

基于提钒尾渣的高温显热蓄热材料 导热性能研究及模拟

朴荣勋¹, 李 轩², 季 颖³

(1. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000;
3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 利用提钒尾渣为主要原料, 高硅粘土为辅料, 石墨材料为改性剂, 通过碳热还原-粉末冶金方法进行了高温显热蓄热材料的制备研究, 分析石墨含量对显热蓄热材料的物相演变、比热容变化及导热变化规律。XRD 物相分析表明, 材料的主要物相包括石英、含高硅组分的钠长石、钛铁矿以及碳酸盐等物相, 随着石墨含量的增加, 石英相比率随之减少。比热容测试结果表明, 比热容随石墨含量的增加先增大后减小, 当石墨含量为 3% 时, 比热容最高, 在 500 ~ 700 °C 下的比热容值为 820 ~ 3 180 J/(kg·K)。导热系数测试结果表明, 当石墨含量小于 5% 时, 蓄热材料导热系数变化不大, 基本保持在 0.75 W/(m·K) 左右; 当石墨含量大于 5% 时, 导热系数呈现明显的上升趋势。为了进一步探索石墨对蓄热材料导热性能的影响, 进行了模拟计算, 利用非线性修正项代替分散体体积分数项, 修正后的 Maxwell 模型可很好地预测试验结果。

关键词: 提钒尾渣; 蓄热材料; 石墨; 粘土; 比热容; 导热系数

中图分类号: X757 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)01-0093-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Research and modeling on thermal conductivity of high temperature heat storage material based on vanadium tailings

Piao Rongxun¹, Li Xuan², Ji Ying³

(1. Department of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Key Lab. of Process Equipment and Control, Zigong 643000, Sichuan, China; 3. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: Using vanadium tailings as the base material, high silicon containing clay as auxiliary material and graphite material as modifier, the preparation of the high temperature sensible heat storage materials was carried out by means of carbon thermal reduction followed by powder metallurgy. The effects of graphite content on phase evolution, specific heat capacity and heat conduction of sensible heat storage material were studied. XRD phase analysis result shows that the main phases of the material include quartz, albite, ilmenite and carbonate. With the increase of graphite content, the ratio of quartz decreases. The specific heat capacity test results show that the specific heat capacity firstly increases and then decreases with the increase of graphite content. When the graphite content is 3%, the specific heat

收稿日期: 2020-10-06

基金项目: 攀枝花市科技局项目 (2017CY-G-17); 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金科研项目 (GK201919)。

作者简介: 朴荣勋 (1983—), 男, 吉林延吉人, 工学博士, 通讯作者, 主要从事钒钛资源综合利用及钒钛新材料新技术研究, E-mail: 940310433@qq.com。

capacity is the highest, and the specific heat capacity at 500 ~ 700 °C is 820 ~ 3 180 J/(kg·K). The thermal conductivity test results show that when the graphite content is less than 5%, the thermal conductivity of the heat storage material changes slightly, basically remains at about 0.75 W/(m·K); when the graphite content is more than 5%, the thermal conductivity presents an upward trend. In order to further explore the effect of graphite on thermal conductivity of heat storage materials, the modeling calculation is carried out, and by replacing the volume fraction term of dispersion with the nonlinear correction term, the modified Maxwell model could well predict the experimental data.

Key words: vanadium tailings, heat storage material, graphite, high silicon containing clay, specific heat capacity, thermal conductivity

0 引言

由于化石燃料的短缺和污染排放,可再生能源越来越受到人们的关注。在可再生能源中,太阳能由于具有储量大、分布广等优点得到了广泛应用,特别是太阳能热发电过程中的太阳能热高温利用已成为各国关注的焦点^[1-2]。然而,太阳能受地域差异、季节交换、昼夜交替等因素的影响,存在着间歇性、不连续的缺点。热能蓄热 (Thermal energy storage, TES) 被认为是一种很有前景的可再生能源开发技术^[3],是随时获取能源供应和调节能源生产与需求匹配的有效途径,它对太阳能发电(或集光太阳能)^[4]技术的优化具有十分重要的作用。目前,蓄热方式主要有显热蓄热、潜热蓄热或相变蓄热以及热化学蓄热^[5],在这些储热技术中,显热蓄热是应用最为广泛,安全性最高、成本最低、最简单的储热方式^[6]。热能蓄热技术的核心和关键是蓄热材料,目前最常用的显热蓄热材料有水、导热油、熔盐、石头、砖、水泥、混凝土、陶瓷等^[2,5]。这些蓄热材料的选择主要取决于所需应用的温度水平^[7]。对于显热蓄热材料,理想的特性是高蓄热密度、良好的导热性、化学稳定性、环境友好和低成本、低热膨胀和体积变化小,使用寿命长,温度范围宽等^[2]。

提钒尾渣是钒渣提钒后的残渣也称提钒弃渣或钒浸出渣。随着我国钢铁行业对含钒特种钢的需求,钒在钢中的含量逐年升高,提钒尾渣的产生量也逐年升高,目前,我国钢铁行业每年产生提钒尾渣近100万t^[8],仅攀钢、承钢每年排放的提钒尾渣就达50多万t^[9]。现阶段提钒尾渣的利用率较低,没有合理而经济的综合利用方法,大量堆放不仅占用土地,而且严重污染了环境^[10]。由于提钒尾渣中含有大量的三氧化二铁、三氧化二铬、二氧化锰及二氧化钛等第四周期元素,使得提钒尾渣具有很强的黑色着色作用,具有很高太阳光吸收率、较宽的烧结温度

范围以及优良的理化性能和成瓷性能^[11-12]。另外,较高的熔点使其在高温区域内都比较稳定^[13]。基于上述特点,可考虑提钒尾渣在高温显热蓄热材料或复合蓄热材料中的应用。为了达到既环保综合利用工业废渣又能开拓新的太阳能蓄热材料的目的,前期笔者以提钒尾渣作为主要原料,利用导热性、热稳定性高的石墨材料作为导热储热改性剂,通过碳热还原-粉末冶金方法,进行了制备高温显热蓄热材料的试验研究^[13]。结果表明,所制备的显热蓄热材料在500 °C以上中高温区域显示良好的蓄热能力;当石墨含量为5%时,材料在500 °C下的比热容为450 J/(kg·K),在700 °C下的比热容为1 042 J/(kg·K);当石墨含量为0 ~ 10%时,材料的综合导热系数在0.54 ~ 1.298 W/(m·K),与常用的高温显热蓄热材料相比,基于提钒尾渣制备的蓄热材料导热系数大于干土壤、含砾土壤、水泥矿浆、高铝混凝土,接近于高温混凝土,但小于浇注陶瓷、粘土、钢筋混凝土、硅耐火砖、镁耐火砖的导热系数。从前期研究可知,石墨添加可提高导热性能和蓄热能力,但材料的比热容和导热系数值都不够高,蓄热性能和综合导热性能还不够理想

粘土作为常见的显热蓄热材料之一,容易获得且成本低,具有较高的比热容和导热系数^[2],如将其添加到提钒尾渣基蓄热材料中,可进一步改善材料的导热蓄热性能。在前期研究基础上,笔者通过添加粘土作为辅料,尝试提高显热蓄热材料的比热容和导热系数,重点研究不同石墨含量对蓄热材料的物相组成、比热容变化规律,结合模拟计算,探究石墨对显热蓄热材料的综合导热性能的影响规律。

1 试验原料及方法

本试验提钒尾渣由四川省攀枝花市某企业提供,其化学成分见表1。由表1可以看出,提钒尾渣中主要含Fe₂O₃、SiO₂、TiO₂、Na₂O等氧化物,大约占

77% 左右, 另外还有少量的 MgO 、 CaO 、 V_2O_5 、 Cr_2O_3 以及 P_2O_5 、 K_2O 、 SO_3 等其他类氧化物。提钒尾渣的主要物相组成有 Fe_2O_3 、 Fe_2TiO_5 等^[14-15]。

采用碳热还原法对提钒尾渣进行碳热还原预处

理, 得到提铁尾渣后作为制备蓄热材料的中间原料, 提铁尾渣的成分见表 2。再以提铁尾渣作为制备蓄热材料的初始原料, 利用粉末冶金的方法进行蓄热材料的制备^[13]。

表 1 提钒尾渣化学成分
Table 1 Chemical components of vanadium tailings

	Na_2O	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	Al_2O_3	MgO	CaO	V_2O_5	Cr_2O_3	其他
%	9.6	40.1	17.0	11.0	6.5	5.4	3.1	2.4	1.6	1.1	2.2

表 2 提铁尾渣化学成分
Table 2 Chemical components of iron tailings

	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	Cr_2O_3	MnO
%	2.22	15.94	16.94	2.98	3.9	4.0	1.5	11.23

以提铁尾渣为主要原料, 石墨作为改性剂, 高硅铝粘土为辅料, 进行粉末冶金处理。本试验所用的石墨粉级别为分析纯, 粘土来自攀枝花本地, 其成分如表 3 所示。以过 200 目 ($74\text{ }\mu\text{m}$) 筛的提铁尾渣为主要原料, 总量为 6 g, 按粘土和尾渣质量比为 1, 石墨含量为 0%、3%、5%、7%、10%、15% 的比例进行混料(分别记为试样 S1、S2、S3、S4、S5、S6), 装入橡胶模具中, 在 120 MPa 压力条件下进行冷等静压成型, 得到直径为 20 mm, 平均高度为 7.5 mm 的圆柱试样, 具体材料配比方案见表 4。将成型后的试样放入石墨坩锅中, 再盖上撒有石墨粉的坩锅盖, 将其放入马弗炉中, 在 $1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 1.5 h, 随炉冷却。

表 3 粘土的化学成分
Table 3 Chemical components of clay

	Fe	SiO_2	TiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	Mn
%	2.65	32.16	0.12	4.61	9.6	0.38	0.17

表 4 制备钒钛蓄热材料材料配比
Table 4 Material proportioning in the preparation of vanadium-titanium heat storage material

试验号	提铁尾渣/g	粘土/g	石墨/g	石墨含量/%
S1	3	3	0	0
S2	2.91	2.91	0.18	3
S3	2.85	2.85	0.3	5
S4	2.79	2.79	0.42	7
S5	2.7	2.7	0.6	10
S6	2.55	2.55	0.9	15

将烧结好的样品进行研磨与抛光, 采用 X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析, 利用综合热分析仪 STA499C 进行差示扫描量热法 (DSC) 测试, 利用稳态平板法 DRL-II 导热系数测试仪, 在圆柱试样 Z 轴(或圆柱轴)方向上测定材料的综合导热系数。

2 结果与讨论

2.1 蓄热材料的物相变化

图 1 为抛光后的蓄热材料的典型宏观形貌。由图 1 可知, 所有试样表面均出现明显的浅色大斑点物相, 并且随着石墨含量的增加, 试样的基体颜色逐渐从黑色转变成灰色, 这些变化是由物相演变引起的。

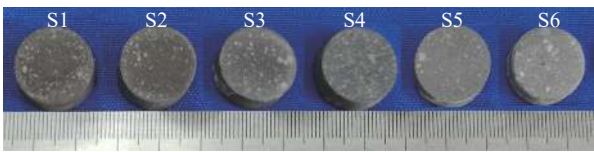


图 1 蓄热材料的典型宏观形貌
Fig. 1 Typical macro-appearance of heat storage materials

图 2 是不同石墨含量蓄热材料的 XRD 图谱。未添加石墨的蓄热材料的主要物相包括石英 SiO_2 、钠长石 $\text{NaAl}_{1.08}\text{Si}_{2.92}\text{O}_8$ 、 $\text{Fe}(\text{Mn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$ 。添加石墨后, 生成石墨相和 $(\text{Mg}_{0.05}\text{Ca}_{0.97})\text{CO}_3$ 。由于 SiO_2 的峰值和石墨相峰值重叠, 不能定量区别物相演变关系, 但结合 XRD 图谱中的主峰和 SiO_2 信号强度可以看出, 随着石墨的加入, 主峰的信号强度先减小后增大, 其他 2θ 位置上的 SiO_2 物相信号逐渐减弱, 说明石墨的加入引起 SiO_2 相的减少。另外, 从 XRD 物相分析中没有发现含 Cr 和 V 元素的物相。由于本研究制备的储热材料中 Cr、V 含量较小, 且 Cr、V 的

原子半径与 Ti、Mn 的原子半径相近, Cr、V 元素有可能固溶于含 Ti 或 Mn 的相中, 具体定量分析有待后续研究。

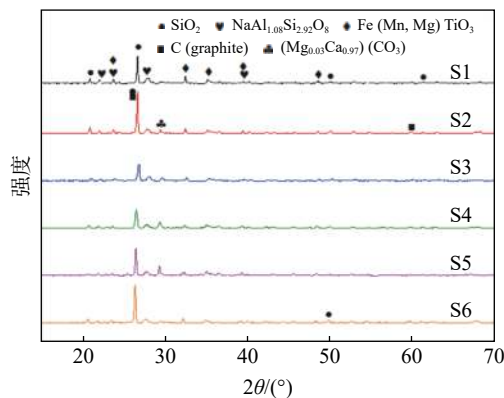


图2 不同石墨含量蓄热材料的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of heat storage material with different graphite contents

2.2 蓄热材料的比热容

比热容是表征蓄热材料性能的一个重要参数, 比热容越大, 表明蓄热能力越大。图3表示从 DSC 测试结果导出的蓄热材料比热容随温度的变化。图中符号点为 DSC 测试结果, 直线为利用指数函数拟合的结果, 拟合结果较好。从图3可以看出, 在温度 200 ~ 1 200 °C 范围内, 没有突峰值或谷峰值, 说明材料比热容对温度以及石墨含量具有较好的稳定性, 这是典型显热蓄热材料的热性能表现。未添加石墨的 S1 试样比热容值较小, 随着石墨含量的增加, 比热容对温度敏感, 即比热容随温度的变化梯度明显变大。当石墨含量为 3% 时, 试样 S2 的比热容最大, 在 78 ~ 1 579 J/(kg·K)。在 500、600、700 °C 下, S2 试样的比热容值分别为 820、1 702、3 180 J/(kg·K), 与未添加粘土辅料的蓄热材料相比^[13], 比热容高出近一倍, 储热能力明显提升。当石墨含量大于 3% 时, 比热容急剧下降, 这是因为过量的石墨导致材料密度降低, 进而降低比热容^[13]。

2.3 蓄热材料的导热系数

表征蓄热材料性能的另一个重要参数为导热系数, 良好的导热性能可提高热能蓄热/放热效率。图4为不同石墨含量蓄热材料在平均温度 45°C 下测定的导热系数。未添加石墨的综合导热系数为 0.754 W/(m·K), 添加 15% 石墨时, 导热系数最高达 1.922 W/(m·K)。当石墨含量小于 5% 时, 蓄热材料的导热系数变化不大。当石墨含量大于 5% 时, 导热系数出现明显的上升趋势。这种变化趋势可能是

由于原料中粘土成分的变化导致蓄热材料内部相的演变而形成的。从 XRD 分析可知, 当未添加石墨时, 材料的主要物相有高硅铝化合物等, 随着石墨的添加, 又生成碳酸化合物等其他物相。当石墨含量较低时, 这些相的形成可能会弱化蓄热材料的综合导热性能, 而石墨添加量达到一定程度后, 材料的综合导热系数受石墨材料的主导影响从而呈急剧上升趋势。与未添加粘土的蓄热材料相比^[13], 添加粘土可在一定范围内明显提高材料的综合导热系数, 如图4所示。这是由于高硅相如 SiO₂ 等物相形成所引起的。由文献[16]可知, 纯物质石英 SiO₂ 的导热系数为 7.69 W/(m·K), 这比铝硅酸盐如长石 (2.3 W/(m·K))、钛铁矿 (2.38 W/(m·K)) 等的导热系数都要高, 这就说明含高硅相的 S1 试样导热系数大于未添加粘土的。另外由图2可知, 随着石墨含量的增加, 碳酸盐相 (Mg_{0.03}Ca_{0.97})CO₃ 含量有所增加, 该相与方解石 CaCO₃ 的化学式接近, 而 CaCO₃ 的导热系数范围较高, 为 3.59 ~ 5.57 W/(m·K)^[16], 表明 S2 系列样品具有较好的导热性能。

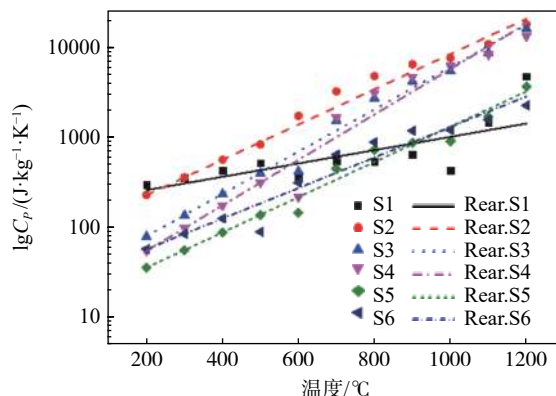


图3 蓄热材料比热容随温度的变化

Fig. 3 Specific heat capacity of thermal storage material with temperature variation

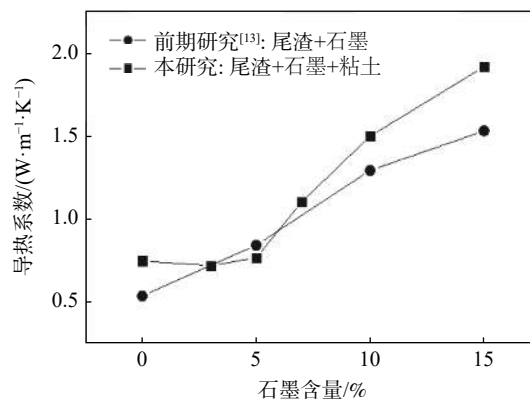


图4 不同石墨含量蓄热材料的导热系数

Fig. 4 Thermal conductivity of heat storage material with different graphite contents

2.4 蓄热材料导热系数的模拟计算

为了进一步探究石墨对显热蓄热材料导热性能的变化规律, 结合前期研究(基于尾渣+石墨制备蓄热材料)试验结果^[13]和本研究(基于尾渣+石墨+粘土制备蓄热材料)试验数据, 进行了导热系数模拟计算。基于物相组成, 本研究制备的蓄热材料可视为由尾渣和石墨两相组成的复合材料。复合材料的有效导热系数模型有很多^[17], 其中并联和串联模型是最简单的模型^[18]。该模型基于电路网络法, 将复合材料两相分解成两层, 两层界面平行或垂直于热流方向, 其有效导热系数分别由以下公式得出:

$$k_e = \phi_m k_m + \phi_p k_p \quad (1)$$

$$\frac{1}{k_e} = \frac{\phi_m}{k_m} + \frac{\phi_p}{k_p} \quad (2)$$

在这里 k_e 为复合材料的有效导热系数, ϕ_m 和 ϕ_p 分别为基体相和分散相的体积分数, k_m 和 k_p 分别为基体相和分散相的导热系数。根据模型的假设, 并联模型界面热阻为零, 而串联模型中两层界面热阻最大, 它们分别为有效导热系数的上限和下限。

利用上述模型, 对蓄热材料进行了模拟计算。假设蓄热材料为两相复合材料, 其中提铁尾渣或添加粘土的提铁尾渣烧结体为基体相, 石墨材料为分散相, 石墨在常温下的密度为 2.25 g/cm^3 ^[19], 圆柱体蓄热材料试样的直径为 18 mm , 高度为 7.5 mm , 计算结果如图 5 所示。由图 5 可知, 在两种系列试验中, 串联模型给出的最低导热系数都与试验数值吻合, 而并联模型给出的上限值在 $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 左右, 所有的试验数据都介于这两个模型计算的结果之间。随着石墨含量的增加, 串联模型计算结果呈线性增加趋势, 而平行模型计算结果呈曲线上升趋势, 显然, 这些模型计算不能模拟试验数据。

Maxwell 模型^[20]是将两相复合材料视为无相互作用的球形粒子无规则地分散在均一导热系数的基体中, 且分散相(无论是颗粒或是气泡)独立存在, 不相互影响, 用于求解复合材料导热系数^[21], 其数学表达式为:

$$k_e = k_m \frac{2k_m + k_p - 2(k_m - k_p)\phi_p}{2k_m + k_p + (k_m - k_p)\phi_p} \quad (3)$$

根据 Maxwell 模型的基本假设, 当分散相含量较低时, 该模型可以准确地预测两相复合材料的导热系数; 对于复合材料, 如多孔复合材料, 当分散相比率大于 0.3 时, Maxwell 模型不能直接预测材料导热系数。从图 5 可以看出, 在两种系列试验条件

下, 由该模型计算得到的材料导热系数均低于试验测量值。当石墨含量大于 10% 时模拟计算明显偏离实测结果。

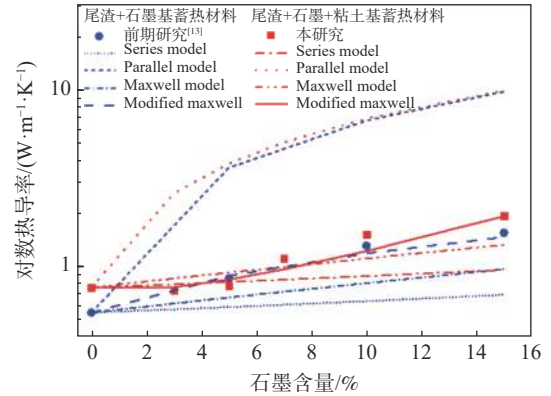


图 5 不同导热系数模型的比较

Fig. 5 Comparison of different thermal conductivity models

从模拟计算可知, 两相的体积分数对导热系数模拟计算结果有较大的影响。除了并联模型外, 上述模型计算结果均呈线性关系, 这与实测的非线性趋势有一定偏差。考虑到上述问题, 笔者采用非线性修正项来代替分散体体积分项^[22]:

$$F_p = \alpha \phi_p + \beta \phi_p^2 \quad (4)$$

在这里 α 和 β 为经验常数, 满足以下边界条件:

a. 当 $\phi_p \rightarrow 0$ 时, $F_p \rightarrow 0$

b. 当 $\phi_p \rightarrow 1$ 时, $F_p \rightarrow 1$

根据边界条件, 可以得出

$$F_p = \alpha \phi_p + (1 - \alpha) \phi_p^2 \quad (5)$$

因此, 在 Maxwell 式 (3) 中用修正项 F_p 代分散相的体积分数, 有效导热系数的表达式为

$$k_e = k_m \frac{2k_m + k_p - 2(k_m - k_p)F_p}{2k_m + k_p + (k_m - k_p)F_p} \quad (6)$$

经验常数 α 的值取决于组分的导热系数、分散相在基体中的分布等^[22], 因此对于不同类型的材料具有不同的值。为了确定经验常数 α , 采用曲线拟合法, 对下面经验方程式进行了拟合。

$$\alpha = A \left(\frac{2k_m}{2k_m} \phi_p^{1/3} \right) + B \quad (7)$$

利用式(5)、式(6)、式(7)以及试验数据拟合计算出两种系列试样的 A、B 优化值, 如表 5 所示。最后再利用修正后的 Maxwell 模型关系式(6)计算出各种试样的有效导热系数。如图 5 所示, 用非线性修正项代替分散体体积分项, 可以很好地模拟试验数据。

表5 修正 Maxwell 模型中的 A 和 B 值
Table 5 A and B values in modified Maxwell model

类别	A	B
前期研究系列 ^[13] : 尾渣+石墨基蓄热材料	-0.044 95	4.139 32
本研究系列: 尾渣+粘土+石墨基蓄热材料	0.130 188	-2.642 8

从模拟预测计算结果来分析,随着石墨的加入,本研究制备的蓄热材料的综合导热系数先保持一定水平,随后上升,当石墨含量低于 5% 时,导热系数基本保持在 0.75 W/(m·K) 左右。与未添加粘土的前期研究结果相比,当石墨含量小于 3% 时,同时添加石墨和粘土的材料综合导热系数高于添加石墨的材料。综合考虑导热系数和比热容的测试结果可知,添加粘土、3% 石墨制备的蓄热材料导热蓄热性能最佳。

3 结论

以提钒尾渣经碳热法除铁后的尾渣为主要原料,以高硅黏土为辅助原料,以石墨材料作为导热改性剂,采用粉末冶金法进行了蓄热材料制备的试验研究。得出的结论如下:

1) 从 XRD 分析可知,未添加石墨时,蓄热材料的主要物相包括石英 SiO_2 , 钠长石 $\text{NaAl}_{1.08}\text{Si}_{2.92}\text{O}_8$, $\text{Fe}(\text{Mn}, \text{Mg})\text{TiO}_3$; 添加石墨后,新生成石墨相和 $(\text{Mg}_{0.05}\text{Ca}_{0.97})\text{CO}_3$ 。随着石墨含量的增加, SiO_2 相比率随之减少。

2) DSC 测试结果表明,当石墨含量为 3% 时,

比热容值最大,在 500~700 °C 温度区域的比热容值为 820~3180 J/(kg·K)。当石墨含量大于 3% 时,比热容急剧下降,这是因为过量的石墨导致材料密度的降低,进而减小比热容。

3) 导热系数测试结果表明,当石墨含量小于 5% 时,蓄热材料的导热系数变化不大,基本保持在 0.75 W/(m·K) 左右;当石墨含量大于 5% 时,导热系数呈现明显的上升趋势,这是由蓄热材料内部物相演变所致。为了进一步探究石墨对显热材料导热性能的变化规律,进行了并联、串联、Maxwell 等、修正 Maxwell 模型的模拟计算。其中,通过非线性修正项代替分散体体积分数项,修正 Maxwell 模型可很好地预测试验结果。

4) 综合考虑导热系数和比热容的测试结果可知,添加 3% 石墨的蓄热材料导热蓄热性能最佳。

致谢

本课题得到攀枝花市科技局项目(编号: 2017CY-G-17)的资助,还得到了过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金(编号: GK 201919)的支持,一并感谢。

参考文献

- [1] Lao Xinbin. Utilization study of coal series kaolin in in-situ synthesis of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ composite ceramics for solar thermal storage[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
(劳新斌. 利用煤系高岭土原位合成 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}_w$ 系太阳能储热复相陶瓷材料的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.)
- [2] Tiskatine R, Oaddi R, Cadi R A E, et al. Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 169: 245–257.
- [3] Cabeza L F, Galindo E, Prieto C, et al. Key performance indicators in thermal energy storage: Survey and assessment[J]. *Renewable Energy*, 2015, 83: 820–827.
- [4] Geissbuhler L, Kolman M, Zanganeh G, et al. Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 101: 657–668.
- [5] Leng Guanghui, Qiao Geng, Zhang Yelong, et al. The new research progress of thermal energy storage materials[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(5): 1058–1075.
(冷光辉, 谯耕, 张叶龙, 等. 储热材料研究现状及发展趋势[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(5): 1058–1075.)
- [6] Kuravi S, Trahan J, Goswami D Y, et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(4): 285–319.
- [7] Ataer O E. Storage of Thermal Energy[C]//Energy Storage Systems. Edited by Gogus Y A. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). UK Oxford: Eolss Publishers, 2006.
- [8] Li Lanjie, Zhao Beibei, Wang Haixu, et al. The process of high efficiency dealkalization and ore blending in ironmaking of the

- extracted vanadium residue[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2017, 17(1): 138–143.
(李兰杰, 赵备备, 王海旭, 等. 提钒尾渣高效脱碱及配矿炼铁工艺[J]. *过程工程学报*, 2017, 17(1): 138–143.)
- [9] Meng Lipeng, Zhao Chu, Wang Shaona, *et al.* Improvement of vanadium extraction from extracted vanadium residue in China[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(3): 49–56.
(孟利鹏, 赵楚, 王少娜, 等. 国内提钒尾渣再提钒技术研究进展[J]. *钢铁钒钛*, 2015, 36(3): 49–56.)
- [10] Hou Jing, Wu Enhui, Li Jun. Current situation and progress of comprehensive utilization of vanadium extraction tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2017, (6): 103–108.
(侯静, 吴恩辉, 李军. 提钒尾渣的综合利用研究现状及进展[J]. *矿产保护与利用*, 2017, (6): 103–108.)
- [11] Xiu Dapeng, Cao Shuliang, Xu Jianhua, *et al.* Application of ceramic solar plate heating system[J]. *Shandong Science*, 2013, 26(2): 72–77.
(修大鹏, 曹树梁, 许建华, 等. 黑瓷复合陶瓷太阳能集热系统的应用研究[J]. *山东科学*, 2013, 26(2): 72–77.)
- [12] Kingery W D, Bowen H K, Uhlmann D R. Introduction to ceramics[M]. Kendall Hunt Pub Co, 1976.
- [13] Piao Rongxun, Li Xuan, Li Guowei, *et al.* Preparation of high temperature sensible heat storage material from vanadium extraction tailings and graphite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(6): 52–59.
(朴荣勋, 李轩, 李国伟, 等. 利用提钒尾渣和石墨制备高温显热蓄热材料的研究[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(6): 52–59.)
- [14] Li Guowei. The preparation and application of black porcelain solar heat utilization of vanadium titanium slag system[D]. Chengdu: Xihua University, 2015.
(李国伟. 利用提钒尾渣制备黑瓷及其太阳能集热应用[D]. 成都: 西华大学, 2015.)
- [15] Wu Enhui, Liu Qianshu, Huang Ping, *et al.* Experimental study on preparation of solar energy collection functional materials from vanadium tailings[C]//2015 Annual Meeting of China's Solar Thermal Utilization Industry and "13th Five Year Plan" Solar Thermal Utilization Development Forum. Suzhou: 2015.
(吴恩辉, 刘黔蜀, 黄平, 等. 提钒尾渣制备太阳能集热功能材料探索试验研究[C]//中国太阳能热利用行业年会暨"十三五"太阳能热利用发展论坛. 苏州: 2015.)
- [16] Schön Jürgen H. Physical Properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics, chapter 9 - thermal properties[J]. *Developments in Petroleum Science*, 2015, 65: 369–414.
- [17] Xu J, Gao B, Du H, *et al.* A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials[J]. *International Journal of Thermal Ence*, 2016, 104: 348–356.
- [18] Carson, James K. Thermal diffusivity and thermal conductivity of dispersed glass sphere composites over a range of volume fractions[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39(6): 1–11.
- [19] Speight J G, Lange N A. Lange's Handbook of Chemistry 16th edition[M]. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [20] Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. Oxford: Clarendon Press, 1881.
- [21] Wang Licheng, Chang Ze, Bao Jiuwen. Prediction model for the thermal conductivity of concrete based on its composite structure[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(7): 765–772.
(王立成, 常泽, 鲍玖文. 基于多相复合材料的混凝土导热系数预测模型[J]. *水利学报*, 2017, 48(7): 765–772.)
- [22] Kumar S, Bhoopal R S, Sharma P K, *et al.* Non-linear effect of volume fraction of inclusions on the effective thermal conductivity of composite materials: A modified maxwell model[J]. *Open Journal of Composite Materials*, 2011, 1(1): 10–18.

编辑 杨冬梅

攀钢钛精矿产量稳居国内龙头地位

(2021年1月15日)2020年,攀钢钛精矿产量123万t,完成计划的103.08%,同比增长8.8%,产品合格率100%,产量和效益均创历史新高,在巩固国内龙头地位的同时,通过持续的科技创新进一步扩大了市场占有率。

摘自 http://www.pzhsteel.com.cn/index.php?s=/Home/Article/pg_jianjie/art_bm_id/101/fl/two/msg_id/2863