

## 柴油掺混正丁醇对火焰发展及光谱的影响

刘海峰, 文铭升, 崔雁清, 张传奇, 郑尊清\*, 尧命发

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 正丁醇是一种很有前景的柴油替代燃料, 针对缸内火焰发展和燃烧中间产物的自发光光谱开展研究, 有助于深入理解柴油掺混正丁醇混合燃料对柴油机燃烧过程的影响规律。因此, 在一台光学发动机上, 利用火焰高速成像技术和自发光光谱分析法, 研究纯柴油与柴油掺混不同比例正丁醇后对发动机缸内火焰发展和自发光光谱的影响。试验过程中, 光学发动机转速为  $1\ 200\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 喷油压力为 600 bar, 进气加热到 398 K, 使上止点附近达到约 900 K 温度。纯柴油、柴油掺混 20% 正丁醇燃料和柴油掺混 40% 正丁醇燃料分别用 D100, DB20 和 DB40 表示, 三种燃料在每个着火循环喷入的油量分别为 17.5, 18.7 和 19.2 mg, 从而保证发动机输出功相同。试验结果表明: 冷却水温不变时, 喷油时刻推迟, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻推迟, 蓝色预混火焰比例减小; 喷油时刻不变时, 提高冷却水温度, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻提前, 蓝色预混火焰比例减小。随着正丁醇掺混比例增加, 呈现局部混合气率先着火的特征且着火时刻推迟, 蓝色预混火焰比例增加, 火焰亮度降低, 火焰亮度从大到小依次为:  $D100 > DB20 > DB40$ 。D100 燃料随喷油推迟, 整体光谱的峰值向长波方向移动, 碳烟辐射增强, OH 谱带的光强峰值先增大后减小, OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带出现的时刻推迟, 表明高温和低温反应时刻推迟; 喷油时刻不变时, 提高冷却水温, 整体光谱的光强增加, OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带的出现时刻提前, 表明高温和低温反应时刻提前。掺混正丁醇后的 DB40 燃料随喷油推迟, 光谱的整体光强增加, OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带的光强峰值提高, 表明推迟喷油对 DB40 燃料也是有助于促进高温和低温反应。DB40 燃料光谱的整体光强低于 D100 燃料, 其 OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  的谱带出现的时刻迟于 D100 燃料, 表明掺混正丁醇后燃料的高温 and 低温反应时刻都相对 D100 燃料推迟。SOI-15、冷却水温  $95\ ^\circ\text{C}$  工况下, D100 燃料的谱线经过  $2\ ^\circ\text{C A}$  就呈现出了类似碳烟黑体辐射谱的特征, 而 DB40 燃料先呈现出 CO 氧化连续谱的特征, 经过  $15\ ^\circ\text{C A}$  才呈现碳烟黑体辐射谱的特征。

**关键词** 柴油; 正丁醇; 火焰发展; 自发光光谱

**中图分类号:** TK428.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-1998-07

### 引言

提高热效率是国内外内燃机研究的关键目标, 由于柴油机排放控制与热效率之间存在矛盾关系, 随着排放法规愈加严格, 排放成为制约柴油机热效率提高的主要因素之一。采用清洁的替代燃料有利于在降低排放的同时保持高的热效率, 国内外研究表明<sup>[1-3]</sup>, 在柴油中添加一定比例的含氧燃料可以改善发动机燃烧与排放, 且发动机动力性不受影响。因此, 近年来, 有关柴油机含氧替代燃料的研究越来越受国内外的研究学者关注。

正丁醇作为一种生物质替代燃料, 近年来被国内外广泛

研究<sup>[4-7]</sup>。国内外学者通过将正丁醇与柴油掺混研究其对柴油机燃烧和排放特性的影响, 结果表明, 柴油掺混正丁醇后能够改善发动机的燃烧和排放特性、提高发动机的热效率<sup>[8-11]</sup>。张鹏等<sup>[12]</sup>进行了柴油机掺混不同含氧燃料燃烧火焰自发光研究, 结果表明含氧燃料的添加降低了燃烧火焰温度和火焰面积, 减少了燃烧过程中的碳烟排放。王站成等<sup>[13]</sup>研究了柴油掺混不同比例正丁醇在不同 EGR 率下的燃烧和排放特性, 结果表明柴油中掺混正丁醇可以加快燃烧速率, 改善 EGR 对燃烧过程带来的负面影响, 降低碳烟排放。针对缸内火焰发展和燃烧过程中间产物的自发光光谱进行研究, 有助于深入理解柴油掺混正丁醇混合燃料对柴油机缸内燃烧过程的影响, 但目前相关研究还比较缺乏。

收稿日期: 2019-06-26, 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51922076, 91941102)资助

作者简介: 刘海峰, 1981 年生, 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室教授 e-mail: haifengliu@tju.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: zhengzunqing@tju.edu.cn

因此,利用火焰高速成像技术和自发光光谱分析法,采集柴油与柴油掺混正丁醇混合燃料的火焰自发光图像和自发光光谱,在光学发动机上研究柴油掺混正丁醇对火焰发展特征及自发光光谱的影响规律。

## 1 实验部分

试验在一台光学发动机上进行,该光学发动机是由一台水冷、四缸、直喷柴油机改造而成,仅保留了原机的第三缸作为工作缸,其基本参数如表 1 所示,光学发动机试验装置示意图如图 1 所示。

表 1 光学发动机基本参数

Table 1 Basic parameters of optical engine

参数	数值
活塞行程/mm	100
缸径/mm	92
排量/L	0.664
压缩比	11
喷孔数	6

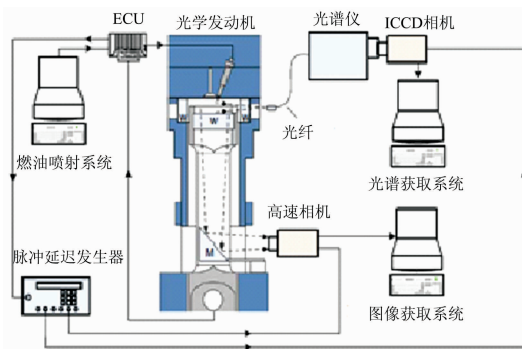


图 1 光学发动机试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical engine test

试验过程中,燃烧室中火焰成像的图像信号通过加长活塞顶部的石英玻璃视窗,然后经过反光镜反射,由高速相机采集,其采集的光信号波段范围为 400~700 nm。光谱仪的光纤探头布置在环形石英窗口一侧接收燃烧过程中自发光信息,光谱仪测量范围是 275~525 nm,分辨率是 3 nm,可以对近紫外波段的羟基(OH),可见光波段的甲醛(CH<sub>2</sub>O)等燃烧物质的发光光谱进行测量。光谱信号采集使用 ICCD 探测器,其带有像增强器,是专门用于光信号捕捉的装置,可以通过提高像增强器的增益值在纳秒级的门宽下捕捉弱光信号,ICCD 探测器可采集的光谱范围是 115~920 nm,可以满足光谱信号采集的需求。光学发动机的有效可视范围,进/排气门、喷油器和缸内压力传感器的相对位置如图 2 所示。

光学发动机由测功机驱动,转速为 1 200 r · min<sup>-1</sup>,无废气再循环,共轨燃油系统可提供 600 bar 的喷射压力。为了减少石英窗和石英环的热负荷,避免污染可视化窗口,光学发动机以跳火模式运行,即每隔 20 个非着火循环着火 1

次。光学发动机由于可视化窗口的引入,导致压缩比较低,因此将进气加热到 398 K,使上止点附近达到约 900 K 的温度,保证能够稳定着火和燃烧。

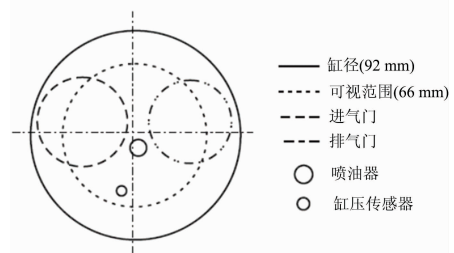


图 2 可视化范围

Fig. 2 Visualization scope

本文利用了两种研究方法,分别为火焰高速成像技术和自发光光谱分析法。火焰高速成像技术是一种传统的光学测试方法,操作比较简便,使用的仪器为高速相机。由于发动机运行过程中存在一定幅度的振动,相机应独立布置,不与发动机接触。在运行发动机之前,需对相机位置及拍摄焦距进行校对工作,使获取的图像达到最佳清晰度,这样就保证了在发动机运行过程中可以获得缸内燃烧过程的清晰图像。自发光光谱分析法是依据燃烧过程中某些物质的化学发光现象,通过光谱仪进行采集,进而进行光谱分析的方法。燃烧发光的机理可以概括为:某些物质(如反应物、中间产物、荧光物质等)成分吸收反应释放的能量而从低能级向高能级跃迁,由于高能级不稳定进而自发回到稳定态的过程中以光辐射的形式释放能量。燃烧化学发光的来源主要为 OH, CH<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub> 和 CH 等自由基和 CO 氧化的连续光谱,该方法可以记录燃烧过程中自发光光谱随时间的变化。

表 2 燃料特性参数<sup>[14]</sup>

Table 2 Fuel parameters

参数	柴油	正丁醇
含氧量/(Wt%)	0	21.6
十六烷值	59	12
低热值/(MJ · kg <sup>-1</sup> )	42.7	33.08
粘度@20 °C (mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	4.842	3.640
沸点/°C	191~367	117.7

试验使用的燃料为纯柴油(D100)、柴油掺混 20% 正丁醇(DB20)和柴油掺混 40% 正丁醇(DB40),均按照体积比掺混。为保证发动机输出功相同,D100, DB20 和 DB40 在每个着火循环喷入的油量分别为 17.5, 18.7 和 19.2 mg。柴油和正丁醇的燃料特性如表 2 所示。由于规律的相似性,因此在研究自发光光谱时只对比 D100 和 DB40 燃料。此外,本研究不同冷却水温度与喷油时刻(start of fuel Injection, SOI)对不同燃料燃烧特性的影响规律,其中冷却水温度分别为 35, 65 和 95 °C, SOI 分别为 -25 °C A ATDC, -15 °C A ATDC 和 -5 °C A ATDC,图中分别用 SOI-25, SOI-15 和 SOI-5 表示。

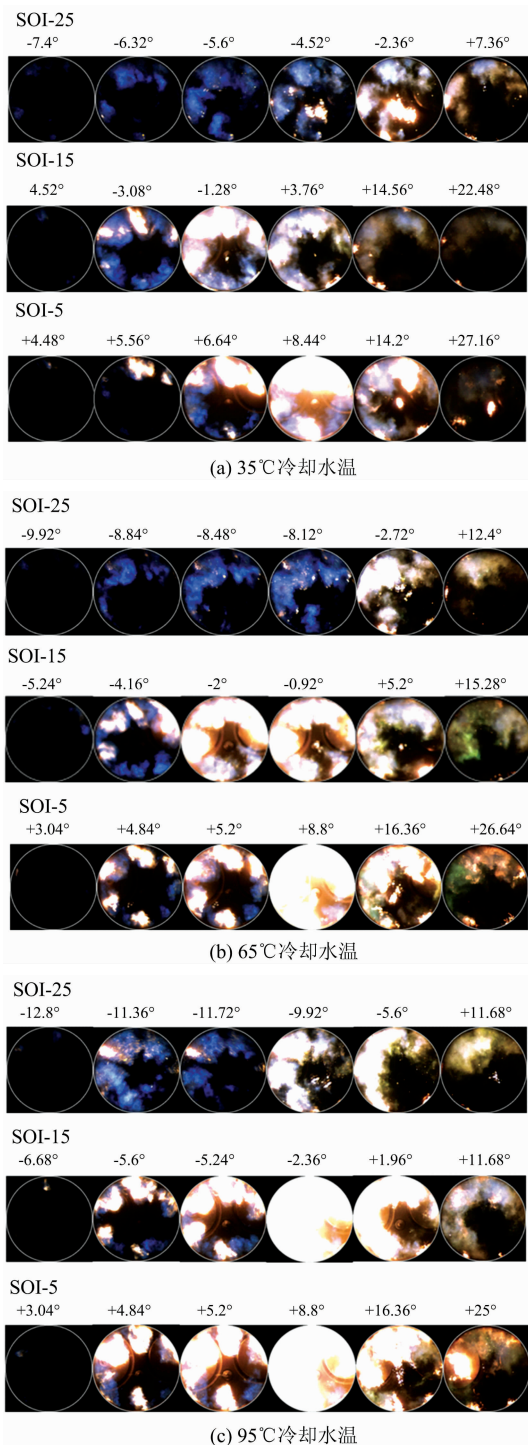


图 3 D100 燃料不同冷却水温下的火焰自发光图像  
(a): 冷却水温 35 °C; (b): 冷却水温 65 °C; (c): 冷却水温 95 °C

Fig. 3 Flame self-luminosity image of D100 fuel at different cooling water temperatures

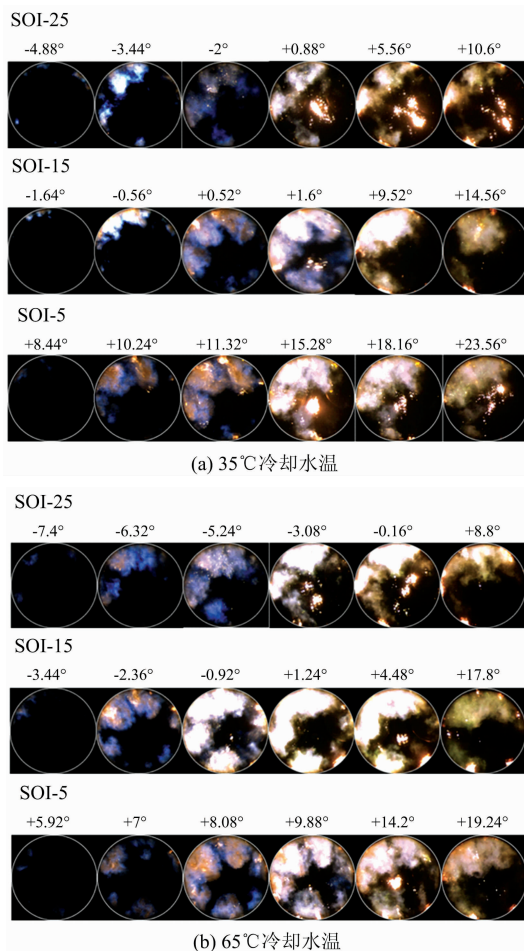
- (a): 35 °C cooling water temperature;  
(b): 55 °C cooling water temperature;  
(c): 95 °C cooling water temperature

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷却水温和喷油时刻对柴油掺混正丁醇混合燃料火焰发展的影响

图 3(a), (b)和(c)为不同冷却水温度下 D100 燃料的火焰自发光图像, 图中最先着火的位置在燃烧室边缘附近, 之后火焰向燃烧室中心区域发展, 有些图的中间存在一个明亮的着火点, 逐渐向外扩散, 其火焰零星分布且自发光呈现亮黄色。这是由于柴油机喷油器在喷油结束后针阀关闭时存在因喷油压力过低造成部分燃油滴漏的现象, 滴漏的燃油雾化不良, 油粒过大, 导致了喷油嘴附近碳烟的生成。图中表明, 冷却水温度不变, 喷油时刻推迟, 滞燃期缩短, 蓝色预混火焰比例减少, 初始火核形成时刻推迟。主要原因是推迟喷油, 燃料进入缸内时的压力和温度较高, 导致滞燃期缩短, 预混燃烧比例降低。图中还表明, 喷油时刻不变, 提高冷却水温度, 滞燃期缩短, 蓝色预混火焰比例减小, 初始火核形成时刻提前, 主要是因为冷却水温度升高, 缸壁度增大, 传热损失减少, 滞燃期缩短, 预混燃烧比例降低, 初始火核形成时刻提前。

由于 DB20 和 DB40 规律类似, 因此, 本文选用 DB20 燃料分析其火焰发展规律。图 4(a), (b)和(c)分别为不同冷却



(b) 65°C 冷却水温

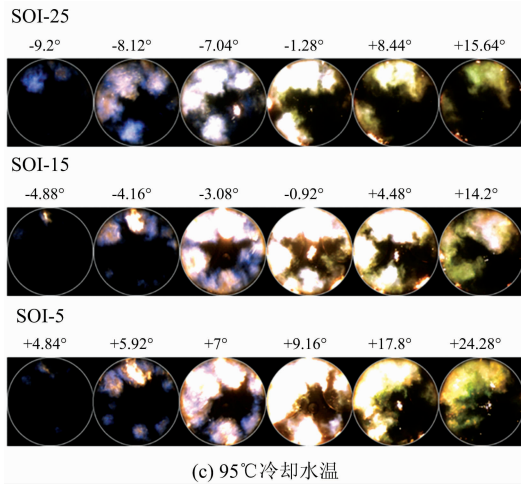


图 4 DB20 燃料不同冷却水温下的火焰自发光图像  
(a): 冷却水温 35 °C; (b): 冷却水温 65 °C; (c): 冷却水温 95 °C

Fig. 4 Flame self-luminosity image of DB20 fuel at different cooling water temperatures

- (a): 35 °C cooling water temperature;  
(b): 55 °C cooling water temperature;  
(c): 95 °C cooling water temperature

水温度与喷油时刻下, DB20 的火焰自发光图像, 图中最先着火的位置与 D100 燃料类似, 有些图的中间也存在一个明显的着火点, 其存在原因与 D100 燃料类似。图中表明, 冷却水温不变, 推迟喷油, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻推迟, 蓝色预混火焰比例减少, 其原因与 D100 燃料类似。图 4 还表明, 喷油时刻不变, 提高冷却水温度, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻提前, 蓝色预混火焰比例减少, 原因与 D100 燃料类似。

为了直接比对不同燃料的影响, 进一步选择 SOI-15、冷却水温 65 °C 工况, 分析柴油掺混不同比例正丁醇后对火焰发展的影响。图 5 为三种燃料火焰自发光图像。图中表明, 随着正丁醇掺混比例增加, 着火时刻推迟, 蓝色预混火焰比例增加, 火焰亮度从大到小依次为: D100 > DB20 > DB40。其原因是, 正丁醇的蒸发潜热高于柴油, 随柴油掺混正丁醇比例的加大, 混合燃料的蒸发潜热增大; 同时, 正丁醇十六烷值低, 使混合燃料的活性随正丁醇比例增大而降低, 因此 DB20 和 DB40 燃料的滞燃期和预混燃烧比例高于 D100 燃料。纯柴油在发动机缸内燃烧时滞燃期短, 与空气混合不均匀, 碳烟生成较多, 而正丁醇是低十六烷值含氧燃料, 混合的改善有利于减少碳烟生成, 而含氧量高有利于碳烟降低。因此火焰亮度从大到小依次为: D100 > DB20 > DB40。此外, D100 燃料的燃烧还能分辨六个喷孔的油束火焰, 但随着正丁醇掺混比例的增大, 滞燃期延长, 早期油束火焰变得不清晰, 而呈现局部混合气率先着火的特征。类似现象在低冷却水温度或较早喷射时刻下均可以观测到。这表明, 当滞燃期延长后, 缸内混合气形成, 后续自燃以及燃烧火焰结构与传统柴油机喷雾油束火焰发展相比存在一定改变。

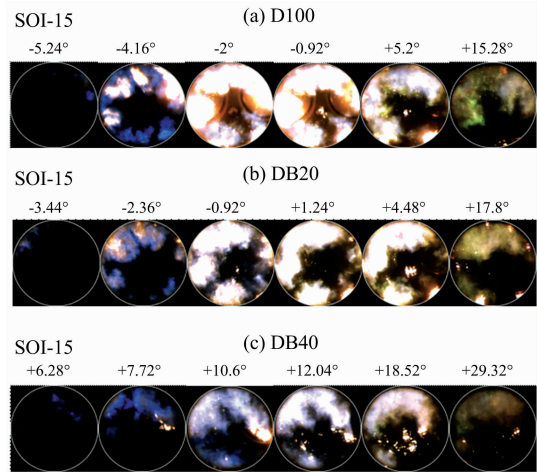


图 5 冷却水温 65 °C, 不同燃料火焰自发光图像  
Fig. 5 Flame self-luminosity image of different fuels at 65 °C cooling water temperature

## 2.2 冷却水温和喷油时刻对柴油掺混正丁醇混合燃料自发光光谱影响

对于 D100 燃料, 冷却水温度 65 和 95 °C 规律类似, 且 95 和 35 °C 差距较明显, 因此选择 35 和 95 °C 冷却水温的自发光光谱进行对比分析。图 6(a) 和 (b) 分别为不同冷却水温下 D100 燃料自发光光谱图, 火焰自发光光谱一些典型的带状光谱已用箭头表示出。OH 谱带的出现说明高温放热反应已经开始, CH<sub>2</sub>O 则是低温放热反应的生成物, 图中表明, 冷却水温 35 °C、SOI-25 工况下, -8 °C A ATDC 时没有光谱信号, 在 -6 °C A ATDC 时出现了 CH<sub>2</sub>O (422~424 和 434.5 nm) 和较弱 OH 带状光谱, 这些带状光谱被叠加到 CO 氧化连续谱 (约 350~500 nm 之间) 上, 此时总体光谱区域的峰值约为 420 nm (不考虑 CH<sub>2</sub>O 和 OH 谱峰)。此外, 在光谱图上也观察不到 CHO 和 C<sub>2</sub> 等物质的谱带, 其原因主要有两个: 第一, 光谱分辨率较低 (3 nm) 不足以区分像 CHO 和 C<sub>2</sub> 等物质的连续光谱的峰<sup>[15]</sup>; 第二, 这些物质的带状光谱化学发光强度较低, 以至于它们被 CO 氧化的连续光谱所覆盖<sup>[16]</sup>。随曲轴转角推迟, 在光谱上观察不到明显的 CH<sub>2</sub>O 谱带, 结合图 3(a) 可知, 采集不到明显的发光信号, 可能是因为 CH<sub>2</sub>O 是低温反应主要产物, 燃烧反应进展到高温阶段, 部分 CH<sub>2</sub>O 被消耗, 因此 CH<sub>2</sub>O 发光信号较弱。随着燃烧进一步发展, OH 谱带光强增加, 在 -4 °C A ATDC 时 OH 谱带最明显, 且光强达到峰值, 总体光谱区域的峰值移动到约 430 nm。在 -2 °C A ATDC 时, 总体光谱呈现类似黑体辐射的特征, 波长大于 430 nm 后光强一直处于高峰, 总体光谱区域的峰值移动到约 450 nm, 说明此时总体光谱曲线是由 CO 氧化连续谱和碳烟辐射连续谱叠加而成, 从图 3(a) 也可看出此时能观察到明显黄色碳烟火焰。随着燃烧发展, 曲轴转角进一步推迟, 2 °C A ATDC 与 12 °C A ATDC 时刻下的整体光谱的形状与 -2 °C A ATDC 的类似, 只是相应的光强减弱。在 12 °C A ATDC 之后燃烧自发光谱线峰值约为 500 nm, 此时缸内除了碳烟炽光外, OH 化学发光仍然存在, 这是由于

OH 是高温放热阶段的标志也是碳烟氧化的重要组分。图中还表明,冷却水温不变,推迟喷油,整体光谱的峰值开始向长波方向移动,表明碳烟辐射增强,OH 谱带的光强峰值先增大后减小,OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带出现的时刻推迟,表明高温

和低温反应时刻推迟;喷油时刻不变,提高冷却水温,整体光谱的光强增加,OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带的出现时刻提前,其原因主要是增大冷却水温度,传热损失减少,缸内温度提高,有利于促进高温和低温反应。

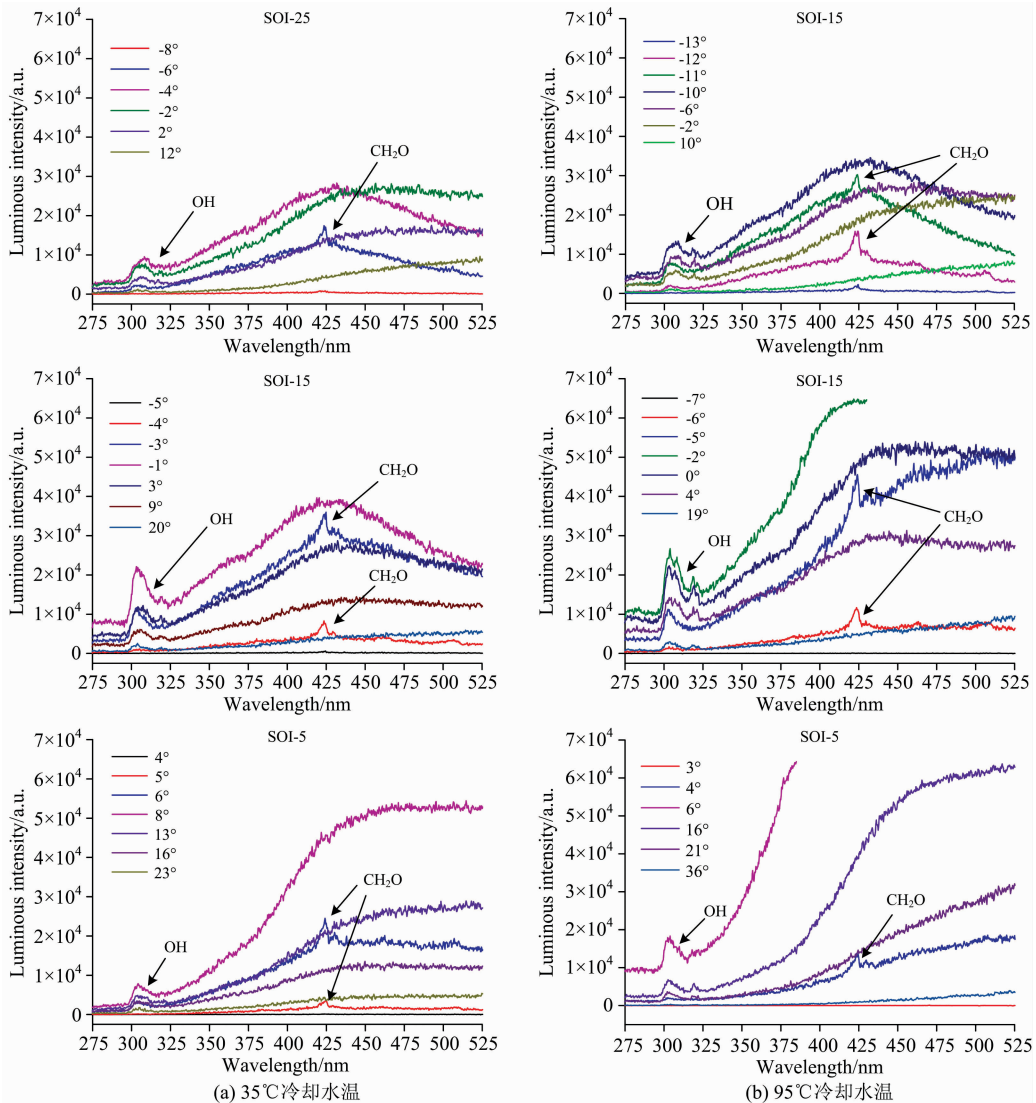


图 6 不同冷却水温度下 D100 燃料自发光光谱

(a): 35 °C 冷却水温; (b): 95 °C 冷却水温

Fig. 6 Self-luminosity spectra of D100 fuel at different cooling water temperatures

(a): 35 °C cooling water temperature; (b): 95 °C cooling water temperature

DB40 和 DB20 的光谱规律类似,选用 DB40 燃料进行分析。由于 35 和 65 °C 冷却水温下火焰自发光光谱太弱,因此只选用 95 °C 冷却水温的火焰自发光光谱进行分析。图 7 为冷却水温 95 °C、不同 SOI 下的 DB40 自发光光谱图,由于 SOI-5 工况下自发光太弱,因此选择 SOI-25 和 SOI-15 工况进行分析。图中表明,SOI-25 工况下,在光谱图上观察不到明显的  $\text{CH}_2\text{O}$ , CHO 和  $\text{C}_2$  等物质的谱带,其主要原因与 D100 燃料类似。1 °C A ATDC 时没有光谱信号,OH 谱带在 2 °C A ATDC 时出现,此时总体光谱的特征呈现为 CO 氧化连续谱,总体光谱区域的峰值约为 420 nm。随着燃烧发展曲轴转

角推迟,OH 谱带光强增加,在 5 °C A ATDC 时 OH 谱带最明显,且光强达到峰值,总体光谱区域的峰值移动到约 440 nm;曲轴转角继续推迟,OH 谱带光强降低。图中还表明推迟喷油,光谱的整体光强增加,OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带的光强峰值提高,表明推迟喷油对 DB40 燃料也是有利于促进高温和低温反应。

在 SOI-15、冷却水温 95 °C 工况下对 D100 和 DB40 进行对比发现,D100 燃料的自发光光谱在 -7 °C A ATDC 时没有光谱信号,在 -6 ~ -5 °C A ATDC 出现了较明显的  $\text{CH}_2\text{O}$  谱带,而 -5 °C A ATDC 之后表现出更强的碳烟辐射连续光

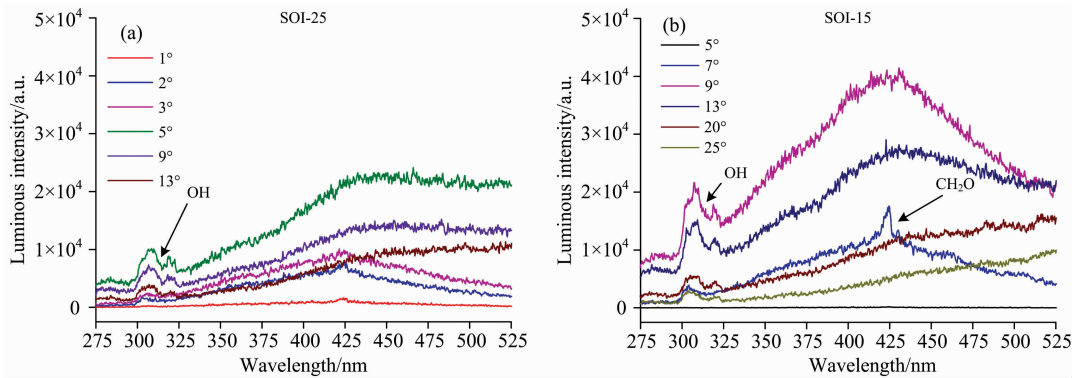


图 7 冷却水温 95 °C 时 DB40 燃料自发光光谱

Fig. 7 Self-luminosity spectra of DB40 fuel at 95 °C cooling water temperature

谱和 OH 带状光谱, 在 -2 °C A ATDC 时 OH 谱带光强最大且最明显, 19 °C A ATDC 时 OH 谱带光强降低到较弱水平。DB40 燃料的自发光光谱在 5 °C A ATDC 时没有光谱信号, 在 7 °C A ATDC 时, 出现了较明显的 CH<sub>2</sub>O 谱带, 之后 CH<sub>2</sub>O 谱带消失。在 9 °C A ATDC 时, OH 谱带光强最大且最明显, 25 °C A ATDC 时, OH 谱带光强降低到较弱水平。DB40 燃料光谱的整体光强低于 D100 燃料, DB40 燃料的 OH 和 CH<sub>2</sub>O 的谱带出现的时刻迟于 D100 燃料, 表明 DB40 燃料的高温和低温反应时刻都迟于 D100 燃料, 其原因主要是正丁醇的十六烷值较低, 柴油掺混正丁醇混合燃料的十六烷值低于柴油, 滞燃期较长, 因此 DB40 燃料的高温和低温反应时刻迟于 D100 燃料, 并且混合的改善及含氧的作用减少了碳烟生成, 光强降低。此外, D100 燃料的谱线经过 2 °C A 就呈现出了类似碳烟辐射谱的特征, 而 DB40 燃料先呈现出 CO 氧化连续谱的特征, 经过 15 °C A 才呈现碳烟辐射谱的特征。

### 3 结 论

(1) 冷却水温不变, 喷油时刻推迟, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻推迟, 蓝色预混火焰比例减小; 喷油时刻不变,

提高冷却水温度, 滞燃期缩短, 初始火核形成时刻提前, 蓝色预混火焰比例减小。随着正丁醇掺混比例的增加, 呈现局部混合气率先着火特征且着火时刻推迟, 蓝色预混火焰比例增加, 火焰亮度降低, 火焰亮度从大到小依次为: D100 > DB20 > DB40。

(2) 纯柴油(D100)燃料随喷油推迟, 整体光谱的峰值向长波方向移动, 碳烟辐射增强, OH 谱带的光强峰值先增大后减小, OH 和 CH<sub>2</sub>O 谱带出现的时刻推迟, 表明高温和低温反应时刻推迟; 喷油时刻不变, 提高冷却水温, 整体光谱的光强增加, OH 和 CH<sub>2</sub>O 谱带的出现时刻提前, 表明高温和低温反应时刻提前。

(3) 柴油掺混 40% 正丁醇的 DB40 燃料随喷油推迟, 光谱的整体光强增加, OH 和 CH<sub>2</sub>O 谱带的光强峰值提高, 表明推迟喷油对 DB40 燃料也是有助于促进高温和低温反应。DB40 燃料光谱的整体光强低于 D100 燃料, 其 OH 和 CH<sub>2</sub>O 的谱带出现的时刻迟于 D100 燃料, 表明掺混正丁醇后燃料的高温和低温反应时刻都相对 D100 燃料推迟。SOI-15、冷却水温 95 °C 工况下, D100 燃料的谱线经过 2 °C A 就呈现出了类似碳烟黑体辐射谱的特征, 而 DB40 燃料先呈现出 CO 氧化连续谱的特征, 经过 15 °C A 才呈现碳烟黑体辐射谱的特征。

### References

- [1] Agarwal A K, Dhar A, Gupta J G, et al. Energy Conversion and Management, 2015, 91: 302.
- [2] Chen P C, Wang W C, Roberts W L, et al. Fuel, 2013, 103(2): 850.
- [3] Huang H, Liu Q, Shi C, et al. Fuel Processing Technology, 2016, 153: 137.
- [4] Liu H, Li S, Zheng Z, et al. Applied Energy, 2013, 112: 246.
- [5] Liu H, Bi X, Huo M, et al. Energy & Fuels, 2012, 26(3): 1900.
- [6] Tornatore C, Marchitto L, Valentino G, et al. Energy, 2012, 45(1): 277.
- [7] Zheng Z, Yue L, Liu H, et al. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 1.
- [8] Atmanlı A, Yüksel B, İleri E, et al. Energy Conversion and Management, 2015, 90(8): 383.
- [9] Siwale L, Kristóf L, Adam T, et al. Fuel, 2013, 107: 409.
- [10] Zheng C, Wu Z, Liu J, et al. Energy Conversion and Management, 2014, 78(1): 787.
- [11] He T P, Chen Z, Zhu L J, et al. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 363.
- [12] ZHANG Peng, TANG Qing-long, CHEN Bei-ling, et al (张鹏, 唐青龙, 陈贝凌, 等). Transactions of CSICE(内燃机学报), 2014, 32(6): 489.

- [13] WANG Zhan-cheng, WU Jian, SHANG Wei-wei, et al(王站成, 吴 健, 商伟伟, 等). Vehicle Engine(车用发动机), 2016, (6): 61.
- [14] HOU Shu-mei, LIU Hai-feng, ZHENG Zun-qing, et al(侯树梅, 刘海峰, 郑尊清, 等). Transactions of CSICE(内燃机学报), 2016, 34 (6): 481.
- [15] Hwang W, Dec J, Sjöberg M. Combustion and Flame, 2008, 154(3): 387.
- [16] Liu H, Zheng Z, Yao M, et al. Applied Thermal Engineering, 2012, 33: 135.

## Effect of Blending *n*-Butanol in Diesel on Flame Development and Spectrum

LIU Hai-feng, WEN Ming-sheng, CUI Yan-qing, ZHANG Chuan-qi, ZHENG Zun-qing\*, YAO Ming-fa  
State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** *N*-butanol is a promising alternative fuel for diesel. The study on the self-luminosity spectra of combustion intermediates and flame development in diesel engine cylinder was helpful to understand the influence law of diesel blended *n*-butanol deeply on the combustion process in diesel engine cylinder. Therefore, this paper used the high-speed flame imaging technology and self-luminosity spectroscopy analysis to study the effects of pure diesel and diesel blending *n*-butanol on the flame development and self-luminosity spectrum of the engine cylinder on an optical engine. During the test, the optical engine speed was  $1\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , with an injection pressure of 600 bar and an intake air heating to 398 K, bringing the temperature around the top dead center to approximately 900 K. Pure diesel, diesel blended with 20% *n*-butanol fuel and diesel blended with 40% *n*-butanol fuel were represented by D100, DB20 and DB40 respectively. The injection masses of D100, DB20 and DB40 were respectively 17.5, 18.7 and 19.2 mg per fired cycle to ensure the same engine output. The experiment results show that when the cooling water temperature remains unchanged, with a delayed start of fuel injection (SOI), the ignition delay is shortened, the initial fire nucleus formation time is delayed, the blue premixed flame proportion is reduced; when the SOI remains unchanged, with the increase of cooling water temperature, the ignition delay is shortened, the initial nucleus formation time is advanced, the proportion of blue premixed flame decreases. With the increase of *n*-butanol blending ratio, the characteristic of the local mixture is first ignited, the ignition time is delayed, the proportion of blue premixed flame increases, and the flame luminosity of fuel decreases. The luminosity of the flame is from  $\text{D100} > \text{DB20} > \text{DB40}$ . For D100 fuel, with delayed injection, the peak of the whole spectrum shifts to a larger wavelength direction, soot radiation is enhanced, the peak light intensity of the OH band first increases and then decreases, and the occurrence time of the OH band and the  $\text{CH}_2\text{O}$  band is delayed, indicating the high temperature and the low temperature reaction delayed. When the SOI remains unchanged, with the increase of cooling water temperature, the light intensity of whole spectrum increases and the occurrence time of OH and  $\text{CH}_2\text{O}$  bands is ahead of schedule, indicating the high temperature and the low temperature reaction advanced. With the SOI delay, the whole light intensity of the spectrum of DB40 fuel after the diesel blended with *n*-butanol, increases, the peak light intensity of the OH band and the  $\text{CH}_2\text{O}$  band increases, which means that delaying injection to DB40 fuel also helps to promote high temperature and low temperature reactions. The whole intensity of the DB40 fuel spectrum is lower than that of D100 fuel, and the occurrence time of OH and  $\text{CH}_2\text{O}$  bands appear later than D100 fuel, indicating that both the high temperature and the low temperature reaction of the fuel after the addition of *n*-butanol are delayed relative to the D100 fuel. Under the condition of SOI-15 and cooling water temperature of  $95\text{ }^\circ\text{C}$ , the spectrum of D100 fuel exhibits similar characteristics of the soot blackbody radiation spectrum after  $2\text{ }^\circ\text{C A}$ , while DB40 fuel first exhibits the characteristics of CO oxidation continuous spectrum, then the characteristics of the soot blackbody radiation spectrum are exhibited after  $15\text{ }^\circ\text{C A}$ .

**Keywords** Diesel; *n*-butanol; Flame development; Self-luminosity spectra

(Received Jun. 26, 2019; accepted Oct. 19, 2019)

\* Corresponding author