

本刊特稿

城市地下空间复合净化 装置设计方法探讨^{*}

清华大学 韩宗伟[☆] 邵晓亮

东莞市利安达环境科技有限公司 欧祖华

中国建筑科学研究院 王志勇

清华大学 石文星[△]

摘要 城市地下空间通风空调系统设计应兼顾热舒适性及空气质量。为有效去除地下空间的污染物,提出了城市地下空间各组分污染物的净化效率确定方法,以采用一次回风全空气系统的某地下商场为例,给出了所需复合净化装置的净化效率的计算步骤,总结出复合净化装置的一次净化效率的确定原则;探讨了复合净化装置的设计原则,研发了适用于地下空间的复合净化装置样机,并检测了其净化性能。在此基础上,对样机作为地下商场回风段净化装置的净化效果进行了模拟分析,结果表明,复合净化装置能较好地保障地下空间工作区的空气品质。

关键词 城市地下空间 室内空气品质 复合净化装置 净化效率 模拟分析

Design method of combined air cleaners in urban underground spaces

By Han Zongwei[★], Shao Xiaoliang, Ou Zuhua, Wang Zhiyong and Shi Wenxing

Abstract The thermal comfort and air quality assurance should be considered together in the design of the ventilation and air conditioning system for urban underground spaces(UUS). In order to remove pollutants effectively in UUS, develops a determining method for clean efficiency of different pollutants. Taking an underground store using all air system with primary return air as example, gives the calculation steps of clean efficiency of the combined air cleaners (CAC). Summarizes the determining principles for primary clean efficiency of the CAC. Discusses its design principle. Develops the prototype of CAC for UUS and tests its cleaning performance. Carries out the simulation and analysis on the cleaning effect when the prototype is used as the cleaning device of return air section for the UUS. The results show that the air quality of workspace can be well ensured with the CAC.

Keywords urban underground space, indoor air quality, combined air cleaner, clean efficiency, simulation and analysis

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

近年来,随着经济的持续快速发展与城市化水平的提高,我国城市地下空间的开发利用得到了较快的发展,目前在全国各地已建成许多公共地下空间(地下商场、地下停车场、地铁等),取得了显著的社会与经济效益。文献调研与现场实测表明,目前大多数地下空间内的主要特征污染物(PM10、细

菌、甲醛、TVOC等)均超出相关标准中规定限值^[1],这主要是由于相对封闭的地下建筑空间内存在多种污染源,而作为地下空间空气质量保障手段的通风空调系统在设计时主要考虑热湿环境保障,

①☆ 韩宗伟,男,1980年10月生,工学博士,博士后

△ 100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系
(010) 62796114

E-mail: wxshi@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2010-10-20

而较少考虑污染物的去除问题所致。近年来, SARS, H1N1 等具有空气传播性的病毒给人们生命及健康带来了巨大的影响, 人们已普遍认识到对生活空间的需求已不仅仅是保障适宜的温湿度, 还需要呼吸健康、新鲜的空气。为了加强公共场所集中空调通风系统卫生管理, 卫生部制定了《公共场所集中空调通风系统卫生管理办法》和《公共场所集中空调通风系统卫生规范》(2006), 规定公共场所集中空调系统应加装空气净化消毒装置, 且两年需清洗一次^[2], 但尚未明确给出对不同类型建筑(特别是地下建筑)的具体控制措施及指标, 缺乏工程应用的指导性与约束性。

通常情况下, 可以采用污染源控制、新风稀释和复合净化的方法, 将空间内污染物浓度控制在规定的范围内^[3], 目前污染源控制的主要方式为定期清洗通风系统。研究表明, 对于 PM10 和细菌污染物, 在通风管道内增加净化装置比定期清洗更加节能且经济^[4-5]; 对于甲醛及 TVOC 等气态污染物, 目前主要是通过新风稀释及复合净化的方式进行控制。然而在实际工程设计时, 在通风空调系统形式一定的条件下, 针对地下空间多种污染物的不同程度超标、不同净化方式(通风及各种净化技术)对不同污染物的净化效果差异, 如何确定通风系统的新风比、换气次数及复合净化装置对各种污染物的净化效率, 在保障地下空间空气质量的同时减少运行能耗至关重要。近年来, 一些学者针对颗粒污染物去除的空气过滤器效率计算进行了一些研究^[6-8]。本文在前人研究基础上, 从工程应用角度阐述典型地下空间净化效率的确定方法, 以期今后地下空间通风空调、复合净化装置的设计提供参考; 同时探讨复合净化装置的设计原则, 对依据该原则设计的复合净化装置进行了性能测试, 为地下空间复合净化装置的研发提供有益的探索。

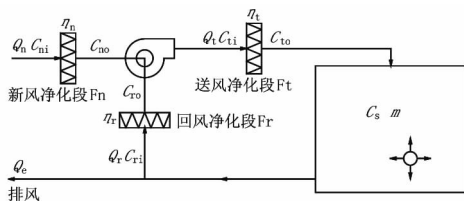
$$V \frac{dC_{si}}{dt} = C_{si}Q_r(1-\eta_{ri})(1-\eta_{ti}) + C_{ni}Q_n(1-\eta_{ni})(1-\eta_{ti}) + m_iV - Q_tC_{si} \quad (1)$$

式中 V 为空间体积, m^3 ; C_{si} 为空间内污染物浓度, mg/m^3 或 cfu/m^3 ; τ 为时间, h ; Q_r 为回风风量, m^3/h ; η_{ri} 为回风净化段 Fr 效率; η_{ti} 为送风净化段 Ft 效率; C_{ni} 为新风污染物浓度, mg/m^3 或 cfu/m^3 ; Q_n 为新风量, m^3/h ; η_{ni} 为新风净化段 Fn 效率; m_i 为单位容积污染物散发速率, $mg/(m^3 \cdot h)$ 或 $cfu/$

1 复合净化装置效率的确定方法

地下空间复合净化装置的设计、安装与通风空调系统形式紧密相关, 根据地下空间使用性质的不同, 地下空间通风空调系统形式主要有带回风的全空气系统、风机盘管加新风系统以及机械排风系统。在地下空间内部污染源散发特性一定的条件下, 合理设计、选择复合净化装置对降低初投资和运行费用, 提高地下空间空气质量有重要意义。

根据通风空调系统形式和污染源情况, 复合净化装置可以独立或组合安装在新风管、送风管或回风管上, 当存在严重的局部污染源时, 有时还需在室内设置空气净化器, 以去除室内的各种污染物。图 1 为复合净化装置在地下空间应用的通用模型示意图, 其中不同类型的通风空调系统形式可以根据对应净化参数的取值进行区分, 具体如表 1 所示。



Q_n, Q_r, Q_t 分别表示新风、回风和送风的风量; η_n, η_r, η_t 分别表示新风、回风及送风段的净化效率; C_s 为建筑内部污染物浓度; $C_{ni}, C_{no}, C_{ri}, C_{ro}, C_{ti}, C_{to}$ 分别为新风、回风和送风净化段前、后污染物浓度; m 为建筑内部污染物散发速率

图 1 地下空间空气污染物的复合净化装置通用模型示意图

表 1 不同通风空调形式下的对应参数范围

	新风	回风	送风
全空气系统(一次回风)	$\eta_n \geq 0, Q_n > 0$	$\eta_r \geq 0, Q_r > 0$	$\eta_t \geq 0, Q_t > 0$
风机盘管加新风系统	$\eta_n \geq 0, Q_n > 0$	$\eta_r \geq 0, Q_r > 0$	$\eta_t = 0, Q_t > 0$
机械通风系统	$\eta_n \geq 0, Q_n > 0$	$\eta_r = 0, Q_r = 0$	$\eta_t = 0, Q_t > 0$
空气净化器	$\eta_n = 0, Q_n = 0$	$\eta_r \geq 0, Q_r > 0$	$\eta_t = 0, Q_t > 0$

从工程应用的角度, 为了便于设计计算, 文献中均采用集总参数法^[6-7], 以需要控制污染物浓度的整个地下空间为对象建立污染物浓度的控制方程:

($m^3 \cdot h$); Q_t 为总风量, m^3/h ; 下标 i 表示污染物种类, $i=1$ 表示可吸入颗粒污染物 PM10, $i=2$ 表示 VOC, 表征污染物甲醛, $i=3$ 表示细菌。

由质量平衡关系知 $Q_t = Q_n + Q_r$, 对式(1)进行积分求解得到空间内污染物浓度变化的瞬态表达式为

$$C_{si}(\tau) = \frac{\alpha}{\beta} - \left[\frac{\alpha}{\beta} - C_{si}(0) \right] e^{-\beta\tau} \quad (2)$$

式中 α 表示建筑内部和外部污染物(新风引入)增加的速度; β 表示通风空调系统的净化能力。

α 和 β 的计算表达式如下:

$$\alpha = C_{ni}rn(1-\eta_{ni})(1-\eta_{ti}) + m_i \quad (3)$$

$$\beta = n[1 - (1-r)(1-\eta_{ti})(1-\eta_{ti})] \quad (4)$$

$$C_{si}(\infty) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} C_{si} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{C_{ni}rn(1-\eta_{ni})(1-\eta_{ti}) + m_i}{n[1 - (1-r)(1-\eta_{ti})(1-\eta_{ti})]} \quad (5)$$

式(5)即为复合净化装置设计时需依据的表达式。在设计时应首先确定地下空间的通风空调形式,并根据表 1 确定相应的参数取值,同时令 $C_{si}(\infty)$ 等于相关标准^[8-13]中规定的对应污染物浓

$$m_i = C_{si}(\infty)n[1 - (1-r)(1-\eta_{ti})(1-\eta_{ti})] - C_{ni}rn(1-\eta_{ni})(1-\eta_{ti}) \quad (6)$$

在已知空间内稳定污染物浓度条件下,利用式(6)可以求得空间内污染物源散发速率 m_i 。由式(5)知,在 m_i 和其他参数一定的条件下,换气次数 n 越大,对应稳态下空间污染物浓度 $C_{si}(\infty)$ 越低。因

$$n_{\min i} = \frac{m_i}{C_{sdi}[1 - (1-r)(1-\eta_{ti})(1-\eta_{ti})] - C_{ni}r(1-\eta_{ni})(1-\eta_{ti})} \quad (7)$$

由式(7)可知,净化器效率 $\eta_{ti}, \eta_{ni}, \eta_{ni}$ 越大, $n_{\min i}$ 值越小,当 $\eta_{ti} = 1$ 时, $n_{\min i}$ 存在最小值为 m_i/C_{sdi} 。而设计空调系统时,需综合考虑换气次数与净化器效率的取值对初投资和运行费用的影响^[14]。

在换气次数 n 一定的条件下,若 $m_i \geq nC_{sdi}$, 说明对现有空调系统增加复合净化装置已经难以将地下空间内污染物浓度控制在规范规定的限值范围内,必须采用净化器辅助净化手段,使得下式成立:

$$n \geq \frac{m_i}{C_{sdi}(1 + \eta_{mi}r_m)} \quad (8)$$

式中 η_{mi} 为净化器效率; r_m 为净化器风量与总风量的比值。

若采用多台净化器,总净化效率为

$$\eta_{mi}r_m = \sum_{j=1}^N \eta_{ji}r_j \quad (9)$$

表 2 地下商场污染物现状及规范中限值

	污染物浓度调查结果	污染物限值	污染物限值的依据
可吸入颗粒物 PM10	0.5~1.5 mg/m ³	≤0.25 mg/m ³	GB 9670—1996《商场(店)、书店卫生标准》
甲醛、TVOC	0.02~0.25 mg/m ³	≤0.12 mg/m ³	GB 9670—1996《商场(店)、书店卫生标准》 GB/T 2017216—1998《人防工程平时使用环境卫生标准》
微生物	5 000~24 000 cfu/m ³	≤4 000 cfu/m ³	GB/T 2017216—1998《人防工程平时使用环境卫生标准》

根据表 2 假定本例的计算条件如下:现有空调系统形式为一次回风全空气系统,其现有净化措施

式(3),(4)中 r 为新风比; n 为换气次数, h^{-1} 。目前,大多数地下空间的通风空调的换气次数(送风量)是根据热湿处理过程确定的。一般空调系统设计过程中,换气次数 n 主要取决于送风温差,商场的换气次数一般在 $5 h^{-1}$ 以上。

由式(2)可知,地下空间内部稳定的污染物浓度表达式为

度限值 C_{sdi} 。对于新建地下空间,设计时污染源散发强度可以根据地下空间使用性质和经验确定;对于既有地下空间可按照下式由空间内部稳定的污染物浓度 $C_{si}(\infty)$ 反算得到:

此,可以改变换气次数使得空间污染物达标,根据标准中规定 $C_{si}(\infty) \leq C_{sdi}$, 当 $C_{si}(\infty) = C_{sdi}$ 时存在最小换气次数 $n_{\min i}$, 此时必须使得系统换气次数 $n \geq \max(n_{\min i})(i = 1, 2, 3)$ 。

式中 j 为净化器编号; N 为净化器台数; η_{ji} 为净化器效率; r_j 为净化器风量与总风量的比值。

2 地下商场复合净化装置的开发与性能测试

前面介绍了不同类型通风空调系统形式下的复合净化装置效率的确定方法,在通风空调系统形式一定的条件下,通过该方法计算的复合净化装置效率通常不是唯一的,而是存在不同组合。合理的复合净化效率设置方案需根据现有净化装置实现的难易程度、阻力、经济性等因素综合确定。下面以地下商场为例,应用前述的效率确定方法进行复合净化装置的设计,同时以计算得出的净化效率参数作为复合净化装置的设计指标,介绍复合净化装置的研制及性能测试情况。

2.1 设计条件的选定

表 2 为由文献[1]总结的目前地下商场内主要污染物浓度范围以及相关规范中规定的限值。

为在送风管道上加装粗效过滤器,即新风段、回风段及送风段当前的净化效率为: $\eta_{ni} = 0$, $\eta_{ti} = 0$,

$\eta_{t1}=30\%, \eta_{t2}=0, \eta_{t3}=40\%$;新风中各污染物的初始浓度为: $C_{n1}=0.4\text{ mg/m}^3, C_{n2}=0\text{ mg/m}^3, C_{n3}=3\,000\text{ cfu/m}^3$;换气次数 $n=8\text{ h}^{-1}$,新风量指标 $q=20\text{ m}^3/(\text{人}\cdot\text{h})$,人员密度 $p=0.3\text{ 人/m}^2$,空间高度 $H=3.6\text{ m}$,送风量 $Q_t=2\,500\text{ m}^3/\text{h}$;设计空间内各污染物浓度为: $C_{sd1}=0.25\text{ mg/m}^3, C_{sd2}=0.12\text{ mg/m}^3, C_{sd3}=4\,000\text{ cfu/m}^3$;目前空间内的稳定污染物浓度为: $C_{s1}(\infty)=0.6\text{ mg/m}^3, C_{s2}(\infty)=0.2\text{ mg/m}^3, C_{s3}(\infty)=7\,000\text{ cfu/m}^3$ 。

2.2 复合净化装置效率的确定

复合净化装置效率设计计算过程可以按照以下几个步骤进行。

1) 计算新风比

新风比 $r=\frac{qp}{nH}=20.83\%$,新(回)风量 $Q_n=Q_t r=500\text{ m}^3/\text{h}, Q_r=Q_t(1-r)=2\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

2) 计算污染物散发源速率

根据式(6)计算得各主要污染物的散发强度分别为: $m_1=1.67\text{ mg}/(\text{m}^3\cdot\text{h}), m_2=0.33\text{ mg}/(\text{m}^3\cdot\text{h}), m_3=26\,400\text{ cfu}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。

3) 校核计算最小换气次数

$$\eta_{ti}=1-\frac{C_{sdi}n-m_i}{C_{ni}nr(1-\eta_{ti})+C_{sdi}n(1-r)(1-\eta_{ti})}=f(\eta_{ti},\eta_{ri})$$

(10)

式(10)即为复合净化装置设计分析的基础表达式,利用该式可以确定复合净化装置对地下空间各特征污染物的净化效率。

① PM10 的过滤方案计算

结合前面确定的基本参数,利用式(10)计算的结果见表 3。由表 3 中可以发现,当 3 个净化段效率大于 60%时,可以保证空间内 PM10 在规定的

该部分计算的目的是考察在已知的换气次数下,在空调系统中增加复合净化器能否解决地下空间内所有特征污染物的净化问题。 $n_{\min1}=m_1/C_{sd1}=6.68\text{ h}^{-1}, n_{\min2}=m_2/C_{sd2}=2.75\text{ h}^{-1}, n_{\min3}=m_3/C_{sd3}=6.6\text{ h}^{-1}$,由于 $(n=8\text{ h}^{-1})>(\max(\eta_{\min i})=6.68\text{ h}^{-1}), i=1,2,3$,说明通过复合净化措施可以使上述三种污染物的浓度在规范限值范围内,不需要增加复合净化器进行辅助净化。

4) 确定复合净化装置的设置方案

考虑到新风污染物浓度 C_{ni} 与污染物限值 C_{sdi} 的相对关系, $C_{n1}>C_{sd1}, C_{n2}<C_{sd2}, C_{n3}<C_{sd3}$,因此在新风段只装设过滤装置,不进行杀菌和去除 VOC,即 $\eta_{n1}>0, \eta_{n2}=\eta_{n3}=0$ 。由于三类污染物主要来自空间内部散发源($m_i>0, i=1,2,3$),因此对回风段进行复合净化非常必要,即 $\eta_{ri}>0(i=1,2,3)$ 。对于送风段, $\eta_{ti}\geq 0$,是否采用相应的净化措施及其净化效率的大小,需结合 η_{ni}, η_{ri} 从技术经济性角度综合确定。

5) 设计计算复合净化装置净化效率

由式(5)知,当控制空间内稳态污染物浓度 $C_{si}(\infty)$ 为规范中规定限值 C_{sdi} 时,有下式成立:

范围内,当只设置送风净化段时,净化器对 PM10 的过滤效率应大于 85%;同时还发现,回风净化段 Fr 效率 η_{r1} 变化对送风净化段 Ft 效率 η_{t1} 影响较大,因此选用较高效率的回风净化段有利于降低对送风净化段的要求。而新风净化段效率对送风净化段净化效率的影响不大,新风净化段效率由 0 增至 100%,送风净化段效率降低不到 10%,这与新

表 3 送风净化段 Ft 效率 η_{ti} 与 η_{n1}, η_{r1} 的对应关系

η_{n1}	η_{r1}										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0	0.85	0.84	0.83	0.82	0.80	0.78	0.75	0.71	0.67	0.60	0.51
0.1	0.85	0.84	0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.64	0.57	0.46
0.2	0.85	0.83	0.82	0.80	0.78	0.75	0.72	0.68	0.62	0.53	0.39
0.3	0.84	0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.65	0.58	0.48	0.30
0.4	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76	0.73	0.68	0.63	0.54	0.41	0.18
0.5	0.83	0.81	0.80	0.77	0.75	0.71	0.66	0.60	0.50	0.34	0.02
0.6	0.82	0.81	0.79	0.76	0.73	0.69	0.64	0.56	0.44	0.23	0
0.7	0.82	0.80	0.78	0.75	0.72	0.67	0.61	0.52	0.37	0.09	0
0.8	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.65	0.57	0.46	0.27	0	0
0.9	0.80	0.78	0.76	0.72	0.68	0.62	0.53	0.40	0.15	0	0
1.0	0.79	0.77	0.74	0.71	0.66	0.59	0.48	0.31	0	0	0

风比和室外污染物浓度有关。综合考虑各净化段处理的风量关系 $Q_i > Q_r > Q_n$, 当确定 3 个净化段效率时, 新风净化段效率不宜过大, 回风净化段效率宜大于送风净化段效率。基于上述考虑, 表 3 中阴影区域参数为较佳的净化效率设置方式下的参数。

② VOC(甲醛为表征污染物)的净化方案计算

表 4 送风净化段 Ft 效率 η_{t2} 与 η_{r2} 的对应关系

η_{r2}	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
η_{t2}	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0

由表 4 可知, 当回风净化效率 $\eta_{r2} = 18\%$ 时, 送风净化段效率 $\eta_{t2} = 0$, 由于现有净化技术对 VOC 的一次净化效率有限, 这未必是最优的方案。考虑到处理风量及初始浓度对吸附光催化降解效果的影响, 需令 $\eta_{r2} > \eta_{t2}$, 设计复合净化装置时, 需根据不同的净化技术从表 4 所计算的组合中选择最优的设计方案, 表 4 中阴影部分参数为较佳的效率设置方式下的参数。

③ 细菌的净化设计计算

由于新风中的细菌浓度 $C_{n3} < C_{sd3}$, 因此新风段不设置杀菌设备, 即 $\eta_{n3} = 0$, 式(5)变为

$$\eta_{r3} = 1 - \frac{C_{sd3}n - m_3}{C_{n3}nr + C_{sd3}n(1-r)(1-\eta_{r3})} = f(\eta_{r3}) \quad (12)$$

根据式(12), 结合前面确定的基本参数进行计算, 计算结果见表 5。

表 5 送风净化段 Ft 效率 η_{t3} 与 η_{r3} 的对应关系

η_{r3}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
η_{t3}	0.82	0.80	0.78	0.75	0.72	0.68	0.63	0.56	0.44	0.26	0.07	0

由于主要细菌的污染源来自空间内部, 因此, 回风过滤杀菌非常必要。由表 5 可以看出, 当回风净化段效率较高时, 送风净化段的净化要求明显降低, 当回风净化段的效率大于 95% 时, 则送风净化段可以不考虑细菌净化要求。由于 PM10 和细菌均采用过滤的手段去除, 因此二者存在一定的相关性, 因此在设计净化段效率时需综合考虑。

2.3 复合净化装置的研制及性能测试

2.3.1 复合净化装置的结构设计要求

在设计地下空间复合净化系统时, 可以按照上述方法选择复合净化装置, 实现确定的净化效率指标, 根据现有的净化技术综合考虑。设计复合净化装置的结构时必须兼顾以下要求:

1) 过滤器的净化效率要高, 以满足各种污染物的净化要求;

由于新风中甲醛浓度 $C_{n2} = 0$, 因此在新风段中不设置甲醛的净化装置, 即 $\eta_{n2} = 0$, 式(5)变为

$$\eta_{r2} = 1 - \frac{C_{sd2}n - m_2}{C_{sd2}n(1-r)(1-\eta_{r2})} = f(\eta_{r2}) \quad (11)$$

结合前面确定的基本参数, 由式(11)计算的结果见表 4。

2) 不产生二次污染, 可在有人的情况下进行净化处理;

3) 过滤器的阻力尽可能小, 部件连接要严密, 不能出现空气旁通短路;

4) 成本低, 运行维护方便, 长期运行安全可靠。

在上述要求中, 第 1, 2 条为保障空气质量的基本要求, 第 3, 4 条为考虑经济性后的附加要求。这两类要求, 尤其是第 1, 3 条要求在实际工程应用中往往难以兼顾。现有大部分地下空间通风空调系统在设计之初没有考虑空间内部的污染物控制, 因此对既有建筑通风系统增加净化装置需保证通风空调系统风量变化较小, 此时第 3 条也成为了基本要求。《公共场所集中空调通风系统卫生规范》规定, 集中通风空调系统净化装置初阻力应小于 50 Pa。对于新建地下建筑而言, 随着各种病毒、甲醛等污染物对人的健康影响日益严重, 笔者认为, 设计通风系统时应将空气质量保障与热舒适性保障放到同等重要的地位, 风机选型时应考虑复合净化装置的阻力。设计复合净化装置时既要满足基本要求, 还要充分考虑附加要求, 必要时可采用各种措施降低阻力。对既有建筑通风空调系统增加复合净化装置时, 可以通过复合净化装置自带风机或增加净化装置断面面积的方式, 减少对通风空调系统风量的影响。

2.3.2 复合净化装置净化流程

基于上述复合净化装置的设计理念, 为了探索研究适合于地下空间的复合净化器型式, 根据某地下商场的污染物分布特征, 笔者设计出一种复合净化装置净化流程, 如图 2 所示, 该流程设计是基于“先粗后精、先易后难”的思想。为了去除空间内部多种污染物, 该装置沿空气流动方向依次设置了 5 级净化单元:

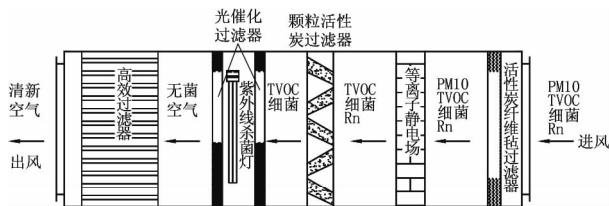


图2 一种地下空间复合净化装置净化流程

1) 第一级为活性炭纤维毡过滤处理,该过程可过滤掉部分 PM10、细菌,吸附部分 TVOC、氘及其子体;

2) 第二级为等离子静电场处理,通过电离装置施加低电流、高电压脉冲电源,从而形成高频脉冲放电,使基态气体得到足够大的能量,电离氧化空气中的细菌、病毒、TVOC 物质及微粒等,在库仑力的作用下,空气中的微尘驱向电集尘板上,通过该级处理几乎所有的 PM10、细菌以及部分气态污染物;

3) 第三级为颗粒活性炭过滤器,通过活性炭超强的吸附能力吸附氘及其他有害气体;

4) 第四级为光催化与紫外线杀菌灯组合处理,光触媒受紫外线光波的辐射,被激活产生游离子、电子及空穴,因而具有很强的光氧化还原能力,分解空气中的一氧化碳、氮氧化物、碳氢化物、醛类、苯及各种有害物质,将它们催化分解还原成环保型无污染的 H_2O 和 CO_2 ,经过该级处理,可以使气态污染物(VOC 及其他无机污染物)浓度达到设计要求;

5) 第五级为高效过滤器过滤,它主要是针对空气中粒径 $0.5 \mu m$ 以上的尘埃的过滤,同时对前四级空气净化装置处理后的副产物进行进一步净化处理。

基于上述流程笔者研制了可安装于通风管道及空调箱内的复合净化装置样机,如图 3 所示,其额定处理风量为 $2000 m^3/h$,空气通过断面尺寸为 $550 mm \times 596 mm$,长度为 $1050 mm$ 。



图3 地下空间复合净化装置样机

2.3.3 复合净化装置性能测试结果

依据《公共场所集中空调通风系统卫生规范》及《空气净化器污染物净化性能测定》(报批稿)测试该样机对颗粒污染物、微生物及 TVOC 的净化效果。测试时将复合净化装置安装在风速可控的风道中间,在装置的上游装有污染物发生装置,在复合净化装置前、后均有用于压力及浓度测量的测试孔。测试阻力时,采用压差计多次测量不同风量下装置前、后的压差,通过取平均值获得复合净化装置的阻力特性;测试净化效率时,则对复合净化装置前、后的污染物浓度进行多次测试,最终得到复合净化装置对各种污染物的一次净化效率。测试结果如图 4 和表 6 所示。

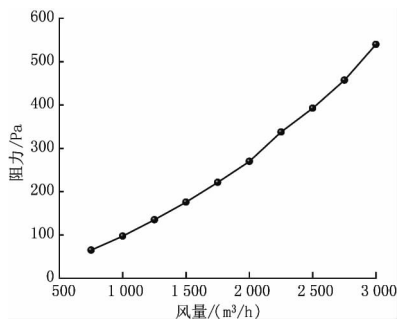


图4 复合净化装置阻力特性

表6 复合净化装置净化效率^[15]

	入口(上游)平均 浓度	出口(上游)平均 浓度	一次净化 效率/%
PM10	0.330 mg/m ³	0.007 mg/m ³	97.9
细菌	534.6 cfu/m ³	32.6 cfu/m ³	94.0
TVOC	1.44 mg/m ³	0.64 mg/m ³	55.8

注:由于检测条件有限,未对氘及其子体的净化效果进行检测。

该复合净化装置在额定风量(风速约为 $1.7 m/s$)下的阻力约为 $270 Pa$,远超出《公共场所集中空调通风系统卫生规范》规定的 $50 Pa$,但是该装置对各种污染物的一次净化效率都比较高,由前述根据地下商场污染现状进行的复合净化装置设计算例可知,该装置可以作为回风段复合净化装置使用。在表 6 所示的净化效率下,通风系统送风段无需考虑对细菌及 TVOC 的净化,因为 TVOC 的净化效率远超出当前污染情况下对净化效率的需求。鉴于样机的阻力过高,今后尚需采取措施,如自带风机、适当增加横截面积以及结构优化进一步降低装置的阻力。

3 复合净化装置应用效果的模拟分析

由于上述复合净化装置的效率确定是基于集

总参数的计算方法,计算过程中未考虑污染源的空间分布特性,为考察复合净化装置的实际应用效果,下面基于第 2.2 节计算的各种污染源散发强度,以研发的复合净化装置作为回风段净化装置,对第 2.1 节提出的某地下商场的复合净化效果进行模拟分析。主要模拟条件如下。

系统形式为一次回风全空气系统,送风量为 2 500 m³/h,新风量为 500 m³/h,回风量为 2 000 m³/h,建筑层高为 3.6 m,面积为 90 m² (9.0 m×10.0 m)。各类污染物浓度或散发速率见表 7。

表 7 新风及建筑内部污染物浓度或散发速率			
	PM10	TVOC	细菌
新风	0.4 mg/m ³	0	3 000 cfu/m ³
建筑内部	1.67 mg/(m ³ ·h)	0.33 mg/(m ³ ·h)	26 400 cfu/(m ³ ·h)

由第 2.2 节的计算结果(表 3~5)可知,若以研发的复合净化装置作为回风净化段,则新风段与送风段净化效率见表 8。

表 8 空调系统各净化段一次净化效率 %			
	新风	回风	送风
PM10	30	97.9	30
细菌	0	94.0	10
TVOC	0	55.8	0

基于以上条件,选用专业求解室内空气分布参数的模拟软件 Aippak 2.1 对各种污染物浓度状况进行了模拟分析,模型示意图见图 5。该算例将空调房间与整个通风管道一起建立模型,从而可以模拟实际的一次带回风系统中的污染物浓度分布。气流组织为上送上回,分别设置 2 个送风口和 2 个回风口,风口尺寸为 400 mm×400 mm。由文献[1]可知,颗粒污染物 PM10 主要是由人员活动扬尘及室外新风引入引起,因此在模型中选择地面作为 PM10 的散发源。而 TVOC 主要是由家具及装

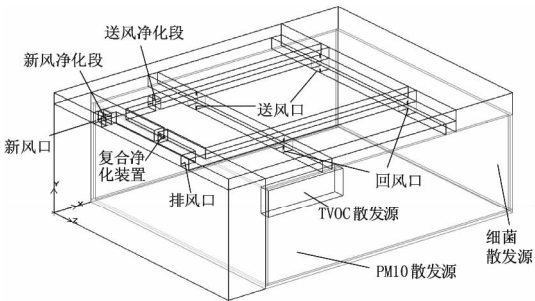


图 5 地下商场污染物净化模拟模型示意图

修材料散发,在模型中设置一个长方体放在房间的中心位置,长方体的尺寸为 3 000 mm×1 000 mm×400 mm,同时将建筑物四周的墙面作为细菌的散发源。

模拟结果如图 6 所示,由于污染源设置具有对称性,因此截取了房间长度方向中间断面的污染物浓度分布。由图中可以看出污染物浓度空间分布不均匀,靠近送风口的区域(图 6 中各图右侧区域)污染物浓度较低,靠近回风口的区域(图 6 各图左侧区域)污染物浓度相对较高。空间污染物浓度分布还和风口与污染源相对位置关系密切,由图中可以看出 TVOC 和细菌在工作区内的污染物浓度大部分在限值以下,由于 PM10 的污染源位置为地面,气流组织为上送上回,因此会在回风口下方存在局部超标的现象。在送风形式不变的情况下,可以通过提高净化装置效率(表 8 中确定的效率值均是根据集总参数计算方式下的最小值,实际设计时需有一定的富余量以提高复合净化的能力)、增加送风量或者在局部超标区域摆放空气净化器来降低超标区域的污染物浓度。

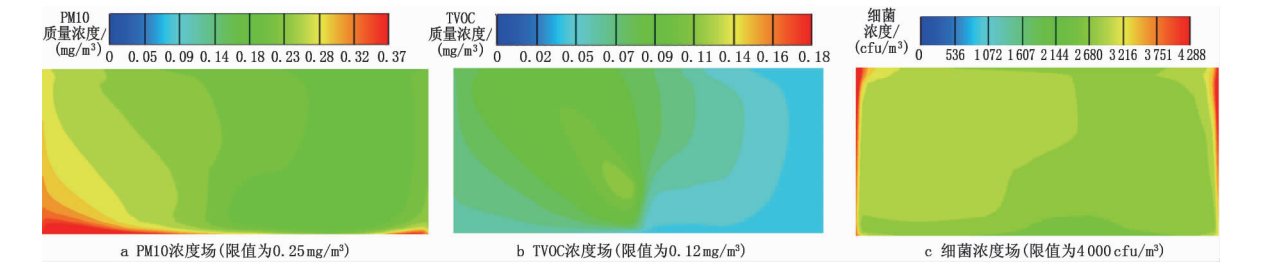


图 6 x=6.5 m 中间断面各污染物浓度分布

4 结论

为提高城市地下空间内部的空气质量,本文根据地下空间污染现状及通风空调形式,提出了适用于各种通风空调形式的地下空间复合净化装置效率的确定方法,以采用一次回风全空气系统的某地下商场为例,详细阐述复合净化装置的净化效率的

计算过程;提出了复合净化装置的设计原则,并对试制样机的效率进行了性能检验,模拟分析了样机在实际工程中的应用效果。通过本文的研究,可以得到以下几点结论。

1) 由于地下空间的污染源主要来自空间内部,因此对于带有回风的全空气系统而言,在回风段安装复合净化装置比较合理,新风段可根据外界污染状况安装粗效或中效过滤器,若回风段复合净化装置难以实现净化要求,可在送风段增加复合净化装置辅助,对于特定污染物送风段的净化效率应低于回风段。

2) 为了保证地下空间内人员的健康要求,地下空间通风空调系统设计应将热舒适性与污染物控制并重,风机选型时应充分考虑复合净化段的阻力。

3) 为了减少风机能耗,降低通风空调系统运行费用,复合净化装置在保证净化效率的基础上应尽可能降低阻力,目前的净化技术条件下,若保证地下空间污染物净化需求,复合净化装置需经过多级处理,造成较大的阻力,因此,研究阻力小、净化效率高的净化技术及流程对于地下空间复合净化装置的开发应用至关重要。目前情况下,可通过自带风机或者降低装置处理空气风速的方法降低其阻力。

4) 模拟结果表明,本文提出的复合净化装置设计方法,能够较好地保证地下空间的污染物浓度范围在限值之内,对于可能出现气流死角的局部超标小区域的环境保障,可以通过提高净化装置效率、增加送风量或者在局部超标区域设置空气净化器控制污染物。

(上接第 22 页)

4.2 通过理论分析可知,当大气压力降低 1 000 Pa 时,相应的湿球温度降低 0.14 °C;当湿空气湿球温度降低 1 °C 时相应的压力降低约 7 250 Pa,空气负压的变化对湿空气湿球温度的影响很不明显。

4.3 实际工程测试结果表明,采用了负压冷却塔的系统,当冷却水温度降低约 1.1 °C 时,冷源系统及水泵输入功率总和不但没有减小,反而增大了 9 kW,由于负压冷却塔风机功率的增加,从冷源系统整体分析,并未体现出节能效果。

参考文献:

[1] 薛殿华. 空气调节[M]. 北京:清华大学出版社,1991

参考文献:

- [1] 韩宗伟,王嘉,邵晓亮,等. 城市典型地下空间的空气污染特征及其净化对策[J]. 暖通空调,2009,39(11):21-30
- [2] 许钟麟,张益昭,曹国庆,等. 用于污染控制的回风口净化装置三个必要条件——空调净化系统污染控制与节能关系系列研讨之三[J]. 暖通空调,2010,40(2):92-95
- [3] 张寅平,张立志,刘晓华,等. 建筑环境传质学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006
- [4] 潘红红,张益昭,曹国庆,等. 治理污染也是为了节能——空调净化系统污染控制与节能关系系列研讨之二[J]. 暖通空调,2010,40(1):99-100,122
- [5] 龚伟,孙鲁春. 新型重症监护病房净化空调系统的应用——空调净化系统污染控制与节能关系系列研讨之一[J]. 暖通空调,2009,39(12):107-108,106
- [6] 徐文华. 舒适性空调空气过滤器效率计算方法[J]. 暖通空调,2001,31(3):42-47
- [7] 曹国庆,张益昭. 通风与空气过滤对控制室内生物污染的影响研究[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(1):130-135
- [8] 国家人民防空办公室,中华人民共和国卫生部. GB/T 17216—1998 人防工程平时使用环境卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1998
- [9] 国家技术监督局. GB 9670—1996 商场(店)、书店卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [10] 国家技术监督局. GB 9672—1996 公共交通等候室卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [11] 中华人民共和国卫生部. GBZ 2—2002 工作场所有害因素职业接触限值[S]. 北京:法律出版社,2002
- [12] 国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国卫生部,国家环境保护总局. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002
- [13] 国家技术监督局,中华人民共和国卫生部. GB 16356—1996 地下建筑氡及其子体控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [14] 徐文华,韩华. 舒适性空调系统的临界净化效率与最小换气次数[J]. 暖通空调,2002,32(1):85-88
- [15] 国家空调设备质量监督检验中心. 复合式空气净化装置检测报告[R], 2010

[2] 郑慧凡. 空气状态参数的一种精确确定方法[J]. 中原工学院学报,2003,14(3)

[3] 高桂芝,王桂娟,高密林,等. 用 visual foxpro 6.0 计算湿空气的状态参数[J]. 河北工程技术高等专科学校学报,2007(2)

[4] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005

[5] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004

[6] Chow T T, Fong K F, Chan A L S, et al. Applying district-cooling technology in Hong Kong[J]. Applied Energy,2004,79(3): 275-289