



寒冷地区冬季自然通风时段选择优化分析

王 焱^{a,b}, 王靖文^a

(兰州交通大学 a. 环境与市政工程学院; b. 铁道车辆热工教育部重点实验室, 兰州 730070)

摘要:为获得最优的冬季自然通风时段,以兰州地区某地板供暖民用住宅为研究对象,考虑围护结构对室外温度波的衰减和延迟效应,得到建筑围护结构的等热流边界条件。在此基础上,采用 FLUENT 软件对不同通风时段的室内污染物浓度场进行了数值分析,结果表明:同一开窗方式时,不同时间段的通风时长不同,不同进风温度对室内污染物的时空分布及迁移特性影响显著,综合考虑污染物排除效果及舒适性,发现 17:00 时开始通风为最优通风时段。

关键词:自然通风;非稳定传热;通风效率;优化

中图分类号:TU832 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0101-08

Optimization analysis of the period of time of natural ventilation in winter in cold zone

Wang Ye^{a,b}, Wang Jingwen^a

(a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering, Ministry of Education of China, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: In order to find out the optimal period of time of natural ventilation in winter, the realizable $k-\epsilon$ turbulent model of CFD is adopted to numerically analyze the pollutant concentration field in a residence in Lanzhou when the unsteady heat transfer through outerwalls is considered. The results indicate that the inlet temperature has significant effect on the indoor pollutants profile and migration, and different ventilation period corresponds to different duration under the same opening patterns. Considering the pollutants elimination efficiency and thermal comfort simultaneously, the ventilation beginning at 17:00 is the optimal ventilation mode.

Key words: natural ventilation; unsteady heat transfer; ventilation efficiency; optimization

随着经济的发展,人们对室内空气品质的要求不断提高。自然通风由于具有控制室内污染物浓度水平、改善室内空气品质、调节室内热环境等功能,并且具有“节能、环境效益好”等优点,越来越受到人们的重视。文献[1]对某教学楼办公室在秋季利用

热压和风压共同作用下的自然通风与室内污染物排除效率关联性进行了数值和实验研究。文献[2]对不同污染源散发条件下的自然置换通风进行了实验研究,结果表明:室内外温差较大时有利于污染物的排出。文献[3]实验研究了重庆某建筑夏季自然通

收稿日期:2015-06-29

基金项目:国家自然科学基金(51266004,51476073);甘肃省自然科学基金(1308RJZA151)

作者简介:王焱(1972-),男,教授,博士,主要从事暖通空调、强化传热研究,(E-mail) wangye@mail.lzjtu.cn。

Received:2015-06-29

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51266004, 51476073); National Natural Science Foundation of Gansu Province of China (No. 1308RJZA151)

Author brief: Wang Ye (1972-), PhD, professor, main research interests: heating ventilation and air conditioning, heat transfer enhancement, (E-mail) wangye@mail.lzjtu.cn.

风对室内污染物排除效果、室内温度、湿度的影响关系。文献[4]对德国法兰克福办公楼的通风监测数据表明:冬季通风时间超过全天时间的 10%~25%,会使冬季的能量消耗增加。文献[5]对印度复杂气候条件下自然通风效果进行了仿真模拟,发现在夏季改变开窗策略可以提高 13%的热舒适度,夜间通风显著改善了室内热舒适性,但冬天只能利用白天通风,而且难以保证室内的热舒适性。文献[6]对意大利 4 000 名学生在冬季和夏季待在教室时的主观热感觉进行了调查研究,结合客观的自然通风条件给出了地中海气候 PMV 的预期因子的建议值。以上研究工作主要是针对夏季或者过渡季展开的。而寒冷地区冬季气温低、昼夜温度波动大,如何合理利用自然通风的优越性来达到既改善室内空气品质又不影响居住者的舒适性这一目标,是在寒冷地区实施自然通风的前提。而生活在同一热工分区的居住者,由于起居习惯、生活规律等存在差异,他们选择开窗通风的时间段也必然有所不同。目前,关于寒冷地区冬季自然通风时段的选择研究,还未见报道。本文以兰州某民用住宅为研究对象,试图通过自然通风数值试验,探寻适合寒冷地区气候特征的冬季自然通风最优时段。

1 物理模型和数学模型

1.1 物理模型

所研究住宅物理模型如图 1 所示。位于 8 层建筑的中间楼层,结构尺寸为: $X \times Y \times Z = 10.5 \text{ m} \times 13.2 \text{ m} \times 2.9 \text{ m}$ 。其中,1#为客厅与餐厅,2#、3#、4#为卧室。C1、C2 为北外窗,C3、C4 为南外窗。外墙传热系数 $K = 0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。推拉式窗户传热系数 $K_c = 2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。室内采用地板供暖。

1.2 数学模型

采用标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型以及 Realizable $k-\epsilon$ 模型分别对文献[7]的通风过程进行了数值计算,并将数值结果与文献[7]的实验结果进行了比对。结果表明:Realizable $k-\epsilon$ 模型计算结果和实验结果吻合度最好。所以,选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型进行模拟。自然通风下室内气流运动属于非稳态湍流流动,与组分输运方程具有相同的形式^[8],其通用控制方程形式均可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi \quad (1)$$

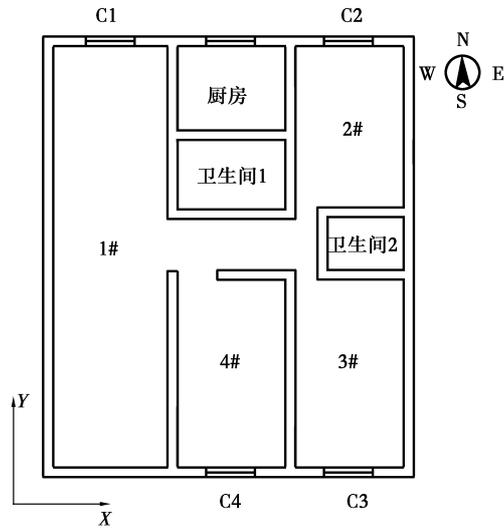


图 1 计算房间平面示意图

Fig. 1 Physical model of the calculating room

式中: φ 为通用变量,分别表示 $u, v, w, T, k, \epsilon, \tau_p$ 。方程中各系数列于表 1。

表 1 控制方程中各系数的确定

Table 1 Coefficients definition of the governing equations

φ	Γ_φ	S_φ
连续性方程	0	0
u	$\mu + \mu_t$	$-\partial p / \partial x$
v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \rho g$
w		$-\partial p / \partial z$
T	$\mu / Pr + \mu_t / Pr_t$	S_T
k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$G_k + P_k - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon$	$(c_{\epsilon 1} G_k + c_{\epsilon 3} P_k - c_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \epsilon / k$
τ_p	$\mu + \mu_t / \sigma_\tau$	ρ

注: $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \epsilon$; c_μ 为经验常数; Pr_t 为能量方程中的湍流普朗特数; σ_k 为湍流动能方程中的普朗特数; σ_ϵ 为湍流动能耗散率方程中的普朗特数; σ_τ 为组分输运方程中的普朗特数。

湍流动能剪切项:

$$G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

湍流动能浮升力产生项: $P_k = -\frac{\mu_t g \beta}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z}$, 湍流粘性 $\mu_t = c_u \rho k^2 / \epsilon$, 热膨胀系数 $\beta = 1 / (T_{ref} + 273.15)$, 参考温度 T_{ref} 取房间 1.1 m 高度水平面上中心点温度值。

方程中各系数取值^[9]: $c_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2, Pr_t = 1.0, \sigma_\tau = 1.0, c_2 = 1.9$ 。

$$c_1 = \max\{0.43, \tilde{\eta} / (5 + \tilde{\eta})\}, \tilde{\eta} = Sk / \epsilon,$$

$$S = (2S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}, S_{i,j} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2.$$

为简化计算, 假定: 室内空气不可压缩, 密度的变化采用 Boussinesq 假设, 忽略流体粘性力做功而引起的耗散热, 室内空气为辐射透明介质, 不参与辐射换热。

1.3 边界条件

1) 入口边界: 综合 IWEC(美国国家气象数据中心) 和 CSWD(清华大学和中国气象局) 所提供兰州冬季气象参数, 兰州在冬季以北风为主导风向, 故本文以北外窗 C1、C2 为计算区域的流动入口边界; 11 月的月平均风速最小, 两种统计结果均为 0.2 m/s, 3 月份风速最大, 两种统计结果均为 1.2 m/s。前期研究表明: 取 1.2 m/s 进风速度不能同时满足室内采暖温度和污染物浓度要求, 故本文进风速度取 0.4 m/s; 进风温度取不同通风时段内的室外平均温度。

2) 出口边界: 排风口 C3、C4 设为自由出流边界条件^[10]。

3) 壁面边界: 气固交界面的空气流动取速度无滑移条件。

4) 热边界设置: 采用非稳定传热方法得到不同通风时段通过围护结构的热流密度平均值, 以此为围护结构的热边界条件。具体数值见表 2。室内采暖热负荷均由地板提供, 设为定热流边界条件, 根据文献[11]设定地板的热流密度为 45 W/m²。内墙、天花板均设为绝热边界。

5) 污染源条件设置: 来自地板的污染物 C₇H₈。假定其沿地板外法线方向向上均匀散发, 根据文献[12]对室内 C₇H₈ 允许浓度规定, 结合散发时长以及房间体积, 可求得散发速率为 5 × 10⁻⁹ kg/s。选用层流模型模拟了污染物的扩散过程(限于篇幅, 扩散过程另文讨论)。结合人们冬季开关窗的习惯, 对计算房间密闭情况下污染物散发 15、17、19、21 h 后的室内污染物浓度场分别作为 4 个通风时段自然通风

数值模拟的初始条件。

表 2 围护结构热流密度

Table 2 Heat flux of the building envelopes

(W · m⁻²)

围护结构	时 间			
	11:00	13:00	15:00	17:00
东墙	8.26	8.09	7.87	7.62
西墙	8.44	8.39	8.16	7.77
南墙	8.00	7.81	7.44	7.00
北墙	8.65	8.59	8.38	8.07
南窗	20.68	12.45	16.32	30.75
北窗	33.29	25.62	24.39	31.46

2 数值求解方法

2.1 网格划分及独立性验证

采用六面体结构网格对计算区域进行离散。考虑进、排风口处流动参数的高梯度变化, 对这些区域的网格进行了局部加密。分别采用 3 套网格(网格数分别为 520 590、672 138 和 868 434)进行了数值试验, 所得(X=8.98 m, Y=3 m)处的速度和温度计算结果均吻合得很好, 说明本文所得解是网格独立性的。考虑计算的经济性, 决定选用 672 138 作为后续计算的网格数。

2.2 数值方法

采用有限体积法对控制方程(1)进行离散; 应用 SIMPLE 算法求解速度/压力耦合问题^[12]; 梯度项方程采用 Green-Gauss Cell Based 格式离散; 动量方程、能量方程、湍流动能方程、湍流动能耗散率方程、组分输运方程均采用二阶迎风格式离散。

2.3 模拟工况及收敛准则

2.3.1 工况确定 为了确定合理的通风工况, 规定同时满足: 通风 1 h 后距地面 1.1 m 高度水平面(规定为工作区高度)上温度的平均值不低于 16.0 °C 和该平面上污染物浓度不高于文献[13]的要求值 2.17 × 10⁻⁹ kmol/m³, 并且, 地面上方 0.1 m 到 1.1 m 间的竖向温差不大于 3.0 °C, 则认为该工况是可行的自然通风工况。据此, 对进风温度为 0 °C, 进风速度为 0.4 m/s, 与不同进、排风口开启度组合, 形成的多工况进行了数值试验, 结果表明: 窗户 C1、C2、C3 的开启度均为 0.1 m 宽(关闭窗户 C4)时为最佳通风工况。为对比分析不同通风时段的室内相

关参数分布,采用这一窗户开关方式,增加另外 3 个通风时段的起始时刻分别为 13:00、15:00、17:00,从而组成 4 个对比通风工况,如表 3 所示。各工况通风时长的确定过程如图 2 所示。

表 3 自然通风模拟工况

Table 3 Simulation cases of natural ventilation

相关参数	工 况			
	1	2	3	4
通风起始时刻	11:00	13:00	15:00	17:00
通风时长/min	51.0	54.6	56.8	58.6
进风温度/°C	0	3.88	4.85	3.06
进风速度/ (m·s ⁻¹)	0.4			
窗户开关情况	C1、C2、C3 均开 0.1 m 宽,C4 关闭			

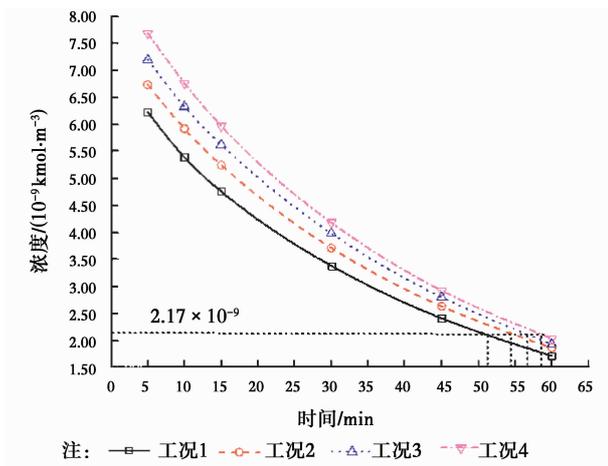


图 2 各工况通风时长确定

Fig. 2 Ventilation time decision of the 4 cases

2.3.2 收敛准则 计算中,同时满足以下条件,认为计算已收敛:

- 1) 连续性方程及动量方程残差设为 10^{-3} ;
- 2) 能量方程求解残差设为 10^{-6} ;
- 3) 监视位置气流参数不再波动;
- 4) 进出口流体质量守恒。

3 计算结果及分析

3.1 通风效率分析

一般利用工作区的通风效率来评价室内污染物的排除效果,其定义式如式(2)所示。

$$\eta = \frac{C_p - C_s}{C_g - C_s} \quad (2)$$

式中: η 为通风效率; C_g 为工作区平均浓度,

kmol/m^3 ; C_p 为排风口浓度, kmol/m^3 ; C_s 为进风口浓度, kmol/m^3 。

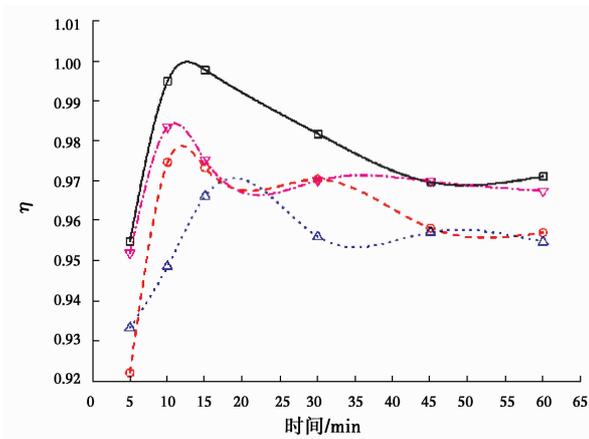
对工况 1~4,统计不同通风时长 $Z=1.1 \text{ m}$ 平面上的 C_7H_8 平均浓度作为工作区污染物平均浓度,同样的方法得到排风口对应时长的污染物平均浓度 C_p ,进入室内的新风中认为不含有 C_7H_8 ,所以,取 $C_s=0$ 。据此得到 4 种工况下的通风效率,如图 3(a) 所示。可以看出,4 种工况的通风效率随时间呈现出类似的变化趋势:通风开始的 10~15 min 内通风效率迅速上升,接着缓慢下降,最后趋于微弱的水平波动,数值均在 0.95~1.0 之间波动。这是因为通风开始时,房间内 C_7H_8 分布较均匀,随着通风的持续进行, C_7H_8 浓度出现分层现象, $Z=1.1 \text{ m}$ 水平面上的 C_7H_8 面平均浓度下降趋势因此变缓,从而导致排风口的 C_7H_8 平均浓度下降速率比 $Z=1.1 \text{ m}$ 水平面上的 C_7H_8 面平均浓度下降速率大。但总体上,工况 1 的通风效率要高于其他各工况的值,通风 40 min 后,工况 1 与工况 4 的通风效率趋于一致,而工况 2 和工况 3 的通风效率趋于一致。图 3(b)为各工况通风结束时的排污效率比较,也印证了这一点。这说明虽然同样的开关窗情况对应相同的气流运动路径,但由于各工况进风温度不同、室内原有的污染物浓度的空间分布不同,导致了冷热气体的热质交换过程也必然不同。温度梯度与浓度梯度的双重作用,使得自然通风中流场、温度场、污染物浓度场之间的耦合效应与排污效率之间的关联性得以体现。

3.2 污染物浓度场分析

下面给出 2.3.1 节所确定的工况 1~4 通风结束时的模拟结果。

图 4 为不同工况时客厅进风窗口中轴线 ($X=1.15 \text{ m}$) 纵截面上 C_7H_8 浓度分布。可以看出,3 个工况表现出了相似的污染物分布特征:自地面朝天板方向, C_7H_8 浓度由低到高呈层状分布,地面附近区域 C_7H_8 浓度梯度较大。这是因为温度较低的室外新风进入房间后,沿窗台下内墙壁形成下降气流,与地板附近的热空气相遇后,便朝远离窗口的方向运动,沿地面形成“冷气湖”,其厚度自北向南逐渐变薄,地面附近的污染物同时被稀释。在人员活动区高度范围内,工况 1 和工况 4 的污染物浓度均未超过文献[13]规定的上限值,工况 2 和工况 3 有局部区域污染物超标现象,而且,在天花板的北部区域有大面积污染物滞留现象。这是因为在密度差形成

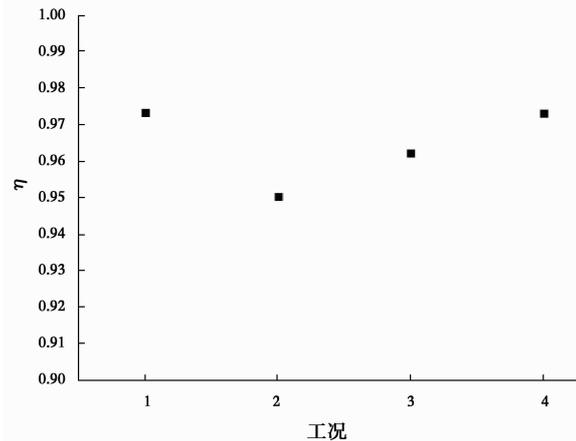
的浮升力作用下,污染物随着自然对流边界层的运动,在北外墙 upper 部和天花板所成的角落处形成了聚集,导致该区域污染物浓度偏高。



注: —■— 工况1 —○— 工况2 —△— 工况3 —▽— 工况4

(a) 通风效率随通风时长变化

(a) ventilation efficiency varies with time



(b) 通风结束时通风效率比较

(b) comparison of the ultimate ventilation efficiency

图 3 通风效率变化曲线

Fig. 3 Ventilation efficiency profile

图 5 为不同工况时 $Y=3\text{ m}$ 横截面(包含了 3# 房间、4# 房间以及客厅部分区域)上的 C_7H_8 浓度分布。可以看出,1# 房间西墙和北墙形成的角落处有污染物滞留现象,这是因为进入室内的冷气流自北朝南的运动导致该角落处产生了回流。但各工况下 1# 房间内污染物浓度均未超标。2# 房间内的污染物浓度最低,4# 房间次之,但各房间内污染物浓度均未超标。3# 房间内的污染物浓度梯度较 1# 和 2# 房间复杂,工况 2 和工况 3 时,在 3# 房间上部区域有较大范围的污染物集聚现象,这是由涡流区以及热滞留所致。总体上,该截面上人员活动区的污染物浓度在各工况下均未超标。

图 6 为不同工况时 $Z=1.1\text{ m}$ 水平面上的 C_7H_8

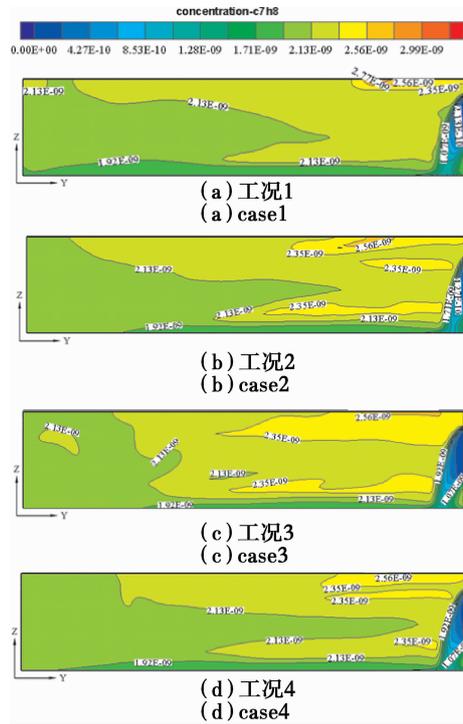


图 4 $X=1.15\text{ m}$ 截面 C_7H_8 浓度场

Fig. 4 C_7H_8 concentration profile in $X=1.15\text{ m}$ section

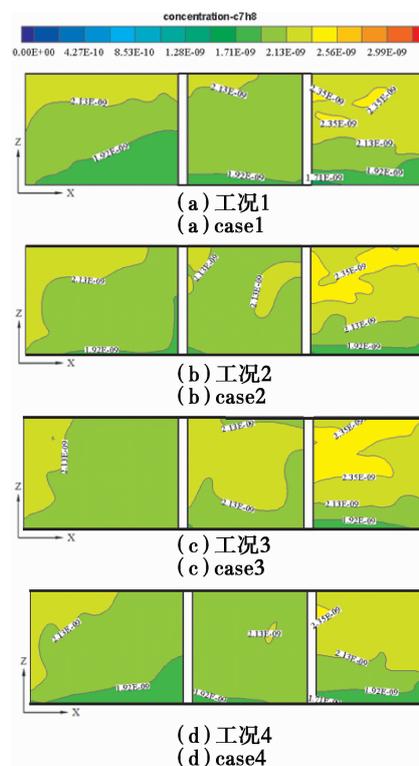


图 5 $Y=3\text{ m}$ 截面 C_7H_8 浓度场

Fig. 5 C_7H_8 concentration profile in $Y=3\text{ m}$ section

浓度分布。可以看出,各工况下客厅 C_7H_8 浓度分布表现出了较一致的特征:靠近客厅西墙附近区域

C₇H₈ 浓度较高,沿着墙体呈带状分布。这是因为室外的低温气体进入室内后,绝大部分很快下沉并与地面附近的污染物进行热质交换,只有少部分气体在客厅西北角落处形成了回流区,与主流区新鲜空气的热质交换远不及其他区域充分。所以,随着低温气体自北朝南方向运动,有一部分污染物便被“压制”在了回流区及客厅西墙附近区域^[14]。客厅绝大部分区域空气质量符合文献^[13]要求,工况 4 时客厅的空气质量明显要优于其他 3 个工况。各工况下,2#房间内污染物的分布差异显著:工况 1 时 2#房间内污染物分布均匀,均未超标,只是在该房间的东南角处有小范围超标;工况 2 和 3 时,2#房间有近一半面积的污染物集聚并超标;工况 4 时,在 2#房间靠近门有小范围污染物集聚并超标。这是因为工况 1 和工况 4 的进风温度要低于工况 2 和工况 3 的进风温度,2#房间的门使过流断面突然缩小引起流场结构变化,从而对污染物迁移产生影响,但这一影响远不及温度场对污染物浓度场影响。3#房间作为各工况通风的唯一出流通道,对于污染物的时空分配起着重要作用,其污染物浓度梯度也最为复杂。在北墙内侧不同范围的污染物集聚可能与温度场以及该区域的回流对污染物扩散过程影响有关,但各工况下 4#房间内污染物浓度均未超标。

3.3 舒适性评价

舒适性是居住者对客观环境的主观反映,是室内流场、温度场、相对湿度以及居住者自身条件综合作用的结果。图 7 给出了工况 1~4 沿房间高度不同水平面上的舒适性评价结果。

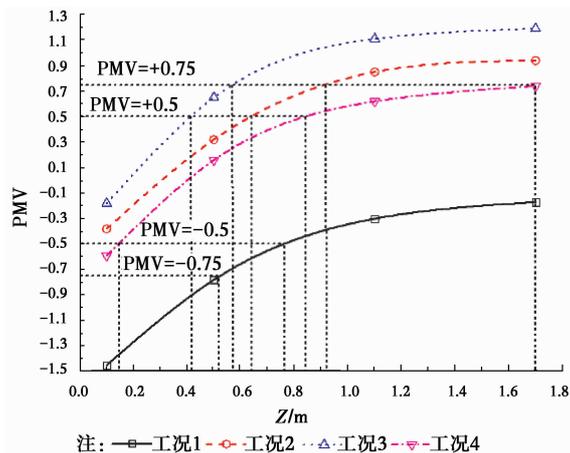


图 7 PMV 平均值沿房间高度变化曲线

Fig. 7 Average value of PMV in vertical direction

可以看出,4 种工况的舒适性表现出了相似的变化规律:PMV 值沿房间高度方向逐渐增大,这主要是室内温度分层所致。根据 PMV-PPD 的热舒适评价指标及 ISO7730 标准规定:以 PPD $\leq 10\%$ 为设计依据^[15],即 90% 以上的人感到满意的热环境为热舒适环境,此时,对应的 PMV = -0.5~+0.5。但考虑中国的实际经济状况,一般计算时都将该值放宽至 PPD $\leq 20\%$ ^[16],此时,对应的 PMV = -0.75~+0.75。所以,根据中国对舒适性要求的 PMV 值以及文献^[15]中关于热感觉的 7 级标度(-3 冷,-2 凉,-1 稍凉,0 不冷不热,+1 稍暖,+2 暖,+3 热)之规定,工况 1 通风过程的 PMV 值自 0.1 m 至 1.7 m 高度处均小于 0,室内从头到脚整体偏凉;工况 2,在 0.1~0.92 m 高度范围内是舒适的;工况 3,在 0.1~0.58 m 高度范围内是舒适的;工况 4,在 0.1~1.7 m 高度范围内是舒适的,就是说,按工况 4 通风时,居住者从头到脚都是舒适的。工况 1~3 对应的舒适区高度均低于一般建筑室内确定 PMV 值的水平面高度 1.1 m。在 1.1 m 水平面上,工况 1 的 PMV 值为 -0.3,介于“热中性”与“稍凉”之间;工况 2 的 PMV 值为 0.83,“稍暖”;工况 3 的 PMV 值为 1.1,“偏暖”;工况 4 的 PMV 值为 0.62,介于“热中性”与“稍暖”之间。所以,考察 Z = 1.1 m 水平面上的舒适性时只有工况 1 能满足国际

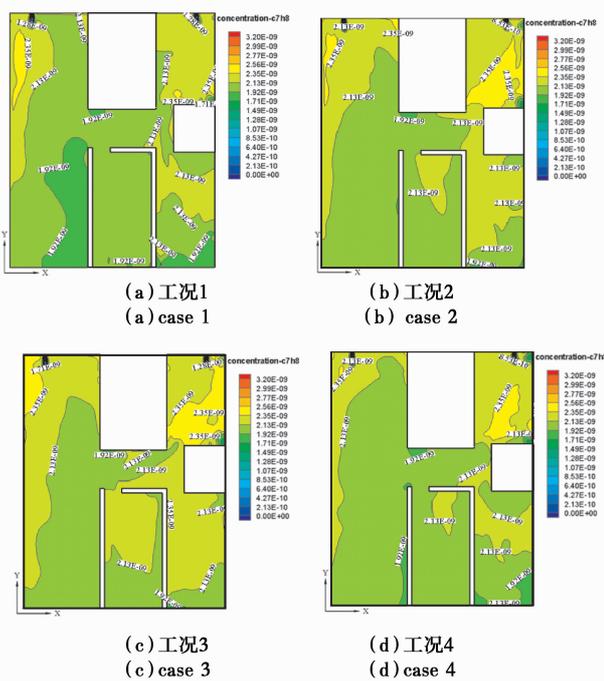


图 6 Z=1.1 m 截面 C₇H₈ 浓度场

Fig. 6 C₇H₈ concentration profile in Z=1.1 m section

上对舒适性要求的 PMV 值,但房间整体偏凉。对于寒冷地区的冬季,居住者却更喜欢待在工况 2、3、4 这样“偏暖”的室内。实际上,冬季室内温度偏低,反而有利于抑制污染物的释放^[17]。

综上所述,工况 1、2、4 均能满足符合我国实际的舒适性要求,工况 4 的舒适度最好。

3.4 最佳通风时段确定

自然通风是将当地气候条件和居住者的生活习惯紧密结合的一种改善室内空气品质的措施。上文关于排污效率和舒适性评价的讨论得到了这样一个结论:感觉舒适的环境未必对健康有利,反之亦然。从图 3(a)可以看出,工况 1 整个通风过程的排污效率均是最高,工况 4 次之,工况 3 最低。从图 3(b)可以看出,通风结束时,工况 1、4 的排污效率相当,均高于其它工况。综合通风过程的排污效率变化以及室内舒适性评价结果,工况 4 为最佳通风时段。居住者如果能通过改变衣着来适应室内偏凉的环境,工况 1 也是比较理想的通风时段。

4 结 论

以兰州某民用住宅为研究对象,采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型对冬季自然通风时室内污染物浓度场进行了数值分析,得到了如下主要结论:

1) 寒冷地区冬季自然通风可以在不同时段进行,但每一时段的通风时长存在差异。

2) 不同通风时段的排污效率随时间呈现出了相似的变化趋势,但对污染物的排除效果存在差异。相同的开窗方式,进风温度对室内污染物的时空分布有显著影响。

3) 所研究的 4 个通风时段,工况 1、2、4 均能满足符合我国实际的舒适性要求,工况 3 稍偏暖,工况 4 的舒适度最好。结合排污效率指标,17:00 时开窗通风,即工况 4 为最优通风工况。

4) 本文是针对特定结构建筑在特定气候条件下寻求不同通风时段的通风模式、实现室内空气质量动态化改善的初步探索,后续研究将会考虑更多因素,使得所得通风模式对建筑类型、气候条件、供暖方式等因素具有更好的适应性。

参考文献:

[1] 周怀改. 通风对建筑物室内污染物浓度分布的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
Zhou H G. Effect of ventilation on indoor pollutant

concentration distribution [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)

[2] 杨秀峰. 自然置换通风条件下室内空气污染的演化规律研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
Yang X F. Investigations on the evolution of indoor air pollution in natural displacement ventilation room [D]. Shanghai: Donghua University, 2013. (in Chinese)

[3] 刘庆. 自然通风下门窗开启对室内环境的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Liu Q. Research of indoor environment affected by opening door and window in the condition of natural ventilation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

[4] Schakib-Ekbatan K, Çakıcı F C, Schweiker M, et al. Does the occupant behavior match the energy concept of the building analysis of a German naturally ventilated office building [J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 142-150.

[5] Rajasekar E, Anupama U, Venkateswaran R. Thermal comfort beyond building design. An investigation in naturally ventilated residential apartments in a hot-dry climate [J]. *Advances in Building Energy Research*, 2014, 8(2): 196-215.

[6] d'Ambrosio A F R, Ianniello E, Palella B I. PMV-PPD and acceptability in naturally ventilated schools [J]. *Building and Environment*, 2013, 67: 129-137.

[7] Blay D, Mergui S, Niculae C. Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet [J]. *Fundamentals of Mixed Convection*, 1992, 213: 65-72.

[8] 李先庭, 江亿. 用计算流体力学方法求解通风房间的空气年龄 [J]. *清华大学学报*, 1998, 38(5): 28-31.
Li X T, Jiang Y. Calculating air age in a ventilated room with CFD method [J]. *Journal of Tsinghua University*, 1998, 38(5): 28-31. (in Chinese)

[9] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
Tao W Q. Numerical heat transfer [M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)

[10] 张卓鹏. 广州地区围合式住区室内自然通风研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Zhang Z P. Research on indoor natural ventilation of enclosed residential districts in Guangzhou [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [11] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Lu Y Q. Practical heating air conditioning design manual [M]. Second Edition. Beijing: China Building Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere, 1980: 330-351.
- [13] 中国国家质量检验检疫总局. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 18883—2002 Standards of indoor air quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. (in Chinese)
- [14] 王焯, 张文霞, 胡文婷. 室内环境参数对室外气象参数瞬时变化的动态响应研究[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(3): 8-14.
- Wang Y, Zhang W X, Hu W T. Dynamic response study of the indoor environmental parameters for variable outdoor meteorological conditions [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(3): 8-14. (in Chinese)
- [15] ISO International Standard 7730. Moderate thermal environment determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [S]. Geneva: International Standard Organization, 1984.
- [16] 王昭俊. 严寒地区居室热环境与热舒适性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002: 27-57.
- Wang Z J. Study on indoor thermal environment and thermal comfort of residence in cold area [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2002: 27-57. (in Chinese)
- [17] 徐东群. 居住环境空气污染与健康[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- Xu D Q. Air contamination and health of residential environment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)