

空气净化器对于 PM2.5 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: 最近北京, 上海等中国大城市的 PM2.5 的严重污染已引起了公众注意, 对空气净化器的净化原理进行研究有助于理解其结构与发展方向。本文介绍了对空气净化器的净化过程进行研究, 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: PM2.5; 空气净化器

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

倪源蔚(1992-) 男, 浙江金华人, 复旦大学物理学系 2011 级本科生

通讯作者: 俞熹 (1978-) 男, 浙江东阳人, 复旦大学物理学系教师, 长期从事物理实验教学.

email: whyx@fudan.edu.cn

基金项目: 复旦大学物理学系 985-3 期建设经费

一、引言

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]，该标准对净化产品风量，气体去除率，去除容量等参数的限值作了规定。以及我国的 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($\frac{Q_1\eta}{V_0}$ 影响净化器的工作效率，越大效率越高)；以及单位时间内房间与外界交换气体体积与房间体积比($\frac{Q_2}{V_0}$ 影响房间污染物的出现，越小越好)（详见后文）。

二、实验原理

PM2.5 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 微米的颗粒物，市场上常用到的空气净化器对 PM2.5 的净化过程可以描述如下：

首先我们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，涡流区与回风口区三个部分^[4]，如图 1 所示，这三个区域在平衡时污染物浓度将各不相同，此处为简化模型，我们将外界污染物浓度取为一相同值。

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其的空气中 99.97%的直径 0.3 微米的粒子^[5]。净化器的工作过程是不断地吸入并排出空气，将带有 PM2.5 的空气经过 HEPA 网的过滤，截留 PM2.5。经测量本实验中使用 HEPA 网对 PM2.5 截留率可高达 99%，则空气净化器排出的空气便接近无 PM2.5 的空气，实验结构图可如图 2 所示。

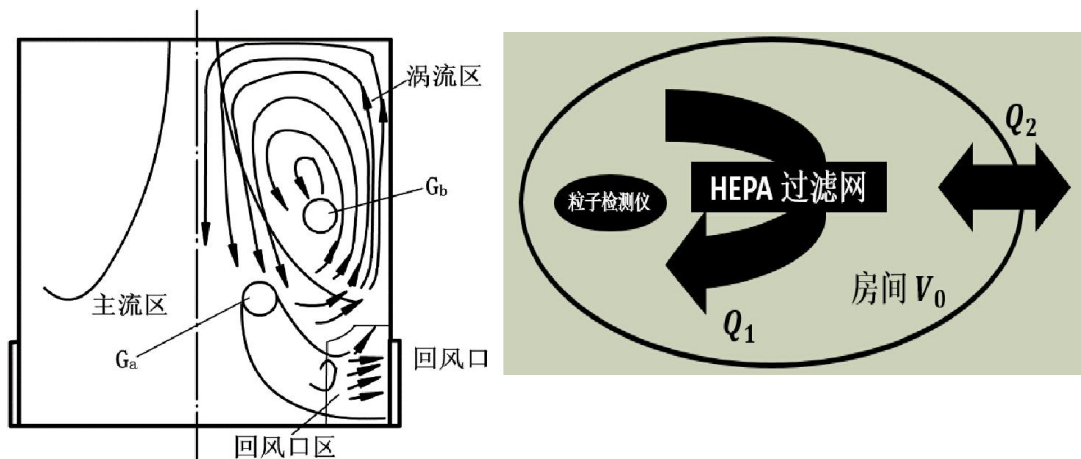


图 1 (左): 三区不均匀分布示意图, 图 2 (右): 实验结构简图, 其中 Q_1 代表单位时间内通过 HEPA 过滤网的空气体积, Q_2 代表实验房间与外界环境单位时间内交流的空气体积, 房间体积为 V_0 。

关于此过程可以建立模型如下:

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数密度为 $\rho_{t=0}$ 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 ρV_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 m 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, 我们可以列出偏微分方程如下:

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

解此方程, 可以得到 ρ 的表达式为:

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

其中 $b = \frac{Q_2}{(Q_1 \eta + Q_2)}$, 而 $a = \frac{Q_1 \eta + Q_2}{V_0}$ 。 $\frac{Q_1 \eta}{V_0}$ 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, 因此我们认为可用于描述空

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。

三、实验装置

本实验中所用的实验装置有: HEPA 过滤网, 一号风扇自制空气净化器, 二号离心机型空气净化器及三号亚都 KJG3002A-3 型空气净化器, Dylos DC1100 Pro 粒子测量检测仪。

四、实验结果与分析

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 220cm 的位置，于 20 平方米房间内（层高 3 米，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。

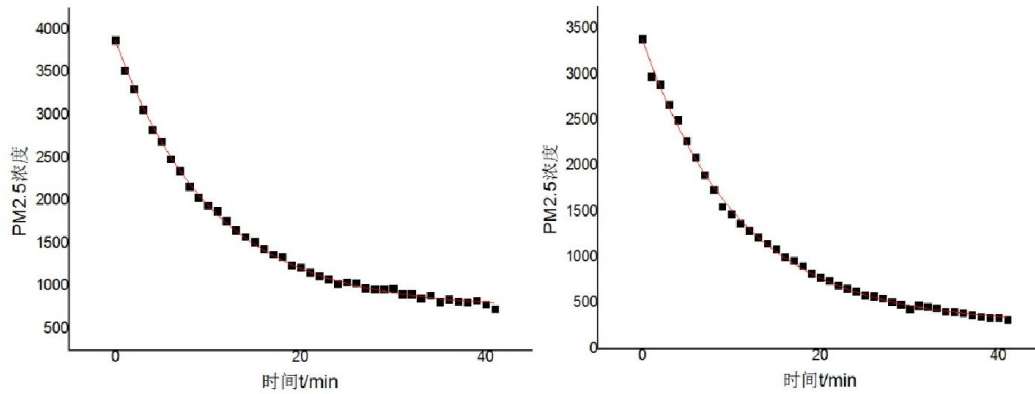


图 3 (左): 2 号空气净化器 $\rho - t$ 拟合图, 图 4 (右): 3 号空气净化器 $\rho - t$ 拟合图, 纵坐标 PM2.5 浓度的定义是 0.01 立方英尺内, 直径处于 0.5-2.5 微米范围内的粒子数量。

利用拟合公式 $\rho = b\rho_0 + (\rho_{t=0} - b\rho_0)e^{-at}$ 对测量得到的数据点进行拟合, 拟合结果为:

2 号空气净化器 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0772$ 而 $\frac{Q_2}{V_0} = 0.0184$, 3 号空气净化器 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0841$ 而 $\frac{Q_2}{V_0} = 7.39 \times$

10^{-3} , 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。本实验中使用的三台空气净化器的性能, 价格对比表可见表 1。

	$Q_1\eta/V_0$	Q_2/V_0	价格/元
一号风扇自制空气净化器	0.0102	9.8×10^{-3}	165
二号离心机型空气净化器	0.0772	0.0184	240
三号亚都 KJG3002A-3 型空气净化器	0.0841	7.39×10^{-3}	980

表 1: 三台空气净化器的性能参数, 价格对比表

2. 模型修正

在 2 号净化器进行的一次实验中, 在 $t = 0\text{min} \sim 15\text{min}$ 的范围与 $t = 16\text{min} \sim 40\text{min}$ 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。

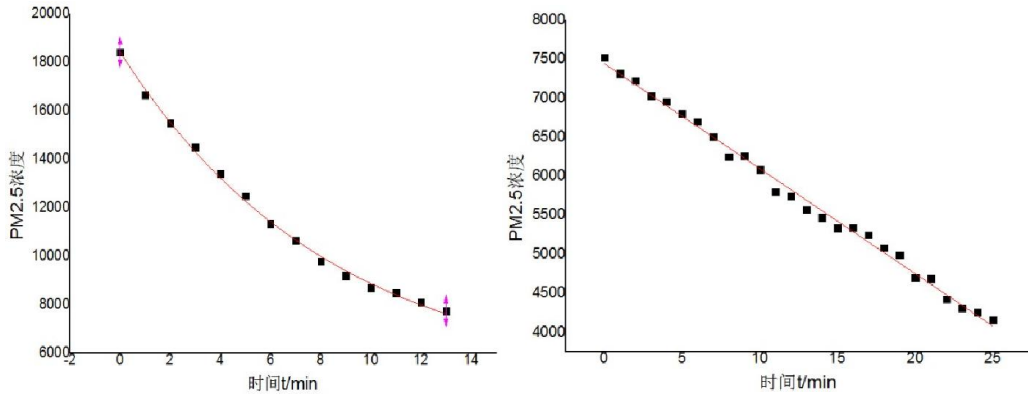


图 5 (左): 2 号空气净化器在 0-15min 时的 $\rho - t$ 拟合图像, 图 6 (右): 2 号空气净化器在 16-40min 时的 $\rho - t$ 拟合图像

如图 5 及图 6 所示, 在 0-15min 2 号净化器 $\rho - t$ 图的拟合结果为 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0886$ 及 $\frac{Q_2}{V_0} = 0.0302$, 而在 16-40min 2 号净化器 $\rho - t$ 图的拟合结果为 $\frac{Q_1\eta}{V_0} = 0.0149$ 及 $\frac{Q_2}{V_0} = -3.89 \times 10^{-3}$ 。同时, 16-40min 的 $\rho - t$ 图出现了较为明显的振荡现象, 即在短时间内会出现 PM2.5 浓度随时间不降反升的情况。

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, 如图 5 所示为 3 小时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。

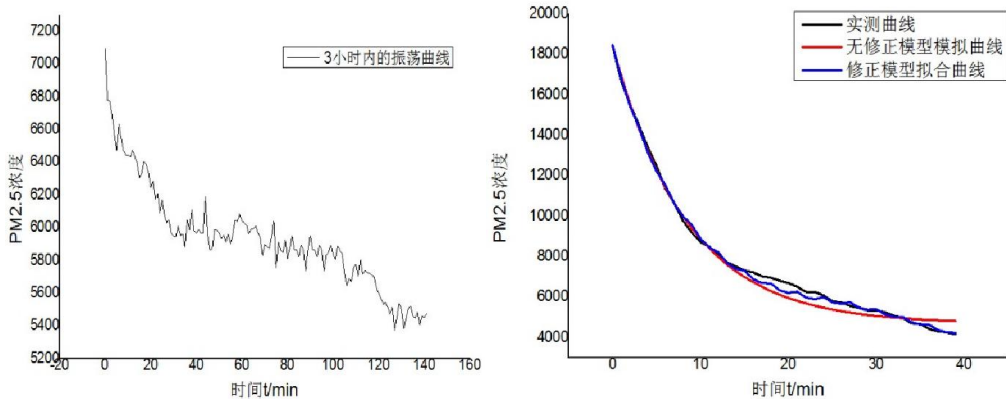


图 7 (左): 在 160 分钟内外界环境 PM2.5 浓度振荡图, 图 8 (右): 模拟房间内 $\rho - t$ 图变化, 黑色曲线为实测出的曲线, 红色曲线为理想模型模拟出的曲线, 蓝色曲线为对模型修正后的模拟曲线

如图 8 所示, 对模型进行修正后, 单位时间内外界进入房间的污染物量在 0 至 25 分钟内上升 12.5%, 在 25 分钟至 40 分钟内下降 50%, 同时, 污染物量以 20% 的幅度作随机上下波动。图 8 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。

五、实验结论

本实验利用 Dylos DC1100 Pro 粒子测量检测仪，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，并对于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]ANSI-AHAMAC-1-2000. Association of home appliance manufacturers method for measuring performance of portable household electric cord-connected room air cleaners
- [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,2013,S1:150-152.
- [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]DOE-STD-3020-2005, Specification for HEPA Filters used by DOE Contractors,9
- [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.

Study of the process of air purifying

Liang Yuchen, Ni Yuanwei, Yu Xi

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai200433)

Abstract: Recently the high PM2.5 concentration had drawn public's attention in Beijing and Shanghai. Researching on air purifier's working mechanism can help us understanding its structure and further development. This paper introduces the process of researching on air purifier's working mechanism, building model and amending it, and in the end finding parameters to describe purifier's performance.

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