

成型流道结构及工艺参数对高水分 拉丝蛋白品质的影响

宁 萌^{1,2}, 王雨芊^{1,2}, 王召君³, 蔡礼扬^{1,2}, 马泓睿^{1,2}, 陈义亮^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为提高高水分拉丝蛋白的纤维成型品质和出料的流畅性,在建立成型模具几何模型基础上,采用 Polyflow 软件建立高水分挤压环境下植物蛋白在双螺杆挤出机成型流道中的非稳态流场模型,以成型模具冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量为影响因素,流道内植物蛋白物料速度均匀性、压力降、剪切应力以及拉伸应力为指标,对高水分拉丝蛋白挤出工艺进行正交试验优化,并结合灰色关联度分析进行综合评估。结果表明:相比于其他因素,冷却区流道横截面纵横比对优化目标的影响程度最大,通过灰色关联度分析得出当冷却区流道横截面纵横比 1:3、冷却温度 70 ℃、入口流量 $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,得到的拉丝蛋白成型品质最佳,对应的灰色关联度为 0.723 5。

关键词:植物蛋白肉;高水分拉丝蛋白;纤维成型;成型流道;流场模拟

中图分类号:TS203;TS221

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)09-0068-08

Impact of forming channel structure and process parameters on quality of high moisture extruded protein

NING Meng^{1,2}, WANG Yuqian^{1,2}, WANG Zhaojun³, CAI Liyang^{1,2},
MA Hongrui^{1,2}, CHEN Yiliang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve the fiber shaping quality and the smoothness of the discharge of high moisture extruded protein, on the basis of establishing the geometric model of the forming mold, the non-steady state flow field model of the plant protein in the mold flow channel of the twin-screw extruder was established by using the Polyflow software in the high-moisture extruding environment. The orthogonal experiment optimization of the high moisture extruded protein extrusion process was carried out with the cross-sectional aspect ratio of the flow channel in the cooling zone of the forming mold, the cooling temperature and the inlet flow rate as the influencing factors, and velocity uniformity, pressure drop, shear stress, and tensile stress of plant protein materials in the flow channel as indexes. In addition, the comprehensive evaluation was conducted by grey correlation analysis. The results showed that compared

with other factors, the cross-sectional aspect ratio of the flow channel in the cooling zone had the greatest influence on the optimization objective, and the grey correlation analysis revealed that when the cross-sectional aspect ratio of the flow channel in the cooling zone was 1:3, the cooling temperature was 70 ℃, and the inlet flow rate was $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, the best shaping quality of the

收稿日期:2024-06-20;修回日期:2025-04-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2100304);2023年度江南大学食品学院学科交叉融合创新项目(SFST2023-KY-16)

作者简介:宁 萌(1985),男,教授,硕士生导师,博士,研究方向为食品智能装备(E-mail)ningmeng0608@126.com。

通信作者:王召君,副研究员,硕士生导师(E-mail)zhaojun.wang@jiangnan.edu.cn。

extruded protein could be obtained, and the corresponding grey correlation value was 0.723 5.

Key words: plant – based protein meat; high moisture extruded protein; fiber forming; forming channel; flow field simulation

联合国粮农组织最新数据显示,预计到 2050 年,全球肉制品需求量将攀升至 4.55 亿 t,届时肉类供应缺口将扩大到无法满足需求导致供需失衡的地步^[1]。为应对人类对动物肉类需求的不断攀升以及传统畜牧业引发的资源枯竭和环境负荷增大,同时促进居民健康饮食,寻求动物肉类的替代方案显得尤为迫切^[2]。植物蛋白肉因具有与动物肉类相似的纤维质地与风味特征,同时能够有效满足人体对蛋白质的日常需求,正逐渐赢得消费者的青睐,成为可持续饮食的新选择^[3]。

目前,高水分挤压技术作为制作植物蛋白肉的关键技术,能够有效地将植物蛋白原料转化为具有肉类质感的食品,为消费者提供丰富的蛋白质来源,但该技术产品的成型过程极其复杂,各项结构参数与工艺参数对其纤维成型品质的影响具有复杂的耦合关系。高水分拉丝蛋白作为植物蛋白肉的一种,其成型工艺主要经历物料混合、剪切熔融及冷却成型 3 个阶段。对植物蛋白熔融体进行冷却成型处理,不仅可以有效遏制植物蛋白熔融体的膨化现象,而且对植物拉丝蛋白纤维的成型品质起到关键作用。然而,现有技术生产的植物蛋白肉在内部纤维结构与口感上与动物肉仍存在一定的差距,需要在质构和纤维结构上进行进一步的优化。植物蛋白肉制备过程中生成的类似动物的纤维结构是决定植物蛋白肉品质最为关键的指标,其纤维成型品质与其对应的流道结构密切相关。然而,关于纤维成型流道的结构及工艺参数之间的耦合效应对纤维成型品质影响的研究还很匮乏,使得现有的双螺杆挤出机关于成型模具的设计也大多依赖经验,并未基于植物蛋白肉纤维成型流场特性设计成型模具对应的系列参数。

在挤出机机筒内,富含蛋白质的物料经历高温、高压、强剪切等一系列的加工过程,导致物料内蛋白质分子结构发生解聚、聚合和重新交联,最后转变为熔融状态流入成型模具^[4]。双螺杆挤出机的成型模具包括模头以及冷却区,经过剪切熔融后的植物蛋白熔融体依次通过模头区和冷却区。模头是双螺杆挤出机机筒与冷却模具之间的连接段,其主要作用是使来自机筒段的植物蛋白熔融体从机筒段的螺旋流动平稳过渡到直线运动,并在产生一定压力的

同时对物料进行均化,避免物料进入冷却区时压力、流速等参数发生突变。随后在冷却区流道中,物料受冷却模具壁面温度差导致的温度梯度的影响,逐步由黏流态转变为高弹态,从而形成拉丝蛋白特殊的纤维结构^[5-6]。

本研究以大豆分离蛋白和谷朊粉为混合植物蛋白原料,在常规高水分拉丝蛋白成型流道结构和真实生产参数的基础上,采用正交试验探究成型流道结构和工艺参数对高水分拉丝蛋白品质的影响,并基于灰色关联度分析,将多目标优化问题简化为单目标问题,确定试验组中的最佳工艺参数,为开发高品质拉丝蛋白产品以及推广高水分挤压技术提供科学依据,并助力于高水分挤压技术的应用与推广。

1 几何模型建立

1.1 物理模型建立

成型模具由模头及冷却区组成。模头是双螺杆挤出机机筒与冷却模具之间的连接段,其流道结构是由一个“∞”形入口到冷却区几何形状的过渡,从结构上应满足流道平滑、压力损失尽可能小等要求。实际生产过程中,植物蛋白熔融体从挤出段挤出进入模头,并经过冷却段冷却成型,最后挤出成品。本研究以螺杆外径(D)为 36 mm,中心距(C_L)为 31 mm 的双螺杆挤出机为例,根据冷却区流道截面形状构建如 1[#]、2[#]、3[#] 3 个成型模具模型,3 个成型模具对应的冷却区流道横截面纵横比分别为 1:1、1:3、1:6。图 1 为 3 个成型模具结构示意图。

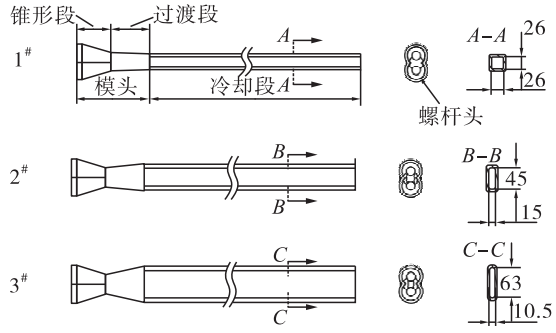


图 1 成型模具结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the forming mold

如图 1 所示,从左到右依次为成型模具的正视图、左视图及其冷却区流道对应的剖面图。为保证研究的严谨性,3 个模型的冷却区流道横截面积相

近,分别为 676、675、661.5 mm²。本模型用 2 个螺杆头代表运动部件,同时简化了模型的复杂程度。

1.2 有限元网格划分

物理模型网格划分是否合理决定了仿真结果的准确性与精度,根据成型流道的模型特点,本文采用几何结构适应性强的四面体单元对计算模型进行整

体网格划分。同时,由于模型外层与冷却模具内壁直接接触,为提高仿真质量,采用 Inflation 方法模型对边缘层网格进行细化。图 2 为 1[#]成型模具流场网格划分结果示意图,物料沿 z 轴正方向挤出。3 个模型对应的网格单元数分别为 764 557、776 595、775 136。

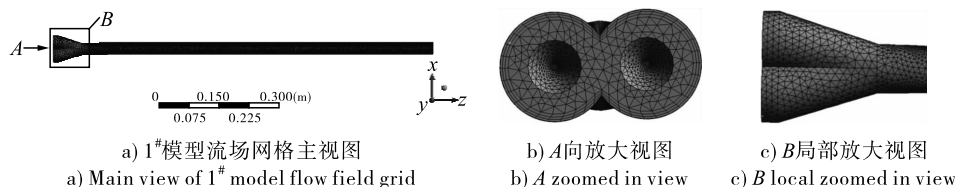


图 2 1[#]成型模具流场网格划分结果

Fig. 2 Mesh division result of flow field 1[#] forming mold

2 数学模型分析

2.1 流场数值模拟理论基础

基于实际情况以及熔融体在挤出机中流动的复杂性,为了方便计算,作出如下假设^[7]:①流体本身不可压缩;②流场为分布与时间无关的稳定层流流场;③忽略惯性力、重力及体积力等的影响;④流体充满整个流道;⑤流道壁面无滑移。

基于上述假设条件,选择 Polyflow 软件作为数值模拟计算分析软件,模拟计算过程遵循流体力学基本方程,拉丝蛋白的纤维成型过程属于广义牛顿-非等温流动,对应的连续性方程、运动方程分别见式(1)和式(2)^[8-9]。式(1)和式(2)中坐标系与图 2 流场模型中坐标系方向保持一致。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度。

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

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

在流场模拟计算中,植物蛋白熔融体属于非牛顿流体,本文采用 Bird - Carreau 模型对其流变特性进行描述。植物蛋白熔融体流变模型方程见式(3)^[10]。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

式中: η 为物料黏度; η_{∞} 为极限黏度; η_0 为零剪切黏度; n 为非牛顿指数; λ 为松弛时间; $\dot{\gamma}$ 为剪切

速率。

根据试验数据,可得到 Bird - Carreau 模型拟合参数分别为 $\eta_{\infty} = 0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta_0 = 74 \ 573 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $n = 0.617$, $\lambda = 1 \text{ s}$ 。

在此基础上,采用 Arrhenius 定律对植物蛋白熔融体流变模型进行温度修正^[11],Arrhenius 定律方程见式(4),修正的植物蛋白原料体系的流变模型方程见式(5)。

$$h(T) = \exp\left(\frac{\alpha}{T} - \frac{\alpha}{T_{\alpha}}\right) \quad (4)$$

式中: $h(T)$ 为温度贡献因子; α 为温度系数,取值为 650.08 K; T_{α} 为参考温度,取值为 368.15 K。

$$\eta = h(T) \eta(\dot{\gamma}) \quad (5)$$

2.2 物性参数与边界条件

制备拉丝蛋白的原料选用质量比为 7:3 的大豆分离蛋白和谷朊粉,其水分含量为 65%,物料密度为 821.53 kg/m³。具体流道边界条件:①入口边界条件设定为体积流量;②出口处设置法向力和切向力均为 0,即流出流道的流体为自由流出状态;③ 2 个螺杆头部设置为在 z 轴方向上做同向顺时针旋转,转速为 280 r/min;④根据流道壁面无滑移假设,流道壁面处的法向速度与切向速度均为 0。

3 仿真结果与分析

3.1 正交试验设计

利用 Polyflow 软件对拉丝蛋白纤维成型过程进行仿真计算,鉴于纤维成型流道工艺参数的复杂性,全面试验将涉及大量的试验次数。为了更快地获取成型流道结构及工艺参数对拉丝蛋白纤维成型品质的影响规律,本文采用正交试验设计方法对本次仿真模拟进行试验设计。选取冷却区流道横截面纵

横比、冷却温度以及植物蛋白熔融体入口流量作为研究对象,分析工艺参数变化对拉丝蛋白挤出成型过程中挤出速度均匀性、压力降、剪切应力以及拉伸应力的影响规律。

根据实际使用过程中常用的流道结构及工艺参数,试验对每个因素选取 3 个水平,进行三因素三水平正交试验设计。正交试验因素及水平如表 1 所示,正交试验设计如表 2 所示。

表 1 正交试验因素及水平

Table 1 Orthogonal experimental factors and levels			
水平	A 横截面纵横比	B 冷却温度/℃	C 入口流量/(m ³ /s)
1	1:1	50	2.5e-6
2	1:3	60	3.0e-6
3	1:6	70	3.5e-6

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design				
试验号	A	B	C	试验方案
1	1	1	1	A ₁ B ₁ C ₁
2	1	2	2	A ₁ B ₂ C ₂
3	1	3	3	A ₁ B ₃ C ₃
4	2	1	2	A ₂ B ₁ C ₂
5	2	2	3	A ₂ B ₂ C ₃
6	2	3	1	A ₂ B ₃ C ₁
7	3	1	3	A ₃ B ₁ C ₃
8	3	2	1	A ₃ B ₂ C ₁
9	3	3	2	A ₃ B ₃ C ₂

3.2 仿真试验结果分析

3.2.1 挤出速度均匀性分析

为正确衡量拉丝蛋白挤出速度的均匀性,本文以速度均匀性指数作为量化指标,旨在通过对比不同试验组中拉丝蛋白出口速度分布的差异性,从而观测物料速度分布特性^[12-13]。

为更直观地展示和分析物料出口的速度分布特征,在模型出口截面上等距随机选取 400 个点并绘制对应的点云图,根据速度均匀性指数对该 400 个点的速度分布进行量化分析。速度均匀性指数越大则说明流体的流动状态更为均匀。速度均匀性指数计算公式见式(6)。

$$\sigma_v = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - \bar{v})^2}}{\bar{v}} \tag{6}$$

式中: σ_v 为速度均匀性指数,值域范围为[0,1]; n 为速度测点数量; v_i 为测点速度,m/s; $\bar{v}$ 为平均速度,m/s。

9 组试验速度均匀性指数如表 3 所示。

表 3 9 组试验速度均匀性指数

Table 3 Velocity uniformity index of 9 experiments			
试验号	σ_v	试验号	σ_v
1	0.730 9	6	0.788 9
2	0.732 4	7	0.823 5
3	0.735 8	8	0.800 9
4	0.763 9	9	0.802 3
5	0.766 0		

利用极差分析确定冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量对拉丝蛋白挤出速度均匀性指数的影响主次和最优水平组合。速度均匀性指数极差分析如表 4 所示。

表 4 速度均匀性指数极差分析

Table 4 Range analysis of velocity uniformity index			
项目	A	B	C
k_1	0.733 0	0.772 8	0.773 6
k_2	0.772 9	0.766 4	0.766 2
k_3	0.808 9	0.775 7	0.775 1
R	0.075 9	0.009 3	0.008 9

由表 4 可知,冷却区流道横截面纵横比(A)对速度均匀性指数的影响最大,冷却温度(B)次之,入口流量(C)的影响最小。采用 A₃B₃C₃ 组合可以得到挤出速度最为均匀的拉丝蛋白成品。

3.2.2 压力降分析

压力降反映了物料由入口流到出口过程中的压力损失情况。过大的挤出压力降会导致物料生产过程中被过度挤压,导致物料成品密实,孔隙率降低,不利于改善拉丝蛋白成品的口感与风味。为探究物料在流道中的压力场变化情况,沿整个纤维成型流道等距离截取 20 个截面,取各截面上物料的平均压力,绘制 9 组试验模型沿 z 轴方向平均压力变化曲线,得到 9 组试验压力降(Δp),如表 5 所示。

表 5 9 组试验压力降

Table 5 Pressure drop of 9 experiments			
试验号	Δp /MPa	试验号	Δp /MPa
1	6.178	6	8.620
2	7.530	7	30.688
3	8.556	8	20.030
4	15.174	9	22.477
5	15.851		

利用极差分析确定冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量对拉丝蛋白冷却过程压力降的影响主次和最优水平组合。压力降极差分析如表 6 所示。

表 6 压力降极差分析
Table 6 Range analysis of pressure drop

项目	A	B	C
k_1	7.421	17.347	11.609
k_2	13.215	14.470	15.060
k_3	24.398	13.218	18.365
R	16.977	4.129	6.756

由表 6 可知,冷却区流道横截面纵横比(A)对压力降的影响最大,入口流量(C)次之,冷却温度(B)的影响最小。采用 $A_1B_3C_1$ 组合生产过程中产生的压力降较小,生产的拉丝蛋白成品具有较为疏松多孔的结构。

3.2.3 剪切应力分析

冷却模具使流道内外层物料能够快速冷却,从而产生黏度梯度导致剪切应力的产生。剪切应力是表征植物蛋白物料分散混合的重要参数,模具出口截面剪切应力分布对拉丝蛋白产品品质起到关键性作用。若物料在冷却模具内承受过大的剪切应力,会使结构断裂,导致最终产品出现变形、表面粗糙等缺点。图 3 为 9 组试验模型出口截面剪切应力云图。

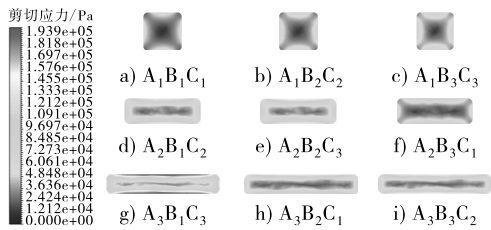


图 3 9 组试验模型出口截面剪切应力云图
Fig. 3 Cloud diagram of shear stress at the exit section of 9 experiments

从图 3 可以看出,剪切应力由中心点逐渐向外层扩大。由于剪切应力分布的不均匀性,本文选取平均剪切应力($\bar{s}_i$)作为评价依据之一。同时,通过试验验证与理论分析可知,植物蛋白熔融体在冷却过程中所经历的剪切应力差值对拉丝蛋白产品的成型质量具有显著的调控作用。具体来说,剪切应力差值较小时,会导致熔融体中的分子链排列趋向于形成较为紧凑且短小的“V”型结构,这种结构特征使拉丝蛋白偏向于更加紧实和短纤维化的特性。反之,若剪切应力差值过大,会显著改变植物蛋白熔融体分子链的排列与取向,促使原本可能形成的“V”型结构逐渐瓦解,转而形成更为平行且长直的宏观纤维结构。适中且恰当的剪切应力差值能够促使植物蛋白熔融体在冷却成型过程中形成既非过于紧凑也非过于平行的纤维结构,在宏观上,这种结构赋予

了拉丝蛋白产品更为均匀的纤维形态,使产品兼具柔软度与咀嚼性。

利用现有的试验机平台,系统地开展了多组试验。根据获得的最佳宏观结构的具体试验参数,进行对应的仿真模拟,确定在该生产条件下,出口处的剪切应力差值为 95.14 kPa,以此为参考值,根据式(7)计算 9 组试验结果差值与参考值之间的绝对差值,绝对差值越小,评价指数越高。值得注意的是,尽管本文基于当前试验数据提出了剪切应力的参考值为 95.14 kPa,但鉴于纤维结构的复杂性及其对多种因素的敏感性,特别是剪切应力差值需要累计至一定阈值方能显著影响产品的纤维结构,该参考值应被视为一个指导性基准,而非绝对的最优值。

$$\Delta s_i = |(\max s_i - \min s_i) - s_a| \quad (7)$$

式中: Δs_i 为剪切应力绝对差值,kPa; i 为试验号; s_i 为出口截面处的剪切应力,kPa; s_a 为参考值,kPa。

9 组试验平均剪切应力和剪切应力绝对差值如表 7 所示。

表 7 9 组试验剪切应力试验数据
Table 7 Shear stress results of 9 experiments kPa

试验号	$\bar{s}_i$	Δs_i	试验号	$\bar{s}_i$	Δs_i
1	34.49	38.52	6	44.58	12.47
2	41.03	23.12	7	97.62	78.92
3	45.69	15.36	8	62.62	18.28
4	66.29	32.00	9	67.72	26.23
5	68.74	35.18			

由于表 7 得到的原始剪切应力试验数据之间的差异较大,无法直接对其进行极差分析。因此,根据式(8)对表 7 中的平均剪切应力以及剪切应力绝对差值进行无量纲化处理,使数据统一到 0~1 范围内。

$$\begin{cases} S_i(\bar{s}_i) = \frac{\max \bar{s}_i - \bar{s}_i}{\max \bar{s}_i - \min \bar{s}_i} \\ S_i(\Delta s_i) = \frac{\max \Delta s_i - \Delta s_i}{\max \Delta s_i - \min \Delta s_i} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_i(\bar{s}_i)$ 、 $S_i(\Delta s_i)$ 分别为无量纲化处理的 $\bar{s}_i$ 、 Δs_i ; $\max \bar{s}_i$ 和 $\min \bar{s}_i$ 分别为所有试验中平均剪切应力的最大值和最小值; $\max \Delta s_i$ 和 $\min \Delta s_i$ 分别为所有试验中剪切应力绝对差值的最大值和最小值。

考虑到平均剪切应力以及剪切应力绝对差值均会对拉丝蛋白纤维成型质量造成影响,根据式(9)对两者的权重关系进行相应的系数分配,综合两者评估剪切应力(∂_i)的影响,其最终计算结果如表 8 所示。

$$\partial_i = 0.4S_i(\bar{s}_i) + 0.6S_i(\Delta s_i) \quad (9)$$

表 8 剪切应力试验数据无量纲处理结果

Table 8 Non – dimensional processing results of shear stress test data

试验号	$S_i(\overline{s_i})$	$S_i(\Delta s)$	∂_i	试验号	$S_i(\overline{s_i})$	$S_i(\Delta s_i)$	∂_i
1	1.000 0	0.608 0	0.764 8	6	0.840 2	1.000 0	0.936 1
2	0.896 4	0.839 7	0.862 4	7	0.000 0	0.000 0	0.000 0
3	0.822 6	0.956 5	0.902 9	8	0.554 4	0.912 6	0.769 3
4	0.496 3	0.706 1	0.622 2	9	0.473 6	0.792 9	0.665 2
5	0.457 5	0.658 2	0.577 9				

利用极差分析确定冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量对拉丝蛋白挤出截面剪切应力的影响主次和最优水平组合。剪切应力极差分析如表 9 所示。

表 9 剪切应力极差分析

Table 9 Range analysis of shear stress

项目	A	B	C
k_1	0.843 4	0.462 3	0.823 4
k_2	0.712 1	0.736 5	0.716 6
k_3	0.478 2	0.834 8	0.493 6
R	0.365 2	0.372 4	0.329 8

由表 9 可知,冷却温度(B)对剪切应力的影响最大,冷却区流道横截面纵横比(A)次之,入口流量(C)的影响最小。采用 A₁B₃C₁ 组合生产的拉丝蛋白出口截面所受的综合剪切应力最佳。

3.2.4 拉伸应力分析

拉伸应力在植物蛋白分散相的变形和取向中具有重要作用,相比于剪切应力,拉伸应力在黏弹性基质中的分散相变形破碎方面更有效。拉伸应力越大,则更有利于拉丝蛋白组织化成型,使产品分层结构更明显,优化了产品的口感。拉伸应力(σ_E)计算公式见式(10)^[14]。

$$\sigma_E = \eta_E \cdot \sqrt{\frac{\partial \bar{v}_x^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_z^2}{\partial z}}$$

(10)

式中: η_E 为拉伸黏度; $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$ 、 $\bar{v}_z$ 分别为物料在 x 、 y 、 z 轴方向上的速度。对于黏弹性流体在低拉伸率的情况下可根据特劳顿比得 $\eta_E = 3\eta$ 。

根据模拟仿真结果可知,植物蛋白在冷却区流道中所受的拉伸应力大小与变化趋势基本保持不变,故采用模型出口截面拉伸应力分布情况代表植物蛋白在纤维成型过程中所受的拉伸应力。图 4 为 9 组试验模型出口截面拉伸应力云图。

从图 4 可以看出,拉伸应力由中心点逐渐向外层扩大。由于拉伸应力分布的不均匀性,本文选取平均拉伸应力作为评价依据,结果如表 10 所示。

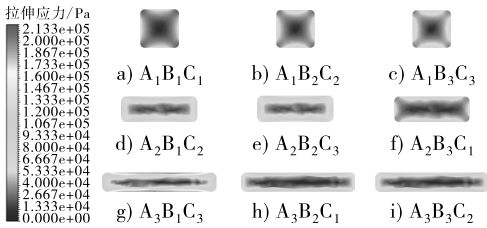


图 4 9 组试验模型出口截面拉伸应力云图

Fig. 4 Cloud diagram of tensile stress at the exit section of 9 experiments

表 10 9 组试验平均拉伸应力

Table 10 Average tensile stress of 9 experiments

试验号	σ_E/kPa	试验号	σ_E/kPa
1	33.89	6	52.73
2	40.29	7	70.40
3	44.81	8	54.97
4	63.66	9	59.31
5	65.95		

利用极差分析确定冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量对拉丝蛋白出口截面平均拉伸应力的影响主次和最优水平组合。平均拉伸应力极差分析如表 11 所示。

表 11 平均拉伸应力极差分析

Table 11 Range analysis of average tensile stress

水平	A	B	C
k_1	39.66	55.98	47.20
k_2	60.78	53.74	54.42
k_3	61.56	52.28	60.39
R	21.90	3.70	13.19

由表 11 可知,冷却区流道横截面纵横比(A)对平均拉伸应力的影响最大,入口流量(C)次之,冷却温度(B)的影响最小。采用 A₃B₁C₃ 组合生产的拉丝蛋白出口截面所受的平均拉伸应力最大。

3.3 灰色关联度分析

灰色关联度分析是一种基于灰色系统理论的统计分析手段,通过评估各个指标的相似性探究系统内部各因素间的相互关联程度。该方法将多个性状

数据整合为一个综合指标,进而进行比较分析,具有较高的稳定性与可靠性,灰色关联度关联系数计算公式见式(11)^[15]。

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y_o(k) - y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |y_o(k) - y_i(k)|}{|y_o(k) - y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |y_o(k) - y_i(k)|} \quad (11)$$

式中: k 为优化参数; $\varepsilon_i(k)$ 为关联系数; ξ 为分辨系数, $\xi \in (0,1)$,本文取 $\xi = 0.5$; $y_o(k)$ 为试验最优数据值; $y_i(k)$ 为试验数据值。

在本次试验评估中,优化目标为拉丝蛋白挤出速度均匀性、压力降、剪切应力以及拉伸应力。速度均匀性指数以及平均拉伸应力越大,拉丝蛋白挤出成型品质更好;同时,生产过程中物料承受的压力降越大,成品结构越密实,承受过的剪切应力越大,成品出现变形、表面粗糙等问题的可能性越大。

因此,在生产过程中,速度均匀性指数以及拉伸应力具有望大特性,压力降以及平均剪切应力具有望小特性。

另外,由于速度均匀性反映了流场内动量传递的平衡性,而压力降过大会导致物料生产过程中被过度挤压,因此上述2个影响因素对植物蛋白肉挤出成型品质具有更大的影响力。对上述4个影响因素的权重进行分配,分别取0.3、0.3、0.2、0.2,并根据式(12)计算获得最终的灰色关联度(γ_i),以综合分析各因素对拉丝蛋白成型品质的整体影响。 γ_i 越大,所对应的压力降、速度均匀性指数、剪切应力以及拉伸应力越接近优化目标。

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^n \lambda_k \varepsilon_i(k) \quad (12)$$

式中: n 为影响因素个数,取 $n=4$; λ 为权重。

基于上述公式计算得到的灰色关联度见表12。

表12 灰色关联度
Table 12 Grey correlation

试验号	σ_v	Δp	∂_i	σ_E	$\varepsilon_i(\sigma_v)$	$\varepsilon_i(\Delta p)$	$\varepsilon_i(\partial_i)$	$\varepsilon_i(\sigma_E)$	γ_i
1	0.730 9	6.178	0.764 8	33.89	0.333 3	1.000 0	0.732 1	0.333 3	0.613 1
2	0.732 4	7.530	0.862 4	40.29	0.337 0	0.900 6	0.864 0	0.377 4	0.619 6
3	0.735 8	8.556	0.902 9	44.81	0.345 5	0.837 5	0.933 8	0.416 4	0.624 9
4	0.763 9	15.174	0.622 2	63.66	0.437 2	0.576 6	0.598 6	0.730 3	0.569 9
5	0.766 0	15.851	0.577 9	65.95	0.446 1	0.558 9	0.566 5	0.804 0	0.575 6
6	0.788 9	8.620	0.936 1	52.73	0.572 3	0.833 8	1.000 0	0.508 1	0.723 5
7	0.823 5	30.688	0.000 0	70.40	1.000 0	0.333 3	0.333 3	1.000 0	0.666 7
8	0.800 9	20.030	0.769 3	54.97	0.672 0	0.469 4	0.737 3	0.541 9	0.598 3
9	0.802 3	22.477	0.665 2	59.31	0.685 9	0.429 2	0.633 4	0.622 1	0.585 6

由表12可知,第6组试验的灰色关联度值最大,为0.723 5,对应冷却区流道横截面纵横比为1:3、冷却温度为70℃、入口流量为 $2.5\text{e}-6\text{ m}^3/\text{s}$,此时生产的拉丝蛋白成型品质最佳。

4 结 论

本文使用 Polyflow 软件,基于高水分拉丝蛋白纤维成型的流变模型,深入探究了其纤维成型流道结构与工艺参数对拉丝蛋白成型品质的影响。以冷却区流道横截面纵横比、冷却温度以及入口流量为影响因素,以较大的速度均匀性指数、拉伸应力以及较小的压力降、剪切应力为优化指标,设计正交试验以模拟实际生产环境,并对仿真结果进行分析处理,得到以下结论。

(1)冷却区流道横截面纵横比对植物蛋白流变性能影响最大,截面纵横比越接近1:1,则有利于减小压力降及其所受的剪切应力,但是对物料出口的

速度均匀性以及冷却过程中所受的拉伸应力有一定的负面影响。

(2)在冷却区流道横截面纵横比1:3、冷却温度70℃、入口流量 $2.5\text{e}-6\text{ m}^3/\text{s}$ 时,所生产的拉丝蛋白成型品质最佳。

参考文献:

- [1] REVELL B. Meat and milk consumption 2050: The potential for demand – side solutions to greenhouse gas emissions reduction[J]. EuroChoices, 2015, 14(3): 4–11.
- [2] 曾艳,郝学财,董婷,等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 338–345, 350.
- [3] HE J, EVANS N M, LIU H, et al. A review of research on plant – based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(5): 54–57.

(下转第100页)

- [14] 安佳星,伍时华,黄嘉齐,等. 酵母破壁酶和蜗牛酶辅助 TRIzol 试剂法提取酿酒酵母总 RNA[J]. 中国酿造, 2020,39(12):46–50.
- [15] ZHOU X, BAO X, ZHOU J, et al. Evaluating the effect of cultivation conditions on palmitoleic acid – rich lipid production by *Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193[J]. Biofuels Bioprod Bioref, 2021, 15(6): 1859–1870.
- [16] 王徐卿,沈建福,王敏,等. 油茶籽饼多酚的乙醇提取工艺优化研究[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(3): 41–44.
- [17] 化妆品:自由基(DPPH)清除实验方法:T/SHRH 006—2018[S]. 上海:上海日用化学品行业协会, 2018.
- [18] 薛小兰,范瑜珊. 灰树花粗多糖提取物体外抑菌及抗氧化活性初步探究[J]. 福建农业科技, 2021, 52(9): 15–19.
- [19] 化妆品:酪氨酸酶活性抑制实验方法:T/SHRH 015—2018[S]. 上海:上海日用化学品行业协会, 2018.
- [20] MENG X, YANG J, XU X, et al. Biodiesel production from oleaginous microorganisms[J]. Renew Energ, 2009, 34(1): 1–5.
- [21] KUMAR L R, KAUR R, YELLAPU S K, et al. Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels: Biodiesel production from oleaginous microorganisms with wastes as raw materials[M]. Cambridge: Academic Press, 2019: 661–690.
- [22] FONSECA G G, GOMBERT A K, HEINZLE E, et al. Physiology of the yeast *Kluyveromyces marxianus* during batch and chemostat cultures with glucose as the sole carbon source[J]. FEMS Yeast Res, 2007, 7(3): 422–435.
- [23] ŠAJBIDOR J, CIESAROVÁ Z, ŠMOGROVIČOVÁ D. Influence of ethanol on the lipid content and fatty acid composition of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Folia Microbiol, 1995, 40(5): 508–510.
- [24] YAZAWA H, KUMAGAI H, UEMURA H. Characterization of triglyceride lipase genes of fission yeast *Schizosaccharomyces pombe*[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2012, 96(4): 981–991.
- [25] 田丝竹,李绪文,臧爽,等. 10 种野生植物果实对 α -淀粉酶和酪氨酸酶的抑制作用及其酚类化合物含量和抗氧化活性研究[J]. 分析化学, 2021, 49(3): 449–459.
- [26] 赵丹,曹玉峰,丁文玉,等. 玫瑰发酵液的抗氧化及美白功效探究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 141–145, 196.
- [27] 许满青. 异常威克汉姆酵母与酿酒酵母发酵对桑椹果酒品质的影响[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2022.
- [28] 刘晓燕,谢丹,马立志,等. 刺梨果渣发酵前后活性成分及抗氧化能力的比较研究[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 16–24.
- [29] 宋冠冠,包东毅. 一种植物源多肽及在化妆品中的应用:201810741300.3[P]. 2019–04–26.
- [30] 杜孝元,刘玮,史飞,等. 酪氨酸酶活性抑制实验及其在祛斑美白化妆品功效评价中的应用[J]. 中国美容医学, 2005, 14(6): 740–742.
- [31] 周春英,马秋华,张玉. 壬二酸衍生物抑制酪氨酸酶活性实验[C]//山东中西医结合皮肤性病学术会议论文集. 上海:中国中西医结合学会皮肤性病专业委员会, 2011:64–66.
- [32] 邓逸琳,王斌,曹辉. 6 种乳酸菌发酵液对皮肤抗氧化及美白功能的评价[J]. 日用化学工业, 2020, 50(5): 325–330.
-
- (上接第 74 页)
- [4] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 81: 25–36.
- [5] CORNENT 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] MURILLO J L S, 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.
- [7] 张王康,于玉真,荆孟杰,等. PVC – U 管材共用挤出机头设计与分析[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2): 106–111.
- [8] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [9] 左晓甜,郭树国,金子云. 带有反向螺纹的同轴变速单螺杆三维流场分析[J]. 中国油脂, 2025, 50(1): 147–152.
- [10] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
- [11] 陈慧涛. 植物蛋白肉纤维成型工艺研究及系统开发[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2023.
- [12] 史佳伟,徐秉恒,史宏斌,等. 喷嘴结构及工艺参数对固体推进剂 3D 打印挤出成型的影响分析[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(5): 740–746.
- [13] 李坦,靳世平,黄素逸,等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013(11): 60–63.
- [14] WITTEK P, ELLWANGER F, KARBSTEIN H P, et al. Morphology development and flow characteristics during high moisture extrusion of a plant – based meat analogue [J/OL]. Foods, 2021, 10(8): 1753[2024–06–20]. <https://doi.org/10.3390/foods10081753>.
- [15] 刘思峰,郭天榜,党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 郑州:河南大学出版社, 1991.