

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-194-08

# 低品位硅铝矿资源化 制备固体蓄热材料与性能优化

李晓卿<sup>1,2,3</sup> 王会<sup>2</sup> 郝智藩<sup>1</sup> 刘开琪<sup>2</sup> 白洋<sup>3</sup> 次恩达<sup>4</sup> 李建强<sup>1,2</sup> 丁胜<sup>5</sup>

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083;

2. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室 北京 100190;

3. 北京科技大学新材料技术研究院 北京 100083;

4. 华北理工大学建筑工程学院 唐山 063210;

5. 赤峰暖捷新型建材有限责任公司 赤峰 024000)

**【摘要】** 在工业生产及生活中,大量的太阳能、风能、谷电等清洁能源得不到高效的利用,而蓄热技术不仅可以提高能源的利用效率,还能降低对环境的污染。固体蓄热材料是蓄热技术的重要部分,具有良好的稳定性,在电力采暖设备方面得到了广泛的应用。利用低品位硅铝矿为原料制备固体蓄热材料,可以实现固废资源化利用,同时可以降低固体蓄热材料成本。采用地开石相为主的低品位硅铝矿、苏州土以及纸浆废液,烧结制备固体蓄热材料,探究了颗粒级配及苏州土的添加量对样品性能的影响。结果表明:不同的颗粒配以及不同含量的苏州土会对制备的固体蓄热材料性能产生影响。当颗粒级配为50:15:35、苏州土添加量为3%时,制备的固体蓄热材料的性能较好,体积密度为 $2.11\text{g}/\text{cm}^3$ ,吸水率为7.92%,热导率为 $1.023\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,比热容为 $0.7047\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,抗压强度为66.37MPa。

**【关键词】** 固体蓄热材料;低品位矿;地开石;固废资源化;烧结

中图分类号 TK0 文献标识码 A

## Preparation of Solid Heat Storage Materials from Low Grade Aluminum Silicate Ore and Optimization of its Properties

Li Xiaoqing<sup>1,2,3</sup> Wang Hui<sup>2</sup> Hao Zhifan<sup>1</sup>

Liu Kaiqi<sup>2</sup> Bai Yang<sup>3</sup> Ci Enda<sup>4</sup> Li Jianqiang<sup>1,2</sup> Ding Sheng<sup>5</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing, 100083;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190;

3. Institute for Advanced Materials Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

4. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210;

5. Chifeng Nuanjie New Building Materials Co., Chifeng, 024000)

**【Abstract】** Heat storage technology can improve the utilization of clean energy such as wind energy, solar energy and valley

基金项目: 赤峰市“科技兴蒙”行动重点专项“大型高效节能环保型储热系统研发与示范”; 中央高校基本科研业务费  
作者简介: 李晓卿 (1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向固体储能材料与储能过程, E-mail: 876755180@qq.com  
通讯作者: 李建强 (1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为储热材料与储能过程, E-mail: jianqiangli@ustb.edu.cn  
收稿日期: 2022-06-18

electricity, which can not only improve the utilization efficiency of resources, but also reduce environmental pollution. Solid heat storage material is an important part of heat storage technology, which has good stability and has been widely used in electric heating equipment. The utilization of solid waste can be realized and the cost of solid heat storage materials can be reduced by using low grade silicon-aluminum ore as raw material to prepare solid heat storage materials. In this paper, low-grade silicon-aluminite, Suzhou clay and paper pulp waste liquid waste were used to prepare solid heat storage materials by sintering. The effects of particle ratio and addition amount of Suzhou clay on the performance of the samples were investigated. The results show that different particle composition and different content of Suzhou clay will affect the properties of solid heat storage materials. When the particle ratio is 50:15:35 and the addition amount of Suzhou clay is 3%, the prepared solid heat storage material has good performance with the volume density of  $2.11\text{g}/\text{cm}^3$ , the water absorption of 7.92%, the thermal conductivity of  $1.023\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , and the specific heat capacity of  $0.7047\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . The compressive strength is 66.37MPa.

**【Keywords】** solid heat storage material; low grade ore; dickite; solid waste recycling; sintering

## 0 引言

蓄热技术<sup>[1]</sup>可以将热能储存起来, 在需要利用热量时进行释放, 在太阳能、风能以及谷电等清洁能源的利用方面有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>, 不仅能够大大提高资源的利用效率, 同时减少对环境的污染<sup>[3,4]</sup>, 为实现清洁供暖提供了思路。近年来, 随着国家清洁能源供暖政策的推进, 我国“煤改电”行业大力发展, 谷电蓄热采暖成为其中的主流。而固体蓄热技术更是谷电蓄热形式的佼佼者, 普遍应用于区域采暖改造、电厂深度调峰和工业生产用热等领域<sup>[4-7]</sup>。

蓄热材料是蓄热技术的核心, 通常可以分为四类: 显热蓄热材料、相变蓄热材料、热化学蓄热材料和吸附蓄热材料<sup>[8]</sup>。显热材料分为固体蓄热材料和液体蓄热材料<sup>[9]</sup>。而固体蓄热具有蓄热性能稳定, 安全系数高等优点, 得到了广泛的利用。目前商业上广泛应用的蓄热材料以 95#镁、92#镁、镁铁砖、镁碳砖等为主<sup>[10]</sup>, 其中镁砖的热导率为  $5\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 体积密度大于  $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ , 比热容在  $1\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  左右, 具有较为良好的性能<sup>[11]</sup>, 广泛应用于清洁供暖领域<sup>[12]</sup>。考虑到清洁供热的目标需求热水温度较低, 因此, 92#和 95#镁砖在清洁供热领域的工作蓄热温区为  $100\text{--}600\text{℃}$ <sup>[13]</sup>。然而随着镁砂资源减少<sup>[14]</sup>, 镁砖的成本也越来越高, 其中 95% 镁砖的成本已经达到 2800–4000 元不等<sup>[15]</sup>, 受疫情影响, 镁砖的价格还在不断提高。因此开发低成本替代镁砖的固体蓄热材料 (蓄热温区  $100\text{--}600\text{℃}$ ), 对于大规模发展固体蓄热清洁供热, 促进“碳中和、碳达峰”具有重要的意义。

与此同时, 我国低品位矿的数量较多, 一些金

属开采后的尾矿品位很低<sup>[16]</sup>, 主要成分为氧化硅和氧化铝。这些低品位的尾矿总量超过 80 亿吨<sup>[17]</sup>, 无法得到很好的利用。低品位矿的市场价值较低, 而对尾矿的进一步利用则是对固体废弃物的再利用<sup>[18]</sup>。目前对于低品位矿的利用有路基材料<sup>[19]</sup>、混凝土<sup>[20]</sup>以及对金属的进一步回收<sup>[21]</sup>等, 也有利用石墨尾矿制备太阳能储热陶瓷<sup>[22]</sup>和利用赤泥制备太阳能蓄热材料<sup>[23]</sup>的应用。采用低品位硅铝矿制备固体蓄热材料, 不仅可以降低固体蓄热材料成本, 同时达到固废资源化利用的效果, 具有较强的环保意义。为了降低蓄热材料成本, 同时提高对低品位硅铝矿的利用, 本文提出采用低品位硅铝矿为原料, 通过研究不同颗粒级配以及添加苏州土掺量获得性能更佳制备固体蓄热材料。

## 1 试验

### 1.1 试验用原料

低品位硅铝矿选取地开石矿粉 (赤峰暖捷新型建材有限责任公司提供), 苏州土 (山东金石耐火材料有限公司提供), 纸浆废液 (锦州市凌宇化工有限公司提供)。

为了解使用的地开石矿粉和苏州土的化学组成, 首先利用 X 射线荧光光谱分析仪 (XRF) 对低品位矿粉以及苏州土进行测试 (见表 1)。由表 1 可以看出, 地开石矿粉和苏州土的主要化学成分均为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。其中地开石矿粉中  $\text{SiO}_2$  含量达 78.01wt%, 其次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量达 17.88wt%, 其他组分 ( $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等) 含量共占 4.41wt%。苏州土中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的组分含量分别为 49.91wt% 和 40.10wt%。

表 1 所用原料及其化学组成表 (wt%)

Table 1 The raw materials and their chemical composition (wt%)

原料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
矿粉	78.01	17.88	0.41	0.015	0.03	0.038	0.19	2.46	0.78
苏州土	49.91	40.10	0.55	0.01	0.30	7.00	0.37	1.09	0.31

进一步采用 X 射线衍射仪 (XRD) 对矿石的物相组成分析 (见图 1), 样品主要由石英 (SiO<sub>2</sub>) (PDF#85-1053)、地开石 (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (OH)<sub>4</sub>) (PDF#72-1163) 两类矿物组成。

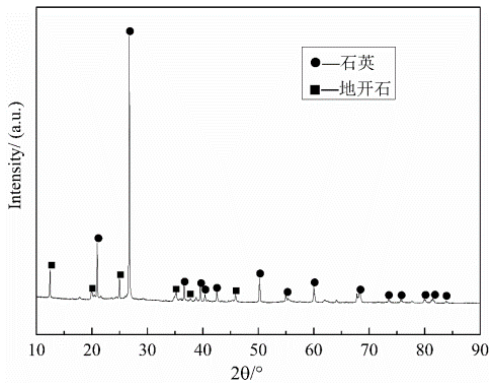


图 1 低品位地开石矿粉的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of low-grade dickite powder

### 1.2 试样制备

将地开石矿石进行破碎、筛分后, 根据颗粒紧密堆积原理, 确定临界粒度为 3mm, 实验原料颗粒尺寸为粗颗粒 3mm~1mm、中颗粒 1mm~0.08mm、细粉<0.08mm 三种不同尺度。选用的苏州土粒径<0.08mm, 为细粉。按照表 2 的实验方案称取不同尺寸大小的颗粒, 首先将粗中颗粒进行混合, 再加入纸浆废液, 搅拌 5min, 再加入细粉混合 10min。将不同颗粒大小的原料混合后, 采用压片机成型压制圆柱型样品以及长方体样品。压制好的样品先在空气中干燥 24h, 再在烘干箱中干燥以 110℃干燥 24h, 然后置于箱式电阻炉中高温热处理。以 2℃/min 速率升温, 在 500℃~900℃范围内的整百温度进行保温 1h, 升温至 1150℃, 在 1150℃保温 1h, 然后随炉冷却, 对热处理后的样品性能进行测试。

表 2 样品配方与颗粒级配

Table 2 Sample formula and particle ratio

试样编号	配方			颗粒级配 (%)			烧成温度 (°C)
	矿粉	苏州土	纸浆废液	粗	中	细	
A1	97	3	6	50	10	40	1150
A2	97	3	6	50	15	35	1150
A3	97	3	6	45	10	45	1150
A4	97	3	6	45	15	40	1150
A5	98	2	6	50	15	35	1150
A6	96	4	6	50	15	35	1150
A7	95	5	6	50	15	35	1150

### 1.3 测试方法

#### (1) 体积密度、气孔率、吸水率

根据阿基米德原理, 采用静力称重法测定样品的气孔率 (Pa) 和体积密度 (D) 吸水率 (Wa)。测试方法为: 将样品放入 100℃恒温的烘箱中烘干至衡重, 即前后两次称量的质量之差小于 0.1g, 测定此时试样质量即为样品的干重 (M<sub>1</sub>)。然后将样品浸泡在水中, 使水完全没过样品, 然后抽真空排

除气泡, 使用密度测试仪测定样品的样品充满浸液后悬浮在浸液中的质量悬浮重 (M<sub>3</sub>) 和样品充满浸液后在空气中的质量饱和水重 (M<sub>2</sub>)。

$$Pa = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{M_1 \times D_1}{M_2 - M_3} \times 100\% \quad (2)$$

$$W_a = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (3)$$

### (2) 热性能测试

采用 Hot Disk 热常数测试仪测量材料的热导率和比热容。在测试时, 被膜装的镍螺旋探头夹于两块样品之中(固体)。在测试时间内, 记录探头的阻值变化, 建立起测试期间探头所经历的温度随时间变化关系。根据材料的导热系数大小, 选择合适的测试参数, 包括: 输出功率, 测试时间以及采用探头的尺寸等, 大体上对于导热系数较小的材料选取低的输出功率和较长的测试时间, 而对于导热系数较大的材料选取高的输出功率和较短的测试时间。本试样测试选择的样品探头型号为 7577, 加热功率为 30mW, 测量时间为 4s。

### (3) 常温抗压强度

在规定条件下, 对试样以恒定的加压速度施加载荷直至破碎或者压缩至原尺寸的 90%, 记录最大载荷, 根据试样所承受的最大载荷和平均受压面积计算出常温耐压强度。将制备好的试样置于干燥箱中于  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  下干燥至恒重, 然后冷却至室温, 实验前防止样品受潮。测量试样两受压面相互垂直的两条直径, 精确至 0.1mm, 根据四个直径的算数平均值计算出平均初始截面积  $A_0$ 。将试样或装好试样的适配器安装在试验机上下两块压板的中心位置, 试样与压板之间不使用任何衬垫材料。选择载荷量程, 使其大于试样预估破坏载荷值的 10%。以  $1.0\text{MPa} \pm 0.1\text{MPa/s}$  的速率连续均匀的施加应力, 直至试样破碎, 即试样不能承受载荷为止。记录指示的最大载荷。试样的常温耐压强度按式(4)计算:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (4)$$

式中,  $\sigma$  为常温耐压强度, MPa;  $F_{\max}$  为记录的最大载荷, N;  $A_0$  为试样受压面初始截面积,  $\text{mm}^2$ 。

### (4) X 射线衍射分析

通过 XRD (Rigaku SmartLab 9 kW) 的物相分析, 可以确定制备所得的固体蓄热材料的结构和晶体变化, 确定制备过程中产生的相组成变化。

### (5) 显微测试

对材料的断面进行 SEM (JSM-7601F) 扫描测试观测其孔隙情况和显微结构, 对比样品的晶粒尺寸和断面结构, 通过显微测试, 分析材料微观结构

与宏观性能的关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒级配对样品性能影响

不同颗粒级配的样品的 XRD 图谱如图 2 所示。在不同颗粒级配下的样品热处理后的物相都为  $\alpha$ -石英和莫来石相, 试样 A1 对应的颗粒级配下, 在  $2\theta=26.702^\circ$  处的衍射峰强度相较于其他颗粒级配的试样在此角度的衍射峰强度大, 可以认为对应的 (011) 晶面在此种颗粒级配下有择优生长的取向特征, 也有可能是在制备试样时选取的试样部位导致。不同颗粒级配的样品生成的莫来石峰强度相差不大, 莫来石相在  $2\theta=5.34^\circ$  以及  $2\theta=2.67^\circ$  的衍射峰强度没有较大区别, 是因为虽然采取了不同的颗粒级配, 但是样品的原料、配方一致, 因此虽然 XRD 中的  $\alpha$ -石英相的衍射峰强度不同, 但是莫来石峰强度没有太大变化。在热处过程中随着温度升高, 地开石相脱水, 地开石和苏州土中的氧化铝和氧化硅反应, 生成了小部分的莫来石。

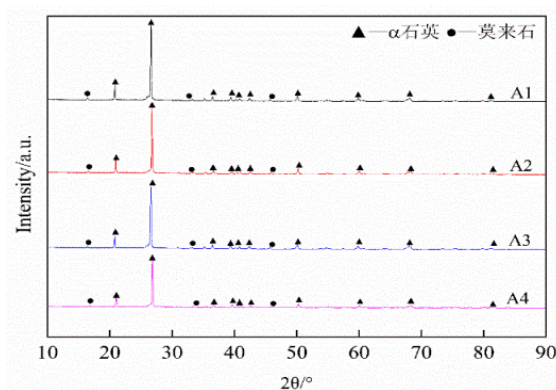


图 2 不同颗粒级配样品 XRD 图

Fig.2 XRD patterns of samples with different particle ratios

图 3 是不同颗粒级配热处理后样品断面的 SEM 图像。从扫描图中可以看出颗粒和气孔的存在, 样品内部的致密性存在差异。样品中的颗粒结合在一起, 生成了较少的颗粒莫来石相。但是同时也看到有较多的空隙存在, 可以看出 A1 和 A2 的致密性要好于 A3 和 A4, 而 A1 和 A2 的性能也相对较好一些。样品内部的致密程度影响样品的性能, 样品 A1 和 A2 的颗粒更加紧密的结合, 样品中的气孔较少。此外, 生成了较少的颗粒莫来石相也有助于提高样品的致密性。



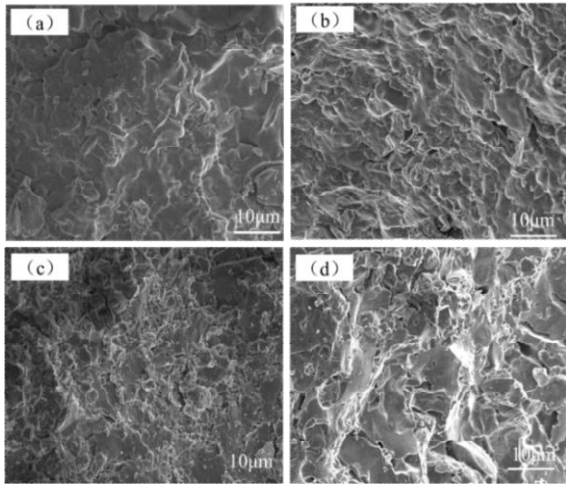


图3 不同颗粒级配样品 SEM 图: (a) A1; (b) A2; (c) A3; (d) A4

Fig.3 SEM images of samples with different particle ratios: (a) A1; (b) A2; (c) A3; (d) A4

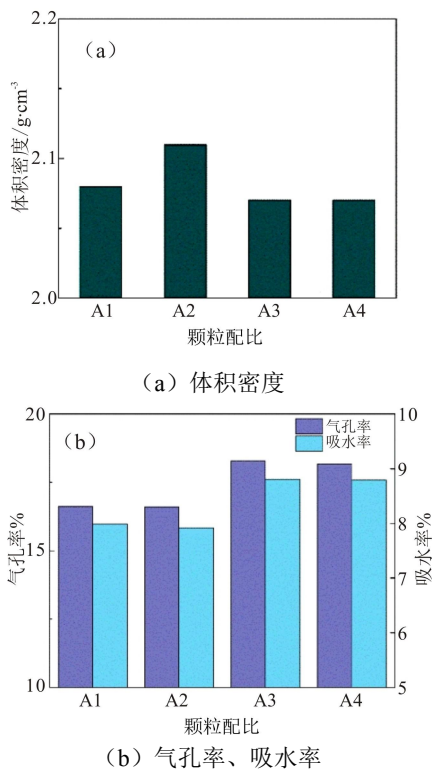


图4 不同颗粒级配样品的体积密度、气孔率和吸水率  
Fig.4 Volume density, porosity and water absorption of samples with different particle ratios

不同颗粒级配的样品体积密度、气孔率、吸水率及抗压强度的数据如图4所示,在不同的颗粒级配下,当颗粒级配为 50:15:35 时,样品的体积密度最大,气孔率和吸水率最小,根据紧密堆积原理,

大颗粒在样品中作为骨架,中颗粒填充大颗粒中的较大的空隙,加入细粉填充剩余的缝隙,通过紧密堆积可以提高样品的体积密度,降低气孔率和吸水率,从而提高材料的强度。颗粒级配为 50:15:35 的样品在实验的几种颗粒级配中体积密度最大,气孔率和吸水率最低,说明在这种颗粒级配下,压制成型后,样品内孔隙率达到最低,细粉更好的填充大颗粒和中颗粒中的空隙。

不同颗粒级配下样品的抗压强度如图5所示,当颗粒级配为 50:15:35 时,样品的抗压强度较大,这是由于颗粒级配不同样品的体积密度和气孔率不同。体积密度大,气孔率低使得样品内部的致密程度,在样品断裂时,不容易从气孔处发生,从而提高样品的抗压强度。

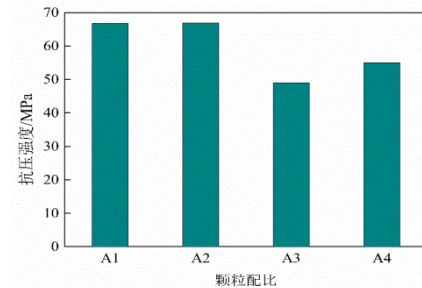


图5 不同颗粒级配样品抗压强度  
Fig.5 Compressive strength of samples with different particle ratios

不同颗粒级配下样品常温下的比热容和热导率如图6所示。在颗粒级配为 50:15:35 时样品的热导率和比热容最高。因为不同的颗粒级配影响样品内部的孔隙率,体积密度大、孔隙率低则样品内部的气孔含量少,样品内部传热快,因此高的体积密度和低的气孔率会提高样品的热导率。

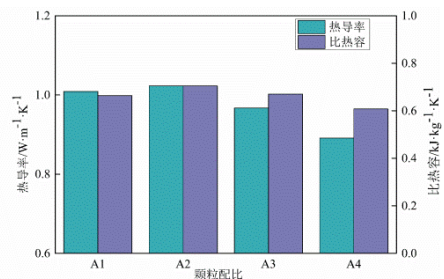


图6 不同颗粒级配样品的热导率、比热容  
Fig.6 Thermal conductivity and specific heat capacity of samples with different particle ratios

## 2.2 苏州土添加量的影响

不同苏州土添加量样品热处理后的 XRD 图谱

如图 7 所示。不同苏州土含量下的样品在热处理后的物相由原来的石英、地开石相变为 $\alpha$ -石英相和莫来石相, 以 $\alpha$ -石英相为主, 生成小部分莫来石相。在不同的苏州土添加量下,  $\alpha$ -石英相的衍射峰强度没有太大的变化。而随苏州土添加量的增多莫来石相的峰强度有所变化, 苏州土含量为 3% 下莫来石的衍射峰强度更加的明显, 在  $2\theta=5.34^\circ$  以及  $2\theta=2.87^\circ$  的衍射峰强度都相对较高, 说明在苏州土添加量为 3% 时, 地开石在升温过程中脱水, 其中的氧化铝以及苏州土中的氧化铝, 在低熔点相熔融促进后, 与氧化硅结合, 生成了莫来石相, 样品生成更多的莫来石, 能够提高样品的密度, 降低样品的气孔率, 提高样品性能。而当苏州土添加量增加时, 低熔点相不足以促进氧化硅和氧化铝接触, 造成氧化硅和氧化铝团聚, 从而降低了莫来石的生成量。

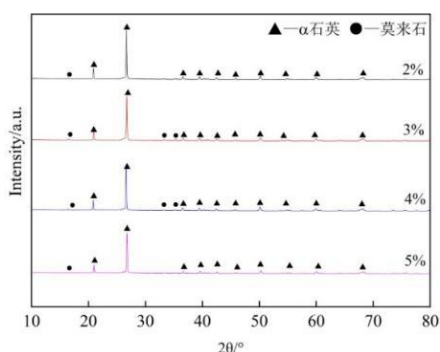


图 7 不同苏州土含量样品 XRD 图

Fig.7 XRD patterns of samples with different amount of Suzhou clay

不同苏州土添加量样品的 SEM 形貌如图 8 所示。从图中可以看出不同苏州土添加量下样品内部的结合程度不同, 苏州土添加量为 2% 时, 样品内部存在较大的孔隙, 苏州土含量为 5% 的样品的断面图中也看到有较大的孔隙, 大孔隙的存在会影响样品的密度, 热性能和力学性能, 孔隙的存在导致热在空隙处在空气中传播, 降低热导率, 样品在进行力学测试时, 也会在气孔处优先发生断裂, 而苏州土添加量为 3% 时, SEM 图中颗粒结合也更加的紧密, 对应的样品的体积密度大, 热性能和力学性能也较高。这是因为苏州土添加促进内部低熔点组分熔融, 产生液相, 促进烧结, 生成莫来石相, 颗粒之间的结合更加紧密, 提高样品内部的致密性, 因此苏州土含量 3% 时样品的性能也更好。

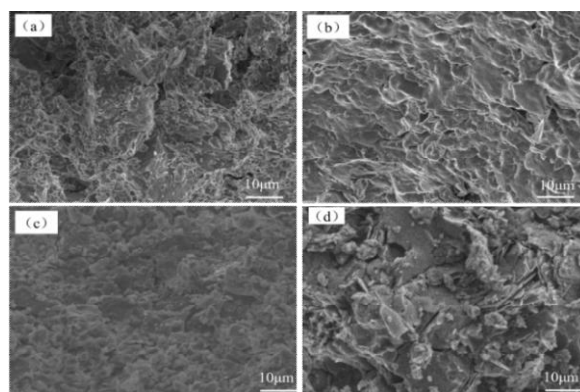
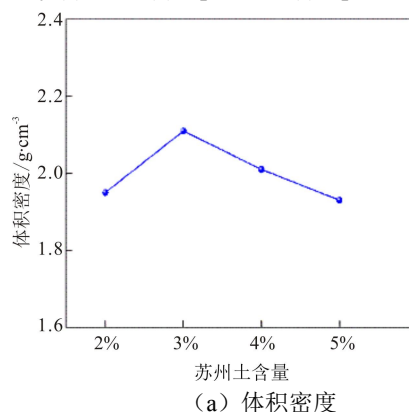
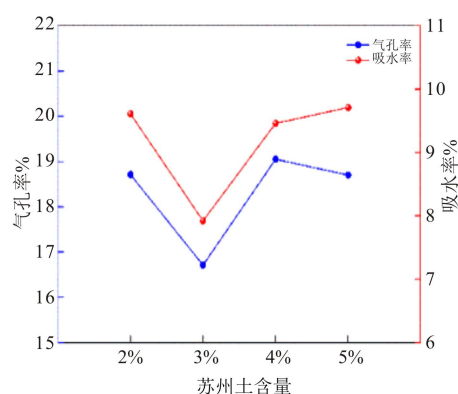


图 8 不同苏州土添加量样品 SEM 图 (a) 2%; (b) 3%; (c) 4%; (d) 5%

Fig.8 SEM of samples with different amount of Suzhou clay (a) 2% ; (b) 3 per cent;(c) 4 per cent; (d) 5%



(a) 体积密度



(b) 气孔率、吸水率

图 9 不同苏州土添加量样品体积密度、气孔率、吸水率变化曲线

Fig.9 Variation curves of volume density, porosity and water absorption of samples with different addition levels of suzhou clay

不同苏州土添加量的样品体积密度、气孔率、吸水率如图 9 所示, 随苏州土添加量的变化, 样品

的体积密度先增加后降低,气孔率和吸水率变化一致,与体积密度变化趋势相反,呈现出先降低后升高的趋势,在苏州土添加量为3%时,样品的体积密度最大,气孔率、吸水率最低,推测是由于在热处理过程中,当苏州土添加量为3%时,低熔点成分会发生熔融,生成液相,促进莫来石的生成,从而减少气孔率,提高体积密度,而随着苏州土含量的进一步增加,低熔点成分形成的液相量不足以促进氧化硅和氧化铝接触,导致氧化硅和氧化铝得不到充分接触,分散在试样内部,莫来石的量也减少,因而体积密度和气孔率降低。

不同苏州土添加量样品的抗压强度变化如图10所示。苏州土添加量为3%时,样品的抗压强度最大,因为在添加量为3%时,低熔点成分形成的液相促进氧化硅和氧化铝的接触,形成更多的莫来石,填充内部的空隙,使得样品的体积密度更大,孔隙率低,在受到外部压力时,样品容易从气孔处开始发生断裂,孔隙率低则样品发生断裂的位置较少,样品的抗压强度也较大。

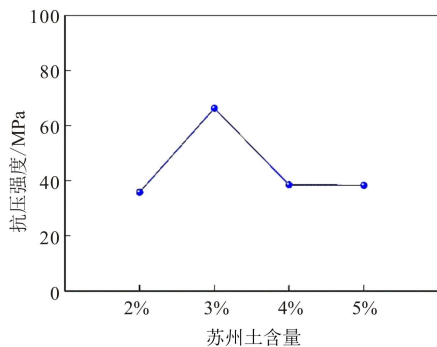


图 10 不同苏州土添加量抗压强度变化曲线

Fig.10 Variation curves of compressive strength with different amounts of Suzhou clay

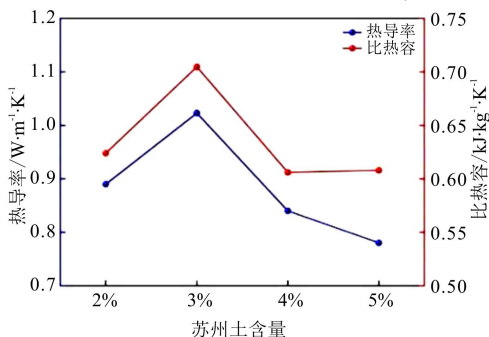


图 11 不同苏州土添加量热导率和比热容变化曲线

Fig.11 Variation curves of specific heat capacities and calorimetric conductivity of samples with different amount of Suzhou clay

不同苏州土添加量的样品常温下的热导率和比热容变化曲线如图11所示,随着苏州土含量的增加,样品的比热容和热导率先上升后下降,在苏州土含量为3%时,低熔点成分熔融,促进氧化硅和氧化铝的反应形成莫来石相,样品的内部更加致密,气孔率低,因此苏州土含量为3%时样品的热导率和比热容更好。

不同苏州土添加量的单位体积蓄热量的变化曲线如图12所示。由图可以看出,随着苏州土含量的增加,样品的蓄热密度先上升后下降,在苏州土含量为3%时,单位体积的蓄热密度达到最佳值,为351.08kWh·m<sup>-3</sup>。同时,与已报道的固体蓄热材料相比,本研究以低品硅铝矿为原料制备的蓄热材料的导热系数(1.023W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)以及体积密度(2.1g·m<sup>-3</sup>)已达到或略高于陶瓷砖等<sup>[24,25]</sup>;比热容(0.7047kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)略低于已有工作(0.9-1.0 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)。由于本研究中的原料成本低廉,故开发的固体蓄热材料仍具有广泛的应用前景。

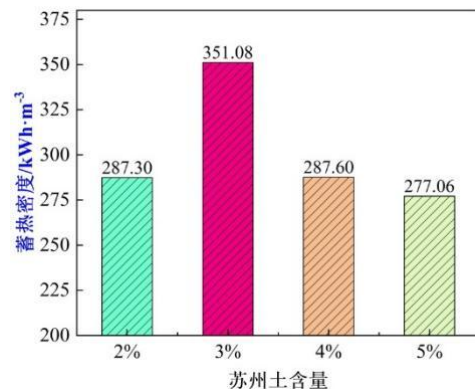


图 12 不同苏州土添加量的蓄热密度变化曲线

Fig.12 Variation curves of thermal energy density per volume of samples with different amount of Suzhou clay

### 3 结论

以低品位硅铝矿为主要原料制备固体蓄热材料,添加苏州土和纸浆废液作为结合剂制备固体蓄热材料,主要结论如下:

通过对不同颗粒级配及苏州土添加量样品性能的探究,当粗中细颗粒级配为50:15:35、苏州土含量为3%时,样品的性能较好,体积密度为2.11g/cm<sup>3</sup>,吸水率为7.92%,热导率为1.023W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,比热容为0.7047kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,抗压强度相对较大。

## 参考文献:

- [1] Hashain S M. Review on sustainable thermal storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques [J]. Energy Convor Manage, 1995,39(1): 2127.
- [2] 崔海亭,袁修干,侯欣宾.蓄热技术的研究进展与应用[J].化工进展,2002,(1):23-25.
- [3] 吴会军,朱冬生,李军,等.蓄热材料的研究进展[J].材料导报,2005,(8):96-98.
- [4] 凌浩恕,何京东,徐玉杰,等.清洁供暖储热技术现状与趋势[J].储能科学与技术,2020,9(3):861-868
- [5] 胡其颖.太阳能热发电技术的进展及现状[J].能源技术,2005,(5):34-41.
- [6] 李勇,解凯.蓄热电锅炉技术应用分析[J].河北电力技术,2009,28(2):41-42,45.
- [7] 肖明东,余莉,滕力.电锅炉蓄热技术在供暖工程中的应用[J].电力勘测设计,2003,(2):74-77.
- [8] 王德军.相变蓄能材料在建筑节能中的应用[J].科技创新导报,2009,(32):31-32.
- [9] 陈彬,李银姬,常杰飞.城市采暖燃煤锅炉电能替代解决方案研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2017,13(2):102-107.
- [10] 葛平,杨斌.固体蓄能供热装置在电能替代工作中的应用研究[J].电力需求侧管理,2016,18(1):34-36,48.
- [11] 赵岷,王启民.基于 ANSYS 分析的蓄热砖蓄热特性数值模拟及实验研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2020,16(2):34-38.
- [12] 孙立本,张少成,许冰,等.66kV 固体电蓄热装置在火电机组深度调峰中的应用[J].华电技术,2018,40(7):38-39,42,78.
- [13] 徐耀祖,阿迪力江·对山拜,商向东,等.基于高倍率蓄热的固体蓄热器研究及应用分析[J].热能动力工程,2020,35(10):72-78.
- [14] 乌志明,马培华.镁、镁资源与镁质材料概述[J].盐湖研究,2007(4):65-72.
- [15] <https://naicai.mysteel.com/21/0713/15/K4D3BEFD3790D509E.html>
- [16] 刘呈祥.有色金属矿山尾矿综合利用进展[J].世界有色金属,2022,(1):152-154.
- [17] 梅国栋.尾矿综合利用与无尾矿山建设探讨[J].金属矿山,2010,(10):142-145.
- [18] 敖顺福.有色金属矿山尾矿综合利用进展[J].矿产保护与利用,2021,41(3):94-103.
- [19] 张智豪,李波,李鹏,等.改良铁尾矿用于道路基层材料的研究[J].中外公路,2018,38(3):274-278.
- [20] 朱志刚,李北星,周明凯,等.铁尾矿砂应用于混凝土的可行性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(3):428-431,436.
- [21] 范敦城,齐大山.铁尾矿预富集—深度还原提铁及尾渣综合利用研究[D].北京:北京科技大学,2018.
- [22] 刘溢.利用石墨尾矿制备太阳能储热陶瓷的研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
- [23] 葛海鹏.利用工业废渣制备太阳能蓄热材料的研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [24] Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,18:327-349.
- [25] Li G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,53:897-923.

## (上接第 179 页)

- [2] 丁广威,刘旭宁,王道重,等.备件需求预测方法研究现状综述[J].价值工程,2020,39(4):296-298.
- [3] 赵晓东,李雄,孙俊峰.战时装备维修器材需求预计方法[J].火力与指挥控制,2018,43(1):67-73.
- [4] 蔡志成,王响.基于改进灰色马尔可夫模型的雷达备件需求预测[J].现代信息科技,2022,6(13):86-89.
- [5] 黄俊超,胡勇.基于灰色马尔可夫模型的器材故障预测研究[J].物流科技,2022,45(4):163-166.
- [6] 刘春光,陈路明,张运银,等.基于改进灰色马尔可夫链的电传动装甲车辆负载需求功率预测[J].兵工学报,2021,42(10):2130-2144.
- [7] 张玉霞,吴艳艳,庞云龙.基于灰色马尔可夫模型的4S店备件需求预测[J].现代工业经济和和信息化,2021,11(3):108-111.
- [8] 刘思峰.灰色系统理论及其应用(第九版)[M].北京:科学出版社,2021.