http://pmse.scu.edu.cn

具有高太阳光调制功能的羟丙基纤维素类复合水凝胶智能窗的结构设计与性能

来思雨[1]，西 鹏[1]，程博闻[2]

（1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387；2. 天津科技大学 化学与材料学院, 天津 300222）

摘要：水凝胶智能窗是一种智能响应窗户，其特点是在临界溶液温度附近能够通过可逆状态转变来调制太阳光，从而达到减少能耗的目的。文中以羟丙基纤维素(HPC)、聚(N-异丙基丙烯酰胺) (PNIPAM)和上转换纳米发光微球(UCNPS@SiO_2-NH_2)为原料，设计制备了一种复合水凝胶(HPC-PNIPAM/UCNPS@SiO_2-NH_2)智能窗。HPC与PNIPAM的复合水凝胶体系通过增加氢键降低了临界溶液温度至约30.65 ℃，其响应时间也从原本的42.13 s减少至14.7 s。而上转换纳米材料的加入增强了水凝胶对太阳光的调制能力，980 nm左右的红外光透射率明显减少。经计算比较发现，所制备的新型复合水凝胶智能窗在20 ℃时拥有优秀的太阳光和可见光透射率，而红外光透射率则为66.28%。升温至40 ℃以上时红外光透射率降到1.43%。与传统的水凝胶智能窗相比，这种新型窗户不仅具有更适宜的临界溶液温度，还展现出优秀的太阳光调制能力。这为新型水凝胶类智能窗的开发提供了新的思路。

关键词：智能窗；羟丙基纤维素材料；太阳光调制能力；上转换发光材料；热致变色材料

中图分类号：TU228 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）03-0143-09

近年来，随着天气变暖，建筑能耗问题受到大家的广泛关注。其中，空调能耗占据了建筑能耗的半数以上。因此，提高建筑对太阳能的利用率成为提高建筑能效的关键。为了实现这一目标，国内外专家近年来进行了不懈的努力。而智能窗概念的提出为提升建筑能效提供了新的可能[1,2]。智能窗是一种通过调节太阳光透过率达到减少进入室内热量的智能响应窗[3,4]。

在早期研究中，二氧化钒(VO_2)作为智能窗的主要功能材料得到广泛应用[5]，但响应速度慢、临界溶液温度高以及需要复杂条件控制等缺陷限制了其应用。随着研究的深入，羟丙基纤维素(HPC)作为一种温敏型聚合物，其较低的临界溶液温度(LCST)和出色的热致变色性能，使之在智能窗的开发中备受关注[6,7]。然而，HPC的临界溶液温度偏高，且近红外光区域的调制能力较弱限制了其实际应用。近两年，杨永生等[8,9]研究了一种HPC/PNIPAM复合水凝胶，通过增强纠缠和引入弱氢键来降低临界溶液温度，使其更适应当前环境需求。此外，为了提高智能窗的太阳光调制能力，国内外研究人员还尝试掺杂了Cs_XWO_3和rGO等无机材料[10~12]。上转换纳米颗粒(UCNP)是一种能将低能量光子结合成高能量光子的光致发光纳米颗粒，它可以将红外光转换为较低热量的可见光，加入该纳米颗粒可以增强智能窗对近红外光的调制能力。

为了克服纤维素类水凝胶智能窗的缺陷，本文以HPC为热致变色材料，通过加入PNIPAM聚合物引入弱氢键改善其临近溶液温度，并根据本课题组的前期工作制备了UCNPs材料[13]，将其用SiO_2微球包覆后再用氨基改性，使其可以均匀的分散在水凝胶中，研究了纳米颗粒加入后对太阳光调制能力的影响以及响应时间和相变温度的变化。研究成果对

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0041
收稿日期：2024-03-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51873152）
通讯联系人：西鹏，主要从事功能高分子材料的设计与合成研究，E-mail: xpsyq0007@sina.com

开发对太阳光具有优异调制功能的智能窗产品具有重要的理论价值。

1 实验部分

1.1 实验原料

异丙基丙烯酰胺(NIPAM，98%含稳定剂)、N, N-亚二甲基乙二胺(BIS，99%)、硝酸铒($Er(NO_3)_3\ 5H_2O$，99%)、3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTES，98%): 希恩思生化科技有限公司；羟丙基纤维素(HPC，M_w=10000)、过硫酸钾(KPS，分析纯)、四甲基乙二胺(TEMED，98%)、硝酸钇($Y(NO_3)_3\ 6H_2O$，99%)、硝酸镱($Yb(NO_3)_3\ 5H_2O$，99%)、正硅酸乙酯(TEOS，98%)：上海麦克林生化科技股份有限公司；氨水(25%)、无水乙醇(分析纯)、尿素(分析纯)、甲苯(分析纯)：天津市风船化学试剂科技有限公司；蒸馏水：实验室自制。

1.2 实验过程

1.2.1 $UCNPS@SiO_2$-NH_2的制备：称取0.15 mmol $Yb(NO_3)_3\ 5H_2O$，0.1 mmol $Er(NO_3)_3\ 5H_2O$和2.8 mmol $Y(NO_3)_3\ 6H_2O$分别加入到50 mL去离子水中并搅拌均匀，再加入4 mol/L尿素溶液并搅拌加热至90 ℃维持5 h。冷却后，分离、洗涤并干燥前驱体粉末。最后，在马弗炉中以5 ℃/min的速率升至1000 ℃煅烧2 h，得到UCNPs样品。

根据Stöber法制备$UCNPS@SiO_2$材料[14,15]。称取0.1 g UCNPs，将其加入到含有30 mL无水乙醇和10 mL去离子水的混合溶液中，在超声波清洗器中超声分散1 h。加入磁子，在磁力搅拌下缓慢加入1.2 mL氨水和0.323 mL TEOS，并在60 ℃持续反应12 h。待溶液恢复到室温后，用离心机分离产物，将分离的产物用乙醇清洗3次，最后在真空干燥箱中干燥12 h后保存备用，样品标记为$UCNPS@SiO_2$。

称取0.1 g样品加入到40 mL甲苯中，放在超声波清洗器中分散1 h，然后放入磁力搅拌器中搅拌并加入1 mL APTES，在110 ℃反应12 h。待反应结束后，用离心机分离产物，并用乙醇清洗3遍，最后在真空干燥箱中干燥12 h，得到的样品标记为$UCNPS@SiO_2$-NH_2。

1.2.2 复合水凝胶的制备：先制备质量分数2%，4%和6%的HPC溶液并分别记为B1，B2和B3。称取0.01 g上述样品依次加入不同质量分数的HPC溶液，放入超声波清洗器中超声分散30 min，分别记为B1′，B2′和B3′。经后续实验对比，4%更适合应用。

称取0.01 g上述样品加入到25 mL 4%的HPC溶液中，放入超声波清洗器中超声分散30 min，然后在室温称取0.5 g，1 g和1.5 g NIPAM和0.02 g BIS分别加入到上述混合溶液中。之后将混合溶液放入磁力搅拌器中以1500 r/min搅拌30 min。随后将称取的0.02 g APS，量取的10 mL TEMED加入到混合溶液中并升温至60 ℃，在氮气气氛中反应2 h。待反应结束后，将溶液放在4 ℃冰箱冷藏12 h，最终得到复合水凝胶样品并依次记为S1，S2和S3。为了进行比较，制备了没有加入纳米微球的HPC-PNIPAM水凝胶并记为S1′，S2′和S3′。

1.2.3 复合水凝胶智能窗的制作：用3M玻璃密封胶将2块石英玻璃板(20 cm×20 cm)的3个边缘黏合在一起防止水凝胶泄露，其边缘厚度为0.5 mm。然后将复合水凝胶用针管分别注射到双层玻璃中，最后在智能窗没有胶封的边缘用3M密封胶密封从而制成智能窗，操作示意图如Fig.1(a)所示。从Fig.1(b)的

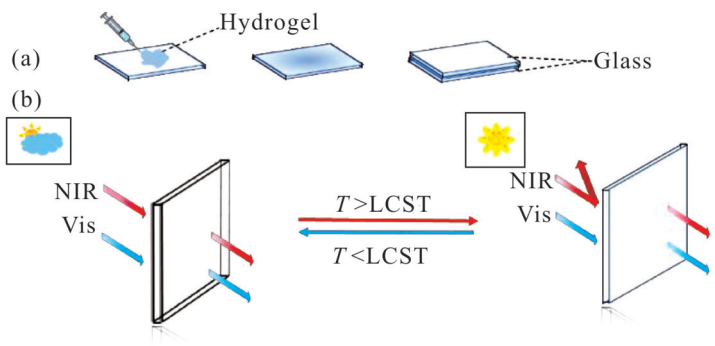


Fig. 1 (a) Fabrication process of smart windows; (b) schematic diagram of transmittance modulation of smart windows

太阳光调制示意图中可以看出, 在不同天气下, 智能窗在低于相变温度时为透明状态, 温度升高后智能窗变为半透明状态,将部分红外光阻隔在窗外, 从而达到红外调制能力。

1.3　测试与表征

1.3.1　形貌表征:使用日本日立公司Hitachi H7650型TEM对样品进行微观形貌分析。将样品用无水乙醇分散均匀后滴在碳膜上,测试电压为100 kV;使用日本日立公司Regulus 8100型SEM拍摄水凝胶样品的微观形貌。为保留其形貌将样品用液氮冷冻,待到完全冻住,放入冷冻干燥机中冷冻24 h, 最后制样进行拍照测试。

1.3.2　元素分布表征:使用上述型号的TEM的能谱仪对样品进行Mapping分析扫描, 并对颗粒表面的元素进行分析。

1.3.3　组成结构表征:使用KBr压片法制样, 然后用NEXUS-670型傅里叶变换红外光谱仪对样品的组成结构进行分析。测试范围为500~4000 cm^{-1}。

1.3.4　相变温度测试:使用德国耐驰制造有限公司的STA 449F5进行DSC分析。水凝胶的升温速率为2 ℃/min, 吹扫氮气流速为10 mL/min,测试温度范围为25~55 ℃。

1.3.5　透射率测定:使用日立公司UH4150型配有加热和降温装置的紫外-可见-近红外分光光度计,对热致变色水凝胶进行不同波段(250~2500 nm)和不同温度(25 ~40 ℃)的透射率测试。

1.3.6　响应时间测试:使用恒温加热台JR- 2020 (800 W)加热智能窗样品, 升温温度范围为20 ~ 40 ℃,用秒表进行计时。

2　结果与讨论

2.1　材料组成和结构分析

利用TEM分析了UCNPs, UCNPs@SiO_2的形貌与结构, 结果如Fig.2所示。从Fig.2(a)和Fig.2(b)可以看出,UCNPs为均匀的球形结构, 平均直径为110 nm。Fig.2(c)和Fig.2(d)为UCNPs@SiO_2纳米微球的TEM图片, 从中可以看出,纳米微球呈现出明显的核壳结构, 其表面平滑, 平均直径为130 nm, 在UCNPs

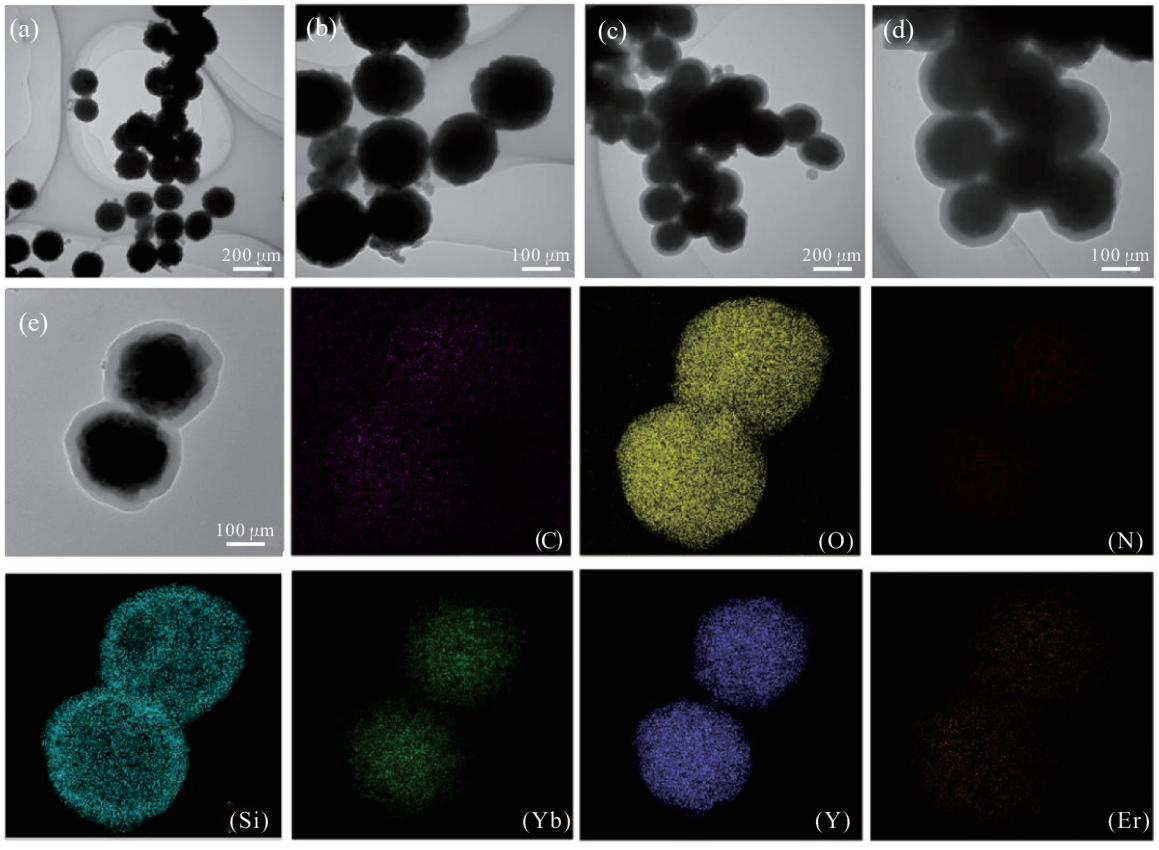


Fig. 2 (a, b) TEM images of UCNPs; (c, d) TEM images of UCNPs@SiO_2; (e) EDS mapping image of UCNPs@SiO_2-NH_2

表面形成了厚度为10 nm的二氧化硅层。另外对改性后的纳米微球进行元素分析，确定Y，Er，Yb，Si，O和N的元素分布，结果如Fig.2(e)所示，从中可以看出，Si分布在纳米微球的外侧，而Y，Er和Yb均匀的分布在纳米微球的内部，这一研究结果证明所有UCNPs都被包覆在二氧化硅壳层中。

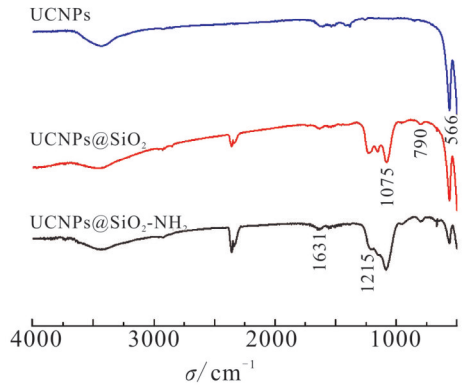


Fig. 3 FT-IR spectra of UCNPs, UCNPs@SiO_2 and UCNPs@SiO_2-NH_2

Fig.3为上转换材料的红外光谱图，其中UCNPs光谱图中，566 cm^{-1}处的特征峰为Y—O的伸缩振动峰。对比于UCNPs样品，在UCNPs@SiO_2光谱图的1075 cm^{-1}和790 cm^{-1}处出现了2个新的吸收峰，这是Si—O—Si的伸缩振动峰，证明样品中存在二氧化硅。而UCNPs@SiO_2-NH_2的光谱图在1631 cm^{-1}处出现N—H的特征伸缩振动峰，在1215 cm^{-1}出现亚甲基的伸缩振动峰，证明UCNPs@SiO_2微球改性氨基成功。

为进一步分析水凝胶的结构，使用SEM进行观察分析，如Fig.4所示。从Fig.4中可以看出，凝胶呈蜂窝状多孔结构，其中Fig.4(a1)和Fig.4(a2)为HPC水凝胶，其孔的数量较多且孔径偏大，而Fig.4(b1)和Fig.4(b2)中HPC-PNIPAM水凝胶相对于前者孔洞更加密集，孔径也相对偏小，其主要是因为加入PNIPAM后氢键的增强提高了交联密度，同时孔径

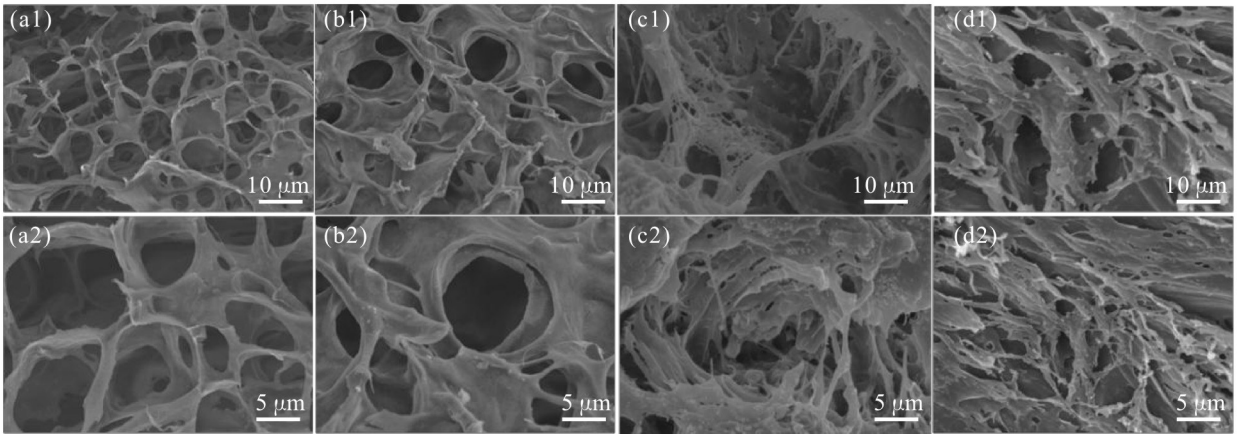


Fig. 4 SEM images of HPC and HPC-PNIPAM:(a1) and (a2) represent the SEM images of HPC; (b1) and (b2) represent the SEM images of HPC-PNIPAM; (c1) and (c2) represent the SEM images of HPC-UCNPs@SiO_2-NH_2; (d1) and (d2) represent the SEM images of HPC-UCNPs@SiO_2-NH_2

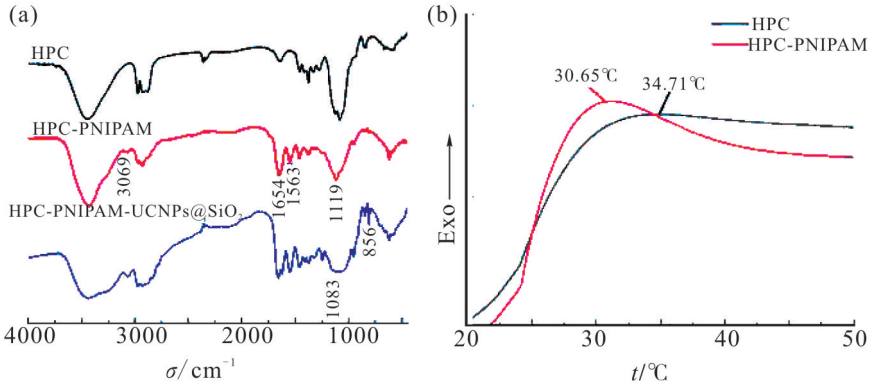


Fig. 5 (a) FT-IR spectra of HPC, HPC-PNIPAM, and HPC-PNIPAM-UCNPS@SiO_2; (b) DSC curves of HPC and HPC-PNIPAM

的变化也影响了水凝胶的透射率。从Fig.4(c1)和Fig.4(c2)中可以看出,纳米微球分散并附着在孔上,透光的同时吸收近红外光从而达到降低近红外透射率的效果。而Fig.4(d1)和Fig.4(d2)相较于Fig.4(b1)和Fig.4(b2),其孔的密集度增加,表明纳米微球的掺杂也提高了水凝胶的交联度。

Fig.5(a)给出了HPC,HPC-PNIPAM和HPC-PNIPAM-UCNPs@SiO_2的红外光谱图。相比于纯HPC,HPC-PNIPAM在1563 cm^{-1}和1654 cm^{-1}处出现了明显的吸收峰,这对应于C=O的伸缩振动和N—H的弯曲振动;3069 cm^{-1}处的吸收峰归因于PNIPAM聚合物主链上的C—H振动峰[8]。1119 cm^{-1}处的特征峰为C—C伸缩振动。掺杂纳米微球的复合水凝胶在856 cm^{-1}处出现明显特征峰,该峰为Si—O—Si的伸缩振动吸收峰,1080 cm^{-1}处出现较宽的特征峰应为Si—O—Si的伸缩振动导致的。因此证明成功地合成了HPC-PNIPAM-UCNPs@SiO_2水凝胶。Fig.5(b)为2种水凝胶的DSC曲线,从图中可以看出,纯HPC的相变温度为34.71 ℃左右,加入PNIPAM后相变温度变为30.65 ℃左右,水凝胶的相变温度降低。

2.2　复合水凝胶的光学性能分析

在Fig.6中通过UV-Vis-NIR分析了样品在不同波段的透过率。为了后续实验分析的便利,对4种水凝胶进行了分别标注,详细的标注情况请参见实验部分。在Fig.6(a)中对比分析发现,B2水凝胶在980 nm波长左右的近红外光透射率为90.8%,而B2′的透射率降到77%。在Fig.6(b)中看出,在40 ℃时,B2的近红外透射率为23.1%,B2′透射率降为17.5%。这主要归因于水凝胶结构随着温度的升高孔径变小,透射率降低,且上转换纳米材料的加入能帮助复合水凝胶调制太阳光。经分析可以得出,B2′水凝胶相比于其他水凝胶,其红外光的调制能力变的更加优秀。

从Fig.6(c)中可以分析出,在20 ℃时,S2′水凝胶相比较于S2,它的透过率从81%降到76%,而在Fig.6(d)中可以看出,在40 ℃时,S2′水凝胶相较于S2水凝胶其在1300 nm左右的红外光透射率从23%降

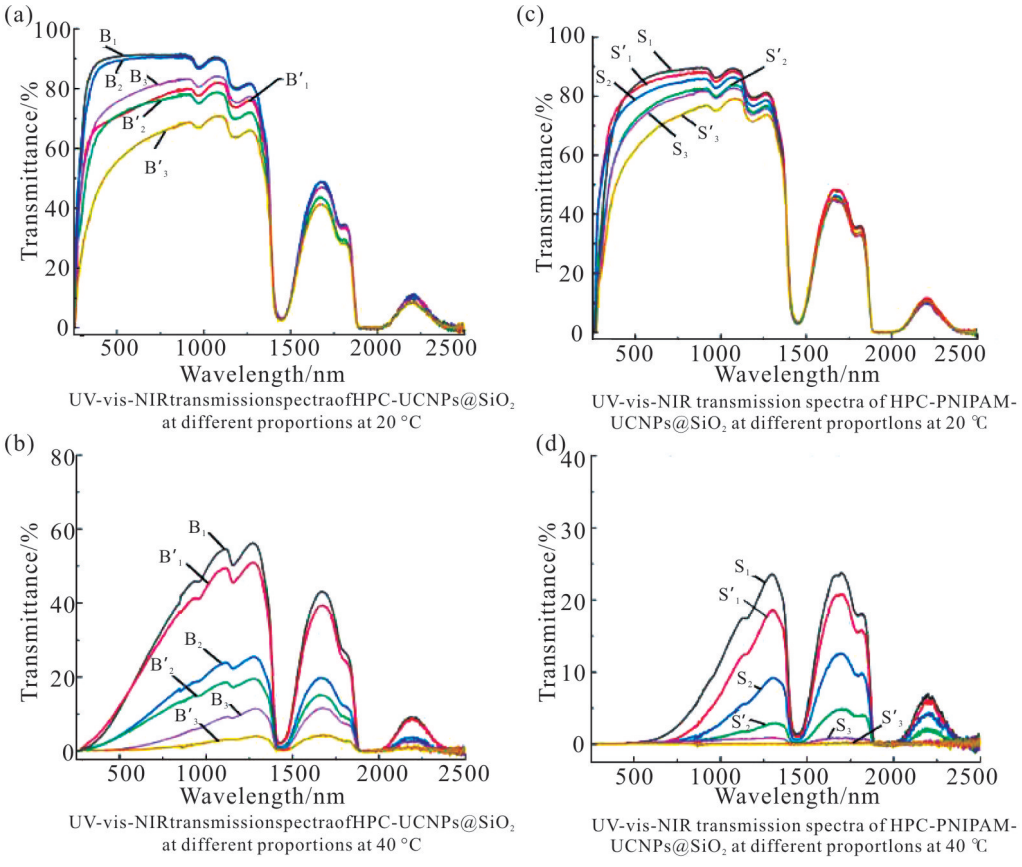


Fig. 6　UV-vis-NIR transmission spectra of different hydrogel samples

到18%，拥有了更好的红外光调制能力。相对于其他水凝胶更适合应用在智能窗上，这说明PNIPAM的加入有效地增强了氢键，提高了交联度，降低了透射率，上转换纳米材料的掺杂也能辅助调制红外光的透射率。

太阳辐射在不同波段辐射的热量不同，其主要分为可见光区域和红外光区域，因此分别讨论不同波段下透射率的变化。通过式(1)[3]分别计算不同复合水凝胶在20 ℃和40 ℃时的平均可见光透射率T_{lum}(380~780 nm)，平均红外光透射率T_{IR}(780~2500 nm)和平均太阳光透射率T_{solar}(250~2500 nm)。结果如Tab.1和Tab.2所示。

$$T_{lum/IR/solar}=\frac{\int\varphi_{lum/IR/solar}(\lambda)T(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int\varphi_{lum/IR/solar}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \quad (1)$$

式中：$T(\lambda)$——不同波长下测定的透射率；φ_{lum}——人眼光视觉的标准发光效率函数；$\varphi_{IR/solar}$——空气质量为1.5时的红外/太阳辐射光谱。

在Tab.1和Tab.2中分别计算了水凝胶不同温度的3种透射率。从Tab.1中对比可以看出，在20 ℃时B2水凝胶加入上转换材料后3种透射率都有所下降，其中近红外光的透射率下降较为明显，从72.06%下降到65.52%，因此可以得出纳米粒子吸收红外光效果明显。在加入PNIPAM后，可见光平均透射率和太阳光平均透射率变化并不明显，而近红外光透射率分别降到68.71%和66.28%。在Tab.2中可以看出，升温至40 ℃后，由于高于临界溶液温度，水凝胶的透过率发生大幅度下降。其中S2′的T_{IR}下降到1.43%，相比于未加入PNIPAM和上转换材料的其他3种水凝胶，它的平均近红外光透射率下降最为明显。这主要归因于复合水凝胶交联度的提高，且上转换材料掺杂后将红外光转换为较低热量的可见光，辅助调制了太阳光。综合2种温度，可以得出，S2′水凝胶不但在低温有较好的T_{lum}和T_{solar}以及较低的T_{IR}，而且升温后其T_{IR}下降最多。因此S2′水凝胶具有优异的太阳光调制能力。

Tab. 1 T_{lum}, T_{IR}, T_{solar} of different mixtures of hydrogels at 20 ℃

Sample	T_{lum}/%	T_{IR}/%	T_{solar}/%
B2	89.45	72.06	74.93
B2′	72.38	62.52	70.16
S2	80.56	68.71	74.93
S2′	74.41	66.28	70.16

Tab. 2 T_{lum}, T_{IR}, T_{solar} of different mixtures of hydrogels at 40 ℃

Sample	T_{lum}/%	T_{IR}/%	T_{solar}/%
B2	6.97	17.33	11.24
B2′	5.72	13.86	9.94
S2	0.18	3.92	1.82
S2′	0.16	1.43	0.71

在Fig.7(a)可以看出，对于980 nm波段，掺杂UCNPs@SiO_2-NH_2纳米粒子在20~40 ℃透过率都比没有掺杂的水凝胶低，尤其在40 ℃左右透射率从61.1%降到26.7%。Fig.7(b)为HPC和HPC-PNIPAM2种水凝胶的相变响应时间，可以看出HPC-PNIPAM比HPC响应时间明显缩短，从42.13 s减少至14.7 s，但UCNPs@SiO_2-NH_2上转换材料的加入对

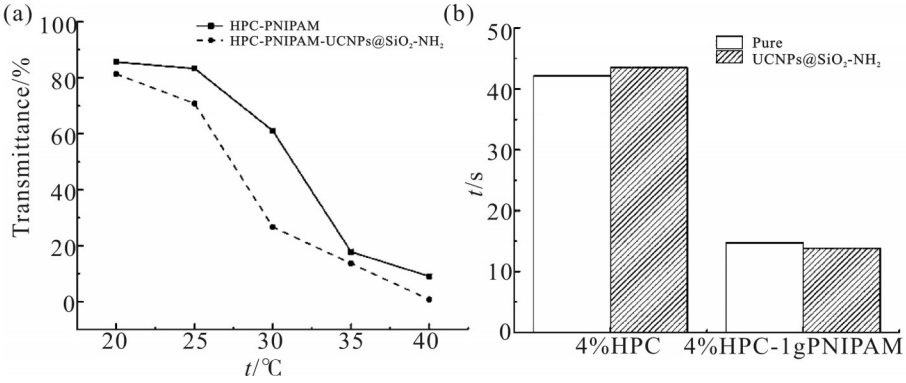


Fig. 7 (a) UV-Vis-NIR transmission spectra of HPC-PNIPAM with and without nanoparticle doping at different temperatures under 980 nm excitation; (b) comparison of response speeds

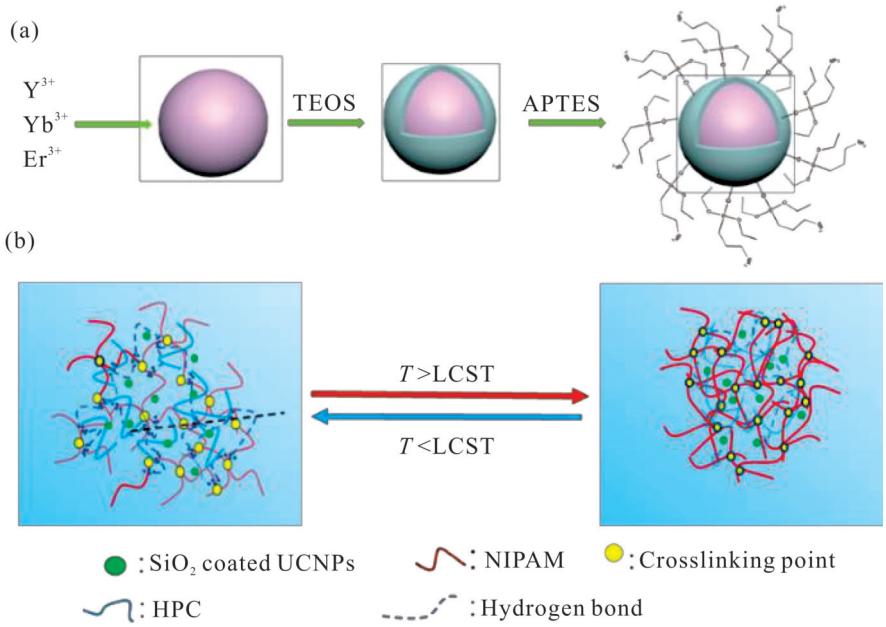


Fig. 8 (a) Coating process of UCNPs materials; (b) transition of HPC-PNIPAM network structure before and after phase transition temperature

响应时间的影响较小。

2.3 复合水凝胶智能窗的应用

2.3.1 复合水凝胶智能窗的机理:Fig.8(a)为UCNPs的包覆过程机理图,通过StÖber法使SiO_2微球包覆UCNPs,并在微球表面进行氨基改性。Fig.8(b)显示了加入纳米微球后水凝胶在相变前后的结构转变。在LCST以下时,聚合物和水形成氢键,此时透过率较高,当温度来到LCST以上时氢键被破坏,聚合物链聚集后导致聚合物链之间形成的孔径变小,散射率增加,光的透射率降低,而纳米微球均匀的分散在水凝胶中吸收部分近红外光,从而达到辅助调制的作用。

2.3.2 复合水凝胶智能窗的应用:Fig.9(a)为制作的简易的房屋模型,通过利用白炽灯模拟太阳并实时监控温度变化来模拟智能窗在不同温度时的实际应用情况,加热速率为5 ℃/min,响应时间为14.5 s,具体情况如Fig.9(b)。在阴天时温度较低,大约在25 ℃左右,此时透过窗户可以清晰看到窗外花朵,太阳光可以完全透射进来,经过白炽灯的照射,模拟的天气转为晴天,温度大约为40 ℃左右,此时智能窗变为近乎不透明状,太阳光难以进入到屋内。在温度升高期间,智能窗从完全透明到半透明最终变为近乎不透明,可以高效地应对不同温度时的变化需求,进而可以很好地针对不同天气进行红外调控。

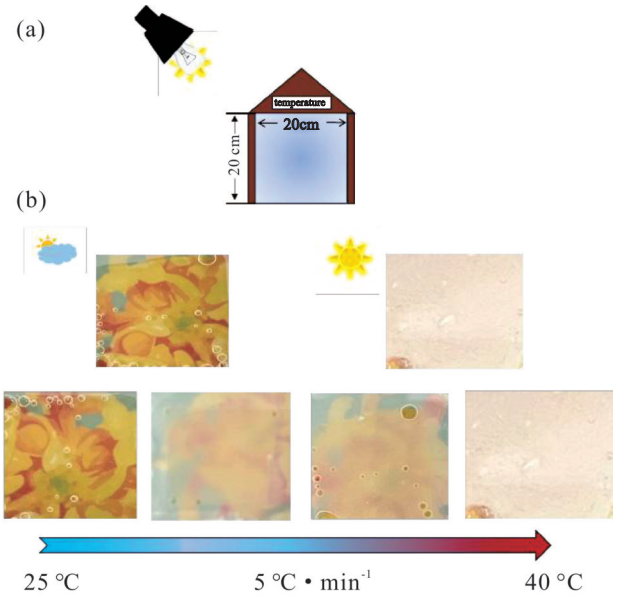


Fig. 9 (a) Simplified schematic of smart window application in a house; (b) digital photographs of the hydrogel smart window at temperatures from 25 ℃ to 40 ℃

3 结论

羟丙基纤维素是一种热致变色材料,本文通过加入聚(N-异丙基丙烯酰胺)和上转换纳米微球制备了一种HPC-PNIPAM/UCNPs@SiO_2-NH_2复合水凝胶。该复合水凝胶有降低的临界溶液温度大约为30.65 ℃,响应时间为14.7 s。通过调控HPC和

PNIPAM的比例, 得到了一种在20 ℃时拥有优秀的太阳光和可见光透射率，红外光透射率在66.28%。升温至40 ℃以上时红外光透射率降到1.43%, 相比其他比例的水凝胶，低温能保证太阳光和可见光的透过率同时对于红外光有优秀的调控能力, 而高温时红外光透射率降幅最大, 具有更高的太阳光调节效率。将上转换纳米材料加入到复合水凝胶可以起到辅助调制太阳光的功能, 研究结果为提高智能窗的节能效率提供了较好的理论基础。

参考文献：

[1] Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. Nature, 2012, 488: 294-303.

[2] Gao L, Bryan B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability[J]. Nature, 2017, 544: 7649.

[3] Zhou Y, Dong X X, Mi Y Y, *et al*. Hydrogel smart windows[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8: 10007-10025.

[4] 许鑫, 庞尔宝, 伍泽鑫, 等. 具有高太阳光调节效率的智能窗用可3D打印Si-Al/PNIPAM-AEMA复合水凝胶[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(12): 111-120.
Xu X, Pang E B, Wu Z X, *et al*. 3D printable Si-Al/PNIPAM-AEMA composite hydrogel for smart windows with high sunlight conditioning efficiency[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(12): 111-120.

[5] Zou Z R, Zhang Z H, Xu J, *et al*. Phase transition mechanism and application of silicon-doped VO_2 thin films to smart windows[J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2021, 32: 23825-23833.

[6] Wu Y P, Connelly K, Liu Y Z, *et al*. Smart solar concentrators for building integrated photovoltaic facade [J]. Solar Energy, 2016, 133: 111-118.

[7] 张伟, 朱林, 李青松, 等. 羟丙基纤维素的微观结构和溶解性及再生[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(7): 93-97.
Zhang W, Zhu l, Li Q S, *et al*. Microstructure, solubility and regeneration of hydroxypropyl cellulose[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(7): 93-97.

[8] Feng Y Q, Wang S C, Li Y Q, *et al*. Entanglement in smart hydrogels: fast response time, anti-freezing and anti-drying[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2211027.

[9] Feng Y Q, Ma W X, Li H B, *et al*. Phase-changing polymer film for smart windows with highly adaptive solar modulation[J]. ACS Applied Materials & Interface, 2023, 15: 5836-5844.

[10] Casini M. Active dynamic windows for buildings: a review[J]. Renewable Energy, 2018, 119: 923-934.

[11] Hang L M, Du Y, Xia H, *et al*. HPC-PAA hydrogel smart windows with and without $Cs_{0.32}WO_3$: high solar modulation ability and luminous transmittance [J]. Ceramics International, 2022, 48: 37122-37131.

[12] Bai Y J, Chen W Q, Tang T Q, *et al*. Photothermal enhancement of reduced graphene oxide in hydroxypropyl cellulose for a smart-window application[J]. Solar Energy, 2022, 245: 376-384.

[13] Bagheri A, Arandiyan H, Adnan N N M, *et al*. Controlled direct growth of polymer shell on upconversion nanoparticle surface via visible light regulated polymerization[J]. Macromolecule, 2017, 50: 7137-7147.

[14] StÖber W, Fink A, Bohn E J J O C, *et al*. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1968, 26(1): 62-69.

[15] Li L, Li Q, Chu J, *et al*. Dual-mode luminescent multilayer core-shell UCNPs@SiO_2@TEuTbB nanospheres for high-level anti-counterfeiting and recognition of latent fingerprints[J]. Applied Surface Science, 2022, 581: 152395.

Structural Design and Performance of Hydroxypropyl Cellulose Composite Hydrogel Smart Windows with High Solar Light Modulation Functions

Siyu Lai[1], Peng Xi[1], Bowen Cheng[2]

(*1. School of Materials Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Chemical Engineering and Materials, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China*)

ABSTRACT: Hydrogel smart window is an intelligent responsive window, which is characterized by modulating sunlight by reversible state transition near the critical solution temperature, so as to achieve the purpose of reducing energy consumption. A composite hydrogel (HPC-PNIPAM/UCNPS@SiO_2-NH_2) smart window was designed and prepared by using hydroxypropyl cellulose (HPC), poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) and up-conversion nano-particles (UCNPS@SiO_2-NH_2) as raw materials. The composite hydrogel system of HPC and PNIPAM reduces the critical solution temperature to about 30.65 ℃ by increasing the hydrogen bond, and the response time is also reduced from the original 42.13 s to 14.7 s. The addition of up-conversion nanomaterials enhanced the ability of the composite hydrogel to modulate sunlight, and the infrared light transmittance at about 980 nm is significantly reduced. It is found that the new composite hydrogel smart window has excellent sunlight and visible light transmission at 20 ℃, while the infrared light transmission is 66.28%. When the temperature rises above 40 ℃, the infrared transmittance drops to 1.43%. Compared with traditional hydrogel smart windows, the composite hydrogel smart window not only has a more suitable critical solution temperature, but also shows excellent sunlight modulation capability. This provides a new idea for the development of a new type of hydrogel smart window.

Keywords: smart window; hydroxypropyl cellulose material; sunlight modulation capacity; upconversion material; thermochromic material