

鸡蛋清蛋白喷雾干燥工艺优化及特性变化

Optimization of egg white protein spray drying process and its characteristics

陈珂^{1,2} 刘丽莉^{1,2} 孟圆圆^{1,2} 代晓凝^{1,2}

CHEN Ke^{1,2} LIU Li-li^{1,2} MENG Yuan-yuan^{1,2} DAI Xiao-ning^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 河南科技大学食品加工与安全国家级教学示范中心, 河南 洛阳 471003)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Processing and Security, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:以鸡蛋清蛋白为原料,研究在最佳喷雾干燥工艺条件下,鸡蛋清蛋白粉的功能特性和结构的变化。以出粉率为指标,通过响应面优化试验确定了最佳喷雾干燥工艺条件:脱糖时间 32 h、进料液速度 466 mL/h、蛋清液质量浓度 29%、进口温度 140 ℃、出口温度 65 ℃,该条件下出粉率为 16.17%。以真空冷冻干燥为对照组,针对喷雾干燥对蛋清蛋白的溶解度、乳化性、起泡性、泡沫稳定性、水分含量、色差值等功能特性进行研究,结果表明,喷雾干燥蛋白与真空冷冻干燥蛋白的溶解度、乳化性、起泡性、泡沫稳定性和水分含量差异不显著($P>0.05$),而且喷雾干燥蛋白有较高亮度、较低的红色和黄色,保持了很好的色泽。傅里叶变换红外(FT-IR)分析表明在酰胺 I 带处,喷雾干燥蛋白发生红移,使酰胺 I 带产生 C=O 伸缩振荡;扫描电镜(SEM)分析显示喷雾干燥蛋白表面呈现大小不一的、颗粒较小、外形完整不规则的球形,而真空冷冻干燥蛋白表面呈现光滑的片层结构。

关键词:鸡蛋清蛋白;喷雾干燥;冷冻真空干燥;功能特性;结构

Abstract: In this study, egg albumin was used to study the functional properties and structural changes of its relative powder under the optimal spray drying conditions. Taking powder yield rate as index, the optimum process conditions of spray drying were made of the de-sugaring time of 32 h, the feed liquid speed of

466 mL/h, the egg white liquid mass concentration of 29%, the inlet temperature of 140 ℃ and the outlet temperature of 65 ℃. Under this condition, the powder yield rate was 16.17%. The effect of spray drying on the functional properties of egg albumin, such as solubility, emulsifying property, foaming property, foaming stability, moisture content and color difference, were studied, with the vacuum-freeze drying as control. The results showed that no significant difference in solubility, emulsification, foaming ability, foam stability and moisture content was found between the spray-dried protein and the vacuum freeze-dried protein ($P>0.05$). Moreover, the spray-dried protein had higher brightness, lower redness and yellowness, and maintained good color quality. Fourier transform infrared (FT-IR) analysis showed that the spray-dried protein was red-shifted at the amide I band, resulting in the C=O stretching oscillation of the amide I band. Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that the surface of spray-dried protein was a spherical shape with different sizes, small particles and irregular shape, while the surface of vacuum freeze-dried protein presented a smooth lamellar structure.

Keywords: egg albumin; spray drying; freeze vacuum drying; functional characteristics; structure

鸡蛋清粉作为鲜鸡蛋清的替代品,具有延长货架期、减轻重量、便于储藏等优点,可解决鲜鸡蛋成本高,易变质的缺点。鸡蛋清粉作为替代品,在各个领域得到了广泛应用。目前中国蛋粉的加工方法主要采用喷雾干燥法^[1],其优势主要体现在以下几个方面:干燥速度快,受热时间短,加工成的蛋粉复原性好;可实现自动化、机械化、连续化生产^[2]。但据相关报道^[3],中国深加工的蛋品仅占鲜鸡蛋总重的 2%,而发达国家加工蛋制品约占鲜鸡

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:U1704114);河南省重大专项(编号:161100110900, 161100110600-2, 161100110700-2, 161100110800-06)

作者简介:陈珂,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通讯作者:刘丽莉(1974—),女,河南科技大学教授,博士。

E-mail: yangliuyilang@126.com

收稿日期:2018-10-16

蛋总重的 40%。其中对鲜鸡蛋深加工制品,广泛应用于食品、保健、美容等各个领域。

目前已有较多关于蛋粉干燥技术的研究。孙临政等^[1]探讨了喷雾干燥条件对蛋清粉特性的影响。Lechevalier 等^[4]研究了蛋清粉在工业加工中对蛋白质结构和功能的影响,证明喷雾干燥是影响蛋清粉起泡特性的关键工艺。刘静波等^[5]曾利用喷雾干燥技术制备速溶蛋黄粉,并对不同溶解程度的蛋黄粉进行特性研究。肖连冬等^[6]研究了蛋白质起泡性和乳化性的影响因素。Iesel 等^[7]也曾研究过干热过程中水分含量对蛋清粉起泡性及理化性质的影响。

中国市场上的鸡蛋加工率较低,仍以鲜蛋消费为主,且蛋鸡养殖高度分散、分布极不均衡,加上运输时间长、贮藏加工条件差,致使鲜鸡蛋在贮藏和加工期间品质劣化速度较快。所以需要采用适用于工业化生产的喷雾干燥法的加工方式对鸡蛋清进行制备,以制备出功能性较好的蛋清粉,但目前针对喷雾干燥蛋清粉的相关文献研究^[1,7]多集中在干燥工艺条件的优化及干燥对某些单一蛋白功能特性的探讨,而且缺乏针对工业常用的喷雾干燥法制备的蛋清蛋白功能性质及其结构变化的深入分析。本研究拟利用喷雾干燥工艺制备成鸡蛋清蛋白粉,通过对鸡蛋清蛋白的理化和结构表征分析,以期从机理上进一步解释喷雾干燥工艺对鸡蛋清蛋白的结构和功能特性造成的影响,为鸡蛋清粉的生产加工提供理论依据。

1 材料与设备

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜鸡蛋:河南洛阳大商新玛特超市;

考马斯亮蓝 G-250:分析纯,上海强顺化学试剂有限公司;

溴酚蓝、溴化钾:分析纯,上海一研生物有限公司;

三羟甲基氨基甲烷:分析纯,上海山浦化工有限公司。

1.1.2 仪器与设备

喷雾干燥机:YC-015 型,上海雅程仪器设备有限公司;

真空冷冻干燥机:XY-FD-100F 型,上海欣渝仪器有限公司;

台式高速离心机:H1650 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

超速冷冻离心机:H1650 型,北京兴达恒信科技有限公司;

色差仪:CM-5 型,深圳市三恩驰科技有限公司;

傅里叶红外光谱仪:VERTEX70 型,德国 Brucker 公司;

扫描电镜:EM-30Plus 型,韩国 COXEM 公司。

1.2 方法

1.2.1 蛋清粉的制作工艺

拣蛋→洗蛋→消毒(含有效氯 1 100 mg/kg 的漂白液浸泡 8 min)→清水喷淋→吹干→打蛋→蛋清蛋黄分离→自然发酵→160 目筛过滤→巴氏杀菌(45 ℃, 30 min)→离心喷雾干燥→出粉(水分含量<5%)→包装

以真空冷冻干燥为对照组,具体制备方法如下:拣蛋→洗蛋→消毒(含有效氯 1 100 mg/kg 的漂白液浸泡 8 min)→清水喷淋→吹干→打蛋→蛋清蛋黄分离(蛋清液质量浓度为 20%)→自然发酵→160 目筛过滤→预冻(-20 ℃, 2 h)→冷冻干燥(压力 15 MPa, 温度 -45 ℃, 24 h)→出粉冷却(水分含量<5%)→包装

1.2.2 鸡蛋清喷雾干燥优化工艺

(1) 脱糖时间:固定进料液速度 450 mL/h,蛋清液质量浓度 25%,进口温度 170 ℃,出口温度 75 ℃,考察脱糖时间(0, 12, 24, 36, 48, 60, 72 h)对干燥工艺出粉率的影响。

(2) 进料液速度:固定脱糖时间 72 h,蛋清液质量浓度 25%,进口温度 170 ℃,出口温度 75 ℃,考察喷雾流量(250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 mL/h)对干燥工艺出粉率的影响。

(3) 蛋清液质量浓度:固定脱糖时间 72 h,进料液速度 450 mL/h,进口温度 170 ℃,出口温度 75 ℃,考察蛋清液质量浓度(5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%)对干燥工艺出粉率的影响。

(4) 进口温度:固定脱糖时间 72 h,进料液速度 450 mL/h,蛋清液质量浓度 25%,出口温度 75 ℃,考察进口温度(155, 160, 165, 170, 175, 180, 185 ℃)对干燥工艺出粉率的影响。

(5) 出口温度:固定脱糖时间 72 h,进料液速度 450 mL/h,蛋清液质量浓度 25%,进口温度 170 ℃,考察出风温度(65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 ℃)对干燥工艺出粉率的影响。

1.2.3 蛋清蛋白粉出粉率的响应面优化试验 根据单因素试验结果,以脱糖时间、进料液速度、蛋清液质量浓度,进口温度,出口温度作为自变量,利用 Design-Expert 8.0.5 软件,以出粉率为响应值,进行五元二次通用旋转设计组合试验,确定最佳的干燥工艺条件。

1.2.4 出粉率(Powder yield rate, PYR)的计算

$$PYR = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

PYR——蛋清粉出粉率, %;

m_1 ——干燥前鸡蛋清液质量, g;

m_2 ——干燥后鸡蛋清质量, g。

1.2.5 水分含量测定 按 GB/T 5009.3—2010 的直接干燥法执行。

1.2.6 鸡蛋清蛋白的功能特性测定

(1) 溶解度的测定:采用考马斯亮蓝法,使用每毫升蛋清蛋白粉中存在的可溶性蛋白质含量表示。以牛血清蛋白为标准蛋白,在 595 nm 波长处测得吸光值,绘制标准曲线,测定蛋白含量。

将不同喷雾干燥工艺条件得到的蛋清蛋白粉溶于蒸馏水中,配制成 1 mg/mL 的蛋白溶液,在常温下搅拌 20 min 后,6 000 r/min 离心 15 min,取上清液^[8],利用绘制出的标准曲线计算蛋白浓度。蛋白质溶解度按式(2)计算:

$$c = \frac{m}{m_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

c ——蛋白质溶解度,%;

m ——溶解的蛋白质量,g;

m_0 ——总蛋白量,g。

(2) 乳化性(EAI)的测定:参照赵功玲等^[9]的方法并作适当修改,称取一定量的样品,与 2.0 mL 大豆色拉油混合,9 500 r/min 均质 1 min,形成乳化液后,立即从试管底部吸取 60 μ L 乳化液,加入到 4.6 mL 2 mg/mL 的 SDS 溶液中(pH 7.3),快速摇匀并在 500 nm 处测定吸光度(A_0)。乳化性(EAI)按式(3)计算:

$$EAI = \frac{2.303 \times 2 \times A_0 \times D}{m \times \Phi \times 1\,000}, \quad (3)$$

式中:

EAI ——乳化性, cm^2/mg ;

D ——稀释倍数;

m ——蛋清粉蛋白质量,mg;

Φ ——油相所占的体积分数,0.056 6。

(3) 起泡性(FAI)和泡沫稳定性(FSI)的测定:参照赵功玲等^[9]的方法,准确称取 1.0 g/100 mL 样品待测液,在室温下调至 pH 为 7.0,然后在 9 000 r/min 搅拌 2 min,再快速移至 500 mL 量筒中,记下泡沫总体积 V_0 ,静置 30 min,记录泡沫总体积 V_{30} 。按式(4)、(5)计算蛋清粉的起泡性和泡沫稳定性。

$$FAI = \frac{V_0}{100} \times 100\%, \quad (4)$$

$$FSI = \frac{V_{30}}{100} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

FAI ——起泡性,%;

FSI ——泡沫稳定性,%;

V_0 ——均质结束时泡沫总体积,mL;

V_{30} ——静置 30 min 后泡沫总体积,mL。

(4) 色泽的测定:利用色差仪测定。在测定前先将样

品暴露在空气中几分钟,同时将机器预热,等到样品色差稳定后,进行黑白板校正。测定时将被测样品放在测试台上,并保证镜头被待测样全部覆盖,每个样品测定 3 次,取平均值。

1.2.7 鸡蛋清蛋白的结构表征

(1) 傅里叶变换红外(FT-IR)分析:准确称取 2 mg 的干燥待测样品粉末和 200 mg 干燥溴化钾粉末,将其混合放置样品槽中压制薄片,然后以溴化钾为背景,在 500~4 000 cm^{-1} 波长的红外光谱仪进行扫描^[10]。

(2) 扫描电镜:取微量待测样,用导电银胶粘到扫描电镜样品台上,然后将样品台放入喷金仪中进行喷金,最后观察样品的微观结构^[11]。

1.2.8 数据分析 每个样品重复 3 次试验,采用 Design-Expert 8.0.5 软件进行响应面试验设计及方差分析,Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 考马斯亮蓝标准曲线的绘制

利用 Origin 8.5 绘制的考马斯亮蓝标准曲线,见图 1。

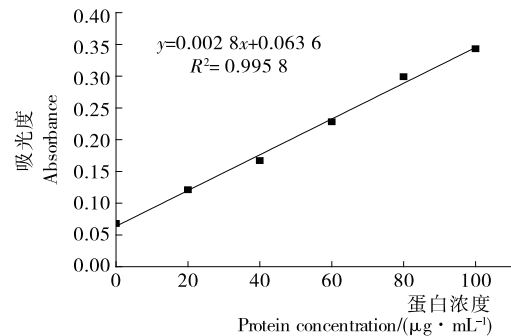


图 1 考马斯亮蓝标准曲线

Figure 1 The standard curve of coomassie blue

由图 1 可知,考马斯亮蓝标准曲线的回归方程为 $y = 0.063\,6 + 0.002\,8x$, $R^2 = 0.995\,8$ 。根据标准曲线可计算出样品蛋白质含量,该方程线性较好,可用于下一步试验。

2.2 单因素试验

喷雾干燥条件对蛋清蛋白粉出粉率的影响见图 2。

由图 2(a)可知,随着脱糖时间的延长,出粉率先上升后下降;在 48 h 时,出粉率达到最大值。原因是新鲜鸡蛋清脱糖前较为黏稠,难以通过筛网,易堵塞喷头,而且不易形成雾滴,从而不易干燥成型^[12]。所以,脱糖时间选定为 48 h。

由图 2(b)可知,当进料液速度 < 400 mL/h 时,蛋清蛋白粉出粉率随进料液速度的增加呈增加趋势,而进料液速度 > 400 mL/h 时,蛋白粉的出粉率随进料液速度的增加呈减小趋势。这是因为在一定压力下,进料液速度

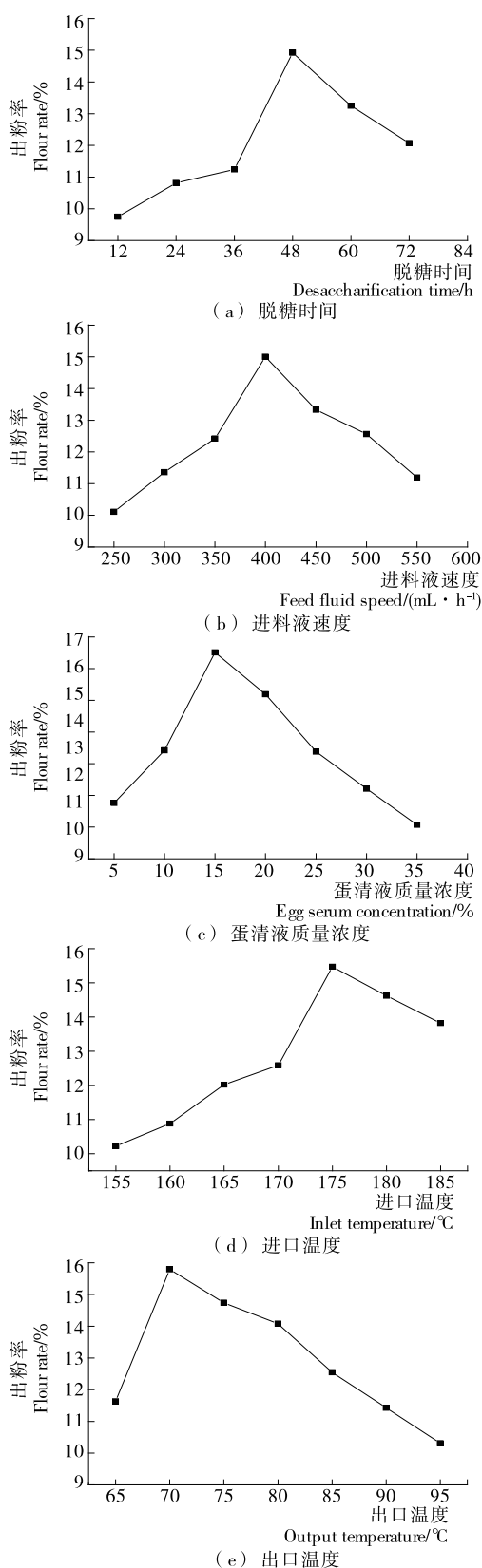


图2 干燥条件对鸡蛋清蛋白粉出粉率的影响

Figure 2 Effect of drying conditions on the flour extraction rate of egg white protein powder

过大,物料不完全干燥,致使出现粘壁现象;同时由于漩涡负压的作用,使料液受热凝固未形成雾状,从而堵塞喷嘴^[13]。因此,进料液速度选择 400 mL/h。

由图 2(c)可知,蛋清蛋白粉出粉率随着进料液浓度的增加,呈先上升后下降的趋势;当进料液浓度为 15% 时,蛋清蛋白粉出粉率出现最大值。原因可能是随着进料液浓度的增加,所得产品水分含量适宜,颗粒状态逐渐变得均匀而细腻,呈均匀粉末状。因此,进料液浓度选定为 15%。

由图 2(d)可知,随着进口温度的升高,出粉率先上升后下降;在 175 °C 时,出粉率达到最大值。原因是受热过高,蛋清液得到充分干燥,含水量低,颗粒变细,从而易于干燥成型^[1]。所以,温度选定为 175 °C。

由图 2(e)可知,随着出口温度的升高,出粉率先上升后下降;在 70 °C 时,出粉率达到最大值。这是因为物料与热空气接触后,易出现粘壁和焦糊现象,严重影响蛋清粉品质;同时由于温度过高还会使鸡蛋清蛋白质二次变性^[13]。因此,出口温度选定为 70 °C。

2.3 二次回归正交旋转试验

在单因素试验基础上,采用五元二次通用旋转试验对蛋清粉出粉率进行响应面优化,其试验设计方案及结果见表 1、2。

表 1 五元二次正交旋转组合设计试验因素与水平

Table 1 Factors and levels used in second-order rotation combination experimental design

水平	X ₁ 脱糖 时间/h	X ₂ 进料液速度/ (mL · h ⁻¹)	X ₃ 蛋清液质 量浓度/%	X ₄ 进口 温度/°C	X ₅ 出口 温度/°C
-2	12	350	15	140	45
-1	24	400	20	150	50
0	36	450	25	160	55
1	48	500	30	170	60
2	60	550	35	180	65

对表 2 中出粉率的试验数据进行多元回归拟合,得到出粉率的回归方程为:

$$Y_1 = 16.29 + 0.22X_1 + 0.13X_2 + 0.16X_3 - 0.18X_4 + 0.32X_5 - 0.16X_1X_2 - 0.13X_1X_3 - 0.071X_1X_4 + 0.056X_1X_5 - 0.030X_2X_3 - 0.18X_2X_4 - 0.15X_2X_5 - 0.32X_3X_4 - 0.033X_3X_5 - 0.092X_4X_5 - 0.27X_1^2 - 0.17X_2^2 - 0.37X_3^2 - 0.21X_4^2 - 0.079X_5^2 \quad (6)$$

该出粉率模型在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下剔除不显著水平后的回归方程为:

$$Y_1 = 16.29 + 0.22X_1 + 0.13X_2 + 0.16X_3 - 0.18X_4 + 0.32X_5 - 0.16X_1X_2 - 0.13X_1X_3 - 0.18X_2X_4 - 0.15X_2X_5 - 0.32X_3X_4 - 0.27X_1^2 - 0.17X_2^2 - 0.37X_3^2 - 0.21X_4^2 \quad (7)$$

表 2 五元二次通用旋转组合试验设计方案及结果

Table 2 Second-order rotation combination experimental design with experimental results

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	出粉率/%
1	1	1	1	1	1	14.92
2	1	1	1	-1	-1	15.93
3	1	1	-1	1	-1	15.16
4	1	1	-1	-1	1	15.91
5	1	-1	1	1	-1	14.74
6	1	-1	1	-1	1	16.52
7	1	-1	-1	1	1	16.27
8	1	-1	-1	-1	-1	14.53
9	-1	1	1	1	-1	15.01
10	-1	1	1	-1	1	16.40
11	-1	1	-1	1	1	15.14
12	-1	1	-1	-1	-1	14.68
13	-1	-1	1	1	1	15.11
14	-1	-1	1	-1	-1	14.72
15	-1	-1	-1	1	-1	14.45
16	-1	-1	-1	-1	1	14.58
17	-2	0	0	0	0	14.70
18	2	0	0	0	0	15.41
19	0	-2	0	0	0	15.25
20	0	2	0	0	0	15.69
21	0	0	-2	0	0	14.36
22	0	0	2	0	0	14.95
23	0	0	0	-2	0	15.74
24	0	0	0	2	0	14.83
25	0	0	0	0	-2	15.33
26	0	0	0	0	2	16.32
27	0	0	0	0	0	16.22
28	0	0	0	0	0	16.30
29	0	0	0	0	0	16.24
30	0	0	0	0	0	16.57
31	0	0	0	0	0	16.12
32	0	0	0	0	0	16.56

2.3.1 方差分析和显著性检验 由表 3 可知,Y₁ 回归模型的 $R^2 = 96.34$, $P < 0.000\ 1$, 差异极显著, 失拟项 $P = 0.230\ 2 > 0.05$, 差异不显著, 说明 Y₁ 模型的拟合度较高; 因此这个回归模型可以较好地反映自变量与 2 个响应值之间的变化关系。

2.3.2 双因素交互效应分析 由图 3 可知, 进口温度与进料液速度对出粉率的交互影响, 等高线显示为椭圆形, 响应面显示为抛物线形, 说明进口温度与进料液速度的交互作用对出粉率影响极显著。这与表 3 中显著性分析

表 3 出粉率的方差分析表

Table 3 Analysis of variance for the flour extraction rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
X ₁	1.17	1	1.17	21.57	0.000 7
X ₂	0.40	1	0.40	7.40	0.019 9
X ₃	0.60	1	0.60	11.10	0.006 7
X ₄	0.77	1	0.77	14.08	0.003 2
X ₅	2.41	1	2.41	44.30	<0.000 1
X ₁ X ₂	0.39	1	0.39	7.23	0.021 1
X ₁ X ₃	0.29	1	0.29	5.30	0.041 8
X ₁ X ₄	0.080	1	0.080	1.47	0.251 5
X ₁ X ₅	0.050	1	0.050	0.91	0.360 9
X ₂ X ₃	0.04	1	0.04	0.014	0.908 3
X ₂ X ₄	0.53	1	0.53	9.72	0.009 8
X ₂ X ₅	0.38	1	0.38	6.89	0.023 6
X ₃ X ₄	1.63	1	1.63	29.96	0.000 2
X ₃ X ₅	0.018	1	0.018	0.32	0.581 6
X ₄ X ₅	0.14	1	0.14	2.48	0.143 6
X ₁ ²	2.17	1	2.17	39.76	<0.000 1
X ₂ ²	0.83	1	0.83	15.19	0.002 5
X ₃ ²	4.05	1	4.05	74.41	<0.000 1
X ₄ ²	1.35	1	1.35	24.71	0.000 4
X ₅ ²	0.18	1	0.18	3.38	0.093 2
回归	15.78	20	1.17	14.48	<0.000 1
剩余	0.60	11	0.054		
失拟	0.42	6	0.071	2.01	0.230 2
误差	0.18	5	0.035		
总和	16.38	31			

结果一致。由等高线的变化趋势可看出, 当进料液速度低于 455.5~461.0 mL/h 某固定值、进口温度低于 156~164 ℃某固定值时, 随着进料液速度与进口温度的增加, 出粉率增加; 当进料液速度高于 455.5~461.0 mL/h 某固定值、进口温度高于 156~164 ℃某固定值时, 随着进料液速度与进口温度的增加, 出粉率减小; 当进料液速度为 455 mL/h、进口温度为 164 ℃ 时, 出粉率为 16.12%。

由图 4 可知, 蛋清液质量浓度与进口温度的响应面呈抛物线形且比较陡峭, 等高线呈明显的椭圆形, 说明蛋清液质量浓度与进口温度对出粉率有极显著的交互作用。由等高线的变化趋势可看出, 当蛋清液质量浓度低于 24.5%~26.5%某固定值、进口温度低于 156~164 ℃某固定值时, 随着蛋清液质量浓度与进口温度的增加, 出粉率增加; 当蛋清液质量浓度高于 24.5%~26.5%某固定值、进口温度高于 156~164 ℃某固定值时, 随着蛋清液质量浓度与进口温度的增加, 出粉率减小。

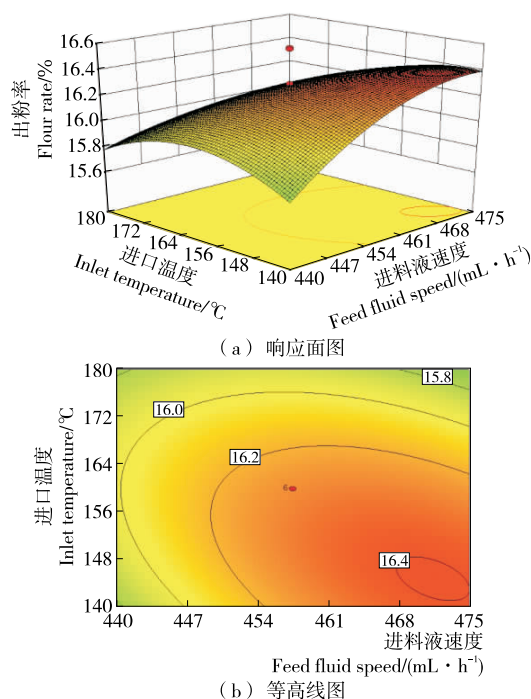


图 3 进料液速度与进口温度交互作用对出粉率的影响
Figure 3 Effect of interaction between feed fluid speed and inlet temperature on flour extraction rate

2.4 利用回归方程确定最佳作用参数和模型验证

经五元二次正交旋转试验及响应面优化法,采用 Design Expert 8.0 软件和回归方程分析得到喷雾干燥蛋清蛋白粉的最佳工艺为:脱糖时间 31.55 h、进料液速度 465.75 mL/h、蛋清液质量浓度 29.11%、进口温度 140 °C、出口温度 65 °C,此时出粉率为 16.79%。为了提高喷雾干燥制备蛋清蛋白粉试验的可行性和验证模型的准确性,把预测的最优工艺条件修改为:脱糖时间 32 h、进料液速度 466 mL/h、蛋清液质量浓度 29%、进口温度 140 °C、出口温度 65 °C。在此条件下做 3 次重复验证实验,实际测得出粉率为 $(16.17 \pm 0.12)\%$;同时测定其水分含量为 $(4.43 \pm 0.03)\%$ 。出粉率的实际值与预测值相差 0.62%,说明出粉率的模型方程与实际结果拟合度良好,证明响应面优化喷雾干燥蛋清蛋白粉的工艺条件是可行的。

2.5 干燥对鸡蛋清蛋白功能特性的影响

2.5.1 干燥对鸡蛋清蛋白溶解度、乳化性、起泡性、泡沫稳定性和水分含量的影响 由表 4 可以看出,喷雾干燥

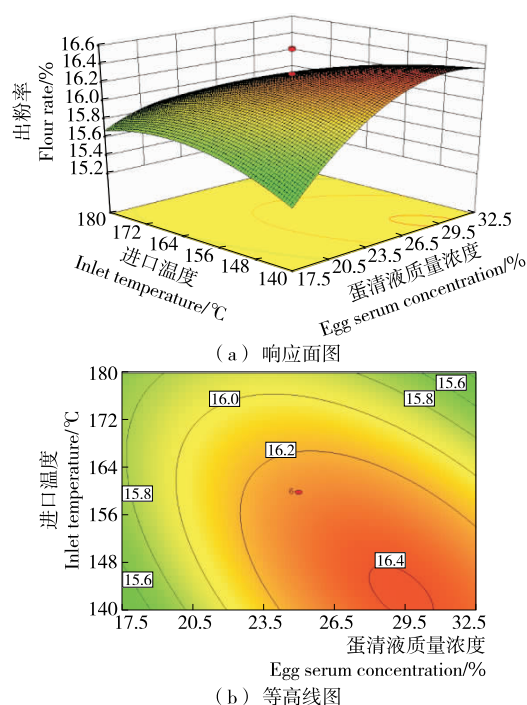


图 4 蛋清液质量浓度与进口温度交互作用对出粉率的影响
Figure 4 Effect of interaction between egg white liquor mass concentration and inlet temperature on flour extraction rate

制备鸡蛋清蛋白的溶解度和乳化性分别为 $(90.98 \pm 0.02)\%$ 、 $(37.34 \pm 0.01) \text{ cm}^2/\text{mg}$,而真空冷冻干燥蛋白的溶解度和乳化性分别为 $(91.13 \pm 0.03)\%$ 和 $(37.66 \pm 0.05) \text{ cm}^2/\text{mg}$,2 种干燥方式比较表明,二者变化不显著 ($P > 0.05$);喷雾干燥制备的鸡蛋清蛋白的起泡性、泡沫稳定性和水分含量与真空冷冻干燥蛋白的相比也没有发生显著性变化 ($P > 0.05$)。综合分析表明,与真空冷冻干燥方式相比较,喷雾干燥优化工艺制备的鸡蛋清蛋白粉的功能特性没有发生显著变化。

2.5.2 干燥对色差值的影响 由表 5 可以看出,喷雾干燥蛋白相对于真空冷冻干燥蛋白,色泽发生了明显变化。从 L^* 值可以看出,喷雾干燥蛋白的明度较高,真空冷冻干燥蛋白色泽较暗。这可能因为不同的干燥方式对产品的形态、颗粒大小、表面结构、美拉德反应的影响不同。从 a^* 值可以看出,喷雾干燥蛋白较真空冷冻干燥蛋白较

表 4 干燥对蛋清蛋白的溶解度、乳化性、起泡性、泡沫稳定性和水分含量的影响

Table 4 Effect of drying on the solubility, emulsifying, foaming, foam stability and moisture content of egg white protein

样品	溶解度/%	乳化性/($\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$)	起泡性/%	泡沫稳定性/%	水分含量/%
真空冷冻干燥蛋白	91.13 ± 0.03	37.66 ± 0.05	60.38 ± 0.06	53.68 ± 0.02	4.42 ± 0.02
喷雾干燥蛋白	90.98 ± 0.02	37.34 ± 0.01	60.01 ± 0.03	53.30 ± 0.04	4.43 ± 0.03

表5 干燥对鸡蛋清蛋白色泽的影响[†]

Table 5 The effect of drying on the white egg of the egg

样品	L^*	a^*	b^*
真空冷冻干燥蛋白	84.30 ± 0.01^b	0.19 ± 0.05^a	9.11 ± 0.24^a
喷雾干燥蛋白	99.66 ± 0.02^a	1.09 ± 0.04^b	8.23 ± 0.02^b

[†] 不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

红。从 b^* 值可以看出,真空冷冻干燥蛋白较喷雾干燥蛋白较黄。

2.6 不同方式干燥鸡蛋清蛋白的结构表征

2.6.1 傅里叶红外光谱分析 对干燥后的鸡蛋清蛋白粉进行傅里叶红外光谱分析,结果见图5。

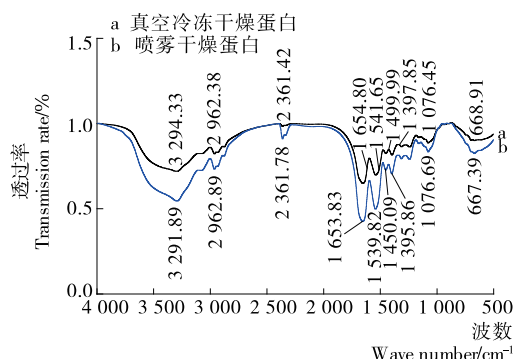


图5 红外光谱图分析

Figure 5 Analysis of fourier transform infrared spectrometer

由图5可知,冷冻干燥和喷雾干燥分别制备的蛋清蛋白粉红外图谱存在一定的差异性。蛋白质在红外区有若干特征吸收带,酰胺I带($1700 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$)对于研究蛋白质二级结构最有价值^[14],二者拥有类似的蛋白主要吸收峰,其中,真空冷冻干燥蛋白和喷雾干燥蛋白分别在 $3291.89, 3294.33 \text{ cm}^{-1}$ 出现强宽峰,主要由O—H伸缩振动引起的,说明可能存在着缔合状态下的氢键^[15]。 $1700 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 为酰胺I带,二者在酰胺I带处均出现了特征吸收,真空冷冻干燥蛋白在此波数范围内的峰,位于 1654.80 cm^{-1} 处,喷雾干燥蛋白红移至 1653.83 cm^{-1} 处,酰胺I带产生C=O伸缩振荡特征吸收峰^[16]。这可能是喷雾干燥使鸡蛋清蛋白的氢键减弱,螺旋度减少^[17],影响C=O的伸缩振荡,从而使酰胺I带处的峰发生位移。

2.6.2 扫描电镜(SEM)分析 对干燥后的鸡蛋清蛋白粉进行SEM测定分析,结果见图6。

由图6中可知,蛋清蛋白经过不同方式干燥之后,其微观结构存在较大差异,喷雾干燥蛋白的表面形态明显不同于真空冷冻干燥蛋白,喷雾干燥蛋白表面呈现大小不一、颗粒较小、外形完整不规则的球形;可能是与热空气接触,扩散率和表面张力变化趋势不同^[18]。而真空冷

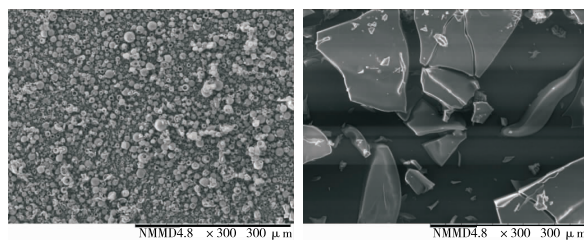


图6 不同方式干燥鸡蛋清蛋白的SEM图

Figure 6 Scanning electron micrographs of different drying methods

冻干燥蛋白表面呈现光滑的片层结构^[19],主要是在低温状态下,迅速形成冰晶体,分子之间的作用力更容易导致溶质聚合^[20]。

3 结论

通过试验确定了鸡蛋清蛋白粉的最佳喷雾干燥条件,并针对其功能特性与结构进行了分析。结果表明,喷雾干燥的蛋清蛋白粉与真空冷冻干燥相比,其功能特性变化并不显著($P > 0.05$),且保持了很好的色泽品质,而这些变化与其结构密切联系。为了更加深入地了解喷雾干燥后鸡蛋清蛋白粉相关功能性质变化的机理,采用FT-IR和SEM测定了干燥后的鸡蛋清蛋白粉结构,结果表明喷雾干燥后的蛋清蛋白的二级结构发生明显变化,表面呈现褶皱的不规则球型。表明喷雾干燥工艺对鸡蛋清蛋白的结构和功能特性造成一定的影响。系统全面研究喷雾干燥鸡蛋清蛋白粉的功能性质与结构的相关性,还有待进一步的深入探讨。

参考文献

- [1] 孙临政, 迟玉杰, 王欢, 等. 喷雾干燥条件对蛋清粉冲调效果的影响[J]. 中国家禽, 2014(2): 29-33.
- [2] 谭佩毅, 黄秀锦. 卵黄抗体鸡蛋粉喷雾干燥工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012(20): 269-272, 275.
- [3] 赵媛, 苏宇杰, 杨严俊. 全蛋粉喷雾干燥工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2015(15): 243-246.
- [4] LECHEVALIER V, JEANTET R, ARHALIASS A, et al. Egg white drying: influence of industrial processing steps on protein structure and functionalities[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 404-413.
- [5] 刘静波, 马爽, 林松毅, 等. 速溶蛋黄粉喷雾干燥工艺优化及其特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(5): 1336-1342.
- [6] 肖连冬, 程爽, 李杰. 大豆分离蛋白起泡性和乳化性影响因素的研究[J]. 中国酿造, 2014(4): 83-86.
- [7] IESEL Van Der Plancken, ANN Van Loey, MARC Hendrickx. Effect of Moisture Content during Dry-Heating on Selected Physicochemical and Functional Properties of Dried Egg White[J]. Agric. Food Chem., 2007, 55: 127-135.

(下转第231页)

- and tandem mass spectrometric detection[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2007, 389: 1 697-1 714.
- [36] SCHENCK F, WONG Jon, LU Chen-seng, et al. Multiresidue analysis of 102 organophosphorus pesticides in produce at parts-per-billion levels using a modified QuEChERS method and gas chromatography with pulsed flame photometric detection[J]. *Journal of Aoac International*, 2009, 92(2): 561.
- [37] 刘琳, 李永新, 江阳, 等. 碳纳米管在农残分析样品前处理中的应用[J]. *现代预防医学*, 2017, 44(9): 1 688-1 687.
- [38] QI Pei-pei, WANG Zhi-wei, YANG Gui-ling, et al. Removal of acidic interferences in multi-pesticides residue analysis of fruits using modified magnetic nanoparticles prior to determination via ultra-HPLC-MS/MS[J]. *Microchimica Acta*, 2015, 182(15/16): 2 521-2 528.
- [39] 刘真真, 齐沛沛, 王新全, 等. 磁纳米材料净化-超高效液相色谱-串联质谱测定猕猴桃中多农残[J]. *色谱*, 2016, 34(8): 762-772.
- [40] STEVEN J Lehotay, KYUNG Ae Son, HYEYOUNG Kwon, et al. Comparison of QuEChERS sample preparation methods for the analysis of pesticide residues in fruits and vegetables[J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, 1 217(16): 2 548-2 560.
- [41] 姚德祥, 黎小鹏, 李拥军, 等. QuEChERS 前处理-气相色谱仪检测火龙果中的多种农残[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2017, 30(1): 36-41.
- [42] 陈姣姣, 张静, 吴思卓, 等. 气相色谱法测定苹果和土壤中的高效氯氟氰菊酯[J]. *色谱*, 2016, 34(10): 1 005-1 010.
- [43] GARCÍA-RODRÍGUEZ D, CELA-TORRIJOS R, LORENZO-FERREIRA R A. Analysis of pesticide residues in seaweeds using matrix solid-phase dispersion and gas chromatography-mass spectrometry detection[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(1): 259-267.
- [44] ISHII Y, KOBORI I, ARAKI Y, et al. HPLC determination of the new insecticide Imidacloprid and its behavior in rice and cucumber[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1994, 42(12): 2 917-2 921.
- [45] 刘冰洁, 贾春虹, 陈莉, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定吡虫啉在花椰菜和土壤中的残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(6): 1 254-1 260.
- [46] ZHANG Fang, YU Chong-tian, WANG Wen-wen, et al. Rapid simultaneous screening and identification of multiple pesticide residues in vegetables[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 757(23): 39-47.
- [47] SHIZUKA Saito-Shida, TOMOKO Hamasaka, SATORU Nemoto, et al. Multiresidue determination of pesticides in tea by liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry: Comparison between Orbitrap and time-of-flight mass analyzers[J]. *Food Chemistry*, 2018, 256: 140-148.
- [48] FOUAD Fadhil Al-Qaim, ZAINAB Haider Mussa, ALI Yuzir, et al. The fate of prazosin and levonorgestrel after electrochemical degradation process: Monitoring by-products using LC-TOF/MS[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 74: 134-146.
- [49] MORENO-GONZÁLEZ David, ALCÁNTARA-DURÁN Jaime, GILBERT-LÓPEZ Bienvenida, et al. Sensitive detection of neonicotinoid insecticides and other selected pesticides in pollen and nectar using nanoflow liquid chromatography orbitrap tandem mass spectrometry[J]. *Journal of AOAC International*, 2018, 101(2): 367-373.
- [50] GANNA Fedorova, TOMAS Randak, RICHARD H Lindberg, et al. Comparison of the quantitative performance of a Q-Exactive high-resolution mass spectrometer with that of a triple quadrupole tandem mass spectrometer for the analysis of illicit drugs in wastewater[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2013, 27(15): 1 751-1 762.
- (上接第 203 页)
- [8] 李乐, 吴晖, 赖富饶. 不同提取 pH 条件下火麻仁蛋白组分的功能性质研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(2): 16-19.
- [9] 赵功玲, 梁新红, 郭延成, 等. 萝卜籽粕蛋白质的组成及功能性质[J]. *食品科学*, 2018(3): 117-122.
- [10] 张艳荣, 高宇航, 刘婷婷, 等. 白灵菇蛋白提取及功能特性和结构分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 42-50.
- [11] 田学智, 龙昌洲, 王子宇, 等. 高静压处理对魔芋葡甘聚糖/大豆分离蛋白复合溶胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017(11): 157-162.
- [12] 赵希荣, 赵立, 叶华. 鸭蛋粉离心喷雾干燥工艺研究[J]. *食品与机械*, 2009, 25(4): 144-148.
- [13] 刘静波, 马爽, 刘博群, 等. 喷雾干燥条件对高铁蛋粉溶解特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 365-371.
- [14] 谢孟峡, 刘媛. 红外光谱酰胺Ⅲ带用于蛋白质二级结构的测定研究[J]. *高等学校化学学报*, 2003(2): 226-231.
- [15] 樊红秀. 高品质人参膳食纤维制取工艺优化及其功能特性的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013: 33-36.
- [16] 王大为, 赵鑫, 董欣, 等. 发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(23): 111-117.
- [17] 黄正芬, 夏宁, 滕建文, 等. 猪皮蛋白粉的理化和功能特性研究[J]. *食品科技*, 2014(6): 145-150.
- [18] JOSHI M, ADHIKARI B, ALDRED P, et al. Interfacial and emulsifying properties of lentil protein isolate[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(3): 1 343-1 353.
- [19] 时文芳, 白榕, 吕丽爽, 等. 喷雾干燥和冷冻干燥莲子蛋白结构及其功能特性的比较[J]. *食品科学*, 2018(9): 95-101.
- [20] GONG Kui-jie, SHI Ai-min, LIU Hong-zhi, et al. Emulsifying properties and structure changes of spray and freeze-dried peanut protein isolate [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 170: 33-40.