

## Research on internal structure optimization and energy storage characteristics of electric water heater

Li WU<sup>1</sup>, Jie HE<sup>1</sup>, Jinli LU<sup>1\*</sup>, Yafang HAN<sup>1</sup>, Ze HONG<sup>2</sup>

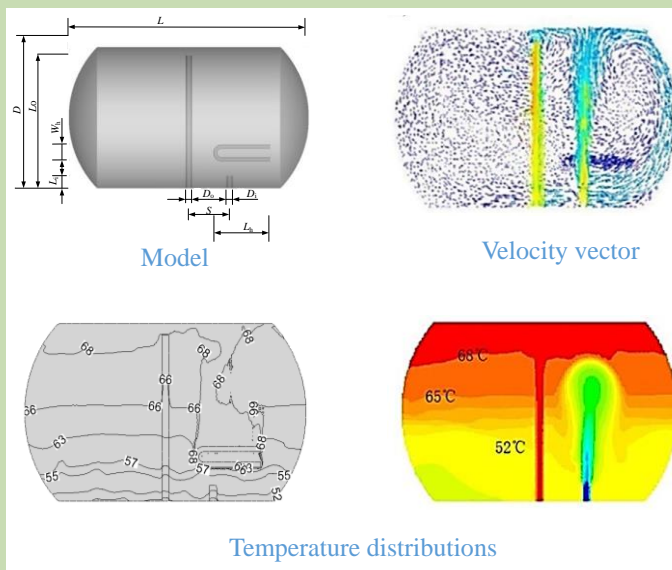
1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China

2. Wuhu Yijiang Haichuang High-tech Intelligent Air Conditioning Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241002, China

**Abstract:** The energy consumption of electric water heater in China has a large proportion of total energy consumption. Therefore, it is of great significance to optimize the energy consumption process of electric water heater. The phase change materials (PCM) have the characteristics of high energy storage density and approximately constant temperature in the process of phase transition. In addition, the thermal conductivity of phase change materials can be enhanced by adding nanometer materials such as graphite. Therefore, it has obvious advantages in heat energy storage and utilization of phase change materials. So, the phase change energy storage technology can be applied to electric water heater to adjust the energy storage process and the goal of "peak shifting" also can be achieved. In this work, the energy storage characteristic of energy storage water heater with phase change material were researched employing numerical simulation method. Four different structural models were established and the influent of inlet and outlet piping construction, electric heating tube arrangement, insulation structure on flow and heat transfer characteristics of water in water heater were discussed. And the influence of energy storage layer thickness on energy storage of electric water heater were researched. The results showed that, compared with the vertical heating tube, the water temperature distribution of horizontal heating tube was more uniform during heating process, and the heating efficiency was improved by about 2.2%. When the inlet tube diameter increased to 1.5 times, the output status of hot water can be excellent improved, and the hot water output efficiency can be increased 17.9%. The addition of phase change materials can increase the water temperature by 10.6% under the condition of same heat preservation time (36 h). The results of this study can provide data support for structural optimization of electric water heater and application of phase change energy storage technology.

achieved. In this work, the energy storage characteristic of energy storage water heater with phase change material were researched employing numerical simulation method. Four different structural models were established and the influent of inlet and outlet piping construction, electric heating tube arrangement, insulation structure on flow and heat transfer characteristics of water in water heater were discussed. And the influence of energy storage layer thickness on energy storage of electric water heater were researched. The results showed that, compared with the vertical heating tube, the water temperature distribution of horizontal heating tube was more uniform during heating process, and the heating efficiency was improved by about 2.2%. When the inlet tube diameter increased to 1.5 times, the output status of hot water can be excellent improved, and the hot water output efficiency can be increased 17.9%. The addition of phase change materials can increase the water temperature by 10.6% under the condition of same heat preservation time (36 h). The results of this study can provide data support for structural optimization of electric water heater and application of phase change energy storage technology.

**Key words:** electric water heater; phase-change thermal energy storage technology; numerical simulation; peak load shifting



收稿: 2020-06-28, 修回: 2020-08-21, 网络发表: 2020-09-21; Received: 2020-06-28, Revised: 2020-08-21, Published online: 2020-09-21

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(编号: 1508085QE95); 国家自然科学基金项目(编号: 51306002)

作者简介: 吴丽(1994-), 女, 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 供热、供燃气、通风及空调工程专业, E-mail: 1280350428@qq.com; 鲁进利, 通讯联系人, E-mail: lujinli@sina.cn.

**引用格式:** 吴丽, 何杰, 鲁进利, 等. 电热水器内部结构优化及储能特性研究. 过程工程学报, 2021, 21(7): 786-793.

Wu L, He J, Lu J L, et al. Research on internal structure optimization and energy storage characteristics of electric water heater (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(7): 786-793, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220206.

# 电热水器内部结构优化及储能特性研究

吴丽<sup>1</sup>, 何杰<sup>1</sup>, 鲁进利<sup>1\*</sup>, 韩亚芳<sup>1</sup>, 洪泽<sup>2</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032  
2. 芜湖弋江创高智能空调股份有限公司, 安徽 芜湖 241002

**摘要:** 将相变储能技术应用于电热水器, 并通过添加石墨纳米颗粒改善相变材料的导热特性, 对其储能过程进行调节, 可以起到“移峰填谷”的作用。建立了四种不同结构的电热水器三维模型, 模拟了电热水器内部速度场与温度场分布特性。考察了进出口水管结构、电加热管布置方式、保温层结构等因素对热水器内部流场及传热特性的影响, 研究了不同储能层厚度对电热水器储能的影响。结果表明, 水平加热管与垂直加热管相比, 加热过程中加热效率提高了2.2%; 进水管管径增大1.5倍, 热水输出率提升了17.9%; 加入相变材料可在相同保温时间内(36 h)使水温最大提高10.6%。

**关键词:** 电热水器; 相变材料储能技术; 数值模拟; 移峰填谷

**中图分类号:** TB34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2021)07-0786-08

## 1 前言

2018年度中国建筑节能年度发展研究报告表明, 建筑运行能耗占全国总能耗的20%<sup>[1]</sup>。其中, 电热水器能耗占20%~40%, 年耗电量达400~600亿kW·h<sup>[2]</sup>。因此, 优化电热水器内部结构, 利用相变储能技术, 调节电热水器的储能过程, 可以达到“削峰填谷”的作用, 具有明显的节能降耗意义。

近年来, 国内外学者在热水器储能特性方面开展了研究, 在热水流动温度分布方面, 得到了两个层流区之间的极限点, 即热传导及热传导与对流共存的区域<sup>[3]</sup>; 分析了温度分布和流动涡流明显分层的原因<sup>[4-6]</sup>; 在结构优化方面, 讨论了进水管、出水管结构尺寸、热水输出率、水箱内温度分布的影响<sup>[7-9]</sup>。目前, 储能技术的研究表明利用相变材料的潜热蓄能可有效提高能源利用率。鲁进利等<sup>[10]</sup>将有机相变材料微胶囊化并与水混合形成潜热型功能热流体用于细小槽道换热器内增强换热效果。Ma等<sup>[11]</sup>将复合氧化石墨烯的相变材料分散到水中形成高热导率、比热和吸光性能的悬浮液, 增强了太阳能直接吸收集热器的储能能力。张宇等<sup>[12]</sup>模拟研究了相变微胶囊悬浮液在槽式太阳能集热管内的热力性能, 发现相变微胶囊悬浮液可以强化对流传热。鲁进利等<sup>[13]</sup>对细小圆管内相变微胶囊悬浮液紊流对流传热特性研究表明, 由于相变材料的相变过程, 相变微胶囊悬浮液与水相比强化了传热能力。邹得球等<sup>[14]</sup>发现目前的研究大都围绕相变储能材料应用到太阳能热水器与热泵热水器开展研究, 且多将石蜡作为蓄能单元以减小储热单元的体积<sup>[15-17]</sup>。但相变材料(Phase Change

Material, PCM)多数采用石蜡, 其热导率较低, 可通过添加铝纤维<sup>[18]</sup>、石墨<sup>[19,20]</sup>、Cu纳米颗粒<sup>[21]</sup>等技术手段提高体系的热导率。

本工作以电热水器为研究对象, 通过改变进口水管结构、电加热管布置方式、保温层结构等方式研究了电热水器内温度场和流场分布、热水输出率、保温特性, 为相变蓄能型电热水器的应用提供数据支撑。

## 2 数理模型

### 2.1 物理模型

以储量50 L的电热水器为研究对象, 其简化后的几何模型及内部结构如图1所示, 主要部件为内胆、进水管、出水管和加热管。内胆长度 $L=590$  mm, 直径 $D=340$  mm, 加热管长度 $L_h=140$  mm, 宽度 $W_h=40$  mm, 进、出水管长度 $L_i$ 和 $L_o$ 分别为30和320 mm, 直径均为15 mm, 间距 $S=100$  mm。

电加热器加热管的布置决定其内部热水的温度分布, 进而影响其加热效率, 而进水流量取决于进水管管径, 从而影响热水器的热水出水速度。基于上述情况, 设计了四种电热水器结构方案, 如表1所示。

基于进水管和加热管的研究结果研究了含有PCM保温层对电热水器运行性能的影响。图2为添加PCM的电热水器模型。

### 2.2 数学模型

重点关注电热水器三个运行阶段: 加热过程、进出水过程和保温过程, 主要考察其运行时的热传导与热对流过程。当电热水器运行时, 内胆中的水除了因温度差

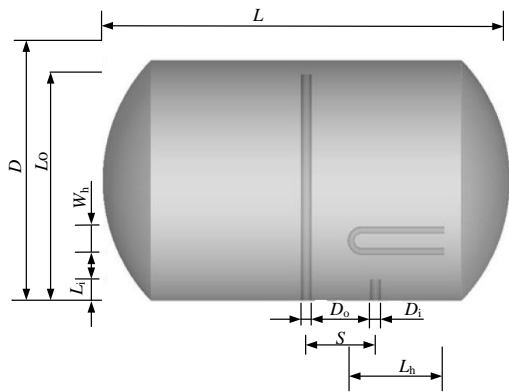


图1 电热水器内部结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of internal structure of electric water heater

表1 不同结构电热水器

Table 1 Different structure electric water heaters	
Case	Structure
1	Vertical heating tube+normal inlet pipe diameter
2	Horizontal heating tube+normal inlet pipe diameter
3	Vertical heating tube+1.5 times diameter of the inlet pipe
4	Horizontal heating tube+1.5 times diameter of the inlet pipe

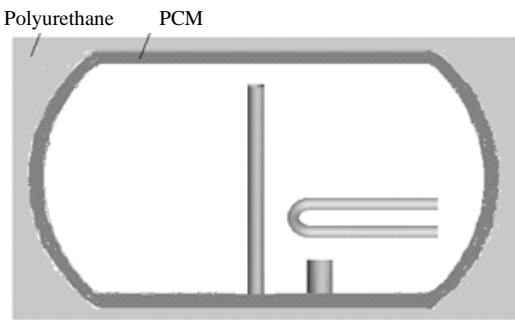


图2 含PCM的电热水器保温层示意图  
Fig.2 Schematic diagram of insulation layer of electric water heater with PCM

发生自然对流外,还由于进水过程出现强制对流。在进出水过程中,进水管附近由于进水的影响速度增大,影响了周围流体,也将周围的流体带入出口,造成强制对流。

假定热水器内介质为不可压缩、常物性流体,控制方程包括连续性方程、动量守恒方程及能量方程<sup>[7]</sup>,对于电热水器加热和进出水过程采用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行求解。对于含有相变材料的模拟过程,为使相变传热过程的模拟更接近实际,采用凝固-熔化模型处理带有模糊区域的相变传热过程。引入液相率 $\alpha$ 表示整个控制体积中液相所占的比例:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & (T < T_s) \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & (T_s < T < T_1) \\ 1, & (T > T_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T_s$ 和 $T_1$ 分别为融化起始温度和完全熔化温度(℃)。此外,为准确模拟相变过程,对方程中的源项进行了修正。

动量方程:

$$S_u = \frac{(1 - \alpha)^2}{(\alpha^2 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} u \quad (2)$$

能量方程:

$$S_n = \frac{\rho}{c_p} \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} \quad (3)$$

式中, $S_u$ 与 $S_n$ 分别为对应控制方程源项, $A_{\text{mush}}$ 为模糊区常数, $\varepsilon$ 为防止分母为0时的极小值,取0.001, $c_p$ 为定压比热容[J/(kg·K)], $\Delta H$ 为相变潜热(kJ/kg)。

对于模型方程组的求解,基于CFD软件,使用二阶迎风格式计算控制方程,用压力-速度耦合半隐式SIMPLE算法,认为相对残差低于 $10^{-6}$ 时即计算收敛。

2.3 网格划分与定解条件

为保证计算结果的准确性,对网格局部加密,并进行网格无关性检验。以方案1为例,选取不同数量的网格进行模拟,对比加热完成时热水器内水的平均温度。网格数为 $55 \times 10^4$ ,  $91 \times 10^4$ ,  $147 \times 10^4$ ,  $263 \times 10^4$ ,  $356 \times 10^4$ 模拟得到的平均温度分别为50.9, 56.9, 63.1, 63.3和63.4℃。考虑数值计算准确性和节省计算时间,最终选定网格数量为 $147 \times 10^4$ 。

对电热水器运行时内部温度场的研究主要分为以下三个过程:(1) 起始状态:不加热,热水器内部水充满,同时进出水处阀门关闭;(2) 加热过程:加热管开始工作,最终热水器内水的平均温度从25℃升高到65℃;(3) 进出水过程:断开加热,进出水阀打开,进水水温保持15℃,流量设定为5 L/min,直到出水温度低于过程(2)加热终止水温20℃(但始终保持出水温度 $\geq 42^\circ\text{C}$ )时该过程结束。

对含有相变材料的研究中,将PCM添加到保温层(聚氨酯)中,通过对比相同条件(加热功率和保温条件)下,分析保温层对热水器内温度场的影响,对电热水器运行时相变材料的融化凝固情况进行分析。采用的保温材料的物性参数如表2所示。含有PCM时保温层的工作过程为:(1) 融化过程,PCM全部为固态,保温层与热水器内水的初始温度均为25℃,开始加热直到水温达到65℃;(2) 凝固过程,加热结束后,热水器在空气中处于保温状态,与空气的对流换热系数 $h=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,此时空气温度为25℃。模拟过程中,热量传递主要考虑了

水与电热水器内壁之间的热传导与热对流、热水器内壁与保温层之间的热传导以及保温层与外界环境之间的热量传递。

表2 保温材料的物性参数  
Table 2 Physical properties of thermal insulation materials

Material	Phase change temperature/℃	Latent heat/(kJ/kg)	Specific heat/[J/(kg·K)]	Heat conductivity coefficient/[W/(m·K)]	Density/(kg/m <sup>3</sup> )
Polyurethane	—	—	1380	0.024	40
Paraffine	51~57	170	2100	0.25	760
Paraffine+10wt% Graphite <sup>[18]</sup>	48~50	158.5	2235	0.94	877.5

3 结果与讨论

为验证模型的准确性,与文献[22]中的研究结果进行对比,结果如图3所示。由图可知,在较大的加热功率下,模拟值与理论计算值基本一致,当加热功率小时最大偏差为9.98%,表明所采用的模型可靠。

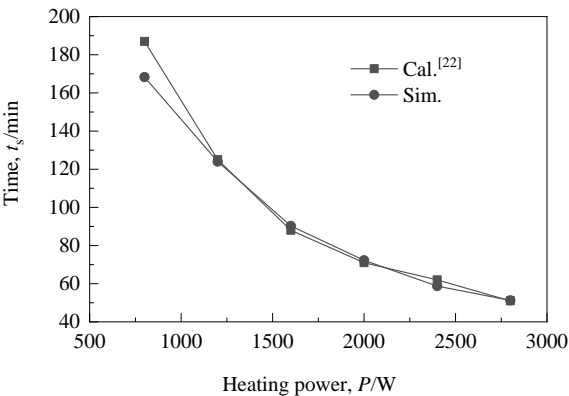


图3 不同加热功率对加热时间的影响  
Fig.3 The effect of different heating powers on heating time

图4(a)和4(b)分别为加热完成后方案1和方案2热水器内水的温度分布。由图可知,因水的自然对流运动,水温沿高度方向逐渐增大,顶部最高温度约为70℃,

底部温度约为50℃,最大水温差约为20℃;热水器底部的等温线更密集,表明底部热水温差大,且换热不均匀。

热水器内部沿高度方向的水温变化如图5所示。由图可知,热水温升速率随高度增加而逐渐降低,表明热水器底部水的温差大于顶部。高度低于150 mm时,方案2水温更高;高度超过150 mm时,两种方案的水温差变得很小。这是由于高度小于150 mm时,采用水平布置的加热管其水的横向接触面积要比垂直布置时大,热水扩散范围更广,结合图4也可看出方案2热水器内水温更均匀。这表明水平加热管比垂直加热管能提高加热器底部水温,缩小热水器内水的温差,从而使热水温度分布更均匀。

加热过程,加热管为电热水器内部水提供热量,由于计算时考虑了电热水器与外界环境之间的散热,因此电热水器的加热效率由式(4)计算:

$$\varphi = \frac{\rho c_p V (T_c - T_A)}{Pt} \times 100\% \tag{4}$$

式中, $\varphi$ 为加热效率(%), $T_A$ 和 $T_c$ 分别为热水器内起始平均水温和加热完成后平均水温(℃), $V$ 为电热水器的热水容量(L), $c_p$ 为定压比热容[J/(kg·K)], $P$ 为加热功率(W), $t$ 为加热时间(s)。

计算所得方案1和2的加热效率分别为94.12%和96.15%,方案2略高于方案1,主要原因是内胆底部水温

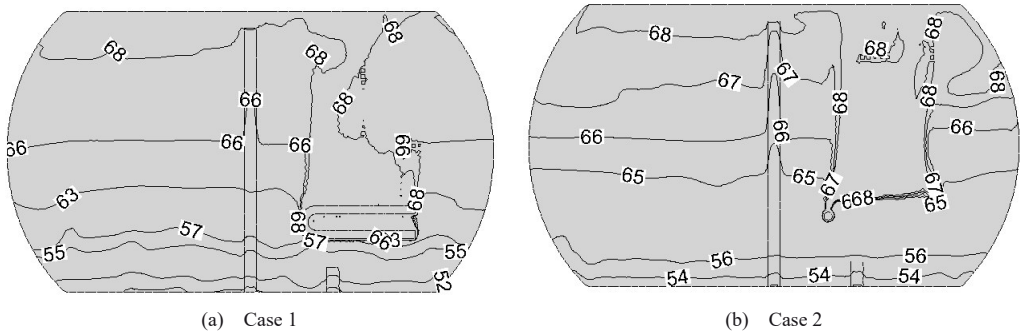


图4 加热完成后热水温度分布(单位:℃)  
Fig.4 Temperature distribution of hot water after heating (Unit:℃)



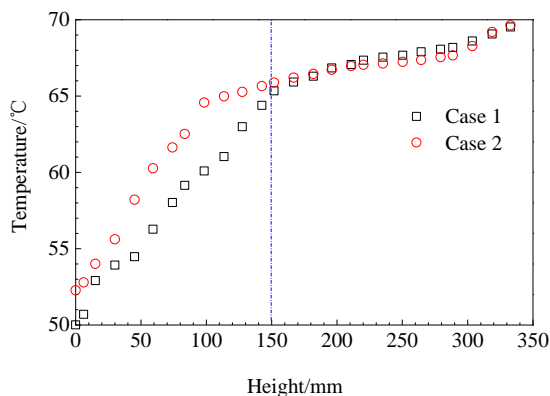


图5 加热完成时温度沿高度的分布

Fig.5 Temperature distribution along height when heating completed

度升高,局部出现温差,发生自然对流;加热管采取水平布置方式时,其与水的横向接触面积大于垂直布置方式,热水扩散分布更广。因此采用水平布置方式的加热管可使电热水器内水温分布更均匀,平均温度更高,加热效率更高。

图6所示为进水30 s时方案2和4热水器内水的速度矢量图。进水阀开启,冷水进入热水器时,因为惯性会向上运动直到触碰内壁,然后顺着壁面向四周扩散,所以进水管末端和内胆上端壁面位置速度相对偏大。方案2进水管进水时对内部流场扰动较显著,引起的漩涡更明显,导致与出水口附近流体混合更充分,从而降低了出水温度;方案4由于增大了进水口管径,进水流速降低,涡流影响范围变小,削弱了对出水口附近水温的影响。由此可知,通过适当增加进水口管径,可减小冷水进入时引起的温度波动。

图7为进水60 s时方案2和4热水器中水温分布云图。由图可知,由于增加进水口管径,冷水流速降低,方案4整体的热水温度分布优于方案2,尤其是顶部热水区域较多;热水器底部区域,方案4的水温更低,表明适当增大进水管管径,冷热水混合面积减小,冷、热水分层越明显,排出的热量越多。

热水输出率 $\theta$ 能直接反映电热水器输出的热量,是评价电热水器能效等级的主要技术指标之一。

$$\theta = \frac{m_p(T_o - T_i)}{(T_c - T_i)\rho V} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $m_p$ 为释放热水质量(kg), $T_o$ 为热水器出水温度(°C), $T_i$ 为热水器进水温度(°C), $T_c$ 为加热结束后热水器内蓄水平均温度(°C), $\rho$ 为水密度(kg/m<sup>3</sup>), $V$ 为热水器内胆蓄水容积(m<sup>3</sup>)。

图8为4种方案热水器出口水温随进水时间的变化。从图可看出,出口温度随进水时间延长而逐渐降

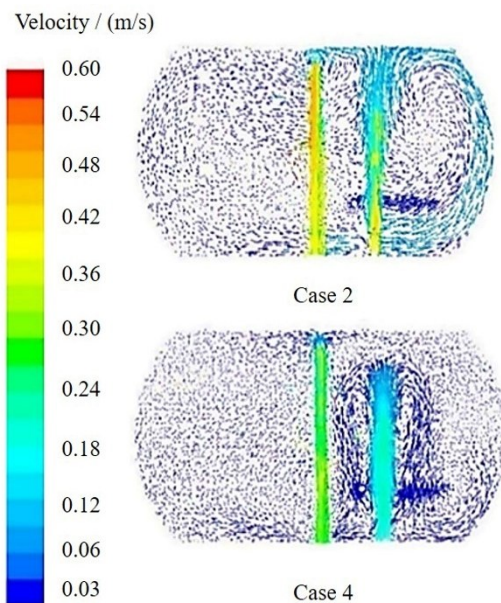


图6 进水30 s时电热水器内水流速度矢量图

Fig.6 Velocity vector diagrams in the electric water heater for 30 s water intake

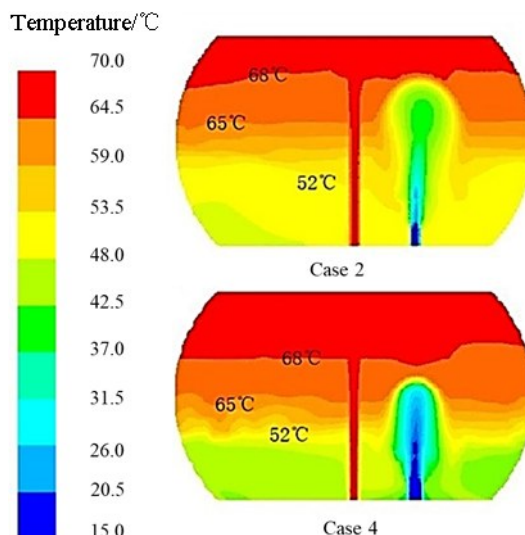


图7 进水60 s时电热水器内温度分布

Fig.7 Temperature distributions in the electric water heater for 60 s water intake

低,进水约250 s,出口温度降低幅度明显,原因是热水器内冷水流量增加时,受冷水进入时的扰动影响,出口水温降低。进水500 s后,方案4的出口水温最高,为44.35°C,方案3次之,方案1和2基本一致,为33.92°C。与方案2相比,方案4的出口水温提高了30.75%。

表3为不同方案的热水输出率。对比方案1与2可知,热水出水时间与出水量在采取水平加热管时均有所增加,热水输出率相对提升了5.2%;加热时间相同时,比较方案1与方案3,进水管管径加粗1.5倍时,热水出水

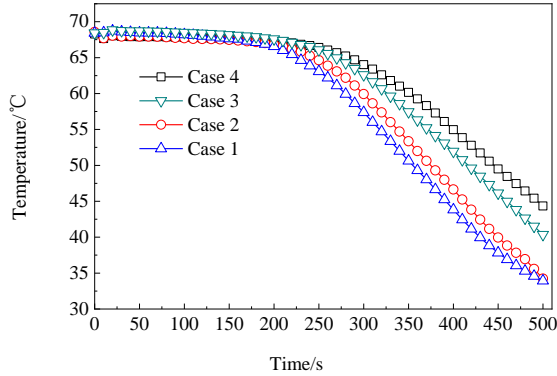


图8 热水器出口温度随时间变化  
Fig.8 Variation of outlet temperature of electric water heater with heating time

温度、出水时间及出水量均有所增加,热水输出率相对提升了 16.9%;对比方案 2 和方案 4,采用水平加热管和管径加粗进水管,热水输出率最终提升了 17.9%。由此可知,与改变加热管布置相比,适当加粗进水管时热水输出率增加更明显。

表 3 不同方案热水输出率				
Table 3 The hot water output rate under different schemes				
Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Maximum temperature/°C	68.72	68.56	68.86	68.28
Minimum temperature/°C	48.02	47.99	48.47	48.45
Time/s	370	390	430	460
Water quality/kg	30.25	31.89	35.16	37.62
Water temperature/°C	63.53	63.49	63.82	63.50
Shutdown temperature/°C	63.27	63.35	63.27	63.35
Hot water output rate/%	62.00	65.20	72.48	76.90

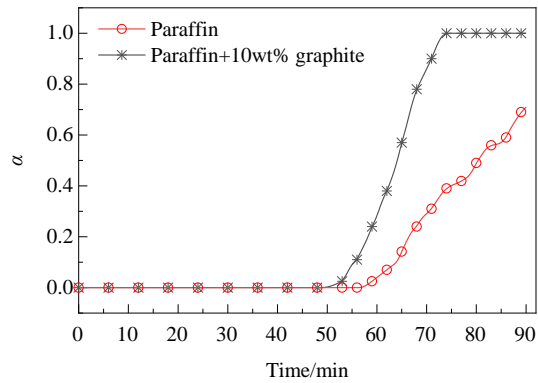


图9 不同相变材料熔化过程液相率变化曲线  
Fig.9 Variation curve of liquid phase ratio during melting of different phase change materials

为进一步提高电热水器使用过程中的热水输出率,在以上研究基础上,通过向方案 3 热水器的保温层中添加不同相变材料考察其对热水器内部水温的影响。

图 9 为不同相变材料熔化过程液相率变化曲线。加热至 52 min 后,含有 10% 石墨的石蜡保温层开始融化,加热至 58 min 后仅有石蜡的保温层才开始融化;随后二者液相体积分数均随加热时间延续而快速变大,但含有 10wt% 石墨的保温层的增长速率更快。尽管两种储能型保温层的相变范围均适宜生活用热水,但从实际应用来看,含有 10wt% 石墨的石蜡保温层能量储存/释放速率更快,更具有实用性。本工作进一步分析石蜡+10wt% 石墨保温层的保温特性。

图 10 为保温阶段不同类型相变储能型电热水器内水的平均温度变化,相变材料层厚度分别为 0, 10, 15 及 20 mm。由图可知,在保温初期,热水器内水温下降速率较快,储能层厚度越厚,降低愈明显,主要原因是此时储能层中相变材料发生融化,且含有 10wt% 石墨,增加了热量传递速率,使热量由水传递到储能层,为蓄热阶段。当达到相变材料的凝固温度时,水温下降的速率开始减缓,相变储能层越厚,水温降低速率越缓慢,为放热阶段。当保温持续 36 h 时,20 mm 厚的储能层使水温稳定在 52°C,而此时不含储能层的平均水温降至 47°C。厚度 10, 15 及 20 mm 储能层热水器内平均水温比不含相变材料时分别提高了 6.9%, 8.6% 和 10.6%。在控制保温层总厚度不变的前提下,设置 PCM 储能层可进一步提高热水器的热水输出温度和热水量。

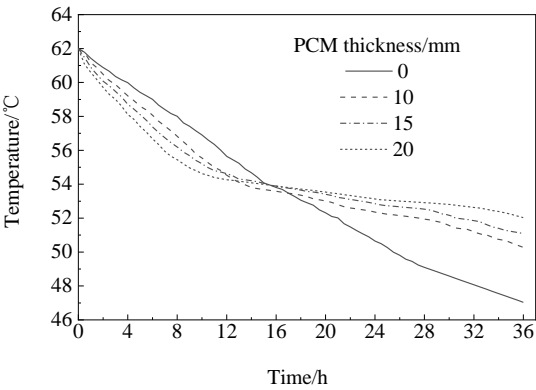


图 10 不同相变层厚度对保温过程中热水器平均水温的影响  
Fig.10 The influence of different thicknesses of PCM on the average water temperature of electric water heater during heat preservation process

4 结 论

采用数值模拟的方法考察了不同类型的加热管和进水管对电热水器内部温度分布及热水输出率的影响,在此基础上,研究了相变材料的加入对电热水器储能和经济的影响,得到如下结论:

(1) 与竖直加热管比较,水平加热管加热过程热水器内水温分布更均匀,底部热水温差更小,加热效率提升约2.2%。

(2) 适当增大进水管管径更有利于热水排出,同时使用水平加热管和加粗进水管,能最大程度优化电热水器热水输出情况,热水输出温度提高了30.75%,热水输出率提升了17.9%。

(3) 总保温层厚度保持不变时,相变材料储能层可进一步提高热水器热水输出水温,当保温时间持续36 h时,厚度10、15及20 mm的相变储能层分别将水温提高了6.9%、8.6%和10.6%。

## 参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 7-9.  
Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. 2018 Annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 7-9.
- [2] 牛纪德, 周遵凯, 杨先亮, 等. 电热水器运行方式与能耗的理论分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(26): 213-214.  
Niu J D, Zhou Z K, Yang X L, et al. Theoretical analysis of operation mode and energy consumption of electric water heaters [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(26): 213-214.
- [3] 王烨, 宋荣飞, 胡悦, 等. 内置隔板开孔方式对太阳能蓄热水箱热分层的影响[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(5): 897-903.  
Wang Y, Song R F, Hu Y, et al. Effect of obstacles with different opening means on thermal stratification in hot water storage tanks [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(5): 897-903.
- [4] Shao S, Shi W, Li X, et al. A new inverter heat pump operated all year round with domestic hot water [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(13/14): 2255-2268.
- [5] Kim M, Kim M S, Chung J D. Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 415-421.
- [6] De Césaro Oliveski R, Krenzinger A, Vielmo H A. Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks [J]. Solar Energy, 2003, 75(2): 121-134.
- [7] 李同, 陶汉中, 蒋川. 真空管型太阳能热水器传热特性的数值分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1247-1253.  
Li T, Tao H Z, Jiang C. Numerical analysis on heat transfer characteristic of evacuated tube solar water heater [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1247-1253.
- [8] 王登甲, 刘艳峰. 太阳能热水采暖蓄热水箱温度分层分析[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(1): 16-19.  
Wang D J, Liu Y F. Temperature stratification analysis of solar hot water heating storage tank [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(1): 16-19.
- [9] 黄建春, 李光正, 江立新, 等. 封闭腔内层流自然对流换热过渡层数值研究[J]. 华中科技大学学报, 2001, (5): 51-53.  
Huang J C, Li G Z, Jiang L X, et al. Numerical study on the flow transition in laminar natural convection flow in a square cavity [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, (5): 51-53.
- [10] 鲁进利, 吕勇军, 韩亚芳, 等. 细小槽道换热器内相变微胶囊悬浮液对流传热 DPM 模拟[J]. 过程工程学报, 2018, 18(5): 951-956.  
Lu J L, Lü Y J, Han Y F, et al. Simulation on convective heat transfer of MPCMS in minichannel heat exchanger based on DPM model [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(5): 951-956.
- [11] Ma X C, Liu Y J, Liu H, et al. Fabrication of novel slurry containing graphene oxide-modified microencapsulated phase change material for direct absorption solar collector [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 188: 73-80.
- [12] 张宇, 田雨亭, 岳小棚, 等. 槽式太阳能集热管内相变微胶囊悬浮液的热力性能分析[J]. 过程工程学报, 2020, 20(3): 276-284.  
Zhang Y, Tian L T, Yue X P, et al. Thermal mechanical characteristics analysis of trough solar collector with microencapsulated phase change suspensions [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(3): 276-284.
- [13] 鲁进利, 张汪林, 韩亚芳, 等. 细小圆管内 Micro-PCMS 紊流对流传热特性的 CFD-DPM 模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(5): 758-763.  
Lu J L, Zhang W L, Han Y F, et al. CDF-DPM simulation on characteristics of turbulent flow and heat transfer for micro-PCMS in mini-pipe [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(5): 758-763.
- [14] 邹得球, 詹建, 李乐园, 等. 热水器用相变储热材料的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(1): 268-273.  
Zhou D Q, Zhan J, Li L Y, et al. Research progress of phase change thermal energy storage materials in water heater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(1): 268-273.
- [15] Alexios P, Sarvenaz S, Vladimir P, et al. Evacuated tube solar collectors integrated with phase change materials [J]. Solar Energy, 2016, 129: 10-19.
- [16] Miqdam T C, Kazem H A. Water solar distiller productivity enhancement using concentrating solar water heater and phase change material (PCM) [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2015, 5: 151-159.
- [17] Wang W, He S, Guo S, et al. A combined experimental and simulation study on charging process of erythritol-HTO direct-blending based energy storage system [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 83: 306-313.
- [18] Summers E K, Antar M A, John H L V, et al. Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification-dehumidification desalination [J]. Solar Energy, 2012, 86: 3417-3429.
- [19] 巫江虹, 杨兆光, 吴青昊, 等. 热泵热水器用相变蓄热材料的性能研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 674-678.  
Wu J H, Yang Z G, Wu Q H, et al. Experimental study on phase-change performance of thermal storage materials in heat pump water heater [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(5): 674-678.
- [20] 周楚, 陈华, 史德福, 等. 相变蓄热式热泵热水器性能实验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(4): 5-9.  
Zhou C, Chen H, Shi D F, et al. Experimental study on performance of phase-transition thermal-storage heat pump water heater [J]. Building Science, 2014, 30(4): 5-9.
- [21] 吴淑英. 纳米复合蓄热材料强化相变传热实验与数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 79-95.  
Wu S Y. Enhanced heat transfer experimental and simulation

- research of nanocomposite phase change materials [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 79–95.
- [22] 冉茂宇. 非出水时段电热水器加热时间与能耗的预测模型 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 247–251.
- Ran M Y. Prediction model of the heating time and energy consumption of electric water heater during the un-draining period [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, 37(2): 247–251.