

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.010

低成本兰炭灰骨架定型相变储热材料的制备及性能研究

Preparation and properties of low-cost phase-change heat storage materials
based on semi-coke ash

熊亚选¹, 药晨华¹, 宋超宇¹, 王辉祥¹, 胡子亮¹, 丁玉龙²

XIONG Yaxuan¹, YAO Chenhua¹, SONG Chaoyu¹, WANG Huixiang¹, HU Ziliang¹,
DING Yulong²

(1.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;2.英国伯明翰大学 伯明翰储能中心,伯明翰 B152TT,英国)

(1.Key Laboratory of HVAC, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2.Birmingham Center for Energy Storage, University of Birmingham, Birmingham B152TT, UK)

摘要:在碳中和背景下,为促进工业固体废弃物的规模化消纳,避免兰炭灰大量堆积对环境造成破坏,创新性提出兰炭灰/碳酸钠定型相变储热材料,通过冷压缩-热烧结法制备兰炭灰基定型相变储热材料,为构建以新能源为主体的电力系统提供可能的储能技术路径。采用激光导热分析法(LFA)、热重及差示扫描量热法(TG-DSC)和X射线衍射法(XRD)对定型相变储热材料的导热性能、储热性能及化学相容性进行表征。结果表明,兰炭灰与碳酸钠的质量比为52.5:47.5时,复合材料各方面的性能最佳,其导热系数在100~800℃内最高可达0.41 W/(m·K),在100~900℃时储热密度达1 101.14 kJ/kg。

关键词:固体废弃物;骨架材料;定型相变材料;碳中和;兰炭;储能;储热;可再生能源

中图分类号:TK 02

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)07-0062-06

Abstract: To promote the large-scale consumption of industrial solid wastes and avoid damage on environment brought by the accumulation of semi-coke ash, we proposed an innovative semi-coke ash/ Na_2CO_3 shaped phase-change heat storage material which is prepared by cold compression-hot sintering (CCHS) method. Taking laser flash analyzer (LFA), thermogravimetric and differential scanning calorimetry (TG-DSC) and X-ray diffraction (XRD), the thermal conductivity, thermal storage and chemical compatibility of the shaped phase-change heat storage material were characterized. The results show that the best properties of the composite can be obtained when the mass ratio of semi-coke ash to Na_2CO_3 is 52.5:47.5. Under this ratio, the composite's thermal conductivity is up to 0.41 W/(m·K) between 100 and 800 °C, and its energy storage density is up to 1 101.14 kJ/kg between 100 and 900 °C.

Keywords: solid waste; framework material; shaped phase-change composite; carbon neutrality; semi-coke; energy storage; heat storage; renewable energy

0 引言

随着工商业及居民用户对能源的需求量越来越大,人们对化石能源的过度开发严重影响了地球的生态环境^[1]。全球气候变暖日益引起人们的广泛关注,目前全球已有包括中国在内的120多个国家提出了碳中和目标,构建以新能源为主体的新型电力系统成为共识方向^[2],但可再生能源的供应仍然

是间歇性的。因此,热能储存(TES)系统需要在可再生能源系统的能源供应和用户的能源需求之间架起一座桥梁^[3]。这不仅可以提高可再生能源的能效,还可以提高化石能源的能效。

TES技术主要有3种类型,即显热、潜热和热化学储存。显热蓄热技术已经成熟,但它的热能储存密度很低,而热化学蓄热技术仍处于实验室研究阶段。潜热蓄热技术有蓄热密度高、充放电温度变化恒定、对空间要求小的优点。然而,相变材料(PCM)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。为了克服潜热和显热储能的缺点,本文提出了一种基于潜热和显热储能的新型定型相变材料^[4]。在这种材料中,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。文献[5]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,得出了铝基复合材料比盐基复合材料具有更高的热性能的结论。工业废弃物是免费的,合理地利用它们将有效改善我们的生活环境。因此,文献[6]提出以粉煤灰作为骨架材料,碳酸钾作为相变材料制备定型相变储热材料,并得到了粉煤灰与碳酸钾最佳的质量比。文献[7]制备了太阳盐/钢渣定型相变储热材料,得到钢渣与熔盐质量比为5:5的复合材料定型效果最优。文献[8]制备了四元硝酸盐/MCM41多孔复合蓄热材料,并得出其抗压强度在四元硝酸盐与MCM41质量比为6:4时最大的结论。文献[9]提出用一种工业废料赤泥作为骨架材料,用硝酸盐作为相变材料制备定型相变储热材料,且观察到总体性能良好,这为作为能源相关应用副产品的赤泥增加了应用途径和价值。文献[10]以膨胀珍珠岩作为骨架材料,硝酸钠作为相变材料,制备了形状稳定的复合相变材料。文献[11]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,以氧化镁为骨架材料制备的定型相变储热材料。结果显示,碳酸盐与氧化镁之间没有化学反应,该复合材料在100次循环后仍表现出良好的热循环稳定性。

然而,文献[6]的研究中涉及粉煤灰的改性,这导致整个制备过程方法复杂、耗时较长。为了促进工业固体废弃物的利用,提高其热性能和力学性能,本文创新性地提出了以兰炭灰作为骨架材料,以碳酸盐 Na_2CO_3 作为相变材料,通过冷压法制备形状稳定的复合相变材料。

尝试用不同质量比的兰炭灰和碳酸钠来检验复合材料烧结后的形状变化。进一步研究了复合材料的储能、导热等关键热性能,并分析了骨架材料与相变材料的化学相容性。结果表明,兰炭灰作为定型相变储热材料的骨架材料具有良好的可行性。

1 试验

1.1 试验原材料

本试验中,以 Na_2CO_3 为相变材料,其购自中国药集团化学试剂有限公司,纯度 $\geq 99\%$ 。骨架材料兰炭灰由购自中国阳泉煤业(集团)有限公司的兰炭在马弗炉中以 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 完全燃烧而制得。使用质

量分数为3%的聚乙烯醇(PVA)溶液作为烧结剂,有助于定型相变储热材料的成型,PVA纯度 $\geq 99\%$ 。

1.2 定型相变储热材料的制备

本试验采用冷压缩-热烧结(CCHS)法制备定型相变储热材料,其制造过程如图1所示,具体制备工艺如下。

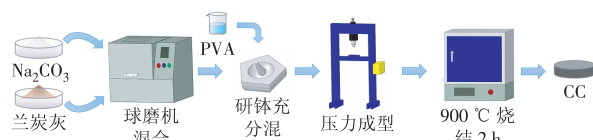


图1 定型相变储热材料的制备流程

Fig. 1 Preparation process of the shaped phase-change heat storage material

(1)将粉状的兰炭放入石英坩埚中,在马弗炉(SX2-5-12A,苏州九联科技有限公司)中以 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度燃烧至少5 h,得到兰炭灰。

(2)将 Na_2CO_3 放入高速粉碎机(FS-100,鹤壁万博仪器有限公司)中粉碎30 s,得到粉末状相变熔盐。

(3)将制得的兰炭灰和碳酸钠分别放入干燥箱(202-3AB,天津市泰斯特仪器有限公司)中,在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下恒温干燥6 h。

(4)利用分析天平(ME104, Mettler Toledo, 0.1 mg),按一定的质量比分别称取兰炭灰和碳酸钠。

(5)将称得的骨架材料和相变熔盐放入行星式球磨机(KE-2L,启东市宏宏仪表设备厂),以 250 r/min 的速度搅拌30 min,得到混合粉末状样品。

(6)将PVA溶液喷洒至上述混合粉末状样品(每 1.0 g 混合粉末喷洒 $50\text{ }\mu\text{L}$ PVA溶液)后放入玛瑙研钵中,研磨至混合粉末与PVA溶液充分混合,得到复合粉末。

(7)称取 1.0 g 上述复合粉末放入圆柱形模具($\phi=13\text{ mm}$)中,在压力机(MSY-50,青岛孚润汽车维修设备有限公司)上,以 6.0 MPa 的压力保压3 min,得到圆柱形复合材料。

(8)最后在空气气氛马弗炉中烧结圆柱形复合材料,烧结工艺如下:1)以 $2\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的加热速率从室温加热至 $100\text{ }^\circ\text{C}$,然后保温半小时以除去残留的水分;2)以 $2\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的加热速率从 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $400\text{ }^\circ\text{C}$,然后保温1 h以除去聚乙烯醇和其他残余水分;3)以 $2\text{ }^\circ\text{C/min}$ 的加热速率从 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $900\text{ }^\circ\text{C}$,然后保温2 h;4)关闭马弗炉,将圆柱形复合材料自然冷却至室温,完成烧结。

所有定型相变储热材料的详细情况均在表1中进行了编码和展示。

表 1 不同定型相变储热材料的详细情况

Tab. 1 Details of different shaped phase-change heat storage materials

项目	定型相变储热材料								
	CC0	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8
$\omega(\text{PCM})/\%$	100.0	60.0	50.0	47.5	45.0	42.5	40.0	35.0	30.0
$\omega(\text{骨架材料})/\%$	0.0	40.0	50.0	52.5	55.0	57.5	60.0	65.0	70.0
$\omega(\text{烧结剂})/\%$	—	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
烧结后目视观察效果	—	S	L	N	N	N	N	N	N

注:S表示严重泄漏和变形;L表示轻微泄漏和变形;N表示无泄漏和变形。

8种不同配比的样品经烧结后的目视观察效果如图2所示。由于烧结过程中碳酸钠的固-液相变转换,经烧结后不同配比的复合材料表面形貌不同。

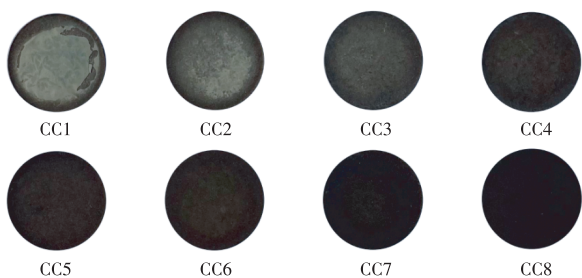


图 2 8种不同配比的样品经烧结后的目视观察效果

Fig. 2 Appearances of samples with eight different ratios after sintering

从图2可以看出,当碳酸钠的质量分数为60.0%时,样品表面出现了明显的熔盐泄漏现象。随着熔盐质量分数的不断减小,样品表面的熔盐泄漏越来越少。

当碳酸钠的质量分数为47.5%时,经烧结后的样品具有完美外观。比较8种不同配比下的样品经烧结后的目视观察效果,CC3即 Na_2CO_3 质量分数为47.5%时样品成型效果最佳。在本研究的后续试验中,主要选取CC3进行复合材料的性能表征。

1.3 表征方法

本试验使用STA449 F3同步热分析仪(德国NETZSCH)测定了材料的熔化和凝固过程、潜热和比热容,同时使用高纯氮气(99.999%)作为保护气体和吹扫气体。

对于每个样品,在氮气气氛下以10 K/min的间隔进行5次熔融固化循环。在高纯氮气(99.999%)作为保护气体和吹扫气体的条件下,通过激光闪光分析法(LFA457, NETSCH)分析的热扩散率来计算定型复合相变材料的热导率。

通过X射线衍射仪Bruker D2(德国Bruker AXS)测试复合材料的化学相容性,方法是利用扫描角度在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 之间且间隔为 0.02° 的Cu靶辐射。

2 结果与分析

2.1 组分化学相容性

相变材料与骨架材料之间的化学相容性对于定型相变储热材料的制备非常重要。本文从理论和试验2个角度对碳酸钠与兰炭灰间的化学相容性进行了研究。

从理论角度来说,通过热力学计算可以得到各反应的吉布斯自由能。吉布斯自由能的大小可以判断一个反应发生的可能性。吉布斯自由能的数值为正,则反应不能自发进行;若数值为负,则反应可以自发进行。不过,还需要通过数值的大小来判断反应发生趋势的强弱。0~1 000 $^\circ\text{C}$ 之间, Na_2CO_3 与兰炭灰中主要化学成分(CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3)可能的反应有



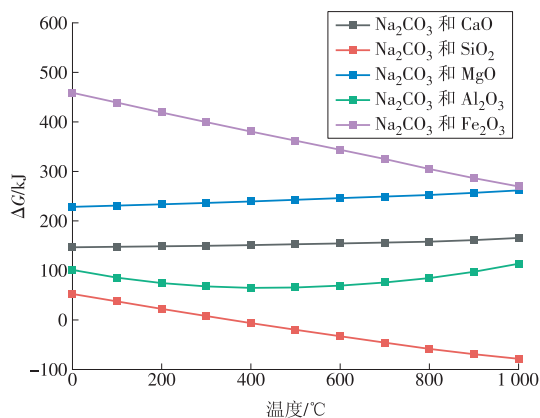
本试验中各反应吉布斯自由能的计算公式如下

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, (6)$$

式中: ΔG 为吉布斯自由能,kJ; ΔH 为焓,kJ; T 为热力学温度,K; ΔS 为熵,kJ/K。

碳酸钠与兰炭灰组分反应的吉布斯自由能如图3所示。由图可知,碳酸钠与氧化铁、氧化铝、氧化钙、氧化镁在0~1 000 $^\circ\text{C}$ 范围内吉布斯自由能均为正值,基本不会发生化学反应。350 $^\circ\text{C}$ 以内碳酸钠与二氧化硅也不能自发进行反应,但超过350 $^\circ\text{C}$ 以后,吉布斯自由能由正值变为负值,反应开始能够自发进行生成硅酸钠。但当温度为1 000 $^\circ\text{C}$ 时,碳酸钠与二氧化硅反应的吉布斯自由能仅为-78.48 kJ,该反应发生的趋势相当小。所以该反应能否在制备复合材料的过程中自发进行,还需要通过具体试验来判断。

X射线衍射仪以 2θ 的角度扫描整个衍射区域,

图3 Na_2CO_3 与兰炭灰组分反应的吉布斯自由能Fig. 3 Gibbs free energy of the reaction between semi-coke ash and Na_2CO_3

将这个角度变化作为图谱的横坐标,将不同衍射角对应衍射峰的强度作为纵坐标,组成了X射线衍射法(XRD)图谱。采用Bruker D2对CC0,CC3和兰炭灰进行的XRD表征,结果如图4所示。从试验的角度验证碳酸钠与二氧化硅的反应能否在制备复合材料的过程中自发进行。

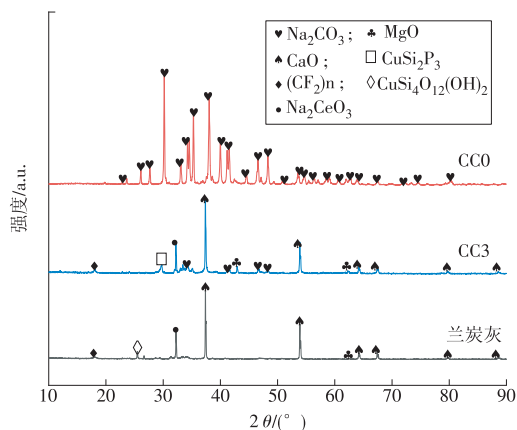


图4 CC0,CC3和兰炭灰的XRD曲线

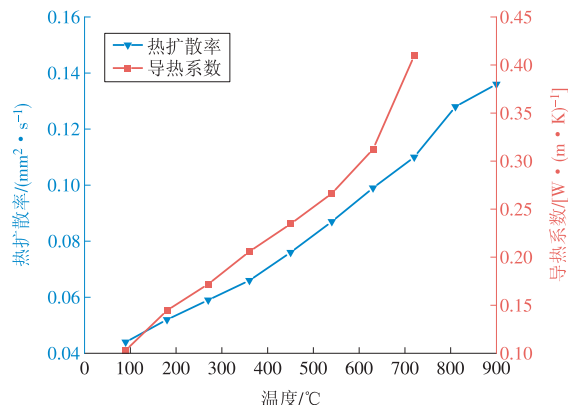
Fig. 4 XRD curves of CC0,CC3 and semi-coke ash

由图4可知,兰炭灰的主要衍射峰分别出现在 $2\theta=32.5^\circ, 38.0^\circ, 54.5^\circ$ 处。CC3的主要衍射峰与兰炭灰的一致,但在 $2\theta=29.0^\circ$ 左右出现了一种化学式为 CuSi_2P_3 的物质,除此之外其图谱中没有出现除碳酸钠和兰炭灰之外的衍射峰。这说明碳酸钠与二氧化硅的反应没有在制备复合材料的过程中自发进行,但也不能排除兰炭灰主要组分之外的微小含量成分与碳酸钠或碳酸钠中含有的杂质发生了反应,具体情况有待进一步试验来分析。

2.2 定型相变储热材料的传热性能

本试验用激光导热分析法(LFA)测量了复合材料的导热系数。测试使用的是烧结后的复合圆柱体材料经研磨呈粉末状的样品。测试时,先在坩埚内壁喷涂一层石墨,然后将待测粉末放入坩埚内。

整个测试过程在氮气氛围下进行。LFA法直接给出的是复合材料的热扩散率,CC3的热扩散率与 100°C 间隔温度的关系如图5所示。

图5 CC3的热扩散率、导热系数与 100°C 间隔温度的关系Fig. 5 Thermal diffusivity and thermal conductivity of CC3 varying with temperature taking 100°C as intervals

由图5可知,随着温度的升高,CC3的热扩散率逐渐增大;但当温度从 800°C 升高到 900°C 时,CC3的热扩散率的增速明显减缓。这可能是由于在测量过程中 Na_2CO_3 的固-液相变转换导致的。利用热扩散率的值并假设在特定的温度范围内密度恒定,在获得复合材料的密度和比热容之后,利用下式计算复合材料的导热系数

$$\lambda = \alpha(T)\rho(T)c_p(T), \quad (7)$$

式中: λ 为复合材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; α 为热扩散率, mm^2/s ; ρ 是复合材料的密度, kg/m^3 ; c_p 为复合材料的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。经计算得:在 $100\sim 800^\circ\text{C}$ 内的导热系数最高可达 $0.41 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

CC3的导热系数与 100°C 间隔温度的关系如图5所示。由图可知,CC3的导热系数随温度的变化趋势与热扩散率相似,随着温度的升高,其导热系数逐渐增大。

2.3 定型相变储热材料的储热性能

CC0,CC3,CC4热流与温度的关系如图6所示。本试验测得的 Na_2CO_3 熔点为 841.4°C ,比热容为 $5.35 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

由图6可知,CC3和CC4的熔化温度均低于纯盐的熔化温度。随着盐含量的降低,复合材料的熔点从CC3的 774.6°C 降低到CC4的 771.5°C 。这也与文献[9]对硝酸盐/赤泥复合材料的研究和文献[12]对硝酸钠/二氧化硅复合材料的研究结果一致,即随着骨架材料的增加,定型相变储热材料的熔点逐渐降低。此外,本试验测得CC3的相变潜热值为 $134.3 \text{ kJ}/\text{kg}$,CC4的相变潜热值为 $130.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。可

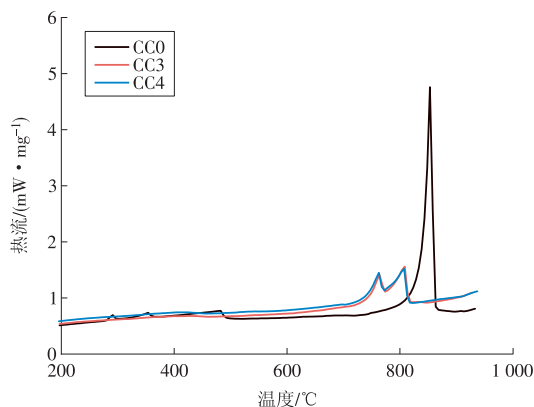
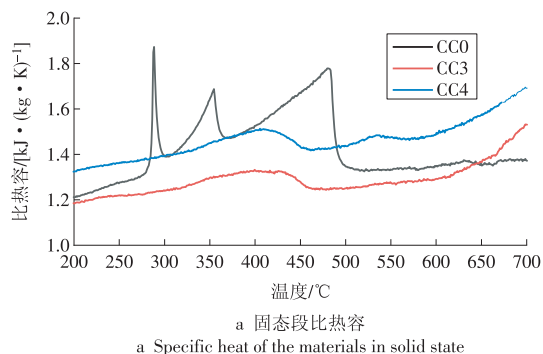


图 6 CC0, CC3, CC4 热流与温度的关系

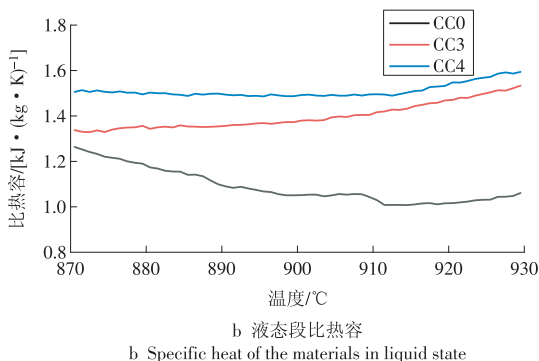
Fig. 6 Heat flux of CC0, CC3 and CC4 varying with temperature

可以看出,随着相变材料的减少,定型相变储热材料的相变潜热也逐渐降低。

图 6 中 CC3 和 CC4 的熔化温度相对于 CC0 而言均显著降低,并且 2 个样品在相变处均出现 2 个峰



a Specific heat of the materials in solid state



b Specific heat of the materials in liquid state

图 7 CC0, CC3, CC4 的比热容对比

Fig. 7 Specific heat of CC0, CC3, CC4

本试验在 100~900 °C 的范围内获得复合材料的储热密度;测得该温度范围内熔盐的熔化潜热为 307.9 kJ/kg;碳酸钠固态时的比热容取 1.41 kJ/(kg·K),液态时的比热容取 1.03 kJ/(kg·K);根据式(7)得出 CC3 即碳酸钠质量分数为 47.5% 时的储热密度,其值为 1 101.14 kJ/kg。

3 结论

本文创新性地提出了以工业固体废弃物兰炭灰作为骨架材料,采用冷压缩-热烧结法制备了兰炭灰/碳酸钠高温定型相变储热材料,并对其物理化学性能进行了表征和分析。主要结论如下。

(1) 兰炭灰与碳酸钠的质量比为 52.5:47.5 时定型相变储热材料的各方面性能最佳。

(2) 兰炭灰/碳酸钠高温定型相变储热材料的熔化温度从碳酸钠的 841.4 °C 降低至 774.6 °C。

(3) 兰炭灰/碳酸钠高温定型相变储热材料的导热系数在 100~800 °C 内最高可达 0.41 W/(m·K),

值,结合图 4 分析可知,定型相变储热材料在烧结过程中发生了化学反应是有可能的。定型相变储热材料的储热密度是评价储热材料的重要性能指标,包括 2 部分:潜热和显热^[13-16]。本试验采用以下公式进行计算^[17-20]

$$Q = (1 - \delta) \int_{T_1}^{T_h} c_{p, sm} dT + \delta \left(\int_{T_1}^{T_m} c_{ps, pcm} dT + \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_h} c_{pl, pcm} dT \right), \quad (8)$$

式中: Q 为复合材料的储热密度, kJ/kg; $c_{p, sm}$, $c_{ps, pcm}$ 和 $c_{pl, pcm}$ 分别为骨架材料、熔盐固态时和熔盐液态时的比热容, kJ/(kg·K); T_1 , T_h 分别表示热能储存过程中的起始温度和终止温度, K; T_m 为相变熔盐的熔化温度, K; ΔH_m 为相变熔盐在固-液相变时的潜热, kJ/kg; δ 为相变材料的质量分数。CC0, CC3, CC4 在固态和液态的比热容曲线如图 7 所示。

100~900 °C 内储热密度可达 1 101.14 kJ/kg, 具有良好的储热性能。

(4) 利用该材料储热, 有利于工业固体废弃物兰炭的资源化利用, 可减少对环境的污染, 同时为构建以可再生能源为主体的电力系统, 实现“双碳”目标, 提供了可行的储热技术路径。

参考文献:

- [1] 刘助仁. 新能源: 缓解能源短缺和环境污染的希望[J]. 国际技术经济研究, 2007(4): 22-26.
- [2] 赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11-20.
- [3] 陈睿哲, 熊亚选, 张慧, 等. 储能供热熔盐换热器设计及运行特性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(12): 54-59.
CHEN Ruizhe, XIONG Yaxuan, ZHANG Hui, et al. Design

- and dynamic performance analysis on a molten salt heat exchanger for energy storage and heating [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(12): 54–59.
- [4] 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113806.
- [5] LI Q, CONG L, ZHANG X, 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. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110511.
- [6] WANG T, ZHANG T, XU G, 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*, 2019, 206. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110328.
- [7] 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. Preparation and properties of solar salt/steel slag shaped composite phase change heat storage materials [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2021, 21(3): 332–340.
- [8] 李进, 王峰, 张世广, 等. 四元硝酸盐/MCM41 多孔复合蓄热材料的制备及稳定性研究 [J]. *华电技术*, 2020, 42(4): 17–22.
LI Jin, WANG Feng, ZHANG Shiguang, et al. Study on preparation for quaternary nitrates/MCM41 porous composite heat-storage material and its stability [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(4): 17–22.
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125407.
- [10] LI R, ZHU J, ZHOU W, et al. Thermal compatibility of Sodium Nitrate/Expanded Perlite composite phase change materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103: 452–458.
- [11] SANG L, LI F, XU Y. Form-stable ternary carbonates/MgO composite material for high temperature thermal energy storage [J]. *Solar Energy*, 2019, 180: 1–7.
- [12] GUO Q, WANG T. Study on preparation and thermal properties of sodium nitrate/silica composite as shape-stabilized phase change material [J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 613: 66–70.
- [13] YU Q, 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: 367–377.
- [14] YE F, GE Z W, DING Y L, et al. Multi-walled carbon nanotubes added to Na_2CO_3/MgO composites for thermal energy storage [J]. *Particuology*, 2014, 15(4): 56–60.
- [15] JIANG F, ZHANG L L, SHE X H, et al. Skeleton materials for shape-stabilization of high temperature salts based phase change materials: A critical review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109539.
- [16] 李昭, 李宝让, 陈豪志, 等. 相变储热技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2020, 39(12): 5066–5085.
LI Zhao, LI Baorang, CHEN Haozhi, et al. State of the art review on phase change thermal energy storage technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(12): 5066–5085.
- [17] 王长君, 刘硕, 丁薛峰. 相变储能技术在清洁供暖中的应用研究 [J]. *华电技术*, 2020, 42(11): 91–96.
WANG Changjun, LIU Shuo, DING Xuefeng. The study on application of phase change energy storage technology in clean heating [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(11): 91–96.
- [18] 钟声远, 赵军, 李浩, 等. 基于城市功能区划分的分布式相变蓄热站热经济性分析 [J]. *华电技术*, 2020, 42(4): 23–30.
ZHONG Shengyuan, ZHAO Jun, LI Hao, et al. Thermal economy analysis of distributed phase change heat storage stations based on urban functional zoning [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(4): 23–30.
- [19] LI C, LI Q, DING Y L. Carbonate salt based composite phase change materials for medium and high temperature thermal energy storage: From component to device level performance through modelling [J]. *Renewable Energy*, 2019, 140: 140–151.
- [20] 王铁营, 王凯晨, 张天影, 等. 粉煤灰高温定型相变储热材料制备及性能表征 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(9): 1235–1242.
WANG Tieying, WANG Kaichen, ZHANG Tianying, et al. High-temperature shape-stable phase-change material based on coal fly ash [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(9): 1235–1242.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

熊亚选 (1977—), 男, 河南原阳人, 教授, 博士, 从事高温熔盐储热方面的研究 (E-mail: xiongyaxuan@bucea.edu.cn)。

药晨华 (1997—), 男, 山西临汾人, 在读硕士研究生, 从事固体储热方面的研究 (E-mail: ych1261072340@163.com)。

宋超宇 (1998—), 女, 山西长治人, 在读硕士研究生, 从事固体储热方面的研究 (E-mail: 1807931498@qq.com)。

王辉祥 (1997—), 男, 河南郑州人, 在读硕士研究生, 从事固体储热方面的研究 (E-mail: whx754137921@163.com)。

胡子亮 (1997—), 男, 河北石家庄人, 在读硕士研究生, 从事固体储热方面的研究 (E-mail: 872971547@qq.com)。

丁玉龙 (1962—), 男, 江苏海安人, 教授, 英国皇家工程院院士, 博士, 从事储能方面的研究。