

通风与空气过滤对控制室内生物污染的影响研究

曹国庆, 张益昭

(中国建筑科学研究院 建筑环境与节能研究院, 北京 100013)

摘要: 在分析室内空气微生物的来源、存活及传播等规律的基础上, 介绍了通风与空气过滤两种建筑室内生物污染工程控制方法, 采用微积分方法建立了通风过滤模型, 分析了通风对降低室内生物污染浓度的影响, 给出了通风空调系统各空气过滤器滤菌效率的设计计算公式。理论计算结果表明当以控制室内生物污染为主要目的时, 自然通风效果不佳, 应考虑机械通风; 提高集中空调系统的各级过滤器滤菌效率, 有助于改善室内生物污染状况。

关键词: 通风; 空气过滤; 微生物污染; 滤菌效率

中图分类号: TU834; Q93-3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)01-0130-06

The Impact of Ventilation and Air Filtration in Controlling Indoor Airborne Microbes

CAO Guo-qing, ZHANG Yi-zhao

(Institute of Building Environment and Energy Efficiency, China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: We analyze the generation, transmission and living mechanism of indoor airborne microbes and present two commonly used engineering control methods for microbial contamination: ventilation and air filtration. A mathematical calculation model is developed to incorporate the two ways likely having significant impact on microbial contamination control. We also discuss the relationship between different ventilation parameters and microbial concentration, provide some design equations for determination of microbial filtration efficiency, and calculate the efficiency of air filters used in certain buildings. The results show that the natural ventilation is not a good contamination control for airborne microbes when they are a main indoor pollutant; mechanical ventilation should be used in such cases. If the atmospheric airborne microbes cannot be neglected or its indoor concentration is high, incorporating ventilation with air filtration is a good way to control indoor airborne microbial contamination. Enhancement of filter efficiency at various levels used in central air-conditioning systems is helpful for improving indoor microbial contamination control condition.

Key words: ventilation; air filtration; microbial contamination; microbial filtration efficiency

“健康从家庭开始”是世界卫生组织提出的口号。然而, 在我国普遍存在卫生设施不完善和卫生习惯不科学的问题。在许多表面干净整洁的居室内, 鼻腔滤过性病毒、呼吸合胞体病毒、沙门氏菌和

大肠杆菌等细菌仍大量存在, 直接危害着居民健康^[1]。细菌和真菌等微生物在室内孳生繁殖而污染空气, 已经成为目前重要公共环境卫生问题, 在美、日、德、法等国家, 是人们最为关注的课题之一^[2-6]。

收稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题: 建筑室内生物污染控制与改善关键技术研究(2006BAJ02A10)

作者简介: 曹国庆(1978-), 男, 中国建筑科学研究院副研究员, 博士, 主要从事空气净化、室内空气质量等方面的研究, (Tel)010-84278377-817; (E-mail)cgq2000@126.com。

控制室内空气的有害微生物浓度水平,减少由于室内生物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。由于室内微生物污染控制涉及医学、微生物学、建筑环境学等方面的专业知识,属于跨学科领域,对一般工程技术人员来说难于处理此类问题。论文拟从工程应用角度阐述通风换气与空气过滤两种室内生物污染控制方法,以期能为相关人员提供一些有益的参考。

1 室内微生物污染控制的技术原理

1.1 室内微生物污染种类和根源

室内微生物污染是一大类活性有机物造成的,通过空气传播,常常是肉眼看不到的,通常包括细

菌、病毒和真菌,各自尺寸及特点如表1^[7]所示。室内空气中的微生物是室内外各种污染造成的,室外空气微生物随气流带入室内,室内湿度较高的浴室、厨房、空调蒸发器等地方容易滋生繁殖大量微生物。人员是建筑室内生物污染的主要来源之一,在室内产生生物污染的活动多是说话、行走、抬臂、起坐等。天津大学1984年以来,对人体发菌量进行了一系列测试,得到了不同服装、动作、场所等情况下的人体发菌量^[8]。文献^[9]给出了人员讲话、咳嗽和喷嚏时释放病毒气溶胶数目的粒径分布图,在进行室内发菌量计算时可结合文献^[8]、^[9]的数据,折合成按人员计算为2 000 cfu/(min·p)。

表1 室内微生物污染种类

污染种类	导致的疾病	尺寸/ μm	特点
细菌	军团症、肝炎、流感、过敏症、肺炎、哮喘	1~10	军团症、肺炎以及肺结核都以空气作为传播媒介
病毒	传染病	0.02~0.4	通过呼吸道传染,例如通过唾液、喷嚏、咳嗽等传染
真菌	哮喘、鼻炎、传染病、癌症	1~60	包括酵母菌和霉菌。能在免疫功能差的人群里引起过敏症,霉菌还能产生悬浮在空气中的有机体,这些有机体常常能产生我们常说的霉变的臭味。

1.2 微生物的存活特性

微生物污染的特点是具有生长、繁殖及延续生物学全过程的能力,只要条件适宜,就会通过细胞分裂繁殖成大的生物群体。以细菌为例,在温、湿度适宜的条件下,一般每1/3~1/2 h可分裂繁殖一次^[10]。由于环境因素(包括气温、相对湿度、大气中的气体、照射等)及微生物种类特性的影响,微生物的存活率(即活性)从其形成的那一瞬间开始就处在不稳定的状态,随时间的推移而降低。国内外大量研究结果表明空气中的微生物群体衰亡与时间呈指数函数关系,可用 $\ln N_t/N_0 = -Kt$ 表达^[8,10], N_t 为 t 时刻的空气微生物浓度, N_0 为起始时刻的空气微生物浓度, K 为衰减常数, t 是时间。细菌和病毒的存活能力与其大小尺寸有很大关系,较小的个体仅需少量水分和养分即可生存,在空气中存活的时间相对较长;与细菌和病毒不同,真菌孢子由于其细胞结构相对完整,存活能力相对较强^[11]。

1.3 微生物污染的传播及危害性

空气中的微生物大多附着在灰尘粒子上,悬浮于空气中借助空气的各种运动进行传播。空气中与疾病有关的带菌粒子直径一般为4~20 μm ,来自人

体的微生物主要附着在12~15 μm 的灰尘粒子上,许多真菌以单个孢子形式存在于空气中。气溶胶学知识表明1~5 μm 的微粒可直接侵入肺泡,6~10 μm 的微粒易沉着在小支气管,10~30 μm 的会沉积在支气管,若微粒上附着致病性的微生物,将引起疾病感染,如熟悉的流感、肺结核、白喉、麻疹、哮喘等。

1.4 室内生物污染的控制

由于室内微生物污染直接威胁着人类健康,且微生物自然衰减的速率是很慢的,特别是当室内存在污染源时,其污染浓度在自然状态下是逐渐上升的,故应采取适当措施控制室内生物污染,改善室内空气品质。目前,建筑室内生物污染控制方法主要有通风、空气过滤和紫外线照射。另外还有一些处在发展阶段的技术也可以应用于生物污染控制,这些技术包括:静电沉积、负离子灭菌、光催化灭菌、等离子体灭菌、臭氧灭菌和化学消毒剂(如过氧乙酸、过氧化氢、二氧化氯等)喷雾消毒灭菌等,但这些技术并未被充分认识,缺乏长期实际应用效果的考核,甚至还有副作用(如臭氧、微生物变异等),并未得到各国专业标准推荐,应用于住宅建筑、办公建筑室内生物污染控制仍有很多问题亟待研究。

紫外线照射的杀菌效果是明显的,并且已在医药、食品行业广泛采用,其缺点是消毒时人员不能在场。将紫外线照射应用到空调系统中时,由于空气流速比较高,细菌暴露于紫外线时间短,接受照射剂量小,消毒效果差,另外伴有臭氧发生,其应用于集中空调系统建筑室内生物污染控制上的具体形式仍有待研究。

目前适用于人居环境建筑室内生物污染控制的主流方向仍是通风和空气过滤,论文将集中讨论通风与空气过滤这两种最基本的、已被充分认识的室内生物污染控制方式。

1.4.1 通风 通风可以有效降低室内生物污染物浓度,原理为通过加大室内新风量,直接物理稀释室内污染物,简单、有效,但其换气的效果容易受到室外气候条件的影响。建筑通风包括自然通风和机械通风,自然通风可在不消耗不可再生能源情况下提供新鲜清洁的自然空气,带走污浊的室内空气,改善室内环境,当自然通风达不到室内污染控制要求时,应设置机械通风。

1.4.2 空气过滤 空气过滤是让空气经过纤维过滤材料,将空气中的颗粒污染物捕集下来的净化方式。空气过滤不仅可以过滤颗粒污染物而且可以过滤细菌和病毒^[12-15],这是因为细菌和病毒这类微生物在空气中是不能单独存在的,常在比它们大数倍的尘粒表面发现。高效过滤器的滤菌效果已成定论,比过滤 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 微粒要大1~3个数量级,这是因为微生物微粒的等价直径约在1~5 μm 之间^[10]。涂光备^[16]等研究发现纤维对大气菌的过滤效率与其对 $\geq 5 \mu\text{m}$ 的大气尘的计数效率有较好的线性相关关系,可以近似地把对大气菌效率看成对 $\geq 5 \mu\text{m}$ 大气尘的计数效率。空气过滤结构简单,在集中、半集中空调系统中应用较广泛。

2 集中空调通风过滤模型

2.1 室内生物污染浓度理论瞬时计算式

为了简化计算,假定室内通风量是稳定的,发菌量是常数,室外大气生物污染浓度是常数,忽略渗入的生物污染和管道产菌的可能性,忽略生物污染物在管道内和室内的繁殖、沉降和衰减,假定室内生物污染物是均匀分布的。

以图1所示1次回风全空气系统为例,可推导出建筑室内生物污染浓度瞬时式。可以看出,进入室内的微生物由3部分组成:1)由回风带入室内的

生物污染;2)由新风带入室内的生物污染;3)室内产生的生物污染。

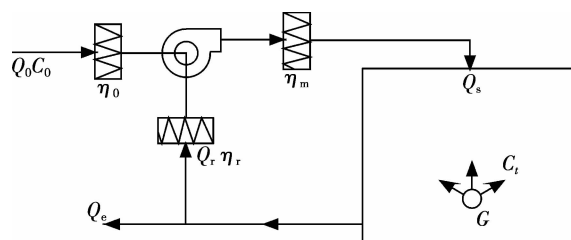


图1 一次回风全空气系统示意图

在微元时间 dt 内室内生物污染浓度的变化 dC_t 可由式(1)进行计算。

$$V \cdot dC_t = C_t Q_r (1 - \eta_r) (1 - \eta_m) \cdot dt +$$

$$C_0 Q_0 (1 - \eta_0) (1 - \eta_m) \cdot dt + G \cdot dt - Q_s C_t \cdot dt \quad (1)$$

式中, V 为室内体积, m^3 ; C_t 为某时间 t (小时) 的室内生物污染浓度, cfu/m^3 ; Q_r 为回风量, m^3/h ; η_r 为回风过滤器滤菌效率, %; η_m 为主过滤器滤菌效率, %; C_0 为室外空气生物污染浓度, cfu/m^3 ; Q_0 为新风量, m^3/h ; η_0 为新风过滤器滤菌效率, %; G 为室内发菌量, cfu/h ; Q_s 为送风量, m^3/h ; $Q_s = Q_0 + Q_r$ 。

设 n 为室内换气次数, h^{-1} ; s 为新风比 ($s = Q_0 / Q_s$); G_v 为单位容积发菌量, $\text{cfu}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, $G_v = G / V$; 把 $t=0$ 时的室内生物污染浓度称为原始生物污染浓度, 以 C_p 表示, 对式(1)进行积分求解可得室内生物污染浓度的瞬时式:

$$C_t = \frac{ns(1-\eta_0)(1-\eta_m)C_0 + G_v}{n[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{n[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]C_p}{ns(1-\eta_0)(1-\eta_m)C_0 + G_v} \right] e^{-n[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]t} \right\} \quad (2)$$

2.2 室内生物污染浓度理论稳定式

将式(2)中的生物污染浓度瞬时式对时间取极限可得其稳定浓度计算式如下:

$$C = \lim_{t \rightarrow \infty} C_t = \frac{ns(1-\eta_0)(1-\eta_m)C_0 + G_v}{n[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]} \quad (3)$$

生物污染浓度稳定式对确定集中空调系统内相关空气过滤器的过滤效率具有重要意义。稳定状态下室内生物污染浓度与许多因素有关,限于篇幅,这里不能逐一加以分析,论文拟对换气次数、新风比、空气过滤器的滤菌效率对室内生物污染浓度的影响进行探讨。

3 室内通风

建筑仅采用通风而无空气过滤措施时,图 1 中的 $\eta_0 = \eta_r = \eta_m = 0$ 。室外空气中极少会存在能够引发严重感染的致病微生物。因此,用于稀释通风的室外空气在一般情况下可以被当作是经过消毒的清洁空气(即 $C_0 = 0$)。此时式(2)可以简化为:

$$C_t = \frac{G_V}{ns} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{nsC_P}{G_V} \right] e^{-nst} \right\} \quad (4)$$

当室内微生物污染源从某时刻起以恒定速度释放污染物时,设定起始时刻微生物污染浓度为 0,则式(4)可进一步简化为:

$$C_t = \frac{G_V}{ns} (1 - e^{-nst}) \quad (5)$$

由式(5)进行计算,图 2 给出了污染源释放量为常数、新风比 $s=1$ (自然通风、机械通风、集中空调新风运行时新风比 s 均为 1)时,对于不同换气次数室内污染物浓度的一般响应情况,自然通风时室内换气次数一般均较小,图 2 中以换气次数 $n=0.2 \text{ h}^{-1}$ 代表自然通风。图 3 给出了污染源释放量为常数、换气次数 $n=8 \text{ h}^{-1}$ 时,对于不同新风比室内污染物浓度的一般响应情况。

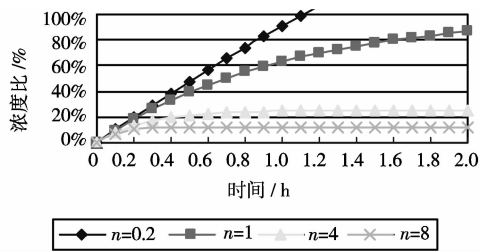


图 2 新风比为 1 时,不同换气次数对室内污染物浓度的影响

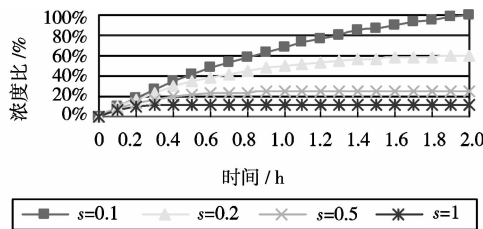


图 3 换气次数为 8 h^{-1} 时,不同新风比对室内污染物浓度的影响

从图 2、3 可以看出:

1) 增大换气次数 n 或新风比 s 可以更好地控制室内生物污染,使其迅速达到稳定浓度,且稳定浓度较小。

2) 自然通风(一般情况下 $n < 1 \text{ h}^{-1}$)无法有效控

制室内生物污染,室内污染物浓度随时间的延长逐渐增大, $n=0.2 \text{ h}^{-1}$ 时,甚至成线性递增关系。

3) 依靠通风控制室内生物污染,在新风比 s 较小时(如 $s=0.1$)效果较差,室内污染物浓度随时间的延长逐渐增大。

4 空气过滤

由于一些病原微生物在浓度很小的情况仍然可以引起感染致病,故应尽可能缩短自净时间,减小室内生物污染稳定情况下的浓度,则要成倍增加换气次数或新风比,引起能耗的巨大增加,此时若能结合空气过滤进行室内生物污染的控制将起到事半功倍的效果。

4.1 新风过滤器滤菌效率 η_0 对 C 的影响

将式(3)中的 C 对 η_0 求偏导可得:

$$\frac{\partial C}{\partial \eta_0} = \frac{-s(1-\eta_m)C_0}{[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]} < 0 \quad (6)$$

C 对 η_0 的偏导小于 0,说明 C 是 η_0 的减函数,随 η_0 的增大而减小、减小而增大,显然,若在新风口安装效率较高的过滤器,对控制建筑室内生物污染是非常有效的,由于我国大气污染相对较重,选用效率较高的新风过滤器是十分必要的。

4.2 回风过滤器滤菌效率 η_r 对 C 的影响

将式(3)中的 C 对 η_r 求偏导可得:

$$\frac{\partial C}{\partial \eta_r} = \frac{[ns(1-\eta_0)(1-\eta_m)C_0 + G_V](1-s)(1-\eta_m)}{n[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]^2} < 0 \quad (7)$$

C 对 η_r 的偏导小于 0,说明 C 是 η_r 的减函数,随 η_r 的增大而减小、减小而增大,显然,若在回风口安装高效过滤器,对控制建筑室内生物污染也是非常有效的,但实际工程条件不允许,主要是因为高效过滤器阻力大,回风采用高效过滤器将显著增加系统能耗。

4.3 η_0 与 η_r 对 C 的影响比较

对比分析式(6)、(7)可以看出, C 对 η_0 的偏导与 η_0 无关,而 C 对 η_r 的偏导与 η_r 有关,且 $\frac{\partial C}{\partial \eta_r}$ 的绝对值随 η_r 的增大而减小,表明增大 η_0 可以显著降低 C ,增大 η_r 虽然也可以降低 C ,但随着 η_r 的增大, C 的降低趋于平缓,即回风过滤器滤菌效率 η_r 越大,其变化对室内空气生物污染浓度的影响越不明显。对于某一特定工况,当 $n, s, \eta_0, \eta_r, \eta_m, C_0, G$ 一定时,

为提高室内空气质量,降低室内生物污染浓度,若仅想调整 η_0 或 η_r ,如何操作? 这个问题可由式(8)中的 p 与数值 1 之间的相对大小来判定。

$$p = \frac{\partial C}{\partial \eta_r} / \frac{\partial C}{\partial \eta_0} = \frac{[ns(1-\eta_0)(1-\eta_m)C_0 + G_V](1-s)}{ns[1-(1-s)(1-\eta_r)(1-\eta_m)]C_0} = \frac{(1-s)C}{sC_0} \quad (8)$$

从式(8)可以看出 p 仅与新风比 s 、稳态室内生物污染浓度 C 、室外大气细菌浓度 C_0 有关,而与 η_0 、 η_r 无关。当 $p > 1$ 时,说明调整 η_r 对 C 的影响大于调整 η_0 ,此时可通过提高 η_r 显著降低室内生物污染浓度 C ;当 $p = 1$ 时,说明调整 η_r 对 C 的影响与调整 η_0 相同;当 $p < 1$ 时,说明调整 η_r 对 C 的影响小于调整 η_0 ,此时可通过提高 η_0 显著降低室内生物污染浓度 C 。

4.4 室外大气细菌浓度 C_0 的选取

前文曾述及室外空气在一般情况下可以被当作是经过消毒的清洁空气(即 $C_0 = 0$),这对于研究能够引发严重感染的致病微生物来说是成立的,但当研究建筑物室内细菌总数,设计计算空气过滤器过滤效率时,室外空气带入室内的微生物污染就不能忽略了。

室外大气细菌浓度的变化相当大,与时间、地点、植被、环境条件、气象等诸多因素有着密切的关系。我国军事医学科学院对室外大气细菌浓度进行了大量研究^[17],给出的城镇大气细菌浓度数据大多在 $1\,000 \sim 5\,000 \text{ cfu/m}^3$ 之间。现在国内许多城市已建立大气污染指数报告制度,设计者可向当地环保部门查取有关数据,对尚无实测数据的地方,建议根据当地大气污染程度采用 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ cfu/m}^3$ 作为 C_0 值,也可取上限浓度 $5\,000 \text{ cfu/m}^3$ ^[18]。

4.5 室内空气细菌浓度设计值 C 的确定

原苏联室内空气卫生评价标准规定细菌总数 $< 2\,000 \text{ cfu/m}^3$ 为清洁空气, $2\,000 \sim 4\,000 \text{ cfu/m}^3$ 为尚满意空气, $4\,000 \sim 7\,000 \text{ cfu/m}^3$ 为轻污染空气, $> 7\,000 \text{ cfu/m}^3$ 为重污染空气^[19]。多年来,我国没有室内空气细菌总数卫生标准,一直沿用前苏联标准作为评价标准。1998年我国颁布了 GB/T 17093-1997《室内空气细菌总数卫生标准》,规定细菌总数应 $\leq 4\,000 \text{ cfu/m}^3$ (撞击法) 和 $\leq 45 \text{ cfu/皿}$ (沉降法)。2002年颁布的 GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》规定菌落总数应 $\leq 2\,500 \text{ cfu/m}^3$ 。

4.6 主过滤器滤菌效率的计算

对式(3)进行数学变换得出主过滤器效率:

$$\eta_m = 1 - \frac{nC - G_V}{nC_0s(1-\eta_0) + nC(1-s)(1-\eta_r)} \quad (9)$$

式中, C 为稳定平衡时的室内生物污染浓度,在确定空气过滤器滤菌效率时,应使 C 小于室内生物污染浓度的允许值。

从式(9)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^[20]。

4.7 实例计算

设某建筑物室内层高 3 m, 人员密度为 0.3 人/m^2 , 新风量为 $16 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{p})$, 换气次数为 8 h^{-1} , 室内设计细菌浓度为 $2\,000 \text{ cfu/m}^3$, 室内发菌量折合成按人员计算为 $2\,000 \text{ cfu}/(\text{min} \cdot \text{p})$, 室外大气细菌浓度为 $5\,000 \text{ cfu/m}^3$ 。此时新风比 $s = 20\%$, 室内平均体积发菌量 $G_V = 12\,000 \text{ cfu}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

4.7.1 η_0 、 η_r 和 η_m 匹配计算 对不同 η_0 和 η_r , 由式(9)计算所得 η_m 如图 4 所示。

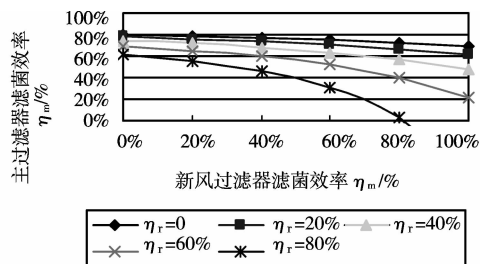


图 4 过滤器滤菌效率计算结果

对图 4 进行分析可知:

1) 选用较高的 η_r 有利于降低对主过滤器的要求,且 η_r 越大,其变化对降低主过滤器滤菌效率 η_m 越明显。

2) 选用较高的 η_0 有利于降低对主过滤器的要求,且 η_0 越大,其变化对降低主过滤器滤菌效率 η_m 越明显,选用 η_0 较高的新风过滤器有利于改善室内空气质量,与提高主过滤器或回风过滤器滤菌效率相比,具有投资较小、运行费用较低及维护管理较方便的优点。

3) η_0 、 η_r 和 η_m 均在 55% 左右时,即可确保室内生物污染浓度在允许浓度范围内。

4) $\eta_r = 0$, 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 $\eta_0 <$

100%,应有 $\eta_m \geq 70\%$,若 $\eta_0 = 0$ (即新风过滤器未安装或失效时),应有 $\eta_m \geq 80\%$ 。

天津大学对不同类型过滤器的滤菌效率做了大量试验^[8],得出在常规滤速下的滤菌效率分别为:粗效过滤器 30%~50%,中效过滤器 70%~90%,高中效以上大于 99%^[11]。根据上述对图 4 的分析可知,主过滤器应为中效过滤器,由蔡杰博士专著^[21]中给出的空气过滤器效率规格经验比较图可知,与中效过滤器对应的欧洲规格过滤器约为 F5~F7,则在考虑一定安全系数的情况下,建议主过滤器至少使用 F7 级过滤器,才能保证室内生物污染浓度降低到允许的限定值以下,计算结果与 EUROVENT REC06^[22]的推荐要求相吻合。

4.7.2 η_0 与 η_r 对 C 的影响比较计算 将 $s=0.2$ 、 $C=2\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 、 $C_0=5\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 代入式(8)可得此时 $p=1.6>1$,说明调整 η_r 对室内生物污染浓度的影响大于调整 η_0 ,此时可通过提高 η_r 显著降低室内生物污染浓度。从图 6 也可以看出,提高 η_r 比提高 η_0 更能显著降低 η_m ,则在 η_m 不变的情况下可以显著降低室内生物污染浓度 C 。

5 结 论

1)当以控制室内生物污染为主要目的时,自然通风效果不佳,应考虑机械通风,加大换气次数或新风比可以显著控制室内污染,但往往引起初投资与运行费用的上升,此时结合空气过滤进行室内生物污染控制往往可以起到事半功倍的效果。

2)对风机盘管加新风系统半集中式空调系统而言,该文分析公式及方法同样适用,此时 η_m 为 0。

3)该文给出的通风过滤模型及过滤器滤菌效率计算方法,可供建筑室内生物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_0 、 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。

4)提高集中空调系统的各级过滤器滤菌效率,有助于改善室内生物污染状况。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。

5)为保证室内生物污染浓度降低到允许值以下,主过滤器至少使用 F7 级过滤器,即中效过滤器。

参考文献:

- [1] 徐友祥,孙玉来,叶华,等. 居室环境微生物污染状况调查[J]. 劳动医学,2001,18(3):184-185.
XU YOU-XIANG, SUN YU-HAI, YE HUA, et al. Investigation of indoor airborne microbial pollution[J]. Journal of Labor Medicine, 2001, 18(3): 184-185.
- [2] FLANNIGAN B, McCABE E M, McGARRY F. Allergenic and toxigenic micro-organisms in houses[J]. Journal of Applied Bacteriology (Suppl.), 1991, 70: 61-73.
- [3] HUSMAN T. Health effects of indoor air microorganisms [J]. Scandinavian Journal of Work Environment and Health, 1996, 22: 5-13.
- [4] SYLVIE PARAT, ALAIN PERDRIX, SYLVIE MANN, et al. Contribution of particle counting in assessment of exposure to airborne microorganisms[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 951-959.
- [5] SIMMONS R B, CROW S A. Fungal colonization of air filters for use in heating, ventilating, and air conditioning (HVAC) systems[J]. Journal of Industrial Microbiology, 1995, 14: 41-45.
- [6] LAITINEN S, KANGAS J, KOTIMAA M, et al. Workers exposure to airborne bacterial and endotoxins at industrial wastewater treatment [J]. American Industrial Hygiene Association, 1994, 55: 1055-1060.
- [7] 罗晓熹,张寅平,吴琼,等. 室内生物污染治理方法研究述评与展望[J]. 暖通空调, 2005, 35(9): 23-29.
LUO XIAO-XI, ZHANG YIN-PING, WU QIONG, et al. Disinfection methods of microbiologic pollution of indoor air: review and prospect [J]. Heating, Ventilating and Air-conditioning, 2005, 35(9): 23-29.
- [8] 涂光备. 药工业的洁净与空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [9] DUGUID J P. The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei[J]. Journal of Hygiene, 1945, 54: 471-479.
- [10] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 李建兴,涂光备,涂岱昕. 室内微生物污染的三种工程控制方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 29-33.
LI JIAN-XING, TU GUANG-BEI, TU DAI-XIN. Three engineering control methods of indoor airborne microbes [J]. Heating, Ventilating and Air-conditioning, 2004, 34(12): 29-33.

(下转第 140 页)

- FU-HAI, et al. Synthesis of macromonomer for polycarboxylic acid type water-reducers[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007(4):111-113.
- [9] HOVER K C. Concrete mixture proportioning with water-reducing admixtures to enhance durability: a quantitative model [J]. Cement and Concrete Composites, 1998(20):113-119.
- [10] RIXOM R. Economic aspects of admixture use [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 20(2/3): 87-101.
- [11] 童代伟. 新型聚羧酸系高性能减水剂的合成研究[J]. 建筑技术开发, 2004, 12:103-105.
- TONG DAI-WEI. Synthesis of polycarboxylic series of high performance water reducer[J]. Building Technique Development, 2004, 12:103-105.
- [12] BRADLEY G, HOWARTH I M. Water soluble polymers; the relationship between structure, dispersing action and rate of cement hydration [J]. Cement Concrete. Aggregate, 1986(8): 996-1001.
- [13] ANNA M GRAHIEE. Contribution to the knowledge of melamine superplasticizer effect on some characteristics of concrete after long period of hardening [J]. Cement and Concrete Research, 1999(29):699-704.
- [14] 李崇智, 李永德, 冯乃谦. 聚羧酸系减水剂结构与性能关系的试验研究[J]. 混凝土, 2002(4):3-5.
- LI CHONG-ZHI, LI YONG-DE, FENG NAI-QIAN. The study of structure and properties of polycarboxylic water-reducing agent[J]. Concrete, 2002(4):3-5.
- [15] 刘治猛, 罗远芳, 刘煜平, 等. 新型聚羧酸类高效减水剂的合成与性能研究[J]. 化学建材, 2004(4):15-18.
- LIU ZHI-MENG, LUO YUAN-FANG, LIU YU-PING, et al. Preparation and properties of a novel polycarboxylic superplasticizer [J]. Chemical Building Materials, 2004(4):15-18.

(编辑 胡玲)

(上接第135页)

- [12] MAUS R, UMHAUER H. Collection efficiencies of coarse and fine dust filter media for airborne biological particles[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(3): 401-415.
- [13] KOWALSKI W J, BAHNFLETH W P, WHITTAM T S. Filtration of airborne microorganisms: modeling and prediction[J]. Ashrae Transactions, 1999, 105(2):4-17.
- [14] WAKE D, REDMAYNE A C, THORPE A, et al. Sizing and filtration of microbiological aerosols[J]. Journal of Aerosol Science, 1995, 26(S1):529-530.
- [15] MILLER-LEIDEN S, LOBASCIO C, NAZAROFF W W. Effectiveness of in-room air filtration and dilution ventilation for tuberculosis infection control[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1996, 46(9): 869.
- [16] 涂光备, 张少凡. 纤维型滤料滤菌、滤尘效率关系的研究[J]. 洁净技术, 1990(2):20-21.
- TU GUANG-BEI, ZHANG SHAO-FAN. Relation of fibers' filtration efficiency for microbes and particles[J]. Air Cleaning Technology, 1990(2):20-21.
- [17] 车凤翔. 空气生物学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] 沈晋明, 许钟麟. 生物洁净室尘埃浓度与细菌浓度的计算方法[J]. 暖通空调, 1995, 25(4):16-19.
- SHEN JIN-MING, XU ZHONG-LIN. Calculation of the particle and airborne bacteria concentration in biocleanrooms [J]. Heating, Ventilating and air-conditioning, 1995, 25(4): 16-19.
- [19] 于玺华. 现代空气微生物学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002.
- [20] 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.
- XU WEN-HUA. Calculation method of air filter efficiency in comfort air conditioning [J]. Heating, Ventilating and Air-conditioning, 2001, 31(3): 42-47.
- [21] 蔡杰. 空气过滤 ABC[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [22] EUROVENT REC 06 Recommendation, 1999. Air filters for better indoor air quality[S0], 1999.

(编辑 王秀玲)