

燃油添加剂改善 HCCI 发动机着火性能的试验研究

纪常伟, 何 洪, 李 超, 梁 晨, 张月红, 马重芳

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘 要: 针对均质预混合压燃着火(HCCI)发动机低负荷易失火的问题,通过在参考燃料(90%的正庚烷和10%的异辛烷)和93号汽油中分别加入适量的着火改进剂过氧化苯甲酸叔丁酯,在HCCI发动机台架上进行燃烧试验.试验结果表明,在参考燃料中添加质量分数为0.3%~1.2%的过氧化苯甲酸叔丁酯后,与参考燃料相比,低负荷界限拓宽了15%~28%,而高负荷界限却降低了0.5%~7%,表明添加剂在拓宽低负荷的同时使高负荷范围下降.93号汽油添加适量的过氧化苯甲酸叔丁酯能够实现HCCI稳定燃烧,而未加添加剂的汽油则不能燃烧.

关键词: 燃油添加剂;均质预混合压燃着火发动机(HCCI);着火性能;过氧化苯甲酸叔丁酯

中图分类号: U 473.5

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2005)06-0604-04

HCCI 发动机是综合了汽油机和柴油机优点的均质预混合高压压缩比压燃着火发动机.高压缩比实现高热效率,均质预混合实现低排放^[1,2].由于 HCCI 燃烧由燃烧边界条件和燃料化学协同控制,因此,着火时刻难于控制,且低负荷容易失火,高负荷容易爆震,运行工况较窄,但在 HCCI 实现的运行工况内,HCCI 发动机具有较高的热效率、极低的 NO_x 排放和较高的 HC 和 CO 排放^[3,4].由此可见,如能通过控制燃烧边界和燃料成分拓宽其运行工况范围,则 HCCI 发动机具有广泛的应用前景.通过采用进气预热、可变压缩比、可变气门正时与升程、燃料添加剂^[5]等措施可拓宽 HCCI 发动机的低负荷工作范围,通过 EGR 降低燃烧反应速率可拓宽 HCCI 发动机的高负荷范围^[6].作者通过在正庚烷和异辛烷的混合物及 93 号汽油中加入适量的过氧化物研究添加剂对 HCCI 发动机低负荷着火性能的影响.

1 添加剂作用机理

燃料燃烧反应是自由基驱动的反应,燃料需在一定温度下才能分解出自由基,发生链式反应,混合气自燃^[7].然而在低负荷下,由于混合气过稀,较低的缸内压缩温度无法使燃油分解出活性自由基,链式反应无法发生,导致 HCCI 发动机低负荷失火.如能在燃油中加入某种添加剂,该添加剂能在较低的温度下分解生成活性自由基,该自由基会起到激活并加速燃料低温反应过程,进而改善 HCCI 发动机着火性能,导致 HCCI 发动机低负荷顺利着火的作用^[5].在低温下(100~200℃)能够分解生成自由基的化合物很多,过氧化物分解产生 RO·自由基;有机碳酸酯分解产生 R·和 RCOO·自由基;偶氮二异丁腈,分解产生 RN·自由基;二茂金属化合物分解产生 R·、RCO·、RCOO·自由基;H₂O₂ 分解产生·OH 自由基或原子氧.金属类化合物可能在发动机排放中产生颗粒物,一般应慎用,最好选择有机过氧化物作为添加剂.有机过氧化物主要有叔丁基过氧化氢、二叔丁基过氧化物、1,1-二叔丁基过氧化环己烷、过氧化苯甲酸叔丁酯、过氧化-2-乙基己酸叔丁酯、叔丁基过氧化 2-乙基己基碳酸酯、二叔丁基二碳酸酯、过氧化叔丁基异丙苯、过氧化氢异丙苯等.HCCI 着火性能决定于单位质量添加剂产生自由基的数目和产生自由基的稳定性和活性.利用量子化学程序进行自由基的稳定性计算表明,过氧化苯甲酸叔丁酯具有较高的低温稳定性,可作为 HCCI 发动机低负荷着火改进剂.为此,在 90%的异辛烷和 10%的正庚烷(参考燃料)中加入适量的

收稿日期: 2004-05-28.

基金项目: 国家“九七三”计划资助项目(2001CB209201).

作者简介: 纪常伟(1965-),男,黑龙江克山人,教授.

过氧化苯甲酸叔丁酯 ($C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$), 配制出含过氧化苯甲酸叔丁酯质量分数分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 和 1.2% 的 HCCI 燃料进行 HCCI 发动机台架实验。

2 实验系统设计

试验发动机为 SOFIM 8140.47 增压中冷柴油机, 将该发动机改造成 1~3 缸柴油机燃烧方式, 第 4 缸 HCCI 燃烧方式。起动时, 1~3 缸柴油运行, 待水温 and 机油温度达到 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 第 4 缸喷入配制的 HCCI 燃料 (90% 的异辛烷和 10% 的正庚烷), 进入柴油-HCCI 混合作模式。将第 4 缸的喷油器安装孔改造成缸压传感器安装孔, 在第 4 缸的进气管上安装 HCCI 燃料喷嘴。缸压数据采集系统由欧姆龙转角编码仪、Kisler 缸压传感器、A/D 数据采集板和采集软件组成。通过对第 4 缸倒拖可测取该缸的压缩上止点。发动机运转后可通过该系统采集缸压和对应的曲轴转角信号。电控燃油喷射系统由单片机、曲轴转角传感器、喷嘴、油泵和监控软件组成。单片机根据曲轴转角信号控制喷油器向第 4 缸进气道喷油, 喷油量可通过控制软件调整。发动机测控采用南峰 FST2A 型全自动测控系统, 采用 AVL 公司的 DiGas 5 组分分析仪测量各种喷油量和添加剂配方下的排放。添加剂为 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$, 实验工况为发动机转速 1400 r/min , 油门开度 12.9%, 对每种加入添加剂的燃料, 减小喷油量直至失火, 增加喷油量直至爆燃, 测量缸压、排放和过量空气系数, 确定在该工况下的燃烧界限 (过量空气系数范围)。

3 实验结果及分析

3.1 参考燃料在 HCCI 燃烧方式下的燃烧特性

在发动机转速为 1400 r/min 时, 在第 4 缸内喷入参考燃料, 增加喷油量直至听到爆燃声, 减小喷油量直至失火, 分别记录各个喷油量下的缸压和过量空气系数。图 1 表明, 在过量空气系数 $\lambda = 2.75$ 时, 缸压曲线出现轻微褶皱, 第 4 缸轻微爆燃, 可听到爆燃声。当 $\lambda > 3.61$ 时, 测得的缸压曲线和倒拖缸压曲线接近, 表明第 4 缸接近熄火。因此, 参考燃料的燃烧界限 (不失火且不爆燃) 为 $\lambda = 2.75 \sim 3.61$ 。

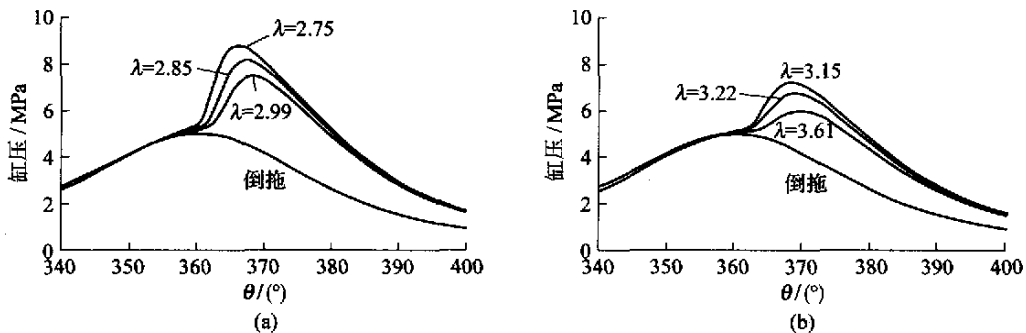


图 1 参考燃料在不同过量空气系数下的缸压

Fig. 1 Cylinder pressures at different excess air factors using the primary reference fuel

3.2 添加 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ 的参考燃料的燃烧特性

在参考燃料中加入适量的 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$, 配制含 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ 质量分数分别为 0.3%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 和 1.2% 的 HCCI 燃料。在相同的实验工况下, 采用上述燃料在 HCCI 发动机上进行燃烧实验, 通过测量缸压和过量空气系数 λ 确定每种燃料的燃烧界限。图 2 表明, 随着添加剂质量分数的逐渐增加, 燃料燃烧的稀限增大, 低负荷燃烧范围得到较大拓宽, 燃料燃烧的浓限缩小, 高负荷燃烧范围有一定程度缩减。与参考燃料相比, 加入 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ 燃料的低负荷燃烧界限拓宽了 15%~28%, 但高负荷界限却降低了 0.5%~7%, 表明过氧化物在低负荷能产生足够的自

由基保证发动机能在很稀的混合气条件下可靠着火,但同时过氧化物也在高负荷下产生一定数量的自由基,加快燃烧速度,导致 HCCI 发动机在高负荷下的爆震提前.

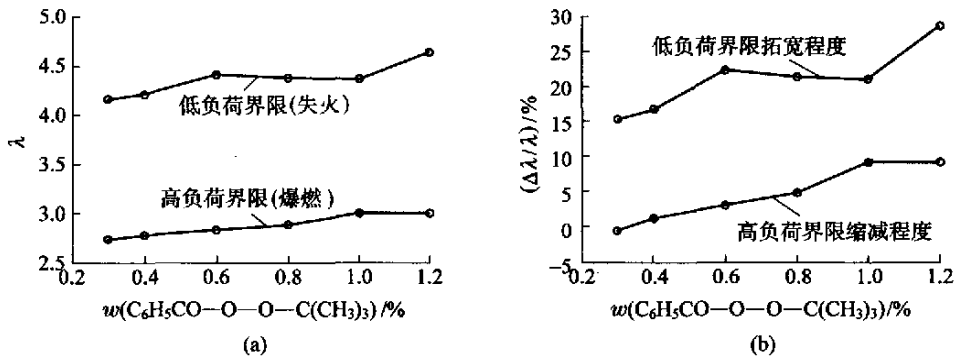


图2 参考燃料中加入不同质量分数的 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ 的 HCCI 发动机燃烧界限
Fig.2 HCCI engine combustion limits at different mass fractions of $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ added to the primary reference fuel

3.3 汽油在 HCCI 燃烧方式下的燃烧

在 93 号汽油中加入适量的 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$, 配制含过氧化苯甲酸叔丁酯质量分数分别为 0.6%、0.8%、1% 的 HCCI 燃料. 在相同的实验工况下, 对上述燃料进行 HCCI 燃烧实验, 通过测量缸压和过量空气系数确定每种燃料的燃烧界限. 实验表明, 纯汽油在指定的实验条件下无法实现 HCCI 燃烧, 但加入适量的添加剂后能稳定燃烧, 与参考燃料 (90% 的异辛烷和 10% 的正庚烷) 相比, 浓限较宽, 但稀限较窄, 具有较强的做功能力, 如图 3 所示.

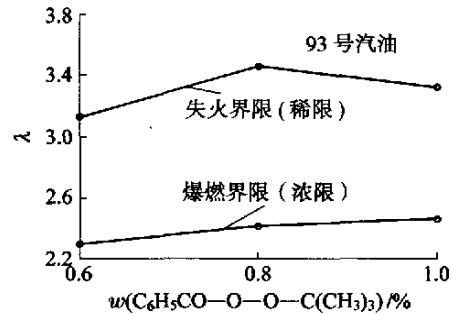


图3 93号汽油中加入不同浓度的过氧化苯甲酸叔丁酯的 HCCI 发动机燃烧界限
Fig.3 HCCI engine combustion limits at different mass fractions of $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ added to RON 93 gasoline

4 结论

在指定的实验工况和实验条件下:

- 1) 采用 90% 的异辛烷和 10% 的正庚烷配制的 HCCI 燃料 (参考燃料), 能在 $\lambda = 2.75 \sim 3.61$ 之间稳定燃烧, 产生极低的 NO_x 和较高的 HC.
- 2) 在参考燃料中添加适量的过氧化氢型添加剂后, 可较大幅度地扩大 HCCI 低负荷燃烧范围, 但却使高负荷燃烧范围略有所下降.
- 3) 93 号汽油添加适量的 $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ 能够实现 HCCI 稳定燃烧, 而未加添加剂的汽油不能燃烧.

参考文献:

- [1] EPPING K, ACEVES S. The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions[J]. SAE Paper, 2002-01-1923.
- [2] DIBBLE R, AU M, GIRARD J. Current research in HCCI combustion at UC Berkeley and LLNL[J]. SAE Paper, 2001-01-2511.
- [3] YANG Jia-jin, CULP T, KENNEY T. Development of a gasoline engine system using HCCI technology—The concept and the test results[J]. SAE Paper, 2002-01-2832.
- [4] OSBORNE R J, LI G, SAPSFORD S M, et al. Evaluation of HCCI for future gasoline powertrains[J]. SAE Paper, 2003-

01-0750.

- [5] TANAKA S, AYALA F, KECK J C, et al. Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132: 219-239.
- [6] PENG Zhi-jun, ZHAO Hua, LADOMMATOS N. Effects of air/fuel ratios and EGR rates on HCCI combustion of n-heptane: A diesel type fuel[J]. *SAE Paper*, 2003-01-0747.
- [7] 布拉特柯夫 A A. 发动机化学理论基础[M]. 北京: 烃加工出版社, 1990.
- BRUTUV A A. *The Basics of Engine Chemistry*[M]. Beijing: Hydrocarbon Processing Press, 1990. (in Chinese)

Experimental Study on the Improvement of Ignition Characteristics of a HCCI Engine by Fuel Additives

JI Chang-wei, HE Hong, LI Chao, LIANG Chen, ZHANG Yue-hong, MA Chong-fang
(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: For the problem of misfire of the HCCI engine at low load, the engine test is carried out by mixing proper ignition improver ($C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$) with the reference fuel (90% iso-octane + 10% n-heptane) and the RON 93 gasoline respectively. After mixing $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$ of 0.3% ~ 1.2% in mass fraction, compared with the reference fuel result, the engine operation range is enlarged by 15% ~ 28% at low load and reduced by 0.5% ~ 0.7% at high load. It shows that additives can increase operational range of engine at low load, while decrease it at high load at the same time. When proper additive is mixed with RON 93 gasoline, stable HCCI combustion can be obtained, but the gasoline cannot burn without additives.

Key words: fuel additives; HCCI engines; ignition characteristics; $C_6H_5CO-O-O-C(CH_3)_3$