

提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料蓄热性能

徐众^{1,2,3}, 侯静^{1,2,3}, 李军^{1,2,3}, 吴恩辉^{1,2,3}, 丁界雄¹, 罗钦文¹

(1. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 四川省太阳能利用技术集成工程实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 太阳能技术集成及应用推广四川省高校重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要:以普通泡沫碳(CF)为支撑材料, 石蜡(PW)、十六酸(PA)和硬脂酸(SA)为相变主材, 攀枝花提钒尾渣(TV)为导热强化剂, 采用恒温浸渍法和浇注法制备提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料, 使用数字温度计和红外成像仪对复合相变材料蓄-放热时间及温度场分布情况进行测试。测试结果表明, 采用恒温浸渍法制备泡沫碳/有机质复合相变材料时, 泡沫碳吸附石蜡、十六酸和硬脂酸的吸附率分别为 66%、72% 和 72%, 填充率较低, 因此将有机质和微米级 TV 混合之后再浇注于泡沫碳孔隙中, 填充效果更好; 在 CF/PW、CF/PA 和 CF/SA 复合材料中分别添加 2%、1.6% 和 0.8% 的微米级 TV 后制得的材料蓄-放热时间比对应的复合材料短, 在 CF/PW 复合材料中添加 TV 后蓄-放热时间缩短最显著; 在三种泡沫碳/有机质复合材料当中分别添加 0%~3% 微米级 TV 时, 中心处温度和最高温度之间的差值比纯有机质高分别高 2.7~3.8、6.4~7.8、5.0~11.9 ℃。蓄-放热时间和温度场分布测试结果均表明, 在 CF/PW 复合相变材料中添加微米级 TV 效果较好。

关键词:提钒尾渣; 泡沫碳; 有机质; 复合相变材料; 温度场分布

doi:10.12476/kczhly.202210130649

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 03-0082-08

引用格式:徐众, 侯静, 李军, 等. 提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料蓄热性能[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(3): 82-89.

XU Zhong, HOU Jing, LI Jun, et al. Investigation on heat storage characteristics of vanadium tailings/carbon foam/organic matter composite phase change materials[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(3): 82-89.

随着环保压力的增加, 以及化石能源的枯竭, 新能源的开发与利用迫在眉睫。新能源转化为低温热能进行储存就是利用方法之一, 一般采用有机相变材料进行储存, 储存材料多存在导热率差、易泄漏和易燃等缺点。为了提升导热率, 研究者在有机质中添加各种纳米材料, 其中在十八醇(OA)和硬脂酸(SA)混合有机质中添加 1%~3% 的纳米氧化锌和微米铜, 可有效改善纳米粒子团聚问题, 使材料导热和蓄-放热速率提升^[1]; 在正癸酸和十四醇混合材料中添加 0.6% 的

纳米石墨时, 材料固态导热系数提升 35.22%, 当添加量大于 0.6% 时纳米粒子会出现团聚和沉降^[2]; 在石蜡中(PW)添加 4%~6% 的碳包覆铝, 导热系数比纯石蜡提高 194.4%^[3]; 添加 0.5% 氧化铜、1.0% 二氧化硅和 3.0% 氧化锌纳米颗粒时, 充一放热速率快速提升^[4]; 添加纳米金属铜、镍、铝、铁和锌为导热增强剂时, 能有效提升材料导热性能, 添加 0.5% 纳米铁时导热系数提高最大^[5]; 添加纳米铜, 材料的固、液态导热系数会随纳米铜质量的增加呈非线性增长^[6]。

收稿日期: 2022-10-13

基金项目: 四川省科技厅国际科技合作项目(2020YFH0195); 攀枝花市指导性科技计划项目(2021ZD-S-4); 工业固态废弃物土木工程综合开发利用四川省高校重点实验室项目(SC-FQWLY-2022-Y-08); 钒钛资源综合利用四川省重点实验(2019FTSZ10)

作者简介: 徐众(1985-), 男, 硕士, 讲师, 从事太阳能技术集成及应用推广研究。

为了抑制有机相变材料易泄漏和易燃等缺点,很多研究者在有机质相变材料当中添加膨胀石墨(EG)、膨胀珍珠岩、泡沫金属、多孔碳纳米管和泡沫碳等多孔吸附材料^[7-11]。在石蜡和硝酸锂中添加泡沫碳就可以制备得到相变材料,并可以应用于相变制冷反射镜和高能量密度电子器件散热器方面^[12]。泡沫碳添加到石蜡中可有效提高导热率^[13]和缩短充—放热时间^[14]。添加于正十八烷^[15]和十八醇^[16]当中导热效果同样得到提升,而以松木和竹木为原料,制备多孔碳材料,并以熔融共混法制备多孔碳/石蜡复合相变材料,材料的导热率分别比纯石蜡提高了100%和216%^[17]。

单一添加多孔材料导热性能提高倍数比较低,尤其是泡沫碳材料。在PW/EG复合材料中添加纳米氧化铜可以有效降低材料的膨胀性,改善温敏性,提高热稳定性^[7],添加3.0%纳米铝导热系数比PW/EG复合材料提高13.7%^[8];在PW/EG复合材料添加0.8%的改性碳纳米管(CNTs)^[9]、25.0%的碳钎维^[10]时材料的导热性能都得到提升;而在碳纤维/石蜡中添加10.0%的纳米石墨片,导热性能增强的同时,渗漏率液降低了10%左右^[11]。

攀枝花的提钒尾渣中存在大量的Fe、V、Ti和Al的氧化物,将其球磨后添加于泡沫碳/有机质复合相变材料中,探究其对复合材料蓄-放热速率及温度场分布情况的影响。实验以普通泡沫碳为支撑材料,石蜡、十六酸和硬脂酸为相变主体材料,提钒尾渣为导热强化剂,制备提钒尾渣/泡沫碳/有机质复合相变材料,并对材料蓄-放热性能和温度场分布情况进行分析。

1 实 验

1.1 材料

泡沫碳(carbon foam -CF),蜂窝状,炭含量30%~60%,大孔径(HR-10);石蜡(paraffin wax-PW),分析纯,熔点59℃左右;十六酸(palmitic acid-PA),分析纯,熔点61~63℃;硬脂酸(stearic acid-SA),分析纯,熔点69~73℃;提钒尾渣(VT)。无水乙醇,分析纯。

1.2 分析测试仪器

箱式电阻炉, SX2-5-12A型;数显恒温水浴

锅, DK-8D型;分析天平, FA114型(精度为0.000 1 mg);导热系数测试仪, DRXL-II型;粉末半导体电阻测试仪, ST2722-SZ;微型行星式球磨仪, F-P400型;台式电动压片机, FYD型;无纸数显温度记录仪, MIK-R200D型;电热鼓风干燥箱, 101型;密封型制样粉碎机, GJ-3型。

1.3 提钒尾渣预处理

使用的提钒尾渣的化学成分见表1,其中含有30%左右的铁,2.08%的五氧化二钒,2.24%的三氧化二铬,以及铝、硅、镁、钙氧化物,并且提钒尾渣大部分氧化物都是呈黑色。提钒尾渣粒径分析,用筛子筛选,测试其粒径分布,+0.45 mm的尾渣61.15%,其中0.045~0.45 mm 33.07%, -0.045 mm 5.77%。采用较大粒径的提钒尾渣与石蜡混合会出现分层现象,因此用密封型制样粉碎机先对提钒尾渣进行处理,保证所有尾渣都能通过0.125 mm的筛子,再用微型行星式球磨仪进行球磨,保证全部通过0.045 mm的筛子结束。球磨条件:称取20 g -0.125 mm的提钒尾渣与2~3 mL的无水乙醇,放入转速为350 r/min的微型行星式球磨仪当中球磨6 h,得到0.045 mm的提钒尾渣,再使其与石蜡混合均匀分散。采用相同的方法进行十六酸与提钒尾渣、硬脂酸与提钒尾渣的混合,添加3%的提钒尾渣之后,十六酸和硬脂酸出现沉降现象,因此提钒尾渣添加量应该控制在3%以下。

表1 提钒尾渣的化学成分/%

Table 1 Chemical constituents of vanadium tailings									
TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	
32.80	12.90	2.08	7.84	14.40	3.20	2.50	3.57	2.24	

1.4 提钒尾渣/泡沫炭/有机质复合相变材料制备

取29.88 g固体有机质(PW、PA或SA)放于250 mL烧杯中,用电加热套加热至熔化,取0.12 g研磨后的TV,加入熔化后的有机质中,搅拌30 min,取4 cm×4 cm×1 cm泡沫碳,称出初始质量后放入混合液当中,在恒温水浴(PW和PA为80℃,SA为90℃)条件下搅拌吸附20 min,再取出冷却称量,得到初吸附量。然后把吸附后的CF放入铝盒,将吸附后的剩余固-液混合物倒入铝盒,制得提钒尾渣质量分数为0.4%的复合相变材料。用同样的方法制备TV质量分数为0.8%、

1.2%、1.6%、2.0% 和 3.0% 的复合相变材料。

1.5 提钒尾渣/泡沫炭/有机质复合相变材料性能测试

1.5.1 泡沫炭对有机质的吸附能力测试

先将 50 g 的固体有机质放入烧杯中熔化，转移至 80 ℃ 的恒温水浴中，取体积为 4 cm×4 cm×1 cm 的泡沫炭，称取质量 m_0 ，放入液体有机质中恒温吸附，并不断搅拌。每隔 20 min 取出，冷却称量 m_i ，采用式 (1) 计算吸附率 η 。

$$\eta = \frac{m_i - m_0}{m_i} \times 100\% \quad (1)$$

1.5.2 复合相变材料蓄-放热性能测试

将 30 g 有机质/TV 混合物倒入放置有 CF 的铝盒中，待凝固后，在复合材料的中心开孔，并将温度计探头插入中心位置，再将铝盒转移到 250 mL 烧杯中，烧杯中加入 100 mL 去离子水，铝盒上表面用泡沫塑料隔热，泡沫塑料四周与烧杯壁紧贴，蓄热结束之后，将烧杯转移到 30 ℃ 恒温水浴，当温度稳定在 30 ℃ 时，再将烧杯转移到 80 ℃ 恒温水浴，循环测试。

蓄-放热过程当中温度场分布情况测试，将采用浇注法制备的复合材料放入铝盒再放入 80 ℃ (SA 水浴温度设置为 90 ℃) 和 30 ℃ 的恒温水浴中蓄-放热，过程中每隔 2 min 将铝盒取出，采用红外成像仪拍照，样品中心温度保持不变时，停止蓄-放热温度场分布测试。

2 实验结果与讨论

2.1 泡沫炭对有机质吸附性能分析

根据吸附能力测试方法，测试 CF 吸附有机质的量随时间变化情况，并采用式 (1) 计算吸附率，具体结果见表 2。从表中可以看出随吸附时间的延长，吸附率变化很小，因此采用直接吸附法制备 CF/有机质复合相变材料，吸附时间在 20 min 即可，CF 对 PW、PA 和 SA 的吸附率分别在 66%、72% 和 72%，实验使用的泡沫炭吸附率比文献^[15]中常压吸附 5 h，吸附率 32.74%，文献中采用的是石墨化泡沫炭导热和吸附能力更强。

2.2 复合相变材料蓄-放热性能分析

用蓄-放热性能测试方法，对复合材料的充放热时间进行测试，TV/CF/PW 复合材料蓄-放热过程当中温度随时间的变化见图 1。从图 1 (a) 可以看出蓄热时添加 TV 之后的材料从 30 ℃ 升温到 62.5 ℃ 时的时间均比未添加的短，其中时间从小

表 2 泡沫炭吸附时间对有机质吸附率的影响

Table 2 Effect of carbon foam adsorption time on adsorption rate

吸附时间/min	20	30	40	50	60
CF/PW	0.66	0.65	0.67	0.66	0.66
CF/PA	0.72	0.72	0.72	0.74	0.75
CF/SA	0.72	0.71	0.72	0.71	0.72

到大的顺序依次为添加 2%、1.6%、3%、1.2%、0.8% 和 0.4%；从图 2 (b) 可以看出在放热过程中，从 65 ℃ 降温到 35 ℃ 时，仅添加 0.4%TV 时的复合相变材料放热时间比未添加的长，其他条件的复合材料放热时间均缩短，从小到大的顺序依次为 2%、3%、0.8%、1.6% 和 1.2%，说明在 CF/PW 复合相变材料当中适当添加提钒尾渣可以提高材料的导热性能。采用同样的方式对 TV/CF/PA 和 TV/CF/SA 复合相变材料的蓄-放热时间进行测试，结果见表 3。

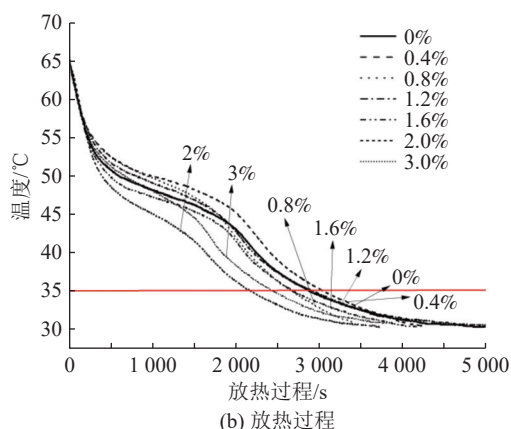
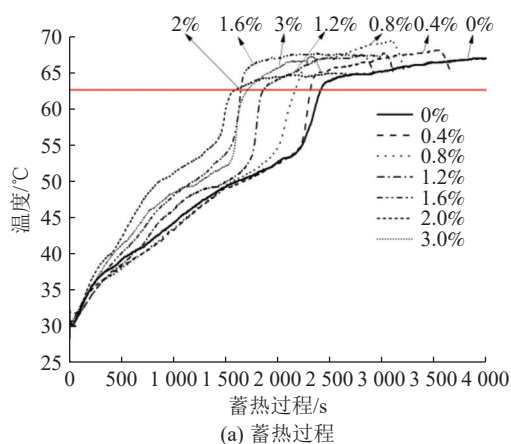


图 1 TV/CF/PW 复合材料蓄-放热温度随时间变化情况
Fig.1 Changes in thermal storage and release temperature of TV/CF/PW composites over time

从表 3 当中可以看出，在 CF/PA 复合相变材料中添加 TV 之后，材料从 30 ℃ 升温到 65 ℃ 的

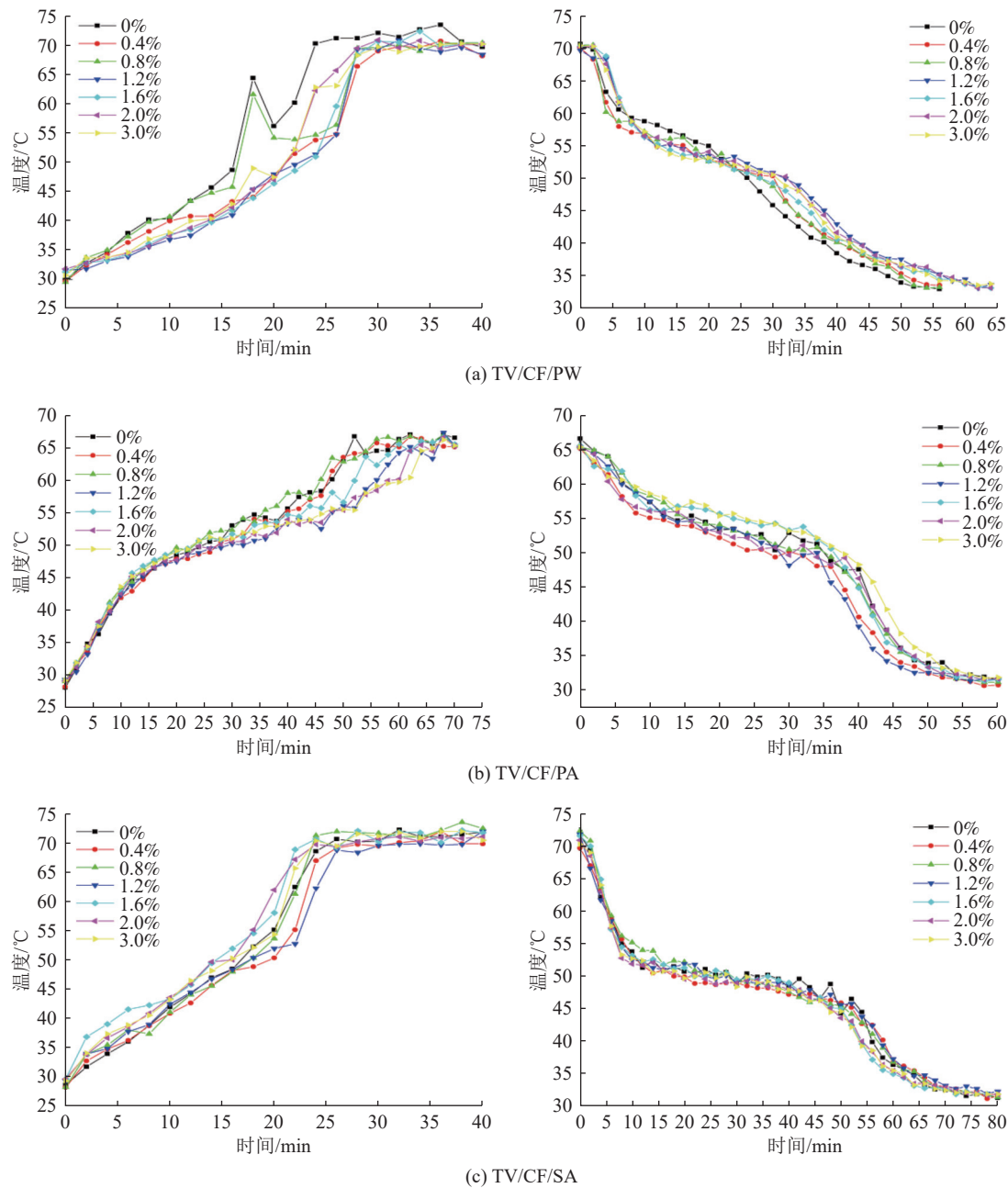


图2 复合相变材料蓄-放热过程中心温度随时间变化情况

Fig.2 Change of core temperature with time of composite phase change material during the thermal storage and release

表3 复合材料在特定温度下的蓄-放热时间

Table 3 Thermal storage and release time of composite phase change materials at specific temperatures

TV添加百分比/%		0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	3.0
TV/CF/PW	30.0~62.5 °C蓄热时间/s	2 410	2 310	2 164	1 858	1 643	1 580	1 705
	62.5~35.0 °C放热时间/s	2 852	2 973	2 597	2 802	2 627	2 105	2 371
TV/CF/PA	30.0~65.0 °C蓄热时间/s	828	1 870	935	1 570	713	1 610	507
	65.0~35.0 °C放热时间/s	2 138	2 587	2 026	2 456	2 062	2 515	2 357
TV/CF/SA	30.0~72.5 °C蓄热时间/s	1 510	1 681	1 487	1 582	1 718	1 435	1 532
	72.5~35.0 °C放热时间/s	3 526	4 453	3 559	4 261	3 690	3 659	3 310

时间仅添加 1.6% 和 3.0%TV 之后的比 CF/PA 短, 放热时 0.8% 和 1.6% 的 CF/PA 短, 综合充放热性能较好的应是添加 1.6%TV 的复合相变材料; 在 CF/SA 复合材料当中添加 TV 之后, 材料从 30 °C 升高到 72.5 °C 的时间仅在 TV 添加量为 0.8% 和 2% 情况下比 CF/SA 短, 放热时仅 0.8% 和 3% 添加 TV 后的材料跟 CF/SA 接近, 其余均增加。添加 TV 之后 CF/PA 和 CF/SA 复合相变材料的蓄放热时间均不稳定, 没有规律性, 因为 TV 在 PA 和 SA 两种酸当中分散不均匀, 且会出沉降现象, 所以条件不同质量分数的 TV 之后材料的蓄-放热时间没有规律。

2.3 复合相变材料蓄-放热温度场分布分析

用蓄-放热过程当中温度场分布测试方法测试复合材料的温度场分布情况, 并对各种复合材料的中心处温度变化情况进行分析, 结果见图 2。图 2 中的 (a) 是 TV/CF/PW 复合材料中心处温度, (b) 是 TV/CF/PA 复合材料中心处温度, (c) 是 TV/CF/SA 复合材料中心处温度。从图中的蓄热过程可以看出, 所有的复合材料的最终温度都达不到恒温水浴设定温度 80 °C, 在温度达到 70 °C 左右时开始稳定; 放热时出现两次快速降温, 都是先快后慢。

从图 2 中的 (a) 可以看出在 CF/PW 当中添加不同质量分数的 TV 后, 蓄热和放热的变化规律基本一致。添加 TV 后蓄热时达到最高温度的时间均滞后, 仅添加 0.8% 后的复合材料与 CF/PW 更接近, 放热从 70.0 °C 降到 60.0 °C 时 (PW 的熔点范围), 添加 1.6%~3.0% 的 TV 材料降温速度减慢, 从 60.0 °C 降到 52.5 °C 时, 添加 0.4%~3.0% 的 TV 后的材料降温速率均比未添加的快, 从 52.5 °C 降到 35.0 °C 时, 则正好相反, 根据中心处温度变化情况可以看出添加 0.8%TV 的复合材料效果较好, 添加 1.2%TV 的复合材料效果较差。从图 2

(b) 中可以看出, 蓄热时材料温度从 30.0 °C 升高到 50.0 °C 时, 添加 0.8%、1.6% 和 3.0%TV 的材料升温速率比 CF/PA 快, 50.0 °C 到 65.0 °C 时添加 0.4% 和 0.8% 的复合材料比 CF/PA 升温快; 放热时, 从 65.0 °C 到 55.0 °C 时, 添加 0.4%、1.2% 和 2.0% 的材料降温速率比 CF/PA 快, 55.0 °C 到 50.0 °C 仅添加 1.6% 和 3.0% 的材料降温速率比 CF/PA 慢, 从 50.0 °C 到 35.0 °C 时, 仅添加 3.0%

的比 CF/PA 降温慢, 综合蓄热和放热结果可以看出, 添加 0.4%TV 的复合材料蓄-放热效果较好, 添加 3.0%TV 的复合材料效果最差。从图 2 中的 (c) 可以看出蓄热时, 从 30.0 °C 升高到 70.0 °C 时, 仅添加 0.8%、1.6% 和 2.0%TV 的复合材料升温速率比 CF/SA 快; 放热时, 从 70.0 °C 降温到 52.5 °C 仅添加 0.8%TV 的复合材料比 CF/SA 降温慢, 从 52.5 °C 到 45.0 °C 时, 所有添加提钒尾渣的复合材料均比 CF/SA 降温快, 且降温速率减缓, 从 45.0 °C 到 35.0 °C 时, 仅添加 0.4%、0.8% 和 1.2%TV 的复合材料比 CF/SA 降温慢, 综合蓄-放热效果, 可以看出添加 1.6%TV 的复合材料效果较好, 添加 1.2% 的较差。

可根据蓄-放热温度场分布情况得出效果较好的复合相变材料, 蓄-放热过程当中温度场变化规律见图 3~5, 图中标识 3 个温度分别为中心处温度、最高温度和最低温度, 其中红色为最高温度, 绿色为最低温度。从图 3 的 (a) 可以看出纯 PW 在 20 min 时中心处温度、最高温度和最低温度分别为 77.0、78.1 和 30.1 °C, 降温 80 min 时分别为 34.0、34.6 和 28.6 °C; (b) 是加入 CF 之后的材料, 升温 26 min 后其温度分别为 71.2、75.1 和 29.7 °C, 降温 80 min 温度变为 37.2、37.7 和 28.6 °C; (c) 是添加 0.8% 的 TV 后, 升温 32 min 后其温度 70.1、74.9 和 30.2 °C, 降温 80 min 温度变为 39.4、40.0 和 28.5 °C; (d) 添加 1.2% 的 TV 后, 32 min 温度升高到 70.9、75.8 和 29.9 °C, 降温 80 min 温度变为 40.0、41.5 和 28.6 °C, 添加 CF 和 TV 之后材料的蓄-放热均比纯 PW 慢, 最高温度也比纯 PW 低, 蓄热时最高温度和中心温度之间的差值从 1.1 °C 变到 4.9 °C 以下。

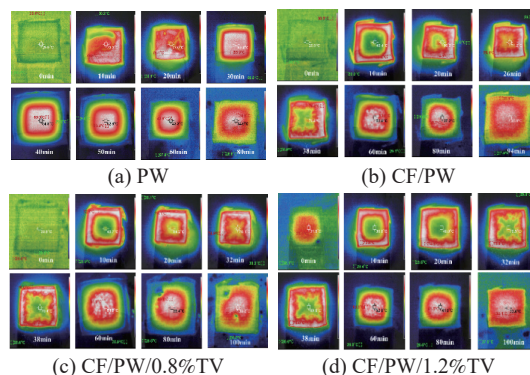


图 3 TV/CF/PW 复合材料蓄-放热温度场分布情况
Fig.3 Temperature field distribution of the TV/CF/PW composite materials during the thermal storage and release

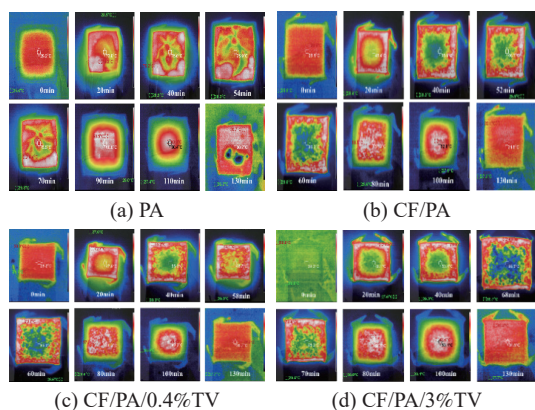


图4 TV/CF/PA 复合材料蓄-放热温度场分布情况
Fig.4 Temperature field distribution of the TV/CF/PA composite materials during the thermal storage and release

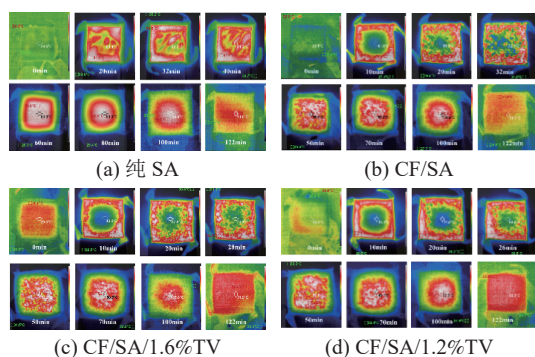


图5 TV/CF/SA 复合材料蓄-放热温度场分布情况
Fig.5 Temperature field distribution of the TV/CF/SA composite materials during the thermal storage and release

从图4的(a)可以看出纯PA在升温54 min时中心处温度、最高温度和最低温度分别为75.9、76.4和28.3℃,降温130 min时分别为30.2、30.7和26.2℃; (b)是加入CF后的材料,升温52 min后其温度分别为66.7、73.6和29.9℃,降温130 min后其温度变为31.5、32.1和27.3℃; (c)是添加0.4%的TV,升温58 min后其温度分别为66.7、74.1和29.8℃,降温130 min后其温度变为30.7、31.3和27.7℃; (d)是添加3%的TV,升温68 min后其温度升高到66.2、74.5和30.7℃,降温130 min后其温度变为31.8、32.4和27.7℃。添加CF和0.4%的TV之后材料的蓄-放热均比纯PA快一些,最高温度也比纯PA低9℃左右,蓄热时最高温度和中心处温度之间的差值从0.5℃变到6.9℃以上。

从图5的(a)可以看出纯SA在32 min时中心处温度、最高温度和最低温度分别为82.3、82.8和30.3℃,降温122 min时其温度分别为31.5℃、32.1℃和30.7℃; (b)是加入CF后的

材料,升温32 min后其温度分别为72.1、77.6和31.0℃,降温122 min温度变为31.3、31.9和28.8℃; (c)是添加1.6%的TV,升温28 min后其温度分别为71.9、79.3和31.1℃,降温122 min温度变为31.9、32.4和28.2℃; (d)是添加3%的TV,26 min后其温度升高到68.6、81.0和30.5℃,降温122 min温度变为32.2、32.8和28.7℃。添加CF和1.6%的TV之后材料的蓄-放热均比纯SA快,最高温度也比纯SA低10.0℃以上,蓄热时最高温度和中心处温度之间的差值从0.5℃变到5.5℃以上。

3 结 论

(1) 采用吸附法制备CF/PW、CF/PA和CF/SA复合相变材料时,吸附时间20 min左右即可,初吸附率分别为66%、72%和72%,吸附法制备出的材料未填满的孔隙较多,因此采用该泡沫碳制备复合相变材料时使用浇注法比吸附法更合适。

(2) 蓄-放热测试结果表明,在CF/PW复合材料当中添加0.4%~3.0%的TV后形成的复合材料蓄热时间均比CF/PW复合材料短,放热的时候除添加0.4%的TV比CF/PW复合材料长,其余的都比CF/PW复合材料短,蓄-放热效果较好的是添加2.0%TV形成的复合材料TV/CF/PW材料;在CF/PA当中添加1.6%的TV之后形成的TV/CF/PA复合材料蓄-放热时间最短;在CF/SA当中添加0.8%的TV之后形成的TV/CF/SA复合材料蓄-放热时间最短;从蓄—放热时间分析可看出,TV是较适合添加到CF/PW复合相变材料的导热强化剂。

(3) 蓄—放热温度场分布测试结果表明,在CF/PW中添加0.8%TV的复合材料效果较好,添加1.2%TV的复合材料效果较差;在CF/PA中添加0.4%TV的复合材料蓄—放热效果较好,添加3%TV的效果较差;在CF/SA中添加1.6%TV的复合材料效果较好,添加1.2%的较差。

(4) 蓄—放热温度场分布测试结果表明,在PW中添加CF、0.8%和1.2%的TV后蓄热过程最高温度与中心处温度之间的差值由纯PW的1.1℃变到3.9、3.8和4.9℃;在PA中添加CF、0.4%和3.0%的TV后蓄热过程最高温度和中心处

温度之间的差值由纯 PA 的 0.5 °C 变到 6.9、7.4 和 8.3 °C；在 SA 中添加 CF、1.6% 和 1.2% 的 TV 后蓄热过程最高温度和中心处温度之间的差值由纯 SA 的 0.5 °C 变到 5.5、7.4 和 12.4 °C；由此可知，添加 TV 对 CF/PW 复合材料温度场分布影响较小，对 CF/SA 复合材料温度场分布影响较大。

参考文献：

- [1] 王俊霞, 王军, 黄崇杏, 等. 导热增强型纳米/微米复合相变蓄热材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(9):82-85+89.
- WANG J X, WANG J, HUANG C X, et al. Preparation and property of nano/micro composite phase change heat storage material for enhancement of thermal conductivity[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(9):82-85+89.
- [2] 王博, 朱孝钦, 胡劲, 等. 利用纳米石墨强化正癸酸-十四醇复合相变材料的导热性能[J]. 材料导报, 2019, 33(22):3815-3819.
- WANG B, ZHU X Q, HU J, et al. Nano-graphite enhanced thermal conductivity of decanoic acid-tetradecyl alcohol composite phase change material[J]. Materials Review, 2019, 33(22):3815-3819.
- [3] 黄志锟, 张海燕, 陈易明, 等. 碳包铝纳米颗粒/石蜡复合相变导热材料的制备及其热学性能研究[J]. 材料研究与应用, 2016, 10(2):100-105.
- HUANG Z K, ZHANG H Y, CHEN Y M, et al. Preparation and thermal properties of carbon coated aluminum/paraffin wax composite[J]. Materials Research and Application, 2016, 10(2):100-105.
- [4] 高丽媛, 杨宾, 郝梦琳, 等. 石蜡基纳米金属复合相变材料热性能的实验研究[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(1):51-56.
- GAO L Y, YANG B, HAO M L, et al. Experimental study on thermal properties of nanometal-paraffin composite phase change materials[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2019, 48(1):51-56.
- [5] 华维三, 章学来, 罗孝学, 等. 纳米金属/石蜡复合相变蓄热材料的实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6):1723-1728.
- HUA W S, ZHANG X L, LUO X X, et al. Experimental study of nanometal-paraffin composite phase change heat storage material[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(6):1723-1728.
- [6] 汪南, 朱冬生, 肖松. 纳米铜/石蜡复合相变蓄热材料的导热性能研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(5):104-106+112.
- WANG N, ZHU D S, XIAO S. Thermal conductivity of nano-Cu/paraffin composite phase change materials[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(5):104-106+112.
- [7] 陆威, 吴永卫. 纳米铝粉/石蜡/膨胀石墨复合相变材料的制备及性能研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(2):101-105+140-141.
- LU W, WU Y W. Preparation and study on the performance of the nano-aluminum/ paraffin/expanded graphite phase change composites[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy, 2017, 32(2):101-105+140-141.
- [8] 任学明, 沈鸿烈, 杨艳. 膨胀石墨/石蜡复合相变材料的碳纳米管掺杂改性研究[J]. 功能材料, 2019, 50(6):6008-6012.
- REN X M, SHENG H L, YANG Y. Study on the preparation and characterization of CNTs modified expanded graphite/paraffin composite PCM[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(6):6008-6012.
- [9] 李果, 欧阳婷, 蒋朝, 等. 碳纤维-纳米石墨片网络体导热增强石蜡相变储能复合材料的制备及表征[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5):1130-1137.
- LI G, OUYANG T, JIANG Z, et al. Preparation and characterization of carbon fiber-graphite nanoplatelets network reinforced paraffin phase change composites[J]. Acta Materialia Sinica, 2020, 37(5):1130-1137.
- [10] 华建社, 张娇, 张焱, 等. 膨胀石墨/石蜡复合相变蓄热材料的热性能及定形性研究[J]. 材料导报, 2016, 30(12):61-64+75.
- HUA J S, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Study on thermal properties and shape-stabilizing of expanded graphite/paraffin composite phase change material[J]. Materials Review, 2016, 30(12):61-64+75.
- [11] 朱教群, 宋轶, 周卫兵, 等. 基于碳材料的有机复合相变材料导热增强研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2):213-222.
- ZHU J Q, SONG Y, ZHOU W B, et al. The use of carbon materials for enhancing heat transfer of organic based composite phase change materials: A review[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2):213-222.
- [12] 余立琼, 龚静, 冯志海. 泡沫碳/相变材料复合体研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(5):6-9.
- YU L Q, GONG J, FENG Z H. Development of composites of carbon foam/phase change materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(5):6-9.
- [13] 殷晓萍. 石蜡/泡沫炭定形复合相变储能材料的制备与性能研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.

YIN X P. Preparation and characterization of paraffin/carbon foam form-stable composite phase change Materials[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[14] 张靖驰, 盛强, 童铁峰, 等. 石蜡/泡沫碳相变复合材料的制备及蓄热实验[J]. *功能材料*, 2016, 47(11):11125-11130.

ZHANG J C, SHENG Q, TONG T F, et al. Preparation and thermal storage experiment of paraffin/carbon foam phase change composite[J]. *Journal of Functional Materials*, 2016, 47(11):11125-11130.

[15] 张靖驰, 盛强, 童铁峰, 等. 正十八烷/泡沫相变复合材料蓄热实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(6):61-65.

ZHANG J C, SHENG Q, TONG T F, et al. Thermal storage experiment of n-octadecane/foam phase change composite[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(6):61-65.

[16] 宿金栋, 李士明, 闫明伟, 等. 多孔碳球/SiC 纳米纤维/十八醇复合相变材料定型封装及其热性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(12):2482-2488.

SU J D, LI S M, YAN M W, et al. Study on stereotypes package and thermal properties of porous carbon spheres/sic nanofibers/1-octadecanol composite phase change materials[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(12):2482-2488.

[17] 陶璋, 伍玲梅, 张亚飞, 等. 生物质多孔碳基复合相变材料制备及性能[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(1):113-119.

TAO Z, WU L M, ZHANG Y F, et al. Preparation and properties of biomass porous carbon composite phase change materials[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(1):113-119.

Investigation on Heat Storage Characteristics of Vanadium Tailings/Carbon Foam/Organic Matter Composite Phase Change Materials

XU Zhong^{1,2,3}, HOU Jing^{1,2,3}, LI Jun^{1,2,3}, WU Enhui^{1,2,3}, DING Jiexiong¹, LUO Qinwen¹
(1.College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan 617000, China; 2.Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Solar Technology Integration, Panzhihua, Sichuan 617000, China;
3.Application and Solar Technology Integration Sichuan Provincial Key Laboratory of University, Panzhihua, Sichuan 617000, China)

Abstract: Using carbon foam (CF) as supporting materials, paraffin (PW), palmitic acid (PA) and stearic acid (SA) as phase change main materials and Panzhihua vanadium tailings (VT) as thermal conductivity enhancer, vanadium tailings/carbon foam/organic composite phase change materials were prepared by constant temperature impregnation and pouring method. Digital thermometer and infrared image were used to test the heat storage and release time and temperature distribution of composite phase change materials. The test results show that when the carbon foamed/organic composite phase change material is prepared by the constant temperature impregnation, the adsorption rates of carbon foam to PW, PA, and SA are 66%, 72% and 72%, respectively. The filling rate is low. Therefore, after mixing organic matter with micron-level TV and then pouring it into the carbon foam pores, the filling effect is better. The thermal storage shortened time of CF/PW, CF/PA and CF/SA composites with the addition of 2%, 1.6% and 0.8% of micron-level TV was shorter than that of the corresponding composites. When 0%~3% of micron-level TV was added to three kinds of carbon foamed/organic composites, the difference between the center temperature and the highest temperature was 2.7~3.8, 6.4~7.8 and 5.0~11.9 °C higher than that of pure organic material. The test results of thermal storage shortened time and temperature field distribution show that micrometer TV is the best in CF/PW composite phase change materials.

Keywords: vanadium tailings; carbon foam; organic matter; composite phase change material; temperature field distribution