

# 纳米 SiO<sub>2</sub> 冻干胶-ATO 复合贴膜玻璃的制备及调光隔热性能研究\*

周建华<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 程浩亮<sup>1</sup>, 苗蕾<sup>1†</sup>, 衣笠直己<sup>1</sup>, 许家友<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 2. 广州大学化学化工学院, 广州 510006)

**摘要:** 将纳米 SiO<sub>2</sub> 冻干胶和 ATO 复合分散液涂覆在 PET 薄膜上, 干燥后贴在玻璃上制成贴膜玻璃, 研究了其光学、隔热温差等性能。结果表明, 当分散液为 10%SiO<sub>2</sub> + 10%ATO 时, 所得贴膜玻璃具有较好的光谱选择性, 可见光透过率为 77.2%、近红外屏蔽波长 (透过率小于 10%) 为 1 500 nm、遮蔽系数为 0.69; 同时贴膜玻璃还具有较好的隔热效果, 自制贴膜玻璃试验箱内空气温度比空白玻璃箱内空气温度低 8℃。

**关键词:** 调光隔热; SiO<sub>2</sub> 冻干胶; 纳米 ATO; 贴膜玻璃

中图分类号: TK519; TU55

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.02.012

## Preparation, Light-Dimming and Heat-Insulating Properties of Nano-SiO<sub>2</sub> Cryogels-ATO Composite Filmed Glass

ZHOU Jian-hua<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, CHENG Hao-liang<sup>1</sup>, MIAO Lei<sup>1</sup>,  
KINUGASA Naoki<sup>1</sup>, XU Jia-you<sup>2</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Nano-silica cryogels and ATO composite dispersion were coated on PET film, and then the coated film was pasted on the glass to prepare filmed glass. The optical and thermal insulation properties of the filmed glass were investigated. The results showed that the filmed glass with dispersion of 10%SiO<sub>2</sub> + 10%ATO had better spectral selectivity. The visible light transmittance, near-infrared shielding wavelength (with transmittance less than 10%) and shading coefficient of the filmed glass were 77.2%, 1500 nm and 0.69, respectively. It also showed good heat-insulating performance. The air temperature inside the test box with filmed glass was 8℃ lower than that with blank glass.

**Key words:** light-dimming and heat-insulating; silica cryogels; nano-ATO; filmed glass

## 0 引言

在建筑中, 窗玻璃承载透明、自然采光、室内外交互等多种功能, 对提升人们的生活品质起着重要作用。现代建筑采用大面积玻璃窗和幕墙已经成为一个世界性的设计趋势, 这种趋势将会造成能源浪费和全球变暖的继续恶化, 给全球环境造成很大压力。为了促进社会经济的可持续发展和环境保护的需要, 窗玻璃增添了更多的设计选择项<sup>[1]</sup>, 其构

造、光学及热学性能随气候条件、人们喜好、建筑物整体要求可调节。采用集节能性与装饰性于一体的窗玻璃, 不仅能满足一定的采光性能, 同时其良好的隔热性能减少夏天室外太阳辐射进入室内以及冬天室内热量散失, 最大程度减少室内制冷采暖的能耗。

热量通过玻璃的方式有三种<sup>[2]</sup>: 传导、对流和辐射。太阳辐射波长集中在 0.3 ~ 2.5 μm, 属于短波辐射; 而室内物体与室外环境间温差引起辐射换热

\* 收稿日期: 2014-11-10 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目 (2012B091000165); 广东省高端外国专家项目 (GDJ20144400003); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (182344KYSB20130006)

† 通信作者: 苗蕾, E-mail: miaolei@ms.giec.ac.cn

的波长范围在  $3 \sim 50 \mu\text{m}$ , 属于长波辐射<sup>[3]</sup>。长波辐射和短波辐射的波长范围没有重叠, 可以通过控制玻璃对长波辐射以及太阳近红外辐射的透过率来达到节能的目的。

Low-E 玻璃是目前较为成熟的玻璃节能技术<sup>[4]</sup>, 但其生产工艺复杂、设备昂贵、成本高, 还易屏蔽电磁波信号。因而研究人员开发出透明隔热涂料, 其工艺简单、施工方便、价格低廉, 不会屏蔽电磁信号, 更容易大面积应用。其中, 铟掺杂氧化锡 (ATO) 是透明隔热涂料中最常见的材料<sup>[5]</sup>。国内外研究学者在研究纳米 ATO 的粒径、电子浓度等因素的基础上, 探索了纳米 ATO 的分散工艺以及涂膜的光热性能, 获得了较好的节能效果<sup>[6-10]</sup>。但目前研究中大多采用的水性体系 (如聚氨酯) 涂层, 其硬度、附着力和耐水性均有待提高。采用  $\text{SiO}_2$  溶胶与 ATO 形成杂化涂层, 其机械性能和热稳定性得到了明显提高<sup>[11,12]</sup>。

$\text{SiO}_2$  气凝胶具有高比表面积、高孔隙率、大孔隙、与空气声阻抗相匹配等特点, 是现有固体材料中热导率最低的材料<sup>[13]</sup>。将  $\text{SiO}_2$  气凝胶制成透明隔热涂料, 可以在玻璃上形成具有良好机械性能和隔热效果的涂层。本文通过真空冷冻干燥法制备了与气凝胶具有相似绝热性能且成本低廉的纳米  $\text{SiO}_2$  冻干胶<sup>[14]</sup>, 并与纳米 ATO 复合, 均匀分散, 涂覆于 PET 薄膜上, 制成了贴膜玻璃, 分析了贴膜玻璃的光学、隔热温差等性能, 为节能玻璃设计提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 $\text{SiO}_2$ 冻干胶的制备

采用溶胶-凝胶法合成  $\text{SiO}_2$  凝胶, 将正硅酸乙酯 (TEOS) 加入到叔丁醇 (TBA) 中, 滴加  $0.1 \text{ mol/L}$  的 HCl 催化水解,  $50^\circ\text{C}$  恒温搅拌 1 h 得到  $\text{SiO}_2$  溶胶。再滴加  $1 \text{ mol/L}$  的  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 搅拌 2 min 后, 倒入培养皿中密封, 于室温下静置得到无色透明的凝胶, 其中各物质的摩尔比例保持为  $\text{TEOS} : \text{TBA} : \text{HCl} : \text{NH}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 10 : 0.004 : 0.02$ 。用 TBA 置换三次, 室温下老化 12 h, 放入冷冻干燥机 (北京四环, LGJ-18B) 进行真空冷冻干燥<sup>[14]</sup>, 得到疏松白色粉末, 即  $\text{SiO}_2$  冻干胶。

### 1.2 分散液的制备

将  $\text{SiO}_2$  冻干胶、ATO 纳米粉体 (上海沪正纳米科技有限公司) 加入到乙酸丁酯中, 粉体的总含量

为 20wt%。添加 10wt% 的分散剂 (德国迪高), 采用剪切搅拌机高速搅拌 10 h。然后用 500 目纱布过滤, 即得  $\text{SiO}_2$  冻干胶与 ATO 的复合分散液。

### 1.3 贴膜玻璃的制备

取一定量分散液, 与压敏胶粘剂按重量比 2 : 1 混合均匀, 采用刮涂器在 PET 薄膜上涂膜, 干膜厚度为  $50 \mu\text{m}$ , 晾干后贴在 4 mm 厚的普通浮法玻璃上, 即贴膜玻璃。

### 1.4 性能表征

采用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, Hitachi S-4800) 观察  $\text{SiO}_2$  冻干胶、ATO 纳米粉体的形貌。采用紫外-可见-近红外分光光度计 (Lambda 750) 测试玻璃在  $250 \sim 2500 \text{ nm}$  波段的透射、反射图谱。并根据《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》<sup>[15]</sup>, 计算出玻璃的可见光透射比  $T_{\text{vis}}$ 、太阳光直接透射比  $T_{\text{sol}}$ 、太阳能总透射比  $g$  和遮蔽系数  $S_g$  等参数。采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR TENSOR27) 测试玻璃在  $2.5 \sim 15 \mu\text{m}$  波段的反射图谱, 并计算表面辐射率  $\epsilon_i$ 。

采用实验室自制装置测试隔热温差, 如图 1 所示, 样品距离光源 20 cm, 单腔箱内空间为  $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 。实验采用卤钨灯 (275 W) 模拟太阳垂直辐照条件, 在外界气流速度、空气温度、湿度、辐照条件确定的情况下, 同时测定空白玻璃和贴膜玻璃的隔热效果, 得到玻璃内表面和试验箱内空气温度的变化曲线<sup>[8,16]</sup>, 分析样品屏蔽太阳辐射的能力。

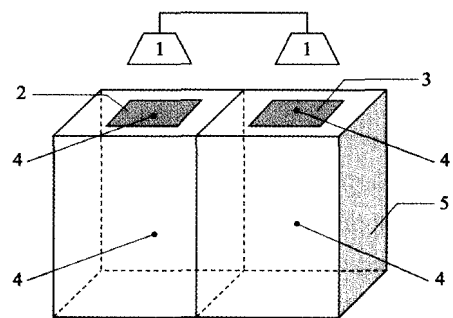


图 1 隔热温差测试示意图 (1 卤钨灯; 2 普通玻璃; 3 贴膜玻璃; 4 热电偶; 5 聚苯乙烯泡沫保温箱)

Fig. 1 Schematic diagram of thermal-insulation temperature test

## 2 结果与讨论

$\text{SiO}_2$  冻干胶和 ATO 粉体的 SEM 照片如图 2 所

示。从图中可以看出, SiO<sub>2</sub> 冻干胶颗粒连接起来形成三维网络多孔结构, 粒径为 20~40 nm, 因而具有较高比表面积和较低热导率。而 ATO 粉体的颗粒更细, 粒径分布在 10 nm 左右, 有少量团聚现象。这种 SiO<sub>2</sub> 冻干胶颗粒表面含有丰富的羟基, 有助于分散剂的锚定, 与 ATO 粉体复合后可提高分散液的稳定性。

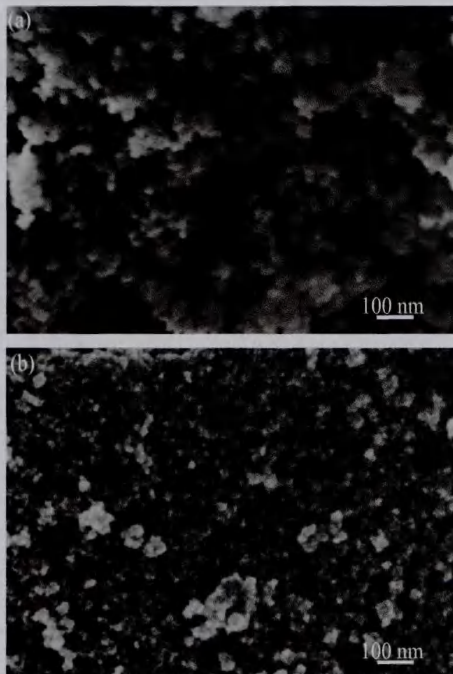


图2 SiO<sub>2</sub> 冻干胶 (a) 和 ATO 粉体 (b) 的 SEM 照片  
Fig. 2 SEM photos of silica cryogels (a) and ATO powders (b)

将不同比例混合的 SiO<sub>2</sub> 冻干胶和 ATO 复合分散液涂覆在 PET 薄膜上, 制成贴膜玻璃。并与 4 mm 空白玻璃、某公司 3 mm Low-E 玻璃对比, 具体说明见表 1。

根据 GB/T 2680-94, 我们测试了样品的紫外-可见-近红外透射和反射光谱, 结果如图 3 和图 4 所示。利用光谱数据计算出玻璃的可见光透射比  $T_{vis}$  (380~780 nm)、太阳光直接透射比  $T_{sol}$  (300~2 500 nm)、近红外光透射比  $T_{nir}$  (780~2 500 nm)、太阳能总透射比  $g$  和遮蔽系数  $S_g$  等参数, 列于表 1。

由图 3 和图 4 可以看出, 普通浮法玻璃 (1 号) 在可见光区和近红外区具有高透过和低反射, 而 Low-E 玻璃 (8 号) 在可见光区高透, 但在近红外区却有高反射和低透过, 也意味着这两种玻璃在可见光区和近红外区都是低吸收。由于 PET 在近红外有吸收, PET 贴膜玻璃 (2 号) 在测试光谱范围内透过率整体略低于未贴膜的空白玻璃。贴膜中加入

SiO<sub>2</sub> 冻干胶分散液后 (3 号), 可能由于 SiO<sub>2</sub> 含量过高导致薄膜出现白化现象, 近红外区透过率比 PET 贴膜玻璃下降了 15%, 可见光区透过率为 88%。

为了增加冻干胶贴膜玻璃的近红外辐射屏蔽效果, 我们将 ATO 纳米粉体与 SiO<sub>2</sub> 冻干胶复合。单纯 ATO 的贴膜玻璃 (7 号) 在测试波段的透过率均最低, 可将光透过率降低至 68%。而 SiO<sub>2</sub> 冻干胶与 ATO 复合的贴膜玻璃在近红外区的透过率都迅速下降到 10% 以下, 可见光区透过率仍保持在 75% 以上, 从而兼顾了透明采光与隔热节能的双重目的。

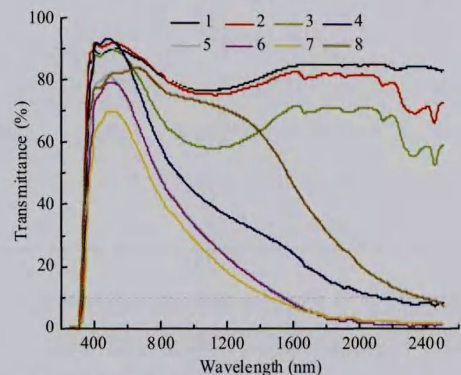


图3 样品的紫外-可见-近红外透射光谱  
Fig. 3 UV-visible-near infrared transmittance spectra of the samples

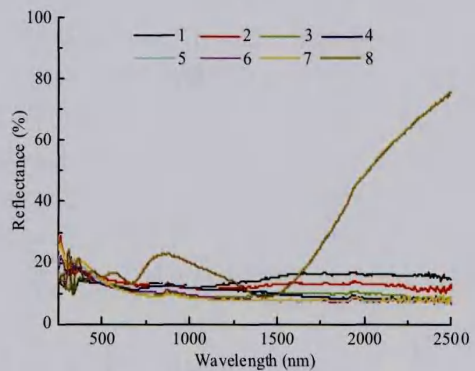


图4 样品的紫外-可见-近红外反射光谱  
Fig. 4 UV-visible-near infrared reflectance spectra of the samples

新型高性能建筑用窗要求玻璃在降低太阳能得热率的同时不显著降低可见光透射比, 即将太阳得热控制与光线控制分开考虑, 这样既能自然采光照, 又可以降低阳光辐射, 改善室内的光热环境质量, 提高居住舒适度。可见光透射比  $T_{vis}$  与遮蔽系数  $S_g$  的比值在一定程度上反映了室内光线强度与玻璃遮阳效果之间的关系<sup>[17]</sup>。当比值大于 1 时, 表明

玻璃的光热性能较好,室内有足够光线照明,同时进来的太阳近红外辐射较少,从而阻隔了太阳辐射得热。从表 1 可知,对于所制备的冻干胶贴膜玻璃, $T_{vis}$  与  $S_e$  的比值均大于 1。考虑到性价比,5 号贴膜

玻璃(其分散液为 10%SiO<sub>2</sub> + 10%ATO)最优,近红外屏蔽波长(透过率小于 10%)为 1 500 nm,与文献<sup>[8,18]</sup>中的结果一致,而且可见光透过率可达 77.2%,遮蔽系数为 0.69。

表 1 样品的参数说明及光学性能计算结果

Table 1 The parameters description and the calculated data of the optical properties of the samples

样品编号	玻璃种类	贴膜种类	分散液组成	$T_{vis}$	$T_{sol}$	$T_{nir}$	$g$	$S_e$	$\epsilon_i$
1	4 mm 普通浮法玻璃	-	-	0.896	0.838	0.799	0.85	0.96	0.832
2	4 mm 普通浮法玻璃	PET	-	0.915	0.842	0.786	0.86	0.97	0.845
3	4 mm 普通浮法玻璃	PET	20%SiO <sub>2</sub>	0.884	0.745	0.636	0.78	0.88	0.842
4	4 mm 普通浮法玻璃	PET	15%SiO <sub>2</sub> + 5%ATO	0.894	0.639	0.369	0.70	0.79	0.837
5	4 mm 普通浮法玻璃	PET	10%SiO <sub>2</sub> + 10%ATO	0.772	0.522	0.281	0.61	0.69	0.847
6	4 mm 普通浮法玻璃	PET	5%SiO <sub>2</sub> + 15%ATO	0.768	0.513	0.277	0.60	0.67	0.841
7	4 mm 普通浮法玻璃	PET	20%ATO	0.679	0.449	0.238	0.56	0.63	0.844
8	3 mm Low-E 玻璃	-	-	0.836	0.743	0.651	0.76	0.85	0.129

图 5 是采用 FTIR 测试的样品远红外漫反射光谱。可以看出,贴膜玻璃和普通玻璃在远红外波段的反射都很低,计算得到的辐射率为 0.83 ~ 0.84(如表 1)。而 Low-E 玻璃的远红外反射率极高,基本在 80%以上,因而表面辐射率小于 0.13。也就是说,Low-E 玻璃不易吸收外来的长波辐射热量,而是直接反射这部分热辐射,但单片 Low-E 玻璃的表面和边缘暴露于大气中,容易凝结水汽或受到污染(尤其是含硫离子的污染),从而丧失低辐射功能,因此须与阻隔对流传导的中空玻璃配合使用才能达到最佳节能效果。贴膜玻璃则吸收了大部分长波辐射热量并向室外和室内二次辐射,在 GB/T 2680-94 标准条件下(室内外两侧换热系数不同),向室外的二次

辐射约 3/4,向室内辐射约 1/4,因此单片贴膜玻璃就可以兼顾高透与遮阳,适用于不同的气候地区,季节适应性也更强。

图 6a 为太阳辐射能量经过玻璃的传递方式,包括透射、反射、吸收以及二次辐射<sup>[2]</sup>,直观地反映了热量通过各种玻璃进入室内的情况及其节能原理。空白玻璃(1号,图 6b)对太阳辐射能量直接透射很高,反射和吸收都较低,进入室内的太阳能为 85.2%。贴膜玻璃(以 5 号样品为例,图 6c)降低了太阳能量的直接透过,增加了吸收,同时向窗外和室内进行二次辐射(分别为 26.5%和 9.2%),因而使得进入室内的太阳能降低,仅为 61.4%。对比试验中的 Low-E 玻璃(8号,图 6d)为高透型,镀膜面在室内侧,太阳能的直接透射为 74.3%,尽管吸收和向室内的二次辐射较低,进入室内的太阳能仍达 75.7%。

采用热辐射光源卤钨灯发射出的光照射玻璃,高温的卤钨灯以热辐射的方式将能量传递给玻璃,一部分能量被玻璃阻隔(吸收和反射),其余热量进入箱体内腔。玻璃与箱内空气之间在传导、对流和热辐射的共同作用下进行热量的传递。因吸收光波能量而自身温度升高的玻璃温度高于箱内紧邻玻璃的空气温度,产生温度差,空气内部的冷热流体形成对流运动而传递热量。玻璃吸收热量,传递给箱内空气的同时,也向箱体外侧空气传递着热量。一

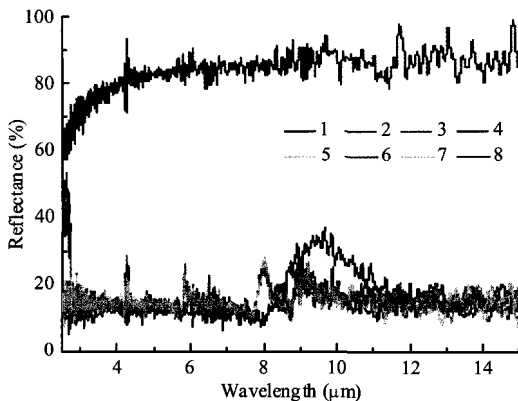


图 5 样品的远红外漫反射光谱

Fig. 5 Far-infrared diffuse reflectance spectra of the samples

段时间后，玻璃的温度和箱内空气温度不再变化，达到动态平衡。

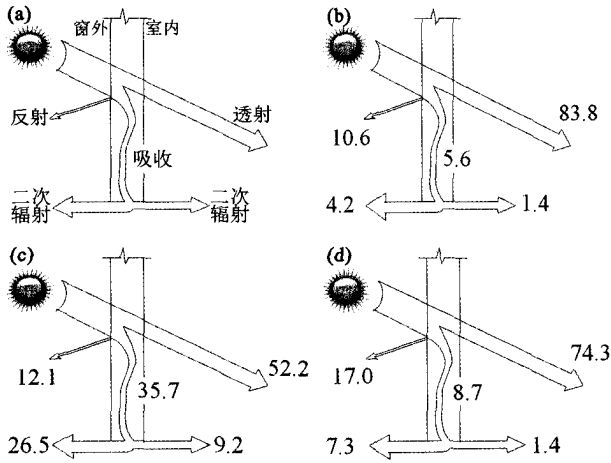


图 6 太阳辐射能量经过玻璃传递的示意图  
Fig. 6 Schematic diagrams of solar radiation passing through a glass

温度和箱内空气温度在 40 min 后达到平衡。图 7a、7b 分别对应玻璃内表面和箱内空气温度在卤钨灯照射下的变化曲线。表 2 列出了贴膜玻璃内表面、空气相对于空白玻璃时的温差数据。与空白玻璃（1 号）相比，贴膜玻璃具有较好的阻隔效果，能够通过对红外光的吸收和再辐射明显地改善玻璃的隔热性能。而且贴膜玻璃内表面温度升高的速率比箱内空气的要快得多，说明贴膜玻璃向箱外侧辐射的热量更多。贴膜玻璃箱内与空白玻璃箱内的温度相差 8℃ 左右，而玻璃遮挡的面积仅为 15 cm × 7 cm，当贴膜玻璃大面积应用时，隔热效果会更加明显。

表 2 贴膜玻璃内表面、箱内空气相对空白玻璃的温差结果  
Table 2 The temperature difference of the glass inner surface and air between the two chambers

样品编号	玻璃内表面温差 (°C)	箱内空气温差 (°C)
1	0	0
2	2	1
3	2	2
4	8	6
5	8	7
6	8	7
7	8	8
8	7	3

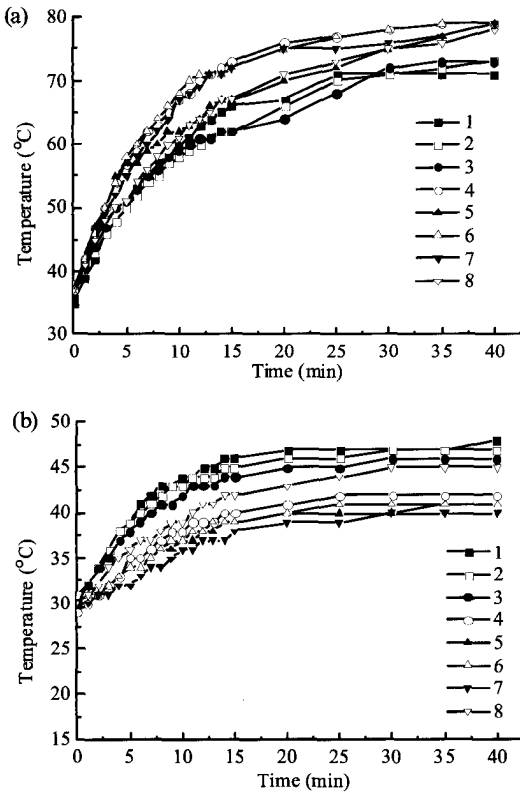


图 7 玻璃内表面 (a) 和箱内空气 (b) 的温度曲线  
Fig. 7 Temperature curves of glass inner surface (a) and air (b) inside the chambers

本实验中，图 1 所示试验箱中间用聚苯乙烯泡沫板隔成两个独立箱体，分别放置空白玻璃（位置 2）和贴膜玻璃（位置 3），进行平行试验，玻璃的

### 3 结 论

SiO<sub>2</sub> 冻干胶和 ATO 复合分散液涂覆在 PET 薄膜上，制成了贴膜玻璃，具有较好的调光隔热性能，其对可见光的透过率为 67.9%~89.4%，遮蔽系数为 0.6~0.9。近红外屏蔽波长（透过率小于 10%）最小为 1 500 nm，进入室内的太阳能总量可低至 56%。与未涂膜的空白玻璃相比，在同样的卤钨灯照射下，本研究制备的贴膜玻璃箱内空气的温度低 8℃。这样的单片贴膜玻璃可以兼顾透明与隔热，在节能窗玻璃方面有广阔的应用前景。

### 参考文献：

- [1] Gardiner D J, Morris S M, Coles H J. High-efficiency multistable switchable glazing using smectic A liquid crystals[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009, 93(3): 301-306.
- [2] Chow T T, Li C Y, Lin Z. Innovative solar windows for cooling-demand climate[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(2): 212-220.
- [3] Gueymard C A, Myers D, Emery K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing[J].

- Solar Energy, 2002, 73(6): 443-467.
- [4] Huang S P, Wang Z S, Xu J, et al. Determination of optical constants of functional layer of online Low-E glass based on the Drude theory[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(10): 3179-3183.
- [5] Granqvist C G. Transparent conductors as solar energy materials: a panoramic review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(17): 1529-1598.
- [6] Dai Z, Li Z H, Li L, et al. Synthesis and thermal properties of antimony doped tin oxide/waterborne polyurethane nanocomposite films as heat insulating materials[J]. Polymers for Advanced Technology, 2011, 22(12): 1905-1911.
- [7] Feng J, Huang B Y, Zhong M Q. Fabrication of superhydrophobic and heat-insulating antimony doped tin oxide/polyurethane films by cast replica micromolding[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 336(1): 268-272.
- [8] Qu J, Song J R, Qin J, et al. Transparent thermal insulation coatings for energy efficient glass windows and curtain walls[J]. Energy and Buildings, 2014, 77: 1-10.
- [9] Li S L, Zhu P L, Zhao T, et al. Optical, electrical, and thermal insulation properties of antimony-doped tin oxide nanoparticles prepared by frozen gel method[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2014, 70(3): 366-370.
- [10] Koebel M M, Nadargi D Y, Jimenez-Cadena G, et al. Transparent, conducting ATO thin films by epoxide-initiated sol-gel chemistry: a highly versatile route to mixed-metal oxide films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(5): 2464-2473.
- [11] Wang L Y, Hang J Z, Shi L Y, et al. Preparation and characterization of NIR cutoff antimony doped tin oxide/hybrid silica coatings[J]. Materials Letters, 2012, 87: 35-38.
- [12] Chen X C. Synthesis and characterization of ATO/SiO<sub>2</sub> nanocomposite coating obtained by sol-gel method[J]. Materials Letters, 2005, 59(10): 1239-1242.
- [13] Baetens R, Jelle B P, Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 761-769.
- [14] Su L F, Miao L, Tanemura S, et al. Low-cost and fast synthesis of nanoporous silica cryogels for thermal insulation applications[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2012, 13(3): 035003.
- [15] 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].
- [16] Shi Y X, Song Z N, Zhang W D, et al. Physicochemical properties of direct-resistant cool white coatings for building energy efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 110: 133-139.
- [17] Jelle B P. Solar radiation slazing factors for windows panes, glass structures and electrochromic windows in buildings-measurement and calculation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 116: 291-323.
- [18] Giraldo T R, Escote M T, Maciel A P, et al. Transport and sensors properties of nanostructured antimony-doped tin oxide films[J]. Thin Solid Films, 2006, 515(4): 2678-2685.

#### 作者简介:

周建华(1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事透明隔热、节能建筑材料研究。

苗 蕾(1972-), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进国外杰出人才、中科院广州能源研究所热电转换材料与器件团队负责人、兼日本精细陶瓷研究中心材料技术研究所客座研究员, 现主要从事热电转换材料和节能方面的研究与开发工作。

2015年第3卷第1期(Vol.3 No.1)第19页公式(21)更正

更正前	更正后
$k \frac{Z}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right)$	$k = \frac{Z}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right)$