

大豆蛋白液喷涂粒子速度场的 PIV 初探

何思念, 杨传民, 郭杰, 任少伟
(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 选择蔬菜复合纸覆膜成型过程中的最优喷涂条件。**方法** 利用 PIV (粒子图像测速) 技术测量不同喷涂参数下大豆蛋白液喷涂雾化粒子的速度场分布, 并通过数据分析软件 Tecplot 处理分析喷涂参数对大豆蛋白液喷涂雾化粒子速度场的影响, 最终得出喷雾速度场中心轴上和某一截面上速度的变化规律。**结果** 当喷涂气压一定时, 喷涂粒子速度随着喷涂液压的增大呈增大趋势, 但不是很明显。当喷涂液压不变时, 喷涂粒子速度随着喷涂气压的增大呈先减小后增大的趋势。在喷雾场喷嘴中轴线方向上雾化粒子速度从喷口喷出后先急剧增大, 随着距喷嘴越来越远逐渐呈现波动变化的趋势, 最后趋于稳定。在距离喷嘴 300 mm 的截面处, 粒子速度以轴心处最大, 向外沿径向逐渐减小, 大体呈对称趋势。**结论** 用 PIV 技术对大豆蛋白液喷涂粒子速度场进行研究, 可为后期蔬菜复合纸覆膜成型提供一个有力的试验数据参考。

关键词: 蔬菜复合纸; 大豆蛋白液; PIV 技术; 粒子速度场

中图分类号: TB484. 1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0041-05

Preliminary Study on Spraying Particle Velocity Field of Soybean Protein Solution by PIV

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

ABSTRACT: The work aims to select the best spraying condition in the process of forming vegetable compound paper by laminating. PIV (particle image velocimetry) technology was applied to measure the velocity field distribution of soybean protein solution's sprayed atomized particles under different spraying parameters. The effects of spraying parameters on the velocity field distribution of soybean protein solution's sprayed atomized particles were processed and analyzed with the data analysis software Tecplot. Finally, the change law of velocity on the central axis of spray velocity field and some section was obtained. When it reached certain spraying pressure, the sprayed particle velocity increased with the increase in the spraying hydraulic pressure, but it was not quite obvious. When the spraying hydraulic pressure remained unchanged, the sprayed particle velocity decreased and then increased with the increase in the spraying pressure. In the axial direction of the spray field nozzle, the atomized particle velocity increased rapidly after it was ejected from the nozzle, and then gradually presented a tendency of fluctuation with the increasingly farther distance from the nozzle, and finally, it tended to be stable. In the cross section 300 mm away from the nozzle, the particle velocity was the largest in the axis, and it decreased outwards gradually along the radial direction. The particle velocity was symmetrical to the center generally. The study on the sprayed particle velocity field of soybean protein solution with PIV technology is conducted and it can provide a powerful reference for the test data of forming vegetable compound paper by laminating in the later periods.

KEY WORDS: vegetable compound paper; soybean protein solution; PIV technology; particle velocity field

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目 (15JCZDJC34100); 天津市高校发展基金 (20130403); 天津市高等职业技术教育研究会 2015 年度课题 (XV307)

作者简介: 何思念 (1990—), 女, 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, 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。

随着经济的飞速发展,人们对产品的包装要求越来越高,特别是食品包装,但市面上大多数使用石油基非降解食品包装材料,过度使用石油基非降解食品包装材料导致了大量的难以处理的永久性垃圾,对生态环境造成了严重污染,因此发展易降解、无污染、可食性的新型食品包装材料越来越受到国内外学者的重视^[1-2]。蔬菜纸的研发不仅符合绿色环保的理念,同时能够满足人们对膳食纤维的需求,但纯蔬菜纸作为包装材料不能达到较好的热封性能,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^[3-7]。

大豆蛋白液雾化粒子速度场特性是影响大豆蛋白液喷涂覆膜成型的重要因素之一,严重影响着纯蔬菜纸的覆膜质量。大豆蛋白液喷涂粒子速度场的研究是新型包装材料蔬菜复合纸研究的重要组成部分,选择合适的喷涂雾化参数(喷涂流量、喷涂气压、喷涂液压)能够显著提高蔬菜复合纸的包装性能^[8-10]。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 PIV(粒子图像测速)技术测量大豆蛋白液喷涂粒子速度场分布。大豆蛋白液喷涂粒子速度受到大豆蛋白液粘度、电子脉冲喷嘴频率、喷涂流量、喷涂气压、喷涂液压等多种因素的影响,这里将大豆蛋白液粘度、电子脉冲频率和喷涂流量选为固定参数,主要研究喷涂气压、喷涂液压对大豆蛋白液喷涂粒子速度场及其分布的影响。

1 实验

1.1 材料与设备

主要材料:分离大豆蛋白,山东万得福实业集团有限公司;羧甲基纤维素钠(CMC)、甘油、聚羧酸盐等食品级添加剂,天津化工有限公司。主要仪器: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,HHD-2数显恒温水浴锅,上海皓庄仪器有限公司;捷豹牌10HP空气压缩机,台商独资厦门东亚机械有限公司制造;二维伺服喷嘴移动架,天津商业大学包装与机械工程中心;粒子图像测速系统,北京立方天地科技发展有限公司。

1.2 系统结构

采用 PIV 系统进行大豆蛋白喷涂液速度场实验,系统结构见图 1。整个实验装置包括 PIV 测量系统、大豆蛋白液喷涂雾化系统、二维伺服喷嘴移动系统和废液回收装置。

PIV 测速系统的组成主要包括双脉冲式激光器、高速数字相机、同步控制系统以及图像采集与后处理软件 Tecplot 等,大豆蛋白液喷涂雾化系统喷嘴为扇

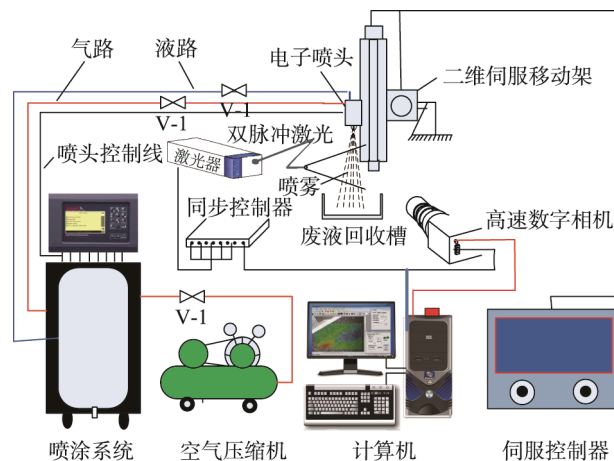


图 1 速度数据采集系统

Fig.1 Velocity data acquisition system

形两相流电子脉冲喷嘴,配有 MSM-2250 喷嘴控制系统实现喷涂参数精确控制,使用空气压缩机来提供压力,最大容积为 40 L,具备有加热功能的储液罐。

1.3 PIV 测量原理

PIV 的基本原理是测量示踪粒子在时间 Δt 内的位移 Δx , Δy , 进而获得粒子运动的速度 $v_x = \Delta x / \Delta t$, $v_y = \Delta y / \Delta t$, 在流场中散播一些适当的示踪粒子,用脉冲激光片光照射所测流场的切面区域,通过 CCD 相机记录系统摄取 2 次或者多次曝光的粒子图像,形成 PIV 试验图像,再利用图像互相关方法分析 PIV 图像,获得流场一个切面内定量的速度分布,获得每一小区域中粒子图像的平均位移,由此确定流场切面上整个区域的二维速度^[11]。该试验采用 PIV 对喷雾进行试验测量,大豆蛋白液喷雾液滴为被测对象,因此不需要添加任何示踪粒子^[12]。

1.4 实验方案

设定大豆蛋白液粘度为 0.0261 Pa·s,大豆蛋白液质量分数为 5%,喷嘴电子脉冲频率为 80 Hz,喷涂流量为 50 mL/min。侯红红^[13]等已有实验证明,当喷涂气压为 0.199 MPa,喷涂液压为 0.151 MPa 时,可得到最优的喷雾角,因此选择喷涂气压为 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22, 0.24, 0.26 MPa,喷涂液压为 0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22, 0.24, 0.26 MPa。通过改变喷涂参数(喷涂气压、喷涂液压),采集不同喷涂条件下大豆蛋白液雾化速度场信息,然后进行速度场的数据分析。

2 结果与分析

2.1 整体形貌

喷雾装置和 PIV 系统装置调试完成后,首先拍摄标尺,确定放大倍数^[14],对喷雾场进行尺寸标定,在

PIV 系统中标定后得出的图像放大率,即每像素图像放大 0.2325 mm,每像素的放大速度为 0.4650 m/s。调试完后,进行喷雾,利用 PIV 系统进行图像采集,为了避免喷雾瞬时性对某些雾化特性的影响^[15],试验中设定在同一喷涂参数下,连续采集 30 张原始图像。对采集的 30 张图像进行平均化处理,最后得出特定喷涂参数下的图像。在喷涂气压为 0.12 MPa,喷涂液压为 0.24 MPa 的喷涂条件下,从 30 张原始图像中挑选连续 2 张图像,见图 2。由于曝光时间不同,后一帧的图像会比前一帧的图像稍暗一些。在上述喷涂条件下,用 PIV 对采集的 30 张图像进行互相关计算后,再用后处理软件 Tecplot 处理后得到最终的喷雾图像的速度场,见图 3。

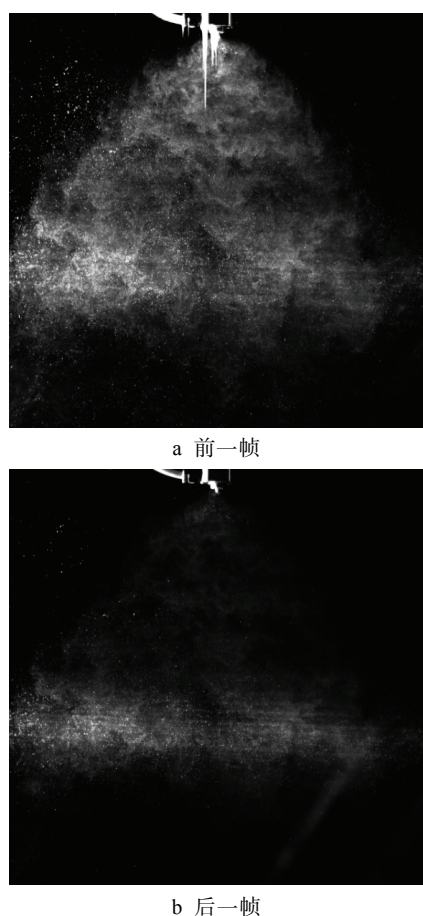


图 2 2 帧连续的原始图像

Fig.2 Two consecutive frames of the original image

由图 2—3 可以看出,扇形的电子脉冲对大豆蛋白液进行喷涂时,喷雾场基本呈现对称分布,喷头中心轴靠近喷头处的速度最大。

2.2 大豆蛋白液喷涂粒子速度场受喷涂参数的影响

2.2.1 喷嘴中轴线方向上粒子的速度分布

喷涂气压为 0.16 MPa 时,喷嘴中轴线上的粒子速度随着喷涂液压的增大呈增大的趋势,但不明显,见图 4a。喷涂液压为 0.16 MPa,喷嘴中轴线上的粒

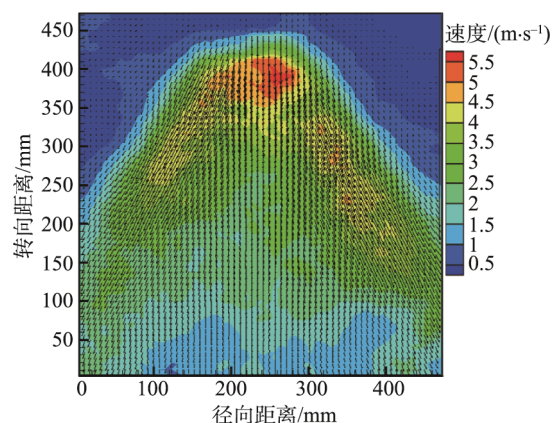
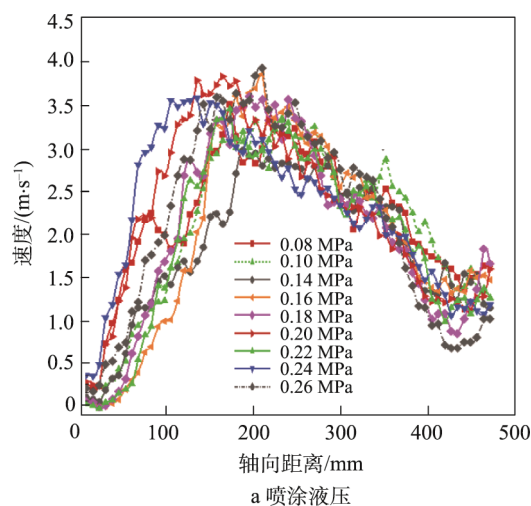


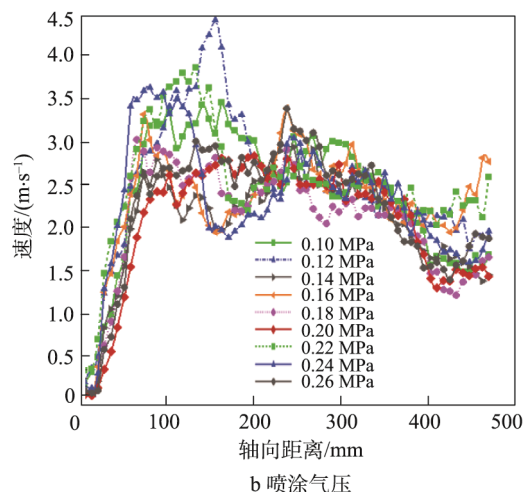
图 3 喷雾粒子速度场

Fig.3 Spray particle velocity field

子速度随着喷涂气压的增大呈先减小后增加的趋势,见图 4b。由图 4 可知,中轴线上的粒子速度在喷头喷出后急剧增大,之后呈现波动的变化趋势,最后趋于稳定。这主要是由于大豆蛋白雾化液与空气的混合作用所致。在大空间中,空气处于静止状态,喷雾喷出后粒子处于较高速度,于是空气便与喷雾发生剧烈



a 喷涂液压



b 喷涂气压

图 4 喷涂液压和喷涂气压对轴向速度分布影响
Fig.4 Effects of spraying hydraulic pressure and spraying pressure on the axial distribution of velocity

混合,喷雾卷吸空气后将动量传递给新增空气,随着喷雾的前进,其卷吸的空气增多,传递的动量也更多,导致了整体速度的下降。此外,颗粒碰撞也使油滴损失一部分动量,两者共同造成了粒子速度沿轴向距离的增大而减小,同时距离更大,雾滴速度分布更均匀^[16]。

喷雾喷嘴中轴线上的粒子速度随着气液压比的变化规律见图5,取喷嘴中轴线上与喷嘴距离100 mm处的粒子速度进行数据分析,当气液压比分别为1:2, 1:3, 2:3, 3:2, 2:1, 3:1时,粒子速度分别为4.917, 4.727, 4.120, 4.117, 5.216, 4.337 m/s,从这些数据可以看出,随着气液压比的增加,喷头中轴线上的粒子速度随着气液比的增加呈先减小后增加的趋势。由图5并不能很明显地看出上述规律,说明气压和液压对喷雾粒子速度场的影响都很明显,需要后续进行多因素的正交试验分析,才能够得出优化的喷涂参数。

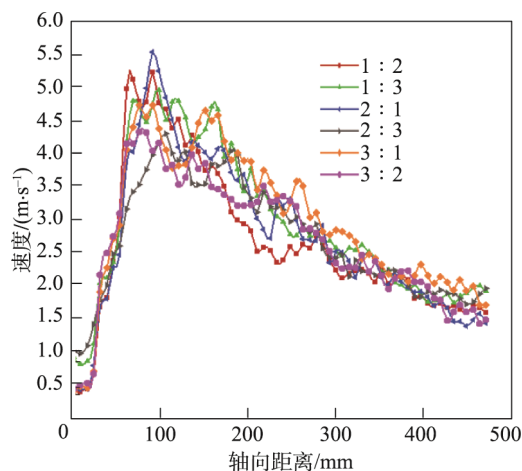


图5 喷涂气液压比对轴向速度分布影响
Fig.5 Effects of spraying gas hydraulic ratio on the axial distribution of velocity

2.2.2 距喷嘴300 mm截面上粒子速度的变化

喷涂气压为0.16 MPa,喷涂液压改变时,距喷嘴300 mm截面处的粒子速度分布见图6a。可以看出,随着液压的增大,粒子速度呈增大的趋势,但不是很明显。喷涂液压为0.16 MPa,喷涂气压改变时,距喷嘴300 mm截面处的粒子速度分布见图6b。可以看出,轴心处的速度最大,向外沿径向逐渐减小,基本呈对称分布,这是由于大豆蛋白液和气体从喷嘴喷出,雾化形成雾滴群后进入静止的大气空间,属于自由湍流射流,根据自由射流理论,粒子在离开喷口后与周围空气介质混合,发生剧烈的能量动量交换,其速度的变化十分剧烈^[17]。喷雾与空气的混合是先由边缘开始向喷雾中心递进的,对于均匀的喷雾,其喷嘴下游的速度场呈现轴心速度大,边缘速度小,由轴心向边缘递减的规律。

2.2.3 不同截面上的粒子速度

在喷涂气压、液压均为0.2 MPa的条件下,选取

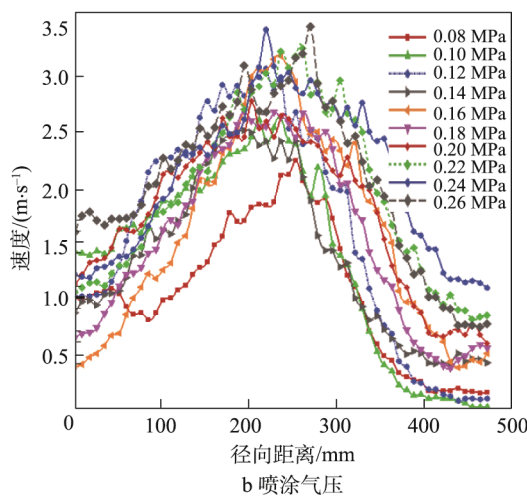
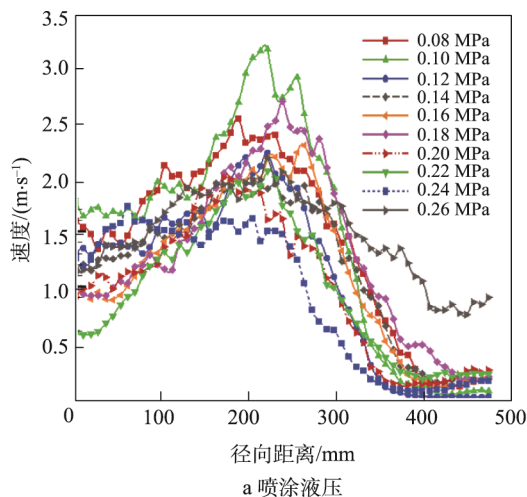


图6 喷涂液压和喷涂气压对径向速度分布影响
Fig.6 Effects of spraying hydraulic pressure and spraying pressure on the radial distribution of velocity

距离喷嘴不同的3个截面的速度分布,见图7。可以看出,距离喷嘴300, 500, 600 mm处,速度分布均以轴心处为最大,向外沿径向逐渐减小。由于距离喷嘴越远,粒子速度越来越小,几乎接近于自由落体,所以截面上的粒子速度基本上大体相似,在距离喷嘴

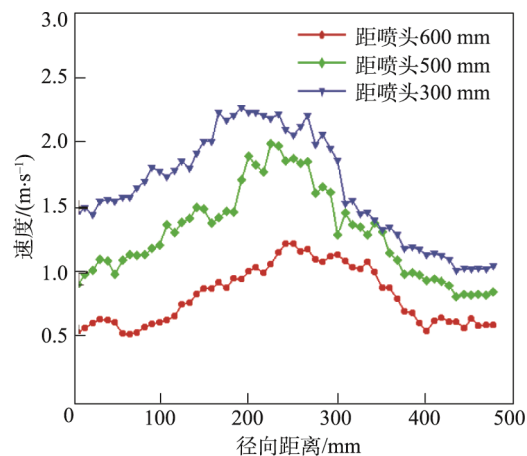


图7 不同截面上的粒子速度
Fig.7 Particle velocity on different sections

600 mm 以下时,速度波动小,供后续优化以找到粒子速度大体一样的截面进行参考。

3 结语

利用 PIV 系统对大豆蛋白喷涂液雾化场粒子速度进行了初步探索,并分析喷涂参数对雾化场粒子速度的影响,得出了以下结论:在喷涂气压不变时,大豆蛋白液喷涂粒子速度随喷涂液压的增加呈增大的趋势,但趋势不是很明显;在喷涂液压不变时,大豆蛋白液喷涂粒子速度随着喷涂气压的增加呈先减小后增大的趋势;在喷涂雾化场喷嘴轴线上,粒子速度在喷口喷出后急剧增大,之后呈现波动的变化趋势,最后趋于稳定的趋势;在距喷嘴 300 mm 的截面处,粒子速度以轴心处为最大,向外沿径向逐渐减小,大体呈对称趋势。

根据以上分析,可以看出,大豆蛋白液喷涂粒子速度场与喷涂气压、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子速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.可降解生物基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, 125(S): 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, 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.
- [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, et al. 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] 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.
- [12] 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.
- [13] 侯红红,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-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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 谢象春.湍流射流理论与计算[M].北京:科学出版社,1975.
XIE Xiang-chun. Turbulent Jet Theory and Calculation[M]. Beijing: Science Press, 1975.