

# 层式通风下室内气流组织特性数值仿真

许 健,余跃进,张若楠

(南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 针对层式通风这一新型通风方式,在考虑外窗得热的条件下,通过采用 Navier-Stokes 方程与 RNG 的  $k-\varepsilon$  涡粘性湍流模型对空间气流的三维温度场、速度场、污染物  $\text{CO}_2$  浓度场模拟,计算 PPV 及 PPD 指数,并且与相同情况下的置换通风方式进行对比. 分析结果表明,在换气次数相同条件下,层式通风方式较置换通风方式能使呼吸区获得更好的 IAQ 与人体热舒适度.

[关键词] 层式通风,置换通风,气流组织,IAQ,数值仿真

[中图分类号] TU831.8 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)01-0039-06

## Numerical Simulation of Air Distribution Characteristics in Room of Stratum Ventilation

Xu Jian, Yu Yuejin, Zhang Ruonan

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** In this present paper, the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model are used to predict three-dimensional temperature field, velocity field, pollutant  $\text{CO}_2$  concentration distribution in considering the exterior windows and interior heat radiation conditions imposed by thermal buoyancy effects. It also has computed PPV and PPD to evaluate human thermal comfort. At the same time, its performance is compared with displacement ventilation in the same situation. The result shows that, with the stratum ventilation, occupancy can have favorable IAQ and thermal comfort in the breathing zone.

**Key words:** stratum ventilation, displacement ventilation, air distribution, IAQ, numerical simulation

目前,各国都致力于二氧化碳的减排工作以应对全球变暖和能源危机,这就需要我们更多地采用节能技术和管理措施以降低其能耗,而暖通空调系统的能耗占建筑能耗 50% 以上,其节能意义不言而喻. 中国内地以及世界其他国家和地区都陆续采用新的规范标准<sup>[1]</sup>,一般而言,理想的夏季空调设定温度为 25.5℃,国家发改委倡导的夏季空调温度为 26℃. 可以看出提高室内的空调温度,节约了部分能源,但是空调温度的升高,会对室内热环境和气流产生影响. 优化室内的气流组织,会提高人体的热舒适,减少空调系统的能耗,防止病态建筑综合症的发生都具有积极的意义.

层式通风可以作为一个解决节能与热舒适矛盾的有效手段,具有很强的节能潜力和应用前景. 此新型通风方式自提出以来,西安交通大学的王泮浩和香港城市大学的林章等人对其气流组织形式做了较多的研究<sup>[2]</sup>,取得了很有指导价值的数. 但目前国内外对该通风方式的研究和文献还相对较少,不同工况下的气流参数还有待深入研究. 因此考虑其模型实验受多方面条件影响和制约,并未涉及外环境的辐射对室内空气射流的影响,笔者通过采用 RNG 的  $k-\varepsilon$  湍流模型,在考虑外部辐射热的情况下对内设污染源、热源的室内气流组织进行 CFD 模拟研究,并且与现在常用的置换通风方式进行比较,分析气流组织的速度场、温度场、污染物随气流组织的分布规律及 IAQ,可为工程应用和相关的研究提供一定的依据.

## 1 通风方式的比较

### 1.1 传统通风方式

常用的传统非工业空调通风方式一般有以下几种,混合通风、置换通风和个性化通风<sup>[2]</sup>如表 1 所示.

收稿日期:2013-08-27.  
通讯联系人:余跃进,教授,研究方向:建筑节能. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn

混合通风因可兼顾加热和冷却高负荷变化规律,同时为工作区域提供较均匀的温度分布而被广泛采用,但混合通风效率较低,导致其能源消耗过高<sup>[3]</sup>.

表 1 传统通风方式的比较

Table 1 Comparison of conventional ventilation

通风方式	驱动力	热舒适性	IAQ	能耗
混合通风	风机动力	温度梯度小	均匀相同,但质量差	较高
置换通风	空气热浮力	温度梯度大,有头热脚寒现象	工作区品质较好	低于前者
个性化通风	风机动力	有空气沉降现象	呼吸区品质较好	低于前两者

置换通风从形式上属于下送风,气流从位于侧墙下部的散流器水平低速送入室内,在浮升力的作用下上升至工作区,吸收人员和设备负荷形成热羽流. 在上升过程中,热羽流不断卷吸周围空气,流量逐渐增加. 热力分层高度将整个空间分为上下两个区,下区空气由下向上呈单向“活塞流”,沿高度方向形成明显的温度梯度和污染物浓度梯度;上区空气循环流动,污染物浓度较大,温度趋于均匀一致. ISO 7730 对置换通风有这样的设计规定,标高为 0.1~1.1 m 的垂直温差不得超过 3℃;ASHRAE 标准对置换通风的设计要求为高差在 0.1~1.7 m 之间,温度同样不得超过 3℃. 这 2 个标准的设计要求均为防止头热脚寒现象的产生<sup>[4]</sup>. 由此可见,置换通风在设计中的规定限制了其在工业及民用建筑中的发展. 目前置换式通风较多用于层高大于 2.4 m 的空调系统,如办公室、会议室、计算机机房和剧院等.

个性化通风方式以工作区为主要调节区,将新鲜空气直接送至呼吸区,缩短新风年龄,以保证人体整体感知的空气品质较好<sup>[5]</sup>. 考虑到居住者个体偏好及差异,通过局部冷却或加热的独立调节手段以减小个体差异对舒适性的影响,同时产生的心理作用也有助于从感知上提高空气品质,从而最大程度地提高每一位居住者对所处环境的满意程度. 由于个性化通风在施工中的布置受家具的限制,其末端装置价格昂贵,且安装、改造较难,因此其实用性并不高.

1.2 层式通风方式

层式通风概念的发展,历经 4 个阶段<sup>[6]</sup>: 汇流射流、对冲射流、转折通风,最后形成了层式通风.

该通风方式以形成新鲜空气层并直接送到工作呼吸区的送风方式特点,如图 1 所示,通过位于侧墙上且略高于工作区高度的送风口来实现,风口具体设计高度由使用者经常处于站姿还是坐姿来决定. 将新鲜空气直接送达到呼吸区,因此所需的新风量可大幅减少. 同时,送风温度在相同的热舒适性前提下可比混合通风高. 新风量的减少,送风温度的提高为节能创造了空间.

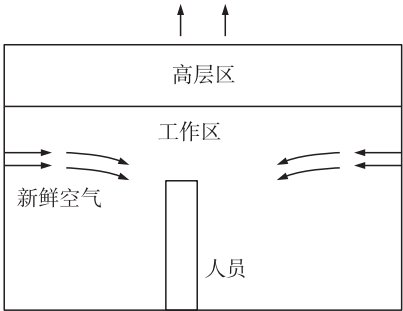


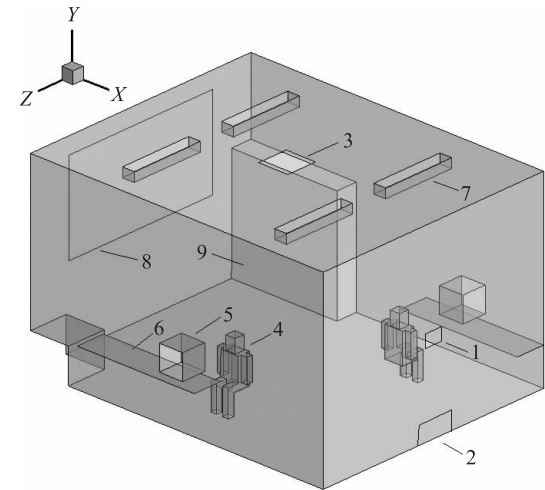
图 1 层式通风原理

Fig. 1 Principle of stratum ventilation

2 层式通风与置换通风的数值分析

2.1 物理模型

房间模型采用典型的办公室布置如图 2 所示,房间尺寸为:5 m×4 m×3 m,取房间地面西北角为空间原点(0,0,0),房间内布置有模拟坐姿办公人员(4)、电脑(5)、灯(7)、书柜(9)等,污染源设置在人体正面,高度为 1.1 m 处,CO<sub>2</sub> 释放量为 0.014 m<sup>3</sup>/(h·p). 房间西侧墙面为外墙,配有外窗,其尺寸为 2.6 m (长)×1.5 m (宽),考虑太阳通过该外窗的辐射热影响,空调室外计算温度取 33.5℃. 窗内无遮阳,通风方式采用侧送风,送风口为格栅送风口,层式送风口



1. 层式通风送风口;2. 置换通风送风口;3. 排风口;4. 人员;5. 电脑;6. 桌子;7. 灯;8. 外窗;9. 书柜

图 2 办公室模型布置

Fig. 2 Layout of the office model

尺寸为  $0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , 设置高度取略高于人员坐姿办公时高度位置 ( $Y=1.2 \text{ m}$ ), 置换送风口为  $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , 顶部的中间设置排风口, 尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ .

## 2.2 数学模型

房间内的空气流为低速流, 此情况的空气在不可压缩的范围内, 即假定房间内气流为定常不可压缩粘性三维流动, 涡粘性湍流模型的控制方程采用平均连续方程和雷诺平均 Navier-Stokes 方程<sup>[7,8]</sup>, 其中: 连续性方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

雷诺平均方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \tau_{ij}) = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2)$$

式中,  $u_i$  为速度分量;  $\mu_i$  为涡粘性系数;  $\tau_{ij}$  为粘性应力;  $\rho$  为密度;  $p$  为压力;  $f_i$  为质量力.

利用气流组织通风稀释室内气体污染物, 这里采用组分运输方程:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i, \quad (3)$$

式中:  $Y_i$  为各组分质量组分浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $R_i$  为化学反应净产生速率; 因本研究中不涉及化学反应, 故  $R_i$  值为 0;  $S_i$  为离散相及用户定义的源项导致的额外产生速率 ( $\text{kg}/\text{s}$ );  $\bar{J}_i$  为扩散通量 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ).

压力与速度耦合方式采用 SIMPLE 算法, 空间离散方法中, 压力与动量采用 Second Order, 各项残差均设置为  $1 \times 10^{-3}$  以下, 其中动能项的残差达到  $1 \times 10^{-6}$  以下.

## 2.3 边界条件

进口采用给定的边界条件, 层式送风速度  $V_{in} = 1.39 \text{ m/s}$ , 置换送风速度  $V_{in} = 1.04 \text{ m/s}$ , 送风温度  $T_{in} = 292 \text{ K}$ , 模型初始化  $Re = 1.75 \times 10^4$ , 气流为湍流, 两种情况的通风量均按 5 次换气次数取定, 人体作为污染物  $\text{CO}_2$  的释放源以  $7.14 \text{ mg/s}$  的流量释放, 电脑散热量  $108 \text{ W}$ , 灯  $34 \text{ W}$ , 人体散热  $100 \text{ W}$ , 窗外表面温度  $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

# 3 研究结果及分析

## 3.1 速度矢量场分布比较

图 3 所示为置换通风和层式通风条件下过送风口中心的垂直截面 ( $Z=2$ ) 的气流流动速度矢量图, 可以看到置换通风方式中, 气流从房间下部格栅送风口进入, 气流贴附地面慢慢散布形成“空气池”, 之后遇到室内的热源, 受升浮力影响, 形成类层流的活塞流状态缓慢向上移动, 到达人员和工作设备高度后, 受热源影响产生回流, 并且在近外窗侧由于通过窗的辐射热使得在该侧形成一个小涡流. 在工作区域内的流速较为均匀, 且大部分气流流速均在  $0.15 \text{ m/s}$  以下, 不会造成吹风感, 符合通风空调设计要求<sup>[9]</sup>.

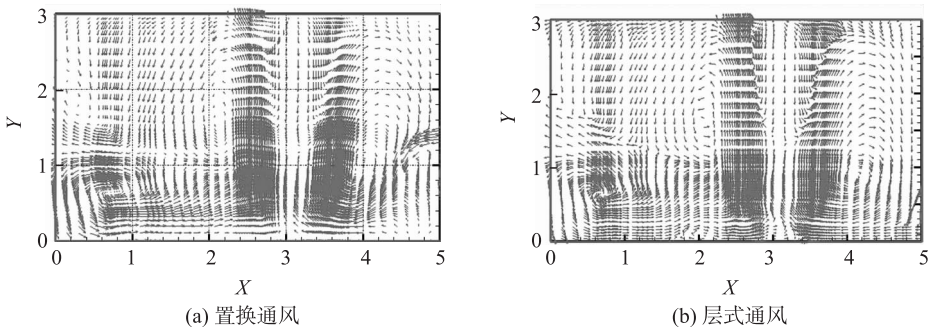


图 3  $Z=2$  截面气流速度矢量

Fig.3 Cross-section ( $Z=2$ ) velocity distribution

层式通风方式下, 气流从略高于工作区的高度进入沿射流方向送至人员工作区域, 气流速度相对较大, 这里易产生吹风感, 之后气流受热源及障碍物影响分为两部分, 大部分向上形成回流, 小部分向下流动. 这里可以判断, 向上的气流利于排走人体释放的污染物  $\text{CO}_2$ , 向下的气流可以去除人体的余热; 若有多

人办公时,应设置若干层式送风口或者送风角度,分别对应不同办公区域以获得最佳的新鲜空气射流.

3.2 温度场分布比较

图 4 为紧邻人员工作位置截面( $Z=1.5$ )的温度分布图,由图可以看出,置换通风房间内温度较为均匀,垂直于房间方向上产生热力分层,受热源及外窗辐射影响分层的区域有所挤压;层式通风方面,送风气流在工作区域沿射流方向的区域内上部温度较高,下部温度较低,为层状分布;并且在置换通风时,工作高度 1.3 m 以下部分大多为 301 K,层式通风条件下,1.3 m 以下区域中气流多数在 299 K 左右,判断出在工作区域层式通风除热能力较好.

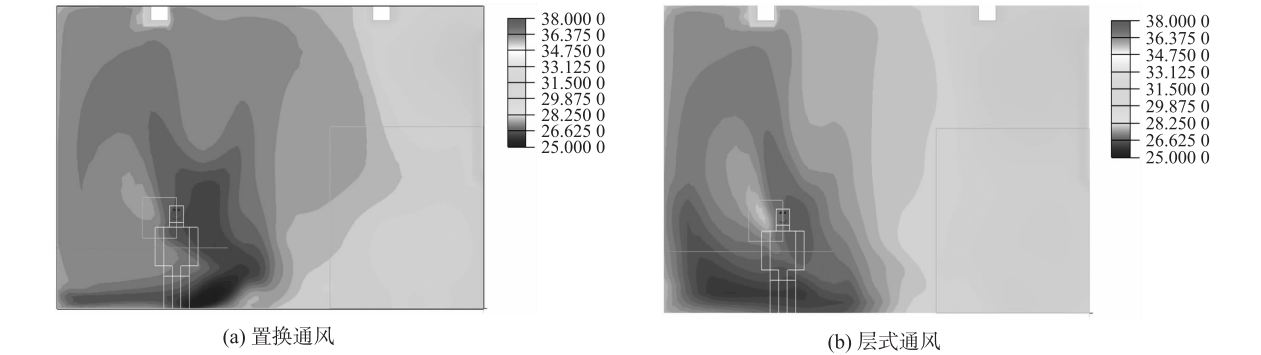


图 4  $Z=1.5$  截面温度分布  
Fig. 4 Cross-section( $Z=1.5$ ) temperature distribution

3.3  $\text{CO}_2$  浓度场分布比较

图 5 为紧邻人员工作位置截面( $Z=1.5$ )的  $\text{CO}_2$  浓度分布图,可以看到在置换通风系统中污染物没有明显的被升浮力带向房间上部,仅向周围有一定程度的扩散,这样会影响呼吸区( $Y=1.3$  m, 人体头部高度)的空气品质,其应用条件可以参照李欣<sup>[10]</sup>等人的研究:置换通风适合用于污染物比环境空气密度小,供气比环境空气温度低,层高大的场所.故考虑到本研究以  $\text{CO}_2$  作为污染物,其密度比空气大,房间层高 3 m 等条件限制了置换通风的排污能力;而层式通风中,送风气流可直接到达人体附近的工作区,冲散人体排出的污染物,呼吸区的整体空气品质较好,保证了人员的健康.

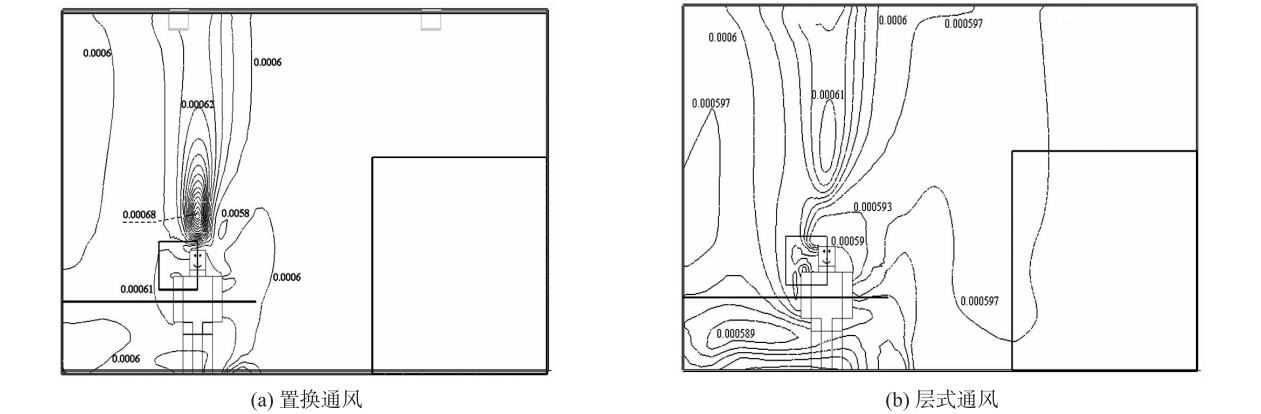


图 5  $Z=1.5$  截面  $\text{CO}_2$  浓度分布  
Fig. 5 Cross-section( $Z=1.5$ )  $\text{CO}_2$  concentration distribution

3.4 PMV 与 PPD 分析

图 6 为  $Y=1.2$  截面的 PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)分布图,图 7 为两种通风方式下  $Y=1.2$  (头部)和  $Y=0.5$ (腰部)截面的 PMV(Predicted Mean Vote)分布图. 根据 ISO 7730<sup>[11]</sup>评价本次室内环境的热舒适性. 由图对比可以看出,置换通风时在办公位置的 1.2 m 高度及以下 PMV 为 1.3 左右,PPD 平均值为 24,人体舒适度属于热区间;因为层式通风的射流直接将新鲜空气送至工作区附近,故看到其 1.2 m 高度及以下 PMV 多为 0.75 至 1,其中由于工作设备散热,人体正面有微热感,人体背后及周边都为 1,人体感觉为舒适.

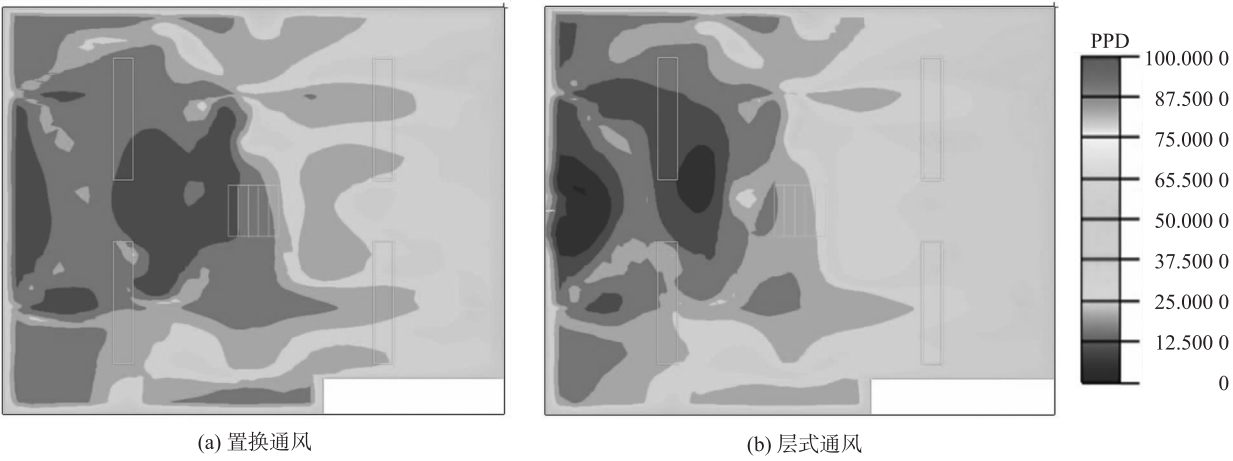


图 6  $Y=1.2$  截面 PPD 分布  
Fig. 6 Cross-section( $Y=1.2$ ) PPD distribution

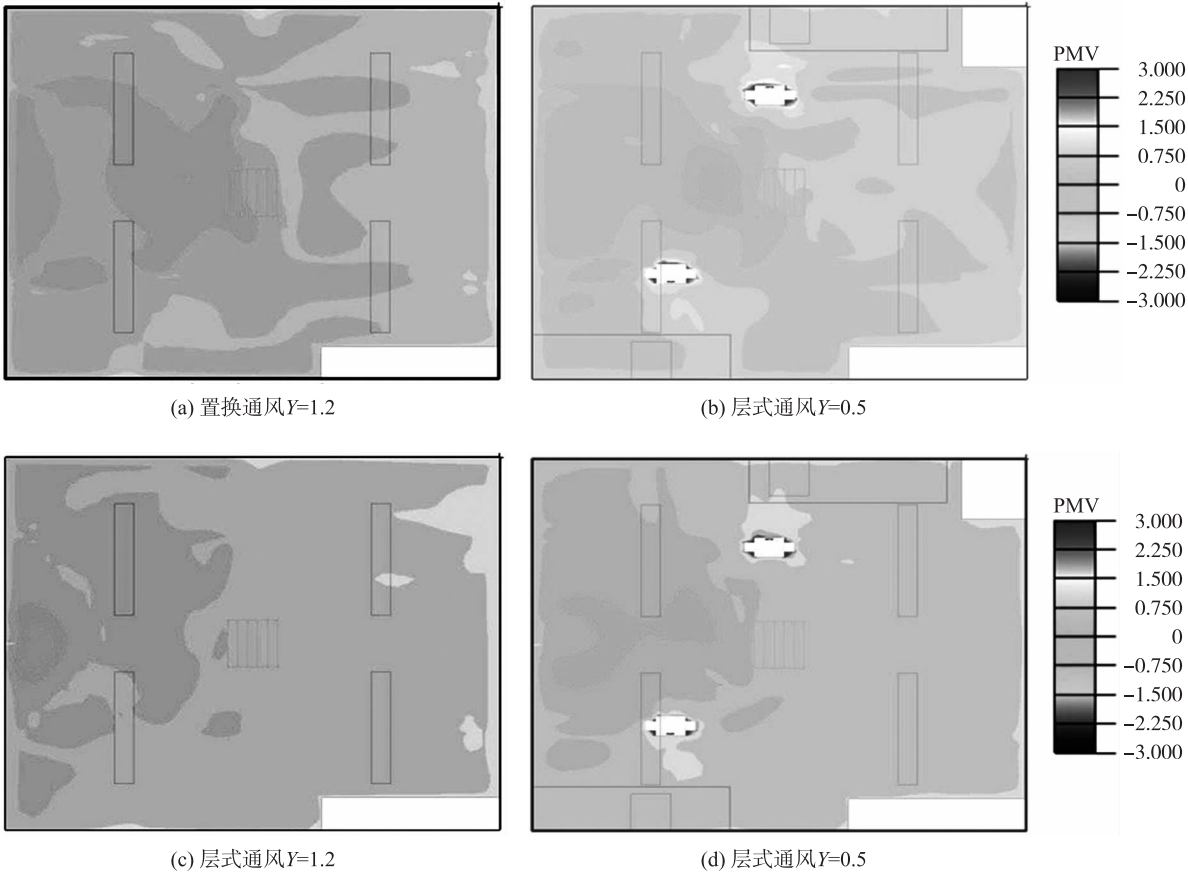


图 7  $Y=1.2$  和  $Y=0.5$  截面 PMV 分布  
Fig. 7 Cross-section( $Y=1.2$  and  $Y=0.5$ ) PMV distribution

4 结论

通过对层式通风系统气流组织进行的数值分析,根据其三维流动场内的温度场、速度场、污染物浓度场及 PMV-PPD 分布情况,结合同条件下置换送风方式的表现,得到以下的结论:

- (1)在速度分布上,层式送风在工作区域速度变化较大,为避免吹风感出现,可考虑将射流方向调整至人体侧面或成一定角度送入,若人员较多,可根据人员分布特点分别设置送风口或分别设置送风角度以达到新鲜空气直接送至呼吸区的目的;置换送风在房间内整体速度分布较为均匀,变化较小。
- (2)在温度分布上,层式送风在工作区高度下,射流范围内温度变化较明显,在胸部及以下位置温度



在 25 ~ 26 ℃, 房间上部有部分温度分层; 置换送风有较明显热力分层, 在高度方向上靠近人体区域温度变化较大, 易出现头热脚冷现象。

(3) 在浓度分布上, 层式通风有较强的排污能力, 在人员活动区特别是呼吸区内排污效果比置换通风排污效果要好。

(4) 在舒适度方面, 对于工作区域内的人体周围, 层式通风较置换通风能够提供更好的热舒适性。

## [ 参考文献 ] (References)

- [1] 林章, 周天泰, 曾志宽. 层式通风—高温空调下的出路[J]. 化工学报, 2010, 40(9): 82–87.  
Lin Zhang, Zhou Tiantai, Zeng Zhikuang. Ventilation system for higher room temperature setting[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2010, 40(9): 82–87. (in Chinese)
- [2] 刘晓东, 严彩球, 王沅浩, 等. 层式通风室内气流组织特性试验研究[J]. 制冷与空调, 2009, 9(2): 57–60.  
Liu Xiaodong, Yan Caiqiu, Wang Fenghao, et al. Experimental study of the air distribution characteristics in room of stratum ventilation[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2009, 9(2): 57–60. (in Chinese)
- [3] 李建兴, 张美元. 空调系统送风方式对热舒适性的影响[J]. 中国建设信息供热制冷, 2005(10): 77–80.  
Li Jianxing, Zhang Meiyuan. The effect of thermal comfort with different air supply systems[J]. China Construction Heating and Refrigeration, 2005(10): 77–80. (in Chinese)
- [4] 李俊, 孙淑凤, 狄洪发, 等. 稳态条件下人体对个体送风的热反应研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 1–6.  
Li Jun, Sun Shufeng, Di Hongfa, et al. Thermal response of human on personalized ventilation in stable conditions[J]. HVAC, 2004, 34(12): 1–6. (in Chinese)
- [5] 高乃平, 贺登峰, 牛建磊. 关于个性化送风若干问题的讨论[J]. 建筑科学, 2008, 24(8): 103–108.  
Gao Naiping, He Dengfeng, Niu Jianlei. Some significant issues on personalized ventilation[J]. Building Science, 2008, 24(8): 103–108. (in Chinese)
- [6] Lin Z, Chow T T, Tsang C F. Stratum ventilation-conceptual introduction [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Beijing: Indoor Air, 2005: 3 260–3 264.
- [7] Cho Y, Awbi H B, Karimipanh T. Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation[J]. Building and Environment, 2008, 43(6): 1 091–1 100.
- [8] Cho Y, Awbi H B, Karimipanh T. Comparison between wall confluent jets and displacement ventilation in aspect of the spreading ratio on the floor[J]. Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vols1–5, 2005: 3 249–3 254.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB/50736—2012 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
China Academy of Building Research. GB/50736–2012 The HVAC Design Code [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 李欣, 罗军. 置换通风的应用前景及其适用性分析[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会. 武夷山, 2002: 188–193.  
Li Xin, Luo Jun. The application prospect and availability analysis of displacement ventilation [C]//Proceedings of the Biennial Meeting of National HVAC & R. Wuyishan, 2002: 188–193. (in Chinese)
- [11] Fanger ISO7730. Moderate Thermal Environments-determination of the PMV and PPD Indicates and Specification of the Conditions for Thermal Comfort[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1995.

[ 责任编辑: 刘 健 ]