

掺混重整气对汽油机燃烧及排放特性的影响*

戴晓旭 纪常伟 汪硕峰 梁晨 句丙杰

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 车载燃料重整制氢技术可以回收发动机尾气余热,在线制取重整气与汽油混合燃烧。基于一台 1.6 L 四缸汽油机,在转速 1 800 r/min,进气道绝对压力 61.5 kPa,理论当量比条件以及最大制动扭矩点火角条件下,考察混重整气对汽油机燃烧和排放性能的影响。试验结果表明:随着进气中重整气混合分数的逐渐增加,重整气中氢气的体积分数逐渐升高,燃油油耗率降低,指示热效率升高。尾气中 HC、NO_x 和 CO₂ 的排放量降低,而 CO 的排放量则有所升高。

关键词: 汽油机 重整气 乙醇 余热回收 排放

中图分类号: TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0007-05

Effect of Syngas on Combustion and Emission Characteristic of Gasoline Engine

Dai Xiaoxu Ji Changwei Wang Shuofeng Liang Chen Ju Bingjie

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

Abstract: The onboard fuel reforming could not only recovery the exhaust heat but also produce syngas for the mixed combustion in cylinders. An experimental study was carried out on a four-cylinder 1.6 L gasoline engine at a speed of 1 800 r/min, a manifolds absolute pressure of 61.5 kPa and the maximum brake torque for the spark timing to explore the effect of syngas addition on the engine combustion and emission performances at the stoichiometric condition. The experimental results demonstrated that the hydrogen volume fraction in syngas increased with the increase of syngas addition fraction. The fuel consumption rate was decreased and the indicated thermal efficiency was improved. HC, NO_x and CO₂ emissions were reduced whereas CO emission was increased after the syngas enrichment at the stoichiometric condition.

Key words: Gasoline engine Syngas Ethanol Exhaust heat recovery Emissions

引言

氢气作为一种可再生的替代燃料,一定程度上可以缓解人类对化石燃料的依赖。氢气由于具有点火能量密度低、火焰传播和扩散速度快等优势,可以有效改善发动机的缸内燃烧^[1~3]。将氢气作为添加剂与汽油混合燃烧,不但可以减少油耗,提高发动机的热效率,还能够改善发动机的排放^[4~6]。然而,氢

气的制备及储运往往会带来诸多的安全隐患。

车载燃料重整制氢技术可以通过回收发动机的尾气余热,在线制取富氢重整气,从而实现重整气和汽油的混合燃烧。目前水蒸气重整反应由于具有反应器结构简单、产氢效率高等优点被广泛应用于燃料重整制氢领域^[7~8]。燃料重整的原料通常为甲醇、乙醇等醇类物质。与其他原料相比,乙醇毒性小、可再生、运输也比较方便^[9~10]。考虑到生产成

收稿日期: 2012-09-10 修回日期: 2012-09-20

* 高等学校博士学科点专项基金资助项目(20111103110010)、北京市教委科技计划重点项目(KZ201210005002)和北京市自然科学基金资助项目(3122006)

作者简介: 戴晓旭, 博士生, 主要从事燃料重整制氢技术、尾气排放控制、燃烧与节能技术研究, E-mail: xiaoxu@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 纪常伟, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机污染控制、燃烧与节能技术、混合燃料研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn

本的因素,燃料重整制备催化剂的材料逐渐由 Pt、Rh、Pd 等贵金属向较为廉价的 Ni、Cu、Zn 和稀土材料发展,提高催化剂的选择性,增强防硫、防积炭的能力是燃料重整制氢技术的工作重点和发展方向。

本研究主要通过自行设计的燃料重整反应器吸收发动机的尾气余热,并在铜基催化剂的作用下,将乙醇水溶液转化为富氢重整气。探究理论当量比条件下,进气中重整气的添加对汽油机燃烧和排放特性的影响。

1 试验设备与方案

1.1 试验系统

试验系统如图 1 所示,发动机是北京现代的 1.6 L 汽油机,6000 r/min 额定输出功率为 82.32 kW,4500 r/min 时的额定输出转矩为 143.28 N·m。与计算机相连的发动机原机电子控制单元(OECU)和混氢电子控制单元(HECU)控制点火正时和汽油的喷射时刻及脉宽。被发动机尾气加热的燃料重整反应器在催化剂的作用下制取富氢重整气。通过安装在反应器前后端的热电偶检测尾气温度,利用冷阱将重整气中未反应的乙醇等物质冷凝出来。之后进行重整气采样,并将其引入气相色谱分析仪检测重整气中的组分及其含量。采样完成后,重整气被引入发动机的第四缸参与缸内燃烧。

发动机的测控系统为普联 FC2000 型发动机测控装置。其主要设备包括:GW160 型电涡流测功机(测量误差:±1 r/min 范围内),测功机主要控制发动机的转速和负荷;FC2210 型智能油耗仪(测量误差在 ±0.4 g/min 范围内)测量发动机的油耗;20N060 型热式质量流量计(测量误差:±0.1 L/min 范围内)测量发动机的进气量。缸压数据采集及燃烧分析系统主要包括:瑞士奇士乐公司生产的 Kistler 2613B 型曲轴信号传感器(分辨率设定为 0.2°, 测量误差:±0.01° 范围内)、Kistler 6117BFD17 型火花塞式缸压传感器(测量误差:±0.03 MPa 范围内)和 Dewetron 燃烧分析仪。火花塞式缸压传感器安装在发动机第四缸上,编码仪加装于曲轴前端,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,利用 Dewe-CA 燃烧分析软件对发动机连续运行 200 个循环的缸压和曲轴转角等数据进行采集和处理。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。

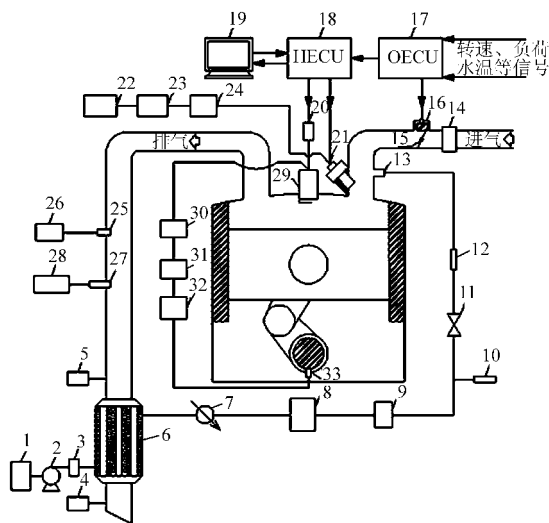


图 1 试验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram 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. 干燥器 9. 重整气流量计 10. 重整气采样管 11. 截止阀 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. OECU 18. HECU 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

1.2 试验方案

在充分暖机后进行试验,发动机冷却水的温度为(85±1)℃,润滑油的温度为(90±1)℃。发动机的转速被设定在 1800 r/min 左右,调节节气门开度确保进气道绝对压力为 61.5 kPa。HECU、OECU 与计算机相连,控制发动机点火正时以及汽油的喷射时刻和脉宽。改变重整原料的流量,实现重整气在进气中的体积分数由 0 逐渐增加到 2.33%。汽油的喷射脉宽随着重整气混合比例的增加而逐步降低,以保证发动机处于理论当量比条件下运行。重整气在进气中的体积分数 α 和过量空气系数 λ 定义为

$$\alpha = \dot{v}_r / (\dot{v}_r + \dot{v}_{\text{air}}) \times 100\% \quad (1)$$

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

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

$A_{\text{st},g}$ ——汽油理论空燃比($A_{\text{st},g} = 14.6$)

A_{st,H_2} ——氢气理论空燃比($A_{\text{st},\text{H}_2} = 34.3$)

$A_{\text{st},\text{CO}}$ ——一氧化碳理论空燃比($A_{\text{st},\text{CO}} = 2.5$)

过量空气系数由 Horiba MEXA-110 A/F 型分析仪(测量误差:0.1 A/F, 当 A/F = 14.7 时)插入发动机第四缸排气管的氧传感器获得。仪器中 H/C 摩尔比通过汽油、氢气和一氧化碳的质量流量来调节, 以便更好地测定发动机的过量空气系数。测量值与计算值的误差在 $\pm 5\%$ 之间。为了探究不同重整气混合分数对发动机性能的影响, 对于所有试验点, 点火提前角均控制在最大转矩的点火时刻 (MBT)。所有测试点均采集 200 个循环的缸内压力, 通过 Dewe-CA 燃烧分析软件考察重整气混合分数对缸内压力、指示热效率以及 HC、CO、NO_x、CO₂ 等参数的影响。

2 试验结果及讨论

2.1 乙醇水蒸气重整

图 2 表示的是重整气流量随原料流量的变化。当发动机转速为 1 800 r/min, 进气道绝对压力为 61.5 kPa, 理论当量比和 MBT 点火角时, 从图 2 可以看出, 重整气流量随着重整原料流量增加而稳定增加。当原料流量由 18 mL/min 增加到 48 mL/min 时, 重整气的流量由 90 L/h 提高到 230 L/h。此时在发动机的进气中, 重整气的体积分数由 0.92% 逐渐增加到 2.33%。这是由于随着重整气进入气缸, 燃油消耗逐渐减少, 稀燃程度加剧, 后燃作用增强, 最终致使尾气温度升高。一般而言, 催化剂的活性是随着温度的升高而增强的, 因此随着重整原料供给量的不断加大, 重整气的产量也随之升高。

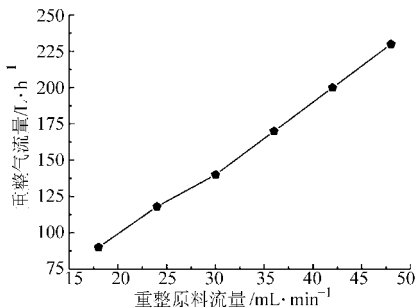


图 2 重整气流量随重整原料流量的变化

Fig. 2 Variation of syngas flow rate with feedstock flow rate

乙醇溶液在一定的温度和催化剂的作用下产生重整气。重整气的主要成分是氢气和一氧化碳以及少量未反应的原料。一般而言, 重整气中氢气的比例越高说明乙醇水蒸气重整制氢的效果越好。图 3 表示重整气中氢气和一氧化碳的体积分数随着重整原料流量的变化。可以看出, 当重整原料流量由 18 mL/min 增加到 48 mL/min 时, 氢气的体积分数由 50.64% 增加到 62.27%。这或许是由于重整反应生成的气态产物和未反应的原料, 在高的反应器压

力和原料流量下更容易通过反应器, 从而保证催化剂的表面可以更易被干燥和清洁。另外, 较高重整原料流量条件下产生的 H 和 OH 官能团也较多, 这也同样有利于氢气的产生。与此同时, 图 3 还表明, 当重整原料的流量由 18 mL/min 增加到 48 mL/min 时, 一氧化碳体积分数由 36.34% 降低到 15.48%。根据水汽转移反应^[11] (WGS), 重整反应中生成的一氧化碳可以进一步反应形成氢气。WGS 作为副反应会消耗生成的一氧化碳, 并产生更多的氢气。因此在重整气中氢气和一氧化碳体积分数随着重整原料流量的变化趋势是相反的。

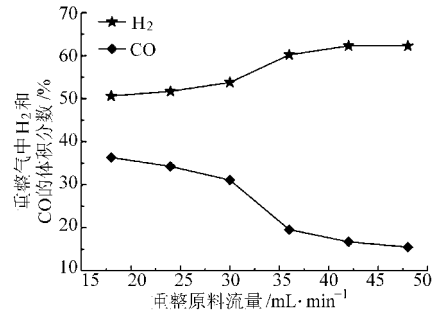


图 3 重整气中氢气和一氧化碳随重整原料流量的变化

Fig. 3 Variation of products concentration in syngas with feedstock flow rate

2.2 缸内压力及指示热效率

如图 4 所示, 当进气中混入重整气后, 缸内峰值压力有所升高, 并且峰值压力出现的时间有所提前。由于重整气中的氢气和一氧化碳具有较高的燃烧温度和火焰传播速度, 与纯汽油相比, 缸内重整气和汽油混合物的燃烧更加迅速。因此与原机相比, 缸内峰值压力升高, 峰值压力提前出现。然而, 进气中混入重整气之后, 随着曲轴转角的变化, 缸内压力达到峰值之后, 比原机下降得更迅速。这是因为重整气的引入使得缸内后燃持续期缩短。而后燃持续期的缩短意味着排气损失的减少。因此, 混入重整气之后, 发动机的效率得到提升。

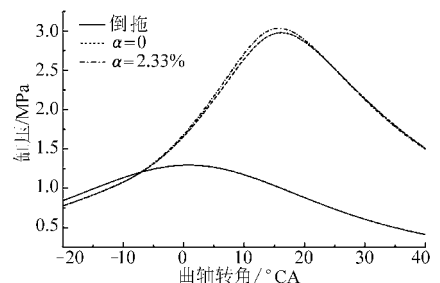


图 4 缸内压力随曲轴转角的变化曲线

Fig. 4 Variation of in-cylinder pressure with crank angle

图 5 为燃油消耗率随重整气混合分数的变化。从图 5 看出, 当进气中重整气的混合分数由 0 逐渐升高到 2.33% 时, 发动机的燃油消耗率由 3.30 kg/h

逐渐降低到 2.86 kg/h。这说明进气中混入重整气可以提高汽油机的经济性。合理的解释是重整气引入气缸后,为了保证过量空气系数为理论当量比,HECU 通过控制喷油脉宽减少了喷油量。因此,随着重整气混合分数的提高,发动机的燃油消耗率逐渐减低。

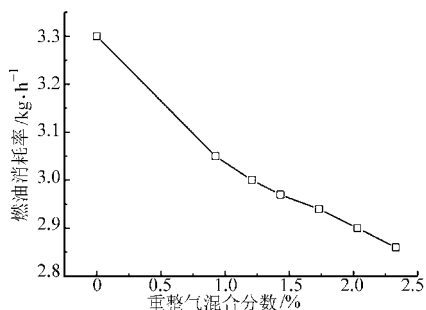


图5 燃油消耗率随重整气混合分数的变化曲线

Fig. 5 Variation of fuel consumption rate with the syngas volume fraction

指示热效率对于评价发动机燃油经济性至关重要,而燃油经济性可以通过优化燃烧系统或改善燃料燃烧特性实现。图6表示发动机指示热效率随进气中重整气体积分数的变化趋势。由图6可以看出,由纯汽油到重整气混合分数达到 2.33%时,发动机的指示热效率由 34.52% 提升到 39.52%。可能的原因是氢气和一氧化碳具有更宽的火焰极限,使得重整气和汽油的混合物比纯汽油燃烧得更加充分。而且,氢气的淬熄距离短可以使缸内混合气的火焰传播更加接近气缸壁和裂缝,这有利于提升发动机的燃烧效率,进而提高发动机的指示热效率。

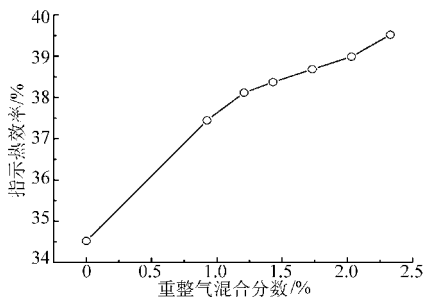


图6 指示热效率随重整气混合分数的变化曲线

Fig. 6 Variation of indicated thermal efficiency with syngas volume fraction

2.3 排放分析

通过测定三元催化器前尾气中 HC、CO、NO_x 和 CO₂ 的含量,探究重整气的引入对发动机排放特性的影响。图7表示 HC 排放量随着重整气混合分数的变化。当发动机转速为 1800 r/min,进气管道绝对压力为 61.5 kPa,理论当量比和 MBT 点火角时,HC 排放量随着重整气混合分数的增加而显著下降。当重整气在进气中的体积分数达到最大值 2.33%时,与原机相比,HC 排放量降低了 14.62%。这是由于

氢气的淬熄距离比汽油短,重整气和汽油混合物的燃烧火焰与纯汽油相比更容易到达气缸壁和裂缝。与此同时,重整气中氢气和一氧化碳具有较高的火焰燃烧和扩散速度,这使得缸内混合气的燃烧更加迅速和充分。因此,随着重整气混合分数的不断升高,HC 排放量显著下降。

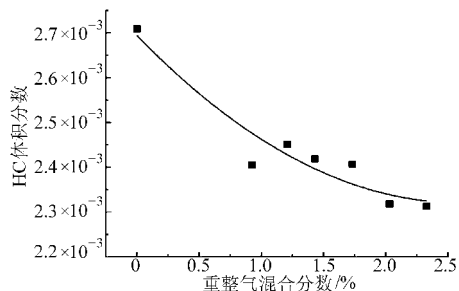


图7 HC 排放量随重整气混合分数的变化曲线

Fig. 7 Variation of HC emissions with syngas volume fraction

如图8所示,CO 的排放量随着重整气混合分数的升高而增加。当重整气的混合分数达到 2.33%时,CO 的排放量达到了 3.6×10^{-3} 。可能的解释是氢气具有较高的理论空燃比,其燃烧会消耗更多的 O₂。另外,快速燃烧的氢气迅速消耗着其附近的空气,而导致贫氧区的形成,最终导致 CO 不能进一步与 O₂ 反应生成 CO₂。

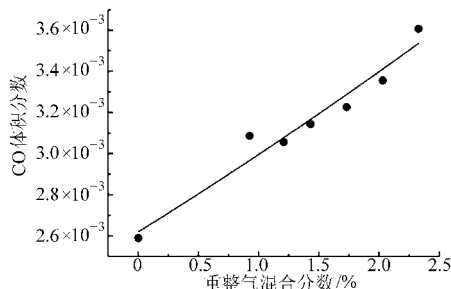


图8 CO 排放量随重整气混合分数的变化曲线

Fig. 8 Variation of CO emission with syngas volume fraction

另外,随着重整气混合分数的提高,重整气中未反应的乙醇浓度也有所上升。乙醇汽化需要消耗能量,因此会降低燃烧温度。燃烧持续期的缩短和燃烧温度的降低,会减少 CO 的氧化时间并降低 CO 的氧化温度,从而导致尾气中的 CO 排放量有所增加。

图9表示 NO_x 排放量随重整气体积分数的变化,可以看出 NO_x 排放量随着重整气混合分数的增加逐渐降低。与原机相比,当重整气混合分数达到 2.33%时,NO_x 的排放量降低了 9.11%。由于氢气和一氧化碳的体积能量密度低于汽油,在理论空燃比条件下,总的燃料能量流量随着重整气混合分数的增加而降低。另外,缸内温度对于 NO_x 排放的作用至关重要,当重整气流量较高时,重整气中未反应的乙醇由于蒸发吸热,降低了发动机的缸内温度。

因此,尾气中的 NO_x 排放量随着重整气混合分数的增加而降低。

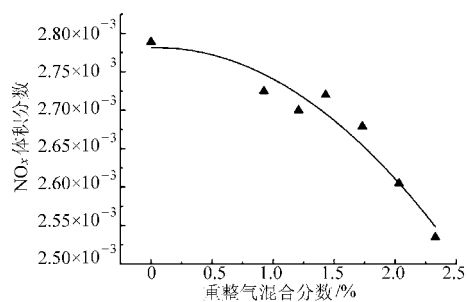


图9 NO_x 排放量随重整气混合分数的变化曲线

Fig.9 Variation of NO_x emissions with syngas volume fraction

如图10所示,随着重整气混合分数的逐渐升高,尾气中的 CO_2 排放量有所下降。当重整气在进气中的混合分数达到2.33%时, CO_2 的排放由原机的14.47%下降到14.30%。这是由于重整气中氢气在缸内的燃烧并不产生 CO_2 。因此,随着重整气混合分数的提高,氢气体积分数的提高,燃油消耗的减少,尾气中的 CO_2 排放量逐渐降低。另一方面,尽管重整气中本身含有一定的 CO ,但是由图3可以看出,当重整气混合分数逐渐升高,重整气中的 CO 含量是在逐渐降低的。因此,总体而言,混入重整气之后, CO_2 的排放量逐渐减少。

3 结论

利用自行设计的燃料重整反应器回收尾气余

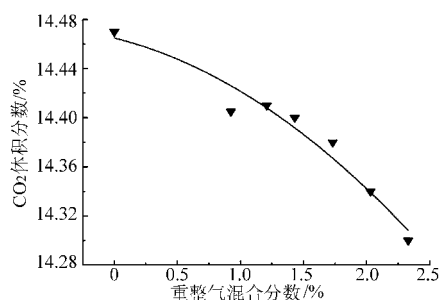


图10 CO_2 排放量随重整气混合分数的变化曲线

Fig.10 Variation of CO_2 emission with syngas volume fraction

热,在催化剂的作用下将乙醇溶液转化成富氢的重整气。并考察进气中引入重整气对汽油机缸内燃烧和排放特性的影响。通过试验得到以下结论:

(1) 随着重整原料的增加,重整气的流量显著提高。重整气中氢气的体积分数逐渐升高,而一氧化碳则逐渐降低。

(2) 当重整气的混合分数逐渐增加时,发动机的指示热效率也随之升高。这是由于重整气中氢气和一氧化碳具有更宽的火焰极限和更短的淬熄距离。

(3) 由于氢气和一氧化碳具有较高的燃烧温度和火焰传播速度,重整气的引入使得缸内峰值压力有所升高,并且峰值压力出现的时间有所提前。

(4) 随着重整气混合分数的逐渐升高,尾气中 HC 、 NO_x 和 CO_2 的排放量逐渐降低,而 CO 的排放量则有所升高。

参 考 文 献

- Kahraman E, Ozcan 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): 2066 ~ 2072.
- Tsolakis A, Megaritis A, Wyszynski M. Low temperature exhaust gas fuel reforming of diesel fuel [J]. Fuel, 2004, 83(13): 1837 ~ 1845.
- 马凡华, 刘海全, 李勇, 等. 氢内燃机缸内燃烧特性 [J]. 内燃机工程, 2008, 29(1): 29 ~ 33.
Ma Fanhua, Liu Haiquan, Li Yong, et al. Analysis of in-cylinder combustion of hydrogen fueled engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(1): 29 ~ 33. (in Chinese)
- 汪硕峰, 纪常伟, 焦磊, 等. 混氢改善汽油机低怠速性能的研究 [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)
- 纪常伟, 句丙杰, 戴晓旭. 内燃机尾气余热重整制氢混燃性能试验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 27 ~ 32.
Ji Changwei, Ju Bingjie, Dai Xiaoxu. Mixed combustion performance experiment of syngas produced by ethanol steam reforming for engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 27 ~ 32. (in Chinese)
- Hu E, Huang Z, Liu B, et al. Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 528 ~ 539.
- 张利静, 张武高. 车载燃料重整制氢及其在发动机上的应用 [J]. 柴油机, 2008, 30(3): 24 ~ 29.
- Lima S, Silva A, Cruz I, et al. H_2 production through steam reforming of ethanol over Pt/ZrO₂, Pt/CeO₂ and Pt/CeZrO₂ catalysts [J]. Catalysis Today, 2008, 138(3 ~ 4): 162 ~ 168.
- 余立挺, 马建. CuZnAlZr 催化剂上甲醇氧化水蒸汽重整制氢 I. 催化剂组成的优化 [J]. 催化学报, 2004, 25(7): 523 ~ 528.
Yu Liting, Ma Jian. 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)
- Veronica M, Graciela B, Norma A, et al. Ethanol steam reforming using Ni(II)-Al(III) layered double hydroxide as catalyst precursor kinetic study [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138(1 ~ 3): 602 ~ 607.
- Song H, Ozkan U. Ethanol steam reforming over Co-based catalysts: role of oxygen mobility [J]. Journal of Catalysis, 2009, 261(1): 66 ~ 74.