

智能遮阳材料性能及抗霉变性能

马一平, 范建熙, 郭玉刚, 杨 凡

(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: 制备了一种温致透光率可逆变化智能遮阳材料, 研究不同原材料配比、温度、时间对透光率变化, 以及水质和防腐剂对其抗霉变性的影响。结果证明: 通过调节聚合物配比可使其透光率在 80%~90% 间变化; 温度是智能遮阳材料透光率改变的主要因素; 引入防腐剂和调整 pH 值可以使智能遮阳材料 3~5 年内不发生霉变。

关键词: 智能遮阳材料; 透光率; 温度; 抗霉变性能

中图分类号: TB34

文献标志码: A

Properties and Anti-mildew Performance of Intelligent Solar Shading Material

MA Yiping, FAN Jianxi, GUO Yugang, YANG Fan

(Key Laboratory of Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A kind of thermotropic intelligent solar shading material was prepared. The effect of different ratio of raw materials, temperature and time on the change of transmittance, and the water quality and anti-mildew agent on its resistance to mildew was studied. Results show that by adjusting the ratio of raw materials can make its transmittance changes between 80% ~ 90%. Temperature is the main factor of the change of transmittance of intelligent solar shading material. Introduction of anti-mildew agent and adjust pH value can protect intelligent solar shading material from mildewing in 3 ~ 5 years.

Key words: intelligent solar shading material; transmittance; temperature; anti-mildew performance

降低能耗的重要途径。玻璃材料由于其可增加建筑美感及满足建筑采光需求在现代建筑中被大量使用, 但是由于它的通透性而无法阻挡强烈太阳辐射, 导致夏季建筑制冷能耗剧增, 降低室内舒适性。缓解此问题的一般方法是采用遮阳措施。已有学者研究了一些复合智能遮阳玻璃窗体材料, 如电致变色材料^[2-3]、温致变色材料^[4-7]、热致变色材料^[8]等。这些材料的优点是根据环境的变化, 自动改变玻璃透光率, 实现智能遮阳。马一平等^[9]通过大量的试验研究, 研制出了一种温致变色智能遮阳材料。低温时呈高透光率状态, 能够满足透光需求; 高温时转变为低透光率状态, 能够满足夏季遮阳需求。通过调节水溶性聚合物和无机盐配比, 可以使智能遮阳材料的转变温度、透光率等达到最佳。本文在前期研究基础上, 探究该材料遮阳性能透光率的主要决定因素及抗霉变性能。

1 试验部分

1.1 智能遮阳材料制备

出于技术保护原因, 本试验所用原料均用符号表示。选用两种水溶性聚合物(分别用 A, C 表示), 选用一种无机盐(用 S 表示), 采用上海市的自来水作为溶剂。具体制备过程如下: 首先将水溶性聚合物 A, C 中的一种或两种材料按 0.5%~10.0% 质量分数溶于水, 然后将无机盐 S 按 0~18% 质量分数溶于水, 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。智能遮阳材料均用 A/C/S 组合表示, 如: C_wS_u 表示 100 mL 水中含有 w g 水溶性聚合物 C 与 u g 无机盐 S。配置的智能遮阳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可逆变化。将

随着全球经济飞速发展, 能源成为制约人类社会发展的因素, 节约能源消耗成为世界主题。据报道, 欧洲国家建筑能耗大约占据欧盟成员国总能耗的 40%^[1], 因此降低建筑能耗是欧洲乃至全世界

智能遮阳材料封存在玻璃夹层之间制备成智能遮阳玻璃,玻璃夹层厚度为 5 mm.

1.2 智能遮阳材料透光率测试

采用紫外-可见分光光度计(型号为日立 U-3310)测试样品的光谱透光率,透光率测试波长范围为 190~900 nm. 本文选用 600 nm 波长点的透光率分析该智能遮阳材料透光率随温度和时间的变化情况.

1.3 智能遮阳材料曝晒试验

试验采用自行设计的曝晒装置进行曝晒试验,对遮阳玻璃的遮阳性能进行评估. 曝晒装置为内部尺寸 300 mm×300 mm×300 mm 木箱,木板厚度约为 10 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 mm 的小孔,以便测温装置热电偶插入空间中心处. 木箱四周及底部用 40 mm 厚的泡沫塑料板(导热系数为 $0.028 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)包覆,曝晒的样品材料覆盖在曝晒装置上,用硅胶黏结密封,其中一个侧面与遮阳玻璃材料组合. 将所有进行曝晒的装置置于室内一昼夜,使其与环境达到热平衡. 试验时,将曝晒装置置于晴朗无风或微风天气室外日光下,每隔 0.5 h 测量各装置内温度及环境温度.

1.4 智能遮阳材料抗菌性初步研究

在使用本文制备的智能遮阳材料时发现,实验室环境长期储存过程中,智能遮阳材料产生不可逆黑色沉淀. 由于本试验使用的原材料都不是黑色物质,而且根据试验材料的性质及其作用机理也不会产生黑色物质,故而推测可能是霉腐微生物腐蚀了试验材料. 不可逆黑色沉淀影响了智能遮阳材料的美观性和透光效果,因此加入抗霉腐微生物以提高智能遮阳材料的抗菌性能. 配置智能遮阳材料,加入抗霉腐微生物,长期放置,定期观察其状态.

2 试验结果及讨论

2.1 智能遮阳材料状态变化

智能遮阳材料在温度高于转变温度的时候不透光,温度低于转变温度的时候透光,具体情况如图 1 所示. 所用材料为 C_2S_8 ,转变温度约为 10°C ,在常温下始终保持不透光状态(见图 1a). 温度低于转变温度时,材料高度透明,能够清楚看到遮阳玻璃背后的手机(见图 1b). 本文将智能遮阳材料随着温度升高,从完全透明状态转变到开始不透明状态的临界温度定义为该材料的转变温度.

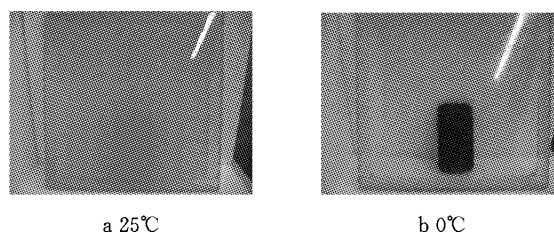


图 1 智能遮阳材料遮阳状态随温度变化情况

Fig.1 Variation of the intelligent shading materials state with the temperatures

2.2 智能遮阳材料透光率影响因素

研究影响智能遮阳材料透光率变化的因素对控制智能遮阳材料透光率及实际应用有很大意义. 影响透光率的主要因素有时间和温度及原材料配比,因此通过设计试验对这些因素加以研究.

2.2.1 智能遮阳材料的透光率^[9-11]

采用紫外-可见分光光度计测试了 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 200~850 nm,材料为 C_2S_6 . 测试结果如图 2 所示. 在温度区间 $20\sim 50^\circ\text{C}$,随着波长的增加,透光率逐渐增加,然后趋于稳定. 原因在于根据瑞利散射原理,粒径比波长小很多的粒子对光波的散射,其散射能力与入射光的波长四次方成反比,因此波长越短的光波越容易被散射. 随着温度升高,200~850 nm 范围内,光波透过率逐渐下降,在 50°C 时,透光率几乎为零. 这是因为随着温度升高,智能遮阳材料溶质颗粒逐渐增大,同时对光的散射大大加强,散射类型也不再是瑞利散射.

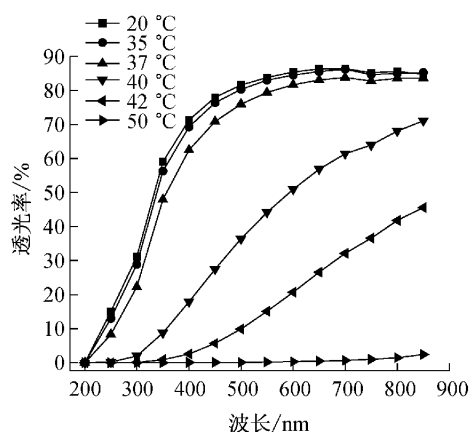


图 2 不同温度下智能遮阳材料透光率随波长的变化

Fig.2 The transmittance variation of intelligent shading materials with the temperatures

2.2.2 原材料配比对透光率的影响

以 C/S 系列为例,设计两组试验,分别为 C_wS_4

组和 C_2S_u 组,研究组分对智能遮阳材料低温透光率的影响.表1给出了不同 C/S 配比下溶液 20℃ 波长为 600 nm 时的透光率.

表1表明, C_wS_4 组中,随组分 C 配比增高,每增加 2 g C 后溶液透光率下降约为 3%; C_2S_u 组中,组分 S 配比变化,透光率无明显变化.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会有一定下降.在 C_2S_6 中添加 0.5 g 的 A 后, $A_{0.5}C_2S_6$ 在低温透明状态下 600 nm 波长的透光率由原来的 89.3% 变为 87.8%,在 C_2S_6 中添加 1 g A 后 $A_1C_2S_6$ 的透光率为 86.4%,可见每增加 0.5 g A 后透光率下降约 1.5%.

表1 不同 C/S 配比下溶液 20℃ 波长为 600 nm 时的透光率
Tab.1 The transmittance of different proportions of C/S at 20℃

C_wS_4 配比	透光率/%	C_2S_u 配比	透光率/%
C_1S_4	90.2	C_2S_2	87.3
C_2S_4	87.1	C_2S_4	87.1
C_4S_4	84.4	C_2S_8	88.1
C_6S_4	81.6	C_2S_{10}	88.8
C_8S_4	76.8	C_2S_{12}	87.3

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 和 C 配比影响,基本不受无机盐 S 配比的影响.因此,选择合适的水溶性聚合物组分比例,通过改变 S 的配比调整遮阳材料的转变温度不会影响遮阳材料的透光率.进一步试验结果表明, C_2S_u 和 $A_{0.5}C_2S_u$ 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光性要求;高温透光率低于 1%,高温时能够有效阻挡太阳光,减少传入室内的太阳辐射热量,消除或防止夏季室内过热现象.经过大量试验发现, C_2S_u 和 $A_{0.5}C_2S_u$ 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材料的其他性能.

2.2.3 时间和温度对透光率影响

为了进一步分析智能遮阳材料透光率转变的性质,研究时间和温度对透光率影响的主次性.设计试验如下:先将智能遮阳材料置于一定温度(20℃),然后用紫外-可见分光光度计加热装置加热升温至某一温度(分别为 35,37,40,50℃),维持某一温度一段时间(40~50 min),期间每 5 min 测试其 600 nm 光波下的透光率.起始点为温度最初到达设定温度时测定的透光率.本试验采用了智能遮阳材料 C_2S_6 和 $A_{0.5}C_2S_6$.

C_2S_6 (转变温度约为 35℃) 透光率随时间变化,如图3所示.在 20℃ 时,透光率基本维持在 86.8% 左右,随着温度升高逐渐接近转变温度,智能遮阳材料透光率开始转变.在转变温度附近,经过 45 min,透光率从 84.1% 降低到 80.9%,降低了 3.2%.当温度维持在 37℃ 的时候,透光率从 83.0% 降低到了 69.8%,降低了 13.2%.40℃ 时,透光率从 38.0% 降低到了 3.6%,降低了 34.4%.当温度远高于转变温度后(50℃),其透光率迅速降至零并维持在零附近.可见温度越高,在相同时间内,智能遮阳材料透光率下降得越多.在 37℃ 稳定约 10 min,智能遮阳材料透光率已经达到 77.9%,低于 35℃ 时稳定 45 min 的透光率 80.9%.而在 40℃ 稳定不到 5 min,智能遮阳材料透光率已经达到 20.0%,远远低于材料在 37℃ 稳定了 45 min 时的透光率.因此温度越高,能够使智能遮阳材料在越短时间内从高透光率状态转变为低透光率状态.

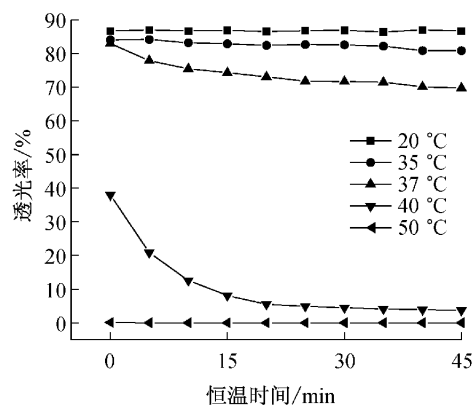


图3 不同温度下 C_2S_6 透光率随恒温时间变化

Fig.3 The transmittance variation of C_2S_6 with the time at different temperatures

这种规律在 $A_{0.5}C_2S_6$ 上也能体现出来(见图4). $A_{0.5}C_2S_6$ 转变温度在 30℃ 附近.在 20℃ 时,透光率维持在 85.0% 左右.在温度远远高于转变温度时(50℃),透光率降低至零,并保持稳定.温度升高至接近转变温度时,材料透光率开始下降,并随着时间延长逐渐降低,最终趋于稳定.经过 40 min,在 28℃ 时,趋于稳定时透光率约为 83.1%;在 30℃ 时,趋于稳定时透光率为 15.4%.温度越高,在相同时间内,材料转变后的透光率越低,最终趋于稳定时的透光率也越低.

为了进一步分析温度对智能遮阳材料的影响,设计如下试验:将智能遮阳材料 C_2S_6 从 34℃ 开始升温到 44℃,以 1℃ 为升温间隔,在每个温度间隔分别

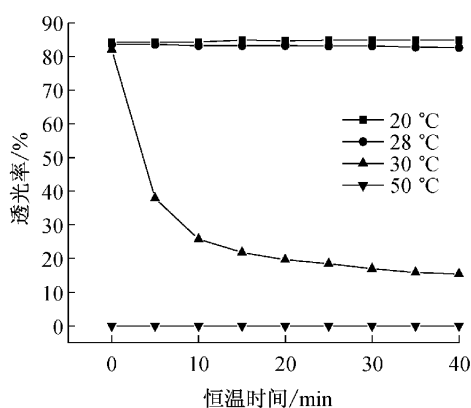


图 4 不同温度下 $A_{0.5}C_2S_6$ 透光率随恒温时间变化

Fig. 4 The transmittance variation of $A_{0.5}C_2S_6$ with the time at different temperatures

恒温 2, 5, 10 min (即升温速率为 $2, 5, 10 \text{ min} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), 测试其 600 nm 波长下的透光率. 试验结果如图 5 所示. 随着温度升高, 智能遮阳材料透光率逐渐降低, 温度越高, 智能遮阳材料的透光率越低. 在升温过程中, 智能遮阳材料在不同温度恒温的时间逐渐延长, 从 2 min 逐渐延长到 10 min, 透光率下降速率先升高, 然后逐渐减小. 可见, 在转变温度以上但透光率未降低到零的温度区间, 随着时间增加, 智能遮阳材料透光率逐渐降低. 如: 在 38°C , $2 \text{ min} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 升温速率组中透光率为 78.4%, $5 \text{ min} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 组中透光率为 76.0%, 而 $10 \text{ min} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 组中透光率为 69.4%. 从 34°C 开始升温到 44°C , 虽然三种升温方式分别经历了 20, 50 和 100 min, 但是最终在 44°C 透光率均趋向于 2%. 可见在相同温度范围内 ($34 \sim 44^\circ\text{C}$), 升温速率快, 到达低透光率状态时间越短. 换句话说, 只要温度达到一定水平, 智能遮阳材料透光率便能转变到相应的状态, 时间只是影响其转变

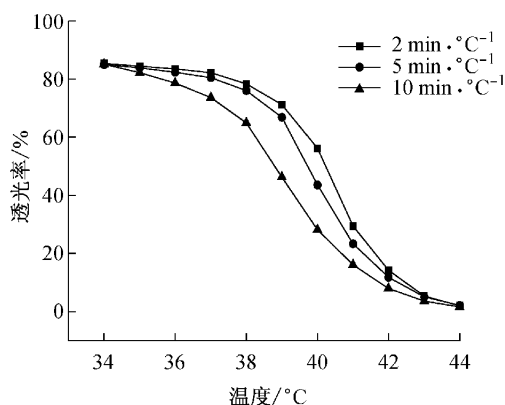


图 5 不同升温速率下 C_2S_6 透光率随温度变化

Fig. 5 The transmittance variation of C_2S_6 with the temperatures at different increasing rates of temperatures

的次要因素, 温度才是影响智能遮阳材料的主要因素.

综上所述, 温度是影响智能遮阳材料透光率的关键因素, 但是在温度高于智能遮阳材料转变温度时, 时间对智能遮阳材料透光率也有一定影响. 升温速率快, 在相同时间到达的温度越高, 智能遮阳材料的透光率越低, 智能遮阳材料从高透光率状态转变到低透光率状态的时间就越少.

2.3 智能遮阳材料曝晒结果

为了探索智能遮阳材料遮阳效果, 利用曝晒装置进行曝晒试验, 来测试智能遮阳材料的遮阳效果. 曝晒试验结果如图 6 所示. 曝晒从早上 9 点到下午 17 点结束. 智能遮阳材料 (C_2S_6 , C_2S_8 , C_2S_{20}) 转变温度分别约为 ($37, 30, 7^\circ\text{C}$). C_2S_{20} 在曝晒过程中始终为不透光状态. 随着曝晒进行, 曝晒装置内温度先升高, 在 14 点左右达到最高点, 然后开始下降. 玻璃夹层材料为水的对比试样曝晒装置温度始终保持最高, 因为水始终保持透光状态, 基本没有遮阳功能. 而夹层材料为 C_2S_{20} 的曝晒装置温度始终保持最低, 因为 C_2S_{20} 始终保持不透光的遮阳状态. 起初, 玻璃夹层材料为水的对比试样曝晒装置与夹层为 C_2S_6 曝晒装置同步升温, 在 10 点左右, 曝晒装置温度达到了 37°C , C_2S_6 转变温度为 37°C 左右, C_2S_6 发生状态转变, 使曝晒装置升温速率下降, 导致了 C_2S_6 的温度曲线低于水的温度曲线. 同理, C_2S_8 转变温度更低, 接近 30°C 左右, 因此 C_2S_8 的温度曲线低于水和 C_2S_6 的温度曲线.

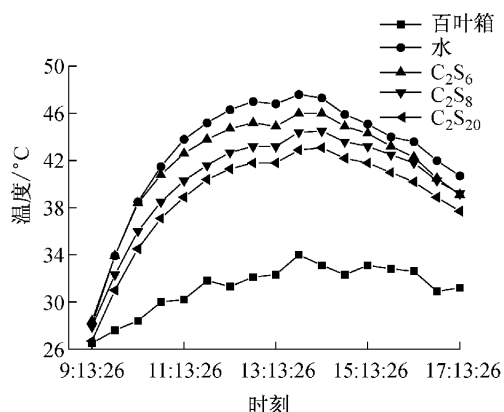


图 6 智能遮阳材料曝晒试验

Fig. 6 The insolation experiment of intelligent solar shading materials

用智能遮阳材料曝晒装置和夹层为水的曝晒装置的曝晒温度最大差值来表示智能遮阳材料的遮阳效果 (遮阳效果 = 夹层为水曝晒装置温度 - 智能遮阳材料曝晒装置温度), 结果如表 2 所示.

表2 智能遮阳材料遮阳效果

Tab.2 The solar shading effect of intelligent solar shading materials

智能遮阳材料	遮阳效果/℃
C ₂ S ₆	1.9
C ₂ S ₈	3.8
C ₂ S ₂₀	5.1

在自行设计的曝晒装置中,与夹层材料为水的曝晒装置对比,完全不透光的智能遮阳材料 C₂S₂₀ 曝晒装置温度最大温差为 5.1℃,可见智能遮阳材料在不透光状态下具有良好的遮阳效果.但是随着智能遮阳材料转变温度的升高,遮阳状态出现温度推后,遮阳效果有所下降.智能遮阳材料 C₂S₆ 与 C₂S₈ 曝晒装置与夹层为水的曝晒装置的最大温差分别为 1.9℃与 3.8℃.

综上所述,智能遮阳材料的与水相比在自组装的曝晒装置中最大遮阳效果可以达到 5.1℃.调节智能遮阳材料转变温度,可调节智能遮阳材料的遮阳效果.

2.4 智能遮阳材料霉变性能

2.4.1 不同水质对霉变性能的影响

在使用本文智能遮阳材料时发现,长期使用过程中,智能遮阳材料有可能发生霉变,产生不可逆黑色沉淀.智能遮阳材料霉变不利于智能遮阳材料的应用,必须提高智能遮阳材料防霉性.霉腐微生物生

存繁殖需要充足的水分、合适的 pH 值、温度等因素,但是水是其不可缺少的条件,因此通过改变水质,或许能够抑制霉变.试验采用去离子水、蒸馏水以及自来水配制智能遮阳材料,密封好,放置在干燥室温环境.长期放置(2009.12—2013.6),观察记录霉变情况,结果如表 3 所示.

表3 不同水质配置智能遮阳材料霉变情况

Tab.3 The mildew state variation of intelligent solar shading materials with different water

水质配置	A _{0.5} C ₂ S ₁₀	C ₂ S ₄	C ₂ S ₁₀
去离子水	霉变	霉变	霉变
蒸馏水	霉变	霉变	霉变
自来水	霉变	霉变	霉变

试验结果证明,使用去离子水、蒸馏水也无法彻底使智能遮阳材料霉变得到很好的抑制.从表 3 看出,A/C/S 和 C/S 系列智能遮阳材料在改变水质后,其霉变依旧发生,因此单纯控制水的纯净度以及其他条件可能还不足以很好地抑制霉菌的生长.

2.4.2 不同防腐剂对抗菌性的影响

因为防霉剂对霉腐微生物有很好的抑制作用,为了提高智能遮阳材料的防霉性能和其实用性,引入两种常见防霉剂(经试验测试并不会改变智能遮阳材料低温透光和高温不透光的性质):山梨酸钾,苯甲酸钠.长期放置两年之后,观察霉变情况,结果如表 4.

表4 不同防腐剂对智能遮阳材料防霉性影响

Tab.4 The influence of mildew agent to anti-mildew performance of intelligent solar shading materials

组号	配方	放置日期	防霉性
1	C ₂ S ₆ +HCl, pH=2~3	2010.4—2012.6	无霉变
2	C ₂ S ₆ +HCl+质量分数 0.2%山梨酸钾, pH=2~3		黄色透明,无霉变
3	C ₂ S ₆ +HCl+质量分数 0.1%苯甲酸钠, pH=2~3		无霉变
4	C ₂ S ₆ 空白组		霉变
5	C ₂ S ₆ +质量分数 0.1%苯甲酸钠		霉变

根据防霉剂使用手册^[12],苯甲酸钠和山梨酸钾在一定的 pH 范围内才能发挥抑制霉腐微生物生长的功能.苯甲酸钠和山梨酸钾最佳的抗菌环境分别为 pH<4 和 pH<5~6,因此决定在 pH=2~3 环境中使用.组 1 和 4 结果表明,酸性条件下能够一定程度上抑制霉腐微生物的生长.组 3,4,5 结果证明,单独使用苯甲酸钠而不调节其 pH 值,防霉剂不能达到很好的抑菌效果.在合适的 pH 值(2~3)下,掺入防霉剂之后,能够提高智能遮阳材料的抗菌性能.但是发现山梨酸钾本身容易被空气中的氧气着色,导致溶液发黄,不利于智能遮阳材料低温时的透光性能.综上所述,在酸性环境中(pH=2~3)中,智能

遮阳材料的抗霉变性能得到提高,在酸性环境下配合使用防霉剂能使智能遮阳材料的防霉性得到提高.

3 智能遮阳机理讨论

本文所研究的智能遮阳材料属于一种温致透光率可逆变化的体系材料,大多数温致透光率可逆变化体系都至少包括两种以上物质.在温度低于某个临界温度时,两种或者多种材料的折射率相当,或者相近,具有较高的太阳辐射透过率而呈现一种透明状态.温度在高于某个临界温度时候,两种或者多种

材料的折射率产生了差异,导致体系的太阳辐射散射率增加,透过率大大下降,从而产生不透明状态.本体系材料中 C 物质同时具有亲水基团和疏水基团,而且在低温下亲水基团与水作用从而与水有很好的溶解性;随着温度升高,亲水基团与水形成的微弱氢键断裂,疏水基起了主导作用,导致材料的溶解度下降,析出聚集成团簇,溶质颗粒增大,使材料体系对太阳辐射的散射能力增大,透光率下降.物质 S 属于离子型无机盐,溶于水后使 C 物质中的亲水基团与水离子的氢键弱化断裂,从而导致 C 物质溶解度降低,使 C 物质析出的温度下降.

4 结论

(1) 本文所研制智能遮阳材料在低温下具有高透光率,高温下具有低透光率.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.

(2) 温度对本材料透光率的影响起了关键作用,时间起了次要作用.当温度高于转变温度时,智能遮阳材料透光率随着时间逐渐降低最终趋于稳定,温度决定其最终稳定的透光率.温度越高,智能遮阳材料的透光率越低;升温速率快,相同时间内温度升得越高,智能遮阳材料从高透光率状态转变到低透光率状态的时间就越少.

(3) 智能遮阳材料在自行设计的曝晒装置中最大遮阳效果可以达到 5.1°C .不同转变温度 C_2S_6 (37°C) 与 C_2S_8 (30°C) 遮阳效果分别为 1.9°C 和 3.8°C ,调节智能遮阳材料转变温度,可调节智能遮阳材料的遮阳效果.

(4) 调整智能遮阳材料水质不能有效抑制智能遮阳材料的防霉性能.调整智能遮阳材料 pH 值,或者选择合适的防霉剂(苯甲酸钠),均能提高本文中智能遮阳材料的防霉性能.

参考文献:

[1] Balaras A C, Gaglia G A, Georgotoulou E, *et al.* European

residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings[J]. *Building and Environment*, 2007, 42 (3): 1298.

[2] Papaefthimiou S, Syrrakou E, Yianoulis P. An alternative approach for the energy and environmental rating of advanced glazing, an electrochromic window case study[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(1): 17.

[3] Baetens R, Jelle P B, Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94(2): 87.

[4] Lampert M C. Chromogenic smart materials [J]. *Materials Today*, 2004, 7(3): 28.

[5] Seeboth A, Schneider J, Patzak A. Materials for intelligent sun protecting glazing[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2000, 60 (3): 263.

[6] Watanabe H. Intelligent window using a hydrogel layer for energy efficiency[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1998, 54(1): 203.

[7] Nitz P, Hartwig H. Solar control with thermotropic layers[J]. *Solar Energy*, 2005, 79(6): 573.

[8] 冯刚,王跃川.热致调光聚合物材料进展[J].*材料导报*, 2007, 21(3): 21.

FENG Gang, WANG Yuechuan. Recent advances in thermally lighting-adjusting polymeric materials [J]. *Journal of Materials*, 2007, 21(3): 21.

[9] 马一平,李远珊.智能遮阳材料的应用性能初探[J].*同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(12): 1838.

MA Yiping, LI Yuanshan. Preliminary research on application properties of intelligent solar materials[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(12): 1838.

[10] 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 Materials*, 2005, 8 (2): 164.

[11] 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.

[12] 马振瀛.防霉剂手册[M].北京:轻工业出版社,1988.

MA Zhenying. Anti-mould agent databook[M]. Beijing: Light Industry Press, 1988.