

DOI: 10.15986/j.1006-7930.2016.05.020

竖壁贴附射流加导流板呼吸区送风气流组织CFD及试验研究

李安桂, 刘旺兴, 要聪聪, 曹雅蕊, 尹海国

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 本文以有集中热源的办公室建筑为例, 在相同送风量和相同送风温度条件下, 研究比较了两种直接向呼吸区送风(竖壁贴附射流加导流板送风和层式送风)的气流组织特性, 分析比较了两种送风方式的温度场和速度场及温度和速度随房间高度的变化. 研究表明, 两种送风方式下, 新风都可以直接达到呼吸区内, 呼吸区内空气品质良好, 但竖壁贴附射流加导流板形成的竖壁贴附呼吸区送风可以在工作区内形成一个速度和温度都更加均匀的空气湖环境, 且能够获得较好的舒适度. 该研究为竖壁贴附呼吸区送风的新型气流组织设计提供了参考依据.

关键词: 竖壁贴附射流; 导流板; 层式通风; 气流组织; 热舒适性

中图分类号: TU 834.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2016)05-0738-07

CFD and the experimental study of air distribution in the breathing zone based on air curtain ventilation with deflector

LI Angui, LIU Wangxing, YAO Congcong, CAO Yarui, YIN Haiguo

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper takes an office of concentrated heat source as an example. Under the same condition of supply air rate and temperature, the research compares characteristics of air distribution formed by two kinds of supply air directly to the breathing zone (air curtain ventilation with deflector and stratum ventilation), analyzes the two kinds of the temperature field and velocity field, variation of temperature and speed with the change of room height are also studied. The results show that fresh air can both directly reach the breathing zone in two air supply modes, where high air quality forms. But air curtain ventilation with deflector can form an air lake in which air velocity and temperature are uniform, so we may feel more comfortable.

Key words: air curtain ventilation; deflector; stratum ventilation; air distribution; thermal comfort

通风空调能耗一般占建筑能耗的70%左右. 建筑密闭性随之产生的建筑综合症(SBS, sick building syndrome), 使得人们的身心健康与工作效率受到直接影响. 国内外的研究发现, 室内的气流组织、空气品质与工作效率有着直接关系^[1-2]. 目前常见的通风方式有混合通风和置换通风^[3], 前者是采用稀释原理更新室内空气的混合通风, 后者是基于活塞原理排除污染空气. 近年来, 西安建筑科技大学李安桂教授等提出了一种新的通风方式——竖壁贴附射流通风模式^[4], 它是在与传统的通风模式对比分析的基础上发展起来的, 结合了混合通风和置换通风的优点, 见图1. 竖壁贴附射流模式的原理是送风口布置在房间上部靠近竖壁的区域, 射流由风口送出后由于康达效应而与竖直壁面形成贴附现象, 此后射流主体将沿壁面垂直向下流动, 撞击地面后转为水平向扩散流动. 送风进入工作区前类似于传统混合式通风, 但由于竖直壁面的“扶持”效应, 能够较好的将新鲜空气和冷/热量下送至人员工作

区中, 然后射流以辐射流动方式沿地板向前延伸扩散, 在工作区形成类似于置换通风的空气湖, 有效提高了室内空气品质和通风效率^[5].

本文旨在研究通过竖壁贴附射流加导流板呼吸区送风模式, 见图2(a). 并与香港城市大学林章^[6]提出的层式通风进行比较研究, 见图2(b), 层式通风是通过位于侧墙上且略高于工作区高度的送风口来实现, 风口具体高度由使用者经常处于站姿还是坐姿决定. 层式通风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.

1 研究方法

CFD技术作为研究室内环境通风气流组织的工具已经有几十年了^[7], 各种计算模型和计算方法日趋成熟, 本文采用CFD技术对竖壁贴附射流通风加导流板形成的呼吸区送风和层式通风进行研究比较, 对比两种呼吸区送风方式下的室内热环境和通风效果.

收稿日期: 2016-04-25

修改稿日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778145); 国家自然科学基金项目(51478377); 陕西省教育厅产业化培育项目(15JF004)

作者简介: 李安桂(1963—), 男, 教授, 主要从事建筑通风空调气流组织、太阳能建筑一体化等方面研究. E-mail: Liag@xauat.edu.cn

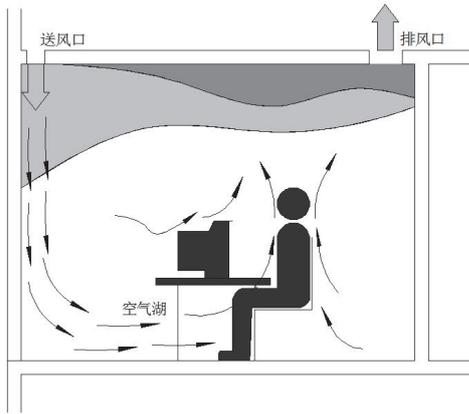
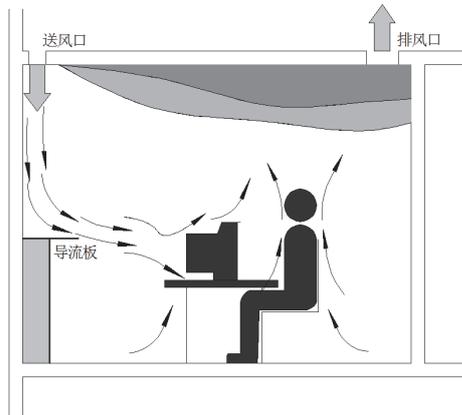
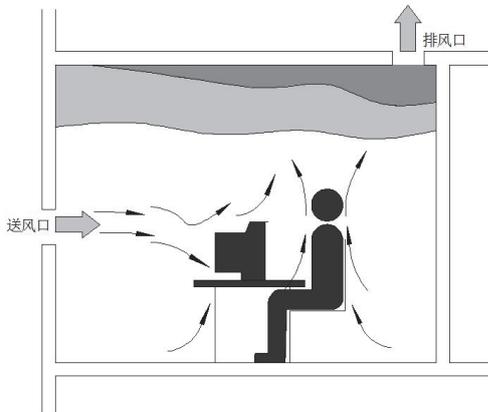


图1 竖壁贴附射流通风示意图
Fig.1 Sketch map of air curtain ventilation



(a) 竖壁贴附呼吸区送风



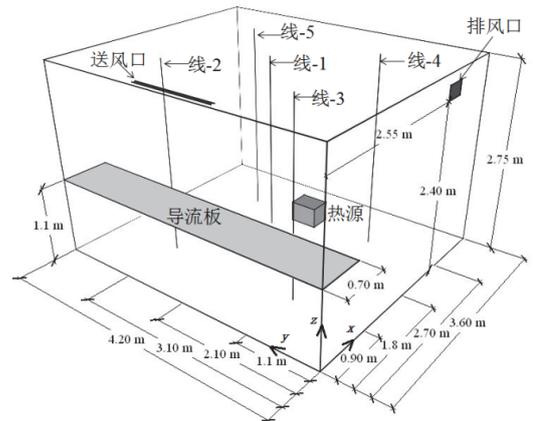
(b) 层式送风

图2 本文研究的通风模式示意图
Fig.2 Ventilation modes in this study

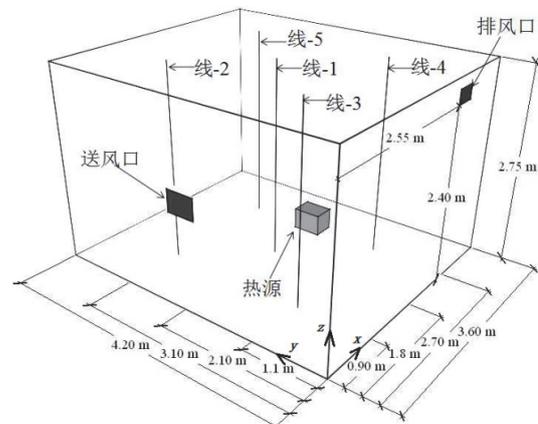
1.1 房间模型的建立

本文以一个简化的空调房间作为研究对象, 模型见图3. 房间内部的几何尺寸为 $x \times y \times z = 3.6 \text{ m} \times 4.2 \text{ m} \times 2.75 \text{ m}$. 竖壁贴附射流通风送风口尺寸为 $x \times y = 0.05 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 在竖壁上加垂直导流板($x \times z = 0.7 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$)层式通风送风口尺寸为 $y \times z = 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 排风口尺寸 $x \times z = 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 位于侧墙上. 一个长方体集中热源尺寸为 $x \times y \times z = 0.3 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$, 放置在地面上. 模型房间内均匀布置5条沿房间高度的垂直线用于数据的监测分析, 起点

位置分别对于坐标 (x, y) : 线-1(1.8, 2.1)、线-2(0.9, 3.1)、线-3(0.9, 1.1)、线-4(2.7, 1.1)和线-5(2.7, 3.1).



(a) 竖壁贴附呼吸区送风



(b) 层式送风

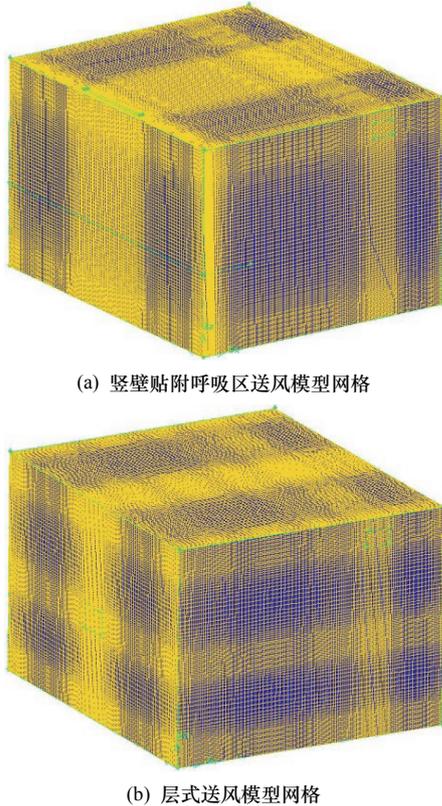
图3 房间模型图
Fig.3 Model of the room

1.2 计算模型离散

对研究模型的区域采用结构化网格划分, 用局部加密的措施, 在节约计算机资源的基础上确保结果的准确性. 图4(a)为三维竖壁贴附射流通风模型网格图, 网格数目为1 571 360个, 送风口、排风口和热源区域, 竖壁贴附射流中竖向壁面贴附区和横向地面空气湖区网格进行加密. 图4(b)为层式送风模型网格图, 网格数目为1 340 928, 同样在送风口、排风口和热源区域进行了局部加密.

1.3 边界条件

- (1) 入口边界条件: 速度入口边界条件, 两种送风方式送风量相同, 竖壁贴附射流送风速度为1 m/s, 层式送风速度为0.5 m/s.
- (2) 回风口边界条件: 自由出流(Outflow).
- (3) 壁面边界条件: 屋顶、地面、墙壁采用静止壁面(Stationary wall), 无滑移(No-slip).
- (4) 热源边界条件: 房间负荷全由集中热源承担, 在民用建筑中^[8], 其建筑容积热强度大致在 $q_v = 5 \sim 15 \text{ W/m}^3$, 本文研究热源取500 W.



(a) 竖壁贴附呼吸区送风模型网格

(b) 层式送风模型网格

图4 网格划分示意图

Fig.4 Grid division

1.4 湍流模型的选择及验证

湍流模型包括：标准 $k-\epsilon$ 模型($Sk-\epsilon$)、可实现 $k-\epsilon$ 模型($Rk-\epsilon$)、重整化群($RNGk-\epsilon$)、标准 $k-\omega$ 模型($Sk-\omega$)、剪切应力运输($SSTk-\omega$)模型。稳态RANS方程和 $SSTk-\omega$ 模型可以准确的预测出特定的室内环境温度分层。然而，常用的五种湍流模型， $SSTk-\omega$ 和 $Sk-\omega$ 模型可以成功地模拟出热羽流结构和相关的热分层现象，其他的三个 $k-\epsilon$ 模型计算结果并不准确^[9]，文献[9]也研究了 $SSTk-\omega$ 模型计算有热源的室内置换通风的正确性，文献[5]指出 $SSTk-\omega$ 模型预测得到的竖壁贴附射流通风流场与全尺寸实验结果较为接近，本文主要研究两种送风形式和热源热羽流对室内气流组织的影响，因此选择 $SSTk-\omega$ 湍流模型。

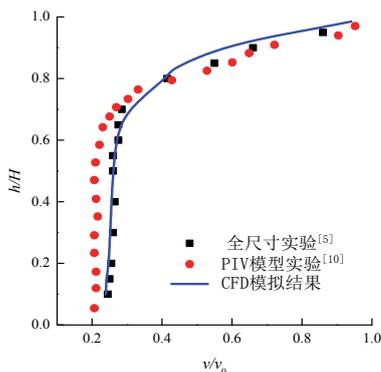


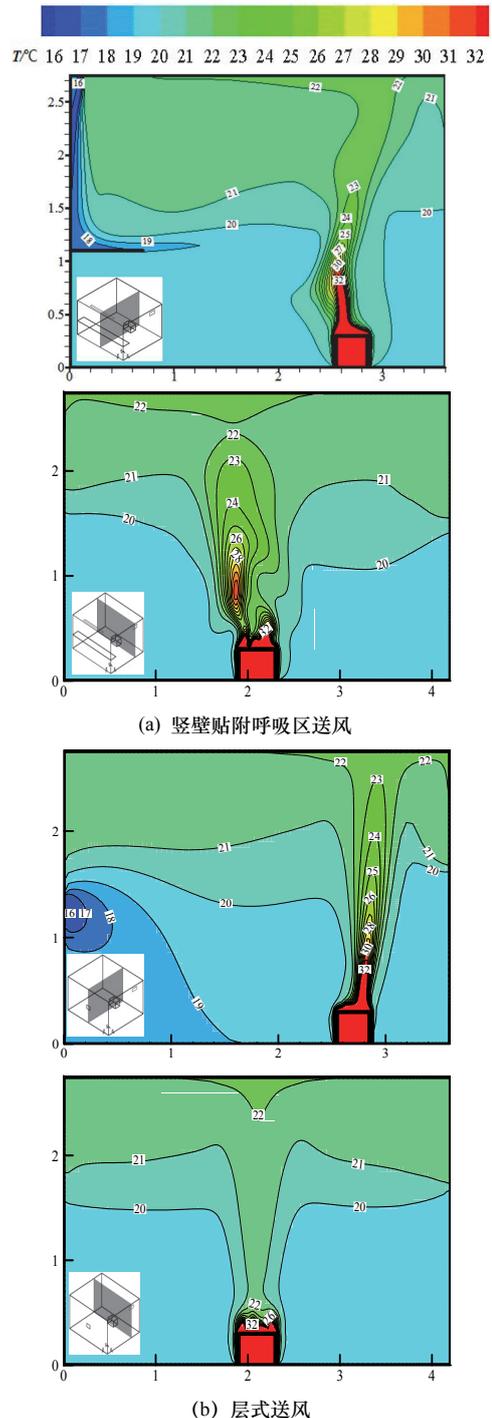
图5 竖壁贴附射流模型验证

Fig.5 Model verification of the air curtain ventilation

图 5 为相同条件下竖壁贴附射流竖壁区轴线速度的数值模拟预测和全尺寸实验、PIV 模型实验的无量纲对比结果。从图可以看出，模拟结果和全尺寸实验结果接近，与 PIV 模型实验有一定的误差，这主要是由于文献[10]中的 PIV 实验采用缩尺模型，本身具有一定的误差，因此，该模型能够用于通风效果的预测与研究，下文就依据该模型建模。

2 气流组织分析

2.1 温度场分布



(a) 竖壁贴附呼吸区送风

(b) 层式送风

图6 温度分布图

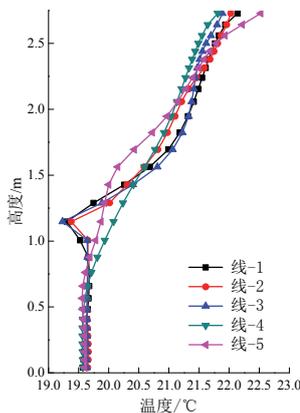
Fig.6 Contour of temperature

图6为两种送风方式下,在 $x=2.7\text{ m}$ 截面和 $y=2.1\text{ m}$ 截面上的温度分布图.由图比较可以看出,层式通风在送风口附近区域温度较低,随着送风的延伸,温度逐渐升高,新风冷气流形成层状气流,总体上气流在下部区域温度较低,上部空间温度较高,具有一定的分层现象;从图中可以看出,竖壁贴附射流加导流板的送风方式在导流板下面形成了一个较厚的空气湖,导流板的作用的将竖壁贴附射流的空气湖整体提升了一个高度,使得建筑下部空间气流分布比较均匀,并且新风直接送到呼吸区,新风利用效率比较高,这一点层式送风和竖壁贴附射流加导流板具有相同的效果,而且上下区域温度分布明显说明排除热能力较好.

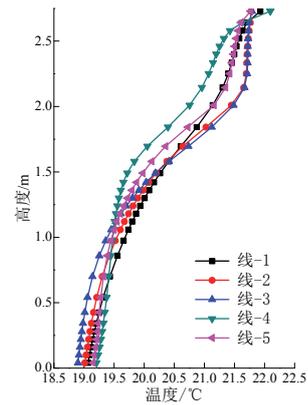
2.2 温度分析

图7为两种送风方式的温度梯度,由图7(a)和(b)可以看出,两种送风方式的温度曲线走势基本相同,都是随高度增加而增大,这是室内热源所起到的作用,空气被热源加热上升,使得上部空间温度较高.从图7(a)可以看出,在竖壁贴附射流加导流板送风中,线1、2和3的温度在1.1 m高度处发生了突变,温度突然变小然后又升高到原来的轨迹上,这是因为线1、2和3在导流板附近,竖壁贴附射流的新风温度低,碰撞当导流板上射流方向发生改变,沿着导流板蔓延展开,因此线1、2和3在该处检测到的温度才会偏离原来的方向而发生改变.

从图8可以看出,在1.1 m以下,层式送风的温度小于竖壁贴附射流加导流板送风,并且温度梯度较大,竖壁贴附射流加导流板送风在该区域内温度几乎不变,分布较均匀,这说明在工作区域竖壁贴附射流加导流板送风室内舒适性更高.1.1 m高度处竖壁贴附射流加导流板送风的温度曲线拐点是由于送风由新风直接经导流板导流送入,使得该区域温度较低,在炎热的夏季,可以给室内人员带来明显的凉爽感.



(a) 竖壁贴附呼吸区送风



(b) 层式送风

图7 垂直向温度梯度

Fig.7 Temperature gradient of vertical direction

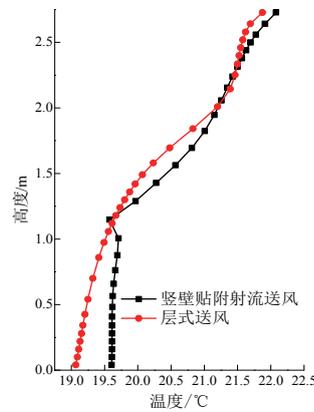


图8 两种送风方式温度随高度变化图

Fig.8 Temperature changes with height of both ventilation modes

2.3 速度场分布

图9为两种送风方式在 $x=2.1\text{ m}$ 截面和 $y=2.1\text{ m}$ 截面的速度分布.从图9(a)竖壁贴附射流加导流板送风速度分布图中可以看出,房间上部区域和下部区域速度几乎无变化,除了集中热源周围区域速度是 0.1 m/s ,其它的均稳定在 0.05 m/s ,而竖壁射流经导流板碰撞形成的中部送风经过的区域,风速变化明显,风速偏大,易产生吹风感,距竖壁 1 m 处为 0.5 m/s ,距竖壁 2 m 处为 0.3 m/s ,因此,采用这种送风方式时应充分考虑送风速度与室内办公座椅的布置位置,避开射流直接到达的区域.从图9(b)速度分布图看出,层式通风送风直接由布置在房间垂直墙壁上呼吸区高度的风口送入,新风直接到达呼吸区,在下部区域速度大部分为 0.1 m/s ,上部区域风速稳定在 0.05 m/s .两种送风新风均由房间中部进入,遇热源加热周围的空气形成的热羽流相互叠加,一部分射流向上,另一部分向下,向上的部分气流有助于排除室内的热量,向下的气流有助于冲散热源周围的热量.

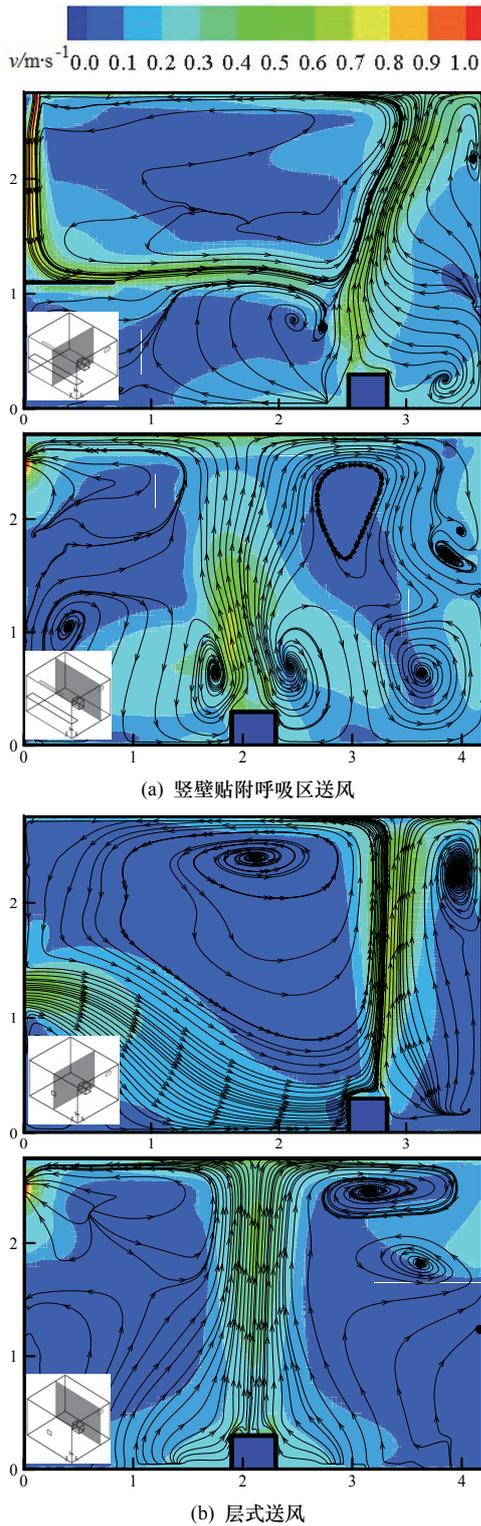


图9 速度分布图
Fig.9 Contour of velocity

2.4 速度分析

图10为两种送风方式的温度梯度图。从竖壁贴附射流加导流板送风速度随高度变化图看出,在1.1 m以下区域,距离竖壁较近的线1、2和3速度几乎没有变化,温度在0.05 m/s,距离热源较近的线4和5温度先增大后又减小。这是由于距离竖壁越近,受到导流板的影响就越大,竖壁射流撞击到导流板后

送风方向发生改变,沿导流板方向水平扩散,因此,在1.1 m到1.4 m的区域内,线1、2和3的速度发生较大的变化,最大速度可达到0.4 m/s,可以使得新风更大范围的送到呼吸区内;热源附近的线4和5的温度随高度变化曲线,主要是因为热源羽流的作用,热源加热附近的空气上升形成负压,周围气流压力相对变大就会流向热源附近流动,进而在热源附近形成速度比较大绕流。从层式送风速度随高度变化图可以看出,在排风口高度(2.5 m)以下,整个空间速度几乎稳定在0.05 m/s,这说明层式送风室内空气流均匀性良好。

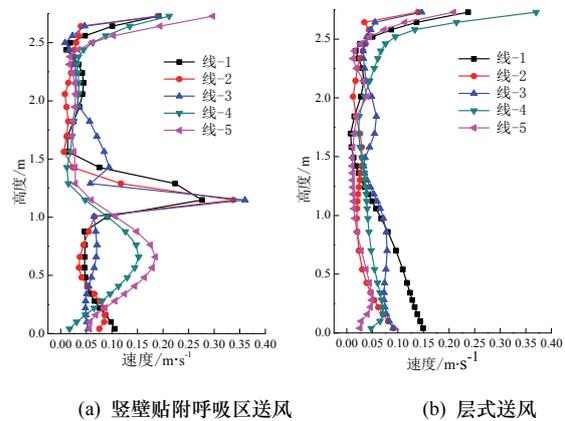


图10 垂向速度梯度
Fig.10 Velocity gradient of vertical direction

图11可以看出,层式送风在1.1 m以下速度在0.05~0.1 m/s之间,速度从下往上呈递减,这主要是由于室内存在集中热源的缘故,1.1~2.5 m高度之间速度很小,约为0.025 m/s。竖壁贴附射流加导流板送风在1.1 m高度以下速度在0.05~0.1 m/s,并呈递增现象,在1.1~1.4 m高度上,速度瞬间变大,这是由于加导流板的作用,使得该高度气流速度较大,有利于新风充分扩散到整个呼吸区,但过大的风速容易产出吹风感,设计时应充分考虑。

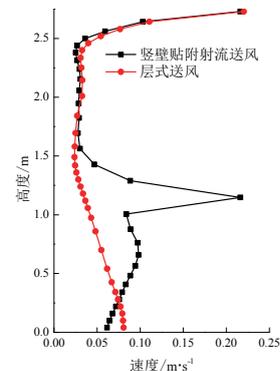


图11 两种送风方式速度随高度变化图
Fig.11 Velocity changes with height of both ventilation modes

3 空气品质评价指标分析

3.1 头脚温差

工作区的头脚温差是衡量人体热舒适性的一个标准. 为了满足人员工作区的热舒适性要求, 保证室内空气品质, 设计标准要求^[11]:

$$\text{坐姿头脚温差: } \Delta t_{1.1-0.1} \leq 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{站姿头脚温差: } \Delta t_{1.8-0.1} \leq 3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

表1是两种送风方式在相同送风量和相同负荷条件下坐姿时和站姿时的头脚温差, 从表中数据可以看出, 不管是坐着还是站着时, 竖壁贴附呼吸区送风和层式通风形成的室内气流组织流场头脚温差都很小, 完全满足设计标准要求的头脚温差, 可见这两种送风方式在工作区形成的空气品质是非常良好的.

表1 两种送风方式下头脚部位温差

Tab.1 Temperature difference between the head and foot part for both ventilation modes

两种送风方式	坐姿头脚温差 $\Delta t_{1.1-0.1} / ^\circ\text{C}$	站姿头脚温差 $\Delta t_{1.8-0.1} / ^\circ\text{C}$
层式通风	0.06	0.18
竖壁贴附呼吸区送风	0.03	0.16

3.2 通风(温度)效率^[8]

通风效率是表示送风排除室内污染物的能力指标. 排除室内过余热量的效率也可称为温度效率 E_T , 其倒数为热分布系数 m , 由三个最重要的温度决定, 即送、排风温度 t_0 、 t_E 及工作区温度 t_w , 即

$$E_T = \frac{t_E - t_0}{t_w - t_0} \quad (1)$$

或
$$m = \frac{t_w - t_0}{t_E - t_0} = \frac{1}{E_T} \quad (2)$$

虽然 E_T 只是一个直接以温度值表示的性能参数, 然而由于它与其他的一些参数之间有某种关联性, 也可以评价其他如热污染源的污染物分布, 因此可以说通风效率是评价通风方式优劣的重要指标. 从上面的公式可以分析得出, 适当的降低送风温度, 尽可能的提升排风温度, 就可以得到较高通风(温度)效率. 表2是竖壁贴附呼吸区送风和层式通风两种送风方式的通风(温度)效率. 竖壁贴附射流呼吸区送风与层式送风的通风效率相差不多, 两种送风的通风效率都比较高.

3.3 不均匀系数

不均匀系数是评价气流不均匀程度的参数指标, 它是通过计算工作区温度和速度的分布均匀程度来进行评价室内空气品质的^[12]. 表3是两种送风方式分别在工作区脚踝高度处(0.1 m)、坐姿高度处(1.1 m)和站姿高度处(1.8 m)的温度和速度不均匀系数. 在0.1 m高度平面, 层式送风的温度和速度不均匀系数都比竖壁贴附呼吸区送风的大, 表明在脚踝处竖壁贴附加导流板呼吸区送风温度和速度分布比较均匀, 但两种送风的温度不均匀系数在 10^{-3} 数量级别上, 说明在靠近地面处两种送风温度分布都较均匀; 在1.1 m高度平面, 竖壁贴附呼吸区送风的温度和速度不均匀系数都比层式送风的大, 这说明在坐姿高度, 竖壁贴附呼吸区送风温度和速度变化比较明显, 在炎热的夏天, 会更容易给人员带来凉爽感; 在1.8 m高度平面, 温度不均匀系数竖壁贴附呼吸区送风比层式送风大, 速度不均匀系数层式送风比竖壁贴附射流呼吸区送风的大, 但两种送风方式在该高度处不均匀系数相差都不大, 而且不均匀系数本身也很小, 说明站姿高度处两种送风分布都比较均匀.

表2 两种送风方式下通风效率

Tab.2 Ventilation efficiency of both ventilation modes

两种送风方式	送风温度 $t_0 / ^\circ\text{C}$	排风温度 $t_E / ^\circ\text{C}$	工作区平均温度 $t_w / ^\circ\text{C}$	通风(温度)效率 E_T	热分布系数 m
层式通风	16	21.65	20.44	1.27	0.79
竖壁贴附加导流板呼吸区送风	16	21.85	20.87	1.20	0.83

表3 两种送风方式下不均匀系数

Tab.3 Uniformity coefficient of both ventilation modes

两种送风方式	温度不均匀系数 k_t			速度不均匀系数 k_u		
	$z=0.1 \text{ m}$ 平面	$z=1.1 \text{ m}$ 平面	$z=1.8 \text{ m}$ 平面	$z=0.1 \text{ m}$ 平面	$z=1.1 \text{ m}$ 平面	$z=1.8 \text{ m}$ 平面
层式通风	0.007 2	0.005 2	0.011 3	0.775 2	0.532 9	0.710 7
竖壁贴附加导流板呼吸区送风	0.002 1	0.010 9	0.018 1	0.396 8	0.868 0	0.566 0

4 结论

本文研究了竖壁贴附射流加导流板对流场的影响,并与层式呼吸区送风方式做了比较,得出以下结论:

(1) 风口布局方面,层式送风口布置在垂直墙壁中部,往往不利于送风管道的布置,且占用建筑空间较大,在安装方面有一定的局限性.如果采用竖壁贴附导流板呼吸区送风气流组织,可以通过竖壁贴附射流加导流板(送风口布置在屋顶)实现,后者充分利用建筑上空间,利用导流板可以达到与层式送风将新风直接送到呼吸区内同样的效果,但克服了层式送风口布置的工程局限性.

(2) 温度场方面,层式送风系统在送风口高度以下空间,射流区域温度变化明显,房间1.5 m以下区域,温度在18~20 °C,房间上部区域有一定的分层现象.竖壁贴附射流加导流板送风在导流板下部区域形成厚厚的一层空气湖,温度稳定在20 °C,热舒适性较高;在上部区域,同样形成明显类似于置换通风的分层现象.

(3) 速度场方面,层式送风系统和竖壁贴附射流加导流板送风系统射流影响区域速度变化都比较大,房间上下区域速度变化小,人体呼吸区域容易造成吹风感,因此在设计应选择计算合适的送风速度.建议导流板处的控制风速应在0.3~0.5 m/s.

(4) 空气品质评价指标方面,层式送风系统和竖壁贴附射流加导流板送风系统的头脚温差、通风效率和工作区三个重要高度工作面温度和速度不均匀系数都比较接近,两种送风方式形成的室内品质在工作区满足人员热舒适性要求.

参考文献 References

[1] WARGOCKI P, WYON D P, SUNDELL J, et al. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome(SBS) symptoms and productivity[J]. *Indoor Air*, 2000, 10(4): 222-236.

- [2] WARGOCKI P, WYON D P, BAIK Y K, et al. Perceived air quality, sick building syndrome(SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads[J]. *Indoor Air*, 1999, 9(3): 165-179.
- [3] ASHRAE. 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE, Inc., 2001: 26.
- [4] YIN H, LI A. Airflow characteristics by air curtain jets in full-scale room[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19: 675-681.
- [5] 尹海国. 条缝型送风口形成的竖壁贴附射流模式气流组织特性研究及设计方法初探[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
YIN Haiguo. Study on Design Procedures of Air Distribution by Air Curtain Ventilation with A Linear Slot Diffuser[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2013.
- [6] LIN Z, CHOW T T, TSANG C F. Stratum ventilation: a conceptual introduction[C]//Proceedings of the 10th international conference on indoor air quality and climate, Beijing, China, 2005: 4-9.
- [7] NIELSEN P V. Fifty years of CFD for room air distribution[J]. *Building and Environment*, 2015, 91: 78-90.
- [8] 赵鸿佐. 室内热对流与通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHAO Hongzuo. Indoor heat convection and ventilation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] GILANI S, MONTAZERI H, BLOCKEN B. CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis[J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 299-313.
- [10] 崔伟峰. 一种新型通风方式: 体热源影响下条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式2DPDV实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
CUI Weifeng. A new type of ventilation: 2DPDV studies of air curtain ventilation in a slot-ventilated outlet: Volumetric heat source condition[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2010.
- [11] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2版. 中国建筑工业出版社, 2008.
LU Yaoqing. Practical heating air conditioning design handbook [M]. 2nd ed. China Building Industry Press, 2008.
- [12] 陈晨, 连之伟, 铃木智博, 等. 嵌入式空调室内机气流组织分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(2): 230-233.
CHEN Chen, LIAN Zhi-wei, TOSHIHIRO Suzuki et al. Air distribution analysis of ceiling-mounted cassette type indoor unit[J]. *Journal of Donghua University(Natural Science)*, 2008, 34(2): 230-233.

(编辑 桂智刚)