

金属泡沫固体复合材料的周期性非稳态热响应特性

殷英^①, 徐会金^{①②*}, 赵长颖^②

① 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580;

② 上海交通大学工程热物理研究所, 上海 200240

* 联系人, E-mail: hjxu@upc.edu.cn

2016-01-17 收稿, 2016-04-29 修回, 2016-04-29 接受, 2016-08-30 网络版发表

国家自然科学基金(51406238)、山东省优秀中青年科研奖励基金(BS2014NJ009)和中国博士后科学基金(2015M570363)资助

摘要 金属泡沫是一种高导热性多功能材料, 内部传热有明显的局部非热平衡特性, 而在导热中的热响应特性与外界环境密切相关. 本文基于两方程模型研究了填充固体石蜡的金属泡沫复合材料在非稳态过程中的热响应特性. 结果表明, 金属泡沫与石蜡间存在局部非热平衡效应, 需采用两方程模型计算. 当环境温度随时间作周期波动时, 金属泡沫内温度场也呈周期波动, 并且, 随环境温度波动周期的增大, 局部非热平衡效应先增大后减小, 即存在一个共振周期使得局部非热平衡效应最明显. 在外界温度波动幅度一定时, 金属泡沫内温度振幅随波动周期的增大呈对数趋势增大, 不同位置振幅的衰减程度不同, 距加热面越远衰减越多. 本文还详细讨论了金属泡沫的孔隙率、孔密度、热扩散率, 以及石蜡中含纳米颗粒添加物对复合材料热响应特性的影响程度. 在实际应用中, 应综合考虑这些影响因素, 从而使该复合材料的换热性能达到最优. 本文揭示了金属泡沫导热中金属骨架相和填充固体相的温度差异, 对于多孔介质非稳态热传导的局部非热平衡特性具有直接的科学意义.

关键词 多孔介质, 传热, 数值分析, 波动周期, 纳米颗粒

金属泡沫是一种新型多功能材料, 具有孔隙率高($\varepsilon > 0.8$), 质量轻、比表面积大、强度高、优良特性^[1,2], 在强化换热、热储能、催化反应和吸附传质等热科学领域, 以及新兴的产业如太阳能热发电、太阳能热化学等领域也有着广泛的应用^[3~5]. 近年来已有不少学者从事相关研究. Lu等人^[6]研究了开孔金属泡沫换热器总的换热系数和流动压降; Xu等人^[7~9]基于单方程模型和两方程模型探究了相关参数对金属泡沫管内流体流动与换热的影响. Li等人^[10]和Zhao等人^[11]研究了金属泡沫对石蜡换热的强化作用, Li等人^[10]还指出由于石蜡和泡沫骨架物性相差较大, 有必要采用两方程计算; 杲东彦等人^[12]和杨佳霖等人^[13]对金属泡沫强化石蜡换热过程进行了可视化实验研究; Qu等人^[14]将金属泡沫和相变材料的复合结

构应用于电子设备热管理. 最近, 又有学者尝试将纳米颗粒加入金属泡沫复合系统中, 比如, Hossain等人^[15]研究了纳米颗粒的体积分数和金属泡沫孔隙率对相变材料-金属泡沫-金属颗粒复合体换热性能的影响. Tasnim等人^[16]基于局部热平衡模型研究了金属泡沫-相变材料系统中加入纳米颗粒对系统换热性能的影响, 其结果表明, 系统中加入纳米颗粒会削弱整个系统的导热和对流换热的能力, 延迟相变材料融化的时间. 在工程领域, 周期性边界条件下非稳态导热广泛存在^[17,18], Minkowycz等人^[19]研究了周期性温度环境下多孔介质内温度变化特点. Barletta等人^[20]研究了周期性正弦温度边界下, 圆管内充分发展流的换热规律. Abdous等人^[21]研究了周期性温度边界下空心球体的温度分布. 然而, 这些研究都是针

引用格式: 殷英, 徐会金, 赵长颖. 金属泡沫固体复合材料的周期性非稳态热响应特性. 科学通报, 2016, 61: 3964–3972

Yin Y, Xu H J, Zhao C Y. Periodically unsteady thermal response of metal-foam solid composite (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3964–3972, doi: 10.1360/N972016-00069

对同种材料,对于金属泡沫和石蜡两种物质构成的新型复合材料,其热特性与环境密切相关.在非稳态受热过程,尤其是考虑局部非热平衡效应的周期性非稳态导热,目前相关研究较少.

鉴于局部非热平衡效应更能反映实际物理过程,在工程上更具应用价值,因此基于两方程模型,本文对填固体石蜡的金属泡沫复合材料在周期性温度边界条件下的非稳态热响应特性开展了数值研究,分析了金属泡沫的孔隙率、孔密度、热扩散率、纳米颗粒添加物、距离加热面的位置等因素对金属泡沫内局部非热平衡效应,温度振幅和振幅衰减程度的影响.

1 物理模型

本文物理模型如图1所示,在矩形腔体内烧结金属泡沫,在金属泡沫内填充有固体石蜡,计算区域为封闭的二维矩形腔体,矩形区域的长 $L=50\text{ mm}$, $H=100\text{ mm}$,上壁面和下壁面绝热,左壁面温度 T_1 周期变化,右壁面温度为 T_2 ,初始温度为 T_0 .在编程计算中对模型做如下假设:(1)金属泡沫是均匀的,且各向同性;(2)金属泡沫和填充石蜡的热物性参数不随温度变化;(3)加热温度低于石蜡相变温度,石蜡受热后未发生相变.

本文采用两方程模型(局部非热平衡模型)对金属泡沫和石蜡的非稳态导热过程进行数学建模,石蜡和金属泡沫的能量方程分别为

$$\text{石蜡: } \varepsilon \rho_f c_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{fe} \nabla T_f) + k_{int} a_{sf} (T_s - T_f), \quad (1)$$

金属泡沫:

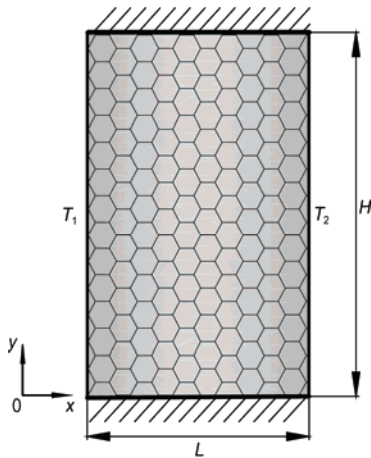


图1 物理模型

Figure 1 Physical model

$$(1-\varepsilon) \rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{se} \nabla T_s) - k_{int} a_{sf} (T_s - T_f), \quad (2)$$

方程(1)和(2)中,下标f表示固体石蜡,s表示金属泡沫; T_f , T_s , ρ_f , ρ_s , c_{pf} , c_{ps} , k_{fe} , k_{se} 分别为石蜡与金属泡沫的温度、密度、比定压热容、有效导热系数; t 为时间; ε 表示金属泡沫的孔隙率; k_{int} 为石蜡和金属泡沫界面间的导热系数; a_{sf} 为泡沫比表面积,本文中采用的相关参数的计算式见表1^[1,8,10,22,23],相关的材料物性参数见表2^[10,24].

非稳态导热初始条件为

$$t=0: T_s = T_f = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H. \quad (3)$$

在 t 时刻的边界条件为

$$x=0: T_s = T_f = T_1 = T_a + A \sin(ft); x=L: T_s = T_f = T_2, \quad (4a)$$

$$y=0, y=H: \frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0, \quad (4b)$$

其中, T_a 是环境温度波动的平均值, A 是环境温度波动幅度(温度振幅), f 是环境温度波动角频率, $f=2\pi/t_0$, t_0 环境温度波动周期(波动周期),本文中: $T_0=10^\circ\text{C}$, $T_1=10+30\sin(ft)$, $T_2=10^\circ\text{C}$.

2 数值方法及验证

本文采用有限容积法^[23]对当前问题进行求解,石蜡和金属骨架的耦合温度方程组采用Gauss-Seidel迭代法进行求解计算,当求解变量前后两次迭代的最大相对误差小于 10^{-5} 时,则该时层收敛,进行下一时层计算.对网格进行独立性考核,经计算网格节点数为 31×61 ,每个周期内的时间节点数为100,网格继续加密对计算结果基本没有影响.为验证本文所用算法的正确性,对图1所示模型在恒壁温边界条件下的非稳态导热过程进行计算,将计算结果与文献[25]中的分析解进行对比($x/L=0.8$, $y/H=0.5$).如图2所示,本文计算结果与分析解结果基本一致.

3 计算结果与讨论

3.1 恒壁温条件下非稳态导热的特性

本部分对恒壁温边界条件下的非稳态导热过程进行分析研究.考虑到铜泡沫应用广泛,因而主要研究铜泡沫.取铜泡沫的孔隙率 $\varepsilon=0.8$,孔密度 $\omega=10\text{ PPI}$.如图3所示为 $y/H=0.5$ 截面上,不同位置温度的变化特点,在非稳态初始阶段,石蜡与铜泡沫的温度不同,即石蜡和铜泡沫间存在局部非热平衡效应,说

表 1 金属泡沫相关参数计算关联式

Table 1 The correlations calculating the parameters of metal foam

参数	计算关联式	参考文献
有效导热系数, k_{se} , k_{fe}	$k_{se} = k_e _{k_i=0}, k_{fe} = k_e _{k_s=0}, k_e = 1/\left(\sqrt{2}(R_A + R_B + R_C + R_D)\right),$ $R_A = 4\lambda/\left[(2e^2 + \pi\lambda(1-e))k_s + (4 - 2e^2 - \pi\lambda(1-e))k_i\right],$ $R_B = (e - 2\lambda)^2/\left[(e - 2\lambda)e^2k_s + (2 - 4\lambda - \pi\lambda(e - 2\lambda)e^2)k_i\right],$ $R_C = (\sqrt{2} - 2e)^2/\left[2\pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e)k_s + 2(\sqrt{2} - 2e - \pi\lambda^2(1 - 2\sqrt{2}e))k_i\right],$ $R_D = 2e/\left[e^2k_s + 2(4 - e^2)k_i\right],$ $\lambda = \sqrt{2}\left(2 - (5/8)e^3\sqrt{2} - 2\varepsilon\right)/\left(\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)\right), e = 0.339,$	[10,22]
孔直径, d_p	$d_p = 0.0254/\omega$, ω 为孔密度(PPI), 单位英寸上孔的个数	[1]
纤维直径, d_f	$d_f = 1.18\sqrt{1 - \varepsilon/3\pi}\left[1 - \exp((\varepsilon - 1)/0.04)\right]^{-1}d_p$	[8]
比表面积, a_{sf}	$a_{sf} = 3\pi d_f\left[1 - \exp((\varepsilon - 1)/0.04)\right]/(0.59d_p)^2$	[8]
界面间导热系数, k_{int}	$k_{int} = 1/\left(\frac{d_p}{2k_i} + \frac{d_f}{2k_s}\right)$	[23]

表 2 相关的材料物性参数^[10,24]Table 2 The physical properties of related materials^[10,24]

物质	导热系数 (W/(m K))	密度 (kg/m ³)	比热容 (J/(kg K))	热扩散率 (m ² /s)
石蜡	0.2	785.02	2850	8.939×10^{-8}
纯铜	398	8930	386	1.555×10^{-4}
碳钢	36.7	7750	470	1.008×10^{-5}

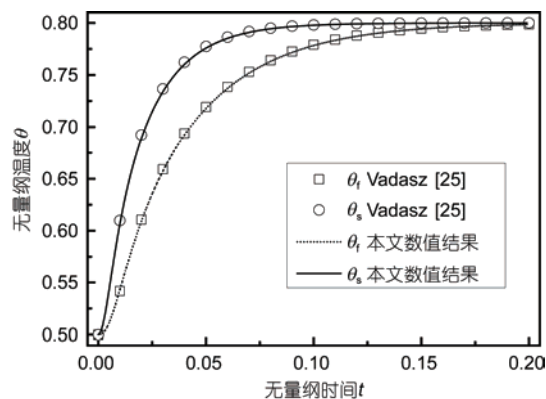


图 2 本文数值解与文献分析解的对比

Figure 2 Comparison between present numerical solution and analytical solution in reference

明采用两方程模型计算的必要性。此外, 距离加热面越近, 温度差别越明显, 局部非热平衡效应也越明显, 随时间推移, 趋于稳态, 石蜡和铜泡沫温度逐渐相同, 局部非热平衡效应逐渐消失, 这也说明局部非热平衡效应仅存在于非稳态过程中。

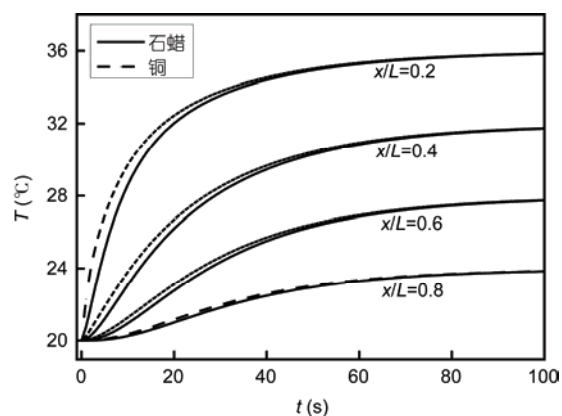


图 3 不同位置温度随时间的变化

Figure 3 Temperature varies with time at different positions

3.2 周期性边界条件下非稳态导热的基本特性

边界条件周期性变化的非稳态导热过程主要包括两个阶段, 初始阶段和经历足够时间后的周期平衡阶段(或者称准稳态阶段)。初始阶段石蜡和金属泡沫的温度变化特点如图4所示, 不同位置石蜡和铜泡沫的温度随时间做周期波动, 响应时间和波动振幅存在滞后和衰减, 这是由准稳态传热部分的温度降及相位滞后造成的, 且离加热壁面越远, 时间滞后越大, 而且振幅衰减越多。从图4也可看出, 铜泡沫的温度变化比石蜡快, 具体情况为: 边界温度上升时, 铜泡沫的温度也迅速上升达到最大值, 达到最大值所需的时间比石蜡小, 并且, 铜泡沫温度振幅(最大

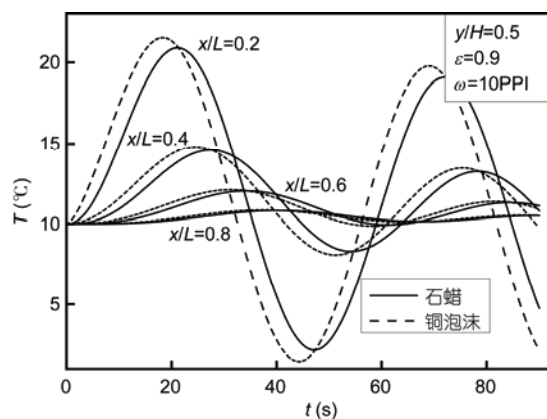


图4 初始阶段不同位置温度随时间变化

Figure 4 The temperature varies with time at different positions in the initial phase

值)比石蜡大;当边界温度下降时,铜泡沫的温度又迅速减小,达到最小值所需时间也比石蜡小.铜泡沫温度振幅大的原因是铜的导热率大,对热扰动衰减程度小;而石蜡温度变化落后于铜泡沫主要由于石蜡的热扩散率较小,扩散能力差,它温度的变化更主要是借助于铜泡沫对它的导热.如图5所示为 $y/H=0.5$, $x/L=0.2$ 点温度随时间做周期性波动,当经历一定时间后,物体温度会以相同的周期规律发生变化,即达到周期平衡阶段.

本文下面将主要探究周期平衡阶段石蜡与金属泡沫复合材料的热特性.为断定达到周期平衡所需的时间,在计算区域中选一参考点($x/L=0.25$, $y/H=0.5$),分析该点温度振幅随时间的变化,当其基本不随时间变化时可认为达到周期平衡.如图6所示,

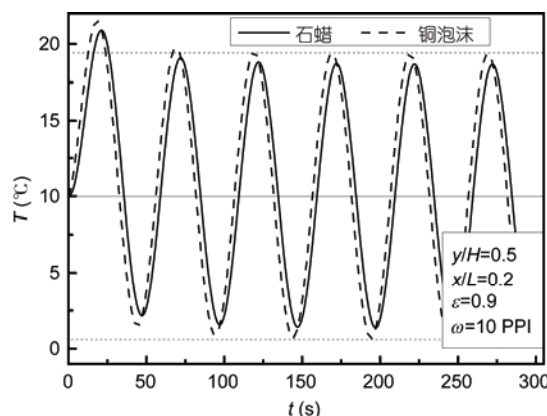

 图5 $y/H=0.5$, $x/L=0.2$ 处温度随时间变化

Figure 5 The temperature varies with time at position of $y/H=0.5$, $x/L=0.2$

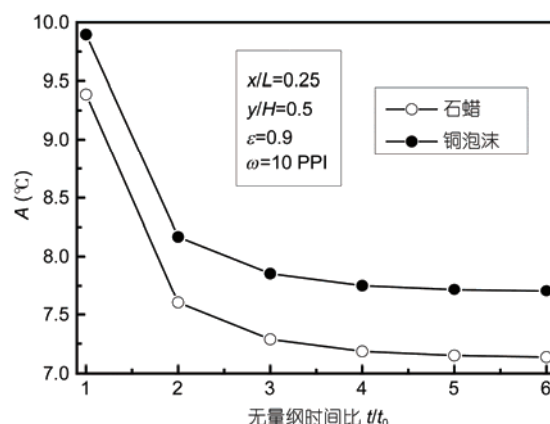


图6 石蜡和铜泡沫的温度振幅随时间变化

Figure 6 The temperature amplitude varies with time of paraffin and copper foam

$t/t_0 > 4$, 温度振幅基本不变,可认为达到周期平衡.

3.3 局部非热平衡的变化特点

石蜡与铜泡沫的温度不相等,存在局部非热平衡效应.在计算区域内选取一点,计算金属泡沫和石蜡在一个时间周期内温差的平均值,通过平均温差来描述局部非热平衡的大小,如下为平均温差计算式:

$$\Delta T = \frac{\int_t^{t+t_0} |T_s - T_f| dt}{t_0} \quad (5)$$

平均温差越大,局部非热平衡越大,反之,局部非热平衡越小.下面分析波动周期、孔隙率、孔密度、泡沫骨架热扩散率、纳米颗粒添加物对局部非热平衡的影响.如图7所示,环境温度的波动周期由1 s变化到1000 s,即波动周期由小变大,而波动频率与波动周期成反比,所以波动频率由大到小,平均温差总体变化趋势是先急剧增大,然后逐渐减小,其间,存在一个共振波动周期,此时平均温差存在最大值,即此处局部非热平衡效应最明显.如图7(a)所示,当孔隙率减小为0.8,平均温差最大值变大,出现最大值的波动周期减小;最大值两侧,平均温差的变化更陡.这可能由于波动周期较小时材料的导热率占主导因素,孔隙率减小致使铜泡沫的有效导热系数增大石蜡的有效大热系数减小,二者的差值增大,局部非热平衡效应增大,而随着波动周期增大,波动周期的影响占主导,所以孔密度的影响减弱.如图7(b)所示,当孔密度增大为40 PPI,平均温差大幅度减小,仍存在最大值,但最大值减小,出现最大值的波动周期也

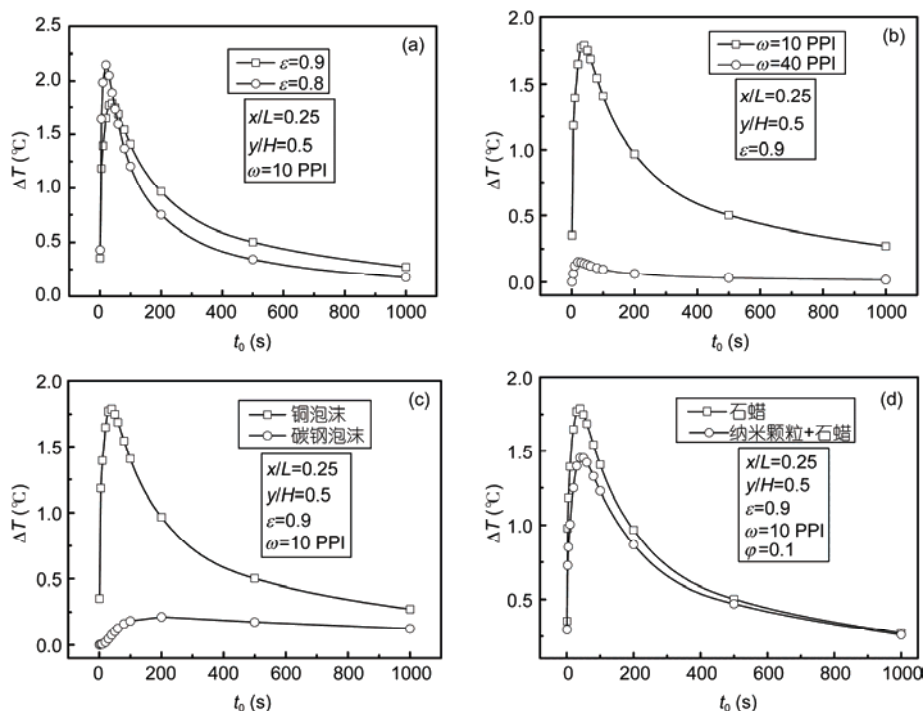


图7 各参数对平均温差的影响. (a) 孔隙率; (b) 孔密度; (c) 热扩散率; (d) 纳米颗粒

Figure 7 Effects of basic parameters on the fluid-solid temperature difference. (a) Porosity; (b) pore density; (c) foam thermal diffusivity; (d) nano-particles

减小. 这是由于孔密度增大, 即每英寸长度上的孔洞个数增多, 金属骨架的纤维直径减小, 石蜡与铜泡沫间能充分换热, 所以两者温差小, 局部非热平衡效应不明显. 如图7(c)所示, 将铜泡沫换为碳钢泡沫, 铜泡沫的热扩散率大于碳钢, 平均温差整体减小, 但仍然存在最大值, 出现最大值波动周期变大, 最大值右侧温度变化平缓. 铜泡沫复合物的平均温差比碳钢复合物的, 是因为铜和石蜡间的热导系数相差大, 局部非热平衡效应明显, 此处同样说明采用两方程模型计算的必要性. 此外, 在石蜡中加入体积分数10%的 Al_2O_3 纳米颗粒, 石蜡和纳米颗粒混合物的有效导热系数采用Maxwell模型计算^[15], 如图7(d)所示, 局部非平衡效应总体减小, 但减小程度不明显, 这是因为纳米颗粒增大了石蜡的导热率, 从而石蜡和纳米颗粒复合体的有效导热率与铜泡沫的导热率的比值减小.

3.4 温度振幅

如图8所示为不同位置不同周期温度振幅的变化. 由于材料本身存在热阻, 所以沿 x 方向温度振幅不断衰减. 不同位置的温度振幅还和温度波动周期

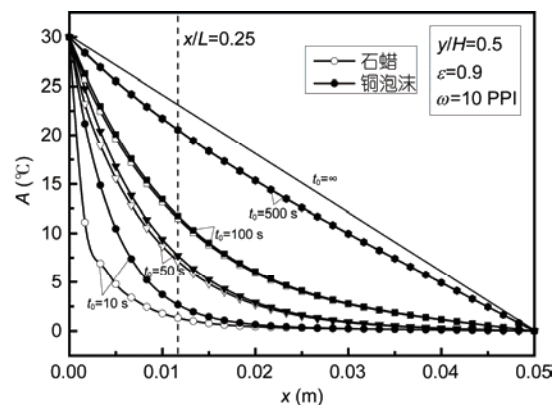


图8 温度振幅随波动周期变化曲线

Figure 8 Temperature amplitude varies with the fluctuation cycles

(或波动频率)有关, 周期小(频率高), 距离受热面越远, 振幅衰减越多. 当波动周期无穷大, 即到达稳态时, 温度振幅的大小和衰减程度取决于材料本身的热阻和其所处位置. 从图8中还可以看出局部非热平衡的变化, 同样, 当壁面温度波动周期小(波动频率较高), 距离受热面近, 石蜡和铜泡沫的温度相差较大, 即局部非热平衡效应明显. 随波动周期的增大, 局部非平衡效应减小; 当波动周期无穷大, 石蜡与铜

泡沫温度一样,局部非热平衡效应消失,这也说明,局部非热平衡效应只存在于非稳态过程中。

在周期性热扰动从左向右侧传播过程中,物体内温度振幅将逐渐衰减,不同波动周期的衰减程度不同。为分析波动周期、金属泡沫的孔隙率、孔密度、热扩散率、纳米颗粒添加物对温度振幅和衰减程度的影响,对计算区域内某点振幅变化情况进行研究。如图9所示,随外加温度的波动周期的增大,温度振幅皆呈对数趋势增长,振幅衰减程度减小。当温度波动周期不断增大,趋向于稳态,不同位置处温度振幅和衰减程度都为定值,温度振幅沿热量传播方向线性减小。图9(a)为孔隙率的影响,随波动周期的增大,孔隙率为0.9的温度振幅整体小于孔隙率为0.8的,也就是说孔隙率增大,振幅衰减增大。当波动周期较小时,石蜡和铜泡沫的温度振幅相差较大,铜泡沫的振幅高于石蜡,而随着波动周期的增大,两者振幅一致。由于铜的导热系数远大于石蜡,波动周期较小时,导热系数是影响振幅的主导因素,随波动周期的增大,波动周期占主导,导热系数影响削弱。当波动周期相同时,孔隙率减小,石蜡与泡沫铜的振幅都增大,当波动周期足够大时,孔隙率的影响基本消失。

如图9(b)所示为孔密度对温度振幅的影响,孔密度的变化对振幅衰减基本没有影响。但是,孔密度增大,局部非热平衡效应减小,石蜡与铜泡沫的振幅基本相同。这主要是由于孔密度增大,相同体积内孔洞增多,从而使金属骨架的纤维直径减小,石蜡与铜泡沫间能充分换热,两者温差很小,局部非热平衡效应不明显,与前面图7(b)的结果一致。如图9(c)所示为热扩散率对温度振幅的影响,随波动周期的增大,铜泡沫的温度振幅一直高于碳钢泡沫,这也说明碳钢对温度振幅的衰减程度比铜大。石蜡和碳钢的温度振幅基本相同,这是由于碳钢的导热系数小于铜,而多孔介质和其填充物的导热系数相差越小,局部非平衡效应越不明显。如图9(d)所示为 Al_2O_3 纳米颗粒添加物对温度振幅的影响,石蜡的有效导热率增大,但温度振幅却略微减小,温度振幅的衰减程度有所增大。

4 结论

(1) 在非稳态升温过程中,金属泡沫与石蜡的温度不同,存在局部非热平衡效应,这说明采用两方程模型计算的必要性。(2) 当环境温度随时间作周期波动时,金属泡沫内温度场也呈周期波动。随环境温度

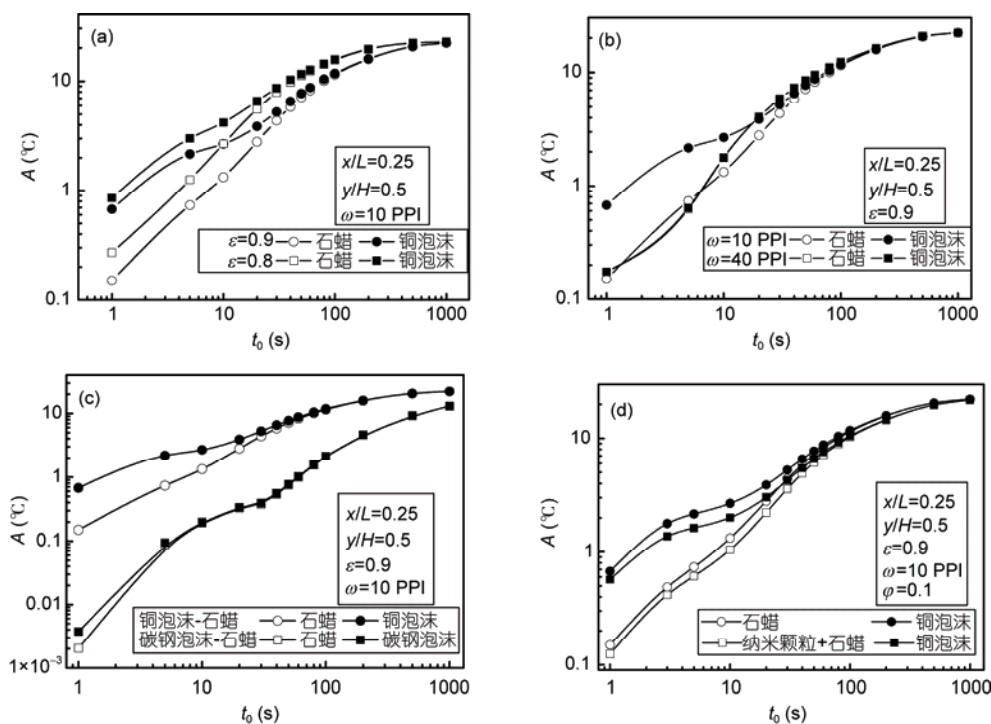


图9 各参数对温度振幅的影响。(a) 孔隙率;(b) 孔密度;(c) 热扩散率;(d) 纳米颗粒

Figure 9 Effects of basic parameters on temperature amplitude. (a) Porosity; (b) pore density; (c) foam thermal diffusivity; (d) nano-particles

波动周期的增大, 局部非热平衡效应先增大后减小, 即存在一个共振波动周期, 此时局部非热平衡效应最明显. 增大金属泡沫的孔隙率和孔密度、减小泡沫骨架的热扩散率, 以及在石蜡中添加 Al_2O_3 纳米颗粒都会减弱局部非热平衡热效应. (3) 在环境温度波动幅度一定时, 复合材料类温度振幅随温度波动周期

的增大整体呈对数趋势增大, 不同位置的振幅衰减程度不同, 距受热面越远衰减越多. 金属泡沫的孔隙率和孔密度, 纳米颗粒添加物对温度振幅和衰减程度的影响较小, 而金属泡沫热扩散率的影响相对较大. 在实际应用中, 应综合考虑这些影响因素, 使复合材料的性能达到最优.

参考文献

- 1 Zhao C Y, Kim T, Lu T J, et al. Thermal Transport Phenomena in Porous Metal Foams and Sintered Beds. Cambridge: University of Cambridge, 2001. 6–9
- 2 Lu W, Zhao C Y, Qu Z G. Single-phase convection in circular pipe with metal foams (in Chinese). J Eng Thermophys, 2008, 29: 1895–1897 [陆威, 赵长颖, 屈治国. 金属泡沫填充水平圆管内单相对流换热研究. 工程热物理学报, 2008, 29: 1895–1897]
- 3 Xu H J, Qu Z G, Tao W Q. Thermal transport analysis in parallel-plate channel filled with open-celled metallic foams. Int Commu Heat Mass, 2011, 38: 868–873
- 4 Zhao C Y. Review on the thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. Int J Heat Mass Transfer, 2012, 55: 3618–3632
- 5 Li W Q, Qu Z G, Tao W Q. Numerical study of solid-liquid phase change in metallic foam (in Chinese). J Eng Thermophys, 2013, 34: 141–144 [李文强, 屈治国, 陶文铨. 金属泡沫内固-液相变数值模拟研究. 工程热物理学报, 2013, 34: 141–144]
- 6 Lu T J, Stone H A, Ashby M F. Heat transfer in open-cell metal foams. Acta Mater, 1998, 46: 3619–3635
- 7 Xu H J, Qu Z G, Tao W Q. Numerical simulation on self-coupling heat transfer in double-pipe heat exchangers filled with metallic foams. Appl Therm Eng, 2014, 66: 43–54
- 8 Xu H J, Gong L, Zhao C Y, et al. Analytical considerations of local thermal non-equilibrium conditions for thermal transport in metal foams. Int J Therm Sci, 2015, 95: 73–87
- 9 Xu H J, Qu Z G, Du Y P, et al. Flow condensation in tube filled with annular metal foam (in Chinese). CIESC J, 2011, 62: 1246–1251 [徐会金, 屈治国, 杜艳平, 等. 内壁填充环状金属泡沫的管内流动凝结换热. 化工学报, 2011, 62: 1246–1251]
- 10 Li W Q, Qu Z G, He Y L, et al. Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. Appl Therm Eng, 2012, 37: 1–9
- 11 Zhao C Y, Lu W, Tian Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). Sol Energy, 2010, 84: 1402–1412
- 12 Gao D Y, Chen Z Q, Chen L H. Visualized experiment of melting of paraffin wax in aluminum foam with open cells (in Chinese). CIESC J, 2014, 65: 95–99 [皋东彦, 陈振乾, 陈凌海. 开孔泡沫铝内石蜡融化相变过程的可视化实验研究. 化工学报, 2014, 65: 95–99]
- 13 Yang J L, Du X Z, Yang L J, et al. Visualized experiment on dynamic thermal behavior of phase change material in metal foam (in Chinese). CIESC J, 2015, 66: 497–503 [杨佳霖, 杜小泽, 杨立军, 等. 泡沫金属强化石蜡相变蓄热过程可视化实验. 化工学报, 2015, 66: 497–503]
- 14 Qu Z G, Li W Q, Wang J L, et al. Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink. Int Commu Heat Mass, 2012, 39: 1546–1549
- 15 Hossain R, Mahmud S, Dutta A, et al. Energy storage system based on nanoparticle-enhanced phase change material inside porous medium. Int J Therm Sci, 2015, 91: 49–58
- 16 Tasnim S H, Hossain R, Mahmud S, et al. Convection effect on the melting process of nano-pcm inside porous enclosure. Int J Heat Mass Transfer, 2015, 85: 206–220
- 17 Hu Z M, Zeng L K, Wu J Q, et al. Numerical simulation of unsteady heat transfer in kiln wall with periodically variational boundary conditions (in Chinese). Bull Chin Ceram Soc, 1997, 4: 4–9 [胡智敏, 曾令可, 吴建青, 等. 周期性变化边界条件下窑墙非稳态导热的数值模拟. 硅酸盐通报, 1997, 4: 4–9]
- 18 Bai M L, Dong W J. Research on gridding plot rule of finite element computation for periodic transient heat transfer (in Chinese). J Therm Sci Tech, 2003, 2: 38–41 [白敏丽, 董卫军. 周期性瞬态导热有限元计算网格剖分规则研究. 热科学与技术, 2003, 2: 38–41]
- 19 Minkowycz W J, Haji S A, Vafai K. On departure from local thermal equilibrium in porous media due to a rapidly changing heat source: The sparrow number. Int J Heat Mass Transfer, 1999, 42: 3373–3385
- 20 Barletta A, Schio E R. Mixed convection flow in a vertical circular duct with time-periodic boundary conditions: Steady-periodic regime.

- Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47: 3187–3195
- 21 Abdous M A, Moallemi N. Solution of two-dimensional transient heat conduction in a hollow sphere under harmonic boundary condition. Res J Appl Sci Eng Tech, 2014, 7: 4396–4403
- 22 Boomsma K, Poulikakos D. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44: 827–836
- 23 Tao W Q. Numerical Heat Transfer (in Chinese). 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 78–98 [陶文铨. 数值传热学. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 78–98]
- 24 Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. 555–556 [杨世明, 陶文铨. 传热学. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006. 555–556]
- 25 Vadasz P. On the paradox of heat conduction in porous media subject to lack of local thermal equilibrium. Int J Heat Mass Transfer, 2007, 50: 4131–4140

Periodically unsteady thermal response of metal-foam solid composite

YIN Ying¹, XU HuiJin^{1,2} & ZHAO ChangYing²

¹ College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

² Institute of Engineering Thermophysics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

With the development of materials and manufacturing techniques, using highly conductive metallic porous materials, such as metal foam, metal fiber felt, lattice-frame material, and so on, to enhance heat transfer becomes possible. As a highly-conductive multi-functional material, metal foam owns many good features including high porosity, light weight, large surface area, high strength, etc. To date, the thermal response characteristics of porous media with transient heat transfer have been investigated to some extent. For metal foam, the local thermal non-equilibrium (LTNE) effect can be found during the unsteady heat conduction process. However, for the unsteady heat conduction of the highly-conductive metal foam saturated with solid with a low thermal conductivity, the LTNE effect exists, but the thermal response characteristics of the metal foam and the infill solid with the periodically changing thermal boundary condition are rarely investigated. In this paper, based on the two equations model, the thermal response of the composite material which is made up of the metal foam and the saturated paraffin wax was numerically investigated with the periodic fluctuating temperature boundary condition, in which the temperature difference between metal foam and the infill paraffin wax was considered. The finite volume method (FVM) was used to discrete the coupled governing equations including the porous solid equation for metal foam and the infill solid equation for paraffin wax. The governing equations were solved by Gauss-Seidel iteration method. The present simulation method was validate by comparing with the analytical results under a constant temperature boundary. Then, the effects of various parameters on the thermal response characteristics were discussed. It was found that the LTNE effect exists in the metal foam and paraffin wax and thus the two equations model must be employed. When the ambient temperature periodically fluctuates with time, the temperature field inside the metal foam also reflects the cyclical fluctuations, and with the increasing of temperature fluctuation cycles, the LTNE effect increases firstly and then decreases. This means that there is a resonant time cycle corresponding to the most significant LTNE effect. When the fluctuant amplitude of ambient temperature is fixed, the temperature amplitudes of the metal foams increase with the increasing of temperature fluctuation cycles. The decay degrees of temperature amplitudes are different at different positions. The farther the position away from the heating surface, the more lagging the temperature amplitudes. The thermal diffusivity of the metal foam has a significant impact on the temperature amplitude and decay degree of temperature, while the porosity, pore density and nano-particles additive have less notable effect on them. For copper foam, pore density has a larger impact on LTNE phenomena, compared with porosity. When porosity and pore density are constant, the thermal diffusivity of metal foam has main impact on LTNE phenomena. Therefore, these factors should be considered synthetically so that the heat transfer rate of the composite is optimal. This paper reveals the temperature differences between porous solid phase and the infill solid phase during the metal foam heat conduction process, which shows direct scientific significance for the LTNE effect of an unsteady heat conduction in porous media.

porous media, heat transfer, numerical analysis, temperature fluctuation cycle, nano-particles

doi: 10.1360/N972016-00069