

挤压工艺对复合组织蛋白品质及结构的影响

王梦妍, 李文钊*, 冯亚倩, 田霄翔, 阮美娟

(天津科技大学 食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 以大豆分离蛋白和蛋清粉为主要原料, 利用双螺杆挤压机制备复合组织蛋白。通过单因素和响应面实验对复合组织蛋白挤压工艺进行优化, 并分析蛋白质二级结构变化, 探索挤压工艺对复合组织蛋白品质的提升机理。结果表明: 最佳工艺为水分含量 42%、机筒温度(Ⅲ区) 145 ℃、螺杆转速 17 Hz。该工艺下复合组织蛋白具有独特豆香味、组织均匀有弹性、咀嚼口感好, 感官评分最高。蛋白质经挤压处理后无新的特征峰出现, 二级结构中 α -螺旋和 β -转角含量降低, β -折叠和无规则卷曲含量增加, 结构稳定性增加。

关键词: 大豆分离蛋白; 蛋清粉; 复合组织蛋白; 挤压工艺; 品质评价; 二级结构

Effect of Extrusion Process on the Quality and Structure of Textured Composite Protein

WANG Meng-yan, LI Wen-zhao*, FENG Ya-qian, TIAN Xiao-xiang, RUAN Mei-juan

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: A textured composite protein was prepared by a twin-screw extruder with soy protein isolate and egg white powder as the main ingredients. The extrusion process of the textured composite protein was optimized through single factor and response surface experiments. The influence of the extrusion process on the protein secondary structure and the mechanism of extrusion in improving the quality of the textured composite protein were studied. The results showed that the optimal extrusion process was moisture content of 42%, barrel temperature (zone III) of 145 ℃, and screw speed of 17 Hz. The textured composite protein produced with the optimal process had the unique flavor of bean, uniform and elastic texture, good taste, and high sensory score. No new characteristic peaks of the protein secondary structure appeared after extrusion. In addition, the extrusion process reduced the content of α -helices and β -turns, increased the content of β -sheets and random coils, and improved the structural stability of the protein.

Key words: soy protein isolate; egg white powder; textured composite protein; extrusion process; quality evaluation; secondary structure

引文格式:

王梦妍, 李文钊, 冯亚倩, 等. 挤压工艺对复合组织蛋白品质及结构的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 143-150.

WANG Mengyan, LI Wenzhao, FENG Yaqian, et al. Effect of Extrusion Process on the Quality and Structure of Textured Composite Protein[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 143-150.

大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)作为一种健康蛋白, 必需氨基酸种类丰富, 具有乳化性、凝胶性、起泡性、吸油性等很多优良的加工性能, 因而广泛应用于肉制品、乳制品、挤压加工^[1-2]。蛋清粉(egg white powder, EWP)是典型的优质蛋白质, 因具有较强的凝胶性及起泡性等^[3-4], 常被应用于食品加工中, 可以明显

改善产品的质构和风味。

挤压组织化是指蛋白原料在高温、高压和高剪切力的作用下, 蛋白质发生变性导致结构改变, 形成网状组织结构的过程^[5-6]。通过挤压法生产的组织蛋白营养价值丰富, 又具有肉类咀嚼感, 经过复水调味后可制成不同风味的方便食品, 既能满足人们的营养需

作者简介: 王梦妍(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品加工技术。

* 通信作者: 李文钊(1970—), 女(汉), 教授, 研究方向: 食品加工技术。

求,又能有效降低患高血压、肥胖等疾病风险^[7]。在挤压生产组织蛋白过程中,物料水分含量、机筒温度、螺杆转速等挤压工艺参数是决定挤压过程能否顺利完成的关键因素,对产品品质特性具有很大影响^[8]。赵城彬等^[9]研究发现,在适宜的挤压温度下,膨化豆粕蛋白的二级结构发生改变,蛋白质部分变性,增大了氮溶解指数和蛋白质分散指数,表明蛋白质适当变性有利于提高豆粕品质。肖志刚等^[10]研究发现,调节螺杆转速能够改善肉饼的质构特性,随着螺杆转速的增加,硬度呈现出先增加后降低的趋势,通过对蛋白质分子产生强烈的剪切、拉伸和挤压作用,使蛋白质颗粒破裂,经过模头冷却形成明显的纤维结构。

目前,以大豆分离蛋白为原料挤压生产组织蛋白已有广泛研究,而以大豆分离蛋白为原料复配蛋清粉制备复合组织蛋白鲜有报道。本研究以大豆分离蛋白和蛋清粉为主要原料,优化动植物蛋白质挤压工艺,在营养互补、降低成本的同时,也丰富了组织蛋白产品的种类。进一步在最佳工艺条件的基础上,研究大豆分离蛋白-蛋清粉混合体系在挤压机腔内蛋白质二级结构的变化规律,探索蛋白质二级结构与品质之间的关系,为复合组织蛋白的开发提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白:山松生物制品有限公司;蛋清粉:天津太阳食品有限公司;溴化钾(分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤压机(SLG30-IV):山东赛百诺机械有限公司;质构仪(TA.XT.Plus):英国 Stable Micro System 公司;和面机(HM740):青岛汉尚电器有限公司;真空冷冻干燥机(Scientz-10N):宁波新芝生物科技股份有限公司;傅里叶变换红外光谱仪(Tensor 27):德国布鲁克公司。

1.3 试验方法

1.3.1 复合组织蛋白的制备

工艺流程:原料→混合→调湿拌料→挤压→切割成型→冷却干燥→装袋密封。

操作要点:大豆分离蛋白与蛋清粉(按蛋清粉占混粉总质量 6%计)称重,将称重好的原料在和面机中搅拌 20 min 使其混合均匀,根据物料水分含量要求计算出补加水量,调节水分后将混粉装入自封袋平衡水分 12 h,将原料进行挤压处理,设定挤压机 I、II 区温度分别为 60、90 °C,IV 温度在 III 区基础上升温 10 °C。

1.3.2 单因素试验

在前期挤压预试验基础上,分别考察水分含量、机

筒温度、螺杆转速 3 个因素,以复合组织蛋白质构特性(硬度、弹性、咀嚼度)、理化特性(膨化度、吸水率)和感官品质为评价指标,设置水分含量为 36%、38%、40%、42%、44%,机筒温度(III 区)为 130、135、140、145、150 °C,螺杆转速为 15、16、17、18、19 Hz,考察不同挤压工艺条件对复合组织蛋白品质的影响。

1.3.3 响应面试验

在单因素试验基础上,选择水分含量、机筒温度、螺杆转速为自变量,根据 Box-Behnken 中心组合试验原理,以感官评分为响应值,进行三因素三水平响应面试验设计,试验因素与水平设计见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平设计

Table 1 Response surface test factors and horizontal design

水平	A 水分含量/%	B 机筒温度/°C	C 螺杆转速/Hz
-1	40	140	16
0	42	145	17
1	44	150	18

1.3.4 复合组织蛋白质构测定

将复合组织蛋白条放入 40 °C 水浴锅中复水 30 min,取出后在铁丝网上沥水 10 min,切成 2.0 cm×0.4 cm 的样品。采用质构仪测定组织蛋白条的质构特性,测试条件:测试模式为全质构测试,测试探头为 P/100,测试前速度为 1.0 mm/s,测试中速度为 2.0 mm/s,测试后速度为 2.0 mm/s,压缩比为 40%,两次压缩间隔 5 s,触发力为 5 g。每个样品至少做 6 个平行,最终结果取平均值。

1.3.5 复合组织蛋白膨化度测定

参考王威^[11]的方法,随机截取产品 10 段,以游标卡尺测定其直径,求其平均值作为产品的直径(cm),其与模孔直径(cm)的比值即为膨化度,计算公式如下。

$$\text{膨化度}/\%=(\text{产品直径}/\text{模孔直径})\times 100$$

1.3.6 复合组织蛋白吸水率测定

参考张波等^[12]的方法,称取约 20 g 未粉碎样品,放入 500 mL 烧杯中,加入 300 mL 蒸馏水,在 40 °C 下保温吸水 60 min,取出后放置铁丝网上沥水 10 min,称量吸水后产品质量。每个样品做 3 次平行,结果取平均值。计算公式如下

$$\text{吸水率}/\%=(W_2-W_1)/W_1\times 100$$

式中:W₁为吸水前样品质量,g;W₂为吸水后样品质量,g。

1.3.7 傅里叶变换红外光谱测定

将复合组织蛋白置于冻干机中冷冻干燥 12 h,于研钵中快速研磨成粉末并过 100 目筛,密封备用。称取 1 mg 样品与 150 mg 左右的 KBr 于研钵中快速混合后研磨,于压片机压成透明光亮的薄片。取出样品进行

红外光谱扫描,扫描波段为 $4\ 000\text{ cm}^{-1}\sim 400\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为16次,分辨率为 4 cm^{-1} 。对于大豆蛋白,各个子峰的归属为 $1\ 640\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 615\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 680\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 670\text{ cm}^{-1}$ 为 β -折叠; $1\ 650\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 为无规则卷曲; $1\ 660\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 为 α -螺旋; $1\ 670\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 660\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 700\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 680\text{ cm}^{-1}$ 为 β -转角^[13-14]。对不同挤压工艺条件下的复合组织蛋白的红外光谱进行去卷积、二阶导数求导可得各部分的含量。

1.3.8 复合组织蛋白感官评价

参考安红周等^[15]的方法,将复合组织蛋白放入 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中复水30 min,取出后在铁丝网上沥水10 min,切成 $2.0\text{ cm}\times 0.4\text{ cm}$ 的样品。从外观形态、色泽、气味、组织状态和口感5个角度进行评价,由经过培训的10名食品专业人员进行评分,具体评分标准见表2。

表2 复合组织蛋白感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation table of composite texture protein

评分项目	评分标准
外观形态 (15分)	呈完整条状,形状规则,表面光滑无毛刺(11分~15分) 呈条状,形状较规则,表面有少量碎片,毛刺较少(6分~10分) 不成条状,形状不规则,表面粗糙,呈碎片状,毛刺较多(0分~5分)
色泽 (15分)	呈浅黄色或浅棕色,颜色均匀一致,无焦糊现象(11分~15分) 呈暗黄色,颜色较均匀,略有焦糊现象(6分~10分) 呈黄褐色,颜色不均匀,有较多焦糊现象(0分~5分)
气味 (20分)	香味浓郁,具有产品特有的豆香味,无其他不良气味(16分~20分) 具有淡淡的香味,产品豆腥味较浓(10分~15分) 无香味,产品豆腥味较强烈,引起不适(0~9分)
组织状态 (30分)	结构紧密,质地均匀,组织结构明显(21分~30分) 组织结构较完整,质地较均匀,组织结构较明显(10分~20分) 结构松散,质地不均匀,组织结构不明显(0分~9分)
口感 (20分)	硬度、弹性良好,咀嚼口感好,有咬劲(16分~20分) 硬度、弹性适中,咀嚼口感较好,较有咬劲(10分~15分) 较硬、弹性较差,咀嚼口感发黏,咬劲较差(0分~9分)

1.3.9 数据分析

采用Excel 2016进行数据处理,利用SPSS 16.0中Duncan检验对数据进行显著性分析($p<0.05$),图像采用Origin 2018绘制,响应面采用Design-Expert 8.0.6设计分析,红外数据采用Omic 8.2进行分析,所得结果均采用3次重复试验的平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 水分含量对复合组织蛋白品质的影响

水分含量对复合组织蛋白质构特性的影响见表3,

对膨化度、吸水率和感官评分的影响见图1。

表3 水分含量对复合组织蛋白质构特性的影响

Table 3 Effect of moisture content on texture characteristics of composite texture protein

水分含量/%	硬度/g	弹性	咀嚼度
36	542.96 \pm 48.87 ^a	0.96 \pm 0.02 ^a	457.89 \pm 47.70 ^a
38	440.79 \pm 21.89 ^b	0.94 \pm 0.02 ^{bc}	401.83 \pm 17.84 ^{ab}
40	337.02 \pm 15.65 ^c	0.92 \pm 0.02 ^c	274.63 \pm 40.41 ^d
42	365.10 \pm 32.05 ^c	0.92 \pm 0.02 ^c	299.14 \pm 44.49 ^{cd}
44	427.60 \pm 25.56 ^b	0.93 \pm 0.01 ^{bc}	350.82 \pm 18.33 ^{bc}

注:同列不同字母表示有显著性差异($p<0.05$)。

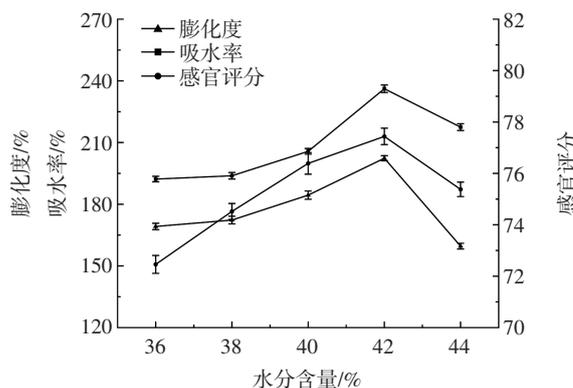


图1 水分含量对复合组织蛋白膨化度、吸水率和感官品质的影响
Fig.1 Effect of moisture content on swelling degree, water absorption capability and sensory quality of texture protein texture

由表3和图1可知,随着水分含量的增加,复合组织蛋白的硬度和咀嚼度先降低后升高。当水分含量为36%时,挤压过程由于缺少水分导致产品无法膨化,硬度较高,吸水率较低。产品组织结构粗糙,咀嚼口感较差,因此感官评分较低。当水分含量继续增加,硬度和咀嚼度逐渐降低,说明水分的增加促进了原料混合,原料在水与蛋白质相互作用下形成组织化结构,产品的膨化度和吸水率逐渐升高,感官评分升高,并在水分含量42%时感官评分最高。当水分含量为44%时,过多的水分会增加物料湿度,润滑度随之增加,螺杆对物料的剪切和摩擦减弱,缩短了物料在挤压机内的滞留时间^[16],导致产品挤压膨化不充分,膨化度和吸水率较低,感官品质下降。综上所述,初选水分含量42%为复合组织蛋白挤压品质较好的条件。

2.1.2 机筒温度对复合组织蛋白品质的影响

机筒温度对复合组织蛋白质构特性的影响见表4,对膨化度、吸水率和感官品质的影响见图2。

由表4和图2可知,随着机筒温度的升高,复合组织蛋白的硬度和咀嚼度先降低后升高,弹性变化不显著($p>0.05$)。温度的升高在降低熔融体黏度的同时,也会增加水蒸气,使产品膨胀、密度降低^[17],最终导致产品

表4 机筒温度对复合组织蛋白质构特性的影响

Table 4 Effect of barrel temperature on texture characteristics of composite texture protein

机筒温度/℃	硬度/g	弹性	咀嚼度
130	793.97±37.60 ^a	0.98±0.02 ^a	660.51±28.68 ^a
135	310.58±16.54 ^c	0.97±0.01 ^{ab}	265.42±7.74 ^c
140	313.88±17.67 ^c	0.95±0.01 ^b	266.28±29.77 ^c
145	346.03±30.43 ^c	0.96±0.01 ^{ab}	290.77±31.40 ^c
150	420.46±16.55 ^b	0.98±0.01 ^a	368.45±13.46 ^b

注:同列不同字母表示有显著性差异($p<0.05$)。

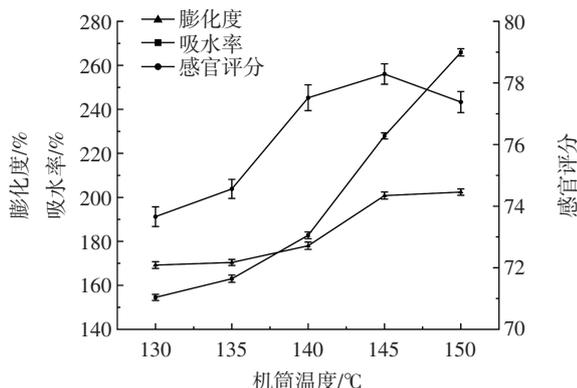


图2 机筒温度对复合组织蛋白膨化度、吸水率和感官品质的影响

Fig.2 Effect of barrel temperature on swelling degree, water absorption capability and sensory quality of texture protein texture

硬度下降。在物料水分含量一定时,温度低于140℃,物料没有完全熟化,不能达到挤出产品形成稳定的组织结构的要求,此时膨化度和吸水率较低。随着挤压温度的升高,复合组织蛋白的膨化效果变好,复合组织蛋白内部的气孔增多,结构疏松,故膨化度和吸水率升高,产品质地柔软,感官品质提升。综上所述,机筒温度为145℃是复合组织蛋白挤压品质较好的条件。

2.1.3 螺杆转速对复合组织蛋白品质的影响

螺杆转速对复合组织蛋白质构特性的影响见表5,对膨化度、吸水率和感官品质的影响见图3。

由表5和图3可知,随着螺杆转速的增加,复合组织蛋白的硬度和咀嚼度先降低后升高,弹性先升高后

表5 螺杆转速对复合组织蛋白质构特性的影响

Table 5 Effect of screw speed on texture characteristics of composite texture protein

螺杆转速/Hz	硬度/g	弹性	咀嚼度
15	472.55±32.28 ^b	0.90±0.01 ^b	393.23±37.84 ^b
16	438.02±21.76 ^b	0.92±0.01 ^b	368.48±30.43 ^b
17	318.56±24.15 ^d	0.95±0.01 ^a	260.51±11.83 ^c
18	372.55±34.08 ^c	0.91±0.01 ^b	294.82±15.98 ^c
19	684.59±30.16 ^c	0.79±0.02 ^c	547.06±25.53 ^a

注:同列不同字母表示有显著性差异($p<0.05$)。

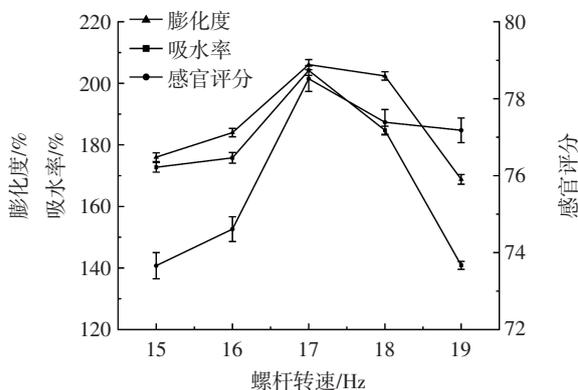


图3 螺杆转速对复合组织蛋白膨化度、吸水率和感官品质的影响

Fig.3 Effect of screw speed on swelling degree, water absorption capability and sensory quality of texture protein texture

降低。当螺杆转速较低时,物料停留时间过长,挤出含有焦糊硬块导致硬度和咀嚼度较大,进而影响复合组织蛋白感官品质。当螺杆转速在16 Hz~18 Hz时,物料所受剪切和摩擦程度增大,有利于物料中蛋白质分子间聚合作用的加强,产品膨化程度也相应升高,吸水后质地柔软,其硬度和咀嚼度逐渐降低,感官品质较好。当继续螺杆转速增大至19 Hz时,膨化度和吸水率急剧降低,过高的螺杆转速缩短了物料在挤压机内停留时间,受热不均匀,不利于良好组织化结构的形成,产品弹性较差,入口易碎,导致复合组织蛋白感官品质降低。综上所述,螺杆转速为17 Hz是复合组织蛋白挤压品质较好的条件。

2.2 响应面设计结果与分析

2.2.1 响应面设计及其结果

响应面设计及其结果见表6。

表6 响应面设计及其结果

Table 6 Response surface test design and results

序号	A 水分含量/%	B 机筒温度/℃	C 螺杆转速/Hz	Y 感官评分
1	44	150	17	84.62
2	40	140	17	83.48
3	42	145	17	88.25
4	44	145	16	81.36
5	44	140	17	84.55
6	42	145	17	88.64
7	42	150	16	82.59
8	42	145	17	88.49
9	40	145	18	80.53
10	42	145	17	88.47
11	42	140	18	80.27
12	40	150	17	83.56
13	40	145	16	80.23
14	42	145	17	87.42
15	44	145	18	81.49
16	42	140	16	81.96
17	42	150	18	82.48

2.2.2 回归模型拟合及方差分析

对表6的数据进行回归分析,得到复合组织蛋白感官评分(Y)对自变量水分含量(A)、机筒温度(B)、螺杆转速(C)的多元回归方程: $Y=88.25+0.5275A+0.3738B-0.1713C-0.0025AB-0.0425AC+0.3950BC-2.56A^2-1.64B^2-4.79C^2$ 。

感官评分的回归模型方差分析见表7。

表7 感官评分的回归模型方差分析

Table 7 Regression model analysis of variance for sensory score

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
模型	151.99	9	16.89	47.80	<0.0001	**
A	2.23	1	2.23	6.30	0.0404	*
B	1.12	1	1.12	3.16	0.1186	
C	0.23	1	0.23	0.66	0.4420	
AB	0.00	1	0.00	0.00	0.9935	
AC	0.01	1	0.01	0.02	0.8903	
BC	0.62	1	0.62	1.77	0.2255	
A ²	27.64	1	27.64	78.22	<0.0001	**
B ²	11.32	1	11.32	32.03	0.0008	**
C ²	96.59	1	96.59	273.37	<0.0001	**
残差	2.47	7	0.35			
失拟项	1.53	3	0.51	2.15	0.2368	
净误差	0.95	4	0.24			
总和	154.47	16				

注:*表示模型或因素影响显著($p<0.05$);**表示模型或因素影响极显著($p<0.01$)。

由表7可知,该回归模型 $p<0.01$,说明该方程的模型极显著($p<0.01$)。从方差结果可以看出,水分含量(A)对复合蛋白感官评分影响显著($p<0.05$);机筒温度(B)和螺杆转速(C)对复合蛋白感官评分影响不显著($p>0.05$);交互项AB、AC、BC对复合蛋白感官评分影响不显著($p>0.05$);水分含量(A)的二次项、机筒温度(B)的二次项、螺杆转速(C)的二次项对复合蛋白感官评分影响极显著($p<0.01$)。失拟项p值为0.2368($p>0.05$),失拟项不显著,说明回归模型与实际情况拟合程度高,可以利用此模型预测复合组织蛋白感官评分的最高值。由F值可知,各个因素对复合蛋白感官评分的影响程度为水分含量>机筒温度>螺杆转速。

2.2.3 响应曲面分析

应用 Design-Expert 8.0.6 软件对上述试验结果进行响应面分析,可以得到该模型的响应面和等高线图,结果见图4~图6。

由图4~图6可以看出,水分含量、机筒温度与螺杆转速之间的等高线图均为椭圆形,说明水分含量、机筒温度与螺杆转速的作用明显。响应面为开口向下的曲面,说明在试验范围内感官评分存在最值。

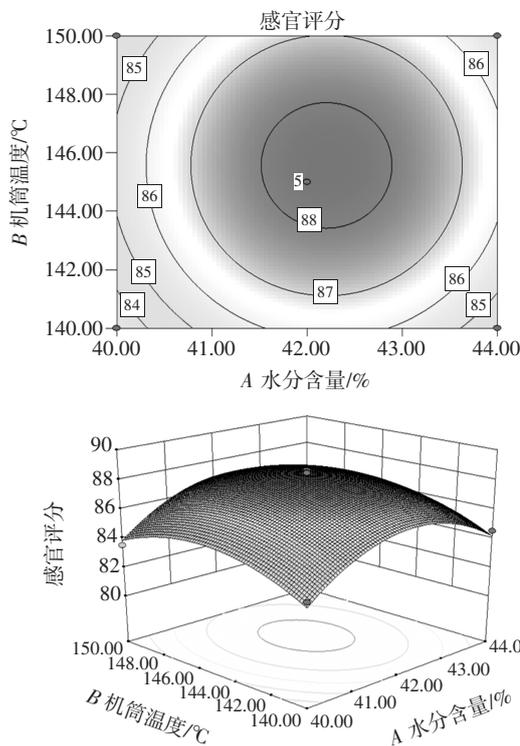


图4 水分含量与机筒温度交互作用对感官评分影响的响应面及等高线

Fig.4 Response surface plot and contour plot of the effect of the interaction between moisture content and barrel temperature on the sensory score

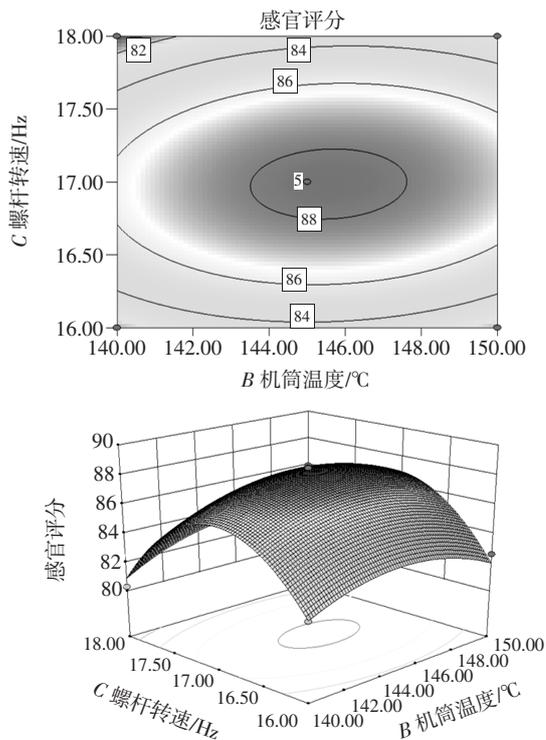


图5 机筒温度与螺杆转速交互作用对感官评分影响的响应面及等高线

Fig.5 Response surface plot and contour plot of the effect of the interaction between barrel temperature and screw speed on the sensory score

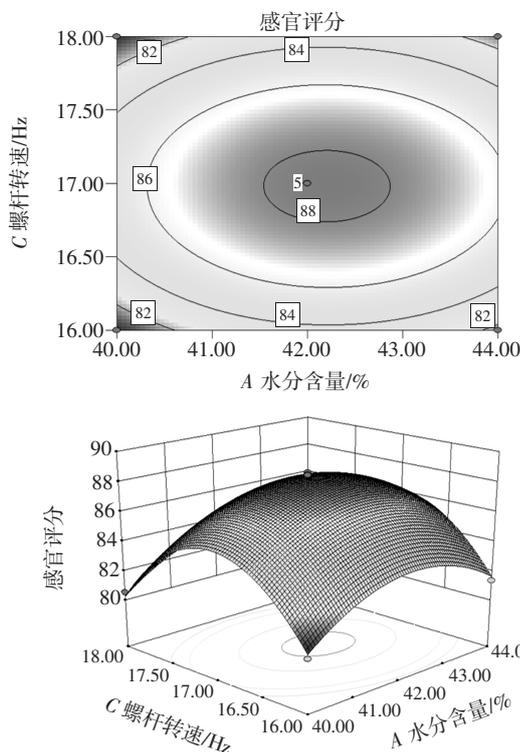


图6 水分含量与螺杆转速交互作用对感官评分影响的响应面及等高线

Fig.6 Response surface plot and contour plot of the effect of the interaction between moisture content and screw speed on the sensory score

2.2.4 验证试验

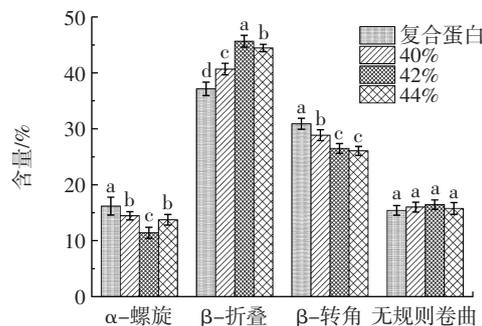
响应面优化得到的复合组织蛋白的最佳工艺为水分含量 42.21%、机筒温度 145.59℃、螺杆转速 16.98 Hz。在此条件下,理论最高感官评分为 88.30。结合实际操作的可性,调整复合蛋白挤压的工艺参数:水分含量为 42%,机筒温度为 145℃,螺杆转速为 17 Hz,并进行验证试验,感官评分为 88.42,与理论值接近,且生产的复合组织蛋白具有独特豆香味、组织均匀有弹性、咀嚼口感好。

2.3 挤压工艺对复合组织蛋白二级结构的影响

2.3.1 水分含量对复合组织蛋白二级结构的影响

最佳挤压条件中的水分含量为 42%,在此基础上,上下浮动 2%探索水分含量对复合组织蛋白二级结构的影响,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,复合蛋白原料和挤压产品中蛋白质的二级结构中主要以 β 结构形式存在,有研究证明由 β 结构组成的蛋白质聚集体具有稳定构象^[18]。与对照组相比, α -螺旋、 β -转角含量显著降低($p < 0.05$), β -折叠的含量显著增加($p < 0.05$),无规则卷曲含量稍有增加但变化不显著($p > 0.05$),说明在加热过程中蛋白变性,内部氢键断裂,使不稳定的 α -螺旋含量减少^[19]。当水分含量为 42%时,挤压过程中水分的增加促进了 α -



不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

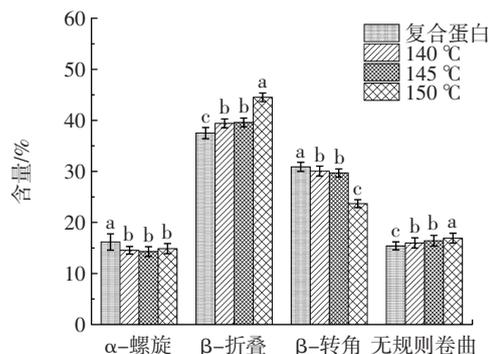
图7 水分含量对复合组织蛋白二级结构的影响

Fig.7 Effect of moisture content on secondary structure of composite texture protein

螺旋和 β -转角向 β -折叠结构转变,结构变得紧密且稳定,这与 Yuryev 等^[20]的研究结果一致。当水分含量为 44%时,产品挤压不充分,蛋白未充分变性导致组织化程度低。由此推测水分含量的增加有利于组织化结构的形成,且挤压过程中蛋白质的变性有利于提高复合组织蛋白的品质。

2.3.2 机筒温度对复合组织蛋白二级结构的影响

最佳挤压条件中的机筒温度为 145℃,在此基础上,上下浮动 5℃探究机筒温度对复合组织蛋白二级结构的影响,结果如图 8 所示。



不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图8 机筒温度对复合组织蛋白二级结构的影响

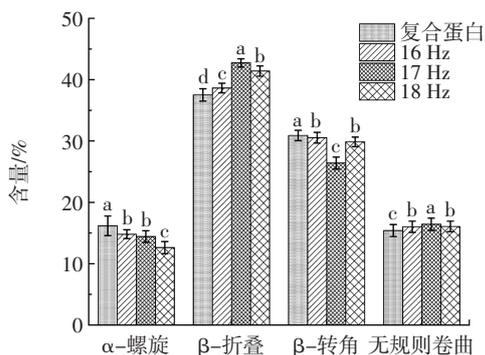
Fig.8 Effect of barrel temperature on secondary structure of composite texture protein

由图 8 可知,机筒温度为 140℃~150℃的挤压样品较复合蛋白原料相比,二级结构各部分含量发生了明显变化,这一升温过程导致 β -折叠和无规则卷曲含量增加,其中 β -折叠升幅明显,而降低了 α -螺旋和 β -转角含量,蛋白质不同二级结构的真实含量可能受加热过程中蛋白质聚集体的影响,由于这些聚集体是分子中不同部分分子间相互作用的结果,挤压过程破坏了这些分子间相互作用,从而改变了不同二级结构的含量,较高的挤压温度下分子间相互作用的破坏更为明显。当升温至 150℃时,此时氢键断裂程度较大,

从而降低了蛋白质的螺旋度^[21],蛋白质变性剧烈导致二级结构遭到破坏,表现为蛋白质结构的延展和无规则卷曲含量的增加,此时过度变性会降低复合组织蛋白的品质。

2.3.3 螺杆转速对复合组织蛋白二级结构的影响

最佳挤压条件中的螺杆转速为 17 Hz,在此基础上,上下浮动 1 Hz 探索螺杆转速对复合组织蛋白二级结构的影响,结果如图 9 所示。



不同小写字母表示组间差异显著($p < 0.05$)。

图 9 螺杆转速对复合组织蛋白二级结构的影响

Fig.9 Effect of screw speed on secondary structure of composite texture protein

由图 9 可知,当螺杆转速由 16 Hz 升高至 18 Hz, α -螺旋含量降低, β -转角含量先降低后升高, β -折叠含量先升高后降低,无规则卷曲含量升高。螺杆转速较低时,由于原料在挤压机内输送和受热的时间较长,变性程度大,导致挤压产品中相对不稳定的结构逐渐向较稳定的 β -折叠和无规则卷曲结构转变。无规则卷曲的存在可能增加了蛋白质分子的灵活性,具有这种结构和较高表面疏水性的蛋白质具有更大降低表面张力的能力,使其在界面上被强烈吸附^[22]。因此,在挤压过程后,无规则卷曲数量的增加,可能有助于形成灵活的蛋白质结构,使结构变得柔软不紧凑,可推断经过挤压处理后产品的结构弹性随着无规则卷曲含量的增加而有所改善。随着螺杆转速的不断升高,增加了 β 结构含量,这标志着分子间交联和分子间氢键形成了蛋白质聚集体^[23-24],增强了结构的稳定性,螺杆转速增加对 β -折叠具有一定正面影响。

2.3.4 复合组织蛋白挤压前后傅里叶红外光谱分析

复合组织蛋白挤压前后傅里叶红外光谱分析见图 10。

酰胺键的特征吸收峰有酰胺第 I 谱带(羰基伸缩振动, $3\ 500\text{ cm}^{-1}\sim 3\ 100\text{ cm}^{-1}$)、酰胺第 II 谱带(即 N-H 面内弯曲振动, $1\ 640\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$)^[25]。由图 10 可知,在 $3\ 500\text{ cm}^{-1}\sim 3\ 100\text{ cm}^{-1}$ 范围内,原料和样品均出现一个宽峰,在 $1\ 690\text{ cm}^{-1}\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$ 波数范围内均有明显的

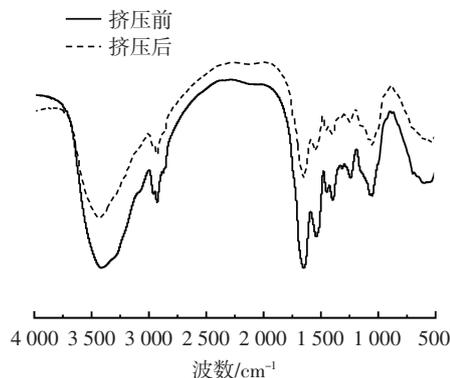


图 10 复合组织蛋白挤压前后的傅里叶红外光谱

Fig.10 FTIR spectrum of composite texture protein before and after extrusion

特征吸收,均存在特征吸收峰,但两种样品的特征吸收无明显差别,在酰胺键的特征谱带范围内,复合组织蛋白的红外光谱中也未发现谱带的减少及新的吸收谱带生成。因此,在复合组织蛋白挤压过程中并无新的酰胺键生成。

3 结论

本文优化挤压工艺条件对复合组织蛋白品质提升,并进一步探索蛋白二级结构对蛋白品质提升的作用机理。结果表明,最佳的挤压工艺条件为水分含量 42%、机筒温度(Ⅲ区)145℃、螺杆转速 17 Hz,此时复合组织蛋白的感官评分最高。挤压处理后无新的特征峰出现,挤压组织化并未完全破坏蛋白质的二级结构,此时二级结构展开, α -螺旋、 β -转角等有序结构含量降低, β -折叠和无规则卷曲含量增加,结构稳定性增加,使得复合组织蛋白的品质在一定程度上得到提升。本试验对双螺杆挤压制作复合组织蛋白的工艺提供了参考,探索了工艺优化后复合组织蛋白二级结构的变化对复合组织蛋白的品质提升的机理,但是挤压工艺对品质的影响复杂,对品质影响的作用机理还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙雪,赵晓燕,朱运平,等.酶解大豆分离蛋白的功能性及应用研究进展[J].粮食与油脂,2021,34(9):14-17.
SUN Xue, ZHAO Xiaoyan, ZHU Yunping, et al. Research progress on function and application of enzymatic hydrolysis of soy protein isolate[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(9): 14-17.
- [2] 崔维真.挤压对大豆分离蛋白-淀粉体系组织结构和性质的影响[D].济南:齐鲁工业大学,2020.
CUI Weizhen. Effects of extrusion on tissue structure and properties of soy protein isolated-starch system[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2020.
- [3] 闫文芳,李文钊,代任任,等.米面制品用功能性鸡蛋蛋白粉研究进展[J].中国家禽,2019,41(21):52-57.

- YAN Wenfang, LI Wenzhao, DAI Renren, et al. Research progress on functional egg albumen powder for rice-flour products[J]. China Poultry, 2019, 41(21): 52-57.
- [4] 刘尚丞, 张思原. 蛋清粉的加工特性及改性研究进展[J]. 中国家禽, 2022, 44(6): 100-106.
- LIU Shangcheng, ZHANG Siyuan. Research progress on processing properties and modification of egg white powder[J]. China Poultry, 2022, 44(6): 100-106.
- [5] PIETSCH V L, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Kinetics of wheat gluten polymerization at extrusion-like conditions relevant for the production of meat analog products[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 102-109.
- [6] SINGHA P, SINGH S K, MUTHUKUMARAPPAN K, et al. Physico-chemical and nutritional properties of extrudates from food grade distiller's dried grains, garbanzo flour, and corn grits[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(7): 1914-1926.
- [7] 陈锋亮, 魏益民, 张波, 等. 植物蛋白原料体系影响挤压组织化研究进展[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 110-113, 122.
- CHEN Fengliang, WEI Yimin, ZHANG Bo, et al. Research advances in effects of vegetable protein material systems on extrusion texturization[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(4): 110-113, 122.
- [8] 肖洪, 李楠楠, 闫龙涛, 等. 挤压加工技术对食品理化性质、营养成分影响的研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43 (2): 214-219.
- XIAO Hong, LI Nannan, YAN Longtao, et al. Research progress regarding the effects of extrusion processing technology on the physical and chemical properties and nutritional components of food[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2): 214-219.
- [9] 赵城彬, 张浩, 刘景圣. 挤压温度对膨化豆粕品质及蛋白质结构的影响[J]. 中国油脂, 2017, 42(7): 45-49.
- ZHAO Chengbin, ZHANG Hao, LIU Jingsheng. Effects of extrusion temperature on quality of extruded soybean meal and protein structure[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(7): 45-49.
- [10] 肖志刚, 霍金杰, 江睿生, 等. 螺杆转速对素肉饼质构特性和结构特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(6): 148-153.
- XIAO Zhigang, HUO Jinjie, JIANG Ruisheng, et al. Effect of screw rotation speed on texture characteristics and structural characteristics of vegetarian meat patty[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(6): 148-153.
- [11] 王威. 全麦挤压膨化营养食品的加工工艺研究[J]. 食品安全导刊, 2021(36): 158-161.
- WANG Wei. Research on the processing technology of whole wheat extruded nutritious food[J]. China Food Safety Magazine, 2021(36): 158-161.
- [12] 张波, 魏益民, 康立宁, 等. 挤压参数对组织化大豆蛋白持水性的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 260-263.
- ZHANG Bo, WEI Yimin, KANG Lining, et al. Effect of extrusion parameters on the capability of water holding and water absorption of texturized soy protein[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 260-263.
- [13] XUAN Z. FTIR characterization of the secondary structure of insulin encapsulated within liposome[J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Science, 2003, 12(1): 11-14.
- [14] 王奕云. 脱脂大豆复合蛋白挤压组织化特性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- WANG Yiyun. Extrusion texturization properties of defatted soybean flour with protein complexes[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014.
- [15] 安红周, 吴文举, 周豫飞, 等. 大豆分离蛋白原料特性与组织蛋白品质关系的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 30-36.
- AN Hongzhou, WU Wenju, ZHOU Yufei, et al. Relation between features of soy isolate protein raw materials and textured protein quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(4): 30-36.
- [16] 张海静, 杨哲, 曹燕飞, 等. 挤压参数对酱油渣粗纤维含量影响研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 123-127.
- ZHANG Haijing, YANG Zhe, CAO Yanfei, et al. Effect of extrusion parameters on crude fiber content of soy sauce residue[J]. China Brewing, 2021, 40(1): 123-127.
- [17] ALTAN A, MCCARTHY K L, MASKAN M. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 231-242.
- [18] CARBONARO M, MASELLI P, NUCARA A. Relationship between digestibility and secondary structure of raw and thermally treated legume proteins: A Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopic study[J]. Amino Acids, 2012, 43(2): 911-921.
- [19] TOMCZYŃSKA-MLEKO M, KAMYSZ E, SIKORSKA E, et al. Changes of secondary structure and surface tension of whey protein isolate dispersions upon pH and temperature[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2014, 32(1): 82-89.
- [20] YURYEV V P, ZASYPKIN D V, ALEXEYEV V V, et al. Structure of protein texturates obtained by thermoplastic extrusion[J]. Food/ Nah-rung, 1990, 34(7): 607-613.
- [21] QI P X, ONWULATA C I. Physical properties, molecular structures, and protein quality of texturized whey protein isolate: Effect of extrusion moisture content[J]. Journal of Dairy Science, 2011, 94(5): 2231-2244.
- [22] CASES E, RAMPINI C, CAYOT P. Interfacial properties of acidified skim milk[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 282(1): 133-141.
- [23] MOZAFARPOUR R, KOOCHEKI A, MILANI E, et al. Extruded soy protein as a novel emulsifier: Structure, interfacial activity and emulsifying property[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 361-373.
- [24] BECK S M, KNOERZER K, SELLAHEWA J, et al. Effect of different heat-treatment times and applied shear on secondary structure, molecular weight distribution, solubility and rheological properties of pea protein isolate as investigated by capillary rheometry[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 208: 66-76.
- [25] 张余. 花生蛋白挤压组织化技术及其机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- ZHANG Cuan. Extrusion texturization technology and mechanisms of peanut protein[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.