

天然气掺氢配合废气再循环发动机燃烧过程的数值模拟

王婕, 黄佐华, 刘兵

(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: 基于 AVL-FIRE 软件, 数值模拟了掺氢比为 20%、不同当量比 (0.9~1.4)、不同废气再循环率 (0~0.25, 指废气的质量分数) 的情况下, 天然气掺氢发动机缸内压力、温度、氮氧化物随曲轴转角的变化规律及其三维空间分布。缸内压力的计算值与实测值达到很好的吻合, 表明模拟计算能进行天然气掺氢发动机的燃烧分析。计算结果表明: 当天然气掺氢发动机使用废气再循环 (EGR) 后, 缸内温度、压力、放热量和 NO 质量分数都降低, NO 出现的时刻推迟。废气再循环率大于 15% 时, NO 质量分数降低的速度已不明显。使用 EGR 是降低 NO 排放最直接和最有效的手段。在过量空气系数 1.1 处, NO 生成量最高。稀薄燃烧也是天然气掺氢发动机实现低 NO 排放的重要手段。

关键词: 天然气发动机; 废气再循环; 燃烧; 数值模拟

中图分类号: TK42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0022-04

Numerical Simulation of Combustion Process in a Spark-Ignition Engine Fuelled with Natural Gas-Hydrogen Blends Combined with Exhaust Gas Recirculation

WANG Jie, HUANG Zuohua, LIU Bing

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

Abstract: The variations with the crankshaft rotation and 3-dimensional distribution of pressure, temperature, and NO in the cylinder of a natural gas-hydrogen engine were simulated with a hydrogen volume fraction of 20%, excess air ratios (0.9-1.4), and exhaust gas recirculation (EGR) mass fractions (0-0.25) by AVL-FIRE. The predictions of the cylinder pressure agree well with the experimental data, indicating the feasibility of the simulation in the combustion analysis for natural gas-hydrogen engines. The calculation results show that the temperature and pressure in the cylinder, heat released, and the mass fraction of NO decrease, and NO occurs late. The decrease of NO is not obvious when EGR mass fraction is less than 0.15. The use of EGR can be the most effective method to reduce the emission of NO. The yield of NO is the greatest at the excess air ratio of 1.1. Lean mixture combustion is also an important approach to lowering NO emission from natural gas-hydrogen engines.

Keywords: natural gas engine; exhaust gas recirculation; combustion; numerical simulation

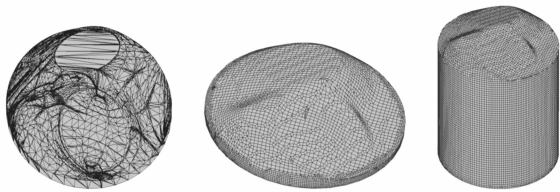
与石油相比, 天然气因储量高、热值高、抗爆性能好等优点成为最有前景的替代燃料。在天然气中掺混氢气可以改善天然气燃烧速率低、稀燃能力差的问题^[1-6]。为了配合使用废气再循环 (EGR) 技术

以降低天然气掺氢发动机最主要的排放物 NO_x , 本文应用三维数值模拟软件 FIRE 8.5 对天然气掺氢发动机的燃烧过程进行了数值模拟, 获得了不同废气再循环率 γ 和不同过量空气系数时天然气掺氢发

动机的燃烧与排放特性. 数值分析说明,使用 EGR 是降低 NO 排放最直接和最有效的手段.

1 计算模型及方法

本文计算的发动机是 HH368Q 火花点火发动机,主要结构参数见文献[7]. 计算模型的生成首先采用 Saro 便携式激光扫描仪产生发动机在上止点时的面网格,其次利用 Fame Advance Hybrid 全自动网格生成工具产生上止点时的计算网格,最后利用 Fame Engine Plus 半自动网格生成工具生成计算所需的间隔为 10°的移动网格(见图 1).



(a)上止点面网格 (b)上止点计算网格 (c)下止点计算网格
图 1 计算网格示意图

针对此几何模型,在 FIRE 软件中设定求解器(Solver)参数,部分计算参数见表 1.

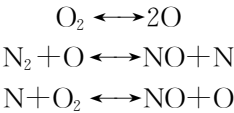
表 1 模拟计算基本参数

参数	取值
发动机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	2 000
节气门开度	全开
点火提前角 (上止点前)/ $(^\circ)$	30
初始压力/MPa	0.1
初始温度/K	315
掺氢比($\varphi(H_2)$)/%	20
过量空气系数	0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4
γ	0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25

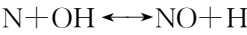
构造完体网格后,针对建立好的几何模型,结合模拟的实际物理过程,设定组分输运模型和燃烧模型. 本文采用在工程流动与数值计算中应用最广的湍流黏性系数法,燃烧模型选择涡破碎模型. 本文研究的重点是天然气掺氢发动机中 NO_x 生成情况,因此下面仅列出 NO_x 生成模型:

在内燃机排放的 NO_x 中占多数的是 NO,其主要来源是参与燃烧的空气氮,空气中的氮生成 NO 的化学机理是扩展的泽耳多维奇(Zeldovich)机理. 在化学计量混合比($\lambda=1.0$)附近,导致 NO 生成

和消失的主要反应为



在非常浓的混合气中还有反应



NO 的生成随温度的提高呈指数函数急剧增加. 当温度低于 1 800 K 时,NO 的生成速率极低,到 2 000 K 就达到很高的速率. 大致可以认为温度每提高 100 K,NO 的生成速率几乎翻一番. 由于 NO 的生成反应比燃料的燃烧反应慢,所以只有很少一部分 NO 产生于很薄的火焰反应带中,大部分 NO 在火焰离开后的已燃气体中生成. 如果反应物在高温环境停留时间不足,则 NO 达不到化学反应时的平衡含量,NO 排放量减小^[8].

2 计算结果及分析

Akansu 等人的研究结果表明,天然气掺混氢气可以降低发动机排放,最佳掺氢比($\varphi(H_2)$)为 20%~30%,过高的掺氢比降低了天然气优良的抗爆性,导致功率下降,油耗增加^[9]. 本文为了验证所选模型的准确性,选取掺氢比为 20%、过量空气系数为 1.1 的工况,对缸内压力的计算结果和试验结果进行了对比(见图 2). 为了节省计算时间和成本,本文采用单步快速化学反应模型,对燃烧速率的假设会产生一定的偏差,因此压力峰值出现的时刻略晚于试验结果. 另外,试验值是多个循环的缸内平均压力,而数值计算仅是模拟单个循环缸内的理想燃烧,并且传热模型对壁面传热估计不足,因此造成两者峰值压力的差别. 最高压力的计算值与试验值偏差为 1.63%,出现的相位差为 2.6°,满足精度要求. 数据对比表明,模拟结果与计算结果吻合较好,模型计算可以进行天然气掺氢发动机燃烧过程的数值模拟研究.

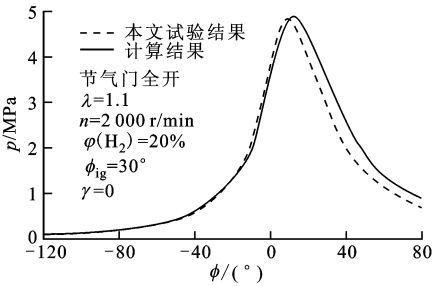


图 2 缸内压力计算与试验结果的对比

2.1 EGR 对 NO 生成的影响

以过量空气系数为 1.1 的工况为例,分析 EGR 对 NO 生成的影响.从图 3 可以看出:NO 最高浓度产生于远离火焰前锋的焰后高温区; γ 为 0.25 时,NO 生成量急剧减少,且出现时对应的曲轴转角滞后;随着球形火焰向燃烧室的传播和气缸容积膨胀,缸内温度下降,NO 浓度不再增加而维持稳定数值,形成所谓的“NO 冻结现象”.

表 2 表明:随着 γ 的不断增大,缸内最高压力和最高温度都有明显降低,NO 的生成浓度明显降低,NO 出现时对应的曲轴转角 ϕ_{NO} 向后推迟.当 γ 为 0.15 时,NO 的排放仅是无 EGR 时的 8.48%.继续增大 γ ,NO 降低效果减缓,同时也会对燃油经济性、动力性和 HC 排放产生不利影响.

结合以上计算结果及分析,可推断改变发动机的 γ 对 NO 排放影响的原因:一方面,由于废气中的 CO_2 和 H_2O 的比热容值大于空气, γ 增加,进入缸内的残余废气 CO_2 和 H_2O 含量增加,在降低燃烧反应速率的同时也将吸收燃烧释放的部分热量,缸内混合气的平均比热容增加,缸内温度升高率下降;另一方面,EGR 的引入减少了进入缸内的新鲜充量,使燃烧温度、压力和压力升高率降低,燃料放热量减少,燃烧速度降低,高温持续时间缩短,同时缸

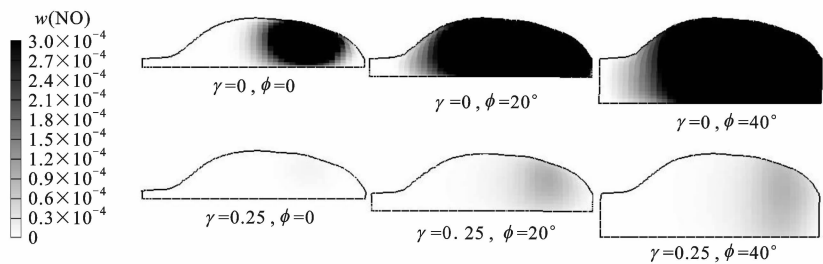
内 O_2 量减少,根据 NO 生成机理——扩展 Zeldovich 模型可知,NO 也会有所降低.

2.2 过量空气系数的影响

如图 4 所示,在 $\lambda=1.0$ 处的最高压力、最高温度和累积放热量都比其他工况下要高,在不考虑 EGR 时,分别是 $\lambda=1.4$ 时的 1.2~1.3 倍,说明在理论空燃比附近天然气掺氢发动机燃烧情况最好,但 NO 排放在 $\lambda=1.1$ 处达到最大值,是 $\lambda=1.4$ 且不加 EGR 时的 1.74 倍.这是因为,过量的 O_2 在促使 NO 生成的同时会吸收一部分燃烧热量致使气缸温度下降,从而抑制了 NO 生成; $\lambda=1.1$ 处缸内温度虽然不是最高值,但氧气浓度增加的影响大于温度降低的影响,两者综合作用使 NO 排放最高值出现在 $\lambda=1.1$ 处.结合文献[10]试验所得的结论,本文研究认为稀薄燃烧是天然气掺氢发动机实现低 NO 排放的重要手段.

3 结 论

(1)NO 生成受 γ 影响较大.随着 γ 的增加,NO 生成的浓度显著降低,出现 NO 的时刻推迟.当 γ 大于 15%时,NO 排放下降的速度已不明显.EGR 是降低 NO 排放最直接和最有效的手段.



节气门全开, $\varphi(\text{H}_2)=20\%$, $\lambda=1.1$, $\phi_{\text{ig}}=30^\circ$
图 3 天然气掺氢发动机缸内 NO 质量分数对比图

表 2 过量空气系数为 1.1、掺氢比为 20%、 γ 不同时的缸内参数对比

γ	T_{max}/K	$p_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\phi_{\text{NO}}/(\circ)$	$10^6 \times w(\text{NO})$
0.00	2 327.23	4.900 18	-27.6	1 298.530
0.05	2 243.84	4.726 88	-27.4	598.795
0.10	2 159.47	4.551 55	-27.4	255.676
0.15	2 074.08	4.374 63	-27.2	100.118
0.20	1 987.65	4.196 74	-27.0	35.489
0.25	1 900.52	4.018 75	-26.8	11.233

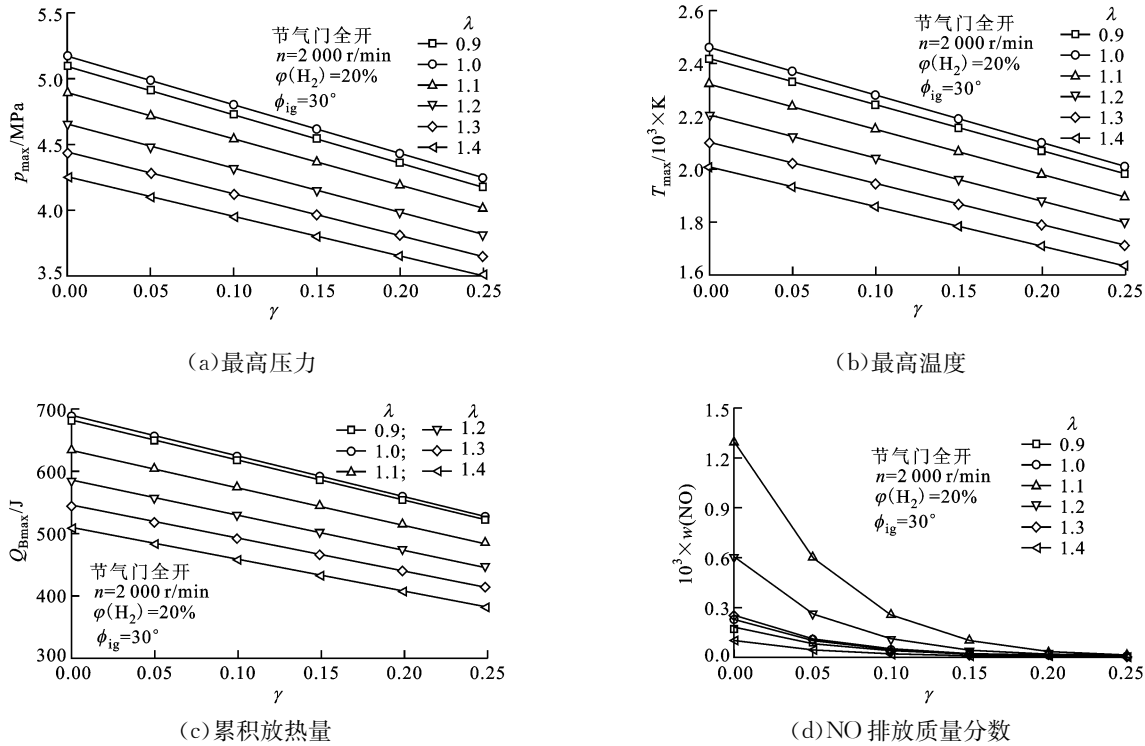


图 4 不同过量空气系数下的计算结果

(2)天然气掺氢发动机在过量空气系数为 1.1 处,NO 生成量最高. 稀薄燃烧也是天然气掺氢发动机实现低 NO 排放的重要手段.

参考文献:

[1] 黄佐华,王金华,黄印玉,等. 氢能在燃烧发动机上利用的研究综述[EB/OL]. [2006-08-10]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>.

[2] AKANSU S O, DULGER A, KAHRAMAN N, et al. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(4): 1527-1539.

[3] KARIM G A, WIERZBA I, ALOUSI Y A. Methane-hydrogen mixtures as fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1996, 21(7): 625-631.

[4] BAUER C G, FOREST T W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles; part I [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26(1): 55-70.

[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] SIERENS R, ROSSEEL E. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions[J]. ASME Journal of

Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122 (1): 135-140.

[7] 刘兵,黄印玉,黄佐华,等. 天然气掺氢火花点火发动机性能与排放研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40 (11): 1268-1271.

LIU Bing, HUANG Yinyu, HUANG Zuohua, et al. Experimental study on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with CNG-hydrogen mixtures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(11): 1268-1271.

[8] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 1999, 233-234.

[9] AKANSU S O, DULGER A, KAHRAMAN N, et al. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(4): 1527-1539.

[10] 刘兵,黄佐华,曾科,等. 天然气掺氢火花点火式发动机排放性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (2): 245-246.

LIU Bing, HUANG Zuohua, ZENG Ke, et al. Experimental investigation on emissions of a spark-ignition engine fuelled with hydrogen enriched natural gas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 245-246.

(编辑 王焕雪)