

空气扰动对净化器去除香烟源颗粒物性能的影响

李艳菊¹, 裴剑霖¹, 刘沛², 申利芬¹, 徐乐¹, 陈志雄¹

(1. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384;

2. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

摘要:空气净化器可有效改善雾霾天气下室内空气质量, 颗粒物去除效果与洁净空气量(CADR)是衡量其性能的主要参数。在典型室内环境下, 以香烟源颗粒物为目标, 开展空气扰动对净化器去除颗粒物效果和CADR的影响实验与评价分析。结果显示, 在室内空气扰动下, 净化器对粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 的颗粒物去除率为75.6%, 在无空气扰动情况下的去除率为46.6%。空气净化器对粒径 $0.3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 的颗粒物有较好的去除效果, 而对于粒径 $10 \mu\text{m}$ 的较大颗粒物, 空气扰动造成CADR增加。空气扰动在一定程度上提升了空气净化器的净化能力, 同时在性能方面也存在影响。

关键词: 空气扰动; 空气净化器; 颗粒物; 洁净空气量; 去除效果

中图分类号: X513

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2020)01-0068-04

Effect and Assessment of Air Disturbance on Removal of Cigarette Source Particulate by Air Cleaner

LI Yan-ju¹, PEI Jian-lin¹, LIU Pei², SHEN Li-fen¹, XU Le¹, CHEN Zhi-xiong¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Beijing Institute of Architectural Design Co., Ltd, Beijing 100045, China)

Abstract: Air cleaner effectively improved indoor air quality in hazy weather, particle removal effect and clean air delivery rate (CADR) were the main parameters in measuring its performance. In this paper, targeting the cigarette source particles, the effect and evaluation of air disturbance on particulate removal and CADR of air cleaner were carried out in a typical indoor environment. The results indicated that the removal rate was 75.6% with indoor air disturbance when the particle size was not less than $5 \mu\text{m}$, while the removal rate was 46.6% without air disturbance. The air cleaner had high removal efficiency when the particle size was $0.3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$. When the particle size was more than $10 \mu\text{m}$, CADR increased by air disturbance. To a certain extent, indoor air disturbance improved the purification ability of air cleaner and also affected its performance.

Key words: Air disturbance; Air cleaner; Particulate; Clean air delivery rate; Removal effect

现代人类90%以上的时间在室内度过^[1], 颗粒物是影响室内空气质量的主要因素^[2]。室内外空气中存在大量粒径 $< 10 \mu\text{m}$ 的飘尘, 对人类健康危害较大^[3-5], 空气净化器是降低室内颗粒物浓度的主要方式之一。国内外针对空气净化器去除颗粒物的性能及其影响因素开展了众多研究。有学者研究了空气净化器对颗粒物传播特性的影响, 得出室内颗粒物浓度与净化器位置、释放源和风量等因素密切相关^[6-8]。Sultan等^[9]指出适宜的空气净化器可将室内超细颗粒物浓度降低90%。空气

净化器的性能与特定环境及污染物、气流等有关^[10-12], 众多学者在空气净化器对颗粒物的去除效果、洁净空气量(CADR)、气流组织等测试和评价方面开展了研究^[13-15]。此外, 空气净化装置还可有效净化室外颗粒物^[16]。在测试和评价标准方面, 2013年日本修订了家庭用空气净化机性能标

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51308372)

作者简介: 李艳菊(1980—), 女, 河北邢台人, 副教授, 博士, 研究方向为室内污染物去除与控制。

准(JEM 1467—2013^[17]),2015 年我国颁布了国家标准《空气净化器》(GB/T 18801—2015)^[18]。目前,在空气净化器性能影响因素方面的研究较多,空气扰动作为影响净化器性能、污染物分布的因素,其针对性研究较少。今在典型室内环境下,将香烟作为固定尘源,利用风扇产生室内空气扰动,开展空气扰动对不同粒径颗粒物的去除效果实验,研究空气扰动对空气净化器颗粒物去除性能的影响。

1 实验环境与方法

1.1 环境与仪器

选择典型办公环境(6.8 m × 4.3 m × 3.7 m),室内有办公桌、台面、水盆,顶部安装风扇(三叶吊扇)一台(用于室内空气扰动)。室内温湿度通过温湿度计(CENTER 314 型)测量,颗粒物浓度采用六通道激光粒子计数器(TSI 9306 型,流量 2.83 L/min)测试,使用自行研制的安装有 HEPA 过滤器三面出风的有动力型空气净化器。

1.2 实验方法

参考国家标准^[18],将净化器置于房间中央,采样位置距墙壁 0.5 m,高度 1.2 m,发尘点高度 0.8 m,距窗 1.2 m,使用红塔山牌香烟。采样点与发尘点布置见图 1(GS 为发尘点,S1、S2、S3 为采样点,每个采样点测试 5 次)。

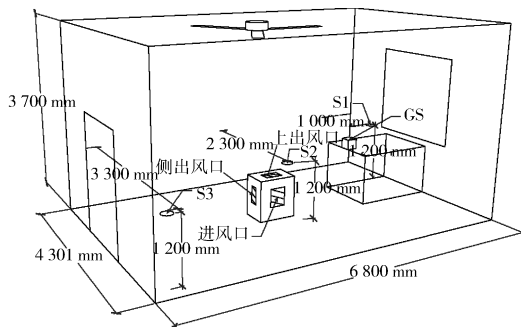


图 1 采样点与发尘点布置

Fig. 1 Layout of sampling points and generation source

实验步骤:①实验准备。实验开始前,自然通风 30 min,关闭门窗 5 min,测量室内颗粒物背景浓度,采样时间 2 min,测试时间 20 min,同时测量温湿度。两次实验之间,重复实验准备。②发尘。关闭门窗,点燃 5 根香烟(满足测试背景浓度要求),使之完全燃尽,开启风扇扰动 10 min,使室内颗粒

物达到均匀状态。③颗粒物自然衰减实验。关闭空气净化器,在关闭风扇和开启风扇条件下分别测试颗粒物浓度衰减,采样时间 2 min,测试 20 min^[18]。④颗粒物总衰减实验。开启空气净化器,在关闭风扇和开启风扇条件下分别测试颗粒物浓度总衰减,采样时间 2 min,测试 20 min^[18]。房间颗粒物浓度为 3 个采样点数据平均值,实验时门窗关闭,室内无人员走动。

1.3 数据处理

室内颗粒物浓度随时间的变化符合指数函数变化趋势,衰减常数 K 按照下式^[18]计算:

$$C_t = C_0 e^{-Kt} \quad (1)$$

式中: C_t 为颗粒物某一时刻 t 的浓度,个/ m^3 ; C_0 为初始时刻 $t=0$ 时的颗粒物浓度,个/ m^3 ; K 为颗粒物衰减常数, min^{-1} ; t 为时间, min 。

CADR 按照下式^[18]计算:

$$\text{CADR} = 60 \times (k_e - k_n) \times V \quad (2)$$

式中:CADR 为洁净空气量, m^3/h ; k_e 为总衰减常数, min^{-1} ; k_n 为自然衰减常数, min^{-1} ; V 为被测房间容积, m^3 。

不同粒径颗粒物的去除效率按照下式计算:

$$\eta = (1 - C_n/C_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为不同粒径颗粒物的去除效率,%; C_n 为净化后不同粒径颗粒物浓度,个/ m^3 ; C_0 为净化前不同粒径颗粒物浓度,个/ m^3 。

2 实验结果与分析

研究表明^[19],当相对湿度超过 65% 时颗粒物会发生凝并现象。在实验过程中,实验室温度控制在 19.4 °C ~ 23.0 °C,相对湿度保持在 28% ~ 30%,故不考虑颗粒物凝并现象。在发尘结束且充分混合后,测得初始浓度(室内粒径 $>0.3 \mu\text{m}$ 的颗粒物粒子浓度)为 1.23×10^{10} 个/ m^3 ,符合背景浓度 2.0×10^9 个/ m^3 ~ 2.0×10^{10} 个/ m^3 的要求^[18]。

2.1 净化器颗粒物去除效果

空气净化器对 $\leq 0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径颗粒物的去除效率,在关闭风扇工况下分别为 36.4%、58.8%、60.3%、49.6%、46.0%、46.6%,在开启风扇工况下分别为 32.0%、61.8%、69.2%、67.2%、68.7%、75.6%。无空气扰动,关闭风扇时,空气净化器对室内空气中粒径

0.5 μm ~ 1 μm 的颗粒物过滤效果最好,去除率为60.3%;对粒径 ≤ 0.3 μm 的颗粒物过滤效果相对较差,去除率为36.4%。开启风扇时,空气净化器对室内空气中粒径5 μm ~ 10 μm 的颗粒物过滤效果最好,去除率为75.6%;对粒径 ≤ 0.3 μm 的颗粒物去除效果最差,去除率仅为32.0%。

对比关闭/开启风扇工况下的去除效率,粒径 > 0.3 μm 的颗粒物在开启风扇时去除效率均高于关闭风扇时;在开启风扇条件下,随着颗粒物粒径增加,去除效率呈升高趋势。关闭风扇时,由于净化器位置固定,其作用范围有限,吸风口吸入附近空气较多,稍远处的大颗粒物大多由于重力作用在空气中迅速沉降,难以到达净化器进而被去除,造成无风扇扰动下较大颗粒物去除效率低的现象。开启风扇时,较大颗粒物易随空气扰动被净化器吸风口吸入,同时与室内壁面碰撞从而加速沉降^[20],导致大颗粒物去除效率升高。

2.2 空气扰动对不同粒径颗粒物均匀性分布的影响

开启空气净化器时, ≤ 0.3 μm 、0.3 μm ~ 0.5 μm 、0.5 μm ~ 1 μm 、1 μm ~ 3 μm 、3 μm ~ 5 μm 、5 μm ~ 10 μm 粒径颗粒物的衰减相关系数 R^2 ,在关闭风扇工况下分别为0.964、0.980、0.991、0.890、0.602、0.643,在开启风扇工况下分别为0.438、0.944、0.990、0.972、0.927、0.925。当室内空气加入扰动时,粒径 ≤ 0.3 μm 的颗粒物衰减相关系数减小,大粒径颗粒物衰减相关系数增加。对于3 μm ~ 10 μm 较大粒径的颗粒物,开启风扇时室内空气充分扰动,增加了其在室内分布的均匀性,导致相关系数增加。

对于 ≤ 0.3 μm 小粒径颗粒物,在关闭风扇条件下,所测实验结果的相关系数较高($R^2 > 0.95$),在开启风扇条件下相关系数降低(R^2 为0.438),其在关闭/开启风扇工况下的浓度变化见图2。在开启风扇条件下,小粒径颗粒物的室内浓度波动明显,这是由于其气流跟随性强^[21],距离净化器吸入口较远时难以得到净化,导致不同采样点位置的颗粒物浓度存在差别,衰减相关系数变化较大。因此,在空气净化产品性能测试评价中,应充分考虑室内空气扰动因素,以及该因素造成的室内污染物浓度波动与分布。

2.3 空气扰动对CADR的影响

空气净化器在关闭/开启风扇两种工况下对不同粒径颗粒物的CADR对比见图3。关闭风扇时,

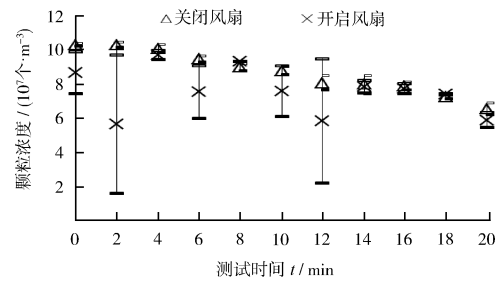


图2 小粒径颗粒物在关闭/开启风扇条件下的浓度变化

Fig. 2 The concentrations of small particle under the fan on/off conditions

空气净化器对粒径0.5 μm ~ 1 μm 的颗粒物CADR最高(200.0 m^3/h);开启风扇时,对粒径5 μm ~ 10 μm 的颗粒物CADR最高(259.2 m^3/h)。无风扇扰动时,CADR随粒径增加先升后降;开启风扇时,CADR随粒径增加而增大,且大粒径颗粒物的CADR较无风扇扰动条件下有明显增加,粒径1 μm ~ 5 μm 的颗粒物CADR提升了37% ~ 55%。由于净化器位置固定、风量有限、多在吸风口处吸入空气,以及大颗粒物在较远处沉降等原因,在关闭风扇条件下,其CADR较低;开启风扇时,空气扰动使得室内大颗粒物分布更加均匀,同时增加了其沉降概率^[20],CADR也随粒径增加而增大。此外,气流组织也是影响净化器CADR和净化效果的重要因素。空气净化器不同于送风系统,在相同的CADR下,室内空气质量与气流组织相关。该实验中房间为自然通风,测试时门窗关闭,未涉及气流组织问题,而对于通风系统与净化器结合的室内环境,其空气质量需要考虑净化器性能和气流组织的共同作用。因此,基于空气净化器检测方法得出的净化效果,以及净化器在实际房间使用时的差异是需要进一步开展研究的内容。

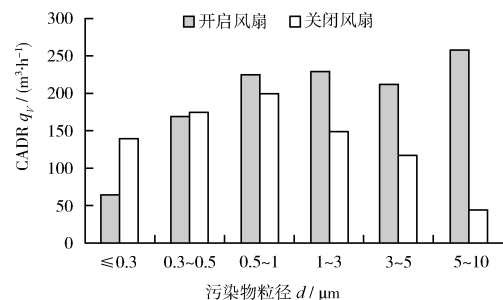


图3 关闭/开启风扇条件下不同粒径颗粒物的CADR

Fig. 3 CADR of air cleaner for different particles under the fan on/off conditions

3 结论与建议

通过实验发现,在室内空气扰动工况下,空气净化器对粒径 $>0.3 \mu\text{m}$ 的颗粒物去除效果提高。同时,随着粒径增加,室内空气扰动增大了净化器的洁净空气量,在一定程度上提升了净化能力。空气扰动对于净化器性能测试也存在影响,合理地改变室内扰动工况,能够有效提高净化效果,获得较大的洁净空气量。因此,在净化器性能评价中,应控制测试环境的空气扰动工况,在提高净化器性能的同时,降低由空气扰动带来的系统误差和偶然误差。此外,未来针对空气净化器性能评价测试方法,一方面建议考虑静态测试与实际使用状态下的对比,为更加科学合理地评价与选择空气净化器提供科学依据;另一方面,空气流速和方向也是影响净化器颗粒物去除效果的因素,有必要开展进一步的系统研究。

[参考文献]

- [1] KLEPEIS N E, NELSON W C, OTT W R, et al. The national human activity pattern survey (nhaps): a resource for assessing exposure to environmental pollutants[J]. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 2001, 11(3): 231–252.
- [2] 李想. 自然通风住宅建筑室内空气品质的测试研究及治理措施[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [3] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对对人体健康的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 592–597.
- [4] 吴莹, 程滢, 陈军, 等. 夏收和秋收期间泰州市空气质量特征研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(1): 31–35.
- [5] 韩月梅, 沈振兴, 曹军骥, 等. 室内外细粒 $\text{PM}_{2.5}$ 和总悬浮颗粒物污染水平的对比研究[J]. *中国粉体技术*, 2009, 15(2): 14–17.
- [6] CHEN L, JIN X M, YANG L J, et al. Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner: The effect of non-uniform particle distributions[J]. *Building Simulation*, 2017, 10(1): 1–11.
- [7] JIN X, YANG L, DU X, et al. Particle transport characteristics in indoor environment with an air cleaner[J]. *Indoor & Built Environment*, 2015, 31(14): 189–207.
- [8] SIEGEL J. Primary and secondary consequences of indoor air cleaners[J]. *Indoor Air*, 2016, 26(1): 88–96.
- [9] SULTAN Z, NILSSON G, MAGEE R. Removal of ultrafine particles in indoor air: Performance of various portable air cleaner technologies[J]. *Hvac & R Research*, 2011, 17(4): 513–525.
- [10] QIAN H, LI Y G, SUN H Q, et al. Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in a simulated hospital ward[J]. *Building Simulation*, 2010, 3(3): 215–224.
- [11] JUNG S, AHN Y, LEE Y, et al. Removal characteristics and distribution of indoor tobacco smoke particles using a room air cleaner[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2013, 30(2): 351–356.
- [12] 杨华, 刘清珺, 曲晶明, 等. 空气净化器净化燃香源 $\text{PM}_{2.5}$ 的性能与效果评价[J]. *环境工程*, 2016, 34(6): 90–94.
- [13] 张欣, 刘俊杰, 侯跃飞, 等. 空气净化器去除颗粒污染物的试验性能研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(5): 303–307.
- [14] 卜钟鸣, 向建帮, 陈姚波, 等. 空气净化器细颗粒物去除效果的环境舱测试与实际评价[J]. *暖通空调*, 2013, 43(12): 64–67.
- [15] 王鹏, 柳静献, 毛宁, 等. 空气净化器去除细粒子性能实验研究[J]. *工业安全与环保*, 2015, 41(5): 57–60.
- [16] 柳一琳, 李鸿, 夏愉乐, 等. 室外空气净化设备的设计与试验研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(5): 12–16.
- [17] 日本空气净化器专门委员会, 日本标准化委员会, 日本电机工业协会. JEM 1467—2013, Air cleaners of household and similar use[S]. Tokyo: Japanese Electrical Manufacturers, 2013.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18801—2015 空气净化器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [19] 李灿, 崔术祥, 杨维, 等. 相对湿度对室内细颗粒物粒径分布影响的试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4): 254–258.
- [20] 付斌, 张爱军, 韩克勤. 风速对无风量空气净化器净化效果的影响[J]. *卫生研究*, 2003, 32(5): 497–498.
- [21] 韩云龙, 胡永梅, 钱付平, 等. 自然通风室内颗粒物分布特征[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 116–120.
- 本栏目编辑 吴珊 姚朝英
- [14] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [15] 洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 等. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 8016–8027.
- [16] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 643–650.
- [17] 姚进忠, 曾建军. 石羊河流域土地利用结构合理性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 230–234.

(上接第31页)

- 动态特征及驱动因素分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(3): 27–31.
- [10] 董品杰, 赖红松. 基于多目标遗传算法的土地利用空间结构优化配置[J]. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(6): 52–55.
- [11] 郑新奇, 王筱明. 城镇土地利用结构效率的数据包络分析[J]. *中国土地科学*, 2004, 18(2): 34–38.
- [12] 张颖, 王群, 王万茂. 中国产业结构与用地结构相互关系的实证研究[J]. *中国土地科学*, 2007, 21(2): 4–11.
- [13] 刘玲, 王勇, 谢世友, 等. 基于 GIS 的岩溶区土地利用的地形梯度分布研究——以酉阳县板溪乡为例[J]. *中国岩溶*,