基于 PIV 的大豆蛋白液双枪喷涂速度场的研究

寇金宝, 龚国腾, 邢炯, 杨传民

(天津商业大学,天津 300134)

摘要:目的 为了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 利用粒子图像速度场仪(Particle Image Velocimetry, PIV),对不同干涉程 度下的大豆蛋白液双枪喷涂雾化场进行拍摄,利用 PIV 和 Origin 软件处理图像,得到速度数据并对比。 结果 随着双枪间偏转角的增大,基线上的平均速度减小;偏转角为 0°时,两喷雾粒子流在干涉线处碰 撞,少有透过干涉线的粒子;在不同偏转角下,基线上的速度峰值从大到小为偏转角 7°时的速度峰值、 偏转角 0°时的速度峰值、偏转角 15°时的速度峰值;当偏转角为 0°时,随着液压的增大,基线上的第 2 个速度谷值会右移,并且会增大直至消去。结论 当偏转角为 0°、液压为 0.24 MPa 时,在基线上干涉区 域内的速度最均匀。

关键词:大豆蛋白液;双枪喷涂干涉;粒子图像速度场仪;速度场

中图分类号: TB484; O629.73; TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)15-0131-06 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.017

Double-nozzle Spraying Velocity Field of Soybean Protein Liquid Based on PIV

KOU Jin-bao, GONG Guo-teng, XING Jiong, 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, improve the efficiency of coating, and get uniform and consistent coating of soybean protein. A Particle Image Velocimetry (PIV) was used to take pictures of the spraying atomization field of soybean protein liquid under different interference degrees between two spray nozzles. PIV and origin software were used to process the images, and the speed data were obtained and compared. With the increase of deflection angle between two nozzles, the average velocity at baseline decreased. When the deflection angle was 0° , two spray particles collided at the interference line, and few particles passed through the interference line. The velocity peak on the baseline appeared at different deflection angles of 7° , 0° , and 15° . When the deflection angle was 0° , with the increase of hydraulic pressure, the second velocity value on the baseline moved to the right and increased until it disappeared. When the deflection angle is 0° and the hydraulic pressure is 0.24 MPa, the velocity is the most uniform in the interference region at the baseline.

KEY WORDS: soybean protein liquid; double-nozzle spraying interference; particle image velocimetry; velocity field

为了在蔬菜纸上覆上一层均匀一致的大豆蛋白 薄膜,本课题科研团队对喷涂技术进行了研究。为保 证喷涂覆膜的均匀性,需要保证喷涂雾化表征的均匀 性,在此基础上,本课题科研团队利用 PIV 对喷涂雾 化表征的均匀性进行了研究^[1-3]。

喷涂指通过碟式雾化器或喷枪,利用压力(或离

收稿日期: 2022-06-15

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。

心力),把喷枪内的液体分散,形成均匀、细小的雾 滴,然后喷涂到零部件表面的一种涂装方法。随着科 学技术的发展,越来越多的领域都应用到了喷涂技 术,像燃烧学雾化、食品和药品加工中的喷雾干燥、 农药喷雾、除尘与灭火、海水淡化等方面都应用到了 喷涂技术^[4-5]。喷涂技术的广泛应用同时也促进着大 量学者们对喷涂雾化过程的研究,Dafsari等^[6]采用激 光诊断技术,通过研究压力旋流喷嘴的雾化质量和喷 雾结构对不同黏度的航空燃料进行了实验研究。 Shadrin 等^[7]采用阴影摄影法对气动喷嘴喷射水煤浆 燃料的雾化和燃烧进行了研究。Fathinia 等^[8]用高速 摄影机研究了过热度、入口压力和入口温度对3种不 同类型全锥形喷嘴喷射角的影响。

PIV 能够克服热线只能单点测量的限制,可以快速准确地测量出某个截面的空间流场,得到该截面流场的空间结构和速度矢量场,是一种先进的无扰动流场测量技术^[9-10],在冲击射流的流场结构和流动特征研究中得到了广泛应用。沈鑫垚等^[11]、Lyulin等^[12]、Murakami等^[13]、Zhao等^[14]、Abbas等^[15]都利用 PIV 技术对各自待测流场的速度场进行了测量,都取得了 准确的实验结果。

基于本课题科研团队对单枪喷涂雾化表征均匀 性的研究,为了实现宽幅覆膜,增大覆膜效率,本文 提出双枪喷涂的设想,并引入偏转角的概念,对双枪 喷涂雾化表征的均匀性进行研究。研究在不同干涉情 况下(不同的偏转角)双枪喷涂雾化场速度场的变化 规律。

1 实验

1.1 原料与设备

实验原料: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 型自制搅拌型加热液油搅拌釜, 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;斯普瑞喷雾系 统上海有限公司,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 装置及方法

喷涂雾化场图像采集系统主要是由喷涂控制系统、二维移动架和 PIV 系统组成,如图 1 所示。将大豆蛋白混合液放入喷涂系统的保温缸中,由二维移动架固定喷嘴,将两喷嘴间的距离、角度调整好后,由喷涂控制系统控制喷涂过程的流量、液压和气压,大豆蛋白混合液和空气分别经由液路和气路在喷嘴处汇合形成喷雾。开始喷雾后,PIV 系统的激光发生器打出一束垂直于水平面的激光面,将喷雾面打亮,此时高速摄像机将对喷雾面进行拍摄,拍摄出清晰的大豆蛋白喷雾场照片,随后即可对照片进行处理。

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。 设置偏转角变量为 0°、7°和 15°。对比不同气压和液 压下,偏转角对沉积基线上粒子速度的影响。



a 图像采集系统

b 图像采集系统实物

图 1 喷涂雾化场图像采集系统 Fig.1 Image acquisition system of spraying atomization field

第44卷 第15期

1.4 实验模型的建立

利用 PIV 系统对双枪喷涂系统的喷雾进行拍摄, 可得到两喷雾面相交汇的形貌图像。为了更好地研究 各个变量之间的关系,本文对双枪喷雾面中的喷射高 度、喷头间距、沉积基线长度、偏转角和干涉基线进 行了定义。各参数标注如图 2 所示,以探求双枪喷涂 雾化表征的喷涂规律。

喷射高度(H)是喷头到基带的垂线距离,其高度由实际喷涂冲击速度大小所定,本实验喷射高度的取值为 350 mm。

喷头间距(W)是两喷头之间的直线距离,由喷 射高度(H)及以下喷雾角选定。本实验选取的喷头 间距为 60 mm。

沉积基线长度(L)是在固定的喷射高度、固定 的喷涂参数以及固定的两喷头位置下,喷雾落在基带 上的最长距离。若改变上述参数,沉积基线长度也会 改变。如图 2 所示,双枪喷涂过程中,沉积基线长度 等于面I沉积基线长度($L_a + L_b$)与面II的沉积基线长 度($L_c + L_d$)之和减去干涉基线长度 $\Delta L \circ L$ 和 ΔL 的 计算是基于统计学方法,依据多幅 PIV 图像表达的喷 雾场尺度求平均值。

$$\bar{L} = \left(\sum_{i=1}^{n} L_{i}\right) / n = \left(\sum_{i=1}^{n} (L_{ai} + L_{di})\right) / n + W \quad i = 1, 2, 3, ..., n \quad (1)$$

$$\bar{\Delta L} = \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta L_{i}\right) / n = \left(\sum_{i=1}^{n} (L_{\text{b}i} + L_{\text{c}i})\right) / n - W \quad i = 1, 2, 3, ..., n \quad (2)$$



图 2 双枪喷雾场主视图模型 Fig.2 Master view model of double-nozzle spraying field

偏转角(α)为两喷头在圆柱副上的夹角。在图 2 和图 3 中,固定圆柱 *AB*,将 *A* 喷头始终固定在圆 柱横杆上,将 *A*、*B* 两喷头喷雾扇形面调至同一平面 上,此时 *A*、*B* 两喷头的夹角为 0°,绕圆柱副旋转 *B* 喷头,旋转的角度为偏转角(α)。*A*、*B* 两喷头喷出 的喷雾面分别是面I和面II,α不为 0 时,*A*、*B* 两喷 头的 2 个扇形面不共面,面I的位置始终是固定的, 本文通过旋转面II来控制偏转角的变化。

1.5 实验数据处理方法

利用 PIV 软件处理图像数据,得到双枪喷雾场各

点的速度数据。由于高速摄像机在拍摄时无法清晰地 将整个双枪喷雾场拍全,所以拍摄的速度数据集中在 两喷头之间。为了探寻干涉对速度的影响,本文利用 Origin 软件提取了面I的单枪喷雾边界,并以此为边 界。在固定的喷射高度下提取不同偏转角下面I的右 沉积基线上的速度数据,来研究面II对面I的右沉积基 线上速度的影响。



图 3 双枪喷雾场左视图模型 Fig.3 Left view model of two-nozzle spraying field

2 结果与分析

2.1 偏转角对沉积基线上平均速度的影响

两喷嘴间距是一定的,选取的喷涂流量为30 mL/min。 为研究偏转角的变化对大豆蛋白喷雾沉积基线上的 速度的影响,对比不同喷涂参数下,面I右沉积基线 上的平均速度大小。为了更直观地观察同参数下不同 偏转角的沉积基线平均速度,将不同喷涂液压、喷涂 气压标注为1到9号,如表1所示,标注组号后作出 曲线如图4所示。

由图 4 可知,除了第 4 组外,其余各组面I右沉 积基线的平均速度大小随偏转角的变化规律为随着 偏转角的增大,面I右沉积基线的平均速度减小。当 偏转角为0°时,干涉面(面Ⅱ)与待测面(面I)处于 同一平面内,此时面II的部分左沉积基线与面I的右沉 积基线重合,面I的右沉积基线上大豆蛋白混合液雾 化粒子增多,气液动能增大,使得面I右沉积基线上 的粒子平均速度也增大。当偏转角为7°时,面Ⅱ相对 面I偏转了 7°。由于实验所用的扇形喷头喷出的扇面 是有厚度的扇面,偏转了小角度,右侧的 B 喷头所喷 出的面II之外的雾化粒子还是会落在 A 喷头面I的右 沉积基线上, 粒子增多, 动能增大, 右沉积基线上的 平均速度也增大。但由于 B 喷头喷出的雾化粒子主要 集中于面II之中,面II之外的雾化粒子相对较少,所 以偏转 7°后,落在面I右沉积基线上的雾化粒子也比 偏转 0°时的少,且此时的平均速度小于偏转角

Tab.1 Spraying parameter label	
组号	喷涂参数/MPa
1	液压 0.08
	气压 0.08
2	液压 0.08
	气压 0.16
3	液压 0.08
	气压 0.24
4	液压 0.16
	气压 0.08
5	液压 0.16
	气压 0.16
6	液压 0.16
	气压 0.24
7	液压 0.24
	气压 0.08
8	液压 0.24
	气压 0.16
9	液压 0.24
	气压 0.24

庙〉会参行旦

主1





为 0°时的平均速度。当偏转角为 15°时,两喷头的雾 化场完全分离,不再发生干涉现象,此时面I的右沉 积基线上仅有 A 喷头喷出的雾化粒子,因此,其平均 速度小于偏转角为 0°和 7°时的平均速度。第 4 组偏 转角为 0°时的平均速度小于偏转角为 7°时的平均速 度,观察其速度场图像,发现速度场图像中出现了孔 洞,推测可能是喷头发生了堵嘴的情况,使得沉积基 线上的速度减小。

2.2 偏转角对沉积基线上各点的速度分量大小的影响

根据喷涂流量为 30 mL/min、液压为 0.08 MPa 和气压为 0.08 MPa 的速度数据作出折线图,如图 5 所示。x 轴为面I右沉积基线上各测点的坐标, y 轴为面I右沉积基线上各测点的速度大小。



图 5 偏转角对面I右沉积基线上 各点速度的影响 Fig.5 Effect of velocity of each point on the right sedimentary baseline opposite the deflection angle of surfaceI

如图 5 所示,偏转角为 15°时,各喷涂参数下沉 积基线上的粒子速度沿着 x 轴方向大体上是呈现先 减小再增大再减小的趋势。当偏转角为 0°,沉积基线 上的粒子速度沿着 x 轴方向呈先减小后增大,再减小 再增大的趋势;当偏转角为 7°时,沉积基线上的粒子 速度沿着 x 轴方向大体上是呈先减小再增大再减小 的趋势,并且峰值要高于偏转角为 15°和 0°时。

当偏转角为 0°时会出现第 2 个谷值,这是由于此时的两喷雾面粒子流会在谷值处附近交汇,在面II粒子流的干预下,喷头 *B* 为此段基线粒子提供主要动能,所以在此位置的速度会随着 x 轴上升。当偏转角为 7°时,其峰值要高于偏转角为 15°和 0°时,这是因为此时的面I和面II相较于 0°时不直接交汇,粒子流碰撞不明显,所以此时面II的粒子会越过干涉线,部分粒子会落在面I右沉积基线上增大基线上的速度。

2.3 液压对沉积基线上各点的速度大小的 影响

根据喷涂流量为 30 mL/min、气压为 0.24 MPa、 液压为 0.08、0.16 和 0.24 MPa 的速度数据作出折线 图,见图 6a—c。x 轴为面I右沉积基线上各所测点的 坐标,y 轴为面I右沉积基线上各测点的速度大小。

如图 6 所示,随着液压的增大,各偏转角下的速度曲线图的峰值和谷值会有向右移动的趋势,并且当偏转角为 0°时,第 2 个谷值逐渐增大,直至消去。



图 6 液压对面I右沉积基线上各点速度的影响 Fig.6 Influence of hydraulic pressure on each point velocity on the right deposition baseline ofI

实验结果表明,在同一偏转角下,相较于不同气 压,不同液压对喷雾粒子速度影响更大,沉积基线上 的粒子速度折线图随着喷涂液压的变化而变化,这主 要受沉积基线的长度发生变化的影响。喷涂液压提供 了喷头喷出喷雾的主要动力,随着液压的增大,喷头 内部推动喷雾喷出的推动力增大,而喷涂流量和喷涂 气压不变,这样就使得喷雾的喷雾角增大,沉积基线 长度增大。

2.3.1 沉积基线的长度变化对峰值和谷值位置的 影响

如图 7 所示,通过观察并计算大量速度场图像, 发现 A 喷头的喷雾沉积基线要比 B 喷头的喷雾沉积 基线长,且 A 喷头沉积基线长度随着液压的增加比 B 喷头增加的更长。由于喷嘴的结构不发生变化,随着 沉积基线的拉长,速度随位移变化图也发生拉长的现 象,所以随着喷涂液压的增加,峰值会向右移动。面 AA_oE 和面 BB_oD 分别为喷涂液压为 0.08 MPa 时喷头 A 和喷头 B 的喷雾面,此时干涉主要发生于线段 CO 附近。因为在靠近喷雾面边缘处,沉积基线上的速度 会由靠近中心向边缘逐渐减小,这是由沉积基线边界 点的确定所决定的,线段 CO 处正处于 A、B 两喷头 喷雾面的边界处,所以谷值在 O 点附近。当喷涂液 压为 0.16 MPa 时,由于 A 的沉积基线的增加量大于 B 的, EE'大于 D'D,所以 O 点向右偏移到 O'点,谷 值在 O'点附近,谷值会向右移动。



图 7 沉积基线长度变化 Fig.7 Schematic diagram for length variation of sedimentary baselines

2.3.2 沉积基线长度的变化对峰值和谷值大小的 影响

面I右沉积基线上的速度峰值只与喷头 A 的结构 和喷涂参数有关,随喷涂液压、气压的增大而增大。 面I右沉积基线上的第 2 个速度谷值随沉积基线的增 大而增大。由于喷嘴的结构不发生改变,速度曲线拉 长,面I右沉积基线上的速度曲线靠近边缘处的峰值 逐渐右移,而面II的峰值向左移,从而交会处的谷值 会随着沉积基线长度的增大而增大,直至消去谷值产 生新的峰值。如图 6c 所示,当喷涂液压为 0.24 MPa 时谷值已经消去。

如图 6a—b 所示,当喷涂液压为0.08 MPa 和0.16 MPa 时,偏转角为 7°时的峰值普遍大于偏转角为 0°时的峰 值,且偏转角为 0°时的峰值普遍大于偏转角为 15°时的 峰值。在图 6 所示各参数下,偏转角为 7°时的变化趋势 都与偏转角为 0°时的变化趋势相似,但是面I右沉积基 线上各点的速度大小普遍大于偏转角为 0°时的。

当喷涂液压为 0.08 MPa 和 0.16 MPa 时,偏转角 为 7°时的峰值较高。这是因为与偏转 0°相比,偏转 7° 时面II会有更多的粒子穿过干涉线 CO 去影响面I右沉 积基线上的速度,使其在面II左沉积基线边界内的速 度增加,所以偏转角为 7°时的峰值普遍大于偏转角为 0°时的峰值,且各测点的速度均普遍大于偏转角为 0° 时的。同理偏转角为 0°时,虽穿过干涉线的粒子不如 偏转 7°时的多,但也有部分粒子穿过,因此各测点速 度普遍大于偏转 15°时的测点速度。当喷涂液压为 0.24 MPa 时,由于面I峰值的左移和面II峰值的右移, 偏转角为 0°时的峰值可能是两峰值的叠加而成的,所 以其峰值要大于偏转 7°时的峰值。

3 结语

为了在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,在双枪喷涂实验中设计了一个新物理量——偏转 角。通过改变偏转角的大小来控制干涉程度,探寻不同 干涉情况下喷雾场的速度变化规律,研究双枪喷涂雾化 表征的速度均匀性,为实现宽幅覆膜奠定理论基础。

参考文献:

 (1) 龚国腾,杨传民,邢炯,等. 基于二值化灰度图像的 大豆蛋白液喷雾相对雾化程度的研究[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 225-230.
 GONG Guo-teng, YANG Chuan-min, XING Jiong, et al. Relative Atomization Degree of Soybean Protein Liquid Spray Based on Binary Gray Image[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 225-230.

[2] 蔚俊,杨传民,邢炯,等.基于 PIV 粒子速度场图像 大豆蛋白液的可喷性研究[J].包装工程,2021,42(9): 102-107.

YU Jun, YANG Chuan-min, XING Jiong, et al. Sprayability of Soybean Protein Solution Based on PIV Particle Velocity Field Image[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 102-107.

[3] 何思念,杨传民,郭杰,等.大豆蛋白液喷涂粒子速度场的 PIV 初探[J].包装工程,2017,38(21):41-45.
HE Si-nian, YANG Chuan-min, GUO Jie, et al. Preliminary Study on Spraying Particle Velocity Field of Soybean Protein Solution by PIV[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21):41-45.

LU Jing-he, LIU Xiao, HU Chuan-long, et al. Experimental Study on Flashing Spray Characteristics of Pressure Swirl Nozzle with Ethanol Solution[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 110015.

- [4] 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, 2021: 1-11.
- [5] DAFSARI R A, LEE H J, HAN J, et al. Evaluation of the atomization characteristics of aviation fuels with different viscosities using a pressure swirl atomizer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 145: 118704.
- [6] SHADRIN E Y, ANUFRIEVn I S, SHARYPOV O V. Atomization and Combustion of Coal-Water Slurry Fuel Sprayed by a Pneumatic Nozzle[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2021, 62(3): 490-495.
- [7] FATHINIA F, KHIADANI M, AL-ABDELI Y M. Experimental and Mathematical Investigations of Spray Angle and Droplet Sizes of a Flash Evaporation Desalination System[J]. Powder Technology, 2019, 355: 542-551.
- [8] 许相辉, 蒋甲利, 牛中国, 等. 圆柱尾流场的 Tomo-PIV 测量[J]. 实验流体力学, 2015, 29(5): 60-64. XU Xiang-hui, JIANG Jia-li, NIU Zhong-guo, et al. Measurements of Cylinder's Wake by Tomo-PIV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(5): 60-64.
- [9] ADRIAN R J. Twenty Years of Particle Image Velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 159-169.
- [10] 沈鑫垚, 毛军逵, 刘方圆, 等. 基于 PIV 技术的单圆 孔脉冲射流流场特征[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9): 1845-1855.
 SHEN Xin-yao, MAO Jun-kui, LIU Fang-yuan, et al. Flow Field Characteristics of Single round Hole Pulsed Jet Based on PIV Technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1845-1855.
- [11] LYULIN Y, KRETA A, OUERDANE H, et al. Experimental Study of the Convective Motions by the PIV Technique within an Evaporating Liquid Layer into the Gas Flow[J]. Microgravity Science and Technology, 2020, 32(2): 203-216.
- [12] MURAKAMI M, TAKADA S. PIV Measurement of Flow Field Generated during Noisy Film Boiling in Saturated He II[J]. Cryogenics, 2020, 108: 103083.
- [13] ZHAO Yong-ling, LI Hai-wei, KUBILAY A, et al. Buoyancy Effects on the Flows around Flat and Steep Street Canyons in Simplified Urban Settings Subject to a Neutral Approaching Boundary Layer: Wind Tunnel PIV Measurements[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 797: 149067.
- [14] ABBAS S, ALI E, MOHAMMADREZA N. 2D PIV Study of Flow Accelerated Corrosion Downstream a Typical Industrial Gate Valve[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 121: 103260.