黄金尾矿/粉煤灰制备相变储能材料及其性能研究

王晓宇1,李健2,张伟屹1,李静1,邵艳秋1,邵莹莹3,张涛1,田超3,马近伟3,李书慧3,朱英1

1. 齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院新材料研究所,山东省市政污泥处置工程技术研究中心,山东济南 250014;

2. 山东省固体废物和危险化学品污染防治中心,山东济南 250000;

3. 山东山科生态环境研究院有限公司,山东济南 250000

中图分类号:TD926.4⁺2 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2023)06-0072-07 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.06.008

摘要 尾矿是一种错位资源,其综合利用受到广泛关注。一些尾矿具有丰富的孔隙结构和较大的比表面积,可以作为相变储能材料的载体,应用于相变储能领域。以黄金尾矿混合粉煤灰作为基础骨架材料,太阳盐作为相变储能材料,采用冷压缩热烧结法制备了相变储能材料。利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、差示扫描量热法(DSC)和激光导热仪(LFA)表征了相变储能材料的热物理性能、化学相容性、导热性能。结果表明,当黄金尾矿含量为22.5%、粉煤灰含量为22.5%、太阳盐含量为55%时,复合材料各方面性能最佳且具有良好的化学相容性,最大潜热为53.81 J/g,导热系数为0.27 W/(m·K),抗压强度达到33.7 MPa。样品在经过100次热循环后,仍具有优异的储热性能。利用尾矿制备相变储能材料具有良好的可行性,为尾矿资源化利用提供了一种新途径。

关键词 黄金尾矿;相变储能材料;储热性能;导热性能;尾矿资源化

引言

日益增长的能源消耗和迫在眉睫的环境问题,突 出了发展高效的能源储存的重要性^[1]。热能储存技术 是利用储能介质将热能储存起来,需要时释放热能, 最大限度地将能源利用效率提高^[2]。热能储存技术包 括显热储存、热化学储存和潜热储存^[3]。显热储存技 术是一种纯粹的物理现象,需要大量的存储材料和巨 大的温度波动来存储热能,热力学效率低下^[4]。热化 学储存储能密度高,但反应物成本高,存储安全性低^[5]。 潜热储存因其在较小温度范围内的蓄热量大、化学稳 定性好等特点而受到积极的追求^[6],是目前最合适的 储能技术。

潜热储存是利用相变储能材料(PCM)在熔化和 冻结过程中,可逆地存储和释放巨大的潜热^[7]。相变 储能材料主要包括无机 PCM、有机 PCM 和复合 PCM 三类。无机 PCM 主要有熔融盐类、金属等;有 机 PCM 主要包括石蜡、醋酸和其他有机物;复合 PCM,既能克服单一的无机或有机物 PCM 存在的缺点,又可以改善 PCM 的应用效果。根据相变储能材料的状态可分为固-固相变、固-液相变、固-气相变和液-气相变在相变过程中容积的巨大变化使得其实际应用受到限制^[9],固-固相变材料通常表现出较低的潜热储存能力而受到限制,固-液相变由于其高潜热和可行性是目前应用最广泛的^[10]。但固-液相变材料存在容易泄漏、稳定性差等问题^[11],为了解决这些问题,研究者提出加载相变储能材料支撑材料,其中最常见的是多孔陶瓷^[12]、多孔碳材料^[13]、金属泡沫^[14]和硅藻土^[15]。这些材料可以限制液体相变储能材料在结构中的流动,从而改善了易泄漏和热稳定性差的问题。

一些尾矿具有丰富的孔隙结构和较大的比面积, 可以作为相变储能材料载体,不仅解决了相变储能材 料泄露问题,还为尾矿的利用提供一种新途径^[16]。 Jiang 等人^[17]提出利用铁尾矿与采剥废石为原料制成 的多孔陶瓷作为相变储能材料载体,制备的复合相变

收稿日期:2023-11-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52204422); 济南市社会民生专项(202221015); 济南市"新高校 20条"创业计划项目 (2021GXRC124); 山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2022TSGC1084); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程 (2023TSGC0533)

作者简介:王晓宇(2000一),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事固体废物处理及资源化方面研究, E-mail: wxy13012484152@163.com。

通信作者:张伟屹(1993一),男,山东泰安人,副研究员,硕士生导师,主要从事非金属矿物资源及工业固体废弃物的高效利用研究, E-mail: zhangweiyi@sdas.org。

储能材料物理强度高,储热性能稳定。Wang等人18 以石墨尾矿为主要原料,采用自发熔融浸渗法制备的 相变储能材料具有优良的热物理性能。黄金尾矿是 金矿选别后排出的工业固体废物,堆存会对大气造成 污染,其渗滤水还会污染地下水。粉煤灰是热电厂产 生的主要固体废物,其堆积不仅有扬尘的风险,也给 周边环境造成影响。黄金尾矿与粉煤灰主要成分为 SiO, 和 Al₂O₃, 具有多孔结构, 大多数孔径在 0.1~1 µm 之间,能够作为相变材料的载体。Yang^[19]利用黄金尾 矿和硝酸钠制备的复合相变储能材料,具有良好的机 械性能和导热性能。Wang 等人²⁰¹利用粉煤灰和 K₂CO₃制备的复合相变储能材料,热循环后,在潜热、 化学相容性等方面均表现较好。制备的复合相变材 料的结构稳定性主要受以下两点因素作用:一方面是 成型过程的机械锁定作用,另一方面是熔融盐凝固后 的黏结作用。当应用温度超过熔融盐的熔点时,熔融 盐溶解变为液体分布在载体材料表面,依靠表面张力 和毛细管力,还有由骨架材料和无机盐间的界面能生 成的液桥作用,使得熔融盐紧紧吸附在尾矿基体表面。 太阳盐具有潜热高、适应温度范围广、优异的热性能 和耐腐蚀性,已广泛用于熔盐再生传热、废热利用和 复合相变储能材料领域。若利用单一黄金尾矿负载 相变材料,最高只可负载45%太阳盐,黄金尾矿与粉 煤灰进行混合后,颗粒级配更加合理,能够带来更多 的孔隙以通过表面张力和毛细管力负载相变材料,提 高相变材料负载率。利用黄金尾矿和粉煤灰制备相 变储能材料,不仅解决了尾矿的处置问题,而且降低 了复合相变储能材料的成本。黄金尾矿和粉煤灰作 为相变储能材料的骨架材料具有可行性。

本文以黄金尾矿和粉煤灰混合尾矿作为骨架材料,太阳盐作为相变储能材料,采用冷压缩热烧结法,制备复合相变储能材料(CPCMs),并对 CPCMs进行 表征和分析。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

以太阳盐(SS)为相变储能材料(PCM),太阳盐

由 NaNO₃和 KNO₃(质量比3:2)研磨混合,并在390℃ 下融化,然后研磨得到^[21]。NaNO₃和 KNO₃均为分析 纯,采购于上海阿拉丁化学试剂有限公司,黄金尾矿 来自山东省招远市某黄金矿,粉煤灰来自于山东省某 热电厂。黄金尾矿和粉煤灰主要成分如表1所示 (LOI为粉煤灰与黄金尾矿在900℃下烧失量)。以 聚乙烯醇溶液(质量分数为3%)为烧结剂(PVA),以 利于相变储能材料的成型。在本次实验过程中,我们 将黄金尾矿与粉煤灰按照1:2、1:1、2:1的质量比 进行负载相变材料实验,根据负载相变材料太阳盐的 百分比,得到黄金尾矿与粉煤灰1:1为最优比例。

表 1 黄金尾矿与粉煤灰主要化学成分 /% Table 1 Main chemical compositions of gold tailings and fly ash

组分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	LOI
黄金尾矿	69.85	12.68	3.06	4.61	1.96	1.53	1.17	5.02
粉煤灰	56.72	21.55	1.03	1.17	7.69	5.32	1.72	2.96

1.2 复合相变储能材料的制备

本实验采用冷压缩热烧结法制备复合相变储能 材料,制备过程如图1所示,制备工艺如下:

(1)将黄金尾矿与粉煤灰按照质量比1:1放入 球磨机中,以200 r/min粉碎混合30 min,得到混合 尾矿。

(2)将上述混合尾矿和太阳盐放入烘箱 100 ℃下 干燥 2 h,去除其中水分。

(3)将混合尾矿粉末与太阳盐按照表2所示不同 质量比进行配比,加入聚乙烯醇溶液作为烧结剂放在 玛瑙研钵中混合研磨,得到混合均匀的粉末,将10g 混合粉末放在压片机中,在10MPa压力下压制10min, 得到一个直径25mm圆形生坯。

(4)将圆形生坯放在马弗炉中,升温速率为5℃/ min,升温至380℃,保温2h,关闭马弗炉,降至室温, 得到不同质量比的尾矿基复合材料(FG)。

1.3 材料表征方法

使用电子万能实验机(CMT6103)测定了制备的



太阳盐

图1 复合相变储能材料的制备流程

Fig. 1 Preparation process of composite phase change energy storage materials

/%

衣 2 个问贝里比的相受饷能忉枓	

 Table 2
 Phase change energy storage materials with different mass ratios

样品			复合	材料		
	FG1	FG2	FG3	FG4	FG5	FG6
太阳盐	35	40	45	50	55	60
混合尾矿	65	60	55	50	45	40

复合材料的抗压强度。以乙醇作为侵入性液体,样品的表观孔隙度(*π*_a,%)采用阿基米德法测定。复合材料的*π*_a用公式(1)计算^[22]:

$$\pi_{\rm a} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\% \tag{1}$$

式中: m_1 为干样质量(g), m_2 为浮质量(g), m_3 为湿样 质量(g)。

采用扫描电子显微镜(SEM; Sigma 300)表征每个 样品的微观形态、内部孔隙结构以及混合尾矿和 SS 之间的界面结合。采用差示扫描量热法(DSC; 瑞士 Mettler DSC3)测定每个试样在氮气条件下、温度 30~380℃之间、加热/冷却速率为 10℃/min 的熔点 和潜热。使用 X 射线衍射仪(日本 Rigaku SmartLab SE)分析物相组成,扫描角度为 10°~80°,扫描速度为 5°/min。 复合材料的热扩散系数由激光导热仪(NETZSCH LFA 467)测量。利用公式(2)计算 CPCMs 的导热系数 [K, W/(m·K)]:

$$K = \alpha \times C_P \times \rho \tag{2}$$

式中: K 为导热系数, $W/(m\cdot K)$; α 为热扩散系数, mm^2/s ; ρ 为密度, g/cm^3 ; C_p 为定压比热容, $J/(g\cdot K)$ 。

2 结果与讨论

2.1 形貌特征

图 2 为 CPCMs 烧结前后的形貌对比。从图 2(a) 中可以看出,烧结前随着太阳盐含量增加样品表面没 有明显变化。从图 2(b)看到,烧结后随着盐含量的增 加样品表面出现微孔越来越多,这是由于在较高盐浓 度下,混合尾矿基体在加热过程中无法应对熔盐的膨 胀,而发生少量泄露。混合尾矿含量大于 45% 以上时 样品形貌没有明显变化,当混合尾矿含量小于 45% 时 可以看到外观出现了变形,侧面出现裂缝,说明盐发 生了泄露,导致了裂缝的产生。综上,当混合尾矿含 量为 45%、太阳盐含量为 55% 时,样品外观较完美, 没有发生泄露,是本研究中复合材料的最佳质量比。



图2 样品烧结前后外观对比

Fig. 2 Comparison of the appearance of the samples before and after sintering

2.2 微观结构分析

为了更好地观察太阳盐在混合尾矿基体中的分 布情况,通过扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS) 对样品进行了表征和分析。图 3(a, b)可以看到混合 尾矿基表面存在大量的孔隙及粗糙表面,这些能够为 相变储能材料提供载体;图 3(c, d)能够看到相变储能 材料太阳盐负载在基体上;图 3(e, f)可以看到随着太 阳盐含量的增加,有大量的太阳盐均匀地分散在混合 尾矿基体表面和空隙间,说明混合尾矿基体能够负载 相变储能材料并且紧密结合。图 3(g, h, i)为样品中 的元素分布情况,其中 Na 和 K 元素代表 PCM, Si 元 素代表骨架材料,可以看出 PCM 的分布较均匀,由于 骨架中 SiO₂ 含量较高, Si 元素分布得更加紧密。因此, 从元素分布上证实,太阳盐和混合尾矿已经紧密结合 在一起。

2.3 相变储能材料的物理性质

不同太阳盐含量复合材料的孔隙度和抗压强度如图 4 所示。随着样品中混合尾矿含量从 65% 降低到 45%, 抗压强度也增加, 达到最大值为 33.7 MPa, 孔隙度也逐渐降低, 这是因为复合材料受到高于 FG 熔



图 3 混合尾矿 (a, b)、复合材料 FG1(c, d)和 FG5(e, f)的 SEM 图与 FG5(g, h, i)的 Na、K和 Si 元素分布 Fig. 3 SEM maps of mixed tailings (a, b), composites FG1 (c, d), and FG5 (e, f) with elemental distributions of Na, K and Si for FG5 (g, h, i)



图 4 复合材料的抗压强度和孔隙度 **Fig. 4** Compressive strength and porosity of composites

点的温度,导致 SS 液化并通过毛细力和表面张力被 吸收到黄金尾矿基体中,在凝固的过程中,均匀地分 布在基体的孔隙中,使得复合相变储能材料孔隙度下 降,抗压强度增加,具有良好的机械性能。混合尾矿 含量从 45% 降到 40% 时,抗压强度发生迅速下降,孔 隙度也增大,这是由于相变过程中产生的液体超过了 混合尾矿基体的承载能力,复合材料在凝固过程中发 生泄漏,内部出现裂纹,从而导致抗压强度下降,孔隙 度增加。这些结果表明,混合尾矿含量为 45%、SS 含 量为 55% 时(即 FG5),可以得到无泄漏且物理性能适 当的复合相变储能材料。

2.4 相变储能材料的化学相容性

尾矿载体、太阳盐和 FG5 的 XRD 图谱如图 5 所示。我们可以看到有 NaNO₃、KNO₃和石英三种主要物相,尾矿载体的衍射峰主要出现在 20.8°、26.6°、27.5°和 28.0°,太阳盐的衍射峰主要出现在 23.6°、29.5°、32.0°、34.0°、38.9°和 48.0°,FG 的衍射峰主要出现在 20.8°、23.6°、26.6°、29.5°和 38.9°。FG 中的衍射峰除太阳盐和混合尾矿相的衍射峰外,没有其他衍射峰出现。样品 FG5 低于尾矿载体和太阳盐的衍射峰是由于混合产生 FG 后尾矿载体和太阳盐的结晶度降低,Qin 等人^[2]也发现了这一现象。这些现象说明太阳盐和混合尾矿只是物理结合在一起,并没有发生化学反应,具有较好的化学相容性。



图 5 尾矿载体、太阳盐和复合材料 FG5 的 XRD 图谱 Fig. 5 XRD patterns of tailings carrier, solar salt and composite FG5

2.5 相变储能材料的热性能

采用差示扫描量热法(DSC)研究了 FG 的相转变 行为,并分析了其储热特性,相变潜热随太阳盐(SS) 含量的增加而增加,证明了 SS 在相变过程中提供潜 热。如图 6(a)所示,不同 SS 含量的 FG 样品的 DSC 曲线与纯 SS 相似,相变潜热随 SS 含量的增加而增加, 证明了 SS 在相变过程中提供了相变潜热。此外,SS 含量从 35%增加到 55%导致熔点的变化(表 3)。事 实上,样品 FG1 和 FG5 的熔点均低于纯盐的熔化温度。 随着盐含量降低,骨架材料含量增加导致熔点从 223.73 ℃降到 217.34 ℃。这与 Guo 等人^[24]的研究结 果一致,即随着盐含量的降低 CPCMs 的熔点降低。

在发生融化和冻结的热循环过程中,相变储能材 料保持稳定是很重要的。图 6(b)为混合尾矿含量为 45%、SS 含量为 55%(FG5)的复合材料试样经过 100 次热循环后的 DSC 曲线。热循环前的融化和冻结温 度分别为 217.34 ℃ 和 238.45 ℃, 100 次热循环后的融 化和冻结温度分别为 217.24 ℃ 和 237.13 ℃。此外,潜 热降低 2.75 J/g,降幅为 5.1%,变化较小,这是由于分



图 6 复合材料的 DSC 曲线(a)和 FG5 经过 100 次热循环前后 DSC 对比曲线(b)

238.45

237.13

Fig. 6 DSC curves of composites (a) and DSC comparison curves of FG5 before and after 100 thermal cycles (b)

53.81

51.06

Table 3 Melting point and latent heat of different samples						
样品	熔化温度/℃	峰值温度/℃	冻结温度/℃	潜热/(J·g-1)		
SS	223.73	229.33	238.82	111.70		
FG1	208.89	220.98	238.96	32.85		
FG2	213.81	223.20	242.62	38.29		
FG3	215.23	224.01	245.34	43.83		
FG4	216.02	223.85	247.01	48.96		

表3 不同样品的熔点和潜热

217.34

217.24

FG5

FG5循环后

将本研究制备的样品与文献报道的其他复合相 变储能材料性能进行比较,结果见表4。用混合尾矿 制备的相变储能材料的性能与之前研究的相变储能 材料性能相当,在潜热方面具有较好性能,这表明其 具有较高的储热能力和较大的抗压强度,在热能储存 领域具有较大潜力。

散在混合尾矿基体表面的 SS 仅被表面张力和毛细管 力吸附, 而热循环促进了基体附近的盐泄漏。这些结 果证实了 FG 具有稳定的储热和放热能力。

224.48

224.46

2.6 相变储能材料的热扩散系数和导热系数

相变储能材料的热扩散系数和导热系数如图 7 所示。由于混合尾矿具有较高的孔隙度,内部存在空 气,空气的导热系数在 0.026 W/(m·K) 左右,导致导热 系数较低。然而,SS 的存在显著降低了 FG 的孔隙率,





Fig. 7 Thermal diffusion coefficient and thermal conductivity of composites

表 4 本文制备复合相变储能材料与文献报道的复合材料 的性能比较

当温度在 25~380 ℃ 之间时, 随着 SS 在混合尾矿基体中的分布变得更加均匀, FG 变得更加致密。当混合

尾矿含量为45%、SS含量为55%时,热扩散系数为0.22 mm²/s,导热系数达到0.27 W/(m·K)。因此,在相变储能材料SS的存在下,热扩散系数和导热系数都

 Table 4
 Comparison of the properties of composite phase

 change energy storage materials prepared in this paper with
 composites reported in the literature

样品	潜热/(J·g-1)	抗压强度/MPa	文献
硝酸钾/钢渣	43	34.35	[3]
太阳盐/废半焦灰	53.04	86.12	[4]
硝酸钠/电石渣	41.91	59.5	[25]
硝酸钠/硅藻土	97.42	11.95	[26]
太阳盐/黄金尾矿	45.01	36.66	[27]
太阳盐/黄金尾矿/粉煤灰	53.81	33.7	本文

3 结论

得到了提高。

(1)混合尾矿基所能负载相变储能材料太阳盐的 最大含量为55%,不会发生泄漏且物理性能最佳。黄 金尾矿和粉煤灰与相变储能材料太阳盐仅发生了物 理结合,没有发生化学反应,具有极好的化学相容性。

(2)当混合尾矿含量为45%、太阳盐含量为55%时, 复合材料的潜热为53.81 J/g,导热系数为0.27 W/(m·K), 具有良好的热性能。 (3)利用黄金尾矿作和粉煤灰作为相变储能材料的载体,不但降低了相变储能材料的成本,还解决了 尾矿的处置问题,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG X, ZHANG H, LIANG Q, et al. Resource utilization of solid waste in the field of phase change thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106362.
- [2] KENISARIN M M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 955–970.
- [3] LIU Y, JIANG Z, ZHANG X, et al. Steel slag-KNO₃ phase change composites for thermal storage at medium-high temperature and solid waste recycling[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 301: 127655.
- [4] GUO D, LIU H, ZHANG Y, et al. Waste semi-coke ash for fabrication of form-stable phase change materials for thermal energy storage[J].
 Waste and Biomass Valorization, 2022, 14(7): 2419–2432.
- [5] 姜竹, 邹博杨, 丛琳, 等. 储热技术研究进展与展望[J]. 储能科学与 技术, 2022, 11(9): 2746-2771.
 JIANG Z, ZOU B Y, CONG L, et al. Recent progress and outlook of thermal energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2746-2771.
- [6] 熊亚选, 药晨华, 宋超宇, 等. 低成本兰炭灰骨架定型相变储热材料的制备及性能研究[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 62-67.
 XIONG Y X, YAO C H, SONG C Y, et al. Preparation and properties of low-cost phase-change heat storage materialsbased on semi-coke ash[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 62-67.
- [7] GONG S, DING Y, LI X, et al. Novel flexible polyurethane/MXene composites with sensitive solar thermal energy storage behavior[J].
 Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2021, 149: 106505.
- [8] JIANG F, ZHANG L, SHE X, 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: 109539.
- [9] ZHOU Y, WU S, MA Y, et al. Recent advances in organic/composite phase change materials for energy storage[J]. Engineered Science Energy & Environment, 2020(9): 28–40.
- [10] ALI S, DESHMUKH S P. An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials[J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 26: 1231–1237.
- [11] LI M, GUO Q, SU Y. The thermal conductivity improvements of phase change materials using modified carbon nanotubes[J]. Diamond and Related Materials, 2022, 125: 109023.
- [12] LI R, ZHOU Y, DUAN X. A novel composite phase change material with paraffin wax in tailings porous ceramics[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151: 115–123.
- [13] LI M, GUO Q, NUTT S. Carbon nanotube/paraffin/montmorillonite composite phase change material for thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2017, 146: 1–7.
- [14] ZHENG H, WANG C, LIU Q, et al. Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 372–381.

- [15] LIU Z, HU D, LV H, et al. Mixed mill-heating fabrication and thermal energy storage of diatomite/paraffin phase change composite incorporated gypsum-based materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 703-713.
- [16] 刘鹏,顾晓滨,饶俊,等. 典型固体废弃物制备相变复合材料研究现状及展望[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 380-385.
 LIU P, GU X B, RAO J, et al. Development and prospects for preparation of composite phase change materials from typical solid waste[J]. Silicate Bulletin, 2019, 38(2): 380-385.
- [17] 蒋骞,潘大伟,艾天,等.铁尾矿与采剥废石基多孔陶瓷复合相变 储能材料的制备与表征[J].化工矿物与加工,2023,52(5):24-31. JIANG Q, PAN D W, AI T, et al. Preparation and characterization of porous ceramic matrix for composite phase change energy storage materials using iron tailing sandmining-stripping waste rock[J]. Chemical Minerals and Processing, 2023, 52(5): 24-31.
- [18] 王富国,陈立萌,朱孝钦,等.基于石墨尾矿的复合相变储能材料的制备与表征[J].化工矿物与加工,2018,47(2):23-27.
 WANG F G, CHEN L M, ZHU X Q, et al. Preparation and characterization of composite phase change energy storage materials based on graphite tailings[J]. Chemical Minerals and Processing, 2018, 47(2): 23-27.
- [19] 杨会康. 固废基中高温复合相变储热材料的制备及其性能优化研究[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2023.
 YANG H K. Preparation and performance optimization of medium and high temperature composite phase change heat storage materials based on solid waste[D]. Ji'nan: Qilu University of Technology, 2023.
- [20] 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 K₂CO₃[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 206: 110328.
- [21] 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.
- [22] YANG H, ZHANG W, ZHU Y, et al. Preparation and characterisation of sodium nitrate/stone-sawing mud shape-stabilized phase change materials for medium-high temperature thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 106047.
- [23] QIN Y, LENG G, YU X, et al. Sodium sulfate-diatomite composite materials for high temperature thermal energy storage[J]. Powder Technology, 2015, 282: 37-42.
- [24] 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.
- [25] XIONG Y, WANG H, WU Y, et al. Carbide slag based shape-stable phase change materials for waste recycling and thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104256.
- [26] XU G, LENG G, YANG C, et al. Sodium nitrate-Diatomite composite materials for thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2017, 146: 494-502.
- [27] WANG X, ZHANG W, SHAO Y, et al. Gold tailings-solar salt shape-stabilized phase change materials for medium-high temperature thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109810.

Preparation and Properties of Phase Change Energy Storage Materials with Gold Tailings/Fly Ash

WANG Xiaoyu¹, LI Jian², ZHANG Weiyi¹, LI Jing¹, SHAO Yanqiu¹, SHAO Yingying³, ZHANG Tao¹, TIAN Chao³, MA Jinwei³, LI Shuhui³, ZHU Ying¹

1. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Advanced Materials Institute, Shandong Engineering Research Centre of Municipal Sludge Disposal, Jinan 250014, Shandong, China;

2. Shandong Solid Waste and Hazardous Chemicals Pollution Prevention Center, Jinan 250000, Shandong, China;

3. Shandong Shanke Institute of Ecological Environment Co. LTD, Jinan 250000, Shandong, China

Abstract: Tailings is a type of misaligned resource that has received widespread attention for comprehensive utilization. Tailings can serve as carriers for phase change materials (PCMs) in thermal energy storage applications with rich pore structures and relatively large specific surface areas. In this study, a novel composite phase change material (CPCM) was prepared by a hybrid sintering method to combine gold tailings–fly ash mixture as the base material with solar salt as the phase change material for thermal energy storage. The chemical compatibility of the CPCM analyzed by X–Ray Diffraction (XRD). And the micro–structure, thermal conductivity performance of the CPCM were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), Differential Scanning Calorimeter (DSC) and Laser Flash Analysis (LFA). The results showed that when the content of gold tailings was 22.5%, fly ash was 22.5% and solar salt was 55%, the composite has the best properties and good chemical compatibility. Furthermore, the maximum latent heat of the CPCM was 53.8 J/g, its thermal conductivity was 0.27 W/(m·K), and reached a mechanical strength of 33.7 MPa. Critically, the CPCM specimens had good cycling reliability after 100 thermal cycles. In conclusion, the utilization of tailings to prepare phase change energy storage materials was considered to be feasible and provided a new avenue for the resource utilization of tailings.

Keywords: gold tailings; phase change material for energy storage; thermal storage properties; thermal conductivity; tailings resource utilization

引用格式:王晓宇,李健,张伟屹,李静,邵艳秋,邵莹莹,张涛,田超,马近伟,李书慧,朱英.黄金尾矿/粉煤灰制备相变储能材料及其性能研究 [J]. 矿产保护与利用,2023,43(6):72-78.

WANG Xiaoyu, LI Jian, ZHANG Weiyi, LI Jing, SHAO Yanqiu, SHAO Yingying, ZHANG Tao, TIAN Chao, MA Jinwei, LI Shuhui, ZHU Ying. Preparation and properties of phase change energy storage materials with gold tailings/fly ash[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 72–78.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn