

空气净化器对于 PM_{2.5} 的净化特性研究

梁驭辰,倪源蔚,俞 熹

(复旦大学 物理学系,上海 200433)

摘要:介绍了空气净化器的净化过程,通过建模及模型修正的过程,给出描述净化性能的参数.

关键词:PM_{2.5};空气净化器;建模

中图分类号:O 4-34

文献标识码:A

文章编号:1000-0712(2015)06-0050-04

随着大城市的雾霾污染日益严重,对室内空气净化的需求也愈发迫切,对于空气净化器的评价各国有其完全不同的标准,如美国的 AHAMAC-1-2000 标准^[1],以 CARD(clean air delivery rate) 评定空气净化器的性能.日本的(JIC9615) 标准^[2]对净化产品风量、气体去除率、去除容量等参数的限值作了规定.我国有 GB/T 18801-2002《空气净化器》标准^[3].

本文通过对空气净化器最基本的物理规律进行模型建立,发现空气净化器的性能可通过两个简单的参数描述:单位时间内通过空气净化器空气体积与房间体积比 $\frac{Q_1\eta}{V_0}$,它影响净化器的工作效率,越大效率越高;单位时间内房间与外界交换气体体积与房间体积比 $\frac{Q_2}{V_0}$,它影响房间污染物的出现,越小越好.

1 实验原理

PM_{2.5} 又称细颗粒物,指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,市场上常用的空气净化器对 PM_{2.5} 的净化过程可以描述如下.

首先需要对空气净化器进行简化,在复杂的理论描述中,启动空气净化器后其外部的空间可分为主流区、涡流区与回风口区 3 个部分^[4],如图 1 所示.这 3 个区域在平衡时污染物浓度将各不相同,其中 G_a 与 G_b 为尘源,即散发尘粒的源头.此处为简化模型,本文将外界污染物浓度取为一相

同值.

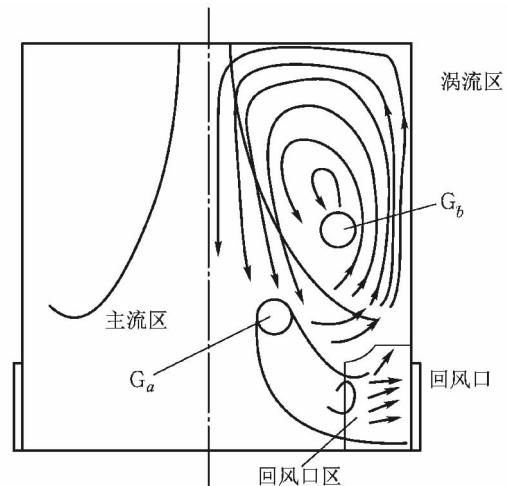


图 1 三区不均匀分布示意图

空气净化器的主要部件是 HEPA 过滤网,即高效率空气微粒子过滤网,主要由无规则排布的化学纤维或玻璃纤维制成,合格的 HEPA 过滤网需要满足的标准是可以除去通过它的空气中 99.97% 的直径 0.3 μm 的粒子^[5].净化器的工作过程是不断地吸入并排出空气,将带有 PM_{2.5} 的空气经过 HEPA 网的过滤,截留 PM_{2.5}.经测量本实验中使用 HEPA 网对 PM_{2.5} 截留率可高达 99%,则空气净化器排出的空气便接近无 PM_{2.5} 的空气,实验结构图如图 2 所示.其中 Q_1 代表单位时间内通过 HEPA 过滤网的空气体积, Q_2 代表实验房间与外界环境单位时间内交换的空气体积,房间体积为 V_0 .

此过程可以建立模型如下:

收稿日期:2014-09-15;修回日期:2014-12-03

基金项目:复旦大学物理学系 985-3 期建设经费资助

作者简介:梁驭辰(1994—)男,江西景德镇人,复旦大学物理学系 2011 级本科生.

通讯作者:俞熹, email: whyx@fudan.edu.cn



图 2 实验结构简图

假设刚开启空气净化器的时刻为 $t = 0$ 的时刻，此时房间内颗粒污染物的浓度为 $\rho_t = 0$ 而房间的体积为 V_0 。假设 HEPA 网的面积为 S_1 ，而在外力作用下（一般空气净化器均会安装一个风扇）通过 HEPA 网的空气流速为 v_1 ，则可知通过 HEPA 网的单位时间空气流量值为 $Q_1 = S_1 v_1$ 。

那么，在空气净化器运行了时间 t 后，假设此时房内空气中污染物数密度已变为了 ρ ，则房内的总颗粒物数为 $n = \rho V_0$ ，则此时单位时间内 HEPA 网吸收的颗粒物数量可表示为 $\frac{dn}{dt} = -Q_1 \rho \eta$ ，其中 η 是 HEPA 网对通过其颗粒物的吸收效率。

另外，我们的实验环境无法做到与外界完全隔绝，它依然在不停地与外界进行空气的交换，假设单位时间内外界与实验环境的对流空气流量为 Q_2 ，则由此导致单位时间内颗粒物的增加量为 $\frac{dn}{dt} = Q_2(\rho_0 - \rho)$ ，综合上述两式，可以列出偏微分方程：

$$V_0 \left(\frac{d\rho}{dt} \right) = -Q_1 \eta \rho + Q_2 (\rho_0 - \rho) \quad (1)$$

解此方程，可以得到 ρ 的表达式为

$$\rho = b \rho_0 + (\rho_{t=0} - b \rho_0) e^{-at} \quad (2)$$

式 (2) 中 $b = \frac{Q_2}{(Q_1 \eta + Q_2)}$ ， $a = \frac{Q_1 \eta + Q_2}{V_0}$ ，而 $\frac{Q_1 \eta}{V_0}$ 表示

单位时间内净化器净化空气体积占房间体积比 $\frac{Q_2}{V_0}$

表示单位时间内净化器与外界交换气体体积占总体积百分比，因此笔者认为可用于描述空气净化器的

性能。其中 $\frac{Q_1 \eta}{V_0}$ 的值越大的对应净化器的性能越优

秀； $\frac{Q_2}{V_0}$ 的值越小，不容易造成再次污染，对应房间内净化效率越高。

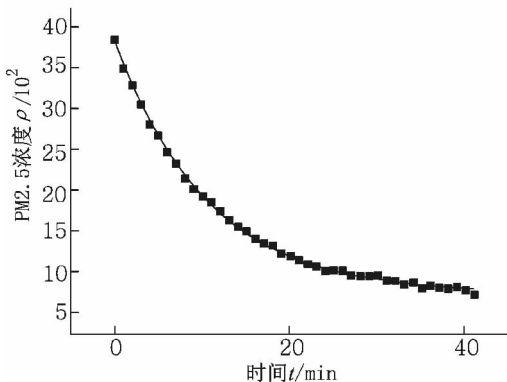
2 实验装置

本实验中所用的实验装置有：HEPA 过滤网，1 号风扇自制空气净化器，2 号离心机型空气净化器及 3 号亚都 KJG3002A - 3 型空气净化器，Dylos DC1100 Pro 粒子测量检测仪。

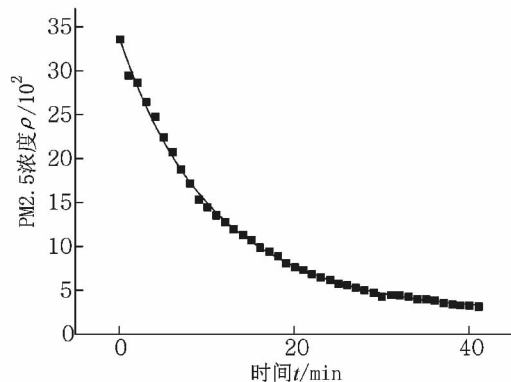
3 实验结果与分析

3.1 不同种类空气净化器性能比较

将 Dylos DC1100 Pro 粒子测量检测仪放置于距离空气净化器 220 cm 的位置，于 20 m² 房间内（层高 3 m，门窗关闭）开启空气净化器，测量从 $t = 0$ 开始的 PM2.5 浓度变化。此处浓度的定义是 0.01 cu ft（cu ft 为立方英尺，是应废除的单位）内，直径处于 0.5 ~ 2.5 μm 范围内的粒子数量。由图 3(a) 和 (b) 可知，在相同时间内 3 号净化器比 2 号净化器的 ρ 值要小。



(a) 2 号空气净化器



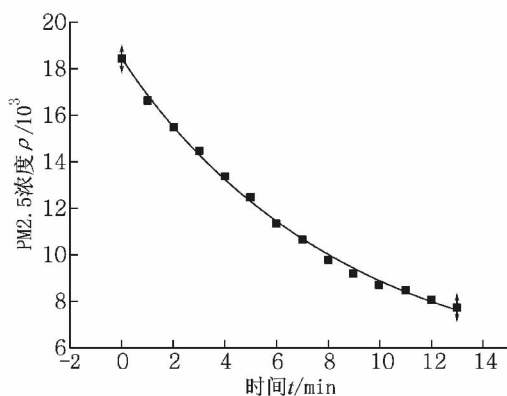
(b) 3 号空气净化器

图 3 ρ - t 拟合图

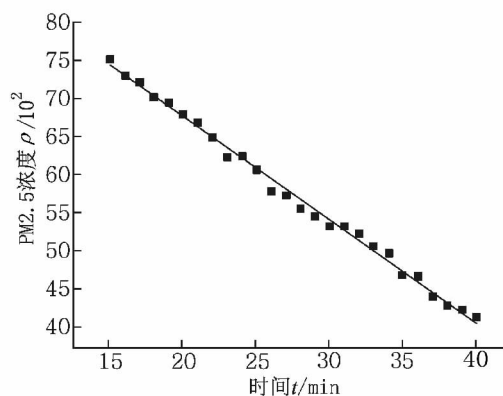
利用式(2)可对测量得到的数据进行拟合. 本实验中使用的3台空气净化器的性能、价格对比表见表1. 由表1结果可知: 3号空气净化器的 $\frac{Q_1\eta}{V_0}$ 大于2号净化器, 而3号 $\frac{Q_2}{V_0}$ 的值要小于2号. 依据之前的判断标准3号净化器的性能会优于2号.

表1 三台空气净化器的性能参数、价格对比表

设备名称	$Q_1\eta/V_0$	Q_2/V_0	价格/元
1号风扇自制空气净化器	0.0102	9.8×10^{-3}	165
2号离心机型空气净化器	0.0772	1.84×10^{-2}	240
3号亚都 KJG3002A-3型空气净化器	0.0841	7.39×10^{-3}	980



(a) 开启后0~15 min变化



(b) 开启后16~40 min变化

图4 2号空气净化器 $\rho-t$ 拟合图

此现象的因素之一可能是外界环境中PM2.5的浓度及单位时间内房间与外界环境交换的气体体积并非一定值, 而是随着时间有显著的改变. 之二是外界环境中的PM2.5浓度也会不断振荡, 图5所示

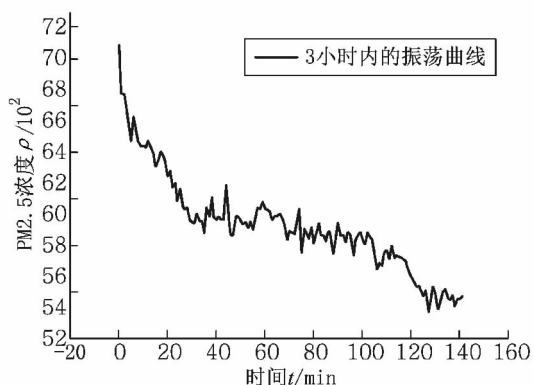


图5 外界环境浓度振荡图

3.2 模型修正

在2号净化器进行的实验中, 在 $t=0 \sim 15 \text{ min}$ 的范围与 $t=16 \sim 40 \text{ min}$ 的范围内, 对 $\rho-t$ 曲线分别进行拟合, 结果发现得到的拟合结果完全不同.

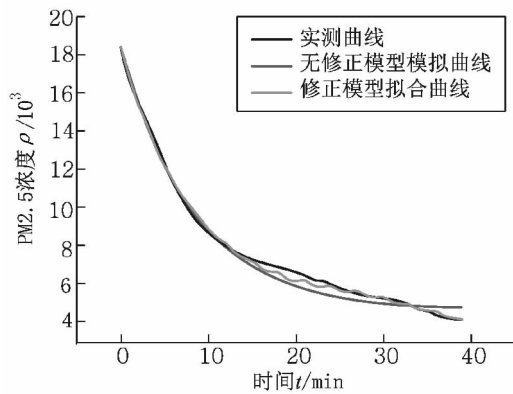
如图4所示, 在 $0 \sim 15 \text{ min}$ 2号净化器 $\rho-t$ 图4(a)的拟合结果为 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0886$ 及 $\frac{Q_2}{V_0} = 0.0302$; 而在 $16 \sim 40 \text{ min}$ 2号净化器 $\rho-t$ 图4(b)的拟合结果为 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0149$ 及 $\frac{Q_2}{V_0} = -3.89 \times 10^{-3}$. $\frac{Q_2}{V_0}$ 为负值表明原有的理想模型已经不能够解释现在的情况. 同时, $16 \sim 40 \text{ min}$ 的 $\rho-t$ 图出现了较为明显的振荡现象(参见图6), 即在短时间内会出现PM2.5浓度随时间不降反升的情况.

为3 h内实验室外界环境中PM2.5浓度的振荡图, 上海市环境监测中心近日得出的结果也证明了这一点^[6]. 这两个因素可以同时导致单位时间内进入房间的污染物量随时间有显著变化.

如图6所示, 对模型进行修正后, 单位时间内外界进入房间的PM2.5浓度在 $0 \sim 25 \text{ min}$ 内上升12.5%, 在 $25 \sim 40 \text{ min}$ 内下降其初始值的50%, 同时, PM2.5浓度以20%的幅度作随机上下波动. 修正后的偏微分方程可以写为

$$V_0 \left(\frac{d\rho}{dt} \right) = -Q_1\eta\rho + Q_2 \left(\left(\rho_0 + \frac{\rho_0 t}{200} \right) (1 + 0.2 \times \text{random}) - \rho \right), \quad 25 \geq t > 0 \quad (3)$$

$$V_0 \left(\frac{d\rho}{dt} \right) = -Q_1\eta\rho + Q_2 \left(\left(\frac{9}{8}\rho_0 - \frac{\rho_0(t-25)}{30} \right) \cdot \right)$$

图6 模拟房间内 $\rho-t$ 图

$$(1 + 0.2 \times random) - \rho \Big), \quad 40 \geq t > 25 \quad (4)$$

其中 ρ_0 代表 $t=0$ 时外界PM2.5的浓度, $random$ 表示一个从-1至1之间的随机数,因为这个方程难以进行求解,因此直接使用偏微分方程来对曲线进行模拟.图6中包含了 $\rho-t$ 的实测曲线、模型修正前的模拟曲线及修正后的模拟曲线.

4 实验结论

本实验利用Dylos DC1100 Pro粒子测量检测

Study of the process air purifier removing PM2.5 particles

LIANG Yu-chen, NI Yuan-wei, YU Xi

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Recently in Beijing and Shanghai the high PM2.5 concentration has drawn public's attention. Researching on air purifier's working mechanism can help us understanding its structure and further development. We introduce the process of researching on air purifier's working mechanism, build model and amend it. At last we find parameters to describe purifier's performance.

Key words: PM2.5; air purifier; building model

仪,在开启空气净化器的条件下,测试房间内PM2.5污染物数量,并对得到的PM2.5浓度-时间曲线建立模型并进行了拟合,还对在实验过程中发现的实验数据振荡现象提出了解释.

参考文献:

- [1] 路世昌,由世俊,叶天震,等.等离子体空气净化器去除室内尘埃颗粒性能测试研究[J].环境与健康杂志,2004,21(4):224-227.
- [2] 许鹏,范存养.空气清净器的发展现状和评价方法(J).洁净与空调技术,1995(2):2-7.
- [3] 鲁建国,张晓. GB/T 18801-2008《空气净化器》与PM2.5的关系探讨[J].家电科技,2013(1):150-152.
- [4] 许钟麟.空气洁净技术原理(M).上海:同济大学出版社,1998:363-370.
- [5] Standard DOE. DOE HEPA filter test program[J]. Order,1998,703:487-4650.
- [6] 王茜.上海市秋季典型PM2.5污染过程数值预报分析(J).中国环境监测,2014,30(2):7-13.