

微圆管内相变微胶囊悬浮液换热特性研究

钟小龙 刘东 胥海伦

西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010

摘要 通过实验研究了相变温度为 50 ℃ 的相变微胶囊悬浮液在 1 mm 微小圆管内的换热特性, 并与相同条件下的蒸馏水换热进行了对比。结果表明, 在雷诺数(Re)为 300~1000 范围内, 不同浓度的相变微胶囊悬浮液平均换热系数和平均努塞尔数(Nu)均高于蒸馏水, 且随 Re 的增加而增大; 相同 Re 下, 相变微胶囊悬浮液的平均壁面温度低于蒸馏水, 且随 Re 的增大而减小; 随着相变微胶囊质量分数的增加, 平均换热系数和平均 Nu 逐渐增大、平均壁面温度逐渐降低。

关键词 测量; 冷却; 相变材料; 微胶囊; 悬浮液; 圆管

中图分类号 TK124

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111405

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Microencapsulated Phase Change Material Suspension in Micro-Circular Tube

Zhong Xiaolong Liu Dong Xu Hailun

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract By contrast with distilled water under the same condition, heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material suspension (MEPCMs) of which the phase change temperature is 50 ℃ are investigated in a micro-tube of radius of 1 mm. It appears that for Reynolds number (Re) ranging from 300 to 1000 both the average heat transfer coefficient and the average Nusselt number (Nu) of MEPCMs with different mass concentrations are higher than that of distilled water, and increase with Reynolds number increasing. Moreover, the wall temperature of the MEPCMs suspension is lower than that of the distilled water at the same Reynolds number, and it decreases as Re increases. In addition both the average heat transfer coefficient and the average Nusselt number increase as the mass concentration of MEPCMs increases, whereas the wall temperature decreases.

Key words measurement; cooling; phase change material; microcapsule; suspension; circular tube

OCIS codes 140.3320; 140.6810; 140.3380

1 引言

激光技术广泛运用于各行各业^[1-4], 但由于其在电光转换过程中输入的大部分电功率转化成的热量被激光器本身所吸收, 导致激光器在工作过程中出现本身温度过高, 输出波长变化, 输出功率变低, 使用寿命变短等问题。针对激光器产生的热效应问题, 研究者们提出了空气冷却, 单侧水冷, 蓝宝石薄片冷却等常规冷却方式^[5]。但是随着激光器尺寸的日益小型化及输出功率的不断提高, 其输入的电功率转化成的热量也随之变大, 单位面积热流密度增加, 散热需求增大, 常规冷却方式已经无法满足其散热需求, 必须采取有效的冷却措施。现有激光器冷却技术中, 微结构冷却由于流动换热通道尺寸小、表面传热系数大以及换热面积大等特点, 是一种非常有效的冷却方式^[6-7]。

微小结构冷却作为一种高效的冷却方式被研究者^[8-11]广泛认同, 而在微小结构冷却换热流体中加入相变

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-09; 网络出版日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51306156)、西南科技大学研究生创新基金(14ycx095)

作者简介: 钟小龙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事微结构内流动换热方面的研究。E-mail: 906366809@qq.com

导师简介: 刘东(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高热流密度器件冷却方面的研究。

E-mail: dtld123@126.com

微胶囊颗粒,构成相变微胶囊悬浮液,利用相变微胶囊的潜热带走更多的热量,可以达到更好的冷却效果。Goel等^[12]在管径3.14 mm,长300 mm的圆管内换热实验证实了相变微胶囊悬浮液的使用可以大大降低管壁温度。Mulligan等^[13]在管径6.1 mm,长910 mm的圆管内实验也证实了相变微胶囊悬浮液不仅能够降低系统壁面温度还能够提高传热流体对流传热系数。Inaba等^[14]在管径15 mm,长5850 mm的圆管内实验发现相同雷诺数(Re)下相变微胶囊悬浮液的平均传热系数是水的2~2.8倍。郝英立等^[15]在内径6.78 mm,长736.6 mm的圆管内实验同样也证实了相变微胶囊的加入可以显著降低壁面温度和流体温度,显著增强流体与壁面间的对流换热。王利等^[16]在通过内径5.11 mm,长3.4 m的圆管内实验发现相同 Re 下相变微胶囊悬浮液的修正努塞尔数(Nu)约是水的3.0倍。鲁进利等^[17]在内径2 mm,长800 mm的圆管内实验证实了相变微胶囊的加入可以降低壁面温度以及流体出口温度,相变微胶囊颗粒的加入可以大大强化传热。本文搭建相变微胶囊悬浮液在低 Re 下微小圆管内的换热实验台,并通过实验研究了其换热特性。

2 实验装置和实验方法

2.1 实验系统

实验系统如图1所示,相变微胶囊悬浮液由机械隔膜泵2从低温恒温槽1中吸入,经过脉动阻尼器3,主循环回路流量调节阀5、流量计6后进入实验段7进行换热,换热后与旁通回路流量调节阀4分流的流体流回低温恒温槽1后继续循环。实验时低温恒温槽的出口温度为40℃。

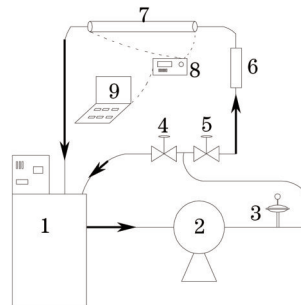


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

实验段采用长为300 mm,内径为1 mm的紫铜圆管,铜管外表面每隔20 mm焊接一个K型热电偶,热电偶焊接表面涂有一层室温下可固化的硅橡胶,由于硅橡胶导热系数小,一般为0.2~0.3 W/(m·K),可以减小加热丝对热电偶测温的影响,为了达到常热流壁面边界条件(q_w 为常数),加热丝缠绕之前,在焊接有热电偶的圆管外表面包裹一层高导热石墨片,高导热石墨片水平导热系数为700~1200 W/(m·K),可以很好的满足实验均热流的要求,为了进一步减小加热丝对热电偶测温的影响,当加热丝缠绕至热电偶焊接点处,将加热丝从焊接点与管轴线对称的圆管表面缠绕过去,避免加热丝与热电偶焊接点的接触(图2)。加热丝两端与调压器相连,通过调节变压器的输入电压来控制加热功率,为了减少热量散失和更好固定加热段,将焊接有K型热电偶和均匀缠绕加热丝的紫铜管密封在四氟棒槽道内形成实验段(图3),K型热电偶温度信号通过数据采集仪8采集后,由电脑9输出。

2.2 相变微胶囊悬浮液

实验采用相变微胶囊如图4所示,其芯材为石蜡,壁材为密胺树脂,相变温度约为50℃,相变焓约为

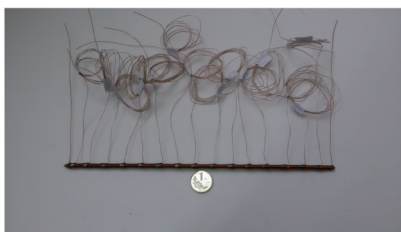


图2 1 mm圆管外裹加热丝图

Fig.2 1 mm tube wrapped on the heater



图3 1 mm圆管换热实验段图

Fig.3 Experimental setup of 1 mm tube heat transfer

100 J/g,其外观为白色粉末,含68%石蜡和32%密胺树脂,平均粒径约为8 μm 。将该相变微胶囊与蒸馏水按照质量分数配制成不同浓度的相变微胶囊悬浮液,为了测试其分散性,采用高倍显微镜对相变微胶囊悬浮液(MEPCMs)进行观察,发现相变微胶囊在蒸馏水中具有很好的分散性(图5)。

应用文献[12,18-20]的相关公式,可以得出相变微胶囊及其悬浮液的具体物性参数,如表1所示, C_m 为相变微胶囊悬浮液的质量分数。

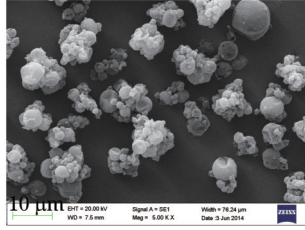


图4 相变微胶囊电镜图

Fig.4 Electronic microscope image of MEPCM

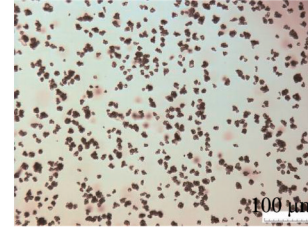


图5 相变微胶囊显微镜图

Fig.5 Microscopic image of MEPCM

表1 相变微胶囊颗粒及其悬浮液物性参数

Table 1 Physical properties of MEPCM particle and slurries

	Density /(kg/m^3)	Specific heat /[$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	Thermal conductivity /[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	Dynamic / ($10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	Latent heat /(J/g)
Water (40 $^{\circ}\text{C}$)	992.2	4.174	0.634	0.656	—
Paraffin	912	2.5	0.21	—	189
Melamine	1500	1.2	0.2	—	—
MEPCM particle	1100	2.1	0.162	—	100
MEPCM slurries					
$C_m=5\%$	997	—	0.606	0.741	—
$C_m=10\%$	1002	—	0.578	0.856	—
$C_m=15\%$	1007	—	0.551	1.015	—

3 数据处理与误差分析

3.1 数据处理

由于相变微胶囊相变温度为50 $^{\circ}\text{C}$,因此实验中,固定实验段入口温度为40 $^{\circ}\text{C}$,而为了控制加热量,通过调压器设置,固定加热功率为39 W。因此微小圆管平均对流换热系数:

$$h_m = \frac{Q}{A\Delta T_m} = \frac{Q}{\pi DL\Delta T_m}, \quad (1)$$

$$\Delta T_m = \frac{1}{14}(T_1 + T_2 + \dots + T_{14}) - \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}), \quad (2)$$

式中 Q 表示输入功率, A 为圆管内表面面积, D 为圆管内径, L 为圆管长度, ΔT_m 为平均壁面与平均流体温差,平均壁面温度通过表面热电偶测量并通过傅里叶定律计算求得,平均流体温度通过进出口热电偶测量并取平均求得。

实验中

$$Re = \frac{\rho_b u_m D}{\mu_b} = \frac{4\rho_b f}{\pi D \mu_b}, \quad (3)$$

式中 ρ_b 为相变微胶囊密度, u_m 为相变微胶囊的速度, f 表示的流量计所测流量, μ_b 表示悬浮液粘度。

平均努赛尔数:

$$Nu = \frac{Q}{A\Delta T_m} \cdot \frac{D}{k_b} = \frac{Q}{\pi L\Delta T_m k_b}, \quad (4)$$

式中 k_b 为流体导热系数。

3.2 误差分析

实验中,标定后的热电偶精度为 ± 0.4 $^{\circ}\text{C}$,转子流量计测量前用质量称重法进行标定,标定中所用电子秤

精度为 ± 1 g。使用万能工具显微镜和精度为0.02 mm的游标卡尺进行长度测量,根据误差分析理论,间接误差计算公式如下:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}, \quad (6)$$

根据此公式计算各个参数误差,结果见表2。

表2 实验不确定度

Table 2 Experimental uncertainties

Parameters	Uncertainty	Parameters	Uncertainty
Q (heat power)	2.4%	f (flow rate)	6%
D (diameter)	2%	Re	8.1%
ΔT_m (mean temperature difference)	5.8%	h_m	6.9%
u_b (viscosity)	5%	Nu	8.2%
k_b (thermal conductivity)	5%		

4 实验结果和讨论

4.1 平均壁面温度 $T_{w,m}$ 与 Re 的关系, 壁面流体平均温差 ΔT_m 与 Re 的关系

图6给出了质量分数分别为5%、10%和15%相变微胶囊悬浮液在圆管内换热时的平均壁面温度 $T_{w,m}$ 随 Re 的变化关系曲线,并与相同实验条件下的蒸馏水进行了对比。从图中可以得出,雷诺数 $Re=300\sim 1000$,质量分数为5%、10%、15%相变微胶囊悬浮液平均壁面温度随 Re 增加而降低;相同 Re 下,蒸馏水对应管壁温度最高,相变微胶囊悬浮液对应的管壁面温度随浓度的增加而降低。由结果可知,管壁壁面温度受 Re 以及相变微胶囊悬浮液浓度有较大影响。由于相变微胶囊悬浮液以低于相变温度(50 °C)的入口温度进入实验段,流经实验段与加热壁面对流换热,吸收热量温度逐渐升高,当达到相变温度时,微胶囊中的相变材料相变,此时流体温度升高幅度变缓,同时由于定热流密度实验条件,管壁平均温度升高幅度较去离子水也偏低。随着 Re 以及悬浮液质量浓度的增加,单位时间内流过实验段与管壁换热的相变微胶囊增多,相变吸收的潜热增大,温升速率降低更加明显。

图7给出了蒸馏水、质量分数分别为5%、10%、15%的相变微胶囊悬浮液壁面流体平均温差与 Re 的关系曲线,由图中结果可知,不同浓度的相变微胶囊悬浮液壁面流体平均温差均大于蒸馏水,且随质量分数的增加,平均温差减小。

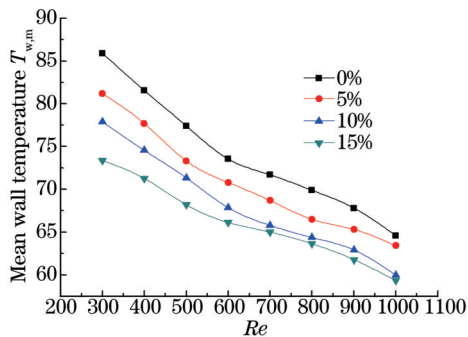


图6 平均壁面温度 $T_{w,m}$ 与 Re 关系

Fig.6 Variation of mean wall temperature with Reynolds number

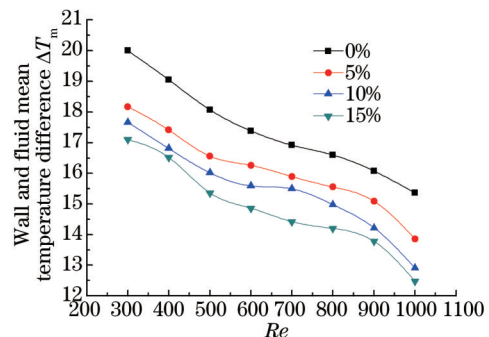


图7 壁面与流体平均温差 ΔT_m 与 Re 关系

Fig.7 Variation of wall and fluid mean temperature difference with Reynolds number

4.2 平均换热系数 h_m 和 Re 的关系

利用(2)式所求得的算术平均温差,可以得到微小圆管内相变微胶囊悬浮液平均对流换热系数 h_m 。图8为进口温度40 °C、加热功率39 W下蒸馏水、质量分数为5%、10%和15%的相变微胶囊悬浮液的平均换热系

数 h_m 随 Re 的变化关系曲线。

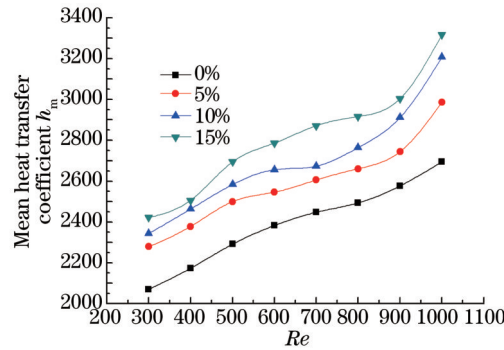


图8 h_m 随 Re 变化图

Fig.8 Variation of mean heat transfer coefficient with Reynolds number

由图(8)中可以看出, $Re=300\sim 1000$, 不同浓度的相变微胶囊悬浮液平均对流换热系数 h_m 随 Re 的增加而增大, 相同 Re 下, 蒸馏水对应平均对流换热系数 h_m 最小, 相变微胶囊悬浮液对应的平均对流换热系数 h_m 随质量分数的增加而增大。由结果可知, 相变微胶囊悬浮液的平均对流换热系数受 Re 、质量分数影响较大。这主要是由于相变微胶囊悬浮液以低于相变温度($50\text{ }^\circ\text{C}$)的入口温度($40\text{ }^\circ\text{C}$)进入实验段, 在流经实验段过程中与加热壁面对流换热, 吸收热量温度逐渐升高, 当达到融化温度时, 微胶囊中的相变材料开始融化, 吸收融化潜热, 微胶囊在相变过程中使相变微胶囊悬浮液的表观导热系数增大, 提高与管壁之间的对流换热系数。实验前调节变压器输入功率, 确定加热功率为 39 W , 保证了相变微胶囊悬浮液在最大流量($Re=1000$)下出口温度高于相变温度($50\text{ }^\circ\text{C}$), 保证相变微胶囊悬浮液在与加热管壁内对流换热过程中相变完全, 因此当 Re 以及悬浮液质量分数增加时, 单位时间内流过实验段与管壁换热的相变微胶囊增多, 相变吸收的潜热增大, 相变产生强化换热效果更加明显。

同时随着 Re 的增大, 工质与管壁对流换热热入口段长度变长, 实验条件下, $Re=300$ 时蒸馏水对应热入口段长度 $L=91\text{ mm}$, 而当 $Re=1000$ 时其对应热入口段长度为 $L=302\text{ mm}$, 此时整个管道均处于热入口段长度内, 流体在热入口段内, 由于边界层较充分发展短薄, 换热系数高, 因此随着 Re 的增加, 相变微胶囊悬浮液与管壁之间的平均对流换热系数增大。

4.3 对流换热特性

由(4)式可以得出基于平均对流换热系数 h_m 获得的平均 Nu 。图9给出了蒸馏水、质量分数为5%、10%、15%相变微胶囊悬浮液在 1 mm 圆管内换热时平均 Nu 数随 Re 的变化关系曲线。

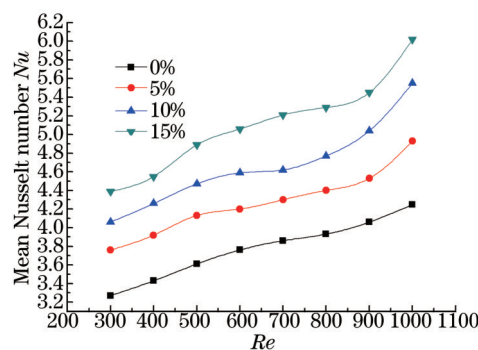


图9 平均 Nu 随 Re 变化图

Fig.9 Variation of mean Nusselt number with Reynolds number

从图9中可以得出, 基于算术平均温差获得的平均 Nu , 对于蒸馏水其值处于 $3.27\sim 4.25$ 之间, 对于质量分数为5%相变微胶囊悬浮液其值处在 $3.76\sim 4.93$ 之间, 质量分数为10%相变微胶囊悬浮液其值处在 $4.06\sim 5.55$ 之间, 对于质量分数为15%相变微胶囊悬浮液其值处在 $4.39\sim 6.02$ 之间。从中可以看出, 低质量下相变微胶囊悬浮液平均 Nu 数与去离子水相差不大, 但随着相变微胶囊悬浮液质量浓度的增加其对平均 Nu 影响效果变强。图中随着 Re 增加, 平均 Nu 呈现增加趋势, 这是由于随着 Re 的增大, 入口段长度不断增长, 从而

导致了平均 Nu 随 Re 的增大而增大。

5 结 论

基于大功率激光器的高热流密度的冷却特点,对质量分数分别为 5%、10%和 15%相变微胶囊悬浮液在 1 mm 圆管微小通道内换热特性进行了实验研究,得到如下结论:

1)当加热功率一定时,不同质量分数相变微胶囊悬浮液壁面平均温度均随 Re 增加而降低;在相同 Re 下,随着相变微胶囊悬浮液质量分数的增加壁面温度逐渐降低,且均大于蒸馏水。

2)不同质量分数相变微胶囊悬浮液平均换热系数均随 Re 的增加而增大,其中质量分数为 15%浓度相变微胶囊悬浮液最大,质量分数为 10%次之,质量分数为 5%最小且均大于蒸馏水。

3)不同质量分数相变微胶囊悬浮液平均 Nu 数均随 Re 的增加而增大;随着相变微胶囊悬浮液质量分数的增加,相变微胶囊悬浮液平均 Nu 数逐渐增大。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin, *et al.*. Laser transmission welding poly propy lene plastics[J]. Chinese J Lasers, 2008,35(3): 466-471.
王 霄, 张惠中, 丁国民, 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 466-471.
- 2 Mei Lifang, Chen Genyu, Liu Xufei, *et al.*. Three-dimensional laser cutting technology in auto-body panel[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3308-3312.
梅丽芳, 陈根余, 刘旭飞, 等. 车身覆盖件的三维激光切割工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3308-3312.
- 3 Wang Meng, Liu Tiegen, Xu Baozhong, *et al.*. Sound controlled focus system for laser drilling system[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1277-1280.
王 萌, 刘铁根, 许宝忠, 等. 基于声波控制激光焦点的打孔系统[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1277-1280.
- 4 Zhang Fang, Su Rongguo, Wang Xiulin, *et al.*. Fluorescence characteristics extraction and differentiation of phytoplankton [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 2052-2059.
张 芳, 苏荣国, 王修林, 等. 浮游植物荧光特征提取及识别测定技术[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2052-2059.
- 5 Tao Yujia, Huai Xiulan, Li Zhigang, *et al.*. Advancement of cooling techniques in high-power solid state laser[J]. Laser Journal, 2007, 28(2): 11-12.
陶毓伽, 淮秀兰, 李志刚, 等. 大功率固体激光器冷却技术进展[J]. 激光杂志, 2007, 28(2): 11-12.
- 6 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang, *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1686-1692.
田长青, 徐洪波, 曹宏章, 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1686-1692.
- 7 Liu Gang, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, *et al.*. Fluid-solid coupled heat transfer design numerical study for water cooling CCEPS laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402004.
刘 刚, 唐晓军, 徐臻婧, 等. CCEPS激光器水冷设计的流固耦合传热数值研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402004.
- 8 Yu Xiangfei, Zhang Chunping, Teng Jyh-tong, *et al.*. A study on the hydraulic and thermal characteristics in fractal tree-like microchannels by numerical and experimental methods[J]. Int J Heat Mass Tran, 2012, 55(25-26): 7499-7507.
- 9 Chen Yongping, Cheng Ping. An experimental investigation on the thermal efficiency of fractal tree-like microchannel nets [J]. Int Commun Heat Mass Tran, 2005, 32(7): 931-938.
- 10 Xu Jinliang, Song Yanxi, Zhang Wei, *et al.*. Numerical simulations of interrupted and conventional microchannel heat sinks [J]. Int J Heat Mass Tran, 2008, 51(25-26): 5906-5917.
- 11 Y Sui, C J Teo, Poh Seng Lee, *et al.*. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels[J]. Int J Heat Mass Tran, 2010, 53 (13-14): 2760-2772.
- 12 Manish Goel, Sanjay K Roy, S Sengupta. Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions[J]. Int J Heat Mass Tran, 1994, 37(4): 593-604.
- 13 J C Mulligan, Y G Bryant, D P Colvin. Microencapsulated phase-change material suspensions for heat transfer in spacecraft thermal systems[J]. J Spacecraft Rockets, 1996, 33(2): 278-284.
- 14 Hideo Inaba, Myoung-Jun Kim, Akihiko Horibe. Melting heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurries with plural microcapsules having different diameters[J]. J Heat Tran, 2004, 126(4): 558-565.

- 15 Hao Yingli, A Khan, Yong-X TAO. Experimental study on the convection heat transfer of latent functionally thermal fluid in a circular tube[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(2): 283-285.
郝英立, A Khan, Yong-X TAO. 圆管内潜热型功能流体对流换热的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(2): 283-285.
- 16 Wang Li, Zhao Bingquan, Zhao Zhennan. Experimental research on the heat transfer characteristics in microencapsulated phase change material suspensions[J]. *Gas & Heat*, 2006, 26(12): 66-70.
王 利, 赵兵全, 赵镇南. 微胶囊相变悬浮液传热特性的实验研究[J]. *煤气与热力*, 2006, 26(12): 66-70.
- 17 Lu Jinli, Hao Yingli. Pressure drop and heat transfer characteristics of latent functional thermal fluid in mini-scale[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2010, 61(6): 1385-1392.
鲁进利, 郝英立. 细小尺度下潜热型功能热流体压降与传热特性[J]. *化工学报*, 2010, 61(6): 1385-1392.
- 18 Sanjay K Roy, Branko L Avanic. Turbulent heat transfer with phase change material suspensions[J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2001, 44(12): 2277-2285.
- 19 Hu Xianxu, Zhang Yinping. 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(15): 3163-3172.
- 20 Poh-Seng Lee, S V Garimella, Dong Liu. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2005, 48(9): 1688-1704.

栏目编辑: 宋梅梅