

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.005

# 基于图像处理技术的炉窑内生物柴油火焰特性研究\*

蒋绍坚 钟伟 张常亮 王传余

(中南大学能源科学与工程学院,长沙410083)

**摘要:**通过高速摄影利用图像处理技术研究生物柴油在炉窑内的燃烧火焰特性,分别对火焰体积、形状和结构、长度进行了研究。结果表明:增大空气过剩系数 $\alpha$ ,火焰体积逐渐减小,火焰变形越来越严重;增加雾化压力 $p$ ,火焰体积先增大后减小,火焰变形越来越严重,火焰结构越来越分散;对火焰实际长度进行计算,在0.2 s时间内火焰长度波动范围很大,呈现出突增与突降的规律,存在“脱焰过程”。火焰长度与空气过剩系数 $\alpha$ 成反比,随着雾化压力 $p$ 的减小,火焰长度曲线变化趋势平缓。

**关键词:**生物柴油 火焰特性 高速摄影

中图分类号:TK6 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2013)09-0024-06

## Flame Characteristics of Biodiesel in Industrial Furnace Based on Image Processing

Jiang Shaojian Zhong Wei Zhang Changliang Wang Chuanyu

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The flame characteristics of biodiesel burning in industrial furnace were studied. The volume, shape, structure of flame and length were analyzed based on image processing by using high-speed photography method. The experimental results showed that with the increase of excess air coefficient  $\alpha$ , the volume of flame gradually decreased and the flame deformation was more and more serious. With the increase of atomization pressure  $p$ , the volume of flame first increased and then decreased. The flame deformation was more and more serious, and the flame structure was more and more fragmented. Through the calculation, the range of the actual length of the flame of 0.2 s was very large, which emerged a sudden increase and drop rule, existed a “taking off the flame” process. The flame length became inversed to the excess air coefficient  $\alpha$ . Along with the decrease of the atomization pressure  $p$ , the curve of flame length changed gently.

**Key words:** Biodiesel Flame characteristics High-speed-photography

### 引言

生物柴油是以油料作物、野生油料植物和微藻等水生植物油脂以及动物油脂、餐饮垃圾油等为原料油经酯交换反应得到的各种脂肪酸单酯的混合物<sup>[1]</sup>,它具有可再生性和环境友好两大优势,已经引起了各国学者的广泛关注<sup>[2~3]</sup>。目前生物柴油的研究主要集中在生物柴油的制备研究<sup>[4~7]</sup>和内燃机

上的应用研究<sup>[8~11]</sup>。然而,生物柴油在工业方面的应用极为少见,只有一些单位和研究机构<sup>[12~13]</sup>对生物原油(只经过提纯而未经过酯交换反应的生物油)在工业方面的应用开展了一些工作,并取得了一些成果,充分说明了生物柴油在工业应用领域具备一定的空间。

工业领域中的各种燃烧器及炉窑的设计、运行等对燃料的品质和燃烧性能,尤其在各种燃烧条件

收稿日期:2012-09-06 修回日期:2012-09-25

\*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD41B05)

作者简介:蒋绍坚,教授,主要从事低碳能源技术研究,E-mail: sjjiang@mail.csu.edu.cn

下的火焰特性,有一定的要求,因此对生物柴油在炉窑内燃烧的火焰特性的研究是十分必要的。生物柴油在燃烧过程中,其火焰形状、结构总是在不断地发生变化,且火焰传播速率快,肉眼和一般的数码相机很难捕捉到,这对于研究火焰体积、火焰亮度、火焰形状、火焰结构带来了巨大的困难,必须借助于特定的测试仪器才能实现,采用火焰的可视化方法和激光诊断技术是目前最有效的研究手段<sup>[14]</sup>。

王忠<sup>[15]</sup>等采用内窥镜直接高速摄影的方法,研究了燃烧柴油和生物柴油发动机燃烧过程中着火延迟期、着火点位置、燃烧温度和燃烧速度的变化规律;何旭<sup>[16]</sup>等通过高速摄影仪研究了柴油机内生物柴油的喷雾、着火和燃烧特性。本文通过高速摄影仪对不同工况条件下生物柴油在炉窑内的燃烧火焰进行拍摄,研究空气过剩系数 $\alpha$ 和雾化压力 $p$ 对生物柴油在炉窑内燃烧火焰体积、形状、结构、长度的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验原料和设备

实验用生物柴油由湖南省林业科学院提供,热值为 39 198 kJ/kg。该生物柴油为多种甲酯的混合物,其元素组成可以近似由油酸甲酯( $C_{19}H_{36}O_2$ )代替。实验选用美国 REDLAKE 公司的 MotionPro X3TM 型高速摄影仪进行,该摄影仪使用 CMOS 传感器,具有支持双曝光模式功能,允许时间间隔为 100 ns 的连续两次曝光,拍摄分辨率为 1 280 像素  $\times$  1 024 像素,拍摄频率为 1 000 f/s。

图 1 为生物柴油燃烧特性实验平台示意图。生物柴油燃烧器燃烧方式为旋流燃烧;油泵由 Danfoss 公司生产,型号为 BFP21L3,压力范围 0 ~ 2 MPa;雾化喷嘴由 Danfoss 公司生产,型号为 S60,其雾化方式为机械雾化,实心雾化,雾化角为 60°;空气旋流片直径为 56 mm,分为内、外两层,两层旋向相同,且分别有 18 片大小相同的叶片,每片叶片与旋流片本体有 30°左右的夹角;燃烧室长 200 cm、宽 90 cm、高 90 cm,壁厚 20 cm,由耐火保温纤维材料制成,并设有火焰观察口。

### 1.2 实验方法

该实验平台由供油系统、送风系统、燃烧系统、排烟系统组成。生物柴油燃烧器具有可调节雾化压力的功能,实验根据油压范围选取雾化压力 $p$ 为:1.6、1.4、1.2、1.0、0.8、0.6 MPa,不同雾化压力下对应的生物柴油流量为:36.2、32.9、30.1、28.0、25.4、22.6 mL/min;空气过剩系数 $\alpha$ 分别取 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8。实验时,对雾化压

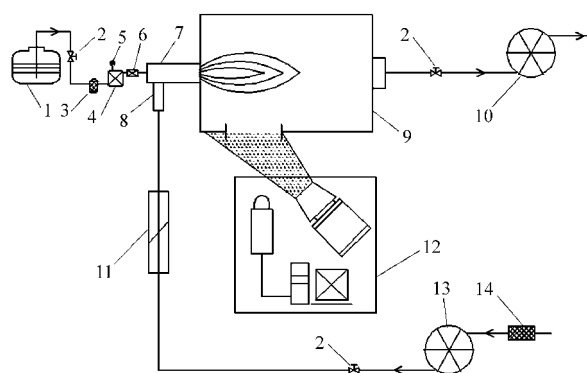


图 1 生物柴油燃烧特性实验平台流程图

Fig. 1 Schematic of test rig for flame characteristics of biodiesel

1. 油罐 2. 阀门 3. 过滤器 4. 油泵 5. 压力表 6. 电磁阀
7. 燃烧器 8. 助燃空气管道 9. 燃烧室 10. 引风机 11. 空气流量计
12. 高速摄影仪图像采集系统 13. 鼓风机 14. 空气过滤器

力 $p$ 和不同空气过剩系数 $\alpha$ 进行交叉实验,共计 54 个工况。助燃空气和生物柴油均为常温 20℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 火焰体积

以全部工况为例,研究 $p$ 和 $\alpha$ 对生物柴油在炉窑内燃烧的火焰体积的影响。图 2 为生物柴油燃烧所有实验工况的火焰图片。

由图 2 可以看出,在 $p$ 一定的条件下,生物柴油在炉窑内燃烧的火焰体积随着 $\alpha$ 的变大而逐渐减小。随着 $\alpha$ 的增加,一方面提供了更多的氧气,

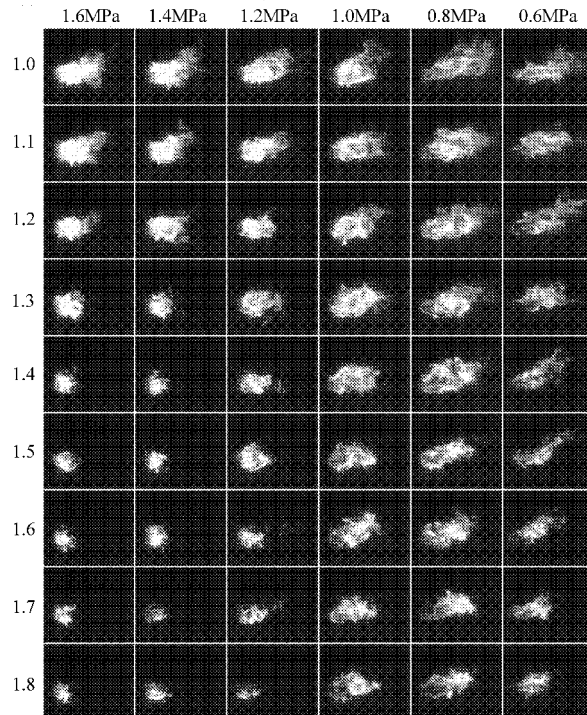


图 2 生物柴油燃烧高速摄影图

Fig. 2 High-speed photography of biodiesel combustion

且空气流量的增加同时提高了空气流经旋流片之后的轴向和径向速度,因此加强了空气与生物柴油液滴的混合作用,加快了燃烧速度,使得生物柴油液滴在很短时间内就能够实现完全燃烧,所以导致火焰体积变小;另一方面,当 $\alpha$ 增加到一定程度之后,空气的流速过快,以致于大于生物柴油的燃烧速度,致使生物柴油液滴还未来得及完全蒸发,燃烧就被吹离火焰的主体,从而失去了较好的燃烧条件,同时空气量的增加对燃烧也很不利,所以生物柴油完全燃烧程度极差,导致火焰体积变小。

$\alpha$ 不变时,生物柴油燃烧的火焰体积随着 $p$ 由1.6 MPa减小到1.0 MPa而逐渐变大, $p$ 继续减小时,火焰体积逐渐变小; $\alpha$ 由1.0增加到1.8的过程中,这种变化趋势逐渐增强。当 $\alpha$ 一定时, $p$ 降低,雾化效果变差,生物柴油液滴直径变大,因此, $p$ 减小导致生物柴油液滴完全燃烧的时间显著增加,液滴需要在更长的空间内完成燃烧过程,所以火焰体积会变大,但是由于 $p$ 在减小的同时会降低生物柴油的流量,又会起到减小火焰体积的作用,因此就出现火焰体积先增大后减小的趋势。随着 $\alpha$ 的增大生物柴油燃烧的火焰体积随雾化压力减小而先增大后减小的趋势越来越明显,主要是由于随着空气过剩系数的增大,助燃空气加强燃烧过程的作用变得越来越小,相反助燃空气流速变大对减弱燃烧过程的作用变得逐渐显著,因此这种变化趋势变得更加

明显。

随着 $p$ 的减小,火焰体积随 $\alpha$ 的增加而减小的趋势逐渐减弱,一方面是由于 $p$ 的减小导致雾化效果减弱,生物柴油液滴的直径变大,根据 $D^2$ 蒸发定律,生物柴油液滴的寿命与初始直径的平方成正比,因此, $p$ 减小导致液滴完全燃烧的时间显著增加,液滴需要在更长的空间内完成燃烧过程,所以火焰体积随 $\alpha$ 增大而减小的趋势变弱;另一方面,相同 $\alpha$ 条件下,空气的流量将随着 $p$ 的减小而减小,空气流速对火焰体积减小的影响也将减弱,所以火焰体积随空气过剩系数增大而减小的趋势变弱。但是当 $p$ 由1.0 MPa继续降低到0.6 MPa时,生物柴油的雾化效果极差,生物柴油液滴燃烧速度非常慢,单位时间放热量也非常低,对于抵抗高空气过剩系数下的助燃空气的流速和助燃空气带来的冷量对燃烧的负面作用的能力很差,因此火焰体积随空气过剩系数减小的趋势又有所加强。

## 2.2 火焰形状与结构

通过高速摄影仪的快速捕捉,可以清楚地观察到火焰形状、结构在瞬间的变化过程,直观地了解火焰形状与结构。

图3~5分别显示了雾化压力 $p$ 为1.2 MPa、空气过剩系数 $\alpha$ 为1.1,雾化压力 $p$ 为1.2 MPa、空气过剩系数 $\alpha$ 为1.7,雾化压力 $p$ 为0.6 MPa、空气过剩系数 $\alpha$ 为1.1,3种条件下生物柴油在炉窑内燃烧

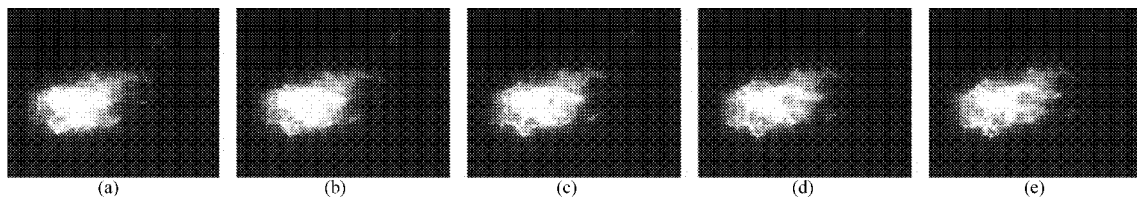


图3 雾化压力1.2 MPa,空气过剩系数1.1,0.008 s内火焰变化过程

Fig. 3 Flame change process in 0.008 s ( $p=1.2$  MPa,  $\alpha=1.1$ )

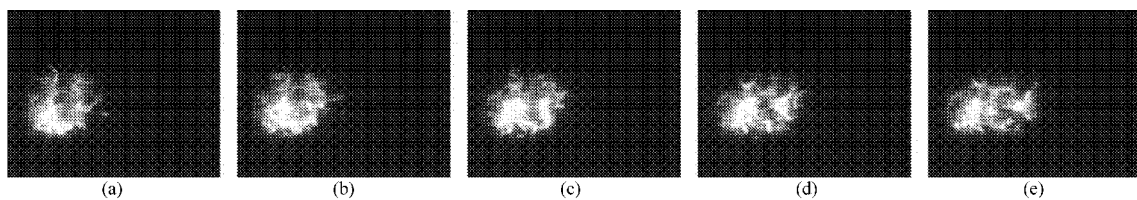


图4 雾化压力1.2 MPa,空气过剩系数1.7,0.008 s内火焰变化过程

Fig. 4 Flame change process in 0.008 s ( $p=1.2$  MPa,  $\alpha=1.7$ )

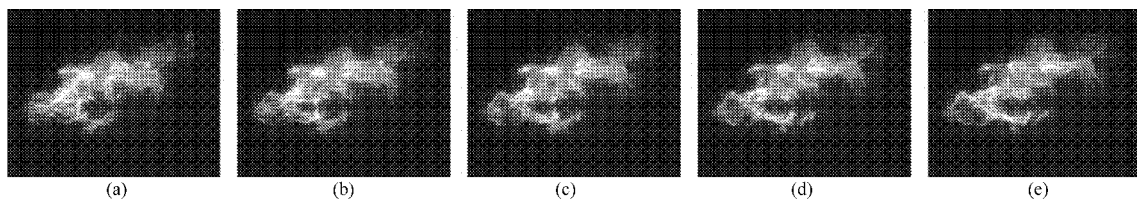


图5 雾化压力0.6 MPa,空气过剩系数1.1,0.008 s内火焰变化过程

Fig. 5 Flame change process in 0.008 s ( $p=0.6$  MPa,  $\alpha=1.1$ )

的火焰形状与结构在 0.008 s 内的变化情况, 每张图片之间间隔为 0.002 s。

比较图 3 和图 4, 空气过剩系数  $\alpha$  为 1.1 时, 在 0.008 s 的变化过程中火焰主体和火焰边缘始终比较分明, 且整个火焰始终是连续在一起的, 除了合理的火焰波动外, 并没有发生强烈的火焰破碎现象, 火焰形状与结构一直较为理想。当空气过剩系数为 1.7 时, 在 0.008 s 的时间内, 火焰主体与火焰边缘始终无法清楚地分辨, 且整个火焰连续性极差, 出现了非常大的波动, 破碎现象不断发生, 火焰严重变形, 没有固定的结构可言。说明随着空气过剩系数  $\alpha$  的变大, 火焰的变形越来越严重, 火焰的结构越来越模糊。

比较图 3 和图 5, 雾化压力  $p$  为 0.6 MPa 时, 在 0.008 s 的时间内, 火焰主体与火焰边缘始终无法清楚地分辨, 且整个火焰连续性极差, 出现了非常大的波动, 破碎现象不断发生, 火焰严重变形, 没有固定的结构可言。说明随着雾化压力  $p$  的降低, 火焰的变形越来越严重, 火焰的结构越来越分散。

### 2.3 火焰长度

利用高速摄影技术对火焰长度进行测量, 实质

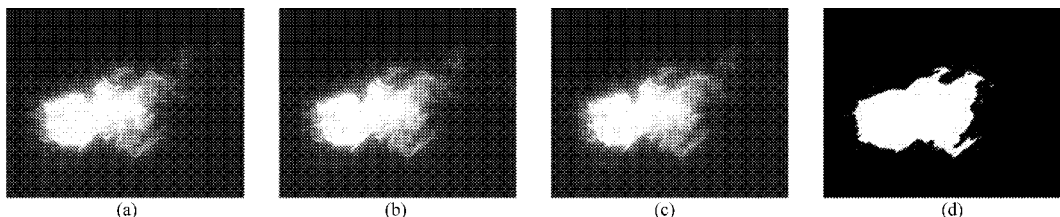


图 6 图像处理效果

Fig. 6 Effect of flame image processing

利用程序扫描二值化的火焰图像得到该火焰图像最远点的像素坐标, 其结果为 (901, 810), 所以该火焰的实际长度为 263.983 4 mm。

利用 Matlab 软件对各工况下的批量图像进行处理得出 0.2 s 内火焰长度的变化曲线, 图 7 为某一工况下火焰长度变化曲线。

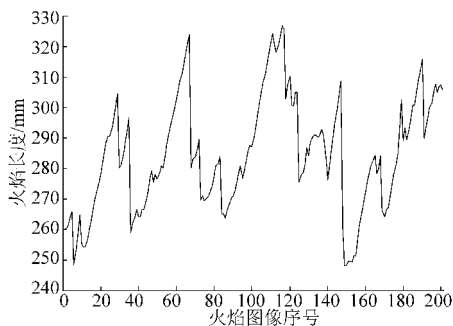


图 7  $p = 1.6$  MPa,  $\alpha = 1.0$  时火焰长度变化曲线

Fig. 7 Changing curves of flame length

( $p = 1.6$  MPa,  $\alpha = 1.0$ )

通过全部 54 个工况的火焰长度在 0.2 s 时间内

是一种基于数字图像处理技术的火焰长度测量方法。火焰实际长度计算公式为

$$L = \beta l_b = \beta(c - a) \quad (1)$$

式中  $L$ ——火焰实际长度

$\beta$ ——单位像素代表的实际长度

$l_b$ ——火焰的像素长度

燃烧器出口处像素坐标为  $(a, b)$ , 图像中火焰最远点的像素坐标为  $(c, d)$ 。经过实验计算, 获得本次实验过程中的  $\beta$  值为 0.318 436 mm/像素, 燃烧器出口处像素坐标为 (72, 602)。

根据图像学和数字图像处理原理, 通过对火焰图像进行转灰度、去噪声、图像的二值化处理分割, 确定火焰边界, 找出火焰最远点的坐标, 从而计算出火焰长度, 该方法能够获得理想的测量结果。本次实验拍摄的火焰图像大小均为 1 280 像素  $\times$  1 024 像素, 现从所有工况中任取一张图片进行处理, 主要使用 Matlab R2008b 软件, 将原始彩色图转换为灰度图像后, 再进行去噪, 然后按照“最大方差阈值法”的算法, 使用 Matlab 进行编程, 确定阈值, 得到二值化的火焰图像。图 6 为图像处理效果。

变化情况的研究, 发现有相同的规律: 火焰长度并不是通常肉眼所看到的那样保持一定的长度不变, 而是在不断变化, 这种“火焰波动”变化速度非常快, 人的肉眼难以分辨; 虽然火焰长度在不断变化, 但是并不是完全杂乱无章、无规律可循的, 全部工况火焰长度变化图均显示, 火焰长度的变化总是呈现出突增与突降的规律, 且突增的过程缓慢一些, 突降过程十分迅速。

生物柴油以旋流方式在炉窑内燃烧过程中, 火焰的最前沿部分在燃尽阶段会脱离火焰主体, 然后燃烧殆尽, 在这部分火焰燃烧过程中, 后面的火焰主体也会逐渐地增长, 当脱离火焰主体部分的火焰燃烧殆尽之后火焰主体最前沿处会有另一部分火焰脱离火焰主体燃烧。因此, 火焰长度在极短的时间内就会呈现出突增与突降的规律, 且从火焰的最前沿部分火焰准备脱离火焰主体时开始到这部分火焰燃烧殆尽的过程中, 火焰长度就会呈现出突增的现象, 且这段过程经历的时间相对较长, 因此该过程相对

缓慢一些,而当脱离火焰主体的这部分火焰燃烧殆尽之后,此时火焰区域突然减少,因此,火焰长度会呈现出突降的现象,且这段过程经历的时间很短,因此该过程十分迅速。

从以上 54 个工况火焰长度变化规律反推回来,还可以得到这样一个结论:当生物柴油以旋流燃烧的方式在炉窑内燃烧时,其火焰总是不停地、快速地经历这样一个过程:火焰最前沿面部分火焰在燃尽阶段会脱离火焰主体完成最后的燃烧过程(如图 8 所示,按照时间顺序,从左到右、从上到下为火焰的发展过程,每张图片之间时间间隔为 0.001 s),将其定义为“脱焰过程”。从图 7 可以发现火焰长度的这种突增与突降的过程非常多,这说明生物柴油以旋流燃烧方式在炉窑内燃烧,火焰既有大尺度“脱焰过程”又有小尺度“脱焰过程”。

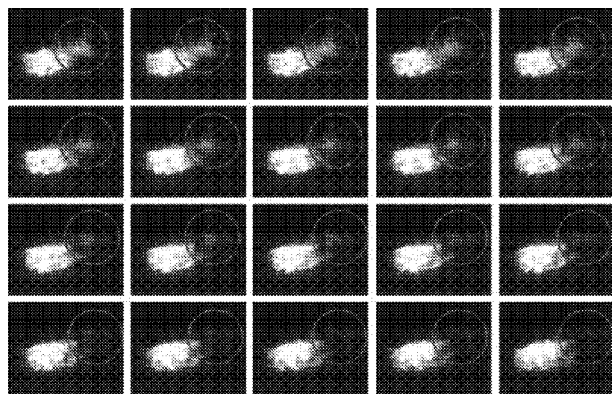


图 8 火焰“脱焰过程”图

Fig. 8 Process of “taking off the flame”

对 54 个工况的火焰长度进行计算取平均值,得到其火焰长度,对这些火焰长度数据进行二次多项式拟合,得到火焰长度特性曲线。以 1.4、0.8 MPa 为例,如图 9 所示。火焰长度与空气过剩系数  $\alpha$  成反比,随着  $\alpha$  的增加,火焰长度在不断地减小。同时,随着雾化压力  $p$  的减小,火焰长度曲线变化趋势平缓。雾化压力越小时,火焰“脱焰过程”越严重,火焰长度减小趋势变缓。整体上看,各火焰长度数据点基本上都在拟合曲线的附近,采用二次多项式对 6 条曲线进行拟合十分合理,拟合结果都比较理想。在不同工况下的火焰长度基本上呈线性变化

趋势,规律性较强。

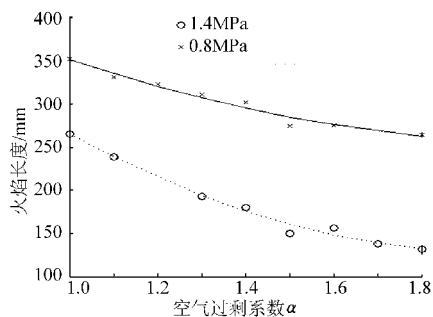


图 9 火焰长度特性曲线

Fig. 9 Characteristics curves of flame length

### 3 结论

(1) 火焰体积变化规律:雾化压力  $p$  一定的条件下,生物柴油在炉窑内燃烧的火焰体积随着空气过剩系数  $\alpha$  的变大而逐渐减小;雾化压力  $p$  由 1.6 MPa 减小到 0.8 MPa 过程中,火焰体积随空气过剩系数  $\alpha$  的变大而逐渐减小的这种变化趋势逐渐减弱,但从 0.8 MPa 到 0.6 MPa,这种趋势又有所加强;空气过剩系数  $\alpha$  一定的条件下,生物柴油在炉窑内燃烧的火焰体积随雾化压力  $p$  由 1.6 MPa 减小到 0.8 MPa 而逐渐变大,再随雾化压力  $p$  由 0.8 MPa 减小到 0.6 MPa 而逐渐变小;空气过剩系数  $\alpha$  由 1.0 增加到 1.8 过程中,这种变化趋势逐渐增强。

(2) 火焰形状与结构变化规律:雾化压力  $p$  相同,随着空气过剩系数  $\alpha$  的变大,火焰的变形越来越严重,火焰的结构越来越模糊;空气过剩系数  $\alpha$  相同,随着雾化压力  $p$  的变大,火焰的变形越来越严重,火焰的结构越来越模糊。雾化压力在 1.2 ~ 1.6 MPa 时,空气过剩系数在 1.0 ~ 1.3 的区域内火焰形态较为理想,存在着最佳火焰形态。

(3) 火焰长度变化规律:在任意极短的时间内,生物柴油在炉窑内燃烧的火焰长度在不断地变化,总是呈现出突增与突降的规律,且突增的过程较突降过程缓慢一些。同时存在着“脱焰过程”。火焰长度与空气过剩系数  $\alpha$  成反比,随着雾化压力  $p$  的减小,火焰长度曲线变化趋势平缓。

### 参 考 文 献

- 1 Yusuf Chisti. Biodiesel from microalgae[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25:294 ~ 306.
- 2 Fangrui Ma, Milford A. Hanna. Biodiesel production: a review[J]. Bioresource Technology, 1999, 70(1):1 ~ 15.
- 3 Jason Hill, Erik Nelson, David Tilman, et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(30):11 206 ~ 11 210.
- 4 Ayhan Demirbas. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods[J]. Progress in Energy and Combustion science, 2005, 31(5 ~ 6):466 ~ 487.
- 5 Ritesh Kumar, Ravi Kumar G, Chandrashekar N. Microwave assisted alkali-catalyzed transesterification of Pongamia pinnata seed

- oil for biodiesel production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(11):6 617 ~ 6 620.
- 6 Krisada Noiroj, Pisitpong Intarapong, Apanee Luengnaruemitchai, et al. A comparative study of KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(4):1 145 ~ 1 150.
- 7 Ayhan Demirbas. Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(1):125 ~ 130.
- 8 Cumali İlkılıç, Selman Aydın, Rasim Behcet, et al. Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(3):356 ~ 362.
- 9 Mustafa Canakei. Production of biodiesel from feedstocks with high free fatty acids and it's effect on diesel engine performance and emissions[D]. Ames, IA: Iowa state University, 2001.
- 10 Zafer Utlu, Mevlüt Süreyya Koçak. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(8):1 936 ~ 1 941.
- 11 梅德清,袁银男,孙平,等. 生物柴油发动机燃烧火焰与放热过程特性研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11):26 ~ 30.  
Mei Deqing, Yuan Yinnan, Sun Ping, et al. Features of burning flames and heat release process of biodiesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11):26 ~ 30. (in Chinese)
- 12 Stamatov V, Honnery D J Soria. Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(13):2 108 ~ 2 121.
- 13 Czernik S, Bridgwater A V. Overview of application of biomass fast pyrolysis oil[J]. *Energy and Fuels*, 2004, 18(2):590 ~ 598.
- 14 张雷,郭子如,丁以斌. 高速摄像在火焰传播中的应用[J]. *煤矿爆破*, 2007(3):16 ~ 19.  
Zhang Lei, Guo Ziru, Ding Yibin. Application of high-speed image pick-up in study of flame-propagation[J]. *Coal Mine Blasting*, 2007(3):16 ~ 19. (in Chinese)
- 15 王忠,袁银南,梅德清,等. 生物柴油燃烧过程内窥镜高速摄影实验研究[J]. *内燃机学报*, 2007, 25(2):163 ~ 166.  
Wang Zhong, Yuan Yinnan, Mei Deqing, et al. Experimental study on combustion process of bio-diesel fuel with end scope high speed photography[J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 25(2):163 ~ 166. (in Chinese)
- 16 何旭,郑亮,赵陆明,等. 生物柴油喷雾、着火和燃烧特性试验研究[J]. *内燃机工程*, 2012, 33(5):41 ~ 45.  
He Xu, Zheng Liang, Zhao Luming, et al. Experimental research on the spray, ignition and combustion characteristics of biodiesel[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 33(5):41 ~ 45. (in Chinese)
- 

(上接第 18 页)

- 7 Picon V, Postel Y, Nicot E, et al. Electro-magnetic valve actuation system; first step toward mass production[C]. *SAE Paper* 2008-01-1360, 2008.
- 8 王力彪,何邦全,谢辉,等. 发动机可变气门技术的研究进展[J]. *汽车技术*, 2005(12):4 ~ 9.  
Wang Libiao, He Bangquan, Xie Hui, et al. Study progress of engine variable valve technology[J]. *Automobile Technology*, 2005(12):4 ~ 9. (in Chinese)
- 9 Ekdahl E, Quinn S B. VCT cam timing system utilizing calculation of intake phase for dual dependent cams; U. S., 6745732[P]. 2004-06-08.
- 10 Morikawa J, Isobe D. Valve timing control apparatus for an internal combustion engine; U. S., 6109224[P]. 2000-08-29.
- 11 Takahashi S. Control device for a variable valve timing mechanism of an engine; U. S., 6352016[P]. 2002-03-05.
- 12 Moriya Y. Value performance control apparatus for internal combustion engine; U. S., 5769044[P]. 1998-06-23.
- 13 谢辉,班智博,何邦全,等. 用于 HCCI 发动机的可变气门定时机构; 中国, 201110219766.5[P]. 2011-10-21.