工艺条件下,通过改变螺杆转速可有效地调节植物蛋白肉蒸煮段的停留时间,以保证充分熟化和拉丝质量的工艺要求。

#### 2.2.4 剪切速率

图 15 为挤出方向上不同截面处物料的平均剪切速率。

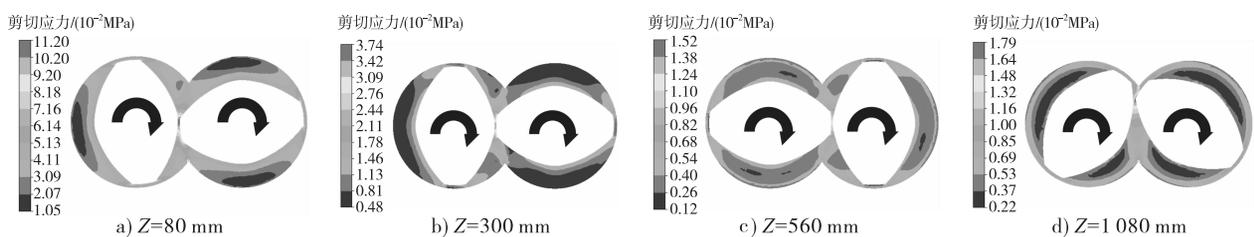


图 15 不同截面处物料的平均剪切速率  
Fig. 15 Average shear rate of materials at different cross sections

由图 15 可知,随着螺杆转速的增加,剪切速率逐渐增加。在物料由入口进入时物料剪切速率较小,继续向前推进物料,物料温度升高、黏度减小,剪切速率增加,在 800 mm 截面处物料的剪切速率达到最大。螺纹元件段(喂料段)物料的剪切速率平稳并且远小于啮合块段的,剪切速率在第 3、4、5 个啮合块处达到最大值。在双螺杆之间的间隙处物料的剪切速率最大,这是由于同向双螺杆的运动特性,使得双螺杆间隙处的物料受到双向的剪切,剪切效果明显。

#### 2.2.5 剪切应力

剪切应力是指垂直于挤出方向,使物料不同部分产生相对滑动的应力。剪切应力越大,越有助于物料的分散和混合。图 16 为挤出方向上不同截面处物料的剪切应力云图。

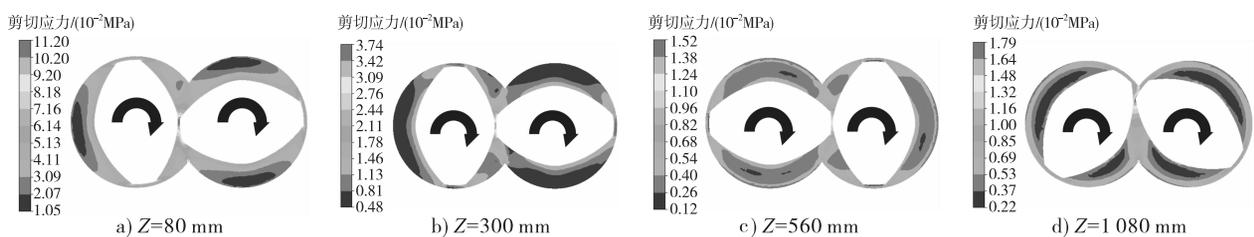


图 16 不同截面处物料的剪切应力云图  
Fig. 16 Shear stress contours of materials at different cross sections

由图 16 可知,螺杆间隙处的剪切应力最大,4 个截面处,80 mm 截面处存在最大剪切应力,约为 0.112 MPa,560 mm 截面处的最大剪切应力最小,约为 0.015 MPa。这是因为剪切应力随物料黏度的增大而增大,喂料段和混合段由于粉状蛋白和水混合,物料黏度较大,所以剪切应力较大;随着物料进入蒸煮段,物料温度升高,黏度变小,剪切应力降低,黏度对剪切应力的影响比剪切速率更大。相比 560 mm 截面,1 080 mm 截面处剪切应力略大。这是因为螺杆受到冷却段低温的影响,导致表观黏度增加,剪切应力增加。因此,物料的高温流变对剪切应力的分布有着重要的影响。

### 3 结论

基于试验测量了植物蛋白肉的材料属性,采用数值模拟方法分析了 5 个螺杆转速下同向双螺杆挤压机的出口流量、螺杆扭矩和机头压强,通过试验验证的方法探究了数值模拟的可行性,然后讨论了挤出植物蛋白肉过程中的流道内特性(压强、速度、温度、剪切速率和剪切应力)。结果发现:挤压机出口流量、螺杆扭矩和机头压强都随着螺杆转速的增加而增大,试验值与模拟值相对误差较小,验证了数值模拟的有效性,但高转速下过高的剪切应力会降低植物蛋白肉成型质量,其中螺杆转速 290 r/min 下的植物蛋白肉品质最佳。在 290 r/min 螺杆转速条

件下,通过螺杆元件的排布和机筒壁面温度的控制,螺杆段流道的压强波动上升;物料温度随着壁面温度先升高后降低,靠近机筒的物料升温和降温都要更快,导致一定程度的壁面速度滑移;物料达到相分离临界温度的停留时间是螺杆转速的幂律函数,由此可确定双螺杆的适宜转速,以保证充分熟化和拉丝质量的工艺要求;剪切速率随螺杆转速的增加而增大,在啮合块处达到最大值;剪切应力在螺杆间隙处达到最大值。综上,可以通过数值模拟的方法指导植物蛋白肉的实际生产。

#### 参考文献:

- [1] YANG Q H Z, EIKELBOOM E, VAN DER LINDEN E, et al. A mild hybrid liquid separation to obtain functional mungbean protein [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2022, 154: 112784 [2024 - 05 - 07]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112784>.
- [2] DENG Q, WANG Z, FU L, et al. High - moisture extrusion of soy protein; Effects of insoluble dietary fiber on anisotropic extrudates [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 141: 108688 [2024 - 05 - 07]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108688>.
- [3] 肖志刚,李航,王哲,等.高水分组织化复合蛋白的挤压制备及品质特性研究[J].*中国粮油学报*,2022,37(1):72-80,88.
- [4] 李雪菲,相海,任嘉嘉,等.高水分挤压组织化植物蛋白纤维结构形成机制研究进展[J].*中国油脂*,2023,48(6):67-72.
- [5] CORNET S H V, SNEL S J E, SCHREUDERS F K G, et al. Thermo - mechanical processing of plant proteins using shear cell and high - moisture extrusion cooking [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62(12): 3264 - 3280.
- [6] SUN D, ZHOU C, YU H, et al. Integrated numerical simulation and quality attributes of soybean protein isolate extrusion under different screw speeds and combinations [J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2022, 79: 103053 [2024 - 05 - 07]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103053>.
- [7] 金子云,郭树国.新型混炼单螺杆植物蛋白挤出机的仿真分析与参数优化[J].*中国油脂*,2024,49(11):146-152.
- [8] MALIK M, KALYON D, GOLBA J C. Simulation of co - rotating twin screw extrusion process subject to pressure - dependent wall slip at barrel and screw surfaces; 3D FEM analysis for combinations of forward - and reverse - conveying screw elements [J]. *Int Polym Proc*, 2014, 29(1):51-62.
- [9] 田文马,戴晨龙,杜继芸,等.基于滑移边界的饼干面团双辊挤压成型的数值模拟[J].*力学与实践*,2023,45(3):544-550.
- [10] 魏静,张光辉.双螺杆捏合机螺纹元件型线设计理论与方法[M].北京:科学出版社,2018.
- [11] TÉLLEZ - MORALES J A, GÓMEZ - ALDAPA C A, RODRÍGUEZ - MIRAND J. Impact of extrusion on swelling power and foam stability in mixtures of corn starch and whey protein isolate as a model system [J/OL]. *Emir J Food Agric*, 2022:2869 [2024 - 05 - 07]. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i5.2869>.
- [12] MANEPALLI P H, MATHEW J M, ALAVI S. Stochastic modeling of expansion of starchy melts during extrusion [J]. *J Food Eng*, 2019, 245: 57 - 64.
- [13] SANDOVAL MURILLO J L, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high - moisture extrusion of meat substitutes [J]. *J Food Eng*, 2019, 242: 8 - 20.