

# 赤藻糖醇/甘露醇热性能实验研究

张瑞瑞,王宁,高志,于晓慧,杨宾\*  
(河北工业大学能源与环境工程学院,天津 300401)

**摘要:**以赤藻糖醇/甘露醇为相变材料基液,通过熔融共混两步法制备纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料,探究纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数、超声时间、超声功率等对复合相变材料传热特性的影响。结果表明,随着纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数的增加,复合相变材料导热率逐渐增大,当质量分数为 1.0% 时,导热率提高 24.1%,熔化时间最多可缩短 63.3%;当仅以超声时间为变量时,最优熔化时间为 1 h,熔化时间缩短 58.0%;当仅考虑超声功率时,最优超声功率为 100 W,熔化时间缩短 53.4%。

**关键词:**赤藻糖醇/甘露醇;相变材料;纳米 TiO<sub>2</sub>;导热率;传热

中图分类号:TB34

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)06-0162-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.033

## Experimental study on thermal performance of erythritol/mannitol

ZHANG Rui-rui, WANG Ning, GAO Zhi, YU Xiao-hui, YANG Bin\*

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Nano TiO<sub>2</sub>-erythritol/mannitol composite phase change material is prepared by a melting/blending two-step method using erythritol/mannitol as the substrate liquid of phase change material. The effects of nano TiO<sub>2</sub> content, ultrasonic time, ultrasonic power, etc. on the heat transfer characteristics of the composite phase change materials are analyzed. Experimental results show that as the mass fraction of nano TiO<sub>2</sub> increases, the thermal conductivity of the material increases gradually. When the mass fraction of nano TiO<sub>2</sub> is 1.0%, the thermal conductivity of the material is increased by 24.1%, and the melting time is shortened by up to 63.3%; If the ultrasonic time is selected as the unique variable, the optimal melting time is 1 h, which is shortened by 58.0%; If only ultrasonic power is considered, the optimal value is 100 W, which shortens the melting time by 53.4%.

**Key words:** erythritol/mannitol; phase change material; nano TiO<sub>2</sub>; thermal conductivity; heat transfer

相变储能技术由于储能密度高、相变潜热大、稳定性好等优点被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。糖醇具有高存储密度、价格低廉、无毒、无腐蚀性等优点在热能存储领域中有较好的应用前景<sup>[4]</sup>。但糖醇类相变材料的热导率较低且存在过冷现象,影响储能和放能速率。许多学者针对这些问题进行了研究,章学来等<sup>[5]</sup>通过添加纳米二氧化钛作为成核剂改善赤藻糖醇性能,并对复合相变材料的过冷度、相变潜热、导热系数进行测定;结果表明,添加 0.1% 的纳米二氧化钛-赤藻糖醇过冷度下降 37.91%,潜热值下降 2.25%,导热系数增大 3.67 倍。Srikanth 等<sup>[6]</sup>利用分散技术制备了甘露醇/氧化铜复合相变材料,结果表明,随着氧化铜质量分数的增加,复合相变材料相对结晶速率有所增加,当氧化铜质量分数为 0.5% 时,氧化铜/甘露醇的导热系数比纯甘露醇提高

25.2%;经过 100 次融化凝固循环后材料仍然表现出高潜热值和较好的稳定性。Shao 等<sup>[7]</sup>对赤藻糖醇/甘露醇进行了等温融化、结晶循环和 DSC 测试,结果表明,赤藻糖醇/甘露醇二元共晶混合物相比纯赤藻糖醇过冷度有所降低,同时熔点和熔化潜热相比于纯赤藻糖醇也有所降低。

尽管很多学者对赤藻糖醇/甘露醇的 DCS 测试、循环测试以及过冷度测试进行了探究,但对于实际蓄热过程的影响因素研究涉及很少。为拓宽相变材料相变温度范围,获得高相变潜热、低成本的相变材料,笔者采用赤藻糖醇/甘露醇二元糖醇混合物为相变材料基液,添加纳米 TiO<sub>2</sub> 以提高相变材料传热性能。并探究纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数、超声时间、超声功率、过热度对相变材料蓄热过程的影响。

收稿日期:2021-07-09;修回日期:2022-03-28

基金项目:河北省自然科学基金(E2019202089);大型公共建筑空调系统智慧运营管理关键技术研究(2018-K1-009)

作者简介:张瑞瑞(1996-),女,硕士研究生,研究方向为可再生能源利用与建筑节能技术,hncjzhangrui@163.com;杨宾(1980-),男,博士,副教授,研究方向为建筑节能与可再生能源,通讯联系人,Yangbin0720@hebut.edu.cn。

## 1 实验

### 1.1 材料及设备

实验中采用的纳米  $\text{TiO}_2$  比表面积为  $30 \sim 50 \text{ m}^2/\text{g}$ , 粒径为  $30 \text{ nm}$ , 纯度为  $99\%$ ; 所用相变材料 (PCM) 的基本参数如表 1 所示。实验所用设备的

详细信息如表 2 所示。

表 1 相变材料的基本参数

| 材料  | 相变温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 相变潜热/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$ | 纯度  |
|---|--------------------------|--------------------------------------|-----|
| 赤藻糖醇 ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$ )  | 118.6                    | 380.7                                | 分析纯 |
| D-甘露醇 ( $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$ ) | 167.9                    | 330.5                                | 分析纯 |
| 赤藓糖醇/甘露醇                                      | 113.6                    | 339.9                                | —   |

表 2 实验所用设备

| 设备名称          | 型号         | 设备参数   | 生产厂家          |
|---------------|------------|--|---------------|
| 超级恒温槽         | DC-0506-II | 温度范围: $-5 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ; 稳定度: $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$                      | 南京舜玛仪器设备有限公司  |
| 数据采集仪         | GP20       | 测量精度: $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$  | 横河电机有限公司      |
| 热电阻           | PT100      | 测量范围: $-70 \sim 500^{\circ}\text{C}$ ; 精度: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$                       | 上海松导加热传感器有限公司 |
| 电子天平          | BSM220.4   | 精度: $0.0001 \text{ g}$ ; 最大量程: $220 \text{ g}$   | 上海卓精电子科技有限公司  |
| 集热式恒温磁力搅拌器    | DF-101T    | 最大搅拌速度: $3000 \text{ r}/\text{min}$  | 巩义市予申仪器有限公司   |
| 超声处理器         | VCY500     | 最大超声功率: $500 \text{ W}$  | 上海研永超声设备有限公司  |
| 场发射扫描电镜       | Gemini300  | 最大放大倍数: $200$ 万倍   | 国仪量子技术        |
| Hotdisk 导热测量仪 | 2500s      | 导热系数范围: $0.005 \sim 500 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 温度范围: $0 \sim 1000 \text{ K}$ | 北京东方顶峰科技有限公司  |

### 1.2 复合相变材料的制备

将赤藻糖醇和甘露醇按一定摩尔比 ( $84:16$ ) 均匀混合后熔化作为复合相变材料基液, 基液完全熔化保持液体状态  $10 \text{ min}$ ; 然后加入相应浓度的纳米  $\text{TiO}_2$ , 用磁力搅拌器搅拌  $10 \text{ min}$ ; 最后将超声处理器放置于溶液中, 根据不同状态的要求进行超声时间和功率的设定。

### 1.3 材料表征

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察材料表面特征, 在室温下利用瞬态板热源法使用 hotdisk 导热测量仪对复合相变材料导热率进行测定。

### 1.4 复合相变材料的蓄热性能测试

利用蓄热箱进行复合相变材料蓄热特性实验, 该蓄热箱长  $120 \text{ mm}$ 、宽  $40 \text{ mm}$ 、高  $100 \text{ mm}$ 。在蓄热箱距底部  $20 \text{ mm}$  处固定 1 根水平铜管, 铜管直径  $14 \text{ mm}$ , 两端连接恒温槽进口端与出口端作为热源。在实验过程中将蓄热箱外部加上保温棉, 减少热量损失。实验中布置 4 个热电阻测点记录样品在蓄热过程中温度变化规律, 其热电阻位置参考杨<sup>[8]</sup>的蓄放热实验设计并加以改进。

整个熔化过程基本保证在室温 ( $23 \pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$  范围内进行, 并且重复实验 3 次, 取 3 次实验数据平均值作为最终结果。

## 2 实验结果分析

### 2.1 SEM 分析

纳米二氧化钛、赤藻糖醇/甘露醇、纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇的 SEM 图如图 1 所示。

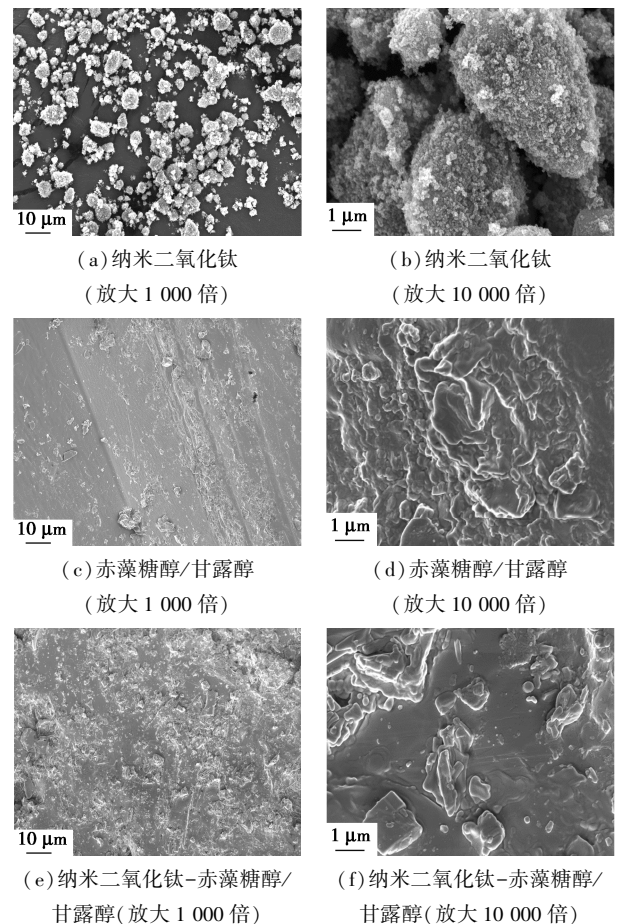


图 1 纳米二氧化钛、赤藻糖醇/甘露醇、纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇的 SEM 图

由图 1 中可以看出, 纳米二氧化钛表面呈现出粗糙的颗粒状结构。赤藻糖醇/甘露醇为光滑的片状结构, 表明赤藻糖醇与甘露醇得到均匀混合, 并不

存在各自纯物质。二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇也呈现出片状结构,但由于纳米二氧化钛的加入表面略显粗糙。

### 2.2 导热率的测量

纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇导热系数如图 2 所示。由图 2 可知,随着纳米二氧化钛质量分数的增加,赤藻糖醇/甘露醇的导热性能逐渐增强。这是由于二氧化钛在赤藻糖醇/甘露醇内部随机分散、相互连接建立起传热矩阵,提供有效的传热路径,增大导热率。赤藻糖醇/甘露醇的导热系数为  $0.5035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,纳米二氧化钛质量分数分别为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0% 时,纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇导热系数相比于纯赤藻糖醇/甘露醇分别增加 1.5%、16.3%、19.1%、21.7%、24.1%。

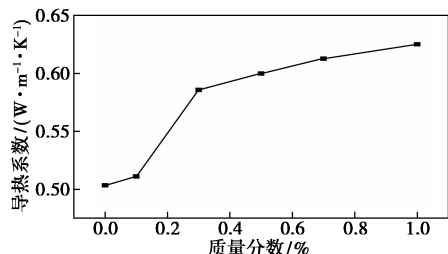
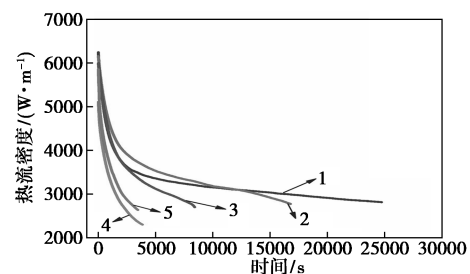


图 2 不同质量分数纳米  $\text{TiO}_2$  的  
纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇的导热系数

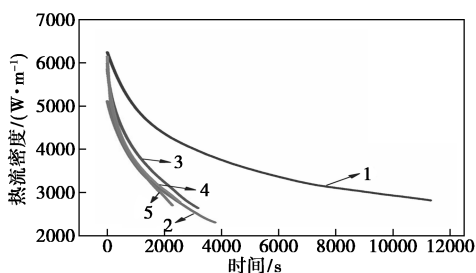
### 2.3 蓄热实验结果分析

#### 2.3.1 纳米 $\text{TiO}_2$ 质量分数对复合相变材料的蓄热效果的影响

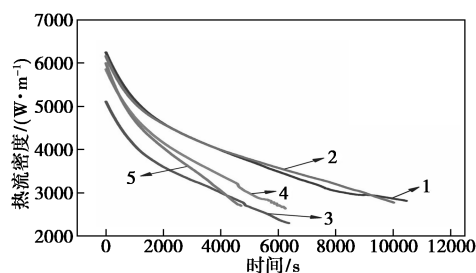
将不同质量分数纳米  $\text{TiO}_2$  的纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料进行熔化实验,各个测点热流密度在熔化过程中随时间变化情况如图 3 所示。



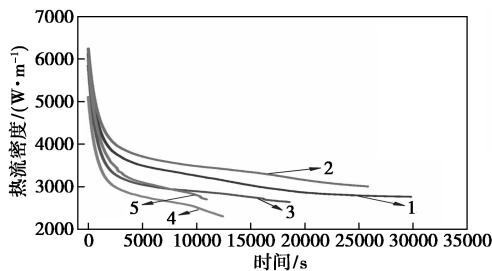
(a) 6# 测量点



(b) 7# 测量点



(c) 9# 测量点



(d) 10# 测量点

1—0.1%; 2—0.3%; 3—0.5%; 4—0.7%; 5—1.0%

图 3 不同质量分数纳米  $\text{TiO}_2$  的  
复合相变材料热流密度变化曲线

由图 3 可知,熔化初期各个测点热流密度较高,接着近乎直线下降,当下降到一定程度时下降幅度趋于平缓,最终趋于一个稳定数值。这主要是因为加热之初蓄热箱内材料温度较低,与热源温差最大且换热热阻最小,当加热一定时间后,内部相变材料开始熔化导致换热热阻增大且接触温差减小。由于赤藻糖醇/甘露醇固液密度的不同会有一些的体积膨胀率,当相变材料开始熔化后内部会存在一定的空隙阻碍传热,由于重力作用,空隙更多地存在于铜管的上部,因此上部的 9# 热电阻相对于 10# 热电阻热流密度变化相对平缓。从 4 个测点热流密度可以看出,同一时刻各个热电阻存在差异。

熔化过程所用时间如表 3 所示。由表 3 可知,随着纳米二氧化钛质量分数的增加,纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料熔化时间逐渐缩短。这是由于纳米二氧化钛在复合相变材料内部形成传热矩阵,提供有效的传热路径,纳米  $\text{TiO}_2$  的增多使这种传热路径变密集,熔化速度加快。纳米  $\text{TiO}_2$  质量分数为 0.3%、0.5%、0.7%、1.0% 的复合

表 3 不同质量分数纳米  $\text{TiO}_2$  的复合相变材料熔化时间

| 纳米二氧化钛质量分数/% | 熔化时间/s |
|--------------|--------|
| 0.1          | 29771  |
| 0.3          | 25784  |
| 0.5          | 18556  |
| 0.7          | 12403  |
| 1.0          | 10914  |

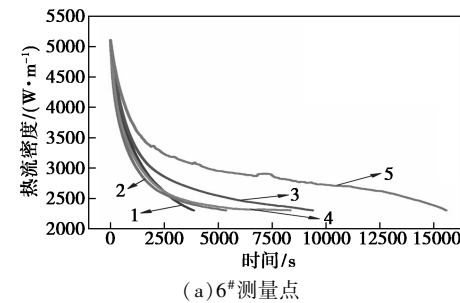
相变材料相比纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数为 0.1% 时,熔化时间分别缩短 13.4%、37.7%、58.3%、63.3%。纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数与复合相变材料熔化时间成正二次方关系,拟合公式为:

$$y = 433.64x^2 - 7711.4x + 37850 \quad R^2 = 0.9768 \quad (1)$$

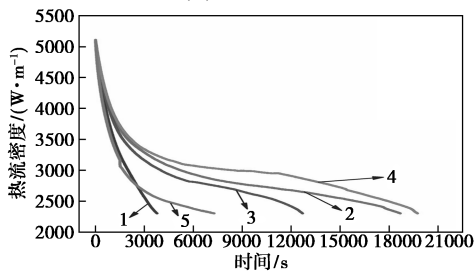
式中:y 为熔化时间;x 为纳米二氧化钛的质量分数。

### 2.3.2 超声时间对蓄热特性的影响

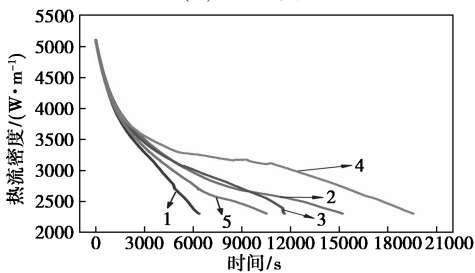
为缓解纳米粒子在相变材料的团聚现象,在复合相变材料制备过程中采用超声将纳米粒子均匀分散。不同超声时间下的纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料熔化过程中各个测点热流密度随时间变化情况如图 4 所示,熔化时间如表 4 所示。



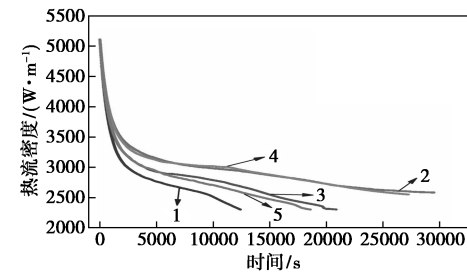
(a) 6# 测量点



(b) 7# 测量点



(c) 9# 测量点



(d) 10# 测量点

1—1.0 h; 2—1.5 h; 3—2.0 h; 4—2.5 h; 5—3.0 h

图 4 不同超声时间下复合相变材料热流密度变化曲线

由图 4 可知,相变材料熔化过程中热流密度变化趋势与表 3 相似。由表 4 可知,随着超声时间的增加,熔化时间并非线性变化。超声时间为 1 h 时熔化过程完成最快,这是因为超声时间过长,溶液升温导致纳米粒子运动加剧,促进团聚进而沉淀,影响传热效果<sup>[9]</sup>。超声时间为 1.0、2.0、2.5、3.0 h 相比于超声时间为 1.5 h 时熔化过程分别缩短 58.0%、29.3%、7.6%、37.0%。在熔化过程中 4 只热电阻表现趋势有差异,虽然利用超声手段在一定程度上缓解了纳米 TiO<sub>2</sub> 在相变材料内分布不均匀的现象,但纳米 TiO<sub>2</sub> 不可避免地发生沉降,导致材料内部温度分布不均匀。超声时间与复合相变材料熔化时间成负四次方关系,拟合式为:

$$y = -2955.8x^4 + 36360x^3 - 157147x^2 + 278367x - 142222 \quad R^2 = 1 \quad (2)$$

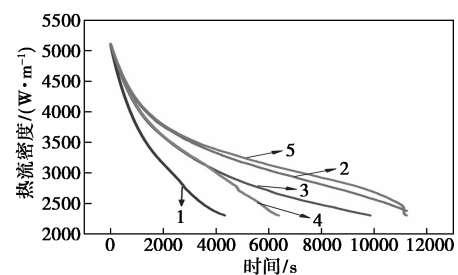
式中:y 为熔化时间;x 为超声时间。

表 4 不同超声时间下复合相变材料熔化时间

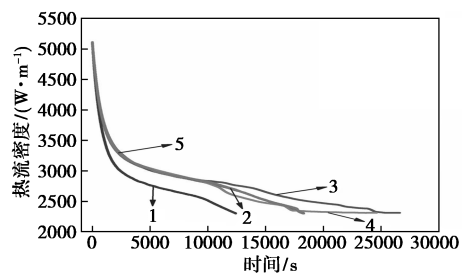
| 超声时间/h | 熔化时间/s | 超声时间/h | 熔化时间/s |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.0    | 12403  | 2.5    | 27263  |
| 1.5    | 29514  | 3.0    | 18588  |
| 2.0    | 20863  |        |        |

### 2.3.3 超声功率对蓄热特性的影响

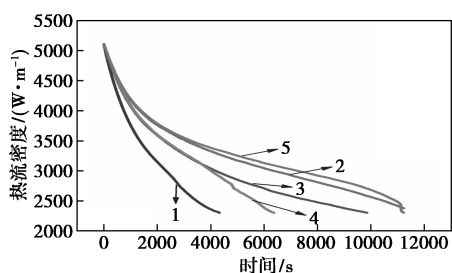
不同超声功率下的纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料熔化过程中各个测点热流密度随时间变化情况如图 5 所示。不同超声功率下的熔化时间如表 5 所示。由图 5 与表 5 可知,随着超声功率的增大,复合相变材料熔化时间先增加到达峰值后逐渐减少,当超声功率为 200 W 时,熔化时间



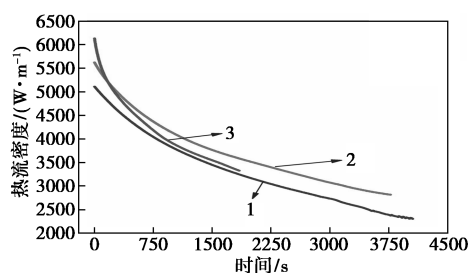
(a) 6# 测量点



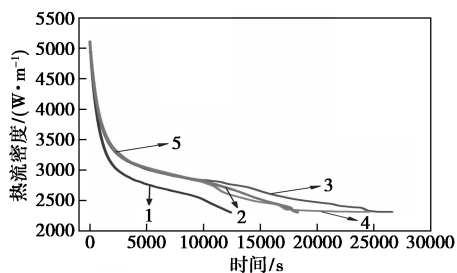
(b) 7# 测量点



(c) 9# 测量点



(b) 7# 测量点



(d) 10# 测量点

1—100 W; 2—150 W; 3—200 W; 4—250 W; 5—300 W

图 5 不同超声功率下热流密度变化曲线

表 5 不同超声功率下融化时间

| 超声功率/W | 融化时间/s | 超声功率/W | 融化时间/s |
|--------|--------|--------|--------|
| 1000   | 12403  | 250    | 24606  |
| 150    | 18298  | 300    | 18235  |
| 200    | 26595  |        |        |

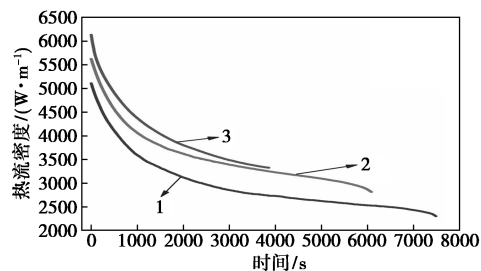
最长。超声功率为 100、150、250、300 W 的融化时间比于超声时间为 200 W 时快 53.7%、31.2%、7.8%、31.4%。超声时间与复合相变材料融化时间成负四次方关系,拟合式为:

$$y = -2955.8x^4 + 36360x^3 - 157147x^2 + 278367x - 142222 \quad R^2 = 1 \quad (3)$$

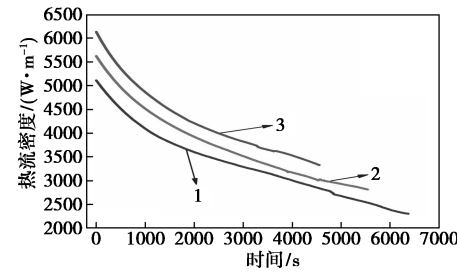
式中:  $y$  为融化时间;  $x$  为超声功率。

### 2.3.4 过热度对蓄热特性的影响

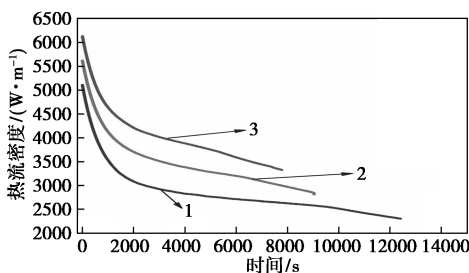
赤藻糖醇/甘露醇熔点为 113.6℃,将热源温度控制在 160、170、180℃ (过热度为 46.4、56.4、66.4℃) 进行纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料熔化实验,各个测点热流密度随时间的变化情况如图 6 所示。



(a) 6# 测量点



(c) 9# 测量点



(d) 10# 测量点

1—160℃; 2—170℃; 3—180℃

图 6 不同热源温度下复合相变材料热流密度变化曲线

由图 6 中可以看出,从 4 只热电阻来看,随着过热度提升,熔化速度有所加快。这是因为较大的过热度使换热热阻减小,传热加快。热源温度为 170℃ 与 180℃ 较热源温度 160℃ 时的熔化时间分别缩短 27.1% 与 37.2%。熔化所用时间如表 6 所示。

表 6 不同热源温度下融化时间

| 热源温度/℃ | 融化时间/s |
|--------|--------|
| 160    | 12403  |
| 170    | 9041   |
| 180    | 7784   |

## 3 结论

通过实验研究纳米 TiO<sub>2</sub> 质量分数、超声时间、超声功率等对赤藻糖醇/甘露醇复合相变材料蓄热特性的影响,得出如下结论:

(下转第 170 页)

由表 2 可以看出,5 种材料的膜阻抗  $R_s$  基本一样,但电荷转移阻抗  $R_{ct}$  显著不同。SiO 的电荷转移阻抗  $R_{ct}$  为 369.1  $\Omega$ ,经掺杂改性后材料的电荷转移阻抗均显著减低,特别是铌钨氧化物掺杂改性以后,材料的电荷转移阻抗  $R_{ct}$  为 113.5  $\Omega$ ,表明电子在电极材料中的阻力较小,导电性较好。交流阻抗数据结果表明,通过掺杂改性,可以在 SiO 材料表面形成一层高导电物质,使电荷转移阻抗显著减小,从而提高了改性 SiO 材料的电子传导能力。

### 3 结论

采用铌钨氧化物作改性剂,掺杂改性 SiO,同时考察了五氧化二铌、钛酸锂、钛铌氧化物的改性效果。XRD 测试表明,SiO 材料为无定型非晶体结构,经掺杂改性后材料中出现显著特征添加剂的峰。添加钛酸锂材料形成硅酸锂盐,没有显著晶体硅的特征峰。扫描电镜分析结果表明,经球磨后 SiO 材料颗粒更加圆润没有显著棱角,添加改性剂呈絮状颗粒物包裹 SiO。改性后材料的充放电比容量均显著降低,首次充放电效率由 SiO 的 45.0% 提升至 SiO@NWO 的 70.5%。交流阻抗测试表明,改性后材料的电荷转移阻抗显著降低,由 SiO 的 369.1  $\Omega$  降低为 SiO@NWO 的 113.5  $\Omega$ ,导电性能显著提升。

#### 参考文献

[1] 刘柏男,徐泉,褚庚,等.锂离子电池高容量硅碳负极材料研究

(上接第 166 页)

(1)随着纳米  $TiO_2$  质量分数的增加,纳米二氧化钛-赤藻糖醇/甘露醇导热系数逐渐升高,纳米  $TiO_2$  质量分数为 1% 时其导热系数比纯赤藻糖醇/甘露醇提高 24.1%。

(2)从纳米  $TiO_2$  质量分数、超声时间、超声功率 3 个方面确定复合相变材料最佳制备体系为:纳米  $TiO_2$  质量分数为 1%、超声时间为 1 h、超声功率为 100 W。

(3)纳米  $TiO_2$  质量分数与熔化时间关系曲线符合二次多项式形式;超声功率、超声时间与熔化时间均符合四次多项式形式。

#### 参考文献

[1] Zakir K,Zulfiqar K,Abdul G.A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials,thermal stability and compatibility[J].Energy Conversion and Management,2016,115(5):132-58.

进展[J].储能科学与技术,2016,5(4):417-421.

- [2] 张刚,刘兴稳,张帆,等.高能效长寿命硅碳复合材料的制备及其电化学性能[J].储能科学与技术,2020,9(3):826-830.
- [3] 刘凡,秦利娟,刘艳侠.锂离子电池硅碳负极材料的最新研究进展[J].现代化工,2017,37(12):14-18.
- [4] Wu J,Cao Y,Zhao H,*et al.*The critical role of carbon in marrying silicon and graphite anodes for high energy lithium ion batteries[J].Carbon Energy,2019,1(1):1-20.
- [5] Liu Z,Yu Q,Zhao Y,*et al.*Silicon oxides:A promising family of anode materials for lithium-ion batteries[J].Chemical Society Reviews,2019,48(1):285-309.
- [6] 李兆麟,吕鹏鹏,赵海雷,等.复合溶胶-凝胶-钢法制备锂离子电池氧化亚硅/碳复合负极材料[J].硅酸盐学报,2021,49(1):153-160.
- [7] 吴文骏,马海燕,杨化滨.氧化亚硅/石墨/碳复合材料的制备及其电化学性能[J].南开大学学报:自然科学版,2015,(3):54-58.
- [8] Griffith K J,Wiaderek K M,Cibin G,*et al.*Niobium tungsten oxides for high-rate lithium-ion energy storage[J].Nature,2018,559(7715):556-563.
- [9] Koçer C P,Griffith K J,Grey C P,*et al.*Lithium diffusion in niobium tungsten oxide shear structures[J].Chemistry of Materials,2020,32(9):3980-3989.
- [10] Lakhnot A S,Gupta T,Singh Y,*et al.*Aqueous lithium-ion batteries with niobium tungsten oxide anodes for superior volumetric and rate capability[J].Energy Storage Materials,2020,27(80):506-513.
- [11] Wang L,Wang Z Y,Wu J F,*et al.*To effectively drive the conversion of sulfur with electroactive niobium tungsten oxide microspheres for lithium-sulfur battery[J].Nano Energy,2020,77:105173-105184.
- [12] 陈垒,陈振宇,杨智雄,等.碳包覆改性制备高倍率钛铌氧化物  $TiNb_2O_7$  [J].电源技术,2019,43(11):1757-1760. ■

[2] Meng Z N,Zhang P.Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM[J].Applied Energy,2017,190(4):524-39.

[3] Raza G,Zhang P,Meng Z N.Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials-A review[J].Applied Energy,2019,238:582-611.

[4] 王飞波,孟祥瑞,李敏霞,等.多元糖醇混合物的蓄放热性能[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(5):475-482.

[5] 章学来,丁锦宏,罗孝学,等.纳米二氧化钛-赤藻糖醇储能体系实验研究[J].制冷学报,2016,37(1):70-76.

[6] Srikanth S,Suresh S.Study of thermo-physical properties and cycling stability of d-Mannitol-copper oxide nanocomposites as phase change materials[J].Journal of Energy Storage,2018,15(10):245-55.

[7] Shao X F,Yang S,Wang C,*et al.*Screening of sugar alcohols and their binary eutectic mixtures as phase change materials for low-to-medium temperature thermal energy storage. (II): Isothermal melting and crystallization behaviors[J].Energy,2019,180:572-583.

[8] 杨亚帅.基于太阳能供暖系统的相变蓄热材料研究[D].天津:河北工业大学,2017.

[9] 甘伟,章学来,徐笑锋.超声波优化相变蓄冷材料的研究进展[J].包装工程,2021,42(1):46-54. ■