

一般通风用空气过滤器的PM_{2.5}效率探究

张万毅 何泰隆 林忠平

(同济大学)

摘 要 对比ISO 16890:2014与EN 779:2012及GB/T 14295—2008中的3种效率分级方法,介绍一般通风用过滤器PM效率的测定方法,并据此测试计算6只不同级别的过滤器及7个过滤器组合分别对DEHS气溶胶与大气尘的PM_{2.5}效率。结果表明,脱离气溶胶粒径分布的PM_{2.5}效率在应用上具有局限性,组合过滤器的PM_{2.5}效率具有一定裕量。根据试验结果推荐使用DEHS气溶胶作为参考气溶胶,采用计数方法测算过滤器的PM_{2.5}效率。

关键词 室内空气品质;一般通风用空气过滤器;PM_{2.5};PM效率;粒径分布

Study on PM_{2.5} efficiency of air filters for general ventilation

Zhang Wanyi He Tailong Lin Zhongping

(Tongji University)

ABSTRACT Three kinds of efficiency classification method based on ISO 16890:2014, EN 779:2012 and GB/T 14295-2008 are compared. Determination methods of particulate matter efficiency of air filter for general ventilation are introduced. PM_{2.5} efficiencies to poly-dispersed DEHS aerosol and ambient air dust are tested and calculated for six different air filters and seven kinds of filter-groups. The results show that PM_{2.5} efficiency without description of particle size distribution is not adequate in application, and filter-group has higher PM_{2.5} efficiency than predicted. Based on the experimental results, the poly-dispersed DEHS aerosol and particle counting method are recommended when determining PM_{2.5} efficiency of air filters for general ventilation.

KEY WORDS indoor air quality; air filter for general ventilation; PM_{2.5}; PM efficiency; particle size distribution

随着我国工业化的发展,化石燃料大量燃烧,近年来全国各地空气污染情况愈发严重,室内外空气中颗粒物浓度逐年攀升。近几十年来,国内外学者开展了大量颗粒物污染对人体健康影响的研究,结果表明,对颗粒物的长期暴露可能引发人体心血管病、呼吸道疾病并导致死亡风险上升^[1],而其中又以细颗粒物(PM_{2.5})对人体的危害最大^[2]。

空气过滤器可滤除空气中的颗粒物,保证室内空气的洁净度,使室内人员、产品、设备免受颗粒物侵害,被广泛应用于商办与住宅建筑、生产工厂、医院等场合。

目前我国市场主要采用的空气过滤器标准有GB/T 14295—2008《空气过滤器》^[3]和EN 779:2012 *Particulate air filters for general ventilation—Determination of the filtration performance*^[4](《一般通风过滤器——过滤性能测试》),在这2个标准中,受试过滤器的等级按其测试用气溶胶的计重过滤效率或计数过滤效率确定,级别分别按照亚高效、高中效等或者F8和F7等名称标识。但现行的GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[5]以及GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》^[6]对室内外空气中颗粒物含量均以PM₁₀及PM_{2.5}的年均/日均质量浓度上限的形式规定,因

收稿日期:2015-08-11

作者简介:张万毅,博士研究生,主要研究方向为空气洁净技术。

此,在如今更加关注空气质量与人体健康的场合,现有的空气过滤器分级方式已不能够很好地适用。为了评价空气过滤器对某一等价粒径以下颗粒物的过滤效果,需要确定一种更加直观的效率分类方法,即空气过滤器的 PM 效率。

1 一般通风用空气过滤器不同分级方式的对比

与欧洲标准 EN 779:2012 以过滤器生命周期内对 0.4 μm 粒子的平均效率分级^[4]以及中国标准 GB/T 14295—2008 按照过滤器初始效率进行简单分级^[3]不同,国际标准草案 ISO/DIS 16890-

1:2014 *Air filters for general ventilation-Part 1: Technical specifications, requirements and efficiency classification system based upon Particulate Matter (PM)*^[7]和 ISO/DIS 16890-2:2014 *Air filters for general ventilation-Part 2: Measurement of fractional efficiency and air flow resistance*^[8]中对空气过滤器的 PM 效率定义为:受试过滤器对测试气溶胶不同 PM 分段(PM₁, PM_{2.5}和 PM₁₀)的初始计重效率。表 1 所示为参考文献^[9]对上述 3 种标准的对比。

表 1 三种空气过滤器标准的比较

标准	GB/T 14295—2008	EN 779:2012	ISO/DIS 16890:2014
测试方法	气溶胶计径计数法	气溶胶计径计数法	气溶胶计径计数法
过滤器是否去除静电	否	是	分为未消除/已消除静电分别测试
气溶胶	KCl 固态气溶胶	DEHS(或等同液体)	DEHS 及 KCl
发生的气溶胶粒径范围	0.3~10 μm	0.2~3.0 μm	0.3~10 μm
是否有气溶胶静电中和装置	是	是	对 DEHS 无,对 KCl 有
测量粒径范围	$\geq 0.3 \mu\text{m}$, 0.5 μm , 1.0 μm , 2.0 μm 和 5.0 μm	0.2~3 μm	0.3~10 μm
适用范围	$\geq 0.5 \mu\text{m}$ 初始分组 效率 $\leq 99.9\%$	0.4 μm 初始效率低于 98%	PM ₁₀ 效率 $\geq 20\%$ 且 PM ₁ 效率 $\leq 99\%$
评级方法	$\geq 0.5 \mu\text{m}$ 或 $\geq 2 \mu\text{m}$ 初始分组 效率或计重效率	0.4 μm 容尘平均效率或者 平均计重效率	对某一 PM 分段(PM ₁ /PM _{2.5} /PM ₁₀)的初始计重效率
尘源	BF-2 粉尘	ASHRAE 粉尘	不进行容尘

2 PM 效率确定方法

为获得具有实际应用意义的 PM 效率,需要得到过滤器对当地大气尘的计重过滤效率,然而在测试过程中获得的大气尘分布并不稳定,也未必具有代表性,因此直接用气溶胶计重仪器测算的效率在应用上存在局限性。按照 ISO 16890-1:2014 推荐的方法,可以在假定大气尘堆积密度恒定的情况下,根据典型大气尘的体积-粒径分布,通过使用参考气溶胶对受试过滤器进行效率试验,将某一粒径以下的各初始分级计数效率与对应粒径档在体积-粒径分布中的积分进行加权平均,以获得受试过滤器对当地典型大气尘在此粒径下的 PM 效率。

有必要说明的是,此方法不适宜对效率太高(如对 PM₁ 效率超过 99%)或者太低(如对 PM₁₀ 效率低于 20%)的过滤器进行计算。

1) 获得典型大气尘体积-粒径分布:在用户关心的粒径范围内,室外大气尘的体积-粒径分布可能因地区、季节、天气情况而有所差别,但总体上一般呈现双峰对数正态分布。其分布可表示为

$$q(d) = \frac{dQ(d)}{d \ln d} = y \times f(d, \sigma_{gA}, d_{50A}) + (1+y) \times f(d, \sigma_{gB}, d_{50B}) \quad (1)$$

函数图像如图 1 所示。

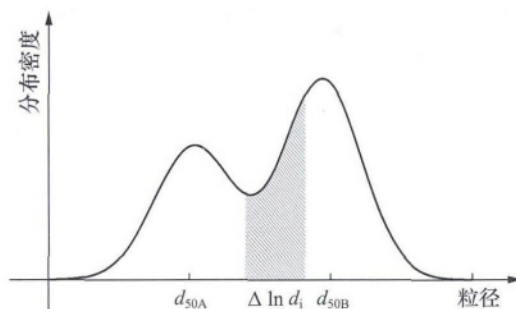


图 1 大气尘体积-粒径分布示意图

式中: $q(d)$ 为大气尘体积-粒径分布的概率密度; $Q(d)$ 为分布概率; d 为等价粒径; y 为双峰分布的混合比;

$$f(d, \sigma_g, d_{50}) = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \times \exp$$

$\left(-\frac{\ln d - \ln d_{50}}{2(\ln \sigma_g)^2}\right)$,为对数正态分布; σ 为正态分布的标准差; d_{50} 为粒径分布中单峰的中位粒径; A 代表粒径较细的峰; B 代表粒径较粗的峰。

2) 过滤器 PM 效率的计算

由受试过滤器对参考气溶胶的初始分级效率,可按照下式计算过滤器的 PM 效率:

$$E(\text{PM}_x) = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \cdot q(\bar{d}_i) \cdot \Delta \ln d_i)}{\sum_{i=1}^n (q(\bar{d}_i) \cdot \Delta \ln d_i)} \quad (2)$$

式中: E_i 为过滤器对参考气溶胶的初始分级效率;
 $d_i = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}$ 为某一粒径通道几何平均粒径;
 $\Delta \ln d_i = \ln d_{i+1} - \ln d_i$ 为粒径档对数宽度。

$q(\bar{d}_i) \cdot \Delta \ln d_i$ 如图1中阴影部分所示,代表粒径区间内颗粒物占总测量颗粒物的体积分数值。将某一粒径下过滤器分级效率按照各粒径档体积分数值加权平均即可得到过滤器的PM效率。

根据标准规定,计算PM1效率时,选取的粒径通道 $n \geq 3$,其中最大的粒径通道上限粒径应等于 $1.0 \mu\text{m}$,其最小粒径通道的下限粒径应等于 $0.3 \mu\text{m}$;计算PM2.5效率时,选取的粒径通道 $n \geq 6$,其中最大的粒径通道上限粒径不应超过 $3.0 \mu\text{m}$,其最小粒径通道的下限粒径应等于 $0.3 \mu\text{m}$;计算PM10效率时,选取的粒径通道 $n \geq 9$,其中最大的粒径通道上限粒径应等于 $10.0 \mu\text{m}$,其最小粒径通道的下限粒径应等于 $0.3 \mu\text{m}$ 。

上述方法在使用过程中,需要预先知道典型大气尘的体积-粒径分布,此分布可以根据大气尘各粒径档计数,以几何平均粒径按照球体计算粒径档内总体积,用数学软件拟合获得。值得说明的是,实际气溶胶颗粒体积非球形造成的误差在各个粒径档均存在,但计算PM效率、进行加权平均时采用的是各粒径档与气溶胶总体的相对值,因此在一定程度上可以消除此误差。

在某一地区典型大气尘体积-粒径分布已知的情况下,可以方便地按照受试空气过滤器初始分级效率进行其对大气尘PM效率的预测。当缺乏此分布数据时,可以采用一种更为简便的方法计算PM效率,即按照应用场合大气尘实测各粒径档计数,用各粒径档颗粒物球形等价体积进行效率的加权平均,以下试验将采用此种方法得到受试空气过滤器对试验场所大气尘PM2.5的过滤效率。

3 通风用过滤器PM2.5效率试验

试验所采用的空气过滤器试验台如图2所示。该试验台依据EN 779:2012搭建,主要构件有进气预过滤器、变频风机箱、喷嘴组流量计(流量测量装置)、高效过滤器、人工尘发生器、混合室、粒子计数器、风管部件及末端高效过滤器等。本空气过滤器的效率试验中,采用BCJ-1激光粒子计数器作为颗粒物计数浓度测试仪器,TSI 8534作为颗粒物计重浓度测试仪器,采用DEHS多分散相气溶胶作为试验气溶胶。

选取6只级别分别为G3、G4、M5、M6、F7和F8的空气过滤器作为试验样品,所有空气过滤器均为袋式,额定风量为 $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ 。试验分为2部分:第一部分为单个空气过滤器效率试验,对G3、G4、M5、M6、F7和F8这6只空气过滤器进行初始效率试验;第二部分为空气过滤器组合效率试验,对G4+M5、G4+M6、G4+F7、G4+F8、M5+M6、M5+F7和M5+F8共7个空气过滤器组合进行初始效率试验。

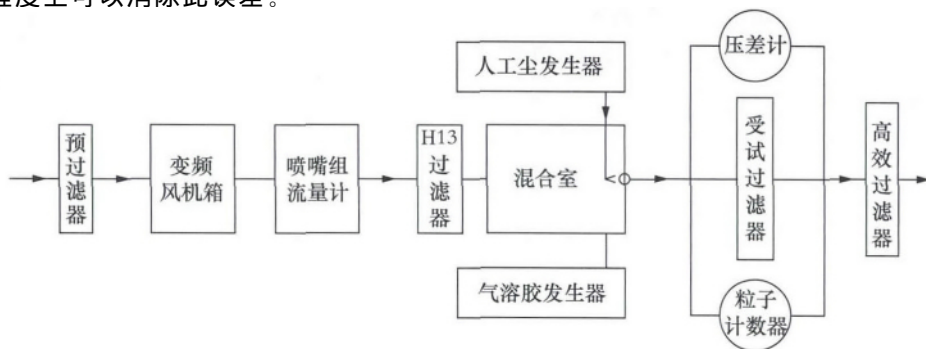


图2 空气过滤器性能试验台示意图

BCJ-1激光粒子计数器可测量得到受试空气过滤器上下游气溶胶 $\geq 0.3 \mu\text{m}$, $\geq 0.5 \mu\text{m}$, $\geq 0.7 \mu\text{m}$, $\geq 1.0 \mu\text{m}$, $\geq 2.0 \mu\text{m}$ 和 $\geq 5.0 \mu\text{m}$ 6个粒径分组的计数浓度,由此可计算出 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$, $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$, $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$, $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$, $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 和 $\geq 5.0 \mu\text{m}$ 共6个粒径区间的颗粒物计数

浓度。

根据上述算法,ISO 16890-1:2014规定的3种PM效率的起始粒径均为 $0.3 \mu\text{m}$,这与BCJ-1激光粒子计数器的量程下限吻合,但过滤器PM2.5效率的上限粒径按照规定不得大于 $3 \mu\text{m}$,因此本试验采用的粒子计数器无法由各粒径档读

数直接得到 PM_{2.5} 计数。在上述 13 组试验中发现,在粒径大于 0.7 μm 的范围中,上下游 DEHS 粒子的对数计数浓度与对数粒径呈明显线性关系(如图 3 所示),因此试验中按照此线性规律,由各组试验的上下游 DEHS 粒子的计数浓度分布求取 PM(2.0~2.5)的计数浓度,这样就可以方便地由各粒径档颗粒物球形等价体积进行效率加权平均,来计算受试过滤器对 DEHS 气溶胶的 PM_{2.5} 效率。

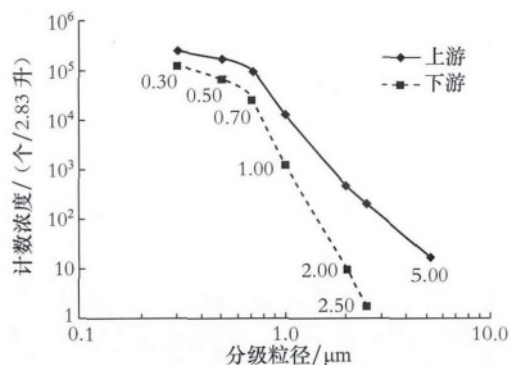


图 3 上下游 DEHS 粒子计数浓度分布

TSI 8534 型 DUSTTRAK™ 气溶胶监测仪可直接测量得到受试空气过滤器上下游气溶胶中 PM_{2.5} 的质量浓度,由此可计算得到受试空气过滤器对 DEHS 气溶胶中 PM_{2.5} 的过滤效率。

4 过滤器/组合过滤器 PM_{2.5} 效率试验结果与讨论

4.1 受试过滤器的分级效率

图 4 所示为试验得到的各受试空气过滤器对 DEHS 多分散气溶胶的初始分级效率,从试验结果看出,从 G3 到 F8,过滤器在各个粒径档上的过滤效率递增;M6, F7 和 F8 过滤器在各粒径档分级效率较为接近;G3 和 G4 过滤器在小于 1.0 μm 范围几乎无效率。

4.2 DEHS 多分散气溶胶与大气尘的体积-粒径分布

图 5 所示为试验用 DEHS 多分散气溶胶及试验场所实测大气尘的体积-粒径分布。由图可知,

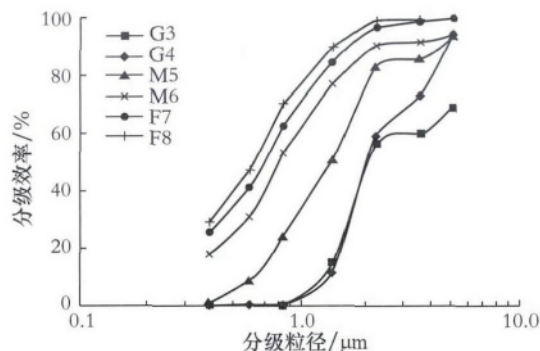


图 4 各受试空气过滤器对 DEHS 多分散气溶胶的分级效率

在用户关注的粒径 0.3 μm 以上的范围内,DEHS 多分散气溶胶体积分布为单峰分布,体积(质量)主要集中在 0.3~2.5 μm 等价粒径之间;而大气尘的体积分布则呈现较明显的双峰分布,在 0.3~2.5 μm 等价粒径之间的体积不到总体积的 50%。因试验采用的粒子计数器在大于 5.0 μm 的粒径范围没有更细的粒径档划分,故图 5 无法很好地反映大气尘在粗粒径范围(即 $>5.0 \mu\text{m}$)内的分布。

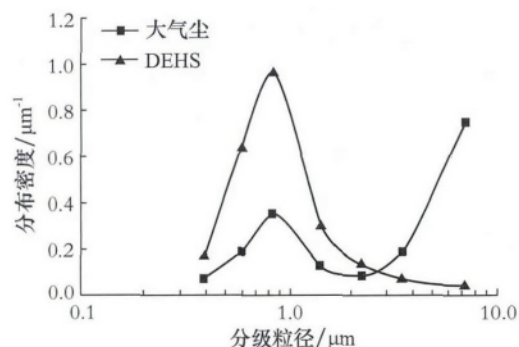


图 5 DEHS 多分散气溶胶及大气尘体积-粒径分布

4.3 受试过滤器的 PM_{2.5} 效率

由图 4 和图 5 包含的数据信息可计算受试过滤器对 DEHS 多分散气溶胶及大气尘的 PM_{2.5} 效率。根据 TSI 8534 的测试结果可简单换算获得受试过滤器对 DEHS 多分散气溶胶的 PM_{2.5} 效率,结果如表 2 所示。

表 2 各受试空气过滤器的 PM_{2.5} 效率计算结果

受试空气过滤器级别	G3	G4	M5	M6	F7	F8
PM _{2.5} 过滤效率 (对 DEHS/BCJ-1)	6.4	7.1	32.7	58.0	66.7	72.5
PM _{2.5} 过滤效率 (对 DEHS/TSI 8534)	5.3	6.1	28.4	52.3	58.7	64.3
0.4 μm 粒径档过滤效率	0	0	2.4	18.3	25.7	29.0
PM _{2.5} 过滤效率 (对大气尘/BCJ-1)	5.8	7.0	29.9	54.0	62.7	68.3

由表 2 可知, G3 和 G4 两种粗效空气过滤器对 PM_{2.5} 的过滤效率极低, 小于 10%。结合图 4 可以看出, 在 2.5 μm 以下的粒径区间, G3 和 G4 空气过滤器的效率曲线非常接近, 两者在 0.3~1.0 μm 粒径区间均无效率, 在 1.0~2.0 μm 区间效率也仅有 10%, 而 DEHS 气溶胶以及大气尘的 PM_{2.5} 的体积(质量)主要分布在 0.3~2.0 μm 区间, 这是 G3 和 G4 两种粗效空气过滤器的 PM_{2.5} 效率如此低的原因。

从第 1 组和第 2 组的对比结果来看, 由 BCJ-1 粒子计数器测试计算的空气过滤器 PM_{2.5} 效率要普遍大于 TSI 8534 直接测得计重浓度计算的结果。TSI 8534 的测量范围为 0.1~15 μm , 而 BCJ-1 粒子计数器只测量大于 0.3 μm 的粒子, 因此可能受试空气过滤器对 0.3 μm 以下部分 DEHS 粒子过滤效率的降低导致了上述结果的出现。但也应注意到, 2 组测量使用仪器之间因测量精度、内置算法等导致的系统误差更加可能淹没量程带来的差异, 成为效率差别的主要原因。

用 BCJ-1 粒子计数器和 TSI 8534 均可测算得到受试空气过滤器的 PM_{2.5} 效率, 但 BCJ-1 粒子计数器同时可以获得不同粒径档的分级效率, 可供用户自行计算空气过滤器对特殊粒径分布的 PM_{2.5} 过滤效率。此外, 环境空气中细粒径颗粒物的计数浓度通常远大于粗粒径颗粒物, Seaton A. 等^[10]指出, 在健康风险评估方面, 颗粒物计数浓度比计重浓度更加重要, 因此通过粒子计数的方法确定空气过滤器的 PM 效率更加具有实际意义。

将第 1 组和第 4 组进行对比可以发现, 用同样的分级效率对分布不同的 DEHS 气溶胶与大气尘分别进行计算, 得到受试空气过滤器对 2 种气溶胶

的效率并不相同, 空气过滤器对 DEHS 的 PM_{2.5} 效率要普遍大于对大气尘的 PM_{2.5} 效率。这是因为在本试验中, 2 种气溶胶在体积-粒径分布的 PM_{2.5} 部分虽然形状类似, 但 DEHS 气溶胶的分布更加集中陡峭, 在 2.5 μm 以下区间, 各级别受试空气过滤器效率占优的粒径档(0.7~2.5 μm) DEHS 气溶胶被滤除了更多的相对质量。因此, 确定空气过滤器 PM 效率时, 应说明具体的测试气溶胶的粒径分布, 否则在应用上将带来偏差。

由图 5 也可看出, DEHS 气溶胶绝大部分体积比例分布在 0.3~2.5 μm 之间, 即在测算 PM_{2.5} 效率的粒径区间内, DEHS 气溶胶分布充足, 这样可以避免效率测试中因为粒径档内计数太小造成的统计误差, 所以推荐用 DEHS 气溶胶作为参考气溶胶测试通风用空气过滤器对大气尘的 PM_{2.5} 效率。

第 3 组数据表明, 受试空气过滤器对 PM_{2.5} 过滤效率与对 0.4 μm 粒径档的过滤效率之间存在显著差距, 故不应当根据 0.4 μm 粒径档过滤效率评价空气过滤器对 PM_{2.5} 的过滤效率。

4.4 空气过滤器组合的 PM_{2.5} 效率

表 3 所示为各受试空气过滤器组合的 PM_{2.5} 效率。

对比表 2 中受试 M5, M6, F7 和 F8 空气过滤器, 空气过滤器组合使用时对 PM_{2.5} 的过滤效率均有显著提高。若根据空气过滤器串联进行 PM_{2.5} 效率计算, 以 G4+F7 为例, 串联计算效率为 $1 - (1 - 7.0\%)(1 - 62.7\%) = 65.3\%$, 比实测的 PM_{2.5} 效率(71.8%)低。故在实际工程中, 无论是根据末级空气过滤器的效率还是根据空气过滤器串联计算得到的效率进行选型, 系统过滤效率都将存在一定的裕量。

表 3 各受试空气过滤器组合的 PM_{2.5} 效率

受试空气过滤器组合	G4+M5	G4+M6	G4+F7	G4+F8	M5+M6	M5+F7	M5+F8	%
PM _{2.5} 过滤效率(对 DEHS/BCJ-1)	39.6	68.0	71.8	85.7	79.4	82.3	86.1	
PM _{2.5} 过滤效率(对 DEHS/TSI 8534)	30.4	61.3	64.8	76.7	72.2	74.5	76.1	

5 结论

笔者根据 ISO 16890-1:2014 规定的一般通风用空气过滤器 PM 效率的计算方法, 测定计算了不同级别的 6 个空气过滤器及 7 个空气过滤器组合对试验用 DEHS 多分散气溶胶及大气尘的 PM_{2.5} 效率, 得出如下结论:

1) 大气尘的粒径分布因地域、季节、天气不断

变化, 对受试空气过滤器的 PM_{2.5} 效率确定带来很大影响, 因此测试空气过滤器 PM_{2.5} 效率时应说明效率所针对的气溶胶的粒径分布;

2) 空气过滤器组合的 PM_{2.5} 效率普遍大于对应的末级空气过滤器及过滤器组合效率计算值, 在实际使用中根据组合效率选择的空气过滤器组合其实际过滤效率存在一定裕量;

3) 在0.3~2.5 μm 各粒径档中,DEHS气溶胶计数浓度较大,不致引起显著统计误差,可作为空气过滤器PM效率测定中的参考气溶胶;

4) 考虑到计数占比更高的细粒径颗粒物对人体健康带来的更大风险,以及受试空气过滤器对不同分布气溶胶PM_{2.5}效率的计算推广,采用计数方法确定空气过滤器的PM_{2.5}效率更具有实际意义。

一般通风用空气过滤器对环境空气中颗粒物的PM_{2.5}效率的确定需要2组数据:一是此环境空气颗粒物体积-粒径分布,二是受试空气过滤器的分级计数效率,后者可以在空气过滤器性能试验台上完成,前者则因环境空气中颗粒物粒径分布的不稳定性而较难确定,为控制室内颗粒物污染,需要后期各城市典型大气尘粒径分布模型以及室内各尘源散发模型的建立与完善。

参考文献

- [1] Dockery D W, Xu X, Spengler J D, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. Journal of Occupational & Environmental Medicine, 1995, 37(2): 1753-1759.
- [2] C Arden P C, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(6): 709-742.
- [3] GB/T 14295—2008 空气过滤器[S].
- [4] EN 779:2012 Particulate air filters for general ventilation-Determination of the filtration performance[S].
- [5] GB 3095—2012 环境空气质量标准[S].
- [6] GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S].
- [7] ISO/DIS 16890-1:2014 Air filters for general ventilation-Part 1: Technical specifications, requirements and efficiency classification system based upon particulate matter (PM)[S].
- [8] ISO/DIS 16890-2:2014, Air filters for general ventilation-Part 2: Measurement of fractional efficiency and air flow resistance[S].
- [9] 何维浪, 林忠平, 张晓磊, 等. 空气过滤器性能测试方法与标准浅析[J]. 洁净与空调技术, 2012(3): 15-19.
- [10] Seaton A, Macnee W, Donaldson K, et al. Particulate air pollution and acute health effects[J]. Lancet, 1995, 345(8943): 176-178.

