

多孔金属位置对相变平板蓄热强化的数值研究

杨洋¹, 张良^{1*}, 刘晗意¹, 曹家源¹, 夏玉娟²

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²中国标准化研究院, 北京

收稿日期: 2025年7月28日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年8月27日

摘要

为了提升潜热储能系统内部的换热性能, 弥补蓄热材料导热系数小的劣势。本文研究了在实际热泵蓄热水箱中相变储能板内部填充泡沫金属铜强化其蓄、放热过程, 采用热非平衡模型, 模拟了四种填充位置的差异对储能板的换热性能差异, 仿真分析了四种方案在储能水箱蓄热阶段, 板内部相变材料融化的固液界面发展, 温度场及储能量的变化。结果显示: 与纯相变材料相比, 在相同融化时间内复合材料内部有着更高的平均温度、更好的温度均匀性以及更大的液态融化占比; 在填充量相同的情况下, 填充位置的差异对储能板换热性能的影响也有差异。在板中间横向填充的方案有着最佳的强化效果, 融化时间缩短了80.43%, 储能总量仅减小1.2%。泡沫金属横向布置与竖向布置的方案得益于在过程中形成了有利于对流换热的环境, 强化效果更为显著。

关键词

相变储热装置, 强化传热, 泡沫金属, 数值模拟

Numerical Study of Heat Storage Enhancement of Phase Change Plate by Porous Metal Position

Yang Yang¹, Liang Zhang^{1*}, Hanyi Liu¹, Jiayuan Cao¹, Yujuan Xia²

¹College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²China National Institute of Standardization, Beijing

Received: Jul. 28th, 2025; accepted: Aug. 20th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

Abstract

To enhance the heat transfer performance of latent heat thermal energy storage systems and

*通讯作者。

文章引用: 杨洋, 张良, 刘晗意, 曹家源, 夏玉娟. 多孔金属位置对相变平板蓄热强化的数值研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 405-418. DOI: 10.12677/mos.2025.148578

mitigate the low thermal conductivity of phase change materials (PCMs), this study investigates the integration of copper metal foam into PCM slabs within a practical heat pump storage water tank to improve charging/discharging processes. A thermal non-equilibrium model was adopted to simulate the effects of four distinct filling configurations on the heat transfer performance of the PCM slabs. Numerical simulations were conducted to analyze the evolution of solid-liquid interfaces, temperature field distributions, and energy storage variations during the charging phase. Results indicate that, compared to pure PCM, the composite material with metal foam exhibits higher average temperatures, superior temperature uniformity, and a significantly increased liquid phase fraction within the same melting duration. Under identical filling amounts, variations in filling configurations led to differentiated heat transfer enhancements. The horizontal filling configuration at the slab's central region demonstrated optimal performance, achieving an 80.43% reduction in melting time with only a 1.2% decrease in total energy storage capacity. Both horizontal and vertical filling configurations promoted favorable convective heat transfer environments, resulting in pronounced performance improvements. This research offers critical insights for optimizing the structural design of PCM-based thermal energy storage systems.

Keywords

Phase Change Material Device, Heat Transfer Enhancement, Foamed Metal, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

热能储存是平衡能源供需不匹配的有效途径,通过热能储存可以将可再生能源资源整合到能源系统中,使其更具有可持续性[1]。由于相变材料(PCM, Phase change material)在相变时吸收(放出)的大量相变潜热的特性,被认为是最佳的储能方案。目前,相变储能方案已广泛应用于太阳能储能、建筑节能系统、空调热泵系统、余热回收等众多领域[2] [3]。但由于传统 PCM 导热系数低的特点,限制了相变储能单元的储能速率。因此强化相变储能单元的传热效率成为研究的重点。泡沫金属由于其高孔隙率、内部连通的结构、较大的比表面积等特性,在 PCM 储能系统中起到了强化传热的优良作用[4] [5]。

Lafdi 等人[6]采用实验和数值方法研究了孔隙率和孔径对金属泡沫-PCM 复合材料融化过程的影响,结果表明,高孔隙率和大孔径更有助于达到稳态温度。在实际应用中应选用适宜的泡沫孔隙率及孔径对储能系统的换热有较好的强化作用。Liu 等人[7]建立了一个数值模型来分析填充有石蜡/泡沫铜复合材料的管壳式单元中的融化过程。发现降低泡沫铜的孔隙率可以显著提高 PCM 的融化速率。Mesalhy 等[8]发现自然对流在 PCM 相变过程中起到主要作用,降低填充体孔隙率可以提高熔融速率,但也会抑制对流运动。以上研究发现:在 PCM 内添加泡沫金属可以增加复合材料的导热率使 PCM 融化时间缩短,但由于多孔材料的加入导致相变材料的自然对流受到抑制。表 1 为对多孔金属不同的研究方法应用于储能系统模块强化换热的研究概况。

目前,已有研究多聚焦于泡沫金属在单表面加热换热场景,研究方向主要分为最佳填充位置、角度、填充量及孔隙率,相关实验及模拟成果颇丰,但针对相变材料于蓄热水箱全表面参与换热场景的研究较少,然而储能系统在实际的应用中,如储能热水器、电池热管理和蓄热建筑等,都是整体参与换热。因此,本文聚焦于实际热泵储能热水器,在储能板内布置多孔泡沫金属分析研究对储能系统蓄热阶段的强化效果。本文采用数值仿真法,研究局部填充时泡沫金属的不同填充位置对 PCM 融化特性的影响,确定

最优填充位置，完善相变材料换热应用理论体系。

Table 1. Research on porous metal-enhanced phase change heat transfer
表 1. 多孔金属强化相变换热的研究

作者	系统储能方式	研究方法	研究模型及内容	研究结论
Varun Joshi [9]	平板底部单表面加热	数值模拟和实验研究	提出了一种新型的复合潜热储能装置。对比了不同泡沫金属填充高度与纯 PCM 的融化状态。	在高温梯度区域局部布置金属泡沫体，并在低温梯度区域不作布置，有效地发挥金属泡沫的强化特性，确定了最佳填充率为 0.5 H。
Abdulmunem R. Abdulmunem [10]	平板上方单表面加热	数值模拟和实验研究	研究了 PCM 容器在 0°、30°、60°、和 90°不同的倾斜角度下对 PCM 在矩形容器内的融化特性的影响。	PCM 容器倾斜角的减小导致 PCM 的融化过程完成所需的时间增加。
Zoubida Haddad [11]	平板侧方单表面加热	数值模拟	研究了在 PCM 中部分填充泡沫金属，五种不同填充方式在单恒热流壁面加热下对 PCM 融化的影响。	结果显示：从左上到右下对角线插入泡沫层表现出最佳的融化性能，融化时间和储能能量分别减少 77.7%和 6.7%。
Xu Yang [12]	圆柱内表面单面加热	数值模拟	研究了在卧式同心管蓄热装置中填充泡沫金属强化作用。	多孔介质部分位于下部对 PCM 融化性能的增强效果最好，多孔介质的最佳填充高度比为 0.7。
Pouyan Talebizadeh Sardari [13]	长方体底部单表面加热	数值模拟	研究了不同变量下填充了金属泡沫铜的 PCM 储热系统在垂直容器的融化过程。	多孔金属可提高 PCM 融化速度，低孔隙率换热性能优于高孔隙率，孔径改变对其无影响。多段多孔结构布置使融化时间缩短 3.5%。

2. 数值传热模型

Zhang ping [14]等采用热非平衡模型进行了石蜡与泡沫金属复合下的融化特性模拟，并测量了金属材料与相变材料间的温差。证明了：实验结果与数值模拟结果吻合较好，表明双温能量模型能较好地描述相变材料的传热特性。本次数值计算使用热非平衡模型。所考虑的假设为[9]：

- (1) 流体流动是严格的层流并且可以遵守 Boussinesq 假设；
- (2) 局部热平衡存在于糊状区域(液 - 固区域中)；
- (3) 金属泡沫材料和 PCM 是均匀的、各向同性的，并且每个相的特性保持静态。

PCM 流体的连续性、动量方程以及金属泡沫和 PCM 的能量方程如下所述[15]：

连续性方程

$$\rho_{PCM} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

动量方程

I: x 方向

$$\rho_{pcm} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{PCM} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - A_{mushy} \frac{(1-f)^2}{f^3 + q} u - \frac{u_{PCM}}{K} u - \frac{1}{\sqrt{K}} C_i \rho_{pcm} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

II: y 方向

$$\rho_{PCM} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{PCM} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - A_{mushy} \frac{(1-f)^2}{f^3 + q} v - \frac{\mu_{PCM}}{K} v - \frac{1}{\sqrt{K}} C_i \rho_{PCM} v \sqrt{u^2 + v^2} + \rho_{PCM} g \beta (T_f - T_\infty) \quad (3)$$

式中, 因变量 u 和 v 为液体 PCM 速度矢量, m/s; p 为液体 PCM 压力, Pa; T_f 为 PCM 温度, °C; f 为液体 PCM 分数; ρ 为密度, Kg/m³; t 为时间, s; μ_{PCM} 为动力黏度, Kg/m·s⁻¹; K 为渗透率, m⁻²; C_i 为惯性系数, m⁻¹; β 为 PCM 体积热膨胀系数, K⁻¹; T_∞ 为起始温度, K; A_{mushy} 为糊状常数, A_{mushy} 的值通常在 10³ 到 10⁹ 之间[16] [17]。

液体 PCM 的体积分数 f 随着融化过程变化。当 PCM 未融化处于固态时 $f=0$; PCM 完全相变为液态时 $f=1$; 当 PCM 处于糊状区时位于两相态 f 位于 0 与 1 之间。液体分数和温度有关的用于求解的方程如下式[9]:

$$f = \begin{cases} 0, & T_f < T_{m1} \\ \frac{T_f - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}, & T_{m1} \leq T_f < T_{m2} \\ 1, & T_f \geq T_{m2} \end{cases} \quad (4)$$

上式中, T_{m1} 和 T_{m2} 分别为 PCM 相变融化的下限温度和上限温度。

能量方程

I: PCM 的能量方程

$$\varepsilon(\rho C_p)_{PCM} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} \right) + \varepsilon(\rho C_p)_{PCM} \left(u \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} + v \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right) = (k_{effpcm} + K_{id}) \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) - \varepsilon L_h \rho_{PCM} \frac{\partial f}{\partial t} \quad (5)$$

II: 泡沫金属材料的能量方程:

$$(1-\varepsilon)(\rho C_p)_{mf} \left(\frac{\partial T_{mf}}{\partial t} \right) = k_{effmf} \left(\frac{\partial^2 T_{mf}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{mf}}{\partial y^2} \right) + h_i A_i (T_{PCM} - T_{mf}) \quad (6)$$

上式中: ε 为泡沫金属的孔隙率; k_{effpcm} 、 k_{effmf} 分别为 PCM 和泡沫金属的有效导热系数, W/m·K⁻¹; K_{id} 为 PCM 热扩散导热系数, W/m·K⁻¹; L_h 为 PCM 的相变潜热, kJ/kg; h_i 为 PCM 与泡沫金属间的间隙传热系数, W/m²·K⁻¹; A_i 为泡沫金属材料的界面表面积, m⁻¹。

2.1. 泡沫金属的数据参数

(1) 界面表面积 A_i

孔隙率 ε 及孔密度 ω 是多孔泡沫材料的基本结构参数, 本次仿真采用的金属泡沫铜的参数为: PPI = 20; 孔隙率 0.97; 高度 $H = 50$ mm 其他结构参数如孔径 d_p , m; 金属纤维直径 d_f , m; 可由下列公式得出 [18]-[20]:

$$d_p = \frac{22.4 \times 10^{-3}}{\omega} \quad (7)$$

$$d_f = 1.18 \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}} d_p \quad (8)$$

泡沫金属的界面表面积 A_i 可以由 Calmidi 和 Mahajan 提出的相关性进行确定[21]:

$$A_i = \frac{3\pi d_f \left(1 - e^{\frac{\varepsilon-1}{0.004}}\right)}{(0.59d_p)^2} \quad (9)$$

(2) 渗透率 K

相变后的液态 PCM 在流经多孔结构的泡沫金属后会形成压力梯度。可由 Yang 等人提出优化后的经验公式得出[22]: 该公式仅由孔径 d_p , 金属纤维直径 d_f 组成:

$$K = 0.00073(1-\varepsilon)^{-0.024} (d_p)^2 \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.11} \quad (10)$$

(3) 惯性系数 C_i

惯性系数 C_i , m^{-1} 。

惯性系数可以通过以下相关性来估计[23]:

$$C_i = \frac{0.00212(1-\varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{-1.63}}{\sqrt{K}} \quad (11)$$

2.2. 泡沫金属的有效导热系数及热扩散系数

对于局部热非平衡模型, 在传热计算中应考虑 PCM 与泡沫金属间的有效传热系数 K_{effpcm} , $\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}^{-1}$ 。本次研究选用下列公式进行计算[24]:

$$K_{effpcm} = \frac{1}{\sqrt{2} (R_A + R_B + R_C + R_D)} \quad (12)$$

上式中 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 为泡沫金属的相关系数、与泡沫金属材料的结构参数有关: 本次选用的金属泡沫铜的相关参数如下: $R_A = 0.004$; $R_B = 0.006$; $R_C = 0.05$; $R_D = 0.014$ 。

$$K_{td} = \frac{0.36}{1-\varepsilon} \rho_{PCM} C_{PCM} d_f \sqrt{u^2 + v^2} \quad (13)$$

2.3. 间隙传热系数 h_i

液态 PCM 在多孔介质中的流动换热多为自然对流, 间隙传热系数 h_i 可由 Zhukauskas 等[25]提出的圆柱与周围流体绕流的关联式进行确定:

$$h_i = \begin{cases} 0.76\text{Re}^{0.4}\text{Pr}^{0.37} \frac{K_{PCM}}{d_f}, & 0 < \text{Re} \leq 40 \\ 0.52\text{Re}^{0.5}\text{Pr}^{0.37} \frac{K_{PCM}}{d_f}, & 40 < \text{Re} \leq 1000 \\ 0.52\text{Re}^{0.6}\text{Pr}^{0.37} \frac{K_{PCM}}{d_f}, & 1000 < \text{Re} \leq 20000 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{pcm} d_f |\vec{V}|}{\varepsilon \mu_{pcm}} \quad (15)$$

3. 数值仿真

3.1. 物理模型及边界条件设置

为了确定泡沫金属最佳填充位置以及与优化前的换热性能差异对比。因此设置了五种不同填充位置方案，如图 1 所示：(a) 板内完全填充 PCM；(b) 在空间底部插入泡沫金属；(c) 在中间高度插入泡沫金属；(d) 在空间顶部插入泡沫金属；(e) 在板中心部位垂直布置。相变材料储能单元为一个长方体板，其体积尺寸为：200 mm (长) × 100 mm (宽) × 20 mm (厚)，与实际储能板大小一致。部分填充泡沫金属铜，为兼顾储能变化与强化换热程度，选取填充高度为储能板高度的一半[26]。其余空隙部分填充 PCM，泡沫金属铜及 PCM 物性参数见表 2。

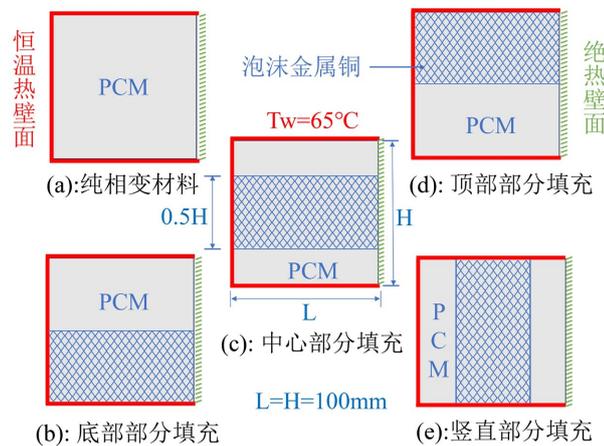


Figure 1. Schematic diagrams of the configuration comparison between five PCM and foam metals

图 1. 五种相变材料与泡沫金属布置对比示意图

Table 2. Thermophysical parameters of foam metal copper and phase change materials

表 2. 泡沫金属铜与相变材料的热物性参数

材料	相变材料(PCM)		金属泡沫铜
密度/(kg/m ³)	1481 (固)	1333 (液)	8920
比热/(J/kg·k)	3313 (固)	3373 (液)	380
导热系数/(W/m·k)	1.189 (固)	0.603 (液)	401
相变潜热/(kJ/kg)	261.6		
融化温度/°C	57.6~58.5		
动力黏度/(kg/m·s)	36.5 × 10 ⁻⁵		
体积变化率/%	11.1		

相变材料储能板的应用场景为热泵储热水箱，蓄热水箱尺寸：350 mm (长) × 350 mm (宽) × 1000 mm (高)，储存 PCM 的相变储能板浸放在水箱中。研究蓄热水箱的储能阶段，设定板的壁面均为恒温，温度与热水温度一致 $T_w = 65^\circ\text{C}$ 。泡沫金属及 PCM 物性参数如表 2 所示。此外，在所有壁面均采用无滑移边界条件。选取研究单块板进行分析，根据对称原理，选取板的左半边储能区域进行计算分析，右边界设定为绝热壁面，大大减小计算时的计算量。PCM 与泡沫金属铜的初始温度设定为 24°C 。为了准确描述 PCM 与泡沫金属间的传热，使用热非平衡模型对两者之间的换热方程耦合。在布置多孔复合材料的区域进行了两

倍网格加密。收敛判断条件为：连续性方程和动量方程的收敛准则为 10^{-6} 能量方程的收敛准则为 10^{-8} 。

3.2. 网格无关性与时间步长独立性验证

为了研究瞬态过程每次计算步长以及模型总网格数量对计算结果的影响。对瞬态计算设置了四种不同时间步长方案见表 3。选用填充方案(c)进行对比计算。结果显示，满足收敛条件下，方案 3 与方案 2 的融化时间偏差仅 0.12%。符合计算精度要求。分析讨论了四种不同网格数量对计算的影响，见图 2。结果显示：网格数量为 117,766 与数量为 239,800 两种方案在计算结果中液态占比变化相差无几。综上，权衡准确性与计算耗时，后续仿真沿用时间步长为 0.01 s 以及网格数量为 117,764 的方案开展后续研究。

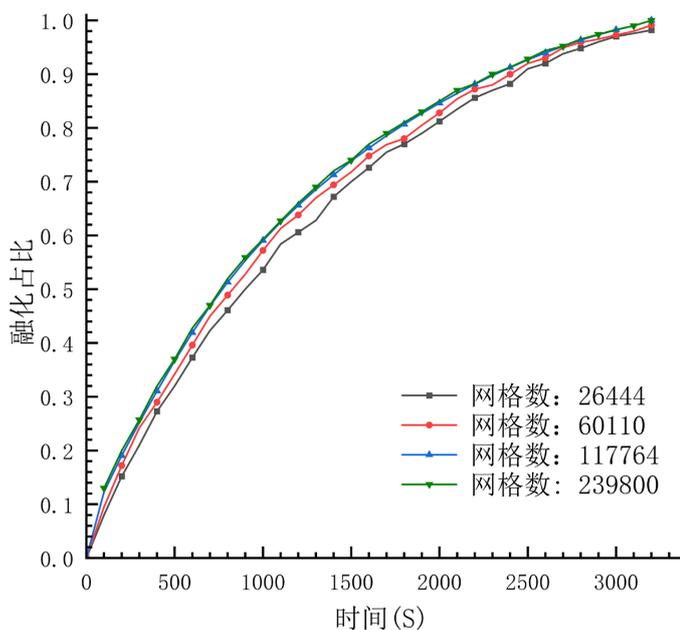


Figure 2. Grid independence verification comparison
图 2. 网格数量无关性验证对比图

Table 3. Comparison of the results of different settings for time step sizes and mesh quantities
表 3. 不同时间步长和网格数量设置方案结果对比

方案设置	时间步长	融化时间	变化率(%)
方案 1	0.1 s	3200 s	—
方案 2	0.05 s	3190 s	0.31
方案 3	0.01 s	3186 s	0.12
方案 4	0.001 s	3183 s	0.09

3.3. 模型方案验证

基于本文采用的计算模型，对文献[14]中的泡沫金属集成 PCM 的复合材料实验模型进行仿真复现，与实验结果进行对比。其中，在材料板中心平面上，同一高度上在距左侧加热边界 55.0 mm 和 57.0 mm 距离上分别设置两个温度测点：监测 PCM 与金属结构的温度变化。图 3 为实验与复现的温度变化对比。可见两组数据存在较好的接近性。但由于在仿真中外壁面并未考虑与环境对流作用，所以数据与实验结果存在一定差异，但位于合理区间。综上对比验证，可验证本次仿真模型具有一定的合理准确性。

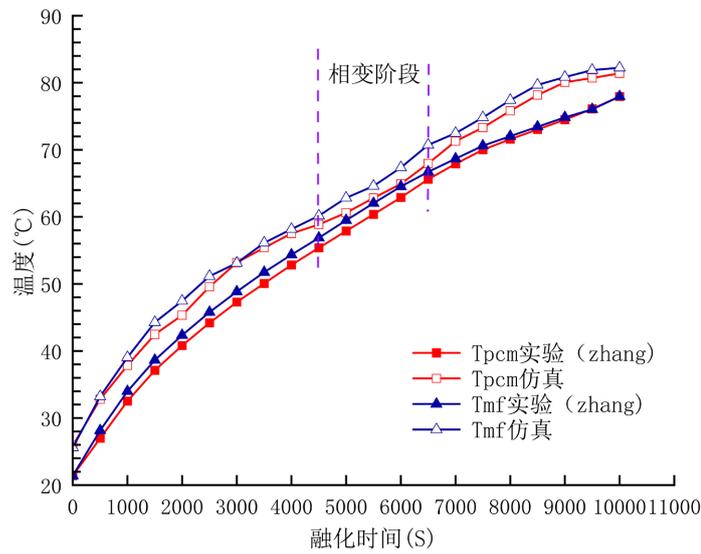


Figure 3. Variation in the temperature difference at a certain point between PCM and foam metal during melting in current numerical research and experimental [14]
图 3. 当前数值研究与实验[14]在融化中 PCM 与泡沫金属某点温度差异变化

4. 结果分析与讨论

4.1. 固液界面演化

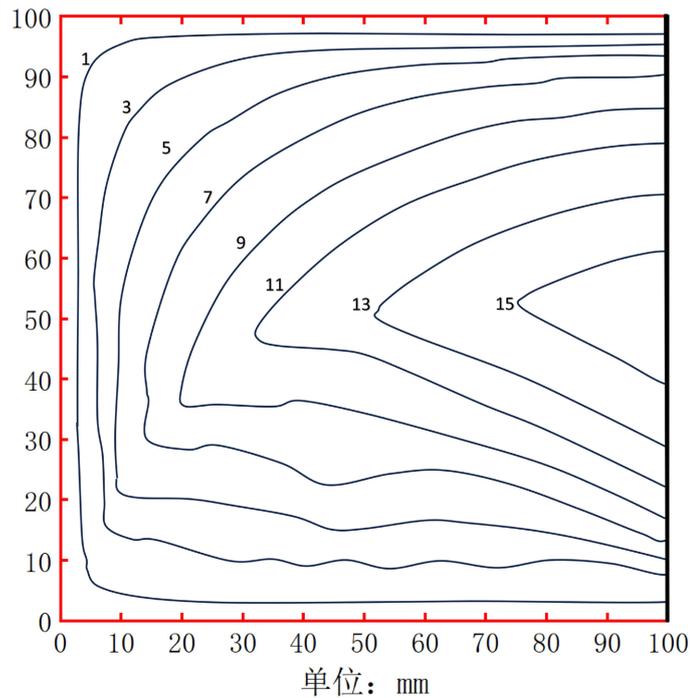


Figure 4. Volution curve of the solid-liquid interface in the melting process of scheme (a) with time ($\times 10^3$ s)
图 4. 方案(a)融化过程固液界面随时间($\times 10^3$ s)演化曲线

研究融化过程固液界面发展，将体积分数 f 为 0.5 设为等值线，表示为融化糊状区域的一半，近似为

实际融化过程的固液分布界面。方案(a)融化各时刻固液界面分布线于图 4。图中展示板内不同时刻固液分布的具体分布情况,分界线上数字代表融化时间($\times 10^3$)。其分界线右侧为固态、左侧为已融化的液态。融化初始阶段,材料的固液界面整体与热壁面相互平行,在此阶段热传导占据主导地位。随融化时间的增加,液态占比逐步增大,处于高温状态的液态材料在板内凭借自然对流,液态部分在左侧上方和下方聚集,内部流速最大处也出现在这个区域。说明在融化时间 5000 s 后,板内部对流传热占据主导地位。

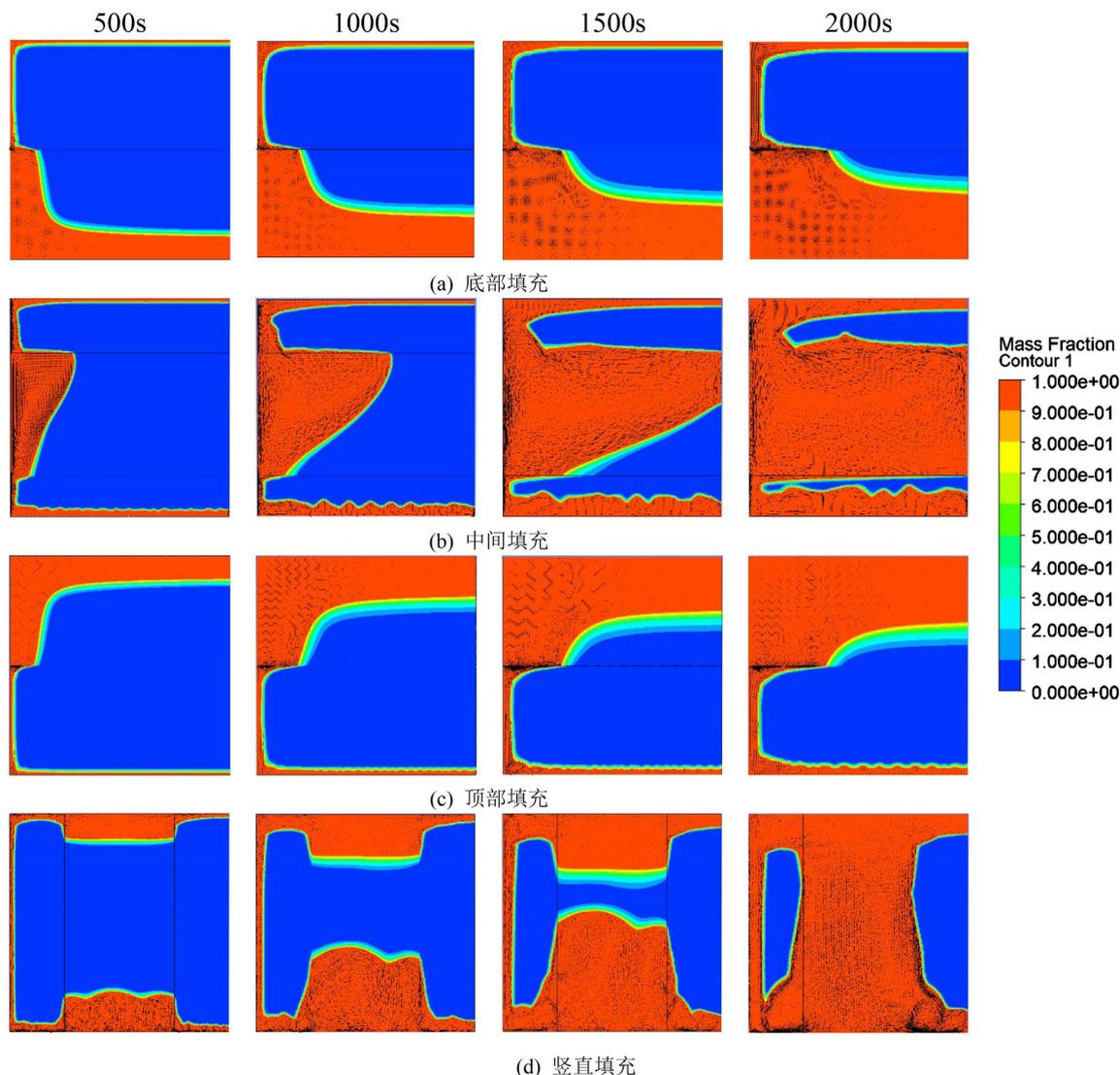


Figure 5. Nephograms of the solid-liquid interface distribution of the internal PCM under four filling schemes at different melting times

图 5. 不同融化时间下四种填充方案内部相变材料固液界面分布云图

图 5 展示了四种填充方案随着融化时间增长,内部 PCM 的固液发展状况。与方案(a)相比,在相同融化时间时,填充了泡沫金属的方案均呈现出较多的液态占比。这归因于泡沫金属优良的导热性能,促使其内部的 PCM 加速受热融化。

在 500 s~1000 s 时可以看出,在热壁面附近以及复合区域中液态流动出现,靠近热源部分的 PCM 吸收来自面的导热,快速升温的泡沫金属液也通过热传导将能量传递给相邻 PCM,PCM 克服相变潜热开始

升温融化。同时由图 5 的(b)和(d)可知,融化后的液态分布并非完全与热源分布位置一致,在(b)复合区域的上半部分以及(d)复合区域的下半部分融化的液态占比更大,这是源于液态 PCM 受热自然对流的结果。

在 2000 s 时复合区域的 PCM 几乎完全融化。2000 s 时刻,图 5(a)的下半部分以及(c)的上半部分仅有小部分融化。在此部分,内部的热量传输仍为来自热壁面的热传导,同时由于 PCM 导热系数较小的特性使得这部分区域受热融化缓慢。同时,图中还可知:在 2000 s 时,图 5(a)的上方与(c)的下方区域的 PCM 融化占比与界面演变也存在差异。(c)下部区域的界面发展呈现不规则的波浪状,(a)上部固体边界则相对平滑。原因在于,内部融化后的液态 PCM 升温后产生的密度差驱动力使之形成流动,但由于液态 PCM 在多孔泡沫金属与未填充区域间流动阻力差异,(c)中的对流强度相比(a)而言更为强烈。同时也可以看出在非填充区域,PCM 的糊状区域明显较窄,在图 5 与图 6 的 1000 s 时刻,在固液界面纯 PCM 的温度有着明显分层,这都是 PCM 导热系数较小的缘故。

图 5 可知,填充了相同的泡沫金属下,不同方案的内部融化占比也不相同,在 2000 s 时可明显得知:(b)、(d)比(a)、(c)融化更快,这由于在融化过程中,在复合区域的 PCM 完全融化后,(b)、(d)在内部形成了更有利于液态对流的固液分布,图 5 中黑色部分为内部融化后 PCM 的自然对流的流动矢量,可以看出(b)、(d)相较(a)、(c)内部的对流强度更为剧烈、明显。同时方案(b)、(d)凭借优异的填充位置,使之内部有着更好的温度分布。温度梯度和流动环境促成了较强的对流。这表明储热单元内金属泡沫位置对熔化过程的影响是显著的。

综上所述,对于系统强化换热过程而言,一方面可借助泡沫金属提升整体换热能力提升导热换热,另一方面应在融化过程中构建有利于对流换热的流动环境增强自然对流换热强度。

4.2. 温度分布云图对比

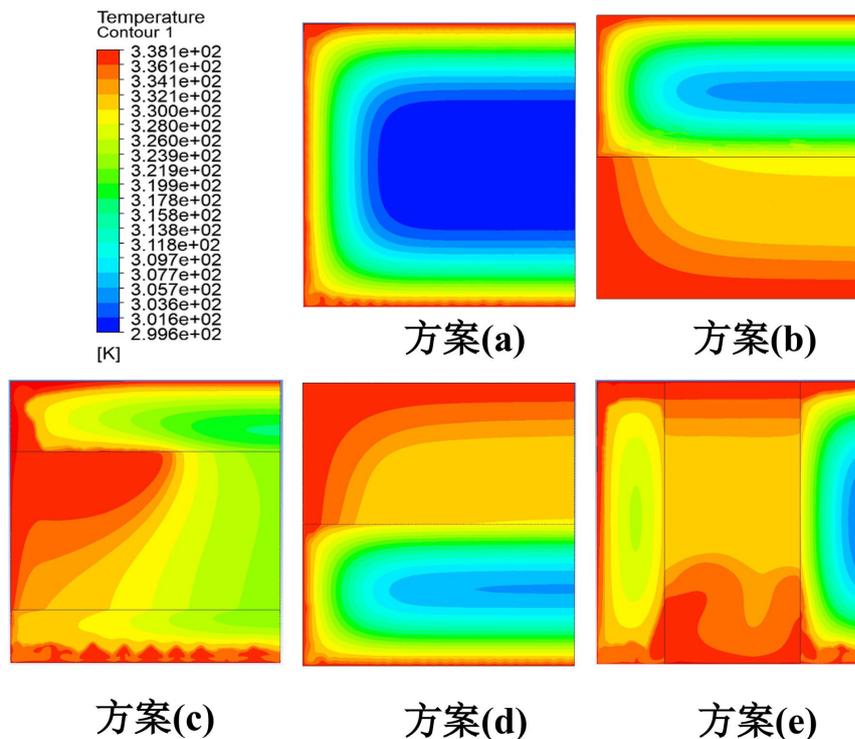


Figure 6. Temperature distribution nephograms of the internal phase change materials (PCM) under different schemes at 1000 seconds of melting

图 6. 融化 1000 s 时不同方案内部 PCM 的温度分布云图

图 6 为储能板内融化时间为 1000 s 时刻下不同布置方案内部 PCM 的温度云图, 此时: 纯 PCM 仅有部分融化, 导热占主导地位。由于 PCM 导热系数较小, 在非复合区域内的 PCM 有着明显的温度分层。由图 6(b) (d) 可见, 在填充了泡沫金属区域的 PCM 整体温度的大小及均匀性都有着较大提升, 而在相邻的 PCM 区域, 边缘部分的 PCM 接受来自高温泡沫金属的导热, 与方案(a)相比, 温度分布有着一定改善, 但由于 PCM 导热系数较小, 热量难以继续传递。方案(c)整体有着最佳的温度分布均匀性以及更高的平均温度, 这是由于填充的泡沫金属连通了热壁面与远离热源的部分, 凭借泡沫金属较高导热系数, 使得在远离热壁面这部分的复合材料的整体导热效果得到增强。

4.3. PCM 储能量随时间变化

图 7 表示了从加热起始至 PCM 完全融化过程中, 能量从热壁面传递至储能系统中 PCM 的变化情况, 储能量包含 PCM 因温度变化产生的显热以及融化时吸收的相变潜热。不同布置方案在储能过程均呈现出储能量随加热时间递增的趋势。方案(a)储能量最大, 这是由于填充泡沫金属使 PCM 填充量降低。总体来看, 泡沫金属的加入显著促进了系统储能速率的提升。

0~1000 s 的融化初期, 填充位置的改变对储存单元的储能量没有影响, 此时内部导热为主要传热机制, 主要为高温泡沫金属热传导给内部 PCM 以及靠近热壁面的 PCM 升温融化, 液态 PCM 开始在热壁面及复合区域附近出现。热壁面及复合区域附近出现。

1000~3000 s 阶段, 复合部分的 PCM 逐渐完全融化, 纯 PCM 区则缓慢升温融化。由图 6 及图 7 可知, 得益于方案(c)、(e)较好的填充位置其内部温度有更佳的均匀性、整体的融化速度更快。因此其储能变化明显优于方案(b)、(d), 在此阶段方案(c)、(e)内部 PCM 完全融化, 达到最大储能量。

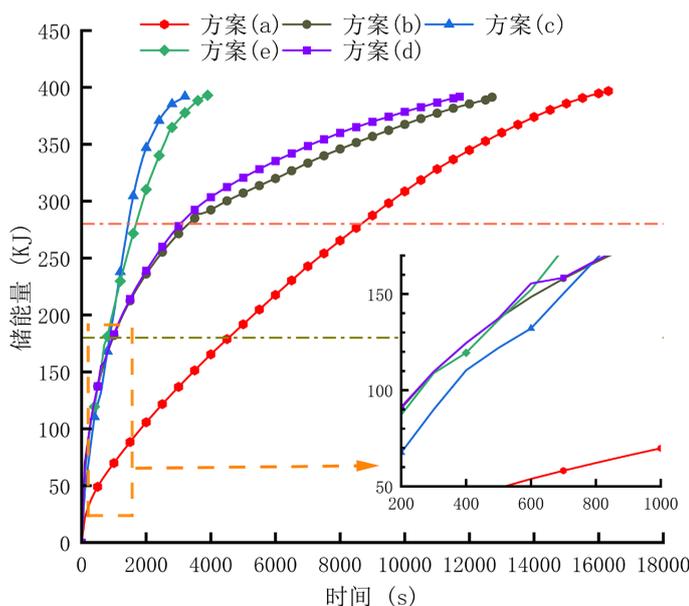


Figure 7. The diagram of the variation in energy storage of phase change materials with the increase of melting time

图 7. PCM 储能量随融化时间增长变化图

3000 s 后, 方案(d)的图像斜率开始大于方案(b)。此时复合区域内 PCM 已完全融化, 后续为纯 PCM 区材料升温融化。由于下方填充的方案(b)中底部的多孔材料对流动产生较大抑制作用, 使内部液态自然对流传热强度弱于方案(d)。此阶段对流传热占传热总成的主导地位, 因此方案(d)的储能效率优于方案(b)。

此外,在融化的后期阶段,蓄热系统的储能速率都有着一定程度的减缓。这由于此时材料整体的平均温度已经接近相变温度 56.6°C ,与热壁面的温度($T_w = 65^{\circ}\text{C}$)间传热温差较小,储能后期系统从外界吸收热量的能力较弱。因此,考虑到系统应用的实际环境,需要选取合适相变温度的相变材料,以便进一步提高能源利用效率。

图 8 为不同方案完全融化时间对比,以方案(a)为基准,评估不同填充位置对强化融化速度的效果。泡沫金属的加入能够加速融化,方案(b)、(d)融化时间分别减少 22.1%、28.22%,但因其作用区域对纯 PCM 区域影响有限,改善效果欠佳。相较而言,方案(c)、(e)在融化过程中形成了更利于内部自然对流传热的流动环境,提升效果更为显著。中间填充的方案(c)融化效率提升高达 80.43%,储能总量仅减小 1.2%,改善效果最佳。

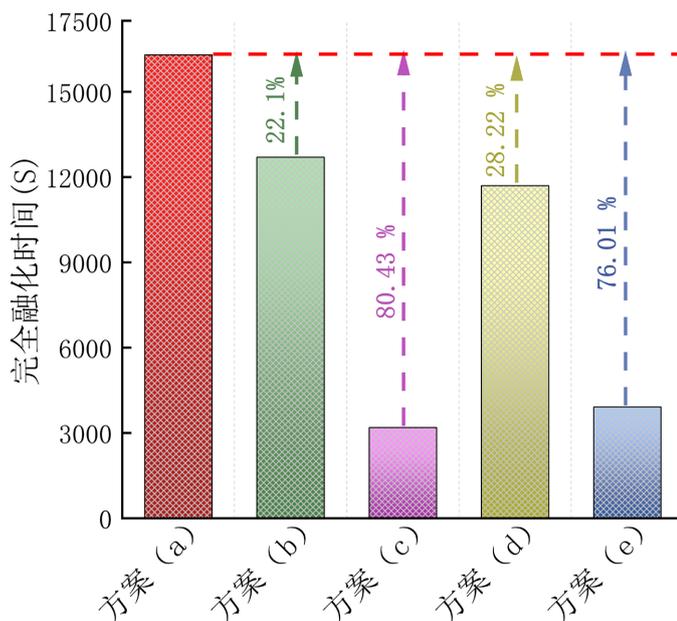


Figure 8. Five fully melted time comparison charts for settings
图 8. 五种设置方案完全融化时间对比图

5. 结论

本文对蓄热水箱内应用的相变材料储能板强化换热的蓄热过程进行了数值研究。采用内部填充金属泡沫铜的方法,设置了四种不同的填充位置,研究在多表面加热下不同方案内部相变材料的融化过程以及强化效果的影响,对比分析了过程的固-液面演化、温度分布以及储能效率和完全融化的时间,得出了如下结论:

(1) 填充了泡沫金属后,对蓄热板内相变材料的融化过程有着较大程度的改善。填充位置会对储能过程的强化产生不同影响。其中:中间填充的方案最佳,减小了 80.43%的融化时间,储能能量仅减小 1.2%。

(2) 2000 s 时刻 PCM-泡沫金属复合材料内部的相变材料率先完全融化。融化过程中由于液态 PCM 的对流效果使得固液分布界面有较大差异。中间填充方案中的相变材料具备较高的平均温度水平良好的温度均匀特性。

(3) 在填充等量泡沫金属的情形下,方案(c)与方案(e)不仅依赖于泡沫金属较好强化整体的传热效果,还在融化后期中在内部形成了有利于内部对流换热的流动环境,缩短了 66.6%的融化时间。

(4) 鉴于相变材料的相变温度与热源温度较为接近,使得储能板融化进程的后期存在较长的缓慢蓄

热时段。故而在相变储热系统的设计中，为有效缩减蓄能时长，应当优先选用相变温度与热源温度差值较为显著的储能材料。

参考文献

- [1] Khudhair, A.M. and Farid, M.M. (2004) A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, **45**, 263-275. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(03)00131-6)
- [2] Mahavar, S., Sengar, N., Rajawat, P., Verma, M. and Dashora, P. (2012) Design Development and Performance Studies of a Novel Single Family Solar Cooker. *Renewable Energy*, **47**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.013>
- [3] Regin, A.F., Solanki, S.C. and Saini, J.S. (2008) Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2438-2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
- [4] 田东东, 王会, 刁永发, 等. 金属泡沫孔密度对石蜡融化性能影响的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 32-39.
- [5] Tong, X., Khan, J.A. and RuhulAmin, M. (1996) Enhancement of Heat Transfer by Inserting a Metal Matrix into a Phase Change Material. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, **30**, 125-141. <https://doi.org/10.1080/10407789608913832>
- [6] Lafdi, K., Mesalhy, O. and Shaikh, S. (2007) Experimental Study on the Influence of Foam Porosity and Pore Size on the Melting of Phase Change Materials. *Journal of Applied Physics*, **102**, Article ID: 083549. <https://doi.org/10.1063/1.2802183>
- [7] Liu, Z., Yao, Y. and Wu, H. (2013) Numerical Modeling for Solid-Liquid Phase Change Phenomena in Porous Media: Shell-and-Tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage. *Applied Energy*, **112**, 1222-1232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.022>
- [8] Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A. and Bowman, K. (2005) Numerical Study for Enhancing the Thermal Conductivity of Phase Change Material (PCM) Storage Using High Thermal Conductivity Porous Matrix. *Energy Conversion and Management*, **46**, 847-867. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.010>
- [9] Joshi, V. and Rathod, M.K. (2019) Thermal Performance Augmentation of Metal Foam Infused Phase Change Material Using a Partial Filling Strategy: An Evaluation for Fill Height Ratio and Porosity. *Applied Energy*, **253**, Article ID: 113621. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113621>
- [10] Abdulmunem, A.R., Samin, P.M., Rahman, H.A., Hussien, H.A., Mazali, I.I. and Ghazali, H. (2020) Experimental and Numerical Investigations on the Effects of Different Tilt Angles on the Phase Change Material Melting Process in a Rectangular Container. *Journal of Energy Storage*, **32**, Article ID: 101914. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101914>
- [11] Haddad, Z., Iachachene, F., Sheremet, M.A. and Abu-Nada, E. (2023) Numerical Investigation and Optimization of Melting Performance for Thermal Energy Storage System Partially Filled with Metal Foam Layer: New Design Configurations. *Applied Thermal Engineering*, **223**, Article ID: 119809. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119809>
- [12] Xu, Y., Ren, Q., Zheng, Z. and He, Y. (2017) Evaluation and Optimization of Melting Performance for a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit Partially Filled with Porous Media. *Applied Energy*, **193**, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.019>
- [13] Sardari, P.T., Mohammed, H.I., Giddings, D., Walker, G.S., Gillott, M. and Grant, D. (2019) Numerical Study of a Multiple-Segment Metal Foam-PCM Latent Heat Storage Unit: Effect of Porosity, Pore Density and Location of Heat Source. *Energy*, **189**, Article ID: 116108. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116108>
- [14] Zhang, P., Meng, Z.N., Zhu, H., Wang, Y.L. and Peng, S.P. (2017) Melting Heat Transfer Characteristics of a Composite Phase Change Material Fabricated by Paraffin and Metal Foam. *Applied Energy*, **185**, 1971-1983. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.075>
- [15] Nield, D.A. and Bejan, A. (2006) *Convection in Porous Media*. Springer.
- [16] Fadl, M. and Eames, P.C. (2019) Numerical Investigation of the Influence of Mushy Zone Parameter Amush on Heat Transfer Characteristics in Vertically and Horizontally Oriented Thermal Energy Storage Systems. *Applied Thermal Engineering*, **151**, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.102>
- [17] Hong, Y., Ye, W., Du, J. and Huang, S. (2019) Solid-Liquid Phase-Change Thermal Storage and Release Behaviors in a Rectangular Cavity under the Impacts of Mushy Region and Low Gravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **130**, 1120-1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.024>
- [18] Fourie, G.J. and Du Plessis, P.J. (2002) Pressure Drop Modelling in Cellular Metallic Foams. *Chemical Engineering*

-
- Science*, **57**, 2781-2789. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(02\)00166-5](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(02)00166-5)
- [19] Calmidi, V.V. (1999) Transport Phenomena in High Porosity Fibrous Metal Foams.
- [20] Bhattacharya, A., Calmidi, V.V. and Mahajan, R.L. (2002) Thermophysical Properties of High Porosity Metal Foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **45**, 1017-1031. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(01\)00220-4](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(01)00220-4)
- [21] Calmidi, V.V. and Mahajan, R.L. (2000) Forced Convection in High Porosity Metal Foams. *Journal of Heat Transfer*, **122**, 557-565. <https://doi.org/10.1115/1.1287793>
- [22] Yang, X., Lu, T.J. and Kim, T. (2014) An Analytical Model for Permeability of Isotropic Porous Media. *Physics Letters A*, **378**, 2308-2311. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2014.06.002>
- [23] Calmidi, V.V. (1998) Transport Phenomena in High Porosity Fibrous Metal Foams. Department of Mechanical Engineering, University of Colorado.
- [24] Boomsma, K. and Poulikakos, D. (2001) On the Effective Thermal Conductivity of a Three-Dimensionally Structured Fluid-Saturated Metal Foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**, 827-836. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(00\)00123-x](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(00)00123-x)
- [25] Žukauskas, A. (1972) Heat Transfer from Tubes in Crossflow. In: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 93-160. [https://doi.org/10.1016/s0065-2717\(08\)70038-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2717(08)70038-8)
- [26] Joshi, V. and Rathod, M.K. (2019) Thermal Transport Augmentation in Latent Heat Thermal Energy Storage System by Partially Filled Metal Foam: A Novel Configuration. *Journal of Energy Storage*, **22**, 270-282. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.02.019>