

# 有遮阳翻板的两栋多层建筑自然通风数值模拟

邱龙辉<sup>1,2</sup>, 陶求华<sup>1</sup>, 郑健雯<sup>2</sup>

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 福建省能源清洁利用与发展重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 文中基于计算流体力学(CFD)数值模拟,建立了一种室内外气流耦合模型,研究了翻板遮阳对多层建筑室内外风环境的影响。通过对比3种遮阳工况下的流线分布、风速云图和室内通风量大小,分析遮阳翻板的安装位置和前排建筑遮挡对室内风速分布和通风量的影响。结果表明:在迎风遮阳工况下,由于前排建筑的遮蔽,后排建筑的室内通风量会显著下降;在背风遮阳工况下,后排建筑的室内通风量下降得最为明显;相比无遮阳,迎风遮阳会降低前排建筑的室内通风量,而背风遮阳则影响较小。

[关键词] 遮阳翻板;自然通风;数值模拟;耦合模型

[中图分类号] TU 834.1

## Numerical Simulations of Natural Ventilation in Two Multi-Storey Buildings with Shading Louvers

QIU Longhui<sup>1,2</sup>, TAO Qiuhua<sup>1</sup>, ZHENG Jianwen<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Energy Cleaning Utilization and Development, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations, this paper establishes a coupled indoor-outdoor airflow model to study the impact of louver shading on the wind environment inside and outside multi-story buildings. By comparing streamline distributions, wind speed contour maps, and indoor ventilation rates under three shading conditions, the influence of the installation position of shading louvers and the shading effect of front-row buildings on indoor wind speed distribution and ventilation rates were analyzed. The results indicate that, under the windward shading condition, due to the shielding effect of the front-row buildings, the indoor ventilation rate of the rear-row buildings decreases significantly; under the leeward shading condition, the decrement in the indoor ventilation rate of the rear-row buildings is the most; compared to no shading, windward shading reduces the indoor ventilation rate of the front-row buildings, while leeward shading has a relatively minor impact.

**Keywords:** louvers; natural ventilation; numerical simulation; coupled model

[收稿日期] 2023-11-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目“数据中心间接蒸发冷却空调系统风-水响应机制及其热环境调控策略研究”(52208111);国家自然科学基金项目“导湿纤维型间接蒸发冷却器热湿传递机理及优化调控研究”(52308096);福建省自然科学基金项目“翻板遮阳的内廊式教学楼气载污染物跨室传播机理研究”(2020J01691)

[作者简介] 通信作者:陶求华(1981—),副教授,博士,从事制冷空调节能研究。E-mail:qhtao@jmu.edu.cn

0 引言

建筑的自然通风效果受到建筑立面设计的影响。遮阳翻板作为一种可调节的遮阳构件,除了改善室内光环境外,还通过改变周围流场来影响室内外空气流通<sup>[1]</sup>。一些学者对遮阳构件影响下的建筑自然通风情况进行了研究。Jiang 等<sup>[2]</sup>研究了百叶窗对多层建筑室内通风潜力的影响,结果表明较大的百叶窗角度可以产生更大的通风阻隔效果,且迎风百叶窗比背风百叶窗对通风潜力的影响更大。Lee 等<sup>[3]</sup>研究了百叶窗对室内开口处的风速影响,结果表明随着百叶窗的倾角变化,室内开口处的风速相差最高可达到 53%。庄连飞<sup>[4]</sup>研究了有无百叶遮阳对室内风速的影响,结果表明在百叶倾角 60° 时,室内平均气流速度比无遮阳时下降了 15%。

目前城市化的推进让城市建筑密度增大,学者开始对多栋建筑的室内外流场进行研究。Cui 等<sup>[5]</sup>研究了自然通风状况下,存在上游干扰建筑时,下游建筑室内气流特性的影响,发现上游建筑结构的增大会提高下游目标建筑迎风房间的平均空气交换率。Chen 等<sup>[6]</sup>研究了上游建筑物对目标建筑物风环境的影响,结果发现上游建筑物存在降低了目标建筑周围的平均风速比。Zhong 等<sup>[7]</sup>研究了上游建筑高度对下游建筑物的影响,结果表明上游建筑物高度的增加严重降低了尾流速度,进而降低了下游建筑物的通风速率。

虽然多栋建筑的通风特性已被部分研究者关注,但这些研究通常忽略了遮阳设备对建筑通风潜力的影响。因此,本文通过 CFD 数值模拟建立了室内外气流耦合模型,分析了两栋带有遮阳翻板的多层建筑在不同风向下的室内外通风性能,旨在为多栋建筑遮阳设计提供指导,并探索遮阳翻板对建筑通风潜力的影响。

1 研究方法

1.1 控制方程

CFD 方法已广泛用于预测建筑环境中的气流场<sup>[8]</sup>。为了评估遮阳翻板对室内外耦合环境气流特性的影响,采用稳态雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)求解气流场。该方程在精度和计算消耗之间取得了良好的平衡。对于不可压缩流动,时间平均控制方程的一般形式为 $\frac{\partial}{\partial t}(\varphi) + \nabla \cdot (\bar{u}_\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi$ 。其中: $\varphi$  代表不同的标量,包括三个速度分量 $\mu_x$ 、 $\mu_y$ 、 $\mu_z$ ,湍流动能 $\kappa$ ,耗散率 $\varepsilon$ ,平均速度 $\bar{u}$ ,有效扩散系数 $\Gamma_\varphi$ 和源项 $S_\varphi$ 。在数值模拟中,控制方程通过有限体积法(FVM)被离散化为代数方程。

1.2 几何模型

为了研究在自然通风条件下,翻板遮阳对两栋遮阳建筑的影响,研究对象为某两栋大楼,建筑长 9 m,宽 4.5 m,高 15 m,房间窗口高 1.5 m,宽 2.4 m。采用了 1:15 缩小比例的五层建筑。建筑物和遮阳翻板的几何尺寸及其几何关系如图 1 所示。每层有两个单元,每个单元在迎风或背风立面上只有一个窗户,中间有内门以产生贯流通风。本文使用了 Tao 等<sup>[9]</sup>室外梭形百叶的原型几何形状。对于每个遮阳案例,在遮阳立面附近有 48 个百叶窗板条。无遮阳建筑、迎风和背风遮阳建筑如图 2 所示。B1 和 B2 分别代表上下游建筑,W1-W5 和 L1-L5 单元代表从一楼到五楼的迎风和背风单元。接近气流的风向垂直于有开口的立面。采用无翻板遮阳的参考案例来评估与有迎风和背风单侧翻板遮阳的案例的区别。

为了研究两栋上下游遮阳建筑在开窗情况下的建筑内外流场的分布情况,建立了如图 3 所示的室内外气流耦合模型,以同时求解建筑内部和外部的风环境。在室内外气流耦合模型中,假设气流为不可压缩。因为在通风建筑中,室内的空气质量守恒,通过对房间各个开口处的法向速度进行积分计算,可以获取房间的自然通风量<sup>[10]</sup>,计算式为 $Q = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{N_y} \sum_{n=1}^{N_z} |U_{m,n}| \Delta y_m \Delta z_n$ 。其中: $\Delta y_m$  和  $\Delta z_n$  分别表示在  $y$  和  $z$  方向上,跨越一个网格单元所需的距离; $U_{m,n}$  代表在网格上的平均法向速度,以 m/s 为单位; $N_y$  和  $N_z$  分别表示在  $y$  和  $z$  方向上的网格编号。

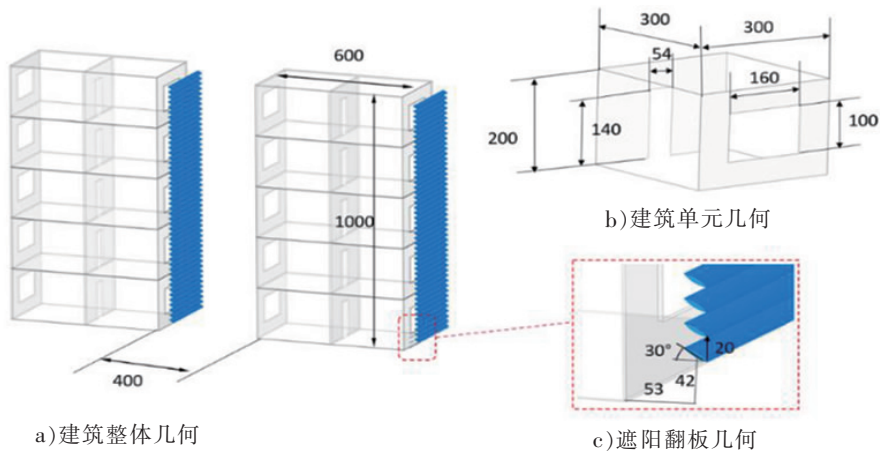


图 1 栋多层建筑和遮阳百叶的尺寸(单位:mm)  
Fig.1 Dimensions of two multi-storey buildings and shade louvers (unit:mm)

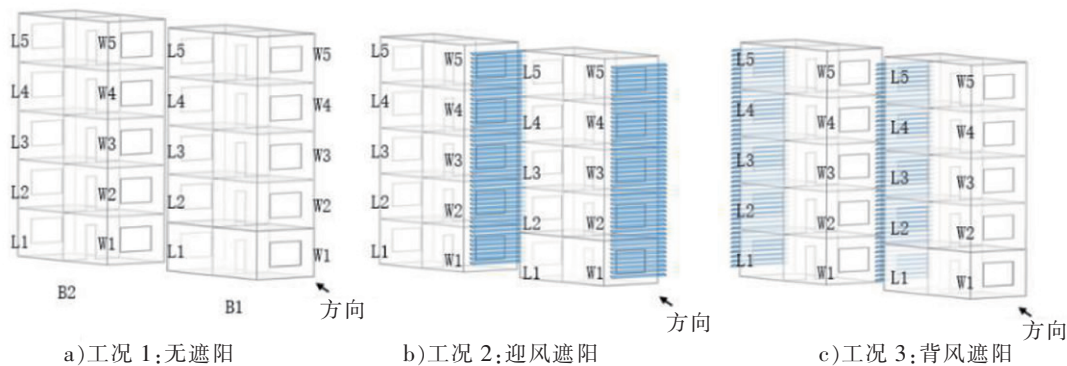


图 2 无遮阳、迎风遮阳、背风遮阳工况  
Fig.2 Cases for non-shaded, windward louvers and leeward louvers

1.3 计算域和网格划分

本研究采用 ANSYS 进行建模，并用 ICEM 进行结构网格划分，再使用 FLUENT 软件进行数值模拟。图 4 所示为两栋翻板遮阳建筑外流场的计算域。本研究在定义计算域的尺寸时，参考了文献 [11]。其中：建筑的高度为  $h_0$ ，屋顶至计算域顶部边界的距离为  $5h_0$ ，迎风面至计算域入口边界的距离为  $5h_0$ ，背风面至计算域出口边界的距离为  $10h_0$ ，侧壁至计算域侧面边界的距离为  $5h_0$ 。最终生成的网格满足计算域要求，阻塞率低于 3%。在建筑物墙壁、地面和遮阳翻板上的近壁网格的最小高度为 0.000 3 m。这样的设置可以确保  $y^+$  值小于 5 且接近 1，以便对所有表面上的近壁边界层采用增强壁面函数进行处理。最终生成的网格总数约为 1000 万。全局网格和建筑体局部网格如图 5 所示。

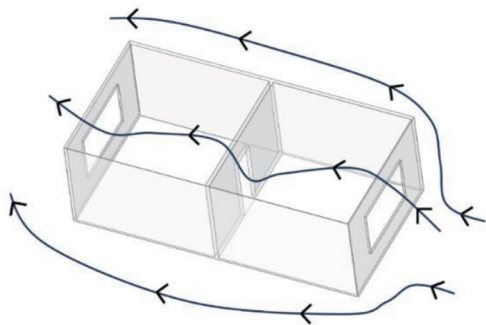


图 3 室内外气流耦合模型

Fig.3 Coupled indoor and outdoor airflow model

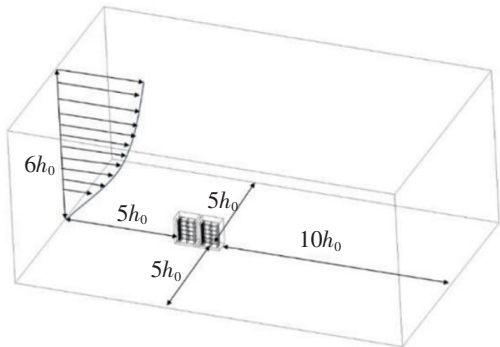


图 4 计算域的大小

Fig.4 Dimensions of the computational domain

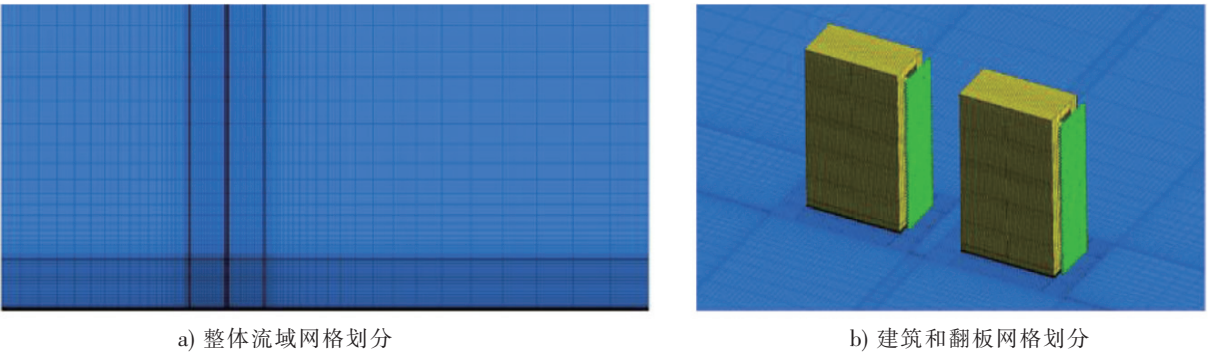


图 5 全局网格和局部网格  
Fig.5 Global and local mesh

1.4 边界条件

计算域的边界条件如表 1 所示。计算域的入口被定义为接近气流的速度入口，其遵循幂律剖面。气流速度  $U$  和湍流强度  $I$  由地形类别的环境参数定义。接近气流的参考速度  $U_{\text{ref}}$  为 5.0 m/s。参考高度  $h_0$  是建筑物高度。 $\alpha$  是描述表面粗糙度的幂律系数，对于郊区地形，该系数为 0.27。动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  是湍流模型的参数。常数  $C_\mu$  设置为 0.09，处理流动边界层时选用增强壁面处理。

表 1 边界条件  
Tab.1 Boundary conditions

位置	方程
入口	$U(z) = U_{\text{ref}} \left( \frac{z}{h_0} \right)^\alpha$
	$I(z) = 0.1 \left( \frac{z}{h_0} \right)^{-\alpha-0.05}$
	$k(z) = [U(z)I(z)]^2$
	$\varepsilon(z) = C_\mu^{0.5} k(z) \frac{U(z)}{h_0} \alpha \left( \frac{z}{h_0} \right)^{\alpha-1}$
出口	$\frac{\partial(\mu_x, u_y, \mu_z, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$
顶面	$u_z = 0$
	$\frac{\partial(\mu_x, u_y, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$
	$\frac{\partial(\mu_x, u_y, k, \varepsilon)}{\partial y} = 0$
侧面	$u_y = 0$
	$\frac{\partial(\mu_x, u_z, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$
	$\frac{\partial(\mu_x, u_z, k, \varepsilon)}{\partial z} = 0$

2 计算结果与分析

2.1 数值模拟验证与敏感性分析

通过对在自然通风下的室内外耦合气流场建筑进行数值模型验证。将数值模拟验证结果跟前人的实验数据进行对比，为确保本研究数值模拟的网格无关性，另外生成了 1 套粗糙网格与 1 套精细网格，保持其他设置相同的情况下进行了模拟计算。3 套网格中分别含有 451 078、1 076 625（参考案例）、3 013 000，3 套网格通过节点数量等比增减生成。

将数值模拟结果与 Jiang 等<sup>[12]</sup> 的实验数据比较，参考实验设置在风洞中，建筑物为立方体且具有迎风开口，如图 6a 所示的参考模型的长、宽和高均为  $H_0 = 250 \text{ mm}$ ，开口处在建筑立面的中心线上。其中： $H_0$  是用来进行验证的参考模型高度。门的宽度和高度分别为  $0.336H_0$  和  $0.5H_0$ ，建筑物高度处的参考速度设置为 8.2 m/s。计算域大小如图 4 所示，边界条件的设置与表 1 相同，选取了五根与实验相同位置的线提取线上的速度。3 种工况的模拟结果与实验数据的速度对比 ( $U/U_{\text{ref}}$ ) 如图 6b ~ f 所示。数值模拟结果得到的无量纲速度分布与实验数据相差较小，参考案例的无量纲速度的绝对偏差为 0.094，表明数值模拟对建筑室内外的气流场的预测精度达到了要求，粗糙网格工况与精密网格工况无量纲速度的绝对偏差分别为 0.098 和 0.092，与参考案例的差值分别为 0.004 和 0.002，因此可以确保参考案例中的网格精度满足模拟结果的网格无关性要求。



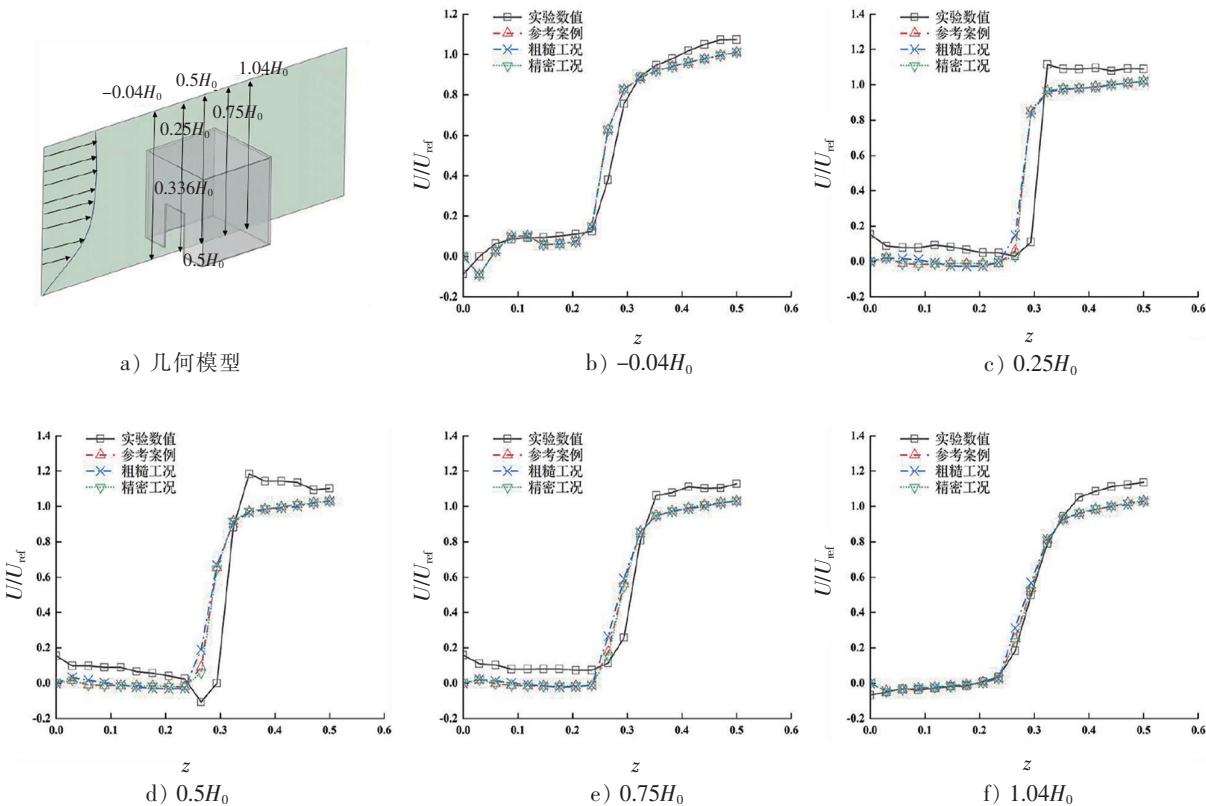


图 6 具有迎风开口的建筑的无量纲速度分布的验证

Fig.6 Validation of the dimensionless velocity distribution for the building with a windward opening

2.2 气流特性

通过对比图 7 中 3 种不同遮阳工况下室内流线，可以发现遮阳翻板的存在明显改变了 B1-W 楼列房间窗口气流的人射角度。在无遮阳与背风遮阳工况下，可以观察到 B1-W 楼列进入室内的气流随着楼层的变化呈现出不同的行为。在顶楼，气流趋向于朝向天花板方向吹，而在较低楼层，则倾向于吹向地面。通过迎风遮阳与无遮阳工况对比，发现进入迎风遮阳的 B1-W 楼列房间窗口的气流均吹向天花板，而无遮阳工况下的相同楼列仅有第 5 层窗口气流吹向天花板，而其余 4 层房间的人射方向都指向地面。背风遮阳与无遮阳工况对比，背风遮阳 B1-L 楼列窗口流出室外的气流由于遮阳翻板的存在，流出窗口的气流均呈现向地面的方向，而无遮阳的 B1-L 楼列窗口气体的出流方向都朝向上方，因此背风遮阳 B1-L 楼列窗口流出的气体不容易混入背风面的循环气流区，相反，更容易与建筑峡谷上方的气流进行交换，所以背风遮阳并没有在街道峡谷底部形成相对封闭的涡流。

通过对比图 8 中 3 种不同遮阳工况下的风速可知，由于前排建筑的阻挡，2 排建筑之间的风速往往较小，后排建筑形成了大面积的风影区。由于建筑内门的面积小于窗口的面积导致气流在前排迎风建筑门口处风速增大。从 3 张云图中可对比分析出，迎风遮阳翻板的存在会增大 B1-W 楼顶的再贴附区域，而背风遮阳和无遮阳对它的影响较小。迎风遮阳与无遮阳工况相对比，遮阳翻板不仅改变 B1-W 楼列所有房间窗口处气流的人射角度，在第 5 层的窗口处也出现了局部风速增大。另外迎风遮阳与无遮阳工况的 B2 楼列房间内的风速分布不同，由于 B1 楼列的遮蔽，B2 楼列房间内风速普遍较低，迎风工况下 B2-W1 至 B2-W3 房间内门处出现了局部风速增大；而无遮阳工况下的局部风速增大现象出现在 B2-L4 和 B2-L5 房间内。相比无遮阳工况，背风遮阳工况 B1 楼列房间

内的风速分布与无遮阳相差不大, 背风遮阳的街道峡谷内有局部风速增大, 集中在第 3 层到第 5 层。在 B2 楼列中, 背风遮阳的局部风速增大主要在第五层。

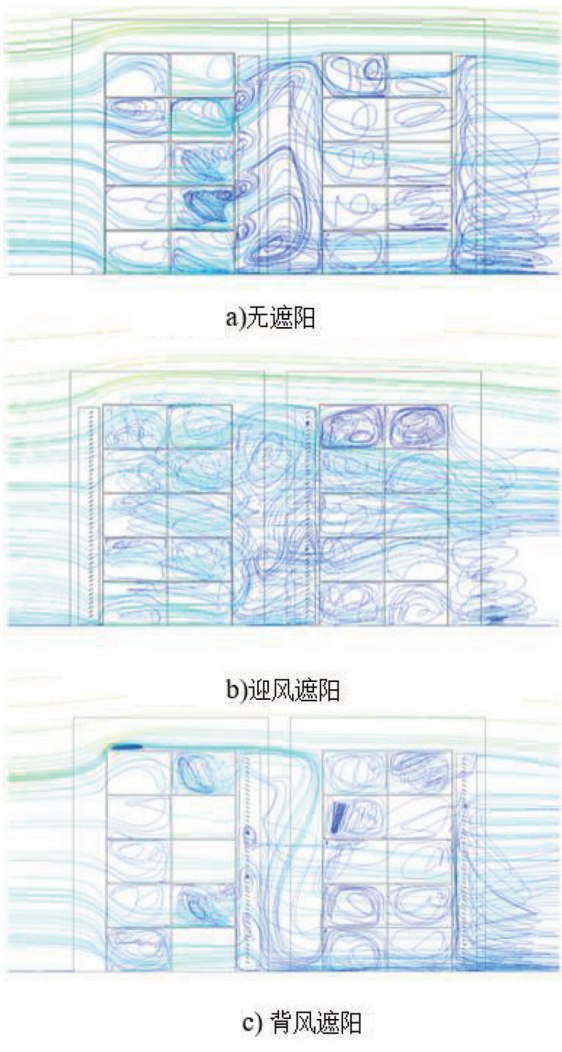


图 7 不同遮阳工况中的流线图

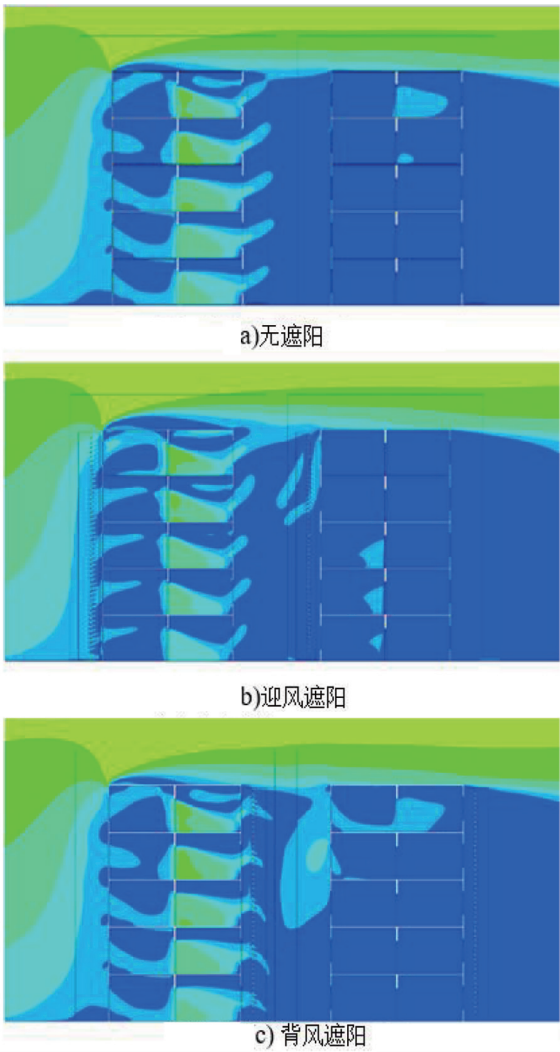


图 8 不同遮阳工况中的速度云图

Fig.7 Flow diagrams under different shading conditions Fig.8 Velocity cloud image under different shading conditions

2.3 遮阳翻板对室内通风量的影响

通过对 3 种工况下两栋遮阳建筑所有房间的通风量进行计算, 统计如图 9 所示。

如图 9a 所示, 在 3 种遮阳工况中, 迎风楼层房间内的通风量, 因为同一层前后房间共用同一个门且窗口面积一样, 所以前后房间通风量一致, 只需要计算一半房间即可。如图 9b 所示, 在 3 种遮阳工况下, 背风楼层房间内的通风量, 同迎风楼层一样只需要计算一半房间即可。从图 9 可知, 对于整栋建筑, B1 楼列的通风量远远大于 B2 楼列。迎风遮阳工况下, B1 楼列的总体通风量为  $20.3\text{ m}^3/\text{s}$ ; 背风遮阳工况下, B1 楼列的总体通风量为  $23.1\text{ m}^3/\text{s}$ ; 无遮阳工况下, B1 楼列的总体通风量为  $22.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。

在 B1 楼列中, 3 种工况下的房间通风量的取值范围分别为  $3\sim5$ 、 $3.5\sim6$ 、 $3.5\sim5\text{ m}^3/\text{s}$ ; 在 B2 楼列中, 3 种工况下的房间通风量的取值范围分别为  $0\sim1.5$ 、 $0\sim2$ 、 $0\sim2\text{ m}^3/\text{s}$ 。

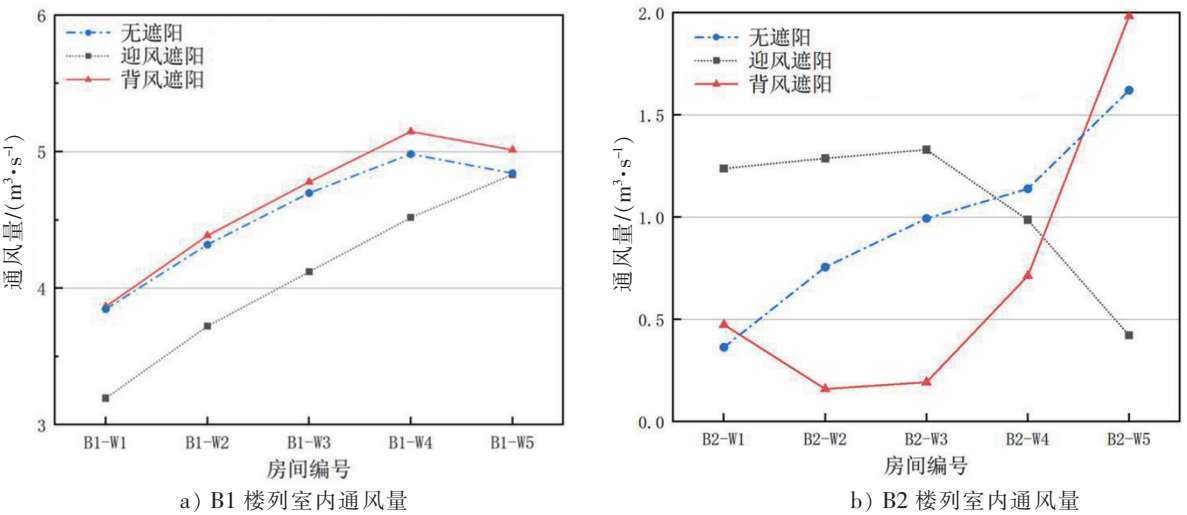


图 9 不同遮阳工况下前后两栋建筑室内的通风量  
Fig.9 Ventilation volume of two buildings under different shading conditions

2.3.1 不同楼层的计算结果比较

从图 9a 中可看出，背风遮阳和无遮阳工况在整栋楼的通风量均大于迎风遮阳；3 种遮阳工况中的通风量的最小值均在第 1 层，迎风遮阳工况下的通风量最大值在第 5 层，背风遮阳和无遮阳工况的通风量最大值均在第 4 层；背风遮阳和无遮阳工况中的通风量在第 1 层到第 4 层递增，而从第 4 层升到第 5 层时有轻微的下降。从 B1 楼整体的通风量来看，迎风遮阳室内的平均通风量降低 10%，W1 室内通风量受影响最大，下降了 17%；随着楼层的递增，遮阳翻板对室内的通风量影响逐渐减小，W5 室内受影响最小，通风量下降了 0.2%。背风遮阳相比无遮阳工况增大了室内通风量，在背风遮阳工况下，W4 室内通风量最大，达到了  $5.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相比无遮阳工况增大了 3.3%，W5 室内通风量的增长率最大 3.5%，室内通风量为  $5.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

从图 9b 中可看出，B2 楼列的通风量相比 B1 楼列整体上显著下降，3 种遮阳工况下的室内通风量均在  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  以内。迎风遮阳工况下，室内通风量在 W1-W3 波动幅度较小，而在 W3-W5 下降的幅度显著，在 W5 房间内下降率最大，相比 W4 达到了 57.3%。在背风遮阳工况下，室内通风量在 W1-W2 先小幅度下降，然后随楼层逐渐递增，最大增长率出现在 W5 房间内，相对 W4 房间增长了 178%。B2 楼列的室内最大通风量出现在背风遮阳工况下的 W5，相比迎风遮阳工况的 B2-W5 通风量增大了 371%，比无遮阳工况增大了 22%。B2 楼列的室内最低通风量出现在无遮阳工况下的 W1，相比迎风遮阳工况下的 B2-W1 房间通风量下降了 70.6%，相比背风遮阳工况的 B2-W1 房间通风量下降了 23.3%。

2.3.2 不同楼列的计算结果比较

由图 9 可看出，由于上游建筑 B1 的遮挡导致下游建筑 B2 的通风量整体上远小于 B1。在迎风遮阳工况下，B2 楼列的总体通风量为  $5.26 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相对 B1 楼列下降了 74.1%；B2 楼列第 1 层到第 3 层房间内通风量较为稳定，通风量在第 3 层到第 5 层递减；B2-W5 房间内的通风量在 B2 楼列中最低，相对无遮阳工况下的 B2-W5 下降了 74%，相对 B1-W5 下降了 91.2%。

在背风遮阳工况下，B2 楼列的总体通风量为  $3.52 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相对 B1 楼列下降了 84.8%；B2 楼列通风量在第 1 层到第 2 层略有下降，在第 2 层到第 5 层随楼层上升而递增；B2 楼列最低的通风量出现在 B2-W2 房间，相对无遮阳工况下的 B2-W2 下降了 78.9%，相对 B1-W2 下降了 96.3%。

在无遮阳工况中，B2 楼列的总体通风量为  $4.87 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相对 B1 楼列下降了 78.5%；B2 楼列房间内通风量随着楼层递增，最大室内通风量出现在 B2-W5，相对 B1-W5 下降了 66.5%。

### 3 结论

本文对有遮阳翻板的两栋多层建筑自然通风进行了计算流体力学(CFD)模拟,并将模拟结果与前人实验数据进行对比验证;以风速和通风量作为评价指标,对不同来流风向下的室内通风量进行研究,得到如下三点结论。

1) 通过将数值模拟结果与前人实验研究数据做对比,无量纲速度的绝对偏差为0.094,验证了本研究模拟参数设置的准确性,方法可以用于评估耦合气流场下的房间自然通风。

2) 迎风遮阳改变了B1楼列房间窗口气流的入射角度,在顶楼窗口处出现了局部风速增大现象,迎风楼列总体通风量相比无遮阳工况平均下降了10%。

3) 上游建筑的存在会导致下游建筑的风速和通风量显著下降,3种遮阳工况中背风遮阳下B2楼列总体通风量最小为 $3.52\text{ m}^3/\text{s}$ ,相比B1楼列总体通风量下降了84.8%,下降得最为显著。

### [ 参考文献 ]

- [1] YAO J. An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements [J]. Building and Environment, 2014, 71: 24-32.
- [2] JIANG F, TAO S, TAO Q, et al. The effect of louver blinds on the wind-driven cross ventilation of multi-storey buildings [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104614.
- [3] LEE D S, KIM S J, CHO Y H, et al. Experimental study for wind pressure loss rate through exterior venetian blind in cross ventilation [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 123-130.
- [4] 庄连飞. 百叶外遮阳对建筑夏季自然通风与热舒适的影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [5] CUI D J, MAK C M, KWOK K C S, et al. CFD simulation of the effect of an upstream building on the inter-unit dispersion in a multi-story building in two wind directions [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 150: 31-41.
- [6] CHEN L, MAK C M. Integrated impacts of building height and upstream building on pedestrian comfort around ideal lift-up buildings in a weak wind environment [J]. Building and Environment, 2021, 200: 107963.
- [7] ZHONG H Y, JING Y, SUN Y, et al. Wind-driven pumping flow ventilation of highrise buildings: effects of upstream building arrangements and opening area ratios [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137924.
- [8] MONTAZERI H, BLOCKEN B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis [J]. Building and Environment, 2013, 60: 137-149.
- [9] TAO Q, LI Z, ZHENG J, et al. A mathematical model for calculating total transmission of solar radiation through shuttle louvers and experimental verification [J]. Energy and Buildings, 2018, 172: 159-169.
- [10] JIANG Y, CHEN Q. Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(13): 1155-1178.
- [11] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 1749-1761.
- [12] JIANG Y, ALEXANDER D, JENKINS H, et al. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(3): 331-353.

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)