

## 气凝胶玻璃的气候适用性分析

陈友明<sup>†</sup>, 肖亚玲, 郑思倩, 刘洋  
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**建立了气凝胶玻璃的光学模型与动态传热模型并进行了实验验证.根据已有理论方法建立了其他 5 种对比玻璃的模型,分别是:双层中空玻璃模型、三层中空玻璃模型、高透型 Low-E 中空玻璃模型、双银型 Low-E 中空玻璃模型和遮阳型 Low-E 中空玻璃模型.提出利用太阳能效用指标来评价玻璃的全年适用性,并借助累计逐时得热量指标来评价玻璃在供暖期或空调期的适用性.结果表明:气凝胶玻璃在严寒地区(哈尔滨)、寒冷地区(北京)、夏热冬冷地区(长沙)、温和地区(昆明)均具有一定的节能潜力,气凝胶玻璃的太阳能效用分别高出双层中空玻璃 266.3、158.6、114.3、40.5 kWh/m<sup>2</sup>(水平面),气凝胶玻璃的气候适用性序列为哈尔滨>北京>长沙>昆明.

**关键词:**建筑节能;气凝胶玻璃;适用性;气候;太阳能效用

**中图分类号:** TU111.2

**文献标志码:** A

## Analysis on Suitability of Employing Aerogel Glazing System in Different Climate Zones

CHEN Youming<sup>†</sup>, XIAO Yaling, ZHENG Siqian, LIU Yang  
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The optical and dynamic heat-transfer models of aerogel glazing system were developed and validated by experiments. The models of other five common glazing systems (including double, triple and 3 kinds of Low-E double glazing systems) were also built based on the existing methods. The index of efficient solar energy was introduced to evaluate glazing's annual suitability, while the index of accumulative hourly heat gain was used to evaluate the glazing systems' suitability in the heating or the cooling season alone. The simulation results show that employing aerogel glazing system in severe cold region (Harbin), cold region (Beijing), hot-summer cold-winter region (Changsha) and temperate region (Kunming) can achieve energy efficiency. The differences of the efficient solar energy between aerogel and double glazing systems in these cities are 266.3, 158.6, 114.3 and 40.5 kWh/m<sup>2</sup>, respectively. The order of suitable level for employing aerogel glazing system is as follow: Harbin> Beijing> Changsha> Kunming.

**Key words:** building energy efficiency; aerogel glazing; suitability; climate; efficient solar energy

\* 收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678227), National Natural Science Foundation of China(51678227)

作者简介:陈友明(1966—),男,湖南祁东人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: ymchen@hnu.edu.cn

2014年,中国建筑领域的建造和运行能耗占全社会一次能耗总量的比例高达36%<sup>[1]</sup>,降低建筑能耗,提高建筑能效,探讨建筑节能技术<sup>[2-3]</sup>已经成为建筑领域研究焦点.中国地域辽阔,有5个典型气候区,各气候区对建筑节能的要求差异较大.在以供热为主的气候区,建筑节能主要考虑保温,同时要尽可能多地引进太阳辐射.在以空调为主的气候区,建筑节能主要考虑隔热.气凝胶玻璃是一种新型的建筑节能玻璃,为了科学合理地推广其应用,有必要考察其气候适用性.目前已有学者对气凝胶玻璃的节能效果进行了模拟分析研究.Berardi<sup>[4]</sup>通过模拟分析发现气凝胶玻璃除适用于寒冷气候区外,在热湿气候区也具有较大的节能潜力.Buratti等<sup>[5]</sup>将气凝胶玻璃样本与同结构的中空玻璃比较,发现使用气凝胶玻璃后室内热损失减少,但同时进入到室内的太阳辐射也有一定程度的减少.文献[6]在eQUEST软件上模拟分析了气凝胶玻璃与其他4种常见玻璃在中国不同气候区的全年负荷.研究发现气凝胶玻璃在哈尔滨、北京、上海三地的节能率分别可以达到20%、11%、9%,即气凝胶玻璃在严寒地区的适用性很强,在寒冷地区和夏热冬冷地区具有一定的适用性.现有研究<sup>[4,6-7]</sup>多采用近似计算方法——K-SC模型对玻璃系统进行模拟和评估,即按标准测量方法在法向入射条件下测得玻璃的综合传热系数、遮阳系数或太阳得热系数,根据相应参数进行热工计算.但值得注意的是法向入射条件下光线通过半透明介质的路径短,吸收率低,会导致计算出的进入室内的太阳辐射得热量值偏高.此外,对于气凝胶玻璃来说,气凝胶层对太阳辐射有较强的吸收作用,所以随着太阳辐射强度、太阳入射角的变化,气凝胶层吸收的太阳辐射热量也会发生变化,气凝胶层吸收的太阳辐射热量会向外层玻璃和内层玻璃传递,从而影响各层玻璃温度的分布,进而影响玻璃的热工性能.K-SC模型采用法向入射条件下气凝胶玻璃系统总的太阳得热系数、遮阳系数,不能准确计算室外气象条件变化时各层玻璃对太阳辐射的吸收热及吸热后向室内传递的这部分太阳得热量,从而影响气凝胶玻璃节能评价的准确性.

本文建立了气凝胶玻璃的动态传热模型并进行了实验验证.该模型考虑了玻璃系统中各层介质的热容及各层介质吸收的太阳辐射热量,为非稳态带内热源的热平衡模型,该模型能反映玻璃的热工性能在不同地理位置,不同气象条件,不同时刻的动态变化.另外在Karlsson等<sup>[8]</sup>提出的太阳辐射得热

系数多项式模型的基础上建立了3种Low-E中空玻璃的传热与光学模型.利用累计逐时得热量及太阳能效用等指标比较气凝胶玻璃与其他5种常见节能玻璃在各气候区的节能潜力大小,考察气凝胶玻璃适用的气候区.

## 1 不同类型玻璃的传热与光学模型

### 1.1 气凝胶玻璃的计算模型及其实验验证

#### 1.1.1 气凝胶玻璃动态传热模型

本文研究对象是将颗粒SiO<sub>2</sub>气凝胶填充在双层玻璃中间制成的气凝胶玻璃.针对其密度较大、热容较大、蓄热能力较强的特点,建立了其非稳态的传热模型(即动态模型).气凝胶玻璃的传热过程包括玻璃与室内外环境之间的对流换热、辐射换热、玻璃内部的导热、各层介质对太阳辐射的吸收和蓄热作用.如图1所示,在外层玻璃和内层玻璃中心各设1个温度节点,气凝胶层设3个等距节点,每个节点代表该区域的温度,每层玻璃吸收的太阳辐射视为均匀分布.由能量守恒原理<sup>[9]</sup>,依次建立节点1~5的热平衡方程式:

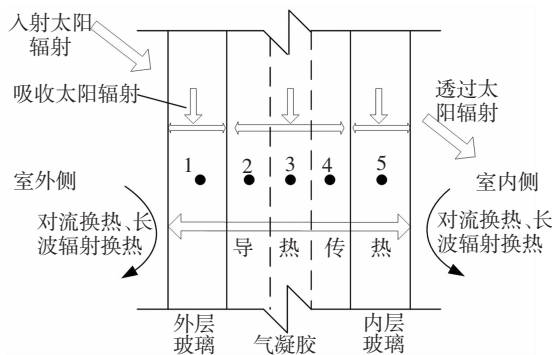


图1 气凝胶玻璃系统传热机理

Fig.1 Heat-transfer mechanism of aerogel glazing system

$$\rho_1 c_{p1} \delta_1 \frac{dT_1}{dt} = h_{ce}(T_e - T_1) + h_{re}(T_e - T_1) + k_1(T_2 - T_1) + q_{a1}, \quad (1)$$

$$\rho_2 c_{p2} \frac{\delta_2}{3} \frac{dT_2}{dt} = k_1(T_1 - T_2) + k_2(T_3 - T_2) + \frac{1}{3} q_{a2}, \quad (2)$$

$$\rho_2 c_{p2} \frac{\delta_2}{3} \frac{dT_3}{dt} = k_2(T_2 - T_3) + k_2(T_4 - T_3) + \frac{1}{3} q_{a2}, \quad (3)$$

$$\rho_2 c_{p2} \frac{\delta_2}{3} \frac{dT_4}{dt} = k_2(T_3 - T_4) + k_1(T_5 - T_4) + \frac{1}{3} q_{a2}, \quad (4)$$

$$\rho_1 c_{p1} \delta_1 \frac{dT_5}{dt} = h_{ci}(T_i - T_5) + h_{ri}(T_i - T_5) + k_1(T_4 - T_5) + q_{a3}. \quad (5)$$

式中:  $T_e, T_i$  分别为室外、室内空气温度, K;  $\delta_1, \delta_2$  分别为玻璃、气凝胶的厚度, m;  $h_{ce}, h_{ci}$  分别为玻璃与室外、室内侧表面对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_{re}, h_{ri}$  分别为外层玻璃与室外环境、内层玻璃与室内环境之间的辐射换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $q_{\alpha 1}, q_{\alpha 2}, q_{\alpha 3}$  分别为各层玻璃对太阳辐射的吸收得热,  $W/m^2$ .

节点之间的导热传热系数分别为:

$$k_1 = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1\delta_2/3 + \lambda_2\delta_1}, \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{3\lambda_2}{\delta_2}. \quad (7)$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为玻璃、气凝胶的导热系数,  $W/m \cdot K$ . 辐射换热系数按式(8)(9)计算:

$$h_{ri} = \sigma \varepsilon (T_i^2 + T_s^2)(T_i + T_s), \quad (8)$$

$$h_{re} = \sigma \varepsilon (T_{sky}^2 + T_i^2)(T_{sky} - T_i)/(T_e - T_i). \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$  为玻璃辐射发射率;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $T_{sky}$  为天空温度, K.

室外侧玻璃与外界环境之间的对流换热系数在工程上普遍采用 MoWiTT 方法的半经验公式计算<sup>[10]</sup>. 室内侧对流换热系数根据相似准则关联式计算<sup>[11]</sup>:

$$h_c = \frac{\lambda_a Nu}{l}. \quad (10)$$

式中:  $\lambda_a$  为空气导热系数,  $W/m \cdot K$ ;  $l$  为特征尺寸, m;  $Nu$  为努谢尔特准则数.

玻璃系统对太阳辐射的总吸收率、透射率分别为:

$$\alpha = \frac{\alpha_D I_D + \alpha_d I_d}{I}, \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\tau_D I_D + \tau_d I_d}{I}. \quad (12)$$

式中:  $I_D, I_d, I$  分别为玻璃外表面接收的太阳直射辐射量、散射辐射量、总辐射量,  $W/m^2$ ;  $\alpha_D, \alpha_d$  分别为玻璃系统对太阳直射辐射、散射辐射的吸收率;  $\tau_D, \tau_d$  分别为玻璃系统对太阳直射辐射、散射辐射的透射率.

通过单位面积气凝胶玻璃的室内逐时得热量如式(13)所示,

$$q = h_{ci}(T_5 - T_i) + h_{ri}(T_5 - T_i) + \tau I. \quad (13)$$

### 1.1.2 气凝胶玻璃光学模型

采用界面能量平衡法<sup>[12]</sup>推算玻璃系统的透过性能. 将气凝胶层近似视为对太阳辐射具有均匀的透过、吸收性质的半透明薄层, 气凝胶玻璃系统看作是三层半透明薄层组成的透过体系. 如图 2 所示, 对于界面  $K$ , 进入和离开界面的辐射能量相等:

$$G_K + F_K' = F_K + G_K'. \quad (14)$$

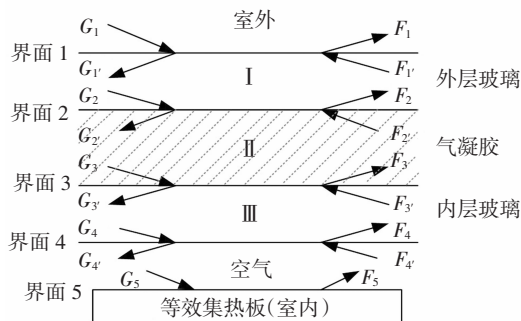


图 2 透过体系示意图

Fig.2 Schematic diagram of the transmitting system

假设在太阳辐射波长范围内玻璃和气凝胶的消光系数不变, 界面  $K$  的正、反向反射率  $\rho_K$  可根据菲涅耳定律计算, 如式(16)所示. 当光线从折射指数为  $n_1$  的介质进入折射指数为  $n_2$  的介质时, 入射角为  $\theta_1$ , 折射角为  $\theta_2$ , 则

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1. \quad (15)$$

$$\rho_K = \begin{cases} \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, & \theta_1 < 30^\circ; \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right], & \theta_1 \geq 30^\circ. \end{cases} \quad (16)$$

根据 Bouguer 定律, 辐射能量在各层介质的透射率如式(17)所示.

$$\tau_{K \rightarrow K+1} = \exp(-K_\lambda L). \quad (17)$$

式中:  $K_\lambda$  为消光系数,  $mm^{-1}$ ;  $L$  为光线在介质中的路程, mm.

将室内简化为一层等效集热板, 该集热板界面为第 5 层界面, 假设透过的太阳辐射全被室内吸收, 根据递推公式<sup>[12]</sup>可逐次计算出各层界面等效透射率:

$$\begin{cases} \varphi_K = \frac{1 - \rho_K}{2 - \rho_K \beta_K'}, \\ \beta_K = 1 - \varphi_K(1 - \beta_K'), \\ \beta_K' = \beta_{K+1} \tau_{K \rightarrow K+1}^2. \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\varphi_K$  为界面正向等效透射率,  $\varphi_K = G_K'/G_K$ ;  $\beta_K$  为界面正向等效反射率,  $\beta_K = F_K/G_K$ ;  $\beta_K'$  为反向等效反射率的倒数,  $\beta_K' = F_K'/G_K'$ .

气凝胶玻璃系统总透射率、各层介质对室外辐射能量的吸收率分别由式(19)(20)计算.

$$\tau = \prod_{K=1}^4 (\varphi_K \tau_{K \rightarrow K+1}), \quad (19)$$

$$\alpha_{K \rightarrow K+1} = \varphi_K (1 - \tau_{K \rightarrow K+1} + \beta_K' \frac{1 - \tau_{K \rightarrow K+1}}{\tau_{K \rightarrow K+1}}) \prod_{i=1}^{k-1} \varphi_i \tau_{i \rightarrow i+1}.$$

(20)

玻璃各层对太阳辐射的吸收热量  $q_{a1}$ 、 $q_{a2}$ 、 $q_{a3}$  可由式(21)计算得到:

$$q_{aK} = \alpha_{K \rightarrow K+1} \cdot I.$$

(21)

根据气凝胶玻璃系统光学模型,已知某时刻玻璃外表面太阳入射角,可得到此时玻璃系统的太阳直射辐射透过率和吸收率.对散射辐射的透过、吸收计算则取不同入射角下透过体系光学性能参数的平均值.光学模型与动态传热模型耦合即可计算得到各层玻璃的温度分布及通过气凝胶玻璃系统的室内得热量.

1.1.3 气凝胶玻璃计算模型的实验验证

在长沙(112.92E,28.22N)一实验楼楼顶搭建了一尺寸为 2.0 m × 2.0 m × 2.5 m 气凝胶玻璃实验房<sup>[13]</sup>,屋顶水平安装一整块 8 mm+12 mm+8 mm 颗粒型气凝胶玻璃,铝合金边框,密封性良好,实验房四周采用 PVC 遮光板遮光.实验测量太阳辐射、各层玻璃温度、环境温度及风速.选用 2016 年 6 月 20 日—6 月 21 日(晴间多云)采集的数据来验证气凝胶玻璃理论模型(K-SC 模型的计算结果同时与实验结果进行对比).玻璃材料物性参数见表 1.

表 1 材料物性参数表

Tab.1 Physical property parameters

| 材料                   | 物性参数                          |                      |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| 透明玻璃                 | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )      | 2 500                |
|                      | 比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> ) | 840                  |
|                      | 导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> ) | 0.75                 |
|                      | 消光系数/mm <sup>-1</sup>         | 0.016                |
|                      | 折射指数                          | 1.526                |
| <hr/>                |                               |                      |
| SiO <sub>2</sub> 气凝胶 | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )      | 100                  |
|                      | 比热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> ) | 3 500                |
|                      | 导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> ) | 0.024                |
|                      | 消光系数/mm <sup>-1</sup>         | 0.03 <sup>[14]</sup> |
|                      | 折射指数                          | 1.02 <sup>[15]</sup> |

如图 3 所示,动态传热模型模拟值的结果与室内太阳辐射得热量实测值比较接近,6 月 20 日白天的平均相对误差为 2.1%,6 月 21 日白天的平均相对误差为 5.6%,最大相对误差不超过 10%,模型足够准确,可以用来对气凝胶玻璃性能进行模拟分析研究.对于 K-SC 模型来说,如图 3 所示,K-SC 模型

模拟值明显高于实测值和动态传热模型模拟值,其与实测值之间白天的平均相对误差为 34.9%,显然高估了太阳辐射得热.原因主要是 K-SC 模型采用法向入射条件下的遮阳系数,而法向入射条件下光线通过半透明介质的路径短,吸收率低,从而导致计算出的透过玻璃进入室内的太阳辐射得热量值偏高.

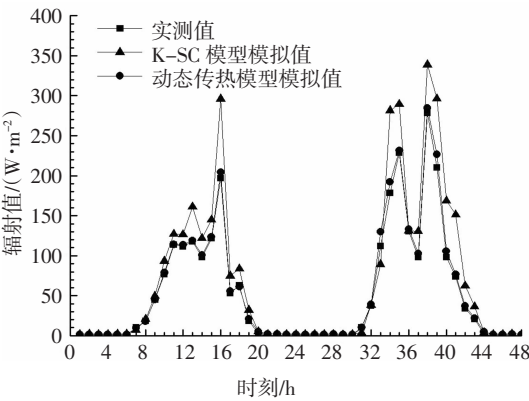


图 3 室内太阳辐射得热量  
Fig.3 Indoor solar heat gain

图 4 为气凝胶玻璃各层温度的实测值与动态传热模型模拟值对比(K-SC 模型无法计算得到各层玻璃的温度值),其中外层玻璃、气凝胶、内层玻璃温度模拟值与实测值之间的均方根误差依次为 1.0 °C、1.6 °C、1.1 °C.误差可能由模型本身所取参数与真实值的差异及测试人员、仪器、环境等因素造成.

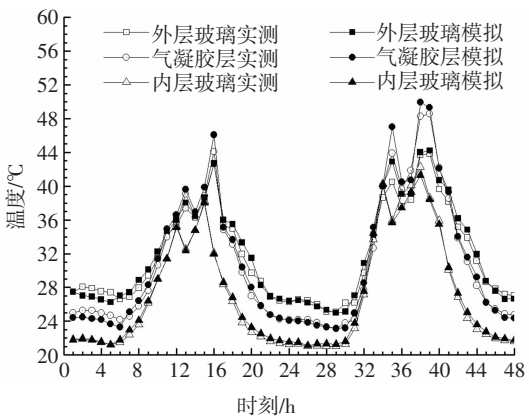


图 4 各层玻璃温度变化  
Fig.4 Temperature variation of each glass layer

1.2 双层中空玻璃、三层中空玻璃的传热与光学模型

双层中空玻璃、三层中空玻璃与气凝胶玻璃的传热、光学模型的建立方法类似,不同之处主要有三点,其一是气凝胶玻璃传热模型在气凝胶层设置了 3 个计算节点,而双层中空玻璃、三层中空玻璃的传

热模型只在空气层设置一个节点;其二在于气凝胶层对于太阳辐射的吸收率较大,而双层中空玻璃和三层中空玻璃的空气夹层对太阳辐射全透过;最后,对于双层中空玻璃和三层中空玻璃的传热模型,需考虑相邻两层玻璃之间的长波辐射换热。

### 1.3 Low-E 中空玻璃的传热与光学模型

对于 Low-E 中空玻璃,可以采用和气凝胶玻璃一样的建模方法,只是在建立其光学模型时,需考虑 Low-E 膜层对太阳辐射的透过、吸收作用,而由于缺乏 Low-E 膜层的折射率等光学参数,所以本文采用 J.Karlsson 等提出的多项式经验模型对 Low-E 中空玻璃进行建模分析,该模型已经过验证<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.1 太阳辐射得热计算模型

通过玻璃进入室内的太阳辐射得热包括两部分:直接透过玻璃系统的太阳辐射和太阳辐射经玻璃系统吸收后间接向室内传递的热量。进入室内的太阳辐射得热与入射角  $\theta$  及相应入射角下的玻璃得热系数  $g(\theta)$  有关。根据 Karlsson 等提出的多项式经验模型计算太阳辐射得热系数  $g(\theta)$ ,其表达式<sup>[16]</sup>为:

$$g(\theta)=g(g(0),p,q)=g(0)(1-az^\alpha-bz^\beta-cz^\gamma). \quad (22)$$

式中: $g(0)$ 为玻璃法线方向的太阳得热系数; $p$ 为玻璃层数; $q$ 为玻璃种类参数,根据不同玻璃及膜取值为 1~10; $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$  均为与玻璃种类有关的常数,其中  $z=\theta/90, a=8, b=0.25/q, a+b+c=1, \alpha=5.2+0.7q, \beta=2, \gamma=(5.26+0.06p)+(0.73+0.14p)q$ 。

高透型、双银型和遮阳型 Low-E 中空玻璃的  $q$  值分别取为 3、2 和 2.5,选取这 3 种 Low-E 中空玻璃的法向太阳得热系数分别为 0.54、0.41 以及 0.38<sup>[8]</sup>,根据式(22)可得这 3 种玻璃的太阳得热系数经验式如式(23)~(25)所示:

$$g(\theta)=0.54\left[1-8\left(\frac{\theta}{90}\right)^{73}-0.833\left(\frac{\theta}{90}\right)^2-7.0833\left(\frac{\theta}{90}\right)^{781}\right], \quad (23)$$

$$g(\theta)=0.41\left[1-8\left(\frac{\theta}{90}\right)^{6.6}-0.125\left(\frac{\theta}{90}\right)^2-7.125\left(\frac{\theta}{90}\right)^7\right], \quad (24)$$

$$g(\theta)=0.38\left[1-8\left(\frac{\theta}{90}\right)^{6.95}-0.1\left(\frac{\theta}{90}\right)^2-7.1\left(\frac{\theta}{90}\right)^{7.405}\right]. \quad (25)$$

透过单位面积玻璃的室内太阳辐射得热量  $I_{\text{sol}}$  按式(26)计算:

$$I_{\text{sol}}=I_{\text{D}}g_{\text{D}}(\theta)+I_{\text{d}}g_{\text{d}}(\theta). \quad (26)$$

由于天空散射和地面反射辐射的入射角难以准确得出,其辐射得热系数可近似按  $45^\circ$  入射角时

的直射辐射来计算<sup>[17]</sup>。因此,透过单位面积玻璃进入室内的太阳辐射得热量可写为:

$$I_{\text{sol}}=I_{\text{D}}g_{\text{D}}(\theta)+I_{\text{d}}g_{\text{d}}(\theta=45^\circ). \quad (27)$$

#### 1.3.2 室内逐时得热量计算

室内逐时得热量由太阳辐射得热量和室内外的温差传热量两部分构成,其表达式如下:

$$q=I_{\text{sol}}+k(T_{\text{e}}-T_{\text{i}}). \quad (28)$$

式中: $k$ 为综合传热系数<sup>[12]</sup>,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,忽略 Low-E 膜层传热热阻,按式(29)计算:

$$k=1/\left[\frac{1}{h_{\text{ce}}}+\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_{\text{a}}}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)+\frac{1}{h_{\text{ci}}}\right]. \quad (29)$$

## 2 模拟条件

模拟用气象参数选用 CSWD 气象数据。供暖期室内设计温度为  $20^\circ\text{C}$ , 空调期室内设计温度为  $26^\circ\text{C}$ 。其他相关参数包括 6 种不同类型玻璃的规格参数,见表 2。各气候区典型城市的供暖期、空调期时间划分<sup>[18]</sup>,见表 3。相关模拟条件确定后,根据第 1 节建立的各种玻璃的传热模型和光学模型,可由 MATLAB 编程计算得到各城市不同朝向通过单位面积玻璃的逐时得热量。

表 2 玻璃规格参数表

Tab.2 Specifications of different glazing systems

| 序号 | 玻璃类型                                      |
|----|-------------------------------------------|
| 1  | 6 mm 白玻+12 mm 颗粒型气凝胶+6 mm 白玻              |
| 2  | 6 mm 白玻+12 mm 空气+6 mm 白玻                  |
| 3  | 4 mm 白玻+12 mm 空气+4 mm 白玻+12 mm 空气+4 mm 白玻 |
| 4  | 6 mm 高透型 Low-e 玻璃+12 mm 空气+6 mm 白玻        |
| 5  | 6 mm 双银型 Low-e 玻璃+12 mm 空气+6 mm 白玻        |
| 6  | 6 mm 遮阳型 Low-e 玻璃+12 mm 空气+6 mm 白玻        |

表 3 各气候区典型城市的供暖期和空调期划分

Tab.3 Heating and cooling seasons of typical cities in different climate zones

| 气候区    | 典型城市 | 供暖期                | 空调期             |
|--------|------|--------------------|-----------------|
| 严寒地区   | 哈尔滨  | 9月28日—<br>次年4月20日  | 无               |
| 寒冷地区   | 北京   | 10月28日—<br>次年4月5日  | 6月20日—<br>8月3日  |
| 夏热冬冷地区 | 长沙   | 11月12日—<br>次年4月10日 | 6月25日—<br>8月23日 |
| 夏热冬暖地区 | 广州   | 无                  | 5月26日—<br>9月22日 |
| 温和地区   | 昆明   | 11月12日—<br>次年2月9日  | 无               |

### 3 气凝胶玻璃气候适用性分析

不同的气候区气候差异较大,建筑节能标准各异,气凝胶玻璃的气候适用性分析即借助相关评价指标对气凝胶玻璃与其他常见节能玻璃在同一气候区的节能潜力进行研究,比较其节能潜力大小,从而考察气凝胶玻璃适用的气候区。

#### 3.1 气候适用性评价指标

本文选用的评价指标为累计逐时得热量和太阳能效用量。累计逐时得热量即单位面积玻璃在供暖期或空调期逐时得热量和逐时失热量的代数(得热量为正,失热量为负)。累计逐时得热量大于0,说明通过单位面积玻璃的逐时得热量大于逐时失热量,在供暖期,这部分得热有利于减少室内热负荷,而在空调期,这部分得热会增大室内冷负荷,故在某地供暖期间,通过单位面积玻璃的累计逐时得热量越大则此种玻璃的节能潜力越大,越适用于该地区,空调期间则相反。对于全年仅有供暖期或空调期的气候区来说,利用累计逐时得热量指标即可评价气凝胶玻璃在该气候区的适用性,而对于既需供暖又需空调的气候区,必须综合考虑全年得热量情况,利用3.4节提出的全年太阳能效用量指标来评价其适用性。气候适用性分析过程中涉及到的累计逐时得热量、热负荷、冷负荷以及供暖空调能耗等指标只表示通过单位面积玻璃的值,不考虑其他影响因素。

#### 3.2 供暖期累计逐时得热量对比

由表3可知,哈尔滨和昆明两地只考虑其供暖期,利用供暖期累计逐时得热量指标即可考察气凝胶玻璃的气候适用性。以哈尔滨为例,如图5(a)所示,1号气凝胶玻璃在各朝向的累计逐时得热量均为最大,2号双层中空玻璃在各朝向上的累计逐时得热量均最小,在水平面上,这两项数值分别为103、-163.3 kWh/m<sup>2</sup>。同样,在昆明,不论在哪个朝向上,气凝胶玻璃的累计逐时得热量都是最大,故可

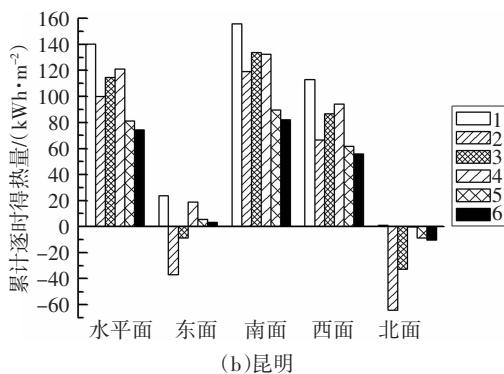
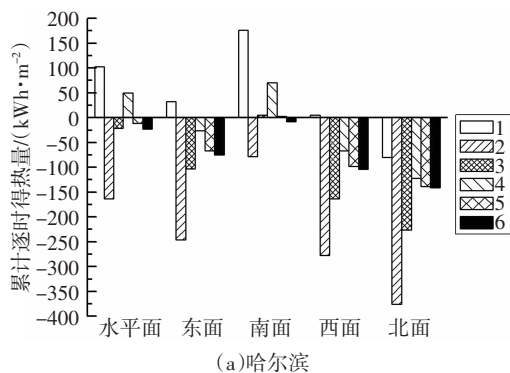


图5 供暖期单位面积玻璃累计逐时得热量

Fig.5 Accumulative hourly heat gain per square metre in the heating season

据此推论相对于其他几种玻璃,气凝胶玻璃更适用于严寒地区(哈尔滨)、温和地区(昆明)。对于3种Low-E中空玻璃,通过单位面积高透型Low-E中空玻璃的累计逐时得热量最大,这是因为高透型Low-E中空玻璃的太阳辐射得热系数大于双银型和遮阳型,高透型Low-E中空玻璃对太阳辐射的利用率更高。

#### 3.3 空调期累计逐时得热量对比

广州属于夏热冬暖地区,全年主要考虑夏季空调。空调期间,白天室外气温较高,太阳辐射较强,通过玻璃进入室内的热量很大,夜间室外气温较低,失热主要发生在晚上。由图6可知,气凝胶玻璃在各朝向上的累计逐时得热量均较大,气凝胶玻璃在广州地区的适用性不强。这是由SiO<sub>2</sub>气凝胶颗粒的传热特性决定的,原因主要有两方面。其一,虽然气凝胶玻璃的太阳辐射透过率较低,但气凝胶玻璃对太阳辐射的吸收率高,玻璃吸收的太阳辐射有较大部分会成为室内得热。其二,气凝胶的纳米多孔网络结构以及纳米尺度效应导致气凝胶具有极低的导热系数<sup>[9]</sup>,以致气凝胶玻璃的夜间失热量较小,得热量较大,失热量较小,故气凝胶玻璃在广州地区空调期间的累计逐时得热量在这几种玻璃中偏大。如

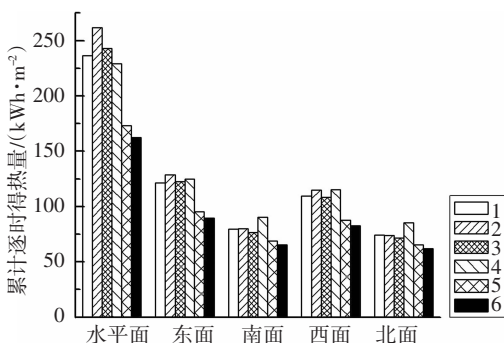


图6 广州空调期单位面积玻璃的累计逐时得热量  
Fig.6 Accumulative hourly heat gain per square metre in Guangzhou

图 6 所示,6 号遮阳型 Low-E 中空玻璃在广州地区各个朝向上的累计逐时得热量均为最小,是最适用于广州地区的玻璃类型。

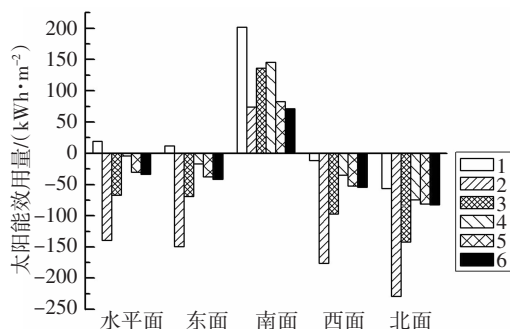
### 3.4 全年太阳能效用对比

有的气候区既需供暖也需空调,利用累计逐时得热量指标,只能分别得到在供暖期或空调期适用性最强的玻璃类型,且供暖期和空调期适用性最强的玻璃类型可能不一样,我们需要找到一个指标来综合评价玻璃的全年适用性。我们知道,供暖期通过玻璃的得热主要是太阳辐射得热,其有助于减少室内热负荷,是有效利用的太阳能,而空调期的得热包括两部分,一部分是太阳辐射得热,另一部分是室内外温差传热,失热发生在夜间,且失热量较小,总的来说整个空调期期间的累计逐时得热量是正的,并且这部分得热量构成了冷负荷。我们定义太阳能效用,它表示通过单位面积玻璃全年有效利用的太阳能,这部分太阳能有助于减少供暖空调能耗,其表达式如下:

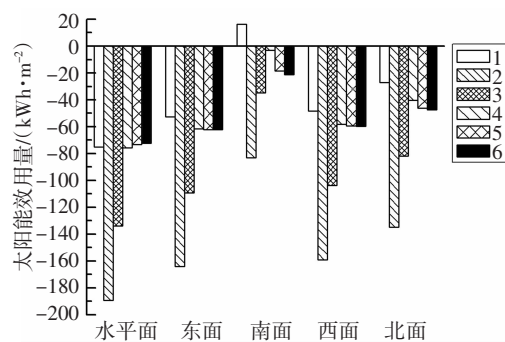
$$E = Q_G - Q_K \quad (30)$$

式中:  $Q_G$  为供暖期累计逐时得热量,  $\text{kWh}/\text{m}^2$ ;  $Q_K$  为空调期累计逐时得热量,  $\text{kWh}/\text{m}^2$ 。

观察图 7 可知,太阳能效用有正有负,太阳能效用为正说明利用供暖期间的太阳辐射得热而减少的热负荷比空调期间由单位面积玻璃造成的冷负荷大,全年有效的利用太阳能减少了供暖空



(a)北京



(b)长沙

图 7 全年太阳能效用对比

Fig.7 Comparison of annual efficient solar energy

调能耗。如图 7 所示,在北京和长沙两地,除长沙水平面外,1 号气凝胶玻璃在各朝向上的太阳能效用均为最大,说明综合全年情况来看,气凝胶玻璃在寒冷地区(北京)和夏热冬冷地区(长沙)相比于其他几种玻璃的节能潜力更大,适用性更强。

### 3.5 气凝胶玻璃气候适用性序列

综上所述,气凝胶玻璃在哈尔滨(严寒地区)、北京(寒冷地区)、长沙(夏热冬冷地区)和昆明(温和地区)均适用,选取与气凝胶玻璃同结构的双层中空玻璃为参照对象,将各地气凝胶玻璃在不同朝向的太阳能效用与对应的双层中空玻璃的太阳能效用之差值作为参考依据,评价气凝胶玻璃在各地应用的节能潜力大小,得到气凝胶玻璃的气候适用性序列。如图 8 所示,以水平面为例,在哈尔滨、北京、长沙和昆明四地气凝胶玻璃的太阳能效用分别高出双层中空玻璃 266.3、158.6、114.3、40.5  $\text{kWh}/\text{m}^2$ ,同样,在其他朝向上,气凝胶玻璃与双层中空玻璃的太阳能效用差值也遵循哈尔滨>北京>长沙>昆明的序列,气凝胶玻璃与双层中空玻璃的太阳能效用差值越大,说明气凝胶玻璃应用越节能,故此序列也是气凝胶玻璃的气候适用性序列,即气凝胶玻璃在严寒地区最适用,寒冷地区次之。

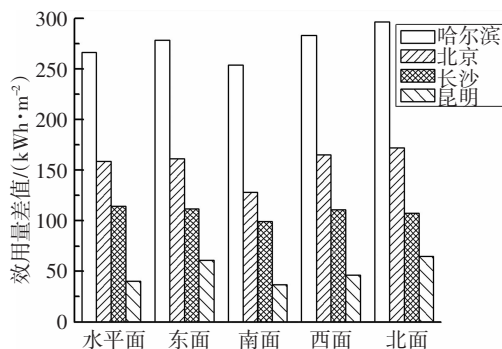


图 8 气凝胶玻璃与双层中空玻璃效用差值比较

Fig.8 Comparison of the difference of efficient solar energy between aerogel and double glazing system

## 4 结 论

本文建立了一种新型的建筑节能玻璃——气凝胶玻璃的光学模型与动态传热模型并进行了实验验证。根据已有理论方法建立了其他 5 种常见节能玻璃的传热与光学模型,模拟分析了这 6 种玻璃在我国五大气候区典型城市应用的空调期和供暖期逐时得热量情况,利用累计逐时得热量和太阳能效用等指标来评价气凝胶玻璃在我国各气候区的适用性,得出了以下结论:

1) 在全年主要考虑供暖或空调的气候区,利用

累计逐时得热量指标来分析不同类型玻璃的气候适用性,气凝胶玻璃在严寒地区(哈尔滨)和温和地区(昆明)适用性强,但不适用于全年主要考虑空调的夏热冬暖地区(广州)。

2)在寒冷地区(北京)和夏热冬冷地区(长沙),全年既有供暖期又有空调期,利用太阳能效用指标来分析各种玻璃的全年气候适用性,其中除长沙地区的水平面外,气凝胶玻璃在各个朝向上的太阳能效用均最大,说明寒冷地区和夏热冬冷地区适宜推广应用气凝胶玻璃。

3)在气凝胶玻璃适用的地区,选取同结构的双层中空玻璃为参照对象,将各地气凝胶玻璃与双层中空玻璃在不同朝向的太阳能效用差值作为参考依据,得出气凝胶玻璃的气候适用性序列为哈尔滨>北京>长沙>昆明,即气凝胶玻璃在严寒地区最适用,寒冷地区次之。

## 参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告2016[M].北京:中国建筑工业出版社,2016:7—16.  
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2016 Annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 7—16. (In Chinese)
- [2] 陈友明,高丽慧,王衍金,等.夏热冬冷地区 VDSF 自然通风实验研究与优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5): 120—125.  
CHEN Y M, GAO L H, WANG Y J, *et al.* Experimental research and optimization of natural ventilation for VDSF in zones Hot in Summer and Cold in Winter [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5): 120—125. (In Chinese)
- [3] 陈友明,王京南,王衍金.双层皮幕墙内置遮阳百叶倾角评价方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(9):174—181.  
CHEN Y M, WANG J N, WANG Y J, *et al.* Evaluation method of blind angle for double skin facades [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(9): 174—181. (In Chinese)
- [4] BERARDI U. The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project [J]. Applied Energy, 2015, 154: 603—615.
- [5] BURATTI C, MORETTI E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems [J]. Applied Energy, 2012, 97: 430—437
- [6] WANG H, WU H J, DING Y F, *et al.* Feasibility and optimization of aerogel glazing system for building energy efficiency in different climate zones [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2015, 10(4): 412—419.
- [7] 冯晶琛,丁云飞,吴会军.不同类型玻璃在北京地区的节能研究[J].建筑节能,2012(5):50—54.  
FENG J C, DING Y F, WU H J. Energy efficiency of various types of window glass in Beijing [J]. Building Energy Efficiency, 2012 (5): 50—54. (In Chinese)
- [8] KARLSSON J, ROOS A. Modelling the angular behaviour of the total solar energy transmittance of windows [J]. Solar Energy, 2000, 69(4): 321—329.
- [9] 周娟.建筑围护结构动态传热模拟方法的研究[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2012:62—69.  
ZHOU J. Simulation methods research on transient heat transfer through building envelope [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2012: 62—69. (In Chinese)
- [10] 吴军翟.夏热冬冷地区双层玻璃幕墙热工性能模型分析[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2013:40—45.  
WU J D. Research on thermal calculation model of ventilated double skin facade in hot summer cold winter zone [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2013: 40—45. (In Chinese)
- [11] 章熙民,任泽霁.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2003: 168—178.  
ZHANG X M, REN Z P. Heat transfer theory [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 168—178. (In Chinese)
- [12] 江亿.建筑环境系统模拟分析设计方法—DeST[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:93—116.  
JIANG Y. Building environmental system simulation and analysis—DeST [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 93—116. (In Chinese)
- [13] 陈友明,李宇鹏,郑思倩,等.实际气候条件下气凝胶玻璃光热特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):157—164.  
CHEN Y M, LI Y P, ZHENG S Q, *et al.* Experimental study on optical and thermal characteristics of aerogel glazing system under real climate condition [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(5): 157—164. (In Chinese)
- [14] LIU Y, CHEN Y M, LI Y P, *et al.* Solar extinction coefficient of silica aerogel calculated through integral model and experimental data [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1253—1258.
- [15] HENNING S, SVENSSON L. Production of silica aerogel [J]. Physica Scripta, 1981, 23: 697—702.
- [16] KARLSSON J, RUBIN M, ROOS A. Evaluation of predictive models for angle-dependent total solar energy transmittance of glazing materials [J]. Solar Energy, 2001, 71(1): 23—31.
- [17] 丁勇,刘旭,丁正辽,等.不同玻璃对夏季炎热地区室内太阳辐射得热的影响分析[J].太阳能学报,2014,35(1):177—182.  
DING Y, LIU X, DING Z L, *et al.* Influence of different glass on the indoor solar heat gain in hot summer areas [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(1): 177—182. (In Chinese)
- [18] 张慧玲.建筑节能气候适应性的时域划分研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2009:126—139.  
ZHANG H L. Study on time-domain division of building energy efficiency climate adaptation [D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, 2009: 126—139. (In Chinese)
- [19] 李聪航,江世臣,姚正平,等.纳米多孔 SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热材料的传热特性及其应用研究 [C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会论文集.太原:中国学术期刊电子出版社,2013:97—102.  
LI C H, JIANG S C, YAO Z P, *et al.* Heat transfer characteristics and application of nanoporous SiO<sub>2</sub> aerogel insulation materials [C]// Proceedings of the Tenth Annual Academic Conference of the Professional Committee of Deep Space Exploration Technology of the Chinese Astronautical Society. Taiyuan: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2013: 97—102. (In Chinese)