

基于马尔文激光粒度分析仪的生物质燃油雾化特性研究

田仲富, 王述洋, 曹有为 (东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 采用马尔文激光粒度分析仪, 研究了生物质燃料的雾化特性, 并分析了气液质量流量比、沿喷孔轴向距离、径向距离、液体的表面张力系数以及液体的粘性系数等参数对生物质燃油雾化特性的影响。通过试验发现, 气液质量流量比和沿喷孔轴向距离是影响索特平均直径的最主要因素; 且在相同的雾化条件下, 生物质燃油雾化质量最差, 生物质燃油和醇类的混合燃料的雾化质量较好, 而柴油的雾化质量最好。

关键词 生物质燃油; 雾化特性; 索特平均直径

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)32-12700-03

Research on Atomization Characteristics of Biomass Fuel Based on Malvin Laser Particle Size Analyzer

TIAN Zhong-fu et al (School of Mechanical & Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract By using Malvin laser particle size analyzer, the atomization characteristics of biomass fuel were studied, effects of gas to liquid mass flow ratio, surface tension of nozzle axial distance, radial distance, liquid and liquid viscosity coefficient on characteristics of biomass fuel atomization were analyzed. Through the experiment, gas to liquid mass flow is the most obvious along the spray hole ratio and axial distance on the impact of DSMD; and in the atomization under the same conditions, the biomass fuel atomization quality was the worst, the atomization quality of blended fuel of biomass fuel and alcohol is better, and the atomization quality diesel is the best.

Key words Biomass fuel; Atomization characteristics; Sauter mean diameter

随着非再生能源的不断消耗, 迫使人们越来越重视再生能源的开发。生物质燃油是具有来源广泛、可再生、排放污染物低等优点的能源, 越来越受到各界的关注。但由于生物质燃油和石化柴油在理化特性等方面有很大的不同, 致使在柴油机雾化不同, 燃油的雾化过程决定了燃烧及排放特性。因此有必要对燃油的雾化和油束特性进行深入研究^[1]。

燃油雾化特性评价指标有: 喷雾液滴尺寸分布, 索特平均直径、喷雾锥角以及相对尺寸范围和发散边界。虽然很多学者在不同热力设备中实现了生物质燃油的雾化燃烧, 但是其中的雾化平均直径一般都是通过一些经验公式进行推测的, 很少对其雾化特性进行试验研究。该研究在一个大气压的常温条件下采用马尔文激光粒度分析仪, 测量雾化流场中生物质燃油粒径分布情况, 观察气液质量流量比对雾化特性的影响^[2-4]。

1 生物质燃油雾化原理

雾化过程实质上就是通过某种方法将有一定体积的液体破碎, 使之成为由许多微小颗粒组成的液滴群^[5]。所以, 雾化过程就是在外力与液体表面张力和黏滞性之间互相竞争的结果, 液体表面的张力试图使液体保持球形, 但是, 液体会破碎形成大量液滴; 而这些液滴是极不稳定的, 由于周围气流的作用, 又会发生二次雾化, 进而破碎成更小的液体颗粒。

在研究液体雾化时, 首先应该充分了解液滴的破碎模式和破碎过程。自从 21 世纪初期, 很多学者都对液滴的破碎过程进行了许多理论和试验研究。如今, 公认的液滴破碎模式主要有以下 3 种: ①当液滴处于平行或旋转气流中, 球形

液滴首先被压扁, 形成椭圆形, 然后破碎; ②当液滴处于平行双曲线或库特流形气流中时, 球形液滴首先被拉伸成雪茄形状, 然后破碎; ③当液滴处于不规则气流时, 在液滴上会形成突起的褶皱部分, 它逐渐与本体分离, 形成大量微小颗粒, 即表面剥离式破碎模式^[6]。

2 生物质燃油雾化特性

液体燃料的雾化是在雾化器或喷嘴中进行的, 燃油喷嘴的种类繁多, 但其雾化过程在理化上都是大同小异的。实现液体雾化的最有效途径是提高液体与周围空气之间的相对速度, 通常情况下, 相对速度越高, 液滴的平均直径越小。为了获得较大的相对速度, 一类喷嘴是将燃料以较高的速度喷入低速运动或静止的介质中, 比如直射喷嘴和离心喷嘴; 还有一类是将低速运动的燃料放在相对高速运动的气体介质中, 比如气动雾化喷嘴^[7-8]。目前, 应用最广泛的是直射喷嘴、气动雾化喷嘴以及离心喷嘴。该研究是采用耐腐蚀材料制作的气动雾化喷嘴。

2.1 雾化特性参数 通常情况下, 影响雾化性能的主要参数包括: 喷嘴结构、喷雾运行参数、气液相介质的物理化学特性等参数。其中, 雾化锥角以及雾化细度是最为重要的雾化性能评价指标。研究表明, 雾滴的颗粒越小, 加热、蒸发和燃烧过程越快。但是雾化颗粒过细也会缩小燃烧稳定性范围, 降低燃烧效率, 这是因为过小的燃料液滴由喷嘴喷出后会马上被气流带走, 在某一区域形成过浓的混合物, 可燃挥发分和液滴还未充分与氧气反应就被排出。雾化后颗粒最大、最小液滴的直径相差非常悬殊, 最大和最小颗粒的粒径有时可能相差 60~90 倍^[9]。液滴粒径分布是表征雾化程度和质量的直接指标, 由于液滴粒径分布体现了燃油喷雾的总表面积, 该值对燃油蒸发率和油气混合速率具有重要影响。索特平均直径 (D_{SMD}) 是描述液滴粒径分布的重要参数。 D_{SMD} 的定义式为:

基金项目 国家星火计划项目(072223002); 黑龙江省自然科学基金项目(C201244); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DL12BB01)。

作者简介 田仲富(1978-), 男, 山东聊城人, 讲师, 在读博士, 从事生物质热解液化研究。

收稿日期 2013-10-21

$$D_{SMD} = \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 f(D) dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^2 f(D) dD} \quad (1)$$

其中, D 是液滴直径, D_{max} 和 D_{min} 分别是最大和最小液滴直径; $f(D)$ 是液滴粒径的概率密度函数。

在保持其他参数一致的情况下,圆滑喷孔入口比尖锐喷孔入口获得更大的索特平均直径。但是,随着喷油压力的提高,两者形成的液滴索特平均直径之间的差距逐渐减小。Hiroyasu 在试验的基础上得出了索特平均直径的经验公式。

$$D_{MSD} = \max\left[\frac{SMD_{low}}{D}, \frac{SMD_{high}}{D}\right] \quad (2)$$

$$\frac{SMD_{low}}{D} = 4.12 Re^{0.12} We^{-0.75} \left[\frac{\mu_l}{\mu_g}\right]^{0.54} \left[\frac{\rho_l}{\rho_g}\right]^{0.18} \quad (3)$$

$$\frac{SMD_{high}}{D} = 0.38 Re^{0.25} We^{-0.32} \left[\frac{\mu_l}{\mu_g}\right]^{0.37} \left[\frac{\rho_l}{\rho_g}\right]^{-0.47} \quad (4)$$

其中,下标 *low* 代表低喷油压力情况, *high* 代表高喷油压力情况, μ_g 和 μ_l 分别为气相和液相动力粘度。

从 Hiroyasu 的经验公式可以看出,索特平均直径随喷油压力的增加而减小,随气液粘度比的增大而增加;另外,索特平均直径还受气液密度的影响。但是 Hiroyasu 的经验公式没有考虑喷孔内流对索特平均直径的影响^[4]。

2.2 影响雾化性能的因素 雾化期间,气相介质的动能一部分用来增加液滴的动能,另一部分用来克服表面张力和黏滞力使液滴破碎。近年来,利用水、乙醇、调和机油、甘油、生物柴油、肥皂水等液体在不同空气雾化喷嘴中进行喷雾试验,发现液体的粘度和表面张力、气液质量流量比、密度及喷嘴的结构参数等是对其雾化颗粒索特平均直径具有显著影响的主要因素^[10-11]。对于某一特定喷嘴, D_{SMD} 随主要影响因素变化的关系式可以用下式来表示。

$$D_{SMD} = A \sigma_l^a v_l^b F_{ALR}^{-c} \rho_l^{-d} m_l^e P^{-f} \quad (5)$$

其中, A 代表拟合常量; σ 代表液体粘度; v 代表液体表面张力; F_{ALR} 代表气液比; ρ 代表液体密度; m 代表质量流量; P 代表气液注入压力差; 下表 l 代表液体; 上标 a, b, c, d, e, f 代表拟合系数。

3 生物质燃油雾化特性试验

3.1 常温常压试验 试验采用马尔文激光粒度分析仪进行,试验台简图如图 1 所示,主要由马尔文 Spraytec 气动雾化

型激光粒度仪、喷油泵和 PC 机组成。可以用其来测量雾化液滴的尺寸大小及分布。实际测量的评价指标包括雾化液滴尺寸分布、索特平均直径、特征直径、相对尺寸范围和发散边界。马尔文激光粒度分析仪的检测原理如图 2 所示。

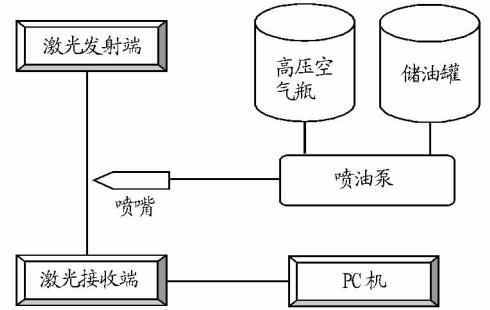


图 1 试验台装置示意

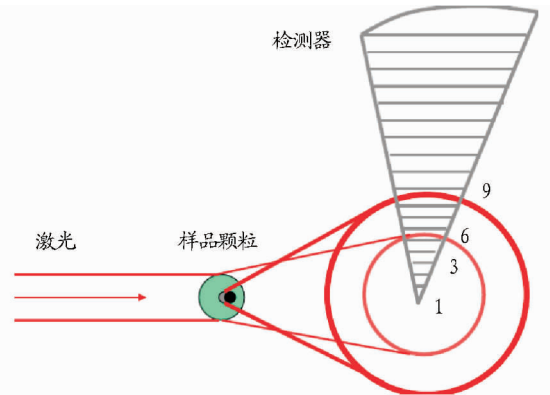


图 2 马尔文激光粒度分析仪的检测原理示意

试验使用气动雾化喷嘴,充分利用介质之间的互相挤压和加速作用,将喷嘴中连续的液柱或液膜雾化破碎成一系列不同直径的液滴。空气由高压空气瓶供给,雾化空气流量控制在 15% ~ 20% 当量空气量。试验在常温、常压下进行,生物质燃油和空气都不需进行预热,喷孔直径为 0.566 mm。

3.2 试验燃料 试验过程中采用东北林业大学生物质能工程中心自行研制的 ZKR-100 型旋转锥式生物质闪速热解液化装置以玉米秸秆为原料生产的燃油为试验用生物质燃油,简记为 B100。生物质燃油/小分子醇类混合燃料是在超声乳化条件下制得的,其中醇类质量分数为 5%,用 BE5 表示。0#柴油由市面购买。试验所用燃料的基本性质如表 1 所示。

表 1 试验燃料的基本性质

燃料	密度 kg/m ³	运动粘度 mm ² /s	含水率 %	表面张力 N/m	元素组成质量分数//%				
					C	H	O	S	N
B100	1 091.16	11.26	29.31	0.037	30.18	10.30	59.06	0.30	0.16
BE5	1 138.58	7.40	24.38	0.031	31.71	10.42	57.31	0.37	0.19
柴油	845.73	3.13	0.10	0.033	84.84	12.39	1.88	0.33	0.56

4 生物质燃油雾化特性试验数据及分析

4.1 生物质燃油雾化流场特性 在调整好生物质燃油流量和空气流量的条件下进行雾化试验,利用马尔文激光粒度分析仪测量了液滴粒径分布情况。通过选择不同的测量位置,对喷雾状态进行全面的测量。沿着喷嘴轴线方向,从喷嘴出

口处开始,到 160 mm 结束,每 4 mm 测量 1 个点;在选定的轴向位置,沿着垂直于轴的径向,每 1 mm 测量 1 个点,直到光束离开雾炬。

生物质燃油的 D_{SMD} 与沿喷嘴轴向距离的关系如图 3 所示。由图 3 可见,随着沿轴向距离的增加,生物油的 D_{SMD} 先

是迅速下降,当下降到一定值后又缓慢升高。从喷孔到距离喷孔72 mm处是 D_{SMD} 的拐点位置,此时生物质燃油的 D_{SMD} 由最初的99.4 μm 下降到46.8 μm ,液体颗粒离开喷嘴进入空气中后,颗粒内部包含大量微小气泡,由于其内外压差的突然变化使得气动压力大于液体表面张力,气泡发生膨胀、破碎,进而导致包裹在其周围的液膜逐渐破碎,从而造成粒径的减小,这个过程也被称作颗粒的二次破碎;另一方面高速气液混合射流卷吸周围大气,与流场互相作用也造成了粒径的减小。随着轴向距离的进一步增加, D_{SMD} 开始增大,这是由于二次破碎作用减弱,同时扰动造成颗粒相互碰撞,大颗粒不断粘着小颗粒从而使粒径不断增大。

生物质燃油的 D_{SMD} 与径向距离的关系如图4所示。由图4可以看出,喷雾流场的雾化角约为 41° ,随着轴向距离的增加,液滴可以在较远的径向距离处检测到,雾矩半径增大。 D_{SMD} 随轴向距离的增加先略微减小后增大;在同一轴向位置处,生物油的 D_{SMD} 随径向距离增大而增大。这是由于液滴离开喷嘴后向四周散射,其中小颗粒的动量小,贯穿能力较弱,小颗粒很难到达离轴线较远的地方。

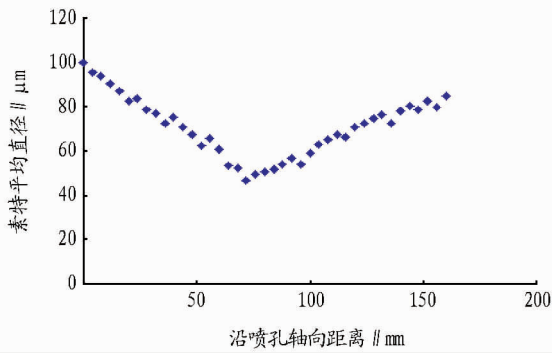


图3 生物质燃油的 D_{SMD} 与沿喷孔轴向距离的关系

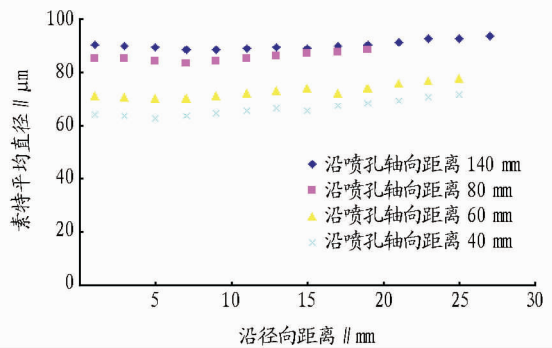


图4 生物质燃油的 D_{SMD} 与径向距离的关系

4.2 液体表面张力和粘性系数对雾化特性的影响 不同液体表面张力系数对雾化特性的影响如图5所示。由图5可见,在相同的气液质量流量比(R)的情况下,液体表面张力系数越大,雾化越困难, D_{SMD} 的值越大(其中,各种燃料的表面张力系数如表1所示),这是由于表面张力系数大的液体耗散的功较大,从而消耗了过多的雾化能,使得液体雾化破碎的能量相对减少,从而很难形成细小的雾滴。

不同液体的粘度系数对雾化特性的影响如图6所示。

由图6可知,在相同的气液质量流量比(R)的情况下, D_{SMD} 首先随着液体粘性系数的增大(其中,各种燃料的粘度系数如表1所示)出现小幅升高,但当液体粘性系数达到某一特定值时,其又开始逐渐降低。出现这种现象,是因为在粘度系数大的液体中更有利于气泡的流动,所以更容易实现气泡雾化。

通过以上试验数据可知,液体表面张力系数和液体的粘度系数与 D_{SMD} 的关系与公式(5)是一致的。

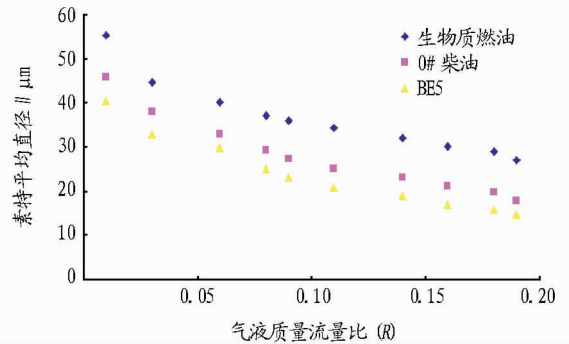


图5 不同液体表面张力系数对雾化特性的影响

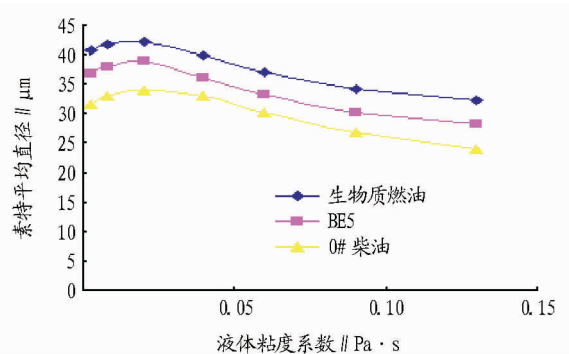


图6 不同液体的粘度系数对雾化特性的影响

5 结论

该研究以东北林业大学生物质能工程实验中心为依托,搭建了生物质燃油雾化系统,利用马尔文激光粒度分析仪进行了相应的雾化试验,得到以下结论。

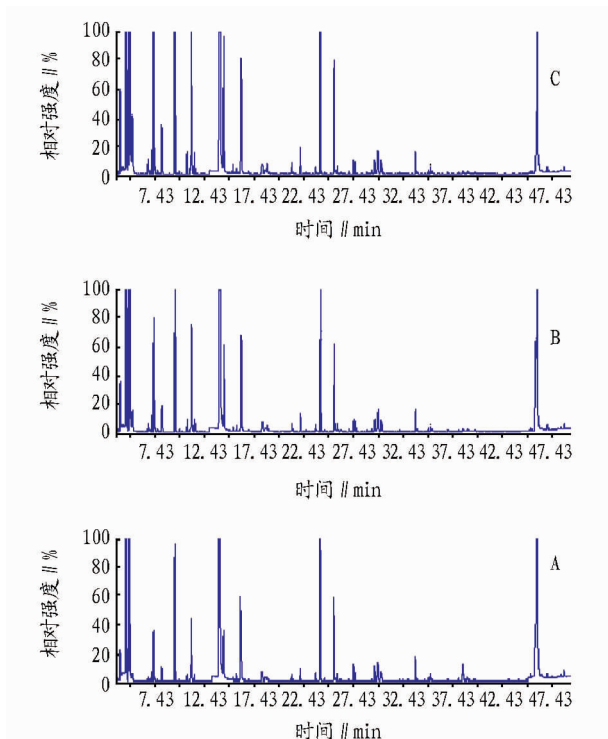
(1) 不同液体燃料的雾化特性是由其自身的基本性质而决定的。试验结果表明,减小生物质燃油的密度,降低粘度,通过乳化等技术可以改善其雾化特性。

(2) 生物质燃油的索特平均直径主要受气液质量流量比、沿喷孔轴向距离、径向距离、液体的表面张力系数以及液体的粘性系数等参数影响。

(3) 由于二次破碎作用、空气剪切以及紊流气流中颗粒碰撞粘结等因素,使得生物质燃油的索特平均直径沿着喷孔轴线方向先减小而后增大。

(4) 在相同的雾化条件下,生物质燃油雾化质量最差,生物质燃油和醇类混合燃料的雾化质量较好,而柴油的雾化质量最好。通过添加醇类助剂可以降低生物质燃油液滴的 D_{SMD} ,从而改善其雾化性能,进而提高其燃烧性能。

(下转第12721页)



注:A、B、C 依次为称样量 0.2、0.5、1.0 g。

图 3 不同称样量下的总离子色谱

表 2 不同品牌卷烟烟丝中美拉德反应风味物质相对含量对比 %

样品 序号	相对百分含量						
	醛类	酮类	醇类	酸类	酯类	杂环类	其他类
1	32.01	11.01	26.16	27.98	1.22	1.46	0.16
2	33.14	10.77	28.29	24.87	1.09	1.48	0.35
3	32.28	18.12	25.63	21.32	0.84	1.60	0.22
4	31.70	10.56	36.39	18.27	1.60	1.28	0.21
5	26.87	10.64	34.68	25.06	1.19	1.36	0.20
6	30.05	10.78	35.58	20.54	1.57	1.26	0.22

3 结论

建立了一种静态顶空-气相色谱-质谱联快速分析检测卷烟烟丝中美拉德反应风味物质,该方法不仅样品前处理简便,可有效避免溶剂污染和非挥发性组分的干扰,而且自动化程度高,使用自动顶空进样器可实现大批量样品美拉德反应的风味物质的快速检测。同时该方法对研究烟叶美拉德反应机理和美拉德反应条件优化有指导的意义。

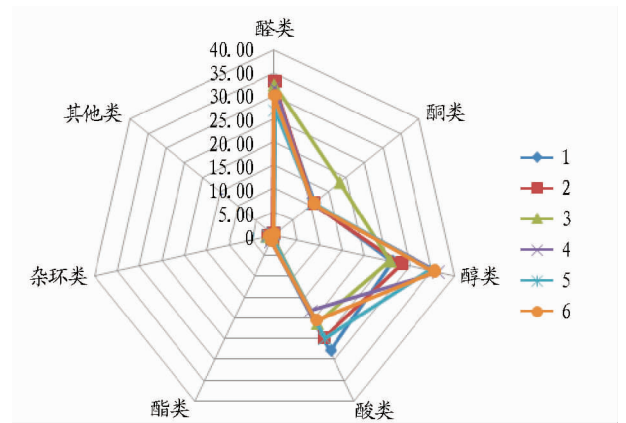


图 4 6 种不同品牌卷烟烟丝中美拉德反应风味物质雷达图

参考文献

- [1] JALBOUT A F, SHIPAR A H. Formation of pyrazines in hydroxyacetaldehyde and glycine nonenzymatic browning Maillard reaction: A computational study [J]. Food Chem, 2007, 103(4): 1208 - 1216.
- [2] YANG H, BARRINGER S. Alkylpyrazines and other volatiles in cocoa liquors at pH5 to 8 by selected ion flow tube-mass spectrometry (SIFT-MS) [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): 121 - 127.
- [3] FREDDY R D. Fractionation of colored Maillard reaction products from dark specialty malts [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2004, 62(2): 79 - 86.
- [4] 文冬梅, 伍锦鸣, 赵谋明, 等. 烟叶末在酶解和美拉德反应过程中风味变化规律的研究 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 176 - 179.
- [5] 余祥英, 胡军, 曾世通, 等. Maillard 反应中杂环香味化合物形成机理的研究进展 [J]. 香料香精化妆品, 2012(4): 46 - 53.
- [6] 黄龙, 朱巍, 程志昆, 等. 红枣提取物的 Maillard 反应制备烟用香料的研究 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1673 - 1676.
- [7] 黄龙, 陈一, 程志昆, 等. 番茄汁 Maillard 反应制备烟用香料的研究 [J]. 香料香精化妆品, 2011(3): 9 - 13.
- [8] 胡军, 曾世通, 宗永立, 等. 葡萄糖/丙氨酸 Maillard 反应水溶性高分子产物的规模化合成及其在烟草中的应用 [J]. 烟草科技, 2010(7): 29 - 33.
- [9] 朱智志, 廖新成, 李光照, 等. 大枣浸膏的 Maillard 反应及其在烟草中应用研究 [J]. 安徽农学通报, 2008, 14(7): 40 - 42.
- [10] 朱文辉, 杨柳, 杨红燕, 等. 美拉德反应研究进展 [J]. 烟草科学研究, 2009(3): 55 - 58.
- [11] 杨继, 杨柳, 卢岚, 等. 热重-固相微萃取/气相色谱-质谱联用研究葡萄糖/天冬酰胺模拟体系非水相 Maillard 反应 [J]. 分析测试学报, 2011, 30(3): 233 - 241.
- [12] 孙红梅, 李侠, 张春晖, 等. 鸡骨素及其酶解液的美拉德反应产物挥发性风味成分比较分析 [J]. 分析测试学报, 2013, 32(6): 661 - 667.
- [13] 顾小红, 孟绍凤, 汤坚, 等. Maillard 模式反应牛肉香精挥发性风味成分分析 [J]. 中国调味品, 2006(6): 37 - 47.
- [14] 王昊阳, 郭寅龙, 张正行, 等. 顶空-气相色谱法进展 [J]. 分析测试技术与仪器, 2003, 9(3): 129 - 135.
- [15] 钟罗宝, 陈谷. 顶空进样器在快速检测食品美拉德反应风味物质中的新应用 [J]. 现代食品科技, 2009, 25(9): 1091 - 1095.
- [6] LU Q, LI W Z, ZHU X F. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1376 - 1383.
- [7] NGUYEN D, HONNERY D. combustion of bio-oil ethanol blends at elevated pressure [J]. Fuel, 2008, 87(2): 232 - 243.
- [8] 刘联胜, 杨华, 衡国辉. 气液质量流量比对气泡雾化喷嘴燃烧特性的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 10 - 14.
- [9] 杨华, 杜聪, 周晓芳. 空气旋流强度对气泡雾化喷雾流场及火焰的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(6): 523 - 528.
- [10] 施爱平, 叶丽华, 袁银南. 生物柴油喷射雾化特性试验与分析 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 44 - 47.
- [11] 刘承运, 陆强, 孙书生. 稻壳生物油的燃烧及污染物排放特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2008, 36(5): 577 - 582.

(上接第 12702 页)

参考文献

- [1] 李立琳, 王忠, 许广举, 等. 柴油机燃用柴油与生物柴油的雾化特性分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 299 - 300.
- [2] SU HAN PARK, HYUN K VU SUH, CHANT SIK LEE. Effect of bioethanol-biodiesel blending ratio on fuel spray behavior and atomization characteristics [J]. Energy and Fuels, 2009, 23: 4092 - 4098.
- [3] AYHAN DEMIRBAS. Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 2093 - 2109.
- [4] 虞育松. 直喷式柴油机近喷孔区域燃油喷射雾化机理的基础研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 9 - 11.
- [5] 袁银南, 陈汉玉, 张春丰. 生物柴油喷雾特性试验 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 1 - 4.