

DOI: 10.7652/xjtuxb201405008

汽油机双火花塞轻度均质稀燃特性的测试分析

尚会超¹, 张力¹, 陈春望², 谢德云²

(1. 重庆大学机械工程学院, 400044, 重庆; 2. 重庆建设摩托车股份有限公司, 400050, 重庆)

摘要: 在单火花塞均质预混燃烧室结构的基础上增设双火花塞点火系统,通过改造电控燃油喷射系统实现了双火花塞轻度均质稀燃模式的稳定运行。通过设置双火花塞化学当量比(过量空气系数 λ 为1)、双火花塞轻度均质稀燃(λ 为1.1)和单火花塞化学当量比(λ 为1)的状态,测试了双火花塞对轻度均质稀燃过程及其燃烧特性的影响。研究表明:双火花塞在加速缸内稀燃的总体效应主要体现在10%~50%累积燃烧放热的前期燃烧期;轻度均质稀燃(λ 为1.1)状态的双火花塞燃烧放热和循环变动特性仍明显优于单火花塞化学当量比状态;在低负荷非稳定燃烧工况,双火花塞在加速缸内燃烧过程、减小循环变动率和提高燃烧稳定性的效果上更加突出。台架测试表明:在稀燃运行区域,双火花塞轻度均质稀燃模式的燃油经济性较单火花塞化学当量比燃烧模式提升了3%~6%,并有助于降低有害物的排放。

关键词: 双火花塞点火;稀薄燃烧;燃烧放热率;循环变动

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)05-0043-07

Experimental Analysis of Mild Homogeneous Lean Combustion for Gasoline Engine with Dual-Spark Plug

SHANG Huichao¹, ZHANG Li¹, CHEN Chunwang², XIE Deyun²

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Jianshe Motorcycle Company Limited, Chongqing 400050, China)

Abstract: A dual-spark plug ignition system is assembled on a gasoline engine ignited by single-spark plug with homogeneous premixed combustion. By reconstructing electronic control fuel injection system, it is observed that the engine can be steadily operated in a mild homogeneous lean burn mode. To further investigate the effect of double-spark plug ignition on mild homogeneous lean combustion, three running states, dual-spark plug with chemical equivalent ratio ($\lambda=1$), dual-spark plug with lean mixture ($\lambda=1.1$) and single-spark plug with equivalent ratio ($\lambda=1$), are tested for character diagnosis of the combustion. The overall effect of in-cylinder combustion acceleration due to the double-spark plug ignition is mainly reflected in the early combustion stage of 10%-50% mass fraction burned; and the heat release together with the cyclic variation of the double-spark plug with lean mixture is superior to the single-spark plug with stoichiometric mixture obviously. And the effect of combustion process accelerating in the cylinder, cyclic variation rate reducing as well as the combustion stability improving are much more outstanding for the double-spark plug ignition, especially under the unstable combustion condition with lower load. Bench test also shows that the dual-spark plug lean burn mode enables

收稿日期: 2013-09-25。 作者简介: 尚会超(1986—),男,博士生;张力(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 重庆市科技攻关计划重点项目(CSTC2007AA6006-6)。

网络出版时间: 2014-02-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140226.1158.011.html>

to improve fuel economy by 3%-6% compared with single-spark plug stoichiometric mode in the lean burn operation area, and to reduce emission of deleterious substances.

Keywords: dual spark plug ignition; lean combustion; rate of heat release; cyclic variation

汽油机在部分负荷工况采用稀薄燃烧,可降低泵气损失,增加混合气比热比,使热效率得以提高。长期以来,分层稀薄燃烧系统得到广泛重视和研究^[1-4],但由于分层稀燃系统存在混合气分层状态难以精确控制,微粒排放和 HC 排放较高,NO_x 排放后处理困难等问题^[5-6],加之系统控制复杂、成本高,直至目前分层稀燃系统并未成为汽油机产品开发和投产的主流。

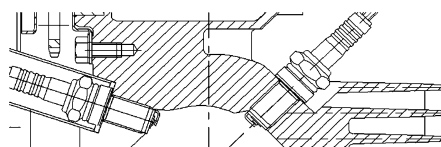
均质稀燃是汽油机实现稀薄燃烧的另一技术途径。汽油机的强烈循环变动、不完全燃烧、失火等非正常燃烧现象在稀混合气条件下更加严重^[7-8],所以需要采取有效措施来保证充分和稳定燃烧。长期实践表明,双火花塞能够明显缩短快速燃烧期,降低循环变动率,扩大燃烧极限^[9-11]。理论上双火花塞可以改善汽油机在轻度稀混合气状态下的燃烧特性,由此引发了人们对汽油机双火花塞轻度均质稀燃模式的研究。

本文在单火花塞均质预混燃烧室结构的基础上增设双火花塞点火系统,改造电控燃油喷射系统,从而实现了双火花塞轻度均质稀燃模式的稳定运行。通过设置双火花塞化学当量比(过量空气系数 $\lambda = 1$)、双火花塞轻度均质稀燃($\lambda = 1.1$)和单火花塞化学当量比($\lambda = 1$)状态,测试诊断双火花塞对轻度均质稀燃过程及燃烧特性的影响,验证双火花塞轻度均质稀燃模式在提高燃油经济性上的实际效果,并探讨双火花塞轻度均质稀燃模式的可行性。

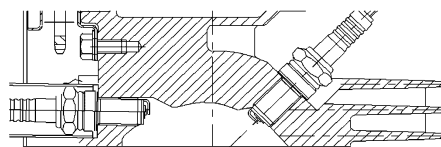
1 样机改造与测试方法

183FMQ 为气道电控喷射单缸斜置式四冲程车用汽油机,其缸径行程为 83 mm×71.6 mm,压缩比为 8.7:1,6 500 r/min 下最大功率为 17 kW,5 000 r/min 下最大扭矩为 26 N·m。183FMQ 原机采用单火花塞点火,本文在原有气缸盖结构的基础上新增火花塞构造,涉及新增火花塞密封、火花塞与机油间的隔离、套筒与气缸盖间的密封、套筒与链轮室盖间的密封、火花塞与气门间的运动干涉、火花塞与正时链轮的运动干涉等,改造后 183FMQ 为双火花塞点火系统。根据发动机结构设计了两种新增火花塞布置方案,即倾斜布置和水平布置,如图 1 所示。水平布置时,两个火花塞不对称,其实际应用

情况较少,且加工空间有限;倾斜布置时,双火花塞位置基本对称,火花塞优化设计的位置空间比较大。鉴于此,本文选择双火花塞沿气缸中心对称且倾斜布置进行样机制造和测试。



(a) 倾斜布置



(b) 水平布置

图 1 双火花塞布置方案

为实现轻度均质稀燃模式,对电控燃油喷射系统进行了改造,除怠速控制、喷油时刻控制、点火时刻控制等基本功能外,还增加了双火花塞点火和二次喷射功能。双火花塞点火通过在电喷系统中增加一个点火模块来实现,可独立控制双火花塞点火系统中各个火花塞点火时刻;二次喷射功能要求每个循环中可分别在压缩上止点与排气上止点按比例进行两次燃油喷射。在压缩上止点时燃油喷入进气道底部,利用燃烧产生的高温可使油膜蒸发且在下一个进气行程吸入气缸,形成较为均匀的混合气。

在轻度均质稀燃状态(λ 为 1、1.05、1.1、1.2)下对电控燃油喷射系统重新进行台架标定,并进行稀薄燃烧区域的初步设置。点火提前角标定中,双火花塞最佳点火提前角明显滞后于单火花塞状态,而不同均质稀燃状态(λ 为 1、1.05、1.1、1.2)对点火提前角的影响则相对较小。在两次喷油比例标定测试中,第二次喷油比例为 10%或 90%时,尾气中测得的 λ 发生明显变化,这是由于两次喷油中,其中一次喷油脉宽比喷油器动作的时间少,导致此次喷油无效的缘故。在剔除 10%和 90%喷油比例后,燃油消耗率与第二次喷油比例基本无关,但 CO、HC 排放随着第二次喷油比例的增大而增大,NO_x 排放随着第二次喷油比例的增大而减小,如表 1 所示,这是由于第二次喷射燃油的雾化不完全而导致发动机燃烧

不充分的缘故。

表 1 4 000 r/min 下喷油比例对排放的影响

第二次喷油比例/%	λ	$\varphi(\text{CO})/\%$	$\varphi(\text{HC})/10^{-6}$	$\varphi(\text{NO}_x)/10^{-6}$
0	0.995	1.12	190	2 891
10	1.106	0.08	157	2 587
20	1.036	0.34	163	2 859
30	1.008	0.74	176	2 683
40	1.003	0.92	180	2 598
50	1.000	1.08	188	2 576
60	0.996	1.12	185	2 489
70	0.990	1.39	181	2 424
80	0.985	1.42	183	2 511
90	1.044	0.43	149	2 619
100	0.942	2.66	218	2 043

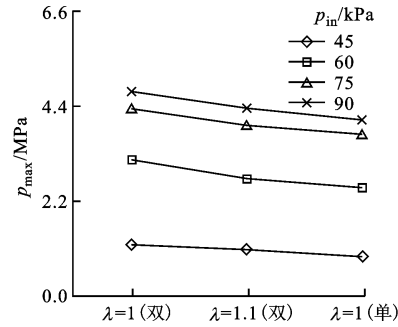
在不同的负荷及火花塞数量下,对缸内轻度均质稀燃特性进行了测试。燃烧诊断中:采用 Kistler 6052B 压力传感器采集缸内压力信号,再由 5011B 电荷放大器将压电传感器输出的电信号转化为电压信号;采用 Kistler 2613B 曲轴转角信号发生器采集转角信号,采样分辨率为 0.1° ;由 DEWE-2010 燃烧分析仪进行数据分析和处理。燃烧测试中选取了有代表性的进气管压力,分别为 45、60、75、90 kPa,测试时转速为最大扭矩下的转速 5 000 r/min,且分别在双火花塞化学当量比($\lambda=1$)、双火花塞轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)和单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态下进行。

2 燃烧测试诊断

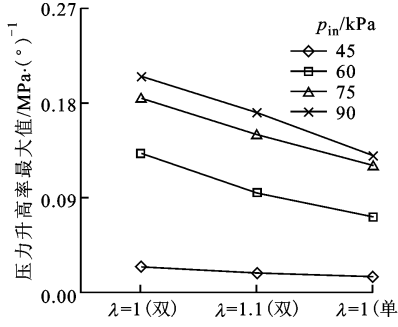
2.1 双火花塞对稀薄燃烧压力和压力升高率的影响

在各种负荷下,缸内最高燃烧压力 $p_{\max}$ 及压力升高率最大值从高到低对应的工况依次为:双火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态、双火花塞轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态、单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态。5 000 r/min 时在不同负荷下的缸压测试数据,除低负荷(进气管压力 p_{in} 为 45 kPa)外,最高燃烧压力对应曲轴转角从小到大与最高燃烧压力从高到低对应的工况顺序相同,如图 2 所示。

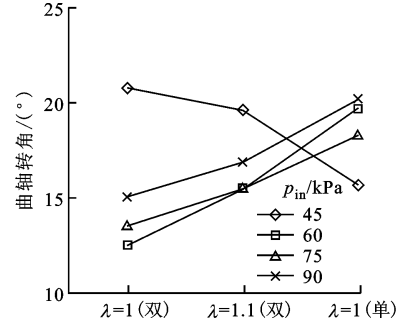
在化学当量比状态,采用双火花塞时缸内最高燃烧压力及压力升高率明显提高,同时中、高负荷下,最高燃烧压力提高及其对应曲轴转角提前,使得发动机获得了较大的膨胀比,从而提高了循环热效率^[12]。低负荷时,单火花塞 $\lambda=1$ 的燃烧持续期较长,燃烧放热速度降低,使得最高燃烧压力对应的曲轴转角相对较小。



(a)最高燃烧压力



(b)压力升高率最大值



(c)最高燃烧压力对应的曲轴转角

图 2 最高燃烧压力及其对应曲轴转角和压力升高率最大值的变化

在轻度均质稀燃状态($\lambda=1.1$),测得的双火花塞的缸内最高燃烧压力及压力升高率相对于双火花塞化学当量比时有所降低,但仍高于单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态。

2.2 双火花塞对稀薄燃烧放热特性的影响

测试过程中,5 000 r/min 时不同负荷下的缸内瞬时燃烧放热率和累积燃烧放热率随曲轴转角变化的对比分析表明:在化学当量比状态,双火花塞的燃烧放热速度较单火花塞大幅提升,最大燃烧放热率明显提高,最大燃烧放热率对应的曲轴转角提前;在轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态,双火花塞的燃烧放热率仍高于单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态,其累积燃烧放热率和最大燃烧放热率以及对应的曲轴转角接近于双火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态,表明双火

花塞在加速缸内稀薄燃烧放热速度上的效果显著。

通过分析累积放热 10%、50%、90% (CA10、CA50、CA90) 对应的曲轴转角, 将燃烧持续期(点火至 CA90) 分为 3 个阶段: 火焰发展期(点火至 CA10)、快速燃烧前期 (CA10 至 CA50) 和快速燃烧后期 (CA50 至 CA90), 如图 3 所示。从图 3 可以看出,

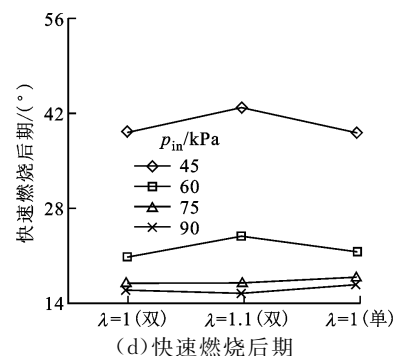
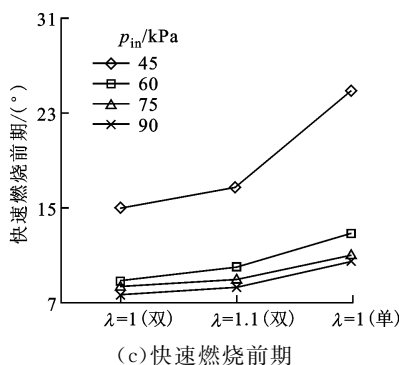
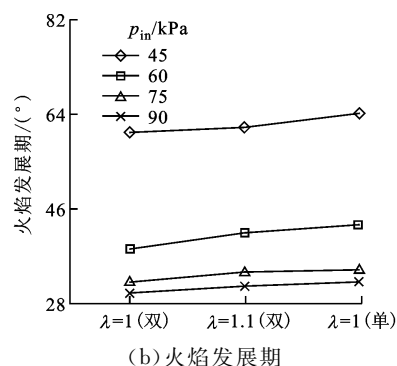
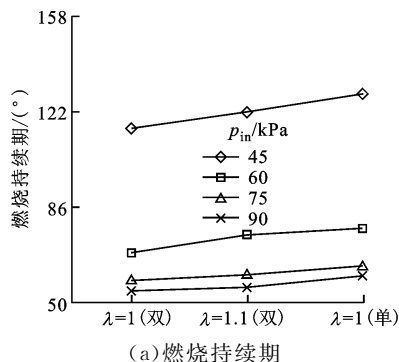


图 3 不同负荷下缸内燃烧持续期的变化

采用双火花塞加快了燃烧速度, 缩短了燃烧持续期, 主要体现在 CA10 至 CA50 燃烧期间, 低负荷时效果更加明显。

在化学当量比状态, 采用双火花塞缩短了燃烧持续期约 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 其中火焰发展期缩短约 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$, 快速燃烧前期缩短约 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$, 而快速燃烧后期的变化则很小。这是因为双火花塞点火有利于火核早期形成和发展, 同时燃烧初期火焰前锋面积增大, 从而加快了前期燃烧速率。在轻度均质稀燃 ($\lambda=1.1$) 状态, 混合气浓度降低, 火焰传播速率下降, 燃烧持续期相对于比双火花塞化学当量状态有所延长, 但仍较单火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态短, 尤其在低负荷时火焰发展期和快速燃烧前期缩短、缸内燃烧过程加速的效果更加显著, 燃烧持续期缩短有利于提高热效率及燃烧的稳定性。

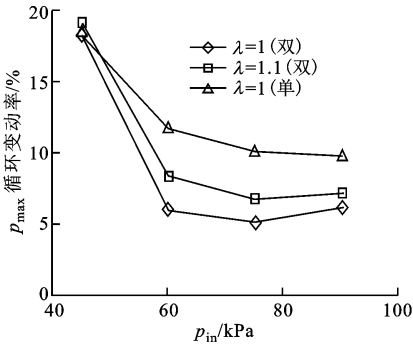
2.3 双火花塞对稀薄燃烧循环变动的影响

5 000 r/min 时不同负荷下的缸内最高燃烧压力循环变动率和指示平均有效压力 (p_{IMEP}) 循环变动率如图 4 所示。图 4a 中, 单火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态在测试工况下的最高燃烧压力循环变动率在 10% 左右, 属于较高的循环变动率, 主要原因在于原机采用了强挤流型燃烧室构造。采用双火花塞点火系统后, 燃烧速率加快, 燃烧循环变动率降低。在化学当量比状态, 最高燃烧压力循环变动率大幅降低, 除低负荷 (进气管压力为 45 kPa) 外, 最高燃烧压力循环变动率均降至 7% 以下; 在轻度均质稀燃 ($\lambda=1.1$) 状态, 最高燃烧压力循环变动率较化学当量比状态有所上升, 但仍然明显优于原机单火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态。

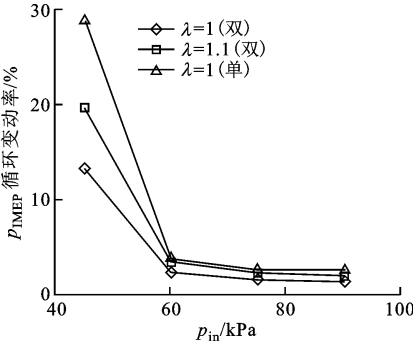
图 4b 中, 双火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态的 p_{IMEP} 循环变动率最低, 双火花塞轻度均质稀燃 ($\lambda=1.1$) 状态稍高, 单火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态最大, 这与图 4a 最高燃烧压力循环变动率的情况一致。从 p_{IMEP} 循环变动率可以进一步看出, 在低负荷、非稳定燃烧工况 (进气管压力为 45 kPa), 双火花塞能使 p_{IMEP} 循环变动率显著降低。由此可见, 双火花塞对于促进和改善轻度均质稀燃时的稳定性具有重要作用。

2.4 双火花塞对稀薄燃烧平均有效压力的影响

5 000 r/min 时不同负荷下 p_{IMEP} 测试数据如图 5 所示。因燃烧放热率提高和燃烧持续期缩短, 使得双火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态获得了最大 p_{IMEP} , 在中、高负荷下较单火花塞化学当量比 ($\lambda=1$) 状态的 p_{IMEP} 提高约 2%~4%, 而在低负荷下较单火



(a)最高燃烧压力循环变动率



(b) p_{IMEP} 循环变动率

图 4 循环变动率

花塞化学当量比($\lambda=1$)状态的 p_{IMEP} 提高达 10%。

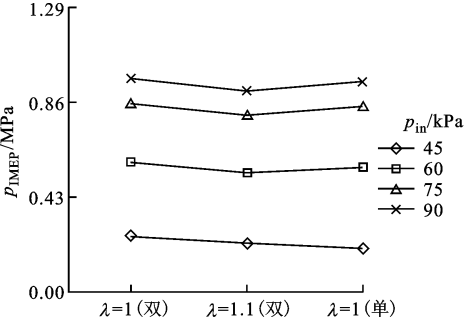


图 5 指示平均有效压力

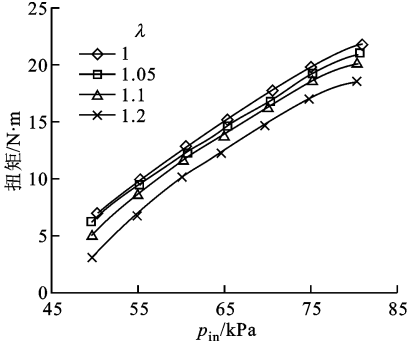
在轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态,混合气变稀,燃油供给量减少,该状态下 p_{IMEP} 低于化学当量比状态;在低负荷(进气管压力为 45 kPa)下,双火花塞轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态的 p_{IMEP} 高于单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态。原因在于低负荷下单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态的燃烧放热速率低,燃烧持续期长,循环变动大,燃烧稳定性差,而双火花塞展示出在改善燃烧稳定性上的显著效果。

3 稀燃区域标定及测量

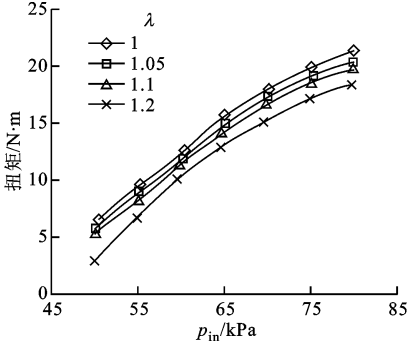
3.1 稀薄燃烧区域标定

怠速下使用稀薄燃烧会影响稳定性,而高负荷下使用稀薄燃烧会导致动力不足,因此通过标定稀

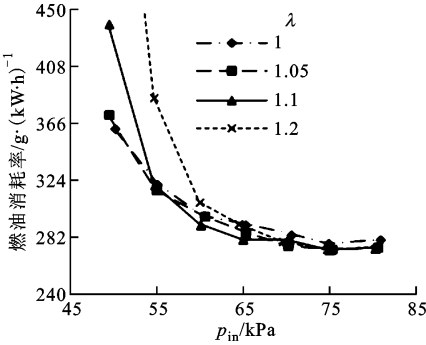
薄燃烧区域,让稀薄燃烧区域落在常用部分负荷驾驶区域之内,以提高燃油经济性。5 000、5 800 r/min 时不同混合气状态(λ 为 1、1.05、1.1、1.2)下的扭矩和燃油消耗率随负荷的变化如图 6 所示。从图 6 可以



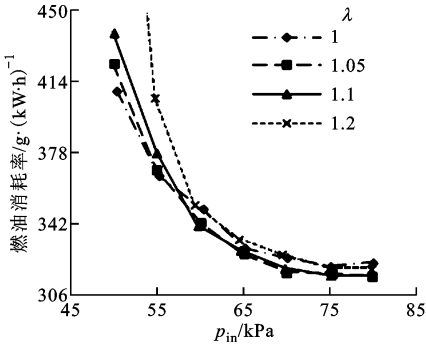
(a)5 000 r/min 时扭矩



(b)5 800 r/min 时扭矩



(c)5 000 r/min 时燃油消耗率



(d)5 800 r/min 时燃油消耗率

图 6 双火花塞稀薄燃烧标定试验结果

看出,混合气变稀,供油量减少,输出扭矩依次降低。当 λ 为 1.05 和 1.1 时,输出扭矩虽有降低,但差距不大;当 λ 为 1.2 时,输出扭矩相对于化学当量比($\lambda=1$)状态出现较大幅度降低,燃烧稳定性差,表明该状态可能接近稀薄燃烧极限。此外,不同稀薄燃烧状态在低负荷和高负荷下的输出扭矩差距较大,在中等负荷下差距相对较小。

3 种均质稀燃状态(λ 为 1.05、1.1、1.2)在中、高负荷时燃油消耗率较化学当量比($\lambda=1$)状态要低,而在低负荷时要高。其中,在进气管压力小于 55 kPa 的低负荷下, λ 为 1.05 的燃油消耗率与化学当量比($\lambda=1$)时的燃油消耗率相差并不大,而 λ 为 1.1 和 1.2 的燃油消耗率明显增大。随着富氧程度的加大,低负荷下燃烧循环变动增大,燃烧不稳定现象更加突出,即使采用双火花塞也难以将其控制在合理范围。

表 2 为试验标定的双火花塞轻度均质稀燃区域对应的 λ 值,其中进气管压力为 50~70 kPa,转速为 3 000~5 500 r/min。由表 2 可见,在原有燃烧室结构的基础上,采用双火花塞轻度均质稀燃模式,其混合气过量空气系数不宜大于 1.1。在稀薄燃烧运行区域,双火花塞轻度均质稀燃模式较原机单火花塞化学当量比模式可提升 3%~6% 的燃油经济性。

表 2 双火花塞轻度均质稀燃区域对应的 λ 值		λ					
$p_m /$ kPa							
	3 000 r·min ⁻¹	3 500 r·min ⁻¹	4 000 r·min ⁻¹	4 500 r·min ⁻¹	5 000 r·min ⁻¹	5 500 r·min ⁻¹	
50	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
55	1.05	1.1	1.1	1.1	1.1	1.05	
60	1.05	1.1	1.1	1.1	1.1	1.05	
65	1.05	1.1	1.1	1.1	1.1	1.05	
70	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	

3.2 稀薄工况排放测量

4 000 r/min 时在不同富氧稀燃状态(λ 为 1.05、1.1)下的排放随负荷的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出:随着负荷的增大,CO 和 HC 排放呈下降趋势,NO_x 排放呈上升趋势;随 λ 增大,CO 和 NO_x 排放降低,低负荷时较为明显;当进气管压力超过 60 kPa 时,不同稀薄状态对 HC 和 NO_x 排放的影响很小。

转速和混合气状态(λ 为 1、1.05、1.1)对排放的影响如图 8 所示。从图 8 可以看出:在稀燃状态,CO、HC 和 NO_x 排放随着 λ 的增大均有所降低;随

着转速升高,CO 和 NO_x 排放呈下降趋势,但 NO_x 在 5 500 r/min 时出现峰值;转速低于 5 000 r/min 时,HC 排放随转速的升高而降低,超过 5 000 r/min 时,HC 排放开始上升,在 5 000~6 000 r/min 之间,HC 排放达到峰值后开始下降。

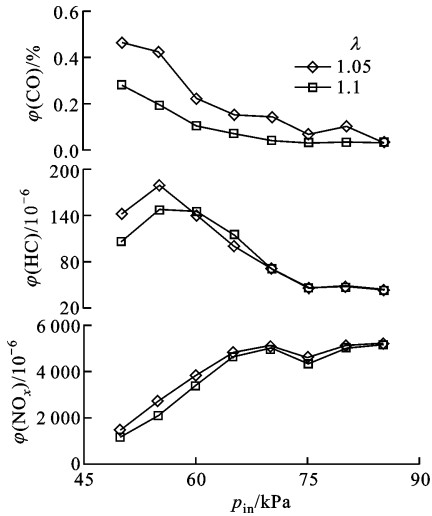


图 7 4 000 r/min 时不同 λ 和负荷下的排放对比

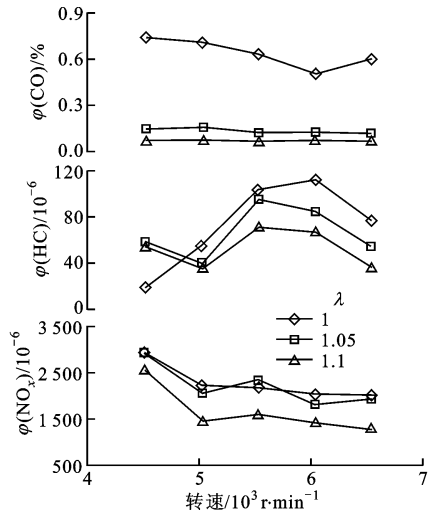


图 8 进气管压力为 60 kPa 时不同 λ 和转速下的排放对比

总体而言,双火花塞轻度均质稀燃在一定程度上有助于降低有害物排放,对于排放后处理可通过采用稀土储氧材料提高催化剂储氧能力来扩大空燃比可操作窗口的简单途径实现。

4 结 论

在单火花塞均质预混燃烧室结构基础上增设双火花塞点火系统,改造电控燃油喷射系统并进行调校标定,利用双火花塞加快燃烧放热速率、降低循环变动、提高燃烧稳定性的特征,来实现双火花塞轻度均质稀燃模式的稳定运行。燃烧测试诊断表明:在

化学当量比状态,双火花塞燃烧持续期缩短约 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$,其中火焰发展期缩短约 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$,快速燃烧前期缩短约 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$,热效率提升了 $2\%\sim 4\%$;在轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态,双火花塞燃烧持续期虽有所延长,但仍较单火花塞化学当量比状态短,尤其在低负荷、非稳定燃烧工况,双火花塞缸内燃烧过程加速的效果更加突出,表明双火花塞可以弥补稀混合气燃烧速率减缓的缺陷。

在化学当量比状态,双火花塞最高燃烧压力的循环变动率大幅降低;在轻度均质稀燃($\lambda=1.1$)状态,最高燃烧压力循环变动率较化学当量比状态有所上升,但仍优于单火花塞化学当量比($\lambda=1$)状态。在低负荷非稳定燃烧工况,双火花塞能促使 p_{IMEP} 循环变动率成倍降低,证实双火花塞对于改善轻度均质稀燃的燃烧稳定性、扩展稀燃极限具有明显效果。

台架性能测试表明:轻度均质稀燃状态在较多负荷工况较化学当量比状态可获得更低的燃油消耗率,但是受极端燃烧稳定性影响,双火花塞轻度均质稀燃模式下 λ 不宜超过 1.1。在稀薄燃烧运行区域,与原机单火花塞化学当量比燃烧模式相比,双火花塞轻度均质稀燃模式可提升 $3\%\sim 6\%$ 燃油经济性,并在一定程度上有助于降低有害物排放。

参考文献:

- [1] CHEOLWOONG P, SUNGDAE K, HONGSUK K, et al. Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine [J]. *Energy*, 2012, 41(1): 401-407.
- [2] 李林, 张力, 张瑜, 等. 双火花塞点火汽油机轻度分层混合气生成过程的数值模拟 [J]. *汽车工程*, 2010, 32(8): 673-677.
LI Lin, ZHANG Li, ZHANG Yu, et al. Numerical simulation on the preparation process of mildly stratified mixtures for a DSI gasoline engine [J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(8): 673-677.
- [3] DANAIAH P, RAVI K P, VINAY K D. Lean combustion technology for internal combustion engines: a review [J]. *Science and Technology*, 2012, 2(1): 47-50.
- [4] 王婕, 黄佐华, 刘兵. 天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(5): 22-25.
WANG Jie, HUANG Zuohua, LIU Bing. Numerical simulation of combustion process in a spark-ignition engine fuelled with natural gas hydrogen blends combined with exhaust gas recirculation [J]. *Journal of*
- Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(5): 22-25.
- [5] 姚喜贵, 郑伟, 吴汶芪, 等. 电控 LPG 发动机稀燃技术影响因素的试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2010, 31(6): 17-21.
YAO Xigui, ZHENG Wei, WU Wenqi, et al. Experimental study of impact factors on lean burn technology for electron-controlled LPG engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2010, 31(6): 17-21.
- [6] SEUNG H Y, CHANG S L. Lean combustion and emission characteristics of bioethanol and its blends in a spark ignition (SI) engine [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(8): 3484-3492.
- [7] 刘德新, 冯洪庆, 刘书亮, 等. 二次喷油过程对稀燃汽油机性能影响的试验研究 [J]. *内燃机学报*, 2003, 21(5): 333-336.
LIU Dexin, FENG Hongqing, LIU Shuliang, et al. Experimental study on the effects of twice fuel injection process on performance of lean burn gasoline engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2003, 21(5): 333-336.
- [8] 郑建军, 黄佐华, 王金华, 等. 直喷式天然气发动机不同压缩比下燃烧循环变动规律 [J]. *内燃机学报*, 2011, 29(2): 97-104.
ZHENG Jianjun, HUANG Zuohua, WANG Jinhua, et al. Effect of compression ratio on cycle-by-cycle variations in a direct injection natural gas engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2011, 29(2): 97-104.
- [9] RAMTILAK A, JOSEPH A, SIVAKUMAR G, et al. Digital twin spark ignition for improved fuel economy and emissions on four stroke engines, SAE 2005-26-008 [R]. Washington DC, USA; SAE, 2005.
- [10] BILGIN A. Geometric features of the flame propagation process for an SI engine having dual-ignition system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2002, 26(11): 987-1000.
- [11] ISMAIL A, ISMET S, ATILLA B. Effects of the stroke/bore ratio on the performance parameters of a dual-spark-ignition (DSI) engine [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(4): 1825-1831.
- [12] 曲大为, 李君, 高莹, 等. 点火模式对增压稀燃 LPG 发动机燃烧特性的影响 [J]. *汽车工程*, 2011, 33(6): 477-481.
QU Dawei, LI Jun, GAO Ying, et al. Effects of different ignition modes on the combustion characteristics of a turbocharging lean burn LPG engine [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(6): 477-481.

(编辑 苗凌)