

生物柴油碳烟特性的可视化研究

何 旭, 马 骁, 吴复甲, 王建昕

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

Visualization Investigation of Soot Characteristics of Engine Fuelled with Biodiesel Fuel

HE Xu, MA Xiao, WU Fu jia, WANG Jian xin

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In an optical engine, the visualization investigation of the combustion process of diesel/biodiesel blended fuels was implemented by high-speed photography and the flame images were acquired. Based on the two-color method, KL factor which indicated the integrated soot concentration in the cylinder was obtained from the flame image in order to analyze the effect of biodiesel on the combustion and soot formation in the cylinder. The results show that with the increase of biodiesel proportion in the blended fuel, the maximum combustion pressure gradually reduces, ignition delay increases and combustion duration decreases. In addition, the luminosity and distribution area of the flame reduces. The maximum KL factor is also reduced as well as the distribution area of rich soot concentration decreases and the process of soot oxidation is speeded.

摘要: 在1台光学可视化发动机上,采用高速摄影法,对不同掺混比例的柴油/生物柴油混合燃料进行研究,获取缸内燃烧火焰图像,通过双色法得到表征缸内碳烟总体分布的KL因子,分析了生物柴油对缸内燃烧过程和碳烟生成特性的影响。研究结果表明,随着生物柴油掺入比例的增加,最高燃烧压力逐渐降低,滞燃期相对延长,燃烧持续期缩短,火焰的亮度和分布面积都随之下降。KL因子的最高浓度降低,碳烟较浓的分布区域减小,碳烟的氧化进程加快。

关键词: 内燃机; 双色法; 碳烟; 柴油机; 生物柴油; 高速摄影

Key words: IC engine; two-color method; soot; diesel engine; biodiesel; high speed photography

中图分类号: TK464

文献标识码: A

0 概述

随着我国经济的发展,汽车保有量大幅度增加,极大地促进了内燃机行业的发展,但同时也造成了能源短缺和环境恶化等一系列问题。近10年来许多国家竞相展开了替代燃料的研究和应用工作,生

物柴油按一定比例与普通柴油掺混而不需要对原机进行大幅度改造,且具有可再生和来源广泛的特点,因此受到了很多国家的重视,得到了快速发展。与传统柴油相比,生物柴油属于含氧燃料,能够显著降低柴油机排放的碳烟和微粒(PM),如结合废气再循环(EGR)、高压喷射等技术可以达到同时降低NO_x

收稿日期: 2008-01-25

基金项目: 中国博士后科学基金(20070410058)

作者简介: 何 旭(1976-),男,博士后,主要研究方向为发动机缸内工作过程激光诊断, E-mail: hhxxu@tsinghua.edu.cn.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 PM 排放的目的,减轻了后处理系统的负担^[1,2]。

目前对生物柴油具有大幅度降低碳烟和微粒排放的能力已经达成共识,但其机理还不明确。目前普遍认为生物柴油对柴油机碳烟排放的改善效果主要依赖于氧含量的大小。Miyamoto 的研究表明燃料中的氧含量超过 30 % 时就会实现无烟燃烧^[3]。美国环保署在重型柴油机上进行的生物柴油含量对排放的影响研究表明:含氧燃料对发动机排放的影响主要与其掺混量有关,几乎成正比的关系,碳烟最大下降 50 %^[4]。另外一些研究表明含氧燃料的分子结构对排放也有较大的影响^[5]。这些研究主要是通过柴油机台架性能试验和模拟计算来进行,尚需通过可视化手段对碳烟的生成和氧化过程进行进一步验证。采用可视化手段研究生物柴油的碳烟生成机理,寻找进一步降低碳烟的控制策略,可以更好地平衡碳烟和 NO_x 的排放关系,指导混合燃料设计,对实现清洁高效燃烧具有重要意义。

本文利用可视化技术,在 1 台光学可视化发动机上,对不同掺混比例的生物柴油混合燃料进行可视化解析,采用高速摄影法获取缸内燃烧火焰图像,通过双色法分析得到表征缸内碳烟总体分布的 *KL* 因子,研究分析了生物柴油对缸内燃烧过程和碳烟生成特性的影响。

1 试验装置与方法

试验中共采用 4 种燃料,分别为 B0、B20、B50 和 B100。其中 B0 代表纯柴油,采用当地购买的普通商业 0[#] 柴油,可以满足欧 II 排放标准;B100 为以菜籽油为原料制备的纯生物柴油;B20 为 20 % 体积的生物柴油掺混 80 % 体积的普通柴油;B50 为 2 种油按照 1:1 的体积比例掺混。试验用油的燃料特性如表 1 所示。

表 1 试验用油的燃料特性

燃 料	B0	B20	B50	B100
柴油/(体积)%	100	80	50	0
生物柴油/(体积)%	0	20	50	100
密度/(g·cm ⁻³)	0.830	0.839	0.852	0.873
热值/(kJ·kg ⁻¹)	43 140	42 476	41 505	39 950
含氧量/(重量)%	0	2.2	5.41	10.56

试验装置系统如图 1 所示,它主要由光学可视化发动机、高速摄影系统、缸压数据采集系统和同步控制系统组成。光学可视化发动机由 1 台单缸四冲程柴油机改装而成,其主要参数如表 2 所示。在原机的基础上,加长了缸体和活塞,并在活塞顶部安装

1 块石英玻璃,通过石英下方的 45° 反射镜,即可观察到缸内的燃烧火焰。试验过程中,为了模拟真实发动机的工作,通过循环水对机体进行加热,使试验点接近实际发动机工作状态。试验用高速摄像机是日本 PHOTRON 公司的 FASTCAM-ultima512 CMOS 相机,试验中采用 4000 帧/s 的拍摄速度,单帧像素为 256×256,在 600 r/min 转速下每 2 幅图片之间间隔角度为 0.9°CA。缸内压力由 Kistler 压力传感器和电荷放大器采集到计算机中。同步控制系统根据角标传感器给出的同步信号,协调控制缸压采集、燃油喷射和高速摄影同时进行。试验流程为:将循环水加热到 85℃,光学发动机由直流测功机拖动至转速为 600 r/min,高速摄像机处于待命状态,设置好喷油和缸压采集的次数,一切就绪后向同步控制系统发出指令,燃油射入缸内着火,高速摄影和缸压采集同时开始工作,当达到预设的数值后系统自动停止,然后就可以对采集到的图像和缸压数据进行分析处理。试验过程中,每换 1 种燃料就需要对油路和供油系统进行清洗,以保证试验的精确性。

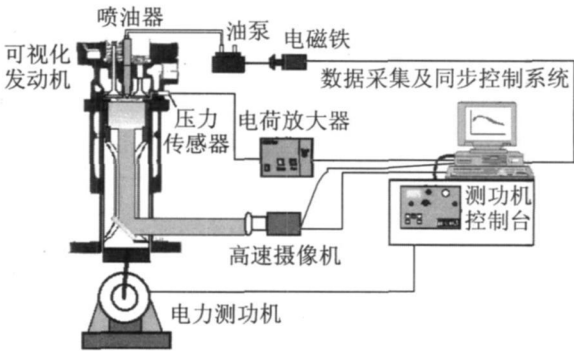


图 1 试验装置系统简图

表 2 光学发动机性能参数

项目	参数
气缸数	1
缸径×行程/mm	100×105
连杆长度/mm	215
气门数	2
转速/(r·min ⁻¹)	600
循环水温/℃	85
供油提前角/°CA	27
喷油量/(mL·100 cycle ⁻¹)	3.3

双色法是利用柴油机“明亮”火焰中的碳粒辐射出的连续光谱,来获得表征缸内整体碳烟浓度的 *KL* 因子的二维分布。在工程上可以认为发动机内每处的碳粒密度是不变的,用 *K* 表示吸收系数,近似于碳粒的数密度成比例,*L* 为在火焰的探测方向

上的光轴的几何厚度,那么通过消去 KL 因子得到碳烟粒子温度的计算公式和 KL 因子公式^[4]:

$$\left[1 - \exp\left\{-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{Ta_1} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right]^{\lambda_1} = \left[1 - \exp\left\{-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{Ta_2} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right]^{\lambda_2} \tag{1}$$

$$KL = -\lambda_2 \ln\left[1 - \exp\left\{-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{Ta} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] \tag{2}$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别为选定的 2 个波长,通常直接选择数码图像中 R、G、B 3 个通道中的 2 个; $C_2 = 14\,388\,\mu\text{mK}$, 为第二普朗克常数; T_a 为对应光强 $I(\lambda, T)$ 时的亮度温度,选择特定的 2 个波长及其对应的亮温,即可由式(1)计算出碳烟粒子的温度;系数 α 是碳烟粒子直径及碳烟复折射指数的函数,主要受到火焰结构及燃料种类的影响,对于大多数燃料,在可见光区间一般取 1.38。关于双色法的详细原理可以参考文献[6]。

2 试验结果与讨论

4 种燃料的缸内压力曲线如图 2 所示, 0°CA 为压缩上止点。由图 2 可见,随着生物柴油掺入比例的增加,最高燃烧压力逐渐降低,滞燃期相对延长,这和文献[7]的研究结果相一致。这主要是因为

生物柴油的热值低于普通柴油, B100 比 B0 降低约 7.4%, 因此混合燃料的热值小于普通柴油。此外生物柴油粘度高于普通柴油,会造成缸内雾化质量下降,混合气形成不均匀,推迟了燃烧相位。B20 由于生物柴油掺入比例较低,缸压曲线和 B0 差别不大,但随着生物柴油掺入比例的增加, B50 和 B100 滞燃期推迟更加明显,着火时刻的推迟造成最高燃烧压力的进一步降低。因此如果在柴油机上应用生物柴油混合燃料时不希望对原机进行大规模改动时,掺入比例应该有 1 个限值,这样可以保证其动力性能。

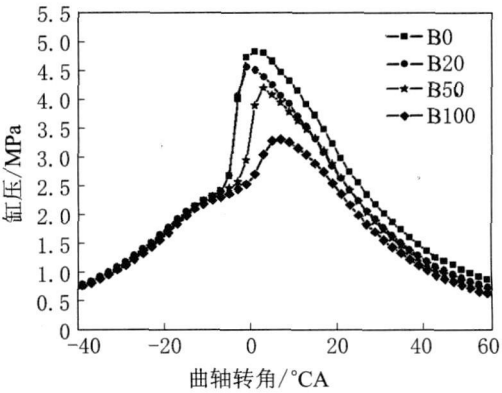


图 2 缸压曲线对比

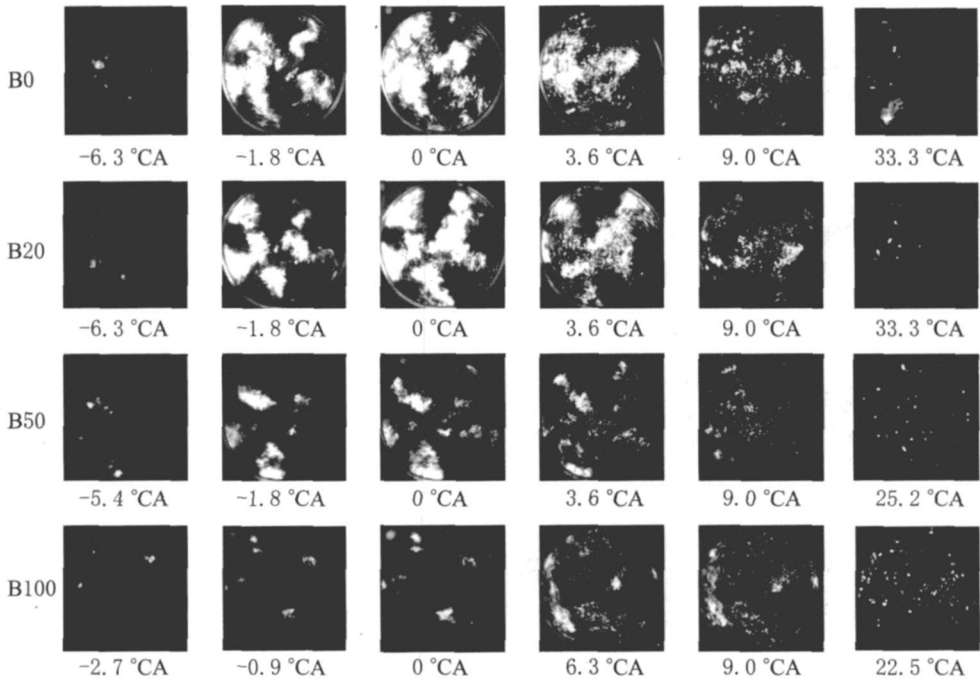


图 3 燃烧火焰图片对比

图 3 为高速摄像机记录下来的不同燃料燃烧过程的火焰图片。第 1 幅图为着火时刻的图像,最后 1

幅为燃烧结束时的图像,为了便于比较燃烧过程中火焰的发展情况,中间的 4 幅尽量选择火焰发展形

态相似, 对应的曲轴转角相同的图像来进行比较。其中每组第 3 幅左上角的圆点是用来作为上止点指示信号的激光光斑。由图 3 也可见, B0 和 B20 的着火滞燃期相同; B50 和 B100 相对分别延迟了 0.9、3.6°CA, 这与缸压曲线显示出来的燃烧特性一致。从整个燃烧过程来看, 4 种燃料的燃烧持续期分别为 39.6、39.6、30.6、25.2°CA, 随着燃料中生物柴油含量的增加, 燃烧持续期缩短。这主要是因为生物柴油属于含氧燃料, 氧原子改善缸内局部缺氧的状况, 促进扩散燃烧, 加速燃烧进程, 缩短了燃烧所需要的时间。火焰的亮度和分布面积可以反映出缸内燃烧的剧烈程度。B0 和 B20 的火焰分布比较饱满, 基本充满整个空间, 火焰十分明亮; B50 的火焰只分布在油束周围, 亮度大幅度下降; B100 的火焰最暗, 着火点出现在喷注的端部, 即使在上止点后 6.3°CA 时燃烧最为猛烈的时刻, 尚有大面积的暗区没有被火焰填充, 这表明 B100 的燃烧质量很差。

由于柴油机的燃烧主要是以扩散燃烧方式进行, 燃烧过程中形成的碳烟粒子受热产生辐射形成明亮的火焰, 所以火焰越亮, 分布面积越广, 说明火焰中的碳烟越多。从图 3 火焰图像可大概观察到燃烧过程中火焰的面积和发展, 但是难以定量分析其碳烟分布, 需要采用双色法进一步处理。高速摄像机所拍摄的彩色图片, 包含着 3 个单色通道(RGB)的图像, 使得数据采集和处理更方便, 成本更低^[8]。选用高速摄像机拍摄的数字图像 RGB 中的 R、G 2 个通道值, 利用双色法对燃烧室内的整体碳烟浓度(KL 因子)进行了计算, 4 种燃料的碳烟最浓时刻的二维碳烟分布如图 4 所示。由图 4 可见, 火焰亮度越大的区域, 对应的 KL 因子越大, 意味着产生的碳烟越多。随着燃料中生物柴油比例的增加, 大 KL 因子的分布区域也变小, 最高 KL 因子浓度从 3.35096 降低到 2.89624。

图 5 为 4 种燃料燃烧时 KL 因子随着曲轴转角的变化趋势, 其中 KL 因子小于 0.5 的区域认为是背景区域, 不在统计范围之内。由图 5 可见, B0 和 B20 的高 KL 因子的区域(多碳粒的区域)分布在上止点-5~10°CA 之间, 特别是 KL 大于 2.5 的像素点分布较多, 表明这段时期内有较多的碳粒生成。当生物柴油掺入比例进一步提高, KL 因子较大的像素点(>2.5)大幅度减小, 这表明生物柴油使燃烧过程中生成的碳粒大幅度减少, 抑制燃烧过程中碳烟的生成。从 KL 因子发展的时间历程来看, B0 和 B20 在燃烧初期生成的碳烟数量基本相当, 但 B20 的氧化速度特别快, 在 20°CA 时 KL 因子已经降到

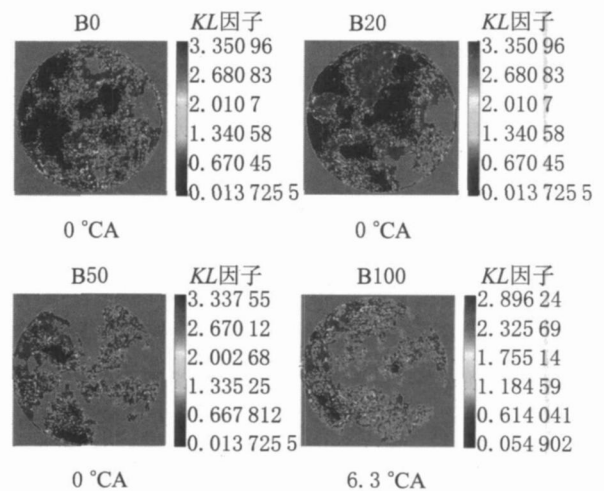


图 4 缸内 KL 因子分布对比

2000 像素以下, 而 B0 则一直持续到 35°CA 时才基本完成碳烟氧化。这些现象主要取决于 2 方面的因素: 第一, 生物柴油的主要成分为甲酯, 基本不含多环芳香烃, 多环芳香烃是碳烟生成的前驱物, 一般而言燃料中多环芳香烃含量愈高, 其生成的碳烟越多, 2007 年颁布的北京市车用柴油标准中规定多环芳香烃不得超过 11%, 由于生物柴油中含有的多环芳香烃的数量远远低于柴油, 因此生物柴油的碳烟生成比柴油低; 第二, 生物柴油是含氧燃料, 随着生物柴油的掺混比例增加, 氧含量也随之增加。碳烟生成的条件是高温缺氧, 氧原子一定程度改善了这种状况, 减少了碳烟的生成, 同时氧原子在燃烧过程中起到了助燃作用, 特别是在喷雾核心等燃料浓度高的区域, 促进了扩散燃烧的进行, 使燃料能够充分地燃烧, 加速已经生成的碳烟的氧化, 从而降低了最终的碳烟排放。当生物柴油掺混比例继续增加, 碳烟氧化的时间历程进一步缩短, 在 20°CA 前就基本完成碳烟氧化。B0、B20 和 B50 这 3 种燃料在着火后缸内碳烟浓度迅速上升, 在上止点时达到最大值; B100 着火相对较晚, 而且碳烟浓度上升缓慢, 出现了碳烟浓度上升和下降的时间基本相等的现象, 这说明生物柴油粘度的增加造成了混合气质量下降、使燃烧恶化, 这会影响到发动机的动力性能。从综合效果来看, B20 由于生物柴油的掺入比例较少, 燃烧特性上和 B0 基本一致, 同时在碳烟排放方面具有优势。因此, 对于直接应用生物柴油而不对原机进行大规模改动, 则小比例掺混是不错的选择; 而要进一步提高生物柴油的掺混比例, 就需从燃油雾化入手、提高混合气的质量, 以保证燃烧的充分进行。

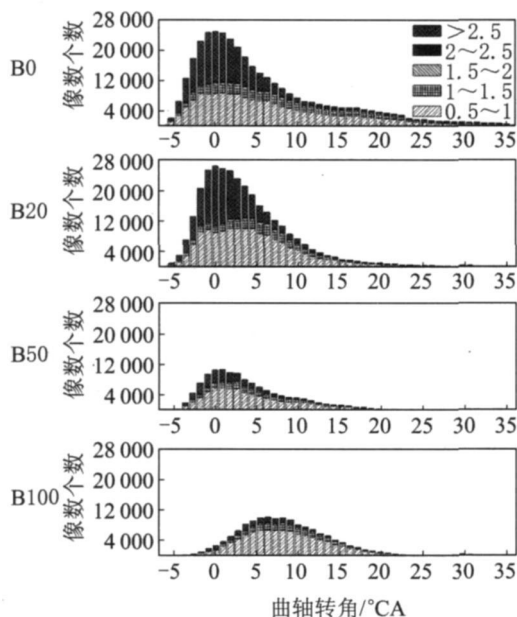


图 5 KL 因子随曲轴转角变化对比

3 结论

(1) 随着生物柴油掺入比例的逐渐增加, 最高燃烧压力逐渐降低, 滞燃期相对延长, 燃烧持续期缩短, 火焰的亮度和分布面积都随之下降。

(2) 随着生物柴油掺入比例的增加, 含氧量上升, 大 KL 因子的分布区域减小, 最高 KL 因子浓度降低, 碳烟的氧化进程加快。

(3) 当生物柴油掺入比例过高, 燃烧质量恶化, 动力性能下降。小比例的生物柴油混合燃料在实际发动机应用中具有较大优势。

参考文献:

- [1] Mueller C J, Martin G C. Effects of oxygenated compounds on combustion and soot evolution in a DI diesel engine: broadband natural luminosity imaging[C]//SAE 2002-01-1631, 2002.
 - [2] Murayama T, Zheng M, Chikahisa T. Simultaneous reductions of smoke and NO_x from a DI diesel engine with EGR and dimethyl carbonate[C]//SAE 952518, 1995.
 - [3] Miyamoto N, Ogawa H, Nurun N M. Smokeless low NO_x high thermal efficiency and low noise diesel combustion with oxygenated agents as main fuel[C]//SAE 980506, 1998.
 - [4] Environmental Protection Agency. Draft technical report, a comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions[R]. EPA 420-P-001, 2002.
 - [5] Curran H J, Fisher E M, Glaude P A. Detailed chemical kinetic modeling of diesel combustion with oxygenated fuels[C]//SAE 2001-01-0653, 2001.
 - [6] Zhao H, Ladomatos N. Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24: 221-255.
 - [7] 覃 军, 刘海峰, 尧命发. 柴油机掺烧不同比例生物柴油的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(4): 335-340.
 - [8] 田 辛, 何邦全, 王建昕. 用双色法研究进气道喷射乙醇柴油引燃时的燃烧过程[J]. 内燃机学报, 2004, 22(1): 39-44.
- Qin J, Liu H F, Yao M F. Experiment study on diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(4): 335-340.
- Tian X, He B Q, Wang J X, et al. Research on the combustion process of ethanol injected in the intake port ignited by diesel fuel by means of 2 color method[J]. Transaction of CSICE, 2004, 22(1): 39-44.

(编辑: 许 蕾)

敬 告 读 者

即日起,《内燃机工程》杂志电话改为 021-25079814, 65244464。传真为 021-65244464, 25079998。
杂志邮箱: nrjgc@163.com。

特此通知。

《内燃机工程》编辑部