

# 框式玻璃幕墙热工性能的数值模拟方法

雷 克<sup>1</sup>, 张其林<sup>1</sup>, 庞绍华<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海同磊土木信息技术有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 研究了框式玻璃幕墙的稳态传热机理和光学性能, 运用差分法建立了玻璃体系的传热和光学性能数值计算模型, 基于二维稳态热传导理论推导并建立了框体系在对流、辐射等边界条件及其耦合作用下的热工性能有限元计算模型. 采用 Visual C++ 和 ObjectARX 对 AutoCAD 进行二次开发, 研发了框式玻璃幕墙热工性能计算软件. 通过与多种商业软件的计算对比, 验证了文中计算理论和数值方法的正确性.

**关键词:** 框式玻璃幕墙; 热工性能; 辐射对流; 数值方法

**中图分类号:** TU111.19

**文献标志码:** A

## Numerical Simulation Method on Thermal Performance of Frame Supported Glass Curtain Walls

LEI Ke<sup>1</sup>, ZHANG Qilin<sup>1</sup>, PANG Shaohua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tonglei Civil Engineering Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An investigation was made into steady-state heat transfer mechanism and optical properties of frame supported glass curtain walls (FSGCW) are investigated. The differential method was applied to establishing the numerical computation model of the heat transfer and optics performances of glass systems. Based on the two-dimensional steady-state heat transfer theory, the thermal performance finite element model was derived and established for frame systems in boundary conditions of convection, radiation as well as the couple of them. The FSGCW thermal performance analysis software was developed based on the secondary compiling of the AutoCAD using Visual C++ and ObjectARX. The proposed theory and numerical method was verified on the basis of a comparative study of various prevailing commercial softwares.

**Key words:** frame supported glass curtain walls; thermal performance; radiation and convection; numerical method

建筑玻璃幕墙是指由玻璃和支承结构体系共同组成的建筑外围护结构, 按照支承体系的不同可分为点支、全玻式和框式玻璃幕墙等<sup>[1]</sup>. 玻璃幕墙已成为现代建筑的标志. 伴随着能源危机的加重和中国城市化进程的推进, 建筑能耗占我国社会总能耗的比例呈增长态势, 且增速越来越快, 从 1996 年的 19% 增加到了 2008 年的 23%<sup>[2]</sup>. 而建筑能耗中的很大一部分用于改善室内的热环境<sup>[3]</sup>. 建筑幕墙作为现代建筑中使用较多的围护结构, 其热工性能的优劣将直接影响室内热环境, 从而决定建筑能耗.

国外关于建筑玻璃幕墙热工性能的研究起步较早<sup>[4-7]</sup>, 国内学者也对玻璃幕墙热工性能计算进行了相关研究<sup>[8-10]</sup>. 我国在参考国内外幕墙热工计算研究成果和标准体系的基础上, 颁布了《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJ/T151—2008)<sup>[11]</sup>, 包括了玻璃幕墙热工性能的相关计算方法, 但关于计算理论未详细说明.

本文对框式玻璃幕墙传热机理进行了研究, 基于传热学理论, 运用差分法和有限单元法分别推导并建立了玻璃体系和框体系的热工分析数值计算模型, 并采用 Visual C++ 和 ObjectARX 对 AutoCAD 进行了二次开发, 研发了适用于我国规程的框式玻璃幕墙热工性能分析计算软件. 研究结果表明, 本文的计算理论和所编制的软件能够准确地计算玻璃幕墙热工性能, 并且能够推广应用到其他形式的幕墙体系中.

## 1 玻璃体系传热数值计算模型

传热系数是反应玻璃热工性能的重要指标. 在幕墙设计过程中, 采用不同型号的玻璃组成的玻璃体系传热系数往往未知. 由于玻璃的传热过程可近

似地认为是一维热传导,因此本文基于一维热传导理论<sup>[12]</sup>,以双层玻璃体系且封闭空腔填充空气为例,运用差分法建立玻璃体系传热系数的数值计算模型。

双层玻璃由玻璃与封闭空腔组成,如图1所示。当传热过程处于稳态时,玻璃体系的热过程包括玻璃内部的导热、玻璃与环境、玻璃与玻璃之间的辐射换热以及空腔内的对流换热。假设热能由室内传向室外,根据能量守恒原理针对上述热过程建立双层玻璃传热数值计算模型如式(1)所示。

$$[q] = [C][\Delta T] \quad (1)$$

式中: $[q]$ 为热流密度矩阵; $[C]$ 为热系数矩阵,包含导热系数、对流和辐射换热系数; $[\Delta T]$ 为温差矩阵。将式(1)详细展开如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} h_{c,in} + h_{r,in} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda_{g1}}{d_{g1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{c,v} + h_{r,v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\lambda_{g2}}{d_{g2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{c,out} + h_{r,out} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{in} - T_{11} \\ T_{11} - T_{12} \\ T_{12} - T_{21} \\ T_{21} - T_{22} \\ T_{22} - T_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $h_{c,in}$ 和 $h_{c,out}$ 分别为室内和室外的对流换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ;  $h_{r,in}$ 和 $h_{r,out}$ 分别为室内和室外的辐射换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ;  $h_{c,v}$ 和 $h_{r,v}$ 分别为封闭空腔的对流和两玻璃界面之间的辐射换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ;  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ 分别为室内外环境温度,K;  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ 分别表示双层玻璃体系各界

面的室内、外表面的温度,K;  $\lambda_{g1}$ 和 $\lambda_{g2}$ 为玻璃体系各玻璃板的导热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ ;  $d_{g1}$ 和 $d_{g2}$ 为封闭空腔的厚度,m;  $q_1 \sim q_5$ 表示各热过程中的热流密度, $W \cdot m^{-2}$ 。

通常,双层玻璃与室内、外之间的对流换热系数可以测得。封闭空腔内的气体由于相邻两玻璃界面的温差驱使出现对流现象。封闭空腔内的对流换热系数 $h_{c,v}$ 与气体努塞尔数 $Nu$ 、气体层的导热系数 $\lambda_a$ 和气体层的厚度 $d_a$ 有关,计算如式(3)所示。相关参数具体计算过程可参见文献<sup>[13]</sup>。

$$h_{c,v} = Nu \lambda_a / d_a \quad (3)$$

辐射换热系数是关于辐射面的辐射温度值和发射率的函数。由于玻璃面板表面温度未知,所以式(2)中的辐射换热系数为未知量。玻璃与室内环境之间的辐射换热系数计算公式如(4)所示。

$$h_{r,in} = \frac{\sigma(T_{in}^3 + T_{11}^3 + T_{11}T_{in}^2 + T_{in}T_{11}^2)}{(1/\epsilon_{in} + 1/\epsilon_{11}) - 1} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{in}$ 为室内环境发射率; $\epsilon_{11}$ 为玻璃室内一侧界面的表面发射率; $\sigma$ 为 Boltzmann 常数。

根据能量守恒定律,当双层玻璃热过程处于稳态时,上述各热过程的热流密度 $q$ 必相等。计算前,假定固体材料的热属性不随温度变化而变化,室内、外的发射率、环境温度和辐射温度、对流换热系数和玻璃的导热系数、发射率均为已知值,其余量未知。计算时,由已知的室内、外温度值假设出玻璃体系各界面的温度初值。此时可计算出玻璃体系与室内、外的辐射换热系数,也可计算出气体相应的热特性参数,进而计算出封闭空腔的对流换热系数和两片玻璃之间的辐射换热系数。求解式(2),可求得各热过程中的热流密度 $q$ 。将所得的热流密度的平均值带入式(2)反算出玻璃体系各界面的温度值。更新未知的参数,重复上述计算步骤,通过多次迭代计算直到收敛,便可求得各个表面的温度值和热流密度。玻璃体系的传热系数 $U$ 由式(5)求解。至此,双层玻璃的传热系数数值计算模型已经建立。3层及3层以上的玻璃体系数值模型可以依此类推。

$$U = \left| \frac{q}{T_{in} - T_{out}} \right| \quad (5)$$

## 2 玻璃体系光学参数计算模型

### 2.1 单层玻璃光学性能计算模型

玻璃的光学性能同样是反应玻璃幕墙节能的一项重要指标。玻璃光学性能的指标通常包括可见光透射比 $\tau_v$ 和反射比 $\rho_v$ ;太阳光直接透射比 $\tau_{sol}$ 与反射

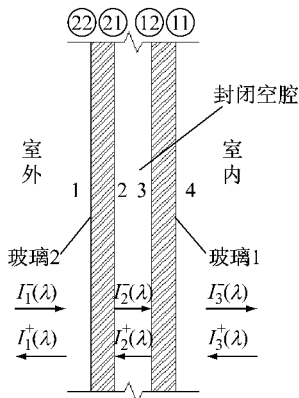


图1 双层玻璃热过程计算模型

Fig.1 Thermal process of double glazing

比  $\rho_{\text{sol}}$ ; 太阳光直接吸收比  $A_{\text{sol}}$  和总透射比  $g$  以及玻璃的遮阳系数  $C_g$  等. 玻璃体系一般由两片及多片玻璃组合而成, 其光学特性由单片玻璃的光学特性所决定, 首先应对单片玻璃的光学参数计算进行研究.

单片玻璃在一定波长范围内的透射比光谱数据  $\tau(\lambda)$  与反射比光谱数据  $\rho(\lambda)$  可以通过试验测定. 可见光波长范围通常在 380~780 nm 之间, 而太阳光波长在 300~2 500 nm 之间. 对单片玻璃的光谱数据在可见光波长范围内或太阳光波长范围内进行积分, 可求得其可见光透射比  $\tau_v$  与反射比  $\rho_v$ 、太阳光直接透射比  $\tau_{\text{sol}}$  与反射比  $\rho_{\text{sol}}$  和太阳光直接吸收比  $A_{\text{sol}}$  [14].

单片玻璃的太阳光总透射比  $g$  是指太阳辐射能量透过玻璃进入室内的热量, 既包括直接透过的部分, 也包括玻璃吸收太阳辐射后向室内的二次传热. 因此, 单片玻璃的太阳光透射比  $g$  与室内外两侧的对流换热系数有关, 计算式如式(6)所示. 遮阳系数是指单片玻璃的太阳光透射比  $g$  与通过 3 mm 标准单层平板白玻璃的太阳光透射比的比值. 遮阳系数  $C_g$  的计算如公式(7)所示.

$$g = \tau_{\text{sol}} + \frac{A_{\text{sol}} h_{\text{in}}}{h_{\text{in}} + h_{\text{out}}} \quad (6)$$

式中:  $h_{\text{in}}, h_{\text{out}}$  分别为室内室外的对流换热系数.

$$C_g = \frac{g}{0.87} \quad (7)$$

## 2.2 双层玻璃光学性能计算模型

玻璃体系的可见光透射比光谱数据  $\tau(\lambda)$  与反射比光谱数据  $\rho(\lambda)$  需由单片玻璃光谱数据来合成. 本文再次以双层玻璃为例(如图 1 所示), 假定室外只有太阳辐射, 室外和室内环境反射比为 0, 根据能量守恒原理, 采用差分法建立玻璃体系光谱数据合成计算数值模型, 如式(8)所示.

$$[S][I_n] = [I_s] \quad (8)$$

式中:  $[S]$  是由双层玻璃中各玻璃的光谱数据组成的光谱矩阵;  $[I_n]$  是各间层的光能矩阵;  $[I_s]$  辐射能矩阵.

对  $[I_n]$  在一定波长范围内进行多次求解, 得到各间层的光谱数据. 再按式(10)拟合多层玻璃的光谱数据. 将式(8)展开如式(9)所示.

$$\begin{bmatrix} -1 & \tau_1(\lambda) & 0 & \rho_{22}(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \tau_2(\lambda) & 0 & \rho_{12}(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{21}(\lambda) & 0 & \tau_1(\lambda) & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{11}(\lambda) & 0 & \tau_2(\lambda) & -1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} I_1^+(\lambda) \\ I_2^+(\lambda) \\ I_3^+(\lambda) \\ I_1^-(\lambda) \\ I_2^-(\lambda) \\ I_3^-(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_s(\lambda) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: “+”和“-”分别表示辐射流向室外和流向室内;  $\tau_1(\lambda)$  和  $\tau_2(\lambda)$  分别为玻璃 1 和 2 的透过比光谱数据;  $\rho_{11}(\lambda), \rho_{12}(\lambda), \rho_{21}(\lambda)$  和  $\rho_{22}(\lambda)$  分别为玻璃体系各界面的反射比光谱数据,  $I_1^+(\lambda), I_2^+(\lambda), I_3^+(\lambda), I_1^-(\lambda), I_2^-(\lambda)$  和  $I_3^-(\lambda)$  分别表示各间层流向室外和室内的光能数据;  $I_s(\lambda)$  表示辐射光能值.

$$\tau(\lambda) = \frac{I_{n+1}(\lambda)}{I_s(\lambda)} \quad \rho(\lambda) = \frac{I_1^-(\lambda)}{I_s(\lambda)} \quad (10)$$

当得到双层玻璃的光谱数据后, 可按照单层玻璃的计算方法计算双层玻璃的光学性能参数. 3 层及 3 层以上的玻璃体系光学参数数值计算模型可以依此类推.

## 3 框体系热工性能数值计算模型

### 3.1 稳态热传导微分方程

框式玻璃幕墙是由玻璃体系与支承结构体系构成, 包括明框与隐框两种类型. 框是框式玻璃幕墙的重要组成部分, 因此, 在其整体热工性能中框的热工性能具有重要的作用. 框通常是由金属型材和断热胶条等材料组成, 为了能够起到很好的保温隔热作用, 其断面设计构造较为复杂, 包括较多的空腔等, 这直接导致框架体系内部的传热过程和温度场分布比玻璃体系的要复杂. 框的传热过程可近似为沿着框断面的一个二维热传导过程. 为了能够对框体系的热工性能和内部的传热机理以及温度场分布进行分析, 本文以二维稳态热传导理论为基础, 利用有限单元法建立框体系的传热数值计算模型.

根据二维稳态热传导理论建立的无内热源的热传导微分方程如式(11)所示 [15].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$$

式中:  $k_x$  和  $k_y$  是材料两个主方向( $x, y$  方向)的导热系数;  $T$  为温度.

本文利用平面三节点三角形单元对体系进行离散, 设定每个节点仅有一个温度自由度. 二维稳态热传导的有限元求解格式为

$$[K][T] = [P] \quad (12)$$

式中:  $[K]$  为三角形单元热传导矩阵;  $[T]$  为三角形单元温度矩阵;  $[P]$  为温度载荷矩阵。

推导出三角形单元二维热传导矩阵  $[K]$  计算式为

$$[K] = \frac{k_x}{4A} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j^2 & b_j b_k \\ b_k b_i & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4A} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_i & c_j^2 & c_j c_k \\ c_k c_i & c_k c_j & c_k^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $A$  为三角形单元面积;  $b$  和  $c$  分别为三角形单元两节点的纵、横坐标差值;  $i, j, k$  分别为节点编号<sup>[16]</sup>。

热力学边界条件包括对流、辐射等。单元热力学边界条件不同,热传导矩阵  $[K]$  和温度载荷矩阵  $[P]$  都需要进行相应的修正。下文将仅以对流边界为例进行详细推导。

### 3.2 对流换热边界条件

当单元边界为对流换热时,二维稳态热传导微分方程为

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y = h_f (T_f - T) \quad (14)$$

式中:  $h_f$  为对流换热系数;  $T_f$  为外界流体温度;  $n_x, n_y$  分别为法向量。

本文以单元  $ij$  边与外界进行对流换热为例,推导单元热传导矩阵和单元温度载荷矩阵的修正式如下:

$$\Delta K_{ij} = \frac{h_f l_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Delta P_{ij} = \frac{h_f T_f l_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $l_{ij}$  表示三角形单元的各边长。同理,当三角形单元  $ik$  边和  $jk$  边与外界进行对流换热时,单元热传导矩阵和温度载荷矩阵的修正式也可以推出。

当对流换热系数  $h_f$  无穷大时,可认为流体与物体边界的温度相等,即常温边界条件。在计算时,  $h_f$  越大,计算结果越准确。

## 4 玻璃幕墙热工计算软件研发

### 4.1 软件研发

以 Visual C++ 为开发工具,在前文所建立的理论推导和数值计算模型的基础上,基于 ObjectARX 技术对 AutoCAD 进行了二次开发,实

现了玻璃幕墙热工性能分析的软件化。相比 LBNL 系列热工软件,本文所开发软件各模块统一度更高,包括玻璃体系的光学、传热和结露性能分析、框体系的二维有限元计算以及幕墙整体热工性能计算等,并且建立了中国玻璃数据库,包括了我国所使用的大多数玻璃种类,更能适合我国实际情况。由于基于 AutoCAD 软件平台,因此,相对于其他国外软件具有更好的建模功能,并实现了对材料进行直接填充等功能,在操作方面更加便捷。利用 CGAL (Computational Geometry Algorithm Library) 提供的三角化程序,对框体系进行了有限元网格的自适应划分,可对框体系在对流、辐射以及多种边界耦合作用下的热工性能和温度场进行有限元数值模拟分析。后处理可实现绘制模型等温线、温度云图和热流矢量图等功能。所编制的软件不仅可以应用于框式玻璃幕墙热工性能计算中,同时也可应用于全玻式幕墙和非透明幕墙等多种幕墙体系中。软件流程图如图 2 所示。

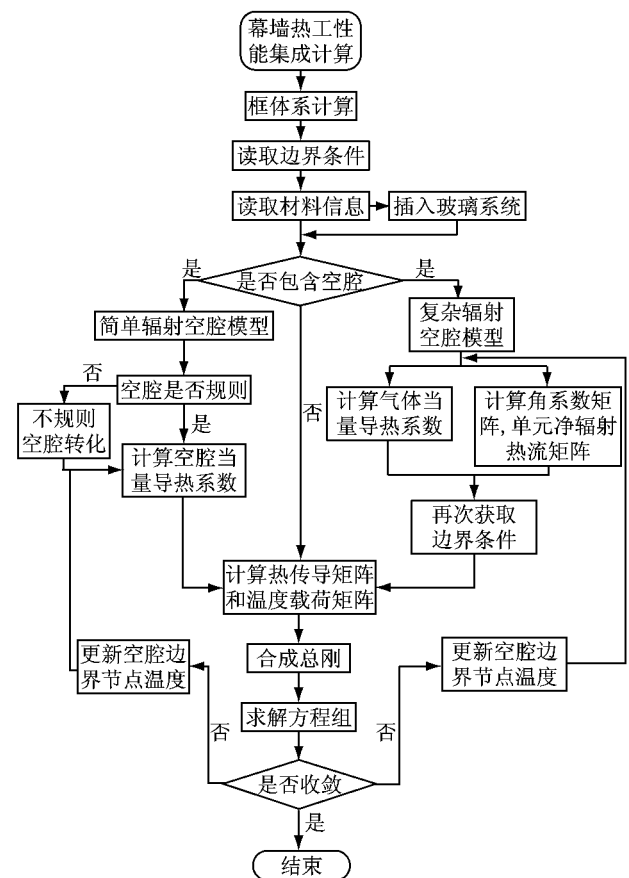


图2 玻璃幕墙软件计算程序流程

Fig.2 The flow chart of software calculation program

### 4.2 软件对比验证

#### 4.2.1 玻璃体系热工性能算例验证及分析

以间层填充为空气、氩气、氦气和氙气的 3 层玻璃体系为例,将采用本文方法所计算的热工性能结果与美国伯克利大学的 LBNL 系列热工软件计算结果进行对比. 计算时,采用相同的玻璃型号,确保材料的一致性. 玻璃厚度为 3 mm,气体间层厚度为 12 mm. 设室内、外环境温度分别为 20℃和-20℃,对流换热系数分别为 1.8 和 16.0 W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>,假设室内、室外平均辐射温度等于室内、室外环境温度. 计算结果如表 1,2 所示.

表 1 3 层玻璃传热系数计算结果对比  
Tab.1 The contrast of 3-layer glass system thermal transmittance

方法	传热系数/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )			
	空气	氩气	氦气	氙气
本文	1.666	1.537	1.466	1.449
LBNL	1.668	1.539	1.468	1.451

表 2 3 层玻璃光学参数计算结果对比(内填空气)  
Tab.2 The contrast of 3-layer glass system optics parameters

方法	可见光透射比	可见光前反射比	可见光后反射比	太阳光总透射比	遮阳系数
本文	0.319	0.110	0.110	0.487	0.560
LBNL	0.318	0.111	0.111	0.488	0.561

由表 1 和表 2 的 3 层玻璃传热系数和光学参数计算结果对比表明,本文与 LBNL 软件计算结果十分接近,从而验证了本文的正确性. 同时,玻璃体系的传热系数随着惰性气体惰性的增强而减小,也就意味着保温隔热性能越来越好.

4.2.2 框体系热工性能算例验证

对一块导热系数为 0.18 W·(m·K)<sup>-1</sup>的正方形板分别采用通用有限元软件 ANSYS,LBNL 系列软件热工模块 THERM 和本文计算方法进行了二维热传导的计算. 正方形板尺寸为 400 mm×400 mm;上边界对流换热系数为 6 W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>,流体温度为 20℃;下边界对流换热系数为 8 W·(m<sup>2</sup>·K),流体温度为 10℃;左边界温度为 15℃;右边界温度为 30℃. 正方形板尺寸及节点编号如图 3 所示.

对正方形板在设置好的边界条件下的温度场进行计算,3 种软件计算结果如表 3 所示. 由对比结果可知,本文各节点温度值计算结果与 THERM 计算结果十分接近,与 ANSYS 计算结果误差也在 1%左右,从而验证了本文框体系数值计算方法的正确性.

由于框式幕墙的框体系内部构造较复杂,为了进一步验证本文框体系热工性能计算理论的正确

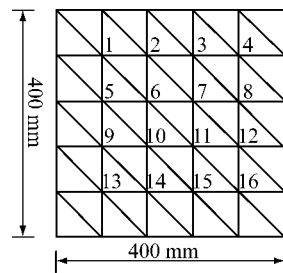


图 3 正方形板尺寸及节点编号  
Fig.3 The dimensions and points number of square plate

表 3 节点温度值计算结果  
Tab.3 The point temperature calculation results

节点编号	温度/℃		
	ANSYS	THERM	本文解
1	19.491	19.211	19.209
2	21.292	21.012	21.010
3	23.106	22.826	22.824
4	26.193	25.913	25.911
5	19.147	18.867	18.865
6	21.222	20.942	20.940
7	23.670	23.390	23.388
8	26.738	26.458	26.456
9	17.874	17.594	17.592
10	19.695	19.415	19.413
11	22.345	22.065	22.063
12	25.983	25.703	25.701
13	15.399	15.119	15.117
14	16.380	16.100	16.098
15	18.498	18.218	18.216
16	23.430	23.150	23.148

性,对在夏热冬冷地区实际工程中所采用的幕墙框在夏、冬季以及过度季节环境边界条件下的热工性能和温度场分布进行模拟计算,并与 THERM 软件计算结果进行对比. 图 4 为某玻璃幕墙框截面尺寸图. 模型中材料包括铝合金、聚氨酯密封胶、硅酮结构胶和浮法玻璃. 玻璃体系为双层玻璃,玻璃的厚度为 6 mm,封闭空腔中的气体为空气,厚度为 12 mm. 材料的导热系数和表面发射率如表 4 所示.

表 4 材料热工性能参数  
Tab.4 Thermal property of materials

材料名称	导热系数/(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )	表面发射率
铝合金	160.00	0.9
聚氨酯密封胶	0.25	0.9
硅酮结构胶	0.35	0.9
浮法玻璃	1.00	0.9

将各种材料填充到框截面模型中,如图所 5 示. 对截面进行网格划分如图 6 所示. 边界条件类型包括室内、室外和绝缘边界,其中上、下表面分别定义为室内和室外边界,两侧为绝缘边界,不同季节的边

界条件如表 5 所示. 分别计算各季节下截面最大、最小温度值以及截面的传热系数, 并与 THERM 软件结果进行对比, 对比结果如表 6 所示. 从表 6 中的数据可知, 本文计算结果与 THERM 计算结果相差在 2% 以内, 进一步表明本文计算理论的合理性. 在不

同季节下的框截面温度场云图如图 7 所示, 可知不同季节下框截面的温度场分布大不相同. 在夏季和过渡季节, 框表面的温度均高于室内, 在冬季则低于室内.

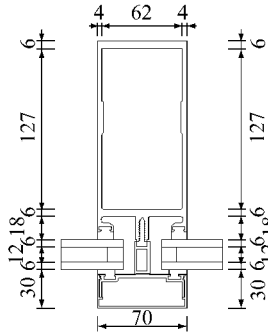


图 4 框截面尺寸(单位:mm)

Fig.4 The dimensions of frame section (unit:mm)

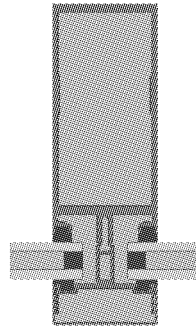


图 5 模型材料填充

Fig.5 The materials filling model

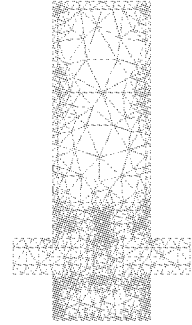


图 6 模型网格划分

Fig.6 The model element mesh

表 5 不同季节的边界条件

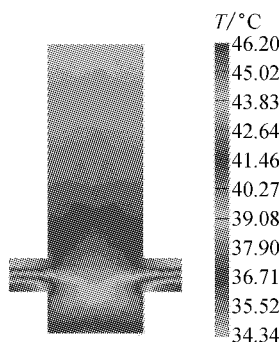
Tab.5 Boundary conditions of different seasons

季节	边界类型	换热系数/( $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ )	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	辐射温度/ $^{\circ}\text{C}$	太阳辐射强度/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
夏季	室内	4.0	25	25	0
	室外	25.0	40	40	300
冬季	室内	2.5	20	20	0
	室外	15.0	-10	-10	300
过渡季节	室内	1.5	15	15	0
	室外	8.0	25	25	100

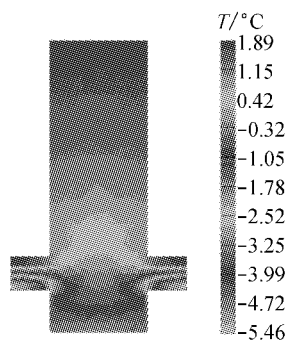
表 6 对比验证结果

Tab.6 Comparison of the calculated results with THERM results

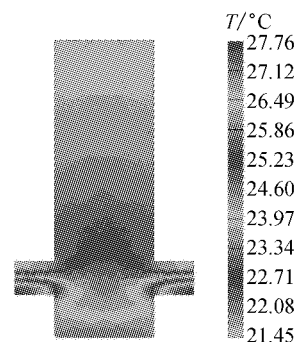
参数	夏季		冬季		过渡季节	
	THERM	本文	THERM	本文	THERM	本文
$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	46.408	46.202	1.846	1.888	27.504	27.755
$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	34.197	34.338	-5.432	-5.456	21.396	21.451
框截面传热系数/( $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ )	4.69	4.67	1.18	1.19	3.08	3.09



a 夏季边界条件



b 冬季边界条件



c 过渡季边界条件

图 7 不同季节边界条件温度场云图

Fig.7 The temperature nephogram in different seasons

## 5 结论

分别针对框式玻璃幕墙的玻璃体系的传热、光学性能和框体系的热工性能和温度场计算理论进行了研究,建立了各种参数的数值计算模型,编制了计算程序,并与多种软件计算结果进行对比.通过上述研究,得到如下结论:

(1) 建立了玻璃体系传热和光学参数数值计算模型,编制了玻璃体系热工性能计算程序.

(2) 对框体系在不同环境边界条件下的传热计算进行了理论推导,验证了计算方法的有效性,并对某实际工程中的框体系在不同季节下的热工性能和温度场分布进行了数值模拟.

(3) 以 Visual C++ 为开发工具,基于 ObjectARX. 技术对 AutoCAD 进行了二次开发,实现了框式玻璃幕墙热工性能分析的软件化,相比国外其他幕墙热工软件具有建模功能强、各模块统一度高、更适应我国规范等优点,同时,软件不仅可以应用于框式玻璃幕墙热工性能计算中,也可应用于全玻式幕墙和非透明幕墙等多种幕墙体系中.

## 参考文献:

- [1] 张其林. 玻璃幕墙结构[M]. 济南: 山东科技出版社, 2006.  
ZHANG Qilin. Glass curtain wall structures [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 2006.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度研究发展报告 2011[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Tsinghua University Building Energy Research Center. 2011 annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度研究发展报告 2010[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Tsinghua University Building Energy Research Center. 2010 annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [4] Adelqui Fissore, Nestor Fonseca. Experimental study of the thermal balance of a window, design description [J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3309.
- [5] Shih N J, Huang Y S. An analysis and simulation of curtain wall reflection glare [J]. Building and Environment, 2001, 36(1): 619.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 15099: 2003 Thermal performance of windows, doors and shading devices-Detailed calculations [S]. London: International Organization for Standardization Press, 2003.
- [7] National Fenestration Rating Council. NFRC 100: 2004 Procedure for determining fenestration product U-factors [S]. Silver Spring: National Fenestration Rating Council Press, 2004.
- [8] YU Kezhi, DING Guoliang, CHEN Tianji. Simulation of air curtains for vertical display cases with a two-fluid model [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(9): 2583.
- [9] Chen Y G. Parametric evaluation of refrigerated air curtains for thermal insulation [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 2988.
- [10] 刘涛. 基于有限单元法的玻璃幕墙热工性能的分析与设计 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.  
LIU Tao. Analysis and design of thermal performance of curtain walls based on FE [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2010.
- [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.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 151-2008 Calculation specification for thermal performance of windows, doors, and glass curtain-walls [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [13] Wdgt L J. A correlation to quantify convective heat transfer between vertical window glazings [J]. ASHRAE Transactions, 1996, 102(1): 940.
- [14] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB/T 2680—94 建筑玻璃可见光透射比、太阳光直接透射比、太阳能总透射比、紫外线透射比及有关窗玻璃参数的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.  
The State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. GB/T 2680-94 Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance for glass in building and related glazing factors [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [15] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
WANG Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [16] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
KONG Xiangqian. The application of the finite element method in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1998.