

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-803-06

百叶覆盖下足尺外窗内壁对流换热特性研究

郑凯杰 袁艳平 蒋福建

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 为探明百叶覆盖下足尺外窗内壁的对流换热水平, 通过实验的方式测量了百叶覆盖下足尺外窗内壁的对流换热量。此外, 还研究了百叶的设置及百叶帘的开启程度对外窗内壁对流换热的影响。研究表明对于遮阳工况, 当百叶完全覆盖外窗内壁时, 外窗内壁表现为对流得热; 而当百叶帘部分覆盖外窗内壁时, 外窗内壁可能表现为对流散热。该研究结果可为百叶内遮阳相关的模拟研究提供参考依据。

【关键词】 内遮阳; 窗户; 足尺实验; 对流换热

中图分类号 TU228 文献标识码 A

Research on Convective Heat Transfer

Characteristics of Inner Surface of Full-scale Window Covered by Louver

Zheng Kaijie Yuan Yanping Jian Fujian

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

【Abstract】 In order to find out the convective heat transfer level of the inner surface of the full-scale window covered by the louver, this paper measures the convective heat transfer of the inner surface of the full-scale window covered by the louver by means of experiments. In addition, this paper also studies the influence of the setting of the louver and the opening degree of the louver on the convective heat transfer of the inner surface of the full-scale window. The research shows that for the shading condition, when the louver completely covers the inner surface of the window, the inner surface of the window shows convection heat gain; and when the louver partially covers the inner surface of the window, the inner surface of the window may show convection heat dissipation. The results of this study can provide a reference for the simulation research related to the internal shading of the louver.

【Keywords】 inner shading; window; full-scale experiment; convective heat transfer

0 引言

我国碳减排工作已经进入总量控制阶段。建筑作为能源消耗的三大“巨头”之一, 是温室气体排放的重要来源。建筑节能将是我国实现绿色低碳可持续发展的关键^[1]。目前的建筑能耗过高的主要原因之一是其围护结构热工性能较差; 外窗是建筑保温中最薄弱的环节, 其长期使用能耗约占整个建筑

长期使用能耗的 50%^[2], 因此各国的节能规范和措施注重对外窗热工性能的控制。遮阳的使用能有效减少太阳辐射进入室内, 减少太阳得热, 因此其成为设于外窗之上最常见的节能技术, 其中内遮阳因其易于维护和调节被广泛的应用于建筑遮阳中。目前对百叶覆盖下外窗内壁换热的研究^[3-5]大都基于缩尺外窗 (窗高 $\leq 0.41\text{m}$), 而典型的外窗其窗高

基金项目: 成都市科技局科研基金 (2019YF0501326SN)

作者简介: 郑凯杰 (1996.10-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1149379093@qq.com

通讯作者: 袁艳平 (1973.06-), 男, 博士后, 教授, E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-16

往往高于 1.5m，基于缩尺外窗的研究不一定适用于足尺外窗的换热分析。因此本文基于百叶覆盖下足尺外窗（窗高 2.1m）的换热实验对外窗内壁的对流换热特性展开研究。

1 工况设置

实验研究中共设计了两种主要工况：遮阳工况和非遮阳工况。遮阳工况代表太阳辐射直接照射外窗的情形，如夏季晴天时位于建筑阳面的外窗；非遮阳工况代表太阳辐射未直接照射外窗的情况，如外窗位于建筑阴面的外窗。遮阳工况考虑了百叶表面吸收太阳辐射强度为 350W/m² 和 120W/m² 的两种案例（分别对应遮阳工况 1 和遮阳工况 2），参考百叶表面温度与百叶表面吸收太阳辐射强度的关系^[6]，将百叶表面设置为定温条件。参考缩尺外窗内壁对流换热实验^[7]对非遮阳工况外窗内壁及室内空气间的温差进行设置。

表 1 工况设置

Table 1 Working condition settings

	外窗内壁温度 (°C)	室内空气温度 (°C)	百叶温度 (°C)
遮阳工况 1	42.4	25.3	51.7
遮阳工况 2	36.4	24.9	42.3
非遮阳工况 1	42.4	25.8	\
非遮阳工况 2	36.5	26.1	\

注：百叶角度 0°，百叶中心距外窗内壁的距离 21.5mm。

实验装置周边的环境如表 2 所示，周边壁面的材质均为常见的办公建筑室内装修材质，周边壁面的温度与常见办公建筑夏季室内壁面温度相近。因此，本文百叶覆盖下外窗内壁及百叶的换热特性研究是基于典型夏季办公建筑室内环境展开的研究。

表 2 周边壁面材质及温度情况

Table 2 Surrounding wall material and temperature

	材质	温度条件
地面	大理石	23±1°C
天花板	石膏板	24.5±0.5°C
四周的壁面	胶合板	26±0.5°C

2 实验装置及数据处理

2.1 实验装置

百叶覆盖下外窗内壁对流换热的实验工作在

宽敞的实验用房中进行，实验用房中配备的空调及油汀用于环境温度的控制。参考等温竖壁自然对流实验研究的设置^[8]，在实验装置四周布置高 2800mm 的胶合板，减少由空调引起的强制对流对实验结果的影响，如图 1 所示。

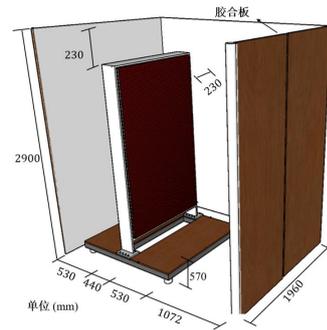


图 1 实验装置及其附件示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device and its accessories

实验装置的设计参考百叶内遮阳相关的实验研究^[7,9]，实验装置由等温竖壁构件和等温百叶构件组成。等温竖壁构件如图 2 所示，等温竖壁构件由铝板、加热层、保温层及支撑架构成，铝板正面被抛光处理用于等效外窗内壁。铝板的导热率大且易于加热膜的贴附，铝板被加热后铝板表面的温度较均匀，因此内遮阳百叶相关的换热研究^[7,8]中均使用等温铝板等效外窗内壁进行实验研究。



(a) 正面图 (b) 等温竖壁构件内部结构

图 2 等温竖壁构件实物图

Fig.2 Physical diagram of isothermal vertical wall components

本实验采用尺寸为 1200mm×2100mm×10mm 的铝板模拟高度为 2100mm 的外窗内壁，通过贴附于铝板背面的加热层对铝板进行加热。通过调节加热片的加热功率维持铝板表面的温度差异在 2°C 以内。在加热层的背部布置硅酸铝保温棉和聚苯乙烯

泡沫板组成的厚度为 135mm 的保温层, 铝板和加热层四周填充硅酸铝保温棉, 减少加热层的热量从等温竖壁构件正面 (即铝板正面) 以外的其他表面散热入室内。钢制的支撑架被用于固定铝板、加热层及保温层, 并通过支撑架底座的旋钮调整铝板正面垂直于地面。

等温百叶构件由内遮阳百叶和聚酰亚胺 (PI) 加热膜组成, 用于模拟等温的内遮阳百叶。在 PVC 百叶表面贴附同尺寸的 PI 加热膜对百叶进行加热。如图 3 所示, PVC 百叶帘由 105 片百叶组成, 百叶帘的尺寸为 2100mm×1200mm。单片百叶的尺寸为 1200mm×23.7mm×0.2mm, 相邻的两片百叶的间距为 $P_5=20\text{mm}$ 。

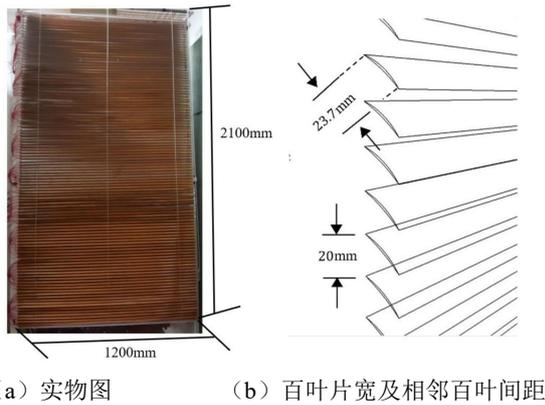


图 3 等温百叶构件实物图及百叶几何参数

Fig.3 The physical diagram of isothermal louvre components and the geometric parameters of the louvre

2.2 实验测点布置

本实验目的是测得等温竖壁和百叶表面的对流换热量。竖壁的对流换热量通过等温竖壁构件与周边环境的热平衡关系计算推导而得, 热平衡计算推导详情见 2.3 节。百叶表面的对流换热量也由相应的热平衡计算获得。热平衡计算中涉及的温度参数包含竖壁表面温度、百叶表面温度、实验环境空气温度及周边环境壁面温度; 涉及的热量参数包含硅胶加热膜加热量、PI 加热膜加热量和等温竖壁构件板除竖壁表面以外的其他表面的散热量。

竖壁表面温度由铝板背部均匀布置的热点偶测得。如图 4 所示, 24 根 T 型热电偶由导热胶固定至铝板背部事先钻好的深度 5mm、直径 4mm 的 24 个孔洞用于铝板温度的监测。铝板导热率大, 铝板内部温度测点的温度与铝板正面温度基本相同, 可用铝板内部测点的温度代替铝板正面温度。

由于贴附于百叶表面的 PI 加热膜共由 10 个调压器分别控制, 对于由同一个调压器控制的 PI 加热膜其表面温度基本相同, 因此 21 根 T 型热电偶被布置于隶属于不同调压器的百叶表面用于百叶表面的温度的监测, 如图 4 所示。实验环境空气温度由布置于铝板中轴线正前方 500mm 远处三个高度水平处的 T 型热电偶测得。周边环境壁面温度由贴附于壁面的 11 根 T 型热电偶测得 (其中地面及天花板温度各由一根 T 型热电偶测得, 未在图中展示), 测点布置如图 4 所示。

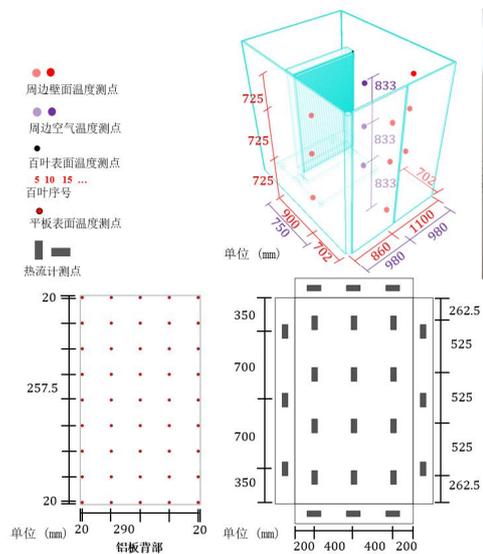


图 4 温度测点及热流测点布置图

Fig.4 Layout of temperature measuring points and heat flux measuring points

等温竖壁构件竖壁 (即铝板正面) 以外的其他表面的散热量由尺寸为 100mm×50mm×2.5mm 的 JZRL-2 热流计片测得热流密度后计算而得, 热流计片被布置于加热层背部及铝板四周的保温层内, 测点布置如图 4 所示。铝板背部加热层的加热量及百叶表面贴附的 PI 加热膜加热量由万用表测得加热膜的电流、电阻及电压计算而得。

2.3 实验原理

等温竖壁的对流换热通过热平衡法计算而得。热平衡法是通过稳态条件下,等温竖壁构件与周边环境的热平衡关系得出竖壁(即铝板正面)的对流换热热量。等温竖壁构件与周边环境的热平衡关系如图 5 所示。

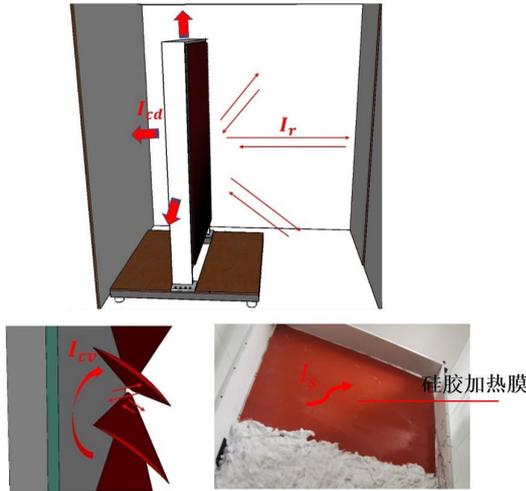


图 5 等温竖壁构件与周边的热平衡关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of the thermal equilibrium relationship between the isothermal vertical wall member and the surrounding

图中的热平衡方程可用式(1)进行表示:

$$I_s = I_r + I_{cv} + I_{cd} \quad (1)$$

式中, I_s 为等温竖壁构件内热源加热强度(即加热层加热强度), W/m^2 ; I_r 为竖壁与周围壁面的净长波辐射换热强度, 周围壁面包括周边环境壁面和百叶表面, W/m^2 ; I_{cv} 为竖壁与实验环境空气的对流换热强度, W/m^2 ; I_{cd} 为等温竖壁构件从竖壁(即铝板正面)以外表面的散热强度, W/m^2 。

在本次实验中, I_s 可由上文中所测量的相关参数结合式(2)计算得出; I_{cd} 利上文所设置的热流密度计测量和计算得出; I_r 则通过竖壁与周边壁面的角系数关系(见表 3), 结合上文中所测得竖壁表面温度、百叶表面温度及周边环境壁面温度经节点网络法进行计算得出, W/m^2 。等温竖壁的对流换热强度 I_{cv} , 在测量或计算等温竖壁构件的 I_s 、 I_r 和后, I_{cd} 可间接计算得出等温竖壁的对流换热强度 I_{cv} 。

$$Q_s = U_s i_s - i_r^2 R_r \quad (2)$$

式中, Q_s 为加热层加热量, U_s 为供电电源电

压, V ; i_s 为流经电源的电流强度, A ; i_r 为流经导线的电流强度, A ; R_r 为导线电阻, Ω 。

表 3 竖壁与周边的角系数关系

Table 3 The relationship between the vertical wall and the surrounding angle coefficient

地面	天花 板	右侧 围合板	左侧 围合板	前方 围合板	百叶表 面	
角系数	0.0053	0.0146	0.095	0.095	0.161	0.6292

2.4 误差分析

根据误差传递理论, 由式(2)可得, 本章所设计实验模型内热源量的相对误差可用下式计算[10]:

$$\frac{\Delta I_s}{I_s} = \sqrt{\left(\frac{U_s i_s}{U_s i_s - i_r^2 R_r} \frac{\Delta U}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{U_s i_s}{U_s i_s - i_r^2 R_r} \frac{\Delta i_s}{i_s}\right)^2 + \left(\frac{2i_r^2 R_r}{U_s i_s - i_r^2 R_r} \frac{\Delta i_r}{i_r}\right)^2} \quad (3)$$

表 4 公式(3)中的参数误差

Table 4 Parameter errors in Equation (3)

	$\frac{\Delta U}{U_s}$	$\frac{\Delta i_s}{i_s}$	$\frac{\Delta i_r}{i_r}$	$\frac{\Delta I_s}{I_s}$
相对 误差	0.43	0.18	0.18	0.30

由式(1)可得等温竖壁表面平均对流换热热量的相对误差计算公式由下式得到:

$$\frac{\Delta I_{cv}}{I_{cv}} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_s - I_{cd} - I_r} \frac{\Delta I_s}{I_s}\right)^2 + \left(\frac{I_{cd}}{I_s - I_{cd} - I_r} \frac{\Delta I_{cd}}{I_{cd}}\right)^2 + \left(\frac{I_r}{I_s - I_{cd} - I_r} \frac{\Delta I_r}{I_r}\right)^2} \quad (4)$$

表 5 公式(4)中的参数误差

Table 5 Parameter errors in Equation (4)

	$\frac{\Delta I_{cd}}{I_{cd}}$	$\frac{\Delta I_r}{I_r}$	$\frac{\Delta I_{cv}}{I_{cv}}$
相对误差	0.12	0.05	0.0965

结合不同工况下实验所得出的参数的极值, 以及相关仪器和计算方法的相对误差, 可得等温竖壁表面平均对流换热热量的相对误差为 9.65%。其结果在工程研究范围内可接受, 故认为上述实验结果可信。

3 结果与讨论

3.1 内遮阳百叶对外窗内壁对流换热的影响

首先比较了非遮阳工况(太阳辐射未直接照射外窗)时, 百叶的设置对外窗内壁对流换热的影响。其中, 未设置内遮阳百叶外窗内壁的对流换热热量由等温竖壁对流换热的经验公式[11]计算而得。如图 6

所示, 对于非遮阳工况, 当内遮阳百叶中心距离外窗内壁为 21.5mm 时, 内遮阳百叶的设置对外窗内壁对流换热影响较小 (差异在 1% 以内)。因此, 对于非遮阳工况, 百叶距离外窗内壁并非特别近的情况时, 内遮阳百叶的设置对外窗内壁对流换热的影响较小。

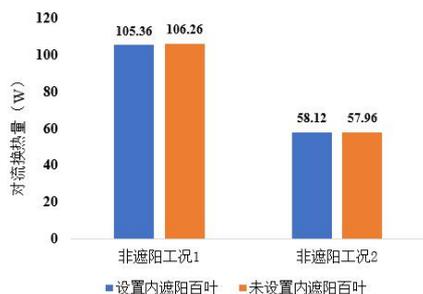


图 6 非遮阳工况时百叶设置对外窗内壁对流换热的影响

Fig.6 Influence of louver setting on the convective heat transfer of the inner surface of the window under non-shading conditions

其次, 比较了遮阳工况时, 百叶的设置对外窗内壁对流换热的影响。由图 7 可以发现, 即使在外窗内壁的温度高于室内空气温度 17℃ 的情况下, 内遮阳百叶的设置使得外窗内壁对流得热, 而非对流散热。对于遮阳工况, 内遮阳百叶遮挡并吸收太阳辐射后百叶具有较高的温度, 因此外窗内壁可能为对流得热。

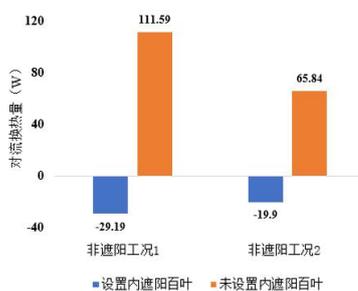


图 7 遮阳工况时百叶设置对外窗内壁对流换热的影响

Fig.7 Influence of louver setting on the convective heat transfer of the inner surface of the window under shading conditions

3.2 百叶帘开启程度对外窗内壁对流换热的影响

百叶帘开启程度为百叶帘覆盖下的外窗内壁面积与外窗内壁总面积的比值。由图 8 可以发现, 对于非遮阳工况 2 而言, 百叶帘的开启程度对外窗内壁对流换热的影响较小。对于非遮阳工况, 当百叶距离外窗内壁较远时 (安装距离为 21.5mm), 百

叶对外窗内壁周边空气温度的影响较小, 因此百叶的设置或百叶帘的开启程度对外窗内壁对流换热基本没有影响。

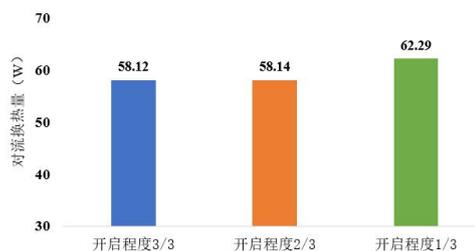


图 8 非遮阳工况时百叶帘开启程度对外窗内壁对流换热的影响

Fig.8 Influence of the opening degree of the venetian blinds on the convective heat transfer of the inner surface of the window under non-shading conditions

由图 9 可知, 遮阳工况时百叶帘的开启程度对外窗内壁对流换热有显著的影响。当百叶完全覆盖外窗内壁时, 外窗内壁为对流得热; 而当百叶帘部分覆盖外窗内壁时, 外窗内壁为对流散热。外窗内壁对流换热并非与百叶帘开启程度呈线性关系, 其中百叶帘的开启程度由 3/3 调整为 2/3 后, 外窗内壁的对流换热量变化较大。



图 9 遮阳工况时百叶帘开启程度对外窗内壁对流换热的影响

Fig.9 Influence of the opening degree of the venetian blinds on the convective heat transfer of the inner surface of the window under shading conditions

4 结论

本文通过百叶覆盖下足尺外窗内壁换热实验研究了外窗内壁对流换热水平, 得出以下结论:

(1) 对于非遮阳工况, 当内遮阳百叶距离外窗内壁足够远时 (百叶中心距外窗内壁距离 $\geq 21.5\text{mm}$), 内遮阳百叶的设置或百叶帘的开启程度对外窗内壁的对流换热影响不大。

(2) 对于遮阳工况, 内遮阳百叶覆盖下足尺外窗内壁的对流换热可能为负值, 即外窗内壁为对流得热。

(3) 对于遮阳工况, 百叶帘的开启程度对外窗内壁对流传热方向有显著的影响。当百叶完全覆盖外窗内壁时, 外窗内壁为对流得热; 而当百叶帘部分覆盖外窗内壁时, 外窗内壁可能为对流散热。此外, 外窗内壁的对流换热并非与百叶帘的开启程度呈线性关系。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 2019 中国建筑能耗研究报告[J]. 建筑, 2020, (7): 30-39.
- [2] 杨长军. 利用 DEST 模拟窗户对建筑能耗的影响[J]. 制冷与空调, 2012, 26(6): 572-574.
- [3] Ye P, Harrison S J, Oosthuizen P H, et al. Convective Heat Transfer from a Window with a Venetian Blind: Detailed Modeling[J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(2): 1-7.
- [4] Phillips J, Naylor D, Harrison S J, et al. Free Convection from a Window Glazing with a Venetian Blind: Numerical Model Development[J]. Transactions of the CSME, 1999, 23(1): 159-172.
- [5] Phillips J, Naylor D, Oosthuizen P H, et al. Numerical study of convection and radiative heat transfer from a window glazing with a venetian blind[J]. Int J HVAC&R, 2001, 7: 383-01.
- [6] N Duarte. An experimental study of free convective heat transfer from a vertical plate in the presence of heated venetian blinds[D]. London: The University of Western Ontario, 1999: 115-116.
- [7] Machin A D, Naylor D, Oosthuizen P H, et al. Experimental Study of Free Convection at an Indoor Glazing Surface with a Venetian Blind[J]. Journal of HVAC&R Research, 1998, 4(2): 153-166.
- [8] T Tsuji, Y Nagano. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate[J]. Heat Mass Transfer, 1988, 31(8): 1723-1734.
- [9] Collins M R, Harrison S J, Naylor D, et al. Heat Transfer from an Isothermal Vertical Plate with Adjacent Heated Horizontal Louvers: Validation[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124(6): 1078-1087.
- [10] 蒋福建. 翻板-围护结构系统的对流长波辐射换热机理研究[D]. 中国: 同济大学, 2018: 75-76.
- [11] S Ostrach. An Analysis of Laminar Free-Convection Flow and Heat Transfer about a Flat Plate Parallel to the Direction of the Generating Body Force[J]. NACA Technical Report, 1953: 1111.