

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-045-07

# 医护人员走动对 ICU 病房内气流分布的影响

张金航 张登春 熊 梨

(湖南科技大学土木工程学院 湘潭 411201)

**【摘要】** 考虑到 ICU 病房内医护人员走动的情况, 运用 FLUENT 软件, 采用动网格方法对某 ICU 病房内医护人员进行走动程序的设置, 并对医护人员走动所引起的气流变化进行数值模拟。研究结果表明, ICU 病房内医护人员的走动主要对医护人员尾部区域有一定影响, 影响区域约为人体 3 倍身宽, 使尾部区域气流速度以及颗粒物浓度较大, 并且其气流速度与医护人员走动速度几乎保持一致; 医护人员走动对病患区域影响较小, 当医护人员接近病患时在 ICU 病房内呼吸机和药品桌等医用设备附近时, 由于走动引起的气流带动医用设备的颗粒物扬起扩散至病患附近。

**【关键词】** ICU 病房; 人员走动; 动网格; 气流变化; 数值模拟

中图分类号 TU834 文献标识码 A

## Effect of Medical Staff Walking on Air Flow Characteristics in ICU Ward

Zhang Jinhang Zhang Dengchun Xiong Li

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201)

**【Abstract】** Considering that there will be medical staff walking in ICU Wards, the moving grid method is used to set the walking program of medical staff in an ICU ward by using FLUENT software, and the air flow change caused by medical staff walking is numerically simulated. The results show that the movement of TCM nurses in ICU ward mainly has a certain impact on the tail area of medical workers. The affected area is about three times the body width of human body, which makes the air velocity and particle concentration in the tail area larger, and its airflow speed is almost consistent with the walking speed of medical staff. The movement of the medical staff has little impact on the patient area. When the medical staff is close to the patient and near the ventilator, medicine table and other medical equipment in the ICU ward, the airflow caused by the movement drives the particles of the medical equipment to rise and spread to the patient.

**【Keywords】** ICU ward; personnel movement; moving grid; airflow change; numerical simulation

## 0 引言

随着 2020 年以来新冠疫情在全球的爆发, 医院病房的环境问题越来越受到广泛重视, ICU 病房作为特别的病房科室, 收纳的病人大多患有严重疾病, 更加容易成为感染高风险区域。目前对于 ICU 病房内气流特征的研究, 大多数研究病房内人员静止状态下的情况。

Cheong K W D 等<sup>[1]</sup>利用数值模拟结合实验验证的方法, 研究了负压隔离病房内气流组织与污染物浓度的关系。Verma T N 等<sup>[2]</sup>通过 CFD 软件对 ICU 病房内送风速度及送风口位置进行研究, 采用 9 种不同组合进行比较分析, 得出病房内通风达到最佳空气质量的方案。冯昕等<sup>[3]</sup>就单人和双人病房的三种气流组织方案进行了研究, 研究得出顶送,

基金项目: 湖南省自然科学湘潭联合基金项目 (2021JJ50122); 2021 年湘潭市第三批长株潭国家自主创新示范区建设专项 (CG-ZDGS20211005)

作者简介: 张金航 (1997-), 男, 硕士研究生, E-mail: 820863258@qq.com

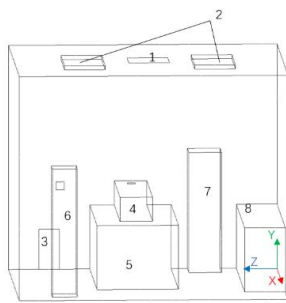
通讯作者: 张登春 (1972-), 男, 博士, 教授, E-mail: dczhang2000@126.com

收稿日期: 2022-09-02

床内侧单回风口的气流组织对污染物排除效果最好。赵福云等<sup>[4]</sup>就某 I 级局部送风垂直单向流洁净手术室空态下的气流组织进行了研究,研究了回风口布置形式和送风速度对气流组织产生的影响。王明明<sup>[5]</sup>提出采用局部空气处理装置作为降低室内颗粒物浓度的措施,采用数值模拟方法对不同风口的效果进行相关分析。岑冬冬<sup>[6]</sup>在基于室内人员走动的情况下,应用 CFD 软件就室内气流组织和污染物扩散进行数值模拟,并且采用动量源的方法模拟人员走动对室内环境的影响。Brohus H 等<sup>[7]</sup>发现室内人员走动会对人员周围气流产生强烈干扰,进而影响室内流场及污染物分布。Wang J 等<sup>[8]</sup>采用动网格法研究了人员走动对手术室悬浮液滴的影响,结果表明人员走动会产生严重的尾流,从而增大局部气流速度。

以上研究成果,大多数是在病房内人员保持静止的情况下研究的,而对病房内人员走动的情况并没有做深入的研究。本文运用 Ansys Fluent 软件,对单间 ICU 病房内气流分布特征进行数值模拟分析,采用动网格方法分析了医护人员走动对病房内气流分布的影响,研究结果表明医护人员的走动对病房的局部气流会有影响,并且主要影响医护人员行走的区域。同时本研究也为 ICU 病房内空气质量的优化提供参考。

### 1 物理模型



1—送风口; 2—灯具; 3—回风口; 4—病患; 5—病床;  
6—医护人员; 7—呼吸机; 8—药品桌

图 1 单间 ICU 病房物理模型

Fig.1 Physical model of single ICU ward

按照真实的 ICU 单人间病房尺寸与结构进行建模,并对部分形状进行了简化,如图 1 所示。整个病房尺寸为 3.3m×3.03m×2.8m (长×宽×高),病房内主要包括: 1 名躺在病床上的患者 (0.4m×

0.3m×1.6m)、1 名医护人员 (0.4m×0.6m×1.6m)、1 台呼吸机 (0.4m×0.4m×1.5m)、1 个药品桌 (2.3m×0.5m×0.8m)、2 盏相同灯具 (1.0m×0.5m×0.05m)、1 张病床 (2.0m×1.0m×0.8m), 房间采用顶送侧回的气流组织形式, 房间顶部中央布置尺寸为 0.5m×0.5m 的送风口, 侧下方布置尺寸为 0.5m×0.25m 的回风口。

### 2 数学模型

使用 FLUENT 软件对 ICU 病房内空气流动与污染物扩散进行数值模拟, 考虑到 ICU 病房内障碍物较多, 选用 RNG  $k-\epsilon$  模型结合加强壁面函数法对病房内流场进行模拟计算。采用拉格朗日法的颗粒物离散相模型对颗粒物运动进行模拟, 以展现颗粒物轨迹及单个颗粒的分布情况<sup>[9]</sup>。对病房内进行假设:

- (1) ICU 病房内空气流动为稳态湍流;
- (2) 病房内空气为低速不可压缩流动, 并且符合 Boussinesq 假设;
- (3) 整个病房为壁面绝热状态且表面温度均匀分布;
- (4) 忽略固体表面间的辐射影响;
- (5) 病房气密性良好, 不考虑门窗漏风的影响。

在 ICU 病房内空气流动过程中, 满足质量守恒、动量守恒、能量守恒以及组分输运定理, 其控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \tag{2}$$

能量方程:

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\Phi}{c} + a \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \frac{1}{c} q_R \tag{3}$$

组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\rho}{R_e \cdot S_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] + \frac{\rho Q L_0}{u_0 C_0} \tag{4}$$

湍流动能  $k$  方程:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍流动能耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (6)$$

式中,  $u_i$  为速度矢量, m/s;  $x_i$  代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向;  $T$  为温度, K;  $\Phi$  为能量耗散率,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_R$  为内热源产生率,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\mu$  为层流动力粘度, Pa·s;  $\mu_t$  为湍流动力粘度, Pa·s;  $\nu$  为运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C$  为污染物体积浓度, ppm;  $R_e$  为雷诺数;  $S_c$  为施密特数;  $Q$  为污染物发生率, ppm/s;  $L_0$  为特征长度, m;  $u_0$  为特征速度, m/s;  $C_0$  为特征浓度, ppm;  $k$  为湍流动能, J;  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率;  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍流动能产生项, J;  $c$  为空气比热,  $1.01 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $C_1$ 、 $C_2$  为经验常数;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别为  $k$  和  $\varepsilon$  有效普朗特数的倒数。

### 3 动网格及边界条件设置

#### 3.1 动网格模型

选用动网格模型对医护人员的走动进行模拟, 由于动网格的存在, 控制体内有一部分是运动的, 因此会产生一定的变化, 而这些变化需要相应的守恒方程来控制, 满足网格守恒定律。对于通量  $\phi$ , 在任意一个控制体内, 其边界是运动的, 其守恒方程式为:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{eV} \rho \phi (\bar{u} - \bar{u}_s) \cdot d\bar{A} = \int_{eV} \Gamma \nabla \phi \cdot d\bar{A} + \int_V S_\phi dV \quad (7)$$

对于动网格, 采用弹性系数法与动态重构法相结合的更新方法对网格进行更新, 同时自定义函数 (UDF) 用来给定运动物体的运动行为。

#### 3.2 边界条件

本文使用 FLUENT 软件对病房进行模拟, 采用控制容积法对控制方程进行离散, 对流项和扩散项使用幂函数差分格式, 应用 SIMPLE 算法求解离散控制方程。

(1) 送回风口边界条件: 送风口采用速度边界条件。由于 ICU 病房的特殊性, ICU 病房也是一个隔离病房洁净室, 根据文献[10], ICU 病房属于 IV 级洁净手术室, 其换气次数至少应为 12 次/h,

本计算模型换气次数取 12.5 次/h, 得出送风口速度为 0.39m/s, 送风温度根据文献[10]规定 ICU 病房内温度以及送风温差要求, 取送风温度为 22℃ 进行计算。回风口采用压力出口边界条件。

(2) 壁面边界条件: 绝热状态, 壁面湍流方法使用加强壁面函数法。

(3) 颗粒物边界条件: 假设病人的呼气作为污染源, 经计算, 取人体呼气速率<sup>[11]</sup>为 0.8m/s, 人体发尘量为送回风口以及人的口鼻设为逃逸边界, 壁面以及呼吸机设为反射边界, 其余皆设为捕捉边界。

(4) 热源条件: 病人散热量<sup>[12]</sup>为 40W/m<sup>2</sup>, 医护人员散热量为 50W/m<sup>2</sup>, 呼吸机散热量为 170W, 灯具散热量为 60W。

(5) 医护人员走动条件: 由于 ICU 病房的特殊性, 医护人员在病房内走动速度较慢, 综合国内外研究分析<sup>[13-17]</sup>, 拟定医护人员行走速度为 0.5m/s。

## 4 模拟过程

ICU 病房内医护人员在病房内主要围绕病患进行相关医疗工作。因此, 医护人员的运动轨迹主要围绕着病床运动, 考虑到 ICU 病房的特殊性, 医护人员并不能一直待在病房内, 因此, 采用自定义函数设置医护人员的轨迹为医护人员绕着病床运动, 最后回到医护人员最开始的位置。医护人员轨迹图如图 2 所示。

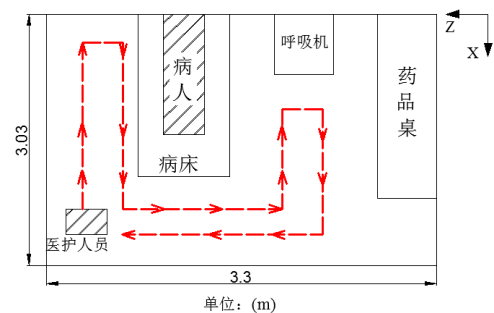


图 2 病房内医护人员走动轨迹俯视图

Fig.2 Top view of walking track of medical staff in the ward

图 2 中, 箭头即为医护人员运动轨迹, 为了接近实际运动情况, 医护人员的来回转动都设置成原地转动。医护人员整个运动情况如下: 医护人员首先沿着 X 轴负方向运动 2.15m, 然后旋转 180° 改变医护人员朝向, 接着沿着 X 轴正方向运动 2.15m

回到原点，随后旋转 90° 改变医护人员朝向，并沿着 Z 轴负方向运动 1.8m 到达病床另一侧，紧接着旋转 90° 改变医护人员朝向，并沿着 X 轴负方向运动 1.4m，然后再旋转 180° 改变朝向，并沿着 X 轴正方向运动 1.4m，最后旋转 90° 改变朝向，并沿着 Z 轴正方向运动 1.8m 回到最初的起点。

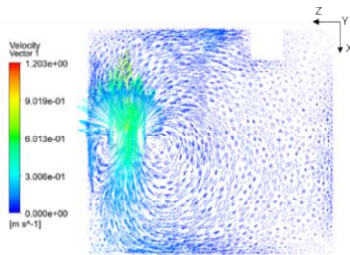
其具体模拟过程为：(1) 首先对医护人员处于静止状态的情况进行模拟，颗粒物在整个模拟过程一直释放；(2) 然后对医护人员走动过程重新进行模拟，根据医护人员 0.5m/s 走动速度，设置人员转动时间，转动 180° 需要 1s，按照图 2 的轨迹，医护人员共运动 24.9s，回到原点；(3) 继续对气流变化和粒子扩散进行模拟计算 5.1s。整个模拟过程中走动状态一共计算 30s。

### 5 计算结果分析

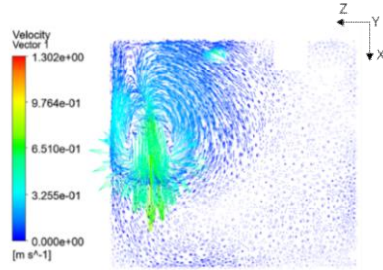
为了研究医护人员走动对 ICU 病房内气流分布的影响，在医护人员走动轨迹中选取医护人员所在的不同位置进行分析比较。医护人员的运动轨迹，分为 6 个过程：(1) 0-4.3s 过程医护人员在病床一侧朝病床前部运动；(2) 5.3s-9.6s 过程医护人员返回；(3) 10.1s-13.7s 医护人员朝病床另一侧运动；(4) 14.2s-17s 医护人员在另一侧朝病床前部方向运动；(5) 18s-20.8s 医护人员在另一侧返回病床尾部方向；(6) 21.3s-24.9s 医护人员在病床尾部返回最初位置的运动。

#### 5.1 人员走动对速度分布的影响

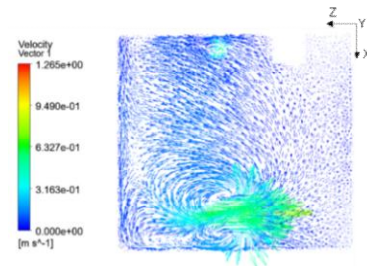
分别选取上述六个过程进行 2s 即走动 1m 后的医护人员的位置，医护人员停止走动的时间 ( $t=24.9s$ )，以及整个计算结束的最终状态 ( $t=30s$ ) 共 8 个状态进行分析比较，取医护人员嘴部高度所在平面 ( $Y=1.35m$ ) 分析气流运动情况。图 3 为人员走动过程中 8 个不同时刻下速度矢量分布。



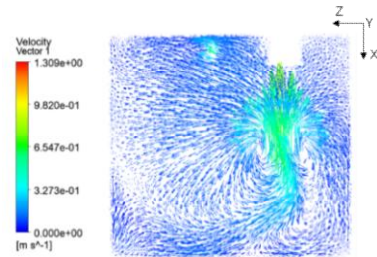
(a) 走动 2s 后的速度矢量分布



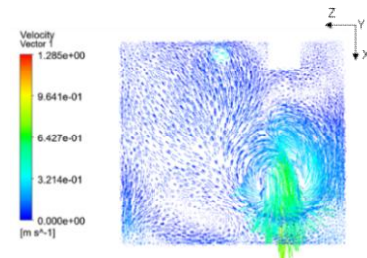
(b) 走动 7.3s 后的速度矢量分布



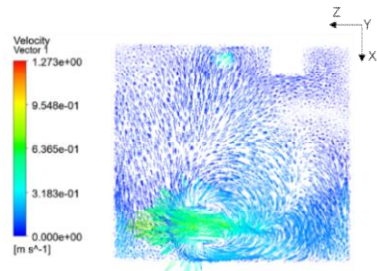
(c) 走动 12.1s 后的速度矢量分布



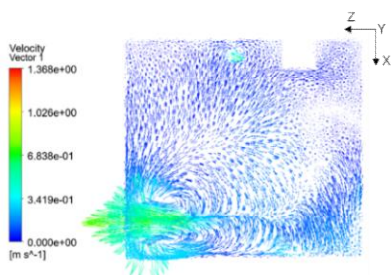
(d) 走动 16.2s 后的速度矢量分布



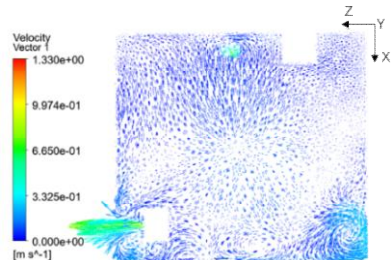
(e) 走动 20s 后的速度矢量分布



(f) 走动 23.3s 后的速度矢量分布



(g) 走动 24.9s 后的速度矢量分布



(h) 走动 30s 后的速度矢量分布

图 3 医护人员走动过程中的速度矢量分布

Fig.3 Velocity vector distribution of medical staff during walking

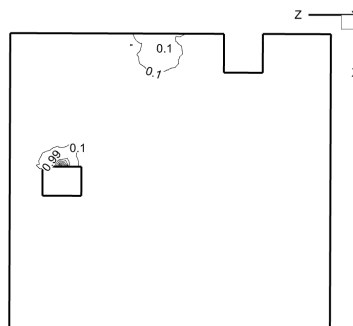
由图 3 可知, 在医护人员行走过程中, 医护人员的运动会干扰到 ICU 病房内局部气流, 影响区域主要在医护人员尾部气流的区域, 其影响范围大约是人体 3 倍身宽, 使这些区域的气流速度较大。由于医护人员距离病患距离较近, 其走动过程会干扰病患部分区域的气流, 并且在病患区域同时受到送风气流以及病患呼吸气流的影响, 使病患部分处于干扰区域中, 其气流随着时间的改变变得较为紊乱。干扰区域的气流速度大小约为 0.6m/s, 该速度大小正好接近医护人员的运动速度。因此, 干扰引起的二次气流的速度大小与医护人员的行走速度相近保持一致。随着医护人员在 24.9s 后结束走动后, 由图 3 (h) 可知, 由于医护人员走动带来的二次气流的干扰随着医护人员的静止逐渐变小从而消失, 整个 ICU 病房内气流逐渐恢复正常。

### 5.2 人员走动对病房内颗粒物浓度分布的影响

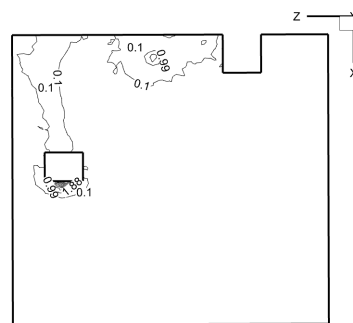
同样选取上述 8 个不同状态点进行分析比较, 取医护人员嘴部高度所在的平面 ( $Y=1.35\text{m}$ ) 对病房内颗粒物浓度进行分析。图 4 为人员走动过程中 8 个不同时刻下颗粒物浓度分布。

由图 4 可知, 整个 ICU 病房内大部分颗粒物浓度为  $0-0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 在医护人员走动过程中, 医护人员尾部 3 倍身宽范围内颗粒物浓度会受到影响, 其浓度较其他区域浓度略高, 为  $0.1-1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而在医

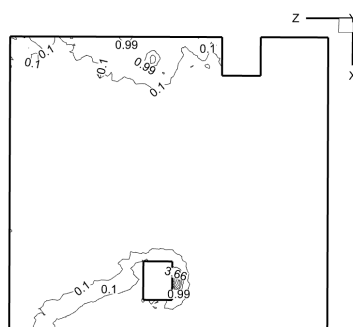
护人员呼吸区域, 由于嘴部颗粒物散发源的影响, 其颗粒物浓度较大。对于医护人员处, 颗粒物释放沿着呼吸的距离逐渐降低。同时在医护人员走动过程中, 由于颗粒物浓度较小, 医护人员的走动对病患区域颗粒物浓度并没有明显影响, 在病患处的颗粒物浓度主要受到病患呼吸气流的影响。因此, 医护人员走动主要影响医护人员身后的浓度场。



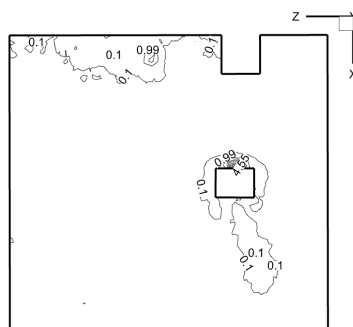
(a) 走动 2s 后的颗粒物浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



(b) 走动 7.3s 后的颗粒物浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



(c) 走动 12.1s 后的颗粒物浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



(d) 走动 16.2s 后的颗粒物浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

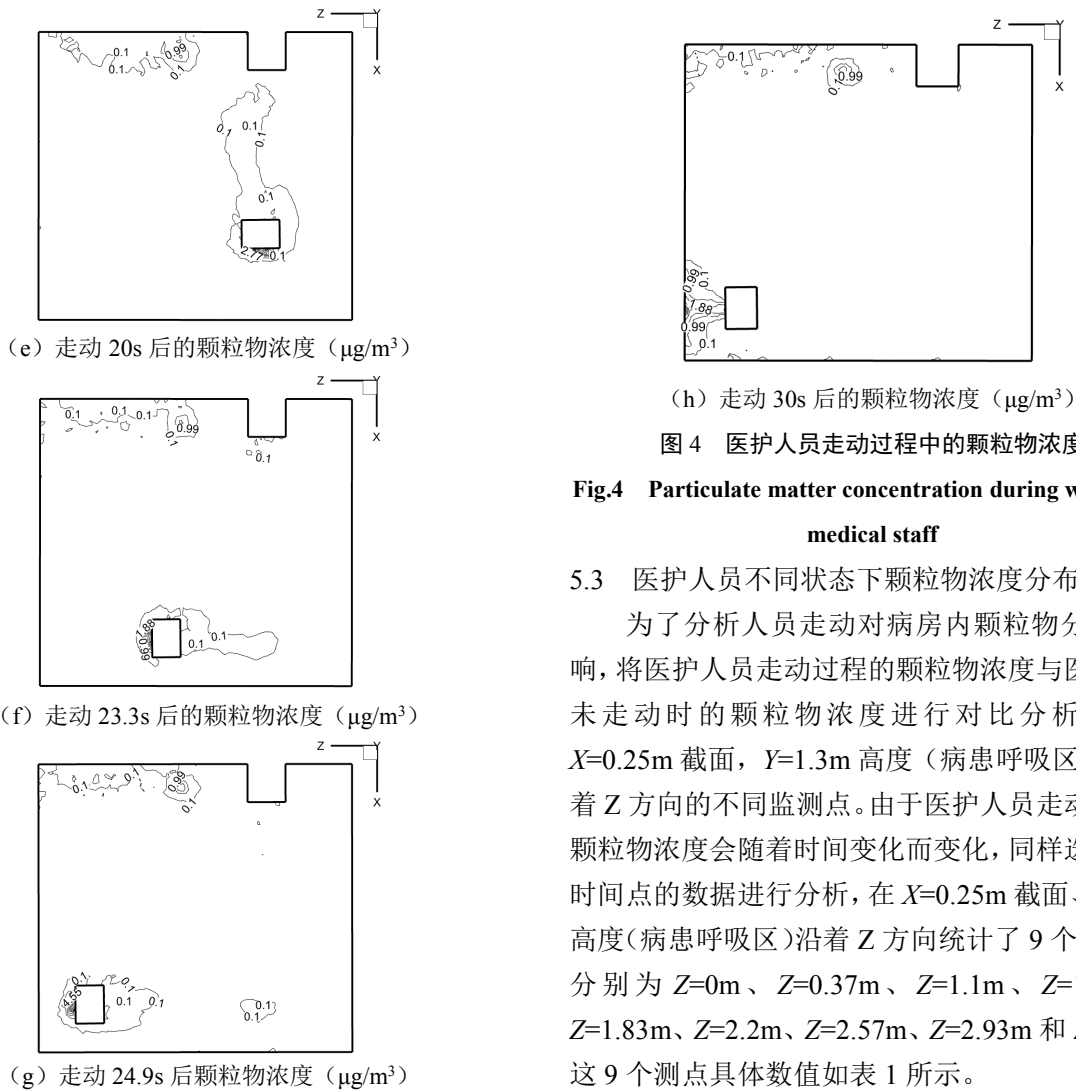


图 4 医护人员走动过程中的颗粒物浓度

Fig.4 Particulate matter concentration during walking of medical staff

5.3 医护人员不同状态下颗粒物浓度分布的对比  
 为了分析人员走动对病房内颗粒物分布的影响,将医护人员走动过程的颗粒物浓度与医护人员未走动时的颗粒物浓度进行对比分析,选取  $X=0.25\text{m}$  截面,  $Y=1.3\text{m}$  高度(病患呼吸区)上沿着  $Z$  方向的不同监测点。由于医护人员走动会引起颗粒物浓度会随着时间变化而变化,同样选取 8 个时间点的数据进行分析,在  $X=0.25\text{m}$  截面、 $Y=1.3\text{m}$  高度(病患呼吸区)沿着  $Z$  方向统计了 9 个监测点,分别为  $Z=0\text{m}$ 、 $Z=0.37\text{m}$ 、 $Z=1.1\text{m}$ 、 $Z=1.47\text{m}$ 、 $Z=1.83\text{m}$ 、 $Z=2.2\text{m}$ 、 $Z=2.57\text{m}$ 、 $Z=2.93\text{m}$  和  $Z=3.3\text{m}$ ,这 9 个测点具体数值如表 1 所示。

表 1 不同时间下各个测点的颗粒物浓度值(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Table 1 Particle concentration values at various measuring points at different times (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

时间点	2s	7.3s	12.1s	16.2s	20s	23.3s	24.9s	30s	平均值
$Z=0\text{m}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Z=0.37\text{m}$	0	0	0.0006	0	0.002	0	0	0.011	0.001694
$Z=1.1\text{m}$	0	0.164	0.114	0.0896	0	0	0	0.15	0.0647
$Z=1.47\text{m}$	0.0495	0.136	0.06	0.018	0.016	0.035	0.027	0.049	0.048813
$Z=1.83\text{m}$	0.5957	2.4476	2.06	2.11	1.84	1.84	1.83	1.855	1.822
$Z=2.2\text{m}$	0.0185	0.1015	0.178	0.1525	0.124	0.086	0.079	0.037	0.097
$Z=2.57\text{m}$	0	0.0461	0.0649	0.1492	0.096	0.14	0.09	0.097	0.085
$Z=2.93\text{m}$	0	0.2165	0.071	0.034	0.081	0.061	0.089	0.051	0.075
$Z=3.3\text{m}$	0	0.001	0.055	0.11	0.085	0.15	0.175	0.096	0.084

由表 1 计算这 9 个测点在 8 个不同时间点上的平均值,将其作为医护人员走动状态下的颗粒物浓度值,与医护人员保持不走动状态下的相同监测点

的颗粒物浓度进行对比,图 5 为两种情况下  $X=0.25\text{m}$  截面、 $Y=1.3\text{m}$  高度(病患呼吸区)沿着  $Z$  方向上的颗粒物浓度。

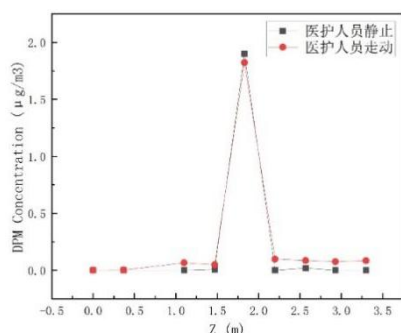


图 5 病患呼吸高度截面医护人员不同状态下的颗粒物浓度

**Fig.5 Cross section of patient's respiratory height particulate matter concentration of medical staff in different states**

由图 5 可以看出,在医护人员行走和医护人员静止状态下,两者的颗粒物浓度变化情况一致,均在  $Z=1.5\text{m}-2.0\text{m}$  范围附近的颗粒物浓度较大,此范围内正好是病患所在位置附近,而在  $Z=1.83\text{m}$  附近出现峰值,此处正好是病患嘴部呼吸区所在位置。由于高度  $Y=1.3\text{m}$  为颗粒物刚从病患嘴部释放,最大浓度都集中在病患呼吸区附近,使颗粒物并未来得及完全扩散至四周,因此仅在病患附近处颗粒物浓度较高。

在  $Z=1.83\text{m}$  处,医护人员走动状态下的颗粒物浓度最大值为  $1.822\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,医护人员静止时的最大值为  $1.905\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,医护人员静止状态时的颗粒物浓度最大值则略大于医护人员行走状态时的最大值。而在其他不同位置处,医护人员静止时颗粒物浓度均略小于医护人员行走状态下的颗粒物浓度值。因此,由于医护人员的走动,加上病房内相关仪器以及药品桌对颗粒物捕捉的因素,使病床两侧的颗粒物浓度较高,而病患处颗粒物浓度受医护人员行走的影响较小。

## 6 结论

(1) 在 ICU 病房内医护人员的走动会干扰 ICU 病房内局部气流,主要影响医护人员行走的区域,其影响区域约为人体 3 倍身宽的范围,使该区域的浓度及速度较大。

(2) ICU 病房内医护人员的走动使影响区域速度较大,该速度与医护人员行走速度大小基本保持一致。

(3) ICU 病房内医护人员的走动对病患区域

影响较小,只有在接近病患时和在 ICU 病房内呼吸机和药品桌等医用设备附近时,由于走动引起的气流带动医用设备的颗粒物扬起扩散至病患附近。

## 参考文献:

- [1] Cheong K W D, Phua S Y. Development of ventilation design strategy for effective removal of pollutant in the isolation room of a hospital[J]. Building and Environment, 2006,41(9):1161-1170.
- [2] Verma T N, Sinha S L. Numerical simulation of contaminant control in multi-patient intensive care unit of hospital using computational fluid dynamics[J]. Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 2015,5(5):1088-1092.
- [3] 冯昕,许钟麟,张益昭,等.负压隔离病房气流组织效果的数值模拟及影响因素分析[J].建筑科学,2006,22(1):35-41.
- [4] 赵福云,王云鹤,杨国彪.洁净手术室空气气流组织模拟[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(11):986-994.
- [5] 王明明.ICU 中颗粒物空气传播的局部控制对策研究[D].青岛:青岛理工大学,2019.
- [6] 岑冬冬.基于室内人员走动及数量变化工况下的通风系统优化设计[D].苏州:苏州大学,2018.
- [7] Brohus H, Balling K D, Jeppesen D. Influence of movements on contaminant transport in an operating room[J]. Indoor air, 2006,16(5):356-372.
- [8] Wang J, Chow T T. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room[J]. Building and Environment, 2011,46(10):1993-2002.
- [9] Lu Q Q, Fontaine J R, Aubertin G. A Lagrangian model for solid particles in turbulent flows[J]. International journal of multiphase flow, 1993,19(2):347-367.
- [10] GB 50333-2013,医院洁净手术部建筑技术规范(附条文说明)[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [11] Yuan X, Chen Q, Glicksman L R. Performance evaluation and design guidelines for displacement ventilation[J]. ASHRAE Transactions, 1999,105(1):298-309.

(下转第 59 页)