

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180302906

癸酸-棕榈酸-硬脂酸/聚丙烯腈/氮化硼 复合相变纤维膜的传热性能

柯惠珍^{1,2}, 李永贵^{1,2}

(1. 闽江学院 福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室, 福建 福州 350108;

2. 闽江学院 服装与艺术工程学院, 福建 福州 350108)

摘要 为克服癸酸-棕榈酸-硬脂酸(CA-PA-SA)三元低共熔物液相渗漏和导热性能差的问题,以不同质量比的静电纺聚丙烯腈/氮化硼(PAN/BN)复合纳米纤维膜作为支撑材料,通过物理吸附法制备新型CA-PA-SA/PAN/BN复合相变纤维膜,并研究了BN导热纳米粒子对复合相变纤维膜的形貌结构、储热性能以及储热和放热速率的影响。结果表明:添加质量分数为10%的BN导热纳米粒子对制备的CA-PA-SA/PAN/BN复合相变纤维膜的形貌结构没有影响;复合相变纤维膜的融化温度和融化焓值分别为25℃和136.4~138.6 kJ/kg;通过添加具有高导热系数的BN纳米粒子,CA-PA-SA/PAN/BN复合相变纤维膜的整体传热性能增强,储热和放热时间分别缩短了38%和41%。

关键词 复合相变纤维膜; 氮化硼; 癸酸-棕榈酸-硬脂酸三元低共熔物; 储热性能; 传热性能

中图分类号: TQ 342.94 文献标志码: A

Heat transfer property of capric acid-palmitic acid-stearic acid/ polyacrylonitrile/boron nitride composite phase change fibrous membranes

KE Huizhen^{1,2}, LI Yonggui^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Novel Functional Textile Fibers and Materials, Minjiang University, Fuzhou,

Fujian 350108, China; 2. Faculty of Clothing and Design, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract Electrospun polyacrylonitrile/boron nitride (PAN/BN) composite nanofibrous membranes with different mass ratios were used as supporting materials to overcome the problems of poor thermal conductivity and the leakage problems of capric acid-palmitic acid-stearic acid (CA-PA-SA) ternary eutectic acting as solid-liquid phase change materials. And then innovative CA-PA-SA/PAN/BN composite phase change fibrous membranes were prepared by physical adsorption. The influences of BN nanoparticles with high thermal conductivity on their morphological structure, thermal performance, as well as thermal energy storage and release rates were studied. The scanning electron microscopy images reveals that the morphological structure of CA-PA-SA/PAN/BN composite phase change fibrous membranes are unaffected by the addition of 10% BN nanoparticles. The differential scanning calorimetry results suggest that the melting temperatures and enthalpies of the prepared composite phase change fibrous membranes are about 25℃ and 136.4-138.6 kJ/kg, respectively. Heat transfer test results indicate that the integral heat transfer performance of CA-PA-SA/PAN/BN composite phase change fibrous membranes are improved by virtue of the addition of BN nanoparticles with high thermal conductivity, and their melting and freezing times are shortened about 38% and 41%, respectively.

Keywords composite phase change fibrous membrane; boron nitride; capric acid-palmitic acid-stearic acid ternary eutectic; thermal energy storage property; heat transfer property

收稿日期: 2018-03-14 修回日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51706092); 福建省自然科学基金青年创新项目(2018J05091); 福建省中青年教师教育科研项目(JAT170445)

第一作者: 柯惠珍(1986—),女,讲师,博士。主要研究方向为功能纺织材料。E-mail: kehuizhen2013@163.com。

相变储能材料包括有机相变材料(如石蜡、脂肪酸等)、无机相变材料(如水合盐等)以及共晶相变材料(如脂肪酸低共熔物等),可应用于建筑节能^[1]、余热回收系统^[2]、冰箱^[3]、储能纤维^[4]等领域。

脂肪酸低共熔物具有相变潜热高、无毒、无腐蚀性的优点,同时还具有良好的物理、化学与热稳定性。但是由于脂肪酸低共熔物属于固-液相变材料,存在液相渗漏问题,而且其导热系数小、热传导效率低,使其实际应用受到了一定程度的限制^[5]。为了克服渗漏问题,通常采用表面聚合法^[6]、静电纺丝法^[7]、混合法^[8]、吸附法^[9]、灌注法^[10]等方法制备定形相变复合材料。定形相变复合材料是由支撑材料(如聚苯胺^[6]、聚酰胺6^[7]、纳米硅^[8]、膨胀石墨^[9]、膨胀蛭石^[10]等)和固-液相变材料(如脂肪酸、石蜡、聚乙二醇等)组成的一类复合材料。此外,根据文献报道可知,在增强相变材料体系整体传热性能方面,通常是在相变体系中结合具有高导热系数的材料,如膨胀石墨^[9]、银纳米线^[10]、铜纳米颗粒^[11]、石墨烯泡沫^[12]等。纳米氮化硼(BN)作为一种陶瓷型导热填料,其导热性能优异,导热系数为80~200 W/(m·K),是改善聚合物复合材料传热性能的有效增强剂。此外,纳米粒子还具有优异的力学和热学性能,有利于增强复合材料的力学性能以及改善材料的热稳定性^[13]。

将BN作为传热增强材料负载到聚合物纳米纤维中制备聚合物与BN复合纳米纤维膜,作为定形相变复合材料支撑材料的研究还少见报道,因此,本文采用静电纺丝法制备聚丙烯腈/氮化硼(PAN/BN)复合纳米纤维膜作为支撑材料,以癸酸-棕榈酸-硬脂酸(CA-PA-SA)三元低共熔物作为固-液相变材料,通过物理吸附法制备新型的CA-PA-SA/PAN/BN复合相变纤维膜,研究了添加BN导热纳米粒子对CA-PA-SA/PAN复合相变纤维膜的形貌结构、储热性能以及传热性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验原料

N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、癸酸(CA)、棕榈酸(PA)和硬脂酸(SA),购自国药集团化学试剂有限公司。纳米氮化硼(BN),粒径尺寸约为100 nm,纯度为99%,购自合肥科晶材料技术有限公司。

1.2 静电纺纳米纤维支撑膜的制备

称取适量的PAN粉末添加到DMF溶剂中,质量分数为10%,将配制好的PAN溶液放置到磁力搅拌器上搅拌(转速约为350 r/min),直至PAN充分

溶解,溶液均匀澄清,搅拌温度设置为30℃。再称取不同质量比例的BN导热纳米粒子添加到配制好的PAN溶液中,PAN与BN的质量比为95:5和90:10。将配制好的复合纺丝溶液搅拌均匀并倒入带有金属针头的塑料针筒(容积为20 mL)用于静电纺丝。静电纺丝装置主要由高压电源、注射装置(注射泵和注射针筒)和收集装置(滚筒和铝箔)组成。静电纺丝电压设置为30 kV,注射速率和滚筒的转速分别设置为1 mL/h和100 r/min。采用相同纺丝工艺参数制备得到PAN、PAN/BN5(95:5)和PAN/BN10(90:10)纳米纤维膜。

1.3 复合相变纤维膜的制备

根据课题组前期研究^[14]可知,CA-PA-SA三元低共熔物的共晶质量比为83.82:10.19:5.99,按比例称取CA、PA和SA并倒入烧杯中,再将烧杯放入60℃烘箱中,直到其充分熔融混合,最后再放置到超声波水浴中振荡5 min,使其更加均匀。

采用物理吸附法制备定形相变复合纤维膜^[15],以静电纺PAN、PAN/BN5和PAN/BN10纳米纤维膜为支撑材料,将其放置到熔融的CA-PA-SA三元低共熔物中使其充分吸附24 h,随后取出并去除纤维膜表面未吸附的三元低共熔物,最后将制备的CA-PA-SA/PAN、CA-PA-SA/PAN/BN5和CA-PA-SA/PAN/BN10复合相变纤维膜放入培养皿中保存,用于进一步表征测试。

1.4 表征与测试

采用S-3400 N型扫描电子显微镜(SEM)对制备的支撑材料以及CA-PA-SA/PAN、CA-PA-SA/PAN/BN5和CA-PA-SA/PAN/BN10复合相变纤维膜的形貌结构进行观察。

采用Q2000差示扫描量热仪(DSC)分析复合相变纤维膜的储热性能,测试过程中氮气流量为50 mL/min,测试温度和测试速率分别为-30~70℃和8℃/min,测试样品质量约为5 mg。

采用传热测试装置分析复合相变纤维膜的储热峰和释放速率^[15]。测试方法:首先将约为5 g的纤维膜剪碎并装到测试瓶中,然后将热电偶放到测试瓶中部,以确保测试过程中温度测量精确。在升温融化测试过程中,将测试瓶放置到40℃的恒温水浴中,当热电偶感应到的温度达到35℃后,再将测试瓶快速转移到-10℃的冰箱中进行降温结晶过程测试。在融化和结晶测试过程中温度随时间的变化数据通过数据记录器在计算机中自动记录。

1.5 热循环测试

为分析CA-PA-SA三元低共熔物在静电纺

PAN/BN 复合纳米纤维膜中的渗漏情况 将 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜悬挂在环境模拟实验箱中进行 100 次加热和冷却循环测试(即 100 次重复吸热和放热)。测试温度范围为-10~50 ℃,升温 and 降温速率均为 5 ℃/min。然后分别采用 SEM 和 DSC 分析 100 次循环使用后 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜的形貌结构与储热性能。本文中 100 次热循环测试后 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜样品编号为 CA-PA-SA/PAN/BN10-cycled。

2 结果与讨论

2.1 复合相变纤维膜的形貌结构分析

图 1 示出采用相同纺丝工艺条件制备得到的静电纺纳米纤维膜的 SEM 照片。可见,静电纺 PAN, PAN/BN5 和 PAN/BN10 复合纳米纤维膜呈现出常规静电纺纳米纤维膜三维多孔网络结构的特征。纯 PAN 纳米纤维表面光滑无珠节,纤维平均直径约为 200 nm。当复合纤维膜中 BN 导热纳米粒子质量分数为 5% 时(见图 1(b)),复合纤维形貌结构良好,与纯 PAN 纤维相比没有明显的差异,纤维直径分布均匀,平均纤维直径约为 220 nm,这表明添加少量的 BN 对纤维的形貌结构和平均直径影响较小。当复合纳米纤维中 BN 导热纳米粒子质量分数进一步增加到 10% 时,复合纤维中可观察到少量的团聚节

点,这是由于部分 BN 导热纳米粒子在纺丝过程中出现了团聚。换句话说,当 BN 导热纳米粒子在复合纤维中含量较低时,其与 PAN 能够较好地结合在一起,二者具有良好的相容性。从形貌结构角度考虑,BN 导热纳米粒子在复合纤维中的质量分数应控制在 10% 以内。

图 2 示出采用物理吸附法制备得到的复合相变纤维膜的 SEM 照片。可以看出,由于毛细管吸附效应和表面张力作用,CA-PA-SA 三元低共熔物已被成功地吸附并分散到 PAN 和 PAN/BN 纳米纤维膜的多孔网络结构中。此外,不同种类复合相变纤维膜的形貌结构之间没有明显的差异,这表明 BN 的含量对复合相变纤维膜的形貌结构没有影响。值得注意的是,本文中采用的 CA-PA-SA 三元低共熔物的相变融化温度约为 25 ℃,也就是说在 SEM 测试过程中,CA-PA-SA 三元低共熔物一直处于融化状态。SEM 照片显示,通过物理吸附法能够将融化状态的 CA-PA-SA 三元低共熔物吸附到 PAN 和 PAN/BN 纳米纤维膜的孔隙结构中,可有效防止其在相变过程中的渗漏。

图 3 示出经过 100 次加热和冷却循环测试后 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜的 SEM 照片。与图 2(c) 相比,复合相变纤维膜的形貌结构没有发生明显变化,CA-PA-SA 三元低共熔物仍然被分散在 PAN/BN10 复合纳米纤维膜的多孔网络结构中,未观察到渗漏现象。

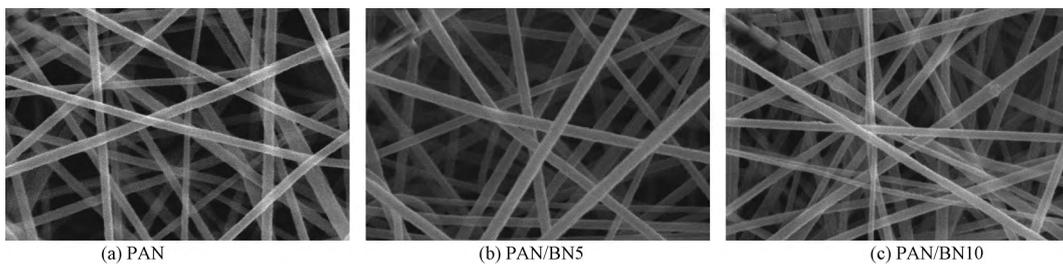


图 1 静电纺纳米纤维膜的 SEM 照片(×20 000)

Fig.1 SEM images of electrospun nanofibrous membranes (×20 000)

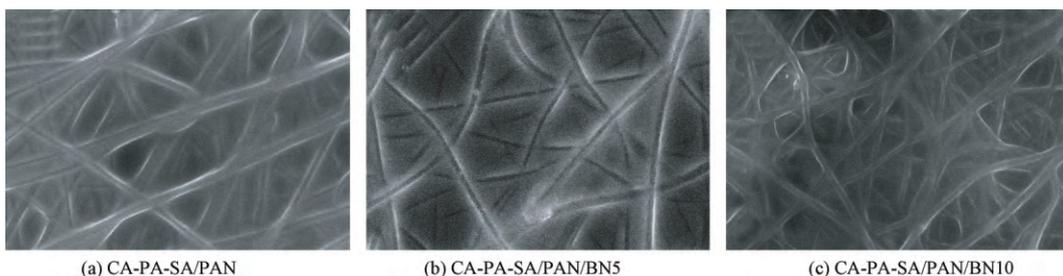


图 2 复合相变纤维膜的 SEM 照片(×10 000)

Fig.2 SEM images of composite phase change fibrous membranes (×10 000)

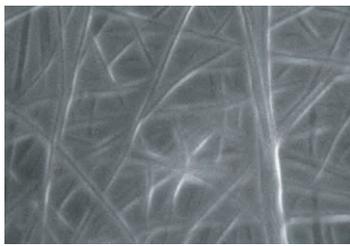


图3 CA-PA-SA/PAN/BN10-cycled 复合相变纤维膜的SEM照片($\times 10\ 000$)

Fig.3 SEM image of CA-PA-SA/PAN/BN10-cycled composite phase change fibrous membrane($\times 10\ 000$)

2.2 复合相变纤维膜的储热性能分析

图4 示出 CA-PA-SA 三元低共熔物、CA-PA-SA/PAN、CA-PA-SA/PAN/BN5、CA-PA-SA/PAN/BN10 以及 100 次热循环后 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜的 DSC 曲线。纯的 CA-PA-SA 三元低共熔物显示有较强的吸热峰和放热峰。制备的 CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜的储热和放热峰的强度稍低于纯 CA-PA-SA 三元低共熔物相变峰的强度。静电纺 PAN 和 PAN/BN10 纳米纤维膜在测试温度范围内没有出现相变峰, 这表明静电纺 PAN 和 PAN/BN 纤维膜只是支撑材料, 不提供相变焓值。

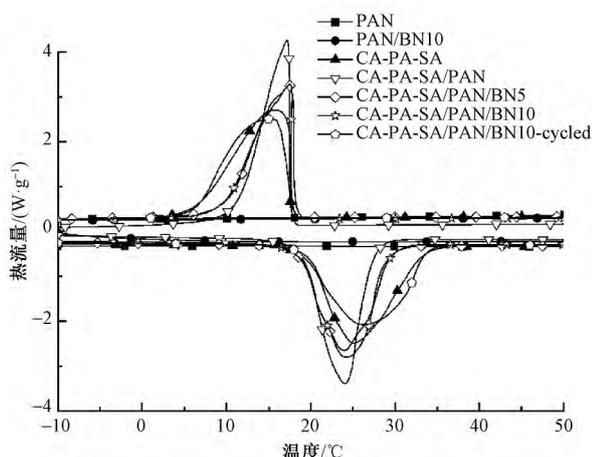


图4 CA-PA-SA 三元低共熔物和复合相变纤维膜的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of CA-PA-SA ternary eutectic and composite phase change fibrous membranes

表1 示出从 DSC 曲线分析得到的热性能数据, 包括融化温度、结晶温度、融化焓值和结晶焓值。可以看出, 与纯 CA-PA-SA 三元低共熔物的相变焓值相比, CA-PA-SA/PAN、CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜的相变焓值有小幅减小, 分别约为纯 CA-PA-SA 三元低共熔物相变焓值的 95%、95% 和 94%, 这是由于静电纺 PAN/BN 复合纳米纤维膜作为支撑材料在复合相变纤维膜中占了一定的质量比重。从 DSC 测试结果可知,

添加 BN 导热纳米粒子对复合相变纤维膜的相变温度没有显著影响。表1 数据显示, 复合相变纤维膜的融化焓值与结晶焓值相近, 这表明 CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜具有可逆的相变储热性能。

表1 CA-PA-SA 三元低共熔物和复合相变纤维膜的热性能数据

Tab.1 Thermal performance data of CA-PA-SA ternary eutectic and composite phase change fibrous membranes

| 样品 | 融化温度/ °C | 融化焓值/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 结晶温度/ °C | 结晶焓值/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
|------------------------------|-------------|---|-------------|---|
| CA-PA-SA | 25.12 | 145.7 | 15.60 | 144.5 |
| CA-PA-SA/PAN | 24.06 | 138.6 | 17.17 | 137.4 |
| CA-PA-SA/PAN/BN5 | 24.13 | 137.7 | 17.39 | 135.8 |
| CA-PA-SA/PAN/BN10 | 23.89 | 136.4 | 17.50 | 132.6 |
| CA-PA-SA/PAN/ BN10-cycled | 26.37 | 136.2 | 15.47 | 133.8 |

此外, 表1 数据还显示, 经过 100 次热循环后 CA-PA-SA/PAN/BN10 定形相变复合纤维膜的相变焓值仍保持在 133~137 kJ/kg 之间。与未经过循环使用的 CA-PA-SA/PAN/BN10 定形相变复合纤维膜相比, 其融化和结晶焓值均没有下降, 这充分说明定形相变复合纤维膜在重复使用过程中 CA-PA-SA 三元低共熔物没有出现渗漏。

相变温度是相变材料的一项非常重要的性能指标, 其直接决定了相变材料能否适用于某个特定的工程应用领域。Sari 等^[16] 研究表明建筑室内比较认可的舒适温度范围是在 16~25 °C 之间, 因此, 只有相变融化温度范围在 16~25 °C 之间的相变材料才会被考虑应用到建筑节能领域的相变墙板中。Sarier 等^[17-18] 研究表明, 应用于调温纤维与纺织品领域的相变材料的理想相变融化温度在 15~35 °C 之间。本文中 DSC 分析结果表明, 制备得到的 CA-PA-SA/PAN/BN 复合相变纤维膜的相变融化温度约为 25 °C。因此, 从相变温度角度考虑, 其在相变节能建筑领域以及调温纤维与纺织品领域有潜在的应用前景。

2.3 复合相变纤维膜的传热性能分析

复合相变材料的储热和放热速率反映了储热应用中热能传递的快慢。本文研究了添加不同质量分数 BN 导热纳米粒子对复合相变纤维膜储热和放热速率的影响。图5 示出 CA-PA-SA/PAN、CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜在储热和放热过程中温度随时间的变化曲线。可以看出, 负载 BN 导热纳米粒子制备的 CA-PA-SA/PAN/BN 复合相变纤维膜在融化和结晶过

程中的传热所需时间明显缩短。从图5(a)可知,当测试温度从 35 °C 下降到 17 °C (结晶温度),复合相变纤维膜的结晶时间分别为 20.0 min (CA-PA-SA/PAN), 14.6 min (CA-PA-SA/PAN/BN5) 和 11.8 min (CA-PA-SA/PAN/BN10)。与 CA-PA-SA/PAN 复合相变纤维膜相比,由于相变体系中添加了 BN 导热纳米粒子,CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜结晶所需时间分别缩短了 27% 和 41%。此外,从图 5(b) 可以观察到,在测试温度从 -5 °C 上升到 25 °C (融化温度) 过程中,CA-PA-SA/PAN, CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜融化所需时间分别为 15.1, 12.0, 9.4 min。显然,CA-PA-SA/PAN/BN5 和 CA-PA-SA/PAN/BN10 复合相变纤维膜融化所需时间也分别减少了 21% 和 38%。传热测试结果表明,随着 BN 导热纳米粒子质量分数的增加,CA-PA-SA/PAN/BN 复合相变纤维膜的传热速率明显提高,这是由于 BN 纳米粒子作为陶瓷型导热填料具有较高的导热系数,将其均匀地分散到纤维基体中能够形成贯穿于整个相变复合纤维体系连续的导热网链结构,这有助于热量在相变体系中快速地传递,从而缩短了复合相变纤维膜融化和结晶所需的时间。

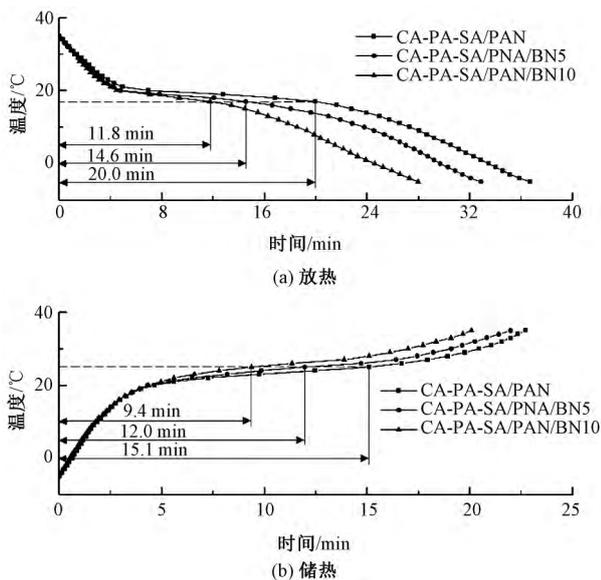


图 5 复合相变纤维膜在放热和储热过程中温度与时间的变化曲线

Fig.5 Temperature and time curves of composite phase change fibrous membranes in thermal energy release process (a) and storage process (b)

3 结 论

本文以静电纺 PAN/BN 复合纳米纤维膜作为支撑材料,通过物理吸附法制备了新型的 CA-PA-

SA/PAN/BN 复合相变纤维膜。扫描电子显微镜分析结果表明:CA-PA-SA 三元低共熔物被成功地吸附到 PAN/BN 复合纳米纤维膜的多孔网络结构中;当复合纳米纤维膜中 BN 质量分数低于 10% 时,其对制备的 CA-PA-SA/PAN/BN 复合相变纤维膜的形貌结构没有影响。热性能测试结果表明:CA-PA-SA/PAN/BN 复合相变纤维膜的融化温度约为 25 °C,融化焓值在 136.4~138.6 kJ/kg 之间;添加 10% 的 BN 导热纳米粒子对复合相变纤维膜的储热性能没有显著影响,但其储热和放热时间明显缩短了 38% 和 41%。

FZXB

参考文献:

[1] BASTANI A, HAGHIGHAT F. Expanding Heisler chart to characterize heat transfer phenomena in a building envelope integrated with phase change materials [J]. Energy and Buildings, 2015, 106: 164-174.

[2] ZHANG SL, WU W, WANG SF. Integration highly concentrated photovoltaic module exhaust heat recovery system with adsorption air-conditioning module via phase change materials [J]. Energy, 2017, 118: 1187-1197.

[3] FIORETTI R, PRINCIPI P, COPERTARO B. A refrigerated container envelope with a PCM (phase change material) layer: experimental and theoretical investigation in a representative town in central Italy [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 131-141.

[4] 徐素梅, 哈丽丹·买买提, 米娜瓦尔·乌买尔, 等. 月桂酸纤维素酯/聚乙二醇相变储能纤维的制备及其性能 [J]. 纺织学报, 2016, 37(4): 7-14.

XU Sumei, HALIDAN Maimaiti, MINAWAR Wumaier, et al. Preparation and performance of cellulose lauric acid esters/polyethylene glycol grafted copolymer fibers [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(4): 7-14.

[5] YUAN YP, ZHANG N, TAO WQ, et al. Fatty acids as phase change materials: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 482-498.

[6] ZENG JL, ZHU FR, YU SB, et al. Myristic acid/polyaniline composites as form stable phase change materials for thermal energy storage [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 114: 136-140.

[7] CAI YB, GAO CT, XU XL, et al. Electrospun ultrafine composite fibers consisting of lauric acid and polyamide 6 as form-stable phase change materials for storage and retrieval of solar thermal energy [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2012, 103: 53-61.

[8] LI X Y, CHEN H S, LI H Q, et al. Integration of form-stable paraffin/nanosilica phase change material composites into vacuum insulation panels for thermal energy

- storage [J]. *Applied Energy*, 2015, 159: 601-609.
- [9] WANG S P, QIN P, FANG X M, et al. A novel sebacic acid/expanded graphite composite phase change material for solar thermal medium-temperature applications [J]. *Solar Energy*, 2014, 99: 283-290.
- [10] DENG Y, LI J H, QIAN T T, et al. Thermal conductivity enhancement of polyethylene glycol/expanded vermiculite shape-stabilized composite phase change materials with silver nanowire for thermal energy storage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 295: 427-435.
- [11] LOHRASBI S, SHEIKHOLESAMI M, GANJI D D. Multi-objective RSM optimization of fin assisted latent heat thermal energy storage system based on solidification process of phase change material in presence of copper nanoparticles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118: 430-447.
- [12] QI G Q, YANG J, BAO R Y, et al. Hierarchical graphene foam-based phase change materials with enhanced thermal conductivity and shape stability for efficient solar-to-thermal energy conversion and storage [J]. *Nano Research*, 2017, 10(3): 802-813.
- [13] WANG L J, HAN D B, LUO J, et al. Highly efficient growth of boron nitride nanotubes and the thermal conductivity of their polymer composites [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122: 1867-1873.
- [14] KE H Z. Phase diagrams, eutectic mass ratios and thermal energy storage properties of multiple fatty acid eutectics as novel solid-liquid phase change materials for storage and retrieval of thermal energy [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 1319-1331.
- [15] KE H Z, GHULAM MUH, LI Y G, et al. Ag-coated polyurethane fibers membranes absorbed with quinary fatty acid eutectics solid-liquid phase change materials for storage and retrieval of thermal energy [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 1-9.
- [16] SARI A, KARAIPEKLI A. Preparation and thermal properties of capric acid/palmitic acid eutectic mixture as a phase change energy storage material [J]. *Materials Letters*, 2008, 62: 903-906.
- [17] SARIER N, ONDER E. Organic phase change materials and their textile applications: an overview [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 540: 7-60.
- [18] MONDAL S. Phase change materials for smart textiles: an overview [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 1536-1550.

(上接第25页)

- [15] LIN S, WEI W, WU X H, et al. Selective recovery of Pd(II) from extremely acidic solution using ion-imprinted chitosan fiber: adsorption performance and mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299(6): 10-17.
- [16] 陶庭先, 吴之传, 孙志娟. 偕胺肟基纤维对 Ni²⁺ 的吸附动力学 [J]. *华南理工大学学报*, 2003, 31(9): 53-56.
TAO Tingxian, WU Zhichuan, SUN Zhijuan. Kinetics of adsorption of nickel (II) ion on fibre containing amidoxime groups [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2003, 31(9): 53-56.
- [17] 李松林, 周亚平, 刘俊吉. 物理化学: 下册 [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 517-529.
LI Songlin, ZHOU Yaping, LIU Junji. *Physical Chemistry: Volume 2* [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009: 517-529.
- [18] LI X J, WANG X, WANG Q Q, et al. Effects of imidization temperature on the structure and properties of electrospun polyimide nanofibers [J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2014, 9(4): 33-38.
- [19] 董世华, 胡运华. 冠醚聚合物的研究 II: 以聚硫醚为主链的硫杂冠醚聚合物的合成及其络合性能 [J]. *高分子学报*, 1990, 1(4): 399-405.
DONG Shihua, HU Yunhua. Studies on polymeric crown ethers II: syntheses and complexation properties of polymeric thiacyclopentane ethers with polythiaether back-bone [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 1990, 1(4): 399-405.
- [20] 李书干, 焦晓宁. 聚酰亚胺针刺织物与聚苯硫醚针刺织物的热稳定性与燃烧性能对比 [J]. *纺织学报*, 2012, 33(12): 35-39.
LI Shugan, JIAO Xiaoning. Comparison of thermal stability and combustibility between PI and PPS needle punched fabrics [J]. *Journal of Textile Research*, 2012, 33(12): 35-39.
- [21] 孔敏荣. 电荷半径比在无机化学中的应用 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1992(1): 65-68.
KONG Minrong. Some application of charge-radius ratio in inorganic chemistry [J]. *Journal of Beijing Teachers College (Natural Sciences Edition)*, 1992(1): 65-68.
- [22] 关勇, 孔繁荣. 电荷-半径比在无机化学中的某些应用 [J]. *北京农学院学报*, 1994(2): 120-124.
GUAN Yong, KONG Fanrong. Some applications of charge-radius ratio in inorganic chemistry [J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 1994(2): 120-124.
- [23] 凤权, 武丁胜, 桓珊, 等. AOPAN/RC 纳米纤维膜的制备及对金属离子吸附性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(8): 140-144.
FENG Quan, WU Dingsheng, HUAN Shan, et al. Preparation and metal ion adsorption properties of AOPAN/RC nanofibrous membrane [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(8): 140-144.