

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.015



# 风机盘管加新风系统室内 PM<sub>2.5</sub> 污染控制

樊越胜<sup>1</sup>, 谢伟<sup>1</sup>, 余俊伟<sup>1</sup>, 司鹏飞<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国建筑西南设计研究院, 成都 610042)

**摘要:**在对民用建筑通风系统常用过滤器滤料性能测试基础上,建立了常规风机盘管加新风系统空调房间室内颗粒物浓度集总参数模型,讨论了回风过滤段和新风过滤段过滤器效率的设计选型方法。以西安市某空调系统为例,为满足室内 PM<sub>2.5</sub> 污染控制标准,基于室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度“不保证 10 d”取值计算,结果表明,余压为 50~80 Pa 的机组回风过滤器效率选用 G3、G4 型过滤器,余压为 30~50 Pa 的机组回风过滤器效率选用初效 G2、G3 型过滤器,同时,室内设置等效过滤效率的空气净化器,新风选用初效 G4 加中效 F7 或 F8 两级过滤。

**关键词:**新风系统; 风机盘管; PM<sub>2.5</sub>; 空气过滤器

**中图分类号:**X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0111-06

## Pollution control of indoor PM<sub>2.5</sub> of fan coil unit and fresh air system

Fan Yuesheng<sup>1</sup>, Xie Wei<sup>1</sup>, Yu Junwei<sup>1</sup>, Si Pengfei<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. China Southwest Architecture Design Institute, Chengdu 610042, P. R. China)

**Abstract:** A theoretical and experimental measurement analysis on air filter of fan coil unit and fresh air system was conducted through establishing a mass balance equation. In this paper, a certain building in Xi'an is taken as an example, the outdoor PM<sub>2.5</sub> concentration is calculated based on “no assurance of 10 days”. The results show that the synthetic fiber of G3 or G4 air filter can be used in return air of FCU when the fan pressure is 50-80pa, and the G2 or G3 air filter can be used when the pressure is 30-50pa. Meanwhile, G4 and F7 or F8 two-stage filtration can be used in fresh air system when equivalent filtration efficiency air purifier should be installed.

**Keywords:** primary air system; FCU; PM<sub>2.5</sub>; air filter

室内颗粒物污染日益引起人们重视。其中, PM<sub>2.5</sub>(空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )是影响人体健康的重要污染物,由于粒径小,能够进入机体更深处;比表面积大,携带更多有毒有害物质,对人体健

康更具有危害性<sup>[1-5]</sup>。

文献[6-8]通过建立一次回风空调系统室内颗粒物浓度平衡方程,分析了集中空调系统过滤器选型计算方法,但其控制粒径是 PM<sub>10</sub>,未涉及到目前

收稿日期:2016-11-29

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700503)

作者简介:樊越胜(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事室内通风与颗粒物污染控制,(E-mail)fanyuesheng@xaunt.edu.cn。

Received:2016-11-29

Foundation item:13<sup>th</sup> Five-Year Key Project (No.2016YFC0700503)

Author brief:Fan Yuesheng (1965-), professor, doctoral supervisor, main research interests: indoor ventilation and particulate contamination control, (E-mail) fanyuesheng@xaunt.edu.cn.

人们更加关注的可入肺颗粒物 PM<sub>2.5</sub>。

风机盘管系统因其占有空间小、便于调节等优点得到广泛应用。由于风机余压的限制,常规过滤器效率配置不能太高。虽然,静电过滤器有效率稳定、阻力低、方便冲洗等优点,但盲目使用会导致室内臭氧浓度超标,产生二次污染等问题。由于中国室内外 PM<sub>2.5</sub> 污染严重,对于半集中式空调系统室内 PM<sub>2.5</sub> 污染控制亟待解决。

本文在常规过滤器滤料性能测试的基础上,通过建立风机盘管加新风系统室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度平衡方程,对半集中式空调系统室内 PM<sub>2.5</sub> 的控制策略进行探讨。

### 1 风机盘管系统室内颗粒物浓度模型

图 1 为常规风机盘管加新风空调系统物理模型。

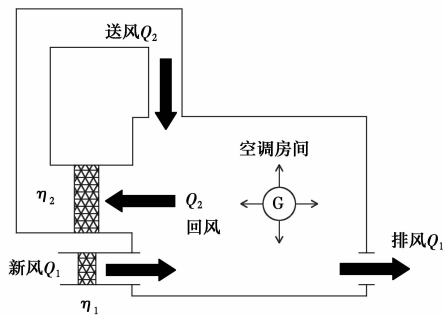


图 1 空调系统物理模型

Fig. 1 Physical model of air conditioning system

建立室内颗粒物浓度集总参数模型,如式(1)所示。

$$Q_2(1-\eta_2) \cdot C + Q_1(1-\eta_1) \cdot C_w + GV - KVC - Q_2 \cdot C - Q_1 \cdot C = 0 \quad (1)$$

式中:V为室内体积,m<sup>3</sup>;Q<sub>1</sub>为新风量,m<sup>3</sup>/h;Q<sub>2</sub>为回风量,m<sup>3</sup>/h;η<sub>1</sub>为新风过滤器计重效率;η<sub>2</sub>为回风过滤器计重效率;C<sub>w</sub>为室外颗粒物浓度,mg/m<sup>3</sup>;K为颗粒物沉降率,1/h;G为室内单位体积发尘量,mg/(h·m<sup>3</sup>);C为室内颗粒物的浓度,mg/m<sup>3</sup>。

计算新风过滤效率,如式(2)所示。

$$\eta_1 = 1 - \frac{C \cdot [S + (1-S) \cdot \eta_2 + \frac{K}{N}] - \frac{G}{N}}{S \cdot C_w} \quad (2)$$

式中:Q为总风量,m<sup>3</sup>/h;S为新风比,S=Q<sub>1</sub>/Q;N为换气次数,1/h。

### 2 常规滤料的过滤性能测试

《一般通风用空气过滤器性能试验方法》(JG/T 22—1999)<sup>[9]</sup>给出了一般通风空调系统过滤器粒子的计数计径法。对于室内控制标准,《建筑通风效果

测试与评价标准》(JGJ/T 309—2013)<sup>[10]</sup>要求室内 PM<sub>2.5</sub> 的日平均浓度宜小于 75 μg/m<sup>3</sup>。这与过滤器标准中所要求的粒径范围不一致,造成设计人员无法选择过滤器。

鉴于此,通过对民用建筑常用过滤器滤料性能进行测试,分析各滤料对 PM<sub>2.5</sub> 的计重效率,以方便设计选型。

测试选取某品牌过滤效率等级为 G1~F9 的滤料,所测试滤料的材质及技术性能参数如表 1 所示。

表 1 过滤器材质及技术性能

Table 1 Material and technical performance of air filter

级别	材质	滤料厚度/ mm	额定风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	耐温/°C
G1	聚酯	10	2.0	100
G2	波纹铝网	10	2.0	300
G3	合成纤维	15	2.0	100
G4	合成纤维	15	2.0	100
M5	合成纤维	25	0.6	100
M6	合成纤维	25	0.6	100
F7	合成纤维	30	0.3	100
F8	合成纤维	30	0.3	100
F9	合成纤维	30	0.3	100

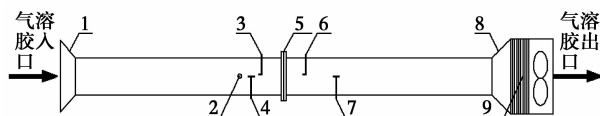
#### 2.1 常用过滤器滤料性能测试

实验装置的风管长度及采样点参考文献[9]对过滤器性能试验装置的风道系统构造及尺寸要求制作,图 2 为测试装置示意图。

1)主体风道采用内壁光滑的 UPVC 管材制作而成,共分为两段,直径为 φ160 mm;

2)实验尘源采用大气尘,其中包含的 3 种物料的成分配比关系为:道路尘,72%;炭黑,23%;短纤维,5%。

3)实验仪器采用 GRIMM1. 109 便携式气溶胶光谱仪测试过滤器前后 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度,粒径范围 0. 25~32 μm,重现性 5%;TSI8375 型微压计测试过滤器阻力,测试范围-3 735~+3 735 Pa,分辨率 0. 1 Pa;TSI 8386 型风速仪测试风速,测试范围 0~30 m/s,分辨率 0. 01 m/s。每 10 min 采集 1 组数据,测试结果采用平均值计算。



注: 1.入口, 2.风速测点, 3.上游静压测头; 4.上游PM<sub>2.5</sub>采集孔; 5.滤料; 6.下游静压测头; 7.下游PM<sub>2.5</sub>采集孔; 8.渐扩管; 9.软接

图 2 过滤器性能测试装置示意图

Fig. 2 Filter performance testing device

测试时间为2015年6月—7月,实验采样在室内完成。为保证测试数据的可比性,室外气象状态稳定,测试时室内温度26~33℃,湿度55%~73%,风速0.3~0.8 m/s。室内2名测试人员,无

其他室内尘源。

## 2.2 测试结果

测试不同过滤风速下滤料对PM2.5的计重效率和阻力,如表2所示。

表2 过滤器性能测试结果

Table 2 Test results of air filter efficiency performance

类别	级别	过滤风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	EN779 标准过滤效率分级		过滤粒径	实验测试	
			人工尘计重效率 A <sub>m</sub>	对 0.4 μm 粒子的计数效率 A <sub>m</sub>		过滤效率/%	初阻力/Pa
初效	G1	1.5~2.5	50% ≤ A <sub>m</sub> < 65%		PM2.5	0~2.1	2.0~8.3
	G2		65% ≤ A <sub>m</sub> < 80%			1.3~7.4	6.2~18.5
	G3		80% ≤ A <sub>m</sub> < 90%			5.6~15.0	13.3~26.0
	G4		90% ≤ A <sub>m</sub>			8.3~26.5	15.0~33.6
中效	M5	0.4~1.0	40% ≤ A <sub>m</sub> < 60%		PM2.5	11.7~30.2	20.3~35.5
	M6		60% ≤ A <sub>m</sub> < 80%			19.0~32.4	26.7~38.2
高中效	F7	0.2~0.5	80% ≤ A <sub>m</sub> < 90%		PM2.5	25.0~43.2	36.3~45.6
	F8		90% ≤ A <sub>m</sub> < 95%			34.6~62.5	40.2~63.5
	F9		95% ≤ A <sub>m</sub>			42.3~67.3	50.6~78.6

## 2.3 数据分析

实验PM2.5过滤效率峰值与滤速关系,如表3所示。

表3 过滤效率峰值与滤速的关系

Table 3 Relationship between peak efficiency and speed

级别	参数	
	效率峰值/%	滤速/(m·s <sup>-1</sup> )
G1	2.1	1.65
G2	7.4	1.87
G3	15.0	1.85
G4	26.5	1.72
M5	30.2	0.75

对比可知,G1~G4滤料过滤效率峰值所对应的滤速小于额定风速,建议应用该级别范围滤料时,减小滤速至1.7~1.9 m/s,以提高其过滤效率;而M5级别的滤料过滤效率峰值对应的滤速大于额定风速,建议应用该滤料时,在阻力满足要求的情况下,可以适当增大滤速至0.75 m/s。

M6~F9滤料的PM2.5过滤效率随着滤速的增大而减小,可能是由于实验中的过滤风速处在扩散领域,随着滤速的增加,扩散效应减弱,从而导致其过滤效率降低。

## 3 PM2.5 污染控制

### 3.1 室内PM2.5控制标准

国家环保部发布的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)<sup>[11]</sup>规定,居民区PM2.5的年平均浓度

不得超过35 μg/m<sup>3</sup>,PM2.5的24 h平均浓度不得超过75 μg/m<sup>3</sup>。表4统计了一些国家PM2.5的室内控制标准。

表4 室内PM2.5控制标准

Table 4 Indoor PM2.5 control standards μg/m<sup>3</sup>

目标污染物	中国	美国	欧洲	加拿大
PM2.5	75[24 h]	15[1 a]	10[1 a]	100[1 h]
		65[24 h]	25[24 h]	40[L]

注:(Ventilation for acceptable indoor air quality)(ANSI/ASHRAE 62.1—2013)

室外大气颗粒物污染加剧了室内PM2.5污染,文献[12]测试表明,室内PM2.5计重浓度占PM10的比重高达88%,说明室内颗粒物浓度主要由细颗粒物贡献。针对中国PM2.5的高污染趋势,应尽快制定室内PM2.5控制标准。

### 3.2 FCU 回风过滤器效率

3.2.1 过滤器控制 高静压机组,指在额定风量时出口静压不小于30 Pa的机组<sup>[13]</sup>。由于出风静压值较大,回风可设置过滤系统。

由式(2)可知,当 $\eta_1 \leq 1$ 时,新风过滤器取值有效。

$$C \cdot \left( S + (1 - S)\eta_2 + \frac{K}{N} \right) \geq \frac{G}{N} \quad (3)$$

即:  $\eta_2 \geq \frac{G - (K + SN)C}{(1 - S)NC}$

3.2.2 过滤器+净化器控制 当计算结果不满足式(3)时,为使新风过滤器效率取值有效,室内应加装空气净化器,计算如式(4)所示。

$$C \cdot \left( S + (1-S)\eta_2 + \frac{K}{N} + \frac{Q_1\eta'}{NV} \right) \geq \frac{G}{N} \quad (4)$$

式中:  $Q_1$  为室内净化器循环风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\eta'$  为净化器过滤效率, %; 净化器的洁净空气量  $\text{CADR} = Q_1\eta'$ 。

3.2.3 过滤器选型分析 为防止过滤器系统阻力增加而造成风量衰减, 过滤器的阻力应按终阻力计算。过滤器终阻力按初始阻力的 2 倍计算<sup>[14]</sup>。

设定风机盘管风口、风管的阻力为  $\Delta P_1$ , 过滤器的初阻力为  $\Delta P_2$ , 终阻力为  $2\Delta P_2$ , 风机盘管余压为  $\Delta P_3$ 。过滤器的阻力可根据式(5)计算。

$$\Delta P_1 + \frac{\Delta P_2 + 2\Delta P_2}{2} \leq \Delta P_3 \quad (5)$$

风机盘管一般选用中档转速下的风量作为额定风量, 由图 3 可知, 初阻力  $\Delta P_2$  与终阻力  $2\Delta P_2$  的均值所对应的阻力曲线与风机盘管中速  $n_2$  对应的工况点作为额定工况点。风机盘管初始运行时, 风量为  $Q_1$ ; 随着系统运行, 过滤器阻力增加, 开启高速运行, 风量为  $Q_2$ 。风机盘管风量的区间范围为  $[Q_2, Q_1]$ 。

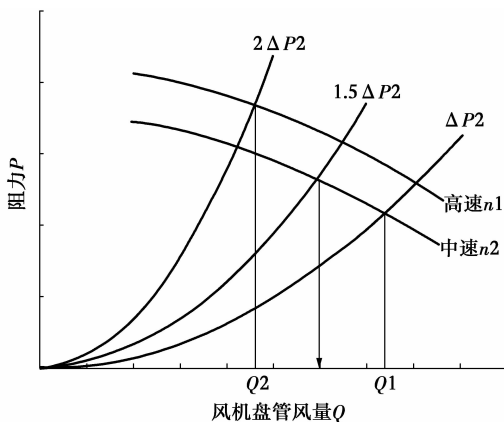


图 3 风机盘管风量与阻力变化曲线

Fig. 3 Air volume and resistance curves of FCU

根据式(5), 当计算回风过滤器的阻力  $\Delta P_2$  所对应的 PM2.5 过滤效率  $\eta$  满足式(3)时, 新风过滤器取值有效; 当过滤器的阻力  $\Delta P_2$  所对应的效率  $\eta$  不满足式(3)时, 为使得新风过滤器取值有效, 室内应加装净化器, 且回风过滤与室内净化系统应满足式(4)要求。

对于自然渗风系统, 取新风过滤器效率  $\eta_1 = 0$ , 新风量取渗透风量计算, 回风过滤器效率计算如式(6)所示。

$$\eta_2 = \frac{SN(C_w - C) + (G - KC)}{(1-S)NC} \quad (6)$$

根据计算式(5), 阻力为  $\Delta P_2$  的过滤器所对应的效率为  $\eta$ , 当  $\eta \geq \eta_2$  时, 可通过过滤器控制室内 PM2.5 浓度; 当  $\eta < \eta_2$  时, 室内应设置净化器, 净化器配置可按式(7)计算。

$$\text{CADR} =$$

$$\frac{SN \cdot (C_w - C) + (G - KC) - (1-S)NC \cdot \eta_2 V}{C} \quad (7)$$

式中:  $\eta_2$  为通过式(5)计算的过滤器阻力  $\Delta P_2$  所对应的过滤效率。

### 3.3 新风过滤器效率

3.3.1 新风比  $S$  对过滤器效率  $\eta_1$  的影响 由式(2), 新风过滤器效率对新风比求偏导, 可得式(8)。

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial S} = \frac{C \cdot \left( \eta_2 + \frac{K}{N} \right) - \frac{G}{N}}{S^2 \cdot C_w} \quad (8)$$

由式(8)可知, 当  $\eta_2 > \frac{G - KC}{C \cdot N}$  时,  $\frac{\partial \eta_1}{\partial S} > 0$ , 即新风比越大, 所需新风过滤器效率越高; 当  $\eta_2 < \frac{G - KC}{C \cdot N}$  时,  $\frac{\partial \eta_1}{\partial S} < 0$ , 即新风比越大, 所需新风过滤器效率越低。

3.3.2 换气次数  $N$  对过滤器效率  $\eta_1$  的影响

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial N} = \frac{KC - G}{SC_w N^2} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当  $KC > G$  时,  $\frac{\partial \eta_1}{\partial N} > 0$ , 即换气次数大, 所需新风过滤器效率越高; 当  $KC < G$  时,  $\frac{\partial \eta_1}{\partial N} < 0$ , 即换气次数越大, 所需新风过滤器效率越低。

在过滤器设计计算时, 可首先分析新风比、换气次数对过滤器效率的影响, 以便合理选型。

## 4 工程算例

西安市某空调房间采用风机盘管加新风系统, 风机盘管送风与新风分别送入室内。以某房间为例, 层高 3.6 m, 空调面积为 20  $\text{m}^2$ , 系统总风量为 640  $\text{m}^3/\text{h}$ , 回风量 560  $\text{m}^3/\text{h}$ , 新风量 80  $\text{m}^3/\text{h}$ , 室内 PM2.5 的沉降率为 0.4  $\text{h}^{-1}$ <sup>[15-17]</sup>, 室内 PM2.5 浓度取 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[10]</sup>。

### 4.1 室外 PM2.5 浓度

室外 PM2.5 浓度设计值参考文献[18]给出的基于“不保证天数法”, 如表 5 所示。

表 5 室外 PM2.5 浓度设计值

Table 5 Outdoor PM2.5 control standards  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

城市	不保证 5 d	不保证 10 d	不保证 15 d	不保证 20 d
北京	316	269	259	221
西安	272	242	204	198
郑州	231	203	195	184
武汉	268	234	221	185
重庆	173	159	152	146

计算以西安市为例,基于“不保证 10 d”取值为  $242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

#### 4.2 室内 PM2.5 发尘量计算

文献[8]给出舒适性空调室内 PM10 发尘量计算公式,如式(10)所示。

$$G = \frac{G_p}{V} \cdot \left( \frac{F}{\beta} + \rho \cdot F \right) \quad (10)$$

式中: $G_p$  为人员发尘量,  $\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{人})$ ;  $F$  为室内面积,  $\text{m}^2$ ;  $\beta$  为室内面积与人员密度的折合系数,取 40;  $\rho$  为人员密度,  $\text{人}/\text{m}^2$ 。

室内 PM2.5 发尘量参考文献[12], PM2.5 占 PM10 发尘量的比例进行计算,这与文献[19-20]给出的计算结果相近,可进行估算。

#### 4.3 回风过滤器效率

由式(3)计算可得

$$\eta_2 \geq \frac{0.17 - (0.4 \times 0.075) - (0.125 \times 8.89 \times 0.075)}{(1 - 0.125) \times 8.89 \times 0.075} = 10.0\%$$

该风机盘管选用中档转速,额定风量为  $560 \text{ m}^3/\text{h}$ 、余压为 60 Pa 某机型,高速  $n_1$ :中速  $n_2 = 1$ :0.8。图 4 为该风机盘管机外余压值分别为 0、30、60、80 Pa 风量-余压曲线。

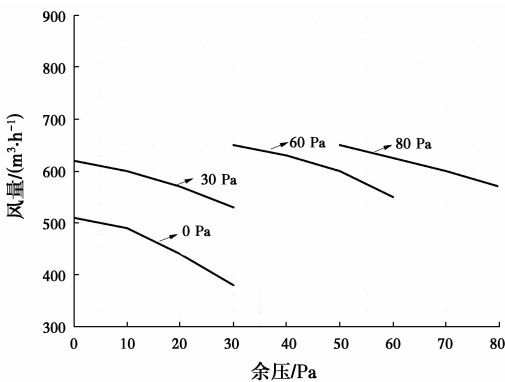


图 4 风机盘管风量-余压曲线

Fig 4 Air volume and pressure curves of FCU

经计算  $\Delta P_1 = 12 \text{ Pa}$ ,  $\Delta P_3 = 60 \text{ Pa}$ ,根据式(5)计算  $\Delta P_2 = 32 \text{ Pa}$ ,回风过滤器选取可参考表 2,采用 G4 型初效过滤器,初阻力  $\Delta P_2 = 32.0 \text{ Pa}$ ,  $\eta_2 = 26.0\%$ ,满足式(3)的要求。

FCU 初阻力为 44 Pa,根据余压-风量曲线,实际运行风量  $Q_1 = 620 \text{ m}^3/\text{h}$ ;随着回风滤网的积尘,过滤器阻力达到 2 倍时,FCU 阻力为 76 Pa,假设  $\Delta P_1$  变化忽略不计,高档风量  $Q_2 = 538 \text{ m}^3/\text{h}$ ,风量相对额定风量衰减 4%。

若风机盘管采用余压值为 30 Pa 的机组,经计算  $\Delta P_1 = 5 \text{ Pa}$ ,其它计算参数不变,  $\Delta P_2 = 16.7 \text{ Pa}$ ,

$\eta_2 = 6.2\%$ ,采用 G2 型初效过滤器;同时,要满足式(4)的要求,室内应加装  $\text{CADR} = 110 \text{ m}^3/\text{h}$  的空气净化器。

#### 4.4 新风过滤器效率

新风效率可按式(2)计算。经计算  $\eta_1 = 64.7\%$ 。

由于中国大气污染严重,新风过滤选用两级过滤,即初效加中效,前级初效过滤器对末级过滤器起保护作用,可减少对过滤器的清洗或更换周期。

文献[14]给出过滤器串联的效率计算,如式(11)所示。

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n) \quad (11)$$

式中: $\eta$  为串联过滤器 PM2.5 计重总效率;  $\eta_1$  为一级过滤器 PM2.5 计重效率;  $\eta_n$  为  $n$  级过滤器 PM2.5 计重效率。

新风一级初效过滤器选用 G4 型合成纤维初效过滤器,PM2.5 过滤器效率为 26.0%;二级过滤器效率为 52.3%,选取滤料为合成纤维的 F8 型过滤器。

其他计算结果如表 6 所示。

表 6 空气过滤器效率计算结果

Table 6 Calculation results of filter efficiency

城市	新风总效率/%	一级过滤效率/%	二级过滤效率/%
北京	68.2	26.0(G4)	57.0(F8)
西安	64.7	26.0(G4)	52.3(F8)
郑州	57.9	26.0(G4)	43.1(F7)
武汉	63.5	26.0(G4)	50.5(F8)
重庆	46.3	13.2(G3)	38.1(F7)

## 5 结论

1) G1~F5 级别滤料的过滤效率随过滤风速呈现先升高后降低的趋势,建议应用 G1~G4 级别滤料时,减小滤速至  $1.7 \sim 1.9 \text{ m/s}$ ,应用 F5 级别的滤料时,可增大滤速至  $0.77 \text{ m/s}$ ,以提高过滤效率;M6~F9 级别滤料尽可能将滤速控制在较小范围之内。

2) 基于室外 PM2.5 浓度值“不保证 10 d”取值计算,风机盘管机组加独立新风系统,新风选用初效 G4 加中效 F7 或 F8 型两级过滤,余压为  $50 \sim 80 \text{ Pa}$  的机组回风过滤器效率选用 G3、G4 型。

3) 对于余压较低的风机盘管机组,当回风过滤器效率不满足式(3)时,应按满足式(4)要求,室内设置等效过滤效率的空气净化器。

4) 建议过滤器生产厂家增加粗、中效过滤器对 PM2.5 等粒子计重效率的标定,以及风机盘管产品样本上附加风量余压曲线,以方便过滤器选型设计。

#### 参考文献:

[1] WALLACE L. Correlation of personal exposure to

- particles with outdoor air measurements; a review of recent studies [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000,32:15-25.
- [2] MAGE D, WILSON W, HASSELBLAD V, et al. Assessment of human exposure to ambient particulate matter [J]. *Journal of Air & Waste Management Association*, 1999,49:1280-1291.
- [3] HOUTHUIJS D, BREUGELMANS O, HOEK G, et al. PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe; results from the CESAR study [J]. *Atmospheric Environment*, 2001,35:2757-2771.
- [4] 高军, 房艳兵, 江畅兴, 等. 上海地区冬季住宅室内外颗粒物浓度的相关性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014,36(2):110-114.
- GAO J, FANG Y B, JIANG C X, et al. Relationship between indoor and outdoor particulate matter concentrations in a residential building in winter of Shanghai [J]. *Journal of Civil, Architecture & Environmental Engineering*, 2014, 36(2): 110-114. (in Chinese)
- [5] CAKMAK S, DALES R, KAURI L M, et al. Metal composition of fine particulate air pollution and acute changes in cardiorespiratory physiology [J]. *Environmental Pollution*, 2014,189(12):208-214.
- [6] 刘亮. 基于空调建筑室内颗粒物控制的过滤器效率研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
- LIU L. Study of the filter efficiency for controlling indoor particulate matter in air-conditioning buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] WILLIAM J F, FAULKNER D A, SULLIVAN D, et al. Particle concentrations and sizes with normal and high efficiency air filtration in a sealed air-conditioned office Building [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000,32:527-544.
- [8] 谢伟. 室内颗粒物浓度变化特征及污染控制策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- XIE W. The research on characteristic of indoor particulate matter and control strategies [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国国家技术监督局. 一般通风用空气过滤器性能试验方法:JG/T 22—1999 [S]. 1999.
- AQSIQ. Methods for testing the performance of air filters used in general ventilation: JG/T 22-1999 [S]. 1999. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑通风效果测试与评价标准:JGJ/T 309—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. The standard of the measurement and evaluation for efficiency of building ventilation: JGJ/T 309-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [11] 国家环境保护总局. 环境空气质量标准:GB/3095—2012 [S]. 2012.
- SEPA. Ambient air quality standards: GB/3095-2012 [S]. 2012. (in Chinese)
- [12] 樊越胜, 谢伟, 李路野, 等. 西安市某办公建筑室内外颗粒物浓度变化特征分析[J]. *建筑科学*, 2013, 29(8): 39-44.
- FAN Y S, XIE W, LI L Y, et al. Feature analysis of changes of indoor and outdoor particulate matter concentration of a certain office building of Xi'an [J]. *Building Science*, 2013, 29(8): 39-44. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风机盘管机组:GB/ 19232—2003 [S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- AQSIQ. Fan coil unit: GB/ 19232-2003 [S]. Beijing: China Standards Press, 2003. (in Chinese)
- [14] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- XU Z L. Air clean technology principle [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [15] FOGH C L, BYRNE M A, ROD J, et al. Size specific indoor aerosol deposition measurements and derived I/O concentrations ratios [J]. *Atmospheric Environment*, 1997,31(15):2193-2203.
- [16] THATCHER T L, LAYTON D W. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence [J]. *Atmospheric Environment*, 1995,29(13): 1487-1497.
- [17] BYRNE M A, GODDARD A J H, LANGE C, et al. Stable tracer aerosol deposition measurements in a test chamber [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(4): 645-653.
- [18] 王清勤, 赵力, 李国柱, 等. 建筑室内细颗粒物污染控制设计方法研究[J]. *暖通空调*, 2016, 46(4): 61-65.
- WANG Q Q, ZHAO L, LI G Z, et al. Study on design of indoor PM2.5 pollution control [J]. *HV & AC*, 2016, 46(4): 61-65. (in Chinese)
- [19] LI Y G, CHEN Z D. A balance-point method for assessing the effect of natural ventilation on indoor particle concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 2003,37(4):4277-4285.
- [20] 赵欢, 毛华雄, 林忠平. 民用建筑控制 PM2.5 空气过滤器的选型与对比[J]. *制冷与空调*, 2015, 15(10): 84-89.
- ZHAO H, MAO H X, LIN Z P. Selection and comparison of air filter for PM2.5 control in civil buildings [J]. *Refrigeation and Air Conditioning*, 2015, 15(10): 84-89. (in Chinese)