

# 混合燃料添加剂对均质压燃燃烧影响的试验研究

李超<sup>1</sup>, 纪常伟<sup>1</sup>, 何洪<sup>2</sup>, 沈自友<sup>2</sup>, 何超<sup>1</sup>, 李韞<sup>1</sup>, 马重芳<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 汽车工程系, 北京 100022; 2. 北京工业大学 应用化学系, 北京 100022)

**摘要:** 以一台 4 缸柴油机为原机, 在改造过的第 4 缸进行均质压燃 (HCCI) 燃烧试验, 研究了混合添加剂对 HCCI 燃烧过程的影响。试验结果分析表明, 在不同发动机转速、HCCI 稳定燃烧工况下, 混和添加剂均优于单一添加剂, 即混合添加剂使得着火和放热提前, 燃烧放热率峰值升高, 并且发动机转速越高, 混合添加剂对 HCCI 的燃烧影响越明显。此外, 混和添加剂有助于改善高转速下 HCCI 发动机的失火, 使得发动机在实验转速下工作平稳。

**关键词:** 动力机械工程; 均质压燃; 混合添加剂; 燃烧; 缸压

**中图分类号:** U473.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2007)05-0598-06

## Experimental Investigation on the Effect of Mixed Additives on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion

LI Chao<sup>1</sup>, JI Chang-wei<sup>1</sup>, HE Hong<sup>2</sup>, SHEN Zi-you<sup>2</sup>, HE Chao<sup>1</sup>, LI Yun-zhe<sup>1</sup>, Ma Chong-fang<sup>1</sup>

(1. Department of Automotive Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Department of Applied Chemistry, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** The experimental research of homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion process with mixed additives was carried out by the modified fourth cylinder of a four-cylinder diesel engine. The influence of mixed additives on the HCCI combustion process was investigated. Experimental results indicate that the mixed additives are better than the single additive for HCCI fuel, causing ignition and heat release timings to be advanced and the peak of heat release rate to be increased at different engine speeds and steady operating conditions. Moreover, with the increase of engine speed, the influence of mixed additives on HCCI combustion is more obvious. In addition, mixed additives are beneficial to improving HCCI engine misfire at the high speed, and make the engine operating stable at specified speeds.

**Key words:** power machinery engineering; homogeneous charge compression ignition; mixed additive; combustion; cylinder pressure

随着汽车工业的发展, 能源短缺和环境保护是发动机工业需要面临的两个严峻问题, 所以找到一种新的燃烧方式便成为解决上述问题的最佳途径。均质充量压缩燃烧 (HCCI) 作为一种新型的燃烧方式越来越受到人们的广泛关注, 早在 20 世纪 30 年代, 均质混合气压缩自燃的燃烧方式已经在汽油机上存在, 但它一直被认为是一种异常燃烧现象而被

抑制。在二冲程发动机上真正有意识应用 HCCI 燃烧始于 1979 年 Onishis<sup>[1]</sup>和 Noguchi<sup>[2]</sup>的研究。这种燃烧解决了火花点燃燃烧速度慢的缺点, 其燃烧没有明显的火焰前锋, 是一种在气缸内形成多点着火核心的自燃, 使得着火更加稳定的同时, 减少了火焰传播的距离和燃烧持续期。与传统的压燃式柴油机相比, 它不是扩散燃烧, 压缩燃烧前的燃油和空气

收稿日期: 2005 - 11 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50522202); 国家重点基础研究发展规划项目 (2001CB209201)

是均匀预混和的;其燃烧速率也不受燃油蒸发与空气混和速率影响,而是由其自身化学反应动力学所决定的。HCCI 可以达到像柴油机一样的高效率,适用于汽油、柴油等多种替代燃油,同时  $\text{NO}_x$  和碳烟的排放极低<sup>[3]</sup>。但是,其燃烧速率和着火时刻难于控制、工况范围相对狭窄,以及容易出现失火或爆震现象。针对 HCCI 燃烧存在的问题,在已经明确添加剂对改善 HCCI 着火有明显作用的前提下,在基础燃料(PRF90 - 90%异辛烷 + 10%正庚烷)中添加不同的混和添加剂,进行发动机试验研究,从而找出在不同转速的条件下,改善 HCCI 燃烧的最佳混和添加剂,揭示混和添加剂对改善 HCCI 燃烧的规律。

## 1 试验柴油机改造与试验系统

本试验用发动机为南京 SOFIM8140.47 直列 4 缸涡轮增压直喷柴油机,排气量 2 499 mL,压缩比 18.5:1。保持原发动机第 1、2、3 缸柴油工作方式,改造第 4 缸为 HCCI 燃烧方式。使用前 3 缸的柴油起动并热机,在发动机水温和机油温度稳定在 90 时,第 4 缸根据要求进行 HCCI 试验,此时发动机为柴油-HCCI 混合动力模式。为了实现 HCCI 燃烧,在与第 4 缸对应的进气歧管接近气门处安装燃油喷

嘴,使空气与燃油预混合;拆除原机第 4 缸燃烧室顶部柴油机喷油嘴,在原有位置安装压力传感器,以测量缸压。如图 1 所示。

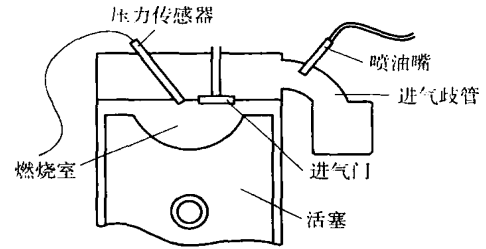


图 1 原机第 4 缸 HCCI 机械改造简图

Fig. 1 Schematic of the HCCI modification of the fourth cylinder of the original engine

HCCI 试验系统主要由喷油系统、数据采集系统和发动机测控系统组成,如图 2 所示。喷油系统包括电子控制单元、曲轴转角传感器、喷油器、油泵、油箱和控制软件组成;数据采集系统包括 Kistler6117 缸压传感器、Kistler5007 电荷放大器、欧姆龙曲轴转角编码仪、AC6111 数据采集板和 Labview 采集程序;发动机测控采用南峰 FST2A 型全自动测控系统。在试验过程中,系统采集第 4 缸的燃烧压力和对应的曲轴转角信号,从而进行缸压、压力升高率、燃烧温度和燃烧放热率等计算和分析。

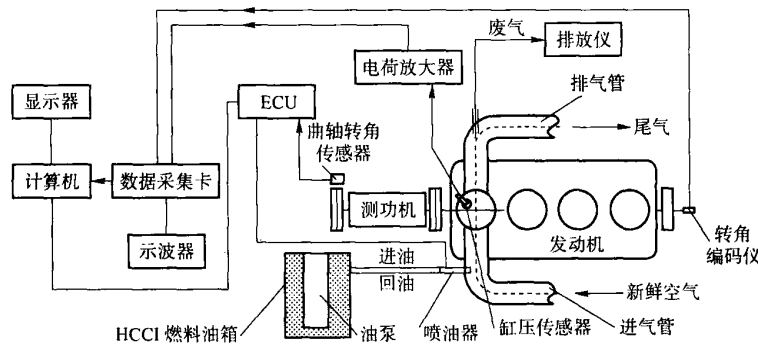


图 2 HCCI 试验系统简图

Fig. 2 Schematic of the HCCI experimental system

## 2 试验燃料、条件及方法

通过对添加剂物理性质的比较和质谱均相受热燃烧分解实验,选择能分解产生更多叔丁氧基自由基的过氧化物作为添加剂。因此,初步筛选出 4 种过氧化物添加剂,每种添加剂按 2% 的质量分数添加到基础燃料 PRF90 中,分别进行发动机 HCCI 燃烧试验,研究结果表明添加剂 DTBP 改善 HCCI 着火能力最强。为了进一步研究添加剂对 HCCI 着火

的影响,本文以 4 种单一添加剂为基础,配制出 3 种混和添加剂,进行 HCCI 试验。4 种添加剂分别为二叔丁基过氧化物 (DTBP)、叔丁基过氧化氢 (TBHP)、过氧化苯甲酸叔丁酯 (TBPB)、过氧化二叔戊基 (DTAP)。将 DTBP 与 TBPB 混和作为混和添加剂 1,记为 M1;DTBP 与 DTAP 混合作为混和添加剂 2,记为 M2;DTBP、TBPB、DTAP 与 TBHP 混合作为混和添加剂 3,记为 M3。主要过氧化物添加剂性质如表 1 所示。

表 1 过氧化物添加剂性质

Tab. 1 The property of peroxide additives

化合物	沸点/	闪点/	受热产生的 自由基 a	受热产生的 自由基 b
TBHP	158	62.0	$(\text{CH}_3)_3\text{CO} \cdot$	$\text{OH}$
DTBP	110	18.3	$(\text{CH}_3)_3\text{CO} \cdot$	$(\text{CH}_3)_3\text{CO} \cdot$

试验条件为水温、机油温度  $90^\circ\text{C}$ ，使发动机转速分别稳定在  $900$ 、 $1200$ 、 $1600$  和  $1800$   $\text{r/min}$ 。根据 HCCI 燃烧负荷及转速范围较窄的特点，定义  $900$   $\text{r/min}$  为低转速工况， $1200$  和  $1600$   $\text{r/min}$  为中等转速工况， $1800$   $\text{r/min}$  为高转速工况。分别将单一添加剂 DTBP 和 3 种混和添加剂按照 2% 的质量分数添加到基础燃料中，配制出 4 种试验燃料：Fuel0 (PRF90 + 2% DTBP)，Fuel1 (PRF90 + 1% DTBP + 1% TBPB)，Fuel2 (PRF90 + 1% DTBP + 1% DTAP)，Fuel3 (PRF90 + 0.5% DTBP + 0.5% TBPB + 0.5% DTAP + 0.5% TBHP)。对以上燃料分别进行发动机 HCCI 实验，通过控制喷油量找出每种试验燃料的工作范围，即在最小喷油量点找出失火点，在最大喷油量点找出爆震点，分别采集并记录不同喷油量下的缸压，通过分析缸压、放热率等，找出不同转速下的相对最优的混和添加剂。

### 3 试验结果和分析

#### 3.1 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响 ( $900$ $\text{r/min}$ )

图 3 为 DTBP 添加剂和 3 种混和添加剂的试验燃料，在水温、机油温度  $90^\circ\text{C}$ ，发动机转速  $900$   $\text{r/min}$ ，循环喷油量  $6.91$   $\text{mg}$  条件下，HCCI 燃烧的缸压—曲轴转角图、峰值压力相对变化率(混和添加剂的峰值压力与 DTBP 添加剂峰值压力之差再除以 DTBP 添加剂的峰值压力)、压力升高率和放热率曲线。

从图 3(a) 可以看出，DTBP 添加剂 HCCI 燃料缸压值最小，峰值为  $8.1$   $\text{MPa}$ ，其位置为上止点后  $4^\circ$ ，3 种混合添加剂 HCCI 燃料峰值压力均高于单一添加剂，为上止点后  $2^\circ$ ，着火提前；从图 3(b) 可以看出，M1、M2 和 M3 的峰值压力与 DTBP 的峰值压力相比升高幅度分别为  $1.1\%$ 、 $3.2\%$  和  $4.8\%$ 。从图 3(c) 可以看出，M1 峰值压力最小。从图 3(d) 可知，M1 放热率略小，但放热提前，M2 和 M3 放热相对滞后。由此可见，在发动机低转速工况，混合添加剂峰值压力和放热率增加，位置前移，证明混合添加剂更有利于改善 HCCI 着火。比较 3 种混和添加剂，其缸压和放热率峰值变化差别不大，但 M1 放热

率峰值明显前移且爆震程度略小于其他两种混和添

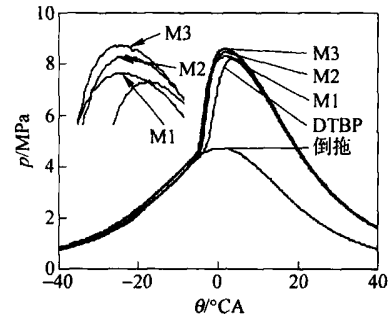
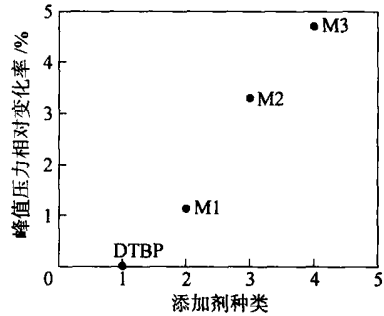
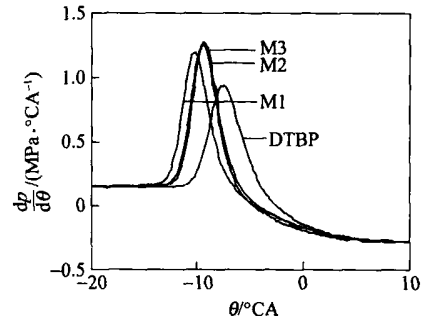
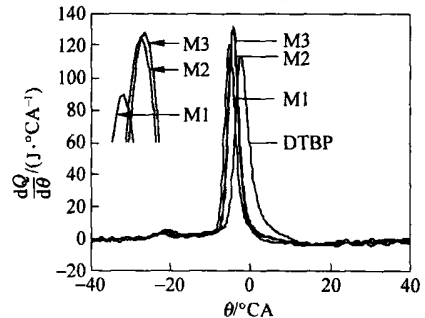
(a)  $p-\theta$  曲线  
(a) Curves of  $p-\theta$ (b) 峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系  
(b) Relations between pressure peak variety rates and different additives(c)  $dp/d\theta-\theta$  曲线  
(c) Curves of  $dp/d\theta-\theta$ (d)  $dQ/d\theta-\theta$  曲线  
(d) Curves of  $dQ/d\theta-\theta$ 

图 3 在  $900$   $\text{r/min}$  下 HCCI 燃烧的  $p$ 、 $dp/d\theta$ 、 $dQ/d\theta$  曲线及峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系

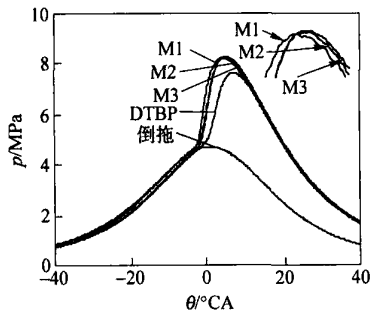
Fig. 3 Curves of  $p$ 、 $dp/d\theta$  and  $dQ/d\theta$  and relations between pressure peak variety rates and different additives at  $900$   $\text{r/min}$  for HCCI combustion

添加剂。从添加剂改善着火时刻的角度看, M1 优于 M2 和 M3。

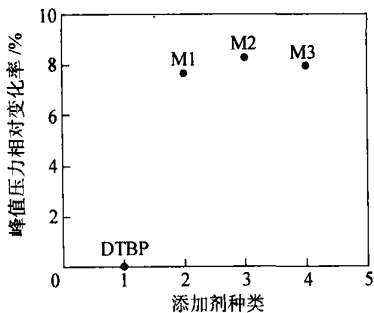
### 3.2 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响(1 200 r/min)

图 4 为 DTBP 和 3 种混和添加剂, 发动机 1 200 r/min, 试验条件不变, HCCI 燃烧的缸压—曲轴转角、峰值压力相对变化率、压力升高率和放热率曲线。

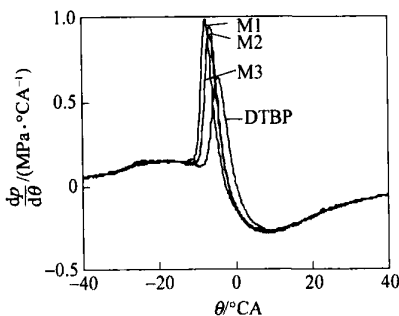
从图 4 可以看出, 3 种混合添加剂对 HCCI 燃烧的影响仍然优于 DTBP, 相对缸压增大且峰值位置前移, 着火提前, 压力升高率减小, 有利于改善 HCCI 着火和燃烧, 其峰值压力相对升高幅度均高于 7%, 这说明在较高转速发动机工况下, 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响更明显。其中 M1 放热最提前, 因此在该工况下, M1 仍然优于其他两种混合添加剂。



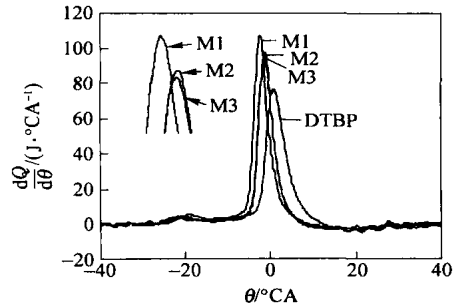
(a)  $p-\theta$  曲线  
(a) Curves of  $p-\theta$



(b) 峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系  
(b) Relations between pressure peak variety rates and different additives



(c)  $dp/d\theta-\theta$  曲线  
(c) Curves of  $dp/d\theta-\theta$



(d)  $dQ/d\theta-\theta$  曲线  
(d) Curves of  $dQ/d\theta-\theta$

图 4 在 1 200 r/min 下 HCCI 燃烧的  $p-\theta$ 、 $dp/d\theta$ 、 $dQ/d\theta$  曲线及峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系

Fig. 4 Curves of  $p-\theta$ ,  $dp/d\theta$ ,  $dQ/d\theta$  and relations between pressure peak variety rates and different additives at 1 200 r/min for HCCI combustion

### 3.3 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响(1 600 r/min)

图 5 为 DTBP 添加剂和 3 种混和添加剂的试验燃料, 发动机转速为 1 600 r/min, 与 900 r/min 完全相同的试验条件下, HCCI 燃烧的缸压—曲轴转角、峰值压力相对变化率、压力升高率和放热率曲线。

从图 5 可以看出, 3 种混合添加剂对 HCCI 燃烧的影响明显优于单一 DTBP 添加剂, 峰值压力明显提高, M1 的峰值压力最大, 相对单一添加剂提高了将近 24%, 峰值压力位置为上止点后 5°, 与单一添加剂相比, 着火提前程度最大。其压力升高率和放热率也明显高于其他两种混合添加剂。从实验结果可以看出, 在高转速发动机工况下, 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响最明显, 压力升高最多, 放热率相对较大且有充分地放热时间, 可见, M1 明显优于其他两种混合添加剂。

通过比较各个转速下的缸压—曲轴转角图, 如图 3(a)、图 4(a) 和图 5(a) 所示, 可以看出, 在相同机油温度和水温, 同样循环喷油量的条件下, 随着发动机转速的升高, 单一添加剂峰值压力和放热率明显下降, 而混和添加剂的峰值压力和放热率在发动机各个转速工况基本保持不变。这说明混合添加剂在发动机低速工况下, 可以产生较大的缸压和放热率; 在高转速工况下, 缸内压力和放热率保持基本不变, 缸内燃烧基本不受发动机转速的影响, 从而使得发动机工作稳定。

### 3.4 混和添加剂对 HCCI 燃烧的影响(1 800 r/min, 循环喷油量为 6.26 mg)

图 6 为配有单一 DTBP 添加剂和 3 种配有混和

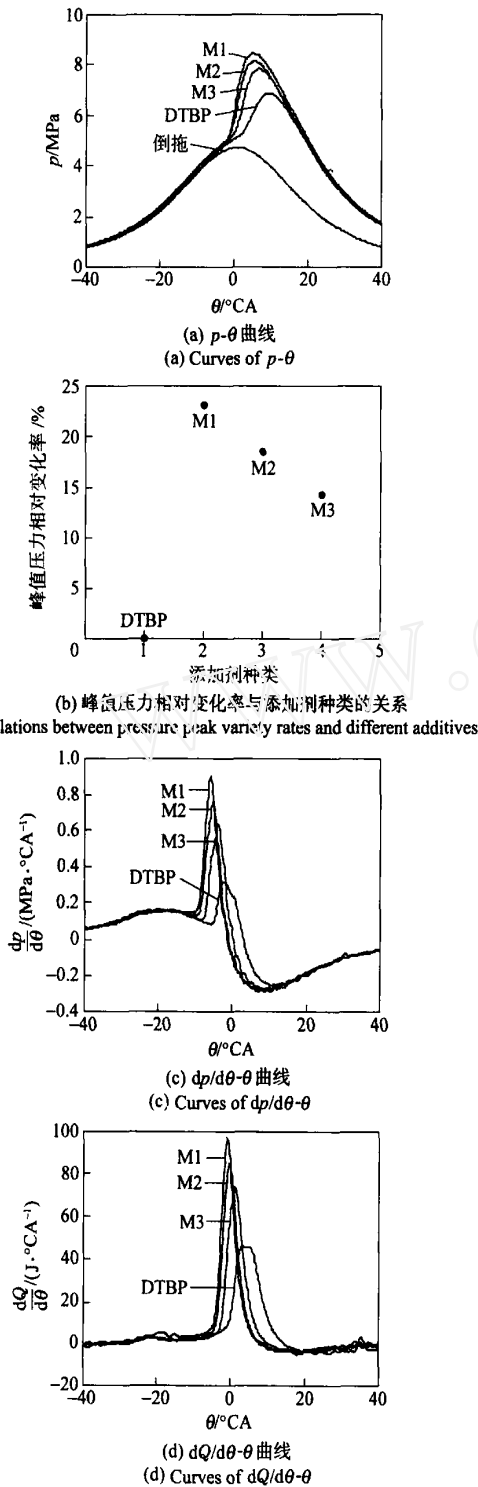


图 5 在 1 600 r/min 下 HCCI 燃烧的  $p$ 、 $dp/d\theta$ 、 $dQ/d\theta$  曲线及峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系

Fig. 5 Curves of  $p$ 、 $dp/d\theta$ 、 $dQ/d\theta$  and relations between pressure peak variety rates and different additives at 1 600 r/min for HCCI combustion

添加剂的试验燃料,发动机转速为 1 800 r/min,与

900 r/min 完全相同的试验条件下,循环喷油量为 6.26 mg, HCCI 燃烧的缸压 - 曲轴转角、峰值压力相对变化率和放热率曲线。

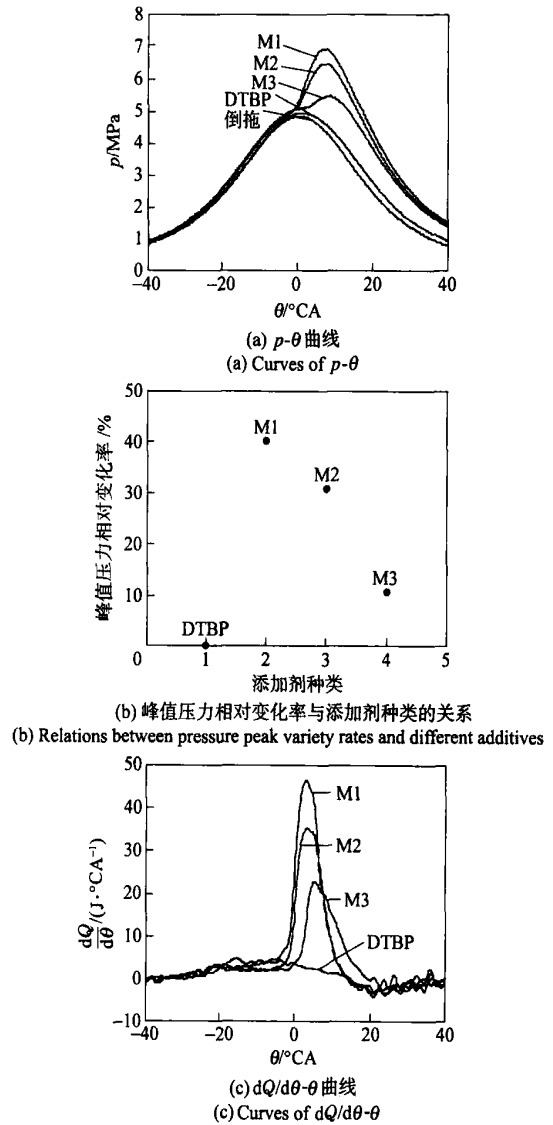


图 6 在 1 800 r/min 下 HCCI 燃烧的  $p$ 、 $dQ/d\theta$  曲线及峰值压力相对变化率与添加剂种类的关系

Fig. 6 Curves of  $p$ 、 $dQ/d\theta$  and relations between pressure peak variety rates and different additives at 1 800 r/min for HCCI combustion

从图 6 可以看出,在高转速(1 800 r/min)下,单一 DTBP 添加剂缸压曲线几乎和发动机倒拖曲线重合,此时的喷油量使得使用单一 DTBP 添加剂的 HCCI 燃烧处于失火状态,而使用其他 3 种混和添加剂的 HCCI 燃烧均不失火,表明混合添加剂有助于改善 HCCI 燃烧在高转速下的失火。从图 6 可知,混合添加剂 M1 的缸压峰值和放热率峰值也为 3 种混合添加剂中最大,且放热时刻最提前,说明

M1 混和添加剂 HCCI 燃烧着火最提前。

综上所述,比较 3 种混合添加剂和单一添加剂 DTBP, M1 对 HCCI 燃烧的影响最明显,最有助于 HCCI 着火,为最优的混合添加剂。

#### 4 结论

通过研究混和添加剂对 HCCI 燃烧过程的影响,可以得出如下结论:

1) 混和添加剂与单一添加剂相比可以更好地改善 HCCI 燃烧,添加剂可以使得燃烧提前,压力和放热率峰值增大,从而提高发动机功率和扭矩。

2) 分别在低、中、高发动机转速工况下, M1 (DTBP 与 TBPB 两者混和添加剂) 对 HCCI 燃烧影响明显,且随着发动机转速越升高,影响越明显,可见, M1 混和添加剂可以更好地改善 HCCI 燃烧和发

动机性能。

3) 混和添加剂与单一添加剂相比,相同的循环喷油量,混和添加剂可以使缸压和放热率在各个发动机转速工况下保持相对不变。特别是 HCCI 发动机工作在高转速工况下,混和添加剂可明显改善燃烧失火,保证发动机稳定工作,达到拓宽 HCCI 发动机转速范围的目的。

#### 参考文献(References)

- [1] Onishi S, Hong Jo S, Shoda K, et al. A new combustion process for internal combustion engines[C]. SAE Paper, 1979, 790501.
- [2] Noguchi M, Tanaka T, Takeuchi Y, et al. A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion[C]. SAE Paper, 1979, 790840.
- [3] Dibble R, Aceves S M, et al. Current research in hcci combustion at uc berkeley and LLNL[C]. SAE Paper, 2001, 012511.