

章编号: 1671-6612 (2025) 01-026-08

圆柱双 U 型低温相变蓄能装置动态蓄热释热特性研究

张瑞雪^{1,3} 邵京² 李俊华² 崔一鸣^{1,3} 薛汇宇^{1,3} 冯晓梅^{1,3} 康熙⁴

(1. 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013;

2. 中国航空油料有限责任公司 北京 100088;

3. 建科环能科技有限公司 北京 100013;

4. 河北省建筑工程质量检测中心有限公司 石家庄 050021)

【摘要】 以圆柱双 U 型低温相变蓄能装置为对象, 利用数值模拟计算方法, 动态分析了相变蓄能装置蓄热特性、释热特性, 并分析热流体温度、流速对相变蓄能装置蓄热影响。研究表明: 相变温度、固相率、流体温度是分析蓄热、释热特征的关键参数; 提高热流体流速、温度均可以缩短相变蓄热时长, 热流体温度比热流体流速对蓄能装置蓄热特性影响更大。

【关键词】 双 U 型低温相变蓄能装置; 蓄热特性; 释热特性; 相变温度; 固相率; 流体温度
中图分类号 TU83 文献标志码 A

Dynamic Storage and Release Characteristics of the Cylindrical Double U-type Low-temperature Phase Change Thermal Storage Device

Zhang Ruixue^{1,3} Shao Jing² Li Junhua² Cui Yiming^{1,3} Xue Huiyu^{1,3} Feng Xiaomei^{1,3} Kang Xi⁴

(1. China Academy of Building Research, Beijing, 100013;

2. China National Aviation Fuel Group Limited, Beijing, 100088;

3. Jianke EET Co., Ltd, Beijing, 100013;

4. Hebei Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd, Shijiazhuang, 050021)

【Abstract】 A cylindrical double U-shaped low-temperature phase-change energy storage device was used as an object to dynamically analyze the heat storage and heat release characteristics of the phase-change energy storage device by numerical simulation method, and the influence of thermal fluid temperature and flow rate on the heat storage device was analyzed. The results show that the phase change temperature, solid phase ratio and fluid temperature are the key parameters to analyze the characteristics of heat storage and heat release. Increasing the velocity and temperature of hot fluid can shorten the duration of phase change heat storage, and the temperature of hot fluid has more influence on the heat storage characteristics of energy storage device than the velocity of hot fluid.

【Keywords】 Double U-type low-temperature phase change storage device; Heat storage characteristics; Heat release characteristics; Phase change temperature; Solid phase ratio; Fluid temperature

基金项目: 国家重点研发计划项目“零碳建筑太阳能高效蓄能输配与末端技术及产品研发”(2022YFC3802704); 近零碳供油系统设计研究与实践(HYKJ-202212)

作者简介: 张瑞雪(1986-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: zhangruixue198639@163.com

通讯作者: 李俊华(1995-), 女, 硕士研究生, 工程师, E-mail: lijh06@cnaif.com

收稿日期: 2024-09-13

0 引言

新型储能是构建新型电力系统的重要技术和基础装备, 是实现碳达峰碳中和目标的重要支撑^[1]。蓄能空调是提升电力系统调节能力和灵活性, 支撑新型电力系统动态平衡的一项重要技术手段^[2]。建筑需求侧负荷大、时空波动性强, 导致能源供需不匹配, 蓄能可解决建筑能量供应与需求在时间上不一致性, 实现建筑负荷匹配, 有效转移电力高峰、平衡电网负荷、降低运行费用^[3-5]。

相变蓄能作为一种蓄能方式, 因具有储能密度较高、储/放热过程中温度恒定或近似恒定、存储装置体积小、价格便宜等优点, 广泛应用在太阳能热利用、建筑节能等多个领域^[6]。在蓄能空调领域, 相变蓄能应用研究主要聚焦在太阳能、空气源、土壤源热泵耦合系统中相变蓄热材料特性、相变蓄热装置特性^[7-12], 针对相变蓄能装置与高温水源热泵耦合系统研究较少。相变蓄能装置结构形式较多, 学者对管壳式^[13-18]、盘管式^[19,20]等相变蓄热装置进行了蓄热或释热单一过程数值模拟计算。蓄热是将能量储存在相变材料的过程, 释热是相变材料将储存能量释放的过程, 研究相变蓄能装置蓄热、释热完整周期特性为分析蓄能装置能否匹配分时电价、满足建筑负荷需求的重要提供理论参考。笔者在上述研究基础上, 以匹配高温水源热泵供热系统的圆柱双 U 型低温相变蓄能装置为对象, 利用数值模拟计算方法, 动态分析蓄热、释热完整周期的蓄热特性、释热特性, 并分析热流体温度、流速对相变蓄能装置蓄热影响。

1 相变蓄能装置物理和数学模型

1.1 物理模型

圆柱双 U 型相变蓄能装置结构模型如图 1 所示, 其外形为圆柱体, 高 1.65m, 直径 0.2m, 外壳采用高性能聚丙烯制成, 内部封装月桂酸类相变材料, 其物性参数如表 1 所示。相变蓄能装置进、出管为 2 根 U 型铜管, 直径 15mm, 1 根用于蓄热, 1 根用于释热。蓄热时, 高温水由热泵冷凝侧出口流入蓄热 U 型管进口, 与温度较低的相变材料发生热交换, 温度降低后再通过蓄热 U 型管出口流回热泵冷凝器入口; 在此过程中, 相变材料因吸收热量由内向外逐渐熔化, 直至全部熔化且其温度与热流体的温度基本相近。释热时, 供暖末端温度较

低的水进入释热 U 型管进口, 与温度较高的相变材料发生热交换, 温度升高后再通过释热 U 型管出口流回供暖末端, 相变材料因释放热量由内向外逐渐凝固, 直至固相率稳定不变且其温度稳定基本不变。

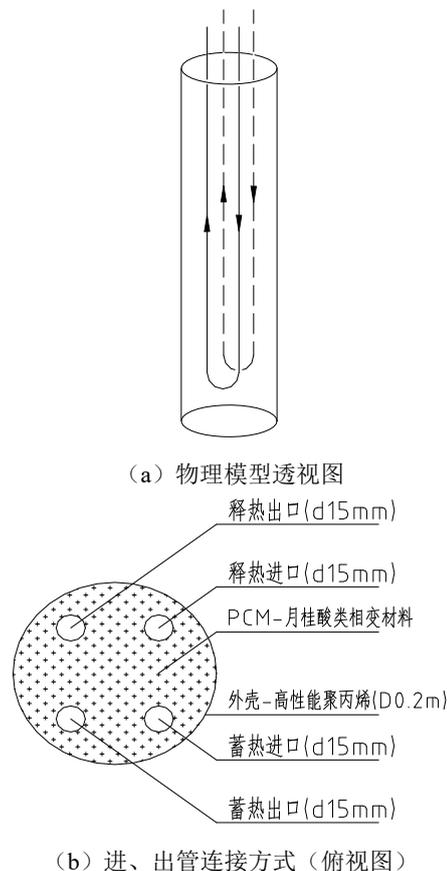


图 1 圆柱双 U 型相变蓄能装置结构模型

Fig.1 Structure model of cylindrical double U-shaped phase change storage device

表 1 月桂酸类相变材料热物性参数^[15]

Table 1 Thermal properties of lauric acid phase change materials^[15]

状态/参数	固态	液态
比热容/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	1.76	2.27
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1007	862
导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	1.6	1.6
相变温度/ $^{\circ}\text{C}$	42.63	42.63
相变潜热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	211.6	211.6

1.2 数学模型

数值模拟分析采用 solidification/melting 模型, 引入了固相率参数处理相变传热过程, 该方法通过

固相比比例间接跟踪相界面位置的变化,在固相和液相并存的糊状区域视为多孔介质处理。

由于相变传热过程较为复杂,诸如液体相变材料自然对流、相变引起的体积变化等因素影响相变传热过程,需进行适当简化:①相变材料均匀,各向同性;②相变材料固相、液相热物性参数为常数且不随温度变化;③不考虑相变过程中体积变化;④固相状态区域不随流体流动;⑤蓄能装置外壁绝热。根据上述假设以及相变传热理论,建立如下控制方程^[16]。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial U_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + q + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

放热时(1)式右侧第三项:

$$\rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} > 0 \quad (2)$$

吸热时(1)式右侧第三项:

$$\rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} < 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot [1 - f_s]}{C_k} \cdot U \cdot \Delta x \quad (4)$$

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_l[1-f_s] + \rho_s f_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l \mu_l^l [1-f_s] + \rho_s \mu_s^s f_s)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$f_s = \begin{cases} 0 & T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T < T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_s 为固相率,在 0~1 之间变化; L 为潜热, J/kg; μ 为黏度系数, Pa·s; U 为液体速度, m/s; Δx 为网格大小, m; C_k 为渗透系数, m²; ρ_s 、 ρ_l 为固体、液体密度, kg/m³; μ_s^s 、 μ_l^l 为固液两相模糊区运动速度, m/s。

外壁绝热:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=R} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, z=h} = 0 \quad (8)$$

式中: T 为温度, °C; R 为蓄能装置底部半径, m; h 为蓄能装置高度, m。

1.3 模拟计算工况

蓄能装置蓄热释热特性数值计算边界条件如表 2, 压力和速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 压力梯度采用 PRESTO 格式离散, 动量方程和能量方程均采用二阶迎风格式离散。

表 2 蓄热和释热数值模拟计算工况

Table 2 Numerical simulation conditions of heat storage and heat release

工况	相变材料 初始温度/°C	热流体 进口温度/°C	热流体 进口速度/m·s ⁻¹	时间 步长/min	计算 时长/min
蓄热计算工况 1	20	65	0.5	10	340
释热计算工况 1	65	35	0.5	10	1030

1.4 网格无关性检验

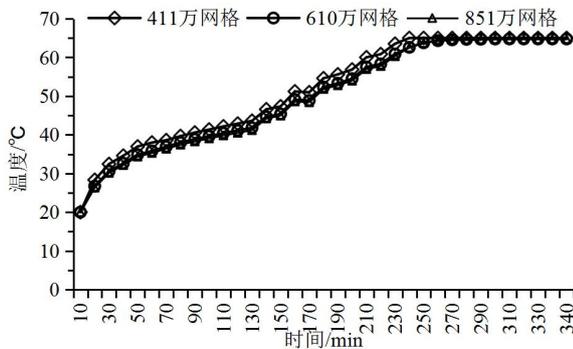


图 2 不同网格相变区域平均温度

Fig.2 Monitor temperature of different grid numbers

图 2 为蓄热计算工况 1 相变区域平均温度变化

曲线。由图可知, 网格数量为 610 万网格与 851 万网格温度曲线基本重合, 为保证计算结果准确性与计算效率, 本研究网格划分为 610 万网格。

2 计算结果分析

2.1 蓄热特性模拟分析结果

图 3 和图 4 为蓄热过程相变区域固相率变化情况, 整个相变区域固相率与时间基本呈反向变化关系。从图可以看出: (1) 固相率变化整体分三个阶段, 第一阶段 0min~130min, 固相率由 100.00% 降低到 62.57%, 变化速率为 0.17/h; 第二阶段 130min~240min, 固相率变化速率增大, 由 62.57% 迅速降低到 0.00%, 在 240min 时固相率达到

0.00%, 变化速率为 0.34/h; 第三阶段 240min~340min, 固体相变材料全部液化, 固相率不发生变化; (2) 在蓄热过程中, 第二阶段固相率变化速率是第一阶段固相率变化速率的 2.00 倍; 分析原因主要由于第二阶段发生相变, 固态和液态混合区域固相率降低、液态率增加, 液态相变材料在质量和体积上均占明显优势, 液态相变材料扰动作用加强, 自然对流、相变传热加持加剧了内部换热, 使得融化过程加速, 固相率降速变化大。

图 5 和图 6 为蓄热过程相变区域平均温度变化情况, 相变区域平均温度与时间呈正向变化关系。由图可以看出: (1) 由于第一阶段相变区域与热流体温差大, 换热效果好, 在 0min~60min 相变材料迅速升温至平均温度 35.83℃, 60min~130min 升温速度变缓至平均温度 41.81℃, 基本达到相变温度; (2) 第二阶段如前固相率变化分析, 液态相变材料占主导, 自然对流、相变传热作用加强了内

部换热, 整个相变区域平均温度变化快, 在 240min 时相变材料全部融化, 此时相变区域平均温度为 62.60℃; (3) 第三阶段 310min 时相变区域平均温度达到 64.77℃, 基本达到热流体温度 65.00℃, 蓄热温度稳定, 蓄热过程停止。

比较图 3 和图 5: (1) 第二阶段 240min 时, 相变材料全部融化, 固相率为 0.00%, 液相率为 100.00%; (2) 此时相变区域内平均温度基本达到 62.60℃, 自然对流和相变潜热占据主导作用, 内部换热仍在进行, 整个相变区域温度持续升高; (3) 第三阶段 310min 时, 整个相变区域平均温度基本达到热流体温度, 蓄热过程基本结束; 整个蓄热过程说明, 固相率达到 0.00% 后, 并不意味着蓄热过程结束, 第三阶段以导热传热为主; (4) 相变温度 (42.63℃)、固相率 (0.00%)、蓄热流体温度 (65.00℃) 是蓄热过程三个关键节点, 三个关键参数将蓄热过程划分为三个变化阶段。

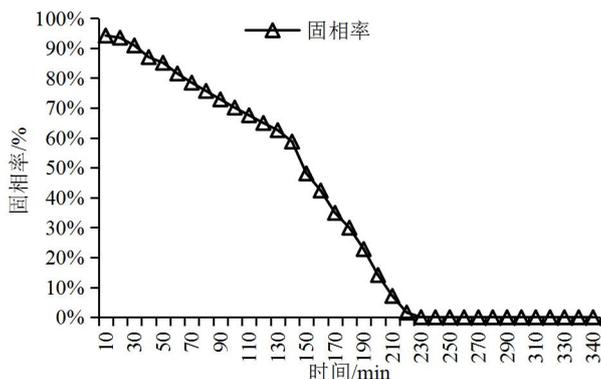


图 3 蓄热过程相变区域固相率变化曲线

Fig.3 Curve of solid phase ratio change during heat storage

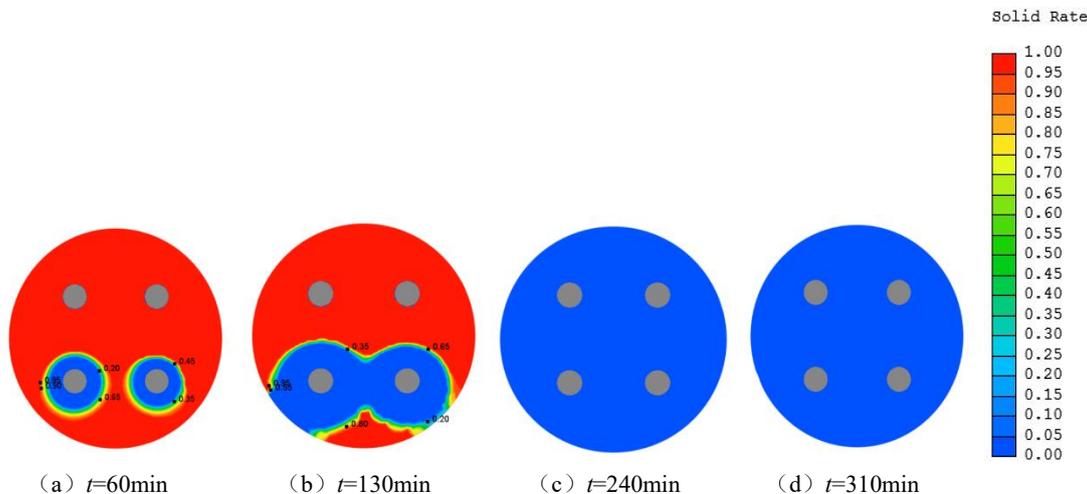


图 4 相变蓄能装置蓄热过程固相率变化

Fig.4 Change of solid phase ratio during heat storage

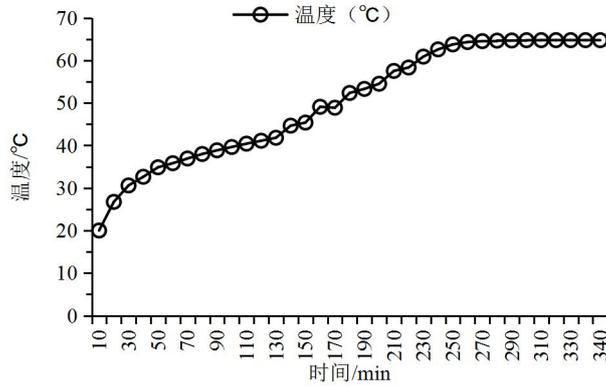


图 5 蓄热过程相变区域平均温度变化曲线

Fig.5 Average temperature change curve during heat storage

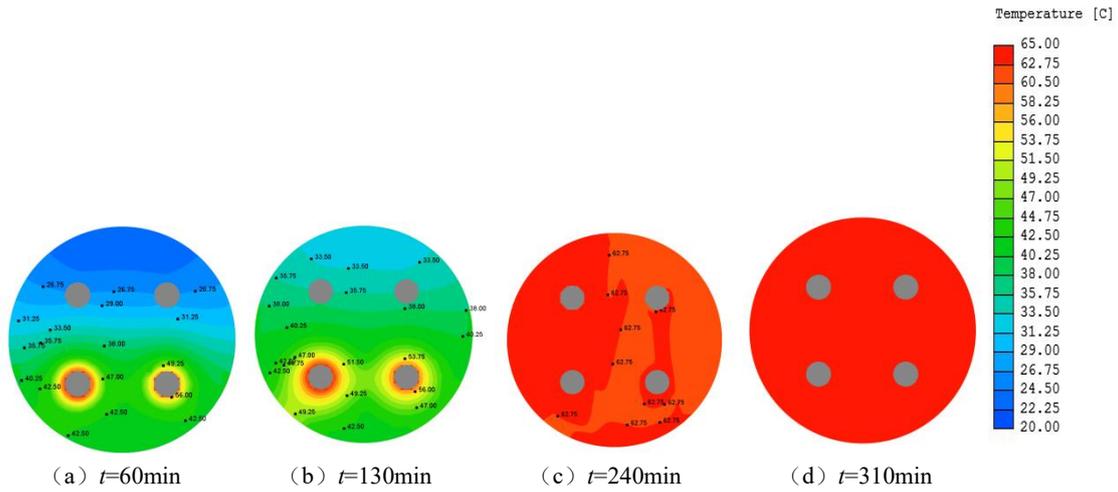


图 6 相变蓄能装置蓄热平均温度变化

Fig.6 Change of average temperature of heat storage

2.2 释热特性模拟分析结果

图 7 和图 8 为释热过程相变区域固相率变化趋势图，整个相变区域固相率与时间基本呈正向变化关系。从图 7 可以看出：（1）固相率变化整体也分三个阶段，第一阶段 0min~220min，该阶段固相率变化缓慢，释热 90min 时固相率达到 9.99%，释热 220min 时固相率达到 25.98%，该阶段固相率增速为 0.07/h；第二阶段 220min~770min，固相率达到 76.98%，该阶段固相率增速为 0.06/h；第三阶段 770min~1030min，950min 时固相率达到 94.19%，之后固相率稳定基本维持不变，该阶段固相率增速为 0.06/h；（2）第一阶段固相率是第二阶段、第三阶段的 1.17 倍，释热过程较长。

图 9 和图 10 为释热过程相变区域平均温度变化情况，相变区域平均温度与时间呈反向变化关系。由图可以看出：（1）由于第一阶段相变区域

与热流体温差大，换热效果好，在 0min~90min 相变材料平均温度迅速降低至 47.12℃；在 90min~220min 热流体与相变材料进行显热换热，在 220min 时平均温度达到 42.89℃，基本达到相变温度；（2）第二阶段发生相变，潜热换热占据主导作用，温度下降趋势也逐渐减缓，在 770min 时相变区域平均温度达到 34.96℃，基本达到热流体温度 35.00℃；（3）第三阶段 950min 时，相变区域基本凝固，此时相变区域平均温度达到 29.77℃，该过程固态相变材料占主导，主要以导热为主，传热过程缓慢进行，至 1030min 时，相变区域平均温度达到 27.35℃，第三阶段释热过程基本结束；（4）相变温度（42.63℃）、释热流体温度（45.00℃）、固相率（100.00%）是释热过程三个关键节点，三个关键将参数释热过程划分为三个变化阶段。

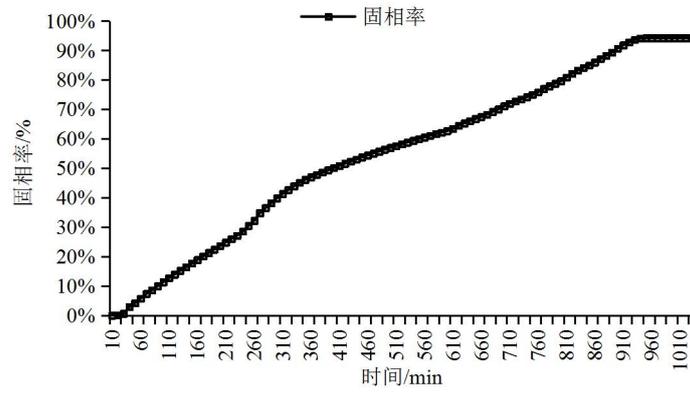


图 7 释热过程相变区域固相率变化曲线

Fig.7 Curve of solid phase ratio change during heat release

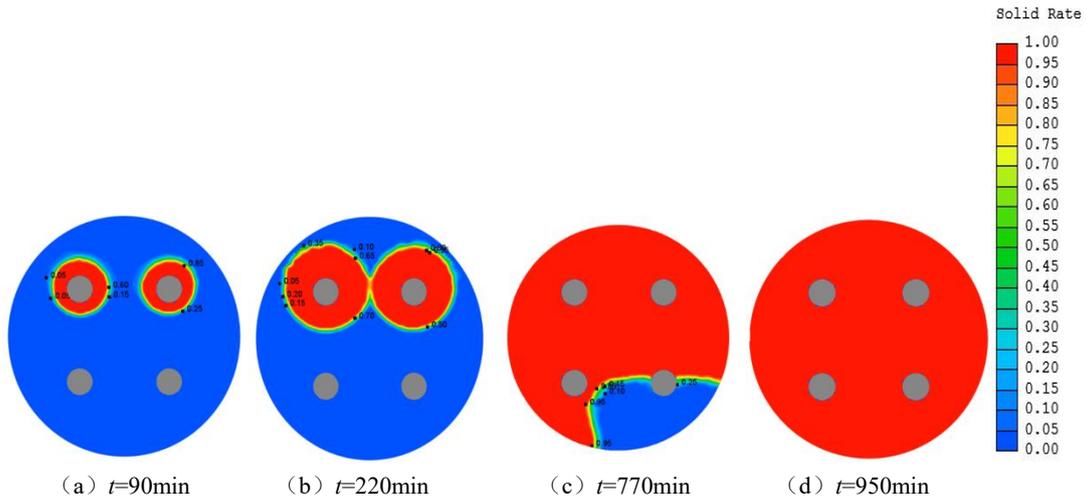


图 8 相变蓄能装置释热过程固相率变化

Fig.8 Change of solid phase ratio during heat release

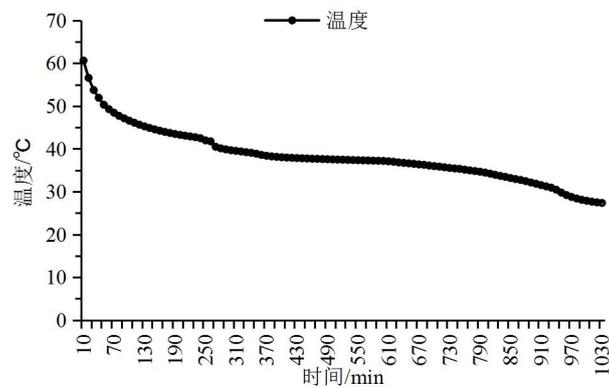


图 9 释热过程相变区域平均温度变化曲线

Fig.9 Average temperature change curve during heat release

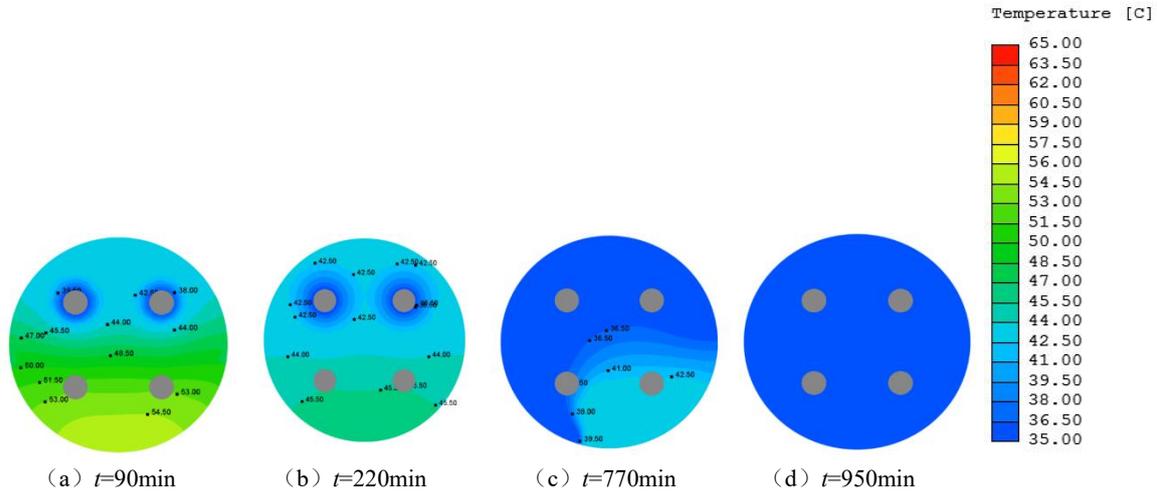


图 10 相变蓄能装置释热平均温度变化

Fig.10 Change of average heat release temperature

2.3 不同工况蓄能装置蓄热特性对比分析

表 3 给出了三种蓄热运行工况下蓄能装置相变区域固相率达到 0.00%所需时间,数值模拟计算获得热流体进口温度、速度因素对蓄热性能的影响。从计算结果看出:蓄热工况 2 蓄能装置固相率达到 0.00%完成时间最短,蓄热工况 3 蓄能装置固相率达到 0.00%完成时间最长。

对比蓄热工况 2 和蓄热工况 1,流速提升 0.5m/s,固相率达到 0.00%完成时间缩短 40min,

由此可知在其他参数相同的情况下,热流体进口速度越大完成时间越短;对比蓄热工况 1 和蓄热工况 3,热流体进口温度提高了 20℃,固相率达到 0.00%完成时间缩短 490min。由此可知在其他参数相同的情况下,热流体进口温度越高完成时间越短;调整热流体入口温度对固相率达到 0.00%完成时间的影响比调整热流体速度的影响更大,因此可认为热流体进口温度比热流体进口流速对蓄能装置蓄热特性影响更大。

表 3 不同蓄能工况蓄热数值计算结果

Table 3 Numerical calculation results of heat storage under different energy storage conditions

工况	相变材料 初始温度/℃	相变 温度/℃	热流体 进口温度/℃	热流体 进口速度/m·s ⁻¹	固相率 0.00% 完成时间/min
蓄热计算工况 1	20	42.63	65	0.5	230
蓄热计算工况 2	20	42.63	65	1	190
蓄热计算工况 3	20	42.63	45	0.5	720

3 结论

以圆柱双 U 型低温相变蓄能装置为对象,采用数值模拟方法,动态分析了蓄能装置蓄热、释热特性,对比了热流体温度、流速对蓄热特性的影响,得到以下结论:

(1) 相变温度、固相率(0.00%)、蓄热流体温度是蓄热过程三个关键节点,三个关键参数将蓄热过程划分为三个变化阶段。蓄热进行 130min 时相变区域平均温度基本达到相变温度,240min 时相变区域固相率为 0.00%,液相率为 100.00%,相变材料全部融化,平均温度基本达到 62.60℃;

310min 时,整个相变区域平均温度基本达到热流体温度,蓄热过程基本结束。

(2) 相变温度、释热流体温度、固相率(100.00%)是释热过程三个关键节点,三个关键参数将释热过程划分为三个变化阶段。释热进行 220min 时相变区域平均温度基本达到相变温度;770min 时相变区域平均温度达到 34.96℃,基本达到热流体温度 35.00℃;950min 时,相变区域基本凝固,此时相变区域平均温度达到 29.77℃。

(3) 提高热流体流速、温度均可以缩短相变蓄热时长,热流体温度比热流体流速对蓄能装置蓄

热特性影响更大。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”新型储能发展实施方案[EB/OL].(2022-1-29),[2024-3-5]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/22/content_5680417.htm.
- [2] 人民网.国家电网加快构建新型电力系统:让更多绿电供得上用得好[EB/OL].(2023-4-19),[2024-3-5]. <http://ah.people.com.cn/n2/2023/0419/c227767-40383028.html>.
- [3] 徐伟,邹瑜,孙宗宇,等.《蓄冷空调工程技术规程》修订要点[J].暖通空调,2018,48(7):2.
- [4] 李骥,徐伟,邹瑜,等.蓄冷空调系统能效限值研究[J].暖通空调,2018,48(7):11.
- [5] 张瑞雪,李骥,徐伟,等.间歇运行供暖系统设计日逐时热负荷附加计算[J].暖通空调,2018,48(7):17.
- [6] 贺斌,何光进,孙彩云,等.相变储能材料研究进展及应用[J].信息记录材料,2022,23(5):72-75.
- [7] 姜益强,齐琦,姚杨,等.太阳能季节性相变蓄热热泵系统在哈尔滨应用的模拟研究[J].暖通空调,2007,37(3):15-20.
- [8] 李志永,陈超,罗海亮,等.太阳能一相变蓄热供暖系统耦合传热模型的建立与实验验证[J].建筑科学,2010,159(10):292-295.
- [9] 杨灵艳,倪龙,姚杨,等.三套管蓄能型太阳能和空气源热泵集成系统可行性实验[J].太阳能学报,2010,31(9):1168-1172.
- [10] 冯国会,付永亮,常莎莎,等.基于空气源热泵的双向相变储能材料与系统储能单元研究[J].建筑科学,2013,29(6):34-38.
- [11] 李新国,胡晓辰,王健.太阳能、蓄热与地源热泵组合系统能量分析与实验[J].太阳能学报,2012,33(4):640-646.
- [12] 朱家玲,王钰沛,张伟.地源热泵与螺旋管式相变蓄热耦合系统的实验研究[J].太阳能学报,2014,35(7):1111-1117.
- [13] 李伟.管外与球体内相变蓄热问题的数值模拟与实验研究[D].天津:天津大学,2010.
- [14] 袁培,孙相印,常宏旭,等.管壳式蓄热装置的设计及蓄热单元三维数值模拟与优化[J].热科学与技术,2018,17(2):102-110.
- [15] Fang Ming, Chen Guangming. Effects of Different Multiple PCMs on The Performance of A Latent Thermal Energy Storage System[J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27:994-1000.
- [16] 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.
- [17] 姜益强,齐琦,姚杨,等.圆柱形壳管式相变蓄热单元的释热特性[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(6):927-930.
- [18] 姜益强,齐琦,姚杨,等.圆柱形壳管式相变蓄热单元的蓄热特性研究[J].太阳能学报,2008,29(1):29-34.
- [19] 李慧.螺旋管式相变蓄热过程的数值模拟和实验研究[D].天津:天津大学,2011.
- [20] 程晓敏,任学宏,李元元,等.螺旋盘管相变蓄热装置的数值模拟[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015,37(6):822-826.
- [21] 周素娟,张小松,殷勇高.套管型相变蓄热装置蓄热过程动态模拟[J].流体机械,2008,36(1):59.
- [22] Software Cradle Co., Ltd. User's Guide Basics of CFD Analysis[Z]. Software Cradle Co., Ltd, 2012:102-105.