

正庚烷均质压燃发动机燃烧循环变动

薛 乐,张春化,王 娇

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究均质压燃(HCCI)发动机燃烧的循环变动,在 1 台改装的 HCCI 发动机上进行了试验。通过改变进气温度、混合气浓度和运行转速等参数,研究了参数变化对正庚烷 HCCI 燃烧的影响。研究表明:随着过量空气系数从 1.9 增加到 2.7,峰值压力的平均值从 6.69 MPa 降低到 5.50 MPa,进气温度从 30 ℃增加到 70 ℃,峰值平均压力从 5.49 MPa 增加到 6.44 MPa,所对应的曲轴转角位置也有所提前;随着转速的提高,峰值压力也有所增加,并且出现的时刻都有所提前;在转速为 1 500 r/min 条件下,进气温度为 30 ℃、过量空气系数为 1.9 时的循环变动系数最小,进气温度在 50 ℃、过量空气系数为 2.1 时的循环变动最小,分别为 2.89% 和 1.68%。可以得出最优的进气温度、混合气浓度等,使得 HCCI 发动机的燃烧稳定性得到保证。

关键词:汽车工程;内燃机;均质压燃;正庚烷;循环变动

中图分类号:U464.178

文献标志码:A

Cyclical variation of an HCCI engine fuelled by n-heptane

XUE Le, ZHANG Chun-hua, WANG Jiao

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the cyclical variation of HCCI engines, a modified HCCI engine was used in the experiment. By changing intake temperature, mixture concentration and engine speed, the effects of parameter variation on n-heptane HCCI combustion were studied. The results show that when λ changes from 1.9 to 2.7, the mean value of peak pressure decreases from 6.69 MPa to 5.5 MPa, the intake temperature increases from 30 ℃ to 70 ℃, the mean peak pressure increases from 5.49 MPa to 6.44 MPa and the corresponding crank angles are also advanced. With the increase of engine speed, the peak pressures increase and their timings are also advanced. Under the condition that the engine speed is 1 500 r/min, the COV is the smallest when the intake temperature is 30 ℃ and λ is 1.9, and when the intake temperature of 50 ℃ and λ of 2.1, which are 2.89% and 1.68%, respectively. Therefore, the optimal intake temperature and mixture concentration can be obtained to ensure the combustion stability of HCCI engines. 1 tab, 7 figs, 8 refs.

Key words: automobile engineering; internal combustion engine; HCCI; n-heptane; cyclical variation

0 引言

在节能减排形势日益严峻的形势下,人们日益追求低能耗和高效率的发动机。均质充量压缩着火(homogeneous charge compression ignition, HCCI)是一种新型的燃烧方式,它将柴油机的压燃方式和汽油机的均质混合气相结合。由于无节流损失,均质混合气燃烧迅速,而且燃烧温度也相对较低,因此效率高、几乎无颗粒物和 NO_x 排放,得到广大研究者的青睐。尽管如此,HCCI 的燃烧过程却不是稳定,众多条件可以影响到均质压燃发动机的稳定运行。Maurya 等在固定转速下对 HCCI 燃烧的循环变动进行了研究,并对峰值放热率等参数做出了影响规律曲线,结果表明随着进气温度的升高和混合气变浓,循环变动系数增加^[1],Li 等在 1 个单缸发动机上对压缩比、进气压力等因素对循环变动的影响做了研究,发现循环变动受着火相位的影响很大,着火相位推迟太久将带来更大的循环变动^[2];彭亚平等研究了乙醇均质压燃的燃烧循环变动规律,并引入适量 EGR(废气再循环),从而更好地改善了燃烧速率,降低了压力升高率,更为突出 HCCI 发动机的优势所在^[3];郑尊清等在 1 台单缸机上进行了不同辛烷值燃料的均质压燃燃烧的循环变动试验,发现在恒定的平均指示压力下,随着辛烷值的提高,循环变动越来越明显,尤其是辛烷值较高时,高转速下循环变动十分明显^[4];王志等对多缸情况下不同缸的均质压燃燃烧循环变动做了研究^[5];吴晗等关于 EGR 对 HCCI 发动机的研究表明,EGR 对均质压燃发动机性能和运行范围有重要影响^[6]。

正庚烷作为一种基础参考燃料,其性质与柴油具有可比性,十六烷值较高。但挥发性比柴油好很多,因此可以用作均质压燃发动机的试验燃料,以代替研究柴油的均质压燃燃烧。为此,本文在 1 台由双缸机改造的 HCCI 发动机上实现了 HCCI 燃烧循环变动的试验,并分析了可变参数对循环变动的影

1 试验装置及方法

HCCI 试验发动机由 1 台双缸柴油机改造而成,1 个缸用来作为启动,另 1 个缸作为 HCCI 模式运行。试验发动机主要参数见表 1。

试验装置如图 1 所示。为了能够正常实现均质压燃模式的运行,2 个缸 A、B 有着独立的进排气系

表 1 试验发动机主要参数
Tab. 1 Main parameters of test engine

名称	参数
燃烧室形状	ω 型
压缩比	17 : 1
缸径/mm	100
冲程/mm	105
进气门开启角(BTDC)/°A	17
进气门关闭角(ABDC)/°A	43
排气门开启角(BBDC)/°A	47
排气门关闭角(ATDC)/°A	17

统。B 缸采用进气道喷射方式形成均质混合气,喷油器安装在进气门上游 60 cm 处。喷油器由开发的 1 个控制单元控制,根据喷油器的特性,通过调节喷油脉宽,可以精确控制燃料的喷射量。根据实测的空气量和燃料的理论空燃比,即可计算出混合气过量空气系数。试验时,A 缸以柴油机压燃模式运行,起动发动机并暖机;待发动机温度正常后,切断 A 缸柴油供给的同时,控制 B 缸的电控单元开始 HCCI 燃料喷射,发动机即转入 HCCI 模式运行;待 HCCI 模式运行平稳后,连续测量 60 个工作循环,压力传感器采集信号后,经电荷放大器传输至 CB-566 型燃烧分析仪,每隔 0.25 °C A 采集一次缸压信号,随后处理分析,然后输出数据。图中 ECU 为中央电控单元。

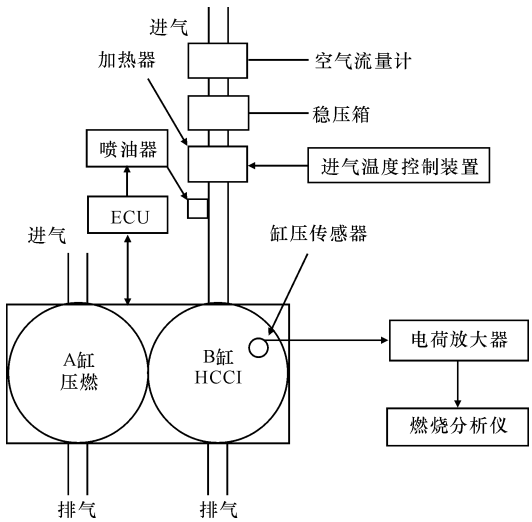


图 1 试验装置
Fig. 1 Test apparatus

峰值压力的平均值和峰值压力的分布可由燃烧分析仪直接得到。压力循环变动系数 COV 按下式计算。

$$I_{COV} = \frac{\delta p}{p_{max}} \times 100\%$$

(1)

式中: I_{COV} 为压力循环变动系数的值; δ_p 为峰值压力平均值的标准偏差; p_{max} 为峰值压力的平均值。

把测得的 $p-\varphi$ 转换为 $p-V$ 图, 积分可得指示功 W_i , 就可计算得到指示功率 P_i 。

2 试验结果与分析

2.1 进气温度对循环变动的影响

图 2、图 3 给出了转速 $n=1\ 200\ \text{r/min}$ 和过量空气系数 $\lambda=2.3$, 进气温度改变时的循环变动。从图 2 可以看出, 随着进气温度的升高, 峰值压力 p_{max} 有明显升高; 进气温度 $T_{\text{in}}=50\ ^\circ\text{C}$ 时的循环变动系数要低于其他温度的。这是因为随着进气温度的上升, 缸内化学反应速率增加, 从而燃烧持续期也较短, 但进气温度持续上升则造成爆震趋势增强, 燃烧过早发生, 放热较快, 前一循环又对后一循环有所影响, 从而造成循环变动系数再次变大^[7]。 p_i 为指示功率。

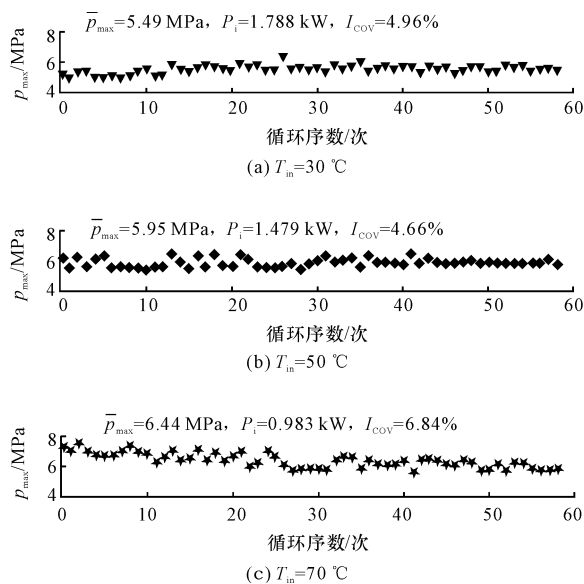


图 2 峰值压力随进气温度的变化

Fig. 2 Peak pressure change with intake temperature change

从图 3 可以看出, 峰值压力百分比 R_θ 随曲轴转角 θ 的分布也较为集中, 且随着进气温度的升高, 峰值压力出现的时刻也逐渐前移。随着进气温度不断增加, 爆震燃烧的趋势有了一定的上升, 在较高温度时, 峰值压力的分布明显前移, 此时着火时刻也有所提前, 前循环的爆震燃烧也会影响到下一循环的运转质量。因此在 $70\ ^\circ\text{C}$ 的时候循环变动系数较高, 而且峰值压力分布也较为分散。而相对来说在进气温度为 $50\ ^\circ\text{C}$ 时, 峰值压力的分布较为集中, 这时反应速度较快但不至于发生爆震现象, 因此可作为较为

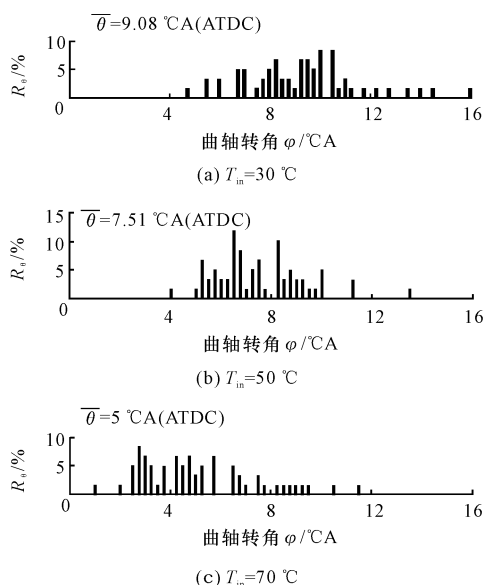


图 3 峰值压力分布随进气温度的变化

Fig. 3 Peak pressure distribution change with intake temperature change

合适的进气温度。 $\bar{\theta}$ 为峰值压力出现时刻对应的曲线转角的平均值。

2.2 混合气浓度对循环变动的影响

下页图 4 和图 5 给出了转速 $n=1\ 500\ \text{r/min}$ 、进气温度 $T_{\text{in}}=30\ ^\circ\text{C}$ 条件下, 不同混合气浓度时的循环变动。从图 4 可以看出, 随着过量空气系数变小, 混合气变浓, 峰值压力逐渐升高, 但循环变动系数却逐渐减小。随着混合气变浓, 反应速度有所加快, 活性基的生成加速, 加之正庚烷本身的自燃性较好, 燃烧速率加快, 从而放热速率加快, 所以峰值压力平均值 \bar{p}_{max} 有较大的增长。另外, 整个放热过程比较集中, 所以燃烧的稳定性比较好。由于正庚烷的自燃性较好, 所以过浓的混合气会引起发动机爆震燃烧, 燃烧质量下降, 因此混合气不宜过浓。

从图 5 可以看出, 混合气较浓时, 峰值压力出现的时刻有较大的提前。这是由于单位体积的混合气分子有效碰撞的机会加大, 反应速率增大, 生成活性基速度加快, 从而着火时刻有所提前, 因此使得峰值压力的出现也有所提前; 浓混合气条件下峰值压力的分布也非常集中, $\lambda=1.9$ 时主燃烧基本上集中在 $6\ ^\circ\text{CA}\sim 11\ ^\circ\text{CA}$ 之间, 而且主要的燃烧都发生在压缩上止点之后, 这也正体现了均质压燃燃烧放热集中的特点, 在一定程度上有助于提高有效的热效率。另外可以看出, $\lambda=1.9$ 时峰值平均压力对应的相位比 $\lambda=2.3$ 、 $\lambda=2.7$ 时提前较多, 而且分布的比例在整个过程中前半段较大, $\lambda=2.3$ 、 $\lambda=2.7$ 时, 则对应

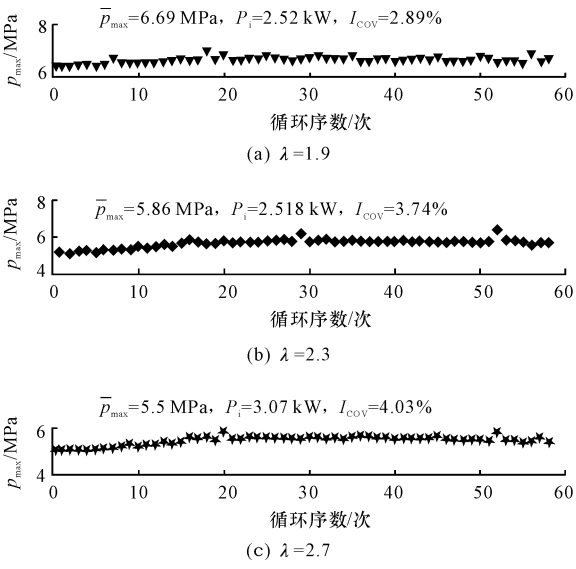


图 4 峰值压力随 λ 的变化

Fig. 4 Peak pressure change with the change of λ

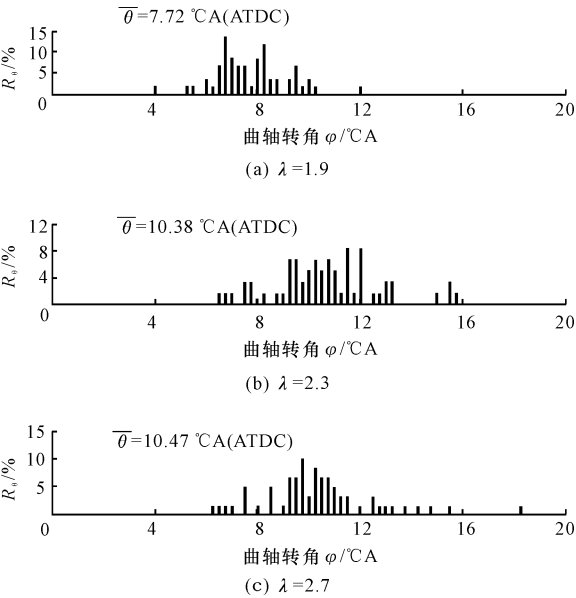


图 5 峰值压力分布随 λ 的变化

Fig. 5 Peak pressure distribution change with the change of λ

10 °CA 以后所占的比例较大。

2.3 转速对循环变动的影响

图 6、图 7 给出了在过量空气系数 $\lambda=2.1$ 和进气温度 $T_{in}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,不同转速时的循环变动。由图 6 可知,随着发动机转速从 1 200 r/min 增加到 1 500 r/min,循环变动系数下降到 1.68%。转速的提高使得压缩冲程所占的时间有所减小,因此缸内混合气散失的热量也会有所减小,从而使得混合气温度升高,燃烧的反应速率增大,从而有效地有助于着火之前的准备过程^[8]。在较合适的进气温度 $T_{in}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,转速为 1 500 r/min 时得到了很好的

结果,循环变动系数仅为 1.68%,同时峰值平均压力和指示功率也最高。

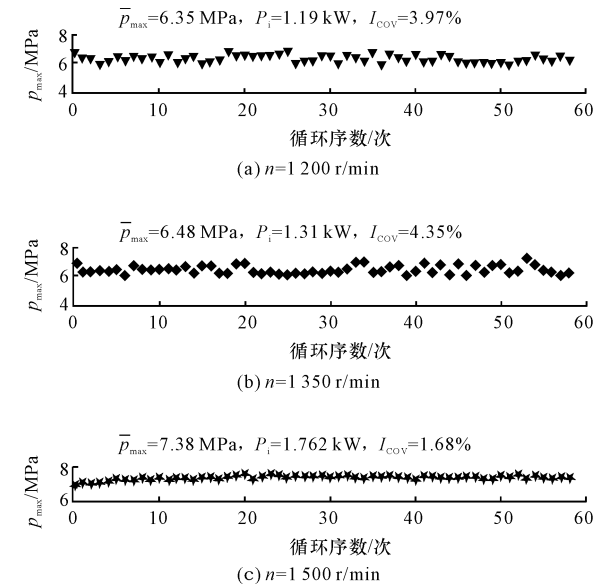


图 6 峰值压力随发动机转速的变化

Fig. 6 Peak pressure change with the change of engine speed

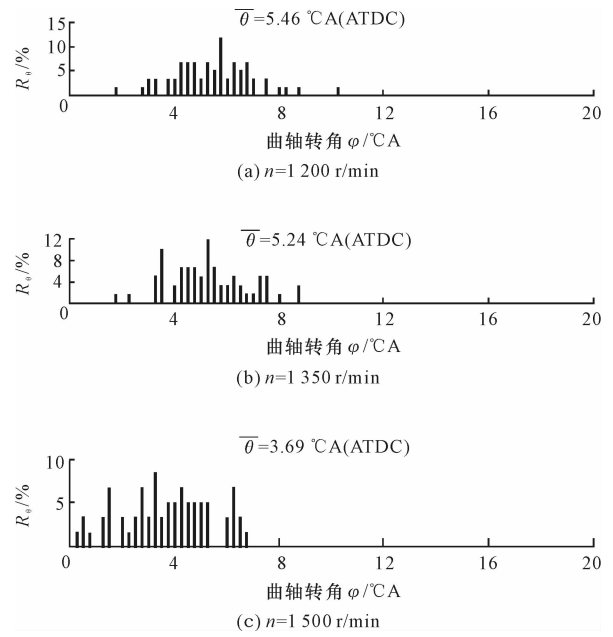


图 7 峰值压力分布随发动机转速的变化

Fig. 7 Peak pressure distribution with the change of engine speed

从图 7 可以看出,和 $n=1\text{ }200\text{ r/min}$ 相比, $n=1\text{ }500\text{ r/min}$ 时的峰值压力平均时刻将近提前了近 2 °CA,达到 $\bar{\theta}=3.69\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。显然,发动机转速升高的情况下,混合气有在上止点之前着火趋势,这将对动力性的提高不利。一方面,转速的提高使得热量散失有所减小,缸内的混合气流动加快,缸内温度升高使燃烧加快;另一方面,提高转速会降低发动机

的充气效率,在一定程度上降低了燃烧的总放热量,也就阻碍了着火时刻的提前。综合这两方面的因素,从而出现峰值压力的分布情况的百分比较为均匀,很少出现某一时刻放热极大的现象。

3 结 语

(1)进气温度 T_{in} 在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,峰值压力随着进气温度的升高而增大,循环变动系数在进气温度 $T_{in}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候最小,此温度为最佳。随着进气温度升高,峰值压力的分布也整体前移。

(2)混合气浓度 λ 在 $1.9\sim 2.7$ 时,随混合气变浓,峰值压力分布较为集中,燃烧过程较为集中,峰值压力也逐渐变大,循环变动系数逐渐减小,燃烧稳定性变好。

(3)转速 n 在 $1\,200\sim 1\,500\text{ r/min}$ 时,随转速升高时,循环变动变小,峰值压力的分布也整体明显前移,分布也变得较为均匀,峰值压力也有所提高。高转速条件下,在较低的进气温度时,即可得到较小的压力循环变动。

(4)由于正庚烷抗爆性较差,对发动机循环稳定性有一定影响,后续研究应积极探索混合燃料 HCCI 发动机的循环变动情况,同时利用新型技术以提高 HCCI 发动机运行的稳定性。

参考文献:

References:

- [1] Maurya R K, Agarwal A K. Statistical analysis of the cyclic variations of heat release parameters in HCCI combustion of methanol and gasoline[J]. Applied Energy, 2012, 89(1):28-236.
- [2] Li H L, Neill W S, Chippior W L. An experimental investigation of HCCI combustion stability using n-heptane[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2012, 134(2):1-8.
- [3] 彭亚平,郭英男,黄为钧,等.乙醇燃料均质压燃的燃烧循环变动[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(2):301-306.
PENG Ya-ping, GUO Ying-nan, HUANG Wei-jun, et al. Cycle-by-cycle variation of ethanol homogeneous charge compression ignition combustion[J]. Journal of

Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(2):301-306. (in Chinese)

- [4] 郑尊清,尧命发,张波,等.均质压燃的燃烧循环变动试验[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2005,38(6):485-489.
ZHENG Zun-qing, YAO Ming-fa, ZHANG Bo, et al. Cycle to cycle variation experiment of homogeneous charge compression ignition combustion[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2005, 38(6):485-489. (in Chinese)
- [5] 王志,张志福,徐帆,等.多缸汽油 HCCI 发动机燃烧循环变动的研究[J].内燃机工程,2010,31(3):1-6.
WANG Zhi, ZHANG Zhi-fu, XU Fan, et al. Study of cycle variation in a multi-cylinder gasoline HCCI engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(3):1-6. (in Chinese)
- [6] 吴晗,张春化,佟娟娟,等. EGR 对甲醇 HCCI 发动机性能和运行范围的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(5):102-106.
WU Han, ZHANG Chun-hua, TONG Juan-juan, et al. Effect of EGR on performance and operation range of methanol HCCI engine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5):102-106. (in Chinese)
- [7] 陈昊,祁东辉,边耀璋.喷雾特性对生物柴油燃烧和排放特性的影响[J].交通运输工程学报,2009,9(1):40-43.
CHEN Hao, QI Dong-hui, BIAN Yao-zhang. Influence of spray performance on combustion and emission characteristics of biodiesel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1):40-43. (in Chinese)
- [8] 张欣,李从心,胡准庆.掺氢比对低热值气体发动机燃烧性能的影响[J].中国公路学报,2011,24(5):107-112.
ZHANG Xin, LI Cong-xin, HU Zhun-qing. Effect of hydrogen addition fraction on combustion performance of low heat value gas engine[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5):107-112. (in Chinese)