

双层通风幕墙热气流有限分析计算方法的研究^{*}

陈海¹, 姜清海², 郭金基¹, 张开成², 张镇成², 崔传芹²

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;

2. 中山盛兴幕墙有限公司, 广东 中山 528412)

摘要: 研究双层幕墙在温差作用下引起热气流流动状态。针对双层幕墙通道, 建立气流的 N-S 动量方程、连续性方程和温度场方程, 将通道分成有限段单元, 在一维流动下寻求方程组的解析解, 通过单元间的速度、压力及温度连续条件化为数值解, 开发有限分析计算软件, 并给出计算实例。

关键词: 双层幕墙; 热气流; 有限分析法; 计算软件

中图分类号: TP391.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 01-0034-04

双层通风幕墙是由内、外两道幕墙组成。内外幕墙之间形成一个相对封闭的通道, 空气可以从下部进风口进入, 又从上部出风口离开这一通道。在这通道中空气处于流动状态, 热空气也可在这一通道流动, 经出风口排出, 减小太阳辐射热, 节约能源。双层玻璃及中间空气层有阻隔室外噪音、滤过阳光避免直射, 无眩光困扰, 实现自然光照明, 增加室内舒适感; 冬季将进、出风口封闭可起保温作用。这种幕墙是一种新型的幕墙结构, 代表幕墙技术的新发展。

双层幕墙通道热气流流动属流体动力学及传热传质学问题, 包含质量的传递、动量及能(热)量的交换, 极其复杂。国内外的研究多半停留在实验阶段, 理论计算要精确求解流体动力学和传热方程十分困难。本文首先建立双层幕墙通道由温度差而产生质量力引起热气流流动的 N-S (Navier-Stokes) 动量方程、温度场方程及连续性方程, 用有限分析 (FA) 法^[1]进行局部解析解与全局数值解, 编制计算程序, 开发双层幕墙热气流计算的软件。

1 双层幕墙通道热气流的计算模型

双层幕墙外层为夹胶玻璃, 内层为中空玻璃, 通道间距为 Δ , 其尺寸远小于宽度及高度, 选取的坐标 $xoyz$ 如图 1 所示。由于气流在 z 向速度变化小, 气流流速在 x 及 y 方向分别记为 u 、 v 。假设气流是稳定流动, 速度低, 气流看作是**不可压缩的; 并忽略黏性力的影响, 看作理想流体。从双层幕墙热气流流动的大量实验观察表明, 气流进入通

道后, 沿 x 方向流动是主要的, y 方向气流流动是次要的。即 $u \gg v$, 因而模型的热气流流动可以看作一维流动。此时, 通道内气流速度仅以表示, 应满足连续性方程、N-S 动量方程及温度场 (z 向) 变化方程^[2]。

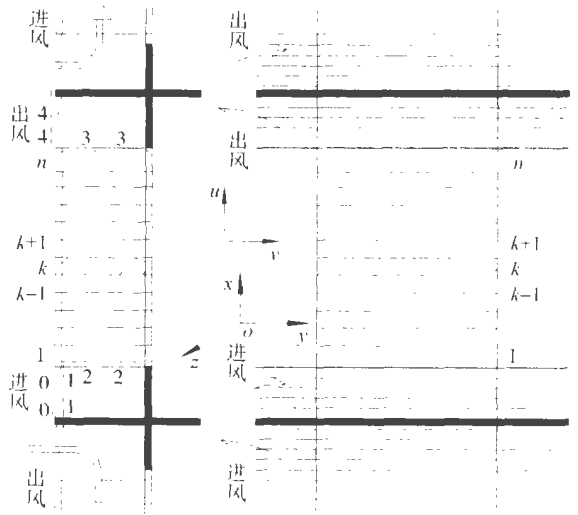


图 1 双层幕墙计算模型及单元划分示意图

Fig 1 The sketch of double curtain wall structure

连续性方程:

$$\rho \frac{du}{dx} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$u \frac{du}{dx} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

温度场方程:

^{*} 收稿日期: 2004-04-01

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (980343); 广东省中山市科技项目 (2004A139)

作者简介: 陈海 (1974 年生), 男, 讲师, 通讯联系人, 郭金基, E-mail: chenhai@tom.com

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{3}$$

式中， ρ 为气流的密度； P 为流体的压力； T 为流场中的温度； a 为动能修正系数，由气流的雷诺（Reynold）数判别：属紊流时为 1；属层流时为 2。 X 单位质量力在 x 向的投影。

X 是由于外层玻璃（单片玻璃）受太阳热辐射使气流热膨胀（密度差）产生的单位质量力在坐标轴分量，与入口温度 T_1 、通道内最高温度 T_3 及 x 有关，且一般是 x 的非线性函数，而 T_1 、 T_3 选取温度差 $(T_3 - T_1)$ 。如果由温度差而产生密度差是引起运动的惟一原因，这种运动称为自然流动。

单位质量力：

$$X = g \cdot \psi \cdot \theta(T, x, \psi) \tag{4}$$

式中， ψ 为温度差产生质量力的热力学系数； θ 为温度差。

热气流计算模型在一维流动情况下，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，概括如下：

(1) 在 1—1 入口截面两侧及出口截面 3—3 两侧气流速度、压力： u_1 、 P_1 、 u_3 、 P_3 应该满足贝努里能量方程和满足连续性方程。

(2) 模型外表面为外层玻璃承受太阳辐射热量。根据文[3] 可以查出建筑物所在地区太阳总辐射照度 I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)，再由外层玻璃的吸热系数 ρ_i 和外表面换热系数 α_e 及当地室外平均气温 T_e 写出玻璃外表面综合温度平均值 T_{sa} 的计算式。根据外层玻璃传热阻 R_i 和内表面的换热系数可以计算玻璃内表面温度平均值 T_{w1} 。由外层玻璃的传热系数 K_{w1} 和两侧的温度差 $T_{sa} - T_{w1}$ ，可以计算出外层玻璃由太阳总辐射照度提供给模型的热量 Q_{w1} 。

(3) 双层幕墙内层为中空玻璃，通常已给出中空玻璃的传热系数 K_{w2} 和建筑结构的室内温度记为 T_{w3} ，设中空玻璃在双层玻璃夹道侧表面温度为 T_{w2} ，则可以计算出中空玻璃传递的热量 Q_{w3} 。

(4) 双层幕墙通道内热气流流动所带走的能量由两部分组成：①热气流流动所带走的热量 Q'_{w2} ，与气流是层流或紊流流态有关，可以导出其计算公式；②热气流流动所消耗的功率 Q''_{w2} ，将两者合拼 $Q_{w2} = Q'_{w2} + Q''_{w2}$ 。

综上所述，模型系统热平衡方程为：

$$Q_{w1} = Q_{w2} + Q_{w3} \tag{5}$$

双层幕墙热交换效率记为 η ，则

$$\eta = Q_{w2} / Q_{w1} \tag{6}$$

双层幕墙热气流一维自然流动的模式可以由式（1）—式（3）和综上所述的因素，结合实验确定热力

学参数、物理常数及流体阻力系数，列出补充方程（4）使微分方程封闭，才能具备求解的条件。

2 有限分析法求解方程及软件设计

双层通风幕墙热气流流动要满足式（1）—（3），质量力 X 与温度差和 x 的函数关系（4），同时还要满足进、出风口段的贝努里能量方程，方程组是耦合的，并且是非线性的，要精确求解非常困难。本文首先通过实验方法确定（1）、（4）式中的物理常数 ψ 使方程组封闭，然后采用有限分析法求解。其要点如下：将双层幕墙通道分成有限个小单元体，如图 1 所示。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，即在小单元段 $T(x_k)$ 等于常量，这样可以将耦合偏微分方程解耦^[4]。

设任取 k 单元，一维流动条件下，定常、不可压缩，忽略气体自身质量力，只考虑由温差引起自然流动。将（4）式代入（2）式得动量方程

$$u_k \frac{du_k}{dx} = g \cdot \psi \cdot \theta(T_k, x) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP_k}{dx} \tag{7}$$

温度场方程

$$u_k \frac{\partial T_k}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} \tag{8}$$

在 k 单元段， $x = x_k$ ， $T(x_k) = f(x_k, z) = f^*(z)$ 对 x_k 为常数 $\frac{\partial T_k}{\partial x} = 0$ ，则（8）式为：

$$\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} = 0$$

利用双层幕墙通道两侧玻璃的表面温度为边界条件，求出 T_k 的解析解，代入（7）式，进行动量积分求出 u_k 的解析解。

在单元体之间应满足速度、压力及温度的连续条件，即：当 $x = x_k$ 时，

$$u_k A_k = u_{k-1} A_{k-1} \quad P_k = P_{k-1} \quad T_k = T_{k-1} \tag{9}$$

采用有限分析法解出在单元微分方程（7）、（8）连同进、出风口气流应满足贝努里能量方程的局部解析解；由单元体之间的速度、压力及温度的连续条件（9）转换为全局数值解，以此设计计算程序。也可以设法先解双层幕墙通道微分方程组求出解析解，再分成有限单元段通过连续条件（9），转换为全局数值解，设计计算程序。

选择 Microsoft Visual C++ 6.0 语言作为开发工具，直接在 Windows 平台上进行双层幕墙通道气流有限分析计算机软件系统（简称 AFFACS）的设计。程序设计流程如下：①前处理操作系统，具有图形化界面、标准菜单和对话框；②动态录入双层幕墙

结构、气流、热力学参数等信息，自动生成计算文件；③编制源程序，进行数值计算；④后处理操作系统，自动输出计算结果和原始数据信息；⑤生成含全部资料的报表，具备打印功能；⑥加密执行文件，提交面向用户软盘。

3 算例及讨论

算例 1：北京某大厦一期招标工程双层幕墙如图 2 所示。依据 AFFACS 计算程序，输入模型 I（双进风、单出风模型）几何尺寸 $a=1.4\text{ m}$ 、 $b=0.415\text{ m}$ 、 $h=2.5\text{ m}$ ，进风口、出风口有效面积。

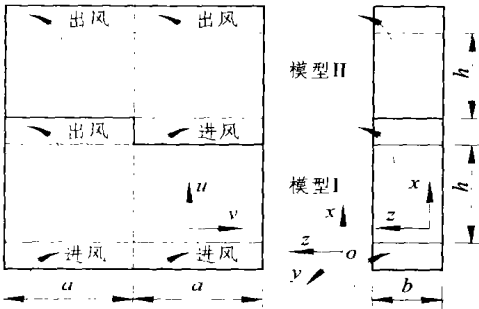


图 2 算例模型示意图
Fig. 2 The sketch of model

按照国家标准《采暖通风与空气调节设计规范》GBJ19 87（2001 年版）^[4] 查询。北京：北纬 $39^{\circ}48'$ ，透明度等级 4，查出太阳时（12 时）：辐射照度 I 朝南（S）：448。

北京夏季室外平均气温 T_e ，查阅外层玻璃吸热系数，内、外表面换热系数 α_e 、 α_i ，传热系数 K_{w1} ，热阻 R_i ，中空玻璃传热系数 K_{w2} ……等输入 AFFACS 软件系统。

将热气流密度 ρ ，局部阻力损失系数 ζ 等输入 AFFACS 软件系统；

将热气流热力学系数 C_p 、 ψ C_v 、 λ 等输入 AFFACS 软件系统。

经过 AFFACS 计算软件计算结果如下：

选取夏季太阳时：中午 12 时，S（朝南）

模型 I（双进风，单出风）：

进风口面积 $A_1=1.4\times0.415\times2=1.162\text{ (m}^2\text{)}$

出风口面积 $A_2=0.581\text{ m}^2$

外层玻璃表面综合温度 $T_{sa}=33.97\text{ }^{\circ}\text{C}$

双层幕墙通道最大平均温度 $T_w=32.36\text{ }^{\circ}\text{C}$

外层玻璃传递太阳辐射热量 $Q_{w1}=31.27\text{ W}$

热气流带走热量 $Q_{w2}=8.31\text{ W}$

热效率： $\eta=26.58\%$

算例 2 进行双层通风幕墙受热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，模型结构如图 3 所示。选择实验模型 II（单进风、双出风模型），几何尺寸： $a=1.2\text{ m}$ ， $b=0.2\text{ m}$ ， $h=2.5\text{ m}$ 。

依据国家标准，广州地区夏（秋）季太阳时：16，朝向 H（S），太阳辐射照度 $I=462\text{ W/m}^2$ 。由于天气闷热，室外平均气温由平均值 $31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加最高幅值 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算。

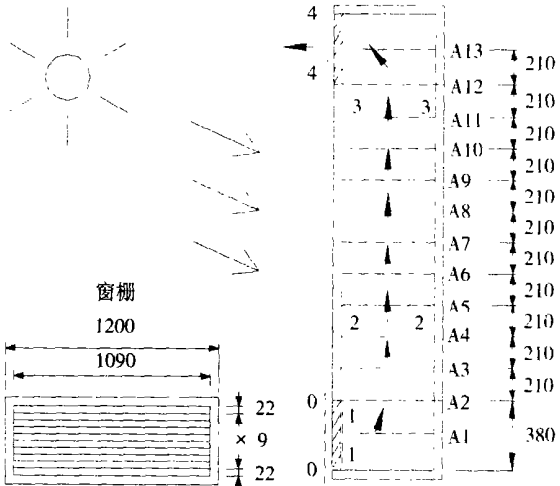


图 3 双层幕墙结构示意图
Fig. 3 The sketch of structure

依据 AFFACS 计算程序，输入双层幕墙几何尺寸： a 、 b 、 h 、 A_1 、 A_2 及流通面积修正系数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 ；输入流体力学及热力学参数： z_1 、 z_2 、 z_3 、 ψ C_p ；输入气流物理量： P_0 、 u_0 、 ρ 。

有限单元划分：截面 0—0 至 1—1 为第 1 单元；截面 1—1 至 2—2 为第 2 单元；截面 2—2 至 3—3 分成第 3 单元到第 5 单元；截面 3—3 至 4—4 为第 6 单元。

经过 AFFACS 计算软件计算结果如下：

选取夏季太阳时：16 时，H（S）（南向有直射）

模型 II（单进风，双出风）：

进风口面积 $A_1=1.090\times0.22\times9=0.2158\text{ m}^2$

出风口面积 $A_2=0.4316\text{ m}^2$

外层玻璃表面综合温度 $T_{sa}=39.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，

双层幕墙通道最大平均温度 $T_w=37.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，

外层玻璃传递太阳辐射热量 $Q_{w1}=41.32\text{ W}$

热气流带走热量 $Q_{w2}=12.69\text{ W}$

热效率 $\eta=30.72\%$ 。

经过 AFFACS 计算程序计算各截面的速度值、温度值及压力值，与实验值对照，分别列于表 1。

表 1 计算结果与与实验值对照

Tah 1 Comparison between computational results and test results

单元段	$u_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$P_i/(\text{Pa})$		$T_i/^\circ\text{C}$	
	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值
0—1	0.183	0.183	-0.077	-0.08	35.99	36.0
1—2	0.192	0.193	0.203	0.18	36.89	36.96
2—3	0.172	0.162	0.243	0.22	37.13	37.40
3—4	0.152	0.148	0.269	0.26	37.32	37.52
4—5	0.122	0.122	0.313	0.30	37.57	37.68
5—6	0.091	0.092	0.346	0.32	37.71	37.68

文[5]将 $\theta(T,x)$ 用双层幕墙进口及出口的温度差值表示,即 $\theta(T,x)$ 为常量,则方程(2)式可以直接进行动量积分。然而 $\theta(T,x)$ 若是幕墙通道内 T 及 x 的函数,必须建立 $\theta(T,x)$ 的补充方程,(2)式才能求解。本文研究沿热气流流动方向温度 T 按曲线变化的情况,采用有限分析方法,在每个小单元段内温度差 $\theta(T,x_0)$ 近似看作常量,用阶梯形折线逼近真实曲线,对(2)式进行动量积分求解微分方程组,得到局部解析解,再转化为全局数值解;其产生的计算误差可用文[1]的方法估算,近似为 $h_k/3n^2$ (h_k 为 k 单元的标高, n 为单元数),只要 n 充分大,可以满足精度的要求。

双层幕墙热气流的计算,在计算条件(例如温度差)具备下,可以采用美国 ANSYS、FLUENT 通用程序。ANSYS 是用有限元(FE)法、FLUENT 是用控制容积有限差分(FD)法编制功能很强的程序。但由于双层幕墙热气流的计算必须事先输入符合中国气候情况的热工参数,双层幕墙的热工参数及流体力学参数,求得温度差的变化模型,才能得到较为符合实际的结果,前期工作花去不少时

间^[9]。ANSYS 等输出的流场结构,压力及流速分布图,按工程设计要求也不规范,并且 ANSYS 等通用程序价格昂贵,要由经专门培训的程序员操作才能普及使用^[7]。

本文采用有限分析(FA)计算方法,它与有限单元(FE)法和有限差分(FD)法不同,其实质是将局部解析解与全局数值解相结合的计算方法,在计算技术上有重要创新。本文自主开发的双层幕墙热气流有限分析计算软件系统(AFFACS)专用程序,计算速度快,只要输入幕墙几何尺寸及热工资料和流体力学相关的参数,不超过 3 min 便能得到计算结果;计算精度高,功能齐全操作简便,能满足现代大型建筑或高层建筑双层幕墙热气流及热工参数设计计算的需要,具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 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.
[2] 郭金基, 张应元. 污水处理系统的紊流方程组及其应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1992, 31(3): 1—7.
[3] 中华人民共和国国家标准《采暖通风与空气调节设计规范》GBJ19—87(2001)[S].
[4] 姜清海, 郭金基, 宇松凯, 等. 钢索结构计算的有限分析法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2002, 41(5): 15—18.
[5] 普朗特 L. 流体力学概论[M]. 郭永怀, 等译. 北京: 中国科学出版社, 1981.
[6] 张桂生, 陈立东, 丁欧. 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.
[7] 于浩峰. 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.

Finite Analysis Calculation Method of
the Hot Air Flow inside the Double Curtain Wall

CHEN Hai¹, JIANG Qing hai², GUO Jin ji¹, ZHANG Kai cheng², ZHANG Zheng cheng², CUI Chuan qin²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Zhongshan Shengxing Curtain Wall Co., Ltd, Zhongshan 528412, China)

Abstract: The liquid status on the effect of the temperature difference inside the double curtain wall is researched. On the channels inside the double curtain wall, the Navier-Stokes momentum equations and the consecutive equations and the temperature field equations are constituted. Using the theory of one dimensional liquid flow, the channel is divided into a series of discretional units, and the local analytical solution of the equations is founded. With the confined conditions and the connected conditions on the speeds and pressures and temperatures in the units, the whole numerical solution is transferred. Finally, the computer software is developed, and the example is introduced.
Key words: double curtain wall; hot air flow; finite analysis method; computation software