

文章编号: 1008-1542(2023)01-0029-08

## 自然对流对套管式相变蓄热器蓄热性能的影响

蒋静智, 彭培英, 崔海亭, 宋庆松, 陈正佳

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:** 针对蓄热器内相变材料融化、相变区域自然对流换热过程中蓄热效率不确定问题, 以套管式相变蓄热器为基本结构, 以添加质量分数为10%膨胀石墨的石蜡作为相变蓄热材料, 采用数值模拟的方法研究由重力引起的自然对流对相变蓄热器蓄热性能的影响。结果表明, 固液相密度差引起的自然对流对相变蓄热过程有明显的促进作用, 数值模拟过程中, 考虑与不考虑自然对流时, 蓄热器的蓄热时间相差近2倍; 不同区域相变材料受自然对流的影响不同, 在相变材料融化前期, 套管上方由于液相自然对流的影响, 融化速率更快。根据蓄热器融化速率和融化状态的特点, 通过传热过程理论分析, 将融化过程进行分段, 可以更加深入地了解蓄热器蓄热过程的机理和规律, 为优化蓄热器结构提供理论依据。

**关键词:** 太阳能; 相变蓄热; 自然对流; 数值模拟; 传热分析

中图分类号: TK02

文献标识码: A

DOI: 10.7535/hbkd.2023yx01004

## Effect of natural convection on heat storage performance of tubular phase change heat accumulator

JIANG Jingzhi, PENG Peiying, CUI Haiting, SONG Qingsong, CHEN Zhengjia

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract:** Aiming at the uncertainty of heat storage efficiency during the melting process of phase-change materials in the heat accumulator and the natural convection heat transfer process in the phase-change region, the influence of natural convection caused by gravity on the heat storage performance of the phase change heat storage was studied by numerical simulation with the tube-type solar phase change accumulator as the basic structure and the paraffin with 10% expanded graphite as the heat storage material. The results show that the natural convection caused by solid-liquid density difference has an obvious promoting effect on the phase change heat storage process. The heat storage time of the heat accumulator considering natural convection is nearly twice that of the heat accumulator without considering natural convection. The influence of natural convection on phase change materials in every region is different. In the early stage of melting of phase change materials, the

收稿日期: 2022-07-14; 修回日期: 2023-01-08; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 河北省自然科学基金(E2019208345)

第一作者简介: 蒋静智(1972—), 女, 河北阜城人, 教授, 博士, 主要从事强化传热及储能方面的研究。

E-mail: jjzhi2000@126.com

蒋静智, 彭培英, 崔海亭, 等. 自然对流对套管式相变蓄热器蓄热性能的影响[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(1): 29-36.

JIANG Jingzhi, PENG Peiying, CUI Haiting, et al. Effect of natural convection on heat storage performance of tubular phase change heat accumulator[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(1): 29-36.

melting rate above the innertube is faster due to the influence of natural convection of liquid phase. Based on the theoretical analysis and according to the characteristics of the melting rate and melting state of the heat accumulator, the melting process is segmented, which can further understand the heat storage process of the heat accumulator and provide certain theoretical guidance for optimizing the structure of the heat accumulator.

**Keywords:** solar energy; phase change heat storage; natural convection; numerical simulation; heat transfer analysis

为实现“碳达峰、碳中和”目标,可再生能源的兴起与发展对中国结构转换、动能转变、低碳转型具有重要的意义<sup>[1]</sup>。太阳能、风能、地热能、生物质能都是环保、清洁的能源,也是满足全球能源需求的潜在候选者。但是大多数可再生能源,如太阳能、风能、潮汐能,是间歇或循环能源,在时空尺度上供需不匹配<sup>[2]</sup>。相变蓄热系统作为解决能源供应时间与空间矛盾的有效手段,是提高能源利用率的重要途径之一,也是中国实现可持续发展、高质量发展的必由之路<sup>[3]</sup>。高效相变储能成为中国当前能源利用的研究热点问题<sup>[4-5]</sup>。

近年来,针对相变储能技术,从相变材料的制备到相变蓄热器的结构设计均取得了许多研究成果<sup>[6-15]</sup>,对于实际应用中传热效率更高的相变材料的筛选和蓄热时间更短、效率更高的蓄热器结构的设计均取得了良好的指导作用。随着相变储能技术研究的不断深入,相变蓄热过程中,相变区域液相在重力作用下的自然对流对蓄热融化过程的影响受到了研究者的广泛关注。FORNARELLI等<sup>[16]</sup>对管壳式蓄热装置中自然对流及糊状区常数进行了研究,结果表明,自然对流能增加热通量,可以减少近35%的蓄热时间;糊状区常数的影响不可忽略,虽然其对总蓄热时间影响较小,但是延迟了蓄热过程中的对流,对蓄热器融化状态有较大影响。SEDDEGH等<sup>[17]</sup>发现在融化过程中,主要的传热模式是对流传热,且自然对流能增强换热,导热是凝固过程中的主要传热方式。邹勇等<sup>[18]</sup>建立了同心套管管壳式相变蓄热器的二维模型,以计算流体力学软件的凝固/融化模型为基础,对石蜡相变材料的融化过程进行多次仿真模拟,结果表明,自然对流对石蜡融化过程起着重要作用,对流极大加速了石蜡的融化进程。吴学红等<sup>[19]</sup>分析了相变材料区域蓄热过程的数据,结果发现,随着蓄热过程的进行,对流换热的比重逐渐增大。由此可见,蓄热器融化过程中,相变区域自然对流换热过程是影响蓄热器蓄热效率的一个重要因素。本文以套管式相变蓄热器为基本结构,以添加质量分数为10%膨胀石墨的石蜡作为蓄热材料,采用数值模拟方法研究套管式太阳能相变蓄热器的传热特性,并研究由重力引起的自然对流对相变蓄热器蓄热性能的影响。

## 1 模型建立

### 1.1 物理模型

蓄热装置为套管式换热器,如图1所示,外部圆筒的高度为315 mm,外环直径为126 mm,内环直径为25 mm,传热管内和筒体之间的环形空腔填充相变材料。相变材料为石蜡中加入质量分数为10%膨胀石墨的复合相变材料(物性参数如表1所示)。传热管里面流动的热媒水给相变材料加热或冷却,筒体两端和外壁包裹绝热材料。由于蓄热器进出口温差很小,故本文将内环外壁面温度设置为恒定的343 K。

表1 添加10%膨胀石墨后相变材料的物性参数

Tab.1 Physical parameters of phase change materials with 10% expanded graphite

状态	熔点/K	相变潜热/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	比热/(kJ· (kg·K) <sup>-1</sup> )	导热系数/ (W·(m·K) <sup>-1</sup> )
固相	327	235	900	1.828	1.568
液相	329	235	880	1.918	1.458

### 1.2 数学模型

本文采用FLUENT软件中在固定温度或一定温度范围内固液相变的流体流动和传热问题上计算精度较高的凝固/融化模型对蓄热器的蓄放热过程进行数值模拟,以其内嵌的焓-多孔性公式对相变传热问题进

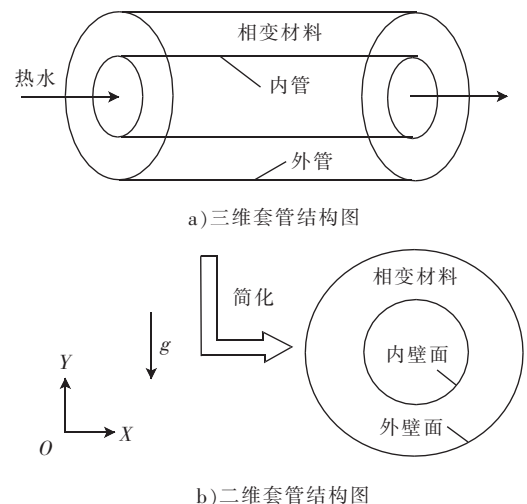


图1 同心套管蓄热器物理模型

Fig.1 Physical model of concentric casing heat storage

行求解<sup>[20]</sup>。该模型将固液混合区看作多孔性介质区域,依靠焓值对相变界面进行跟踪。同时,为了在保证准确度的同时节省计算量,根据蓄热器的特点在数值计算中采用以下基本假设<sup>[20-21]</sup>:1)相变材料纯净、各向同性;2)相变材料液态、固态时的热物性相同;3)忽略传热管和外筒壁厚以及外筒壁面与外界的热量交换;4)液态的相变材料满足 Boussinesq 假设,即只在浮升力项中考虑密度变化;5)蓄热器中已经融化的液态相变材料为不可压缩牛顿流体;6)考虑液相区由重力引起的自然对流,自然对流为层流流动。

相变区域采用的控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0。$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho_p \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta_p \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u, \\ \rho_p \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta_p \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_v, \end{aligned}$$

源项:

$$S_u = Au, \quad S_v = Av + \rho_{\text{ref}} g \beta (T - T_{\text{ref}}),$$

其中:

$$A = -C \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3 + \epsilon},$$

式中: $C$ 为糊状区常数,根据相变材料的不同一般取  $10^4 \sim 10^7$ ,本文相变材料为石蜡,根据陈阳丽<sup>[22]</sup>的实验研究相变材料为石蜡时,取  $10^6$  最为合理; $\rho_{\text{ref}}$ 为参考密度; $\beta$ 为体积膨胀系数; $\varphi$ 为液相率; $T_{\text{ref}}$ 为参考温度, $\epsilon$ 为一个小于 0.001 的极小值,防止分母为 0。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_p h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_p v h)}{\partial y} = \text{div}(\lambda_p \text{grad} T_p) + S_p,$$

式中: $S_p = -\left( \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \Delta H) \right)$ ;  $h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,P} dT$ ;  $\lambda_p = \lambda_{s,p} \cdot (1-\varphi) + \lambda_{l,p} \varphi$ ;  $C_{p,P} = C_{p,Ps} \cdot$

$(1-\varphi) + C_{p,Pl} \varphi$ ;  $h$ 为相变材料的显热焓; $H$ 为潜热焓;

$\lambda_p$ 为导热系数; $C_{p,P}$ 为比热容; $\Delta H$ 为相变潜热; $\lambda_{s,p}$ 为固

态相变材料导热系数; $\lambda_{l,p}$ 为液态相变材料导热系数;

$C_{p,Ps}$ 为固态相变材料比热容; $C_{p,Pl}$ 为液态相变材料比

热容。

### 1.3 模型可靠性验证

为验证采用的数学模型和数值模拟方法的可靠性和精确性,选取了文献[23]的实验工况进行 FLUENT 软件数值模拟。实验所采用的相变材料为石蜡,传热流体为水,传热流体入口温度为  $70^\circ\text{C}$ ,相变材料初始温度为  $30^\circ\text{C}$ 。相变材料及传热各部分材料物性参数见文献[23]。取蓄热器中 3 个实验监测点(测点 2,5 和 8),通过 FLUENT 软件在相应实验点设置监视器并与实验测量结果进行对比,对比结果如图 2 所示。由图 2 可知,数值模拟所得和实验测得的 3 个检测点的温度随时间变化的曲线吻合度较高,平均误差小于 1.5%,说明采用本文

的数学模型和计算方法,利用 FLUENT 软件对该相变材料的凝固融化过程进行数值模拟是可靠的。

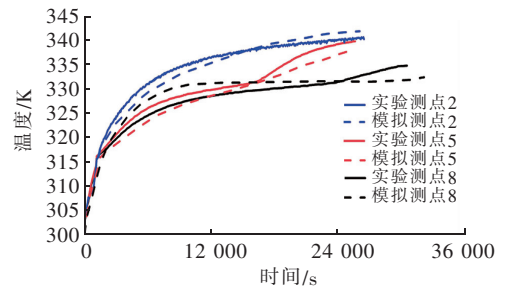


图 2 不同监测点数值模拟结果与实验结果对比图

Fig. 2 Comparison chart of numerical simulation results and experimental results at different monitoring points

## 1.4 网格无关性验证

为提高数值模拟计算的精度和计算速度,本文所有模型均采用 ICEM 软件对相变区域进行结构化网格划分。设置节点间距分别为 1,3,5,得到不同网格大小的离散模型。在其他条件相同的情况下分别对相变材料的融化过程进行运算,其网格数量和所用时间及计算的相变材料融化时间如表 2 所示。当网格间距为 5 时,由于节点数少,温度或液相率变化率较大的数值难以捕捉,计算极易发散。网格间距为 1 和 3 时,计算结果极为接近,但网格间距为 1 时的计算时间比间距为 3 时要多 60 h,计算经济性差。因此本次模拟采用节点间距为 3 的网格对区域进行离散化。

表 2 网格无关性验证

Tab.2 Grid independence verification

网格间距	网格数量	相变蓄热材料完全融化时间/s	计算用时/h
1	14 140	16 400	180
3	6 240	16 000	120
5	1 904	—	—

## 2 FLUENT 的有关参数设置

### 2.1 数学模型和计算方法的选择

采用 FLUENT 软件对相变过程进行数值求解。选用二维模型,读入网格文件,进行网格检查,修改模型单位为 mm。流体为不可压缩流体,选取 Pressure-Based 求解法。考虑自然对流对蓄热过程的影响时,设置重力方向为 Y 轴负方向,大小为  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。由于相变区域液相流速缓慢、雷诺数小,因此流动方程选取层流模型。为有效降低低雷诺数流场计算时的残差,选用 Power Law 方法进行求解。

选取 FLUENT 软件中的内置凝固/融化模型对蓄热器内的相变蓄热过程进行数值模拟计算,能量方程自动打开,由于相变蓄热材料液相区的自然对流流动状态较为复杂,而 PISO 算法在计算瞬态性较高的流场时具有明显优势,因此选用 PISO 算法进行求解,2 个修正系数均为默认值 1,压力和能量求解使用二阶迎风格式。

### 2.2 相变材料物性参数的设置

选择加入质量分数为 10% 的膨胀石墨复合材料为本模拟计算的相变材料,FLUENT 中设置该相变材料的物性参数如下:考虑温度变化引起密度变化而产生的自然对流对相变过程的影响,因此相变材料密度设置选择 Boussinesq,大小为  $900 \text{ kg/m}^3$ 。由于相变材料在固相和液相时比热容和导热系数不同,因此选用逐段线性(piecewise-line)方法,根据固相和液相的熔点按照表 1 的数值将比热容和导热系数设置到 FLUENT 中,同时设置相变材料的相变潜热为  $235 \text{ kJ/kg}$ 。

### 2.3 边界条件和计算步长的设置

将蓄热器外表面和两端面均设置为绝热壁面,内壁面为  $343 \text{ K}$  恒温壁面,以加热环形区域的相变材料。考虑计算精度和计算的经济性,将非稳态的时间步长设置为  $0.1 \text{ s}$ ,同时为实时监测液相率的变化情况,设置了液相率变化监视器。

## 3 结果与讨论

### 3.1 自然对流对相变区液相分数分布的影响

图 3 a)和图 3 b)分别给出了有、无自然对流情况下石蜡液相分数随时间变化的情况。红色区域为液相区,蓝色为固相区,介于两者之间的黄绿色区域为糊状区。从图 3 可以看出,同一时刻,考虑自然对流时的蓄热器液相区域面积明显大于不考虑自然对流时的液相区域面积,随着时间的延长,这种影响更加明显。说明在有自然对流的作用下,相变材料融化速度更快。在不考虑自然对流时,随着时间的增加,石蜡的固液交界面以规则的同心圆状由内环向外壁面缓慢扩展;而在自然对流作用下的蓄热器相变界面的扩展形态是不规则的,左右大致对称,且传热管正上方区域先融化再向两侧扩展,液相区域呈碗状分布,直到上半区域完全融化,下半区域才开始融化,而造成此特点的原因正是自然对流的影响。

图 4 给出了有、无自然对流时蓄热器蓄热过程的液相率随时间变化的情况,由图 4 可看出,自然对流影响下的蓄热器融化蓄热进程明显快于无自然对流影响的蓄热器。无自然对流的蓄热器蓄热过程用时约  $58\,000 \text{ s}$ ,而有自然对流时蓄热器蓄热时间约为  $16\,000 \text{ s}$ ,蓄热时间相差 2 倍左右。因此,自然对流对蓄热器蓄热过程的影响至关重要。

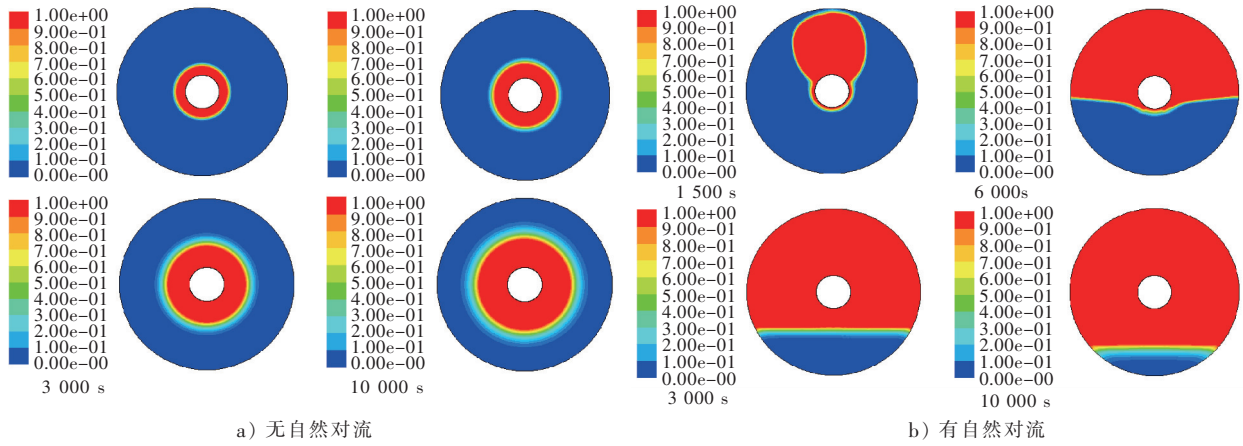


图 3 不同时刻有、无自然对流的蓄热器蓄热过程固液相云图

Fig. 3 Solid-liquid phase cloud diagram of heat storage process with or without natural convection at different time points

分析认为,考虑自然对流时,固液相密度不同且液相相变材料随着温度的升高,密度减小,在重力场的作用下,密度小的液相相变材料向上流动,密度大的相变材料向下流动,相变材料携带其自身的能量从一处传递到另一处,从而形成自然对流的热量传递方式。不考虑自然对流时,相变区域的热量传递方式只能依靠相变材料的热传导,而石蜡的导热系数较小。因此考虑自然对流时,相变区域的热量传递速率远远大于不考虑自然对流时单纯依靠热传导的热量传递速率,相变区域的热量交换更快,融化速度也更快,相变材料全部融化需要的时间也更短。

### 3.2 自然对流对相变区域液体流动的影响

重力引起的自然对流可以极大地加快蓄热器的融化蓄热进程,是相变蓄热的重要影响因素,研究相变蓄热必须将其考虑其中。为了能进一步清楚地观察到融化过程中各个阶段的液相区的自然对流状态,图 5 给出了有自然对流影响时相变

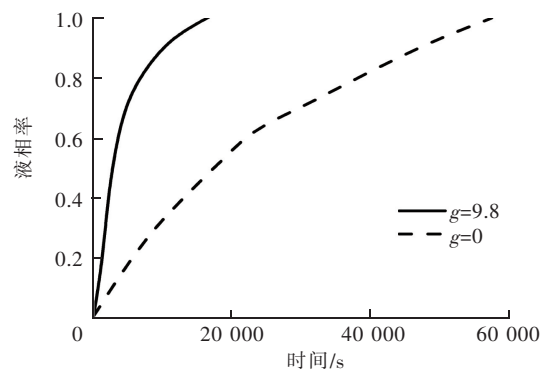


图 4 有、无自然对流的蓄热过程液相率随时间变化曲线图

Fig. 4 Curves of liquid phase ratio versus time in heat storage process with or without natural convection

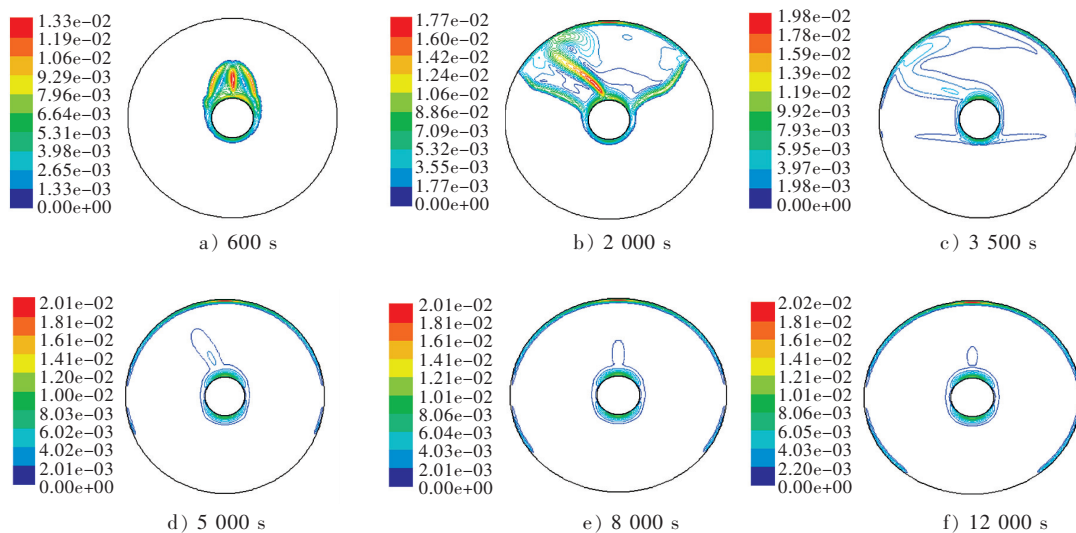


图 5 有自然对流时不同时刻同心套管蓄热器液相区流线图

Fig. 5 Flow line diagram of concentric casing heat storage with natural convection at different time points

材料融化过程中不同时刻液相区域的流线图。从图 5 中可以看出,液相区域在融化过程中自始至终都存在明显的自然对流,液相区流场的整体速度与紊乱程度随着融化时间的增加而趋于平缓。

结合图 6 液相区流动矢量图可以看出,自然对流作用下高温管壁附近的热流体自由向上流动,而相界面附近的冷流体沿界面向下流动从而形成了多个涡状流动区,且由于传热管上方的空腔区域较为空旷,且无固定的遮挡或插入物,使得液相区域相变材料的涡结构处于不稳定状态,会随机移动,但大致呈现为 2 个主要涡结构相互挤压的状态。

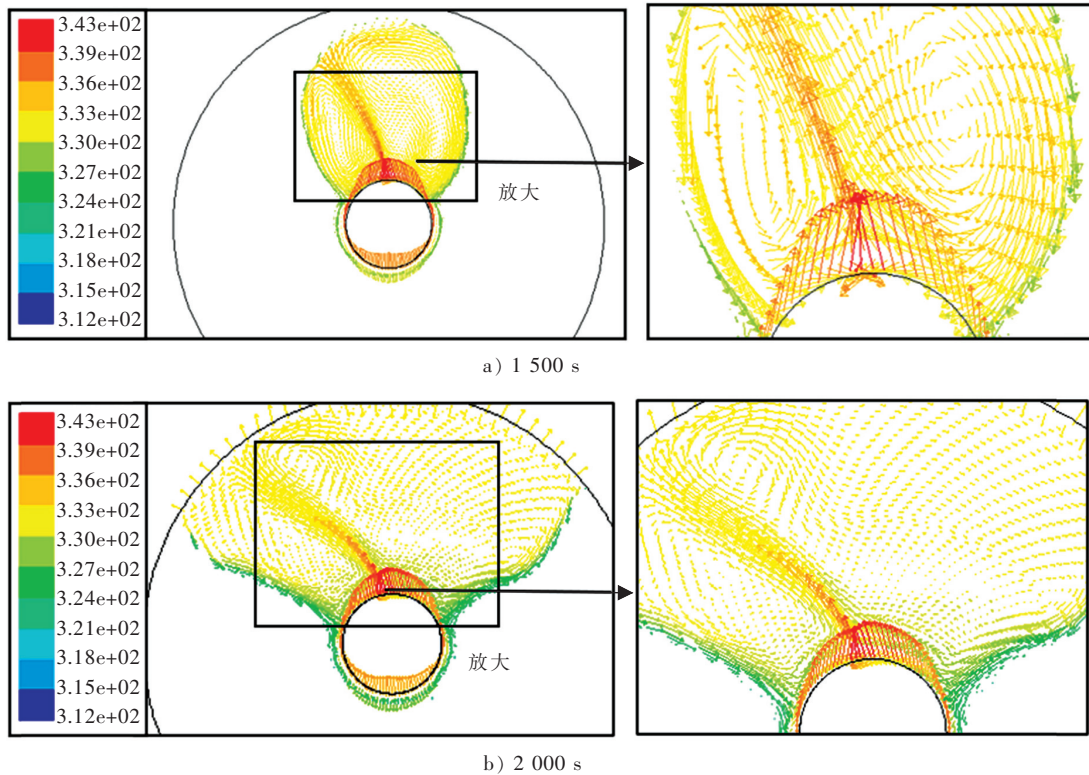


图 6 不同时刻液相区自然对流流动矢量图

Fig. 6 Vector diagrams of natural convection flow in liquid region at different time points

分析认为,在相变材料融化前期,靠近套管上方的相变材料先融化,且在重力场的作用下向上流动,进而快速与其周围的固液相相变材料进行换热,在该部分区域,各点温度差异大,因此流体密度差异大,在重力场的作用下,自然对流的流动状况更为明显,由图 5 a)和图 5 b)可知,相变区域的流线较为密集,液相相变材料流动的紊乱程度较强,从图 6 流体的矢量图也可以看出,相变区域流动的大小和方向均较为复杂,甚至在某些区域会形成涡。随着融化过程的进行,达到 5 000 s 以上时,从图 3 和图 5 可以看出,同心套管上方的相变材料已经全部融化成液态,此时,上半部分的液相相变区域温度基本相同,密度差异减小,重力场下,自然对流的流动速度较小,因此,后期的融化过程,液相区流场的速度和紊乱程度趋于平缓。

### 3.3 自然对流作用下同心套管的融化蓄热特性

研究相变发生的主导传热方式是采用强化换热手段的基础,结合图 3 不同时刻有无自然对流情况下的固液相云图和图 5 不同时刻同心套管蓄热器液相区流线图,可以得出同心套管蓄热器的融化蓄热过程特性:在融化过程前期自然对流作用下,套管上方的相变材料受到高温流体的冲刷迅速融化,两相界面呈现不规则形状,而套管下方的相变材料除接近壁面的部分发生融化外,其他区域处于基本不融化的状态。在融化过程的中后期,自然对流充分发展阶段形成的多个涡有不规则的移动和相互合并现象,蓄热过程后期自然对流影响逐渐减弱,涡有缩小甚至消失的趋势,蓄热速度也大幅降低。

分析认为,相变材料融化前期,换热管上方的相变材料在自然对流的影响下,快速将管壁的热量传递到套管上方的相变材料,因而其上部的相变材料快速融化;而套管下方的相变材料在被管壁加热的情况下,由固态融化为液态,由于其上面有管壁的阻挡,因此虽然考虑自然对流,但其向上的流动无法进行,套管下方的相变材料区域的换热仍然只能依靠纯导热的方式,其融化速度缓慢,因此在套管上方区域大面积相变材料融

化为液体时,其下方的相变材料仍然保持在固相而不被融化。可以看出套管上方由于自然对流的存在加速了冷热流体的掺混,对融化过程有明显的促进作用;在套管下方,由于热流体处于相变区域的上方,自然对流无法形成,因此其融化速率较为缓慢,需要的融化时间更长。

### 3.4 自然对流作用下同心套管蓄热器的蓄热分段分析

图 7 给出了有自然对流的同心套管蓄热器液相率曲线图,由图 7 可以看出,该同心套管蓄热器相变材料的融化时间约为 16 000 s。根据前述的同心套管的蓄热特性,该同心套管的融化蓄热过程可大致分为 3 个阶段:第 1 阶段,蓄热过程刚刚开始,自然对流尚未充分发展,相变材料之间的传热以导热为主要形式,此阶段时间极短,约为 70 s(由于时间太短图中未标出);随着蓄热时间增加,液相区逐渐增大,重力作用下液态相变材料向上流动,从而引发液相区普遍存在的自然对流,蓄热过程进入第 2 阶段,在此阶段相变材料区域传热以对流换热为主导,此阶段到 4 000 s,同心套管蓄热器的液相率达到约 65%;随着空腔上半区域的液相材料完全融化,下半部分的弓形区域由于缺少自然对流的促进,进入了导热为主缓慢融化的第 3 阶段,此阶段是整个蓄热过程中融化速率最慢的一个阶段,所需融化时间较长。

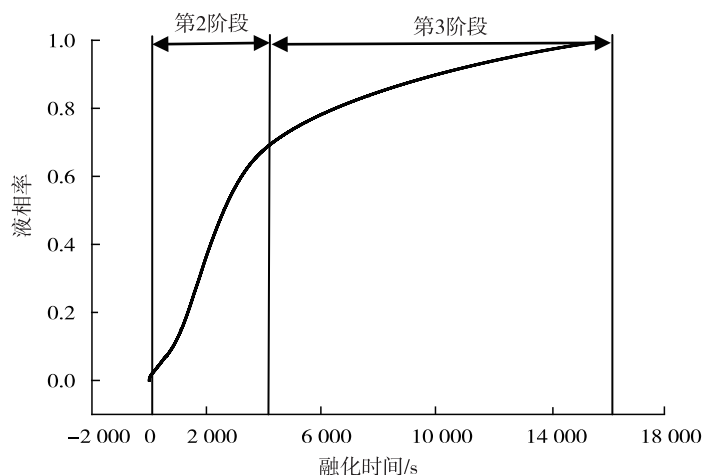


图 7 同心套管蓄热器蓄热过程液相率  
随时间变化曲线图

Fig. 7 Curve of liquid phase rate versus time in the heat storage process of concentric casing accumulator

## 4 结 论

利用流体计算软件 FLUENT,以添加质量分数 10%膨胀石墨的石蜡作为复合相变蓄热材料,选取内置凝固融化模型,液态相变材料采用 Boussinesq 假设,以逐段线性法设置复合相变材料的比热容和密度,对套管式相变蓄热器的蓄热过程进行了数值模拟计算,考察有、无自然对流对蓄热器蓄热过程的影响,着重分析了液态相变材料的自然对流对相变区域流动特性和传热特性的影响,得到结论如下。

1)密度差引起的自然对流对相变蓄热器的蓄热过程有较强的促进作用,有、无自然对流,蓄热器的蓄热完成时间相差近 2 倍。

2)有自然对流时,在相变材料融化过程前期,套管上方各点温度差异大,自然对流换热更为强烈,该区域相变材料融化速度较快,而套管下方,由于温度高,密度小的液体在相变材料区域的上方,无法形成自然对流,融化速度慢。在融化过程的后期,套管上方的相变材料已全部融化,温度差异小,自然对流强度逐渐平缓,套管下方的相变材料融化速度大幅度降低。

3)基于有自然对流存在时相变材料区域液体流动和蓄热特性的分析,将同心套管的蓄热阶段分为自然对流影响较大的前期快速融化阶段(第 2 阶段)和自然对流强度逐渐平缓的后期缓慢融化阶段(第 3 阶段)。基于理论分析将相变材料融化过程进行分段可以更加深入地了解自然对流对蓄热器蓄热过程的影响规律,为优化蓄热器结构提供一定的理论参考。

通过研究发现,自然对流可以明显促进蓄热器上半部分的融化过程,但对套管以下相变材料区域部分影响较小,套管下方相变区域的主要传热方式仍然依靠纯导热,传热效率低。为解决这一问题,后续研究应从强化套管以下相变材料的传热速率出发,设计更为有效的强化传热结构,如加装肋片、采用偏心套管等,以快速提高蓄热器的蓄热效率,满足新能源利用过程中的高效储能要求,进而解决新能源发展过程中时空尺度供需不匹配的问题。

### 参考文献/References:

- [1] 赵宏图. 碳中和与中国能源安全[J]. 当代世界, 2022(6): 21-26.

- ZHAO Hongtu. Carbon neutrality and China's energy security[J]. *Contemporary World*, 2022(6): 21-26.
- [2] 汪波,李朝前. 全球可再生能源发展现状及趋势[J]. *中国物价*, 2018(5): 44-47.  
WANG Bo, LI Chaoqian. Current situation and trend of global renewable energy development[J]. *China Price*, 2018(5): 44-47.
- [3] 王梅杰,胡良博. 相变蓄热技术的研究现状及发展趋势[J]. *能源研究与利用*, 2021(5): 28-32.  
WANG Meijie, HU Liangbo. Research status and development trend of phase change heat storage technology[J]. *Energy Research & Utilization*, 2021(5): 28-32.
- [4] 金光,肖安汝,刘梦云. 相变储能强化传热技术的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(6): 1107-1115.  
JIN Guang, XIAO Anru, LIU Mengyun. Research progress on heat transfer enhancement technology of phase change energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(6): 1107-1115.
- [5] 林文珠,凌子夜,方晓明,等. 相变储热的传热强化技术研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(9): 5166-5179.  
LIN Wenzhu, LING Ziyue, FANG Xiaoming, et al. Research progress on heat transfer of phase change material heat storage technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(9): 5166-5179.
- [6] 华建社,张娇,张焱,等. 膨胀石墨/石蜡复合相变蓄热材料的热性能及定形性研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(12): 61-64.  
HUA Jianshe, ZHANG Jiao, ZHANG Yan, et al. Study on thermal properties and shape-stabilizing of expanded graphite/paraffin composite phase change material[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(12): 61-64.
- [7] 华维三,章学来,罗孝学,等. 纳米金属/石蜡复合相变蓄热材料的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(6): 1723-1728.  
HUA Weisan, ZHANG Xuelai, LUO Xiaoxue, et al. Experimental study of nanometal-paraffin composite phase change heat storage material[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2017, 38(6): 1723-1728.
- [8] 崔海亭,李宁,赵华丽,等. 太阳能热发电系统蓄热装置的模拟研究[J]. *流体机械*, 2016, 44(5): 77-82.  
CUI Haiting, LI Ning, ZHAO Huali, et al. The numerical simulation of heat storage device used in solar thermal power generation[J]. *Fluid Machinery*, 2016, 44(5): 77-82.
- [9] 任红霞,孙坤坤,崔海亭,等. 组合式高温相变蓄热器蓄热过程的数值模拟[J]. *可再生能源*, 2016, 34(1): 106-111.  
REN Hongxia, SUN Kunkun, CUI Haiting, et al. Numerical simulation of heat storage process of high temperature phase change heat accumulator[J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(1): 106-111.
- [10] 蒋静智,罗威,薄林,等. 太阳能螺旋槽管相变蓄热器强化传热性能研究[J]. *河北科技大学学报*, 2018, 39(5): 462-469.  
JIANG Jingzhi, LUO Wei, BO Lin, et al. Study on heat transfer enhancing performance of spiral groove tube in phase change heat storage for solar energy[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, 39(5): 462-469.
- [11] MAZHAR A R, SHUKLA A, LIU Shuli. Numerical analysis of rectangular fins in a PCM for low-grade heat harnessing[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 152: 78-84.
- [12] TAO Y B, HE Y L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 245-259.
- [13] 任智彬,黄河,高佳徐,等. 三维套管式加肋相变蓄热单元的传热特性分析[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(5): 437-443.  
REN Zhibin, HUANG He, GAO Jiayu, et al. Analysis of heat transfer characteristics of three-dimensional tubular ribbed phase change heat storage unit[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(5): 437-443.
- [14] 于鹏,李晓庆,毛前军,等. 矩形蓄热单元内石蜡熔化传热特性的数值模拟与实验研究[J]. *可再生能源*, 2022, 40(6): 781-786.  
YU Peng, LI Xiaoqing, MAO Qianjun, et al. Numerical simulation and experimental study of melting heat transfer characteristics of paraffin in rectangular heat storage unit[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(6): 781-786.
- [15] 席治国,张卢腾,胡廷文,等. 熔融池相变传热特性的大涡模拟数值研究[J]. *核动力工程*, 2022, 43(1): 15-21.  
XI Zhiguo, ZHANG Luteng, HU Yuwen, et al. Large-eddy simulation numerical study on phase change heat transfer characteristics of melting pool[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2022, 43(1): 15-21.
- [16] FORNARELLI F, CAMPOREALE S M, FORTUNATO B, et al. CFD analysis of melting process in a shell-and-tube latent heat storage for concentrated solar power plants[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 711-722.
- [17] SEDDEGH S, WANG X L, HENDERSON A D. Numerical investigation of heat transfer mechanism in a vertical shell and tube latent heat energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 698-706.
- [18] 邹勇,仇汝冬,王霞. 石蜡相变材料蓄热过程的模拟研究[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(1): 101-108.  
ZOU Yong, QIU Rudong, WANG Xia. Simulation study on thermal storage process of paraffin phase change materials[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(1): 101-108.
- [19] 吴学红,姜文涛,翟亚妨,等. 内翅式套管相变蓄热器性能研究[J]. *可再生能源*, 2016, 34(9): 1369-1374.  
WU Xuehong, JIANG Wentao, ZHAI Yafang, et al. Study on the performance of sleeve PCM thermal energy storage unit with internal fins[J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(9): 1369-1374.
- [20] BRENT A D, VOLLER V R, REID K J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal[J]. *Numerical Heat Transfer*, 1988, 13(3): 297-318.
- [21] DANTZIG J A. Modelling liquid-solid phase changes with melt convection[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1989, 28(8): 1769-1785.
- [22] 陈阳丽. 环腔内石蜡熔化过程的数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.  
CHEN Yangli. Numerical Analysis on Melting Process of Paraffin in a Vertical Annular Cylinder[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [23] 刘凤青. 泡沫金属对相变蓄热强化性能的数值模拟及实验研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2010.  
LIU Fengqing. Numerical Simulation and Experimental Study on Enhancement of Foam Metals to Phase Change Heat Storage[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2010.