

# 掺混标准氢氧气对汽油机性能的影响

纪常伟, 杨金鑫, 汪硕峰, 王华超, 张 攀, 周小龙

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

**摘 要:** 针对汽油机部分负荷条件下热效率低和有害排放高的问题, 笔者在一台加装了电控氢、氧气喷射系统的四缸汽油机上研究了掺混标准氢氧气对汽油机燃烧与排放特性的影响。标准氢氧气定义为氢气与氧气物质的量比为2:1的氢氧气。试验时, 通过调整氢气和氧气喷嘴的喷射脉宽, 使标准氢氧气占进气的体积分数( $\alpha_{2H_2/O_2}$ )由0分别增加至2%和4%, 并减少汽油的喷射脉宽, 使混合气的过量空气系数由1.00增加至1.50。结果表明: 掺入标准氢氧气能改善汽油机经济性, 发动机比燃料能量消耗率最低值由原机的12.63 MJ/kW·h分别降低至 $\alpha_{2H_2/O_2}$ 为2%和4%时的12.27 MJ/kW·h和12.11 MJ/kW·h; 此外, 掺入标准氢氧气后, 汽油机滞燃期及快速燃烧持续期缩短, 最大压力升高率提高, HC及CO排放降低, 但NO<sub>x</sub>排放明显增加。

**关键词:** 氢气; 氧气; 汽油机; 燃烧; 排放

中图分类号: TK 411

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)09-1378-06

## Effect of Standard Hydroxygen Addition on the Performance of a Gasoline Engine

Ji Chang-wei, YANG Jin-xin, WANG Shuo-feng, WANG Hua-chao, ZHANG Bo, ZHOU Xiao-long

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

**Abstract:** The gasoline engines usually encounter the dropped thermal efficiency and adversely increased toxic emissions at part load conditions. This paper investigated the effect of standard hydroxygen addition on the performance of a gasoline engine. The standard hydroxygen is defined as the hydroxygen with a hydrogen-to-oxygen mole ratio of 2:1. The experiment was carried out on a four cylinder gasoline engine equipped with an electronically controlled hydrogen and oxygen injection system. During the experiment, the volume fraction of the standard hydroxygen in the total intake was raised from 0 to 2% and 4% by adjusting the injection durations of hydrogen and oxygen, respectively. The gasoline injection duration was reduced to enable the global excess air ratio of in-cylinder charge to increase from 1.00 to 1.50. The test results showed that the addition of standard hydroxygen availed improving the engine fuel economy. The lowest brake specific energy consumption rate was decreased from 12.63 MJ/kW·h to 12.27 MJ/kW·h and 12.11 MJ/kW·h of the 2% and 4% standard hydroxygen-blended gasoline engines, respectively. Moreover, it was also found that the flame development and propagation periods were shortened, the peak cylinder pressure rise rate was enhanced, HC and CO emissions were reduced whereas NO<sub>x</sub> emissions were increased after the standard hydroxygen addition.

**Key words:** hydrogen; oxygen; spark ignition engine; combustion; emissions

收稿日期: 2012-06-01.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3122006); 北京市教委科技计划重点项目(KZ201210005002); 教育部博士点基金资助项目(201111103110010); 2012年学科与研究生教育-创新人才培养计划-博士生创新基金资助项目(YB201208).

作者简介: 纪常伟(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧、节能与排气净化方面的研究, E-mail: chwji@bjut.edu.cn.

在部分负荷条件下,由于进气门节流损失的增加以及进入缸内燃料能量的减少,使汽油机缸内混合气的流动强度明显减弱且燃烧温度降低,从而导致汽油机在部分负荷条件下出现热效率降低且有害排放升高的问题。相对汽油而言,氢气具有较高的扩散和火焰传播速度及较低的点火能量,所以氢气被普遍认为是点燃式内燃机较为优良的代用燃料<sup>[1-2]</sup>。但氢气较高的燃烧温度和宽广的燃烧界限却又会导致纯氢内燃机出现 $\text{NO}_x$ 排放高、早燃及回火等问题<sup>[3-4]</sup>。

相比之下,由氢气和其他化石燃料所组成的掺氢燃料内燃机则可以利用氢气和传统燃料各自的特点来获得在内燃机全部运行工况下较好的燃烧与排放水平<sup>[5-11]</sup>。研究表明,向天然气和汽油机中掺入少量氢气即可有效缩短内燃机燃烧持续期,提高内燃机热效率并减少HC及CO排放的产生<sup>[12-13]</sup>。

同时,由于稀燃时燃料的燃烧温度较低,且缸内混合气中含氧量较高,内燃机可以在稀燃时获得更高的热效率和更好的排放水平。但汽油的燃烧界限较窄,因而汽油机在稀燃时往往会产生较高的循环变动。相对汽油,氢气具有更宽的稀燃界限,因而进气掺氢可以有效地抑制点燃式内燃机稀燃时的循环变动并拓宽其稀燃界限<sup>[14]</sup>。

然而,无论对于纯氢还是掺氢内燃机而言,氢气基础设施建设的不足都会给车辆加氢带来困难。近年来,通过小型车载制氢机电解水制氢是解决掺氢内燃机车辆加氢困难问题的途径<sup>[15]</sup>。在电解水的

过程中会同时产生氢气和氧气。氧气也是一种优良的助燃剂,提高内燃机进气中的氧浓度也有利于促进燃料充分燃烧。然而,目前利用氢气和氧气2种气体组成氢氧气来共同改善汽油机燃烧与排放性能的研究还少有报道。由于1 mol 氢气燃烧需要0.5 mol 氧气,因而可以将氢气和氧气物质的量比为2:1的氢氧气定义为标准氢氧气,其自身不需要外加氧化剂或其他燃料便可充分燃烧;将氢气和氧气物质的量比低于2:1的氢氧气定义为富氧氢氧气;将氢气和氧气物质的量比高于2:1的氢氧气定义为富氢氢氧气。

为此,本文在一台1.6 L四缸汽油机上研究了混掺标准氢氧气对稀燃汽油机燃烧与排放特性的影响规律。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

试验在北京现代1.6 L自然吸气式四缸汽油机上进行,表1给出了该机型的具体技术参数。试验前,在原机进气道上加装了一套氢气和氧气的电控喷射系统。为避免氢、氧气预先混合而带来的回火危险,将4个氢气喷嘴分别安装在内燃机各缸的进气歧管处,并将1个氧气喷嘴单独安装在节气门上游,从而使从喷嘴喷出的氧气起到提高进气中氧浓度的作用。试验中,进气道和供气管路中均未发生回火现象。氢气和氧气喷嘴的开启及关闭由一台自主开发的混合燃料电子控制单元(HECU)控制。

表1 发动机主要技术参数

Table 1 Engine specifications

发动机类型	制造商	缸径/ mm	活塞行程/ mm	排量/ L	压缩比	额定转矩/ ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	额定功率/ ( $\text{kW}/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )
四冲程、直列四缸、水冷	北京现代	77.4	85.0	1.599	10:1	143.28/4 500	82.32/6 000

图1给出了本研究所使用的试验系统结构图。使用FC2210型智能油耗仪测量进入发动机的汽油流量(测量误差不大于满量程的 $\pm 0.4\%$ )。采用同圆20N060、七星华创D07-19B及D07-19BM型热式气体质量流量计分别测量进入发动机的空气、氧气与氢气流量(测量误差均不大于满量程的 $\pm 1\%$ )。发动机缸内压力由Kistler 6117BFD17型火花塞式缸压传感器测量(缸压测量非线性度低于 $\pm 0.6\%$ )。使用Kistler 2613B型编码仪测量发动机曲轴转角位置(分辨率为 $0.2^\circ$ 曲轴转角,测量误差小

于 $\pm 0.01^\circ$ 曲轴转角)。通过DEWE-CA燃烧分析软件对发动机连续运行200个循环的缸压、曲轴转角和转速等数据进行采集和处理。采用Horiba MEXA-110型空燃比分析仪与Horiba MB-201型宽域氧传感器测量混氢发动机的空燃比(该系统在空燃比为14.7~30时最大测量误差为 $\pm 0.1\sim 0.7$ )。采用Horiba MEXA-7100DEGR型尾气分析仪测量发动机尾气中HC、CO与 $\text{NO}_x$ 的浓度,3种污染物的测量精度均为 $10^{-6}$ (体积分),测量误差小于读数的 $\pm 1\%$ 。

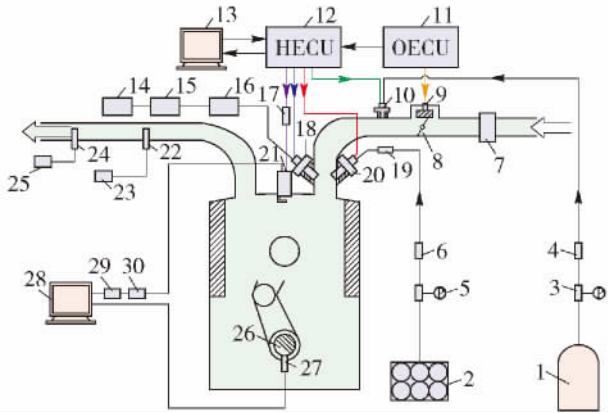


图1 试验系统简图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

1. 氧气罐; 2. 氢气罐; 3. 氧气管路减压阀; 4. 氧气质量流量计; 5. 氢气管路减压阀; 6. 氢气质量流量计; 7. 空气流量计; 8. 节气门; 9. 怠速旁通阀; 10. 氧气喷嘴; 11. 原机电子控制单元(OECU); 12. 混合燃料电子控制单元(HECU); 13. 标定计算机; 14. 汽油箱; 15. 汽油泵; 16. 汽油流量计; 17. 点火模块; 18. 汽油喷嘴; 19. 阻燃阀; 20. 氢气喷嘴; 21. 火花塞式缸压传感器; 22. 氧传感器; 23. 空燃比分析仪; 24. 尾气采样管; 25. Horiba MEXA-7000 法规排放分析仪; 26. 曲轴; 27. 光学编码器; 28. 燃烧分析仪; 29. A/D 转换器; 30. 电荷放大器

## 1.2 试验方法

试验在发动机暖机后进行,并将冷却液温度和机油温度分别控制在  $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间. 试验时,内燃机转速控制在  $1400\text{ r/min}$ ,通过调整节气门开度使进气管道内的压力保持  $61.5\text{ kPa}$ . 通过混合燃料电子控制单元调整氢气和氧气的喷射脉宽,使标准氢氧气占进气的体积分数由 0 增加至 2% 和 4%,并控制每种标准氢氧气占进气体积分数下的氢气和氧气物质的量比为 2:1. 在各标准氢氧气占进气体积分数下,通过减少汽油的喷射脉宽,使缸内混合气的过量空气系数由 1.00 逐渐增加至 1.50. 标准氢氧气占进气的体积分数 ( $\alpha_{2\text{H}_2/\text{O}_2}$ ) 及标准氢氧气-汽油-空气的过量空气系数 ( $\lambda$ ) 分别定义为

$$\alpha_{2\text{H}_2/\text{O}_2} = \left[ \frac{V_{\text{H}_2} + V_{\text{O}_2}}{V_{\text{H}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{air}}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{V_{\text{air}}\rho_{\text{air}}}{(V_{\text{H}_2}\rho_{\text{H}_2}AF_{\text{H}_2} + m_{\text{gas}}AF_{\text{gas}})} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{H}_2}$ 、 $V_{\text{O}_2}$  及  $V_{\text{air}}$  分别为标准状态下氢气、氧气及空气的体积流量 ( $\text{L/min}$ );  $\rho_{\text{air}}$  和  $\rho_{\text{H}_2}$  分别为空气和氢气在标注状态下的密度 ( $\text{g/L}$ );  $m_{\text{gas}}$  为汽油的质量流量 ( $\text{g/min}$ );  $AF_{\text{H}_2}$  和  $AF_{\text{gas}}$  分别为氢气和汽油的理论空燃比.

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 比燃料能量消耗率

比燃料能量消耗率 ( $E$ ) 是反映混合燃料内燃机经济性的重要指标. 同比燃油消耗率相比较,比燃料能量消耗率更适合反映单位质量热值不同的 2 种燃料所组成的混合燃料对发动机经济性的影响.  $E$  定义为

$$E = (V_{\text{H}_2}\rho_{\text{H}_2}L_{\text{H}_2} + m_{\text{gas}}L_{\text{gas}}) / P_b \quad (3)$$

式中:  $L_{\text{H}_2}$  和  $L_{\text{gas}}$  分别为氢气和汽油的低热值 ( $\text{MJ/kg}$ );  $P_b$  为发动机有效功率.

图 2 给出了不同标准氢氧气占进气体积分数条件下,发动机比燃料能量消耗率随过量空气系数的变化曲线. 从图 2 中可以看出,相同过量空气系数条件下,发动机比燃料能量消耗率随标准氢氧气占进气体积分数的增加而降低. 当标准氢氧气占进气体积分数由 0 提高至 2% 和 4% 时,发动机比燃料能量消耗率的最小值由  $12.63\text{ MJ/kW}\cdot\text{h}$  分别降低至  $12.27\text{ MJ/kW}\cdot\text{h}$  和  $12.11\text{ MJ/kW}\cdot\text{h}$ . 这主要是因为氢气的燃烧速度约为汽油的 5 倍,因而混氢后缸内燃料可以更加迅速的燃烧,从而减少内燃机传热损失和排气损失,进而提高内燃机经济性. 同时,提高进气中的氧浓度也有利于提高燃料的燃烧效率,从而降低内燃机比燃料能量消耗率. 从图 2 还可看出,标准氢氧气对改善汽油机经济性的效果在稀燃时更加明显. 这主要是因为汽油的稀燃界限较窄,因而稀燃时汽油会产生较严重的不完全燃烧现象. 由于氢气的燃烧界限较宽,因而掺入标准氢氧气后,缸内混合气可以在更高的过量空气系数下充分燃烧. 因此,掺混氢氧气有利于降低汽油机稀燃时的比燃料能量消耗率.

图 2 还表明,相同标准氢氧气占进气体积分数条件下,比燃料能量消耗率随过量空气系数的增加先降低而后又有所升高. 这主要是因为适当提高过量空气系数有利于提高缸内氧浓度并降低混合气燃烧温度,从而有利于提高燃料的燃烧效率并减少传热损失.

### 2.2 燃烧过程

图 3 给出了不同标准氢氧气占进气体积分数条件下,发动机滞燃期 ( $\theta_{0-10}$ ) 和快速燃烧持续期 ( $\theta_{10-90}$ ) 随过量空气系数的变化曲线. 从图 3 可看出,相同过量空气系数条件下,向进气中掺入标准氢氧气后发动机滞燃期明显缩短. 在过量空气系数为 1.43 时,滞燃期由原机的  $43.9^{\circ}$  分别缩短至标准氢

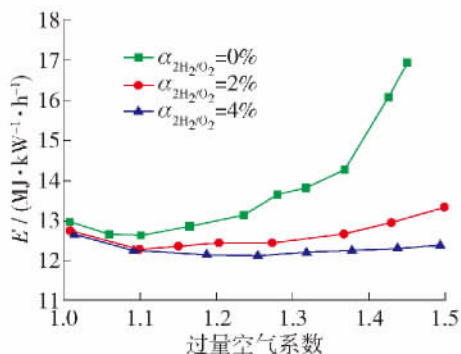


图 2 不同  $\alpha_{2H_2/O_2}$  下  $E$  随过量空气系数的变化规律

Fig. 2 Variations of  $E$  with excess air ratio at different  $\alpha_{2H_2/O_2}$

氧气占进气体积分数为 2% 和 4% 时的  $28.3^\circ$  和  $21.6^\circ$ 。这主要是因为氢氧气中的氢气有利于提高缸内 O 和 OH 基团的生成速度<sup>[16]</sup>, 从而促进燃料燃烧时的链式反应速度。同时, 氢气较低的点火能量也有利于缸内混合气被快速点燃。此外, 图 3(b) 表明 相同过量空气系数条件下, 掺入标准氢氧气也可以使汽油机的快速燃烧持续期明显缩短。这是因为氢气的火焰速度明显高于汽油, 因而向进气中掺入氢氧气有利于促进燃料的快速燃烧。同时, 适当提高进气中的氧浓度也有利于燃料的充分燃烧, 进而使发动机快速燃烧持续期在掺入标准氢氧气后较原机明显缩短。

同时, 图 3(a) 表明, 在相同标准氢氧气占进气体积分数条件下, 汽油机滞燃期和快速燃烧持续期均随过量空气系数的增加而延长。造成这种现象的原因是: 同一标准氢氧气混掺分数下, 随着过量空气系数的增加, 进入发动机缸内的燃料能量流量降低, 导致汽油机缸内混合气燃烧温度下降, 进而使  $\theta_{0-10}$  和  $\theta_{10-90}$  均随过量空气系数的增加而延长。

发动机最大压力升高率 ( $(dP/d\theta)_{max}$ ) 是反映内燃机燃烧过程的重要参数。图 4 给出了不同标准氢氧气占进气体积分数下,  $(dP/d\theta)_{max}$  随过量空气系数的变化曲线。从图 4 可看出, 因为掺入氢氧气有利于缩短内燃机燃烧持续期, 所以相同过量空气系数条件下, 掺入标准氢氧气后汽油机  $(dP/d\theta)_{max}$  有所增加。这说明稀燃时向汽油机中掺入标准氢氧气有利于改善燃料的燃烧过程, 并提高内燃机做功能力。此外, 图 4 还表明, 由于发动机燃烧持续期延长, 燃料的燃烧速度减缓, 因而在相同的标准氢氧气占进气体积分数下,  $(dP/d\theta)_{max}$  均随过量空气系数的增加而降低。

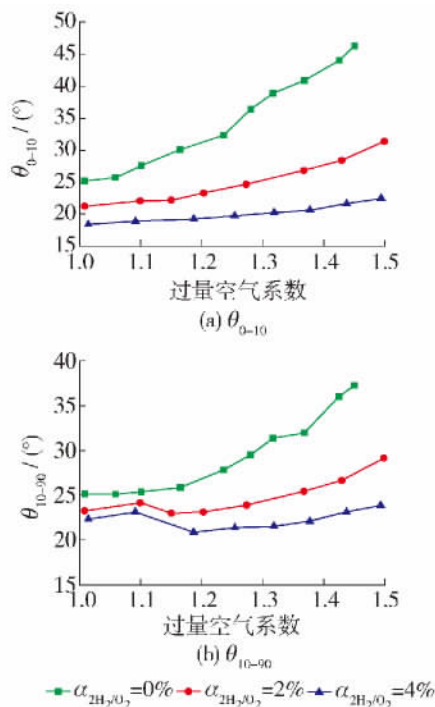


图 3 不同  $\alpha_{2H_2/O_2}$  下  $\theta_{0-10}$  和  $\theta_{10-90}$  随过量空气系数的变化规律

Fig. 3 Variations of  $\theta_{0-10}$  and  $\theta_{10-90}$  with excess air ratio at different  $\alpha_{2H_2/O_2}$

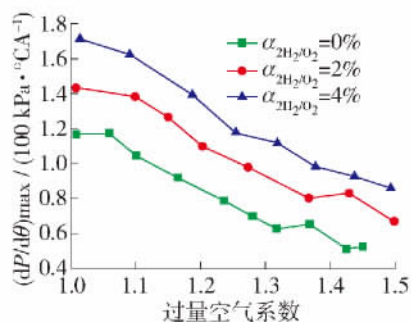


图 4 不同  $\alpha_{2H_2/O_2}$  下  $(dP/d\theta)_{max}$  随过量空气系数的变化规律

Fig. 4 Variations of  $(dP/d\theta)_{max}$  with excess air ratio at different  $\alpha_{2H_2/O_2}$

### 2.3 主要排放污染物

图 5 给出了不同标准氢氧气占进气体积分数条件下, 汽油机 HC、CO 及  $NO_x$  比排放随过量空气系数的变化曲线。

从图 5(a) 可看出, 当过量空气系数大于 1.25 时, 原机所产生的 HC 随过量空气系数的增加而快速升高。这主要是因为汽油的燃烧界限较窄, 因而在原机较高的过量空气系数条件下产生了不完全燃烧现象, 从而导致 HC 排放快速升高。而在相同的过量空气系数条件下, 掺混了标准氢氧气的汽油机

HC 排放低于原机,特别是在稀燃条件下,掺混标准氢氧气对降低汽油机 HC 排放的作用更加明显.造成这种现象的原因是:氢气的淬熄距离较短,所以增加进气中标准氢氧气所占的体积分数有利于降低汽油机由于罅隙效应所产生的 HC 排放.此外,氢气宽广的燃烧界限也有利于使掺氢燃料在稀燃条件下充分燃烧,进而降低汽油机稀燃时的 HC 排放.

图 5(b) 表明,稀燃时向进气中掺入标准氢氧气有利于减少汽油机的 CO 排放.这是因为提高进气中的氧浓度有利于 CO 在高温条件下被转化为  $\text{CO}_2$ .此外,氢气宽广的稀燃界限和较高的燃烧温度也有利于促进燃料在稀燃环境下的充分燃烧,并使 CO 被转化为  $\text{CO}_2$  的反应可以在更高的温度下进行.

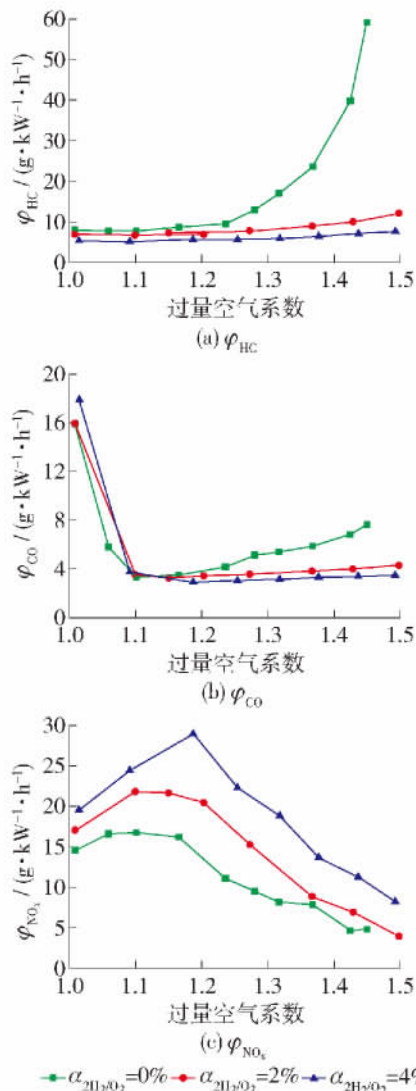


图 5 不同  $\alpha_{2\text{H}_2/\text{O}_2}$  下主要排放污染物随过量空气系数的变化规律

Fig. 5 Variations of main toxic emissions with excess air ratio at different  $\alpha_{2\text{H}_2/\text{O}_2}$

因此,稀燃时向汽油机中掺混标准氢氧气有利于减少 CO 排放.在过量空气系数为 1.43 的条件下,CO 排放由原机的 6.86 g/kW·h 分别降低至标准氢氧气占进气体积分数为 2% 和 4% 时的 4.02 g/kW·h 及 3.40 g/kW·h.同时,从图 5(b) 也可看出,相同标准氢氧气占进气体积分数下,汽油机 CO 排放随过量空气系数的增加先降低而后又有所升高.这主要是因为适当加大缸内混合气的过量空气系数有利于促进 CO 被充分转化为  $\text{CO}_2$ .然而,在过高的过量空气系数条件下,由于缸内燃料燃烧温度明显下降,从而使 CO 被转化为  $\text{CO}_2$  的能力减弱,进而导致 CO 在较高的过量空气系数条件下再次升高.

从图 5(c) 可看出,相同过量空气系数条件下,掺入标准氢氧气会导致  $\text{NO}_x$  排放的明显增加.这是由氢气的燃烧温度较高,且掺入标准氢氧气后缸内氧浓度增加所造成的.图 5(c) 还表明,相同标准氢氧气占进气体积分数条件下,汽油机  $\text{NO}_x$  排放随过量空气系数的增加先升高而后快速减少.造成这种现象的原因是: $\text{NO}_x$  排放的生成主要与缸内温度和氧浓度有关,提高缸内温度和氧浓度均会导致  $\text{NO}_x$  排放的增加.当过量空气系数少量增加时,缸内氧浓度较理论过量空气系数时有所提高,而混合气的燃烧温度也不会下降过多.因此,小幅提高过量空气系数会使  $\text{NO}_x$  排放有所增加.然而,当过量空气系数过高时,缸内燃料的燃烧温度明显下降,从而使  $\text{NO}_x$  在较高的过量空气系数条件下又有所降低.

### 3 结论

1) 相同标准氢氧气占进气体积分数条件下,汽油机比燃料能量消耗率随过量空气系数的增加先降低而后又有所升高.向进气中掺入标准氢氧气有利于降低汽油机比燃料能量消耗率.试验条件下,发动机比燃料能量消耗率最低值由原机的 12.63 MJ/kW·h 分别降低至  $\alpha_{2\text{H}_2/\text{O}_2}$  为 2% 和 4% 时的 12.27 MJ/kW·h 和 12.11 MJ/kW·h.

2) 相同过量空气系数条件下,提高进气中标准氢氧气所占的体积分数可以使内燃机滞燃期和快速燃烧持续期明显缩短.

3) 汽油机最大压力升高率随标准氢氧气占进气体积分数的增加而提高,这表明,加入标准氢氧气有利于改善汽油机稀燃时的燃烧过程及做功能力.

4) 相同过量空气系数条件下,掺入标准氢氧气后,汽油机 HC 和 CO 排放明显降低,但  $\text{NO}_x$  排放却有所增加.

## 参考文献:

- [1] BALL M, WIETSCHER M. The future of hydrogen—opportunities and challenges [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 615–627.
- [2] SALIMI F, SHAMEKHI A H, POURKHESALIAN A M. Role of mixture richness, spark and valve timing in hydrogen-fueled engine performance and emission [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(9): 3922–3929.
- [3] 杨振中, 王丽君, 李士雷, 等. 基于遗传算法的氢发动机优化控制研究[J]. *内燃机学报*, 2008, 26(1): 62–68.  
YANG Zhen-zhong, WANG Li-jun, LI Shi-lei, et al. Study on optimum control of hydrogen fueled engine based on genetic algorithms [J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(1): 62–68. (in Chinese)
- [4] KAHRAMAN E, OZCANL S C, OZERDEM B. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fueled spark ignition engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(12): 2066–2072.
- [5] BALAT M, BALAT H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(11): 2273–2282.
- [6] COSTA CR, SODRE J R. Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance [J]. *Applied Thermal Energy*, 2011, 31(2/3): 278–283.
- [7] SALES L C M, SODRE J R. Cold start emissions of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel [J]. *Fuel*, 2012, 95: 122–125.
- [8] SALES L C M, SODRE J R. Cold start characteristics of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel [J]. *Applied Thermal Energy*, 2012, 40: 198–201.
- [9] DAS L M. Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27(5): 479–487.
- [10] DAS L M. Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1996, 21(8): 703–715.
- [11] LI G, ZHANG Z, YOU F, et al. A novel strategy for hydrous-ethanol utilization: Demonstration of a spark-ignition engine fueled with hydrogen-rich fuel from an onboard ethanol/steam reformer [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(14): 5936–5948.
- [12] 马凡华, 汪俊君, 程伟. 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 Fan-hua, WANG Jun-jun, CHENG Wei. Influence of hydrogen ratio on idle performance of natural gas-hydrogen fuelled engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(4): 296–301. (in Chinese)
- [13] WANG J, HUANG Z, MIAO H, et al. Study of cyclic variations of direct-injection combustion fueled with natural gas-hydrogen blends using a constant volume vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(24): 7580–7591.
- [14] JI C, WANG S, ZHANG B. Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen-gasoline engine under various loads and lean conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11): 5714–5722.
- [15] DULGER Z, OZCELIK K R. Fuel economy improvement by on board electrolytic hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25(9): 895–897.
- [16] WANG J, HUANG Z, TANG C, et al. Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane-air mixtures combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 1084–1096.

(责任编辑 刘 潇)