

数字图像相关技术在大豆蛋白喷涂流速测量中的应用

陈国营, 杨传民, 董肖云, 陈诚, 张小川

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 分析蔬菜复合纸制备过程中的喷涂雾化规律, 研究大豆蛋白喷涂液在不同喷涂参数下雾化场速度的变化。 **方法** 首先通过高速摄像机采集多帧连续喷涂图像, 然后对采集的图像序列做相关性分析以获得各图像对之间的相对位移场, 最后结合高速摄像机采集图像参数计算大豆蛋白液喷涂雾化速度场。 **结果** 选取喷头下方 10 cm 处, 边长为 10 cm 的正方形区域的雾化颗粒进行分析, 当气压一定时, 大豆蛋白雾化颗粒平均速度随液压的增大而增大; 液压一定时, 随着气压的增大, 大豆蛋白喷雾颗粒平均速度先减小后增大, 最后趋于某一稳定值。 **结论** 通过数字图像相关技术对高速摄像机拍摄的雾化场图像进行处理分析, 能够描述大豆蛋白液喷涂雾化场的速度分布特性。通过处理不同喷涂参数下的雾化图像, 得到了喷涂参数对雾化颗粒速度的影响。

关键词: 数字图像相关; 高速摄像机; 大豆蛋白喷涂液; 流速测量

中图分类号: TB484. 1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)05-0063-05

Application of Digital Image Correlation Technique in the Velocity Measurement of Soy Protein Spray

CHEN Guo-ying, YANG Chuan-min, DONG Xiao-yun, CHEN Cheng, ZHANG Xiao-chuan

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: This work was aimed to analyze the law of the spray atomization in the production of the vegetable composite paper, and to study the change in the atomization field's speed of the soy protein spraying fluid under different coating conditions. Firstly continuous spray images were collected by high-speed cameras. Then correlation analysis of the collected image sequence was conducted to obtain the relative displacement field of the image pairs. Finally, combined with the images' parameters acquired by the high speed camera, the speed field of the soy protein spraying fluid's atomization was calculated. Analysis was conducted with the atomized particles in the square area 10 cm below the nozzle with a side length of 10 cm. At a constant air pressure, the average velocity of soy protein atomized particles increased with increasing hydraulic pressure. At a constant hydraulic, with the increase of air pressure, the average velocity of soy protein atomized particles first decreased and then increased, and finally tended to be stabilized. After analyzing the images of atomization field collected by high-speed camera using the digital image correlation technique, the velocity distribution characteristics of the soy protein spraying fluid atomization field was described. Through processing spray images under different spraying parameters, the influence of spraying parameters on atomized particle velocity was obtained.

KEY WORDS: digital image correlation technique; high-speed cameras; soy protein spray coating dispersions; velocity measurement

在利用电子脉冲喷雾系统将大豆蛋白液喷涂蔬菜纸表面制备蔬菜复合纸^[1-2]的过程中, 喷涂雾化效果是

收稿日期: 2015-07-17

基金项目: 天津市自然科学基金(15JCZDJC34100); 天津市高校发展基金(20130403)

作者简介: 陈国营(1989—), 男, 河北人, 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。

直接影响蔬菜复合纸包装性能的关键因素^[3-5]。大豆蛋白液喷雾颗粒速度作为喷涂雾化效果影响因素的一种,是评价雾化质量、蔬菜复合纸制备等工作的重要参考指标。由于大豆蛋白液的特殊物理性能、喷涂系统喷头物理结构、喷涂系统参数设置以及外部环境等因素,使得喷涂过程中液体流动规律研究变得非常复杂,仅靠建立理论模型进行分析难以得到准确的结果,必须采用理论分析与实际试验测量相结合的方法来解决。目前应用于流体流速测量的方法可分为接触式和非接触式两类^[6],接触式主要有毕托管流速测量法、旋桨式流速测量法、热线流速测量法^[7]、电磁流速测量法等,非接触式主要有基于微粒追踪技术的激光PIV三维流速测量法^[8]、激光摄像流速测量法^[9]等。

接触式流速测量对流体有一定的要求,如热线流速测量法利用热电阻传感器的热损失来测流速,要求必须清洁无杂质,而大豆蛋白液具有一定的粘稠度,当大豆蛋白液附着在传感器表面,会改变热耗散率,将造成较大误差。非接触式测量方法如PIV技术,自其国产化以来,成本有所降低,但其对测量现场条件要求较为苛刻,且灵活性不强,难以在实际工程问题中进行应用。文中利用Matlab软件编制数字图像相关程序,对高速摄像机拍摄连续喷涂雾化图像做相关性分析,建立喷雾轮廓的位移场和速度场。

1 实验

1.1 材料和仪器

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;IDTY4S2-16G型高速摄像机,美国Integrated design tools公司;WH7401-60型电动搅拌机,天津市威化实验仪器厂;DK-98-IIA电热恒温水浴锅,天津泰斯特仪器有限公司。

1.2 大豆蛋白喷涂液的制备

将大豆蛋白和蒸馏水加入四口圆底瓶中,在80℃恒温水浴加热搅拌,搅拌约60 min后,加入添加剂CMC(质量分数为1%)、甘油、聚羧酸盐(质量分数为1%),而后搅拌约30 min,最终制得大豆蛋白喷涂液。

1.3 喷雾图像采集

1.3.1 图像采集系统

高速摄像机采集喷雾场图像的实验装置见图1。

整个实验装置包括喷雾系统、高速摄像系统以及喷头二维移动系统等三大部分。喷雾系统采用斯普瑞喷雾系统上海有限公司生产的Auto-Jet电子脉冲喷雾系统,配有专为喷雾应用所开发的专用控制器,可以监控和设定来自于不同的传感器或仪表,确保可以对系统液路和气路压力等喷雾参数的精确控制。高速摄像机系统采用IDTY4S2-16G型高速摄像机。高速摄像机一般以每秒1000~10 000帧的速度记录,导致每张图像的曝光时间有限,需要辅助光源来提高有限时间内的曝光量,从而提高图像质量。实验采用激光片光源来提高高速摄像机曝光量。二维移动支架可以调整喷头在平面内位置,以便高速摄像机的拍摄。

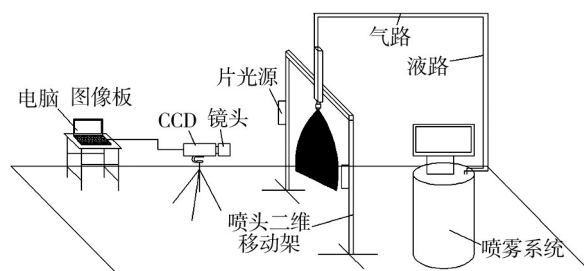


图1 高速摄像机采集图像设备布局

Fig.1 Layout of image capture equipment for high-speed cameras

1.3.2 图像采集过程

首先将制备好的喷涂液加入电子脉冲喷涂系统的储液罐,调整气压、液压等喷雾参数。利用IDTY4S2-16G型高速摄像机进行图像采集,根据实验条件设置高速摄像机的采集频率(1000帧/秒)、采集帧数(100帧)。采集的部分图像见图2。

为了明确喷雾图像中像素点与实际尺寸之间的换算关系,用高速摄像机拍摄一副标尺图像。水平方向500 mm所间隔的像素数为837,竖直方向400 mm所间隔的像素数为670,可知单个像素块大小所代表的实际尺寸为0.597 mm。

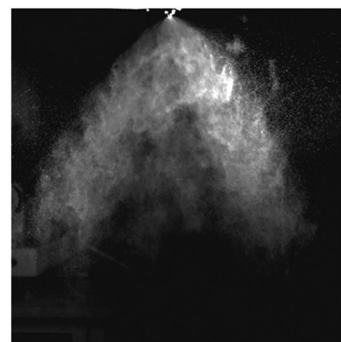


图2 喷雾图像

Fig.2 Spray image

2 数字图像相关的 Matlab 实现

2.1 Matlab 程序处理喷涂图片

文中 Matlab 图像处理程序^[10-13]基本思路:首先采用 Matlab 中的 imread 函数读入由高速摄像机采集的连续 2 幅喷涂雾化原始图像;其次对图像进行去背景处理,消除图片中不是大豆蛋白液雾化颗粒的物体;然后定义相关系数,对 2 幅图像做相关性分析,得出 2 幅图像中像素点的位移;最后根据高速摄像机采集图像的间隔时间得出大豆蛋白液喷涂雾化的速度场。

2.1.1 读入图像及去背景

首先使用 Matlab 中 imread 函数读入 2 幅喷雾图像和 1 幅背景图像,然后采用 imsubtract 函数从喷雾图像中去除背景图像信息,见图 3。

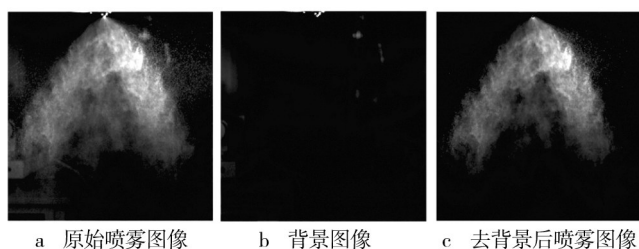


图3 图像去背景

Fig.3 Background removal of image

对应的 Matlab 语言实现的源程序及主要注解如下所述。

A=imread('ImgA000001.bmp'); 读入图像文件

B=imread('ImgA000001.bmp');

C=imread('bj.bmp');

A1=imsubtract(A,C); 进行图像减法,去除图像中的背景信息

B1=imsubtract(B,C);

2.1.2 定义相关系数及做相关性分析

相关系数,或称线性相关系数,是衡量 2 个随机变量之间线性相关程度的指标,其计算公式为:

$$c = \frac{\sum f \otimes g}{\sqrt{\sum (f \otimes f) \times \sum (g \otimes g)}} \quad (1)$$

式中: f 为以第 1 幅图像中某一像素点为中心、大小为 41×41 的矩形模板的像素矩阵; g 为以第 2 幅图像中某一像素点为中心、大小为 41×41 的矩形模板的像素矩阵; c 为第 1 幅图像中某一像素点与第 2 幅图像中某一像素点的相关系数; $f \otimes g$ 为矩阵 f 与矩阵 g 对应元素相乘得到一个大小为 41×41 的矩阵; $\sum$

表示矩阵中所有元素求代数和。若 c 越接近于 1,则说明 2 幅图像中的像素点相关性能高,可判定 2 幅图像中的像素点显示的是同一大豆蛋白液雾化颗粒,利用两像素点的坐标差可得该大豆蛋白液雾化颗粒在采集 2 幅图像的时间间隔内发生的位移^[14]。

对应的 Matlab 语言实现的部分源程序及主要注解如下所述。

xsize=41; 子区尺寸

f=double(i1(x-(xsize-1)/2:x+(xsize-1)/2,y-(xsize-1)/2:y+(xsize-1)/2)); 定义相关系数

c1=0;u=0;v=0; 相关系数初值可设为 0,临时变量

for i=-20:20

for j=-20:20 矩形模板的圆心移动搜索范围

xx=x+i; 矩形模板的圆心移动后的行坐标

yy=y+j; 矩形模板的圆心移动后的列坐标

g=double(i2(xx-(xsize-1)/2:xx+(xsize-1)/2,yy-(xsize-1)/2:yy+(xsize-1)/2));

if c1<=sum(sum(f.*g))/sqrt(sum(sum(f.*f))*sum(sum(g.*g)));

c1=sum(sum(f.*g))/sqrt(sum(sum(f.*f))*sum(sum(g.*g)));

v=i;u=j;

end;

end

2.1.3 大豆蛋白液喷涂雾化场速度分析

由高速摄像机采集喷雾图像时的采集条件及标尺图像可知,连续采集 2 帧图像的时间间隔为 1/1500 s,一个像素的实际长度为 0.597 mm。首先将像素位移场转变为实际尺寸位移场,再利用速度与时间、位移之间的关系可得大豆蛋白液喷涂雾化场速度。

对应的 Matlab 语言实现的部分源程序及主要注解如下所述。

k=;t=1/1500; 图像采集条件

u1=k*u; v1=k*v; 转换为实际尺寸

u2=u1/t; v2=v1/t; 速度计算

2.2 Matlab 图像处理程序的验证

为了验证程序的准确性,用摄像机拍摄一幅原始图像见图 4a,利用 Photoshop 图像处理软件从原始图像中选出 4 个区域 A,B,C 和 D,并作相应的移动处理:A 区域垂直向下移动 2 个像素值,B 区域垂直向上移动 3 个像素值,C 区域垂直向上移动 4 个像素值,D 区域垂直向上移动 6 个像素值。得到变换后的图像见图 4b,移动距离加倍后的图像见图 4c。

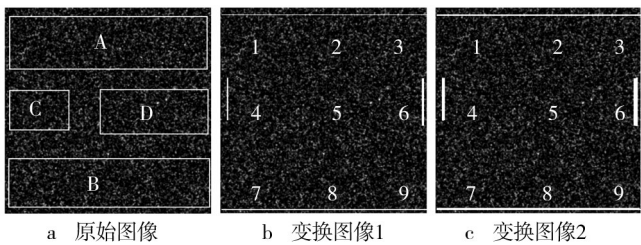


图4 图像处理过程
Fig.4 Image processing process

在图像7和8中分别选出9个像素点,然后运行 Matlab 程序对原始图像和变换后的图像进行运算,并做相关性分析,计算得出9个像素点在竖直方向的位移量 u 和水平方向的位移量 v 的位移矩阵:

$$U_1 = \begin{bmatrix} -2.004 & -2.022 & -2.016 \\ 0.008 & 0.061 & 0.061 \\ 3.021 & 3.012 & 3.008 \end{bmatrix}$$
$$U_2 = \begin{bmatrix} -4.007 & -4.024 & -4.019 \\ 0.007 & 0.042 & 0.042 \\ 6.013 & 6.011 & 6.009 \end{bmatrix}$$
$$V_1 = \begin{bmatrix} -0.003 & -0.003 & 0.015 \\ 3.993 & -5.958 & -5.998 \\ 0.007 & 0.016 & 0.017 \end{bmatrix}$$
$$V_2 = \begin{bmatrix} -0.002 & -0.004 & 0.013 \\ 8.003 & -11.998 & -12.004 \\ 0.005 & 0.012 & 0.013 \end{bmatrix}$$

图4b中9个像素点的位移矢量见图5。

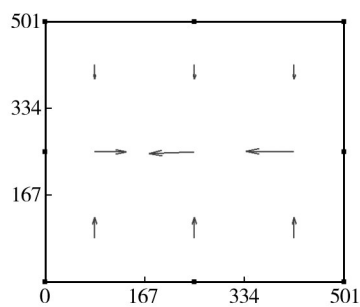


图5 3×3像素点的位移矢量
Fig.5 Displacement vector of 3×3 pixel

分析最终的计算结果,以第1点为例,该点2次移动后计算结果分别为 $u_1=-2.004$ 和 $v_1=-0.003$, $u_1=-4.007$ 和 $v_1=-0.002$,即该点相对于原图像中的位置第1次向下移动了2个像素,第2次向下移动了4个像素,计算结果准确,其余点做相同分析。可知自编 Matlab 图像处理程序计算准确有效,可用于大豆蛋白液喷涂雾化场速度的分析计算。

3 结果与分析

3.1 喷涂液压和气压对大豆蛋白喷雾颗粒速度的影响

利用上述自编 Matlab 数字图像处理程序对不同喷雾参数下采集的图像进行分析。喷雾流量为 50 mL/min,液压、气压都分别为 0.10,0.15,0.20,0.25 MPa 时,喷雾场中距喷头 10 cm 处,边长为 10 cm 的正方形区域中大豆蛋白喷雾颗粒平均速度见表 1。

表1 不同液压、气压对大豆蛋白雾化颗粒速度的影响
Tab.1 Effect of different hydraulic pressures and air pressure on velocity of soybean protein atomized particles

气压/MPa	液压/MPa				m/s
	0.10	0.15	0.20	0.25	
0.10	18.39	21.88	25.13	28.61	
0.15	15.67	21.03	23.24	26.53	
0.20	16.48	17.57	20.16	24.38	
0.25	17.09	19.76	21.64	23.11	

由表1可知,气压一定时,随着液压的增大,大豆蛋白喷雾颗粒速度呈上升趋势;当液压一定时,随着气压的增大但小于此时的液压,大豆蛋白喷雾颗粒速度减小,气压继续增大,大豆蛋白喷雾颗粒速度变大。

3.2 喷涂流量对大豆蛋白喷雾颗粒速度的影响

喷涂气压、液压均为 0.20 MPa,喷涂流量为 30,35,40,45,50,55,60,65 mL/min 时,喷雾场中距喷头 10 cm 处,边长为 10 cm 的正方形区域中大豆蛋白喷雾颗粒平均速度分别为 15.94,16.33,17.72,19.54,20.16,22.11,21.39,20.67 m/s。可知流量小于 55 mL/min 时,随着流量的增大,大豆蛋白雾化颗粒速度增大;当流量大于 55 mL/min 时,大豆蛋白雾化颗粒速度开始减小。

参考喷雾学相关文献,液体雾化是连续液体碎裂成大量离散型液滴的过程,主要受空气动力、表面张力和粘力控制。文中所用喷雾液体均为大豆蛋白液,黏性系数相同,所以雾化过程主要受表面张力和空气动力的影响。当气压较小并小于液压时,空气动力不足以打破液滴自身平衡,雾化质量较差,喷雾场有明显的连续液体,因此喷雾场的速度较大;气压增大时,雾化质量提高、颗粒变小、速度变慢;当气压进一步增大时,喷雾场液体完全雾化,且雾化颗粒还能保有较大的动能,所以喷雾场雾化颗粒的速度会有少量的提

高^[15]。气压、液压一定,流量从30~55 mL/min时,由于喷嘴喷出的液体增多,雾化效果变差,颗粒速度变大;当流量大于55 mL/min时,喷嘴喷出的液体进一步增多,而气压、液压不足以提供足够的能量,颗粒速度开始变小。

4 结语

基于Matlab强大的数字图像处理功能,对高速摄像机拍摄大豆蛋白液喷涂雾化场图像进行了相关性分析,得出了喷雾场雾化颗粒的速度,并讨论了喷雾过程中液压和气压对喷雾场雾化颗粒的速度的影响。结果表明,文中自编数字图像处理程序能够方便、高效地计算大豆蛋白喷雾速度场,为深入开展图像法测量流体速度打下了基础。

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] 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, 125:255—261.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] 蔡守允,杨大明,朱其俊.模型试验流速测量仪器的分析研究[J].水资源与工程学报,2007,18(3):36—38.
CAI Shou-yun, YANG Da-ming, ZHU Qi-jun. Study of Velocity Instruments by the Model Test[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(3):36—38.
- [7] 陈曦,沙奕卓,吕文华.热线流速仪在风洞流场测试中的应用[J].仪器仪表学报,2011,32(12):276—280.
CHEN Xi, SHAYi-zhuo, LYU Wen-hua. Application of the Hot-wire Anemometer in the Wind Tunnel Flow Field Test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):276—280.
- [8] 陈维真,陈标,张春华,等.基于自适应窗口选择PIV技术的序列星图运动估计方法[J].光学精密工程,2008,16(7):1279—1284.
CHEN Wei-zhen, CHEN Biao, ZHANG Chun-hua. Motion Estimation Algorithm of Serial Star Images Based on Adaptive Window Selection PIV Technique[J]. Optics Precision Engineering, 2008, 16(7):1279—1284.
- [9] 王文海,吴俊奇,滕华.摄像机结合图像处理技术实现明渠流速测量[J].北京建筑工程学院学报,2002,18(2):18—21.
WANG Wen-hai, WU Jun-qi, TENG Hua. Measure the Velocity of Steady Flow in an Open Channel[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2002, 18(2):18—21.
- [10] RAFAEL C G, RICHARD E W. Digital Image Processing[M]. Third Edition. Pearson: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [11] KENNETH R C. Digital Image Processing[M]. Pearson: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [12] 河东健,耿楠,张义宽.数字图像处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
HE Dong-jian, GENG Nan, ZHANG Yi-kuan. Digital Image Processing[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2003.
- [13] 杨丹,赵海滨. MATLAB图像处理实例详解[M].北京:清华大学出版社,2013.
YANG Dan, ZHAO Hai-bin. Example Explanation of MATLAB Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [14] ZHANG X, CHEN J, WANG Z, et al. Digital Image Correlation Using Ring Template and Quadrilateral Element for Large Rotation Measurement[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50:922—928.
- [15] 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.