

# THE UNIVERSITY OF WARWICK

**Original citation:**

Tian, Yuan and Zhao, Chang-Ying (2011) Using porous metals to enhance heat transfer in phase change materials (PCMs). In: 2011 Chinese Society of Engineering Thermophysics Heat and Mass Transfer Conference. Xi'an, China, 14-17th Oct 2011. Published in: Proceedings of 2011 Chinese Society of Engineering Thermophysics Heat and Mass Transfer Conference pp. 208-212.

**Permanent WRAP url:**

<http://wrap.warwick.ac.uk/52401>

**Copyright and reuse:**

The Warwick Research Archive Portal (WRAP) makes the work of researchers of the University of Warwick available open access under the following conditions. Copyright © and all moral rights to the version of the paper presented here belong to the individual author(s) and/or other copyright owners. To the extent reasonable and practicable the material made available in WRAP has been checked for eligibility before being made available.

Copies of full items can be used for personal research or study, educational, or not-for-profit purposes without prior permission or charge. Provided that the authors, title and full bibliographic details are credited, a hyperlink and/or URL is given for the original metadata page and the content is not changed in any way.

**A note on versions:**

The version presented here may differ from the published version or, version of record, if you wish to cite this item you are advised to consult the publisher's version. Please see the 'permanent WRAP url' above for details on accessing the published version and note that access may require a subscription.

For more information, please contact the WRAP Team at: [wrap@warwick.ac.uk](mailto:wrap@warwick.ac.uk)

warwick**publications**wrap  
  
highlight your research

<http://go.warwick.ac.uk/lib-publications>

2011 Heat and Mass Transfer Conference  
Xi'an, China, 14<sup>th</sup> – 16<sup>th</sup> October 2011  
Organised by Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSET)

## Using Porous Metals to Enhance Heat Transfer in Phase Change Materials (PCMs)

Y Tian<sup>1</sup> CY Zhao<sup>2,\*</sup>

1 School of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK  
2 School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai  
200240, China

Email: [changying.zhao@sjtu.edu.cn](mailto:changying.zhao@sjtu.edu.cn) Tel: 021-34204541

**Abstract:** Heat transfer enhancement mechanism of Phase Change Materials (PCMs) by high-porosity metal foams was investigated in this study. The Darcy-Brinkman-Forchheimer modified flow model was employed in the numerical simulations to consider the non-Darcy effects in metal foams: viscous flow resistance and inertia flow resistance. Local Non-Thermal Equilibrium (LNTE) model was used to consider the temperature difference between PCM and metal foam. The results showed that in the solid and two-phase zone the heat transfer rate in PCMs was significantly increased by metal foams, whilst in the liquid zone, natural convection was found to be weakened by the large flow resistance of metal foams, despite which the overall heat transfer rate was still higher than the case where metal foams were not used. Metal foams of low porosity and high pore density were found to perform better than the ones of high porosity and low pore density.

**Keywords:** Phase Change Material; Metal Foam; Heat Transfer Enhancement; Thermal Energy Storage.

# 泡沫金属对相变材料 (PCM) 的传热强化

田原<sup>1</sup> 赵长颖<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Engineering, University of Warwick, UK, CV4 7AL

<sup>2</sup> 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200092

Email: [changying.zhao@situ.edu.cn](mailto:changying.zhao@situ.edu.cn) Tel: 021-34204541

**摘要:** 本文系统研究了泡沫金属对相变材料 (PCM) 传热性能的影响, 并分析了其增强换热的机理。动量方程采用 Darcy-Brinkman-Forchheimer 修正模型以精确反映高孔隙率泡沫金属内的流动特性; 能量方程采用两方程局部非热平衡 (LNTE) 模型以反映金属骨架和 PCM 间的温差。结果发现: 在固相和相变区, 泡沫金属凭借其较高的导热能力大大增强了 PCM 的传热; 在液相区, 泡沫金属一定程度上抑制了 PCM 的自然对流, 但是凭借其高的导热能力, 总的换热系数仍然高于纯 PCM 样本; 另外, 低孔隙率和高孔密度的泡沫金属具有更高的传热性能。

**关键词:** 相变材料、PCM、泡沫金属、强化换热、蓄能

## 1 引言

大多数可再生能源具有间断性的特点, 如太阳能受昼夜、四季和气候等的影响, 所以在能量生产和需求之间存在不可避免的时间差。这使得蓄热系统 (TES, Thermal Energy Storage) 变得更为重要<sup>[1]</sup>。高性能的 TES 系统需要良好的蓄热材料, 相变材料 (Phase Change Materials<sup>[1]</sup>) 在其相变过程中吸收和释放大量的热, 并能够保持其温度相对不变, 可以作为理想的蓄热材料。特别对于那些对工作温度等参数要求恒定的应用, 像太阳能热电站, PCM 更具优势。

然而大多数 PCM 具有较低的导热系数: 有机石蜡类为 0.2 W/(mK), 无机盐类 PCM 为 0.5 W/(mK)<sup>[1]</sup>。这使得 PCM 在吸放热过程中的传热恶化, 对于太阳能电站来说, 意味着当使用白天储存在 PCM 里的热量来发电时 (夜间发电), 由于传热太差热量不能及时地被释放出来, 这对电厂的稳定和连续运转来说是致命的。既然大多数 PCM 具有较低的导热系数, 它的换热增强技术就显得尤为重要了。

具有超轻结构的泡沫金属是一种新型材料, 其连续性金属骨架使得它们具有高的导热能力, 因而可被用于增强 PCM 的换热从而加快 PCM 吸放热的速度。泡沫金属的优异传热性能已被一些学者研究过, 但这些研究集中于单相传热问题<sup>[2]</sup>, 并多为纯导热问题。Zhao et. al. 研究了泡沫金属内的自然对流问题<sup>[3]</sup>, 但也只局限于单相流体换热。本文针对高孔隙率泡沫金属内的相变换热进行了数值和实验研究。数值模型综合考虑了耦合的导热和自然对流, 动量方程采用 Darcy-Brinkman-Forchheimer 修正模型以精确反映高孔隙率泡沫金属内的流动特性, 能量方程采用两方程局部非热平衡 (LNTE) 模型以反映金属骨架和 PCM 间的温差 (传统的基于局部热平衡的一方程模型不再适用于泡沫金属<sup>[4]</sup>)。

## 2 物理问题和数学描写

如图 1 所示, 一矩形泡沫金属的孔隙全部被 PCM 浸占。测试段的边界条件: 底部为恒热流边界, 实验中采用柔性硅胶加热器进行加热; 考虑到样本对周围空间的散热, 其左、右和上边界为第三类边界条件。本实验采用 RT58 作为 PCM, 其相变潜热、相变温度、比热、导热率, 粘度和热膨胀系数分别为: 181 kJ/kg, 48-62°C, 2.1 kJ/kg, 0.2 W/m/K, 0.0269 Pa·s,  $1.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (PCM 来源: RUBITHERM<sup>®</sup> GmbH, Germany)。

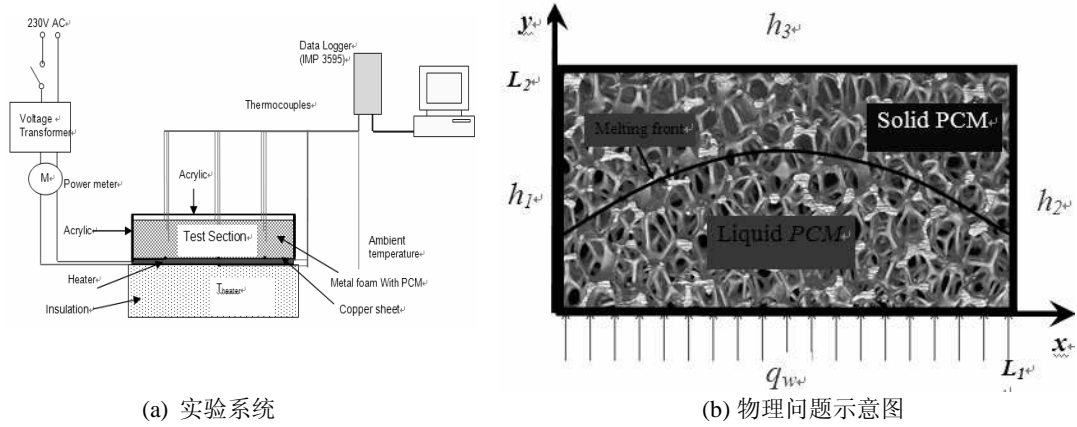


图1 物理问题描述

连续性方程和动量方程:

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

$$\rho_f \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu_f}{K} u - \frac{\rho_f C_f}{\sqrt{K}} |u|u \quad (2)$$

$$\rho_f \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_f}{\varepsilon} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu_f}{K} v - \frac{\rho_f C_f}{\sqrt{K}} |v|v + \rho_f g \varepsilon \beta (T_f - T_{ref}) \quad (3)$$

这里  $u$  和  $v$  为 PCM 速度在  $x$  和  $y$  方向的分量。  $C_f$  为泡沫金属内流动的惯性因子，  $K$  为渗透率。由于篇幅限制，其他参数的确定在此略去，它们与泡沫金属的微结构有关<sup>[2, 4]</sup>。

采用焓法，其能量方程为:

$$T_f = \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_f}{\rho_f C_{pf}}, \quad H_f \in (-\infty, \rho_f C_{pf} T_m) \\ T_m, \quad H_f \in [\rho_f C_{pf} T_m, \rho_f C_{pf} T_m + \rho_f H_L] \\ \frac{H_f - \rho_f H_L}{\rho_f C_{pf}}, \quad H_f \in (\rho_f C_{pf} T_m + \rho_f H_L, +\infty) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\rho_s C_{ps} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{se} \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) - h_{sf} a_{sf} [T_s - T_f] \quad (5)$$

$$\varepsilon \frac{\partial H_f}{\partial t} + \rho_f C_{pf} \varepsilon \left( u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = k_{fe} \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + h_{sf} a_{sf} [T_s - T_f] \quad (6)$$

这里，下标  $s$  代表泡沫金属，  $f$  代表 PCM。由于篇幅原因，所有的边界条件在此略去<sup>[4]</sup>。

### 3 数值模拟

耦合的自然对流和导热方程采用 SIMPLE 算法迭代计算，程序采用了均匀网格：50 ( $x$ -direction, 0.025 m)  $\times$  200 ( $y$ -direction, 0.2 m)。另外对网格独立性也进行了考察，发现进一步加密网格其结果变化均在 0.5% 以内。程序中对没有完成相变过程的 PCM 的粘度赋值无穷大，以确保自然对流就不会发生在固相区，程序可作出自主的判断哪些区域存在自然对流哪些区域仅有导热存在。

### 4 结果与讨论

基于实验中使用的各仪器的精度限制，实验结果的不确定性被评估在 6.67 % 以内，关于实验的细节可参考[5]。图 2 为数值结果同实验数据的比较，可以看出两者基本吻合一致：当  $t = 1200\text{ s}$  左右时，PCM 开始熔化(也取决于离加热壁的距离)，这时 PCM 的温度增加变得缓慢起来，这是由于这时从加热边界供给的热量都被用于克服相变潜热所以显热并没有增加；当  $t = 4000\text{ s}$  左右时，大部分 PCM 完成了相变过程，这时从加热边界吸收的热量不再被用于克服相变潜热，所以它们的温度随之迅速增加。数值结果和实验数据在相变区存在微小差别，这主要归因于在数值模型中 PCM 被假定有恒定的单一熔点，而本实验采用了 RT58 作为 PCM 材料，它有着变化的熔点 (48-62  $^{\circ}\text{C}$ )，这就使得数值结果不可能与实验数据完全一致。

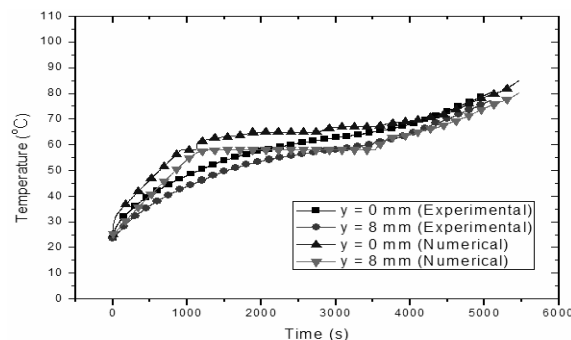


图 2 数值结果与实验数据对比

图 3 给出了不同时刻 PCM 的流场型线，可以看出：当  $t = 1108.3\text{ s}$  时，仅仅靠近加热底面并且靠近中心的一部分 PCM 开始了熔化过程，这部分开始熔化的 PCM 在  $x = 0.04$  与  $x = 0.16$  之间，和  $y = 0$  与  $y = 0.002$  之间。由于底部加热，左、右和上边界在向环境散热，所以在 PCM 之内形成了两个对称的涡，这两个涡以 PCM 的中心线为对称轴 ( $x = 0.1$ )，左边的涡为逆时针，右边的为顺时针，这些都是合理的因为左边界和右边界在向外界散热，所以靠近左右边界的 PCM 温度低一些，因而有向下运动的趋势。另外，中心线是对称轴，所以浮生力驱动的速度不可能有  $x$  方向的分量，它只可能有  $y$  方向的分量。所有这些分析都在图 3 中得到了再现。随着时间的推移，越来越多的 PCM 开始并完成了相变过程，直到  $t = 5859.0\text{ s}$  时，所有的 PCM 均已完成了相变过程，如图 3 (b) 所示，这时，同样有两个对称的涡在整个 PCM 区域当中。另外，数值模拟结果显示：由于金属泡沫多孔的结构使得流动阻力大大增加，因而浮生力推动的流速较小不致于产生很明显的自然对流<sup>[4]</sup>，也就是说 PCM 的自然对流被泡沫金属在很大程度上抑制了。不过由于泡沫金属对导热的极大强化，它能够帮助把热量迅速有效地从加热面吸进其金属骨架，然后通过其超高的比表面积把热量再传递给内部的 PCM，所以即使它抑制了自然对流，总体来说它还是提高了 PCM 的换热性能<sup>[4]</sup>。

图 4 比较了具有不同结构参数的泡沫金属对 PCM 传热的影响，一共使用了 3 个不

同的泡沫金属样本，他们分别为：0.95 的孔隙率和 10 *ppi* 的孔密度；0.95 的孔隙率和 30 *ppi* 的孔密度；0.85 的孔隙率和 30 *ppi* 的孔密度。这里 *ppi* 为 pores per inch，即泡沫金属样本在每线性英尺（2.54 cm）下存在的微孔数量。图 4 中所有的比较是基于固定边界热流密度的情况下，所以越小的温差意味着更好地传热性能，可以看出：具有 0.85 孔隙率和 30 *ppi* 孔密度的泡沫金属样本具有最高的传热性能，0.95 孔隙率和 30 *ppi* 孔密度的泡沫金属样本其次，0.95 孔隙率和 10 *ppi* 孔密度的泡沫金属的换热性能最低。这是因为更低的孔隙率意味着金属骨架的体积分数更大，更多的高导热率金属骨架显然对增强换热有很大的促进作用；另外，更高的孔密度如 30 *ppi* 意味着泡沫金属的孔更细和更密，所以 PCM 和金属骨架间的接触面积也大得多，这对传热也是很有好处的。

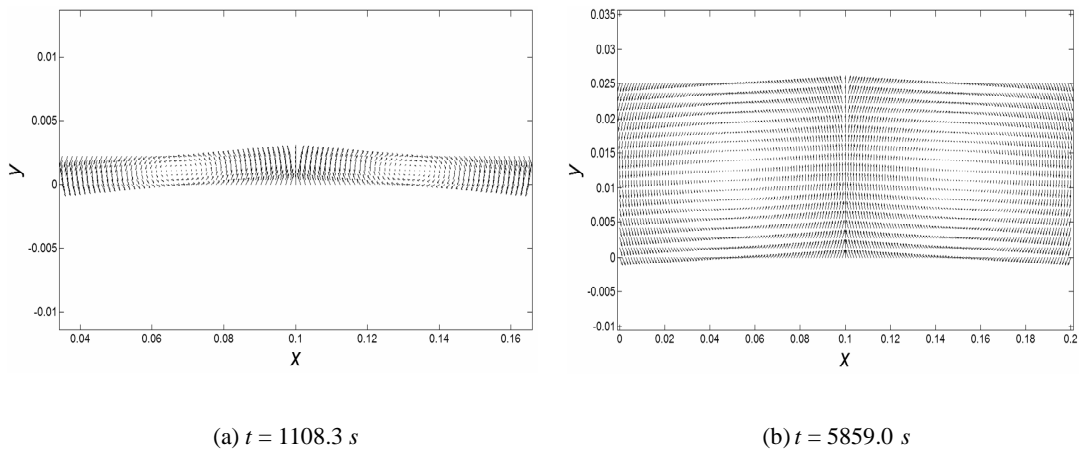


图 3 不同时刻 PCM 的流场型线

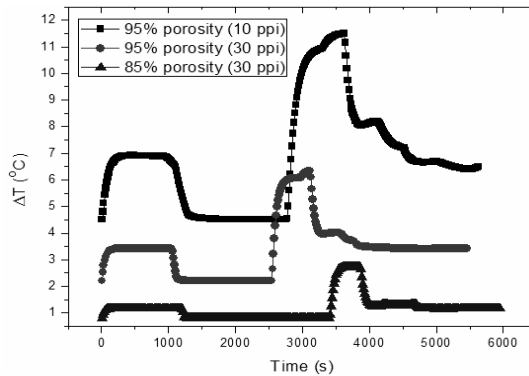


图 4 泡沫金属微结构对传热的影响

图 5 给出了 PCM 在相变过程中的温度场演化过程。当  $t = 976.5 s$  时，PCM 的最高温度为  $57^{\circ}C$ ，还尚未达到其熔点  $58^{\circ}C$ ，这时相变还没有发生，PCM 在蓄积显热为后续的相变做准备；当  $t = 1108.3 s$  时，靠近底部加热面的中央的一小部分 PCM 已经开始了熔化，但两边靠近左右边界的部分和靠近上边界的 PCM 都还没有开始熔化，这是因为这些边界是散热边界，其附近的温度要相对较低一些；随着时间的推移，越来越多的 PCM 被熔化了，如图 5 (c) 所示 ( $t = 1318.3 s$ )；当  $t = 5859.0 s$  时，区域内的所有 PCM 已经完成了相变过程，这时 PCM 的最高温度为  $92^{\circ}C$ ，最低温度为  $72^{\circ}C$ ，靠近底面的 PCM 有着更高的温度，靠近左、右和上边界的 PCM 有着较低的温度。

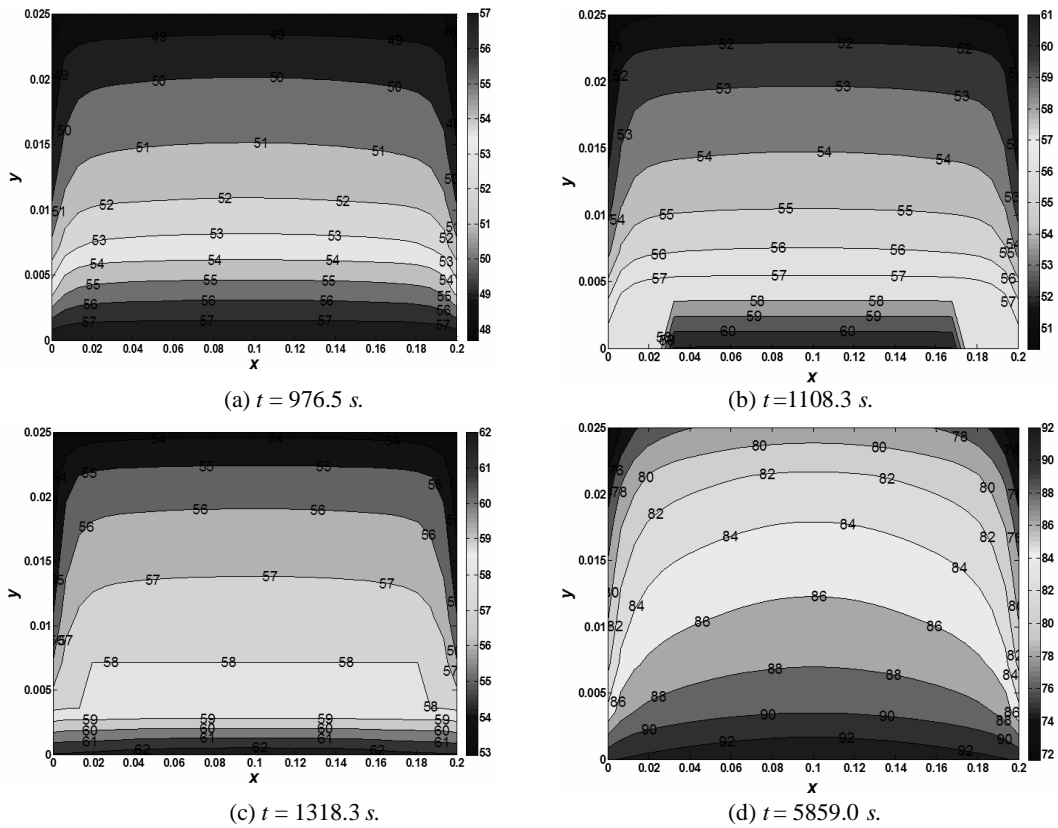


图 5 PCM 相变过程中的温度场演化

## 5 结论

本文系统研究了泡沫金属对相变材料 (PCM) 传热性能的影响, 并分析了其增强换热的机理。尽管实验采用的 PCM 没有固定的熔点 (48-62 °C), 数值模拟结果与实验数据仍然吻合较好。在固相和相变区, 泡沫金属凭借其较高的导热能力大大增强了 PCM 的传热; 在液相区, 泡沫金属一定程度地抑制了 PCM 的自然对流, 但是凭借其高的导热能力, 总的换热系数仍然高于纯 PCM 样本; 另外, 低孔隙率和高孔密度的泡沫金属具有更高的传热性能。

## 6 鸣谢

本研究被下列各基金共同资助, 作者在此以表感谢: 英国 EPSRC 重大基金项目 (The UK Engineering and Physical Sciences Research Council, with EPSRC Grant Number: EP/F061439/1); 英国 Warwick 大学 RDF 基金 (Warwick Research Development Fund: Strategic Award, Grant Number: RD07110)。

### 参考文献:

- [1] Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* 2003;23:251-283.
- [2] Calmidi VV, Mahajan RL. Forced convection in high porosity metal foams. *ASME Transactions – Journal of Heat Transfer* 2000;122:557-565.
- [3] Zhao CY, Lu TJ, Hodson HP. Natural convection in metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005;48:2452-2463.
- [4] Tian Y, Zhao CY. Thermal Analysis in Phase Change Materials (PCMs) Embedded with Metal Foams, In: *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference - IHTC14*, paper number: IHTC14-22452, Washington DC, USA, August 8<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup>, 2010.
- [5] Zhao CY, Lu W, Tian Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). *Solar Energy* 2010;84:1402-1412.