

公共建筑室内 PM_{2.5} 污染控制策略研究

曹国庆¹, 谢慧², 赵申² (1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

[摘要] 根据公共建筑室内 PM_{2.5} 污染来源、运动规律, 结合室内 PM_{2.5} 污染控制通风过滤模型, 分析了通风换气对降低室内 PM_{2.5} 污染浓度的影响, 给出了空气过滤器过滤效率计算公式及简化选型计算公式, 提供了室内 PM_{2.5} 浓度控制标准要求, 结合目前常见的集中空调系统空气过滤器配置工况, 通过实例计算, 给出了集中空调系统空气过滤器等级组合建议。

[关键词] 公共建筑; 通风; 空气过滤; PM_{2.5} 污染; 过滤效率

[中图分类号] TU834.8 [文献标识码] A

Strategic Research of Pollution Control of Indoor PM_{2.5} in Public Buildings

CAO Guoqing¹, XIE Hui², ZHAO Shen² (1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the source of indoor and outdoor PM_{2.5} pollution in public buildings and its law of motion as well as the ventilation and filtering model for indoor PM_{2.5} pollution control, the influence of ventilation and air change on the decrease of indoor PM_{2.5} concentration was analyzed, the calculation formula of efficiency of air filter and the calculation formula for simplification and model selection were provided, and the criteria for indoor PM_{2.5} concentration control was prepared. By referring to common working condition of air filter of central air-conditioning system, the combination of grade of air filter of central air-conditioning system was recommended in an example.

Keywords: public buildings, ventilation, air filtration, PM_{2.5} pollution, filter efficiency

0 引言

随着我国经济的快速发展以及人们生活水平的提高, 健康的室内环境是人人向往的目标。室内空气质量与人们健康息息相关, 一些常见疾病如肺心病、心血管病、癌症等均与颗粒物污染及其复合污染有关。近年来我国大气中 PM_{2.5} (空气动力学直径 $d_a < 2.5 \mu\text{m}$) 的污染问题日益严重, 困扰我国中东部地区的大范围雾霾污染时有发生, 雾霾天气下, 室外 PM_{2.5} 浓度升高, 严重危害人体健康。控制室内空气的有害 PM_{2.5} 浓度水平, 减少由于室内 PM_{2.5} 污染对人们造成的影响, 已成了空气环境保障系统必须面对的问题。

在室外大气污染难以短期根治的情况下, 本文拟从工程应用角度阐述通风过滤对室内 PM_{2.5} 污染进行控制的方法, 以期能为相关人员提供一些有益的参考。

1 室内外 PM_{2.5} 污染来源

1.1 室内污染源

沉积在室内表面上的细微颗粒物可能会因为人的活动、空气流动等再次悬浮到室内, 从而增加室内的 PM_{2.5} 含量。细微颗粒物的再悬浮与人员活动有着密切的关系, 公共建筑室内活动是影响室内细微颗粒物再悬浮的主要因素。另外, 香烟烟雾 ETS (Environmental Tobacco Smoke) 是一个重要的室内污染源, 香烟在燃吸过程中产生两部分烟气, 其中被吸烟者直接吸入体内的主流烟仅占整个烟气的 10%, 90% 的侧烟流弥散在空气中。如果在室内吸烟, 则势必造成室内空气的污染。Congrong He 等对室内吸烟、清扫等活动产生 PM_{2.5} 的散发速率进行了研究, 给出的研究结果表明吸烟散发 PM_{2.5} 速率

[收稿日期] 2014-09-02 [修回日期] 2014-12-27

[基金项目] “十二五”国家科技支撑计划项目“建筑室内颗粒物污染及其复合污染控制关键技术研究”(2012BAJ02B02)

[作者简介] 曹国庆(1978-), 男, 博士, 研究员

[联系方式] egq2000@126.com

为 0.99 mg/min,室内清扫活动散发 PM2.5 速率 0.04~0.07 mg/min^[1]。

1.2 室外污染源

室外大气 PM2.5 浓度的变化相当大,与时间、地点、环境条件、气象等诸多因素有着密切的关系。我国环境保护部行业标准 HJ 633—2012《环境控制质量指数(AQI)技术规定(试行)》给出了空气质量指数分级标准^[2],规定室外空气质量指数类别为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染,对应的PM2.5的24h均值范围分别为:0~35 μg/m³、35~75 μg/m³、75~115 μg/m³、115~150 μg/m³、150~250 μg/m³、250~500 μg/m³。

2 通风过滤模型

通风过滤是让空气经过过滤材料,将空气中的细微颗粒污染物捕集下来的净化方式,在民用建筑集中空调系统中得到了广泛应用,为控制室内PM2.5污染,换气次数与过滤效率之间的经济匹配成为亟待研究的课题。以图1所示的一次回风全空气系统为例,根据文献[3]可推导出建筑室内PM2.5浓度稳定平衡时过滤器效率计算式,如式(1)所示。

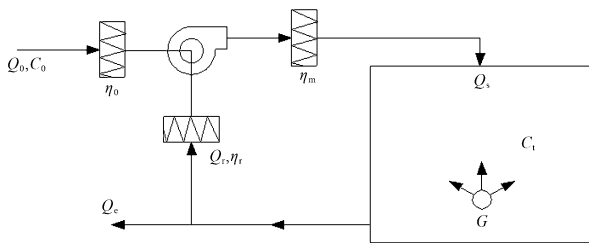


图1 一次回风全空气系统示意图

$$\eta_m = 1 - \frac{C - \frac{G_v}{n}}{C_0 s(1 - \eta_0) + C(1 - s)(1 - \eta_r)} \quad (1)$$

式中: C 为稳定平衡时的室内 PM2.5 污染浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n 为室内换气次数, h^{-1} ; η_0 为新风过滤器滤菌效率, %; η_m 为主过滤器滤菌效率, %; η_r 为回风过滤器滤菌效率, %; C_0 为室外空气 PM2.5 污染浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; s 为新风比; G_v 为单位容积发尘量 ($G_v = G/V$), $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$; V 为室内体积, m^3 ; G 为室内发尘量, $\mu\text{g}/\text{h}$ 。

在确定空气过滤器过滤效率时,应使 C 小于室

内 PM2.5 污染浓度的限值。从式(1)可以看出, η_0 、 η_r 越大, η_m 越小,三者存在最佳匹配问题。要根据过滤器的效率、阻力、额定风量、容尘量、外形尺寸、价格、寿命周期成本及现场允许安装空间作综合考虑^[4]。

由于产生 PM2.5 污染较大的室内污染源(如吸烟)在公共建筑内很多情况是短期存在的,以平衡状态为研究对象确定过滤器效率时可以不考虑这类污染源,则式(1)可以简化为:

$$\eta_m = 1 - \frac{C}{C_0 s(1 - \eta_0) + C(1 - s)(1 - \eta_r)} \quad (2)$$

式(2)可以作为公共建筑集中空调系统过滤器配置的计算依据,即当已选定 η_0 、 η_r 和 η_m 三者中的两者时,通过(2)可以很容易计算出另一个过滤器过滤效率。

3 计算条件

3.1 室内 PM2.5 浓度标准

有关国家室内颗粒物浓度控制的标准规范汇总如表1^[4]所示,可以看出我国标准 GB 18883—2002《室内空气质量标准》相对于美国、WHO 和加拿大标准未给出 PM2.5 暴露标准。我国是 PM2.5 污染严重的国家,近些年来整体呈 PM2.5 高污染态势,经济发达地区污染尤为显著。随着经济的不断发展,城市汽车保有量的迅速增加,城市大气中小颗粒物所占比例不断增大,更应该关注 PM2.5 对人体健康的危害,所以我国应尽快制定 PM2.5 的室内控制标准。GB 18883—2002《室内空气质量标准》给出的可吸入颗粒物(PM10)的日平均值 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,参考 WHO 标准中 PM2.5 和 PM10 的质量浓度比为 0.5,估计今后出台的国家标准 PM2.5 的日平均浓度可高达 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。国家环保部发布的 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[5] 规定“居民区的 PM2.5 的年平均浓度不得超过 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 的 24 小时平均浓度不得超过 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。”

3.2 空气过滤器过滤效率标准

空气过滤器是指空气过滤装置,有初效过滤器、中效过滤器、高中效过滤器、亚高效过滤器等型号,各种型号有不同的性能参数要求。国家标准 GB/T 14295—2008《空气过滤器》^[6] 给出的过滤器分类如

表 1 室内颗粒物控制标准比较 单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

污染因子	美国 NAAQS	加拿大 (1995 年)	WHO/欧洲	中国 (2002 年)
PM2.5	15 [1 yr]	100 [1 h]	10 [1 yr]	
	65 [24 h]	40 [L]	25 [24 h]	
PM10	50 [1 yr]		20 [1 yr]	150 [24 h]
	150 [24 h]		50 [24 h]	

注: 本表中[]内的数字指污染物的时间平均值(h = 小时; yr = 年; L = 长期)。未指明时间的指 8 小时平均值。

表 2 所示, 从表 2 可以看出国家标准规定一般空气过滤器效率为大气尘分组计数效率。有关 PM2.5 过滤效率的测试方法目前尚未有相关标准要求, 雾霾天气下各地区大气颗粒物的质量浓度差异比较大, 目前缺乏各级过滤器 PM2.5 过滤效率的实际测试数据, 因此就需要由计数效率估算计重效率, 许钟麟研究员在其专著中给出了计重效率的估算^[7], 推导出对于粒径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的大气尘计重效率不低于计数法效率的 99%, 因此中效及以上各级过滤器 PM2.5 过滤效率可以近似按表 2 计数法效率进行估算。

表 2 GB/T 14295—2008《空气过滤器》的过滤器分类

性能类别 性能指标	额定风量下 的效率 E/%	等效欧盟标 准过滤器级别
亚高效(YG)	$99.9 > E \geq 95$	F9
高中效(GZ)	$95 > E \geq 70$	F8
中效 I(Z1)	粒径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$, 大气尘计数法	$70 > E \geq 60$
中效 II(Z2)		$60 > E \geq 40$
中效 III(Z3)	$40 > E \geq 10$	M5
粗效 I(C1)	粒径 $\geq 2.0 \mu\text{m}$, 大气尘计数法	$E \geq 50$
粗效 II(C2)		$50 > E \geq 20$
粗效 III(C3)	标准人工尘 计重效率	$E \geq 50$
粗效 IV(C4)		$E < 50$

3.3 空调系统过滤器配置工况

公共建筑集中空调系统常见的空气过滤器配置主要有 6 种:

1) 工况一($\eta_o, \eta_r, \eta_m > 0$) 为典型的一次回风集中空调系统过滤器配置, 对新风、回风、送风均设置了空气过滤器, 该工况在大风量、设置了双风机的集中空调系统中比较常见, 如大型剧院建筑、体育场馆建筑等;

2) 工况二($\eta_o, \eta_m > 0, \eta_r = 0$) 为目前国内大部分公共建筑集中空调系统的过滤器配置情况, 如办公建筑、商业建筑;

3) 工况三($\eta_m > 0, \eta_o, \eta_r = 0$) 考虑的是公共建筑集中空调系统未安装有效的新风过滤器时的情况,

该工况在既有公共建筑集中空调系统中也比较常见, 一些空调系统新风口只加了尼龙网, 在空调机组内也未加新风过滤器, 尼龙网可阻挡羽毛、柳絮、杨絮等物进入空调系统, 但对 PM2.5 基本没有过滤效率;

4) 工况四($\eta_o > 0, \eta_r, \eta_m = 0$) 为典型的风机盘管(或多联机)加新风系统运行工况, 风机盘管一般无余压, 或虽有余压但没有为其设置过滤器;

5) 工况五($\eta_o, \eta_r > 0, \eta_m = 0$) 为工况四的改进, 即为风机盘管加装空气过滤器, 当然前提是风机盘管要有余压, 所加装的空气过滤器阻力小;

6) 工况六($\eta_r > 0, \eta_o, \eta_m = 0$) 为多联机或风机盘管系统, 室内无机械通风补充新风的情况, 这种情况对于外区办公建筑(有外窗)空调系统是比较常见的。

4 实例分析

4.1 案例计算

设定新风比 $s = 0.2$, $C = 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $Co = 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 对不同 η_o 和 η_r , 由式(2) 计算所得 η_m 如图 2 所示。

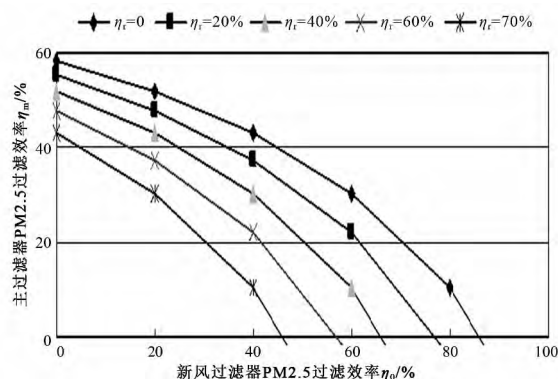


图 2 新、回风过滤器与主过滤器 PM2.5 过滤效率匹配计算

对图 2 进行分析可以看出:

1) 选用较高的 η_o, η_r 均有利于降低对主过滤器 PM2.5 过滤效率的要求, 由于公共建筑集中空调系统新风量往往小于总送风量、回风量, 与提高主过滤器或回风过滤器过滤效率相比, 选用较高的 η_o 具有投资较小、运行费用较低及维护管理较方便的优点。

2) η_o, η_r 和 η_m 均在 35% 左右时, 即可确保室内 PM2.5 污染浓度在允许浓度范围内。

3) $\eta_r = 0$, 即不安装回风过滤器, 这种情况在目前的集中空调通风系统上比较普遍, 此时若使 $\eta_m = 0$ 应有 $\eta_o \geq 88\%$ 若 $\eta_o = 0$, 即新风过滤器未安装或失效时, 应有 $\eta_m \geq 58\%$ 。

对于公共建筑空调系统为全空气系统的工况, 大部分情况仅设置了新风过滤器、主过滤器, 没有回风过滤器, 新风比 $s \leq 0.2$ 。此时若新风过滤器级别为 G4 (PM2.5 过滤效率约为 10% ~ 20%), 则通过计算 (或查图 2) 可确定主过滤器 PM2.5 过滤效率

应不低于 50% ~ 60%, 查表 2, 则过滤器级别不宜低于 F7。G4 + F7 的过滤器组合可作为公共建筑集中空调系统设计选型时的最低配置。

4.2 工况统计分析

表 3 为不同新风比、不同工况条件下的空气过滤器 PM2.5 过滤效率匹配计算统计表, 给出的是特定条件下 (η_o 、 η_r 和 η_m 相等或为零) 的过滤器最低限值供参考。

表 3 不同新风比、不同工况条件下的空气过滤器 PM2.5 过滤效率匹配计算统计表

η	新风比 s									备注
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	
$\eta_o = \eta_r = \eta_m$	14.0%	23.3%	35.5%	43.2%	48.7%	52.9%	56.2%	61.1%		工况一
$\eta_o = \eta_m (\eta_r = 0)$	21.0%	31.1%	42.1%	48.4%	52.7%	55.9%	58.4%	62.0%	64.7%	工况二
$\eta_m (\eta_o = \eta_r = 0)$	25.9%	41.2%	58.3%	67.7%	73.7%	77.8%	80.8%	84.8%	87.5%	工况三
$\eta_o (\eta_r = \eta_m = 0)$	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	87.5%	工况四
$\eta_o = \eta_r (\eta_m = 0)$	25.9%	41.2%	58.4%	67.8%	73.7%	77.8%	80.8%	84.8%		工况五
$\eta_r (\eta_o = \eta_m = 0)$	36.8%	77.8%				> 100%				工况六

从表 3 可以看出:

1) 工况四 (风机盘管加新风系统) 新风过滤器的效率限值与 s 无关, 对式 (2) 进行推导也可以得出, 新风过滤器效率限值仅与室内、外 PM2.5 计算浓度有关, 为确保室外空气严重污染时 ($C_o = 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 室内 PM2.5 浓度在 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下, 新风过滤器对 PM2.5 的过滤效率应不小于 87.5%, 由表 2 可知, 空气过滤器级别不宜低于 F8。

2) 除工况四外, 其他工况空调系统空气过滤器 PM2.5 过滤效率最小限值均随着新风比的增大而增加。

3) 工况六的新风比可以理解为自然通风新风量占室内空调机送风量加自然通风量的比值, 显然该新风比 s 数值是很小的, 一般会小于等于 0.05。表格中的计算值显示当 $s \geq 0.2$ 时, 要求回风过滤器的过滤效率大于 100%, 当然这是不可能的。该工况条件下若对室内空调机加装空气过滤器, 其 PM2.5 过滤效率不宜小于 36.8%, 由表 2 可知, 空气过滤器级别不宜低于 M6。

5 结论

1) 提高集中空调系统的各级过滤器效率, 有助于改善室内 PM2.5 污染状况。由于我国大气污染相对较重, 选用效率较高的新风过滤器有利于改善室内空气品质, 延长空调系统部件的运行寿命, 与在

空调箱内或末端送风口提高过滤级别相比, 有投资少、运行费用低及维护管理较方便的优点。

2) 为保证室内 PM2.5 污染浓度降低到允许值, 当集中空调系统未设置回风过滤器时, 建议集中空调系统新、送风过滤器组合最低为 G4 + F7, 即新风过滤器至少使用 G4 级过滤器, 主过滤器至少使用 F7 级过滤器。

3) 对于风机盘管加新风系统, 当风机盘管上无法设置过滤器时, 为确保室内 PM2.5 浓度降低到允许值以下, 新风过滤器级别不宜低于 F8。

4) 对于风机盘管系统, 当室内无新风送入时, 为消除由于自然通风渗透进入室内的室外污染物, 宜为风机盘管加装不低于 M6 级别的空气过滤器, 当无法加装时, 应考虑室内设置等效功能的空气净化器。

5) 本文给出的过滤器选型计算方法, 可供建筑室内 PM2.5 污染控制领域的工程技术人员用于过滤器效率的设计或校核计算; 工程实际中应用的新风、回风及送风空气过滤器可能各自都由多级空气过滤器组成, 此时只需将 η_o 、 η_r 和 η_m 分别定义为各自多级过滤器串连后的效率即可。

[参考文献]

[1] Congrong He, Lidia Morawska, Jane Hitchins, et al. Contribution from indoor sources to particle number and mass

- concentrations in residential houses [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21): 3405-3415
- [2] 中国环境监测总站. 环境控制质量指数(AQI)技术规定(试行) HJ 633—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [3] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2003
- [4] 谢慧, 赵申, 曹国庆. 国内外 PM_{2.5} 控制标准及对比 [J]. 建筑科学, 2014, 30(6): 37-43
- [5] 中国环境科学研究院. 环境空气质量标准 GB3095—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [6] 中国建筑科学研究院. 空气过滤器 GB/T14295—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [7] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2014: 160-161

(上接第 25 页)

(3.57 分), 而建立“领跑者”体系并加大宣传力度的有效程度相对最弱, 平均得分为 3.3 分。由此表明, 要提升建筑能效相关的绿色产业链的完善程度, 行政手段和市场化应该同步推行, 而在近期, 行政手段的有效性超过了市场机制的作用, 这与现阶段相关市场的不完善性相关, 因而未来应在充分运用行政手段的基础上, 着重相关市场的培育和完善, 使市场的作用能进一步发挥。

4 解决方案分析

新建建筑的主要障碍是制度设计不完善、健康的市场竞争机制尚未形成、高能效技术缺失和实施能力不足。与之相对应的是, 其主要的影响因素也为市场支撑体系、技术支撑体系和能力支撑体系的相关因素。因此, 主要提升措施应充分结合市场机制, 完善现有制度体系, 同时促进高能效技术的研发, 提升高能效技术的实施能力。具体如下:

1) 制度设计及市场化推动。通过行政许可制度, 对项目的整体能效进行把关。通过建立绿色建筑评价标识等制度, 在对建材市场进行规范的基础

上, 对建材的能效进行要求。同时, 通过信息公式等方式, 解决新建建筑市场中存在的信息不对称等一系列问题。将制度设计同市场推进相结合, 综合考虑。

2) 高能效技术研发推广。把建筑节能和绿色建筑/既有居住建筑节能改造作为各级政府科技投入的重点领域; 提供整体解决方案的高能效领跑者; 制定政策鼓励提供低成本高能效的解决方案的设计、运营商; 制定政策鼓励高性能绿色建筑/高标准的既有居住建筑节能改造示范性工程; 建立国家和省市级实验室, 促进相关技术研发; 建立国家和省市级工程技术中心, 促进相关技术研发应用等。

3) 能力提升。实施绿色建筑和建筑节能规划、设计、施工、运管的资质管理, 通过资质管理的方式, 保证绿色建筑各个参与主体的质量; 提升专业操作人员的素质, 提升建筑运营阶段的能效水平; 建立完善职业后再教育体系, 提升在职人员综合素质和专业素养, 使得建筑能效提升各个环节的具体参与人员的素质得到有效提高, 通过三项措施综合, 提升能力建设。