

天然气掺氢配合废气再循环发动机的性能及排放研究

姜雪, 胡二江, 巩静, 黄佐华

(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: 在一台火花点火天然气发动机上开展了不同掺氢比 $\varphi(\text{H}_2)$ 和废气再循环率 ϕ 下发动机性能和排放的实验研究. 研究表明: 引入废气再循环(EGR)会使发动机功率降低, 但掺氢可以提高大 ϕ 值工况下的发动机功率. 有效燃油消耗率随 ϕ 的增大呈现先减小后增大的趋势, 在 ϕ 为 5% 时达到最低, 有效燃油消耗率随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增大而降低. 天然气掺氢后 NO_x 排放增加, 引入 EGR 使 NO_x 排放得到降低, 此降低效果在大掺氢比情况下更为显著. 在 ϕ 较大时, 天然气掺氢具有较好的效果. HC 和 CO 排放随 ϕ 的增大而增加, 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增大而降低. 当 ϕ 为 10%、 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 20% 时, 发动机可获得较好的综合性能.

关键词: 天然气; 氢气; 废气再循环; 排放

中图分类号: TK429 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0018-04

Experimental Study on Engine Performance and Emissions Fuelled with CNG-Hydrogen Blends Combined with EGR

JIANG Xue, HU Erjiang, GONG Jing, HUANG Zuohua

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

Abstract: An experimental study on the performance and emissions of a spark ignition engine with natural gas-hydrogen blends combined with EGR was conducted. The results show that the engine power output decreased with the increase of exhaust gas recirculation ratio (ϕ), and hydrogen enrichment at a considerable ϕ could improve the engine power output. Brake specific fuel consumption decreased first and then increased with the increase of ϕ , and its value was minimum when $\phi=5\%$. Brake specific fuel consumption decreased with the increase of hydrogen fraction. For a specified hydrogen fraction, NO_x concentration decreased with the increase of ϕ , which was more obvious at high hydrogen fractions. HC and CO emissions increased with the increase of ϕ and decreased with the increase of hydrogen fraction. The higher performance and the lower emissions of the engine could be obtained when $\varphi(\text{H}_2)=20\%$ and $\phi=10\%$.

Keywords: natural gas; hydrogen; exhaust gas recirculation; emissions

随着能源供需矛盾的突出和环保要求的日益严格, 发动机替代燃料的研究越来越多地受到人们的关注. 天然气(CNG)作为一种替代燃料, 具有排放清洁、经济性好、抗爆性能好、热效率高、安全性高、储量丰富的优点, 但也存在燃烧速率低、能量密度

低、点火能量高、排气温度较高、不易储存和携带、无润滑性等缺点. 与天然气相比, 氢气具有火焰传播速率高、放热速率高、燃烧时间短、稀燃能力强、排放特性好、燃烧循环变动小的特点^[1]. 使用掺氢燃料时发动机可以引入更大的废气再循环(EGR), 天然气掺

氢燃料也因其良好的经济性和排放特性受到了广泛的关注,成为车用发动机替代燃料研究的热点之一。但是,天然气掺氢燃料的燃烧还存在一些问题有待解决,其中最突出的问题是 NO_x 排放较高。引入 EGR 可以大大改善 NO_x 的排放状况。Karim 等人^[2]在发动机上进行了掺氢比 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 0%、10%、20%、30%、40%、60%、80% 的实验研究,得出掺氢可以改善发动机的燃烧和排放性能。Das 等人^[3]的研究表明,天然气中掺混体积分数为 25% 的氢气时,发动机热效率和相同功率下天然气发动机相比提高了 30%,燃油消耗率下降了 30%。Allenby 等人^[4]进行了天然气掺氢配合 EGR 的实验研究,得出在实验掺氢比下,废气再循环率 ϕ 为 25% 时,循环变动率在 5% 以内, NO_x 排放也有大幅度下降。本文在一台 HH368Q 火花点火发动机上开展了天然气掺氢配合 EGR 的实验研究,主要研究了 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 0%、10%、20%、30% 的 CNG/ H_2 混合燃料,同时配合 0%、5%、10%、15%、18% 的废气再循环率进行发动机的性能和排放测试,对天然气掺氢发动机配合 EGR 实现高效低污染燃烧提供了实验和数据支撑。

1 实验装置和燃料配置

本实验所用发动机的系统图和主要参数见文献[5],氢气和天然气的物性参数见文献[6]。

实验对 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 0%、10%、20%、30% 的 4 种混合燃料进行了研究。不同比例的天然气、氢气预先在高压气瓶中混合,由 ECU 控制喷入进气管的燃料量。燃料与空气混合均匀后,进入气缸燃烧。排气管上装有一个氧传感器,通过实时测定排气中氧的含量来确定过量空气系数 λ (实际空气质量与理论所需空气质量的比值)。将测得的 λ 反馈给 ECU, ECU 再根据反馈回来的 λ 控制燃料量,进而使 λ 达到实验中的设定值 1.0。 ϕ 通过 EGR5230 分析仪来测量。

2 实验结果及分析

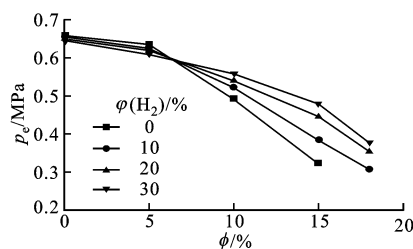
作为初期研究,所有实验均在转速为 2 000 r/min、固定点火提前角为上止点前 30° 曲轴转角、节气门全开、 $\lambda=1.1$ 的工况下进行。

2.1 混合燃料配合 EGR 的动力性与经济性

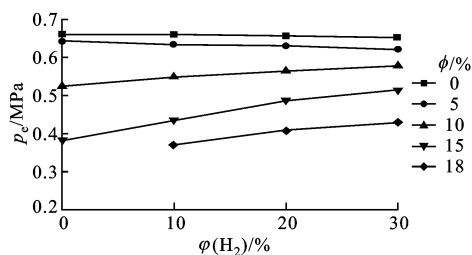
图 1a 给出了不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下平均有效压力 p_e 随 ϕ 的变化关系。对于给定掺氢比的燃料, p_e 随 ϕ 的增大而降低。这是因为随着 ϕ 的增大,进入气缸的新鲜

空气和燃料量均减少,燃烧速率降低,燃烧相位滞后,燃烧放热在膨胀行程的比例增加,传热损失增加,缸内压力下降,从而导致 p_e 下降。

图 1b 给出了不同 ϕ 下 p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系。在无废气再循环和低 ϕ 值时, p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而略有降低,而当 ϕ 大于 5% 后, p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而升高。天然气掺氢会使混合燃料体积热值降低,导致功率下降。无废气再循环和低 ϕ 值时,虽然掺氢可以提高火焰传播速率,改善燃烧,但氢气的壁面火焰激励距离远小于天然气,导热率远大于天然气,使发动机壁面冷却损失增大,其作用高于掺氢对火焰传播速率提高的影响,从而导致 p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而略有下降^[7-8]。在 ϕ 较大时, p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而升高。由于氢气的稀燃能力远大于天然气,故当 ϕ 较大时,火焰温度和传播速率明显降低,燃烧放热过程延长,缸内压力下降。掺氢可以有效提高混合燃料的稀燃极限和火焰传播速率,缩短大 ϕ 值下的燃烧持续期,使 p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而升高,对大 ϕ 值工况十分有利。



(a) 不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 p_e 随 ϕ 的变化关系

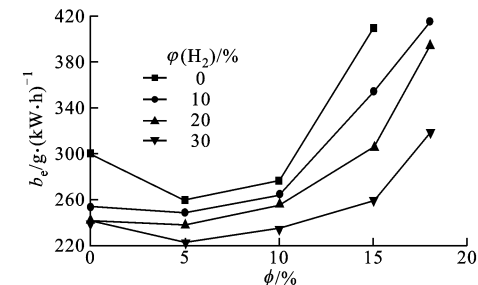


(b) 不同 ϕ 下 p_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

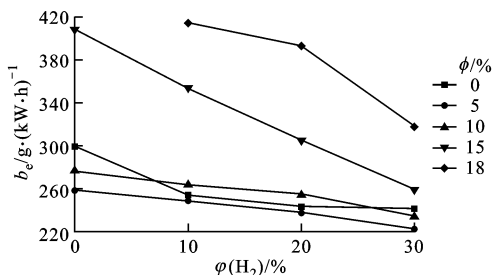
图 1 p_e 与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系

图 2 给出了有效燃油消耗率 b_e 与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系。由图 2a 可知,随着 ϕ 的增加, b_e 呈现先降低后增加的趋势,在 ϕ 为 5% 处达到最小值。 ϕ 较小时,由于废气对充量的加热作用,有利于提高火焰传播速率,使 b_e 下降。随着 ϕ 进一步增加,废气的引入对燃烧温度降低和火焰传播速率降低影响加大,缸内压力下降,燃烧放热持续期增加,燃烧放热的等容度下降,还有可能出现部分燃烧现象,导致 b_e 随 ϕ 的进一步增加而增加。

由图 2b 可知, b_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而降低. 这是因为掺氢可以明显地提高火焰传播速率, 提高燃烧放热的等容度, 改善气缸内的燃烧过程. ϕ 越大, 掺氢改善燃烧的效果越明显. 这主要是因为大 ϕ 值时, 混合气稀释, 火焰传播速率明显降低, 而天然气掺氢可以弥补火焰传播速率下降带来的影响, 保持较快的火焰传播速率和燃烧稳定性, 从而改善了 b_e .



(a) 不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 b_e 随 ϕ 的变化关系



(b) 不同 ϕ 下 b_e 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

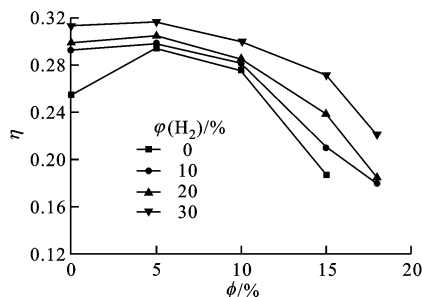
图 2 b_e 与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系

图 3 给出了有效热效率 η 与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系. η 随 ϕ 的增大呈现先增加后降低的趋势, 这与 b_e 随 ϕ 变化的规律相反. η 与 b_e 成反比关系, 因此 η 随 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 变化的原因与对 b_e 的分析相同. 同样, ϕ 越大, 掺氢改善燃烧的优势越明显.

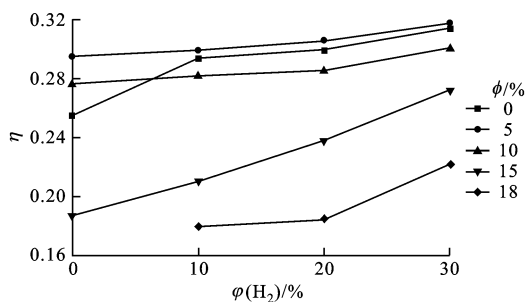
2.2 混合燃料配合 EGR 的排放特性

图 4 给出了 NO_x 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系. 由图 4a 可知, 随着 ϕ 的增加, NO_x 排放明显降低, 并且这种降低效果在 $\varphi(\text{H}_2)$ 越大时越明显. 因为随着 ϕ 的增加, 混合气中燃料量减少, 燃烧速率降低; 同时由于废气中 CO_2 和 H_2O 的比热容比较大, 使燃烧最高温度降低^[9], 抑制了 NO_x 的生成. 当 ϕ 增加到 15% 时, NO_x 排放已处于很低的水平, 此后继续增加 ϕ 对于降低 NO_x 排放已无明显效果, 反而会降低发动机功率和增加燃油消耗率.

由图 4b 可知, 随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加, NO_x 排放呈现增加趋势. 因为氢气具有较高的火焰传播速率, 随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加, 火焰传播速率加快, 缸内气体温度

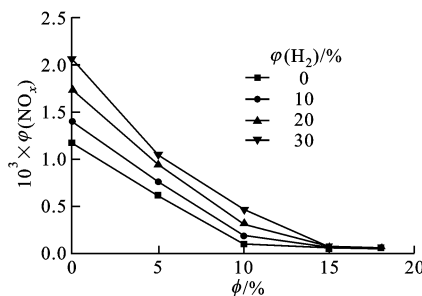


(a) 不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 η 随 ϕ 的变化关系

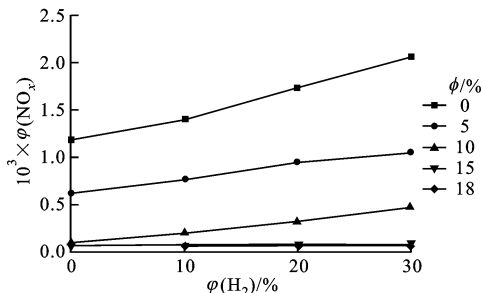


(b) 不同 ϕ 下 η 随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

图 3 η 与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系



(a) 不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 NO_x 排放随 ϕ 的变化关系



(b) 不同 ϕ 下 NO_x 排放随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

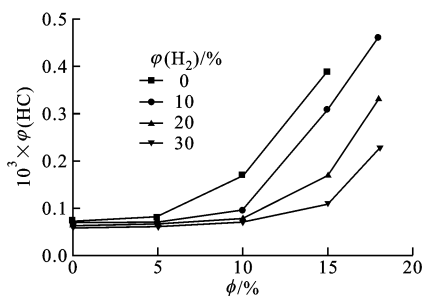
图 4 NO_x 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系

升高, 使 NO_x 排放增加. 因此, 结合掺氢和 EGR 两项措施, 可以实现发动机的高效低污染燃烧过程.

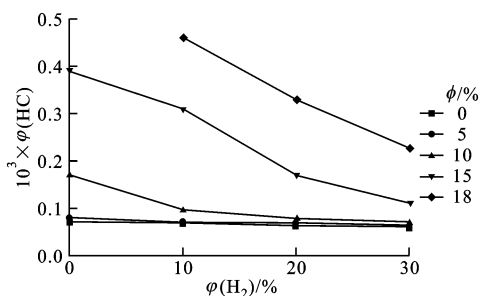
图 5 给出了 HC 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系. 由图 5a 可知, HC 排放随 ϕ 的增加而增加. 从无废气再循环到小 ϕ 值变化时, HC 排放基本没有变化; 此后, 继续增加 ϕ , HC 排放迅速增加. 这是因为随着 ϕ

的增加,火焰传播速率、燃烧温度以及 HC 的后氧化能力均下降,部分燃烧循环出现的几率增加,HC 排放增加^[10]. 由图还可以看出,随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加,HC 排放出现明显增加的 ϕ 值提高,表明掺氢可以确保在更大的 ϕ 值下获得稳定的燃烧过程.

由图 5b 可知,随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加,HC 排放呈现下降的趋势. 这是因为掺氢使混合气的燃烧速率加快,改善了燃烧过程所致. 另外,由于氢气淬熄距离短,从而有效降低了壁面激冷和狭隙效应引起的未燃 HC 排放,并且氢气不含 C,燃烧时不产生 HC 排放物,因此 HC 排放随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加而降低. 此外,由图 5b 还可明显看出,随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加,不同 ϕ 对 HC 排放的影响要低于其对天然气燃烧时的影响,反映出掺氢可降低 EGR 对 HC 排放的影响程度.



(a)不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 HC 排放随 ϕ 的变化关系

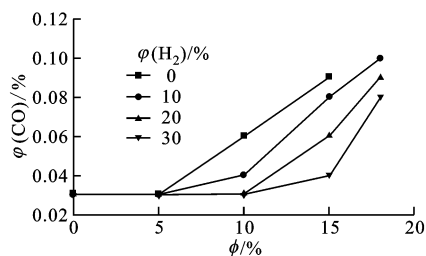


(b)不同 ϕ 下 HC 排放随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

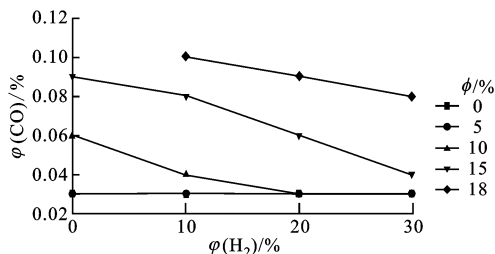
图 5 HC 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系

图 6 给出了 CO 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系. 由图 6a 可知,CO 排放随 ϕ 的增加而增加. 从无废气再循环到小 ϕ 值变化时,CO 排放基本没有变化. 随着 ϕ 的增加,燃烧速率降低,燃烧温度降低,不完全燃烧产物 CO 的后氧化能力下降,使 CO 排放迅速增加.

由图 6b 可知,随着 $\varphi(\text{H}_2)$ 的增加,CO 排放呈现降低趋势. 这是因为掺氢后燃烧速率提高,不完全燃烧产物减少. 此外,掺氢改善了燃烧性能,且氢气不含 C,燃烧时不会产生 CO,从而导致 CO 排放降低.



(a)不同 $\varphi(\text{H}_2)$ 下 CO 排放随 ϕ 的变化关系



(b)不同 ϕ 下 CO 排放随 $\varphi(\text{H}_2)$ 的变化关系

图 6 CO 排放与 ϕ 和 $\varphi(\text{H}_2)$ 的关系

3 结 论

本文在一台火花点火发动机上开展了 CNG/ H_2 混合燃料配合 EGR 的性能与排放实验研究,获得的主要结论如下.

(1)掺氢比一定时,平均有效压力随 ϕ 的增加而降低. ϕ 为 0% 和 5% 时,平均有效压力随掺氢比的增加而降低; ϕ 大于 5% 时,平均有效压力随掺氢比的增加而升高.

(2)有效热效率呈现随 ϕ 的增加先增加后降低,随掺氢比的增加而增加的趋势.

(3) NO_x 排放随 ϕ 的增加明显降低,这种降低效果在大掺氢比时更加明显;随着掺氢比的增加, NO_x 排放呈现出增加的趋势. HC 和 CO 排放随 ϕ 的增加而增加,随掺氢比的增加而降低.

(4)在 $\varphi(\text{H}_2)$ 为 20%、 ϕ 为 10% 时,发动机可获得较好的综合性能指标.

参考文献:

- [1] AKANSU S O, DULGER Z, KAHRAMAN N, et al. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 9(14):1527-1539.
- [2] KARIM G A, WIERZBA I, AL-ALOUSHI Y. Methane-hydrogen mixtures as fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1996, 21(7):625-631.
- [3] DSA L M, GULATI R, GUPTA P K. A comparative

- evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25(8): 783-793.
- [4] ALLENBY S, CHANG W C, MEGRITIS A, et al. Hydrogen enrichment: a way to maintain combustion stability in a natural gas fuelled engine with exhaust gas recirculation, the potential of fuel reforming [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2001, 215(3): 405-418.
- [5] HUANG Zuohua, LIU Bin, ZENG Ke, et al. Experimental study on engine performance and emissions for an engine fueled with natural gas-hydrogen mixtures [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20 (5): 2131-2136.
- [6] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [7] SHODO T, NABETAMI S, NAKAJIMAIMA Y. Analysis of the degree of constant volume and cooling loss in a spark ignition engine fuelled with hydrogen [J]. *International Journal of Engine Research*, 2001, 2 (1): 81-92.
- [8] LARSEN J F, WALLACE J S. Comparison of emissions and efficiency of a turbocharged lean-burn natural gas and hythane-fueled engine [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119 (1): 218-226.
- [9] HEYWOOD J B. *Internal combustion engine fundamentals*[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1998.
- [10] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2005: 76-83.

(编辑 荆树蓉)