

文章编号:1000-8055(2011)09-1947-06

相变材料微胶囊表面吸附纳米颗粒 对传热过程的影响

王 亮, 林贵平

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过对相变材料微胶囊、纳米颗粒和基液之间传热过程的仿真计算, 分析了纳米颗粒的数目、粒径和热导率对微胶囊与流体之间传热 Nu 的影响. 进而采用数值方法研究了吸附纳米颗粒后, 微胶囊-流体传热系数的提高对相变过程的影响, 研究结果为纳米颗粒的强化传热机制提供了部分理论依据.

关 键 词: 相变材料微胶囊; 相变; 纳米颗粒; 纳米流体; 强化传热

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Effect of microencapsulated phase change material absorbing nanoparticles on heat transfer

WANG Liang, LIN Gui-ping

(School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: By numerical simulation of the heat transfer among nanoparticles, microencapsulated phase change material (MPCM) and liquid, the factors such as nanoparticle amount, diameter and thermal conductivity, which affect the MPCM-liquid heat transfer Nusselt number, were analyzed. When MPCM absorbed nanoparticles, the effect of the increase of the MPCM-liquid heat transfer coefficient on the phase change period was also studied numerically, providing a theoretical basis for the mechanism of enhancing the heat transfer with nanoparticle.

Key words: microencapsulated phase change material; phase change; nanoparticle; nanofluid; enhanced heat transfer

相变材料微胶囊是指通过微胶囊制备技术将相变材料(PCM)封装在质密且具有一定弹性的聚合物外壳内,制成的微米级别的相变颗粒.将相变材料微胶囊与单相传热流体混合形成一类“潜热型功能热流体”.由于相变材料在相变过程中吸收/释放相变潜热,因而该流体表现出很大的表现比热容,是一种集储热与强化传热功能于一身的传热工质^[1-3].

然而,相变材料微胶囊大幅度地提高流体有效比热容的同时降低了传热流体的导热率,在一定程度上降低了其对流换热性能^[4-5].近年来的研究发现,相比基液来说,纳米流体在传热传质等方面的能力得到了很大提高^[6-9].因此,将 TiO_2 纳米颗粒分散到潜热型功能热流体中从而制成一类“基于纳米颗粒和相变材料微胶囊的复合型功能热流体”,实验结果表明,添加少量纳米颗粒的潜

收稿日期:2010-09-02; 修订日期:2010-11-12

基金项目:国家自然科学基金(50436020); 中国博士后科学基金(20100470187)

作者简介:王亮(1980—),男,黑龙江伊春人,博士后,主要从事功能型热流体传热研究.

热型功能热流体的传热性能得到了较大提高^[10].

悬浮在载流介质中的相变材料微胶囊颗粒由于在传热过程中发生固-液相变,其相变潜热为功能流体提供了附加的热容,而有效热容的增加是其具有高表面传热系数的主要因素.除此以外,颗粒与流体之间的微对流作用会增大功能热流体的表观热导率^[10].这种作用的大小取决于颗粒 Peclet 数,在颗粒粒径低于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的情况由于微对流作用引起的表观热导率的增大可以忽略不计^[1].目前纳米颗粒的增强流体传热的机理尚不明晰,其可能的因素有:颗粒的布朗运动、颗粒表面吸附的液体分子层、颗粒内部的声子弹性散射以及纳米颗粒的团聚等效应^[11].本文针对于“复合型功能热流体”中两种不同级别颗粒的吸附作用对传热的影响进行了理论分析与数值计算,进而分析了对相变材料微胶囊相变过程的影响,为纳米颗粒强化潜热型功能热流体传热的机制提供了部分理论依据.

1 纳米颗粒强化潜热型功能热流体传热的机理

在实验研究中发现:添加了纳米材料的潜热型功能热流体的无量纲壁面温度有了明显降低,即纳米材料的添加对潜热型功能热流体的换热能力有很大提高.纳米颗粒增强潜热型功能热流体对流换热的机理有:①如同纳米流体,悬浮在水中的纳米颗粒提高了流体有效热导率;②流体的有效热导率的增大使管流中心区域的温度升高,因而微胶囊相变更加充分,释放出更高的相变潜热.除此之外,通过扫描电镜(SEM)发现有部分纳米颗粒(约 120 nm)依附在较大的相变材料微胶囊颗粒(约 $2\text{ }\mu\text{m}$)表面,如图 1 所示.纳米颗粒吸附在相变材料微胶囊表面,会对微胶囊颗粒与基液之间传热以及微胶囊颗粒内部的相变传热产生一定的影响.

潜热型功能热流体对流换热过程中,相变材料微胶囊与周围液体之间的温差引起热量交换,当温度升高/降低至相变温度时,颗粒自外而内的发生相变,并释放/吸收相变潜热.相变材料微胶囊表面与基液之间的传热系数是求解这类固液两相流体能量方程以及颗粒相变过程的关键.传热学中,常引入无量纲数 Nu 衡量颗粒-流体之间传热的强弱.对于静止在流场中的球形颗粒,热扩散是传热的主要机制.通过求解颗粒周围流体的温度场可以得到流场中静止圆球的颗粒-流体 Nu

等于 2.0 ^[12].对于颗粒与流体有相对运动的情况,国外一些学者通过实验及数值模拟等手段发展了预测颗粒-流体表面传热系数的无量纲关系式^[13],通常的形式为: $Nu = 2.0 + aRe^bPr^c$,其中系数 a, b 和 c 皆为常数; Re 为颗粒相对于流体的雷诺数; Pr 为流体的普朗特数.

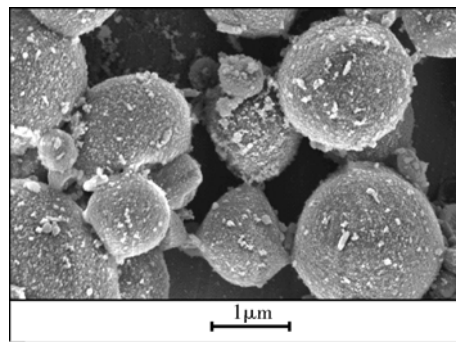


图1 微胶囊表面吸附纳米颗粒的扫描电镜照片

Fig. 1 SEM photos of microencapsulated phase change material absorbing nanoparticles

在潜热型功能热流体中添加金属氧化物纳米颗粒,这些纳米颗粒一部分分散在基液中,另一部分吸附在较大的微米级相变颗粒表面.这些含有纳米颗粒的基液具有纳米流体的特性,提高了基液的热导率.吸附在相变材料微胶囊表面的纳米颗粒,由于纳米颗粒的热导率远远高于基液,因而降低了相变颗粒表面的温度梯度,提高了相变材料微胶囊与液体之间的传热 Nu .

1.1 纳米颗粒、相变材料微胶囊和基液之间的传热模型

对于单个相变材料微胶囊来说,纳米颗粒的吸附效应对于相变材料微胶囊-流体传热的影响主要受到以下三个因素的影响:相变材料微胶囊吸附纳米颗粒的数量 n 、纳米颗粒尺度 d_p 和纳米颗粒的热导率 λ_p . 纳米颗粒数量和尺度直接反映出纳米颗粒在微胶囊表面的影响区域,而纳米颗粒的热导率则反映到微胶囊表面的温度梯度.为了得到一个通用的关联式,对纳米颗粒尺度和纳米颗粒的热导率无量纲化.因此可以认为,吸附了纳米颗粒的相变材料微胶囊表面平均 Nu 可表示为

$$\overline{Nu} = Nu_0 \cdot f(n, d_p/D, \lambda_p/\lambda_f) \quad (1)$$

其中 D, λ_f 和 Nu_0 分别表示微胶囊直径、基液的热导率和无纳米颗粒时的微胶囊表面 Nu .

首先作如下假设:①由于相变材料微胶囊粒径仅为几个微米,具有很好的跟随性,因此假设相变材料微胶囊颗粒相对流体静止,热扩散为传热的主要方式.②假设流体中的微胶囊颗粒均匀分

布且纳米颗粒在相变材料微胶囊表面均匀分布. 基于以上假设以及圆球的中心对称性,取单个纳米颗粒、部分微米颗粒球体以及部分流体为计算区域,如图2所示.

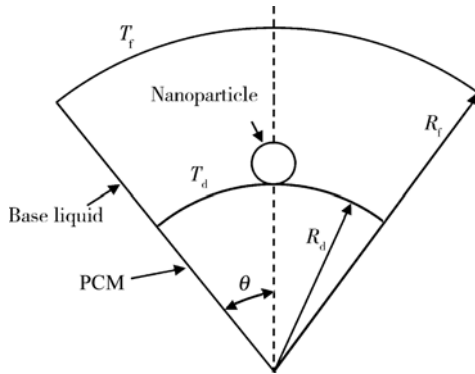


图2 数值计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the model to be simulated

数学模型:相变材料微胶囊、纳米颗粒以及液相皆符合球坐标系下轴对称的稳态傅里叶定律

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (2)$$

边界条件:在颗粒与流体界面处为等热流密度边界条件;由于在 R_f 无穷远处空间范围内的流体温度分布为 $(T - T_\infty)/(T_f - T_\infty) = R/r$,因此边界 R_f 处的热流率为

$$q_r = -k_f \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_f} = \frac{k_f}{R_f} (T_f - T_\infty) \quad (3)$$

1.2 仿真结果与讨论

对式(2)离散化后代迭代求解,首先为验证模型的正确性,假设纳米颗粒的热导率与流体相同,进行数值计算得到颗粒与流体传热 Nu 为 1.9998,接近理论值 2.0.

1.2.1 颗粒粒径比对传热的影响

图3显示基液热导率为 $0.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,纳米颗粒热导率为 $11.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 时,在粒径比 d_p/D 分别为 $0.025 \sim 0.20$ 时,微米颗粒局部 Nu 分布.可以看出,由于纳米颗粒的热导率远高于水,微胶囊表面靠近纳米颗粒的区域温度梯度较小,因而局部 Nu 较高,并且 Nu 高的区域随着纳米颗粒粒径的增大而增大.

对 Nu_θ 面积加权平均得到微胶囊表面平均 Nu .图4显示了平均努塞尔数随纳米颗粒尺度的提高而增大,并通过拟合得到粒径比与表面平均 Nu 之间的关系 ($d_p/D < 0.20$)

$$\overline{Nu} = 2.0 + \frac{1}{20} (d_p/D) + \frac{40}{3} (d_p/D)^2 \quad (4)$$

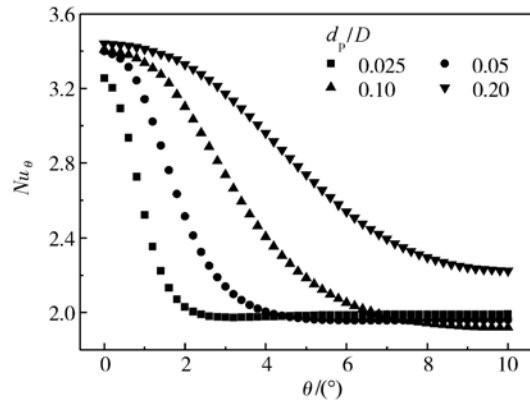


图3 不同颗粒粒径比的局部 Nu

Fig. 3 Local Nusselt number of various diameter ratios

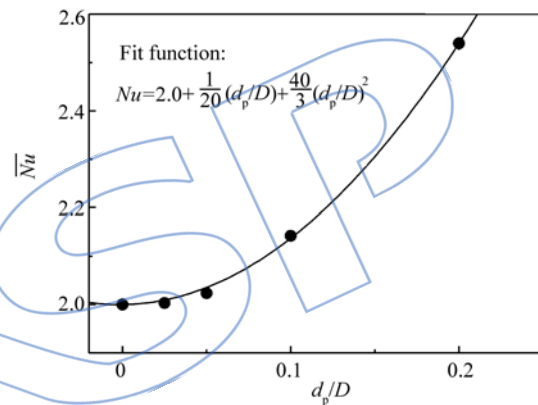


图4 颗粒粒径比 vs. 平均 Nu

Fig. 4 Diameter ratios vs average Nusselt number

1.2.2 热导率比对传热的影响

图5表示了当粒径比 d_p/D 为 0.10 时,在纳米颗粒与基液间的相对热导率 λ_p/λ_f 为 $0.5 \sim 25.0$ 时, Nu_θ 的分布情况.可以看出,在纳米颗粒影响的区域内(微胶囊表面 θ 约为 $0^\circ \sim 6^\circ$ 间), Nu_θ 随着相对热导率的升高而增大,在此区域外则几乎无影响.

图6表示了当粒径比 d_p/D 为 0.10 时,平均 Nu 随着相对热导率变化趋势,可以看出当相对热导率大于 10.0 时,该变化曲线区域平缓,提高纳米颗粒的热导率贡献不明显.式(5)为通过拟合得到相对热导率 λ_p/λ_f 与表面平均 Nu 之间的关系

$$\overline{Nu} = 2.136 - 0.2 \cdot e^{-\frac{7}{20} \frac{\lambda_p}{\lambda_f}} \quad (5)$$

1.2.3 纳米颗粒数目比对传热的影响

图7显示了当粒径比为 0.10 时,微米颗粒表面吸附的纳米颗粒数量 n 与平均 Nu 之间的关系,可以看出,平均 Nu 随着纳米颗粒数量的增大

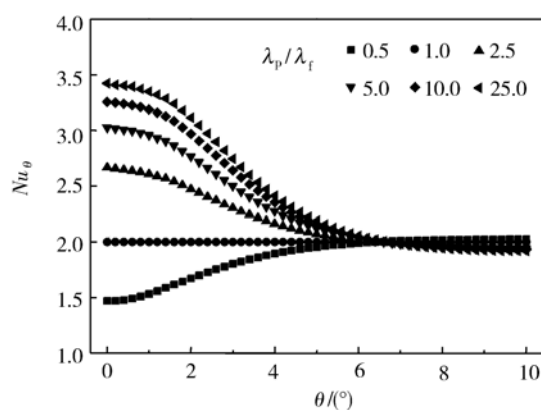
图5 不同颗粒-基液热导率比的局部 Nu

Fig. 5 Local Nusselt number of various thermal conductivity ratios between nanoparticle and liquid

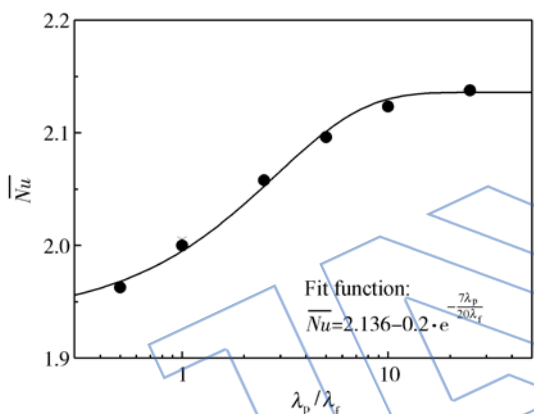
图6 颗粒-基液热导率比 vs 平均 Nu

Fig. 6 Thermal conductivity ratios between nanoparticle and liquid vs average Nusselt number

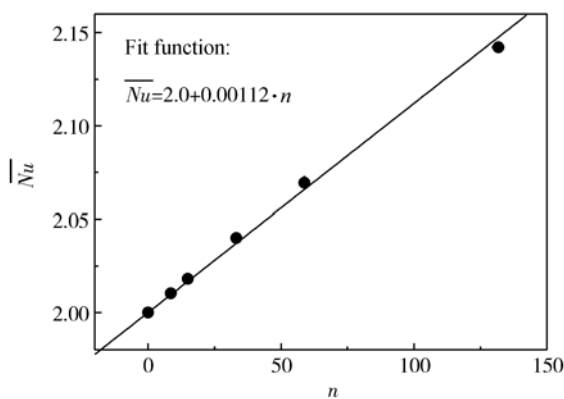
图7 吸附的纳米颗粒数目 vs 平均 Nu

Fig. 7 Nanoparticle number vs average Nusselt number

而提高,近似成正比例关系,拟合得到关系式

$$\overline{Nu} = 2.0 + 0.00112 \cdot n \quad (6)$$

综合以上分析以及式(4)~(6),采用待定系数法得到吸附的纳米颗粒数目 n 、粒径比 d_p/D 和相对热导率 λ_p/λ_f 与微胶囊-基液传热平均 Nu 的关联式如下:

$$\overline{Nu} = 2.0 + n \cdot (0.136 - 0.2 \cdot e^{-\frac{7\lambda_p}{20\lambda_f}}) \cdot$$

$$[0.745(d_p/D)^2 + 0.002794(d_p/D)] \quad (7)$$

结果表明,由于纳米颗粒热导率通常会远远高于基液的热导率,在相变材料微胶囊悬浮液中添加纳米颗粒后,由于纳米颗粒的吸附在相变材料微胶囊表面使得 Nu 得到提高,而另一方面,流体的整体热导率也得到提高,因而增强了相变材料微胶囊与流体之间的换热,加快了相变潜热的释放速度,进而提高了功能流体的传热性能。

2 相变材料微胶囊表面传热系数对相变过程的影响

现有的研究表明,纳米流体的热导率远远高于现有的理论模型预测的结果^[6-9]. Eastman 等^[6]对于 Al_2O_3 、 CuO 和 Cu 纳米颗粒在基液为水和 HE-200 油的纳米流体的研究发现,添加了体积分数仅 5% 的纳米颗粒后其热导率得到了 60% 的提高. Xuan 和 Li^[7]通过瞬态热线法测量了铜水纳米流体的热导率,体积分数为 2.5%~7.5% 的纳米流体热导率比水提高了 24%~78%. Zhou 等^[8]研究发现在水中添加 0.4% 的 CuO 纳米颗粒使得流体热导率提高了 17%. Xie 等^[9]实验研究发现,5% 的 SiC 水合纳米流体的热导率比水高出 20%.

复合型功能热流体中的纳米颗粒一部分被吸附在微米级别的相变颗粒表面,另一部分悬浮在基液中,对于相变颗粒与周围流体之间的 Nu 和流体热导率都有一定促进作用,最终提高了相变颗粒与流体之间对流换热. 为了研究相变颗粒-流体间表面传热系数对微胶囊相变过程的影响,采用了有限差分法对如图 8 所示的微胶囊熔化传热过程进行了数值计算,其中微胶囊囊壁的厚度设定为颗粒半径的 5%.

2.1 数学模型

本文采用焓法模型描述球体在表面传热条件下含有糊状区的相变过程. 焓法将焓和温度一同作为待求变量,无需追踪相分界面与建立分区控制方程.

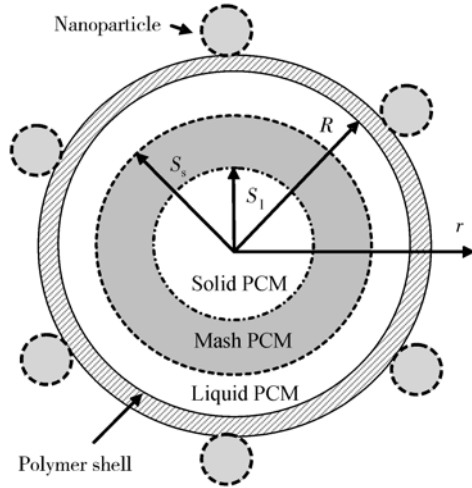


图8 相变材料微胶囊物理模型

Fig. 8 Schematic model of microencapsulated phase change material (PCM)

对于相变材料微胶囊外壳 (\$R_{\text{pcm}} \leq r \leq R_{\text{shell}}\$)

$$\frac{\rho_{\text{shell}} \cdot c_{\text{shell}}}{\lambda_{\text{shell}}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 (rT)}{r \partial r^2} \quad (8)$$

对于微胶囊内部的相变材料 (\$r \leq R_{\text{pcm}}\$)

$$\frac{\rho_{\text{pcm}} \cdot c_{\text{pcm}}}{\lambda_{\text{pcm}}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 (rT)}{r \partial r^2} + \frac{\Delta h_m \cdot \rho_{\text{pcm}}}{\lambda_{\text{pcm}}} \frac{dK_s}{dt} \quad (9)$$

其中 \$\Delta h_m\$ 为总相变潜热, \$K_s\$ 为相变材料熔化过程中的固相体积分数. 基于如图 9 所示的差示扫描量热仪 (DSC) 测试数据, \$K_s\$ 采用下式计算

$$K_s(T) = 1 - \frac{1}{\Delta h_m} \int_{T_{\text{ms}}}^T [c_{p,\text{eff}}(T) - c_{p,m}(T)] dT \quad (10)$$

得到的固相体积分数 \$K_s\$ 随温度变化如图 10 所示. 相变材料的囊壁和外壁面边界条件分别为

$$\lambda_{\text{shell}} \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_{\text{pcm}} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (r = R_{\text{pcm}}) \quad (11)$$

$$-\lambda_{\text{shell}} \frac{\partial T}{\partial r} = h_p(T - T_f) \quad (r = R_{\text{shell}}) \quad (12)$$

对控制方程的无量纲化: 取无量纲温度 \$\theta = (T - T_f)/(T_0 - T_f)\$, 无量纲半径 \$r_x = r/R_{\text{pcm}}\$, 无量纲时间 \$\tau = \lambda_{\text{pcm}} t / (\rho_{\text{pcm}} c_{\text{pcm}} R_{\text{shell}}^2)\$, 并离散化为差分格式后迭代求解.

2.2 计算结果与分析

图 11 显示了当初始温度为 25℃ 的相变材料微胶囊周围流体温度突变至 30℃, 经过时间 1.0\$\tau\$ 和 1.5\$\tau\$ 后, 颗粒-流体之间的传热系数分别为 1.0, 1.2 和 1.4 倍时的相变材料微胶囊内部温度分布. 可以看出, 相变颗粒与流体之间的传热系数对于相变过程有着显著影响, 提高该传热系数可

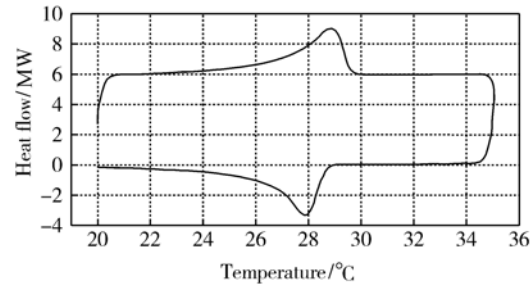


图9 相变材料微胶囊 DSC 测试曲线

Fig. 9 DSC curve of microencapsulated phase change material

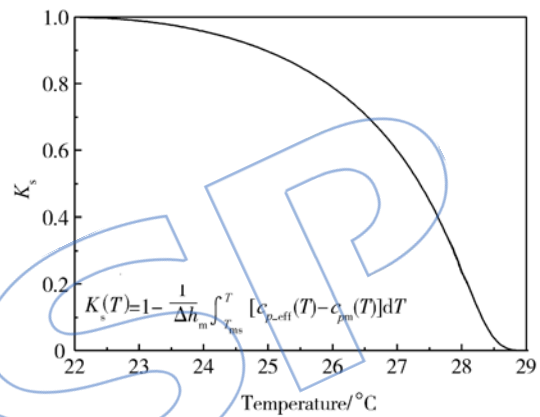


图10 相变材料固相体积分数 vs 温度

Fig. 10 Solid volume fraction of phase change material vs. temperature

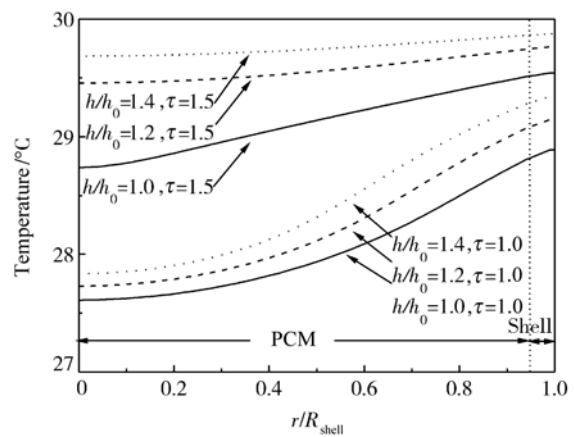


图11 微胶囊相变过程中的内部温度分布

Fig. 11 Temperature profile inside the microencapsulated phase change material

以有效地加快相变颗粒的相变速率.

图 12 表示了当初始温度为 25℃ 的相变材料微胶囊周围流体温度分别突变至 30℃ 和 35℃ 时, 颗粒-流体之间的传热系数对相变材料微胶囊

内部完全相变所需时间的影响. 可以看出, 随着颗粒表面传热系数的提高与相变颗粒完全相变所需时间呈接近线性关系, 当颗粒表面传热系数升高至原来的 1.4 倍时, 完全相变所需时间分别缩短了 27.6% 和 14.0%.

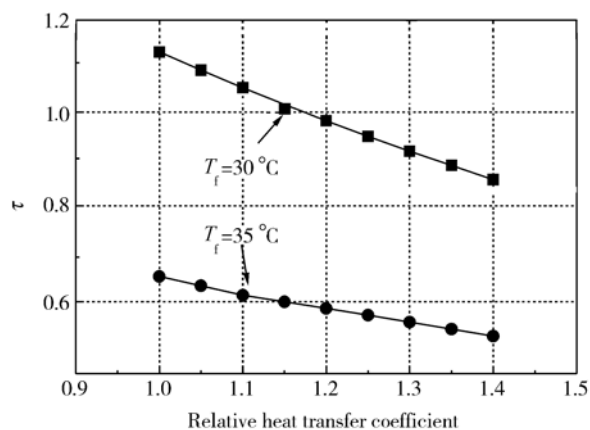


图 12 颗粒-流体之间传热系数对完全相变时间的影响
Fig. 12 Effect of particle-liquid heat transfer coefficient on complete phase change period

3 结 论

本文针对“基于纳米颗粒和相变材料微胶囊的复合型功能热流体”中相变材料微胶囊表面吸附纳米颗粒对传热过程的影响, 采用数值方法研究了微胶囊表面吸附的纳米颗粒数量、纳米颗粒尺度和纳米颗粒的热导率对微胶囊-流体传热 Nu 的影响, 并且得到通用的无量纲关联式. 研究结果表明, 相变材料微胶囊-流体之间的传热 Nu 随着吸附纳米颗粒数目、纳米颗粒尺度以及纳米颗粒的热导率的增大而增大. 通过对微胶囊内部相变过程的仿真研究表明, 添加纳米颗粒后, 相变材料微胶囊-流体间传热系数的提高可以提高微胶囊的相变速率, 缩短相变所需时间, 进而使得流体内部相变颗粒的相变潜热发挥得更加充分.

参考文献:

- [1] Charunyaorn P, Sengupta S, Roy S K. Forced convective heat transfer in microencapsulated phase change material slurries; flow in circular ducts [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(3): 819-833.
- [2] Goel M, Roy S K, Senguta S. Laminar forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material suspensions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(4): 593-604.
- [3] Hu X X, Zhang Y P. Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement with microencapsulated phase change material slurries; laminar flow in a circular tube with constant heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(15): 3163-3172.
- [4] Alvarado J L, Marsh C, Sohn C, et al. Thermal performance of microencapsulated phase change material slurries in turbulent flow under constant heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(9-10): 1938-1952.
- [5] Rao Y, Dammel F, Stephan P, et al. Convective heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material suspensions in minichannels [J]. *Heat Mass Transfer*, 2007, 44(2): 175-186.
- [6] Eastman J A, Choi U S, Li S, et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids [C] // *Proceeding of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II*. Boston, USA: Material Research Society, 1997: 3-11.
- [7] Xuan Y M, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21(1): 58-64.
- [8] Zhou L P, Wang B X. Experimental research on the thermophysical properties of nanoparticle suspensions using the quasi-steady state method [C] // *Annual Proceedings Chinese Engineering Thermophysics*. Dalian: [s. n.], 2002: 889-892.
- [9] Xie H Q, Wang J C, Xi T G, et al. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles [J]. *Journal Applied Physics*, 2002, 91(7): 4586-4572.
- [10] Wang L, Lin G P, Chen H S, et al. Convective heat transfer characters of nanoparticle enhanced latent functionally thermal fluid [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(6): 1744-1750.
- [11] Koblinski P, Phillpot S R, Choi S U, et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(4): 855-863.
- [12] 刘大有. 两相流体动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [13] Barigou M, Mankad S, Fryer P J. Heat transfer in two-phase solid-liquid food flows; a review [J]. *Transactions of IChemE*, 1998, 76(3): 3-29.