

Physicochemical and Atomization Performance Study of Coal Based F-T Aviation Fuel

Xiaoyi Yang*, Jing Zhao, Guanyu Zhou, Ruoqiao Tan

School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing
Email: yangxiaoyi@buaa.edu.cn

Received: Aug. 21st, 2015; accepted: Sep. 21st, 2015; published: Sep. 24th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Coal based Fischer-Tropsch synthetic jet fuels have been investigated in its component characteristics, physicochemical properties and atomization performance in comparison with kerosene. Synthetic jet fuel mainly consists of alkane component with 99.04%, and less aromatic hydrocarbon components. In respect of physicochemical properties, the density of coal based Fischer-Tropsch synthetic aviation fuel is lower than the standard aviation kerosene, while the volatility and freezing point of FT fuel are better than that of kerosene. By comparing the spray angle, atomized droplet average diameter and droplet size distribution index, the results show that coal based Fischer-Tropsch synthetic aviation fuels are similar to aviation kerosene in spray angle. In addition, coal base Fischer-Tropsch synthetic aviation fuel appears smaller atomization droplet mean diameter (SMD) and uniform droplet size distribution, which indicates that FT fuels can produce low emission in combustion.

Keywords

Coal Based Fischer-Tropsch Synthetic Aviation Fuel, Physicochemical Properties, Atomization Performance, SMD

煤基费托航空燃料理化与雾化性能研究

杨晓奕, 赵晶, 周冠宇, 谭若樵

北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京
Email: yangxiaoyi@buaa.edu.cn

*通讯作者。

收稿日期：2015年8月21日；录用日期：2015年9月21日；发布日期：2015年9月24日

摘要

本文选取我国自主合成的煤基费托合成航空燃料，对其组分特性、理化性能、雾化性能进行了实验和理论分析研究。煤基费托合成航空燃料主要由链烷烃组分构成，其含量达到99.04%，不含芳香烃组分。理化性能方面，煤基费托合成航空燃料的密度低于标准航空煤油，但有更好的挥发性和低温性能。通过比较煤基费托与标准航空煤油雾化锥角、雾化液滴SMD和液滴尺寸分布指数N值三个表征雾化性能的参数，实验结果表明煤基费托合成航空燃料与标准航空煤油宏观雾化性能相近，但微观上，煤基费托合成航空燃料的雾化液滴SMD更小，且液滴尺寸分布更加均匀。

关键词

煤基费托合成航空燃料，理化特性，雾化性能，SMD

1. 引言

煤基航空替代燃料以煤炭资源为原料，在中国的应用将具有较大的市场。分析其原因，其一，目前中国石油对外依存度已超过 50%，这一趋势仍将持续增加，煤基航空替代燃料研发将降低我国对进口石油的依赖度。其二，对我国“富煤、少油”的国情，由于运输条件限制，大量煤炭无法外运。因此，开发煤制合成油技术，既能缓解石油供应，又可促进煤炭就地转化，提高经济效益。其三，煤基航空替代燃料的发展将有利于煤炭资源的集中使用和清洁化利用。

煤基航空燃料在国外得到了大力发展。早在 1999 年美国空军开展了大量煤基费托合成替代燃料研究工作[1]，直接使用原来机载、船载燃料系统，既可以作为主机燃料又可以作为辅机燃料，可作为船舶燃料又可以作为舰载机燃料，从而保持燃气轮机使用维护规范的连续性和有效性。南非 SASOL 燃料公司以煤炭为原料，采用费托工艺获得半合成喷气燃料(SSJF)与全合成喷气燃料(FSJF)，2002 年取得在商用飞机上使用认证[2]。其中半合成喷气燃料(SSJF)在航空上已有 10 年的应用经验。

煤基合成燃料拓宽了动力燃料来源的多元化[3]。费托(Fischer-Tropsch)合成是最具应用前景的航空替代燃料制备方法[4]。费托合成技术原料主要是煤制合成气或天然气，也可以是生物质气化的合成气。如果工艺条件得到合适控制，费托合成燃料与传统航空燃料不仅性能相似，而且组成中硫、氮含量少，可降低航空发动机污染排放[5]。但同时煤基合成燃料存在体积热值偏低，芳烃含量少，粘度高等应用问题[6]。鉴于此，为了推进煤基航空燃料在中国的应用，本研究采用中国内蒙古伊泰集团有限公司生产的煤基费托燃料为基本原料，研究煤基航空燃料的组成、理化及雾化性能与标准航空煤油的差异方面，为煤基费托合成燃料生产技术优化提供明确目标，另一方面为在实际发动机中应用奠定基础。

2. 实验方法

2.1. 样品

本文实验使用的煤基费托合成喷气燃料以中国内蒙古伊泰集团有限公司生产的煤基费托燃料为基础原料，使用的航空煤油为符合 RP-3 标准的燃油。

2.2. 理化及组成测试方法

样品组成分析采用 GC-MS(Agilent 7890/5975C)；GC/MS 分析的色谱条件：HP-5MS 色谱柱，载气为

高纯氦气, 流量 1 ml/min, 分流比为 80:1, 进样口温度 280℃, 接口温度 280℃, 柱温 50℃, 保持 5 min, 以 4℃/min 升温至 260℃, 保持 5 min。质谱条件: 离子源为 EI, 离子源温度 230℃, 四级杆温度 150℃。

理化性能中, 密度测量仪器型号为 SYA-1884A (符合 GB/T1884-2000 标准); 热值测量仪器为 HWR-15E 改进型(符合 GB/T 384-1981 标准); 闪点测量仪器为宾斯基-马丁闭口闪点试验仪(符合 ASTM D 323-08 标准); 烟点测量仪器为烟点灯(符合 ASTM D 1322-08 标准); 运动粘度测量仪器型号为 SYD-265H (符合 GB/T 265 标准); 表面张力测量仪器型号为 SFT-A1 (符合 ASTM D1331 标准); 电子天平仪器型号为 BS124S, 精度为 0.0001 g。

2.3. 雾化实验

2.3.1. 实验装备

燃油雾化实验台由燃油供给装置、调节装置、喷嘴及马尔文激光粒度测试装置构成。

雾化试验选择某加力燃烧室双油路离心式雾化喷嘴, 用该喷嘴的副油路进行雾化试验研究。该喷嘴副油路在 0.1 MPa 供油压差下的体积流量为 4.27 ml/s。

马尔文激光粒度测试仪由主机和计算机两部分组成: 主机包含激光光源和信号采集处理系统; 计算机完成数据处理及显示、打印测试结果; 马尔文激光粒度测试仪的接收端用焦距为 300 的透镜。

2.3.2. 实验测试方法

为深入了解燃料雾化性能, 对燃料喷雾锥角和沿轴向的 SMD 和 N 值进行测量。其中轴向测量位置如图 1 所示, 测量点的位置在雾化喷嘴中心轴上, 第一测量点距喷嘴轴向距离为 25 mm, 各测量点之间的轴向距离为 10 mm, 共 8 个测量点。由于喷雾炬在离开喷嘴后会有一定程度的收缩, 对喷雾锥角测试时选轴向长度为 $l = 45$ mm 处的喷雾炬宽度为基准进行测试。

2.3.3. 实验数据采集及分析

通过马尔文激光粒度测试仪得到测量点的粒径分布。液滴尺寸分布采用罗辛 - 拉姆勒(Rosin-Rammler)分布函数表征:

$$Q = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^N \right] \quad (1)$$

式中: Q 为累积分布, 即尺寸小于 D 的液滴体积占总液雾体积百分数; \bar{D} 为当 $Q = 0.632$ 时的液滴尺寸, 代表液雾细度; N 为液滴尺寸分布指数, 表明液滴尺寸分布均匀性。

液滴平均直径用索太尔平均直径(SMD)表示, 即在液体总质量相等条件下, 按照液滴总表面积不变原则求得平均直径。由于液滴总体积反映燃料质量, 总表面积反映液滴蒸发快慢, 因而索太尔平均直径能够间接反映真实液滴燃烧性能, 其表达式为:

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

式中 D_i 为液滴直径, n_i 为直径为 D_i 的液滴数目。

3. 结果与讨论

3.1. 组成与理化性能

煤基费托合成航空燃料与石油基航空煤油 RP-3 的组分特性与理化性能对比如表 1 所示。在组分组成

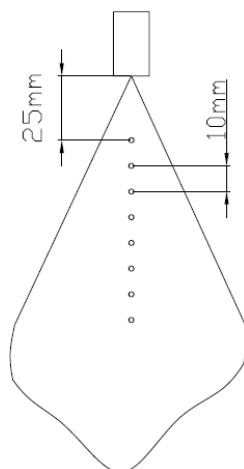


Figure 1. Microscopic atomization characteristic measurement of fuel
图 1. 燃料微观雾化特性测量位置示意图

Table 1. Components and physicochemical properties of aviation fuels and coal based aviation fuels
表 1. RP-3 与煤基 F-T 航空燃料的组成特性及理化性能

	RP-3	煤基F-T燃料	GB 6537-2006
化学组成			
链烷烃(%)	60.85	99.04	-
芳香烃(%)	4.62	0	<20
环烷烃(%)	32.35	0.18	-
烯烃(%)	2.18	0.03	<5
氢碳比(mol %)	1.95	2.14	-
物理性质			
密度(kg/m ³)	783.4	758.2	775~830
闪点(°C)	43	39	>38
冰点(°C)	-45.2	-47	<-47
表面张力(mN/m)	24.1	-	-
粘度(20°C, mm ² /s)	1.72	2.22	>1.25
热值(MJ/kg)	42.9	47.4	>42.8

方面, 相对于石油基航空煤油 RP-3 而言, 煤基费托合成航空燃料主要由链烷烃组分构成, 其含量达到 99.04%, 不含芳香烃组分, 不饱和烯烃组分含量仅为 0.03%。饱和链烷烃的组成特性决定了煤基费托合成航空燃料具有燃烧性能好、热安定性好、不易生炭等性质。但是由于不含有芳香烃组分, 其管道内输运特性会较石油基航空煤油有所降低。

燃料组分决定理化性能, 煤基费托合成航空燃料饱和链烷烃含量高, 因此其热值更高, 但是密度低, 为 758.2 kg/m³, 低于国标最低 775 kg/m³ 的要求, 低密度的特性会对 F-T 燃料的航程性能带来不利影响。此外, 煤基费托合成航空燃料的闪点和冰点均低于石油基航空煤油, 意味着煤基费托合成航空燃料拥有更好的点火性能和低温性能。煤基费托合成航空燃料的粘度高于石油基航空煤油, 将预示其燃油喷雾的性能及流动性会与航煤有所差异。

3.2. 雾化性能

3.2.1. 雾化锥角

航空煤油 RP3 基准燃料与煤基 F-T 合成喷气燃料在不同供油压差下的雾化锥角对比如图 2 所示：航空煤油 RP3 基准燃料的雾化锥角随供油压差的增大呈增大趋势。在供油压差小于 0.1 MPa 时其雾化锥角迅速增大到 76.3°，当供油压差大于 0.1 MPa 时其雾化锥角增大速度迅速减缓，在 0.45 MPa 时其雾化锥角达到 84.1°，当供油压差大于 0.45 MPa 时其雾化锥角趋于稳定，在 84°~87°之间。

煤基 F-T 合成喷气燃料的雾化锥角随供油压差的增大呈增大趋势。在供油压差小于 0.2 MPa 时其雾化锥角迅速增大到 81.5°，当供油压差大于 0.2 MPa 时其雾化锥角增大速度迅速减缓，在 0.35 MPa 时其雾化锥角达到 87.6°，当供油压差大于 0.35 MPa 时其雾化锥角趋于稳定，在 82°~87°之间。

根据锥角分析雾化形状，F-T 合成燃料与 RP-3 基准燃料在供油压差为 0.02 MPa 时，在喷嘴喷口附近有一个由旋转液膜形成的空腔，随后形成线状液滴向下不断发散，且线状液滴随距喷嘴喷口距离的增加而不断破碎减小。在供油压差为 0.05 MPa 时，由液膜形成的空腔消失，喷雾炬的外轮廓为切线与轴向夹角不断减小的曲线，并且液滴不断向周向扩散。在供油压差大于 0.1 MPa 后，喷雾炬的外轮廓逐渐变为一条直线。由于液滴与静止空气之间的相互作用，随着供油压差的增大喷雾炬周围形成的漂浮小液滴数目越来越多，在空气升力的作用下不断向喷嘴方向移动。如图 2 所示，航空煤油 RP-3 和煤基费托合成喷气燃料的雾化锥角随供油压差的变化趋势相似。当供油压差较小时，煤基费托合成喷气燃料的雾化锥角相对较小，随着供油压差的增大，两者雾化锥角相差很小。说明在低供油压差状态，费托合成燃料的雾化锥角小，其燃烧火焰相对 RP-3 燃料呈现较细而长的特点，对其在燃烧室内完全燃烧带来一定不利影响。但在高供油压差下，两种燃料将具有相似的火焰形状，有利于 F-T 燃料适应现有航空发动机燃烧室。

3.2.2. 雾化平均粒径 SMD

雾化性能的主要由燃料的雾化细度来衡量，雾化细度的评价指标中应用最广泛的是索太尔平均直径 (SMD)。在压力雾化条件下燃料的雾化液滴 SMD 主要影响因素有燃料理化特性、喷射环境物理特性、液体喷射压力和雾化喷嘴。燃料理化特性中对燃料雾化液滴 SMD 影响因素主要有粘度、表面张力和密度，燃料表面张力和粘度对其雾化液滴 SMD 影响主要在于初次雾化阶段，并且粘度对燃料雾化液滴 SMD 影

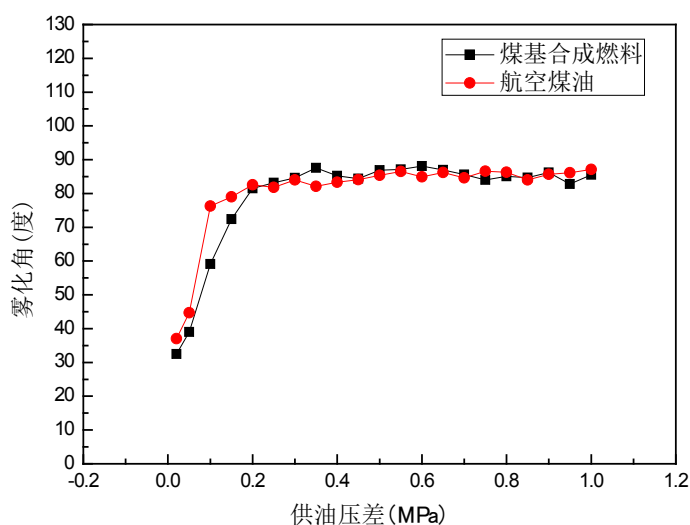


Figure 2. Comparison of spray angles under different oil pressures
图 2. 不同供油压差下的雾化锥角对比

响较大,燃料表面张力和密度对其雾化液滴 SMD 影响主要在二次雾化阶段。在本试验中,燃料喷射环境物理特性和雾化喷嘴均相同,因而燃料雾化液滴 SMD 的主要影响因素是燃料理化特性和供油压差。煤基费托合成喷气燃料与航空煤油 RP-3 的表面张力和粘度相差很小,但煤基费托合成喷气燃料的密度相对较低,因而燃料理化特性对燃料雾化液滴 SMD 的影响主要在二次雾化阶段。

RP3 基准燃料在供油压差小于 0.1 MPa 时,其 SMD 值随供油压差的变化很大,在 0.1 MPa 到 0.7 MPa 之间 RP3 基准燃料的 SMD 减小速度变慢,但一直减小,当供油压差大于 0.7 MPa 时,RP3 基准燃料的 SMD 值慢慢趋于稳定。在供油压差小于 0.7 MPa 时,随着距喷嘴出口距离的增大 RP3 基准燃料的 SMD 值呈减小趋势,但当供油压差大于 0.7 MPa 时,除距喷嘴出口 25 mm 测试点外,RP3 基准燃料的 SMD 值随着距喷嘴出口距离的增大基本没有变化,稳定在 30 μm 左右。

煤基 F-T 合成喷气燃料在供油压差小于 0.1 MPa 时,其 SMD 值随供油压差的变化很大,在 0.1 MPa 到 0.7 MPa 之间煤基 F-T 合成喷气燃料的 SMD 减小速度变慢,但一直减小,当供油压差大于 0.7 MPa 时,煤基 F-T 合成喷气燃料的 SMD 值慢慢趋于稳定。在供油压差小于 0.7 MPa 时,随着距喷嘴出口距离的增大煤基 F-T 合成喷气燃料的 SMD 值呈减小趋势,但当供油压差大于 0.7 MPa 时,除距喷嘴出口 25 mm~45 mm 处的测试点外,煤基 F-T 合成喷气燃料的 SMD 值随着距喷嘴出口距离的增大基本没有变化,稳定在 28.5 μm 左右,如图 3 所示。

RP3 基准燃料和合成燃料的 SMD 随供油压差的变化趋势相似,虽然 SMD 大小相差不大,但 F-T 合成燃料在低供油压差情况下在各个测试点有相对较好的 SMD 特性。随着供油压差的增大,在各个测试点 RP3 基准燃料和合成燃料的 SMD 差距逐渐减小。较小的 SMD 分布,预示 F-T 燃料在航空发动机燃烧室中的燃烧过程将更完全,与现役航空燃料 RP-3 相比具有更小的生成烟粒的可能性。

3.2.3. 液滴尺寸分布指数

如图 4 所示,RP3 基准燃料的液滴尺寸分布指数随着供油压差的加大呈现先减小后增大的趋势。在供油压差小于 0.1 MPa 时随着供油压差的加大呈减小趋势,且距喷嘴出口越近,其减小的值越大,然后在不同测试点趋于相近的恒定值。在供油压差超过 0.55 MPa 时,距喷嘴出口 95 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差超过 0.6 MPa 时,距喷嘴出口 85 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差超过 0.7 MPa 时距喷嘴出口 35 mm~75 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差超过 0.75 MPa 时距喷嘴出口 25 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差为 0.85 MPa 时各个测试点的液体尺寸分布指数均超过 7,表现出了良好的雾化液滴分布效果。

F-T 合成喷气燃料的液滴尺寸分布指数随着供油压差的加大呈先减小后增大的趋势。在供油压差小于 0.1 MPa 时随着供油压差的加大呈减小趋势,且距喷嘴出口越远,其减小的值越大,然后在不同测试点趋于相近的恒定值。在供油压差超过 0.6 MPa 时,距喷嘴出口 55 mm~95 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差超过 0.7 MPa 时,距喷嘴出口 25 mm~45 mm 处的液滴尺寸分布指数开始迅速增大。在供油压差为 0.85 MPa 时各个测试点的液体尺寸分布指数达到 10 左右,表现出了良好的雾化液滴分布效果。

在不同的测试点合成燃料和 RP3 基准燃料的液滴分布指数 N 值随供油压差的变化趋势基本相同,均呈先减小后增大的趋势。在不同的测试点合成燃料和 RP3 基准燃料的液滴分布指数 N 值在小于 0.55 MPa 供油压差条件下差别很小,当供油压差大于 0.55 MPa 后,在距喷嘴出口近的测试点合成燃料的 N 值相对于 RP3 基准燃料较大,在距喷嘴出口远的测试点合成燃料的 N 值相对于 RP3 基准燃料较小。总体来讲,F-T 合成燃料的液滴分布相对于 RP3 基准燃料更均匀,说明其在燃烧室中燃烧时间更短,更有利于降低发生积碳的可能性。

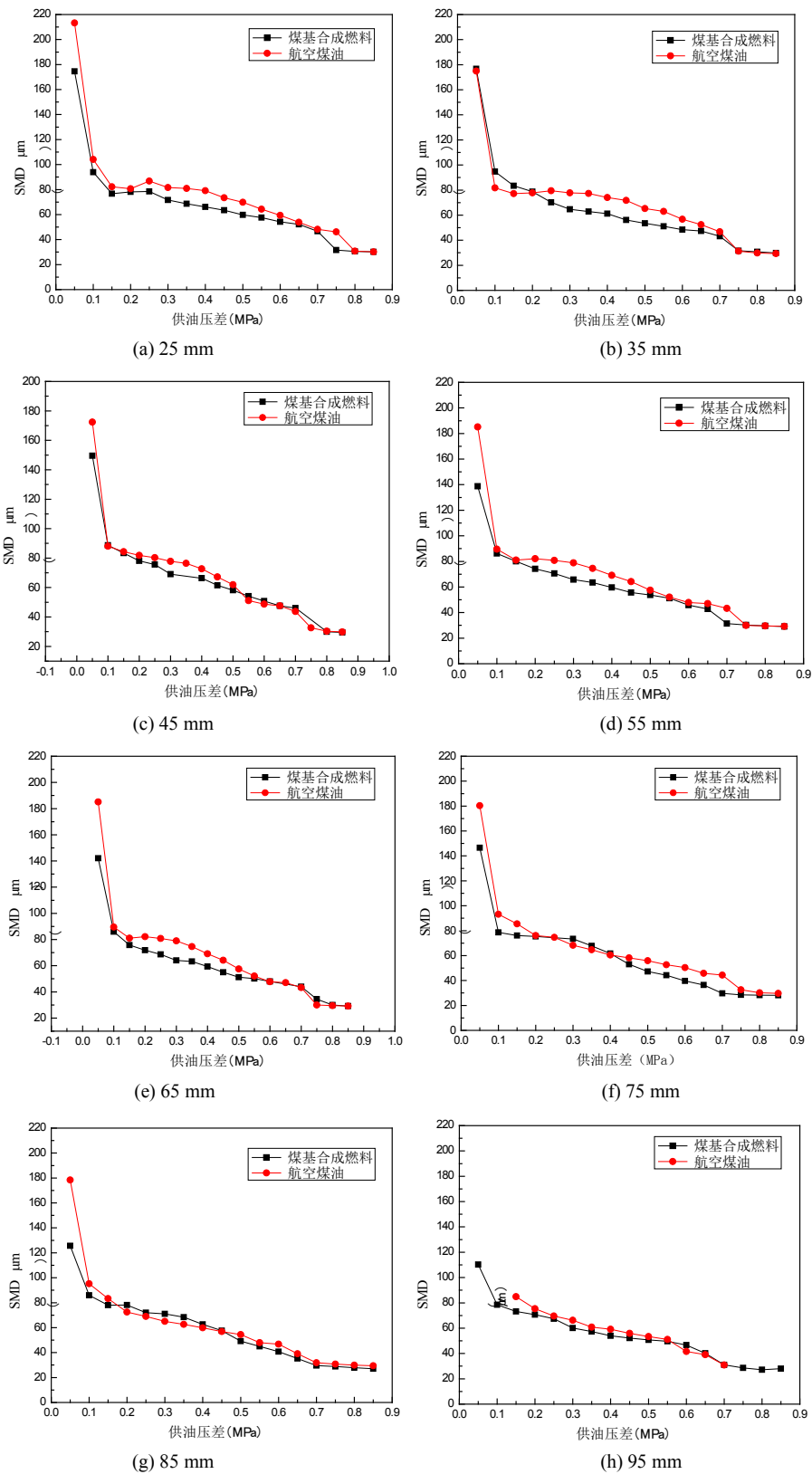


Figure 3. Compare of average particle size (SMD) of fuel under different oil pressures
 图 3. 燃料在不同供油压差下的平均粒径(SMD)对比

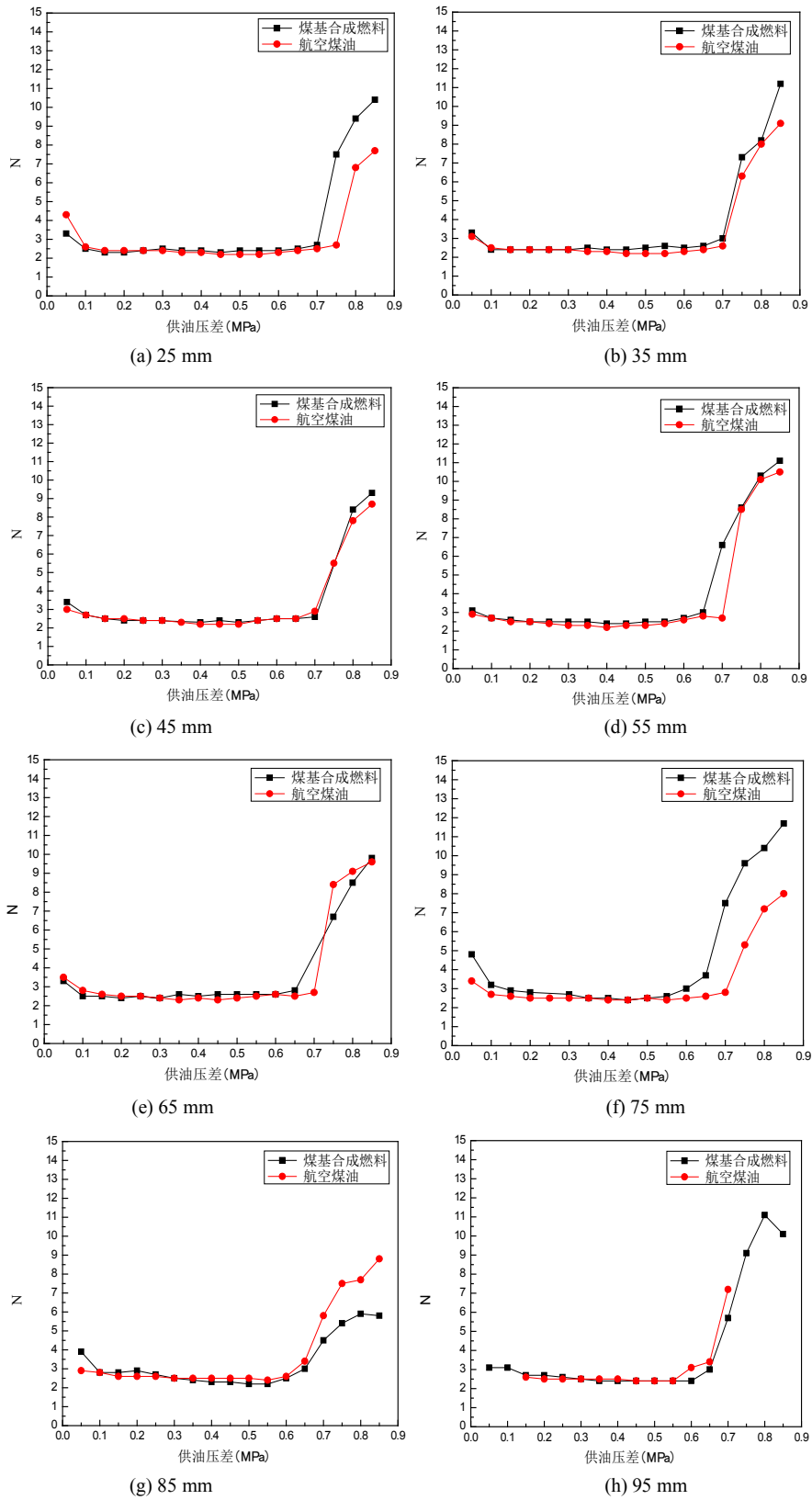


Figure 4. Compare of droplet distribution index of fuel under different oil pressures
 图 4. 燃料在不同供油压差下的液滴分布指数对比

4. 结论

煤基费托合成航空燃料主要由链烷烃组分构成, 其含量达到 99.04%, 不含芳香烃组分。理化性能方面, 煤基费托合成航空燃料的密度低于标准航空煤油, 但有更好的挥发性和低温性能。

在宏观雾化性能方面, 煤基费托合成喷气燃料和航空煤油 RP-3 的雾化锥角随供油压差的变化趋势相似。当供油压差较小时, 煤基费托合成喷气燃料的雾化锥角相对较小, 随着供油压差的增大, 两者雾化锥角相差减小。

在微观雾化性能方面, 煤基费托合成喷气燃料和航空煤油 RP-3 的雾化液滴 SMD 和液滴尺寸分布指数 N 随供油压差的变化趋势基本相同, 但煤基费托合成喷气燃料在相同条件下有更好的雾化性能。在低供油压差下, 煤基费托合成喷气燃料的雾化液滴 SMD 相对航空煤油 RP-3 较小, 且随着距喷嘴喷口距离的增大差距越来越小。在高供油压差下当距喷嘴喷口距离大于 65 mm 时, 煤基费托合成喷气燃料的雾化液滴 SMD 相对较小, 这种差距主要由两种燃料的密度不同引起。在低供油压差下, 在距喷嘴喷口近时煤基费托合成喷气燃料的液滴尺寸分布更均匀, 距喷嘴远时航空煤油 RP-3 的液滴尺寸分布更均匀。在高供油压差下, 煤基费托合成喷气燃料和航空煤油 RP-3 的液滴尺寸分布指数 N 在各个测试点的值震荡很大, 煤基费托合成喷气燃料的液滴尺寸分布指数 N 总体相对较大。

煤基费托合成喷气燃料与航空煤油 RP-3 的雾化特性相似, 在应用过程中不会对燃油的空间分布有太大的影响, 并且可以使燃烧室在低工况下有更好的雾化燃烧性能, 在高工况下更易完全燃烧, 使燃烧室温度分布更加均匀。

基金项目

感谢国家国际科技合作专项项目对本工作的支持(S2013GR0432)。

参考文献 (References)

- [1] Caroline, E.B. and Harold, H.S. (2000) Direct liquefaction for production of high yields of feedstocks for specialty chemicals or thermally stable jet fuels. *Fuel Processing Technology*, **64**, 57-72.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00077-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00077-1)
- [2] Rina, V.D.W., Mariam, A., Piet, D.C., et al. (2011) Comprehensive two-dimensional gas chromatography for the analysis of synthetic and crude-derived jet fuels. *Journal of Chromatography A*, **1218**, 4478-4486.
- [3] Clifford, A.M. and Petrus, N.J.R. (2009) Properties, characteristics, and combustion performance of Sasol fully synthetic jet fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **131**, 19-36.
- [4] 陶志平 (2011) 替代喷气燃料的进展及在我国发展的建议. *石油炼制与化工*, **7**, 92-96.
- [5] 薛艳, 王树雷, 刘婕 (2010) 煤直接液化制取喷气燃料原料油的组成分析. *石油学报*, **S1**, 264-267.
- [6] 张翠君, 陶志平, 刘保民 (2009) 喷气燃料组成对润滑性影响的实验研究. *石油炼制与化工*, **8**, 68-70.