

空气过滤器能效分级适用性探讨

同济大学 包必超[☆] 廖明月 林忠平[△]

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 张晓磊

摘要 根据 EN 779 标准对 16 只不同过滤级别的空气过滤器样品进行了性能试验,依据 EUROVENT 4/11 的能效分级方法对受试空气过滤器进行了能效分级。试验数据分析结果表明,该分级标准对于部分类型(F 级)过滤器的平均阻力范围选取过小,不能准确反映过滤器在实际应用过程中的能耗差异。提出应以 2 倍初阻力作为计算终阻力,同时建议采用单位容尘量平均能耗作为过滤器能效评价标准。

关键词 能效分级 空气过滤器 适用性 能效评价 单位容尘量平均能耗

Applicability discussion on energy efficiency classification of air filters

By Bao Bichao[★], Liao Mingyue, Lin Zhongping and Zhang Xiaolei

Abstract Tests the filtration performance of sixteen air filters with different filtration classification based on EN 779 standard and classifies their energy efficiency classification according to the method stipulated by EUROVENT 4/11 standard. Analysis results of the testing data indicate that the limited range of average pressure drop for fine filters suggested in EUROVENT 4/11 standard could not accurately reflect the actual energy consumption difference of the filters. Suggests that two times initial filter pressure drop should be taken as the final pressure drop to calculate average pressure drop and energy efficiency classification should be based on average energy consumption per unit dust holding capacity.

Keywords energy efficiency classification, air filter, applicability, energy efficiency evaluation, average energy consumption per unit dust holding capacity

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

我国建筑能耗占社会总能耗的比例约为 21%~24%,而目前发达国家的建筑能耗占总能耗的近 1/3。暖通空调设备作为公共建筑领域广泛使用的重要设备,其能耗约占建筑总耗电量的 50%~60%^[1]。而在暖通空调设备的能耗中,风机的能耗占很大比例,欧洲通风协会 EUROVENT 的分析结果显示,风机能耗占空调机组能耗的 50%^[2]。风机克服的阻力中很大一部分来自空气过滤器,统计表明空调机组中过滤器的能耗占总风机能耗的 10%~30%^[3]。另一方面,我国的大气污染日益严重,根据国家环境保护部发布的权威消息,2013 年全国 95.9%的重点大中城市细颗粒物(PM_{2.5})严重超标^[4]。室外污染的加剧使得空气过滤器在集中空调系统及空气净化器中的应用受到了更多的关注。因此,空气过滤器在使用期间的

能耗不容忽视。

不同国家、组织颁布了相关的过滤器标准对空气过滤器进行评价与分级。过滤器的阻力作为过滤器的一个重要性能指标并没有得到足够的重视,如欧洲标准 EN 779:2012^[5] 及美国标准 ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007^[6] 的过滤器分级依据是过滤效率,对阻力没有明确要求;我国的 GB/T 14295—2008《空气过滤器》^[7] 以大于 0.5 μm 或 2 μm 粒子的初始分组效率(或计重效率)作

①☆ 包必超,男,1988 年 4 月生,在读硕士研究生

△ 林忠平(通信作者)

201804 上海市曹安公路 4800 号同济大学机械与能源工程学院暖通空调研究所

(021) 65984228

E-mail: zplin99@tongji.edu.cn

收稿日期:2014-03-11

一次修回:2014-04-03

二次修回:2014-05-04

为分级依据,对过滤器只有初阻力上限要求,如中效过滤器在其额定风量下初阻力不得大于 80 Pa。为评价过滤器的能效,欧洲通风协会于 2011 年发布了基于 EN 779 标准的过滤器能效评价标准 EUROVENT 4/11^[8]。本文根据 EUROVENT 4/11 的能效分级方法对 16 只受试空气过滤器进行能效分级评价,并讨论该能效分级方法的适用性,为我国相关标准的制定提供参考。

1 EUROVENT 4/11 一般通风用过滤器能效分级

1.1 空气过滤器能耗

空气过滤器的能耗可以定义为运行风量、风机效率、运行平均压降、运行时间的函数,可用式(1)计算:

$$W = \frac{q_v \Delta \bar{p} t}{1\,000 \eta} \quad (1)$$

式中 M_x 为规定量的 ASHRAE 负荷尘,用以模拟过滤器运行 1 a 的情况。该粉尘量因效率分组 x ($x=G,M,F$) 而异,G 级(粗效)过滤器取 $M_G=350$ g,M 级过滤器取 $M_M=250$ g,F 级过滤器取 $M_F=100$ g。若过滤器的喂尘量(根据 EN 779 标准,过滤器达到终阻力时的容尘量)低于 M_x ,则该过滤器

被定为能效 G 级,分级过程终止。

式(1)中 W 为过滤器的能耗; q_v 为通过过滤器的体积风量; $\Delta \bar{p}$ 为过滤器在特定容尘量下的平均阻力; t 为过滤器的使用时间; η 为风机的运行效率(包括电动机效率)。

一般通风空调系统常采用变频风机,通过改变风机转速保证空调机组的风量不变,因此假定体积风量 q_v 为 3 400 m³/h。一般空调机组的风机的平均效率(包括电动机效率) η 为 0.50,风机一年的运行时间 t 取 6 000 h。根据 EN 779 标准对过滤器在额定风量下进行容尘试验,采用多项式 $\Delta p = am^4 + bm^3 + cm^2 + dm + \Delta p_i$ 拟合阻力曲线,并计算出相应的多项式系数 a,b,c,d 。其中 Δp 为过滤器阻力; m 为积尘量; Δp_i 为过滤器在额定风量下的初阻力。根据下式计算过滤器的平均阻力:

$$\Delta \bar{p} = \frac{1}{M_x} \int_0^{M_x} \Delta p dm = \frac{1}{5} a M_x^4 + \frac{1}{4} b M_x^3 + \frac{1}{3} c M_x^2 + \frac{1}{2} d M_x + \Delta p_i \quad (2)$$

器被定为能效 G 级,分级过程终止。

1.2 空气过滤器能效分级

利用式(1)计算过滤器的能耗 W ,根据 EN 779 标准给出的过滤器能效分级方法,按表 1 对过滤器的能效进行分级。

2 能效分级试验

表 1 EUROVENT 4/11 一般通风用空气过滤器能效分级

能效分级	kW·h					
	G4	M5	M6	F7	F8	F9
	$M_x=350$ g	$M_x=250$ g			$M_x=100$ g	
A	0~600	0~650	0~800	0~1 200	0~1 600	0~2 000
B	>600~700	>650~780	>800~950	>1 200~1 450	>1 600~1 950	>2 000~2 500
C	>700~800	>780~910	>950~1 100	>1 450~1 700	>1 950~2 300	>2 500~3 000
D	>800~900	>910~1 040	>1 100~1 250	>1 700~1 950	>2 300~2 650	>3 000~3 500
E	>900~1 000	>1 040~1 170	>1 250~1 400	>1 950~2 200	>2 650~3 000	>3 500~4 000
F	>1 000~1 100	>1 170~1 300	>1 400~1 550	>2 200~2 450	>3 000~3 350	>4 000~4 500
G	>1 100	>1 300	>1 550	>2 450	>3 350	>4 500

根据 EN 779 标准对 16 只不同过滤级别的空气过滤器样品进行空气过滤器性能试验,并根据能效分级方法对受试空气过滤器进行能效分级评价,根据试验结果进行数据分析并讨论空气过滤器的能效评价结果。

2.1 试验台简介

试验台按照欧洲过滤器测试标准(EN 779)及中国制冷空调工业协会标准(CRAA 432)的要求搭建,如图 1 所示。该试验台主要由以下结构部件组成:空气入口过滤器和消声弯头、变频风机箱、喷嘴流量计组(标准件)、高效空气过滤器、混合室、气

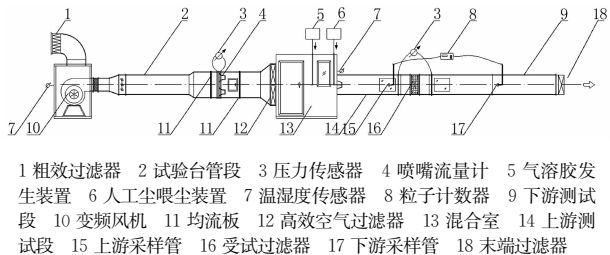


图 1 过滤器性能试验装置

溶胶发生装置、人工尘喂尘装置、压力传感器、温湿度传感器及风管等。

2.2 试验样品

测试使用 ASHRAE 人工尘。考虑到过滤器检测的普适性和多样性,通过对一般通风空调用过滤器的市场调研,选取若干主流生产企业的空气过滤器样品(见表 2)。其中,2#,4#与 3#,5#样品的滤料分别来自两家不同的供应商。

表 2 空气过滤器样品

厂家	过滤器编号	滤料	级别	过滤器型式
甲	1#	玻璃纤维	M6	V 型密褶式
	2#	玻璃纤维	F7	V 型密褶式
	3#	玻璃纤维	F7	V 型密褶式
	4#	玻璃纤维	F9	V 型密褶式
	5#	玻璃纤维	F9	V 型密褶式
乙	6#	化学纤维	G4	袋式
	7#	玻璃纤维	M5	袋式
	8#	玻璃纤维	M6	袋式
	9#	化学纤维	F7	袋式
	10#	玻璃纤维	F7	袋式
丙	11#	化学纤维	G4	袋式
	12#	化学纤维	M5	袋式
	13#	化学纤维	F7	袋式
丁	14#	化学纤维	G4	板式
	15#	化学纤维	M6	袋式
	16#	玻璃纤维	M6	袋式

2.3 试验方法

按照 EN 779 标准对空气过滤器样品进行测试,对于 M 及 F 级过滤器,首先进行初阻力及额定风量(3 400 m³/h)下 0.4 μm 粒子的 DEHS(癸二酸二辛酯)初始效率测试,通过光学粒子计数器进行 13 次上下游切换采样并计算过滤效率。其次进行过滤器容尘试验,ASHRAE 人工尘的喂尘浓度为 70 mg/m³。发生过程中过滤器阻力会不断上升,通过调节风机频率使过滤器容尘过程中试验风量保持不变。初次发生量为 30 g,记录过滤器的计重效率、阻力和对 0.4 μm 粒子的 DEHS 计数效率。分阶段(至少 4 次)发生直至终阻力达到 450 Pa,试验结束。每个阶段都需记录过滤器的计重效率、阻力及计数效率,其中对 0.4 μm 粒子的 DEHS 计数效率在每个容尘阶段结束后进行测试。G 级过滤器无需测试计数效率,且容尘阶段的终阻力为 250 Pa,其余过程与 M 及 F 级过滤器测试过程相同。

2.4 试验结果及分析

利用式(1)对试验空气过滤器样品进行能效分级,结果见表 3。

表 3 试验空气过滤器能效分级结果

编号	过滤级别	M_x/g	容尘量/g	$\Delta p_i/Pa$	$\Delta \bar{p}/Pa$	$W/(kW \cdot h)$	能效分级
14#	G4	350	121.0				G
11#	G4	350	639.0	46	75.79	858.58	D
6#	G4	350	522.0	35	80.94	916.87	E
7#	M5	250	586.0	52	83.50	945.94	D
12#	M5	250	821.0	84	122.32	1 385.59	G
8#	M6	250	521.0	56	103.54	1 172.87	D
1#	M6	250	429.1	81	114.57	1 297.88	E
15#	M6	250	321.0	72	139.43	1 579.45	G
16#	M6	250	265.8	78	183.83	2 082.41	G
9#	F7	100	382.0	70	90.34	1 023.37	A
10#	F7	100	470.0	100	104.35	1 182.03	A
2#	F7	100	490.9	91	96.09	1 088.56	A
3#	F7	100	521.0	85	95.69	1 084.00	A
13#	F7	100	556.7	93	99.77	1 130.16	A
4#	F9	100	361.8	181	193.80	2 195.35	B
5#	F9	100	259.0	117	153.19	1 735.38	A

2.4.1 F 级过滤器能效分级分析

图 2 为 F 级空气过滤器的容尘阻力曲线。根据能效评级,4#与 5#过滤器的能效级别分别为 B 与 A。4#过滤器的初阻力为 181 Pa,大于 5#过滤器的初阻力 117 Pa,但其阻力增长明显慢于 5#过滤器,因此,若过滤器计算终阻力继续上升至某一值时,2 只过滤器的平均阻力相同,能效评级也相同。同时,实际应用中空气过滤器更换时的终阻力通常为初阻力的 2 倍,从图 2 可知,当其容尘

量为 100 g 时,两过滤器的阻力都低于其 2 倍初阻力。因此,评级方法中的计算终阻力选取偏小。

2#,3#,9#,10#,13#过滤器(F7 级)的初阻力分别为 91,85,70,100,93 Pa,阻力为 450 Pa 时的容尘量分别为 490.9,521.0,382.0,470.0,556.7 g,说明其容尘性能有一定的差异。而由表 3 可以看出,这 5 只过滤器的能效级别均为 A 级(0~1 200 kW·h)。从图 2 可以看出,在 0~100 g 的容尘区间内,5 只 F7 级过滤器的阻力和容尘

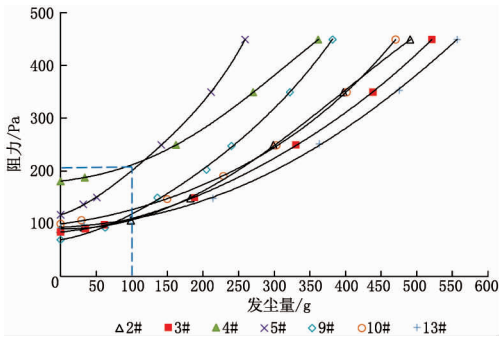


图 2 F 级空气过滤器容尘阻力曲线

表 4 F7 级过滤器容尘 100 g 时的阻力上升

编号	过滤级别	初始阻力/Pa	容尘 100 g 时阻力/Pa	平均阻力 $\Delta\bar{p}$ /Pa	阻力上升/Pa	上升比/%
2 #	F7	91	107.77	96.09	16.77	18.43
3 #	F7	85	110.51	95.69	25.51	30.01
9 #	F7	70	118.65	90.34	48.65	69.50
10 #	F7	100	112.09	104.35	12.09	12.09
13 #	F7	93	109.26	99.77	16.26	17.48

滤器的能效并不能完全反映其能效,平均阻力的取值区间过小。

2.4.2 M 级过滤器能效分级分析

图 3 为 M 级空气过滤器的容尘阻力曲线。从表 3 可以看出,1 #,8 #空气过滤器的能效评级高于

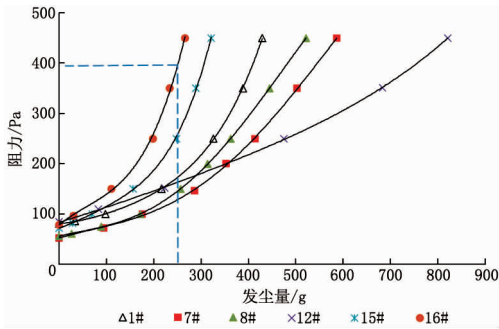


图 3 M 级空气过滤器容尘阻力曲线

15 #,16 #空气过滤器。由于 1 #,8 #空气过滤器的容尘量远大于 15 #,16 #空气过滤器,且 M6 级过滤器的平均压降是按照容尘 250 g 的阻力性能曲线近似积分计算得到的,所以容尘量小的空气过滤器的阻力上升幅度比容尘量大的空气过滤器要大,即平均阻力大于容尘量大的空气过滤器,说明该能效分级方法对 M 级过滤器的评价有一定作用,能够较为准确地反映过滤器在实际使用寿命期间的能效。

2.4.3 G 级过滤器能效分级分析

图 4 为 G 级空气过滤器的容尘阻力曲线。14 #空气过滤器是板式过滤器,其过滤面积相比袋式和 V 型密褶式小,所以即使具有相同的单位面

量的曲线差别不大,但当容尘量超出这个区间时,容尘阻力曲线出现显著不同。

从表 4 可以看出,在容尘 100 g 时,除了 9 #空气过滤器,其他 4 只空气过滤器的阻力上升幅度很小。5 只过滤器的阻力均在 110 Pa 左右,可以认为处于空气过滤器寿命周期的初期,用这一段的平均压降来计算空气过滤器的能效分级并不能完全反映其实际能效。

以上分析表明,对于 F 级过滤器,用容尘开始到容尘 100 g 这个区间的平均压降来计算空气过

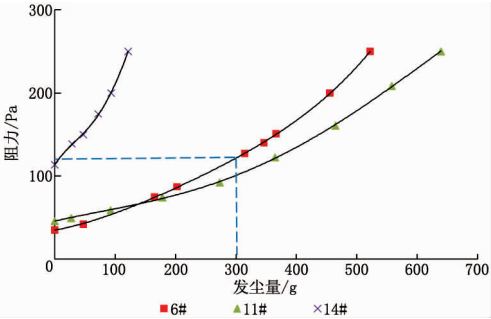


图 4 G 级空气过滤器容尘阻力曲线

积容尘量,也会导致容尘量小很多。欧洲通风协会标准考虑了这一情况并规定:若过滤器的喂尘量低于 M_x ,则过滤器被定为能效 G 级。

6 #,11 #均为袋式过滤器,滤料面积大,故容尘量比板式过滤器大,在容尘 350 g 时的阻力也大致是初阻力的 2 倍。2 只过滤器的能效等级分别为 E 和 D,说明能效分级对 G 级过滤器的容尘阻力特性具有一定的评价作用。

2.5 能效分级讨论

根据试验结果与分析可知,该能效评价标准虽然在一定程度上能够评价空气过滤器的能效,但对于 F 级过滤器,其计算的平均阻力范围过小。实际应用中空气过滤器更换时的终阻力通常为初阻力的 2 倍,因此可以考虑采用空气过滤器阻力为初阻力的 2 倍时的容尘量作为计算平均阻力的依据 (M_x),分别计算相应终阻力下的容尘量、平均阻力及能效分级(依据 EUROVENT 4/11),计算结果见表 5。

表 5 终阻力为初阻力 2 倍时的能效分级

编号	过滤级别	$\Delta p_i/\text{Pa}$	终阻力/ Pa	容尘量/ g	$\Delta \bar{p}/\text{Pa}$	$W/(\text{kW} \cdot \text{h})$	能效分级	原能效分级	单位容尘量平均能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{g}$)
14 #	G4	114	228	110.4	162.62	1 842.21	G	G	16.7
11 #	G4	46	92	266.5	67.03	759.37	C	D	2.8
6 #	G4	35	70	151.2	50.35	570.42	A	E	3.8
7 #	M5	52	104	202.0	76.24	863.70	C	D	4.3
12 #	M5	84	168	263.4	124.52	1 410.60	G	G	5.4
8 #	M6	56	112	192.0	78.28	886.70	B	D	4.6
1 #	M6	81	162	234.8	111.16	1 259.18	E	E	5.4
15 #	M6	72	144	147.0	103.61	1 173.68	D	G	8.0
16 #	M6	78	156	117.8	114.85	1 301.02	E	G	11.0
9 #	F7	70	140	128.5	98.93	1 120.68	A	A	8.7
10 #	F7	100	200	299.6	133.62	1 513.68	C	A	5.1
2 #	F7	91	182	225.0	120.60	1 366.21	B	A	6.1
3 #	F7	85	170	221.0	118.93	1 347.22	B	A	6.1
13 #	F7	93	186	277.0	126.73	1 435.57	B	A	5.2
4 #	F9	181	362	281.9	247.94	2 808.64	C	B	10.0
5 #	F9	117	234	128.9	167.56	1 898.14	A	A	14.7

EUROVENT 4/11 中的过滤器能效分级是以指定容尘量,即在处理相同的粉尘量的基础上进行对比确定的。由表 5 可知,当达到 2 倍初阻力时各过滤器的容尘量并不相同。因此,能效分级不仅应反映过滤器在实际使用周期内的能耗,同时也应考虑粉尘处理能力。表 5 中空气过滤器的单位容尘量平均能耗是以过滤器 2 倍初阻力作为计算终阻力得出的,等于按 EUROVENT 4/11 计算方法计算得到的能耗除以 2 倍初阻力时的容尘量,能更好地反映过滤器的实际能效。

3 结语

通过对 16 只不同级别的过滤器样品的试验分析,探讨了 EUROVENT 4/11 能效分级标准的适用性。对试验结果的分析发现,该标准对部分过滤器来说平均阻力范围选取偏小,不能准确反映各过滤器的实际能耗差异。对于国内相关标准的制定,建议采用 2 倍初阻力或根据空气过滤器的级别设置科学合理的终阻力。为了体现空气过滤器寿命周期内的能效,也更有利于在同一使用条件下比较各过滤器的性能,推荐在合理的终阻力的前提下,使用单位容尘量平均能耗作为能效评价标准。

参考文献:

[1] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调,2005,35(5):30-40

[2] EUROVENT. Document 6/8 Recommendations for calculations of energy consumption for air handling units[R]. Paris: EUROVENT, 2005

[3] 梅洁,袁旭东. 变风量空调系统中过滤器的能耗计算[J]. 能源技术,2004,25(1):31-33

[4] 财新网. 2013 年中国 95.9% 大中城市 PM2.5 严重超标[EB/OL]. (2014-03-26). [http:// china.caixin.com/2014-03-26/100656716.html](http://china.caixin.com/2014-03-26/100656716.html)

[5] BSI. BS EN 779:2012 Particulate air filters for general ventilation—determination of the filtration performance[S]. Brussels: CEN, 2012

[6] ASHRAE. ANSI/ASHRAE 52.2-2007 Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size [S]. Atlanta: ASHRAE, 2007

[7] 中国建筑科学研究院. GB/T 14295—2008 空气过滤器[S]. 北京:中国标准出版社,2009

[8] EUROVENT. EUROVENT 4/11 Energy efficiency classification of air filters for general ventilation purposes[S]. Paris: EUROVENT, 2011