

低活性燃料和直喷时刻对低负荷 RCCI 发动机着火燃烧特性影响的可视化试验研究

刘旭¹, 钟汶君¹, 姜鹏¹, 戴礼明¹, 何志霞^{1,2}, 王谦^{1*}

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏大学 能源研究院, 江苏镇江 212013)

摘要: 本研究的目标是探索在低负荷条件下 RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 燃烧模式所面临的挑战, 即由于燃烧室中的稀薄燃料混合物导致的不充分燃烧甚至失火问题。为了解决这个问题, 采用光学诊断和后处理技术, 研究了在这低负荷下低反应性燃料和直接喷射时刻对双燃料发动机燃烧和火焰特性的影响。测试了三种不同的低反应性燃料和五种不同的直喷时刻, 同时使用加氢化催化生物柴油 (HCB) 作为高反应性燃料。研究结果显示, 乙醇含量的增加导致较长的点火延迟, 并且点火核心向燃料流的下游位移。因此, 发生了更加均匀的燃烧过程和较慢的火焰传播, 最终导致了较低的缸压和放热率。其中预混合 E10 可以获得更高的指示平均有效压力 (IMEP) 为 0.20 MPa, 超过 E0 约 0.02 MPa 和 E100 约 0.05 MPa。研究还强调, 推迟 HCB 的 DI 时刻可以减少点火延迟时间, 并产生更高的可燃混合物浓度梯度, 从而实现更高的表现放热速率和较短的燃烧持续时间。此外, 自然燃烧的亮度图像表明, 推迟 DI 时刻显著影响着火核心生成和传播的特性。形成的着火核心逐渐从靠近壁面的区域向上游区域移动, 蓝色火焰区域和前沿传播速度显著增加。在低负荷条件下, 推迟 DI 时刻可以实现更有利的火焰传播和更高的 IMEP, 同时有效减小喷雾壁面撞击和池燃烧现象的影响。

关键词: 活性控制压燃; 光学诊断技术; 低负荷

A Visual Experimental Study on the Impact of Low Reactivity Fuel and Direct Injection Timing on Combustion Characteristics of Low Load RCCI Engines

Xu Liu¹, Wenjun Zhong¹, Peng Jiang¹, Liming Dai¹, Zhixia He^{1,2}, Qian Wang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The objective of this study is to explore the challenges associated with the RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) concept under low loads, where there may be insufficient combustion or misfires caused by a lean fuel mixture in the combustion chamber. To address this issue, optical diagnostics and post-processing techniques are utilized to investigate the effects of low-reactivity fuel and direct injection timing on combustion and flame characteristics in a dual-fuel engine under such conditions. The study tested three different low-reactivity fuels and five different direct injection (DI) timings while maintaining hydrogenated catalytic biodiesel (HCB) as a high-reactivity fuel. The research findings reveal that an increase in ethanol content results in longer ignition delay and a displacement of the ignition kernels towards the downstream of the fuel stream. Consequently, a more homogeneous combustion process and slower flame propagation occur, ultimately reducing the combustion intensity, cylinder pressure, and peak apparent heat release rate. Premixing E10 allows for a higher indicated mean efficient pressure (IMEP) of 0.20 MPa, exceeding E0 by 0.02 MPa and E100 by 0.05 MPa. The research also highlights that delaying the DI timing of HCB reduces ignition delay time and creates a higher concentration gradient of the combustible mixture, resulting in a higher apparent heat release rate and shorter combustion duration. Additionally, natural combustion luminosity images indicate that delaying the DI timing substantially impacts the characteristics of flame kernels generation and propagation. The ignition kernels formed shifted gradually from the near-wall region to upstream region of the spray, as the blue flame area and front propagation speed showed a significant increase. Retarded DI timing can achieve more favorable flame propagation and a higher IMEP under low loads conditions with a

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 51876083 and 52076103) ;

作者简介: 刘旭 (1996-), 男, 博士生, 主要研究方向为活性控制压燃燃烧模式着火燃烧特性, E-mail:xuliu0421@163.com;
王谦 (联系人), E-mail:qwang@ujs.edu.cn;

higher premixed energy ratio, while effectively reducing the impact of spray-wall impingement and pool burning phenomena.

Key words: reactivity-controlled compression ignition, optical diagnostics, low load conditions.

中图分类号: TK421

文献标识码: A

0 引言

传统内燃机(ICE)以其可靠的性能、高的功率输出和耐久性长期以来一直被用于驱动交通和国防设备[1]。然而,当前的能源危机和环境问题对ICE技术提出了重大挑战[2]。ICE产生的排放物,包括氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)和温室气体(GHG),对人类健康和环境都有着不利影响[3]。为了应对这些挑战,提出了各种有前景的方法,如先进燃烧策略、替代燃料及其组合[4,5]。

近年来,低温燃烧(LTC)的研究趋势突显了对反应性控制压缩点火(RCCI)的广泛兴趣[6]。在这种燃烧方法中,通过提前进气门喷射引入低反应性燃料以产生预混合混合气,同时直接喷射高反应性燃料到燃烧室中[8]。燃烧过程始于高反应性区域的自动点火,随后由反应性分布决定的控制火焰传播[9]。有效的燃烧控制涉及对燃烧室内反应性和浓度梯度的精确调节[10]。在这方面,研究人员进行了实验和模拟,以研究在RCCI发动机中高反应性和低反应性燃料的各种组合。先前的研究使用汽油[11]、天然气[12,13]、甲醇[14]、乙醇[15,16]和丁醇[8,17]作为低反应性燃料,而柴油[15,18]和生物柴油[19,20]则被用作高反应性燃料。这些研究强调了燃料性质在控制反应性梯度和优化燃烧以减少排放物方面的关键作用。此外,具有较高反应性的低反应性燃料促进了自动点火过程,从而缩短了燃烧持续时间。观察到在较高负荷下,较低反应性的燃料更适合,而在较低负荷下,较高反应性的燃料更合适[21]。除了燃料性质的研究,Li等人[19]还进一步研究了生物柴油喷射时刻对双燃料发动机中RCCI燃烧的影响。研究结果表明,将生物柴油喷射延迟到压缩行程的上止点附近会增加可燃混合物的反应性和浓度梯度,有利于更容易的点火,并有效地平衡了汽油引入缸内的低反应性。Ma等人[22]通过调整柴油喷射策略,研究了直接喷射时刻对混合物反应性和层化的影响。发现较早的柴油喷射倾向于增加缸内混合物的反应性,而较晚的喷射则增强了混合物的层化。此外,

双重喷射策略适用于较低的预混能量占比工况,而单一喷射则更适合较高的预混合能量占比工况[23]。综合考虑以上关于RCCI的主要研究发现,燃料性质和直接喷射时刻的控制显著影响可燃混合物的反应性和浓度层化,使得燃烧的联合控制成为可能,扩大RCCI发动机的工作负荷范围。

在这个意义上,Benajes等人[24-26]进一步进行了一系列关于低负荷下低反应性燃料特性、直接喷射时刻和预混合能量比对RCCI燃烧的影响的综合研究。他们使用了四种乙醇-汽油混合物作为预混合燃料,同时将柴油(B7)作为高反应性燃料。这些研究强调了缸内燃料反应性梯度对发动机效率的显著影响,尤其是在低负荷条件下。研究人员还确定了乙醇-汽油混合物作为低负荷工况的有前景的替代燃料。具体而言,与E85(乙醇85%,汽油15%体积比)相比,预混合E10(乙醇10%,汽油90%体积比)的总表征效率增加了3-4.5%。还观察到,当PER设置为49%、59%和69%时,所有四种燃料组合都实现了着火,但燃烧不完全,导致了超过欧洲VI排放标准的碳氢化合物(HC)和一氧化碳(CO)排放。此外,当PER进一步增加到79%时,E85-B7案例中的发动机发生了失火现象,主要归因于缸内燃料混合物的活性较低并且分布较为稀薄[27,28]。鉴于这一研究结果,关键是在低负荷下引入更高反应性的燃料,以缓解不足燃烧或缺火的问题,尤其是在较高PER下。在这方面,由于其较高的十六烷值和优越的燃烧特性,氢化催化生物柴油(HCB)作为一种高反应性燃料已经引起了关注[29,30]。研究发现证实了HCB相比柴油具有更短的火焰浮起长度和点火延迟时间[31,32]。因此,HCB有潜力作为高活性燃料缓解RCCI发动机低负荷下的不充分燃烧或失火问题的。此外,考虑到低负荷下低反应性燃料和直接喷射时刻的重要作用,可以探索在HCB的直接喷射时刻调整的情况下,HCB与各种低反应性燃料的结合利用。然而,为了全面理解和优化这些条

件下的 RCCI 燃烧, 还需要进一步的研究和分析, 特别是进行可视化实验。

因此, 利用光学诊断技术和相应的图像后处理技术研究了低负荷下 HCB 的低反应性燃料和直喷时刻对双燃料发动机燃烧和火焰发展特性的影响。为此, 本研究测试了三种不同的低反应性燃料和五种不同的直喷时刻。通过调整低反应性燃料和直接喷射时刻, 在低负荷下实现了在较高预混能量占比下的双燃料稳定燃烧。

1 试验台架与实验方法

1.1 光学发动机系统

所有实验均在一台自然吸气的单缸透明发动机中进行, 该发动机是从一台 R425 柴油发动机改装而来的。表 1 提供了发动机的规格, 图 1 详细描述了实验系统的示意图。透明发动机包括两个燃料供给系统, 即进口燃油喷射 (PFI) 和直接喷射 (DI), 以及空气进气加热和水循环系统以及电子控制系统。在进气冲程的早期阶段, PFI 系统将低反应性燃料引入进气歧管, 形成预混合燃料。随后, 在压缩冲程的后期阶段, DI 喷嘴将高反应性燃料引入燃烧室, 触发点火。图 2 显示了在上止点处对燃烧室的可视化示意图。为了建立一个直径为 64 毫米的圆形视区, 将一块平面石英玻璃放置在活塞顶部。使用压力传感器 (KISTLER 6056A) 测量缸内压力。为了捕捉天然火焰的亮度图像, 使用高速相机结合放置在石英窗口下方的 45°镜子。实验中使用的相机是高速彩色相机 (NAC Memrecam HX-5E), 配备了 Bayer 滤镜和尼康 200 毫米镜头。相机设置为以每秒 10000 帧的速度录制, 对应记录间隔为 0.72°CA。光圈设置为 f/16.0, 曝光时间为 4 微秒。不确定度见表 2。

表 1 光学发动机参数

参数	Value
缸径(mm)	92
冲程(mm)	94
排量(L)	0.667
压缩比	13:1
进气门数量	2
排气门数量	2
进气门开启时刻 (°CA BTDC)	375
进气门关闭时刻 (°CA BTDC)	140

排气门开启时刻 (°CA ATDC)	135
排气门关闭时刻 (°CA ATDC)	375
叠加角 (°CA)	30
Port injection pressure (MPa)	0.5
Direct injection pressure (MPa)	80

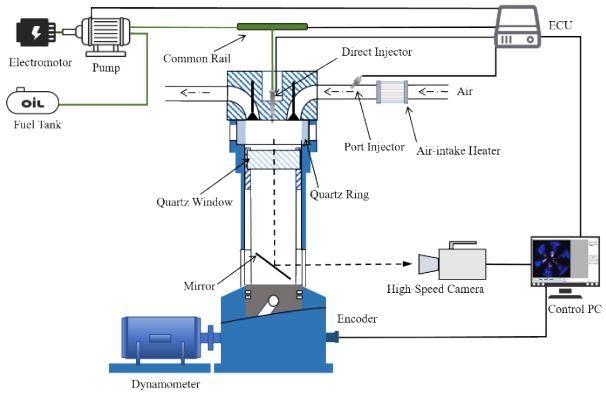


图 1 光学发动机示意图

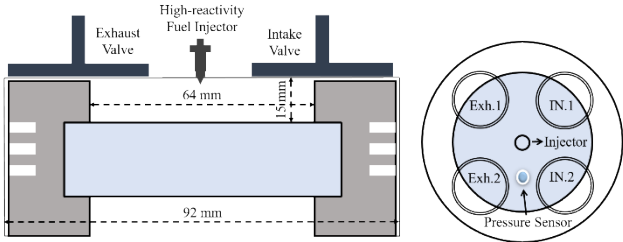


图 2 上止点处燃烧室可视化的示意图

表 2 光学发动机系统不确定性

参数	数值
发动机转速 (rpm)	1200 ± 3.60
进气温度 (°C)	85.0 ± 0.8
循环水温度 (°C)	85.0 ± 0.6
火焰图像	1 pixel(0.12 mm)

1.2 光学发动机系统

图像的强度分布可以用于分析特定时刻火焰传播的空间特征, 这可以通过量化注册像素的强度计数来实现。在我们的情况下, 裁剪图像的分辨率为 714×714, 并且我们将径向方向分为 357 个段, 从而在燃烧室内得到 357 个离散的圆, 其对应的离散化半径为 ($r_1, r_2, \dots, r_{357}$) [33]。图 3(b)提供了一个示例。该过程涉及到检索与火焰像素对应的空间积分自然亮度 ($SINL$) 值, 并沿径向方向沿周向轴进行聚合。为了获得火焰像素的 $SILN$, 一种有效的方法是使用红、绿、蓝三个通道的像素值加权求和。这种方法被广泛认可为 BT.601 或 ITU-R 推荐, 并具有特定的加权系数:

$$SINL_r = \oint_0^{2\pi} 0.299Pix_{(r,\alpha)}^R + 0.587Pix_{(r,\alpha)}^G + 0.114Pix_{(r,\alpha)}^B \quad (1)$$

其中, r 是燃烧室的离散化半径, α 是极坐标中的角度, Pix 是离散圆上的像素点, R 、 G 和 B 分别是每个像素点的红、绿、蓝分量。图 3(c)显示了 $SINL_{(r,CAD)}$ 的时空图的示例, 该图是五个单独燃烧循环的平均结果。在给定的图中, y 轴表示从火焰中心到周围点的距离(半径), 而 x 轴表示发动机的曲轴角度。 $SINL$ 值表示发动机燃烧特性的时空分布, 可以研究不同半径和曲轴角度处火焰强度的情况, 从而更好地理解发动机的燃烧过程和性能。

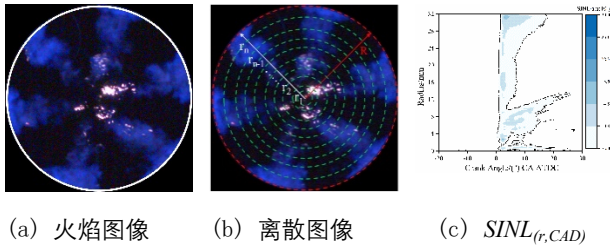


图 3 火焰图像处理

在光学发动机燃烧室中, 火焰面积可以客观地反映火焰的发展情况, 尽管它是指径向投影面积。在自然火焰亮度领域中, 蓝色预混合火焰和黄色扩散火焰之间存在二分法。具体而言, 前者归因于 UV-可见光谱范围内的燃料分解, 即 OH^* (306.4 nm)、 CH^* (431.5 nm)、 C_2^* (516.5 nm) 和 CO_2^* (340-650 nm), 而后者则源于可见红外光谱范围超过 550 nm 的烟灰辐射[12]。在图像中, 像素颜色的确定依赖于红、绿、蓝三个分量的组合。根据图 4 中的研究结果, 当识别火焰类型时, 红色通道相对于绿色和黄色通道具有更高的灵敏度。这表明可以选择特定的红色通道阈值作为区分预混合火焰和扩散火焰的依据, 正如先前的文献中所详细描述的那样[12]。本研究在进行多次比较后将红色通道阈值固定为特定值 135。因此, 像素值小于 135 被认定为预混合火焰, 而大于或等于 135 的像素被视为扩散火焰。

$$s_T = \frac{dA/dt}{L_f} \quad (2)$$

其中, A 表示火焰面积, t 表示时间, L_f 表示火焰前沿的长度。

1.3 试验工况

在本研究中, 采用了低反应性燃料, 以不同乙醇含量的汽油形式出现, 分别称为 E0 (100%汽油)、

E10 (90%汽油, 10%乙醇) 和 E100 (100%乙醇), 同时保持 HCB 作为高反应性燃料。本研究使用 ZDHW-6000 自动量热计确定燃料的低位热值 [35]。对于 E10 的目标性质, 采用了两种混合物性质模型进行预测。具体而言, 应用 Kay 的混合规则[36]估计辛烷值、密度、汽化潜热和含氧量, 而 Arrhenius 混合规则[36]则用于预测动力粘度。测试燃料的主要性质列于表 3 中。

表 3 燃油属性

燃油属性	E0	E10	E100	HCB
辛烷值	95	96.4	108	-
十六烷值	-	-	-	83
低位热值 (MJ/kg)	44	42.7	26.7	44
密度 (kg/m ³)	700	710	790	780
汽化潜热 (kJ/kg)	297	326.5	561.5	-
氧含量 (%)	0	3.86	34.7	0
动力粘度 (m ² /s)	0.44	0.52	1.08	6.08

本研究旨在评估低反应性燃料性质和喷油时刻对低负荷条件下 RCCI 燃烧性能的影响。为了探索低活性燃料的性质, 结合了三种不同的低反应性燃料与 HCB (E0-HCB, E10-HCB 和 E100-HCB) 进行了实验。此外, 使用 E10-HCB 的组合在五种不同的喷油时刻条件 (35 °CA, 30 °CA, 25 °CA, 20 °CA 和 15 °CA BTDC) 下进行了实验研究。表 4 提供了发动机试验条件的综合概述。为了确保精确性并减小实验误差的影响, 每个工况重复了五次。所呈现的结果是五个连续循环的平均值。同时, 图 5 展示了 E10-HCB 情况下的压力-体积 (P-V) 图, 清晰地显示了喷油时刻和持续时间。

表 4 试验工况

参数	工况	
	Part-I. 低活性燃料	Part-II. 直喷时刻
发动机转速 (rpm)	1200	1200
循环总能力 (J)	1000	1000
进气道喷射能量 (J)	800	800
缸内直喷能量 (J)	200	200
低活性燃料	E0/E10/E100	E10
进气道喷射时刻 (°CA BTDC)	300	300
高活性燃料	HCB	HCB

直喷时刻 (°CA BTDC)	25	35/30/25/20/15
IMEP (MPa)	0.18/0.20/0.15	0.14/0.17/0.20/0.23/0.25

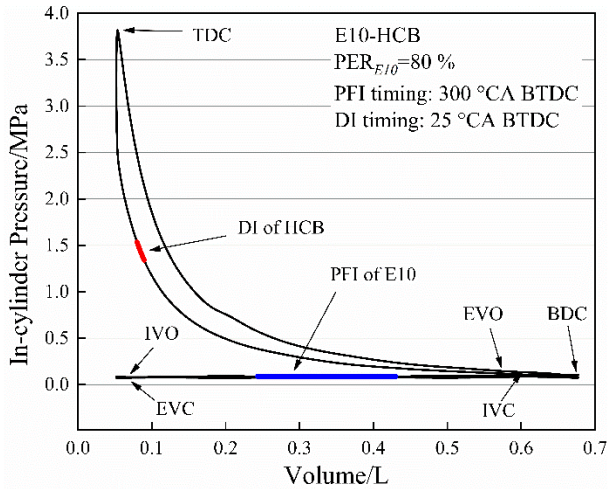


图 5 E10-HCB 工况下的压力-体积 (P-V) 图, 显示了喷油时刻和持续时间

2 结果与讨论

2.1 低活性燃料属性对 RCCI 燃烧及火焰发展特性的影响

2.1.1 燃烧特性

本节讨论了低活性燃料性质对 RCCI 燃烧特性的影响, 具体涉及 E0、E10 和 E100 作为低活性燃料, 而 HCB 保持为高活性燃料。低活性燃料在 300 °CA BTDC 时注入进气歧管, 而 HCB 在 25 °CA BTDC 时注入气缸。每个循环的总燃料能量保持在 1000 J, 而预混合能量比设置为 80%。图 6 展示了不同低活性燃料的气缸内压力和明显热释放率 (AHRR) 曲线, 而图 7 显示了相应的燃烧相位曲线。在本研究中, 点火滞后时间定义为 HCB 喷射时刻和 CA10 之间的曲轴角度间隔。燃烧持续时间定义为 CA10 和 CA90 之间的曲轴角度间隔。

从图 6 可以看出, 根据 HCB 的喷射持续时间为 3.17 °CA, 所有三种工况下的点火和燃烧过程均发生在 HCB 喷射完成之后。在点火滞后时间方面, 随着乙醇混合比的增加而延长。此外, 峰值气缸内压力、AHRR 和压力上升速率随乙醇混合比的增加而减小。这些趋势是多种因素的结果, 包括气缸内温度和反

应性的逐渐降低。增加预混合燃料中的乙醇含量会导致其低位热值降低, 但蒸发潜热增加。为了弥补低位热值的降低, 需要注入更多的燃料以获得相同数量的预混合燃料能量。随后, 在蒸发和扩散过程中, 这导致更高的热吸收, 从而在整个压缩冲程中降低气缸内温度[16]。此外, 气缸内混合物的点火性能减弱也可以归因于乙醇的物理和化学性质, 例如其低辛烷值和高自燃温度[25]。如图 6 所示, E0-HCB 工况下的 CA50 (热释放完成的曲轴角度的 50%) 位于 TDC 之前, 表明燃烧开始较早。相比之下, E10-HCB 和 E100-HCB 工况下均出现延迟的 CA50, 发生在活塞行程下行阶段, 从而导致负压缩工作的减少。值得注意的是, 乙醇混合比也会影响燃烧持续时间, 乙醇含量越高, 燃烧持续时间越长。表 4 进一步提供了关于低活性燃料在表征平均有效压力 (IMEP) 方面性能, E10-HCB 工况下显示出比 E0-HCB 和 E100-HCB 工况下更高的扩展功率能力, 表明在低负荷条件下具有更好的燃烧性能。

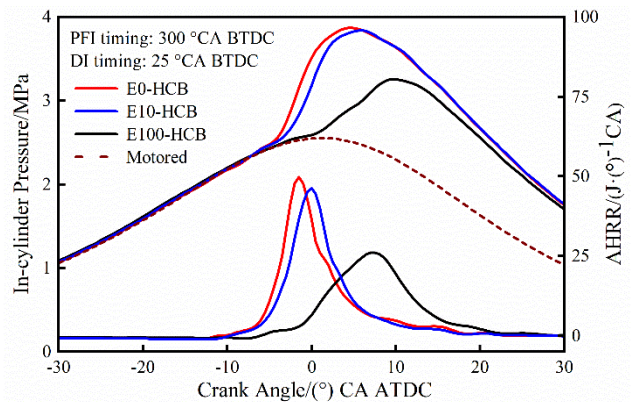


图 6 使用不同低活性燃料对应的缸压和放热率

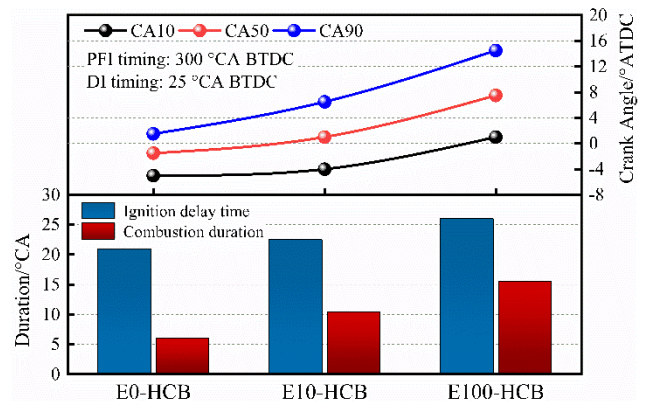


图 7 使用不同低活性燃料对应的燃烧相位

2.1.2 火焰发展特性

为了提高在不同低反应性燃料条件下获取的真彩色自然亮度图像序列的清晰度, 图 8 中的火焰图像按燃烧相位而非曲轴角位置排列。这些图像显示,

在低反应性燃料的乙醇混合比增加的初期燃烧阶段，点火核的时刻逐渐延迟。这一观察结果与文献[25]中的研究结果一致。此外，随着乙醇混合比的增加，观察到点火核形成的位置逐渐从喷雾的上游区域向下游区域移动。这表明燃烧室内的高反应性区域也向喷雾的下游区域和燃烧室壁移动。随着火焰前沿的推进，它消耗反应性介质并在其后形成新的点火核。随后，火焰前沿和点火核合并形成一个新的火焰前沿，进一步传播到未燃区域。火焰传播的速率和方向由介质的反应性分布决定[37]。在 E0-HCB 和 E10-HCB 工况下，可以清楚地观察到火焰前沿在燃料喷雾沿轴向和径向同时传播，形成了燃料喷雾区域内明显的蓝色预混火焰。然而，在 E100-HCB 工况下，燃烧室中存在大量未燃区域。这导致燃烧不稳定和点火失效，因为燃料与空气的混合物变得过

于稀薄，无法维持燃烧在燃料喷雾区域。因此，燃烧不完全，形成了未燃燃料与空气的混合物团块。结果，火焰前沿主要沿着燃烧室边缘传播，那里的燃料与空气的混合物更加浓度较高且能够维持燃烧。然而，燃料喷雾区域内的不完全燃烧导致燃烧效率的下降和排放物的增加。

随着燃烧的进行，在靠近燃烧室壁的区域可以观察到明亮的黄色火焰被蓝色火焰包围。在靠近燃烧室壁附近区域观察到明亮黄色火焰的主要原因是燃烧不完全产生的碳颗粒。这种不完全燃烧是由于氧含量的减少，阻碍了燃料和空气的完全燃烧。此外，随着燃烧室内温度和压力的增加，中心区域会出现几个明亮的黄色斑点，这是由于喷油器喷射不均匀的高辛烷值燃料导致的“滴油现象”[38]。

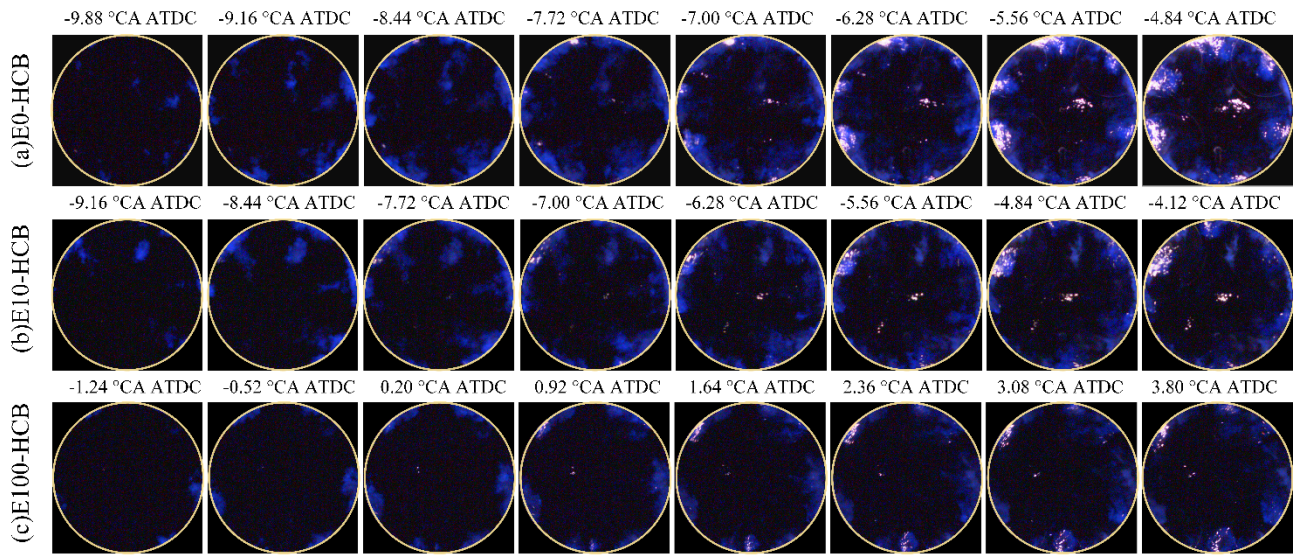
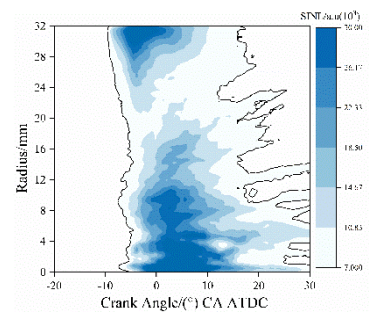


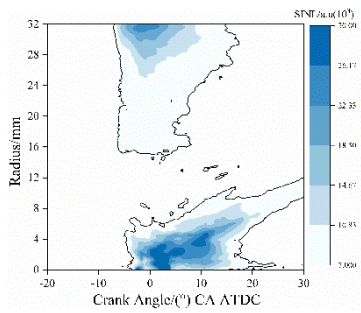
图 8 不同低反应性燃料条件下的真彩色自然火焰亮度图像

基于对不同低反应性燃料的火焰亮度图像的捕获，图 9 以 $SINL(r, CAD)$ 图形的形式展示了整体时空进展情况，该图形的计算方法如第 2.2 节所述。显然，随着乙醇混合比的增加，燃烧室的外围区域和中心区域的燃烧强度逐渐降低。此外，随着乙醇混合比的增加，这些局部富燃料区域的径向延伸长度和持续时间逐渐减小。在 $SINL(r, CAD)$ 图中观察到的趋势可以归因于乙醇的物理特性。乙醇具有比汽油更高的汽化热和蒸发潜热，这导致燃烧过程中的释放热量减少。这反过来导致燃烧强度的降低和富燃料区域持续时间的缩短。此外，乙醇具有更高的含氧量，这抑制了高亮度碳烟的形成。这是因为乙醇中的羟基 (OH) 可以与氧分子 (O_2) 反应生成过氧基自由基 (HO_2)，然后过氧基自由基 (HO_2) 可以与碳烟颗粒反应生成氧化产物[39]。

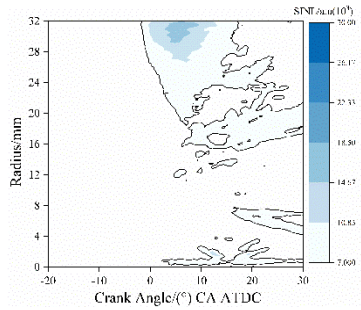
这个过程被称为氧化，是乙醇降低燃烧中高亮度碳烟形成的主要机制。



(a) E0-HCB



(b) E10-HCB



(c) E100-HCB

图9 不同低反应性燃料条件下的时空强度分布图

为了了解不同低反应性燃料的传播特性,对蓝色预混火焰和黄色扩散火焰进行了分离。图10和图11显示了不同低反应性燃料条件下两种火焰类型的火焰面积和火焰传播速度。由于点火发生在高反应性燃料喷射结束之后,预混燃料-空气混合物的点火比高反应性燃料的直接喷射更加均匀。具体而言,高反应性燃料和预混燃料-空气混合物可以在燃烧室中创建浓度和反应性梯度。这些梯度将使混合物在点火之前达到更均匀的状态,从而避免在燃烧室中形成更富燃料的区域。因此,可以观察到在所有三种工况下,燃烧室中蓝色火焰的峰值面积都超过黄色火焰的峰值面积,这表明预混燃烧在RCCI概念的燃烧过程中起主导作用。

此外,从图10可以观察到,随着乙醇混合比的增加,燃烧室中蓝色火焰和黄色火焰的峰值面积都减小。值得注意的是,与使用E0相比,使用E10可以有效抑制高亮度碳烟的产生,同时保持蓝色火焰面积没有明显减小。然而,使用E100会导致蓝色火焰和黄色火焰的峰值面积显著减小。这种趋势可以归因于乙醇与汽油的不同燃烧特性[19,20]。乙醇的点火滞后后期较汽油更长,这将导致燃烧的开始延迟。点火滞后后期的延长可能会导致燃烧室中沿燃料喷雾方向的可燃混合物浓度梯度减小,从而在喷雾的上游区域形成较薄的混合物,可能无法达到点火所需的条件。此外,乙醇具有较高的汽化热,这可能会对燃烧过程产生冷却效应,并进一步导致峰值

火焰面积的减小。点火滞后后期的延长和可燃混合物浓度的降低也可能导致火焰传播速度的降低,如图11所示。当可燃混合物浓度较低时,由于反应速率降低,火焰前缘移动更慢,导致不完全燃烧或无法维持燃烧,从而降低燃烧效率并增加有害物质的排放,尤其在E100-HCB的工况下。

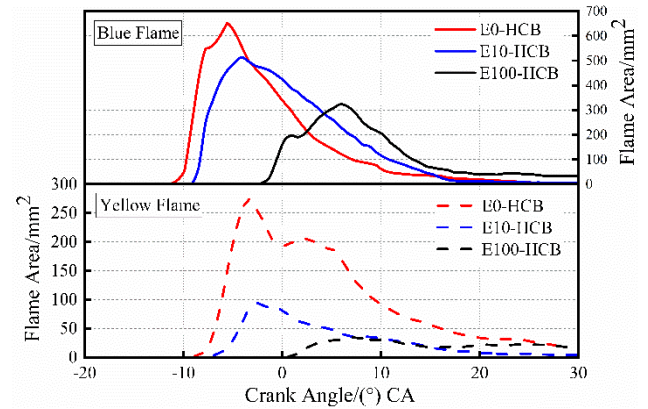


图10 不同低反应性燃料条件下的火焰面积分布图

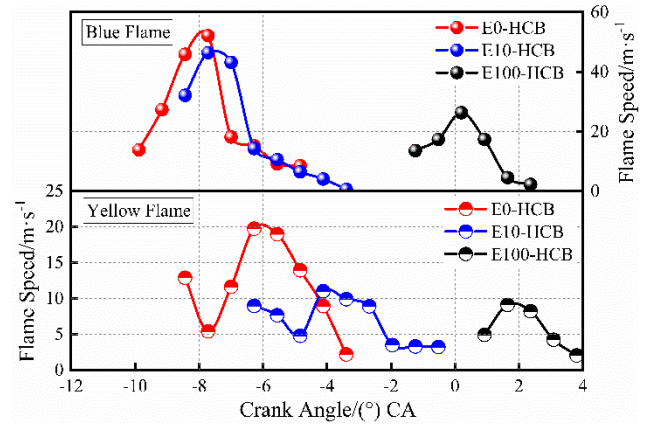


图11 不同低反应性燃料条件下的火焰传播速度

总的来说,当使用E0作为低反应性燃料时,主要的燃烧和释放热过程发生在活塞压缩行程期间,导致发动机功率降低。此外,明亮黄色碳烟的生成更为明显,存在碳排放污染的风险。此外,E0的生产和使用需要更多的石油资源,对环境可能产生负面影响。另一方面,预混E100可能导致燃料喷雾区域的不完全燃烧,降低燃烧效率并增加排放物。相比之下,预混E10在减少碳烟生成方面具有优势,同时在更高的替代比和低负载条件下保持良好的发动机性能。HCB的直接喷射时刻在RCCI概念下的燃烧中也起着重要作用。因此,在第3.2节中将讨论其对E10-HCB双燃料发动机在低负载条件下燃烧特性的影响,以进一步优化燃烧性能。

2.2 HCB 直喷时刻对 RCCI 燃烧及火焰发展特性的影响

2.2.1 燃烧特性

图 12 展示了不同 HCB 喷射时刻下的缸内压力和 AHRR 曲线，而图 13 显示了相应的燃烧相位曲线。值得注意的是，所有的燃烧和放热过程都发生在 HCB 喷射结束后。随着喷射时刻接近 TDC，由于相应缸内温度和压力满足燃料-空气混合物的燃烧条件能力增加，点火延迟时间逐渐减小。这导致喷雾方向上可燃混合物浓度梯度增加，点火更为集中，放热率逐渐增加，燃烧持续时间缩短。此外，峰值缸内压力在 SOI 时刻延迟时初始增加，达到最大值在 SOI-25 的情况下。这种初始增加是因为 SOI-25 的 CA50 时，活塞距 TDC 更近，对缸内压力的增加有更大影响[40]。然而，如果 SOI 时刻进一步延迟，可以观察到峰值缸内压力的降低和 CA50 的延迟。这表明燃烧过程延迟，CA50 的延迟证明了这一点，主要燃烧过程发生在活塞的向下行程期间，这可能导致峰值缸内压力的降低。此外，从 IMEP 的角度来看，如表 4 所示，在低负载条件下，推迟 SOI 时刻可以导致 IMEP 的增加。具体而言，当 SOI 时刻从 35°CA 延迟到 15°CA BTDC 时，IMEP 从 0.14 增加到 0.24 MPa，这可以改善发动机性能。这个结果凸显了优化 SOI 时刻以实现更高效率和更好发动机性能的潜力，在更高的替代比和低负载条件下尤为如此。

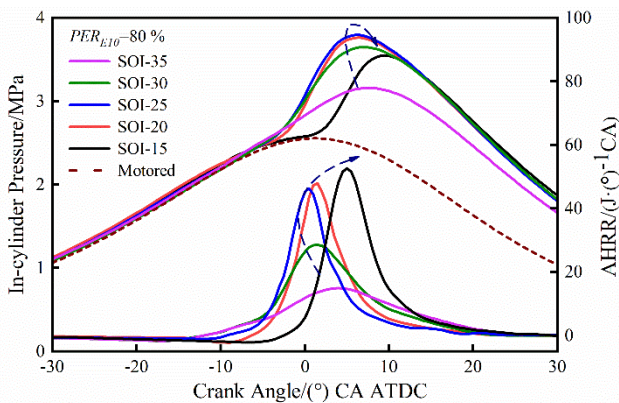


图 12 不同喷射时刻对应的缸压和放热率

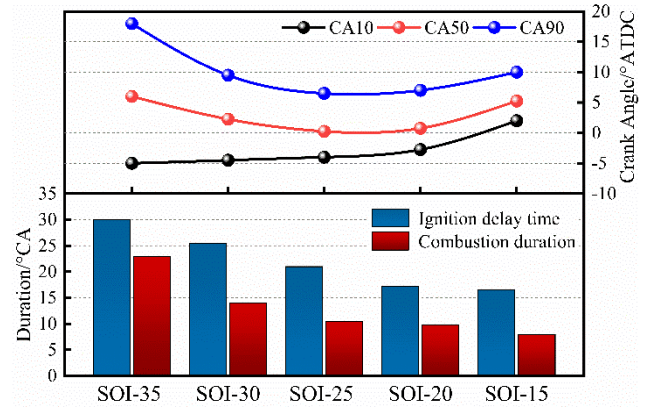


图 13 不同喷射时刻对应的燃烧相位

2.2.2 火焰发展特性

图 14 展示了不同 SOI 时刻下的真彩色自然火焰亮度图像序列的比较。在燃烧的初始阶段，燃烧室中观察到的点火核的时刻随着 SOI 时刻的延迟而逐渐推迟。同时，SOI 时刻的延迟也影响到点火核的生成和发展。关于 SOI-35 和 SOI-30 的工况，观察到由于缸内顺时针涡流的存在，点火核倾向于在燃烧腔的边缘附近形成并沿着燃烧室的周长传播[41]。然而，这可能导致点火核无法在燃烧贫燃区域合并和发展，从而产生点火失效的潜在问题。这些发现是多种因素的综合结果。较早的 SOI 时刻对应于较低的燃烧室热力环境，导致更长的点火延迟期。这会产生更均匀的可燃气体混合物，减少了燃烧室内高反应性区域的发生。在 Tang 等人的研究中[42]发现，当 SOI 时刻设置在 30°CA 到 60°CA BTDC 之间时，部分燃料会进入挤压区域和气缸壁。随着活塞上升，部分燃料可能被困在挤压区域和活塞与气缸壁之间的缝隙中。由于蒸发和扩散困难，这些燃料孔隙不太可能参与后续的燃烧过程。至于 SOI-25 的工况，可以观察到点火核同时出现在近壁区域和燃油喷雾的下游。随后，壁面附近区域的火焰前沿沿着周向发展，而燃油喷雾区域的火焰前沿在喷雾上游发展。当 SOI 时刻进一步延迟至 20°CA 和 15°CA BTDC 时，较高的热力环境导致点火延迟时间的缩短，导致燃油喷雾方向上的局部当量比增加。因此，几乎所有的点火核都出现在燃油喷雾区域，随后火焰前沿沿着喷雾的轴向和径向发展。当下游火焰接近燃烧腔的边缘时，它继续沿周向发展。随着后续火焰发展，局部氧气含量降低，导致产生由煤烟热辐射引起的黄色扩散火焰。此外，喷雾雾化不良的 HCB 可能引起“喷油器滴漏”现象，在燃烧室中心生成几个明亮的黄色斑点。

根据不同 SOI 时刻下捕获的真彩色自然火焰

亮度图像, 图 15 以 $SINL_{(r,CAD)}$ 图形式展示了整体时空进展工况。结果显示, 高强度区域主要位于燃烧室的近壁和中心区域。近壁区域高亮度区域的主要原因是喷雾撞击现象, 而中心区域的高亮度区域则是由于“喷雾器滴漏”现象所致 [37]。观察到延迟 SOI 时刻会导致近壁区域火焰强度的初始上升和后续下降。由于喷雾与壁面的碰撞和燃烧室内较高的热力环境, SOI-25 工况下观察到高亮度区域的峰值。然而, 对于 SOI-35 和 SOI-30 工况, 早期喷油时刻

导致部分燃料喷入挤压区域而未燃烧。喷入碗形区域的剩余燃料主要积聚在近壁区域。尽管如此, 较低的热力环境和较长的点火延迟时间导致近壁区域可燃混合物的均匀性增加。这可能导致高亮度区域的减少, 甚至可能导致失火。当 SOI 时刻延迟至 20°C A 和 15°C A BTDC 时, 几乎所有的点火核都位于燃油喷雾方向上。这在近壁燃烧中大大缓解了氧气不足的问题, 并逐渐减少了近壁区域的高亮度区

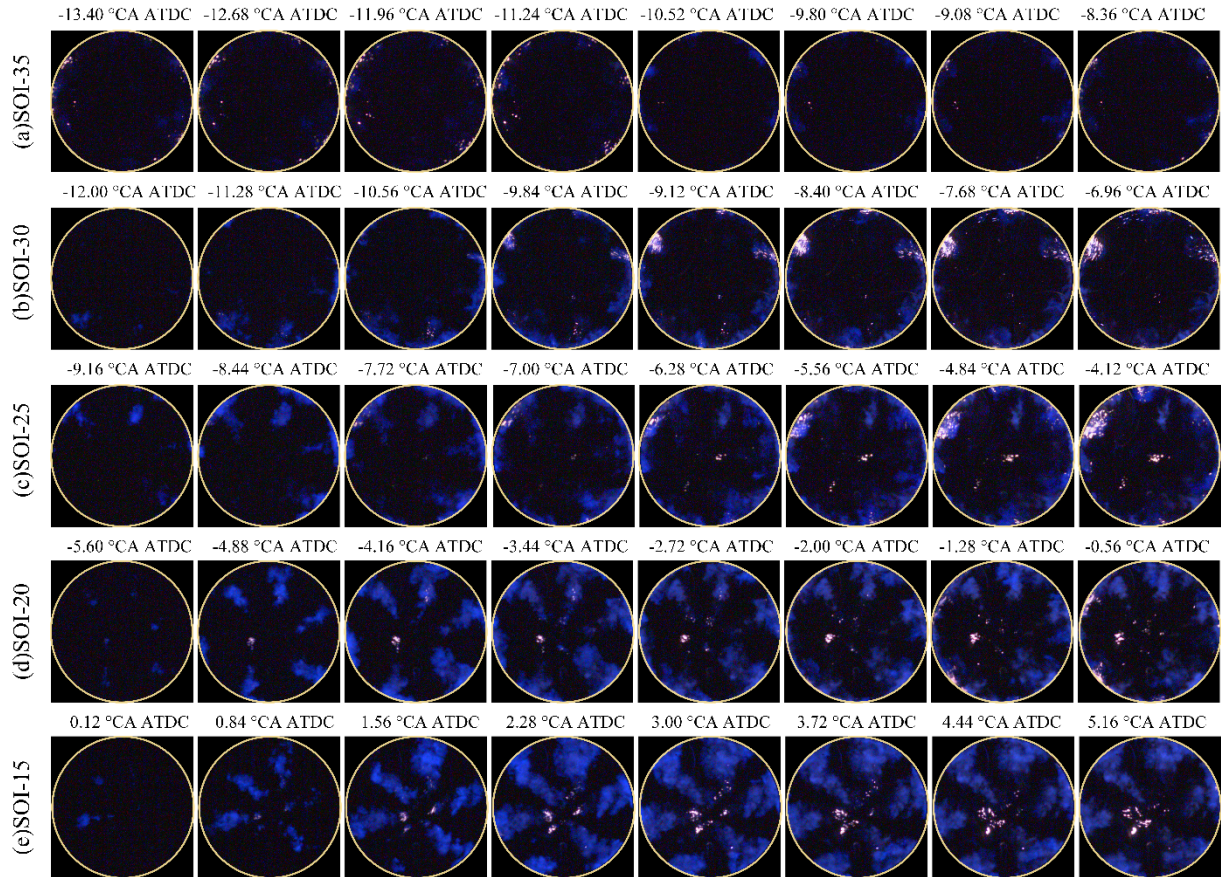


图 14 不同低反应性燃料条件下的真彩色自然火焰亮度图像

域。此外, 延迟 HCB 的 SOI 时刻会增加火焰在燃油喷雾方向上的传播距离。这表明延迟的 SOI 时刻增加火焰在燃油喷雾方向上的传播距离。这表明延迟的 SOI 时刻增强了燃烧室内的反应性和浓度梯度, 使得沿燃油喷雾方向的更多区域达到点火所需的条件。

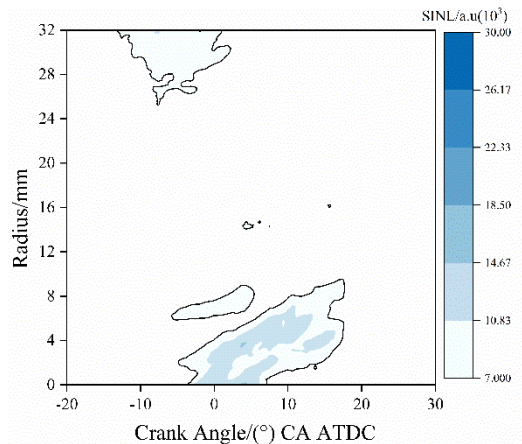
为了更好地了解不同火焰类型的传播特性, 分别研究了蓝色预混火焰和黄色扩散火焰。分析了蓝色和黄色火焰在不同喷油正时 (SOI) 时刻下的面积曲线和传播速度, 并将结果呈现在图 16 和图 17 中。根据实验观察, 延迟 SOI 时刻会导致蓝色火焰峰值面积增加。这增加表明在燃烧室内满足点火所需条件的可燃混合物更多。此外, 蓝色火焰的传播速度

也显示出类似的趋势, 表明在喷雾轴和径向方向上形成了更高的反应性梯度和浓度梯度[36]。蓝色火焰的传播速度在每种工况下显示出初始增加然后随后减少的趋势。这种行为可以归因于燃烧初期可燃气体的高浓度。火焰迅速消耗前方的气体, 产生热能并进一步促进燃烧过程。然而, 随着火焰的推进, 它消耗了可燃气体并产生了二氧化碳和水蒸气等副产品。这些副产品在火焰后面积累, 降低了氧气和可燃气体的浓度。这反过来导致火焰传播速度下降。至于黄色火焰, 峰值面积显示出初始增加后的减少, 随着 SOI 时刻的延迟。在 SOI-25 工况下, 由于喷雾与壁面撞击现象和燃烧室内较高的热力环境, 峰值面积达到最高点[37]。随着 SOI 时刻的进一步延迟, 点火核在几乎完全形成于燃油喷雾区域, 并逐渐向

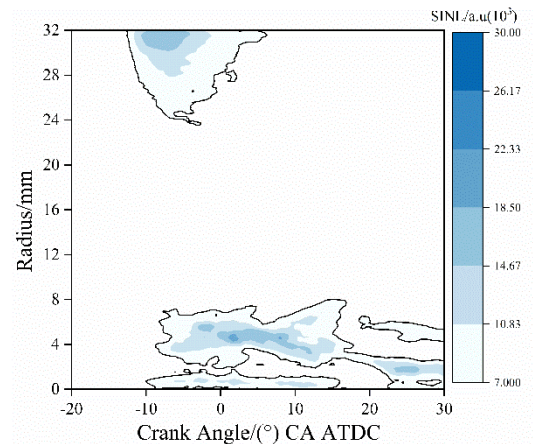
上游移动。这导致近壁面池燃烧现象的改善和黄色火焰峰值面积的逐渐减小。

总体而言, SOI 正时在构建与燃烧室相关的反应性梯度方面起着至关重要的作用, 进而影响着燃烧效率。当 SOI 时刻被延迟时, 可以减少 HCB (扩散火

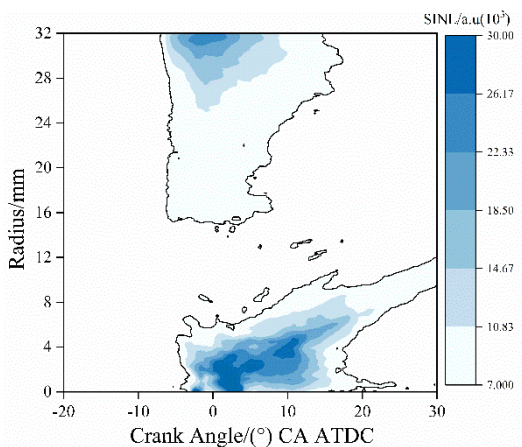
焰核心) 与预混空燃混合物之间的混合时间, 从而增加喷雾方向可燃混合物的浓度梯度和反应性梯度。利用这种效应可以防止喷雾与壁面的碰撞影响, 并通过提高燃烧室内的反应性梯度来提高燃烧效率, 从而改善低负荷条件下的发动机性能。



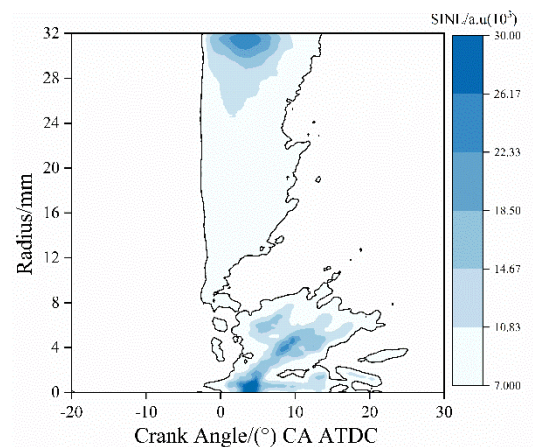
(a)SOI-35



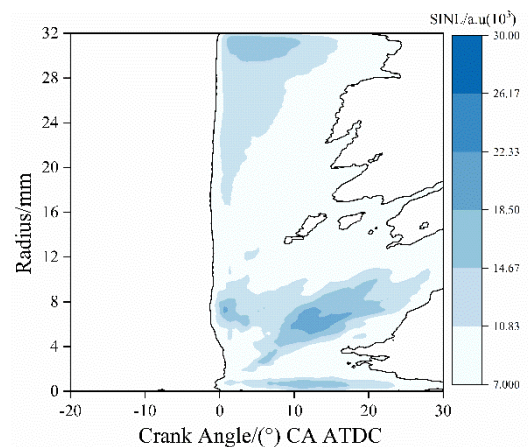
(b)SOI-30



(c)SOI-25



(d)SOI-20



(e)SOI-15

图 15 不同低反应性燃料喷射时刻下的火焰综合发光强度强度时空分布图

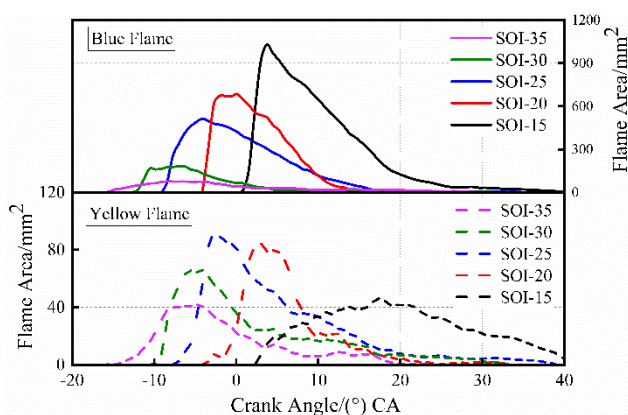


图 16 不同直喷时刻下的火焰面积分布图

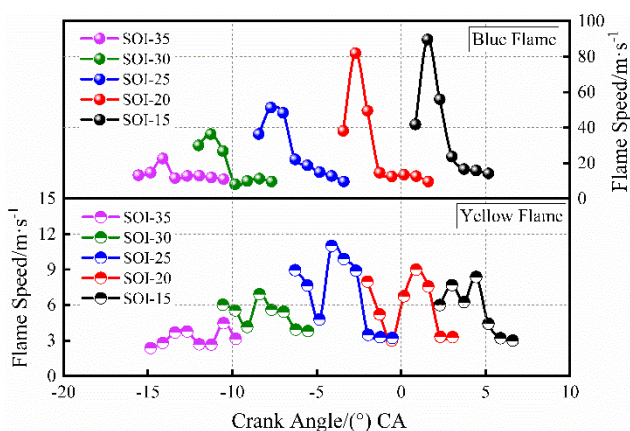


图 17 不同直喷时刻下的火焰传播速度

3 结论

在这项研究中, 研究了低反应性燃料和 SOI 时刻对轻负荷条件下双燃料光学发动机中 RCCI 燃烧和火焰传播特性的影响。因此, 对燃烧室内的参数进行了分析, 以提供优化 RCCI 燃烧以改善发动机性能的见解。主要结论如下:

(1) 随着预混燃料中乙醇混合比的增加, 缸内峰值压力和放热速率逐渐降低, 压力上升速率减小, 点火时刻延迟。这是由于乙醇具有较高的低位发热值和较慢的燃烧速度, 导致更均匀但更慢的燃烧过程, 并具有较长的持续时间。此外, 在低负荷下, E10-HCB 工况下表现出更好的燃烧效率和较高的输出功率。

(2) 随着乙醇含量的增加, 火焰点逐渐向燃油喷雾的下游偏移。延迟点火和氧含量的增加导致燃烧强度减小和燃料富集区持续时间缩短。蓝色和黄色火焰的峰值面积和传播速度降低, 表明燃烧室内可

燃混合物的浓度梯度更均匀。然而, 在 E100-HCB 工况下可能发生点火失败。

(3) 延迟 SOI 时刻可以减少点火延迟时间。这导致燃油喷雾方向上可燃混合物的浓度梯度增加, 从而实现更集中的点火。放热速率的逐渐增加最终缩短了点火持续时间。此外, 在低负荷条件下延迟 SOI 时刻可以增加 IMEP。

(4) 延迟 SOI 时刻可以改变火焰特性, 如点火核的上游移动、池燃烧减少和火焰传播距离增加。这也导致蓝色火焰面积和传播速度的增加, 而黄色火焰峰值面积则呈现初始增加后减少的趋势。通过提高燃烧室内的反应性梯度, 可以利用这种效应来防止喷雾与壁面的碰撞影响, 并提高燃烧效率。

参考文献

- [1] Ni P, Wang X, Li H. A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel* 2020;279:118477.
- [2] Tan KM, Ramachandaramurthy VK, Yong JY. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;53:720–732.
- [3] Wei J, Wang Y. Effects of biodiesels on the physicochemical properties and oxidative reactivity of diesel particulates: A review. *Science of the Total Environment* 2021;788:147753.
- [4] Imtenan S, Varman M, Masjuki HH, Kalam MA, Sajjad H, Arbab MI, Fattah IMR. Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review. *Energy Conversion and Management* 2014;80:329–356.
- [5] Reitz RD. Combustion and ignition chemistry in internal combustion engines Foreword. *International Journal of Engine Research* 2013;14(5):411–415.
- [6] Leach FCP, Davy M, Terry B. Combustion and emissions from cerium oxide nanoparticle dosed diesel fuel in a high speed diesel research engine under low temperature combustion (LTC) conditions. *Fuel* 2021;288:119636.
- [7] Reitz RD, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition

(RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 2015;46:12–71.

[8] Soloiu V, Moncada JD, Gaubert R, Knowles A, Molina G, Ilie M, Harp S, Wiley JT. Reactivity Controlled Compression Ignition combustion and emissions using n-butanol and methyl oleate. *Energy* 2018;165:911–924.

[9] Tang Q, Liu H, Li M, Geng C, Yao M. Multiple optical diagnostics on effect of fuel stratification degree on reactivity controlled compression ignition. *Fuel* 2017;202:688–698.

[10] Li Y, Jia M, Chang Y, Xu Z, Xu G, Liu H, Wang T. Principle of determining the optimal operating parameters based on fuel properties and initial conditions for RCCI engines. *Fuel* 2018;216:284–295.

[11] Li J, Yang WM, An H, Zhou DZ, Yu WB, Wang JX, Li L. Numerical investigation on the effect of reactivity gradient in an RCCI engine fueled with gasoline and diesel. *Energy Conversion and Management* 2015;92:342–352.

[12] Lee C, Pang Y, Wu H, Nithyanandan K, Liu F. An optical investigation of substitution rates on natural gas/diesel dual-fuel combustion in a diesel engine. *Applied Energy* 2020;261:114455.

[13] Poorghasemi K, Saray RK, Ansari E, Irdmousa BK, Shahbakhti M, Naber JD. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine. *Applied Energy* 2017;199:430–446.

[14] Wang L, Liu J, Ji Q, Sun P, Li J, Wei M, Liu S. Experimental study on the high load extension of PODE/methanol RCCI combustion mode with optimized injection strategy. *Fuel* 2022;314:122726.

[15] Pan S, Cai K, Cai M, Du C, Li X, Han W, Wang X, Liu D, Wei J, Fang J, et al. Experimental study on the cyclic variations of ethanol/diesel reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in a heavy-duty diesel engine. *Energy* 2021;237:121614.

[16] Qian Y, Wang X, Zhu L, Lu X. Experimental studies on combustion and emissions of RCCI (reactivity controlled compression ignition) with gasoline/n-heptane and ethanol/n-heptane as fuels. *Energy* 2015;88:584–594.

[17] Soloiu V, Duggan M, Harp S, Vlcek B, Williams D.

PFI (port fuel injection) of n-butanol and direct injection of biodiesel to attain LTC (low-temperature combustion) for low-emissions idling in a compression engine. *Energy* 2013;52:143–154.

[18] Feng Y, Zhu J, Mao Y, Raza M, Qian Y, Yu L, Lu X. Low-temperature auto-ignition characteristics of NH₃/diesel binary fuel: Ignition delay time measurement and kinetic analysis. *Fuel* 2020;281:118761.

[19] Li J, Yang WM, An H, Zhao D. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study. *Applied Energy* 2015;155:59–67.

[20] Zhang Y, Zhan L, He Z, Jia M, Leng X, Zhong W, Qian Y, Lu X. An investigation on gasoline compression ignition (GCI) combustion in a heavy-duty diesel engine using gasoline/hydrogenated catalytic biodiesel blends. *Applied Thermal Engineering* 2019;160:113952.

[21] Benajes J, Molina S, García A, Monsalve-Serrano J. Effects of direct injection timing and blending ratio on RCCI combustion with different low reactivity fuels. *Energy Conversion and Management* 2015;99:193–209.

[22] Ma S, Zheng Z, Liu H, Zhang Q, Yao M. Experimental investigation of the effects of diesel injection strategy on gasoline/diesel dual-fuel combustion. *Applied Energy* 2013;109:202–212.

[23] Molina S, García A, Pastor JM, Belarte E, Balloul I. Operating range extension of RCCI combustion concept from low to full load in a heavy-duty engine. *Applied Energy* 2015;143:211–227.

[24] Benajes J, Molina S, García A, Monsalve-Serrano J. Effects of direct injection timing and blending ratio on RCCI combustion with different low reactivity fuels. *Energy Conversion and Management* 2015;99:193–209.

[25] Benajes J, Molina S, García A, Monsalve-Serrano J. Effects of low reactivity fuel characteristics and blending ratio on low load RCCI (reactivity controlled compression ignition) performance and emissions in a heavy-duty diesel engine. *Energy* 2015;90:1261–1271.

[26] Desantes JM, Benajes J, García A, Monsalve-Serrano J. The role of the in-cylinder gas temperature and oxygen concentration over low load reactivity controlled compression ignition combustion efficiency. *Energy* 2014;78:854–868.

[27] Hanson R, Kokjohn S, Splitter D, Reitz RD. Fuel

Effects on Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion at Low Load. SAE International Journal of Engines 2011;4(1):394–411.

[28] Kokjohn SL, Hanson RM, Splitter DA, Reitz RD. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion. International Journal of Engine Research 2011;12(3):209–226.

[29] Jiang P, Liu X, Cao L, Wang Q, He Z. Numerical investigation of dual-fuel direct injection on RCCI combustion performance at low load condition. Journal of Mechanical Science and Technology 2021;35(9):4247–4259.

[30] Xuan T, Sun Z, EL-Seesy AI, Mi Y, Zhong W, He Z, Wang Q, Sun J, El-Batsh HM, Cao J. An optical study on spray and combustion characteristics of ternary hydrogenated catalytic biodiesel/methanol/n-octanol blends; part II: Liquid length and in-flame soot. Energy 2021;227:120543.

[31] Zhong W, Pachiannan T, He Z, Xuan T, Wang Q. Experimental study of ignition, lift-off length and emission characteristics of diesel/hydrogenated catalytic biodiesel blends. Applied Energy 2019;235:641–652.

[32] Zhong W, Tamilselvan P, Wang Q, He Z, Feng H, Yu X. Experimental study of spray characteristics of diesel/hydrogenated catalytic biodiesel blended fuels under inert and reacting conditions. Energy 2018;153:349–358.

[33] Ahmad Z, Kaario O, Qiang C, Vuorinen V, Larmi M. A parametric investigation of diesel/methane dual-fuel combustion progression/stages in a heavy-duty optical engine. Applied Energy 2019;251:113191.

[34] Zheng Z, Fang X, Liu H, Geng C, Yang Z, Feng L, Wang Y, Yao M. Study on the flame development patterns and flame speeds from homogeneous charge to stratified charge by fueling n-heptane in an optical engine. Combustion and Flame 2019;199:213–229.

[35] Ling Q, He S, Babadi AA, Yuan C, Pan C, Jiang D, Cao B, Hu Y, Wang S, Zheng A. Preparation of low-nitrogen chlorella based on proteolysis technology and pyrolysis characteristics of the products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2022;167:105630.

[36] Ariffin Kashinath SA, Abdul Manan Z, Hashim H, Wan Alwi SR. Design of green diesel from biofuels using computer aided technique. Computers & Chemical

Engineering 2012;41:88–92.

[37] Tang Q, Liu X, Liu H, Wang H, Yao M. Investigation on the dual-fuel active-thermal atmosphere combustion strategy based on optical diagnostics and numerical simulations. Fuel 2020;276:118023.

[38] Soleri D, Sauve K, Lecointe B, Kashdan J, Dronniou N. Optical Investigation of Dual-fuel CNG/Diesel Combustion Strategies to Reduce CO₂ Emissions. SAE International Journal of Engines 2014.

[39] Luo Y, Zhu L, Fang J, Zhuang Z, Guan C, Xia C, Xie X, Huang Z. Size distribution, chemical composition and oxidation reactivity of particulate matter from gasoline direct injection (GDI) engine fueled with ethanol-gasoline fuel. Applied Thermal Engineering 2015;89:647–655.

[40] Cui Y, Liu H, Wen M, Feng L, Wang C, Ming Z, Zhang Z, Zheng Z, Zhao H, Wang X, et al. Optical diagnostics and chemical kinetic analysis on the dual-fuel combustion of methanol and high reactivity fuels. Fuel 2022;312:122949.

[41] Cui Y, Liu H, Wen M, Feng L, Ming Z, Zheng Z, Fang T, Xu L, Bai X-S, Yao M. Optical diagnostics of misfire in partially premixed combustion under low load conditions. Fuel 2022;329:125432.

[42] Tang Q, Liu H, Li M, Yao M. Optical study of spray-wall impingement impact on early-injection gasoline partially premixed combustion at low engine load. Applied Energy 2017;185:708–719.