



钢渣基固碳储热材料的开发及热物性研究

房洪彬¹, 高 祺¹, 金秋彤¹, 张小霞¹, 龚志军^{1,2}

(¹内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010; ²白云鄂博共生伴生矿资源高效利用省部共建协同创新中心, 内蒙古 包头 014080)

摘要: 本研究以钢渣为基体, 通过碳封存技术将其转化为固碳材料, 并与硝酸钠相变材料复合, 采用冷压烧结法制备了一种新型固碳储热一体化复合材料。通过正交试验优化碳封存条件, 确定最佳反应条件为: 温度75℃、CO₂压力0.85 MPa、液固比35、搅拌速率950 r/min。在此条件下, 温度提升至95℃并反应4 h后, 固碳量达到294 kgCO₂/t_{钢渣}。扫描电子显微镜(SEM)观察显示, 硝酸钠均匀贴合于固碳钢渣孔隙之中; X射线衍射(XRD)分析表明二者具有良好的化学相容性, 仅为物理混合。热物性测试结果表明, 固碳钢渣/硝酸钠复合材料的最佳负载量为50%, 其熔点为303.2℃, 相变潜热值为81.9 J/g, 导热系数为0.866 W/(m·K)。经过300次加热/冷却循环后, 该复合材料展现出良好的循环稳定性。与钢渣硝酸钠复合相变储热材料相比, 其储热性能更为优异。本研究不仅为固废资源的高效利用提供了新的途径, 还为开发高性能复合相变储热材料提供了实验依据, 推动了固碳与储热一体化技术的发展, 为清洁低碳能源转型中的可再生能源储存技术提供了重要的技术支持。

关键词: 碳封存; 冷压烧结; 固碳储热一体化; 复合相变储热材料

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0815

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-353-10

Development and thermal properties study of steel slag-based CO₂-fixing thermal storage materials

FANG Hongbin¹, GAO Qi¹, JIN Qitong¹, ZHANG Xiaoxia¹, GONG Zhijun^{1,2}

(¹Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; ²Provincial-Ministerial Jointly-Built Collaborative Innovation Center for Efficient Utilization of Co-occurring Mineral Resources in Baiyunebu, Baotou 014080, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study investigates the conversion of steel slag into a carbon-sequestering matrix through accelerated mineral carbonation. The resulting CO₂-fixing steel slag is combined with sodium nitrate phase-change material (PCM) using cold-press sintering, producing a dual-functional composite capable of simultaneous carbon sequestration and thermal energy storage. An orthogonal experimental design is employed to optimize carbonation parameters, with optimal conditions identified as 75℃, 0.85 MPa CO₂ pressure, a liquid-to-solid ratio of 35, and a stirring speed of 950 r·min⁻¹. Further carbonation conducted at 95℃ for 4 h under optimized conditions yields a carbon sequestration capacity of 294 kg CO₂/t steel slag. Scanning electron microscopy analysis reveals homogeneous impregnation of

收稿日期: 2025-09-09; 修改稿日期: 2025-10-30。

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2025QN05032), 内蒙古科技大学科科炬计划项目(KJJH2024953)

第一作者: 房洪彬(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为熔融盐复合相变材料, E-mail: 3130067779@qq.com; 通信作者: 龚志军, 副教授, 研究方向为洁净燃烧、烟气净化, E-mail: gongzj77@163.com。

引用本文: 房洪彬, 高祺, 金秋彤, 等. 钢渣基固碳储热材料的开发及热物性研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 353-362.

Citation: FANG Hongbin, GAO Qi, JIN Qitong, et al. Development and thermal properties study of steel slag-based CO₂-fixing thermal storage materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 353-362.

sodium nitrate within the pore structure of the CO₂-fixing steel slag. X-ray diffraction analysis demonstrates high chemical compatibility between the constituents, confirming the absence of chemical reactions and indicating purely physical interactions. Thermal characterization shows that the composite containing 50% CO₂-fixing steel slag exhibits a melting temperature of 303.2°C, a latent heat capacity of 81.9 J/g, and a thermal conductivity of 0.866 W/(m·K). The composite also maintains stable thermal performance over 300 heating-cooling cycles. Compared with previously reported steel slag-sodium nitrate PCM composites, this system exhibits markedly enhanced thermal energy storage performance. Overall, this study proposes a sustainable dual-functional strategy for the high-value utilization of steel slag while providing systematic experimental validation for the development of high-performance composite PCMs. Furthermore, it demonstrates the technical feasibility of coupling carbon capture with thermal energy storage, offering a robust materials-level foundation for renewable energy storage technologies in the transition toward clean, low-carbon energy systems.

Keywords: carbonation; cold pressing; integrated carbonation and storage; composite phase-change storage material

“双碳”目标背景下,工业领域能源高效利用是解决能源与环境矛盾的关键。然而,工业能源系统面临热转换效率的阈值限制,导致热能利用效率偏低、缺口持续扩大,难以满足严格的节能减排需求。热能储存(TES)因其自身可储存热量并延缓释放的特性,成为提升综合利用效率的重要途径^[1]。其中,基于相变材料(PCM)的相变储热技术凭借其高储能密度与近等温释热特性,在工业余热回收(如钢铁、冶金、水泥行业 SCR 脱硝系统烟气处理)中优势显著,可实现余热梯级回收与能量时空转换,突破能效瓶颈^[2-3]。

熔盐因其良好的热物性、热稳定性与经济性常被用作相变储热材料,如 Tian 等^[4]制备共晶氯盐 NaCl-CaCl₂ 应用于聚光太阳能电站中成本仅为 33.52 元/kg; Mo 等^[5]将 LiNO₃/NaCl 共晶盐应用于中温 TES 系统 50 次热循环后仍具备 99.7% 的热可靠性。但 Zhang 等^[6]、Díaz-Herrezuelo 等^[7]通过对包括熔盐在内的相变材料归纳发现普遍存在低导热系数与液体泄露问题,严重限制了实际应用。

为解决熔盐泄漏并提高复合材料强度,研究者常采用莫来石、高岭土等传统骨架载体^[8]。Liu 等^[9]以多孔莫来石为基体负载熔融 Na₂SO₄ 制备复合材料; Zhang 等^[10]以高岭土为基体负载熔融 NaCl-KCl 共晶盐成功制备性能良好的复合材料。可见,利用传统骨架材料有效防止了熔盐泄漏,提高了材料强

度和热稳定性。然而传统骨架多为天然矿石或其加工品,成本较高且开采易造成环境破坏。相比之下,工业固废作为骨架材料,成本低、资源丰富且环境友好。王辉祥等^[11]以电石渣为基体代替传统骨架负载不同比例 Na₂CO₃ 制备最优复合材料; 杨洋等^[12]以电石渣-钢渣复合固废为基体经碳化后负载硝酸钠制备复合材料,固碳率为 24.48%, 经历 1440 次加热/冷却循环后仍具有优异的储热性能。利用工业固废,既能缓解固废堆积的环境压力,又为储热材料提供经济高效方案,推动了技术发展并实现固废高值化利用^[13]。

CO₂ 捕集、利用与封存(CCUS)作为关键的脱碳技术备受重视,其核心环节 CO₂ 封存通常利用天然矿石(蛇纹石、橄榄石等)中的 Ca²⁺、Mg²⁺ 将 CO₂ 矿化固定^[14-15]。但天然矿石的开采能耗高、反应条件苛刻、易产生二次污染,与储热传统骨架面临相似问题。富含 Ca²⁺、Mg²⁺ 的碱性固废(如钢渣)成为其理想替代品^[16]。

研究发现,钢渣作为一种典型碱性固废,其高钙镁特性使其兼具储热介质与固碳骨架材料潜力。固碳技术研究方面,如杨郢旭等^[17]、戴民等^[18]将钢渣与矿粉、熟石灰等混合后经 CO₂ 矿化养护后制备胶凝材料与钢渣板,制得的胶凝材料与板材在稳定性、耐久性、抗折强度上明显强于未经 CO₂ 矿化养护前。然而,这些研究主要集中在单一功能的材料

上,对具有固碳储热双重功能的复合材料的研究还处于起步阶段。复合相变储热材料的研究中,已有研究涉及钢渣与相变材料的复合,但研究主要集中于常规钢渣复合材料,如Liu等^[19]、Xiong等^[20]、Wang等^[21]以钢渣为基体,分别负载KNO₃、NaNO₃、NaCO₃制备一系列性能良好的复合材料。以上研究均展示了钢渣复合材料的潜力,但针对固碳钢渣与硝酸钠复合相变储热材料的系统性研究却相对匮乏^[22]。

基于此,本研究创新性地开发了一种固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料,通过碳封存技术将钢渣转化为固碳材料,与中温熔盐硝酸钠混合制备可应用于SCR烟气脱硝余热领域的兼具固碳储热双重功能的复合材料,并研究了其机械强度、熔点、相变焓值及导热性能。

1 实验材料与制备

1.1 实验材料

本实验所用的硝酸钠(NaNO₃)为分析纯,购于国药集团,潜热值0.51 J/g;实验所用钢渣来自包钢现场,密度为2.7706 g/cm³,其所含成分分析见表1。

表 1 实验所用钢渣的成分分析	
Table 1 Composition analysis of the steel slag used in the experiments	
组成	含量/%
CaO	50.07
SiO ₂	28.12
Al ₂ O ₃	10.17
SO ₃	3.43
MgO	1.47
Fe ₂ O ₃	4.34
其他	3.87

1.2 复合相变储热材料的制备方法

1.2.1 固碳钢渣制备

本实验通过正交试验法筛选固碳钢渣制备的最优条件。实验前,将钢渣在120℃干燥箱中干燥至质量恒定,随后在球磨机中研磨至粒径小于200目。固碳钢渣制备步骤如下:用分析天平称取钢渣,按一定液固比与纯水混合搅拌倒入高压反应釜;设定反应温度并加热至恒定;通入CO₂升压至设定值,同时开启搅拌器,各反应条件见表2选择;反应至4 h后取出产物;于120℃干燥至质量恒定,称重计算固碳率。

表 2 固碳钢渣正交反应条件				
Table 2 Orthogonal reaction conditions for CO ₂ -fixing steel slag				
编号	反应温度/℃	压力/MPa	搅拌速率/(r/min)	液固比
1	45	0.75	650	15
2	45	0.85	750	25
3	45	0.95	850	35
4	45	1.05	950	45
5	55	0.75	750	35
6	55	0.85	650	45
7	55	0.95	950	15
8	55	1.05	850	25
9	65	0.75	850	45
10	65	0.85	950	35
11	65	0.95	650	25
12	65	1.05	750	15
13	75	0.75	950	25
14	75	0.85	850	15
15	75	0.95	750	45
16	75	1.05	650	35

1.2.2 固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料制备

本实验采用冷压烧结法制备复合相变储热材料。实验前,将固碳钢渣、硝酸钠在120℃干燥箱中干燥至质量恒定。按图1所示制备样品,具体操作步骤为:固碳钢渣与硝酸钠按质量比(9:1、8:2、7:3……3:7、2:8、1:9)混合后,置于球磨机中研磨;取各比例混合粉末1 g,在压片机中以5 MPa压力压制成片(Φ=15 mm)。将成型生胚以20~200℃,5℃/min升温;200~330℃,1℃/min升温并恒温90 min,放入马弗炉烧制。烧制完成后,观察封存情况,确定最佳混合比例,样品备用。

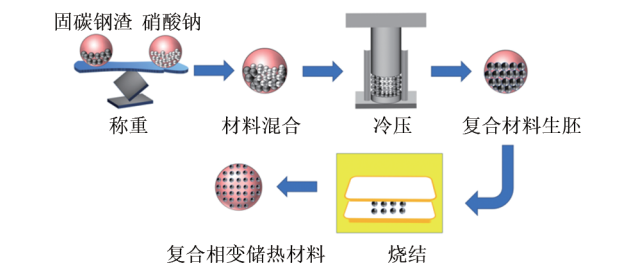


图 1 复合相变储热材料制备示意图
Fig. 1 Schematic of composite PCM preparation

1.3 复合相变储热材料性能衡量标准

1.3.1 钢渣固碳率

固碳率是指钢渣通过矿化作用固定CO₂所增加质量占原钢渣总重的百分比,其计算公式为:

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta m_2}{m - \Delta m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δm_2 为 105~950℃ 阶段的质量损失(g), 即 CO_2 释放量; $(m - \Delta m_1)$ 为样品干燥后的质量(g)。

1.3.2 样品失重率

采用冷压烧结进行样品制备时, 本文所提出的样品失重率反映相变材料在制备过程的挥发程度, 其计算公式为:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, w 为失重率; W_1 、 W_2 分别是复合相变储热材料烧结前、烧结后的重量(g)。

1.3.3 密度

密度是衡量样品重要的物性参数之一, 密度的变化一定程度上彰显着样品材料的特性发生改变, 其计算公式为:

$$\rho = \frac{m}{\pi R^2 h} \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; m 是复合相变储热材料样品的质量(g); R 为样品的半径(cm); h 是样品的厚度(cm)。

1.3.4 导热系数

导热系数是复合相变储热材料的一个关键热物性参数, 但其一般不能直接得到, 需要借助热扩散系数、比热容等参数, 其计算公式为:

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad (4)$$

式中, α 为热扩散系数(mm^2/s); C_p 是比热容($\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$); ρ 是固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料的密度(kg/m^3)。

2 结果与讨论

2.1 钢渣矿化结果

2.1.1 正交试验分析

图2为钢渣矿化 CO_2 正交试验结果及四因素指标趋势图, 表3为正交试验方差分析表。图2结果

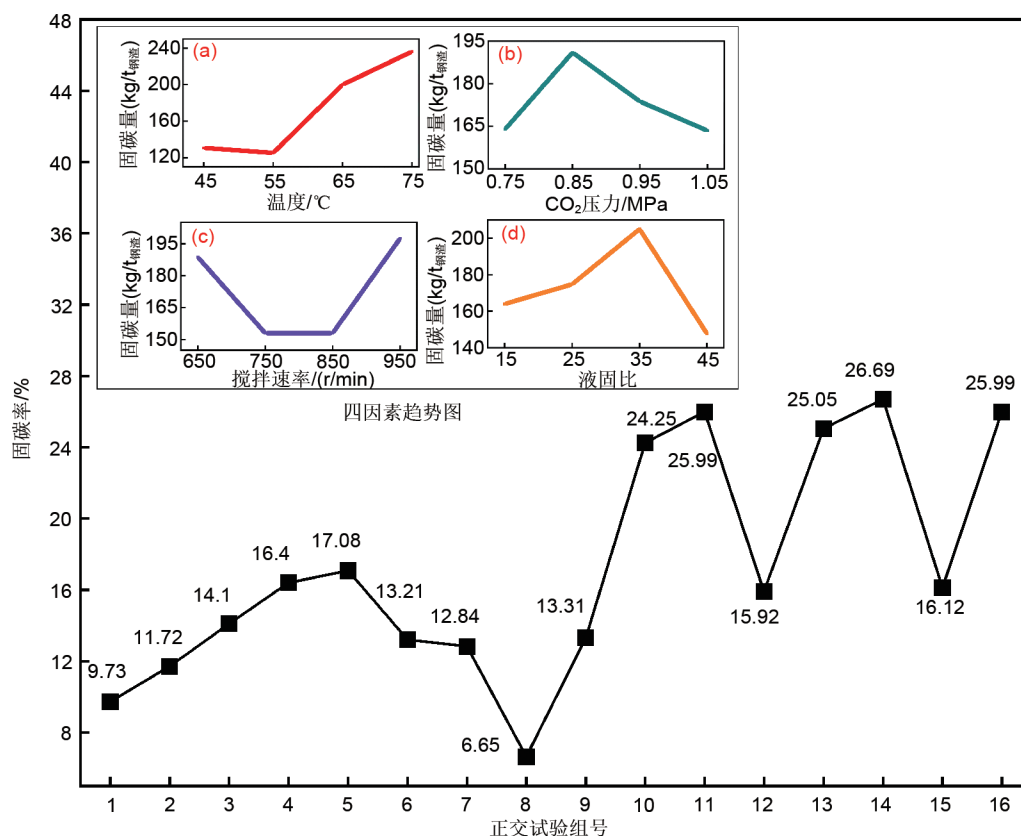


图2 钢渣矿化 CO_2 正交试验结果及四因素指标趋势图 (a) 温度指标趋势图; (b) CO_2 压力指标趋势图; (c) 搅拌速率指标趋势图; (d) 液固比指标趋势图

Fig. 2 Orthogonal array results and four-parameter trends for CO_2 mineralization in steel slag (a) trend chart of temperature indicators; (b) trend chart of CO_2 pressure index; (c) trend chart of stirring rate index; (d) trend chart of liquid-solid ratio index

表明, 16 组试验中固碳率未随单一因素增大而增大, 说明温度、 CO_2 压力、液固比、搅拌速率四因素共同影响固碳率。通过图 2 正交试验数据进行指标与极差分析绘制得出因素指标趋势图, 筛选出最优条件: 温度 75°C 、 CO_2 压力 0.85 MPa 、液固比 35、搅拌速率 950 r/min 。基于图 2 数据进行方差分析, 见表 3。结果显示温度对固碳率的影响显著性最高, 其次是搅拌速率、液固比、 CO_2 压力。据此, 调整制备条件为 95°C 、 0.85 MPa 、 950 r/min 、液固比 35, 反应 4 h 后, 固碳量达到 $294\text{ kgCO}_2/\text{t}_{\text{钢渣}}$ 。

表 3 正交试验方差分析表

Table 3 Orthogonal Array ANOVA Table

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	显著性水平	显著性
温度	3.48	3	1.16	2.997	0.25	*
CO_2 压力	0.16	3	0.053	0.137		
搅拌速率	0.62	3	0.207	0.535		
液固比	0.56	3	0.187	0.483		
误差	1.16	3	0.387			
总和	5.98	15	$F_{0.25}(3,3)=2.36; F_{0.1}(3,3)=5.39$			

2.1.2 孔结构变化

钢渣直接湿法矿化 CO_2 前后孔结构变化见表 4。经过 CO_2 矿化后, 钢渣比表面积明显增大, 主要由于固碳反应优先与钢渣中的活性碱性成分如游离氧化钙发生反应, 使得钢渣内部致密结构占比降低; 伴随游离氧化钙向碳酸钙转变, 材料整体从致密块状物向多孔新物相转变, 进而整体比表面积增大。

表 4 钢渣矿化 CO_2 前后孔结构数据Table 4 Pore structure data before and after CO_2 mineralization in steel slag

样品	比表面积/(m^2/g)	孔体积/(mL/g)	平均孔径/nm
钢渣	7.9025	0.026362	8.52
固碳钢渣	37.0508	0.082927	4.33

2.2 复合相变储热材料的封存结果

图 3、图 4 是样品烧结实况汇总图及失重率汇总图。如图 3 示, 固碳钢渣与硝酸钠混合比例小于 5:5 时, 生胚烧制后出现大量硝酸钠泄露, 尤其在 1:9 和 2:8 比例下, 这是因为固碳钢渣形成的孔隙不足以容纳过量的硝酸钠。当比例大于 5:5 时, 样品外观完整, 不再塌陷, 表明固碳钢渣能够有效封存硝酸钠。综合图 3 烧结实况和图 4 失重率汇总, 确定 5:5 为固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料最佳的混合比例, 此时基体孔隙与硝酸钠匹

配, 既避免了泄露, 又保持了较高的潜热。

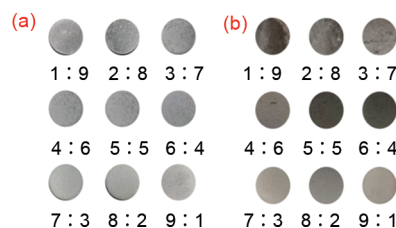


图 3 复合相变储热材料烧结实况汇总图 (a) 烧结前; (b) 烧结后

Fig. 3 Sintering process summary of composite PCM (a) before sintering; (b) after sintering

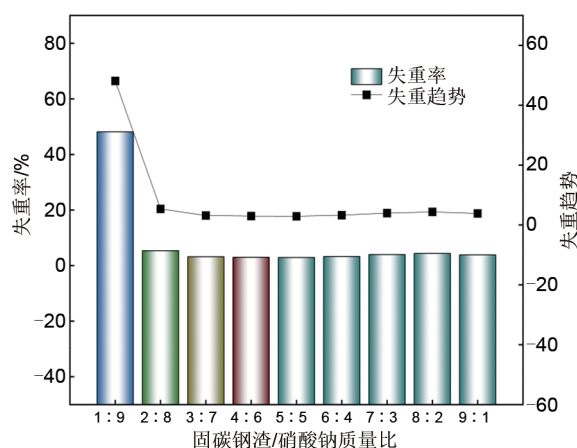


图 4 复合相变储热材料失重率汇总图

Fig. 4 Mass loss summary of composite PCM

2.3 复合相变储热材料的抗压性能

图 5 为固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料不同比例混合的抗压强度汇总图。复合相变储热材料在 5:5 比例下抗压强度为 17.3 MPa , 满足 GB/T 50081—2019 普通混凝土等级 C15 标准。当比例为 7:3 时, 抗压强度达到最大值 38.4 MPa , 随后降低。这是由于该比例下形成的相变材料“黏结桥”厚度最高, 使抗压强度优于其他混合比例^[1]。但鉴于 5:5 比例的储热密度更大, 仍确定 5:5 为最优比例。

图 6 是固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料热循环前后机械强度对比图。经过 300 次冷热循环后, 复合相变储热材料的抗压强度从 17.3 MPa 降至 3.3 MPa 。多次循环使硝酸钠反复相变, 体积变化对固碳钢渣基体不断产生应力, 使得基体“骨架”退化, 导致抗压强度下降。

2.4 复合相变储热材料的微观结构

图 7 是钢渣、固碳钢渣和与硝酸钠复合相变储

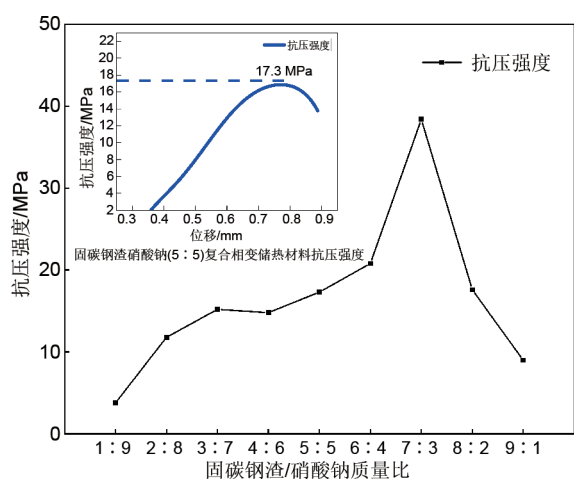


图5 复合相变储热材料抗压强度汇总图

Fig. 5 Compressive strength summary of composite PCM

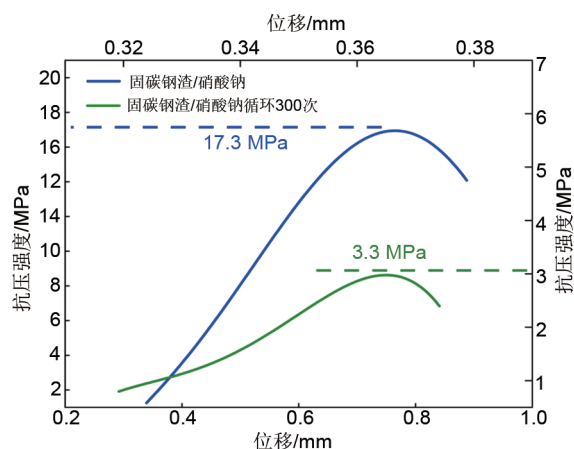


图6 复合相变储热材料抗压强度循环前后对比图

Fig. 6 Compressive strength comparison before and after thermal cycling of composite PCM

热材料的表面形貌。图7(a)钢渣微观结构由块状、棱柱状晶体堆叠,形成复杂孔隙网络;而 CO_2 矿化后的图7(b)固碳钢渣表面由针状晶体交织堆叠,形成规整、连通性好的孔隙网络。这种针状晶体交织结构类似“骨架”,可均匀分散应力,提高复合材料抗压性能。固碳钢渣和钢渣均为多孔结构,但固碳钢渣更规整、发达的孔隙网络,意味着更大的比表面积,表4孔结构数据也证实了这一点,因此固碳钢渣对硝酸钠的负载量高于钢渣。此外,固碳钢渣孔隙网络规整使相变过程热量传递更顺畅,热阻更小,潜热值也会提高;而硝酸钠负载量的提升亦使得复合相变储热材料热物性更接近纯硝酸钠,熔点也随之接近。

图8是固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料冷热

循环前后的EDS元素成像图谱。循环后,固碳钢渣针状结构变得均匀圆润,表明材料的相变、体积变化与成分迁移已经致使基体形貌和结构发生退化,较钢渣更优异的微观结构消失,传热通道严重受阻,对外表现储热性能下降。EDS图谱显示固碳钢渣的C、Ca、Si元素与硝酸钠的N、Na元素既重合又互补,表明硝酸钠负载并未因循环改变。对比N、Na元素发现,循环后N、Na元素产生了聚集现象,这是由于硝酸钠在循环过程中发生微流动,使得熔融硝酸钠不断进入固碳钢渣孔隙所形成的。

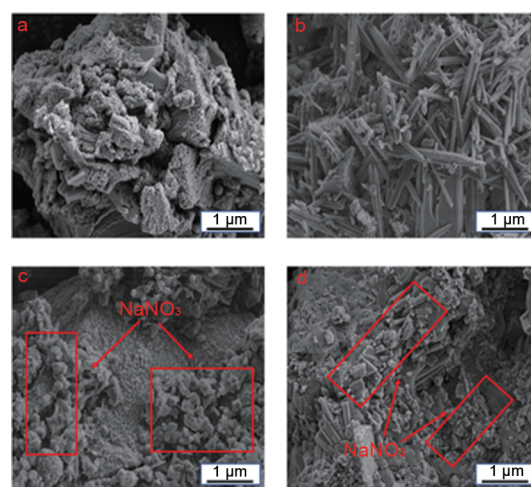


图7 钢渣、固碳钢渣及复合相变储热材料的表面形貌 (a) 钢渣; (b) 固碳钢渣; (c) 钢渣复合相变储热材料; (d) 固碳钢渣复合相变储热材料

Fig. 7 Surface morphology comparison of steel slag, CO_2 -fixing steel slag, and composite PCM (a) steel slag; (b) CO_2 -fixing steel slag; (c) steel slag-PCMs SEM figure; (d) CO_2 -fixing steel slag-PCMs SEM figure

2.5 复合相变储热材料的化学相容性分析

图9是固碳钢渣、硝酸钠及其复合相变储热材料的衍射光谱。 2θ 值为 29.42° 、 38.96° 、 47.92° 时固碳钢渣/硝酸钠复合材料与硝酸钠的衍射峰相同,表明硝酸钠结晶结构未变; 2θ 值为 45.82° 、 48.35° 等处,复合相变储热材料与固碳钢渣的衍射峰相同,表明固碳钢渣结构稳定,与硝酸钠化学相容性良好。

经300次冷热循环后,复合相变储热材料XRD谱图中主要晶相仍为硝酸钠与碳酸钙,未出现新衍射峰,但晶体硝酸钠峰强度略有下降。结果表明复合相变储热材料在 $25\sim 400^\circ\text{C}$ 温度区间内具有良好的热循环稳定性和化学相容性,足以应用于SCR

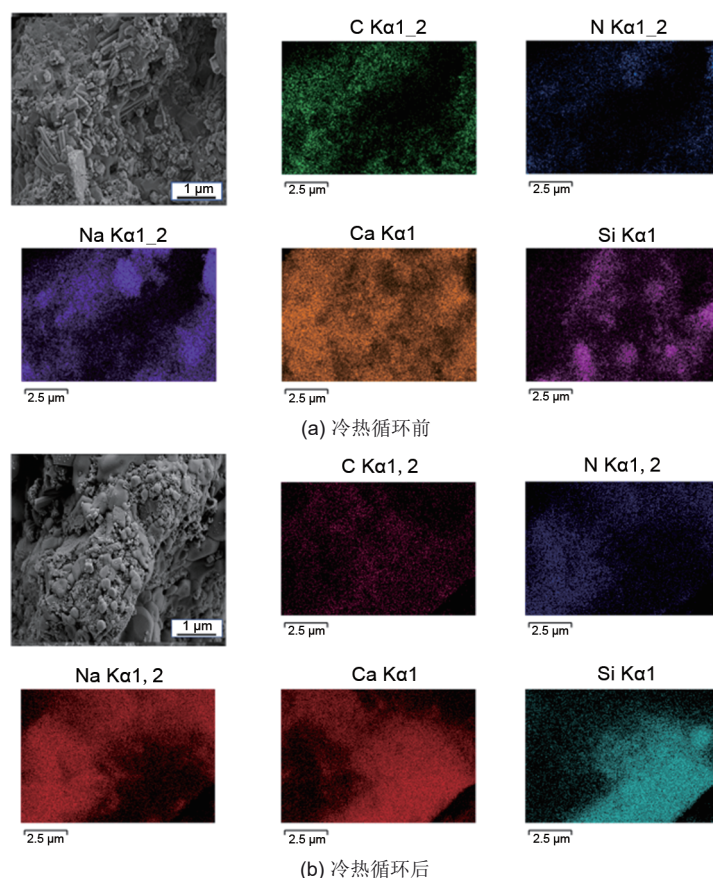


图8 固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料EDS元素成像图谱 (a) 冷热循环前; (b) 冷热循环后
Fig. 8 EDS elemental mapping of CO_2 -fixing steel slag/ NaNO_3 composite PCM (a) before thermal cycling; (b) after thermal cycling

脱销余热回收系统。

2.6 复合相变储热材料的热物性能分析

2.6.1 熔点、相变潜热值及储热密度

图10为钢渣/硝酸钠、固碳钢渣/硝酸钠复合相

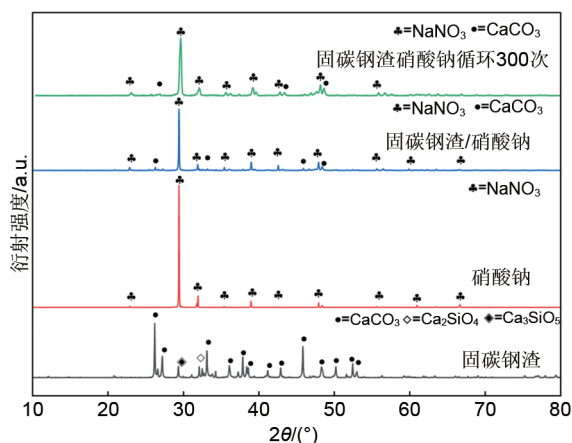


图9 固碳钢渣, 硝酸钠, 复合储热相变材料X衍射光谱图
Fig. 9 XRD patterns of CO_2 -fixing steel slag, NaNO_3 , and composite PCM

变储热材料及硝酸钠DSC曲线图。 NaNO_3 的熔点为 306.8°C , 相变潜热为 178.5 J/g , 固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料的熔点为 303.9°C , 相变潜热为 81.9 J/g ; 钢渣/硝酸钠复合相变储热材料的熔点为 300.3°C , 相变潜热为 72.7 J/g 。明显固碳钢渣/硝酸钠复合材料潜热值、熔点均更接近纯 NaNO_3 热物性参数, 表明其作相变材料基体的储热效果固碳钢渣优于钢渣。

图11、图12为固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料冷热循环前后DSC图与储热密度图。300次冷热循环后, 复合相变储热材料熔点降低了 2.8°C , 潜热值降低了39.61%, 为 49.46 J/g ; 25°C 为基点, 400°C 时复合相变储热材料循环前后储热密度分别达 351.12 J/g 和 233.57 J/g 。结合2.4节微观结构分析可知, 多次循环使固碳钢渣基体结构退化, 孔隙传热网络严重受阻, 相变材料部分潜热值无法展现。考虑其制备过程的经济廉价性, 循环后仍具备一定储热能力, 该复合相变储热材料依然可

以应用于实际中。

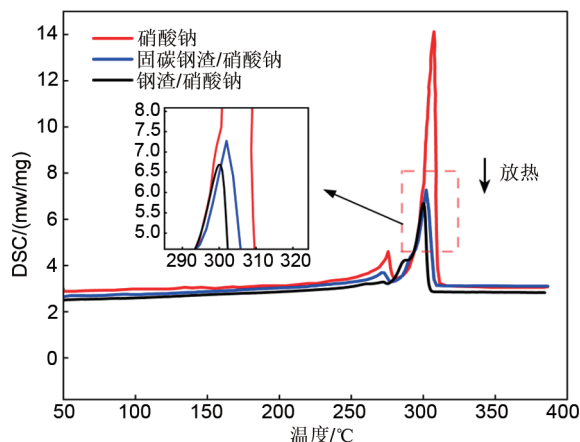


图 10 复合相变储热材料 DSC 曲线
Fig. 10 DSC curve of composite PCM

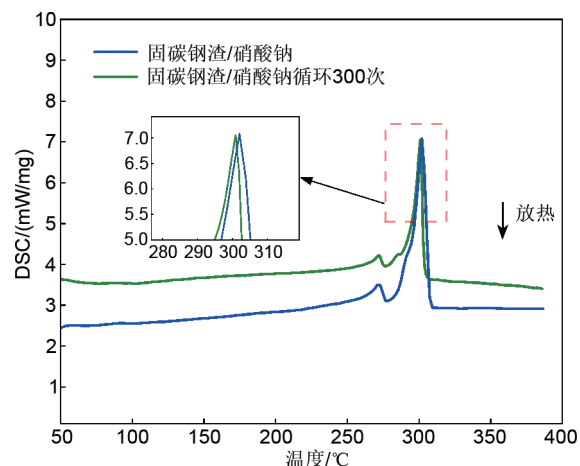


图 11 复合相变储热材料冷热循环前后 DSC 曲线
Fig. 11 DSC curve before and after thermal cycling of composite PCM

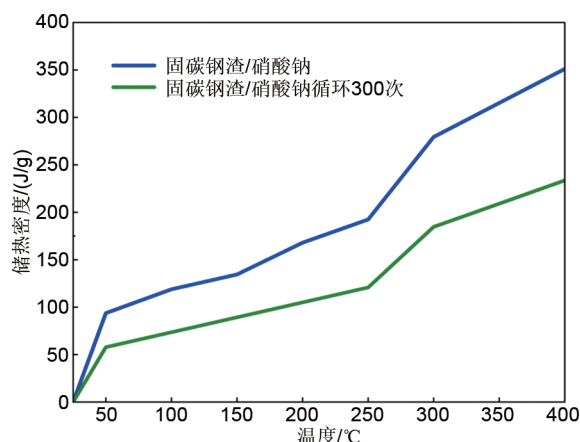


图 12 复合相变储热材料冷热循环前后储热密度
Fig. 12 Energy storage density before and after thermal cycling of composite PCM

2.6.2 导热性能

表 5 是采用激光导热所测数据。根据式(4)计算得到固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料最大导热系数为 $0.866 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

表 5 固碳钢渣/ NaNO_3 的导热系数测试数据

Table 5 Thermal conductivity test data of CO_2 -fixing steel slag/ NaNO_3

编号	热扩散系数/(mm^2/s)	比热容/($\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$)	密度/(kg/m^3)
1	0.527	0.782	2.0934
2	0.531	0.798	2.0933
3	0.535	0.811	2.0938
平均值	0.531	0.797	2.0935

图 13 是不同固废作基体复合硝酸钠导热系数排列图。与其他固废基复合相变储热材料导热系数对比, 固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料导热性能仍表现良好。图 14 是固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料的具体导热系数与热扩散系数。复合相变储热材料在 $25\sim 400^\circ\text{C}$ 温度范围内, 循环前后导热系数变化趋于一致, 最大值分别是 $0.866 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.855 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 高于纯硝酸钠。经 300 次循环后, 导热系数降低, 原因与潜热降低相同, 固碳钢渣基体原有传热网络被阻隔, 热阻增加, 导热随之降低。

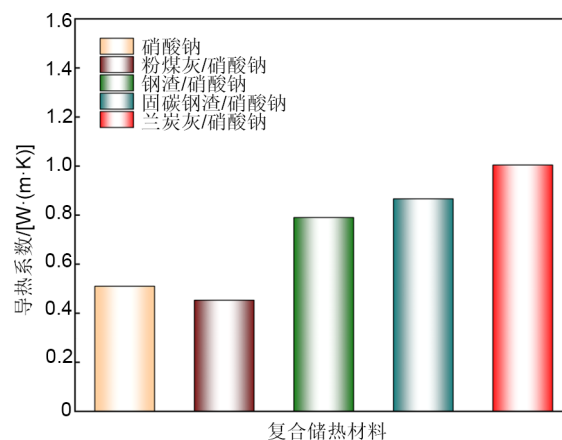


图 13 固废/硝酸钠复合相变储热材料导热系数^[23-26]
Fig. 13 Thermal conductivity of solid waste/ NaNO_3

3 结 论

本研究以钢渣为原料, 通过碳封存技术制备固碳钢渣, 与硝酸钠相变材料复合, 采用冷压烧结法制备固碳储热复合材料。通过实验测量和分析, 得出以下主要结论。

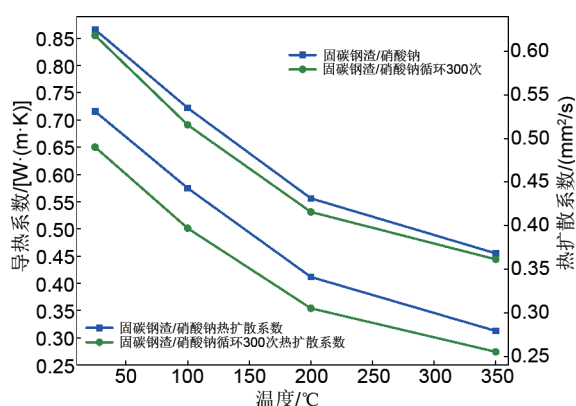


图14 复合相变储热材料冷热循环前后导热系数

Fig. 14 Thermal conductivity comparison before and after thermal cycling of composite PCM

(1) 固碳钢渣制备最优反应条件为: 温度75℃、CO₂压力0.85 MPa、液固比35、搅拌速率950 r/min。温度提升至95℃后固碳量达294kgCO₂/t_{钢渣}。

(2) 固碳钢渣与硝酸钠具备良好的化学相容性, 最大负载量为50%, 优于钢渣/硝酸钠复合相变储热材料, 抗压强度为17.3 MPa。

(3) 固碳钢渣/硝酸钠复合相变储热材料的熔点为303.2℃, 相变潜热值为81.9 J/g, 导热系数为0.866 W/(m·K), 展现出良好的热稳定性。

参考文献

[1] 肖天烈, 郁青春, 刘治平, 等. 改性粉煤灰基高温定形相变材料的制备及性能研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3699-3708. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0671.

XIAO T L, YU Q C, LIU Z P, et al. Preparation and properties of modified fly ash-based high temperature-shaped composite phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3699-3708. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0671.

[2] 任璞. 焦化厂烟气脱硫脱硝及余热利用方法研究[J]. 山西化工, 2024, 44(9): 221-223. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2024.09.076.

REN P. Research on flue gas desulfurization, denitrification and waste heat utilization methods in coking plants[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(9): 221-223. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2024.09.076.

[3] 赵亮, 王海洋, 方向晨, 等. 改性粉煤灰相变储能材料在余热回收中的应用[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 598-602. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.006.

ZHAO L, WANG H Y, FANG X C, et al. Modification of fly ash as a carrier of paraffin wax based phase change energy storage material for waste heat recovery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(6): 598-602. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.006.

[4] TIAN H Q, WANG W L, DING J, et al. Thermal performance and economic evaluation of NaCl-CaCl₂ eutectic salt for high-temperature thermal energy storage[J]. Energy, 2021, 227: 120412. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120412.

[5] MO S P, XIAO B, LI J X, et al. LiNO₃/NaCl nanocapsules with high thermal properties for medium-temperature thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110672. DOI: 10.1016/j.est.2024.110672.

[6] ZHANG N, YUAN Y P, CAO X L, et al. Latent heat thermal energy storage systems with solid-liquid phase change materials: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(6): 1700753. DOI: 10.1002/adem.201700753.

[7] DÍAZ-HERREZUELO I, FALCOZ Q, SOUM-GLAUDE A, et al. Solar salt encapsulated into 3D printed activated carbon/alumina supports for thermal energy storage applications[J]. Open Ceramics, 2024, 19: 100648. DOI: 10.1016/j.oceram.2024.100648.

[8] MILIOZZI A, CHIERUZZI M, TORRE L. Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt/diatomite composite phase change material[J]. Applied Energy, 2019, 250: 1023-1035. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.090.

[9] LIU R P, ZHANG F, SU W M, et al. Impregnation of porous mullite with Na₂SO₄ phase change material for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 134: 268-274. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.12.012.

[10] ZHANG T Y, WANG T Y, WANG K C, et al. Development and characterization of NaCl-KCl/Kaolin composites for thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2021, 227: 468-476. DOI: 10.1016/j.solener.2021.09.020.

[11] 王辉祥, 熊亚选, 任静, 等. Na₂CO₃/电石渣复合相变储热材料制备与性能[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3819-3827. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0378.

WANG H X, XIONG Y X, REN J, et al. Fabrication and performance investigation of Na₂CO₃/carbide slag shape-stable phase change composites[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 3819-3827. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0378.

[12] 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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0683.

YANG Y, XIONG Y X, REN J, et al. Effects of CO₂ capture on carbide-steel slag shape-stable phase-change composites[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3690-3698. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0683.

[13] XIONG Y X, HE M, WU Y T, et al. A comprehensive review on the utilization of industrial solid waste in thermal energy storage field[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 285: 113562. DOI: 10.1016/j.solmat.2025.113562.

[14] SU X N, LIU P F, MEI Y D, et al. The impact of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) projects on environmental protection, economic development, and social equity[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 482: 144218. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144218.

- jclepro.2024.144218.
- [15] WANG F, DREISINGER D, JARVIS M, et al. Kinetics and mechanism of mineral carbonation of olivine for CO₂ sequestration[J]. Minerals Engineering, 2019, 131: 185-197. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.024.
- [16] ZHANG Y P, ZHAN G X, HUANG Z L, et al. Performance and mechanisms of alkaline solid waste in CO₂ mineralization and utilization[J]. Waste Management, 2024, 175: 62-72. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.12.047.
- [17] 杨鄯旭, 高嵩, 邹玉国, 等. CO₂矿化硬化钢渣基凝胶材料耐久性研究[J]. 非金属矿, 2024, 47(6): 94-97, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8098.2024.06.026.
- YANG S X, GAO S, ZOU Y G, et al. Study on the durability of CO₂ mineralized hardened steel slag-based cementitious materials[J]. Non-Metallic Mines, 2024, 47(6): 94-97, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8098.2024.06.026.
- [18] 戴民, 王玉虎, 房延凤. 钢渣基 CO₂矿化板材的制备与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(6): 5-9, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2024.06.002.
- DAI M, WANG Y H, FANG Y F. Preparation and properties of CO₂ mineralized sheet based on steel slag[J]. New Building Materials, 2024, 51(6): 5-9, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2024.06.002.
- [19] LIU F, GE G H, GU W L, et al. Diatomite-based phase change composite coatings applied to concrete walls with solar thermal storage and preservation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 290: 113717. DOI: 10.1016/j.solmat.2025.113717.
- [20] XIONG Y X, YANG Y, ZHANG A, 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. DOI: 10.1016/j.est.2023.109736.
- [21] WANG J L, WANG Y, HUANG Y. Synthesis and characterization of form-stable carbonate/steel slag composite materials for thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104708. DOI: 10.1016/j.est.2022.104708.
- [22] 丛玉丽. 钢渣矿化资源化利用技术进展与应用[J/OL]. 矿产综合利用, 1-10. [2025-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20250527.1404.002>.
- [23] 李淑贤. 粉煤灰基定型复合相变储热材料的热物性研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- LI S X. Thermal physical properties of fly ash-based shaped stable phase change thermal storage materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [24] LIU K, ZHAO H X, YUAN Z F, et al. Preparation and characterization of steel slag-based low, medium, and high-temperature composite phase change energy storage materials [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106309. DOI: 10.1016/j.est.2022.106309.
- [25] 药晨华, 熊亚选, 任静, 等. 硝酸钠/兰炭灰复合相变储热材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 300-309. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220222.002.
- YAO C H, XIONG Y X, REN J, et al. Preparation and properties of sodium nitrate/semi-coke ash shape-stable phase change composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 300-309. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220222.002.
- [26] 杨洋. 电石渣-钢渣复合相变材料制备及性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.