

大豆蛋白液喷雾场粒度分布变化

任少伟, 杨传民, 陈国营, 何思念, 郭杰
(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 研究大豆蛋白液喷雾场粒度分布的变化规律, 为选择一个合适的蔬菜纸喷涂面提供实验数据, 以期得到质量好的蔬菜复合纸覆膜。**方法** 将大豆蛋白喷涂雾化场网格化, 使用粒度仪分别测量各个区域的粒径和粒度占比分布。**结果** 雾化场轴向距离从 $H=10$ cm 处的 $95\ \mu\text{m}$ 左右, 到 $H=15$ cm 处的 $85\ \mu\text{m}$ 左右, 到 $H=20$ cm 处的 $65\ \mu\text{m}$ 左右, 再到 $H=30$ cm 处的 $45\ \mu\text{m}$ 左右, 最大粒径占比范围逐渐降低; 雾化场径向距离从 $L=4$ cm 处的 $40\sim 50\ \mu\text{m}$, 到 $L=8$ cm 处的 $35\sim 40\ \mu\text{m}$, 到 $L=12$ cm 处的 $35\sim 40\ \mu\text{m}$, 再到 $L=16$ cm 处的 $30\sim 35\ \mu\text{m}$, 最大粒径占比范围也逐渐降低; 在相同的喷涂气压、喷涂液压下, 随着轴向距离的增加, 大豆蛋白液液滴粒径分布范围的减小, 大粒径大豆蛋白液液滴的比例逐渐减少, 粒径分布朝着小粒径方向靠拢, 大豆蛋白液液滴粒径分布曲线越来越陡峭; 在喷涂气压、喷涂液压不变的情况下, 仅仅改变大豆蛋白液的粘度, 在相同的喷雾场位置随着大豆蛋白液粘度的减小, 粒度分布朝小粒径方向靠拢, 小粒径大豆蛋白液液滴比例逐渐减小。**结论** 喷涂气压越大、大豆蛋白液粘度越小, 雾化效果越好, 而喷涂液压对雾化效果影响不大; 大豆蛋白液喷雾场液滴的粒径分布随着喷雾贯穿距离的增加, 小粒径液滴所占比例逐渐增加, 粒径分布曲线朝小粒径方向发展, 同时随着垂直与喷雾轴心线径向距离的增加, 小粒径液滴所占百分比也增加, 粒径分布曲线朝着小粒径方向发展。

关键词: 大豆蛋白液; 激光粒度仪; 粒度分布

中图分类号: TB484.1; TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)17-0046-07
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.008

Particle Size Distribution Change of Soybean Protein Spray Field

REN Shao-wei, YANG Chuan-min, CHEN Guo-ying, HE Si-nian, GUO Jie
(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to study the change law of spray field particle size distribution of soybean protein solution, to provide experimental data for choosing a suitable vegetable paper coating surface, which can get vegetable per composite film of good quality. The spray atomization field of soybean protein was grid-enabled. The particle sizes and particle size ratio distributions of each area were respectively measured by the particle size analyzer. The axial distance of the atomization field was from about $95\ \mu\text{m}$ at $H=10$ cm, to about $85\ \mu\text{m}$ at $H=15$ cm, to about $65\ \mu\text{m}$ at $H=20$ cm, and then to about $45\ \mu\text{m}$ at $H=30$ cm. The maximum particle size ratio was gradually decreased, and the radial distance of the atomization field was from $40\sim 50\ \mu\text{m}$ at $L=4$ cm, to $35\sim 40\ \mu\text{m}$ at $L=8$ cm, to $35\sim 40\ \mu\text{m}$ at $L=12$ cm, and then to $30\sim 35\ \mu\text{m}$ at $L=16$ cm. The maximum particle size ratio was gradually reduced; under the same spray pressure and spray hydraulic pressure, as the axial distance increased, the particle size distribution range of the soybean protein solution droplets decreased, and the ratio of large-particle size soybean protein solution droplets was gradually decreased. The particle size distribution approached the direction of the small particle size, and the particle size distribution curve of the soybean protein solution droplets became steeper and steeper. When the spray pressure and the spray hydraulic pressure were constant, only the viscosity of the soybean protein solution was changed. At the same spray field position, as the viscosity of the

收稿日期: 2018-03-29

基金项目: 天津市高校发展基金 (20130403)

作者简介: 任少伟 (1991—), 男, 天津商业大学硕士生, 主攻生物基材料。

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

soybean protein solution decreased, the particle size distribution approached the direction of small particle size, and the proportion of the small particle size soybean protein solution droplets was gradually decreased. The higher the spray pressure, the smaller the viscosity of the soybean protein solution, and the better the atomization effect. The spray hydraulic pressure has little effect on the atomization effect. The particle size distribution of the soybean protein solution spray field droplets gradually increases with increase of the spray penetration distance and the proportion of the small particle size droplets, and the particle size distribution curve develops toward the small particle size. At the same time, as the radial distances of the vertical axis and spray axis increase, the percentage of small particle size droplets also increases, and the particle size distribution curve develops toward the small particle size.

KEY WORDS: soybean protein solution; laser particle size analyzer; particle size distribution

随着经济的发展，包装变得越加普遍，越加重要，包装材料的可降解性、安全性和可食性也越来越受到国内外学者的重视^[1-2]。综合上述特性和现有国内外发展的技术，蔬菜纸被国内外学者认为是现有石油基包装材料的最佳替代品。蔬菜纸不仅具有易降解、无污染的特性，还极大地丰富了包装形式，但蔬菜纸的热封性一直难以达到包装材料的要求。蔬菜纸覆膜越均匀，一致性越高，蔬菜纸的热封性越强，抗剪切力越强，抗撕裂强度越高。文中拟研究大豆蛋白粒径对喷涂均匀一致性的影响，为制备具有一定包装性能的蔬菜复合纸提供理论基础^[3-7]。通过研究喷雾场粒度的分布变化，找到合适的、最佳的喷涂界面，能够极大地提高蔬菜纸覆膜的均匀一致性，从而改善蔬菜纸的包装性能^[8-15]。

文中采用食品级脱脂大豆蛋白粉、医用蒸馏水、医用甘油、食品级聚羧酸盐、食品级羧甲基纤维素钠，按照一定比例制备大豆蛋白母液。在粒度数据采集系统的基础上，利用粒度仪测量大豆蛋白液液滴雾化效果和粒度分布变化。

1 实验

1.1 实验材料

主要实验材料有食品级脱脂大豆蛋白粉、医用蒸馏水、医用甘油、食品级聚羧酸盐、食品级羧甲基纤维素钠。

1.2 实验仪器：

主要实验仪器：LSA-III 型激光粒度仪，天津大学。

1.3 实验装置

实验装置见图 1。

1.4 实验方案

在喷涂流量为 50 mL/min、电子脉冲喷涂设备各项参数恒定不变 ($P_a=0.20\text{ MPa}$, $P_L=0.20\text{ MPa}$, 脉冲频率 80 Hz)，且大豆蛋白配比不变时，测得大豆蛋白液粘度 $\eta=0.0261\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。采集不同位置处大豆蛋白液粒度分布，见图 2。

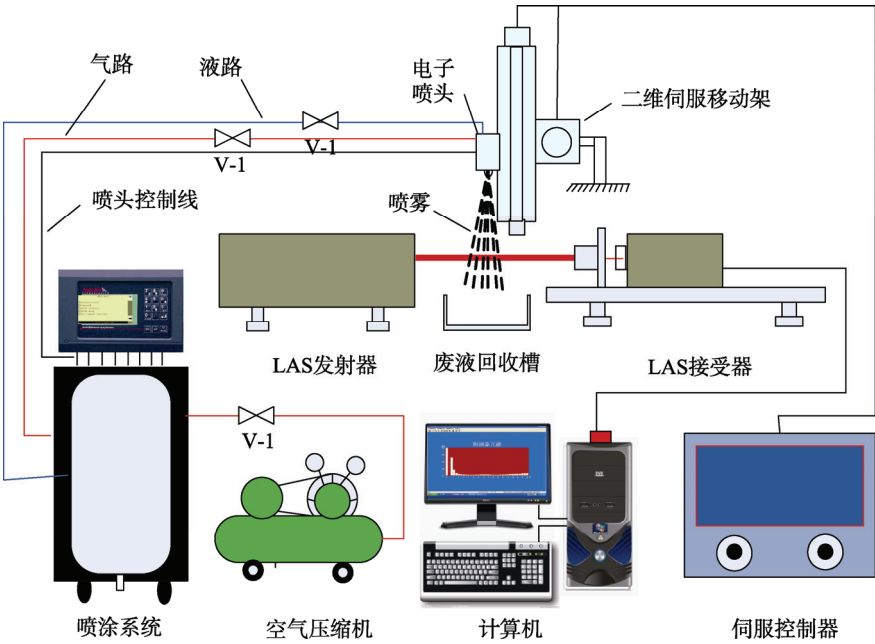


图 1 粒度数据采集系统
Fig.1 Particle size data acquisition system

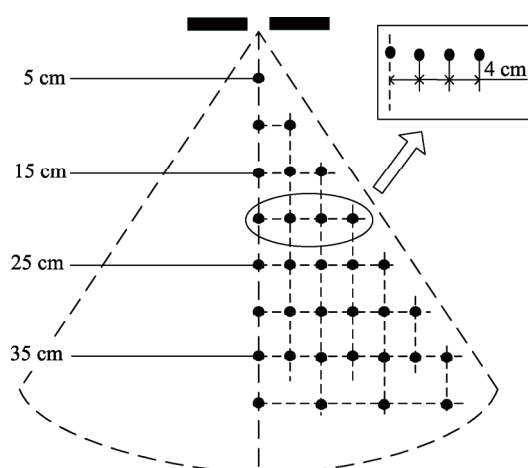


图 2 喷涂雾化场测量点

Fig.2 Spray atomization field measurement point

2 实验分析

2.1 喷雾场轴心线上粒度分布分析

在上述实验定量条件下,测量粒度占比分布,绘制粒度分布图,见图 3。雾化场轴向距离从 $H=10$ cm 处的 $95\ \mu\text{m}$ 左右,到 $H=15$ cm 处的 $85\ \mu\text{m}$ 左右,到

$H=20$ cm 处的 $65\ \mu\text{m}$ 左右,再到 $H=30$ cm 处的 $45\ \mu\text{m}$ 左右,最大粒径占比范围逐渐降低。从 $H=10$ cm 到 $H=30$ cm,粒径分布范围从 $8\sim 220\ \mu\text{m}$ 到 $8\sim 120\ \mu\text{m}$,再到 $8\sim 100\ \mu\text{m}$,粒径分布逐渐趋于小粒径范围,且粒径分布范围减小,液滴粒度分布较为均匀。这是由于空气与液滴混合,气液两相流相互作用,在空气的作用下使液滴快速破裂和撞击,吸收了大量的动能,从而发生二级雾化,产生了更小的液滴,轴向距离越远空气阻力越大,液滴分布趋于小粒径范围分布。

2.2 喷雾场轴心线一定时径向粒度分布变化分析

在上述实验定量条件下,测量粒度占比分布,绘制粒度分布图,见图 4。分析粒径分布范围,见表 1。从表 1 中可以看出,沿着轴向距离 30 cm 处的径向方向,随着径向距离的增加粒径分布范围逐渐减小,粒径分布向小粒径范围靠拢。在图 4a 中,粒径大于 60

表 1 粒径分布分析

Tab.1 Analysis of particle size distribution

径向距离 L/cm	4	8	12	16
粒径分布范围/ μm	8~85	8~70	8~65	8~60

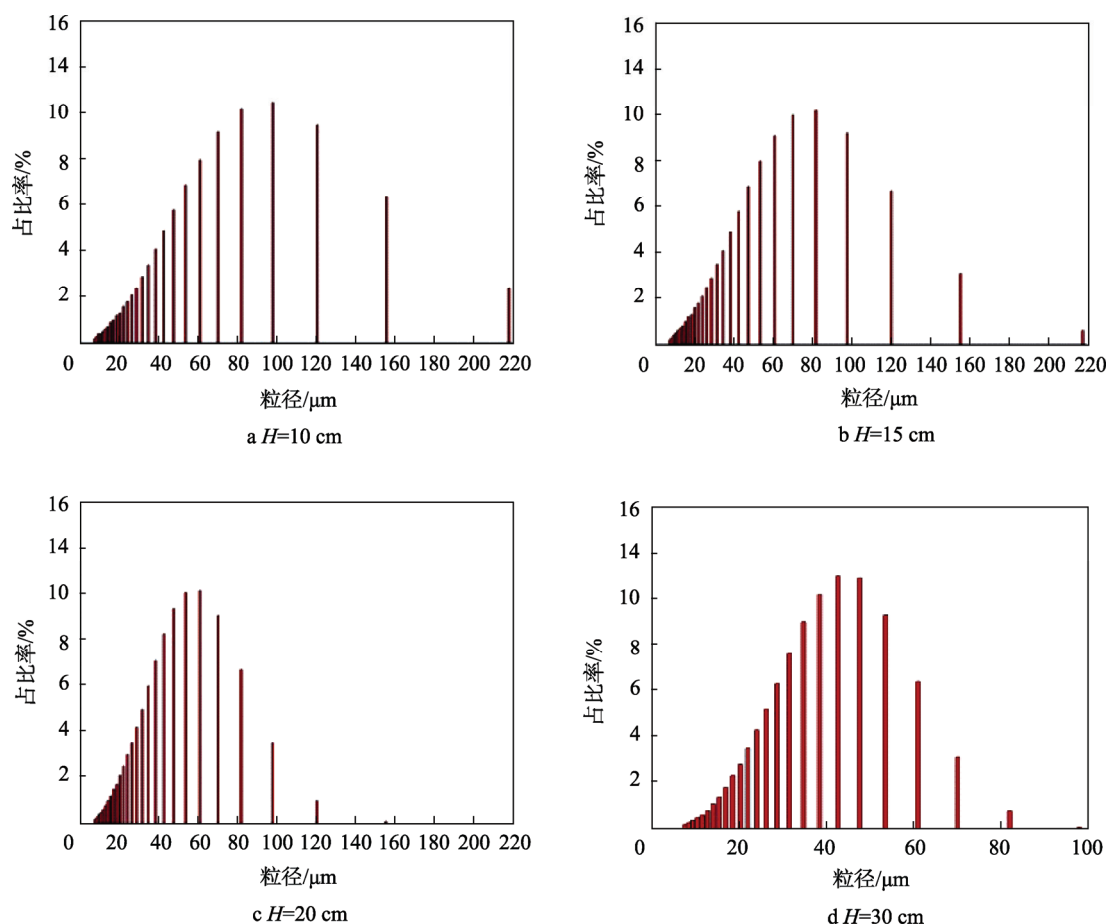


图 3 轴向粒度微分分布

Fig.3 Axial differential particle size distribution

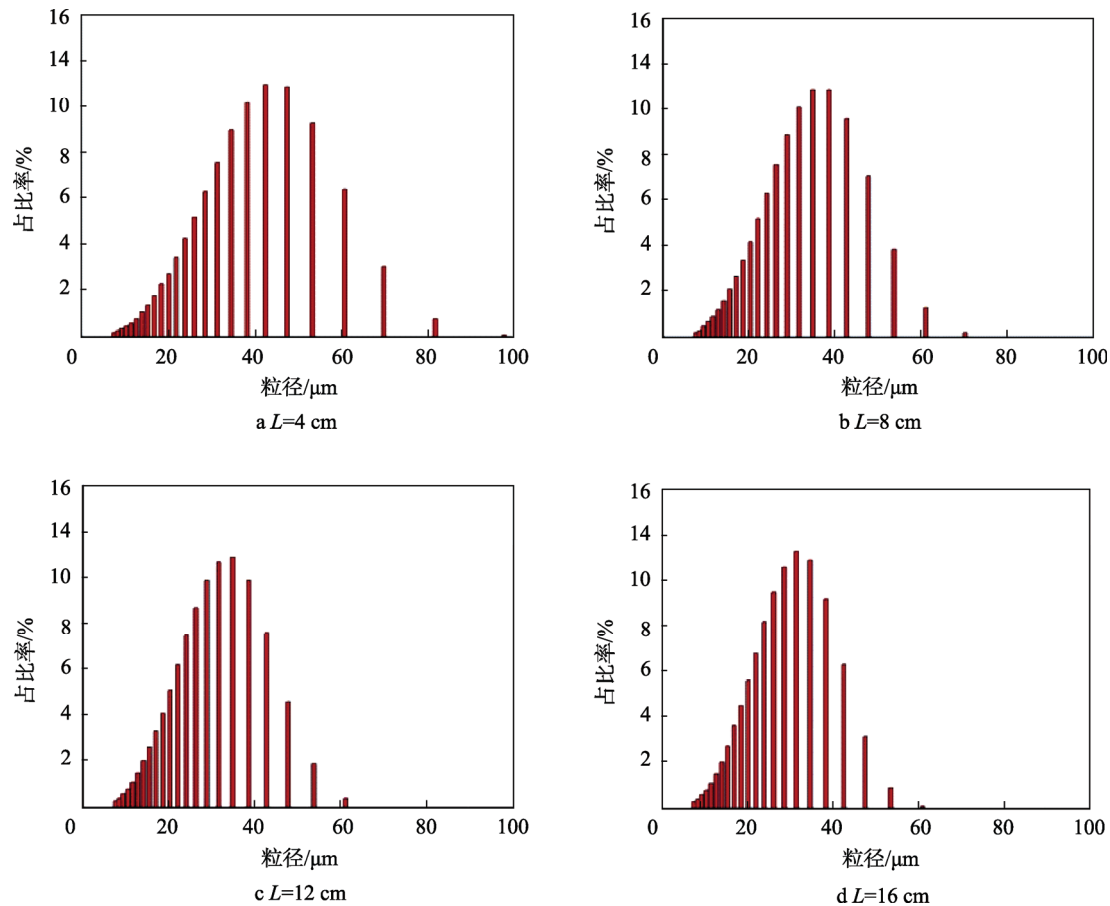
图 4 径向粒度微分分布 ($H=30\text{ cm}$)

Fig.4 Radial differential particle size distribution

μm 的大豆蛋白液液滴大约占的比例为 10%。在图 4b 中, 粒径大于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的大豆蛋白液液滴大约占的比例为 1.5%。在图 4c 中, 粒径大于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的大豆蛋白液液滴大约占的比例为 0.5%。在图 4d 中, 粒径高于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的大豆蛋白液液滴大约占的比例为 0.2%。随着喷雾径向距离的增加, 占整个粒径分布比例最大的粒径范围逐渐降低, 从径向距离 L 为 4 cm 处的 $40\text{ }\mu\text{m}$ 至 $50\text{ }\mu\text{m}$, 到 L 为 8 cm 处的 $35\text{ }\mu\text{m}$ 到 $40\text{ }\mu\text{m}$, 到 L 为 12 cm 处的 $35\text{ }\mu\text{m}$ 到 $40\text{ }\mu\text{m}$, 再到 L 为 16 cm 处的 $30\text{ }\mu\text{m}$ 到 $35\text{ }\mu\text{m}$ 。通过对比图 4, 可以明显地反应出喷涂雾化场在轴线距离一定时, 随着径向距离的增加, 大豆蛋白液液滴粒度逐渐减小, 且粒度分布更加均匀。

在喷涂气压 $P_a=0.24\text{ MPa}$, 喷涂液压 $P_L=0.20\text{ MPa}$, 大豆蛋白液粘度 $\eta=0.0261\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 喷涂雾化场轴心线上轴向距离分别为 $10, 15, 20, 30\text{ cm}$ 处的粒度微分分布见图 5。在相同的喷涂气压、喷涂液压下, 随着轴向距离的增加, 大豆蛋白液液滴粒径分布范围减小, 大粒径大豆蛋白液液滴的比例逐渐减少, 粒径分布朝着小粒径方向靠拢, 大豆蛋白液液滴粒径分布曲线越来越陡峭, 这与喷涂气压为 0.16 MPa 时的变化趋势一致。对比图 5d 和图 2d 发现, 喷涂气压的增大能提高小粒径大豆蛋白液液滴所占比例, 喷涂气压

$P_a=0.16\text{ MPa}$ 时大豆蛋白液液滴粒径主要分布在 $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 而喷涂气压 $P_a=0.24\text{ MPa}$ 时大豆蛋白液液滴粒径主要分布在 $30\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 喷涂气压 $P_a=0.24\text{ MPa}$ 下的大豆蛋白液液滴分布范围要窄, 粒径高于 $60\text{ }\mu\text{m}$ 时的大豆蛋白液液滴的比例较小, 粒度分布曲线也比较陡峭。这是由于液体在经过空气助力的作用下快速破裂, 液滴吸收了大量动能, 空气助力越大, 液滴粒径会越小, 雾化效果越好。当气压值继续上升, 达到一定值时, 增大空气助力不会再使雾化质量进一步改善。这是由于高速气流的速度是一定的, 液滴出口流速是一定的, 液滴出口流速趋于稳定, 雾化效果的变化趋于平缓, 因此气压越大, 粒径差值越小。

在大豆蛋白液粘度 $\eta_2=0.0174\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 喷涂气压 $P_a=0.20\text{ MPa}$, 喷涂液压为 $P_L=0.20\text{ MPa}$ 时, 喷涂雾化场轴向距离 15 cm , 径向距离 $4, 12\text{ cm}$ 处; 喷涂雾化场轴向距离 25 cm , 径向距离 $4, 12\text{ cm}$ 处的粒度微分分布见图 6。将图 6a 与图 4a 对比发现, 在喷涂气压、喷涂液压不变的情况下, 仅仅改变大豆蛋白液粘度, 在相同的喷雾场位置随着大豆蛋白液粘度的减小, 粒度分布朝小粒径方向靠拢, 小粒径大豆蛋白液液滴比例减小, 大部分集中在 $50\sim 70\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 粒

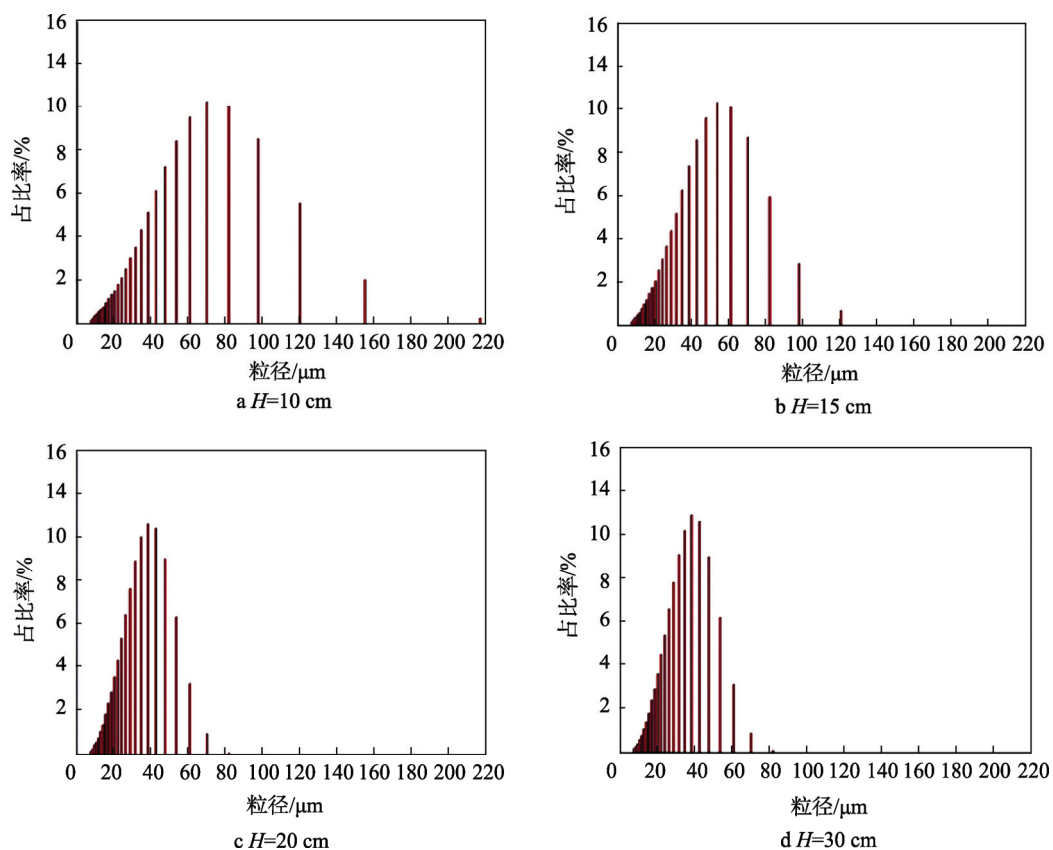


图5 喷涂气压对粒径微分分布的影响

Fig.5 Effects of spray pressure on differential particle size distribution

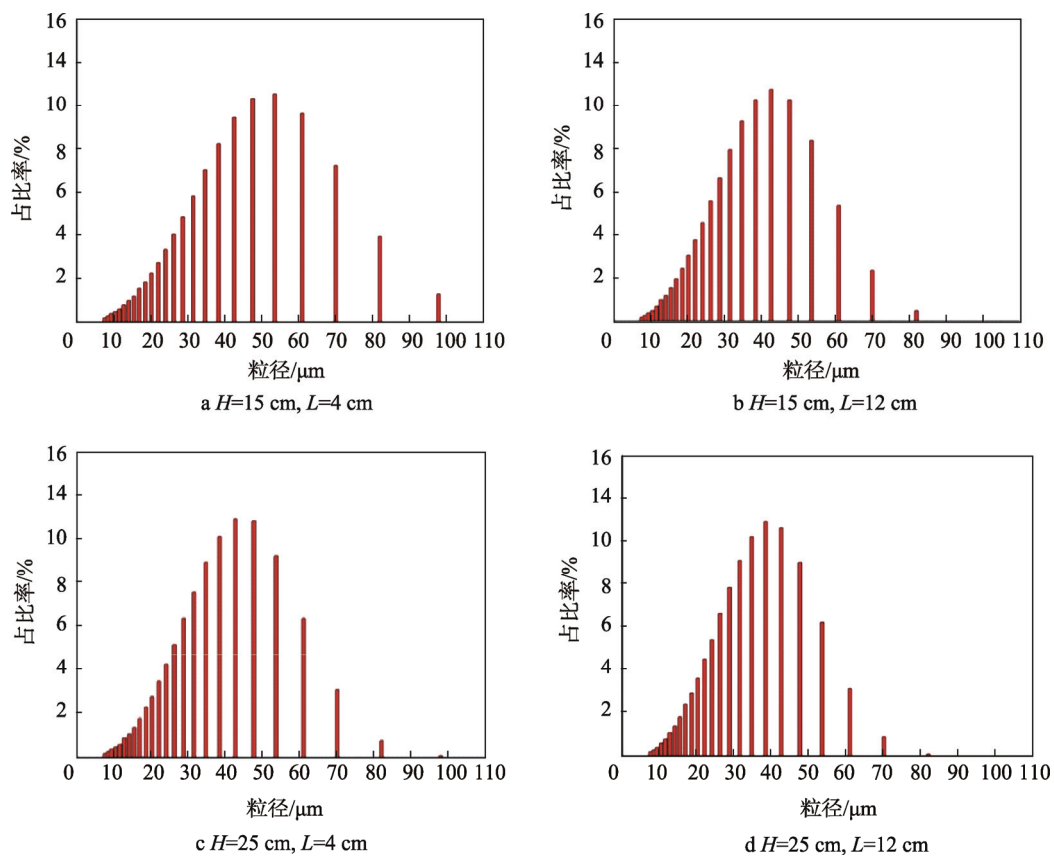


图6 大豆蛋白液粘度对粒径微分分布的影响

Fig.6 Influence of soybean protein solution viscosity on differential particle size distribution

径高于 $80\ \mu\text{m}$ 的大豆蛋白液液滴比例减小。大豆蛋白粘度越小, 喷雾过程中需要克服大豆蛋白液分子之间粘性作用力越小, 因此减小大豆蛋白液粘度值, 能增大小粒径大豆蛋白液液滴的比例, 液滴分布朝小粒径方向靠拢, 从而改善喷涂雾化质量。

在大豆蛋白液粘度 $\eta_2=0.0261\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, 喷涂气压 $P_a=0.20\ \text{MPa}$, 喷涂液压 $P_L=0.16\ \text{MPa}$ 时, 喷涂雾化

场轴向距离 $15\ \text{cm}$, 径向距离 $4, 12\ \text{cm}$ 处; 喷涂雾化场轴向距离 $25\ \text{cm}$, 径向距离 $4, 12\ \text{cm}$ 处的粒度微分分布见图 7。将图 7 与图 4 对比发现, 喷涂液压的改变对大豆蛋白液液滴粒度微分分布的影响不明显, 说明喷涂液压对喷涂雾化场液滴颗粒的影响不大, 没有喷涂液压和大豆蛋白液粘度的影响显著。

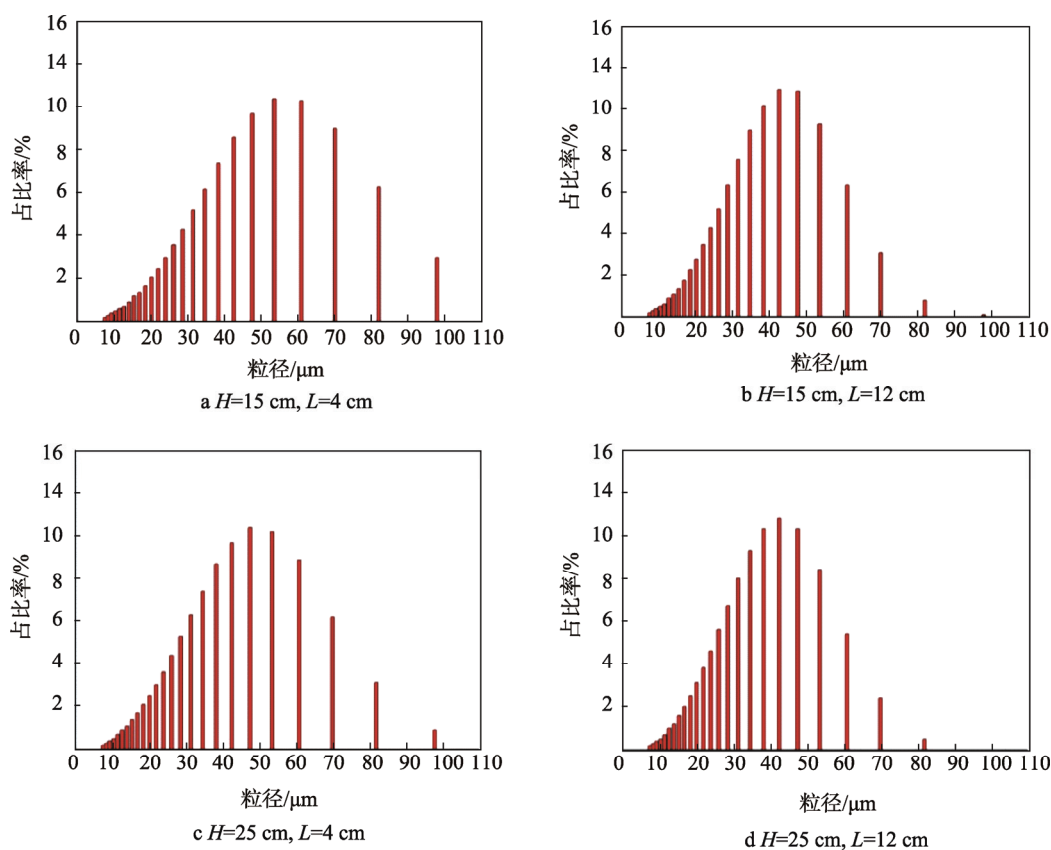


图 7 喷涂液压对粒径微分分布的影响

Fig.7 Impact of spray hydraulic pressure on differential particle size distribution

3 结语

1) 喷涂气压越大、大豆蛋白液粘度越小, 雾化效果越好, 而喷涂液压对雾化效果影响不大。

2) 大豆蛋白液喷雾场液滴的粒径分布随着喷雾贯穿距离的增加而小粒径液滴所占比例增加, 粒径分布曲线朝小粒径方向发展, 同时随着垂直与喷雾轴心线径向距离的增加, 小粒径液滴所占百分比的增加, 粒径分布曲线朝小粒径方向发展。

3) 喷涂雾化场在轴线距离一定时, 随着径向距离的增大, 粒径分布逐渐趋于小粒径范围, 且粒径分布范围减小, 液滴粒度分布较为均匀; 喷涂雾化场径向距离一定时, 随着轴向距离的增加也符合上述规律; 在轴心线 $H=30\ \text{cm}$ 以下找到合适的蔬菜纸待喷

涂面更有利于保证蔬菜复合纸的喷涂质量。

参考文献:

- [1] 黄巍, 孙靓. 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 Pu-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]. Joarnal of Applied Ploymer Science, 2012, 125: 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. 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 周立杰. 幂律流体环空流场 PIV 实验研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
ZHOU Li-jie. Study on the PIV Experiment of the Annular Flow Field of Power Law Fluid[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2006.
- [11] 金春玉. 空心圆锥雾化喷嘴喷雾实验与数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
JIN Chun-yu. Experimental and Numerical Study on Spray Atomization of Hollow Cone Nozzle[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [12] 许宏庆, 何文奇, 李良杰, 等. 应用 PIV 技术对气固两相流粒子浓度场的瞬时测量[J]. 流体力学实验与测量, 2003(3): 53—56.
XU Hong-qing, HE Wen-qi, LI Liang-jie, et al. Instantaneous Measurement of Particle Concentration Field in Gas Solid Two Phase Flow Using PIV Technique[J]. Fluid Mechanics Experiment and Measurement, 2003(3): 53—56.
- [13] 于忠强. 空气雾化喷嘴雾化特性的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
YU Zhong-qiang. The Atomization Characteristics of Air Atomizing Nozzle[D]. Dalian: Experimental Study of Dalian University of Technology, 2014.
- [14] 周进华. 小油量气泡雾化喷嘴的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
ZHOU Jin-hua. Experimental Study of Small Oil Volume Effervescent Atomizer[D]. Wuhan: Wuhan Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [15] 谢象春. 湍流射流理论与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1975: 46—54.
XIE Xiang-chun, Turbulent Jet Theory and Calculation[M]. Beijing: Science Press, 1975: 46—54.