

稀释对 CO 掺氢混合燃料燃烧与排放性能的影响*

陈雷¹ 王彦滑¹ 志贺圣一² 荒木幹也² 曾文¹

(1. 沈阳航空航天大学航空宇航工程学院, 沈阳 110136; 2. 群馬大学工学研究科, 群馬县桐生市 3760052)

摘要: 在一台转速固定的火花点火发动机上进行了 CO₂ 稀释对 CO 掺氢混合燃料的燃烧及排放性能影响的试验研究。结果表明, 氢气较快的燃烧速度弥补了由于其热值较低造成的对平均有效压力的影响, 使得在每个当量比条件下平均有效压力基本保持不变。同时, 掺氢对提升热效率及燃烧稳定性、改善 CO 以及 NO_x 排放都有显著作用。适当的 CO₂ 稀释对平均有效压力和热效率的影响均不明显, 而 NO_x 排放水平则显著下降。但是过高的稀释率会导致部分燃烧, 造成平均有效压力、热效率及 CO 排放的恶化。

关键词: 生物质燃气 稀释燃烧 排放

中图分类号: TK43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0028-05

Effect of Dilution on Combustion and Emission Characteristics of Gaseous Blended Fuels

Chen Lei¹ Wang Yanhua¹ Araki Mikiya² Shiga Seiichi² Zeng Wen¹

(1. School of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. Department of Mechanical Engineering, Gunma University, Gunma 376-8515, Japan)

Abstract: The experiment of effect of CO₂ dilution on combustion characteristics of H₂-CO blended fuel by using a spark-ignition engine with fixed speed was carried out. The results showed that fast burning velocity of H₂ offset its lower LHV, as a result, BMEP at each equivalent ratio kept almost constant. H₂ substitution also benefited for thermal efficiency, engine stability, CO and NO_x exhaust emissions. Suitable dilution hardly affected BMEP and thermal efficiency, but greatly reduced NO_x emission. However, excess dilution induced to partial burn, which was bad for all these parameters of BMEP, thermal efficiency and CO emission.

Key words: Biomass fuel gas Dilution combustion Emission

引言

生物质气体燃料的成分随着反应物及反应条件的不同而有所变化,但其大多含有氢气(H₂)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)、氮气(N₂)以及一些杂质^[1-2]。一些学者的研究表明,生物质气体燃料组分中的可燃气体以 H₂ 和 CO 为主^[1],同时还有大量的 CO₂,而且每种气体成分的浓度随着反应温度条件的不同有着明显的变化。H₂ 和 CO 的燃烧特性有较大差异,CO₂ 则有抑制燃烧的作用。因此,探明生物质燃气混合气中主要成分的百分比

对于燃烧及排放性能的影响,以及找到各组分的最佳混合比例,对于生物质燃气内燃机的应用就显得尤为重要。

目前,国内外对于一氧化碳掺氢燃烧的研究较少,大多数研究者把工作重点放在 CH₄掺氢燃烧上,并取得了一系列成果^[3-10]。但是,由于甲烷只占生物质燃气体积分数的很小一部分,因此相对于天然气掺氢来说,一氧化碳掺氢的燃烧特性更为重要,而目前国外的相关研究文献还不多见,国内则尚未开展类似研究。基于此,笔者在一台火花点火发动机上进行 CO 掺氢混合燃料稀释燃烧试验研究,分析

收稿日期: 2012-06-22 修回日期: 2012-07-28

* 国家自然科学基金资助项目(50906059)

作者简介: 陈雷,讲师,主要从事内燃机代用燃料研究,E-mail: cl_officer1981@hotmail.com

掺氢比和稀释率对燃烧及排放特性的影响,为生物质气体燃料在内燃机上的合理应用及推广提供理论支持。

1 试验装置及试验方案

试验所用发动机为本田产 GX340 型火花点火发动机,并保持转速 1 500 r/min、最佳点火提前角 (MBT)以及节气门全开 (WOT)条件不变,其主要技术参数见表 1。试验中,气缸压力采用 KISTLER 公司 6125A 型压力传感器测量,测得的数据由该公司 5011B 型电荷放大器放大和转换;采用日本 HORIBA 公司生产的 MEXA4000 型傅里叶变换红外线光谱分析仪 (FT-IR) 分别对 CO、HC 和 NO_x 排放量进行测量。在研究中,将原发动机的汽油喷嘴更换为 3 个 KEIHIN 公司产 CNG 专用喷嘴 (H₂、CO 和 CO₂ 各一个),并将其安装在位于进气门上游的气体混合装置上。CO 与 CO₂ 喷射压力均为 0.255 MPa。由于 H₂ 容易引发回火,因此为了扩大 H₂ 的喷射持续期从而得到更宽的应用范围,其喷射压力适当降低。本试验中,H₂ 喷射压力选定为 0.105 MPa。试验装置如图 1 所示。

表 1 发动机主要参数
Tab.1 Engine specifications

参数	数值
型式	单缸,风冷,4 冲程
气门形式	单顶置凸轮轴
燃烧室几何形状	楔形
工作容积/mm ³	337
活塞直径×行程/mm×mm	82×64
压缩比	8
额定功率/kW	8.1
额定转速/r·min ⁻¹	3 600
节气门开度	WOT
转速/r·min ⁻¹	1 500

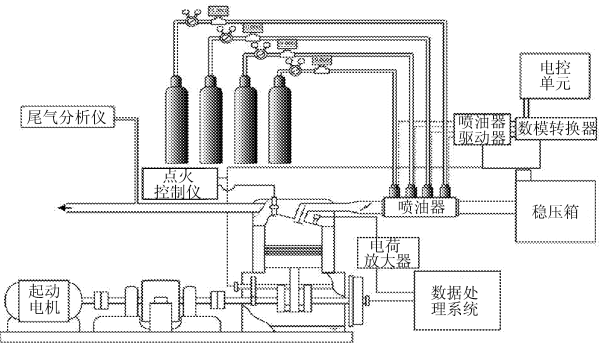


图 1 天然气掺氢稀释燃烧试验台架简图
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

如前所述,实际生物质燃气的成分随气化条件的不同而有很大变化。本研究的目的是得到生物质

燃气中主要成分的最佳混合比例,因此,试验中所采用的燃料条件范围是根据作者前期研究成果^[11]选定的(CO 当量比 φ_{CO} 的范围为从稀燃极限到化学计量比,H₂ 当量比 φ_{H_2} 的范围为从稀燃极限到发生回火时的当量比)。在本研究中,总的当量比 φ 为 φ_{CO} 和 φ_{H_2} 之和,即

$$\varphi = \varphi_{CO} + \varphi_{H_2} \tag{1}$$

在试验中,在每一个 φ 的条件下分别改变 φ_{CO} 和 φ_{H_2} 的值,并保持 φ 的值不变,从而测得在每一个 φ 条件下氢气量对燃烧性能的影响。为了避免过高的燃烧温度, φ 的范围被限制在 0.3 ~ 0.8。试验中采用的 φ 、 φ_{CO} 、 φ_{H_2} 的条件如表 2 所示。

表 2 试验中使用的当量比条件
Tab.2 Equivalence ratio conditions

φ	φ_{CO}	φ_{H_2}
0.8	0.7	0.1
	0.6	0.2
	0.6	0
0.6	0.5	0.1
	0.4	0.2
	0.3	0.3
	0.2	0.4
	0.3	0.1
0.4	0.2	0.2
	0.1	0.3
	0	0.4
0.3	0.1	0.2
	0	0.3

在每组 φ 条件下,保持 φ_{H_2} 和 φ_{CO} 的和不变,逐渐减小 φ_{CO} 并增加 φ_{H_2} 直至回火发生。然后在每组 φ_{H_2} 和 φ_{CO} 条件下,逐渐掺入 CO₂ 并增加其流量,直至发动机无法稳定工作为止。

由于 H₂ 和 CO₂ 在混合气中的体积分数对于燃烧有着很大的影响,为了便于分析,本文中给出以下两个定义:

掺氢比是 φ_{H_2} 与 φ 的比值,定义为

$$H = \frac{\varphi_{H_2}}{\varphi_{H_2} + \varphi_{CO}} \tag{2}$$

稀释率是 CO₂ 的物质的量与燃料及 CO₂ 总物质的量的比值,定义为

$$R = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO_2} + M_{fuel}} \tag{3}$$

2 试验结果与分析

2.1 CO 掺氢混合燃烧试验

试验中首先进行无稀释条件下的 CO 掺氢混合燃料燃烧试验。

图 2 所示是掺氢比对平均有效压力 p_{me} 的影响。

如图所示,在每一个当量比条件下 p_{me} 随 H 的升高没有明显变化。 p_{me} 主要由热投入量决定,以往的研究结果表明^[12],当 $\varphi = 0.8$ 或 $\varphi = 0.6$ 时,热投入量计算结果与实际 p_{me} 的变化趋势区别不大,但当 $\varphi = 0.4$ 或 $\varphi = 0.3$ 时,与热投入量的计算结果相比, p_{me} 的变化趋势有比较明显的升高。这表明 p_{me} 随 H 的变化并不仅仅取决于热投入量,而是还有其他影响因素。

考虑到 H_2 的燃烧速度要远大于 CO ,在小当量比条件下 p_{me} 计算值和试验值的差应该归结于不同的燃烧速度。 H 对于燃烧持续期的影响如图 3 所示。掺氢导致了混合燃料燃烧速度的加快,因此在各当量比条件下燃烧持续期随 H 的增加而显著缩短。由于如图 4 所示的最佳点火提前角也随着 H 的增加而有所滞后,造成燃烧等容度增加,因此如图 5 所示的热效率随着 H 的增加而升高。在 $\varphi = 0.6$ 时,与 CO 最高 26% 的热效率相比,0.5 的掺氢比使得 CO 掺氢混合燃料的最高热效率超过了 28%。另外,与 CO 相比 H_2 较短的淬熄距离导致了更高的燃烧效率,这也有利于提升热效率。虽然淬熄距离的缩短使燃烧更加接近于冷壁,会造成一定程度上热损失的增加,但是综合考虑这两个相反方面因素的影响,氢气的增加有助于提升热效率。

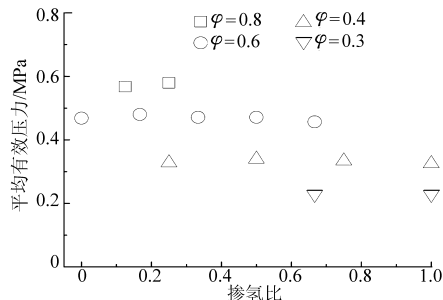


图 2 掺氢比对 p_{me} 的影响

Fig. 2 Effect of H on p_{me}

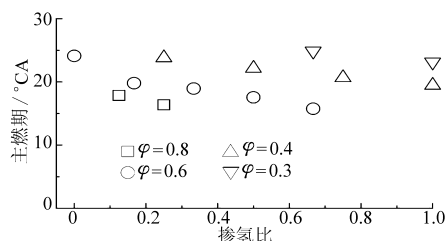


图 3 掺氢比对燃烧持续期的影响

Fig. 3 Effect of H on main combustion duration

因此可以说,虽然掺氢导致热投入量有所减少,但由于提高了热效率,这两方面相反的影响相抵消,因此 p_{me} 保持不变。

图 6、7 分别是 NO_x 和 CO 排放量随着掺氢比的变化情况。由于本试验中所使用的燃料为 CO 掺氢混合燃料,其中并不含有碳氢化合物,因此 HC 排放

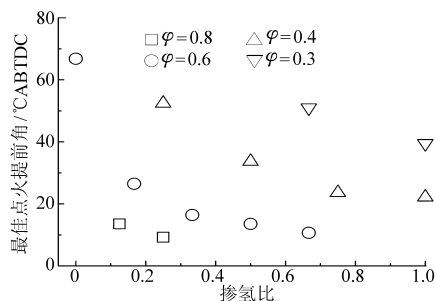


图 4 掺氢比对最佳点火提前角的影响

Fig. 4 Effect of H on MBT

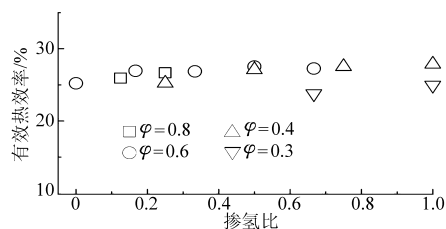


图 5 掺氢比对有效热效率的影响

Fig. 5 Effect of H on η_e

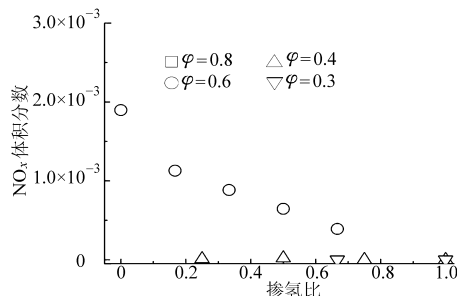


图 6 掺氢比对 NO_x 排放量的影响

Fig. 6 Effect of H on NO_x emission

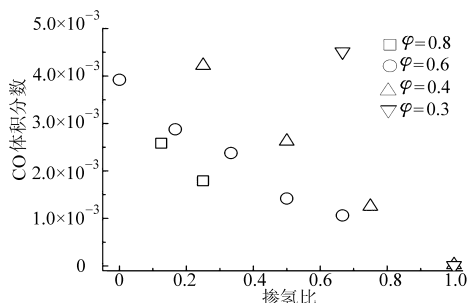


图 7 掺氢比对 CO 排放量的影响

Fig. 7 Effect of H on CO emission

的结果在本文中并未给出。

当 $\varphi < 0.4$ 时,由于燃烧温度较低, NO_x 排放处于很低水平。当 $\varphi = 0.8$ 时,由于燃烧温度过高,导致 NO_x 超出了测量范围。当 $\varphi = 0.6$ 时,随着 H 的增加, NO_x 排放量显著下降。考虑到 H_2 和 CO 与氧气反应的反应前后摩尔数变化一致,因此 NO_x 排放量的变化主要取决于 H_2 较低的燃烧温度。

在每个当量比条件下, CO 排放量均随着 H 的增加而迅速下降,这主要是更少的未燃 CO 造成的。与此同时,随着 H_2 的不断增加,混合燃料的淬熄距

离有所下降,因此 CO 的燃烧效率势必有所升高,这也对 CO 排放量的降低有所促进。

2.2 稀释燃烧性能试验

在 H_2/CO 混合燃烧的基础上,逐渐掺入 CO_2 ,考查 CO_2 稀释对燃烧及排放性能的影响。当量比条件与稀释前一致,在每一个当量比条件下 R 均从 0 逐渐增加到 0.7。

图 8 所示是 R 对于 p_{me} 的影响。在 φ 一定时,随着 R 的增加,进入气缸的燃料流量减小,因此 p_{me} 势必有所下降。 R 增加造成的热投入量变化情况如图中虚线所示。

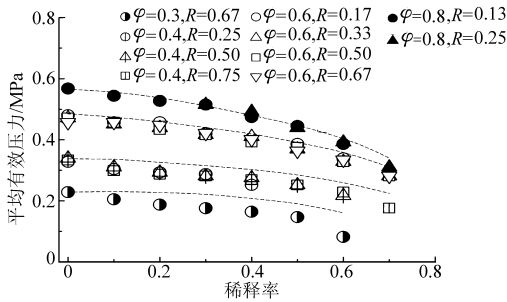


图 8 稀释率对平均有效压力的影响
Fig. 8 Effect of dilution rate on p_{me}

如图所示,在较大当量比以及较低 R 条件下, p_{me} 和热投入量的变化趋势是一致的。但是当 φ 减小或者 R 增加时, p_{me} 的下降幅度超过了热投入量的变化幅度。而且,随着 φ 的减小 p_{me} 和热投入量的差值逐渐增大,尤其是在 R 为 0.7 时这种差异尤为明显。考虑到在各燃料条件下循环变动系数的水平都不高,因此造成这种差异的主要原因应该从燃烧角度考虑。

为了了解这种差异发生时发动机工作状况的变化,建立了 p_{me} 和循环变动系数之间的相互关系。如图 9 所示, p_{me} 和循环变动系数的关系呈现出两个区域。图中大部分数据点都位于区域 1 中,这些点的 R 均小于 0.4,其 p_{me} 和循环变动系数可以近似看作是线性关系。因此可以认为,在这一区域 p_{me} 的变化主要是由 φ 的变化以及稀释造成的热投入量变

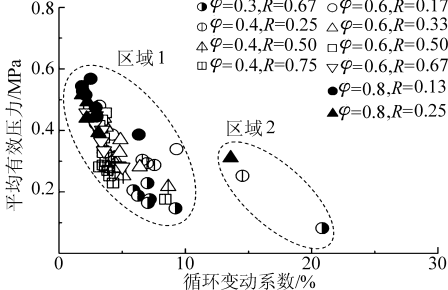


图 9 p_{me} 和循环变动系数的对应关系
Fig. 9 Correlation between p_{me} and cyclic variation coefficient

化而造成的。区域 2 中的点较少,且 R 较大,均处于 0.6 ~ 0.7 范围内。其循环变动系数的变化幅度要远远大于 p_{me} 的变化幅度。结合前期研究成果^[11],造成这一现象的主要原因是在大稀释率条件下由于热投入量过少造成部分燃烧,从而导致发动机稳定性的急剧下降。部分燃烧也影响了热效率,图 10 所示是热效率随 R 的变化情况。在较大 φ 以及较小 R 条件下,热效率的变化幅度很小;而在较小 φ 以及大 R 条件下,热效率的下降较为明显。

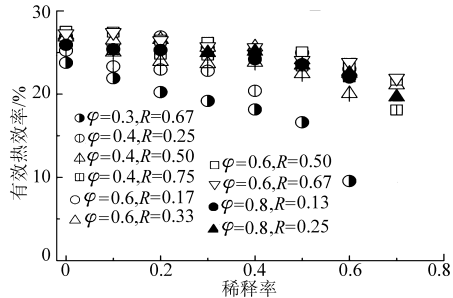


图 10 稀释率对有效热效率的影响
Fig. 10 Effect of dilution rate on effective thermal efficiency

这两种不同的变化是由不同的原因造成的。在前一种条件下,随着稀释率的逐渐增加,热投入量逐渐减小,这会导致燃烧速度减慢,燃烧持续期增长,从而导致循环效率下降,所以热效率有所下降。在后一种条件下,由于存在部分燃烧,造成燃烧效率急剧下降,从而导致热效率有较大幅度的降低。

稀释率对 NO_x 和 CO 排放的影响情况分别如图 11 和图 12 所示。在图 11 中,随着 φ 的减小以及 R 的增加,由于热投入量减少造成燃烧温度降低,所以 NO_x 排放量随着 R 升高而有明显的下降。值得注意的是,当 R 为 0 时,在最高当量比 $\varphi = 0.8$ 条件下 NO_x 排放由于燃烧温度过高而超出了测量界限;而随着 R 的升高, NO_x 排放量的下降十分明显,在 R 为 0.4 时已经下降到 2×10^{-4} 以下。可见 CO_2 稀释对 NO_x 排放的抑制作用十分显著。

CO 排放主要由 φ 和淬熄距离决定。在稀燃条件下,过量的空气保证了较高的燃烧效率,因此 CO 排放普遍较低。随着 R 的增加,CO 排放量的增加

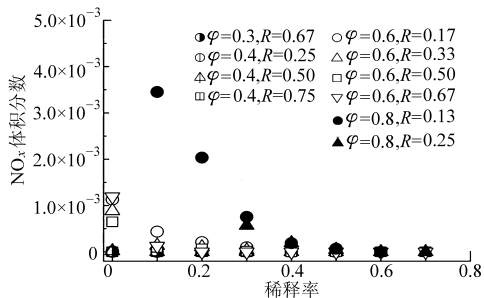


图 11 稀释率对 NO_x 排放量的影响
Fig. 11 Effect of dilution rate on NO_x emission

主要取决于淬熄距离的增加,这在前期工作中已经详细叙述。

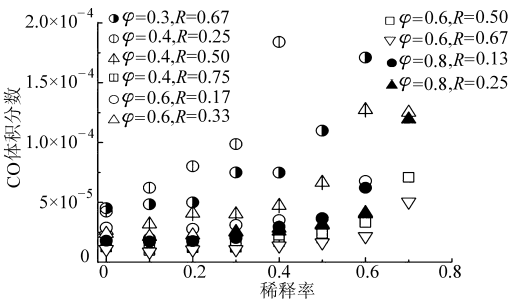


图 12 稀释率对 CO 排放量的影响

Fig. 12 Effect of dilution rate on CO emission

对比 p_{me} 、热效率及 NO_x 排放量可以发现,在一定范围内 H_2 稀释燃烧在保证了较高热效率及低 NO_x 排放量的前提下有效地提高了发动机的功率输出。如果以有效热效率大于 26%、 NO_x 排放量小于 5×10^{-4} 为界限,较为理想的 H_2 稀释燃烧燃料及稀释条件如表 3 所示。

3 结论

(1) H_2 较快的燃烧速度弥补了由于其热值较低造成的对 p_{me} 的影响,使得在每个当量比条件下 p_{me} 基本保持不变。氢气的快速燃烧也有助于提升热效率。与此同时,随着掺氢量的增加 NO_x 和 CO 排放量也有所改善。

表 3 $\varphi = 0.6$ 时的适宜燃气条件

Tab. 3 Favorable gas component ($\varphi = 0.6$)

H	R	$\eta_e/\%$	NO_x 排放量
0.17	0.1	26	4.36×10^{-4}
0.17	0.2	27	2.09×10^{-4}
0.33	0.1	27	1.37×10^{-4}
0.33	0.2	27	1.04×10^{-4}
0.50	0.1	27	9.5×10^{-5}
0.50	0.2	27	6.3×10^{-5}
0.50	0.3	26	1.2×10^{-5}
0.67	0.1	27	1.23×10^{-4}
0.67	0.2	26	0
0.83	0.1	28	8.1×10^{-5}
0.83	0.2	27	4.6×10^{-5}
0.83	0.3	27	1.3×10^{-5}
0.83	0.4	27	0

(2) 稀释燃烧能够大幅度地降低 NO_x 排放量。当稀释率处于一定水平时,稀释对 p_{me} 和热效率的影响均不明显,而 NO_x 排放水平则显著下降。过高的稀释率会导致部分燃烧,造成 p_{me} 和热效率的下降,但是在多数情况下发动机的循环变动系数均在 10% 以下。

(3) 如果 26% 的热效率和 5×10^{-4} 的 NO_x 排放被视为可以接受的经济性及排放指标,通过掺氢及稀释燃烧方式可以建立起较为广泛的发动机运行参数指标范围。

参 考 文 献

1 Sweeten J M, Annamalai K, Thien B, et al. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) fuels. Part I. Feedlot biomass (cattle manure) fuel quality and characteristics [J]. Fuel, 2003, 82(10): 1 167 ~ 1 182.

2 Xiao X B, Le D D, Morishita K, et al. Multi-stage biomass gasification in internally circulating fluidized-bed gasifier (ICFG): test operation of animal-waste-derived biomass and parametric investigation at low temperature [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(8): 895 ~ 902.

3 黄彬, 胡二江, 黄佐华, 等. 火花点火天然气掺氢发动机结合 EGR 时的循环变动规律[J]. 内燃机学报, 2011, 29(1): 16 ~ 22. Huang Bin, Hu Erjiang, Huang Zuohua, et al. Cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR[J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(1): 16 ~ 22. (in Chinese)

4 苗海燕, 焦琦, 黄佐华, 等. 稀释气对掺氢天然气层流预混燃烧火焰稳定性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(3): 220 ~ 224. Miao Haiyan, Jiao Qi, Huang Zuohua, et al. Effect of diluent gas on flame stability of laminar combustion of premixed hydrogen enriched natural gas and air mixtures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(3): 220 ~ 224. (in Chinese)

5 Hu E, Huang Z, Liu B, et al. Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 528 ~ 539.

6 Zheng J, Hu E, Huang Z. Combustion and emission characteristics of a spray guided direct-injection spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(17): 11 155 ~ 11 163.

7 Miao H, Lu L, Huang Z. Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(11): 6 937 ~ 6 947.

8 Shudo T, Nakajima Y, Tsuga K. Combustion characteristics of $\text{H}_2 - \text{CO} - \text{CO}_2$ mixture in an IC engine [C]. SAE Paper 2001-01-0252, 2001.

9 Mohammed S, Baharom M, Rashid A. et al. The effects of fuel-injection timing at medium injection pressure on the engine characteristics and emissions of a CNG-DI engine fueled by a small amount of hydrogen in CNG [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(18): 11 997 ~ 12 006.

参 考 文 献

1 Chhetri A B, Watts K C. Viscosities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures[J]. Fuel, 2012,102(12):789~794.

2 Mustafa E T, Gerpen J H V. The kinematic viscosity of biodieseland its blends with diesel fuel[J]. JAOCS,1999,76(12):1 511~1 513.

3 Carlos A N J, Filipe X F, Fabiano A N F. Densities and viscosities of binary mixtures of babassu biodiesel + cotton seed or soybean biodiesel at different temperatures[J]. Journal of Chemical & Engineering Data,2010,55(11):5 305~5 310.

4 Esteban B, Riba J R, Baquero G, et al. Characterization of the surface tension of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines [J]. Fuel,2012,102(2):231~238.

5 张建明,张卫刚,王亚伟,等. 柴油高压物理特性的研究[J]. 高压物理学报,2005,19(1):41~44.
Zhang Jianming, Zhang Weigang, Wang Yawei, et al. Study on high pressure physical properties of diesel oil[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 41~44. (in Chinese)

6 Aleiferis P G, Serras-Pereira J, Augoye A, et al. Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector fordirect-injection spark-ignition engines[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2010,53(21~22): 4 588~4 606.

7 Ejim C E, Fleck B A, Amirfazli A. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: surface tension and viscosity effects[J]. Fuel,2007,86(10~11): 1 534~1 544.

8 Bari S, Lim T H, Yu C W. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine[J]. Renewable Energy, 2002, 27(3): 339~351.

9 Kalam M A, Masjuki H H. Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(10): 289~297.

10 Gong Chen[美]. 燃油温度对直喷式柴油机燃料喷射、燃烧和排放的影响[J]. 颜光耀,译. 国外内燃机车,2009(6):23~29.

11 Nwafor O M I. Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlettemperature[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(12): 507~511.

12 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

13 郭七一. 内燃机瞬态测温技术与直喷式柴油机缸内局部瞬态传热研究[D]. 北京:北京理工大学,1991.

14 张建国. 快速响应薄膜温度传感器技术研究[D]. 武汉:国防科技大学,2008.

15 钱兰,陈宁. 薄膜热电偶动态响应特性的实验研究[J]. 内燃机学报,1998,16(2):251~252.
Qian Lan, Chen Ning. Thin-film thermocouple dynamic response characteristic experiment research[J]. Transactions of CSICE, 1998, 16(2): 251~252. (in Chinese)

16 Weber C. Disintegration of liquid jets[J]. Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik, 1931,11(2):136~154.

17 Reitz R D, Bracco F V. Mechanism of atomization of a liquid jets[J]. Physics of Fluids, 1982, 25(10):1 730~1 742.

18 Skiepko J. On the stability of an evaporation viscous jet[J]. Archives of Mechanics, 1991,443(1):41~47.

19 杜青,刘宁,张建新,等. 液体燃料射流破碎的热不稳定性分析[J]. 燃烧科学与技术, 2005,11(4):323~328.
Du Qing, Liu Ning, Zhang Jianxin, et al. Analysis of thermal instability for the breakup of liquoid jets [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005,11(4):323~328. (in Chinese)

(上接第 32 页)

10 Park C, Kim C, Choi Y. Power output characteristics of hydrogen-natural gas blend fuel engine at different compression ratios [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(10): 8 681~8 687.

11 Chen L, Shiina R, Araki N, et al. Effect of CO₂ dilution on the combustion characteristics of a spark-ignition engine fuelled with individual component of bio-gas[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2010(10):1 629~1 636.

12 Chen Lei. Performance and emissions of a spark-ignition engine operated with gaseous fuels modeled for low-temperature gasification of biomass[D]. Gunma: Gunma University, 2011.