

非挥发性颗粒物排放适航符合性验证方法

刘来¹, 沈苏华¹, 宋建宇², 王杰¹

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 2. 中国民用航空适航审定中心, 北京 100102)

摘要:为了践行绿色发展理念, 国际民用航空组织(ICAO)对商用航空发动机非挥发性颗粒物(nvPM)排放提出了新的要求, 各国适航当局也陆续发布了相应的适航规章。为了满足ICAO及适航规章中对航空发动机nvPM排放的要求, 对nvPM排放适航符合性验证方法进行了分析。综述了国际民用航空组织制定的新的航空涡轮发动机非挥发性颗粒物排放认证监管标准, 结合国际民用航空组织和美国汽车工程师协会(SAE)推荐的nvPM排放测试标准, 总结了nvPM排放适航符合性验证方法, 包括验证路线、nvPM测试系统搭建、测试程序以及后处理等内容, 为搭建nvPM测试系统和开展nvPM测试奠定理论基础, 可供商用航空发动机非挥发性颗粒物排放适航审查提供参考。

关键词:非挥发性颗粒物; 符合性验证方法; 适航; 采集测量; 商用航空发动机

中图分类号: V235

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.06.008

Research on the Airworthiness Compliance Verification Method of nvPM Emission

LIU Lai¹, SHEN Su-hua¹, SONG Jian-yu², Wang Jie¹

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., LTD. Shanghai 200241, China;

2. Engine Certification Center of CAAC, Beijing 100102, China)

Abstract: In order to implement the concept of green development, the International Civil Aviation Organization (ICAO) has put forward new requirements for non-volatile particulate matter (nvPM) emissions for commercial aviation engines, and the airworthiness authorities of various countries have successively issued corresponding airworthiness regulations. In order to meet the requirements of the nvPM emissions of aero engines with ICAO and airworthiness regulations, it is necessary to study the airworthiness compliance verification methods of nvPM emissions. The new certification regulatory standards for nvPM emissions for aircraft turbine engines developed by ICAO are briefly described in this article. Referring to the nvPM emission test standards recommended by ICAO and the Society of Automotive Engineers (SAE), the airworthiness compliance verification methods of nvPM emissions are summarized, including verification routes, nvPM test system construction, test procedures, post-processing, etc. which lay a theoretical foundation for building nvPM test systems and conducting nvPM tests, and provides reference of nvPM emissions for commercial aircraft engines for the airworthiness authorities.

Key words: nvPM; mean of compliance; airworthiness; sampling and measurement; commercial aircraft engine

0 引言

近年来,随着民用航空产业的迅速发展,航空器排放污染对大气环境和人体健康造成了不可忽视的影响^[1-2]。航空器污染排放主要来自于发动机,包括一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(Unburned hydrocarbons, UHC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物,其中由于近年来雾霾等恶劣大气条件对人体健康产生持续重大危害,颗粒物排放备受关注^[3-5]。在2010年之前,国际

民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)航空环境保护委员会(Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP)制定了排放标准和措施,仅限于NO_x、CO和UHC等气态污染物的排放,以及烟雾的排放(以烟度SN报告)^[6]。其中发烟指数(Smoke Number, SN)测量是为了确保飞机发动排气能见度符合适航标准而开发的,不提供环境影响评估所需的关于颗粒物数量、大小和成分的任何信息。CAEP第8次会议(2010年)认识到SN已经无法满足

收稿日期: 2020-10-28 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 刘来(1995), 男, 硕士, 工程师, 从事航空发动机污染排放适航规章研究工作; E-mail: 11318959285@163.com。

引用格式: 刘来, 沈苏华, 宋建宇, 等. 非挥发性颗粒物排放测量适航符合性验证方法研究[J]. 航空发动机, 2022, 48(6): 49-55. LIU Lai, SHEN Suhua, SONG Jianyu, et al. Research on the airworthiness compliance verification method of nvPM emission[J]. Aeroengine, 2022, 48(6): 49-55.

对发动机颗粒物排放的限制要求,因此在2016年制定了首个针对飞机发动机非挥发性颗粒物(non-volatile Particulate Matter, nvPM)排放的新监管标准(CAEP/10)。在制定nvPM质量和数量排放的监管标准之前,飞机发动机排放认证试验需要一种标准化的取样和测量方法,美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)飞机发动机气体和颗粒物排放测量委员会为飞机发动机nvPM质量和数量测量制定了标准化协议^[7-8],国际民用航空组织在此基础上制定发布了附件16《环境保护》第Ⅱ卷《航空器发动机的排放物》(第4版,2017)。

虽然国际民用航空公约和SAE相关标准对非挥发性颗粒物排放测试做出了较为详细的规定,但由于中国商用航空发动机产业起步较晚,缺乏相关测试经验,目前中国还没有成熟的nvPM测量系统。国外主航空发动机设备制造商研发制造体系成熟,拥有多种型号产品,目前国际上存在3个符合标准化规范的航空发动机nvPM排放测量系统,可供欧美主航空发动机设备制造商产品适航取证使用。国外研究学者对nvPM排放测量技术也进行了深入研究。Durdina等^[9-10]提出了颗粒物质量测量的方法,并对喷气飞机的颗粒物污染进行了评估;Lobo等^[11]对比了3种符合ICAO排放试验标准的测量系统的测试结果,发现在测量设备的误差波动范围内测量结果一致性较好。

本文对nvPM排放标准进行了解读,并基于国际民用航空组织推荐的nvPM测量规程,总结了用于航空发动机非挥发性颗粒物排放测量适航取证的符合性验证方法。

1 适航规章要求

为了控制飞机发动机排放物对全球空气质量的影响,国际民用航空组织制定了排放标准,各国民航局根据ICAO排放标准制定了相应的适航排放法规,以期在航空发动机设计制造阶段贯彻落实排放要求。

现行的适航法规采用烟度测量评判发动机颗粒物排放水平,发烟指数(SN)测量是为了确保飞机发动机排气能见度符合适航标准而应用的,并不能对发动机颗粒物排放的质量和数量定量测量。为了进一步限制发动机颗粒物排放水平,2017年3月3日,国际民航组织航空环境保护委员会第十次会议(CAEP/10)审议通过了附件16《环境保护》第Ⅱ卷《航空器发

动机的排放物》的第9次修订(第4版),本次修订新增了对发动机 n_{vPM} 排放测量的要求:额定推力大于26.7 kN且在2020年1月1日或之后生产的所有涡轮风扇和涡轮喷气发动机及其衍生产品均需符合nvPM排放最大质量浓度限制要求^[12]。CAEP/10最大nvPM质量浓度的监管水平是基于nvPM质量浓度和烟度之间的统计关系制定的^[13],确保了任何符合烟度认证要求的飞机发动机也将达到nvPM质量排放水平。非挥发性颗粒物排放的具体要求如下:发动机应在足够的推力设定值上测试,以确定发动机的非挥发性颗粒物排放,可使用下述特定百分比的额定推力以及经审定当局同意的可产生最大质量浓度 $\text{nvPM}_{\text{mass}}$ 、最大非挥发性微颗粒物质量排放指数 E_{Imass} 和最大非挥发性微颗粒物数量排放指数 E_{Inum} 的

运行模式	推力设定值
起飞	100% F_{to}
爬升	85% F_{to}
进近	30% F_{to}
滑行/地面慢车	7% F_{to}

注: F_{to} 为额定推力。

对于在2020年1月1日或之后生产的某一类型或型号的额定推力大于26.7 kN的所有涡轮风扇

和涡轮喷气发动机国际适航法规对非挥发性颗粒物的排放要求为最大质量浓度特征值 $n_{\text{vPMmass}}/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$

$$n_{\text{vPMmass}} \leq 10^{(3 + 2.9F_{\text{to}}^{-0.274})} \quad (1)$$

目前各国适航当局根据ICAO要求(CAEP10)及相关行业标准制定了nvPM排放适航法规。其中欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)在CS-34第3修正案中根据国际民航公约附件16第2卷(第4版)新增了对发动机nvPM排放测量的要求,加拿大和巴西等国家也已经将nvPM排放要求(CAEP10)纳入适航规章要求,目前FAA尚未将nvPM要求纳入FAR-34部,中国CCAR-34部正在按照国际民用航空公约附件16第2卷(第4版)要求进行修订。为了适应适航要求,开展非挥发性颗粒物排放采集测量技术研究十分必要。

目前国际上存在的3个航空发动机nvPM排放测量系统,分别是瑞士联邦材料测试与开发研究所(Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Empa)的固定(后改移动)系统(Swiss fixed system, CHE),欧洲卡迪夫大学的移动系统(European mobile system by Cardiff University, EUR)以及北美密苏里科技大学的移动系统(North American mobile system by Missouri University of Science and

Technolog, NAM), 以上测试系统均符合 SAE AIR6241 标准规范的要求, 3 个测试系统结构如图 1 所示。

2 符合性验证方法

颗粒物的组成成分十分复杂^[14-15], 主要包括直接排放的一次颗粒物和以气态形式排放到大气中经过一系列物理化学过程生成的二次颗粒物。其中, 一次颗粒物又可分为直接以固体形式排放的一次固态颗粒物和在高温条件下为气态, 经过空气稀释、降温后凝结为固态的一次凝结颗粒物^[16]。而非挥发性颗粒物(nvPM)即一次颗粒物中直接以固体形式排放的一次固态颗粒物, 是存在于燃气涡轮发动机喷管出口截面、当加热到 350℃ 时不挥发的排放微粒。

最新研究表明^[17], 对于典型的航空发动机, 与总颗粒相比, 直径小于 10 nm 的的燃烧颗粒占比低于 10%, 直径大于 300 nm 的占比低于 0.01%。约 90% 以上的颗粒物直径介于二者之间。

由于发动机排放颗粒物组成复杂, 粒径极小, nvPM 排放测量系统需要采集具有代表性的航空发动机排气样品, 在传输过程中要降低样本中颗粒物质量

浓度, 同时去除气体中非燃烧产生的大颗粒物物质, 最终通过测量仪器测量得到 nvPM 质量浓度和数量浓度。

为满足 nvPM 适航规章要求, 工业方需通过 nvPM 排放试验向审定当局表明符合性, 在对适航要求以及国内外排放测试标准进行充分研究后, 本文归纳总结了满足适航要求的符合性验证方法。

- (1)对测量设备进行符合性验证, 保证搭建的测量系统符合测试标准;
- (2)对试验系统和设备进行校准, 保证测量结果的有效性;
- (3)对测试发动机进行构型确认, 确定测试发动机与发动机设计构型一致;
- (4)检查试验方法及测试程序, 确定测试程序符合测试标准;
- (5)对试验用油进行理化分析, 确定测试用油符合测试标准;
- (6)进行多台份测试, 对获得的试验数据按测试标准进行处理修正, 提供符合测试标准的符合性判据。

符合性验证技术路线如图 2 所示。

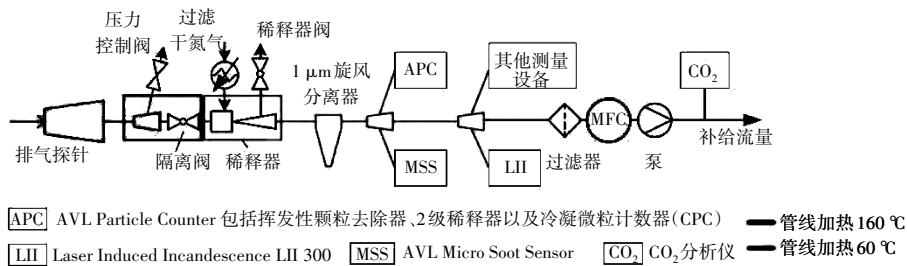


图 1 Swiss(CHE)-North American(NAM)-European(EUR)测试系统结构

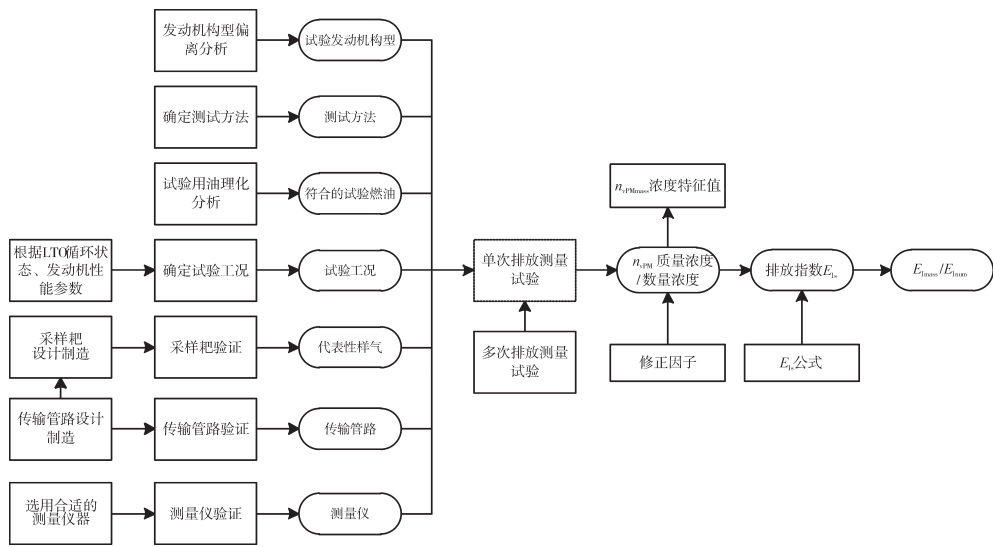


图 2 适航符合性验证路线

2.1 试验系统搭建

国际民用航空公约附件16卷II和SAE ARP6320对非挥发性颗粒物采集测量系统做出了严格的要求,按照要求搭建标准化的nvPM采集测量系统是进行符合性验证的第一步。ICAO推荐的测试规程中包含对测试设备(如采样探针、采样管路、温度控制、分流器、稀释器、旋风分离器、测量仪器等)的要求,对测试程序(如泄漏检查、清洁检查、反冲洗准备、测试准备、采样过程、测量仪器校准等)的要求,同时对测试数据的记录及计算分析方法等也有详细描述。

非挥发性颗粒物物质采样测量系统如图3所示。该系统主要包含3部分,分为5区:收集部分(1区)、传输部分(2、3和4区)和测量部分(5区)。为了减小颗粒物传输损失,采样管路应尽可能避免弯折,同时采样管路从探头端部到测量仪进口处的总长度不得超过35 m。

收集部分主要包括采样耙和连接管路,用于采集具有代表性的航空发动机排气样本并将样本从采样探头输送至分流器1,总长度不得超过8 m;传输部分分为2、3、4区,主要包括分流器1、压力控制阀、隔离阀、稀释器、稀释气体加热器、旋风分离器、分流器2,加热连接管路等部件,用于将样本气体传输至测量仪器,并降低样本中颗粒物质量浓度,同时去除气体中非燃烧产生的大颗粒物;测量部分主要包括nvPM质量测量仪、nvPM数量测量仪、挥发性颗粒物去除器、CO₂分析仪、主泵、流量控制器等部件,用于测量样本气体中nvPM的质量浓度和数量浓度,并通过主泵

和流量控制器控制管路中流入测量仪器的气体流量。

在采集测量系统中,最重要的部分是nvPM测量分析仪器^[18-19]。对于nvPM质量浓度测量,目前可用的测量方法包括燃烧分析法、光吸收光度法以及激光诱导白炽。数量浓度测量包含2部分,挥发性微粒去除器内含稀释系统和去除挥发性物质的设备,用来去除挥发性颗粒物并将微粒数量浓度进一步稀释到数量测量仪量程范围内。而颗粒物数量浓度测量仪使用的是微粒冷凝计数器,用于对非挥发性颗粒物数量浓度进行测量。

2.2 试验系统和设备校准

为了保证测量结果的准确性和有效性,需要对试验系统和测量设备进行校准,包括对nvPM质量浓度测量仪、nvPM数量浓度测量仪,以及挥发性微粒去除器等,采用ICAO推荐的校准方法,在具备相应资质的实验室进行校准。具体校准程序见第2.5节。

2.3 试验发机构型确认

在进行发动机测量试验前,需要对试验发机构型进行确认,确保试验发机构型与取证发动机设计型号保持一致。通过建立基准标准发动机性能模型,确定发动机性能参数,为排放试验和测量结果修正提供参考。

2.4 试验用燃油规范

由于试验用油对发动机颗粒物排放生产具有重大影响,为保证测量结果的规范性,每次试验前确定试验用油是否符合燃油规范是nvPM排放测试适航取

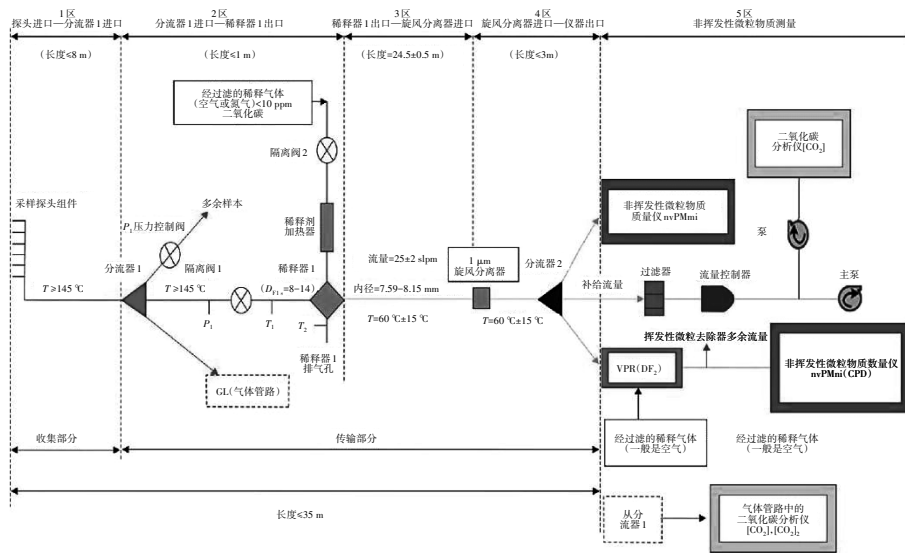


图3^[12] 非挥发性微粒物质采样测量系统

证符合性验证工作中不可缺少的一环。

测试期间使用的燃油应符合表 2 中的燃油规范。在每次测试前,均应对试验用燃油进行取样,由具备相应测量分析资质的实验室进行理化分析,评估其是否符合规范。

表 2 试验用燃油规范

性质	单位	许可范围
15 ℃时的密度	kg/m ³	780~820
蒸馏温度,10% 沸点	℃	155~201
终馏点	℃	235~285
燃烧净热值	MJ/kg	42.86~43.50
芳烃体积分数	%	15~23
萘烃体积分数	%	0.0~3.0
烟点	mm	20~28
氢的质量分数	%	13.4~14.3
硫的质量分数	%	<0.3
-20 ℃时的运动粘度	mm ² /s	2.5~6.5

2.5 试验程序

为了保证测量过程的规范性,按照要求搭建试验测量系统后,在试验前需要进行一系列的准备工作。

(1)反冲洗检查:在发动机起动和关闭时对 1 区进行,用于去除采样探头和管路中残留的未燃烧燃料。

(2)渗漏检查:用于确定收集部分和气体管路是否渗漏,检查要求渗漏流速应小于 0.4L/min。

(3)清洁度检查:用于确定收集部分和气体管路是否存在颗粒物残留,要求 30 s 平均非挥发性微颗粒物质量浓度应小于 1 μg/m³,30 s 平均非挥发性颗粒物数量浓度应小于 2.0 微粒/cm³。

(4)外界微粒测量:应在发动机测试前后获取代表发动机空气进口处情况的外界非挥发性微粒物质质量和数量浓度,所报告的值应为 2 次测量结果的平均值。

(5)测量仪器校准:应每年由具备相关资质的实验室对 nvPM 质量测量仪、数量测量仪、CO₂ 分析仪等测量仪器进行校准,以便符合规定的性能要求。

(6)挥发性微粒去除器稀释因子(DF₂)校准:应按照挥发性微粒去除器制造商的规定,在挥发性微粒去除器的每个稀释设定值对 DF₂ 进行校准。

(7)碳平衡检查:将依据测量 CO₂ 质量浓度估算出的空气/燃料比与基于试验发动机性能参数计算得到的空气/燃料比进行对比,要求二者在滑行/地面慢车模式下差异不超过±15% 以及在其他运行模式下差

异不超过±10%。

试验应在所有仪器和样本传输管路预热并达到稳定之后进行,同时应对非挥发性颗粒物质量仪/数量测量仪进行制造商所建议的可操作性检查,当发动机运行和测量的非挥发性微粒物质及[CO₂]_{dil1} 浓度在所要求的推力设定值稳定后,应将至少 30 s 的数据平均后记录下来。

2.6 数据处理

型号取证过程需要获得 1 台或多台具有代表性的发动机在着陆起飞循环 4 个推力设定值(滑行/地面慢车 7%、进近 30%、爬升 85%、起飞 100%)下的排放数据。同时,为了得到最终的符合性判据,将试验数据按照定义的公式进行处理分析。nvPM 质量浓度为

$$n_{\text{vPM}_{\text{mass}}} = n_{\text{vPM}_{\text{mass_STP}}} \cdot D_{\text{F1}} \cdot k_{\text{thermo}} \tag{2}$$

式中: k_{thermo} 为热泳损失修正因子。

在非挥发性微粒物质采样和测量系统中,微粒会因沉积机理而损失在采样系统管壁上。热泳损失与粒径不相关;非挥发性微粒物质采样和测量系统的整体微粒损失(收集部分的热泳损失除外)被称为系统损失,与粒径相关。热泳损失修正因子为

$$k_{\text{thermo}} = \left(\frac{T_1 + 273.15}{T_{\text{EGT}} + 273.15} \right)^{-0.38} \tag{3}$$

式中: T_1 为稀释器 1 进气管壁温度; T_{EGT} 为发动机排气温度,通常 $T_1 < T_{\text{EGT}}$, 即 $k_{\text{thermo}} > 1$ 。

对于系统损失修正,制造商只需采用 ICAO 附件 16 卷 II 附录 8 所述的方法确定非挥发性微粒物质质量和非挥发性微粒物质数量系统损失修正因子($k_{\text{SL}_{\text{mass}}}$ 和 $k_{\text{SL}_{\text{num}}}$),并向审定当局报告,无需对试验测量结果进行系统损失修正。

非挥发性微粒物质质量和数量排放指数为

$$E_{\text{I}_{\text{mass}}} = \frac{22.4 \times \left[n_{\text{vPM}_{\text{mass_STP}}} \times D_{\text{F1}} \times k_{\text{thermo}} \right] \times 10^{-3}}{\left(N_{[\text{CO}_2]_{\text{dil}}} \times D_{\text{F1}} - N_{[\text{CO}_2]_{\text{b}}} + N_{[\text{CO}]} + N_{[\text{HC}]} \right) (M_{\text{C}} + \alpha M_{\text{H}})} \tag{4}$$

$$E_{\text{I}_{\text{num}}} = \frac{22.4 \times \left[n_{\text{vPM}_{\text{num_STP}}} \times D_{\text{F1}} \times D_{\text{F2}} \times k_{\text{thermo}} \right] \times 10^6}{\left(N_{[\text{CO}_2]_{\text{dil}}} \times D_{\text{F1}} - N_{[\text{CO}_2]_{\text{b}}} + N_{[\text{CO}]} + N_{[\text{HC}]} \right) (M_{\text{C}} + \alpha M_{\text{H}})} \tag{5}$$

式中: $E_{\text{I}_{\text{mass_STP}}}$ 、 $E_{\text{I}_{\text{num_STP}}}$ 分别为测量得到的非挥发性微粒物质质量、数量浓度; D_{F1} 、 D_{F2} 分别第 1、2 阶段稀释因子; k_{thermo} 为热泳损失修正因子; $N_{[\text{CO}_2]_{\text{dil}}}$ 为第 1 稀释阶段后样气中的二氧化碳体积浓度; $N_{[\text{CO}]}$ 为样气中一

氧化碳的体积浓度; $N_{[\text{CO}]}$ 为样气中未燃碳氢化合物气体的体积浓度; $N_{[\text{CO}_2]_b}$ 为空气中的二氧化碳体积浓度; $M_c=12.011$,为碳原子质量; $M_H=1.008$,为氢原子质量; α 为燃料的原子氢碳比。

为了保证测量结果可靠,要求至少做3次发动机测试,可使用1台或多台发动机进行。在符合性程序中规定,所有测试中的最大非挥发性微粒物质质量浓度值的平均值使用由测试发动机数量*i*所确定的适当系数转换成某一特征值后,才能与规定数值比较,从而判断颗粒物排放是否符合适航要求。用于确定非挥发性微粒物质质量浓度特征值的系数见表3。制造商可结合试验测量成本和实际测量结果综合考虑选择测试发动机数量。

表3 用于确定非挥发性微粒物质质量浓度特征值的系数

测试发动机 数量 <i>i</i>	1	2	3	4	5	>5
系数	0.7769	0.8527	0.9091	0.9213	0.9296	$1 - \frac{0.15736}{\sqrt{i}}$

2.7 误差分析

利用nvPM排放测量系统可以对燃气涡轮发动机排气颗粒的数量、质量进行定量分析。这些仪器被工业界、学术界和政府研究机构广泛接受,可以作为实验室或移动系统在燃烧室或涡轮发动机出口平面附近的困难条件下运行。使用这种提取取样技术,必须特别考虑取样系统,以尽量减小将排气微粒运送到测量仪器时的损失。

同时,由于非挥发性颗粒物采样和测量系统的实施需要最长35 m的采样管路,并且包含若干采样和测量系统组件,会导致大量的微粒损失,其中非挥发性微粒物质质量可能损失约50%,非挥发性微粒物质数量可能损失约90%。包括与颗粒物粒径无关的热泳损失和与颗粒物粒径相关的系统损失,其中热泳损失在数据处理中已经考虑了,所以只需单独对系统损失进行分析。

3 总结与展望

本文对nvPM排放标准进行了介绍,结合国际民航组织和SAE推荐的非挥发性颗粒物采集测量系统搭建和测量程序,归纳总结了nvPM排放适航符合性验证方法,包括验证路线、nvPM测试系统搭建、测试程序以及后处理等,为搭建nvPM测试系统和开展

nvPM测试奠定基础,指导制造商向审定当局表明nvPM排放的符合性。

目前,国外主航空发动机设备制造商(Original Equipment Manufacturer, OEM)均有可供使用的成熟的非挥发性颗粒物采集和测量系统,以满足排放适航验证需求,而中国尚未建立起航空发动机非挥发性颗粒物采集和测量系统,高等院校和研究所大多也未对该问题进行深入研究。为了满足中国航空产业国际化发展以及排放适航要求,提高在国际民航环境保护领域的话语权,对非挥发性颗粒物采集和测量系统进行研究十分迫切和必要。由于中国尚无符合适航要求的颗粒物排放测试分析系统和流程规范可借鉴,nvPM排放测量标准研究仍然存在一些疑问和难点。主要包括:

(1)在nvPM排放测量中要求采集具有代表性的样气,但并未明确指出如何表明样气的代表性,问题的焦点主要聚集在采样靶的设计制造方案上,未来需加快对采样靶的研制;

(2)在nvPM排放采集测量过程中,对传输管路几何结构和温度做出了严格规定,但并没有说明采样管路几何特征及温度对样气传输损失的影响,为了加深对标准中管路几何结构和温度要求的理解,在今后的试验研究中需重点关注;

(3)由于中国商用航空发动机产业起步较晚,缺乏nvPM排放测量经验,也没有相应的颗粒物测量设备,在国产发动机研制过程中,可推动中国供应商对颗粒物测量设备的研制。

参考文献:

- [1] Masiol M, Harrison R M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95, 409-455.
- [2] 刘静,肇俊武. 国外民用航空发动机低污染燃烧室的发展[J]. 航空发动机, 2012, 38(4): 11-16.
LIU Jing, ZHAO Junwu. Development of low emission combustor for foreign civil aeroengine[J]. Aeroengine, 2012, 38(4): 11-16. (in Chinese)
- [3] 赵坚行,王锁芳,刘勇. 热动力装置的排气污染与噪声[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 163-189.
ZHAO Jianxing, WANG Suofang, LIU Yong. Exhaust pollution and noise of thermal power plants[M]. Beijing: Science Press, 2009: 163-189. (in Chinese)
- [4] Petzold A, Marsh R, Johnson M, et al. Evaluation of methods for measuring particulate matter emissions from gas turbines[J]. Environmen-

- tal Science and Technology, 2011, 45(8), 3562–3568.
- [5] Ballal D R, Zelina J. Progress in aeroengine technology (1939–2003) [J]. Journal of aircraft, 2004, 41(1): 43–50.
- [6] International Civil Aviation Organization. Annex 16 to the convention on international civil aviation. environmental protection, volume II –aircraft engine emissions (3rd ed)[S]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2008:1–160.
- [7] SAE AIR6241. Procedure for the continuous sampling and measurement of non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines [S]. NewYork:SAE International, 2013:1–55.
- [8] SAE ARP6320. Procedure for the continuous sampling and measurement of non-volatile particulate matter emissions from aircraft turbine engines[S]. NewYork:SAE International, 2018:1–67.
- [9] Durdina L, Brem B T, Abegglen M, et al. Determination of PM mass emissions from an aircraft turbine engine using particle effective density[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99, 500–507.
- [10] Durdina L, Brem B T, Setyan A, et al. Assessment of particle pollution from jetliners: From smoke visibility to nanoparticle counting [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51(6), 3534–3541.
- [11] Lobo P, Durdina L, Brem B T, et al. Comparison of standardized sampling and measurement reference systems for aircraft engine non-volatile particulate matter emissions[J]. Journal of Aerosol Science, 2020, 105557:1–17.
- [12] International Civil Aviation Organization. Annex 16 to the convention on international civil aviation. environmental protection, volume II –aircraft engine emissions (4th ed)[S]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2017:1–174.
- [13] Agarwal A, Speth R L, Fritz T M, et al. Scopell method for estimating aircraft black carbon mass and particle number emissions[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(3), 1364–1373.
- [14] 夏卿. 飞机发动机排放对机场大气环境影响评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- XIA Qing. Study on the impact of aircraft engine emissions on airport atmospheric environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [15] Petzold A. Properties of jet engine combustion particles during the partemis experiment: microphysics and chemistry[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30:52–56.
- [16] Corio L A, Sherwell J. In stack condensible particulate matter measurements and issues[J]. Journal of the Air&Waste Management Association, 2000, 50(2): 207–218.
- [17] Endand G C, McGrath T. Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas fired combustion systems[R]. Morgantown: National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [18] SAE AIR6037. Aircraft exhaust nonvolatile particle matter measurement method development[S]. NewYork: SAE International, 2018: 1–85.
- [19] SAE AIR5892. Nonvolatile exhaust particle measurement techniques [S]. NewYork: SAE International, 2012:1–48.

(编辑:程 海)