

太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道的节能计算与实验研究^{*}

陈海¹, 姜清海², 郭金基¹, 毛伙南², 张开成², 杨欢军²
(1 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;
2 中山盛兴股份有限公司, 广东 中山 528412)

摘 要: 研究在不同太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道气流, 建立相关的流场和温度场状态方程组, 计算双层玻璃幕墙冬季增热保温和夏季热气流降温的节能性能。通过双层玻璃幕墙的实体模型试验, 观察流场结构, 温度场变化, 实测相关参数。最后开发有限分析计算软件, 并给出计算实例。
关键词: 双层玻璃幕墙; 太阳辐射; 热通道; 有限分析法; 实验
中图分类号: TP391.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 06-0035-05

双层玻璃幕墙外层上下两端有可控制空气进出的装置, 内层设可开启的窗, 内外两层玻璃之间形成一个相对封闭的热通道。在太阳辐射和外界大气的的作用下产生热效应, 可以改善建筑表面的微气候环境, 进而提高建筑内部环境舒适度, 同时还不妨碍玻璃幕墙的外观效果。它可以积极调节阳光辐射、主动应用空气流动, 起到节约能源的作用。具体表现为春秋季采光通风, 冬季保温增热, 夏季隔热降温。

1 双层玻璃幕墙热通道的节能计算

春秋两季, 进出风口及内层窗都开启, 在外层幕墙的遮挡和过滤下, 提供了各种天气条件下的自然通风, 节省空调通风换气的能耗; 冬天, 进出风口及内层窗都关闭, 形成一个封闭的空气保温层蓄热, 同时由于阳光的照射, 热通道内空气温度升高增热, 产生“温室效应”, 减少室内采暖的运行费用; 夏天, 进出风口开启而内层窗关闭, 形成一个通道与外界大气相互流动的空气间层, 在阳光照射形成的温差作用下, 室外空气可以从下部进风口进入, 升温后从上部出风口离开热通道, 产生“烟囱效应”, 减少室内空调制冷的负荷。如图 1 所示。

1.1 冬季蓄热增热量及效率计算

冬季, 外层玻璃所承受的太阳热辐射, 一部分经反射和空气对流散失在大气中, 另一部分经过吸收引起外层玻璃外表面温度升高。则外层玻璃外表

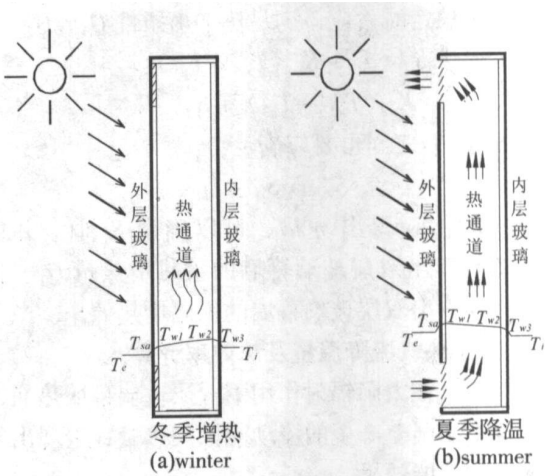


图 1 双层玻璃幕墙热通道节能示意图
Fig. 1 The sketch of double glass curtain wall

面综合平均值记为 T_{xi} :

$$T_{xi} = T_e + \zeta(T\alpha_e) \tag{1}$$

式中, T_e 为当地室外温度平均值; ζ 为外层玻璃太阳辐射吸收系数; α_e 为外层玻璃外表面换热系数; T 为太阳辐射照度平均值。根据所在地经、纬度以及具体的太阳时不同, 太阳辐射照度也不同^[1]。

外层玻璃内表面平均温度记为 T_{w1} :

$$T_{w1} = T_i + (T_{xi} - T_i) / (R_w \cdot \alpha_i) \tag{2}$$

式中, R_w 为外层玻璃传热阻, 单位为 $m^2 \cdot K/W$; α_i 为外层玻璃内表面换热系数。

$$T_i = (T_e + 1.5) \cdot \eta_i \tag{3}$$

式中 T 称为室内计算平均温度, η_i 为修正系数取 ≤ 1 。

将双层玻璃幕墙看成一个整体, 则其单位面积

^{*} 收稿日期: 2006 04 10
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (980343); 建设部研究开发资助项目 (06-K5-20)
作者简介: 陈海 (1974年生), 男, 讲师, E-mail: chenhai@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

受太阳光辐射及因温差而传递的蓄热增热量为：

$$Q_1 = S_{r1} \cdot I_1 + K_{w1} (T_{sa} - T_{w1}) \tag{4}$$

式中， S_{r1} 为双层玻璃幕墙太阳辐射蓄热系数； I_1 为双层玻璃幕墙太阳光辐射照度， $W \cdot m^{-2}$ ； K_{w1} 为外层玻璃传热系数， $W / ^\circ C \cdot m^2$ ；

双层玻璃幕墙进、出风口封闭，通道内空气经过太阳光辐射温度上升，使内层玻璃外表面温度上升并向内传递热量，同时内层玻璃也受到太阳光辐射获取热量，两者相加表示为：

$$Q_2 = K_{w2} (T_{w2} - T_{w3}) + S_{r2} \cdot I_2 \tag{5}$$

式中， S_{r2} 为内层玻璃太阳辐射蓄热系数； I_2 为内层玻璃内表面太阳光辐射照度， $W \cdot m^{-2}$ ； K_{w1} 为内层玻璃传热系数， $W / ^\circ C \cdot m^2$ 。

在太阳光辐射连续作用下，通道内空气温度上升并趋于稳定时，应该满足热平衡条件 $Q_1 = Q_2$ ：

$$S_{r1} \cdot I_1 + K_{w1} (T_{sa} - T_{w1}) = K_{w2} (T_{w2} - T_{w3}) + S_{r2} \cdot I_2 \tag{6}$$

同时 S_{r1} 和 S_{r2} 之间也要应满足：

$$S_{r1} = S_{r2} + \eta \tag{7}$$

通过实验测量得出 η 后，可以确定 S_{r1} 值。并由（4）式计算出双层玻璃幕墙的蓄热增热量 Q_1 。再由此可计算出双层玻璃幕墙的保温增热效率。

1.2 夏季热气流降温量及热效率计算

夏季，在太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道内气流由于温差产生的流动能散失热量，表现出气流降温的节能效果。

外层玻璃经太阳辐射传递给热通道的热量为：

$$Q_{w1} = K_{w1} (T_{sa} + T_{w1}) \tag{8}$$

热通道气流流动散失的热量 Q_{w2} 主要由热气流流动所带走的热量 Q_{w2}' 和流动所消耗的功率 Q_{w2}'' 两部分组成。可表示为：

$$Q_{w2} = Q_{w2}' + Q_{w2}'' \tag{9}$$

内层玻璃传递的热量为：

$$Q_{w3} = K_{w2} (T_{w2} - T_{w3}) \tag{10}$$

双层玻璃幕墙整体的热平衡方程为：

$$Q_{w1} = Q_{w2} + Q_{w3} \tag{11}$$

双层玻璃幕墙热交换效率记为，则

$$\eta = Q_{w2} / Q_{w1} \tag{12}$$

双层玻璃幕墙热通道气流散失的热量即降温量，需要对热通道气流的流场和温度场进行分析，计算热通道内气流的流量和温度，如图 2 所示。热通道气流计算模型可以看作一维流动的理想流体。通道内气流应满足连续性方程、N - S 动量方程及温度场（z 向）变化方程^[3]。还必须研究气流在进、出风口流动，内外层玻璃受热辐射的热交换，

夹道内气流的热平衡等因素。同时还需要考虑由于外界大气的变化及人工增加的通风设备对双层玻璃幕墙热通道内气流的影响。

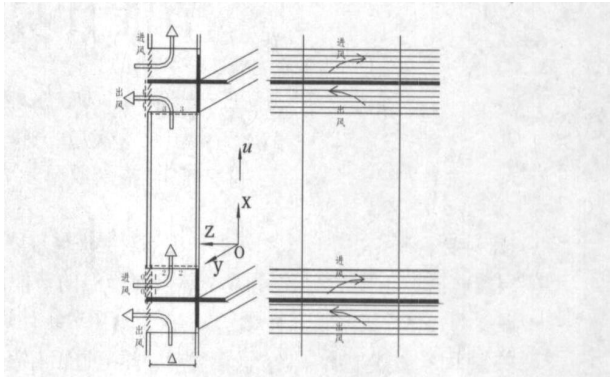


图 2 双层玻璃幕墙示意图
Fig. 2 The sketch of double curtain wall structure

先建立双层玻璃幕墙热通道在太阳辐射下由温度差而产生质量力引起热气流流动的流体动力学和传热方程组，再通过实验方法确定方程组中的热力学参数、物理常数、流体阻力系数及太阳蓄热系数等使方程组封闭，采用有限分析法^[3]，得到流量和温度，进而完成双层玻璃幕墙热通道气流的节能及效率计算。

2 参数测定的实验研究

选择广州地区不同太阳时辐射下，封闭双层玻璃幕墙的进出风口窗栅。进行双层玻璃幕墙保温增热测试，实测内外表面辐射照度、温度和进出口封闭时热通道温度场，确定太阳辐射蓄热系数和增热量。

测量热通道空气间层温度有 9 个测孔，如图 3 所示。然后将测量各点的太阳光照度和温度取平均值，或以有代表性的一组数据为基准，参考其它组数据加以修正。双层玻璃幕墙增热、保温性能测试结果如下：

①蓄热增热量 Q_1 随不同地区和季节太阳辐射照度的不同而不同。通过实验可以看出双层玻璃幕墙在太阳辐射的作用下，热通道内空气间层温度明显高于外、内层玻璃表面温度，符合太阳辐射蓄热的规律。

②将每日太阳时分成 3 个时段：8 ~ 10 时，11 ~ 13 时，14 ~ 17 时。每个时段温度测量共 81 点，照度含水平及垂直方向共 36 点。由此得出每 1 时段的太阳辐射蓄热系数 S_{r1} 再取平均值，见表 1。

③将双层玻璃幕墙热通道间距 Δ 选为 400 mm、200 mm。在这一数值范围内，测量得到的双层幕

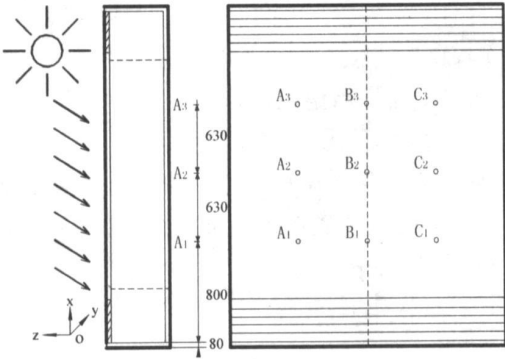


图 3 增热保温试验模型及测点示意图

Fig 3 The sketch of cbsemodel and measure points

墙太阳辐射蓄热系数 S_n 差距很小。两者误差小于 0.5%。

表 1 双层玻璃幕墙太阳蓄热系数				
Tab. 1 S_n The solar thermal storage coefficient				
Δ/mm	8~10时	11~13时	14~17时	平均值
$\Delta/400$	0.482	0.493	0.489	0.488
$\Delta/200$	0.481	0.494	0.488	0.4877

④在太阳辐射 I_1 很小时， $S_n \approx 0$ 测量得出内层玻璃内表面温度高于通道空气间层温度，再高于外层玻璃内表面温度，是向外散热，由此可看出，双层玻璃幕墙明显达到保温作用。

选择夏天不同的太阳时，打开进风口进行双层玻璃幕墙热通道气流试验，双进单出、单进双出模型及测试点分布见图 4。实测双进单出、单进双出和双进双出三种模型下的流场结构，通道内沿气流上升方向指定截面的温度、压力和速度分布，计算热气流的流量，确定流体力学方程物理常数。速度和压力的测试值取三点的平均值，或以有代表性的一组数据为基准，参考其他组加以修正。

同时，结合实际工况还要考虑外界大气自然风和人工强迫风对双层玻璃幕墙热通道的进、出风口风速和气压的影响以及进、出风口外加不同构造窗柵后，局部阻力损失系数的变化。

3 计算软件设计

在一维流动模型下，建立气流流动的动力学和传质传热方程组，通过实验方法确定相关参数和物理常数使方程组封闭，再采用有限分析（FA）法将热通道分成有限个小单元体，将非线性温度函数随 x 变化的曲线形式用折线形式来代替，将耦合偏微分方程解耦，寻求局部解析解转化为全局数值解^[4]，以此编制计算程序，开发双层幕墙热气流

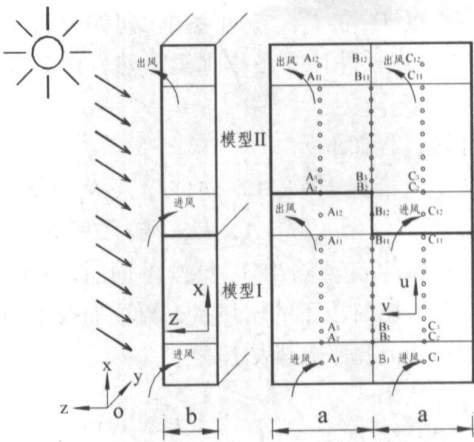


图 4 热气流实验模型及测点分布示意图

Fig 4 The sketch of model and measure points

计算的软件^[5]。

程序设计选择 Microsoft Visual C++ 6.0 语言作为开发工具。根据国家气候资料提供的若干大城市冬、夏季太阳照度及室外平均气温建立相关数据库。编制计算机程序，开发 HWFACS 软件。设计框图见图 5。

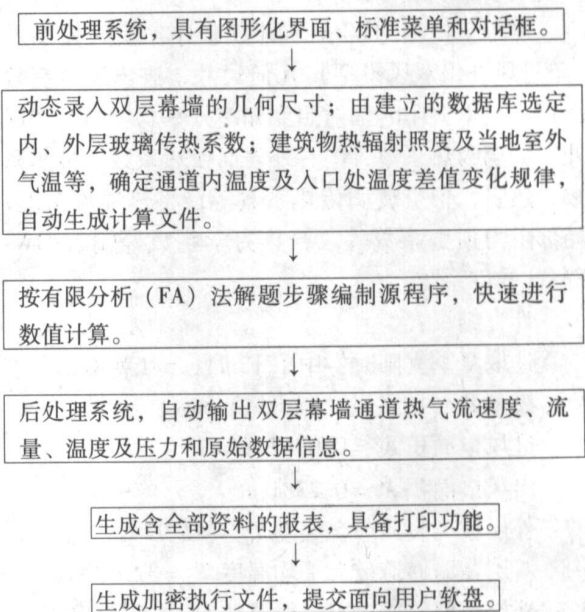


图 5 计算软件设计流程图

Fig. 5 Flow chart of computer software

4 算例及讨论

《上海世纪大道双层幕墙招标工程》热通道幕墙面积 $A=2590\text{ m}^2$ ，中空玻璃传热系数 $K_{w2}=2.0\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ，双层幕墙传热系数 $K_{w1}=1.5\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ，上海的地区室外冬夏两季温度 T_w 和太阳辐射照度 I 由国家规范确定。双层幕墙蓄热系数 S_n 取平均值 0.488，中空玻璃蓄热系数 S_g 取 0.438，冬

季室内温度 T_{w3} 取 T_w , 每年冬季以 100 d 计算, 试用 HWFACS 软件计算冬季保温增热性能和夏季热气流计算。

计算过程如下:

冬季: 依据 HWFACS 软件输入 K_{w1} 、 K_{w2} 、不同时段 S_{t1} 、 S_{t2} 、 I 、 A 、 T_w , 输入所在地区位置, 由数据库自动输出 T_{sa} 。按不同时段 S_{t1} 、 I 算出在该太阳时段下的增热量, 再取加权平均值得到当天每小时每平方米增热量。

计算结果:

双层幕墙 $T_{sa} = -1^\circ\text{C}$,

每小时每平方米增热量: $Q_1 = 145.41 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$

中空玻璃每小时每平方米增热量: $Q_2 = 117.48$

$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$

每小时每平方米实际增数量: $Q = 29.73 \text{ W} \cdot \text{m}^2$

$\cdot \text{h}$

双层幕墙面积 $A = 2590 \text{ m}^2$,

每小时实际增热量 $72.35 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}$

每年冬季按 100 d 每天 8 h 计算,

双层幕墙由太阳辐射增热量: $Q = 72347 \text{ kW}$ 。

双层幕墙效率: 23.78%

夏季: 依据 HWFACS 计算程序, 输入模型 II (单进风、出双风模型) 几何尺寸, 进出风口有效面积。夏季太阳时辐射照度和室外平均气温, 查阅外层玻璃吸热系数, 内、外表面换热系数, 传热系数, 热阻, 中空玻璃传热系数等; 将热气流密度, 局部阻力损失系数等^[6], 热力学系数等输入 HWFACS 软件系统。

计算结果:

选取夏季太阳时: 中午 12 时, S (朝南)

模型 II (单进风, 双出风):

进风口面积 $A_1 = 0.0567 \text{ m}^2$

出风口面积 $A_2 = 0.2381 \text{ m}^2$

外层玻璃表面综合温度 $T_{sa} = 32.97^\circ\text{C}$,

双层幕墙通道最大平均温度 $T_w = 32.79^\circ\text{C}$,

外层玻璃传递太阳辐射热量 $Q_{w1} = 5.83 \text{ W}$

热气流带走热量 $Q_{w2} = 0.86 \text{ W}$

热效率: $Q_{w2} = 14.67\%$ 。

进行双层玻璃幕墙受太阳辐射由温差效应产生热气流的模型试验, 实测入口, A_4 、 A_6 、 A_8 、 A_{11} 截面及出口的速度、压力及温度, 实验模型结构如图 6 所示。选择实验模型 I (双进风、单出风模型), 几何尺寸: $\Delta = 0.2 \text{ m}$, $b = 1.2 \text{ m}$, $h = 2.5 \text{ m}$ 。广州地区夏季太阳时: 16 朝向 H(S): $I_1 (\text{W} \cdot \text{m}^2)$;

$W(E)$: $L_2 (\text{W} \cdot \text{m}^2)$, 由国家标准 GBJ19-87 (2001 年版) 确定。由于天气闷热, 室外平均气温由平均值 31.1°C 加最高温幅值计算。试用 HWFACS 计算程序计算双层幕墙热气流速度, 流量, 压力及温度与实验测出相应截面的速度、压力和温度值比较, 并计算外层玻璃传递热量 Q_w , 热气流带走的热量 Q_{w2} 及热效率。

计算过程如下:

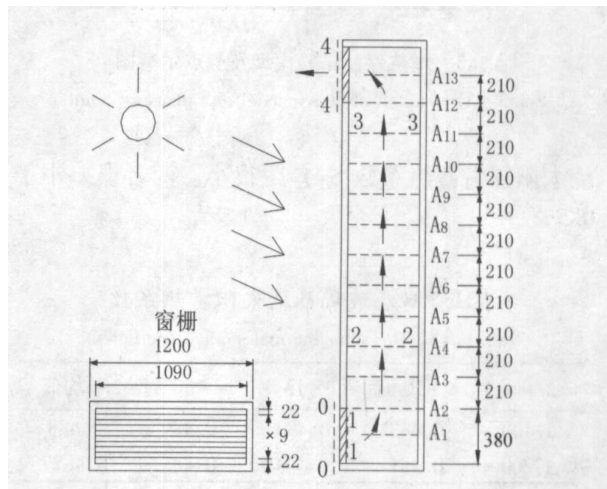


图 6 实验模型结构示意图

Fig 6 The sketch of experiment model

依据 HWFACS 计算程序, 输入双层幕墙几何尺寸, 热力学系数, 流体力学参数和物理量等输入 HWFACS 软件系统。

层流流动 $a = 2$

有限单元划分可以根据需要确定, 为了与实验值对比作如下划分:

截面 0-0 ~ 1-1 为第 1 单元;

截面 1-1 ~ 2-2 为第 2 单元;

截面 2-2 ~ 3-3 分为 3 单元;

截面 3-3 ~ 4-4 为第 6 单元。

经过 HWFACS 计算软件计算结果如下:

外层玻璃表温: $T_{sa} = 37.86^\circ\text{C}$,

内层玻璃外表温: $T_{w3} = 36.35^\circ\text{C}$,

夹道内最高平均温度: $T_w = 37.11^\circ\text{C}$,

通道入口气流速度: $u_1 = 0.0839 \text{ m/s}$

热气流流量: $Q = 130.337 \text{ m}^3/\text{h}$

热气流最大压力: $P_{\max} = 0.210 \text{ Pa}$

热效率: $\eta = 47.44\%$ 。

经过 HWFACS 软件计算出各截面的速度、温度及压力, 与实验值对照, 列于表 2

表 2 计算结果与实验值对照
Tab. 2 The experiment and calculation comparison

单元段	计算值 u_i /(m·s ⁻¹)	实验值 u_i /(m·s ⁻¹)	计算值 T_i /℃	实验值 T_i /℃	计算值 P_i /Pa	实验值 P_i /Pa
0-1	0.084	0.088	35.78	35.78	-0.014	-0.012
1-2	0.114	0.116	36.49	36.3	0.160	0.17
2-3	0.135	0.141	36.67	36.55	0.179	0.18
3-4	0.156	0.163	36.83	36.9	0.187	0.192
4-5	0.187	0.194	37.02	36.98	0.201	0.208
5-6	0.168	0.175	37.13	37.1	0.21	0.22

现阶段双层玻璃幕墙热通道气流的节能计算方法还比较复杂，不太实用。例如，在计算条件齐备时，可以使用美国 ANSYS 等通用有限单元法程序^[7-9]，但使用较为繁琐，成本较高。再如，假定边界条件简单时，可以使用热工学经验公式迭代求解^[9]，但计算结果误差又较大，应用较窄。

本文针对现代新型建筑技术发展的趋势，采用有限分析法，于文 [9] 的计算方法不同，在计算技术上有重要创新；自主开发的双层幕墙增热保温和热气流有限分析计算专用程序，适用范围广，运行速度快，计算精度高，功能齐全操作简便，可满足现代大型公共建筑或高层商业建筑双层幕墙设计对通道热气流节能分析计算的需要，推动双层玻璃幕墙的技术进步，有具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准. GBJ19-87 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
[2] L 普朗特. 流体力学概论[M]. 郭永怀, 等译. 北京: 中

国科学出版社, 1981.
[3] 郭金基. 变截面开口薄壁杆件的有限分析法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1985 24(4): 39-50
[4] 陈海, 姜清海, 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.
[5] 姜清海, 陈海, 郭金基, 等. 双层幕墙热气流有限分析计算软件及应用[J]. 机电工程技术, 2005 34(1): 79-81
[6] 姜清海, 郭金基, 陈海, 等. 双层幕墙强迫送风有限分析的计算机软件与实验研究[J]. 广东土木建筑, 2004 (11): 9-11.
[7] 张桂生, 陈奕东, 丁鸥. CFD 流体模型在双层换气幕墙传热分析中的应用[J]. 工程建筑与设计. 2003(9), 5-7
[8] 丁浩峰. 双层幕墙通道内空气流动的 CFD 计算及分析[J]. 门窗幕墙信息, 2004(8): 10-11.
[9] 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

Experiment Research and Them al Cakulation on the Heat Channel of Double Glass Curta in Wall under the Solar Radiation

CHEN Hai¹, JIANG Qing-hai², GUO Jin-jin¹, MAO Huo-nan², ZHANG Kai-dong², YANG Huan-jun²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering Sun Yat sen University, Guangzhou 510275 China
2. Zhongshan Shengxing Limited Liability Company, Zhongshan 528412 China)

Abstract The liquid status and temperature fields on the effect of the difference solar radiant in heat channel of the double glass curtain wall are researched. Base on the status of liquid flow and heat transmit, the equations of airflow consecutive and heat conservation are founded. Using the finite analysis method, the energy conservation performance is transferred. According to the models experiment, the partial resistance loss coefficients are measured. Finally, the software is developed and the example is introduced.

Key words double glass curtain wall; solar radiation; heat channel; finite analysis method; experiment