

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-064-08

# 考虑热损失的相变水箱蓄热性能研究

赵 宁 曹晓玲 左培仙 李金伟

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘 要】** 相变水箱储热量大、储热密度高,被广泛应用于热能储存系统中。但在之前的水箱蓄热性能研究中很少关注到相变水箱的热损失,由于相变材料的存在,相变水箱的温度变化规律、热损失情况与普通水箱并不相同。因此建立了一维相变蓄热水箱传热数学模型,分析了相变温度、相变材料位置以及相变材料含量对静置状态下相变水箱热损失的影响。结果表明,添加相变材料可以减缓水箱内的温度下降,提高相变温度会导致水箱蓄热量减少,相变温度 55℃,静置结束时,相变水箱蓄热量较普通水箱提高 25.93%;相变材料位于中心时更有利于水箱热量的储存;相变材料含量越高,水箱的平均热损失系数越高。研究了静置状态下相变水箱的热损失情况,为后续优化相变水箱热设计提供了理论依据。

**【关键词】** 相变水箱;数值模拟;热损失

中图分类号 TK02 文献标志码 A

## Study on Thermal Storage Performance of Phase Change Water Tank Considering Heat Loss

Zhao Ning Cao Xiaoling Zuo Peixian Li Jinwei

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** Phase change water tanks with large heat storage capacity and high heat storage density are widely used in thermal energy storage systems. However, in previous studies on the thermal storage performance of water tanks, little attention has been paid to the heat loss of phase change water tanks. Due to the presence of phase change materials, the temperature change law and heat loss of phase change water tanks are different from those of ordinary water tanks. In this paper, a one-dimensional phase change water storage tank heat transfer numerical model is established, and the effects of phase change temperature, phase change material position and phase change material content on the heat loss of the phase change water tank under static state are analyzed. The results show that adding phase change materials can slow down the temperature drop in the water tank and increasing the phase change temperature will lead to a decrease in the heat storage capacity of the water tank. When the phase change temperature is 55℃, the heat storage of the phase change water tank is 25.93% higher than that of the ordinary water tank at the end of the static state. When the phase change material is located in the center of the tank, it is more conducive to the storage of heat in the water tank; The higher the content of phase change material, the higher the average heat loss coefficient of the water tank. This paper studies the heat loss of the phase change water tank under static state, which provides a theoretical basis for the subsequent optimization of the thermal design of the phase change water tank.

**【Keywords】** Phase change water tank; Numerical simulation; Heat loss

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3802704)

作者简介: 赵 宁 (1997.06-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1657682753@qq.com

通讯作者: 曹晓玲 (1984.08-), 女, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: caoxl@swjtu.cn

收稿日期: 2025-02-25

## 0 引言

随着全球能源需求的不断增加, 使用高效节能的储热技术成为了能源利用的研究重点<sup>[1]</sup>。太阳能转化为热能的效率高, 用途广泛<sup>[2]</sup>。然而, 太阳能资源的可用性与建筑物的热量需求之间存在时间上的不匹配。因此可以采用热能存储的方式, 通过转移热量来弥补不同时间段的差距。相变材料因其具有高的潜热储能能力, 在众多热能储存材料中颇具应用前景<sup>[3]</sup>。相变蓄热水箱储热量大, 储热密度高, 具有单位热存储体积更小的优点<sup>[4]</sup>, 因此使用相变蓄热水箱进行蓄热是非常可靠的。

在实际应用过程中, 蓄热水箱的热损失不可忽略, 国内外学者对水箱的热损失进行了相关研究。蓄热水箱热损失随着表面积/体积比降低而减少<sup>[5-7]</sup>。於慧姝等<sup>[8]</sup>提出, 在相同前提下, 球形水箱的漏热损失量最小。但考虑到实际情况, 采用圆柱形水箱更为合理。Fan 等<sup>[9]</sup>对高径比 5:1, 体积为 150L 的水箱进行了热损失分析, 在 76℃ 水温下, 测得水箱侧面、顶部、底部的热损失系数分别为 1.83W/K、0.19W/K 和 0.48W/K, 水箱总热损失系数为 2.51W/K。唐景春等<sup>[10]</sup>指出在保温过程中, 矩形蓄热水箱壁面的对流换热以及顶部检修口的漏热, 是蓄热水箱热损失多、散热大的位置。张广宇等<sup>[11]</sup>指出水箱散热量与水箱的体积和保温层厚度有关系, 当保温厚度在 200-300mm 范围内时, 既能保证较低的散热率, 也能控制成本。刘俊峰等<sup>[12]</sup>对相变水箱的热损失进行了模拟研究, 得到了热损失系数和熔盐温度的定量关系, 以及外部壁面热损失随时间变化的规律。李金平等<sup>[13]</sup>针对西北农村建筑建立了太阳能供暖系统, 提出蓄热水箱热损失主要发生在自然冷却阶段。Ding 等<sup>[14]</sup>提出在太阳能热水系统中应用 PCM 可以降低电辅助加热器的功耗和热损失; 在室外平均温度较高的区域, 添加 PCM 对于减少热损失更有效。上述研究多集中于普通水箱的结构、保温以及环境参数对水箱热损失的影响, 而相变水箱的温度变化、热损失过程与普通水箱并不相同。因此本文针对相变水箱静置条件下的热损失情况进行分析。

本文建立了一维相变水箱传热数学模型, 求解并验证了模型的准确性。在此基础上, 通过焓效率、热损失系数、蓄热效率等参数分析相变水箱中相变材料的相变温度、位置以及含量等对水箱静置过程

中热损失的影响。

## 1 相变水箱传热数学模型建立及求解

### 1.1 模型假设

通过一维能量微分方程对水和相变材料区域分别建模, 数学模型由水域模型、相变材料域模型和耦合迭代法组成, 水箱分层示意图如图 1 所示。假定相变蓄热水箱为圆柱体, 相变材料被水包围在内部, 模型中未考虑水箱壁面材料。忽略水和相变材料区域的径向传热, 因此假设位于同一层的水或相变材料具有相同温度, 假设水箱内部沿流动方向的流量分布均匀, 因此仅考虑能量方程, 模型采用有限体积法对计算域进行空间离散, 时间项采用隐式格式, 求解过程采用 TDMA 方法进行求解, 相变过程计算采用焓法。设定相变材料为定形材料, 因此不考虑相变材料内部的热对流。

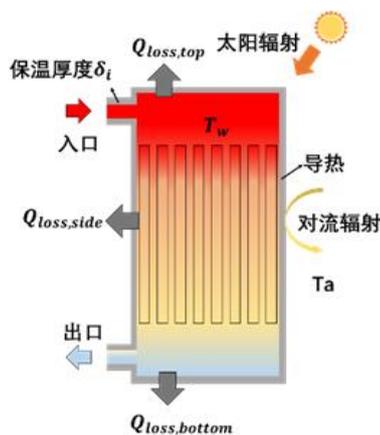


图 1 相变水箱热量传递过程

Fig.1 Heat transfer process of phase change water tank

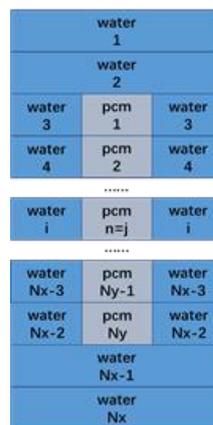


图 2 水箱节点划分

Fig.2 Water tank node division

1.2 控制方程

(1) 水区域

$$\frac{\partial \rho_w c_w T_w}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_w c_w u T_w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) +$$

$$h A_s (T_a - T_w) / V + K_{hl} A_{pw} (T_p - T_w) / V$$

式中： $\rho_w$  为水密度， $\text{kg/m}^3$ ； $c_w$  为水比热， $4180[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ ； $T_w$  为水温， $\text{K}$ ； $u$  为入口流速， $\text{m/s}$ ； $k$  为水导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $h$  为水箱与外界总换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； $T_a$  为环境温度， $\text{K}$ ； $K_{hl}$  为水与相变材料的换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； $T_p$  为相变材料温度， $\text{K}$ 。

(2) 相变材料区域

$$\frac{\partial \rho_p H_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + K_{hl} A_{pw} (T_w - T_p) / V$$

式中： $\rho_p$  为相变材料密度， $\text{kg/m}^3$ ； $H_p$  为相变材料焓值， $\text{J/kg}$ 。

由于焓是温度的函数，因此将焓项转换为温度项，系数如式 (4) 所示。

$$H_p = S_1 T_p + S_2$$

$$S1 = \begin{cases} c_s & T < T_{m1} \\ \frac{E_l}{T_{m2} - T_{m1}} & T_{m1} \leq T \leq T_{m2} \\ c_l & T > T_{m2} \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 0 & T < T_{m1} \\ c_s T_{m1} - \frac{E_l T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}} & T_{m1} \leq T \leq T_{m2} \\ c_s T_{m1} + E_l + c_l T_{m2} & T > T_{m2} \end{cases}$$

式中： $T_{m1}$ 、 $T_{m2}$  为相变材料温度； $E_l$  为相变潜热， $\text{J/kg}$ ； $c_s$ 、 $c_l$  为相变材料固相、液相比热，

$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

整理得相变区域的控制方程如 (5) 所示。

$$\frac{\partial \rho_p (S_1 T_p + S_2)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + K_{hl} A_{pw} (T_w - T_p) / V$$

(3) 初始条件和边界条件

初始条件为温度条件。

$$\begin{cases} T_w(x, t) |_{t=0} = T_{w0} \\ T_p(x, t) |_{t=0} = T_{p0} \end{cases}$$

水箱传热计算采用第三类边界条件。

$$\begin{cases} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{x=0} = h(T_f - T_{x=0}) \\ \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{x=Nx} = h(T_f - T_{x=Nx}) \end{cases}$$

1.3 数学模型求解

由于水箱传热模型为变系数的偏微分方程，因此采用有限体积法对上述数学模型进行离散，控制方程离散后可写成式 (8) 矩阵方程的形式。

$$\begin{cases} [A]_{n \times n} [T_w^{n+1}]_{n \times 1} = [C]_{n \times 1} \\ [B]_{n \times n} [T_p^{n+1}]_{n \times 1} = [D]_{n \times 1} \end{cases}$$

使用 MATLAB 软件编程求解上述数学模型，首先定义所有已知参数，确定时间和空间步长并对水箱内水和相变材料进行网格划分；在一个时间步长内，计算该时刻所有的温度。由于关于水和相变材料的方程组均为非线性方程组，系数矩阵与未知温度有关，因此将上一时刻的温度值作为预算值带入系数矩阵进行迭代计算，当目前迭代和上一次迭代结果的误差满足计算精度要求时，将当前迭代计算值作为该时刻结果，依次循环计算。

1.4 模型验证

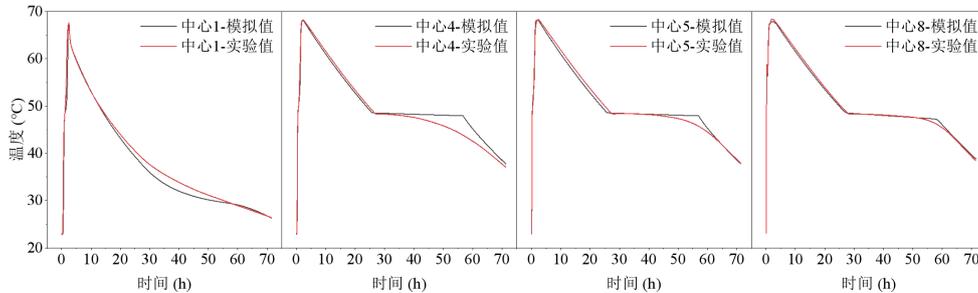


图3 相变水箱水温对比图

Fig.3 Comparison of water temperature inside the phase change water tank

为验证上述数学模型及计算程序的准确性，将 模拟计算结果与实验结果作对比，以证明数学模型

的准确性。选取水箱顶部（中心 8）、底部（中心 1）、中间（中心 4、5）4 个点作为水温对比，如图 3 所示。经计算，相变水箱水温实验与模拟结果的平均均方根误差和平均相对误差分别为 2.20 和 4.04%。考虑到数值模拟时假设和简化产生的误差以及由于实验设备及测量过程造成的偏差，认为模拟和实验的结果偏差在可接受的范围内，数值模拟所用模型能够较为真实的反映实际情况。

## 2 相变水箱蓄热性能参数

在相变水箱热损失的评估过程中，单一参数不能全面反映水箱的蓄热性能，为更加准确地评估相变水箱热损失，因此选取多个参数进行评价。

### (1) 焓效率

提供给相变水箱的焓的  $Ex_{in}$  和相变水箱出口的焓  $Ex_{out}$  可通过公式 (9) 计算。

固态

$$Ex_{pcm} = \sum_j m_{pcm,j} C_{p,s} \left( T_{pcm,j}(t) - T_{p,init} - T_0 \ln \frac{T_{pcm,j}(t)}{T_{p,init}} \right)$$

熔融状态

$$Ex_{pcm} = \sum_j m_{pcm,j} C_{p,s} \left( T_{m,s} - T_{p,init} - T_0 \ln \frac{T_{m,s}}{T_{p,init}} \right) + m_{pcm,j} E\beta \left( 1 - \frac{2T_0}{T_{m,s} + T_{m,l}} \right) \quad (12)$$

液态

$$Ex_{pcm} = \sum_j m_{pcm,j} C_{p,s} \left( T_{m,s} - T_{p,init} - T_0 \ln \frac{T_{m,s}}{T_{p,init}} \right) + m_{pcm,j} E_l \left( 1 - \frac{2T_0}{T_{m,s} + T_{m,l}} \right) + m_{pcm,j} C_{p,l} \left( T_{pcm,j}(t) - T_{m,l} - T_0 \ln \frac{T_{pcm,j}(t)}{T_{m,l}} \right)$$

焓效率定义为水箱中储存的总焓和热流体提供的焓之比<sup>[15]</sup>。

### (2) 热损失系数

$$u_{L,i} = - \frac{m_{w,i} c_w (T_{w,i}^{n+1} - T_{w,i}^n) + m_{p,i} (S_1^{n+1} T_{p,j}^{n+1} + S_2^{n+1} - S_1^n T_{p,j}^n - S_2^n)}{m_{w,i} (T_{w,i} - T_a) \Delta \tau} \quad (14)$$

### (3) 蓄热效率

蓄热效率定义为静置结束时水箱储存的热量与蓄热完成时水箱储存的热量之比，计算公式如式 (15) 所示。

$$\eta = \frac{Q_{\text{储存}}}{Q_{\text{输入}}} \times 100\% \quad (15)$$

$$Ex_{in} = \int_0^t \dot{m} C_p \left( T_{in} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{in}}{T_0} \right) dt \quad (9)$$

$$Ex_{out} = \int_0^t \dot{m} C_p \left( T_{out} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{out}}{T_0} \right) dt$$

式中： $T_{in}$  为入口温度，K； $T_{out}$  为出口温度，K； $T_0$  为参考温度，K。

相变水箱内的总焓等于 PCM 区域的焓和水区域的焓的总和。

$$Ex = Ex_{water} + Ex_{pcm} \quad (10)$$

相变水箱中水的焓计算公式如式 (11) 所示。

$$Ex_{water} = \sum_n m_{w,i} C_p \left( T_{w,i}(t) - T_{init} - T_0 \ln \frac{T_{w,i}(t)}{T_{init}} \right) \quad (11)$$

相变水箱中相变材料中的焓计算公式如式 (12) 所示。

$$\eta_c = \frac{Ex}{Ex_{in} - Ex_{out}} \quad (13)$$

## 3 影响因素研究

在明确热损失评价参数的基础上，需进一步探讨相变材料在水箱静置过程中发挥的作用，因此选取相变温度、相变材料位置、相变材料含量为影响因素进行相关分析。

### 3.1 相变温度

保持其他参数一致，分别选取相变温度为

50℃、55℃、60℃的相变材料进行水箱传热过程模拟，水箱内温度分布图如图 4 所示。

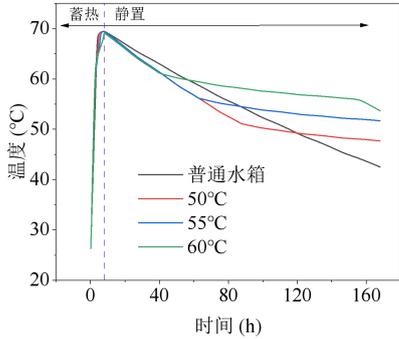


图 4 不同相变温度水箱平均温度变化图

Fig.4 Average temperature variation inside the tank at different phase change temperatures

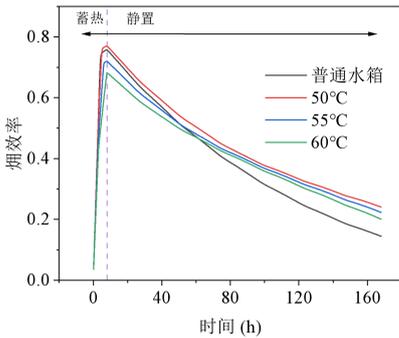


图 5 不同相变温度水箱焓效率图

Fig.5 Exergy efficiency of tank at different phase change temperatures

由图 4 可知，蓄热完成后，水箱温度逐渐下降，在发生相变前，相变水箱温降速率高于普通水箱，是因为相变材料比热容小于水，在热损失量相同的情况下，相变水箱的温度下降更快。当相变材料释放潜热后，水箱温度维持在相变温度附近。可以看出，在 156h 相变温度为 60℃的水箱已完成相变。到静置结束，相变温度为 55℃的水箱潜热释放接近尾声，50℃的水箱仍有部分潜热未释放完，因此应选取合适的相变温度以便更多利用相变潜热。

由图 5 可知，不同相变温度对应的焓效率不同。相变温度高的水箱在蓄热时与环境温差大，能量散失多，焓效率低。当水箱开始静置后，焓效率呈现下降趋势，普通水箱焓效率下降相对更快，在后期处于较低水平。静置前期，相变水箱与外界环境温差大，水箱温度下降快，因此焓效率下降快，当相变材料释放潜热后，水箱温度维持在相变温度附近，水箱温降变缓，焓效率下降变缓。

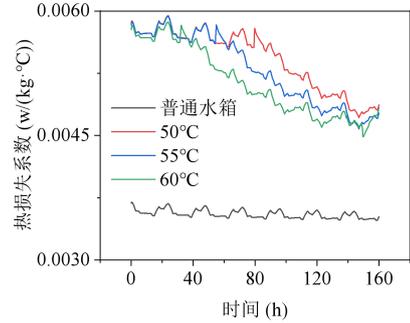


图 6 不同相变温度水箱平均热损失系数图

Fig.6 Average heat loss coefficient of tanks at different phase change temperatures

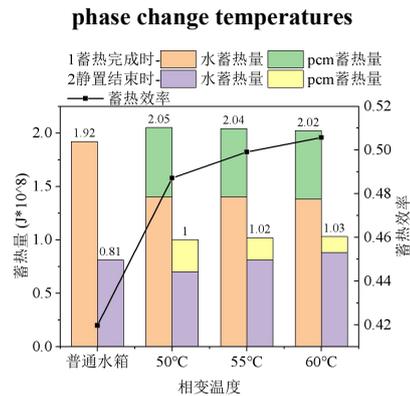


图 7 不同相变温度水箱蓄热量、蓄热效率图

Fig.7 Heat storage and heat storage efficiency of tank at different phase change temperatures

由图 6 可知，水箱平均热损失系数随环境变化而波动，相变水箱的平均热损失系数均高于普通水箱。普通水箱只有显热，与外界环境换热相对稳定，波动小。在相变材料释放潜热前，不同相变温度的水箱平均热损失系数相差不大，当相变材料释放潜热后，水箱温降变慢，热损失系数逐渐降低。以相变温度 60℃为例，潜热释放完毕时，水箱的平均热损失系数降低到 0.0045W/(kg·°C)，随后逐渐上升。

由图 7 可知，相变温度升高，蓄热量略有降低，原因是蓄热过程中热水与相变材料温差小，换热效率低导致相变温度为 60℃的水箱蓄热量小于另外两种水箱。蓄热效率随相变材料温度升高而升高，说明相变温度高能更好储存热量。在静置过程中，虽然相变水箱的平均热损失系数大，但蓄热结束时热量高，所以在静置结束时相变水箱的蓄热量和蓄热效率高于普通水箱。相变温度为 55℃时，在静置结束时，相变水箱的蓄热量较普通水箱提高了 25.93%。为保证水箱的蓄热量并有效利用相变潜热，在后续计算中选取相变温度为 55℃。

### 3.2 相变材料位置

在相变材料质量相同的前提下, 探究相变材料位置对水箱焓效率、热损失系数等的影响。相变材料位置示意图如图 8 所示。

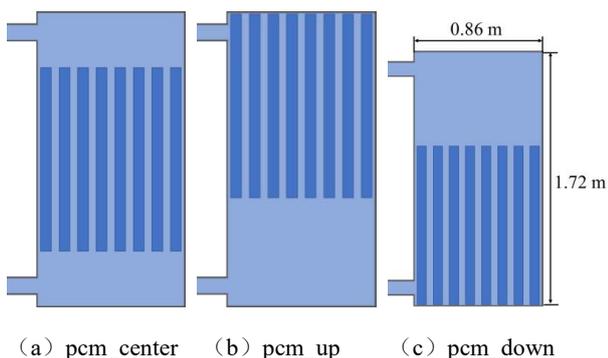


图 8 相变材料位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the location of phase change materials

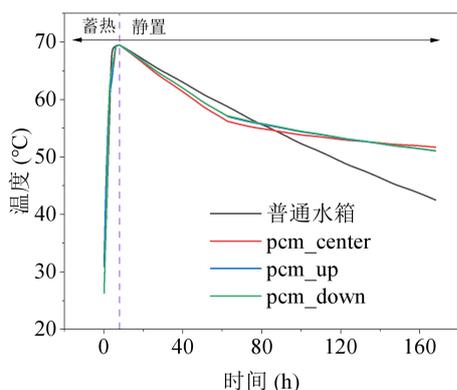


图 9 不同相变材料位置水箱平均温度图

Fig.9 Variation of average temperature inside the tank at different phase change material locations

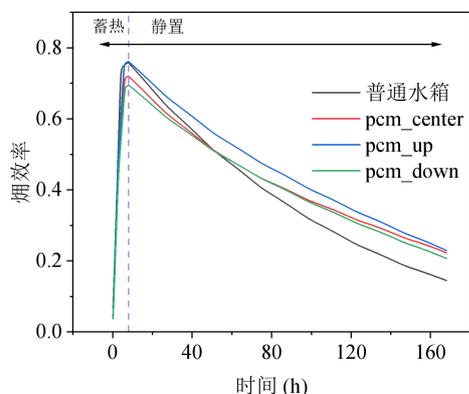


图 10 不同相变材料位置水箱焓效率图

Fig.10 Tank exergy efficiency diagram for different phase change material positions

由图 9 可知, 相变材料位置对水箱的平均温度影响较小, 但相变材料位于中心时, 降温略快于另两种水箱。在静置结束后, 相变水箱平均温度高出普通水箱约 9.2°C。由图 10 可知, 在蓄热完成时, 相变材料位于上部的水箱焓效率最大, 位于底部的焓效率最小。这是因为相变材料位于上部时, 相变材料直接与热水换热, 换热效率高, 焓效率高。因为相变水箱的焓效率下降速率小于普通水箱, 因此在 52h 后相变水箱焓效率均高于普通水箱。

由图 11 可知, 相变材料位置会影响水箱的平均热损失系数, 在 54h 后, 随着相变材料释放潜热, 水箱平均热损失系数逐渐降低, 相变材料位于中心时的热损失系数低于另外两种情况, 原因是相变材料位于中心时, 向上下两部分水体释放潜热, 但相变材料位于上部或下部时, 相变材料一部分向水体散热, 另一部分更靠近环境, 向环境释放更多潜热, 使得水箱的平均热损失系数更高。

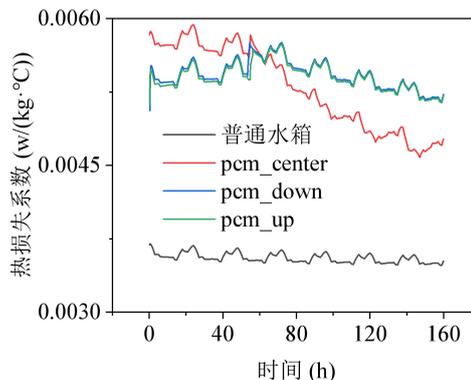


图 11 不同相变材料位置水箱平均热损失系数图

Fig.11 Average heat loss coefficient of tank at different phase change material positions

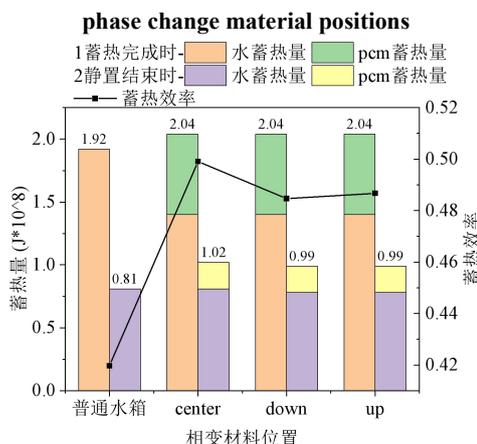


图 12 不同相变材料位置水箱蓄热量、蓄热效率图

Fig.12 Heat storage and heat storage efficiency of tanks at different phase change material positions

如图 12 所示，蓄热结束时相变材料位置不同的水箱蓄热量均达到了  $2.04 \times 10^8 \text{J}$ ，说明相变材料位置对蓄热量几乎不产生影响，但会影响蓄热效率，到水箱静置结束时，相变材料位于中心的水箱蓄热量最高为  $1.02 \times 10^8 \text{J}$ ，蓄热效率最高。结合图 10，相变材料位于上部或下部的水箱平均热损失系数高，热损失量大，因此相变材料位于中心的相变水箱热损失最小，蓄热效率最高，更有利于水箱的热量储存。

### 3.3 相变材料含量

分别选取相变材料体积占比为 30%、40%、50% 进行相变水箱传热过程模拟，水箱内部温度分布如图 13、图 14 所示。

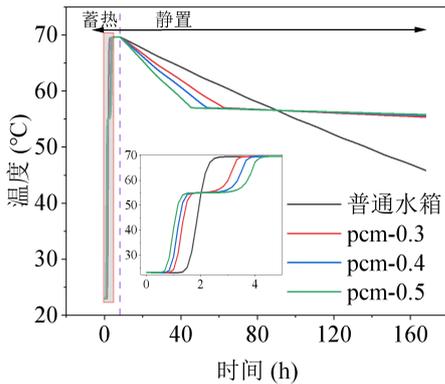


图 13 不同相变材料含量水箱中心温度图

Fig.13 Temperature at the center of the tank for different phase change material contents

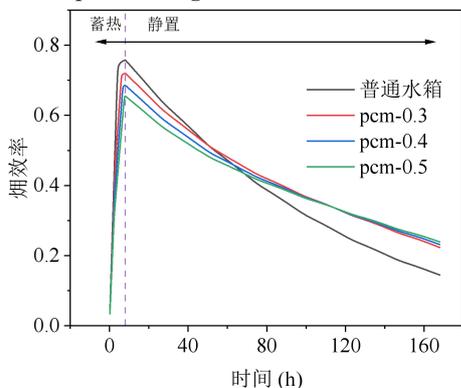


图 14 不同相变材料含量水箱焓效率变化图

Fig.14 Variation of exergy efficiency of tank with different content of phase change material

由图 13 可知，在蓄热阶段，相变材料含量越高，蓄热时间越长。随着相变材料含量增加，在静置初期水箱温降快，原因是相变材料含量越多，水箱整体的等效比热越小，在热损失相同的情况下，

水箱温度下降越快。当相变材料释放潜热后，相变水箱温度维持在相变温度附近，在 90h 后，不同相变材料含量的水箱温度均高于普通水箱，并维持到静置结束。由图 14 可知，相变材料含量越高，焓效率下降越慢，说明相变材料含量增加能够更好地维持水箱温度并减少热损失，使相变水箱焓效率下降变慢并在后期维持在较高水平。

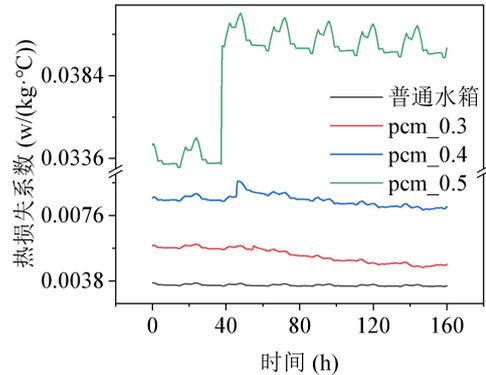


图 15 不同相变材料含量水箱平均热损失系数图

Fig.15 Average heat loss coefficient of tanks with different phase change material contents

由图 15 可知，相变材料含量越高，水箱的平均热损失系数越高，且在相变材料释放潜热后，平均热损失系数出现突增随后降低，原因是相变材料开始释放潜热时，虽然水箱内温度恒定，但相变材料放热速率快，导致热损失量增加，热损失系数出现突增；随着相变潜热释放，相变水箱温降变缓，平均热损失系数在相变阶段缓慢降低。

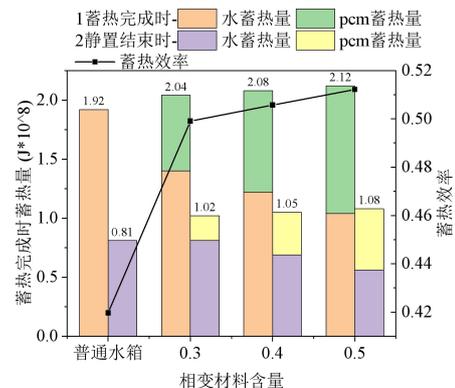


图 16 不同相变材料含量水箱蓄热量、蓄热效率图

Fig.16 Heat storage and heat storage efficiency of tanks with different phase change material contents

由图 16 可知，相变材料含量越高，在蓄热完成和静置结束时的蓄热量都越高，分别为  $2.12 \times 10^8 \text{J}$ 、 $1.08 \times 10^8 \text{J}$ ，同时蓄热效率也最高。这是因为在蓄热完成时，相变材料含量越高，储存潜热

越多,在静置过程中,相变材料释放的潜热能够减缓水温下降,减少水箱热损失,因此蓄热效率高。结合图15,相变材料含量越高,水箱的平均热损失系数越高,因此应根据实际情况选择合适的相变材料添加量。

#### 4 结论

本文在一维相变水箱传热模型建立的基础上,研究了相变材料相变温度、位置以及含量对水箱静置过程热损失的影响。主要结论有:

(1) 相变材料的相变温度不是越高越好,虽然相变温度高在水箱静置阶段能够有效地储存热量并减少水箱热损失,但相变温度升高会导致水箱的蓄热量减少,因此应选取合适的相变温度以平衡相变水箱的蓄热和静置过程,相变温度为 $55^{\circ}\text{C}$ 时,在静置结束时,相变水箱蓄热量较普通水箱提高25.93%。

(2) 相变材料位于水箱中心时,相变水箱热损失最小,蓄热效率最高,更有利于水箱的热量储存。

(3) 增加相变材料含量能够提高水箱的蓄热量和蓄热效率,但会延长蓄热时间,并导致静置状态下水箱的平均热损失系数增大,因此应根据实际情况选择合适的相变材料添加量。

#### 参考文献:

- [1] Wang L, Guo L, Ren J, et al. Using of heat thermal storage of PCM and solar energy for distributed clean building heating: A multi-level scale-up research[J]. *Applied Energy*, 2022,321:119345.
- [2] Liu H, Wang D, Jiao X, et al. Storage periods and heating terminals types influence on the solar heating thermal storage volume in the Tibetan Plateau regions[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023,66:107461.
- [3] Pielichowska K, Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage[J]. *Progress in materials science*, 2014,65:67-123.
- [4] Kong W, Lei Y, Jiang Y, et al. Preparation and thermal performance of polyurethane/PEG as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017,130:1011-1019.
- [5] Yang Z, Chen H, Wang L, et al. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification[J]. *Renewable Energy*, 2016,85:31-44.
- [6] Dahash A, Ochs F, Janetti M B, et al. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems[J]. *Applied energy*, 2019,239:296-315.
- [7] Liang F, Zhang Y, Liu Q, et al. Experimental study on thermal energy storage performance of water tank with phase change materials in solar heating system[J]. *Procedia Engineering*, 2017,205:3027-3034.
- [8] 於慧姝,陆春林,金苏敏.热泵热水器蓄热水箱的漏热损失分析[J].*流体机械*,2010,38(11):81-84.
- [9] Fan J, Furbo S. Buoyancy driven flow in a hot water tank due to standby heat loss[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(11): 3438-3449.
- [10] 唐景春,孟晓磊,张健.矩形水箱保温过程数值模拟与试验研究[J].*合肥工业大学学报:自然科学版*,2017,40(8):1026-1030.
- [11] 张广宇,曹颖,王岩,等.太阳能季节蓄热供暖系统蓄热水箱的研究与模拟计算[J].*暖通空调*,2019,49(3):91-96.
- [12] 刘俊峰,马少波.圆柱形相变储热器热损失的研究[J].*合肥工业大学学报(自然科学版)*,2016,39(4):457-461.
- [13] 李金平,刘润,崔维栋,等.西北地区太阳能采暖系统储热水箱热损失试验研究[J].*兰州理工大学学报*,2020, 46(4):67-72.
- [14] Ding Z, Wu W, Chen Y, et al. Dynamic simulation and parametric study of solar water heating system with phase change materials in different climate zones[J]. *Solar Energy*, 2020,205:399-408.
- [15] Sun B, Liu Z, Ji X, et al. Thermal energy storage characteristics of packed bed encapsulating spherical capsules with composite phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022,201:117659.