

# 燃料实时设计与 HCCI 燃烧控制

侯玉春 黄震 吕兴才 方俊华 俎琳琳

(上海交通大学内燃机研究所, 上海 200030. E-mail: hycddd@sju.edu.cn)

**摘要** 根据燃料设计的思想, 提出了混合燃料比例实时优化的 HCCI 燃烧控制新方法. 利用 HCCI 单缸发动机研究了异辛烷/正庚烷的实时预混合控制的 HCCI 燃烧, 结果发现混合燃料 HCCI 着火以及燃烧相位主要取决于正庚烷实际的燃空当量比. 异辛烷的加入对爆震当量比界限有所拓展, 但 HCCI 爆震主要与混合燃料总当量比有关. 随着异辛烷比例的提高, 导致 HCCI 当量比运行范围变窄, 但是混合燃料实时调控的 HCCI 燃烧最大负荷相对纯正庚烷提高了大约 80%. 采用实时优化控制, 取得了负荷拓展与排放降低综合效果, 其整个运行范围具有较高的热效率.

**关键词** HCCI 燃烧 燃烧设计 实时控制 正庚烷 异辛烷

均质充量压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)燃烧技术是由温度、压力和混合气成分等因素控制的化学动力学燃烧过程, 具有高效、低排放的潜力<sup>[1]</sup>. 均质、高温燃油混合气的压缩触发缸内多点同时着火燃烧, 因此 HCCI 着火控制比传统发动机的火花点火或直喷时刻控制着火的方式具有更大挑战. 另外低负荷时稀薄混合气的 HCCI 燃烧导致缸内燃气温度过低容易失火; 而在高负荷时更多的燃料几乎同时着火燃烧, 放热快速剧烈, 燃烧趋向于瞬间“爆炸”而导致爆震. 因此 HCCI 发动机实用化的关键症结在于着火时刻和燃烧速率的控制<sup>[1-3]</sup>.

解决这些问题的一种措施是使用技术手段来改善缸内的燃烧环境, 进而控制 HCCI 燃烧. 其中, 废气再循环、可变压缩比和可变气门正时等措施<sup>[4-6]</sup>在 HCCI 燃烧控制着火时刻和燃烧速率上取得了一定进展.

同时 HCCI 燃烧具有良好的燃料适应性, 对现有常规或替代燃料的 HCCI 燃烧研究发现, 燃料的单一物性都无法实现宽负荷运行. 主要表现是高辛烷值燃料不容易压燃, 在低负荷时着火特性差, 燃烧效率低, 排放恶化. 而高十六烷值燃料具有良好的低温自燃着火特性, 低负荷工况有良好的燃烧特性和排放特性, 但是大负荷下着火提前, 容易爆震. 但是近十年的研究普遍认为, 燃料性质及其低温反应特性对 HCCI 的着火时刻与燃烧速率具有关键性作用<sup>[2-3]</sup>. 因此将异辛烷与正庚烷<sup>[7-9]</sup>、LPG 和 DME<sup>[10]</sup> 及甲醇和 DME<sup>[11,12]</sup> 等高辛烷值和高十六烷值的两种燃料掺混, 进行燃料设计以改变燃料性质, 实现负荷的拓展和排放的降低成为相关研究的热点. 这些研究表明, 高

辛烷值燃料的添加对高十六烷值燃料的 HCCI 燃烧具有相位控制作用和负荷拓展的潜力.

现在常见的燃料设计方法大都只是在发动机运转前事先把燃料配制好, 一旦燃料配好, 混合燃料理化特性也就无法改变. 这种固定配比混合燃料在本质上与原有的高辛烷值燃料或者高十六烷值燃料一样, 单调物性往往无法适应变化的 HCCI 发动机工况, 不能发挥混合燃料负荷拓展潜力, 同时导致在负荷拓展与排放控制上顾此失彼.

由于发动机的运行工况是实时变化的, 因而从燃料的物化特性上讲, 要求燃料能够实时适应发动机工况要求, 在宽运转范围内实现高效率 and 低排放. 本文根据燃料设计的思想, 提出了混合燃料比例实时优化的 HCCI 燃烧控制新概念和方法, 利用电控系统在不同工况实时优化高辛烷值燃料(异辛烷)/高十六烷值燃料(正庚烷)比例, 进而实现负荷的拓展、碳氢(HC)和一氧化碳(CO)排放降低. 这种实时燃料设计思想的实现与完善对现有燃料的 HCCI 燃烧在中小功率发动机或者固定式发电机应用将具有实际推动作用.

## 1 实验系统与实验过程

四缸四冲程的高速直喷柴油机改造成 HCCI 燃烧研究型的单缸机, 其技术参数见表 1. 原机第四缸运行 HCCI 燃烧模式, 其他三缸依旧运行柴油机的直喷模式. 整个实验系统如图 1 所示.

本文改变了发动机运行前将燃料比例配好的原有燃料设计思想, 改为在发动机运行当中, 在燃烧之前的进气过程中分别按照各自油量需求将高辛烷值

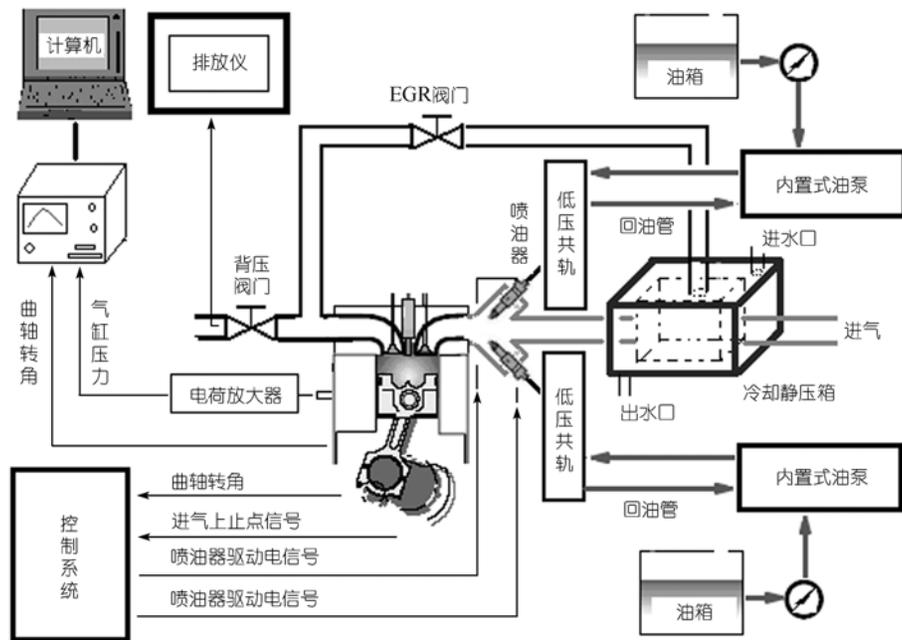


图 1 实验装置系统

燃料和高十六烷值燃料喷入进气道，利用进气冲程和压缩冲程可以实现两种燃料的混合，进而实现任意配比混合燃料的实时预混合 HCCI 燃烧。正庚烷和异辛烷两种基础燃料作为典型的高十六烷值和高辛烷值燃料用于本文的研究，其基本物理化学性质见表 2。

为了实现混合燃料比例实时、精确的改变与控制，本文利用汽油机上通常采用的燃油供给系统和燃油喷射系统来控制异辛烷和正庚烷的喷油量。每个工况的两种燃料混合气的总当量比根据下面公式计算：

$$\phi_{\text{fuel}} = (G_{\text{n-heptane}} \times AF_{\text{n-heptane}} + G_{\text{iso-octane}} \times AF_{\text{iso-octane}}) / G_{\text{air}}$$

其中  $G_{\text{air}}$ ， $G_{\text{n-heptane}}$  和  $G_{\text{iso-octane}}$  分别是空气、正庚烷和异辛烷的质量流量，而  $AF_{\text{n-heptane}}$  和  $AF_{\text{iso-octane}}$  分别是正庚烷和异辛烷的化学当量比。

本文使用开环控制系统，发动机实验确定如下工况：转速 1800 r/min，进气温度  $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，冷却水温度  $(82 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。气缸压力采用 Kistler 的 6125A 型传感器，传感器的输出电荷信号经过 Kistler 5015 型电荷放大器转化成电压信号。每个工况采样 50 个循环，采样频率为 100 kHz，并用计算机存储和分析。未燃碳氢、一氧化碳、二氧化碳和氮氧化物通过 AVL DIGAS4000 气体分析仪进行测量。其中 HC 排放采用加热式氢火焰离子法(HFID)测量，CO 排放采用不分光红外线吸收型分析法(NDIR)测量，NO<sub>x</sub> 测量用加热式化学发光(WCLD)法检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实时控制异辛烷/正庚烷的 HCCI 燃烧特性

在实验设定条件下，异辛烷即使在很高燃空当

表 1 单缸 HCCI 发动机的参数

缸径 × 冲程	排量	压缩比	喷油时刻	进气门开启时刻×关闭时刻	排气门开启时刻×关闭时刻
98 mm × 105 mm	0.782 L	18.5:1	285 BTDC	16 BTDC × 52 ABDC	66 BBDC × 12 ATDC

BTDC—上止点前，ABDC—下止点后，BBDC—下止点前，ATDC—上止点后

表 2 正庚烷(n-heptane)和异辛烷(iso-octane)的物理化学参数

	摩尔质量/g·mol <sup>-1</sup>	密度/g·cm <sup>-3</sup>	沸点/K	低热值/kJ·kg <sup>-1</sup>	辛烷值	纯度/%
正庚烷	100.2	0.682	371.3	44566	0	>97.33
异辛烷	114.2	0.690	372.2	44310	100	>99.79

量比( $\phi$ )条件下也不能着火. 而正庚烷在很稀薄的条件下就容易着火. 图 2 为实验测得的不同异辛烷/正庚烷 HCCI 燃烧运行区域. 可以看出混合燃料的着火主要与混合物中正庚烷的实际当量比有关. 当混合物燃料中的正庚烷的自身可以高温着火, 或者其低温反应具有相当的强度时, 混合燃料才有可能发生着火.

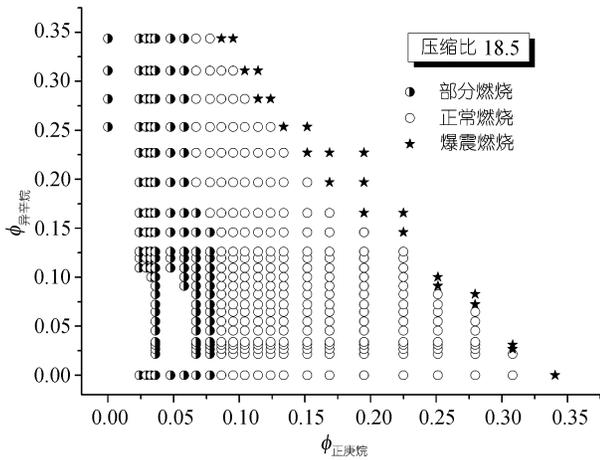


图 2 异辛烷/正庚烷的发动机运行区域(压缩比为 18.5)

根据实验研究, 0.086 燃空当量比的正庚烷处于着火临界状态. 图 3(a)为该当量比条件下的正庚烷与不同当量比的异辛烷混合燃烧情况. 可以看出, 加入少量异辛烷燃烧强度没有大的变化. 从 0.119 燃空当量比开始, 随着异辛烷的增加其混合物 HCCI 燃烧逐渐加强. 当混合燃料中正庚烷的实际当量比增加的时候, 其自身燃烧程度比较充分, 添加少量的异辛烷就导致 HCCI 燃烧强度差别明显, 如图 3(b)所示.

同时, 混合燃料中两种燃料对于 HCCI 燃烧相位的影响值得重视. 从图 3 可以看出, 当正庚烷比例固定时, 不同混合燃料的 HCCI 燃烧压力明显上升阶段对应大致相同的曲轴转角相位, 根据相应放热率可以看出, 其燃烧相位保持大致的相同, 尤其低温反应时刻, 低温放热程度基本保持不变. 而且对比两种正庚烷当量比条件的混合燃料的 HCCI 燃烧可以发现, 随着正庚烷的燃空当量比增加, 异辛烷/正庚烷的燃烧相位一致性更显著; 同时整体性提前, 尤其高温着火时刻表现更加明显.

这种现象说明了两个问题. 首先, HCCI 的低温放热主要来源于正庚烷的低温反应. 而低温反应的程度与相位控制了整个 HCCI 燃烧相位, 正庚烷当量

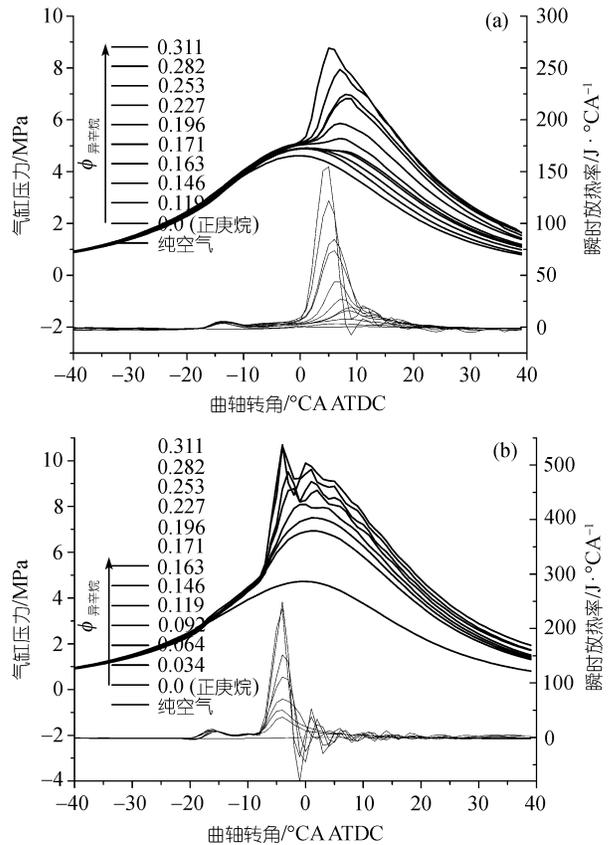


图 3 固定正庚烷添加不同异辛烷的燃烧压力及其放热率 (a)  $\phi_{\text{正庚烷}} = 0.086$ ; (b)  $\phi_{\text{正庚烷}} = 0.195$

比越大, 对混合燃料的燃烧相位影响越明显.

其次, 不能否认异辛烷对 HCCI 的抑制作用. 由于异辛烷的低温反应不活跃, 所产生的自由基少, 反而可能消耗正庚烷低温反应产生的 OH 自由基, 抑制了正庚烷的低温反应; 同时异辛烷的低温放热量少, 但是加入大量异辛烷, 其燃料吸热对缸内温度有一定影响. 因而异辛烷的添加与比例提高, 其混合物 HCCI 燃烧的低温反应必然受到抑制. 在正庚烷当量比固定的条件下, 至少保证其处于着火临界状态, 随着异辛烷的添加导致高温燃烧加强, 使得缸壁温度和缸内残余废气温度升高. 温度的提高促进了碳氢燃料的低温反应. 因而混合燃料低温燃烧又得以改善, 所以异辛烷的加入对 HCCI 的低温燃烧相位和反应程度都没有表现出大的区别, 因而 HCCI 高温着火时刻基本相同.

## 2.2 实时控制异辛烷/正庚烷的 HCCI 排放特性

分别在 0~0.35 当量比范围内, 利用控制系统实时控制异辛烷和正庚烷喷油量及其比例, 可以看到

NO<sub>x</sub> 排放低于 20 ppm, 这主要是由于 HCCI 缸内燃烧温度低引起的. HCCI 的燃烧模式是燃烧温度低的重要原因, 同时爆震的限制使参与燃烧的混合气比较稀薄, 也是不可忽视的原因. 而 CO 和 HC 排放是 HCCI 燃烧面临的主要排放压力.

图 4 为实时控制异辛烷/正庚烷燃料 HCCI 燃烧的 CO 和 HC 排放. 从图中可以看出, 在失火和部分燃烧区, 其 HC 排放因为没有燃烧而恶化, 大约分布在 400~3000 ppm. 异辛烷的增加, 导致未燃 HC 排放大量增加. 在燃烧区 HC 排放与正庚烷的燃空当量比

密切相关, 正庚烷的比例越高, 其 HC 排放就低. 当正庚烷一定时, 随着异辛烷当量比的增加, HC 排放表现出增加趋势, 而随着正庚烷的当量比增加, 异辛烷加入导致排放增加趋势将有所减弱. 而 CO 排放与总当量比关系更为密切, 在爆震区域附近, 由于总当量比高, 其 HCCI 燃烧充分, 燃烧温度高, 因而其 CO 可以更多转化为 CO<sub>2</sub>, CO 排放很低. 而在低当量比或者失火区, 由于燃烧温度低, 分子氧化过程容易中断, 导致 CO 排放生成量很少; 而对于中间当量比区域, 如果正庚烷比例高, 其混合燃料的低温反应相对强烈, 因而导致大量 CO 排放生成, 但是由于缺乏足够高的温度, 其生成的相当部分 CO 又不能完全氧化为最终产物 CO<sub>2</sub>, 因而造成了这一区域 CO 排放相当高.

### 2.3 HCCI 燃烧拓展潜力的探讨

图 5 反映了燃料辛烷值、总当量比与发动机运行范围之间的关系. 可以看出随着辛烷值即异辛烷比例的提高, 其着火越发困难, 加浓混合气才可以着火, 同时可以看出, 随着辛烷值提高, 其爆震的当量比界限有所提高, 但是其变化的趋势不如着火的当量比界限明显. 高辛烷值的混合燃料很难着火燃烧, 而一旦着火由于混合气浓度高, 其燃烧必然剧烈而接近爆震状态, 因而可以看出随着辛烷值的增加, 其运行范围变窄.

以燃空当量比表示, 正庚烷的运行当量比范围在 0.086~0.308 之间, 而异辛烷/正庚烷混合燃料的运行当量比范围在 0.086~0.421 之间, 相对正庚烷有所拓展. 但是从图 5 可以看出, 对于所有不同比例混合

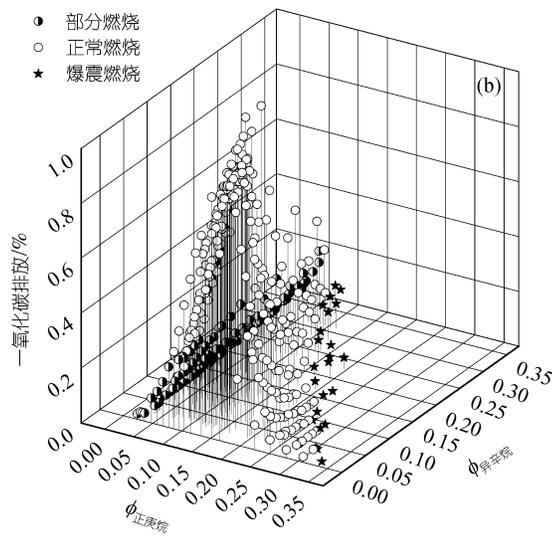
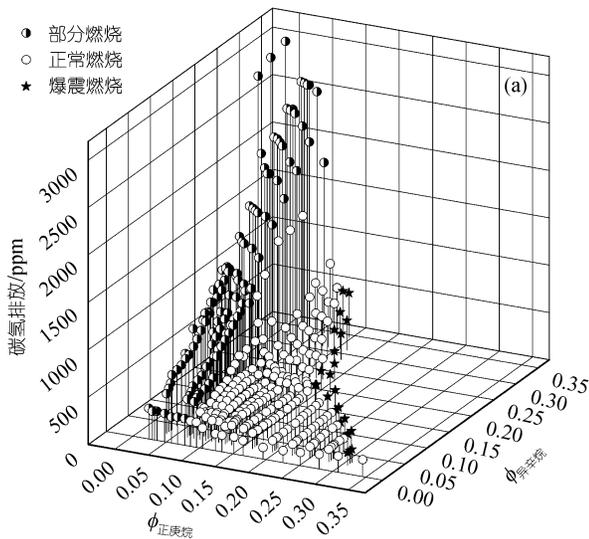


图 4 实时控制异辛烷/正庚烷 HCCI 燃烧 HC 和 CO 的排放  
(a) HC 排放; (b) CO 排放

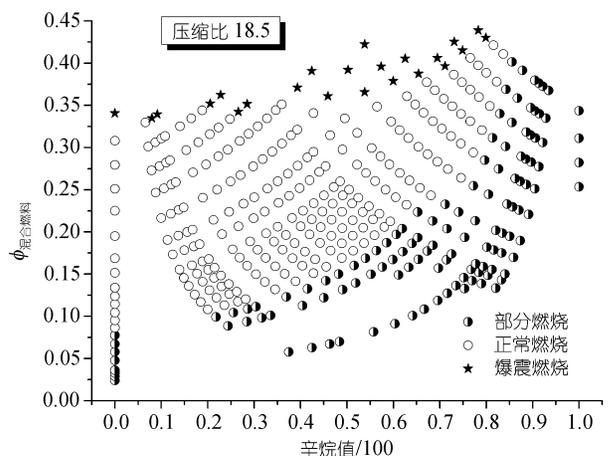


图 5 混合燃料辛烷值对 HCCI 发动机运行区域的影响

燃料,其发生爆震的当量比范围大约在 0.32~0.43 之间.因此,异辛烷/正庚烷 HCCI 负荷进一步拓展的瓶颈在于总当量比不能太高.不论是什么样的辛烷值燃料,只要混合气过浓,一旦着火,就容易发生爆震,因而束缚了负荷拓展.

但是异辛烷/正庚烷混合燃料的实际运行负荷得到了大幅度提高,纯正庚烷的 HCCI 燃烧最大指示压力大约为 0.25 MPa,而辛烷值添加,其混合燃料最大指示压力大约提高 80%,达到 0.47 MPa,为原机的 60%左右.负荷提高主要依赖于高辛烷值混合燃料的燃烧相位滞后.其高温着火时刻在上止点附近,较纯正庚烷压缩负功大大减少.如前分析,正庚烷实际当量比决定了 HCCI 燃烧相位.当正庚烷量实际当量比很小的时候,接近着火界限,其燃烧相位基本上止点附近.大量异辛烷的加入,使得混合燃料高温着火依然控制在上止点附近,同时最大燃烧压力提高,其负荷大大拓展.所以燃烧相位的控制是高比例异辛烷混合燃料拓展负荷的主要原因.

对于相同负荷条件,可出现不同配比方案.图 6 为实时控制在相同负荷条件下的异辛烷/正庚烷燃料燃烧情况.相同负荷下,随着异辛烷的比例增大,缸内最大压力下降,但是其燃烧相位后移.而电控系统的应用可实时、精确控制正庚烷和异辛烷喷油量及其比例,可实现任何配比方案.一般来说,负荷越低,实现该负荷的配比方案越多.负荷越高,可供选择的实现方案减少,并且偏向高辛烷值配比.

2.4 实时优化控制异辛烷/正庚烷的 HCCI 燃烧性能

为了实现负荷拓展和排放降低的双重目标,选取相同负荷条件下不同异辛烷/正庚烷组合中,排放最佳的作为该负荷条件下的优化控制方案.图 7 为不同负荷下优化比例的异辛烷/正庚烷燃料的缸内压力以及放热率曲线.由图 7 可见,随着负荷的增加,最大压力峰值出现的相位并没有提前,而是出现不同程度的滞后.随着负荷的增加,冷焰阶段的放热始点并不象纯正庚烷或固定比例异辛烷/正庚烷混合燃料那样提前,而是出现滞后;负温度系数区(NTC)随负荷增加而延长,主燃烧阶段放热始点随负荷增加而滞后.因而实验证明,通过实时调控正庚烷和异辛烷的油量及其比例,可以控制混合燃料 HCCI 燃烧在上止点附近或者上止点后进行,实现降低压缩负功和拓展负荷运行范围的目的.

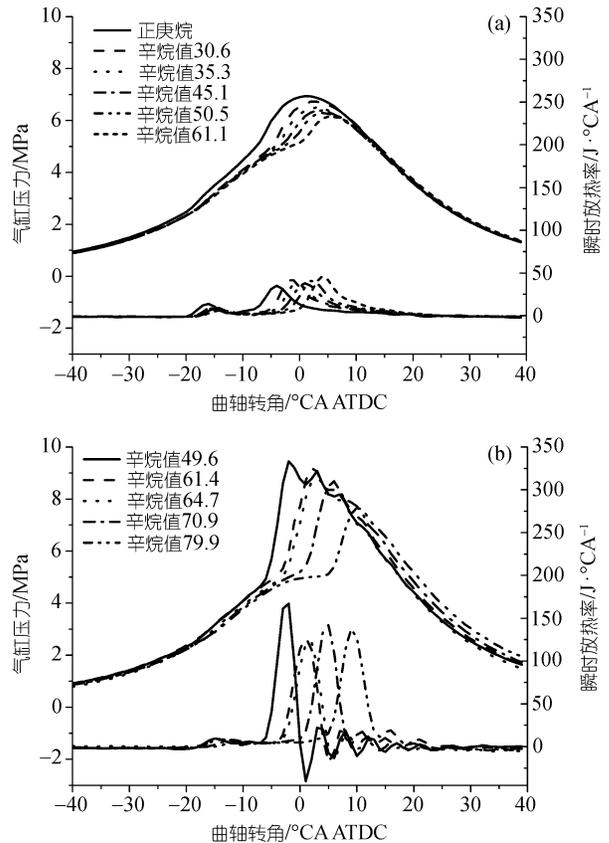


图 6 在相同指示平均压力条件下,不同异辛烷/正庚烷的缸内压力和放热率曲线  
(a) IMEP = 0.20 MPa; (b) IMEP = 0.40 MPa

2.5 实时优化控制异辛烷/正庚烷的 HCCI 排放性能

利用实时优化控制异辛烷/正庚烷,在稳定充分地拓展 HCCI 负荷同时,也取得了良好的排放效果.图 8 比较了实时优化控制混合燃料的 HCCI 燃烧与纯正庚烷以及固定配比异辛烷/正庚烷混合燃料的 HCCI 燃烧的 HC 和 CO 排放.根据实验研究,辛烷值为 60~70 的异辛烷/正庚烷混合燃料的高温着火时刻大约在上止点附近,其压缩负功小,故而这里选取 RON60 作为固定配比燃料的代表.

从图 8(a)可以看出,固定配比燃料的燃烧,HC 排放随着负荷增加而降低.固定比例的混合燃料物化特性固定,无法在全负荷范围内随意控制着火时刻,来满足充分燃烧的条件,因而高辛烷值固定配比的混合燃料,在小负荷范围的 HC 排放相当高;利用优化控制策略调控异辛烷/正庚烷的 HCCI 燃烧,可以控制 HCCI 着火时刻,使得燃烧充分,其 HC 排放随

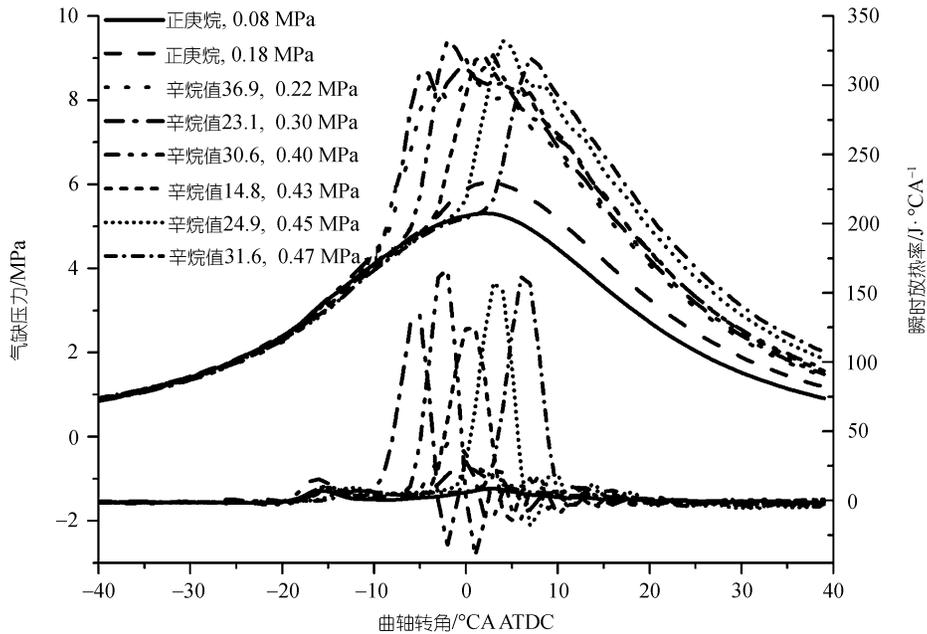


图 7 不同负荷条件下, 优化比例的异辛烷/正庚烷燃料的缸内压力以及放热率曲线

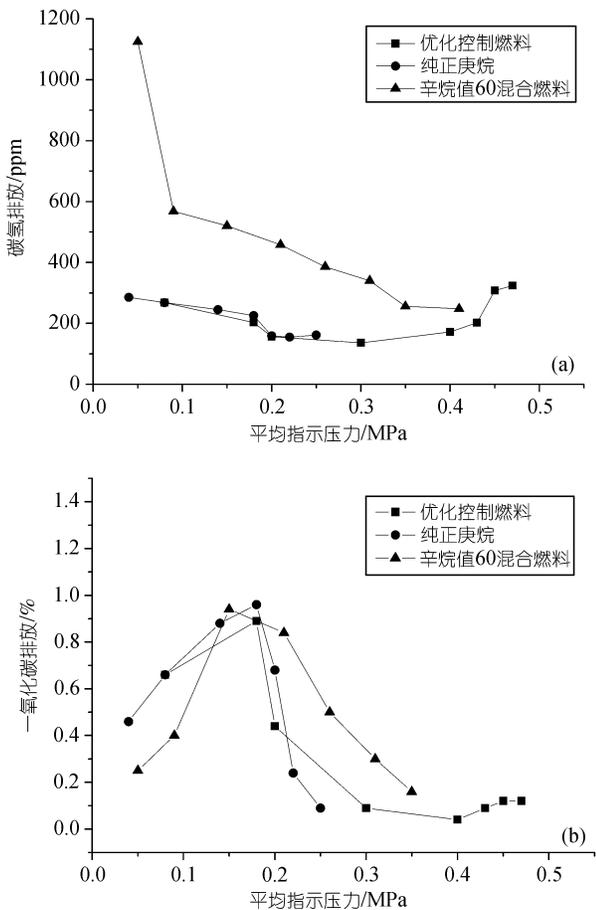


图 8 实时优化控制与固定配比 HCCI 燃烧排放的比较  
(a) HC 排放; (b) CO 排放

随着负荷增加而控制在 150~350 ppm 较低范围内, 就整个运行范围来讲, 实时优化控制方法要取得比固定配比混合燃料普遍良好的 HC 排放性。值得注意的是, 优化实时控制在拓展负荷运行区域的同时, 取得与正庚烷相当的 HC 排放效果。

在图 8(b)中燃料比例实时优化的 CO 排放各个负荷下相对纯正庚烷基本差不多, 而相对于固定配比燃料, 尤其是高辛烷值混合燃料, 其 CO 排放有所降低, 在中间负荷降低比较显著。

### 2.6 实时优化控制与固定比例控制效果比较分析

图 9 是实时优化控制混合燃料的 HCCI 燃烧与纯正庚烷和固定配比 RON60 的 HCCI 燃烧指示热效率  $\eta_i$  的比较。可以看出, 在小负荷范围内  $\eta_i$  很差, 主要是燃烧相对不充分造成的;  $\eta_i$  随负荷增加而增加; 在大负荷范围,  $\eta_i$  维持在一个较高的水平。综合来说, 实时优化控制 HCCI 燃烧在全负荷范围内要比纯正庚烷和 RON60 高。

相对实时优化控制混合燃料的 HCCI 燃烧的  $\eta_i$ , 正庚烷的中低负荷的  $\eta_i$  与之相当, 但是随着负荷增加, 纯正庚烷的  $\eta_i$  显著降低, 主要是由于正庚烷的着火过早, 导致压缩负功过高, 因而效率变差。同时在全负荷范围, 相对实时优化控制 HCCI 燃烧, RON60 固定配比燃料的  $\eta_i$  要普遍偏低。其中在低负荷区域差别要大一些, 主要是由于高辛烷值燃料在小负荷范围内着火性能差, 其燃烧相对不充分造成的。

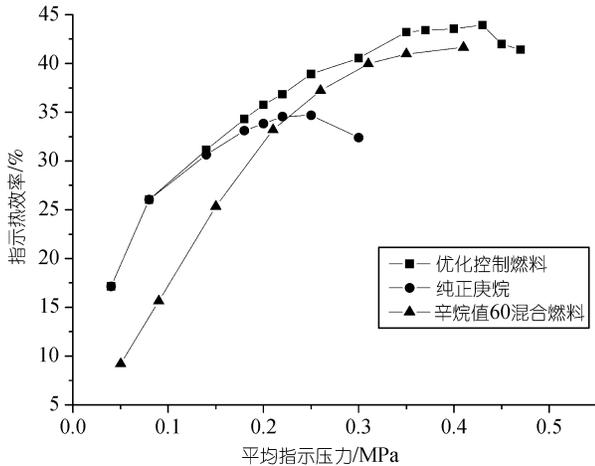


图9 实时优化控制与固定配比 HCCI 燃烧指示热效率比较

### 3 结论

为了实现 HCCI 负荷的拓展和排放控制, 本文 HCCI 单缸发动机研究了异辛烷/正庚烷预混合实时控制的 HCCI 燃烧, 实验结果表明:

( ) 在设定实验条件下, 混合燃料 HCCI 着火以及燃烧相位主要取决于正庚烷实际的燃空当量比。异辛烷的加入对爆震当量比界限有所拓展, 但 HCCI 爆震主要与混合燃料总当量比有关。

( ) 在不同负荷条件下, 实时改变正庚烷和异辛烷的喷油量及其比例, 实现不同负荷条件下 HCCI 的燃烧优化, 确保稳定着火和安全运行, 充分发挥两种燃料拓展负荷的潜力, 相对纯正庚烷负荷运行范围提高了大约 80%。

( ) 相对固定配比混合燃料, 异辛烷/正庚烷燃料实时优化控制 HCCI 燃烧, 同时在整个运行范围内热效率较高, 取得较好的 HC 和 CO 排放效果。

致谢 本工作受国家自然科学基金重点项目(批准号: 50136040)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2001CB209208)资助。

### 参 考 文 献

- 1 Epping K, Aceves S, Bechtold R, et al. The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions. SAE Paper, 2002-01-1923, 2002
- 2 Gen S, Koji O, Tomonori U, et al. The effect of fuel properties on low and high temperature heat release and resulting performance of an HCCI engine. SAE Paper, 2004-01-0553, 2004
- 3 Tanaka S, Ferran A, James C, et al. Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives. Combust Flame, 2003, 132: 219—239[DOI]
- 4 Michael Y A, James W G, Robert D, et al. 1.9-liter four-cylinder HCCI engine operation with exhaust gas recirculation. SAE Paper, 2001-01-1894, 2001
- 5 Yang J L, Todd C, Thomas K. Development of a gasoline engine system using HCCI technology-the concept and the test results. SAE Paper, 2002-01-2832, 2002
- 6 George K, Nick C, Tom M. Demonstration of HCCI using a single cylinder four-stroke SI engine with modified valve timing. SAE Paper, 2000-01-2870, 2000
- 7 Lü X C, Chen W, Huang Z. A fundamental study on the ignition, combustion, and emissions of HCCI engines fueled with primary reference fuels. SAE Paper, 2005-01-0155, 2005
- 8 Yao M F, Zheng Z Q, Zhang B, et al. The effect of PRF fuel octane number on HCCI operation. SAE Paper, 2004-01-2992, 2004
- 9 Shigeyuki T, Ferran A, James C K. A reduced chemical kinetic model for HCCI combustion of primary reference fuels in a rapid compression machine. Combust Flame, 2003, 133: 467—781[DOI]
- 10 Chen Z L, Konno M, Oguma M, et al. Experimental study of CI natural gas/DME homogeneous charge engine. SAE Paper, 2001-01-0323, 2001
- 11 Jumpei O, Daisuke Y, Susumu S, et al. Effects of the compositions of the double componential fuel on the HCCI combustion mechanism. JSAE Paper, 20065213, 2006
- 12 Yao M F, Chen Z, Zheng Z Q, et al. Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol. Fuel, 2006, 85(14): 2046—2056

(2006-04-23 收稿, 2006-07-27 接受)