

# 混氢改善汽油机低怠速性能研究\*

汪硕峰<sup>1</sup> 纪常伟<sup>1</sup> 焦磊<sup>2</sup> 张旻玥<sup>1</sup> 张擘<sup>1</sup> 黄霄楠<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 李斯特测试设备上海有限公司, 北京 100027)

**【摘要】** 在一台加装了电控氢气喷射系统的四缸汽油机上, 试验研究了混氢对发动机低怠速性能的影响。在怠速转速不变、维持进气混合气处于当量比的条件下, 在 0~6% 的范围内逐渐增加氢气在总进气中的体积分数, 测试了发动机转速分别为 800、700、600 r/min 时的低怠速性能。试验结果表明, 纯汽油机怠速为 800 r/min 时, 发动机稳定运行的燃料能量流量  $E_f$  为 30.8 MJ/h, 而当混氢分数增加至 6.0%、怠速转速降至 600 r/min 时,  $E_f$  降低至 18.6 MJ/h; 随进气混氢体积分数的提高, 发动机低怠速时的燃烧持续期缩短, HC、CO 及  $\text{NO}_x$  排放量降低, 循环变动也减小。可见, 进气掺氢可有效改善发动机的低怠速性能。

**关键词:** 汽油机 混氢 怠速 燃烧 排放

**中图分类号:** TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0022-05

## Effect of Hydrogen Addition on Improving Low Idle Speed Performance of SI Engine

Wang Shuofeng<sup>1</sup> Ji Changwei<sup>1</sup> Jiao Lei<sup>2</sup> Zhang Minyue<sup>1</sup> Zhang Bo<sup>1</sup> Huang Xiaonan<sup>1</sup>

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

2. AVL Test Systems Shanghai Co., Ltd., Beijing 100027, China)

### Abstract

An experiment was carried out on a four-cylinder spark-ignited (SI) gasoline engine to investigate the effect of hydrogen addition on the engine performance at low idle speed conditions. The engine was run at three idle speeds of 800 r/min, 700 r/min and 600 r/min. At the specified idle speed and stoichiometric conditions, the hydrogen volumetric fraction in the total intake was gradually increased from 0 to about 6%. The experimental results showed that the engine fuel energy flow rate was reduced from 30.8 MJ/h at the idle speed of 800 r/min and a hydrogen volumetric fraction in the intake of 0 to 18.6 MJ/h at the idle speed of 600 r/min and a hydrogen volumetric fraction in the intake of 6.0%. For different idle speeds, the engine combustion duration was shortened, cyclic variation was eased and HC, CO and  $\text{NO}_x$  emissions were decreased with the increase of hydrogen volumetric fraction in the intake. All in all, the addition of hydrogen was effective for enhancing the engine performance at low idle speed conditions.

**Key words** Gasoline engine, Hydrogen, Idle, Combustion, Emissions

### 引言

怠速工况下, 由于缸内燃烧温度低、残余废气

多, 汽油机往往会产生较高的能耗和有害排放<sup>[1]</sup>。因此, 改善汽油机怠速性能成为提高发动机整体经济性和排放性的重要环节之一。

收稿日期: 2011-07-07 修回日期: 2011-07-17

\* 国家自然科学基金资助项目(50976005)

作者简介: 汪硕峰, 博士生, 主要从事氢混合燃料内燃机性能研究, E-mail: shfwang@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 纪常伟, 教授, 博士生导师, 主要从事内燃机节能、净化及燃烧控制研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn

研究表明,降低转速是减少发动机怠速能耗的有效手段之一<sup>[2]</sup>。但过低的怠速会导致缸内混合气的流动强度降低、燃料燃烧速度减缓,使发动机出现怠速不稳甚至熄火等现象<sup>[3]</sup>。

氢气的扩散速度比汽油高,因而混氢可以提高缸内混合气的均匀程度,同时,氢气较高的绝热火焰速度、较短的淬熄距离及宽广的稀燃极限也有利于缩短燃烧持续期,进而减小发动机的循环变动<sup>[4]</sup>。因此,进气混氢可以有效改善发动机的燃烧与排放性能<sup>[5-7]</sup>。

本文在一台加装了电控氢气喷射系统的四缸汽油机上,就怠速转速为 600、700 和 800 r/min 时,进气混氢对汽油机低怠速条件下燃烧与排放性能的影响进行试验研究和比较分析。

## 1 试验

### 1.1 试验系统

试验在 1.6 L 汽油机上进行,该机型主要技术参数如表 1 所示。试验前,在原机进气管道上加装了一套电控氢气喷射装置,使汽油和氢气可以同时在各缸进气歧管内喷射。利用自主开发的混合燃料电子控制单元(HECU)控制发动机怠速旁通阀开度及点火角,进而调整发动机的怠速转速。各种转速下,发动机点火角均控制在上止点附近,该点火角与原机怠速点火角相同。

表 1 发动机主要技术参数

Tab.1 Engine specifications

参数	数值
缸径/mm	77.4
活塞行程/mm	85.0
排量/L	1.599
压缩比	10
额定转矩(转速)/N·m(r/min)	143.28(4500)
额定功率(转速)/kW(r/min)	82.32(6000)

图 1 为发动机试验系统结构图。发动机曲轴输出端与 GW160 型电涡流测功机相连(转速测量误差为  $\pm 1$  r/min)。汽油流量由 FC2210 型质量式燃油流量计测量(测量误差为  $\pm 0.4$  g/min)。使用 EPI-800 与 DM09 型热式气体质量流量计测量标准状态下空气与氢气的体积流量(测量误差均小于满量程的  $\pm 0.4\%$ )。Kistler 2613 型光学编码仪安装在发动机曲轴自由端以测量曲轴位置并触发缸压采集(分辨率设定为  $0.2^\circ\text{CA}$ ,测量误差在  $\pm 0.01^\circ\text{CA}$  内)。Kistler 6117 型火花塞式缸压传感器安装于发

动机第四缸(缸压测量非线性度在  $\pm 0.6\%$  内)。使用 Horiba MEXA-110 $\lambda$  型空燃比分析仪测量发动机空燃比(在空燃比为 14.7~30 时最大测量误差在  $\pm 0.7$  内)。采用 Horiba MEXA-7100D 型尾气分析仪测量发动机尾气中 HC、CO 与 NO<sub>x</sub> 的浓度,3 种排放物的测量精度均为  $10^{-6}$ (体积分数),测量误差小于读数的  $\pm 1\%$ 。

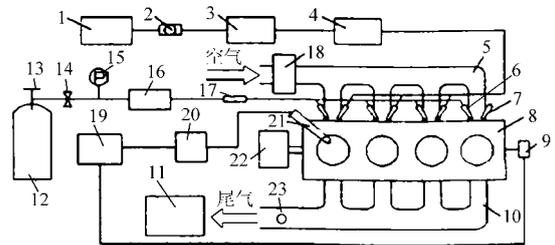


图 1 试验系统简图

Fig.1 Schematic of the experimental system

1. 汽油箱 2. 汽油滤清器 3. 油耗仪 4. 电动汽油泵 5. 进气管道 6. 氢气喷嘴 7. 汽油喷嘴 8. 发动机 9. 编码仪 10. 排气管 11. 尾气分析仪 12. 氢气罐 13. 气瓶开关 14. 调压器 15. 氢气压力表 16. 氢气流量计 17. 阻燃阀 18. 空气流量计 19. 燃烧分析仪 20. 电荷放大器 21. 火花塞式缸压传感器 22. 测功机 23. 空燃比分析仪

### 1.2 试验方案

试验在发动机暖机结束后进行。试验过程中,将发动机水温与机油温度分别控制在  $(90 \pm 1)^\circ\text{C}$  和  $(95 \pm 1)^\circ\text{C}$  内。

首先将发动机转速控制在 800 r/min,通过 HECU 将发动机怠速转速分别降低至 700 r/min 和 600 r/min。在不同的发动机转速条件下,通过加大氢气的喷射脉宽,使氢气占总进气的体积分数( $\varphi(\text{H}_2)$ )由 0 逐渐增加至 6% 左右。在某一  $\varphi(\text{H}_2)$  条件下,通过减少汽油喷射量,使汽油-氢气-空气所组成的混合气过量空气系数  $\lambda$  始终保持在 1.00 附近。 $\varphi(\text{H}_2)$  和  $\lambda$  分别定义为

$$\varphi(\text{H}_2) = \frac{q_{v\text{H}_2}}{q_{v\text{H}_2} + q_{v\text{air}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\lambda = q_{v\text{air}} \rho_{\text{air}} / (q_{m\text{g}} \alpha_{st,\text{g}} + q_{v\text{H}_2} \rho_{\text{H}_2} \alpha_{st,\text{H}_2}) \quad (2)$$

式中  $q_{v\text{H}_2}$ ——氢气体积流量, L/min

$q_{v\text{air}}$ ——空气体积流量, L/min

$q_{m\text{g}}$ ——汽油质量流量, g/min

$\rho_{\text{H}_2}$ ——氢气密度, g/L

$\rho_{\text{air}}$ ——空气密度, g/L

$\alpha_{st,\text{g}}$ ——汽油理论空燃比

$\alpha_{st,\text{H}_2}$ ——氢气理论空燃比

通过 DEWE-CA 燃烧分析软件对不同工况下 200 个循环的发动机缸压数据进行采集、分析,最终得出试验结果。

## 2 试验结果分析

### 2.1 混氢及降低怠速转速对循环变动的影响

减小怠速转速的波动是发动机怠速控制过程的主要目标之一。图2为不同怠速转速条件下,发动机转速的循环变动系数 $C$ 随进气混氢体积分数的变化曲线。 $C$ 定义为

$$C = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (n_{i,k} - \bar{n}_{i,k})^2 / (M - 1)}{\bar{n}_{i,k}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $n_{i,k}$ ——发动机第 $k$ 个循环的转速  
 $\bar{n}_{i,k}$ ——发动机 $M$ 个循环的平均转速  
 $M$ ——试验循环数

从图2中可以看出,相同进气混氢体积分数下, $C$ 随怠速转速的降低而升高。这主要是因为降低怠速转速后,发动机怠速旁通阀开度减小,缸内混合气的流动减弱,使混合气均匀程度有所降低,进而导致燃料燃烧不稳定,循环变动增加。同时,减小怠速旁通阀开度还会造成缸内残余废气系数增加,使燃料燃烧速度减缓,燃烧持续期延长,进而导致 $C$ 随怠速转速的降低而升高。

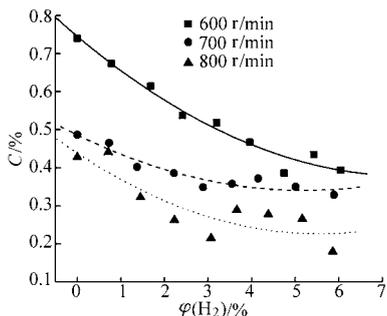


图2 不同转速下 $C$ 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化曲线

Fig. 2 Variation of  $C$  with  $\varphi(\text{H}_2)$  at different idle speeds

图2还表明,进气混氢有利于减小发动机怠速时的循环变动,且这种效果在发动机处于较低的怠速转速时更加明显。在怠速转速为600 r/min时,当进气混氢体积分数由0增加至6.0%时, $C$ 降低约46.8%。这是由于氢气的点火能量较低,所以混氢后缸内混合气较纯汽油更容易起火燃烧;同时,氢气的绝热火焰速度约为汽油的5倍<sup>[8]</sup>,因此混氢可以缩短发动机燃烧持续期。另一方面,氢气的扩散速度明显高于汽油,所以混氢可以提高混合气的均匀程度,促进燃料的充分、快速燃烧。由于任何一种缩短燃烧持续期的方法都有利于减小发动机循环变动<sup>[9]</sup>,所以随进气混氢体积分数的增加, $C$ 逐渐降低。

### 2.2 混氢及降低怠速转速对燃料能量流量的影响

由于怠速时发动机并不对外输出有用功驱动车

辆前进,因而燃料能量流量可以较直观地反映发动机的怠速经济性。

图3为不同怠速转速条件下,进入发动机的总燃料能量流量 $E_f$ 随进气混氢体积分数的变化曲线。图3表明,进气混氢体积分数相同时, $E_f$ 随怠速转速的降低而明显减小。 $E_f$ 由纯汽油机在800 r/min怠速条件下的30.8 MJ/h减小至进气混氢体积分数为6.0%、怠速转速为600 r/min时的18.6 MJ/h。造成这种现象的主要原因是:发动机怠速时所作的功主要用于驱动曲轴旋转和克服各种阻力。随怠速转速的降低,驱动曲轴旋转所需要的动能明显减少,而在相同的水温及机油温度条件下,发动机需要克服的阻力功又相对保持不变。因此,降低怠速转速有利于提高发动机怠速时经济性。另一方面,混氢有利于缩短燃烧持续期,减小传热损失和排气损失,进而使混氢后发动机热效率得到提高,燃料能量消耗量降低。

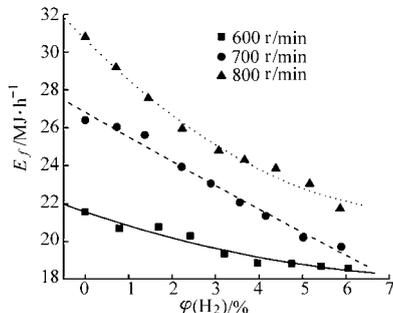


图3 不同转速下 $E_f$ 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化曲线

Fig. 3 Variation of  $E_f$  with  $\varphi(\text{H}_2)$  at different idle speeds

### 2.3 混氢及降低怠速转速对燃烧过程的影响

图4a和图4b分别为不同怠速转速条件下,发动机火焰发展期和火焰传播期随进气混氢体积分数的变化曲线,其中 $\theta_1$ 为火焰发展期, $\theta_2$ 为火焰传播期。从图4中可以看出,在 $\varphi(\text{H}_2)$ 为0的条件下,当发动机怠速转速由800 r/min降低至600 r/min时, $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别延长了5.0%和5.6%。这主要是因为降低怠速转速后,发动机怠速旁通阀开度减小,导致缸内残余废气系数随转速的降低而升高,进而导致发动机火焰发展期和火焰传播期在降低怠速转速后有所延长。图4还表明,混氢后发动机燃烧持续期明显缩短。在怠速转速为600 r/min的条件下,当进气混氢体积分数由0提高至6.0%时,发动机火焰发展和传播期分别缩短约16.6%和19.8%。造成这种现象的原因是:氢气的点火能量较低,所以混氢后缸内混合气更容易被点燃,使混氢后发动机火焰发展期有所缩短。同时,混氢有利于加快缸内O和OH基团的生成<sup>[10]</sup>,进而促进燃料的快速和充分燃烧。另一方面,氢气的燃烧界限较宽,所以氢气/汽

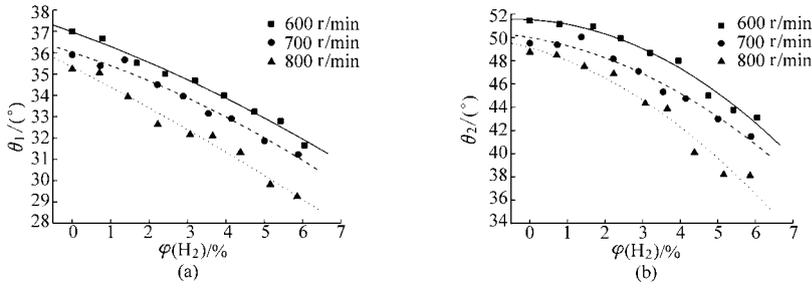


图4 不同转速下  $\theta_1$  和  $\theta_2$  随  $\varphi(H_2)$  的变化曲线

Fig. 4 Variations of  $\theta_1$  and  $\theta_2$  with  $\varphi(H_2)$  at different idle speeds

(a)  $\theta_1$  (b)  $\theta_2$

油混合气较纯汽油可以在更高的残余废气系数下正常燃烧,这也使得混氢后发动机低怠速条件下的燃烧持续期有所缩短。

### 2.4 混氢及降低怠速转速对泵气损失的影响

图5给出了不同怠速转速条件下发动机平均泵气有效压力( $p_p$ )随进气混氢体积分数的变化曲线。

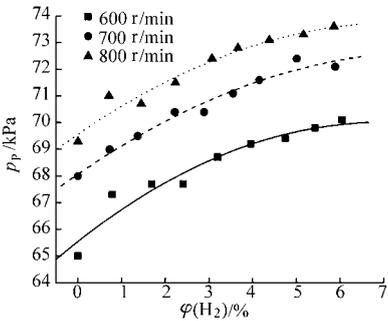


图5 不同转速下  $p_p$  随  $\varphi(H_2)$  的变化曲线

Fig. 5 Variation of  $p_p$  with  $\varphi(H_2)$  at different idle speeds

从图5中可以看出,  $\varphi(H_2)$  相同时,降低怠速转速可以减少发动机泵气损失。这是因为尽管降低怠速转速后发动机进气量有所减少,但由于转速的下降对  $p_p$  的影响更加明显,因而发动机泵气损失随怠速转速的降低而减少。由于混氢后燃料燃烧速度加快,所以 ECU 需要在  $\varphi(H_2)$  增加后减小怠速马达开度才能够将发动机怠速转速稳定在其目标值附近<sup>[11]</sup>。因此,相同怠速转速条件下,混氢后发动机泵气损失有所增加。

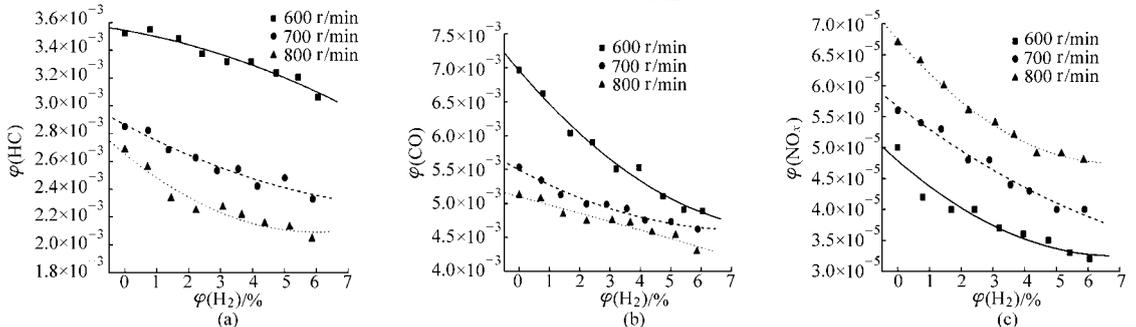


图6 混氢及降低怠速转速时主要排放物的变化曲线

Fig. 6 Variations of exhaust emissions with  $\varphi(H_2)$  at different idle speeds

(a) HC (b) CO (c)  $NO_x$

### 2.5 混氢及降低怠速转速对有害排放的影响

从图6a和图6b中可以看出,降低转速后缸内残余废气增多,燃烧温度降低,因而相同进气混氢体积分条件下发动机 HC 和 CO 排放量均随怠速转速的降低而升高。而进气混氢则能够有效地减少发动机 HC 和 CO 排放。在 600 r/min 的条件下,当  $\varphi(H_2)$  由 0 增加至 6.0% 时,HC 和 CO 排放量分别降低 13.7% 和 31.4%。这主要是因为氢气的淬熄距离远低于汽油,所以混氢后缸内火焰可以传播的更加接近缸壁,从而促进燃料的充分燃烧并减少由于“罅隙效应”所产生的 HC 排放<sup>[7]</sup>。此外,在相同的怠速转速及过量空气系数条件下,进入发动机的汽油流量随  $\varphi(H_2)$  的增加而减小,而氢气又是一种不含碳的燃料,所以在相同的怠速转速条件下,HC 和 CO 排放量均随进气混氢体积分数的增加而降低。同时,从图6a和6b中还可以看出,进气混氢对改善发动机在 600 r/min 时的 HC 和 CO 排放效果较在 700 r/min 和 800 r/min 时更加明显。这主要是因为低转速条件下发动机进气量较小,空气流动速度也相对较低,从而导致混合气均匀性下降。而氢气的扩散速度则明显高于汽油,所以随进气混氢体积分数的增加,进入发动机的混合气均匀程度得到改善,进而使 HC 和 CO 排放量随  $\varphi(H_2)$  的增加而下降。当发动机怠速升高时,进入发动机的空气流量和流速均有提高,从而使混氢对于改善混合气的作

用效果有所减弱。

图 6c 表明,相同进气混氢体积分数条件下,发动机  $\text{NO}_x$  排放量随怠速转速的下降和进气混氢体积分数的增加而明显减小。这主要是因为进入缸内的燃料能量流量随转速的降低和  $\varphi(\text{H}_2)$  的升高均有所减小,从而使得缸内燃料燃烧时所产生的最高温度在降低怠速后有所下降,进而使得  $\text{NO}_x$  排放量随怠速转速的降低和  $\varphi(\text{H}_2)$  的增加而减小<sup>[12]</sup>。发动机在怠速为 600 r/min 且  $\varphi(\text{H}_2)$  为 6.0% 时所产生的  $\text{NO}_x$  较 800 r/min 且  $\varphi(\text{H}_2)$  为 0 的  $\text{NO}_x$  降低约 55.2%。

### 3 结论

(1) 进气混氢有利于改善发动机怠速时的循环变动。相同进气混氢体积分数条件下,发动机的循

环变动随怠速转速的降低而升高,当进气混氢体积分数由 0 增加至 6.0% 时,  $C$  降低约 46.8%。

(2) 混氢后,汽油机能够通过降低怠速进一步提高经济性,怠速为 800 r/min 时,纯汽油发动机的能耗为 30.8 MJ/h,而当混氢分数增加至 6.0%、怠速转速降至 600 r/min 时,能耗降低至 18.6 MJ/h。

(3) 由于燃烧温度降低且残余废气系数增加,发动机燃烧持续期随怠速转速的降低而延长。进气混氢可以有效缩短发动机低怠速条件下的火焰发展期和火焰传播期。

(4) 相同怠速转速条件下,进气混氢可以降低发动机怠速时所产生的 HC、CO 及  $\text{NO}_x$  排放量。相同进气混氢条件下,随发动机怠速转速的降低,  $\text{NO}_x$  排放量减小,但 HC 和 CO 排放量有所升高。

### 参 考 文 献

- 1 Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. Development of a driving cycle for Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(15): 2 323 ~ 2 335.
- 2 Fukui T, Enomoto H. Decreasing of the engine idle speed of a small gasoline engine with feedback control [C]. SAE Paper 2009-32-0171, 2009.
- 3 Kerns J, Surnilla G. Fuel assisted idle speed control for lean burn gasoline engines [C]. SAE Paper 2006-32-0009, 2006.
- 4 王金华,黄佐华,苗海燕,等. 利用定容燃烧弹研究天然气掺氢混合燃料直喷燃烧循环变动[J]. 内燃机学报, 2008, 26(5): 410 ~ 419.  
Wang Jinhua, Huang Zuohua, Miao Haiyan, et al. Study of cycle-by-cycle variations of direct-injection combustion fueled with natural gas/hydrogen blends using a constant volume bomb [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(5): 410 ~ 419. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 陈浩,刘兵,王金华,等. 火花点火发动机燃用天然气掺氢混合燃料循环变动研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(1): 18 ~ 24.  
Chen Hao, Liu Bing, Wang Jinhua, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas/hydrogen blends [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(1): 18 ~ 24. (in Chinese)
- 7 Ma Fanhua, Wang Yu, Liu Haiquan, et al. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(18): 5 067 ~ 5 075.
- 8 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): 1 541 ~ 1 552.
- 9 Wang Jinhua, Chen Hao, Liu Bing, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4 876 ~ 4 883.
- 10 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.
- 11 汪硕峰,纪常伟,张擎,等. 混氢对稀燃汽油机怠速性能的影响试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 1 ~ 5.  
Wang Shuofeng, Ji Changwei, Zhang Bo, et al. Effect of hydrogen enrichment on the performance of a lean-burn gasoline engine at idle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 12 Ji Changwei, Wang Shuofeng. 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.