

几种光催化空气净化器的性能测试分析

鹿院卫, 马重芳, 王伟, 常梦媛

(北京工业大学 环境与能源工程学院 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100022)

摘要: 为了对目前市场上出现的光催化空气净化器性能进行客观评价, 对引进的 3 台进口、1 台国产光催化空气净化器样机的结构及性能进行了详细的分析和检测。检测实验在 4 m^3 的玻璃密封仓内进行, 应用美国 Inter-scan 公司生产的 HCHO 在线分析仪, 采用逐层分析的方法, 对不同净化器的内部结构层进行了污染物 HCHO 的降解性能实验, 结果发现, 由于净化器催化剂层的成膜方法及结构设计不同, 导致目前市场上出现的高科技产品——纳米光催化空气净化器在性能上存在着严重的问题。同时提出了一种评价净化器性能的方法, 利用洁净空气量及污染物降解 90% 所需时间可以对净化器性能进行客观评价。

关键词: 纳米; 光催化; 空气净化器

中图分类号: TU 834.86

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2005)01-0058-05

通常室内空气污染为大气污染的 2~5 倍, 甚至达到 100 倍以上, 而城市居民每天在室内度过的时间长达 21.53 h, 占全天时间的 92%^[1], 因此, 室内空气质量对人体健康的影响远比室外空气严重, 特别是使用空调和暖气的密闭空间, 其空气质量更令人担心。纳米光催化空气净化器是近几年发展起来的新一代空气净化器, 其净化结构为杀菌光与脱臭杀菌过滤网, 同时兼具杀菌、消毒、除味、除尘之功效。但由于纳米光催化空气净化技术的研究涉及多学科的交叉, 到目前为止, 该项技术仍有一些关键问题没有得到解决^[2-3], 使得目前市场上出现的纳米光催化空气净化器存在着一系列的问题。

1 室内净化器性能评价方法

目前, 对净化器净化效率较为客观的评价方法是洁净空气量法^[4-6]。洁净空气量是参照美国标准^[7]提出的, 它是一项涉及到空气净化器产品使用特征、并能够反映出其净化能力的性能指标, 不仅适用于评价空气净化器去除悬浮颗粒物的能力, 也适用于评价去除其他空气污染物的能力。空气净化器可去除的每一种空气污染物都有一个相应的洁净空气量数值。洁净空气量(q_{CARD})的表达式为

$$q_{\text{CARD}} = V(k_e - k_n) \quad (1)$$

式中: q_{CARD} 为洁净空气量(m^3/min); V 为试验室容积(m^3); k_e 为总衰减常数(min^{-1}); k_n 为自然衰减常数(min^{-1})。

式(1)中衰减常数的计算是依据待测气体质量浓度在稀薄状态下所遵守的指数稀释方程

$$\rho_t = \rho_0 e^{-kt} \quad (2)$$

式中: ρ_t 为在时间 t 时的污染物质量浓度(mg/m^3); ρ_0 为在时间 $t=0$ 时污染物质量浓度(mg/m^3); t 为时间(min); k 为衰减常数(min^{-1})。通过式(2)分析密封仓内净化器开启前后污染物质量浓度变化, 可求得 k_n 和 k_e , 由式(1)可求得洁净空气量, 从而可比较准确地对净化器性能进行评价。

同时, 根据污染物的衰减常数 k , 由室内污染物降解 90% 所需时间($t_{1/10}$)可以比较直观地判断净化器的净化效果, 即 $t_{1/10} = (\ln 10)/k = 2.31/k$ 。

收稿日期: 2003-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50346006, 50476036); 国家 SARS 攻关专项基金资助项目(2003A10); 北京工业大学博士启动基金资助项目(520050142003030); 北京工业大学青年基金资助项目(97005014200401)。

作者简介: 鹿院卫(1971-)女, 陕西蓝田人, 副研究员, 博士。

2 光催化空气净化器性能检测

作者分别对 4 台光催化空气净化器(净化器 A(国产)、B(日本)、C(日本)、D(美国))的光催化性能进行了测试,结果发现,这些已经进入市场的光催化空气净化器在性能上都存在着一系列的问题.检测实验在 4 m^3 的玻璃密封仓内进行,为了检测光催化空气净化器对污染物的降解效果,实验过程中就净化器每一结构层对污染物的降解效果进行了逐层分析,以对净化器的净化效果进行客观评价.

3 净化器性能检测结果

光催化空气净化器 A 由外及内依次为预过滤层、活性炭吸附层、光催化层及贯流风扇.图 1 为光催化空气净化器 A 的催化剂负载层,从光催化层的局部看,催化剂 TiO_2 负载在一层纤维网上,网上打有小孔,催化剂与污染物接触的面积较小,而且只有一层光催化层与光源相接触,光源发出的光子未能被充分利用.图 2 为光催化空气净化器 A 对 HCHO 的降解效果,图中曲线 1 表示密封仓内的净化器未启动;曲线 2 表示密封仓内净化器启动,活性炭吸附层和光催化层同时作用;曲线 3 表示将净化器内活性炭吸附层取出,只保留光催化层的净化结果.从实验结果知,净化器整机对污染物 HCHO 具有较好的去除效果,而去除活性炭吸附层后,净化器对污染物的去除效果与未开机时污染物的自然衰减效果相近,说明净化器 A 实质起作用的只是活性炭吸附层,而 TiO_2 光催化层基本没起作用.

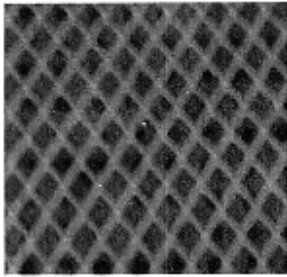


图 1 净化器 A 的光催化层结构

Fig.1 The photocatalytic film of purifier A

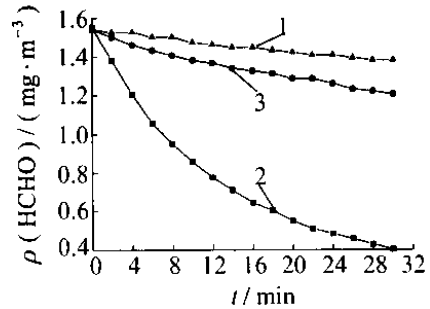


图 2 净化器 A 对 HCHO 的降解效果

Fig.2 The degradation of HCHO by purifier A

光催化空气净化器 B 由外及内依次为预过滤层、高压静电除尘层、2 层蜂窝状光催化层和布置在光催化层中间的一排外径 3 mm 的紫外灯管.这种紫外灯管布置形式可以充分利用光源发出的活性光子.蜂窝状光催化层结构如图 3 所示,催化剂基材为纸质材料,这样的结构一方面降低了气流流动阻力,另一方面增大了污染物与催化层的接触面积,且光透性较好.净化器 B 对 HCHO 的降解效果如图 4 所示,图中曲线 1 表示密封仓内的净化器启动;曲线 2 表示密封仓内净化器启动,但光催化层被去除;曲线 3 在表示密封仓内的净化器未启动.实验结果表明,30 min 内,净化器整机将污染物 HCHO 从 0.8 mg/m^3 降为 0.16 mg/m^3 ,降解率为 80%,而去除光催化层后,污染物 HCHO 在 30 min 内从 0.8 mg/m^3 降为 0.72 mg/m^3 ,降解率只有 10%,可见光催化层对污染物的降解作用较为明显.但是净化器 B 在使用过程中存在着一个较为严重的问题,即催化层在使用过程中存在着掉粉的现象,脱落的催化剂 TiO_2 超细粉末吹入环境,容易产生二次污染.

光催化空气净化器 C 由高效过滤层和光催化净化层构成,风机将气流从净化器前面板吸入,从顶部排出,在风机壳排风口处布置有光催化净化层,净化层光催化剂载体为蜂窝铝质结构,且面积较小.检测过程中,分别就光催化层与净化器整机对污染物 HCHO 的降解效果进行检测,结果发现,无论整机效果还是光催化层,对污染物 HCHO 基本不起作用.检测结果如图 5 所示,图中曲线 1 表示密封仓内的净化器未启动;曲线 2 表示密封仓内的净化器启动;曲线 3 表示密封仓内的净化器启动,但去除了高效过滤层,只

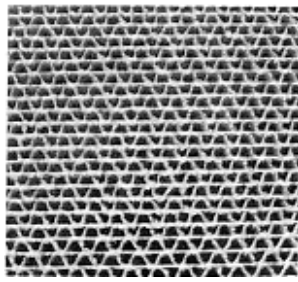


图3 净化器B的光催化层结构

Fig.3 The photocatalytic film of purifier B

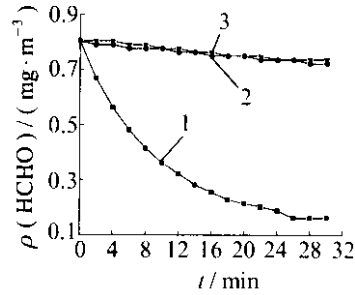


图4 净化器B对HCHO的降解效果

Fig.4 The degradation of HCHO by purifier B

保留光催化层. 结果表明, 只保留光催化层时启动净化器, 光催化层对 HCHO 基本没有降解作用, 在 30 min 内 HCHO 由 0.67 g/m³ 降为 0.656 g/m³, 降解率为 2.0%. 而做整机性能测试时, 即净化器过滤层和光催化层同时作用, 则 30 min 内 HCHO 从 0.79 g/m³ 降为 0.73 g/m³, 降解率为 10.1%, 由此认为净化器整机对污染物 HCHO 的降解是由于过滤层吸附了部分 HCHO 的结果.

光催化空气净化器 D 结构简单, 其底部方形结构盒内只安装了 1 个 220 V 荧光灯镇流器. 外部连接了 1 只长度 50 mm, 外径 20 mm 的紫外灯管, 紫外灯外面套了 1 层菱形网, 菱形网即是其所谓的光催化净化网. 如此简单的净化器结构不符合净化器起作用的结构设计, 测试结果如图 6 所示, 可见净化器 D 同样对污染物 HCHO 基本不起作用.

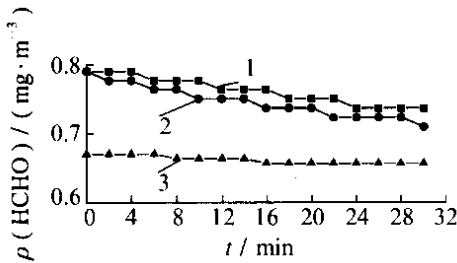


图5 净化器C对HCHO的降解效果

Fig.5 The degradation of HCHO by purifier C

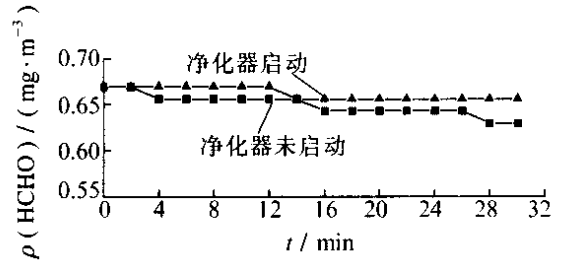


图6 净化器D对HCHO的降解效果

Fig.6 The degradation of HCHO by purifier D

4 光催化空气净化器性能检测结果分析及评价

4 种不同品牌的光催化空气净化器由于其净化结构及催化剂负载形式的差异, 净化器净化效果各不相同. 光催化空气净化器 D 结构最简单, 光催化网面积很小, 也没有配备风机使气流流动, 只是单纯的光照, 且光强有限, 因此根本起不到光催化净化空气的效果. 其他 3 台空气净化器的结构设计思路基本一致, 都希望将不同净化技术集成在一起, 发挥不同净化技术的协同作用来提高净化效率, 但由于净化器结构设计及催化剂负载形式的差异, 净化结果也截然不同, 尤其是光催化空气净化器, 其光催化净化效果甚差.

3 种净化器都使用了初滤技术, 以过滤大的灰尘、纤维和漂浮物等. 初级过滤后留下的细小灰尘、颗粒物及气体污染物, 不同的净化器采用了不同的处理技术. 净化器 A 采用物理活性炭吸附的方法将细小颗粒及污染气体吸附去除, 净化器 B 则采用等离子体除尘器将初滤过后的细小灰尘予以去除, 净化器 C 则是采用 HEAP 高效过滤技术将初滤后的细小颗粒过滤去除. 设计原理上, 3 种产品都希望将去除颗粒物后的污染气体通过光催化的方法予以光解除除, 因而都在气流出口处布置了光催化空气净化器层, 但光催化剂的负载技术各不相同. 净化器 A 是在平板型纤维表面喷涂一层 TiO₂ 催化剂, 催化剂层只有 1 层, 净化器 B

采用蜂窝纸结构表面负载催化剂,2 层催化剂层中间布置紫外灯管,净化器 C 则是在风机壳壳出口处布置面积较小的催化剂层,基材为铝材。

净化器整机性能测试在 4 m³ 的密封仓内进行,测试结果如图 7 所示,净化器 A 和净化器 B 对污染气体 HCHO 的去除效果最为明显,而日本净化器 C 的去除效果则较差。整机性能测试衰减常数通过式(2)计算得到,见表 1。表 1 从净化器性能评价指标出发分别分析了净化器整机及不同结构层对 HCHO 的去除效果,从而对净化器的光催化净化效果作出客观的评价。

从表 1 可看出,对于净化器 A,光催化层对污染物 HCHO 根本不起作用,在 4 m³ 的密封仓内注入 0.8 mg/m³ 的污染气体 HCHO,要使密封仓内 90% 的 HCHO 被去除,如果只用光催化层进行降解,需要 7 700 min,而加上活性炭吸附层,去除 90% 的 HCHO 所需时间则降为 53 min,这个时间与净化器整机测试及活性炭吸附作用所需的时间基本一致,可见对于光催化空气净化器 A,实质上对污染物起去除作用的是活性炭吸附层。净化器 A 的洁净空气量 $q_{CADR} = 0.36 \text{ m}^3/\text{min}$,即每分钟有 9% 的 HCHO 被去除。

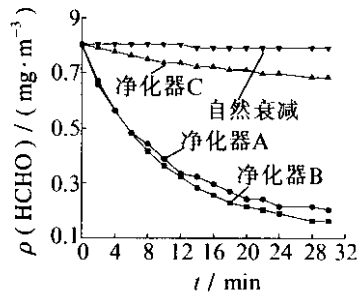


图 7 净化器整机性能测试结果

Fig.7 The performance of three purifiers

表 1 光催化空气净化器性能指标

Tab.1 Performance index of three purifiers

净化器名称	性能指标	$k/(\text{min}^{-1})$	$t_{1/10}/\text{min}$	q_{CADR}
净化器 A	光催化层	0.000 3	7 700	
	光催化层 + 活性炭层	0.043 9	53	
	活性炭层	0.043 2	54	
	整体特性	0.045 0	51	0.36
净化器 B	光催化层	0.054 3	43	
	去除光催化层	0.003 5	660	
	整体特性	0.054 1	43	0.44
净化器 C	光催化层	0.000 7	3 300	
	光催化层 + 过滤层	0.005 6	412	
	整体特性	0.005 4	412	0.02

对于净化器 B,当无光催化空气净化层时,要使 4 m³ 密封仓内 0.8 mg/m³ 的污染物 HCHO 降解 90%,需要 660 min,而加上光催化空气净化层则所需时间降为 43 min,这个时间与净化器整机性能测试时间相一致,说明净化器 B 对污染物起净化作用的是光催化净化层。但光催化层在使用过程中存在着催化剂脱落现象,净化层的具体构成还需进一步研究。净化器 B 的洁净空气量 $q_{CADR} = 0.44 \text{ m}^3/\text{min}$,即每分钟有 11% 的 HCHO 被去除。

对于净化器 C,通过比较污染物降解 90% 所需的时间可知,光催化空气净化层对于污染物的降解根本不起作用,净化器 C 对污染物的去除是由于过滤层的吸附的作用。净化器 C 的洁净空气量 $q_{CADR} = 0.02 \text{ m}^3/\text{min}$,即每分钟有 0.4% 的 HCHO 被去除。

可见 3 种光催化空气净化器只有净化器 B 的光催层起到污染物降解作用,其他 2 种净化器实质上只是吸附、过滤层在起作用,光催化层基本不起作用。但是,将净化器 B 的光催化层放入 0.1 m³ 的不锈钢密封仓内进行性能测试,结果发现,在关灯时,污染物浓度降低很快,开灯后浓度下降变慢,再关灯,浓度下降又加快,以此推断净化器 B 的光催化层内含有吸附性材料。开灯后污染物浓度下降变慢,是由于密封仓内

温度变化导致 HCHO 脱附引起的.

5 结 论

1) 提出了净化器性能评价指标, 利用洁净空气量及污染物降解 90% 所需时间可以对净化器性能进行客观评价.

2) 净化器不同的结构设计导致了不同的净化效率, 净化器结构设计应该集成不同的净化技术, 发挥其协同作用来提高净化效率.

3) 光催化空气净化器的催化剂成膜技术及催化剂层结构对净化器净化效率影响较大, 光催化空气净化器应该提高催化剂层膜的牢固性和催化活性.

参考文献:

- [1] MOLHAVE L, The sick buildings and other buildings with indoor climate problems[J]. Environment, 1989, 15: 65-74.
- [2] RUAPP G B, HOSSAIN M M. First-principles modeling, scaling laws and design of structured photocatalytic oxidation reactors for air purification[J]. Catalysis Today, 2001, 69: 41-49.
- [3] HOSSAIN M M, RUAPP G B. Three-dimensional developing flow model for photocatalytic monolith reactors[J]. AIChE J, 1999, 45(6): 1309-1321.
- [4] 陈烈贤, 吴亚西. 空气净化器性能试验方法的探讨[J]. 环境与健康杂志, 2001, 18(4): 233-236.
CHEN Lie-xian, WU Ya-xi. Exploration of methods for measuring performance of room air cleaners[J]. Journal of Environmental Health, 2001, 18(4): 233-236. (in Chinese)
- [5] 徐强, 杨沛, 匡国正, 等. 空气净化器对室内有害气体净化效果的研究[J]. 江苏卫生保健, 2000, 2(1): 9-10.
XU Qiang, YANG Pei, KUANG Guo-zheng, et al. Research on the air cleaner's purification effect on indoor toxic gas[J]. Jiangsu Health Care, 2000, 2(1): 9-10. (in Chinese)
- [6] 李莉, 李凤霞, 原田靖. 空气净化器吸附室内 HCHO 性能测试分析[J]. 环境与健康杂志, 2001, 18(6): 367-368.
LI li, LI Feng-xia, YUAN Tian-jing. Testing and analysis of air purifier's adsorptive performance to formaldehyde in indoor air[J]. Journal of Environment Health, 2001, 18(6): 367-368. (in Chinese)
- [7] ANSI/AHAM AC-1-1988, Portable Household Electric Cord-connected Room Air Cleaners[S].

Testing and Analysis of Performance for Several Photocatalytic Air Purifiers

LU Yuan-wei, MA Chong-fang, WANG Wei, CHANG Meng-yuan

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education of China,
College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The interior construction and performance of four photocatalytic air purifiers were tested and analyzed detailedly, which was bought from domestic and abroad market. Testing experiments were conducted in a 4 cubic meter airtight chamber using the formaldehyde analyzer which produced by America Interscan Company. The performance of each composing element inside different air purifiers was analyzed systematically. The results show that those photocatalytic air purifiers have many lacks in performance due to different photocatalyst-loaded method and interior construction design. The performance of four photocatalytic air purifiers was estimated objectively by means of the index of clean air delivery rate and the time needed to decompose 90% of the air contaminants.

Key words: nanometer; photocatalyst; air purifiers