

燃料敏感性对内燃机部分预混燃烧(PPC)光谱特性的影响研究

刘海峰, 明镇洋, 文铭升, 崔雁清, 刘威, 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 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, 研究了燃料敏感性(S)为0和6时对发动机缸内火焰发展和燃烧发光光谱的影响。试验过程中, 通过改变喷油时刻(SOI=-25, -15和-5°CA ATDC)使燃烧模式从部分预混燃烧过渡到传统柴油燃烧模式。通过使用正庚烷、异辛烷、乙醇混合燃料来改变燃料敏感性。结果表明, 在PPC模式下(-25°CA ATDC), 火焰发展过程是从近壁面区域开始着火, 而后向燃烧室中心发展, 即存在类似火焰传播过程, 同时在燃烧室下部未燃区域也形成新的着火自燃点。敏感性对燃烧相位影响较大, 对缸内燃烧火焰发展历程影响较小; 高敏感性燃料OH和CH带状光谱出现的时刻推迟, 表明高敏感性燃料高温反应过程推迟, 且光谱强度更低, 表明碳烟辐射强度减弱。在PPC到CDC之间的过渡区域(-15°CA ATDC), 燃烧火焰发光更亮, 燃烧反应速率比-25°CA ATDC时刻的反应速率更快。高、低敏感性燃料对缸压放热率的影响规律与-25°CA ATDC相近, 此时的燃烧反应更剧烈, 放热率更高, 碳烟出现时刻更早。该喷油时刻下的光谱强度高于PPC模式下的光谱强度, 说明此时的CO氧化反应与碳烟辐射更强。在CDC模式下(-5°CA ATDC), 由于使用的燃料活性较低, 燃烧放热时刻过于推迟, 放热量很小, 缸内燃烧压力低, 因此燃料敏感性对缸压和放热率的影响不明显, 但从燃烧着火图像中可以看到高敏感性燃料的火焰出现时刻较低敏感性燃料推迟。低敏感性燃料的燃烧初期蓝色火焰首先出现在燃烧室中心, 着火火焰出现时刻更早, 之后蓝色火焰从中心向周围扩散, 呈现火焰传播为主导的燃烧过程; 燃烧后期, 局部混合气过浓区导致亮黄色火焰面积逐渐增大并向周围扩散。高敏感性燃料的火焰发展趋势与低敏感性燃料类似, 黄色火焰的亮度与面积更小。尽管高、低敏感性燃料的OH和CH带状光谱的出现时间相近, 但高敏感性燃料的光谱强度仍更低。综合分析, 火焰发展结构与自发光光谱特征主要受喷油时刻的影响, 燃料的敏感性主要影响着火时刻和火焰自发光光谱强度, 且高敏感性燃料的光谱强度更低。

关键词 光学发动机; 部分预混燃烧(PPC); 燃料敏感性; 自发光光谱; 火焰发展

中图分类号: TK428.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-2999-08

引言

柴油机由于具有较高的热效率和耐久性被广泛应用于交通运输领域^[1]。传统的柴油燃烧(CDC)模式产生较高的碳烟和NO_x排放, 需要采用复杂的后处理系统满足越来越严格的排放法规。为了降低缸内原始排放并获得更高的热效率, 许多先进燃烧概念被提出, 例如: 均质压燃(HCCI)、部分预混燃烧(PPC)、活性控制压燃(RCCD)等。

HCCI模式可以实现高热效率同时获得极低的NO_x排放和碳烟排放。但是, HCCI燃烧反应速率受燃料的化学反应动力学控制, 一旦负荷提高, 缸内喷射燃料的能量增大, 多点同时着火导致燃烧爆发压力和压力升高率均显著增大,

很容易超过发动机设计的机械强度(当前发动机可承受的最大爆发压力约16~22 MPa), 导致发动机受损。因此, 近年来PPC燃烧模式受到广泛关注。与HCCI早喷或气道喷射形成的均质混合气相比, PPC燃烧模式喷射时刻一般在-60~-25°CA ATDC, 介于HCCI早喷和传统柴油机喷射之间。因此, 其燃烧特征介于HCCI的预混压燃和传统柴油机扩散压燃之间, 被称为部分预混压燃^[2]。研究表明, 与HCCI多点自燃不同, PPC燃烧过程存在自燃和火焰传播过程, 因此有效抑制了过快的燃烧反应速率, 较HCCI的燃烧可控性更高, 拓展了HCCI高效清洁运行的工况范围。

PPC模式中采用柴油类高十六烷值燃料时, 需要引入大量废气再循环(EGR)来抑制缸内过早的自燃, 才能实现所需的高十六烷值燃料的部分预混合过程。然而, 引入过多的

收稿日期: 2020-09-14, 修订日期: 2021-01-09

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51922076), 国家自然科学基金重大研究计划项目(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: haifengl@tju.edu.cn

EGR 会降低燃烧效率、增加未燃碳氢和一氧化碳排放,甚至导致发动机失火。因此,近年来国内外研究更多采用汽油类高辛烷值燃料实现 PPC 模式,通过燃料特性调控实现更长的滞燃期和更大比例的预混合气。Kalghatgi 等^[3]研究表明,与柴油相比汽油 PPC 可以进一步降低 NO_x 和碳烟排放。An 等^[4]研究低辛烷值(RO_N)燃料(RO_N从 50 到 77)对 PPC 燃烧模式的影响,结果表明在较低的进气温度下燃烧稳定性提高,并且多次喷射策略可以在较低的进气温度下进一步改善燃烧稳定性。

同时,研究表明燃料敏感性提高,有利于改善燃料的抗爆性,进一步满足燃料与发动机协同优化需求^[5]。Javed 等^[6]研究表明高敏感性燃料在低温下反应缓慢,而在高温下具有高反应活性,并显示出较低敏感性燃料更强的负温度系数(NTC)行为。郑尊清等^[7]在一台改造的单缸试验发动机上进行了燃料敏感性对 PPC 燃烧和排放特性影响研究,采用不同敏感性的燃料为配制的甲苯掺混燃料和市售 92 号汽油。研究表明:燃料敏感性越高,滞燃期越长,油气混合越充分,预混燃烧比例越大,NO_x 排放越高。燃烧重心(CA₅₀)随着敏感性的增加先推迟后提前,燃料敏感性越低,压升率越低。Shi 等^[8]在一台光学发动机中测试了三种相同辛烷值,不同敏感性的燃料 PRF77(S=0),TPRF77-a(S=3)和 TPRF77-b(S=5)对发动机燃烧以及 PPC 模式下排放的影响,结果表明较高的敏感性通常会导致初始燃烧时刻延迟,滞燃期延长,延迟 CA₅₀ 的燃烧相位以及燃烧持续期,对于敏感性较低的燃料会出现一些明亮的小斑点,燃烧过程有更高的未燃碳氢和 CO 排放。

乙醇燃料因其可再生性和原料来源广泛的特点被国内外广泛关注。目前,汽油与乙醇的混合燃料在很多国家得到推广应用。此外,乙醇具有更高的 RO_N 值和燃料敏感性,因此可以显著改变燃料活性和敏感性。Fan 等^[9]在光学快速压缩机(RCM)中,使用包含正庚烷/异辛烷/乙醇,不同的敏感性 0 和 8 的两种燃料,进行了试验和模拟研究,探究其对火焰速度的影响。结果表明,高敏感性燃料的火焰速度比低敏感性燃料的火焰速度对压力的依赖性更大。Szybist 等^[10]为探究燃料敏感性对 SI 发动机抗爆性的影响,设计了三种燃料,RO_N 几乎保持恒定(RO_N=99.2~100)并改变 S(S=0, 6.5 和 12)。结果表明,在平均指示压力 10 bar 下,抗爆性与 S 成反比,其中 S=0 燃料抗爆性最好。随着负荷的增加,趋势发生逆转,并且抗爆性与燃料 S 成正比,其中 S=12 燃油具有最高的抗爆性。

基于上述研究可知,燃料敏感性对发动机燃烧过程有重要影响,但针对燃料敏感性对 PPC 模式下燃烧火焰发展历程的研究较少,相关的影响机制和规律有待探明。因此,本文在一台光学发动机上,选用正庚烷、异辛烷、乙醇燃料,采用燃烧火焰自发光成像与燃烧自发光光谱测量方法,研究 PPC 模式下燃料敏感性对发动机燃烧特性和火焰发展的影响规律,为 PPC 模式下燃烧控制和燃料选择提供参考。

1 实验部分

试验装置如图 1 所示,主要由光学发动机、燃油喷射系统和图像采集系统组成。光学发动机由一台水冷、四缸、直喷柴油机改造而成,仅保留了原机的第三缸作为光学诊断的工作缸,基本参数如表 1 所示。燃烧室结构与可视区域如图 2 所示。

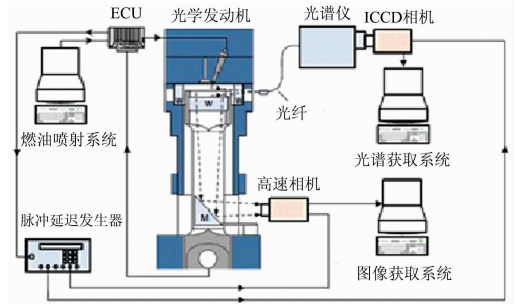


图 1 光学发动机测试示意图^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of optical engine test^[11]

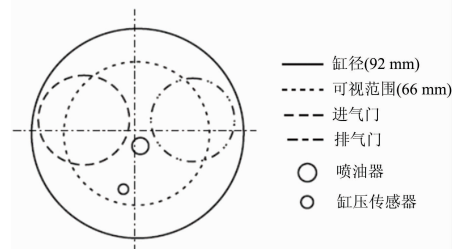


图 2 燃烧室的结构和视场示意图

Fig. 2 Schematic of structure and view field of the combustion chamber

表 1 光学发动机结构参数

Table 1 Optical-access engine specifications

参数	数值
冲程	4
缸径/mm	92
活塞行程/mm	100
排量/L	0.664
压缩比	11:1
喷孔数	6
喷雾夹角/°	150
喷嘴直径/mm	0.15

试验过程中光学发动机以 $1\ 200\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度运行,博世共轨直喷系统提供 600 bar 的喷射压力,发动机涡轮增压比约为 1.5。发动机以跳火模式运行,每隔 20 个非着火循环后有 1 个着火循环,以减少石英窗热应力和对光学窗口的污染。为了保证可视化范围,对燃烧室结构进行了改动设计,导致改造后的几何压缩比为 11。为了保证 PPC 燃烧过程的稳定性,将进气温度加热至 $125\ ^\circ\text{C}$ 。根据绝热压缩过程计算

表明,在活塞上止点处压缩温度约 900 K。

火焰自发光成像试验中,燃烧室火焰的图像信号通过加长活塞顶部的石英玻璃,经过 45°紫外反光镜反射,最后由高速相机记录火焰自发光图像。高速相机(Photron SA5,日本)配备尼康 50 mm 焦距镜头,光圈数设置为 F1.4。帧速率和曝光时间设置为每秒 20 000 帧和 50 μ s。图像分辨率为 512×512 像素。

自发光光谱的试验过程中,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,分辨率为 3 nm,可以对近紫外波段的羟基(OH),可见光波段的甲醛(CH₂O),CH 自由基,CO 氧化连续光谱等燃烧发光光谱进行采集。装有图像增强器的 IC-CD 探测器可以在纳秒级门宽下捕捉光信号,其光谱采集范围为 115~920 nm,可满足光谱信号采集的需求。

本文选用了具有相同辛烷值(RON=50)高、低敏感性(S=6 与 S=0)的两种燃料。高敏感性 S=6 的燃料,由正庚烷、异辛烷、乙醇按照体积分数 66.4%, 16.6%, 17% 混合

而成。低敏感性 S=0 的燃料由正庚烷和异辛烷按体积分数 50%, 50% 混合而成,试验所用燃料特性如表 2 所示。

表 2 测试燃油物理性质

Table 2 Test fuel properties^[12-13]

燃料	正庚烷	异辛烷	乙醇
密度/(g·cm ⁻³)	0.682	0.69	0.79
RON	0	100	108±1
MON	0	100	90±1
辛烷值敏感性(RON-MON)	0	0	16~20
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	44.6	44.2	26.95

此外,本文还研究了不同的喷油时刻(start of injection, SOI)对高、低敏感性燃料的影响,SOI 值分别为 -25, -15 和 -5°CA ATDC,分别对应典型的 PPC 喷射时刻,PPC 模式到 CDC 模式的过渡条件,典型 CDC 喷射时刻。具体的试验条件如表 3 所示,其中高敏感性燃料喷油量略高以保证缸内输入的燃料热值相当。

表 3 试验条件

Table 3 Experimental conditions

燃料	燃料敏感性/S	喷油压力 /MPa	喷油时刻 / (°CA ATDC)	进气温度 /°C	冷却液温度 /°C	喷油量 /mg
正庚烷,异辛烷按照体积分数 50%, 50%	0		-25			19.24
正庚烷、异辛烷、乙醇三种燃料按照体积分数 66.4%, 16.6%, 17%	6	60	-15 -5	125	95	20.81

2 结果与讨论

2.1 不同敏感性燃料的燃烧过程

图 3 为 -25°CA ATDC 喷油时,高、低敏感性燃料的缸内燃烧压力、放热率和火焰发展图像。图 3(a)表明,两种不同敏感性燃料均能观测到低温和高温放热过程,而且高敏感性燃料的低温和高温着火时刻较敏感性燃料均推迟。图 3(b)和(c)分别为 S=0 和 6 的燃烧火焰自发光高速成像图。图中表明,燃烧前期以蓝色火焰为主,主要原因是在 -25°CA ATDC 时刻喷油,滞燃期较长,有较充足的时间形成很好的预混合气,因此以蓝色火焰为主导,从燃烧图像中推测未生成碳烟,后续会结合光谱进一步分析。燃烧后期,高低敏感性燃料分别在 10.96 和 9.52°CA ATDC 观测到亮黄色火焰,表明局部过浓区可能有碳烟生成。两种燃料火焰发展过程相似,都是从近壁面区域开始着火向燃烧室中心发展,即存在类似火焰传播过程,又在燃烧室下部未燃区域形成新的着火自燃点,这一现象与之前 PPC 燃烧研究相同。在火焰图像红色框中,存在位于气缸中心的亮黄色斑点,这是由于喷油器在喷油结束后因喷油压力过低造成部分燃油雾化不良,油粒过大,导致了喷油嘴附近碳烟的生成。上述分析表明,燃料敏感性对燃烧相位影响较大,对缸内燃烧火焰发展历程影响很小,不同敏感性的燃料燃烧火焰发展过程相近。

在 -15°CA ATDC 喷油时,高、低敏感性燃料缸压放热

率和火焰发展图像如图 4 所示。由图 4(a)可知,高、低敏感性燃料对缸压和放热率的影响规律与 -25°CA ATDC 相近,与低敏感性燃料相比,高敏感性导致高温放热阶段滞燃期延长了约 3°CA。与 -25°CA ATDC 喷射不同的是此时的燃烧反应更剧烈,放热率峰值更高。从图 4(b)和(c)也可以观测到该喷射时刻下,燃烧火焰发光更亮,火焰占满整个燃烧室区域时间约 4°CA,燃烧反应速率比 -25°CA ATDC 时刻的反应速率更快。喷油时刻在 -15°CA ATDC,恰好位于 PPC 向 CDC 的过渡区域,因此亮白色的火焰出现的更快,表明在此喷油时刻下碳烟出现时刻更早。从整体火焰发展过程看,该喷油时刻燃料敏感性对整体火焰发展的影响与 -25°CA ATDC 喷油时刻下类似。

在 -5°CA ATDC 喷油时,高、低敏感性燃料的缸压、放热率和火焰发展情况如图 5 所示。该喷油时刻属于典型的柴油机燃烧模式,但是由于燃料辛烷值相对柴油更高,因此着火滞燃期显著延长,导致图 5(a)所示燃烧放热时刻过于推迟,放热量很小,缸内燃烧压力低。因此,燃料敏感性对缸压和放热率的影响不显著,没有呈现更早喷射时刻下高敏感性燃料燃烧推迟的现象,但是从图 5(b)和(c)的燃烧着火图像中可以看到高敏感性燃料的火焰出现时刻较敏感性燃料推迟。图 5(b)和(c)表明与 -25 和 -15°CA ATDC 喷油时刻下的火焰发展不同, -5°CA ATDC 喷油时刻下低敏感性燃料的燃烧初期蓝色火焰首先出现在燃烧室中心,之后蓝色火焰从中心向周围扩散,呈现火焰传播为主导的燃烧过程。这主

要是缸内燃烧滞后, 燃烧温度降低, 很难形成新的自燃点, 只能等待火焰传播过程消耗未燃混合气。燃烧后期, 局部混合气过浓区导致亮黄色火焰面积逐渐增大并向周围扩散。高敏感性燃料的火焰发展过程与低敏感性燃料类似, 但燃烧后期黄色火焰的亮度与面积减小, 这可能是高敏感性燃料增加了乙醇, 其含氧作用抑制碳烟生成并促进了后期碳烟氧化。此时滞燃期足够长, 混合的影响不占主导因素, 因此含氧燃料的氧化作用是主要因素。

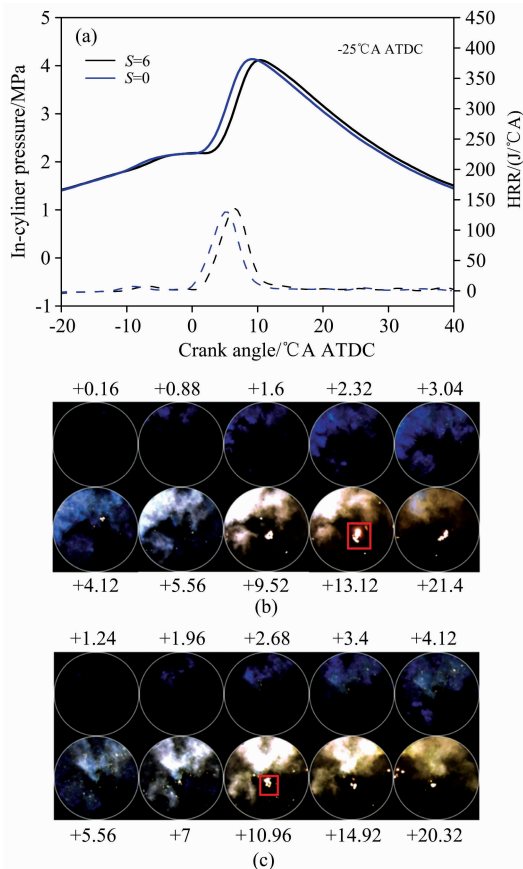


图 3 -25°CA ATDC 喷油, 高低敏感性 ($S=0, 6$) 燃料对缸压放热率和火焰发展的影响

(a): -25°CA ATDC 喷油时缸压和放热率曲线;
(b): $S=0$; (c): $S=6$

Fig. 3 Effect of high and low sensitivity ($S=0, 6$) fuel on in-cylinder pressure, heat release rate and flame development at -25°CA ATDC injection

(a): Cylinder pressure heat release rate curve at -25°CA ATDC injection; (b): $S=0$; (c): $S=6$

2.2 不同敏感性燃料的自发光光谱

图 6 分别为喷油时刻 -25°CA ATDC, $S=0$ 和 6 时火焰自发光光谱, 图中光谱结果是 5 个着火循环平均所得, 且实验过程中的光谱范围 $275\sim 525\text{ nm}$ 满足实验要求。同时, 采用 Savitzky-Golay 滤波和三次样条插值算法^[14], 该方法可以对光谱数据进行平滑处理并且提高图像分辨率, 光谱强度伪色图如图 7 所示。图 6(a) 可知, 从 5°CA ATDC 开始出现了微弱的 CH (431.4 nm) 和 OH (310 nm) 带状光谱, 此时对

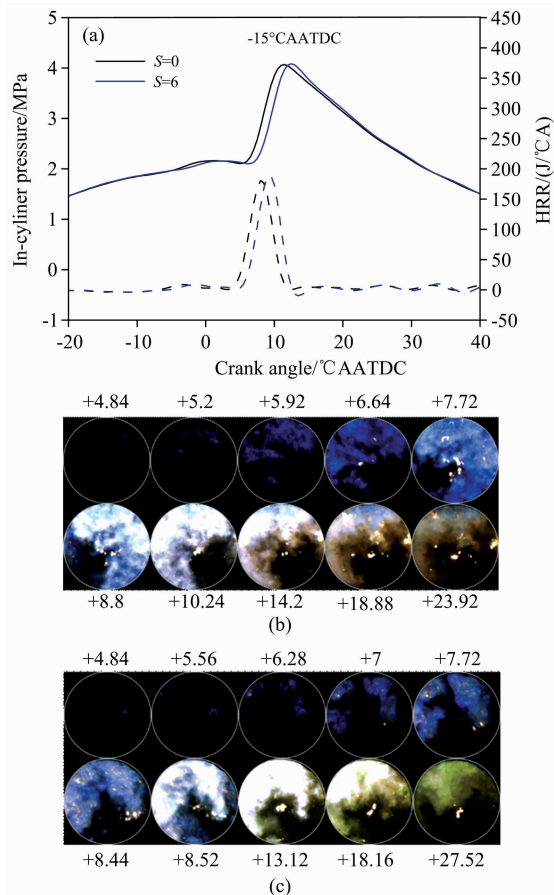


图 4 -15°CA ATDC 喷油, 高低敏感性 ($S=0, 6$) 燃料对缸压放热率和火焰发展的影响

(a): -15°CA ATDC 喷油时缸压放热率曲线;
(b): $S=0$; (c): $S=6$

Fig. 4 Effect of high and low sensitivity ($S=0, 6$) fuel on in-cylinder pressure, heat release rate and flame development at -15°CA ATDC fuel injection

(a) In-cylinder pressure and heat release rate curve During Fuel Injection at -15°CA ATDC; (b): $S=0$; (c): $S=6$

应图 3 (a) 的放热过程也进入高温阶段; 到 7°CA ATDC 时, OH 和 CH 更加明显, 表明燃烧反应更加剧烈, 这些光谱被叠加到 CO 氧化连续谱 ($350\sim 500\text{ nm}$ 之间) 上。随曲轴转角推迟, OH 强度逐渐增大, 在 11°CA ATDC 时, OH 谱带光强最强, 且整体光谱强度达到最高值, 光谱区域的峰值移动到约 435 nm 左右。此时燃烧放热过程基本结束, 燃烧火焰已从蓝色火焰向亮黄色火焰转化, 此时自发光主要来自碳烟辐射, OH 自由基氧化碳烟开始被大量消耗。在 13°CA ATDC 时, 总体光谱光强开始降低, 光谱强度峰值在 450 nm 左右, 表明此时 CO 氧化过程主导的化学发光光谱减弱。在 20 和 30°CA ATDC 时刻下的整体光谱趋势与 13°CA ATDC 相同, 整体光谱强度依次降低, 此时除了碳烟辐射, OH 化学发光仍存在, 这是由于 OH 既是高温放热阶段的标志也是碳烟氧化的重要组分。由图 6 (b) 的 $S=6$ 光谱可知, 在 9°CA ATDC 开始出现 OH 和较弱的 CH, 相比于 $S=0$ 延迟出现, 这是由

于高敏感性燃料延长了滞燃期,推迟了高温反应过程。随着曲轴转角推迟,光谱的变化趋势与低敏感性的趋势相同。从波长与位置来看,前述的不同敏感性燃料火焰光谱特征可以在图 7 中观察到,并且可以看出,不同敏感性的燃料火焰的光谱规律类似。然而,随着敏感性的增加,光谱强度峰值降低,这是由于高敏感性燃料滞燃期延长同时含有乙醇,促进了混合并抑制了碳烟生成,减弱了后期的碳烟辐射^[15]。

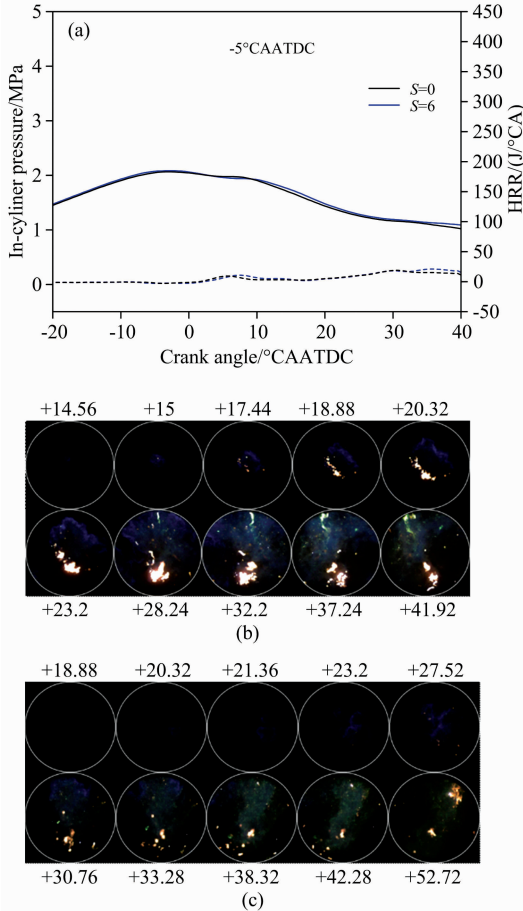


图 5 -5°CA ATDC 喷油, 高低敏感性 ($S=0, 6$) 燃料对缸压、放热率和火焰发展的影响

(a): -5°CA ATDC 喷油时缸压放热率曲线;
(b): $S=0$; (c): $S=6$

Fig. 5 Effect of high and low sensitivity ($S=0, 6$) fuel on in-cylinder pressure, heat release rate and flame development at -5°CA ATDC injection

(a): In-cylinder pressure and heat release rate curve at -5°CA ATDC fuel injection; (b): $S=0$; (c): $S=6$

图 8(a)和(b)分别表示 -15°CA ATDC 时刻喷油, $S=0$ 和 6 时的火焰自发光光谱。当 $S=0$ 时, 从 9°CA ATDC 开始出现微弱的 OH 和 CH 带状光谱, 光谱峰值在 431 nm 左右。随着曲轴转角推迟, OH 与 CH 的变化趋势与 -25°CA ATDC 喷油相同, 在 12°CA ATDC 时, OH 谱带光强最强, 仍存在较弱 CH 光谱谱带, 且整体光谱强度达到最高值。在 16°CA ATDC 时高温放热反应结束, 整体光谱强度降低, 峰值在 440 nm 左右, 此时自发光主要来自碳烟辐射, 但仍存在

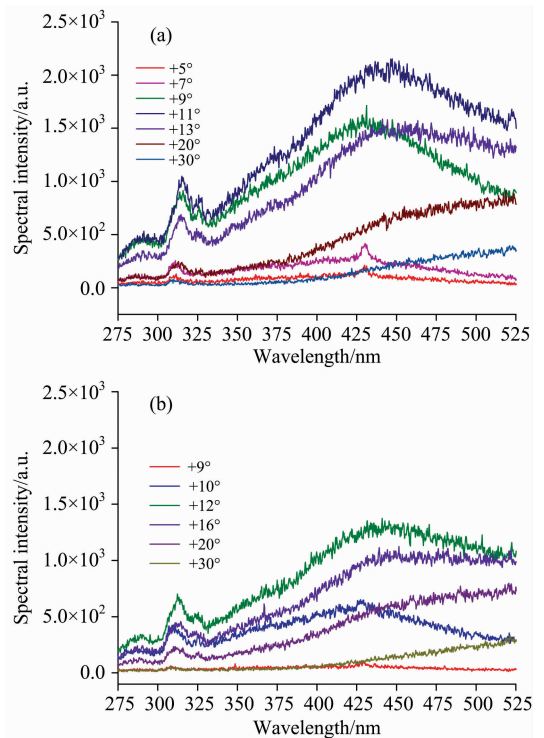


图 6 -25°CA ATDC 喷油, 高低敏感性燃料自发光光谱

(a): $S=0$; (b): $S=6$

Fig. 6 Self-luminescence spectrum of high and low sensitivity fuels at -25°CA ATDC injection

(a): $S=0$; (b): $S=6$

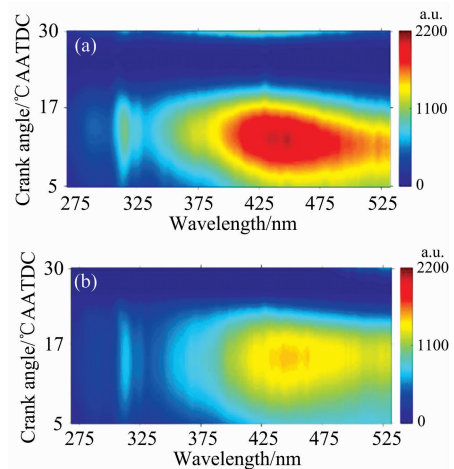


图 7 -25°CA ATDC 喷油, 高低敏感性燃料强度的伪色图

(a): $S=0$; (b): $S=6$

Fig. 7 Pseudo-color diagram of high and low sensitivity fuel intensity at -25°CA ATDC injection

(a): $S=0$; (b): $S=6$

CO 氧化化学发光。在 20 和 30°CA ATDC 时刻, 整体光谱强度依次降低, 峰值向更大的波长移动, 原因与 -25°CA ATDC 喷油时刻所述相同。高敏感性燃料在 10°CA ATDC 出现较弱的 OH 与 CH 带状光谱, 相比低敏感性燃料推迟出现。

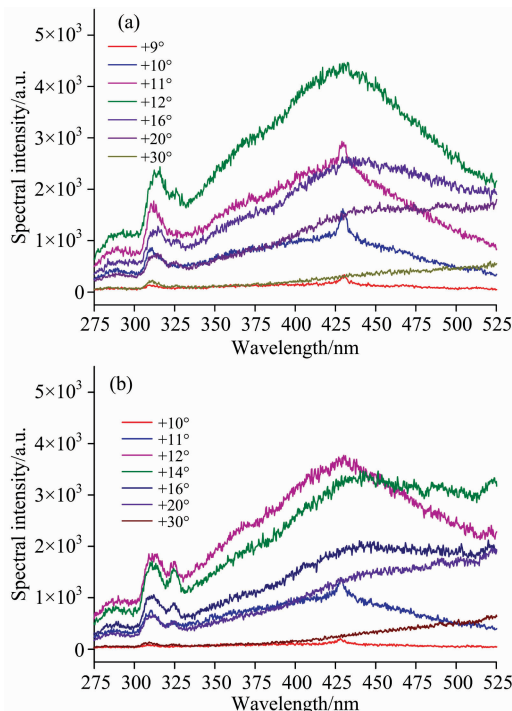


图 8 -15°C ATDC 喷油, 高低敏感性燃料自发光光谱
(a): S=0; (b): S=6

Fig. 8 Self-luminescence spectrum of high and low sensitivity fuels at -15°C ATDC injection
(a): S=0; (b): S=6

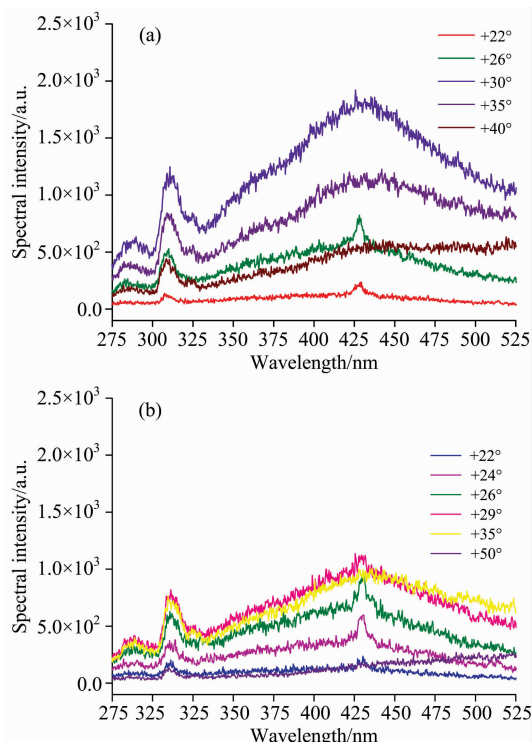


图 10 -5°C ATDC 喷油, 高低敏感性燃料自发光光谱
(a): S=0; (b): S=6

Fig. 10 Self-luminescence spectrum of high and low sensitivity fuels at -5°C ATDC injection
(a): S=0; (b): S=6

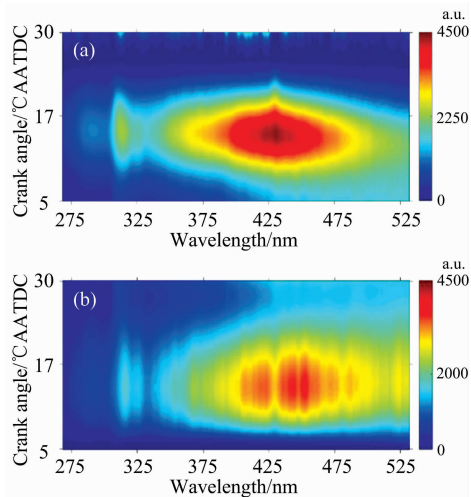


图 9 -15°C ATDC 喷油, 高低敏感性燃料自发光光谱强度伪色图
(a): S=0; (b): S=6

Fig. 9 Pseudo-color diagram of high and low sensitivity fuel intensity at -15°C ATDC injection
(a): S=0; (b): S=6

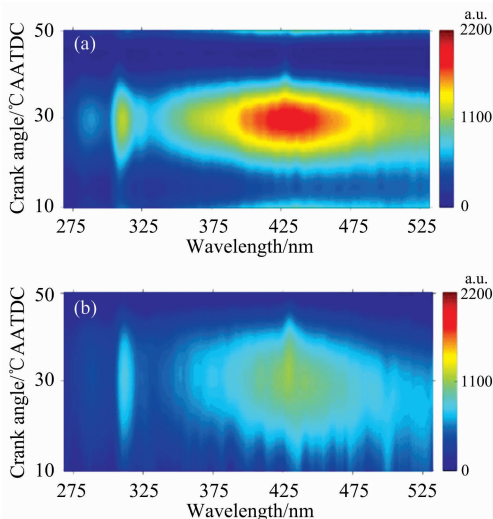


图 11 -5°C ATDC 喷油, 高低敏感性燃料自发光光谱强度伪色图
(a): S=0; (b): S=6

Fig. 11 Pseudo-color diagram of high and low sensitivity fuel intensity at -5°C ATDC injection
(a): S=0; (b): S=6

在 12°C ATDC, OH 光谱强度达到最大, 光谱峰值在 425 nm 左右, 且光谱强度低于低敏感性燃料, 原因如上节所述。如图 9(a)和(b)所示, 不同敏感性燃料的火焰光谱曲线类似,

随着敏感性增大, 光谱强度峰值降低。图 9 与图 7 相比, -15°C ATDC 喷油时的光谱强度高于 -25°C ATDC, 说

明在该喷油时刻下 CO 氧化过程与碳烟辐射更强。

图 10(a)和(b)分别表示 -5°CA ATDC 时刻喷油, $S=0$ 和 6 时的火焰自发光光谱。当 $S=0$ 时, 22°CA ATDC 开始出现微弱的 CH 和 OH 带状光谱, 随曲轴转角推迟, CH 与 OH 的强度增大。在 29°CA ATDC 时, OH 谱带光强最强, 且光谱强度达到最高值, 光谱区域的峰值移动到约 431 nm 左右。此时自发光主要来自碳烟辐射, 但仍存在 CO 氧化化学发光。随着喷油时刻继续推迟, 整体光谱强度下降, 峰值中心向更大波长方向移动。高敏感性燃料首次在 22°CA ATDC 出现微弱的 OH 和 CH 带状光谱, 未发生推迟, 这可能是由于燃烧放热时刻过于推迟, 放热量很小, 此时缸内燃烧压力和温度较低, 缸内的热力学条件减弱了燃料敏感性影响。同时, 由图 11 可以发现两种敏感性燃料火焰光谱强度变化规律类似, 高敏感性燃料的光谱峰值低于低敏感性燃料, 原因如前所述。

3 结 论

在一台光学发动机中, 运用火焰自发光成像与光谱分析法, 研究燃料敏感性对部分预混压燃和传统柴油燃烧模式下

燃烧特性的影响。

(1)在典型的 PPC 模式下(-25°CA ATDC 喷油), 燃料敏感性对燃烧相位影响较大, 对缸内燃烧火焰发展历程影响较小。两种燃料火焰发展过程相似, 都是从近壁面区域开始着火向燃烧室中心发展, 即存在类似火焰传播过程, 又在燃烧室下部未燃区域形成新的着火自燃点。高敏感性燃料抑制了 OH 和 CH 带状光谱出现的时刻且降低了光谱强度。

(2)在 -15°CA ATDC 喷油时刻, 高低敏感性燃料对缸压放热率的影响规律与 -25°CA ATDC 相近, 但是燃烧火焰发光更强, 燃烧反应更剧烈, 放热率更高, 碳烟出现时刻更早。该喷油时刻下的光谱强度高于 PPC 模式下的光谱强度。

(3)在 -5°CA ATDC 模式下, 燃料敏感性对缸压和放热率的影响不显著。燃烧初期蓝色火焰首先出现在燃烧室中心, 之后蓝色火焰从中心向周围扩散, 呈现火焰传播为主导的燃烧过程; 燃烧后期, 局部混合气过浓区导致亮黄色火焰面积逐渐增大并向周围扩散。高、低敏感性燃料的 OH 和 CH 带状光谱的出现时间相近。

(4)整体来看, 燃料的敏感性主要影响着火时刻和火焰自发光光谱强度, 对缸内火焰发展结构与自发光光谱特性影响很小, 火焰结构和光谱特性主要受喷油时刻影响。

References

- [1] Liu Hai-feng, Ma Jun-sheng, Dong Fang, et al. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 1787.
- [2] An Y, Vallinayagam R, Vedharaj S, et al. SAE 2017, 2017-01-2403.
- [3] Kalghatgi Gautam T, Risberg Per, Ångström Hans-Erik. SAE Technical Paper, 2007.
- [4] An Yanzhao, Vallinayagam Raman, Tang Qinglong, et al. Applied Energy, 2019, 235: 56.
- [5] Fan Qin-hao, Qi Yun-liang, Wang Ying-di. Combustion and Flame, 2020, 212: 252.
- [6] Tamour Javed, Changyoul Lee, Mohammed Alabbad, et al. Combustion and Flame, 2016, 223.
- [7] ZHENG Zun-qing, HE Zi-han, WANG Hu, et al(郑尊清, 贺子晗, 王 浒, 等). Chinese Internal Combustion Engine Engineering(内燃机工程), 2019, 40(1): 9.
- [8] Shi H, An Y, Johansson B. SAE Technical Paper, 2019.
- [9] Fan Q, Qi Y, Wang Z. SAE Technical Paper, 2019.
- [10] James P Szybist, Derek A Splitter. Combustion and Flame, 2017, 177: 49.
- [11] Cui Yanqing, Liu Haifeng, Geng Chao, et al. Fuel, 2020, 269: 117441.
- [12] Wang Chongming, Soheil Zeraati-Rezaei, Xiang Liming. et al. Applied Energy, 2017, 191: 603.
- [13] Tien Mun Foong, Kai J Morganti, Michael J Brear, et al. Fuel, 2014, 115: 727.
- [14] Cheng Song, Kang Dongil, Aleksandr Fridlyand, et al. Combustion and Flame, 2020, 216: 369.
- [15] LIU Hai-feng, WEN Ming-sheng, CUI Yan-qing, et al(刘海峰, 文铭升, 崔雁清, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(7): 1998.

Study on the Influence of Fuel Sensitivity on the Spectral Characteristics of Partially Premixed Combustion in Internal Combustion Engines

LIU Hai-feng, MING Zhen-yang, WEN Ming-sheng, CUI Yan-qing, LIU Wei, YAO Ming-fa

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In this paper, the effect of fuel sensitivity (S) of 0 and 6 on the flame development and combustion luminescence spectrum in the engine cylinder are studied in an optical engine by using flame high-speed imaging technology and self-luminescence spectroscopy. The combustion model was transitioned from the new partially premixed combustion to diesel combustion mode by changing the injection timing ($SOI = -25, -15, -5^\circ\text{CA ATDC}$), and the fuel sensitivity is changed by using n-heptane, iso-octane, ethanol mixed fuel. The results show that in the PPC model (-25°CA ATDC), the flame development process starts from the area near the wall and then develops toward the center of the combustion chamber and it is a similar flame propagation process, and a new unburned area is formed in the lower part of the combustion chamber. Sensitivity has a more significant impact on the combustion phase and less on the development history of the combustion flame in the cylinder. The high-sensitivity fuel suppresses when the OH and CH band spectra appear, and the spectral intensity is lower. With the change of fuel injection time, the spectral change trend of the two sensitive fuels is the same. The high-sensitivity fuel suppresses the high-temperature reaction process, weakens the soot radiation and reduces the spectral intensity. In the transition area between PPC and CDC (-15°CA ATDC), the combustion flame glows brighter than -25°CA ATDC , and the combustion reaction rate is faster than the reaction rate at -25°CA ATDC . The influence of high and low sensitivity fuels on the cylinder pressure heat release rate is similar to -25°CA ATDC . The combustion reaction is more intense, the heat release rate is high, and the soot appears earlier. The intensity of the spectrum at this time of fuel injection is higher than that in the PPC model, indicating that the CO oxidation reaction and soot radiation are stronger. In CDC mode, due to the low fuel activity used, the time of combustion heat release is too delayed, the heat release is small, and the combustion pressure in the cylinder is low, which is close to the misfire condition. Therefore, the effect of fuel sensitivity on cylinder pressure and heat release rate is not significant. The blue flame of low-sensitivity fuel first appears in the center of the combustion chamber at the beginning of the combustion, and the ignition flame appears earlier, and then the blue flame spreads from the center to the surroundings, showing a combustion process dominated by flame propagation. In the later stage of the combustion, the local mixed gas passes the dense zone causes the bright yellow flame area to increase and spread to the surroundings gradually. The flame development trend of high-sensitivity fuel is similar to that of low-sensitivity fuel, and the brightness and area of yellow flame are small. The appearance time of OH and CH band spectra of high-sensitivity and low-sensitivity fuels is similar, and the spectral intensity of high-sensitivity fuels is low. It may be because at the time of fuel injection, the flame retardation period is long enough, and the oxidation of ethanol in the susceptible fuel is the dominant factor. Comprehensive analysis shows that the flame development structure and spectrum development process are mainly affected by fuel injection time. The fuel sensitivity mainly affects the ignition time and flame self-luminescence spectrum intensity, and the spectrum intensity of low-sensitivity fuels is great.

Keywords Optical engine; Partially premixed combustion (PPC); Fuel sensitivity; Self-luminous spectrum; Flame development

(Received Sep. 14, 2020; accepted Jan. 9, 2021)