

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.006

CO₂ 稀释对生物质燃气燃烧与排放特性的影响*

陈雷¹ 荒木幹也² 志贺圣一² 曾文¹

(1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学院, 沈阳 110136; 2. 群馬大学工学研究科, 群馬县桐生市 376-8515)

摘要: 在一台火花点火发动机上, 分别进行了 CO₂ 稀释对生物质燃气中可燃组分 CH₄、CO 和 H₂ 的燃烧及排放性能影响的试验研究。研究表明, 稀释燃烧能够有效降低 NO_x 排放量; 适当的稀释率对发动机的平均有效压力、循环变动以及热效率的影响较小, 但过大的稀释率会导致部分燃烧。通过 CO₂ 稀释燃烧的手段, 可以得到生物质燃气以一定热效率和 NO_x 排放水平为指标的适宜燃料条件范围。

关键词: 生物质燃气 稀释燃烧 排放特性

中图分类号: TK43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0030-05

Effect of CO₂ Dilution on Combustion and Emission Characteristics of Biogas

Chen Lei¹ 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: Effect of CO₂ dilution on combustion and emission characteristics of CH₄, H₂ and CO was analyzed in a spark-ignition engine. The results showed that dilution could reduce NO_x emission. Suitable dilution ratio had little influence on brake mean effective pressure, cyclical fluctuation and brake thermal efficiency. However, excessive dilution ratio would induce to partial burn. Favorable operation range of biogas could be obtained with acceptable brake thermal efficiency and NO_x emission by employing dilution combustion, which benefits for biogas application.

Key words: Biogas Dilution combustion Emission characteristics

引言

通过气化、裂解等技术手段, 固态或液态的生物质原料可以被制成一定组分的可燃气体^[1-7]。在这些气体混合物中, 可燃组分主要含有 H₂、CO 以及 CH₄, 而不可燃组分的气态成分一般为 CO₂ 和 N₂^[8]。根据生物质原料以及所采用的试验方法、反应条件的不同, 每种组分的相对含量相差很大, 这对于发动机的燃烧及排放特性均有显著影响, 因此有必要进行组分浓度对生物质燃气发动机燃烧及排放性能影响的研究。在前期研究中, 课题组进行了可燃组分变化对于发动机性能的影响研究^[9-10]。

本文主要考察 CO₂ 相对浓度变化对 H₂、CO、CH₄ 燃烧及排放性能的影响, 并找到对于每一种组分的以一定热效率及 NO_x 排放为标准的 CO₂ 最佳稀释比率。

1 试验装置及试验方案

1.1 试验装置

试验在一台经改造的 HONDA GX340 火花点火发动机上进行。CH₄、H₂、CO 和 CO₂ 分别由 Keihin 公司产 CNG 专用喷嘴喷入到气体混合器中。试验中所采用的具体仪器设备以及试验条件参见文献[9]。

收稿日期: 2012-09-28 修回日期: 2012-10-27

* 国家自然科学基金资助项目(50906059)

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

1.2 试验方案

在前期研究中得知,每一种燃料的当量比变化范围是: Φ_{CH_4} 为 0.63 ~ 1.06; Φ_{CO} 为 0.42 ~ 1.04; Φ_{H_2} 为 0.19 ~ 0.64。本研究中,与前期研究一致,保持 3 种燃料的当量比,并在每一种燃料的每一个当量比条件下分别逐渐增加 CO₂ 加入量,直至燃烧终止。

为了更直观表明 CO₂ 和燃料投入量之间的关系,本文引入稀释率 R 的概念,并规定 R 表示 CO₂ 在燃料和 CO₂ 的混合物中所占的摩尔分数,具体公式为

$$R = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO_2} + M_{Fuel}} \quad (1)$$

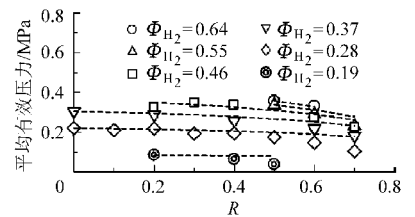
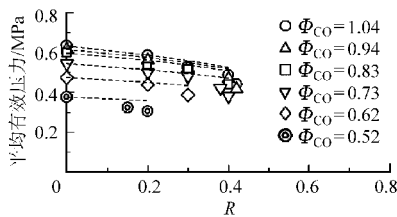
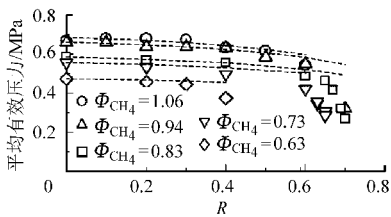


图 1 平均有效压力随 R 的变化

Fig. 1 Effect of R on brake mean effective pressure

由式(1)可知, R 用来表示进气混合气中 CO₂ 的体积分数。虽然它可以直观地表示燃料和稀释剂混合物中稀释剂的含量,但并没有考虑空气造成的影响;而对于内燃机来说,空气量的多少直接影响发动机的性能。因此,需要对稀释率重新定义,公式为

$$R' = \frac{M_{CO_2}}{M_{CO_2} + M_{Fuel} + M_{Air}} \quad (2)$$

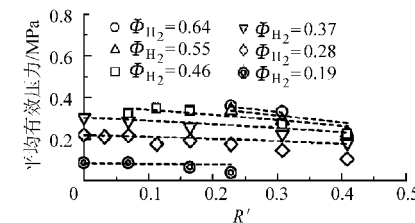
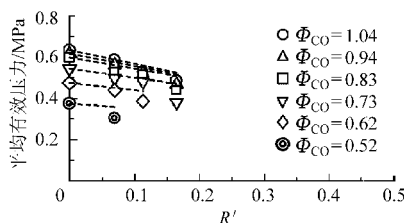
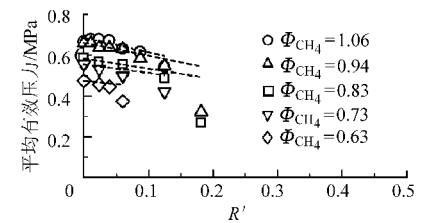


图 2 平均有效压力随 R' 的变化

Fig. 2 Effect of R' on brake mean effective pressure

为了更好地表示 R 对平均有效压力的影响,分别计算了每种燃料在每组 Φ 及 R 条件下的热投入量。为了方便与平均有效压力比较,将每组 Φ 条件下 $R=0$ 工况的热投入量计算值扩大一定的倍数,使之与相同 Φ 条件下 $R=0$ 工况的平均有效压力结果相等,而其他 R 条件下的热投入量计算值均乘以相同倍数,然后将每组 Φ 的各个 R 条件下的热投入量计算结果用虚线连接,如图 1 中虚线所示。在 Φ 较大、 R 较小的条件下,对于所有燃料而言平均有效压力和热投入量的变化趋势相同,均随着 R 的升高而略有下降。这表明在较小 R 条件下热投入量的

2 试验结果与分析

图 1 所示为 R 对平均有效压力的影响。如图所示,相对于 CO、CH₄ 和 H₂ 有更宽的可燃范围。对于 H₂ 来说,为了避免回火的发生,当 $\Phi \geq 0.46$ 时在每个 Φ 条件下均存在一个最小 R 。在同一个 Φ 条件下,CH₄ 和 CO 的 R 极限有所不同,CH₄ 的稀释极限为 $R=0.7$,而 CO 的稀释极限则是 $R=0.4$ 。前期研究结果表明,CH₄ 和 CO 的燃烧持续期以及平均有效压力基本相同^[9],因此其稀释极限不应该有如此大的差异。考虑到 CH₄ 和 CO 作为燃料时发动机容积效率的不同,造成上述稀释极限的差异可能是由 R 的定义引起的。

图 2 所示为 R' 对平均有效压力的影响。如图所示,CH₄ 和 CO 的稀释极限基本一致,符合前述分析的结果。由此可得,在进行稀释燃烧比较分析时, R' 比 R 的定义更为准确。但为了模拟实际生物质燃气的成分,同时也为了与前期研究保持一致^[10],本文中仍然使用 R 表示燃料的稀释率。

变化是平均有效压力变化的决定因素。而当 R 较大时,可以明显看到平均有效压力从虚线分离。这说明这一区域平均有效压力的变化还受其他因素的影响。

为了分析这一影响,文中引入了循环变动系数和 R 之间的关系,如图 3 所示。当 $\Phi > 0.73$ 并且 $R < 0.6$ 时,循环变动系数的变化并不明显;而当 $R > 0.6$ 时,在绝大多数 Φ 条件下循环变动系数均随着 R 的增加而显著上升。尽管数值不同,但 CO 的循环变动系数变化趋势和 CH₄ 类似。而对于 H₂ 而言,除了稀燃极限 $\Phi = 0.19$ 之外,循环变动系数随 R 的

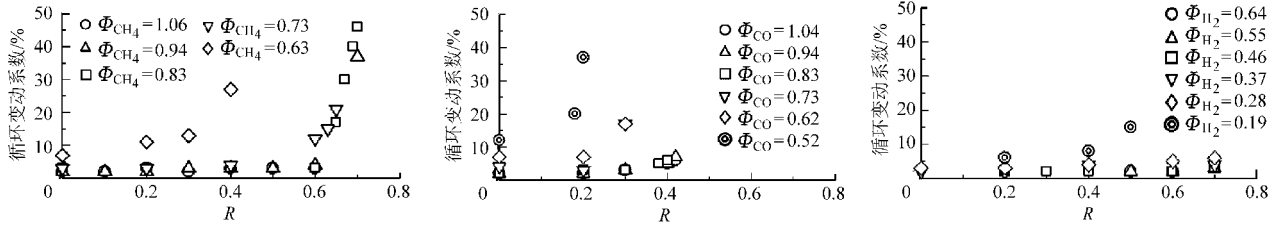


图3 循环变动系数随R的变化

Fig. 3 Effect of R on cyclical fluctuation index

升高没有显著变化,在所有工况下循环变动系数均小于10%。

平均有效压力与循环变动系数变化的不同说明,在不同R条件下3种燃料的燃烧特性不同。

对比图1和图3可以发现,图1中平均有效压力与热投入量分离的区域和图3中循环变动系数快速升高的区域基本一致,这表明在这一区域燃烧发生了变化。为了揭示这种变化,本文将平均有效压力和循环变动系数进行对比,其关系如图4所示。图中,CH₄、CO的平均有效压力与循环变动系数的

关系类似,明显呈两个区域。在区域1中,循环变动系数均小于10%,而且在此区域中平均有效压力和循环变动系数的变化幅度均不大;而在区域2中,平均有效压力的较小变化对应了循环变动系数的急剧增大。这说明在区域2的条件下发动机的运行很不稳定,而较小的平均有效压力变化说明不稳定运行不是由平均有效压力的减小造成的,而是有其他原因。考虑到这一区域对应的是较小 Φ 及较大R条件,可以认为发动机的不稳定运行是由不正常燃烧造成的。

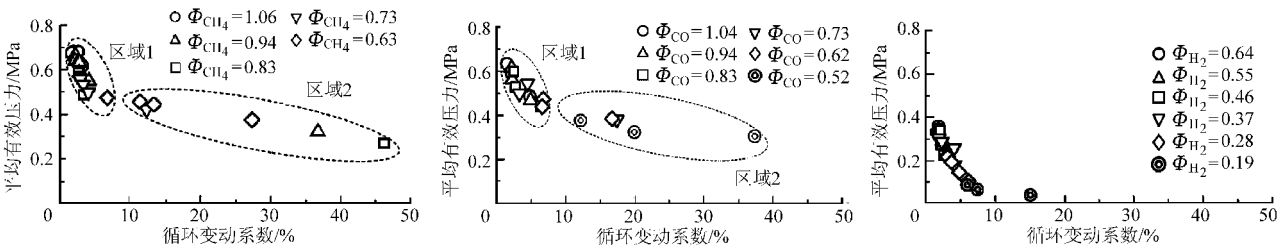


图4 平均有效压力和循环变动系数的关系

Fig. 4 Correlation between brake mean effective pressure and cyclical fluctuation index

为了进一步探讨这一区域的不正常燃烧现象,本文给出了初燃期和循环变动系数的关系,如图5所示。与图4类似,图5中也呈现出两个较为明显的区域。在区域1中,初燃期和循环变动系数均在一个较小的范围内变化,而且从图上可以看到两者之间有很明显的线性关系。循环变动主要是由初燃期火焰传播的变化引起,区域1中这种线性关系证

明了这一点。在区域2中,对应于初燃期的每一个较小的增长,循环变动系数均迅速增加。这一现象说明在区域2的条件下循环变动不仅受初燃期火焰传播影响,还受其他因素制约。考虑到相对应的燃料条件,区域2中较大的循环变动系数增加应该归结为发生了部分燃烧。

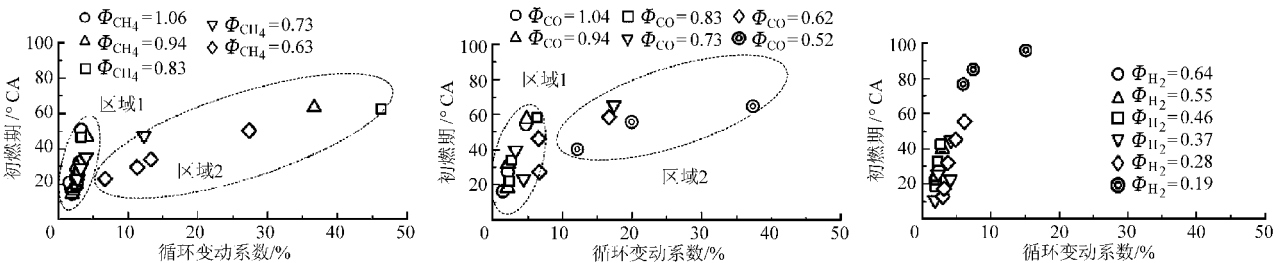


图5 初燃期和循环变动系数的关系

Fig. 5 Correlation between initial combustion duration and cyclical fluctuation index

图6所示为R对有效热效率的影响。对于每一种燃料而言,随着R的增加在每一个 Φ 条件下都存在一个热效率基本保持不变的区域,这一区域随

着 Φ 的减小而变小。热效率的下降与图3、4中区域2的条件相对应,因此,可以认为热效率的下降主要是由部分燃烧造成的。

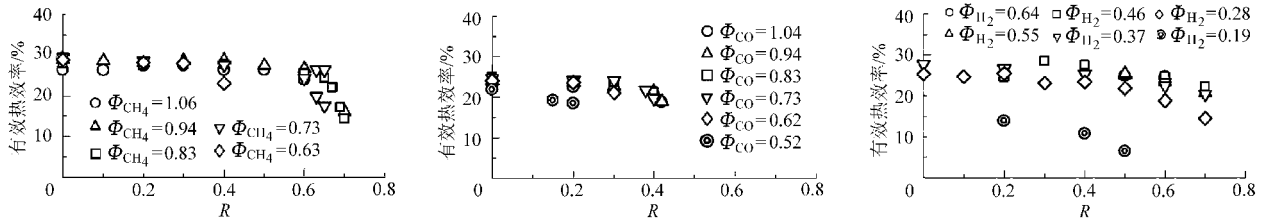


图6 R对有效热效率的影响

Fig. 6 Effect of R on brake thermal efficiency

图7所示为 R 对主燃期的影响。在每一个 Φ 下,所有燃料的主燃期随着 R 的增加均有所延长。主燃期的延长会造成燃烧等容度的下降,对热效率有不良影响;但主燃期的变化幅度很小,对热效率的影响作用有限。另一方面,随着 R 的增加燃料的比热比势必增加,这一变化又会对热效率有促进作用,但这两方面的影响作用都较小。

图8、图9所示为 R 对于 NO_x 和 CO 排放量的影响。如图所示,尽管排放水平不同,随着 R 的增加 CH_4 和 CO 燃烧产生的 NO_x 排放量均大幅度下降。随着 R 的增加,进入气缸的燃料量减少,燃烧温度势必降低,从而导致 NO_x 排放量的下降。由于 H_2 的当量比较小,燃烧温度较低,因此其在所有 Φ 及 R 条件下 NO_x 均为零。

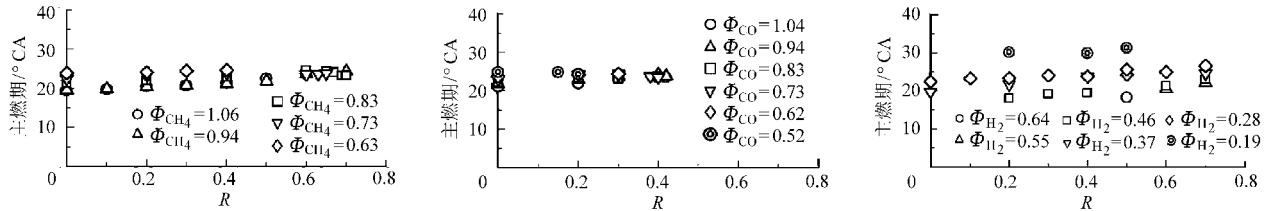


图7 R对主燃期的影响

Fig. 7 Effect of R on main combustion duration

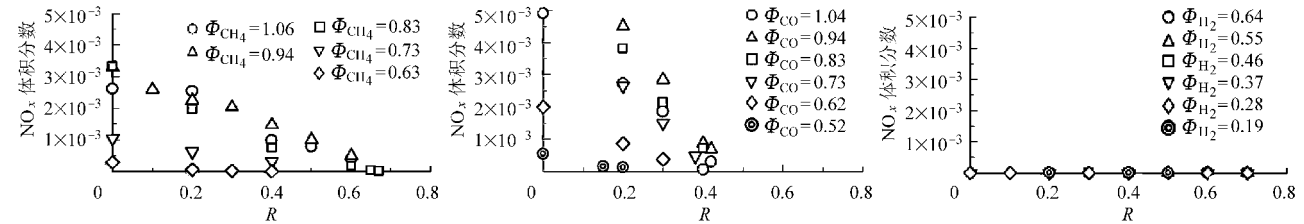


图8 R对NO_x排放量的影响

Fig. 8 Effect of R on NO_x emission

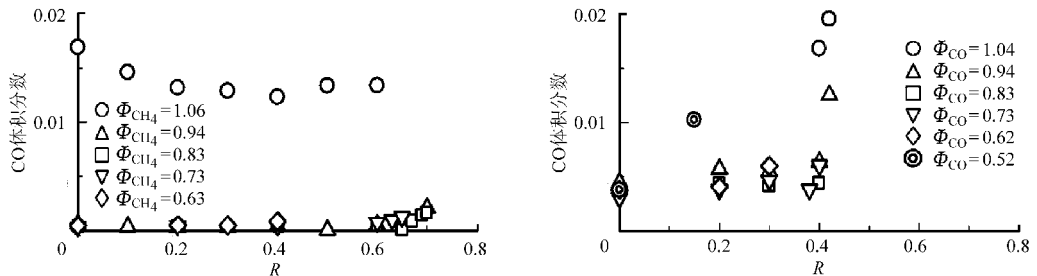


图9 R对CO排放量的影响

Fig. 9 Effect of R on CO emission

对于 CH_4 , 当 $\Phi = 1.06$ 时,由于燃烧效率的影响造成 CO 的排放水平较高,而在其他 Φ 条件下 CO 均处于较低水平, R 的变化并没有对 CO 排放量造成明显影响。与 CO 燃烧有关的 CO 排放来自于不完全燃烧以及 CO 的淬熄产生,因此在所有 Φ 条件下排放均较高。随着 R 的增加, CO 排放量在较大 R 时有较明显升高,通过与图3所示的循环变动信息

的对比, CO 排放量的升高现象主要是由部分燃烧造成的。

通过图6和图8的对比可以看出,在一定 R 区域内 NO_x 排放量大幅下降,而有效热效率的变化很小。本研究中单一燃料燃烧的最高热效率为30%,如果设定最高热效率的90%以及 NO_x 排放量 5×10^{-4} 作为可接受水平,可以得到稀释燃烧较高热效

率—较低 NO_x 排放区域所对应的燃料条件。这一燃料条件如表 1 所示。

表 1 适宜燃气条件

Tab. 1 Favorable gas component

	R	热效率 $\eta_e/\%$	NO 排放量
ϕ_{CH_4}	0.7	0.4	3.25×10^{-4}
		0	2.92×10^{-4}
	0.6	0.2	6.1×10^{-5}
		0.3	2.5×10^{-5}
ϕ_{H_2}		0.3	0
	0.5	0.4	0
		0	0
	0.4	0.2	0

3 结论

(1) 稀释燃烧能够使 NO_x 排放量显著降低,但较大的稀释率以及较小的当量比条件会导致部分燃烧。对于 CH_4 以及 CO , 在 $R > 0.6$ 或 $\Phi = 0.63$, 以及 $\Phi < 0.62$ 并且 $R > 0.2$ 的工况下会发生部分燃烧,造成平均有效压力、循环变动系数以及 CO 排放的恶化,因此在实际应用中应避开这一工况区域。

(2) 通过 CO_2 稀释燃烧的手段,可以得到生物质组分气体燃料的以一定热效率和 NO_x 排放水平为指标的适宜燃料条件范围,这对于生物质燃料在内燃机上的应用有着积极的意义。

参 考 文 献

- Gan J B, Smith C T. A comparative analysis of woody biomass and coal for electricity generation under various CO_2 emission reductions and taxes [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(4):296~303.
- Faij A, Meuleman B, Turkenburg W, et al. Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in the Netherlands [J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(2):125~147.
- Ganesh A, Banerjee R. Biomass pyrolysis for power generation—a potential technology [J]. Renewable Energy, 2001, 22(1~3):9~14.
- Buragohain B, Mahanta P, Moholkar V S. Biomass gasification for decentralized power generation: the Indian perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1):73~92.
- Wu C Z, Huang H, Zheng S P, et al. An economic analysis of biomass gasification and power generation in China [J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1):65~70.
- Sridhar G, Paul P J, Mukunda H S. Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel—an experimental analysis [J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 21(1):61~72.
- Song T, Wu J H, Shen L H, et al. Experimental investigation on hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 36:258~267.
- Xiao X B, Le D D, Morishita K, et al. Multi-stage biomass gasification in internally circulating fluidized-bed gasifier (ICFC): test operation of animal-waste-derived biomass and parametric investigation at low temperature [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(9):895~902.
- 陈雷,荒木幹也,志贺圣一,等. 生物质燃气组分气体的燃烧及排放特性[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):31~34. Chen Lei, Araki Mikiya, Shiga Seiichi, et al. Combustion and emission characteristics of individual component of biogas in SI engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):31~34. (in Chinese)
- Chen Lei, Shiga Seiichi, Araki Mikiya. Combustion characteristics of an SI engine fueled with H_2 - CO blended fuel and diluted by CO_2 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(19):14632~14639.