碱基复合相变储热材料冷烧结制备与性能表征

卫国锋[1],李正阳[2],梁茂冰[2],王紫薇[2],张 曼[2],李 琦[2*]
(1.中国石油长庆油田第一采气厂,陕西 靖边 718500; 2.北京工业大学机械与能源工程学院,北京 100124)

摘要:碱盐基熔盐因其强腐蚀性、强吸水性和形状不稳定等问题严重制约了工程应用。为解决以上问题,创新性地使用冷烧结工艺,$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐为相变材料,氧化钙为骨架材料,去离子水为烧结剂进行了复合定型相变材料的制备。结果表明,$NaOH-NaNO_3/CaO$ 复合定型相变材料形成了致密结构,有效减轻了碱盐基熔盐的泄露及强吸水性问题。在冷烧结工艺下,复合定型相变材料潜热为 117.4 kJ/kg,相变温度为 290.7℃,分解温度为 549.4℃,抗压强度超过 100 MPa,实现了机械性能与热稳定性的良性结合,为中高温热能储存领域提供了一种性能可控的新型复合相变材料,为太阳能光热发电、工业余热回收等场景的高效储能技术升级提供了重要技术支撑。

关键词:碱盐;烧结;复合材料;制备;氧化钙;热能储存
中图分类号:TB34 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0107-07
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.019

Preparation and characterization of alkali salt-based composite phase change thermal storage materials by cold sintering

WEI Guo-feng[1], *LI Zheng-yang*[2], *LIANG Mao-bing*[2], *WANG Zi-wei*[2], *ZHANG Man*[2], *LI Qi*[2*]
(1.PetroChina Changqing Oilfield NO. 1 Gas Production Plant, Jingbian 718500, China;
2.College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Alkali salt-based molten salts face significant challenges in engineering applications due to their strong corrosiveness, high hygroscopicity, and shape instability. To address these issues, this study innovatively adopts a cold sintering process to prepare a shape-stabilized composite phase change material, using $NaOH-NaNO_3$ binary eutectic salt as the phase change material, CaO as the skeleton material, and deionized water as the sintering agent. The results show that the $NaOH-NaNO_3/CaO$ composite forms a dense structure, effectively mitigating leakage and high hygroscopicity problems of alkali salt-based molten salts. Under the cold sintering process, the composite exhibits a latent heat of 117.4 kJ/kg, a phase change temperature of 290.7℃, a decomposition temperature of 549.4℃, and a compressive strength exceeding 100 MPa, achieving a favorable balance between mechanical properties and thermal stability. This study provides a performance-controllable novel composite phase change material for medium-to high-temperature thermal energy storage, offering important technical support for the upgrading of efficient energy storage technologies in scenarios such as solar thermal power generation and industrial waste heat recovery.

Key words: alkali salt; sintering; composites; preparation; calcium oxide; thermal energy storage

热能储存技术作为解决能源供需矛盾、提高能源利用效率的重要手段,在太阳能利用、电网调峰、废热与余热回收等领域展现出巨大潜力[1]。在各类储热技术中,基于相变潜热的存储技术因其工艺简单、储能密度高且成本合理等特点,成为当前研究与应用的热点[2]。相变材料作为该技术的核心,其性能直接影响储热效率。其中,碱基熔盐类相变材料因具有适宜的熔化温度、较高的相变潜热、优异的热稳定性和较低的粘度等优势,在热能储存领域受到广泛关注[3]。但是,受限于腐蚀性强、易泄漏和导热率低等缺陷[4-6],碱基熔盐类材料的工程化放大应用受到较大的阻碍和制约。

近年来,形状稳定型复合相变材料的发展为克服传统熔融盐泄漏和腐蚀问题提供了新思路[7-8]。这类材料通常由储能基体、结构支撑材料和导热增强剂组成,一般通过传统的冷压热烧结工艺制备,能实现热物理性能与机械性能的良好结合[9]。Li 等[10]成功开发了埃洛石纳米管-硝酸盐复合相变储热材料,并在此基础上,通过引入石墨作为导热增强剂,将复合材料的导热系数从 0.62 W/(m·K)显著提升至 1.3 W/(m·K)。Gregoire 等[11]开发了 $NaNO_2/NaNO_3-MgO$-膨胀石墨复合材料,其表现出可逆的固-固转变(175℃)和可逆的固-液转变(223℃),总熔化潜热为 120 kJ/kg。Xiong 等[12]的研究表明,当钢渣、碳化物渣和 $NaNO_3$ 的质量比为 2.5∶2.5∶5时,复合材料在 100~400℃温度范围内的

收稿日期:2026-01-06;**修回日期**:2026-08-20
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52406214);国家重点研发计划(2025YFE0121000)
作者简介:卫国锋(1984-),男,高级工程师,研究方向为能源存储分级调控,weiguofeng001@163.com;李琦(1987-),女,博士,副教授,研究方向为跨尺度复合储能材料的制备与性能表征,通讯联系人,liqi@bjut.edu.cn。

储热密度达到 371.1 kJ/kg。

虽然通过热烧结工艺制备所得的复合材料具有良好的储热性能,但它们的制造过程必须经历一个小时或更长时间的高温,这不仅可能会导致熔盐的热分解、颗粒过烧、化学反应以及晶型转变等问题,还会造成能源的极大消耗,增加成本。最近的研究表明,冷烧结技术为熔盐复合材料的制备提供了一种创新解决方案。该技术基于溶剂介导的溶解-沉淀机制,在低温(<250℃)和压力(100~500 MPa)协同作用下实现材料致密化。Galotta 等[13]采用氢氧化钠溶液为烧结剂,在 150℃和 100~300 MPa 压力下对硅藻土进行冷烧结,烧结后样品的致密度高达 90%。Liu 等[14]通过冷烧结工艺制备的 $NaNO_3$-MgO 复合定型相变储热材料在经过 500 次加热-冷却循环后仍可以保持稳定,且其致密度超过 98%。Luo 等[15]采用冷烧结技术制备了盐-硅藻土复合材料,并揭示了其致密化机理。整理当前国内外关于冷烧结工艺的研究现状可以看出,目前关于使用冷烧结技术制备盐基复合定型相变材料的研究相对较少。特别是针对碱盐基熔盐作为相变材料,与相容性骨架材料复合制备高性能定型相变材料的研究更为匮乏,阻碍了高性能碱盐基复合相变材料的开发与实际应用。

基于上述现状,本文创新性地将冷烧结工艺应用于碱盐基复合定型相变材料的制备。以 NaOH-$NaNO_3$(质量比 15.5∶84.5)二元共晶盐为相变材料,CaO 为骨架材料,去离子水为烧结剂,通过优化冷烧结工艺参数实现材料的低温高效致密化。通过对复合定型相变材料的微观结构特征、形状稳定性、化学物理相容性、力学性能和相变行为进行研究,验证碱盐基复合定型相变材料的制备可行性。该方法不仅能够有效解决碱盐基熔盐强腐蚀性、强吸水性及形状不稳定性等缺陷,而且有望克服传统烧结工艺中高温和长时间烧结带来的问题并显著降低能源消耗,拓展碱盐基熔盐在储热领域的应用前景。

1 样品制备及实验过程

1.1 实验材料

本研究使用的 $NaNO_3$ 和 NaOH 购自中国北京益利精细化学品有限公司,均为纯度大于 99%的分析纯试剂,其组成的二元共晶盐作为相变储热基体材料。CaO 作为结构支撑材料,购自北京迈瑞达科技有限公司,质量等级为分析纯。去离子水作为烧结剂,去离子水由实验室的去离子水器生产。所有原材料均在收到后即使用,无需进一步处理。

1.2 制备方法

1.2.1 $NaNO_3$-NaOH 二元共晶盐的制备

首先,按 84.5∶15.5 的质量比称量 $NaNO_3$ 和 NaOH 原料并充分混合;然后,将混合物转移到镍坩埚中,放入电加热炉中熔化,加热程序如下:以 10℃/min 的升温速度从 25℃升温到 150℃,并在 150℃温度下保持 30 min 以去除样品中的残余水分;之后以 10℃/min 的升温速度从 150℃升温到 350℃,恒温 7 h 以确保二元盐完全熔化共晶。最后,使用加热过程相反的温度曲线将熔融样品冷却至环境温度,研磨机中将二元共晶盐研磨成粉末状态,并将其放入恒温鼓风炉中以便进行后续实验。

1.2.2 复合定型相变材料的制备

选用已制备的 NaOH-$NaNO_3$ 二元共晶盐为相变材料,CaO 为骨架支撑材料,去离子水为烧结剂,采用冷烧结工艺制备 NaOH-$NaNO_3$/CaO 复合定型相变材料。其制备流程如图 1 所示,具体冷烧结工艺包括以下步骤。

(1)用电子天平量取足量 CaO 和 NaOH-$NaNO_3$ 二元共晶盐,并将样品按 4∶6的质量比充分混合均匀。

(2)用喷雾器在 NaOH-$NaNO_3$ 二元共晶盐和 CaO 的混合物中加入特定含量的去离子水溶液(共设置 5 组实验,质量分数分别为:3%、5%、7%、9%、11%),然后再将样品放置到坩埚中混合 20 min,在热控模具温度升高至预设温度(共设 5 组实验,温度分别为:90、120、150、180、210℃)后,将混合粉末移入圆柱形热控模具中。

(3)将热控模具放置在压力机下方,在 150℃的冷烧结温度及 200 MPa 的单轴压力下对样品进行成型和烧结,时间持续 8 min,之后将样品自然冷却至环境温度,即可得到直径 15 mm、高度约为 4 mm 的复合定型相变材料。通过重复上述步骤和调整冷烧结工艺参数,可以制备不同的复合定型相变材料,将其保存在鼓风干燥箱中,以便进一步测试和表征。

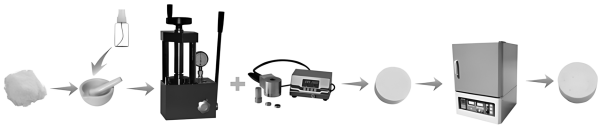


图 1 冷烧结制备工艺流程

1.3 测试与表征

采用扫描电子显微镜及能谱仪(SEM-EDS,SU9000,HITACHI,日本)观察了复合定型相变材料

的微观形貌和元素分布。利用 X 射线衍射仪(XRD,D8,BRUKER,德国)和傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR,TENSOR 27,BRUKER,德国)对其化学结构和稳定性进行表征。热物性测试方面,采用差示扫描量热仪(DSC,241 Ployma,耐驰,德国)测定复合定型相变材料的相变温度和潜热值,并使用热重分析仪(TGA,lab-systems evo,SETARAM,法国)评估其热稳定性。机械性能测试通过万能试验机(Instron 5689,USA)测定,上述所有测试均严格遵循仪器标准操作规程,使用经校准合格的设备完成,且通过 3 次以上重复测试验证了数据的重复性(相对标准偏差 $RSD<5\%$)。此外,复合定型相变材料的致密度通过将实际密度除以理论密度来计算,实际密度基于几何法测量,理论密度通过式(1)计算,所有测试均进行 3 组平行实验以确保数据的可靠性。

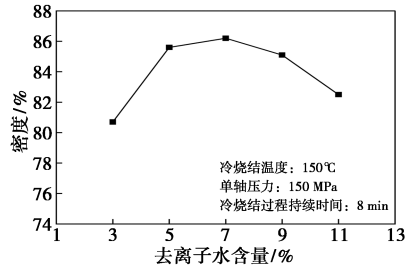
$$\rho = [(M_1 + M_2)/(M_1/\rho_1 + M_2/\rho_2)] \times 100\% \quad (1)$$

式中,M_1 为物质 1 的重量,kg;M_2 为物质 2 的重量,kg;ρ_1 为物质 1 的密度,kg/m^3;ρ_2 为物质 2 的密度,kg/m^3。

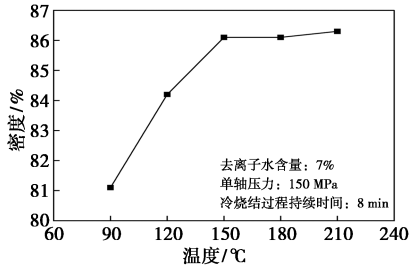
2　结果讨论与分析

2.1　冷烧结参数对材料致密度的影响

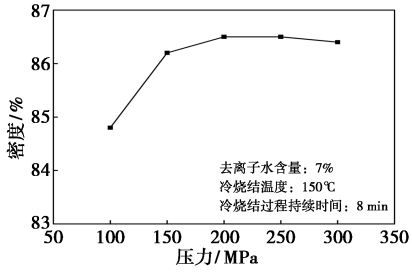
为了寻找复合材料制备的最佳操作条件以及烧结参数对复合材料力学性能的影响,测定了不同烧结条件(烧结剂浓度、烧结温度、单轴压力和烧结时间)下复合定型相变材料的致密度。图 2(a)展示了烧结剂含量对复合材料致密度的影响,可以看出,其致密度呈现出先增长后下降的趋势,这是因为较低的烧结剂含量会导致 $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐和 CaO 颗粒无法被充分润湿,从而限制了尖锐边缘的溶解和颗粒的重新排列,所以致密度较低;而当烧结剂含量过高时,颗粒会被过度润湿,导致在蒸发沉淀过程中形成微孔,从而降低了材料的致密度。图 2(b)显示了复合材料致密度随冷烧结温度的变化情况,可以看出,随着冷烧结温度的升高,复合材料的致密度逐渐增大,并在 150℃ 时稳定在 86% 左右。在冷烧结温度为 90℃,其致密度相对较低。这是由于当冷烧结温度低于烧结剂的蒸发温度时,不会出现在冷烧结过程中由于溶剂蒸发,溶质沉淀的现象,所以复合材料的致密度较低。单轴压力是复合定型相变材料致密化的主要驱动力之一,会影响复合材料中的晶粒重排和质量传输,在给定的较大单轴压力下,有助于润湿颗粒进入孔隙并重新排列,形成复合材料的初始致密化。如图 2(c)所示,复合定型相变材料的致密度随着单轴压力的增加而增加,当单轴压力超过 200 MPa 时,存在一个最佳致密度,该值最终稳定在 86.5%左右。图 2(d)显示了冷烧结持续时间对复合定型相变材料致密度的影响,在烧结时间为 8 min 时,复合材料的致密度可达 86%以上,相较于传统的冷压热烧结工艺,冷烧结在致密化该复合定型相变材料的速度极快。依据图 2 中所示的测试结果,可以确定复合材料的最佳冷烧结参数为:烧结剂质量分数 7%,冷烧结温度 150℃,单轴压力 200 MPa,冷烧结持续时间 8 min。除非另有说明,以下研究均采用这些参数制备的样品。



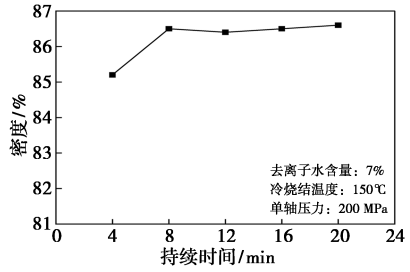
(a)烧结剂含量



(b)冷烧结温度



(c)单轴压力



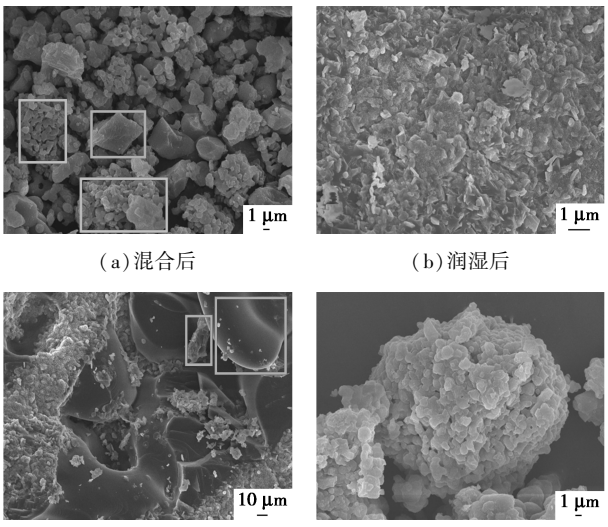
(d)冷烧结持续时间

图 2　冷烧结操作参数对复合相变材料致密度的影响

2.2 微观结构及元素分析

2.2.1 微观结构

图 3 显示了 $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐和 CaO 的混合物在被烧结剂润湿前后及冷烧结后的扫描电镜图像，红色框选所示为 CaO，蓝色框选为碱基二元相变材料，从图 3(a)可以看出，$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐和 CaO 的混合物呈现出一种较为松散的颗粒状结构，颗粒之间存在着明显的空隙，没有明显的团聚现象，这主要是由于在未被烧结剂润湿时，各颗粒之间主要依靠自身的范德华力等物理作用力相互堆砌，缺乏有效的粘结物质来改变其表面形态和相互作用关系。在被烧结剂润湿后，如图 3(b)所示，颗粒表面被一层液相物质所覆盖，液相的润湿作用使得颗粒之间结合的更加紧密，原本松散的颗粒被液相粘结在一起，小尺寸的 CaO 颗粒粘附大尺寸的二元共晶盐颗粒并包裹其表面，形成一个用于冷烧结的核/壳状结构[16]。从图 3(c)、(d)可以看出，在冷烧结过程中，高温和压力的共同作用使得混合物颗粒之间的界限逐渐模糊，CaO 与二元共晶盐之间形成了一个致密的整体结构，这种结构能有效消除液态盐的渗漏并保持复合材料的形状稳定。



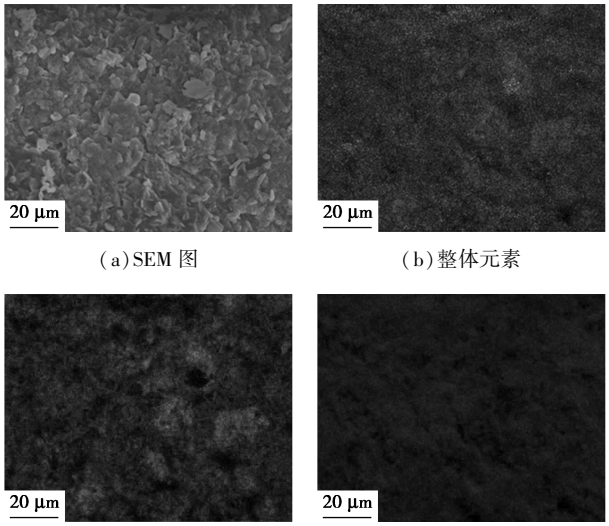
(a)混合后 (b)润湿后

(c)冷烧结后的微观结构 (d)冷烧结后的微观结构

图 3 $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐和 CaO 的混合物在被烧结剂润湿前后及冷烧结后的扫描电镜图像

2.2.2 元素分析

对冷烧结后的样品进行了 EDS 测试，进一步观察其元素分布是否均匀。冷烧结后复合材料的微观结构与以及与之对应的元素分布特征如图 4 所示。其中，Na 元素代表 $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐的分布情况，而 Ca 元素对应 CaO 骨架的分布情况。在图中可以看出，复合定型相变材料整体元素分布十分均匀，二元共晶盐成功填充了 CaO 骨架结构所产生的间隔空间。这一结果与图 3 相结合，更加充分的证实了经过冷烧结处理之后，二元共晶盐与 CaO 之间形成了致密的整体结构，这种结构有效消除液态盐的渗透，提升复合定型相变材料的整体性能。分析复合材料的定型致密原因可以发现，由于骨架支撑材料与烧结剂发生的水化反应，CaO 颗粒表面会产生不规则的氢氧化物层，从而发生奥斯特瓦尔德熟化和颗粒的外延生长现象，进而对熔盐材料进行包裹吸附，达到阻止泄露和维持结构稳定的目的。



(a)SEM 图 (b)整体元素

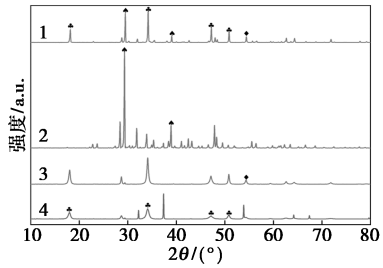
(c)Ca 元素 EDS 分析 (d)Na 元素 EDS 分析

图 4 冷烧结后复合定型相变材料

2.3 化学性能分析

2.3.1 化学相容性

通过 X-射线衍射仪和傅里叶红外光谱仪分别评估复合材料内部的化学兼容性和化学相容性。图 5 为 XRD 衍射图谱，可以看出，复合定型相变材料中在 2θ = 18.2、29.3、34.3、38.9、47.1、50.8° 及 54.4°有 7 个主要的衍射峰，其中，前 6 个主要衍射峰与二元共晶盐和 CaO 中的衍射峰一致，但在 2θ = 54.4°出现了新的衍射峰，这与 $Ca(OH)_2$ 的衍射峰一致，这是由于 CaO 与去离子水发成水化反应生成了 $Ca(OH)_2$。除此之外，Na_2CO_3 衍射峰的最强峰 2θ 约为 31°[16]，在图 5 中体现并不明显，因此可以认为相变材料制备过程中由于去离子水和空气中二氧化碳复合作用形成的微量碳酸钠并不会对样品产生明显影响。复合定型相变材料中并没有出现新的衍射峰，这表明二元共晶盐与 CaO 之间没有发生化学反应，在冷烧结过程中，复合材料具备良好的化学相容性。

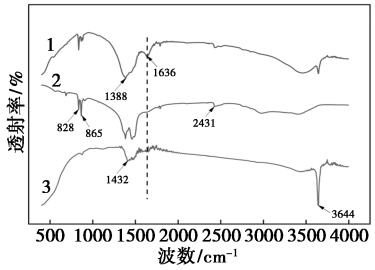


1—$NaOH-NaNO_3/CaO$;2—$NaOH-NaNO_3$;3—$Ca(OH)_2$;4—CaO

图 5　CaO、$Ca(OH)_2$、$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐及 $NaOH-NaNO_3/CaO$ 复合定型相变材料的 XRD 谱图

2.3.2　化学兼容性

图 6 所示为傅里叶变换红外图谱。分析结果显示,二元共晶盐具有几个明显的特征峰,分别出现在 828、865 cm^{-1}和 1 388 cm^{-1}处。其中,在 828 cm^{-1}和 865 cm^{-1}处的特征峰分别是由 N—O 的面内和面外弯曲振动引起,而位于 1 388 cm^{-1}的特征峰则与 N—O 的对称伸缩振动有关[15]。此外,CaO 在 1 432 cm^{-1}和 3 650 cm^{-1}的范围内存在 2 个明显的特征峰,在 3 650 cm^{-1}处的特征峰是由于部分 CaO 与空气中的水分子反应生成了 $Ca(OH)_2$,O—H 键的伸缩振动引起了峰的产生,1 636 cm^{-1}左右处的微小振动为 O—H 键的弯曲振动[17]。复合定型相变材料在 1 636 cm^{-1}有一个明显的特征峰,O—H 键弯曲振动引起的。对于二元共晶盐 O—H 在红外光谱的消失现象,可能是因为经过电加热炉的高温处理,体系中仅存在无水的 $NaOH-NaNO_3$ 且无水 NaOH 中的 OH^-因与 Na^+形成强离子键,再加上两者发生了共晶反应,其 O—H 伸缩和弯曲振动被严重抑制,进而导致峰强度极弱。从图中可以看出,复合定型相变材料只结合了原材料的主峰,没有产生新的特征光谱,表明复合定型相变材料的化学性质稳定。这一结果与图 5 中的观察结果相结合,证实了复合材料具备良好的化学和物理兼容性。

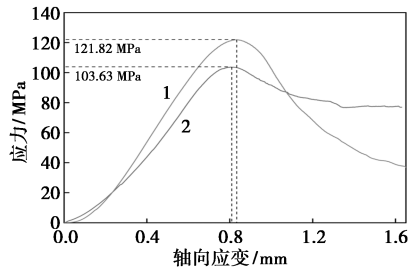


1—复合相变材料;2—二元共晶盐;3—氧化钙

图 6　CaO、$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐及 $NaOH-NaNO_3/CaO$ 复合定型相变材料的傅里叶变换红外图谱

2.4　机械性能

复合定型相变材料的机械强度是影响实际使用性能的重要参数之一,图 7 显示复合定型相变材料抗压强度的应力-应变曲线对比。可以看出,在给定的单轴压力下,复合材料的应力首先随轴向应变增加,然后达到最大值,最后又减小到最小值,该最大值与断裂力矩相对应,可视为机械强度值[18]。复合材料具有较高的机械强度,为 121.82 MPa,这使得该材料在实际应用中能够承受较大的压力和外力作用,保证结构的稳定性和可靠性。然而,复合材料循环一次后的机械强度降低至 103.63 MPa,这可能是由于循环后复合材料内部孔隙增加以及外部表面不平整所致。在循环过程中,材料内部可能会发生运动和重排,使得原本紧密排列的结构出现了一些微小的孔隙,这些孔隙的存在削弱了材料的整体结构,降低了其机械强度。且在循环后该材料表面变得不平整,这也会使得其机械强度下降。



1—循环前;2—循环后

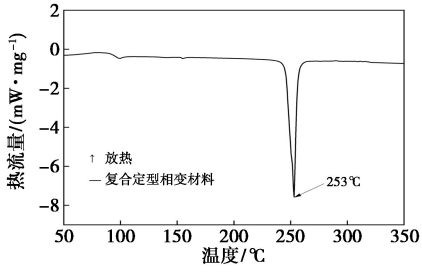
图 7　复合相变材料循环前后的机械强度

2.5　热物理性能

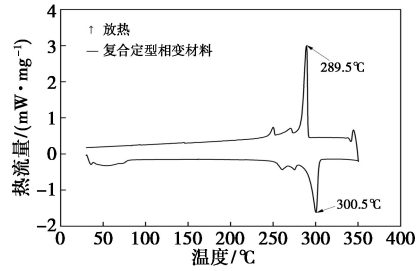
2.5.1　相变特性

为了有效评价所制备的复合材料的相变性能,采用 DSC 进行复合材料的相变特性和相变潜热的分析,其结果如图 8 所示。二元共晶盐的峰值相变温度为 253℃,相变潜热为 248.1 kJ/kg。而当加入骨架材料 CaO 后,$NaOH-NaNO_3/CaO$ 复合定型相变材料在融化过程中的相变峰值温度为 300.5℃,相变潜热为 117.4 kJ/kg;在凝固过程中,相变峰值温度为 289.5℃,相变潜热为 122.2 kJ/kg。值得注意的是,与二元共晶盐相比,复合定型相变材料的相变温度上升了约 40℃。造成该实验结果的原因还需进一步探究,但限域成核结晶是该结果的原因之一。在复合相变材料中,碱基熔盐被包覆在由氧化钙形

成的多尺度柔性骨架载孔洞中,这些不同尺度的微孔对碱基熔盐的相变行为产生影响,从而观察到其熔化温度较纯物质有一定提升。



(a) $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐

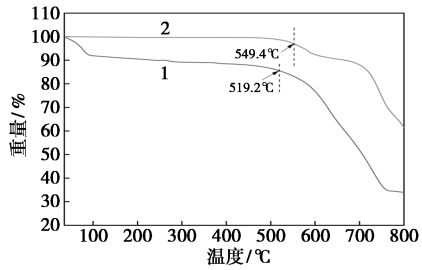


(b) $NaOH-NaNO_3$/CaO 复合定型相变材料

图 8 热循环 1 次后的 DSC 曲线

2.5.2 分解温度

通过热重分析仪测量复合材料最高工作温度来检验其热稳定性,图 9 为测量结果。在热重曲线中,测试样品的最高分解温度是指样品质量损失达 3% 时的测量值[19]。可以看出,在 100℃ 以下,$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐有明显的质量降解,这是由于物理吸附的水和结晶水挥发所致,其分解温度为 519.2℃。复合材料的分解温度为 549.4℃,相较于二元共晶盐,$NaOH-NaNO_3$/CaO 复合材料的分解温度提高了 30℃ 左右,且其在 0~100℃ 的温度区间内没有出现明显的失重现象。这是由于在冷烧结过程中,$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐被 CaO 形成的刚性骨架结构所包容。这种骨架结构不仅可以有效阻止相变过程中液相的渗出,还可以显著提升复合材料的热分解温度,同时克服碱盐基熔盐强吸水性的缺陷。由于复合材料的熔点远低于 500℃,因此其在 30~500℃ 的潜在使用温度范围内具有良好的热稳定性。



1—$NaOH-NaNO_3$;2—$NaOH-NaNO_3$-CaO

图 9 二元共晶盐及复合定型相变材料的热分解曲线

3 结论

本文以 $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐为相变材料,CaO 为骨架材料,去离子水作为烧结剂,基于冷烧结工艺制备了 $NaOH-NaNO_3$/CaO 复合定型相变材料。实验首次验证了碱盐基熔盐制备复合定型相变材料的可行性,并研究了烧结剂含量、单轴压力、冷烧结温度和冷烧结持续时间等冷烧结参数对复合定型相变材料致密度的影响,并对复合定型相变材料的微观结构特征及致密化机理、化学特性和热物理性能进行了分析,得出以下结论。

(1) $NaOH-NaNO_3$/CaO 复合定型相变材料的最佳冷烧结工艺参数为:去离子水质量分数 7%,冷烧结温度 150℃,单轴压力 200 MPa,冷烧结持续时间 8 min。在该操作条件下,$NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐与 CaO 可以形成相对致密的整体结构,这种结构能有效消除液态盐的渗漏并保持其形状稳定。

(2) $NaOH-NaNO_3$ 二元共晶盐、CaO 及去离子水之间没有发生化学反应,复合材料具有良好的物理及化学相容性。

(3) 碱基复合相变材料具有优异的力学性能,最大复合机械强度可达 121.82 MPa。

(4) 碱基复合相变材料具有较好的储热能力,其相变起始温度为 290.7℃,相变潜热为 117.4 kJ/kg,分解温度为 549.4℃,在 30~500℃ 的潜在使用温度范围内具有卓越的热稳定性。

参考文献

[1] Huang J X, Zhao Y, Song J, *et al*. A review of progress in thermo-mechanical energy storage technologies for combined cooling, heating and power applications[J]. Frontiers in Energy, 2025, 19(2): 1-27.

[2] 熊亚选,尹心成,药晨华,等.兰炭灰固碳对复合相变储热材料性能的影响[J].热力发电,2024,53(7):62-72.

[3] 杨洋,熊亚选,任静,等.碳捕捉对电石渣-钢渣复合相变储热材料性能的影响[J].储能科学与技术,2023,12(12):3690-3698.

[4] Martinze F R, Borri E, Ushak S, *et al*. Experimental characterization of phase change materials for thermal energy storage in the temperature range between 270℃ and 400℃ [J]. Energy, 2025, 314: 134243.

[5] Zhao Z H, Feng X R, Feng D L, *et al*. Bird skeleton-inspired 3D hollow diamond-enhanced PEG composite PCM for photothermal conversion and thermal management[J]. Frontiers in Energy, 2025, 19(2): 227-239.

[6] Liu X J, Lin F K, Guo Z J, *et al*. Diatomite porous ceramic-based phase change materials with $Ti_3C_2T_x$ coating for efficient solar-thermal energy conversion[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 107: 114967.

[7] Zhou S L, Zhang Q Y, Liu H, *et al*. A facile eutectic strategy for scalable, leakage-free thermochromic phase-change composites enabling smart temperature labels and secure data encryption[J]. Advanced Science, 2025, 13(5): e19934.

[8] Shi H, Yang X M, Mo J, *et al*. Cross-linked polyrotaxane based aerogel as supporter for leakage-proof phase change materials with high enthalpies[J]. Materials Today Communications, 2025, 44: 112092.

[9] Wu C L, Wang Q, Sun S P, *et al*. Comprehensive thermal properties of ternary eutectic molten salt/nanoparticles composite phase change materials for high-temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 261: 112531.

[10] Li C, Han L, Leng G Y, *et al*. Nitrate salt-halloysite nanotube (HNT) composite phase change materials for thermal energy storage: The feasibility of material fabrication by using HNT as skeleton substance and its thermal properties[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 263: 112565.

[11] Gregoire B, Ma H K, Palacios A, *et al*. Sodium nitrite-sodium nitrate eutectic based composite phase change material (CPCM) for medium-temperature thermal energy storage (TES): Exploring the relationship between microstructures and thermal properties[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101: 113922.

[12] Xiong Y X, Yang Y, Zhang A T L, *et al*. Investigation on low-carbon shape-stable phase change composite by steel slag and carbide slag for solar thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109736.

[13] Galotta A, Giust E, Bortolotti M, *et al*. Cold sintering of diatomaceous earth[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(9): 4329-4340.

[14] Liu M, Jin Q, Shen P. Cold sintering of $NaNO_3$/MgO heat-storage composite[J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28955-28960.

[15] Luo J, Chen Y, Zhang X, *et al*. Microwave-induced preparation of MgO-loaded N-rich porous biochar from marine biomass for efficient CO_2 capture and mechanism exploration via theoretical calculation[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 405: 136915.

[16] Jiang Y, Sun Y, Bruno F, *et al*. Thermal stability of Na_2CO_3-Li_2CO_3 as a high temperature phase change material for thermal energy storage[J]. Thermochemical Acta, 2017, 650: 88-94.

[17] 李钰颖,魏雯珍,李琦,等.可用于低中温热能储存的四元硝酸盐/埃洛石/石墨定型复合材料的制备与研究[J].储能科学与技术,2022,11(3):1044-1051.

[18] Li C, Han L, Li Q, *et al*. Development and investigation of salt based composite phase change material containing diatomite as skeleton substance by cold sintering technology for medium and high temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 271: 112821.

[19] Li Q, Cong L, Zhang X, *et al*. Fabrication and thermal properties investigation of aluminum based composite phase change material for medium and high temperature thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 211: 110511.■

(上接第 106 页)

参考文献

[1] Wang X X, Liao S Y, Wan J Y, *et al*. Electromagnetic interference shielding and absorption materials: Current status and future perspectives[J]. Materials Today Physics, 2023, 32: 101008.

[2] Wu N, Guo H, Zhang Q Q, *et al*. Electromagnetic wave pollution and its biological effects: A review[J]. Environmental Research, 2022, 204: 112068.

[3] Cao M S, Chen H Y, Zhang L J, *et al*. Toward the application of high-performance electromagnetic wave absorption by designing nanostructures[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(21): 2110194.

[4] Quan L, Cui J, Cui M J, *et al*. A review of porous lightweight composite materials for electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 214: 108744.

[5] Liang C, Guo Z H, Tian S Y, *et al*. Recent advances in 1D and 2D nanostructures for microwave absorption[J]. Nano Research, 2021, 14(7): 2045-2062.

[6] Ni B, Shi Y, Wang X, *et al*. Sub-nanometer materials: Synthesis, properties, and applications[J]. Advanced Materials, 2020, 32(18): 1904246.

[7] Pan F, Cai L, Shi Y, *et al*. Heterointerface engineering in electromagnetic wave absorbing materials[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(10): 2101960.

[8] Zhao B, Fu H, Chen B, *et al*. The role of interfacial defects in enhancing polarization loss for electromagnetic wave absorption[J]. Carbon, 2021, 173: 1050-1060.

[9] Lv H, Miao J J, Zhao J Y, *et al*. An interface engineering strategy to construct core-shell heterostructures for high-performance microwave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 415: 129052.

[10] Liu P, Li F, Luo S H, *et al*. Interfacial polarization dominant CNTs/Polyvinylidene fluoride composite with excellent electromagnetic wave absorption[J]. Composites Science and Technology, 2022, 218: 109184.

[11] Chen W, Weng X L, Zheng J, *et al*. Atomic-scale interface engineering for electromagnetic wave absorption[J]. Science Bulletin, 2023, 68(5): 512-520.

[12] Li X, Chen C, Luo H, *et al*. Enhanced dielectric loss and interfacial polarization in sub-1nm heterogeneous structures[J]. Nano Letters, 2021, 21(9): 3809-3816.

[13] Feng A, Zhai J J, Lei X Y, *et al*. Constructing multiple heterogeneous interfaces in sub-nano composites toward ultrabroadband microwave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(12): 14601-14611.

[14] Wang G, Li Q, Zhang Y, *et al*. Ultrathin heterostructures with maximized interfaces for superior electromagnetic energy dissipation[J]. Advanced Science, 2021, 8(15): 2100470.■