

生物质气燃烧稳定性与层流燃烧特性的试验

曾文¹, 李玮薇¹, 罗虎², 何昊宸², 刘宇¹, 陈保东¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部(院), 沈阳 110136;
2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了获得沼气的燃烧稳定性与层流燃烧特性,在定容燃烧弹中试验测量了当量比范围为 0.7~1.4、初始压力范围为 0.1~0.5 MPa、初始温度范围为 290~380 K 条件下沼气的层流火焰传播特性。同时,对其燃烧稳定性与层流燃烧速度的主要影响因素进行了分析。结果表明:当层流燃烧速度小于 0.15 m/s 时,火焰在发展过程中将出现浮力不稳定,火核中心逐渐向上飘起。马克斯坦长度随初始压力的升高或当量比的降低逐渐变小,火焰前锋面不稳定性得到增强;初始温度对马克斯坦长度的影响不明显。随当量比的升高,无拉伸火焰传播速度与层流燃烧速度先升高后降低,两者的最大值出现在当量比为 1.1 时;同时,沼气的层流燃烧速度随初始温度的降低或初始压力的升高逐渐降低。

关键词: 层流燃烧速度; 燃烧稳定性; 沼气; 火焰传播特性; 马克斯坦长度

中图分类号: V231.2; TK401

文献标志码: A

Experiment on combustion stability and laminar burning characteristics of biomass gas

ZENG Wen¹, LI Weiwei¹, LUO Hu², HE Haochen²,
LIU Yu¹, CHEN Baodong¹

(1. Faculty of Aerospace Engineering,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to gain the combustion stability and laminar burning characteristics of biogas, the laminar flame propagation characteristics of biogas over the equivalence ratio range of 0.7—1.4, the initial pressure range of 0.1—0.5 MPa, and the initial temperature range of 290—380 K were measured in the constant volume combustion bomb. Furthermore, the main influential factors of the combustion stability and laminar burning velocity of biogas in laminar combustion were investigated. Results showed that the buoyancy instability would appear in the flame propagation process and the flame core would fly upward if the value of the laminar burning velocity was below 0.15 m/s. With the increasing of the initial pressure or decrease of the equivalence ratio, the Markstein length decreased and the instability of the flame front increased. However, the effect of the initial temperature on the Markstein length was not obvious. With the increasing of the equivalence ratio, the unstretched flame propa-

收稿日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51376133, 51676132); 株洲市科技计划项目(20160102)

作者简介: 曾文(1977—),男,教授,博士后,主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的数值研究。

引用格式: 曾文,李玮薇,罗虎,等. 生物质气燃烧稳定性与层流燃烧特性的试验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 2049-2057. ZENG Wen, LI Weiwei, LUO Hu, et al. Experiment on combustion stability and laminar burning characteristics of biomass gas [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2049-2057.

gation speed and the laminar burning velocity increased initially and then decreased, and the maximum values were measured at the equivalence ratio of 1.1. Furthermore, the laminar burning velocity of biogas decreased with the decreasing of initial temperature or the increasing of initial pressure.

Key words: laminar burning velocity; combustion stability; biogas; flame propagation characteristics; Markstein length

在城市日常生活中会产生大量的固体废弃物(生活垃圾),生活垃圾的处理方式一般为填埋。由于这些生活垃圾一般具有易腐性与高含水率的特征,会快速降解,从而产生大量的垃圾填埋气体(沼气),使垃圾填埋场蕴藏着巨大的资源化潜力。沼气为一种含有气态可燃成分(CH_4 、 H_2 和 CO 等)的可燃混合气体,热值为 $19\,228\text{ kJ/m}^3$ 。如果采用沼气为燃料进行发电,既能回收资源,又能减少污染气体排放,产生的经济与社会效益非常显著。

利用沼气发电是国际上应用最广泛的技术之一。目前,燃气轮机的设计燃料基本为天然气或轻柴油。以沼气为燃料的燃气轮机,在将燃料由天然气改为沼气时,燃料成分发生变化,热值降低(甲烷热值为 $35\,864.4\text{ kJ/m}^3$ 、柴油热值为 $39\,710\text{ kJ/m}^3$),且需要满足环境保护和燃气轮机可靠性、经济性要求。因此,需在充分了解沼气燃烧特性^[1-7](燃烧稳定性及层流燃烧特性)的基础上对燃气轮机的燃烧室结构和运行参数进行相应调整与改进^[8-11]。

目前,试验测量燃料燃烧特性的方法有对冲火焰法^[12]、本生灯法^[13]与定容弹法^[14]等。相对于其他测试方法,定容弹法^[15]可方便地分析火焰传播过程中的火焰拉伸效应与火焰稳定性,因而获得了广泛应用。Tinaut 等^[1]在定容弹中对某种生物质气(主要成分为 CO 、 CO_2 、 H_2 、 N_2 、 CH_4)的层流燃烧特性进行了试验测量,并分析了生物质气中含水量(湿度)对其层流燃烧速度的影响。Lee 等^[2]构建了某种生物质气(主要成分为 H_2 、 CO 、 CH_4 、 CO_2 、 N_2 、 H_2O)的燃烧反应简化机理,采用该燃烧反应机理对其着火延迟时间与层流燃烧速度进行了数值计算,并与相应试验数据进行了对比分析。Yan 等^[3]对 4 种生物质气的层流燃烧速度进行了试验测试,并与采用不同燃烧反应机理计算得到的层流燃烧速度进行了对比分析。Vu 等^[4]在定容弹中试验测试了 3 种生物质气的火焰传播特性及层流燃烧特性,并对其层流燃烧

速度进行了数值计算(燃烧反应机理为 GRI-Mech 3.0)。

本文在定容燃烧弹中试验测量了当量比范围为 $0.7\sim 1.4$ 、初始压力范围为 $0.1\sim 0.5\text{ MPa}$ 、初始温度范围为 $290\sim 380\text{ K}$ 条件下沼气的火焰传播特性,并分析了各初始工况对沼气的火焰传播特性、火焰稳定性与层流燃烧速度的影响。

1 试验装置与原理

Hu 等^[16]对本文所采用的定容燃烧弹测试系统及相应的试验原理进行了详细阐述,在此不再赘述。

对沼气的主要组成成分进行了分析,并根据组成成分及所占比例进行试验配气,如表 1 所示。从表可以看出,沼气的主要成分为 CH_4 、 CO_2 、 O_2 、 N_2 。同时,各主要成分在不同沼气中的含量也不尽相同。本文在试验配气时,选定了这几种主要组份的配气比例,当然,不同的配气比例将影响其火焰传播特性、燃烧稳定性及层流燃烧速度,作者将在后续的研究中重点分析沼气中主要组成成分的组成比例对其层流燃烧特性的影响。

表 1 沼气的主要组成成分
Table 1 Main compositions of biogas

成分	实际体积分数/%	配气体积分数/%
CH_4	47~59	47
CO_2	35~41	35.5
O_2	<1	0.5
N_2	1~17	17

2 火焰传播特性

图 1 显示了初始温度 T_0 为 320 K 、初始压力 p_0 为 0.2 MPa 时,当量比 ϕ 对沼气火焰传播特性的影响。碳氢燃料在层流燃烧过程中,会存在优先扩散、流体动力学及浮力不稳定等 3 种火焰不稳定性。当层流燃烧速度小于 0.15 m/s 时,主要

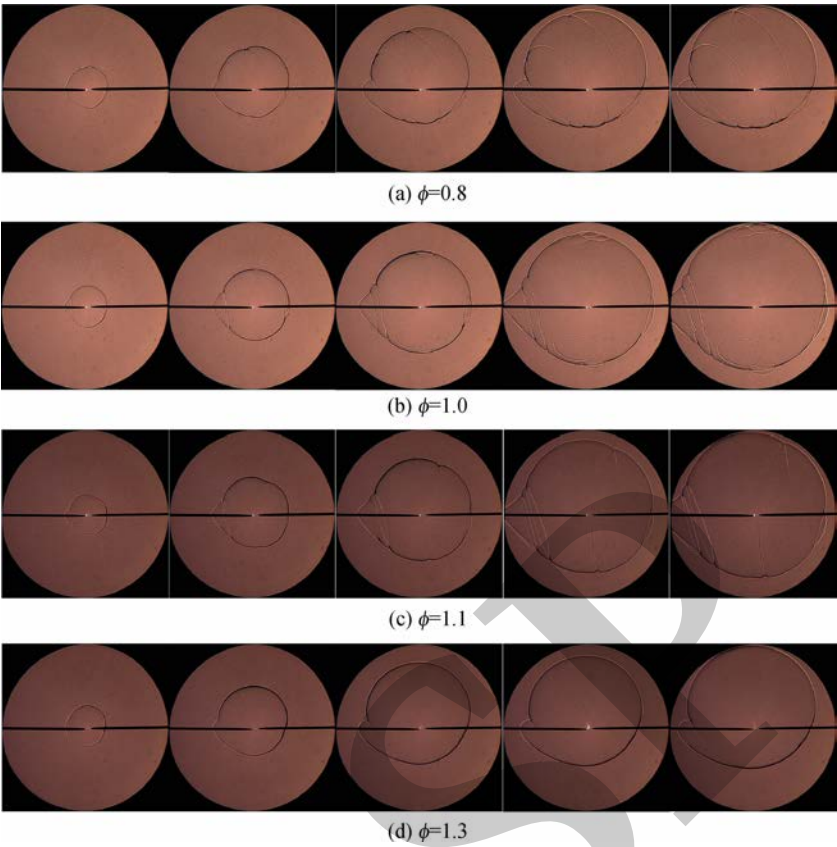


图 1 当量比对火焰传播特性的影响

Fig. 1 Effects of equivalence ratio on the flame propagation characteristics

出现浮力不稳定。由于受到浮力的影响,火焰会从火核中心逐渐向上飘起,并随着火焰前锋面的向外扩展,出现上半球大、下半球小的特征。如图 1 所示,当初始温度为 320 K、初始压力为 0.2 MPa 时,在当量比分别为 0.8、1.0、1.1 与 1.3 时,火焰在发展过程中都出现了浮力不稳定性。当量比为 1.0 与 1.1 时,浮力不稳定性现象不是很明显,因为在此工况下,层流燃烧速度接近 0.15 m/s;但是,当量比为 0.8 与 1.3 时,由于此时层流燃烧速度低于 0.15 m/s,火焰向上漂浮的现象较为明显,火焰稳定性较差。

图 2 显示了初始温度为 320 K、当量比为 1.0 时,初始压力 p_0 对沼气火焰传播特性的影响。如图所示,当初始压力为 0.1 MPa 时,火焰前锋面始终呈准球形向外发展,且火焰前锋面较为光滑,此时,层流燃烧速度大于 0.15 m/s;当初始压力持续升高至 0.2 MPa 与 0.3 MPa 时,层流燃烧速度小于 0.15 m/s,火焰在发展过程将出现浮力不稳定性,火核中心逐渐向上飘起。

图 3 显示了当量比为 1.0、初始压力为 0.1 MPa 时,初始温度 T_0 对沼气火焰传播特性的影响。如图所示,在各初始温度下,火焰前锋面始终

呈准球形向外发展,且火焰前锋面较为光滑,此时,层流燃烧速度均大于 0.15 m/s,浮力不稳定性不再出现。

图 4 显示了初始温度为 320 K、初始压力为 0.2 MPa 时,当量比对火焰半径 r 随时间 t 变化趋势的影响规律。

如图 4 所示,在各工况下火焰半径随着火后时间的延长均呈线性增长;当量比由 0.8 升高至 1.1 时,火焰传播速度升高较为明显;但是,当量比继续升高至 1.3 时,火焰传播速度呈现降低趋势;当量比为 1.1 时,火焰传播速度达到最大。

图 5 显示了初始温度为 320 K、当量比为 1.0 时,初始压力对火焰半径随时间变化趋势的影响规律。

如图 5 所示,随着初始压力由 0.1 MPa 升高至 0.3 MPa 时,火焰传播速度呈现降低趋势。

图 6 显示了初始压力为 0.1 MPa、当量比为 1.0 时,初始温度对火焰半径随时间变化趋势的影响规律。如图所示,初始温度对火焰传播速度的影响不明显。

通过计算式 $S_n = dr/dt$ 可获得拉伸火焰传播速度 S_n ,其中, r 为火焰半径, t 为时间。图 7 显示

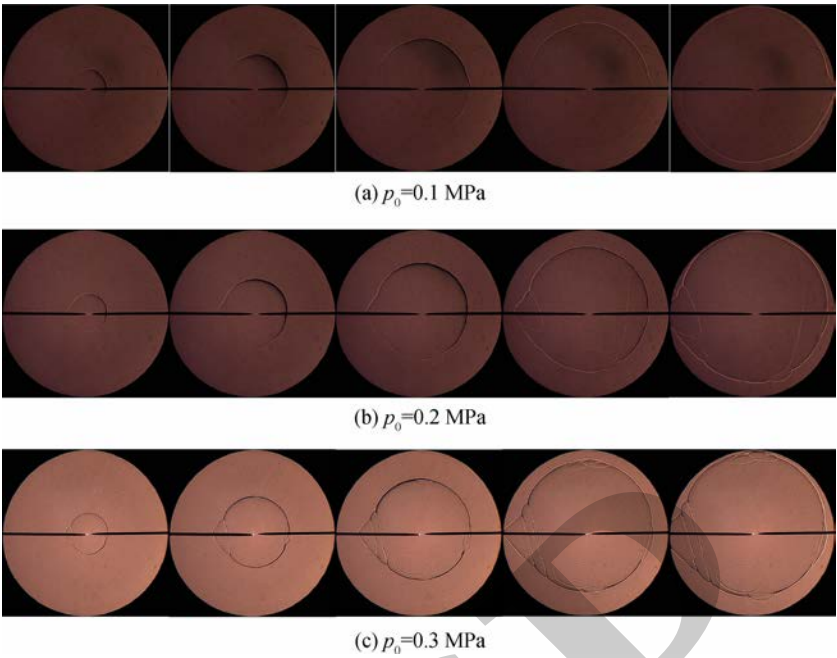


图 2 初始压力对火焰传播特性的影响

Fig. 2 Effects of initial pressure on the flame propagation characteristics

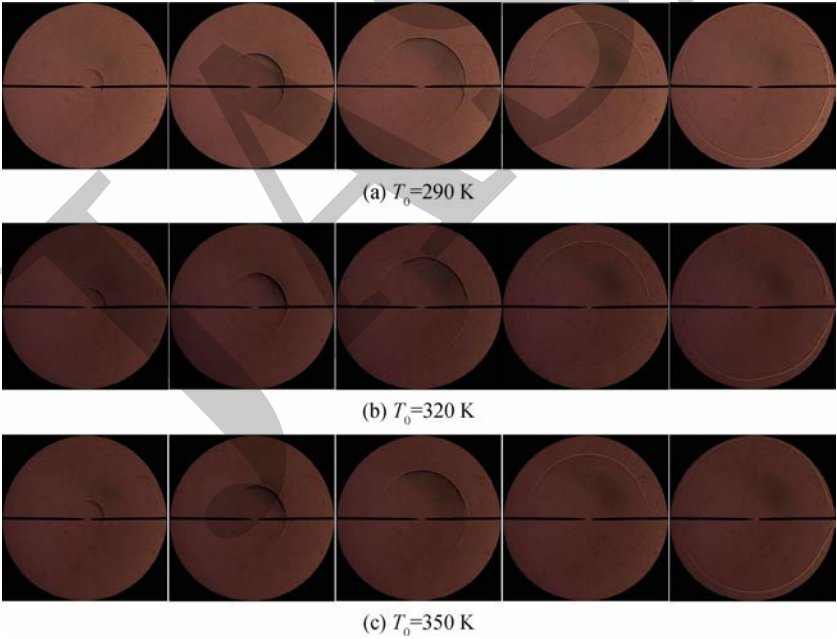


图 3 初始温度对火焰传播特性的影响

Fig. 3 Effects of initial temperature on the flame propagation characteristics

了初始温度为 320 K、初始压力为 0.2 MPa 时,当量比对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化趋势的影响规律。

如图 7 所示,当量比为 0.8 时,拉伸火焰传播速度随火焰半径的增加呈现降低的趋势;当量比逐渐升高时,拉伸火焰传播速度随火焰半径的增加呈现升高的趋势;同时,拉伸火焰传播速度在当

量比为 1.1 时达到最大。

图 8 显示了初始温度为 320 K、当量比为 1.0 时,初始压力对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化趋势的影响规律。如图所示,拉伸火焰传播速度随初始压力的升高逐渐降低,同时,在不同的初始压力下,拉伸火焰传播速度随火焰半径的增加逐渐升高。

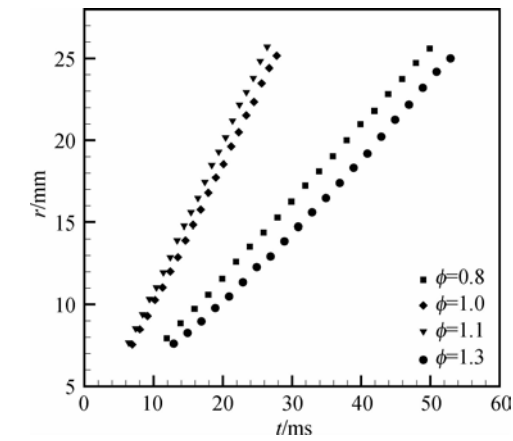


图 4 当量比对火焰半径随时间变化的影响
($T_0=320\text{ K}$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 4 Effects of equivalence ratio on variations of flame radius with time ($T_0=320\text{ K}$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

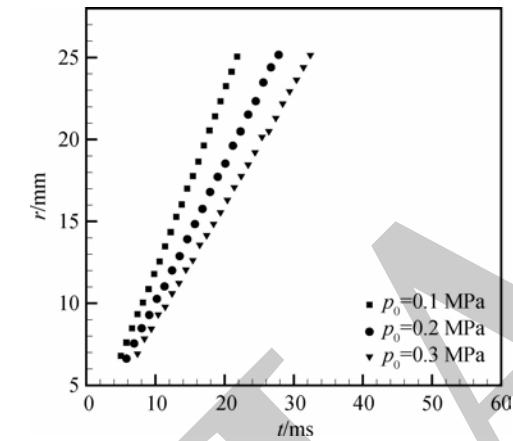


图 5 初始压力对火焰半径随时间变化的影响
($T_0=320\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 5 Effects of initial pressure on variations of flame radius with time ($T_0=320\text{ K}$, $\phi=1.0$)

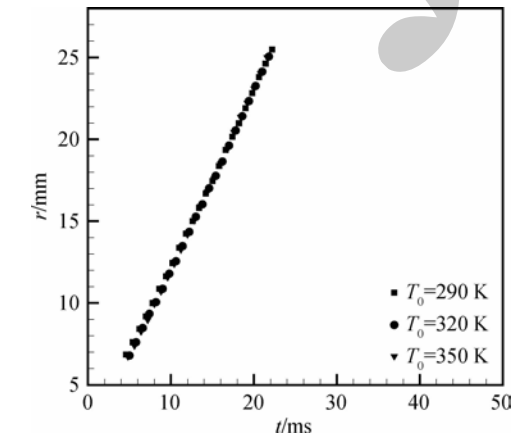


图 6 初始温度对火焰半径随时间变化的影响
($\phi=1.0$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 6 Effects of initial temperature on variations of flame radius with time ($\phi=1.0$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

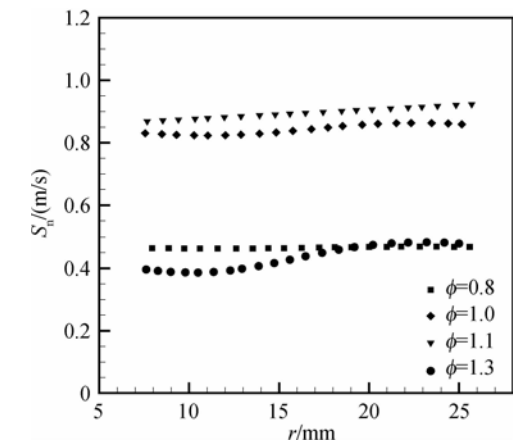


图 7 当量比对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化的影响
($T_0=320\text{ K}$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 7 Effects of equivalence ratio on variations of stretched flame propagation velocity with flame radius
($T_0=320\text{ K}$, $p_0=0.2\text{ MPa}$)

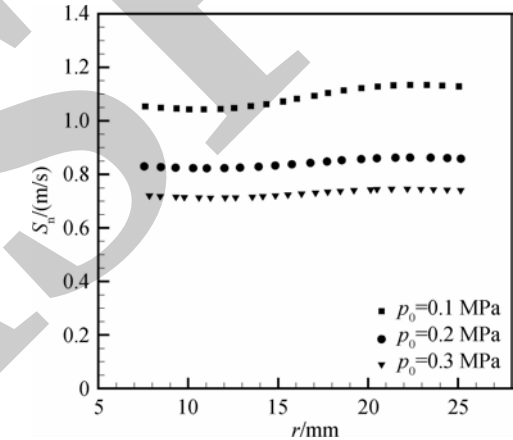


图 8 初始压力对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化的影响
($T_0=320\text{ K}$, $\phi=1.0$)

Fig. 8 Effects of initial pressure on variations of stretched flame propagation velocity with flame radius
($T_0=320\text{ K}$, $\phi=1.0$)

图 9 显示了当量比为 1.0、初始压力为 0.1 MPa 时,初始温度对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化趋势的影响规律。

如图 9 所示,在不同的初始温度下,拉伸火焰传播速度随火焰半径的增加逐渐升高。同时,拉伸火焰传播速度随初始温度的升高而逐渐升高,但升高幅度较小。

根据计算式 $S_l - S_n = L_b \alpha$,可获得表征火焰稳定性的马赫斯坦长度(L_b ,在图中为直线斜率的相反值)以及无拉伸火焰传播速度(S_l ,在图中为直线在 y 轴上的截距),其中, α 为火焰拉伸率。

图 10、图 11 与图 12 分别显示了初始压力、

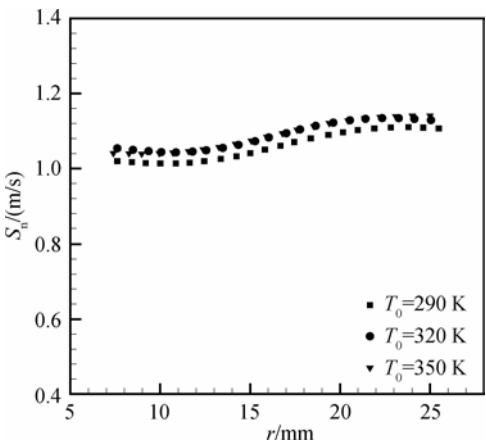


图 9 初始温度对拉伸火焰传播速度随火焰半径变化的影响($\phi=1.0, p_0=0.1\text{ MPa}$)

Fig. 9 Effects of initial temperature on variations of stretched flame propagation velocity with flame radius ($\phi=1.0, p_0=0.1\text{ MPa}$)

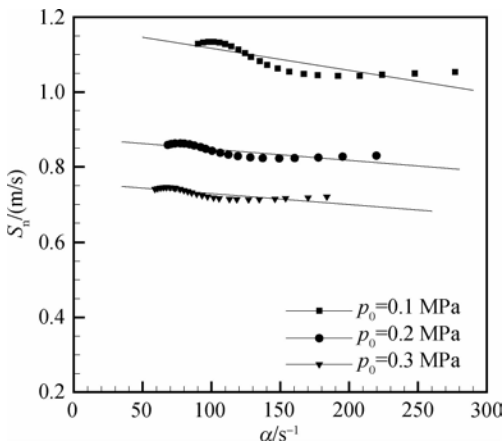


图 10 初始压力对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化的影响($T_0=320\text{ K}, \phi=1.0$)

Fig. 10 Effects of initial pressure on variations of stretched flame propagation velocity with flame stretch rate ($T_0=320\text{ K}, \phi=1.0$)

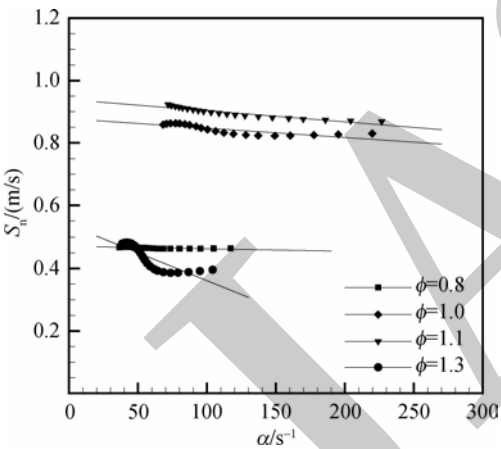


图 11 当量比对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化的影响($T_0=320\text{ K}, p_0=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 11 Effects of equivalence ratio on variations of stretched flame propagation velocity with flame stretch rate ($T_0=320\text{ K}, p_0=0.2\text{ MPa}$)

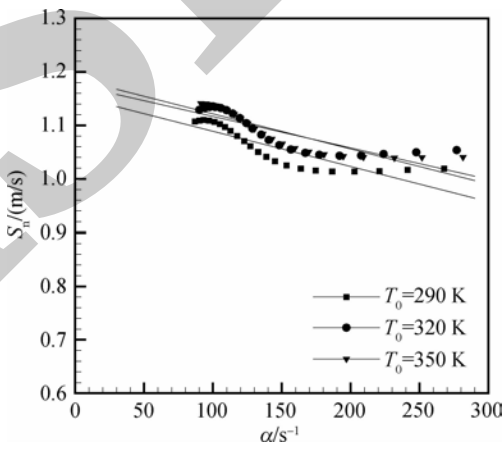


图 12 初始温度对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化的影响($\phi=1.0, p_0=0.1\text{ MPa}$)

Fig. 12 Effects of initial temperature on variations of stretched flame propagation velocity with flame stretch rate ($\phi=1.0, p_0=0.1\text{ MPa}$)

当量比与初始温度对拉伸火焰传播速度随拉伸率变化趋势的影响规律。

如图 10~图 12 所示,在各工况下,随火焰拉伸率的增加,拉伸火焰传播速度均呈现下降趋势;同时,随初始压力的降低或初始温度的升高,无拉伸火焰传播速度逐渐升高;当当量比由 0.8 逐渐升高至 1.1 时,无拉伸火焰传播速度也随之升高,但是,在当量比为 1.3 时却快速下降。

3 火焰稳定性

火焰在向外发展过程中火焰前锋面是否稳

定,主要由马克斯坦长度的值来反映。火焰前锋面保持稳定时马克斯坦长度为正值,不稳定时马克斯坦长度为负值。

图 13 显示了不同初始温度与初始压力下马克斯坦长度随当量比的变化趋势。

由图 13 可见,随着当量比的增加或初始压力的降低,马克斯坦长度逐渐增大;当初始温度为 320 K、初始压力为 0.3 MPa、当量比为 0.8 时,马克斯坦长度为负值,说明此时火焰稳定性较差。同时,初始温度对马克斯坦长度的影响不明显。

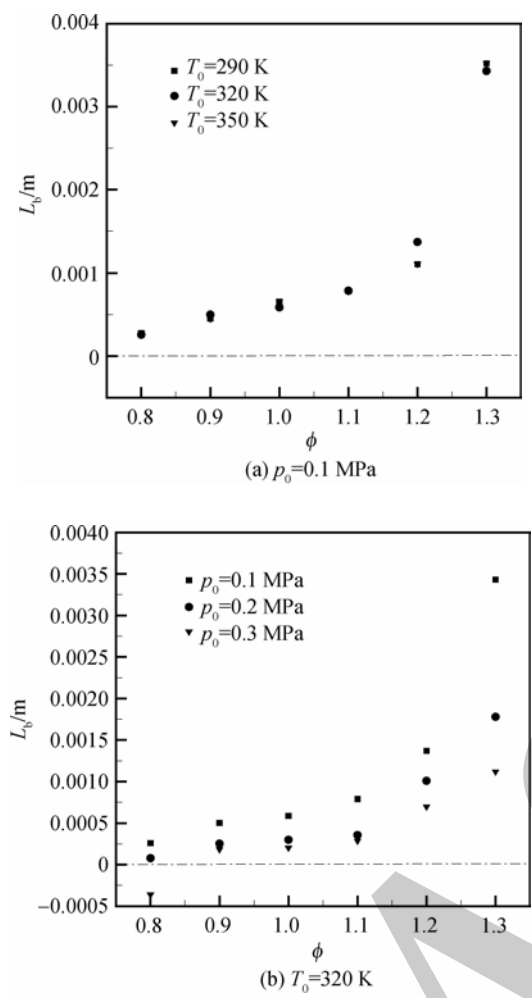


图 13 马克斯坦长度随当量比的变化
Fig. 13 Variations of Markstein length with equivalence ratio

4 层流燃烧速度

图 14 显示了不同初始温度与初始压力下无拉伸火焰传播速度随当量比的变化趋势。同时,根据火焰前锋面上的质量守恒,有 $A\rho_u U_1 = A\rho_b S_1$,从而可获得各工况下层流燃烧速度 U_1 。式中 A 为火焰前锋面面积, ρ_u 、 ρ_b 分别为未燃与已燃区混合气的密度。

图 15 显示了不同初始温度与压力下层流燃烧速度随当量比的变化趋势。

如图 14~图 15 所示,在各工况下随当量比的升高,无拉伸火焰传播速度与层流燃烧速度先升高后降低,两者的最大值出现在当量比为 1.1 时。同时,随初始压力的升高,无拉伸火焰传播速度与层流燃烧速度逐渐降低。初始温度对无拉伸火焰传播速度的影响较为复杂,在不同当量比下,无拉伸火焰传播速度随初始温度的升高呈现不同的变化趋势;但是,层流燃烧速度随初始温度的升

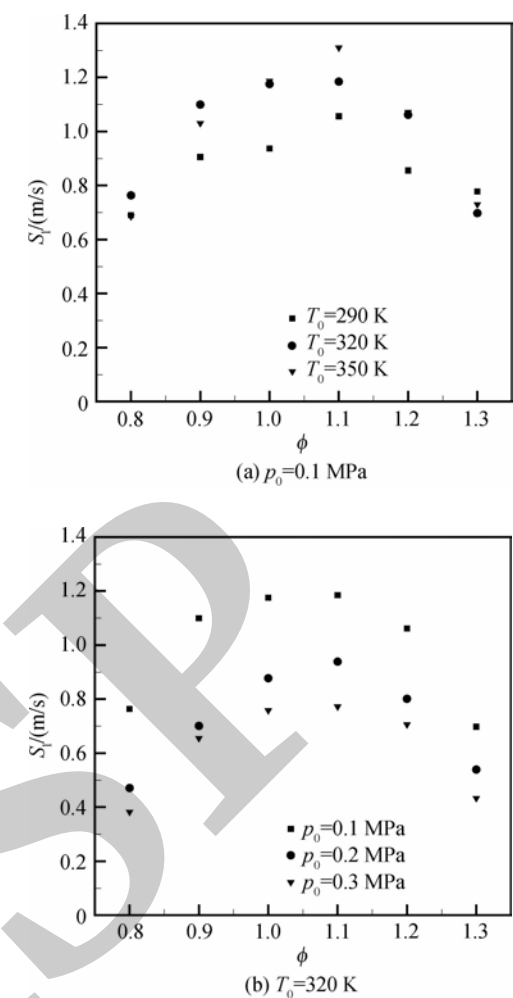
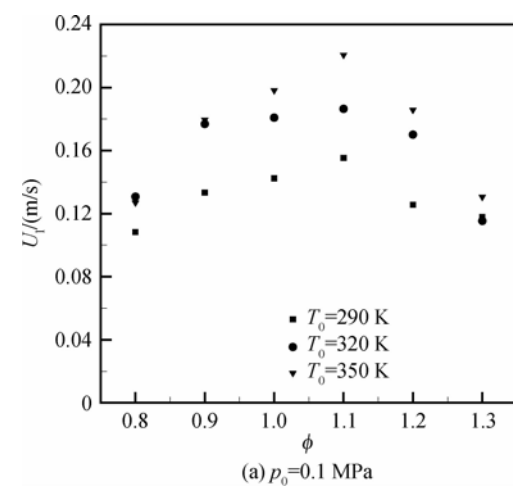


图 14 无拉伸层流火焰传播速度随当量比的变化趋势
Fig. 14 Variations of unstretched laminar flame propagation velocity with equivalence ratio

高而逐渐升高。
由于沼气的热值(19 228 kJ)比甲烷燃料的热值(35 864.4 kJ)低将近 1 倍,因此,在相同工况下,甲烷燃料的层流燃烧速度将远大于沼气的层流燃烧速度。例如,当初始压力为 0.1 MPa、当量



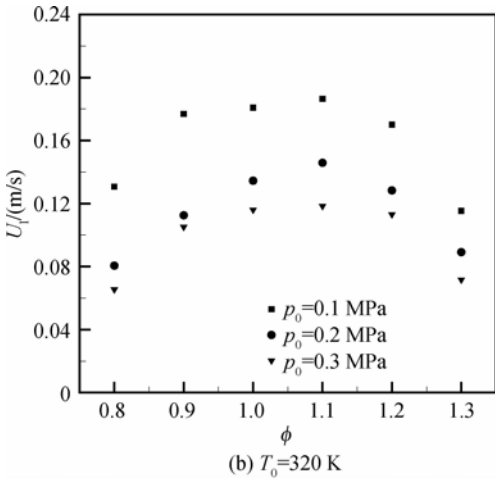


图 15 层流燃烧速度随当量比的变化趋势
Fig. 15 Variations of laminar burning velocity with equivalence ratio

比为 1.0、初始温度为 320 K 时,沼气的层流燃烧速度为 0.181 m/s,甲烷燃料的层流燃烧速度^[17]为 2.72 m/s,是沼气的 15 倍。因此,在设计以沼气为燃料的燃气轮机时,燃烧室的长度较以甲烷为燃料的燃气轮机燃烧室要延长,这样才能保证沼气在燃烧室内进行充分燃烧。

5 结 论

在定容燃烧弹中试验测量了当量比范围为 0.7~1.4、初始压力范围为 0.1~0.5 MPa、初始温度范围为 290~380 K 条件下沼气的火焰传播特性,并分析了当量比、初始压力与初始温度对沼气燃烧稳定性与层流燃烧速度的影响。得到以下结论:

1) 当初始温度为 320 K、初始压力为 0.2 MPa 时,在各当量比下火焰在向外发展过程中均出现了浮力不稳定现象;当初始温度为 320 K、当量比为 1.0 时,低初始压力下火焰前锋面呈准球形向外发展,且火焰前锋面较为光滑,当初始压力持续升高至 0.2 MPa 与 0.3 MPa 时,火焰在向外发展过程将出现浮力不稳定性现象,火核中心逐渐向上飘起;当量比为 1.0、初始压力为 0.1 MPa 时,在各初始温度下,火焰前锋面始终呈准球形向外发展,且火焰前锋面较为光滑,此时,浮力不稳定性不再出现。

2) 马赫斯坦长度随初始压力的升高或当量比的降低逐渐变小,火焰前锋面不稳定性增强;初始温度对马赫斯坦长度的影响不明显。

3) 随当量比的升高,无拉伸火焰传播速度与层流燃烧速度先升高后降低,两者的最大值出现

在当量比为 1.1 时。同时,层流燃烧速度随初始温度的降低或初始压力的升高逐渐降低。

参考文献:

[1] TINAUT F V, MELGAR A, GIMÉNEZ B, et al. Characterization of the combustion of biomass producer gas in a constant volume combustion bomb[J]. Fuel, 2010, 89(3): 724-731.

[2] LEE H C, MOHAMAD A A, JIANG L Y. A detailed chemical kinetics for the combustion of H₂/CO/CH₄/CO₂ fuel mixtures[J]. Fuel, 2017, 96(1): 294-307.

[3] YAN B, WU Y, LIU C, et al. Experimental and modeling study of laminar burning velocity of biomass derived gases/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2011, 36(5): 3769-3777.

[4] VU T M, SONG W S, PARK J, et al. Measurements of propagation speeds and flame instabilities in biomass derived gas-air premixed flames[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2011, 36(18): 12058-12067.

[5] AMELL A A, YEPES H A, CADAVID F J. Numerical and experimental study on laminar burning velocity of syngas produced from biomass gasification in sub-atmospheric pressures[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2014, 39(16): 8797-8802.

[6] BARSALI S, MARCO A D, GIGLIOLI R, et al. Dynamic modelling of biomass power plant using micro gas turbine[J]. Renewable Energy, 2015, 80: 806-818.

[7] SIMÕES G, MAGALHÃES D, RABAÇAL M, et al. Effect of gas temperature and oxygen concentration on single particle ignition behavior of biomass fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(1): 2235-2242.

[8] 李杨, 翁一武, 屠恒勇. 两种低热值生物质气发电方式的实验研究[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1938-1941.

LI Yang, WEN Yiwu, TU Hengyong. Experimental study on two types of power generation methods with low heat value biogas[J]. East China Electric Power, 2010, 38(12): 1938-1941. (in Chinese)

[9] 余超, 袁怡祥, 詹德君, 等. 生物质气成分含量变化对燃烧室 exergy 效率的影响[J]. 可再生能源, 2014, 32(8): 1216-1219.

YU Chao, YUAN Yixiang, ZHAN Dejun, et al. The influence of the BDG compositions on exergy efficiency of the combustor[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(8): 1216-1219. (in Chinese)

[10] 张巍, 翁一武, 刘爱斌. 生物质气微型燃气轮机燃烧室的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 100-104.

ZHANG Wei, WEN Yiwu, LIU Aiguo. Numerical simulation study of a micro gas combustor burning gasified biomass fuel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(1): 100-104. (in Chinese)

[11] 张倩倩, 薄泽民, 桑振坤, 等. 以生物质气为燃料的微型燃气轮机运行特性分析[J]. 热能动力工程, 2016, 31(1): 44-49.

ZHANG Qianqian, BO Zemin, SANG Zhenkun, et al. Analysis on operating characteristics of biogas-fired micro gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(1): 44-49. (in Chinese)

[12] KUMAR K, SUNG C J, HUI X. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels [J]. Fuel, 2011, 90(3): 1004-1011.

[13] BOSSCHAART K J, LPH D G. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(3): 261-269.

[14] WEISS M, ZARZALIS N, SUNTZ R. Experimental study of Markstein number effects on laminar flamelet velocity in turbulent premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2008, 154(4): 671-691.

[15] GU X J, HAQ M Z, LAWES M, et al. Laminar burning velocity and Markstein numbers of methane-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2000, 121(1): 41-58.

[16] HU E J, HUANG Z H, HE J J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames [J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2009, 34 (11): 4876-4888.

[17] LIANG Y T, ZENG W, HU E J. Experimental study of the effect of nitrogen addition on gas explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1): 1-9.

(编辑:王碧珺)