

二氧化钒镀膜玻璃参数测量与模拟

史昊杨¹, 朱群志¹, 王文婷¹, 高彦峰²

(1. 上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090; 2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要: 二氧化钒镀膜玻璃(下称 VO₂ 玻璃)是一种有前景的热致变色玻璃, 具有相变机能, 可以通过自身光学透过率的变化, 调节进入建筑室内的太阳光, 达到节能的目的。根据国家对建筑玻璃的测量标准, 测量了 VO₂ 玻璃的可见光透射率、太阳光直接透射率、相变温度、发射率、可见光反射率等参数, 计算出了 VO₂ 玻璃的遮阳系数 Sc 值。通过建立传热模型, 模拟计算出了传热系数 K 值。最后将所有关于 VO₂ 玻璃的参数汇总并与目前常用节能玻璃进行性能的比较和分析, 得出 VO₂ 玻璃优于部分目前常用节能玻璃, 略弱于 Low-E 玻璃。VO₂ 玻璃优势在其相变机能和对光污染的控制, 缺点是采光性能一般, 隔热性能不足, 相变前后的透射率变化范围窄。对其性能不足的改进是未来的发展方向。

关键词: 建筑节能; 新型建材; 钒氧化物薄膜; 实验测量; 参数模拟

中图分类号: TU832.17

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0239-07

Parameters Measurements and Simulations of Vanadium Dioxide Coated Glass

SHI Haoyang¹, ZHU Qunzhi¹, WANG Wenting¹, GAO Yanfeng²

(1. Institute of Energy and Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, P. R. China;

2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200090, P. R. China)

Abstract: Vanadium dioxide coated glass (VO₂ glass) is a promising thermochromic energy-saving glass. Its film can change phase at a certain temperature from the semiconductor into a metallic state, accompanied by changes in optical properties. The VO₂ glass can intelligently adjust the solar radiation from the sunlight for the room, to achieve energy efficiency of the building. Use the national standards of architectural glass measuring, measure the visible transmittance, solar direct transmittance rate, the phase transition temperature, the thermal parameters of the emission rate, the visible reflectivity of VO₂ glass. Collect the current parameters of VO₂ glass and compare and analysis them with common energy-saving glass. Conclusions are that the VO₂ glass is superior to some common energy-saving glass, but slightly weaker than Low-E glass. The advantages of VO₂ glass are its phase transition function, a very weak reflection, the weak points are its lighting performance, insulation performance, the transmittance change range before and after the phase transition is a narrow which is the direction of development and improvement in the future.

Key words: energy efficiency; building materials; vanadium iodide thin film; experimental measurement; numerical simulation

目前的建筑玻璃有着良好的光学、热学性能, 但玻璃特性不可变, 无法适应不同季节对玻璃的不同要求。冬季, 玻璃需要透过红外辐射进入室内, 增加室内热量, 减少采暖能耗; 夏季, 玻璃需要将红外辐射阻挡在室外, 减少进入室内的热量, 减少制冷能耗。

VO₂ 玻璃是一种有前景的热致变色玻璃。VO₂ 是一种金属氧化物, VO₂ 在 68 °C 左右的温度条件下, 其原有的半导体性质快速变为金属性质, 同时伴随四角金刚石结构向具有单斜对称的扭曲金刚石结构的转变, 这种结构性的变化导致了其相变前后光学透过率的变化^[1]。相变前后可见光透过性能基本不变, 从而保证良好的照明; 而在红外波长, 透射率

由较高突变至几乎不透过, 从而实现智能调控进入室内的红外辐射的功能。许多研究者认为 VO₂ 适合镀在玻璃表面, 制成热致变色玻璃, 通过其光学特性变化来调节进入室内的太阳辐射, 可以达到节能的目的。

目前国外对 VO₂ 的研究主要集中在美国橡树岭国家实验室纳米相材料科学中心、美国田纳西大学、美国贝尔实验室。国内研究集中在中科院上海硅酸盐研究所、国防科技大学等高校及科研院所。对 VO₂ 镀膜玻璃的研究集中在制备中掺杂以减低相变温度, 以及如何提高 VO₂ 光学性能方面。比如 LU^[2] 等利用离子注入法分别向 VO₂ 膜中掺入了 Li⁺, Al³⁺ 和 P⁵⁺ 离子, 从而降低或提升了相变温度。伦敦大学科

收稿日期: 2012-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976063); 上海市科委资助项目(09DZ1202504); 上海市东方学者岗位、上海市曙光计划资助项目(09SG51)

作者简介: 史昊杨(1986-), 男, 硕士生, 主要从事节能技术研究, (E-mail)shy10@163.com。

研小组通过化学汽相沉积法及掺钨工艺,使相变温度降低到 29℃ 以下^[3]。在提高 VO₂ 透过率方面,Chen 等^[4]在硅基上用离子束溅射方法制得纯 VO₂ 薄膜,相变前后透射率由 50% 降低到 3%,性能十分理想。上海硅酸盐研究所^[5]对 VO₂ 可见光透过率调控进行了研究,并通过减少薄膜厚度和设计微观结构的办法提高 VO₂ 薄膜可见光透过率。

由于 VO₂ 玻璃距离大批量生产和具体工程应用相去甚远,目前对 VO₂ 玻璃作为实验样品研究较多,作为建筑玻璃的研究较少。新型 VO₂ 热致变色玻璃性能如何,是否符合建筑对玻璃的性能要求,与其他玻璃相比的优势与不足,都是目前急需研究的方向。

本文根据建筑玻璃的基本热学参数,对 VO₂ 玻璃进行了测量,如透射率、相变温度、发射率、反射率等等。根据国家标准^[6],计算出 VO₂ 玻璃的可见光光谱透射率、可见光反射率、太阳光谱透射率等。根据测量数据模拟出 VO₂ 玻璃的传热系数 K 值和遮阳系数 Sc 值。最后与目前常用玻璃进行性能比较和分析,指出 VO₂ 玻璃目前的不足和未来的发展方向。

1 VO₂ 薄膜玻璃热学参数测量

1.1 样品的获得

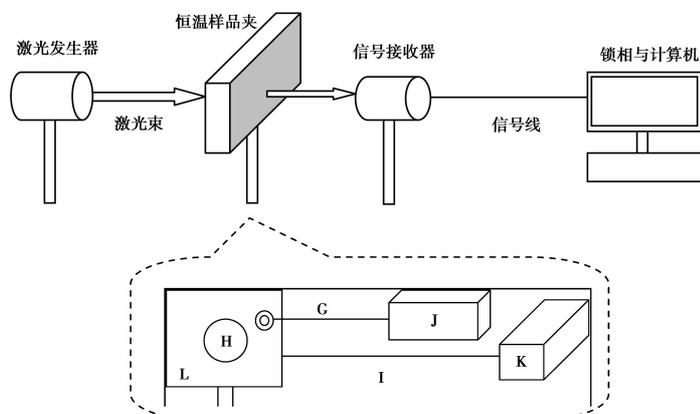
VO₂ 样品某研究所制备提供。掺杂钨的二氧化钒玻璃

是采用聚合物辅助沉积方法制备的,属于液相法制膜体系。其大致流程如下:将含聚合物(成膜促进剂)、钒和钨的无机盐的镀膜前驱液以旋涂的方式涂布于抛光的石英片上,然后置于 80℃ 烘箱干燥。重复以上过程以得到所需的膜厚。然后将所得石英片在 N₂ 气氛下退火,退火温度为 450~600℃^[13]。

VO₂ 玻璃样品尺寸分别为 2.5 cm × 2.5 cm,厚度为 1 mm。镀膜厚度是通过多次旋涂的方法或者提拉速度确定的,VO₂ 薄膜厚度控制在 100 nm,厚度控制精度在 5 nm 以内。

1.2 相变温度测量

相变温度指的是 VO₂ 相态转变的温度。由于 VO₂ 具有热滞性,所以 VO₂ 玻璃的相变温度取的是相变开始温度和结束温度的平均值。自搭建了激光透射率测试仪,用观察透射率的办法测量相变温度。基本实验系统由激光发生器(635 nm)、恒温样品夹、信号接收器、锁相、计算机等组成。激光器发出激光,透过一定温度的样品后信号被接收器采集并送至锁相和计算机进行分析。具体结构如图 1,其中为了控制样品温度,自制了恒温样品夹。其由电源、半导体制冷片、测温探头、温度控制器组成。使用时,电源供给直流电,半导体制冷片加热或者制冷样品,测温探头和温度控制器负责控制电流开关,让样品稳定在一定的温度下。



H:透光孔,I:电源线,J:温度控制器,K:电源,L:半导体制冷片

图 1 相变温度测试系统结构图

对样品加热和制冷后的透射率变化结果如图 2 所示,升温时此样品的相变开始于 35℃,在 45℃ 完全相变。降温时相变开始于 40℃,到 30℃ 完全恢复到之前的相态,可知 VO₂ 具有热滞性。使用式(1)计算相变温度 T_{tran} ,可得相变温度为 37℃。

$$T_{\text{tran}} = T_{\text{up}} + T_{\text{drop}}/2 \quad (1)$$

式中: T_{up} 表示升温时的平均相变温度; T_{drop} 表示降温时的平均相变温度。

1.3 透射率测量

太阳光直接透射率是指在太阳光谱(300~2500 nm)范围内,直接透过玻璃的太阳能强度对入射太阳能强度的比值,是决定进入室内太阳辐射量的一个重要参数。可见光透射率是指在可见光光谱(380~780 nm)透过玻璃材料的可见

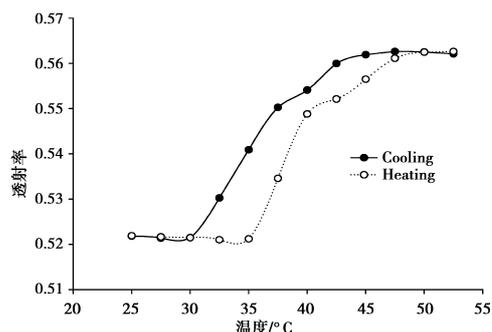


图 2 透射率随温度变化图

光光通量与投射在其表面可见光光通量之比,是决定玻璃采光性能的重要参数。

测量系统选用了自搭建的分光光度计系统。系统是基于卓立汉光的光谱仪 Omni-λ, Stanford research 的锁相 SR830 等设备,测量原理是用单色仪发出单色光,经过斩波器后射入到样品上,再被探测器接受,最后转化为电子信号被锁相和计算机处理和记录。具体结构如下图 3。

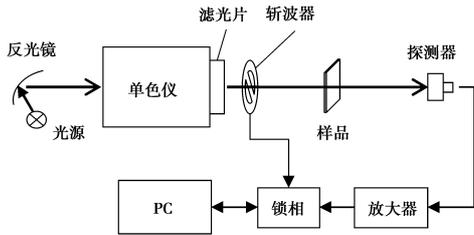


图 3 分光光度计结构示意图

VO₂ 玻璃透射率测量结果如图 4,可以看到透射率在相变前后有着显著的区别。根据不同波长玻璃的直接透射率,根据国标 GB/T 2680-94^[6]中的光谱分布表可计算出太阳光直接透射率。根据式(2),计算出太阳光直接透射率由相变前的 0.51 变化到相变后的 0.44,变化率为 16%。根据式(3),计算出可见光透射率为相变前的 0.48 和相变后的 0.50。

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_{\lambda} \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_{\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

式中: S_λ 太阳光谱辐射相对光谱分布, D_λ 标准照明体相对光谱功率分布, V(λ) 表示明视觉光谱光视功率, τ(λ) 光谱透射率。

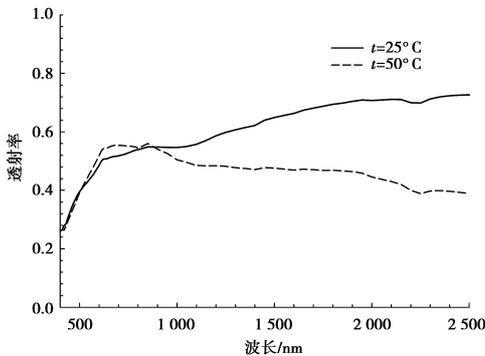


图 4 VO₂ 样品透射率在相变前后的变化图

1.4 发射率测量

玻璃的全波长半球向发射率(辐射率)指的是玻璃与同温黑体相比在所有可能方向和波长上的平均发射率。发射率决定了进入室内的二次辐射热传递的量,是决定玻璃的隔热能力的一个重要参数。

VO₂ 样品的发射率测量是通过积分球反射率测试系统进行测试的。测试的原理是基于基尔霍夫定律:对于热平衡

体来说,其发射率等于吸收率,如式(4)^[8]。通过测量物体的半球的反射率从而推导出半球发射率。发射率测试系统包括积分球、光源、温控设备、探测器、计算机等。原理是用光源产生单波长的光照射在样品上,用探测器将收集样品的反射光转化为电信号,记录在计算机中。实验系统图如图 5。

$$\epsilon = \alpha = 1 - \tau - \rho \quad (4)$$

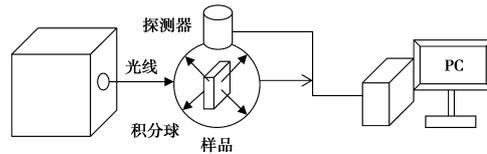


图 5 积分球测试实验系统图

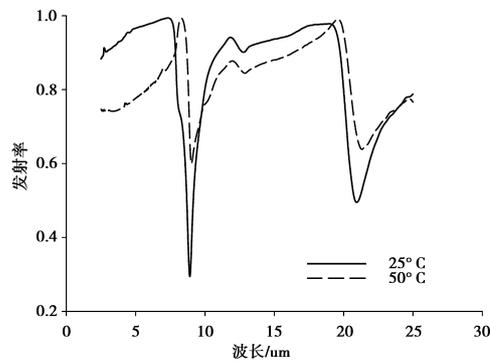


图 6 样品发射率随着波长变化曲线图

测试分别在 25、50 °C 进行,测得的反射率结果如图 6。根据光谱分布对测得的各波长发射率进行积分,使用公式(5)^[6],通过计算可知发射率 ε 为 0.85(相变前),0.84(相变后)。

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \xi_{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda}{E_b} \quad (5)$$

其中, E_{λ,b} 是同温度下黑体在不同波长发射率, E_b 为黑体发射的总功率。

1.5 反射率测量

玻璃的可见光反射率是在可见光波长投射到玻璃上面被反射的辐射能与投射到物体上的总辐射能之比。VO₂ 玻璃的可见光反射率是衡量玻璃反射可见光的能力的重要参数,较大的玻璃可见光反射率会造成建筑光污染。

VO₂ 玻璃的发射率由岛津 UV-3600 分光光度计测试系统进行测量。UV-3600 测试波长范围为: 385 ~ 2500 nm,分辨率为:0.1 nm,原理图如图 7。首先将样品放在样品夹上加热或制冷,并用光源照射,测出样品反射的光信号,然后与不放样品的光信号相比得到可见光反射率。测量结果如图 8。

根据国标 GB/T 2680-94^[6]中的光谱分布表,用式 2 积分得 VO₂ 玻璃可见光反射率为:相变后 0.06,相变前 0.04。

1.6 吸收率测量

太阳光直接吸收比是指投射到玻璃上被吸收的热辐射能与投射到玻璃上的总热辐射能之比,是影响玻璃隔热性能的重要参数。太阳光直接吸收比的测量同样使用 1.4 节的

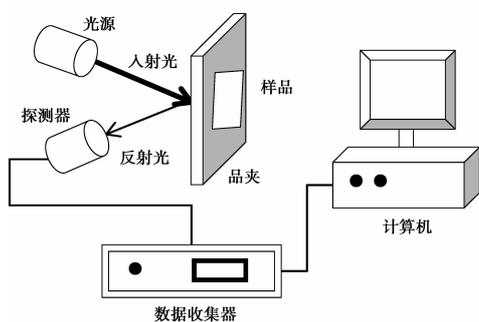


图7 反射率测试系统示意图

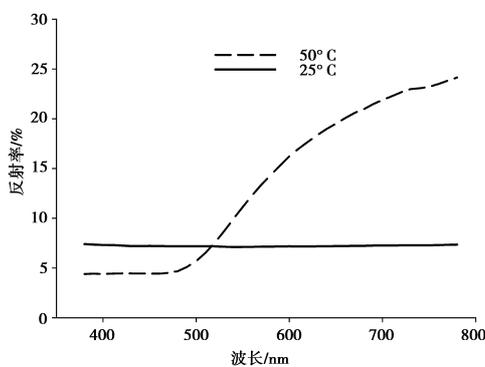


图8 可见光反射率曲线

岛津 UV-3600 分光光度计进行测量,波长范围在 220~2500 nm。根据辐射能平衡定律: $\alpha + \tau + \rho = 1$,通过测量玻璃的反射率 ρ 、透射率 τ ,可以计算出吸收率 α 。测量结果如图 9。

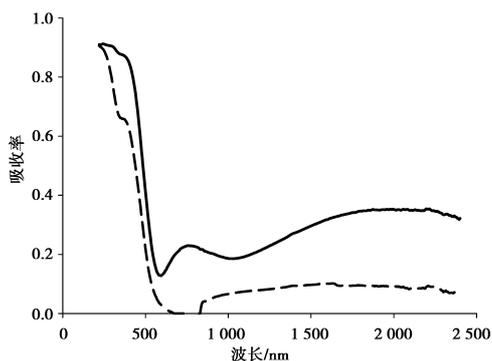


图9 测试吸收率曲线

根据国家标准中的光谱分布表^[6],可根据式 2 积分得 VO₂ 玻璃的太阳光直接吸收率为:相变后 0.21,相变前 0.39。

1.7 导热率测量

玻璃的导热率影响 VO₂ 玻璃的隔热能力。镀膜玻璃的导热率由两个因素影响,一个是玻璃基底本身的热导率,另一个是镀膜的热导率。对于 VO₂ 镀膜导热率,University of Illinois 和 Harvard University 的 Dong-Wook Oh 和 Changhyun Ko 教授进行了研究。他们测试了不同厚度的 VO₂ 薄膜的导热率,90 nm 厚度的薄膜的测量结果为:相变后 6 W/(m·K),相变前 3.8 W/(m·K)^[7]。经过计算可知

100 nm 厚的 VO₂ 薄膜的单位面积热阻为相变前 1.7×10^{-8} K/W,相变后 2.6×10^{-8} K/W。这跟玻璃的热导率 $1 \sim 2$ W/(m·K),热阻 $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ K/W 相比,相差 5 个数量级。因此薄膜的热阻可以忽略,只针对玻璃基底进行导热率的测量。

玻璃基底的热导率是由 Sweden Hot Disk Inc. 公司生产的 Hot Disk Thermal Constants Analyzer 进行测量。精度为 $\pm 2\%$,测量范围是 0.005~500 W/(m·K)。Hot Disk 使用瞬变平面热源技术测量样品,其原理是使用双螺旋探头加热样品,假设样品无限大,加热一定时间后测量出样品与探头接触面的温升,然后根据测出的温升、加热时间、探头输出的热功率来计算热导率,实验设备系统图如图 10。共测试 5 次,取多次测量值的平均值为最终测量参数。

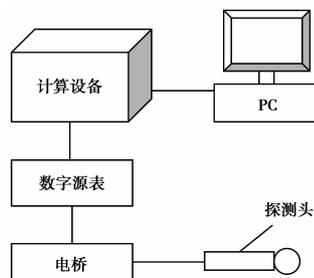


图10 实验设备系统图

导热率测试仪没有安装薄膜测试模块,对于这种比较薄的样品,测出的是整个样品的热导率。玻璃样品导热率测量平均值为 1.18 W/(m·K),接近国标规定的建筑用玻璃的 1.23 W/(m·K)。

表1 VO₂ 玻璃样品导热系数测量结果

次数	导热系数/(W/(m·K))
第一次	1.181
第二次	1.179
第三次	1.179
第四次	1.178
第五次	1.181

1.8 测量数据小结

对于本章测试的内容,首先进行了分类归纳,如表 2,将所有测得参数归纳到一个数据表格中。

表2 测得参数汇总

参数	VO ₂ 相变前	VO ₂ 相变后
相变温度	37 °C	37 °C
太阳光直接透射率	0.51	0.44
可见光透射率	0.48	0.50
可见光反射率	0.06	0.04
半球发射率(辐射率)	0.85	0.84
太阳能直接吸收率	0.39	0.21
样品整体热导率/(W/(m·K))	1.18	1.18

2 Sc 值计算和 K 值模拟

在测出了玻璃的重要基本参数后,还需要对 VO₂ 玻璃的 K 值和 Sc 值进行测量,才能得到玻璃全面的性能参数。Sc 值即为遮阳系数(shading coefficient),Sc 是指太阳辐射总透射比与 3 mm 厚普通无色透明平板玻璃的太阳辐射的比值。遮阳系数越小,阻挡阳光热量向室内辐射的性能越好。K 值,或者说传热系数,定义是:在无太阳辐射条件下,单位时间内的玻璃组件一侧空气到另一侧空气的传输热量。K 值是用来衡量玻璃隔热性能的物理量,其值越小隔热性能越优异。

就建筑节能玻璃来讲,K 值和 Sc 值是最主要的性能参数。K 值主要体现玻璃的隔热能力,Sc 值主要体现玻璃的遮蔽太阳辐射的能力。测量这两个参数需要相关的测量仪器和合适的样品大小。由于目前 VO₂ 玻璃还处于实验室阶段,样品尺寸太小不适用于测量仪器,故采取传热分析和数值模拟的办法获得其 K 值和 Sc 值。

2.1 Sc 值计算

遮阳系数 Sc 值是两种传热情况同时决定的,如图 11 第一种是太阳辐射照射在玻璃上,透过玻璃直接进入室内;第二种是太阳辐射照射在玻璃上,玻璃会吸收部分辐射。玻璃温度升高后通过热辐射和热传导向室内传递热量,一般称为太阳辐射的二次热传递。

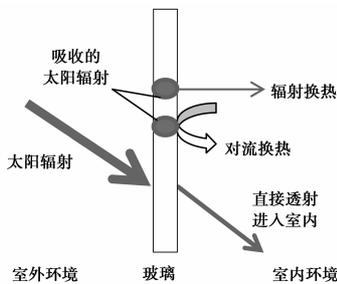


图 11 影响 Sc 值的两种传热情况

根据国家标准^[6],Sc 值由太阳能总透射比 g 计算出,如公式(6)。太阳辐射总透射比通过玻璃的成为室内得热量的太阳辐射与投射到玻璃构件上的太阳辐射的比值。而 g 由式(7)~(9)计算得出。

$$Sc = g / \tau_s \quad (6)$$

式中, g 表示试样的太阳能总透射比; τ_s 表示普通 3 mm 玻璃的太阳能总透射比,取 0.889。

$$g = \tau_e + q_i \quad (7)$$

$$q_i = \alpha_e \times [h_i / (h_i + h_e)] \quad (8)$$

$$h_i = 3.6 + (4.4\epsilon_i / 0.83) \quad (9)$$

式中, q_i 表示室内侧的二次热传递系数; τ_e 表示太阳能直接透射比; α_e 表示太阳能直接吸收比; h_i 表示试样构件内侧表面的热传递系数; h_e 表示试样构件外侧表面的热传递系数,取 23 W/m²·K; ϵ_i 表示半球辐射率。

经过计算,可得 g 值为相变前 0.61,相变后 0.49。Sc 值为相变前 0.68,相变后 0.55。相变前后 Sc 变化率为 24%。Sc 值变化率接近四分之一,可以起到一定的智能调节太阳辐射的效果。

2.2 K 值计算

传热系数 K 值是二种传热情况同时决定的:第一种为外界空气的热量经过室外对流传热进入玻璃,再经过玻璃内的热传导,最后通过对流传热进入到室内。第二种为外界空气、天空和其他物体发出辐射,热量通过辐射传热,透过玻璃进入室内,如图 12

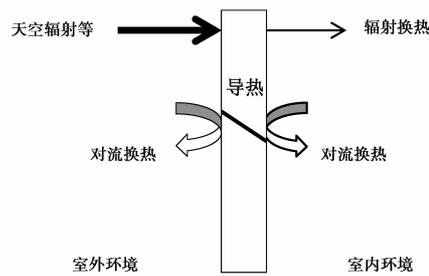


图 12 K 值的几种传热情况

根据国家标准^[10]对于传热系数 K 值的测试规定,K 值是在无太阳辐射的条件下用专用测试系统测出的。K 值的计算公式如式(10)。测试条件如表 3,下文的模拟计算均是在此表中条件下进行的。

$$K = \frac{q_c + q_r}{\Delta T} \quad (10)$$

式中, q_c 表示对流与导热热流密度; q_r 表示辐射换热热流密度; ΔT 表示测试系统的室内外温差

表 3 K 值测试条件

室外温度 /°C	室内温度 /°C	室外气流 /(m·s ⁻¹)	室内气流 /(m·s ⁻¹)	太阳辐射强度 /(W·m ⁻²)
-20.3	17.1	3	自然对流	0

为计算出合理的 VO₂ 玻璃的 K 值,建立了玻璃的物理传热模型。影响 K 值的第一种传热情况可认为是导热和对流共同导致的。传热网络如图 13 所示,各部分均有合适的计算方程支撑。第二种传热情况是辐射换热导致的,传热网络图如图 14 所示。

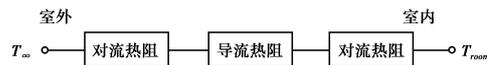


图 13 玻璃温差传热途径网络图



图 14 玻璃辐射传热途径网络图

2.2.1 对流和导热选用方程

室内对流传热属于自然对流,选用了竖直平板自然对流公式^[8],如式(11)~(14)。

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (11)$$

$$\overline{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (13)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (14)$$

式中, Pr 表示普朗特数; Nu 表示努谢尔数; Ra 表示瑞利数; T_s 表示玻璃表面温度; T_∞ 表示环境温度; β 表示热膨胀系数; L 表示玻璃长度; α 表示动力粘度; ν 表示运动粘度。

室外由于两种流动: 自然对流和受迫流动同时存在, 适用何种对流换热公式需要进行判断。根据流体力学知识, 对于垂直平板, $(Gr_L/Re_L^2) \ll 1$ 时可以忽略自然对流, 而 $(Gr_L/Re_L^2) \gg 1$ 时可以忽略受迫对流^[8]。计算 Gr 、 Re 如式(15)、(16)所示。

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (15)$$

$$Re_L = u_\infty L \frac{\rho}{\mu} \quad (16)$$

式中: Gr 表示格拉晓夫数; Re 表示雷诺数; g 表示重力加速度; u_∞ 表示空气流速。

计算可得: $(Gr_L/Re_L^2) = 8.1 \times 10^{-3} \ll 1$ 。因此可认为在国家标准测试条件下, 玻璃外表面可忽略自然对流。故应用受迫流动对流换热模型。对于等温平板和雷诺数在 5×10^5 以下的层流, 故应用平板受迫对流^[8] 公式(17)~(20)算出对流传热量。

$$\overline{Nu}_L = 0.664Re_L^{1/2}Pr^{1/3} \quad (17)$$

$$Re_L = u_\infty \frac{L}{\nu} \quad (18)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (19)$$

式中, k 表示空气的导热系数

热传导计算方程选用傅里叶方程, 如式(20)。

$$q = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{\sigma} \quad (20)$$

式中, ΔT 表示玻璃内外表面温差; σ 表示厚度; k 表示热导率

2.2.2 辐射换热选用方程

K 值测试系统中的室内外空气都会发射辐射, 就会产生辐射热交换。天空和玻璃之间有空间热阻, 玻璃本身有表面热阻, 玻璃和室内之间有空间热阻, 如式(21)~(23)。

$$q = \Delta E/R \quad (21)$$

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (22)$$

$$R = 1/F_{12} + 1/F_{23} + (1-\varepsilon)/\varepsilon \quad (23)$$

式中, E 表示辐射发射功率; σ 表示波尔兹曼常数; T 表示物体温度; R 表示总热阻; F 表示角系数; ε 表示发射率

在各个参数的选择上, 参考了诸多研究者文献中的数据: 天空温度选取的刘森元等^[11] 的研究结果, 平均低于空气温度 15°C 。天空辐射的发射率使用 F. P. Incropera 所著书中数据^[8], 取 $\varepsilon=0.1$ 。根据重庆大学和剑桥大学的研究^[12], 玻璃垂直面对天空的角系数 $F_{21}=0.5$ 。室内物体是涂了白色保温涂料的墙壁, 根据古春艳等人的研究, 发射率 $\varepsilon=0.8$ ^[16]。

2.2.3 求解过程

需要计算的参数是玻璃表面的对流换热热流密度和辐射传热热流密度。已知量为室内外温度、天空背景温度、风速、玻璃的基本物性参数。未知量为玻璃表面温度。因为方程不封闭, 故在实际计算中, 需要对方程中的未知量——玻璃温度进行确定。采取的数学方法是迭代法, 通过先假定玻璃温度和空气温度一致, 让循环减少 0.1°C , 逐次计算所有方程, 最终在方程达到平衡时循环停止, 此时的玻璃表面温度即为精度较高的玻璃温度值。在所有量都已知的情况下, 可以求得 K 值, 计算流程图如图 15。

由于涉及到大量计算, 故根据传热模型和相关计算方法, 编写了 K 值模拟计算机程序进行计算。经过运算后, 获得了 VO_2 玻璃的相变前后的 K 值为 $5.41/5.40$ 。

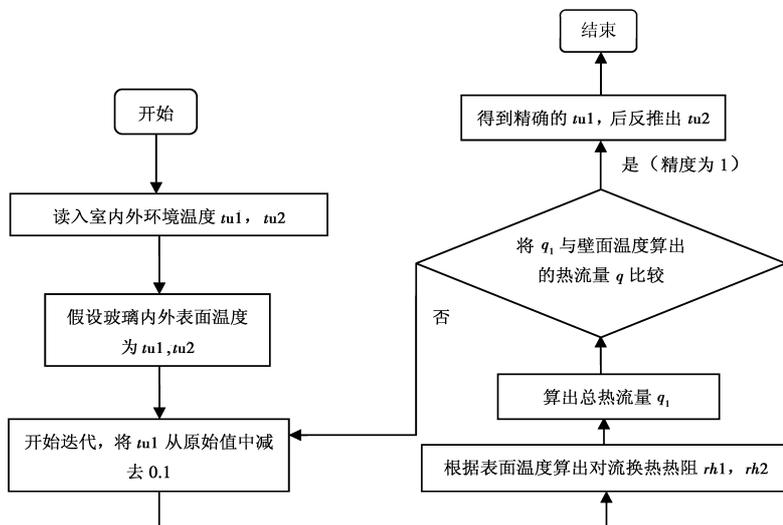


图 15 计算玻璃内外表面温度计算程序流程图

3 结 论

表 4 玻璃性能参数比较表

厚度/mm	可见光		太阳光		遮阳系数 Sc	传热系数 K	
	透射率/%	反射率/%	透过率/%	吸收率/%			
普通浮法玻璃	2	91	8	85	5	1	5.8
热反射玻璃	6	31	49	42	27	0.56	5.7
Low-E 玻璃	3	82	10	69	11	0.83	3.7
VO ₂ 玻璃	1	48/50	6/4	51/44	39/21	0.68/0.55	5.41/5.40

将测量部分和模拟部分得出的 VO₂ 玻璃的参数,以及各大玻璃厂商的现有玻璃参数归到一张表中,如表 4,就可以清楚的看到与目前在用的建筑外窗玻璃相比,VO₂ 玻璃的性能的优势与差距。目前在用玻璃参数来自于上海耀皮玻璃集团^[14],属于适用于上海等冬冷夏热地区节能玻璃标准^[15]的量产玻璃。根据表 4,可得分析如下:

1) 可见光透射率方面,VO₂ 玻璃略高于国家标准^[9]的最低标准 40%,采光性能一般,远不如 Low-E 和普通浮法玻璃,但比热反射玻璃高。这种现象是由 VO₂ 镀膜层的光学性质决定的,VO₂ 镀层在可见光波长有较强的吸收,导致可见光的透过性能的降低。

2) 可见光反射率方面,VO₂ 玻璃与 Low-E、普通玻璃处于一个水平,反射率很低,不会产生光污染问题。热反射玻璃目前因为其反射率过高,产生的光污染问题受到社会的关注。

3) 太阳光直接透过率方面与遮阳系数 Sc 方面。VO₂ 玻璃有热致变色能力,Sc 调节范围为 24%。在低温半导体态时,VO₂ 玻璃可以透过较多的太阳光,透过率和 Sc 值超过热反射玻璃,增加了室内得热,减少室内采暖能耗。在高温金属态,VO₂ 玻璃可以反射较多的太阳光,透射率和 Sc 值低于普通玻璃和 Low-E 玻璃,与热反射玻璃相当,减少了进入室内的热量,减少了室内的制冷能耗。

4) 传热系数 K 方面。VO₂ 玻璃的 K 值与浮法玻璃、热反射玻璃基本相同,可见 VO₂ 玻璃在这方面并没有优势。Low-E 玻璃由于有低反射特性,辐射热阻较大,故 K 值优于其他几种玻璃。

根据以上的分析,可以做出这样的总结和展望:

1) 总体来说,VO₂ 玻璃在多个性能参数上优于普通浮法玻璃和热反射玻璃,但与 Low-E 玻璃相比略弱。如能进一步提升 VO₂ 玻璃的性能,超越 Low-E 等节能玻璃也并非是不可能。

2) VO₂ 玻璃有较好的热致变色能力,遮阳系数在相变前后有着 24% 的变化,可以适应冬夏季对玻璃性能的不同要求,这是 VO₂ 玻璃的优势。但由于变化率仍不够大,故某些参数如冬季时的 Sc 值不理想。未来需要进一步提高 VO₂ 玻璃相变前后的透射率变化。

3) VO₂ 玻璃 36 °C 的相变温度符合建筑实际情况。VO₂ 玻璃采光性能一般,但反光很弱,不易产生光污染。适合于在建筑幕墙表面大面积使用。增加 VO₂ 玻璃的可见光透射率是一个重要的研究方向。

4) VO₂ 玻璃传热系数仍然较高。由于没有低辐射特性,VO₂ 玻璃需要做成中空玻璃来降低 K 值,而且中空玻璃中可以充惰性气体,可以保护 VO₂ 镀层。与中空玻璃结合应该是未来 VO₂ 玻璃的发展方向。

参考文献:

- [1] Be'Teille F, Livage J. Optical switching in VO₂ thin films[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 1998, (13): 915-921.
- [2] Lu S W, Hou L S, Gan F X. Synthesis and phase transition of Cu²⁺ ion doped VO₂ thin films[J]. Journal of Materials Science Letters, 1996(15):856-857.
- [3] Guinneton F, Valmalette J C, Gavarrri J R. Nanocrystalline vanadium dioxide: synthesis and mid-infrared properties[J]. Opt. Mater, 2000, 15(2):111-114.
- [4] Chen S H, Yi X J. Phase transition VO₂ thin films for optical switches[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 25(1):157-163
- [5] Zhu Q Z, Shi H Y, Gao Y F. Characterization of optical properties of vanadium-oxide thermochromic films[C]. In: Asia Thermal Physics Conference 2010, Beijing, 2010: 109131.
- [6] 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:中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] Oh D W, Ko C, Shriram R, et al. Thermal conductivity and namic heat capacity across the metal-insulator transition in thin film VO₂[J]. Applied Physics Letters, 96(13):151906-1-3.
- [8] Incropera F P, Dewitt D P. Fundamental of heat and transfer [M]. Newyork:John Wiley & Sons, 2007:342-369, 400-482
- [9] GB 50189-2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] GB/T 23483-2009 建筑物围护结构传热系数及采暖供热量检测方法[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 刘森元, 黄远锋. 天空有效温度的探讨[J]. 太阳能学报, 1983 (1):63-68
- [12] 李百战, 罗庆, 姚润明. 城市地面对天空热辐射角系数问题的求解[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(2):86-89.
- [13] Zhang Z T, Gao Y F, Chen Z, et al. Thermochromic VO₂ thin films: solution-based processing, improved optical properties, and lowered phase transformation temperature [J]. Langmuir 2010, 26(13):10738-10744.
- [14] Shanghai Yaohua Pilkington Glass Co., Ltd. Glass Tech Data [DB/OL]. http://www.sypglass.com/blcp.asp, 2012.
- [15] JGJ134-2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准强制性条文条款[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 古春艳, 缪国元, 许锦峰. 建筑节能涂料的制备与表征[J]. 中国涂料, 2010(3):65-67.