



客机座舱气态污染物及其净化技术现状*

天津大学 陆义[☆] 裴晶晶[△] 韩旭 刘鲁萌 刘俊杰

摘要 介绍了客机座舱环境的特点与飞机环境控制系统中的通风净化系统,给出了国外关于机舱内空气质量的实际调查结果,总结了目前新风中臭氧处理的方法及可能面临的问题,对可用于回风中挥发性有机化合物处理的几种技术及其利弊进行了分析对比,探讨了机舱空气净化技术的发展方向。

关键词 机舱环境 气态污染物 挥发性有机化合物 环境控制系统 臭氧转化器

Review of gaseous pollutants in aircraft cabin and purification technologies

By Lu Yi[★], Pei Jingjing, Han Xu, Liu Lumeng and Liu Junjie

Abstract Presents the characteristics of aircraft cabin environment and the ventilation purification system of its environmental control system. Gives survey results of cabin air quality, and summarizes ozone treatment methods in cabin outdoor air systems and potential problems. Analyses and compares several technologies that can be used for removal of volatile organic compounds in cabin return air systems. Discusses the developing orientation of cabin air purification technology.

Keywords aircraft cabin environment, gaseous pollutant, volatile organic compound, environmental control system, ozone catalytic converter

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

0 引言

随着经济的发展,我国航空客流量也逐年增加,2012年航空输送旅客已经达到3.2亿人次,且仍在持续增长,预计到2020年将达到7亿人次^[1]。不仅客运量在增加,机舱内环境质量也受到越来越多的关注。机舱环境由飞机的环境控制系统控制,其控制着机舱内的压力、温度、湿度、空气流动与气流分布、空气循环与过滤、空气中污染物等多方面内容,是飞机的几个主要系统之一。

现代民用客机座舱环境与办公室、住宅等建筑环境不同,具体表现在:人员密集、新风量小、低压、低湿、密闭性高等。

人员密集。机舱内的人员密度大,每个乘客平均拥有的空间只有 $1\sim 2\text{ m}^3$ ^[2],远小于一般的办公环境。

低压与低湿。典型的商业飞机在巡航状态下,机舱内的空气压力比较低,一般相当于 $1\ 676\sim 2\ 134\text{ m}(5\ 500\sim 7\ 000\text{ ft})$ 高度处的大气压^[3],约为 $77.8\sim 82.2\text{ kPa}$,即只有标准大气压的 $3/4$ 左右。一般商业客机的巡航高度在 $5\ 490\sim 12\ 500\text{ m}$ 之间^[4]。在这个高度,特别是飞行高度较高时,大气中水分含量很低。机舱内水分主要来源于乘客的呼吸与汗液蒸发,因此机舱内相对湿度很低,通常低于 20% ,一般只有 $14\%\sim 19\%$ ^[3]。有研究表明,过低的相对湿度会造成乘客与乘务人员身体干燥瘙痒、眼睛干涩及呼吸道不通畅等多种不适的症状^[5]。另外,在建筑室内环境中的研究表明,相对

①[☆] 陆义,男,1990年7月生,在读硕士研究生

[△] 裴晶晶(通信作者)

300072 天津大学环境科学与工程学院14楼240C室
(022) 27409500

E-mail: jpei@tju.edu.cn

收稿日期:2014-02-21

修回日期:2014-03-17

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(编号:2012CB720100)

湿度的降低会放大空气中污染物的影响,更容易造成病态建筑综合征^[6]。因此,为保证乘客及乘务人员的健康,在低湿的机舱环境中,机舱内空气质量的控制就显得尤为重要。

越来越多的证据显示,客机座舱内的挥发性有机化合物(VOC)、臭氧等气体会影响乘客和乘务人员的舒适性与健康。因此,了解机舱内气态污染物的种类与浓度水平,总结现有的处理技术,分析其利弊并探讨未来的发展方向,对机舱内气态污染物的处理及保证机舱环境的安全与舒适有一定的指导意义。

1 机舱环境控制系统与舱内气态污染物

机舱环境控制系统的一个主要任务是控制舱内污染物的浓度,这与客舱通风系统有直接关系。客机的通风多采用50%新风+50%回风^[7]。飞机的主发动机引入外部新鲜空气进行压缩与加热,在燃烧室前将一部分压缩空气送入飞机的通风系统,在空调包(air conditioning pack)中减压并冷却,然后与来自机舱内的、经过高效过滤器过滤后的回风混合,再送回客舱。

美国供热、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)的商用客舱空气质量标准(ASHRAE Standard 161-2007)建议的人均舒适通风量约为7.1 L/s^[8]。大部分的现代商业客机中人均通风量约为6~12 L/s,而在Lindgren等人对26架波音767-300飞机进行的调查中,根据机舱内CO₂平均体积分数(709×10^{-6})推算得出巡航状态下机舱内人均通风量达到了15 L/s^[9]。

机舱内的污染物主要有颗粒物、微生物及气态污染物三大类,其来源主要为:

- 1) 飞机到达与离开机场时的地面气态污染物;
- 2) 飞机巡航状态时引入的新风中的臭氧;
- 3) 乘客及乘务人员呼出与代谢散发的CO₂、丙酮、乙醇及感官污染物(气味);
- 4) 机舱内清洗剂散发的化学污染物;
- 5) 某些航班中喷洒杀虫剂的残留物^[5];
- 6) 臭氧与有机物反应产生的二次污染物。

由于来源不同,机舱环境控制系统的回风系统与新风系统面临着不同的任务。

2 回风中的气态污染物及其处理技术

2.1 回风中的气态污染物

在巡航状态下,除臭氧以外的其他污染物主要来自机舱内部。这些舱内污染物的去除主要在回风系统中进行。一般商用客机的回风系统都装有高效过滤器。2009年的欧洲标准EN 1822-1规定,用于飞机的高效过滤器,对最易穿透粒径为0.3 μm的颗粒的去除效率应达到99.97%,但是高效过滤器对气态污染物却无能为力。

Lindgren等人对26架波音767-300飞机上的空气质量进行检测后发现,巡航状态下,CO₂的体积分数在96%的检测时间内低于 $1\ 000 \times 10^{-6}$,NO₂与O₃的质量浓度最大值分别为37,66 μg/m³,甲醛的质量浓度最大值为15 μg/m³,机舱内空气质量符合美国联邦航空局的标准^[9]。

Nagda等人根据2003年以前的6篇关于机舱内污染物种类与浓度实时检测的文献中的数据,总结了机舱内CO₂和CO的浓度水平并进行对比,认为机舱内主要污染物浓度水平与住宅、办公室等建筑环境及其他交通工具内的污染物接近,但机舱内乙醇与丙酮浓度明显较高,这归结为机舱内较高的人员密度;氯代烃及与燃料有关的污染物浓度比建筑及其他交通工具内更低^[5]。

克兰菲尔德大学的健康与环境研究所受英国政府资助,对机舱内污染物进行了实际检测,发现甲苯、二甲苯与柠檬烯等VOC的浓度满足英国标准BS EN 4618:2009,也满足居住及办公环境的标准^[10]。

关军等人随机选取16架次国内航班,对机舱内的VOC进行了实测,结果显示座舱内总的污染物浓度在巡航阶段出现一定程度的增加,其增量主要来自于人员活动,如餐饮服务、人体散发等^[11]。

综上,机舱内气态污染物的浓度基本与居住及办公建筑环境中接近。但是,目前对机舱内气态污染物的控制,主要的方法是引入新风进行稀释,以将污染物维持在较低浓度水平。而随着对机舱环境要求的逐渐提高及能耗成本的增加,有必要采取更主动、更高效的技术手段。

2.2 回风中气态污染物处理技术

2.2.1 吸附技术

吸附分为物理吸附与化学吸附,分别基于吸附剂与吸附质的分子间作用力及分子间的化学键。吸附的效果主要与吸附机理、吸附表面积、孔隙率、平衡吸附量、污染物在吸附剂中的扩散系数和半衰

期等因素有关^[12-13]。

在建筑室内空气净化领域,吸附已被多项研究证明是一种有效的去除 VOC 的方法。Parmar 等人通过实验证明活性炭对于去除多种气态污染物均有效果^[12,14];Fang 等人研究发现基于吸附原理的除湿转轮对改善空气品质有积极作用,除湿转轮对 VOC 和感官污染物(气味)的去除效率分别不低于 94%与 80%,使用除湿转轮后测试人员对空气品质的不满意率由 70%降低到 20%,同时通过检测没有发现二次污染物^[15]。

对于机舱或其他交通工具的舱室,去除气态污染物的吸附装置通常采用类似颗粒物过滤器的一次性过滤单元。吸附过滤器由支撑基体和阻燃吸附床组成,在机舱环境下常与颗粒物过滤器结合在一起使用,同时去除颗粒物与化学污染物。图 1 为美国某公司的 HEPA/Odour 吸附过滤器示意图^[16],其将高效空气过滤器和吸附过滤器结合在

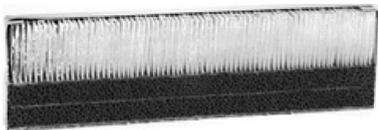


图 1 某公司 HEPA/Odour 吸附过滤器横截面^[16]

一起,横截面下半部分即为用于去除气态污染物的吸附材料。该过滤器已作为可选件应用于 Airbus A320/A330/A340 等系列飞机中,可与普通高效过滤器互相转换。

吸附技术的优势在于:1) 吸附过滤器适合低温环境,而且对多种污染物均可有效去除;2) 水蒸气对活性炭吸附 VOC 有不利影响,而机舱内相对湿度很低,更有利于活性炭的吸附;3) 吸附过滤器结构简单,安全节能。

然而,吸附技术也存在很多问题:1) 活性炭吸附过滤器由于受到吸附量的限制,质量大,使用寿命有限,由于飞机的空气净化装置只有在 C 检(通常为飞行 6 500 h 后)时才更换,这一缺点严重影响吸附技术在机舱污染物控制方面的长效性;2) 吸附材料吸附量达到饱和后易产生二次污染;3) 在机舱环境中,不仅存在 VOC 和气味等污染物,还存在较高浓度的臭氧,吸附态的 VOC 可与臭氧发生二次反应,产生包括超细颗粒物在内的多种有害副产物^[17],这使得吸附技术应用于机舱环境时需要谨慎考虑。

2.2.2 光催化技术

光催化技术是指在紫外线的照射下,催化剂将气态污染物催化分解为二氧化碳和水的技术。典型的光催化装置包括两个最基本的部件:光催化材料与紫外灯光源。研究中最常用到的催化剂是 TiO_2 , ZnO 与 ZnO_2 也有应用^[18-19]。在室内空气净化领域,光催化技术是一种通用的空气净化技术,可以同时去除多种污染物,如醛类、芳烃、烷烃、烯烃、卤代烃、气味等。但是光催化氧化过程容易产生副产物,如甲醛、乙醛,这些副产物的危害甚至更大^[20-21]。因此有研究认为光催化技术还不是可以真正应用于实际的成熟技术^[22]。

GINestet 等人设计了一种用于机舱的新型光催化氧化空气过滤器,其中的光催化单元包括 2 个可以互换的负载 TiO_2 面板和夹在中间的 4 个紫外线灯(见图 2)。研究结果表明,光催化单元的效

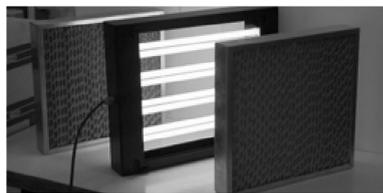


图 2 光催化单元示意图^[23]

率随 VOC 种类的不同而不同。其中甲苯最难被氧化,反应的中间产物为甲醛和乙醛,中间产物会继续被氧化,但是对于中间产物是否会被完全氧化,以及光催化技术是否适用于实际机舱环境并没有给出答案^[23]。

为验证在实际机舱环境中,光催化技术对 VOC 的净化效果和乘客对空气品质主观评价的影响,Sun 等人在模拟机舱中进行了实验,评价以 TiO_2 为催化剂的紫外光催化对 VOC 的净化效果。结果显示,光催化技术可以有效去除 VOC,如乙醇、甲苯、异戊二烯,但乙醇未完全氧化时会产生甲醛、乙醛等副产物^[24]。

Wisthaler 等人在高乘客密度、航行时间 7 h 的条件下模拟对比了吸附与光催化技术的净化效果。结果发现,两种技术都可有效去除大部分的有机污染物,但是光催化在不能完全氧化乙醇时,会产生有害的甲醛和乙醛气体,而乙醇在机舱中非常常见,主要由湿纸巾、酒精饮料散发以及人体呼出。综合考虑,吸附技术比光催化技术在整体上效果更好,但是作者同时也指出,该研究没有考虑长期效

果,比如较低的相对湿度对有机污染物在光催化材料上积聚的影响,以及吸附剂达到吸附饱和与饱和后污染物再散发的影响^[25]。

在机舱净化产品方面,光催化技术还没有得到实际应用。图 3 为美国某公司处于开发阶段的光催化可再生吸附装置模型。在实验室条件下测得

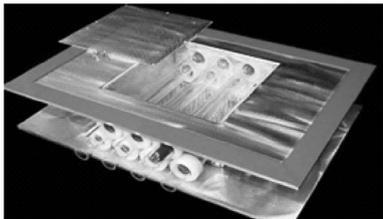


图 3 美国某公司光催化可再生吸附装置模型^[16]

其对 VOC 的去除效率可达 90% 以上。该装置将光催化技术和吸附技术结合起来,既发挥了光催化效率高、阻力小、寿命长的优势,也通过吸附组件消除了光催化可能带来副产物的问题。但是这种装置结构复杂,吸附组件同样存在对副产物吸附饱和的问题,实际效果也有待验证。

光催化装置的优势在于:1) 可以在常温下工作;2) 可以处理多种污染物;3) 质量轻、阻力小;4) 效率稳定,使用寿命长。但也存在很多问题:1) 需要消耗电能;2) 设备结构复杂;3) 易产生有害副产物。

2.2.3 低温等离子技术

低温等离子技术是利用等离子反应器内的高活性自由基和臭氧将空气中的 VOC 或气味污染物氧化成二氧化碳和水,达到净化空气目的的技术^[26]。

低温等离子技术可以有效去除颗粒物,去除效率在 76%~99% 之间^[27-28],对气态污染物的去除效果并不理想,但当其与热催化技术^[27]、紫外光催化技术^[28]结合时,去除 VOC 的效果会明显提高。Van Durme 等人通过实验证明,对于等离子技术,相对湿度越低,甲苯的去除效果越好^[29],这一特性恰好适用于低湿的机舱环境。

低温等离子装置的优点在于:1) 有较长的寿命;2) 在整个寿命周期内都能维持稳定的效率;3) 可以同时去除颗粒物和气态污染物。其最大的问题在于容易产生副产物(如臭氧),且需要较高的电压,若应用于飞机上,则可能存在较大的安全隐患。

2.2.4 热催化技术

热催化技术是指利用贵金属、过渡金属氧化物等催化材料,在加热条件下将 VOC 氧化为二氧化碳和水的技术。

Muggli 等人对比了 $\gamma\text{-MnO}_2$ 与 Pt/TiO₂ 两种分别代表过渡金属氧化物与贵金属的典型催化材料对 VOC(以正己烷、苯与乙酸乙酯三种不同性质的有机物为代表)的去除效果,在反应温度达到 200 °C 或更高时,两种材料对 VOC 的去除效率均能达到 90% 以上^[30]。

通常条件下,反应温度需要达到 100 °C 或更高,对 VOC 的催化分解才会有明显效果^[31]。因此,催化反应所需的高温环境严重限制了热催化技术在机舱环境的应用。目前热催化技术已有应用,美国某公司将 VOC 的催化分解与臭氧的催化分解相结合制备催化转化器,用于处理新风中的 VOC,但其主要作用是处理臭氧^[32]。

3 新风中的臭氧及其处理技术

3.1 新风中的臭氧

机舱内的臭氧来自外部大气。中高纬度地区大气对流层的高度约为 8 000~12 000 m,因此,很多商业飞机,特别是飞行高度较高的越洋飞机以及在高纬度地区飞行的飞机会在臭氧浓度较高的对流层顶及平流层内飞行。以美国汽车工程师学会的报告为例,在北纬 50°、海拔 10 700 m 处,春季臭氧体积分数可达到 0.5×10^{-6} ;在北纬 80°处,甚至高达 1.0×10^{-6} ^[2]。

机舱内的臭氧会直接引起乘客眼睛干涩、头痛、胸闷及皮肤干燥瘙痒等多种不适症状,长期接触会引起严重的呼吸道疾病并损害免疫系统。同时臭氧会与机舱内的 VOC、人体皮肤、头发及衣服等多种物质发生反应,产生多种副产物及超细颗粒物^[33]。

美国联邦航空局 (FAA) 操作要求 CFR-title14-part121. 578^[34]、适航标准 CFR-title14-part25. 832^[35],ASHRAE 的商用客舱空气质量标准 (ASHRAE Standard 161-2007^[8]) 均对客舱中的臭氧浓度作出了规定:飞行高度高于 9 754 m (32 000 ft) 时,臭氧体积分数任何时刻均不允许超过 0.25×10^{-6} ,且飞行高度高于 8 230 m (27 000 ft) 时,任意连续 3 h 的平均值不得超过 0.1×10^{-6} 。这些标准适用于任何航班。FAA 的顾问委员会 (AC120 - 38) 及 ASHRAE Standard 161-

2007 建议在有可能出现臭氧超标的航班中,应连续监测臭氧浓度,且应安装并运行臭氧转换器。可见,控制飞机客舱中的臭氧浓度对于保护乘客及机务人员的健康是非常必要的,而且在某些机型中是强制性的。因此,对于新风中污染物处理的一个主要任务就是去除其中的臭氧。

Spengler 等人实际调查发现,被检航班机舱内臭氧平均体积分数为 0.08×10^{-6} , 并且检测到有 20% 的航班机舱内臭氧体积分数超过了 0.10×10^{-6} , 有 11% 的航班机舱内臭氧体积分数超过了 0.12×10^{-6} [4]。2006—2007 年, Bhangar 等人对北美境内的航班和跨洋航线的航班机舱内的臭氧浓度进行了实时检测, 结果显示, 在没有安装臭氧转化器的飞机机舱内, 臭氧浓度的平均值是装有臭氧转化器的 7 倍; 装有臭氧转化器的飞机机舱内臭氧浓度较高时, 仍满足美国联邦航空局的标准 [36]。美国客机机舱环境研究中心在 2010 年的报告中指出, 没有安装臭氧转化器的飞机机舱内臭氧浓度明显较高, 且在调查的 46 架未安装臭氧转化器的飞机中, 8 架飞机的机舱内臭氧体积分数超过了 0.10×10^{-6} , 1 架超过了 0.25×10^{-6} [33]。

综合相关标准与实际调查结果, 飞机有必要安装去除臭氧的装置, 并予以定期的维护与更换。

3.2 新风中臭氧的处理技术

通常对气态臭氧的净化有两种方法: 1) 吸附, 如活性炭吸附去除臭氧; 2) 催化分解, 钯、铂等贵金属及二氧化锰等过渡金属氧化物催化分解臭氧均有很高的效率。

3.2.1 吸附技术

1977 年, 在美国联邦航空局确认臭氧是造成机舱内人员身体不适的主要原因后, 泛美航空公司与波音公司合作, 以活性炭吸附作为应急方案在波音 747 上试用。采用活性炭吸附的方法可以很好地去除臭氧, 但是存在很严重的问题: 过滤器寿命短, 需要频繁更换; 质量大, 对于飞机是一个非常大的负担; 防火性差, 由于臭氧的强氧化性, 活性炭吸附臭氧后, 容易自燃甚至发生爆炸。由于这些缺陷, 活性炭吸附去除臭氧的方法并没有得到广泛应用。

3.2.2 热催化技术

对于臭氧的净化, 热催化技术是利用催化材料, 将臭氧催化分解为氧气的技术。1978 年, Johnson Matthey 公司以贵金属为活性涂层, 金属

蜂窝结构为基底, 套装在金属罐体中, 研发了臭氧催化装置, 随后进行商业化并应用于飞机上。目前, 臭氧转化器是飞机上主流的去臭氧的装置。

臭氧转化器的催化材料主要有两类, 一类是贵金属, 如铂、钯、铑等; 一类是过渡金属氧化物, 如锰、镍、铁、钴、铜等的氧化物。

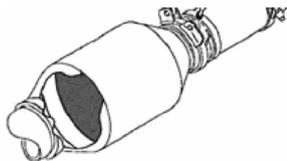
1979 年, Johnson Matthey 公司在实验了 30 种不同的活性材料后, 最终选择了铂作为催化材料。而 Heck 等人研究发现, 无论是在无污染的理想环境下, 还是在实际飞行环境中检测, 钯对臭氧的催化效率比铂更高 [37]。除钯、铂等贵金属外, Hao 等人发现金对催化分解臭氧也有很大的潜力, 在高浓度 (体积分数 400×10^{-6})、常温 (300 K) 条件下, 仍有很高的催化分解效率 [38]。Imamura 等人研究了银、镍、锰、铁、铜、钴等多种金属的氧化物对臭氧的催化分解效率, 发现氧化银的效率最高 [39]。

在过渡金属中, 催化分解臭氧效率最高的是以 MnO_2 为代表的锰氧化物 [40]。在 Tatsushima 等人的专利中也提到以 MnO_2 为催化材料可以达到很好的催化效果 [41]。顾玉林比较了 MnO_2 , Co_3O_4 , NiO , Fe_2O_3 , CuO 的催化活性, 并进行了复金属材料实验, 对比锰-铜、锰-镍、锰-铁、锰-钴、钴-镍、铁-镍、铜-镍等多种双金属氧化物催化材料, 发现锰-铜系金属氧化物的活性最高, 稳定性最好 [42]。

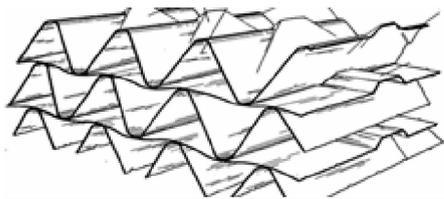
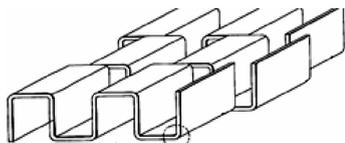
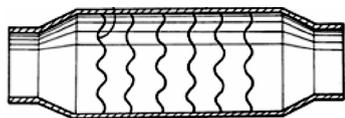
Lester 等人通过实验发现贵金属如铂等, 搭配基体金属如镍、铁等催化效果很好 [43]。Liu 等人研究了双金属催化剂如钯与镍组合, 铂、铑、金等与锰、钴、铁等组合的催化效果。在实验中, 钯与镍组合, 在臭氧体积分数为 1×10^{-6} 、温度为 $95 \sim 175$ °C 的条件下, 臭氧的转化效率均在 98% 以上 [44]。Yu 等人在锰催化剂中加入钯, 以提高催化剂的抗水性, 发现锰含量为 80%~90% 时催化活性最高 [45]。

实际应用于飞机上的催化剂主要以贵金属为主, $1\% Pd/\gamma-Al_2O_3$ 是目前飞机上使用的效率最高的臭氧催化材料 [46]; 也可搭配过渡金属氧化物, 如 $Pd-MnO_x/SiO_2-Al_2O_3$, 以有效降解臭氧, 同时提高抗钝化能力 [47]。

臭氧转化器一般由金属外壳和内部涂有催化剂的蜂窝状金属或陶瓷组成 [7] (如图 4 所示), 催化剂附着于蜂窝状空气流通通道表面, 增加了催化剂

图 4 臭氧转化器结构示意图^[7]

与臭氧的接触面积。为了增加流道内的径向流动,也可以在流道上增加突起的肋片^[48](如图 5 所示);或者采用近似蜂窝状的结构,如交叉流道的蜂窝结构^[49](如图 6 所示);或者采用膜结构^[50-51],膜结构一般都采用多层和褶皱的形式(如图 7 所示),滤膜为一层很薄的多孔材料或微纤多孔材料,其上附着催化材料。

图 5 带肋片蜂窝状结构示意图^[48]图 6 交叉流道蜂窝状结构示意图^[49]图 7 臭氧转化器膜结构示意图^[50]

除已经得到广泛应用的蜂窝状结构整体式催化转化器外,也有学者对其他结构形式的热催化分解臭氧转化器进行了研究。Kalluri 等人利用直径为 4, 8, 12 μm 的镍纤维,采用湿法造纸技术,将负载钯、银的氧化铝粉末均匀分布其中,烧结制备了金属纤维毡(如图 8 所示),再成型为 W 型过滤器,其对体积分数为 10×10^{-6} 的臭氧的催化分解效果很好,臭氧的停留时间非常短(67~200 μs),且压

图 8 负载活性组分的金属纤维毡^[52]

降很小,与现有的整体式臭氧催化转化器的压降接近^[52]。

这种采用金属纤维毡的过滤器与现在很多颗粒物过滤器类似,其最终成型的结构形式多样,便于结构优化,以提高效率与寿命,减小压降。同时,负载不同的催化材料,可以去除不同的污染物,而不仅仅限于臭氧。如通过与活性材料组合,可以实现去除机舱内 VOC 等多种污染物,以及实现同时去除臭氧与 VOC 的目的。因此,这是一种很有潜力的可应用于机舱内臭氧与 VOC 去除的技术。

热催化分解去除臭氧技术在航空工业的研究和应用已有 30 多年的历史,其主要优势在于技术成熟,可以满足机舱内的净化要求,但也存在以下问题:1) 热催化分解一般需要最低 150 $^{\circ}\text{C}$ 的工作环境,在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上能更好地保证对多种污染物的有效去除,如果工作环境温度低于 150 $^{\circ}\text{C}$,催化氧化效果就会显著下降^[30];2) 根据航空工业界的经验,臭氧转化器也会不断积聚污染物,效率逐渐降低;3) 偶然发生的烟雾或高浓度燃油污染物在很短的时间内便会促使催化剂中毒。

4 总结与展望

目前机舱内空气质量与一般建筑环境接近,除臭氧以外的其他气态污染物的控制主要是通过新风的稀释作用。而随着全球性的能源危机,客机的新风量很可能进一步减小,这就要求对机舱内的 VOC 及气味等污染物采取更主动、更有效的控制方式。

对于 VOC 的净化,在吸附、光催化、热催化与等离子等几种主要技术中,应用较多的是吸附技术。吸附装置结构简单,适合低温环境,对多种污染物都可有效去除,几乎不产生二次污染物,但是吸附容量有限,寿命短。

除吸附技术外,热催化技术在机舱环境中的应用也有一定潜力。催化材料会将吸附到表面的污染物分解掉,因此理论上不存在吸附饱和与寿命过短的问题。但是在常温下,包括贵金属与过渡金属氧化物在内的多数催化材料的催化活性都不高,且一种催化材料往往只对特定的某几种污染物有较高的催化效果,而实际条件下污染物的种类都是很复杂的。

另外,由于反应产物复杂、停留时间过长及安全与稳定性等原因,虽已有将光催化技术应用于机

舱中去除 VOC 的相关研究,但并无应用实例;尚没有将低温等离子技术应用到机舱环境中的研究。

而对于新风中必须去除的臭氧,热催化技术的应用在国外已经商业化,且趋于成熟。但我国在该领域仍处于起步阶段,目前笔者正在进行低温下催化分解臭氧的相关研究。

综合考虑臭氧与 VOC 的去除,笔者认为热催化技术是最有应用潜力的。其关键在于开发常温或中低温条件下,针对机舱内气态污染物的高效催化材料。虽然一般情况下贵金属,如铂、钯等的催化效率高于过渡金属氧化物,如二氧化锰,但后者在经济性方面优势更大。

对于热催化材料应用的结构形式,传统的填充床结构阻力较大,但效率较高,仍有一定的应用价值;也可参考现有的颗粒物过滤器,将催化材料与滤纸结合,制成气态污染物过滤器;整体式蜂窝催化转化器的阻力较小,在能耗方面有较大优势,合适的催化材料与负载方式将成为其应用的关键。

参考文献:

[1] 尹维友. 大型客机环控系统中高效空气过滤器过滤性能的研究[D]. 天津:天津大学,2000: 9-10

[2] Hocking M B. Passenger aircraft cabin air quality: trends, effects, societal costs, proposals [J]. *Chemosphere*, 2000, 41(4): 603-615

[3] Strøm-Tejse P, Wyon D P, Lagercrantz L, et al. Passenger evaluation of the optimum balance between fresh air supply and humidity from 7-h exposures in a simulated aircraft cabin[J]. *Indoor Air*, 2007, 17(2): 92-108

[4] Spengler J D, Ludwig S, Weker R A. Ozone exposures during trans-continental and trans-pacific flights[J]. *Indoor Air*, 2004, 14(s7): 67-73

[5] Nagda N L, Rector H E. A critical review of reported air concentrations of organic compounds in aircraft cabins [J]. *Indoor Air*, 2003, 13(3): 292-301

[6] Fang L, Wyon D P, Clausen G, et al. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance [J]. *Indoor Air*, 2004, 14(s7): 74-81

[7] Hunt E H, Reid D H, Space D R, et al. Commercial airliner environmental control system [C] // The Aerospace Medical Association Annual Meeting. Anaheim, California, 1995

[8] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 161-2007 Air quality within commercial aircraft [S]. Atlanta: ASHRAE Inc,2007

[9] Lindgren T, Norbäck D. Cabin air quality: indoor

pollutants and climate during intercontinental flights with and without tobacco smoking[J]. *Indoor Air*, 2002, 12(4): 263-272

[10] Crump D, Harrison P, Walton C. Aircraft cabin air sampling study: part 2 of the final report[R], 2011

[11] 关军,杨旭东,王超,等. 飞机座舱环境挥发性有机化合物的实测与分析[J]. *暖通空调*, 2013, 43(12): 80-84

[12] Parmar S S, Grosjean D. Sorbent removal of air pollutants from museum display cases [J]. *Environment International*, 1991, 17(1): 39-50

[13] 范延臻. 改性活性炭对有机物的吸附性能[J]. *环境化学*, 2001(5): 444-448

[14] Yao M, Zhang Q, Hand D W, et al. Adsorption and regeneration on activated carbon fiber cloth for volatile organic compounds at indoor concentration levels[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(1): 31-36

[15] Fang L, Zhang G, Wisthaler A. Desiccant wheels as gas-phase absorption (GPA) air cleaners: evaluation by PTR-MS and sensory assessment[J]. *Indoor Air*, 2008, 18(5): 375-385

[16] Bull K, Roux P. Cabin air filtration systems—novel technological solutions for commercial aircraft[C] // 40th International Conference on Environmental Systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010

[17] Metts T A. Heterogeneous reactions of ozone and d-limonene on activated carbon[J]. *Indoor Air*, 2007, 17(5): 362-371

[18] Zhu B L, Xie C S, Wang W Y, et al. Improvement in gas sensitivity of ZnO thick film to volatile organic compounds (VOCs) by adding TiO₂ [J]. *Materials Letters*, 2004, 58(5): 624-629

[19] 崔星. TiO₂ 光催化降解气态污染物的影响因素研究进展[J]. *化工进展*, 2013(10):2377-2386

[20] Hodgson A T, Destailats H, Sullivan D P, et al. Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air cleaning applications [J]. *Indoor Air*, 2007, 17(4): 305-316

[21] Mo J, Zhang Y, Xu Q, et al. Determination and risk assessment of by-products resulting from photocatalytic oxidation of toluene [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 89(3): 570-576

[22] Zhang Y, Mo J, Li Y, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(26): 4329-4343

[23] Ginestet A, Pugno D, Rowley J, et al. Development of a new photocatalytic oxidation air filter for aircraft cabin[J]. *Indoor Air*, 2005, 15(5): 326-334

- [24] Sun Y, Fang L, Wyon D P, et al. Experimental research on photocatalytic oxidation air purification technology applied to aircraft cabins[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(3): 258-268
- [25] Wisthaler A, Strøm-Tejsten P, Fang L, et al. PTR-MS assessment of photocatalytic and sorption-based purification of recirculated cabin air during simulated 7-h flights with high passenger density [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(1): 229-234
- [26] 栾志强. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J]. *环境科学*, 2011(12): 3476-3486
- [27] Park J H, Byeon J H, Yoon K Y, et al. Lab-scale test of a ventilation system including a dielectric barrier discharger and UV-photocatalyst filters for simultaneous removal of gaseous and particulate contaminants[J]. *Indoor Air*, 2008, 18(1): 44-50
- [28] Van Durme J, Dewulf J, Sysmans W, et al. Efficient toluene abatement in indoor air by a plasma catalytic hybrid system [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2007, 74(1): 161-169
- [29] Van Durme J, Dewulf J, Demeestere K, et al. Post-plasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air: effect of humidity [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 87(1): 78-83
- [30] Muggli D S, McCue J T, Falconer J L. Evaluation of γ -MnO₂ as a VOC removal catalyst: comparison with a noble metal catalyst [J]. *Journal of Catalysis*, 1998, 173(2): 470-483
- [31] 徐秋健. 热催化蜂窝降解室内 VOCs 实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2011(8): 1406-1408
- [32] Anderson S L. Composite combustion catalyst and associated methods: US Patent 6327293[P], 2009-06-12
- [33] Nazaroff W W, Weschler C J. Ozone in passenger cabins: concentrations and chemistry [R]. Report No. RITE-ACER-CoE-2010-2, Final Report, 2010
- [34] CFR (Code of Federal Regulation). Federal Aviation Administration, Amdt. CFR-title14-part121. 578 [S]. Washington: Department of Transportation, 2003
- [35] CFR (Code of Federal Regulation). Federal Aviation Administration, Amdt. CFR-title14-part25. 832 [S]. Washington: Department of Transportation, 2003
- [36] Bhangar S, Cowlin S C, Singer B C, et al. Ozone levels in passenger cabins of commercial aircraft on North American and transoceanic routes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11): 3938-3943
- [37] Heck R M, Farrauto R J, Lee H C. Commercial development and experience with catalytic ozone abatement in jet aircraft[J]. *Catalysis Today*, 1992, 13(1): 43-58
- [38] Hao Z, Cheng D, Guo Y, et al. Supported gold catalysts used for ozone decomposition and simultaneous elimination of ozone and carbon monoxide at ambient temperature [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2001, 33(3): 217-222
- [39] Imamura S, Ikebata M, Ito T, et al. Decomposition of ozone on a silver catalyst [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1991, 30(1): 217-221
- [40] Dhandapani B, Oyama S T. Gas phase ozone decomposition catalysts [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1997, 11(2): 129-166
- [41] Tatsushima M, Sakura M. Ozone cracking catalyst; US Patent 4871709[P], 1989-10-03
- [42] 顾玉林. 臭氧分解催化剂的制备及性能研究[J]. *工业催化*, 2002(6): 39-42
- [43] Lester G R, Homeyer S T. Catalytic converter with metal monolith having an integral catalyst; EP Patent 0666776 B1[P], 1996-08-14
- [44] Liu D, Winstead D R, Michalakos P M. Environmental control system including ozone-destroying catalytic converter having anodized and washcoat layers; US Patent 6576199 B1[P], 2003-06-10
- [45] Yu Q, Pan H, Zhao M, et al. Influence of calcination temperature on the performance of Pd-Mn/SiO₂-Al₂O₃ catalysts for ozone decomposition [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2): 631-634
- [46] Heck R M, Farrauto R J. Catalytic air pollution control: commercial technology [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009
- [47] 余全伟. 整体式锰基催化剂催化分解地表臭氧[J]. *催化学报*, 2009(1): 1-3
- [48] Nilsson S. A catalyst carrier; EP Patent 0298943 A2 [P], 1989-01-11
- [49] Lester G R, Homeyer S T. Catalytic converter with metal monolith having an integral catalyst; EP Patent 0666776 B1[P], 1996-08-14
- [50] Byrd N R, Luoto R E. Ozone removal filter having manganese dioxide coated thereon; US Patent 4207291[P], 1980-06-10
- [51] Yoshimoto M, Nakatsuji T, Nagano K, et al. Methods of ozone decomposition and catalyst structures used therein; EP Patent 0388094 A1[P], 1990-09-19
- [52] Kalluri R R, Cahela D R, Tatarchuk B J. Comparative heterogeneous contacting efficiency in fixed bed reactors: opportunities for new microstructured systems [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 90(3): 507-515