

喷涂参数及带速对大豆蛋白液喷涂平均密度的影响

黄绍祥¹, 杨传民¹, 常淑英^{2,3}, 何思念¹

(1.天津商业大学, 天津 300134; 2.河北工业大学, 天津 300131;

3.天津电子信息职业技术学院, 天津 300350)

摘要: **目的** 研究大豆蛋白喷涂在硫酸纸上的平均密度, 以及喷涂参数和带速对喷涂平均密度的影响。**方法** 首先通过摄像机采集喷涂图像, 再运用 Matlab 软件处理计算大豆蛋白液所占面积比。面积比越大, 则大豆蛋白喷涂效果越好, 并利用响应面分析法研究喷涂参数及带速对喷涂平均密度的影响。**结果** 当液压为 159 Pa, 气压为 180 Pa, 带速为 11.93 mm/s 时, 大豆蛋白液所占面积比可达 79.9079%, 此时最佳。**结论** 单个因素中液压和带速对喷涂平均密度有显著影响。通过分析软件建立了大豆蛋白液所占面积比与喷涂参数及带速之间的关系模型, 并得到了最佳喷涂条件。

关键词: 大豆蛋白液; 平均密度; 喷涂参数; 带速; 图像处理

中图分类号: TB484.1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0078-05

Effects of Spraying Parameters and Belt Velocity on the Soybean Protein's Average Spraying Density

HUANG Shao-xiang¹, YANG Chuan-min¹, CHANG Shu-ying^{2,3}, HE Si-nian¹

(1.Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2.Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China;

3.Tianjin Electronic Information College, Tianjin 300350, China)

ABSTRACT: The work aims to research the average density of soybean protein spraying on the parchment paper and the influence of spraying parameters and belt velocity on the average spraying density. Firstly, the spraying image was collected by the camera and then the area ratio of soybean protein solution was processed and calculated by software Matlab. The larger the area ratio was, the better the spraying effect of soy protein was. The effect of spraying parameters and belt velocity on the average spraying density was also studied based on response surface analysis. When hydraulic pressure was 159 Pa, air pressure was 180 Pa and belt velocity was 11.93 mm/s, the area ratio of soybean protein solution could be up to 79.9079%, which was the best. Among the single factors, the hydraulic pressure and belt velocity has a significant effect on the average spraying density. The relational model between the area ratio of soybean protein solution and the spraying parameters & belt velocity is built through analysis software, and the optimal spraying conditions are identified.

KEY WORDS: soybean protein solution; average density; spraying parameters; belt velocity; image processing

蔬菜基材料及其原料来源丰富, 而且具有无污染、可食等优越性, 成为食品包装等领域研究的一

大热点^[1-3]。由于纯蔬菜纸热封合性能极差, 限制了其在包装行业的应用。为了赋予蔬菜纸更好的热

收稿日期: 2016-07-05

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目 (15JCZDJC34100); 天津市高校发展基金 (20130403); 天津市高等职业技术教育研究会课题 (XV307)

作者简介: 黄绍祥 (1989—), 男, 安徽人, 天津商业大学硕士生, 主攻食品包装机械。

通讯作者: 杨传民 (1959—), 男, 河北人, 天津商业大学教授、博导, 主要研究方向为包装机械和包装材料。

封性能,将大豆蛋白液与蔬菜纸复合,从而制作出具有热封性能的蔬菜纸^[4-6]。大豆蛋白膜具有良好的生物相容性和生物降解性,还具有营养特性、力学性能、阻氧气性能、阻湿性能和阻油性能^[7-8]。喷涂的均匀性是衡量产品涂装质量的重要指标之一,它对确保涂层功能、节约涂料等都有其重要的意义^[9]。

为了使蔬菜纸的热封合达到最佳效果,要求喷涂的大豆蛋白液尽可能均匀。由于刚制出来的蔬菜纸薄厚不均匀,不易做喷涂大豆蛋白液后的观察和分析,所以该实验采用耐高温的硫酸纸作为喷涂的基材。为了便于图像分析处理,在大豆蛋白液中加入等量的红色食用色素。为提高大豆蛋白喷涂的平均密度,将制备好的大豆蛋白液喷涂在硫酸纸上,在不同的液压、气压及带速下进行喷涂,采集图像,利用 Matlab 软件对图像进行分析计算,即得出大豆蛋白液所占的面积比,从而体现出喷涂的平均密度。

1 实验

1.1 材料与仪器设备

材料:大豆蛋白粉、水、聚羧酸盐、羧甲基纤维素钠、甘油、食用红色素。仪器设备:电子脉冲喷涂设备,斯普瑞喷雾系统上海有限公司;电动搅拌器 WH7401-60 型,天津市威化实验仪器厂;电热恒温水浴锅 DK-98-IIA,天津泰斯特仪器有限公司;流延机,天津商业大学自制;摄像机,佳能中

国有限公司。

1.2 大豆蛋白喷涂液的制备

制备过程:大豆蛋白、蒸馏水→加入四口圆底瓶中(80℃恒温水浴加热搅拌)→搅拌约 60 min→加入添加剂 CMC(质量分数为 1%)、甘油、聚羧酸盐(质量分数为 1%)→搅拌约 30 min→大豆蛋白喷涂液^[10]。

1.3 图像采集过程

首先制备大豆蛋白母液,其次将制备好的大豆蛋白母液加入电子脉冲喷涂设备的储液罐,调节好液压、气压及流延机的带速,喷涂过程在流延机的 80℃恒温保温箱烘干。取烘干后的硫酸纸,在喷枪走过的横向区域剪下为 45 cm×4 cm 的样条,并在样条上横向每隔 5 cm 剪裁出 5 cm×4 cm 的长方形纸片,利用摄像机进行图片采集,原始图像见图 1。

1.4 图像处理过程

从采集的图像的中心区域截取相同尺寸的图像,图片尺寸为 1089×1634,见图 2。利用 Matlab 的图像处理^[11-13]功能将截取好的图像进行灰度处理,转换后的灰度图像见图 3。对图 3 进行各像素点的提取,利用编好的程序进行分析计算,并把计算好的每一个横向样条下的 5 个长方形纸片对应的大豆蛋白涂层所占面积比进行平均值处理,即可得大豆蛋白液所占面积比,来表征喷涂平均密度。

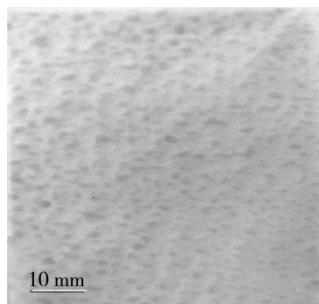


图 1 原始图像
Fig.1 Original image

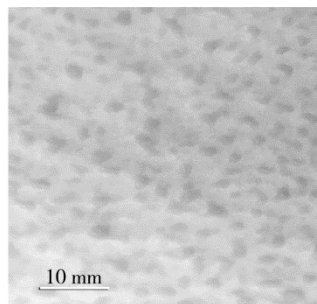


图 2 截取图像
Fig.2 Clipping image

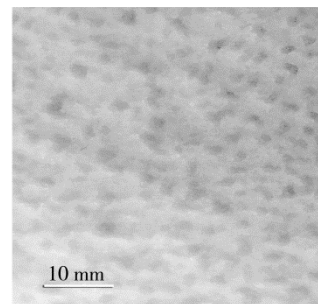


图 3 灰度图像
Fig.3 Gray image

1.5 实验方案

1)不同液压、气压及带速下的实验方案设计。由于在大豆蛋白液喷涂过程中,喷涂流量太大时,喷涂在纯蔬菜纸的表面会有倒流现象,因此流量必

须控制在 50 mL/min 之内^[14]。通过预实验得出带速在小于 9 mm/s 时,带基本不动,带速大于 24 mm/s 时,带开始打滑,选用参考带速在 9~21 mm/s。实验条件:电子脉冲喷涂设备的气压为 200 Pa,流延机的带速为 12 mm/s,改变液压(120, 140, 160,

180, 200, 220 Pa); 液压为 160 Pa, 带速为 12 mm/s, 改变气压 (120, 140, 160, 180, 200, 220 Pa); 液压为 160 Pa, 气压为 180 Pa, 改变带速(9, 12, 15, 18, 21 mm/s)。在以上条件下进行实验喷涂, 采集图像后, 运用 Matlab 软件对大豆蛋白液所占面积比进行计算, 即大豆蛋白液喷涂平均密度的评价。

2) 喷涂实验条件优化。实验利用 Box-Behnken 中心设计原理^[15], 综合单因素实验结果, 以液压、气压、带速 3 个因素, 大豆蛋白液所占面积比为响应值, 设计三因素三水平响应面分析, 实验因素水平见表 1。

表 1 响应面实验因素水平

Tab.1 The levels and factors of response surface experiment

水平	因素A 液压/Pa	因素B 气压/Pa	因素C 带速/(mm·s ⁻¹)
-1	150	170	10.5
0	160	180	12
1	170	190	13.5

2 结果与分析

2.1 液压对喷涂平均密度的影响

在喷涂过程中, 设定喷涂气压为 200 Pa, 带速为 12 mm/s, 当液压为 120, 140, 160, 180, 200, 220 Pa 时, 得到的大豆蛋白所占面积比分别为 67.2384%, 68.8200%, 76.4604%, 58.1244%, 45.4060%, 36.9248%。当液压小于 160 Pa 时, 随着液压的增大, 大豆蛋白液所占面积比呈上升的趋势; 当液压大于 160 Pa 时, 大豆蛋白液所占面积比反而下降; 当液压为 160 Pa 时, 所得大豆蛋白所占面积比最大。根据该实验结果, 优化实验中的液压应为 140 ~ 180 Pa。

2.2 气压对喷涂平均密度的影响

在喷涂过程中, 设定喷涂液压为 160 Pa, 带速为 12 mm/s, 当气压为 120, 140, 160, 180, 200, 220 Pa 时, 得到的大豆蛋白所占面积比分别为 53.6660%, 60.5820%, 63.9760%, 80.4100%, 76.4604%, 21.8080%。当气压小于 180 Pa 时, 随着液压的增大, 大豆蛋白液所占面积比呈上升的趋势; 当液压大于 180 Pa 时, 大豆蛋白液所占面积比反而下降; 当气压为 180 Pa 时, 所得大豆蛋白所占面积比最大。根据该实验结果, 优化实验中的液压

应为 160 ~ 200 Pa。

2.3 带速对喷涂平均密度的影响

在喷涂过程中, 设定喷涂液压为 160 Pa, 气压为 180 Pa 时, 当带速为 9, 12, 15, 18, 21 mm/s, 得到的大豆蛋白所占面积比分别为 59.8740%, 80.4100%, 70.6500%, 56.4700%, 32.1460%。当带速小于 12 mm/s 时, 随着带速的增大, 大豆蛋白液所占面积比呈上升的趋势; 当带速小于 12 mm/s 时, 大豆蛋白液所占面积比反而下降, 当带速为 12 mm/s 时, 所得大豆蛋白所占面积比最大。根据该实验结果, 优化实验中的带速应为 9 ~ 15 mm/s。

2.4 喷涂实验的优化结果及分析

响应面实验设计及结果见表 2, 用 X_1 , X_2 , X_3 分别表示液压、气压、带速 3 个自变量。

表 2 响应面实验设计与结果

Tab.2 Design and results of response surface experiment

试验号	X_1	X_2	X_3	大豆蛋白液所占面积比/%
1	0	0	0	80.137
2	1	0	1	63.906
3	0	0	0	79.766
4	1	-1	0	64.192
5	0	0	0	79.694
6	0	1	-1	70.118
7	1	0	-1	63.410
8	0	-1	1	69.574
9	0	0	0	80.112
10	-1	1	0	67.104
11	1	1	0	63.666
12	0	0	0	79.616
13	0	1	1	69.440
14	-1	0	-1	67.246
15	0	-1	-1	69.628
16	-1	0	1	64.174
17	-1	-1	0	65.336

由表 2 可知, 通过 Design Expert 8.0.6 软件分析得到的二次响应曲面模型拟合于方程见式(1)。

$$Y = -4433.64350 + 31.88452X_1 + 18.67447X_2 + 48.43100 + X_3 - 5.73500 \times 10^{-3}X_1X_2 + 0.059467X_1X_3 - 0.010400X_2X_3 - 0.098982X_1^2 - 0.048922X_2^2 - 2.34789X_3^2 \quad (1)$$

表 3 回归模型方差分析
Tab.3 Variance analysis of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	709.79	9	78.87	700.79	<0.0001*
X_1	9.43	1	9.43	83.80	<0.0001*
X_2	0.32	1	0.32	2.84	0.1360
X_3	1.37	1	1.37	12.15	0.0102*
X_1X_2	1.32	1	1.32	11.69	0.0111*
X_1X_3	3.18	1	3.18	28.28	0.0011*
X_2X_3	0.097	1	0.097	0.86	0.3833
X_1^2	412.53	1	412.53	3665.69	<0.0001*
X_2^2	100.78	1	100.78	895.48	<0.0001*
X_3^2	117.51	1	117.51	1044.14	<0.0001*
残差	0.79	7	0.11	—	—
失拟项	0.55	3	0.18	3.12	0.1504**
纯误差	0.24	4	0.059	—	—
总值	710.58	16	—	—	—

注：*为差异显著，显著水平 $P<0.05$ ；**为不显著。

由表 3 可知，带速对大豆蛋白液喷涂平均密度

影响一般显著，液压对大豆蛋白液喷涂平均密度影响极为显著，气压对大豆蛋白液喷涂平均密度影响不显著，液压×气压、液压×带速对大豆蛋白液喷涂平均密度影响一般显著，液压、气压、带速各个平方项对喷涂平均密度影响极显著。相关系数 R^2 为 0.9989，校正系数 R_{Adj}^2 为 0.9975，说明回归方程可以描述各因素与响应值之间的真实关系，从而通过回归方程确定喷涂条件和带速。

液压与气压的响应面见图 4a，液压与带速的响应面见图 4b，气压与带速的响应面见图 4c。实验中得到的大豆蛋白所占面积比越大时，说明喷涂的平均密度就越好。从图 4 可以看出，液压和带速对大豆蛋白液喷涂平均密度的影响极为显著，而气压对大豆蛋白液喷涂平均密度的影响较小。利用 Design Expert 8.0.6 软件获得了各个因素的最佳条件组合：液压为 159 Pa，气压为 180 Pa，带速为 11.93 mm/s，大豆蛋白液所占面积比的响应值为 79.9079%。

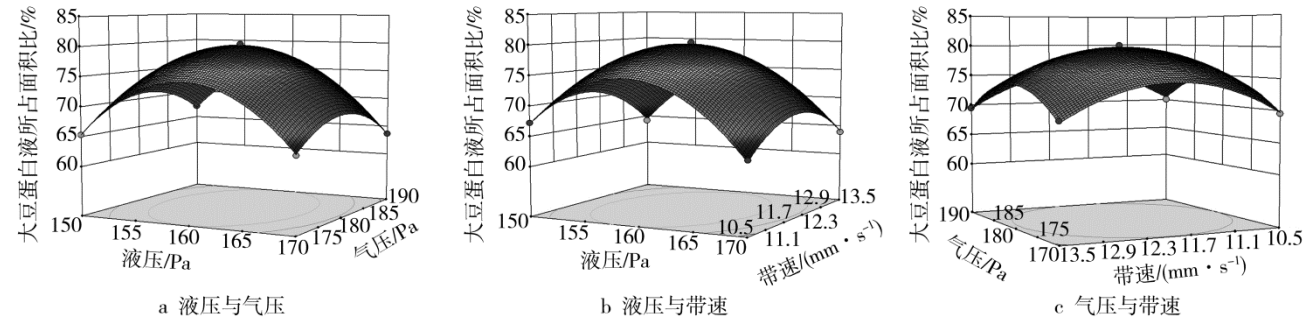


图 4 响应面
Fig.4 Response surface plot

3 结语

利用 Matlab 软件分析得出了大豆蛋白液所占面积比。在蔬菜复合纸喷涂过程中，得出大豆蛋白液在不同液压、气压、带速下喷涂平均密度的变化规律，其中对大豆蛋白液喷涂平均密度影响的重要性顺序从大到小分别是液压、带速、气压，并且三者之间交互影响显著。通过实验设计得到最佳的喷涂条件：液压为 159 Pa，气压为 180 Pa，带速为 11.93 mm/s，此时的大豆蛋白液所占面积比可达到 79.9079%。

参考文献：

[1] 张鹰，黄玩娜，梁素瑜，等. 蔬菜纸的研究进展[J].

农产品加工, 2010(3): 68—70.
ZHANG Ying, HUANG Wan-na, LIANG Su-yu, et al. Progress of Vegetable Paper Research[J]. Farm Products Processing, 2010(3): 68—70.
[2] MARTINS I M G. New Biocomposites Based on Thermoplastic and Bacterial Cellulose[J]. Compo sites Science and Technology, 2009, 69(13): 2163—2168.
[3] 王心宇，陈翠辉，杨传民. 干白菜蔬菜纸的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 1—2.
WANG Xin-yu, CHEN Cui-hui, YANG Chuan-min. Study on Preparation and Properties of Vegetable Paper of Dried Cabbage[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 1—2.
[4] 邵才，杨传民，王心宇. 大豆蛋白-芹菜复合纸力学性能及热封性能研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 1—3.
SHAO Cai, YANG Chuan-min, WANG Xin-yu. Research on Mechanical Properties and Heat Seal Performance of Soybean Protein-celery Composite Paper[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 1—3.

- [5] 侯红红. 蔬菜复合纸的热封性能及大豆蛋白液可喷性研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.
HOU Hong-hong. Study on the Heat Sealing Performance of Vegetable Compound Paper and the Spray Characteristics of Soybean Protein[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.
- [6] SHAO C, YANG C, WANG X, et al. Characterization of Soy Protein—celery Composite Paper Sheet: Rheological Behavior, Mechanical, and Heat-sealing Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(S2): 255—261.
- [7] 贾云芝, 陈志周. 可食性大豆分离蛋白膜研究进展[J]. 包装学报, 2011(3): 70—74.
JIA Yun-zhi, CHEN Zhi-zhou. Research Progress of Edible Soybean Protein Isolate[J]. Journal of Packaging, 2011(3): 70—74.
- [8] RHIM J W, MOHANTY K A, SINGH S P, et al. Preparation and Properties of Biodegradable Multilayer Films Based on Soy Protein Isolate and Poly (Lactide) [J]. American Chemical Society, 2006, 45(6): 3059—3066.
- [9] 陈雁, 颜华, 王力强, 等. 机器人匀速喷涂涂层均匀性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1210—1213.
CHEN Yan, YAN Hua, WANG Li-qiang, et al. Uniformity Analysis of Robot Spraying Coating[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition), 2010, 50(8): 1210—1213.
- [10] 邵才. 芹菜基可食性包装纸性能及其食品品质评价的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2012.
SHAO Cai. Edible Wrapper Based on Celery and Evaluation of Food Quality[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2012.
- [11] 涂望明, 魏友国, 施少敏. MATLAB 在数字图像处理中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2/3): 299—300.
TU Wang-ming, WEI You-guo, SHI Shao-min. Application of MATLAB in Digital Image Processing[J]. Micro Computer Information, 2007, 23(2/3): 299—300.
- [12] 邓巍, 丁为民, 张浩. MATLAB 在图像处理和分析中的应用[J]. 农机化研究, 2006(6): 194—198.
DENG Wei, DING Wei-min, ZHANG Hao. Application of MATLAB in Image Processing and Analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(6): 194—198.
- [13] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing, Third Edition[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [14] 侯红, 杨传民, 田少龙, 等. 蔬菜复合纸的大豆蛋白喷涂液雾化角度研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 33—38.
HOU Hong, YANG Chuan-min, TIAN Shao-long, et al. Spray Angle of Soy Protein Spray Coating Dispersions for Vegetable Composite Paper[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 33—38.
- [15] ALLAIX D L, CARBONE V I. An Improvement of the Response Surface Method[J]. Structural Safety, 2011, 33(2): 165—172.