

文章编号: 1000-7032(2025)08-1517-09

硅基碳点/PVA 复合材料中光热效应对形状记忆性能增强机制研究

任卫杰¹, 刘子江¹, 王庆凯¹, 徐文军², 秦振兴^{1*}

(1. 太原科技大学 应用科学学院, 山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 山西 太原 030024;

2. 山西砼邦建筑工程有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 形状记忆材料作为一类能够在外界刺激下恢复至初始状态的智能材料,在柔性电子、智能包装和生物医学等新兴领域展现出极大潜力。然而,传统聚乙烯醇(PVA)材料在水中形状恢复效率受到极大限制。本文报道了一种基于PVA/碳点复合体系的新型光响应形状记忆材料。将碳点与PVA复合,在水介质中展现出相较于纯PVA更优异的形状恢复性能。研究表明,碳点与PVA之间形成的氢键是提升形状记忆效应的重要因素,而碳点中硅元素的引入使得复合材料的形状恢复速度显著提升,相较于纯PVA提升了3倍左右。这源于碳点的硅元素掺杂显著增强了该复合材料的光热转换效率,在光照条件下能将更多太阳光光能转化为热能,从而加速分子链段运动而实现快速形变恢复。基于该材料优异的可控形变性能及水响应特性,本研究为开发高效光-热-水多重响应型智能材料提供了新思路。

关键词: 形状记忆材料; 硅掺杂碳点; 氢键; 光热转换

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250157

CSTR: 32170.14.CJL.20250157

Enhancement Mechanism of Shape Memory Performance by Photothermal Effect in Silicon-based Carbon Dots/PVA Composites

REN Weijie¹, LIU Zijiang¹, WANG Qingkai¹, XU Wenjun², QIN Zhenxing^{1*}

(1. Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Congbang Construction Engineering Co., LTD, Taiyuan 030032, China)

* Corresponding Author, E-mail: qinzx@tyust.edu.cn

Abstract: Shape memory materials, as a type of intelligent materials that can restore to their initial state under external stimuli, have shown great potential in emerging fields such as flexible electronics, smart packaging, and biomedicine. However, the shape recovery efficiency of traditional polyvinyl alcohol (PVA) materials in water is greatly limited. This paper reports a novel photo-responsive shape memory material based on a PVA/carbon dots composite, which exhibits superior shape recovery performance in water compared to pure PVA by combining the carbon dots with PVA. The results obtained here have shown that the hydrogen bonds formed between the carbon dots and PVA are an important factor in enhancing the shape memory effect. The introduction of silicon elements into the carbon dots significantly improves the shape recovery speed in the composite, which is about three times higher than that of pure PVA. This is due to the silicon-doping of the carbon dots significantly enhance the photothermal conversion efficiency of the composite material to result in converting more solar energy into heat under sunlight conditions, thereby, accelerating the

收稿日期: 2025-05-22; 修订日期: 2025-06-07

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202303021222175); 山西省高校科技创新计划项目(2023L176); 太原科技大学科研启动基金项目(20232004,20232129)

Supported by the Fundamental Research Program of Shanxi Province(202303021222175); Science and technology innovation plan of colleges and universities in Shanxi Province(2023L176); Taiyuan University of Science and Technology Scientific Research Initial Funding(20232004,20232129)

movement of molecular chains and achieving rapid shape recovery. Considering that as-prepared composite has the excellent controllable deformation performance and water-responsive characteristics, This study provides a new idea for the development of efficient light-thermal-water multi-responsive intelligent materials.

Key words: shape memory materials; Si-doped CDs; hydrogen bonds; photothermal conversion

1 引 言

形状记忆材料(Shape memory materials, SMMs)作为一类能够响应外界刺激(如水、光、热等)并实现可控形变的智能材料,在柔性电子、生物医学及智能包装等领域展现出了巨大的应用潜力^[1-3]。其中,形状记忆聚合物(Shape memory polymers, SMPs)因其成本低、可设计性强等优势备受关注。传统SMPs如聚氨酯、聚酰亚胺等虽已取得一些进展,但它们响应模式单一、驱动效率较低等问题仍制约着实际应用。近年来,通过功能化改性和复合策略等构建多重响应型SMPs,从而突破单一刺激的限制。聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)因其丰富的羟基基团和可调的物理交联结构,成为水响应型SMPs的理想基体材料^[4]。然而,纯PVA在水中因氢键网络的动态可逆性低,具有形状恢复速率低等问题。研究表明,在PVA中引入纳米材料(如碳纳米管、氧化石墨烯)可通过增强界面相互作用而增强其形状记忆性能^[5]。

碳点(Carbon dots, CDs)作为一类新兴的零维纳米材料,因其水溶性和丰富的表面官能团(如羟基、羧基),在聚合物功能化改性中备受关注^[6-7]。研究表明,CDs的引入可显著改善PVA的力学性能与热稳定性,同时赋予其荧光、磷光等光学特性。Yang等研究报道了将PVA与碳量子点共混,制备了形状恢复率可调的发光水致形状记忆聚合物复合材料^[8]。氧和活性富氢碳量子点可以通过强氢键相互作用在PVA中充当额外的物理交联点,极大地提高了PVA的形状记忆性能;Wu等报道了一种由碳点和PVA组成的光响应形状记忆聚合物的新策略^[9]。所制备的碳点具有良好的可见光吸收和良好的光热转换,使碳点/PVA复合聚合物能够作为光响应形状记忆聚合物。可见,碳点不仅可以作为光热剂,还可以提供额外的氢键相互作用,通过调控水分子渗透行为与分子链运动,实现材料的可逆形变。最近,杂原子掺杂被证明是优化材料电子结构的有效策略^[10]。Yang等利用氮元素掺杂碳点,其不仅可以有效地提高复合

材料的导电性和稳定性,而且它们具有大量的表面官能团和成核位点^[11]。Yu等利用硫元素掺杂调节了碳点的电子结构,获得了前所未有的效率催化光致电子转移可逆加成-破碎-链转移(PET-RAFT)水相聚合^[12]。尤其是硅原子的引入,导致碳点的内部产生分级能级体系,这种能级梯度有利于光生载流子的快速传输,同时硅的半导体特性可促进光热转换效率的提升^[13]。这同样为进一步提升PVA基聚合物形状记忆效应的光响应速率提供了新的思路。

因此,本研究提出了一种基于硅掺杂碳点/PVA复合体系的新型光-热-水多重响应型形状记忆材料。通过碳点表面丰富的官能团与PVA形成的氢键,并结合硅掺杂诱导的光热增强效应,实现了水环境中的PVA形状记忆性能的提升。该研究首次揭示了硅掺杂所诱导的光热转化效应对PVA中氢键网络主导的形状记忆功能的协同作用机制,为开发新一代智能驱动材料提供了实验依据与技术支撑。

2 实 验

2.1 试剂与原料

间苯二胺(m-PD)、九水偏硅酸钠、聚乙烯醇(PVA)于阿拉丁化学(中国)有限公司购置。无水乙醇等试剂购买于天津大茂化学试剂技术有限公司。所有化学试剂和溶剂使用前未做进一步纯化操作。

2.2 样品表征

透射电子显微镜(TEM)图像由JEOL公司JEM-2100采集;傅里叶变换红外光谱分析在Nicolet iS50光谱仪(Thermo Fisher, 美国)上完成,测试波段为500~4 000 cm^{-1} ;采用北京泊菲莱科技提供的CHF-XM500型氙灯光源作为照明系统;紫外-可见吸收光谱由U-3900紫外/可见分光光度计采集(日立, 日本);英国爱丁堡仪器公司生产的FLS-1000型荧光分光光度计实施荧光特性表征;动态力学分析(DMA)使用美国TA Q800动态力学分析仪(固定频率1 Hz, 温度范围-40~120 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。

2.3 样品制备

硅掺杂碳点(SiCDs)制备:将0.054 g的间苯二胺与0.142 g九水偏硅酸钠溶解在体积比为1:1的去离子水和乙醇的混合溶液中,于室温条件下进行20 min超声分散。随后将混合溶液转移至10 mL聚四氟乙烯反应釜中,在真空干燥箱进行220 ℃的水热反应10 h。待反应体系冷却至室温后,采用500 KD截留分子量透析袋进行24 h透析纯化(每隔3 h更换一次去离子水),继而在冷冻干燥机中冻干24 h,最后收集冻干的固体粉末,即为硅掺杂碳点(SiCDs)。

碳点(CDs)制备:将0.054 g的间苯二胺溶解在体积比为1:1的去离子水和乙醇的混合溶液中,其余步骤与上述SiCDs的制备一致。

纯PVA薄膜制备:分多次将1.5 g PVA粉末逐步加入30 mL去离子水中,在恒温磁力搅拌器(95 ℃)中持续反应3 h至完全溶解。然后,将均匀混合物倒入成型的模具中,在60 ℃的鼓风干燥箱中保持72 h以流延复合膜(形状记忆薄膜的尺寸(40 mm(长)×4 mm(宽)×0.1 mm(厚度))。

PVA/SiCDs复合材料制备:首先将1.5 g PVA粉末溶解于30 mL去离子水中,95 ℃恒温搅拌1 h。同时,将15 mg的SiCDs分散到20 mL去离子水中,超声分散10 min,获得SiCDs分散液。随后,采用逐滴加入的方法将SiCDs分散液向PVA溶液中少量多次倒入,混合液在95 ℃恒温下继续搅拌2 h。然后,将搅拌后的混合溶液逐渐倒入成型模具中,在60 ℃的鼓风干燥箱中保持72 h以流延复

合膜(成型后的膜保存在干燥皿中)。同样地,PVA/CDs复合材料制备只需把SiCDs改为CDs,其余步骤与上述一致。

2.4 形状记忆性能测试及计算

通过弯曲试验测量形状记忆行为,形状恢复率(R_r)和形状固定率(R_f)是描述材料形状记忆性能的两个基本量。 R_r 量化了材料记忆其永久形状的能力,而 R_f 量化了切换段固定机械变形的能力。首先将复合材料直条4 cm×0.4 cm×0.01 cm放入90 ℃的烘箱中20 min,然后弯曲至接近180 ℃的角度(θ_0)。然后,借助外力将带材冷却至室温,固定变形(θ_i)。最后,将变形的复合材料浸入水中,记录弯曲角度(θ_r)随浸入时间的延长而发生的变化(使用数码相机记录形状随时间的宏观变化,试验环境温度为25 ℃),从而研究其形状恢复性能。 R_f 和 R_r 计算公式如下:

$$R_f = \frac{\theta_i}{\theta_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$R_r = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_i} \times 100\%. \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 碳点的形貌结构和发光性能

图1为CDs和SiCDs的透射电子显微镜(TEM)图像。所制备的两种碳点均呈现类球状,粒径在纳米尺度。从HRTEM图中(右上角)可以清楚地观察到晶格条纹,硅元素的掺杂并未改变碳点的晶格间距,间距均为0.21 nm,这对应于石墨碳(100)晶面^[14],表明所制备两种碳点的碳核具有类石墨结构。

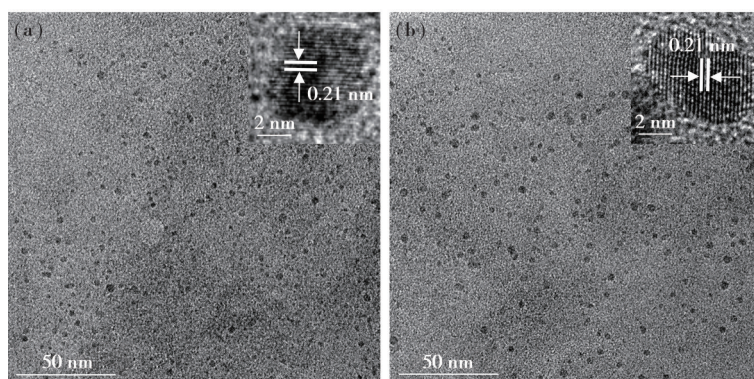


图1 (a)CDs和(b)SiCDs的TEM和HRTEM(右上)图像

Fig.1 TEM and HRTEM(upper right) images of (a)CDs and (b)SiCDs

为了理解两种碳点表面官能团的分布情况,测试了其傅里叶变换红外光谱(FTIR)。如图2所示,两种碳点在3 300~3 500 cm^{-1} 处出现的吸收峰是O—H/N—H的伸缩振动,2 980 cm^{-1} 处的吸收峰应是C—

H键的伸缩振动,1 623 cm^{-1} 是C=C键的伸缩振动,1 365 cm^{-1} 处为C=N键的伸缩振动,1 285 cm^{-1} 是C—O键的伸缩振动。这些特征峰说明两种碳点表面均含有丰富的羟基、羧基和氨基等官能团,这些

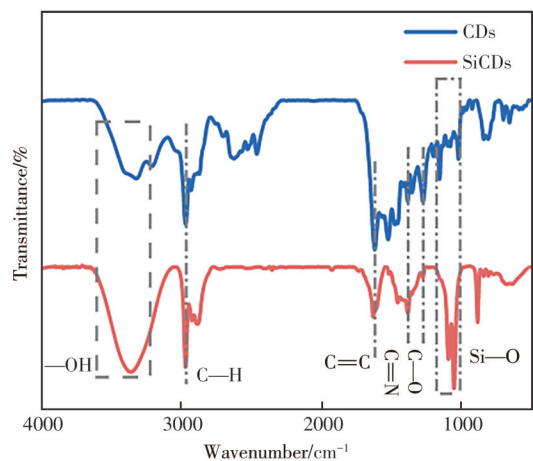


图2 CDs和SiCDs的傅里叶红外光谱
Fig.2 FTIR of CDs and SiCDs

基团为后续构建形状记忆所需的动态氢键网络提供了结构基础。值得注意的是,与 CDs 不同, SiCDs 在 1 049~1 100 cm^{-1} 附近新出现的特征吸收峰归属于 Si—O 键的伸缩振动^[15],这表明硅元素以 Si—O 键的形式成功地掺杂入碳点中。X 射线光电子能谱(XPS)中 Si 2p 谱图显示(图 S1), Si—O 位于 102.8 eV,该结果进一步验证了硅元素的成

功掺杂。通过 X 射线衍射仪(XRD)对两种固态碳点的物相进行了表征(图 S2), CDs 和 SiCDs 均未出现明显的衍射峰,而是在 20° 左右表现出无定型结构常见的弥散峰,该峰归因于碳点的典型特征,这与石墨晶格间距有关。

除了形貌结构,对两种碳点的光学性能也进行了详细的分析,包括紫外-可见吸收光谱(Abs)、激发光谱(PLE)及发射光谱(PL)。如图 3(a)、(b)所示, CDs 在 320 nm 附近呈现宽强吸收峰,归因于碳核边缘的 C=O/C=N 键的 $n-\pi^*$ 跃迁^[16]; 而 SiCDs 的吸收光谱中约 270 nm 处的强吸收峰归因于 sp^2 杂化碳结构 C=C 键的 $\pi-\pi^*$ 跃迁^[17],这说明碳点中可能含有芳香共轭体系; 约 330 nm 处的肩峰则对应 C=O 结构的 $n-\pi^*$ 跃迁。两者吸收峰的显著差异表明硅掺杂有效调控了碳点的电子能级结构。通过两种碳点的激发和发射光谱可以看出, CDs 的最佳激发峰为 450 nm, 发射峰为 530 nm; 而 SiCDs 的最佳激发峰为 395 nm, 发射峰为 505 nm。SiCDs 激发光谱和发射光谱的蓝移可能是由于硅掺杂引入新的能级或缺陷态,这改变了 CDs 的电

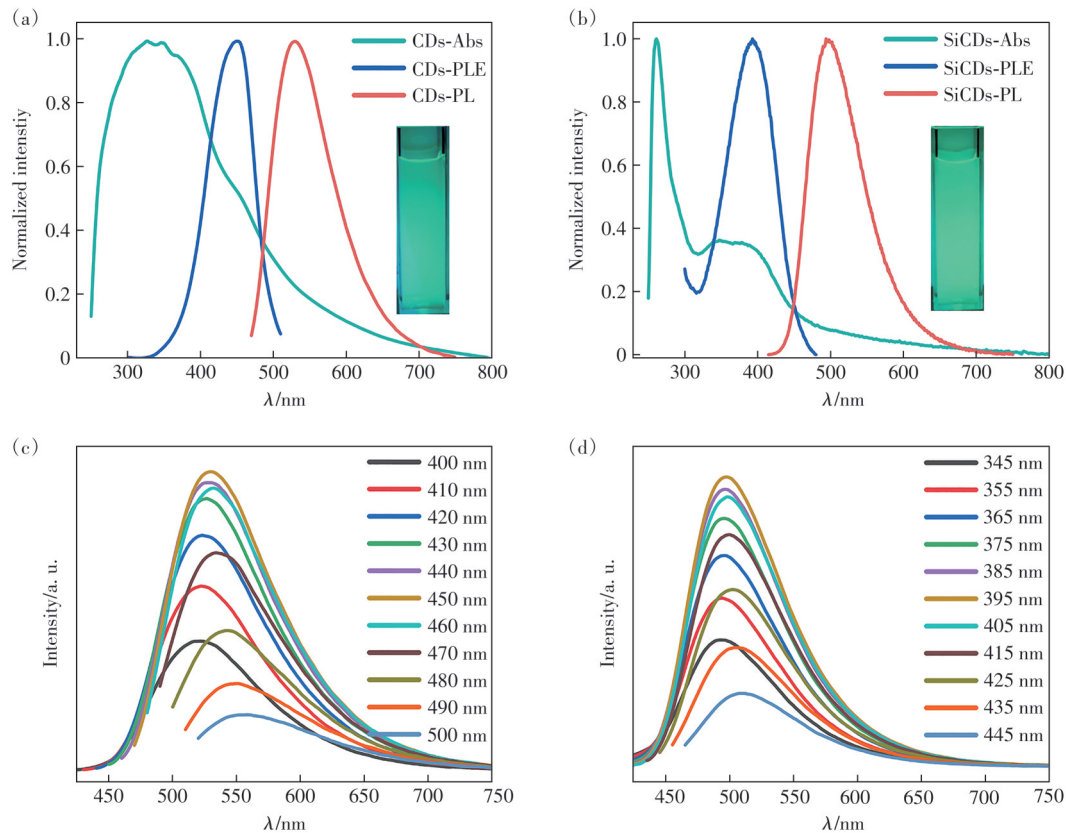


图3 (a)CDs和(b)SiCDs的紫外-可见吸收、激发和发射光谱;(c)CDs和(d)SiCDs不同激发波长的发射光谱

Fig.3 Ultraviolet-visible absorption, excitation and emission spectra of (a)CDs and (b)SiCDs. Emission spectra of (c)CDs and (d)SiCDs at different excitation wavelengths

子结构,进而影响了其发光性能。此外,图 3(c)、(d)分别呈现了 CDs 和 SiCDs 的发射光谱的激发依赖关系。相较于 CDs, SiCDs 似乎表现出更强的激发不依赖特性,这不仅与碳点中多发射中心的电子跃迁机制密切相关^[18],更进一步说明了两种碳点不尽相同的表面结构。

3.2 碳点和 PVA 复合材料的形状记忆性能

基于碳点丰富的表面官能团及优异的光学特性,我们制备了 PVA/CDs 形状记忆复合材料,并对其水致形状记忆行为进行了研究。通过实验得到最佳碳点含量的 PVA/CDs 复合材料,并控制碳点含量一致得到 PVA/SiCDs 复合材料。为了探究碳点

对 PVA 在水中的形状记忆性能,我们对比研究了 PVA、PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 复合材料的形状记忆性能。采集了三者温度为 25 °C 去离子水中的形状恢复过程的图片,如图 4 所示。纯 PVA 薄膜因过度溶胀导致形状恢复率仅为 78%(420 s);相比于纯 PVA, PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 分别仅需 160 s 和 135 s 即可完全恢复其原始形状。这种显著的性能提升源于水分子与复合材料之间的竞争性氢键作用^[9]。结果表明,将 CDs 与 SiCDs 分散在 PVA 中均可提升复合材料的形状记忆恢复时间。值得注意的是, PVA/SiCDs 展现出更快的恢复动力学,暗示通过硅掺杂该复合物中可能引入了额外的增强机制。

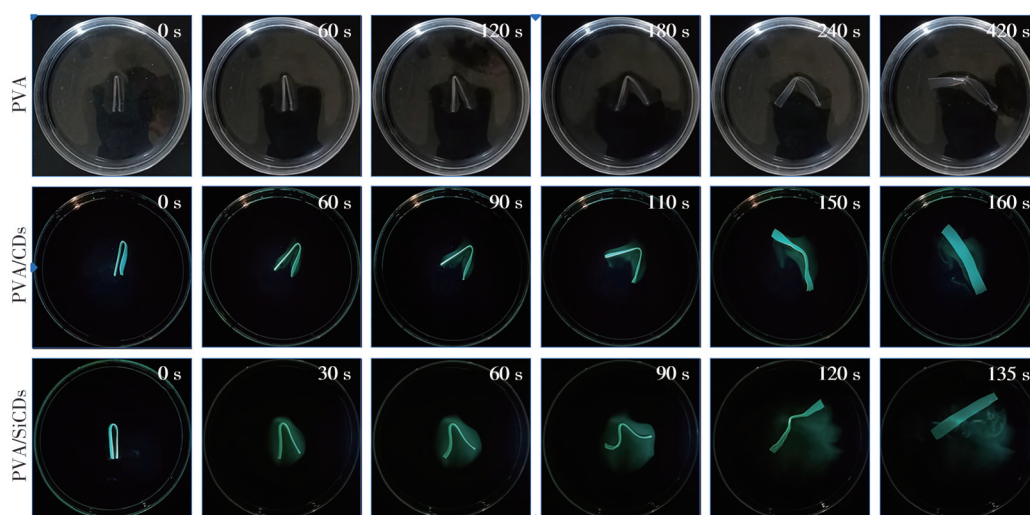


图 4 PVA、PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 复合材料形状恢复过程的图片

Fig.4 Photos of the shape recovery process of PVA, PVA/CDs and PVA/SiCDs composites

为了揭示 PVA 与 CDs 之间的相互作用,对 PVA、PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 复合材料进行了 FT-IR 光谱测试。如图 5(a)所示, PVA 的 O—H 键伸缩振动吸收峰位于 3 287 cm^{-1} 。加入 CDs 后, PVA/

CDs 复合材料中 O—H 键伸缩振动峰向低波数偏移(从 PVA 谱中的 3 287 cm^{-1} 降低到 PVA/CDs 谱中的 3 256 cm^{-1})。该结果证实了 CDs 和 PVA 之间存在额外的氢键,大量的物理交联点有助于减少

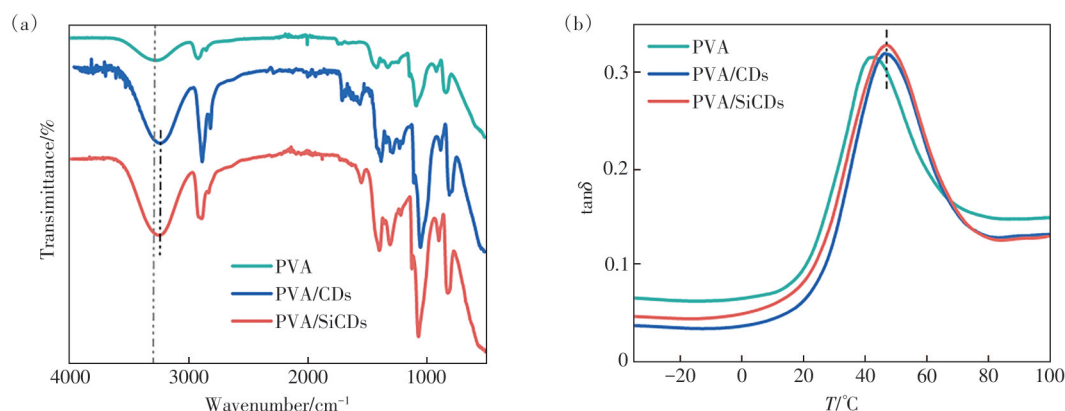


图 5 PVA、PVA/CDs、PVA/SiCDs 的(a)傅里叶红外光谱和(b)DMA($\tan\delta$ 随温度的函数)

Fig.5 (a)Fourier infrared spectra and (b)DMA(function of $\tan\delta$ with temperature) of PVA, PVA/CDs, and PVA/SiCDs

链滑移,从而有助于快速恢复形状记忆行为^[9]。此外,采用动态热机械分析(DMA)测定了三者的热力学性能。如图 5(b)所示,CDs 的引入使复合材料的玻璃化转变温度 T_g (以最大 $\tan\delta$ 的峰值位置确定)显著提高(从 PVA 中的 42.5 °C 增加到 PVA/CDs 中的 46.9 °C),表明 CDs 可以通过界面相互作用加速 PVA/CDs 复合材料的形状记忆速率^[20]。值得注意的是,尽管 PVA/SiCDs 与 PVA/CDs 具有相近的氢键作用强度和 T_g 值(图 5(a)、(b)),但其形状记忆性能明显更优,暗示存在其他作用机制。

3.3 SiCDs 诱导的光热效应对 PVA 基复合物形状记忆性能的影响

众所周知,温度是影响形状记忆性能的重要因素^[21-22]。我们对 PVA/SiCDs 在不同温度下的形状记忆性能进行了探究。如图 6 所示,当温度为

25 °C 时,PVA/SiCDs 用时 135 s 可完全恢复其原始形状;温度升高到 30 °C,PVA/SiCDs 的形状恢复时间减少到 97 s;当温度进一步升高到 35 °C 时,仅用时 79 s 即可完全恢复到其原始形状。可见,随着温度升高,形状记忆性能有明显的提高。这是因为升高环境温度可加速分子链段运动,从而提高恢复速率。考虑到碳点的光热转换特性^[23],猜测 PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 优异的形状记忆性能不仅与氢键有关,而且可能与温度有关。通过图 S3 对比 CDs 和 SiCDs 拉曼光谱(Raman spectra),发现 CDs 的 G/D 值(G 和 D 峰的强度比)大于 SiCDs,表明硅元素的引入使碳点缺陷程度增大,导致碳点把更多的光转换为热,从而使 PVA/SiCDs 表现出更优的形状记忆性能。该结果也证明了 SiCDs 激发光谱和发射光谱蓝移是缺陷态存在的原因。

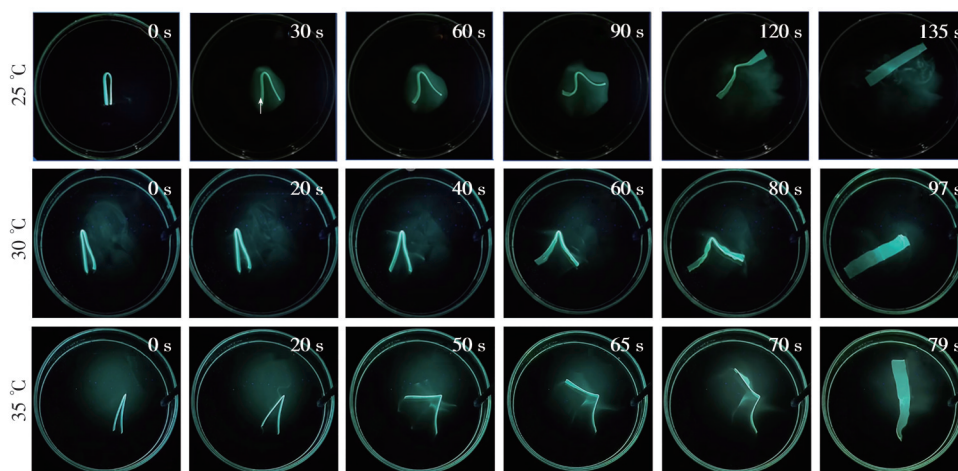


图 6 PVA/SiCDs 复合材料在不同温度下形状恢复过程的照片

Fig.6 Photos of the shape recovery process of PVA/SiCDs composites at different temperatures

为了证明上述猜测,研究了温度随光照时间的变化规律。如图 7(a)所示,纯 PVA 随着光照 ($100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 时间的增加,温度几乎不变。引入 CDs 后,PVA/CDs 随着光照时间的增加,温度不断升高。相比于 PVA/CDs,PVA/SiCDs 在光照下产生更显著的温度跃升。为了更精确地展示温度变化,监测了样品在不同时间光照下的升温情况(图 7(b)),在 PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 体系中,温度 and 时间的依赖性不同。PVA/CDs 表面温度在 40 s 内由 28 °C 升高到 40.9 °C,在 100 s 内进一步升高稳定在 42.1 °C。相比之下,PVA/SiCDs 表面温度在 40 s 内由 28 °C 升高到 42.8 °C,在 100 s 内进一步升高稳定在 44.2 °C,比 PVA/CDs 表面温度高

2.1 °C。上述分析结果证实了我们的猜想。为了进一步检验硅掺杂对促进碳点光热转换的贡献,对样品的吸收和光致发光(PL)性能进行了测试。显然,与 PVA/CDs 相比,PVA/SiCDs 表现出更强的可见光吸收(图 7(b)),这对于增强光热转换至关重要^[24]。图 7(c)为 365 nm 波长激发的 PL 发射光谱,对应于最佳吸收峰。值得注意的是,PVA/SiCDs 的 PL 强度比 PVA/CDs 弱,表明其电子与空穴复合产生的光激发辐射受到抑制^[25]。这些结果清楚地表明,硅元素的掺杂增强了光吸收,促进了光激发载流子的非辐射重组,极大地促进了碳点的光热转换,进而提高形状记忆性能。最后,对 PVA/SiCDs 复合材料形状记忆性能进行了重复性

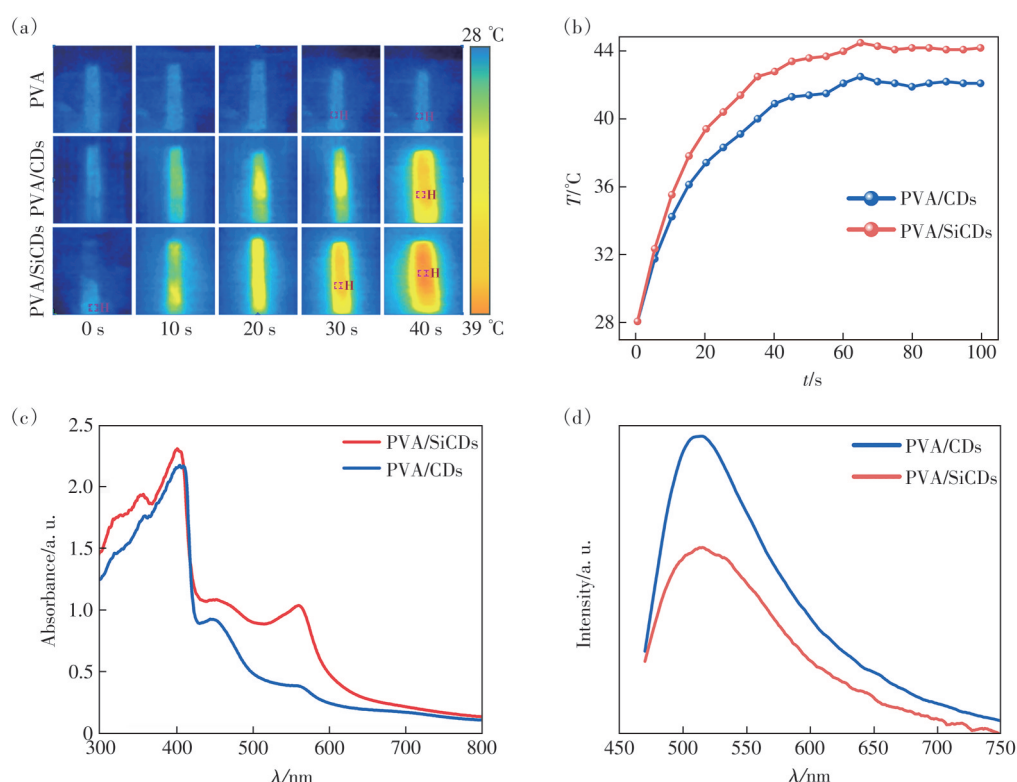


图 7 (a)PVA、PVA/CDs、PVA/SiCDs 在模拟太阳光下的近红外热成像照片;(b)模拟太阳光下 PVA/CDs、PVA/SiCDs 表面温度随照射时间的变化;PVA/CDs 和 PVA/SiCDs 的吸收(c)和发射(d)光谱

Fig.7 (a)Near-infrared thermal imaging photos of PVA, PVA/CDs and PVA/SiCDs under simulated sunlight. (b)Surface temperatures of PVA/CDs and PVA/SiCDs with exposure time under simulated sunlight. Absorption(c) and emission(d) spectra of PVA/CDs and PVA/SiCDs

和稳定性评估。从图 S4 中可以看出,经过四次重复性实验,发现 PVA/SiCDs 复合材料恢复时间相比于第一次 135 s 并没有明显增加,从而证明该形状记忆材料具有很好的循环稳定性。

4 结 论

本研究开发了一种基于 PVA/硅掺杂碳点复合体系的新型光响应形状记忆材料。实验表明,碳点的引入通过与 PVA 间的氢键作用显著增强了材料的形状记忆效应,而硅元素掺杂的碳点通过增强复合材料的光热转换效率,进一步提升了

复合材料的形状记忆性能。该光-热转化机制使得 PVA/SiCDs 复合材料在光照下的形状恢复速度相较于纯 PVA 提升了 3 倍左右,且在水中仍能保持优异的形状恢复性能。该研究不仅突破了传统 PVA 材料水响应效率较低的限制,更为开发具有多重刺激响应能力的智能材料体系提供了实验依据和技术路径。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250157>

参 考 文 献:

- [1] MING G Q, LI F F, XU M M, *et al.* Shape memory cyclic behavior and mechanical durability of woven fabric reinforced shape memory polymer composites [J]. *Compos. Sci. Technol.*, 2024, 258: 110866.
- [2] YADAV A, SINGH S K, DAS S, *et al.* Shape memory polymer and composites for space applications: a review [J]. *Polym. Compos.*, 2025, doi: 10.1002/pc.29707.
- [3] DU J L, ZHANG W L, YANG W B, *et al.* Study of shape memory mechanism and performance of shape memory polyurethane prepared based on tetrahydrofuran [J]. *J. Mol. Struct.*, 2024, 1302: 137484.
- [4] YANG P, ZHU Z Q, LI X H, *et al.* Facile synthesis of yellow emissive carbon dots with high quantum yield and their

- application in construction of fluorescence-labeled shape memory nanocomposite [J]. *J. Alloy. Compd.*, 2020, 834: 154399.
- [5] ZHAO W, ZHANG A P, LI X K, *et al.* Novel flexible polyether segment polybenzoxazine shape memory nanocomposites reinforced by incorporating functionalized carbon nanotubes [J]. *Compos. B Eng.*, 2025, 292: 112104.
- [6] ZHANG Y Q, YANG Y Z, DING S R, *et al.* Exploring carbon dots for biological lasers [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(16): 2418118.
- [7] SHI Y G, YANG X Y, ZHANG Y Q, *et al.* pH-induced synergistic changes in color and shape of soft actuator based on degradable carbon dots/sodium alginate gel [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2025, 351: 123112.
- [8] YANG G H, WAN X J, LIU Y J, *et al.* Luminescent poly(vinyl alcohol)/carbon quantum dots composites with tunable water-induced shape memory behavior in different pH and temperature environments [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(50): 34744-34754.
- [9] WU S S, LI W, SUN Y Q, *et al.* Facile fabrication of a CD/PVA composite polymer to access light-responsive shape-memory effects [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(26): 8935-8941.
- [10] LV J S, GUO S K, HE Y B. Modification strategies of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ceramic electrolyte for high-performance solid-state batteries [J]. *Tungsten*, 2021, 3(3): 260-278.
- [11] YANG H M, DONG J G, GAO X N, *et al.* Modulating built-in electric field *via* N-doped carbon dots for robust oxygen evolution at large current density [J]. *Small*, 2025, 21(13): 2410399.
- [12] YU Y, TAO S Y, ZENG Q S, *et al.* Sulfur-doped carbonized polymer dots: a biocompatible photocatalyst for rapid aqueous PET-RAFT polymerization [J]. *Carbon Energy*, 2025, 7(3): e686.
- [13] SUN Z S, ZHOU W Y, LUO J B, *et al.* High-efficient and pH-sensitive orange luminescence from silicon-doped carbon dots for information encryption and bio-imaging [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2022, 607(Pt 1): 16-23.
- [14] 白静静, 许凤利, 李鹏炬, 等. 折射率对碳点基发光太阳能聚光器光电性能的影响 [J]. *发光学报*, 2024, 45(10): 1724-1731.
- BAI J J, XU F L, LI P J, *et al.* Effect of refractive index on photoelectric properties of carbon dots-based luminescent solar concentrator [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(10): 1724-1731. (in Chinese)
- [15] GONG X, ZHENG S Y, ZHAO X J, *et al.* Engineering high-emissive silicon-doped carbon nanodots towards efficient large-area luminescent solar concentrators [J]. *Nano Energy*, 2022, 101: 107617.
- [16] WANG Y L, HUANG G H, YAN Z S, *et al.* Solvent-regulated multicolor-emissive carbon dots and their application in multicolor light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(37): 15051-15057.
- [17] 刘子江, 苗润泽, 任卫杰, 等. 氮和硼元素共掺杂对碳点荧光的调控机制 [J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1981-1989.
- LIU Z J, MIAO R Z, REN W J, *et al.* Regulations of N and B co-doping on carbon dots fluorescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 1981-1989. (in Chinese)
- [18] ZHOU M J, XU S, ZHANG W J, *et al.* How luminescence performances of silicon-doped carbon dots contribute to copper-catalyzed photoATRP? [J]. *ACS Catal.*, 2024, 14(14): 10418-10426.
- [19] WU S S, LI W, ZHOU W, *et al.* Large-scale one-step synthesis of carbon dots from yeast extract powder and construction of carbon dots/PVA fluorescent shape memory material [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(7): 1701150.
- [20] ZHU Z Q, YANG P, CHEN M Z, *et al.* Microwave synthesis of amphiphilic carbon dots from xylose and construction of luminescent composites with shape recovery performance [J]. *J. Lumin.*, 2019, 213: 474-481.
- [21] MING G Q, XU M M, LI F F, *et al.* Effects of woven textures on the mechanical and shape memory properties of epoxy-based shape memory polymer composites [J]. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2025, 194: 108885.
- [22] LIU Q S, RUAN Y F, LING Z, *et al.* Photo-thermal dual responsive shape memory MOF derived carbon/EVA composites with radar wave stealth [J]. *Carbon*, 2025, 234: 119976.
- [23] ZHANG W, CHANG Q, XUE C R, *et al.* A gelation-stabilized strategy toward photothermal architecture design for highly efficient solar water evaporation [J]. *Sol. RRL*, 2021, 5(5): 2100133.
- [24] LIU C T, SU J W, CHANG Q, *et al.* Electricity-boosted solar-to-vapor conversion upon fiber-supported CDs@CuS for rapidly vaporizing seawater [J]. *Sol. RRL*, 2022, 6(8): 2200170.

- [25] CHANG Q, SHEN Z H, GUO Z Y, *et al.* Hydroxypropylmethyl cellulose modified with carbon dots exhibits light-responsive and reversible optical switching [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(10): 12375-12382.



任卫杰(1992-),男,山西运城人,博士,讲师,2022年于中北大学获得博士学位,主要从事新型发光材料的制备及应用的研究。

E-mail: 2023006@tyust.edu.cn



秦振兴(1982-),男,山西长治人,博士,教授,博士生导师,2013年于华南理工大学获得博士学位,主要从事新型发光材料制备及器件开发的研究。

E-mail: qinzx@tyust.edu.cn