

煤基费托燃料雾化和点火实验研究^{*}

高晓会¹, 林宇震^{1,2}, 霍伟业¹, 刘振涛¹, 张 弛^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为了评价煤基费托合成航空替代燃料的雾化和点火性能, 利用单头部矩形燃烧室对国产煤基费托燃料、传统航空煤油 RP-3 以及二者 50:50 混合燃料的雾化索太尔平均直径 *SMD* 和贫油点火边界进行了实验研究。实验结果显示, 常温条件下, 三种燃料的雾化 *SMD* 和贫油点火边界都有相同的变化趋势, *SMD* 的减小趋势在供油压力达到 0.5MPa 后变缓, 贫油点火边界的扩展趋势在燃烧室压降达到 2.0% 后变缓; 相比航空煤油 RP-3, 煤基费托燃料的雾化性能和点火性能稍差, 通过相互掺混可以得到改善。使用响应面模型 (RSM) 研究总结了雾化 *SMD* 的经验关系式, 分析了燃料雾化和蒸发过程对其点火性能的影响。

关键词: 费托合成; 替代燃料; 雾化; 响应面模型; 贫油点火

中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2017) 11-2622-06

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2017. 11. 027

Experiment Research on Atomization and Ignition of Coal-Based Fischer-Tropsch Fuel

GAO Xiao-hui¹, LIN Yu-zhen^{1,2}, HUO Wei-ye¹, LIU Zhen-tao¹, ZHANG Chi^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the atomization and ignition performance of coal-based Fischer-Tropsch synthetic aviation alternative fuels, a single-module rectangular combustor was used to experiment the atomization Sauter mean diameter (*SMD*) and lean ignition limit of the domestic coal-based F-T synthesis, traditional aviation kerosene RP-3 and 50:50 mixture of both fuels. Experiment results show that, the atomization and lean ignition limit of the three fuels share the same trends under normal temperature respectively, where the decreasing trend of *SMD* slows after fuel injection pressure reaches 0.5MPa and the expansion trend of lean ignition limit slows after combustor pressure drop reaches 2.0%. Atomization and ignition performance of the F-T fuel are poorer than that of aviation kerosene RP-3, which can be improved by mixing with each other. The atomization *SMD* empirical relationship was summarized by using the response surface methodology (RSM), and the effects of atomization and evaporation process on ignition performance were analyzed.

Key words: Fischer-Tropsch synthesis; Alternative fuel; Atomization; Response surface methodology; Lean ignition

^{*} 收稿日期: 2016-07-12; 修订日期: 2016-09-03。

基金项目: 国家自然科学基金 (51306010); 北京市自然科学基金 (3152020)。

作者简介: 高晓会, 男, 硕士生, 研究领域为航空替代燃料。E-mail: leather_999@163.com

1 引言

面对当今能源短缺和环境污染的问题,发展航空替代燃料(Alternative fuels)成为航空领域的重要研究课题。煤基费托(Fischer-Tropsch)燃料作为一种可行的来源,已经受到越来越多的重视。

煤基费托燃料的合成工艺越来越成熟,作为其中关键因素的高效催化剂已被广泛研究^[1~4],现在成熟的费托合成技术,已经可以避免加工过程中CO₂等污染气体的产生^[5,6],这对煤基费托燃料的广泛应用打下了基础。中国已完成基于钴基固定床合成油技术的千吨级工业侧线实验,将煤基费托燃料的应用进行了推广^[7]。

由于其无硫、无氮、基本不含芳香烃的特征,费托燃料作为很有潜力的清洁能源^[8],其基础理化性质和基础燃烧性质已被广泛研究,但由于燃料理化性质、燃烧性质和材料兼容性等方面的差异,目前费托燃料还需要与传统航空燃料混合使用。Sung等^[9]使用实验方法研究了费托燃料S-8和传统航空煤油JP-8,Jet-A自动点火性质的差异,发现三种燃料具有相同的两级点火性质和负温度系数等点火延迟性质,但是S-8的点火延迟时间要比JP-8和Jet-A短。Wang等^[10]全面对比了三种费托燃料S-8,Shell GTL, Sasol IPK和传统航空煤油Jet-A点火延迟时间的区别,发现由于其衍生十六烷值的不同,四种燃料在低温区和负温度系数区的点火延迟时间有明显不同,在高温区则差别不大。另外就其层流火焰传播速度、熄火性质等,都已有团队^[11]展开了研究。Naik等^[12]发展了两种费托燃料(Shell GTL和S-8)的代理燃料,在此基础上构建了详细化学反应机理,并在点火延迟时间、自燃温度、层流火焰传播速度、熄火应变率和NO_x排放等基础燃烧性质方面进行了验证。Thomas等^[13]研究了石蜡基费托燃料(SPK-FT)在模

型燃烧室中的燃烧性能,包括壁面温度、燃烧效率、出口温度分布和颗粒物排放,并与航空煤油JP-8+100以及二者50:50混合燃料进行了对比,发现费托燃料有着更低的壁面温度和更高的燃烧温度与出口温度,颗粒物排放和冒烟水平更低,对燃烧室的热冲击更小。

为了推动煤基费托合成航空替代燃料的基础研究和部件及整机验证,本文采用航空发动机单头部模型燃烧室对国产煤基费托燃料的雾化性能和点火性能开展实验研究,主要研究其理化性质和环境因素对雾化SMD和贫油点火边界的影响。

2 雾化实验

2.1 实验设计

燃料雾化颗粒度常用 Sauter 平均直径 SMD 表示,见式(1)。SMD同时考虑了液雾的总体积与总表面积,总体积反映了燃料质量,进而反映了燃料的发热量,总表面积则反映了液雾的蒸发速率,因此,SMD最能反映实际液雾的燃烧属性^[14]。SMD是评价航空燃料在燃烧室中燃烧性能的重要参数。

$$SMD = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (1)$$

雾化实验所采用的测试系统如图1所示,燃油雾化装置^[15]采用空心喷雾锥型离心喷嘴和内外双旋流器。其中,内旋流器为斜切孔形式,旋流数为0.91,外旋流器为径向叶片形式,旋流数为0.93,经过实验标定的总有效面积为200±0.9mm²。利用马尔文激光粒度测试仪测量旋流器下游点火器位置处的雾化SMD,该仪器测量误差在1%以内,极限测量尺寸为5.4μm,满足实验需求。实验工况为常温293.15K,旋流器前后的气流压力降分别为0,0.5,2kPa,供油压力以0.1MPa的间隔从0.1~1MPa均匀变化。

三种燃料在实验条件下(室温20℃)的基础理化

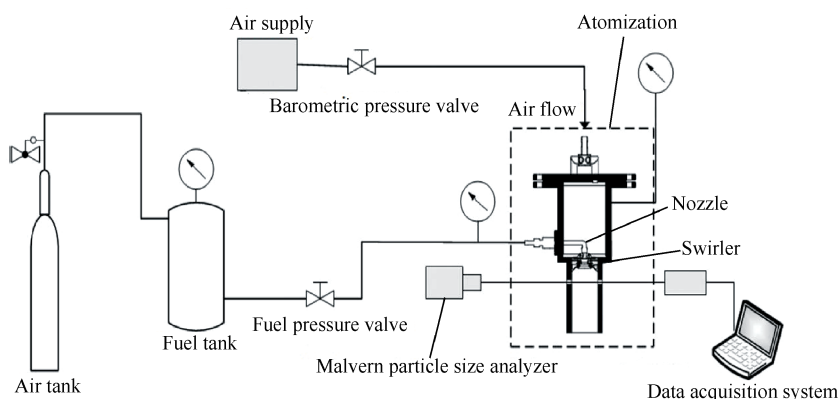


Fig. 1 Measurement system of atomization experiment

性质如表1所示,其中,混合燃料由煤基费托燃料和航空煤油RP-3以摩尔配比50:50配成。三种燃料的各项性质都有差异,煤基费托燃料的分子量和黏度最大,密度和表面张力最小,航空煤油RP-3则相反,二者的混合燃料居中。

2.2 实验结果

通过雾化实验,得到三种燃料的雾化SMD,数据整理后如图2所示,横坐标为供油压力 Δp_i ,纵坐标为雾化SMD,参变量为空气压力降 Δp_a 。从图3可以看出,在不同的空气压力降下,随着供油压力的增大,三种燃料的SMD都逐渐减小,并且减小的趋势逐渐放缓;煤基费托燃料的SMD最大,航空煤油RP-3的SMD最小。在相同的供油压力下,随着空气压力降的增大,三种燃料的雾化SMD逐渐减小;供油压力大于0.5MPa时,三种燃料的SMD大致都在30~50 μm ,且变化趋势平缓,表明此时雾化过程趋于极限,增大供油压力对于改善雾化效果的影响不大。与航空煤油RP-3相比,煤基费托燃料的雾化性能相对较差。

根据经典雾化理论^[14],影响燃料雾化SMD的基础理化性质包括燃料密度、黏度和表面张力,环境因素包括气流密度、气流和液滴的相对速度。由于本研究的雾化实验是在常压下进行,气流密度基本不变,可忽略其影响;气流与液滴的相对速度由气流速度和液滴速度决定,前者可由空气压力降表征,后者由供油压力表征。所以,影响雾化SMD的主要因素为燃料的密度、黏度和表面张力以及供油压力、空气压力降。当考虑气动力作用时,Leclercq等^[16]发现,气动力成为雾化过程的主导因素,而燃料理化性质对于喷雾的形成影响较小;Yule等^[17]研究成果也表明,相比于液体黏度,表面张力对雾化效果的影响基本可以忽略不计。综合以上分析,本研究对雾化SMD采用修正的幂次经验关系式^[18]为

$$SMD = C \rho_f^a \mu_f^b \Delta p_i^c \Delta p_a^d \tag{2}$$

式中 ρ_f , μ_f 分别为燃料的密度(kg/m^3)和黏度($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$), Δp_i 和 Δp_a 分别为供油压力(MPa)和空气压力降(Pa)。空气压力降为0时,液滴喷射进入静止大气,此时只有供油压力的影响而没有旋流的影

响,可设 Δp_a 的值为1Pa,使式(2)成立并得以拟合。使用DoE (Design of Experiment)方法对三种燃料的雾化SMD实验数据进行处理^[19],具体实现途径是使用软件Design Expert的响应面模型(Response surface methodology, RSM)^[20],选取对设计因子数量没有限制的Historical-Data设计类型。将式(2)两边同时取对数,得到式(3)所示的线性经验关系式,选

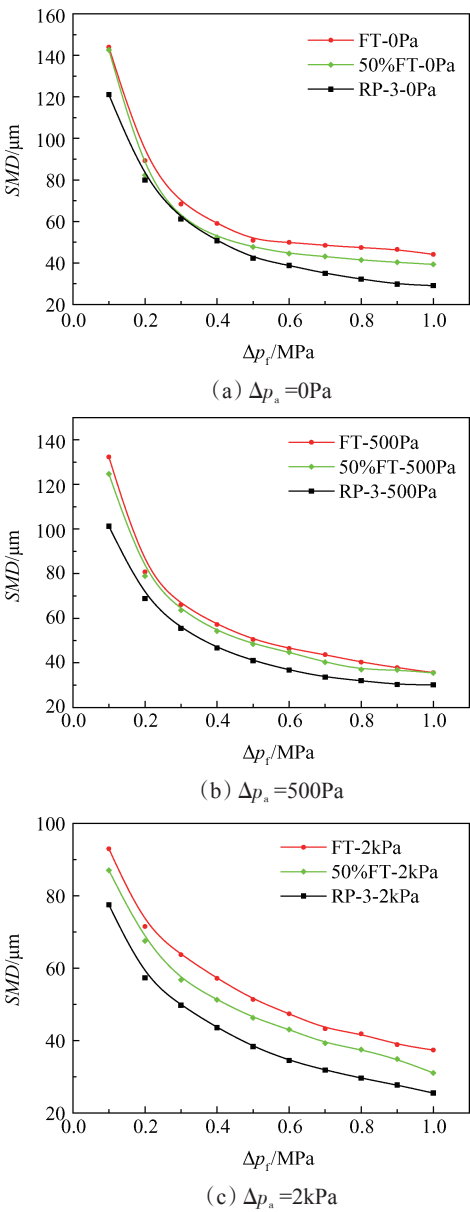


Fig. 2 Atomization SMD of the three fuels under different air pressure drops

Table 1 Comparison of physical and chemical properties of the three fuels

Fuel	Formula	<i>M</i>	$\rho_f/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\mu_f/(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	$\sigma_f/(\text{mN}/\text{m})$	<i>LHV</i> /(MJ/kg)
FT	C _{12.14} H _{26.18}	173.15	755.9	1.3025×10 ⁻³	24.67	43.68
50%FT:50%RP-3	C _{11.13} H _{23.18}	157.88	773.2	1.1794×10 ⁻³	24.89	43.28
RP-3	C _{10.35} H _{20.83}	145.59	790.0	1.0093×10 ⁻³	25.32	42.87

择 Historical-Data 中的线性模型,拟合得到关于 SMD 的经验关系式,据此反映 SMD 与燃料基础理化性质和环境因素的内在规律。

$$\lg SMD = \lg C + a \lg \rho_f + b \lg \sigma_f + c \lg \Delta p_f + d \lg \Delta p_a \quad (3)$$

拟合过程中发现,燃料密度的假设检验 P 值高达 0.3657,显著性很小,可将其忽略以提高拟合模型的精确度,从而式(2),(3)可简化为

$$SMD = C_1 \mu_f^{b_1} \Delta p_f^{c_1} \Delta p_a^{d_1} \quad (4)$$

$$\lg SMD = \lg C_1 + b_1 \lg \mu_f + c_1 \lg \Delta p_f + d_1 \lg \Delta p_a \quad (5)$$

最终拟合结果如下

$$SMD = 10^{-4.492} \mu_f^{1.001} \Delta p_f^{-0.514} \Delta p_a^{-0.017} \quad (6)$$

利用软件 Design Expert 的诊断工具分析拟合结果的准确性和影响因素的相关性。模型的拟合优度判定系数 $R^2=0.9655$, SMD 实验测量值和模型预测值之间的线性偏差如图 3 所示,可见预测值与实验结果有很高的吻合度,这证实了拟合得到的经验关系式能够准确地预测雾化 SMD 。

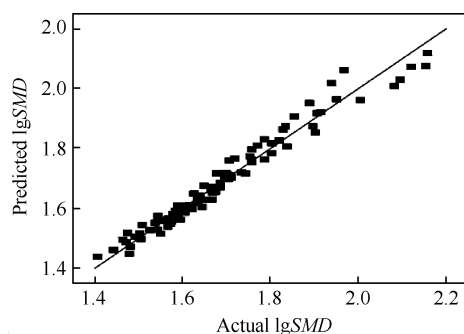


Fig. 3 Comparison of SMD between experimental results and the model predictions

图 4 为雾化 SMD 的相关性扰动图,可以定性地说明不同因素对 SMD 的影响。扰动图中直线的斜率表示 SMD 对相关因素的灵敏度^[21],斜率越大表明该因素对 SMD 的影响效果越大;正斜率表明增加该因素会增加 SMD 。图 4 显示最显著的影响因素是供油压力,供油压力增大会使雾化 SMD 大幅下降;燃料黏度的

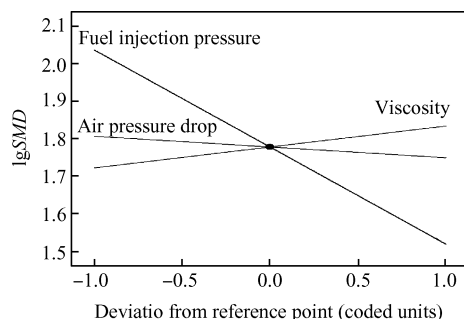


Fig. 4 Perturbation plots showing the effect of different factors on SMD

增加会使雾化 SMD 增加,而空气压力降的增加则会使雾化 SMD 减小。这些相关性结论与式(6)一致。

3 点火实验

3.1 实验设计

点火性能是衡量航空发动机燃烧室性能好坏的重要参数之一,对于煤基费托燃料应用于现有发动机,燃烧室点火性能是考核其适用性的重要指标。本研究在常温常压下,利用单头扇形燃烧室对煤基费托燃料和两种对比燃料进行了点火实验,具体指标为贫油点火当量比,即燃料能够成功点火的最小当量比,将不同工况下的贫油点火当量比用光滑曲线连结成贫油点火边界。

单头矩形燃烧室如图 5 所示,包括燃油离心喷嘴、双级旋流器和火焰筒等。其中,喷嘴和旋流器与雾化实验装置一致。

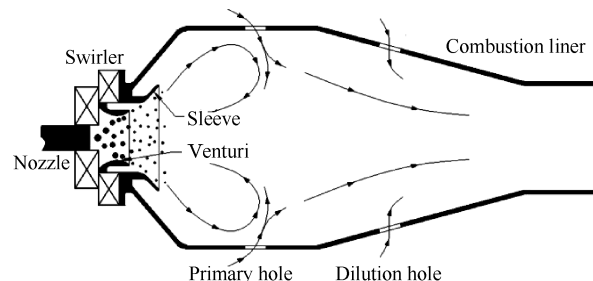


Fig. 5 Schematic of the single-module sector combustor

常压点火实验系统如图 6 所示。整个实验系统由气路、油路、实验段、前后测量段及排气段组成^[22]。实验段与测量段主要由模型燃烧室实验件、点火器、燃烧室后转接段、水冷套、点火嘴、喷嘴等部件组成。实验在常温常压条件下进行,燃烧室空气压力降从 0.5% ~ 4.5% 变化。

3.2 实验结果

通过点火实验,得到三种燃料常温常压下的贫油点火边界,实验结果整理后如图 7 所示,横坐标为燃烧室进出口压降,纵坐标为贫油点火当量比,其中 p_3^* 为燃烧室进口总压, p_4^* 为燃烧室出口总压。从图 7 可以看出,在燃烧室压降 0.5% ~ 4.5% 的范围内,随着燃烧室压降的增大,三种燃料的贫油点火当量比都逐渐减小,点火区域逐渐增大,点火性能改善。在燃烧室压降达到 2.0% 后,点火边界的扩展趋势逐渐放缓。

图 8 给出了三种燃料贫油点火边界上的供油压力变化,按照本研究得到的雾化 SMD 经验关系式(4),估算出贫油点火边界上的雾化 SMD ,如图 9 所示。燃烧室压降相同时,在贫油点火边界上煤基费

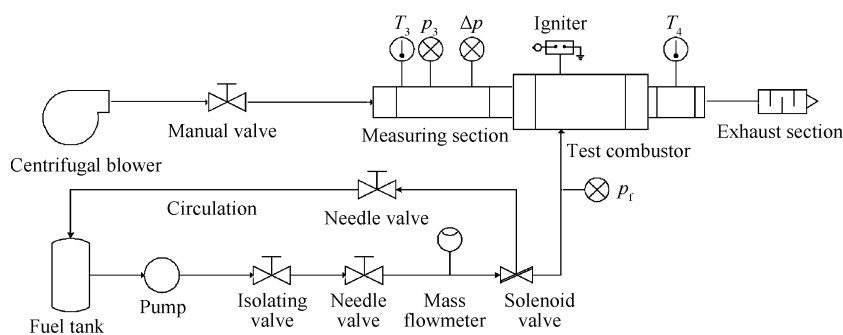


Fig. 6 Measurement system of ignition experiment

托燃料的供油压力高于航空煤油 RP-3, 但煤基费托燃料的雾化 SMD 相比航空煤油 RP-3 明显要大, 根据式(4)可知, 此时燃料黏度对雾化 SMD 的正相关作用比供油压力的负相关作用影响更大。

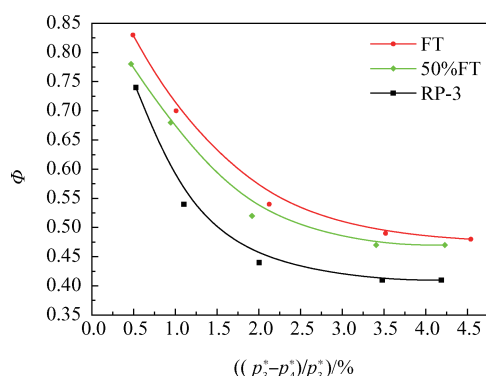


Fig. 7 Lean lightoff fuel-air ratio of the three fuels

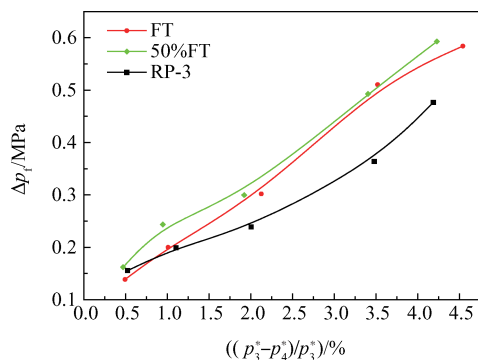
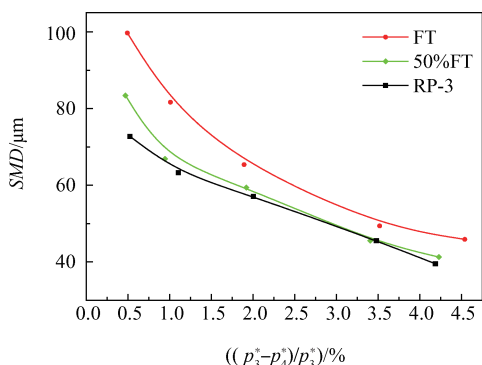


Fig. 8 Fuel injection pressures at lean ignition boundary

Fig. 9 Calculated SMD at lean ignition boundary

影响燃料点火性能的物理因素除了雾化过程, 还有燃料的蒸发过程, 考虑到三种燃料都是成分复杂的混合物, 而蒸馏曲线直接表征了燃料的蒸发速率, 测量其蒸馏曲线更为实用, 所以使用蒸馏曲线作为衡量燃料蒸发过程的指标。图 10 给出了三种燃料常压下蒸馏曲线的实验测试结果, 横坐标为燃料的蒸馏体积分数, 纵坐标为蒸馏温度。显然, 煤基费托燃料的蒸馏温度最高, 航空煤油 RP-3 的蒸馏温度最低, 混合燃料介于两者之间; 与航空煤油 RP-3 相比, 煤基费托燃料的蒸发速率更慢。

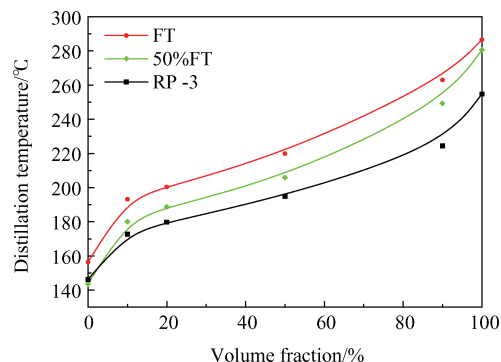


Fig. 10 Distillation curves of the three fuels

综合分析可知, 在同样的气动条件下, 煤基费托燃料雾化粒径较大, 蒸发速率较慢, 更难产生可燃蒸汽被点燃, 这导致煤基费托燃料的贫油点火边界在航空煤油 RP-3 之上, 点火性能较差。至于贫油点火过程中雾化粒径和蒸发速率的影响权重问题, 还需要对煤基费托燃料测定更精细的蒸发数据, 比如有效蒸发量, 以作进一步的研究分析。

4 结论

通过本文研究, 得到以下结论:

(1) 在空气压力降 $0 \sim 2 \text{ kPa}$, 供油压力 $0.1 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 的范围内, 三种燃料的雾化 SMD 变化趋势一致; 供油压力大于 0.5 MPa 后, 雾化 SMD 减小趋势变缓, 雾化过程趋近极限。

(2)拟合得到三种燃料理化性质范围内的雾化SMD关于燃料黏度、密度和空气压力降的经验关系式。

(3)在燃烧室压降为0.5%~4.5%范围内,三种燃料的贫油点火边界变化趋势一致,压降大于2.0%后,贫油点火边界扩展趋势变缓;与航空煤油RP-3相比,煤基费托燃料的黏度较大,其在贫油点火边界上的雾化SMD更大。

(4)与传统航空煤油RP-3相比,煤基费托燃料的雾化性能和蒸发性能较差,导致其点火性能也较差,通过相互掺混可以在一定程度上改善。

致谢:感谢天津大学和石油化工科学研究院对燃料理化性质的测试。

参考文献:

- [1] Zhou Z, Zhang Y, Tierney J W, et al. Hybrid Zirconia Catalysts for Conversion of Fischer-Tropsch Waxy Products to Transportation Fuels[J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 83(1-3): 67-80.
- [2] Yan P, Tao Z, Hao K, et al. Effect of Impregnation Methods on Nickel-Tungsten Catalysts and Its Performance on Hydrocracking Fischer-Tropsch Wax[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(6): 691-697.
- [3] Sarkari M, Fazlollahi F, Ajamein H, et al. Catalytic Performance of an Iron-Based Catalyst in Fischer-Tropsch Synthesis[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 127: 163-170.
- [4] Díaz J A, Akhavan H, Romero A, et al. Cobalt and Iron Supported on Carbon Nanofibers as Catalysts for Fischer-Tropsch Synthesis[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 128: 417-424.
- [5] Huffman G P. Incorporation of Catalytic Dehydrogenation into Fischer-Tropsch Synthesis of Liquid Fuels from Coal to Minimize Carbon Dioxide Emissions[J]. *Fuel*, 2011, 90(8): 2671-2676.
- [6] Huffman G P. Zero Emissions of CO₂ During the Production of Liquid Fuel from Coal and Natural Gas by Combining Fischer-Tropsch Synthesis with Catalytic Dehydrogenation[J]. *Fuel*, 2013, 109: 206-210.
- [7] 孙予罕, 陈建刚, 王俊刚, 等. 费托合成钴基催化剂的研究进展[J]. 催化学报, 2010, 31(8): 919-927.
- [8] Antonovski V, Rotavera B, Petersen E, et al. Combustion Measurements of Synthetic Fuels at Gas Turbine Conditions[C]. *Cincinnati: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2007.
- [9] Kumar K, Sung C. A Comparative Experimental Study of the Autoignition Characteristics of Alternative and Conventional Jet Fuel/Oxidizer Mixtures[J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 2853-2863.
- [10] Wang H, Oehlschlaeger M A. Autoignition Studies of Conventional and Fischer-Tropsch Jet Fuels[J]. *Fuel*, 2012, 98: 249-258.
- [11] Kumar K, Sung C, Hui X. Laminar Flame Speeds and Extinction Limits of Conventional and Alternative Jet Fuels[J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1004-1011.
- [12] Naik C V, Puduppakkam K V, Modak A, et al. Detailed Chemical Kinetic Mechanism for Surrogates of Alternative Jet Fuels[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(3): 434-445.
- [13] Thomas A E, Saxena N T, Shouse D T, et al. Heating and Efficiency Comparison of a Fischer-Tropsch (FT) Fuel, JP-8+100, and Blends in a Three-Cup Combustor Sector[J]. *Isrn Mechanical Engineering*, 2012, 2012: 1439-1447.
- [14] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [15] 霍伟业, 林宇震, 张弛, 等. 正癸烷作为航空煤油雾化过程代理燃料的研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 188-195.
- [16] Leclercq P, Aigner M. Impact of Alternative Fuels Physical Properties on Combustor Performance[C]. *USA: Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2009.
- [17] Yule A J, Chinn J J. The Internal Flow and Exit Conditions of Pressure Swirl Atomizers[J]. *Atomization and Sprays*, 2000, 10(2): 121-146.
- [18] Lefebvre A H, Ballal D R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions[M]. *Boca Raton: CRC Press*, 2010.
- [19] Chen L, Liu Z, Sun P, et al. Formulation of a Fuel Spray SMD Model at Atmospheric Pressure Using Design of Experiments (DoE)[J]. *Fuel*, 2015, 153: 355-360.
- [20] Sahu J N, Acharya J, Meikap B C. Response Surface Modeling and Optimization of Chromium (VI) Removal from Aqueous Solution Using Tamarind Wood Activated Carbon in Batch Process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2-3): 818-825.
- [21] Dou-Sheng Z, Wen L, Ya-Ping L, et al. Establishment and Optimization of an HPTLC Method for the Analysis of Gatifloxacin and Related Substances by Design of Experiment[J]. *JPC Journal of Planar Chromatography Modern TLC*, 2013, 26(3): 215-225.
- [22] 王延胜, 林宇震, 李林, 等. 中心分级燃烧室点火性能试验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(1): 98-104. (WANG Yan-sheng, LIN Yu-zhen, LI Lin, et al. Experimental Investigation on Ignition Performance of Internally-Staged Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(1): 98-104.)

(编辑: 朱立影)