

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-001-09

排风口位置对 竖壁贴附射流夜间通风降温效果影响的分析

季文慧 李亚军

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对成都地区气候特征, 开展排风口位置对竖壁贴附射流夜间通风降温效果的分析。选取夏季典型日气象参数进行数值模拟, 针对 $s/b=2$, 送风速度为 4m/s , 分析上部排风和下部排风对室内速度场和温度场的影响。上排风和下排风对竖壁贴附区速度场无明显影响, 但是下排风情况下水平贴附区射流主体性保持较好, 水平空气湖区速度较大。上排风模式下射流沿着壁面继续向上“攀附”一段距离, 对贴附墙体降温效果更好。

【关键词】 贴壁射流; 夜间通风; 排风口位置; 降温效率

中图分类号 TU834.3 文献标志码 A

Analysis of the Influence of the Outlet Position on the Cooling Effect of the Wall-mounted Attached Night Ventilation

Ji Wenhui Li Yajun

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In view of the humid and hot climatic characteristics of Chengdu, the effect of air outlet location on night cooling performance of wall-mounted attached night ventilation was studied. The meteorological parameters of typical summer days were selected for numerical simulation. With $s/b=2$ and air supply velocity 4 m/s , the effects of upper exhaust and lower exhaust on indoor velocity and temperature fields were analyzed. The upper and lower exhaust locations have no obvious influence on the velocity field in the vertical wall attachment zone, but the subjectivity of the jet in the horizontal adhesion zone is kept better under the condition of the lower exhaust, and the velocity in the horizontal air region is larger. With the upper exhaust, the jet continues to "cling" along the wall for a certain distance, which has a better cooling effect on the attached wall.

【Keywords】 Wall-mounted attached ventilation; Night ventilation; Location of outlet; Cooling efficiency

0 引言

夜间通风技术可以实现在适宜的气象条件下, 利用通风气流实现建筑构件的降温, 改善室内热环境, 有利于降低建筑能耗。Stefano 等人^[1]研究了办公建筑应用夜间通风耦合空心板蓄热体对降低夏季冷负荷的效果, 结果表明, 夜间通风和蓄热质的耦合应用可以实现在 70% 的使用时段内办公建筑

室内空气温度低于 28°C 。Givoni^[2]通过实测多栋不同蓄热水平的建筑, 结果表明采用夜间通风可以有效降低重质建筑的室内最高温度。杨柳等人采用气候降温潜力 (CCP)^[3]对我国多个城市进行夜间通风降温潜力的气候适宜性分析, 结果表明, 我国北方大部分地区的 CCP 在 30 到 180 之间, 具有较好的降温潜力, 但是中部和东部地区的 CCP 值在 10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 52108096); 四川省科技计划省院省校合作项目 (编号: 2022YFSY0051)

作者 (通讯作者) 简介: 季文慧 (1990.07-), 女, 博士, 副教授, E-mail: wenhuiji@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-25

到 60 之间，夜间通风降温潜力较低。我国夏热冬冷地区夏季闷热，昼夜温差较小，室外静风率高。龙展图^[4]针对夏热冬冷地区的上海、武汉和南京等几个典型城市在夏季和过渡季节应用夜间通风开展了模拟研究，结果表明，夏热冬冷地区采用夜间通风技术的降温潜力较小，但是在过渡季节仍有一定应用潜力。

夜间通风降温效果的影响因素可归结为三类：气象参数、建筑参数和通风参数^[5]。室外气象参数主要影响昼间建筑得热水平和夜间室外空气温度^[6,7]。建筑的使用特征^[8]、内热源^[9]以及热工参数^[10,11]等对夜间通风的运行环境和蓄热能力影响显著。通风参数主要包括通风时段^[8]、通风形式^[12,13]、通风量^[14]、通风控制策略^[15]。对于通风气流的有效组织，Artmann 等人的研究^[12]表明，不同的夜间通风气流组织模式会对建筑物内表面的对流换热系数产生影响。因此，选用合理的通风方式，可以改善夜间通风的降温效率。

我国夏热冬冷地区夏季闷热，昼夜温差较小，室外静风率高。在该地区的气候条件下，合理的通风方式对提高夜间通风能量利用率尤为重要。作者前期的研究^[16,17]表明，采用通风射流直接作用于墙体内壁面降温的非等温贴壁射流夜间通风方式（见图 1），可以增强送风气流与墙体内壁面的对流换热强度，有助于高效带走墙体蓄热，减少空调能耗。此外，前期已针对送风温度、送风时间段^[18]、送风口位置及送风角度^[19]对非等温贴壁射流夜间通风降温效果的影响。本文将重点分析排风口位置及房间尺度对非等温贴壁射流夜间通风降温效果的影响。

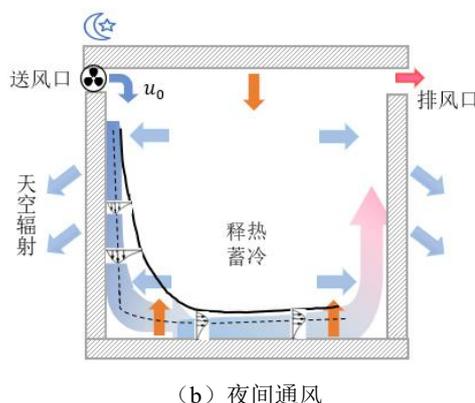
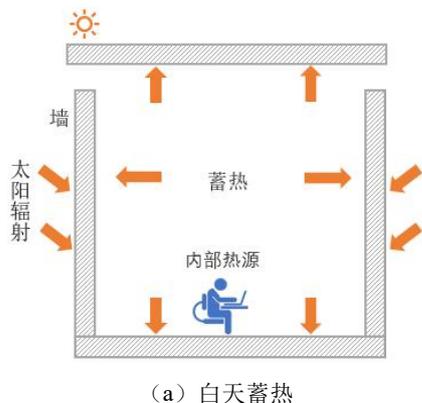


图 1 竖壁贴附射流夜间通风系统原理
Fig. 1 Principle of the WANV system

1 数值计算模型及求解方法

1.1 物理模型

根据实测所用小室构造^[20]，建立几何模型，如图 2 所示。其中，条缝型送风口设置尺寸为 2700mm×40mm，送风口距墙的相对位置 s/b 为 2，即 $s/b = (d+b/2) = 2$ ， s 为送风口中轴线距贴附墙体的距离（mm）， b 为风口宽度（mm）， d 为风口内侧距贴附墙体的距离（mm）；排风口的尺寸为 400mm×400mm。

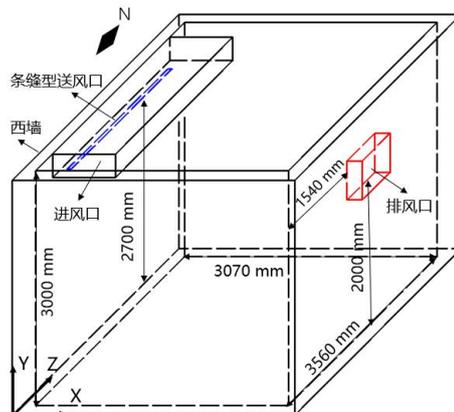


图 2 竖壁贴附射流夜间通风小室简图
Fig.2 Schematic diagram of the WANV

1.2 控制方程

由于非等温竖壁贴附射流夜间通风的过程中室外空气温度随时间变化，为了考察夜间通风条件下射流对墙体和室内空气温度的影响，采用瞬态湍流模型求解竖壁贴附射流通风模式下的速度场和温度场分布。其对应的非稳态湍流雷诺时均控制方程组如下：

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程:

动量方程反映了流体流动过程中的动量守恒性质, 将流体微元分别在三个坐标方向上应用牛顿第二定律并引入牛顿切应力公式, 得到 x 、 y 、 z 三个方向的动量守恒方程:

$$\text{div}(\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\text{div}(\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial x} + \rho f_z \quad (4)$$

式中: p 为流体微元体上的压力, Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 为作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量; f_x 、 f_y 和 f_z 为 x 、 y 、 z 三个方向上的单位质量力, m/s^2 。

(3) 能量守恒方程:

它反映了流体流动过程中能量守恒的基本性质。其控制方程为:

$$\text{div}(\rho \vec{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为流体传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分源项。

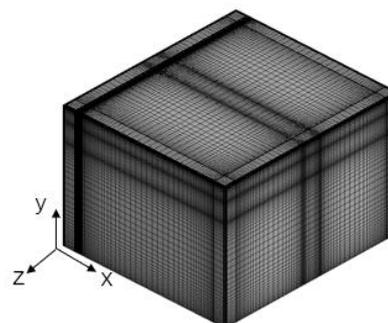
上述各基本方程中, 稳态流动中出现的未知量为 u 、 v 、 w 、 p 、 T 、 ρ 六个, 方程不封闭, 还需再补充一个联系压力和密度的状态方程使得方程封闭, 即:

$$p = p(\rho, T) \quad (6)$$

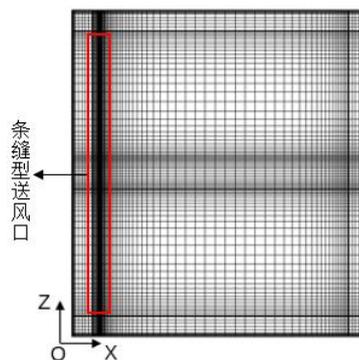
1.3 网格划分

采用 ICEM 进行网格结构化划分。对条缝型送

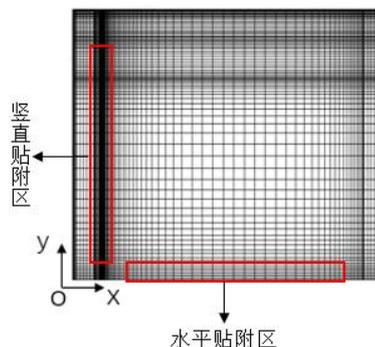
风口、排风口、竖直向近壁区域和水平向空气湖区域的网格进行加密, 网格划分如图 3 所示。



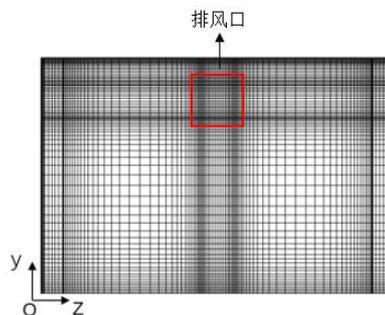
(a) 轴测图



(b) 俯视图



(c) 主视图



(d) 侧视图

图 3 网格划分示意图

Fig.3 Mesh generation in the computational domain

1.4 边界条件及求解设置

(1) 典型日气象参数

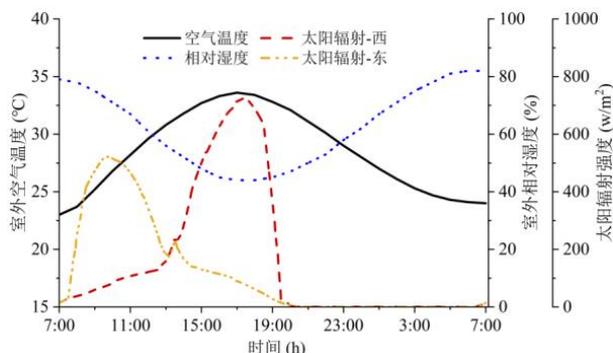


图 4 成都地区夏季典型日气象参数

Fig.4 The typical climate profile of Chengdu

图 4 给出了夏季典型日室外气象参数。该气象日内，室外空气温度范围在 23~33.5℃，相对湿度在 45%~83%之间，东向和西向的太阳辐射强度最大值为 570 和 780W/m²。

(2) 入口边界

选择速度入口 (Velocity-inlet)，采用用户自定义函数 (UDF) 输入。送风温度为室外空气温度，送风速度为 2m/s~4m/s。

(3) 出口边界

出口边界选择自由出流 (Outflow)。

(4) 围护结构边界

地面设置为绝热边界。屋顶和墙体的外壁面边界设置为对流边界 (Convection)，并引入室外空气综合温度。墙体内部面设置为耦合方式 (Coupled)。

$$T_z = T_{air} + \frac{a \times I_s}{\alpha_{out}} + \frac{Q_{lw}}{\alpha_{out}} \quad (8)$$

式中： T_z 为室外空气综合温度，℃； T_{air} 为室外空气温度，℃； a 为围护结构外表面对太阳辐射的吸收率； I_s 为太阳辐射强度，W/m²； α_{out} 为围护结构外表面对流换热系数，W/(m²·℃)； Q_{lw} 为围护结构外表面与环境的长波辐射换热热量，W/m²。围护结构外表面对流换热系数 α_{out} ，根据规范取 19W/(m²·℃)。

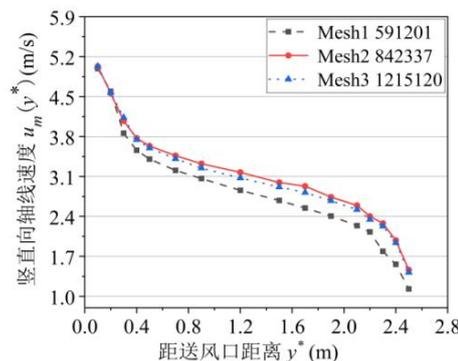
(5) 求解设置

求解器选用基于压力 (Pressure-Based) 的隐式 (Implicit) 格式；流体密度随温度的变化采用 Boussinesq 假设；压力速度耦合方式为 SIMPLE 算法；对流项离散格式为二阶迎风格式 (Second Order

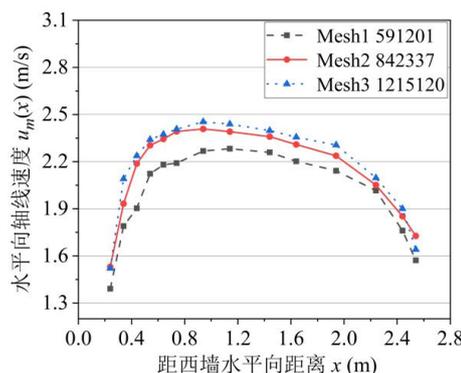
Upwind)。计算采用非稳态求解，经过时间步长无关性验证^[21]后设定时间步长为 30s。

1.5 计算模型验证

(1) 网格独立性验证



(a) 竖直向贴附区



(b) 水平空气湖区

图 5 网格独立性验证

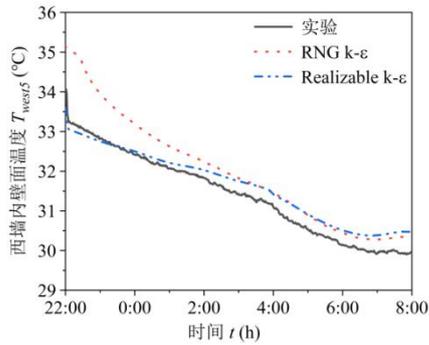
Fig.5 Grid independence

为验证计算网格的独立性，共监测了 58 万、84 万和 121 万 3 种数量网格下模拟得到的射流轴线速度分布情况。图 6 为射流送风速度为 5m/s，夜间通风开启时间为 22:00，三种不同数量的网格在竖直向贴附区和水平空气湖区的射流轴线速度分布情况。由图 6 可知，在竖直向贴附区和水平空气湖区的模拟结果表明，84 万网格数和 118 万网格数的模拟结果差异较小，而 59 万网格数的速度分布与其他两种数量网格的模拟结果差异较大。因此，综合考虑计算准确性和计算成本，最终选用 84 万数量的网格进行后续模拟研究。

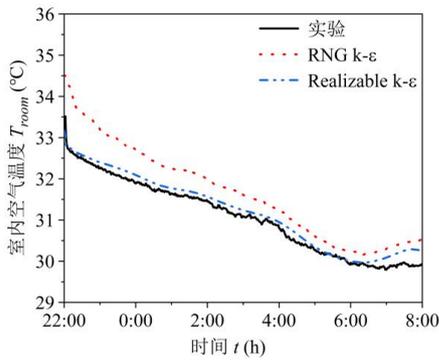
(2) 湍流模型比较验证

选择了 RNG k-epsilon 模型和 Realizable k-epsilon 模型进行对比分析，并采用前期的实验数据^[20]对典型工况的数值模拟进行验证。由图 6 可知，对比实验和模拟得到的西墙内壁面温度和室内

空气温度, 应用 Realizable k-epsilon 湍流模型得到的模拟结果与实验结果的偏差较小, 最大误差在 5% 以内, 后续将用 Realizable k-epsilon 湍流模型开展模拟。



(a) 西墙内壁面温度



(b) 室内空气温度

图 6 模拟结果与实验结果对比

Fig.6 Comparisons between simulation results with experimental data

2 夜间通风降温效果评价指标

为评估竖壁贴附射流夜间通风系统在通风过程中的降温效率, 引入壁面温度效率 ϵ_w 。

$$\epsilon_w = \frac{T_{out,air} - T_{in,air}}{T_{west5} - T_{in,air}} \quad (2)$$

式中: $T_{out,air}$ 为排风温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{in,air}$ 为送风温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{west5} 为西墙内壁面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

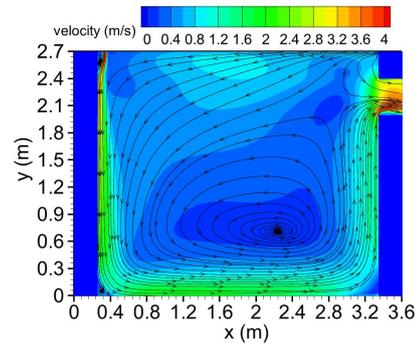
3 排风口位置的影响分析

基于 $s/b=2$, 送风速度 4m/s 的工况, 通过改变排风口位置研究不同排风口位置对室内速度场分布、墙体蓄放热的影响。

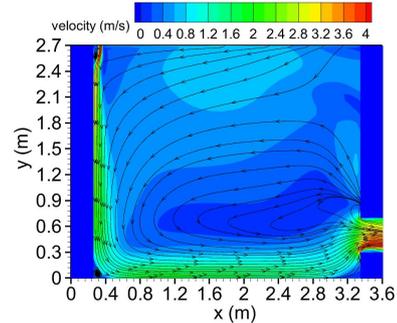
3.1 速度场分析

图 7 为送风口相对位置 $s/b=2$, 送风速度 4m/s ,

不同排风口位置下的室内全局速度分布。对比图 (a) 和图 (b) 可知, 当排风口位于房间上部时, 水平向射流会沿着墙体继续贴附并从排风口排出, 在距离地面高度 1.0m 左右会出现数量级较小的漩涡; 当排风口位于房间下部时, 水平向射流沿着地面向前流动并从下部排风口直接流出, 在距离地面 1.0m 左右处风速要大于上排风情况, 但是房间右侧区域无漩涡产生。



(a) 排风口位于房间上部

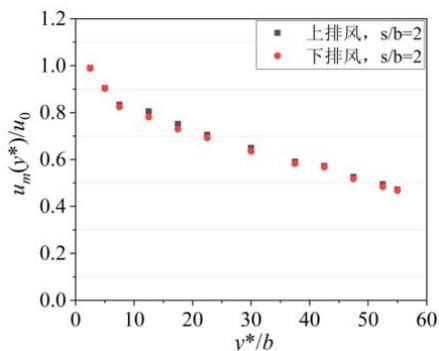


(b) 排风口位于房间下部

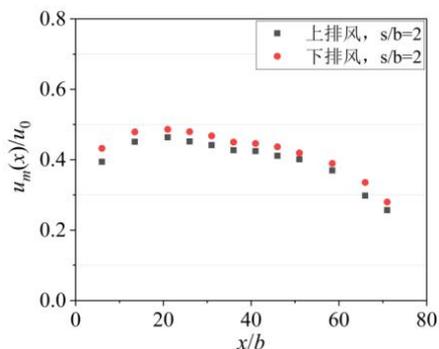
图 7 不同排风口位置下室内全局速度场

Fig.7 Global velocity distribution under different positions of exhaust vents

图 8 为送风口相对位置 $s/b=2$, 送风速度 4m/s , 不同排风口位置下的射流轴线速度衰减情况。由图 (a) 可知, 在 $s/b=2$ 全程贴附射流模式下排风口位置对竖直壁面贴附区射流主体速度分布无明显影响, 上排风和下排风模式下竖直向射流轴线速度衰减基本一致。在图 (b) 中不同排风模式对水平空气湖区射流轴线速度的衰减有一定影响。在下排风模式下, 射流贴附地面在水平方向流动后由开设在房间右下角的风口流出, 与上排风模式相比, 射流在流动过程中主体厚度扩散较小, 在相同的 x/b 下水平向射流轴线速度衰减较慢, 在相同的对应点处射流轴线速度取值较大。



(a) 竖直贴附区

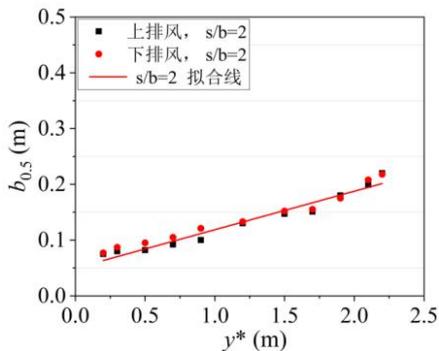


(b) 水平贴附区

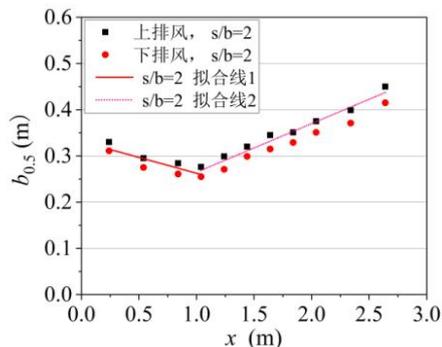
图 8 不同排风口位置下射流轴线速度衰减

Fig.8 Jet centerline velocity attenuation at different outlet positions

图 9 为送风口相对位置 $s/b=2$, 送风速度 4m/s , 不同排风口位置下射流沿运动方向厚度扩展情况。在图 (a) 中, 不同排风模式下竖直向射流厚度扩展均呈现线性变化, 送风口位置改变对竖直壁面贴附区射流厚度扩展无明显影响。在图 (b) 中, 当排风口位置位于房间下部区域, 射流沿着地面流动到达东墙后从下部风口排出, 与上排风模式相比少了射流沿着东墙继续流动的过程。在下排风模式下东墙对水平空气湖区域射流流动的干扰较小, 射流主体性保持较强, 在相同的水平距离内射流沿运动方向厚度扩展小。



(a) 竖直贴附区

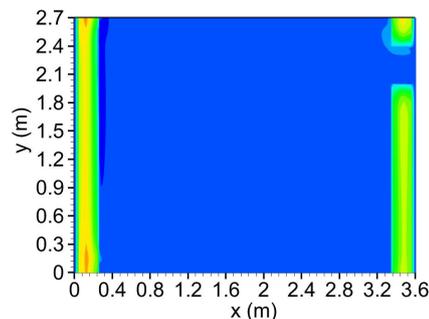
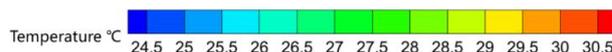


(b) 水平贴附区

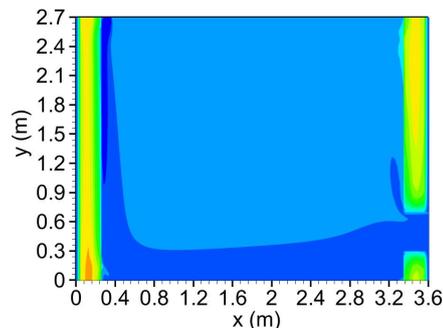
图 9 不同排风口位置下射流厚度扩展

Fig.9 Jet thickness at different outlet positions

3.2 温度场分析



(a) 排风口位于房间上部



(b) 排风口位于房间下部

图 10 不同排风口位置下室内全局温度场

Fig.10 Global temperature distribution under different positions of exhaust vents

图 10 为送风口相对位置 $s/b=2$, 不同排风口位置下在通风结束时刻室内全局温度分布。由图 (a) 可知, 在上排风模式下水平空气湖区域射流在沿着东墙贴附过程气流会在高度方向扩散, 通风结束以后室内温度场分布均匀。但是在图 (b) 所示的下

排风模式中, 水平向射流贴附地面流动后从房间下部风口排出, 通风气流对房间整体降温效果较差, 房间内温度分层明显。此外, 下排风模式下水平区域的射流不再贴附东墙向上流动, 在通风结束以后上排风模式下东墙整体温度要低于下排风情况。

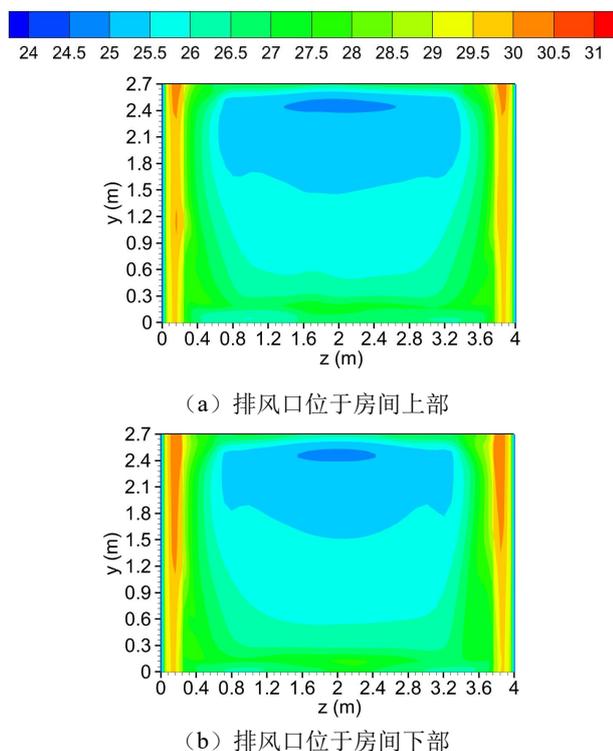


图 11 不同排风口位置下西墙内壁面温度分布

Fig.11 West wall surface temperature distribution under different positions of exhaust vents

图 11 为送风口相对位置 $s/b=2$, 不同排风口位置下通风结束时刻西墙内壁面温度分布。由图可知, 在不同的排风口位置下垂直向射流对西墙内壁面的冷却效果相同, 通风结束以后西墙内壁面温度基本一致。但是, 由于上排风模式下室内空气组织比较均匀, 空气湖区域内的气流会随着水平向射流与东墙的贴附而继续扩散, 因此对于上排风模式下房间的南墙和北墙整体温度要低于下排风的情况。

图 12 为送风口相对位置 $s/b=2$, 不同排风口位置下墙体内壁面温度分布。对比图 (a) 和图 (b) 可知, 在两种排风口位置下西墙内壁面温度基本相同。由于不同排风口位置室内空气组织的差异, 气流对墙体的冷却降温效果不同, 导致南墙、北墙和

东墙内壁面最高温度不同。在上排风模式下气流对西墙以外其他三面墙体的冷却较好, 在通风开启前墙体内壁面温度要低于下排风工况 0.2°C 左右, 并且在通风结束以后, 上排风模式下三面墙体的内壁面平均温度也相对较低。

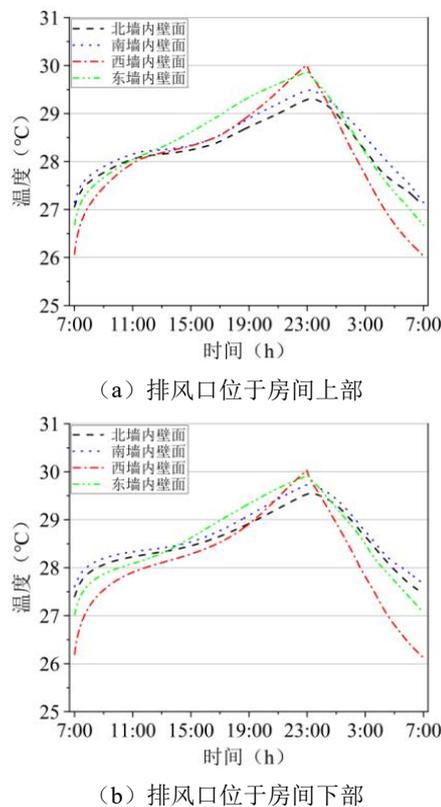


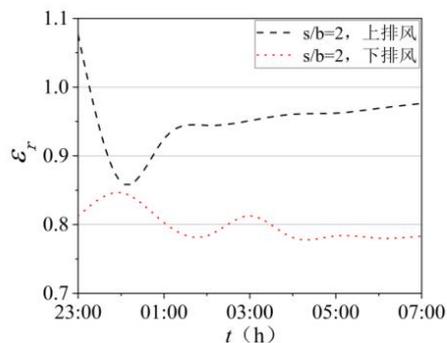
图 12 不同排风口位置下墙体内壁面温度分布

Fig.12 Wall surface temperature distribution under different positions of exhaust vents

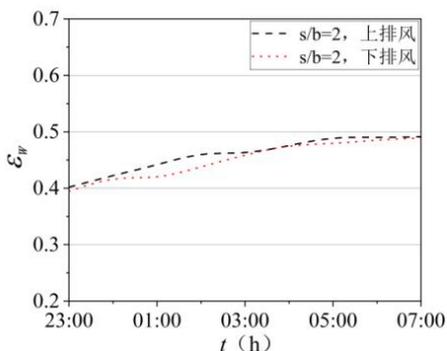
3.3 降温效果分析

3.3.1 温度效率

图 13 为送风口相对位置 $s/b=2$, 不同排风口位置下房间温度效率和墙体内壁面温度效率。由图可知, 不同排风口位置下夜间通风期间房间温度效率和壁面温度效率有显著差异。在上排风模式下室内空气组织分布均匀, 房间温度效率在 0.9 左右。下排风模式下房间温度分布不均匀, 在房间底部射流贴附贴面流动温度较低, 沿房间高度方向温度差异大, 房间温度效率较低。但是由图 (b) 可知, 不同的排风模式下射流和西墙均可以形成较好的贴附, 壁面温度效率没有显著差别。



(a) 房间温度效率



(b) 壁面温度效率

图 13 不同排风口位置下温度效率

Fig.13 Temperature efficiency at different positions of exhaust vents

3.3.2 释热效率

表 1 是在 $s/b=2$, 送风速度为 4m/s , 通风时间段为 23:00 到 07:00, 不同排风口位置下竖壁贴附射流夜间通风系统的释热效率。在其他送风条件相同时, 上部排风工况下射流可以与东墙壁面形成再次贴附, 对墙体的冷却较好, 可以移除更多墙体内部的热量, 系统的 γ 值大。

表 1 不同排风口位置下系统释热效率 γ

Table 1 Heat release efficiency of the system under different positions of exhaust vents

排风口位置	s/b	风速 (m/s)	通风时间段	γ
上部	2	4	23:00~07:00	3.301
下部	2	4	23:00~07:00	3.052

4 结论

本文研究了不同排风口位置对竖壁贴附射流夜间通风降温效果的影响, 并得到以下结论: 针对 $s/b=2$, 送风速度为 4m/s , 分析上部排风和下部排

风对室内速度场和温度场的影响。上排风和下排风对竖壁贴附区速度场无明显影响, 但是下排风情况下水平贴附区射流主体性保持较好, 水平空气湖区速度较大。上排风射流沿着壁面继续向上“攀附”一段距离, 对贴附墙体降温效果更好。相比于下部排风, 上排风模式下室内温度场分布更均匀, 因此建议采用上部排风口。

参考文献:

- [1] Å S P C, Kindinis A. Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads[J]. 2007,42:3285-3297.
- [2] Givoni B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods[J]. Energy and Buildings, 1998,28: 25-32.
- [3] 杨柳,杨晶晶,宋冰,等.被动式超低能耗建筑设计基础与应用[J].科学通报,2015,60(18):1698-1710.
- [4] 龙展图.夏热冬冷地区夜间通风降温特性及优化控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [5] 朱新荣,杨柳,刘加平.建筑夜间通风降温研究进展[J].暖通空调,2010,40(6):111-116.
- [6] Artmann N. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe[J]. Applied Energy, 2007,84:187-201.
- [7] 元晓琳.北方办公建筑夜间通风降温潜力及适用性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- [8] Wu L, Zhao J, Wang Z. Night ventilation and active cooling coupled operation for large supermarkets in cold climates[J]. Energy and Buildings, 2006,38:1409-1416.
- [9] Finn D P, Connolly D, Kenny P. Sensitivity analysis of a maritime located night ventilated library building[J]. Solar Energy, 2007,81(6):697-710.
- [10] Yang L, Li Y. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation[J]. Energy and Buildings, 2008,40:2052-2058.
- [11] Zhou J, Zhang G, Lin Y, et al. Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings[J]. Energy and

- Buildings, 2008,40(6):979-986.
- [12] Artmann N, Jensen R L, Manz H, et al. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation[J]. Energy and Buildings, 2010,42(3):366-374.
- [13] Dréau J LE, Heiselberg P, Jensen R L. Experimental investigation of convective heat transfer during night cooling with different ventilation systems and surface emissivities[J]. Energy and Buildings, 2013,61:308-317.
- [14] 杨昌智,龙展图,陈超,等.夜间通风降温特性及优化控制方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):199-204.
- [15] Wang Z, Yi L, Gao F. Night ventilation control strategies in office buildings[J]. Solar Energy, 2009,83(10):1902-1913.
- [16] Ji W, Luo Q, Zhang Z, et al. Investigation on thermal performance of the wall-mounted attached ventilation for night cooling under hot summer conditions[J]. Building and Environment, 2018,146:268-279.
- [17] Ji W, Wang H, Du T, et al. Parametric study on a wall-mounted attached ventilation system for night cooling with different supply air conditions[J]. Renewable Energy, 2019,143:1865-1876.
- [18] 李亚军,季文慧,袁艳平.送风参数对竖壁贴附射流夜间通风降温效果的影响[J].制冷与空调,2022,36(6):813-818.
- [19] Li Y, Ji W, Jiang F, et al. Elsevier Ltd, 2022. Investigation of the influence of jet supply configurations on the thermal and flow behaviors of the wall-attached night ventilation system[J]. Sustainable Cities and Society, 2022,83(May):103957.
- [20] 季文慧.办公建筑竖壁贴附射流夜间通风动态热过程研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [21] 李亚军.非等温竖壁贴附射流夜间通风降温特性研究[D].成都:西南交通大学,2022.