

# 天然气掺氢火花点火式发动机排放性能研究

刘兵, 黄佐华, 曾科, 陈浩, 蒋德明, 王锡斌, 苗海燕

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 在一台天然气掺氢的火花点火发动机上,研究了掺氢比和过量空气系数对发动机排放性能的影响.结果表明,在掺氢比一定时,过量空气系数对 HC、CO、NO<sub>x</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放有较大的影响.在相同过量空气系数下,随着掺氢比的增加,HC 排放量有所降低,特别是稀燃下的 HC 排放量大幅降低.NO<sub>x</sub> 排放量随掺氢比的增加而增加,而 CO<sub>2</sub> 排放量随掺氢比的增加而减少.掺氢后,发动机的稀燃极限有所提高,稀燃条件下发动机的 HC、CO、CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放量比较低.

**关键词:** 火花点火发动机;天然气;氢气;排放

**中图分类号:** TK429 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0243-05

## Experimental Investigation on Emissions of a Spark-Ignition Engine Fuelled with Hydrogen Enriched Natural Gas

LIU Bing, HUANG Zuohua, ZENG Ke, CHEN Hao, JIANG Deming, WANG Xibin, MIAO Haiyan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** An experimental investigation on the influence of the different percents of hydrogen and excess air ratios on emissions characteristics of a spark-ignition engine fuelled with hydrogen enriched natural gas was conducted. The results show that excess air ratio has a remarkable effect on HC, NO<sub>x</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> emissions when engine is operated with a given percent of hydrogen. HC emissions decreases as increasing the percent of hydrogen at the same excess air ratio, especially under the lean-burn condition. However, NO<sub>x</sub> emission increases and CO<sub>2</sub> concentration decreases as the percent of hydrogen increases. Adding hydrogen into natural gas can extend the lean burn limit of mixture. Engine combustion at lean mixture can get low emissions of HC, CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>.

**Keywords:** spark ignition engine; natural gas; hydrogen; emission

近年来,由于石油能源的日益枯竭和汽车排放标准的日益严格,世界各国对替代燃料的研究越来越重视.天然气作为一种替代燃料,由于其具有储量大、辛烷值高、排放低、价格便宜等优点,使得天然气发动机在城市公交系统获得了广泛的应用.但是,天然气发动机要满足更严格的排放法规,必须采用进气门多点顺序喷射技术、氧传感器闭环反馈技术、废气再循环技术,以及采用含有特殊配方的双床催化反应器,它们都对电子控制系统的控制精度要求比较高<sup>[1-2]</sup>.

目前,对天然气掺氢发动机的性能研究已成为一大热点,有关研究表明,在天然气掺氢后发动机的稀燃极限有所提高,稀燃时 NO<sub>x</sub> 排放量比较低<sup>[3-4]</sup>,而且从一台氢气预混、天然气直喷的火花点火式发动机上发现<sup>[5]</sup>,天然气掺氢后可明显改善稀混合气下的燃烧过程,它在提高发动机热效率的同时可降低 HC 和 NO<sub>x</sub> 的排放量.为了验证天然气掺氢发动机的排放性能,美国能源部等发起了 AVTA (advanced vehicle testing activity) 项目<sup>[6]</sup>,研究结果显示,在不进行排气后处理的情况下,采用增

压、废气再循环及优化点火提前角等技术, Ford F-150皮卡燃用掺氢比为 30% ( $\varphi(\text{H}_2)=30\%$ ) 的压缩天然气/氢气 (CNG/ $\text{H}_2$ ) 混合燃料, 其  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  排放量可达到高超低排放机动车 (SULEV) 的排放标准。

本文在一台由 HH368 汽油机改装的发动机上, 开展了掺氢比 ( $\varphi(\text{H}_2)$ ) 分别为 0、12%、23%、30% 和 40% 的 CNG/ $\text{H}_2$  混合燃料发动机排放性能试验, 分析了掺氢比和过量空气系数对发动机排放性能的影响。

## 1 试验装置和燃料配制

试验用发动机是由 HH368Q 汽油机改装而成的汽油/天然气掺氢两用燃料发动机 (发动机既可使用汽油, 也可使用天然气掺氢混合燃料), 发动机及其电子控制系统如图 1 所示。改装后 CNG/ $\text{H}_2$  混合燃料供气装置由高压气瓶、加气阀、减压装置、燃料量步进电机和混合器组成。当发动机燃用天然气和氢气的混合燃料时, 首先将 CNG 和  $\text{H}_2$  在高压气瓶中按一定的体积比混合, 然后用减压装置将混合燃料送入进气管文氏混合器并与空气进行混合, 最后将混合气体送入发动机。为了控制空燃比和点火提前角, 本文设计了电子控制单元 (ECU) 和计算机端的 ECU 标定软件。ECU 标定软件通过计算机串口与 ECU 通讯, 一方面监控发动机工作状态, 另一方面可实时调整燃料量步进电机 (用来调节空燃比) 的开度和点火提前角的大小。

试验中, 采用湘仪电力测功仪来测量发动机功率和扭矩, 采用 Horiba 公司的 MEXA-700 $\lambda$  仪器实时测量过量空气系数, 采用 Horiba 公司的 MEXA-720 $\text{NO}_x$  仪器测量  $\text{NO}_x$  排放量, 采用 Horiba 公司的 MEXA-554JA 排放分析仪器测量 HC、CO 和  $\text{CO}_2$  的排放量。

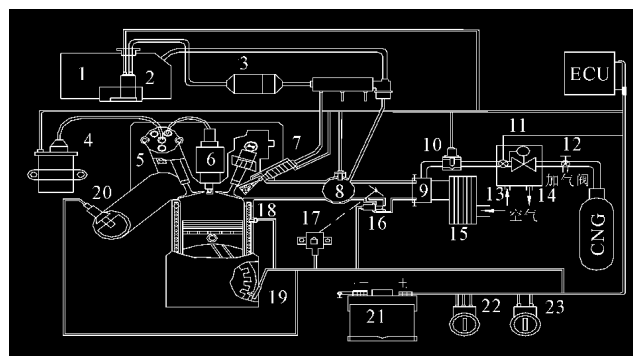
本文试验所用天然气为陕北天然气, 试验用氢是纯度为 99.995% ( $\varphi(\text{H}_2)=99.995\%$ ) 的高纯氢。

## 2 试验结果与分析

以下所有试验是在发动机转速为 3 000 r/min, 平均有效压力 (BMEP) 分别为 0.16 MPa 和 0.32 MPa, 以及点火提前角为  $40^\circ$  (CA BTDC) 下进行的。过量空气系数  $\lambda$  从 0.9 开始, 通过调整燃气控制用步进电机来增加过量空气系数, 一直到发动机不能稳定运转为止。

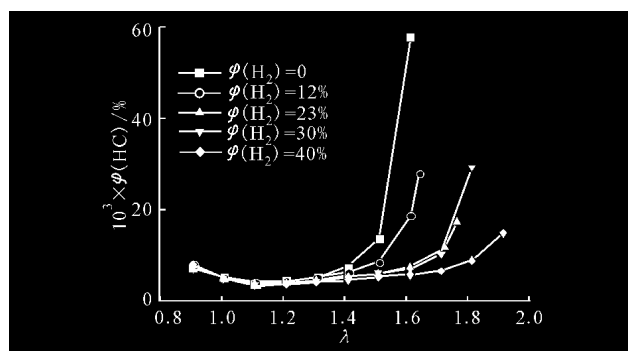
不同掺氢比下 HC 排放量与  $\lambda$  之间的关系如图

2 所示。从中看出: 掺氢比一定时, HC 和  $\lambda$  的变化趋势相同; 当  $\lambda < 1$  时, 即过量空气系数比较小, 致使燃烧不完全, 所以 HC 排放量呈增大的趋势; 当  $\lambda$  在 1.0~1.3 之间, 燃烧充分, HC 排放量下降; 随着  $\lambda$  的进一步增加, 燃烧恶化甚至出现循环失火, 同时由于排热能力下降而导致 HC 在缸内和排气管中的后氧化能力下降, 所以 HC 排放量急剧增加。从图中还可以看出, 若提高 CNG/ $\text{H}_2$  混合燃料中氢气的比例, 可有效提高燃料的稀燃极限, 降低稀燃条件下的 HC 排放量, 这样 HC 排放量将随  $\lambda$  的增加其变化比较缓慢。

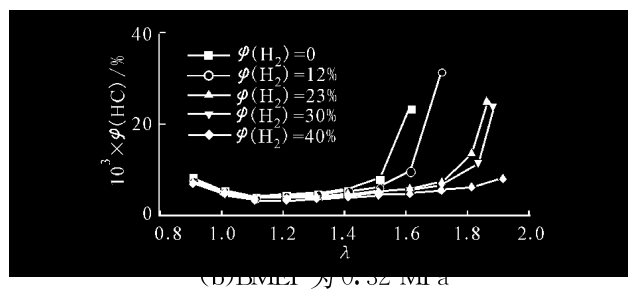


1: 油箱; 2: 电动燃油泵; 3: 汽油滤清器; 4: 点火线圈; 5: 分电器; 6: 火花塞; 7: 喷油器; 8: 进气压力传感器; 9: 混合器; 10: 燃料量步进电机; 11: 减压装置 (电磁阀、减压阀、高压表); 12: 加气阀; 13: 加热水进口; 14: 加热水出口; 15: 空气滤清器; 16: 怠速步进电机; 17: 节气门位置传感器; 18: 水温传感器; 19: 转速传感器; 20: 氧传感器; 21: 蓄电池; 22: 点火开关; 23: 汽油/天然气切换开关

图1 汽油/天然气掺氢两用燃料发动机示意图



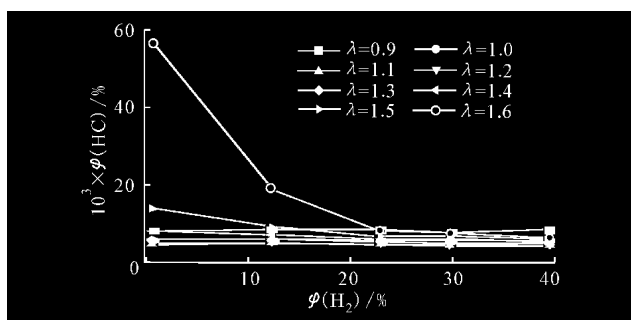
(a) BMEP 为 0.16 MPa



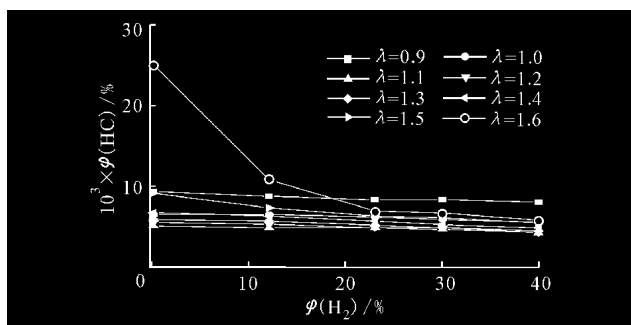
(b) BMEP 为 0.32 MPa

图2 不同掺氢比下 HC 排放与过量空气系数  $\lambda$  的关系

不同 $\lambda$ 下 HC 排放量随掺氢比的变化关系如图 3 所示.从图中看出:当 $\lambda < 1.5$ 时,掺氢比对 HC 排放量的影响并不大,HC 排放量也比较小;当 $\lambda > 1.5$ 时,掺氢比对 HC 排放量的影响比较大,随着掺氢比的增加,HC 排放量大幅度降低.这主要是由于纯天然气的稀燃极限较窄,随着掺氢比的增加,天然气的稀燃极限随之加大,在稀燃条件下的燃烧稳定性增强,所以 HC 排放量得到有效抑制.此外,在稀燃条件下( $\lambda = 1.6$ ),随着 BMEP(负荷)增加,燃用纯天然气时 HC 排放量大幅下降,这是由于负荷的增加、缸内温度升高、发动机的稀燃极限拓宽所致.



(a)BMEP 为 0.16 MPa

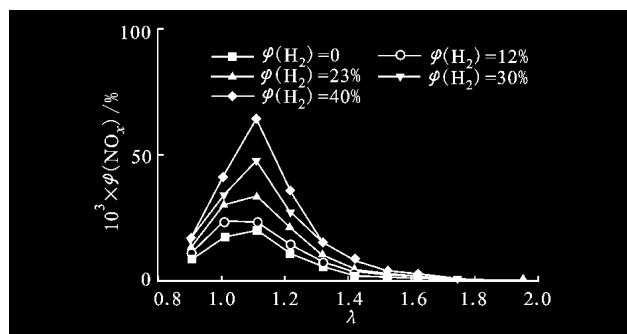


(b)BMEP 为 0.32 MPa

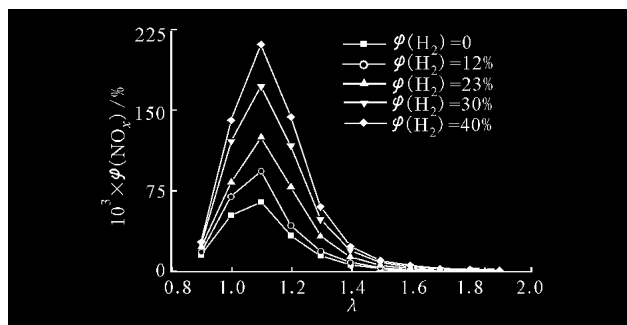
图 3 不同 $\lambda$ 下 HC 排放量与掺氢比的关系

不同掺氢比下  $\text{NO}_x$  排放量与 $\lambda$ 的关系如图 4 所示.从图中看出:在掺氢比一定的情况下, $\text{NO}_x$ 与 $\lambda$ 的变化趋势基本相同;若 $\lambda$ 过小,由于氧浓度过低而抑制了 $\text{NO}_x$ 的生成量;当 $\lambda = 1.1$ 时,足够的氧气能使燃料充分燃烧,同时缸内温度比较高,所以 $\text{NO}_x$ 排放量达到最大值;随着 $\lambda$ 进一步增加,缸内高温下降,这将导致 $\text{NO}_x$ 排放量迅速降低;当 $\lambda > 1.6$ 时, $\text{NO}_x$ 排放量最低.由此可见, $\lambda$ 对 $\text{NO}_x$ 的排放量影响很大.

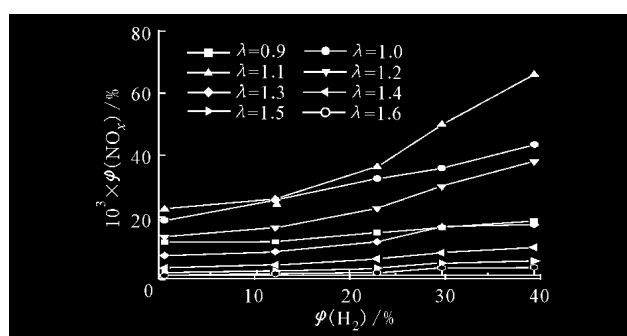
不同 $\lambda$ 下  $\text{NO}_x$  排放量随掺氢比的变化关系如图 5 所示.从中看出,掺氢比增加, $\text{NO}_x$  排放量呈增加趋势.原因是:氢气的火焰传播速度较快,随着掺氢比的增加,火焰传播速度进一步加快,火焰温度提高,所以  $\text{NO}_x$  排放量增加.从图中还可以看出, $\lambda$  过大或过小, $\text{NO}_x$  排放量的增加幅度均比较小,而 $\lambda$



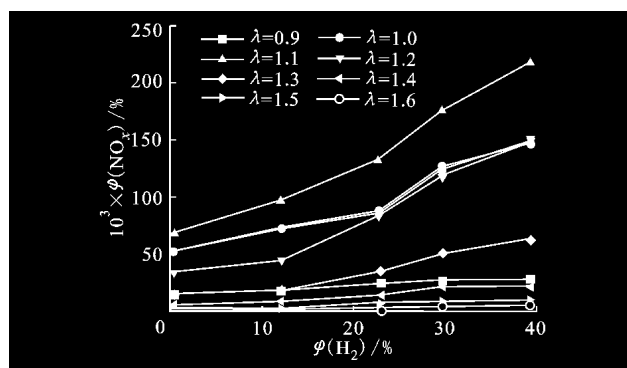
(a)BMEP 为 0.16 MPa



(b)BMEP 为 0.32 MPa

图 4 不同掺氢比下  $\text{NO}_x$  排放量与 $\lambda$ 的关系

(a)BMEP 为 0.16 MPa



(b)BMEP 为 0.32 MPa

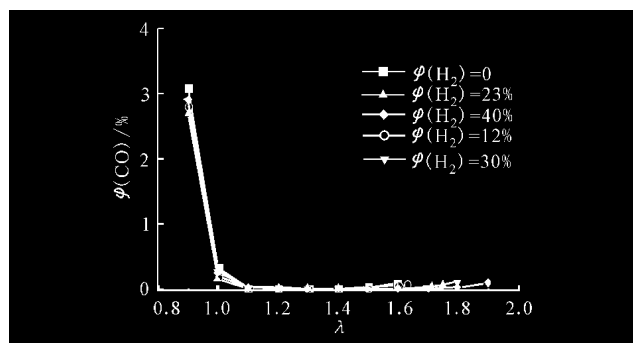
图 5 不同 $\lambda$ 下  $\text{NO}_x$  排放量与掺氢比的关系

在 1.1 附近, $\text{NO}_x$  排放量随着掺氢比的提高而增加幅度较大.原因是:在 $\lambda$ 过小时,由于氧浓度过低而抑制了 $\text{NO}_x$ 的生成量,而在 $\lambda$ 过大时,燃烧温度低而抑制了 $\text{NO}_x$ 的生成量,当在 1.0~1.3 之间时,由于氧气充足,燃烧温度适当,使得  $\text{NO}_x$  排放量随掺

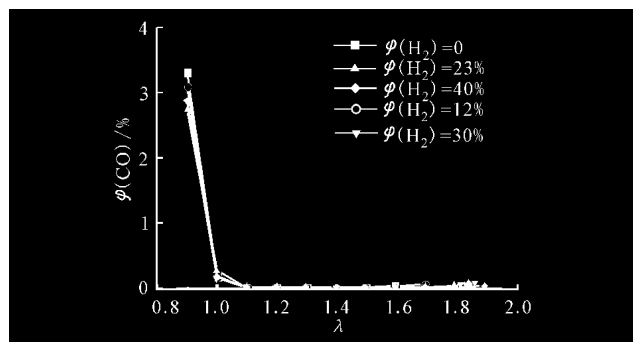
氢比的增加而显著增加。

综合 HC 和  $\text{NO}_x$  排放量来看,随着掺氢比的增加,稀燃极限得以拓宽。所以,发动机在 HC 排放未出现大幅增加的情况下,采用稀燃技术可显著降低  $\text{NO}_x$  的排放量。

CO 排放量与  $\lambda$  的关系如图 6 所示。从中看出:对于给定掺氢比的 CNG/ $\text{H}_2$  燃料, $\lambda$  过小,CO 排放量较大,这主要是由于氧浓度较低导致燃料不完全氧化所致;随着  $\lambda$  的增加,即氧浓度增加,促进了 CO 进一步氧化,所以 CO 排放量明显降低;在过稀混合气下,CO 保持在一个很低的排放量水平。另外,上述 4 种燃料的 CO 排放特性基本相似,掺氢比对 CO 排放量影响不明显。原因是:CO 排放量主要受  $\lambda$  的影响。



(a)BMEP 为 0.16 MPa

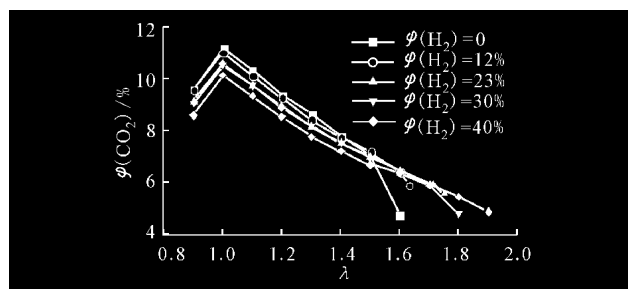


(b)BMEP 为 0.32 MPa

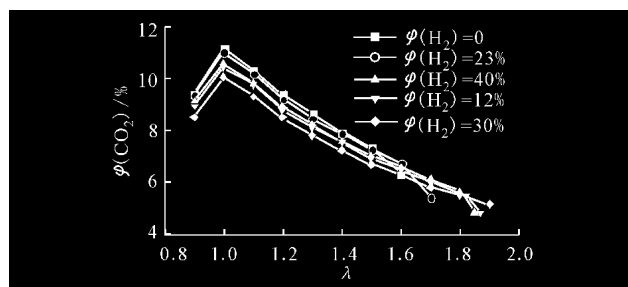
图 6 不同掺氢比下 CO 排放量与  $\lambda$  的关系

不同掺氢比下的  $\text{CO}_2$  排放量随  $\lambda$  的变化如图 7 所示。从中看出:发动机在燃用不同掺氢比的 CNG/ $\text{H}_2$  燃料时, $\text{CO}_2$  排放量在  $\lambda=1.0$  时达到最大值;若  $\lambda < 1.0$  和  $\lambda > 1.0$ ,  $\text{CO}_2$  排放量逐渐减小。若  $\lambda < 1.0$ ,混合气燃料中的碳原子由于缺氧而难以完全氧化,从而形成并排放出大量的 CO,此时  $\text{CO}_2$  排放量小于  $\lambda=1.0$  时的排放量;若  $\lambda > 1.0$ ,随着  $\lambda$  的增加,可燃混合气中含碳量减少, $\text{CO}_2$  排放逐渐减少。在  $\lambda$  过大时,由于发动机循环不断变化,所以发生不完全燃烧甚至出现循环失火,致使 HC 排放量较高, $\text{CO}_2$

排放量急剧减少。



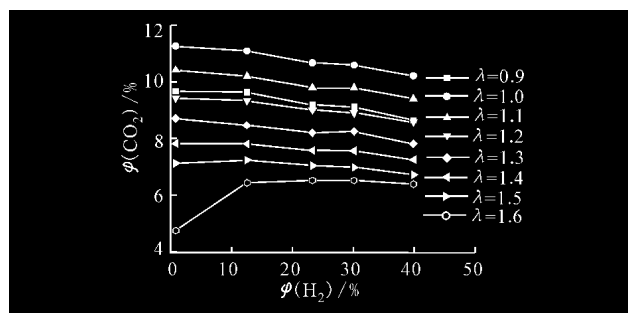
(a)BMEP 为 0.16 MPa



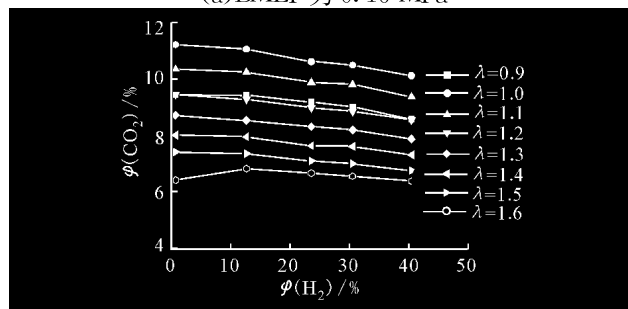
(b)BMEP 为 0.32 MPa

图 7 不同掺氢比下  $\text{CO}_2$  排放量与  $\lambda$  的关系

不同  $\lambda$  下  $\text{CO}_2$  排放量随掺氢比的变化如图 8 所示。从中看出,随着掺氢比的增加, $\text{CO}_2$  排放量有所降低。原因是:掺氢比的增加导致了 CNG/ $\text{H}_2$  混合燃料中的碳氢比减小。因此,天然气掺氢燃烧有助于减少排放  $\text{CO}_2$  温室气体。在  $\lambda=1.6$  的混合气下,纯天然气燃烧出现大面积的淬熄现象,HC 排放量迅速增加,致使纯天然气的  $\text{CO}_2$  含量较低。



(a)BMEP 为 0.16 MPa



(b)BMEP 为 0.32 MPa

图 8 不同  $\lambda$  下  $\text{CO}_2$  排放量与掺氢比的关系

### 3 结 论

在一台天然气掺氢火花点火式发动机上,研究了不同负荷下掺氢比和 $\lambda$ 对发动机排放性能的影响,结论如下.

(1)掺氢比一定时, $\lambda$ 在1.0~1.3之间的HC排放量较小, $\lambda$ 过小或过大都将导致HC排放量增加. $\lambda$ 一定时,随着掺氢比的增加,HC排放量有所降低,在稀燃条件下经掺氢可大幅降低HC的排放量.掺氢比一定时, $\lambda$ 在1.1附近, $\text{NO}_x$ 排放量最大, $\lambda$ 过大或过小都会降低 $\text{NO}_x$ 的排放量. $\lambda$ 一定时,随着掺氢比的增加, $\text{NO}_x$ 排放量增加, $\lambda$ 在1.1附近的 $\text{NO}_x$ 排放量增加幅度较大,而 $\lambda$ 过大或过小, $\text{NO}_x$ 排放量增加幅度较小.

(2) $\text{CO}$ 排放量主要受 $\lambda$ 的影响,在 $\lambda$ 相同的条件下,掺氢比对 $\text{CO}$ 排放量影响不大. $\lambda$ 在1.0附近, $\text{CO}_2$ 的排放量最大, $\lambda$ 过大或过小都使 $\text{CO}_2$ 排放量下降.随着掺氢比的增加, $\text{CO}_2$ 温室气体排放量减少.

(3)天然气掺氢后,有利于扩大稀燃极限,在稀燃条件下,HC、CO、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的排放量较低.

参考文献:

- [1] VERMIGLIO E, JEMKINS T, KIELISZEWSKI M, et al. Ford's SULEV dedicated natural gas trucks, SAE 971662 [R]. Washington DC: SAE, 1997.
- [2] KATO K, IGARASHI K, MASUDA M, et al. Development of engine for natural gas vehicle, SAE 990574 [R]. Washington DC: SAE, 1999.
- [3] HOEKSTRA R L, COLLIER K, MULLIGAN N, et al. Experimental study of a clean burning vehicle fuel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1995, 20(9):737-745.
- [4] SIERENS R, ROSSEEL E. VARIABLE composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122 (1): 135-140.
- [5] SHUDO T, SHIMAMURA K, NAKAJIMA Y. Combustion and emissions in a methane stratified charge engine with hydrogen pre-mixing [J]. JSAE Review, 2000, 21(1):3-7.
- [6] ROBERTA B, DONALD K, JAMES F. Hydrogen and hydrogen/natural gas station and vehicle operations-2006 summary report [EB/OL]. [2006-09-01]. <http://er.inel.gov/hydrogen.shtml>.

(编辑 苗凌)