

煤基喷气燃料在地面单管燃烧室内 燃烧和排放特性研究

杨文^{1,2}, 张冬梅³, 曹文杰³, 吴秀章¹, 王树雷³

(1. 中国神华煤制油化工有限公司, 北京 100011;

2. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249;

3. 北京航空油料技术开发中心, 北京 100076)

摘 要: 为研究煤基喷气燃料的燃烧和排放特性,通过改造的单管燃烧室评估了煤基喷气燃料和石油基RP-3喷气燃料的燃烧和排放特性差异. 试验结果表明:煤基喷气燃料具有更加优异的贫油点火和贫油熄火性能,两种喷气燃料的燃烧和排放特性随燃油流量和燃烧室出口温度的改变呈现出一致的变化趋势,在相同质量流量下,煤基喷气燃料的燃烧和排放性能要低于RP-3,在相同燃烧室出口温度时,煤基喷气燃料燃烧时的壁温要低于RP-3.

关 键 词: 煤基喷气燃料; RP-3 喷气燃料; 单管燃烧室; 燃烧特性; 排放特性

中图分类号: V313

文献标志码: A

Studies on combustion and emission characteristics of coal-based jet fuel in ground individual can combustor

YANG Wen^{1,2}, ZHANG Dong-mei³, CAO Wen-jie³,
WU Xiu-zhang¹, WANG Shu-lei³

(1. China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing,

China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Beijing Research Institute of Aviation Oil, Beijing 100076, China)

Abstract: By the improved individual can combustor, the differences of the combustion and emission characteristics between coal-based jet fuel and petroleum-based RP-3 jet fuel were evaluated. The results showed that the coal-based jet fuel had better lean ignition and lean blowout performances; in addition, the combustion and emission characteristics of these two jet fuels exhibited the same trends when the fuel flow or exit temperature changed. However, the combustion and emission characteristics of the coal-based jet fuel were slightly lower than those of the RP-3 at the same fuel flow, furthermore, at the same exit temperature, the wall temperature of the coal-based jet fuel was lower than that of the RP-3.

Key words: coal-based jet fuel; RP-3 jet fuel; individual can combustor;
combustion characteristic; emission characteristic

喷气燃料是航空飞机专用燃料.近年来,喷气燃料的种类日益增多,在传统的石油基喷气燃料基础上,通过改进生产工艺、改变添加剂等发展了多种新的石油基喷气燃料.此外,非石油基喷气燃料,比如生物质喷气燃料^[1-3]、F-T合成喷气燃料^[4]和煤基喷气燃料等也已经陆续被研制出来^[5].在这些非石油基喷气燃料中,煤基喷气燃料由于原料储量丰富、密度高、热安定性优良而被认为是未来喷气式飞机的首选燃料^[5-6].神华煤直接液化示范装置是世界首套百万吨级煤直接液化装置.从2011年开始商业化稳定运行到现在,该装置不但生产出了优质的煤基柴油和石脑油,而且生产出了煤基喷气燃料^[7].

任何一种新型喷气燃料要取代传统燃料,必须能够适用于现行的相关装置,只有这样新型喷气燃料取代当前的燃料才是经济可行的.新型喷气燃料在投入正式应用之前要进行多项性能检测,即进行测试认证.测试认证包括最初的理化性能测试、烃类组成分析,中间的台架试验和发动机试验,最后的飞机试飞试验.从台架试验开始,都是对喷气燃料使用性能的测试,而燃烧和排放特性是喷气燃料重要的使用性能之一.对于喷气燃料的燃烧和排放特性,国内外的学者进行了深入研究.这些研究分为理论研究和试验研究两方面.在理论研究方面,一般使用组分简单明确的替代燃料来代表喷气燃料.例如,肖保国等将79%的正十烷、13%的三甲基环己烷、8%的己基苯组成RP-3的替代燃料^[8],曾文等使用的替代燃料是由正癸烷、甲苯和丙基环己烷按照体积分数为0.65,0.10,0.25组成^[9].在国际上,不同学者对于喷气燃料Jet-A和JP-8的燃烧机理研究分别使用了不同的替代燃料^[10-12].有些新型非石油基喷气燃料在烃类组成方面与传统石油基喷气燃料有显著不同^[5,13],因此,基于石油基喷气燃料建立的替代燃料模型就不能完全适用于新型喷气燃料.在试验研究方面,为评估新型喷气燃料在真实航空发动机上的燃烧和排放,科研人员要通过真实航空发动机在地面进行测试.比如,Schobert课题组分别使用高压燃气涡轮发动机和T63涡轮发动机,研究对比了石油基喷气燃料JP-8和煤基喷气燃料JP-900的燃烧和排放特性^[13].由于使用的是真实航空发动机,因此试验设备庞大、试验耗费巨大、试验周期长,所以使用真实航空发动机对新型喷气燃料进行燃烧和排放特性评估难度较大.多年以来,根据真实航空发动机燃烧室的参

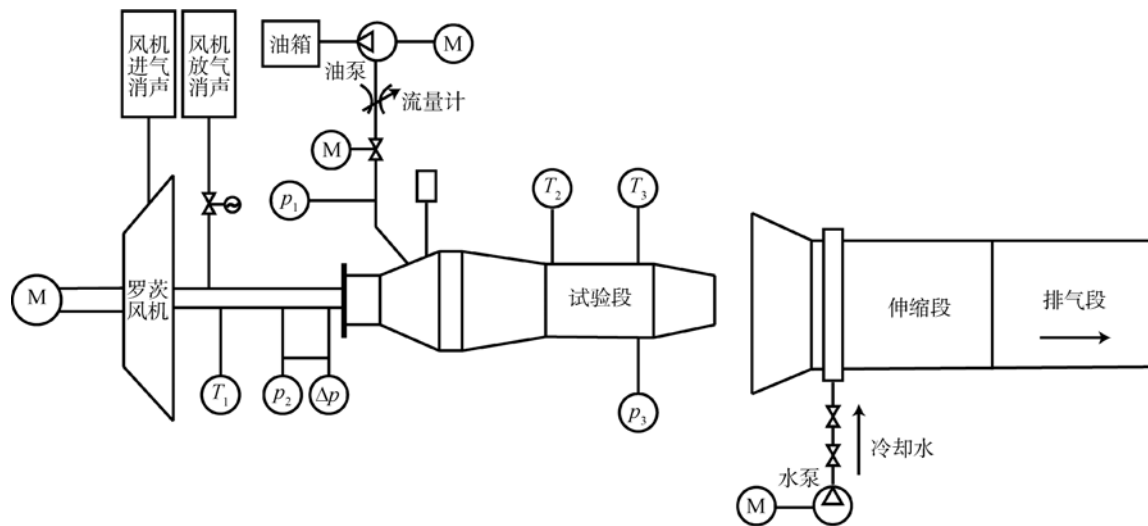
数,研究人员一直不断地发展尺寸小、耗费少的新型试验用燃烧室,从而降低喷气燃料的试验费用并且提升测试数据的质量.新型试验用燃烧室中比较有代表性的有圆筒喷雾燃烧室^[14]、小型超声速燃烧室^[15]、热循环燃烧室^[16]等.这些试验用燃烧室具有设备尺寸小、变量可控性强、试验观察和数据记录方便的优点.

在试验用燃烧室中,火焰筒和单管燃烧室在航空工业中已经有多年的研究和应用^[17-19].它们不但在一定空气流量范围内可以进行稳定燃烧,而且是结构简单、使用方便的试验装置.为研究喷气燃料的燃烧和排放特性,北京航空油料技术开发中心以涡喷6发动机火焰筒为原型设计并建造了一套单管燃烧室试验装置.在本文中,我们对这套试验装置进行了改造,进一步完善了试验方法.通过这个改进的单管燃烧室试验装置,我们研究并对比了神华生产的煤基喷气燃料和RP-3喷气燃料的燃烧和排放特性.

1 试验装置和试验方法

1.1 单管燃烧室

试验用单管燃烧室(装置结果简图如图1所示)是由北京航空油料技术开发中心和中航工业606所共同设计并搭建的试验装置.该单管燃烧室的主要性能指标如表1所示,主要尺寸如下:喷口进口直径为170 mm,试验段长度为220 mm,出口直径为110 mm.除了单管燃烧室,整个试验装置还包括进气系统、排气系统、冷却系统、燃油系统、电气控制系统、数据采集系统等.试验中,空气由罗茨鼓风机抽入进气管道,空气流量由电动阀门调节.燃油系统可以计量和调节燃料流量.试验中,燃油泵将喷气燃料输送到燃油喷嘴,然后通过高压喷射雾化进入燃烧室.电气控制可以对空气流量、燃油流量进行实时调控.数据采集系统包括温度传感器(K型热电偶,精度为 $\pm 1\%$ 测量值)、压力传感器(测量范围0~120 kPa,精度为 $\pm 0.5\%$ 测量值)和数据采集传输电缆组成,每隔0.5 s记录一组数据.如图1中所示,燃烧室平均壁温测是由15个均匀分布的热电偶进行测量,最后的数据取15个测量点的平均值.对于燃烧室出口平均温度,是由均匀分布在试验段末端的15个热电偶进行测量,最后的测量数据取15个测量点的平均值.



M 阀门; p_1 燃油压力; p_2 进气总压; Δp 进气总静压差; p_3 燃烧室出口压力;
 T_1 进气温度; T_2 燃烧室平均壁温(15个温度测量点); T_3 燃烧室出口平均温度(15个温度测量点)

图1 单管燃烧室试验装置简图

Fig. 1 Experimental setup of individual can combustor

表1 单管燃烧室主要性能指标

Table 1 Main performance parameters of individual can combustor

性能指标	数值
空气流量/(g/s)	0~700
进口空气温度	与大气温度相同
燃油流量/(g/s)	0~12
燃油温度	与室温相同
燃油压力/MPa	0~3
燃烧室出口温度/℃	≤ 820

表2 气体分析仪主要性能指标

Table 2 Main performance parameters of gas analyzer

性能指标	数值	精度/%
O ₂ 体积分数/%	0.01	± 0.2
CO ₂ 体积分数/%	0.1	± 3
CO 质量分数/%	0.0001	± 3
SO ₂ 质量分数/%	0.0001	± 3
NO 质量分数/%	0.0001	± 3
NO ₂ 质量分数/%	0.0001	± 3
温度/℃	0.1	± 0.4

1.2 尾气测量设备和方法

尾气测量使用的是气体组分分析仪. 该分析仪可以用于连续测量喷气燃料燃烧性能评定装置喷管尾流中的 O₂ 体积分数、CO₂ 体积分数以及 CO, NO, NO₂, SO₂ 等质量分数以及尾气温度. 相关测量指标如表 2 所示.

试验过程中, 将探针垂直插入到单管燃烧室试验段的末端(图 1 中 T_3 的测量位置), 并将探针的探头固定在试验段末端的中心位置. 燃烧尾气通过探头上的小孔进入气体分析仪.

1.3 试验用喷气燃料

试验用 RP-3 喷气燃料由加氢裂化工艺生产, 其理化性能满足国标 GB6537-2006 要求. 试验用煤基喷气燃料由神华煤直接液化装置生产. 两种喷气燃料的主要理化性能指标如表 3 所示.

从表 3 可以看到, 煤基喷气燃料完全满足国标 GB6537-2006 要求. 此外, 北京航空油料技术开发中心还采用 SH/T 0606-2005 中间馏分烃类组成测定法(质谱法)分析了煤基喷气燃料的烃类组成(分析结果如表 4 所示).

1.4 试验方案

试验方案为: ①将空气流量固定, 然后缓慢提升燃油流量并启动点火按钮, 测量贫油点火时的燃油流量和油气比; ②分别测量燃油流量在 5, 6, 7, 8, 9 g/s 时的燃烧和排放特性参数; ③测量燃烧室出口平均温度分别为 400, 500, 600, 700, 800 ℃ 时的燃烧室平均壁温; ④最后缓慢减少燃油流量, 寻找贫油熄火时的燃油流量和油气比; ⑤试验顺序依次为 RP-3 喷气燃料、混合燃料(由 RP-3 喷气燃料和煤基喷气燃料按照体积比 1:1 混合而

成)、煤基喷气燃料. 为保证测量数据的置信度,每种喷气燃料都至少进行 3 次试验,然后取 3 次测量数据的平均值. 此外,计算 3 次测量的平均值与单次测量的数值之间的偏差,如果单次偏差超过平均值的 5%,则重新试验,直到 3 次测量的偏差在 5% 以内.

表 3 试验用煤基喷气燃料和 RP-3 喷气燃料理化性能指标

Table 3 Properties of coal-based jet fuel and RP-3 jet fuel

理化性能指标	数值	测试结果	
		RP-3	煤基
酸值/(mg/g)	≤0.015	0.007	0.0035
硫质量分数/%	≤0.2	0.009	0.0004
芳烃体积分数/%	≤20	9.4	2.2
流程(初馏点)/℃	实测	146.0	155
10%	≤205	163	167
20%	实测	168	172
50%	≤232	180	185
90%	实测	207	207
终馏点	≤300	225	229
残留量体积分数/%	≤1.5	1.0	0.9
损失量体积分数/%	≤1.5	1.0	0.5
闪点/℃	≥38	44	44
密度/(kg/m ³)	775~830	780	828
黏度/(mm ² /s)	≥1.25	1.65	1.94
冰点/℃	≤-47	-55	-70
净热值/(MJ/kg)	≥42.8	43.5	42.9
烟点/mm	≥25.0	27.8	26.4
热安定性,压力降/kPa	≤3.3	0.06	0
管壁评级	≤3	1	0

表 4 试验用煤基喷气燃料烃类组成

Table 4 Hydrocarbon type of coal-based jet fuel

烃类	体积分数/%
链烷烃	9.9
总环烷烃	87.9
总饱和烃	97.8
总芳烃	2.2

2 结果与讨论

2.1 贫油点火与贫油熄火

对于航空发动机,在大机动飞行、空中慢车等工况下,喷气燃料贫油点火和熄火性能不好会导致空中停车,产生危险. 因此贫油点火和贫油熄火时判断喷气燃料燃烧特性的重要指标. 在本文的试验中,待空气流量稳定后开启燃油系统、提升燃油流量,然后接通点火系统进行点火. 如果在点火按钮按下 10 s 之内还不能点火,即认为点火不成功,继续提升燃油流量直到点火成功. 点火成功之后开始后续的试验测量. 等相关测量完成之后,通过减油法来测量贫油熄火,即缓慢减少燃油流量直到燃烧室熄火,此时的油气比即为贫油熄火油气比.

试验测量得到的贫油点火和贫油熄火时的油气比如表 5 所示. 从试验结果可以看到,煤基喷气燃料的贫油点火和贫油熄火的油气比要略低于 RP-3 喷气燃料. 此外,与 RP-3 喷气燃料相比,煤基喷气燃料与 RP-3 喷气燃料混合之后的贫油点火和贫油熄火的油气比都出现了下降的趋势(贫油点火油气比从 0.005 98 下降到 0.005 55,贫油熄火油气比从 0.002 89 下降到 0.002 83).

喷气燃料的贫油点火和贫油熄火与诸多因素相关,比如燃烧室结构、空气温度、燃油油滴雾化特性等. 在本文的研究中,3 种喷气燃料是在同一个单管燃烧室进行试验,所以燃烧室结构对贫油点火和熄火的影响是相同的. 另外,试验是在室温下进行的,所以空气温度基本保持不变. 因此,3 种喷气燃料在贫油点火和熄火上的差别主要来自于燃料本身的油滴雾化特性差异. 燃料的雾化性能与其密度、黏度、表面张力等理化特性相关. 从表 3 可以看到,煤基喷气燃料的密度和黏度都要大于 RP-3 喷气燃料. 根据以往对喷气燃料雾化性能的研究^[20-22],密度和黏度较大的燃料的雾化性能要差一些. 但是,煤基喷气燃料的雾化性能却要比 RP-3 略强一些. 这个主要的原因可能在于表面张力的差别. 煤基喷气燃料主要组成是环烷烃,其极性要比链烷烃小,因此,煤基喷气燃料的表面张力就要小于 RP-3. 所以煤基喷气燃料虽然在密度和黏度方面不利于雾化,但是其烃类组成的特点不但弥补了这一劣势,而且使得雾化性能更优异,从而使得其在贫油点火和熄火性能方面要略优于 RP-3.

表5 3种喷气燃料贫油点火、贫油熄火油气比

Table 5 Lean ignition and lean blowout fuel air ratios of three jet fuels

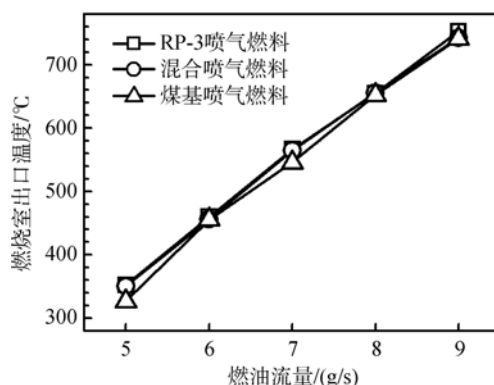
燃料种类	贫油点火油气比	贫油熄火油气比
RP-3	0.005 98	0.002 89
混合燃料	0.005 55	0.002 83
煤基	0.005 05	0.002 66

2.2 燃烧和排放特性随燃油流量的变化

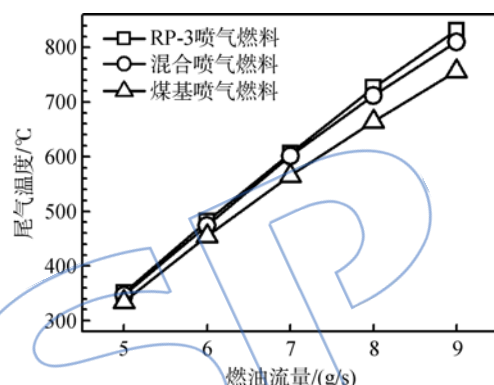
点火成功之后,将燃油流量提升,测量在固定燃油流量点稳定燃烧时的燃烧和排放特性数据.在固定燃油流量点为 5, 6, 7, 8, 9 g/s 时的燃烧室出口平均温度、尾气温度的测量结果如图 2 所示.在每个固定测量点都将燃油流量稳定 1 min,在图 2(a)中所示的燃烧室出口温度是 15 个均匀分布的温度测量点在这 1 min 之内的平均值.从图中可以看到,相比于 RP-3 喷气燃料,在相同燃油流量条件下,煤基喷气燃料燃烧时的燃烧室出口平均温度略低.混合喷气燃料燃烧时的燃烧室出口平均温度与 RP-3 喷气燃料燃烧时的燃烧室出口平均温度基本接近.相比于燃烧室出口平均温度的微小差异,两种喷气燃料在燃烧尾气温度上的差异非常明显.从图 2(b)可以看到,在相同燃油流量下,煤基喷气燃料的燃烧尾气温度明显低于 RP-3 喷气燃料的燃烧尾气温度,而且随着燃油流量增大,燃烧尾气温度的差异越来越大.此外,当燃油流量小于 7 g/s 以下时,混合燃料的燃烧尾气温度与 RP-3 喷气燃料的燃烧尾气温度基本相近.当燃油流量大于 7 g/s 时,两种喷气燃料的燃烧尾气温度差异变大,并且同样是随着燃油流量增大,燃烧尾气温度差异增大.

比较 RP-3 喷气燃料和煤基喷气燃料的燃烧尾气组成(图 3 和图 4),可以看到尾气中 O_2 体积分数、 CO_2 体积分数及 CO 质量分数、氮氧化物质量分数随燃油流量的变化趋势完全一致.如图 3(a)所示,随着燃油流量的上升,尾气中 O_2 体积分数显著下降,与之相反, CO_2 体积分数明显上升.图 3(c)显示 3 种喷气燃料燃烧尾气中 CO 质量分数随燃油流量上升的变化完全一致,即随着燃油流量从 5 g/s 上升到 6 g/s,CO 质量分数急剧上升,然后,随着燃油流量从 6 g/s 上升到 8 g/s,CO 质量分数又缓慢下降,但是当燃油流量从 8 g/s 上升到 9 g/s 时,CO 质量分数又开始上升.

对于 CO 质量分数非单调性变化,我们认为



(a) 燃烧室出口平均温度



(b) 尾气温度

图2 燃烧室出口平均温度、尾气温度随燃油流量的变化
Fig. 2 Exit temperature and temperature of gaseous emissions varying with fuel flow

这直接反映出在燃烧室内喷气燃料进行燃烧反应的复杂性.需要指出的是,喷气燃料燃烧尾气中 CO 质量分数随燃油流量或发动机功率非线性变化已经有报道^[1,23].到目前为止,相关报道中也没有给出理论解释.本文没有做燃烧理论方面的研究,因此也无法从理论上对于这一现象提供解释.此外,对于试验的 3 种喷气燃料,CO 质量分数随燃油流量的变化趋势是完全一致的,说明相同的单管燃烧室内,燃料的燃烧情况基本相似,而 CO 质量分数非线性变化与燃料无关,只是与试验使用的单管燃烧室装置相关.在该单管燃烧室装置内,CO 质量分数非线性变化应该与空气流体力学特性、燃烧温度等相关,相关的解释已经属于对单管燃烧室进行燃烧性能研究的范围,不在本论文的研究范围之内.

虽然 3 种喷气燃料的 O_2 、 CO_2 体积分数及 CO 质量分数等随燃油流量改变的变化趋势一致,但是在相同燃油流量时,3 种喷气燃料燃烧尾气中的组份含量也存在明显差异.从图 2(b)与图 3(b)和图 3(c)可以看到,在相同燃油流量条件

下,煤基喷气燃料的 CO_2 体积分数和 CO 质量分数要低于 RP-3 和混合燃料. 再结合相同燃油流量时燃烧尾气温度的差异,可以看到 3 种喷气燃料在单管燃烧室中发生的燃烧反应存在显著差别. 喷气燃料燃烧反应与其烃类组成密切相关,国内目前主要使用的 RP-3 喷气燃料的主要烃类组成是链烷烃^[8-9],但是,煤基喷气燃料中近 90% 的烃类是环烷烃,而链烷烃和芳香烃的比例很低. 正

是由于这个组成特点,相比于石油基喷气燃料,煤基喷气燃料具有密度大、热安定性好、吸热能力强的优点. 然而,煤基喷气燃料的净热值较低,而且环烷烃与链烷烃的燃烧反应机理有很大差异. 另外,在高温条件下,环烷烃会发生脱氢生成多环芳烃的吸热反应,从而使得燃烧尾气温度降低. 因此,在相同质量流量下,煤基喷气燃料和石油基喷气燃料燃烧之后,在尾气温度、尾气成分等方面会有明显差异.

喷气燃料燃烧排放的主要污染物是 SO_2 和氮氧化物(主要是 NO 和 NO_2). 图 4(a)~图 4(c) 显示了试验测量得到的燃烧尾气中 SO_2 , NO , NO_2 质量分数随燃油流量的变化情况. 图 4(a) 显示,当燃油流量小于 6 g/s 时,煤基喷气燃料燃烧尾气中 SO_2 质量分数为零,而 RP-3 喷气燃料燃烧尾气中 SO_2 质量分数将近 0.0002%. 当燃油流量大于 6 g/s 时,3 种试验燃料燃烧尾气中 SO_2 质量分数变为零. 这一试验结果的出现有两方面的原因:①由于煤液化柴油本身硫含量要低于石油基的 RP-3 喷气燃料(如表 2 所示);②流量增大之后, SO_2 质量分数在尾气中已经低于仪器的检测极限.

从图 4(b)可以看到,对于 3 种试验燃料,随着燃油流量上升,尾气中 NO 质量分数都在上升. 当燃油流量小于 7 g/s 时,燃烧尾气中的 NO 质量分数变化幅度非常小,当燃油流量大于 7 g/s 后,燃烧尾气中的 NO 质量分数显著上升. 对比煤基喷气燃料和 RP-3 喷气燃料,在相同质量流量下,煤基喷气燃料燃烧尾气中 NO 质量分数更高,而且燃油流量大于 7 g/s 后, NO 质量分数上升的幅度更大. 通过图 4(c)可以看到,3 种试验燃料燃烧尾气中 NO_2 质量分数完全一致,并且 NO_2 质量分数随燃油流量呈现出阶梯状增长.

从图 2、图 3 和图 4 反映的试验结果可以看到,在单管燃烧室内,煤基喷气燃料与 RP-3 喷气燃料的燃烧和排放特性参数随燃油流量的变化趋势完全一致. 但是就尾气温度和氮氧化物排放来说,煤基喷气燃料在燃烧和排放方面的性能要逊色于石油基的 RP-3 喷气燃料. 我们得到的这个试验结论与之前美国宾州大学所得到的试验结论一致. 他们使用高压燃气涡轮发动机和 T63 涡轮轴发动机,研究发现煤基喷气燃料 JP-900 的燃烧和排放特性要比石油基喷气燃料 JP-8 低一些. 此外,从图 2 和图 3 显示的试验结果可以发现,虽然混合喷气燃料是由煤基喷气燃料和 RP-3 喷气燃

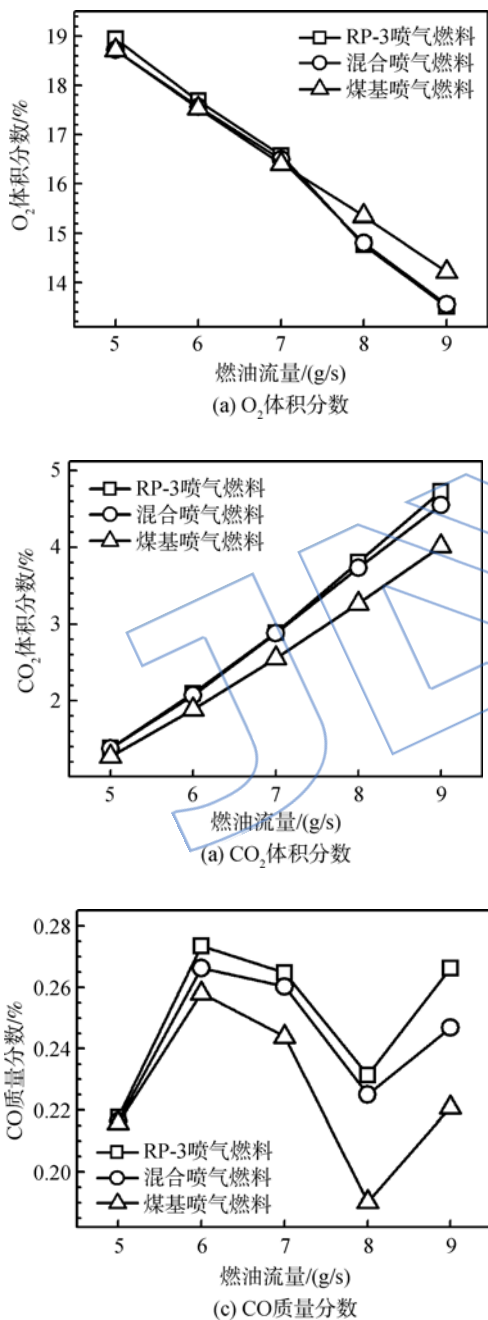


图3 燃烧尾气中 O_2 , CO_2 体积分数、 CO 质量分数随燃油流量的变化

Fig. 3 O_2 , CO_2 volume fraction and CO mass fraction in gaseous emissions varying with fuel flow

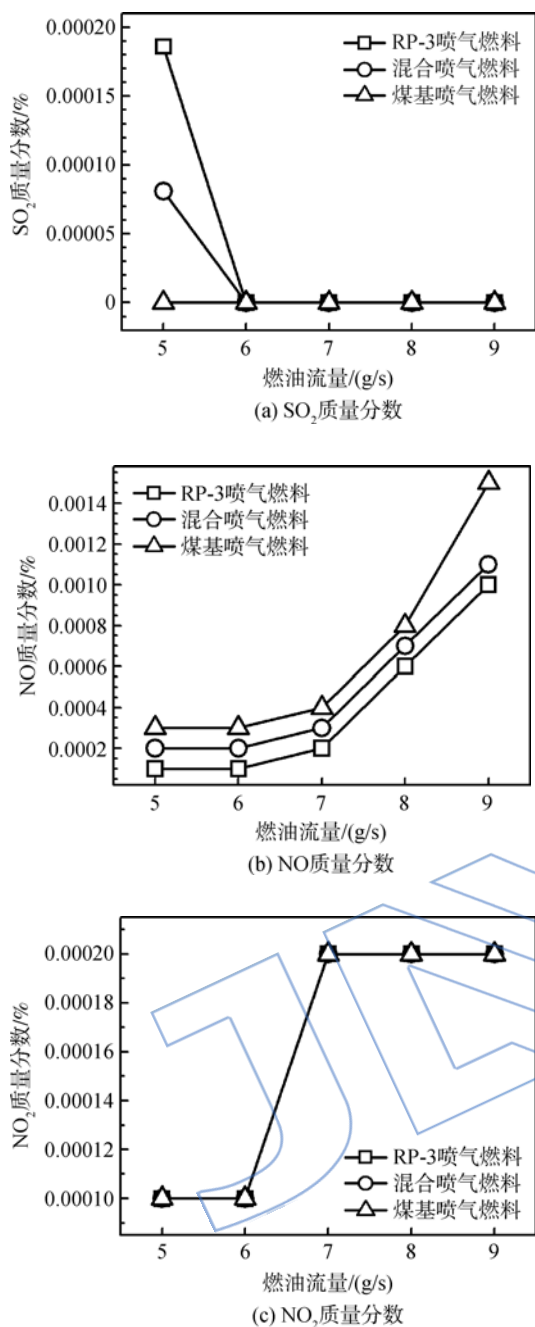


图4 燃烧尾气中 SO_2 , NO , NO_2 质量分数随燃油流量的变化.

Fig. 4 SO_2 , NO , NO_2 mass fraction in gaseous emissions varying with fuel flow

料按照体积比 1 : 1 混合制备而成,但是,其燃烧和排放特性参数更接近 RP-3 喷气燃料. 这个试验结果表明,有链烷烃存在时,可以提升环烷烃的燃烧性能. 考虑到环烷烃在密度、热安定性、吸热性能方面的巨大优势,所以现阶段可以考虑将煤基喷气燃料中的主要的环烷烃组份作为添加剂加入到 RP-3 喷气燃料中,实现在提升 RP-3 喷气燃料密度、热安定性和吸热性能的同时又不降低其燃烧和排放性能. 美国空军就根据 JP-900 的烃

类组成特点,将一些环烷烃加入 JP-8 中^[23],从而显著提升了 JP-8 的氧化安定性、热稳定性和吸热能力.

2.3 燃烧特性随燃烧室出口温度的变化

使用同一个燃烧室,通过其性能参数的变化,也可以间接的反映出不同喷气燃料之间燃烧性能的差别. Patra 等在使用圆筒喷雾燃烧室研究乙醇对喷气燃料燃烧和排放特性的影响时对比了燃烧室壁温的变化^[14]. 在本文的研究中,测量了燃烧室出口平均温度相同时 3 种喷气燃料的燃烧室壁温. 在试验过程中,空气流量始终固定 (500 g/s),通过调节燃油流量来使燃烧室出口平均温度达到设定的值.

从图 5 可以看到,对于 3 种试验燃料,燃烧室出口温度从 400 °C 增加到 700 °C 过程中,燃烧室壁温都是呈现不断上升的特点,但是从 700 °C 到 800 °C 时燃烧室壁温却急剧下降,甚至 800 °C 时的壁温低于 600 °C 时的壁温. 这一现象有可能与燃烧室内火焰发射率的变化有关. 而火焰发射率与火焰中的烟灰密切相关,当燃烧室温度高时燃烧室内的烟灰就会减少. Patra 等的研究就表明当燃烧室内火焰中的烟灰降低时,火焰发射率降低,从而使得燃烧室壁温下降^[14]. 图 4 还反映出,在达到相同燃烧室出口温度时,煤基喷气燃料的壁温要略小. 这个现象可能与煤基喷气燃料更强的吸热性能有关,即燃烧室有一部分壁温要被喷入燃烧室的喷气燃料吸收,由于煤基喷气燃料的吸热性能更强,所以壁温就要更低一些.

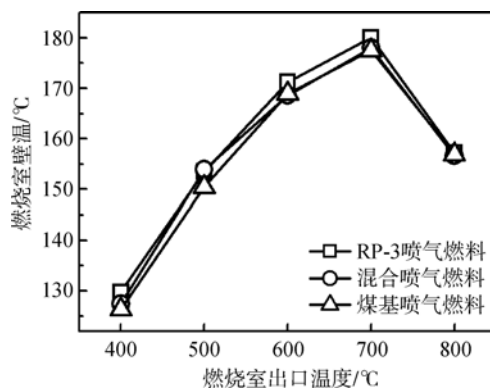


图5 燃烧室壁温随燃烧室出口温度的变化

Fig. 5 Wall temperature varying with exit temperature

3 结 论

根据涡喷发动机的火焰筒结构,搭建了一套单管燃烧室试验装置. 基于这套试验装置,建立了

一套评估喷气燃料燃烧和排放特性的试验方法。在这套试验方法的基础上,研究对比了煤基喷气燃料和 RP-3 喷气燃料的燃烧和排放特性。根据试验结果,得到如下结论:

1) 煤基喷气燃料的贫油点火和贫油熄火性能要优于 RP-3 喷气燃料。

2) 煤基喷气燃料的燃烧和排放特性参数随燃油流量改变的变化规律与 RP-3 喷气燃料完全一致。

3) 在相同燃油流量下,煤基喷气燃料的燃烧和排放性能要低于 RP-3 喷气燃料。

4) 在相同燃烧室出口平均温度下,煤基喷气燃料燃烧产生的燃烧室壁温要低于 RP-3 喷气燃料。

参考文献:

- [1] Berghthorson J M, Thomson M J. A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42 (1): 1393-1417.
- [2] Oldani A, Valco D, Min K, et al. Conventional and bio-derived jet fuel surrogate modeling in low temperature and lean combustion [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29 (7): 4597-4607.
- [3] 任海涛, 郭放, 杨晓奕. 中国微藻航空煤油制备潜能及 CO₂ 减排 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41 (1): 1-8.
REN Haitao, GUO Fang, YANG Xiaoyi. Potential of microalgae cultivation for bio-jet fuel producing and reduce CO₂ emissions in China [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41 (1): 1-8. (in Chinese)
- [4] Lamprecht D. Fischer-Tropsch fuel for use by the U. S. military as battlefield-use fuel of the future [J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21 (3): 1448-1453.
- [5] 杨文, 吴秀章, 陈茂山, 等. 煤基喷气燃料研究现状及展望 [J]. *洁净煤技术*, 2015, 21 (5): 52-57.
YANG Wen, WU Xiuzhang, CHEN Maoshan, et al. Review of coal-based jet fuel [J]. *Clean Coal Technology*, 2015, 21 (5): 52-57 (in Chinese)
- [6] Mochida I, Okuma O, Yoon S H. Chemicals from direct coal liquefaction [J]. *Chemical Reviews*, 2013, 114 (3): 1637-1672.
- [7] 李克健, 吴秀章, 舒歌平. 煤直接液化技术在中国的发展 [J]. *洁净煤技术*, 2014, 20 (2): 39-43.
LI Kejian, WU Xiuzhang, SHU Geping. Development of direct coal liquefaction technologies in China [J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20 (2): 39-43. (in Chinese)
- [8] 肖保国, 杨顺华, 赵慧勇, 等. RP-3 航空煤油燃烧的详细和简化化学动力学模型 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25 (9): 1948-1955.
- [9] 曾文, 李海霞, 马洪安, 等. RP-3 航空煤油模拟替代燃料的化学反应详细机理 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29 (12): 2810-2816.
ZENG Wen, LI Haixia, MA Hongan, et al. Detailed chemical reaction mechanism of surrogate fuel for RP-3 kerosene [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29 (12): 2810-2816. (in Chinese)
- [10] Bruno T J, Smith B L. Evaluation of the physicochemical authenticity of aviation kerosene surrogate mixtures: Part 1 analysis of volatility with the advanced distillation curve [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24 (8): 4266-4276.
- [11] Bruno T J, Huber M L. Evaluation of the physicochemical authenticity of aviation kerosene surrogate mixtures: part 2 analysis and prediction of thermophysical properties [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24 (8): 4277-4284.
- [12] Heneghan S P, Zabarnick S, Ballal D R, et al. JP-8 + 100: the development of high-thermal-stability jet fuel [J]. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, 1996, 118 (3): 170-179.
- [13] Balster L M, Corporan E, De Witt M J, et al. Development of an advanced, thermally stable, coal-based jet fuel [J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89 (4): 364-378.
- [14] Patra J, Ghose P, Datta A, et al. Studies of combustion characteristics of kerosene ethanol blends in an axis-symmetric combustor [J]. *Fuel*, 2015, 144 (1): 205-213.
- [15] Tsue M, Imamura O, Suzuki S, et al. Effects of fuel properties on self-ignition and flame-holding performances in SCRAM jet combustor for n-alkane fuels [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33 (2): 2391-2398.
- [16] Wierzbicki T A, Lee I C, Gupta A K. Performance of synthetic jet fuels in a meso-scale heat recirculating combustor [J]. *Applied Energy*, 2014, 118 (1): 41-47.
- [17] 马朝臣, 霍学敏, 张强. 一种拓宽微型单管燃烧室流量范围的调节装置 [J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31 (6): 657-661.
MA Chaochen, HUO Xuemin, ZHANG Qiang. An adjusting device for extending the flow range of micro can combustor [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31 (6): 657-661. (in Chinese)
- [18] 薛鑫, 林宇震, 张弛, 等. 火焰筒压力损失对贫油熄火特性和燃烧效率的影响 [J]. *航空动力学报*, 2012, 27 (12): 2687-2691.
XUE Xin, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Effects of liner pressure loss on combustor lean blow-out and combustion efficiently performances [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27 (12): 2687-2691. (in Chinese)
- [19] 黎明, 吴二平, 索建秦, 等. 某型燃烧室火焰筒的性能对比试验 [J]. *航空动力学报*, 2013, 28 (8): 1689-1695.

- LI Ming, WU Erping, SUO Jianqin, et al. Performance comparative experiment on flame tubes of a certain combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1689-1695. (in Chinese)
- [20] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 旋流杯燃烧室头部流场与喷雾对贫油熄火的影响[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 332-337.
- YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. The effect of flow field and fuel spray of combustion with swirl cup on lean blowout limit at idle condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 332-337. (in Chinese)
- [21] 张弛, 傅奇慧, 荣龙, 等. 含氧生物燃料的雾化性能测试及分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2660-2665.
- ZHANG Chi, FU Qihui, RONG Long, et al. Measurement and analysis of atomization characteristics of oxygenated bio-fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2660-2665. (in Chinese)
- [22] 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.
- HUO Weiye, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Research on n-decane as surrogate fuel of aviation kerosene in atomization process[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 188-195. (in Chinese)
- [23] Corporan E, Edwards T, Shafer L, et al. Chemical, thermal stability, seal swell, and emissions studies of alternative jet fuels[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(3): 955-966.

(编辑: 叶 青)

JALSP