

重点推介

## 大豆蛋白液浓度及喷涂条件对雾化角的影响

董肖云<sup>1</sup>, 杨传民<sup>1</sup>, 陈国营<sup>1</sup>, 陈诚<sup>1</sup>, 郑毅<sup>2</sup>

(1. 天津商业大学, 天津 300134; 2. 河北工业大学, 天津 300131)

**摘要:**目的 为了分析蔬菜复合纸的喷涂效果, 研究大豆蛋白喷涂液在不同的蛋白液浓度及喷涂条件下雾化角的变化与雾化整体形貌。方法 首先通过高速摄像机采集喷涂图像, 其次利用 Matlab 图像处理功能计算雾化角, 并通过响应面分析法分析大豆蛋白浓度及喷涂条件对雾化角的影响。结果 当液压力大、气压小时, 喷涂雾化效果较差; 随着气压的增大, 雾化效果逐渐变好。单因素中浓度和气压对大豆蛋白喷涂液的雾化角有显著影响, 并通过分析软件得到了雾化角与喷涂工艺参数和浓度之间的关系模型。结论 得到了最佳的喷涂条件, 大豆蛋白质量分数为 11.13%, 气压为 2 MPa, 液压为 1.64 MPa, 此时的雾化角可达到 81.4690°。

**关键词:** 大豆蛋白喷涂液; 浓度; 喷涂条件; 雾化角; 雾化形貌

**中图分类号:** TB484.1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)03-0001-05

### Influence of Soy Protein Concentration and Spraying Conditions on Atomization Angle

DONG Xiao-yun<sup>1</sup>, YANG Chuan-min<sup>1</sup>, CHEN Guo-ying<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>

(1. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

**ABSTRACT:** The influence of different soy protein spray coating dispersion concentrations and spraying conditions on the atomization angle and the atomization overall morphology was studied to evaluate spraying quality on vegetable composite paper. The high-speed camera was used to collect images of spraying and then the spray angle was calculated through the image processing function of Matlab software. The effect of the concentration and process parameters on spray angle was also analyzed according to the response surface methodology. When the hydraulic pressure was high and the air pressure was low, poor atomization was generated. With the increase of air pressure, the better atomization performance was achieved. In the aspect of single factor, concentration and air pressure had a significant effect on the spray angle. The relative model of spray angle, process parameters and concentration was established by analytical software. The optimal spraying condition was obtained as follows. The spray angle of SPSCD was up to 81.4690°, when the concentration of SPSCD was 11.13%, the air pressure was 2 MPa, and the hydraulic pressure was 1.64 MPa.

**KEY WORDS:** soy protein spray coating dispersions; concentration; spray conditions; spray angle; atomization morphology

大豆蛋白膜具有较好的成膜性和生物降解性, 因而受到了国内外研究者的高度关注<sup>[1]</sup>。由于大豆蛋白膜的力学性能对较高湿度和温度敏感, 因而这种材料

的应用受到了限制<sup>[2]</sup>。蔬菜纸亦称纸菜, 是一种可食性新型蔬菜深加工产品<sup>[3]</sup>。单一的蔬菜纸不能进行热封合, 且力学性能差异较大, 限制了其在食品包装领

收稿日期: 2015-05-26

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)

作者简介: 董肖云(1989—), 女, 河北人, 天津商业大学硕士生, 主攻食品包装材料。

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。

域的应用。邵才等<sup>[4]</sup>以芹菜纸为基材,利用喷涂设备,在芹菜纸表面喷涂一层大豆蛋白液,发现大豆蛋白-芹菜复合纸较芹菜纸力学性能均匀,且实现了蔬菜纸的热封合。其中大豆蛋白喷涂液的喷涂效果决定着蔬菜复合纸的整体质量。

实验采用了扇形喷涂(或直线形喷涂)电子脉冲喷枪喷涂工艺,为气液两相喷涂技术。雾化角指喷嘴出口到喷雾距外包络线的两条切线之间的夹角<sup>[5]</sup>。雾化角反映了喷雾分布的范围,一般来说,雾化角越大,喷雾受到周围气体的剪切作用越强,相应地雾化粒径就会减小<sup>[6]</sup>,雾化效果更好。利用高速摄像机可以在很短的时间内完成对高速目标的快速、多次采样<sup>[7]</sup>,因此能清晰地记录脉冲喷涂画面。

从喷涂覆膜厚度沉积效率和膜的性能角度考虑,因覆膜干燥水汽蒸发和交联的需要,一般大豆蛋白喷涂液越黏稠越好。大豆蛋白喷涂液过于黏稠会失去可喷性,而过稀会降低覆膜效率。可喷性以不堵喷嘴且较好雾化为标志。雾化整体形貌又受到喷涂液的浓度、喷涂气压、液压等条件的制约,因此,文中利用高速摄像机观察不同浓度的大豆蛋白喷涂液,在不同喷涂条件下的雾化角与雾化整体形貌,来界定合理的蛋白液浓度及相关雾化规律。

## 1 实验

### 1.1 原料与仪器设备

原料采用市售大豆蛋白、CMC、甘油、聚羧酸盐。

主要仪器设备:WH7401-60型电动搅拌机,天津市华北实验仪器有限公司;MSM-2250型电子脉冲喷涂设备,斯普瑞喷雾系统上海有限公司;DK-98-IIA型电热恒温水浴锅,天津泰斯特仪器有限公司;IDTY4S2-16G型高速摄像机,美国 Integrated design tools 公司;安东帕高级流变仪,Physica MCR 301, Anton Paar。

### 1.2 大豆蛋白喷涂液的制备

制备工艺流程:大豆蛋白、蒸馏水→加入四口圆底瓶中(80℃恒温水浴加热搅拌)→搅拌约60 min→加入添加剂CMC(体积分数1%)、甘油、聚羧酸盐(体积分数1%)→搅拌约30 min→大豆蛋白喷涂液<sup>[8]</sup>。

### 1.3 图像采集过程

采用杨传民等<sup>[9]</sup>研制的蔬菜复合纸多喷枪喷涂复

合系统进行喷涂,并采用高速摄像机记录喷涂画面。

#### 1.3.1 形貌的采集

在喷涂前先调节高速摄像机到合适的位置采集背景图,然后在外部环境不变的情况下打开喷涂系统进行喷涂图像采集。通过 Matlab 软件将采集的喷涂图像与背景图相减,从而有效地消除背景的干扰,得到清晰的喷涂轮廓图。

#### 1.3.2 雾化角的确定

常用定义雾化角的方法有2种,见图1。方法1,在喷嘴的出口作雾化边界的切线,2根切线之间的夹角即为出口雾化角,出口雾化角的数值与理论计算值比较接近。方法2,在离喷嘴一定距离处作一垂直于雾化中心的垂线,或以喷嘴出口中心为圆心作一圆弧,它们与雾化边界得到2个交点,该两点和喷口中心相连,两连线的夹角即为雾化角。国内常用的距离或半径为200~250 mm<sup>[10-11]</sup>。由于实际的喷雾轮廓边缘为曲线,采用最小二乘拟合的方法,用直线拟合轮廓边缘曲线,得到的喷雾角见图2。

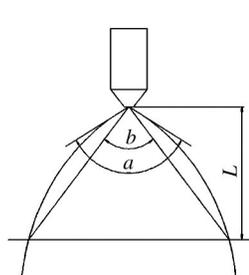


图1 雾化角定义  
Fig.1 Definition of a spray angle

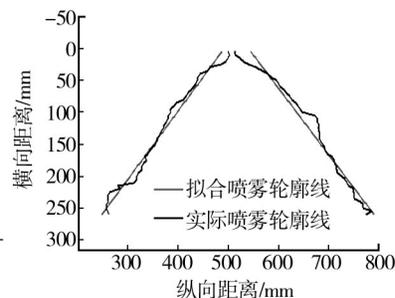


图2 提取的喷雾轮廓边缘曲线及拟合直线  
Fig.2 Edges extracted from the atomization morphology and its fitted straight lines

### 1.4 实验方案

#### 1.4.1 不同大豆蛋白浓度及喷涂条件的实验方案设计

侯红红等<sup>[12]</sup>已有实验证明,喷涂流量超过50 mL/min时,大豆蛋白喷涂液接触纯蔬菜纸的表面后出现倒流现象,且流量在0~50 mL/min时,雾化角呈上升趋势,所以这里选择喷涂流量均为50 mL/min。

共设定6种大豆蛋白喷涂液配方,其大豆蛋白质量分数分别为5%,10%,15%,20%,25%,30%;每个配方的添加剂均为CMC(体积分数17.5%)、聚羧酸盐(体积分数17.5%)、甘油(7.5 g)。喷涂条件在喷雾系统厂家提供的喷雾参数参考值的基础上设计:液压分别为1.0,1.5,2.0,2.5 MPa;气压分别为1.0,1.5,2.0,

2.5 MPa。将每种配好的喷涂液分别在不同液压和气压组合条件下进行喷涂,并利用高速摄像机进行图像采集。

#### 1.4.2 喷涂实验条件优化

实验根据 Box-Behnken 中心设计原理<sup>[13]</sup>,应用 Design Expert 8.0.4 软件进行实验设计。以大豆蛋白浓度、气压、液压3个因素为自变量,并以-1,0,1分别代表自变量的低、中、高水平,雾化角的大小为响应值,设计了三因素三水平17个实验点的响应面分析实验,实验因素水平见表1。

表1 响应面实验因素水平

Tab.1 The levels and factors of response surface experiment

水平	因素A	因素B	因素C
	大豆蛋白质量分数/%	气压/MPa	液压/MPa
-1	5	1.0	1.5
0	15	1.5	2.0
1	25	2.0	2.5

## 2 结果与分析

### 2.1 喷雾形貌特性

利用流变仪测定质量分数分别为5%,10%,15%,20%,25%,30%的大豆蛋白喷涂液,在剪切速率为100 s<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>时的表观黏度分别为0.07,0.11,0.23,0.31,0.39,0.45 Pa·s。上述现象可知,表观黏度随着喷涂液浓度的增加而增加,这是由于可溶性固形物含量的增加加剧了聚合物分子的相对运动和相互作用<sup>[14]</sup>。

通过采集的图片分析,喷雾轮廓基本呈扇形分布,但在不同液压、气压喷涂条件下,雾化形貌存在较为明显的差异。不同浓度的大豆蛋白喷涂液具有较为一致的变化趋势,因此以质量分数为10%大豆蛋白喷涂液为例,分析雾化形貌特性。当气压小、液压大时,喷涂液雾化效果较差,雾化颗粒较大,尤其会在扇形两边边缘飞出较大的蛋白液颗粒。液压越大现象就越明显,见图3a和b。

随着气压的增大,喷涂雾化效果逐渐变好,雾化粒度减小,且颗粒分布均匀。气压为2.0 MPa与2.5 MPa时的喷涂轮廓及颗粒粒度相比变化不大,故优化实验中气压设为1~2 MPa。

### 2.2 雾化角的变化

大豆蛋白质量分数为5%,15%,20%,30%,喷涂

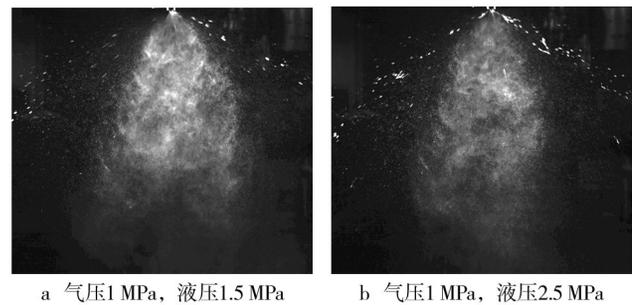


图3 不同喷涂条件下的形貌

Fig.3 The overall morphology of atomization in different spraying conditions

条件均为气压2 MPa、液压1.5 MPa时,经过二值化处理的喷雾图像见图4。当大豆蛋白质量分数为5%时雾化角最大,随着蛋白浓度的增大雾化角呈减小的趋势。这可能是由于对同一种蛋白质来说,表面张力常数 $k$ 值随蛋白质浓度的增加而增大<sup>[15]</sup>,当表面张力较小时喷雾角较大,而当表面张力较大时喷雾角较小,表面张力和喷雾角变化趋势基本上是相反的<sup>[16]</sup>。这是因为表面张力较小时,喷雾中的蛋白质液滴更容易破碎,在气动力作用下喷雾散得更开,拥有更大的雾化角。

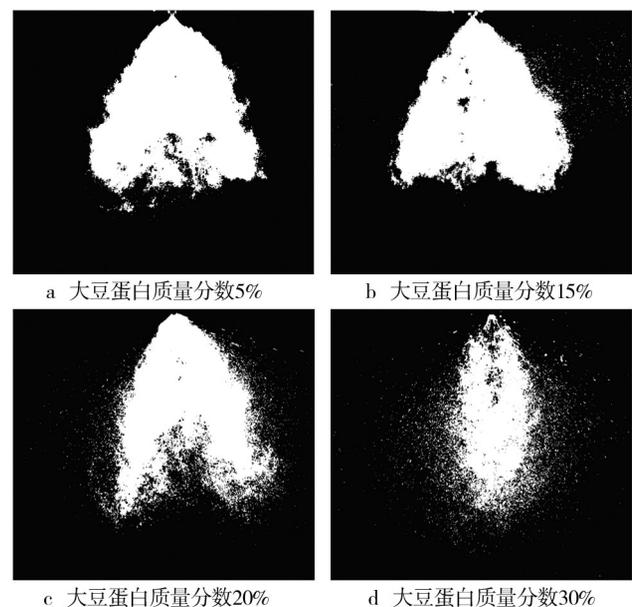


图4 二值图像

Fig.4 Two-value image

当大豆蛋白质量分数为30%时,由于大豆蛋白喷涂液过于黏稠,出现了堵塞喷头现象,可喷性较差。这说明在喷涂液的制备过程中,适宜的大豆蛋白浓度对蔬菜复合纸的覆膜质量至关重要。

2.3 喷涂实验的优化结果及分析

将大豆蛋白浓度、气压、液压3个自变量分别用  $X_1, X_2, X_3$  表示, 响应面实验设计及结果见表2。

表2 响应面实验设计与结果

Tab.2 Design and results of response surface experiment

试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	雾化角/(°)
1	-1	0	1	76.0883
2	0	-1	-1	65.4067
3	0	0	0	77.5372
4	0	-1	1	66.4357
5	0	1	1	77.7533
6	1	1	0	69.3705
7	-1	0	-1	74.6130
8	0	0	0	77.7475
9	0	0	0	77.5175
10	0	1	-1	79.4105
11	1	0	1	64.5805
12	-1	-1	0	66.5253
13	0	0	0	77.4581
14	-1	1	0	81.4691
15	1	0	-1	66.3900
16	0	0	0	77.6516
17	1	-1	0	58.2418

根据表2的结果, 得到的优化回归方程为:

$$Y = -24.12276 + 1.69035X_1 + 62.16483X_2 + 36.76874X_3 - 0.19076X_1X_2 - 0.16424X_1X_3 - 2.68620X_2X_3 - 0.052572X_1^2 - 13.69421X_2^2 - 7.62911X_3^2$$

各因素对雾化角影响的方差分析结果见表3。由表3可知, 该模型的  $P < 0.0001$ , 表明模型极显著。失拟

表3 回归模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	737.92	9	81.99	3051.22	< 0.0001*
$X_1$	201.13	1	201.13	7484.94	< 0.0001*
$X_2$	330.17	1	330.17	12286.93	< 0.0001*
$X_3$	0.12	1	0.12	4.31	0.0766**
$X_1X_2$	3.64	1	3.64	135.41	< 0.0001*
$X_1X_3$	2.70	1	2.70	100.38	< 0.0001*
$X_2X_3$	1.80	1	1.80	67.13	< 0.0001*
$X_1^2$	116.37	1	116.37	4330.60	< 0.0001*
$X_2^2$	49.35	1	49.35	1836.54	< 0.0001*
$X_3^2$	15.32	1	15.32	570.00	< 0.0001*
残差	0.19	7	0.027		
失拟项	0.13	3	0.045	3.00	0.1376**
纯误差	0.054	4	0.013		
总值	738.10	16			

注: \*为差异显著, 显著水平  $P < 0.05$ ; \*\*为差异不显著。

项  $P = 0.1376 > 0.05$ , 故失拟项不显著, 模型选择合适。回归模型决定系数  $R^2 = 0.9997$ , 矫正决定系数  $R^2_{Adj} = 0.9994$ , 说明回归方程可以较好地描述各因素与响应值喷雾角之间的真实关系, 可以通过该回归方程确定大豆蛋白喷涂工艺条件。

方差分析表明, 大豆蛋白浓度和气压对雾化角的影响极为显著 ( $P < 0.0001$ ), 液压对雾化角的影响不显著 ( $0.0766 > 0.05$ )。大豆蛋白浓度  $\times$  气压、大豆蛋白浓度  $\times$  液压、气压  $\times$  液压、大豆蛋白浓度平方项、气压平方项、液压平方项对雾化角的影响极显著。

根据回归方程, 作出三维响应面图, 大豆蛋白浓度与气压的响应面, 大豆蛋白浓度与液压的响应面, 气压与液压的响应面分别见图5—7。从图5—7可以看出, 大豆蛋白浓度和气压对雾化角的影响极为显

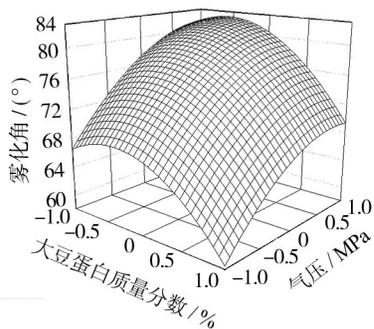


图5 大豆蛋白浓度与气压的响应面

Fig.5 Response surface plot of concentration and air pressure

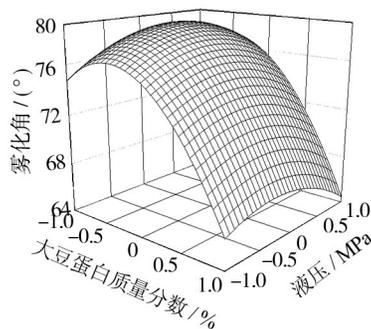


图6 大豆蛋白的浓度与液压的响应面

Fig.6 Response surface plot of concentration and hydraulic pressure

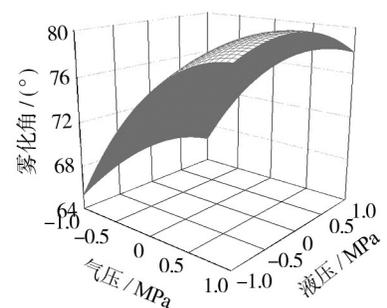


图7 气压与液压的响应面

Fig.7 Response surface plot of air pressure and hydraulic pressure

著,而液压对雾化角的影响较小。

利用Design Expert 8.0.4软件获得了各个因素的最佳条件组合:大豆蛋白浓度为11.13%,气压为2 MPa,液压为1.64 MPa,雾化角响应值为 $81.4690^\circ$ 。在此条件下进行3次实验,得到的雾化角平均值为 $(81.2473 \pm 0.3689)^\circ$ 。

### 3 结语

在蔬菜复合纸喷涂过程中,得出了大豆蛋白喷涂液在不同的蛋白液浓度及喷涂条件下雾化角的变化与雾化整体形貌的相关规律,并通过试验设计软件得到了最佳的喷涂条件:大豆蛋白质量分数为11.13%,气压为2 MPa,液压为1.64 MPa,此时的雾化角可达到 $81.4690^\circ$ ,也为类似的脉冲喷涂实验提供了数据及雾化规律的参考。

#### 参考文献:

- [1] RHIM J W, MOHANTY K A, SINGH S P, et al. Preparation and Properties of Biodegradable Multilayer Films Based on Soy Protein Isolate and Poly(lactide)[J]. American Chemical Society, 2006, 45(6):3059—3066.
- [2] TKACZYK A H, OTAIGBE J U, HO K L G. Bioabsorbable Soy Protein Plastic Composites: Effect of Polyphosphate Fillers on Biodegradability[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2001, 9(1): 19—23.
- [3] 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.
- [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] 汪铁林, 周玉新, 伍沅. 旋涡压力喷嘴的雾化特性[J]. 化学工程与装备, 2008(2): 6—10.  
WANG Tie-lin, ZHOU Yu-xin, WU Yuan. Atomization Characteristics of the Eddy Pressure Nozzle[J]. Chemical Engineering and Pharmacy, 2008(2): 6—10.
- [6] 刘娟, 孙明波, 李清廉, 等. 基于VOF方法分析离心式喷嘴结构参数对性能影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2826—2833.  
LIU Juan, SUN Ming-bo, LI Qing-lian, et al. Analysis of Geometric Parameters Influence on Pressure Swirl Injector Performance Based on VOF Interface Tracking Method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2826—2833.
- [7] 王毅, 王子初. 高速摄像机拍摄速率校准方法研究[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 58—61.  
WANG Yi, WANG Zi-chu. Research on Calibration Method of Rate of High-speed Camera[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(6): 58—61.
- [8] 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.
- [9] 杨传民, 王心宇, 寇金宝. 蔬菜复合纸多喷枪喷涂复合系统: 中国, 202247529U[P]. 2012-05-30.  
YANG Chuan-min, WANG Xin-yu, KOU Jin-bao. Spraying Guns Composite System of the Vegetables Composite Paper: China, 202247529U[P]. 2012-05-30.
- [10] LIU D, ZHAO J, YE H. Modeling of the Solidification of Gas-atomized Alloy Droplets during Spray Forming[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 372(1): 229—234.
- [11] CLEARY V, BOWEN P, WITLOX H. Flashing Liquid Jets and Two-phase Droplet Dispersion I. Experiments for Derivation of Droplet Atomisation Correlations[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(3): 786—796.
- [12] 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.
- [13] ALLAIX D L, CARBONE V I. An Improvement of the Response Surface Method[J]. Structural Safety, 2011, 33(2): 165—172.
- [14] RAZAVI S M A, TAHERI H, QUINCHIA L A. Stead Shear Flow Properties of Wild Sage (Salvia Macrosiphon) Seed Gum as a Function of Concentration and Temperature[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 451—458.
- [15] 阚健全, 陈宗道, 杨辉, 等. 蛋白质溶液表面张力及其与功能性质的关系[J]. 中国粮油学报, 1999, 14(5): 30—34.  
KAN Jian-quan, CHEN Zong-dao, YANG Hui, et al. Change of Surface Tension in Protein Solutions and Relationship between Surface Tension and Functional Properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1999, 14(5): 30—34.
- [16] 朱斌. 油醇混合燃料喷雾特性研究及喷嘴优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.  
ZHU Bin. Research on Spray Characteristics of Gasoline-Alcohol Blends and Injector Nozzle Optimization[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.