

驻极体空气过滤器对办公环境 PM_{2.5} 的净化效果

水甜甜 沈恒根* 杨学宾 马欢 聂雪丽 周刘轲 刘琳

(东华大学环境科学与工程学院 上海 201620)

摘要 针对办公环境 PM_{2.5} 的净化问题,现场测试了以3种不同过滤面积的驻极体空气过滤器为核心过滤元件的空气净化器的过滤性能,并与普通高效微粒空气过滤器(high-efficiency particulate air, HEPA)、初效碳纤维滤层和活性炭滤网等进行了对比。测试点为上海某三楼办公室座位区离地面 1.1 m 处人体坐姿呼吸平面。采用蜡烛烟雾作为室内微细颗粒污染物的来源。分别测试了 40 min 内 PM_{2.5} 的质量浓度衰减值和相应运行功率,并计算了净化器处理风量和洁净空气量。结果表明,过滤面积在 0.20 ~ 0.54 m² 范围内驻极体过滤器的过滤效率随面积增加而提高;过滤面积为 0.29 m² 的驻极体处理风量最大;以洁净空气量与功率的比值作为指标,可以直观判断出净化效果最好的是初效滤网叠加过滤面积为 0.54 m² 的驻极体过滤器;该工况下 40 min 内 PM_{2.5} 浓度衰减率与 HEPA 几乎相同且均接近 70%,但是洁净空气量大于 HEPA。

关键词 空气净化 PM_{2.5} 驻极体空气过滤器 高效空气过滤器 洁净空气量

中图分类号 X701 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)06-2933-08

PM_{2.5} filtration performance of electret air filter in office buildings

Shui Tiantian Shen Henggen Yang Xuebin Ma Huan Nie Xueli Zhou Liuke Liu Lin

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract Aiming at the PM_{2.5} purification in office buildings, this study field tested the filtration performance of three types of electret air filters with different filtration areas and compared them with high efficiency particulate air (HEPA) filter, primary efficiency filter layer and granular activated carbon filters. The office building was located in Shanghai and the measured point was on the 1.1 meters just above the floor and in the occupant breathing zone. Smoke of wax pure candles was employed as the indoor source to generate the airborne fine particulate matter. The attenuation value of PM_{2.5} mass concentration and the power of the air cleaner were measured in 40 minutes. Also both the filter air flow rate and the clean air delivery rate were calculated. The results show that the filtration efficiency of electret air filters increases with filtration area if the filtration area is between 0.20 and 0.54 m². The electret air filter with 0.29 m² exhibits the largest clean air delivery rate. Using the ratio of clean air delivery rate divided by power as an evaluating indicator, the filter combining a primarily efficient filter with the 0.54 m² electret filter presents the highest filtration performance. Meanwhile, its attenuation value is close to 70% within 40 minutes and similar to the HEPA media. Its clean air delivery rate, however, seems greater than the HEPA media.

Key words air filtration; PM_{2.5}; electret air filter; HEPA; clean air delivery rate

低能见度雾霾天气严重影响人们的日常工作与生活,其中的主要污染物为可入肺颗粒物 PM_{2.5}。室外环境空气中的颗粒物是室内空气中颗粒物的主要来源之一^[1]。流行病学研究发现,室内颗粒物的浓度水平与呼吸系统、心肺疾病等的发病率及死亡率存在正相关关系^[2]。Liang 等^[3]最新研究表明,北京 PM_{2.5} 浓度峰值与人类流感病例的延迟增加效应有极其重要的关联。美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency)对人类活动模式的调查发现,人们在室内、外停留的时间分别为 87% 和 13%^[4]。办公环境空气品质直接影响人体健康

和工作效率。然而,目前国内办公建筑的已有集中式空调系统大多数只采用内置的初效滤网对空气进行过滤,PM_{2.5} 过滤效率非常低。最行之有效的做法是采用移动式空气净化器,但目前市售多功能净化

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAJ02B07);中央高校基本科研业务费专项资金

收稿日期:2015-01-06;修订日期:2015-02-03

作者简介:水甜甜(1990—),女,硕士研究生,主要从事室内空气质量监测和净化技术研究工作。

E-mail: 13122427783@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shenhg@126.com

器存在一些问题:一方面,净化器以高效滤纸为核心过滤元件,运行阻力高、送风量小、可使用面积小;另一方面,具有吸附有害气体功效的活性炭层本身易饱和并变成二次污染源^[5],光触媒的光催化效果持久、对人体无害,但是实际除菌效果与实验室环境下效果的差距较大。已有的研究表明,驻极体滤料是一种高效低阻的新型纤维滤料^[6],可作为净化器核心元件。Afshari等^[7]和Siamak等^[8]指出蜡烛可以产生大量不同粒径的颗粒物,这些颗粒物主要是细颗粒物和超细颗粒物,其中PM_{2.5}达到90%以上,可作为本文实验用尘源。

目前,国内外有很多学者对空气过滤器和空气净化进行了大量的研究。Hubbard等^[9]实验揭示了近30年来空气净化器用臭氧发生器的负面影响,即臭氧导致室内二次有机气溶胶。Siamak等^[8]研究结果表明,细颗粒物在纤维表面沉降并形成一种称为树突的链状附聚物,越来越多的颗粒物使树突的数目增加并因静电充电展开分支,从而提高驻极体过滤器的效率。Zaatari等^[10]针对安装于商业建筑物的高效过滤器对空调能耗和室内空气品质的影响展开了研究,指出将最低效率报告值等级为8(minimum efficiency reporting value 8, MERV8)的空气过滤器替换为MERV13/14期间,在风机转速可调节与不可调节两种工况下,制冷能耗均增加2~4%,但PM_{2.5}的洁净空气量提高2.9~3.8倍。Chan等^[11]现场测试了3种不同类型的空气净化器对酒店环境污染物的净化效率,结果表明,这些净化器的实际使用性能均远远低于生产厂家声称的性能。蔡冰等^[12]针对新型电凝并式空气净化单元的研究表明,高压高频电凝并装置能促使小粒子凝并为较大的粒子团,从而易于被净化单元中中效过滤器捕集。

但是,当前对空气净化装置的研究主要集中于净化机理与已有净化产品性能的检测。虽然一些研究指出了静电纤维过滤器具有高效过滤性能^[8,13]及目前空气净化器产品存在的问题^[9,11],然而,关于静电纤维过滤器对空气净化器净化效果和运行能耗影响的研究比较少。本实验测试了驻极体过滤器3种不同过滤面积下,测点处PM_{2.5}质量浓度随时间的衰减及净化器实际使用功率,并计算了洁净空气量,同时与初效过滤器、HEPA等进行了对比。

1 测试装置与方法

实验装置位于上海市的一座5层类似中庭式坐

北朝南办公建筑的三楼。该办公室长、宽、高尺寸为:6.90 m×6.30 m×3.06 m,靠走廊的内门的尺寸为:2.10 m×2.00 m,外窗尺寸为:5.00 m×2.40 m;门窗密封性较好。如图1所示,最大的办公桌位于中央区域,8把办公椅分散在办公桌周围,靠东、西墙分别放有书桌、书架等办公设备。办公桌、书桌、书架都是木制的,表面都涂有光滑油漆涂料,办公椅表面包有光滑皮料,使用时间均不超过3年。实验前先打扫房间,并擦洗室内办公设备。测点布置在A点正上方,离地面1.1 m处,测试过程中门窗紧闭,室内只有一位测试人员并保持静坐。

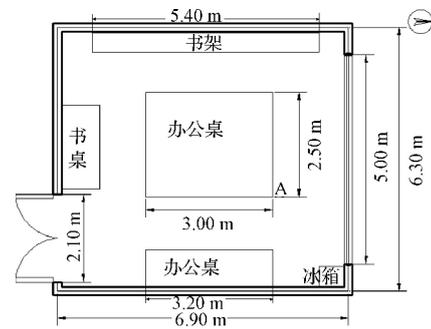


图1 办公室平面布置图

Fig. 1 Furniture layout in the office

1.1 实验装置

实验用空气净化器以风机作为动力源,使空气在室内循环流动,污染的空气通过机内的空气过滤系统-碳纤维初效过滤网、活性炭过滤网、实验用过滤层(HEPA/驻极体过滤器),使各种有害物被吸附清除。驻极体过滤器采用克重规格为250 g/m²的驻极体材料,褶皱均为45 mm,褶皱数分别为:6褶、10褶、20褶,具体参数见表1。具体净化流程见图2。

表1 3种实验用驻极体空气过滤器基本参数

Table 1 Some parameters of three types of electret air filter

编号	总长度 L (mm)	宽度 W (mm)	高度 h (mm)	褶皱数 n (个)	间距 d (mm)	过滤面积 A (m ²)
1 [#]	420	290	45	6	70	0.20
2 [#]	420	290	45	10	42	0.29
3 [#]	420	290	45	20	21	0.54

1.2 测试仪器

实验主要测量不同过滤面积的驻极体过滤器及HEPA、活性炭过滤网等作用下,室内PM_{2.5}浓度衰减过程和相应的净化器使用功率,具体测试仪器及测试内容见表2。

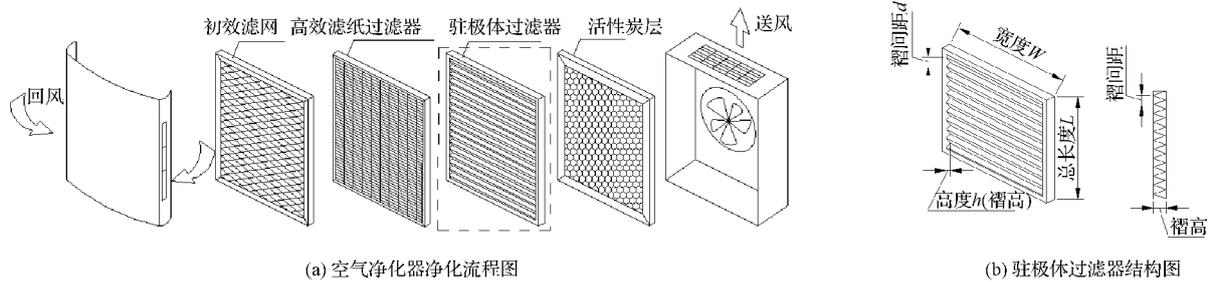


图 2 实验用装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of experimental setups

表 2 实验仪器参数及精度

Table 2 Parameters and accuracy of test instruments

仪器名称	型号	测试对象	测量范围	精度
气溶胶粒径谱仪	GRIMM1.108 型	颗粒物质量浓度随时间的变化值	计重浓度: 0.1 ~ 100 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 粒径: 0.23 ~ 20 μm	—
IAQ CALCT 空气质量测试仪	TSI 7545 型	室内 CO ₂ 浓度随时间衰减过程	0 ~ 9 821 mg/m^3	读数的 $\pm 3.0\%$ 或 ± 3.0
VelociCalc 多功能通风仪表	TSI 9555 型	风速、温度、湿度	0.25 ~ 30 m/s	读数的 $\pm 1.00\%$ 或 $\pm 0.02 \text{ m}/\text{s}$
TECMAN 微型电力监测仪	TM9 + 型	净化器功率	0.3 ~ 2 200 W	读数的 $\pm 1.0\%$

1.3 实验方法

本文所采用的实验方法如下:

1) 在图 1 中桌角 A 点放置空气净化器, 测点位于 A 点正上方 1.1 m 处;

2) 测量室内、外环境温湿度及室内原始颗粒物浓度值;

3) 点燃 2 只蜡烛, 20 min 后熄灭, 打开室内吊顶风扇, 利用表 2 所列气溶胶粒径谱仪监测室内不同粒径颗粒物浓度的变化, 当浓度趋于平稳时关闭风扇, 待室内颗粒物浓度再稳定 2 min 后, 立即开启净化器, 并以该时刻作为计时零点, 开始测量颗粒物浓度随时间的衰减值;

4) 重复步骤 3, 监测净化器加装不同规格、材质的过滤器时, 蜡烛燃烧产生的各粒径颗粒物在 40 min 内的浓度衰减情况, 及送、回风口的风速、颗粒物浓度值, 计算相应时刻的 PM_{2.5} 浓度值;

5) 监测净化器未开启状态下, 测点处蜡烛燃烧产生的各粒径颗粒物浓度 1 h 内自然沉降情况, 并计算相应时刻的 PM_{2.5} 浓度衰减值。

2 结果与讨论

结合空气净化器的运行参数, 采用过滤效率、处理风量、测点 PM_{2.5} 浓度衰减规律、洁净空气量及洁净空气量与功耗的比值等参数来评价驻极体

空气过滤器的过滤特性。首先, 分别计算了净化器相应的处理风量、过滤效率等循环净化运行参数。然后, 讨论了不同过滤器作用下的测点 PM_{2.5} 浓度衰减规律。最后, 计算了净化器的 2 个综合评价指标: 洁净空气量及洁净空气量与功耗的比值。

2.1 循环净化运行参数

空气净化器处理体积相同的空气时, 相同时间内 PM_{2.5} 的净化时效, 取决于处理风量和过滤效率。空气净化器的处理风量由送风口尺寸及实测送风速度计算, 并以房间空间尺寸为依据, 计算每分钟可完成的室内空气循环次数; 净化效率由净化器送回风口浓度差与回风口浓度计算。测试与计算结果列于表 3。

从表 3 中可以看出, HEPA 的过滤效率最高, 达 88.01%, 但净化器相应处理风量最小, 相比不加装过滤器工况, 处理风量衰减了 54.89%; 驻极体过滤效率随过滤面积的增加而增加, 过滤面积为 0.54 m² 时, PM_{2.5} 净化效率最高, 达到 85.32%, 仅比 HEPA 的效率低 3.05%; 但处理风量比 HEPA 高 15.27%; 驻极体过滤面积为 0.29 m² 时, 净化器处理风量最大, 为 459.13 m³/h, 比不加装过滤器时, 处理风量减少了 46.18%。Siamak 等^[8]对驻极体过滤器的研究表明: 驻极体过滤器对包括超细颗粒物

表3 空气净化器加装单层过滤器的循环净化运行参数
Table 3 Cycle filtration parameters of the air filter with single-layer filter

运行参数	常见空气过滤器				驻极体空气过滤器		
	不加装	初效	活性炭	HEPA	1#	2#	3#
送风速度(m/s)	6.67	5.68	5.36	3.10	3.38	3.59	3.47
处理风量(m ³ /h)	853.03	726.42	685.49	384.98	432.27	459.13	443.78
净化效率(%)	1.26	1.31	2.85	88.01	66.04	79.13	85.32
空气循环(次/min)	0.11	0.09	0.09	0.05	0.05	0.06	0.06

在内的不同粒径和浓度的颗粒物的过滤效率一般在45%~80%之间,该结论与本文3种过滤面积的驻极体过滤器的过滤效率比较接近。初效过滤层及活性炭层的净化效率均低于3.00%,若考虑自然沉降及颗

颗粒物碰撞凝聚等因素,过滤效率几乎可以忽略;而且会增加净化器阻力,活性炭层的阻力大于初效滤层。过滤器叠加后的PM_{2.5}过滤特性的测试与计算结果见表4。

表4 空气净化器加装叠加过滤器的循环净化运行参数
Table 4 Cycle filtration parameters of the air filter with some coupled elements

叠加过滤器的构成	初效叠加 HEPA	初效叠加 驻极体 1#	初效叠加 驻极体 2#	初效叠加 驻极体 3#	HEPA 叠加 活性炭层	初效叠加 HEPA 和 活性炭层
送风速度(m/s)	3	3.21	3.34	3.22	2.98	2.8
处理风量(m ³ /h)	383.67	410.53	427.15	411.81	381.11	358.09
风量减小率(%)	0.33	5.03	6.96	7.2	1	6.98
净化效率(%)	88.63	68.14	82.09	85.23	86.42	84.53
效率提高率(%)	0.72	3.19	3.8	0.27	-1.8	-3.94
空气循环(次/min)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

从表3、表4中可以看出,HEPA、驻极体过滤器分别与初效过滤器叠加使用后,处理风量减小率小于7.20%,过滤效率均略有提高,提高率小于3.80%。而HEPA与活性炭层叠加使用时,处理风量与过滤效率均略有降低;HEPA与活性炭层、初效滤层叠加使用后,处理风量比HEPA降低6.98%,效率比HEPA降低3.94%;过滤效率降低可能的原因是当大流量空气穿过活性炭层时,过滤初期会有细小的炭粒脱落,并随送风直接进入室内。

以上分析可知,仅仅比较过滤效率或处理风量很难判断哪一种过滤器净化时效性最佳。因此,为便于比较处理风量、过滤效率的综合作用效果,需要对室内PM_{2.5}浓度的衰减过程进行分析。

2.2 浓度衰减规律

使用蜡烛烟雾作为颗粒物发生源,粒子粒径分布采用便携式气溶胶粒径谱仪测量。点燃2只蜡烛20min后熄灭,待室内浓度稳定后,每间隔2min记录一组不同粒径颗粒物的计重浓度,共记录了20min,然后取各粒径颗粒物计重浓度的平均值。图3所示为10组粒子粒径分布的平均值。可以看出,蜡烛燃烧的烟雾中产生的颗粒物主要为1.0μm以下的颗粒物。

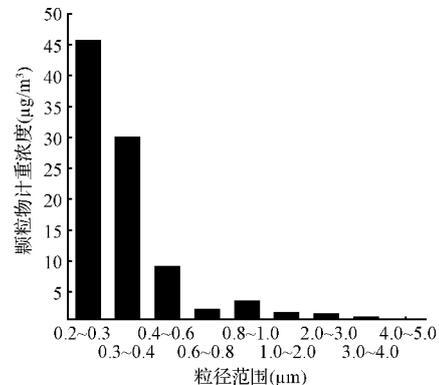


图3 蜡烛烟雾粒子粒径分布
Fig. 3 Particle size distribution of candle smoke

为了使每次测得结果具有可比性,本实验做了两方面努力:一是控制每次实验时燃烧2只蜡烛,燃烧时间为20min;二是将所涉及到的粒子浓度均进行无量纲化,即衰减时间段内每个时刻的浓度值除以其对应的初始浓度值,统一衡量标准。

2.2.1 单层过滤器

由图4可见,室内初始浓度为70μg/m³左右,驻极体过滤器与HEPA分别单独作用时,室内PM_{2.5}浓度基本能够在前20min内达到室内一级空气质

量日均浓度标准(1#驻极体过滤器需 30 min)。HEPA 单独作用时,PM_{2.5}浓度随时间变化最快,在衰减末期仍然具有较大的衰减速度,40 min 内浓度衰减率为 70.20%,为最大值。驻极体过滤器对 PM_{2.5} 的净化效果,整体上随过滤面积增加而越来越好:前 20 min 过滤面积为 0.29 m² 的过滤器的净化效果在部分时间段比过滤面积为 0.54 m² 的过滤器好;但在后 20 min,在过滤面积为 0.54 m² 的过滤器作用下,PM_{2.5} 的浓度仍在不断降低,而另外 2 种过滤面积的驻极体过滤器作用下的 PM_{2.5} 的浓度开始趋于平稳;40 min 内 3 种过滤面积的驻极体过滤器对应的 PM_{2.5} 浓度衰减率分别为 56.06%、62.11% 和 66.50%。对比初效滤层、活性炭滤层分别单独作用工况与颗粒物自然沉降工况,可见活性炭层对 PM_{2.5} 的过滤效率几乎为零,而初效过滤器对 PM_{2.5} 有一定程度的净化效果,40 min 内 PM_{2.5} 浓度衰减为初始浓度的 80.27%。

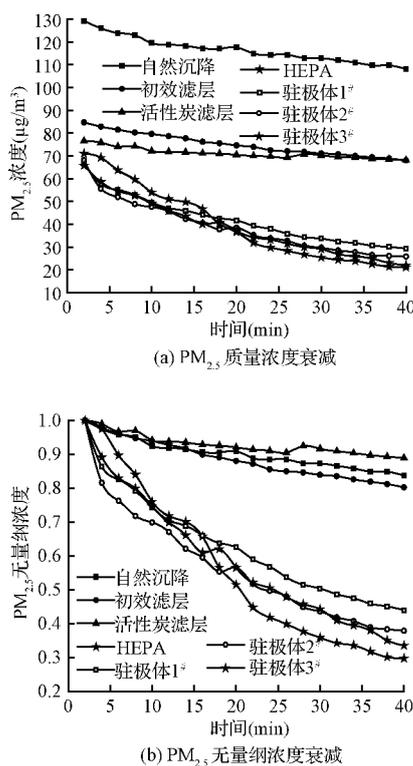


图 4 单层过滤器对 PM_{2.5} 的净化效果

Fig. 4 PM_{2.5} filtration performance of single-layer filter

2.2.2 叠加过滤器

由图 5 可知,从 40 min 内叠加过滤器的空气净化结果来看,单独使用 HEPA 时 PM_{2.5} 浓度衰减率仍然最大,HEPA 同时叠加初效滤层、活性炭滤层(实

验用净化器原装滤层)的浓度衰减率最小,40 min 内仅为 61.14%;而殷璐^[14]对大金公司生产的光催化空气净化器的研究表明,对大部分粒径颗粒物而言,30 min 内测点浓度衰减率达 60%,略优于本文实验用原装净化器。因此,并不是净化器叠加的滤层越多对 PM_{2.5} 的净化效果越好,滤层越多,阻力越大,处理风量越小。尤其是 HEPA 叠加了活性炭层后,PM_{2.5} 浓度衰减速度相比 HEPA 叠加初效滤层的衰减速度大幅降低。一方面由于初效滤层过滤效率比活性炭层高,另一方面由于活性炭层阻力更大、处理风量更小。由此可以得出结论:虽然 HEPA 过滤效率很高,但由于本身阻力大,处理风量小,造成室内空气整体净化时效性降低,因此从净化 PM_{2.5} 角度,不适合再与初效滤层、活性炭滤层叠加使用。

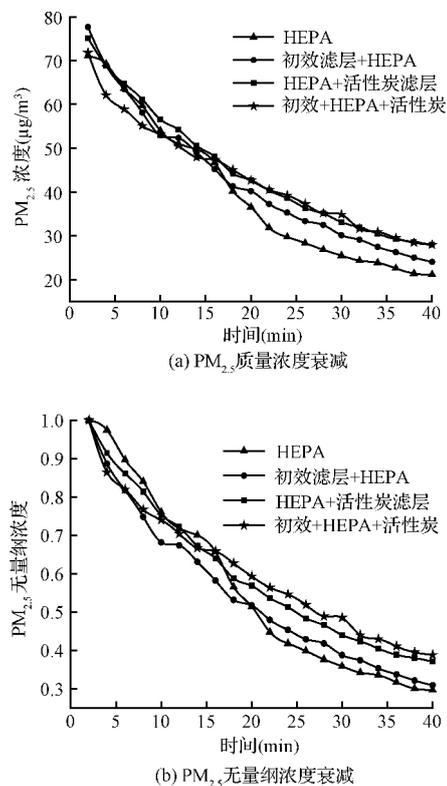


图 5 高效过滤器及其叠加不同滤层对 PM_{2.5} 净化效果

Fig. 5 PM_{2.5} filtration performance of the filter combined HEPA media with other elements

由图 6 分析可知,驻极体过滤器与初效滤层叠加后对 PM_{2.5} 的净化效果普遍得到小幅度提升。从所有驻极体过滤器的净化效果曲线来看:净化效果最好的是过滤面积为 0.54 m² 的驻极体过滤器叠加初效滤层,该工况下 40 min 内 PM_{2.5} 浓度衰减率为 70.12%,与单独使用 HEPA 的浓度衰减率(70.20%)

几乎相等;结合2.1节实验数据分析知,该工况的处理风量比单独使用HEPA高6.96%;过滤面积为0.29 m²的驻极体过滤器叠加初效滤层工况的净化效果仅次于0.54 m²的驻极体过滤器叠加初效滤层工况,该工况下40 min内PM_{2.5}浓度衰减率为66.01%,但处理风量比单独使用HEPA高10.91%。风量大,则对应的运行阻力低,因此,从降低运行阻力角度考虑,应优选驻极体空气过滤器。

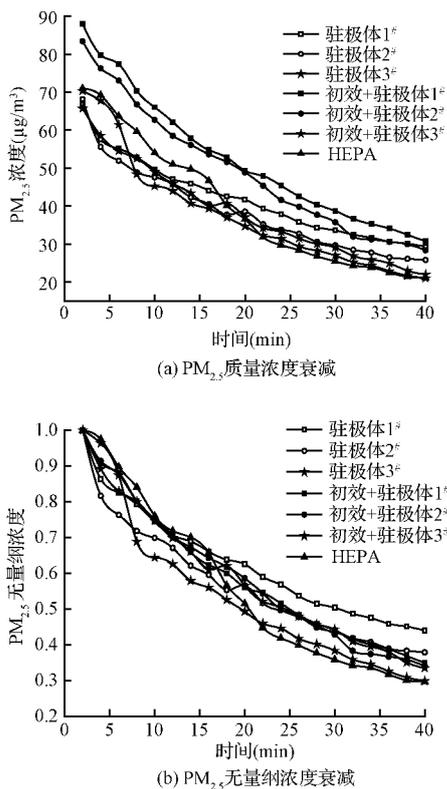


图6 驻极体过滤器及其叠加初效滤层对PM_{2.5}净化效果
Fig.6 PM_{2.5} filtration performance of the filter combined electret with the primary element

2.3 过滤性能指标

净化器过滤性能指标可由综合评价指标洁净空气量(clean air delivery rate, CADR)以及洁净空气量和功耗P的比值表征。CADR可由公式(1)计算^[15]:

$$CADR = (\lambda - k) V - Q \quad (1)$$

式中:CADR为洁净空气量指标(m³/h);λ是拟合系数,由室内PM_{2.5}浓度随时间变化拟合得出^[12];k是PM_{2.5}自然沉降速率(h⁻¹),细颗粒物的自然沉降速率取0.05 h⁻¹^[16];V是室内空间的体积(m³);Q为通风量(m³/h)。

实际环境中的通风量Q使用二氧化碳法进行测定,在均匀的室内空间应有^[15,17]:

$$C_i(t) = C_o + (C_i(0) - C_o) e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (2)$$

式中:C_o指室外二氧化碳体积分数(mg/m³);C_i(0)、C_i(t)分别为室内初始时刻、t时刻二氧化碳体积分数(mg/m³)。

关闭门窗并在测试房间内点燃2只蜡烛,20 min后熄灭蜡烛,待CO₂浓度分布均匀后同时测试室内、外CO₂体积分数,分别记为C_i(0)、C_o;并以该时刻作为计时零点,监测室内CO₂体积分数随时间的变化规律,并将各时刻测量值记为C_i(t);监测过程中,室内没有人员活动。测定结果如图7所示。按照式(2)拟合计算出房间的室内通风量Q为31.37 m³/h。

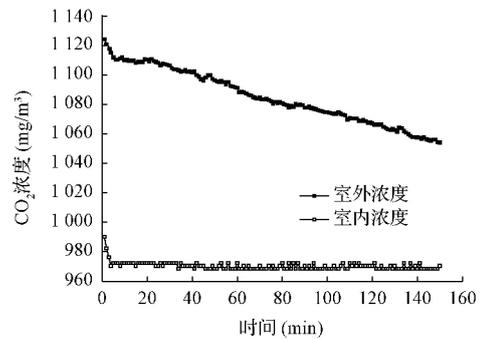


图7 室内、外CO₂浓度衰减
Fig.7 Attenuation value of indoor and outdoor CO₂ concentration

在上述已有实验基础上,重复测量并计算净化器加装不同过滤器时室内测点PM_{2.5}浓度衰减值一次,每种工况前后共测量2次,并按照式(1)~(2)拟合并计算洁净空气量,然后求平均值。计算结果见表5。驻极体过滤器及其被叠加后,洁净空气量在188~265 m³/h之间,接近Molgaard等^[18]对5个家用和办公用空气净化器进行实验得出的过滤型空气净化器洁净空气量在100~300 m³/h之间的结论。CADR/P表征净化器洁净空气量与过滤器功率之间的比值。CADR和CADR/P的数值大小,可以直观判断不同过滤器单独作用或叠加后的净化效果。表5中的数值所反映的净化效果与2.2小节分析结果基本吻合,净化效果最好的是初效滤网叠加过滤面积为0.54 m²的驻极体,紧接着依次是HEPA、初效滤网叠加HEPA、初效滤网叠加过滤面积为0.228 m²的驻极体。

表5 净化器对 PM_{2.5} 净化效果的评价指标分析
Table 5 Performance index evaluation of the PM_{2.5} purification efficiency of air filter

	过滤器参数	洁净空气量	CADR/P
		CADR(m ³ /h)	(m ³ /kWh)
单层	初效滤网	18.09	401.53
	活性炭滤网	2.17	48.80
	HEPA	264.40	5 961.73
	驻极体 1 [#]	188.68	4 330.40
	驻极体 2 [#]	201.41	4 582.68
	驻极体 3 [#]	211.24	4 743.70
叠加	初效 + HEPA	261.51	5 915.25
	初效 + 驻极体 1 [#]	208.25	4 815.12
	初效 + 驻极体 2 [#]	247.32	5 674.99
	初效 + 驻极体 3 [#]	264.64	5 980.62
	HEPA + 活性炭	215.45	4 903.33
	初效 + HEPA + 活性炭	195.21	4 449.79

3 结 论

本文实验测试了驻极体及 HEPA 叠加粗效过滤网、活性炭过滤网过滤器, 办公环境内 PM_{2.5} 浓度衰减、净化器处理风量、运行功率等过滤性能参数。主要得出以下结论:

(1) PM_{2.5} 瞬时过滤效率。初效滤网过滤效率非常差, 活性炭滤网基本没有效果; 过滤面积在 0.198~0.54 m² 范围内的驻极体过滤效率随面积增加而提高; HEPA 过滤效率最高, 为 88.01%; 初效滤网叠加过滤面积为 0.54 m² 驻极体的过滤效率次之, 为 85.23%。

(2) 净化器处理风量。HEPA 处理风量最小, 运行阻力最大; 过滤面积为 0.29 m² 的驻极体处理风量最大; 初效滤网与活性炭滤网均会降低处理风量, 活性炭滤网对应处理风量低于初效滤网。

(3) PM_{2.5} 浓度衰减评价。HEPA 单独使用的效果优于与其他模块叠加使用的效果; 驻极体与初效滤网叠加后净化效果普遍得到小幅度改善; 过滤面积为 0.54 m² 的驻极体与初效滤网叠加使用后, 40 min 内 PM_{2.5} 浓度衰减率与 HEPA 几乎相同, 且均为 70% 左右, 但处理风量比 HEPA 大 6.96%, 相应运行阻力低。

(4) CADR 和 CADR/P 综合指标。净化效果最好的是初效滤网叠加过滤面积为 0.54 m² 的驻极体过滤器, 紧接着依次是 HEPA、初效滤网叠加 HEPA、初效滤网叠加过滤面积为 0.29 m² 驻极体过滤器。

参 考 文 献

[1] Ozkaynak H., Xue J., Spengler J., et al. Personal exposure

- to airborne particles and metals: Results from the Particle TEAM study in Riverside, California. *Journal of Exposure Analysis and Environment Epidemiology*, **1996**, 6(1): 57-58
- [2] Bauling A., Sourdeval M., Meyer M., et al. Biological effects of atmospheric particles on human bronchial epithelial cells. comparison with diesel exhaust particles. *Toxicology in Vitro*, **2003**, 17(5-6): 567-573
- [3] Liang Y. J., Fang L. Q., Pan H., et al. PM_{2.5} in Beijing-temporal pattern and its association with influenza. *Environmental Health*, **2014**, 13(1): 102-109
- [4] 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. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **2001**, 11: 231-252
- [5] 王娟, 张彭义, 野泽康平, 等. 动态法测试空气净化器甲醛去除性能的研究. *环境工程学报*, **2011**, 5(1): 137-140
Wang Juan, Zhang Pengyi, Kohei N., et al. Study on performance of air cleaner to remove formaldehyde by continuous mode. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(1): 137-140 (in Chinese)
- [6] 杨荆泉, 田涛. 驻极体过滤材料及其在空气净化领域的应用. *环境与健康杂志*, **2009**, 26(8): 743-745
Yang Jingquan, Tian Tao. Application of electret filtration material in air purification. *Journal of Environment and Health*, **2009**, 26(8): 743-745 (in Chinese)
- [7] Afshari A., Matson U., Ekberg L. E. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, **2005**, 15(2): 141-150
- [8] Siamak R. A., Johnson M. S., Yazdi S., et al. Filtration efficiency of an electrostatic fibrous filter: Studying filtration dependency on ultrafine particle exposure and composition. *Journal of Aerosol Science*, **2014**, 72: 14-20
- [9] Hubbard H. F., Coleman B. K., Sarwar G., et al. Effects of an ozone-generating air Purifier on indoor secondary Particles in three residential dwellings. *Indoor Air*, **2005**, 15(6): 432-444
- [10] Zaatari M., Novoselac A., Siegel J. The relationship between filter pressure drop, indoor air quality, and energy consumption in rooftop HVAC units. *Building and Environment*, **2014**, 73: 151-161
- [11] Chan W., Lee S. C., Hon A., et al. Management learning from air purifier tests in hotels: Experiment and action research. *International Journal of Hospitality Management*, **2015**, 44: 70-76

- [12] 蔡冰, 尉继英, 江锋, 等. 电凝并式空气净化单元对颗粒物 and 甲醛净化效果的实验. *环境工程学报*, **2007**, 1(1): 91-96
Cai Bing, Wei Jiying, Jiang Feng, et al. Experiment on particles and formaldehyde elimination by electric coagulation indoor air cleaning system. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2007**, 1(1): 91-96 (in Chinese)
- [13] Fisk W. J., Faulkner D., Palonen J., et al. Performance and costs of particle air filtration technologies. *Indoor Air*, **2002**, 12(4): 223-234.
- [14] 殷璐. 空气净化器对通风房间颗粒态污染物捕集的研究. 上海: 东华大学硕士学位论文, **2010**
Yin Lu. Evaluation of air purifier for reducing Aerosol exposure in the ventilated room. Shanghai: Master Dissertation of Donghua University, **2010** (in Chinese)
- [15] Zhang Yinping, Mo Jinhan, Li Yuguo, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmospheric Environment*, **2011**, 45(26): 4329-4343
- [16] Shaughnessy R. J., Sextro R. G. What is an effective portable air cleaning device? A review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **2006**, 3(4): 169-181
- [17] Roulet C. A., Foradini F. Simple and cheap air change rate measurement using CO₂ concentration decays. *The International Journal of Ventilation*, **2002**, 1(1): 39-44
- [18] Mølgaard B., Koivisto A. J., Hussein T., et al. A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners. *Aerosol Science and Technology*, **2014**, 48(4): 409-417