

夏季不同通风方式的房间内甲醛扩散模拟研究*

山东建筑大学热能工程学院 王倩**

山东建筑大学热能工程学院、可再生能源建筑利用技术教育部重点实验室、

山东省可再生能源建筑应用技术重点实验室 张浩*

摘要 采用 CFD 的方法对地板送风、混合通风及置换通风房间内的温度场、速度场及甲醛分布情况进行数值模拟,对不同通风方式的房间内的甲醛含量进行对比分析。模拟结果表明:甲醛的分布主要受室内空气气流组织的影响,甲醛浓度出现分层现象随高度增加而增加,地板送风方式下的甲醛含量较其他两种送风方式低。对不同通风方式房间内的甲醛扩散进行模拟及分析,对空调房间采用哪种通风方式降低室内甲醛含量具有一定的指导意义。

关键词 数值模拟; 甲醛浓度; 通风方式

Simulation Study on Formaldehyde Diffusion in Rooms with Different Ventilation Modes in Summer

Wang Qian and Zhang Hao

Abstract In this paper, CFD method is used to simulate the temperature field, velocity field and formaldehyde distribution under floor air supply, mixed ventilation and displacement Ventilated and floor ventilation. in floor ventilation, mixed ventilation and displacement ventilation. The formaldehyde content in rooms with different ventilation modes is compared and analyzed. The simulation results show that the distribution of formaldehyde is mainly affected by indoor air distribution. The formaldehyde concentration increases with the increase of height. The formaldehyde content in floor air supply mode is the lost than the other two air supply modes. In this paper, the formaldehyde diffusion in different ventilation modes is simulated and analyzed, which ventilation modes are used to reduce the indoor formaldehyde content in air-conditioned rooms has certain guiding significance.

Keywords Numerical simulation; Formaldehyde concentration; Ventilation modes

0 引言

进入21世纪以来,随着国家的经济快速发展,人们对室内高档舒适的环境追求越来越高,高档华丽的装修必然伴随着室内环境污染问题^[1]。而《2002年世界卫生报告^[2]》针对室内空气品质对居住人员健康影响作了专门性的数据报告:长期居于室内的人员受到来自室内环境污染的危害程度远大于室外^[3]。我国室内甲醛污染主要由建筑材料、装修材料及家具产生,具体来源于各种人造板材、墙面涂料、胶黏剂、处理剂等化学建材类建筑材料产品^[4-5]。民用建筑工程中使用的饰面人造木板是造成室内甲醛污染的主要来源之一。人造木板中甲醛释放持续时间长、释放大,对室内甲醛超标起着决定作用^[6]。研究资料表

明,通风换气不仅可以有效调节室内温湿度,同时也是减轻室内甲醛污染最简单有效的办法^[7-8]。国内外许多学者针对不同通风方式室内污染物扩散情况进行了研究,姚军^[9]利用数值模拟的方法分析了污染源位于不同位置对层状通风办公室内甲醛浓度的影响,最终确定出办公室内书柜等污染源较合理的布置方式。岳高伟^[10-11]等模拟分析了不同送风方式、不同送风速度对室内甲醛浓度分布的影响,得出同侧送回形式更有效地减小室内甲醛浓度,并且送风速度为2 m/s 时效果最佳。余水^[12]分析了不同送风方式对空调房间内污染物质量浓度分布的影响,通过模拟分析比较不同送风方式和不同污染物散发量下室内污染物质量浓度的分布特点,指出了顶送侧回的送风方式比同侧上送下回、异侧上送下回、异侧上送上回送风方式除污效果好。本文主要采用 CFD 的方法对夏季地板送风、混合通风及置换通风房间内的速度场、温度场及甲醛浓度场的分布情况进行数值模拟及分析。

* 非牛顿幂律流体能量传输机理研究 (ZR2014JL039)

**王倩,女,1993年9月生,在读硕士研究生

250101 山东省济南市临港开发区凤鸣路山东建筑大学新校区
18766113067

E-mail: 1627823762@qq.com

收稿日期: 2019-04-02

1 数学模型

对房间内的甲醛进行准确的数值模拟,必须建立能准确描述气体流动规律的控制方程,即质量守恒、动量守恒和能量守恒方程;其次本文主要采用标准湍流 $k-\varepsilon$ 模型和气体组分运输模型。

1.1 基本控制方程

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

式中:从左依次是瞬态项、对流项、扩散项以及源项,其中 ϕ 表示通用的变量,可以表示分速度、温度以及常数等, Γ 和 S 分别表示广义扩散系数和广义源项。其中,质量守恒方程中, ϕ 取 1, Γ 取 0, S 取 0; 动量守恒方程中, ϕ 取 u_i , Γ 取 μ , S 取 $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$; 能量守恒方程中, ϕ 取 T , Γ 取 k/c , S 取 S_T 。本文中,能量方程中热源为人员、计算机与灯,具体设置值如表 1 所示。

1.2 湍流模型

$k-\varepsilon$ 方程

流动能方程 (k 方程):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (2)$$

湍流能量耗散率方程 (ε 方程):

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

式中: G_k 为层流速度梯度产生的湍流流动动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; C_1, C_2, C_3 为常量,在空气和水的实验基础上,取 $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{3\varepsilon}=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.3 组分运输模型

本文主要研究室内的空气与甲醛混合物,采用组分运输模型模拟室内甲醛分布情况。

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) = \Gamma \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + s(x, y, z) \quad (4)$$

式中: Γ 为任一点的扩散系数, $s(x, y, z)$ 为任一点的扩散强度,本文取办公桌的甲醛扩散强度为 7.2×10^{-11} kg/s, C 为任意一点甲醛浓度。

2 建立模型

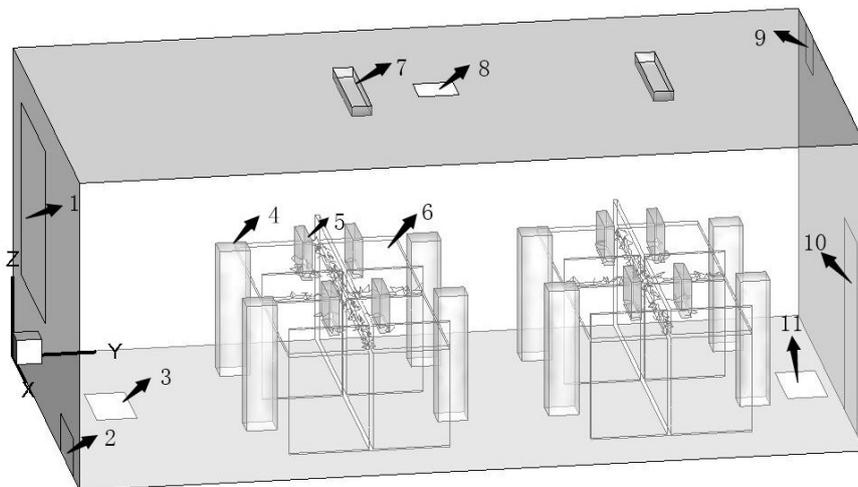
2.1 几何模型的建立

本文选取济南市某采用置换通风空调的办公室为研究对象,房间具体尺寸为 $4.2 \text{ m} \times 7.8 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$,对房间模型进行简化如图 1 所示,办公室模型具体尺寸设置如表 1 所示。

表 1 办公室模型具体设置

名称	数量	尺寸 (m×m×m)
房间	1	4.2×7.8×3.2
人员	8	0.4×0.4×1.2
办公桌	8	4.2×7.8×3.2
计算机	8	0.5×0.1×0.4
灯	2	0.2×1.2×0.1
窗户	1	1.2×1.8
混合送风风口	2	0.4×0.4
置换送风风口	2	0.4×0.8
地板送风风口	3	0.4×0.8

注:人员的模型简化为六面体是为了便于用矩形网格进行离散,坐姿呼吸高度约为 1.2 m。



1-窗户; 2-混合通风回风口(置换通风送风口); 3-地板送风送风口; 4-人员; 5-电脑; 6-办公桌; 7-灯; 8-地板送风回风口; 9-混合通风送风口(置换通风回风口); 10-门
图 1 物理模型

2.2 网格的划分

本文对内部结构相对复杂的办公室房间选用非结构网格划分,其划分网格简单,成型比较容易,经过网格独立性验证,本物理模型中地板送风最少网格数为 234000,混和送风最少网格数为 233000,以及置换送风最少网格尺寸为 226000。其中模型中的最大网格尺寸不超过 0.4 m,网格质量均在 0.3 以上。在窗户及门的缝隙网格尺度不超过 0.2 m,人员、电脑和桌子的网格尺寸不超过 0.2 m,送、回风口的网格尺寸不超过 0.1 m。

2.3 物理模型的简化和假设

由于空调房间对室内空气流动的影响因素很多,所以,我们在模拟不同通风方式下的空调房间内的热舒适性及空气品质时,需要对模型做一些假设和简化。

(1) 在整个模拟过程中,室内空气被看作是不可压缩、常物性流体,满足 Boussinesq 假设;甲醛视为常物性、不可压缩流体。

(2) 其流动呈稳态湍流,流场具有高紊流 Re 数。

(3) 将各壁面设定为定壁温稳态传热,且不考虑传热表面辐射的影响。

(4) 本文对温度场、速度场及甲醛浓度分布情况的分析均在系统达到稳定状态后进行^[13]。

2.4 边界条件的设定

速度入口边界条件的确定:本次空调的通风系统采用二次回风系统,送风温差取为 6℃,通过焓湿图的计算可得总送风量为 0.48 kg/s,即 0.4 m³/s。地板送风的送风速度取 1.25 m/s,混合送风的送风速度取 2.5 m/s,置换送风的送风速度取 0.6 m/s,送风温度均取 291K。出口边界条件为自由出流,靠室内流体流动的推力。甲醛散发源选取办公桌面,采用 Mass Flow Inlet 边界条件,其释放强度为 7.2×10⁻¹¹ kg/s^[14]。室内热源及污染源的边界条件具体设置如表 2 所示。

表 2 边界条件的设定

名称	类型	边界条件	备注
人员	壁面	常热流	75 W
计算机	壁面	常热流	110 W
灯	壁面	常热流	40 W
窗户	壁面	常壁温	28℃
外墙	壁面	常壁温	26℃
内墙	壁面	常壁温	25℃
地面	壁面	常壁温	24℃
办公桌	壁面	释放强度	7.2×10 ⁻¹¹ kg/s

3 模拟结果与分析

3.1 典型截面和直线的选取

为了更好地分析比较房间内不同通风方式下的人员工作位置处的温度场、速度场及甲醛的分布情况,我们主要选取 Z 方向上人的主要呼吸面 Z=1.2m 截面。

为了分析研究房间内人员办公区域不同位置的甲醛分布情况,在室内具有代表性的地方选取 3 条垂直直线, A (2.2, 1, 0) — (2.2, 1, 3.2); B (2.2, 4.5, 0) — (2.2, 4.5, 3.2); C (2.2, 7.3, 0) — (2.2, 7.3, 3.2), 每条线上选取了 32 个点,三条直线在模型里的具体位置如图 2 所示。

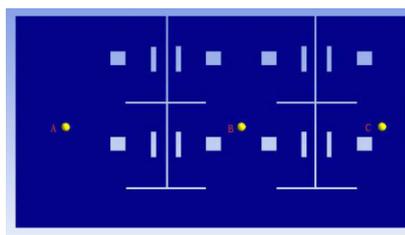
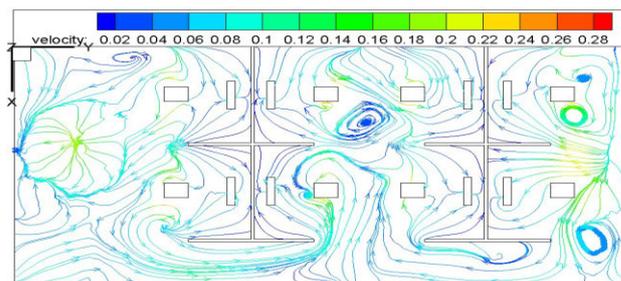


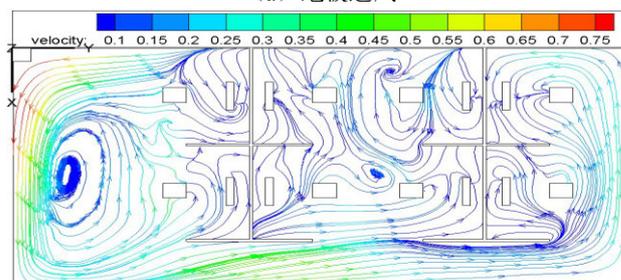
图 2 三条直线在模型里的位置

3.2 在截面 Z=1.2 m 处不同通风方式下各场的分布

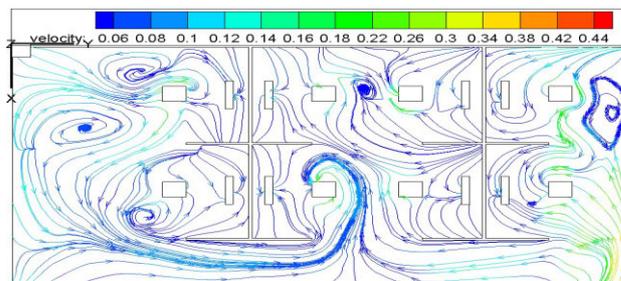
3.2.1 不同通风方式下的速度场的分布



(a) 地板送风



(b) 混合通风



(c) 置换通风

图 3 速度场的分布

由图 3 速度场的分布看出,三种不同通风方式下的速度场的分布有较大的不同。由图 3 (a) 得知,呼吸截面上,地板送风方式的速度场的分布情况较紊乱。冷风在地板由两个送风口送入室内,贴墙壁向房间内部人员工作区域运动,但由于墙壁及房间内障碍物的约束作用,在呼吸面上仅在靠近右侧墙壁及内部办公桌附近有较多的漩涡产生。但房间内此截面处的空气流速在 0 m/s~0.2 m/s,人员的吹风感较小。由图 (b) 得知,呼吸截面上,混合通风方式下的气流组织较好,房间气体主流大部分贴紧窗户外墙以一定的流动速度向房间内部流动,仅在靠近窗户位置由于墙壁的约束作用形成了一个较大的漩涡。房间内靠近墙壁处空气流速高于人员工作区域中间部位,而人员工作区域的吹风感较小。由图 3 (c) 得知,呼吸截面上,置换通风方式下的空气均由靠近墙壁四周向房间中部人员工作区域流动。置换通风方式下气流在垂直方向上产生两个明显的区域,下部单向流动区和上部紊流混合区,此截面上的空气流动有明显的混合分流现象。由于墙壁及办公桌的阻挡作用,在靠近墙壁及桌子附近人员工作区域有几个明显的漩涡产生。房间内呼吸截面处的流速均在 0 m/s~0.15 m/s 左右,不产生吹风感,人员的舒适性较高。

3.2.2 不同通风方式下的温度场的分布

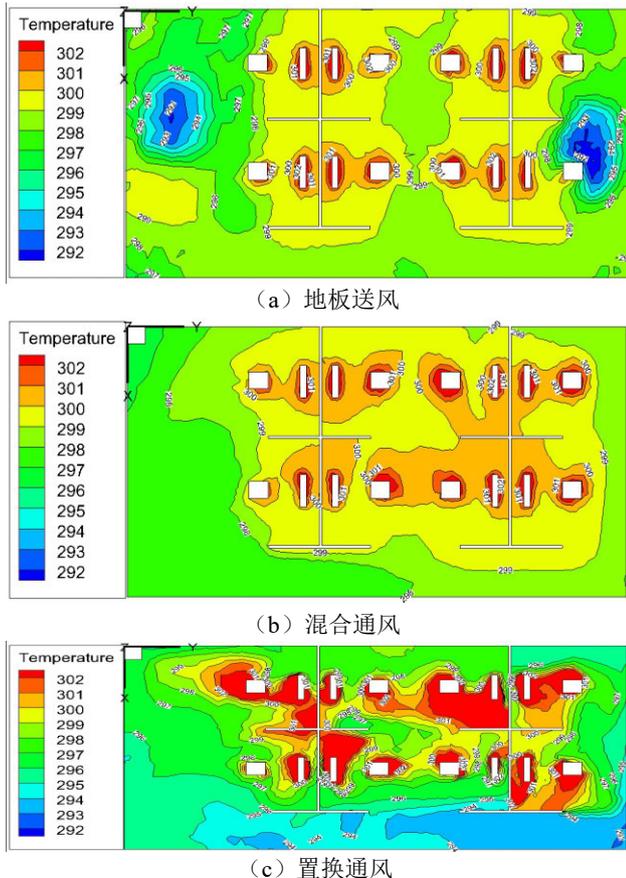


图 4 温度场的分布

由图 4 温度场的分布看出,呼吸截面上,三种不同通风方式下的温度场的分布有较大的不同。由图 4 (a) 地板送风方式下温度场的分布情况得知,此截面上,在地板送风风口上方由于室内空气直接与冷空气进行热量交换,所以靠近送风口处温度较低。房间内送风口周围热空气不断地与冷空气进行掺混,此处的温度梯度较大,换热效果较好。人员本身及电脑热源的散热,使得人员工作区域的空气温度较高,但由于冷空气不断地向房间内部流动,所以聚集在内部工作区的热量最终会被冷空气带走。此截面房间内整体温度较舒适。由图 4 (b) 混合通风方式下温度场的分布得知,房间冷空气大部分贴紧窗户外墙以一定的流动速度向房间内部流动,所以房间四周墙壁的温度较低,而人员的工作区域,由于周围空气与冷空气无直接接触,进行热量交换,使得热量集中在此区域,很难散走。由图 4 (c) 置换通风方式下温度场的分布得知,房间右下角角落处,由于冷风速度较大,房间内的热空气与冷风充分进行热量交换,使得此处空气温度较低。房间内整体温度趋势也是靠近墙壁四周的空气温度较低,而内部人员工作区域的温度较高。但部分冷空气也可以进入房间内部,也能带走部分热源产生的热量。

3.2.3 不同通风方式下的甲醛质量分数场的分布

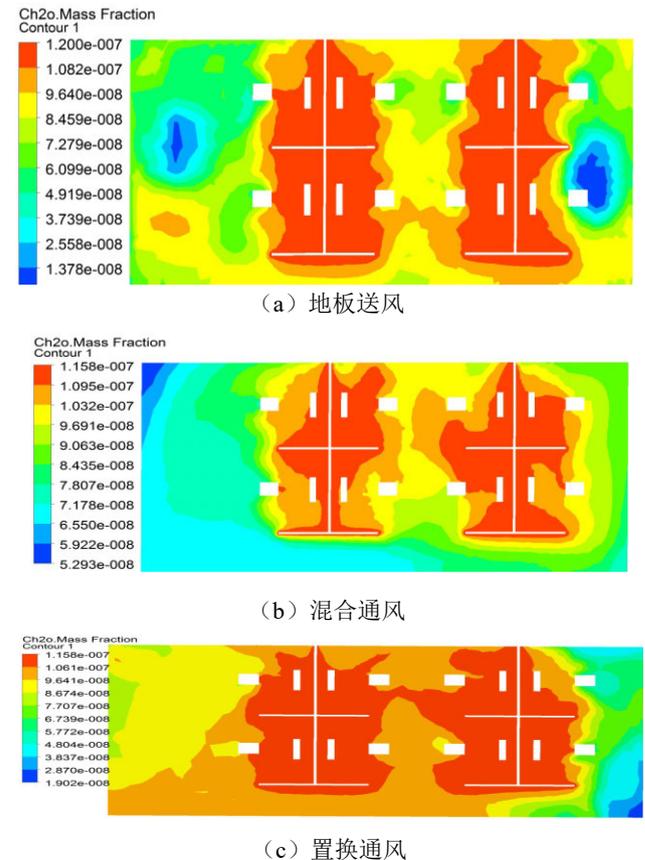


图 5 甲醛质量分数场的分布

由图 5 甲醛质量分数分布图可看出,三种不同通风方式下甲醛浓度场与温度场的分布具有一定的相似性,房间内甲醛含量受流场的分布影响较大。由图 5 (a) 地板送风方式下的甲醛质量分数分布图可以得出,在靠近送风口位置处气流组织较好无漩涡产生的区域的甲醛的含量较低。在人员工作区域由于不能很好的将污染源产生的甲醛带走,使得此处甲醛含量较高。由图 5 (b) 混合通风方式下的甲醛质量分数分布图可以看出,此呼吸截面上, 甲醛整体含量较低。

甲醛浓度从墙壁向人员工作内部区域逐渐增加,并且有明显的分层现象。房间左侧由于空气流速较大甲醛含量明显低于右侧。由图 5 (c) 置换通风方式下的甲醛质量分数分布图可以看出,此截面下,房间右侧空气流速较大,使得房间右侧角落甲醛含量较低。房间左部靠近墙壁附近有较大的漩涡产生使得甲醛含量较其他区域高。人员工作区域由于气流组织较差使得办公桌产生的甲醛不能很好地被稀释带走。

3.2.4 不同通风方式下不同位置甲醛随高度分布规律

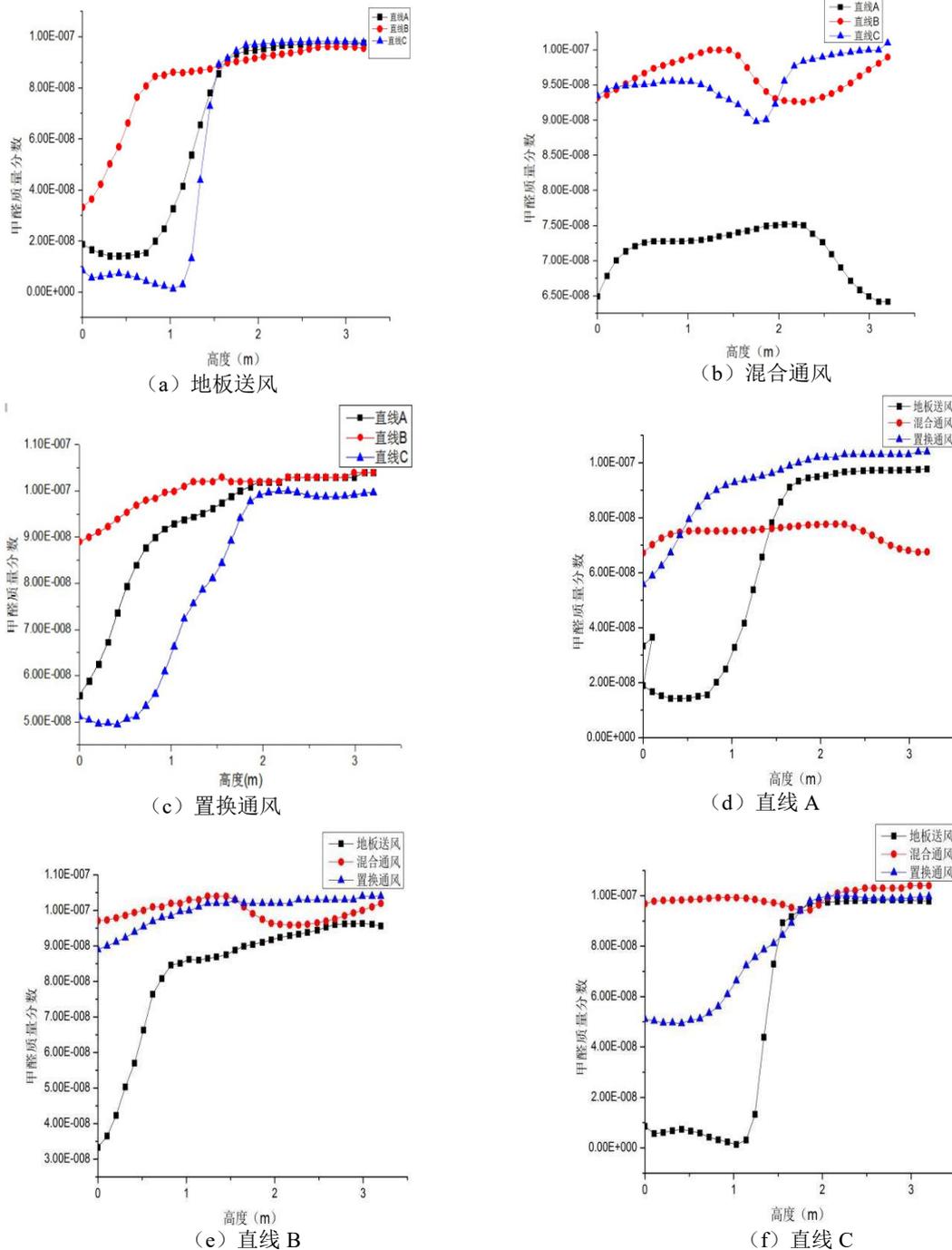


图 6 不同通风方式下不同位置甲醛随高度分布规律

由图6(a)、图6(b)、图6(c)得出,三种不同通风方式下的甲醛浓度在垂直高度方向上有着明显的分层现象,并且甲醛浓度随着高度的增加而增加。并且在人员工作区域直线B的位置处,由于空气速度较低且气流组织较紊乱,甲醛含量高于其他区域。直线C位置处,由于空气流速较高,气流组织较好,能更好地稀释甲醛,使甲醛浓度较低。而置换通风由于气流组织紊乱度较高使得甲醛含量并不直接随着高度的增加而增加,反而有先增后减又增加的趋势。由图6(d)、图6(e)、图6(f)得出,不仅在呼吸截面处,三条直线上地板送风方式下的甲醛含量较其他两种通风方式低,房间大部分区域在地板送风方式下对甲醛的稀释作用都较好,使得甲醛含量较低。

4 结论

采用通风方式的房间内甲醛分布受温度场和速度场的影响较大,特别是速度场的影响最大。本文主要应用Fluent软件对空调房间进行了数值模拟,对房间的呼吸截面上的温度场、速度场及甲醛质量分数进行对比分析。主要结论如下:

(1) 由速度场的模拟结果得出,房间整体空气流动趋势为自送风口向回风口,但在桌子及房间角落由于有漩涡的产生,其气流组织较差。置换通风与地板送风方式下的人员工作区域的速度较低,人员吹风感较小。

(2) 由温度场的模拟结果得出,房间内与送入的冷空气直接接触且空气速度较大处的区域温度较低,在电脑及人员热源附近产生的热量由于不能及时被带走使得温度分布较不均匀,且温度较高。

(3) 由甲醛的分布场模拟结果得出,房间内甲醛的分布受速度场的影响较大,在桌子及房间角落由于有漩涡的产生其气流组织较差,此处甲醛含量较高。在空气速度较大空气流动较均匀的位置,甲醛含量较低。

通风房间内甲醛的分布有明显的分层现象且随高度增加而增加。而在人的呼吸面处,地板送风方式的甲醛含量较置换通风与混合通风低。甲醛严重影响人员身体健康,所以选择合适的通风方式对室内甲醛的净化至关重要。

参考文献

- [1] 陆梦华.室内甲醛污染物通风净化效应[D].河南:河南理工大学,2016
- [2] 宋广生.中国室内环境污染控制理论与实务[M].北京:化学工业出版社,2006
- [3] 王芳,王鹏浩,徐洪祥.冬季东北地区室内甲醛扩散的数值模拟[J/OL].哈尔滨理工大学学报,2018(06)
- [4] 刘晓红,周定国.室内环境污染研究现状与展望[J].木材工业,2003,17(2)
- [5] JH Yang. CFD Analysis of the Inhaled-Air Quality for the Inpatients in a Four-Bed Sickroom[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2013,12(1)
- [6] 张成芬.室内甲醛污染的危害及测定方法的研究[J].化学教育,2007(1)
- [7] 沈成钢,刘秀春,张志梅.温度对装修后室内空气中甲醛含量的影响[J].中国卫生检验杂志,2007,01
- [8] 周明,谢序璠,黄晓华,等.不同气温条件下室内甲醛污染特性的探讨[J].四川环境,2005,04
- [9] 姚军,荣煜.污染源的不同位置对层状通风办公室内环境的影响[J].洁净与空调技术,2016(03)
- [10] 岳高伟,陆梦华,贾慧娜.室内污染物扩散的通风优化数值模拟[J].流体机械,2014,42(04)
- [11] 冯国会,姜编,黄凯良,张亿先,杨雪.严寒地区通风房间室内甲醛污染物浓度分布规律研究[J].流体机械,2017,45(11)
- [12] 于水,管玉祥,贺廉洁.不同送风方式对空调房间内污染物质量浓度分布的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(06)
- [13] 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(1-3)
- [14] Dong C, Li-Qing L I, Wei-Wu M A. Experience research on formaldehyde emission from wood-based panels and measurement of emission parameters[J]. China Environmental Science, 2014, 34(2)