文章编号:1001-2060(2024)08-0112-08

固体颗粒储热特性及热稳定性实验研究

孙丽伟^{1,2},宋国良^{1,2},纪 阳^{1,2},汤仔华^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所煤炭高效低碳利用全国重点实验室,北京100190;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为选择流态化换热器的储热材料,选取4种来源广泛、价格低廉的沙漠沙、石英砂、玄武岩和气化粗渣,在 不同温度下分别对4种材料的密度与比热容进行了测试,并对热处理前后的样品进行了扫描电子显微镜(SEM)、X 射线荧光光谱(XRD)与X射线衍射(XRF)的分析。实验结果表明:4种储热材料的储热能力排序为玄武岩>沙漠 沙>石英砂>气化粗渣;对储热能力最优的玄武岩与沙漠沙热稳定性进行测试,热稳定性排序为玄武岩>沙漠沙; 综合考虑储热性能及热稳定性,玄武岩可以作为流态化换热器的储热材料。

关键 词:热电解耦;流态化换热器;储热材料;储热能力;热稳定性

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.013

[**引用本文格式**]孙丽伟,宋国良,纪 阳,等. 固体颗粒储热特性及热稳定性实验研究[J]. 热能动力工程,2024,39(8):112-119. SUN Liwei,SONG Guoliang,JI Yang, et al. Experimental study on thermal storage characteristics and thermal stability of solid particles [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(8):112-119.

Experimental Study on Thermal Storage Characteristics and Thermal Stability of Solid Particles

SUN Liwei^{1,2}, SONG Guoliang^{1,2}, JI Yang^{1,2}, TANG Zaihua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100049)

Abstract: In order to choice thermal storage material of fluidized heat exchanger, four widely sourced and low-cost solid particles as heat storage materials were selected, including desert sand, quartz sand, basalt and coal gasification coarse slag. The density and specific heat capacity of the four materials were separately tested at different temperatures. And scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) analyses were conducted on the samples before and after heat treatment. The experimental results show that the heat storage capacity of the four heat storage materials is in the order of basalt > desert sand > quartz sand > coal gasification coarse slag, and the thermal stability of basalt and desert sand with optimal heat storage capacity is tested in the following order: basalt > desert sand. Considering thermal storage performance and thermal stability, basalt can be used as a thermal storage material for fluidized heat exchangers.

Key words: thermoelectric decoupling, fluidized heat exchanger, thermal storage materials, heat storage capacity, thermal stability

收稿日期:2023-12-16; 修订日期:2023-12-25

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA29010100)

Fund-supported Project: the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA29010100)

作者简介:孙丽伟(1988 -),女,中国科学院硕士研究生.

通信作者:宋国良(1974-),男,中国科学院大学研究员.

引 言

热能储存系统在应对可再生能源的波动性、间 歇性和随机性,以及应对热电联产机组的"以热定 电"灵活性调峰等方面起到重要作用^[1]。显热储热 系统可以提供稳定可靠且环保的能源,将其整合到 热电联产机组中,可以实现热电解耦。对于应用于 热电解耦的储热装置,目前工程中常用的是储热水 罐^[2-3],但其占地面积大,温度范围小^[4]。在提高温 度使用范围方面,固体颗粒作为储热介质表现出特 有的优越性。同时,流态化固体储热系统可以改善 固体颗粒的流动性和增强储热性能,因此开展适用 于流态化储热系统固体储热材料的研究对于热电解 耦具有重要意义。

从现有的研究来看,沙漠沙、石英砂和玄武岩等 天然材料是优良的储热材料,有较高的密度,但比热 容较低[5-7]。然而,目前沙漠沙、石英砂和玄武岩的 应用场景大多数为移动床储热系统和固定床储热系 统。Diago 等人^[8]对应用于移动床的沙漠沙在1000 ℃ 下的热稳定性和光学性能的研究表明,高温下沙漠 沙中的 CaCO, 分解会削弱沙漠沙的光学性能, 钙含 量低的沙漠沙热稳定性好。Sang 等人^[9]研究了应 用于移动床的涂覆过渡金属氧化物的沙漠沙在 800 ℃ 的热稳定性和光学性能,研究结果表明,沙漠 沙涂覆过渡金属氧化物后可以提高光学性能和稳定 性,但对比热影响不大。Bouvry 等人^[10]研究了应用 于移动床的玄武岩在1000 ℃时的热稳定性,研究 结果表明,选取的含有 MgO、FeO 的玄武岩热稳定性 更好。Tiskatine 等人^[11]研究了应用于固定床的沙 漠沙、石英砂岩等岩石在 650 ℃时的热稳定性和岩 石的抗压强度等,研究结果表明,石英和方解石含量 高的岩石热稳定性不好:石英砂岩在多次循环后热 稳定性能良好。Nahhas 等人^[12]研究了应用于固定 床的玄武岩在700 ℃时的热物性和机械性能,研究 结果表明,粒径较细的玄武岩的热物性和机械性能 好。Liao 等人^[13]对固定床中使用的玄武岩的成分、 热稳定性、比热容和热导率等参数进行评价,研究结 果表明,玄武岩可作为优良的固定床储热材料。综 合来看,在移动床中使用的沙漠沙、玄武岩等储热材 料的温度较高,在800~1000℃范围内,对储热材 料的光学性能要求较高。在固定床中使用沙漠沙、 石英砂和玄武岩为固体储热颗粒的温度在650~ 700℃,且对固体颗粒的抗压强度和热导率有较高 的要求。当沙漠沙、石英砂和玄武岩应用于流态化 储热系统时,固体颗粒和空气混合呈鼓泡状态,固体 颗粒的热导率对储热材料的筛选影响不大。此外, 流化床换热器是间接换热,管侧介质与气固混合物 分开,因此对抗压强度要求不高。同时,由于不需要 吸收太阳光,对光学性能没有要求。然而,流化床换 热过程中需要考虑摩擦的影响,因此要对粒径的变化 进行考查;此外,流化床换热过程的储放热温度为50~ 600℃,因此需要在50~600℃温度范围开展储热材 料的筛选。为实现气化粗渣(水煤浆气化后产生的 一种粗渣)的资源化利用^[14-16],其作为固体储热颗 粒是否合适也需要进一步探究。

本文对不同粒径范围的沙漠沙、石英砂、玄武岩 和气化粗渣的热物理性质进行表征实验,通过对比 不同物质的密度、比热容和热稳定性,构建了适用于 新型流态化换热器的固体储热颗粒筛选的方法。研 究结果可为解决热电联产机组的"以热定电"的灵 活性调节问题提供基础数据与技术支撑。

1 储热材料与实验方法

研究的储热材料为沙漠沙、石英砂、玄武岩和气 化粗渣。储热材料选用流态化换热用的宽筛分粒 径,粒径分别为0~0.5、0~1和0~2 mm。沙漠沙 来自甘肃威武民勤沙漠,石英砂来自河南郑州巩义 铭海环保科技有限公司,玄武岩来自河北省鑫磊矿 物加工厂,气化粗渣来自内蒙古伊泰有限公司。

文献[17-18]实验方法具体如下:

第1阶段:测量不同粒径、不同材质的固体储热 颗粒的密度和比热容,结合价格经济性选出1~2种 优质材料。

第2阶段:将第1阶段筛选出的每一种材料均 分为两组。一组不做处理,作为对比材料;另一组置 于马弗炉内加热至600℃且恒温10h,冷却至室温 后观察热处理前、后的颜色变化、质量变化和团聚情 况,从宏观上探究储热材料的热稳定性;同时,对热 处理前、后的储热材料进行扫描电子显微镜分析测 试(SEM)和X射线荧光光谱分析测试(XRF)、X射 线衍射分析测试(XRD),从微观上探究储热材料的 热稳定性。

为了获得加热前、后储热材料的微观形貌,需要 对储热材料进行 SEM 测试,通过不同放大倍数下的 观察分析获得不同微观层次上的特性。SEM 测试 前需要先核对材料本身是否有磁性,进行有针对性 测试。本研究中的沙漠沙和玄武岩都属于强磁材 料,观测前喷金(Au、Pt)处理拍照清晰度更好。为 了获得加热前后储热材料的元素及组成成分,需要 对储热材料进行 XRF 测试。测量时需要将材料的 粒径研磨至 200 目。为了获得加热前后储热材料晶 体结构或者官能团的变化,需要对储热材料开展 XRD 晶相组分测试,测试前同样需要将材料的粒径 研磨至 200 目。

2 结果与分析

2.1 不同储热材料的成分分析

沙漠沙、玄武岩、石英砂和气化粗渣4种固体颗 粒的组成成分详见表1。4种固体颗粒均为混合物, 主要组成成分是SiO,,且SiO,所占的比重存在差异。

表 1 4 种材料的组成成分分析(%) Tab. 1 Analysis of composition of 4 kinds of materials (%)

组成成分/%	沙漠沙	玄武岩	石英砂	气化粗渣
SiO ₂	80.89	51.63	95.64	53.65
Al_2O_3	9.23	14.61	1.33	18.37
K20	2.78	1.91	0.23	2.59
Na ₂ O	2.63	-	1.39	2.69
CaO	1.79	10.17	0.56	10.02
Fe_2O_3	1.60	14.66	0.1	6.83
MgO	-	3.87	-	0.93
SO3	-	-	0.3	3.26
其他	1.08	3.15	0.45	1.66

"-"表示没有数据。

2.2 不同储热材料密度和比热容特性分析

密度测量使用美国麦克公司生产的全自动密度 分析仪 AccuPyc1340,每个测试结果均为3次测量 后的算术平均值。不同材质不同粒径的固体颗粒的 密度如图1所示。根据测试结果,密度从大到小的 顺序为玄武岩>沙漠沙>石英砂>气化粗渣,沙漠 沙与石英砂密度相差不大,密度跟固体颗粒的粒径 关系不大。





沙漠沙、石英砂、玄武岩采用差示扫描热仪 DSC 设备,测试在质量不变的条件下 50~590 ℃间的比 热容:气化灰渣采用 DSC 设备变质量测试 50~480 ℃ 下的比热容,温度设置为480 ℃是为了防止气化粗 渣发生燃烧(经热重测试着火温度为555℃)。不 同材质不同粒径固体颗粒的比热容如图 2 所示。比 较图2(a)~图2(c)可以得出:0~0.5 mm 沙漠沙和 石英砂的比热容随温度升高而升高,且在580℃左 右出现峰值.0~1.0~2 mm 的沙漠沙和石英砂的比 热容随着温度的升高先增大后减小再出现峰值,总 体上呈增长趋势;0~0.5 mm 玄武岩的比热容随温 度升高而升高,0~1、0~2 mm 的玄武岩的比热容随 温度升高先上升后下降再上升。分析原因为:0~0.5 mm 沙漠沙、石英砂和玄武岩的比热容随温度升高 而升高,是因为粒径在0~0.5 mm 范围内温度是主 要的影响因素:0~1、0~2 mm的沙漠沙、石英砂和 玄武岩的比热容随着温度的升高先增大后减小,总 体上呈增长趋势,是因为200℃以下受外部水分蒸 发吸热的影响呈增大趋势,而200~590℃受内部水 分分解的影响:沙漠沙和石英砂在 580 ℃左右出 现峰值是α相石英向β相石英转化造成的[18]。由 图 2(d) 可以得出: 气化粗渣比热容呈先上升后下降 再平缓的趋势,比热容在100℃左右出现峰值,是因 为150℃以下受到水蒸发吸热的影响。此外,比较 图 2(a)~图 2(d),沙漠沙、石英砂和玄武岩 3 种物 质的比热容随粒径的增大而增大,而气化粗渣的比 热容随粒径的不同呈现差异性,因此粒径范围是影 响固体颗粒比热容的因素之一。





2.3 不同储热材料储热能力分析

由于相同质量的固体颗粒升高相同温度时,比 热容 c_p 越大则固体颗粒吸/放热量越大,而质量与 密度和体积有关,因此比热容 c_p 越大、密度 ρ 越大, 单位体积固体颗粒升高相同温度时,则固体颗粒吸 热量越大。总之, $\rho \cdot c_p$ 可以作为固体颗粒储热能力 的评价指标,其物理意义是固体颗粒单位体积单位 温度的吸热量,即储能密度^[19]。不同材质不同粒径 固体颗粒的 $\rho \cdot c_p$ 值如图3所示。



图 3 不同材质不同粒径固体颗粒的ρ·c_p值 Fig. 3 The ρ·c_p values of solid particles with different materials and particle sizes

从图3可知,相同粒径范围下,温度在 50~450 ℃ 范围内,储能密度的排序基本为:玄武岩 > 沙漠沙 > 石英砂 > 气化粗渣,沙漠沙略高于石英砂,两者相差 不大;0~2 mm 粒径下玄武岩 ρ·c_p 最大,其次是沙 漠沙,因此玄武岩储热能力是最好的。

2.4 不同储热材料的热稳定性分析

根据测试目的不同热稳定性是衡量储热材料稳 定性的重要指标。热稳定性分为两类:一类是固体 颗粒在一次循环下的稳定性(测试极限温度),一 类是固体颗粒在多次循环下的稳定性(测试使用寿 命)。一次循环即将固体颗粒置于马弗炉中加热至 600 ℃且恒温 10 h 然后冷却至室温的过程。多次 循环是一次循环重复进行多次,重复的次数即循环 的次数。

基于固体颗粒吸收 540 ℃蒸汽放出的热量下是 否稳定的测试目的,只进行固体颗粒在一次循环下 的稳定性测试,且将极限温度设置为 600 ℃(满足 大于 540 ℃);测试时长设定为 10 h,即固体颗粒在 600 ℃下恒温 10 h 的稳定性。具体过程如下:使用 马弗炉进行热稳定性的测试,选用 0~2 mm 粒径下 的玄武岩和沙漠沙各两份样品,1 份作为对照组不 处理;1 份置于瓷质坩埚内并放入马弗炉中在空气 气氛下加热至 600 ℃且恒温 10 h,待样品冷却至室 温后取出。将热处理前后的样品进行对比,观察样 品的质量变化以及团聚情况,如图 4~图5 所示。







Fig. 5 Agglomeration situations of solid particles of desert sand and basalt with different particle sizes before and after heat treatment

实验结果表明,沙漠沙的质量变化小于4%,玄 武岩的质量变化小于1%,因此沙漠沙和玄武岩在 热处理前后质量变化很小;颜色均发生变化,均没有 团聚现象。

玄武岩和沙漠沙热处理前后粒径分布变化如图 6 所示。沙漠沙粒径的体积分数变化小于 2%;玄武 岩粒径的体积分数变化小于 1%。因此,沙漠沙和 玄武岩的粒径分布在热处理前后变化不大。







对热处理前后的样品进行 SEM、XRF 和 XRD 测试,从微观结构上测试样品的热稳定性。图7是 沙漠沙热和玄武岩热处理前后放大5万倍的微观结 构图。从图7可以看出:热处理前后的沙漠沙颗粒 的形貌没有发生变化,分散性好,热处理后的颗粒表 面有细小碎屑,不影响颗粒的正常使用,热稳定性 好;热处理前后的玄武岩颗粒的形貌没有发生变化, 分散性好,热处理后的颗粒表面有细小碎屑,不影响 颗粒的正常使用,热稳定性好,比沙漠沙表面产生的 小碎屑要少。







(a) 沙漠沙



加热前



(b) 玄武岩



XRF 的测试样品热处理前后组成成份的质量 分数变化如图 8 所示。XRF 的测试结果表明,沙漠 沙的主要成份是 SiO, 其次是 Al, O, 加热前总质量 分数约为90.1%,加热后总质量分数约为89.5%; 加热后 SiO,质量分数轻微增大,而 Al,O,质量分数 轻微减小:其他成份质量分数较小且热处理前后质 量分数变化均小于1%。玄武岩的主要成分是 SiO₂,其次是 Al₂O₃和 Fe₂O₃,加热前总质量分数约 80.8%,加热后总含量约81.1%;加热后有3种成 份轻微增大,其他成份热处理前后略微变小;所有组 成成份热处理前后质量分数变化均小于1%。



Fig. 8 Mass fraction changes of composition of desert sand and basalt before and after heat treatment

对热处理前后的沙漠沙和玄武岩进行 XRD 测 试,结果如图9所示。



before and after heat treatment

再根据国际衍射数据中心发行的标准衍射卡片 数据库[20]数据对热处理前后的沙漠沙和玄武岩进 行物相鉴定和定量分析。分析可知:沙漠沙的主要 物相有石英 SiO,、钠长石 Na[AlSi, O₈]、钙长石 Ca [Al₂Si₂O₈]、橄榄石 Fe₂SiO₄和钾长石 K[AlSi₃O₈];玄 武岩的主要物相有石英 SiO,、钙长石 Ca[Al,Si,O₈]、 辉石 Mg,Si,O₆、钾长石 K[AlSi,O₈]和磁铁矿 Fe,O₄。 沙漠沙、玄武岩中含量最高的成分是 SiO,,沙漠沙 的 SiO₂的含量高于玄武岩中的含量。分析原因:沙 漠沙和玄武岩在热处理前后, α - SiO,向 β - SiO,过 渡,且β-SiO₂的热膨胀系数较大易造成固体颗粒 破碎^[21-22];200~590 ℃过程中,Si-OH 分解生成 新的 Si - O - Si 和 H,O,破坏了原子键^[21],例如方 沸石 Na [AlSi, O₆]·H, O 在热处理过程中失水分 解^[12]。因此,石英 $\alpha - \beta$ 相的过渡和 Si – OH 的分 解是影响沙漠沙和玄武岩破碎的原因,因此储放热 的理想温度需要低于 570 ℃。磁铁矿 Fe₃O₄热处理 后质量分数降低并转换为赤铁矿 Fe₂O₃, 而赤铁矿 导热率较好^[23]会增加整体材料的导热性:橄榄石 Fe₂SiO₄在700 ℃时观察到了分解^[10],因此在热处理 过程中比较稳定。此外,沙漠沙和玄武岩的其他物 相质量分数热处理前后变化不大,成分比较稳定。

3 结 论

对储热材料采用物性测量的方法,研究宽筛分 下储热材料应用于流态化换热器的可行性。主要研 究结论如下:

(1)从储能密度ρ·c_p来看,0~2 mm 玄武岩具 有最好的储热性能,沙漠沙次之。因此,0~2 mm 沙 漠沙和0~2 mm 玄武岩在储热性能方面具有较大 潜力,气化粗渣的储热性能则较差。

(2) 玄武岩和沙漠沙均具有良好的热稳定性。 从宏观上看,沙漠沙和玄武岩在热处理前后的质量 分数变化分别小于 4% 和 1%;沙漠沙、玄武岩的颜 色在热处理前后发生了变化;热处理后的沙漠沙、玄 武岩没有出现团聚现象。从 SEM 微观上看,热处理 前后沙漠沙与玄武岩的外观形貌变化不大,热处理 后表面产生小碎屑,通过 XRD 与 XRF 对热处理前 后的沙漠沙、玄武岩进行定量与定性分析表明,沙漠 沙和玄武岩的主要成份是 SiO₂,热处理前后各组成 成份质量分数变化小于 1%。

(3)从储热性能和热稳定性考虑,选择玄武岩 作为储热材料。

参考文献:

- [1] 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 Zhu, ZOU Boyang, CONG Lin, et al. Recent progress and outlook of thermal energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(9);2746-2771.
- [2] 金国强,高耀岿,张丽霞.储热罐改造对供热机组热电解耦及 调峰能力的影响研究[J].汽轮机技术,2021,63(2):133 -136,114.

JIN Guoqiang, GAO Yaokui, ZHANG Lixia. Research on the effect of heat storage tank reconstruction on decoupling and peaking capacity of CHP units[J]. Turbine Technology, 2021, 63(2):133 – 136, 114.

[3] LAI F, WANG S, LIU M, et al. Operation optimization on the largescale CHP station composed of multiple CHP units and a thermocline heat storage tank [J]. Energy Conversion and Management,

2020,211:1-12.

- [4] CAO L, WANG Z, PAN T, et al. Analysis on wind power accommodation ability and coal consumption of heat-power decoupling technologies for CHP units[J]. Energy, 2021, 231:1-12.
- [5] MARTIN C, BONK A, BRAUN M, et al. Investigation of the longterm stability of quartzite and basalt for a potential use as filler materials for a molten-salt based thermocline storage concept[J]. Solar Energy, 2018, 171;827 – 840.
- [6] KIWAN S, SOUD Q R. Numerical investigation of sand-basalt heat storage system for beam-down solar concentrators[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 13:1-12.
- [7] SCHLIPF D, SCHICKTANZ P, MAIER H, et al. Using sand and other small grained materials as heat storage medium in a packed bed HTTESS[C]//Beijing: Proceedings of the International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems (Solar PACES), 2015.
- [8] DIAGO M, LNIESTA A C, SOUM-GLAUDE A, et al. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology [J]. Applied Energy, 2018, 216:402 - 413.
- [9] SANG Lixia, WANG Kaiyin, WU Yuting, et al. The improved solar weighted absorptance and thermal stability of desert sand coated with transition metal oxides for direct particle receiver [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 251;1-9.
- [10] BOUVRY B, CARRION A J F, ANDUJAR J, et al. Mediterranean basin basalts as potential materials for thermal energy storage in concentrated solar plants [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 171:50 – 59.
- [11] TISKATINE R, EDDEMANI A, GOURDO L, et al. Experimental evaluation of thermo-mechanical performances of candidate rocks for use in high temperature thermal storage[J]. Applied Energy, 2016,171:243 – 255.
- [12] NAHHAS T, PY X, SADIKI N. Experimental investigation of basalt rocks as storage material for high-temperature concentrated solar power plants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 110:226 – 235.
- [13] LIAO Jun, ZHU Xupeng, LI Jianan, et al. High-temperature thermal properties and wear behavior of basalt as heat storage material for concentrated solar power plants [J]. Advanced Materials, 2022, 37:547-553.
- [14] 张丽宏,金要茹,程芳琴.煤气化渣资源化利用[J].化工进展,2023,42(8):4447-4457.

ZHANG Lihong, JIN Yaoru, CHENG Fangqin. Resource utilization of coal gasification slag[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(8):4447 – 4457.

[15] 王辅臣.煤气化技术在中国:回顾与展望[J].洁净煤技术,
 2021,27(1):1-33.
 WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China; Review

and prospect[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1):1-33.

- [16] 李红亚,严 彪,马向荣,等.煤气化渣资源化技术开发与研 究利用进展[J].当代化工,2023,52(2):403-406.
 LI Hongya,YAN Biao,MA Xiangrong, et al. Research progress in development and utilization technology of coal gasification slag
 [J]. Contemporary Chemical Industry, 2023,52(2):403-406.
- [17] SAEED R S, ALSWAIYD A, SALEH N S, et al. Characterization of low-cost particulates used as energy storage and heat-transfer medium in concentrated solar power systems [J]. Materials, 2022, 15(8):1-20.
- [18] 高 妍.太阳能粒子吸热器传热介质性能研究[D].北京:华 北电力大学,2021.
 YAN Gao. Research on heat transfer fluid performance of solid particle solar receiver[D]. Beijing: North China Electric Power Uniersity,2021.
- [19] 刘 钰.用于显热储热的掺铝铁矿石材料的制备及热性能研究[D].北京:华北电力大学,2020.
 LIU Yu. Study on preparation and thermal properties of aluminum-doped iron ore material for sensible heat storge[D]. Beijing: North China Electric Power University,2020.
- [20] 国际衍射数据中心. PDF 5 + 数据库[EB/OL]. 2023 09. http://www.icddchina.com/pdf4.html. International Centre for Diffraction Data. PDF - 5 + database [EB/OL]. 2023 - 09. http://www.icddchina.com/pdf4.html.
- [21] LIU J, CHANG Z, WANG L, et al. Exploration of basalt glasses as high-temperature sensible heat storage materials [J]. ACS Omega, 2020, 5(30):19236 - 19246.
- [22] RADWAN O A, HUMPHREY J D, HAKEEM A S, et al. Evaluating properties of Arabian desert sands for use in solar thermal technologies [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 231:1-11.
- [23] MOLGAARD J, SMELTZER W W. Thermal conductivity of magnetite and hematite [J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(9):3644-3647.

(丛 敏 编辑)