高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

基于分子交联网络调控的定形相变水凝胶与性能

李春琳，罗程敏，侯德旺，徐宇泽，李成杰

（江苏海洋大学 环境与化学工程学院，江苏 连云港 222005）

摘要：相变水凝胶由于其能够在吸收-释放热量的同时保持形状稳定的良好性能，是当今电子器件进行热管理应用时可供选择的一类重要材料。聚乙二醇（PEG）具有适宜的相变温度、高储能容量和优异的水溶性及良好的化学稳定性，可作为理想的相变储能材料，但存在易泄露、导热低的问题。本文采用冷冻-解冻物理交联法制备聚乙烯醇（PVA）/PEG 相变水凝胶，利用 PVA 的网络结构封装 PEG，通过 PVA 与 PEG 之间的氢键作用形成紧密的分子交联网络，实现相变水凝胶的形状稳定性、高相变焓和优异的力学性能。结果表明，相变水凝胶在 80 ℃下加热无泄漏，相变焓可达 63 J/g，相变水凝胶的力学强度达 8 MPa，干燥后干胶的力学强度增强至 15 MPa，并可明显降低电子器件的发热温度。该方法为设计性能优异的相变水凝胶及热管理应用提供了新的思路。

关键词：聚乙烯醇；聚乙二醇；相变；水凝胶；热管理

随着后摩尔时代的到来，电子元器件不断向微型化、高速化和高集成度方向发展，由此引发的“热障”问题日益严峻[1]，严重影响电子设备的稳定性、可靠性和服役寿命。研发高效的热管理材料以及技术，已成为当下电子领域迫切解决的关键问题。相变材料（Phase change materials, PCMs）具备在特定温度或者温度区间内发生相态转变的特性，能够在近似恒温条件下吸收或者释放大量潜热，同时保持温度恒定，这种特性使得相变材料在电子元件热管理中发挥着极其重要的作用，为解决电子元件的散热难题提供了有效的解决方法。

相变水凝胶属于一种特殊的水凝胶材料，具有宽温度响应范围、优异的热循环可逆性及材料结构可设计性，其在特定条件之下会出现相转变，并伴随能量的吸收或者释放现象[2]，使其在生物组织、温度调控、能量转换等方面有着广泛的应用潜能[3~5]。针对相变水凝胶，近年来相关研究团队在相变水凝胶的制备、性能及机理方面进行了研究。Zhou 等[6]以海藻酸钠（SA）、羧甲基壳聚糖（CMCS）为基体，选用丙烯酰胺（AM）、蒙脱土（MMT）、新戊二醇（NPG）作为单体，在交联剂与引发剂协同作用下，成功制备出一种力学性能优异、简单高效的隔热相变水凝胶，可用于减轻锂离子电池热失控传播。Lei 等[7]以 MOF 衍生的 ZrOx/多孔碳为太阳能-热转换材料、PEG 为相变材料，PVA 为支撑基质，通过共聚反应制备了具有良好热管理性能、高效水传输能力和出色抗太阳能波动性能的相变水凝胶（MHG），解决了传统太阳能蒸发器在太阳能波动环境下难以维持高效热蒸发的问题。李宁[8]以壳聚糖（CS）作为基体，添加聚乙二醇（PEG）后得到 CS/PEG 水凝胶，PEG 添加量越高，储热保温效果越好，可应用于农业大棚和建筑物隔热层，调节内部温度。闫博康等[9]通过聚丙烯酰胺（PAM）和海藻酸钠（SA）双网络水凝胶包覆 $Na_2SO_4·10H_2O$ 制备的复合相变水凝胶，相变温度

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0130
收稿日期：2025-09-05
基金项目：连云港市花果山英才“双创计划”（LYGBSH2025012）；中国博士后科学基金（2024M751205）；江苏省高校自然科学基金面上项目（21KJB430028）
通讯联系人：李成杰，主要从事功能橡胶弹性体、导热高分子研究，E-mail: licj_poly@jou.edu.cn

范围为 30～45 ℃，具有较高的热导率、良好的形状稳定性和出色的控温性能，500 次热循环后相变潜热和温度均保持稳定，可应用于中低温热能存储系统，如小型冷链设备，维持低温环境，减少能耗。

聚乙二醇（PEG）作为一种典型的有机相变材料，具有相变潜热高、相变温度范围宽、化学稳定性良好、无毒无害等优点[10]，在热管理领域呈现出了巨大的应用潜力。然而 PEG 在相变过程中会从固态转变为液态，其流动性容易引发泄露问题，对材料的使用安全性造成了极大影响[11]，限制了其在实际热管理中的应用。对聚乙二醇相变材料进行封装，研发新型复合相变储能材料，平衡泄漏、蓄热性能和导热效率之间的矛盾，成为了亟需突破的技术难题。聚乙烯醇（PVA）是一种常见的水凝胶载体，具有优异的机械强度以及化学稳定性，且无毒、无害[12]，其分子链上大量的羟基赋予其良好的亲水性以及交联能力[13-15]。将 PVA 用于封装 PEG，可有效地限制 PEG 分子的自由移动，防止其出现泄露，同时还可为复合材料提供良好的力学性能。

基于此，本文以 PVA 水凝胶为载体，将 PEG 水溶液与 PVA 水溶液充分混合，借助 PEG 与 PVA 分子链之间的氢键作用，采用冷冻-解冻物理交联法制备 PVA/PEG 相变水凝胶，研究相变水凝胶的化学结构、微观形貌及相互作用，分析相变水凝胶的力学性能、相变性能及形状稳定性，研究其热量存储和释放能力，揭示基于分子作用的定型相变水凝胶的性能特点与作用机制，并将其应用于模拟电子元件散热场景，评估实际热管理效果，为其在热管理领域的进一步优化和应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚乙烯醇（PVA1799，聚合度 1700，醇解度 99%），分析纯，上海毕得医药科技股份有限公司；聚乙二醇 6000（PEG 6000），分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司。其它试剂均为市售。

集热式恒温加热器磁力搅拌器（DF-101S），杭州旌斐仪器科技有限公司；电动鼓风干燥箱（DH9070A），上海一恒科学仪器有限公司；真空干燥箱（DZF6050），上海一恒科学仪器有限公司；电子天平（CP214），赛多利斯科学仪器有限公司；傅立叶变换红外光谱仪（NICOLET iS10），美国赛博飞世尔公司；差示扫描量热仪（DSC214），德国 NETZSCH 公司；X 射线衍射仪（RigakuD/maxIIIB），日本理学株式会社；扫描电子显微镜（JEOL JSM-5900LV），日本电子株式会社；电子万能拉伸机（Z2005），德国 Zwick/Roell 公司；冷冻干燥机（BILON-FD80AE），中国上海比朗仪器制造有限公司。

1.2 实验过程

精确称量 20 g 聚乙烯醇（PVA），将其置于 250 mL 三口烧瓶中，加入 80 mL 去离子水，在 95℃恒温水浴环境下，使用电动搅拌器持续搅拌 2 h，制得质量分数为 20 %的 PVA 水溶液。向上述溶液中分别添加 10 g、20 g、30 g、40 g 数均分子量为 6000 的聚乙二醇（PEG 6000），继续搅拌 0.5 h 以确保混合均匀，然后转移至定制模具中，于-16 ℃低温环境冷冻 20 h，随后在室温条件下自然解冻，冷冻-解冻循环 1 次后成功制得系列 PVA/PEG 相变水凝胶。为后续测试需要，将相变水凝胶置于冷冻干燥机中干燥，备用。

1.3 测试与表征

1.3.1 化学结构表征：采用傅立叶变换红外光谱仪分析相变水凝胶的结构组成，扫描速度为20 min^{-1}，分辨率为4 cm^{-1},通过光谱特征峰判断PVA与PEG之间的相互作用及样品的化学结构特征。

1.3.2 相变性能分析：采用差示扫描量热仪分析样品的相变焓，温度范围为20~100 ℃，升降温速率为10 K/min，全程采用氮气气氛保护，避免样品氧化，精准获取样品的相变热学参数。

1.3.3 结晶结构分析：采用X射线衍射仪分析样品的衍射峰，扫描范围为2θ=5~60°，λ=0.154 nm，通过衍射峰的位置、强度及半高宽，分析样品的晶体结构、结晶度及晶粒尺寸特征。

1.3.4 微观形貌表征：采用扫描电子显微镜观察样品的低温脆断形貌，测试前先对样品进行喷金处理，喷金薄层厚度控制在1~20 nm，随后在15 kV的加速电压下进行观察，清晰呈现样品的内部微观结构及孔隙特征。

1.3.5 力学性能测试：采用万能材料试验机对样品进行拉伸性能测试，拉伸速率为500 mm/min，通过测试获取样品的拉伸强度、断裂伸长率等力学参数，评价其机械性能优劣。

1.3.6 热响应性能测试：采用红外热成像仪对样品进行热流响应性能测试，实时捕捉样品表面的温度变化并拍照记录，分析样品在热作用下的温度分布及热响应速率，评价其热管理相关性能。

1.3.7 泄露性能分析：将PVA/PEG相变水凝胶置于80 ℃烘箱中，分别在5 min、10 min、15 min、20 min四个时间节点观察样品的外观形态及泄漏情况，直观评价样品的高温定型稳定性。

2 结果与讨论

2.1 PVA/PEG相变水凝胶的制备与结构分析

PVA水凝胶由于其具备独特的三维网状结构，同时具有良好的亲水性和柔韧性，可以用来作为封装相变材料的理想载体。Fig.1为PVA/PEG相变水凝胶的制备过程，在物理交联过程中，PEG的线性分子链结构与PVA三维网状结构相互穿插交织，通过氢键、范德华力等分子间作用力形成物理交联点，将PVA与PEG分子链稳固连接形成稳定的互穿网络结构。PVA水凝胶三维网状结构提供了骨架支撑，还增强了其保水能力和力学性能，使得PVA/PEG相变水凝胶具备优异的性能。本实验选择PEG 6000作为相变组分，一方面PEG 6000的链长适中，能够在PVA基体中提供足够多的醚氧原子（-O-）以形成有效氢键，同时其分子量不至于过大，避免了链段运动能力下降导致的相容性降低问题；另一方面，PEG 6000具有较为合适的结晶/熔融温度范围，具有较高的相变焓。因此，选用PEG 6000在氢键增强、相变性能与材料加工性之间取得平衡。

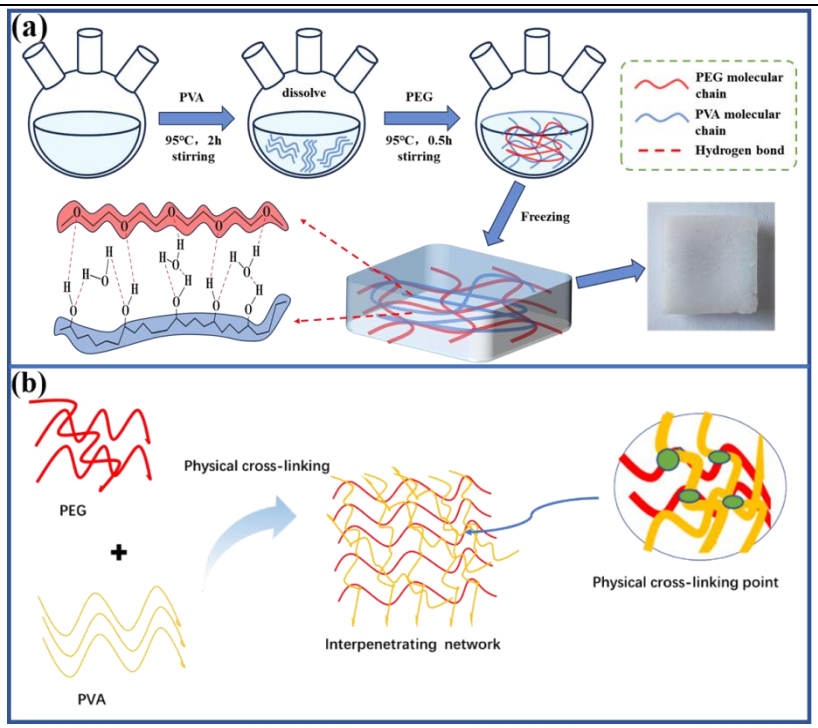


Fig. 1 (a) Preparation of PVA/PEG phase change hydrogel; (b) schematic diagram of the physical crosslinking mechanism of PVA/PEG

Fig.2(a)为 PEG、PVA 及 PVA/PEG 相变水凝胶的红外光谱，可以看出，对于 PEG，在 2895.15 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 C-H 键的伸缩振动，1105.21 cm^{-1} 处吸收峰归属于 PEG 分子中 C-O 键的伸缩振动。对于 PVA，3279 cm^{-1}、2895.11 cm^{-1}、1100.31 cm^{-1} 处的吸收峰分别归属于 O-H 伸缩振动、C-H 伸缩振动和醇羟基 C-O 伸缩振动。对于 PVA/PEG，3279 cm^{-1} 处的吸收峰变宽，PEG 与 PVA 羟基形成分子间氢键，导致 O-H 键长变长、键能降低，振动频率减小，红外吸收峰向低波数方向移动（即发生红移）；同时，氢键网络改变了 O-H 键振动的偶极矩，导致峰宽化。2893 cm^{-1} 处的吸收峰发生红移，虽然 C-H 键本身不直接参与氢键形成，但 PVA 与 PEG 形成氢键导致分子间相互作用增强，分子链的构象和堆积方式改变，间接影响 C-H 键振动时的电子云分布和分子间作用力情况改变。在 1000~1150 cm^{-1} 范围内，PVA/PEG 复合材料的峰发生峰位红移、峰数增多及强度改变，对应 PEG 的 C-O-C 峰（1105 cm^{-1}）红移至 1100~1104 cm^{-1}，同时对应 PVA 的 C-O 峰向低波数偏移，证明了 PVA 与 PEG 之间存在分子间氢键作用。PEG、PVA 和 PVA/PEG 相变水凝胶的 XRD 谱图如 Fig.2(b)所示。可知，纯 PEG 在 16°和 21°左右处显示出两个强烈的尖锐衍射峰，PVA 属于半晶高分子，在 20°左右处出现对应其（101）晶面的衍射峰，结晶区域由强氢键网络组成。对于 PVA/PEG，在 20°和 25°处出现明显衍射峰，衍射峰的偏移主要是因为 PVA 和 PEG 之间氢键的形成导致界面形成新的有序结构，而在 16°处对应 PEG 的衍射峰消失，氢键作用导致 PEG 分子链运动受到限制。同时，与 PEG 和 PVA 相比，PEG/PVA 的衍射峰强度明显降低，表明其结晶度下降。

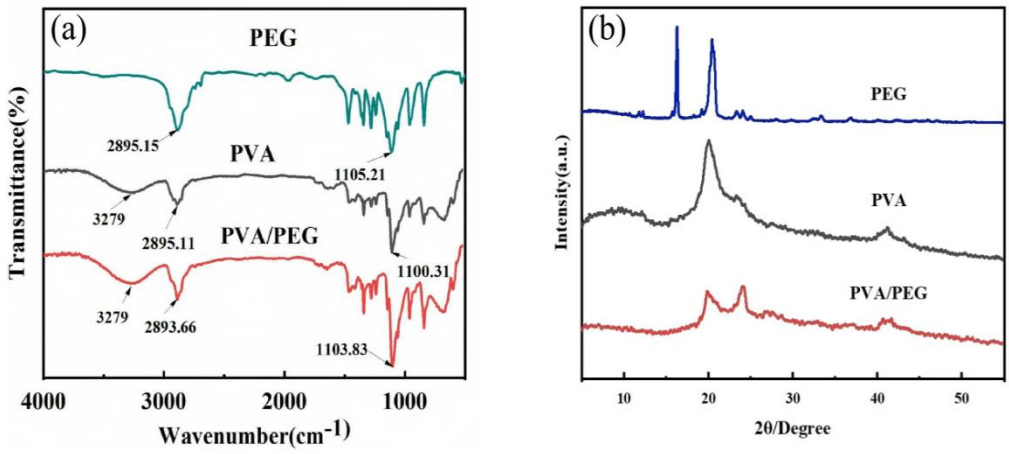


Fig. 2 (a) FT-IR spectra of PEG, PVA and PVA/PEG composite phase change hydrogels; (b) XRD patterns of pure PEG, pure PVA and PVA/PEG composite phase change hydrogels

2.2 PVA/PEG 相变水凝胶的定形能力及相变性能

由于 PVA 水凝胶能够通过自身的网状结构将 PEG 相变材料封装，可以通过动态泄露实验探究 PVA/PEG 相变水凝胶的形状稳定性。如 Fig.3 所示，将 PEG 与 PVA/PEG 相变水凝胶置于 80 ℃恒温烘箱中进行加速泄漏测试（该温度较 PEG 的相变温度高 25 ℃，可有效模拟材料在过热条件下的实际工况）。通过 5 min、10 min、15 min、20 min 四个时间节点进行观测。可以看到，纯 PEG 在 5 min 时即发生完全固-液相变，熔融液相在表面张力作用下形成液滴并沿基底铺展，至 20 min 时全部熔化泄露。而 PVA/PEG 相变水凝胶在相同条件下始终维持结构完整性，未发生泄露现象。这是因为通过冷冻-解冻法制备的 PVA/PEG 相变水凝胶形成了物理交联网络，PVA 与 PEG 之间具有氢键作用，同时 PVA 水凝胶网络较好封装 PEG，使得 PEG 在高于相变温度时，能够有效束缚在复合材料中，不发生泄露，展现出良好的抗泄露性能。

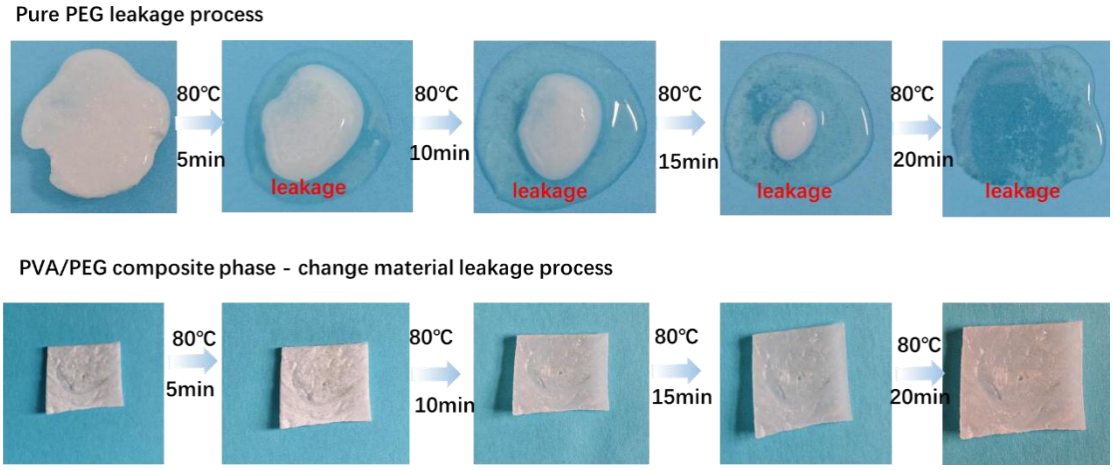


Fig. 3 Leakage experiments for pure PEG and PEG/PVA phase change hydrogel at 80 ºC

Fig.4(a)为 PVA/PEG 相变水凝胶的相变性能，可以看出，随 PEG 含量增加，相变焓呈现上升趋势，相变储能性能提升，相变焓可达 62 J/g，优于文献报道的相变水凝胶的相变焓。Fig.4(b)为 PVA/PEG30 相变水凝胶循环 20 次的 DSC 曲线图，可以看出，相变循环后的熔融焓、结晶焓无明显变化，表明 PVA/PEG 相变水凝胶在热循环后能够保持良好的热循环稳定性和形状稳定性。PVA 水凝胶作为基体，能够通过自身网络结构以及与 PEG 之间的氢键作用封装 PEG，有效解决了相变材料

的泄露问题，证明了水凝胶封装相变材料的可行性，为相变水凝胶的循环使用提供了方法[16]。

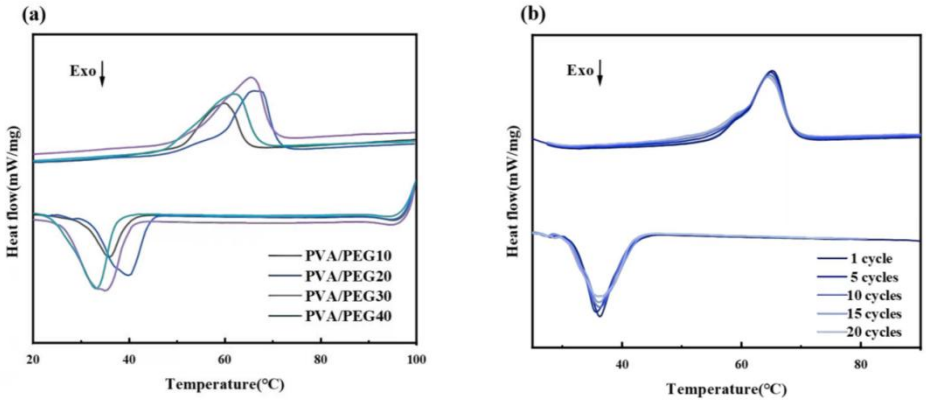


Fig. 4　(a) DSC curves of PVA/PEG phase change hydrogels with different mass fractions of PEG; (b) DSC cyclic curves of the PVA/PEG30 phase change hydrogel

2.3　PVA/PEG 相变水凝胶的力学性能

Fig.5(a,c)为不同质量 PEG 的 PVA/PEG 相变水凝胶的应力-应变曲线和力学性能柱状图，可知，随着 PEG 的加入，相变水凝胶的拉伸强度逐渐增加，PEG 通过氢键与水分子及 PVA 相互作用，均匀分散在 PVA 网络中，相容性较好，相变水凝胶的力学性能较 PVA 水凝胶明显改善，PVA/PEG40 相变水凝胶的拉伸强度达 8 MPa 以上，断裂伸长率仍保持较高水平。Fig.5(c,d)为 PVA/PEG 相变水凝胶干燥后的应力-应变曲线和循环拉伸测试结果，可以发现干燥后的 PVA/PEG 相变材料力学强度急剧增加，干燥后水分流失，PVA 链间以及 PEG 与 PVA 之间的氢键作用增强，形成更致密的网络，导致力学强度增加。在循环拉伸测试中，干燥后的 PVA/PEG 复合相变材料的应力随循环次数增加逐渐降低。这是由于 PVA 基体依靠分子间氢键形成物理交联网络，循环载荷下部分氢键发生断裂，且 PVA 与 PEG 两相界面逐步产生微损伤与界面脱黏，应力承载能力下降。但 PEG 的增塑作用赋予 PVA 链段一定的滑移能力，高分子主链骨架未发生大规模断裂，因此，材料在多次循环后仍维持较高的可拉伸性。

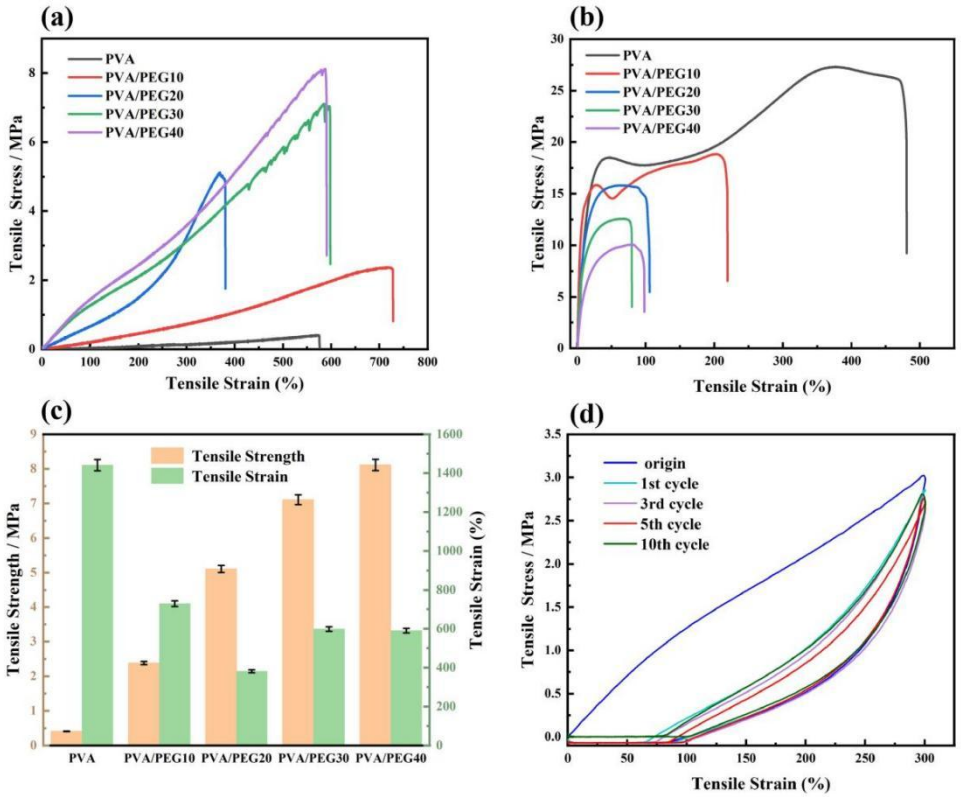


Fig. 5　(a) Tensile stress-strain curves of PVA/PEG hydrogels with varied PEG contents；(b) tensile stress-strain curves of dried PVA/PEG composites；(c) tensile strength and elongation at break of PVA/PEG hydrogels with varied PEG contents；(d) cyclic tensile stress-strain curves of dried PVA/PEG composites

将 PVA/PEG 相变水凝胶裁剪成长方形，两端用夹子夹住，下方用 100 g 砝码挂住，探究其加热前后的变形情况，如 Fig.6(a,b)所示。可以看出，在 25 °C 和 70 °C 下该相变水凝胶均具有良好的弹性，在拉伸变形后能够恢复其原始形状。在 25 °C 下，PVA/PEG 相变水凝胶可以支撑 100 g 砝码的重量，拉伸形变较小；当置于 70 °C 烘箱中加热 1 h，PVA/PEG 相变水凝胶明显软化，在相同载荷下产生更大的拉伸变形，弹性增强。高温下，PEG 发生结晶-熔融相变，分子链活动性及分子链间作用力增强，从而引起力学状态转变。由于相变材料物理状态的变化（固-液或液-固），凝胶体系可以在相变前后能够发生宏观力学模量转变，为按需调控动态力学转变提供了思路。

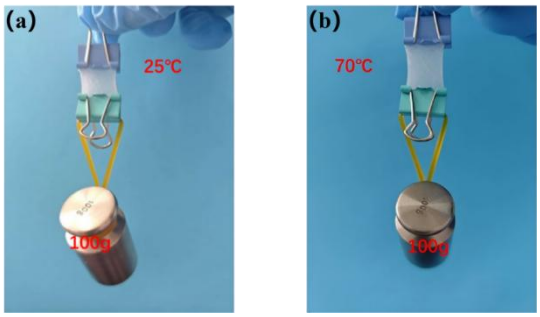


Fig. 6　(a) PVA/PEG phase change hydrogel supporting a 100 g mass at 25 °C; (b) PVA/PEG phase change hydrogel supporting a 100 g mass at 70 °C

将 PVA/PEG30 相变水凝胶冷冻干燥后低温脆断，采用扫描电镜（SEM）观察其断面形貌，如 Fig.7 所示。可以看出，该水凝胶具有三维多孔网络结构，网孔结构较为疏松，但其孔洞大小不一，

形状不规则，孔洞边缘较为粗糙，且凝胶表面还有一些纹理出现，这是因为 PEG 与 PVA 混合后，二者氢键相互作用形成了网络结构，断面呈现粗糙特征，断面处出现的白色颗粒为分散在 PVA 水凝胶基体中的 PEG 组分。

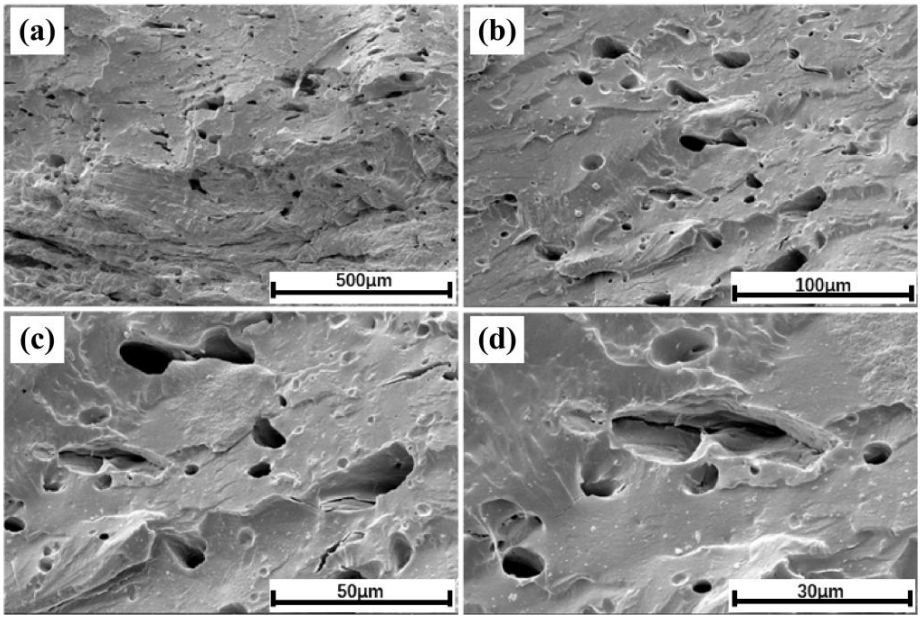


Fig. 7　SEM images of fractured surfaces of the PVA/PEG30 phase change hydrogel

2.4　PVA/PEG 相变水凝胶的热管理应用

为评估 PVA/PEG 相变水凝胶在电子设备热管理中的实际应用潜力，采用红外热成像技术对覆盖与未覆盖该相变水凝胶的发热片进行温升特性测试。如 Fig.8(a,b)所示，将相变水凝胶置于发热片核心区域，在相同加热功率下，升温至 80.5 ℃，未覆盖相变水凝胶的发热片所需时间为 167 s，而覆盖相变水凝胶的发热片所需时间为 442 s，即升温至相同温度，覆盖相变水凝胶的发热片比未覆盖的发热片所需的时间极大延长。PEG 相变组分发生相变时，吸收大量潜热，显著延缓系统温升，同时相变水凝胶会阻碍热量从发热片向周围快速传递。如 Fig.8(c,d)所示，持续加热 210 s 后，未覆盖样品的发热片表面温度急剧升至 89.8 ℃，而覆盖 PVA/PEG 相变水凝胶的发热片表面温度仅为 36.5 ℃（温差达 53.3 ℃）。移除相变水凝胶后，发热片表面温度仍维持在 38.2 ℃，较对照组降低 37.9 ℃，表明材料在吸收热量后并未快速释放，显示出优异的热缓冲性能。持续运行 180 s 后，发热片表面温度稳定在 50.6 ℃，移除相变水凝胶后发热片温度为 52.3 ℃，较未防护状态降低 37.5 ℃。结果表明，PVA/PEG 相变水凝胶通过固-液相变高效吸收并储存热量，延长设备安全工作时间，显示出显著的温控效应，可为相变材料在便携式电子产品、高功率芯片等热管理场景的应用提供了实验依据与设计参考。

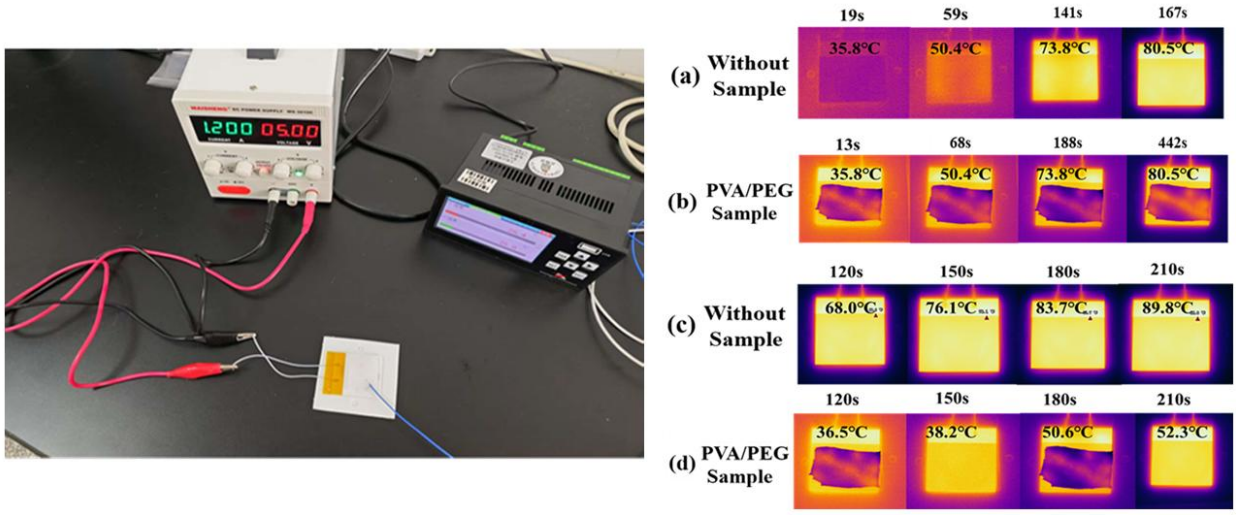


Fig. 8　Infrared thermography of PVA/PEG phase change hydrogel for thermal management in electronic products

3　结论

本文制备的基于分子间作用力调控的 PVA/PEG 定形相变复合水凝胶，通过 PVA 水凝胶三维网络与 PEG 相变组分间氢键和范德华力协同作用，实现了相变功能与结构稳定性提升。该相变水凝胶在 80 ℃加热条件下无任何泄漏现象，可稳定保持宏观形态，相变焓可达 63 J/g，且经过 20 次冷热循环后仍能维持稳定的相变行为。由于分子间氢键作用，该相变水凝胶的力学强度可达 8 MPa，干燥后其力学强度进一步增强至 15 MPa，较纯 PVA 水凝胶显著提升。热管理应用实验证明，PVA/PEG 相变水凝胶通过固-液相变高效吸收热量，在相同运行时间内，可有效降低电子器件的发热温度超 30℃，在电子元件散热领域具有显著的应用前景。

参考文献：

[1] 王天伦, 秦文波, 黄飞, 等.热界面材料可靠性能研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7): 183-190.
Wang T L, Qin W B, Huang F, et al. Progress on research of reliability of thermal interface materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(7): 183-190.

[2] Zhang N, Yuan Y P, Cao X L, et al. Latent heat thermal energy storage systems with solid-liquid phase change materials: a review[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20: 1700753.

[3] 郑勰, 查刘牛. 超快温度响应性纳米纤维水凝胶的制备及其用于药物的可控释放[J]. 材料研究学报, 2020, 34(6): 452-458.
Zheng X, Zha L N. Preparation of ultra-fast temperature responsive nanofibrous hydrogel and application in controllable drug release[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2020, 34(6): 452-458.

[4] 王杰, 李莹, 邵亮, 等. 聚乙烯醇/聚吡咯复合导电水凝胶应变传感器的制备及性能[J]. 高等学校化学学报, 2021, 42(3): 929-936.
Wang J, Li Y, Shao L, et al. Preparation and properties of poly(vinyl alcohol)/polypyrrole composite conductive hydrogel strain sensor[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 42(3): 929-936.

[5] Qi Y, Lu Y, Zhou Q Q, et al. Application of high-performance hydrogels in wearable sensors[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry,2022, 50: 1699-1711.

[6] Zhou G, Huang Q, Zhang Q, et al. Thermal insulation phase-change hydrogel with enhanced mechanical properties for inhibiting thermal runaway propagation in lithium-ion battery module[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 102: 114102.

[7] Lei S, Li Z, Xu H, et al. Phase-change material-integrated hybrid gels for solar steam generation under solar fluctuations[J]. Solar RRL, 2024, 8: 2400051.

[8] 李宁. 壳聚糖水凝胶制备及热管理性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
Li N. Preparation and thermal management properties of chitosan hydrogels[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.

[9] 闫博康, 李林峰, 李元元, 等. SSD/PAM-SA 双网络复合相变水凝胶的制备及热性能研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3369-3375.
Yan B K, Li L F, Li Y Y, et al. Preparation and thermal properties of SSD/PAM-SA dual-network composite phase change hydrogels[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3369-3375.
[10] 全瑞星, 缪文晶, 袁长顺, 等. 聚乙二醇基定型复合相变材料的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(3): 1010-1025.
Quan R X, Miao W J, Yuan C S, et al. Research progress of polyethylene glycol-based structured composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(3): 1010-1025.
[11] 王杰, 王娇娜, 张群, 等.柔性聚乙二醇基相变储能材料的研究进展[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2023, 43(4): 1-10.
Wang J, Wang J N, Zhang Q, et al. Research progress of flexible polyethylene glycol-based phase change energy storage materials[J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition), 2023, 43(4): 1-10.
[12] Soliman T S, Zaki M F, Hessien M M, et al. The structure and optical properties of PVA-$BaTiO_3$ nanocomposite films[J]. Optical Materials, 2021, 111: 110648.
[13] Holloway J L, Lowman A M, Palmese G R. The role of crystallization and phase separation in the formation of physically cross-linked PVA hydrogels[J]. Soft Matter, 2012, 9: 826-833.
[14] Baker M I, Walsh S P, Schwartz Z, et al. A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2012, 100: 1451-1457.
[15] Jiang S, Liu S, Feng W H. PVA hydrogel properties for biomedical application[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2011, 4: 1228-1233.
[16] 符浩, 曹正, 李震, 等. 高导热相变水凝胶的制备及温度响应性[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(5): 144-153.
Fu H, Cao Z, Li Z, et al. Preparation and temperature responsiveness of high thermal conductivity phase change hydrogels[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(5): 144-153.

Shape-Stabilized Phase Change Hydrogel Based on Molecular Crosslinking Network and Its Properties

Chunlin Li, Chengmin Luo, Dewang Hou, Yuze Xu, Chengjie Li
(School of Environmental and Chemical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

ABSTRACT: Phase change hydrogels have emerged as a promising class of materials for thermal management applications in modern electronic devices owing to their ability to absorb and release heat while maintaining structural stability. Polyethylene glycol (PEG) exhibits desirable characteristics such as a suitable phase transition temperature, high energy storage capacity, excellent water solubility, and good chemical stability, making it an ideal phase change energy storage material. However, it suffers from issues like leakage and low thermal conductivity. In this work, polyvinyl alcohol (PVA)/PEG phase change hydrogels were fabricated via the freezing-thawing physical crosslinking method. The PVA network was utilized to encapsulate PEG, and a tightly crosslinked molecular network was formed through the hydrogen bonding between PVA and PEG, endowing the phase change hydrogels with shape stability, high phase change enthalpy and superior mechanical properties. The results demonstrate that the hydrogel exhibits no leakage even when heated at 80 °C, achieves a phase change enthalpy of up to 63 J/g, and possesses a mechanical strength of 8 MPa. After drying, the xerogel shows enhanced mechanical strength reaching 15 MPa. Furthermore, the phase change hydrogel significantly reduces the operating temperature of electronic devices. This work provides a novel strategy for designing high-performance phase change hydrogels and advancing their applications in thermal management.

Keywords: poly(vinyl alcohol); polyethylene glycol; phase change; hydrogel; thermal management