

空气净化器内部结构对其 净化效率的影响研究

鹿院卫 夏国栋 尹雪云 马重芳 关雅贤

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要 本文通过理论分析及实验验证, 全面分析了影响净化器净化效率的因素, 结果发现净化器内部辐射场、流场和浓度场分布是影响净化器效率的主要因素。净化器内部结构的设计应该充分考虑这些因素的影响, 使其净化效率达到最佳。

关键词 空气净化; 光催化氧化; 室内空气

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)02-0319-03

RESEARCH ON THE EFFECT OF AIR PURIFIER'S INTERIOR CONFIGURATION ON ITS PURIFYING EFFICIENCY

LU Yuan-Wei XIA Guo-Dong YIN Xue-Yun MA Chong-Fang Guan Ya-Xian

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract Effect of air purifier's interior configuration on its purifying efficiency was studied by analysis and experiment. The results shown that radiant field, flow field, concentration field inside air purifier are the main influencing factor to its purifying efficiency. The design of air purifier should consider these elements to improve its efficiency.

Key words air purification; photocatalytic oxidation; indoor air

1 前言

近年来, 随着人们对居室环境要求的提高, 大量的新型建筑和装饰材料进入住宅和公共建筑, 加之现代化建筑物的密闭性, 造成建筑物室内空气污染问题日益突出, 已严重地危害到了人体健康, 从而受到社会各界的普遍关注。

为了改善室内空气质量, 人们提出了很多办法, 如控制污染源、增加室内新风量等。但有些地方(如医院、已装修的带污染材料的建筑), 这种局部控制污染源的方法已是不可能的; 另外增加建筑新风量, 却增加了室内取暖、通风、空调的额外费用, 且这种方法只是对污染物起到稀释作用, 并不能完全根除。研究一种空气净化设备, 来大幅度消除室内各种污染物和细菌, 且不破坏原有建筑物结构, 一直是人们研究的一个方向。纳米光催化氧化技术的出现, 为人们研制这种净化设备提供了思路。北京工业大学在光催化氧化去除室内污染物方面做了很多有意义的工作, 对光催化氧化作用下室内甲醛、苯、氨、氮氧化物、二氧化硫等污染物的降解特性进

行了深入的研究, 取得了很好的结果。将光催化氧化技术产业化是国内外同行研究的最终目的, 它需要考虑的因素很多, 其中光催化反应器的结构设计是一个主要的影响因素。多年来, 这项技术一直难以产业化, 一个主要原因是净化器的净化效率低, 运行费用高。净化器运行效率直接与其内部结构相关, 因此, 净化器内部结构的研究, 就成为光催化空气净化器研制的一个核心问题。本文从净化器结构影响效率 - 费用方面对净化器内部结构进行优化设计。

2 净化器结构设计

光催化氧化去除室内污染物的基本原理是: 当紫外光的能量大于或等于半导体 TiO_2 的禁带能量时, 价带上的电子被激发进入导带, 同时在价带上产生相应的空穴。光致电子和空穴与催化剂表面吸附的水 (H_2O) 和氧气 (O_2) 发生反应, 生成具有强氧化性的羟基官能团, 与污染物发生作用, 从而达到去除污染物的目的。

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-01-14

基金项目: “十五” 国家医学科技攻关资助项目; 中国博士后基金资助项目

作者简介: 鹿院卫 (1971-), 女, 陕西蓝田人, 博士后, 主要从事纳米空气净化方面的研究。

从光催化原理分析可知,合理的净化器结构应该满足:在净化器内部,活性光子、固体催化剂与污染气流应紧密、有效地接触,且光子利用率高。从净化器运转的费用分析可知,风机及光能消耗量是决定净化器运转的总年费用(RMB/yr),因此,净化器设计必须考虑:(1)以最小的动力驱动室内污染气流以一定的速度通过净化器,即气流通过净化器进出口的压降低;(2)光源发出的光子能够被有效利用。光子的有效利用包括两方面的内容,一是光源产生的光子全部被用来激发生成光致电子与空穴,这样光源的辐射场分布就成为净化器内部结构设计必须考虑的一个参数;二是必须保证光致电子和空穴被充分利用,即必须有足够的污染气流发生作用来阻止光致电子与空穴的复合,这样,流过净化器内部的污染物流场和浓度场也就成为净化器设计必须考虑的另一个参数。以上分析可见,合理的净化器内部结构应该充分考虑气流通过净化器进出口压降、辐射场、流场和浓度场的影响。

2.1 压降对净化器结构设计的要求

考虑到风机的能量损耗,净化器的设计应该考虑以最小的动力来满足净化器内部流场需求,同时保证光子的有效利用。为此本文采用蜂窝状光催化剂负载结构,如图1所示。这样的蜂窝状结构通道产生的压降很小,几乎可以忽略不计,同时可以保证污染气流与纳米催化剂的接触表面积足够大,以保证光子的有效利用。目前,这种结构已被广泛应用于汽车尾气及其他发动机尾气的治理^[1]。

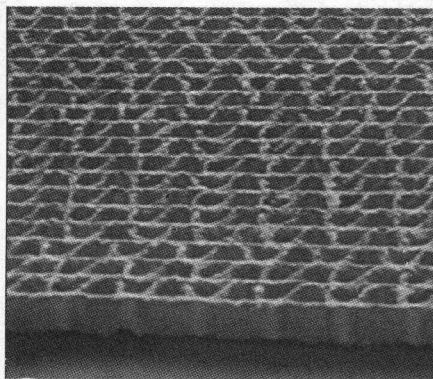


图1 催化剂层基体结构

2.2 辐射场对净化器结构设计的要求

辐射场是决定空气净化效率的一个主要参数。因为局部辐射强度决定着催化剂光能吸收速率,即决定着光催化反应速率。对于辐射场的计算 Hossain & Raupp^[1~3] 提出第一定律辐射场模型,对反应器内部辐射场分布进行模拟计算,认为紫外光辐射场是由通道几何形状、通道纵横比 L/W 及催化剂

涂层平均反射率来决定。当催化剂涂层的反射率及通道几何形状一定时,辐射场分布仅由通道的纵横比来唯一确定。图2为通道壁上辐射光强随无量纲轴向距离 $X = x/W$ 的变化,即光强随着通道轴向距离的增大而逐渐减小,当 X 增大到3时,该处光强已降低到入射光强的1%以下。可见,净化器内部结构应充分考虑催化剂基体蜂窝状结构每一通道的纵横比不能太大,且紫外光源与催化剂层应充分靠近,以充分利用光子。本文净化器内部光源与催化剂层结构如图3所示,光源两侧分别布置催化剂层,使光源发出的光子被充分利用,光源距催化剂层的距离为0.5 cm。同时在第一排催化剂层的上游附加一过滤层,过滤层上也可以涂催化剂,以充分利用光源发射的光子。

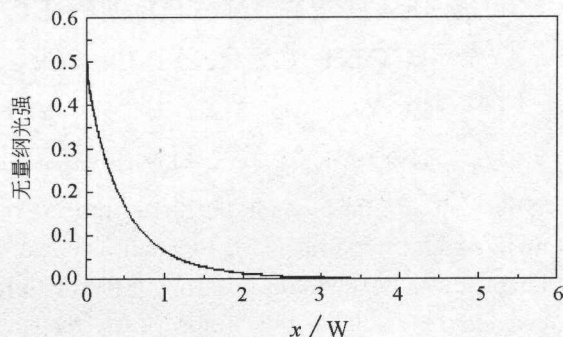


图2 壁上辐射光强随无量纲轴向距离 x/W 的变化

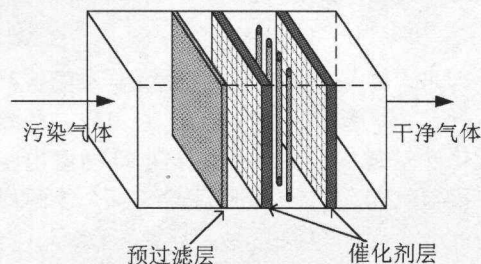


图3 净化器内部结构示意图

2.3 流场和浓度场对净化器结构设计的要求

净化器内部流场及浓度场对净化效率的影响是相互制约的,流场和浓度场的设计应该保证有足够的污染气流通过光活性区与光子发生作用,且驻留时间足够长。当室内污染物浓度一定时,要增大通过光活性区的污染量,则必须增大气流流速,而这样会造成污染物驻留时间减小,净化效率反而降低。因此,要提高净化器效率,必须充分考虑内部流场和浓度场的影响。Hossain^[4] 提出未充分发展对流-扩散反应模型对反应器内部流场和浓度场进行分析,计算结果发现污染气流通过催化剂层时入口处横向速度最大,而远离入口处,横向速度几乎为零,轴向速度变为最大,故入口处污染气流向壁面的质量传递系数较大;同时在入口的壁面附近,污染物浓度梯度

变化最大。因此,在光强较大、污染物质量传递较大和浓度变化较大的入口区,污染物降解速率最大,由此同样得出催化剂层通道的纵横比不宜太大。在此提出两个无量纲量: Re (雷诺数) 和 Da (Dankohler 数), 对反应器内部光催化反应特性进行分析, 其中 Re 是以速度场方程得到的无量纲数, Da 是由光催化表面浓度场得到的无量纲数, 这样, 反应器反应性能的好坏则由通道的几何形状、纵横比及 Re, Da 数来唯一决定。

当催化剂层结构确定, 则净化器效率则由流场 (Re) 和浓度场 (Da) 唯一确定。当 Da 一定时, 当 Re 增加一倍, 光催化反应效率则由于污染物在活性区的驻留时间减少几乎减小一半。当 Re 一定时, Da 数的增加实际上是增加污染物向催化剂表面的扩散速率, 但当 Da 增大到一定时, 反应速率则因催化剂活性受到限制, 因为所有活性光子被消耗完了, 要提高净化效率, 必须增加催化剂活性。因此, 当催化剂层结构和活性一定时, 反应器效率与 Re 数和 Da 数存在一最佳匹配。

3 实验验证

本文设计的净化器内部结构如图 2 所示, 催化剂层板几何尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, 厚度 6 mm , 层板上蜂窝孔密度为 $250 \cdot 250\text{ CPM}$ (cells per square meter), 蜂窝通道的纵横比为 1.5 。实验验证是在 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的玻璃密封仓内进行, 测试的污染物为甲醛, 其浓度的变化用 4160 型甲醛分析仪来测量。

辐射场对净化效率的影响, 如图 4 为一排紫外灯 /1 排催化剂层和一排紫外灯 /2 排催化剂层的实验结果, 可见两层催化剂层的净化效率比一层催化剂层高, 这主要是由于与一层催化剂层相比, 两层催化剂层与污染物的接触面积增大了, 同时光子的利用得到提高。图 5 与图 6 为流场与浓度场对净化器效率的影响, 当室内污染物浓度较低时, 流量较小时净化效率较高, 而浓度较高时则相反, 流量较大时净化效率较高, 这主要是由于污染物浓度与其在

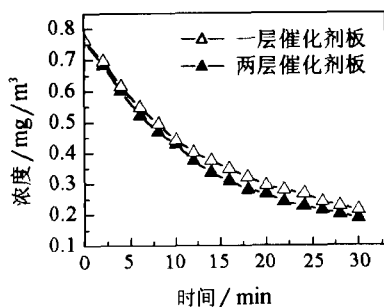


图 4 辐射场对净化器效率的影响

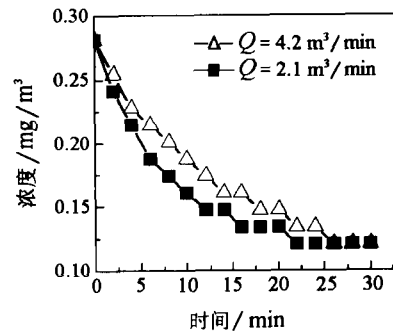


图 5 低浓度时流场对净化器效率的影响

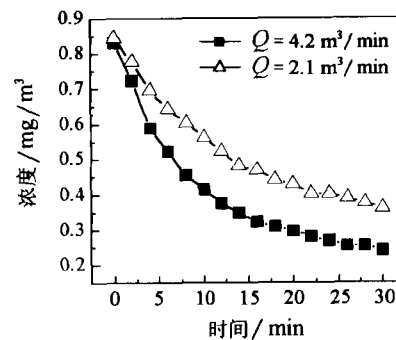


图 6 高浓度时流场对光催化效率的影响

催化剂层表面驻留的时间相互作用的结果。可见, 流场和浓度场之间存在着相互制约。

4 结 论

本文通过实验分析了净化器内部结构对净化效率的影响, 结果认为合理的净化器设计应充分考虑催化剂层基体结构、内部辐射场、流场和浓度场的影响:

- (1) 蜂窝状催化剂负载结构可以减小流动阻力, 增大污染物接触面积, 降低动力损耗。
- (2) 射场场光强分布沿通道轴向逐渐减小, 故内部催化剂层的布置应该充分靠近光源。
- (3) 污染物流场的分布在通道入口处横向速度最大, 催化剂层的纵横比不宜过大。
- (4) 浓度场的分布应充分考虑污染物在催化剂层内部的驻留时间。

参 考 文 献

- [1] Hossain Md M, Ruapp G B. Radiation Field Modeling in a Photocatalytic Monolith Reactor. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(22): 3771-3780
- [2] Hossain Md M, Ruapp G B. Modelling of a Photocatalytic Honeycombed Monolith Reactor for Airpurification Process. *J. Adv. Oxid. Technol.*, 1998, 3: 285-291
- [3] Hossain Md M, Ruapp G B. Polychromatic Radiation Field Model for a Honeycomb Monolith Photocatalytic Reactor. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, 54(15): 3027-3034
- [4] Hossain Md M, Ruapp G B. Three-Dimensional Developing Flow Model for Photocatalytic Monolith Reactors. *AIChE J.*, 1999, 45(6): 1309-1321