

# 电凝并式空气净化单元对颗粒物和甲醛净化效果的实验

蔡冰 尉继英 江锋\* 张振中  
(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要** 研究一种新型电凝并式空气净化单元对室内空气中颗粒物和甲醛的净化效果。实验结果表明, 高压高频(HV-HF)电凝并装置能促使小粒子相互凝并为较大的电中性的粒子团, 这些具有较高比表面积的电中性粒子团进入室内空间, 能继续粘附空气中及物体表面上的颗粒, 形成更大的粒子团, 从而易于被净化单元中的中效过滤器捕集, 而且该净化单元对于大粒子(粒径 $> 0.7 \mu\text{m}$ )浓度较高的场所净化效果更加明显。另外, 室内空气中吸附在颗粒物表面的甲醛也随之被高效去除。该净化单元的投入使用, 起到了提高过滤效率、去除气溶胶小粒子、降低能耗、进一步改善室内空气品质等多重功效。

**关键词** 室内空气净化 高压高频(HV-HF) 电凝并 颗粒物 甲醛

中图分类号 R122.2 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)01-0091-06

## Experiment on particles and formaldehyde elimination by electric coagulation indoor air cleaning system

Cai Bing Wei Jiyang Jiang Feng Zhang Zhenzhong  
(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A new type of electric coagulation indoor air cleaning system was introduced in this paper and its effect on particles and formaldehyde in indoor air was studied preliminarily. The results showed that particles were collided to form clusters by the drive of electric coagulation device, and the coagulated clusters tended to become larger and larger after the adhesion of particles in indoor air and the surface of object. Therefore, they were quite ready to be captured by the filter of the cleaning system. The air cleaning unit had an excellent effect on the condition of higher concentration of large particles, meanwhile, the formaldehyde adsorbed on the surface of particles was also removed effectively. The tests revealed that the cleaning unit has obvious functions in terms of improving filtration efficiency, removing smaller particles, reducing power consumption and improving the quality of indoor air.

**Key words** indoor air purification, high voltage-high frequency, electric coagulation, particle, formaldehyde

人们平均每天有大于 2/3 的时间在室内度过, 随着社会的高速发展和人们生活水平的不断提高, 室内空气质量越来越受到人们的重视。然而由于建筑物内部大量采用合成材料装修、普遍使用空调器等原因, 使得室内产生的很多有机污染物及人体产生的生物污染物得不到很好的稀释、消除。美国环保局(EPA)的调查结果表明, 室内空气污染程度是室外空气的 2~5 倍, 有时甚至高达 100 倍。所以, 室内空气污染治理势在必行。

颗粒物是室内空气的主要污染物之一。空气中 98% 以上的粒子其粒径 $< 1 \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>, 它们不仅在

在呼吸系统内沉降, 其表面所吸附的甲醛、硫化物等气体污染物对人体的危害也非常严重。中央空调系统中的中效过滤器对粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的粒子过滤效率较低; 如果使用高效过滤器, 虽然可提高过滤效率, 但不仅增加设备的初投资, 还会使系统的阻力明显升高, 增加耗电量和运行成本。家用分体式空调器

收稿日期: 2006-01-20 修订日期: 2006-07-17

作者简介: 蔡冰(1980~), 女, 硕士研究生, 主要从事室内空气净化方面的研究工作。

通讯联系人, E-mail: jk0@mails.tsinghua.edu.cn

同样存在上述问题,甚至更加严重。

本实验研究一种新型的高压高频 (HV-HF) 电凝并式空气净化单元,即将 HV-HF 电凝并装置与中效过滤器结合使用,可对室内空气中多种污染物有较好的去除效果。

HV-HF 电凝并式空气净化单元如图 1 所示,一般安装在空气处理系统的风道内,它由功率发生器和电凝并装置 2 部分组成。电凝并装置使功率发生器产生的高压直流电 (约 2.5 kV, 10 μA) 和 550 V, 330 mA 的高频交流电 (约 550 V, 330 mA) 形成振幅高达约 15 万次/s 的复杂电场<sup>[2]</sup>。进入该装置的粒子在电场内的碰撞几率增大,相互粘结为接近电中性的极化粒子团,这些粒子团进入室内,能够像“滚雪球效应”一样粘附室内空气中及物体表面上 1 μm 以下的粒子并形成更大的粒子团。随后,粒子团被循环气流带回到空气处理系统中,很容易被净化单元中的中效过滤器所捕集,从而使室内空气质量得以提高。此外, HV-HF 电凝并装置在净化空气时不会产生臭氧危害<sup>[3]</sup>,它与中效过滤器结合使用可以形成一种新型的高效低能耗的空气净化系统,对其进行深入研究有重要的实用意义。

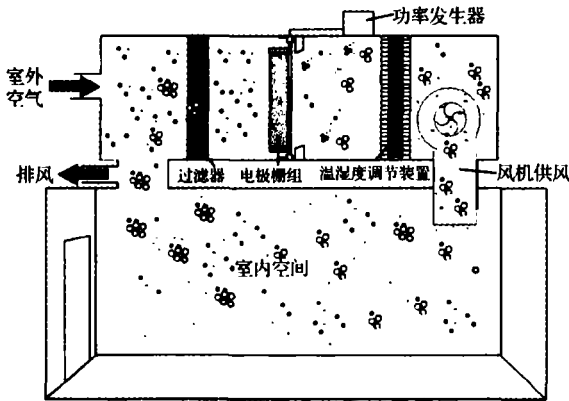


图 1 电凝并空气净化系统示意图

Fig 1 Electric coagulation air cleaning system

目前在关于 HV-HF 电凝并空气净化单元的研究中,针对颗粒物只有各个粒径段粒子的总计数浓度或总重浓度处理效果的评价,没有相同粒径不同工况下粒子计数浓度或相同工况下不同粒径粒子计数浓度随处理时间变化的比较;而针对气体污染物的处理效果评价,也只有 HV-HF 电凝并装置和过滤器结合使用的效果测试,未与单独使用过滤器的工况进行对比分析。本文作者重点对单独使用过

器以及过滤器与 HV-HF 电凝并结合使用 2 种工况下对颗粒物和甲醛的净化效果进行了实验研究和对比分析,取得了一些初步成果。其中对于颗粒物的净化效果分不同粒径区间分别研究其计数浓度的变化,本文中选取了粒径  $\geq 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0$  和  $5.0 \mu\text{m}$  的粒子;对甲醛的净化效果采用质量浓度进行分析。

### 1 实验部分

#### 1.1 实验系统

HV-HF 电凝并式空气净化单元性能实验系统如图 2 和图 3 所示,由体积为  $10 \text{ m}^3$  的不锈钢实验舱、中效过滤器、HV-HF 电凝并装置、循环风机、烟雾发生装置 (图 3)、旁通高效过滤器和管道组成。烟雾发生装置产生的各种待测污染物由小气泵送入实验舱,舱内空气通过管道到达中效过滤器和 HV-HF 电凝并装置,并由循环风机送回到实验舱。在实验舱中心处设置采样点,以测试系统中各种待测污染物的浓度。旁通高效过滤器用于实验前的系统净化,以保证每次实验本底的稳定性。

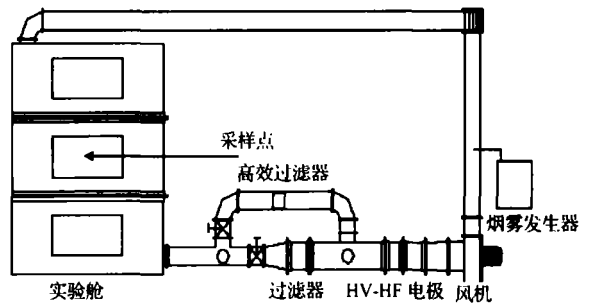


图 2 电凝并式空气净化实验系统示意图

Fig 2 Electric coagulation device experimental system

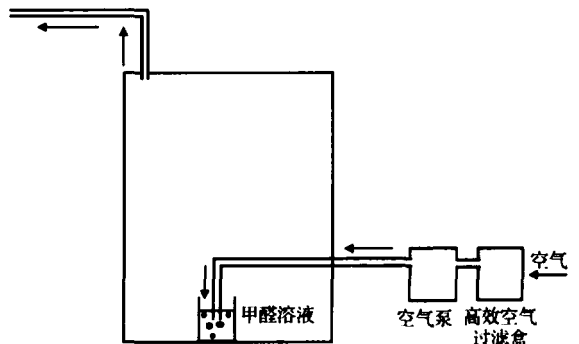


图 3 烟雾发生器示意图

Fig 3 Particles and formaldehyde generator

### 1.2 实验用粒子和甲醛的发生及测量

#### 1.2.1 粒子的发生及测量

采用振动法发生粒子,测量仪器为苏州华达仪器设备厂生产的 BCJ-1D 尘埃粒子计数器,在实验中同时测量粒径  $\geq 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2$  和  $5 \mu\text{m}$  的粒子数。

#### 1.2.2 甲醛的发生及测量

在烟雾发生装置中,将与空气泵出口连接的软管伸入装有 300 mL 40% 甲醛溶液的烧杯内,利用饱和和蒸气压的原理将甲醛输入实验系统中。输入甲醛饱和和蒸气流量为  $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,每次输入时间为 15 min,经测定初始甲醛浓度约为  $1.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

甲醛的测量采用国标 GB/T 16129 居住区大气中甲醛卫生检验标准方法,即 AHMT 分光光度法。以  $1.0 \text{ L}/\text{min}$  的流量采样 5 min,以测试实验系统内甲醛浓度随处理时间的变化情况。

#### 1.3 实验步骤

首先用高效过滤器将系统净化 30 min,之后向实验系统中同时发生待测污染物 15 min,停止发生后即开始测量单独使用中效过滤器时实验舱中心处各待测污染物浓度的变化情况,每分钟采样测量 1 次,连续测量 60 min,重复上述实验舱净化、发尘及污染物检测步骤,进行 HV-HF 电凝并装置和中效过滤器结合使用工况下的净化效果评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 颗粒物的净化效果研究

粒子的去除率按下式计算:

$$P = \left[ 1 - \frac{n_i}{n_0} \right] \times 100\%$$

$P$ ——去除率(%);

$n_i$ ——某时刻某粒径粒子数浓度(个/ $\text{cm}^3$ );

$n_0$ ——初始时刻某粒径粒子数浓度(个/ $\text{cm}^3$ )。

图 4 为 2 种工况下各粒径粒子的净化效果图。

在单独使用中效过滤器的工况下(图 4a),随处理时间增加,各粒径粒子去除率总体呈增加趋势,且粒径越大,去除率越高。粒径  $> 1 \mu\text{m}$  的粒子去除率与粒径  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子去除率差别较大。在 HV-HF 电凝并装置和过滤器结合使用的工况下(图 4b),随着处理时间增加,各粒径粒子去除率开始阶段增加,约 20 min 后粒径  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子去除率减小,说明实验系统空气中粒径  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子数增加。导致该现象的原因可能是经 HV-HF 电凝并装置产生的极化微粒不但可以粘附空气中的粒子,还可以吸附附着在壁面上的粒子,使其从壁面脱附至空气中;此外中效过滤器对于粒径  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子过滤效果较差,过滤器对这些粒子的去除作用小于壁面脱附作用,所以粒径  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子呈现出粒子数增加的现象。该过程持续约 5 min,当壁面粘附的粒子脱附并逐渐被去除后,小粒子的去除率又逐渐增大。

HV-HF 电凝并装置本身不是过滤器,其单独使用时对空气中的污染物去除作用不明显。但它可以通过高频振荡促进表面带有静电荷的小粒子发生凝并,生成粒径较大且整体为电中性的极化粒子,它能

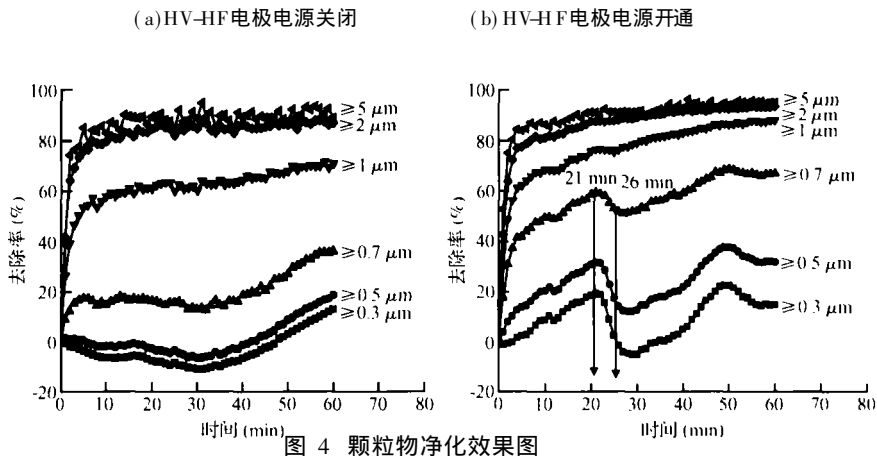


图 4 颗粒物净化效果图

进一步吸附空气中的微粒形成粒子团,从而可以使中效过滤器达到更理想的过滤效果。这样既提高了空气净化系统的过滤效率,又不增加系统负荷,还可减少中央空调的新风量,进而降低空调能耗,符合当前高效节能的设计理念。Frey<sup>[4]</sup>的实验表明,气溶胶微粒的粒径分布在 HV-HF 电凝并作用下会发生改变,粒径 < 0.8 μm 的粒子变少,粒径 > 0.8 μm 的粒子变多,粒径 > 25 μm 的粒子数增加 8 倍以上。在香烟烟雾污染的房间内, HV-HF 电凝并空气净化系统使用 0.5 h 后房间内可吸入颗粒物比单独使用过滤器时减少约 50%<sup>[5]</sup>。

从图 5 对比粒径相同 2 条去除率曲线可以看出,对于粒径较小的粒子(图 5a)开始阶段去除率增加较快,出现了壁面粒子脱附至空气中的作用大于空气中粒子去除作用的现象;对于粒径较大的粒子(图 5c),由于中效过滤器对较大粒径粒子过滤效率较高,所以在 2 种工况下去除率差别不大;对于粒径约 1 μm 的粒子(图 5b), 2 种工况下去除率差距随着处理时间增加而增大,处理时间约 1 h 后粒径为 0.7~1.0 μm 的粒子在电极投入使用后比单独使用过滤器提高了 33 个百分点。

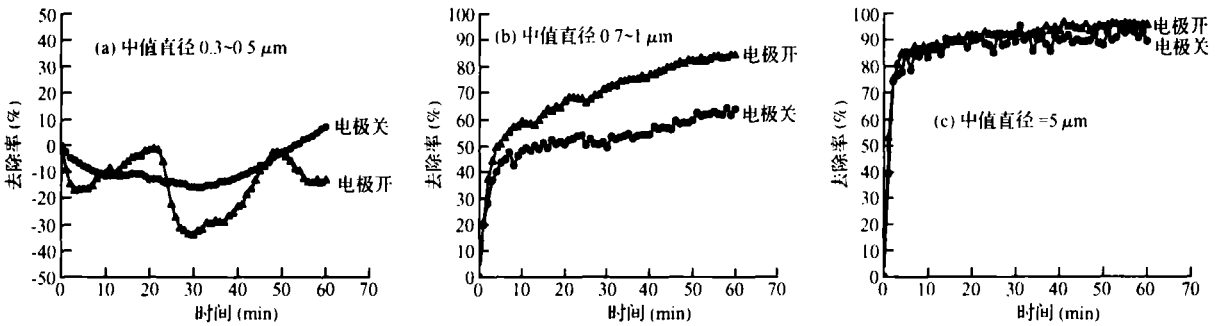


图 5 各粒径颗粒物净化效果比较图

Fig 5 Purification efficiency of different particles

2.2 对甲醛的净化效果

甲醛的去除率按下式计算:

$$P = \left[ 1 - \frac{c_t}{c_0} \right] \times 100\%$$

P——去除率(%) ;

c<sub>t</sub>——某时刻甲醛的质量浓度 (mg/m<sup>3</sup>) ;

c<sub>0</sub>——初始时刻甲醛的质量浓度 (mg/m<sup>3</sup>) ;

图 6 是电凝并装置与过滤器同时使用时(即 HV-HF 电极电源开通,如图中实线所示)与只使用过滤器时(即 HV-HF 电极电源关闭,如图中虚线所示),实验舱中心处甲醛去除率随处理时间变化的对比图。由实验结果可以看出,不论 HV-HF 电凝并装置是否投入使用,甲醛均有较高的去除率,在处理时间为 1 h 的时候,有无 HV-HF 电凝并装置时的去除率分别为 88.89% 及 84.37%。实验中同样发现甲醛在实验开始阶段去除率提高较快,之后在约 20 min 左右,同样出现了去除率下降的现象,该过程持续约 5 min 后结束,在此后的时间段内,使用电凝并装置时甲醛的去除率一直比单独使用中效过滤器高。

投入使用后,颗粒物与甲醛在处理时间约 20 min 时去除率都有稍降低的相同现象,说明了在该净化系统中,甲醛的去除与颗粒物的去除相关性较大。原因可能是甲醛较容易吸附于颗粒物表面或其表面的水膜内,在颗粒物去除的同时甲醛也被间接地去除。实验中较高的甲醛去除率说明空气中的甲醛可能更多地以吸附态的气溶胶形式存在,而并非以单纯的气体分子形态存在。

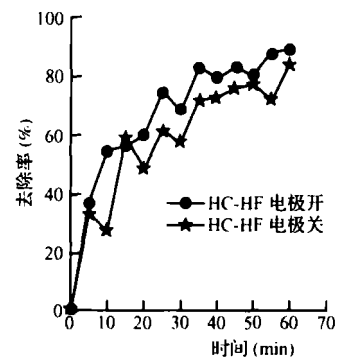


图 6 发尘时甲醛净化效果图

Fig 6 Formaldehyde's purification efficiency with particles generating

从图 4 和图 6 可以看出:当 HV-HF 电凝并装置

### 2.3 空气中粒子的粒度分布对电极系统净化效果影响

系统净化 30 min 后,单独发生甲醛而不发生粒子,重复粒子及甲醛污染物检测步骤,进行 HV-HF 电凝并装置和中效过滤器结合使用工况下的净化效果评价,并与前文中发尘条件下的实验结果进行对比分析。

图 7 为发尘和不发尘实验中初始粒子粒度分布(图 7a)和粒子的表面积分布图(图 7b)的对比。实验表明,不发尘时小粒子较多,而发尘后粒径 > 0.7 μm 的粒子增多,说明这种人工发尘方法增大了大粒子数量所占的比重。

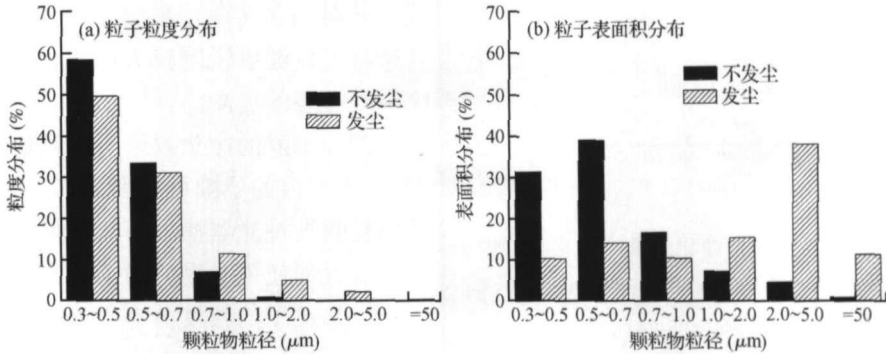


图 7 粒子初始浓度比较图

Fig 7 Comparison of initial concentration

图 8 为不发尘时电凝并装置关闭和开启 2 种工况下各粒径粒子的净化效果图。在单独使用中效过滤器的工况下(图 8a),各粒径去除率随时间的变化规律与发尘实验结果(图 4a)相近。在 HV-HF 电极电源开通的工况下,处理时间 10 min 内各粒径粒子去除率比单独使用过滤器有较明显的提高,之后逐渐趋于平缓;10 min 后粒径 > 1 μm 的粒子去除率比

单独使用过滤器时减小。这种大粒子净化率减小的现象是由于在电凝并装置的作用下,系统中的小粒子在不断地凝并长大,但在一定的时间段内,其粒径还没有增大到能被中效过滤器过滤的范围,因此循环系统中的大粒子数目增多的作用大于过滤去除的作用。

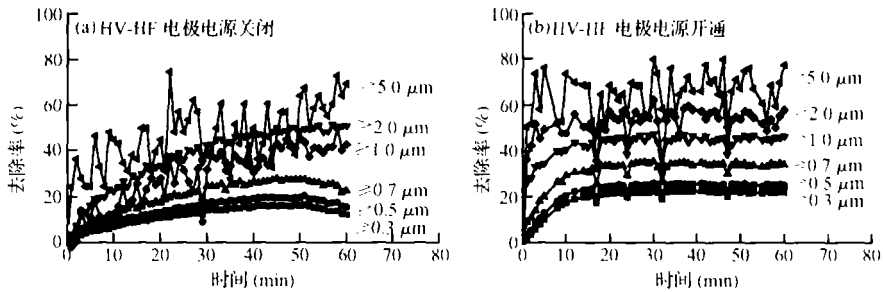


图 8 不发尘时颗粒物净化效果图

Fig 8 Particles' purification efficiency without particles generating

图 9 为不额外发尘情况下, ECE 关闭与开启 2 种工况下,实验舱中心处甲醛去除率随处理时间变化的对比图。处理时间为 1 h 后,有无 ECE 去除率分别为 67.80% 和 74.54%,较额外发尘时的 88.89% 及 84.37% 分别降低了 12.1 和 9.8 个百分

点,此时实验系统中剩余甲醛的浓度分别为 0.483 mg/m<sup>3</sup> 和 0.382 mg/m<sup>3</sup>,均尚未达到室内空气质量卫生规范的浓度限值。表 1 是发尘与不发尘时甲醛平均净化率的比较,从数据中也说明发尘时颗粒物中粒径 > 0.7 μm 的粒子浓度提高,甲醛的平均

去除率也提高。与发尘实验类似的是,不论发尘与否,仅从净化效果来看,ECE投入与否对平均净化效果的影响不大。

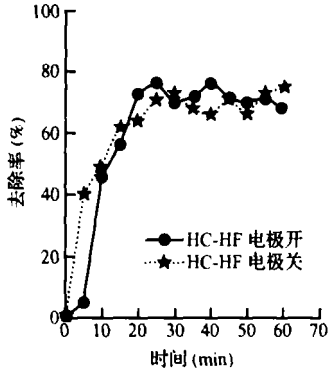


图9 不发尘时甲醛净化效果图

Fig. 9 Formaldehyde's purification efficiency without particles generating

表1 本实验甲醛平均去除率

Table 1 Average removal rate of HCHO in the experiment

测试工况	处理时间	
	30 min 平均去除率 (%)	60 min 平均去除率 (%)
不额外发尘时	24	60
额外发尘时	52	67

在 HV-HF 电极电源开通的工况下,人工发尘时粒子及甲醛的净化效果较好,这项实验结果说明增加系统中的大粒子有利于污染物的去除。根据电凝并装置的工作原理可知,粒径较大的粒子其碰撞截面大,在有限的电凝并空间内与小粒子发生碰撞的频率远远大于小粒子之间的碰撞,因此,小粒子更容易以大粒子为核,粘附在其表面使整体的粒径进一步增大,直到被过滤器捕集而去除。当系统中大粒子数目少时,小粒子之间需要较长的时间才能凝并

到足够大的粒径而被过滤。因此只有当系统中粒径  $> 0.7 \mu\text{m}$  的粒子较多时,电凝并装置对颗粒物的去除效果才较明显。

### 3 结论

通过实验可以得到以下结论:

(1) HV-HF 电凝并装置的投入使用提高了中效过滤器对空气净化系统中颗粒物的净化效果,尤其是对人体健康影响较大的  $1 \mu\text{m}$  左右的粒子的去除率有显著的提高。

(2) 甲醛的净化效果与颗粒物的去除相关性很大,说明室内的甲醛可能大多以吸附态存在,可以随着颗粒物被过滤器捕集而间接被去除;而 HV-HF 电凝并装置的使用对甲醛的净化率提高不太明显。

(3) 粒子的粒度分布对净化效果影响较大,当大粒子(粒径  $> 0.7 \mu\text{m}$ )的浓度较高时, HV-HF 电凝并装置的作用效果更明显。

(4) HV-HF 电凝并装置更适用于机场、地铁站以及宾馆饭店等污染物浓度较高的场合。

### 参考文献

- [1] Frey A. H. Enhancing contaminant control to mitigate aeroallergies. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, **1996**, 77: 460~466
- [2] 曹阳, 郎四维. 介绍一种新型空气自净系统. *建筑科学*, **1998**, 14(1): 58~61
- [3] Frey A. H. Modification of an indoor room odor by passing the room supply air through a complex electrical field. *Bull Environ Contam Toxicol*, **1983**, 31(6): 699~704
- [4] Frey A. H. Change in room aerosol concentration by in-duct complex electric fields. *J Envir Sci*, **1984**, Jan/Feb: 34~36
- [5] Frey A. H. Modification of aerosol size distribution by complex electric fields. *Bull Environ Contam Toxicol*, **1985**, 34: 850~857