

空气净化器性能的实测与分析

杨秀峰, 夏利梅, 周雪涵

(扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 在稳定污染源条件下测试了不同风量时空气净化器进出风口处和试验舱内的颗粒物浓度, 分析了净化器的一次净化效率和室内颗粒物的浓度衰减过程. 结果表明, 净化器低档和高档风量时 PM_{2.5} 净化效率分别为 55.1% 和 59.4%, PM₁₀ 净化效率分别为 57.2% 和 61.2%, 高档风量的一次净化效率比低档风量的一次净化效率高 4%; 测得的净化效率与室内颗粒物浓度拟合曲线推算得到的一次净化效率吻合较好; 由颗粒物发生量和净化效率导出的颗粒物浓度衰减方程, 与由室内颗粒物浓度拟合得到的浓度衰减方程均能准确反映净化过程中室内颗粒物浓度的指数衰减特征; 净化器适用面积不仅取决于净化性能, 还与初始浓度、单位面积污染物释放量有关.

关键词: 空气净化器; 稳定污染源; 净化效率; 浓度衰减特征; 适用面积

中图分类号: TU 834.8⁺

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0757-06

Measurement and analysis of the performance of air cleaner

YANG Xiufeng, XIA Limei, ZHOU Xuehan

(College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225127, China)

Abstract: Particulate concentrations in the inlet and outlet of air cleaner and in the chamber with steady pollutant source were measured for different airflow rates of air cleaner to analyze the single-pass removal efficiency of air cleaner and the decay characteristic of indoor particulate concentration. The removal efficiencies of PM_{2.5} for small or large airflow rate are 55.1% and 59.4% respectively, and the removal efficiencies of PM₁₀ for small or large airflow rate are 57.2% and 61.2% respectively. The single-pass removal efficiency of air cleaner for large airflow rate was 4% higher than that for small airflow rate. The particulate removal efficiencies tested agree well with those inferred from the fitting curves of indoor particulate concentration. The equations for particulate concentration decay can be deduced from particulate emission rate and particulate removal efficiency, and can also be obtained by fitting the indoor concentration. Both equations can accurately reflect the exponential decay of particulate concentration during air cleaning. The effective room size depends not only on the performance of air cleaner, but also on the initial concentration and the particle emission rate per unit area of the room.

Key words: air cleaner; steady pollutant source; removal efficiency; concentration decay characteristic; effective room size

人们大多数时间在室内度过, 因此室内空气质量对人体健康的影响较大^[1,2]. 随着大气污染的加剧和雾霾天气的频发, 室内悬浮颗粒物浓度常常超标. Smith^[3]指出, 室内颗粒物污染占室内空气污染的份额高达 76%. 因此, 人们在关注室内温湿度的同时, 越来越关注室内空气污染尤其是颗粒物污染的控制和治理. 于是, 空气净化器的应用日益广泛, 未来将具有更大的市场潜力^[4].

家用空气净化器的品牌众多、功能和质量参差不齐. 现行国家标准 GB/T 18801-2015《空气净化器》^[5]和相关研究主要利用洁净空气量、累积净化量和净化能效等指标评价空气净化器的性

能^[6,7]. 胡晓微等^[8]指出了传统评价指标的局限性, 提出了单位面积净化量、单位时间净化量及单位面积单位时间净化量等补充性指标. 然而, 净化效率是影响净化器性能的重要因素, 也是最直观、最容易被普通消费者理解的性能指标.

已有研究的测试过程通常是先利用污染物发生器使试验舱内的污染物浓度升至较高水平, 再关闭发生器, 分别进行净化器关闭和运行条件下室内污染物的自然衰减试验和总衰减试验^[5-9]. 实际上, 净化器运行过程中室内通常有持续释放的稳定污染源, 因此测试稳定污染源条件下高污染房间(如会议室和棋牌室)内净化器的工作性能更

有现实意义。燃香是室内的常见污染源, Cheng等^[10]报道了燃香烟雾的动力学特性及其对室内环境的影响, 张金萍^[11]指出燃香对室内颗粒数的影响主要集中在 $0.02 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间, 后续有研究^[12,13]探讨了燃香空气污染的特征, 或利用燃香来模拟室内污染源^[14,15]。本研究以燃香为室内颗粒污染源, 在试验舱内测试了一台过滤式空气净化器对悬浮颗粒物的净化性能, 分析了不同风量下的净化效率, 进而在颗粒物质量守恒模型和实测数据的基础上分析了室内颗粒物浓度的衰减特征和浓度达标所需的时间, 可为实际工况下高污染房间内净化器性能的测试、评价及选用提供实践和理论参考。

1 测试过程

试验舱内部尺寸为 $4.89 \text{ m} \times 3.90 \text{ m} \times 2.68 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 面积为 19.1 m^2 , 体积为 51.1 m^3 。试验舱壁面材质为彩钢板, 测试前先进行清洁, 以消除壁面沉积颗粒物的影响。舱内距地面 0.8 m 处放置了 4 盘点燃的蚊香, 模拟均匀释放颗粒物的室内污染源; 天花板处设置 2 台吊扇(直径 70 mm , 扇叶 5 片, 功率 20 W), 测试过程中保持运转, 可使舱内污染物分布接近均匀; 一台崭新的空气净化器放置在试验舱地面中心, 四周无其他物体, 过滤单元非常清洁。颗粒物浓度由 TSI DUST-TRAK-8530 粉尘仪测得, 舱内温度和湿度由 SwebmaAir300 多功能气流测试仪测得, 净化器循环风量由 TSI 8375M 套帽式风量罩测得。试验舱平面布置见图 1。

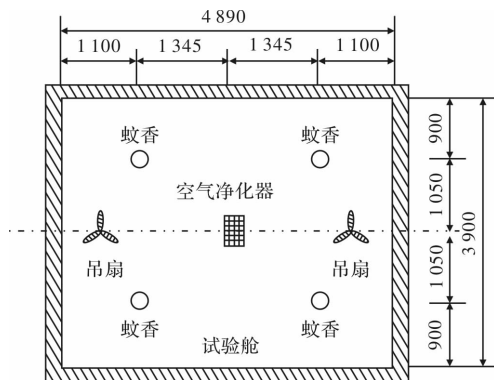


图 1 试验舱平面布置

Fig. 1 Configuration of the test chamber

测试过程按以下步骤进行:

(a) 关闭试验舱门窗, 点燃蚊香, 开启吊扇, 使舱内颗粒物逐渐混合均匀, 记录舱内温度和湿度;

(b) 吊扇搅拌 5 min 后沿试验舱对角线测量离地 1.2 m 、间隔 2.0 m 的 3 个位置处的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度, 分别取平均值为该时刻舱内的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度, 5 min 后进行下一组测试, 共测试 10 组, 耗时 50 min;

(c) 开启空气净化器, 间隔几分钟测试一组颗粒物浓度数据(包括舱内浓度、净化器进风口和出风口浓度);

(d) 分别测量净化器高、中、低档的循环风量;

(e) 关闭空气净化器, 记录试验舱内的温湿度。

测试过程主要分为 2 个阶段, 步骤 a) 和 b) 为颗粒物发生量测试阶段, 步骤 c) 为空气净化器性能测试阶段。测试过程中, 蚊香始终点燃, 持续释放颗粒物; 吊扇保持运行, 以充分搅拌舱内空气。

2 测试结果及分析

2.1 颗粒物发生量

图 2 给出了蚊香点燃、净化器关闭阶段(0~50 min)试验舱内的颗粒物浓度变化。由于试验舱为密闭空间, 且净化器未启动, 故舱内颗粒物浓度不断上升。试验舱内的颗粒物质量守恒方程为

$$\frac{dc}{dt} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

式中, c 为颗粒物浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; t 为时间, s; M 为颗粒物发生量, $\mu\text{g}/\text{s}$; V 为试验舱体积, m^3 。

由(1)式可以得到颗粒物的瞬时浓度为

$$c = \frac{M}{V}t + c_0 \quad (2)$$

式中: c_0 为颗粒物初始浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

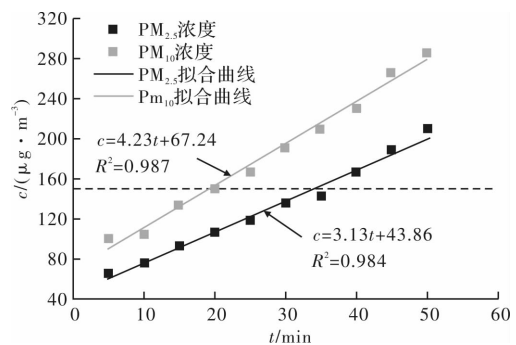


图 2 颗粒物发生量测试

Fig. 2 Test of particulate generation rate

因此, 对测得的颗粒物浓度数据进行线性拟合, 所得直线的斜率即为 M/V , 进而可推算出 4 盘燃香的颗粒物发生量 M 分别为 $2.67 \mu\text{g}/\text{s}$

(PM_{2.5})和 3.60 μg/s(PM₁₀), 即每盘蚊香的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 发生量分别为 0.67 μg/s 和 0.9 μg/s. 图 2 中的水平虚线对应着《室内空气质量标准》GB/T 18883-2002^[16] 规定的室内 PM₁₀ 浓度限值 150 μg/m³, 由图可知 4 盘燃香同时点燃 20 分钟后室内颗粒物浓度即会超标.

2.2 低档风量净化效果

实测得到的空气净化器高、中、低档循环风量分别为 735 m³/h、400 m³/h 和 200 m³/h, 对应的换气次数分别为 14.4 次/h、7.8 次/h 和 3.9 次/h, 下文给出了低档和高档风量条件下净化器测试结果. 颗粒物发生量测试完成后开启空气净化器, 蚊香继续燃烧, 试验舱内的颗粒物浓度逐渐降低. 图 3 给出了净化器低档风量下试验舱内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度变化情况.

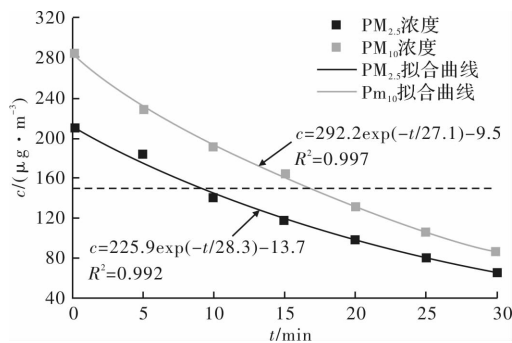


图 3 低档风量下试验舱内的颗粒物浓度变化
Fig. 3 Variation of particulate concentration in test chamber for small air rate of air cleaner

假设试验舱内颗粒物均匀分布, 不考虑粒子沉降, 则净化过程中室内颗粒物质量守恒方程为

$$Mdt - Qc dt = Vdc \quad (3)$$

式中: Q 为净化器循环风量, m³/s; η 为净化器对颗粒物的一次净化效率.

净化过程中舱内颗粒物的瞬时浓度为

$$c = (c'_0 - \frac{M}{Q\eta})e^{-\frac{Q\eta}{V}t} + \frac{M}{Q\eta} \quad (4)$$

式中: c'_0 为净化器启动时(图 2 中的 50 min)的舱内颗粒物浓度, μg/m³; $Q\eta/V$ 为衰减常数(1/s), 在风量 Q 和体积 V 已知时仅取决于一次净化效率 η ; $Q\eta$ 表示净化器提供洁净空气的速率, 相当于国家标准中的洁净空气量 CADR^[5,9,17,18].

因此, 将测得的颗粒物浓度数据拟合为指数函数, 由函数的衰减常数可推算出一次净化效率 η . 根据图 3 的拟合结果推算得到的净化器低档风量对应的一次净化效率分别为 54.3% (PM_{2.5}) 和 56.6% (PM₁₀).

所测空气净化器的进风口位于机器下部, 出风

口分别位于机器上部和左右两侧. 实验过程中, 分别测得了净化器进风口和出风口处的颗粒物浓度, 可据此计算出局部净化效率 η_i 和平均净化效率 η_a , 公式如下:

$$\eta_i = 1 - c_{\text{出}} / c_{\text{进}}, \eta_a = \frac{1}{n} \sum \eta_i \quad (5)$$

净化器低档风量条件下, 实测得到的各出风口处的净化效率如表 1 所示, 表中的平均净化效率 η_a 与图 3 中曲线拟合得到的衰减常数导出的一次净化效率 η 吻合较好, 这说明(3)式关于室内颗粒物均匀分布且忽略粒子沉降的假设是合理的.

表 1 低档风量下的净化效率

Tab. 1 Removal efficiency for small air rate of air cleaner

时间 /min	PM _{2.5} 净化效率/%		PM ₁₀ 净化效率/%	
	上出风口	侧出风口	上出风口	侧出风口
5	59	61	60	55
10	53	52	56	56
15	57	52	57	52
20	56	48	55	59
25	54	54	55	55
30	55	60	59	67
平均 55.7		平均 54.5	平均 57	平均 57.3
平均效率 $\eta_a = 55.1$		平均效率 $\eta_a = 57.2$		

2.3 高档风量净化效果

低档风量净化过程测试结束后, 关闭净化器, 蚊香继续燃烧, 使试验舱内的颗粒物浓度上升至较高水平后再次开启净化器, 进行高档风量下的净化性能测试, 结果见图 4. 将测试数据拟合为指数衰减曲线, 并根据衰减常数推算出净化器对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的一次净化效率分别为 57.4% 和 60.3%.

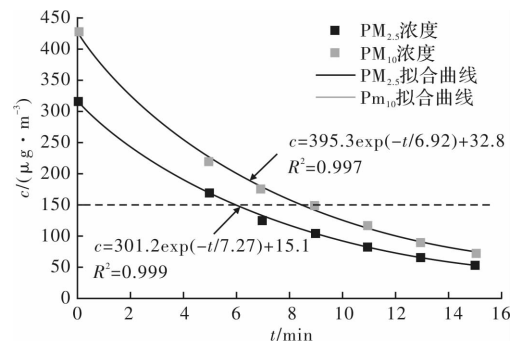


图 4 高档风量下试验舱内的颗粒物浓度变化
Fig. 4 Variation of particulate concentration in test chamber for large air rate of air cleaner

由高档风量下净化器进、出风口处的颗粒物浓度算得的净化效率如表2所示,其结果与图4中拟合曲线的衰减常数对应的一次净化效率非常接近。

表2 高档风量下的净化效率

Tab. 2 Removal efficiency for large air rate of air cleaner

时间 /min	PM _{2.5} 净化效率/%		PM ₁₀ 净化效率/%	
	上出风口	侧出风口	上出风口	侧出风口
5	66	56	69	54
7	61	61	61	60
9	65	58	66	59
11	61	56	61	55
13	53	56	57	60
15	52	68	63	69
平均 59.7		平均 59.2	平均 62.8	平均 59.5
平均效率 $\eta_a = 59.4$		平均效率 $\eta_a = 61.2$		

对比高、低风量的测试结果可以发现,前者对应的一次净化效率比后者约高4%,这是因为该净化器的颗粒物净化机理为机械捕集,故风速越大,

拦截效应越强,一次过滤效率越高^[17]。表1和表2还表明,净化器上部过滤装置和侧边过滤装置的净化效率相差不大,前者比后者略高。

根据净化器的风量和净化效率可以计算得到洁净空气量CADR为449.82 m³/h,为标称值(538 m³/h)的83.6%,低于国标GB/T 18801-2015规定的洁净空气量实测值不应低于标称值90%的要求。该净化器高档风量下的额定功率为75 W,净化能效为5.998 m³/(W·h),国标GB/T 18801-2015规定对颗粒物的净化能效 $\eta_{\text{颗粒物}} \geq 5 \text{ m}^3/(\text{W} \cdot \text{h})$ 为高效级,故本净化器属于高效级。

2.4 浓度衰减方程

(4)式表明,若已知颗粒物发生量 M 、净化器循环风量 Q 、一次净化效率 η 、房间体积 V 和室内颗粒物初始浓度 c'_0 ,可以得到空气净化过程中室内颗粒物浓度的衰减规律。本文在线性拟合得到的颗粒物发生量 M 和净化器进、出风口处实测浓度得到的平均净化效率 η_a 的基础上,导出了净化过程中颗粒物浓度的衰减方程,并与试验舱内实测浓度拟合得到的衰减方程(见图3和图4)进行对比,见表3。

表3 颗粒物浓度衰减方程

Tab. 3 Equations for particulate concentration decay

净化器 风量	PM _{2.5} 浓度衰减方程		PM ₁₀ 浓度衰减方程	
	(4)式导出方程	拟合方程	(4)式导出方程	拟合方程
低档	$c = 122.2e^{\frac{-t}{27.8}} + 87.1$	$c = 225.9e^{\frac{-t}{28.3}} - 13.7$	$c = 172.1e^{\frac{-t}{26.8}} + 113.4$	$c = 292.2e^{\frac{-t}{27.1}} - 9.5$
高档	$c = 294.3e^{\frac{-t}{7.02}} + 22$	$c = 301.2e^{\frac{-t}{7.27}} + 15.1$	$c = 400.7e^{\frac{-t}{6.82}} + 28.8$	$c = 395.3e^{\frac{-t}{6.92}} + 32.8$

由表3可知,两种方法得到的颗粒物浓度衰减方程的衰减常数吻合较好,这是因为两种方法对应的净化效率非常接近。但是,两类衰减方程的常数项差别较大(尤其是低档风量工况),主要是由于净化器开启一段时间后才能到达稳定状态,从而可能导致拟合曲线的起点偏移。总体来说,两种方法得到的衰减方程均能正确反映净化过程中室内颗粒物浓度的衰减特征。

2.5 浓度达标所需时间

由式(3)可知,若室内颗粒物发生量 $M < Q\eta c/V$,净化器工作过程中室内颗粒物浓度逐渐降低;反之,室内颗粒物浓度不降反升。室内颗粒物发生量 M 与房间性质有关,同类房间的 M 值取决于房间面积 A ,将 M/A 定义为房间单位面积的污染物释放量 m ($\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。由式(4)可以导出室内颗粒物浓度由初始浓度 c'_0 降至达标浓度 c_{standard} (150

$\mu\text{g}/\text{m}^3$)所需的时间为

$$t = -\frac{V}{Q\eta} \ln \left[\left(c_{\text{standard}} - \frac{mA}{Q\eta} \right) / \left(c'_0 - \frac{mA}{Q\eta} \right) \right] \quad (5)$$

图5以 $c'_0 = 450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $Q\eta = 450 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例,给出了不同的单位面积污染物释放量 m 和房间面积 A 的条件下,从净化器开始工作到颗粒物浓度降至达标浓度所需的时间,图中的 54 m^2 为该净化器标称的适用面积。图5表明, m 或 A 越大,室内颗粒物浓度达标所需的时间越长。3条曲线的最右侧点分别对应着3个房间的单位面积污染物释放量 m 的最大值,如果 m 超过该值,该台净化器无法使室内浓度降至达标浓度。由此可见,净化器的适用面积不仅取决于净化性能 $Q\eta$,还与初始浓度 c'_0 、单位面积污染物释放量 m 有关,高污染房间的净化器选用应综合考虑上述因素。

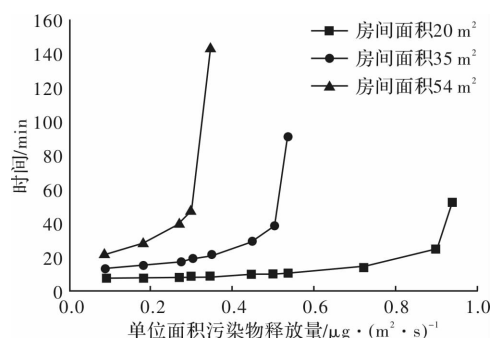


图5 室内污染物浓度达标所需的时间

Fig. 5 Time needed for reducing the particulate concentration to the standard

3 结论

本研究测试了试验舱内污染源稳定散发条件下空气净化器对悬浮颗粒物的净化性能,分析了不同风量下净化器的净化效率和室内颗粒物浓度的衰减特性,可为实际工况下高污染房间内净化器性能的测试和评价提供实践和理论参考。主要研究结论如下:

(1) 燃香可持续稳定地散发颗粒物,每盘蚊香的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 发生量分别为 $0.67 \mu g/s$ 和 $0.9 \mu g/s$;

(2) 由净化器进、出风口处的颗粒物浓度计算得到的净化效率与室内颗粒物浓度拟合曲线推算的净化效率吻合较好;

(3) 该款净化器低档和高档风量条件下测得的 $PM_{2.5}$ 净化效率分别为55.1%和59.4%, PM_{10} 净化效率分别为57.2%和61.2%,高档风量对应的一次净化效率比低档风量对应的一次净化效率约高4%;

(4) 由颗粒物发生量和测得的净化效率导出的颗粒物浓度衰减方程与室内颗粒物浓度数据拟合得到的浓度衰减方程均能准确反映净化过程中室内颗粒物浓度的指数衰减特征;

(5) 净化器适用面积不仅取决于净化性能,还与初始浓度、单位面积污染物释放量有关,高污染房间的净化器选用应综合考虑上述因素。

参考文献 References

[1] 李先庭,杨建荣,王欣. 室内空气品质研究现状及发展[J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 36-40.
LI Xianting, YANG Jianrong, WANG Xin. Status and development of indoor air quality research [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30 (3): 36-40.

[2] WESCHLER C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43 (1): 153-169.
[3] SMITH K R. Fuel combustion, air pollution exposure, and health; the situation in developing countries [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 1993, 18(1): 529-566.
[4] 邓嵘,王萌,陈嘉全,等. 基于HID方法的家庭空气净化器设计[J]. 机械设计, 2016, 33(6): 126-128.
DENG Rong, WANG Meng, CHEN Jiaquan, et al. Design of household air purifier based on HID principle [J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(6): 126-128.
[5] 国家标准化管理委员会. 空气净化器:GB/T 18801-2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
Standardization Administration. Air Cleaner:GB/T 18801-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
[6] 陈凤娜,杨旭东. 室内空气净化器性能评价及选择[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(3): 260-262.
CHEN Fengna, YANG Xuedong. Performance assessment and selection of indoor air cleaner [J]. Journal of Environment and Health, 2009, 26(3): 260-262.
[7] 郭利娜,陈剑波,李美玲,等. 家用空气净化器性能评价指标的探讨[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(7): 628-629.
GUO Lina, CHEN Jianbo, LI Meiling, et al. Discussion on the evaluation index of household air cleaner performance [J]. Journal of Environment and Health, 2014, 31(7): 628-629.
[8] 胡晓微,张于峰,谢朝国,等. 室内空气净化器性能评价指标的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12 (5): 64-68.
HU Xiaowei, ZHANG Yufeng, XIE Chaoguo, et al. Experimental study of the evaluating indicators for the room-conditioning air cleaners [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 64-68.
[9] 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.
ZHANG Xin, LIU Junjie, HOU Yuefei, et al. Experimental study on the performance of the air purifier in removing the particulate pollutants [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 303-307.
[10] CHENG Y S, BECHTOLD W E, YU C C, et al. Incense smoke: characterization and dynamics in indoor environments [J]. Aerosol Science and Technology, 1995, 23(3): 271-281.
[11] 张金萍. 室内燃香烟雾空气污染特征研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(6): 18-24.
ZHANG Jinping. Study on indoor airborne pollution

- characteristics of smoke from incense burning [J]. Building Science, 2010, 26(6): 18-24.
- [12] SEE S W, BALASUBRAMANIAN R. Characterization of fine particle emissions from incense burning [J]. Building and Environment, 2011, 46: 1074-1080.
- [13] HSUEH H T, KO T H, CHOU W C, et al. Health risk of aerosols and toxic metal from incense and joss paper burning [J]. Environmental Chemistry Letters, 2012, 10(1): 79-87.
- [14] 杨秀峰, 亢燕铭. 单区静电净化器性能研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(6): 40-43.
YANG Xiufeng, KANG Yanming. Investigation of single-stage electrostatic cleaners' performances [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(6): 40-43.
- [15] 杨华, 刘清珺, 曲晶明. 空气净化器净化燃香源 $PM_{2.5}$ 的性能与效果评价 [J]. 环境工程, 2016, 34(6): 90-94.
YANG Hua, LIU Qingjun, QU Jingming. Performance assessment and removal effect of $PM_{2.5}$ from source of incense burning by air cleaners [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(6): 90-94.
- [16] 中国标准化研究院. 室内空气质量标准: GB/T 18883-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
China National Institute of standardization Indoor air quality standard: GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [17] ZHANG Y P, MO J H, LI Y G, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(26): 4329-4343.
- [18] 崔晶晶, 杨学宾, 沈恒根, 等. 不同过滤单元的室内空气净化器试验研究 [J]. 暖通空调, 2017, 47(2): 54-59.
CUI Jingjing, YANG Xuebin, SHEN Henggen, et al. Experimental study on indoor air cleaner based on different types of air filter unit [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(2): 54-59.

(编辑 沈 波)

(上接第 723 页)

- [9] 何昌轩, 樊英华, 郑晓光. 沥青混合料动态模量试验研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 555-558.
HE Changxuan, FAN Yinghua, ZHENG Xiaoguang. Test study on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Chong Qing Jiao Tong University (Natural Science), 2010, 29(4): 555-558.
- [10] 刘红, 孔永健, 曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 25-29.
LIU Hong, KONG Yongjian, CAO Dongwei. Influence of adding polyester fiber on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(8): 25-29.
- [11] 张倩, 张尚龙, 李彦伟, 等. 考虑温度场和可变荷载的沥青面层三层式车辙试验 [J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 18-22.
ZHANG Qian, ZHANG Shanglong, LI Yanwei, et al. Total-thickness rutting tests research of asphalt pavement surface considering temperature field and load changes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10): 18-22.
- [12] 关宏信, 张起森, 罗增杰. 考虑温度区间沥青路面面层三层式车辙试验 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 143-147.
GUANG Hongxin, ZHANG Qishen, LUO Zhengjie. Total-thickness laboratory rut tests for asphalt surface course under temperature gradient [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6): 143-147.
- [13] 张尚龙. 基于动态模量的沥青混合料车辙预估模型研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
ZHANG Shanglong. Research of asphalt mixture rutting prediction model based on dynamic modulus [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2014.
- [14] 苏凯, 王春晖, 周刚, 等. 基于加速加载试验的沥青路面车辙预估研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 493-497.
SU Kai, WANG Chunhui, ZHOU Gang, et al. Rutting prediction model for asphalt concrete pavements based on accelerated pavement test [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(4): 493-497.
- [15] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm: theory, application and software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

(编辑 沈 波)