

洁净手术室风系统气流组织模拟研究

阚玉红^{1,2} 李萌蒙¹ 格日勒^{1,2}

1. 中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

2. 北京京诚华宇建筑设计研究院有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 中国人口基数大, 总人数居世界第一, 医院就医人数居世界第一, 手术室的建设和发展迅速。手术室中空气的洁净尤为重要, 风系统气流组织是影响手术室空气洁净度的关键因素。通过对不同条件下的典型 I 级手术室内气流组织进行稳态数值模拟研究, 分析不同 z、x、y 值对应 xy 轴、yz 轴、xz 轴平面的速度分布, 不同送回风速度、相同送风速度不同回风速度下工作面的速度分布。通过对不同条件下的典型 I 级手术室内气流组织进行瞬态数值模拟研究, 分析不同送回风速度、相同回风速度不同送风速度、不同送风口位置污染物的扩散。

关键词: 气流组织; 暖通; 数值模拟

Simulation Research of Airflow Organisation in Clean Operating Room Air System

Yuhong Kan^{1,2} Mengmeng Li¹ Rile Ge^{1,2}

1. MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China

2. Beijing Jingcheng Huayu Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: China's population base is large, the total number of people in the world, the number of hospital visits in the world, the construction of operating theatres is developing rapidly. The cleanliness of air in the operating room is particularly important, and the airflow organisation of the wind system is a key factor affecting the cleanliness of air in the operating room. Through the steady state numerical simulation study on the airflow organisation in a typical Class I operating room under different conditions, we analyse the velocity distribution in the xy-axis, yz-axis and xz-axis planes corresponding to different z, x, y values, and the velocity distribution on the working surface under different air supply and return speeds, and under the same air supply and return speeds with different air return speeds. The transient numerical simulation study of the airflow organisation in a typical Class I surgical room under different conditions is carried out to analyse the diffusion of pollutants at different air supply and return velocities, at different air supply velocities for the same air supply velocity and at different air supply outlet positions.

Keywords: airflow organisation; HVAC; numerical simulation

1 数值模拟的基本理论

1.1 CFD 技术

在 1933 年, 英国的 Thom 用手摇计算机求解了二维粘性流体偏微分方程, 此为世界首次, 计算流体力学即 CFD (Computational Fluid Dynamics) 方法自此诞生^[1]。在 1974 年, 丹麦的 P. V. Nielsen 利用 k-ε 模型模拟房间内的气流组织^[2]。从此以后, CFD 技术得到广泛应用, 各个国家的学者从节能、洁净角度出发, 通过建立各种湍流模型, 用不同方法划分网格, 模拟气流组织、污染物扩散等, 并进行实验对比。

在 CFD 技术应用之前, 流体力学的研究主要集中在理论研究和实验研究。CFD 技术的应用使流体力学得到更广泛的应用和更大的发展。计算流体力学即 CFD 研究通常在流体运动的基本规律基础上, 做出适当简化的假设流体模型, 然后通过运用数学微分方程进行数值求解, 得出离散数据结果。相对于实验研究, 运用 CFD 技术做模拟研究可以

节省大笔资金, 节省大量时间精力, 可以灵活改变模拟变量, 可复制性强, 模拟精度较高, 接近真实情况, 推广性强。对洁净手术室研究而言, CFD 技术的应用无疑是质的飞跃。

1.2 基本控制方程

手术室中压力相当于大气压力, 各种参数波动较小, 房间里面的空气接近理想空气, 可以近似认为其满足理想气体状态方程:

$$PV=nRT \quad (1)$$

式中, P——理想气体压强 (Pa);

V——理想气体体积 (m³);

n——理想气体的物质的量 (mol);

R——理想气体常数, R=8.31 (J/(mol·K));

T——理想气体热力学温度 (K)。

手术室中空气流速较低, 可近似认为不可压缩流体。空气温度、湿度、密度变化不大, 空气流动一般为湍流, 满足质量、动量、能量守恒方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中, x 、 y 、 z ——三维空间内直角系的空间坐标 (m);

u 、 v 、 w ——速度矢量在 x 、 y 、 z 三个坐标系上的分量 (m/s)。

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5)$$

式中, τ ——时间 (s);

ρ ——密度 (kg/m^3);

p ——压强 (Pa);

μ ——动力粘度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

能量方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

式中, T ——温度 ($^{\circ}\text{C}$);

α ——热扩散系数 (m^2/s)。

1.3 流体计算模型

在 1972 年, W.P Jones 和 B.E Launder 提出 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型^[3]。两方程湍流模型有 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和

Realizable $k-\epsilon$ 模型。经过大量的实验验证, Realizable $k-\epsilon$ 模型精度较高, 模拟数据可靠, 计算量相对于大涡模拟等要小很多, 本文所用案例均采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

2 案例简介

2.1 物理模型

本案例在遵循 GB 50333—2013《医院洁净手术部建筑技术规范》条件下, 采用典型手术室模型。房间长 $7\text{m} \times$ 宽 $6.4\text{m} \times$ 高 3m , 手术台位于房间中间位置, 手术台长 $1.8\text{m} \times$ 宽 $0.6\text{m} \times$ 高 0.8m , 手术台外侧长边与房间外侧长边所在的直线平行。手术室采用垂直单向流, 利用顶部洁净天花送风, 送风口长 $2.6\text{m} \times$ 宽 2.4m , 送风口外侧长边与房间外侧长边所在的直线平行。顶部排风口与送风口的边缘距离为 0.2m , 尺寸为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$, 贴近病人头部。双侧面回风口长 $1\text{m} \times$ 宽 0.35m , 底距地面 0.15m , 间距 0.2m , 沿长边均匀分布。典型手术室物理模型如图 1 所示, 模型网格划分后如图 2 所示。

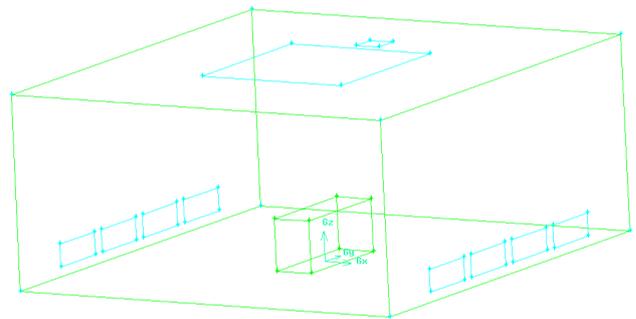


图 1 典型手术室物理模型

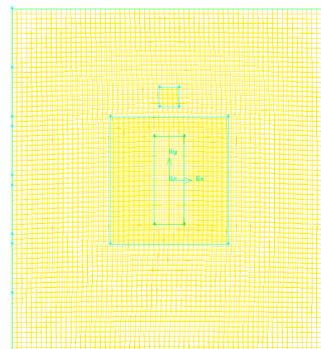
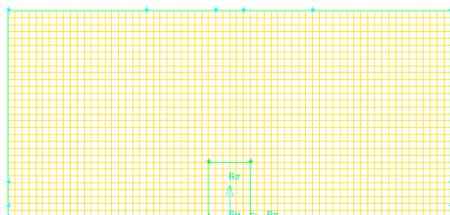
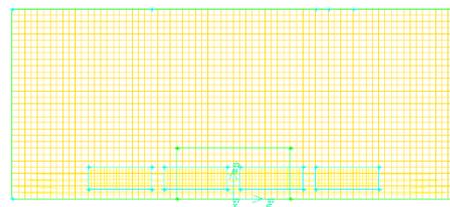
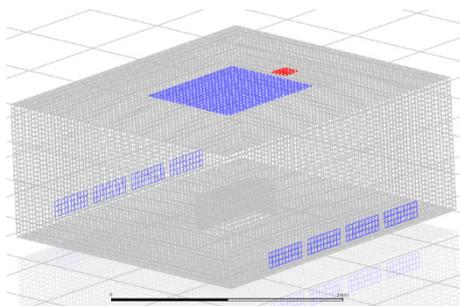


图 2 典型手术室模型网格划分

2.2 数学模型

针对典型手术室模型模拟仿真过程提出假设条件：手术室内空气流速较低，忽略流体密度对流动的影响，不考虑漏风，手术室内空气流动近似考虑为不可压缩常物性牛顿流体的稳态湍流流动，且符合 Boussinesq 假设。

利用网格划分软件对典型手术室模型进行结构化网格划分，然后将网格文件导入模拟软件中进行模拟运算，采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型和 SIMPLE 算法。

2.3 边界条件

送风温度为 293.15K (20℃)，送风速度为 0.45m/s，回风温度为 295.15K (22℃)，回风速度为 0.90m/s，排风口为自由流，其余假设为绝热壁面，利用模拟软件对该典型手术室内温度及流场随时间的变化进行分析。

2.4 网格无关性检验

网格数量影响数值模拟计算结果的精度，一般而言，网格数量越大，计算结果越精准，但同时计算时间越长。如图 3 所示，典型手术室模型的网格数量在 120 万以内，无面积加权系数的平均风速在 0.25~0.28m/s。当网格数量增加到 133536 个时，平均风速逐渐平缓，所以后续模拟选择的模型网格数量约为 13.4 万。

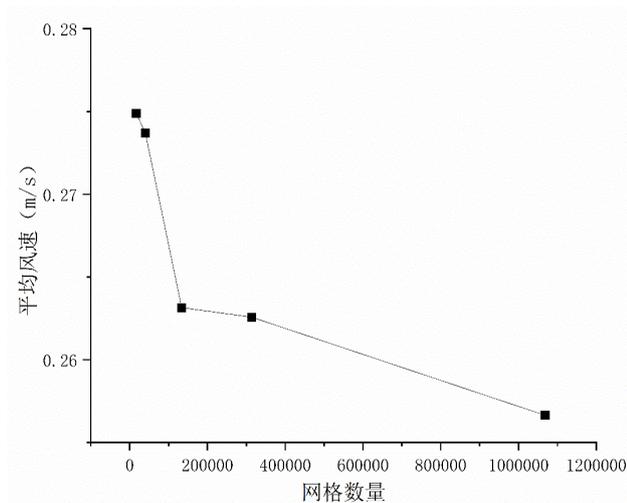


图 3 网格数量对平均风速的影响

3 数值模拟结果分析

3.1 不同 z 值对应 xy 轴平面的速度分布

从图 4 可以看出：受回风气流的影响，较低高度的水平面中高流速区域主要集中在回风区域和房间四个角偏内部的区域。受送风气流的影响，较高高度的水平面中高流速区域主要集中在送风区域和房间四个角偏内部的区域。受送风气流和床、房间棱角阻碍气流的影响，中间高度的水平面中高流速区域主要集中在床外圈和房间四个角落区域。

3.2 不同 x 值对应 yz 轴平面的速度分布

从图 5 可以看出：受回风气流的影响，x 轴两侧高流速

区域主要集中在回风区域。受送风气流的影响，x 轴中间部分高流速区域主要集中在送风口下方。从 $x=\pm 3m$ 和 $x=0m$ 可以看出，受床、房间棱角阻碍气流的影响，床外圈和房间四个角落区域形成了低流速区域。受涡流影响，x 轴两侧靠内部区域形成了低流速区域。从 $x=\pm 3m$ 、 $x=\pm 2m$ 、 $x=\pm 1m$ 可以看出，x 轴两侧速度分布基本对称，间接验证了模型、网格划分及模拟结果的可靠性。

3.3 不同 y 值对应 xz 轴平面的速度分布

从图 6 可以看出：从 $x=\pm 3m$ 可以看出，受涡流影响，y 轴两端低流速区域集中在中间位置。从 $x=\pm 2m$ 和 $x=\pm 1.7m$ 可以看出，模型整体速度分布受排风气流影响较小，受回风气流影响较大，高流速区域集中在回风口前方，低流速区域集中在两侧中间高度区域。从 $x=\pm 0.8m$ 、 $x=\pm 0.6m$ 和 $x=0m$ 可以看出，高流速区域集中在送风口下方，床底部两侧容易生成低速涡流区，形成卫生死角。

3.4 不同送回风速度对工作面 ($z=1.2m$) 的速度影响

将送回风速度根据表 1 中数据设置，得到不同送风速度 $V=0.30$ 、 0.35 、 0.40 、 0.45 、 $0.50m/s$ 对应的 5 个模拟模型，收敛后得到工作面的速度分布如图 7 所示。根据 GB 50333—2013《医院洁净手术部建筑技术规范》表 4.0.1 洁净手术部用房主要技术指标参数，I 级手术室工作面平均风速要求在 0.20~0.25m/s 范围内。从表 1 可以看出，只有 $V=0.35$ 、 $0.40m/s$ 对应的两个模拟模型符合规范的工作面平均风速要求。从图 7 可以看出，送风速度对工作面高速、低速区域相对分布的影响不大。受送风气流和床、房间棱角阻碍气流的影响，高流速区域主要集中在送风口下床外圈区域和房间四个角落区域，低流速区域主要集中在房间四个角偏内侧的区域。房间四个角偏内侧区域形成了涡流，这对于室内空气的品质有很不利的影响。

3.5 不同回风速度对工作面 ($z=1.2m$) 的速度影响

将送回风速度根据表 2 中数据设置，得到不同回风速度 $V=0.70$ 、 0.75 、 0.80 、 $0.85m/s$ 对应的 4 个模拟模型，收敛后得到工作面的速度分布如图 8 所示。根据 GB 50333—2013《医院洁净手术部建筑技术规范》表 4.0.1 洁净手术部用房主要技术指标参数，I 级手术室工作面平均风速要求在 0.20~0.25m/s 范围内。从表 2 可以看出，4 个模拟模型全部符合规范的工作面平均风速要求。从图 8 可以看出，回风速度越低，排风量越大，排风口对下部气流影响越大。当 $v=0.80m/s$ 时，工作面空气流速分布上下基本对称。当 $v=0.70m/s$ 时，工作面空气流速分布在排风口下方区域明显尖锐些，而下部区域较圆润。受送风气流和床、房间棱角阻碍气流的影响，高流速区域主要集中在送风口下床外圈区域和房间四个角落区域，低流速区域主要集中在房间四个角偏内侧的区域。房间四个角偏内侧区域形成了涡流，这对于室内空气的品质有很不利的影响。

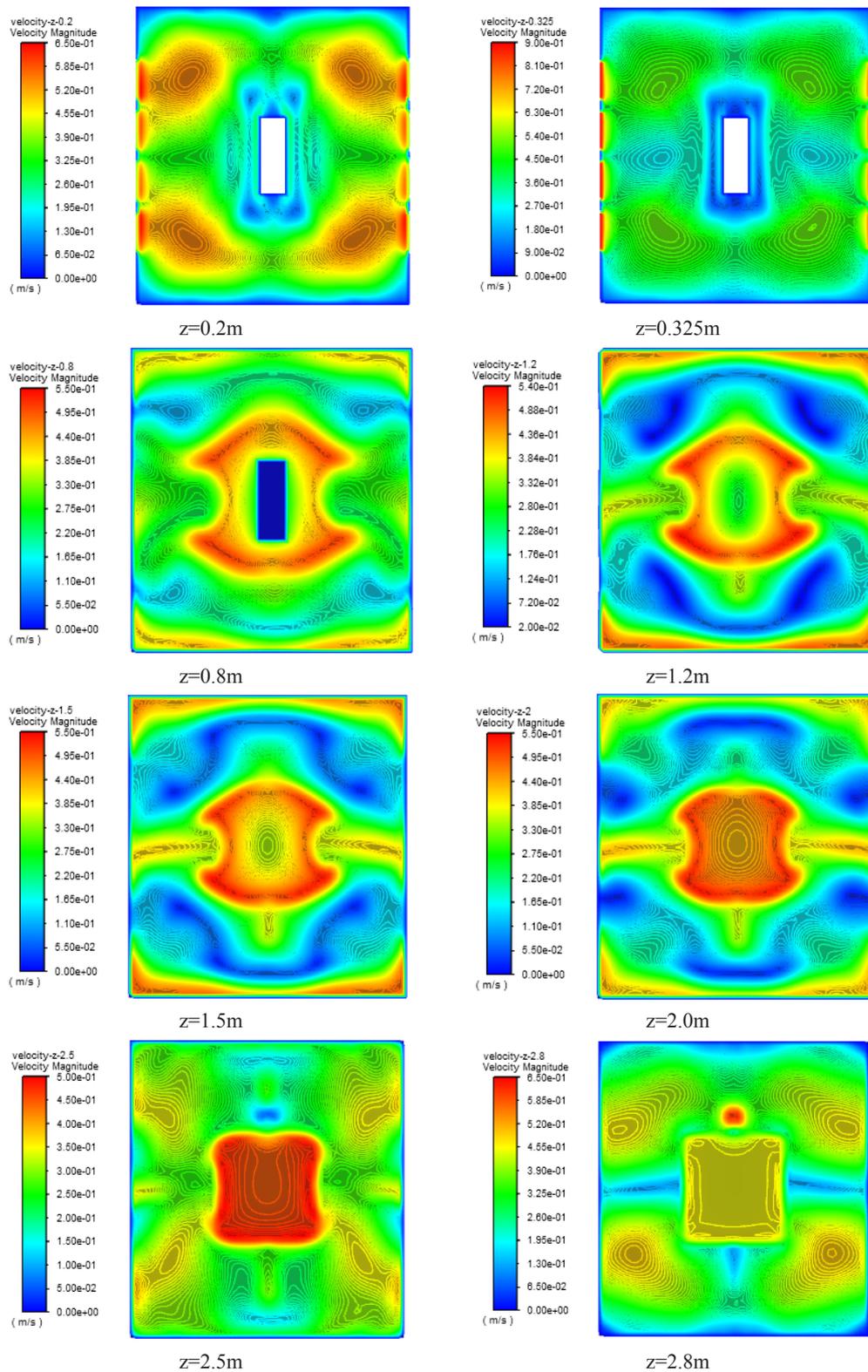


图 4 不同 z 值对应 xy 轴平面的速度分布

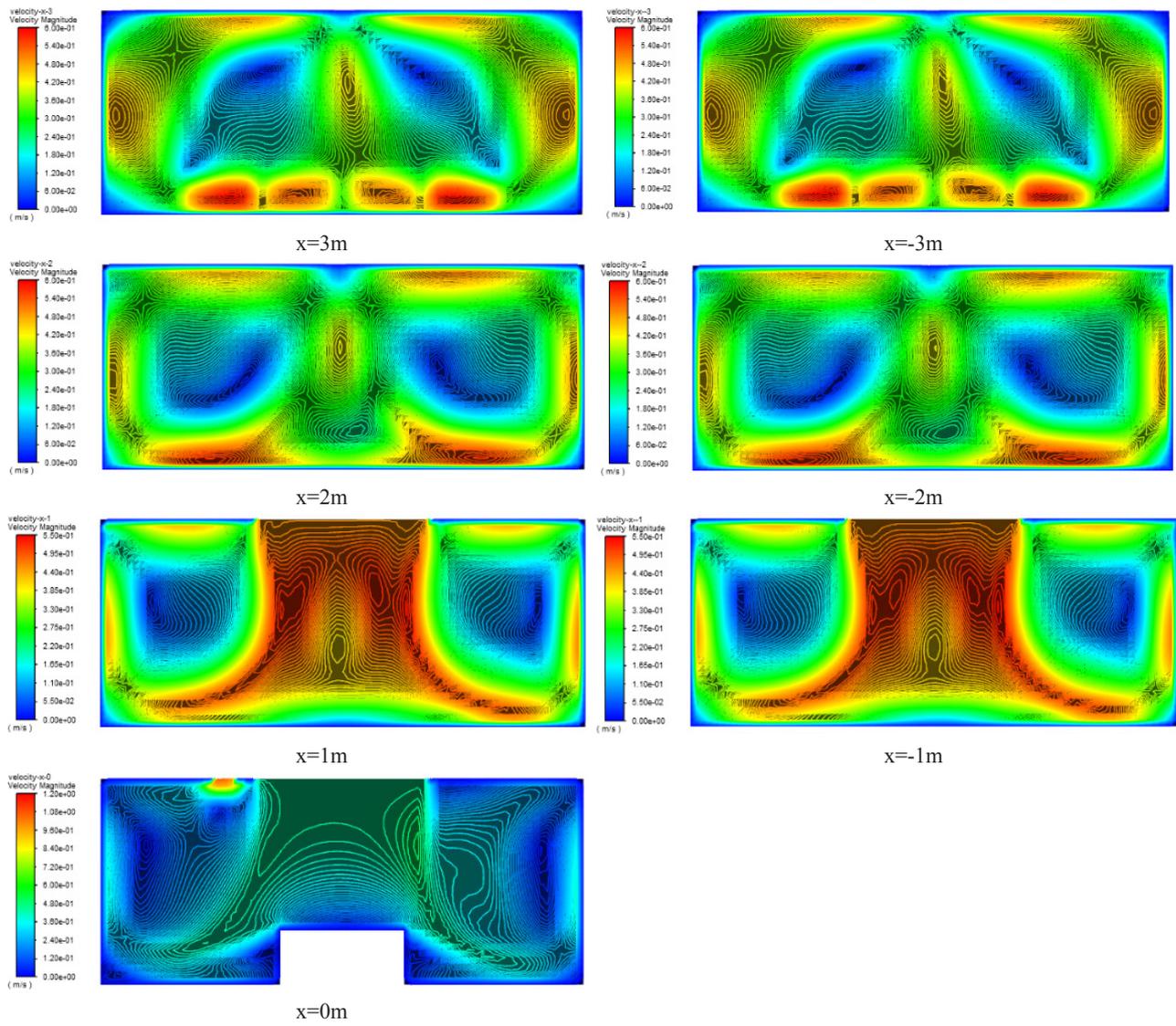


图 5 不同 x 值对应 yz 轴平面的速度分布

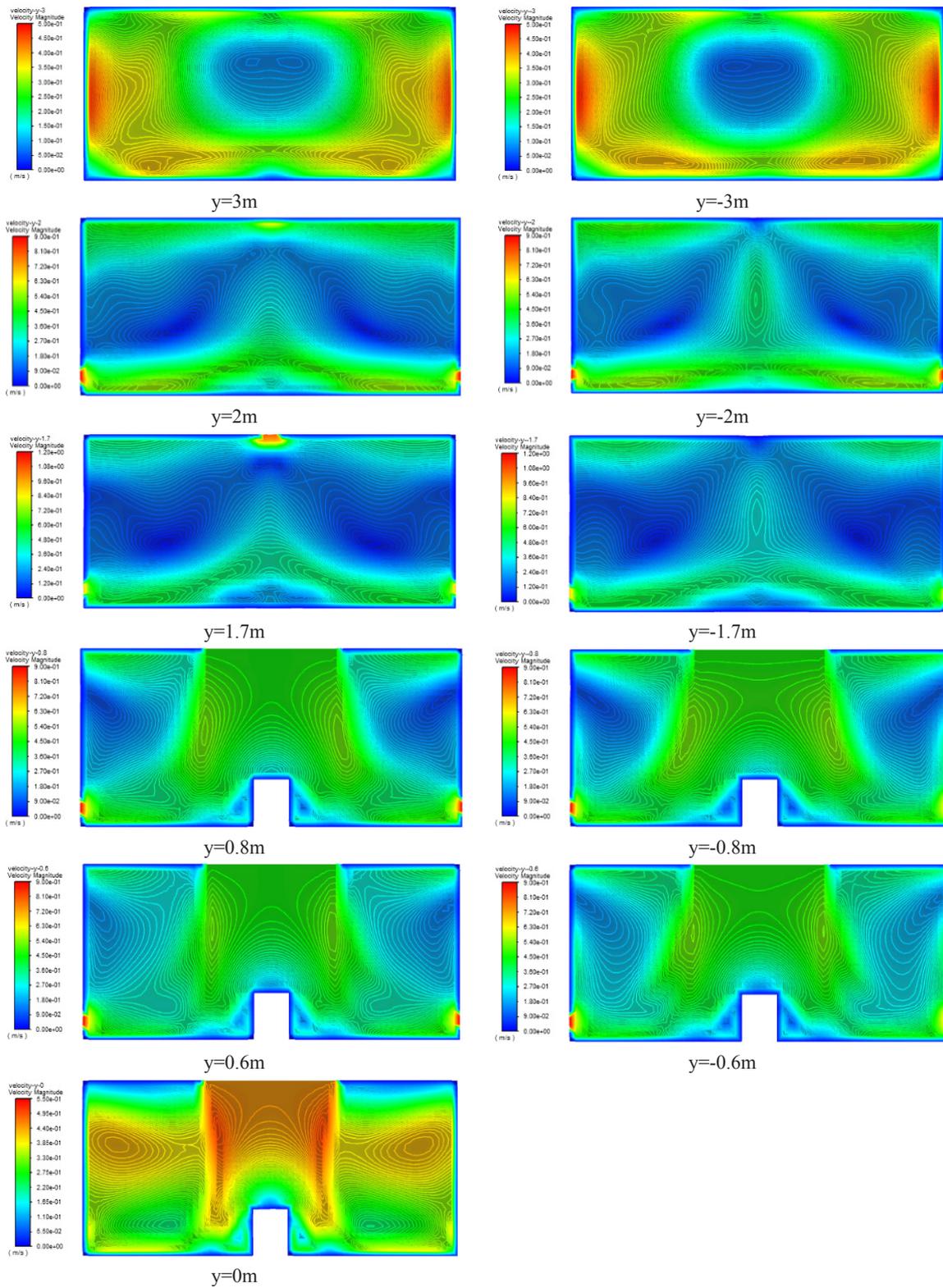


图 6 不同 y 值对应 xz 轴平面的速度分布

表 1 不同送回风速度对应不同的风量及工作面平均风速

送风速度 (m/s)	送风量 (m ³ /h)	回风速度 (m/s)	回风量 (m ³ /h)	排风量 (m ³ /h)	工作面平均风速 (m/s)
0.30	6739.2	0.60	6048	691.2	0.17513891
0.35	7862.4	0.70	7056	806.4	0.20439805
0.40	8985.6	0.80	8064	921.6	0.23389595
0.45	10108.8	0.90	9072	1036.8	0.26332401
0.50	11232	1.00	10080	1152	0.29289099

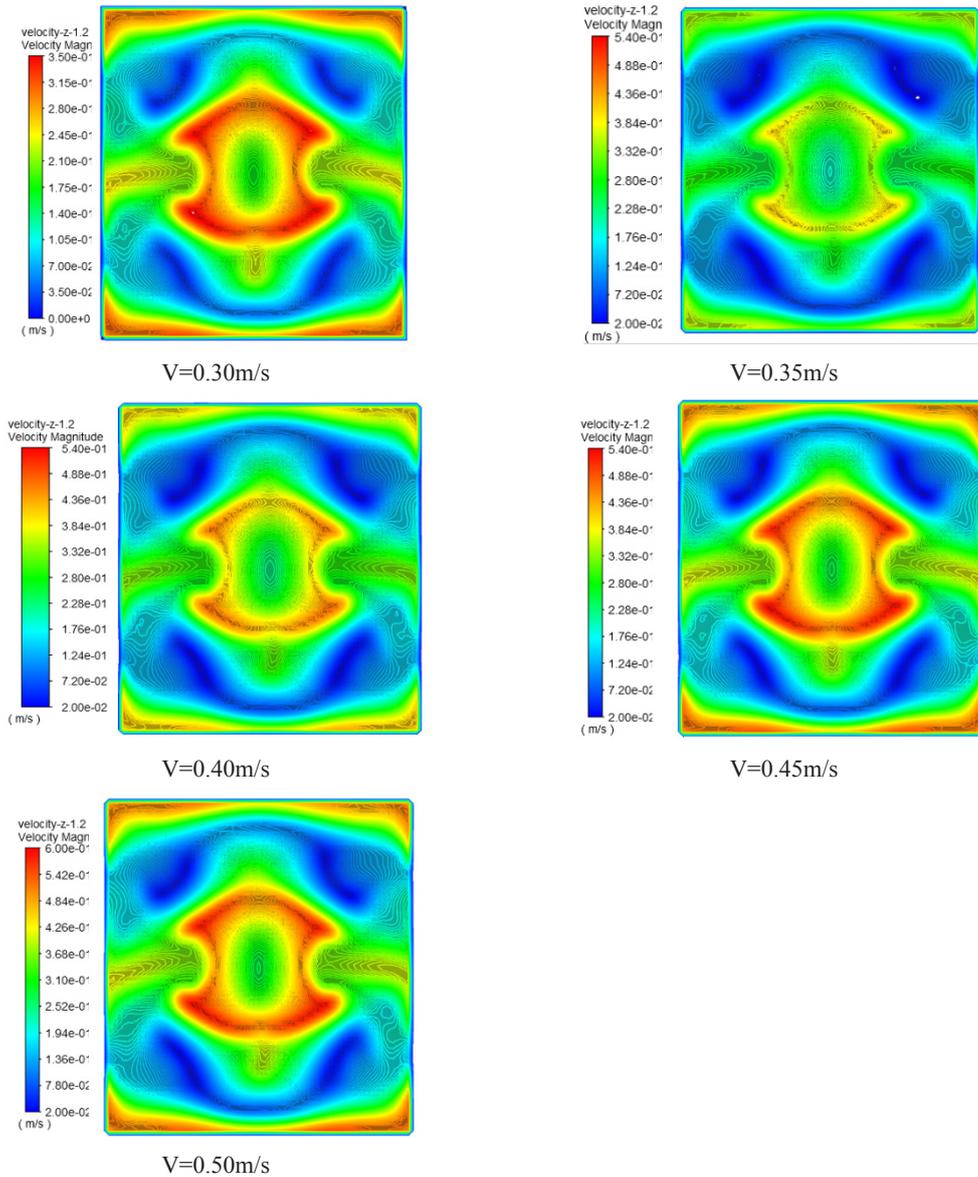


图 7 不同送风速度对应工作面 (z=1.2m) 的速度分布

表 2 不同回风速度对应不同的风量及工作面平均风速

送风速度 (m/s)	送风量 (m ³ /h)	回风速度 (m/s)	回风量 (m ³ /h)	排风量 (m ³ /h)	工作面平均风速 (m/s)
0.40	8985.6	0.70	7056	1929.6	0.22788293
0.40	8985.6	0.75	7560	1425.6	0.23148648
0.40	8985.6	0.80	8064	921.6	0.23389595
0.40	8985.6	0.85	8568	417.6	0.23698570

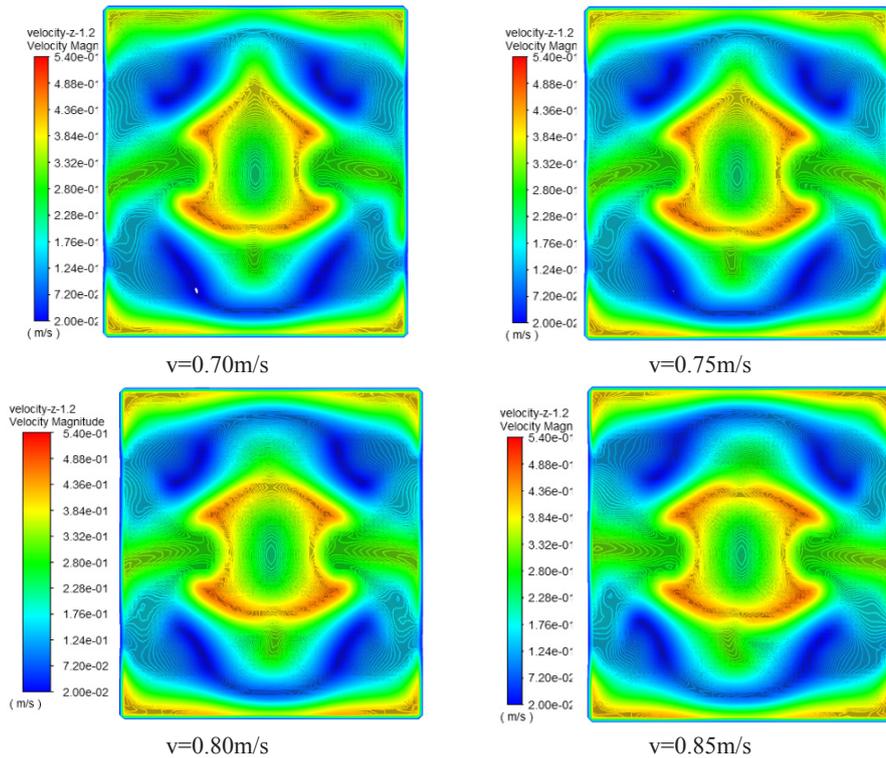


图 8 不同回风速度对应工作面 (z=1.2m) 的速度分布

3.6 不同送回风速度对污染物扩散的影响

将送回风速度根据表 3 中数据设置, 进行污染物瞬态模拟, 得到不同送回风速度对应的 5 个模型模拟数据结果, 如图 9~11 所示。根据图 9 工作面平均有害物占比和体积平均有害物占比随不同送回风速度的分布可以看出, 随着送回风速度的加大, 手术室换气次数加大, 达到稳定状态时有害物的占比越低, 且能更迅速地达到稳定状态。根据 GB 50333—2013《医院洁净手术部建筑技术规范》表 4.0.1 洁净手术部用房主要技术指标参数, I 级手术室工作面平均风速要求在 0.20~0.25m/s 范围内。从图 10 可以看出, 只有送风速度 $V=0.40\text{m/s}$ 、回风速度 $V=0.80\text{m/s}$ 对应的模拟模型符合规范的工作面平均风速要求。随着送回风速度的加大, 手术室换气次数加大, 工作面平均流速和体积平均流速也逐步加大。根据图 11 工作面平均温度和体积平均温度随不同送回风速度的变化也可以看出, 随着送回风速度的加大, 手术室换气次数加大, 工作面平均温度和体积平均温度能更快达到稳定状态时的 20°C 。换气次数 16.7、33.4、50.1、66.9、83.6 次/h 对应的 5 个模型体积平均温度达到 293.2K 的时间分别为: 642、276、166、128、104s, 说明换气系数对温度变化的影响很大。

3.7 不同送风速度对污染物扩散的影响

将送风速度根据表 4 中数据设置, 回风速度保持在 0.8m/s , 进行污染物瞬态模拟, 得到不同送回风速度对应的 4 个模型

模拟数据结果, 如图 12~14 所示。根据图 12 工作面平均有害物占比和体积平均有害物占比随不同送回风速度的分布可以看出, 随着送风速度的加大, 手术室换气次数加大, 达到稳定状态时有害物的占比越低, 且能更迅速地达到稳定状态。根据 GB 50333—2013《医院洁净手术部建筑技术规范》表 4.0.1 洁净手术部用房主要技术指标参数, I 级手术室工作面平均风速要求在 $0.20\sim 0.25\text{m/s}$ 范围内。从图 13 可以看出, 只有送风速度 $V=0.40\text{m/s}$ 对应的模拟模型符合规范的工作面平均风速要求, 送风速度 $V=0.40\text{m/s}$ 对应的稳定状态时工作面平均风速稍微高于 0.25m/s 。随着送风速度的加大, 手术室换气次数加大, 工作面平均流速和体积平均流速也逐步加大。根据图 14 工作面平均温度和体积平均温度随不同送回风速度的变化也可以看出, 随着送风速度的加大, 手术室换气次数加大, 工作面平均温度和体积平均温度能更快达到稳定状态时的 20°C 。送风速度 0.35、0.40、0.45、0.50m/s 对应的 4 个模型体积平均温度达到 293.2K 的时间分别为: 150、128、120、114s, 换气次数变化幅度相对表 3 小很多, 达到 293.2K 的时间变化也不是很明显。值得注意的是, 送风速度 0.35m/s 对应的排风速度为 -0.35m/s , 说明此手术室模型整体为负压, 数据不合理。由于排风量较小, 对整体数据的影响较小, 对各个参数随送风速度变化的规律影响不大。

表 3 不同送回风速度对应不同的风量、排风速度及换气次数

送风速度 (m/s)	送风量 (m ³ /h)	回风速度 (m/s)	回风量 (m ³ /h)	排风量 (m ³ /h)	排风速度 (m/s)	换气次数 (次/h)
0.10	2246.4	0.20	2016	230.4	0.4	16.7
0.20	4492.8	0.40	4032	460.8	0.8	33.4
0.30	6739.2	0.60	6048	691.2	1.2	50.1
0.40	8985.6	0.80	8064	921.6	1.6	66.9
0.50	11232	1.00	10080	1152	2.0	83.6

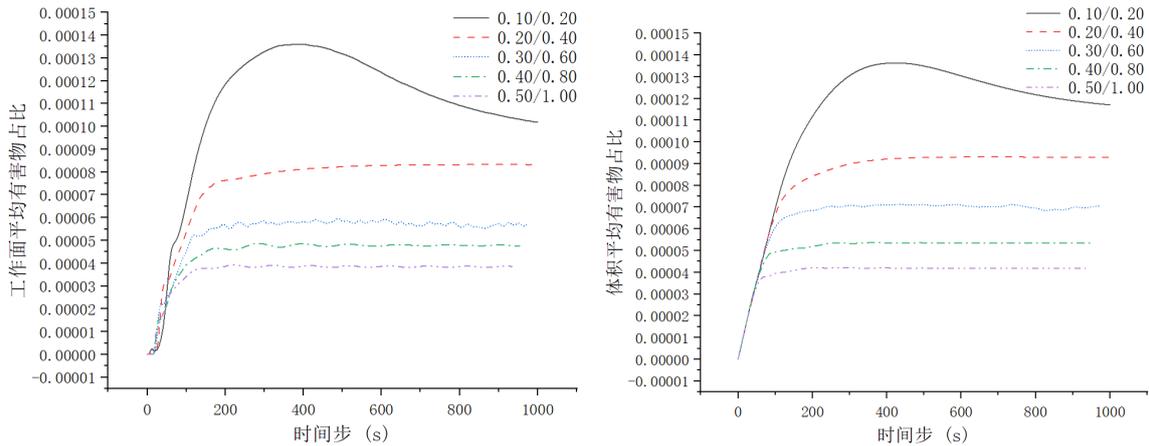


图 9 不同送回风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均有害物占比和体积平均有害物占比

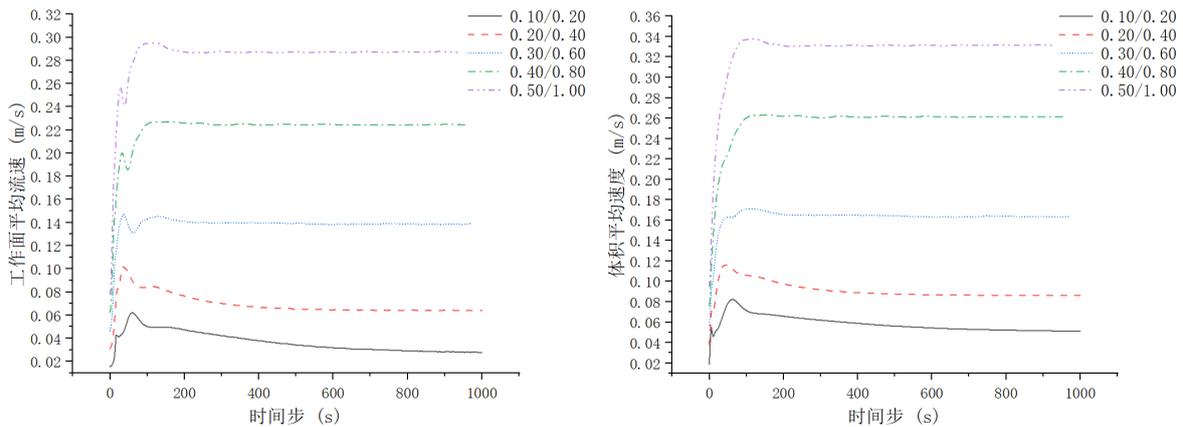


图 10 不同送回风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均流速和体积平均流速分布

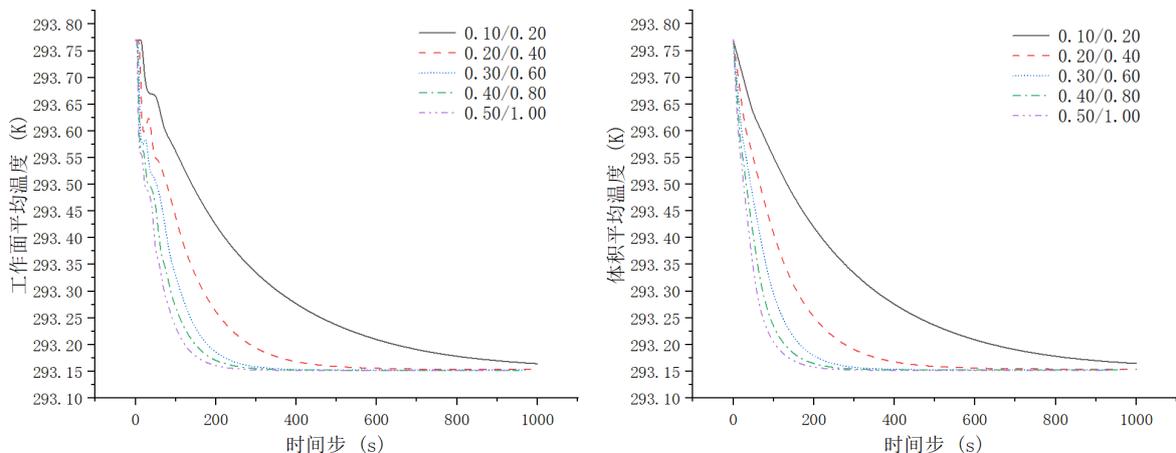


图 11 不同送回风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均温度和体积平均温度分布

表 4 不同送回风速度对应不同的风量、排风速度及换气次数

送风速度 (m/s)	送风量 (m ³ /h)	回风速度 (m/s)	回风量 (m ³ /h)	排风量 (m ³ /h)	排风速度 (m/s)	换气次数 (次/h)
0.35	7862.4	0.80	8064	201.6	-0.35	58.5
0.40	8985.6	0.80	8064	921.6	1.60	66.9
0.45	10108.8	0.80	8064	2044.8	3.55	75.2
0.50	11232.0	0.80	8064	3168.0	5.50	83.6

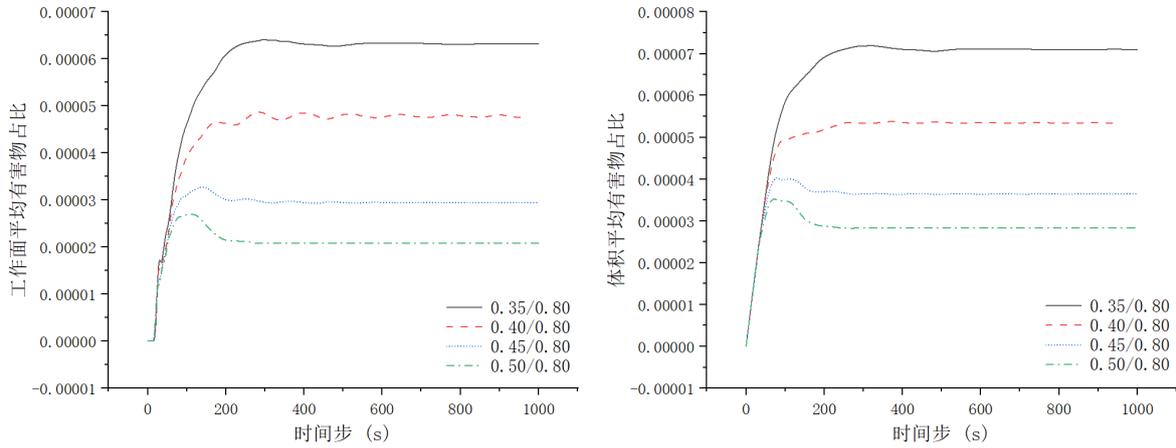


图 12 不同送风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均有害物占比和体积平均有害物占比

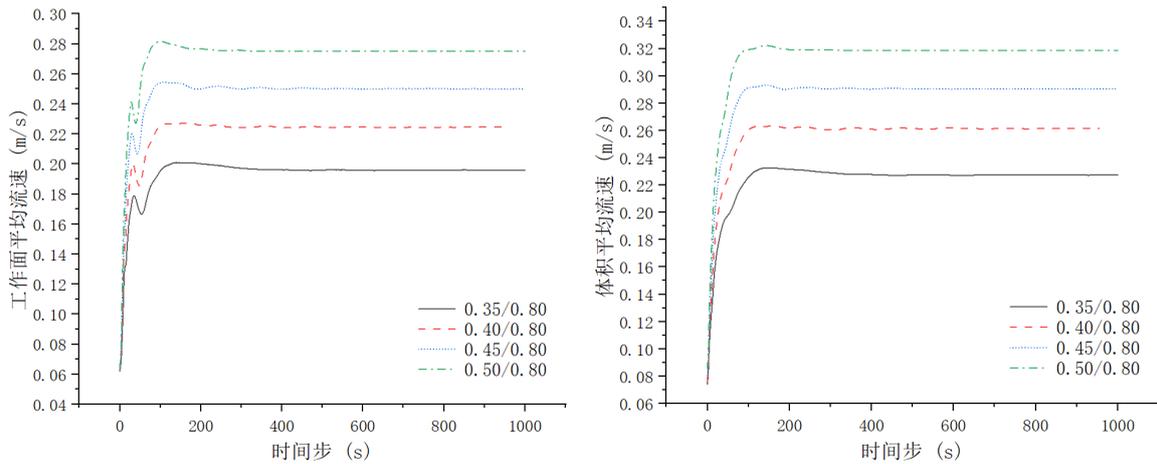


图 13 不同送风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均流速和体积平均流速分布

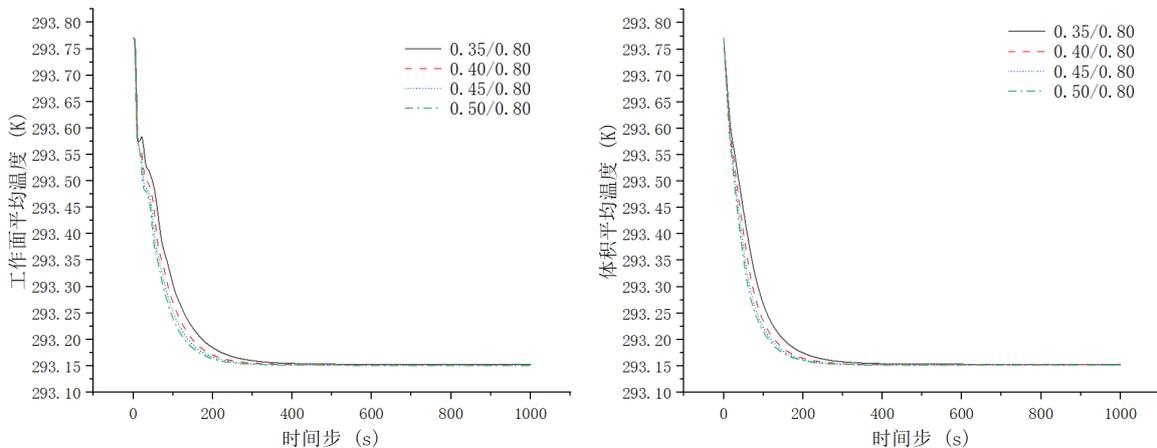


图 14 不同送风速度对应工作面 (z=1.2m) 平均温度和体积平均温度分布

3.8 不同送风口位置对污染物扩散的影响

以送风速度为 0.4m/s, 回风速度为 0.8m/s, 送风口总长度为 2.6m, 总宽度为 2.4m 为固定量, 仅送风口位置为变量, 分别对顶送风、侧送风、顶/侧送风模型进行污染物瞬态模拟, 模型如图 15 所示, 得到不同送风口位置对应的 3 个模型模拟数据结果, 如图 16~18 所示。根据图 16 工作面平均有害物占比和体积平均有害物占比随不同送回风速度的分布可以看出, 达到稳定状态时工作面平均有害物的占比排序为顶送风低于侧送风, 侧送风低于顶/侧送风, 达到稳定状态时体积平均有害物的占比排序为侧送风低于顶送风, 顶送风低

于顶/侧送风, 顶/侧送风效果最差。根据 GB 50333—2013 《医院洁净手术部建筑技术规范》表 4.0.1 洁净手术部用房主要技术指标参数, I 级手术室工作面平均风速要求在 0.20~0.25m/s 范围内。从图 17 可以看出, 3 个模拟模型均符合规范的工作面平均风速要求。达到稳定状态时, 侧送风的工作面平均流速和体积平均流速最低, 顶/侧送风略高于顶送风。根据图 18 工作面平均温度和体积平均温度随不同送回风速度的变化也可以看出, 侧送风工作面平均温度和体积平均温度能更快达到稳定状态时的 20℃, 顶送风稍慢些, 顶/侧送风最慢。

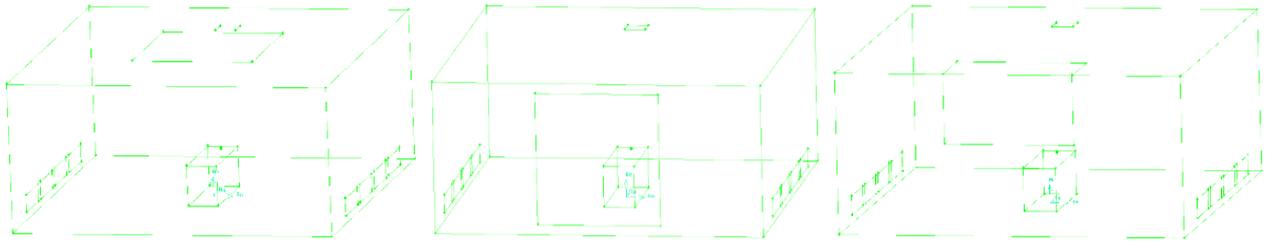


图 15 不同送风口位置的模型 (从左往右依次为顶送风、侧送风、顶/侧送风)

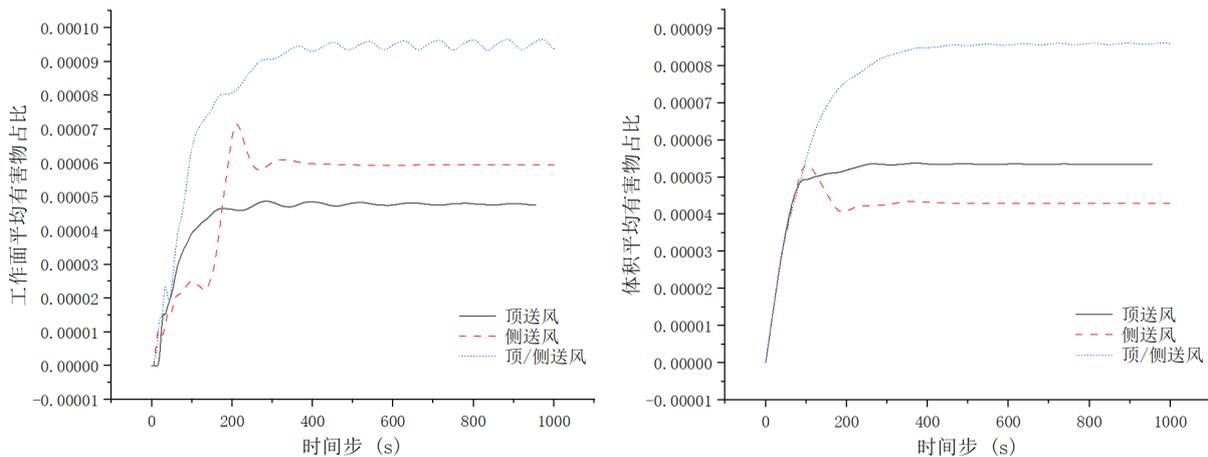


图 16 不同送风口位置对应工作面 (z=1.2m) 平均有害物占比和体积平均有害物占比

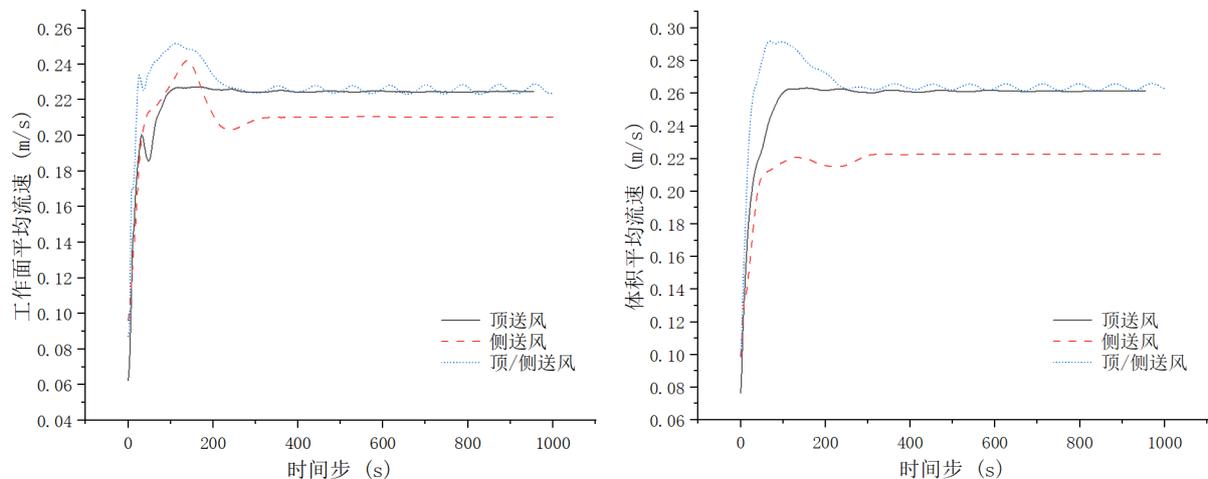


图 17 不同送风口位置对应工作面 (z=1.2m) 平均流速和体积平均流速分布

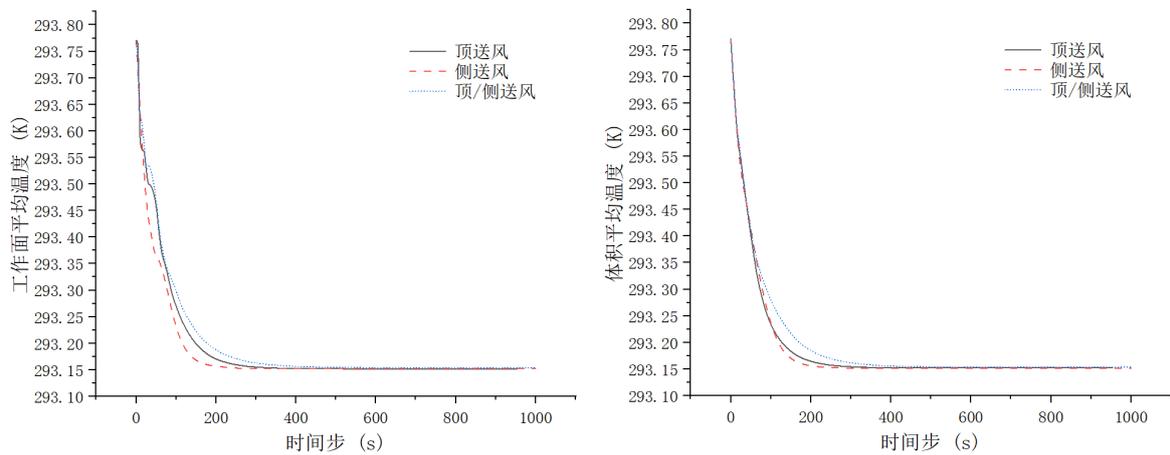


图 18 不同送风口位置对应工作面 ($z=1.2\text{m}$) 平均温度和体积平均温度分布

4 结论

①受床、房间棱角阻碍气流的影响，床外圈和房间四个角落区域易形成涡流区，形成卫生死角，影响有害污染物的排出。

②手术室换气次数越大，越容易排走污染物，速度场、温度场越容易达到稳定状态。

③侧送风、顶送风排污效果在工作面平均值和体积平均值方面各有优势，但顶 / 侧送风效果最差。

参考文献:

- [1] THOM A. The flow past circular cylinders at low speeds[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A,1933,141 (845):651-669.
- [2] NIELSEN P V. Flow in air conditioned rooms: model experiments and numerical solution of the flow equations[D]. Aalborg: Aalborg University,1974.
- [3] Jones W P, Launder B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. International journal of heat and mass transfer,1972,15(2):301-314.