

汽油/氢发动机燃烧特性试验与仿真^{*}

闫皓 纪常伟 汪硕峰

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

【摘要】 进行了当量比 $\phi = 1$ 的汽油机和当量比分别为 0.8、0.6、0.4 的纯氢发动机台架试验。通过对测得的汽油机和氢发动机燃烧缸压数据进行标定,建立了较为准确的 AVL Boost 汽油机和氢发动机燃烧仿真模型,并进行了仿真。结果表明,氢燃料的特性使得缸内混合气的燃烧速度显著加快,燃烧持续期大幅缩短,导致缸压上升,有效热效率得到提高。当量比为 0.4 的稀薄工况时纯氢发动机仍可正常运行,发动机燃用氢气可改善发动机性能。

关键词: 氢发动机 汽油机 燃烧特性 仿真 试验

中图分类号: TK46⁺3

文献标识码: A

Experiment and Simulation on Combustion Characteristics of a Four Cylinder SI Engine Fueled with Hydrogen and Gasoline

Yan Hao Ji Changwei Wang Shuofeng

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract

SI engine experiments were carried out by using hydrogen at equivalent ratio of 0.8, 0.6, and 0.4 and by using gasoline at stoichiometric condition, respectively. Simulation models for gasoline and hydrogen were built based on AVL Boost and calibrated experimentally. The simulation study shows that hydrogen can increase burning rate of hydrogen-air mixture, and shorten combustion duration markedly. As a result, cylinder pressure and thermal efficiency increase accordingly. Hydrogen engine can operate at the equivalence ratio of near 0.4 smoothly and the performance of SI engine is greatly improved.

Key words Hydrogen engine, Gasoline engine, Combustion characteristics, Simulation, Experiment

引言

对现有发动机进行适当改造后直接燃烧氢气^[1](即纯氢燃烧和混氢燃烧)是氢能作为车辆能源的应用途径之一。本文在现有电控汽油机的基础上对发动机进行改造,增加一套电控气道氢气喷射系统,可实现纯汽油、汽油混氢和纯氢 3 种燃烧模式。利用该系统进行纯汽油和纯氢燃料的台架试验,基于试验数据对 AVL Boost 仿真软件的模型进行标定,研究不同当量比工况下纯氢发动机的燃烧特性。

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置

采用现代伊兰特 1.6 L D 型四冲程、直列四缸水冷汽油机,缸径 77.4 mm,行程 85 mm,排量 1.599 L,压缩比为 10,连杆长度 141 mm,自然吸气方式。试验前对发动机进气系统进行了改造,在发动机进气管上安装了 1 套自行研制的多点进气道氢气喷射系统,并采用自行开发的单片机控制系统控制氢气的喷射时刻和喷氢量,氢气喷嘴的安装位置

收稿日期: 2008-07-02 修回日期: 2008-09-02

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50522202)和北京市自然科学基金资助项目(3082004)

作者简介: 闫皓,硕士生,主要从事发动机燃烧与排放控制的研究, E-mail: yanhao@emails.bjtu.edu.cn

尽可能靠近进气门,可有效避免回火。该系统具有纯汽油、汽油混氢和纯氢3种燃烧模式。氢气喷射方式为进气道预混方式,试验中氢气以0.4 MPa的压力喷入进气歧管。试验系统如图1所示。

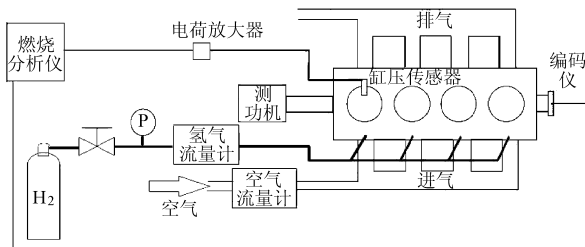


图1 试验系统结构原理图

Fig.1 Schematic of experimental system structure

采用普联 FC2010 型发动机测控仪和普联 GW 电涡流测功机(转矩最大测量误差:0.4% F. S; 转速最大测量误差:±1 r/min)控制发动机的转矩和转速,油耗采用普联 FC2210 型智能油耗仪(燃油流量最大测量误差:0.4% F. S)测量。缸压和曲轴转角信号采用 KISTLER 6117BFD17 型火花塞式缸压传感器(缸压测量精度:±0.6% FSO)和 KISTLER 2613B 型曲轴信号传感器(测量精度:0.2°CA, 测量误差小于 0.01°CA)进行测量,这些信号由 DEWETRON 燃烧分析仪进行分析。空气流量采用美国 EPI-800 型热式空气质量流量计测量(测量精度:±1% F. S)。氢气流量采用北京七星华创生产的 D07-19BM 型热式氢气质量流量计(测量精度:±1% F. S)测量。

1.2 试验方法

首先在转速 1 100 r/min、水温 80℃、节气门开度为 9%、点火角为 14.4°CA(BTDC)的条件下,进行发动机燃用纯汽油的试验,各项数据采集完毕后,切断汽油供应,开启氢气供应。由于纯氢燃烧在高负荷时 NO_x 排放量较高且燃烧稳定性较差^[2],选择在稀燃条件下进行燃氢试验。纯氢燃烧试验时发动机转速固定在 1 100 r/min,水温 80℃,节气门开度为 9%,通过读取各工况点空气流量计的读数计算出所需氢气流量,并通过供氢系统和控制软件对喷氢脉宽、时刻进行调整实现控制喷氢量的功能,以此来调整纯氢燃烧时的当量比。

由于纯氢发动机的非正常燃烧现象(早燃、回火)多发生在当量比 ϕ 为 1 的情况下,当 ϕ 为 0.6~0.5 时,早燃、回火现象基本消失^[3],所以选择当量比为 0.8、0.6、0.4 时进行试验,利用此试验数据对 AVL 公司的 Boost 软件建立的发动机模型进行标定,并对其他工况进行纯氢发动机仿真研究。

2 模型的建立与标定

2.1 模型的建立

收集试验用发动机的各项参数和数据,包括气缸几何参数、凸轮轴型线、进排气歧管几何参数、空气滤清器、三元催化器、各连接管路几何参数,以及各部件环境温度、压力、摩擦因数、流量系数等参数。

利用 AVL Boost 软件提供的各部件模型,根据内燃机学、传热学和工程热力学知识,将收集的发动机各部件的几何参数及相应环境参数输入各模型中,完成模型的建立,如图 2 所示。此模型中的放热率采用 Wiebe 燃烧放热模型计算,传热规律采用 Woschni(1978)公式计算。

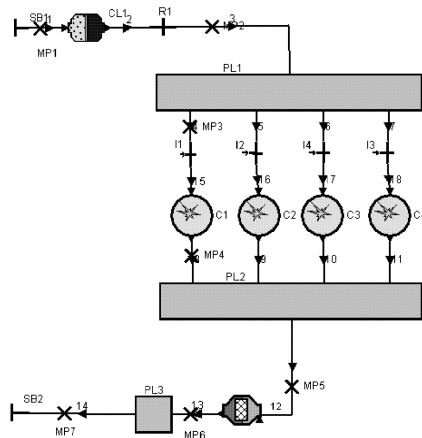


图2 仿真模型系统图

Fig.2 Schematic of simulation system

2.2 模型的标定

根据发动机分别燃烧纯汽油和纯氢试验所得出的试验数据,对软件建立的模型进行标定和相应参数的修改。数据标定工况为转速 1 100 r/min,节气门开度 9%,燃用汽油时当量比为 1(点火提前角为 14.4°CA(BTDC)),燃用氢气时当量比为 0.8、0.6 和 0.4(考虑到点火提前角对转速和稳定性有很大的影响^[4],在试验中选择点火提前角分别为各自最大制动转矩的点火角:2.8°CA、3.2°CA 和 3.8°CA(BTDC))。图 3 为试验结果进行标定后的相应数据对比图。

由图 2、3 可以看出,通过对实际发动机系统各部件的几何、环境参数的精确测量以及对整个试验系统的工作稳定性和准确性的调整所得出的各项测量、试验数据建立的计算模型,比较真实地模拟了本次试验用发动机的性能,误差在可以接受的范围之内,可以进行进一步的仿真计算。

3 仿真结果分析

以下仿真结果都是在转速 1 100 r/min、节气门

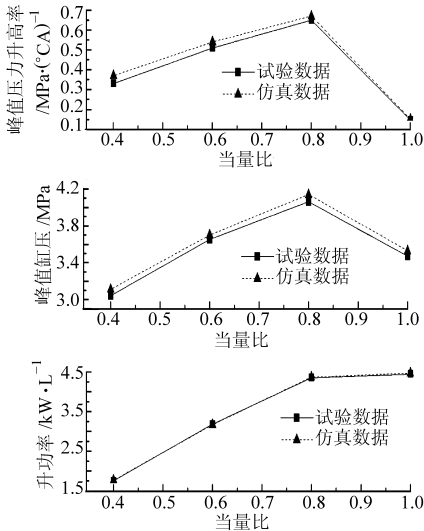


图3 仿真数据标定曲线

Fig.3 Calibration of simulation model with experimental data

开度为9%、当量比变化、各自实现最大制动转矩的点火角(MBT)下得到的结果。

3.1 发动机动力性能与热效率分析

图4为汽油机和氢发动机的平均指示压力和有效热效率随当量比 ϕ 的变化曲线。从图4中可以看出,当量比 ϕ 为0.7和0.8时,发动机燃用氢气的平均指示压力和燃用汽油时基本相同。相对汽油-空气混合气,虽然氢气-空气混合气中燃料的比例较小,但是由于氢气相对汽油扩散速度快、点火能量低、燃烧迅速、火焰传播速度快,其与空气在进气歧管内快速、充分混合,形成均匀的混合气;当混合气进入气缸后,易形成大强度的燃烧室湍流,点火后迅速燃烧并扩散,使得整个燃烧室内的混合气快速、大量放热,压力升高明显,平均有效压力增大,相同当量比工况下作功能力与燃用汽油基本相当。随着当量比升高至0.9和1时,从图4中可以看出燃用汽油的平均指示压力比燃用氢气的高,且有随当量比上升差距增大的趋势,这是由于随着混合气浓度的提高,燃烧压力上升,作功能力增强,但是氢气-空气混合气中氢气是以气态存在,所以占用了较多的燃

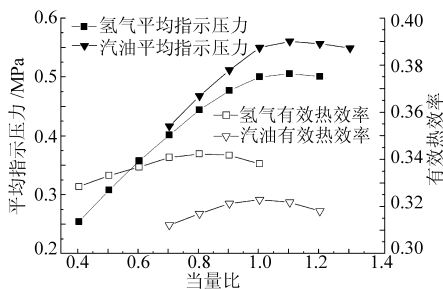


图4 平均指示压力、有效热效率与当量比的关系曲线
Fig.4 Variation of IMEP and brake thermal efficiency with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

烧室空间,导致进入燃烧室的空气相对汽油要少很多,这就使得当量比上升后汽油-空气混合气热值上升的幅度大于氢气-空气混合气,因而导致两种燃料在当量比分别为0.9和1时平均指示压力之差有逐渐增大的趋势($\phi=0.9$ 时,压力差为0.034 82 MPa; $\phi=1$ 时,为0.049 67 MPa)。鉴于当量比在1附近时氢气燃烧会产生大量的 NO_x ,兼顾动力性能和排放性能,氢发动机运行在 $\phi=0.8$ 时较为合理,此时的平均指示压力为汽油 $\phi=1$ 时平均指示压力的80.77%,作功能力有一定幅度的下降。这主要是由于进气道气态喷氢使得燃烧室内燃料相对普通汽油机要少而造成的。从图4中对比两种燃料在 ϕ 为0.7~1的有效热效率可以发现,燃用氢气的有效热效率要高于燃用汽油的有效热效率,这是由于混合气处于稀薄状态,且氢气燃烧速度快,火焰传播速度快,导致燃烧持续期大幅缩小,传热损失相应减少,同时平均指标压力增大,缸内残余废气压力下降(比同工况燃用汽油小4.5%左右),有利于提高充量系数,并减少泵气损失,氢气的快速燃烧还使得整个燃烧过程接近定容燃烧,使发动机有效热效率得到提高^[5-7]。此外,由于燃烧持续期短,氢燃烧时放热率峰值出现在上止点附近,燃料热能转换成机械能的效率较高,因此热效率较高^[8]。

3.2 发动机放热过程和燃烧参数分析

图5为燃烧持续期随当量比 ϕ 的变化曲线。从图5中可以看出随着当量比提高,汽油和氢气的燃烧持续期都在减小,且氢气的燃烧持续期明显比汽油要小,这是由氢气的特性造成的:氢气的点火能量低(0.02 mJ,为汽油的1/10),火焰传播速度快(237 cm/s,为汽油的5.7倍),导致氢气在气缸内快速燃烧放热。图5中的数据也反映出同当量比情况下,汽油的燃烧持续期是氢气的5倍左右。同时,随着氢气当量比减小,混合气浓度逐渐降低,氢气所需点火能量进一步降低^[2],也进一步加大了混合气的燃烧速度,减小了燃烧持续期。

图6为曲轴转角随已燃质量分数的变化曲线。从图6中可以看出氢气的燃烧速度很快,在上止点

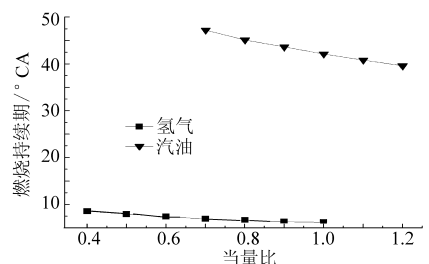


图5 燃烧持续期与当量比的关系曲线
Fig.5 Variation of combustion duration with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

附近就已经燃烧了 50%，而汽油混合气在上止点后 6.7°CA 才燃烧到 50%。通过计算从 10% 到 50% 的曲轴转角可以看出，此时氢气的燃烧速度是汽油的 3.8 倍左右；而从 50% 到 90% 的曲轴转角可以计算出，此时氢气的燃烧速度是汽油的 5.8 倍左右。可见随着缸内火焰的逐渐发展、传播，燃烧温度的不断提升，燃烧速度不断加快，使得燃烧持续期相对汽油显著缩短，减小了传热损失，有利于提高热效率。

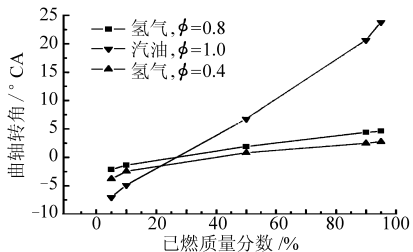


图 6 曲轴转角与已燃质量分数的关系曲线

Fig. 6 Variation of crankshaft angle with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

图 7 为峰值压力和峰值压力对应的曲轴转角随当量比的变化曲线。从中可以看出，燃烧氢气的峰值压力明显比燃烧汽油的要大很多。当量比为 0.8 时，燃烧氢气的峰值压力为 4.135 MPa，为汽油的 1.32 倍，氢气当量比为 0.6 时的峰值压力与汽油当量比为 1.2 时的相当，这说明氢气的高速燃烧放热特性即使是在混合气很稀薄的工况下，也具有较好的作功能力。图 7 中还反映出氢气在上止点后 3.5~4.5°CA 即达到峰值压力，汽油在 11~12°CA 才达到峰值压力，从此也可以得出氢气燃烧速度明显快于汽油。同时，随着当量比的提高，混合气浓度上升，燃烧速度加快，峰值压力点逐渐向上止点靠近。

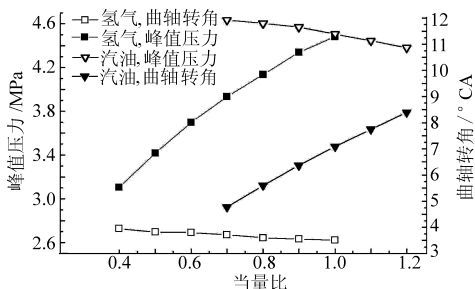


图 7 峰值压力、曲轴转角与当量比的关系曲线

Fig. 7 Variation of maximum cylinder gas pressure and crankshaft angle with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

图 8 为最大压力升高率和最大压力升高率对应的曲轴转角随当量比的变化曲线。从图 8 中可以看出燃烧氢气的最大压力升高率明显高于燃烧汽油的最大压力升高率，也更早的达到最大压力升高率点，这是因为氢气扩散速度很快，与空气混合后在进气歧管和缸内的快速流动使得缸内的湍流强度增大，

促进了氢气的快速燃烧，使得最大压力升高率快速达到并且压力升高速度显著加快。

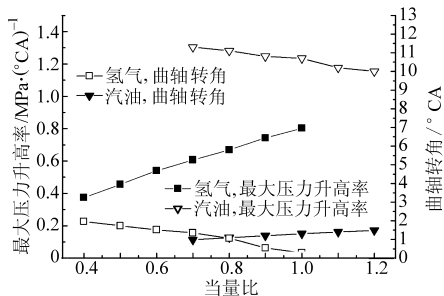


图 8 最大压力升高率、曲轴转角与当量比的关系曲线

Fig. 8 Variation of maximum rate of pressure rise and crankshaft angle with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

图 9 为最大放热率与当量比的关系曲线。从图 9 可以看出氢气燃烧时的最大放热率相对于汽油大幅提升，当量比同为 0.8 时的氢气最大放热率为汽油的 4.46 倍，可见氢气的快速燃烧特性大幅加快了燃料的放热速度，同时还可以看出氢气的最大放热率随当量比的升高逐渐增大，增幅比汽油最大放热率明显，这是因为当量比升高，混合气浓度增大，导致燃烧速度加快，图 5 中的燃烧持续期变化可以反映这一点，随燃烧速度的提升，放热率明显上升。

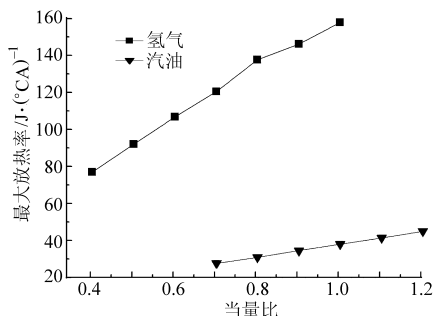


图 9 最大放热率与当量比的关系曲线

Fig. 9 Variation of maximum heat release rate with equivalence ratio for gasoline and hydrogen engine

4 结论

(1) 氢气燃烧过程接近定容燃烧，使发动机有效热效率得到提高，当量比为 0.8 时有效热效率接近 34%。

(2) 当量比为 0.7 和 0.8 工况下燃用氢气的平均指示压力与燃用汽油相当，考虑到浓氢气混合气燃烧容易排放大量 NO_x，所以氢气适合稀薄燃烧。

(3) 氢气的高扩散性在缸内易于形成大强度的湍流和均匀的混合气，加之较低的点火能量和快速的火焰传播速度，使得氢气在缸内燃烧速度明显快于汽油，导致燃烧持续期大幅缩短，传热损失大幅减少。

- 6 Darko Hercog, Milan Curkovic, Karel Jezernik. DSP based rapid control prototyping system for engineering education and research[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design, Munich, 2006: 2 292~2 297.
- 7 杨志东.三轴六自由度液压振动试验系统控制策略的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
Yang Zhidong. Study of control scheme for 3-dimension 6-DOF hydraulic shaking experimental system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- 8 关广丰.六自由度液压振动试验系统控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
Guan Guangfeng. Research on control strategy of 6 DOF hydraulic vibration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- 9 韩俊伟.三向六自由度大型地震模拟振动台的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1996.
Han Junwei. The study on 3-dimension 6-DOF large scale seismic simulating apparatus[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996. (in Chinese)
- 10 张涛.振动台功率谱复现控制算法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
Zhang Tao. Research on replication algorithm for power spectral density of vibration table[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- 11 黄志刚,毛恩荣,梁新成,等.微型轿车八自由度整车动力学仿真与试验[J].农业机械学报,2008,39(6): 29~33.
Huang Zhigang, Mao Enrong, Liang Xincheng, et al. Dynamic simulation experiment of subminiature car based on eight DOF model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6): 29~33. (in Chinese)
- 12 Karabetsos S H, Stavrou P D, Pikasis E K, et al. Design and implementation of an OFDM transceiver framework using Matlab and the TMS320C6713 DSK[C]//EUROCON 2005—the International Conference on “Computer as a Tool”, 2005:554~557.
- 13 Shen Gang, Cong Dacheng, He Jingfeng, et al. Research on three-axis six-DOF shaking table based on rapid prototyping of DSP algorithms using Simulink[C]//2nd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics (ISSCAA 2008), Shenzhen, China, 2008.

(上接第9页)

参 考 文 献

- 1 周立迎.氢能源在汽车行业中的应用及进展[J].移动电源与车辆,2006(2):35~38.
Zhou Liying. Application and progress of hydrogen energy in automobile field[J]. Movable Power Station & Vehicle, 2006(2):35~38. (in Chinese)
- 2 Sebastian Verhelst, Roger Sierens. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines[C]. SAE Paper 2006-01-0430, 2006.
- 3 Niculae Negurescu, Constantin Pana, Marcel Ginu D, et al. Aspects regarding the combustion of hydrogen in spark ignition engine[C]. SAE Paper 2006-01-0651, 2006.
- 4 袁银南,朱磊,王存磊.氢燃料发动机怠速控制策略制定及参数整定[J].农业机械学报,2008,39(3):14~18.
Yuan Yinnan, Zhu Lei, Wang Cunlei. Idle speed control strategy and parameters tuning of hydrogen-fueled engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 14~18. (in Chinese)
- 5 周龙宝,刘巽俊,高宗英.高等内燃机原理[M].北京:机械工业出版社,2003:53~54.
- 6 Hari Ganesh R, Subramanian V, Balasubramanian V, et al. Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: an experimental study[J]. Renewable Energy, 2008, 33(6):1324~1333.
- 7 Andrea T D, Henshaw P F, Ting D S K. The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(14):1541~1552.
- 8 刘永长.内燃机原理[M].武汉:华中科技大学出版社,2001:44~45,253~254.
- 9 王丽君,司爱国,刘海潮,等.氢燃料发动机点火正时控制优化[J].农业机械学报,2008,39(3):19~22.
Wang Lijun, Si Aiguo, Liu Haichao, et al. Optimization on ignition timing control of hydrogen-fueled engines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(3):19~22. (in Chinese)