

基于粒度仪的双枪喷涂雾化场的粒度的研究

寇金宝, 龚国腾, 蔚俊, 杨传民
(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 在保证喷涂雾化表征均匀性的前提下实现宽幅覆膜, 提高覆膜的效率, 以期得到均匀一致的大豆蛋白覆膜。**方法** 利用粒度仪测量不同干涉程度下的大豆蛋白液双枪喷涂雾化场的索特平均直径 (Sauter Mean Diameter, SMD), 利用 Spraylink 软件处理粒度数据, 得到粒度数据并对比。**结果** 双枪喷涂雾化场的 SMD 随着液压的增大先增大后趋于平稳, 随着气压的增大先减小后趋于平稳。当液压分别为 0.08 MPa 和 0.16 MPa 时, SMD 基本不随偏转程度的变化而变化; 当液压为 0.24 MPa 时, SMD 随着偏转程度的增大而增大。双枪喷涂雾化场的径向 SMD 从中心到边缘缓慢减小, 在干涉区域内的轴向 2 点粒径基本相等。**结论** 当液压为 0.08 MPa、气压为 0.24 MPa、偏转角为 0° 时, SMD 相对较小。文中的研究为实现宽幅覆膜奠定了理论基础。

关键词: 大豆蛋白液; 双枪喷涂干涉; 粒度仪; 粒度场

中图分类号: TB484; O629.73; TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)07-0258-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.029

Particle Size of Double-gun Spraying and Atomizing Field Based on Particle Size Meter

KOU Jin-bao, GONG Guo-teng, YU Jun, YANG Chuan-min

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve wide coating on the premise of ensuring the uniformity of spray atomization characterization and improve the efficiency of coating, in order to get uniform and consistent coating of soybean protein. The Sauter mean diameter of the spraying and atomizing field of soybean protein liquid was measured with a particle size meter under different interference degrees, and the particle size data were processed by Spraylink software, and the particle size data were obtained and compared. With the increase of hydraulic pressure, the SMD of the double-gun spraying and atomizing field increased first and then stabilized, and decreased first and then stabilized with the increase of air pressure. When the hydraulic pressure was 0.08 MPa and 0.16 MPa, SMD did not change with the change of the deflection degree. While when the hydraulic pressure was 0.24 MPa, SMD increased with the increase of the deflection degree. The radial SMD of the double-gun spraying and atomizing field decreased slowly from the center to the edge, and the diameters of the two axial points in the interference region were basically equal. When the hydraulic pressure is 0.08 MPa, the air pressure is 0.24 MPa. When the deflection angle is 0° , SMD is relatively small. The research in this work lays a theoretical foundation for the realization of wide coating.

KEY WORDS: soybean protein liquid; double-gun spraying interference; particle size meter; particle field

大豆蛋白是一种数量丰富、价格低廉、具有生物降解性的高营养价值的蛋白质混合物^[1], 现欲采用喷

涂覆膜的方式将其覆在蔬菜纸上, 以提高蔬菜纸的热封性能。为了提高蔬菜纸在实际生产中的力学性能,

收稿日期: 2022-10-18

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目 (15JCZDJC34100)

作者简介: 寇金宝 (1981—), 男, 实验师, 主要研究方向为机械设计和机械制造。

提高其疏水性, 各科研工作者试图向其中加入无污染的增强剂、增塑剂等^[2-5]。Shao 等^[1-6]在符合可食用标准的前提下向大豆蛋白液中添加了不同比例的增强剂, 研究了混合液的流变性能, 并进行喷涂覆膜, 对大豆蛋白蔬菜复合纸的力学性能和热封性能进行评估。

在喷涂过程中, 均匀一致的覆膜是由雾化表征的均匀性决定的, 而雾化表征的均匀性与喷涂的参数和大豆蛋白液动静态流变学参数有关。索特平均直径是评价雾化质量的重要参数, 它的意义是与实际的颗粒具有相同表面积的球体的直径。对索特平均直径的研究可参考燃烧学雾化、喷雾干燥、低温冷却等方面的喷涂研究^[7-10]。

为了探寻喷涂雾化表征的均匀性, 得到均匀一致的大豆蛋白薄膜, 本课题科研团队曾对大豆蛋白液单枪喷涂雾化场的粒度变化进行了研究, 探寻了粒度随黏度、喷涂流量、喷涂液体压力(以下简称液压)和喷涂气体压力(以下简称气压)的变化规律^[11-13]。在此研究基础上, 为了实现宽幅覆膜, 本文提出双枪喷涂的设想, 引入变量偏转角, 研究双枪喷涂下喷涂参数和偏转角对喷雾粒度场的索特平均直径的影响。

1 实验

1.1 原料与设备

主要原料: 大豆分离蛋白粉, 来自汕头市聚丰隆生物科技有限公司; 蒸馏水, 来自实验室自制; 羧甲基纤维素钠(食品级, 质量分数为 1%), 来自河南颖雪生物科技有限公司; 聚羧酸盐(食品级, 质量分数为 1%), 来自山东富舜新材料科技有限公司; 甘油(食品级), 来自郑州万盛食品商行。

主要设备: 安东帕高级流变仪, 意大利 Anton paar

公司; FD-101-BA 型自制搅拌型加热热油搅拌釜, 天津商业大学自制; 扇形电子脉冲空气助力雾化喷嘴, 斯普瑞喷雾系统上海有限公司; MSM-2250 型控制器, 斯普瑞喷雾系统上海有限公司; PIV 粒子图像测速系统, 北京立方天地科技发展有限公司; 伺服电机驱动二维喷涂雾化平台, 无锡迪恩斯传动科技有限公司。

1.2 实验装置及方法

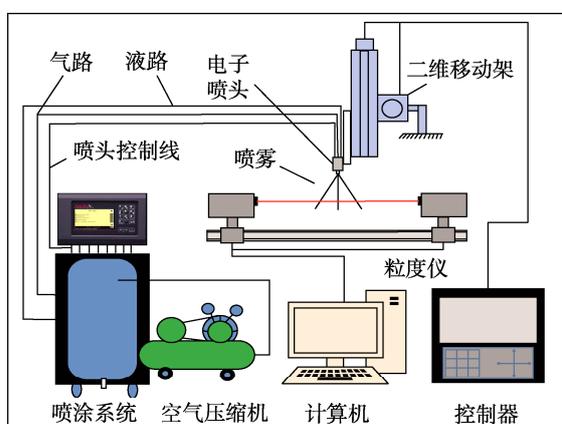
喷涂雾化场粒径采集系统主要由喷涂控制系统、二维移动架和粒度仪组成, 如图 1 所示^[11]。将配制好的大豆蛋白混合液倒入保温缸中, 将两喷嘴固定在二维移动架上, 打开喷涂系统、计算机、控制器和步进电机的开关, 固定好两喷嘴间的距离和角度后, 通过喷涂系统改变喷涂流量、喷涂气压和喷涂液压, 大豆蛋白混合液和空气经由液路和气路到达喷嘴处, 再经过电信号的控制形成喷雾。雾化后, 利用粒度仪测量喷雾激光所打到位置的索特平均直径, 测量完成后, 调整喷涂参数和两喷头的位置再次测量, 如此反复得到预期的数据。

1.3 实验方案

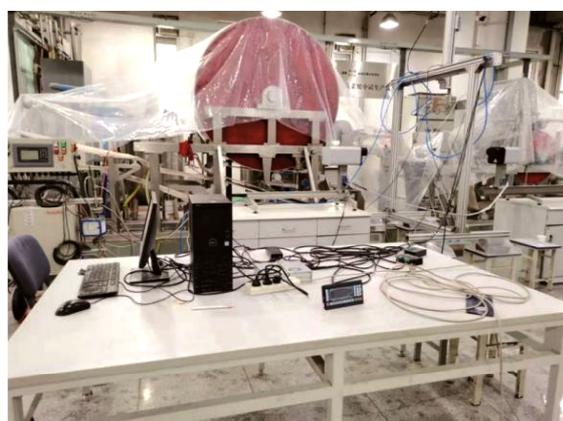
本文设置喷涂系统控制大豆蛋白液喷出的喷涂参数: 流量为 30、50 和 70 mL/min, 液压为 0.08、0.16 和 0.24 MPa, 气压为 0.08、0.16 和 0.24 MPa。设置的偏转角变量为 0°、7°和 15°, 双枪喷涂雾化粒度场的坐标系建立和待测点分布如图 2 所示。

1.4 实验方法

为探究干涉情况对雾化场粒度场的影响, 本文设计了偏转角(α), 如图 2 所示, B 、 C 分别为圆柱 BC 上的 2 个喷头, 喷头 B 喷出喷雾面 I, 喷头 C 喷出喷雾面 II。固定面 I, 旋转面 II, 旋转后两喷头的夹角即为偏转角, 随着偏转角的增大, 干涉程度逐渐减小。



a 粒度采集系统示意



b 粒度采集系统实物

图 1 喷涂雾化场粒径采集系统

Fig.1 Particle size acquisition system for spraying and atomizing field

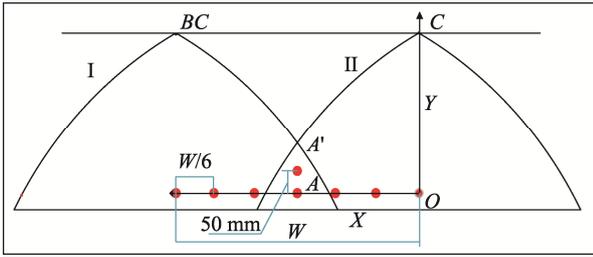


图2 待测点分布
Fig.2 Schematic diagram for distribution of points to be measured

2 结果与分析

2.1 喷涂参数对双枪喷涂喷雾粒度场索特平均直径的影响

2.1.1 液压对双枪喷涂喷雾粒度场索特平均直径的影响

本课题科研团队曾在流变学实验中得出结论：黏度越高，大豆蛋白膜的热封性能越好，因此在保证可喷性的前提下，流量越大，热封性能越好。单枪实验也已证明，在此大豆蛋白混合液的配方下，各喷涂参数都可保证喷涂的可喷性，因此提取喷涂流量相对大的情况进行研究。因为两喷头的间距是根据两喷头在不同参数下的沉积基线长度来确定的，以保证在此间距下，两喷头可接续又不至于沉积基线相交过长。所以提取喷涂流量为 70 mL/min，间距为 850 mm，偏转角为 7° 的双枪喷雾的索特平均直径 (Sauter Mean Diameter, SMD) 数据，研究在不同气压的情况下，平均 SMD 随液压的变化趋势，见图 3。

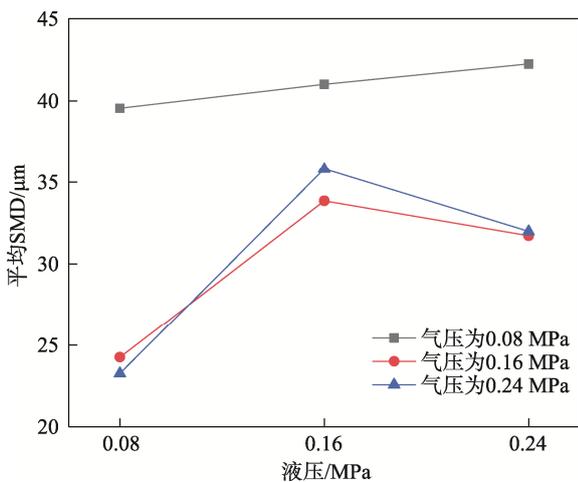


图3 平均 SMD 随液压的变化
Fig.3 Average SMD varies with hydraulic pressure

如图 3 所示，随着液压的增大，平均 SMD 呈现先增大后趋于平稳的趋势。呈现这样的趋势是由于本实验所用的电子脉冲喷涂雾化系统采用的是 PWM 技术对

喷涂流量进行精确控制。喷涂流量为固定值，当液压从 0.08 MPa 增加到 0.16 MPa 时，喷涂系统会根据当前的液压和流量减小脉冲喷嘴的开启时间，使得喷雾所获得的能量减小，液滴就更不易雾化为小颗粒，所以粒径增大；当液压从 0.16 MPa 增加到 0.24 MPa 时，大豆蛋白液自身具备的动能增大，气液流速差增大，剪切力作用增大，足以抵消从脉冲喷嘴中减小的雾化气体能量，所以粒径变化也趋于稳定。双枪喷涂喷雾的粒度场 SMD 随液压的变化趋势与单枪喷涂的相同^[14-15]。

2.1.2 气压对双枪喷涂喷雾粒度场 SMD 的影响

提取喷涂流量为 70 mL/min，间距为 850 mm，偏转角为 7° 的双枪喷雾的 SMD 数据，研究在不同液压的情况下，平均 SMD 随气压的变化趋势，如图 4 所示。

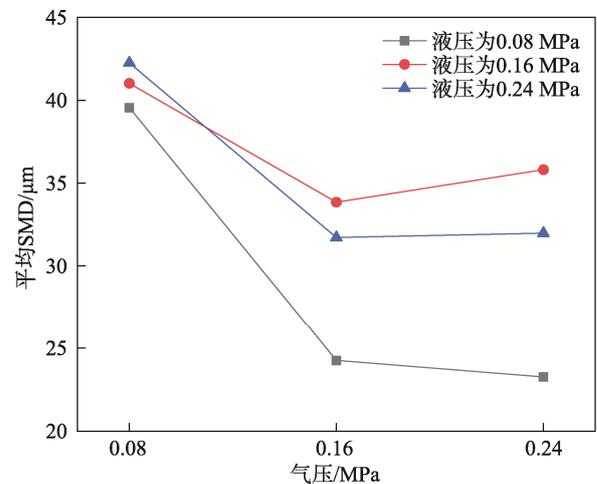


图4 平均 SMD 随气压的变化
Fig.4 Mean SMD changes with air pressure

如图 4 所示，随着气压的增大，平均 SMD 呈现先减小后趋于平稳的趋势。当气压从 0.08 MPa 增加到 0.16 MPa 时，气液两相混合，空气压力的增大加速了液滴的破碎，并且能发生二级雾化，易于产生更小的雾化颗粒；当气压从 0.16 MPa 增加到 0.24 MPa 时，空气压力的增大已经无法再使雾化效果进一步改善，这是由于高速气流的速度已经趋于稳定，无法再有太大的变化，所以粒径减小的趋势也趋于平缓。双枪喷涂喷雾粒度场 SMD 随气压的变化趋势与单枪喷涂喷雾粒度场 SMD 随气压的变化趋势相同^[14-15]。

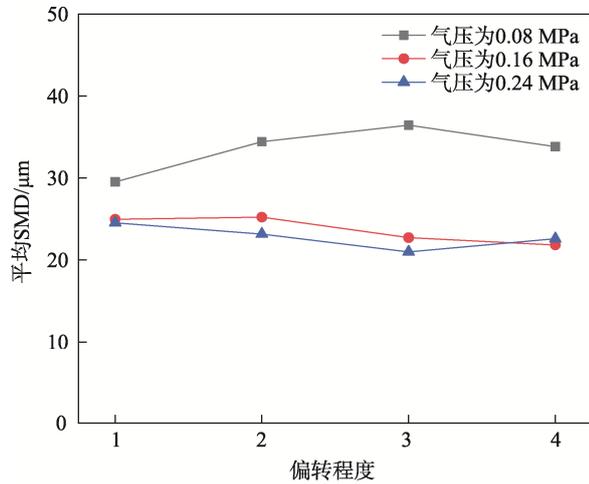
2.2 偏转角对双枪喷涂喷雾粒度场 SMD 的影响

2.2.1 偏转角对平均 SMD 的影响

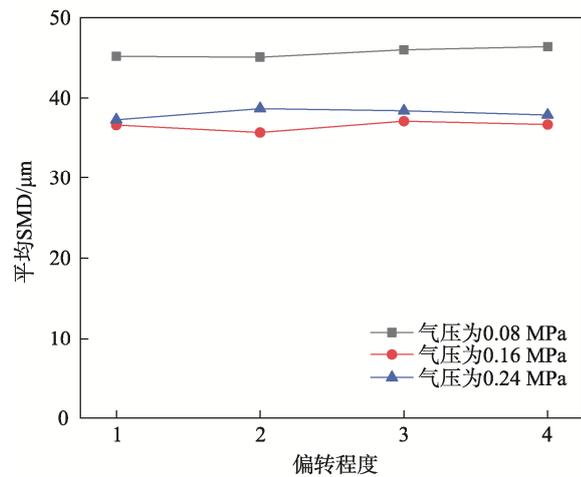
不同于单枪喷涂雾化实验，双枪喷涂雾化实验增加了偏转角这个新变量。为了探究偏转角变化对双枪喷涂喷雾粒度场 SMD 的影响，本节采用控制变量法对其进行研究。自变量为偏转角 0°、7°、15°和单枪喷涂，单枪喷涂可理解为偏转了很大的角度，已经完全不发生干涉。从偏转角 0°到单枪喷涂，偏转程度逐

渐增大, 干涉程度逐渐减小。

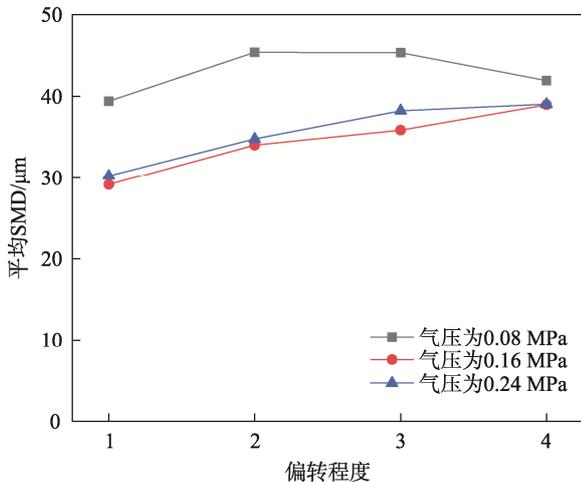
选取提取喷涂流量为 70 mL/min, 间距为 850 mm 的双枪喷雾的 SMD 数据, 为了使双枪情况与单枪情况更易对比, 如图 2, 提取线段 OA 之间的 SMD 数据进行平均, 研究在不同液压和气压的情况下, 平均 SMD 随偏转角的变化趋势。如图 5 所示。图 5a 为当



a 液压为 0.08 MPa



b 液压为 0.16 MPa



c 液压为 0.24 MPa

图 5 平均 SMD 随偏转程度的变化
Fig.5 Mean SMD varies with deflection degree

液压为 0.08 MPa 时, 在气压分别为 0.08、0.16 和 0.24 MPa 的情况下, 平均 SMD 随偏转角的变化曲线图; 图 5b 为当液压为 0.16 MPa 时, 在气压分别为 0.08、0.16 和 0.24 MPa 的情况下, 平均 SMD 随偏转角的变化曲线图; 图 5c 为当液压为 0.24 MPa 时, 在气压分别为 0.08、0.16 和 0.24 MPa 的情况下, 平均 SMD 随偏转角的变化曲线图。将偏转角为 0°、7°、15° 和单枪喷涂分别标号记作 1、2、3 和 4。

如图 5 所示, 当液压为 0.08 MPa 和 0.16 MPa 时, 平均 SMD 基本上不随偏转程度的变化而变化; 当液压为 0.24 MPa 且气压为 0.16 MPa 和 0.24 MPa 时, 平均 SMD 随着偏转程度的增大而缓慢增大。当液压为 0.08 MPa 和 0.16 MPa 时, 平均 SMD 基本上不发生变化, 是因为当前参数下, 两喷枪的喷雾粒子虽然发生了碰撞, 但是碰撞的粒子可能相对较少, 碰撞对粒子粒度的影响也比较小; 当液压 0.24 MPa 时, 大豆蛋白液的动能增大, 沉积基线长度增大, 干涉区域变大, 发生碰撞的粒子变多, 碰撞后粒子破碎, 粒径减小的概率增大, 因此随着干涉程度的减小, 平均 SMD 有缓慢增大的趋势。

2.2.2 偏转程度对双枪喷雾场径向 SMD 的影响

提取喷涂流量为 70 mL/min、间距为 850 mm、液压为 0.16 MPa 的双枪喷雾的径向 SMD 数据, 研究在不同偏转角的情况下, SMD 随 x 轴的变化趋势, 见图 6。

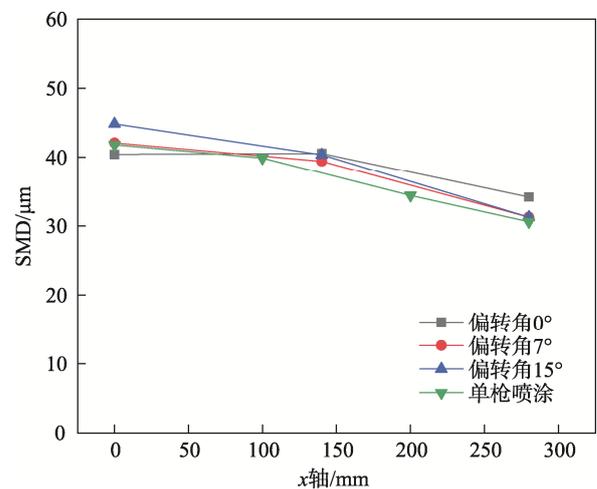


图 6 不同偏转程度下双枪喷雾场径向 SMD 的变化

Fig.6 Variation of radial SMD of double-gun spraying and atomizing field under different deflection degrees

如图 6 所示, 在不同气压和偏转程度条件下, 双枪喷雾场中右侧喷头 C 的径向 SMD 从中心向边缘缓慢减小^[16], 不同的偏转程度对径向 SMD 没有太大的影响。径向 SMD 沿 x 轴从中心向边缘逐渐减小是喷头本身结构所决定的; 偏转程度对径向 SMD 的影响

较小也是由于发生碰撞的粒子较少,且粒子碰撞后对粒径的影响也比较小。

2.2.3 偏转角对双枪喷雾场轴向 SMD 的影响

提取喷涂流量为 70 mL/min、间距为 850 mm、液压为 0.24 MPa 的双枪喷雾的轴向 SMD 数据,研究轴向 SMD 随偏转角的变化趋势,见图 7。

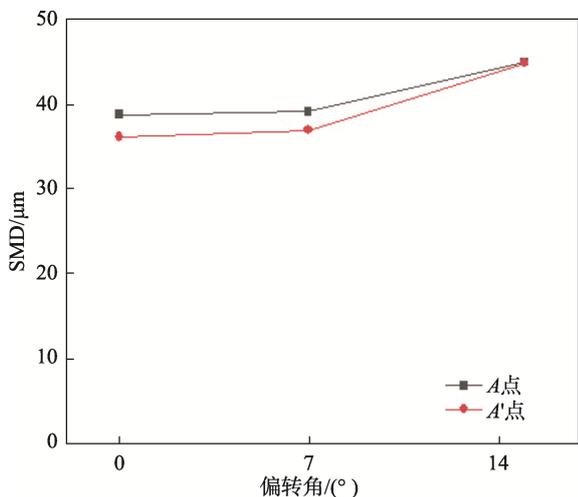


图 7 双枪喷雾场轴向 SMD 随偏转角的变化

Fig.7 Axial SMD of double-gun spraying and atomizing field varies with deflection angle

如图 7 所示,双枪喷雾场轴向 2 点的 SMD 随着偏转角的增大而缓慢增大,而径向 2 点的 SMD 相差不大。SMD 随着偏转角的增大而增大,也如上文所述,粒径随着干涉程度的减小而增大,是粒子碰撞减小了粒径。轴向 2 点的 SMD 相差不大是由于碰撞及初始速度和空气剪切等多因素造成的。在研究单枪喷涂时,课题组曾得出结论,距喷头轴线相对越远,轴向 2 点的粒径相对差值越小,并且上方点的粒径要略大于下方点的粒径,前者是由喷头的结构所决定,后者是因为当喷雾粒子下落时,下落距离越长,空气对雾化粒子的剪切作用相对越充分。当进行双枪喷涂实验时,此时粒子碰撞会造成喷雾面轴向 2 点的粒子微变化,由于粒子碰撞产生的影响要大于这段距离空气剪切产生的影响,并且粒子碰撞有一定的随机性,所以 A 点和 A'点的 SMD 差值产生了不确定性,但是随着偏转角的增大,空气剪切因素逐渐成为主要因素,这 2 点的 SMD 差值也会逐渐减小。

3 结语

为了保证喷涂雾化表征均匀性的前提下实现宽幅覆膜,本文在单枪喷涂的基础上设计了双枪喷涂实验,定义了干涉程度,研究了不同干涉程度下的索特平均直径的变化,并研究了双枪喷涂雾化表征的粒度均匀性,为实现宽幅覆膜奠定理论基础。实验证明,

当液压为 0.08 MPa、气压为 0.24 MPa、偏转角为 0° 时,在此配方下的大豆蛋白液喷雾粒子的 SMD 最小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] GONZALEZ A, GASTELU G, BARRERA G N, et al. Preparation and Characterization of Soy Protein Films Reinforced with Cellulose Nanofibers Obtained from Soybean By-Products[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 758-764.
- [3] GALUS. Functional Properties of Soy Protein Isolate Edible Films as Affected by Rapeseed Oil Concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 233-241.
- [4] ERDEM B G, KAYA S. Production and Application of Freeze Dried Biocomposite Coating Powders from Sunflower Oil and Soy Protein or Whey Protein Isolates[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 127976.
- [5] DOS S P I, GALINDO M V, MEDEIROS J A S, et al. Comparative Study of the Properties of Soy Protein Concentrate Films Containing Free and Encapsulated Oregano Essential Oil[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100419.
- [6] HOU H, YANG C, TIAN S, et al. Study of Rheological Behavior of Soy Protein Spray Coating Dispersions for Edible Vegetable-Based Composite Paper[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2016, 25(4): 197-209.
- [7] ABINASH B, RAKESH K, SARAVANAN B, et al. Lemon Peel Oil as an Alternative Fuel for GDI Engines: A spray Characterization Perspective[J]. Renewable Energy, 2019, 142: 249-263.
- [8] LU J, LIU X, HU C, et al. Experimental Study on Flashing Spray Characteristics of Pressure Swirl Nozzle with Ethanol Solution[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 110015.
- [9] ADALI M B, BARRESI A, BOCCARDO G, et al. Ultrasonic Spray Freeze-Drying of Sucrose and Mannitol-Based Formulations: Impact of the Atomization Conditions on the Particle Morphology and Drying Performance[J]. Drying Technology, 2023, 41(2): 251-261.
- [10] RAMONA S, ADRIAN D, DAMIAN P, et al. Preparation and Characterization of spray-dried Submicron Par-

- articles for Pharmaceutical Application[J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29: 2920-2927.
- [11] 常淑英, 杨传民, 陈国营, 等. 大豆蛋白喷涂液雾化粒子场实验[J]. *包装工程*, 2016, 37(17): 42-47.
CHANG Shu-ying, YANG Chuan-min, CHEN Guo-ying, et al. Experimental Study on Atomized Particle Field of Soybean Protein Spraying Liquid[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(17): 42-47.
- [12] 任少伟, 杨传民, 何思念, 等. 大豆蛋白液组分对表观粘度和粒度的影响[J]. *包装工程*, 2018, 39(9): 31-36.
REN Shao-wei, YANG Chuan-min, HE Si-nian, et al. Effect of Components of Soybean Protein Solution on Apparent Viscosity and Particle Size[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(9): 31-36.
- [13] 任少伟, 杨传民, 陈国营, 等. 大豆蛋白液喷雾场粒度分布变化[J]. *包装工程*, 2018, 39(17): 46-52.
REN Shao-wei, YANG Chuan-min, CHEN Guo-ying, et al. Particle Size Distribution Change of Soybean Protein Liquid Spray Field[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(17): 46-52.
- [14] SIT N M R, ANTHONY H J P, JASON P H, et al. Atomization Behaviour of Juice-Fibre Suspensions in a Two-Fluid Nozzle[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 256: 53-60.
- [15] GARCIA J A, LOZANO A, ALCONCHEL J, et al. Atomization of Glycerin with a Twin-Fluid Swirl Nozzle[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 92: 150-160.
- [16] NAJAFI S M A, MIKANIKI P, GHASSEMI H. Microscopic and Macroscopic Atomization Characteristics of a Pressure-Swirl Atomizer, Injecting a Viscous Fuel Oil[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(1): 9-22.

责任编辑: 曾钰婵