

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.03.003

电子洁净室气流特性分布及颗粒物扩散数值模拟

赵福云, 文雅冰, 黄志荣, 陈 皓, 姚奕合, 谭志成

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为研究换气次数 ACH 、新风比 r 和空调节能比 ϕ 对空态电子洁净室内气流特性分布和颗粒物扩散的影响, 构建了简化的三维洁净室模型, 并采用数值模拟方法分析了室内典型位置处的气流特性、通风状况和颗粒物浓度变化。结果表明, 增大 ACH 、 r 和 ϕ 均可以增强室内人员和工作台区域附近的气流速度。 ACH 和 r 的增加可以促进行人呼吸高度处的通风效果, 而 ϕ 的改变主要对室内人员和工作台区域处的通风影响较大; 颗粒物浓度随 ACH 增加而减少, 室内不同区域的颗粒物扩散受 r 的影响不同, 不同人员处的颗粒物浓度变化差异较大, ϕ 的增大可以降低室内人员附近的颗粒物浓度。

关键词: 气流特性; 颗粒物; 电子洁净室; 数值模拟

中图分类号: TU119⁺.21; X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)03-0014-07

引文格式: 赵福云, 文雅冰, 黄志荣, 等. 电子洁净室气流特性分布及颗粒物扩散数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(3): 14-20.

A Numerical Simulation of Airflow Characteristics Distribution and Particle Diffusion in Electronic Cleanrooms

ZHAO Fuyun, WEN Yabing, HUANG Zhirong, CHEN Hao, YAO Yihe, TAN Zhicheng
(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to study the effects of the air change rate ACH , the fresh air ratio r and the air conditioning energy saving ratio ϕ on the airflow characteristics distribution and particle diffusion in an empty electronic clean room, a simplified three-dimensional clean room model has thus been constructed for this purpose, followed by an analysis of the airflow characteristics, ventilation conditions and particle concentration changes at typical indoor locations by using the numerical simulation method. The results show that an increase of ACH , r or ϕ can all enhance the airflow velocity in the vicinity of the indoor personnel and the operating platform area. With the increase of ACH and r , the ventilation effect can be promoted at the pedestrian breathing height, while the change of ϕ has a great impact on the ventilation of indoor personnel and the operating platform area. The particle concentration decreases with the increase of ACH , while the particle diffusion in different areas of the room is affected by r differently, and the concentration of particulate matter in the vicinity of different indoor personnel varies greatly, with the increase of ϕ generally reducing the concentration of particulate matter in the vicinity of indoor personnel.

Keywords: airflow characteristics; particle; electronic cleanroom; numerical stimulation

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1867221); 湖南省重点研发计划基金资助项目 (2022SK2084)

作者简介: 赵福云 (1977-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑通风与室内净化, E-mail: 1483873260@qq.com

0 引言

随着微电子技术飞速发展, 电子器件的特征尺寸越来越小, 因而对电子器件生产环境的洁净度提出了更高要求, 洁净室内能源消耗较大。故在保证洁净度的情况下尽可能降低能源消耗具有重要意义^[1]。

目前已有大量学者对电子洁净室内的气体流动与扩散进行了研究。黄若奕等^[2]比较了 ISO 3 级微电子洁净室空态与静态时的气流组织分布, 发现大尺寸工艺设备会使洁净室工作区内气流速度的不均匀性增高, 导致工作区内不能形成均匀的单向流流型。S. Murakami 等^[3]采用仿真模拟和实验相结合的方式研究了洁净室的气流组织。HU S. C. 等^[4]实验研究了在满载和不载有洁净工作台的情况下全尺寸运行的风机过滤单元式洁净室内详细的空气湍流特性。王江标等^[5]采用多风机过滤机组 (fan filter unit, FFU) 送风对大型电子洁净室内的气流分布进行了模拟研究, 发现当 FFU 布置率小于 50% 时, 其对洁净室内整体气流分布影响较小。O. Rouaud 等^[6]将数值模拟与选定通风标准的计算相结合, 对食品制造用全尺寸洁净室的瞬态污染物去除效率进行了数值研究。赵福云等^[7]分析了送风量大小、送风口数量及位置、工作台与送风口正对方式等对静态 ISO 6 级乱流电子洁净室内空气环境的影响。Gao N. P. 等^[8]使用漂移通量模型研究了混合通风 (mixing ventilation, MV)、置换通风 (displacement ventilation, DV) 和地板下空气分配 (underfloor air distribution, UFAD) 3 种典型通风系统下, 来自两个不同来源颗粒物的沉积速率和人体暴露量。赵福云等^[9]研究了回风口布置形式和送风速度对手术室内气流组织的影响, 发现回风口正对布置时室内的气流组织分布要优于间断布置。成瑾等^[10]模拟分析了制药洁净室“自净时间”的变化, 得知地面含尘量和送风含尘浓度等对“自净时间”的影响较大。但这些研究大多是研究通风方式或送风系统对洁净室内气流组织的影响, 而对送风参数等的研究尚少。

本文采用数值模拟法研究电子洁净室内气流分布特性、典型位置处通风状况和颗粒物浓度变化。先根据已有实验数据进行模型验证, 确保数值方法准确性, 再讨论换气次数、新风比和空调节能比等因素对室内气流特性、通风状况和颗粒物浓度变化的影响。

1 模型与方法

1.1 物理模型

为研究洁净室内气流组织分布及污染物浓度分

布情况, 建立如图 1 所示的典型洁净厂房物理模型。

本文选取电子洁净厂房为研究对象, 模型尺寸为 4 m × 3 m × 3

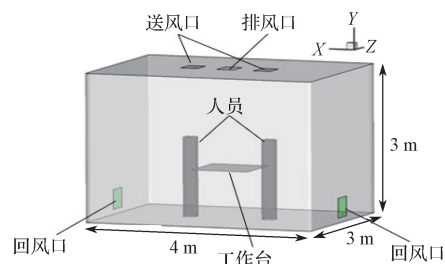


图 1 洁净室物理模型

Fig. 1 A cleanroom physical model

m (长 × 宽 × 高), 房间内设 2 个 0.2 m × 0.2 m × 1.6 m (长 × 宽 × 高) 的长方体模拟人体热源, 同时设有 1 个 1 m × 1 m (长 × 宽) 的作业台。不考虑门和窗, 采用顶送下回的方式, 顶部设置 2 个送风口, 近地面两侧设置 2 个回风口, 2 个送风口之间设置 1 个排风口。送风口的尺寸均为 0.3 m × 0.4 m (长 × 宽), 回风口的尺寸均为 0.3 m × 0.4 m (长 × 宽), 排风口的尺寸为 0.4 m × 0.4 m (长 × 宽)。根据不同换气次数、新风比和空调节能比, 共设置了 7 种模拟计算工况, 具体如表 1 所示。

表 1 模拟数值工况设置

Table 1 Simulation numerical condition setting

数值 工况	换气 次数/h ⁻¹	新风比/ %	空调 节能比/%	数值 工况	换气 次数/h ⁻¹	新风比/ %	空调 节能比/%
1	15	50	50	5	20	70	50
2	20	50	50	6	20	50	40
3	25	50	50	7	20	50	60
4	20	30	50				

本研究中的空调是带热回收装置的新型空调, 若室外温度高于室内温度, 便可进行热回收, 室外环境中经过污染物处理器处理后的新风送入空调设备内, 经空调设备再次处理后送入洁净房间, 然后从出口排出洁净房间, 排出的风中一部分热量被热回收装置吸收, 回收后的热量输送至新风进行下一次循环。空调热回收节能原理如图 2 所示, 图中 T_{in} 为新风吸收热回收热量后的温度, T_{fre} 为新风温度, T_{sup} 为送风温度, T_{exh} 为离开洁净房间温度, T_{out} 为排到室外环境温度, 单位均为 °C。空调节能比的计算式如下:

$$\phi = (T_{in} - T_{fre}) / (T_{sup} - T_{fre}) \quad (1)$$

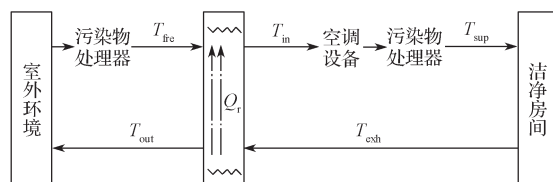


图 2 空调热回收节能原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy saving principle of air conditioning heat recovery

1.2 控制方程

采用 SIMPLE 算法对压力-速度方程进行解耦, 所有对流项均采用二阶迎风格式。此外, 运用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型求解三维稳态下的流场和污染物浓度场。

1) 连续性方程。其表达式为

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u_i 为 x_i ($i = 1, 2, 3$) 方向的速度, m/s 。

2) 动量方程。其表达式为

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i, \quad (3)$$

式中: p 为静压; S_i 为体积力; τ_{ij} 为应力张量, 且

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}。 \quad (4)$$

其中, μ 为动力黏度, δ_{ij} 为一个二元函数, 其自变量 (输入值) 一般是两个整数, 如果两者相等, 则其输出值为 1, 否则为 0。

3) 能量方程。其表达式为

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial(k + k_t)}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h。 \quad (5)$$

式中: h 为显热; T 为空气温度; k 为导热率; S_h 为体积热源; k_t 为湍流扩散引起的导热率, 且

$$k_t = (c_p \mu_t) / (Pr_t)。 \quad (6)$$

其中, c_p 为空气定压比热容, μ_t 为空气湍流黏度, Pr_t 为空气湍流普朗特数, 取 0.85。

4) RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。其表达式为

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}。 \quad (8)$$

式中: k 、 ε 分别为湍流动能和耗散率; μ_t 为湍流黏度; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为浮升力引起的湍动能。 C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均为经验常数, 分别取 0.09, 1.44, 1.92; σ_k 、 σ_ε 分别为 k 、 ε 的湍流普朗特数, 分别取 1.0, 1.3; 经验常数 $C_{3\varepsilon}$ 的值取决于流体速度方向与重力加速度方向。

1.3 常规边界条件设定

设定电子洁净室室内温度为 24°C , 新风温度设为 30°C 。送风口及回风口均采用速度入口 (velocity-

inlet), 排风口定义为压力出口 (pressure-outlet), 其余墙面定义为绝热壁面 (wall)。

采用拉格朗日 DPM 模型计算室内颗粒物的扩散, 工作人员和工作台同时为热源和释放源, 模拟人体温度取 37°C , 工作台热通量为 150 W/m^2 。假定工作人员和工作台释放的粒子粒径均为 $5 \mu\text{m}$, 粒子自身密度为 1000 kg/m^3 , 颗粒物释放速率为 $6.4 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$ 。

2 数值方法验证

本文采用 J. Moureh 等^[11]建立的简化室内通风模型来进行模型可行性验证, 模型结构见图 3。

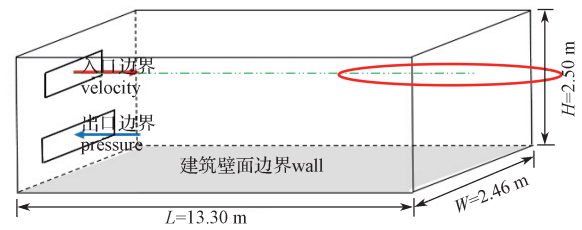
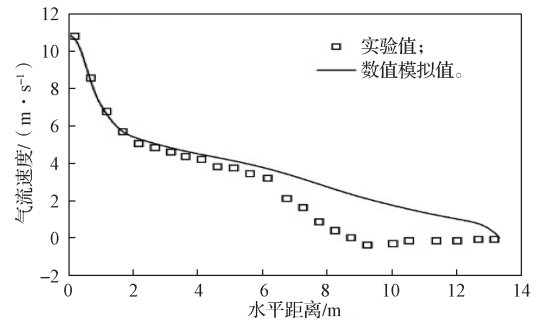


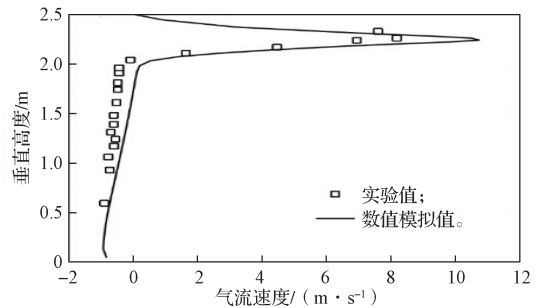
图3 简化室内通风模型结构示意图

Fig. 3 A simplified indoor ventilation model

图3所示模型的室内通风方式为典型的同侧上送下回方式, 其几何尺寸为 $13.30 \text{ m} \times 2.46 \text{ m} \times 2.50 \text{ m}$ ($L \times W \times H$)。选取进风口中心水平高度处的水平速度和距离送风口 1 m 处的垂直速度作为比较对象, 得到的数值结果与实验值的对比如图4所示。



a) 进风口中心水平高度处的水平速度



b) 距送风口1m处的垂直速度

图4 数值模拟结果与实验结果的比较

Fig. 4 Comparison between numerical results and experimental values

从图4中可以看出,在水平距离为0~6.0 m范围内,数值模拟的气流速度与实验值吻合较好,但在水平距离为6.0~13.3 m范围内,数值模拟结果要高于实验值,这说明 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型在预测壁面射流衰减时,会高估末端射流的速度值。其次,数值模拟的垂直速度与实验值吻合较好。总体上,数值结果可以较好地预测气流速度的变化趋势,两者之间的相对误差低于10%,较好地保证了数值方法的可靠性与

准确性。

3 结果与讨论

3.1 气流特性分析

图5~7分别为不同换气次数 ACH 、不同新风比 r 和不同空调节能比 φ 下典型位置 $z = 1.5$ m 处的气流速度分布云图。

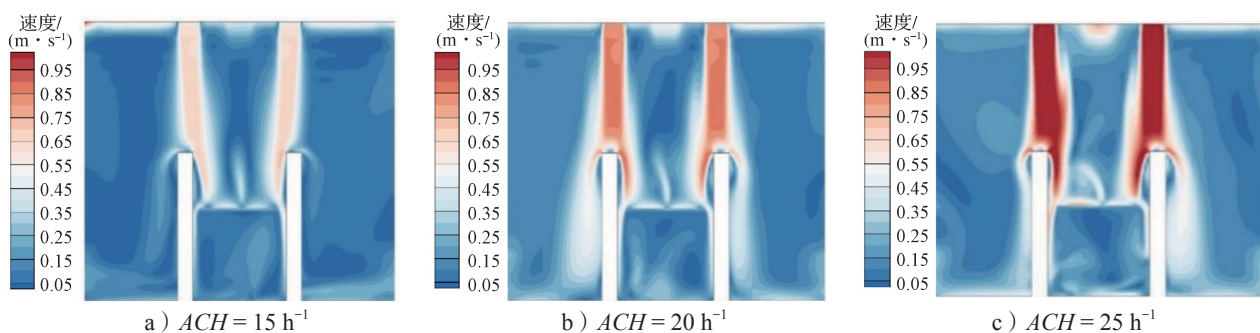


图5 不同 ACH 时 $z = 1.5$ m 处的气流速度分布云图

Fig. 5 Air velocity distribution nephogram with $z = 1.5$ m at different ACH

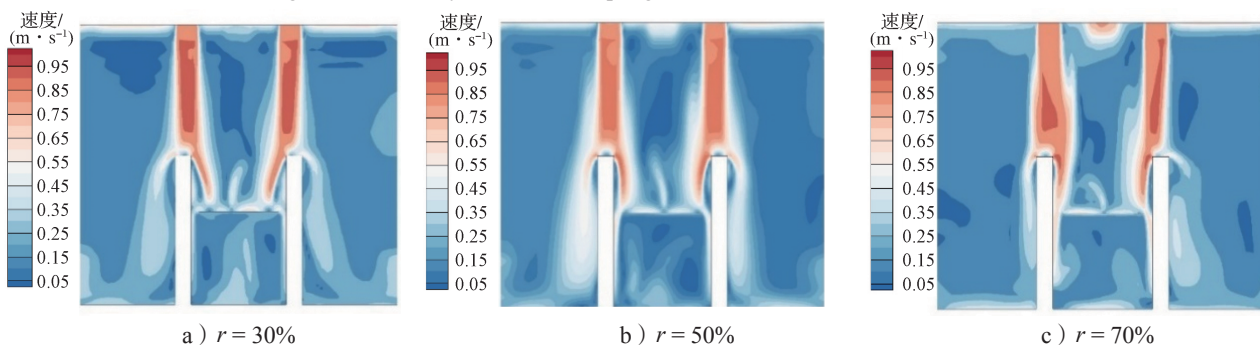


图6 不同 r 时 $z = 1.5$ m 处的气流速度分布云图

Fig. 6 Air velocity distribution nephogram with $z = 1.5$ m at different r

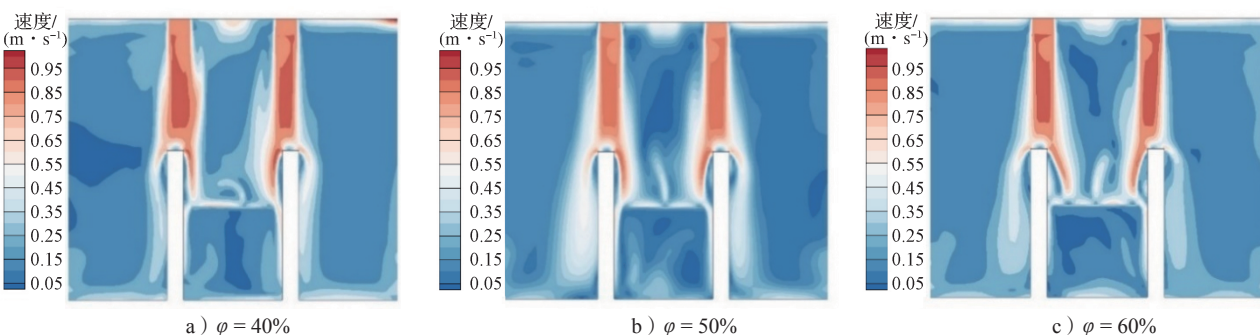


图7 不同 φ 时 $z = 1.5$ m 处的气流速度分布云图

Fig. 7 Air velocity distribution nephogram with $z = 1.5$ m at different φ

图5~7所示不同位置处气流速度分布模拟结果显示,增大 ACH 、 r 和 φ 均可以增强室内人员和工作台区域的气流速度。室内人员与工作台区域的气流方向大体保持了垂直向下的趋势,随着气流逐渐远离送风口且遇到人体阻碍时,气流从人体上方开始向四周偏转。这是因为来自正对人体的顶部送风口的送风气流压制了人体表面向上的热羽流,使得人体四周的气

流都向斜下方流动,从而将人体产生的热量和颗粒物向下扩散并流向回风口。其次,在工作台上方设置一个排风口,可以使得人员和工作台散发的颗粒物正对排风口排出。但是也可以看到,在人体上方偏转的气流沿斜下方扩散的过程中,将受到墙壁的阻挡而被挤压,使气流沿着墙壁爬升,于是在墙壁局部会出现较大流速区。气流在爬升过程中受到重力作用又会下

沉, 逐渐形成低速的涡旋并朝着回风口偏移, 通过回风口排出。气流在接触到地板受到地面的反弹向上运动, 故在设备下方形成低速涡流, 但位置远低于作业台和人体台高度, 最终会流向回风口, 带着热量和污染物颗粒排出洁净室。此外, 人体头部上方的速度分布主要受 ACH 的影响, 不同 r 和 φ 下人体头部上方的速度无显著差异。

3.2 室内通风状况分析

本文采用局部空气龄指标评价电子洁净室内

的通风状况, 局部空气龄 (τ_p) 是指一个空气微团从进入流场到达流场中某点所用的时间, 也表示外界新鲜空气到达某点所用的时间, 是评价室内通风的一个重要指标^[12], 局部空气龄的计算公式如下:

$$\tau_p = \bar{c} / S_p \quad (9)$$

式中: $\bar{c}$ 为示踪气体时均浓度; S_p 为示踪气体释放速率。

图 8~10 分别为不同 ACH 、 r 和 φ 下人员呼吸高度 $y=1.6\text{ m}$ 平面处的局部空气龄分布云图。

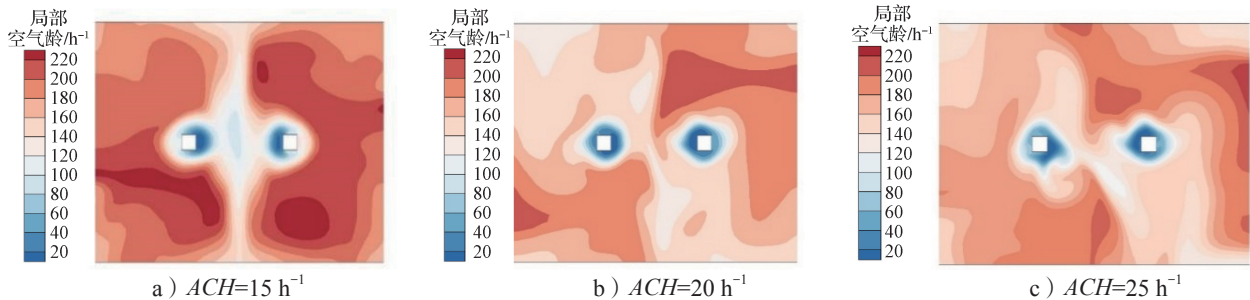


图 8 不同 ACH 时人员呼吸高度 $y=1.6\text{ m}$ 处的局部空气龄分布云图

Fig. 8 Local air age distribution nephogram at the breathing height $y=1.6\text{ m}$ of personnel at different ACH

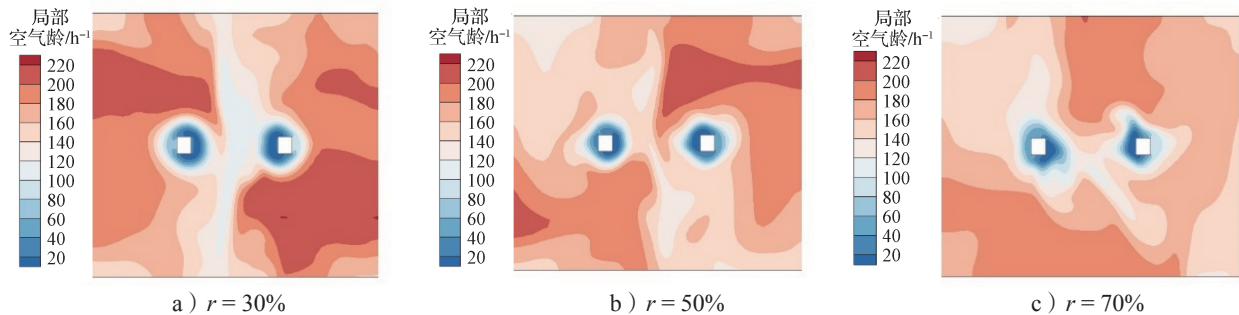


图 9 不同 r 时人员呼吸高度 $y=1.6\text{ m}$ 处的局部空气龄分布云图

Fig. 9 Local air age distribution nephogram at the breathing height $y=1.6\text{ m}$ of personnel at different r

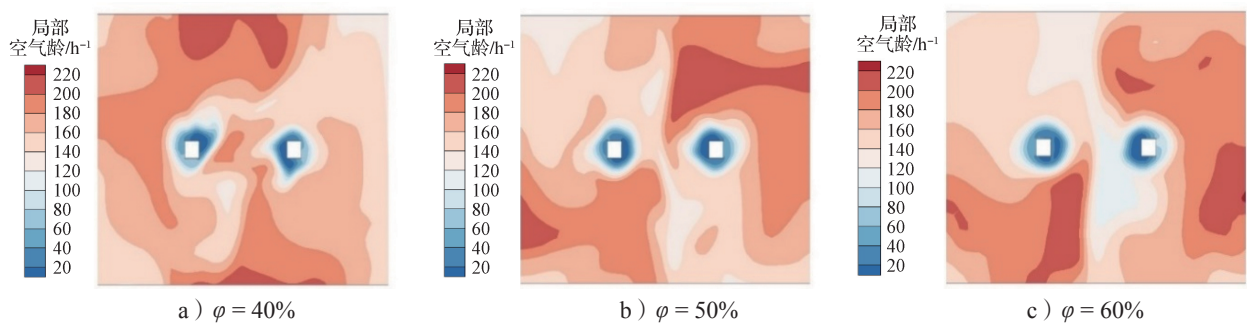


图 10 不同 φ 时人员呼吸高度 $y=1.6\text{ m}$ 处的局部空气龄分布云图

Fig. 10 Local air age distribution nephogram at the breathing height $y=1.6\text{ m}$ of personnel at different φ

图 8 中结果显示, 随着 ACH 增加, 人员呼吸高度处的局部空气龄总体减小, 尤其是靠近室内两侧处, 局部空气龄大幅度降低, 这是因为换气次数越大, 室内送风速度越大, 使得外界空气可以更快达到室内, 从而促进了室内通风换气。此外, 还可观察到, 当 $ACH=15\text{ h}^{-1}$ 时, 局部空气龄沿 $x=2\text{ m}$ 处为中心线, 两侧呈现对称分布现象。然而, 当 $ACH=20\text{ h}^{-1}$

或 $ACH=25\text{ h}^{-1}$ 时, 室内局部空气龄对称分布现象消失, 这可能是因换气次数增大后, 较大的送风速度加速了室内气流搅动, 从而出现了气流乱流现象。

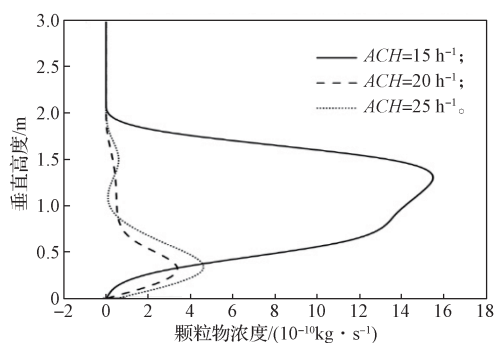
由图 9 可以看出, 当改变 r 时, 总体上略微降低了室内的局部空气龄。当 r 较小时, 靠近回风口侧的墙面附近有较大的局部空气龄, 随着 r 的增大, 在与回风口垂直的墙面附近出现了较大的局部空气龄值。

这是因为当新风比增大后, 回风口处的回风量降低, 从而在一定程度上减少了室内老旧空气的存在。

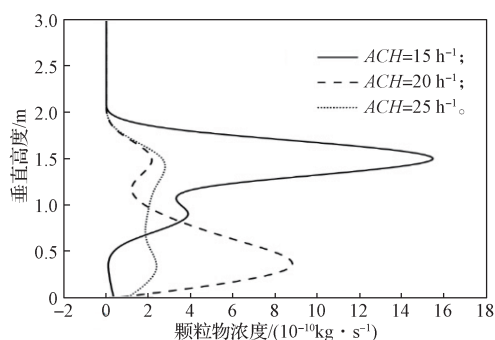
从图 10 中可以发现, 空调节能比 φ 的改变不会增大或减小人员呼吸高度处总体局部空气龄的大小。当 $\varphi=40\%$ 时, 两个人员之间工作台区域的局部空气龄较大, 与 $\varphi=50\%$ 和 $\varphi=60\%$ 时差异较大, 这说明增大 φ 会使得工作台区域的通风状况变差, 这或会对电子洁净室内的正常生产活动造成较大影响。

3.3 室内颗粒物浓度分析

图 11~13 分别分为不同 ACH 、 r 和 φ 下人员附近典型位置处的垂直高度下的颗粒物浓度变化曲线。总体结果显示, 在室内中下部可以发现较高的颗粒物浓度。由于人体和工作台同时为热源和颗粒物释放源, 所以在热浮升力作用下, 部分颗粒物会随热浮升力向上运动, 但同时在重力及顶部送风气流的影响下, 向上运动的颗粒物会被阻挡, 从而主要集中在室内中下部高度区域。



a) $x = 1.1$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线



b) $x = 2.9$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线

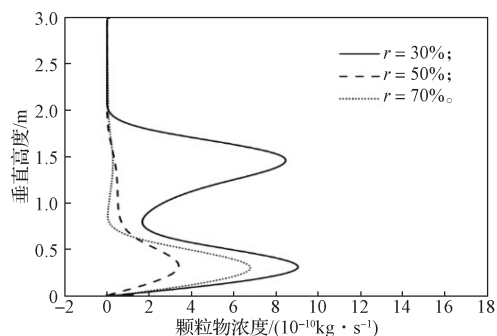
图 11 不同 ACH 时室内人员附近的颗粒物垂直浓度变化曲线

Fig. 11 Vertical concentration change curves of particulate matter in the vicinity of indoor personnel at different ACH

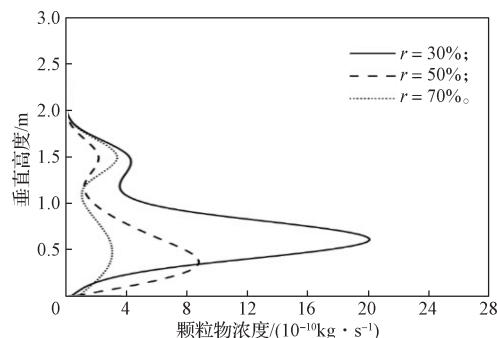
此外, 从结果中还能够得到, 颗粒物的浓度值在 $y = 0.3$ m 处和 $y = 1.5$ m 处分别出现峰值。前者对应于室内下部排风口高度, 颗粒物在此高度处随房间内的气流从回风口排出房间, 再经高效过滤器和热回收装置处理后与新风混合再次送回房间。而后者对应于人员高度, 单向送风气流在遇到人体后发生偏转,

使得在人体附近形成气流绕流现象, 从而出现流动旋涡, 导致颗粒物积聚。

由图 11 可知, 虽然换气次数的增加会促进室内的通风换气, 但不同区域的颗粒物浓度变化幅度仍有较大差异。总体而言, 随着换气次数的增加, 室内人员附近的颗粒物浓度均显著降低。



a) $x = 1.1$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线

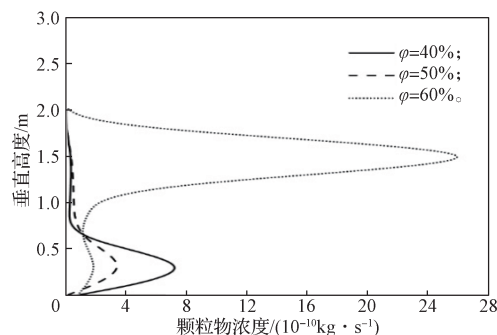


b) $x = 2.9$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线

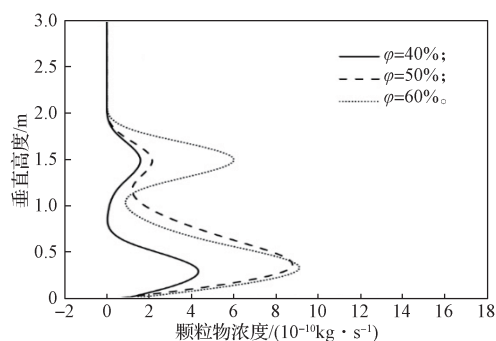
图 12 不同 r 时室内人员附近的颗粒物垂直浓度变化曲线

Fig. 12 Vertical concentration change curves of particulate matter in the vicinity of indoor personnel at different r

从图 12 中可以看出, 当 $r = 30\%$ 时, 室内人员附近的颗粒物浓度均是最高的, 这表明沿垂直方向上, r 越小时人员附近的污染状况越严重。此外, 当垂直高度 $y = 0.3$ m 时, 在室内人员 1 周围, $r = 70\%$ 时的颗粒物浓度要高于 $r = 50\%$ 时的颗粒物浓度; 而在人员 2 周围, $r = 50\%$ 时的颗粒物浓度要高于 $r = 70\%$ 时的颗粒物浓度, 这表明室内不同区域的颗粒物扩散受新风比影响不同, 并不是新风比越高, 颗粒物的去除效果越好, 还可能受房间内其他因素的影响。



a) $x = 1.1$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线



b) $x = 2.9$ m 处颗粒物垂直浓度变化曲线

图 13 不同 φ 时室内人员附近的颗粒物垂直浓度变化曲线

Fig. 13 Vertical concentration change curves of particulate matter in the vicinity of indoor personnel at different φ

由图 13 可知, 在室内人员 1 附近, 洁净室下部区域的颗粒物浓度随空调节能比增大而减少, 而在中上部区域, 颗粒物浓度随空调节能比增大而增大。室内人员 2 附近, 可以明显看到随着 φ 增大, 颗粒物浓度越高。总体而言, 增大 φ 可较好去除室内的颗粒物。

4 结论

通过数值模拟, 探讨不同 ACH 、 r 和 φ 对电子洁净室内的气流特性、通风状况和典型位置处颗粒物浓度变化的影响, 主要得到了如下结论:

1) 送风参数的改变对室内气流分布影响显著, 增大 ACH 、 r 和 φ 均可以增强室内人员和工作台区域附近的气流速度。

2) 随着 ACH 和 r 的增加, 人员呼吸高度处的局部空气龄值整体减小, 通风状况变好, 但 r 增加会使得与回风相垂直的壁面附近出现较大的局部空气龄。而改变 φ 主要对室内人员和工作台区域的局部空气龄影响较大。

3) 室内人员附近的颗粒物浓度主要在 $y = 0.3$ m 处和 $y = 1.5$ m 处分别出现峰值。其中颗粒物浓度随 ACH 的增加而减少; 室内不同区域的颗粒物扩散受 r 的影响不同, 不同人员处的颗粒物浓度变化差异较大; φ 的增大总体上可以降低室内人员附近的颗粒物浓度。

参考文献:

[1] WANG Y, ZHAO F Y, KUCKELKORN J, et al. Indoor Air Environment and Night Cooling Energy Efficiency of a Southern German Passive Public School Building Operated by the Heat Recovery Air Conditioning Unit[J]. Energy and Buildings, 2014, 81: 9–17.

[2] 黄若奕. 高设备占用面积比 ISO3 级微电子洁净室气流

组织研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

HUANG Ruoyi. ISO3 Level Microelectronics Cleanroom with High Equipment Footprint Rate Airflow Research[D]. Chengdu: Southwest JiaoTong University, 2016.

- [3] Murakami S, Kato S, Suyama Y. Numerical Study of Flow and Contaminant Diffusion Fields as Affected by Flow Obstacles in Conventional-Flow-Type Clean Room[J]. Ashrae Transactions, 1990, 96(2): 343–355.
- [4] HU S C, WU Y Y, Liu C J. Measurements of Air Flow Characteristics in a Full-Scale Clean Room[J]. Building and Environment, 1996, 31(2): 119–128.
- [5] 王江标, 李星, 王鲁平. 多 FFU 送风口在大型电子洁净室 CFD 模拟中的简化方法 [J]. 洁净与空调技术, 2016(1): 33–38.
- WANG Jiangbiao, LI Xing, WANG Luping. A Simplified Method of Multi FFU Outlets in CFD Simulation of Large Electronic Clean Room[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2016(1): 33–38.
- [6] ROUAUD O, HAVET M. Numerical Investigation on the Efficiency of Transient Contaminant Removal from a Food Processing Clean Room Using Ventilation Effectiveness Concepts[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(2): 163–174.
- [7] 赵福云, 杨国彪, 王云鹤, 等. 静态 ISO 6 级乱流电子洁净室气流组织数值模拟 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2021, 54(9): 810–819.
- ZHAO Fuyun, YANG Guobiao, WANG Yunhe, et al. Numerical Simulation of Airflow in Static ISO Class 6 Turbulence Electronic Cleanroom[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(9): 810–819.
- [8] GAO N P, NIU J L. Modeling Particle Dispersion and Deposition in Indoor Environments[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(18): 3862–3876.
- [9] 赵福云, 王云鹤, 杨国彪. 洁净手术室空态气流组织模拟 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2020, 53(11): 986–994.
- ZHAO Fuyun, WANG Yunhe, YANG Guobiao. Numerical Simulation of Airflow in an Empty and Clean Operating Room[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11): 986–994.
- [10] 成瑾. 制药洁净室气流分布特性及自净机理研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.
- CHENG Jin. Airflow Motion Distribution and Cleanliness Recovery Characteristics in the Pharmaceutical Cleanroom[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021.
- [11] MOUREH J, FLICK D. Airflow Characteristics Within a Slot-Ventilated Enclosure[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26: 12–24.
- [12] HANG J, SANDBERG M, LI Y. Age of Air and Air Exchange Efficiency in Idealized City Models[J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1714–1723.

(责任编辑: 廖友媛)