

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-364-08

肋片参数对管壳式相变蓄热器蓄热性能影响研究

李文杰 韩如冰

(西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621010)

【摘要】 基于管壳式相变蓄热器,采用数值模拟方法研究了树形肋片结构对蓄热过程的作用机制。建立肋片单元模型,重点分析了肋片参数(末枝长度、末枝与分支夹角)对相变蓄热过程的影响。结果表明,肋片末枝长度对相变过程的影响显著,其与熔化速率呈正相关(末枝长度越长,熔化速率越快);肋片末枝与分支夹角对相变过程影响较明显,当该夹角偏大或偏小时,均会使热传递效率减退,进而削弱了石蜡熔化效果;当夹角为 30°时,可达到最佳的传热效率与温度分布。此外,研究发现在 PCM 开始熔化阶段,树形肋片间存在熔化迟滞区域;通过在分支处增加末枝数量可改善该区域的熔化效果,但其改善幅度较为有限。

【关键词】 相变蓄热;管壳式;肋片;熔化速率

中图分类号 TK02 文献标志码 A

Study on the Influence of Fin Parameters on the Heat Storage Performance of Shell-and-Tube Phase Change Heat Storage Devices

Li Wenjie Han Rubing

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 Based on a shell-and-tube phase change heat storage device, a numerical simulation method was used to investigate the mechanism of action of tree-like fin structures on the heat storage process. A fin unit model was established, with a focus on analyzing the influence of fin geometric parameters (terminal branch length, angle between terminal and primary branches) on the phase change heat storage process. The results indicate that the length of the terminal branches significantly affects the phase change process, exhibiting a positive correlation with the melting rate (longer terminal branches result in faster melting rates); the angle between the terminal branches and the branches also significantly influences the phase change process. When this angle is too large or too small, it reduces heat transfer efficiency, thereby weakening the wax melting effect; When the angle is 30°, the optimal heat transfer efficiency and temperature distribution are achieved. Additionally, the study found that during the initial melting stage of PCM, there is a melting lag zone between the tree-like fins; Increasing the number of terminal branches at the branches can improve the melting effect in this zone, but the improvement was relatively limited.

【Keywords】 Phase change heat storage; Shell-and-tube; Fins; Melting rate

0 引言

国家主席习近平在 2020 年提出中国将争取在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和^[1]。

太阳能是丰富的可再生能源,具有可用性、丰富性和环境友好等优势,但其时效性和地域性限制了大规模应用。因此,储能技术(TES)的发展对于最

基金项目:西南科技大学博士基金项目(23zx7105)

作者简介:李文杰(2001-),男,在读研究生,E-mail: 13541567585@163.com

通讯作者:韩如冰(1978-),女,博士,副教授,E-mail: hanrubing@swust.edu.cn

收稿日期:2025-08-07

大程度地弥补太阳能利用的不足至关重要^[2,3]。

目前国内外学者已经对太阳能相变蓄热器进行了研究。其中, 管壳式相变蓄热器具有单位体积相变材料 (PCM) 填充密度高、热损失低以及加工工艺简便等突出特点, 因而受到广泛关注, 是该领域的研究热点^[4-6]。然而, PCM 普遍存在的低导热系数问题制约了热量的及时储存与利用^[7], 添加肋片是增强 PCM 蓄热性能的常用方式。王玮琦等^[8]研究了矩形环肋对管壳式相变换热器传热性能的影响, 结果表明, 矩形环肋比传统环肋具有更短的熔融时间, 且分形肋片性能优于传统环肋。韩涛等^[9]对比了环肋与直肋结构对相变储热过程的影响, 结果表明, 直肋通过强化自然对流, 其传热效果优于环肋。康湘杰等^[10]提出了一种鱼骨仿生肋片模型, 系统研究肋片关键参数 (长度、位置、角度) 对相变蓄热器蓄放热效率的影响, 结果表明, 鱼骨仿生肋片显著提升 PCM 熔化速率及温度均匀性, 较同体积直肋装置熔化时间更短。谢鑫等^[11]将拓扑优化引入相变储热领域, 揭示了热扩散率比、Stefan 数及自然对流对肋片结构的影响, 结果表明, 拓扑优化设计通过强化对流换热, 使储热单元效率显著提升, 模型达到 0.9 无量纲平均温度与 PCM 完全相变所需时间同步缩短。上述研究表明, 分形肋片可显著强化相变传热, 但仍需对结构进一步优化以获得更佳性能。

本研究旨在探究管壳式相变蓄热器中树形肋片结构^[12]的相变熔化传热特性。基于数值模拟方法, 分析肋片长度与角度变化对熔化性能的影响规律并进行优化设计。研究提供了基于分形理论的肋片优化思路, 为相变蓄热器的应用与优化设计提供参考。

1 数值模拟

1.1 物理模型

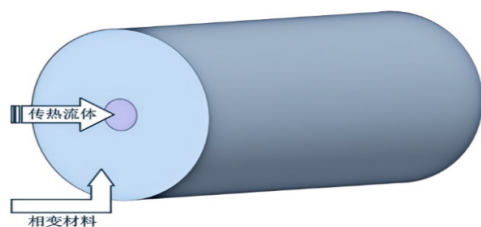


图 1 管壳式相变蓄热器的物理模型

Fig.1 Physical model of the shell-and-tube phase change thermal energy storage unit

本研究针对如图 1 所示的管壳式相变蓄热器的物理模型展开, 对其蓄热特性进行研究。内管与外管间填入相变材料, 内管里面流动的传热流体给相变材料加热或冷却。

Seddegh S 等^[13]通过实验研究了几何参数对垂直圆柱形壳管系统的影响, 结果表明, 当外壳与内管半径比为 5.4 时, 系统展现出最优的储能性能。为了简化计算过程, 本文基于上述研究结论, 将管壳式相变蓄热器合理地简化为二维轴对称模型。又经过初步定壁温模拟显示, 相较于壳管比 8.1, 壳管比 2.7 和 5.4 的蓄热时间分别显著减少了 65.58% 和 42.19%。尽管壳管比 2.7 比 5.4 能进一步缩短 22.39% 的蓄热时间, 但其相变材料装载量过低, 导致总蓄热量小, 优势有限。鉴于本研究旨在集中分析肋片结构的影响, 为避免几何参数过度分散研究焦点, 最终选择综合性能更均衡的半径比 $R/r=5.4$ 作为基准模型, 即内管直径 $d=10\text{mm}$ (半径 $r=5\text{mm}$), 外管直径 $D=54\text{mm}$ (半径 $R=27\text{mm}$)。建模时忽略了内、外管的壁厚影响, 其无肋片管壳式相变蓄热器如图 2 所示。

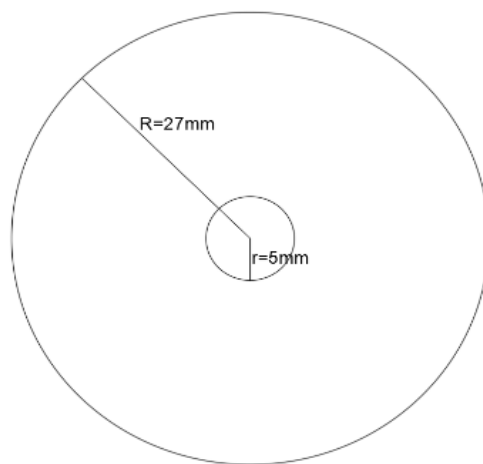


图 2 无肋片管壳式相变蓄热器

Fig.2 Shell-and-tube phase change thermal energy storage unit without fins

1.2 数学模型

为简化其模型, 对管壳式相变蓄热器进行如下假设: (1) 不考虑管壁厚度的影响, 将内管壁面设为恒温, 外管壁面设为绝热; (2) PCM 的密度采用 boussineq 假设, 其余物性参数 (比热容、导热系数等) 均视为恒定且各向同性; (3) PCM 熔化过程中因重力作用产生的自然对流, 按层流流动进行流场分析; (4) 已经熔化的液态相变材料在

蓄热器中为非稳态、不可压缩牛顿流体。控制方程如式 (1) - (7) 所示。

连续性方程和动量方程分别如式 (1)、(2) 所示。

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

式中: V 为速度, m/s。

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho \beta g (T - T_{ref})] + S \quad (2)$$

式中: t 为时间, s; ρ 为相变材料密度, kg/m³; p 为压强, Pa; μ 为动力黏度, Pa·s; β 为热膨胀系数, 1/K; g 为重力加速度, m/s²; T 为温度, K; T_{ref} 为参考温度, K; S 为源项。

动量方程 (2) 中的源项 S 可表示为:

$$S = \left[(1 - \lambda)^2 / \lambda^3 \right] A_{mush} V \quad (3)$$

式中: $A_{mush} V$ 为糊状区常数, 本文取 10^5 进行计算。

能量方程如式 (4) 所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (Vh) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h \right) \quad (4)$$

式中: h 为显热焓, J/kg; H 为潜热焓, J/kg; k 为导热系数, W/(m·K); c_p 为比热容, J/(kg·K)。

显热焓 h 可表示为:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT = h_{ref} + c_p \int_{T_{ref}}^T dT \quad (5)$$

式中: h_{ref} 为参考焓, J/kg。

潜热焓 H 可表示为:

$$H = \lambda L \quad (6)$$

式中: λ 为液相分数, 取值范围 0~1; L 为完全熔化潜热, J/kg。

λ 可表示为:

$$\lambda = \frac{H}{L} = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_s 为相变材料凝固温度, K; T_l 为相变材料熔化温度, K。

1.3 初始和边界条件

采用 Ansys Fluent 2022 R1 建立二维瞬态模型, 基于压力求解法 (Pressure-Based), 重力加速度设置为 y 轴负方向 9.8 m/s^2 , 流动方程设置为默

认层流模型, 利用能量方程和凝固/熔融模型。在对瞬态特性显著的流场展开计算时, PISO 算法具有明显的优势。本文采用二阶迎风格式的 PISO 算法求解, 其中 2 个修正系数均取默认值 1。初始和边界条件如下: 相变材料 (PCM) 初始温度为 300K, 内管管壁恒定温度为 350K, 肋片与内管接触界面、PCM 与肋片接触界面、PCM 与内管接触界面均为耦合壁面传热边界条件, 外管管壁设置为绝热 (热通量=0)。因金属铜导热性较好, 模拟中选用铜制管和肋片, PCM 选用石蜡 RT50 (热物性参数见表 1)。

表 1 石蜡 RT50 的热物性参数

Table 1 Thermal properties of paraffin RT50

参数	数值
密度/(kg/m ³)	780
比热容/[J/(kg·K)]	2000
潜热/(J/kg)	168000
导热系数/[W/(m·K)]	0.2
热膨胀系数/K ⁻¹	0.0006
固相熔点/K	318
液相熔点/K	324

1.4 网格无关性验证和时间步长验证

本研究采用 2231、8687 及 23955 三种网格数量对无肋片管壳式相变蓄热器蓄热工况开展数值模拟分析。不同网格数量下的液相分数变化曲线如图 3 所示。经对比发现, 2231 网格工况的液相分数变化呈现显著差异; 与 8687 网格工况相比, 23955 网格下的液相分数变化未显现明显差异。因此, 本研究最终采用 8687 网格数量开展后续模拟。

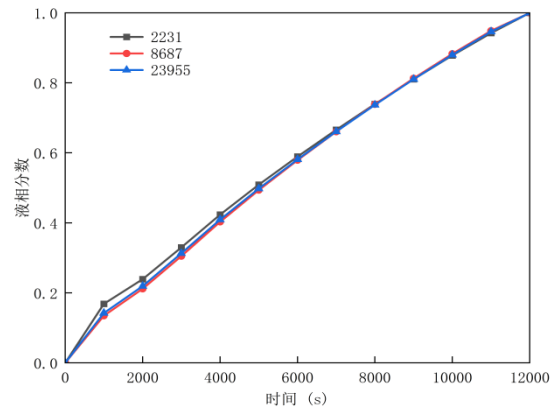


图 3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

采用 0.5s、1s、2s、5s 四种时间步长进行数值模拟分析,不同时间步长(0.5s、1s、2s、5s)下的液相分数变化如图 4 所示。经过对比发现,时间步长的变化对计算结果的影响不显著。时间步长 1s 与 0.5s 的工况下,液相分数曲线变化呈现高度一致性;当时间步长增至 5s 时,曲线偏差显著。综合分析,本研究选择时间步长 1s 进行数值模拟。

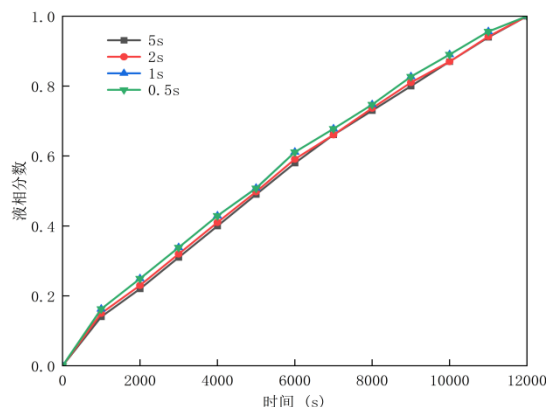


图4 时间步长验证

Fig.4 Time step size verification

1.5 模型验证

为验证数值模拟结果的准确性,本研究将模拟获得的相变材料平均温度曲线与文献[14]中的实验数据进行对比分析。结果如图 5 所示,由图可知,采用本文建立的数值模型得到的模拟结果与文献中实验数据大致趋势相一致,误差在可接受范围内,故本文模型具有可靠性。

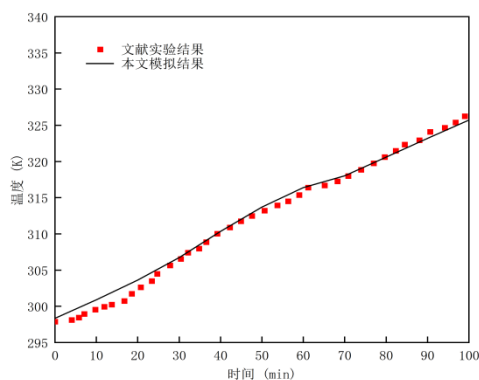


图5 相变材料平均温度随时间变化情况

Fig.5 Temporal variation of the average temperature of the phase change material

2 模拟结果分析

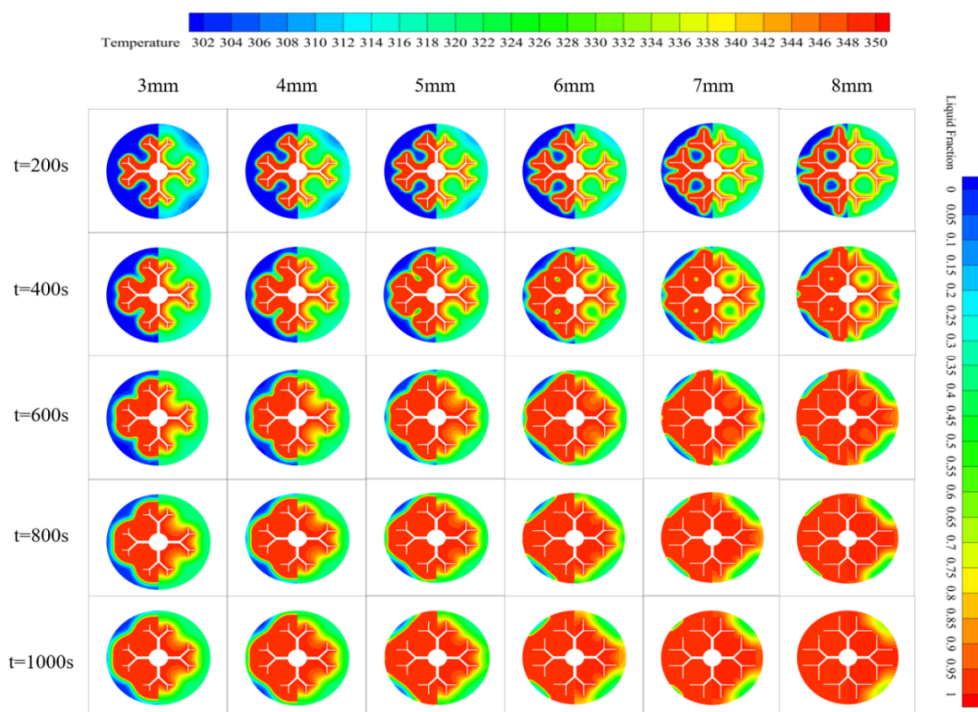
为探究肋片参数对管壳式相变蓄热器蓄热过程的作用机制,本研究采用树形肋片结构。李晓等^[15]通过对温度均匀性与材料用量的分析,发现太阳能相变蓄热风管最佳翅片数为 4,故本研究将树形肋片数量固定为 4 个并呈中心对称分布。肋片主枝与分枝几何尺寸固定:主枝长 6mm、宽 1.5mm;分枝长 6mm、宽 1mm。研究中对末枝长度(3mm、4mm、5mm、6mm、7mm、8mm)的工况下改变末枝与分枝的夹角(15°、30°、45°、60°)进行研究。

2.1 肋片末枝长度对蓄热过程的影响

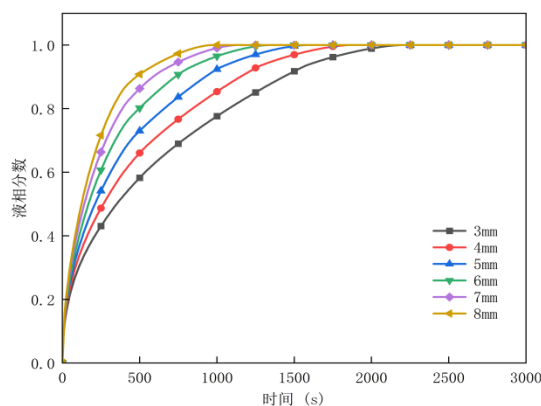
为分析末枝长度对相变蓄热过程的影响,本文在末枝与分枝夹角为 45°工况下,研究末枝长度(3mm、4mm、5mm、6mm、7mm、8mm)对蓄热过程的影响。

图 6(a)展示了不同末枝长度下的液相分数云图(左)、温度云图(右)。在 $t=200s\sim400s$ 时,增加末枝长度可以增强内管周围的传热效果,末枝长度 6mm、7mm、8mm 的蓄热单元中石蜡的熔化速率明显提升,液相区域明显增大,温度分布影响范围较大。在 $t=600s\sim800s$ 时,末枝长度 6mm、7mm 和 8mm 的蓄热单元能有效促进石蜡的相变过程,其温度分布更为均匀;末枝长度 3mm 的蓄热单元虽温度分布均匀但熔化区域受限。在 $t=800s\sim1000s$ 时,末枝长度 6mm 和 7mm 的蓄热单元中石蜡几乎完全熔化(液相率 $>95\%$),末枝长度 8mm 的蓄热单元中石蜡则完全熔化(液相率 $=100\%$),此三组工况熔化过程更均匀,温度分布趋于稳定。相较之下,末枝长度 3mm 的蓄热单元则未熔化区域较多,温度分布趋于分散,并形成明显的温度梯度分布。

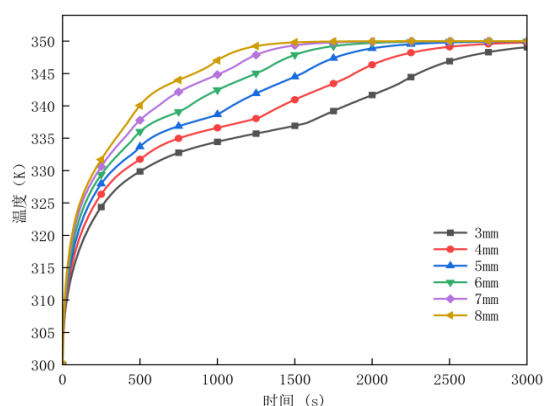
由图 6(b)、图 6(c)可知,末枝长度与熔化速率呈正相关性,末枝长度越长,熔化速率越快;增加末枝长度可增强传热和改善温度分布的均匀性,提升石蜡的熔化效率。定量分析显示,末枝长度 6mm、7mm 和 8mm 的蓄热单元较 3mm 的蓄热单元完全熔化时间分别减少了 39.13%、48.51%、56.06%。综合熔化速率、温度均匀性及材料用量,选择末枝长度 6mm 作为本文的最适宜长度。



(a) 不同末枝长度熔化云图



(b) 液相分数曲线



(c) 温度曲线

图 6 不同末枝长度对石蜡相变过程影响

Fig.6 Effect of branch tip length on the phase change process of paraffin

2.2 肋片末枝角度对蓄热过程的影响

为分析末枝角度对相变蓄热过程的影响,本文在末枝长度 6mm 工况下,研究末枝与分枝的夹角 (15° 、 30° 、 45° 、 60°) 对蓄热过程的影响。

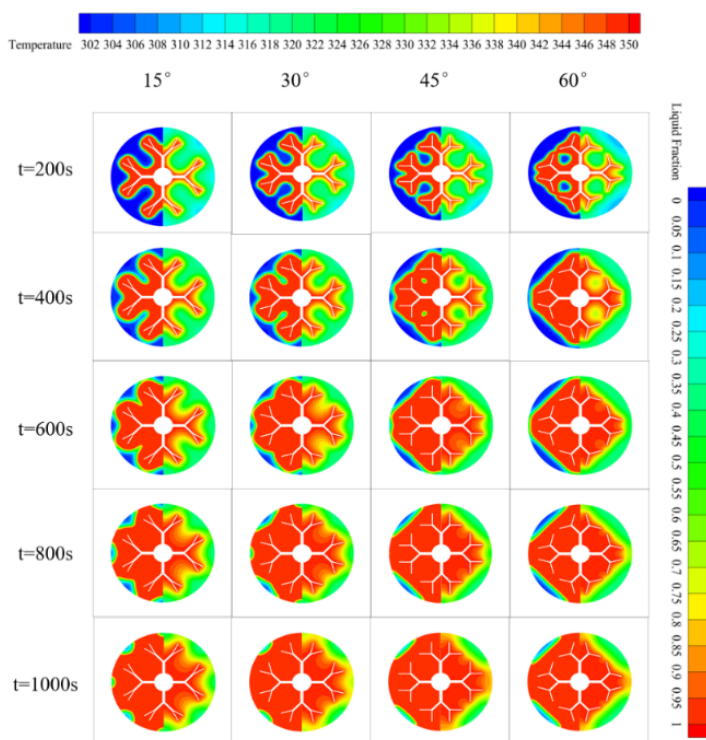
如图 7 (a) 所示的不同末枝肋片角度熔化云图,肋片角度变化影响石蜡熔化速率。当 $t=200s\sim 400s$ 时, 45° 和 60° 肋片蓄热单元对石蜡熔化的促进效果优于 15° 和 30° 肋片蓄热单元。 $t=600s\sim 800s$ 时, 30° 和 45° 肋片蓄热单元对石蜡熔

化过程影响明显,而 60° 肋片蓄热单元因热传导路径受限导致液相区域较小。 $t=800s\sim 1000s$ 时, 15° 和 30° 肋片蓄热单元对相变过程影响最明显,石蜡基本完成熔化且温度分布呈现均匀性。

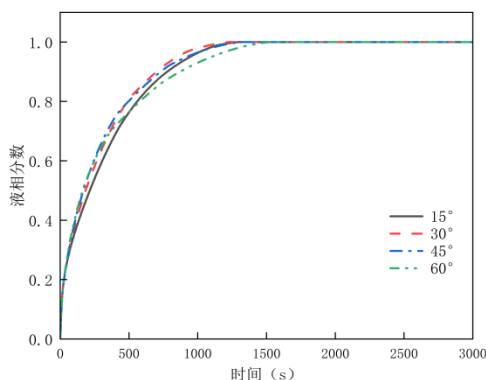
由图 7 (b)、图 7 (c) 可知,各角度液相分数曲线和温度曲线变化趋势具有较高相似性,整体差异度较小。具体而言: 15° 肋片蓄热单元因角度偏小导致热量分布集中,液相分数曲线初始阶段滞后于其他工况,但得益于较长的热传导路径,后期熔化

速率显著提升; 30°肋片蓄热单元的液相分数曲线增长最快, 传热效率最高, 相比于 60°肋片蓄热单元完全熔化时间减少了 19.48%; 45°和 60°肋片蓄热单元的热传导路径较短, 限制了热量向外传递, 导致其

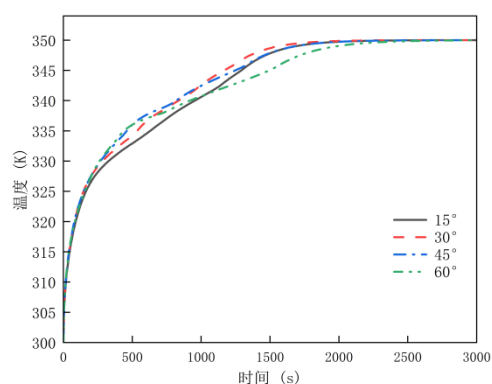
传热效率较低, 液相分数曲线变化较缓慢。综合分析表明, 肋片角度偏大或偏小均会使热传递效率减退, 进而削弱了石蜡熔化效果。因此, 本研究选择末枝与分枝的夹角 30°作为最佳肋片角度。



(a) 不同末枝肋片角度熔化云图



(b) 液相分数曲线



(c) 温度曲线

图 7 不同肋片角度对石蜡相变过程影响

Fig.7 Effect of fin angle on the phase change process of paraffin

2.3 树形肋片针对熔化迟滞区域的优化及效果评估

综合上述结论, 树形肋片结构可显著提升石蜡 RT50 的熔化速率。然而, 如图 7(a) 所示, 在 PCM 开始熔化阶段, 树形肋片间存在熔化迟滞区域。因此, 本研究针对优选参数 (末枝长度 6mm, 夹角

30°) 的树形肋片结构进行优化设计, 通过在距离熔化迟滞区域分支处各增加一个参数相同的末枝对其结构进行改变, 优化前后的结构对比如图 8 所示。图 9(a)、图 9(b) 与图 9(c) 分别展示了优化前后的肋片结构在熔化相分布云图、液相分数

曲线及温度曲线上的对比结果。

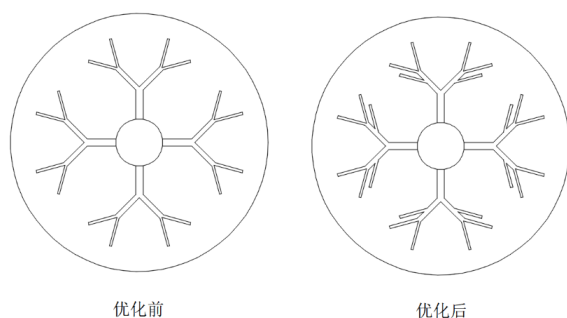


图 8 优化前后结构图

Fig.8 Comparison of the structures before and after optimization

由图 9 (a) 优化前后熔化云图对比可知，优

化后的肋片结构在熔化初期 (400s) 增强了热量的扩散能力, 使原有熔化迟滞区域的相变进程有所加快, 表明局部传热效率得到一定提升。图 9 (b) 的液相分数曲线显示, 优化后的肋片结构中石蜡完全熔化时间较优化前的肋片结构有所缩短, 印证了其在促进液相转化方面的积极作用。图 9 (c) 的温度变化曲线显示, 优化后结构的温度上升速率加快, 反映出其整体热响应性能的改善, 与上述相变过程的加速现象相一致。尽管上述图表均表明优化后的肋片结构在局部和整体性能上均带来一定程度的提升, 但这些改善幅度较为有限, 说明仅通过增加分支密度这一方式, 对熔化迟滞区域的整体熔化性能提升效果仍不够显著。

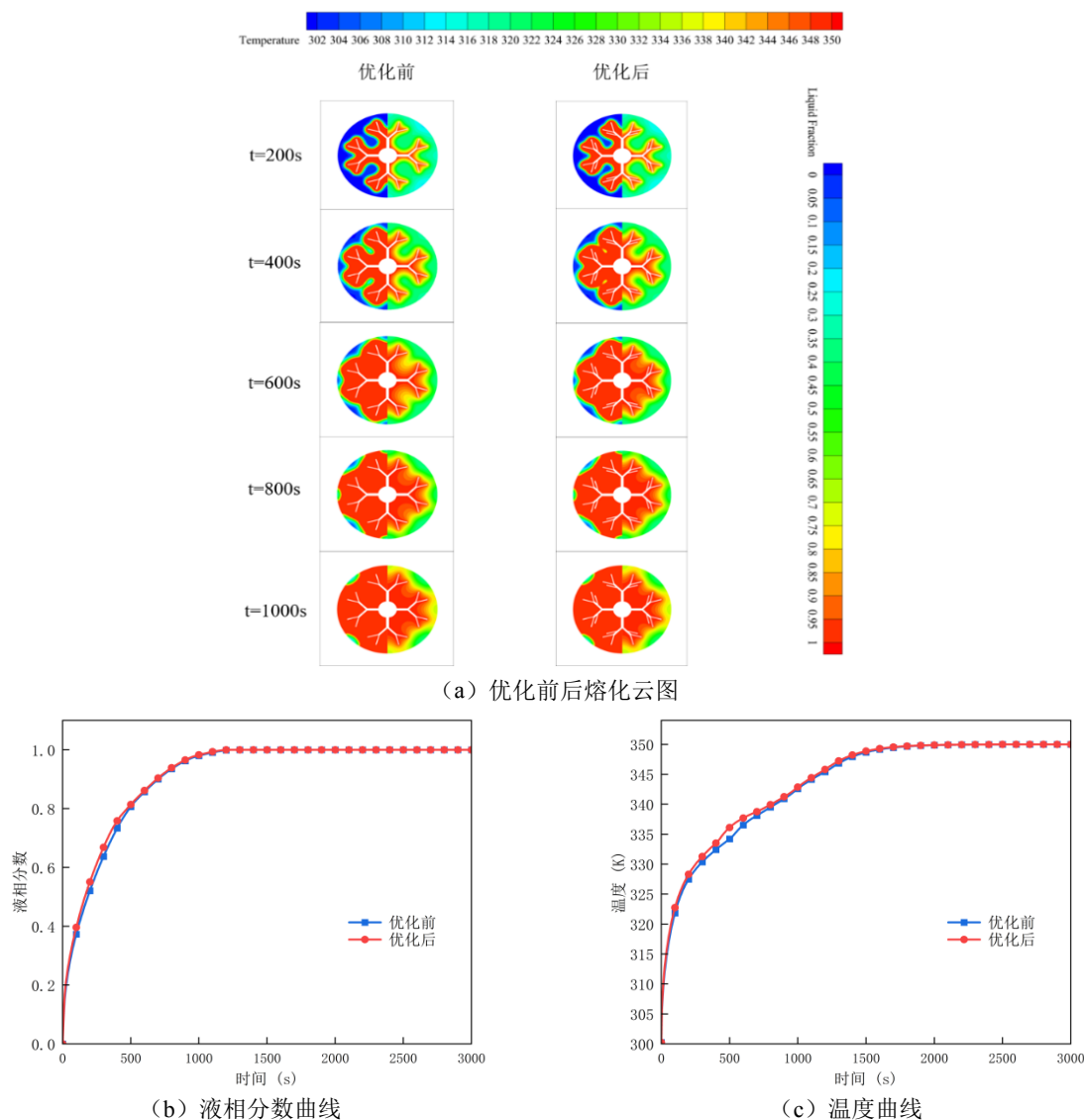


图 9 优化前后对石蜡相变过程影响

Fig.9 Effect of structural optimization on the phase change process of paraffin

3 结论

本文通过数值模拟分析石蜡的熔化过程,研究肋片参数对管壳式相变蓄热器蓄热性能影响。通过石蜡 RT50 在蓄热过程中熔化云图、液相分数曲线和温度曲线随时间变化情况分析,结果表明:

(1) 肋片末枝长度对石蜡相变过程的影响显著,末枝长度与熔化速率呈正相关性,增加末枝长度可有效提高熔化速率。当肋片末枝长度为 6mm、7mm、8mm 时,石蜡熔化效果更好;而较短的肋片(如 3mm)虽温度分布均匀,但熔化区域受限。

(2) 肋片末枝与分支夹角对石蜡相变过程影响较明显,夹角偏大时会限制热传导路径,夹角偏小时热量分布过于集中。故夹角偏大或偏小均会使热传递效率减退,进而削弱了石蜡熔化效果。当夹角为 30° 时,可达到最佳的传热效率与温度分布。

(3) 相变材料在开始熔化阶段,树形肋片间存在熔化迟滞区域;通过在分支处增加末枝数量可改善该区域的熔化效果,增强熔化速率和温度分布的均匀性,但其改善幅度较为有限。

参考文献:

- [1] 安装,Installation,宏观视窗.“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[J].建筑市场与招标投标,2022,(2):8-13.
- [2] Elsheikh A H, Sharshir S W, Ali M K A, et al. Thin film technology for solar steam generation: A new dawn[J]. Solar Energy, 2019,177(JAN.):561-575.
- [3] 杨国栋,张昌建,罗景辉,等.太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵供热(冷)系统特性分析[J].制冷与空调,2024,38(3):337-344.
- [4] 陈久林.管壳式相变蓄热器热性能分析及结构优化[J].热能动力工程,2022,37(7):93-101.
- [5] 李椿,王志华,王建春,等.壳管式相变储能换热器性能研究与场协同效应分析[J].太阳能学报,2020,41(3):226-233.
- [6] 徐嘉尉,王梅杰,王佳丽.换热内管数量、形状及排列方式对管壳式相变蓄热器蓄热性能的影响[J].制冷与空调,2024,24(12):89-95.
- [7] Abolfazl N, Marcello I, Giuseppe L, et al. Enhancing PCMs thermal conductivity: A comparison among porous metal foams, nanoparticles and finned surfaces in triplex tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2022,212.
- [8] 王玮琦,邢玉明,郑文远,等.环肋翅片管相变传热特性及分形优化[J].北京航空航天大学学报,2022,48(12):2520-2528.
- [9] 韩涛,马彦花,方嘉宾,等.管壳式太阳能相变储热器传热特性的数值研究[J].太阳能学报,2023,44(3):525-532.
- [10] 康湘杰,郝凯乐,吴学红,等.管壳式相变蓄热器鱼骨仿生肋片的传热特性研究[J].化工新型材料,2024,52(S2):216-221,227.
- [11] 谢鑫,薛新杰,赵长颖.基于拓扑优化的相变储热单元快速熔化传热结构设计[J/OL].储能科学与技术,1-14 [2025-07-19].<https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0352>.
- [12] Yongliang S, Rehman A M, Pengwei Z, et al. Structure optimization of tree-shaped fins for improving the thermodynamic performance in latent heat storage[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023,184:108003.
- [13] Seddegh S, Wang X, Joybari M M, et al. Investigation of the effect of geometric and operating parameters on thermal behavior of vertical shell-and-tube latent heat energy storage systems[J]. Energy, 2017,137:69-82.
- [14] Hosseini M, Ranjbar A, Sedighi K, et al. A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012,39(9):1416-1424.
- [15] 李晓,胡志鹏,刘雪平.太阳能相变蓄热风管的结构优化[J].制冷与空调,2019,33(5):497-501.