

# 风道式空气净化器降解甲醛的性能

宋雪瑞 郑洁\* 刘鹏

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要** 提出了一种用于空调系统的风道式空气净化器,选取甲醛为目标污染物,并在密闭环境舱内对其净化效果进行了研究。实验结果表明:样机内的压降小于 60 Pa,对于空调系统来说基本可以忽略不计;环境舱中的甲醛含量经处理后可以降低到规定的标准值以下;在最强光照下,其净化效果为传统平板式反应器的 3.5 倍;对于 3 种不同光照强度,甲醛的一次通过效率为 4.99% ~ 10.60%,且与光照度呈正相关;甲醛的转化率和反应速率也随光照强度的增大而提高。此外,在 3 种光照强度下,其对甲醛的净化效能可在 0.80 ~ 0.85 之间,属于 A 级净化器范围。

**关键词** 光催化氧化;净化器;室内环境;甲醛;空调系统

中图分类号 X511 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)08-4371-06 DOI 10.12030/j.cjee.201503224

## Removal performance of formaldehyde with a ducted split air purifier

SONG Xuerui ZHENG Jie\* LIU Peng

(Key Laboratory of Three Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract** A ducted split air purifier used for the air-conditioning system was proposed for the photocatalytic oxidation of formaldehyde in this study. The efficacy of this air purifier was measured in an environmental chamber operating under closed conditions. The results revealed that the air purifier caused a pressure drop of 60 Pa in the air conditioning system, which could be neglected. The use of the air purifier could maintain the formaldehyde concentration below the national air quality standard. This reactor was 3.5 times as effective as a conventional flatbed reactor under the strongest light. The single-pass removal efficiency of formaldehyde was 4.99% to 10.60% for three different light intensities, and was positively correlated with the light intensity. The formaldehyde conversion and reaction rates also increased with the increase in light intensity. Besides, the purification efficiency of formaldehyde was 0.80 to 0.85 for three different light intensities. The ducted split air purifier belonged to the range of Class A purifiers.

**Key words** photocatalytic oxidation; air purifier; indoor environment; formaldehyde; air conditioning system

调查显示,人的一生当中有 80% ~ 90% 的时间是在室内环境中度过的,自 1987 年,美国 EPA 证实了室内空气污染是最大的环境危机之一,室内空气质量 (IAQ) 受到人们越来越多的关注<sup>[1]</sup>。然而,引起室内空气质量恶化的主要原因是室内大量的挥发性有机化合物 (VOCs)<sup>[2]</sup>。现代城市建筑中使用了大量的室内装饰、装修材料,从这些材料中释放出来的甲醛、甲苯等有机物质是室内 VOCs 的主要发生源,严重影响 IAQ<sup>[3]</sup>。VOCs 的浓度超过标准会导致建筑内的人们有不舒适的感觉,如头晕、烦躁、恶心等,甚至还会引发疾病,已经出现以下 3 种病症:病

态建筑综合症 (SBS)、与建筑有关的疾病 (BRI) 以及多种化学污染物过敏症 (MCS)<sup>[4-6]</sup>。对室内空气进行净化处理已迫在眉睫,而光催化氧化 (PCO) 技术不仅可以降解室内大部分的 VOCs,最终生成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等无机无害小分子产物,而且具有反应条件温和、无选择性、催化活性高和使用安全等优点<sup>[6-7]</sup>。因此,如何利用 PCO 技术改善室内空气质量已经成为国内外研究热点,具有广阔的应用前景<sup>[8-9]</sup>。

为了使反应-传质能力更加匹配,增大光源利用率及反应面积,提高 VOCs 降解效率,研究人员在

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAJ03B13);重庆市建设科技计划项目(城科学 2013 第 1-5-2 号)

收稿日期:2015-03-26;修订日期:2015-05-08

作者简介:宋雪瑞(1990—),女,硕士研究生,研究方向:室内空气。E-mail:799563955@qq.com

\* 通讯联系人,E-mail:jz187@cqu.edu.cn

PCO 反应器结构优化、催化材料改性和联合利用其他净化技术等方面做了大量研究<sup>[10-12]</sup>。这些改进在一定程度上提高了反应效率。但是用 PCO 技术处理空气中 VOCs 的实际应用仍然受光催化净化器有效设计的制约和阻碍<sup>[13]</sup>,特别是能够应用于供热、通风及空调系统的光催化空气净化器,国内外鲜有报道。一个受污染的供热、供燃气、通风及空调工程系统能够将污染物遍布于整个建筑,所以,对供热、供燃气、通风及空调工程系统进行净化显得十分必要<sup>[14]</sup>。因此,本研究设计了一种风道式光催化空气净化器,以期提供一种不需要额外占用空间、有效反应面积大、光源利用效率高、反应-传质能力强、反应效率高的净化器,并制作出样机对室内甲醛的降解进行了实验研究,以确定该净化器的应用潜能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置设计

#### 1.1.1 反应器结构设计

传统的光催化空气净化器大都是单体结构,无论是直流式还是折流式都需要占据一定的室内空间。本研究提出了一种风道式光催化空气净化器,其壳体与中央空调送风管材材质相同、大小匹配,通过法兰连接在风机盘管出口的送风管中部,不需要额外占用空间;同时,可以利用风机盘管提供的动力,不需要再设置额外的动力装置(如图1所示)。

该反应器可由多个筒体利用法兰对接得到,用户可以根据自身需要灵活增减。图1所示为内部设一组(至少一组)光催化结构示意图:2张平行设置的W形滤网之间设置有肋片,肋片长度方向上呈W

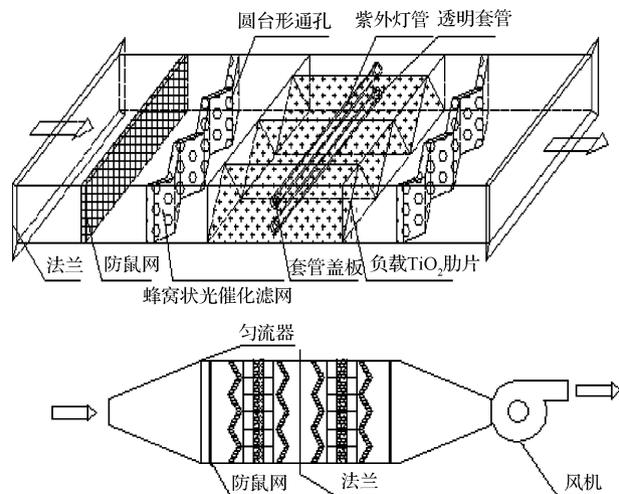


图1 风道式空气净化器结构和样机

Fig. 1 Structure and model machine of duct air purifier

形;肋片中部贯穿安装有透明套管,紫外光源置于透明套管内;透明套管2端设有套管盖板;光催化滤网上沿壳体纵向设置有蜂窝状圆台形平行通孔,且截面大的一端朝向紫外光源。另外,光催化滤网、肋片以及壳体内表面均涂有光催化剂,壳体两端设置防鼠网。

#### 1.1.2 样机制作

由于实验条件的限制,在制作样机时,适当缩小了反应器的尺寸,样品最终的尺寸定为长×宽×高为500 mm×320 mm×250 mm,为了保证进入样机气流均匀,在反应器的前后各加装了一段渐变管,并在净化器入口处装匀流器,样机出口处装风机(如图1所示)。

样机中所选用的风机功率为22 W。透明套管是由锐钛矿型TiO<sub>2</sub>基纳米薄膜自清洁玻璃制成,具有表面不易积灰、使用寿命长等优点。紫外灯波长为254 nm,额定功率为8 W,灯身总长为310 mm,水平安装。催化剂采用 Degussa P25 型 TiO<sub>2</sub>,催化活性很高。TiO<sub>2</sub>薄膜的溶液用溶胶-凝胶法制备,用浸渍的方法将TiO<sub>2</sub>薄膜的溶液涂覆在光催化滤网、肋片和壳体内表面,再经过干燥和煅烧形成催化剂层。

#### 1.1.3 实验系统设计

如图2所示,整个实验系统由环境舱、挥发箱和舱外的大功率电磁式空气压缩机组成。环境舱的尺寸为1 m×0.5 m×1 m,顶部安装一吊扇(功率35 W)。环境舱的底部固定有实验操作台,左、右两表面分别开设一个进风口和一个排风口。实验过程中,将制作好的样机安放在环境舱内的实验操作台

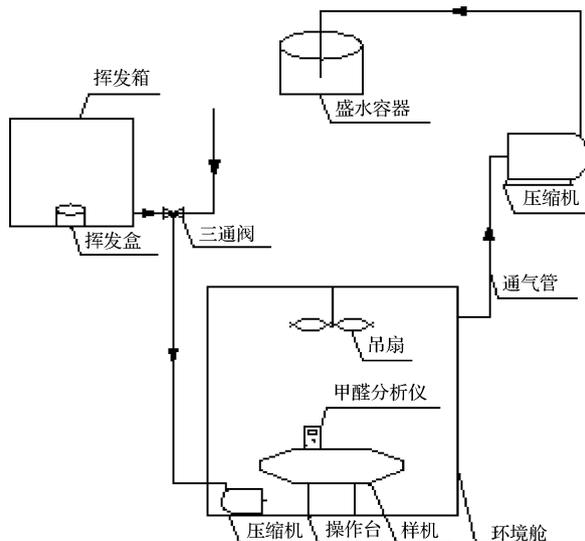


图2 光催化实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photocatalytic experiment system

上,甲醛分析仪放置在样机上,小功率的电磁式空气压缩机位于环境舱的底部。挥发箱底部设置一个挥发盒,主要是用来放置甲醛标准溶液,挥发箱与环境舱之间由通气管相连,箱外设有一个三通阀(一端通入甲醛气体,另一端通入室外新鲜空气)。舱外的大功率电磁式空气压缩机一端与环境舱相接,另一端放入盛水容器。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 实验原理

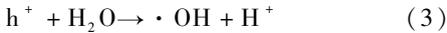
VOCs 的光催化反应一般认为包括以下几个步骤:光激发催化剂表面形成电子-空穴对;电子-空穴对必须能有效地分离;电子-空穴对在催化剂表面与被吸附物发生氧化还原反应;光催化剂表面产物的脱附与再吸附。上述反应步骤用方程表示如下:



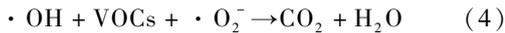
还原反应:



氧化反应:



总反应:



### 1.2.2 实验步骤

本研究选取甲醛作为目标污染物,因其是室内常见的主要污染物,且对人体健康危害较大,所以受到广泛关注<sup>[1]</sup>。实验步骤如下:

1) 将制作好的样机和甲醛分析仪依次放入环境舱内,并对环境舱进行密封;

2) 用棉签蘸取少量的甲醛标准溶液,迅速放入挥发盒内,放上盖子后用水封确保其气密性;

3) 打开小功率电磁式空气压缩机,将三通调节为通入甲醛气体,同时开启大功率电磁式空气压缩机、吊扇和风机,确保环境舱内气体混合均匀;

4) 通过调节三通开启方向和大功率电磁式空气压缩机的启停控制舱内甲醛浓度;

5) 待舱内甲醛气体混合均匀后,关闭 2 个电磁式空气压缩机并打开紫外灯(做自然衰减实验时不开紫外灯),开始记录数据;

6) 实验结束后,将三通调节为通入新鲜空气,开启 2 个电磁式空气压缩机,将环境舱内遗留的甲醛气体通入盛水容器中,以免扩散,对人体造成伤害。

### 1.2.3 实验仪器

根据国家标准(GB/T 18801-2008 空气净化器),控制环境舱内温度  $T$  为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度

RH 为  $(50 \pm 10)\%$ ,  $T$  和 RH 由 KANOMAX 生产的 CLIMOMASTER 6531 测试仪测定。

本研究光照度设定为 150、210 和 320 lx 3 个水平分别对甲醛的降解进行测试,光照度由 TES-1330A 照度计测定。其中,  $T$  由室内空控制, RH 由水的自然挥发进行调节,光照度的改变是通过控制所开启的紫外灯管的数量来实现的。采样浓度由 INTERSCAN 4160 甲醛分析仪测得,风速由风速仪 KANOMAX6531 测得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果分析

#### 2.1.1 样机压降实验

气体在光催化反应器内流动的过程中会产生一定的压力损失,在样机压降实验中,气体压降是通过测量样机进风口与出风口的风速后计算得到的。

从图 3 可以看出,当速度小于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,样机内的压降小于 60 Pa,这样的压降对于空调系统来说基本可以忽略。因此,风道式反应器用于空调系统时,可以利用风机盘管提供的动力,不需要再设置额外的动力装置且风机盘管中风机的压头不需要增加。

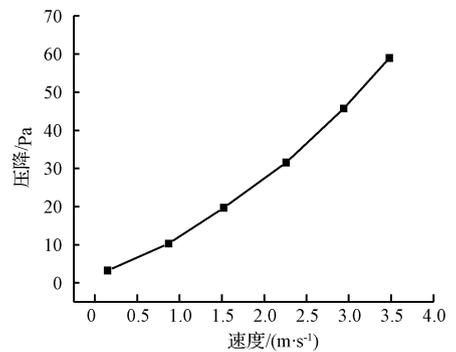


图 3 气体流速对压降的影响

Fig. 3 Effect of volumetric flow rate on pressure drop

#### 2.1.2 甲醛的自然衰减和总衰减

在自然衰减实验中,甲醛浓度降低主要由泄漏、吸附等作用引起。在总衰减实验中,室内甲醛浓度的变化是自然衰减和空气净化器共同作用的结果。因此,对密闭环境舱内的甲醛,根据质量守恒方程可得:

$$V \frac{dC}{dt} = - (K_n V + \text{CADR}) C = - (K_n V + G\eta) C \quad (5)$$

$$\ln C = - \left( K_n + \frac{\text{CADR}}{V} \right) t + \ln C_0$$

$$= - \left( K_n + \frac{G\eta}{V} \right) t + \ln C_0 = - K_e t + \ln C_0 \quad (6)$$

式中:  $C$  为舱内污染物实时浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $V$  为环境舱容积,  $\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{h}$ ;  $\text{CADR}$  为洁净空气量,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $G$  为循环流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $K_e$ 、 $K_n$  为有反应器、无反应器时的总衰减和自然衰减常数,  $\text{h}^{-1}$ ;  $\eta$  为一次通过效率。

当  $t=0$  时, 室内污染物浓度为  $C_0$ 。对式(5)进行积分可得:

对于自然衰减实验,  $\eta=0$ , 式(6)可写成:

$$\ln C = - K_n t + \ln C_0 \quad (7)$$

由式(7)可知, 将污染物浓度值的对数  $\ln C$  与测试时间  $t$  进行线性拟合, 其斜率即为甲醛的自然衰减系数  $K_n$ , 它代表了漏气、沉降作用的大小, 图4(a)给出了  $t=18^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH}=52\%$  的测试环境下反应器对甲醛的降解线性拟合曲线。

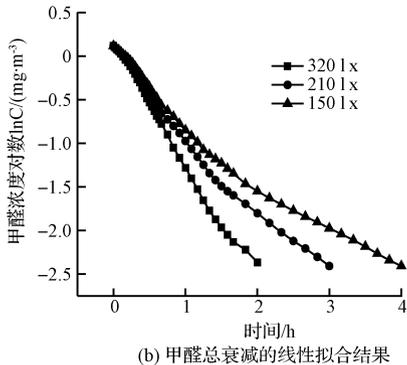
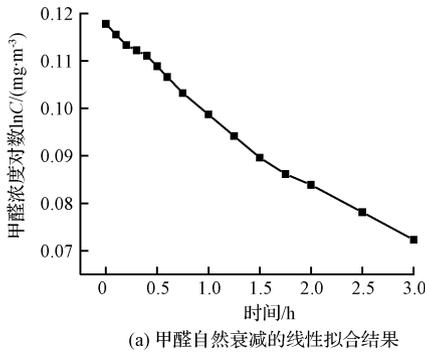


图4 甲醛自然衰减和总衰减的实验结果

Fig.4 Experimental results of natural attenuation and total attenuation of formaldehyde

自然衰减实验结束后, 在初始浓度不变的情况下, 测定不同光照度下甲醛浓度的总衰减, 同样地, 可以给出其  $\ln C$  与  $t$  进行线性拟合的结果, 求得其斜率即为甲醛的总衰减系数  $K_e$ , 如图4(b)所示。

从图4(b)可以看出, 对于设置的3个不同光照条件下, 环境舱内甲醛含量均可降至国家标准值  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以下, 且光照越强, 所需降解时间越短。

表1给出了各工况下甲醛自然衰减和总衰减系数的计算结果及其对应的拟合相关系数。

表1 实验参数拟合结果

Table 1 Results of linear regression

光照度/lx	$K_n/\text{h}^{-1}$	$K_e/\text{h}^{-1}$	$R^2$
320	0.015 7	1.375 0	0.993 1
210	0.015 7	0.889 8	0.979 4
150	0.015 7	0.655 7	0.966 2

### 2.1.3 对比实验

从上述实验可以看出, 风道式反应器的降解性能随光照度的增大而提高, 选择最优光照工况(320 lx), 用传统的平板式反应器取代样机, 再进行一次实验, 并与上述同等条件的降解过程进行对比, 其线性拟合结果如图5所示。

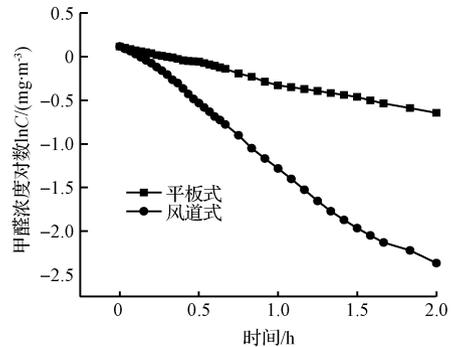


图5 对比实验结果

Fig.5 Results of contrastive experiments

由图5可知, 在相同的实验条件下, 自行设计的风道式反应器降解甲醛的效果明显优于传统平板式。平板式在2 h内的总衰减系数为  $0.394 \text{ h}^{-1}$ , 而风道式的总衰减系数为  $1.375 \text{ h}^{-1}$ , 净化效果为传统式的3.5倍。

## 2.2 空气净化器的性能评价

### 2.2.1 降解效率

一次通过效率  $\eta$  和洁净空气量  $\text{CADR}$  是评价净化器自身性能的重要指标, 由式(6)可知:

$$\eta = \frac{V}{G} (K_e - K_n) \quad (8)$$

$$\text{CADR} = V (K_e - K_n) \quad (9)$$

由此可求得在不同的光照条件下空气净化器降

解甲醛的  $\eta$  和 CADR,其计算结果如表 2 所示。

表 2 净化器的降解效率

Table 2 Degradation efficiency of air cleaner

光照度/lx	$\eta/\%$	CADR/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
320	10.6	0.679 6
210	6.82	0.437 1
150	4.99	0.320 0

### 2.2.2 降解速率

为了讨论光照度对反应器降解性能的影响,计算了 3 种光照度下甲醛的反应速率  $m$  和转化率  $r$ 。它们是反映净化器性能的重要指标,其计算式如下:

$$m = \frac{(C_{\text{in}} - C_{\text{out}})G}{M_m} \times 1\,000 \quad (10)$$

$$r = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $m$  为反应速率, $\mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $r$  为转化率;  $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{out}}$  为反应器进口、出口浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $G$  为循环流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $M_m$  为气体的摩尔质量,甲醛为  $30 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $C_0$  为初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_s$  为反应结束时的浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

从图 4(b)可以看出,在上述 3 种光照条件(320 lx(高)、210 lx(中)、150 lx(低))下,前 1 h 内的浓度值几乎呈线性降低,由式(10)计算出的  $m$  值基本为定值。鉴于此,统一选择 0~1 h 为计算  $m$  和  $r$  的起止时间,计算时先算出各个采样时刻的  $m$  值,然后计算 1 h 内  $m$  的平均值。 $r$  的计算则直接将  $C_0$  和 1 h 时的浓度带入式(11)。图 6 分别给出了甲醛的反应速率和转化率随光照度的变化情况。

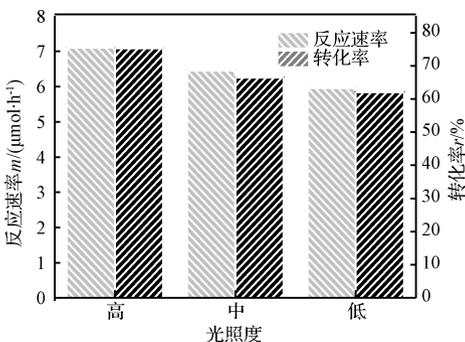


图 6 光照度对反应速率和转化率的影响

Fig. 6 Influence of light intensity on conversion and reaction of formaldehyde

对比发现,随着光照度的增加,甲醛的转化率和反应速率都随之增大,即甲醛的降解能力有所提高。

造成这种趋势的原因在于光照度大时,所产生的光子能量较高,由其激发的空穴氧化能力较强,电子还原能力较强,因此它们与污染物的反应能力加强<sup>[15]</sup>。

### 2.2.3 净化效能

光催化反应器的性能评价应该包含 2 个部分:效率和效益。国家标准采用净化效能将效率和效益结合起来,提出了净化效能  $\varepsilon$ ,其表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\text{CADR}}{P} \quad (12)$$

式中: $\varepsilon$  为净化效能, $\text{m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{W})^{-1}$ ; CADR 为洁净空气量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $P$  为净化器消耗功率,  $\text{W}$ 。

净化效能反映了空气净化器单位功耗所产生的洁净空气量。根据国家标准中的空气净化器气态污染物分级表,我们可以净化效能  $\varepsilon$  为指标对空气净化器进行分级(共分 4 级:A~D,A 级为最高)。

若采用标准的环境测试舱的尺寸,即  $V = 30 \text{ m}^3$ ,重新计算前面各工况下的 CADR 和该工况下的  $P$  代入公式(12),即可求得净化器在各工况下的  $\varepsilon$ ,计算结果见表 3,由计算结果可知该净化器的净化效能可在 0.80~0.85 之间,属于 A 级范围。

表 3 净化器的净化效能

Table 3 Purification efficiency of air cleaner

光照度/lx	CADR/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$P/\text{W}$	$\varepsilon$
320	10.6	0.679 6	0.85
210	6.82	0.437 1	0.82
150	4.99	0.320 0	0.80

## 3 结 论

1) 当面速度小于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,样机内的压降小于 60 Pa,对于空调系统来说基本可以忽略不计。

2) 在密闭环境下,所设计的风道式光催化空气净化器对甲醛的净化效果良好,在 3 种不同的光照条件下,经过一定的时间均能将甲醛浓度控制在标准限值 0.1  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  以下。

3) 在最强光照工况下,通过对比实验,可得到风道式反应器的净化效果为传统平板式的 3.5 倍。

4) 在一定的光照强度范围内,光照强度越大,该反应器对甲醛的一次通过效率越高;对于所设定的 3 种光照强度,甲醛的一次通过效率约与光强呈正相关,分布在 4.99%~10.60% 之间。

5) 对于该风道式空气净化器,在设定的 3 种光照条件下,光照越强,其转化率和反应速率越大。

6)所设计的光催化空气净化器对甲醛的净化效能  
在0.80~0.85之间,满足A级净化器设计要求。

### 参考文献

- [1] WESCHLER C. J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*, **2009**, 43(1): 153-169
- [2] ZHANG Jiefeng, BAI Zhipeng, CHANG V. W. C., et al. Balancing BEC and IAQ in civil buildings during rapid urbanization in China: Regulation, interplay and collaboration. *Energy Policy*, **2011**, 39(10): 5778-5790
- [3] DU Jing, LI Nianping. Study on indoor air quality of ceiling radiant cooling panel system integrated with displacement ventilation//LI Angui, ZHU Yingxin, LI Yuguo. *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Berlin Heidelberg: Springer, **2014**: 497-505
- [4] ZHANG X., ZHAO Z., NORDQUIST T., et al. The prevalence and incidence of sick building syndrome in Chinese pupils in relation to the school environment: A two-year follow-up study. *Indoor Air*, **2011**, 21(6): 462-471
- [5] 孙宏娟, 王彦君, 汤跃庆. 板式儿童家具中挥发性有机物(TVOC)对室内空气质量影响的研究. *中国建材科技*, **2012**, 21(1): 1-7  
SUN Hongjuan, WANG Yanjun, TANG Yueqing. The effect of TVOC from children furniture to the indoor air quality. *China Building Materials Science & Technology*, **2012**, 21(1): 1-7(in Chinese)
- [6] LU Yuanwei, WANG Dinghui, MA Chongfang, et al. The effect of activated carbon adsorption on the photocatalytic removal of formaldehyde. *Building and Environment*, **2010**, 45(3): 615-621
- [7] YU C. W. F., KIM J. T. Photocatalytic oxidation for maintenance of indoor environmental quality. *Indoor and Built Environment*, **2013**, 22(1): 39-51
- [8] WU Yiting, YU Yihui, NGUYEN V. H., et al. Enhanced xylene removal by photocatalytic oxidation using fiber-illuminated honeycomb reactor at ppb level. *Journal of Hazardous Materials*, **2013**, 262: 717-725
- [9] ZHONG Lexuan, HAGHIGHAT F., BLONDEAU P., et al. Modeling and physical interpretation of photocatalytic oxidation efficiency in indoor air applications. *Building and Environment*, **2010**, 45(12): 2689-2697
- [10] 徐秋健, 王者, 莫金汉, 等. 热催化蜂窝降解室内VOCs实验研究. *工程热物理学报*, **2011**, 32(8): 1406-1408  
XU Qiujuan, WANG Zhe, MO Jinhan, et al. Experimental study on the performance of indoor VOC removal by thermal catalytic honeycombs. *Journal of Engineering Thermophysics*, **2011**, 32(8): 1406-1408(in Chinese)
- [11] JIANG Yijiao, AMAL R. Selective synthesis of TiO<sub>2</sub>-based nanoparticles with highly active surface sites for gas-phase photocatalytic oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2013**, 138-139: 260-267
- [12] BARAN T., MACYK W. Photocatalytic oxidation of volatile pollutants of air driven by visible light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **2012**, 241: 8-12
- [13] MILLS A., O'ROURKE C. Photocatalytic organic synthesis in an NMR tube: C-C coupling of phenoxyacetic acid and acrylamide. *Catalysis Today*, **2014**, 230: 256-264
- [14] TEKE A., TIMUR O. Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2014**, 33: 224-235
- [15] DU Jingjing, CHEN Wen, ZHAO Chunxia, et al. Photocatalytic decompositions of gaseous HCHO over Ag/TiO<sub>2</sub> nanotube arrays. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **2011**, 11(12): 10691-10695