

生物柴油对双旋流燃烧室燃烧与排放性能的影响

张善军, 马宏宇, 贾春燕, 金 戈

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为深入研究燃气轮机燃用生物柴油对其燃烧与排放性能的影响,将生物柴油与柴油按照不同比例进行混合,在双旋流燃烧室 90° 扇形试验件上进行降压模拟燃烧试验. 结果表明:随油气比的增加,燃烧效率和 NO_x 排放快速增加并趋于稳定,出口温度分布系数(OTDF)、径向分布系数(RTDF)、CO 排放逐渐减小并趋于稳定;随生物柴油混合比例的增加,燃烧效率、燃烧室升温逐渐降低,OTDF 和 NO_x 排放先减小后增加,RTDF 和 CO 排放逐渐增加. 随油气比的增加,生物柴油对燃烧和排放的主要影响方面发生变化,影响程度逐渐减弱,不同油气比时存在不同的最佳生物柴油混合比例.

关 键 词: 燃气轮机; 双旋流; 生物柴油; 燃烧试验; 燃烧效率; 出口温度分布系数; 径向温度分布系数; 一氧化碳; 氮氧化物

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Influence of biodiesel fuels on double swirler combustor performance and emissions

ZHANG Shan-jun, MA Hong-yu, JIA Chun-yan, JIN Ge

(Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: An experimental study was conducted by using different mixing ratios of biodiesel fuels and diesel oil on an angle 90° double swirler combustor under simulative pressure condition to investigate the influence of biodiesel fuels on the combustor performance and emissions of gas turbine. The experimental results show that with the increment of fuel-air ratio, the combustion efficiency and NO_x emissions increase, and the outlet temperature distribution factor (OTDF), radial temperature distribution factor (RTDF) and CO emission decrease; with the increment of biodiesel fuels-diesel oil ratio, the combustion efficiency and outlet temperature rise gradually drop, and the outlet temperature distribution factor and NO_x emissions decreases first and then increases, and the radial temperature distribution factor and CO emission increase. With the increment of fuel-air ratio, the influence of biodiesel fuels changes and wears off. Different best biodiesel fuels-diesel oil ratios exist under different conditions of fuel-air ratio.

Key words: gas turbine; double swirler; biodiesel fuels; combustion experiment; combustion efficiency; outlet temperature distribution factor (OTDF); radial temperature distribution factor (RTDF); CO; NO_x

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 舰船机电技术项目资助

作者简介: 张善军(1984—), 男, 黑龙江五大连池人, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机主燃烧室设计与试验.

随着世界人口增长及生产的发展,人类对能源的需求越来越大,而常规能源储量有限且不可再生,能源紧缺以及由此引发的石油价格波动、气候变化、地区安全问题日益严重。开发利用可再生、清洁能源已经成为人类进入 21 世纪以后面临的新课题。同时,快速增长的民用和军用燃气轮机更加激化了能源短缺与需求增长之间的矛盾,将可再生资源应用于燃气轮机,对维护社会稳定、促进社会经济持续发展、改善环境意义重大。

在现有的可再生能源中,生物质能中的生物柴油具有广泛的发展前景。俄克拉荷马州大学航空与机械学院的 Habib 等^[1]在 30 kW 燃气轮机上,进行 Jet A、大豆甲酯(SME)、油菜籽甲酯(CME)、Jet A 与 SME 混合油和 Jet A 与 CME 混合油共 5 种燃油的燃烧试验,录取了燃气轮机性能和污染物排放;美国空军实验室^[2]在 P-200 涡轮喷气发动机上进行替代燃油与传统 JP-8 的试验,测量燃烧不同燃油的静推力、燃油消耗率、排气温度和污染物排放,研究利用小型发动机评价两种燃油特性差异的可行性;英国利兹大学的 Li 等^[3]在工业低排放燃气轮机上,进行生物柴油、煤油、两种比例生物柴油与煤油的混合油、混合油与天然气的燃烧试验研究,测量了燃气轮机的污染物排放和贫油熄火边界。中国燃气涡轮研究院的史家荣等^[4]在航空发动机燃烧室上,进行了 0 号柴油与生物柴油的试验,研究了在燃气轮机中使用生物柴油的可行性。除此之外,国内对生物柴油在内燃机上的应用进行了研究,获得了生物柴油对内燃机的燃烧和排放等性能的影响^[5-7]。

本文在某燃气轮机双旋流燃烧室扇形试验件上,对生物柴油与-10 号柴油不同比例混合的燃油进行燃烧试验,分析生物柴油对燃烧室燃烧效率,燃烧室升温,出口温度分布系数 OTDF, RT-DF, NO_x 排放、CO 排放等性能的影响。

1 生物柴油

生物柴油是以草本植物油、木本植物油、动物油、废弃油脂(地沟油)、微藻油脂等为原料,与烷基醇通过酯交换反应和酯化反应生成的长链脂肪酸单烷基酯(通常为脂肪酸甲酯和脂肪酸乙酯),也称为 BD100。其分子链长 14~20 个碳原子,与石化柴油链长相仿,性质与石化柴油类似^[8-9]。生产工艺主要包括化学法和生物法,化学法有酸/碱催化法、超临界法等,生物法有酶催化法和细胞催化法,主要区别是催化剂的选择。目前工业产生

物柴油主要采用酸/碱催化,超临界法和生物法是研究的热点,尚未得到工业化应用。

本次试验用生物柴油原料为地沟油,通过酸/碱催化法加工而成,理化特性见表 1(表中 H 为氢,C 为碳,S 为硫)。与普通柴油相比,生物柴油具有优良的环保特性、较好的润滑性能、较好的安全性能、良好的燃油性能、可再生性、可直接添加使用等优点。但是,生物柴油也有热值略低于石化柴油、弱酸腐蚀性、点火性能不好、原料有限等不足。

表 1 生物柴油理化性能

Table 1 Physico-chemical characteristics of biodiesel fuels

燃油	密度/ (kg/m ³)	黏度/ (mm ² /s)	净热值/ (MJ/kg)	H 原子 数/C 原 子数	S 质量 分数/%
-10 号	808.1	3.55	42.54	1.95	0.016
BD100	876.5	6.70	38.23	1.87	0.0048

2 试验系统

试验系统主要由入口测量段、试验件、出口测量段、排气消声段、供油系统、供气系统和数据处理系统组成,如图 1 所示。

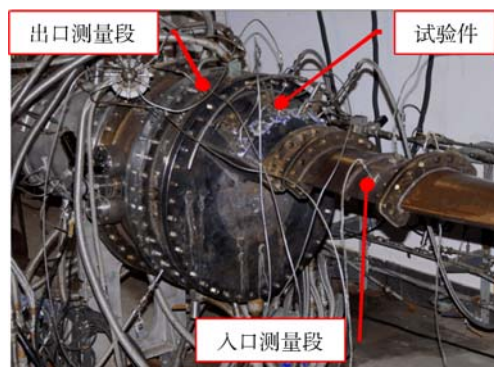


图 1 试验系统主要部件图

Fig. 1 Primary assembly of test system

试验件采用双旋流环形燃烧室的 90° 扇形段,主要包括突扩扩压器、火焰筒、机匣和喷嘴组成,如图 2 所示。

入口测量段包括长直管段和整流装置。长直管段上安装有标准孔板,用于测量试验件入口空气流量。整流装置能够保证试验件进口空气温度和压力的均匀,利用安装其上的压力和温度传感器测量燃烧室入口空气总压、静压和总温。出口测量段主要包括一个水/气双冷高温自动扫描检测

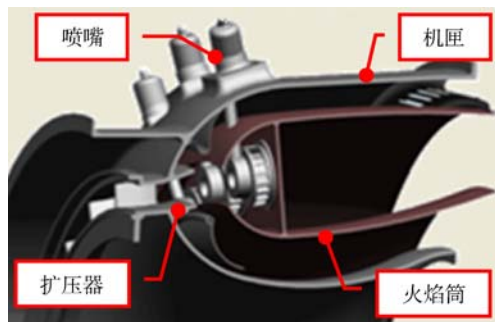


图2 燃烧室试验件结构示意图

Fig. 2 Diagram of combustion on test

装置和一个燃气采样耙,测量燃烧室出口温度场和污染物排放。

试验时,首先通过进气阀门、放气阀门和排气阀门的组合调节,实现试验要求的验件入口空气流量、压力要求,之后通过调节燃油泵的供油压力,控制供油量,实现试验要求的油气比。试验状态调整好并稳定,使用 VXI 系统采集试验数据。每个试验状态至少采集两次,最多 4 次,其中任意两次数据重复性好才进行下个状态试验,若重复性不好,则检查测试仪器和试验设备。

试验使用燃油为-10#柴油和生物柴油按一定体积百分比混合得到的混合燃油,生物柴油的混合比例分别为 0%, 5%, 10%, 20%, 50% 和 100%,简称-10#, BD5, BD10, BD20, BD50 和 BD100,见图 3。采用降压模拟进行试验,进气压力为 0.5 MPa,进气温度为 510~700 K,进气流量为 2.08~2.77 kg/s,油气比(f)为 0.018, 0.020, 0.022, 0.025 和 0.028。

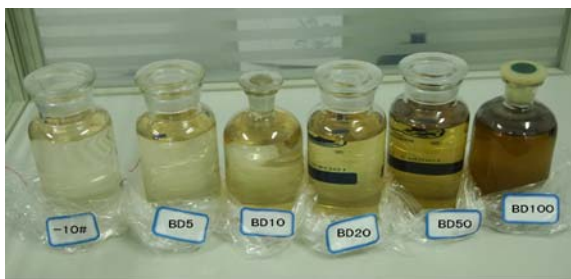


图3 试验用混合燃油

Fig. 3 Oil of different biodiesel fuels-diesel oil ratio

3 试验结果分析

3.1 燃烧效率

图 4 给出了采用燃气分析法测得的燃烧效率(η)。可以看出,随油气比的增加,不同混合比例燃油的燃烧效率快速增大并趋于稳定,主要原因是

试验参数范围内主燃区处于贫油状态,油气比增加引起火焰温度升高和燃烧速率增加。另外,油气比最小时,燃油流量较低,试验所用的离心式旋流杯空气雾化喷嘴一次雾化较差,进而影响二次空气雾化的雾化质量^[10],同时进口空气温度低也影响了燃油蒸发、油气掺混,导致燃烧效率降低^[11]。随着生物柴油比例的增加,燃烧效率降低,这与生物柴油黏度大(运动黏度为柴油的 1.88 倍),不易雾化有关。但是,试验状态下所有燃油的燃烧效率都在 0.99 以上,油气比和生物柴油混合比例对燃烧效率的影响完全可以忽略不计。

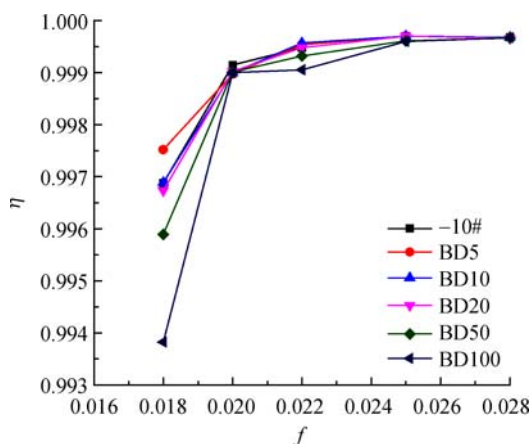


图4 不同燃油燃烧效率随油气比的变化曲线

Fig. 4 Combustion efficiency as a function of fuel-air ratio of different fuels

3.2 燃烧室温升

图 5 给出了采用热电偶逐点测量并取算术平均计算得出的燃烧室温升(ΔT)。可以看出,燃烧室温升随油气比的增加而升高,由于燃烧室温升

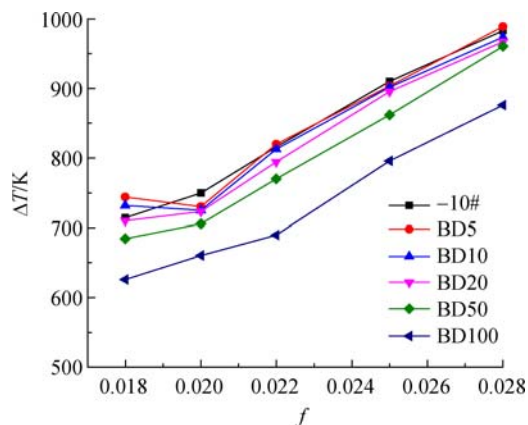


图5 不同燃油燃烧室温升随油气比的变化曲线

Fig. 5 Outlet temperature rise as a function of fuel-air ratio of different fuels

主要取决于油气比和燃烧效率,图 4 显示燃烧效率都在 0.99 以上,可以忽略其对燃烧室温升的影响,而对于贫油燃烧,油气比增加必然引起燃烧室温升的升高.对于不同混合比例的燃油,由于生物柴油热值比-10#柴油低,所以随着生物柴油比例的增加,燃烧室温升降低.在相同的油气比下,BD100 的燃烧室温升比-10#柴油低约 100 K.

3.3 出口温度场分布

图 6 给出了 $f=0.028$ 时的出口温度分布云图.可以看出,不同燃油的出口温度场热区分布基本相同.

为了消除试验件侧壁效应对出口温度分布系数 OTDF、径向分布系数 RTDF 的影响,采用试验件中间 3 头部对应的扇区出口温度场数据对两个参数进行计算^[12-13],结果见图 7、图 8. 可以看

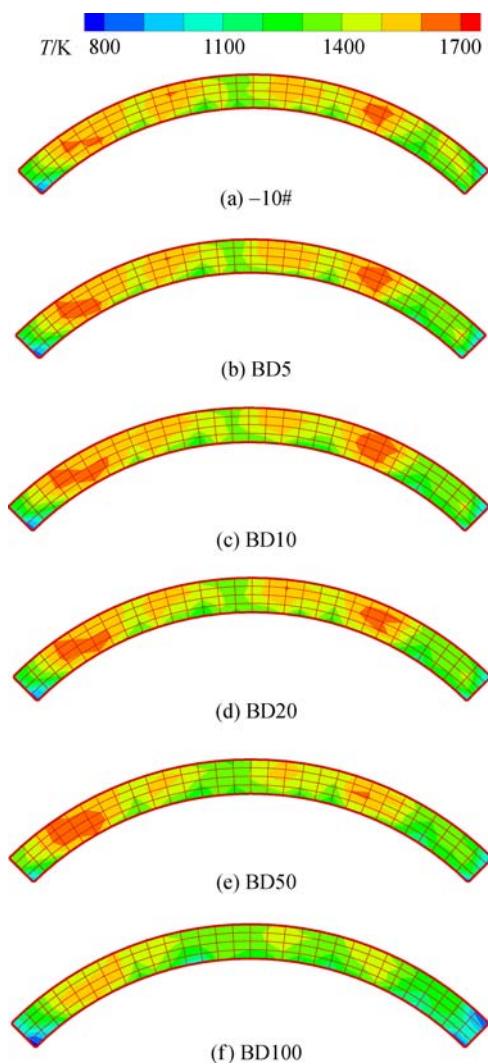


图 6 不同燃油出口温度分布云图

Fig. 6 Outlet section temperature contours of different fuels

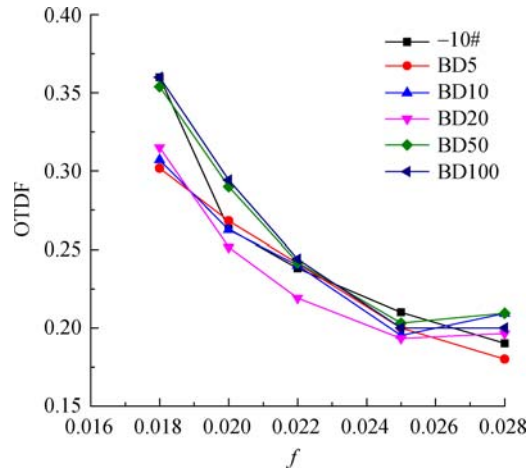


图 7 不同燃油 OTDF 随油气比的变化曲线

Fig. 7 OTDF as a function of fuel-air ratio of different fuels

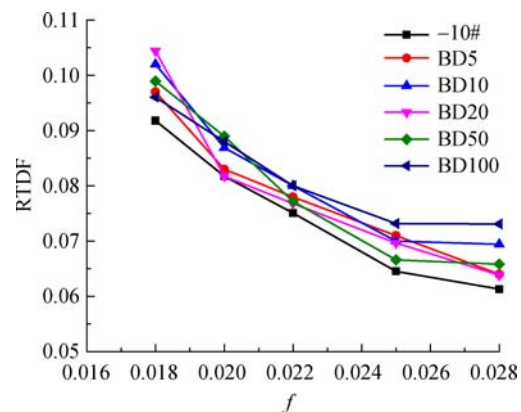


图 8 不同燃油 RTDF 随油气比的变化曲线

Fig. 8 RTDF as a function of fuel-air ratio of different fuels

出,随油气比的增加,OTDF 和 RTDF 逐渐减小并趋于稳定,主要原因是随着油气比的增加,空气雾化喷嘴的雾化质量变好,雾场形态充分发展、喷雾周向分布更加均匀^[14],整个燃烧区的油气混合更加接近均相,进而出口温度场分布也更加均匀^[15].随着生物柴油混合比例的增加,OTDF 呈现先变小后变大的趋势,其中 BD20 的 OTDF 最小,BD100 的 OTDF 最大;RTDF 随生物柴油比例的增加持续变大,-10# 柴油的 RTDF 最小,BD100 的 RTDF 最大.燃烧室出口温度场与燃烧室内空气流场、燃油空间分布和燃烧完全性等多种因素有关,是主燃区出口温度场、掺混孔后温度场和掺混区冷却空气后温度场共同迭加的结果.生物柴油的十六烷值含量高,燃烧反应速率高,缩短燃油燃尽时间,大幅减少未燃尽燃油在燃烧室出口附近燃烧,降低了热点温度,使 OTDF 变小,

但是随着油气比增加导致的燃烧强度增加逐渐削弱了十六烷值的作用,并且随着生物柴油混合比例增加,燃烧室温降低,所以当油气比较大时,OTDF 随生物柴油比例增加而增大,RTDF 主要与生物柴油黏度大有关,导致燃油不易雾化,更易聚集于燃烧室出口截面径向中间位置,导致 RTDF 随生物柴油比例增加而增大。

3.4 CO 排放

图 9 给出了采用非分光红外气体分析仪测量的不同燃油的 CO 排放结果,测量误差不大于 10^{-8} 。可以看出,随着油气比的增加,所有燃油的 CO 排放持续降低并趋于稳定,当 f 小于 0.022 时,CO 排放随 f 的变化显著,当 f 大于 0.022 后,CO 排放基本保持不变,主要原因是在贫油燃烧区间,随油气比增加,燃烧温度增加导致氧化反应速率增加,CO 排放减小。随生物柴油混合比例的增加 CO 排放增加,并且当 f 小于 0.022 时生物柴油对 CO 排放的影响更加明显,当 f 大于 0.022 时,生物柴油对 CO 排放的影响很小。油气比小时,生物柴油黏度大导致的喷嘴雾化效果差是 CO 排放增加的主要原因^[16],随着油气比增加,燃油雾化效果得到改善,燃烧充分,生物柴油的 CO 排放与 -10 # 柴油逐渐接近。

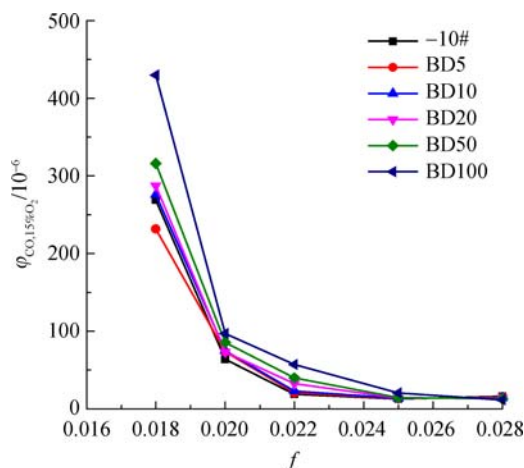


图 9 不同燃油 CO 排放随油气比的变化曲线

Fig. 9 CO as a function of fuel-air ratio of different fuels

3.5 NOx 排放

图 10 给出了采用化学发光气体分析仪测量的燃烧室出口 NOx 排放结果,测量误差不大于 10^{-8} 。可以看出,当 f 小于 0.022 时,NOx 排放随油气比的增加快速增加,当 f 大于 0.022 时,NOx 排放几乎不变,主要原因是油气比增加导致

主燃区温度升高,占大部分 NOx 排放量的热力 NO 快速增加,总 NOx 排放随之增加^[17]。当 f 大于 0.022 时,主燃区当量油气比接近 1,燃烧温度达到并保持在最大值附近,因此 NOx 排放达到最大并趋于稳定^[18]。当 f 小于 0.024 时,BD5, BD10, BD20 和 BD50 的 NOx 排放与 -10 # 相当,其中 BD5 和 BD10 的 NOx 排放比 -10 # 小, BD100 的 NOx 排放明显比 -10 # 大,当 f 大于 0.024 时, -10 # 柴油中混合生物柴油使 NOx 排放增加,并随生物柴油混合比例的增加而增加。生物柴油的十六烷值高,着火延迟期短,燃烧反应速率高,并且含氧量高,形成富氧条件,有利于 NOx 的产生,但是,生物柴油黏度大导致的雾化质量差将一定程度抑制 NOx 的产生,所以,生物柴油的 NOx 排放是各种因素综合影响的结果,油气比小并且生物柴油混合比例低时,雾化质量占主要原因,油气比较大时,富氧占主要原因。

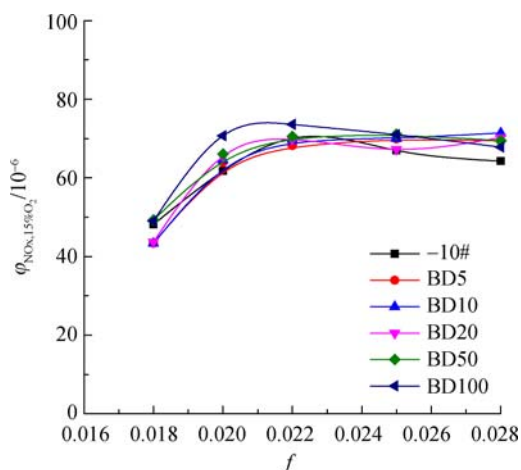


图 10 不同燃油 NOx 排放随油气比的变化曲线

Fig. 10 NOx as a function of fuel-air ratio of different fuels

3.6 最佳混合比例

由前面的分析可知, -10 # 柴油中混合生物柴油主要使燃烧室温降低,同时对出口温度场和污染物排放有不同程度的影响。燃烧室温降低导致的燃机功率降低问题,可以通过增加燃油流量解决。针对生物柴油对燃烧室出口温度场和排放的复杂影响,存在最佳混合比例可以获得理想的燃烧室出口温度场和排放性能。

图 11 分别给出了当 $f=0.022$ 和 0.028 时不同生物柴油混合比例燃油的出口温度场和污染物排放。从图 11(a) 中可以看出, $f=0.022$ 时, -10 # 柴油中混合生物柴油对 OTDF, RTDF 和

NO_x 排放影响很小, 主要对 CO 排放产生影响, 随生物柴油混合比例增加 CO 排放呈现快速增加的趋势, 所以生物柴油的最佳混合比例是 5%, 即最佳混合燃油是 BD5。从图 11(b) 中可以看出, $f=0.028$ 时, -10# 柴油中混合生物柴油对 OTDF, CO 排放和 NO_x 排放影响很小, 主要对 RTDF 产生影响, 随生物柴油混合比例增加 RTDF 呈现先增加后减小之后再增加的变化趋势, 所以生物柴油的最佳混合比例是 20%, 即最佳混合燃油是 BD20。从图 11 中还可以看出, 随着油气比的增加, 生物柴油对燃烧和排放的主要影响方面发生改变, 影响程度逐渐减弱。

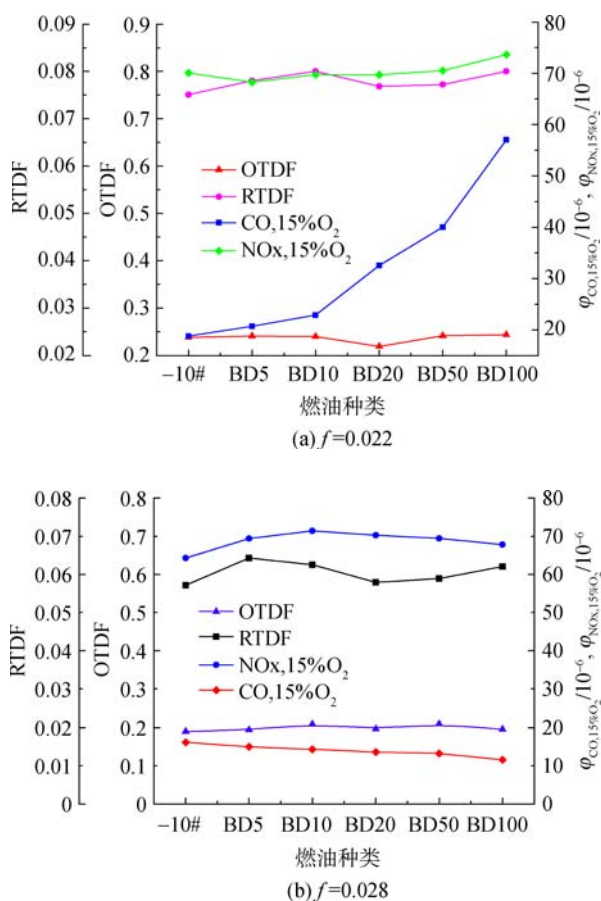


图 11 不同燃油综合性能曲线

Fig. 11 Compositive performances of different fuels

4 结 论

生物柴油在燃气轮机上具有广泛的应用前景, 本文通过燃烧试验, 获得了柴油中混合生物柴油对燃气轮机双旋流燃烧室燃烧和排放性能的影响规律, 总结如下:

1) 燃烧效率随油气比的增加快速增大并趋于稳定, 随生物柴油混合比例的增加而降低, 试验

状态下所有燃油的燃烧效率都大于 0.99, 油气比和生物柴油对燃烧效率的影响可以忽略。

2) 燃烧室温升随生物柴油混合比例的增加而降低, 纯生物柴油的燃烧室温升比 -10# 柴油低约 100 K。

3) 出口温度分布系数 OTDF 和径向分布系数 RTDF 随油气比的增加逐渐变小并趋于稳定, OTDF 随生物柴油混合比例的增加先变小后变大, RTDF 随生物柴油混合比例的增加而变大。

4) CO 排放随油气比的增加快速降低并趋于稳定, 随生物柴油混合比例的增加而增加; NO_x 排放随油气比的增加快速升高并趋于稳定, 随生物柴油混合比例的增加先变小后变大。

5) 生物柴油对燃烧和排放的主要影响方面随油气比的变化而变化, 影响程度随油气增大而减弱。 $f=0.028$ 时生物柴油最佳混合比例为 20%。

参考文献:

- [1] Habib Z B, Parthasarathy R N, Gollahalli S R. Effects of biofuel on the performance and emissions characteristics of a small scale gas turbine[J]. AIAA-2009-827, 2009.
- [2] Baranskii J A, Hokeii J L. Preliminary characterization of bio-fuels using a small scale gas turbine engine[R]. AIAA-2011-694, 2011.
- [3] Li H, Altaher M, Andrews G E. Evaluation of combustion and emissions using biodiesel and blends with kerosene in a low NO_x gas turbine combustor [R]. ASME Paper GT2010-22182, 2010.
- [4] 史家荣, 冯大强, 廖忠权. 新型燃油在燃气轮机中的应用试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(3): 10-13.
SHI Jiarong, FENG Daqiang, LIAO Zhongquan. An experimental investigation of new-type fuel application in gas turbine engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3): 10-13. (in Chinese)
- [5] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机学报, 2006, 24(2): 110-115.
TAN Piqiang, HU Zhiyuan, LOU Diming, et al. Performance and emissions of idt turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels [J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 110-115. (in Chinese)
- [6] 曾威霖, 刘福水, 何旭, 等. 可视化研究生物柴油缸内燃烧温度和碳烟特性[J]. 内燃机学报, 2013, 31(4): 296-301.
ZENG Weilin, LIU Fushui, HE Xu, et al. Visualization study on the in-cylinder combustion temperature and soot characteristics of biodiesel [J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(4): 296-301. (in Chinese)
- [7] 胡鹏, 孙平, 宁海强, 等. 增压中冷柴油机燃用微乳化生物柴油放热规律研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(6): 19-24.

- HU Peng, SUN Ping, NING Haiqiang, et al. Study on heat release rate of turbocharged intercooled diesel engine fuelled with micro-emulsified biodiesel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(6): 19-24. (in Chinese)
- [8] 刘荣厚. 生物质能工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [9] 刘剑, 王学政. 生物柴油应用技术进展[J]. 柴油机设计与制造, 2006, 14(1): 6-8.
- LIU Jian, WANG Xuezheng. Review of application progress for bio-diesel technology[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2006, 14(1): 6-8. (in Chinese)
- [10] 郭新华, 林宇震, 张弛, 等. 离心式同向双旋流器空气雾化喷嘴雾化特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2249-2254.
- GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental investigation on atomization characteristic of an airblast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2249-2254. (in Chinese)
- [11] 刘伟, 林宇震, 刘高恩, 等. 低压条件下复合式多级旋流杯燃烧室燃烧效率研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 650-655.
- LIU Wei, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Research of combustion efficiency of combustors using hybrid airblast atomizer under low pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 650-655. (in Chinese)
- [12] 马宏宇, 赵传亮, 程明, 等. 取样密度对燃烧室试验测量结果的影响[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 19-23.
- MA Hongyu, ZHAO Chuanliang, CHENG Ming, et al. Effect of sampling density on measurement results in combustor test[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 19-23. (in Chinese)
- [13] 林宏军, 程明. 喷嘴匹配方案及火焰筒开孔对燃烧室性能影响的试验研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 13-17.
- LIN Hongjun, CHENG Ming. Effect of nozzle matching and flame tube holes on combustion performance[J]. Aeroengine, 2012, 38(5): 13-17. (in Chinese)
- [14] 赵硕, 张宝诚, 陈俊. 某型发动机燃油喷嘴试验及火焰筒头部的数值模拟[J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 39-42.
- ZHAO Shuo, ZHANG Bochong, CHEN Jun. Experiment of an aeroengine fuel nozzle and numerical simulation of combustor liner head[J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 39-42. (in Chinese)
- [15] 郑严, 沈倍毅. 弹用涡喷发动机燃烧室出口温度场试验与分析[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 187-190.
- ZHENG Yan, SHEN Beiyi. Tests and analysis of exit temperature distribution of the combustor for missile turbojet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 187-190. (in Chinese)
- [16] 曹铭栋, 王占学, 蔡元虎, 等. 基于燃烧室多反应器模型的民用涡扇发动机排放预测[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1042-1052.
- CAO Mingdong, WANG Zhanxue, CAI Yuanhu, et al. Civilian turbofan engine emission prediction based on combustor multi-reactor model[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1042-1052. (in Chinese)
- [17] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 双旋流器燃烧室 NO_x 生成研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 430-435.
- DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, JI Honghu. A study on NO_x formation for double swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 430-435. (in Chinese)
- [18] 张弛, 田野, 薛鑫, 等. 基于射流搅拌燃烧反应器加压条件下的航空煤油燃烧 NO_x 排放[J]. 航空动力学报, 2014, 29(8): 1769-1774.
- ZHANG Chi, TIAN Ye, XUE Xin, et al. NO_x emissions of kerosene combustion at elevated pressure jet stirred combustion reactor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(8): 1769-1774. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)