

双层幕墙热气流流体动力学热工模拟^{*}

毛伙南¹, 戈宏飞¹, 陈海², 任 璆¹, 兰发通¹, 刘 鹏¹, 郭金基²

(1. 中山盛兴股份有限公司, 广东 中山 528412;

2. 中山大学工学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 在强太阳热辐射条件下, 双层幕墙强迫送风热气流 (简称强化热气流) 流量及热功率显著增加。建立三维流体动力学模型及边界条件, 采用 FLUENT 软件对双层幕墙热气流及强化热气流进行热工模拟, 求得双层幕墙在无遮阳、遮阳百叶全开、遮阳百叶封闭三种工况下的温度及速度分布图, 解析强化热气流的成因。最后再通过实验验证。

关键词: 双层幕墙; 强化热气流; 温度; 速度; 热工模拟

中图分类号: TU395 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2013) 01-0029-05

Double Glass Curtain Wall Heat Flow Thermal Simulation of Fluid Dynamics

MAO Huonan¹, GE Hongfei¹, CHEN Hai², REN Qiu¹, LAN Fatong¹, LIU Peng¹, GUO Jinji²

(1. Zhong Shan Sheng Xing Co., Ltd., Zhongshan 528412, China;

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In the strong sun radiation condition, the heat flow and thermal efficiency of double glass curtain wall are significantly increased with the forced air flow (referred to as the strengthening heat flow). The three-dimensional hydrodynamic model and the boundary condition are established. Using software of FLUENT, the thermal simulation of airflow and strengthening heat flow are executed. Under three different conditions of open, closed and without shading louver, the temperature and velocity distribution diagram are drawn, and the cause of strengthening heat flow are analyzed. Finally, verification experiment are completed.

Key words: double glass curtain wall; strengthening heat flow; temperature; velocity; thermal simulation

双层幕墙外层玻璃受太阳辐射热作用下, 热通道空气被加热, 产生质量力形成自然热气流, 又称为“烟囱效应”已在原文 [1] 用有限元分析法作过计算。本文利用太阳能发电驱动风机对双层幕墙强迫送风, 研究强化热气流的成因, 建立三维流体动力学模型, 用 FLUENT 软件进行热工模拟, 得到热通道幕墙在无遮阳、遮阳百叶全开、遮阳百叶封闭三种工况下强化热气流的温度场和速度场, 并

与自然热气流进行对比, 解析强化热气流流量及热功率显著增加的原因, 对双层幕墙节能技术有重大实用意义。

1 物理模型的建立及边界条件的选取

1.1 基本假设

参照国内外在使用 CFD 技术模拟双层玻璃幕墙通风传热方面的经验^[2-8], 以及本幕墙系统的构

* 收稿日期: 2012-05-27

基金项目: 建设部研究开发资助项目 (06-K5-20)

作者简介: 毛伙南 (1975 年生), 男, 高级工程师; E-mail: maohuonan@163.com

造特点,我们作以下的基本假设:①稳定的外界环境条件;②热通道内的空气为不可压缩牛顿流体,并且满足 Boussinesq 假设;③不考虑玻璃壁面蓄热;④假定幕墙密封性能好,不考虑空气渗透;⑤常温下幕墙材料特性与温度无关;⑥忽略室外风速的影响。

1.2 数学模型

空腔内空气的自然对流是在重力场或其他力场的作用下由密度差引起的浮升力产生的,因此必须考虑动量方程中的体积力项 $Y = -\rho g$ 的影响,引入 Boussinesq 假设建立三维稳态方程组^[9]。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ 为空气密度,是温度的函数, kg/m^3 ; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度分量, m/s 。

状态方程:

$$p = \rho RT \quad (2)$$

式中 p 为压力, Pa; R 为气体常数, $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为空气温度, K。

动量方程和能量方程可以写成通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S_{\phi} \quad (3)$$

式中 ϕ 为通用变量; Γ_{ϕ} 为与 ϕ 相对应的广义扩散系数; S_{ϕ} 为与 ϕ 相对应的广义源项。

1.3 气象条件与物性参数

依据气象条件参考文献 [10],选择夏季(最热时),平均太阳辐射照度为 $591.00 \text{ W}/\text{m}^2$;参考气压取为标准大气压, $101\,325 \text{ Pa}$;空气密度, $1.113\,3 \text{ kg}/\text{m}^3$;空气热膨胀系数, $0.003\,225 \text{ (1/K)}$;空气比热, $1\,006.43 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;室外计算温度, 38.1°C ;重力加速度 $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

根据工程实际外层玻璃的物性参数选取^[11]:传热系数 $5.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,吸收率 0.59、反射率 0.10、透射率 0.31;内层中空玻璃:传热系数 $1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,吸收率 0.49、反射率 0.25、透射率 0.26。

1.4 模型选择与边界条件

双层幕墙内的空气在吸收太阳辐射热后,空气密度变小,从而产生热气流的流动,在不同的室外

气温条件和太阳辐射照度下,流态可分成层流及紊流两种形式,其判别的依据是雷诺数 (Re)。当 $Re < 2\,320$ 时,属于层流流动;当 $Re > 4\,000$ 时,属于紊流流动;当 $2\,320 < Re < 4\,000$ 时,热气流的流动处于临界状态,既可能是层流也可能是紊流流动,要结合实际情况判别^[12]。根据幕墙系统的尺寸和气象条件,在计算出相应的 Re 后作流态判别,夏季和夏季(热)两个系列工况里采用的是 RNG $k - \varepsilon$ 紊流模型,冬季的系列工况则采用层流(laminar)模式。空气的密度变化采用 Boussinesq 假设,以准确模拟双层幕墙内因温差而产生的自然对流现象。

在边界条件设置方面,自然送风情况下的进风口、出风口分别设置为压力进口(Pressure-Inlet)与压力出口(Pressure-Outlet),并给定相应的压力、温度及紊流参数。而强迫送风时,需要根据风扇的流量-压力曲线在进风口处给定相应的压升参数。内外层玻璃则根据热平衡方程,给定固壁温度边界条件,作为浮力产生的驱动因素。热通道顶端和底部等其他区域设置为绝热壁面^[13]。

2 求解策略及计算结果

双层幕墙进风口面积: $142 \text{ mm} \times 1\,200 \text{ mm}$,出风口面积: $276 \text{ mm} \times 1\,200 \text{ mm}$,热通道间距 187 mm ,高度 $2\,500 \text{ mm}$,建模时采用三维笛卡尔坐标,网格划分主要采用六面体结构单元,模型的体单元数目为 200 万个。每个 case 经过约 8 000 个迭代步的运算后,流域里监测点的速度、压力和温度基本上达到稳定的状态,这时即认为计算收敛,可进入后处理阶段,分析计算结果^[14]。

自然热气流是指“烟囱效应”产生自然流动的气流;强化热气流是指由太阳能发电提供给蓄电池驱动小风扇送风增强烟囱效应而产生的热气流(含小风扇风量),后者又称强化“烟囱效应”。热功率则指从出风口每小时由热通道气流带走的热空气能量。关闭是指遮阳百叶开度为 0° 即各层叶片处于垂直位置,不透光;全开是指遮阳百叶开度为 90° 即各层叶片处于水平位置,部分透光;无遮阳就是遮阳百叶没有放下,对阳光完全没有遮蔽。按上述多种组合后分六种工况数值计算,得到温度、速度分布模拟效果见图 1 到 6,对比见表 1。

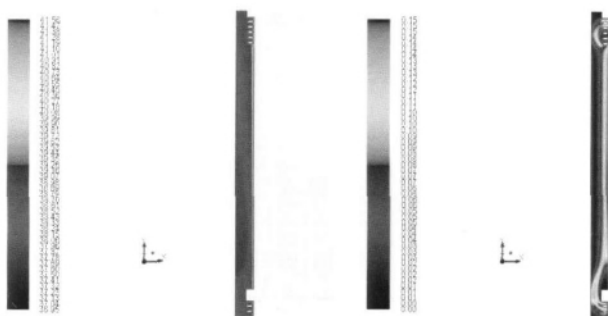


图 1 工况 1 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 1 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 1

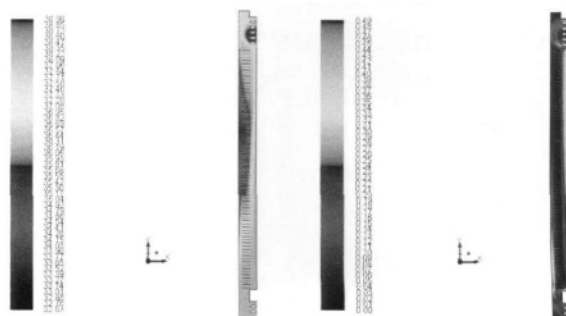


图 4 工况 4 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 4 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 4

工况 2: 无遮阳、强化热气流

工况 5: 遮阳百叶关闭、自然热气流

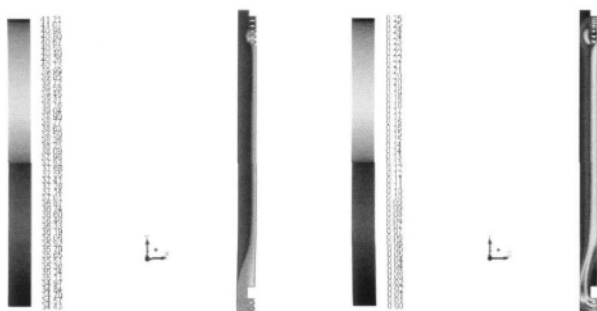


图 2 工况 2 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 2 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 2

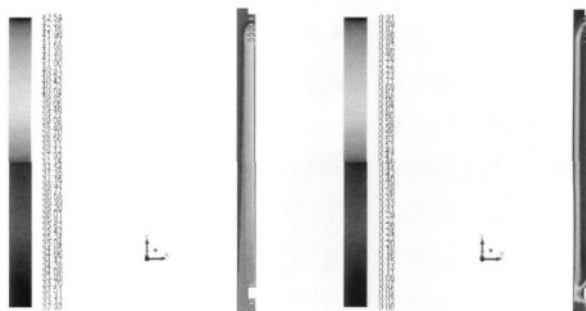


图 5 工况 5 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 5 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 5

工况 3: 遮阳百叶全开、自然热气流

工况 6: 遮阳百叶关闭、强化热气流

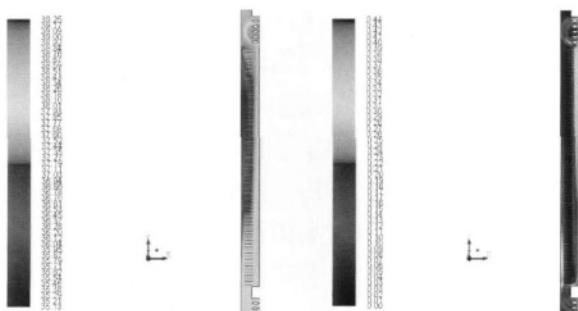


图 3 工况 3 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 3 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 3

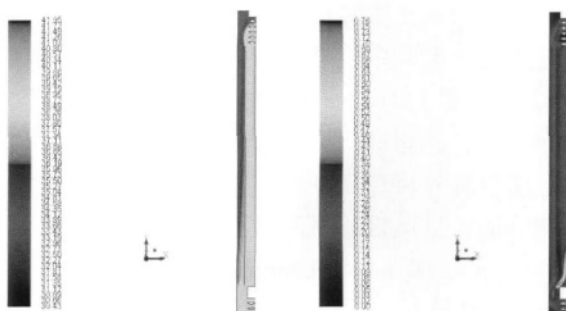


图 6 工况 6 时 Z 向中截面的温度和速度分布图
Fig. 6 The Z direction of central section temperature & velocity distribution on Mode 6

表 1 热工模拟六种工况的对比

Table 1 Comparison of the six modes by thermal simulation

工况	遮阳百叶开启程度	通道气流特征	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	热功率/ W	流量增加/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	热功率增加/ W
1	无遮阳	自然热气流	40.19	8.63		
2	无遮阳	强化热气流	74.35	20.09	34.2	11.96
3	全开	自然热气流	39.70	10.01		
4	全开	强化热气流	77.41	24.01	37.7	13.94
5	关闭	自然热气流	64.93	18.92		
6	关闭	强化热气流	133.11	45.50	64.93	26.58

3 结果分析与实验研究

注意到以上 6 种工况选取夏季 (最热时), 平均太阳辐射强度 $I = 591 \text{ W/m}^2$, 同一照度计算的。太阳能发电驱动强迫送风风机额定风量为 $22 \text{ m}^3/\text{h}$, 因而工况 1 与工况 2 无遮阳、工况 3 与工况 4 遮阳百叶全开及工况 5 与工况 6 遮阳百叶关闭强化热气流扣除额定输入风量 $22 \text{ m}^3/\text{h}$ 净增加量分别为 12.2、15.71 及 39.82 m^3/h 。热气流带走热量 (热功率) 也成倍增加。观察图 1 到图 6 中 Z 向中截面温度分布图发现, 强化热气流的温度比自然热气流的温度高并且在热通道空腔内更均匀, 由此可以解释强化热气流净增加的原因, 归结起来: 太阳辐射热量从外层玻璃内表面传入, 当风机送风时被迅速带到热通道空腔各角落对空气加热使温度上升, 上、下层温度差增大, 质量力增加, 导致热气流迅速增加, 热气流带走的热量 (热功率) 也显著增加。这种现象, 我们称为“强化烟囱效应”; 它对双层幕墙节能技术有重要的实用价值。

实验测试使用的双层玻璃幕墙实物模型, 采用单进风、单出风结构模式, 宽度为 1 300 mm (通道实际宽度 1 210 mm), 间距 600 mm, 高度为 3 150 mm, 扣除进风口及出风口窗栅各 375 mm 以及上部金属外墙板 730 mm, 最终热通道高度 $h = 1 670 \text{ mm}$ 。进风口流通面积为 0.3 (流通系数) $\times 1 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} = 0.099 \text{ m}^2$ (加装百叶和防虫网时), 出风口流通面积为 0.5 (流通系数) $\times 1 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} = 0.165 \text{ m}^2$, 外层为固定式中空玻璃幕墙, 内层为半扇固定、半扇平开的中空玻璃窗, 实际结构如图 7 所示。试验选择在广州地区天气晴好时段, 测试通道内遮阳百叶开闭程度和增强热气流等不同组合作用下热通道光伏幕墙的温度场变化, 并分析其综合性能的规律。实际的试验工作状态分为: 无遮阳自然热气流、无遮阳强化热气流、半遮阳 (遮阳百叶为水平位置, 即全开状态)

自然热气流、半遮阳强化热气流、全遮阳 (遮阳百叶为垂直位置, 即关闭状态) 自然热气流强化热气流等 6 种工况。实测 6 种工况下双层幕墙各个表面所接受的太阳辐射照度量和温度, 入风口、通道截面及出风口处热气流的温度和速度。

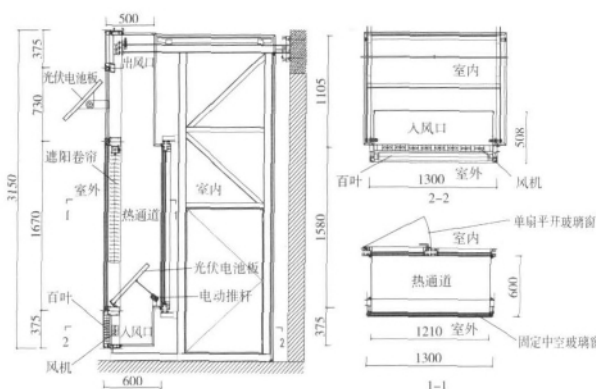


图 7 双层玻璃幕墙试验模型结构示意图 (单位: mm)

Fig. 7 Construction of double glass curtain wall experiment model

试验通过观察常见的 6 种工作状态, 测量双层幕墙各个表面所接受的太阳辐射照度量和温度, 分析遮阳百叶开启程度和进风口风量 (由进风口风机是否开启送风来控制, 未开启时称为“自然热气流”或“烟囱效应”; 开启后称为“强化热气流”) 组合作用对温度场的影响并计算相应的双层玻璃幕墙综合效率。6 种工况下双层幕墙的实验数据列于表 2。

从上述的试验结果, 可看出强化热气流比自然热气流 (“烟囱效应”) 带走的热量多, 促进了通道降温的效果。夏季太阳辐射照度强, 强化热气流流量增加约 2 倍, 在中午时段热气流带走的热量提升作用较大; 冬季太阳总辐射较弱, 强化热气流流量只增加约 1.5 倍, 而且中午时段热气流带走的热量提升作用与其他时段相当, 都为约 30% ~ 40%。在相同条件下打开风机强化热气流后, 强化

表 2 六种工况实验数据的对比

Table 2 Comparison of the six modes by experimental data

工况	时间	太阳辐射/ ($W \cdot m^{-2}$)	出风口 平均风速	流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	入风口平 均温度/ $^{\circ}C$	出风口平 均温度/ $^{\circ}C$	温差 / $^{\circ}C$	热功率 /W
无遮阳自然	11:15	718.9	0.273	162.2	29.40	31.53	2.13	109.2
无遮阳强化	11:30	727.7	0.443	263.1	29.68	31.83	2.15	178.9
半遮阳自然	09:15	466.1	0.237	140.8	24.27	26.28	2.01	89.5
半遮阳强化	09:33	594.6	0.35	207.9	23.97	26.55	2.58	169.6
全遮阳自然	10:33	707.1	0.268	159.2	28.80	31.65	2.85	143.4
全遮阳强化	10:15	605.2	0.442	262.5	27.25	30.32	3.07	254.8

“烟囱效应”能比自然热气流工况下增大热气流流量,增加热气流流动带走的热量(热功率),提升双层玻璃幕墙综合节能性。

事实上是通过利用太阳能发电驱动风机对双层幕墙强迫通风的实验研究^[15],先发现强化烟囱效应,再进行本次 CFD 数值模拟的。本文建立三维流体动力学模型,用 FLUENT 软件进行热工模拟,同时设计实物模型,分别按无遮阳、遮阳百叶全开及遮阳百叶关闭进行一系列实验,得到热通道幕墙在六种工况下强化热气流的温度场和速度场,并与自然热气流进行对比,再次充分验证“强化烟囱效应”的存在,分析了强化热气流流量及热功率显著增加的原因,为双层幕墙节能技术提供了新的理论研究方向,对双层玻璃幕墙的优化设计具有较大的实用意义。

参考文献:

- [1] 陈海,姜海清,郭金基,等. 太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道的节能计算和实验研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2006,45(6):35-39.
- [2] 张桂先,陈立冬,丁鸥. CFD 流体模型在双层换气幕墙传热分析中的应用[J]. 工程建设与设计,2003(9):4-7.
- [3] 陈海辉,邓先和,熊建明. 热通道玻璃幕墙的热工计算[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(3):89-92.
- [4] MANZ H, SCHAEELIN A, SIMMLER H. Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double facades[J]. Building and Environment, 2004, 39(9):1023-1033.
- [5] XU Xiaoli, YANG Zhao. Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(8):1498-1504.
- [6] 刘韬,顾平道,魏世雄. 热通道玻璃幕墙热工性能的 CFD 数值模拟[J]. 东华大学学报:自然科学版,2008,34(4):486-489.
- [7] 李荣敏,顾建明. 玻璃幕墙热通道内气流组织的模拟与分析[J]. 暖通空调,2007,37(1):23-28.
- [8] 程义华,撒世忠,周亚素,等. 带遮阳百叶热通道幕墙的热工数学模型[J]. 建筑热能通风空调,2006,25(4):10-15.
- [9] GAN G. Thermal transmittance of multiple glazing computational fluid dynamics prediction[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21:1583-1592.
- [10] 中国有色金属工业总公司. GBJ 19-87(2001年版)采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 151-2008 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [12] 陈海,姜海清,郭金基,等. 双层通风幕墙热气流有限分析计算方法的研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2005,44(1):34-37.
- [13] SAFER N, WOLOSZYN M, ROUX J J. Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind[J]. Solar Energy, 2005, 79:193-203.
- [14] 韩占忠,工敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [15] 陈海,毛伙南,王秋,等. 节能型热通道光伏幕墙热气流计算与实验研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2011,50(5):39-43.