

地板送风方式下室内甲醛的扩散模拟研究

徐茜荣¹ 张浩^{1,2,*} 王倩³ 玄克勇⁴

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省绿色建筑协同创新中心, 山东 济南 250101; 3. 保定市建筑设计院有限公司, 河北 保定 071000; 4. 山东林李建筑设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 居住环境的空气品质直接影响着室内人员的健康和工作效率, 甲醛作为室内环境的主要污染源, 对良好的室内环境有着不可轻视的破坏作用。文章利用有限元分析软件模拟了地板送风方式下房间中甲醛的扩散情况, 分析了温度场、速度场以及甲醛的浓度场, 获得了甲醛的分布规律。结果表明: 在地板送风的房间中, 甲醛的分布主要受室内气流组织的影响, 在衣柜、床等气流组织差的地方室内甲醛含量较高; 地板送风方式下室内人员活动区风速适宜, 吹风感较小; 房间内存在较明显的温度分层现象, 但总体的室内温度能够满足人员舒适感的要求。

关键词: 数值模拟; 地板送风; 甲醛浓度; 室内空气品质; 室内气流分布

中图分类号: TK-9

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2021)04-0058-06

Simulation study on indoor formaldehyde diffusion under floor air supply mode

XU Xirong¹, ZHANG Hao^{1,2,*}, WANG Qian³, XUAN Keyong⁴

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong Co-innovation Center of Green Building, Jinan 250101, China; 3. Baoding Institute of Architecture Design Co., Ltd., Baoding 071000, China; 4. Shandong Linli Architectural Design Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: The air quality of living environment directly affects the health and work efficiency of indoor personnel. As the main pollution source of indoor environment, formaldehyde has a destructive effect on good indoor environment. In this paper, finite element analysis software is used to simulate the diffusion of formaldehyde in the room under the floor air supply mode. By analyzing the temperature field, velocity field and formaldehyde concentration field, the distribution law of formaldehyde is obtained. The simulation results show that in the room with air supply from the floor, the distribution of formaldehyde is mainly affected by the indoor air distribution. The indoor formaldehyde content is higher in places with poor air distribution such as wardrobe and bed. The wind speed in the indoor activity area is suitable and the sense of blowing is small. There is obvious temperature stratification in the room, but the overall indoor temperature can meet the requirements of comfort of personnel.

Key words: numerical simulation; floor air supply; formaldehyde concentration; indoor air quality; indoor air distribution

收稿日期: 2020-10-14

基金项目: 山东省研究生优质课程建设项目(SDYKC19117); 山东省专业学位研究生教学案例库项目(SDYAL20162)

作者简介: 徐茜荣(1995-), 女, 在读硕士, 主要从事建筑室内热湿环境等方面的研究。E-mail: xuxirongxszy@126.com

通讯作者: 张浩(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事非牛顿幂律流体边界层、建筑外环境、室内热湿环境等方面的研究。

E-mail: qdzhanghao@126.com

http://www.cnki.net

0 引言

随着我国经济水平的不断提升,人们对居住环境也提出了更高的要求,高档、舒适、安全的室内装修已经成为当代居民的共同追求,随之而来的就是装修所带来的室内污染问题。已有资料显示,甲醛是装修过程中产生的主要污染物,如房间内的木制家具、室内装饰和绘画等中通常含有较高含量的甲醛^[1-3]。因此降低室内甲醛含量是为人们提供安全、卫生、舒适的居住环境的重要举措。学者们指出,通风不仅可以调控室内温湿度,而且还可以有效地降低室内污染物的浓度^[4-5]。通风的实质就是交换室内外的空气,加强通风能够将更多的新鲜空气供入室内,从而大大降低污染物的含量,改善室内的空气品质。目前较常采用的通风方式有自然通风、置换通风、地板送风^[6]等,文章主要探究采用地板送风来降低室内污染物含量的方式。

目前,许多学者在研究地板送风方式下的室内空气品质时发现通风可以方便快速地提高室内空气的品质。BAUMAN等^[7]研究了在下送上回的地板送风工况下的室内速度场和温度场分布情况,发现在送风口附近处的风速大,有明显的吹风感,并且随着送风速度的减小,房间内温度会发生分层。ARENS等^[8]通过实验发现在地板送风模式下,送风速度较高时,其大小决定了室内温度的分层程度。SHOKROLLAHI等^[9]通过优化地板送风系统,发现较之于传统送风方式,地板送风可节能约13.2%,且由于存在垂直温差和局部对流冷却,地板送风可以满足局部热舒适的要求。潘李丹^[10]对比了不同通风方式下室内二氧化碳达到稳定所需要的时间,发现采用地板送风时,室内的二氧化碳浓度场在较短的时间内就能够达到稳定。王倩等^[11]对比了夏季不同通风方式下室内甲醛的分布,得出当采用地板送风时室内甲醛的含量更低。

文章结合我国室内环境污染的现状,研究了夏季地板通风方式下室内甲醛的稳态扩散过程,利用有限元分析软件ANSYS模拟室内空气的速度场、温度场以及甲醛的浓度场,并据此提出能够提高室内空气品质的措施。

1 地板送风方式概述

地板送风就是指从地面往建筑物内提供具有一定速度的空气,在新鲜空气向上流动的过程中,会与

污染气体迅速地掺混在一起,因此该过程会不可避免的会产生热交换,由此达到调节室内温度的目的。较之于置换送风,此种方式的风速更大,因此能够加强室内空气的混合程度。在制冷系统中采用地板送风时,应将送风温度设定在17~18℃,并且送风速度不应超过2 m/s。这样不仅可以降低工作区和人员活动区的空气温度,还可以保证较高的空气品质^[12-13]。

地板送风方式便于室内人员对建筑物内的局部环境进行调节,帮助其及时且高效地将室内的污染物及余热排出,提高室内的空气品质。不仅如此,与其他的送风方式相比,在对建筑物进行重新装修时,采用地板送风的方式可以节省大量资金。采用地板送风时,新鲜空气会与送风口周围的空气掺混,使地板附近的空气温度上升,从而使垂直方向上的空气温度梯度降低^[14]。较之于传统的空调系统,地板送风系统的送风温度较高,更为节能,其能耗仅为传统空调系统的34%^[15]。在应用地板送风系统的房间中,室内的空气品质和热舒适性由送风口直接决定,但目前关于如何改善地板送风口性能方面的研究较少,因此地板送风方式并未在我国得到大力推广。

2 地板送风房间的数学及物理模型

通过建立相关的控制方程,可以对室内甲醛的分布情况进行数值模拟。控制方程可以准确描述房间内气体的流动规律,模拟中涉及到质量、动量和能量三大守恒方程。采用湍流模型模拟房间内的气流流动。

2.1 数学模型

2.1.1 基本控制方程

基本控制方程由式(1)表示为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S, \quad (1)$$

式中 $\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}$ 为瞬态项; $\text{div}(\rho u\varphi)$ 为对流项,其中 φ 为通用变量,如温度、分速度、常数等, ρ 为密度, kg/m^3 ; $\text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi)$ 为扩散项, Γ 为广义的扩散系数; S 为广义的源项。

在质量守恒方程中 φ 为1、 Γ 为0、 S 为0; 在动量守恒方程中, φ 为分速度 u_i 、 Γ 为速度 u 、 S 为 $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$; 在能量守恒方程中 φ 为温度 T 、 Γ 为扩散系数 k/c 、 S 为 S_T 。

所研究房间内的流体是室内空气与甲醛的混合物,因此采用组分输运模型对室内甲醛的分布情况

进行模拟。组分输运模型由式(2)表示为

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) = \Gamma \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + s(x, y, z), \quad (2)$$

式中 u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度, m/s; $s(x, y, z)$ 为任意一点的扩散强度; C 为甲醛的质量浓度, mg/m³。

2.1.2 湍流模型中的相关方程式($k-\varepsilon$ 方程)

湍动能方程(即 k 方程), 由式(3)表示为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k, \quad (3)$$

式中 k 为湍动能; μ_t 为涡粘性系数; σ_k 为 k 方程中的湍流普朗特数; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 坐标位置; G_k 为层流速度梯度引起的湍流动能; G_b 为浮力引起的湍流动能; ε 为湍动能耗散率; S_k 为 k 方程中的源项。

湍流能量耗散率方程(即 ε 方程), 由式(4)表示为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (4)$$

式中 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为湍流模型系数, 由实验得到; S_ε 为 ε 方程中的源项。

2.2 物理模型

2.2.1 几何模型建立

选取某采用地板送风的卧室作为研究对象, 设定房间尺寸为 3.3 m×4.8 m×2.6 m, 对房间模型进行简化, 如图 1 所示。在此模型中, 衣柜和地板为室内散发甲醛的污染源。各部分的具体尺寸见表 1。

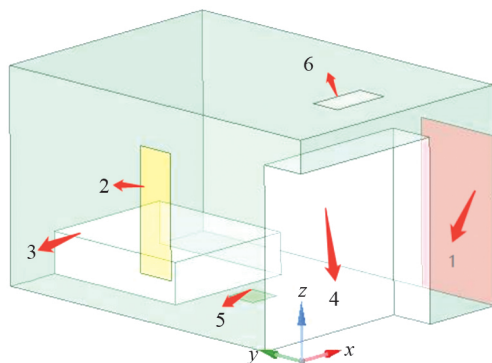


图1 地板送风房间的物理模型图

表1 房间模型具体设置表

名称	尺寸	数量
卧室	3.3 m×4.8 m×2.6 m	1
衣柜	2.2 m×0.6 m×2.2 m	1
床	2.0 m×0.5 m×1.8 m	1
窗户	0.6 m×1.5 m	1
门	2.0 m×1.2 m	1
送风口	0.4 m×0.4 m	1
回风口	0.8 m×0.4 m	1

2.2.2 网格划分

结构化网格划分的方法适用于内部结构工整、简单的模型, 并且可以很好地控制所生成网格的质量, 使计算更易于收敛, 结果的准确性也较高。因此, 对所建立的物理模型采用结构化网格划分的方法, 如图 2 所示。通过网格的独立性验证, 模型中的地板送风的最少网格数是 54 457, 所划分的网格的尺寸、质量都满足要求。

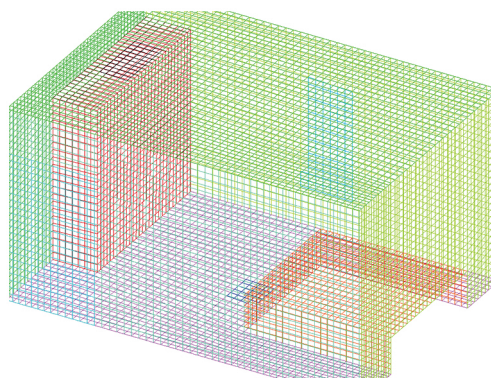


图2 地板送风房间物理模型的网格划分图

2.2.3 物理模型的简化及相关假设

在通过模拟来分析夏季地板送风方式下房间的热舒适性和室内空气品质时, 为了使所建立的物理模型与研究的房间内实际的气体流动状态更加接近, 需要对所建模型做如下简化:

(1) 对室内温度场、速度场和甲醛浓度场的分析, 是在系统达到稳定后所进行^[16], 因此在模拟中可以将房间内的空气的流动看作是稳态、具有高紊流雷诺数的流动过程;

(2) 室内空气、污染气体甲醛, 都可以在模拟中假设为不可压缩的常物性流体, 因为在整个的流动过程中会忽略室内气体的密度变化, 即将其密度视为常数;

(3) 忽略从门缝、窗及墙等位置渗入外部空气的情况;

(4) 不考虑室内其他热源的影响(如室内人员、灯具、家电的散热), 并将房间内各壁面看作是

壁温恒定的稳态传热过程;

(5) 甲醛的扩散过程为单一的物理过程,不会产生化学反应;

(6) 不考虑室内墙壁、绿色植物等对甲醛的吸附作用。

2.2.4 边界条件的设定

在夏季工况下,模拟采用地板送风的房间内甲醛的扩散状况和室内热舒适性。

(1) 为了能够给人员活动区域提供较低的空气温度和较高的空气品质,模拟中设定地板送风的风速为 1.25 m/s ;

(2) 出口处的边界条件设定为自由流出;

(3) 室内的衣柜和地板是甲醛的来源地,采用质量入口(Mass Flow Inlet)边界条件,设定室内甲醛的释放强度为 $7.2 \times 10^{-12} \text{ kg/s}^{[17]}$;

(4) 定义温度边界条件:窗户、外墙、内墙和地面的温度分别为 28 、 26 、 25 、 $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 数值模拟结果分析

为了更好地探究甲醛的分布情况,在房间内分

别选取高度 z 为 0.9 、 1.2 、 2.0 m 的截面作为典型截面,分别为靠近送风口、人员坐姿呼吸区和靠近回风口,并以整个房间作为研究对象,探究 y 方向的甲醛分布和 z 方向的速度分布。

3.1 典型截面处速度分布

典型截面处速度流线如图3所示。房间内部沿地板供应的气流形成了一个逆时针方向的循环流,而漩涡的产生是由于夹带射流,房间内部的流动大于从房间中疏散的能力。因此,内部流动必须先“排队”才能离开房间^[18]。地板送风的气流组织形式为下送上回,所以在下部送风口区域处具有较高的风速。随着高度的上升, z 方向的风速逐渐降低。在人员活动区域 z 为 1.2 m 处风速较低,室内人员的吹风感较小,会大大提升处于该区域的人员舒适感。

速度分布云图如图4所示,地板送风方式只在靠近送风口的位置处具有较大速度,这是由于此处具有较大的卷吸能力,能够向上卷吸风口附近的空气,但同时衰减速度也较大。该位置处的送风风速可达约 1 m/s ,且在此方向上速度的分布较为稳定。

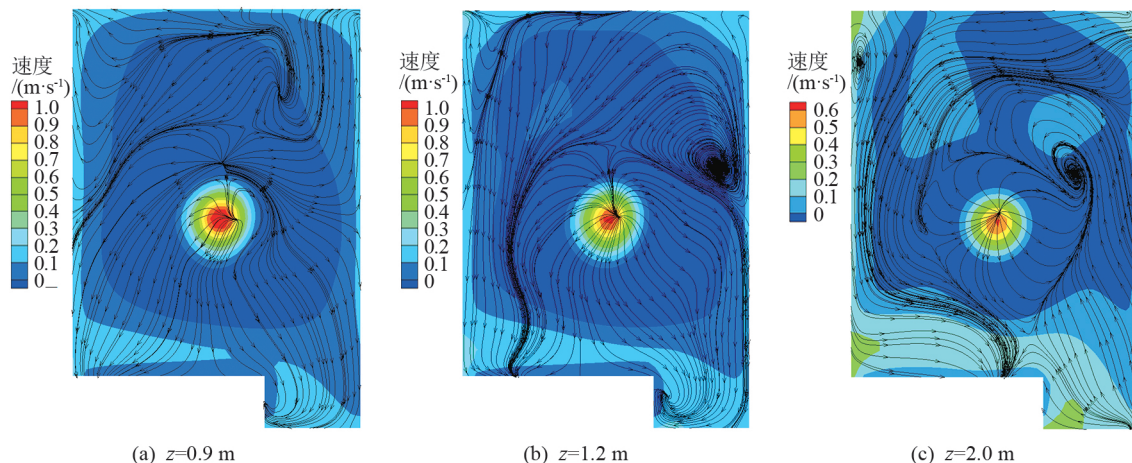


图3 典型截面处的速度流线图

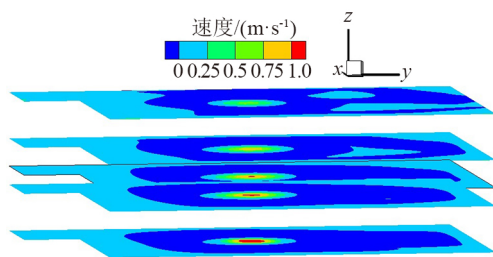


图4 z 方向不同高度速度场分布云图

3.2 典型截面处温度分布

房间竖直平面上的温度分布如图5所示,房间

内存在明显的温度分层现象。在送风口的位置,冷空气会与室内的热空气掺混,送风气流所流经区域内的温度明显低于气流不容易到达的其他区域的温度,在远离送风口处,具有较高的温度。随着高度的增加,温度梯度逐渐减小,这是由于室内热源人、电脑等主要集中在工作区,而上方的热源一般只有照明灯。除送风口处温度较低之外,室内其他地方的温度分布较为均匀,该地板送风房间内的温度维持在 296 K ($23 \text{ }^{\circ}\text{C}$),能够满足室内人员对温度的要求。

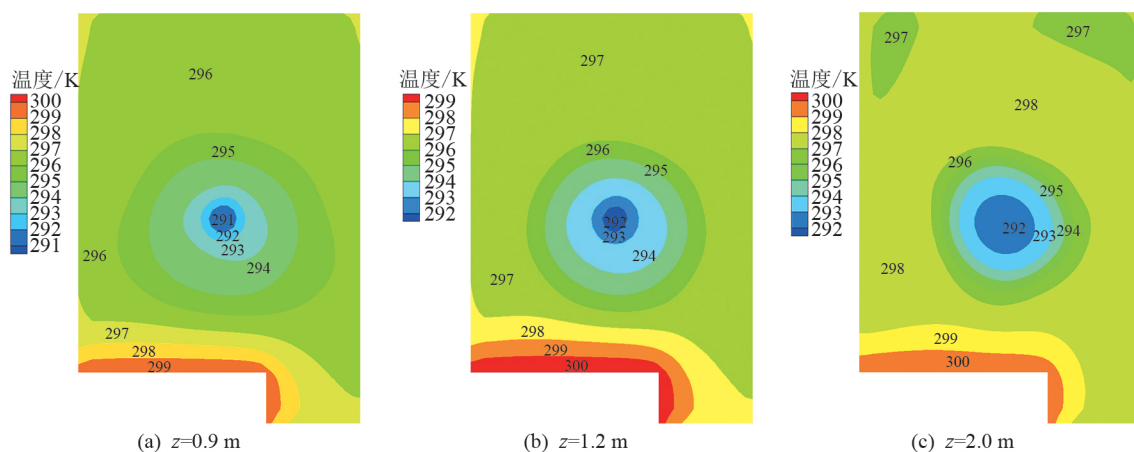


图5 典型截面处温度分布图

3.3 典型截面处甲醛质量分数分布情况

不同截面在地板送风方式下甲醛质量分数的分布如图6所示。可以观察到送风口处的甲醛含量最低,这是因为送风口处的气流组织较好且在此位置没有漩涡产生。但在靠近回风口处,由于气流组织较差,此处甲醛含量较高。室内甲醛的分布情况受到室内流场的影响,在室内存在障碍物(如床、桌子)的地方,气流会先在水平方向流动,在绕过室内

障碍物后才会形成向上流动的气流,这种气流会造成室内下方空气的交叉污染,严重时还会在此处形成涡流^[19],所以这些位置处的甲醛质量分数很高。

由此可见,在布置地板送风口时应尽量与室内所存在的障碍物保持距离,并且应尽量使风口靠近外墙,以达到抵消在外围护结构处所产生的最大负荷的目的;还应合理布置房间内的家具,减少死角的存在,可以很好地排出污染物。

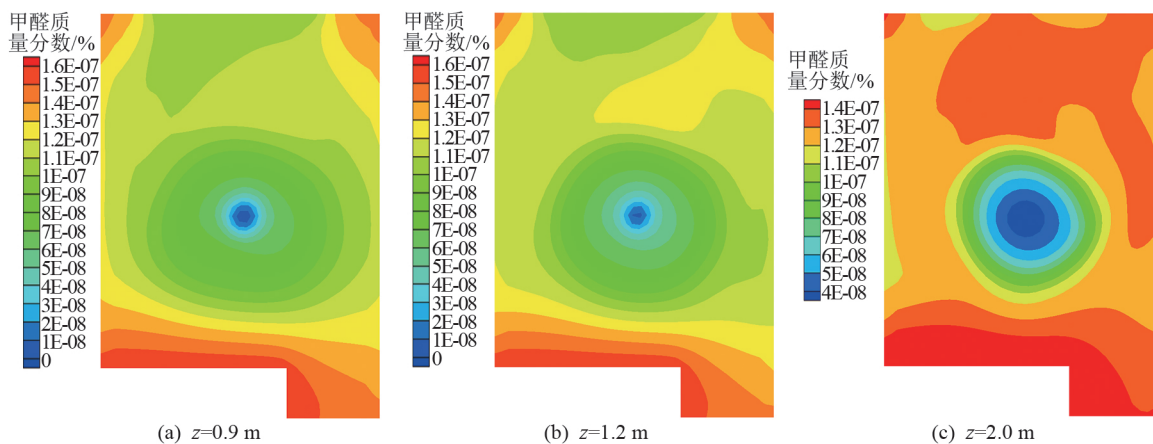


图6 典型截面处甲醛质量分数分布图

3.4 室内宽度方向甲醛质量分数分布情况

y 方向 5 个截面(分别为 0.8、1.2、1.8、2.4、2.9 m)的甲醛质量分数分布如图7所示,左侧由于靠近室内污染源衣柜,所以此处的甲醛含量最高。从左至右,与污染源的距离逐渐增大,与室内送风口之间的距离先增大后减小,因而中间处室内甲醛的含量最低。对比图6和7可以看出, y 方向上甲醛的扩散速率大于 z 方向,这是由于污染物甲醛在高度方向上受到了重力的影响^[20]。所以在 z 方向上,

随着高度的增加甲醛质量分数的分层会愈加明显。

通过向室内引入新风来降低污染物的含量是目前较常采用的净化建筑物内空气的方法。但在引入新风的过程中,需要高度注意新风的质与量。应该先过滤新风,再将其送入室内。除此之外,将新风直接送入室内的方式也受到了人们的推崇。因为这种做法都会从根本上减少污染新风的途径;还应该合理地布置室内的送、回风口,以减少室内的送风死角、提高室内换气效果。

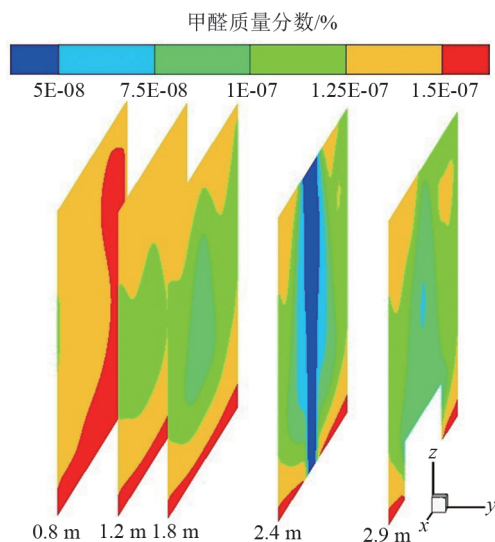


图7 y方向甲醛分布图

4 结论

利用 ANSYS 软件模拟了地板送风方式下房间中甲醛的扩散情况,得到主要结论如下:

(1) 室内甲醛浓度场与室内的速度场和温度场有关,而且速度场对甲醛浓度场的影响更大;在房间高度方向上甲醛的扩散速率较低,分层现象显著;在衣柜、床等气流组织差的地方室内甲醛含量较高,在空气流速较大、较均匀的地区甲醛含量较低。

(2) 室内空气由送风口向回风口处流动,在人员活动区风速适宜,吹风感较小。

(3) 地板送风方式下室内存在较明显的温度分层现象,在整个房间内会形成不同的局部气候环境,但总体的室内温度能够满足人员舒适感的要求。

参考文献:

- [1] ZHU K M, MA S Y. Preparations of Bi-doped SnO_2 hierarchical flower-shaped nanostructures with highly sensitive HCHO sensing properties[J]. Materials Letters, 2019, 236: 491-494.
- [2] 张成芬. 室内甲醛污染的危害及测定方法的研究[J]. 化学教学, 2007(1): 8-10.
- [3] IM D, KIM D, JEONG D, et al. Improved formaldehyde gas sensing properties of well-controlled Au nanoparticle-decorated In_2O_3 nanofibers integrated on low power MEMS platform[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 38(3): 56-63.
- [4] 覃薪儒. 浅谈室内甲醛污染治理技术[J]. 建材与装饰, 2016(10): 199-200.
- [5] 王倩. 基于场协同原理室内甲醛扩散模拟研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [6] 马建垒. 三种主要通风空调送风方式下室内热舒适性模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [7] BAUMAN F S, ARENS E A, TANABE S, et al. Testing and optimizing the performance of a floor-based task conditioning system[J]. Energy & Buildings, 1995, 22(3): 173-186.
- [8] ARENS E A, BAUMAN F S, JOHNSTON L P, et al. Testing of localized ventilation systems in a new controlled environment chamber[J]. Indoor Air, 1991, 1(3): 263-281.
- [9] SHOKROLLAHI S, HADAVI M, HEIDARINEJAD G, et al. Multi-objective optimization of underfloor air distribution (UFAD) systems performance in a densely occupied environment: A combination of numerical simulation and Taguchi algorithm[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101495.
- [10] 潘李丹. 不同送风方式下室内热舒适性与污染物分布特征[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [11] 王倩, 张浩. 夏季不同通风方式的房间内甲醛扩散模拟研究[J]. 洁净与空调技术, 2019(2): 16-21.
- [12] 董海洋, 张秀梅, 高春玲. 办公楼地板送风系统的应用及其设计要求[C]. 厦门: 第13届全国暖通空调技术信息网技术交流会, 2005.
- [13] 马仁民, 连之伟. 置换通风几个问题的讨论[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 18-22.
- [14] 刘良平. 地板送风系统在办公建筑中的应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [15] 刘思捷, 宋德萱, 吴伟. 地板送风系统在住宅建筑中的应用分析[J]. 住宅科技, 2013, 33(12): 42-45.
- [16] RICHARDSON G, HARWOOD D J, EICK S A, et al. Reduction of fine airborne particulates (PM3) in a small city centre office, by altering electrostatic forces[J]. Science of the Total Environment, 2001, 269(1): 145-155.
- [17] 池东, 李立清, 马卫武. 板材甲醛释放实验及其释放参数的测定[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 532-538.
- [18] LIM E, CHUNG J, SANDBERG M, et al. Influence of chemical reactions and turbulent diffusion on the formation of local pollutant concentration distributions[J]. Building and Environment, 2019, 168: 106487.
- [19] 姜海元, 李晓冬. 地板送风气流组织特性的研究[J]. 建筑节能, 2009, 37(7): 32-33, 49.
- [20] 姚聚鹏. 基于欧拉-拉格朗日法的室外颗粒污染物在室内的扩散研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.

(学科责编: 朱志鹏)