

# 大豆蛋白喷涂液雾化粒子场实验

常淑英<sup>1,3</sup>, 杨传民<sup>2</sup>, 陈国营<sup>2</sup>, 黄绍祥<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300132; 2. 天津商业大学, 天津 300134; 3. 天津电子信息职业技术学院, 天津 300350)

**摘要:** **目的** 研究大豆蛋白喷涂液雾化场的粒度分布, 及喷涂过程中喷涂参数对大豆蛋白液雾化液滴粒径的影响, 从而在蔬菜复合纸覆膜成型过程中选择最优喷涂参数。**方法** 利用激光粒度仪测量不同喷涂参数下大豆蛋白液喷涂雾化场的粒度分布, 并通过数据分析软件 Origin 研究喷涂参数对大豆蛋白液喷涂雾化粒度的影响。**结果** 喷涂参数相同时, 喷涂雾化场中随着轴向距离的增加, 大豆蛋白液液滴粒径先显著减小后趋于稳定; 喷涂雾化场中同一轴向位置随着径向距离的增加, 大豆蛋白液液滴粒径呈减小趋势。在喷涂雾化场同一测量点, 随着喷涂气压的增大, 大豆蛋白液液滴粒径逐渐减小; 喷涂液压对大豆蛋白液液滴粒径没有显著影响。**结论** 喷涂气压为 0.2 MPa, 喷涂液压为 0.16 MPa, 喷涂雾化场轴向 30 cm 平面内, 大豆蛋白液雾化液滴粒径较小且均匀。

**关键词:** 蔬菜复合纸; 大豆蛋白; 激光粒度仪; 雾化粒子场

**中图分类号:** TB484.1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:**

## Experimental Study on Atomized Particle Field of Soy Protein Spraying Liquid

CHANG Shu-ying<sup>1,3</sup>, YANG Chuan-min<sup>2</sup>, CHEN Guo-ying<sup>2</sup>, HUANG Shao-xiang<sup>2</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300132; 2. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134; 3. Tianjin Electronic Information College, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The work aims to investigate the particle size distribution in the soy protein liquid atomization field and the influence of spray parameters on soybean protein liquid atomization droplet size in the process of spraying, thus to choose the optimal spray parameters in the process of preparing coated vegetable composite paper. Particle size distribution in atomization field of soybean protein liquid was measured under different spraying parameters by using laser particle size instrument, and the effects of spraying parameters on atomized particle size of the soy protein liquid was analyzed through the data analysis software Origin. When spraying parameters were certain, atomized droplet diameter of soy protein liquid significantly reduced before they were stable with the increase of axial distance in the spray atomization field. Soy protein liquid droplet diameter at the same axial location of the spray atomization field showed a trend of decrease with the increase of radial distance. Soy protein liquid droplet size at the same test point of spray atomization field decreased with the increase of spray air pressure. Impact of spray hydraulic pressure on soybean protein liquid droplet size was not significant. In conclusion, the soy protein liquid droplet size in the plane 30 cm from the nozzle in spray atomization field is smaller and more uniform when the spray air pressure is 0.2 MPa and the spray hydraulic pressure is 0.16 MPa.

**KEY WORDS:** vegetable composite paper; soy protein; laser particle size instrument; atomized particle field

近年来, 随着我国经济的迅速发展, 人们越来越注重产品的包装, 特别是对食品包装提出了更高的要求, 但石油基非降解食品包装材料的过度使用, 形成了难以处理的永久性垃圾, 对人们赖以生存的生态环境造成了严重危害, 因此发展易降解、无污染、可食的新型食品包装材料越来越受到国内外学者的重视<sup>[1-2]</sup>。天津商业大学研发的蔬菜纸作为绿色环保包装材料的同时又能满足人们对膳食纤维的需求, 对我国包装材料的发展具有重大意义。纯蔬菜纸作为包材不能满足热封性能要求, 需以纯蔬菜纸为基材进一步加工制备满足热封性能要求的蔬菜复合纸。大豆蛋白液的喷涂就是在蔬菜纸表面形成一层均匀的大豆蛋白膜, 制备具有包装性能的蔬菜复合纸<sup>[3-7]</sup>。

在大豆蛋白液喷涂于纯蔬菜纸的工作过程中, 大豆蛋白液粒度特性对纯蔬菜纸的覆膜质量有着

重要的影响,进而将影响到蔬菜复合纸的大豆蛋白膜均匀性、抗拉强度以及热封性能。改善大豆蛋白液的喷涂雾化特性能显著提高蔬菜复合纸上蛋白膜的均匀性,大豆蛋白液液滴粒径越小、尺寸分布越均匀,喷涂在纯蔬菜纸上的大豆蛋白液分布越均匀,成型的蔬菜复合纸的热封性能就越好。大豆蛋白液的喷涂雾化粒度场的研究是新型包装材料蔬菜复合纸研究的一个重要组成部分,选择合适的喷涂雾化参数(喷涂气压、喷涂液压)能够显著提高蔬菜复合纸的包装性能<sup>[8-10]</sup>。文中采用扇形电子脉冲喷涂雾化系统,精确控制喷涂雾化参数,并利用LSA-III型激光粒度仪测量大豆蛋白液喷涂雾化场粒度分布。大豆蛋白液液滴雾化粒度受到大豆蛋白液粘度、电子脉冲喷枪频率、喷涂流量、喷涂气压、喷涂液压等多种因素的影响,这里主要研究喷涂气压、喷涂液压对大豆蛋白液喷涂雾化场液滴粒径及其分布的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

材料:分离大豆蛋白、蒸馏水等原料,羧甲基纤维素钠(CMC)、甘油、聚羧酸盐等食品级添加剂。仪器:电子脉冲喷涂设备,斯普瑞喷雾系统上海有限公司;JJ-1精密定时电动搅拌器,上海皓庄仪器有限公司;HHD-2数显恒温水浴锅,上海皓庄仪器有限公司;二维伺服喷枪移动架,天津商业大学包装与机械工程中心;LSA-III型激光粒度仪,天津大学。

### 1.2 装置

这里采用LSA-III型激光粒度仪进行大豆蛋白喷涂液雾化特性实验,粒度数据采集系统见图1。整个实验装置包括激光粒度仪测量系统、大豆蛋白液喷涂雾化系统、二维伺服喷枪移动系统和废液回收装置。

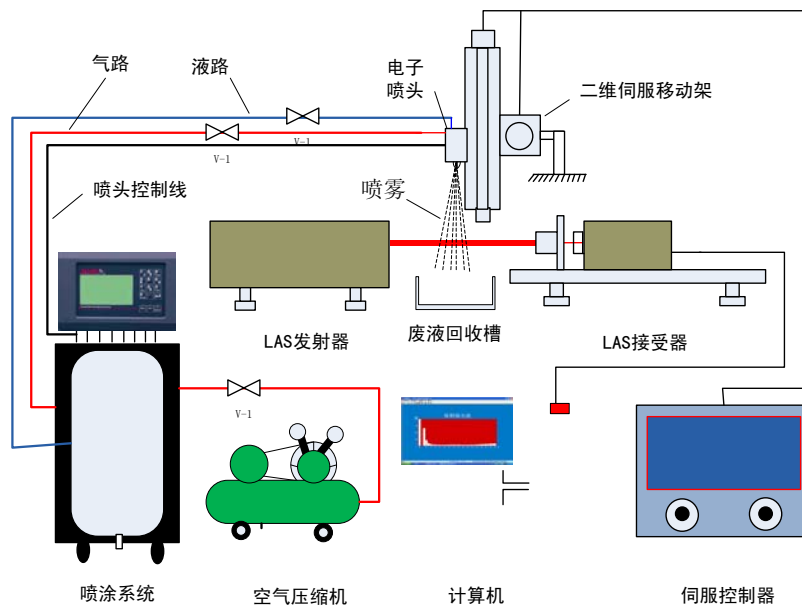


图1 粒度数据采集系统

Fig.1 Particle size data acquisition system

文中实验所用的LSA-III型激光粒度仪是基于弗朗和费衍射原理制成的,配备发射功率为5 MW、波长为632.8 nm、光束直径为12 mm的He-Ne激光连续发射器,焦距为300 mm的傅里叶镜头,以及32环光电探测器,粒径测量范围为5.4~592 μm。大豆蛋白液喷涂雾化系统喷枪为扇形两相流电子脉冲喷枪,配有MSM-2250喷枪控制系统实现喷涂参数的精确控制,捷豹牌10HP空气压缩机用来提供压力,储液罐的最大容积为40 L并具备加热功能。

鉴于激光粒度仪的工作原理，为了能够检测到喷雾场任意一点的粒度分布情况，需要喷枪移动来配合激光粒度仪测量喷雾场中不同位置的点。文中实验自行设计 1 个伺服二维移动平台，平台的固定部分是由铝型材搭接而成的“龙门式”框架，平台的运动部分由 2 台伺服电机带动丝杠螺母机构组成，分别控制喷枪在垂直于激光粒度仪的平面内按竖直或水平方向移动。喷雾场底部有回收装置专门收集经喷枪喷出的大豆蛋白液，防止对实验环境产生污染。

### 1.3 方案

设定大豆蛋白液粘度为 0.0261 Pa·s、喷枪电子脉冲频率为 80 Hz、喷涂流量为 50 mL/min 恒定不变，改变喷涂气压 (0.12, 0.16, 0.20, 0.24 MPa) 与喷涂液压 (0.12, 0.16, 0.20, 0.24 MPa)，采集在不同喷涂参数条件下大豆蛋白液雾化粒度信息，同时为研究喷雾场空间不同位置大豆蛋白液粒度分布情况，选取喷孔的轴向以及径向布置多个不同测点进行喷雾粒度分布的测量。测量位置见图 2，利用伺服二维移动平台调节喷枪的位置，使喷枪处于预定的测点位置，测量喷雾粒子场在此位置的粒度分布。

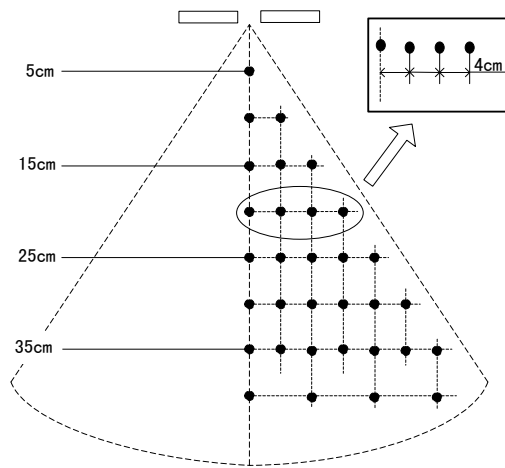


图 2 喷涂雾化场测量点

Fig.2 Spray atomization field measurement point

## 2 结果与分析

### 2.1 大豆蛋白喷涂液雾化粒度

喷涂气压对大豆蛋白喷涂液雾化粒度的影响见图 3a，其中 SMD 为索特平均直径，其物理意义为一假定的液滴直径使其体积于表面积之比等效于颗粒群的总体积与总表面积之比； $P_a$  代表喷涂气体压力； $P_L$  代表喷涂液体压力。喷涂液压为 0.12 MPa，当气压为 0.12 MPa 时，大豆蛋白液液滴的 SMD 为 36.84  $\mu\text{m}$ ；当气压为 0.20 MPa 时，液滴的 SMD 为 24.86  $\mu\text{m}$ 。观察图 3a 中的 4 条曲线可以得出喷涂时气压对大豆蛋白液的雾化液滴粒径的影响存在一定规律：雾化液滴 SMD 随着气压升高逐渐变小；当气压大于 0.2 MPa 以后，SMD 减小速率并趋于稳定。在气压较小时，SMD 随气压的增大而减小。这是由于在雾化过程中助力雾化气体与液滴混合并相互摩擦冲撞，液滴从助力雾化气体吸收大量能量，增加了自身动能，提高了运动速度。喷枪出口处液滴速度的提高会促使液滴进一步产生二级雾化，雾化液滴 SMD 从而变小。当液滴雾化到一定程度时，表面张力产生的附加压力远大于液滴所承受的气体动力，液滴表面张力和粘性力组成的受力平衡很难被打破，因此随着喷涂气压的继续增大，雾化液滴 SMD 变慢，雾化效果改善不太明显<sup>[11-15]</sup>。

喷涂液压对大豆蛋白喷涂液雾化粒度的影响见图 3b，其中 4 条曲线的变化趋势基本相同，但随着喷涂气压的增大变化趋势变得不明显。当喷涂气压为 0.12, 0.16 MPa 时，大豆蛋白液液滴的 SMD 随着喷涂液压从 0.12 MPa 增大到 0.16 MPa 时逐渐增大，随着喷涂液压  $P_L$  继续增大，从 0.16 MPa

增大到 0.24 MPa, 大豆蛋白液液滴的 SMD 值没有明显的变化趋势, 而在一定的 SMD 值范围内微小浮动。当喷涂气压为 0.20 MPa 时, 喷涂液压从 0.12 MPa 增大到 0.24 MPa, 大豆蛋白液液滴的 SMD 先增大后趋于稳定。

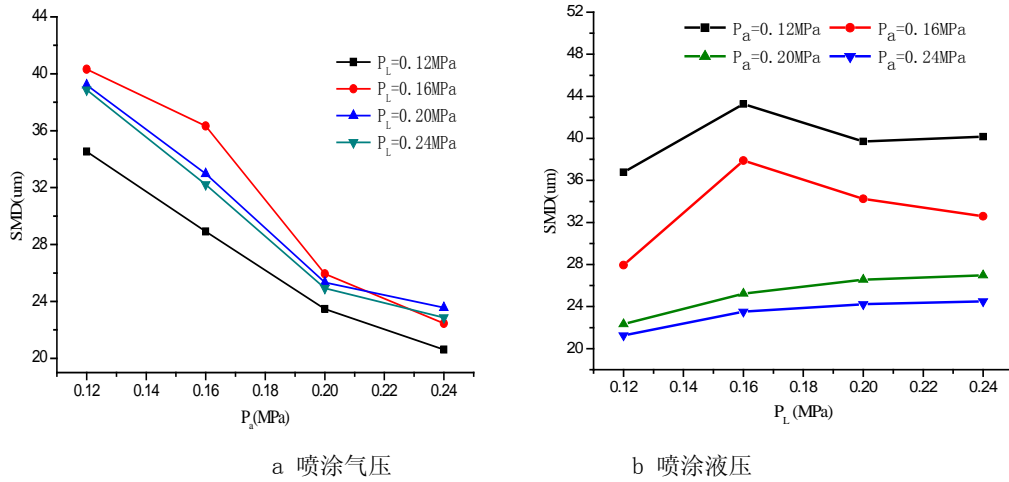


图 3 喷涂气压和喷涂液压对大豆蛋白喷涂液 SMD 的影响

Fig. 3 Effects of spraying pressure and spraying hydraulic on soybean protein liquid spraying SMD

喷涂气压对液滴尺寸分布的影响见图 4a,  $R_N(\%)$  代表横坐标中相应液滴尺寸大小的液滴数目占总的测量的液滴数目的比例,  $D$  表示液滴的直径。其中 4 条曲线存在相同的变化趋势, 雾化液滴粒径分布规律和正态分布非常相似, 存在明显的波峰, 波峰附近的大豆蛋白液雾化液滴粒径占比最大, 波谷附近两侧边占比最小。波峰附近雾化液滴的粒径也可以代表测量点雾化质量。对 4 条曲线进行比较, 随着喷涂气压的增大, 波峰位置向左偏移, 说明喷涂气压越大, 大部分雾化液滴粒径变小, 雾化效果越好。曲线随着喷涂气压的提高, 雾化液滴粒径向波峰聚集, 说明喷涂气压的提升, 有助于改善大豆蛋白液滴的雾化均匀性。

喷涂液压对液滴尺寸分布的影响见图 4b, 图 4b 中 4 条曲线与图 4a 中曲线的变化趋势大致相同, 但对比图 4b 中 4 条曲线, 随着喷涂液压的增大, 以 0.16 MPa 为转折点, 峰值前期偏移量较大后无明显偏移, 说明喷涂液压小于 0.16 MPa 时, 雾化液滴粒径所受影响较为显著, 喷涂液压大于 0.16 MPa 以后, 喷涂液压的增大对雾化液滴粒径影响不大。

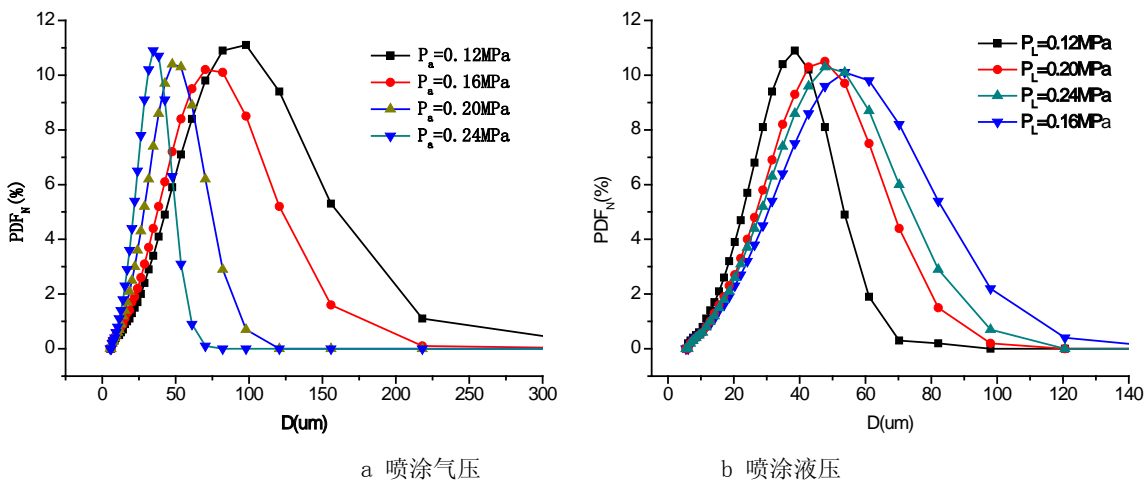


图 4 喷涂气压和喷涂液压对液滴尺寸分布的影响

Fig.4 Effects of spraying pressure and spraying hydraulic on droplet size distribution

## 2.2 大豆蛋白液喷涂雾化场粒度分布

在喷涂液压均为 0.20 MPa 而喷涂气压不同时, 喷枪中心轴线上大豆蛋白液液滴 SMD 随轴向距离变化的分布见图 5a。可以看到大豆蛋白液液滴的 SMD 随着轴向距离的增加呈减小趋势, 减小到轴向 30 cm 后趋于稳定。这是由于以一定的初速度离开喷枪后的液滴在气动力作用下速度迅速衰减, 同时破碎成小液滴, 当液滴尺寸衰减到一定值后, 很难再次破碎。从图 5a 中可以发现在 0.20 MPa 喷涂气压下大豆蛋白液的轴向 SMD 值在 28.0~53.2  $\mu\text{m}$  之间, SMD 在喷嘴处较大, SMD 随着轴向距离的增加而减小, 最后稳定在 28  $\mu\text{m}$  左右。比较大豆蛋白液液滴轴向 SMD 在不同喷涂气压下的分布, 变化趋势大致相同, 在距离喷枪很近的地方, 喷涂气压较大时雾化液滴 SMD 较小。

在喷涂液压为 0.20 MPa 而喷涂气压不同时, 在大豆蛋白液喷涂雾化场距离喷枪 30 cm 处, 大豆蛋白液液滴 SMD 随径向距离变化的分布见图 5b, 反映喷涂气压对雾化液滴粒度径向分布的影响, 从图 5b 中可以看出大豆蛋白液喷雾液滴的径向 SMD 在不同的喷涂气压下分布趋势相当, 大豆蛋白液液滴 SMD 随着径向距离的增加呈减小趋势, 而且随着距离的增加下降速率减小。在同一径向测量位置, 雾化液滴 SMD 随喷涂气压增大而减小, 在距离喷涂雾化场中心轴线较远处减小趋势尤为明显, 比如当喷涂气压分别为 0.12, 0.20 MPa 时, 在径向距离为 4 cm 处, 大豆蛋白液液滴的 SMD 值分别为 33.95, 25.89  $\mu\text{m}$ , 两者 SMD 差值为 8.06  $\mu\text{m}$ , 在径向距离为 16 cm 处, 当喷涂气压分别为 0.12, 0.20 MPa 时, 大豆蛋白液液滴的 SMD 值分别为 26.05, 21.01  $\mu\text{m}$ , 两者 SMD 差值为 5.04  $\mu\text{m}$ , 相比径向距离 4 cm 处的差值小很多。

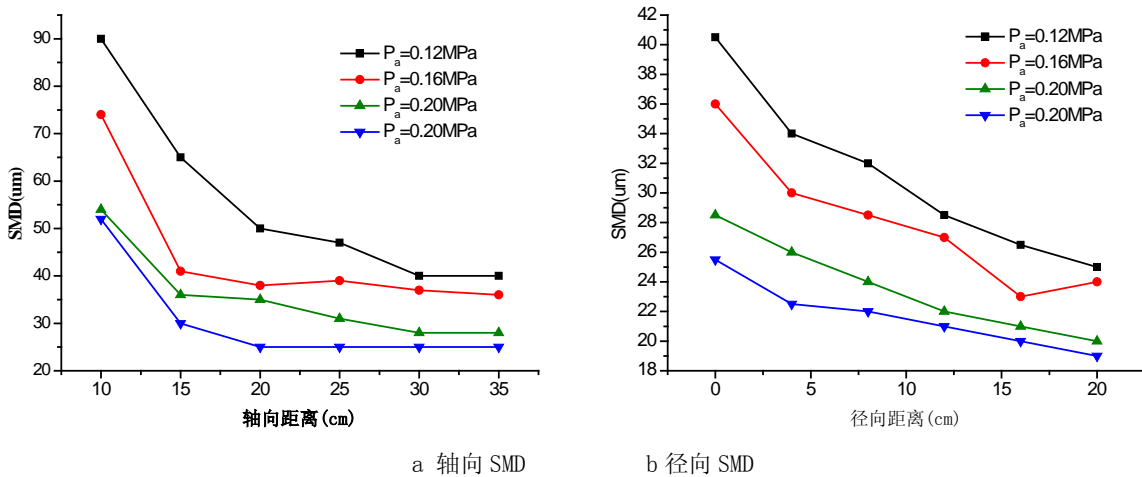


图 5 喷涂气压对轴向和径向 SMD 分布的影响

Fig. 5 Effects of spraying pressure and spraying hydraulic on the axial distribution of SMD

喷涂液压为 0.20 MPa, 喷涂气压为 0.20 MPa 时, 轴向距离分别为 15 cm 和 30 cm 处的径向平面内雾化液滴 SMD 分布见图 6, 可以看到, 雾化液滴 SMD 随着径向距离的增加呈现减小趋势。不同轴向距离雾化液滴 SMD 差值在径向距离 4 cm 处比径向距离 8~16 cm 处较大, 说明 SMD 分布在靠近喷涂雾化轴心线处相对喷涂雾化场边缘处随轴向距离变化的差异更为明显。

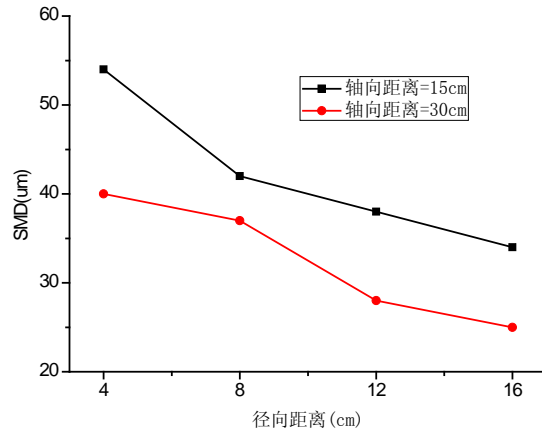


图6 不同轴向位置下径向 SMD 分布

Fig.6 Radial distributions of SMD under different axial position

### 3 结语

利用激光粒度仪对大豆蛋白喷涂液雾化场粒度测量, 并分析喷涂参数对雾化场粒度的影响得出以下结论: 在喷涂液压一定时, 大豆蛋白液喷涂雾化场中雾化颗粒的索特平均直径随着喷涂气压的增大逐渐减小, 且其尺寸分布更趋均匀; 在喷涂气压一定时, 当喷涂液压从 0.12 MPa 增大到 0.16 MPa 时, 随着喷涂液压的增加大豆蛋白液喷涂雾化场中雾化颗粒的 SMD 有增大的趋势, 且液滴尺寸分布更均匀, 喷涂液压从 0.16 MPa 增大到 0.24 MPa 时, 大豆蛋白液喷涂雾化场中雾化颗粒的 SMD 没有明显变化; 当喷涂参数不变时, 大豆蛋白液喷涂雾化场中雾化颗粒的 SMD 随着轴向距离的增加逐渐减小, 并且在轴向距离 30 cm 后趋于稳定, 同一轴向平面内, 随着径向距离的增加雾化颗粒的 SMD 值也呈先减小后稳定的趋势, 在距离喷枪较远的轴向平面内, 雾化颗粒的粒径较均匀。

基于以上分析可以看出, 大豆蛋白液喷涂雾化场液滴的尺寸分布与喷涂气压和喷涂液压之间有很紧密的联系。雾化规律的实验研究为大豆蛋白液喷涂雾化粒度场理论模型的建立, 以及蔬菜复合纸制备工艺参数的选择提供了重要参考。

### 参考文献:

- [1] 黄巍, 孙靛. 食品包装材料安全控制的现状研究[J]. 塑料包装, 2012(3): 26—27.  
HUANG Wei, SUN Liang. Research on the Current Situation of Food Packaging Materials Safety Control[J]. Plastic Packing, 2012(3): 26—27.
- [2] 郭文静, 鲍甫成, 王正. 可降解生物质复合材料的发展现状与前景[J]. 木材工业, 2008(1): 12—14.  
GUO Wen-jing, BAO Fu-cheng, WANG Zheng. An Overview of Natural Fiber and Biodegradable Plastics Composites[J]. China Wood Industry, 2008(1): 12—14.
- [3] 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.
- [4] 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(2): 255—261.
- [5] 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.

- [6] 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, YANG Xin-yu. Research on Mechanical Properties and Heat Seal Performance of Soybean Protein-celery Composite Paper[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 1—3.
- [7] 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.
- [8] 唐洪武, 唐立模, 陈红, 等. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
TANG Hong-wu, TANG Li-mo, CHEN Hong. Modern Flow Measurement Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [9] 黄素逸. 动力工程现代测试技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.  
HUANG Su-yi. Modern Measuring Techniques for Power Engineering[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.
- [10] 赵青秀, 李雅宁. 激光粒度分析仪及其应用刍议[J]. 生命科学仪器, 2010, 8(2): 51—53.  
ZHAO Qing-xiu, LI Ya-ning. Series the Laser Particle Size Analyzer and Application[J]. Life Science Instruments, 2010, 8(2): 51—53.
- [11] 姜光军, 张煜盛. 乙醇/柴油混合燃料喷雾粒度分布特性研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(1): 39—42.  
JIANG Guang-jun, ZHANG Yu-sheng. Study on Droplet Size Distribution of Ethanol/Diesel Blend Spray[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(1): 39—42.
- [12] 曹建明. 液体喷雾学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.  
CAO Jian-ming. Liquid Sprays[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [13] 曹建明. 空气雾化喷枪特征参数的研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
CAO Jian-ming. Research of Air Atomizing Nozzle Characteristic Parameters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [14] 曹建明, 朱辉, 郭广祥. 空气助力改善液滴雾化质量的研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(1):56—60.  
CAO Jian-ming, ZHU Hui, GUO Guang-xiang. Study on Air Assant to Improve Quality of Droplet Atomization[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(1):56—60.
- [15] 张旭升, 李理光, 邓俊, 等. 生物柴油喷雾特性的实验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(2):172—176.  
ZHANG Xu-sheng, LI Li-guang, DENG Jun, et al. An Experimental Study of Bio-Diesel Spray Characteristics[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(2):172—176.

收稿日期: 2016-04-16

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

作者简介: 常淑英 (1982—), 女, 河北人, 河北工业大学博士生, 主要研究方向为复杂机械系统设计。

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。

18622159661      115463926@qq.com