

网格化低温相变储热单元传热性能预测研究

郭 泉^{1,2} 邱云峰¹ 王亚辉^{1,2} 史志国² 田 瑞^{1,2} 崔瑞军¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051;
2. 内蒙古自治区可再生能源重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘要: 设计了内流式网格化低温相变储热单元。确定了影响相变储热单元传热系数的关键影响因素, 分析了单一因素对相变储热单元传热系数的影响规律。分别在储热及放热工况下, 采用改进的多元非线性回归法构建了相变储热单元传热系数的预测模型, 并检验了拟合误差。结果表明: 相变储热单元传热系数受相变储热材料侧平均温度及换热工质侧定性温度的协同影响, 相变储热材料侧平均温度为主要影响因素, 换热工质侧定性温度为次要影响因素, 两者之间具有显著的交互性。储热或放热工况下, 相变储热单元传热系数随单一因素的变化规律基本一致, 储热阶段传热系数明显高于放热阶段, 相变储热单元传热系数预测模型的平均相对预测误差均小于 5.00%。

关键词: 网格化; 相变储热; 传热系数; 影响因素; 非线性回归; 预测模型

中图分类号: TK513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0384-08 OSID: 

Prediction of Heat Transfer Performance of Gridding Low Temperature Phase Change Heat Storage Unit

GUO Xiao^{1,2} QIU Yunfeng¹ WANG Yahui^{1,2} SHI Zhiguo² TIAN Rui^{1,2} CUI Ruijun¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Renewable Energy, Huhhot 010051, China)

Abstract: The low temperature phase change heat storage unit with tubular internal flow gridding was designed. The key factors affecting the heat transfer coefficient of the phase change heat storage unit were determined, and the influence of single factor on the heat transfer coefficient of phase change heat storage unit was analyzed. In the case of heat storage and heat release, the prediction model of heat transfer coefficient of the phase change heat storage unit was established by using the improved multivariate nonlinear regression method, and the fitting error was tested. The results showed that the heat transfer coefficient of the phase change heat storage unit was synergistically influenced by the average temperature of the phase change heat storage material side and the qualitative temperature of the heat transfer working medium side. The average temperature of phase change heat storage material side was the main influencing factor, the qualitative temperature of heat transfer medium side was the secondary influencing factor. And there was significant interaction between the above two. In the case of heat storage or heat release, the change law of heat transfer coefficient of phase change heat storage unit with single factor was basically consistent, the heat transfer coefficient in the heat storage stage was obviously higher than that in the heat release stage. The average relative errors of the prediction model of heat transfer coefficient of phase change heat storage boxes were all less than 5.00%. Based on this study, the intelligent phase change constant temperature system configuration in agricultural greenhouses could be guided and optimized.

Key words: gridding; phase change heat storage; heat transfer coefficient; influence factors; nonlinear regression; prediction model

收稿日期: 2021-03-26 修回日期: 2021-05-28

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS05030)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY21323、NJZY19081)和内蒙古工业大学大学生创新实验计划项目(2020)

作者简介: 郭泉(1987—),男,实验师,主要从事太阳能高效利用及传热传质强化研究,E-mail: guoxiao1196@163.com

通信作者: 田瑞(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事传热传质强化和能源利用研究,E-mail: tianr@imut.edu.cn

0 引言

我国北方寒冷地区农业温室大棚内部维持恒温是提高温室大棚产量的关键措施,将“太阳能+”制热技术应用于农业温室大棚智能恒温系统,具有明显的节能减排优势。储热可保证能源利用过程的连续性 & 稳定性,是提高农业温室大棚内太阳能利用率的重要途径,相变材料潜热储热具有热储存密度高、近等温储放热等特点^[1-4],故相变储热技术在可再生能源利用等领域^[5-9]具有广阔的应用前景。相变储热装置传热系数是决定其储/放热速度及放热效率的关键因素之一,准确预测特定储热装置的传热系数,对指导优化农业温室大棚智能相变恒温系统配置具有重要意义。

国内外相关学者针对储热装置传热性能及相变储热材料强化传热技术进行了诸多分析研究^[10-12]。文献[13]研究发现相变微胶囊内部均匀混合石墨烯可显著增大其导热系数,进而改善储热装置传热性能。文献[14]测定了叉排石蜡管束储热系统的传热系数及放热效率。文献[15]改善了石蜡的导热性能,扩展了石蜡在储热领域的应用范围。文献[16]选用高导热系数材料作为添加剂,提高了换热流体与相变储热材料间的导热系数,缩短了储放热时长。文献[17]研究了周列壳管式储热装置,分析了石蜡储放热过程的传热性能。文献[18]对壳管式储热单元体进行了传热分析,得到了储/放热过程中特征温度、传热管特征尺寸、换热时长、换热量等变量的变化曲线。文献[19]研究了螺旋翅片对立式管壳式潜热储热装置充/放热速率的影响,并测试了强化传热效果。文献[20]总结了提高相变储热装置导热系数的试验和数学研究方法,为优化相变储热装置传热性能提供了方法参考。文献[21]采用优化装置几何结构和提高导热系数方法,强化了潜热储热装置传热性能。文献[22]针对多孔泡沫金属/石蜡复合材料在固液相变时的热传输过程,分析了多孔泡沫结构对储热装置传热特性及热调控性能的影响。文献[23]研究了 SiO₂ 和 CeO₂ 杂化纳米粒子对聚醚基相变材料热物理特性的影响。

综上所述,当前主流的强化传热形式主要有翅片传热管、多壳管、微胶囊、插入金属基体及均匀掺杂高导热性粒子等,对储热装置传热性能的研究主要集中在传热系数测定及传热性能强化效果表征两方面,鲜见相变储热装置传热系数的预测研究。本文采用试验研究、理论研究及统计分析相结合的研究方法,设计内流式网格化的低温相变储热单元,基于 SPSS 软件采用改进的多元非线性回归法构建储

热装置传热系数预测模型,并分析预测误差,进而指导优化农业温室大棚智能相变恒温系统配置。

1 理论计算

1.1 传热系数计算

相变储热单元包括换热工质侧、热交换器及相变储热材料侧 3 个特征传热区。相变储热单元的传热系数 k 由换热工质侧对流换热系数、热交换器导热系数及相变储热材料侧换热系数共同决定,反映相变储热单元储放热过程的传热性能,传热系数 k 计算公式为

$$k = \frac{q}{\Delta T}$$

(1)

其中

$$q = \frac{c_p q_m |T_{out} - T_{in}|}{A}$$

(2)

$$\Delta T = |T_m - \bar{T}|$$

(3)

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

(4)

$$\bar{T} = \frac{\sum_{x=1}^{\sigma} \sum_{y=1}^r T_{xy}}{\sigma r}$$

(5)

- 式中
- q ——热交换器热流密度, W/m^2
- ΔT ——热交换器两侧平均温差, $^{\circ}C$
- c_p ——换热工质定压比热容, $J/(kg \cdot K)$
- q_m ——换热工质设计循环质量流量, kg/s
- T_{out} ——热交换器出口处换热工质温度, $^{\circ}C$
- T_{in} ——热交换器进口处换热工质温度, $^{\circ}C$
- A ——热交换器总换热面积, m^2
- T_m ——换热工质侧定性温度,取为换热工质平均温度, $^{\circ}C$
- $\bar{T}$ ——相变储热材料侧平均温度, $^{\circ}C$
- T_{xy} ——相变储热材料侧测温点 (x, y) 处的实测温度, $^{\circ}C$
- y ——纵向测温点序号
- x ——横向测温点序号
- σ ——横向测温点数量
- r ——纵向测温点数量

1.2 传热系数与换热工质侧循环流量的关系

换热工质侧对流换热系数受该侧定性温度及换热工质循环流量的共同影响。热交换器导热系数在换热过程中近似恒定。相变储热材料侧换热系数由相状态及该侧平均温度共同决定,而相状态的变化直接表现为相变储热材料侧平均温度的改变,故换热工质循环流量对相变储热单元传热系数有一定影响,主要影响对流传热系数。因低温相变储/放热过程的换热工质温度均较低,故可忽略温度对换热工

质定压比热容、动力粘度及密度的影响,即对流传热系数与流量的对应函数关系为

$$k_{ch} = \beta q_m^{0.8} \tag{6}$$

式中 k_{ch} ——换热工质侧对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 β ——决定系数,由换热工质类型及换热管特征尺寸决定

由式(6)可知,换热工质侧对流传热系数与循环质量流量呈近似线性正相关关系变化,而相变储热单元传热系数与换热工质侧对流传热系数也为正相关关系,故热交换器内部换热工质循环质量流量取为实际上限值时,可实现最优储/放热效果。

1.3 改进的多元非线性回归模型建立方法

基于传统多元线性回归法及大量实测数据,采用以下改进的多元非线性回归模型建立方法,获取相变储热单元传热系数 k 的预测模型。首先,采用比较法,选择 SPSS 统计软件中所有的曲线模型进行回归分析,构建传热系数 k 与各相关自变量间的最佳一元非线性回归模型(决定系数 R^2 最大);其次,通过最佳回归模型组及实测数据获得相关自变量 n 对应的初级预测传热系数 k_n 的数据集,初级传热系数 k_n 与传热系数 k 线性相关,自变量之间无明显的线性相关性;最后,将 k_n 集和实测 k 集进行多元线性回归,进而得到相变储热单元传热系数 k 的多元非线性预测模型。

当相变储热单元换热工质以设计循环质量流量在热交换器内部恒定流动时,相变储热单元传热系数主要受换热工质侧定性温度及相变储热材料侧平均温度的影响。相变储热材料侧平均温度对应的初级传热系数为 k_1 ,换热工质侧定性温度对应的初级传热系数为 k_2 ,并进行回归分析^[24-26],可建立相变储热单元传热系数 k 的多元线性预测模型,再将 k_1 、 k_2 的最佳非线性模型代入 k 的多元线性回归结果,可获得 k 的多元非线性预测模型。

k 的多元线性预测模型可设为

$$k_i = a_0 + a_1 k_{1i} + a_2 k_{2i} + u_i \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{7}$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 ——待估回归系数

m ——样本容量 u_i ——随机误差

假设随机误差的总体分布服从 $N(0, \sigma^2)$ 且相互独立,并在 X 、 Y 的观测样本下采用最小二乘法估计待估回归系数,将式(7)写为

$$Y = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & k_{11} & k_{21} \\ 1 & k_{12} & k_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & k_{1m} & k_{2m} \end{bmatrix}$$

$$B = [a_0 \quad a_1 \quad a_2]^T \quad u = [u_0 \quad u_1 \quad \cdots \quad u_m]^T$$

由矩阵表示的多元线性回归模型为

$$Y = XB + u \tag{8}$$

采用最小二乘法估计总体回归系数,估计量的计算公式为

$$B_{LB} = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{9}$$

分别采用 F 检验和 t 检验对回归方程和回归系数进行显著性检验。

2 测试系统与试验方案

2.1 测试装置

针对网格化低温相变储热单元传热性能预测开展研究,相变储热单元由网格化热交换器、相变储热材料封装与保温维护结构、相变储热材料 3 部分组成,网格化热交换器内部为换热工质侧(内流),热交换器与维护结构之间填充相变储热材料。温室大棚的恒温目标为 $12 \sim 22^\circ C$,故相变储热材料选为 58 号半精炼石蜡,相变温度范围 $52.0 \sim 58.0^\circ C$,液相密度为 0.88 g/mL ,固相密度为 0.84 g/mL ,固转液膨胀率为 10.00% ,导热系数为 $0.21 \text{ W}/(m \cdot K)$,比热容为 $3.22 \text{ J}/(g \cdot K)$,相变吸热焓为 163.09 J/g ,相变放热焓为 162.9 J/g 。考虑经济性和易获取性,换热工质选为水。如图 1 所示,网格化热交换器由蛇形不锈钢换热盘管垂直交叉分层(10 层)串接而成,考虑加工工艺及材料强度,选取内径为 6 mm 、壁厚为 1 mm 的 304 不锈钢细管,垂直层间距及盘管间距等长,共构建 729 个边长为 25 mm 的储热网格,储热网格同层相邻管内换热流体保持逆向流动,网格化热交换器换热面积为 0.88 m^2 。储热空间网格化及换热流体流动逆向化,提高了相变储热单元的有效填充率,并改善了其传热性能。网格化热交换器外壁与相变储热材料直接接触,隔离了换热工质与相变储热材料,相变储热材料侧填充 58 号半精炼石蜡(48 kg),外部由相变储热材料封装与保温维护结构密封,形成长方体型相变储热单元,长、宽、高分别为 350 、 310 、 600 mm ,容积为 0.065 m^3 。

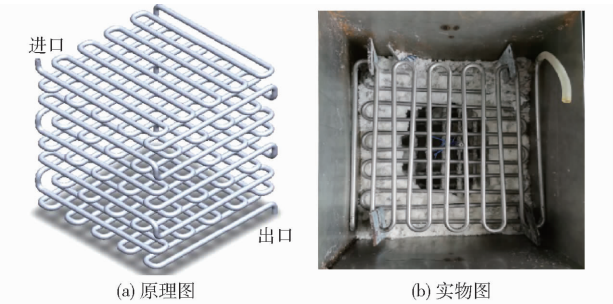


图 1 网格化热交换器

Fig. 1 Gridding heat exchanger

实际应用时依据设计储热量、换热工质循环质量

流量及储热装置理论进出口温差,可将多个储热单元串联为储热体,再将多个储热体串/并联组成储热装置。

图 2 为网格化低温相变储热单元的测温点分布图。因换热工质进出口分别布置在顶部和底部,且分别在体对角线的两个顶点处,故储热网格所对应的换热工质平均温度存在较大差异,如图 2a 所示,为准确表征储热材料侧的平均温度,在低温相变储热单元 y 向均匀布置 5 个测温层 (A/Bn1、A/Bn2、A/Bn3、A/Bn4、A/Bn5),各测温层均位于所在储热网格垂直高度中心平面处。如图 2b 所示,每个测温层分为侧部区和内部区,侧部区在对应储热网格中心处布置 4 个测温点 (B1、B2、B3、B4)。内部区在对应储热网格中心处布置 4 个测温点 (A1、A2、A3、A4),相变储热材料侧共布置 40 个测温点。

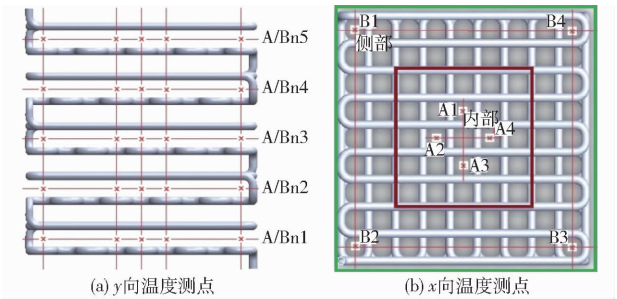


图 2 温度测点布局图

Fig. 2 Layout diagrams of temperature measuring points

2.2 仪器及仪表

本研究所涉及仪器及仪表的主要规格及技术参数如表 1 所示。

表 1 仪器及仪表的主要规格和技术参数
Tab.1 Main specifications and technical parameters of instruments and meters

名称	型号	量程/采样频率	精度
一等标准水银温度计	透明棒式	0 ~ 150.0℃	±0.1℃
电子天平	JA31002	50 kg	0.1 g
玻璃转子流量计	LZB-15	400 L/h	20 L/h
数据采集器	TP700	10 s/次	±0.2%
温度传感器	K	0 ~ 150.0℃	±0.1℃

2.3 测试方案

测试在室内进行,试验时关闭试验系统附近门窗及室内电气设备,保证无风及恒温测试环境。以下为具体测试方案:

(1)搭建试验系统:如图 3 所示,试验系统包括储热环路及放热环路,通过三通阀 3 和三通阀 7 切换储/放热环路。储热环路由恒温水箱 (20 ~ 100℃)、玻璃转子流量计、循环泵、Y 型过滤器、球阀、低温相变储热单元、K 型点状温度传感器及 TP700 型数据采集器组成,恒温水箱为低温相变储

热单元提供设定温度区间的热源,循环泵驱动换热工质循环,球阀和玻璃转子流量计用于调节和显示循环流量,共布置 42 支 K 型点状温度传感器,低温相变储热单元进、出口各布置 1 支温度传感器。放热环路由缓冲水箱、散热装置、玻璃转子流量计、循环泵、Y 型过滤器、球阀、低温相变储热单元、K 型点状温度传感器及 TP700 型数据采集器组成,散热装置及缓冲水箱为低温相变储热单元散热过程提供设定温度区间的冷源,其余功能同储热环路。

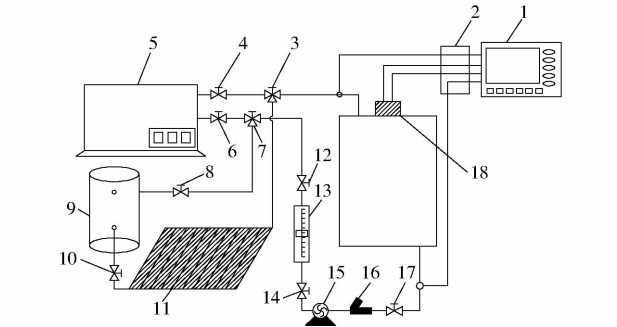


图 3 测试原理图
Fig. 3 Test schematic

- 1. TP700 型数据采集器 2. K 型点状温度传感器 3、7. 三通阀
- 4、6、8、10、12、14、17. 球阀 5. 恒温水箱 9. 缓冲水箱 11. 散热装置
- 13. 玻璃转子流量计 15. 循环泵 16. Y 型过滤器
- 18. 低温相变储热单元

(2)K 型点状温度传感器标定:将一等标准水银温度计与 K 型点状温度传感器同时放入恒温水浴,在 10 ~ 80℃ 范围内间隔 5.0℃ 记录各温度实测值,以一等标准水银温度计显示值作为实际温度,标定各温度传感器,以确保测温准确性。

(3)低温相变储热单元储热性能测试:操作三通阀 3 和三通阀 7,将试验系统切换至储热环路,调节球阀 14,将换热工质循环质量流量调节至 135 L/h (热交换器内径为 6 mm 时匹配的上限流量),恒温水箱提供 58 ~ 60℃ (模拟非聚光型太阳能集热系统集热温度范围) 及 65 ~ 72℃ (模拟聚光型太阳能集热系统集热温度范围) 区间的低温相变储热箱进口温度,储热期间实时监测并记录相变储热材料侧各测点及网格化热交换器进出口温度,储热试验在相同工况下重复 3 次,各测点温度数据取 3 次平均值。

(4)低温相变储热单元放热性能测试:操作三通阀 3 和三通阀 7,将试验系统切换至放热环路,调节球阀 14,将换热工质循环流量调节至 135 L/h,缓冲水箱及散热装置提供 38 ~ 45℃ 区间的低温相变储热箱进口温度,放热期间实时监测并记录相变储热材料侧各测点及网格化热交换器进出口温度,放热试验在相同工况下重复 3 次,各测点温度数据取 3 次平均值。

3 结果与分析

3.1 相变储热单元传热系数变化规律分析

将测试数据代入式(1)~(5),可获得储/放热阶段低温相变储热单元传热系数随特征温度的变化曲线。由图4可知,储热阶段传热系数随相变储热材料侧平均温度和换热工质侧定性温度的变化规律基本一致,均存在两个明显的转折点,两个转折点之间是传热系数快速增大区,主要受相变储热材料相态影响,换热工质定性温度是次要影响因素。该温度区间是相变储热材料固-液两相区,相变储热材料侧传热方式是导热及自然对流混合换热,相变储热材料侧平均温度越大其液相率越高,对流传热强度越大,传热系数随相变储热材料侧平均温度的增大而显著增大。转折点两侧是传热系数平稳区,高温侧相变储热材料是单独液相,传热方式是对流传热,故相变储热单元传热系数达到了较稳定的峰值区。低温侧相变储热材料是单独固相,传热方式是导热,故相变储热单元传热系数达到较稳定的谷值区。放热阶段传热系数随相变储热材料侧平均温度和换热工质侧平均温度的变化规律也基本一致,均存在一个明显的转折点,转折点右侧相变储热材料为单独液相,网格化热交换器两侧传热方式均为对流传热,相变储热单元传热系数显著增大,主要受相变储热材料相态影响,换热工质侧定性温度为次要影响因素。转折点左侧为液-固转换区,当低温换热工质从网格化热交换器入口流入后,网格化热交换器外壁处的相变储热材料快速凝固,使得该处传热形式变为导热,随着放热时长的延长,固-液界面不断向储热网格中心推移,直至相变储热材料完全凝固,故该温度区间为传热系数缓慢降低区。相变储热材料温度在48~63℃区间变化时,储热阶段传热系数变化

区间为80~140 W/(m²·K),放热阶段传热系数变化区间为25~90 W/(m²·K),储热阶段传热系数明显高于放热阶段,究其原因为:储热开始后,网格化热交换器外壁传热形式由导热快速变为自然对流传热,并不断向储热网格中心推移,直至全部融化,传热强度明显增大。而放热阶段相态及传热形式的转变与储热阶段相反,传热强度明显减小。

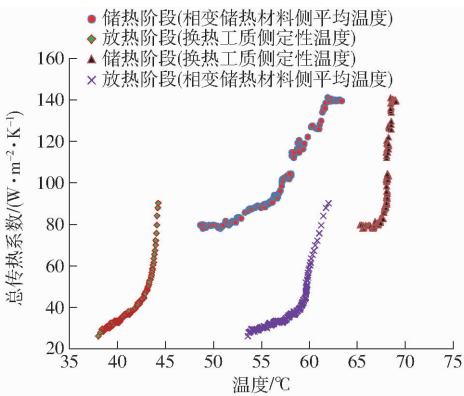


图4 相变储热单元传热系数随特征温度的变化曲线
Fig.4 Change curves of heat transfer coefficient of phase change heat storage unit with characteristic temperature

3.2 相变储热单元初级传热系数最佳回归模型

由表2可知,统计量所对应各模型的相伴概率均小于0.001 0,故所有模型都通过了显著性检验(*F*检验),具有统计学意义。

对比表2中储热阶段相变储热材料侧平均温度各曲线方程回归模型的决定系数 R^2 可知,二次曲线回归模型的 R^2 最大,二次曲线回归模型的系数分别为0.475 2、-46.509、1 200.7,故储热阶段相变储热单元初级传热系数 k_{s1} 与相变储热材料侧平均温度间的最佳回归模型为二次曲线方程

$$k_{s1}=0.475\,2\overline{T^2}-46.509\overline{T}+1\,200.7\quad(R^2=0.810\,0)$$

(10)

表2 回归模型统计

Tab.2 Regression model statistics

模型方程	相变储热材料侧平均温度回归				换热工质侧定性温度回归			
	R^2		Sig. 值		R^2		Sig. 值	
	储热	放热	储热	放热	储热	放热	储热	放热
线性	0.737 0	0.705 0	0.000 1	0.000 1	0.643 0	0.587 0	0.000 1	0.000 1
对数曲线	0.718 0	0.676 0	0.000 1	0.000 1	0.642 0	0.571 0	0.000 1	0.000 1
倒数曲线	0.697 0	0.648 0	0.000 1	0.000 1	0.640 0	0.554 0	0.000 1	0.000 1
二次曲线	0.810 0	0.676 0	0.000 1	0.000 1	0.645 0	0.745 0	0.000 1	0.000 1
三次曲线	0.807 0	0.676 0	0.000 1	0.000 1	0.645 0	0.756 0	0.000 1	0.000 1
复合曲线	0.713 0	0.853 0	0.000 1	0.000 1	0.718 0	0.810 0	0.000 1	0.000 1
幂函数曲线	0.697 0	0.834 0	0.000 1	0.000 1	0.718 0	0.796 0	0.000 1	0.000 1
S 形曲线	0.678 0	0.814 0	0.000 1	0.000 1	0.717 0	0.781 0	0.000 1	0.000 1
增长曲线	0.713 0	0.853 0	0.000 1	0.000 1	0.718 0	0.810 0	0.000 1	0.000 1
指数曲线	0.713 0	0.853 3	0.000 1	0.000 1	0.719 0	0.810 5	0.000 1	0.000 1
Logistic 曲线	0.713 0	0.853 0	0.000 1	0.000 1	0.718 0	0.810 0	0.000 1	0.000 1

对比表2中储热阶段换热工质侧定性温度各曲线方程回归模型的决定系数 R^2 ,指数曲线回归模型 R^2 最大,指数曲线回归模型的系数分别为2.739 9、0.052 4,故储热阶段相变储热单元初级传热系数 k_{s2} 与换热工质侧定性温度间的最佳回归模型为指数曲线方程

$$k_{s2}=2.739\,9\mathrm{e}^{0.052\,4T_m}\quad(R^2=0.719\,0)\quad(11)$$

对比表2中放热阶段相变储热材料侧平均温度各曲线方程回归模型的决定系数 R^2 ,指数曲线回归模型的 R^2 最大,指数曲线回归模型的系数分别为0.014 6、0.136 7,故放热阶段相变储热单元初级传热系数 k_{B1} 与相变储热材料侧平均温度间的最佳回归模型为指数曲线方程

$$k_{B1}=0.014\,6\mathrm{e}^{0.136\,7\bar{T}}\quad(R^2=0.853\,3)\quad(12)$$

对比表2中放热阶段换热工质侧定性温度各曲线方程回归模型的决定系数 R^2 ,指数曲线回归模型 R^2 最大,指数曲线回归模型的系数分别为0.031 6、0.173 9,故放热阶段相变储热单元初级传热系数 k_{B2} 与换热工质侧定性温度间的最佳回归模型为指数曲线方程

$$k_{B2}=0.031\,6\mathrm{e}^{0.173\,9T_m}\quad(R^2=0.810\,5)\quad(13)$$

3.3 相变储热单元传热系数多元非线性预测模型

3.3.1 储热阶段

将储热阶段相变储热材料侧平均温度代入式(10),可获得相变储热材料侧平均温度对应的初级传热系数 k_{s1} 数据集,将储热阶段换热工质侧定性温度代入式(11),可获得换热工质侧定性温度对应的初级传热系数 k_{s2} 数据集。将 k_s 、 k_{s1} 、 k_{s2} 数据集输入SPSS分析软件,进行多元线性回归分析,由表3可知,模型1的相关系数 R 和决定系数 R^2 均接近1,故该模型中相变储热单元传热系数与相变储热材料侧平均温度、换热工质侧定性温度间都存在较密切的线性相关性,总体回归效果均较好,可作为有效预测模型。

表3 回归模型1统计(储热阶段)

项目	统计值	<i>t</i>	Sig. 值
<i>R</i>	0.963 0		
R^2	0.927 0		
<i>F</i>	2 627.243 0		0.000 1
常数	-23.177	-14.747 0	0.000 1
k_{s1}	0.729	39.956 0	0.000 1
k_{s2}	0.575	25.751 0	0.000 1

当统计量 F 为2 627.243 0时,模型1的相伴概率小于0.001,故模型1通过了显著性检验(F 检验),具有统计学意义。

模型1中各回归系数的相伴概率均小于剔除因子的标准值(0.1),通过了 t 检验,故各系数都具有统计学意义。因此,储热阶段相变储热单元传热系数 k_s 的多元线性预测模型为

$$k_s=-23.177+0.729k_{s1}+0.575k_{s2}\quad(R^2=0.927\,0)\quad(14)$$

将式(10)、(11)代入式(14)可得

$$k_s=937.167-0.255\bar{T}^2+0.004\,6\bar{T}^3-1.325T_m^2+0.018\,8T_m^3\quad(15)$$

将式(15)输入OriginPro软件可得图5。图5中回归曲面等高线投影为椭圆形,故相变储热材料侧平均温度与换热工质侧定性温度的交互性显著,相变储热单元传热系数受相变储热材料侧平均温度及换热工质侧定性温度的协同影响,相变储热材料侧平均温度为主影响因素,换热工质侧定性温度为次影响因素。

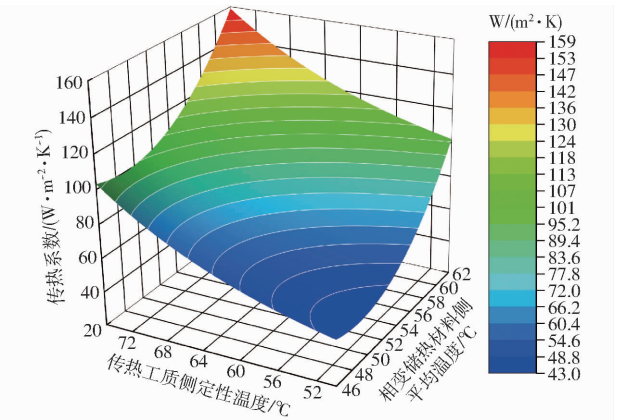


图5 储热阶段相变储热单元传热系数的多重非线性回归曲面

Fig.5 Multiple nonlinear regression surface of heat transfer coefficient of phase change heat storage unit in heat storage stage

3.3.2 放热阶段

将放热阶段相变储热材料侧平均温度代入式(12),可获得相变储热材料侧平均温度对应的初级传热系数 k_{B1} 数据集,将放热阶段换热工质侧定性温度代入式(13),可获得换热工质侧定性温度对应的初级传热系数 k_{B2} 数据集。将 k_B 、 k_{B1} 、 k_{B2} 数据集输入SPSS分析软件,进行多元线性回归分析,由表4可知,模型2的相关系数 R 和决定系数 R^2 均接近1,故该模型中的相变储热单元传热系数与相变储热材料侧平均温度、换热工质侧定性温度都存在较密切的线性相关性,总体回归效果均较好,可作为有效预测模型。

当统计量 F 为2 237.698 0时,模型2的相伴概率小于0.001 0,故模型2通过了显著性检验(F 检

表 4 回归模型 2 统计 (放热阶段)

Tab. 4 Regression model 2 statistics (heat release stage)

项目	统计值	<i>t</i>	Sig. 值
<i>R</i>	0.982 0		
<i>R</i> ²	0.965 0		
<i>F</i>	2 237.698 0		0.000 1
常数	12.774	32.296 0	0.000 1
<i>k</i> _{B1}	0.346	15.154 0	0.000 1
<i>k</i> _{B2}	0.220	10.976 0	0.000 1

验),具有统计学意义。

模型 2 中各回归系数的相伴概率均小于剔除因子的标准值(0.1),通过了 *t* 检验,故各系数都具有统计学意义。因此,放热阶段相变储热单元传热系数 *k_B* 的多元线性预测模型为

$$k_B = 12.774 + 0.346k_{B1} + 0.220k_{B2} \quad (R^2 = 0.965\ 0)$$

(16)

将式(12)、(13)代入式(14)可得

$$k_B = 12.774 + 0.010\ 93e^{0.173\ 9\overline{T}} + 0.003\ 21e^{0.173\ 9T_m}$$

(17)

将式(17)输入 OriginPro 软件可得图 6,图 6 中回归曲面等高线投影为椭圆形,故相变储热单元相变储热材料侧平均温度与换热工质侧定性温度的交互性显著,放热阶段相变储热箱传热系数受相变储热材料侧平均温度及换热工质侧定性温度的协同影响,相对换热工质侧定性温度而言,相变储热材料侧平均温度对传热系数的影响更明显。

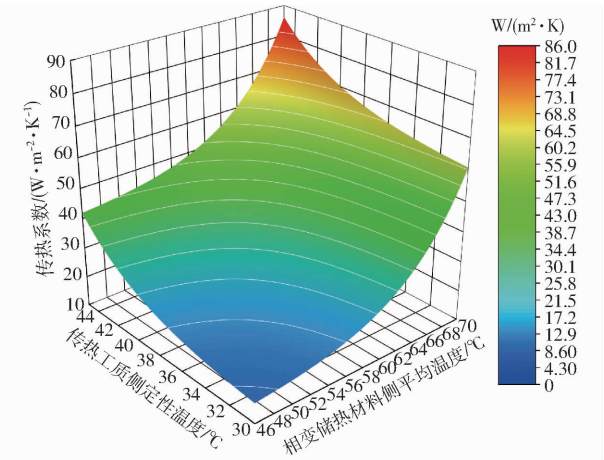


图 6 放热阶段相变储热单元传热系数的多重非线性回归曲面

Fig. 6 Multiple nonlinear regression surface of heat transfer coefficient of phase change heat storage unit in heat release stage

3.3.3 拟合误差检验

将相变储热单元传热系数实测值及对应预测值代入

$$\delta = \frac{|k_{Ni} - \hat{k}_{Ni}|}{k_{Ni}} \times 100\%$$

(18)

式中 *N*——相变储热箱运行状态,可取为 *S* 或 *B* 可获得预测结果的相对误差 δ 。由图 7 可知,储/放热过程相变储热单元传热系数预测误差分布规律相似,受相变储热材料侧温度均匀化速度规律影响,传热系数预测结果的相对误差均呈类 V 型规律分布。传热系数较大区间为单液相,传热系数较小区间为单固相,中部区间为固-液两相。单相区传热形式单一,单液相时为自然对流传热,相变储热材料侧温度分布均匀化速度最快。单固相区为导热传热,相变储热材料侧温度分布均匀化速度最慢,速度两极化导致出现诸多不可控的干扰因素,致使预测误差增大。

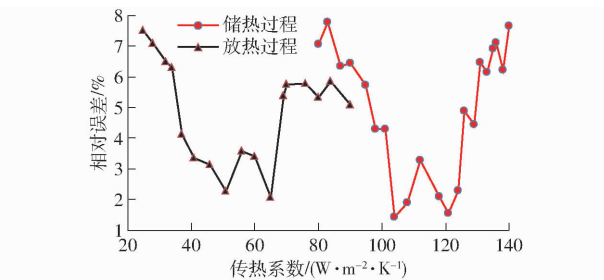


图 7 相变储热单元传热系数预测误差分布曲线

Fig. 7 Prediction error distribution curves of heat transfer coefficient of phase change heat storage unit

储热阶段,传热系数在 80 ~ 140 W/(m²·K) 范围内的预测误差均小于 8.00%,平均相对预测误差为 4.63%。放热阶段,传热系数在 25 ~ 90 W/(m²·K) 范围内的预测误差均小于 8.00%,平均相对预测误差为 4.85%,故平均相对预测误差均小于 5.00%,预测模型在一定范围内较可靠。

4 结论

- (1) 储热或放热阶段,相变储热单元传热系数随相变储热材料侧平均温度和换热工质侧定性温度的变化规律基本一致,均存在明显的转折点。相变储热材料温度在 48 ~ 63℃ 区间变化时,储热阶段传热系数明显高于放热阶段。
- (2) 相变储热单元换热系数受相变储热材料侧平均温度及换热工质侧定性温度的协同影响,相变储热材料侧平均温度为主影响因素,换热工质侧定性温度为次影响因素,两者之间具有显著的交互性。
- (3) 储/放热阶段相变储热单元传热系数预测模型的决定系数均接近 1,具有较好的预测精度。
- (4) 储/放热过程相变储热单元传热系数预测误差分布规律相似,相对误差随传热系数均按类 V 型规律变化,平均相对预测误差均小于 5.00%。

参 考 文 献

- [1] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 张跃锋. 能源危机及其对策[J]. 矿山机械, 2005, 33(11): 122 – 125.
- [3] QU S I, HAN J Q, SUN Z F, et al. Study of operational strategies for a hybrid solar-geothermal heat pump system[J]. Building Simulation, 2019, 12(4): 697 – 710.
- [4] 范立群, 周利, 刘泳, 等. 储热材料研究进展[J]. 枣庄学院学报, 2018, 35(2): 101 – 109.
FAN Liqun, ZHOU Li, LIU Yong, et al. Research progress of thermal storage materials[J]. Journal of Zaozhuang University, 2018, 35(2): 101 – 109. (in Chinese)
- [5] 王守涛. 蓄能式空调系统中有机相变材料的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [6] 梁立晓, 陈梦东, 段立强, 等. 储热技术在太阳能热发电及热电联产领域研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 8 – 15.
- [7] MONOAL S. Phase change materials for smart textiles: an over review[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(11): 1536 – 1550.
- [8] 李芑, 周沛, 仇中柱. 太阳能蓄热技术研究进展[J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 32(1): 73 – 77.
- [9] 李建明, 王浩, 胡艺馨, 等. 温室储热器隔热层与蓄热工质结构设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 329 – 337.
LI Jianming, WANG Hao, HU Yixin, et al. Structural design and performance analysis of thermal insulation layer and heat storage medium for greenhouse heat storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 329 – 337. (in Chinese)
- [10] KEMAL E, AYTUNC A, IBRAHIM D. Heat transfer analysis of phase change process in a finned-tube thermal energy storage system using artificial neural network[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(15): 3163 – 3175.
- [11] KAR I, CLF L, MS M. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(1): 53 – 77.
- [12] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. Numerical and experimental development of medium temperature thermal energy storage (erythritol) system for the hot side of LiBr/H₂O air conditioning applications[C] // World Renewable Energy Congress 2008, 2008.
- [13] LIU X H, DUAN J, YANG J H, et al. Hydrophilicity morphology and excellent adsorption ability of poly (vinylidene fluoride) membranes induced by graphene oxide and poly vinylpyrrolidone[J]. Colloids & Surface A Physicochemical & Engineering Aspects, 2015, 486(9): 172 – 184.
- [14] 甘雪菲, 何正斌, 伊松林, 等. 石蜡相变储热系统的放热效率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 222 – 225.
GAN Xuefei, HE Zhengbin, YI Songlin, et al. Heat release property of paraffin phase change heat storage system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 222 – 225. (in Chinese)
- [15] 谢望平, 朱冬生, 汪南, 等. 石蜡熔化蓄热的试验研究[J]. 广东化工, 2008, 35(1): 10 – 13.
- [16] MUHSIN M, LUISAF C, HARALD M, et al. Heat transfer enhancement of fatty acids when used as PCMs in thermal energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32(2): 135 – 143.
- [17] TRP A. An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell and tube latent thermal energy storage unit[J]. Solar Energy, 2005, 79(6): 648 – 660.
- [18] 李晓倩. 石蜡相变储热与转换系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
LI Xiaoqian. Research on phase change thermal energy storage and transition system with paraffin wax[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [19] DIGANT S M, BHAVESH V, MANISH K R, et al. Thermal performance augmentation in latent heat storage unit using spiral fin: an experimental analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31(10): 1 – 21.
- [20] AL-MAGHALSEH M, MAHKAMOV K. Methods of heat transfer intensification in PCM thermal storage systems: review paper, renew[J]. Energy Rev., 2018, 92(4): 62 – 94.
- [21] IBRAHIM N, SULAIMAN F A, RAHMAN S, et al. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review, renew[J]. Energy Rev., 2017, 74(1): 26 – 50.
- [22] YAO Y P, WU H Y. Thermal transport process of metal foam/paraffin composite (MFPC) with solid-liquid phase change: an experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179(10): 1 – 12.
- [23] PASUPATHI M K, ALAGAR K, STALIN P M J, et al. Characterization of hybrid-nano/paran organic phase change material for thermal energy storage applications in solar thermal systems[J]. Energies, 2020, 13(9): 5079 – 5095.
- [24] 李琳, 左其亭. 城市用水量预测方法及应用比较研究[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 6 – 10.
LI Lin, ZUO Qiting. Comparative research on predicting method and application for city water consumption[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(3): 6 – 10. (in Chinese)
- [25] 李林. 多元线性回归模型预测城市用水量[J]. 塔里木大学学报, 2007, 19(2): 40 – 42.
LI Lin. Application of the multiple linear regressions in forecasting city water consumption[J]. Journal of Tarim University, 2007, 19(2): 40 – 42. (in Chinese)
- [26] 王红强. 基于 SPSS 多元回归分析的原材料对混凝土裂缝的影响分析[J]. 云南水力发电, 2010, 26(4): 3 – 5.