

# 纳米光催化技术在客机座舱空气质量控制中的应用

Application of Nanophotocatalytic Air Quality Control in Commercial Plane Cabin

北京航空航天大学航空科学与工程学院 宁献文 王 浚

**[摘要]** 纳米光催化技术是一种新型的空气净化技术,近年来已成为空气净化领域的研究热点之一。本文简要介绍了纳米光催化技术的发展历史、净化机理以及国内外的研究进展;分析了实际应用中存在的问题;并指出了纳米光催化技术在客机座舱空气质量控制中的应用前景。

**关键词:** 客机座舱 纳米光催化 空气净化 高效过滤器

**[ABSTRACT]** Nanophotocatalysis is a new air purification technique. It has become one of the popular research subjects in the field of air purification. In the paper, the development history, purification mechanism and the research progress at home and abroad are introduced. The problems in use are analyzed, and the application prospects of nanophotocatalysis in the air quality control of commercial plane cabin is pointed out.

**Keywords:** Commercial plane cabin Nano-photocatalysis Air purification High efficiency filter

客机飞行过程中需要从外部引入空气来使座舱压力、温度等参数处于合适的范围,人的新陈代谢、设备运行、材料释放以及从外部高空环境引入的空气,会使座舱内的空气成分变得十分复杂。舱内除含有自然界中的主要空气成分(如  $O_2$ 、 $O_3$ 、 $N_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$  等)外,还含有大量的无机污染物和有机污染物。

乘客和机组人员长期以来一直抱怨旅客机的空气质量问题,普遍反映存在疲劳、头晕、头疼、鼻窦、耳部疾病、干眼症以及咽喉痛等症状,甚至偶尔会出现神经系统功能紊乱甚至丧失<sup>[1]</sup>。

目前,客机座舱内有害物质处理主要通过外部新风稀释、高效过滤器(HEPA)、臭氧转换装置和活性炭吸附装置。飞机为了节省能耗,需要增加再循环率,这势必减少新风量;高效过滤器不能有效去除有机污染物,并且阻力大;活性炭吸附装置体积比较大,不适合飞机空间狭小的环境,而且活性炭还有再生等问题,

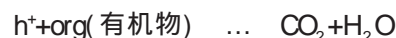
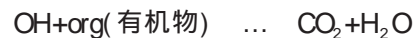
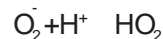
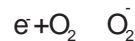
这些都需要引入新的空气质量控制技术来解决。

纳米光催化技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新型空气污染治理技术,因其效率高、体积小、应用范围广而倍受关注。

本文综述了纳米光催化技术净化空气的作用机理、发展历史以及国内外的研究进展,并分析了该技术用于客机空气净化的可行性。

## 1 纳米光催化技术净化机理

光催化反应是指在紫外光( $h\nu$ )的照射下,反应物会在催化剂表面发生氧化还原反应。纳米光催化半导体材料( $TiO_2$ )的催化氧化原理,是以半导体能带理论为基础的“本多-藤岛”效应。当能量大于禁带宽度的光照射半导体催化剂时,价带(VB)上的电子被激发,跃过禁带进入导带(CB),而在价带上产生与电子( $e^-$ )对应的空穴( $h^+$ ),即产生自由电子-空穴对,活泼的电子、空穴在电场作用下可以分别从半导体的导带、价带迁移至半导体/吸附物界面,而且跃过界面,使被吸附物氧化和还原;同时也存在着电子、空穴的复合。价带空穴( $h^+$ )使吸附  $H_2O$  氧化,导带电子( $e^-$ )使空气中的  $O_2$  还原。其反应机理如下<sup>[2]</sup>:



上述产生的含氧小分子和自由基是参与光催化反应的基本单元,它们几乎无选择地将有机物和细菌等氧化分解为  $CO_2$  和  $H_2O$ ,将  $SO_2$  氧化成为  $SO_3$ 。

从上述反应机理可知,半导体内产生的电子-空穴对存在分离/被俘获与复合的竞争,电子与空穴复

合的几率越小,光催化活性越高。因此,催化剂尺寸越小时,电子与空穴迁移到表面的时间也越少,其复合几率也越小,同时催化剂尺寸越小,比表面积越大,吸附能力越强,催化剂表面所吸附的  $\text{OH}^-$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2$  表面态增多,含氧小分子活性物质也随之增加,从而提高了反应效率。另一方面,当催化剂尺寸减少到纳米级时, $\text{TiO}_2$  的氧化还原电位也发生变化,由光激发而产生的价带空穴具有更正的电位,导带电子具有更负的电位,因而氧化还原能力增强。一般来说,纳米级(20nm以下)的  $\text{TiO}_2$  最适合作为光催化剂。

## 2 纳米光催化技术进展

最早开始研究纳米级  $\text{TiO}_2$  光催化氧化的是日本东京大学的藤岛昭,日本在这方面的研究及开发应用处于世界的前列。与此同时,美国、德国等发达国家也相继开展了许多研究工作,美国政府特拨款用于纳米技术的研究与开发。日本三菱制纸公司开发出由  $\text{TiO}_2$  和无机粘合剂制成的催化剂,对甲硫醇、乙醛、硫化氢及三甲胺等异味气体具有良好的去除作用。日本目前开发出具有纳米级  $\text{TiO}_2$  外壳的光催化抗菌陶瓷,应用于医院和公共厕所等需要控制细菌传播和消除恶臭的环境中<sup>[3]</sup>。美国密执根理工大学采用 P-25  $\text{TiO}_2$  作为光催化剂,处理污染的地下水,取得了很好的效果<sup>[4]</sup>。日本大金公司已经推出世界首台真正含有纳米光催化触媒的空调器。

与发达国家相比,我国纳米光催化技术研究从基础研究到开发应用都存在一定的差距。但随着经济的发展,我国的光催化技术也得到了蓬勃发展。华东理工大学科研人员成功开发光催化空气净化器,中国科技大学研制出一种以纳米二氧化钛为主的复合纳米光催化技术净化装置,北京工业大学环境与能源工程学院与北京紫外光云科技有限公司合作研制成功一种纳米光催化涂料<sup>[5]</sup>。

## 3 应用中存在的问题

纳米光催化技术具有广泛的应用前景,但是也存在许多问题。

(1)目前的试验结果主要来自于实验室或小规模的阶段性试验,实际应用报道较少,存在纳米材料的催化效率不高、处理速度不快等问题。

(2)纳米催化氧化去除污染物的机理有待进一步研究,尤其是氧化产物的毒性方面尚存在许多未知因素。比如乙醇光催化氧化产物从理论上推断应该是

$\text{CO}_2$  和水,但从实验结果来看,大部分的氧化产物却是毒性更高的乙醛<sup>[6]</sup>。大分子有机化合物在氧化过程中更存在许多不确定的产物,这些产物有可能会造成新的甚至更严重的污染。

(3)由于纳米材料本身对有机物有氧化作用,纳米材料与粘结剂的耐光催化性、载体的催化活性,包括失活后的再生问题及膜的牢固性仍然是光催化技术的关键。目前纳米光催化剂固定技术相对落后,只停留在简单的玻璃板上或悬浮液中,因此也带来了反应设计方面的问题,如光利用率不高、污染物与催化剂的接触不好、反应器尺寸过大等,这些都有待于进一步研究与探索。

(4)纳米材料的制作成本比较高,一些具有真正光催化功能的纳米材料目前仍然处在实验室研究阶段。由于在工业化生产技术方面仍存在问题,导致成本居高不下,阻碍了其推广应用。

尽管纳米光催化技术还有许多问题有待解决,但作为一种具有广泛应用前景的新型空气净化技术,仍是空气净化领域的研究热点之一。

## 4 在客机空气质量控制中的应用前景

### 4.1 纳米光催化空气净化器

一种适于机载装备的纳米光催化空气净化器结构如图1所示。纳米  $\text{TiO}_2$  复合光催化空气净化器是由支撑体、 $\text{TiO}_2$  光催化剂组成的,具有直通孔的多层结构蜂窝状整体式空气净化器。该净化器由多层组成,为提高光催化效率,在每层结构之间安装多个紫外线灯管,以保证被污染气流与纳米光催化剂的接触表面足够大,保证光子的有效利用。

该净化器独特的结构及复合方式使其具有以下特点:(1)使紫外线光在没有遮挡的情况下直接作用在  $\text{TiO}_2$  光催化剂上,实现了较高的光利用率;(2)利用紧凑式结构设计,使空气净化器体积小、重量轻,具

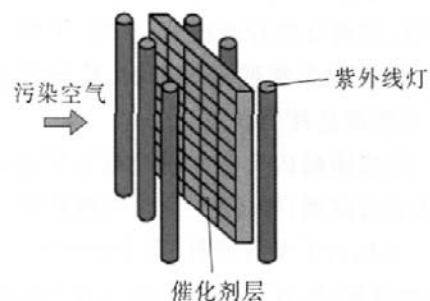


图1 空气净化器内部结构

Fig.1 Interior structure of air purifier

备了在飞机上使用的条件;(3) 净化器特有的蜂窝状直通孔为气体的流动提供了通道,因而其阻力很小。

#### 4.2 纳米光催化空气净化器在客机中的应用

目前客机主要采用外部新风稀释、高效过滤器(HEPA)、臭氧转换装置和活性炭吸附装置来控制座舱内有害物的水平,空气净化原理如图2所示。该装置主要有以下缺点:(1)高效过滤器阻力大,造成再循环风扇功率加大,提高了能耗;(2)活性炭净化装置体积大且比较笨重,另外还有活性炭再生及维护费用高等问题。

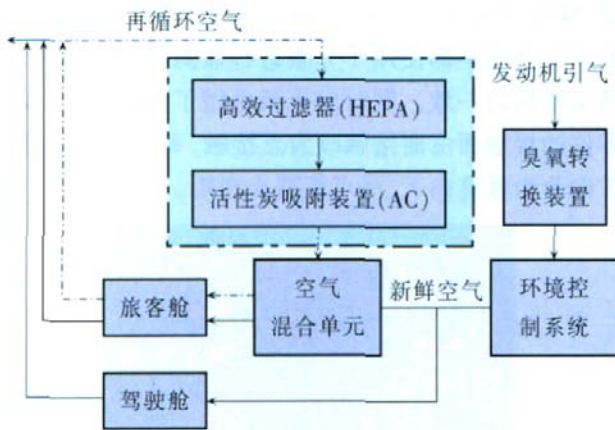


图2 客机座舱空气净化原理图

Fig.2 Principle diagram of air purification for commercial plane cabin

为了能在同一基准下比较纳米光催化空气净化器和活性炭吸附空气净化器的性能,首先介绍一下座舱空气质量评价标准。目前国外广泛采用基于NASA最大允许浓度SMAC的比值简单叠加型空气质量指数,该指标计算公式简单,其计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{C_{i,max}}$$

$$P_{空气} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i,max}}$$

式中:  $P_i$  为空气中  $i$  污染物分指标;  $C_i$  为空气中  $i$  污染物的监测浓度;  $C_{i,max}$  为空气中  $i$  污染物的最大允许浓度;  $P_{空气}$  为空气质量综合指标。

全寿命期费用是指从设计阶段开始一直到使用的整个时期内的投资费用,文献[7-8]在同一基准下分析了纳米光催化装置和高效过滤器/活性炭吸附复合装备的“全寿命期费用”,即比较从一个相对较高的空气质量综合指标值开始净化,到达同一个相对较低的

空气质量综合指标时,两种空气净化装置的“全寿命期费用”。对比结果见表1(全寿命期10年)。从结果可以看出,纳米光催化装置远优于高效过滤器/活性炭吸附复合装置。

表1 空气净化器全寿命期费用对比

新风量/再循环风量	费用/美元		费用节省百分比/%
	高效过滤器/活性炭吸附装置	纳米光催化	
5/15	165 000	80 340	51.3
10/10	96 700	53 560	44.6
15/5	49 000	26 780	45.3

此外,根据文献[8-9]分析,纳米光催化在低湿环境下具有更优的综合效果,而客机在巡航过程中,座舱内平均相对湿度大多在10%~20%之间,有的还在10%以下<sup>[1]</sup>,更适合纳米光催化技术的应用。

综上所述,纳米光催化空气净化器具有效率高、体积小、重量轻、阻力小以及“全寿命期费用”低的特点,且特别适合于低湿环境下使用。

## 5 结束语

由于客机座舱空气质量对乘客和机组人员的生活和健康有很大影响,因而对座舱空气净化技术提出了更高的要求。而纳米催化作为一种新型的空气净化技术,不造成二次污染,为客机座舱提供了理想的环境。

随着科学技术的不断发展,纳米催化氧化技术在用于的空气净化方面的应用将不断得到发展和完善,纳米光催化技术必将在客机座舱空气质量控制中占据重要地位。

## 参 考 文 献

- [1] National Research Council. The airliner cabin environment and the health passengers and crew. National Academy Press, 2002.
- [2] Linsebigler Amy L, Lu Guangquan, Yates John T Jr. Photocatalysis on  $TiO_2$  surfaces: principles, mechanisms, and selected results. Chemical Reviews, 1995, 95(3): 735.
- [3] Fujishima A, Rao Tata N, Tryk D A.  $TiO_2$  photocatalysis and diamond electrodes. Electrochemical Acta, 2000, 10(45): 4 683-4 690.
- [4] Zhang Yin, Crttenden J C, Hand D W, et al. Fixed-bed photocatalysis for solar decontamination of water. Environ Mental and Science and Technology, 1994, 3(28): 435-442.

(下转第95页)

糙度达不到要求。由于零件的表面粗糙度要求很高,而且孔对端面的垂直度要求为0.01mm,因此需要对镗刀进行改进。如果表面粗糙度不好,会直接影响零件的垂直度测量,必须选择高精度的精镗头。在这个试验中,选择Seco Graflex A780系列精镗头,如图4所示,其径向调节精度为每格0.0025mm,而且可靠稳定。镗刀片选择未涂层的超细颗粒硬质合金刀片,选用较大的刀片前角和后角,增加修光刃,刀尖圆弧半径限定在0.2~0.3mm。刀片需进行微细研磨,排屑槽

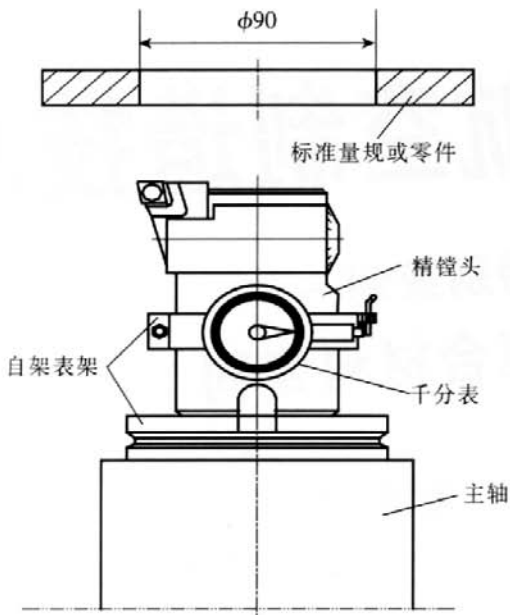


图3 内孔测量装置的改进  
Fig.3 Improvement for inside hole measuring device



图4 Seco Graflex A780 精镗头  
Fig.4 Seco Graflex A780 finish boring head

要大。

## 5 消除回转工作台系统误差

由于零件比较长,无法在一个工位完成,必须将工作台旋转180°。该机床回转工作台的精度在10左右,旋转一周后,转台偏差10,其e值为0.04mm,超出了零件同轴度的要求。

为消除转台的系统误差,采用了自制的量块,量块两面的平行度在0.005mm以内,将量块装卡于零件两侧转台中心上,在镗削完零件的一个φ70mm孔后,用千分表将两个标准量块找正。旋转180°后,再用千分表找正自制的量块,通过转动工作台来补偿转台的系统误差,保证两个量块的找正精度在0.02mm之内,然后加工另一个φ70mm的孔,确保两个孔的同轴度。

## 6 选用合理的加工参数

参考SECO样本的切削参数,考虑到工件的实际壁厚、装卡状态,对本工件来说,主轴转速100r/min,进给量0.02mm/r,加工余量φ0.03mm,同时充分冷却以防止热变形。

通过以上对于零件结构、装卡、测量、刀具选择以及加工误差、加工参数的分析改进,被加工零件尺寸和位置精度均达到图纸要求,而且质量稳定。

(责编 凌川)

(上接第93页)

[5] 刘太奇. 纳米空气净化技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[6] 中国预防医学研究院环境卫生与卫生工程研究所. 纳米光催化涂料对空气中有害物质消除效果检测报告. 北京: 中国预防医学研究院, 2001.

[7] Henschel D B. Cost analysis of activated carbon versus photocatalytic oxidation for removing organic compounds from indoor air. Journal of the Air & Waste Management Association, 1998, 10(48): 985-994.

[8] Hall R J, Sangiovanni J J, Hollick H H, et al. Design of air purifiers for aircraft passenger cabins based on photocatalytic oxidation technology. //Air quality and comfort in airliner cabins, ASTM STP 1393. N L Nagda, Ed. American Society for Testing and Materials, West Conshocken, PA, 2000.

[9] 曾志雄, 徐玉党. 纳米材料TiO<sub>2</sub>光催化技术在空气净化中的应用. 制冷与空调. 2003(4): 36-39.

(责编 根山 金卯)