

# 醇类与柴油混合燃料的燃烧特性分析

周楠<sup>1</sup>, 吴晗<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘 要:** 针对多种醇类与柴油混合物的燃烧特性进行了研究,选取的实验装置为顶部拥有可视观察窗的定容燃烧室. 通过可燃混合气体预燃,模拟柴油发动机的高温高压环境,采用高速相机(幻影 V7.1)记录醇类和柴油混合物的燃烧过程,进而分析其燃烧特性. 实验结果表明,在较低的实验温度下,所选取的混合燃料能够达到无焰燃烧,产生的烟灰发光极低,可降低辐射热损失以及射流引起的壁面热损失. 醇类混合燃料的高汽化潜热,有助于降低绝热火焰温度和氮氧化物的生成量. 表征多醇柴油混合物是一种非常适合直接添加到柴油发动机中的替代燃料.

**关键词:** 醇类混合燃料;柴油;光学诊断;低温燃烧;燃烧特性

中图分类号: U 27 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)01-0097-05

## Combustion Characteristics Analysis of the Alcohol and Diesel Blends

ZHOU Nan<sup>1</sup>, WU Han<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Corresponding author: ZHOU Nan, E-mail: zhounan@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** The combustion characteristics of the alcohol (acetone - butanol - ethanol, ABE) and diesel fuel mixture was studied in the constant volume chamber with a window on the top. A premixed gas mixture containing  $C_2H_2$ ,  $N_2$ , and air was burned in the constant volume chamber to generate a high temperature and high pressure environment that simulated the typical diesel engine in-cylinder top dead centre (TDC) condition. The combustion process was recorded through the top window using a high speed camera (Phantom V7.1) located above the chamber. The results and discussions were based on the data above. It is found that at low ambient temperature and low ambient oxygen, the mixture presented extremely low soot luminosity with better combustion efficiency comparing to pure diesel. The high latent heat of vaporization of the alcohol blends contributes to the reduction of the adiabatic flame temperature and the amount of nitrogen oxides suggesting that ABE solution, an intermediate product during ABE fermentation, is a very promising alternative fuel to be directly used in diesel engines especially under low temperature combustion (LTC) conditions.

**Key words:** alcohol and diesel blends; diesel; optical diagnostics; low temperature combustion; combustion characteristics

与以石油为基础生产醇类相比,生物法发酵生产醇类(丙酮-丁醇-乙醇)逐渐成为热点,然而较高的提纯成本阻碍了工业的大规模生产<sup>[1-4]</sup>. 面对这样的现实,研究人员的关注点转移到了其发酵过程的中间产物上. 以多种醇类混合

物存在的中间产物,如果可以实现简单处理后的直接燃烧,将会简化生产流程并降低生物燃料的开发成本,为其进一步市场化推广铺平道路.

本研究醇类混合燃料在柴油机工作状态下的燃烧特性. 通过对混合燃料的燃烧特性分析,

充分发掘多醇燃料作为替代或部分替代传统燃料并在发动机上应用的能力和前景.不少研究学者已经对醇类与传统燃料混合的燃烧特性进行了前期研究,一些学者将少量的混合燃料应用在发动机的实际操作中;如文献[5-6]分别对正丁醇与纯柴油所组成的混合燃料进行了研究,讨论了丁醇对于柴油燃烧的改善效果并分析了原因;He 和 Sukjit 等将乙醇与柴油组成的混合燃料与纯柴油的燃烧特性进行了对比实验,验证了乙醇柴油混合燃料在排放性能方面的提升<sup>[7-8]</sup>;Chang 等将丙酮对燃烧的影响加入了其研究过程,并初步研究了水对于复合燃料燃烧的影响<sup>[9]</sup>.上述的研究多数是针对单一或者两种醇类与传统燃料混合,多种醇类与传统燃料混合的研究可查证的较少.文献[10]对醇类-柴油和水混合的乳化柴油进行了研究,证实了醇类柴油混合燃料在柴油发动机上的可行性.但是,对于其燃烧和排放特性等的研究仍有很大空间.本文对醇类柴油混合燃料的燃烧过程进行可视化分析研究,提供针对燃料燃烧特性的重要信息,为其在发动机上的应用提供一定的理论基础和实验依据.

## 1 实验概述

### 1.1 实验燃油属性

本文选择低硫柴油作为基础燃料.醇类溶液为丙酮(质量分数 99.5%)、丁醇(质量分数 99.5%)和乙醇(质量分数 99.8%)的混合液,体积比分别为 3:6:1(丙酮:丁醇:乙醇).混合燃料中醇类体积分数为 20%,低硫柴油体积分数为 80%,本文称其为醇类混合燃料,通过温控磁力搅拌器配制而成.燃料的特性见表 1.所配制醇类混合燃料溶液室温静置两周并没有分离现象发生.鉴于本文是初期研究,没有考虑含水条件.

### 1.2 实验装置

本文的主要实验装置(见图 1)为直径 110 mm,深度 65 mm 的可视定容燃烧室,顶部是直径为 130 mm 的 Dynasil 1100 熔融二氧化硅玻璃,针对 190 nm 以上光波的透光率可达 0.97.在燃烧室的底部正中央布置了喷油器,其电喷的控制系统来自 Caterpillar,喷油压力可恒定保持在 134 MPa.为了模拟喷油器工作的真实环境,通过加热棒将定容燃烧室预热到目标温度(105 °C),同时防止水蒸气的影响.燃烧室压力监测采用 Kistler 公司二氧化硅压力传感器和 5026 双模信号放大器,压力传感器固定在燃烧室侧壁,目前装

置中只选取了一个测量点位且传感器误差小于 ±1%.燃烧放热率指燃烧介质在单位时间或单位曲轴转角的燃烧放热量,作为燃烧过程的决定因素,影响着发动机指示热效率、机械负荷及排放特性,本研究依据热力学第一定律,通过采集的压力数据计算得出:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt}$$

式中:γ 为比热比(定压比热容和物质的定容比热容之比); $Q_n$ 为喷油燃烧放热.

表 1 实验燃料特性

Table 1 Fuel properties

| 特性参数                        | 丙酮       | 丁醇       | 乙醇     | 柴油        |
|-----------------------------|----------|----------|--------|-----------|
| 十六烷值                        | —        | 25       | 8      | >40       |
| 低热值<br>MJ·kg <sup>-1</sup>  | 29.6     | 33.1     | 26.8   | 42.7      |
| 汽化潜热<br>kJ·kg <sup>-1</sup> | 518      | 582      | 904    | 270       |
| 氧<br>体积分数/%                 | 27.6     | 21.6     | 34.8   | <10       |
| 着火极限的<br>体积分数/%             | 2.6~12.8 | 1.4~11.2 | 4.3~19 | 0.6~5.6   |
| 密度<br>g·mL <sup>-1</sup>    | 0.791    | 0.813    | 0.795  | 0.82~0.86 |
| 当量空燃比                       | 9.54     | 11.21    | 9.02   | 14.3      |
| 燃点/°C                       | 560      | 385      | 434    | 230       |

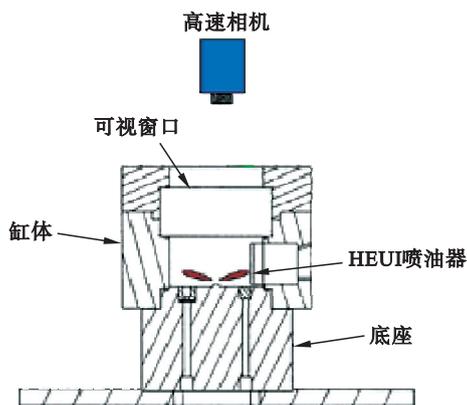


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

实验步骤为:通过进气系统将乙炔、氧气和氮气所组成的混合气体压入定容燃烧室中,控制 3 种气体的压力和体积比可得到期望的环境氧浓度.可燃混合气体在密闭的燃烧室经打火后燃烧,快速地建立高温高压初始环境,考虑到燃烧室本体的传热损失,片刻后其压力和温度会降低到喷油器工作的特定阈值,进而喷油器系统开始工作,完成典型的柴油发动机内的喷射、雾化和燃烧全

过程. 喷油器触发的同时, 高速摄像机开始工作.

实验对象为纯柴油燃料和多醇柴油混合燃料. 六孔喷油器的喷孔直径为 0.145 mm, 喷油压力和喷射的时间分别为 130 MPa 和 3.5 ms. 实验过程中保持喷油量为  $120 \text{ mm}^3$ , 在环境氧体积分数 21% 的条件下, 分别观察两种燃料在环境温度 700, 900 和 1 100 K 中的燃烧情况.

### 1.3 光学诊断

由图 1 可见, 高速相机置于实验装置正上方, 在喷油器工作开始瞬间同步透过观察窗记录燃烧室内火焰形成、发展和完结的整个过程. 高速相机的基本参数和设置如下: 波长响应范围 400 ~ 1 000 nm; 拍摄速率 9 049 帧/s; 分辨率  $416 \times 560$ ; 曝光时间  $3 \mu\text{s}$ . 为了避免过度曝光, 实验中选取较为中等的光圈, 便于对不同工况下的图像进行对比.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 燃烧特性分析

图 2 是醇类混合燃料和柴油在不同环境温度下燃烧压力和放热率曲线. 实验过程中, 两种燃烧喷射压力和持续时间相同, 可认为喷射体积相同, 考虑燃料的热值不同, 已经对所有数据进行了归一化处理. 从燃烧压力可以看出, 3 种不同的环境温度下, 柴油燃烧的最高压力高于醇类混合燃料. 这是由于醇类混合燃料汽化潜热比较大, 形成可燃混合气的过程中消耗了缸内更多的能量, 导致缸内输入的净热量减少.

观察放热率曲线可以发现, 柴油和醇类混合燃料受环境温度因素影响均较为明显. 当环境温度从 1 100 降至 900 K 时, 两种燃料的放热率峰值随温度的降低而升高, 当环境温度继续降低至 700 K 时, 放热率减小. 一般认为, 喷雾燃烧过程中急剧升高的放热率是预混燃烧的结果, 相对较平缓的放热率是扩散燃烧的结果. 因此, 可知环境温度在 1 100 K 时, 主要是由油束的扩散燃烧占主导地位. 油束喷入较高的温度环境下, 油滴经雾化和蒸发后很快达到可燃状态而迅速燃烧, 故在燃烧室内无法累积大量的可燃混合气. 当温度相对较低时, 如 900 K, 油束喷入燃烧室后有一个相对较长的时间蒸发和混合, 最后有更多的可燃混合气同时发生燃烧而得到较高的放热率. 但当温度更低时, 如 700 K, 由于温度已经较低, 加之油滴蒸发吸热进一步降低燃烧室内温度, 导致燃烧速度变慢, 甚至发生失火现象, 所以放热率较低.

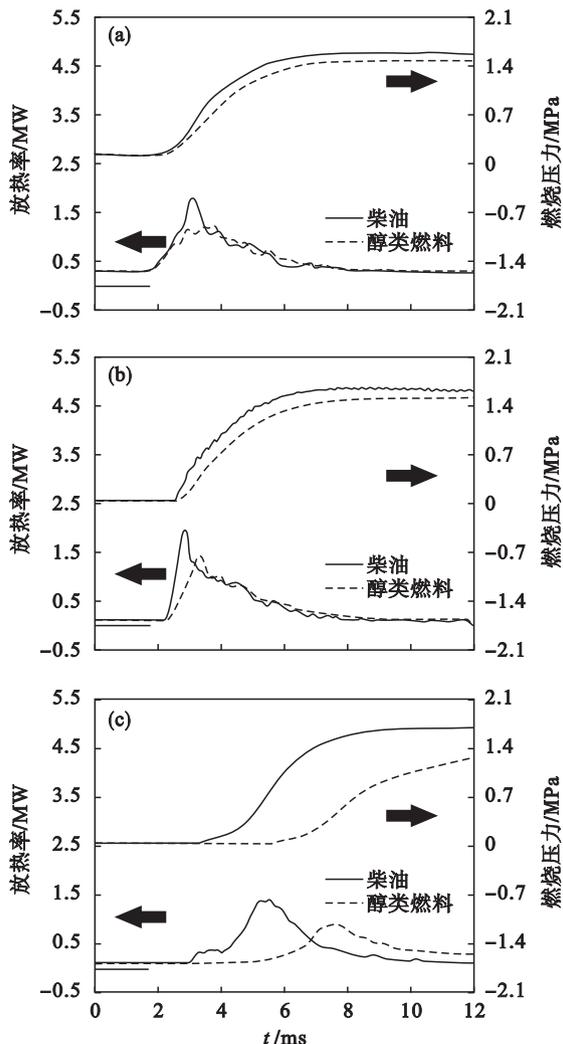


图 2 不同环境温度下压力和放热率  
Fig. 2 Apparent heat release rate and combustion pressure at different ambient temperatures  
(a)—1 100 K; (b)—900 K; (c)—700 K.

比较两种燃料的放热率可以发现, 3 种环境温度条件下, 醇类的预混燃烧现象都不如柴油明显, 这也是由于醇类的高汽化潜热和高自燃温度所导致. 同时燃料的着火极限也是重要的影响因素, 从表 1 中可知柴油具有更低的着火极限, 故可以有更多的混合气参与预混燃烧.

对于两种燃料在各种条件下的着火延迟分析: 放热率大于 0 时认为燃烧已经开始. 很明显, 随着环境温度的降低, 两种燃料着火延迟也随之变长.

在 1 100 K 时, 两种燃料的着火延迟差别不明显. 随着环境温度降低到 900 K, 柴油的着火延迟没有明显的变化, 但是醇类混合燃料的着火延迟逐渐增大. 当环境温度降低到 700 K 时, 两种燃料的着火延迟进一步增长, 但是柴油和醇类混合燃料之间的差值变大. 可知醇类混合燃料的着火

过程对环境温度的变化更为敏感. 由于燃料本身特性的影响, 醇类混合燃料相比柴油有更高的汽化潜热, 导致了着火推后.

## 2.2 火焰结构分析

一般认为实验燃料燃烧形成的自然火焰发光包括化学发光(chemiluminescence)和碳烟发光(soot luminosity)两部分. 而后者要明显强于前者, 这表明碳烟发光能够代表燃烧发光. 碳烟发光本身由两个因素决定: 碳烟的浓度和碳烟的温度. 因此, 自然火焰发光可视为碳烟浓度和温度的表征. 图 3, 图 4 表征的是醇类混合燃料和柴油在不同环境温度下的自然火焰发展过程. 竖列是同一油束的顺序形态. 图片经过 Matlab 的染色处理, 明亮和黑色区域分别代表火焰和背景.

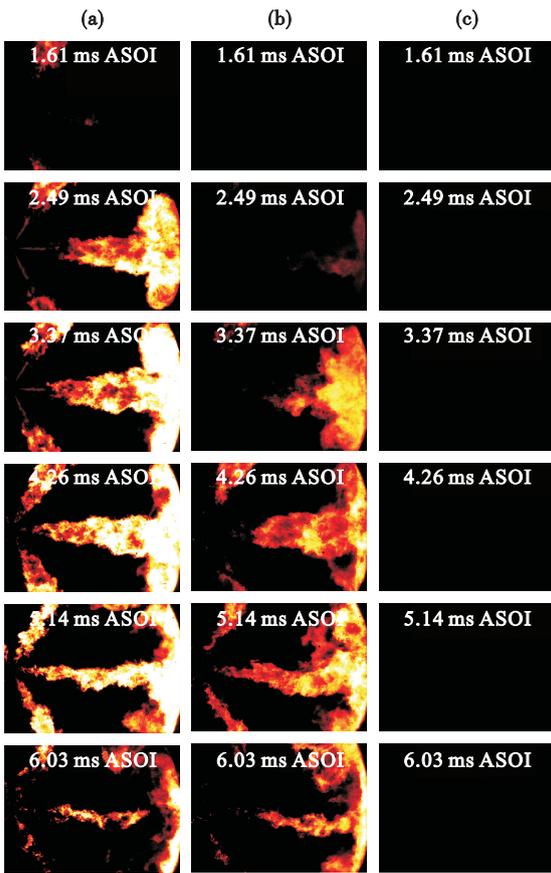


图 3 醇类混合燃料在 21% 氧体积分数不同环境温度下的自然火焰进化过程

Fig. 3 Evolution of alcohol and diesel blends natural luminosity from an individual injection event at 21% ambient oxygen

(a)—1 100 K; (b)—900 K; (c)—700 K.

醇类混合燃料在 1 100 K, 燃料喷射后(after start of injection, ASOI) 1.61 ms 时可以观察到碳烟发光. 引燃后, 火焰成发散形态. 在时间轴移动到 2.49 ms 的图像中, 雾化燃烧主要发生在靠近喷嘴处, 随着火焰向下端传递, 可以清楚地观

察到几处明亮和黑色的区域, 分别对应着燃烧和碳烟前驱物的生成区域. 由于在火焰上游发生的是预混燃烧, 其释放的燃烧能量在下游聚集, 预期较多数量的碳烟在靠近缸壁处生成. 鉴于燃烧过程持续地放热, 不同时间阶段的燃烧火焰不免会发生过饱和现象, 为了保证实验对比的一致性, 将所有的相机参数设置保持不变, 并最大限度地兼顾整体图像的质量. 随着燃烧过程的进行, 燃烧室内的温度和压力也随之升高, 油束的蒸发效果得到加强, 火焰与喷嘴之间的间隔逐渐变小, 直观上观察到火焰有向上游移动的效果, 此时火焰周围所卷吸的空气减少. 随着环境温度进一步降低到 900 K, 醇类混合燃料的碳烟腾起高度(火焰前端到喷油器的距离)与相同条件下的纯柴油相比, 腾起高度较长, 表征大量的空气随着预混燃烧过程的进行而卷吸, 能够达到良好的燃烧效果. 醇类混合燃料的燃烧过程中, 相比较纯柴油而言, 首次观察到发光的位置要贴近缸壁边缘, 可观测到火焰的范围也相对较小. 这是由于醇类混合燃

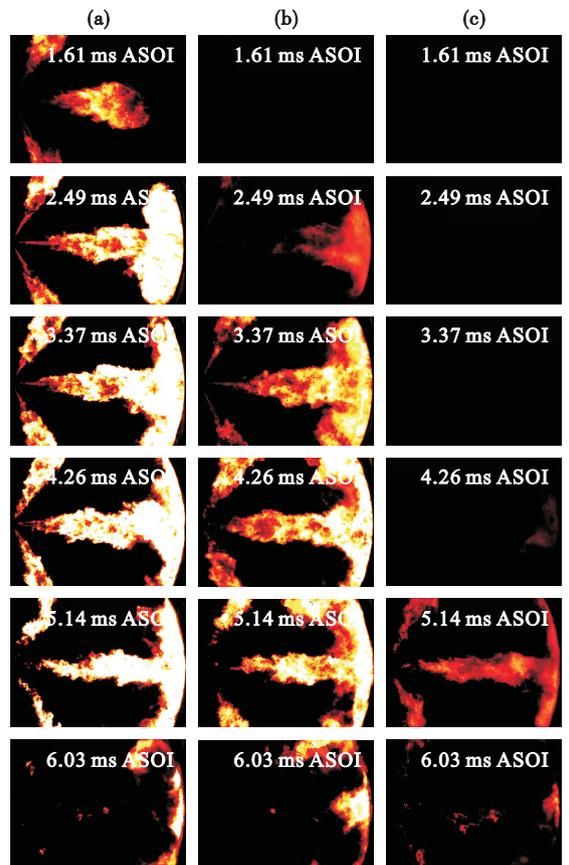


图 4 柴油在 21% 氧体积分数不同环境温度下的自然火焰进化过程

Fig. 4 Evolution of diesel natural luminosity from an individual injection event at 21% ambient oxygen

(a)—1 100 K; (b)—900 K; (c)—700 K.

料的着火延时要长于纯柴油,在这期间燃料与空气能够充分混合,并结合在低温条件下预混燃烧处于支配地位的结果.另外醇类混合燃料的汽化潜热值较高,降低了燃烧过程的温度,达到了醇类混合燃料的冷焰燃烧,自然发光强度的降低,即使其与1100 K下的火焰形态很相似,也说明了冷焰在上游的存在.更有意义的是,当环境温度为700 K时,与1100 K和900 K条件相比,柴油燃烧过程中的自然发光明显减少,可以认为燃烧过程碳烟的产生量也显著减少,通常视作低温燃烧过程.通过图像观察可知其火焰的燃烧形态也发生较大变化.而醇类混合燃料已经观察不到发光,这说明在既定的光圈条件下,醇类混合燃料几乎没有碳烟生成,能够达到完全的无火焰燃烧.表明了碳烟的温度和浓度非常低,进一步弱化了碳烟的形成过程.燃烧室内的无火焰燃烧,也一定程度上抑制了氮氧化物的生成,缸内由于无火焰燃烧能够获得较为均匀的温度分布并减少了传热损失,最终获得较高的燃烧效率.

### 3 结 论

1) 相对于纯柴油,混合燃料的含氧量较高,在燃烧过程中氧化作用较强,可减少碳烟的生成.在不同的温度条件下都能够获得较低的碳烟发光效果.

2) 醇类混合燃料有较长的着火延迟和碳烟腾起高度,允许夹带更多的空气到喷雾的上游以及促进空气和燃料充分混合.醇类混合燃料着火延迟期长,说明混合时间充分,对应过浓混合气区减少,对进一步降低碳烟意义重大.在低环境温度条件下,醇类混合燃料达到无焰燃烧,产生的烟灰发光极低,并降低辐射热损失以及射流引起的壁面热损失.

3) 醇类混合燃料的潜热比柴油高,蒸发冷却效应明显.此功能有助于降低绝热火焰温度和燃

烧终了氮氧化物的生成量.蒸发冷却效果辅以低温燃烧模式将对醇类混合燃料的碳烟生成过程有相当的抑制作用,进一步实现清洁燃烧.

### 参考文献:

- [1] Afschar A S, Biebl H, Schaller K, et al. Production of acetone and butanol by clostridium acetobutylicum in continuous culture with cell recycle [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1985, 22(6): 394 - 398.
- [2] Kraemer K, Harwardt A, Bronneberg R, et al. Separation of butanol from acetone-butanol-ethanol fermentation by a hybrid extraction-distillation process [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2011, 35(5): 949 - 963.
- [3] Qureshi N, Hughes S, Maddox I S, et al. Energy-efficient recovery of butanol from model solutions and fermentation broth by adsorption [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2005, 27(4): 215 - 222.
- [4] Ezeji Q N, Butanol T C. 'A superior biofuel' production from agricultural residues (renewable biomass): recent progress in technology [J]. *Biofuels, Bioproducts, Biorefining*, 2008, 2(4): 319 - 330.
- [5] Feng X, Huo M, Lee C F, et al. The effects of EGR and injection timing on the engine combustion and emission performances fueled by butanol-diesel blends [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2012, 5(3): 794 - 811.
- [6] Liu H F, Huo M, Lee C F, et al. Comparison of ethanol and butanol as additives in soybean biodiesel using a constant volume combustion chamber [J]. *Energy and Fuels*, 2011, 25(4): 1837 - 1846.
- [7] He B Q, Shuai S J, Wang J X, et al. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(35): 4965 - 4971.
- [8] Sukjit E, Herreros J M, Dearn K D, et al. The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol-diesel blends [J]. *Energy* 2012, 42: 364 - 374.
- [9] Chang Y C, Lee W J, Lin S L, et al. Green energy: water-containing acetone-butanol-ethanol diesel blends fueled in diesel engines [J]. *Applied Energy*, 2013, 109: 182 - 191.
- [10] Lin S L, Lee W J, Lee C F, et al. Energy savings and emission reduction of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbons by adding water-containing acetone and neat soybean oil to a diesel-fueled engine generator [J]. *Energy Fuels*, 2010, 24(8): 4522 - 4533.