

玄武岩纤维布移动蓄热箱高温蓄热 工况下的放热特性研究

谈俊豪,王 军

(东南大学 能源与环境学院,江苏 南京 210096)

摘 要:设计一种以玄武岩纤维布为蓄热材料的蓄热箱,采用插排排列提高换热速率和蓄热密度,通过焓分析确定最优蓄热温度,再分析不同流速和入口温度下的放热时间、放热功率和放热效率,得出玄武岩纤维布蓄热箱的放热特性。研究表明:在高温蓄热条件下,每千克空气最大输出功提高约0.5 kJ/K,焓损失为81~151 kJ/kg,焓效率在82%~85%范围内,选定600℃作为基准蓄热温度;分析了5种流速下的放热情况,随着入口流速不断增大,有效放热时间从191.4 min降低到23.7 min,放热功率从344.2 kW增加到2 749.7 kW,放热效率从96.2%降低到93.6%;分析4种入口温度的放热情况,蓄热箱放热时间的差距均在60 s内,放热功率在2 709~3 103 kW之间,平均放热效率为93.4%。

关 键 词:玄武岩纤维;可移动蓄热;数值模拟;放热性能;焓分析

中图分类号:TK11 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.02.015

[引用本文格式]谈俊豪,王 军.玄武岩纤维布移动蓄热箱高温蓄热工况下的放热特性研究[J].热能动力工程,2023,38(2):112-117. TAN Jun-hao, WANG Jun. Study on exothermic characteristics of basalt fiber cloth mobile heat storage box under high temperature heat storage condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(2): 112-117.

Study on Exothermic Characteristics of Basalt Fiber Cloth Mobile Heat Storage Box under High Temperature Heat Storage Condition

TAN Jun-hao, WANG Jun

(College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: A heat storage box with basalt fiber cloth as heat storage material was designed. The heat exchange rate and heat storage density were improved by inserting arrangement. The optimal heat storage temperature was determined by exergy analysis, and then the exothermic time, exothermic power and exothermic efficiency under different flow rates and inlet temperatures were analyzed to study the exothermic characteristics of basalt fiber cloth heat storage box. The research shows that under the condition of high-temperature heat storage, the maximum output work per kilogram of air will increase by about 0.5 kJ/k, the exergy loss will be 81 kJ/kg to 151 kJ/kg, and the exergy efficiency will be in range of 82% to 85%. 600℃ is selected as the reference heat storage temperature; the exothermic cases under five flow rates are analyzed, with the increase of inlet flow rate, the effective exothermic time decreases from 191.4 min to 23.7 min, the exothermic power increases from 344.2 kW to 2 749.7 kW, and the exothermic efficiency decreases from 96.2% to 93.6%; the exothermic cases under the four inlet temperatures are ana-

收稿日期:2022-05-04; 修订日期:2022-09-30

基金项目:国家自然科学基金(5216060011)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(5216060011)

作者简介:谈俊豪(1998-),男,东南大学硕士研究生。

通讯作者:王 军(1968-),男,东南大学副教授。

lyzed,the difference of exothermic time of heat storage box is within 60 s,the exothermic power is within 2 709 kW to 3 103 kW,and the average exothermic efficiency is 93.4%.

Key words: basalt fiber,mobile heat storage,numerical simulation,exothermic performance,exergy analysis

引 言

可移动热能储蓄技术是一种可以实现能量储存、运输、释放等环节^[1]的能源利用方法,在现今的能源系统中具有重要地位,其可移动性和调峰作用提升了能源系统的经济性和功能性。

McKenna 等人^[2-4]提出,分布式供热和热电联产是解决充热来源的方法,上述热源是常见且容易收集利用的能源形式,可保障可移动热能储蓄系统的能源稳定性。在热能交换上,现有的方法通常采用增加换热面积等强化传热的方法,但是依然存在蓄热密度小、导热性能较差等问题^[5-6]。与此同时,拥有广泛的放热功率范围是蓄热模块性能的又一体现,这个指标影响着系统的经济性和使用便捷性^[7-8]。在蓄热温度的控制上,焓分析是评价能量数量和质量的综合评价指标,揭示了能量在传递转化过程中能级退化的本质,文献[9]应用焓的相关概念分析了蓄热式波纹板的蓄热和传热特性,得到了不同雷诺数下的焓损和效率。玄武岩纤维材料在不同温度下拥有良好的热力学性能,可以应用在高温蓄热中^[10-12]。

本文设计的玄武岩纤维布蓄热箱,使用 fluent 软件进行模拟分析,在保证一定蓄热密度的情况下,分析蓄热系统的出口焓值和焓损失,得到最合适的蓄热温度;并在不同的入口流速和温度下,分析蓄热系统功率变化情况,以分析蓄热系统的放热特性。

1 系统模型介绍

1.1 物理和数学模型

玄武岩纤维材料密度在不同温度下均保持在 2 660 kg/m³,其热物性相当稳定,在合适的高温条件下玄武岩纤维的热应力很小^[13],其热物性参数如表 1 所示。

表 1 玄武岩纤维束热物性参数
Tab. 1 Thermophysical parameters of basalt fiber bundle

温度/℃	比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	导热系数/W·(m·K) ⁻¹
100	0.867	1.401
200	0.957	1.404
300	1.033	1.409
400	1.077	1.413
500	1.107	1.416
600	1.127	1.419

以宽为50 mm,厚 2 mm 的纤维布条为单元蓄热体,在蓄热箱中沿流道排列,同一列中每两条纤维布间隔为 8 mm,相邻两列错位 4 mm 排列。为达到连续放热的要求,采用长度为 10 m 的流道进行研究。使用对称边界降低模拟工作时长,具体模型如图 1、图 2 所示。

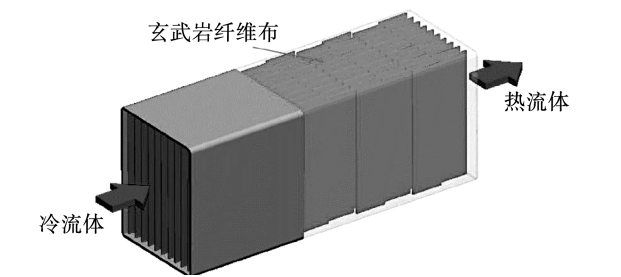


图 1 玄武岩纤维布蓄热箱模型
Fig. 1 Basalt fiber cloth heat storage box model

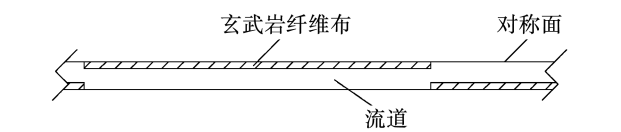


图 2 流道局部示意图
Fig. 2 Schematic diagram of partial flow channel

数值模拟计算遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒 3 大基本方程。由于纤维束插排在箱体中,空气横掠过纤维布时最易形成湍流,因此选用 $k-\epsilon$ 湍流模型结合标准壁面函数。对模型做以下假设:(1) 纤维布各向同性且为连续介质;(2) 空气作为不可压缩流体;(3) 假设箱体的保温性能良好,壁面

作绝热面处理;

1.2 网格无关性和模型验证

首先在流固交界面设置了边界层并加密,网格主要以非结构化网格为主,对 98 万、76 万、51 万和 38 万 4 种网格的模型进行模拟,以出口温度相差不超过 2% 作为标准,验证结果表明,76 万网格的模型具有最好的准确性,因此采用 76 万网格数量的模型进行计算和分析。

为了保证所述模型的有效性,采用文献[14]的有效模型进行对比验证。图 3 为换热 3 000 s 时储热介质温度曲线,两者数据的误差在 3% 以内,验证了本文模型的有效性。

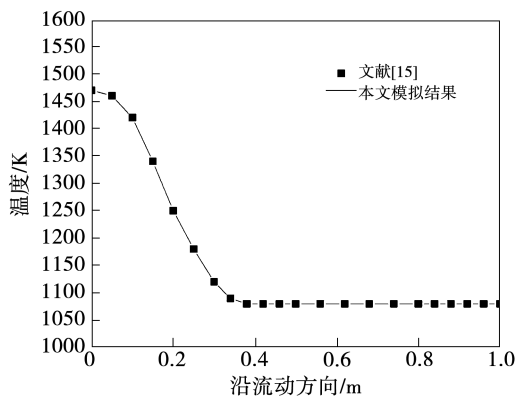


图 3 模型有效性验证

Fig. 3 Model effectiveness validation

1.3 评价标准

本文采用文献[15]焓分析的相关概念来判断蓄热温度对能源利用效率的影响,得到相对较优的蓄热温度,为玄武岩蓄热利用提供有效的理论分析。

在热力系统中焓平衡方程为:

$$\Delta E_x = E_{x,in} - E_{x,out} - E_{x,con} \quad (1)$$

式中: $E_{x,in}$, $E_{x,out}$, $E_{x,con}$, ΔE_x —系统输入、输出、损失、变化的焓, kJ/kg。

在恒定工况下,热力系统相对于环境状态的焓值为:

$$E_{x1} = c_v(T_1 - T_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0} \right) \quad (2)$$

式中: c_v —空气的平均定容比热, kJ/(kg·K); v_1 —空气的比体积, m³/kg; c_p —空气的平均比定压热容,

kJ/(kg·K); p —大气压力, Pa; 下标 0—环境; 下标 1—入口。

由于系统稳流稳态运行,且流道的压力损失较小,因此,压力损失可以忽略不计,系统经过某一过程变化后的焓损失和焓效率为:

$$E_{x,con} = T_0 \left(c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{c_v(T_2 - T_1)}{T_2} \right) \quad (3)$$

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{T_0(s_2 - s_1)}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

式中: s —不同状态下的熵值, kJ/(kg·K); h —不同状态下的焓值, kJ; 下标 2—出口。

作为蓄热设备,放热过程中的功率和蓄热体的放热效率为:

$$P = A \cdot \rho \cdot c_p \cdot V(T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{Q_{rel}}{Q_{sto}} \quad (6)$$

式中: P —放热功率, kW; A —流道面积, m²; ρ —空气密度, kg/m³; V —空气流速, m/s; T_1 、 T_2 —流道进、出口温度, K; Q_{rel} —空气释放的总能量, kJ; Q_{sto} —玄武岩存储的总能量, kJ。

2 结果与分析

2.1 蓄热温度的焓分析

确定合理的蓄热温度是分析放热性能前最为关键的要素。根据图 4 的曲线趋势,由于不同的蓄热温度导致放热阶段空气出口的温度不同,造成其最大做功能力不同。稳定状态下的出口焓值随着温度升高而不断增加,虽然会受到压降和进、出口温度的影响,但是不足以影响整体焓值的增加。温度每上升 100 K,蓄热箱出口焓值上升约 50 kJ/kg。玄武岩的热容随温度变化不大,蓄热密度逐渐增加,两者的增长趋势较为相同。

蓄热箱在放热时的传热方式是低温空气通过高温蓄热流道带走蓄热体中的热量。由于流道较长,因此在稳定放热的过程中,空气在流道中被持续加热,在流道出口被加热到蓄热温度,不同蓄热温度对热力系统造成的焓损失是不同的。由图 5 可知,在环境状态不变的情况下,随着蓄热温度增加,热力系统的焓损失呈现逐渐增大的趋势,而焓效率呈现先不变后减小的趋势。散热温度在 773 ~ 873 K 之间

烟效率超过 84.2% 的效率,随着温度升高,由于传热温差和风机泵耗的增加,在超过 873 K 后烟效率逐步下跌直至 82.9%。

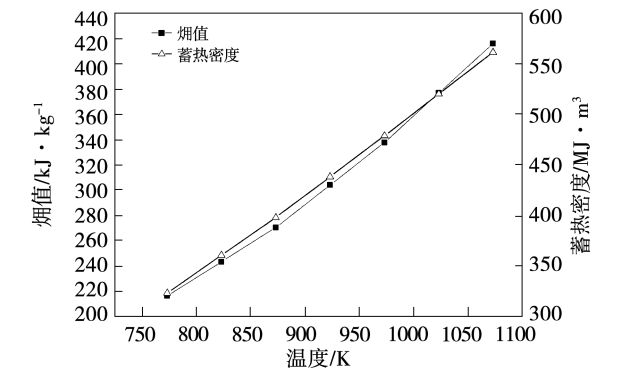


图 4 不同蓄热温度下的出口烟值和蓄热密度

Fig. 4 Exergy value and heat storage density at outlet under different heat storage temperatures

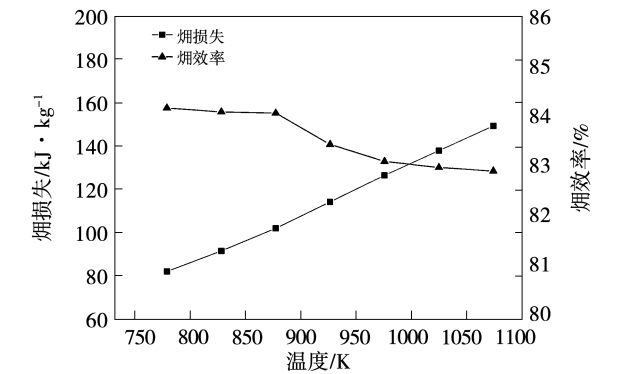


图 5 不同蓄热温度下传热的烟损失和烟效率

Fig. 5 Exergy loss and efficiency of heat transfer under different temperatures

在不同蓄热温度下出口烟值和烟损失效率已知的条件下,综合考虑玄武岩纤维在高温下的寿命情况和蓄热密度,将 873 K 作为后续放热性能分析的基准温度。

873 K 下玄武岩的蓄热密度可以达到 660 MJ/m^3 ,同常用的蜂窝陶瓷等材料相比增大了 10% ~ 12%。

2.2 流速对放热性能的影响

为研究流速对放热性能的影响,研究了 5 种流速下的放热性能,流动介质的入口温度相同均为 298 K。

表 2 为不同流速下蓄热箱的放热时间。在不同的流速下,出口温度均会保持一定时间的稳定,然后

下降并最终达到环境温度。随着入口流速增加,出口空气温度的下降趋势明显,当流速为 0.5 m/s 时维持稳定放热温度的时间约为 170 min,而当流速增加到 4 m/s 时,维持稳定放热的时间仅为 19.4 min。

表 2 不同流速下蓄热箱的放热时间

Tab. 2 Exothermic time of heat storage tank at different flow rates

入口流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	稳定放热时间/min	有效放热时间/min
0.5	170.0	191.4
1	82.5	95.5
2	40.1	47.6
3	26.2	31.7
4	19.4	23.7

图 6 是不同流速下放热功率和放热效率随着时间的变化曲线。在放热功率恒定的时候放热效率线性增加,当放热功率下降的时候,放热效率的增长速度放缓。这是因为放热后期蓄热流道中的斜温层区域随着放热过程变大,空气在流道中换热不充分,导致出口温度降低,热能不能被有效带出蓄热体,导致效率降低。当流速为 0.5 m/s 时,稳定放热功率为 344.2 kW,放热效率为 96.2%;当流速增加到 4 m/s 时,稳定放热功率为 2 749.7 kW,而放热效率为 93.6%。

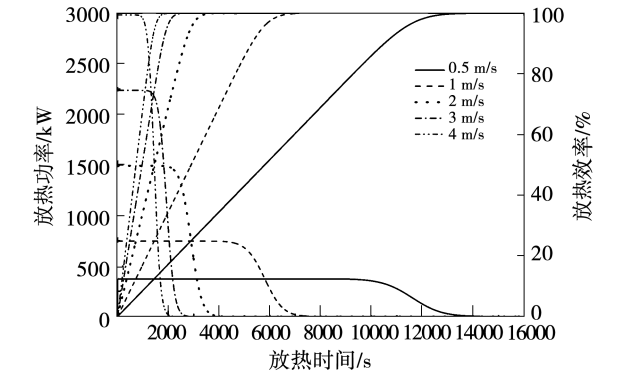


图 6 不同流速下放热功率和放热效率逐时变化曲线

Fig. 6 Duration curves of exothermic power and efficiency at different flow rates

图 7 显示了不同流速下空气和蓄热体的最大温差逐时变化曲线。最大温差值从 0.5 m/s 时的 14.2 K 到 4 m/s 时的 22.9 K,说明流速越大蓄热体内流固温差越大,换热越强烈。但是由于大温差的存在也导

致了可用能的损耗,造成了放热效率的降低。

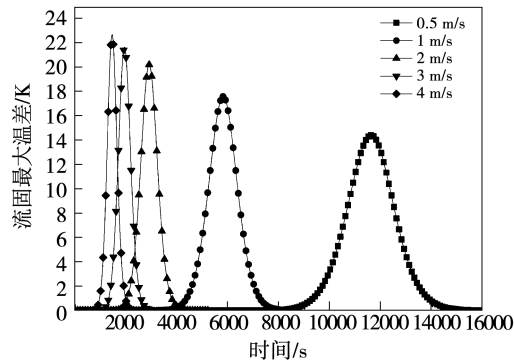


图 7 不同流速下流固最大温差的逐时变化曲线
Fig. 7 Duration curves of maximum temperature difference between air and solid at different flow rates

玄武岩蓄热箱的放热密度范围为 $344.2 \sim 2\,749.7\text{ kW/m}^2$,与现有的传统蓄热器相比,放热功率、密度及可调节性均超过蜂窝陶瓷、岩石填充床等蓄热设备。

根据已有数据,对流速与放热时间的关系进行拟合:

稳定放热时间(min):

$$t = 353.7 - 497.1V + 296.6V^2 - 78.1V^3 + 7.4V^4$$

有效放热时间(min):

$$t = 391.2 - 539.5V + 319.7V^2 - 83.9V^3 + 7.9V^4$$

2.3 入口温度对放热性能的影响

图 8 为不同入口温度下出口温度随时间的变化。虽然入口温度的差异会影响放热的快慢,但是在 614 K 以上的情况下,稳定放热和有效放热的时长差距不超过 1 min,因此蓄热箱的环境适应性良好,入口温度的改变对放热时间的影响较小。

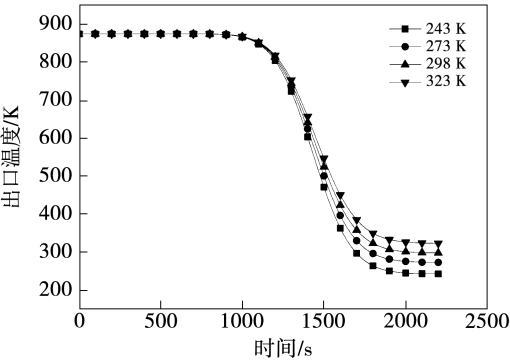


图 8 不同入口温度下出口温度随时间的变化
Fig. 8 Variation of outlet temperature with time under different inlet temperatures

图 9 是不同入口温度下放热功率和放热效率逐时变化曲线。由于环境温度的不同,稳定放热功率的范围在 $2\,709 \sim 3\,103\text{ kW}$ 之间,且稳定放热和有效放热的时长之差在 60 s 以内,放热效率不随时间变化。在整个放热过程中不同温度入口的放热效率差值在 1% 以内,平均放热效率为 93.4%。

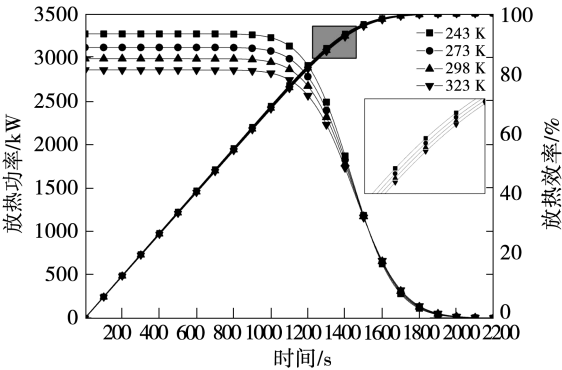


图 9 不同入口温度下放热功率和放热效率变化曲线
Fig. 9 Duration curves of exothermic power and efficiency under different inlet temperatures

图 10 为不同入口温度下流固最大温差的变化曲线。由图 10 可知,虽然入口温度相差 70 K,但是根据曲线趋势和位置,可以认为流道内的换热情况相似,流道中随着时间的变化流体与蓄热材料之间的温差最大值几乎同时出现在 1 400 s 左右。入口温度的变化几乎不影响蓄热箱的换热速度,因此玄武岩蓄热箱对环境的适应性很强。

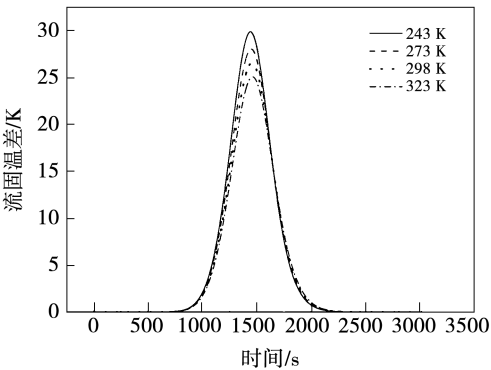


图 10 不同入口温度下流固最大温差的变化曲线
Fig. 10 Duration curves of maximum temperature difference between air and solid under different temperatures

3 结 论

对玄武岩纤维布蓄热箱蓄热温度进行了烔分

析计算,并在最优蓄热温度下对不同流速和温度的放热性能进行了数值模拟研究,得到以下结论:

(1) 在高温蓄热条件下,每千克空气所能做的最大功提高约 0.5 kJ/K,烟损失在 81 ~ 151 kJ/kg,烟效率先不变后下降 82% ~ 85%。

(2) 在入口流速不断增大的情况下,有效放热时间从 191.4 min 降低到 23.7 min,放热功率从 344.2 kW 增加到 2 749.7 kW,放热效率从 96.2% 降低到 93.6%。因此,蓄热箱根据使用要求可以提供不同功率和不同放热时间持续且有效的热能供应。

(3) 4 种入口温度条件下,玄武岩纤维层蓄热箱的稳定有效放热时间的差距均在 60 s 内,稳定有效放热功率在 2 709 ~ 3 103 kW 之间,放热效率几乎没有差别,平均放热效率为 93.4%。因此,玄武岩纤维层蓄热箱的环境适应性极强,且性能可以一直保持稳定。

参考文献:

[1] LIU Ming, SAMAN W, BRUNO F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2118 - 2132.

[2] McKENNA P, TURNER W J N, FINN D P. Thermal energy storage using phase change material: analysis of partial tank charging and discharging on system performance in a building cooling application [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 198: 117437.

[3] 孙博昭,王春波,李松,等. 350 MW 超临界机组可调式蒸汽喷射器工业供热系统热电联产性能分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 36 - 44.

SUN Bo-zhao, WANG Chun-bo, LI Song, et al. Performance analysis of cogeneration in industrial heating system with adjustable steam ejector for 350 MW supercritical unit [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(6): 36 - 44.

[4] REDDY K S, PRADEEP N. Stability analysis of the thermocline thermal energy storage system during high flow rates for solar process heating applications [J]. Solar Energy, 2021, 226: 40 - 53.

[5] PINCEMIN S, OLIVES R, PY X, et al. Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(6): 603 - 613.

[6] ZHU Yan-long, WANG De-xin, LI Peng-yan, et al. Optimization of

exergy efficiency of a cascaded packed bed containing variable diameter particles [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 188: 116680.

[7] 王建辉,王彦博,孙振锋,等. 能源塔—地理管复合热泵系统跨季节蓄热实验研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(8): 1045 - 1050.

WANG Jian-hui, WANG Yan-bo, SUN Zhen-feng, et al. Experimental study on cross-season heat storage of energy tower-buried pipe composite source heat pump system [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8): 1045 - 1050.

[8] 糜金洲. 技术标准化与技术创新、经济增长的互动机理及测度研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.

GENG Jin-zhou. Research on the interaction mechanism and measurement of technological standardization, technological innovation and economic growth [D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[9] DING Yu-xing, OLUMAYEGUN O, CHAI Yue, et al. Simulation, energy and exergy analysis of compressed air energy storage integrated with organic Rankine cycle and single effect absorption refrigeration for trigeneration application [J]. Fuel, 2022, 317: 123291.

[10] CHEN Xing-fen, ZHANG Yun-sheng, HUI D, et al. Study of melting properties of basalt based on their mineral components [J]. Composites, Part B: Engineering, 2017, 116: 53 - 60.

[11] LIU Meng-yong, XIA Jian-xun, LIANG Yong, et al. Preparation and characterization of continuous basalt fibre with high tensile strength [J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12410 - 12415.

[12] LIU Jian-xun, YANG Jian-ping, CHEN Mei-rong, et al. Effect of SiO₂, Al₂O₃ on heat resistance of basalt fiber [J]. Thermochimica Acta, 2018, 660: 56 - 60.

[13] 黄浩,孙志坚,李鹏程,等. 蓄热式波纹板孔隙率影响(火用)损特性的研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(1): 31 - 37.

HUANG Hao, SUN Zhi-jian, LI Peng-cheng, et al. Study on the influence of porosity on exergy loss characteristics of regenerative corrugated plate [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(1): 31 - 37.

[14] ANDREOZZI A, BUONOMO B, PASQUA A D, et al. Heat transfer behaviors of parallel plate systems in sensible thermal energy storage [J]. Energy Procedia, 2017, 126: 107 - 114.

[15] 刘建勋,崔瀛,杨剑平,等. 玄武岩组分、矿物相对其高温熔融过程的影响[J]. 燕山大学学报, 2017, 41(4): 323 - 328.

LIU Jian-xun, CUI Ying, YANG Jian-ping, et al. Effects of basalt components and minerals on its high temperature melting process [J]. Journal of Yanshan University, 2017, 41(4): 323 - 328.

(姜雪梅 编辑)