

# 智能遮阳材料的应用性能初探

马一平, 李远珊

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 通过调节水溶性聚合物配比和无机盐配比, 可以使智能遮阳材料的转变温度、透光率、转变灵敏度及迟滞性等达到最佳。日间曝晒结果表明, 透明状态的智能遮阳材料可使曝晒箱升温 30℃, 不透明状态的该材料可在同等条件下具有阻止曝晒箱内温度升高 9℃左右的遮光效果, 有利于缓解夏季的过热现象。该智能遮阳材料可耐 1 000 次高低温循环, 5 年以上的自然曝晒, 凝固温度低于 -10℃, 环境温度高于转变温度时可保持 1 年以上均匀稳定的白色不透明絮状。

**关键词:** 智能遮阳材料; 透光率; 遮光; 稳定性

**中图分类号:** TU 55

**文献标识码:** A

## Preliminary Research on Application Properties of Intelligent Solar Protection Materials

MA Yiping, LI Yuanshan

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The intelligent solar protection materials can be made out by using soluble polymer and inorganic salts. The switching temperatures, transmittance, sensitivity and hysteresis of these materials can be changed by adjusting the proportion of soluble polymer and inorganic salts. Based on this, the optimal compositions were optimized. The results of daytime insolation indicate that the maximum temperature difference of the insolation device reaches 30℃ when the intelligent solar protection material is transparent. However, when the material changes to opaque, the maximum temperature difference is 10℃ lower than that of the transparent state, which can make the over-hot phenomenon above the switching temperature diminished. No problems are recognized in 1 000 cycles of tests from -10℃ to 50℃. The freezing point of these materials are lower than -10℃. Besides, these materials can keep 5 years light durability and keep steady white and opaque state for longer than 1 year

above the switching temperature.

**Key words:** intelligent solar protection materials; transmittance; window shade; stability

现代建筑中, 玻璃的通透性能使人们充分感受到自然景观、自然光线和自然空间。然而在夏季, 玻璃的大量使用使建筑物室内过热, 从而使建筑制冷空调能耗大大增加。目前的遮阳方式主要采用窗帘、遮阳板、自动卷帘等, 存在价格高、应用不便等缺陷, 故需一种价格较低, 并且在冬、夏季能够自动调节透光率的智能遮阳系统。

用于智能遮阳窗户的材料种类很多, 其中, 聚合物水凝胶在智能遮阳窗户上的应用研究报道较多。Kühl<sup>[1]</sup>用聚乙烯甲基醚、琼脂和水第一次合成了热致变水凝胶并将这种材料夹在平板玻璃之间。1995年 Chahroudi<sup>[2]</sup>采用聚乙烯甲基醚水溶液为基底研制出了用于遮光的可以变浑浊的凝胶体。此外, A. Seeboth 等<sup>[3]</sup>采用聚醚/聚羟基凝胶填充在玻璃夹层中制取了透光率可逆变化材料; Schneider 和 Seeboth 等人<sup>[3-4]</sup>用羟丙基甲基纤维素(HPC)、氯化钠、羟乙基纤维素(HEC)或结冷胶, 制取了透光率可逆变化材料。Meinhardt<sup>[5-6]</sup>以聚醚类物质制备了一种热致变水凝胶(TALD); Haruo Watanabe<sup>[7]</sup>采用一种水溶性聚合物与其他材料配合填充于玻璃夹层中制取了透光率可逆变化的材料。

关于智能遮阳水凝胶材料转变机理的研究, 相变理论比较被认同<sup>[8-10]</sup>。目前德国、日本及匈牙利等国在智能遮阳水凝胶材料方面的研究较为领先<sup>[3, 10-14]</sup>, 并且有产品陆续实现了商品化, 但仍存在生物敏感性、高温状态下不透明状态稳定性、应用成本等方面

收稿日期: 2011-10-22

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA05Z208); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ02B02-03)

第一作者: 马一平(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程材料。E-mail: ypma@citiz.net

通讯作者: 李远珊(1986—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为建筑节能材料。E-mail: 04021065@163.com

的问题.本课题组研究发现,部分水溶性聚合物与无机盐配合可制备出常温温致透光率可逆变化的智能遮阳材料,且转变温度在 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间可进行调节,满足建筑物使用要求<sup>[15-16]</sup>.

## 1 实验部分

### 1.1 智能遮阳材料的配制

出于技术保护原因,本试验所用原料均用符号表示,其中选用2种水溶性聚合物(分别用A、C表示),一种无机盐(用S表示),以上海市的自来水作为溶剂.具体制备过程为:首先将水溶性聚合物A、C中的一种或两种材料按质量分数为 $0.5\%\sim 10.0\%$ 比例溶于水,然后将无机盐S按质量分数为 $0\sim 18\%$ 比例溶于水,再将两种水溶液按 $1:1$ (体积比)混合搅拌均匀,即可制备出智能遮阳材料.该材料在低温时为无色透明液体,在高温时可转变为白色不透明絮状物,且温度在转变温度上下变化时,该液体在无色透明和白色不透明状态之间变化.

### 1.2 智能遮阳材料升温状态转变温度的测试

将智能遮阳材料放置在试剂瓶中,水浴浸泡,从低温到高温调节水浴温度,每提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,恒温放置 $10\sim 15\text{ min}$ ,使溶液内部温度均匀,观察溶液的状态并记录智能遮阳溶液状态发生改变时溶液的恒温温度.从低温到高温该智能遮阳溶液先由透明逐渐过渡到半透明,最后变成不透明的白色絮状,溶液开始出现白色絮状物的初始转变温度为 $T_s$ ,溶液完全变成不透明白色絮状物的最终转变温度为 $T_f$ ,每个转变温度值均测量3次求取平均值.

### 1.3 智能遮阳材料的透光率和迟滞性测试

采用紫外-可见分光光度计(日立U-3310)测试样品的光谱透光率,透光率测试波长范围为 $200\sim 850\text{ nm}$ .本文选用 $600\text{ nm}$ 波长点的透光率分析该智能遮阳材料的透光率随温度的变化,以及不同升、降温次序下的可逆性和迟滞性.

### 1.4 智能遮阳材料的曝晒效果考察

采用曝晒装置(图1)进行了不同透光率的智能遮阳材料对建筑热环境影响的模拟实验.曝晒装置的木箱尺寸为 $300\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ,木板厚度约为 $10\text{ mm}$ ,内部完全用黑漆涂覆,在其中一个侧面中心处打一直径约 $6\text{ mm}$ 的小孔,以便温度计插入空间中心处.木箱四周及底部用 $40\text{ mm}$ 厚的泡沫塑料板(导热系数为 $0.028\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )包覆,顶部覆盖玻璃夹层.玻璃夹层的玻璃均采用 $5\text{ mm}$ 厚的普通玻璃,长宽均为

$30\text{ mm}$ ,夹层厚度分别有 $5, 10, 15\text{ mm}$ 3种,玻璃夹层中可装入液体.曝晒实验前分别将不同的智能遮阳材料装入玻璃夹层中.曝晒实验中使用的智能遮阳材料包括转变温度较高的遮阳材料( $C_2S_4$ ,该材料的 $T_s = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_f = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;其中 $C_2S_4$ 表示 $100\text{ mL}$ 溶液中使用材料C的质量为 $2\text{ g}$ ,材料S的质量为 $4\text{ g}$ ,下同)和转变温度较低的遮阳材料( $C_2S_{18}$ ,该材料的 $T_s = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_f = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )将装好溶液的玻璃夹层覆盖在曝晒装置箱上,用硅胶粘结密封.将所有的装置置于室内一昼夜,使其与环境达到热平衡.实验时,将曝晒装置置于晴朗无风或微风的室外日光下,每隔半小时测量各装置内的温度及环境温度.

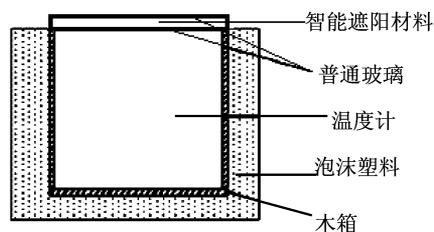


图1 曝晒实验装置

Fig.1 Daytime insolation device

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 智能遮阳材料的高低温状态

图2是智能遮阳材料 $C_2S_{18}$ ( $T_s = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_f = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )放置在 $10\text{ mm}$ 玻璃夹层中不同温度时的状态.当玻璃夹层中的 $C_2S_{18}$ 的温度低于初始转变温度 $T_s$ 时,材料呈透明状态(图2a),且透过率较高,可以清晰地看见玻璃夹层后面的CD盒子.当处于初始转变温度 $T_s$ 和最终转变温度 $T_f$ 之间时 $C_2S_{18}$ 逐渐变成半透明状态,玻璃夹层后面的CD盒子变得模糊(图2b),并且随着温度的升高,材料的透明度逐渐下降,当温度高于最终转变温度后,材料变成白色不透明的絮状,此时玻璃夹层后面的CD盒子已几乎看不见(图2c).此外,实验结果表明,智能遮阳材料的上述性质的变化过程是可逆的,当材料温度逐渐降低时,材料可逐渐恢复透明状态,且可如此反复循环转变.

### 2.2 智能遮阳材料的透光率变化

采用日立U-3310紫外-可见分光光度计测试了C/S及A/C/S系列材料由低温升至高温时不同温度下的透光率,波长范围为 $200\sim 850\text{ nm}$ ,其中材料 $C_2S_6$ 测试结果如图3所示.可以看出,溶液对波长 $<$

400 nm 的光透过率随波长逐渐降低. 在 20 °C 低温状态下, 溶液对于波长  $\geq 400$  nm 光的透过率高于 85%; 随着温度升高, 光透过率不断降低, 材料本身由透明状态逐渐转变半透明状态, 最终变成白色不

透明状态; 当温度达到 50 °C 后, 材料完全变为白色不透明絮状物, 其光透过率小于 1%. 外观状态变化和测得的光透过率变化相吻合, 证明了这种材料透光率随温度变化的性能.

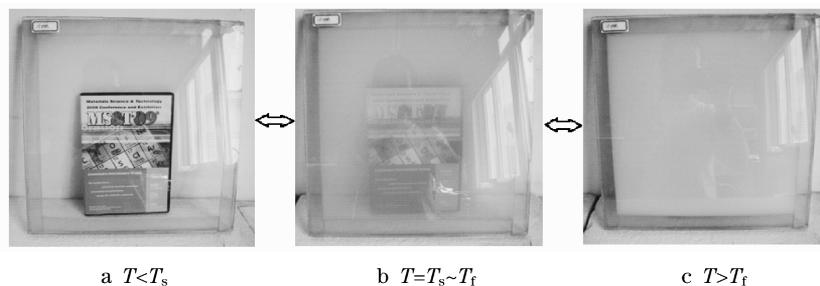


图 2 智能遮阳材料  $C_2S_{18}$  不同温度下的状态

Fig.2 The transparent-opaque transition of intelligent solar protection material  $C_2S_{18}$

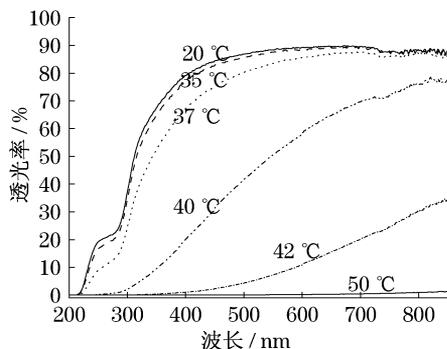


图 3 不同温度下  $C_2S_6$  的透光率与光谱分布图

Fig.3 Transmission and spectrum's distribution of  $C_2S_6$  at different temperatures

此外, 为了研究组分对智能遮阳材料低温透光率的影响, 以 C/S 系列为例, 设计了两组试验, 表 1 给出了不同 C/S 配比下溶液 20 °C 时波长为 600 nm 的透光率.

表 1 不同 C/S 配比下溶液 20 °C 时 600 nm 透光率

Tab.1 Transmission at 600 nm of solutions with different C/S combinatorial proportions at 20 °C

配比	$C_1S_4$	$C_2S_4$	$C_4S_4$	$C_6S_4$	$C_8S_4$
透光率/%	90.2	87.1	84.4	81.6	76.8
配比	$C_2S_2$	$C_2S_4$	$C_2S_8$	$C_2S_{10}$	$C_2S_{12}$
透光率/%	87.3	87.1	88.1	88.8	87.3

表 1 表明, 当 S 配比为 4 时, C 每增加 2 g, 溶液透光率下降约 3%; C 配比为 2 时, S 的变化对透光率无明显影响. 此外, 对 A/C/S 系列测试结果表明, 当 A 和 C 的配比固定时, 改变 S 的配比, 透光率变化不明显; 当 C 和 S 的配比固定时, 随着组分 A 配比增加, 低温透明状态的透光率也会有一定的下降, 在  $C_2S_6$  中添加 0.5 g 的 A 后,  $A_{0.5}C_2S_6$  处于低温透明状态下 600 nm 波长的透光

率由原来的 89.3% 变为 87.8%; 添加 1 g A 后,  $A_1C_2S_{10}$  的透光率为 86.4%, 可见每增加 0.5 g A 后, 透光率下降幅度约为 1.5%.

上述结果表明, 智能遮阳材料的透光率主要受水溶性聚合物组分 A, C 配比影响, 基本不受无机盐 S 配比的影响. 进一步实验结果表明,  $C_2S_x$  和  $A_{0.5}C_2S_x$  系列的低温透光率都高于 85%, 满足寒冷季节建筑物对窗玻璃的透过性要求; 高温透光率可低于 1%, 能够实现高温时有效阻挡太阳光, 减少传入室内的太阳辐射热量, 消除或防止夏季室内过热的现象. 经过大量研究发现,  $C_2S_x$  和  $A_{0.5}C_2S_x$  系列的智能遮阳材料各方面性能较优异, 因此本文主要讨论这两种系列的材料的各种性能.

### 2.3 智能遮阳材料转变温度的影响因素

大量的研究表明, 通过调节 S 的配比可制备出不同转变温度的智能遮阳材料, 水溶性聚合物组分对转变温度的影响无显著规律. 不同配比的 S 对  $C_2S_x$  和  $A_{0.5}C_2S_x$  系列的智能遮阳材料转变温度的影响如图 4 所示.

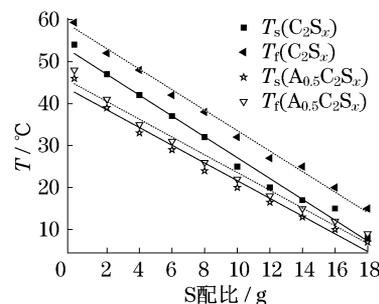


图 4 不同 S 配比对 C/S 及 A/C/S 系列的智能遮阳材料转变温度的影响

Fig.4 The effect of component S of the switching temperatures of C/S and A/C/S series solutions

由图4可见, $C_2S_x$ 和 $A_{0.5}C_2S_x$ 初始转变温度 $T_s$ 和最终转变温度 $T_f$ 均随着S配比的增加近似呈线性下降,直线拟合结果如下.

$C_2S_x$ 的拟合结果为

$$T_s = -2.45x + 51.91, T_f = -2.44x + 57.93$$

$A_{0.5}C_2S_x$ 的拟合结果为

$$T_s = -2.11x + 42.72, T_f = -2.11x + 44.71$$

无机盐S配比 $x$ 的值可在0~18g之间进行调整.当100mL溶液中S配比为0时,溶液的转变温度最高;当S配比达到18g时,即饱和状态,此时转变温度最低.表2为 $C_2S_x$ 和 $A_{0.5}C_2S_x$ 系列的转变温度 $T_s$ 和 $T_f$ 的最大值和最小值.表2说明, $x$ 在0~18之间变化可使 $C_2S_x$ 系列的初始转变温度 $T_s$ 可在8~54℃之间, $T_f$ 可在15~61℃之间调整; $A_{0.5}C_2S_x$ 系列的初始转变温度 $T_s$ 可在7~46℃之间, $T_f$ 可在9~48℃之间进行调整.

此外,从图4中可以看出,当无机盐S的质量相同时, $A_{0.5}C_2S_x$ 的转变温度低于 $C_2S_x$ 的转变温度.此外, $C_2S_x$ 系列的初始转变温度与最终转变温度的差值( $T_f - T_s$ )均为5~7℃,而 $A_{0.5}C_2S_x$ 系列两者的差值( $T_f - T_s$ )仅为2~3℃.可见,配制智能遮阳材料过程中加入组分A可降低遮阳材料的转变温度且使转变更为敏捷.

实验结果表明,C和A的配比与遮阳材料的转变温度无明显的相关性.可以通过单一调整配比中S的配比,实现转变温度的控制,以适应不同建筑物使用要求.

#### 2.4 智能遮阳材料升温状态和降温状态转变的迟滞性

由图5可以看出,升温状态下智能遮阳材料低

温下透光率高于85%,当温度升高到初始转变温度 $T_s$ 以上,透光率发生明显下降,开始变为变透明状态,随着温度继续升高,透明度继续下降,直至高于最终转变温度 $T_f$ 后,透光率低于1%.材料处于降温状态时,温度降低到降温初始转变温度 $T_{sd}$ 后,材料逐渐由不透明白色絮状物变为半透明状态,随着温度升高,透明度变大,直至温度升至降温最终转变温度 $T_{fd}$ 以上,材料的透光率高于85%.当温度低于或者高于转变温度区间时,透光率基本不随温度发生变化.表2列出了 $C_2S_6$ 和 $A_{0.5}C_2S_6$ 的各转变温度值及其转变灵敏差值和迟滞温度值.

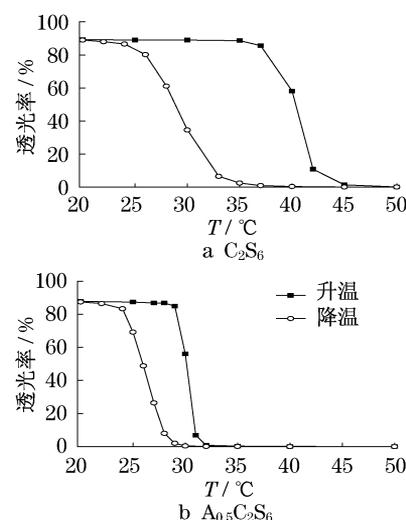


图5 智能遮阳材料升温状态与降温状态的透光率与温度的关系图

Fig.5 The relationship between transmission and temperature of intelligent solar protection material in temperature increase process and temperature decrease process

表2 智能遮阳材料的转变灵敏度及升温状态与降温状态的转变迟滞性

Tab.2 Transitional sensitivity and hysteresis of intelligent solar protection materials in temperature increase process and temperature decrease process

系列	升温状态转变温度/℃		降温状态转变温度/℃		灵敏度/℃		迟滞性/℃	
	$T_s$	$T_f$	$T_{sd}$	$T_{fd}$	$T_f - T_s$	$T_{sd} - T_{fd}$	$T_s - T_{fd}$	$T_f - T_{sd}$
$C_2S_6$	37	42	32	24	5	8	13	10
$A_{0.5}C_2S_6$	29	31	28	24	2	4	5	3

比较图5a,5b可发现, $C_2S_6$ 和 $A_{0.5}C_2S_6$ 升温状态和降温状态的透光率-温度曲线都不重叠.智能遮阳材料转变过程中,当材料的透光率相同时,升温状态下材料的温度都低于降温状态下材料的温度.材料 $C_2S_6$ 和 $A_{0.5}C_2S_6$ 升温状态与降温状态的转变都存在一定的迟滞效应.两种材料降温状态下最终恢复透明

状态时的温度都比升温状态下透明状态开始发生转变的温度高(两者差值用 $T_s - T_{fd}$ 表示), $C_2S_6$ 的 $T_s - T_{fd}$ 值为10℃, $A_{0.5}C_2S_6$ 的 $T_s - T_{fd}$ 值为3℃;降温状态下不透明状态开始变为半透明状态的温度也都比升温状态下半透明状态最终变为不透明状态的温度高(两者差值用 $T_f - T_{sd}$ 表示), $C_2S_6$ 的 $T_f - T_{sd}$ 值为

13 °C,  $A_{0.5} C_2S_6$  的  $T_f - T_{sd}$  值为 5 °C. 此外,  $C_2S_6$  的  $T_s - T_{fd}$  值比  $A_{0.5} C_2S_6$  的高 7 °C,  $T_f - T_{sd}$  值比  $A_{0.5} C_2S_6$  的高 8 °C, 材料  $C_2S_6$  升温状态与降温状态转变的迟滞效应明显高于材料  $A_{0.5} C_2S_6$ .

## 2.5 智能遮阳材料的曝晒效果

为了比较不同状态下该智能遮阳材料的遮阳效果, 日间曝晒实验采用了两种不同转变温度的智能遮阳材料, 其中一种为转变温度高的  $C_2S_4$  ( $T_s = 42$  °C,  $T_f = 48$  °C), 曝晒时保持透明状态; 另一种材料为转变温度较低的  $C_2S_{18}$  ( $T_s = 8$  °C,  $T_f = 15$  °C), 曝晒前后保持白色不透明絮状. 实验结果见图 6.

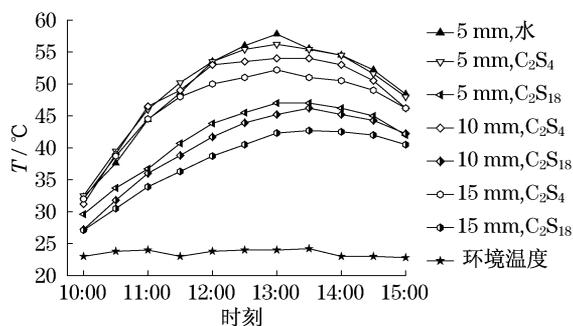


图 6 智能遮阳材料的日间曝晒效果

Fig. 6 Effects of daytime insolation of intelligent solar protection material

由图 6 可见, 曝晒过程中, 环境温度变化比较平缓, 曝晒装置箱内温度先不断上升, 在下午 13:00 时, 箱内温度与环境温差达到最大值, 之后箱内温度开始下降. 放置不同夹层的曝晒箱其升温幅度与环境的最大温差均不同, 表 3 列出了各种夹层曝晒箱与环境的最大温差  $T_{max}$ .

从表 3 可见, 覆盖 5 mm 水的夹层的曝晒箱升温曲线在最上方, 升温幅度最大, 与环境最大温差可达 33.8 °C; 5 mm  $C_2S_4$  的装置箱与环境最大温差为 32.2 °C, 两者的  $T_{max}$  差值只有 1.6 °C. 由此可见, 透明状态下遮阳材料对太阳光有较高的透过性, 对光的透过效果与水相近. 智能遮阳材料的这种性质可使房间通过太阳光照射使其升温, 从而降低冬季的取暖能耗.

由图 6 可见, 当夹层厚度一定时, 放置透明的  $C_2S_4$  玻璃夹层的曝晒箱的升温曲线明显高于不透明的  $C_2S_{18}$ . 夹层厚度为 5 mm 时, 两者与环境最大温差的差异可达 9.0 °C; 10 mm 时, 差异为 7.8 °C; 15 mm 时, 差异为 8.7 °C. 由此可见, 当智能遮阳材料转变为不透明状态时, 具有明显的遮光效果, 可以有

效地阻挡太阳光的入射, 降低箱内的吸热, 从而使箱内的升温幅度明显低于透明状态下遮阳材料的升温幅度. 该智能遮阳材料在建筑物上使用能够实现夏季减少传入室内的太阳辐射热量, 消除或防止室内过热的现象.

表 3 不同智能遮阳材料日间曝晒与环境的最大温差

Tab. 3 The maximum temperature difference of daytime insolation of different intelligent solar protection materials °C

夹层材料	水	$C_2S_4$	$C_2S_4$	$C_2S_4$	$C_2S_{18}$	$C_2S_{18}$	$C_2S_{18}$
夹层厚度/mm	5	5	10	15	5	10	15
$T_{max}/$ °C	33.8	32.2	30.0	28.2	23.2	22.2	19.5

从图 6 和表 3 中可以看出, 溶液的厚度对智能遮阳材料的遮阳效果有一定的影响. 对于同种智能遮阳材料, 随着夹层厚度的增加, 曝晒箱内的升温程度均降低. 对于透明状态下的  $C_2S_4$ , 溶液夹层厚度每增加 5 mm, 曝晒箱的  $T_{max}$  减小 2 °C. 降温的主要因素是随着夹层厚度的增加, 光折射增强, 透过夹层直射到箱内的太阳光减少, 光热转化后的热量随之减少, 升温程度降低. 对于不透明状态下的  $C_2S_{18}$ , 溶液夹层越厚, 对光线的阻断效果越强, 箱内升温程度降低, 夹层厚度每增加 5 mm, 曝晒箱的  $T_{max}$  减小 1.0~2.5 °C.

## 2.6 智能遮阳材料的稳定性

智能遮阳材料的高低温循环稳定性研究中, 利用两个恒温液浴槽(质量分数为 60% 的乙二醇水溶液, 凝固点为 -49 °C), 一个高温(50 °C 左右), 一个低温(-10 °C 左右), 对  $C_2S_{10}$ ,  $A_{0.5} C_2S_6$  做高低温循环测试 1 000 次, 以每 100 次作为节点, 测试材料的透光率. 实验结果表明, 材料在高温状态下(50 °C)的透光性能始终低于 1%; 在低温状态下的透光率随着循环次数的增加略有下降, 经过 1 000 次循环后,  $C_2S_{10}$  和  $A_{0.5} C_2S_6$  在 20 °C 时的透光率均由原来的 87% 下降到 81%, 下降幅度小于 6%. 此外, 循环前后材料的转变温度和转变性质及高温状态保持一致. 综上所述, 该智能遮阳材料具有较好的高低温循环稳定性, 有利于其在长期频繁的转变环境中使用.

将  $C_2S_4$  溶液装在透明玻璃瓶中密封, 放置在阳光可照射的阳台上 5 年, 使其在太阳下充分曝晒并随着自然温度的变化发生转变, 由此考察该智能遮阳材料的紫外老化性能及耐久性. 结果表明, 经过 5 年的自然曝晒,  $C_2S_4$  的转变温度及其高低温转变性质无明显变化.

此外,经实验研究表明, $C_2S_0$  和  $A_{0.5}C_2S_0$  的智能遮阳材料的凝固温度低于  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ;随 S 配比增加,凝固温度逐渐下降.这有利于该智能遮阳材料在冬季温度低于  $0\text{ }^\circ\text{C}$  的地区使用.

将图 2 中所示的放置  $C_2S_{18}$  的玻璃夹层及放置  $A_{0.5}C_2S_{18}$  的玻璃夹层竖放于  $25\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$  的室温中 12 个月(鉴于时间关系,迄今放置了 12 个月,今后还可继续进行放置),材料始终保持均匀稳定的高温不透明絮状.之后将其放置在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  的温度中,玻璃夹层中的溶液仍可恢复为均匀透明状态.

综上所述,本文中的智能遮阳材料的高低温循环稳定性、长时间自然曝晒稳定性、凝固温度和高温状态持久稳定性均符合一般建筑物的使用要求,具有较好的应用前景.

### 3 结论

采用水溶性聚合物 A,C 和无机盐 S 可配制出智能遮阳材料,各组分的添加对智能遮阳材料不同方面性质的影响不同.

光谱分析表明, $C_2S_x$  和  $A_{0.5}C_2S_x$  系列材料透光率在转变温度前后变化非常明显,低于初始转变温度时溶液透光率高于  $85\%$ ,满足寒冷季节建筑物对窗玻璃的透过性要求;高于最终转变温度时溶液透光率可低于  $1\%$ ,可使夏季过热现象得到缓解.

智能遮阳材料的曝晒结果表明,该类材料处于透明状态时可使曝晒箱内温度比环境温度高  $30\text{ }^\circ\text{C}$  以上,可用于寒冷地区;该类材料转变为不透明状态后,具有阻止曝晒箱内温度升高  $9\text{ }^\circ\text{C}$  左右的遮光效果,可使夏季过热现象得到缓解.此外,曝晒实验中,溶液夹层厚度每增加  $5\text{ mm}$ ,透明溶液的透光热效果减小  $2.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,不透明溶液的遮光效果增加  $1.0\sim 2.5\text{ }^\circ\text{C}$ .

该智能遮阳材料经历 1 000 次高低温循环后透光率下降幅度低于  $6\%$ ;长达 5 年以上的自然曝晒后转变温度及其高低温转变性质无明显变化;凝固温度低于  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ;高温不透明絮状的高温状态持久稳定性较好,可长达 12 个月保持均匀稳定的白色不透明絮状.

#### 参考文献:

[1] Katharina Resch, Gernot M Wallner. Thermotropic layers for

flat-plate collectors — a review of various concepts for overheating protection with polymeric materials [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009, 93: 119.

- [2] Chahroudi D. Automatic light valves with polymeric layer containing network of bonds[P]. US 5404245, Apr. 4, 1995.
- [3] Schneider J, Seeboth A. Natural thermotropic materials for solar switching glazing [J]. Materialwissenschaft Werkstofftech, 2001, 32: 231.
- [4] Seeboth A. Chromogenic polymer gels for reversible transparency and color control with temperature at a constant volume[J]. Polym Adv Technol, 2002, 13: 507.
- [5] Meinhardt S. Thermal-translucid gel, method for its preparation and utilization thereof[P]. EP 0228422, 1986.
- [6] Wilson H R. Potential of thermotropic layers to prevent over heating — a review[J]. SPIE, 1994, 2255: 214.
- [7] Seeboth A, Kriwanek J, Patzak A. Chromogenic polymer gels for reversible transparency and color control[J]. ACS Symp Ser, 2005, 888: 110.
- [8] 徐文进, 高崇凯, 刘利. 温度敏感型水凝胶[J]. 现代食品与药品杂, 2007, 17(6): 60.  
XU Wenjin, GAO Chongkai, LIU Li. Temperature sensitive hydrogels press [J]. Journal of Modern Food and Pharmaceuticals, 2007, 17(6): 60.
- [9] Peter Nitz, Helge Hartwig. Solar control with thermotropic layers[J]. Solar Energy, 2005, 79: 573.
- [10] Watanabe Haruo. Intelligent window using a hydrogel layer for energy efficiency [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 1998, 54: 203.
- [11] Zrínyi M, Szilágyi A, Filipcsei G, et al. Smart gel-glass based on the responsive properties of polymer gels [J]. Polym Adv Technol, 2001, 12: 501.
- [12] Gyenes T, Szilágyi A, Lohonyai T, et al. Electrically adjustable thermotropic windows based on polymer Gels[J]. Polym Adv Technol, 2003, 14: 757.
- [13] Szilágyi A, Gyenes T, Filipcsei G, et al. Thermotropic polymer gels; smart gel glass[J]. Macromol Symp, 2005, 227: 357.
- [14] Chahroudi D. Transparent thermal insulating system [P]. US Patent 3,953,110, April 27, 1976.
- [15] 马一平, 王金前. 常温温致透光率可逆变化材料研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(2): 164.  
MA Yiping, WANG Jinqian. Research on the materials with temperature dependent reversible change of transmittance at normal temperature[J]. Journal of Building Material, 2005, 8(2): 164.
- [16] 王金前, 马一平. 智能调光材料透光率研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 397.  
WANG Jinqian, MA Yiping. Study on transmittance of intelligent light-control material [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(3): 397.