

大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201801195 中图分类号 X511 文献标识码 A

王磊, 刘喜宏, 张忠涛, 等. 室内空气总挥发性有机物净化实验装置设计及应用[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2264-2269.

WANG Lei, LIU Xihong, ZHANG Zhongtao, et al. Design and application of indoor air total volatile organic compounds purification experimental device [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 2264-2269.

室内空气总挥发性有机物净化实验装置设计及应用

王磊¹, 刘喜宏², 张忠涛², 司慧^{1,*}, 常建民³, 周炆¹

1. 北京林业大学工学院, 北京 100083

2. 国家林业局林产工业规划设计院, 北京 100010

3. 北京林业大学材料学院, 北京 100083

第一作者: 王磊 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 家具 VOC 检测设备. E-mail: blwl1010@163.com

* 通信作者, E-mail: sihui@bjfu.edu.cn

摘要 为了探究进气流量和相对湿度对活性炭吸附法和光催化转化法动态净化室内空气中总挥发性有机物 (TVOC) 的影响, 设计了一套包含活性炭吸附器和光催化反应器的多功能空气动态净化实验装置, 并利用该装置进行了室内空气净化实验。通过设置不同进气条件 (进气流量和相对湿度) 对室内空气进行净化实验, 采用气相色谱仪对样品 TVOC 浓度进行检测, 并与未经净化处理的空气样品进行对比, 计算 TVOC 去除率。结果表明: 该实验装置能够实现连续进气且能对进气流量和相对湿度进行精准调节; 随着进气流量增大, 活性炭和光催化对 TVOC 去除率减小; 随着进气相对湿度增大, 活性炭对 TVOC 去除率减小, 光催化对 TVOC 的去除率呈现先增大后减小的趋势。以上实验结果为气候舱空气净化系统、家用空气净化器及室内新风过滤系统等动态空气净化系统的设计提供了参考。

关键词 室内; TVOC; 实验装置设计; 动态净化实验

调查显示, 人一生中约有 80% 的时间在室内环境中度过, 室内环境的优劣直接影响人们的身体健康^[1-2]。总挥发性有机物 (total volatile organic compounds, TVOC) 浓度过高是造成室内环境污染的主要原因之一, 如何有效降低空气中的 TVOC 浓度、营造清新健康的室内空气环境是目前室内环保问题的主要研究方向^[3-4]。活性炭吸附法和光催化转化法是目前应用于 TVOC 污染治理领域常用的 2 种方法^[5]。活性炭吸附法主要是利用活性炭作为吸附剂来吸附转移空气中的有机大分子物质, 光催化转化法则是利用光催化剂在光照条件下将有机物转化为无污染的无机小分子物质, 实现降低有机污染物浓度的效果^[6-7]。前期研究^[8-10]表明, 常温条件下, 活性炭吸附法和光催化转化法对 TVOC 的去除效果受到空气湿度及进气流量的影响。为探究以上 2 种方法在动态净化过程中去除空气中 TVOC 的具体情况, 本研究设计一套多功能空气净化实验装置, 该装置包括吸附净化及光催化净化 2 个净化模块。利用该装置, 探究室温条件下不同进气条件 (进气湿度和进气流量) 对活性炭吸附法和光催化转化法动态净化空气中 TVOC 的影响, 实验结果为气候舱空气净化系统、家用空气净化器及室内新风过滤系统等动态空气净化系统的设计提供参考。

1 实验装置设计

1.1 结构与原理

空气净化实验装置主要用于探究活性炭吸附法和光催化转化法在不同进气条件下对室内空气中TVOC的去除效果。该装置主要包括进气风机、初效过滤器、转子流量计、湿度调节系统、吸附过滤器、光催化反应器及气体采样系统等,工艺流程如图1所示。

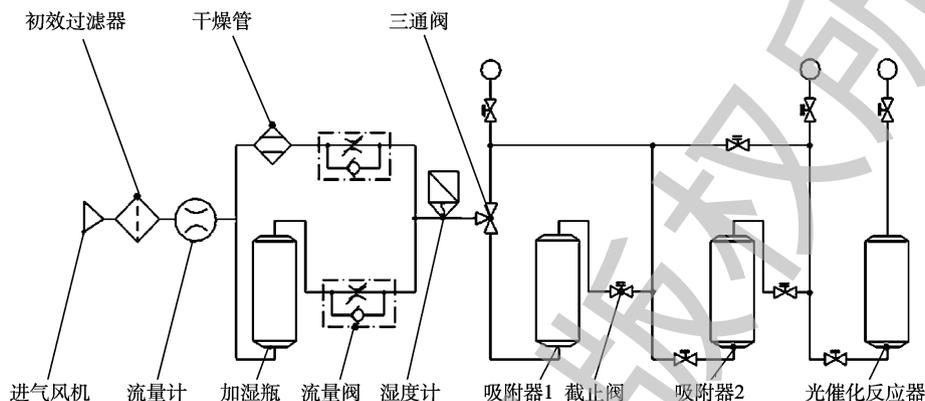


图1 空气净化实验装置工艺流程图

Fig. 1 Air purification experimental process flow chart

空气净化实验装置工作过程: 进气风机将空气抽入装置管道内, 调节进气流量和相对湿度后, 根据实验探究内容, 选择开闭不同阀门, 将空气通入活性炭吸附器或光催化反应器中, 经过一段时间的净化处理后, 从采样口收集处理后的空气样品并进行检测。其中, 系统的进气流量通过玻璃转子流量计直接进行控制, 进气湿度则由湿度调节系统进行调控, 湿度调节系统主要由加湿装置、干燥装置、流量阀及湿度传感器组成, 利用干湿气体混合法, 通过调节干湿气路的流量阀控制干湿气体的混合比例来控制进气湿度, 相对湿度数据由湿度传感器读出。

1.2 关键部件设计

1.2.1 活性炭吸附器

吸附器是装置的核心部件之一, 其整体采用固定床式结构, 为了提高吸附效率, 减少吸附器内边流效应的影响, 对吸附器的设计重点考虑2点创新。1) 整体采用分段式设计。综合考虑气体处理量设计要求、气流面风速以及气体与吸附剂的接触时间, 确定固定床式吸附器内径为40 mm, 两段分别为气体吸附区和气体缓冲区, 两段之间由快接法兰连接, 在实验过程中可快速完成吸附材料的填装与更换。2) 气体均流板与缓冲区的合理配置和优化。均流板的作用在于放置吸附剂和均布气体。所设计的均流板, 中间孔直径为2 mm, 四周孔直径为1 mm, 60°错排分布, 均流板下方设置有高度为40 mm的气体缓冲区。气体缓冲区的作用是适当降低气速, 使气体稳定通过均流板。通过均流板和缓冲区的精巧设计, 能够为活性炭吸附创造良好的气流环境, 弥补传统固定床式吸附器内气流不均匀和存在边流效应等缺陷, 增强实验结果的准确性, 同时吸附器整体结构紧凑小巧, 方便实验操作, 吸附器结构如图2所示。

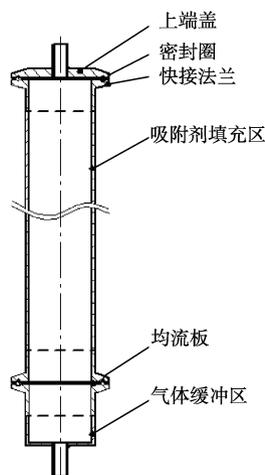


图2 活性炭吸附器结构示意图

Fig. 2 Activated carbon adsorption tank structure diagram

1.2.2 光催化反应器

光催化反应在高浓度污染物环境中具有更好的反应效果^[11],目前常用的光催化反应装置不适用于低污染物浓度的室内环境,针对本实验装置的应用特点,从反应器类型、光源位置和催化剂载体等方面考虑,设计了新型光催化反应器。

反应器采用填充式固定床结构,选用纳米 TiO₂ 作为光催化剂,以镀膜的方式固定在大的连续表面积的载体上,载体填充于反应器内。光照反应时床层静止不动,气体通过床层发生反应,将流经催化剂表面的污染物有效降解。固定床反应器结构简单,操作方便,成本相对较低,适合小型装置或实验室条件下应用。

气体光催化装置的光源采用功率 10 W,波长 254 nm 的低压紫外线灯。为简化反应器结构,降低密封处理要求,避免紫外灯直接接触反应气体产生的实验干扰,本装置设计采用光源外置形式,反应器主体为石英圆管,光源安装于反应器外部,与反应器轴线平行布置,为增大紫外光与光催化剂接触面积,本装置设计均布安装 3 盏紫外灯。

为解决光催化反应在低浓度污染物环境中效果不佳的问题,本设计将光催化技术与活性炭吸附技术相结合,利用活性炭对 TVOC 气体的富集作用,提高光催化剂表面 TVOC 气体浓度,增强光催化效果^[12-13]。但是根据反应器的特点,要求催化剂载体具有较大的透光性和表面积以及较低的气阻,所以普通活性炭材料难以满足要求。综合考虑,本设计选用活性炭滤网作为光催化剂载体,填充在反应器内部,其特殊的结构和性质,既能确保 TVOC 气体与光催化剂的充分接触,又能保证光催化剂能接受足够的紫外光照,是理想的光催化剂载体。

综合以上设计要点,考虑光照强度、气体流速及装置结构紧凑等要求,计算确定圆筒石英光催化反应器直径为 60 mm,管壁厚度为 3 mm,高度为 270 mm,装置外壳为内抛光不锈钢圆筒,直径为 280 mm,筒壁厚度为 2 mm,高度为 260 mm,光催化装置结构示意图如图 3 所示。

1.3 材料筛选

为使本实验装置有更好的净化效果,提高实验数据的准确性和直观性,通过设计实验,筛选确定吸附器中填充的最优活性炭种类及光催化反应器中采用的最佳活性炭滤网规格,实验以室内空气中 TVOC (主要检测:苯、甲苯和二甲苯等)为净化对象。经检测,实验阶段室内空气中 TVOC 浓度始终保持在 0.27~0.33 mg·m⁻³ 浓度范围内,实验采用美国安捷伦公司生产的气相色谱仪 (7890N) 对 TVOC 浓度进行检测。

1.3.1 吸附剂

颗粒活性炭具有良好的吸附效果,常被用于空气污染治理,本装置吸附器中采用颗粒活性炭作为吸附剂。常用的颗粒活性炭按原料不同可以分为椰壳活性炭、杏核活性炭、木质活性炭和果壳活性炭等,不同活性炭理化性质不同,其针对不同的吸附对象也具有不同的吸附效果,实验中 4 种活性炭的具体参数如表 1 所示。

为确定最合适于本装置的吸附剂,设计吸附实验,在相同实验条件下,筛选出吸附效果最优的活性炭,实验结果如图 4 所示。

实验结果表明,椰壳颗粒活性炭对室内 TVOC 具有更好的去除效果,所以设计的吸附器中选择该类椰壳颗粒活性炭作为吸附剂。

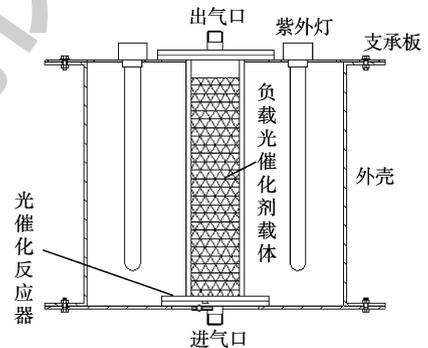


图 3 光催化装置结构示意图

Fig. 3 Photo catalytic device structure diagram

表 1 实验中活性炭具体参数
Table 1 Activated carbon specific parameters in experiment

活性炭种类	颗粒粒径/目	碘吸附值/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	灰分质量分数/%	质量/g
果壳颗粒活性炭	30~50	>600	>1 000	<5	200
木质颗粒活性炭	50~100	>600	>800	<5	200
椰壳颗粒活性炭	30~50	>800	>1 200	<5	200
杏壳颗粒活性炭	30~50	>800	>1 000	<5	200

1.3.2 光催化剂载体

活性炭滤网具有良好的吸附性能及透光性能,是本装置光催化反应器中理想的催化剂载体。活性炭滤网按照网孔大小常被分为大孔隙滤网、中孔隙滤网和小孔隙滤网,其网孔大小分别为 45、30 和 15 mm^2 。网孔越小,活性炭与空气的接触面积越大,吸附效果越好,但是随着网孔的减小,其透光性受到影响,光催化效果也会减弱。为确定最合适的滤网规格,实验在相同条件下,筛选出净化效果最佳的光催化剂载体,结果如图 5 所示。

实验结果表明,大孔隙活性炭滤网作为光催化剂载体时,反应器具有更好的净化效果,所以光催化反应器中采用大孔隙滤网作为光催化剂载体。

2 TVOC 净化实验

2.1 实验材料

吸附器中装填的吸附剂是经过实验筛选的椰壳颗粒活性炭,活性炭在装填之前需进行洗涤和干燥处理,去除活性炭中的灰分,增强吸附性能;光催化剂选用 Degussa 公司的 $\text{P}25\text{TiO}_2$, 催化剂载体选用大孔隙活性炭滤网,炭含量达到 50% 以上,利用硅酸钠水溶液的黏合性将 TiO_2 粉末浸渍固定在活性炭滤网上,负载完成后 $\text{P}25\text{TiO}_2$ 与活性炭滤网的质量比为 1:8。

2.2 实验设计

室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,在自主设计的实验装置上,分别对相对湿度为 20%、40%、60%、80% 和进气流量为 200、400、600、800 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的室内空气进行 TVOC 动态净化实验,采用气相色谱仪对样品 TVOC 浓度进行检测,取 3 次测量结果平均值计算 TVOC 去除率。

实验具体过程以相对湿度 20%、200 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 为例:打开进气风机,实验装置最大流量空载运行 30 min,吹脱管道及装置中附着的 TVOC,减小实验干扰;加湿瓶中装入适量蒸馏水,干燥管中填充硅胶干燥剂,吸附器中装填 200 g 活性炭,光催化反应器中填充负载了纳米 TiO_2 的大孔隙活性炭滤网;打开进气泵和紫外灯,调节进气流量至 200 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$,调节干湿气路流量比,控制进气相对湿度为 20%,并保持稳定;从采样口 1 采样,检测未净化处理气体的 TVOC 浓度;调整阀门开闭,将空气通入活性炭吸附器中,保持通气 10 min,从采样口 2 采样,检测经活性炭吸附处理后空气中的 TVOC 浓度;调整阀门,将空气通入光催化反应器中,保持通气 10 min,从采样口 3 采样,检测经光催化净化处理后空气中的 TVOC 浓度;将采样口 2 和采样口 3 检测的数据与采样口 1 检测的数据比较,计算得

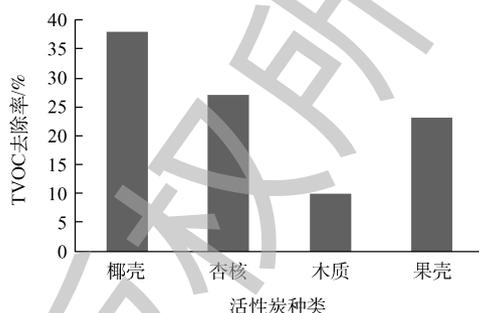


图 4 不同原料颗粒活性炭对 TVOC 的去除率
Fig. 4 Removal rate of TVOC from different raw material granular activated carbons

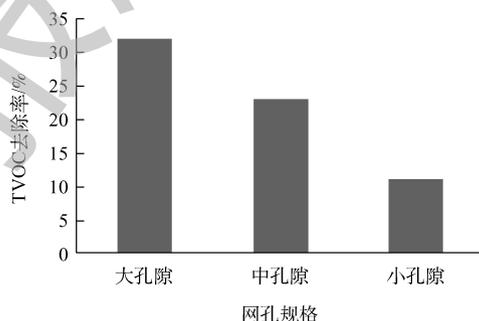


图 5 不同孔隙光催化剂载体对 TVOC 的去除率
Fig. 5 Removal rate of TVOC from different porous photo catalyst carriers

到活性炭吸附法和光催化转化法对室内空气 TVOC 的去除率。

2.3 实验结果与分析

按照上述实验过程进行其他实验, 得到实验结果如图 6、图 7 所示。

实验结果表明, 进气流量相同, 进气相对湿度在 20%~80% 范围内增大时, 活性炭吸附法对空气中 TVOC 的去除率呈现减小的趋势, 光催化转化法则出现先增大后减小的趋势; 进气相对湿度相同, 进气流量在 200~800 L·h⁻¹ 范围内增大时, 活性炭吸附法和光催化转化法对空气中 TVOC 的去除率都呈现减小趋势。其中进气相对湿度为 20%、进气流量为 200 L·h⁻¹ 时, 活性炭吸附法去除空气中 TVOC 效果最好, 去除率达到 37.5%; 进气相对湿度为 40%、进气流量为 200 L·h⁻¹ 时, 光催化转化法去除空气中 TVOC 效果最好, 去除率为 33.2%。

活性炭具有丰富的表面孔隙结构, 能够对其周围的 TVOC 气体产生较强的吸附作用^[14]。当进气流量增大时, 活性炭与 TVOC 分子接触时间减少, 吸附效率降低; 当进气相对湿度增大时, 水蒸气浓度升高, 由于水分子与 TVOC 分子存在竞争吸附的关系, 导致活性炭对 TVOC 吸附效率降低; 所以活性炭在低进气流量及低进气湿度条件下, 对 TVOC 的吸附效果更好。在进行活性炭动态空气净化系统设计时, 可参考以上结论。

光催化转化 TVOC 主要是利用光催化剂在紫外光照条件下, 电子发生迁移, 将催化剂表面的 H₂O 和 O₂ 转化为具有强氧化性的羟基自由基和超氧离子自由基, 从而将催化剂表面的有机物大分子转化为无机小分子^[15], 所以 H₂O 是光催化反应能够发生的必要条件。当水蒸气浓度较低时, 光催化反应不充分, 当水蒸气浓度过高时, 又会影响活性炭滤网对 TVOC 的吸附富集作用; 同样, 当进气流量增大时, 光催化剂与 TVOC 接触时间也会减少, 导致转化效率降低。在设计光催化动态空气净化系统时, 除了保证气体与光催化剂充分接触之外, 还可考虑对进气湿度进行调节, 以获得更好的光催化处理效果。

3 结论

1) 所设计的活性炭吸附器和光催化反应器满足实验使用要求, 实验装置能够实现连续稳定进气, 实现流量和相对湿度的大范围精准调节, 流量调节范围为 0~1 000 L·h⁻¹, 相对湿度调节范围为 15%~90%。除了能进行以上净化实验外, 该实验装置还可进行其他室内空气净化实验, 如吸附材料筛选实验、吸附-光催化联用实验等, 实验装置操作简单, 功能多样。

2) 在一定范围内, 活性炭对室内空气中 TVOC 的去除率随着进气流量和相对湿度的增大而减小; 光催化对室内空气中 TVOC 的去除率随着进气流量的增大而减小, 随着进气湿度的增大出现先增大后减小的趋势。在进行室内空气净化系统设计时可以参考实验结果, 选择最佳进气条件以达到更好的 TVOC 净化效果。

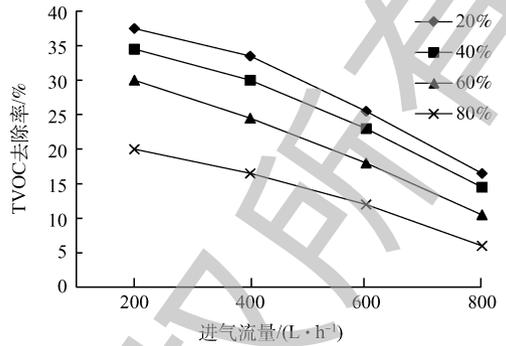


图 6 进气流量和相对湿度对活性炭去除 TVOC 的影响
Fig. 6 Effect of intake air flow rate and relative humidity on removal of TVOC from activated carbon

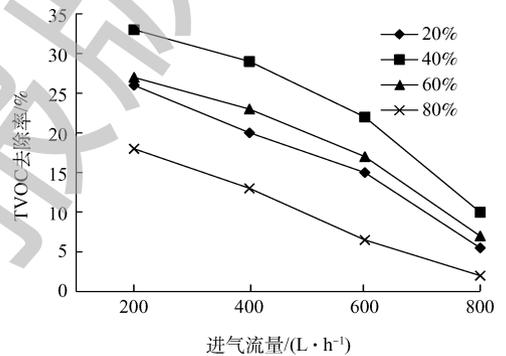


图 7 进气流量和相对湿度对光催化去除 TVOC 的影响
Fig. 7 Effect of intake air flow rate and relative humidity on TVOC removal by photo catalysis

参 考 文 献

- [1] BJARKE M, ANTTIJ K, TAREG H, et al. A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners[J]. *Aerosol Science and Technology*,2014,48(4):409-417. DOI:10.1080/02786826.2014.883063.
- [2] 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*,2011,45:4329-4343. DOI:10.1016/j.atmosenv.2011.05.041.
- [3] 胡秀峰,梅博,韦丽红,等. 室内空气净化技术应用效果研究进展 [J]. *安全与环境学报*,2015,15(6):202-206.
- [4] 钱华,戴海夏. 室内空气污染与人体健康的关系 [J]. *环境与职业医学*,2007,24(4):426-430.
- [5] 马超. 室内空气污染净化技术的现状与发展趋势 [J]. *环境工程*,2011,29(S1):168-170.
- [6] 曹媛媛,郭婷,耿春梅,等. 室内空气污染新状况及污染控制技术 [J]. *环境科学与技术*,2013,36(S2):229-231.
- [7] 白月华. 室内空气中挥发性有机污染物治理对策 [J]. *环境科学与技术*,2011,34(S1):334-339.
- [8] 高华生,汪大翠,叶芸春,等. 空气湿度对低浓度有机蒸气在活性炭上吸附平衡的影响 [J]. *环境科学学报*,2002,22(2):194-198.
- [9] 李小波,关建建,黄庆林,等. 活性炭纤维吸附含溴甲烷气体的性能 [J]. *环境工程学报*,2013,7(8):3131-3136.
- [10] 崔星,石建稳,陈少华. 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*,2013,32(10):2377-2386.
- [11] 张强,田雨. TiO₂ 光催化性能影响因素的研究进展 [J]. *应用化工*,2011,40(11):2022-2025.
- [12] 王玉萍,彭盘英,丁海燕,等. TiO₂/活性炭负载光催化剂的制备与光催化性能 [J]. *环境科学学报*,2005,25(5):611-617.
- [13] 彭人勇,刘淑娟,赵玉美. 活性炭纤维负载 TiO₂ 光催化降解甲醛的影响因素 [J]. *环境工程学报*,2009,3(7):1294-1298.
- [14] 李立清,宋剑飞,孙政,等. 三种 VOCs 物性对其在活性炭上吸附行为的影响 [J]. *化工学报*,2011,62(10):2784-2790.
- [15] 邓一荣,苏雅玲. 纳米 TiO₂ 光催化净化气相污染物 [J]. *环境科学与技术*,2012,35(S2):140-146.

(本文责任编辑: 郑晓梅)

Design and application of indoor air total volatile organic compounds purification experimental device

WANG Lei¹, LIU Xihong², ZHANG Zhongtao², SI Hui^{1,*}, CHANG Jianmin³, ZHOU Yang¹

1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. State Forestry Planning and Design Institute of Forest Products Industry, State Forestry Administration, Beijing 100010, China

3. School of Materials, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

* Corresponding author, E-mail: sihui@bjfu.edu.cn

Abstract In order to determine the effect of inlet flow rate and relative humidity on activated carbon and photo catalytic purification of total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air in dynamic purification process, a set of multi-functional air purifying experimental device including activated carbon adsorption tank and photo catalysis reactor was designed and used to conduct indoor air purifying experiment. Experiments were performed in a thermostatic laboratory with different inlet flow rates and relative humidity, respectively. The gas chromatograph was used to detect the concentration of TVOC in the air samples under different air inlet conditions and compared with the air samples without the air purification treatment to calculate the TVOC removal rate. Experimental results show that the experimental device enables continuous air intake and accurate adjustment of intake air flow and relative humidity. The removal rate of TVOC by activated carbon and photo catalyst decreases when the flow rate increases. When the relative humidity of intake air increases, the removal rate of TVOC by activated carbon decreases and the removal rate of TVOC by photo catalysis first increases and then decreases. The above results provide reference for the design of dynamic air purification system such as climate chamber air purification system, home air purifier and indoor fresh air filtration system.

Key words indoor; TVOC; experimental device design; dynamic purification experiment