

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2024.03.004

废旧发泡混凝土定型相变材料制备及热性能研究

Study on preparation of shape-stable phase-change materials based on cellular concrete and their performances

孟强¹, 田曦², 熊亚选^{2*}
MENG Qiang¹, TIAN Xi², XIONG Yaxuan^{2*}

(1. 中国人民解放军63933部队, 北京100091; 2. 北京建筑大学 供热供燃气通风及空调工程北京市重点实验室, 北京100044)

(1. Troop 63933 of the People's Liberation Army, Beijing 100091, China; 2. Beijing Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilating and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

摘要:为规模化消纳城市固体废弃物,降低废旧发泡混凝土大量堆积对城市生态环境的破坏。提出以废旧发泡混凝土作为骨架材料,对其进行预烧结处理,以 Na_2CO_3 为相变材料制备定型相变材料。结果表明:废旧发泡混凝土可以负载质量分数为45%的 Na_2CO_3 ;差示扫描量热法(DSC)测得该定型相变材料的熔化潜热为126.7 J/g;X射线衍射法(XRD)和傅里叶变换红外法(FT-IR)表明,骨架材料和相变材料之间有良好的化学相容性;激光导热分析法(LFA)测得该定型相变材料的导热系数最大为0.24 W/(m·K)。

关键词:蓄热;固体废弃物;定型相变材料;发泡混凝土;骨架材料;性能

中图分类号:TK 02 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2024)03-0029-06

Abstract: To accommodate massive municipal solid wastes, and avoid environmental pollution resulting from serious waste concrete accumulation, a shape-stable phase-change material (SSPCM) taking waste cellular concrete (WCC) after pre-sintering as its skeleton material and using Na_2CO_3 as its phase-change material is proposed. The test results show that the sintered WCC loading with 45% Na_2CO_3 is of a melting latent heat of 126.7 J/g measured by a differential scanning calorimeter (DSC). And according to the results of X-Ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared (FT-IR), the chemical compatibility between the skeleton material and phase change material of the SSPCM is good. The maximum thermal conductivity of the SSPCM is 0.24 W/(m·K) measured by laser flash analysis (LFA).

Keywords: heat storage; solid waste; shape-stable phase-change material; cellular concrete; skeleton material; performance

0 引言

我国力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和^[1],能源结构的调整和优化已成为能源行业首要任务之一。发展可再生能源,提高能源利用效率,是解决能源危机和环境污染的有效途径。

热能是能源领域中一个重要的分支。热能储存(TES)技术目前主要有3种类型,即显热、潜热和热化学储存。其中,显热蓄热技术已经成熟,但其热能储存密度很低;热化学蓄热技术仍处于实验室研究阶段。潜热蓄热技术具有蓄热密度高、充放电

温度恒定、对空间要求小的优点。然而,相变材料(PCMs)的过冷、相分离、低热导率等特性限制了其在实际工程中的大规模应用。为克服潜热和显热储能的缺点,提出一种基于潜热和显热储能的新型定型相变材料(SSPCMs)^[2]。该材料中,骨架材料将相变材料包裹在微孔中,以减少过冷和相分离,提高热导率,避免相变材料的泄漏。研究表明,可用于制备SSPCMs骨架材料包括氢氧化钙^[3]、氧化铝^[4]、硅藻土^[5-6]、膨胀石墨^[7]、氧化镁^[8]、高岭土^[9]、珍珠岩^[10]和海泡石^[11]等。Li等^[4]比较了以氧化铝为骨架材料、以铝和碳酸氢钠为相变材料的定型相变储热材料,得出铝基SSPCMs比盐基SSPCMs具有更高热性能的结论。

基金项目:国家自然科学基金项目(62033014)
National Natural Science Foundation of China(62033014)

合理利用工业废弃物可有效减少环境污染。Wang 等^[12]提出以粉煤灰作为骨架材料、碳酸钾作为相变材料制备 SSPCMs 并得到粉煤灰与碳酸钾的最佳质量比。王燕等^[13]制备了太阳盐作为骨架材料、钢渣作为相变材料的 SSPCMs, 并通过试验测得钢渣与熔盐质量比为 1:1 时定型效果最优。Anagnostopoulos 等^[14]提出用工业废料赤泥作为骨架材料、硝酸盐作为相变材料制备 SSPCMs, 总体性能良好, 为能源相关应用副产品赤泥提供了利用途径。Li 等^[15]以膨胀珍珠岩作为骨架材料、硝酸钠作为相变材料制备形状稳定的 SSPCMs。Sang 等^[16]提出了以三元碳酸盐($K_2CO_3-Li_2CO_3-Na_2CO_3$)为高温热能储存材料、以 MgO 为骨架材料制备 SSPCMs, 结果显示, 碳酸盐与氧化镁之间没有化学反应, 该材料在 100 次循环后仍表现出良好的热循环稳定性。

发泡混凝土是一种新型绿色建筑材料^[17], 具有保温隔热、耐火性好的特点。废旧发泡混凝土(Waste Cellular Concrete, WCC)作为建筑固体废弃物具有作为骨架材料的潜力, 相较于 MgO 基等人造骨架材料具有来源广泛、极易获得、成本较低、节能低碳的优点, 可用于大规模生产 SSPCMs。发泡混凝土主要由粉煤灰和水泥组成, 前者作为 SSPCMs 的骨架材料已有大量研究文献, 但以 WCC 作为骨架材料目前还没有报道。因此, 本研究采用 WCC 作为骨架材料。 Na_2CO_3 具有腐蚀性小、相变温度高、相变潜热大、温度范围广、储热密度大及成本低廉等特点, 非常适合应用于高温储能系统中。本研究选用 Na_2CO_3 作为相变材料制备高温 SSPCMs, 并分析其储热性能、导热性能及化学相容性, 探索 WCC 作为骨架材料制备低成本绿色 SSPCMs 的可行性。

1 试验

1.1 试验原材料

本研究采用 Na_2CO_3 为相变材料, 购自中国国药集团化学试剂有限公司, 纯度 $\geq 99\%$ 。骨架材料为 WCC。使用质量分数为 5% 的聚乙烯醇(PVA)溶液作为烧结剂, 有助于 SSPCMs 成型, PVA 纯度 $\geq 99\%$ 。

1.2 SSPCMs 制备

首先对 WCC 进行预烧结处理, 去除不耐热的物质。将 WCC 打碎研磨成粉末、称量并记录, 然后将其放在马弗炉(SX2-5-12A)中以 900 °C 的温度烧制 2 h。待马弗炉自然冷却到室温后, 取出烧结后的 WCC 再进行称量并记录。将 2 组数据进行对比分析, 结果显示, 50 g WCC 在 900 °C 下经过 2 h 的高温烧结, 剩余 44.66 g, 热失重比为 10.68 %。图 1 为 WCC 预烧结前后 X 射线衍射法(XRD)分析对比。

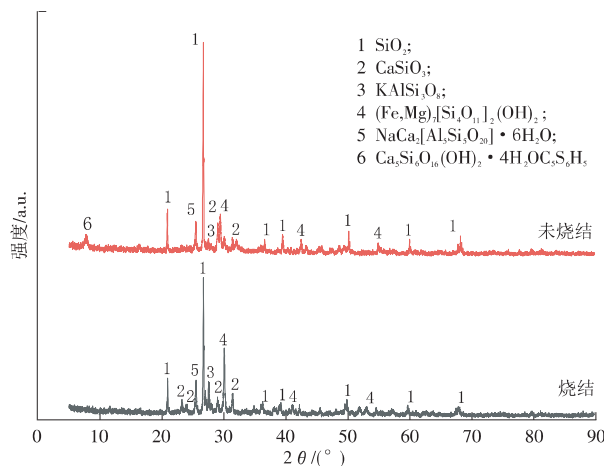


图 1 WCC 预烧结前后的 XRD 对比

Fig. 1 XRD patterns of WCC before and after sintering

由图 1 可见, 经 900 °C 高温预烧结的 WCC 与未烧结 WCC 相比, 前者成分发生了变化, 后者的 SiO_2 衍射峰强度比前者的 SiO_2 衍射峰强度更高, 说明前者的 SiO_2 含量较高。在生产发泡混凝土时, 为克服其脆性大、易裂开、抗拉强度低等缺点, 往往会在其中添加有机纤维及有机胶。这些有机纤维以丙烯聚合技术制作成的等规聚丙烯作为原材料, 再经过特殊的工艺制成合成纤维。

聚丙烯纤维及有机胶会在高温下分解, 因此 WCC 在进行预烧结处理时内部有机纤维会分解并生成新的物质。通过对比 2 种材料的 XRD 曲线可知, 烧结后的 WCC 发生了一系列化学反应, 托贝莫来石在高温下分解为 SiO_2 和硅灰石($Ca_3Si_3O_9$), 由于硅灰石含量少所以无衍射峰。同时, 各个衍射峰的强度变化小, 说明主要物相组成无变化, WCC 的质量损失是有机物分解造成的。

为了更加清楚地了解 WCC 在热处理过程中的质量损失情况, 对其进行热重分析测试。图 2 为 WCC 质量随温度变化的曲线。由图 2 可见, 主要质量损失阶段分别出现在 130~300 °C 和 710~770 °C。其中, 第 1 段质量损失主要是由于 WCC 内部添加的有机纤维分解和 $NaCa_2[Al_3Si_3O_{20}] \cdot 6H_2O$ (钠钙沸石) 脱水导致的。而第 2 段质量损失主要是由于 $(Fe, Mg)_3[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$ (角闪石) 分解成 SiO_2 和 Fe_2O_3 等物质及托贝莫来石分解为 SiO_2 和硅灰石导致的。KAlSi₃O₈ (钾长石) 具有稳定的三维框架结构, 其发解温度高达 1 150 °C, 因此在煅烧温度内并没有分解。

采用冷压烧结法制备 SSPCMs, 制备工艺流程如图 3 所示。具体过程如下: 将粉末状 Na_2CO_3 与适量 WCC 粉末在球磨机(KE-2L)中混合, 混合物以 250 r/min 的速度混合 30 min; 然后将混合物倒入研钵中, 加入适量的质量分数为 5% 的 PVA 溶液, 将其

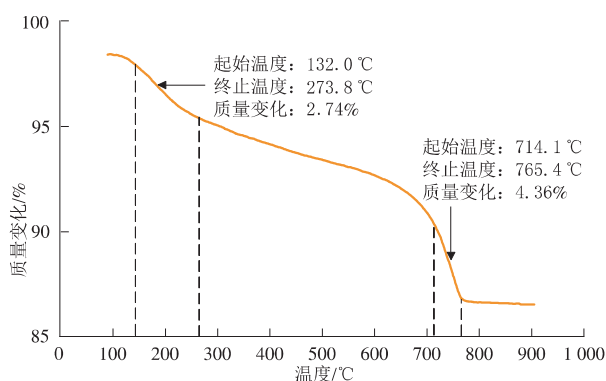


图2 WCC的质量随温度变化曲线

Fig. 2 Mass of WCC varying with temperature

充分研磨直至混合均匀。其中,PVA在样品中只承担辅助成型的作用,且添加的量非常少,1.000 g样

品中纯PVA约为0.005 g,且在230 °C便会分解蒸发。因此,PVA不属于SSPCMs的组成部分,且不会影响SSPCMs的性能。接下来将混合粉体加入圆形模具中,以6 MPa的压力在压力机(MSY-50)中保压3 min,得到直径13 mm、高约3 mm、质量约1 g的圆柱状样品;最后将样品移入马弗炉中按以下程序进行烧结:(1)以2 °C/min的升温速率从室温加热至100 °C后停止加热,保温0.5 h,此过程为干燥过程;(2)以2 °C/min的速率升温,从100 °C加热到400 °C并保温1.0 h,除去PVA;(3)从400 °C加热到900 °C,升温速率为2 °C/min,在900 °C下保温1.5 h;(4)关闭电源,待样品自然冷却至室温后取出最终的SSPCMs成品(以下简称为NC)。

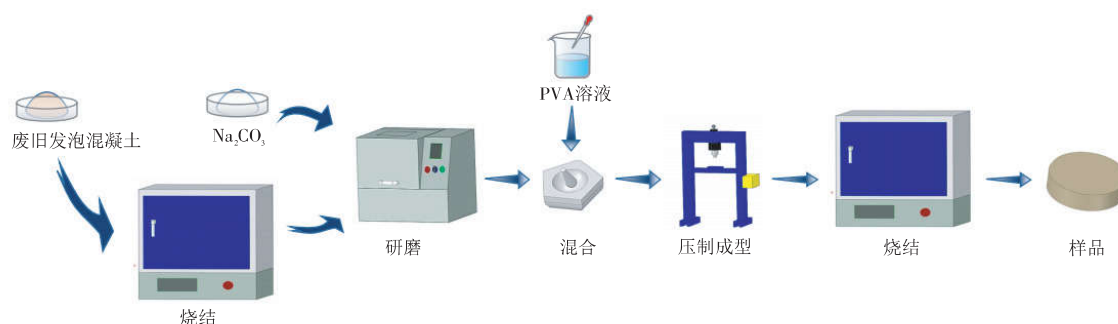


图3 SSPCMs制备工艺流程

Fig. 3 Fabrication of the SSPCMs

表1为 Na_2CO_3 /WCC制备的5种不同质量配比SSPCMs具体信息,图4为5种SSPCMs的成品。

表1 Na_2CO_3 /WCC质量配比Table 1 SSPCMs with different mass ratio of Na_2CO_3 to WCC

SSPCMs	NC1	NC2	NC3	NC4	NC5
$w(\text{Na}_2\text{CO}_3)/\%$	60	55	50	45	40
$w(\text{WCC})/\%$	40	45	50	55	60
$w(\text{PVA溶液})/\%$	5	5	5	5	5

图4 Na_2CO_3 /烧结WCC制成的SSPCMs成品

Fig. 4 Photos of SSPCMs with different mass ratio of sodium carbonate to sintered WCC

如图4所示,5组SSPCMs成品依次为NC1—NC5。可以清晰地观察到,NC1,NC2成品变形十分严重,漏盐现象明显,在高温作用下已经融化,颜色呈深绿色;NC3成品稍有变形,有漏盐现象,颜色为绿色;NC4,NC5成品形状未发生明显变化,漏盐现象也不明显,颜色为土褐色。从结果来看, Na_2CO_3 质量分数为40%~45%的样品可以制备出成型完好

的SSPCMs。

1.3 表征方法

本使用STA449 F3同步热分析仪(德国NETZSCH)测定样品的熔化和凝固过程、潜热和比热。每个样品在氮气气氛下以10 K/min的间隔进行5次熔融固化循环。以高纯氮气(99.999%)作为保护气体和吹扫气体,通过激光闪光分析法(LFA457, NETZSCH)分析热扩散率计算SSPCMs的热导率。通过X射线衍射仪SmartLab(日本理学)测试SSPCMs的物相变化,方法是利用扫描角度 $5.00^\circ \sim 90.00^\circ$ 且间隔为 0.02° 的Cu靶辐射进行扫描。采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Nicolet 600)表征SSPCMs中官能团和化学键的变化,扫描范围 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 SSPCMs的储热性能

通过同步热分析仪测试得出 Na_2CO_3 , NC4和NC5的差示扫描量热法(DSC)曲线,分析各自DSC曲线中出现熔融峰的起始温度和终止温度,对应的峰面积就是样品的相变潜热。 Na_2CO_3 质量占40%时SSPCMs的相变潜热为120.6 J/g,质量占45%时SSPCMs的相变潜热为126.7 J/g, Na_2CO_3 的相变潜热

为 307.9 J/g。图 5 为 Na_2CO_3 , NC4 和 NC5 的 DSC 曲线, 由图 5 可见, 2 种 SSPCMs 的相变潜热都比 Na_2CO_3 小, 原因是 WCC 不具有潜热效应。

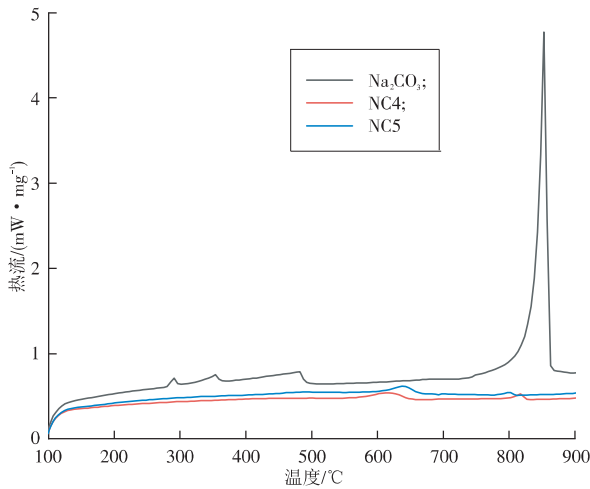


图 5 Na_2CO_3 , NC4 和 NC5 的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of Na_2CO_3 , NC4 and NC5

图 6 为 Na_2CO_3 , NC4 和 NC5 的比热容随温度变化曲线, 由图 6 可见, Na_2CO_3 质量分数较高的 SSPCMs, 其潜热要高于 Na_2CO_3 质量分数较低的 SSPCMs, 这表明 SSPCMs 的储热介质主要为相变材料。此外还可以从图 6 中看出, 样品 NC4 和 NC5 的比热容在非相变阶段随温度变化波动幅度不大, 在相变阶段内比热会有增加。

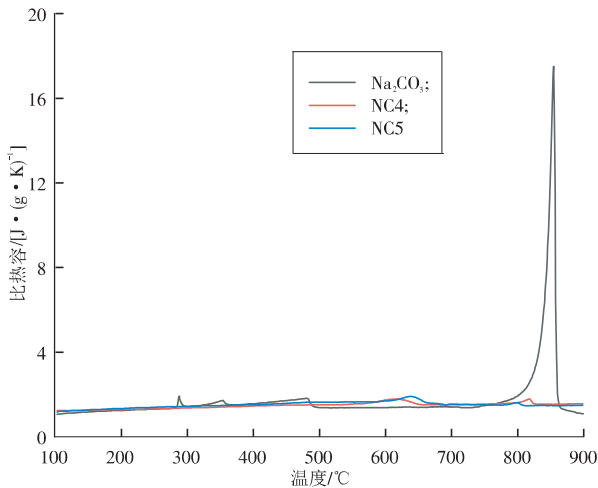


图 6 Na_2CO_3 , NC4 和 NC5 的比热容曲线

Fig. 6 Specific heat curves of Na_2CO_3 , NC4 and NC5

在实际工程应用中, 材料的储热密度是非常重要的性能指标。储热密度是指材料在单位体积内能够存储的热量。根据热力学第一定律对 NC4 及 NC5 的储热密度进行计算, 计算公式为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_{p1} dT + \Delta H_m + \int_{T_1}^{T_2} c_{p2} dT, \quad (1)$$

式中: c_{p1} , c_{p2} 分别为 SSPCMs 相变前后的比定压热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; q 为 SSPCMs 单位质量储热密度, J/g ; T_1 , T_2

分别为 SSPCMs 的计算下限和计算上限温度, K ; T_0 , T_1 为 SSPCMs 的相变起始和终止温度, K ; ΔH_m 为 SSPCMs 的相变潜热, J/g 。

图 7 为 NC4 和 NC5 储热密度随温度变化曲线。由图 7 可见, 2 种材料的储热密度均随储热温差的增大而线性提高, 其中 NC5 的储热密度最高, 为 1 178.99 J/g , NC4 储热密度为 1 150.17 J/g , 储热能力优异。

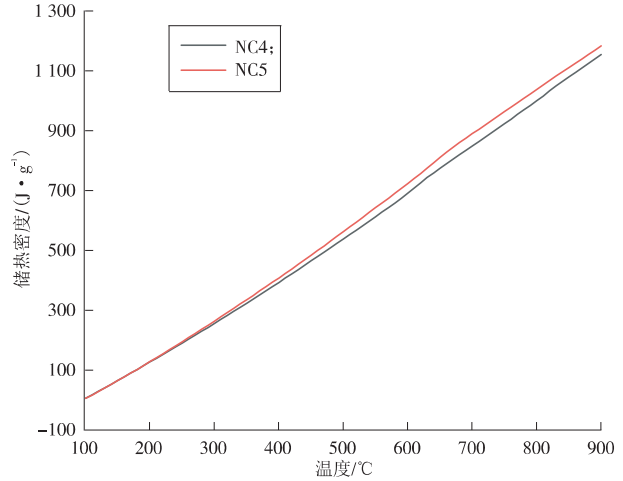


图 7 NC4 及 NC5 的储热密度

Fig. 7 TES capacity of NC4 and NC5

2.2 SSPCMs 的导热性能

SSPCM 的导热系数是评价传热性能的重要参数。本研究采用激光导热系数法 (LFA) 测得 SSPCMs 的热扩散率, 准确测量样品 NC5 的密度并假定其在温度范围内恒定不变, 由下式计算得到样品 NC5 的导热系数。

$$\lambda = \alpha(T) \rho(T) c_p(T), \quad (2)$$

式中: λ 为 SSPCMs 的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; α 为热扩散率, mm^2/s ; ρ 为 SSPCMs 的密度, g/cm^3 ; c_p 为 SSPCMs 的比定压热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。

图 8 为样品 NC5 的热扩散率和导热系数随温度变化曲线。由图 8 可见, NC5 的热扩散系数随温度上升呈现上升趋势。此外, 样品 NC5 的比热容随温度上升增加幅度较小, 但由于样品热扩散率的上升, 导热系数随温度的变化也呈现上升趋势。经计算可得: 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 时 NC5 导热系数为 0.11 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 在 450 $^{\circ}\text{C}$ 时导热系数达到最大值, 为 0.24 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由于样品导热系数较低、保温性能较好, 可用作相变微胶囊填充于有低节能要求的外墙等保温项目。

2.3 SSPCMs 的化学相容性

图 9 为 Na_2CO_3 煅烧 WCC 和样品 NC5 的 XRD 图谱。在样品 NC5 的 XRD 图谱中可见, 其主要物相为 Na_2CO_3 且衍射峰强度最大, 与纯 Na_2CO_3 物相比衍射峰强度大小不同。样品 NC5 的主要物相与煅烧

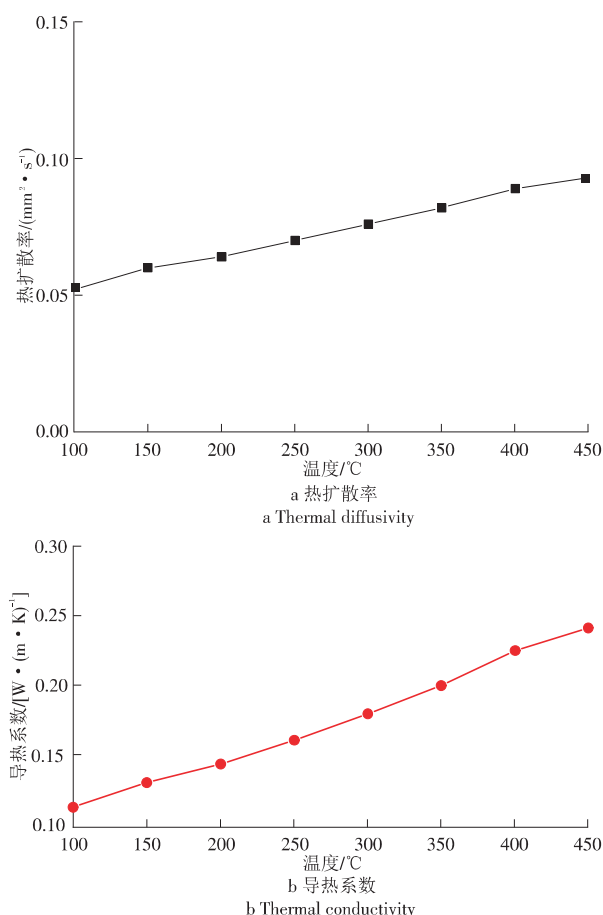
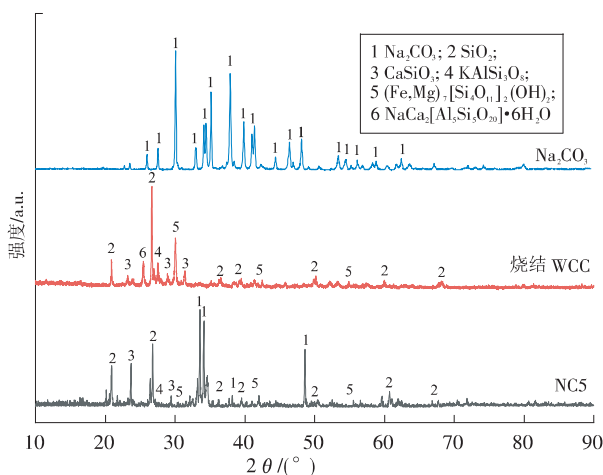


图8 NC5的导热系数和热扩散系数曲线

Fig. 8 Thermal conductivity and thermal diffusivity of NC5

WCC物相成分一致,这说明在冷压烧结法的制备过程中, Na_2CO_3 与煅烧WCC之间没有新的物质生成,两者之间具有良好的化学相容性。

图9 Na_2CO_3 、煅烧WCC和NC5的XRD图谱Fig. 9 XRD patterns of Na_2CO_3 , sintered WCC and NC5

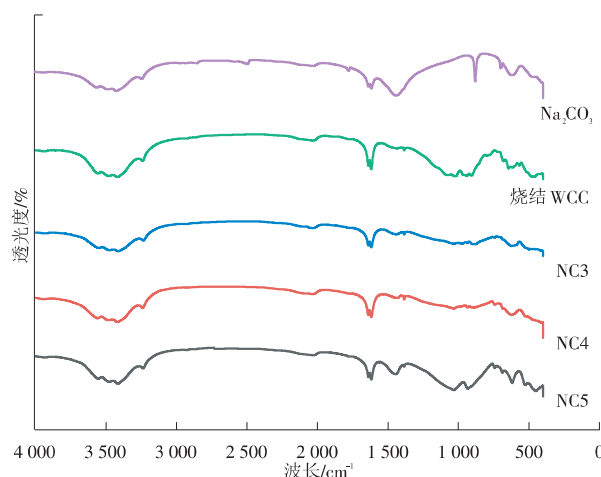
为验证骨架材料和相变材料之间是否会发生化学反应,从原子间化学键的角度做进一步分析。图10为 Na_2CO_3 、煅烧WCC和SSPCMs的傅里叶变换红外法(FT-IR)图谱。由图10可见,三者的官能团都出现了结晶水键合($3\,100\sim 3\,600\text{ cm}^{-1}$),这可能

是由于SSPCMs中的 Na_2CO_3 在制备过程中吸收了空气中的水分。 Na_2CO_3 的其他特征峰值为 $\text{C}=\text{O}$ 键合($2\,030\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{N}=\text{O}$ 键合($1\,777/1\,617\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{C}-\text{O}$ 键合($1\,446\text{ cm}^{-1}$)和 $\text{N}-\text{O}$ 键合(880 cm^{-1});煅烧WCC的主要特征峰值为 $\text{C}=\text{O}$ 键合($2\,031\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{N}=\text{O}$ 键合($1\,638/1\,618\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{C}-\text{O}$ 键合($1\,384\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{Si}-\text{O}$ 键合($1\,023\text{ cm}^{-1}$)和 $\text{N}-\text{O}$ 键合($939/904\text{ cm}^{-1}$)。

由图10和表2可见,样品NC3,NC4和NC5的主要特征峰值基本相同,且化学键位相对应。值得注意的是,NC5的个别特征峰值(934 cm^{-1})相较于NC3与NC4更加突出,这是因为NC5中的WCC质量分数占比最大,NC5中的红外特征峰会更倾向于和WCC中的红外特征峰保持一致。

表2 Na_2CO_3 、烧结WCC和SSPCMs的特征峰Table 2 Characteristic peaks of Na_2CO_3 , sintered WCC and SSPCMs

材料	特征峰值(cm^{-1})
Na_2CO_3	3 413, 3 235, 2 030, 1 777, 1 617, 1 446, 880
烧结WCC	3 551, 3 414, 3 237, 2 031, 1 638, 1 618, 1 384, 1 023, 939, 904
NC3	3 551, 3 414, 3 236, 2 032, 1 637, 1 617, 1 438, 1 384, 1 031, 877
NC4	3 554, 3 413, 3 235, 2 031, 1 638, 1 617, 1 438, 1 384, 1 031, 934, 896
NC5	3 552, 3 413, 3 235, 2 031, 1 638, 1 617, 1 449, 1 385, 1 031, 934

图10 Na_2CO_3 、煅烧WCC和SSPCMs的FT-IR图谱Fig. 10 FT-IR spectra of Na_2CO_3 , sintered WCC and SSPCMs

上述3种样品的特征峰值可分别表示为 $\text{C}=\text{O}$ 键合($2\,031/2\,032\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{N}=\text{O}$ 键合($1\,638\sim 1\,617\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{C}-\text{O}$ 的拉伸振动($1\,438/1\,439\text{ cm}^{-1}$)、 $\text{Si}-\text{O}$ 的拉伸振动($1\,031\text{ cm}^{-1}$)和 $\text{N}-\text{O}$ 键合($1\,000\sim 870\text{ cm}^{-1}$)。通过对比SSPCMs、 Na_2CO_3 和煅烧WCC的特征峰,得出SSPCMs中没有新的化学键产生。综上所述, Na_2CO_3 和WCC在制备SSPCMs过程中主要为物理结合,但骨架材料和相变材料间发生了微弱的化学反应,总体化学相容性较好。

3 结论

以 WCC 为骨架材料, Na_2CO_3 为相变材料, 采用冷压烧结法制备 SSPCMs, 主要结论如下。

(1) 当 Na_2CO_3 在 SSPCMs 中的质量占比为 45% 时, 材料烧结后未发生明显的形变和熔盐泄漏情况; (2) WCC 组分和 Na_2CO_3 之间具有良好的化学相容性; (3) 使用 WCC 制备的 SSPCMs 熔化潜热为 126.7 J/g, 储热密度高达 1 150.71 J/g, 导热系数在 100~450 °C 时最大, 为 0.24 W/(m·K)。

参考文献:

- [1] 张俊锋, 许文娟, 王跃琦, 等. 面向碳中和的中国碳排放现状调查与分析[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 1-10.
ZHANG Junfeng, XU Wenjuan, WANG Yueqi, et al. Investigation and analysis on carbon emission status in China on the path to carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 1-10.
- [2] LI Q, LI C, DU Z, et al. A review of performance investigation and enhancement of shell and tube thermal energy storage device containing molten salt based phase change materials for medium and high temperature applications [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113806.
- [3] YU Q H, JIANG Z, CONG L, et al. A novel low-temperature fabrication approach of composite phase change materials for high temperature thermal energy storage [J]. Applied Energy, 2019, 237: 367-77.
- [4] LI Q, CONG L, ZHANG X S, et al. Fabrication and thermal properties investigation of aluminium based composite phase change material for medium and high temperature thermal energy storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 211: 110511.
- [5] SARI A, BICER A, AL-SULAIMAN F A, et al. Diatomite/CNTs/PEG composite PCMs with shape-stabilized and improved thermal conductivity: Preparation and thermal energy storage properties [J]. Energy and Buildings, 2018, 164: 166-175.
- [6] XU G Z, LENG G H, YANG C Y, et al. Sodium nitrate—Diatomite composite materials for thermal energy storage [J]. Solar Energy, 2017, 146: 494-502.
- [7] LI C C, ZHANG B, LIU Q X. N-eicosane/expanded graphite as composite phase change materials for electro-driven thermal energy storage [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101339.
- [8] JIANG Z, JIANG F, LI C, et al. A form stable composite phase change material for thermal energy storage applications over 700 °C [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 814.
- [9] MEMON S, LIAO W Y, YANG S Q, et al. Development of composite PCMs by incorporation of paraffin into various building materials [J]. Materials, 2015, 8: 499-518.
- [10] SARI A, BICER A. Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 101: 114-122.
- [11] DENG J H, LI W B, JIANG D H. Study on binary fatty acids/sepiolite composite phase change material [J]. Advanced Materials Research, 2011, 374-377: 807-810.
- [12] WANG T Y, ZHANG T Y, XU G Z, et al. A new low-cost high-temperature shape-stable phase change material based on coal fly ash and K_2CO_3 [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 206: 110328.
- [13] 王燕, 黄云, 姚华, 等. 太阳盐/钢渣定型复合相变储热材料的制备与性能研究[J]. 过程工程学报, 2021, 21(3): 332-340.
WANG Yan, HUANG Yun, YAO Hua, et al. Fabrication and characterization of form-stable solar salt/steel slag composite phase change material for thermal energy storage [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(3): 332-340.
- [14] ANAGNOSTOPOULOS A, NAVARRO M E, STEFANIDOU M, et al. Red mud-molten salt composites for medium-high temperature thermal energy storage and waste heat recovery applications [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125407.
- [15] LI R G, ZHU J Q, ZHOU W B, et al. Thermal compatibility of sodium nitrate/expanded perlite composite phase change materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 452-458.
- [16] SANG L X, LI F, XU Y W. Form-stable ternary carbonates/MgO composite material for high temperature thermal energy storage [J]. Solar Energy, 2019, 180: 1-7.
- [17] 朴春爱, 权宗刚, 唐玉娇. 发泡混凝土微结构的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2699-2705.
PIAO Chunai, QUAN Zonggang, TANG Yujiao. Research progress on microstructure of foamed concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 2699-2705.

(本文责编: 惠忻)

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-07-01
上网日期: 2023-08-29; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

孟强(1989), 男, 工程师, 硕士, 从事暖通空调相关工作, 15652352383@163.com;

熊亚选*(1977), 男, 教授, 博士, 从事高温熔盐储热方面的研究, xiongyaxuan@bucea.edu.cn。

*为通信作者。