

超声雾化在非过滤式空气净化装置中的应用*

王金鹏¹, 戚兆阳¹, 朱泽森¹, 刘杰¹, 时运来²

(1. 南京林业大学机械电子工程学院 南京, 210037)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 总结了雾滴捕获细颗粒物的理论, 利用超声雾化除尘技术和负离子技术设计了一种区别于传统空气净化器的非过滤式空气净化装置。在容积为 8 m^3 的模拟实验舱内进行了验证实验, 结果表明, 该空气净化装置在 20 min 内就可以使模拟实验舱内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低 44.2%, 在 50 min 内使模拟实验舱内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从 $382.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低到低于初始值的水平, 即 $72.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 证实其对空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度抑制具有较好的效果。该空气净化装置不需要定期更换滤网, 无须担心因滤网更换不及时而引起室内空气二次污染的问题, 还具有调节室内湿度的功能。

关键词 雾霾; 室内环境; 空气净化; 负离子; 超声雾化

中图分类号 TB559; X513

引言

细颗粒物 (fine particulate matter, 简称 $\text{PM}_{2.5}$), 自从它被纳入我国空气质量监测标准以来, 一直被大家强烈关注。中国环境监测总站每天播报的天气质量数据, 其中就包括 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值。 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物已成为国内雾霾天气的主要污染物。

$\text{PM}_{2.5}$ 的来源主要有工业燃煤、汽车尾气及工矿企业的废气排放等, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 的成分主要有碳颗粒、盐颗粒及重金属颗粒等^[1]。最近, 清华大学和美国健康影响研究所联合发布的《中国燃煤和其他主要空气污染源造成的疾病负担》指出, 空气污染是中国疾病负担的一个重要来源^[2]。2013 年, 中国的 $\text{PM}_{2.5}$ 人口加权平均浓度为 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 99.6% 的人口生活在超出世界卫生组织空气质量指南标准 ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的大气环境里。2013 年的大气污染分析结果显示, 燃煤对 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的贡献率为 40%。雾霾天气也会影响到室内的空气质量。Branco 等^[3] 的研究表明, 幼儿园教室外部的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比值通常在 1~2 之间。石晶金等^[4] 阐述了室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、来源及其影响因素。2015 年 4 月, 清华大学发布了室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染公益调研报告, 结果显示, 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对人的影响更显著, 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 吸入量为室外的 4 倍。实际上, 大部分人一

生中有 80% 的时间在室内度过, 因此, 室内空气质量的优劣直接影响了人们的身体健康和生活质量^[5]。目前, 室内空气的净化方法主要包括植物净化、通风净化和空气净化器净化三种方式。植物净化只能净化特定的污染物, 净化能力极其有限; 通风净化只能使室内和室外的空气形成对流, 及时更换室内的空气, 易受室外空气的影响; 相对而言, 室内空气净化器能够有效地去除室内的颗粒物。目前, 室内空气净化器的除尘技术主要是单一或部分采用了静电除尘、过滤除尘、负离子除尘及水洗除尘等技术, 各有特点。负离子技术占用空间小, 产生的负氧离子对人体有益, 水雾除尘技术可以有效去除水溶性离子污染, 因此, 笔者设计了一种以超声雾化技术和负离子除尘技术为核心的非过滤式空气净化装置, 并进行了实验研究。

1 雾滴捕集微颗粒物的理论

文献[6-7]研究了降雨对空气中的亲水性颗粒的清除效果及其与降雨强度、颗粒在水中的溶解度之间的关系模型。Duhanyan 等^[8] 指出, 空气中颗粒污染物的去除率与水滴的尺寸分布高度相关, 粒径接近的时候去除率更高。关于雾滴对微颗粒物的清除效率问题, Pruppacher 等^[9] 提出了综合考虑布朗运动、热泳和电泳等因素的经典通量模型。Seifeld

* 国家自然科学基金青年基金资助项目(51408311); 南京林业大学人才基金资助项目(GXL2014044)
收稿日期: 2016-08-29; 修回日期: 2016-09-27

等^[10]通过实验研究了雾滴对微颗粒物的捕集效率与雾滴粒径、颗粒物粒径、颗粒物浓度及其环境湿度等因素的关系,并提出了降水(雾滴)清除空气中颗粒物的系数 μ (单位是时间的倒数)的理论公式

$$\mu(d_a) = \frac{3}{2} \frac{E(D_r, d_a)P}{D_r} \quad (1)$$

其中: d_a 和 D_r 分别为颗粒物和雨滴的直径; P 为降水率(降水强度); $E(D_r, d_a)$ 为雾滴捕集微颗粒物的效率。

在此基础上,若将PM2.5的初始浓度考虑进来,Seinfeld给出了另一个公式

$$C_{\text{PM}_{2.5}} = C_{0,\text{PM}_{2.5}} e^{-\mu t} \quad (2)$$

由式(2)可以算出,若要在30 min内使初始PM2.5浓度为100,200和1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的空间的空气质量降到35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (美国 national ambient air quality standard,简称NAAQS),则需要清除系数 μ 分别为2.1,3.5和6.7 h^{-1} 。

Ladino等^[11]进行了雾滴捕集亚微米气溶胶的实验研究,并把自己的实验数据与文献[9]的通量模型进行了对比,在分析了实验数据的基础上,提出了捕集效率应该由碰撞捕集效率和凝并捕集效率两部分组成,其中碰撞捕集效率为

$$\text{CE} = \frac{m_{\text{ICPMS}}}{N_r C_a m_a L \pi (r + a)^2} \quad (3)$$

其中: m_{ICPMS} 为采样收集到的无水偏硼酸锂(LiBO₂)的质量(μg); N_r 为雾滴的数量; C_a 为气溶胶浓度; m_a 为一个LiBO₂颗粒的质量(μg); r 和 a 分别为雾滴和LiBO₂颗粒的直径; L 为雾滴和颗粒物在实验装置的反应通道里有效接触的距离。

相比较于碰撞捕集效率,由于凝并捕集效率实验和理论分析难度极大,Ladino在后续的实验结果分析对比当中,将凝并捕集效率设为1来进行分析和计算。结果表明,捕集效率的实验值与理论分析数值基本处于同一个量级,当雾滴直径为12.8 μm ,相对湿度为88.3%~90%时,捕集效率随着颗粒物的直径(0.05~0.33 μm)的增大先减小后又增大,拐点出现在颗粒物直径0.24 μm 附近;而当颗粒物直径固定为0.24 μm 时,则捕集效率随着雾滴直径(12.8~20 μm)的增大而降低。

对于模拟大气降水来抑制空气雾霾污染物的问题,Yu^[12]提出了大气喷水地球工程方法,并用有记录的全国各地的降水与雾霾的演变数据对此进行了直观的说明。此大气喷水地球工程方法就是在高楼及高塔的顶上安装喷水装置向建筑物外的受污染大气喷水,给受污染的空气洗淋浴。这需要一个模型

来研判采用什么样的压力、流量来“喷水”,所建立的模型需包含大气环境参数(温度、湿度、风速等)、颗粒物的参数(类型、分布、预计的变化过程等)以及喷头距地面的距离、喷头的布置位置等参数。

2 空气净化装置设计

2.1 超声雾化器和负离子发生器选型设计

为了解决室内PM2.5颗粒物污染的问题,笔者提出选择一套能产生粒径接近于2.5 μm 的装置,营造一个局部的适合这些微小雾滴捕获PM2.5颗粒物并且能够完成凝并、沉降整个过程的环境,以此达到抑制室内PM2.5颗粒物浓度的目的。

超声雾化是已知的恰好可以提供粒径接近2.5 μm 的技术,因此笔者选用超声雾化器作为空气净化装置的核心,希望能利用其产生的微小雾滴与空气中的PM2.5颗粒更容易地发生相互作用、凝结、长大及沉降的云物理学过程,将PM2.5颗粒物从空气中分离出来。超声雾化器根据工作频率高低不同又分两大类,这里选用卓尔林 $\Phi 20$ 型超声雾化器,工作频率为1.7 MHz的高频,如图1所示,单个功率为20 W,工作头直径为47 mm,高为40 mm。通过HELOS激光粒谱仪测试其产生的雾滴粒径,结果显示其雾滴中径在10 μm 左右,约是传统的压力喷雾所产生的雾滴粒径的十分之一。



图1 卓尔林 $\Phi 20$ 超声雾化器

Fig. 1 $\Phi 20$ type ultrasonic atomizer from Zhuoer/lin

负离子技术是用直流高压将空气电离,产生负离子和负氧离子,其中负氧离子可以改善人的心肺功能,负离子与空气中的尘埃、烟雾等结合,可以促使其发生团聚作用,也更容易吸附在其他物体的表面,从而达到了净化空气的效果。负离子发生器选用山水韵(Sansui)A2206型多头负离子发生器,如图2所示,负离子数量超过每平方米5 000万个,适



图2 山水韵 A2206 型负离子发生器

Fig. 2 Negative ion generator of A2206 type

用面积可达 15 m^2 , 外形尺寸为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

2.2 空气净化装置整体设计

微细水雾对抑制灰尘能起到较好的效果, 负离子除尘也是行之有效的方法, 但是二者结合是否会对 $\text{PM}_{2.5}$ 产生一定的抑制效果, 而且如何将它们集成在一个装置里也是一个挑战。在超声雾化器产生的水雾测试实验过程中, 发现因水雾密度比空气略重, 水雾会自然下沉, 并形成各种图案, 因此水雾发生装置应该布置在净化装置的上部。为了使与微细颗粒混合之后的水雾能够有一个沉降的空间, 还需要将净化装置的空间尺寸充分利用, 因此把净化装置的下半部分设计成双层玻璃的形式, 允许上述混合水雾在其中反应、沉降。由于仅仅靠水雾沉降带动的空气流动实现内外的空气交换所能产生的单位时间的洁净空气量 (CADR) 太小, 因此在净化装置的中下部设置了两个小风扇辅助气流交换。作为净化空气的装置, 不能仅净化室内外对流的空气, 还需要具备内循环模式, 因此设计了朝向室外和室内的两个进气口, 并设计了单向阀。加工安装完成后的空气净化装置如图 3 所示。

2.3 微细水雾反应室设计

位于净化装置上部的微细水雾反应室如图 4 所示, 其不仅包括超声雾化器、水槽等, 还包括负离子发生器。图中左右两侧各布置了一个进气口, 在进气口内侧设计有单向阀, 可以分别允许室外或者室内的空气进入反应室。在进气口附近布置有负离子发生器, 左右各一个。在反应室的内部有几个支柱支撑起一个长方形水槽, 槽深约 110 mm , 槽内水深约 90 mm , 槽宽为 66 mm , 其中布置 2~4 个超声雾化器。在水槽与反应室内壁之间构成了空气与水雾

向下流动的通道, 支撑水槽的支柱是小长方体, 并未完全遮挡住这一通道。

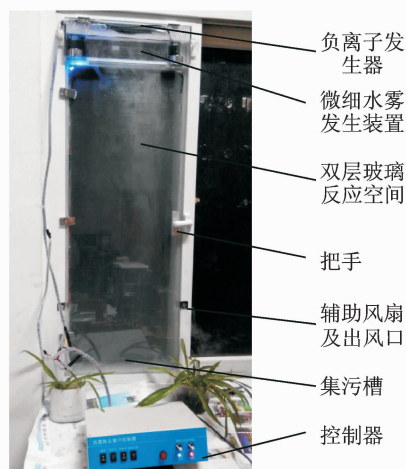


图3 基于超声雾化的非过滤式空气净化装置

Fig. 3 The non-filter air cleaning device based on ultrasonic atomizer

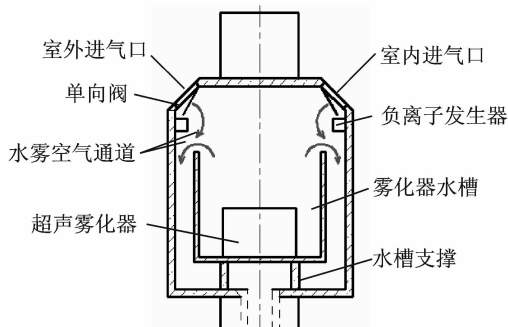


图4 微细水雾反应室侧面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the reaction chamber of fine droplet and $\text{PM}_{2.5}$

2.4 空气净化装置的功能

空气净化装置具有内循环、外循环两种工作模式, 含尘空气进入微细水雾反应室, 其中的微细颗粒物与水雾混合之后通过下落通道进入双层玻璃之间的沉降室, 伴随着含尘雾滴的凝并、沉降以及大雾滴的冲刷, 经过净化的空气从出风口进入室内。由于超声雾化器随着工作时间的延长会发热, 因此通过控制器上的旋钮设置其工作时长和停顿时长 ($0 \sim 60 \text{ min}$)。配合湿度传感器, 还可以自动控制雾化器的启停。另外, 为了进一步增加美感, 在装置双层玻璃沉降室四周设置了霓虹灯。负离子发生器、超声雾化器、强制通风风扇以及霓虹灯可以通过控制器上的按键手动单独控制。

在双层玻璃的底部设置有集污槽, 凝结的水珠滴落在集污槽中, 双层玻璃靠近室内的一侧设计成

可以开合的形式,方便人们在适当的时候打开装置对其内部进行清理。

综上所述,笔者设计的空气净化装置,不仅可以降低室外雾霾对室内人员的影响,还可以通过内循环抑制室内的PM2.5浓度,同时具有调节室内湿度以及为室内补充负氧离子的功能,耗水少,能耗低,清理方便,不需要定期更换滤网,不会因滤网更换不及时而引起室内空气二次污染的问题。

3 空气净化装置的性能实验

3.1 实验系统搭建

空气净化装置实验系统如图5所示。将装置放置在 8 m^3 的由铝型材和有机玻璃搭建的密封的模拟实验舱内,测试仪器采用型号为3016IAQ的LIGHTHOUSE手持式粒子浓度测试仪,见图6。为了控制实验模拟舱内的湿度,增加了简易冷凝器和一个空气泵。

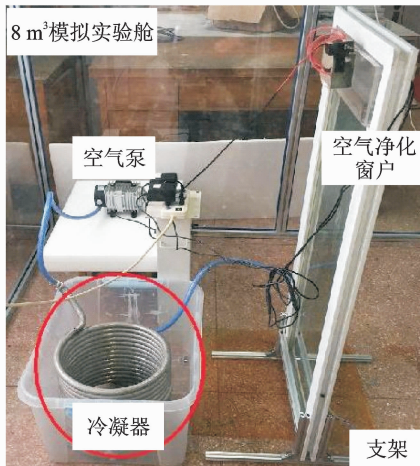


图5 空气净化实验系统

Fig. 5 Experimental system of air purifier



图6 LIGHTHOUSE 3016IAQ手持式粒子测试仪

Fig. 6 LIGHTHOUSE 3016IAQ handheld particle counter

3.2 空气净化效果实验

接通电源,关闭舱门和悬挂于实验舱顶部的风扇,利用LIGHTHOUSE 3016IAQ型粒子测试仪分别测量实验舱内颗粒物浓度。首先,测试仪自动记录PM2.5,PM10、温度及湿度等数据;然后,在实验舱中点燃两根香烟,待香烟燃尽后,开启风扇,使得实验舱中的空气与烟雾均匀混合,通过在实验舱侧壁上的预留孔,利用粒子测量仪测量实验舱内颗粒物浓度数值。整个过程中实验舱处于密闭状态。开启空气净化装置实验系统,9 min后打开测试仪,采样时间为1 min,得到第1组数据。重复上述步骤,每隔10 min测得1组数据,直至PM2.5浓度接近或低于初始值。

3.3 实验数据及分析

综合利用负氧离子和超声雾化技术的空气净化装置的净化效果实验所测得的部分数据如表1所示,绘制的曲线如图7所示。

表1 空气净化装置净化效果实验数据

Tab. 1 Experimental data of air purifying effect test

序号	t/min	PM2.5/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	PM10/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	湿度/%
1	0	94.9	224.5	61.0
2	10	382.7	571.2	63.3
3	20	308.3	801.7	63.8
4	30	213.5	539.4	63.3
5	40	149.7	396.5	62.2
6	50	104.1	293.8	61.1
7	60	72.3	226.9	60.5

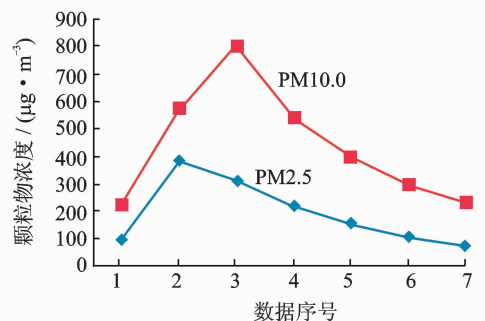


图7 空气净化装置净化效果

Fig. 7 Purifying effect of air cleaning device

分析上述实验数据可知,模拟实验舱内PM2.5初始浓度值为 $94.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,2只香烟点完后,颗粒物的浓度上升到最大值 $382.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。开启净化装置之后,实验舱中PM2.5颗粒物浓度持续下降,在

20 min 内就使得模拟实验舱内的 PM_{2.5} 浓度从 382.7 μg/m³ 降到 213.5 μg/m³, 降低约 44.2%。经过 50 min 左右, 各种颗粒物的浓度降低到低于初始值的水平, PM_{2.5} 物浓度从 382.7 μg/m³ 降到 72.3 μg/m³, PM₁₀ 从 801.7 μg/m³ 降到了 226.9 μg/m³。实验结果表明, 笔者设计的空气净化装置对空气中的 PM_{2.5} 浓度抑制具有较好的效果。PM₁₀ 在净化装置刚启动的时候有短暂上升, 10 min 后才开始逐渐下降, 这可能是因为净化系统刚启动时, 部分微细水雾雾滴没有充分冷凝, 导致测试仪误把小水滴当作 PM_{2.5} 颗粒物所致, 这一变化也与实验舱内的初始阶段的湿度变化相吻合。

4 结 论

1) 笔者利用超声雾化除尘技术和负离子技术设计制作了一种区别于传统空气净化器的非过滤式空气净化装置。

2) 在搭建的 8 m³ 的模拟实验舱内进行了验证实验, 结果表明, 所设计的空气净化装置在 20 min 内就可以使得模拟实验舱内的 PM_{2.5} 浓度降低 44.2%, 在 50 min 后使 PM_{2.5} 浓度从 382.7 μg/m³ 降到 72.3 μg/m³, PM₁₀ 从 801.7 μg/m³ 降到了 226.9 μg/m³, 表明其对空气中的 PM_{2.5} 浓度抑制具有较好的效果。

3) 该空气净化装置还具有调节室内湿度以及为室内补充负氧离子的功能, 耗水少, 能耗低, 方便清理, 无须因为滤网的不及时更换而引起室内空气二次污染的问题。

参 考 文 献

[1] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM_{2.5} 成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2015(12): 4043-4052.
Ma Zhaohui, Liang Yunping, Zhang Jian, et al. PM_{2.5} profiles of typical sources in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015(12): 4043-4052. (in Chinese)

[2] 王尔德. 清华报告: 2013 年中国燃煤大气污染致 36.6 万人过早死亡[N]. 21 世纪经济报道/数字报. 2016-08-19.

[3] Branco P T B S, Alvim-Ferraz M C M, Martins F G, et al. Indoor air quality in urban nurseries at Porto city: particulate matter assessment[J]. Atmospheric Environment, 2014, 84(1): 133-143.

[4] 石晶金, 袁东, 赵卓慧. 我国住宅室内 PM_{2.5} 来源及浓度的影响因素研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2015(9): 825-829.
Shi Jingjin, Yuan Dong, Zhao Zhuohui. Residential indoor PM_{2.5} sources, concentration and influencing factors in China [J]. Journal of Environment and Health, 2015(9): 825-829. (in Chinese)

[5] 李艳, 袁惠新. 分离技术在室内空气污染物净化过程中的应用[J]. 过滤与分离, 2003(1): 32-35.
Li Yan, Yuan Huixin. Separation processes in the control of indoor air quality[J]. Filter & Separator, 2003(1): 32-35. (in Chinese)

[6] Elperin T, Fominykh A, Krasovtsov B. Rain scavenging of soluble gases by non-evaporating and evaporating droplets from inhomogeneous atmosphere [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2013, 122(3-4): 215-226.

[7] Waltrop A, Mitra S K, Flossmann A I, et al. On the scavenging of SO₂ by cloud and rain drops: IV. a wind tunnel and theoretical study of the absorption of SO₂ in the ppb(v) range by water drops in the presence of H₂O₂ [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1991, 12(1): 1-17.

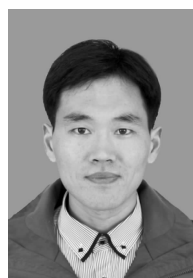
[8] Duhanyan N, Roustan Y. Below-cloud scavenging by rain of atmospheric gases and particulates [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(39): 7201-7217.

[9] Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of clouds and precipitation [M]. 2nd ed. Holland: Lluwer Academic Press, 1997: 568-650.

[10] Seinfeld J H, Pandis Spyros N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New York: Wiley, 2006: 920-1014.

[11] Ladino L, Stetzer O, Hattendorf B, et al. Experimental study of collection efficiencies between submicron aerosols and cloud droplets [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2011, 68(9): 1853-1864.

[12] Yu Shaocai. Water spray geoengineering to clean air pollution for mitigating haze in China's cities [J]. Environmental Chemistry Letters, 2014, 12(1): 109-116.



第一作者简介:王金鹏,男,1979年10月生,讲师。主要研究方向为农林机械化、超声雾化及其应用。曾发表《直线超声电机驱动的精密运动平台位移分辨率》《《振动与冲击》2015年第34卷第22期》等论文。

E-mail: mejpw@aliyun.com

