

不同热值生物燃料燃烧特性数值模拟

周 莉, 夏姣辉

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、涡耗散湍流燃烧模型、P-1 辐射传热模型对二维简化燃烧室燃料甲烷气、沼气、生物质气的燃烧特性进行了数值模拟。通过比较不同截面的燃烧情况,分析燃烧室内的温度分布、NO_x 质量分数分布、流场结构,研究了不同热值燃料的燃烧特性。结果表明:在入口空气、燃料质量流量相同的条件下,随着燃料热值降低,燃烧温度降低,温度分布更均匀,NO_x 排放量减少,流动速度降低;适当调节余气系数,能改善燃烧效果,温度分布仍满足高热值燃料燃烧温度高于低热值燃料燃烧温度的规律;在生物燃料混合气中掺入不同热值的可燃成分,可改变混合气的热值,恰当的混合比例能更好地发挥生物燃料的作用。

关 键 词: 燃烧特性; 生物质气; 热值; 余气系数; 生物燃料

中图分类号: V313

文献标志码: A

Numerical simulation on combustion characteristics of biofuels with different calorific values

ZHOU Li, XIA Jiao-hui

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Combustion characteristics of the two-dimensional simplified combustor were simulated numerically for methane, marsh gas and biomass gas, with introduction of standard $k-\epsilon$ turbulence model, eddy-dissipation turbulence combustion model and P-1 radiation heat transfer model. The temperature distribution, NO_x mass fraction distribution, flow field structure in the combustor were analyzed to obtain the combustion characteristics of fuels with different calorific values by comparing the combustion situations of different cross sections. Results show that, under the condition of same mass flow of inlet air and fuel, the combustion temperature decreases with the decline of calorific value of fuels, the temperature distribution is more uniform, the NO_x emissions are diminished, and the flow velocity is reduced; the proper regulation of excess air coefficient can improve the effect of combustion burning, and the temperature distribution still meets the law that combustion temperature of fuels with high calorific value is higher than that of fuels with low calorific value; the mixing of combustible components with different calorific values in biofuels syngas will change the calorific value of syngas, and the appropriate mixing ratio can play a better role for biofuels.

Key words: combustion characteristics; biomass gas; calorific value; excess air coefficient; biofuels

生物燃料被认为有环保性、可循环性、原料上的多样性等优势,是可再生能源开发利用的重要

方向,因此受到全球各国普遍关注。国内外积极地对生物燃料进行研究和开发。Franco, Yamasaki

收稿日期:2013-06-17

基金项目:国家自然科学基金(51236006,51176156); 陕西省自然科学基金(2013JQ7004)

作者简介:周莉(1978—),女,河南信阳人,教授,博士,主要从事发动机内流气动热力学研究。

等^[1-2]认为生物燃料的净化、成分、热值对燃烧性能有影响,必须针对具体原料的特性进行专门设计,而燃烧室也必须经过专门改造,以达到较高的燃烧效率和较低的 NO_x 排放量.赵晓燕、王朝晖等^[3-4]指出不改变输出功率时使用低热值气体燃料,燃气比增大,燃料供应量势必增加,适当加大喷嘴喷口直径,可降低燃料喷射速度,稳定火焰. Francesco, Sadamas 等^[5-7]研究表明当燃烧室改用生物燃料替代传统燃料时,燃烧室的排放降低. Pascale 等^[8]使用不同的燃烧模型数值模拟了成分为 CH_4 , CO 和 H_2 的生物燃料的燃烧特性,获得较好的温度分布.张顺利^[9]在燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟中指出考虑热辐射,用有限化学反应速率进行模拟,可提高数值的准确性.冯显钦、张巍等^[10-11]研究了空燃比、燃料质量流量等对燃烧室性能的影响.更有学者对不同配比生物燃油混合燃料的排放、热稳定等特性进行了研究^[12-14].

但是由于燃气组分、原料以及制备方法的多样性,使得目前在对生物燃料燃烧特性的系统研究方面仍然鲜见.本文在入口空气和燃气质量流量相同的条件下,运用 FLUENT 计算软件,对甲烷气、沼气、生物质气在燃烧室中的燃烧进行了数值研究,获得燃烧室内的温度分布、 NO_x 质量分数分布、流场结构,细致分析了高低热值燃料的燃烧差异,深入地研究了生物燃料的燃烧特性.

1 生物燃料

生物质气就是利用农作物秸秆、林木废弃物、食用菌渣、禽畜粪便及一切可燃性物质做为原料转换为可燃性能源,不仅可再生而且环保.将木屑、薪柴、秸秆等生物质气化是将生物质能转换为高效高品位清洁能源的最有效措施之一.

本文选取甲烷气、沼气以及 5 种典型的生物质气作为研究对象,5 种典型生物质气分别为甲烷气、沼气、葡萄籽气、木屑气、薪柴气、树叶气、甘蔗茎气,这些燃料代表着不同级别的低位热值,其中葡萄籽气和木屑气热值基本相等,便于更全面的分析热值的细微变化给燃烧带来的影响.标准状况下,气体摩尔体积为 22.4 L/mol ,由标准状况下 1 m^3 燃料的低位热值能计算出 1 kg 燃料的低位热值.所用燃料的成分(按体积分数计算)、低位热值、摩尔质量、化学恰当比、空气质量流量如表 1 所示,其中 q_{lv} 表示按体积计算的低位热值, M 表示摩尔质量, q_{lm} 表示按质量计算的低位热值, $(A/F)_{st}$ 表示空气燃料化学恰当比, q_m 表示按化学恰当比计算出每秒钟燃烧 0.00307 kg 燃料需要消耗的空气流量.

由表 1 可以看出,因原料选择不同,生物质气主要可燃成分 CO , H_2 , CH_4 的体积分数不一样,热值有差异;按质量计算的低位热值的大小趋势和按体积计算的低位热值大小趋势一致.

表 1 燃料主要成分、低位热值、摩尔质量、化学恰当比、空气质量流量

Table 1 Main components, lower calorific value, molar mass, stoichiometric ratio, air flow of fuels

燃料	燃料成分体积分数/%						$q_{lv}/$ (MJ/m^3)	$M/$ (g/mol)	$q_{lm}/$ (MJ/kg)	$(A/F)_{st}$	$q_m/$ (kg/s)
	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2					
甲烷	0	0	0	50.05	1	0	35.8	16	50.05	17.2	0.0528
沼气	38	0	0	17.93	60	2	21.52	26.9	17.93	10.32	0.0316
葡萄籽气	13	0	22	6.65	6	42	7.4	24.9	6.65	7.43	0.0228
木屑气	15	0.7	16.7	6.47	7.8	42.9	7.25	25.1	6.47	7.37	0.0226
薪柴气	11	0.2	20	4.02	2	54.5	4.73	26.3	4.02	4.97	0.0153
树叶气	13.1	0.6	15.1	3.19	0.8	54.6	3.69	25.9	3.19	5.71	0.0175
甘蔗茎气	18.7	0	8	2.18	2	63.8	2.8	28.8	2.18	3.13	0.0096

2 计算模型和数值方法

2.1 物理模型

为了研究不同热值生物燃料和传统燃料燃烧

特性的区别,本文在简化的圆筒形燃烧室内进行数值模拟,图 1 为简化的圆筒形燃烧室的二维模型的 $1/2$. 燃烧室外径为 0.45 m , 长度为 2 m . 燃烧室中心有一个直径为 0.01 m , 长为 0.01 m , 壁厚

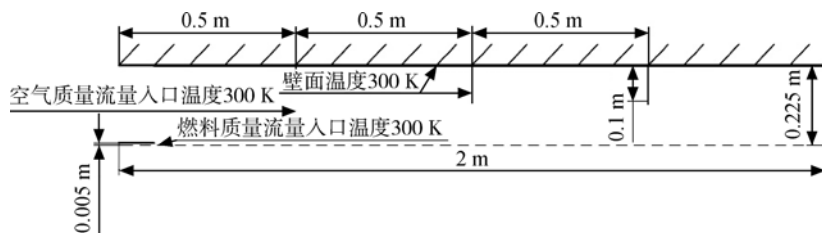


图 1 圆筒形燃烧室二维简图

Fig. 1 Two-dimensional simplified map of cylindrical combustor

为 0.002 m 的小喷嘴. 燃烧室壁上嵌有 3 块厚为 0.005 m, 高 0.1 m 的隔板. 高速流动燃料与低速流动空气混合, 湍流扩散燃烧.

2.2 数值模拟方法

计算流动控制方程为 N-S (Navier-Stokes) 方程, 采用标准的 $k-\epsilon$ 两方程模型和分离隐式求解器进行稳态求解, 物理量的离散格式均为 2 阶迎风格式, 压力速度耦合采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法, 流体为理想不可压气体, 固体为铝. 燃烧模型采用涡耗散湍流燃烧模型, 同时采用计算量小的 P-1 辐射传热模型模拟辐射换热对燃烧的影响^[15].

2.3 边界条件

为了比较不同生物质气和传统燃料燃烧特性的区别, 除燃料性质不同之外, 其他边界条件都相同. 壁面和喷嘴壁面为无滑移、不渗透的固体壁面. 入口燃料的质量流量为 0.00307 kg/s, 温度为 300 K. 入口空气质量流量为 0.00307 kg/s, 温度为 300 K. 壁面温度设为 300 K.

3 计算结果分析与比较

3.1 燃烧室截面温度

表 2 是不同燃料燃烧的平均温度 $\bar{T}$ 和最高温度 $T_{\max}$, 由数据变化趋势表明, 随着热值的降低, 燃烧室的平均温度和最高温度均随之降低.

表 2 不同燃料燃烧的平均温度和最高温度

Table 2 Average and highest combustion temperature of different fuels

温度	燃料						
	甲烷气	沼气	葡萄籽气	木屑气	薪柴气	树叶气	甘蔗茎气
$\bar{T}/K$	1215.72	755.30	512.69	507.92	456.97	441.74	406.03
$T_{\max}/K$	2308.46	2151.24	1985.94	1949.30	1746.60	1637.56	1268.57

3.1.1 燃烧室截面最高温度分析

图 2 显示的是不同燃料在流动方向, 16 个截面上的最高温度 $T_{\max}$ 分布. 不同种类燃料采用的入口燃料的质量流量和入口空气的质量流量是相同的, 由表 1 知生物质气的化学恰当比较甲烷气和沼气的化学恰当比小, 导致采用的生物质气的余气系数较甲烷气和沼气的余气系数大, 生物质气混合气的质量分数相对较低. 由图 2 知, 随着燃料热值的降低, 燃烧高温区逐渐向燃烧室头部靠近^[16], 表明质量分数较低的生物质气更容易燃烧充分. 对生物质气而言, 可燃气体质量分数小, 过量的空气质量流量相对大, 并且和低温壁面存在热传递, 使得燃烧室后端温度变低. 另外, 热值低的燃料在每个截面的最高温度也相应地低于高热

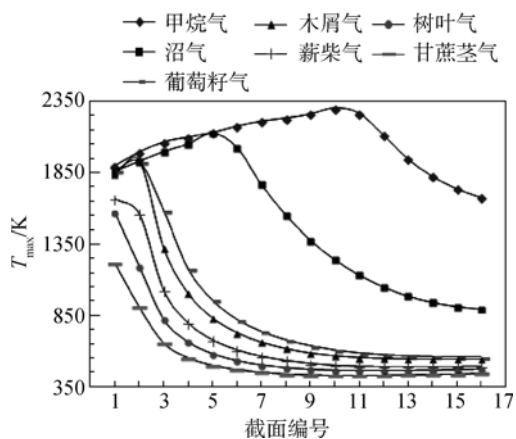


图 2 不同燃料各截面最高温度

Fig. 2 Highest temperature of different fuels in sections

值燃料在该截面的最高温度。

综上分析可知,作为反应燃料燃烧特性的参数——热值,以及在燃料质量流量相同的情况下,能直观地反应混合气质量分数的参数——余气系数的变化,对燃烧温度的分布有很大影响。

3.1.2 燃烧室截面平均温度分布分析

图 3 为不同燃料各截面平均温度 $\bar{T}$ 。由此可见,虽然生物质气燃烧的高温区靠近入口,燃烧室后端最高温度明显降低,但是在流动方向,平均温度并没有太大差异,则证明低热值燃烧的高温区特别小,高温燃气逐渐往后扩散。

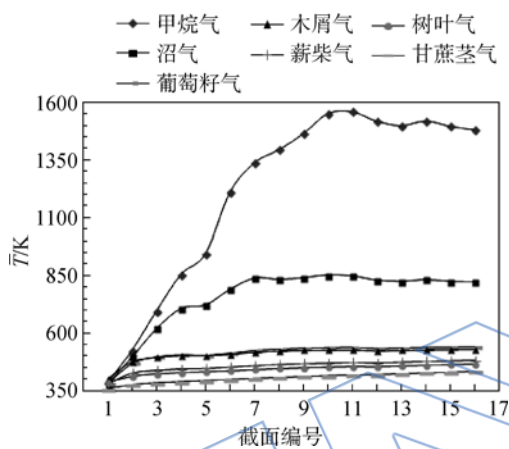


图 3 不同燃料各截面平均温度

Fig. 3 Average temperature of different fuels in sections

3.1.3 燃烧室截面温度不均匀系数分析

燃烧温度不均匀度也是衡量燃料燃烧效果的重要参数,燃烧室截面温度不均匀系数定义式

$$A_t = \frac{T_{\max} - \bar{T}}{\bar{T}} \times 100\% \quad (1)$$

根据表 2 提供的数据,由式(1)计算出各截面温度不均匀系数。图 4 给出了沿流动方向,不同截面温度不均匀系数的分布。由图可见高热值燃料的温度不均匀系数在各截面基本都比低热值燃料的高。且在第 12 个截面处生物质气的温度不均匀系数已经远小于 10%。由此能说明,在燃料质量流量和空气质量流量一致的情况下,低热值燃料温度均匀范围相对比高热值温度均匀范围大。由模拟计算的截面最高温度和截面平均温度数据,利用式(1)得甲烷气、沼气、葡萄籽气、木屑气、薪柴气、树叶气、甘蔗茎气在出口的不均匀系数分别为 0.160, 0.104, 0.033, 0.027, 0.018, 0.014, 0.07,可见生物质气的出口温度很均匀。但由图

2、图 3 知出口温度显然太低,这样在应用中达不到额定出口平均温度,如果要使用生物燃料则需要对燃烧室结构进行改造,以满足实际要求。

由此可知,当入口燃料和入口空气的质量流量一致时,低热值燃料燃烧均匀度较好,热值和余气系数对燃烧温度的均匀度有着重要影响。

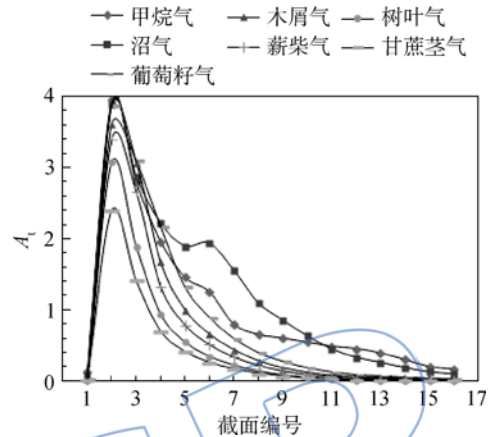


图 4 各截面温度不均匀系数

Fig. 4 Temperature nonuniform coefficient in sections

3.2 燃烧室总温分布、NO_x 质量分数、氧气质量分数分布

图 5 对燃烧室总温、NO_x 质量分数、氧气质量分数的分布图进行了比较,以进一步研究影响 NO_x 排放量的因素。由图明显可见,随着热值降低,高温区不但减小且向前移,温度随之降低。

由甲烷气和沼气对比,生物质气之间对比,虽可燃成分相同,但是可燃成分质量分数和余气系数的变化均对燃烧室轴向温度产生影响。由此可知,通过在混合气中掺入特定热值可燃成分,就能改变热值,通过寻找恰当比例充分利用燃料性能。

由氧气质量分数分布图对比分析可知,生物质气燃料的氧气明显消耗更少。随着燃料热值的降低,燃烧温度降低,NO_x 平均质量分数也相应降低。

通过甲烷气的 NO_x 质量分数轴向分布能看出,高温区前段氧气虽充足但温度低,NO_x 产生得少;高温区中段温度虽高但氧气质量分数不足,NO_x 产生得少;高温区后段温度和氧气质量分数适宜,NO_x 产生得多。NO_x 的产生与燃气的温度及氧气的质量分数有关,温度越高且氧气的质量分数也较大时,所产生的 NO_x 越多,这两个条件没同时满足时 NO_x 产生得较少,此规律通过其他几种燃料也能验证。

3.3 生物燃料在恰当比下总温分布

由于本文模拟是不同热值燃料的燃烧均对应

边界条件一致的情况,从而低热值燃料的余气系数比较大.为进一步分析余气系数对燃烧特性的影响,对沼气、木屑气、薪柴气、树叶气进行数值模拟时的空气入口质量流量改为表 1 中的 q_{mi} ,其他边界条件不变,总温分布如图 6 所示.

由图 6 可知,在经过空气质量流量的适当调

节后,整个流场平均温度明显提高.最高温度也有所变化,沼气、木屑气、薪柴气、树叶气燃烧最高温度分别为 2170,1960,1750,1640 K. 可知,余气系数虽然对燃烧室温度分布产生较大影响,但是依然满足高热值燃料的燃烧温度要高于低热值燃料燃烧的温度的规律.

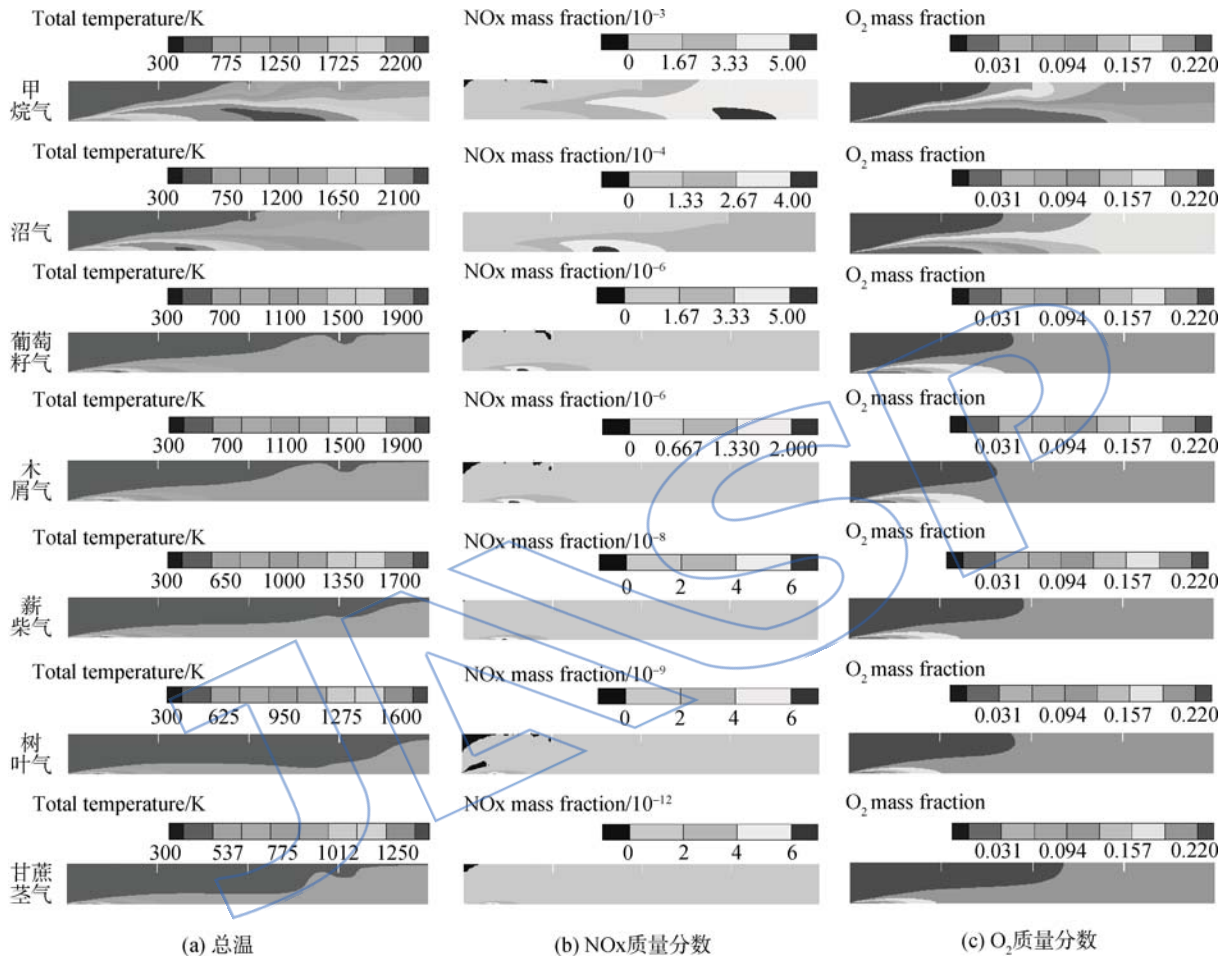


图 5 不同燃料总温分布、NOx 质量分数分布、O₂ 质量分数分布

Fig. 5 Distribution of total temperature, NOx mass fraction, O₂ mass fraction

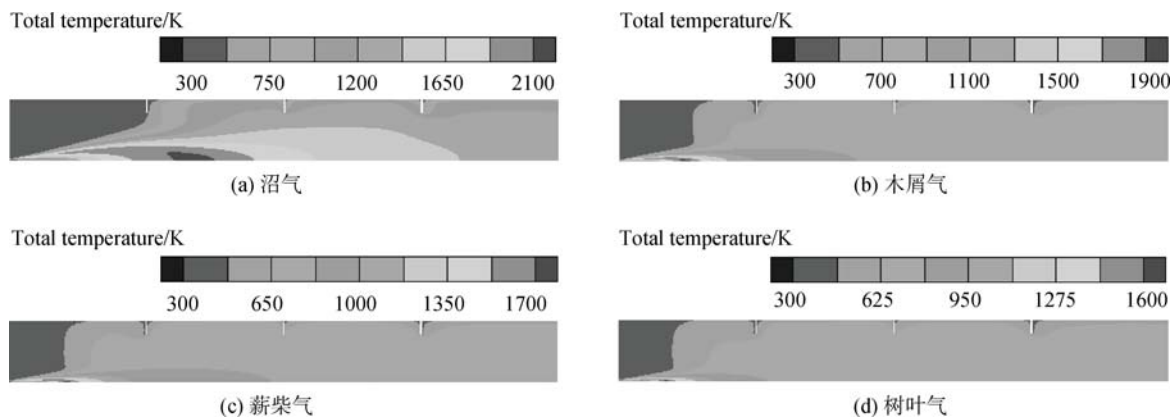


图 6 化学恰当比下总温分布

Fig. 6 Distribution of total temperature under the condition of stoichiometric ratio

3.4 燃烧室流函数分布图

为进一步研究燃烧流动特性,对比燃料的流函数等值线分布,如图7。随着热值的降低,在燃烧室挡板后产生的涡越来越大,结合化学恰当比下总温分布图6易知,热值低的燃料燃烧温度低,气体的能量相应就低,转化的动能就少,对应的速度相对也低。

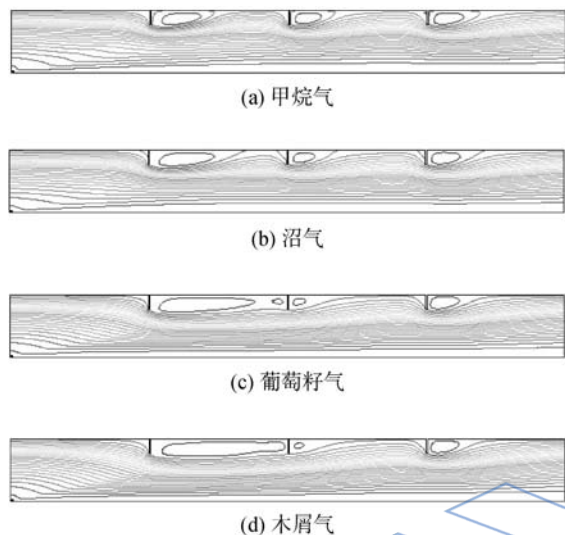


图7 燃料的流函数等值线分布

Fig. 7 Distribution of stream function isoline of fuels

4 结论

本文在相同边界条件下模拟了不同热值生物燃料和以甲烷气为代表的传统燃料在燃烧室中的燃烧特性,结果表明:

1) 在入口燃料和入口空气质量流量一致的情况下,燃料热值越低对应的燃烧温度也低,燃烧高温区缩小且向燃烧室前端靠近,余气系数相对大,易燃烧充分,温度分布更均匀。

2) NO_x 的产生与燃气的温度及氧气的质量分数有关,温度越高且氧气的质量分数越大时,所产生的 NO_x 越多。

3) 余气系数调到恰当的范围时,低热值生物燃料燃烧的温度场分布都有所改善,仍满足高热值燃料的燃烧温度要高于低热值燃料燃烧的温度规律。

4) 生物燃料混合气中可燃成分所占份额会影响燃料热值的大小,在混合气中有目的地掺入特定热值的气体成分,即可改变混合气的热值,设计出所需热值的生物燃料,通过寻找可燃成分最佳的混合比例能更好地发挥生物燃料的实际作用。

参考文献:

- [1] Franco A, Giannini N. Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(2): 163-177.
- [2] Yamasaki Y, Okada Y, Iijima K. Operation of micro gas turbine system employing two stage combustion of biomass gas[R]. ASME Paper GT-2009-59900, 2009.
- [3] 赵晓燕, 李祥晟, 丰镇平. 燃气轮机低热值合成气燃烧室内三维湍流流动的数值模拟研究[J]. 动力工程, 2009, 29(4): 330-334.
ZHAO Xiaoyan, LI Xiangsheng, FENG Zhenping. Numerical simulation research on three dimensional turbulence flow in a gas turbine combustor burning low heat value syngas[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(4): 330-334. (in Chinese)
- [4] 王朝晖, 王成军, 王丹丹, 等. 燃气轮机燃烧室燃烧气体燃料的数值模拟[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(2): 11-14.
WANG Zhaohui, WANG Chengjun, WANG Dandan, et al. Combusting gas fuel simulation for the combustor of gas turbine engine[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2010, 27(2): 11-14. (in Chinese)
- [5] Francesco F, Paolo L, Michele B, et al. CFD simulation of a microturbine annular combustion chamber fueled with methane and biomass pyrolysis syngas: preliminary results[R]. ASME Paper GT-2009-60030, 2009.
- [6] Francesco F, Paolo L, Gianni B. CFD simulation of biomass pyrolysis syngas vs. natural gas in a microturbine annular combustor[R]. ASME Paper GT-2010-23473, 2010.
- [7] Sadamasa A, Atushi I, Shigeru H, et al. Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3131-3138.
- [8] Pascale D A, Marco F, Antonio P. Numerical simulation of biomass derived syngas combustion in a swirl flame combustor[R]. ASME Paper GT-2010-22791, 2010.
- [9] 张顺利. 燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
ZHANG Shunli. Numerical investigation of the flowfield of the combustor in the turbine engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [10] 冯显钦, 车志, 梁瑞香. 简析空燃比对汽车发动机性能的影响[J]. 科技致富向导, 2013(5): 82.
FENG Xianqin, CHE Zhi, LIANG Ruixiang. Simple analysis on the effect of air-fuel ratio on the performance of the car engine[J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2013(5): 82. (in Chinese)
- [11] 张巍. 生物质气微型燃气轮机的特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
ZHANG Wei. Characteristics study on micro gas turbine system for gasfield biomass fuel[D]. Shanghai: Shanghai

- Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [12] 周明, 沈颖刚, 黄金凤. 高原环境下不同配比生物柴油混合燃料排放特性的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(1): 59-63.
- ZHOU Ming, SHEN Yinggang, HUANG Jinfeng. Emission characteristics on biodiesel blends of different ratios under plateau environment[J]. Tractor and Farm Transporter, 2011, 38(1): 59-63. (in Chinese)
- [13] 张天顺, 张汝坤, 玄伟东, 等. 柴油机燃用桐油生物柴油的排放性能试验研究[J]. 农机化研究, 2011(2): 177-180.
- ZHANG Tianshun, ZHANG Rukun, XUAN Weidong, et al. Experimental study on the emission characteristics of diesel engine fueled with bio-diesel prepared from tong oil [J]. Agricultural Mechanization Research, 2011(2): 177-180. (in Chinese)
- [14] 仲兆平, 姜小祥, Naoko E. 生物油/生物柴油混合燃料的热稳定性[J]. 东南大学学报, 2011, 41(1): 129-133.
- ZHONG Zhaoping, JIANG Xiaoxiang, Naoko E. Thermal stability of bio-oil/bio-diesel mixture[J]. Journal of Southeast University, 2011, 41(1): 129-133. (in Chinese)
- [15] Pantankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere Publishing Company, 1980.
- [16] 张振奎, 钟华贵. 多点喷射模型燃烧室性能 CFD 分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(4): 16-21.
- ZHANG Zhenkui, ZHONG Huagui. CFD analysis of performance for the model multipoint injection combustor[J]. Aeroengine, 2010, 36(4): 16-21. (in Chinese)