

文章编号: 1000-8055(2006)06-1012-09

相变材料微胶囊悬浮液在矩形小通道 内层流流动传热的实验

饶 宇^{1, 2*}, Frank Dammel², Peter Stephan², 林贵平¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083;

(2. Chair of Technical Thermodynamics,

Darmstadt University of Technology, Darmstadt 64287, Germany)

摘 要: 本文进行了对比性的实验,以研究相变材料微胶囊(MEPCM)-水悬浮液在水力直径为 2.71 mm 的矩形小通道内的层流流动传热性能。实验中用的 MEPCM 颗粒的平均粒径为 4.97 μm ,与蒸馏水混合制备成质量浓度范围为 0~20% 的 MEPCM-水悬浮液。对比性的实验是指,在相同的悬浮液质量流量和热力条件下,使用不同浓度的 MEPCM 悬浮液进行传热实验。实验发现,MEPCM 悬浮液的冷却性能严重依赖于悬浮液的质量流量和悬浮液的质量浓度。质量浓度为 5% 的悬浮液在整个质量流量范围内总是表现出比水好的冷却性能,它对应的是更低的壁面温度以及更好的传热系数。而对于更高质量浓度的悬浮液,在低质量流量的情况下,它们具有很好的冷却性能;而在高质量流量的情况下,它们表现出的冷却性能比水更差,它们对应更高的壁面温度以及更低的 Nusselt 数。

关 键 词: 航空、航天推进系统;微胶囊;相变材料;悬浮液;小通道;对流传热系数

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Experimental study of laminar flow heat transfer with microencapsulated phase change material suspensions in rectangular mini-channels

RAO Yu^{1, 2*}, Frank Dammel², Peter Stephan², LIN Guiping¹

(1. School of Aeronautical Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Chair of Technical Thermodynamics,

Darmstadt University of Technology, Darmstadt 64287, Germany)

Abstract: A series of comparative experiments was conducted to investigate the laminar flow heat transfer characteristics with microencapsulated phase change material (MEPCM) suspensions in water flowing through rectangular mini-channels with a hydraulic diameter of 2.71 mm. MEPCM particles with an average size of 4.97 μm were used to form suspensions with mass concentrations ranging from 0% to 20%. The comparative experiments were done under the same mass flow rates and the same thermal conditions using water and water-based MEPCM suspensions. The cooling characteristics of MEPCM suspension strongly depend on

收稿日期: 2005-11-21; 修订日期: 2006-03-25

作者简介: 饶宇(1978),男,江西省东乡县,北京航空航天大学博士,主要从事强化传热研究.

the mass flow rate and the MEPCM mass concentration. The 5% suspension always shows better cooling performance than water with lower wall temperatures and enhanced heat transfer coefficient within the whole range of mass flow rates. At higher mass concentrations, however, the cooling performance is more effective only at low mass flow rates. At relatively higher mass flow rates, it shows less effective cooling performance than water at higher wall temperatures and lower Nusselt numbers.

Key words: aerospace propulsion system; microcapsule; phase change material; suspension; mini channel; wall temperature; coefficient of convective heat transfer

相变材料微胶囊 (microencapsulated phase change material, MEPCM) 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的新材料^[1,2], 如图 1~ 图 2 所示。MEPCM 颗粒的粒径为 1~ 100 μm 。MEPCM 可以和流体 (如水, 乙二醇, 硅油等) 混合, 形成 MEPCM 悬浮液。MEPCM 能够强化流体流动传热性能主要被认为是基于如下因素: (1) 悬浮在流体中的 MEPCM 颗粒的芯材 (PCM) 发生相变过程中能够吸收/释放大潜热; (2) 由于 MEPCM 颗粒非常微小, 它有非常大的比表面积; (3) 悬浮液流动过程中 MEPCM 颗粒之间的相互作用。

在过去的二十多年里, 研究人员对 MEPCM 悬浮液在管道内流动和传热性能进行了深入的实验和理论研究^[3-10]。过去的研究表明, MEPCM 能够有效地提高流体对流传热性能, 同时减少所需的流体力学质量流量以及降低泵的功耗。Kasza 和 Chen^[3] 对在热系统中使用 PCM 悬浮液作为传热流体力学质的优点进行了理论分析。他们的分析表明, 与使用传统的单相显热型流体力学质相比, 使用 PCM 悬浮液能够大大降低热力系统中的热源-热沉温度差、流体力学质质量流量、泵的功耗, 而且所需的储液容量也可大大减少。Goei 等^[5] 对 MEPCM-水悬浮液圆管内 ($ID=3.14\text{ mm}$, $L=300\text{ mm}$) 流动传热性能进行了实验研究。他们的实验结果表明, 与水相比, 使用 MEPCM-水悬浮液作为流体传热工质能够大大降低管壁面温度 (壁面温度上升可降低近 50%)。他们还发现, 影响传热性能的最主要参数是 Stefan 数。最近, Inaba 等^[7] 进行了实验, 研究 MEPCM-水悬浮液在圆管内 ($ID=15\text{ mm}$, $L=5850\text{ mm}$) 流动传热性能和紊流流动减阻特性。他们所用的 MEPCM 悬浮液含有不同粒径以及具有不同种类芯材 (不同的熔点温度和不同的相变

潜热) 的 MEPCM, 他们称这种悬浮液为复合 MEPCM 悬浮液。他们的研究表明, 在相同的 Reynolds 数条件下, 该种 MEPCM 悬浮液的平均传热系数是水的 2~ 2.8 倍。

值得注意的是, 过去研究人员对 MEPCM 悬浮液流动传热特性研究都是在大尺寸通道内 ($D_h > 3\text{ mm}$) 进行的, 并且都是针对 MEPCM 悬浮液在圆管内流动传热的情况。区别于过去研究 MEPCM 悬浮液在传统尺寸圆管内的流动传热问题, 本论文中的主要研究工作是: 采用实验方法, 对比研究具有各种质量浓度的 MEPCM 悬浮液在矩形小通道内的层流流动与传热的特征。对于每种质量浓度的 MEPCM 悬浮液传热性能实验, 本研究中强调在相同质量流量和相同的加热条件下开展对比实验研究, 检验水和 MEPCM 悬浮液那种流体是更为优越的冷却流体介质, 并考查 MEPCM 颗粒对单相流体流动传热性能的强化能力。

1 MEPCM 悬浮液及其热物理性质

如图 1 所示, 单个 MEPCM 颗粒由两部分构成: 高聚物外壁和相变材料芯材。图 2 所示的是本实验中用的 MEPCM 颗粒扫描电子显微镜 (SEM) 照片, 它显示颗粒的粒径范围是 1~ 5 μm 。本研究中使用的 MEPCM 颗粒大小为 4.97 μm , 近似密度为 867.2 kg/m^3 。MEPCM 芯材为正十八烷 (熔点约为 28 $^{\circ}\text{C}$); MEPCM 的壁材是聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethylmethacrylate, PMMA)。在单个 MEPCM 内, 芯材所占质量含量约为 80.9%。将 MEPCM 与水混合, 由于 MEPCM 颗粒微小的尺寸, 密度与水相近, 以及悬浮液中分散剂的存在, MEPCM 能够均匀地分散在水中。MEPCM-水悬浮液是一种均匀的两相流体, 其物理性质取决于它的组分 (MEPCM 和水) 各自的物理性质, 以及 MEPCM 在悬浮液中的浓度。

MEPCM 悬浮液的整体密度、比热和导热率的计算可见文献[5]。

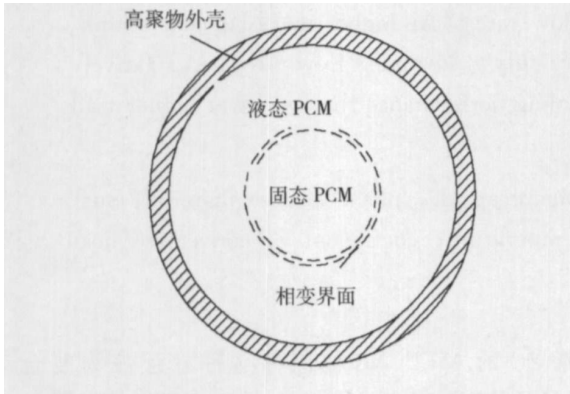


图 1 熔解相变状态下的 MEPCM 示意图

Fig. 1 A sketch of a single MEPCM particle during melting

为确定 MEPCM 悬浮液的整体粘度, 这里使

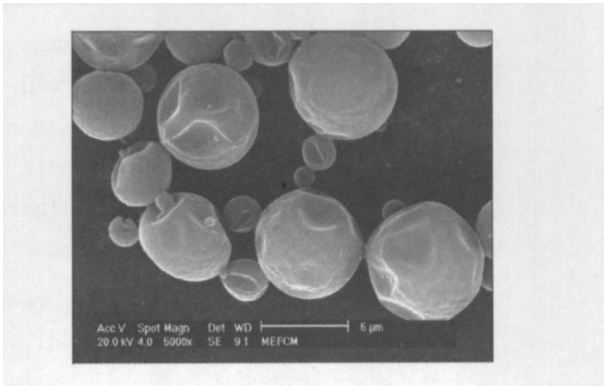


图 2 MEPCM SEM 相片, 1~ 5 μm

Fig.2 MEPCM particles SEM photo, particle size: 1~ 5 μm

用柱状、旋转型流变仪 (a cylindrical rotating rheometer) 测量悬浮液的粘度。

表 1 表示的是用上述各方法得到的 MEPCM 及其悬浮液的物理性质。

表 1 MEPCM 及其悬浮液的物理性质

Table 1 Physical properties of suspension components and suspensions

	密度/(kg /m ³)	比热/(J/ kg • K)	导热率/(W/ m • K)	粘度/(kg/ms)	潜热/(kJ/kg)
水	997	4 180	0. 604	1. 0 × 10 ^{- 3}	
正十八烷 (n Octadecane) (MEPCM 芯材)	850 (固态) 780 (液态)	2000	0. 18	— —	241
PMMA (MEPCM 壁材)	1190	1470	0. 21	— —	
MEPCM 颗粒	867. 2*	1899	0. 1643	— —	
5% 悬浮液	989. 6	4065	0. 571	1. 27 × 10 ^{- 3}	— —
10% 悬浮液	982. 3	3951	0. 541	2. 3 × 10 ^{- 3}	— —
20% 悬浮液	968	3723	0. 483	4. 9 × 10 ^{- 3}	— —

* 这里 PCM 的密度是指其固态和液态密度的平均值

2 实验装置

2.1 流动循环

如图 3 所示的实验系统已经建立起来, 流动循环由主循环和旁路循环组成。流动主循环包括测试装置、一个 Coriolis 流量计、一个流动脉动抑制器、一个用于预热的小型板式换热器、一个用于冷却的小型板式换热器、一件具有精确加热功能的恒温器、一件具有制冷功能的恒温器、一套数据采集系统、一个小型的储液罐、一个蠕动泵 (Peristaltic pump, 质量流量范围: 23~ 2 300 ml/ min) 以及若干个球阀。旁路循环包括一个针阀, 以及与主循环共用的泵和储液罐。

在泵的驱动下, MEPCM 悬浮液从储液罐流入管路并在实验系统中循环流动。它依次流过流动脉动抑制器、预热换热器、测试装置、冷却换热器, 最后流回到储液罐中。其中, 用于预热的板式换热器与具有加热功能且能精确控制温度的恒温器相连接, 因此测试装置的悬浮液入口温度能够被精确调节到预定的温度; 用于冷却的板式换热器与具有制冷功能且能精确控制温度的恒温器相连接, 因此从测试装置流出的、已经被加热的 MEPCM 悬浮液能够被完全冷却到所需的温度, 并且使所有已发生溶解相变的 PCM 重新凝固。为精确控制主循环中 MEPCM 悬浮液的质量流量, 可以使用旁路循环中的针阀结合主循环中的

小通道壁面与流体间的平均温差 ΔT_m 可由下式计算:

$$\Delta T_m = \frac{1}{6}(T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5} + T_{w6}) - \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}) \quad (3)$$

式中, T_{in} 和 T_{out} 是指流体的入口平均温度和出口平均温度。 T_{w1} 、 T_{w2} ... 和 T_{w6} 是指小通道壁面温度, 可用如下的方法计算出: 假设小通道以下铜块内是一维的导热过程, 如图 5 所示, 则有:

$$T_{wi} = T_{ki} - \frac{q_0 H_{w2}}{k_{cb}} \quad (4)$$

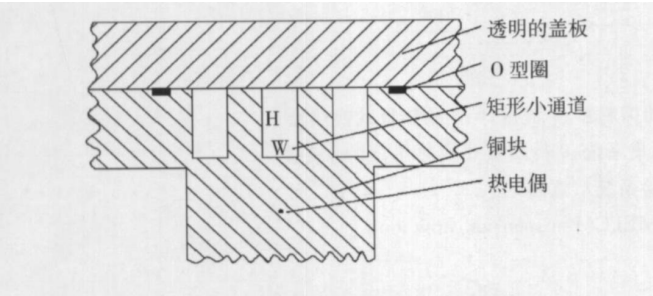


图 5 小通道测试件横截面示意图

Fig.5 Cross section of minichannels

式中, T_{wi} 是热电偶测得的温度值, H_{w2} 是热电偶位置与小通道底壁面间的距离, k_{cb} 是铜块的导热率, q_0 是热电偶位置处来自下端的平均热流密度值(它的计算是通过将总加热功率除以热电偶位置处的横截面积而得到)。

基于平均传热系数的平均 Nusselt 数由下式给出:

$$Nu = \frac{hD_h}{k_b} \quad (5)$$

这里, h 是 MEPCM 悬浮液的平均对流传热系数; k_b 是指静态的 MEPCM 悬浮液的导热率。根据方程(1), 平均 Nusselt 数可写成:

$$Nu = \frac{QD_h}{NA_w \Delta T_m K_b} \quad (6)$$

实验测量的不确定度通过进行标准的误差分析得到。 Nu_m 的相对不确定度由以下式给出:

$$\frac{\delta Nu_m}{Nu_m} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(- \frac{\delta H_{ch}}{H_{ch}} \right)^2 + \left(- \frac{\delta W_{ch}}{W_{ch}} \right)^2 + \left(- \frac{\delta \Delta T_m}{\Delta T_m} \right)^2 + \left(- \frac{\delta k_b}{k_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中, H_{ch} 是实验小通道的高度, W_{ch} 是小通道的宽度。依据方程(7), 影响 Nu_m 的误差来源主要来自于 Q 、 H_{ch} 、 W_{ch} 、 ΔT_m 和 k_b , 这些误差值在表 2 中给出。进行标准误差分析, 可得到 Nu_m 的标准误差分别为 9.7%。

表 2 测量误差

Table 2 Measurement errors

参数	最大误差	参数	最大误差
Q	4.0%	T	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
A_w	0.55%	ΔT_m	5.3%
D_h	0.78%	k_b	7.0%
M	0.39%	Nu_m	9.7%

4 实验结果与讨论

为研究 MEPCM 悬浮液在矩形小通道内的层流流动传热特征, 在实验中用质量浓度为 0~20% 的 MEPCM-水悬浮液在相同质量流量和相同加热条件下进行了对比传热实验。实验中, 对于每种质量浓度的 MEPCM 悬浮液, 质量流量范围是: 0.05 kg/min~ 0.35 kg/min, 对应的质量流密度(mass flux density) 范围是: 33.1 kg/m²s~ 231.5 kg/m²s; 相应地, 平均壁面加热热流密度范围是: 1.923 W/cm²~ 9.615 W/cm² (基于总的传热面积)。表 3 表示了流动传热实验中 MEPCM 悬浮液在各质量流量条件下对应的壁面加热热流大小。对于一定的悬浮液质量流量, 所配置的壁面加热热流密度值相应的加热量理论上能够使悬浮液的出口温度高于 MEPCM 的相变结束温度, 也就是说理论上悬浮的 MEPCM 颗粒都能在通道内发生相变。在所有传热实验中, 测试装置的悬浮液入口温度都控制在 24℃。

4.1 小通道壁面温度

图 6 (a) ~ (d) 表示的是在不同流动以及不同加热热流密度情况下, 沿流动长度 x 小通道的壁面温度。由于存在一些热损失到出口集液口, 壁面温度在流动长度的末端会下降。从图中, 我们可以看到小通道的壁面温度强烈依赖于 MEPCM 悬浮液的质量流量以及悬浮液的质量浓度。

对于工况: 最小质量流量 $M = 0.05$ kg/min, 加热热流密度 $q = 1.923$ W/cm², 如图 6 (a) 所示。小通道的壁面温度随着 MEPCM 悬浮液质量浓度的增加而降低。质量浓度为 20% 的 MEPCM 悬浮液表现出最好的冷却性能, 其对应的壁面温度比水低 4.6~ 5.5℃。

对于工况: 悬浮液质量流量 $M = 0.15$ kg/min, 加热热流密度 $q = 3.846$ W/cm², 如图 6 (b)

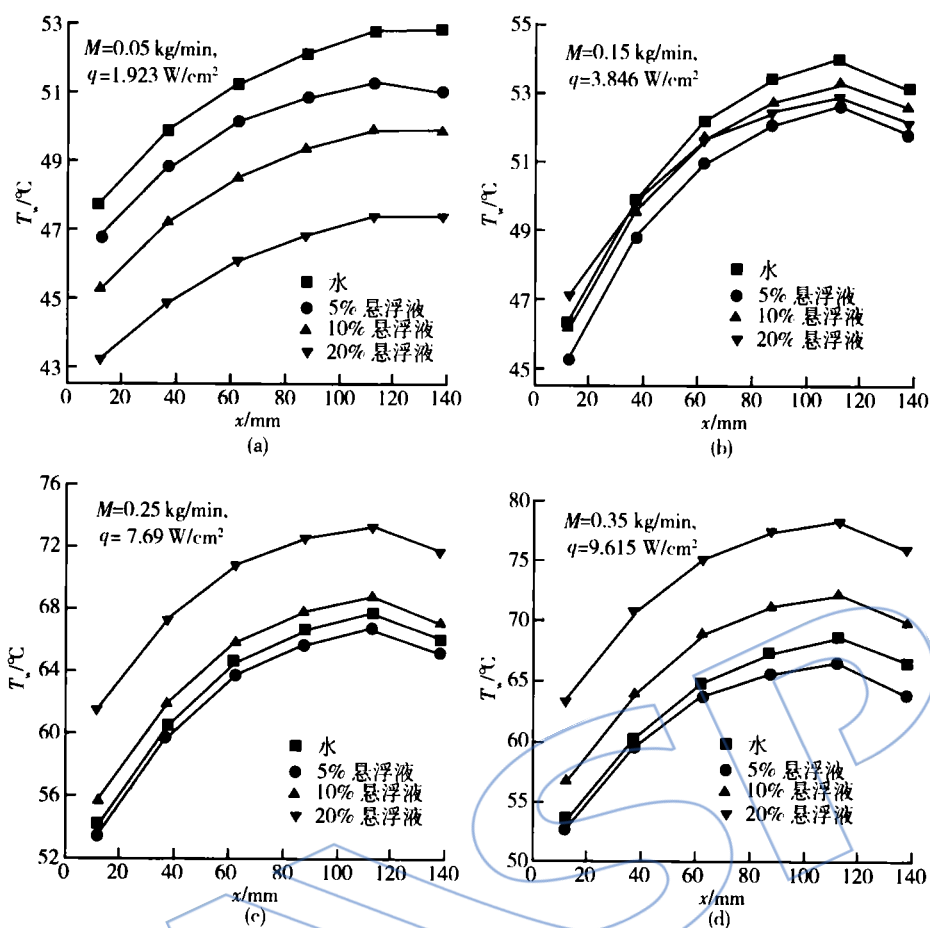


图 6 各质量浓度的 MEPCM 悬浮液对应的小通道壁面温度($T_{in}=24^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Wall temperatures of minichannels for MEPCM suspensions of various mass concentrations ($T_{in}=24^{\circ}\text{C}$)

所示。质量浓度为 5% 的 MEPCM 悬浮液表现出最好的冷却性能,它对应的壁面温度最低。质量浓度为 10% 和 20% 的 MEPCM 悬浮液对应的壁面温度处于水和浓度为 5% 的悬浮液对应的壁面温度之间。总的来说,所有浓度的 MEPCM 悬浮液对应的壁面温度沿流动长度都互相接近,他们之间的最大差别不大于 3°C 。

对于工况: 悬浮液质量流量 $M=0.25\text{ kg/min}$, 加热热流密度 $q=7.69\text{ W/cm}^2$, 如图 6 (c) 所示。质量浓度为 5% 的 MEPCM 悬浮液表现出比水更好的冷却性能,它的壁面温度比水要低约 0.95°C 。对于更高质量浓度的 MEPCM 悬浮液在小通道内的流动,壁面温度则快速上升。质量浓度为 20% 的 MEPCM 悬浮液表现出最差的冷却性能,它对应的最高壁面温度比水高约 7.38°C 。

对于工况: 悬浮液质量流量 $M=0.35\text{ kg/min}$, 加热热流密度 $q=9.615\text{ W/cm}^2$, 如图 6 (d) 所示。质量浓度为 5% 的 MEPCM 悬浮液仍然表现出比水更好的冷却性能,它的壁面温度比水要低约 2.6°C 。对于更高浓度的 MEPCM 悬浮液,

它们在小通道内的冷却性能变得更差。与水相比,浓度为 20% 的悬浮液的最高壁面温度升高了约 9.4°C 。

从图 6 (a) ~ (d) 可知,对于本实验矩形小通道,MEPCM 悬浮液的相对(于水)冷却性能严重依赖于其在通道内质量流量的大小,以及悬浮液质量浓度的大小。质量浓度为 5% 的 MEPCM 悬浮液,在整个质量流量范围($0.05\text{ kg/min} \sim 0.35\text{ kg/min}$),都表现出比水更好的冷却性能,比水对应着更低的壁面温度。对于浓度更高的悬浮液($c \geq 10\%$),在小质量流量($M \leq 0.15\text{ kg/min}$)情况下,MEPCM 悬浮液表现出比水更好的冷却性能,浓度越大的悬浮液相对冷却性能越好,对应着比水更低的壁面温度;在大质量流量($M > 0.15\text{ kg/min}$)情况下,MEPCM 悬浮液的冷却性能比水要差,浓度越大的悬浮液相对冷却性能越差,对应着比水更高的壁面温度。

4.2 平均 Nusselt 数

图 7 表示的是,MEPCM 悬浮液在矩形小通

道内流动的平均 Nusselt 数。在质量流量 $M = 0.05 \text{ kg/min}$ 的情况下, Nusselt 数随着 MEPCM 质量浓度的增加而显著增加。与水相比, 浓度为 5% 的悬浮液的 Nusselt 数增加了 9.5%, 浓度为 10% 的悬浮液的 Nusselt 数增加了 19.7%, 以及浓度为 20% 的悬浮液的 Nusselt 数增加了 46.5%。在质量流量 $M = 0.15 \text{ kg/min}$ 的情况下, 悬浮液的 Nusselt 数倾向于随着 MEPCM 质量浓度的增加而缓慢增加。在质量流量 $M = 0.25 \text{ kg/min}$ 和 $M = 0.35 \text{ kg/min}$ 的情况下, 浓度为 5% 的悬浮液 Nusselt 数比水稍高一些, 但对于浓度更高的悬浮液, Nusselt 数随着质量浓度的增加而显著减小。图 7 也表明, 对于所有浓度的 MEPCM 悬浮液而言, 在整个质量流量范围: $0.05 \text{ kg/min} \sim 0.35 \text{ kg/min}$, 其平均 Nusselt 数是随着质量流量的增加而增加; 并且这种在 Nusselt 数上的增加随着悬浮液浓度的增加以及质量流量的增加而变得越来越不显著。

4.3 定性分析 MEPCM 悬浮液质量流量和浓度对其冷却性能的影响

根据 Shah and London^[11], 对于流体在具有宽/高比为 $\alpha = 0.476$ 的矩形小通道内的流动, 其层流流动热入口段长度 L_{th} 可由下式估算

$$L_{th} \approx 0.057 Re Pr \approx$$
$$0.057 \cdot \frac{\rho_b u_m D_h}{\mu_b} \cdot \frac{\mu_b C_{P,b}}{k_b} \approx$$
$$0.057 \cdot \frac{M}{A} \cdot D_h \cdot \frac{C_{P,b}}{k_b} \quad (8)$$

上式中, ρ_b 、 $C_{P,b}$ 和 μ_b 分别为悬浮液的整体密度、比热和粘度; u_m 为悬浮液在小通道内的平均流速; M 是悬浮液的质量流量, A 是三个矩形小通道的横截面积。

MEPCM 悬浮液在小通道内受热流动时, 由于 MEPCM 相变潜热的作用, 悬浮液的平均整体比热 $C_{P,b}$ 会随着悬浮液浓度的增加而增加; 此外, MEPCM 悬浮液整体导热系数 k_b 随浓度的增加而有所下降(表 1 所示), 因此根据式(8), 在相同质量流量条件下, MEPCM 悬浮液比水的热入口长度要长, 并且对于浓度越大的 MEPCM 悬浮液, 其热入口段长度越长, 相应的热边界层的厚度也会越薄。

表 4 所示的是各浓度的 MEPCM 悬浮液以各种质量流量在实验小通道内流动所对应的可能热入口长度。在小质量流量($M = 0.05 \text{ kg/min}$)条件下, 各浓度的悬浮液在小通道内的流动被认为

为可以达到热充分发展, 热量能够传递到悬浮液流动的核心区, 悬浮液流动中的绝大部分 MEPCM 颗粒能够达到相变温度并发生相变, 并且由于 MEPCM 颗粒在小通道内的平均停留时间较长(4.36 s), MEPCM 颗粒能较充分地发生相变, 进而提高流动传热性能。浓度越高的 MEPCM 悬浮液, 它的流动传热性能提高得也越多。在大质量流量($M = 0.35 \text{ kg/min}$)条件下, MEPCM 悬浮液在小通道内的流动被认为不能达到热充分发展, 热量不能传递到悬浮液流动的核心区, 那里的悬浮液温度仍保持着入口温度, 即 $T = T_{in} = 24^\circ\text{C}$, 不发生任何相变并快速流过通道; 发生相变的 MEPCM 颗粒仅存在于很薄的热边界层内。根据粘性流体理论, 在这贴近壁面的、较薄的热边界层内, 悬浮液的流速很小, MEPCM 颗粒贴近壁面地缓慢流动。在小通道入口附近的热边界层内 MEPCM 颗粒发生相变, 之后在距离仍较长的贴近壁面的悬浮液内, 已完成相变的 MEPCM 颗粒缓缓流过通道, 这实际增加了热量由通道的壁面向悬浮液流动核心传递的热阻, 导致通道壁面温度的再升高。浓度越高的 MEPCM 悬浮液, MEPCM 颗粒与颗粒之间作为传热介质的水减少了, 同时与通道壁面接触的水也减少了, 它的流动传热性能降低得也越多, 相应的壁面温度也越高。

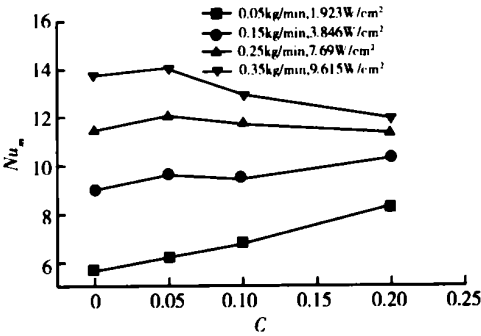


图 7 MEPCM 悬浮液在小通道内流动的平均 Nusselt 数 Nu_m ($T_{in} = 24^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Mean Nusselt numbers of MEPCM suspensions flowing in minichannels for $T_{in} = 24^\circ\text{C}$

质量浓度为 5% 的 MEPCM 悬浮液, 属稀释的悬浮液, 它的密度、导热率以及粘度与水很接近, 并具有相当的相变潜热。当该悬浮液在小通道内流动时, 有充分的水与通道壁面接触并在悬浮的 MEPCM 颗粒之间充当传热介质, 因此该悬浮液总表现出比水要好的流动传热性能。

表 3 流动传热实验中 MEPCM 悬浮液各质量流量对应的壁面加热热流大小

Table 3 Wall heating flux value corresponding to each flow rate value of the MEPCM suspension in the experiment

流体工质	质量流量 (kg/ min)	质量流密度 (kg/ m ² s)	壁面加热热流 q (W/ cm ²)	总加热功率 Q (W)
MEPCM 悬浮液(质量浓 度 c 为 0%、5%、10% 和 20%)	0.05	33.1	1.923	90
	0.15	99.3	3.846	180
	0.25	165.5	7.69	360
	0.35	231.7	9.615	450

表 4 各种浓度的 MEPCM 悬浮液在各种质量流量
条件下对应的热入口长度

Table 4 Estimated thermal entrance of MEPCM
suspensions flow in the minichannels at
various mass flow rates

流体工质	质量流量/ (kg/ min)	估算热入口 段长度/(mm)
0%	0.05	95.89
	0.15	287.67
	0.25	479.45
	0.35	671.23
MEPCM 悬浮液 (浓度为 5%、 10% 和 20%)	0.05	> 95.89
	0.15	> 287.67
	0.25	> 479.45
	0.35	> 671.23

5 结 论

本论文进行了对比实验, 研究相变材料微胶囊(MEPCM)在矩形小通道内层流流动传热特征。MEPCM 悬浮液的质量浓度范围是 0% ~ 20%, 在三个小通道内的质量流量范围是: 0.05 kg/min~ 0.35 kg/ min。本论文研究了 MEPCM 质量浓度和质量流量对 MEPCM 悬浮液层流对流传热性能的影响, 得到以下结论:

(1) MEPCM 悬浮液的质量浓度以及质量流量对其冷却性能有着重要的影响。与水相比, 在低质量流量情况下, 即 $M = 0.05 \text{ kg/ min}$, MEPCM 悬浮液表现出更好的冷却性能, 其相应的壁面温度上升值随 MEPCM 质量浓度的增加而下降的愈加显著, 并且相应的 Nusselt 数也随着 MEPCM 质量浓度的增加而增加; 例如, 与水

相比, 使用浓度为 20% 的悬浮液, 壁面温度上升值可降低约 19.6%, Nusselt 数增加了 46.5%。但随着悬浮液质量流量的增加, MEPCM 悬浮液相对(水)冷却效果变得越来越不好, 其相应的壁面温度与水的接近或高于水的壁面温度。

实验也发现, 质量浓度为 5% 的悬浮液在整个质量流量范围内(0.05 kg/ min~0.35 kg/ min)总是表现出比水好的冷却性能。例如, 在质量流量 $M = 0.05 \text{ kg/ min}$ 条件下, 悬浮液对应的壁面温度比水低约 1.8℃; 在质量流量 $M = 0.35 \text{ kg/ min}$ 条件下, 悬浮液对应的壁面温度比水低约 2~6℃。

(2) 论文从 MEPCM 颗粒对流体热边界层影响的角度理论分析了悬浮液质量浓度和质量流量对 MEPCM 悬浮液在小通道内流动传热性能的影响。分析表明, 在小质量流量($M = 0.05 \text{ kg/ min}$)条件下, MEPCM 悬浮液在矩形小通道内的流动达到热充分发展, 热量和温度可以传递到流动的核心区, 悬浮液中的 MEPCM 颗粒能够充分地发生相变, 强化冷却性能。在大质量流量($M = 0.35 \text{ kg/ min}$)条件下, MEPCM 悬浮液在矩形小通道内的流动不能达到热充分发展, 热量和温度不能传递到流动的核心区, 发生相变的 MEPCM 颗粒仅存在于贴近壁面的热边界层中, 悬浮液中大部分的 MEPCM 颗粒未发生相变并快速流过通道, 因而 MEPCM 颗粒强化流动传热效果不明显, 甚至会降低单相流体的流动传热性能。

(3) 为获得更好的冷却性能, 在低质量流量情况下, 建议使用高质量浓度的 MEPCM 悬浮液; 在高质量流量的情况下, 质量浓度低于 10% 的 MEPCM 悬浮液显得更加有希望。

致 谢

作者饶宇感谢联邦德国学术交流中心

(DAAD) 奖学金, 中国国家留学基金委 (CSC), 国家自然科学基金委 (资助号: 50436020, 50176004) 以及新世纪优秀人才支持计划对其博士论文研究的资助。作者们感谢德国 BASF 公司的 E. Jahns 博士提供相变材料微胶囊 (MEPCM) 以及有帮助的讨论。作者们也感谢 S. Hardt 博士在多通道流量分配数值模拟方面提供的帮助, 以及德国 Max-Planck-Institut fuer Polymerforschung in Mainz 的 M. Wilhelm 教授为测量 MEPCM 悬浮液流变性能提供的帮助。

参考文献:

- [1] Hawlader M. Microencapsulated PCM thermal energy storage system[J]. *Applied energy*, 2003, 74: 195-202.
- [2] Cho J. Microencapsulation of octadecane as a phase change material by interfacial polymerization in an emulsion system [J]. *Colloid and polymer science*, 2002, 280: 260-266.
- [3] Kasza K E, Chen M M. Improvement of the performance of solar energy or waste heat utilization systems by using phase change slurry as an enhanced heat transfer storage fluid[J]. *J. Solar Energy Engineering*, 1985, 107: 229-236.
- [4] Yamagishi Y. An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium[R]. *IEEE Paper*, No. 96082.
- [5] Goel M, Roy S K, Sengupta S. Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1994, 37(4): 593-604.
- [6] Mulligan J C, Colvin D P, Bryant Y G. Microencapsulated phase change material suspensions for heat transfer in spacecraft thermal systems[J]. *J. of Spacecraft and Rockets*, 1996, 33: 278-284.
- [7] Inaba H, Kim M J, Horibe A. Melting heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurries with plural microcapsules having different diameters [J]. *J. Heat Transfer*, 2004, 126: 558-565.
- [8] Hu Xian xu, Zhang Yiir ping. 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]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45: 3163-3172.
- [9] Charunyakorn P. Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, 34: 819-833.
- [10] Roy S K, Avanic B L. Turbulent heat transfer with phase change material suspension[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001: 2277-2285.
- [11] Shah R K, London A L. Laminar flow forced convection in ducts: *Advances in Heat Transfer*[M]. London: Academic Press, 1978.