

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-182-07

医院病房置换通风系统 对空气传播感染风险的影响研究

朱永华

(南京市溧水区人民医院 南京 211200)

【摘要】 医院负压隔离病房的高效通风对于降低院内交叉感染和减少能源消耗至关重要。研究了置换通风在负压隔离病房中的适用性。为了评价不同工况下的通风系统,使用室内的换气效率和室内污染物的去除效率的概念对通风系统进行了研究。主要采用模拟对不同工况下室内的空气换气效率与污染物去除效果进行了研究,并采用实验的方式对模拟结果进行了验证。在研究工况中,分别考虑了换气次数变化,辐射墙壁变化和排风口位置变化对室内换气效率与污染物去除效率的影响。结果显示采用置换通风时,实际的换气效率介于 0.5 和 1.0 之间,污染物去除效率主要集中在 0.73 到 2.0 之间,同时医护人员呼吸高度出现了污染物的自锁现象。虽然置换通风系统可以降低室内的能耗,但是它同时也提高了医护人员的暴露风险。

【关键词】 负压隔离病房; 置换通风; 室内换气效率; 污染物去除效率

中图分类号 TU5 文献标志码 A

Study on the Effect of Displacement Ventilation System in Hospital Negative Pressure Isolation Wards on the Risk of Airborne Infection

Zhu Yonghua

(Nanjing Lishui People's Hospital, Nanjing, 211200)

【Abstract】 Effective ventilation in hospital negative-pressure isolation wards is crucial for reducing nosocomial cross-infections and minimizing energy consumption. In our paper, we studied the applicability of displacement ventilation in negative-pressure isolation wards. In order to assess the ventilation system under different conditions, we applied the concepts of air change efficiency and indoor contaminant removal effectiveness. The study primarily utilized simulations to examine indoor air exchange efficiency and indoor contaminant removal effectiveness under various conditions and validated these simulation results through experiments. Within our study, we assessed the impact of the air change rates, the location of radiant walls, and outlet positions on the air change efficiency and contaminant removal effectiveness. The results indicate that the actual ventilation efficiency of displacement ventilation ranges between 0.5 and 1.0, while contaminant removal effectiveness primarily falls between 0.73 and 2.0. Additionally, the contaminant 'lock-up' phenomenon was observed at the breathing heights of healthcare workers. Although displacement ventilation systems can reduce indoor energy consumption, they simultaneously increase the exposure risk for healthcare workers.

【Keywords】 Negative pressure isolation wards; Displacement ventilation system; Air change efficiency; Contaminant removal effectiveness

作者(通讯)简介: 朱永华(1985.01-), 男, 本科, E-mail: zhuyonghua001@163.com

收稿日期: 2023-12-16

0 引言

医院内部由于病人较多,存在着多种病菌,很容易带来院内交叉感染。研究表明空气传播的病原体会显著增加患者的交叉感染和死亡的概率^[1]。日常的活动例如呼吸、咳嗽、打喷嚏、说话,都有可能产生携带传染病的病原体的生物气溶胶^[2-4]。生物气溶胶离开患者后的运动路径取决于多种复杂因素,包括易感人员附近的微流场与房间内部的流场分布^[5-7]。

若不采取措施,患有空气传播传染病的患者释放的生物气溶胶会扩散到整个隔离病房,甚至可能扩散到医院的其他区域^[8]。针对这一问题,现有解决方案是保持隔离房间的相对负压,理论上在门打开时可使用的室外空气流入房间而室内空气不会泄露到室外^[9]。但是在实际上在门打开时室内的负压会消失,在这一期间室内空气的泄露是不可避免的^[10]。许多规范会要求在负压隔离病房前方设置前厅来减少污染空气直接泄露到室外^[11]。但是尽管采取了这些措施,负压隔离病房内部的医护人员仍然面临着感染的风险。这需要通过提高医护患者的个人防护措施和改善室内的通风策略来降低医护人员的感染风险^[12]。

改善室内通风策略主要采取的措施是提高室内换气次数来稀释和清除空气中的病原体,但是仅仅提高室内的换气次数可能会使得室内出现涡流区和气流短路现象^[13]。导致室内出现清洁区和污染区,人员长时间位于污染区可能会提高人员交叉感染的风险^[14]。研究表明,通风系统的设计以及室内的气流分布对于降低室内交叉感染的作用远比仅

仅提高室内换气次数来的重要。而室内通风系统产生的室内流场是可控的,针对这方面已经有了很多的相关研究^[15-17]。

混合通风与置换通风是在医院内使用的最广泛的通风方式。相比于混合通风,置换通风更加节能。置换通风系统是一种从房间下部送入冷空气,室内冷空气被室内热源卷吸加热后向上运动并累积在天花板下方,最后被天花板上的排风口排出的通风系统。置换通风系统室内被分为污染物和清洁区,其分界面为中性层高度^[18]。一些研究发现,使用置换通风可以降低人体暴露于生物气溶胶的风险^[19],但是另一些情况下,置换通风也会提高室内人员的暴露风险^[20,21]。本文的目的是评估置换通风在负压隔离病房中的适用性。在本文中,我们使用计算流体动力学(CFD)的方法来进行十二项不同的模拟测试,以分析房间换气次数、医护人员位置和排风口位置对负压隔离病房内部暴露于交叉感染风险的影响。

1 研究方法

1.1 全尺寸病房模型

负压隔离病房的模型如下图 1 所示。房间大小为 4.5m (L) × 3.3m (W) × 2.8m (H)。房间内部存在着一个用于模拟躺着病人的假人模型,而一个用于模拟医护人员的假人模型站在床边,如图 1 (a) 所示。病人与医护人员是具有相同几何形状的仿真假人模型。医护人员散热量 80W,病人散热量 70W。在北墙上有 500W 的散热量用于模拟受太阳辐射影响的外墙。其他墙壁与天花板都是绝热状态。

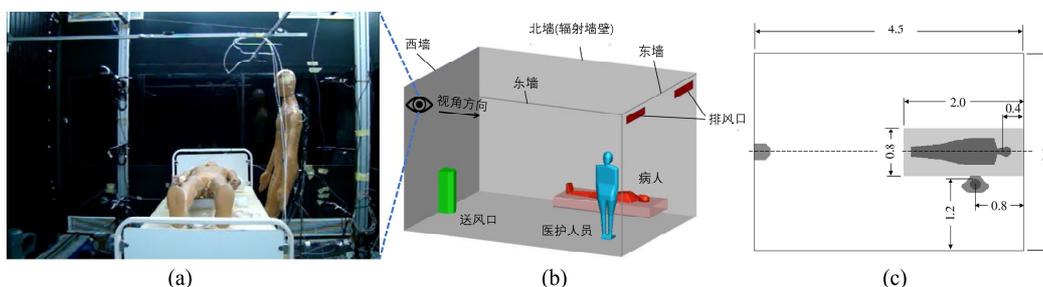


图 1 实验设置

Fig.1 The room structure

1.2 数值模拟

1.2.1 室内换气和医护人员感染风险的量化指标

在本文中,我们使用室内换气效率(ε_a)来定

义通风系统的效率,并可以通过式(1)来表达:

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{2\tau} \quad (1)$$

其中： τ_n 为换气次数的倒数， $\bar{\tau}$ 为房间内的平均空气龄。室内换气效率仅取决于房间内的流场，室内换气效率取值范围在 0 到 1 之间。

在知道室内换气次数和室内流场的情况下，如果知道污染物的排放特性和排放点，则就可以使用污染物去除指数 (ε_c) 来评价室内污染物的去除效果。该指数可取任意正值。当送风没有污染物且送风气流稳定时，可采用排风中的污染物浓度 (c_e) 比上室内的平均污染物浓度 (\bar{c}) 计算 ε_c 的值：

$$\varepsilon_c = \frac{c_e}{\bar{c}} \quad (2)$$

1.2.2 控制方程

室内气溶胶的传播问题是涉及到空气和污染物两种物质的非稳态非等温的三维问题。在本文中，CFD 软件被用于模拟污染物在室内的传播。在模拟中，我们使用了 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型方程，采用 ANSYS Fluent 17.0 进行模拟计算。在离散微分控制方程时，压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法，压力离散格式为 PRESTO!，对流项采用二阶迎风差分格式，扩散项采用二阶精度的中心差分格式。计算时采用单精度分离隐性算法器进行求解。

我们通过空气龄方程来计算室内的局部空气龄。空气年龄 τ 是通过以下方程来进行计算的：

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + \nabla \cdot (\tau \bar{v} - D_a \nabla \tau) = 1 \quad (3)$$

式中， \bar{v} 是空气速度， D_a 是质量扩散系数。我们在 CFD 中编写了一个求解空气龄的子程序，并将该子程序嵌入到 CFD 程序中。当我们计算出整个房间的平均空气年龄时，我们就可以根据公式 (1) 和公式 (2) 获得 ε_a 和 ε_c 的值。我们在 CFD 中定义了 N_2O 和空气两种不发生反应的物质用于模拟污染物在空气中的扩散。我们通过定义 N_2O 在空气中的对流和扩散方程来模拟污染物的对流扩散过程。我们测试了实际中各个壁面的热流密度并把它作为边界条件给到各个壁面。模拟时，我们打开了表面辐射模型。我们使用了 PISO 方案进行压力与速度的耦合，所有方程都采用二阶迎风格式。在进行瞬态模拟前，我们先使用稳态模拟静置室内 30 分钟，瞬态的时间步长根据 Co 数来确定如公式 (4) 所示。

$$Co = \frac{v \times \Delta T}{\Delta s} < 1 \quad (4)$$

其中： v 为空气速度，m/s； Δs 是最小网格尺寸，m；时间步长应满足 $Co < 1$ 。为了捕捉与呼吸过程相关的较小时间尺度的影响，我们选择了 0.02s 的时间步长。

1.2.3 计算域

模拟中使用的计算模型如图 1 所示。计算域中主要使用六面体网格进行离散，但是在靠近弧形送风口和仿真假人表面附近采用了四面体网格。考虑到在仿真假人，排气口，送风口，墙壁附近可能存在较高的速度和温度梯度，我们在这些地区进行了网格加密。同时我们对假人模型进行建模时使用了其他文献中的假人模型^[22]。通过对网格进行独立性检验，我们采用了 150 万的网格数。

1.2.4 边界条件

模拟中病人和医护人员的位置与实验中相同，用于扮演患者的假人通过口部呼气，通过鼻腔吸气。用于扮演医护人员的假人通过鼻子呼吸和吸气。两个假人按照正弦函数进行呼吸，对于患者而言，最大呼气量 0.57L，呼气频率 20 次/分钟。对于医护人员，最大呼气量 0.66L，呼气频率 15 次/分钟。患者人偶在 12s 内共进行四次完整呼吸，而医护人员在 12s 内共进行三次呼吸。医护人员鼻腔和患者口腔中的气流速度是均匀的。同时两个假人呼出的气体温度为 34°C。患者呼出的气体中 N_2O 的质量分数为 $Y_p=20ppm$ 。医护和患者的散热量分别为 80W 和 70W。

病房内部采用放置于地面的散流器进行送风，排风口位于天花板的下方。房间存在三种不同的换气次数 6, 9 和 12h⁻¹，对应送风温度为 18.2, 20.6 和 21.8°C。三种换气次数下，房间内的平均温度相同。对于换气次数为 12h⁻¹ 的工况，整个散流器区域被用作送风口。对于换气次数为 9 次和 6 次的工况，我们分别遮蔽散流器的上部四分之一的区域和散流器的上半部分区域用来保持相同的送风速度。送入房间的空气通过天花板附近的排风口离开房间。排风口为压力出口边界条件。除了天花板，地板和辐射墙壁外的其他三面墙壁被视为绝热。实验中受到辐射的墙壁大小为 4.5m×2.8m，墙壁上安装有传输系数为 4W/(m²·K) 的玻璃墙，室内外温差为 10°C。在模拟中，我们将受辐射墙壁的热流密度设置为 39.7W/m²。模拟工况的相关设置如表 1 所示。

表 1 模拟工况

Table 1 The boundary condition of simulations

模拟工况	排风口所在墙壁	辐射墙壁	换气次数	送风流量 / (m³/h)	送风温度 / (°C)
EN_12*	东墙	北墙	12	500	21.8
ES_12	东墙	南墙			
WN_12	西墙	北墙			
WS_12	西墙	南墙	9	375	20.6
EN_09*	东墙	北墙			
WN_09	东墙	南墙			
EN_09	西墙	北墙	6	250	18.2
WS_09	西墙	南墙			
EN_06*	东墙	北墙			
WN_06	东墙	南墙	6	250	18.2
EN_06	西墙	北墙			
WS_06	西墙	南墙			

注：加*工况表明该工况同时进行了模拟与实验。

1.2.5 模拟结果的验证

采用置换通风的房间中会产生热分层效应。同时由于人员呼出的气体高于周围气体温度，浮力对呼出气体扩散作用的影响不可忽视。选择表 1 中加*的工况进行模拟与实验的对比验证。在模拟中，排风口在右侧墙壁上，而北侧墙壁为辐射墙壁，如而图 2 (a) 和图 2 (e) 所示。图 2 (b) — (d) 为不同换气次数下房间 Z=1.52m 截面上污染物浓度的分布情况，Z=1.52m 截面所在的位置如图 2 (a) 所示。根据图 2 (b) — (d) 可以看出，换气次数越小的工况，其在 Z=1.52m 截面上造成的被污染的面积越大，对应的面平均污染物浓度越高。而对于换气次数为 12h⁻¹ 的工况，由于房间内换气次数较大，室内空间较为新鲜，房间内部 Z=1.52m 截面上被污染面积也越小。具体表现在污染物在垂直方向上最大平均浓度相对换气次数为 6h⁻¹ 与 9h⁻¹ 的工况下来的小。图 2 (f) — (h) 为不同工况下通过实验与模拟得出的垂直高度方向上平均污染物浓度的对比。根据对比可以看出实验值与模拟值较为相近。

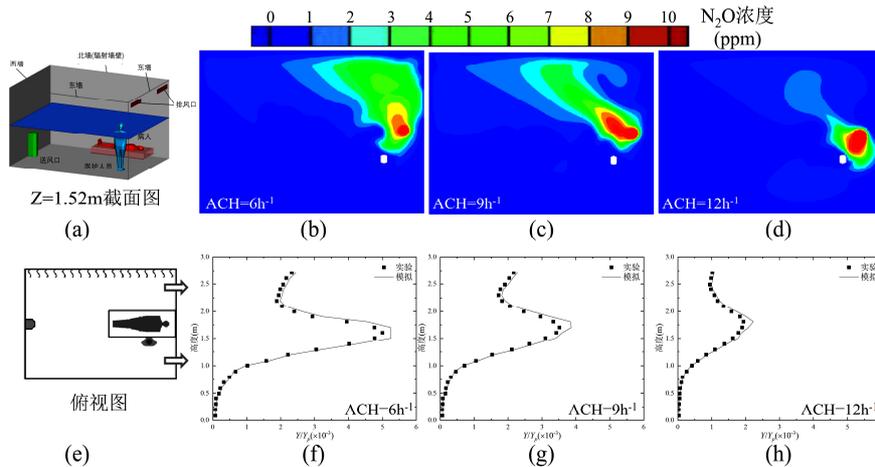
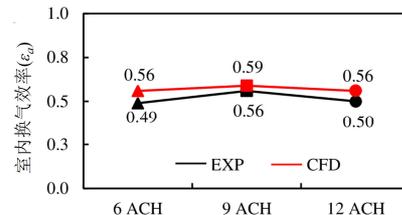


图 2 不同换气次数下，房间 Z=1.52m 截面上污染物浓度的分布情况和模拟与实验结果对比

Fig.2 The distribution of pollutant concentration on the cross section of Z=1.52m under different air change rate and the comparison between simulation and experimental results

在采用位移通风的房间内，会产生热分层效应。呼出空气的温度高于周围空气的温度。浮力的影响将在呼出空气的演变和相关病原体的扩散中起重要作用。通过口部呼出的病原体与通过鼻部呼出的病原体并不相同，易感人员的呼吸方式也会影响人员脸部的微环境，进而影响人员吸入病原体的风险。我们使用模拟计算出的结果与实验中的结果进行了对比，结果如图 3 所示，我们比较了文中提出的两个换气效率指标，根据对比，模拟能够清晰的

捕捉实验趋势。实验得出的污染物去除效率略高于模拟值，这些误差可能来源于测试时产生的误差。



(a) 室内换气效率

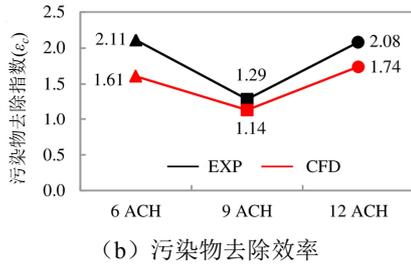


图 3 模拟与实验结果对比

Fig.3 Comparison of simulation and experimental results

2 结果

2.1 吸入污染物随时间变化

污染物的呼出,扩散和被医护人员吸入都是瞬态现象,模拟数据提供了易受感染人群吸入污染物的质量浓度随时间的变化情况。对于患者来说,一个呼吸周期(吸入和呼出)为 3s,而对于医护人员来说,一个呼吸周期为 4s。每隔 12s 两者的呼吸同时开始,在整个 12s 内,医护人员和患者的呼吸是不同步的。这种不同步会导致医护人员在三个呼吸周期内吸入的污染物的量有所不同。图 4 为使用相位平均法计算的医护人员在 12s 内吸入的污染物的浓度。图 4 中 Y_P 代表患者呼出气体中 N_2O 的瞬时质量浓度, $Y_{医护}$ 代表医护人员吸入气体中 N_2O 的瞬时质量浓度,值得注意的是医护人员三次呼吸的平均吸入污染物的量是相同的。这表明患者和医护人员呼吸之间的直接相互作用非常弱,这是因为两者区域之间距离较远^[23]。患者的口部距离医护人员鼻子之间的直线距离为 0.94m。

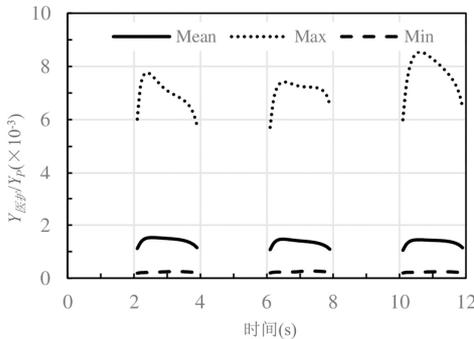


图 4 EN_09 工况中医护人员吸入的 N_2O 浓度

Fig.4 N_2O concentration inhaled by a health care worker in the case of EN_09

注:图中实线为相位平均值,点虚线为最大值,长划线为最小值,这些值来源于 75 个 12s 的周期。

值得注意的是,在每个 12s 周期中医护人员吸入污染物的浓度变化较为显著。这是因为患者呼出

污染物周期性扩散十分明显,尤其是对于室内换气次数较低的工况。结果说明患者呼出污染物的扩散及随后的医护人员吸入污染物的过程是一个瞬态现象,这是因为患者和医护人员之间的流场是瞬态的。当室内气流频率低于人体呼吸频率时,房间内部的整体流场也是呈现瞬态。

2.2 室内换气效率

在室内理想的混合通风中,整个房间内部的空气的污染物相同,室内不存在污染物浓度梯度。如果假设室内为理想的混合通风,这就意味着假设室内的污染物无限快速扩散。而对于理想的置换通风,这就代表室内污染物浓度并没有完全扩散。理想的混合通风与理想的置换通风是理想化的通风方式,实际中是达不到这种程度。在完全混合通风中 $\epsilon_a=0.5$,在理想的置换通风中, $\epsilon_a=1$ 。

在我们的所有实验工况中,当采用置换通风时,实际的换气效率 ϵ_a 介于 0.5 和 1.0 之间,换气效率和室内排风口的位置存在着明显的相关性,如图 5 所示。当排风口位于床一侧的墙壁上时,平均换气效率为 $\epsilon_a=0.56$,当排风口位于送风口所在一侧墙壁上时,平均换气效率可以提高到 $\epsilon_a=0.69$ 。此时房间内的室内流场更接近与理想的置换通风。

室内的换气效率还与辐射墙壁所在的位置有关,研究发现,当辐射所在的墙壁位于医护人员的后方时,室内换气效率大于当辐射墙壁位于医护人员正面,这可能是因为在这种情况下,房间内部热负荷更加平衡。

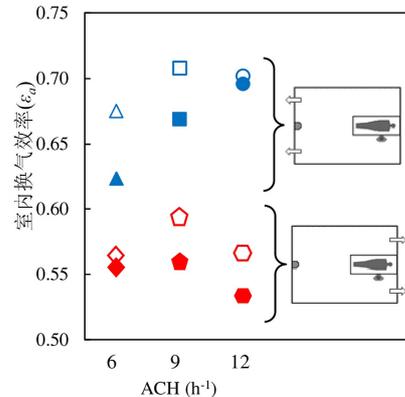


图 5 室内换气效率

Fig.5 Air change efficiency

注:图中三角形、正方形、圆形标志为排气口位于送风一侧墙上,菱形、五边形、六边形标志为排气口位于对面墙上。完整符号为医护人员对面的墙壁为辐射墙壁,空心符号为医护人员背后的墙壁为辐射墙壁。

2.3 污染物的扩散和污染物去除效果

置换通风系统会使得室内出现垂直热分层，这种分层会限制污染物的扩散。为了在具有较低换气次数的房间中保持相同的平均温度，我们降低了送风温度。在空间中高度小于 1.1m 的位置，换气次数较低的工况下室内垂直温度梯度较高，如图 6(a) 所示。而对于高度介于 1.1m 到天花板之间位置，室内垂直温度梯度几乎相同。

考虑到污染源也是热源，由于热源的卷吸作用，来源于热源的热羽流直接将污染物卷吸到房间上部^[24]，室内的污染物预计呈现两区分布^[20]，在中性层以下的高度为清洁区，在中性层以上的高度为污染区。图 6 (b) 显示了垂直高度上 N₂O 的平均浓度。在患者呼吸高度以下的位置 ($z < 0.78\text{m}$)，N₂O 的浓度几乎可以忽略不计。置换通风房间内静止人员呼出的气流受初速度与人员热羽流共同作用下会使得呼出气流上升。这会导致水平高度上的 N₂O 浓度迅速增大，并在 1.6–1.7m 之间达到最大值，如图 6 (b) 所示。人员呼出的气流会集中在医护人员的头部高度区域，这种现象被称为污染物的自锁现象^[25,26]。当室内换气次数降低时，室内的污染物自锁现象会更加明显。这是因为换气次数降低会导致室内更大的温度梯度^[26]。

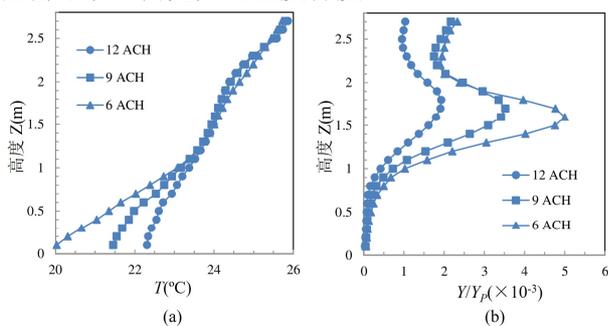


图 6 温度和污染物百分比随高度变化情况

Fig.6 Temperature and pollutant averaged over vertical planes

注：图中工况排气口位于床一侧墙上且辐射墙壁位于医护人员前方。

在理想的混合通风中房间内的污染物是均匀分布的，因此排气的污染物浓度与房间内的平均浓度相同，此时室内的污染物去除效率为 1。在本研究的所有工况中污染物去除效率 ϵ_c 主要集中在 0.73 到 2.0 之间，如图 7 所示。只有当辐射的墙壁位于医护人员的后方且房间换气次数为 12 次时， ϵ_c 低

于 1.0。但是 ϵ_c 和辐射墙壁的位置，换气次数，排风口位置三者之间并没有明确的相关性。同时根据研究发现排风口的位置几乎对 ϵ_c 的值没有影响。

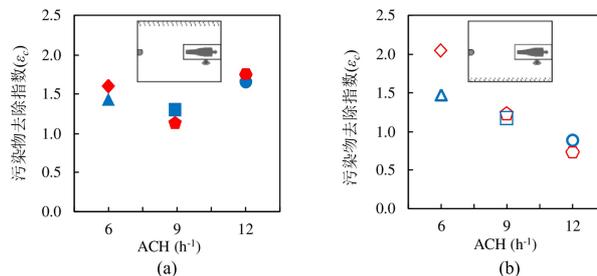


图 7 污染物去除效果

Fig.7 Contaminant removal effectiveness

注：图中三角形、正方形、圆形标志为排气口位于送风一侧墙上，菱形、五边形、六边形标志为排气口位于对面墙上。完整符号为医护人员对面的墙壁为辐射墙壁，空心符号为医护人员背后的墙壁为辐射墙壁。

3 结论

在本文中，我们进行了瞬态的 CFD 模拟来研究置换通风系统在典型负压隔离病房的适用性。在我们的研究中，我们分别对两种排风口位置，两种外墙的位置，三种换气次数的工况进行了研究，基于我们的研究，可以得出以下结论：

(1) 患者呼出污染物的扩散及随后的医护人员吸入污染物的过程是一个瞬态现象，这是因为患者和医护人员之间的流场是瞬态的。同时患者和医护人员呼吸之间的直接相互作用非常弱。

(2) 采用置换通风时，实际的换气效率 ϵ_a 介于 0.5 和 1.0 之间，换气效率和室内排风口的位置存在着明显的相关性。当排风口位于床一侧的墙壁上时，平均换气效率为 $\epsilon_a = 0.56$ ，当排风口位于送风口所在一侧墙壁上时，平均换气效率可以提高到 $\epsilon_a = 0.69$ 。当辐射所在的墙壁位于医护人员的后方时，室内换气效率大于当辐射墙壁位于医护人员正面的工况。

(3) 采用置换通风时，房间内会产生污染物的自锁现象。人员呼出的气流会集中在医护人员的头部高度区域。当室内换气次数降低时，室内的污染物自锁现象会更加明显。

(4) 当采用置换通风时，污染物去除效率 ϵ_c 主要集中在 0.73 到 2.0 之间。只有当辐射的墙壁位于医护人员的后方且房间换气次数为 12 次时， ϵ_c

低于 1.0。但是 ε_c 和辐射墙壁的位置,换气次数,排风口位置三者之间并没有明确的相关性。

本文的研究并未考虑人员移动或者门的开关,分析人员移动对置换通风室内污染物分布的影响会十分有价值。同时我们在研究中将外墙设置为了定热流边界条件,在实际中,外墙的热流量会在白天和季节发生变化时产生变化,同时我们在本文中仅考虑了呼吸作用,并未考虑咳嗽或者打喷嚏这种能排出具有更高初动量的污染物的工况。

参考文献:

- [1] Kaoutar B, Joly C, L'héritau F, et al. Nosocomial infections and hospital mortality: a multicentre epidemiological study [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2004,58(4):268-275.
- [2] Gupta J K, Lin C H, Chen Q. Characterizing exhaled airflow from breathing and talking [J]. *Indoor air*, 2010,20(1):31-39.
- [3] Gupta J K, Lin C H, Chen Q. Flow dynamics and characterization of a cough [J]. *Indoor air*, 2009,19(6): 517-525.
- [4] Zhang H, Li D, Xie L, et al. Documentary Research of Human Respiratory Droplet Characteristics [J]. *Procedia Engineering*, 2015,121:1365-1374.
- [5] Xie X, Li Y, Chwang A T Y, et al. How far droplets can move in indoor environments-revisiting the Wells evaporation-falling curve [J]. *Indoor air*, 2007,17(3):211-225.
- [6] Morawska L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? [J]. *Indoor air*, 2006,16(5):335-347.
- [7] Tang J W, Li Y, Eames I, et al. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2006,64(2):100-114.
- [8] Kao P H, Yang R J. Virus diffusion in isolation rooms [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2006,62(3):338-345.
- [9] Bolashikov Z D, Melikov A K. Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens [J]. *Building and Environment*, 2009,44(7): 1378-1385.
- [10] [Tang J W, Nicolle A, Pantelic J, et al. Different Types of Door-Opening Motions as Contributing Factors to Containment Failures in Hospital Isolation Rooms [J]. *PLOS ONE*, 2013,8(6):66663.
- [11] Fgi. Guidelines for Design and Construction of Hospitals and Outpatient Facilities [Z]. ASHE (American Society for Healthcare Engineering) Chicago. 2014
- [12] Subhash S S, Baracco G, Fennelly K P, et al. Isolation anterooms: Important components of airborne infection control [J]. *American Journal of Infection Control*, 2013,41(5):452-455.
- [13] Hyttinen M, Rautio A, Pasanen P, et al. Airborne Infection Isolation Rooms – A Review of Experimental Studies [J]. *Indoor and Built Environment*, 2011,20(6): 584-594.
- [14] Pantelic J, Tham K W. Adequacy of air change rate as the sole indicator of an air distribution system's effectiveness to mitigate airborne infectious disease transmission caused by a cough release in the room with overhead mixing ventilation: A case study [J]. *HVAC&R Research*, 2013,19(8):947-961.
- [15] Méndez C, San José J F, Villafuella J M, et al. Optimization of a hospital room by means of CFD for more efficient ventilation [J]. *Energy and buildings*, 2008,40(5):849-854.
- [16] Villafuella J M, Castro F, San José J F, et al. Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms [J]. *Energy and buildings*, 2013,57:210-219.
- [17] Khan J A, Feigley C E, Lee E, et al. Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations [J]. *Building and Environment*, 2006,41(7):851-863.
- [18] Bjørn E, Mattsson M, Sandberg M, et al. Displacement Ventilation: effects of movement and exhalation[R]. Dept. of Building Technology and Structural Engineering. *Indoor Environmental Technology*, 1997,R9728:70.
- [19] Kosonen R, Melikov A K, Mundt E, et al. Displacement ventilation. Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations [M]. REHVA. REHVA Guidebooks, 2017:23.

(3) 孔隙率对室内热舒适性有一定影响。在孔隙率较低时,人体可保持热舒适状态;当孔隙率达到20%时,人体舒适度将介于舒适与微暖之间,此时室内PMV和PPD值还在可接受范围内,但过大孔隙率将降低室内热舒适性。

(4) 孔隙率越大,室内平均空气龄随之增加。

综上所述,在对DCV系统进行设计和优化时,应综合考虑孔隙率对室内热环境、热舒适性和空气品质的影响。合理选择孔隙率,可有效提高DCV系统的送风效果,为室内人员提供更为舒适的环境。

参考文献:

- [1] 赵江东,余涛,雷波.弥散式吊顶送风在商场内区冬季供冷中的适用性分析[J].制冷与空调,2019,33(4):414-420.
- [2] Jacobs P, Knoll B. Diffuse ceiling ventilation for fresh classrooms[C]. In: 4th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness. Berlin, Germany, 2009:127-133.
- [3] Zhang C, Heiselberg P. Diffuse Ceiling Ventilation—A Review[J]. International Journal of Ventilation, 2014, 13(1):49-64.
- [4] Mikeska T, Fan J H. Full scale measurements and CFD simulations of diffuse ceiling inlet for ventilation and cooling of densely occupied rooms[J]. Energy and Buildings, 2015,107:59-67.
- [5] Kristensen M H, Jensen J S, Heiselberg P K. Field study evaluation of diffuse ceiling ventilation in classroom during real operating conditions[J]. Energy and Buildings, 2017,138:26-34.
- [6] Hviid C A, Svendsen S. Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets[J]. Energy and Buildings, 2013,56:160-168.
- [7] Terkildsen S, Svendsen S. Performance of low pressure mechanical ventilation concept with diffuse ceiling inlet for renovation of school classrooms[C]. In:32nd AIVC Conference and 1st TightVent Conference. Brussels, Belgium,2011.
- [8] 张臻.顶板多孔对流辐射空调的换热特性研究[D].株洲:湖南工业大学,2015.
- [9] 王安全.夜间热压通风建筑围护结构内表面对流换热过程分析[D].扬州:扬州大学,2019.
- [10] Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities: ISO 7726[S]. Geneva Switzerland: International Standard Organization, 2002.
- [11] Fanger P O. Thermal Comfort-analysis and Application in Environment Engineering[M]. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970.
- [12] Fanger P O, Melikov A, Hanzawa H. Air Turbulence and Sensation of Draught[J]. Energy and Buildings, 1988, 12(1):21-33.
- [13] 朱颖心.建筑环境学(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [14] 石盼弟,余涛,袁艳平.弥散吊顶通风系统气流相互作用原理分析[J].制冷与空调,2021,35(2):143-150.
- [15] [J]. Building and Environment, 2016,106:340-351.
- [20] Bjørn E, Nielsen P V. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms [J]. Indoor air, 2002,12(3):147-164.
- [21] Li Y, Huang X, Yu I T, et al. Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong [J]. Indoor air, 2005,15(2):83- 95.
- [22] Nielsen P V. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2009,6(suppl6):S747-S755.
- [23] Villafuela J M, Olmedo I, San José J F. Influence of human breathing modes on airborne cross infection risk [J]. Building and Environment, 2017,116: 246-256.
- [24] Wu Y, Gao N. The dynamics of the body motion induced wake flow and its effects on the contaminant dispersion [J]. Building and Environment, 2014,82:63-74.
- [25] Gao N, He Q, Niu J. Numerical study of the lock-up phenomenon of human exhaled droplets under a displacement ventilated room [J]. Building Simulation, 2012,5(1):51-60.
- [26] Zhou Q, Qian H, Ren H, et al. The lock-up phenomenon of exhaled flow in a stable thermally-stratified indoor environment [J]. Building and Environment, 2017,116: 246-256.

(上接第188页)