

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.006

内燃机尾气余热重整制氢混燃性能试验*

纪常伟 句丙杰 戴晓旭

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对氢气在汽车上不易存储和携带的问题,利用自行设计的一套燃料重整制氢系统回收发动机尾气余热,实现乙醇水蒸气重整制氢。通过改装发动机进气管,将制取的重整气引入发动机,和汽油一起实现混合燃烧。试验中汽油机的转速为 1 800 r/min,进气压力为 61.5 kPa,在不同的过量空气系数下,分别对原机和重整气掺混体积分数 2.5% 的汽油机的性能进行研究。研究结果表明,随着过量空气系数的增大,重整气中氢气的体积分数越来越大,而一氧化碳的变化趋势则相反。重整气的引入缩短了火焰发展期和快速燃烧持续期,提高了发动机的指示热效率,并降低了 HC 的排放量,而 CO 和 NO_x 的排放量略有增加。

关键词: 汽油机 尾气余热 重整气 氢气 燃烧 排放

中图分类号: TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0027-06

Mixed Combustion Performance Experiment of Syngas Produced by Ethanol Steam Reforming for Engine

Ji Changwei Ju Bingjie Dai Xiaoxu

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at solving the difficulties in hydrogen on-board storage and carriage, a self-designed system was designed in an SI gasoline engine to recover the exhaust heat and produce hydrogen by the ethanol steam reforming. The engine intake manifolds were specially modified so that the produced syngas could be injected and mixed with gasoline simultaneously. During the experiment, the engine was kept at 1 800 r/min and a manifolds absolute pressure of 61.5 kPa. The combustion and emissions performance of the 2.5% syngas-enriched gasoline engine was compared with that of the original engine under various excess air ratios. The experimental results demonstrated that the enhancement of excess air ratio could improve the hydrogen volume fraction whereas reduce the CO concentration in the syngas. The blending of syngas was beneficial for accelerating the flame development and propagation, elevating the indicated thermal efficiency and reducing the HC emissions. Meanwhile, the CO and NO_x emissions were slightly increased after the syngas addition.

Key words: SI engines Exhaust heat Syngas Hydrogen Combustion Emissions

引言

氢气作为一种无污染、可再生的绿色能源,已经被人们广泛关注。对于内燃机而言,由于燃料在气缸内雾化、蒸发以及与空气混合的速率有限,燃料无

法在极短的时间内完全燃烧,从而导致了内燃机热效率低、排放较差。作为一种可再生的替代燃料,氢气具有很多优势。例如:点火能量密度低;火焰传播速度快;淬熄距离短等^[1-3]。在内燃机进气中混入少量氢气,利用氢气在空气中扩散快、点火能量低的

收稿日期: 2012-02-16 修回日期: 2012-03-09

* 国家重点基础研究发展规划(973计划)资助项目(2013CB228403)、北京市教委科技计划重点项目(KZ201210005002)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111103110010)和北京市自然科学基金资助项目(3122006)

作者简介: 纪常伟,教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧、节能与排气净化研究,E-mail: chwji@bjut.edu.cn

特点,改善燃油的雾化和蒸发,促进燃油与空气的混合,可以实现改善缸内燃烧的目的^[4-7]。但是,由于氢气不易存储、运输,此项技术未能得到大规模的推广使用。而利用燃料重整反应器回收内燃机尾气余热,使乙醇水溶液在高温、催化剂的作用下发生反应,在线产生富氢气体与燃油混合燃烧,不但保证了氢气的供应,而且解决了氢气的存储与运输问题。同时氢气的加入提高了发动机的制动功、热效率^[8-9]。

目前,国内外学者对燃料重整技术以及混氢发动机的性能都做了较为深入的研究^[10-18],但是利用发动机尾气余热制取重整气,并将该重整气引入发动机和汽油混合燃烧的研究报道却相对较少。本研究利用自行设计的一套燃料重整制氢系统回收发动机的尾气余热,并在催化剂的作用下将乙醇水溶液转化成重整气。然后将重整气引入发动机,研究其对发动机性能的影响。发动机转速为 1 800 r/min,进气压力为 61.5 kPa,过量空气系数从 1.01 逐渐增大到 1.21,分别对原机和混重整气体积分数 2.5% 的发动机性能进行研究。

1 试验系统及方法

1.1 试验系统设计

用于燃料重整的催化剂是非贵金属催化剂 CuZnAlZr。其制备方法如下:首先将拟薄水铝石、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等体积浸渍,充分干燥后进行煅烧制得 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。然后将 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、拟薄水铝石和 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合打胶,将催化剂载体浸渍在胶体中,干燥后浸入催化剂溶液中,最终经干燥煅烧得到所需催化剂。

燃料重整反应器用于回收尾气余热进行重整反应,该反应器与发动机排气管上的三效催化转换器相连,当乙醇溶液被泵入反应器后,在催化剂的作用下反应生成富氢重整气。通过气体采样管采集重整气样品,并用气相色谱分析仪检测重整气中的各组分及其含量。通过对进气道的改造,乙醇水蒸气重整制取的重整气被引入发动机的第 4 缸,考察重整气对发动机性能的影响。

试验系统如图 1 所示。表 1 列出了试验用发动机的主要参数,发动机测控系统采用普联 FC2000 发动机测控装置。其组成设备包括 GW160 型电涡流测功机(转速测量误差为 1 r/min)、FC2210 型智能油耗仪和 FC2010 型发动机测控仪。缸压数据采集及燃烧分析系统主要包括瑞士奇石乐公司生产的 Kistler2613B 型曲轴信号传感器(分辨率为 0.2°CA ,测量误差小于 0.01°CA)、Kistler6117BFD17 型火花

塞式缸压传感器(缸压测量非线性度低于 0.6%)和 Dewetron 燃烧分析仪。缸压传感器安装在发动机第 4 缸上,编码仪装于曲轴前端,缸压传感器和编码仪分别通过屏蔽电缆与 Dewetron 燃烧分析仪连接,使用 HorbaMEXA-110 λ 型空燃比分析仪与 HorbaMB-201 型宽域氧传感器测量发动机空燃比(在空燃比为 14.7~30 时测量最大误差为 0.7)。采用美国 EPI-800 型质量空气流量计测量进入发动机的空气。采用 Horiba MEXA-7100DEGR 型尾气分析仪测量发动机尾气中 HC、CO 与 NO_x 的体积分数。该分析仪采用化学可见光法测量 NO_x 体积分数;采用不分光红外法测量 CO 体积分数;采用氢离子火焰法测量 HC 体积分数,3 种排放产物的测量精度均为 10^{-6} ,测量误差在读数的 $\pm 1\%$ 范围内。

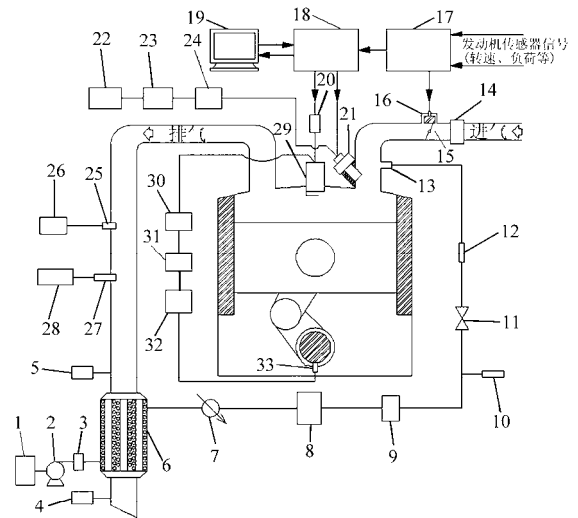


图 1 试验系统原理图

Fig. 1 Schematic of experimental system

1. 重整燃料箱 2. 重整燃料泵 3. 重整燃料流量计 4. 重整器出口端热电偶 5. 重整器入口端热电偶 6. 重整反应器 7. 冷阱 8. 干燥机 9. 重整气流量计 10. 重整气采样管 11. 阻燃阀 12. 单向阀 13. 重整气引入端 14. 空气流量计 15. 节气门 16. 怠速阀 17. 原机电子控制单元 18. 开发电子控制单元 19. 计算机 20. 点火模块 21. 汽油喷嘴 22. 汽油箱 23. 油耗仪 24. 汽油泵 25. 氧传感器 26. 空燃比分析仪 27. 尾气取样管 28. 尾气分析仪 29. 缸压传感器 30. 信号放大器 31. A/D 转换模块 32. 燃烧分析仪 33. 曲轴编码仪

表 1 发动机主要技术参数

Tab. 1 Engine specifications

参数	数值
发动机型式	4 冲程、直列 4 缸、水冷
压缩比	10
缸径/mm	77.4
活塞行程/mm	85.0
排量/L	1.599
标定转矩(转速)/N·m(r/min)	143.28(4 500)
标定功率(转速)/kW(r/min)	83.32(6 000)

1.2 试验方法

在试验过程中,发动机水温控制在 $(90 \pm 1)^\circ\text{C}$ 之间,机油温度控制在 $(95 \pm 1)^\circ\text{C}$ 之间,以减少其对试验结果的影响。试验工况选择发动机转速为 1800 r/min ,进气管绝对压力为 61.5 kPa ,用以获得较高的发动机尾气温度,进而保证较高的重整制氢效率。开发电子控制单元,通过接收原机电子控制单元的信号a和计算机控制信号b分别控制发动机点火时刻和汽油的喷射脉宽。过量空气系数的大小用来描述发动机的稀燃程度,而由于重整气的产量有限,本试验中,在过量空气系数从1.01逐渐增大到1.21的过程中,分别测量原机与重整气掺混体积分数为2.5%的发动机性能参数。重整气体积分数 α 和过量空气系数 λ 定义为

$$\alpha = \dot{v}_r / (\dot{v}_r + \dot{v}_{\text{air}}) \quad (1)$$

$$\lambda = \dot{m}_{\text{air}} / (\dot{m}_g F_{\text{st},g} + \dot{m}_{\text{H}_2} F_{\text{st},\text{H}_2} + \dot{m}_{\text{CO}} F_{\text{st},\text{CO}}) \quad (2)$$

式中 \dot{v}_r ——重整气体积流量, L/h

\dot{v}_{air} ——空气体积流量, L/h

\dot{m}_{air} ——空气质量流量, g/min

\dot{m}_g ——汽油质量流量, g/min

\dot{m}_{H_2} ——氢气质量流量, g/min

\dot{m}_{CO} ——一氧化碳质量流量, g/min

$F_{\text{st},g}$ ——汽油理论空燃比

F_{st,H_2} ——氢气理论空燃比

$F_{\text{st},\text{CO}}$ ——一氧化碳理论空燃比

2 试验结果与分析

2.1 重整气成分分析

重整气中氢气的体积分数直接反映了乙醇水蒸气重整的效果。图2描述了发动机在 1800 r/min ,进气压力为 61.5 kPa 下,重整气中氢气和一氧化碳的体积分数随过量空气系数的变化趋势。从图中可以看出,当过量空气系数从1.01逐渐增大到1.21时,重整气中氢气的体积分数由31.38%升高到60.29%,而一氧化碳的体积分数却由64.97%下降到27.76%。这是因为,排气温度是影响重整效果的主要因素,尽管随着过量空气系数的增大,缸内燃烧温度降低,但是由于后燃作用的增强,排气温度越来越高。因此发动机在稀燃条件下运行时,重整反应器可以吸收更多的热量,重整制氢的效果也更加显著。乙醇水蒸气重整反应中,还会伴有水汽转移反应(WGSR)^[19],该反应会消耗水 and 一氧化碳生成氢气和二氧化碳,因此重整气中氢气的体积分数会逐渐增加,而一氧化碳含量却在逐渐降低。

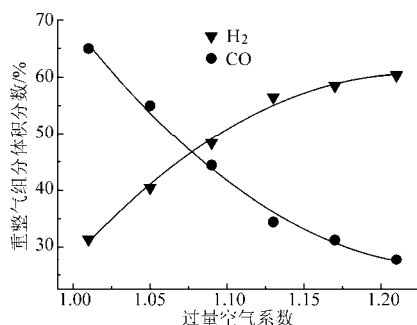


图2 重整气组分体积分数与过量空气系数的关系曲线

Fig. 2 Volume fraction of reformed gas components vs excess air index

2.2 汽油消耗量

汽油消耗量是衡量发动机经济性能的重要指标。图3为汽油消耗量随过量空气系数的变化曲线。从图中可以看出,原机和混重整气发动机的汽油消耗量随过量空气系数的增大逐渐降低。而在相同的过量空气系数下,与原机相比,混入重整气后,汽油消耗量有明显下降,当过量空气系数为1.21时,汽油消耗量从原机的 2.58 kg/h 减少为 2.36 kg/h 。这是因为随着过量空气系数的增大,发动机进气中新鲜空气的比例逐渐增大,燃料燃烧更加充分,故汽油消耗量逐渐降低。而当混入重整气后,重整气的燃烧取代了部分汽油的燃烧,而重整气来源于价格低廉、可再生的乙醇,因此发动机的汽油消耗量降低,起到了降低燃烧成本的作用。

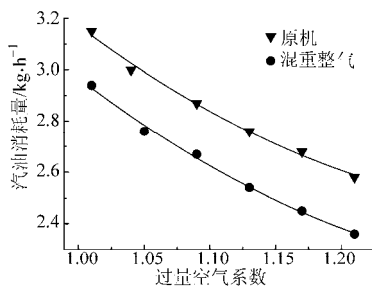


图3 汽油消耗量与过量空气系数的关系曲线

Fig. 3 Fuel consumption vs excess air index

2.3 指示平均有效压力和指示热效率

指示平均有效压力是衡量发动机作功能力的重要指标。图4为指示平均有效压力随过量空气系数的变化曲线。从图中可以看出,原机和混重整气发动机的指示平均有效压力随着过量空气系数的增大逐渐减小。而在相同过量空气系数下,与原机相比,混入重整气之后,指示平均有效压力略有降低。这是因为随着过量空气系数的增大,进入发动机气缸的汽油逐渐减少,燃料燃烧所放出的热量也随之降低,因此,指示平均有效压力随着过量空气系数的升高而降低。另外,当重整气被引入发动机后,与原机

相比,进入气缸的汽油会进一步减少,因此,在相同过量空气系数条件下,混重整气发动机的指示平均有效压力要略低于原机。

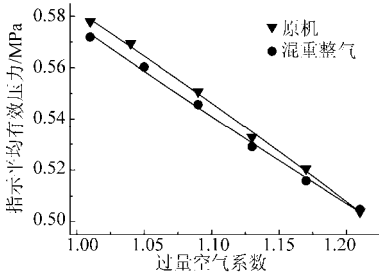


图4 指示平均有效压力与过量空气系数的关系曲线

Fig.4 Indicated mean effective pressure vs excess air index

指示热效率是衡量发动机经济性能的重要指标。图5为指示热效率随过量空气系数的变化曲线。从图中可以看出,原机和混重整气发动机的指示热效率随着过量空气系数的增大而增大,当过量空气系数为1.01时,指示热效率分别为35.75%和36.03%;当过量空气系数为1.21时,指示热效率分别为38.34%和38.89%。并且在相同的过量空气系数下,混重整气发动机可以获得比原机更高的指示热效率。随着过量空气系数的增大,发动机进气中新鲜空气的比例逐渐增大,燃料燃烧更加充分,故指示热效率会随之增大。而由于氢气和一氧化碳的燃烧速度都要比汽油快,同时氢气又具有扩散速度快、淬熄距离短的特点,在发动机进气中加入一定量的重整气有利于增强缸内燃料的均匀混合程度并加快火焰传播,从而使燃料燃烧更加充分,因此混重整气发动机可以获得比原机更高的指示热效率。

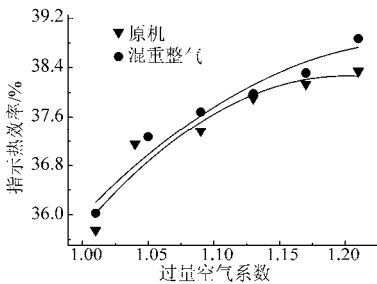


图5 指示热效率与过量空气系数的关系曲线

Fig.5 Indicated thermal efficiency vs excess air index

2.4 燃烧性能分析

C_1 和 C_2 分别为0~10%燃料燃烧持续期所对应的曲轴转角和10%~90%燃料燃烧持续期所对应的曲轴转角,二者可用来反应发动机缸内燃烧状况。图6和图7分别描述了发动机在1800 r/min,进气道绝对压力为61.5 kPa下,原机和混重整气发动机的 C_1 和 C_2 随过量空气系数的变化曲线。

从图6和图7可以看出, C_1 和 C_2 均随着过量空气系数的增加而延长,当引入重整气后,在相同的过

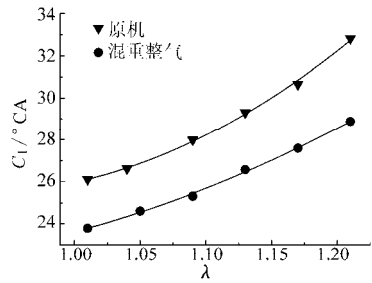


图6 C_1 与过量空气系数的关系曲线

Fig.6 C_1 vs excess air index

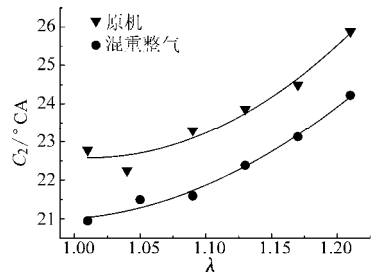


图7 C_2 与过量空气系数的关系曲线

Fig.7 C_2 vs excess air index

量空气系数条件下,混重整气发动机与原机相比, C_1 和 C_2 均有所缩短。这是因为随着过量空气系数的增大,混合气逐渐变稀,缸内火核形成速度和燃料燃烧速度均减慢, C_1 和 C_2 随之延长。重整气中的氢气具有点火能量低、火焰传播速度快的优势,重整气和汽油的混合物比纯汽油更容易点火和快速燃烧,与此同时,重整气中的氢气和一氧化碳对O和OH自由基的结合有促进作用,这也有利于燃烧过程的链锁反应^[20]。因此,与原机相比,混重整气发动机的 C_1 和 C_2 均有所缩短。

2.5 排放性能分析

HC、CO和 NO_x 是汽油机尾气中的主要有害污染物。图8为发动机在1800 r/min,进气压力为61.5 kPa的条件下,HC排放体积分数随过量空气系数的变化曲线。从图中可以看出,原机和混重整气发动机的HC排放体积分数随着过量空气系数的增大呈现出先降低而后略微增加的趋势,并且在相同的过量空气系数下,混重整气发动机要比原机的HC排放体积分数低。这是因为随着过量空气系数的增大,发动机总进气中空气所占比例越来越大,燃料燃烧越来越充分,故HC排放量逐渐降低,当过量空气系数增大到一定程度时,缸内混合气不均匀程度增加,缸壁对火焰的淬熄效应增强,又导致HC排放量有所上升。由于氢气的淬熄距离较短,混入重整气后,混合气的火焰传播能够更加接近气缸壁,从而减少了壁面淬熄造成的HC排放。

图9为CO排放体积分数随过量空气系数的变化曲线,从图中可以看出,原机和混重整气发动机的

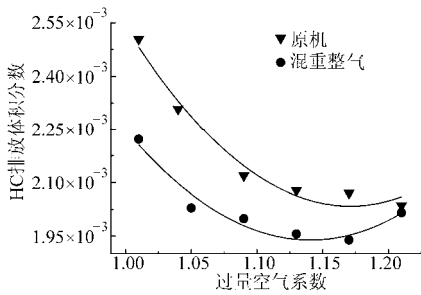


图 8 HC 排放体积分数与过量空气系数曲线

Fig. 8 HC content vs excess air index

CO 排放体积分数随着过量空气系数的增大呈现出先急剧下降而后逐渐趋于平缓的趋势。而在相同的过量空气系数下,混重整气发动机的 CO 排放体积分数要比原机高,尤其是在过量空气系数为 1.01 时,混重整气发动机的 CO 排放体积分数为 3.302×10^{-3} ,而原机的 CO 排放体积分数仅为 2.299×10^{-3} 。CO 主要是由于燃料不完全燃烧所造成的,随着过量空气系数的增大,缸内氧气浓度增大,这有利于燃烧中将 CO 转化为 CO_2 ,故 CO 排放量逐渐降低。而进气中混入的重整气中本身含有一部分 CO,而且重整气中的 H_2 比汽油具有更高的空燃比,在燃烧过程中需要消耗更多的 O_2 ,因此混重整气发动机的 CO 排放量要比原机高。

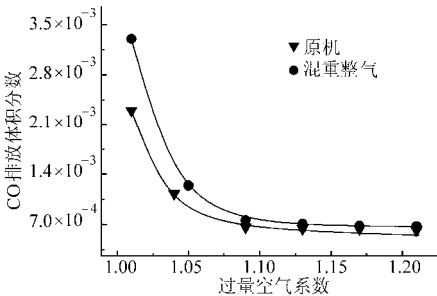
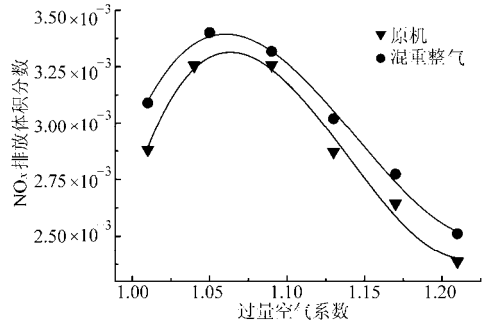


图 9 CO 排放体积分数与过量空气系数的关系曲线

Fig. 9 CO content vs excess air index

图 10 为 NO_x 排放体积分数随过量空气系数的变化曲线,从图中可以看出,原机和混重整气发动机的 NO_x 排放体积分数随着过量空气系数的增大呈现出先增加后降低的趋势。而在相同的过量空气系数下,混重整气发动机的 NO_x 排放体积分数要比原机

高。影响 NO_x 排放体积分数的主要因素为氧气浓度和燃烧温度,当过量空气系数增大时,进气中新鲜空气的比例增大,氧气浓度增大,故 NO_x 排放体积分数随之增加,当过量空气系数继续增大时,汽油的喷射脉宽也会随之降低,进入气缸的燃料能量流量不断降低,使缸内燃烧温度持续降低,因此 NO_x 排放量又开始不断降低,而由于重整气中所含的氢气和一氧化碳的燃烧温度比汽油要高,因此混重整气发动机的 NO_x 排放量要比原机略高。

图 10 NO_x 排放体积分数与过量空气系数的关系曲线Fig. 10 NO_x content vs excess air index

3 结论

(1) 稀燃条件下,发动机的后燃作用增强,使得发动机排气温度升高,反应器可以为乙醇重整回收更多的热量。因此,随着过量空气系数的增大,重整气中氢气的体积分数越来越大,而由于水汽转移反应,一氧化碳的变化趋势与氢气相反。

(2) 随着过量空气系数的增大,汽油消耗量逐渐减少,指示平均有效压力逐渐降低,与原机相比,混重整气发动机的汽油消耗量有明显减少,指示平均有效压力有所降低。而发动机指示热效率逐渐升高,混重整气发动机的指示热效率相比原机有所升高。

(3) 由于重整气中的氢气具有点火能量低、火焰传播速度快的优势,重整气和汽油的混合物比纯汽油更容易点火和快速燃烧,与原机相比,混重整气发动机的火焰发展期和快速燃烧期都有所缩短。

(4) 相比原机而言,引入重整气后,HC 排放量有所降低,而 CO 和 NO_x 的排放量则略有升高。

参 考 文 献

- 1 Kahraman E, Ozcanli S, Ozerdem B. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(12): 2 066 ~ 2 072.
- 2 Andrea T, Henshaw P, Ting D. The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(14): 1 541 ~ 1 552.
- 3 Ma F, Wang Y, Liu H, et al. Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(2): 823 ~ 831.
- 4 Ganesh R, Subramanian V, Balasubramanian V, et al. Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: an experimental stud [J]. Renewable Energy, 2008, 33(6): 1 324 ~ 1 333.

- 5 Steinberg M, Cheng H. Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1989, 14(3): 797 ~ 820.
- 6 Wang S, Ji C, Zhang B. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(17): 9 205 ~ 9 213.
- 7 Ji C, Wang S. Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen gasoline engine under various loads and lean conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 35(11): 5 714 ~ 5 722.
- 8 Tsolakis A, Megaritis A, Wyszynski M. Low temperature exhaust gas fuel reforming of diesel fuel[J]. Fuel, 2004, 83: 1 837 ~ 1 845.
- 9 Tsolakis A, Megaritis A. Catalytic exhaust gas fuel reforming for diesel engines-effects of water addition on hydrogen production and fuel conversion efficiency[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(13): 1 409 ~ 1 419.
- 10 马凡华, 汪俊君, 程伟, 等. 不同掺氢比的 HCNG 燃料对天然气发动机怠速性能影响研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(4): 296 ~ 301.
Ma Fanhua, Wang Junjun, Cheng Wei, et al. Influence of hydrogen ratio on idle performance of natural gas-hydrogen fuelled engine[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(4): 296 ~ 301. (in Chinese)
- 11 闫浩, 纪常伟, 汪硕峰. 汽油/氢发动机燃烧特性试验与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 6 ~ 9.
Yan Hao, Ji Changwei, Wang Shuofeng. Experiment and simulation on combustion characteristics of a four cylinder SI engine fueled with hydrogen and gasoline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 6 ~ 9. (in Chinese)
- 12 王宇, 马凡华, 刘海全, 等. 火花点火天然气掺氢发动机稀燃极限的影响因素[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 9 ~ 13.
Wang Yu, Ma Fanhua, Liu Haiquan, et al. Influence factors of the lean operation limit for a spark ignition hydrogen enriched natural gas engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 9 ~ 13. (in Chinese)
- 13 Liu B, Huang Z H, Zeng K, et al. Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends[J]. Energy and Fuels, 2008, 22(1): 273 ~ 277.
- 14 Ji C W, Wang S F. Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(8): 3 546 ~ 3 556.
- 15 王倩, 徐新, 郭芳林, 等. 乙醇重整制氢催化剂的国内研究进展[J]. 中外能源, 2008(2): 23 ~ 29.
Wang Qian, Xu Xin, Guo Fanglin, et al. Domestic research progress in catalyst for hydrogen manufacture from ethanol reforming [J]. Sino-Global Energy, 2008(2): 23 ~ 29. (in Chinese)
- 16 Lima S, Silva A, Cruzei, et al. H₂ production through steam reforming of ethanol over Pt/ZrO₂, Pt/CeO₂ and Pt/CeZrO₂ catalysts [J]. Catalysis Today, 2008, 138(3~4): 162 ~ 168.
- 17 余立挺, 马建新. CuZnAlZr 催化剂上甲醇氧化水蒸气重整制氢 I. 催化剂组成的优化[J]. 催化学报, 2004, 25(7): 523 ~ 528.
Yu Lingting, Ma Jianxin. Investigation on oxidative steam reforming of methanol over CuZnAlZr catalyst I. Optimization of catalyst formulation[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2004, 25(7): 523 ~ 528. (in Chinese)
- 18 汪硕峰, 纪常伟, 焦磊, 等. 混氢改善汽油机低怠速性能研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 22 ~ 26.
Wang Shuofeng, Ji Changwei, Jiao Lei, et al. Effect of hydrogen addition on improving low idle speed performance of SI engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 22 ~ 26. (in Chinese)
- 19 Profeti L P R, Dias J A C, Assaf J M, et al. EM. Hydrogen production by steam reforming of ethanol over Ni-based catalysts promoted with noble metals[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 525 ~ 533.
- 20 Conte E, Boulouchos K. Influence of hydrogen-rich-gas addition on combustion, pollutant formation and efficiency of an IC-SI engine[C]. SAE Paper 2004-01-0972, 2004.

~~~~~  
(上接第 20 页)

- 6 Kazuhiro Hayashida, Toshio Mogi, Kenji Magai, et al. Growth characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in dimethylether diffusion flame[J]. Fuel, 2011, 90(2): 493 ~ 498.
- 7 Tsuchiya T, Sato Y. Development of DME engine for heavy-duty truck[C]. SAE Paper 2006-01-0052, 2006.
- 8 Yu J, Bae C. Dimethyl ether (DME) spray characteristics compared to diesel in a common-rail fuel injection system[J]. Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(12): 1 135 ~ 1 144.
- 9 吕兴才, 吉丽斌, 马骏骏, 等. 正庚烷均质压燃过程的燃烧稳定性和循环变动的研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(6): 1 ~ 6.  
Lü Xingcai, Ji Libin, Ma Junjun, et al. Study of combustion stabilities and cycle-to-cycle variations of n-heptane homogenous charge combustion ignition (HCCI) combustion[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(6): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 10 石磊, 崔毅, 邓康耀. 柴油燃料 HCCI 燃烧的稳定性研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(3): 244 ~ 249.  
Shi Lei, Cui Yi, Deng Kangyao. Study on stability of HCCI combustion operating with diesel[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(3): 244 ~ 249. (in Chinese)