

相变储能单元内拓扑翅片优化及其传热特性研究

甄华龙¹, 张胜棋¹, 刘运生², 蒲亮^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 江西卓超科技有限公司, 338000, 江西新余)

摘要: 为提升管壳式相变储能单元的蓄放热速率,采用基于变密度法的拓扑优化方法,对二维相变储能单元的翅片进行优化,设计了体积比(翅片体积占设计域体积比)分别为 0.1、0.15、0.2 的导热拓扑翅片;同时考虑液体流动,设计了体积占比分别为 0.1、0.15、0.2 的对流拓扑翅片。基于上述翅片构型,采用数值模拟方法,对比研究了分别使用拓扑翅片和矩形翅片的相变储能单元的蓄放热特性,分析了使用不同体积占比的拓扑翅片的蓄放热过程。研究表明:在蓄热过程中,使用体积占比为 0.15 的导热拓扑翅片和对流拓扑翅片的相变储能单元蓄热速率较矩形翅片分别提升了 11.5%、33.0%,对流拓扑翅片由于考虑了蓄热过程中相变材料的自然对流效应,其性能优于相同体积占比的导热拓扑翅片;在放热过程中,导热拓扑翅片由于翅片分布较均匀、与相变材料接触区域大,其性能优于相同体积占比的对流拓扑翅片,其中体积占比为 0.15 的导热拓扑翅片构型综合性能最优。该研究为翅片设计提供了有效支撑,对推动拓扑优化在相变储能单元内的实际应用具有重要价值。

关键词: 相变储能;拓扑优化;翅片构型;自然对流

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202407006 **文章编号:** 0253-987X(2024)07-0062-11

Research on Optimization and Heat Transfer Characteristics of Topological Fins in Phase Latent Thermal Storage Units

ZHEN Hualong¹, ZHANG Shengqi¹, LIU Yunsheng², PU Liang^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Jiangxi Zhuochao Technology Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi 338000, China)

Abstract: This paper designs the fin configuration of the two-dimensional phase latent thermal storage unit using the topology optimization method based on the variable density method to improve the thermal storage and release rate of the phase latent thermal storage unit. The conductive topological fins with the volume proportion of 0.1, 0.15, and 0.2 are devised. In addition, considering the liquid flow, the convective topological fins with the volume proportion of 0.1, 0.15, and 0.2 are designed. Subsequently, a comparison is drawn between the thermal storage and release characteristics of the topological fins and the rectangular fins in the phase latent thermal storage unit, using a numerical simulation method. An analysis is conducted on the thermal storage and release processes of topological fins with different volume proportions. The results show that the thermal storage rates of the phase latent thermal storage unit using

收稿日期: 2023-10-07。 作者简介: 甄华龙(1999—),男,硕士生;蒲亮(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(xzy022020026)

网络出版时间: 2023-12-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241228.1527.004>

conductive and convective topological fins with a volume proportion of 0.15 surpass those of rectangular fins by 11.5% and 33.0%, respectively. When considering the same volume proportion, the convective topological fins outperform the conductive topological fins due to the natural convection effect of the phase change material during the thermal storage process. During the thermal release process, under the condition of the same volume proportion, the conductive topological fins exhibit better performance than the convection topological fins because of their uniform distribution and large contact area with the phase change material. The conductive topological fins with a volume proportion of 0.15 demonstrate the best comprehensive performance. This study offers insights into fin design and significantly contributes to advancing the practical application of topology optimization in phase latent thermal storage units.

Keywords: phase latent thermal storage; topology optimization; fin configuration; natural convection

能源是人类生存和发展的基础,能源技术的革新推动着人类文明的进步。储能是能源革命的关键技术,是实现碳达峰碳中和目标的重要支撑^[1]。高效的储热单元是可再生能源利用系统的核心技术之一。储热技术可分为显热储热、相变储热和热化学储热 3 类^[2],其中相变储热具有储热过程温度恒定、储热密度大等优点,具有广阔的应用前景。然而,相变材料(PCM)低导热系数的缺点严重影响了相变储能单元的蓄放热速率^[3],常通过添加螺旋^[4]、环形^[5]或矩形^[6]翅片来提升储能单元的蓄放热速率^[7]。

相变储能单元中翅片的优化设计是根据工程经验确定的,此方法缺乏指导翅片设计的理论依据,而拓扑优化方法突破了传统的设计思路,设计自由度较高,能够获得新颖复杂结构的拓扑翅片。

拓扑优化方法在传热领域首先应用在仅考虑热传导的固体传热方向。左孔天等^[8]将拓扑优化方法应用到热传导结构的翅片优化设计中,引起了研究人员的广泛关注。Pizzolato 等^[9]、Zhao 等^[10]在相变储热单元中使用拓扑优化方法设计了拓扑翅片构型,以最大程度提高换热性能。殷健宝等^[11]对相变储能系统的翅片进行拓扑优化设计,通过数值模拟比较拓扑翅片与分形翅片的传热性能,表明使用拓扑翅片的储热单元具备更快的蓄放热速率。Ge 等^[12]对多管储能装置进行拓扑优化设计,并对拓扑翅片和矩形翅片进行实验和模拟分析,验证了拓扑翅片的高效性。

部分学者发现,自然对流因素对翅片构型有显著影响^[13-14]。Pizzolato 等^[15]在二维储热单元中使用拓扑优化方法,设计了考虑自然对流及不考虑自然对流的翅片构型。游吟等^[16]对二维相变储热系统基于拓扑优化原理及考虑自然对流设计了拓扑翅片,验证了自然对流对结构优化有显著影响。Tian 等^[17]以最小

化容量耗散为目标函数,设计了导热翅片和对流翅片,并通过数值模拟发现使用对流翅片的储能单元在熔化凝固过程中具有更好的温度均匀性。

目前,相变储能单元内自然对流对拓扑翅片的影响规律并不清晰,不同体积占比的拓扑翅片对系统蓄放热速率的影响也缺乏研究。因此,本文采用基于变密度法的拓扑优化方法考虑热传导和对流,对二维相变储能单元的翅片进行优化设计,采用计算流体力学(CFD)仿真对比研究相变储能单元内使用拓扑翅片和矩形翅片的蓄放热特性。本研究揭示了自然对流对翅片设计的影响,并通过仿真结果验证了拓扑翅片强化了相变储能单元的换热能力。

1 翅片结构拓扑优化

1.1 几何模型

研究使用的管壳式相变储能单元结构如图 1 所示,热流体从中间管道流入,内管和外壁面之间区域为相变材料 Ω_{PCM} 和高导热翅片 Ω_{Fin} 填充区域。当考虑导热及自然对流因素进行翅片设计时,翅片结构左右对称。为节省计算资源,取二维管壳式相变储能单元的左半部分作为计算域。

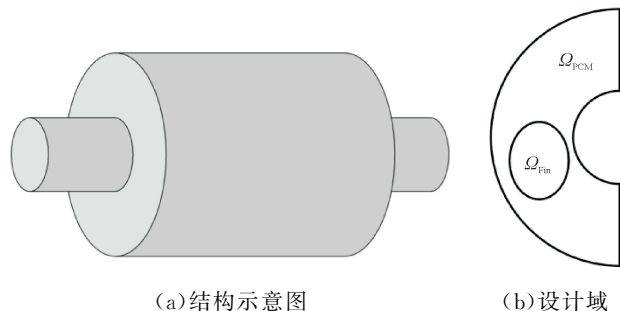


图 1 管壳式相变储能单元结构图及设计域

Fig. 1 Shell and tube phase latent thermal storage unit and design field

使用的相变材料选择 Rubitherm GmbH 公司的商用石蜡 RT21,高导热翅片材料是增材制造常用的 AlSi10Mg 铝合金。表 1 给出了翅片结构拓扑优化的相关参数。

表 1 翅片结构拓扑优化相关参数

Table 1 Related parameters of fin structure topology optimization

参数	数值
储能单元外管半径 r_1/mm	35.0
储能单元内管半径 r_2/mm	12.7
PCM 密度 $\rho_{\text{PCM}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	770~880
PCM 熔化温度范围 $T_{\text{m}}/^{\circ}\text{C}$	20~23
PCM 凝固温度范围 $T_{\text{s}}/^{\circ}\text{C}$	21~19
PCM 导热系数(固/液) $k_{\text{PCM}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.2
PCM 比定压热容(固/液) $c_{p\text{PCM}}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2 000
PCM 潜热 $L/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	124
热膨胀系数 β/K^{-1}	0.001
翅片材料密度 $\rho_{\text{HCM}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 670
翅片材料导热系数 $k_{\text{HCM}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	111
翅片材料比定压热容 $c_{p\text{HCM}}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	915
惩罚因子 P	3~5
过滤半径 R_{min}/mm	0.75~1.00
翅片体积比 V	0.15
储能单元外壁面温度 $T_1/^{\circ}\text{C}$	26
储能单元内壁面温度 $T_2/^{\circ}\text{C}$	16

1.2 数学模型

1.2.1 固体导热模型

仅考虑导热因素时,假设相变材料和翅片材料均为固体,其控制方程为

$$\nabla^2 T = 0 \tag{1}$$

式中: T 为温度。

1.2.2 固液相变传热模型

考虑相变材料在熔化过程中自然对流因素时,假设相变材料和翅片材料均为流体,采用不可压 N-S 方程为控制方程,求解共轭传热问题。引入体积力源项来区分相变材料以及翅片材料,采用等效热容法处理相变材料熔化过程中的相变潜热,采用 Boussinesq 假设计算自然对流效应。

连续性方程

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{2}$$

动量方程

$$\rho \nabla \cdot (\boldsymbol{u} \boldsymbol{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \boldsymbol{u}) - \epsilon \rho \boldsymbol{u} \tag{3}$$

$$\rho \nabla \cdot (\boldsymbol{v} \boldsymbol{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \boldsymbol{v}) - \epsilon \rho \boldsymbol{v} - \rho g \beta \Delta T \tag{4}$$

能量方程

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U} c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 为相变材料速度; p 为相变材料压力; μ 为相变材料动力黏度; ϵ 为布林克曼项,用于区分流体区域和固体区域; β 为热膨胀系数; c_p 为节点比定压热容; k 为导热系数。

1.2.3 拓扑优化模型

(1)目标函数及约束条件。本研究旨在提高相变储能单元内传热效率,因此以计算域中平均温度最大值为优化目标,如下

$$\max z(x, T) = \int T dx / A \tag{6}$$

$$\begin{cases} F(x, T) = 0 \\ x \in X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ \int \theta_s dA \leq V \int dA \\ 0 < \theta_s \leq 1 \end{cases} \tag{7}$$

式中: $F(x, T)$ 为流动传热控制方程,该约束条件表明优化过程需满足传热控制方程; θ_s 为设计变量的密度; A 为设计域面积; V 为翅片体积比,表示设计域中高导热材料体积占比,该条件确定了系统的储热量。

(2)材料变密度插值法。在计算域中,使用固体各向同性材料惩罚函数法^[18]重新定义材料物性,由于目标函数是整个区域的温度最大化,因此在重新定义导热系数时引入惩罚因子,而重新定义密度、比定压热容时不引入惩罚因子。各计算公式如下

$$k(x) = k_{\text{PCM}} + \theta_s^p (k_{\text{HCM}} - k_{\text{PCM}}) \tag{8}$$

$$\rho(x) = \rho_{\text{PCM}} + \theta_s (\rho_{\text{HCM}} - \rho_{\text{PCM}}) \tag{9}$$

$$c_p(x) = c_{p\text{PCM}} + \theta_s (c_{p\text{HCM}} - c_{p\text{PCM}}) \tag{10}$$

$$\epsilon(x) = \theta_s \epsilon \tag{11}$$

式中: $k(x)$ 为插值后节点导热系数; $\rho(x)$ 为插值后的节点密度; $\epsilon(x)$ 为插值后的布林克曼项; θ_s^p 为设计变量密度的 p 次方。

(3)优化算法。本研究采用移动渐近线优化方法(MMA)求解设计变量。MMA 算法由瑞典数学家 Svanberg 在 1987 年提出^[19],计算中定义最大迭代次数是 150 次,当残差小于 10^{-6} 时,完成优化收敛。

(4)过滤。在拓扑优化的计算过程中,相邻节点之间的设计变量会产生较大的差异,出现“棋盘格”现象。为解决上述问题,通过设置过滤半径对优化结果进行过滤,过滤是通过求解一个 Helmholtz 型偏微分方程来实现的^[20]

$$\theta_i = R_{\text{min}}^2 \nabla^2 \theta_i + \theta_s \tag{12}$$

式中: θ_i 为过滤后的设计变量单元密度; R_{min} 为过滤半径。

(5)投影。密度过滤会产生大量的处于 0 和 1 之间的中间密度,导致相变材料和翅片材料的边界不清晰^[21]。引入双曲正切投影函数对中间值进行处理^[22],使密度分布更接近 0~1 分布

$$\theta_p = \frac{\tanh(\gamma(\theta_f - \eta)) + \tanh(\gamma\eta)}{\tanh(\gamma(1 - \eta)) + \tanh(\gamma\eta)} \quad (13)$$

式中: θ_p 为投影后的设计变量单元密度; γ 为投影斜率,控制投影的陡峭程度; η 为投影阈值,取 0.5,当 η 高于 0.5 时 θ_f 取值为 1,当 η 低于 0.5 时 θ_f 取值为 0。

(6)计算流程。本研究基于 SIMP 方法的储热单元翅片结构拓扑优化的完整计算过程如图 2 所示。

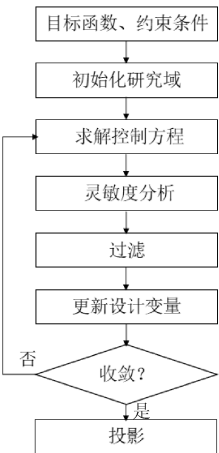


图 2 拓扑优化流程图

Fig. 2 Topology optimization flow chart

1.3 拓扑优化结果分析

1.3.1 导热拓扑翅片

设定翅片体积占比 V 分别为 0.1、0.15 及 0.2, 通过以上计算,得到了仅考虑热传导的导热拓扑翅片,如图 3 所示。黄色区域为高导热材料区域,高导热材料沿径向均匀分布,且翅片形成的分支较均匀,右半部分为几何重构后得到的结构。体积占比为 0.1 的拓扑翅片分支较少,主干较细,而体积占比为 0.2 的拓扑翅片主干较粗,分支较多且径向生长更长。

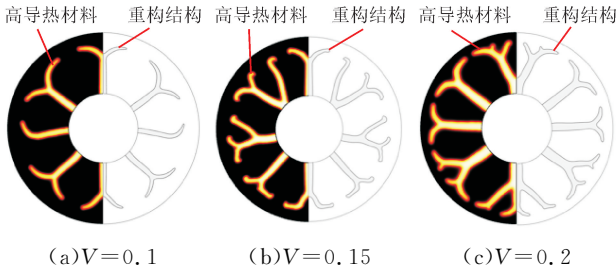


图 3 导热拓扑翅片构型

Fig. 3 Conductive topological fin configuration

1.3.2 对流拓扑翅片

综合考虑热传导和自然对流,得到的翅片构型如图 4 所示。高导热材料分布呈现出上部少而下部密集的状态,上部的翅片没有形成分支,中部的翅片开始形成分支,而下部的翅片形成的分支较多,右半部分为几何重构后得到的结构。

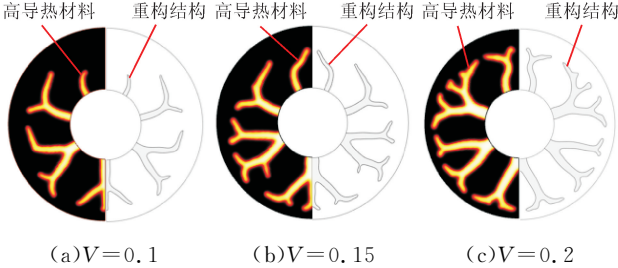


图 4 对流拓扑翅片构型

Fig. 4 Convective topological fin configuration

2 模拟方法与模型验证

2.1 物理模型

通过拓扑优化计算得到了以上 6 种翅片构型,翅片体积比分别为 0.1、0.15、0.2,如图 5 所示。为比较拓扑翅片性能,设计了体积占比为 0.15 的矩形翅片,矩形翅片结构如图 5(g)所示,为节省计算资源,取左半部分作为计算域。

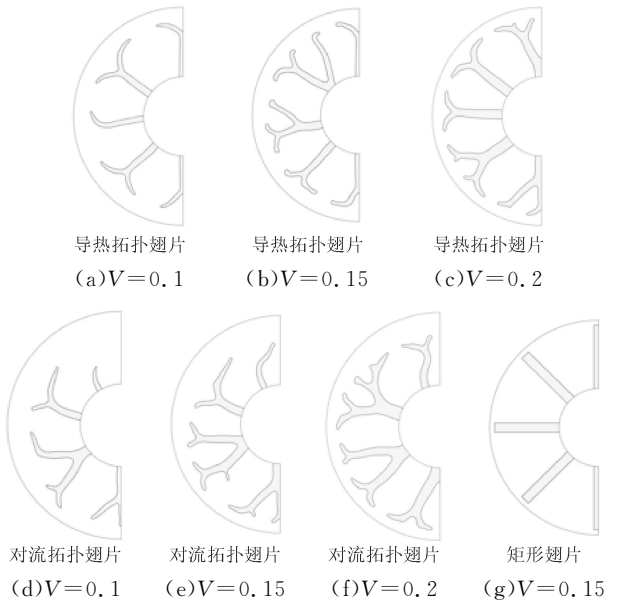


图 5 拓扑翅片及矩形翅片模型

Fig. 5 Topological fins and rectangular fin model

2.2 数学模型

对上述 3 种翅片的相变储能单元的熔化和凝固过程进行仿真计算,采用焓-孔隙率模型,计算相变材料的相变过程^[23-24]。

在本研究中,有以下假设^[25-26]:

- (1)考虑自然对流效应,对密度采取 Boussinesq 假设;
- (2)液体相变材料的流动被视为不可压缩流动;
- (3)计算中忽略了相变材料由固体到液体变化的体积膨胀;
- (4)相变材料和翅片初始温度恒定,且均为各向同性。

描述相变材料流动和传热的控制方程如下。

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{14}$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + S_u \tag{15}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (v \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_v - \rho g \beta \Delta T \tag{16}$$

$$S_u = -A_m \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3 + 0.001} u \tag{17}$$

$$S_v = -A_m \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3 + 0.001} v \tag{18}$$

式中: A_m 为糊状区常数,本文取 10^5 ; φ 为液相体积分数。

能量方程

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho L \frac{\partial \varphi}{\partial t} \tag{19}$$

式中: h 为相变材料焓值。

2.3 无关性验证

以仅考虑热传导的导热拓扑翅片进行讨论。在进行仿真之前,进行网格无关性验证以及时间步长无关性验证,选取 3 712、7 122、11 052 网格数量以及 0.05、0.1、0.2、0.5 s 时间步长,结果如图 6、图 7 所示。考虑计算时间及结果准确性,选取 7 122 网格数量及 0.1 s 时间步长进行计算。

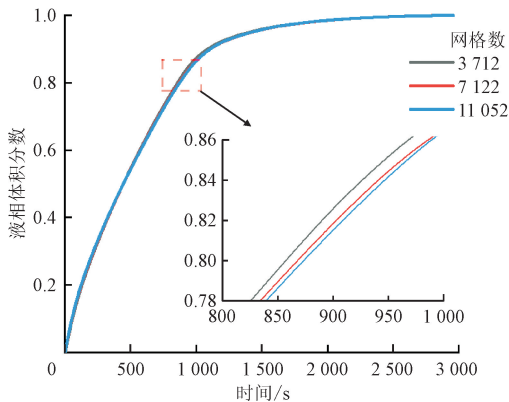


图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Mesh independent study

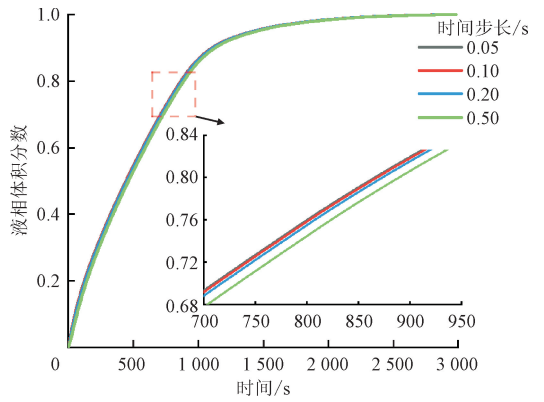


图 7 时间步长无关性验证

Fig. 7 Time-step independent study

2.4 模型验证

为了验证仿真结果的可靠性,使用矩形翅片储能单元的仿真结果与实验结果进行对比。搭建了实验平台,研究了 RT21 在相变储能单元中的熔化凝固过程,实验装置及监测点位置如图 8 所示,实验中,监测点处相变材料温度与模拟结果对比如图 9 所示。实验数据与模拟数据吻合较好,所示结果最大误差不超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,验证了数学模型的准确性。

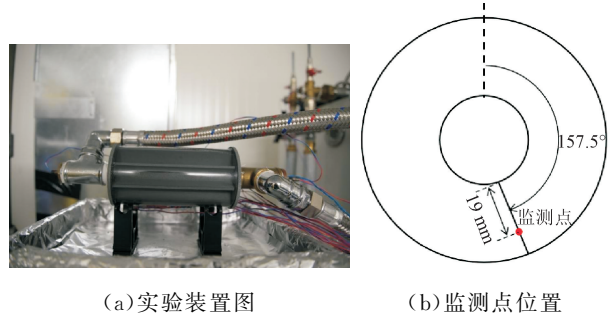
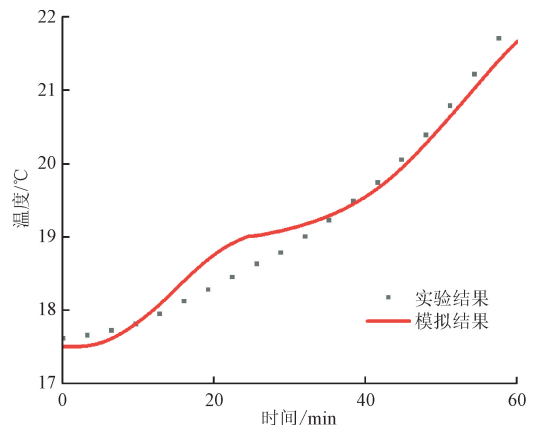


图 8 实验装置图及监测点位置

Fig. 8 Experimental setup diagram and the location of monitoring point



(a) 蓄热过程

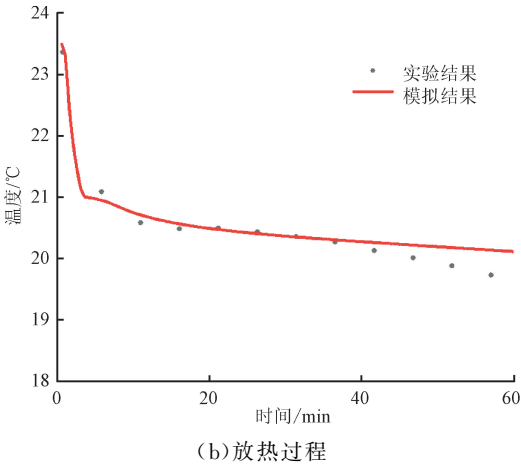


图 9 实验结果与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison between experimental results and simulation results

3 数值仿真结果与讨论

3.1 翅片构型对蓄放热过程影响

3.1.1 蓄热过程

在蓄热过程中,设定内壁面为 26 °C 的恒温边界,外壁面为绝热边界,初始温度为 17.5 °C。选用体积占比为 0.15 的拓扑翅片及矩形翅片进行模拟,如图 5(b)、5(e)、5(g)所示,图 10 展示了使用 3 种翅片构型的相变储能单元在蓄热过程中的液相体积分数随时间变化曲线,图 11 给出了蓄热过程液相体积分云图。由图 10 相变材料熔化时间可知,导热拓扑翅片及对流拓扑翅片的蓄热时间较矩形翅片分别缩短了 11.5%、33.0%。

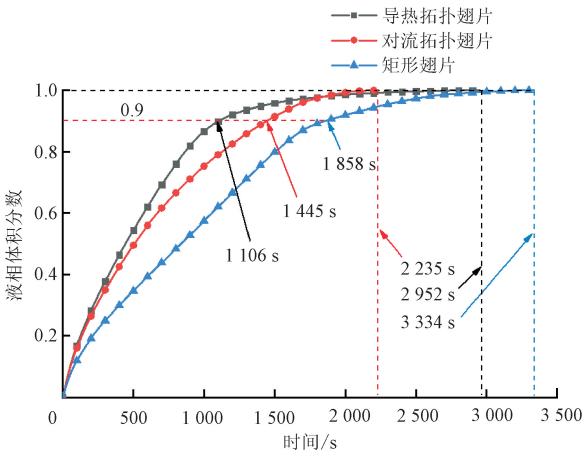


图 10 蓄热过程液相体积分随时间变化

Fig. 10 Changes in the liquid fraction during the thermal storage process

在蓄热过程中,当相变材料熔化达到 90% 时,使用导热拓扑翅片的相变储能单元蓄热速率最快。原因是在二维模型中,导热拓扑翅片与 PCM 接触

长度为 298.44 mm,对流拓扑翅片与 PCM 接触长度为 254.23 mm,导热拓扑翅片接触区域更大,传热效果较好。

如图 10 及图 11 所示,在整个蓄热过程中,使用对流拓扑翅片的储能单元整体熔化速率快。原因是,该翅片下部分支较多,翅片附近的相变材料通过导热作用迅速熔化,由于自然对流的作用,高温液体向上流动,提升了传热速率。

使用导热拓扑翅片的储能单元在后期由于底部的相变材料熔化速率较慢,影响了整体蓄热速率。原因是,在传热过程中,热量通过翅片迅速地传递到翅片附近的相变材料中,而距离翅片较远的底部相变材料则只能通过相变材料间的导热进行传热,传热速率较慢。

矩形翅片由于与相变材料接触区域最小,仅为 177.28 mm,因而传热速率最低,储能单元蓄热所需时间最长。

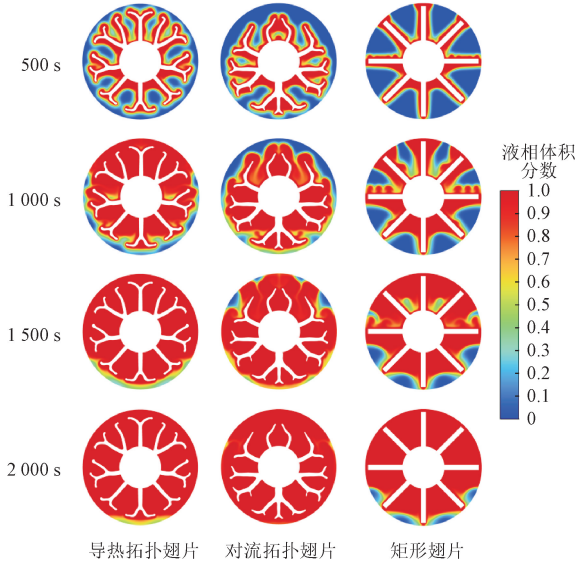


图 11 蓄热过程液相体积分云图

Fig. 11 Liquid fraction contours during the thermal storage process

如图 11 所示,拓扑翅片展现出了更好的传热性能,传热速率要高于矩形翅片。原因是,拓扑翅片分支较多,在储能单元内分布较为均匀,整体传热效果好于矩形翅片。在拓扑优化过程中,极少的约束条件给翅片设计提供了极大的自由度,展现出拓扑优化在传热领域的高效性。

图 12 展示了 1 000 s 时使用 3 种翅片的储能单元的速度分布,使用导热拓扑翅片的储能单元整体速度分布较均匀,而使用对流拓扑翅片及矩形翅片的储能单元整体速度分布不均匀,呈现出上部流速大、下部流速小的现象。

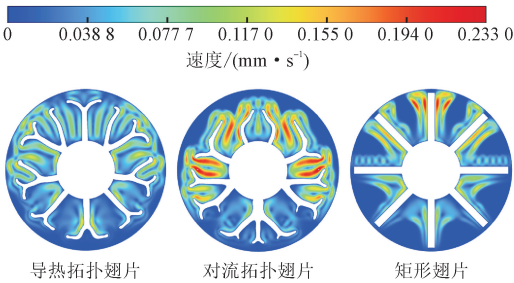


图 12 蓄热过程 1 000 s 时速度分布

Fig. 12 Velocity distribution at 1 000 s during the thermal storage process

3.1.2 放热过程

在放热过程中,设定内壁面为 16℃ 的恒温壁面,外壁面仍为绝热壁面,初始温度为 23℃。图 13 展示了使用 3 种翅片构型的相变储能单元在放热过程中的液相体积分数随时间变化曲线,图 14 给出了放热过程液相体积云图。

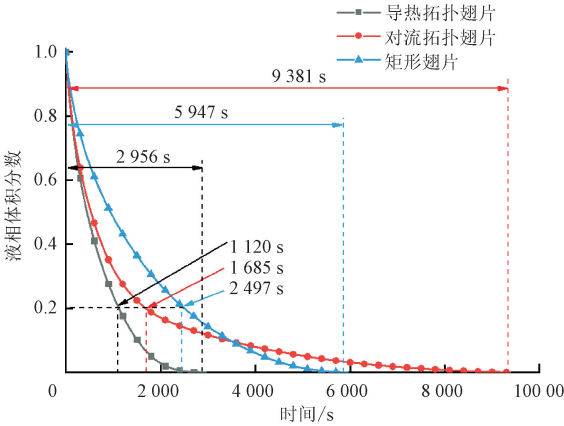


图 13 放热过程液相体积分数随时间变化曲线

Fig. 13 Changes in the liquid fraction during the thermal release process

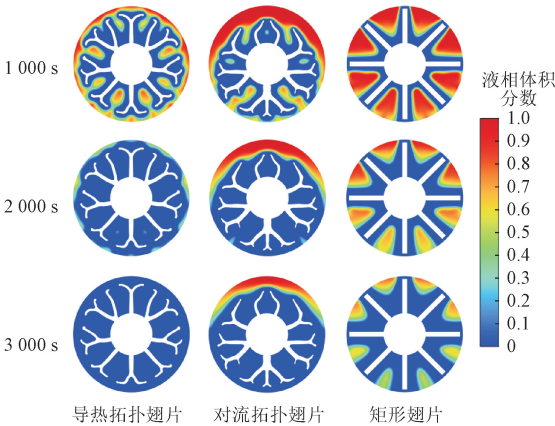


图 14 放热过程液相体积云图

Fig. 14 Liquid fraction contours during the thermal release process

如图 13 及图 14 所示,使用对流拓扑翅片的储能单元放热所需时间过长。原因是,在上方翅片分支较少,储能单元内上部的相变材料不易凝固,并且模拟过程中忽略了相变材料体积变化,没有考虑到凝固过程中液面下降。

在放热过程中,导热拓扑翅片展现出更好的性能,由于翅片整体分布较均匀,整体凝固效果较好,没有出现局部不易凝固的现象。矩形翅片由于空隙过大,部分区域凝固速度较慢,传热均匀性并不好。

3.2 翅片体积占比对蓄、放热过程的影响

为研究翅片体积对蓄放热速率的影响,对不同体积占比的翅片进行拓扑优化设计,得到了体积占比分别为 0.1、0.2 的导热拓扑翅片及对流拓扑翅片,如图 5 所示。

3.2.1 不同体积占比的导热拓扑翅片

体积占比分别为 0.1、0.15、0.2 的导热拓扑翅片如图 5(a)、5(b)、5(c) 所示。对其蓄、放热过程进行模拟,得到了蓄热过程液相体积分数随时间变化曲线及液相体积云图,如图 15、16 所示。翅片体积占比分别为 0.1、0.15、0.2 的储能单元蓄热时间分别为 4 302、2 955、1 826 s,随着翅片体积占比增加,蓄热速率也在提升。

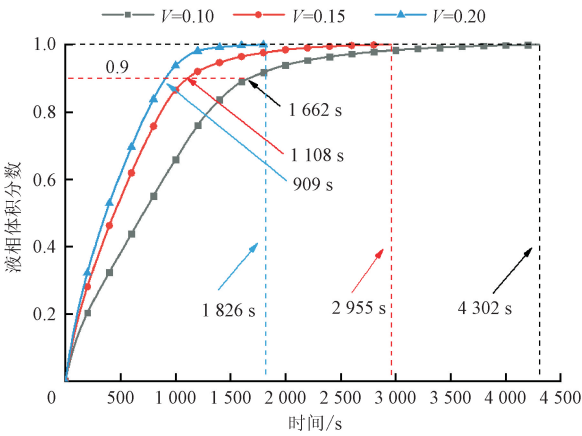


图 15 导热拓扑翅片蓄热过程液相体积分数的变化情况

Fig. 15 Changes in the liquid fraction during the thermal storage process of conductive topological fins

图 17 展示了放热过程相变储能单元内液相体积分数变化,图 18 展示了放热过程液相体积云图。可见,体积占比为 0.1、0.15、0.2 的导热拓扑翅片的放热时间较矩形翅片分别缩短了 22.0%、50.3%、63.5%。

蓄热过程中,当液相体积分数达 0.9 时,体积占比为 0.2、0.15 的导热拓扑翅片蓄热时间仅相差

199 s。放热过程中当液相体积分数达 0.2 时,体积占比为 0.2、0.15 的导热拓扑翅片放热时间仅相差 239 s,蓄、放热速率相差不大。体积占比为 0.15 的拓扑翅片使用的金属材料更少,质量更小,且储热量较体积占比为 0.2 的储能单元多了 5%,因此体积占比为 0.15 的导热拓扑翅片综合性能更优。

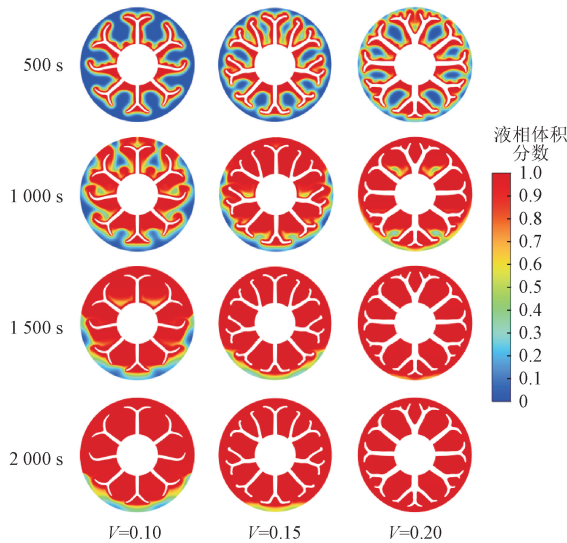


图 16 导热拓扑翅片蓄热过程液相体积云图

Fig. 16 Liquid fraction contours during the thermal storage process of conductive topological fins

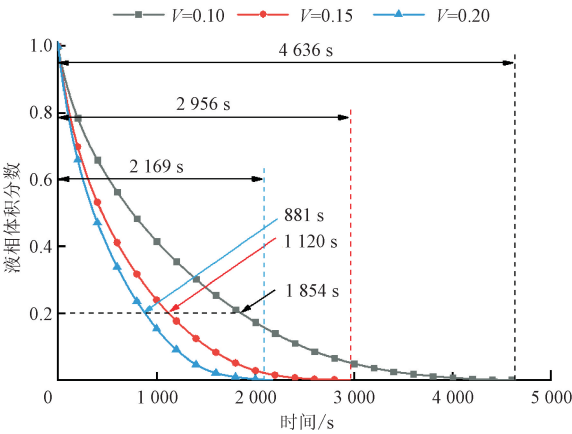


图 17 导热拓扑翅片放热过程液相体积分数随时间变化曲线

Fig. 17 Changes in the liquid fraction during the thermal release process of conductive topological fins

3.2.2 不同体积占比的对流拓扑翅片

体积占比分别为 0.1、0.15、0.2 的对流拓扑翅片如图 5(d)、5(e)、5(f) 所示。对蓄、放热过程进行模拟,得到了蓄热过程液相体积分数随时间变化曲线,如图 19 所示。

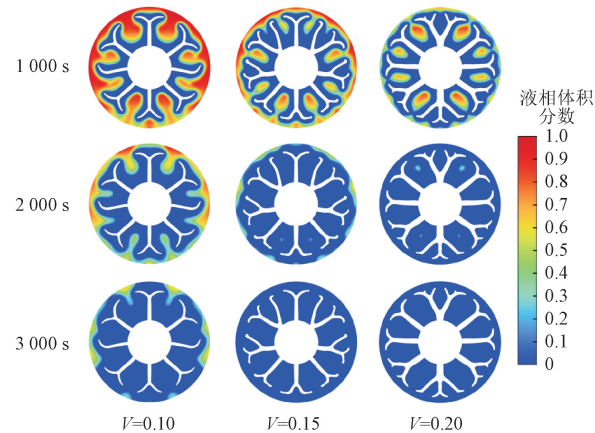


图 18 导热拓扑翅片放热过程液相体积云图

Fig. 18 Liquid fraction contours during the thermal release process of conductive topological fins

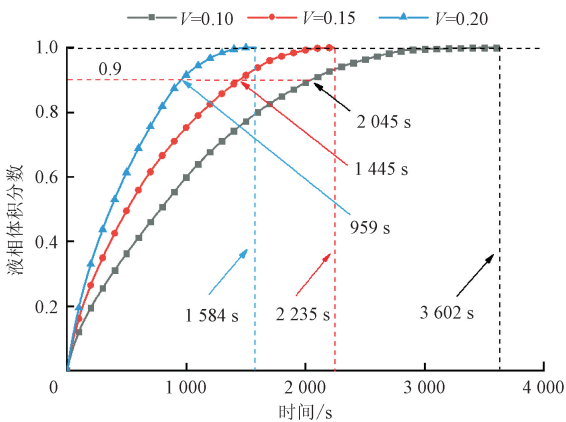


图 19 对流拓扑翅片蓄热过程液相体积分数随时间的变化

Fig. 19 Changes in the liquid fraction during the thermal storage process of convective topological fins

翅片体积占比为 0.1、0.15、0.2 的储能单元蓄热时间分别为 3 602、2 235、1 584 s。随着翅片体积占比的增加,蓄热速率也在提升,且在蓄热过程中相同体积占比的对流拓扑翅片性能均优于导热拓扑翅片。图 20 展示了蓄热过程液相体积分数变化云图,可以看到,最上方的相变材料由于自然对流效应而逐渐熔化。

图 21 展示了放热过程液相体积分数的变化情况,体积占比为 0.1、0.15、0.2 的对流拓扑翅片的放热时间分别为 20 530、9 381、5 154 s。在放热过程中,导热起主导作用,对流拓扑翅片的性能较导热拓扑翅片性能差。通过图 22 给出的放热过程液相体积云图可以看到,对流拓扑翅片由于上部分支较少,顶部的相变材料只能通过相变材料间的导热进行传热,较难凝固,因此对流拓扑翅片凝固所需时间远大于导热拓扑翅片。

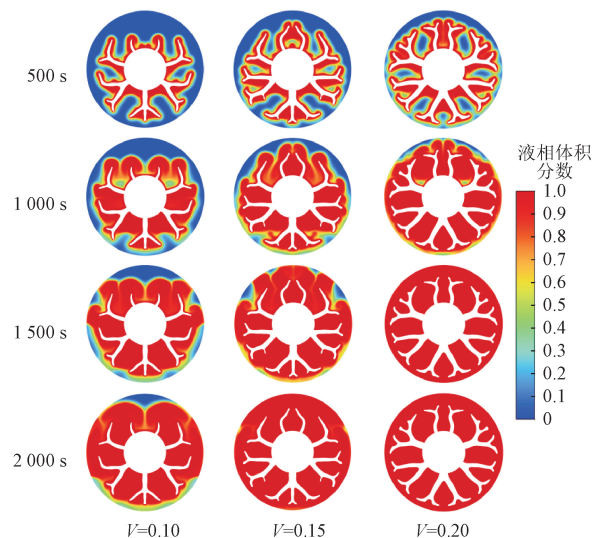


图 20 对流拓扑翅片蓄热过程液相体积云图

Fig. 20 Liquid fraction contours during the thermal storage process of convective topological fins

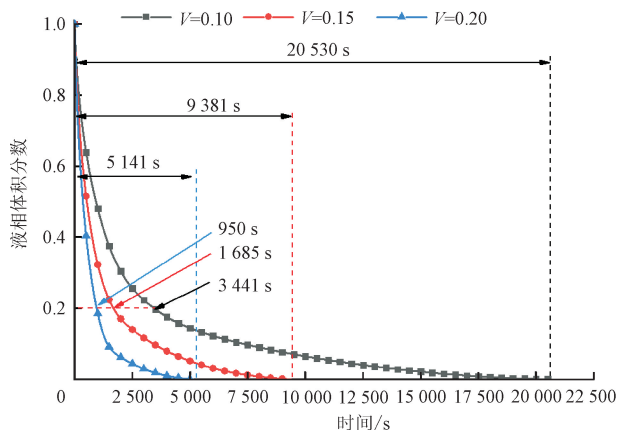


图 21 对流拓扑翅片放热过程液相体积分数随时间变化

Fig. 21 Changes in the liquid fraction during the thermal release process of convective topological fins

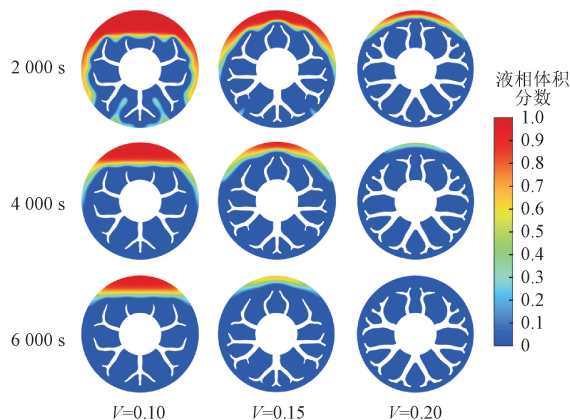


图 22 对流拓扑翅片放热过程液相体积云图

Fig. 22 Liquid fraction contours during the thermal release process of convective topological fins

4 结 论

本文采用拓扑优化方法设计了导热拓扑翅片和对流拓扑翅片,并将拓扑翅片储能单元的蓄、放热性能与矩形翅片储能单元作比较,得到以下结论。

(1)当仅考虑热传导时,通过拓扑优化得到的导热拓扑翅片沿径向分布较均匀,每个翅片主干宽度基本相同。考虑自然对流因素后,翅片构型有显著变化,下部的翅片更宽、更长、分支更多,而上部的翅片更窄、没有分支。

(2)使用导热拓扑翅片和对流拓扑翅片的储能单元的蓄热速率较矩形翅片分别提升了 11.5%、33.0%。在放热过程中,导热拓扑翅片展现出更好的性能。

(3)体积占比为 0.15 的导热拓扑翅片储能单元具有较大的储热量且蓄、放热速率较高,整体质量较小,综合性能更优。

(4)对流拓扑翅片在蓄热过程的性能优于相同体积占比的导热拓扑翅片,但放热过程导热拓扑翅片性能优于相同体积占比的对流拓扑翅片。

参考文献:

- [1] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2022 年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [2] 马朝,何雅玲,袁帆,等. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 1-8.
MA Zhao, HE Yaling, YUAN Fan, et al. Experimental study on the thermal performance of high-temperature shell-and-tube molten salt phase-change thermal energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 1-8.
- [3] 田扬,赵明,胡明禹,等. 加肋旋转对相变蓄热器蓄热性能的影响及场协同分析 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 395-400.
TIAN Yang, ZHAO Ming, HU Mingyu, et al. Effect of ribbed rotation on heat storage performance of phase change thermal storage unit and field synergy analysis [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 395-400.
- [4] WOŁOSZYN J, SZOPA K. A combined heat transfer enhancement technique for shell-and-tube latent heat thermal energy storage [J]. Renewable Energy, 2023,

- 202; 1342-1356.
- [5] ZHU Yuxi, QIU Yan. Comparison of thermal performance between annular fins and longitudinal fins in latent heat storage unit [J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(3): 1227-1238.
- [6] ZHANG Shengqi, PU Liang, XU Lingling, et al. Study on dominant heat transfer mechanism in vertical smooth/finned-tube thermal energy storage during charging process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 204: 117935.
- [7] ZHANG Shengqi, MANCIN S, PU Liang. A review and prospective of fin design to improve heat transfer performance of latent thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106825.
- [8] 左孔天, 陈立平, 张云清, 等. 用拓扑优化方法进行热传导散热体的结构优化设计 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(4): 13-16, 21.
- ZUO Kongtian, CHEN Liping, ZHANG Yunqing, et al. Structural optimal design of heat conductive body with topology optimization method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(4): 13-16, 21.
- [9] PIZZOLATO A, SHARMA A, MAUTE K, et al. Topology optimization for heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 875-888.
- [10] ZHAO Ming, TIAN Yang, HU Mingyu, et al. Topology optimization of fins for energy storage tank with phase change material [J]. *Numerical Heat Transfer (Part A): Applications*, 2020, 77(3): 284-301.
- [11] 殷健宝, 邢玉明, 王仕淞, 等. 相变储能拓扑翅片的性能研究 [J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1-14 [2023-09-22]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0803>.
- YIN Jianbao, XING Yuming, WANG Shisong, et al. Study of the performance of topological fin for phase change energy storage [J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-14 [2023-09-22]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0803>.
- [12] GE Ruihuan, HUMBERT G, MARTINEZ R, et al. Additive manufacturing of a topology-optimised multi-tube energy storage device: experimental tests and numerical analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115878.
- [13] 李含灵, 蓝代彦, 张显明, 等. 自然对流散热齿的拓扑优化 [J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(5): 1357-1361.
- LI Hanling, LAN Daiyan, ZHANG Xianming, et al. Topology optimization of the natural convection fin heat sink [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(5): 1357-1361.
- [14] LI Hanling, LAN Daiyan, ZHANG Xianming, et al. Investigation of the parameter-dependence of topology-optimized heat sinks in natural convection [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2022, 43(11): 922-936.
- [15] PIZZOLATO A, SHARMA A, MAUTE K, et al. Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 210-227.
- [16] 游吟, 赵耀, 赵长颖, 等. 相变储热单元内肋片结构的拓扑优化 [J]. *科学通报*, 2019, 64(11): 1191-1199.
- YOU Yin, ZHAO Yao, ZHAO Changying, et al. The topology optimization of the fin structure in latent heat storage [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(11): 1191-1199.
- [17] TIAN Yang, LIU Xianglei, XU Qiao, et al. Bionic topology optimization of fins for rapid latent heat thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 194: 117104.
- [18] ZHOU M, ROZVANY G I N. The COC algorithm: part II topological, geometrical and generalized shape optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991, 89(1/3): 309-336.
- [19] SVANBERG K. The method of moving asymptotes: a new method for structural optimization [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, 24(2): 359-373.
- [20] LAZAROV B S, SIGMUND O. Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, 86(6): 765-781.
- [21] GUEST J K, PRÉVOST J H, BELYTSCHKO T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(2): 238-254.
- [22] WANG Fengwen, LAZAROV B S, SIGMUND O. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(6): 767-784.
- [23] 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.
- [24] ANSYS Inc. Ansys fluent theory guide [EB/OL]. [2023-09-30]. <https://vdocument.in/ansys-fluent>

theory-guide-568848c30618c.html? page=1.

- [25] 沈永亮, 张朋威, 刘淑丽. 肋片和多孔介质强化梯级相变储热系统性能的对比研究 [J]. 化工学报, 2022, 73(10): 4366-4376.

SHEN Yongliang, ZHANG Pengwei, LIU Shuli. Comparative study on the performance of cascaded latent heat storage system enhanced by fins and porous media [J]. CIESC Journal, 2022, 73(10): 4366-4376.

- [26] 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.

HAN Tao, MA Yanhua, FANG Jiabin, et al. Numerical simulation study of heat transfer characteristics on solar tube-and-shell phase change heat storage unit [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 525-532.

(编辑 杜秀杰)