

芳香烃对涡轴发动机排气冒烟影响的试验

吴施志, 黄开明, 刘伟, 杨芳, 王利
(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为掌握涡轴发动机排气中的冒烟数及芳香烃体积分数对冒烟数的影响,设计了某涡轴发动机冒烟数测量试验方案,通过在 RP-3 航空煤油中添加甲苯($C_6H_5CH_3$)获得不同芳香烃体积分数,开展发动机排气冒烟试验;并根据实测冒烟数(SN)拟合得到了与计算冒烟质量浓度指数(CI)的关系式。试验结果表明:某型涡轴发动机采用基准燃油时各状态冒烟数均小于 40,优于设计指标;最大起飞状态下芳香烃体积分数每增加 3%可导致冒烟数升高 6%。该试验为涡轴发动机排气冒烟数测量和预估提供了一种有效方法,并为通过减少燃油中芳香烃体积分数来抑制发动机冒烟数提供了依据。

关 键 词: 涡轴发动机; RP-3 航空煤油; 芳香烃; 烟雾排放指数; 测试方案设计

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Test on influence of aromatic hydrocarbons on smoke emission characteristics in turboshaft engine

WU Shizhi, HUANG Kaiming, LIU Wei, YANG Fang, WANG Li
(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to obtain the test data and influence of aromatic volume fraction on smoke emission, the smoke number test scheme of a turboshaft engine was designed. Aromatic hydrocarbons volume fraction of kerosene from different production regions was compared and analyzed. By adding toluene ($C_6H_5CH_3$) to RP-3 kerosene, different volume fractions of aromatic hydrocarbons could be gained. The influence of aromatic hydrocarbon volume fraction on smoke emission was studied in domestic aeroengine field. The correlation of smoke number (SN) with concentration index (CI) was fitted according to the measured smoke number. Test results showed that the smoke emission index increased with the power state of turboshaft engine, and the smoke number was less than 40, which was superior to design requirements when turboshaft engine adopted baseline fuel. The increase of 3 percent in aromatic hydrocarbon volume fraction can lead to increase of 6 percent in smoke number. The test has provided an effective method for measurement and prediction of exhaust smoke and also beneficial experience and alternative fuels for suppressing smoke of turboshaft engines.

Key words: turboshaft engine; RP-3 aviation kerosene; aromatic hydrocarbons; smoking emission index; measurement scheme design

直升机主要在低空领域飞行,起飞、着陆等使用场所接近居民区,其所配装动力大多为中小型涡轴发动机,发动机排放物会对附近空气环境和居民健康造成不利影响。发动机排气污染中重要的一个污染源是排气冒烟,冒烟是指燃烧生成以炭为主体的微粒子(0.01~0.06 μm),这些炭烟颗粒会减少光的透射,从而引起冒烟问题。涡轴发动机的燃油流量较小,烟雾排放总量较低,降低排放的成本较高,效果不明显,因此国际上还未对涡轴发动机的烟雾排放标准做出明确规定。虽然从总量来看,涡轴发动机的烟雾排放量所占比例不是很大,但随着低空空域的逐渐开放,未来涡轴发动机的使用数量将不断增加,其烟雾排放的影响也会逐渐增大。对此,欧盟部分航空技术发达国家的制造商正在酝酿建立涡轴发动机烟雾排放标准,以提高产品的技术门槛,未来烟雾排放水平将会成为一个制约发动机技术发展的重要因素。此外,对于军用发动机可见烟将导致目标更容易暴露、排放的热炭粒子是强红外信号;在发动机设计中,烟粒子质量浓度增大会导致燃烧室火焰辐射增加、引起局部过热问题。

航空发动机的排气冒烟质量浓度(黑烟)通常以冒烟数(smoke number, SN, 量符号记为 N_s)来评估^[1]。国内外对航空发动机的排烟研究大多集中于燃烧室的冒烟性能^[2-5]、航空煤油的化学反应机理^[6-9]等方面,如最近 Brundish 和 Miller 利用燃烧室扇形段试验,测量了燃烧室不同轴向位置的冒烟数,获得了燃烧室不同位置炭烟粒子分布^[10]。但公开文献中鲜未发现针对航空涡轴发动机整机开展排烟特性试验的研究。本文以某型涡轴发动机为平台,针对不同航空煤油成分差异,在分析其主要物性参数和化学组分的基础上,在国内开展了不同芳香烃体积分数对排气冒烟的影响试验,录取了煤油中芳香烃体积分数分别为 15.4%、17% 和 20% 时涡轴发动机的排气冒烟数,获得了煤油中芳香烃体积分数对排气冒烟数的影响程度,可为航空涡轴发动机降低排烟污染及燃料选用提供依据。

1 冒烟数的影响因素

1.1 燃油中的芳香烃

航空煤油是一种复杂的混合物,由成百上千个组分组成,主要包括链烷烃(naphthene)、环烷烃(olefins)和芳香烃(aromatic)三大类^[11-12]。烃类燃油裂化及形成炭的倾向性变化很大,闭环结

构的芳香族燃油比直链烃更容易冒烟。一般燃油的烟数在 17~40 之间,而航空煤油的烟数通常在 24~27 范围内^[13]。

燃料中的附加剂、氢/碳比和芳香烃体积分数对排气冒烟影响很大,金属有机化合物(锰、钼)添加剂可以减少排气冒烟,含氢量越低越容易冒烟,芳香烃体积分数增加会使冒烟增多^[14]。为此,《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》(GJB242A-2018)规定发动机排烟测量需要使用含芳香烃体积分数为 17% 的燃油进行试验,燃油中可以加入甲苯以达到规定的芳香烃体积分数,规定芳香烃体积分数是建立一个相同的燃料基准以便对不同发动机排烟进行评估。

由于产地、加工方式、用途和成本的不同,各国航空煤油的化学组分和体积分数都不完全固定,其中美国和加拿大有 Jet A、Jet A-1、JP-5、JP-8 等几类航空煤油,俄罗斯的主要类型有 T-1、T-2、T-6、T-8,我国主要为 RP-3 和 RP-5。图 1 给出了国内外常用航空煤油中芳香烃体积分数的抽样数据。

从图 1 中可以看出,即使是同一类型的航空煤油,其芳香烃体积分数也存在较大差异。产生这种差异的原因包括以下两个方面:一是原油的性质随产地而异,不同原油炼制的航空煤油组成有一定差别;二是生产方法和馏分的差异^[11]。其中 RP-5 航空煤油的各级馏分温度高于 RP-3,其燃烧的不完全性会大于 RP-3,排烟和积炭倾向也更严重。表 1 给出了国内部分产地航空煤油的芳香烃体积分数差异,可见 RP-5 中的芳香烃体积分数最高。

1.2 设计参数的影响

燃烧室工作参数对冒烟的影响主要体现在以下几个方面:进口压力增大、进口温度降低、平均油气比增大均会使冒烟数增加。但由于冒烟的生成机理复杂,影响因素众多,比如喷嘴类型、油气的混合及空间分布等,目前尚没有准确的模型计算冒烟数,文献[15]提供了一个估算发动机冒烟质量浓度指数(CI,量符号记为 I_c)的公式,由式(1)可计算排气中单位质量燃气所包含的炭颗粒质量。

$$I_c = 0.00145 \times \frac{F_{arpz} \times p_3^2}{W_{t,a3} \times t_{pz}} (18 - H)^{1.5} \times \left[1 - 0.00515 \times \frac{\exp(0.001 \times t_{sz})}{W_{t,a3}} \right] \times \rho \quad (1)$$

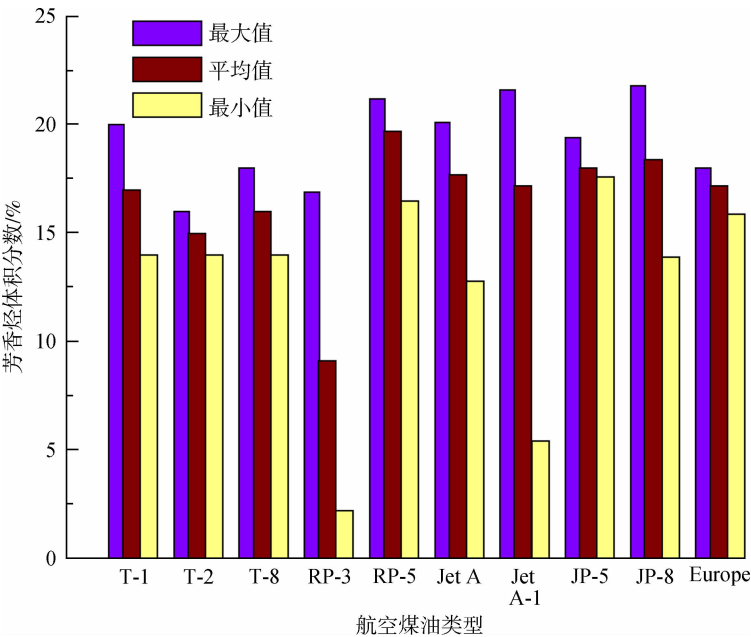


图 1 国内外常用航空煤油中芳香烃体积分数

Fig. 1 Aromatics volume fraction of aviation kerosenes used at home and abroad commonly

表 1 不同产地航空煤油芳香烃体积分数的差异
Table 1 Aromatics volume fraction difference of kerosene from different origins

油样	体积分数/%	
	实测值	上限值
新疆 RP-1	6.4	20
胜利 RP-1	15.4	20
大庆 RP-2	7.3	20
大庆 RP-3	7.0	20
大庆 RP-4	7.7	20
管输 RP-5	19.7	25
孤岛 RP-6	8.5	12

表 2 计算的冒烟质量浓度指数
Table 2 Calculational CI

状态	$I_c/(mg/kg)$
慢车状态	0.15
巡航状态	1.75
连续状态	2.56
起飞状态	2.97

成速度大于氧化速度,而掺混区是氧化区域,该区域氧化速度大于生成速度^[16-17]。随发动机功率状态的提高,航空煤油的燃烧主要在主燃区和中间区完成,尤其最大状态,由于燃烧室内部气压显著提高,导致燃油喷雾更加集中在喷嘴下游区域,此外由于主燃区油气比达到最大值,冒烟数达到最大值。

1.3 试验燃油芳香烃体积分数

发动机可通过采取先进的设计技术降低排气污染,如采用先进的燃烧室构型,优化喷嘴类型等;或通过选用清洁燃料,如荷兰航空公司自2011年6月起,尝试采用由厨房废弃的植物性油脂“地沟油”加工的航空煤油作为民航客机燃料,据称可使客机的炭烟排放量降低50%;此外,通过使用芳香烃体积分数少的燃料可有效减少排气中冒烟数,如生产厂家可通过控制航空煤油的生产方法和炼制程序降低燃料中的芳香烃体积分数。

式中 F_{arpz} 是主燃区油气比; p_3 是燃烧室入口压力; $W_{f,a3}$ 是进入主燃区的空气流量; t_{pz} 是主燃区的温度; t_{sz} 是中间区温度; F_{arsz} 是中间区油气比; H 为燃油中的氢质量浓度; $W_{f,a3}$ 是中间区的空气流量; ρ 是燃气密度。

按照式(1)计算得到了所研究的涡轴发动机燃烧室采用 RP-3 航空煤油在发动机不同状态下的冒烟质量浓度指数(表 2)。

从表 2 可以看出,发动机状态越高冒烟质量浓度越大。排气中冒烟质量浓度增加的主要原因是燃烧室压力和主燃区当量比增加。主燃区和中间区是冒烟的主要生成区域,该区域内冒烟的生

本次研究试验所采购的航空煤油中原始芳香烃体积分数为 15.4%，综合考虑 GJB242 中的要求和表 1 中国内航空煤油中芳香烃体积分数，通过在煤油中添加甲苯(C₆H₅CH₃)使芳香烃体积分数分别达到 17%(定义为基准煤油)和 20%(对应国内另外一种常用煤油 RP-5 中的平均芳香烃体积分数)进行对比试验，以研究燃油中芳香烃体积分数多少对冒烟数的影响程度。

2 冒烟测量试验方案

2.1 冒烟测量方法

发动机冒烟数测量有两种基本方法:光度吸收法和 SAE(美国汽车工程师协会)滤纸法。光度吸收法称为 R. R 测烟表法^[13],是 R. R(罗. 罗)公司提出的基于一个简单的光度吸收仪表,这种仪表没有采用比较元件,并且光线未经平行校正,灵敏度很大程度上取决于元件吸收壁的反射率,测试精度较低。SAE 滤纸法是美国汽车工程师协会认可并推荐的一种冒烟测量方法,已成为世界上通用的标准^[1]。SAE 法是通过测量过滤器滤纸绝对反射率的减少量而间接得到烟雾的浓度。通过调节阀保证每平方米过滤烟痕面积上流过标准取样量的采集样气,并达到计算的取样时间后,用放射率测量仪测量滤纸迎着气流面的反射率。滤纸烟痕越深,过滤纸绝对反射率越低,代表排气中冒烟数越多。

本研究采用 SAE 滤纸法进行排烟分析。SAE 滤纸法采用国际通用的 whatman4 号滤纸,通过普申 C84-Ⅲ 反射率测定仪测量滤纸反射率,测定仪光源采用发光均匀稳定的白电珠泡,光电元器件为环形硒光电池,指示仪表精度优于 1.5%。当清洁过滤纸吸附了烟气中的炭烟颗粒,导致滤纸绝对反射率降低,利用式(2)计算得到冒烟数(SN)。

$$N_s = 100 \times \left(1 - \frac{R_s}{R_w}\right) \tag{2}$$

式中 R_w 为清洁过滤纸的绝对反射率, R_s 为烟痕过滤纸的绝对反射率。

试验中,根据测量的烟气压力、温度和流量,采用式(3)计算清洁滤纸在夹头处的停留时间,即样气采集时间。

$$T = \frac{11.451}{1.229 \times \left(\frac{p}{101.325}\right) \times \left(\frac{288.15}{t + 273.15}\right)} \times \frac{L}{60} \tag{3}$$

式中 T 为样气采集时间(s); p 为样气压力(kPa); t 为样气温度(℃); L 为取样体积流量(L/min)。

2.2 排气取样系统

参考 CCAR (China Civil Aviation Regulations)-34^[18] 中涡轮发动机冒烟测量试验程序,设计了如图 2 所示的取样系统,整个系统主要由 3 部分组成:烟气取样探针、烟气输送管路、滤纸夹头。

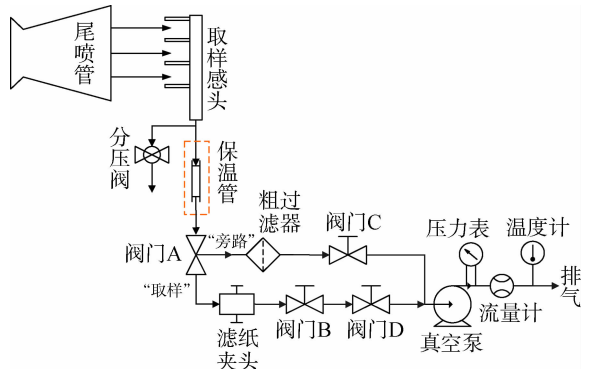


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

烟气取样探针安装于涡轴发动机尾喷管出口平面,周向分布 3 支,每支包含 4 个取样点(按等面积分布,所有取样点的孔径均为 2mm)。每支取样探针取得的 4 点烟气经混合汇至一点,再经四通结构的管路将 3 支取样探针共计 12 点的烟气混合至一条管路(内径为 4 mm);烟气输送管路采用电伴热保温管,可实现加温保温功能,温度控制范围为 80~110℃(±1℃),管路长度约为 10m。管路外包裹聚氨酯保温层,防止进入滤纸夹头的烟气冷凝;为保证通过滤纸的样气体积流量达到 14 L/min,在滤纸夹头后安装无油真空泵(无润滑油,避免污染样气),以防体积流量不足。在真空泵后、滤纸夹头前设置旁路,方便取样过程切换。过滤纸采用 whatman4 号滤纸,灵敏度较高,夹头由耐温耐腐蚀材料制成,能够牢固夹紧滤纸。

试验前需要对系统进行泄漏和清洁检查。试验过程中,当发动机达到规定的功率状态并稳定工作以后,按如下方法采样:

1) 将阀门 A 置于“旁路”位置,并关闭阀门 D,抽取样气至少 5 min,并用阀门 C 调节样气体积流量到 14 L/min。

2) 将清洁过滤纸夹入滤纸夹头,打开阀门 D,并将阀门 A 置于“取样”位置,调节阀门 B 使样气体积流量到 14 L/min。

3) 在此期间,至少应使样气通过管路一分钟

以保证取样系统完全充满了有代表性的样气。

4) 当所选择的取样量所对应的取样容积量通过后,将阀门 A 置于“旁路”位置和关闭阀门 D。

5) 从滤纸夹头中取出带烟痕滤纸,并将清洁过滤纸夹入滤纸夹头。

6) 发动机每个状态至少连续取样 3 次,每次测量得出的冒烟数偏差在±3 以内,否则重复测量。

在试验进行期间,阀门 A 不能置于“关闭”位置,即取样系统不允许处在无流量状态,以防止炭烟颗粒在取样管路内沉积影响测量精度。

3 试验程序及结果

3.1 试验程序

为研究发动机不同功率状态下排烟数的差异,按照《中国民用航空规章》第 34 部 CCAR-34 规定选取下列 4 种功率状态测定某涡轴发动机的冒烟数:最大起飞状态、最大连续状态、巡航状态和地慢状态,发动机在指定功率状态下稳定工作 10 min 后按文中第 2.2 节的规定从尾喷管引气取样,每个状态引气取样 3 次,其中在地面慢车(简称地慢)上推大状态过程中先在空中慢车(简称空慢)状态工作 3 min,测量冒烟数后依次下拉发动机状态,试验谱见图 3。

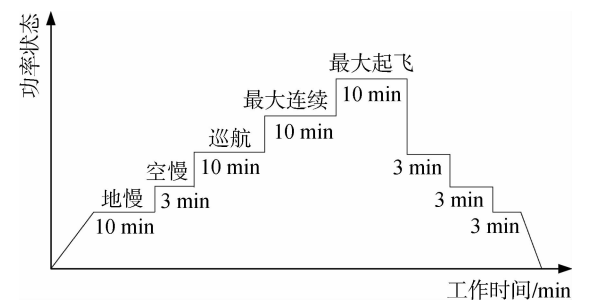


图 3 冒烟测量的试验程序
Fig. 3 Test procedure of smoke emission

将通过燃气的滤纸采用普申 C84-Ⅲ 测量反射率后计算得到冒烟数;图 4 是 4 种状态取样滤纸变化情况,燃气通过滤纸中央后炭粒残留导致灰褐色,反射率降低。

3.2 芳香烃体积分数为 15.4% 的试验结果

本次试验采购的 RP-3 航空煤油中芳香烃体积分数初始值为 15.4%,表 3 是采用该基准航空煤油 3 次冒烟测量试验结果,每个状态 3 次测量得出的冒烟数偏差在±3 以内,测量结果有效。

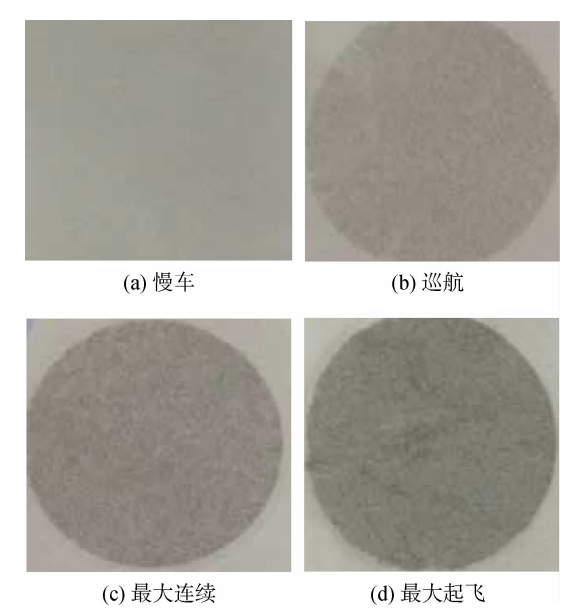


图 4 4 种状态滤纸变化情况
Fig. 4 Filter paper variation at four kinds of state

表 3 基准航空煤油样气测试数据
Table 3 Measurement data of baseline aviation kerosene sample

功率状态	T/s	R _w /%	R _s /%	N _s
慢车状态	42.2	93.8	92	2.01
	41.5	94.9	93.1	1.98
	43.1	93.5	91.5	2.15
巡航状态	42.6	94.5	77.3	18.2
	43.2	95.1	76.5	19.6
	41.9	95.2	78.2	17.9
最大连续	42.1	97.3	73.8	24.2
	43.2	97.4	74.2	23.8
	41.5	98.7	76.5	22.5
最大起飞	42.8	96.1	66.5	30.8
	43.8	95.6	66.1	31.0
	41.9	96.3	66.9	30.5

从表 3 中可以看出,冒烟数随发动机功率状态提高而增加,说明发动机功率状态越大,单位样气中所含有的炭烟颗粒数目越多,滤纸烟痕浓度越深。这主要是由于两个因素导致:所试验的燃烧室主燃区采用富油设计,空气体积流量仅占 33%,随着发动机状态提升,主燃区油气比大幅提高,更容易导致冒烟;发动机压比高,火焰筒内空气密度大,不利于喷雾扩散。因此随发动机状态

的提高,冒烟数增加。

3.3 芳香烃体积分数为 17%和 20%的试验结果

分别采用芳香烃体积分数为 17%的基准航空煤油及芳香烃体积分数为 20%的航空煤油完成了排气冒烟测量试验,各状态的平均冒烟数与初始航空煤油试验冒烟数的对比结果见图 5。

从图 5 中可以看出,相同功率状态,航空煤油中芳香烃体积分数升高,冒烟数增加。但不同状态芳香烃对冒烟数的影响程度不尽相同,其中:慢车状态香烃体积分数增加 3%可以使冒烟数增加约 47%,巡航状态香烃体积分数增加 3%可以使冒烟数增加约 15%,最大连续状态芳香烃体积分数增加 3%可以使冒烟数增加约 7%,最大起飞状态芳香烃体积分数增加 3%可以使冒烟数增加约 6%。这主要是由于添加的甲苯越多,参与聚合反应的单环芳香烃及生成的多环芳香烃就越多,多环芳香烃是炭烟的初始粒子,初始粒子之间通过碰撞凝聚成更大的炭烟颗粒,炭烟颗粒还通过与其他炭氢分子反应,内部炭氢化合物炭化等过程增加炭烟尺寸。因此燃料中芳香烃体积分数越高冒烟数越高。

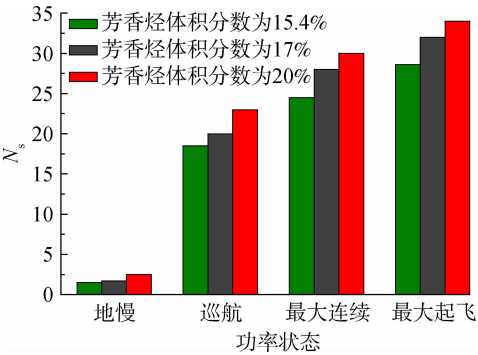


图 5 芳香烃体积分数对冒烟数的影响
Fig. 5 Influence of volume fraction of aromatic hydrocarbon on smoke number

从结果可以看出,采用国军标规定的标准芳香烃体积分数为 17%的燃油时其最大冒烟数为 32;即使采用芳香烃体积分数为 20%的燃油时其最大冒烟数为 34,均优于技术指标规定的 SN 不超过 40 的要求;说明该发动机排气冒烟能够满足国内任意一种航空燃油。由于芳香烃体积分数对发动机排气冒烟有重要影响,因此评定发动机排气冒烟是否达标必须确定统一的芳香烃体积分数作为基准。

3.4 SN 与 CI 的拟合关系

为定量给出前述计算的冒烟质量浓度指数与

实际测量的冒烟数的关系,将表 2 与图 5 中的参数进行线性拟合(图 6),得到某涡轴发动机的冒烟质量浓度指数与冒烟数的关系为

$$N_s = 0.70378I_c + 9.69514 \tag{4}$$

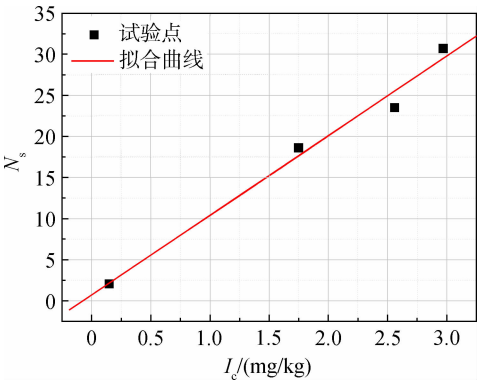


图 6 冒烟数与冒烟质量浓度指数关系
Fig. 6 Relation of smoke number and smoke concentration index

由此,同类型燃烧室的涡轴发动机排气冒烟数预测就可以参考式(1)和式(4)进行计算,可为燃烧室设计提供初步分析工具。

4 结 论

- 1) 某型涡轴发动机采用基准燃油时各状态冒烟数均小于 40,优于设计指标。
- 2) 发动机排气冒烟评定需要以航空煤油中的芳香烃体积分数作为基准,可通过减少燃油中芳香烃体积分数来抑制发动机冒烟数。
- 3) 涡轴发动机冒烟数随功率状态的提高而增加,在直升机起飞、着陆或悬停时,涡轴发动机工作状态相对较高,应减少接近居民聚集区。

参考文献:

[1] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2016.

[2] RIESMEIER E, HONNET S, PETERS N, et al. Flamelet modeling of pollutant formation in a gas turbine combustion chamber using detailed chemistry for gas a kerosene model fuel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(3): 889-905.

[3] PATTERSON P M, KYNE A G, POURKASHANIAN M, et al. Combustion of kerosene in counter-flow diffusion flames[J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(2): 453-460.

[4] 许全宏,林宇震,刘高恩,等. 航空发动机高温升燃烧室贫油熄火及冒烟性能研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 637-640.

XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Research on the high temperature rise combustor lean blow-out and smoke emission characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 637-640. (in Chinese)

[5] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 三旋流器头部燃烧室拓宽燃烧稳定工作范围的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 143-147.

YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Combustor dome design with three swirlers for widening the operation stability range[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 143-147. (in Chinese)

[6] 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, 27(2): 1948-1955.

XIAO Baoguo, YANG Shunhua, ZHAO Huiyong, et al. Detailed and reduced chemical kinetic mechanisms for RP-3 aviation kerosene combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 27(2): 1948-1955. (in Chinese)

[7] 颜应文, 戴超, 李井华. RP-3 航空煤油替代燃料简化机理及其验证[J]. 航空动力学报, 2016, 31(12): 2879-2887.

YAN Yingwen, DAI Chao, LI Jinghua. Reduced mechanism of surrogate fuel for RP-3 aviation kerosene and verification[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(12): 2879-2887. (in Chinese)

[8] 马洪安, 解茂昭, 曾文, 等. RP-3 航空煤油着火特性的影响因素分析[J]. 推进技术, 2015, 36(2): 307-313.

MA Hongan, XIE Maozhao, ZENG Wen, et al. Influencing factor analysis for ignition characteristics of RP-3 kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(2): 307-313. (in Chinese)

[9] 曾文, 陈潇潇, 刘静忱, 等. 航空煤油替代燃料的着火与燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1689-1695.

ZENG Wen, CHEN Xiaoxiao, LIU Jingchen, et al. Ignition and combustion characteristics of surrogate fuels for kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1689-1695. (in Chinese)

[10] BRUNDISH K D, Miller M N. Measurement of smoke particle size and distribution within a gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(2): 889-905.

[11] 张泉雄, 侯凌云, 莫崇康, 等. 航空煤油热裂解结焦实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1308-1312.

ZHANG Xiaoxiong, HOU Lingyun, MO Chongkang, et al. Experiment on thermal cracking coke of aviation kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1308-1312. (in Chinese)

[12] EDWARDS T, MAURICE L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 461-466.

[13] 任广旭, 王琦. 实验室条件下航空发动机冒烟问题研究[J]. 工程与试验, 2009, 49(2): 30-33.

REN Guangxu, WANG Qi. Study on smoking of aero engine under the laboratory condition[J]. Engineering and Test, 2009, 49(2): 30-33. (in Chinese)

[14] AGOSTA A, CERNANSKY N P, MILLER D L, et al. Reference components of jet fuels: kinetic modeling and experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(7): 701-708.

[15] RIZK N K, MONGIA H C. Emissions predictions of different gas turbine combustors[R]. AIAA 94-0118, 1994.

[16] 李锋, 郭瑞卿, 高贤智, 等. 基于分层和分级燃烧机理的低污染燃烧室设计和排放性能预估[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2796-2800.

LI Feng, GUO Ruiqing, GAO Xianzhi, et al. Low pollution combustor design and emission performance prediction based on stratified and staged combustion mechanism[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2796-2800. (in Chinese)

[17] 刘爱斌, 朱悦, 陈保东, 等. 以柴油为燃料的旋流杯燃烧室燃烧性能研究[J]. 推进技术, 2017, 38(8): 1805-1811.

LIU Aiguo, ZHU Yue, CHEN Baodong, et al. Combustion performance study of swirl cup combustor using diesel as fuel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8): 1805-1811. (in Chinese)

[18] 中国民用航空局. 涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定: CCAR-34[S]. 北京: 中国民用航空局, 2002: 1-24.

(编辑: 王碧琚)