

缸内直喷天然气/氢气混合燃料配合 废气再循环的性能与排放

刘亦夫, 刘兵, 曾科, 周磊, 孙璐

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台天然气/氢气混合燃料的缸内直喷火花点火发动机上通过引入废气再循环(EGR)实验研究了 EGR 率、掺氢比及喷射时刻对发动机性能和排放的影响. 结果表明: 掺入氢气, 在小 EGR 率时可以减小平均有效压力(BMEP)和有效热效率, 在大 EGR 率时可以增加 BMEP 和有效热效率; BMEP 随 EGR 率的增大而减小, 有效热效率随 EGR 率的增大先减后增. NO_x 排放随 EGR 率的增大而下降, 随掺氢比的增大而上升; HC 排放随 EGR 的增大而上升, 随掺氢比的增大而下降; CO 排放与 EGR 率变化基本无关, 随掺氢比的增大而上升. 平均指示压力变动系数 C_{imep} 随 EGR 率的增加而增大, 相比于早喷射, 晚喷射时 C_{imep} 的增大趋势更为明显, 此时掺氢可以有效降低 C_{imep} .

关键词: 缸内直喷火花点火; 天然气; 氢气; 废气再循环装置

中图分类号: TK431.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0005-04

Performance and Emission Characteristics of a Direct-Injection Spark-Ignition Hydrogen Enriched Natural Gas Engine Diluted with EGR

LIU Yifu, LIU Bing, ZENG Ke, ZHOU Lei, SUN Lu

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental study was conducted on a direct-injection spark-ignition (DISI) engine fuelled with hydrogen-natural gas blends with the introduction of EGR (exhaust gas recirculation). The effects of the EGR rate, the hydrogen fraction and the injection timing on the engine performance and emission characteristics were investigated. The results show that the hydrogen addition reduced the brake mean effective pressure (BMEP) and the brake thermal efficiency at the lower EGR rate but increased the BMEP and the brake thermal efficiency at the higher EGR rate. The BMEP decreased with an increase in the EGR rate, and the brake thermal efficiency increased at first and then decreased with an increase in the EGR rate. The NO_x concentration decreased with an increase in the EGR rate and increased with the hydrogen fraction. The HC emission increased with the EGR rate and decreased with an increase in the hydrogen fraction. The CO emission changed slightly with the EGR rate and decreased with an increase in the hydrogen fraction. In addition, the variation coefficient of indicated mean effective pressure C_{imep} increased with the EGR rate, and the hydrogen addition could reduce the C_{imep} more effectively for late injection.

Keywords: direct-injection spark-ignition; natural gas; hydrogen; exhaust gas recirculation

随着石油资源的严重短缺和环保要求的日趋严格,清洁代用燃料的开发与利用成为近期研究的热点,其中最具潜力的清洁代用燃料——天然气/氢气混合燃料(HCNG)引起了国内外学者的广泛关注.天然气作为一种代用燃料,其储量大、辛烷值高、排放低、价格便宜,但也存在能量密度低、燃烧速率低、着火范围窄、放热过程等容性差等缺点.氢气具有近7倍于天然气的火焰传播速度,同时具有着火范围宽、排放极低、可再生等优点.在大规模制氢及制氢成本高等问题解决之前,HCNG被认为是迈向清洁氢能的最佳过渡方案.美国能源部发起的AVTA(advanced vehicle testing activity)项目就是对福特(Ford)公司的F-150皮卡进行了改装,其采用了稀燃(lean burn)、可变涡轮废气增压和点火优化控制等技术,燃用了掺氢比为50%的HCNG混合燃料,使得排放达到了SULEV(super ultra-low emission vehicle)的标准^[1-2].

马凡华等人^[3-5]在东风公司EQD210N220电控单点喷射型天然气发动机上开展了燃用HCNG混合燃料的实验研究,结果表明:掺氢只能在空燃比较大时发挥优势,而在空燃比较小时会导致性能恶化;在一定的过量空气系数下,掺氢可显著减小稀燃时的循环变动,从而提高了发动机稀燃能力,减小了失火循环发生的可能性.除稀燃技术以外,废气再循环(EGR)也是一种减少 NO_x 排放的有效手段.Dimopoulos等人^[6]的研究表明,通过点火正时、EGR率和掺氢比的优化组合,可以显著减少 NO_x 排放,提高热效率和燃烧稳定性,同时不会增加HC和CO排放.Allenby等人^[7]利用催化重整技术产生的氢气进行了掺氢体积比为0%和10%的实验研究,结果表明,EGR率 r_{EGR} 为25%时,平均指示压力变动系数 C_{imep} 可以控制在5%以下,同时大幅减少了 NO_x 排放.

目前,关于HCNG的实验都是在进气道喷射或在化油器式发动机上进行的,且多采用稀燃技术,而在缸内直喷天然气掺氢发动机上配合EGR的实验研究却比较少,因此本文针对一台缸内直喷火花点火发动机开展了掺氢比为0%、10%、20%、30%、40%的HCNG混合燃料在不同EGR率下的实验研究,分析了EGR率、掺氢比及喷射时刻对发动机的性能及排放的影响.

1 实验装置和方法

实验用发动机是由TY1100单缸柴油机改装而

成的,改装后的发动机参数、缸内喷油器及火花塞布置参见文献[8],压缩比由原来的8增加至14.采用自主开发的电子控制单元(ECU)对发动机运行参数进行了调节.为了保证EGR率,排气管和进气管之间安装了一台抽气泵,废气经过中冷器和EGR阀进入进气管.采用美国ECM公司的EGR5230分析仪实时测量了EGR率,调整EGR阀,使EGR率以5%的步长在0%~25%之间变化.实验用天然气是陕北天然气,甲烷的体积分数为96.16%,氢气是纯度(体积分数)为99.9%的高纯氢,HCNG燃料的掺氢比分别为0%、10%、20%、30%、40%,天然气和氢气的物性参数见文献[9].实验中发动机转速维持在1200 r/min,节气门保持全开(WOT),燃料喷射提前角 θ_{inj} 分别为 300° 和 170° .调整喷射脉宽使过量空气系数 $\Phi_a=1$,调整点火提前角为最佳点火提前角(MBT).实验前对发动机进行了暖机,将发动机水温加热至 70°C .排气测量中,采用Horiba公司的MEXA-720分析仪来测量 NO_x 排放量和过量空气系数,采用Horiba公司的MEXA-554JA分析仪来测量HC和CO排放量.

2 实验结果及分析

2.1 发动机动力性及经济性

图1给出了平均有效压力(BMEP)与EGR率的关系.从图中看出,BMEP随着EGR率的增加而减小.EGR的引入,使得进入气缸内的空气量减少,每次循环喷射的燃油量相应减少,混合气热值降低;EGR的稀释作用,降低了燃烧速度.这两方面综合影响降低了BMEP.当EGR率小于10%时,与 $\theta_{\text{inj}}=300^\circ$ (早喷射)的BMEP相比, $\theta_{\text{inj}}=170^\circ$ (晚喷射)的BMEP略高,这是因为晚喷射时充气效率更高,但是随着EGR的进一步增大,晚喷射时BMEP下降趋势相比于早喷射更为明显;当EGR率较大时,晚喷射时 C_{imep} 明显大于早喷射,说明晚喷射时燃烧稳定性更差,因而导致了BMEP急剧下降.从图1中还可以看出,当EGR率小于15%时,掺入氢气减小了BMEP,而当EGR率大于15%时,掺入氢气增大了BMEP.原因可以归纳为以下2个方面:①掺氢比的增大降低了燃料的体积热值,同时也增加了燃烧过程中的壁面传热损失,这将导致BMEP减小;②氢气具有近7倍于天然气的层流燃烧速率,掺入氢气将加快燃烧速度.小EGR率时,燃烧能够保持相对稳定,此时影响BMEP变化的原因①起主导作用;大EGR率时,EGR的稀释作用降低了燃烧速

度,从而使燃烧变得不稳定,此时掺入氢气,原因②则发挥主要作用.

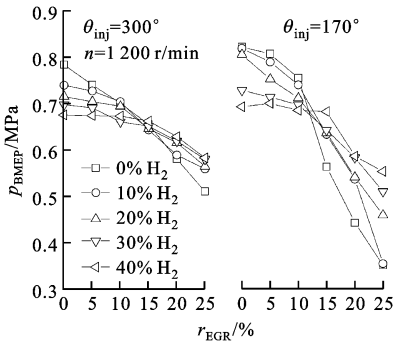


图 1 节气门保持全开且在最佳点火提前角下 BMEP 与 EGR 率的关系

图 2 给出了有效热效率 η 与 EGR 率的关系. 从中看出,随着 EGR 率的增加,有效热效率先增后减,当 EGR 率为 5%~15% 时达到最佳值. 由于实验中节气门始终处于全开状态,所以泵气损失基本不变^[9]. 在 EGR 率增至最佳值以前,有效热效率随之增大,这是因为 EGR 的稀释作用降低了燃烧温度,壁面传热损失减小. 进一步增加 EGR 率,燃烧稳定性降低,甚至出现了不完全燃烧现象,因此有效热效率降低. 当 EGR 率小于 10% 时,有效热效率随掺氢比的增大有所降低;当 EGR 率大于 10% 时,有效热效率随掺氢比的增大而提高. 小 EGR 率时,燃烧依然稳定,掺氢虽能提高了燃烧速度,改善了燃烧环境,但是氢气的壁面传热系数远大于天然气,所以壁面传热损失随之增加,同时混合燃料的体积热值也随着掺氢比的增大而降低. 大 EGR 率时的情况则有所不同,此时燃烧的速度和温度明显下降,燃烧放热过程缓慢,氢气的稀燃能力远优于天然气,此时掺氢将显著提高了火焰的温度和传播速度,缩短了燃烧过程,提高了燃烧等容性,因而提高了有效热效率.

2.2 发动机排放

图 3 给出了 NO_x 排放量与 EGR 率的关系. 从图中看出,NO_x 排放量如同预期的那样,随 EGR 率的增大而减少. NO_x 排放主要与燃烧温度有关^[10], EGR 对 NO_x 排放的抑制作用主要有以下 3 个方面:①EGR 的稀释作用使得燃烧速率减小,燃烧的最高温度降低;②EGR 的引入使得进入气缸的新鲜空气减少,喷射的燃料随之减少,燃烧放热总量减少,燃烧最高温度因此降低;③EGR 中包含的 CO₂、H₂O 等多原子分子的比热容较大,从而降低了燃烧的最高温度. 从图 3 中还可以看出,NO_x 排放量随着掺氢比的增加而提高,这是由于氢气的火焰传播

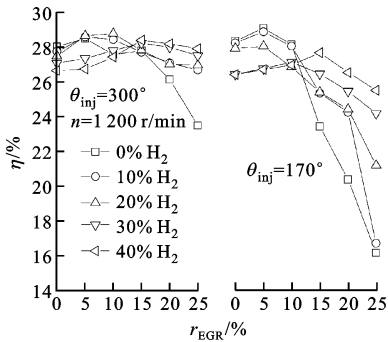


图 2 节气门保持全开且在最佳点火提前角下有效热效率与 EGR 率的关系

速度极快,掺氢比的增大提高了缸内的最高温度,从而使得 NO_x 排放量提高.

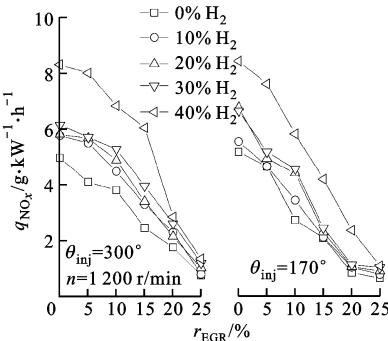


图 3 节气门保持全开且在最佳点火提前角下 NO_x 排放量与 EGR 率的关系

图 4 给出了有效热效率和 NO_x 排放量的关系. 从图中看出,增大 EGR 率,在减少 NO_x 排放量的同时减小了有效热效率,而此时掺入氢气能够提高有效热效率.

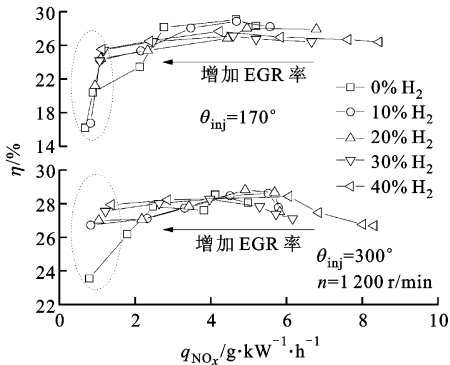


图 4 节气门保持全开且在最佳点火提前角下有效热效率与 NO_x 排放量的关系

图 5 给出了 HC 排放量与 EGR 率的关系. 从图中看出,HC 排放量随 EGR 率的增大而升高. 当 EGR 率小于 10% 时,HC 排放量随 EGR 率的增大缓慢增加;当 EGR 率大于 10% 时,HC 排放量随 EGR 率的增大快速升高. 随着 EGR 率的增大,缸内

燃烧温度下降,燃烧室壁面温度随之降低,壁面淬熄生成的 HC 增多,但是缸内最高温度和排气温度下降对做功冲程后期和排气管中 HC 的后氧化不利. 对比 2 种喷射时刻,小 EGR 率下早、晚喷射时的 HC 排放量大致维持在同一水平,大 EGR 率下晚喷射时 HC 排放量迅速升高,比早喷射时 HC 排放量的上升幅度明显要大. EGR 率为 25% 时,早喷射时 HC 浓度为 $0.9 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$,晚喷射时 HC 浓度为 $1.9 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$,这是由于晚喷射时的燃烧稳定性更差,由不完全燃烧产生了更多的未燃 HC. 随着掺氢比的增大,HC 浓度呈减小趋势,这是因为:随着氢气的掺入,燃料的碳氢比下降;受氢气淬熄距离更短的影响,壁面激冷和淬熄作用生成的 HC 相应减少;在掺氢提高缸内最高温度和排气温度的作用下,促进了 HC 的后氧化. 因此,HC 排放量随掺氢比的增大而下降.

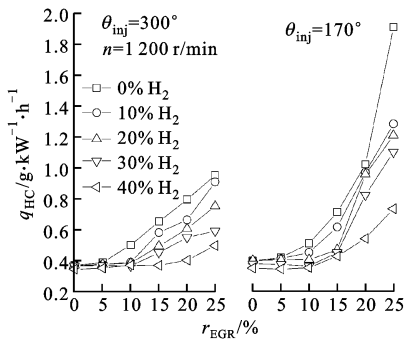


图 5 节气门保持全开且在最佳点火提前角下的 HC 排放量与 EGR 率的关系

图 6 给出了 CO 排放量与 EGR 率的关系. 从图中看出,随着 EGR 率的增加,CO 排放量变化不大. 由于 CO 排放主要与空燃比有关^[10],而在本实验中,空燃比始终控制为化学当量空燃比,因此 CO 排放量与 EGR 率关系不大. 相比早喷射的情况,晚喷射时 CO 的浓度更高,这可能与缸内混合气的分布有关. 喷射时刻推迟,燃料与空气混合的时间缩短,火花塞附近的混合气浓度高,火花塞附近区域的混合气空燃比可能会低于化学当量空燃比,从而生成了更多的 CO. 在同一 EGR 率下,CO 排放量随掺氢比的增大而减少. 掺氢将减小燃料的碳氢比,从而减少 CO 的生成,随着进一步掺氢,缸内燃烧温度升高,进而促进了 CO 在膨胀冲程后期的后氧化.

2.3 发动机循环变动

发动机循环变动可以用 C_{imep} 来表示^[7],即

$$C_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{p_{imep}} \times 100\%$$

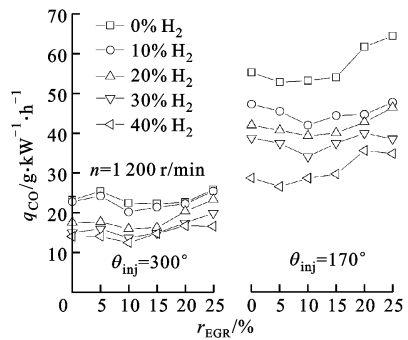


图 6 节气门保持全开且在最佳点火提前角下 CO 排放量与 EGR 率的关系

式中: σ_{imep} 为平均指示压力的标准偏差; p_{imep} 为平均指示压力的平均值. C_{imep} 是燃烧稳定性和车辆操纵性评价的主要参数,一般该值超过 5%,认为发动机燃烧不稳定^[11]. 图 7 给出了 C_{imep} 与 EGR 率的关系. 从图中看出, EGR 率小于 10%,晚喷射时的 C_{imep} 与早喷射时的情况相差无几,而随着 EGR 率的继续增加,晚喷射时的 C_{imep} 迅速增大,这说明大 EGR 率下,晚喷射时发动机的 EGR 容忍度更差. 喷射时刻推迟,燃烧初始时混合气在组成上不均匀,火花塞电极附近混合气成分的循环变动会影响早期火核发展,引起燃烧变动,此外这也可能与火花塞处气流参数(平均参数和湍流参数)的变动有关^[10]. 掺氢可有效降低 C_{imep} ,其作用在大 EGR 率时尤为明显,这为利用 EGR 来降低 NO_x 排放提供了空间.

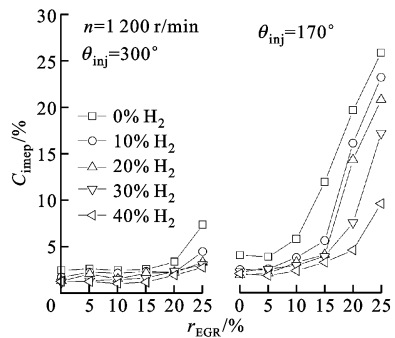


图 7 节气门保持全开且在最佳点火提前角下 C_{imep} 与 EGR 率的关系

3 结 论

(1) BMEP 随着 EGR 率的增加而减小,在小 EGR 率下,晚喷射时的 BMEP 比早喷射时略高,而大 EGR 率下的 BMEP 则急剧减小. 有效热效率随 EGR 的增大先减后增. 掺入氢气在小 EGR 率时 BMEP 和有效热效率减小,而在大 EGR 率时

BMEP 和有效热效率增大。

(2) NO_x 排放量随 EGR 率的增大而下降,随掺氢比的增大而上升。HC 排放量随 EGR 率的增大而上升,随掺氢比的增大而下降。大 EGR 率下,晚喷射时的燃烧稳定性更差,此时 HC 排放量比早喷射时更高;CO 排放量与 EGR 率无太大关系,随掺氢比的增大而上升。晚喷射时的 CO 浓度比早喷射时更大。上述均可能与缸内混合气分布情况有关。

(3) C_{imep} 随着 EGR 率的增大呈上升趋势。大 EGR 率下,晚喷射时发动机的 EGR 容忍度更差。掺氢可以有效降低 C_{imep} ,作用在大 EGR 率时尤为明显。

参考文献:

- [1] JAMES F, DON K. Hydrogen ICE vehicle testing activities, SAE 2006-01-0433 [R]. Warrendale, PA, USA; SAE, 2006.
- [2] DON K, JAMES F. High-percentage hydrogen/CNG blend FORD F-150 operating summary [EB/OL]. [2006-02-08]. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/809114-OkfzRR/native/809114.pdf>.
- [3] MA Fanhua, WANG Yu. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(4): 1416-1424.
- [4] MA Fanhua, WANG Mingyue, JIANG Long, et al. Performance and emission characteristics of a turbo-charged CNG engine fueled by hydrogen-enriched compressed natural gas with high hydrogen ratio [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(12): 6438-6447.
- [5] MA Fanhua, WANG Mingyue, JIANG Long, et al. Performance and emission characteristics of a turbo-

charged spark-ignition hydrogen-enriched compressed natural gas engine under wide open throttle operating conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(22): 12502-12509.

- [6] DIMOPOULOS P, RECHSTEINER C, SOLTIC P, et al. Increase of passenger car engine efficiency with low engine-out emissions using hydrogen-natural gas mixtures; a thermodynamic analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(14): 3073-3083.
- [7] 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.
- [8] 刘亮欣,黄佐华,蒋德明,等. 不同喷射时刻下天然气直喷发动机的燃烧特 [J]. 内燃机学报, 2005, 23(5): 469-474.
- LIU Liangxin, HUANG Zuohua, JIANG Deming, et al. Combustion and emission characteristics of a direct-injection engine fuelled with natural gas/hydrogen blends under various ignition timing [J]. Transaction of CSICE, 2005, 23(5): 469-474.
- [9] 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.
- [10] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, USA; McGraw-Hill, 1998.
- [11] ALGER T, GINGRICH J, MANGOLD B. The effect of hydrogen enrichment on EGR tolerance in spark ignited engine, SAE 2007-01-0475 [R]. Warrendale, PA, USA; SAE, 2007.

(编辑 苗凌)