



空气过滤器效率的气溶胶计数法评价*

中国建筑科学研究院 清华大学 王智超[☆]
清华大学 徐昭炜 李剑东

摘要 通过分析大气尘计数法和气溶胶计数法的特点,指出后者代替前者的必要性。尘源特性和气溶胶发生器是气溶胶计数法的核心,对比了 ANSI/ASHRAE 52.2-1999 和 EN 779:2002 标准中的尘源和气溶胶发生器。介绍了 GB/T 14295—2008《空气过滤器》采用气溶胶计径计数法的理由,并根据该标准的实施情况总结了气溶胶计径计数法的优点。

关键词 空气过滤器 气溶胶计数法 大气尘计数法 气溶胶发生器

Evaluation of aerosols counter method for efficiency of air filter

By Wang Zhichao[★], Xu Zhaowei and Li Jiandong

Abstract Based on the characteristics analysis of the particles counter method and the aerosols counter method, points out the necessity of replacing the former by the latter. Presents that the dust source characteristics and aerosols generator are the core parts in the aerosols counter method, and compares the dust source and the aerosols generator regulated in the standards of ANSI/ASHRAE 52.2-1999 and EN 779:2002. Expounds the reason for adopting the aerosols counter method in the standard of GB/T 14295—2008 of China, and summarizes the advantages of the method based on the implementation of the standard.

Keywords air filter, aerosols counter method, particles counter method, aerosols generator

★ China Academy of Building Research, Beijing, China

①

0 引言

随着现代工业的发展,电子半导体工业、生物制药以及医疗卫生行业对室内颗粒物洁净度的要求越来越严格,同时,随着近年来我国汽车尾气排放、基础建设扬尘以及工业废气排放的逐渐增多,大气环境颗粒物粉尘污染逐渐严重。空气过滤器作为大气环境与建筑室内环境之间的一道“筛子”,作用显得更为重要,其过滤性能以及加工制造技术也都得到了很大提高。

用气溶胶计径计数法取代大气尘计数法检测空气过滤器的过滤效率是 GB/T 14295—2008《空气过滤器》修订时的一项较大改进^[1-3]。其中规定了固态氯化钾(KCl)多分散相气溶胶作为空气过滤器过滤效率试验的尘源,并对气溶胶发生器的要求以及气

溶胶计径计数试验方法作了详细介绍。本文对气溶胶计径计数效率法的相关问题进行探讨。

1 大气尘计数法与气溶胶计径计数法

1.1 大气尘计数法及其优缺点

大气尘计数法是以大气尘作为尘源来检测空气过滤器过滤效率的一种方法,大气尘是指大气环境中的悬浮微粒,它是一种既包含固态微粒也包含液态微粒的多分散气溶胶。由于大气尘简单易得,而且相比其他检测方法,如比色法和计重法,大气尘计数法更能真实和准确地反映空气过滤器过滤性能的优劣,因此,自上世纪 80 年代末以来在我国得到了广泛的使用。

①☆ 王智超,男,1972 年 5 月生,工学硕士,副研究员
100013 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院建筑
环境与节能研究院
(010) 84270003 (0) 13910069896
E-mail: wangzc@ncsa.cn
收稿日期:2010-09-26

* 国家“十一五”科技支撑计划项目“建筑室内热湿环境人工控制与改善关键技术研究”(编号:2006BAJ02A09-2),中国建筑科学研究院应用基金“空气滤料性能试验方法的研究”

综合十多年来的实际使用情况,发现大气尘计数法存在着明显不足之处:由于大气尘的浓度和粒径分布受室外污染源、风速风向、空气温度、空气湿度和环境绿化等因素的影响,因此在时间上和空间上都存在很大的波动,粒子浓度和粒径分布都很难控制。图1是北京市不同日期测试的大气尘粒径分布情况,图2^[4]则给出了我国123个地区大气尘浓度分布和粒径分布情况(图中每1条曲线代表1个地区),图1和图2的数据充分反映了大气尘在时间上和空间上的不确定性。

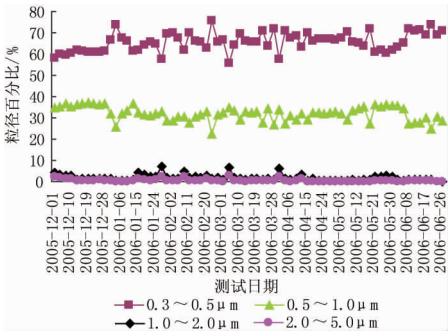


图1 北京市不同日期大气尘的粒径分布情况

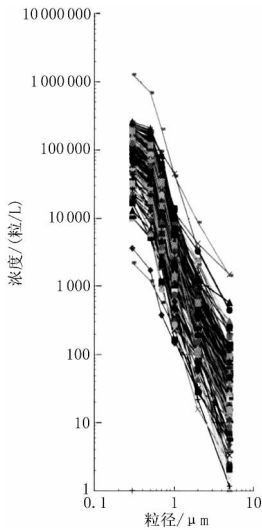


图2 我国123个地区大气尘浓度分布和粒径分布情况

相关的试验数据表明^[5],虽然尘源的浓度变化(在粒子计数器的浓度限值内)对空气过滤器过滤效率的测试影响不大,但是尘源的粒径分布却影响过滤效率的测试结果。这就使得大气尘计数法的试验过程得视天气情况而定,给试验带来诸多不便,而且容易造成试验的不可重复性以及测试结果的不确定性。

1.2 气溶胶计径计数法

气溶胶计径计数法是采用稳定的气溶胶发生器产生一定浓度和粒径分布的多分散气溶胶,用于空气过滤器过滤效率的测试。相比于大气尘计数法,因采用人为控制的方法发生气溶胶,所以在试验过程中其浓度和粒径分布较容易保持稳定。气溶胶计径计数法于上个世纪末和本世纪初开始在欧美等国家大量推广使用,ANSI/ASHRAE 52.2-1999^{[6]①}和EN 779:2002^[5]等标准中有相关规定。虽然ANSI/ASHRAE 52.2-1999和EN 779:2002都采用气溶胶计径计数法,但是两者的尘源和发生器均不相同。

1.2.1 两种气溶胶的性质

ANSI/ASHRAE 52.2-1999标准采用KCl固态气溶胶,EN 779:2002采用DEHS液态气溶胶,两种尘源的主要性质如表1所示。

表1 ANSI/ASHRAE 52.2-1999和EN 779:2002中试验用气溶胶的比较

	ANSI/ASHRAE 52.2-1999	EN 779:2002
气溶胶	KCl	DEHS
粒度特点	多分散固相粒子	多分散雾化液滴
发尘装置	大粒径气溶胶发生器	Laskin喷嘴
气溶胶发生方法	压缩空气雾化器	压缩空气雾化器
粒径范围	0.3~10.0 μm	0.2~3.0 μm
适用范围	能过滤粒径≤10.0 μm粒子的空气过滤器	对0.4 μm(0.3~0.5 μm)粒子的初始过滤效率≥40%且<98%的空气过滤器

1.2.2 大粒径气溶胶发生器

ANSI/ASHRAE 52.2标准推荐大粒径气溶胶发生器作为气溶胶发生器,如图3所示,它可生成粒径范围广的固态气溶胶。该气溶胶发生器的工作原理为:高压空气通过进口处的油水分离器和高效过滤器净化后,成为洁净空气;之后,高压空气

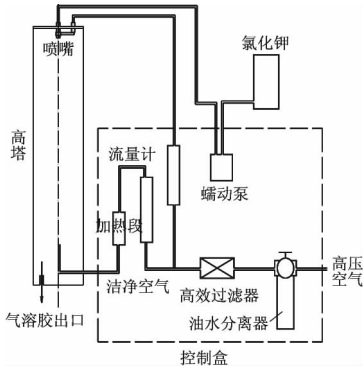


图3 大粒径气溶胶发生装置

① 国家标准《空气过滤器》的修订工作开始于2005年,因此参照的是1999年版的ANSI/ASHRAE 52.2,而非2007年版,两者关于尘源的规定相同。

一部分进入雾化喷嘴,作为雾化喷嘴的喷雾空气;另一部分经过加热器加热后进入高塔底部;溶液由溶液泵送至雾化喷嘴雾化后形成微小液滴,液滴从高塔顶部向下运动,与从高塔底部向上运动的干燥

热空气相遇,使液滴蒸发,形成固态的气溶胶。
表 2 给出了在采用不同质量分数的氯化钾溶液和不同的喷雾压力情况下,大粒径气溶胶发生器生成的氯化钾固态气溶胶的浓度及其粒径分布情况。

喷雾压力/ MPa		气溶胶浓度/(粒/(2.83 L))				气溶胶的粒径分布/%			
		≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥1.0 μm	≥5.0 μm	0.3~0.5 μm	0.5~1.0 μm	1.0~5.0 μm	≥5.0 μm
质量分数 2%的 氯化钾溶液	0.013	41 153	22 057	9 422	267	46.4	30.7	22.2	0.6
	0.017	67 750	35 906	16 486	1 097	47.0	28.7	22.7	1.6
	0.020	85 607	44 680	21 554	2 057	47.8	27.0	22.8	2.4
	0.023	120 532	61 726	28 782	2 121	48.8	27.3	22.1	1.8
	0.026	143 276	73 454	34 036	2 487	48.7	27.5	22.0	1.7
质量分数 5%的 氯化钾溶液	0.013	47 372	25 727	12 132	1 034	45.7	28.7	23.4	2.2
	0.017	105 627	58 164	26 553	1 129	44.9	29.9	24.1	1.1
	0.020	135 095	70 464	33 282	2 282	47.8	27.5	22.9	1.7
	0.023	176 130	92 433	43 944	2 977	47.5	27.5	23.3	1.7

从表中的数据可以看出,即使在不同的工况下,除了粒径范围≥5.0 μm 的粒子所占比例波动较大外,其他粒径范围内的粒子所占比例较稳定,说明大粒径气溶胶发生器生成的气溶胶的粒径分布较稳定。

1.2.3 Laskin 喷嘴喷雾发生器

EN 779:2002 推荐的气溶胶发生器为 Laskin 喷嘴喷雾发生器,图 4 所示为中国建筑科学研究院研制的 Laskin 喷嘴多分散气溶胶发生器,其发生原理就是让压缩空气以很高的速度从小管或孔口喷出,由于伯努利(Bernouli)效应在出口区域产生负压,液体被抽吸上来进入高速气流当中,碎裂、分散而形成粒径较小的气溶胶。该装置具有结构简单、应用方便等特点。

利用 Laskin 喷嘴喷雾发生器产生 DEHS 液

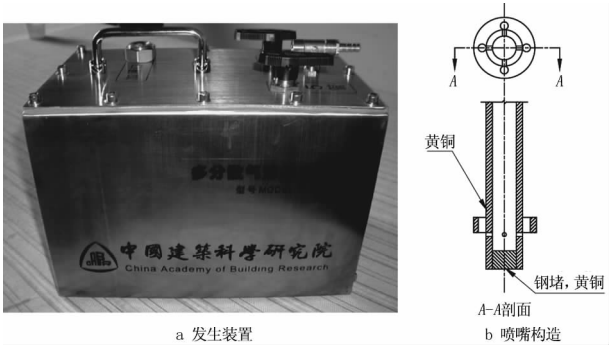


图 4 Laskin 喷嘴喷雾发生器

态气溶胶,在不同喷雾压力下得出气溶胶的浓度和粒径分布,如表 3 所示。表 3 数据表明,即使是在改变喷雾压力的情况下,生成的气溶胶的粒径分布也是稳定的。

喷雾压力/MPa		气溶胶浓度/(粒/(2.83 L))				气溶胶粒径分布/%			
		≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥1.0 μm	≥5.0 μm	0.3~0.5 μm	0.5~1.0 μm	1.0~5.0 μm	≥5.0 μm
0.005 0	47 529	24 835	9 234	91	47.7	32.8	19.2	0.2	
0.005 5	89 516	47 700	17 171	129	46.7	34.1	19.0	0.1	
0.006 0	131 323	69 921	24 448	143	46.8	34.6	18.5	0.1	
0.006 5	160 125	85 238	30 018	171	46.8	34.5	18.6	0.1	
0.007 0	190 841	102 263	35 351	202	46.4	35.1	18.4	0.1	

2 GB/T 14295—2008《空气过滤器》气溶胶计径计数法的来源

鉴于大气尘计数法的不可重复性和不确定性,2005 年,《空气过滤器》修订工作组在借鉴 ANSI/ASHRAE 52.2-1999 和 EN 779:2002 标准后,决定采用气溶胶计径计数法代替大气尘计数法,由于气溶胶的种类和性质是气溶胶计径计数法的关键,而气溶胶发生器的特性决定了气溶胶的种类和性质,因此选取合适的气溶胶种类及其发生器是标准

修订工作中重中之重。
2.1 气溶胶种类的确定
考虑空气过滤器(不包括高效过滤器)主要用于过滤悬浮在环境中粒径范围为 0.5~10.0 μm 的粒子。对表 3 中两种气溶胶进行了对比分析,可以发现:EN 779:2002 所采用的气溶胶的粒径范围(0.3~3.0 μm)未能充分反映空气过滤器作用对象的粒径特性,而 ANSI/ASHRAE 52.2 的试验用气溶胶粒径范围(0.3~10.0 μm)全面覆盖了作用

对象的粒径范围。

在大气尘中,固态粒子占多数,因此在空气过滤器的效率试验中,用固态粒子作尘源更接近实际使用情况,而且固态粒子可以更好地反映电荷对纤维过滤器效率的影响。同时,从空气过滤器过滤机理来看,部分粒子撞击到滤料上后会反弹,尤其是4.0~8.0 μm的大粒子,反弹较严重,使过滤器的效率降低。用固态粒子作试验尘源可以反映粒子反弹的影响,而液态粒子被捕集到纤维上时容易发生破损,不能反映粒子反弹对效率的影响。

综上所述,采用粒径范围较广的固态气溶胶(粒径范围0.5~10.0 μm)作为试验尘源用于空气过滤器的过滤效率试验更为合理。

表4 不同工况下生成的氯化钾粒子的浓度和粒径分布

	喷雾压力/ MPa	气溶胶浓度/(粒/(2.83 L))				气溶胶粒径分布/%			
		≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥1.0 μm	≥5.0 μm	0.3~0.5 μm	0.5~1.0 μm	1.0~5.0 μm	≥5.0 μm
质量分数2%的 氯化钾溶液	0.021	65 626	8 635	528	0	86.8	12.4	0.8	0.0
	0.027	103 407	11 489	572	0	88.9	10.6	0.6	0.0
	0.033	141 090	12 781	529	0	90.9	8.7	0.4	0.0
	0.036	173 813	15 569	610	0	91.0	8.6	0.4	0.0
质量分数5%的 氯化钾溶液	0.015	72 624	13 484	1 194	0	81.4	16.9	1.6	0.0
	0.016	106 799	18 512	1 463	0	82.7	16.0	1.4	0.0
	0.018	134 796	21 109	1 461	0	84.3	14.6	1.1	0.0
	0.020	170 764	22 865	1 341	0	86.6	12.6	0.8	0.0

从表4可以看出,在所试验的8种工况中,不仅未出现粒径≥5.0 μm的粒子,而且粒径≥1.0 μm的粒子也极少,最多仅占到1.6%。虽然可通过加热处理而产生固态粒子,但是表4中的数据明确说明了期望利用Laskin喷嘴喷雾发生器发生粒径范围广(0.5~10.0 μm)的气溶胶是难以行通的。

大粒径气溶胶发生器也采用喷雾发生的原理,虽然其构造较Laskin喷嘴复杂,但是在ANSI/ASHRAE 52.2-1999标准推荐使用后,经过多年的应用,其技术成熟,发尘稳定性好,因此标准修订工作组决定采用大粒径气溶胶发生器作为GB/T 14295—2008《空气过滤器》的多分散气溶胶发生器。通过大量的实验,标准修订工作组熟练地掌握了大粒径气溶胶发生器的发尘特性。

3 气溶胶计径计数法的应用及其优点

GB/T 14295—2008《空气过滤器》自2009年6月1日起开始实施,以氯化钾固态气溶胶为尘源的气溶胶计径计数法开始广泛地应用在我国空气过滤器过滤效率的测试试验中,笔者通过观察和应用,发现气溶胶计径计数法有两个优点。

2.2 气溶胶发生器的确定

鉴于Laskin喷嘴喷雾发生装置应用方便的特点,笔者对其发生粒径范围广的固态气溶胶的可行性进行了探讨。ANSI/ASHRAE 52.2采用氯化钾气溶胶,该物质不仅容易获得,而且对人体无毒无害,所以探讨试验也采用发生氯化钾气溶胶。具体过程为:分别用不同质量分数(2%和5%)的氯化钾溶液作为发生溶液,然后利用经过加热处理的洁净空气加热所发生的液态气溶胶,从而形成固态气溶胶;考虑到喷雾压力可能对所生成气溶胶的性质产生影响,在气溶胶发生过程中,还通过改变喷雾压力,考察气溶胶性质的变化情况。不同工况下生成的氯化钾粒子的浓度和粒径分布情况见表4。

3.1 试验时间短

按照GB/T 14295—2008的要求,进行空气过滤器效率试验时,受试样品上游和下游采样各需要10组有效值(计数浓度),每组采样时间一般为1 min。由于气溶胶计径计数法的尘源稳定,完成一个样品的过滤效率测试所需时间仅约为25~30 min(该时间为采用1台粒子计数器进行试验的时间,如果试验过程采用2台粒子计数器,则测试时间能减半)。如果采用大气尘计数法,为了获得稳定的计数浓度,整个试验可能需要持续1 h或者更长时间。采用气溶胶计径计数法能明显缩短试验时间,提高工作效率。

3.2 测试统一性

由于气溶胶计径计数法采用人为控制的方法发生气溶胶,容易保证试验尘源特性的稳定性和一致性,因此不仅可以避免同一样品在不同时间或者不同测试地点的测试结果不一致,而且不同工况下的测试结果也有可比性,空气过滤器效率测试有了统一的标准作为依据。

4 结论

(上接第 11 页)

4.1 由于大气尘的不稳定性,用气溶胶计径计数法代替大气尘计数法是空气过滤器过滤效率测试技术发展的必然。

4.2 与液态气溶胶相比,粒径范围广的固态气溶胶用于空气过滤器过滤效率试验更为合适,GB/T 14295—2008《空气过滤器》中采用大粒径气溶胶发生器发生氯化钾固态气溶胶作为试验尘源。

4.3 通过 GB/T 14295—2008《空气过滤器》中气溶胶计径计数法的应用情况来看,该方法具有缩短试验时间和统一测试标准等优点。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. GB/T 14295—93 空气过滤器[S]. 北京:中国标准出版社,1993
- [2] 中国建筑科学研究院空气调节研究所. JG/T 22—

1999 一般通风用空气过滤器性能试验方法 [S]. 北京:中国标准出版社,1999

- [3] 中国建筑科学研究院,北京工业大学,河南省米净瑞发净化设备有限公司,等. GB/T 14295—2008 空气过滤器[S]. 北京:中国标准出版社,2009
- [4] 许钟麟. 洁净室及其受控环境设计[M]. 北京:化学工业出版社,2008:10—12
- [5] 安爱明,王智超. 大气尘检测空气过滤器效率不确定因素的分析[J]. 洁净与空调技术,2008(2):1—6
- [6] ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 52. 2-1999 Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size[S], 1999
- [7] CEN. EN 779: 2002 Particulate air filters for general ventilation—determination of the filtration performances[S], 2002