

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.004

# 微通道纳米强化相变微胶囊悬浮液流动与传热实验

朱华星, 杨磊

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章设计了微通道流动与传热实验平台,针对定制的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 纳米颗粒强化相变微胶囊悬浮液(micro-encapsulated phase change material slurry, MPCS)开展循环流动实验,分别从微通道压降、摩擦阻力系数、对流换热系数、微通道板温度等4个方面探究MPCS在微通道中的流动与传热特性。实验结果表明:MPCS在微通道中的压降随质量分数的增加而增大,且明显高于去离子水;与之相比, $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCS在微通道中的压降并无显著变化。此外,微尺度流动可能更有利于在 $Re$ 较小时产生湍流;MPCS的对流换热系数高于去离子水,且随 $Re$ 及质量分数的增大而增大,微通道的板温度更低,表现出更好的冷却效果;相同质量分数的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCS具有更高的对流换热系数,传热性能更佳;在低 $Re$ 下较低的热流密度更有利于传热,在 $Re$ 较高时高热流密度下传热效果更佳。

**关键词:**相变微胶囊;纳米强化;微通道;传热;流动特性

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)04-0455-07

## Experiments on flow and heat transfer of nano-enhanced micro-encapsulated phase change material slurry in microchannel

ZHU Huaxing, YANG Lei

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In this paper, a microchannel flow and heat transfer platform was designed to carry out circulation flow experiments on customized  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle enhanced micro-encapsulated phase change material slurry ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCS). The flow and heat transfer characteristics of MPCS in microchannel were experimentally researched from four aspects: pressure drop, friction resistance coefficient, convective heat transfer coefficient and microchannel plate temperature. The results show that the pressure drop of MPCS in microchannel increases with the increase of mass fraction, which is significantly higher than that of deionized water. In contrast, the pressure drop of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCS in microchannel has no obvious change. In addition, microscale flow may be more conducive to the emergence of turbulence with smaller  $Re$ . It is shown that the convective heat transfer coefficient of MPCS is higher than that of deionized water, and increases with the increase of  $Re$  and mass fraction. The microchannel plate temperature is correspondingly lower, indicating better cooling effect.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCS with the same mass fraction has a higher convective heat transfer coefficient and better heat transfer performance. The experimental results also indicate the influence of heat flux density on heat transfer performance. When  $Re$  is low, lower heat flux density is more conducive to heat transfer; when  $Re$  is high, higher heat flux density is better for heat transfer.

**Key words:** micro-encapsulated phase change material; nano-enhanced; microchannel; heat transfer; flow characteristic

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-04-26

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(JZ2019AKZR0218)

作者简介:朱华星(1996—),男,安徽芜湖人,合肥工业大学硕士生;

杨磊(1983—),男,安徽六安人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: yanglei-seu@hfut.edu.cn.

随着微加工技术的进步,愈加小型化的电子元件产生的高热流密度给系统带来热量过载以及能耗增加的负担,因此对微电子器件的热管理要求也变得更加严格。微通道热沉具有结构紧凑、质量轻、传热性能好、比表面积大的优点<sup>[1]</sup>,目前被广泛应用于多种散热场景<sup>[2]</sup>。

采用微通道的直接液体冷却是一种高效冷却方法,考虑到单相液体冷却的散热能力有限,需要新的传热强化技术来满足大热负荷的需求<sup>[3]</sup>。相变材料具有高熔化潜热和较窄的相变温度区间,其特殊的高潜热,可以实现小尺寸系统中的热能存储<sup>[4-5]</sup>,通过封装相变材料制备相变微胶囊并分散悬浮在基液中,既防止了相变芯材的反应和腐蚀,提高了芯材的耐久性,又可以提高相变速率,增强换热性能,同时易于泵送。目前已广泛应用于建筑热舒适<sup>[6]</sup>、可再生能源储能<sup>[7]</sup>、空调<sup>[8]</sup>、电子制冷<sup>[9]</sup>及食品工业<sup>[10]</sup>等领域。以相变微胶囊悬浮液(micro-encapsulated phase change material slurry, MPCs)为冷却介质的微通道热沉兼具微通道和相变微胶囊的优点而备受研究者的关注。文献<sup>[11]</sup>研究了在平行微通道中流动的 MPCs 的流体力学和热力学性能,研究表明 MPCs 的通入会导致更高的压降,并且压降对温度非常敏感,其传热性能要比水好得多,随着熔化的发生,体积分数 2% 的 MPCs 传热  $Nu$  已达到纯水的 1.36 倍;文献<sup>[12]</sup>开展一系列关于 MPCs 流经内径为 10 mm 圆管的实验,结果表明,体积分数为 5% 的 MPCs 在试验段的固态、固/液态、液态下的  $Nu$  可分别提高 23.9%、20.5%、9.1%;文献<sup>[13]</sup>基于欧拉-欧拉方法,对恒热流下 MPCs 在水平圆管中流动的热流体性能进行数值模拟,研究发现粒径对其流动特性具有显著影响,随着粒径的减小,流动压降及平均对流换热系数均有明显增加;文献<sup>[14]</sup>对双管换热器中 MPCs 的流动传热进行数值研究,结果表明,颗粒体积分数显著影响 MPCs 的传热性能,平均传热系数在体积分数为 15% 时最高,在能量损失最小的情况下,10% 体积分数的悬浮液具有更好的传热效果。

虽然相变微胶囊作为传热工质具有良好表现,但较低的热导率制约了其进一步推广。为了增强其导热性能,研究者在相变材料中添加高导热性添加剂。文献<sup>[15]</sup>以  $TiO_2$  纳米颗粒作为填充材料,石蜡作为芯材,脲醛树脂作为壁材,采用原位聚合法合成双层结构的相变微胶囊,结果表明微胶囊壁里加入纳米粒子能有效提高热稳定

性、增加力学强度、改善密封性能,从而提高微胶囊的使用寿命;文献<sup>[16]</sup>以硬脂醇-碳纳米管作为导热增强剂,通过原位聚合法制备相变微胶囊。与未经强化的相变微胶囊相比,强化后不容易团聚,平均粒径较小,并且具有更高的热导率和机械强度,相变微胶囊的热稳定性也得到了提升;文献<sup>[17]</sup>为提高相变微胶囊的传热速率,将纳米铜、石墨烯纳米片和膨胀石墨添加到相变微胶囊中作为传热促进剂,在添加纳米铜、石墨烯纳米片和膨胀石墨后,相变微胶囊的热导率分别提高了 8.72%、28.27%、39.62%。

综合上述研究现状,关于 MPCs 的传热性能已有一定的研究,但对于 MPCs 的传热影响因素(如  $Re$ 、质量分数、热流密度)的研究还不够全面,同时关于纳米强化相变微胶囊悬浮液在微通道中传热性能的研究还较少。据此本文设计了微通道实验平台,以 MPCs 为工质进行一系列实验,旨在探索不同条件下 MPCs 在微通道中的流动及传热特性,同时探究  $Fe_3O_4$ -MPCs 相对于强化前的影响效果。

## 1 实验装置与材料

### 1.1 实验装置

本文实验台由流体循环通路、温度控制系统和数据采集系统 3 个部分组成,如图 1 所示。

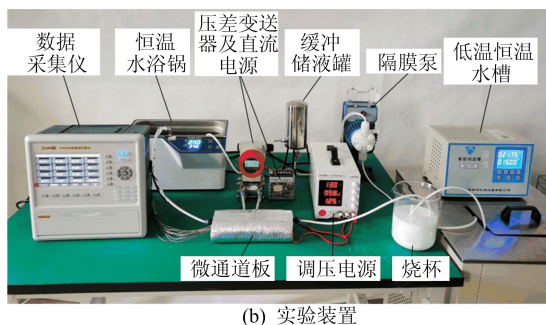
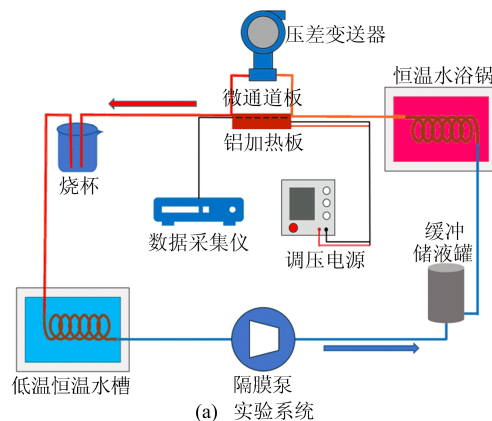


图 1 实验系统及实验装置

流体由隔膜泵驱动并控制流量,调压电源将加热板以一定功率加热以满足流体所需的热流密度条件。流体流出加热台后流经放置在恒温水槽中的紫铜换热螺旋管降温,确保相变微胶囊芯材完全凝固并保持恒定进口温度。实验过程中在进水管、微通道板及整个底座包裹保温材料,以减少向环境的热损失。实验所需主要设备见表 1 所列。

表 1 实验设备

设备名称	型号	精度
隔膜泵	AKS-800	±1%
调压电源	eTM-1502	±1%
数字式黏度计	NDJ-5S	±3%
智能恒温槽	DHX-020	±0.1℃
压差变送器	MIK-2051	±0.075%
恒温水浴锅	WB-2PYO	±0.1℃
K 型热电偶	TT-K-30	±0.1℃
数据记录仪	TP700	

实验所用微通道加热平台如图 2 所示。

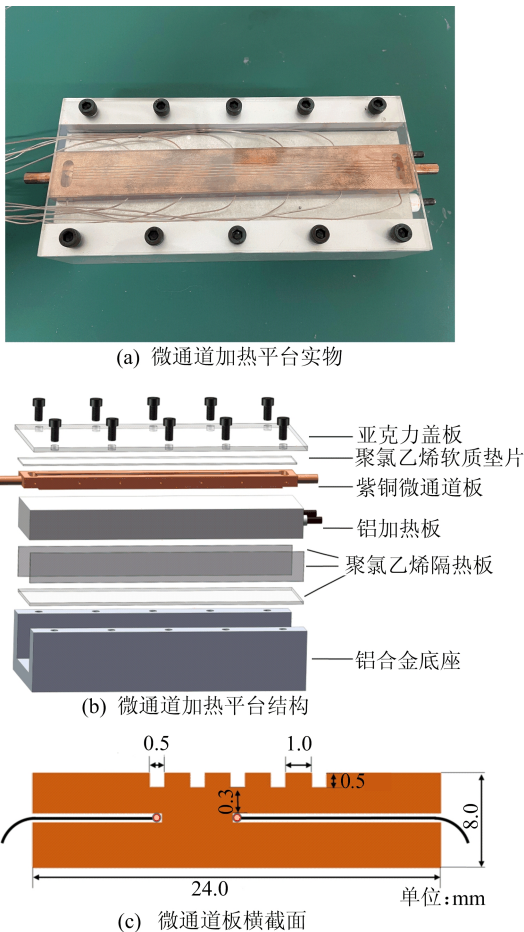


图 2 微通道加热平台

本文在 8.0 mm 厚度的紫铜板上蚀刻 5 个长

度均为 162 mm、宽高均为 0.5 mm 的微槽道,其进、出口处各设计椭圆形集水槽,用于均匀分配进入各槽道中的悬浮液。采用 K 型热电偶进行相关温度测量,微通道板进出口集水槽中各安放 1 个热电偶,沿悬浮液流动方向上等间距布置 2 排共 10 个测温点以获得准确的微通道底部温度,具体位置如图 2c 所示。在加热台外部包裹的保温材料上设置 2 个测温点,用以计算加热台与环境的热量耗散,从而估算传递到微通道板的实际热流。热电偶预先在 0℃ 水浴中进行校准,以确保其准确性。

### 1.2 相变微胶囊悬浮液的物性参数

实验所用相变微胶囊系委托合肥芯能相变新材料科技有限公司定制,采用正十八烷作为相变芯材,密胺树脂作为壳材,芯材质量分数为 70%,微胶囊粒径分布在 5~10 μm 区间。本实验将质量分数为 1%、粒径为 20 nm 的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米颗粒均匀分布在壳材内部。

以去离子水作为基液,通过超声波震荡分散配置 MPCs,相关物性参数见表 2 所列。

表 2 24℃ 下 MPCs 物性参数

参数	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	悬浮液黏度/(mPa·s)
去离子水	997.0	0.924
5%MPCs	992.7	1.041
10%MPCs	988.3	1.214
15%MPCs	984.0	1.421
20%MPCs	979.6	1.658
20%Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -MPCs	987.6	1.623

## 2 数据处理及不确定度

### 2.1 数据处理

实验中直流调压电源功率减去保温材料外部的热量耗散即为悬浮液吸收的热量,即

$$\Phi = UI - Q_s \quad (1)$$

其中: $\Phi$  为悬浮液吸收的热量; $U$ 、 $I$  分别为调压电源的电压与电流; $Q_s$  为热量耗散。

$$Q_s = Sh_a \Delta T_a \quad (2)$$

其中: $S$  为微通道加热平台外裹保温材料除下底面以外的表面积; $h_a$  为一般物体在空气中的自然对流换热系数; $\Delta T_a$  为保温材料外表面与环境温度的温差。

由于微通道芯片四周与顶板具有较好的保温,可以认为热量是从加热板一维导热传递到微通道内,通过各点测试温度  $T_i (i=1, 2, \dots, 10)$  估

算对应的微通道底面温度  $T_{wi}$  :

$$T_{wi} = T_i - \frac{\Phi x}{A_{cu} k_{cu}} \quad (3)$$

其中:  $x$  为热电偶与微通道底面的垂直距离;  $k_{cu}$  为紫铜的热导率;  $A_{cu}$  为微通道板底面积。

悬浮液与微通道之间的传热性能可以通过表面对流换热系数  $h$  衡量,  $h$  的计算公式为:

$$h = \frac{\Phi}{nA\Delta T_m} \quad (4)$$

其中:  $n$  为微通道数量;  $A$  为单个微通道的有效表面换热面积, 可通过翅片模型<sup>[18]</sup> 计算, 即

$$A = A_d + 2\eta A_c \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\tanh(mH_{ch})}{mH_{ch}} \quad (6)$$

$$m^2 = \frac{2h}{k_{cu} W_{fin}} \quad (7)$$

其中:  $A_d$ 、 $A_c$  分别为单个微通道的底面积和侧面积;  $\eta$  为翅片效率;  $m$  为翅片参数;  $H_{ch}$  为微通道深度;  $W_{fin}$  为相邻两微通道之间的壁厚。悬浮液与微通道壁面的平均温差为:

$$\Delta T_m = \frac{1}{10}(T_{w1} + \dots + T_{w10}) - \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}) \quad (8)$$

流体的流态特性通过进口  $Re$  表征,  $Re$  为:

$$Re = \frac{\rho v D_c}{\mu} \quad (9)$$

其中:  $\rho$  为悬浮液密度;  $v$  为悬浮液在微通道中的流速;  $\mu$  为悬浮液动力黏度;  $D_c$  为微通道的水力直径。  $D_c$  的计算公式为:

$$D_c = \frac{2W_{ch}H_{ch}}{W_{ch} + H_{ch}} \quad (10)$$

其中,  $W_{ch}$  为微通过的厚度。流体的流动阻力通过摩擦阻力系数  $f$  表征, 其计算公式为:

$$f = \frac{2D_c \Delta P}{\rho v^2 L_{ch}} \quad (11)$$

其中:  $L_{ch}$  为微通道长度;  $\Delta P$  为微通道两端的压降  $\Delta P$  的计算公式为:

$$\Delta P = \Delta P_{meas} - \Delta P_{in} - \Delta P_{out} \quad (12)$$

其中:  $\Delta P_{meas}$  为表测压差;  $\Delta P_{in}$ 、 $\Delta P_{out}$  分别为微通道进、出口处局部压降<sup>[19]</sup>。

## 2.2 不确定度

实验采用标准误差公式进行分析, 公式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta X_i}{X_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

其中:  $R$  为  $n$  个独立变量  $X_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 的函数;  $\Delta X_i$  为  $X_i$  的绝对误差。

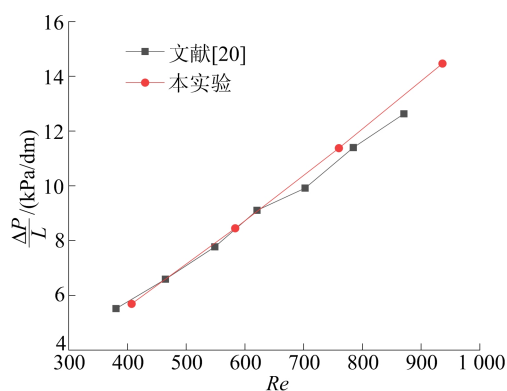
实验主要参数误差见表 3 所列。

表 3 实验参数误差

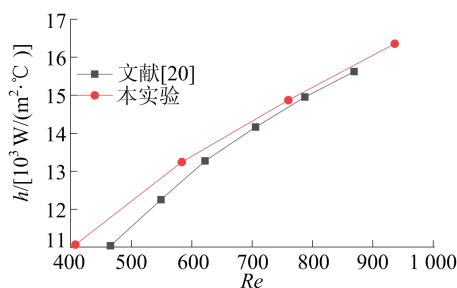
参数	不确定度
热电偶温度	0.100
加热功率	1.000
表测压力差	0.075
对流换热系数	4.600
摩擦阻力系数	2.800

## 3 数据分析

微通道中去离子水的流动压降和对流换热系数的测量结果与文献[20]实验结果的对比如图 3 所示。



(a) 单位长度的压降



(b) 对流换热系数

图 3 实验结果对比

在所涉及的  $Re$  重合部分本实验测得的单位长度流动压降与其实验结果十分接近, 最大偏差不超过 6%; 在  $20\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  的热流密度下基于实测温度得到的对流换热系数与其实验结果相比, 对流换热系数非常接近, 最大偏差不超过 7%, 并具有相同的变化趋势。实验结果的对比从侧面验证了本实验设计的合理性。

### 3.1 相变微胶囊悬浮液的流动特性

#### 3.1.1 相变微胶囊悬浮液的流动压降

无热流时, 去离子水及不同质量分数 MPCs 在微通道中的压降变化如图 4 所示。从图 4 可以

看出,由于相变微胶囊的加入大大增加了流体的黏度,且微胶囊颗粒在流动过程中的碰撞及摩擦造成大量的能量损失,MPCS的压降明显高于去离子水,质量分数越高流动压降越大。与去离子水的流动特点类似,其压降随 $Re$ 的增加近似线性增大。与未经强化的普通MPCS相比,相同质量分数的 $Fe_3O_4$ -MPCS压降并未产生明显变化,说明本研究中采用的纳米强化手段不会增加流动过程中泵功消耗。

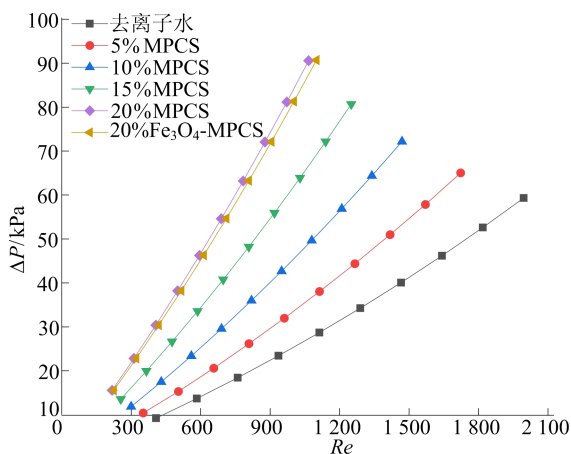


图4 不同质量分数MPCS在微通道中的压降

### 3.1.2 相变微胶囊悬浮液的摩擦阻力

无热流时,不同质量分数的MPCS在微通道中的摩擦阻力系数随 $Re$ 的变化情况如图5所示。

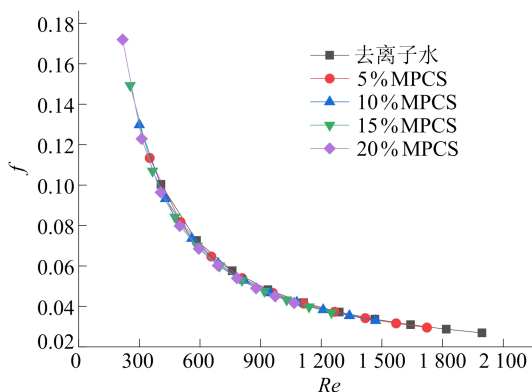


图5 不同质量分数MPCS的摩擦阻力系数

当 $Re$ 小于800时,流动摩擦阻力系数随 $Re$ 增大迅速下降,当 $Re$ 大于800时,下降趋势明显变缓,由此说明过渡点处的临界 $Re$ 比宏观尺度小得多,这表明微尺度流动更有利于在较小的 $Re$ 下产生湍流。此外,不同质量分数MPCS的流动摩擦阻力系数在 $Re$ 相同时几乎重合,说明质量分数对摩擦系数的影响很小。这是由于摩擦阻力

系数表征的是局部剪切应力与局部流动动能密度的比值,主要取决于微通道的相对粗糙度和 $Re$ ,与MPCS的质量分数关系不大。

## 3.2 相变微胶囊悬浮液的传热特性

### 3.2.1 质量分数对MPCS传热性能的影响

热流密度为 $7\ 330\ W/m^2$ 时,不同质量分数MPCS在微通道中的对流换热系数随 $Re$ 的变化如图6所示。由图6可知,悬浮液的对流换热系数随 $Re$ 的增加不断增大。微胶囊在熔化相变过程中能够吸收大量热量,同时基液中微胶囊颗粒的聚集、碰撞会引起颗粒周围的微小对流,因此随着质量分数的增大,对流换热系数也在不断增加;但随着质量分数的进一步增大,对流换热系数的持续增强效果逐渐减弱。

由于在微胶囊的外壳中添加了热导率高的 $Fe_3O_4$ 纳米颗粒,极大的增强了其整体导热能力,相同质量分数下 $Fe_3O_4$ -MPCS的对流换热系数明显高于普通悬浮液。

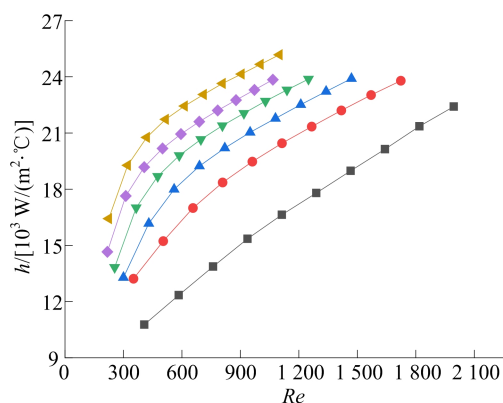


图6 不同质量分数MPCS的对流换热系数

### 3.2.2 不同热流密度下MPCS的传热性能

质量分数20%的MPCS在不同热流密度下的对流换热系数随 $Re$ 的变化如图7所示。在采用不同热流密度加热时,MPCS的对流换热系数均随 $Re$ 的增大而增加;并且随着热流密度的增大,对流换热系数随 $Re$ 的增长速度加快。其随热流密度的变化趋势表明,在低 $Re$ 时较低的热流密度更有利于MPCS传热,较高 $Re$ 时则是高热流密度的情况下传热效果更佳。这由于在低 $Re$ 条件下悬浮液的流速较低、高热流密度时,悬浮液中的相变微胶囊在没有流出微通道时就已经完全熔化,此后的流动过程均为单相传热;而在高 $Re$ 、小热流密度条件下,悬浮液中的相变材料还未完全熔化就已流出微通道。这种情况下,相变

微胶囊在相变过程中的高熔化潜热均未能充分发挥作用,而悬浮液单相传热时其导热系数反而低于去离子水,因此大热流密度下采用较高  $Re$  传热效果更好;而热流密度较小时,采用较高  $Re$  对 MPCs 传热性能的提升并不大,反而会大幅提高压降,这种情况可适当考虑采用较低  $Re$ 。

在热流密度同为  $7\ 330\ \text{W}/\text{m}^2$  时 20% 质量分数的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCs 和普通 MPCs 对流换热系数随  $Re$  的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出,采用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒强化后的相变悬浮液对流换热系数始终高于未经强化的悬浮液。因此可通过此强化手段改善 MPCs 导热系数相对较低的缺点,在低  $Re$  下也能实现更高的传热性能。

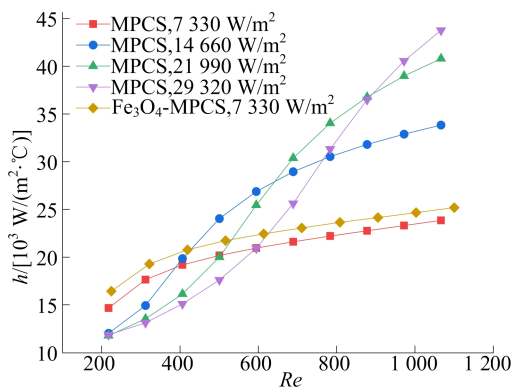


图 7 MPCs 在不同热流密度下的对流换热系数

$Re$  为 1 000 时,悬浮液的对流换热系数随质量分数的变化情况如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着质量分数的增加,不同热流密度下的对流换热系数都有所提高,但热流密度对对流换热系数的影响效果不同。当悬浮液质量分数小于 13% 时,  $14\ 660\ \text{W}/\text{m}^2$  热流密度下对流换热系数最高;质量分数在 13%~18% 的情况下,  $21\ 990\ \text{W}/\text{m}^2$  的热流密度下对流换热系数最高;而当质量分数大于 18% 时,  $29\ 320\ \text{W}/\text{m}^2$  的热流密度下的对流换热系数最大。造成这种变化的主要原因在于低质量分数时过大的热流密度会使相变微胶囊过早的完全熔化,质量分数越高使微胶囊熔化所需要的热流密度也越大。这个结果也证明了图 7 的结论,表明了,在相同的  $Re$  条件下,微通道板施加的热流密度变化,需要匹配不同的质量分数才能实现最佳的换热性能。这意味着采用相变悬浮液冷却方式具有最佳的热负荷及质量分数匹配,这在工程实际应用中具有重要的指导意义。

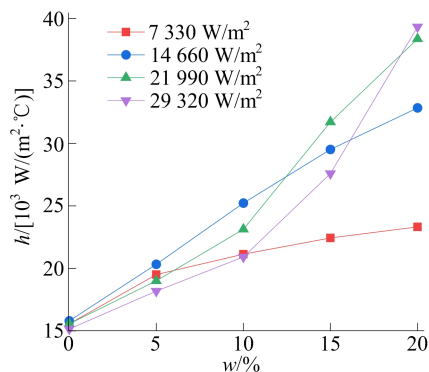


图 8 MPCs 质量分数与对流换热系数的关系

### 3.2.3 MPCs 对微通道板的降温效果

$Re$  为 1 000、热流密度为  $29\ 320\ \text{W}/\text{m}^2$  时,微通道板底部温度沿流动方向的变化如图 9 所示。

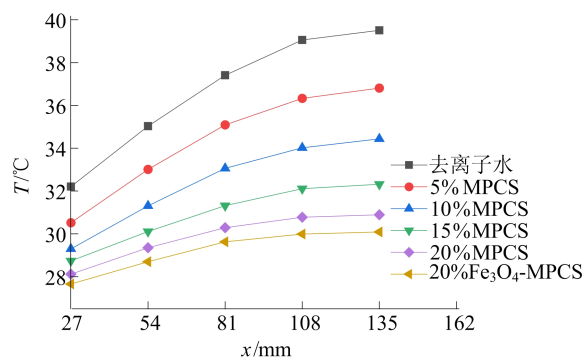


图 9 热流密度为  $29\ 320\ \text{W}/\text{m}^2$  时微通道板底部温度

从图 9 可以看出,微通道底部的温度随板长的增加而增加。在较大热流密度下,各质量分数 MPCs 相较于去离子水对微通道板的降温效果都很显著。液体工质中随着相变微胶囊的加入对于微通道板的冷却降温起到了非常明显的效果。质量分数为 20% 的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MPCs 降温效果最佳,相对于普通 MPCs 的优势明显。但随着质量分数的持续增加,降温效果的提升变得越来越不明显。因此对相变微胶囊的纳米强化尤为必要。

## 4 结 论

本文搭建了微通道传热与流动实验平台,定制了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒强化相变微胶囊,据此配制了相变悬浮液,对其在微通道中的流动及传热开展了实验,得到以下主要结论:

- 1) MPCs 在微通道中的压降随质量分数增大而增大,随  $Re$  的增大基本呈线性增加;采用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒强化并未产生显著的压降变化。
- 2) MPCs 在微通道中的摩擦阻力系数随  $Re$

增大而减小,基本不随质量分数的变化而改变;相比宏观尺寸,微通道中的临界  $Re$  更小。

3) MPCs 的对流换热系数受  $Re$ 、热流密度和质量分数的共同影响,主要取决于相变微胶囊的熔化状态。采用  $Fe_3O_4$  纳米颗粒强化的悬浮液对流换热能力明显优于普通相变悬浮液的。

4) 采用 MPCs 对微通道板进行散热冷却,可以大大降低微通道板的温度,且经纳米颗粒强化后的 MPCs 冷却效果更优。

### [参 考 文 献]

- [1] GAO J, HU Z, YANG Q, et al. Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sinks: modelling review and recent progress[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 29: 101203.
- [2] ZHOU J, CAO X, ZHANG N, et al. Micro-channel heat sink: a review[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(6): 1431-1462.
- [3] SMAKULSKI P, PIETROWICZ S. A review of the capabilities of high heat flux removal by porous materials, microchannels and spray cooling techniques[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104: 636-646.
- [4] SARBUR I, DORCA A. Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(1): 29-64.
- [5] PEREIRA DA CUNHA J, EAMES P. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials: a review[J]. Applied Energy, 2016, 177: 227-238.
- [6] SERRANO A, BORREGUERO A M, GARRIDO I, et al. Reducing heat loss through the building envelope by using polyurethane foams containing thermoregulating microcapsules[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 226-232.
- [7] GAO F, WANG X, WU D. Design and fabrication of bifunctional microcapsules for solar thermal energy storage and solar photocatalysis by encapsulating paraffin phase change material into cuprous oxide[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 168: 146-164.
- [8] NAGANO K. Development of the PCM floor supply air-conditioning system[J]. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption (Fundamentals, Case Studies and Design), 2007, 234: 367.
- [9] COLLA L, FEDELE L, MANCINI S, et al. Nano-PCMs for passive electronic cooling applications[J]. Journal of Physics (Conference Series), 2015, 655: 012030.
- [10] HOANG H M, LEDUCQ D, PREZ-MASIA R, et al. Heat transfer study of submicro-encapsulated PCM plate for food packaging application[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 52: 151-160.
- [11] WANG Y, CHEN Z, LING X. An experimental study of the latent functionally thermal fluid with micro-encapsulated phase change material particles flowing in microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 209-216.
- [12] ZHANG G, CUI G, DOU B, et al. An experimental investigation of forced convection heat transfer with novel micro-encapsulated phase change material slurries in a circular tube under constant heat flux[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 699-709.
- [13] MA F, ZHANG P, SHI X J. Investigation of thermo-fluidic performance of phase change material slurry and energy transport characteristics[J]. Applied Energy, 2018, 227: 643-654.
- [14] ASHAGRE T B, RAKSHIT D. Study on flow and heat transfer characteristics of encapsulated phase change material (EPCM) slurry in double-pipe heat exchanger[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 46: 103931.
- [15] 时雨荃, 蔡明建. 无机纳米粒子填充相变微胶囊壁的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(6): 201-204.
- [16] LI M, CHEN M, WU Z. Enhancement in thermal property and mechanical property of phase change microcapsule with modified carbon nanotube[J]. Applied Energy, 2014, 127: 166-171.
- [17] LIU C, RAO Z, LI Y. Composites enhance heat transfer in paraffin/melamine resin microencapsulated phase change materials[J]. Energy Technology, 2016, 4(4): 496-501.
- [18] LING W, ZHOU W, LIU C, et al. Structure and geometric dimension optimization of interlaced microchannel for heat transfer performance enhancement[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 170: 115011.
- [19] HO C J, LIAO J C, LI C H, et al. Experimental study of cooling characteristics of water-based alumina nanofluid in a minichannel heat sink[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 14: 100418.
- [20] CHEN M, WANG Y, LIU Z. Experimental study on micro-encapsulated phase change material slurry flowing in straight and wavy microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116841.

(责任编辑 吴 亮)