

客舱用发动机引气品质适航符合性验证方法

Verification Method for Airworthiness Compliance of Cabin Engine Bleed Air Quality

■ 梁晶晶 单行健 李卉荟 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司 高艳蕾 / 中国民用航空适航审定中心

随着航空业对客舱引气污染的日益重视，客舱空气污染物相关的行业标准陆续涌现，国内外适航当局也对客舱用发动机引气品质提出了适航要求。发动机制造商需要明确客舱用发动机引气品质适航条款的符合性验证标准，然后通过分析或试验来表明符合性以保证飞行安全，并且尽可能地提供健康、舒适的发动机引气。

典型的民用飞机通过环境控制系统（ECS）为座舱增压和空气调节提供气源，在起飞之前，通常将辅助动力装置（APU）作为ECS的气源，起飞之后则关闭APU供气，将发动机引气出口的压缩空气作为ECS的气源。这种供气方式不需要额外动力来抽取外部空气，对发动机/APU工作的影响也很小，但如果发动机/APU不正常工作导致气源内部出现机械磨损或工作油（滑油、液压油等）泄漏，可能会产生毒气并掺混到气流中，然后随着ECS供气进入到客舱。进入客舱的毒气会使机组人员和乘客的眼睛、鼻子和喉咙受到刺激，出现头疼、头晕、疲劳等反应，在高浓度情况下还会导致呼吸困难、视力模糊、出现认知障碍等急性或慢性症状，影响机组人员安全飞行操作，长期暴露在毒气中的机组人员还会面临更多的健康风险。为保障飞行安全、降低客舱用发动机引气污染对机组人员和乘客健康的影响，国内外适航当局均对客舱用发动机引气品质提出了适航要求，发动机制造商需要通过分析或试验来表明其对相关适航条款的符合性以保证飞行安全，并且尽可能地给机组人员和乘客提供健康、舒适的客舱用引气。

引气品质行业标准的发展历程

早在20世纪70年代，工作环境中的毒气可能会对人体健康造成危害的现象就已经引起了相关行业的注意，美国职业安全与健康管理局（OSHA）制定的劳工健康法规（CFR 29）第1910.1000条对环境中的毒气给出了限制标准。在飞机内部空气品质方面，国际自动机工程师协会（SAE）和欧洲标准化委员会（CEN）都发布过航空行业推荐标准。在航空发动机客舱用引气品质方面，SAE也制定了一系列行业推荐标准。1995年8月，SAE正式发布了航空航天推荐实践（ARP）4418《在发动机正常工作条件下提供的引气中发动机产生污染物的采样和测量程序》，将欧洲预标准（prEN）4618（草案）《飞机内部空气质量标准、准则和测定方法》中规定的污染物浓度限制值作为客舱用发动机引气的空气质量标准，还给出了在发动机正常工作条件下污染物的测量方法和程序。2008年1月，SAE发布了ARP 4418A，该版本将美国联邦航空局航空规章（FAA-14 CFR）第25.831条、欧洲适航标准航空航天信息报告（CS）第25.831条和CFR-29 1910.1000条作为了客舱用发动机引

气品质的要求，并且基于AIR 1539、AIR 4766、prEN4618和美国国家职业安全与健康研究所（NIOSH）出版的手册，更新了发动机正常工作条件下客舱用引气中的9种有毒物质标记物、浓度限制值和测量方法。2018年11月，SAE发布了ARP 4418B，该版本延续使用了ARP 4418A中的有毒物质浓度限制值，但补充了6种污染物的最低检测限（LOD）和最低可定量限（LOQ），并且再次更新了引气中有毒物质浓度的测量方法和程序。上述标准的发展过程如图1所示。

据图1可知，CEN发布的prEN 4618是各类客舱空气品质标准的源头，该报告选择了16种可测量的有毒物质作为污染标记物，还提供了有毒物质可接受的安全限制值、健康限制值和舒适限制值；针对航空发动机正常工作条件下的引气品质，SAE在参考了prEN 4618和NIOSH的分析方法手册（NMAM）的基础上，在ARP 4418中给出了需测量的有毒物质类型、浓度限制值和推荐的测量方法并持续更新，最新版本详见ARP 4418A和ARP 4418B。

适航符合性验证要求

参照当前的客舱空气品质行业标准

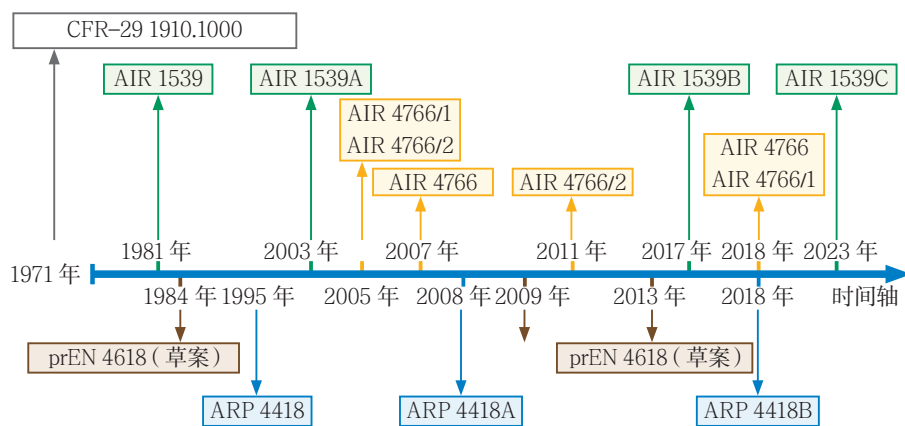


图1 客舱空气品质行业标准的发展历程

可知，对于发动机正常工作场景，发动机制造商应提供健康、舒适的引气品质，尽可能降低客舱用发动机引气对人体健康的影响；对于发动机异常工作场景，发动机制造商至少应提供安全的客舱用引气品质，保证客舱用发动机引气中有毒物质的浓度使人失去能力或使机组人员操作能力下降的发生概率在可接受的范围之内。

发动机正常工作场景

在发动机正常工作场景下，客舱用发动机引气品质应满足ARP 4418A的要求，推荐测量的有毒物质标记物的浓度限制值如表1所示。其中，发动机引气中的污染物浓度应由发动机引气（出口）中的浓度减去环境空气（进口）中的浓度得出，以排除背景浓度对测量结果的影响；可吸入颗粒物是指空气动力学当量直径在0 ~ 10 μm范围内的颗粒物，浓度限制值对应于PM10；表中的浓度限制值对应的标准状态为环境压力101.325kPa、环境温度293.15K（20℃）；如果是在非标准状态下开展的客舱用引气中有毒物质浓度测量试验，应参考GB/T 18883—2022《室内空气质量标准》中的理想气态

方程对气态有毒物质的浓度进行校正；根据AIR 4766/2，如果客舱内的颗粒物浓度参超过5mg/m³，将出现可见烟雾。

发动机异常工作场景

在发动机异常工作场景下，如压气机中的耐磨材料受到旋转叶片摩擦产生的磨削物或者滑油泄漏进入到压气机气流之后发生了热分解，可能会产生毒气并掺混到气流中，随着ECS供气进入到客舱。针对上述可

能因素，中国民用航空规章（CCAR）33.75（g）（2）（ii）条款要求“使机组或乘客失去能力”的预期发生概率不超过定义的极小可能概率，即危害性发动机后果；CCAR-33.75（g）（3）条款要求“考虑机组人员在发现和阻止有毒物质时使工作能力降低的情况”，即重要发动机后果。

ARP 4761A中的危害性发动机后果对应于“机组人员负担大大增加或身体疼痛以至于无法履行职责，飞机的飞行安全裕度或性能大大降低”；重要发动机后果对应于“机组人员身体不适或明显增加工作负担，明显减小飞机的性能或安全裕度”。prEN 4618给出了安全限制值的有毒物质种类，对照prEN 4618可知：如果客舱空气中的有毒物质浓度超过了安全限制值，可能会妨碍飞机的安全运行，从而不符合CCAR-33.75（g）（2）（ii）和CCAR-33.75（g）（3）条款的要求。

根据美国环境保护总署的公开

表1 正常工作场景下的有毒物质浓度限制值

化学物质 登录号	物质名称	浓度限制值		参考的 文件/标准	测量方法
		mg/m ³	ppmv		
75-07-0	乙醛	18	10	prEN 4618	二硝基苯肼高效液相色谱（DNPH-HPLC）测量法
107-02-8	丙烯醛	0.5	0.2	prEN 4618	DNPH-HPLC测量法
50-00-0	甲醛	1.0	0.8	prEN 4618	DNPH-HPLC测量法
71-43-2	苯	3.2	1.0	prEN 4618	气相色谱/质谱（GC/MS）分析法
108-88-3	甲苯	153	40	prEN 4618	GC/MS分析法
78-93-3	甲基乙基酮 （2-丁酮）	598.5	200	prEN 4618	GC/MS分析法
124-38-9	二氧化碳	3650	2000	prEN 4618	非分光红外气体（NDIR）检测法
630-08-0	一氧化碳	17.8	12	prEN 4618	NDIR检测法
—	可吸入 颗粒物	5.0	—	NIOSH	光度计、扫描移动粒子或凝结粒子计数器

数据，表2中的甲醛、苯、丙酮等挥发性有机物在很低的浓度下就能使人察觉到特殊气味。如果发生了客舱引气污染，上述有毒物质通常都会同时存在，当一氧化碳和二氧化碳浓度很低时，机组人员就能闻到其他挥发性有机物的特殊气味或者发现烟雾，然后机组人员会立刻执行检查程序、排烟程序来稀释客舱毒气浓度，提醒乘客使用氧气面罩等来减少毒气对人体健康的影响。根据对多起航空引气污染事件发展过程的调研，机组人员通常在15min之内即可排查出故障发动机、关闭

引气阀甚至关停发动机，执行排烟程序后5min内可使客舱空气恢复到正常水平。

经文献调研和分析发现，prEN 4618中各类有毒物质的安全浓度限制值来自于各类适航条款、各国的职业暴露接触限制标准和世界卫生组织（WHO）空气质量指南，综合这些文献中所述的有毒物质接触时间及其对人体健康的影响，可整理得到异常工作场景下有毒物质浓度的量化要求，如表2所示。因此，如果15min之内有毒物质的浓度均值超过了表2中的浓度限制值，可能导致

CCAR-33.75 (g) (3) 条款中重要发动机后果的发生；如果有毒物质的浓度均值高于表2中的浓度限制值并且乘客/机组人员的接触时间超过了15min，则可能导致CCAR-33.75 (g) (2)(ii)中危害性发动机后果的发生。

适航符合性验证方法 发动机正常工作场景

针对发动机正常工作场景，发动机制造商可参考ARP 4418A中推荐的试验方法开展发动机引气中有毒物质浓度测量试验。ARP 4418A要求该试验至少应包含如下4个典型

表2 异常工作场景下的有毒物质浓度限制值及其气味特征

化学物质 登录号	物质名称	浓度限制值及接触时间	气味特征 & 阈值	浓度限制值下的不同接触时间对人体的健康影响	
				≤ 15min	更长时间
50-00-0	甲醛	5.0mg/m ³ (4.07 ppmv), 超过30min	在室温下有刺鼻、令人窒息的气味；气味阈值为0.83ppm	上呼吸道和眼睛刺激	头晕头痛，眼部或呼吸道疾病，鼻咽癌
75-07-0	乙醛	45 mg/m ³ (25ppmv), 超过15min	有一种刺鼻的令人窒息的气味，但在稀释浓度下，它有一种水果味和令人愉快的气味。气味阈值为0.05ppm (0.09mg/m ³)	眼睛和上呼吸道刺激	慢性酒精中毒症状，诱发肝脏、肾脏损伤和癌症
107-02-8	丙烯醛	0.75 mg/m ³ (0.3ppmv), 超过15 min	有烧焦的、甜的、刺鼻的气味，大多数人在空气浓度约为0.25ppm (0.6mg/m ³) 时可能闻到这种气味	眼睛和上呼吸道刺激	长期接触可能引发呼吸系统疾病、皮肤炎症
108-88-3	甲苯	760mg/m ³ (200ppmv), 超过15min	具有甜味,刺激性气味,气味阈值为2.9ppm	麻醉作用, 皮肤黏膜刺激	吸入8h会导致疲惫, 全身无力
71-43-2	苯	3.2mg/m ³ (1ppmv), 超过8h	有一种甜味气味, 气味阈值为1.5ppm (5mg/m ³)	基本无影响	头晕头痛、意识障碍, 诱发白血病
78-93-3	甲基乙基酮 (2-丁酮)	897.8mg/m ³ (300ppmv), 超过15min	据报道有类似丙酮的气味, 气味阈值为5.4ppm	眼睛、呼吸道刺激	皮肤干燥, 可能影响发育
67-64-1	丙酮	3630mg/m ³ (1500ppmv), 超过15min	有甜味和水果味, 气味阈值为0.4ppm	眼睛、呼吸道刺激	头痛、头晕、疲劳
124-38-9	二氧化碳	9130 mg/m ³ (5000ppmv), 超过90 min	—	犯困,呼吸中枢、中枢神经系统作用	超过8h可能窒息
630-08-0	一氧化碳	100 mg/m ³ (90ppmv), 超过15min	—	轻微头痛, 头晕	恶心, 碳氧血红蛋白血症
75-09-2	二氯甲烷	<3 mg/m ³ (0.86ppmv), 超过24h	有甜味, 气味阈值为2.5 × 10 ⁻⁴ ppm	基本无影响	碳氧血红蛋白血症; 周围神经系统损害

注：①各类物质的浓度限制值对应的标准状态为，环境压力101.325kPa、环境温度293.15K (20℃)；②各类物质的物理特征、气味特征和气味阈值数据来源于美国环境保护总署；③臭氧、超细颗粒物、PM2.5、PM10、内毒素、细菌、病毒和真菌均无安全限制值，最多影响健康，因此不作为发动机异常工作场景下客舱用引气中有毒物质的标记物。

运行状态：带高压引气的慢车运行；从高压引气切换到低压引气之前的运行；从高压引气切换到低压引气之后的运行；带低压引气的高功率运行，如高度巡航。在测量试验中，上述运行状态可被4个试车工况所覆盖：慢车运行、高压引气切换到低压引气之前的稳态转速、高压引气切换到低压引气之后的稳态转速、最大连续推力。

试验开始前，应按照ARP 4418B的要求检测集气管路和引气采集设备的清洁度，确保任一集气管路中的碳一化合物(C1)的含量不超过1.0 ppmv。试验过程中，需要对环境空气(进口)和发动机ECS引气(出口)同时进行采样，发动机本身产生的有毒物质浓度等于出口处与进口处有毒物质浓度的净差值。如果试验被意外中止，则需要立刻停止采集和测量引气，然后让发动机额外运行一段时间，以便将可能出现的杂质或多余的滑油排出发动机，直到集气管路的清洁度满足要求之后再重新开展试验。

如果测量得到的有毒物质浓度净差值(浓度校正到标准状态)均不超过ARP 4418A中的浓度限制值(见表1)，即可表明发动机在正常工作条件下的引气品质符合适航要求。发动机制造商应将有毒物质浓度数据和传播速率信息写入发动机的安装说明书，以便提供给安装对象。

发动机异常工作场景

FAA发布的咨询通告(AC) 33.75-1A指出，当有毒物质是由发动机不正常工作所造成时，且足以在飞行中导致机组人员或乘客失去能力，那么产生和传播有毒物质将被视为危害性发动机后果，例如，有毒物质的传播速度非常快，在能

够阻止它传播时，人员已经失去能力；没有有效措施来阻止可令人失去能力的有毒物质向驾驶舱或客舱传播；在发现人员失去能力前，有毒物质是察觉不到的。AC 33.75-1A还指出，有毒物质掺混到引气中的发动机不正常工作情况主要包括转静子碰磨产生的磨削物或者泄漏的滑油进入到压气机气流之后发生了热分解。因此，发动机制造商可通过两种方法来表明发动机在异常工作场景下的适航符合性，一是计算导致有毒物质产生和阻止其传播等措施的失效概率，验证引气污染故障树的失效概率满足适航要求；二是通过确定有毒物质的来源、成分及浓度，分析并验证发动机可能产生的有毒物质浓度不足以使机组人员或乘客失去能力或者不足以使机组人员工作能力降低。

针对转静子碰磨场景，实践中可通过分析转静子碰磨的位置、选材、典型颗粒大小等识别出可能产生有毒物质的碰磨材料牌号，然后根据碰磨材料的最大工作温度、热分解产物、发动机的最大刮磨量、发动机客舱用引气温度范围等信息，分析可能产生的有毒物质类型和最高浓度水平，评估转静子碰磨导致使机组人员或乘客失去能力或者工作能力降低的可能性/发生概率。

针对滑油泄漏场景，实践中可通过分析滑油泄漏的可能位置、滑油泄漏程度、滑油热分解特性等，评估可能产生的有毒物质类型和最高浓度水平。然后，结合引气污染的察觉方式、机组人员可采取的能够阻止有毒物质传播到客舱的具体措施、滑油泄漏的故障树分析等信息，评估滑油泄漏导致使机组或乘客失去能力或者工

作能力降低的可能性/发生概率。

结束语

目前，发动机引气是民用飞机的主要供气源，其引气品质不仅会妨碍飞机的安全飞行，还可能影响机组人员和乘客的健康和舒适度。然而，大多数的民机客舱中只安装了用于监测火灾的烟雾探测器和用于过滤细小的颗粒物、细菌和病毒等的高效颗粒空气(HEPA)过滤器，普遍缺乏探测和净化气态污染物的设备和手段。发动机制造商需要确保发动机提供的引气品质符合适航要求，尽可能地降低发动机引气对人体健康的危害。

近年来，航空行业内对引气污染问题的研究也取得了一定成果。例如，2015年6月，美国国家航空航天局(NASA)在飞行器综合推进研究(VIPR)项目的引气试验中通过向发动机内部喷射滑油来模拟滑油泄漏的场景，然后对比发动机引气出口处的各类有毒物质探测设备的响应水平，从而识别出了可用于尽早察觉到引气污染的标记物及其探测设备。再如，欧洲航空安全局(EASA)在2015—2017年期间完成的涡轮发动机滑油的热分解及其毒性特征(AVOIL)研究项目，发现了滑油热分解可产生128种以上的化合物，还通过气液界面、人体肺外模型等试验方法研究了滑油热分解产物的毒性及其对人体健康的影响。这些研究成果虽然提高了业界对于发动机引气污染物的认识，但仍然需要在实践中持续创新和应用。

（梁晶晶，中国航发商用航空发动机有限责任公司，工程师，主要从事航空发动机安全性分析和情报研究）