

会议室内飞沫气溶胶分布特征的数值模拟

康智强¹, 张亿先², 冯国会¹, 樊宏博¹, 杨雪¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044)

摘要 目的 分析会议室内不同气流组织对人持续说话产生的飞沫气溶胶运动轨迹的影响, 模拟飞沫气溶胶在会议室内的分布特征, 确定最佳的气流组织方式. 方法 采用 CFD 数值模拟方法, 选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型计算空调房间的温度场和速度场, 分析飞沫气溶胶颗粒的受力情况, 采用拉格朗日法建立飞沫气溶胶颗粒运动的数学模型, 模拟空调房间会议室内同侧上送上回、同侧上送下回、对侧上送下回 3 种混合通风和置换通风对飞沫气溶胶的运动轨迹. 结果 飞沫气溶胶运动轨迹显示飞沫气溶胶在置换通风停留时间和运动距离最短. 3 种混合通风气流组织相比, 同侧上送上回的气流组织中飞沫气溶胶运动时间 112 s 和运动路程 11.1 m 最短, 同侧上送下回次之, 对侧上送下回最长. 结论 3 种混合通风中, 同侧上送上回更容易避免飞沫气溶胶在室内传播, 是最佳的混合通风气流组织方式. 置换通风相比于混合通风更易减小人员之间受感染的可能性, 是最佳的气流组织方式.

关键词 飞沫气溶胶; CFD 数值模拟; 气流组织; 分布特征

中图分类号 X513

文献标志码 A

Numerical Simulation of Droplet Aerosols in Conference Room

KANG Zhiqiang¹, ZHANG Yixian², FENG Guohui¹, FAN Hongbo¹, YANG Xue¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, 400044)

Abstract: To analyze the influence of different air flow organization on trajectories and distribution characteristics of droplet aerosols released by speaking continually in conference room, the best air distribution pattern is proposed. CFD method with RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is introduced to simulate temperature and velocity fields of the air conditioning room. Using Lagrange method, mathematical model of droplet aerosols movement is established through the analysis of the force on droplet aerosols. This paper studies the influence of mixing ventilation (up-supply and the same side up-return; up-supply and the same side down-return; up-supply and the other side down-re-

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378318); 沈阳建筑大学博士后基金项目(SJZUBSH20162035); 沈阳建筑大学学科涵育计划项目(XKHY2-48)

作者简介: 康智强(1980—), 女, 副教授, 主要从事建筑节能技术研究.

turn) and displacement ventilation on trajectory of droplet aerosols in conference room. The trajectories show that residence time and movement distance of droplet aerosols are the shortest in displacement ventilation. Among the three kinds of mixing ventilation, in up-supply and the same side up-return the residence time and movement distance of droplet aerosols are the shortest, followed with up-supply and the same side down-return, in up-supply and the other side down-return are the longest. Conclusion is that displacement ventilation compared to mixing ventilation is the best ventilation airflow organization, which is easier to reduce possibility of infection among the staff. However, among the three kinds of mixing ventilation, up-supply and the same side up-return is the best mixing ventilation airflow organization, which is easier to avoid spreading droplet aerosols.

Key words: droplet aerosols; CFD numerical simulation; air distribution; distribution characteristics

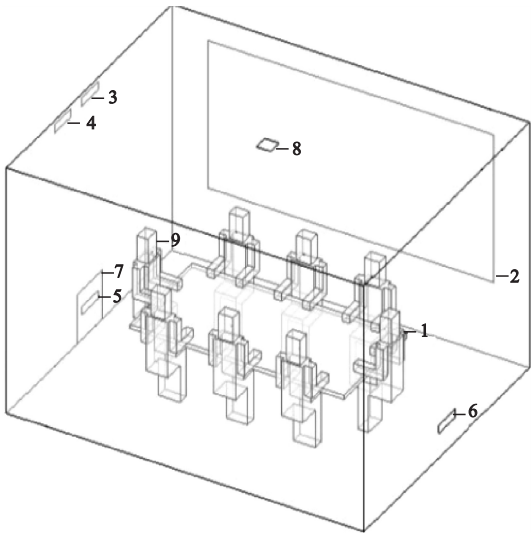
呼吸道传染病毒可以依附于人说话、咳嗽、打喷嚏产生的飞沫气溶胶释放到室内,造成室内的空气被污染.施孝增等^[1]采用实验方法对不同粒径的气溶胶颗粒物在不同换气次数下的浓度衰减规律进行研究.高乃平等^[2]利用高精度的气溶胶光谱仪测量室内气溶胶的分布.CAO Guangyu 等^[3]研究了由条缝形散流器形成的不同的室内气流分布对咳嗽产生的飞沫气溶胶的运动情况的影响.相比于实验方法,CFD 数值模拟方法操作简单并且成本低,被大量学者广泛应用于研究飞沫气溶胶在房间的分布特征.RICHMOND - BRYANT J^[4]以空气传播传染隔离室作为研究场所,数值模拟病人产生的飞沫气溶胶在房间中的速度和浓度的分布.WANG Jinliang 等^[5]同样以空气传播传染隔离室作为研究场所,数值模拟人行走速度对悬浮气溶胶数量的影响.ZHU Shengwei 等^[6]以公共汽车作为研究场所,采用数值模拟方法比较3种混合通风和置换通风对飞沫气溶胶运动的影响.会议室作为办公区里的重要公共场所,其室内的空气品质直接影响到人们的工作效率,因此,笔者选取会议室作为研究对象,采用CFD数值模拟方法对不同气流组织方式下人持续说话产生的飞沫气溶胶的运动轨迹进行分析,确定了最佳的气流组织形式.

1 CFD 数值模拟方法

1.1 物理模型

把复杂的房间简化成一个简单的六面体

几何形状可以加快计算速度,K. W. MUI^[7]和 S. SEEPANA 等^[8]分别通过所建立的几何房间,研究人体相对位置和通风方式不同时对产生的飞沫气溶胶的影响.笔者将会议室房间简化成一个六面体,长宽高为400 cm × 500 cm × 300 cm,室内有8名参会人员.人体模型简化为头、躯干、手臂和腿4个部分,嘴的长宽为2 cm × 1 cm^[9-10].会议室设有3种混合通风方式为:同侧上送上回、同侧上送下回和对侧上送下回,3种混合通风方式采用同一个送风口.置换通风的回风口设置在屋顶的中心位置(见图1).



1. 桌子;2. 窗户;3. 混合通风送风口;4. 同侧上送上回回风口;5. 同侧上送下回回风口;6. 对侧上送下回回风口;7. 置换通风送风口;8. 置换通风回风口;9. 人体模型。

图1 会议室几何模型

Fig. 1 Schematic of conference room

1.2 数学模型

室内气流流态一般为湍流流动. 目前工程应用中湍流的数值模拟方法主要分 3 类: 直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和基于雷诺平均 N - S 方程组(RANS)的模型. 笔者选用适用于模拟室内气流流动^[11-12]的 RANS 中的 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型对室内气流流动进行模拟,数学模型控制方程包括:连续方程、动量方程、能量方程、湍动能 k 方程、耗散率 ε 方程,其通用表达式为^[5].

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varphi\mathbf{v}) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi. \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; t 为时间; \mathbf{v} 为速度矢量; φ 速度在 x 、 y 和 z 方向的分量(u 、 v 、 w),当 $\phi=1$ 时,方程变为连续性方程; Γ_ϕ 为各应变量的有效扩散系数; S_ϕ 为广义源项.

数值模拟颗粒运动主要有欧拉方法和拉格朗日方法. 拉格朗日法适用于颗粒相稀疏的气 - 固两相流,可以追踪飞沫气溶胶的运动轨迹,因此,笔者选用拉格朗日法进行模拟. 拉格朗日法通过求解飞沫气溶胶运动的力平衡方程得到飞沫气溶胶的速度,而后再对时间积分得到飞沫气溶胶的运动轨迹. 运动飞沫气溶胶颗粒所受各种作用力数量级总

汇如表 1 所示^[13].

表 1 运动飞沫气溶胶颗粒所受各种作用力数量级总汇
Table 1 Motion forces respiratory aerosols particles by orders of magnitude club

作用力	数量级	作用力	数量级
拖拽力	-14	热泳力	-17
重力	-15	质量附加力	-19
布朗力	-15	压力梯度力	0

从表 1 可知,室内空气中运动的飞沫气溶胶颗粒受拖拽力、重力和布朗力的数量级相比于热用力、质量附加力和压力梯度力较大. 因此在采用离散相模型模拟气流中飞沫气溶胶颗粒的运动轨迹时,主要考虑颗粒受拖拽力、重力和布朗力的作用^[14]. 单个飞沫气溶胶在 i 方向上的力平衡方程^[15]为

$$\frac{du_{pi}}{dt} = F_d + F_g + F_{ai}. \quad (2)$$

式中: u_{pi} 为飞沫气溶胶在 i 方向上的速度; F_i 为飞沫气溶胶在 i 方向被施加的全部单位质量力, m/s^2 ; F_d 为拖拽力; F_g 为重力; F_{ai} 为布朗力.

1.3 边界条件

边界条件如表 2 所示.

表 2 边界条件

Table 2 Boundary conditions

边界	条件
地面、天花板和四周墙壁	壁面,绝热
窗	壁面,温度恒定 36 ℃
人体表面	壁面,温度恒定 31 ℃
混合通风送风口	入口速度 2.3 m/s,湍流强度 4.5%,温度 20 ℃
置换通风送风口	入口速度 0.23 m/s,湍流强度 5.1%,温度 22 ℃
回风口	自由出流
人嘴	入口速度 1 m/s,湍流强度 6.8%,温度 35 ℃
飞沫气溶胶	5 μm 粒子,总释放率 0.085 μg/s,密度 1 000 kg/m ³

边界条件的设定直接影响模拟结果的准确性. 人嘴作为污染源边界条件的设定对飞沫气溶胶的运动轨迹和传播路径影响很大. YANG Shinhao 等^[16]采用光学粒子计数器研

究咳嗽产生的飞沫气溶胶的粒径大小,并发现飞沫气溶胶粒径光谱分布从 0.6 ~ 16 μm. E. BJØRN.^[17]将嘴呼出的污染物温度设定在 33 ~ 34 ℃,将鼻子呼出的污染物温度设定

在 32 ~ 33 ℃. QIAN Hua 等^[18]将嘴呼出的污染物温度设定在 34 ℃,将鼻子呼出污染物的温度设定在 32 ℃. CFD 数值模拟中,GAO Naiping 等^[19]将鼻子呼出的污染物温度设定为 35 ℃,HE Qibin 等^[10]将人嘴呼出的污染物温度同样设为 35 ℃. 笔者将人说话释放出污染物的温度设定为 35 ℃,释放速度设定为 1 m/s,飞沫气溶胶粒径 5 μm,密度为 1 000 kg/m³^[19],总释放率为 0.085 μg/s^[20].

1.4 模型假设

模型假设在 CFD 数值模拟中是一种常见的解决问题的方法,为方便建立模型与解

决问题创造有利的条件,笔者模型假设:①忽略人嘴开启与闭合的影响,并且假设飞沫气溶胶以恒定速度连续释放;②忽略飞沫气溶胶的蒸发,并且假设飞沫气溶胶的粒径不发生变化;③假设飞沫气溶胶运动到壁面发生反弹;④假设飞沫气溶胶对房间气流不产生影响.

2 模拟结果与分析

2.1 速度场

在 3 种混合通风和置换通风的气流组织下, $x=0$ m 处的 yz 平面显示速度场分布如图 2 所示.

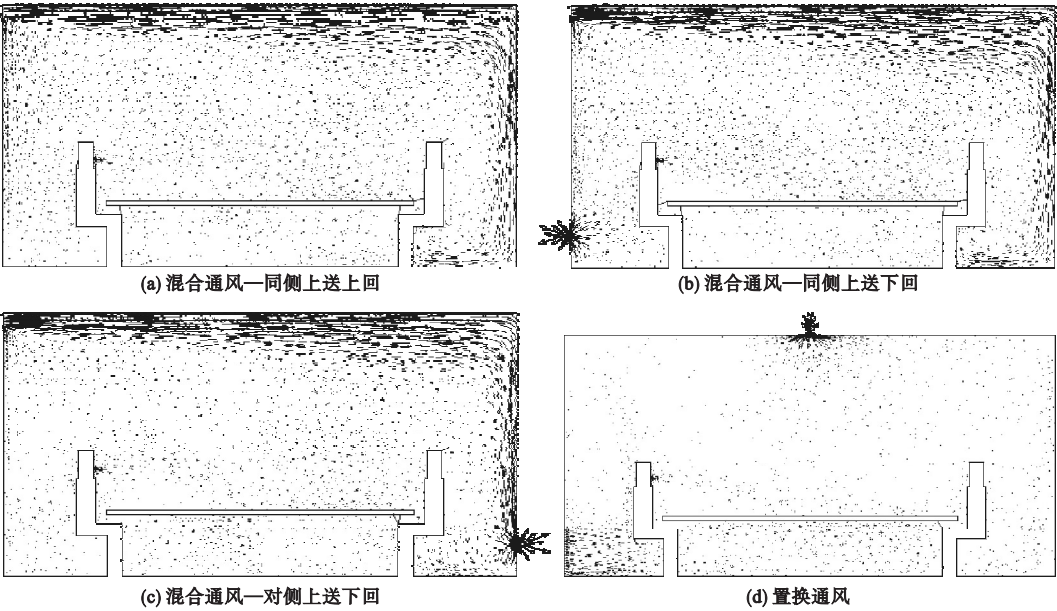


图 2 $x=0$ m 处速度矢量图

Fig. 2 Velocity vectors of plane $x=0$

3 种混合通风的送风口布置贴近顶棚,气流以 2.3 m/s 的速度水平射入,由于附壁效应的作用,促使空气沿壁面流动形成贴附射流.当射流的末端流遇到墙壁时,由于气流受到墙体限制,开始贴附墙壁向下运动.会议室上部主要为射流区,下部为回流区.由图 2 (a)可以看出,对侧上送下回气流组织的部分回流直接排除室外,工作区处于回流和涡流区中,工作区的平均风速为 0.087 m/s;由图 2 (b)、(c)可以看出,同侧上送上回和同侧上送下回气流组织的回流遇到人体后,

沿人体表面向上运动,工作区仅处于回流区中,工作区的平均风速为 0.092 m/s 和 0.078 m/s.由图 2 (d)可以看出,置换通风的低温气流从房间底部送入,部分气流流经人体时被加热,加热后的新风由浮升力作用向上运动,由于新风温度低于室内温度,相对密度较高,部分气流将沿地面流动.会议桌下方区域气流的速度较大,而同时由于受会议桌的遮挡,会议桌以上气流的速度较小,工作区的平均风速为 0.019 m/s.由此可以看出,置换通风工作区的平均风速最小.

2.2 温度场

在3种混合通风和置换通风的气流组织

下, $x = 0\text{ m}$ 处的 yz 平面显示温度场分布如图3所示.

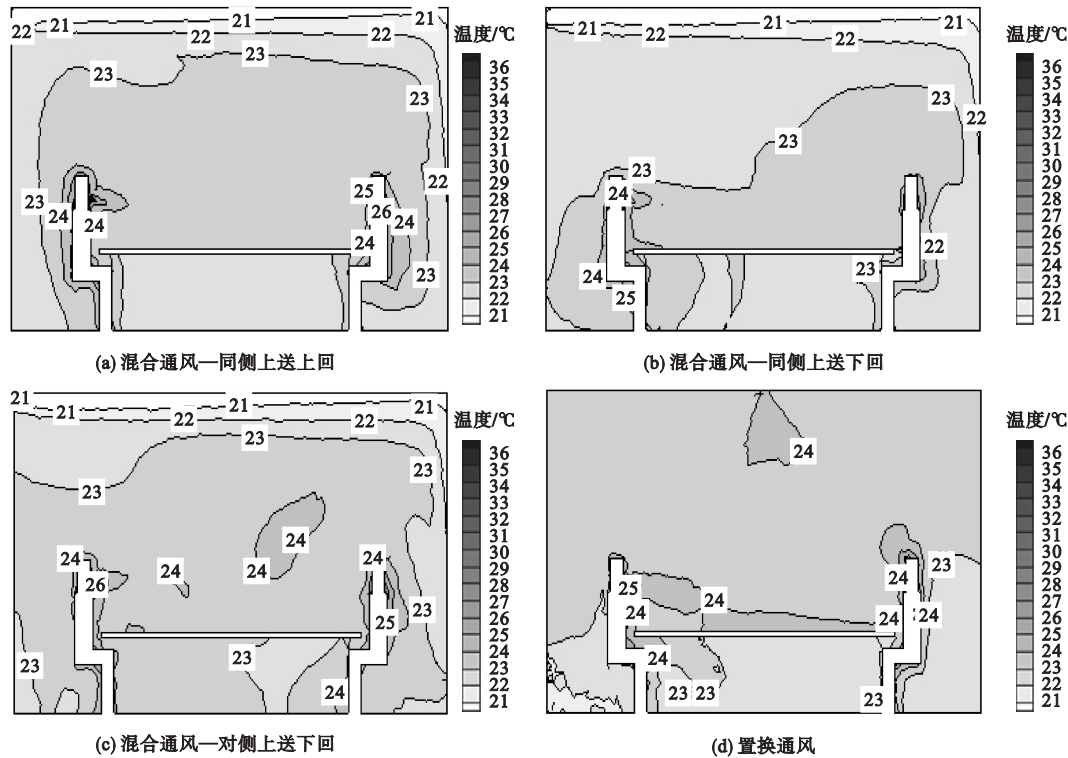


图3 $x = 0\text{ m}$ 处温度云图

Fig. 3 Temperature contour of plane $x = 0$

由图3(a)、(b)、(c)可以看出,3种混合通风的工作区平均温度约为 23°C ,相比较于同侧上送下回和对侧上送下回,同侧上送上回的房间温度分布相对均匀.由于混合通风的回流温度较低而且速度较大,因此能够明显消除人体散热,使得人体表面与周围空气温度相差不大.置换通风的低温气流从房间下部的送风口水平送出,沿地面扩展开来,在地面附近形成一层的“空气湖”,由于桌子阻止了部分气流的上升,桌子上下存在 1°C 温差.由图3(d)右侧人周围的温度可以看出,受人体加热后的新风在浮升力的作用下上升,并在人体周围形成了典型的“热羽”.

2.3 飞沫气溶胶运动轨迹

图4显示的是 $5\text{ }\mu\text{m}$ 飞沫气溶胶从人嘴释放开始到从回风口排出为止的运动轨迹.飞沫气溶胶颗粒初始阶段主要受惯性力的影响,之后的颗粒运动轨迹受室内气流的影响.

由图4(a)、(b)、(c)可以看出,由于混合通风的气流流速大、紊流强度大,使得室内气流强烈掺混,虽然模拟中采用的 $5\text{ }\mu\text{m}$ 飞沫气溶胶粒径较小,气流跟随性较好,因此沿初始速度方向运动一段距离后便改变运动方向.相比之下,由图4(d)可以看出,置换通风的气流流速小、紊流强度小,气流掺混程度较弱,飞沫气溶胶从人嘴射出沿直线传播,直到速度减弱后,跟随自下而上的气流排出室内.

飞沫气溶胶颗粒的运动时间和路程如表3所示.比较3种混合通风发现,由于对侧上送下回的部分气流未与室内空气掺混而直接排除室外,工作区处于回流和涡流中,因此飞沫气溶胶室内停留时间 392 s 和运动路程 23.9 m 最长.而同侧上送上回和同侧上送下回的送风气流与室内空气掺混后再排出室外,工作区处于回流区,因此飞沫气溶胶室内停留时间比飞沫气溶胶在对侧上送下回中停

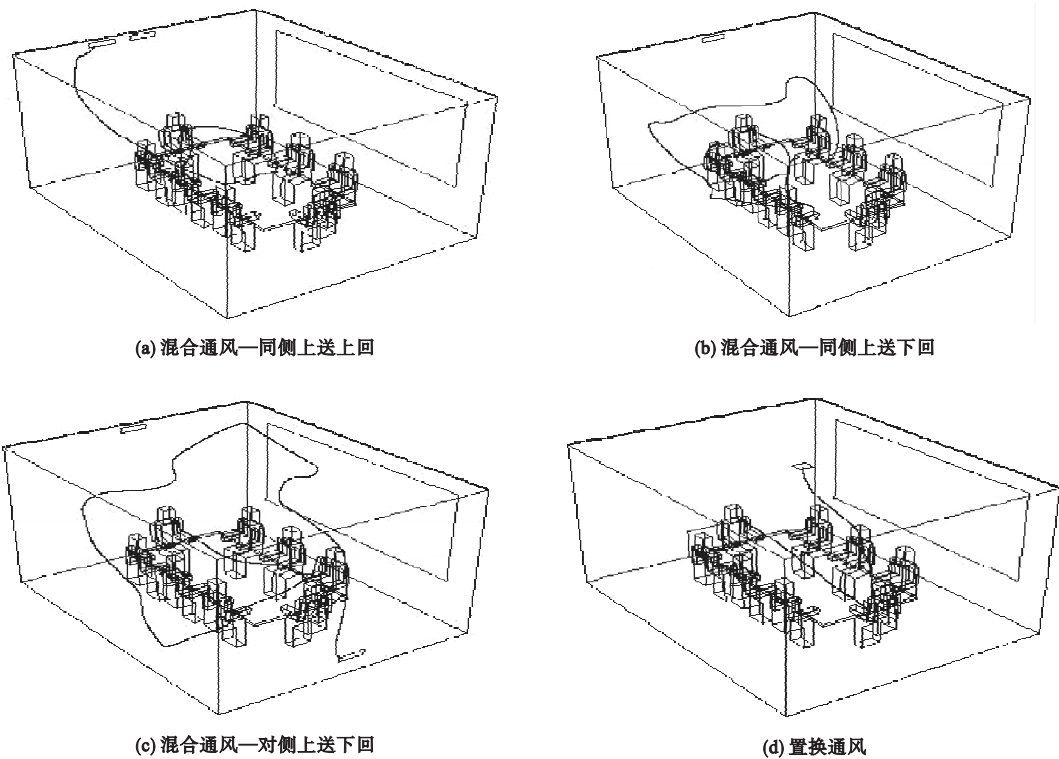


图4 飞沫气溶胶运动轨迹图

Fig.4 Trajectories of droplet aerosols

留的时间短,其中飞沫气溶胶在同侧上送上回气流组织中运动时间112 s和运动路程11.1 m最短.置换通风房间的风速和紊流强度小,飞沫气溶胶跟随室内风速运动的慢,因此飞沫气溶胶运动时间较长,为308 s,但颗粒跟随自下而上的气流排出房间的运动路程最短,为6.5 m.

表3 颗粒运动时间和路程

Table 3 Motion time and distance of particle

气流组织形式	运动 时间/s	运动 路程/m
混合通风——同侧上送上回	112	11.1
混合通风——同侧上送下回	326	18.5
混合通风——对侧上送下回	392	23.9
置换通风	308	6.5

3 结 论

(1)3种混合通风气流组织相比,同侧上送上回的气流组织中飞沫气溶胶运动时间

112 s和运动路程11.1 m最短,同侧上送下回次之,对侧上送下回最长.因此同侧上送上回更容易避免飞沫气溶胶在室内传播,是最佳的混合通风气流组织方式.

(2)置换通风的气流流速小、紊流强度较小,气流掺混程度较弱,飞沫气溶胶在会议室内运动距离较短,相比于混合通风更易减小人员之间受感染的可能性.

(3)由于会议桌对气流运动阻挡作用的影响,工作区混合通风的温度分布比置换通风的温度分布更加均匀.

参考文献

[1] 施孝增,吴家正,李曹县,等.室内气溶胶颗粒物沉积特性的实验研究[J]. 洁净与空调技术,2010(3):10-14.
(SHI Xiaozeng, WU Jiazheng, LI Caoxian, et al. Experimental research on deposition characteristic of indoor aerosol particulate[J]. Contamination control & air-conditioning, 2010 (3):10-14.)
[2] 高乃平,贺启滨,李晓萍,等.人工气候室内呼

- 出气溶胶颗粒物分布的实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 1680 - 1685.
- (GAO Naiping, HE Qibin, LI Xiaoping, et al. Experimental study on distribution of human exhaled aerosol particles in a full-scale chamber [J]. Journal of tongji university (natural science), 2012, 40(11): 1680 - 1685.)
- [3] CAO Guangyu, LIU Shichao, BOOR B E, et al. Characterizing the dynamic interactions and exposure implications of a particle-laden cough jet with different room airflow regimes produced by low and high momentum jets [J]. Aerosol and air quality research, 2015, 15(5): 1955 - 1966.
 - [4] RICHMOND-BRYANT J. Transport of exhaled particulate matter in airborne infection isolation rooms [J]. Building and environment, 2009, 44(1): 44 - 55.
 - [5] WANG Jinliang, 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: 1993 - 2002.
 - [6] ZHU Shengwei, JELENA S, SPENGLER J D, et al. An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments [J]. Building and environment, 2012, 47: 67 - 75.
 - [7] MUI K W, WONG L T, WU C L, et al. Numerical modeling of exhaled droplet nuclei dispersion and mixing in indoor environments [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 167(1): 736 - 744.
 - [8] SEEPANA S, LAI A C K. Experimental and numerical investigation of interpersonal exposure of sneezing in a full-scale chamber [J]. Aerosol science and technology, 2012, 46(5): 485 - 493.
 - [9] LIN Zhang, WANG Jinliang, YAO, et al. Numerical comparison of dispersion of human exhaled droplets under different ventilation methods [J]. World review of science, technology and sustainable development, 2013, 10(1/3): 142 - 161.
 - [10] HE Qibin, NIU Jianlei, GAO Naiping, et al. CFD study of exhaled droplet transmission between occupants under different ventilation strategies in a typical office room [J]. Building and environment, 2011, 46: 397 - 408.
 - [11] LI Xiaoping, NIU Jianlei, GAO Naiping. Spatial distribution of human respiratory droplet residuals and exposure risk for the co-occupant under different ventilation methods [J]. HAVC and research, 2011, 17(4): 432 - 455.
 - [12] ZHANG Lei, LI Yuguo. Dispersion of coughed droplets in a fully-occupied high-speed rail cabin [J]. Building and environment, 2012, 47: 58 - 66.
 - [13] 刘树森. 口腔散发微生物气溶胶在室内传播和运动规律的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
 - (LIU Shusen. Study on transport mechanisms of bio-aerosol produced by mouth in the indoor environment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.)
 - [14] FENG Guohui, ZHANG Yi, LAN Xinying. Numerical study of the respiratory aerosols transportation in ventilated classroom [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 204/208: 4298 - 4304.
 - [15] 田立伟. 室内环境颗粒物浓度预测模型及污染控制策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
 - (TIAN Liwei. The research on modeling of indoor particulate matter of outdoor origin and control strategies [D]. Changsha: Hunan University, 2009.)
 - [16] YANG Shinhao, LEE G W, CHEN C M, et al. The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects [J]. Journal of aerosol medicine, 2007, 20: 484 - 494.
 - [17] BJØRN E, NIELSEN P V. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms [J]. Indoor air, 2002, 12: 147 - 164.
 - [18] QIAN Hua, LI Yuguo, NIELSEN P V, et al. Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems [J]. Indoor air, 2006, 16: 111 - 128.
 - [19] GAO Naiping, NIU Jianlei, MORASKA L. Distribution characteristics of respiratory aerosols in enclosed environments [J]. Journal of southeast university, 2010, 26: 232 - 237.
 - [20] 邓伟鹏, 沈晋明, 唐喜庆, 等. SARS 隔离病房内的气流组织优化研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2005(2): 9 - 14.
 - (DENG Weipeng, SHEN Jinming, TANG Xiqing, et al. The study on the optimization of indoor air distribution for SARS isolation wards [J]. Building energy & environment, 2005(2): 9 - 14.)