

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.061

普通病房飞沫污染物传播特性与评价

张桢康, 张华玲, 刘 鹏

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 空调病房良好的气流组织能快速地排除室内病人产生的飞沫污染物, 从而减小医护及陪护等健康人员的感染风险。通过文献分析给出人体呼吸活动产生飞沫的粒径、数目、速度和温度等基础数据, 利用 Fluent 软件建立普通病房物理模型与飞沫污染物蒸发扩散模型, 借助 Fluent 软件的开放接口 UDF(用户自定义函数), 编写描述病人呼吸与咳嗽产生飞沫的非稳态速度分布的 UDF 程序作为速度输入条件, 模拟了普通病房在上送上回、贴附射流和上送下回 3 种典型的气流组织形式下, 人体飞沫污染物的传播特性。模拟结果发现, 3 种气流组织病房中, 粒径为 $0.1\sim 3\ \mu\text{m}$ 的飞沫在病人与健康人员呼吸区域个数浓度均最大, 上送下回气流组织形式病房内健康人员呼气区域的飞沫个数浓度比上送上回低 40%, 比贴附射流组织形式低近 70%, 且通风效率更高, 排除飞沫污染物的效果更好, 建议普通病房采用上送下回气流组织形式以降低室内人员的交叉感染风险。

关键词: 普通病房; 飞沫污染物; 交叉感染; 气流组织; 蒸发扩散

中图分类号: TU843.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)03-82-11

The propagation characteristics and assessment of airborne droplets in a general ward

ZHANG Ankang, ZHANG Hualing, LIU Peng

(Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: A good air distribution of a general air-conditioned ward can quickly exclude droplet contaminations generated by indoor patients, which can reduce the infection risk of medical staff and escorts. Based on literature analysis, the authors got basic data such as the particle size, number, speed and temperature of droplets generated by human respiratory activities, and established the physical model of the general ward and the droplet evaporative diffusion model by Fluent. Then, with using the open interface UDF (user-defined function) in Fluent, a UDF program was wrote as the speed input condition to describe the non-state speed distribution of patients' breathing and coughing droplets, and the propagation characteristics of droplet contaminations in a general ward under three typical airflow forms, i.e. up supply and up return airflow, wall-attached jet airflow and up supply and down return airflow, were simulated. According to the simulation results, droplets with the particle size of $0.1\sim 3\ \mu\text{m}$ have the largest concentration in the respiratory area of both patients and healthy personnel under the three airflow forms. The droplet concentration under up supply and down return

收稿日期: 2020-03-24 网络出版日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278506)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51278506).

作者简介: 张桢康(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事医院室内环境研究。

通讯作者: 张华玲, 女, 教授, (E-mail) hlzhang@cqu.edu.cn.

airflow in the respiratory area of health personnel is lower than 40% of that under up supply and up return airflow, and lower than about 70% of that under wall-attached jet airflow. The ventilation efficiency under up supply and down return airflow is higher and its effect of excluding droplet contaminations is better, too. It is recommended that up supply and down return airflow should be used in a general ward to reduce the risk of indoor personnel's cross-infection.

Keywords: general ward; droplet contaminations; cross-infection; air distribution; evaporation and diffusion

自猪流感、SARS、禽流感、COVID-19 等传染性疾病爆发以来,对微生物感染控制的科学探索不再局限于微生物学家或医学科学家,流体力学可以做为研究微生物传播特性的重要手段。医院空调病房相对封闭且微生物污染相对集中,通风空调系统应能有效控制病房内微生物污染物的传播,预防病房人员的交叉感染。普通病房的微生物污染物的主要来源为室外空气、通风空调系统、人体呼吸活动和室内潮湿部位等,其中,人体呼吸活动产生的飞沫是病房微生物污染的重要来源。病人在呼吸、说话和咳嗽时会从口部产生含有致病菌的飞沫污染物,增大医护与陪护人员的感染风险。据统计,SARS 期间,北京和香港地区医院的医护人员感染率接近 20%,台湾地区医院的医护人员感染率高达 30%^[1]。Wei 等^[2-3]对人体呼吸活动产生的飞沫在室内环境中的释放、传播和扩散特性进行了综述,并强调气流组织的影响至关重要。因此,应建立良好的病房通风气流组织,快速将飞沫污染物排除,防止病房人员的交叉感染。

由于 CFD 方法具有实用性强、可靠性好等优点,能够对室内气流组织进行科学地预测和评价,文中通过 CFD 方法重点关注空调病房内病人产生的飞沫污染物在室内空间的传播特性,其中,飞沫污染源的粒径、数目、速度和温度等是 CFD 模拟研究的基础数据。Papineni^[4]采用光学粒子计数器(OPC)和分析透射电子显微镜(AEM)对人体呼吸和咳嗽飞沫粒径进行测量,发现其粒径均呈双峰值分布,健康人呼吸产生的飞沫粒径范围为 0~2.5 μm ,90%都小于 1 μm 。Nicas 等^[5]建立了飞沫蒸发粒径随时间的变化函数,当飞沫水分完全蒸发时,飞沫核粒径约为飞沫初始粒径的 44%。Chao 等^[6]采用干涉成像仪(IMI)和粒子图像测速仪(PIV)对呼吸、咳嗽产生的飞沫数目进行测量,发现呼吸产生的飞沫数目为 112~6 720 个;咳嗽产生的飞沫数目为 947~2 085 个;Gupta 等^[7-8]认为呼吸速度随时间呈正弦函数变化,咳嗽速度随时间呈伽玛分布函数关系;Hoppe^[9]发现当不考虑环境温度对飞沫的影响时,飞沫温度与人体温度相等。可见,由于研究者采用的实验方法不同,咳嗽产生的飞沫粒径分布的实测值差异较大,分析这些实验数据,发现人体咳嗽产生的飞沫粒径范围大都在 0~200 μm 之间,依据 Wells^[10]纯水飞沫蒸发—沉降曲线,初始粒径大于 160 μm 的飞沫受重力作用,未完全蒸发之前就会沉降至 2 m 以下。文中基于已有文献的相关实验数据,通过分析整理获得 CFD 模拟的基础数据。

同时,国内外学者对空调房间内颗粒污染物的运动规律也进行了大量的研究。Zhang 等^[11]采用拉格朗日法对室内颗粒物在 3 种送风方式的浓度分布特征进行模拟;通过实验发现,下送风方式排除室内颗粒物的能力最强,但飞沫污染物在传播时存在蒸发,与普通固体颗粒物的传播存在差异。Chao 等^[12]指出粒径大于 87.5 μm 的飞沫主要受到重力作用而沉降,而粒径小于 45 μm 的飞沫则主要随空气传播,但在模拟时则将飞沫污染源的速度设置为稳态,与实际情况偏离较大。Ji 等^[13]采用离散相模型研究了相对湿度与气流组织形式对病人呼出的感染性飞沫在病房内的蒸发、空间分布与扩散距离的影响,模拟结果显示大多数飞沫在变成飞沫核或沉积之前集中在人体口部 ± 0.5 m 范围内,但模拟中仅考虑飞沫的呼出而没有考虑吸入,且飞沫速度为常数。孙炜^[14]利用单颗粒随机轨道模型模拟空调病房内病人咳嗽飞沫的浓度分布,指出下送风形式排除室内飞沫的效率要比置换通风和混合通风高,但在模拟时仅考虑了 1 次咳嗽产生的飞沫。Li 等^[15]通过实验测试和 CFD 模拟 2 种方法对 2 个站立的人之间呼出飞沫的暴露水平进行了研究,得出 1.5 m 为区分飞沫短距离传播与远距离传播的临界距离,但模拟时仅模拟了呼吸模式下飞沫的暴露水平而没有考虑咳嗽模式。

笔者采用 CFD 模拟方法,探寻空调病房内飞沫污染物在上送上回、贴附射流和上送下回 3 种气流组织下的传播规律。与现有研究相比,文中在模拟方法上有所改进。首先,模拟时考虑人体飞沫传播过程的蒸发特性;其次,医护人员只考虑呼吸活动,而病人在前 60 s 内咳嗽 4 次且每次持续 1 s,其余时间均为呼吸活动;另外,呼吸产生的飞沫粒径简化为均匀分布^[16],咳嗽产生的飞沫粒径按不同粒径范围所占平均百分数,结合

离散相模型中 Rosin-Rammler 分布给出其粒径分布函数;最后,编写 UDF 程序并写入 Fluent 描述病人呼吸与咳嗽产生飞沫的非稳态速度分布。通过分析模拟数据,对 3 种气流组织形式排除病房飞沫污染物能力进行初步评价,找出飞沫污染物去除效率最好的气流组织形式。

1 研究方法

1.1 物理模型构建

文中对重庆市 3 家综合医院的普通病房进行了现场调研,发现普通病房内最常见的气流组织形式为上送上回和贴附射流,而上送下回则是规范手册中推荐的气流组织形式,故选择这 3 种气流组织形式来开展模拟研究。物理模型依据重庆市某综合医院的双人普通病房,尺寸为长 7.5 m、宽 3.5 m、高 3 m,采用 ICEM CFD 16.0 建立物理模型,建模时将人员头部与躯体分别简化为正方体和长方体,人体飞沫污染源全部由口部喷出,口部尺寸为长 20 mm×宽 20 mm,病房卫生间门关闭,缝隙设置为宽 0.2 m×高 2.1 m。不同气流组织营造的实质为房间送、回风口位置的调整,3 种典型气流组织病房的物理模型如图 1 所示。

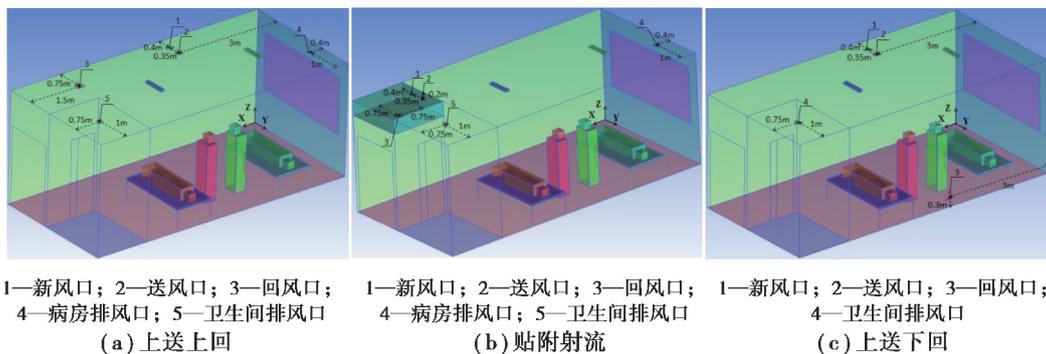


图 1 病房 3 种气流组织的物理模型

Fig. 1 The physical model of general ward under three typical air distribution forms

1.2 数学模型描述

选择 Fluent 16.0 作为 CFD 模拟软件,模拟时对数学模型进行如下假设:

- 1) 病房气密性良好,不考虑房间的渗漏风量;
- 2) 室内空气为常温、低速、常物性、不可压缩的牛顿流体湍流流动;
- 3) 沫颗粒之间不发生凝并、破碎现象,且不考虑飞沫颗粒的存活与衰减特性;
- 4) 沫污染物仅由人体口部喷射而出,无其他来源。

因为空调病房空气为湍流流动,且 RNG k- ϵ 模型的计算速度快、结果准确,故选择 RNG k- ϵ 模型进行求解,采用壁面函数法模拟近壁面区的流动^[17]。Fluent 中规定体积分分数小于 10% 的飞沫和颗粒负载流动,应采用离散相模型,房间中飞沫体积分分数远小于 10%,因此选择离散相模型模拟飞沫喷射与传播过程。考虑到离散相与连续相的相互作用,且病房内粒径小的飞沫长时间悬浮于空气中,采用非稳态离散相模型并开启两相相间耦合计算来模拟飞沫浓度分布。

为了更贴合实际,还需对数学模型进行设置。首先,考虑到飞沫的蒸发特性,将其视为含有一定飞沫核的液滴,选用 Droplet 作为飞沫污染物的材料,采用通用有限速率化学反应模型模拟飞沫中水分的蒸发过程,不勾选 Reaction 化学反应模型。其次,根据文献[18],人体呼吸的喷射速度为正弦函数,咳嗽的喷射速度为脉冲函数,设置病人在前 60 s 内咳嗽 4 次,每次持续时间为 1 s,其余时间都在呼吸,这种动态过程需要借助 UDF(用户自定义函数)编程来解决。数学模型的求解首先利用 SIMPLEC 算法求解稳态的连续相流场,得到稳定的温湿度流场后,再加入离散相模型并采用 PISO 算法进行非稳态的两相相间耦合计算,直至收敛^[19]。

1.3 模型边界条件

病房围护结构、病床等表面边界条件均根据现场实际表面条件进行设置,进口和出口边界条件设置如表 1 所示。

表 1 进口和出口边界条件
Table 1 Inlet and outlet boundary conditions

Part	进口 ^②				出口 ^②		
	新风口	送风口	病人口部 ^①	医护口部 ^①	回风口	病房排风口	卫生间排风口
边界条件	velocity inlet	velocity inlet	velocity inlet +UDF	velocity inlet +UDF	outflow	outflow	outflow

注:①病人在前 60 s 内咳嗽 4 次,每次持续时间为 1 s。医护与陪护人员只考虑呼吸,呼吸气流速度简化为正弦函数

$$v = 0.3 \times \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right),$$

周期为 4 s,呼气为正值,吸气为负值,咳嗽气流速度简化为脉冲函数

$$v = \begin{cases} 10.0 & 0 < t < 1, \\ 0.1 & 1 < t < 15, \end{cases}$$

周期为 15 s;病人和健康人员呼吸活动的气流速度如图 2 所示。

②开启了离散相模型,进口边界条件需选择逃逸(escape),表示离散相穿过边界形成逃逸,终止轨道的计算。

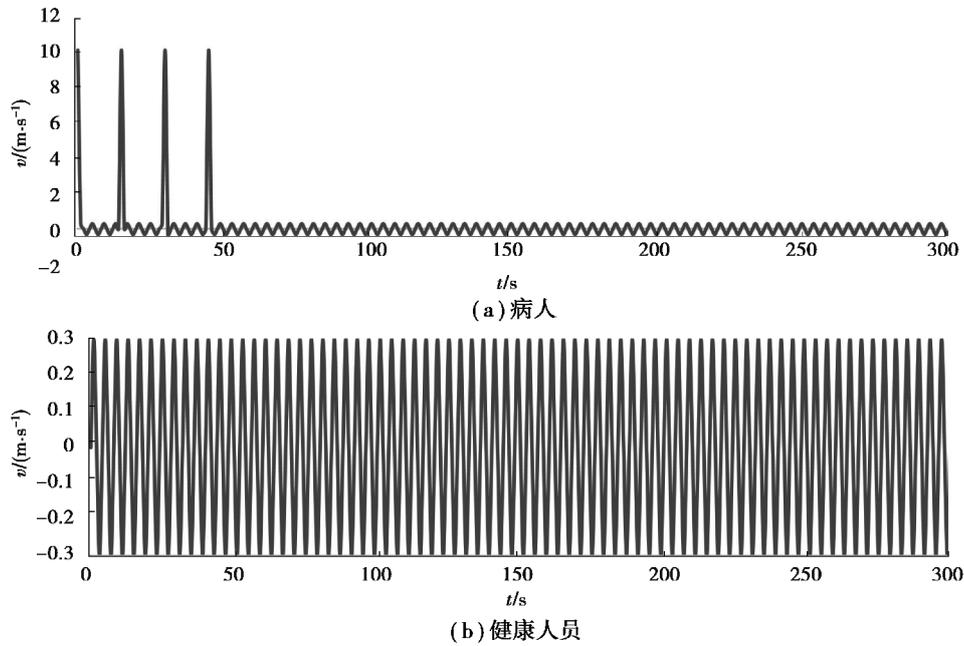


图 2 病人和健康人员呼吸活动的气流速度

Fig. 2 The air velocity of respiratory activities of patients and healthy people

1.4 飞沫污染源的设置

根据现有文献分析可以得到飞沫粒径和数目等参数,参数设置如表 2 所示。

表 2 飞沫污染物主要参数设置

Table 2 The main parameter-settings of droplet contaminations

粒径	数目	温度	组分
呼吸工况:均匀分布,取值为 5.0×10^{-7} m;			
咳嗽工况 [*] :Rosin-Rammler 分布,咳嗽飞沫粒径的最小为 1.0×10^{-7} m,最大为 2×10^{-4} m,平均粒径为 1.6×10^{-4} m,分布指数为 3.42,粒径组数目为 14。	呼吸工况:1 个周期产生的飞沫数目为 800 个 咳嗽工况:1 次咳嗽产生的飞沫数目为 2 800 个	设为 309 K	选用液滴 (droplet)

注：* 文献中[20-21]人体咳嗽产生的 0~200 μm 的飞沫粒径分布,如图 3 所示。根据文献中咳嗽飞沫粒径数据得到不同粒径范围飞沫所占的平均百分数,如图 4 所示,结合离散相模型 Rosin-Rammler 分布可以得到咳嗽飞沫粒径分布特征:最小 1.0×10^{-7} m,最大 2×10^{-4} m,平均 1.6×10^{-4} m,分布指数 3.42,组数为 14。



图 3 咳嗽飞沫粒径分布 (0~200 μm)
Fig. 3 The distribution of droplet size generated by coughing(0~200 μm)

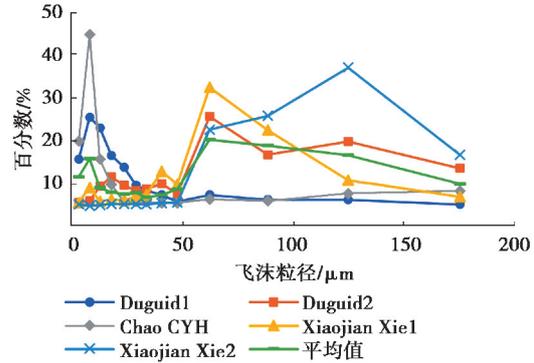
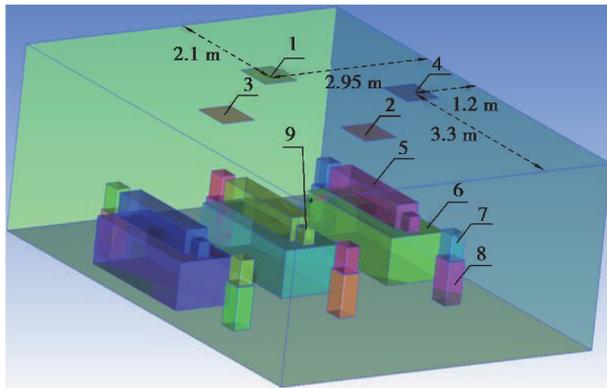


图 4 不同粒径飞沫所占平均百分比
Fig. 4 The average percentage of different ranges of droplet size

2 结果分析

2.1 模型的验证

为了验证 CFD 计算模型选择的正确性,采用文献[12]中的实测数据对文中选择的数学模型进行验证,依据文献中病房的相关物理参数建立的物理模型,如图 5 所示。模拟时飞沫污染源粒径设置为实验中的峰值粒径 12 μm。边界条件根据文献给出的情况进行设置。数学模型的选择设置同文中 2.2 节。Fluent 模拟结果与实验结果对比,如图 6 所示。可见,在飞沫喷出后开始一段时间,飞沫的运动轨迹随时间变化的模拟结果与实验结果有较大的偏差,其余的大部分时间变化趋势相同,总体差异不大,说明文中采用的数学模型及 UDF 程序可以较为准确地模拟病房内飞沫污染物的蒸发扩散。



1—送风口①; 2—送风口②; 3—排风口①; 4—排风口②
5—病人; 6—病床; 7—设备; 8—支座; 9—飞沫污染源;

图 5 三人间病房简化物理模型

Fig. 5 The simplified physical model of triple general ward

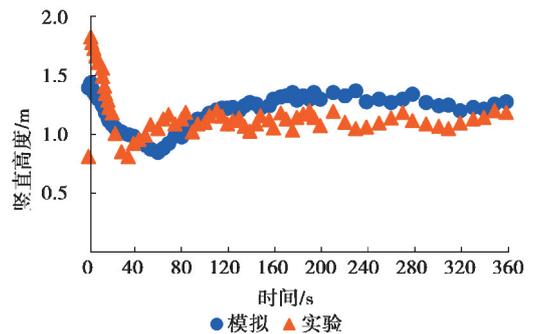


图 6 模拟数据与实验数据对比

Fig. 6 The comparison between simulation results and experimental results

2.2 上送上回

医院空调病房目前普遍采用上送上回气流组织形式,上部回风更方便布置回风管路,同时可以带走病房照明灯具的散热量,适用于有一定美观要求的普通病房。该气流组织形式下病房内飞沫传播模拟结果,如图 7 所示。图中的飞沫浓度是指单位空间体积内所含飞沫的质量,单位为 kg/m^3 。

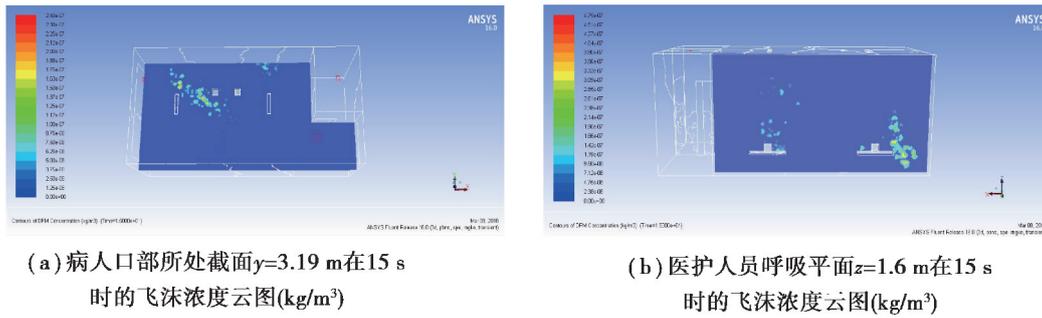


图 7 病人与医护人员口部截面的飞沫浓度云图(15 s)

Fig. 7 The contour of droplet concentration on the cross section of patient and medical staff's mouth (15 s)

由图 7(a)可知,15 s 时图中右侧靠近窗户的病人咳嗽产生的飞沫,由于靠窗一侧天花板处病房排风口的抽吸作用,导致飞沫朝病房窗户侧扩散,粒径大的飞沫往地面沉降;相邻病床的病人产生的飞沫则会随咳嗽气流向上扩散,朝着图中左侧病房入口天花板处的回风口方向运动。表明 2 个病人呼吸和咳嗽时产生的飞沫在扩散过程中相互影响较小。

由图 7(b)可知,15 s 时图中左侧靠近窗户的病人咳嗽产生的飞沫会朝站立的医护或陪护人员呼吸区附近扩散,对病房健康人员的影响较大;相邻病床的病人产生的飞沫只有少量往病人口部上方扩散,大部分不会进入医护或陪护人员呼吸区。

为了更加清晰地表示飞沫在房间扩散分布的情况,利用 MATLAB 软件编程,将房间按 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 划分为多个小立方体,每个小立方体内的飞沫个数计算在其中心点位置,表示该小立方体内个数浓度,得到不同粒径飞沫个数浓度分布图,如图 8 所示(图中红色 * 为病人嘴部位置,红色 + 为陪护或医护嘴部的位置,蓝色 * 或 + 为嘴部投影到地面的位置,图中色彩条表示小立方体内的飞沫数目)^[22]。从图 8 可知,飞沫喷出后 15~300 s,不同粒径的飞沫在病房已充分扩散。在 2 位病人与 2 位健康人员呼吸区内的不同粒径飞沫平均个数浓度随时间变化,如表 3 所示。

表 3 不同粒径飞沫呼吸区平均个数浓度随时间变化(个/ m^3)

Table 3 Average number concentration of droplet with different particle size in respiratory area at different time

时间/s	A($<0.1\ \mu\text{m}$)		B($0.1\sim 3\ \mu\text{m}$)		C($3\sim 10\ \mu\text{m}$)		D($>10\ \mu\text{m}$)	
	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员
15	16	0	6641	1829	32	0	321	78
60	32	32	2 188	2 501	32	32	250	461
300	0	8	6 867	2 508	16	0	8	16

由表 3 可知,B 类飞沫个数浓度最大,且 A、C、D 3 种粒径范围的飞沫个数浓度呈先升后降的趋势。这是因为 A、C、D 3 类飞沫均为咳嗽产生,咳嗽结束其数量不再增加,飞沫在病房内扩散蔓延或被排除,且大粒径飞沫会沉降,导致浓度降低;而 B 类飞沫由呼吸和咳嗽共同产生,呼吸一直在继续,飞沫数量不断增加,所以对于健康人员,其呼吸区飞沫个数浓度会增加,直到飞沫的产生与排除达到平衡为止,但是对于病人,由于咳嗽产生的气流的推动作用,会使病人呼吸区内由呼吸活动产生的 B 类飞沫的个数减少,故病人呼吸区内 B 类飞沫浓度呈先降后升的趋势。

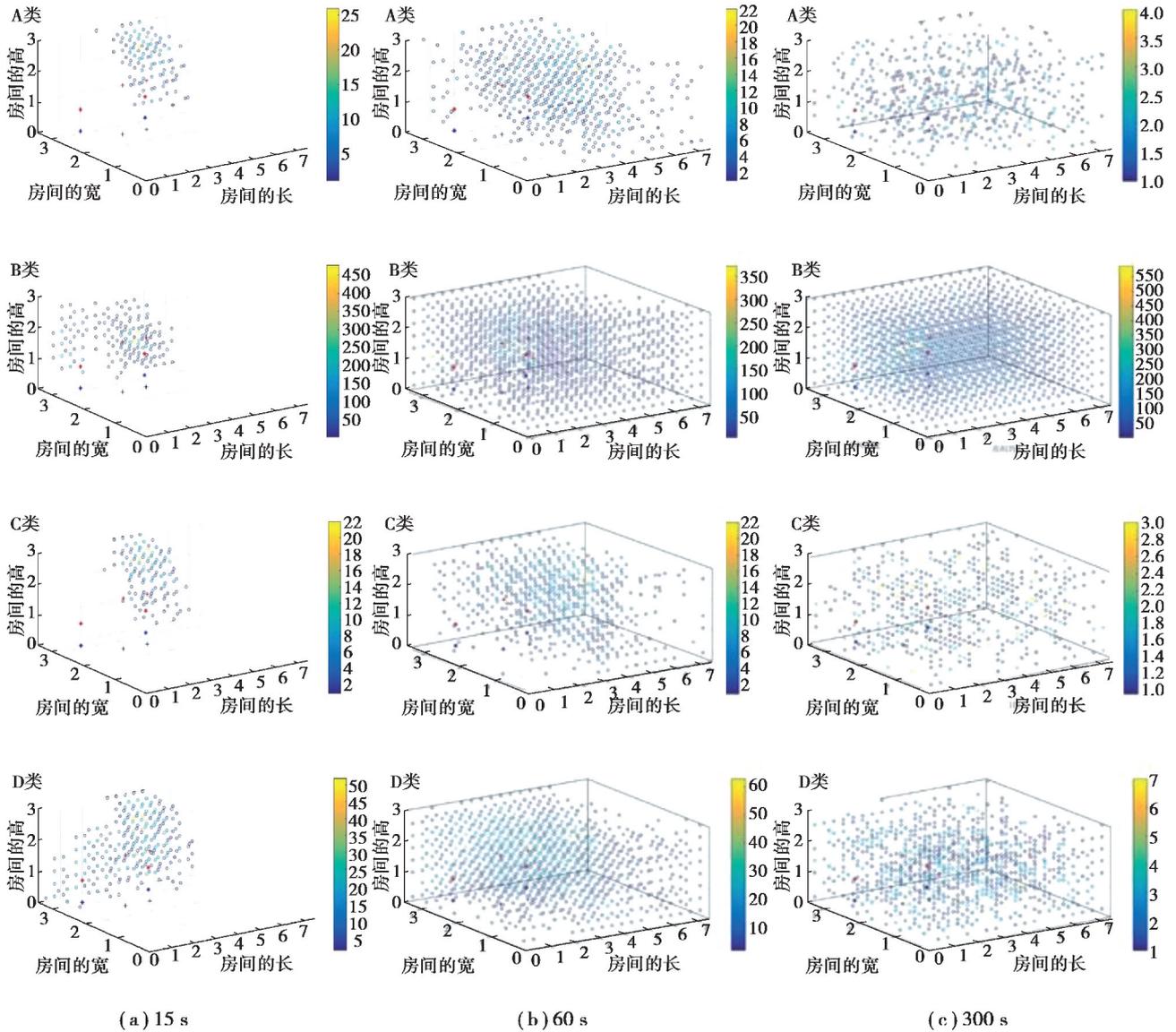


图 8 不同时刻不同粒径飞沫的个数浓度空间分布图(个/m³)
 (A.粒径<0.1 μm;B.粒径为 0.1~3 μm;C.粒径为 3~10 μm;D.粒径>10 μm)

Fig. 8 Spatial distribution of number concentration of droplet with different particle size at different time
 (A. Particle size<0.1 μm; B. The particle size between 0.1 μm to 3 μm;
 C. Particle size between 3 μm to 10 μm; D. Particle size>10 μm)

2.3 贴附射流

贴附射流是另一种广泛应用于医院普通病房中的气流组织形式,利用射流的附壁效应增大射程,通常安装在病房入口处,回风口位于风机盘管下部,占用空间小。该气流组织形式下的模拟结果,如图 9 所示。

由图 9(a)可知,15 s 时图中左侧病人周围的飞沫浓度较大,原因是在贴附射流气流组织形式下,2 个病人均处在回流区,飞沫释放后会向病房入口侧回风口扩散,图中右侧病人呼出的飞沫会影响相邻病人,容易引起相邻病人的交叉感染,存在安全风险。

由图 9(b)可知,15 s 时医护或陪护人员呼吸区平面内飞沫浓度较小,但由于回流的作用,病人产生的飞沫会流经站立的医护或陪护人员呼吸区,因此医护或陪护人员受到感染的风险较大。

该送风方式下在 2 位病人与 2 位健康人员呼吸区内的不同粒径飞沫平均个数浓度随时间变化,如表 4 所示。

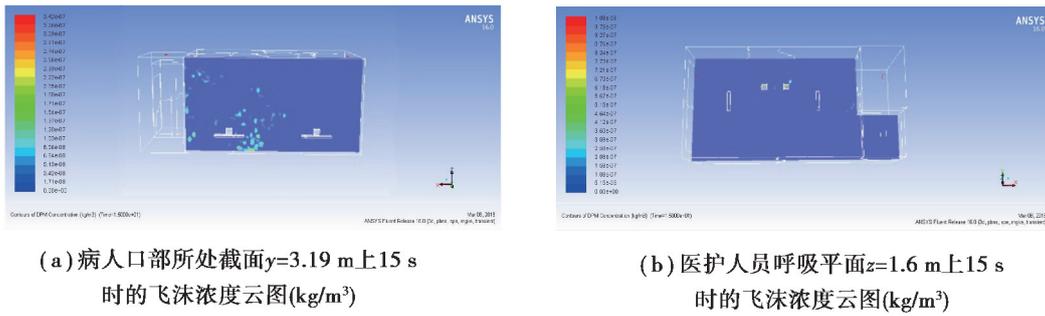


图 9 病人与医护人员口部截面的飞沫浓度云图 (15 s)

Fig. 9 The contour of droplet concentration on the cross section of patient and medical staff's mouth (15 s)

表 4 不同粒径飞沫呼吸区平均个数浓度随时间变化 (个/m³)

Table 4 Average number concentration of droplet with different particle size in respiratory area at different time

时间/s	A(<0.1 μm)		B(0.1~3 μm)		C(3~10 μm)		D(>10 μm)	
	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员
15	24	8	2 063	4 360	8	8	141	71
60	8	32	1 305	3 360	16	55	125	47
300	16	24	2 352	4 242	8	24	32	16

由表 4 可知, B 类飞沫个数浓度最大, 因为回流区的存在, A、B、C 3 种粒径飞沫在病人呼吸区个数浓度均比上送上回气流组织形式下的低, 而在健康人员呼吸区个数浓度均比上送上回气流组织形式下的高, D 类飞沫由于回流区和沉降的作用浓度越来越低, 贴附射流气流组织形式下产生的飞沫污染物对健康人员的影响较大。

2.4 上送下回

上送下回为文献[23]推荐的送风方式, 送风口送入房间的气流先流经医护人员呼吸区域, 再流向病人, 最后由病床下部回风口排出, 病房气流组织模拟结果如图 11 所示。

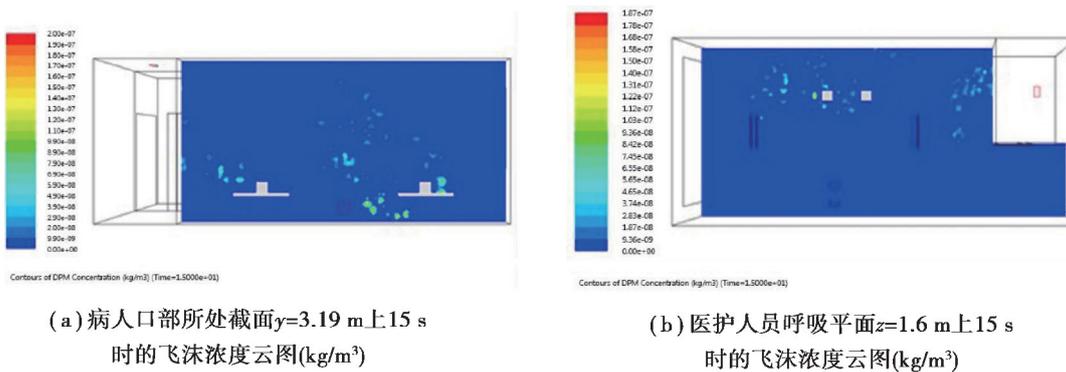


图 10 病人与医护人员口部截面的飞沫浓度云图 (15 s)

Fig. 10 The contour of droplet concentration on the cross section of patient and medical staff's mouth (15 s)

由图 10(a)可知, 15 s 时图中右侧靠近窗户的病人产生的飞沫受底部回风作用, 迅速向病床侧下方回风口聚集, 而图中相邻病床病人产生的飞沫受送风气流影响, 先向病房入口侧运动, 再向下部回风口流动, 病人之间发生交叉感染的概率较小。

由图 10(b)可知, 15 s 时病人产生咳嗽飞沫会朝站立医护或陪护人员呼吸区附近扩散, 但由于送风气流的推进与下部回风口的抽吸, 能较快排出医护人员呼吸区, 建议医护或陪护人员在病房送风口下部区域活动。

上送下回气流组织形式下不同粒径飞沫在 2 位病人与 2 位健康人员呼吸区内的平均个数浓度随时间变化如表 5 所示。

表 5 不同粒径飞沫呼吸区平均个数浓度随时间变化(个/m³)

Table 5 Average number concentration of droplet with different particle size in respiratory area at different time

时间/s	A(<0.1 μm)		B(0.1~3 μm)		C(3~10 μm)		D(>10 μm)	
	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员	病人	健康人员
15	8	16	5 242	1 360	16	32	55	78
60	0	16	5 040	1 578	8	8	172	149
300	16	0	6 555	1 516	8	0	16	8

由表 5 可知,当飞沫充分扩散至整个病房时,健康人员呼吸区不同粒径飞沫个数浓度与另外 2 种气流组织形式相比最低,而病人呼吸区 B 类飞沫个数浓度较高,这是因为上送下回气流组织形式的回风口位于病床下部,离病人呼吸区较近。上送下回气流组织形式对病房内健康人员更为有利。

2.5 污染物排除效果评价

从模拟结果可知,上送下回送风方式由于回风口位于病房床头下部,靠近污染源,能维持室内较低的飞沫污染物个数浓度,排除室内飞沫污染物的能力最强。文中采用通风效率 $E_{v(t)}$ 来评价不同气流组织下送风气流对房间不同位置污染物的排除效果, $E_{v(t)}$ 越大说明送风气流对房间某一位置污染物的排除效果好,反之, $E_{v(t)}$ 越小,说明送风气流对房间某一位置污染物的排除效果差^[24]。 $E_{v(t)}$ 计算式为

$$E_{v(t)} = \frac{C_{e(t)} - C_{o(t)}}{C_{(t)} - C_{o(t)}}, \quad (1)$$

式中, $C_{e(t)}$ 为 t 时刻排风口污染物个数浓度,个/m³; $C_{o(t)}$ 为 t 时刻送风口污染物个数浓度,个/m³; $C_{(t)}$ 为 t 时刻评价区域污染物个数浓度,个/m³。可设送风口浓度 $C_{o(t)} = 0$,式(1)简化为

$$E_{v(t)} = \frac{C_{e(t)}}{C_{(t)}}. \quad (2)$$

此时,通风效率为某时刻排风口处的飞沫污染物个数浓度与工作区个数浓度之比,根据模拟结果,计算得到不同气流组织形式下病房内健康人员呼吸区通风效率,如图 11 所示。

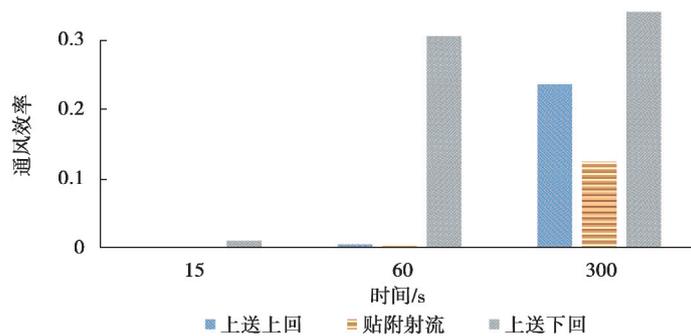


图 11 不同气流组织形式下健康人员呼吸区通风效率对比

Fig. 11 The time-varying ventilation efficiency in respiratory area of medical staff under three typical air distribution forms

由图 11 可知,上送下回气流组织形式通风效率在健康人员呼吸区内均大于上送上回和贴附射流气流组织形式,300 s 时上送下回气流组织形式通风效率约为 0.34,上送上回气流组织形式通风效率约为 0.24,贴附射流气流组织形式通风效率约为 0.12,同样说明上送下回气流组织形式排除室内飞沫污染物的能力最强。

3 结 论

针对空调病房内病人产生的飞沫污染物在室内空间的传播特性,基于文献与现场调研获得现有综合医院空调病房气几种常见流组织形式,以及人体呼吸活动产生飞沫的粒径、数目、速度和温度等基础数据,运用 Fluent 软件建立了病房物理模型与飞沫污染物蒸发扩散模型,借助软件的开放接口用户自定义函数(UDF)编写程序作为人体4次咳嗽与呼吸结合的飞沫喷射过程的速度输入条件。分析模拟飞沫在病房内的蒸发扩散与迁移,得到以下结论:

1)上送上回、贴附射流和上送下回3种气流组织下,粒径在 $0.1\sim 3\ \mu\text{m}$ 之间B类飞沫在病人与健康人员呼吸区域个数浓度都最大,且 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的粒子可进入肺深处,对人体造成的危害较大。300 s时上送上回气流组织形式下,B类飞沫在健康人员呼吸区域个数浓度超过 $2\ 500\ \text{个}/\text{m}^3$,贴附射流超过 $4\ 200\ \text{个}/\text{m}^3$;而上送下回气流组织形式下,B类飞沫在健康人员呼吸区域个数浓度只有 $1\ 500\ \text{个}/\text{m}^3$ 左右,比上送上回低40%,比贴附射流气流组织形式低近70%,说明上送下回气流组织形式排除飞沫污染物效果更好。

2)对比上送上回、贴附射流和上送下回3种气流组织形式,300 s时在站立健康人员呼吸区域,即健康人员距地面高度1.6 m处的通风效率,上送上回气流组织形式通风效率约为0.24,贴附射流气流组织形式通风效率约为0.12,上送下回气流组织形式通风效率约为0.34,说明上送下回气流组织形式排除病房飞沫污染物的能力最强。

3)目前医院病房常采用的贴附射流气流组织形式对病原微生物飞沫污染物的排除效果较差,容易造成室内人员的交叉感染,建议普通病房采用上送下回气流组织形式。

参考文献:

- [1] Who. Summary of probable SARS cases with onset of illness from 1 November 2002 to 31 July 2003[J/OL]. World Health Organization, 2003[2015-7-24]. http://www.who.int/csr/sars/country/table2004_04_21/en/index.html, 2004.
- [2] Wei J J, Li Y G. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment[J]. American Journal of Infection Control, 2016, 44(9): S102-S108.
- [3] 连之伟, 戚大海. 气流组织评价指标的修正[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(8): 937-942.
Lian Z W, Qi D H. Modification for evaluation indexes of air distribution[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(8): 937-942. (in Chinese)
- [4] Papineni R S, Rosenthal F S. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects[J]. Journal of Aerosol Medicine, 1997, 10(2): 105-116.
- [5] Nicas M, Nazaroff W W, Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2005, 2(3): 143-154.
- [6] Chao C Y H, Wan M P, Morawska L, et al. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening[J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40(2): 122-133.
- [7] Gupta J K, Lin C H, Chen Q. Characterizing exhaled airflow from breathing and talking[J]. Indoor Air, 2010, 20(1): 31-39.
- [8] Gupta J K, Lin C H, Chen Q. Flow dynamics and characterization of a cough[J]. Indoor Air, 2009, 19(6): 517-525.
- [9] Höpfe P. Temperatures of expired air under varying climatic conditions[J]. International Journal of Biometeorology, 1981, 25(2): 127-132.
- [10] Wells W F. On air-borne infection[J]. American Journal of Epidemiology, 1934, 20(3): 611-618.
- [11] Zhang Z, Chen Q. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(18): 3396-3408.
- [12] Chao C Y H, Wan M P, Sze To G N. Transport and removal of expiratory droplets in hospital ward environment[J]. Aerosol Science and Technology, 2008, 42(5): 377-394.
- [13] Ji Y C, Qian H, Ye J, et al. The impact of ambient humidity on the evaporation and dispersion of exhaled breathing droplets: a numerical investigation[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 115: 164-172.
- [14] 孙炜. 空调室内污染液滴的扩散及室内热环境的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.

- Sun W. Transport of droplets with contaminant in air-conditioned room and thermal calculation of buildings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [15] Liu L, Li Y, Nielsen P V, et al. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people[J]. *Indoor Air*, 2017, 27(2): 452-462.
- [16] Papineni R S, Rosenthal F S. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects[J]. *Journal of Aerosol Medicine*, 1997, 10(2): 105-116.
- [17] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang F J. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [18] Gupta J K, Lin C H, Chen Q. Characterizing exhaled airflow from breathing and talking[J]. *Indoor Air*, 2010, 20(1): 31-39.
- [19] 刘鹏. 病房飞沫污染物的浓度变化特征及污染控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Liu P. Variation characteristics and pollution control of droplet contaminant concentration in wards[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [20] Duguid J P. The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei[J]. *The Journal of Hygiene*, 1946, 44(6): 471-479.
- [21] Xie X, Li Y, Sun H, et al. Exhaled droplets due to talking and coughing[J]. *J R Soc Interface*, 2009, 6: S703-S714.
- [22] 廖悦. 高海拔地区供暖病房飞沫污染物的传播及风险评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Liao Y. The transmission of droplets contaminants in heating wards of high altitude region and risk assessment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 综合医院建筑设计规范 GB 51039—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of general hospital, GB 51039—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 王焯, 付银安, 管国祥, 等. 寒冷地区民用住宅冬季自然通风数值分析[J]. *重庆大学学报*, 2016, 39(3): 84-94.
Wang Y, Fu Y A, Guan G X, et al. Numerical analysis on the natural ventilation of a residence in winter in cold zone[J]. *Journal of Chongqing University*, 2016, 39(3): 84-94. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)