

甲烷/氢气双燃料均质压燃式燃烧特性研究^{*}

王 雷¹ 潘江如^{*,2} 鲁亚云³

(1. 新疆农业大学机械与交通学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆工程学院, 乌鲁木齐 830025;
3. 新疆职业大学机械电子工程学院, 乌鲁木齐 830013)

摘 要:利用气相化学反应模拟软件 Chemkin 模拟甲烷与氢气混合的燃烧过程, 分析讨论了添加不同比例的氢气对燃烧参数的影响。研究结果表明:随着掺氢比的增加, 反应物燃烧速度加快, 缸内温度、压力随之升高, CO 与 CO₂ 的排放变化不是很大, NO 的排放有所增加; 在掺氢比为 50% 的时候, 气相反应的净产热达到最高值。

关键词:甲烷; 掺氢比; Chemkin; 均质压燃; 内燃机; 燃烧

中图分类号: U473.4+4 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2015.02.005

Researches on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion Characteristics of Methane/hydrogen Dual Fuel^{*}

WANG Lei¹ PAN Jiangru^{*,2} LU Yayun³

(1. College of Mechanical Transportation, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;
2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830025; 3. School of Mechatronics Engineering,
Xinjiang Vocational University, Urumqi 830013)

Abstract: The software Chemkin is used to simulate the gas phase chemical reaction and the combustion process of the mixture of methane and hydrogen gas. Then the effect of adding different proportion of hydrogen gas on combustion parameters is discussed. The results show that with the increase of hydrogen blending ratio, reactant burning speed, temperature in the cylinder, cylinder pressure and NO emission are increased, with emissions of CO and CO₂ changing not so great. When hydrogen blending ratio is 50%, the net heat production by gas phase reaction reached the highest value.

Key words: methane; hydrogen blending ratio; chemkin; homogeneous charge compression ignition; internal combustion engine; combustion

1 引言

汽车尾气造成的污染日趋严重, 各种代用燃料及各种新型燃烧模式应运而生^[1]。现在很多城市的出租车、公共汽车都在使用压缩天然气(CNG)作为燃料, 但其稀燃能力差, 放热速率慢, 热效率低, 影响了燃油经济性^[2]。通过分析碳(C)和氢(H)的理化特性得知, 纯 C 热值要比纯 H 热值低很多, 而且 C/H 比越大, 燃烧排放的未燃碳氢化合物、炭烟、CO、CO₂ 及微粒越多。另有研究表明, 在甲烷中掺氢可提高燃料的燃烧速率, 缩短滞燃期, 抑制燃烧的最高温度, 降低 CH 排放^[3,4]。

目前, 已有很多学者对甲烷掺氢的燃烧进行了研究。Nagalingam 等^[5]在单缸发动机上进行了不同

掺氢比的天然气燃烧试验研究, 发现掺氢后, 发动机点火提前角减小, 有利于减弱 NO_x 的生成。尉庆国等^[6]在定容燃烧弹内进行了甲烷-氢气-空气混合气燃烧试验, 研究了不同初始参数对燃烧压力的影响, 发现随着氢气比例的增加, 最大燃烧压力增大, 火焰传播稳定性降低^[6]。吴长水等^[7]通过改变负荷与点火提前角, 研究了不同掺氢比的天然气发动机的经济性和排放性, 结果表明, 随着掺氢比的增加, 燃气消耗率降低, 发动机的经济性得到改善。

目前, 对掺氢天然气的燃烧分析大多是在内燃机普通点燃方式的模型下进行的, 而为了在实现低排放的同时满足燃油经济性的要求, 一种新的燃烧方式即均质冲量压缩着火(HCCI)成为当前内燃机燃烧的一个研究热点^[8]。因而, 本文讨论的重点就是在以甲烷为燃料的基础上添加不同比例的氢气, 实现 HCCI 燃烧并通过对比分析不同比例的氢气对燃烧参数的影响。

2014-11-04 收稿, 2014-11-12 接受

* 新疆维吾尔自治区高等学校科研计划重点项目(XJEDU2014J048)资助

* * 通讯作者, E-mail: pjr1978@126.com

2 模型建立

本文采用模拟封闭内燃机燃烧的反应器来模拟 HCCI 条件下甲烷与氢气的混合燃烧特性,使用气相化学反应模拟软件 Chemkin 的 IC ENGINE 模块,假设混合气为理想气体,燃烧室为绝热环境,缸内浓度、压力、温度均匀,质量恒定。

2.1 几何模型^[9]

对 Heywood 提出的缸内容积随时间的变化函数

$$\frac{v(t)}{v_c} = 1 + \frac{c-1}{2} [R + 1 - \cos\theta + \sqrt{R^2 - \sin^2\theta}]$$

(1)

求导后得

$$\frac{d(v/v_c)}{dt} = \Omega \left(\frac{c-1}{2} \right) \sin\theta \left[1 + \frac{\cos\theta}{\sqrt{R^2 - \sin^2\theta}} \right]$$

(2)

式中, V_c 是气缸余隙容积, $L; \Omega = \frac{d\theta}{dt}$ 为曲柄旋转角速

度, $\text{rad/s}; R = \frac{L_c}{L_A}$ 为连杆长度与曲轴半径比; C 为压缩比。方程中的未知数通过 Chemkin 软件的反应器用户界面来设定,确定了这些参数就可通过式(2)得出发动机缸内容积随时间的变化率。

2.2 传热模型

采用 Woschni 传热模型,

$$N_{uh} = \alpha R_e^b Pr^c$$

(3)

$$R_e = \frac{D_w p}{\mu}$$

(4)

$$w = \left[\left(C_{11} + C_{12} \frac{v_{swiri}}{\bar{S}_p} \right) \right] \bar{S}_p + C_2 \frac{v_d T_i}{p_i v_i} (p - p_{motored})$$

(5)

式中, N_{uh} 是努赛尔数; R_e 是雷诺数; Pr 是普朗特数; $\bar{w}$ 是缸内工质平均速率, $\text{m/s}; \bar{S}_p$ 是活塞的平均速率, m/s 。

假设缸内无漏气现象,缸壁间的传热忽略,通过此模型可以预测缸内工质的平均速率。

2.3 反应机理

氢的氧化反应机理采用 Marinov 总结的 20 个基元反应^[10], CH_4 及 NO_x 采用的是简化后的反应机理。 CH_4 所属最低碳烃类,其燃烧机理是单阶段着火燃烧,氢的添加使 CH_4 的氧化反应非常敏感。

2.4 发动机参数

本次模拟所用发动机的参数如表 1 所示。

表 1 模拟发动机参数

参数	大小
发动机类型	直立、四冲程、水冷
压缩比	20:1
连杆曲轴半径比	3.33
曲轴转数 (r/min)	1500
发动机余隙容积 (cm^3)	1.0

3 模拟结果分析

图 1~6 均为不同掺氢比的混合气与纯甲烷的燃烧特性曲线图,进气温度 550 K,进气压力 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。通过添加 10%、20%、30%、40%、50% 的氢气来分析其燃烧对各种参数的影响。

3.1 缸内温度和压力变化

由图 1、图 2 可以看出,随着掺氢比的增加,由于氢气的燃烧速率比甲烷快,所以缸内燃烧的着火时刻明显提前,燃料燃烧放热迅速,缸内温度与压力增加迅速,甲烷的反应速度加快,放热相对集中,燃烧时的缸内最高温度与最高压力也随着掺氢比的增加而逐渐增大。

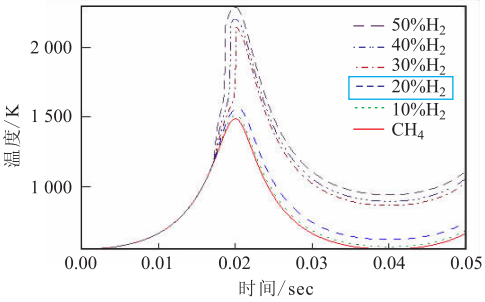


图 1 不同掺氢比的缸内温度曲线

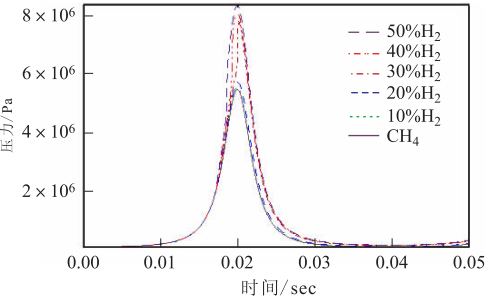


图 2 不同掺氢比的缸内压力曲线

3.2 缸内 CO 和 CO₂ 摩尔分数变化

图 3、图 4 是燃烧过程中 CO 和 CO₂ 的摩尔分数变化曲线,从两图中可以看出,在燃烧初始接近 0.02 秒的时候,CO 的浓度在短时间内迅速增多然后又迅速下降,CO₂ 的摩尔数低,主要是由于 CH_4 分解以后形成的中间燃烧产物 CO 增多。随着温

度、压力的增加,CO 迅速氧化成为 CO₂,所以在这个时刻,CO₂ 迅速增多,CO 迅速减少。但是氢气浓度增加得过多时,CO₂ 和 CO 都与氢原子产生可逆反应,造成 CO 稍微增加和 CO₂ 稍微的减少,如 H₂ 的加入比例为 50% 时。

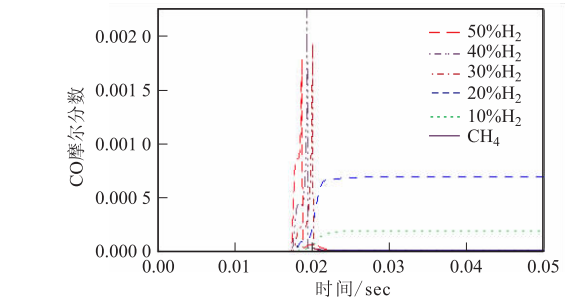


图 3 CO 摩尔分数曲线

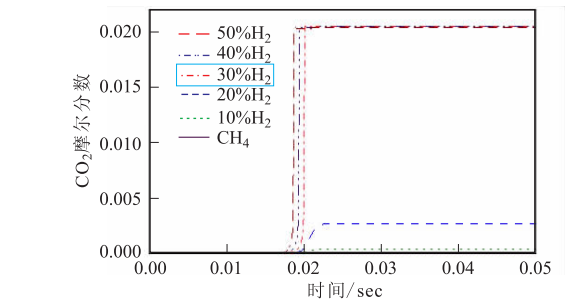


图 4 CO₂ 摩尔分数曲线

3.3 缸内 NO 摩尔分数变化

从缸内 NO 摩尔分数变化曲线图(图 5)可以看出,随着氢气的添加量增大,缸内 NO 的产生随之增多,在掺氢比 50% 时达到最高值。这是由于随着氢气量的增加,缸内温度急剧上升(见图 1),而在 NO 的生成过程中高温是极其重要的条件,当缸内的温度超过1 800 K时,NO 排放会增加。但是由图 5 可以看出,HCCI 燃烧方式的 NO 排放物不是很高,即使 NO 的摩尔分数随着氢气量的增加有所增加,而其数值依然较低。

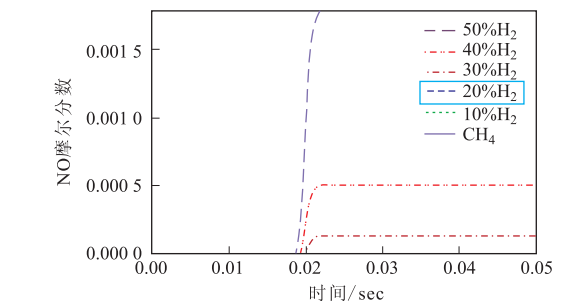


图 5 NO 摩尔分数曲线

3.4 气相反应的净产热变化

图 6 是缸内燃料燃烧的气相反应的净产热变化曲线图,从图中可以明显看出,随着氢气的添加,气相反应的净产热量明显增加,且反应速度加快,使产热速度也变快。在掺氢比为 30%、40%、50% 时,净产热变化明显,在掺氢比 50% 的时候净产热量达到最高值。

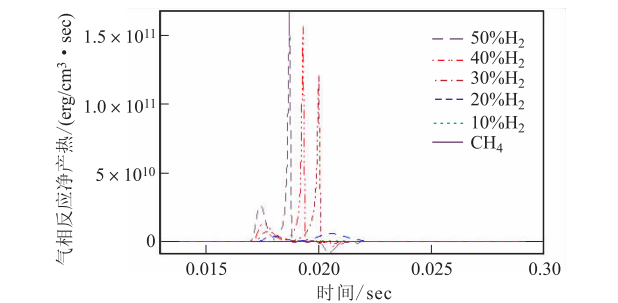


图 6 气相反应的净产热曲线

4 结论

文章运用 Chemkin 软件模拟甲烷掺氢的 HCCI 燃烧,通过添加不等量的氢气,对比分析了缸内温度、压力、气相反应净产热的变化,以及 CO、CO₂、NO 排放物的摩尔分数变化,得出以下结论:

- 1)随着掺氢比的增加,缸内燃烧温度、压力升高,着火时刻提前,最高压力与最大温度也逐渐增大。因此,在内燃机设计允许的条件下可以适当增加氢气来提高燃烧特性。
- 2)随着掺氢比的增加,缸内 CO₂ 含量增加,CO 含量减少。但是氢气浓度增加过多会 CO 略有增加而 CO₂ 略有减少;此外,随着掺氢比的增大,缸内温度升高虽会使生成的 NO 增多,但增加的比例很小,与汽油机、柴油机比较而言,HCCI 模式下的 NO 排量还是很低的。
- 3)随着掺氢比的增加,缸内气相反应的净产热随之增大,产热速度加快,在掺氢比 50% 时,净产热量达到最高值。若只是添加少量氢气,缸内的净产热量变化不明显。

参考文献

[1]王建昕,帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2011:18-29.

[2]张红光,白小磊,韩雪娇,孙娜. 甲烷掺混氢气的燃烧特性试验研究[J]. 兵工学报,2011,32(2):230-235.

(下转第 154 页)

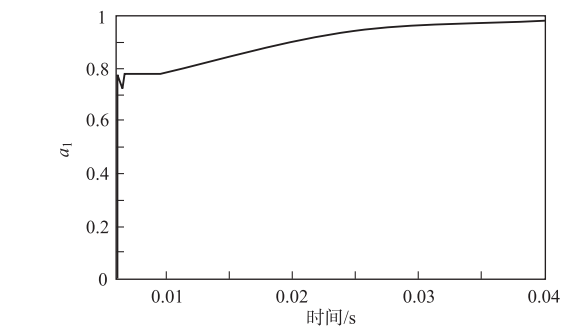


图 7 参数 a_1 对时间 t 曲线($\varepsilon=0.75$)

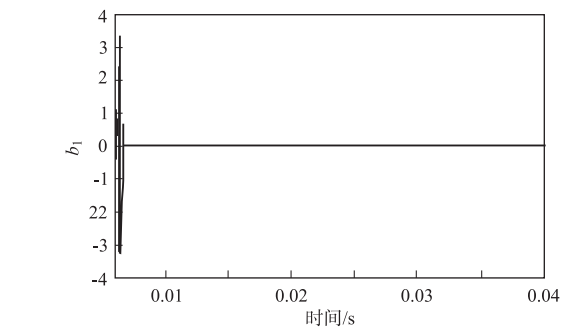


图 8 参数 b_1 对时间 t 曲线($\varepsilon=0.75$)

度和精度得到进一步提高。和随机梯度算法相比，修正随机梯度算法在辨识收敛速度和精度方面均有较大优势，可用于永磁同步电机的参数辨识。

参考文献

[1] LIU K,ZHANG Q,CHEN J,et al. Online Multiparameter Estimation of Nonsalient-Pole PM Synchronous Machines With Temperature Variation Tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(5) :1776-1788.

[2] RAHMAN M K,HITI S. Identification of machine parameters of a synchronous motor[J]. IEEE Trans. Ind. Appl. ,2005,41 (2) :557-565.

[3] GMYREK Z,BOGLIETTI A,CAVAGNINO A. Estimation of iron losses in induction motors :Calculation method ,results ,and analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(1) :161-171.

[4] ICHIKAWA S,TOMITA M,DOKI S,et al. Sensorless control of permanent-magnet synchronous motors using online parameter identification based onsystem identification theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2006,53(2) :363-372.

[5] RASHED M,MACCONNELL P F A,STRONACH A F,et al. Sensorless indirect-rotor-foeld-orientation speed control of apermanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(3) :1664-1675.

[6] 王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究 [D]. 北京:北京交通大学,2011.

[7] 丁锋,丁韬,杨家本,等. 时变参数遗忘梯度估计算法的收敛性 [J]. 自动化学报,2002,28(6) :962-968.

[8] JIE Ding,YANG Shi,WANG Huigang, et al. A modified stochastic gradient based parameter estimation algorithm for dual-rate sampled-data systems [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20 (4) : 1238-1247.

[9] HAN L,DING F. Multi-innovation stochastic gradient algorithms for multi-input multi-output systems[J]. Digital Signal Processing, 2009, 19(4) :545-554.

[10] 梁骞雁,胡育文,鲁文其. 基于梯度算法的永磁伺服系统惯量辨识性能研究 [J]. 航空学报,2011,32(3) :488-496.

[11] 王磊,李宏,武明珠,等. 基于扩展卡尔曼滤波的永磁同步电动机参数辨识 [J]. 微特电机,2012,40(7) :19-22.

[12] 刘亢,刘忠途,李乐荣,等. 永磁同步电机在线多参数辨识方法研究 [J]. 微特电机,2012,40(6) :4-7.



(上接第 133 页)

[3] BLARIGAN P V,KELLER J O. A hydrogen fuelled internal combustion engine designed for single speed/power operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2002,23(7) :603-609.

[4] 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(14) :1527-1539.

[5] NAGALINGAM B,DUEBEL F,SCHMILLEN K. Performance Study Using Natural Gas,HydrogenSupplemented Natural Gas and Hydrogenin AVL Research Engine[J]. International Journalof Hydrogen Energy ,Britain,1983,8(9) :715-720.

[6] 尉庆国,白小磊,张红光. 甲烷-氢气-空气预混合气燃烧特性研究 [J]. 车辆与动力技术,2011,(4) :13-17.

[7] 吴长水,李聪,陈凌珊. 天然气发动机的性能研究 [J]. 小型内燃机与摩托车,2011,40(3) :71-73.

[8] 王大兴,张欣,刘建华. 均质压燃式 (HCCI) 燃烧的研究 [J]. 内燃机工程,2002,23(4) :77-81.

[9] 文媛媛. 天然气掺氢 HCCI 发动机燃烧与排放物的研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2011.

[10] 韩雪娇. 天然气内燃机燃烧问题的基础研究 [D]. 北京:北京工业大学,2013.