

二元工质 Marangoni 对流的实验研究与数值模拟¹⁾

朱志强* 陈淑玲† 刘秋生*,2) 同少莉†

*(中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

†(北京交通大学机电学院, 北京 100044)

摘要 用实验和数值模拟方法研究了正值表面张力温度系数的二元醇类特殊水溶液 Marangoni 对流流动. 首先通过实验测量确定正戊醇水溶液表面张力在特定的浓度分布和温度区间内具有明显随温度升高而增加的变化区域, 然后利用特定浓度配比的正戊醇水溶液, 采用 PIV 方法实验观测了矩形液池中二元工质液层在水平温差驱动下的 Marangoni 对流, 发现了不同于常规的反向热毛细对流流动, 测量的表面速度分布与相同工况的数值模拟结果进行了比较, 发现二者变化趋势一致. 实验观测和理论结果的比较进一步验证了表面张力温度系数为正值时二元工质液层的热毛细流动输运特性.

关键词 二元混合工质, Marangoni 对流, 表面张力, PIV 方法, 数值模拟

中图分类号: O363.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2011)04-0674-06

引 言

热管是一种利用工质相变汽化和冷凝的潜热、毛细抽吸现象且无需外界动力而能够进行传热的高效节能元件, 已经广泛应用于航空、建筑、交通、化学等生产生活各个领域^[1]. 但总体而言, 热管技术还存在很大的发展空间.

目前, 热管的应用范围已经延伸到空天领域, 用于控制元器件温度. 传统重力热管的工作方向性缺陷导致它不能用在空间微重力环境中, 现在的空间热管主要是利用吸液芯的毛细结构将冷凝的液体吸回蒸发端来达到液体循环利用的目的, 但其工作能力受热管毛细极限的制约. 另外, 空间中浮力效应消失, 表面张力效应在液体中起主导地位, 它对热管工作也有很大影响. 因为绝大多数纯液体的表面张力随温度的升高而降低, 如果液体表层存在温度不均匀, 必会诱发从热端到冷端的流动, 即 Marangoni 对流^[2-3]. 对应于热管中, 冷凝端液体要比蒸发端液体的表面张力大. 此种情况下, 气液界面必然存在从热端到冷端的 Marangoni 对流流动, 流动方向与吸液芯内液体流动方向相反, 这必然会不利于冷凝液的回流, 对热管工质的循环造成影响. 表面张力驱动对流阻碍热管内工质循环的这一特性已经成为影

响空间热管工作效率的突出问题, 引起了国内外众多学者的关注^[4-6]. 同时, 热管内带表面相变的液体做为典型的热质交换体系, 其内部复杂的相变与热对流之间的耦合也已经引发了广泛的研究兴趣^[7-8].

针对传统吸液芯热管中的液体倒流问题, 人们提出了一种新的设想, 如图 1 所示. 如果能够找到表面张力温度系数为正值 of 的工质, 即表面张力随温度的升高而升高. 那么在热管中, 冷凝端液体要比蒸发端液体的表面张力小, 液体表面存在从冷端流向热端的对流流动, 此时 Marangoni 效应与吸液芯毛细力作用方向一致, 势必将极大促进冷凝工质的回流.

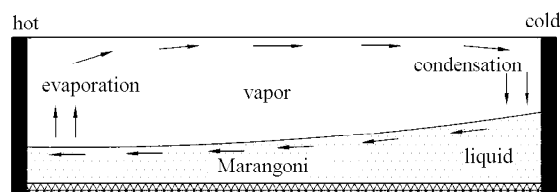


图 1 利用逆向 Marangoni 效应热管工作示意图

Fig.1 Schematics of the heat pipes induced by inverse Marangoni effect

表面张力的大小不仅与液体的种类有关, 还受到诸如温度、压力等环境因素的影响. 纯液体和大

2010-08-02 收到第 1 稿, 2010-12-15 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10772185, 50890182, 11072249) 和中国科学院力学研究所创新资助项目.

2) E-mail: liu@imech.ac.cn

部分无机盐水溶液的表面张力一般随温度升高而线性减小, 而对于某些有机物的水溶液, 表面张力除受温度、压力、溶剂的性质影响外, 还与溶质的性质和浓度有关, 其表面张力有时随着温度和浓度的变化甚至呈现完全不同的变化趋势. Glinski 等^[9]发现较高浓度的二元溶液的表面张力一般随温度升高而减小, 而 Abe 等^[10-11], Savino 等^[12]和 Romeroa 等^[13]实验发现浓度较低时, 某些醇类水溶液在特定浓度下的表面张力在一定温度范围内随温度升高而增大.

本文将研究二元工质表面张力与温度和溶液浓度的关系, 寻找表面张力温度系数为正值合适液体和条件; 并通过实验和数值模拟研究此种溶液内的 Marangoni 对流, 初步探讨液体内部流动规律与输运特性.

1 物理模型和实验装置

1.1 物理模型

如果液体存在表面张力温度系数, 当液层两侧施加水平温差后, 必然诱发水平方向的 Marangoni 对流, 流动方向由表面张力温度系数决定. 本文主要研究二元工质液层中水平温差诱发的 Marangoni 对流, 图 2 为进行实验观测和数值模拟所依据的物理模型. 在图 2 所示的液池系统中, 液池上方和下方分别为空气层和溶液液层, H 表示液层的厚度, L 表示矩形液池的宽度, 液池上下界面绝热, 左右壁面分别施加恒定的温度 T_l 和 T_h , 且 $T_l < T_h$, 由此, 施加在左右刚性壁之间的温度差 (ΔT) 形成了平行于液层表面的外加温度梯度场.

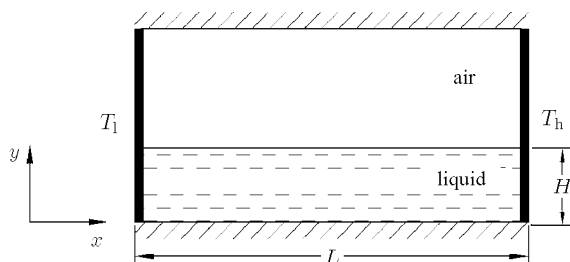


图 2 物理模型示意图

Fig.2 Physical model

1.2 实验装置

配比出合适的溶液后, 将其放入水平放置的矩形液池中, 图 3 为本文所采用的实验装置示意图. 实验液池为矩形狭长槽, 由 2 片铝板和 3 片光学玻璃粘接而成, 长度 (垂直温度梯度方向) 和宽度 (平

行温度梯度方向) 分别为 80 mm 和 25 mm. 为形成水平 Marangoni 对流, 必须存在平行液层方向的温度梯度. 本实验中, 水平温差的形成主要依靠左右两侧固壁的温度控制来实现. 液池左侧的中空铝块内接通由循环水浴控温的循环水, 达到 0.02°C 的控温精度; 液池右侧壁是两块 3 mm 厚的薄铝板, 通过 PID 程序控制薄铝板中间的电阻加热片来达到控制温度的目的, 控温精度可以达到 0.1°C . 为随时监测温度控制的稳定性, 左右两铝块均在靠近液面处打孔放置了 2 根 T 型热电偶, 整个实验过程中的温度变化都被热电偶测量并采集记录到数据采集系统中. 为便于观测平行温度梯度方向液层截面内的 Marangoni 对流流场, 液池前后壁均采用 K9 光学玻璃. 同时, 液池底面也采用 6 mm 的光学玻璃, 一来便于激光片光穿透以防止反光, 二来用于隔绝外界温度影响以保证液池底面是近似绝热的.

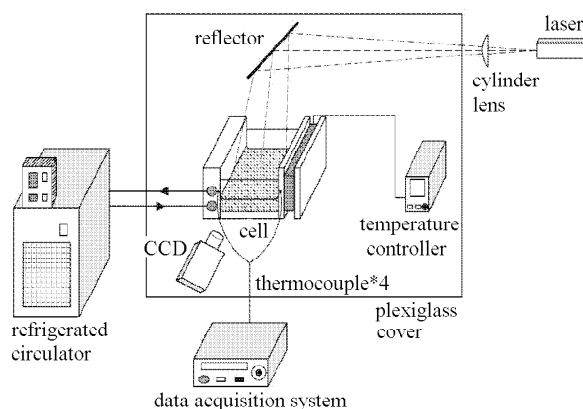


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematics of the apparatus

为了隔绝外界温度和外界空气流动对液层表面温度和液层内流动的影响, 液池两侧控温固壁均包裹了绝热材料, 液池上方加盖了 5 mm 厚的光学玻璃, 在不影响激光穿透的同时隔绝了外界空气. 另外, 实验过程中, 整个实验系统放置在有机玻璃箱中, 以去除空气流动的影响.

在二维流场全场测速应用中, 粒子图像测速技术 PIV (particle image velocity) 通过计算测量场内粒子单位时间内的位移变化 (即流速) 来反映流场, 已经成为最成熟的一种新技术. 本实验中, 激光经柱透镜扩束成为厚度为 1 mm 的激光片光, 然后经反射镜反射后照亮播撒直径为 $5\mu\text{m}$ 示踪粒子的特定液层横截面, 单位时间内示踪粒子移动图像经分辨率为 $768 \times 576 \times 8\text{ bit}$ 的 CCD 记录并传输到计算机后, 利用 PIV 软件分析处理, 从而得到二维流场.

2 结果与讨论

2.1 实验结果

在前人的基础上, 本文配制了不同浓度的异丙醇、正丁醇和正戊醇水溶液, 利用吊片法测量了上述醇类水溶液的表面张力随温度和浓度的变化^[14].

图 4 为不同浓度的正戊醇水溶液的表面张力随温度的变化. 从图中可以看到, 正戊醇水溶液的表面张力随着浓度的升高而减小, 这是由于水的表面张力大于正戊醇, 浓度的升高代表着水所占份额的减小. 同时, 当浓度较小时 (0.7%), 温度升高基本对表面张力没有影响; 随着浓度升高 (浓度大于 1.3%), 其表面张力在 25°C~40°C 温度范围内随温度升高而减小, 即表面张力温度系数为常规的负值; 而在 40°C~65°C 温度范围内随温度升高而增大, 表面张力温度系数为正值, 即浓度大于 1.3% 的正戊醇在 40°C~65°C 温度范围内满足产生逆向 Marangoni 对流的条件.

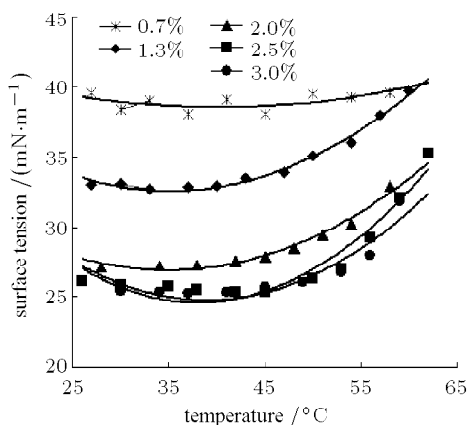


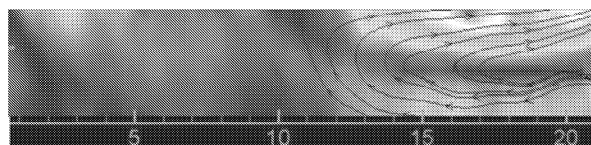
图 4 正戊醇水溶液的表面张力随温度和浓度的变化

Fig.4 Surface tension of 1-pentanol aqueous solution under different temperatures

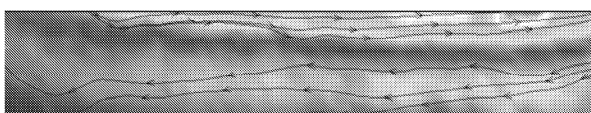
为了验证正戊醇水溶液在特定温度下的表面张力温度系数特性, 研究此种二元工质溶液产生逆向 Marangoni 对流时的液层内部流动规律与机理, 本文选择浓度为 3.0% 的正戊醇水溶液为实验液体, 将之放置于水平矩形液池中, 利用 PIV 方法观测了其在水平温差下液层内部的流场. 在地面实验条件下, 难免存在浮力对流的影响, 为单纯地研究 Marangoni 对流的作用机制, 液层应该尽可能的薄, 本实验中液层厚度为 2.0 mm.

如图 5 为厚度为 2.0 mm 的 3.0% 正戊醇液层在不同温差下的流场分布, 图中左侧为温度低端, 右侧为温度高端. 从图中可以看到, 随着温差从 2°C 增

加到 10°C, 与纯液体中水平 Marangoni 对流流场随温差增加由单一涡胞演化为多涡胞的结构不同^[8,15], 3.0% 正戊醇液层内的流场一直保持单涡胞结构, 差别在于单涡胞的流动范围不同. 由于液层两侧的温度都要高于室温 (20°C), 当温差较小时, 如图 5(a), 液层表面受室温影响, 液层中间部分的液层温度很可能反而要低于冷端温度, 此时只有热端附近的液层满足表面张力温度系数为正值的温度区间, 因此只在热端附近可以观测到从液池中央到热端的 Marangoni 对流流动; 随着温差增大, 室温对液层温度的影响相对减小, 两侧温度传热影响的范围也增大, 导致 Marangoni 对流流动增强, 且流动范围增大. 随着温差加大, 液层内流动增强, 此时浮力对流作用也渐渐明显, 在热壁附近会形成逆时针的小涡胞, 如图 5(c) 所示, 在热壁附近, 存在一条斜向分界线, 分界线左侧为从冷端流向热端的流动碰撞热壁后返回冷端而形成的顺时针涡胞, 而分界线右侧, 浮力作用使得热流体沿热壁爬升, 在热壁附近形成逆时针的小涡胞. 需要说明的是, 限于 PIV 系统的误差, 虽然可以从采集视频中观察到热壁的逆时针涡胞, 但 PIV 分析所得流场并不能清晰描绘.



(a) $T_l = 45^\circ\text{C}$, $T_h = 47^\circ\text{C}$



(b) $T_l = 45^\circ\text{C}$, $T_h = 50^\circ\text{C}$



(c) $T_l = 45^\circ\text{C}$, $T_h = 55^\circ\text{C}$

图 5 2.0 mm 厚的 3.0% 正戊醇液层在不同温差下的流场

Fig.5 Flow fields in 2.0 mm deep, 3.0% 1-pentanol under different temperature gradients

通过分析 PIV 方法得到的流场流动数据, 本文得到了正戊醇液层在不同温差下的表层速度分布,

如图 6 所示, 左侧为冷端, 右侧为热端. 从图中可以看到, 表层速度随着温差的加大而增大, 这是因为外加温差的加大增强了液层的 Marangoni 对流, 从而加快了液层表面流动速度. 此外, 液层中的表层速度分布呈现单峰结构, 峰值靠近热端并且随着温差的加大, 峰值逐渐向热端移动. 这是因为流场整场为单涡胞结构, 热端附近作为对流流动的初始端, 流动最强烈, 因此流场的速度峰值靠近热端. 随着外加水平温差加大, 速度峰值逐渐向热端移动, 表现为单涡胞涡心的位置逐渐靠近热端. 需要说明的是, 图中 $\delta T = 10 \text{ K}$ 时, 在 -0.05 m 处流动速度陡降, 通过与更大温差下的流速分布对比, 如图 6 中 $\delta T = 12 \text{ K}$, 发现此处速度陡降是因为观测时出现实验坏点, 而 PIV 分析数据时, 经过平均化处理, 从而拉低了这个坏点附近的的速度值.

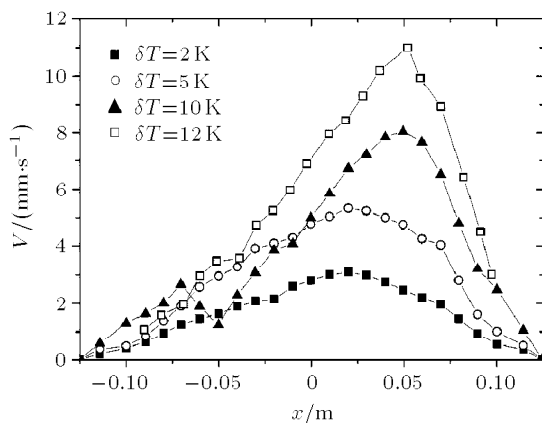


图 6 正戊醇液层在不同温差下的表层速度分布

Fig.6 Surface velocity distribution for 1-pentanol liquid layer under different temperature gradients

2.2 数值分析结果

为进一步分析上述实验观测结果, 本文采用 VOF 方法进行了数值模拟. 计算几何模型与实验液池和液体层厚度取值一致 (如图 2 所示). 液池内上部分为空气, 下部分为溶液. 液池宽为 L , 溶液液面高度为 H . 计算模型取液池上下固壁面为绝热条件, 左右壁面分别保持实验设定的恒定温度 T_l 和 T_h , 且 $T_l < T_h$, 壁面均为无滑移边界, 并假设: (1) 流动为层流; (2) 除密度外其他物性为常数; (3) 忽略黏性耗散热. 初始时液池内流体处于静止状态, 且温度沿 x 方向线性分布. 计算参数取实验液体物性参数和实测的负表面张力温度系数, 并取 3.0% 正戊醇在 $45^\circ\text{C} \sim 65^\circ\text{C}$ 范围内表面张力温度的线性变化值函数为 $\sigma = 7.693 \times 10^{-3}T - 0.0492$. 计算中采用无量纲

参数 Marangoni 数 Ma 来表示 Marangoni 对流的强弱和特性, Ma 数定义为

$$Ma = \sigma_T \frac{d\Delta T}{\mu a} \quad (1)$$

式中, ΔT 为液池两侧壁面间的温度差, d 为液池内液层的厚度, μ, α 分别为液体的动力黏性系数和热扩散系数, 而 σ_T 为液体的表面张力温度系数.

以往的实验和理论证明, 小于 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 厚度的液层内基本上是热毛细对流, 浮力效应可以有效地受到抑制, 尤其是在本文中温差不是很大的实验工况下 ($\delta T < 12 \text{ K}$), 浮力效应可以忽略不计. 由此, 本文开展的数值计算中未考虑重力效应的影响, 这也与空间热管的实际工作环境相契合. 数值计算求解二维的基本控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程以及体积分数 (volume fraction) 方程, 其中对表面张力的处理采用由 Brackbill 提出的连续表面力 (CSF) 模型. 计算采用二维非稳态的 VOF 隐式格式. 为使计算程序更好地收敛, 动量、能量以及体积组分方程的离散均采用一阶迎风格式; 压力-速度的耦合采用 SIMPLE 算法系列中的 PISO 算法. 由于存在气液界面, 收敛比较困难, 初始化时间步长取 0.001 s , 每个时间步长最多迭代数为 25. 待收敛稳定后逐步增大时间步长, 直到流场达到稳定.

图 7 为不同 Ma 数下, 宽高比 $A = 4$ 的 3.0% 正戊醇液层内等温线和流函数分布, 图中左侧为冷端, 右侧为热端. 从图中可以看到, 水平温差下, 流场出现负 Marangoni 对流, 气液界面存在从冷端向热端的对流流动, 并在底部形成回流. 另外, 从等温线上可以看到, 随着 Ma 数的增大, 等温线在气液界面处向热端聚集, 在热端壁面处向下弯曲, 在液相区内部向冷端弯曲. 这是因为 Marangoni 流动随 Ma 数加大而增强, 对流流动范围增大并逐渐向液层下部发展. 由于热端壁面处温度梯度最大, 导致在热端附近流动最为强烈. 从流函数分布上可以看到, 负 Marangoni 对流流场呈现单涡胞结构, 随着 Ma 数的增大, 流动加快, 涡胞中心逐渐靠近热端. 这与实验结果一致, 也解释了实验中观测到的表层速度随外加温差加大而逐渐向热端移动的原因.

通过上述实验所得流场和数值模拟所得流函数对比可以看到, 数值模拟基本上可以反映实验所观测到的现象. 在此基础上, 本文利用数值模拟分析了流场的表面速度, 以更进一步地了解逆向 Marangoni 对流流动规律及机理.

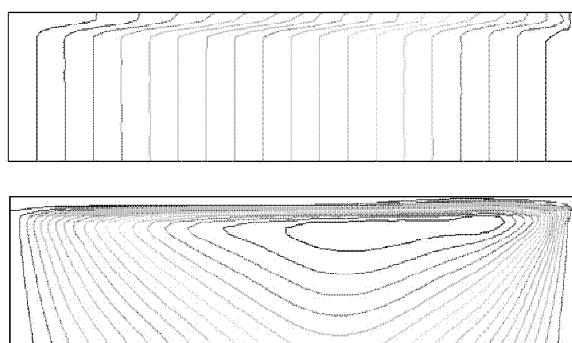
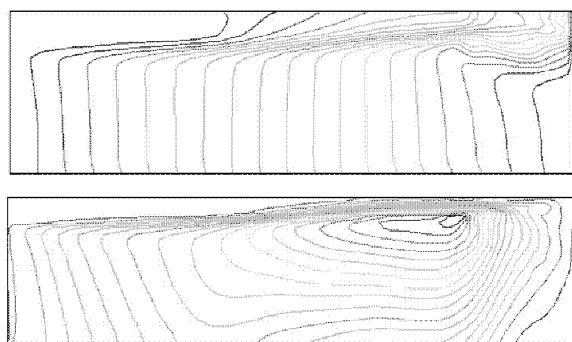
(a) $Ma = 2.4 \times 10^4$ (b) $Ma = 2.4 \times 10^5$

图 7 温度场及流函数分布

Fig.7 Isotherm and stream distribution

如图 8 为不同水平温差下, 数值模拟所得到的 Marangoni 对流流动表面速度分布, 左侧为冷端, 右侧为热端, 液层宽高比 $A = 4$. 由图上可以看到, Marangoni 对流流动的表面速度均呈现单峰结构, 温差越大, 速度峰值越大, 这与图 6 中实验观测到的对流表面速度分布趋势相同, 且数值模拟和实验观测所得的速度峰值的空间位置基本上一致. 具体到速度实际值上, 图 8 中数值模拟速度总比图 6 中实验观测速度要大. 除了实验中示踪粒子的随动性不强和液池上下壁面不是完全绝热的原因外, 主要是因为数值模拟采用二维计算模型且模型的宽高比为 $A = 4$ (小于实验液池中液层宽高比 $A = 10$), 使得数值模拟的 Ma 数要大于实验工况, 从而增大了 Marangoni 对流强度, 加速了表层流动.

尽管数值模拟与实验观测存在一定的差别, 但通过从热毛细对流流型和自由表面的流动速度方向的比较, 数值计算结果和实验观测结果是一致的. 数值模拟结果定性验证了实验观测到的对流流动结果, 二者的综合分析初步显示了二元工质逆向 Marangoni 对流流动规律.

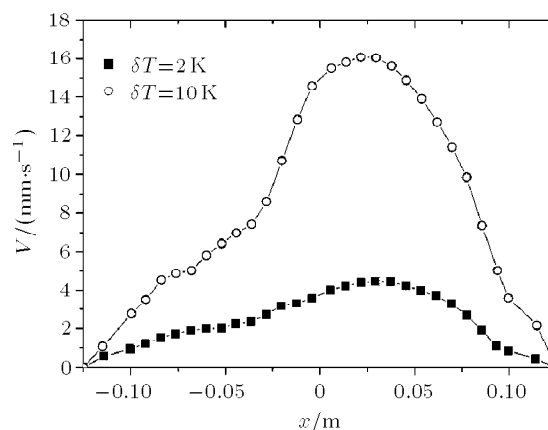


图 8 数值模拟不同温差下的表层速度分布

Fig.8 Numerical results on surface velocity distribution under different temperature gradients

3 结 论

本文通过实验观测和数值模拟研究了一种新型二元工质正戊醇水溶液的 Marangoni 对流流动. 在特定浓度和温度的变化区域内, 该混合液体的表面张力温度系数为正值. 具有该物性的特殊液体工质可用于热管和提高其工作效率. 本文主要结论包括:

(1) 实验测量了不同浓度的正戊醇水溶液的表面张力随温度的变化. 实验发现: 当正戊醇水溶液的浓度大于 1.3% 后, 其表面张力在 $40^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 温度范围内随温度升高而增大, 表面张力温度系数为正值.

(2) 利用 PIV 方法实验观测了 2.0 mm 厚的 3.0% 正戊醇水溶液在水平温差下的 Marangoni 对流流场, 验证了其表面张力温度系数为正值的特性. 实验发现: 液层表面存在从冷端到热端的水平 Marangoni 对流流动; 不同于纯液体中对流流型, 随外加水平温差加大, 3.0% 正戊醇液层内对流流型始终为单涡胞结构; 对流流动表层速度分布呈现单峰结构, 峰值靠近热端, 随着温差的加大, 受流动涡心位置影响, 表层速度峰值逐渐向热端移动.

(3) 由于研究工况并不完全一样, 导致数值模拟所得表层速度比实验观测结果偏大. 但通过从热毛细对流流型和自由表面的流动速度方向的比较, 数值计算结果和实验观测结果是一致的. 所得结果也表明了采用具有正值表面张力温度系数的混合工质, 有利于实现空间热管中的工质靠液体 Marangoni 效应促进工质液体自循环的作用, 提高空间热管的工作效率和可靠性.

参 考 文 献

- 1 Grover GM, Cotter TP, Erickson GF. Structures of very high thermal conductance. *Journal of Applied Physics*, 1964, 35(6): 1990-1991
- 2 Smith MK, Davis SH. Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers: Part 1 Convective instabilities. *J Fluid Mech*, 1983, 132: 119-144
- 3 Riley RJ, Neitzel GP. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers: Part 1 Characterization of steady and oscillatory instabilities. *J Fluid Mech*, 1998, 359: 143-164
- 4 Kuramae M, Suzuki M. Two components heat pipes utilizing the Marangoni effect. *Chemical Engineering of Japan*, 1993, 26(2): 230-231
- 5 Pratt DM, Hallinan KP. Thermocapillary effects on the wetting characteristics of a heated curved meniscus. *J Thermophys Heat Transfer*, 1997, 11(4): 519-525
- 6 Zhang NL, Chao DF. Models for enhanced boiling heat transfer by unusual Marangoni effects under microgravity conditions. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 1999, 20(8): 1081-1090
- 7 Ward CA, Duan F. Turbulent transition of thermocapillary flow induced by water evaporation. *Phys Rev E*, 2004, 69(5): 056308
- 8 Zhu ZQ, Liu QS. Experimental investigation of thermocapillary convection in a liquid layer with evaporating interface. *Chin Phys Lett*, 2008, 25(11): 4046-4049
- 9 Glinski J, Chavepeyer G, Platten JK. Untypical surface properties of aqueous solutions of 1,5-pentanediol. *Colloids and Surfaces A*, 2000, 162(1-3): 233-238
- 10 Abe Y. About self-rewetting fluids - possibility as a new working fluid. *Thermal Science and Engineering*, 2004, 12(3): 9-18
- 11 Abe Y, Iwaski A, Tanaka K. Thermal management with self-rewetting fluids. *Microgravity Science and Technology*, 2005, XVI(I): 148-152
- 12 Savino R, Francescantonio N, Fortezza R, et al. Heat pipes with binary mixtures and inverse Marangoni effects for microgravity applications. *Acta Astronautica*, 2007, 61(1-6): 16-26
- 13 Romeroa CM, Paez MS, Miranda JA, et al. Effect of temperature on the surface tension of diluted aqueous solutions of 1,2-hexanediol, 1,5-hexanediol, 1,6-hexanediol and 2,5-hexanediol. *J Fluid Phase Equilibria*, 2007, 258(1): 67-72
- 14 陈淑玲, 刘鹏飞, 朱志强等. 几种醇类水溶液表面张力的实验研究. 北京交通大学学报, 2008, 32(1): 112-115(Chen Shuling, Liu Pengfei, Zhu Zhiqiang, et al. Experimental study on surface tension of several alcohol aqueous solutions. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2008, 32(1): 112-115(in Chinese))
- 15 Zhu ZQ, Liu QS. Coupling of thermocapillary convection and evaporation effect in a liquid layer when the evaporating interface is open to air. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(3): 233-238

(责任编辑: 刘希国)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND SIMULATION ON THE MARANGONI CONVECTION IN A BINARY MIXTURE¹⁾Zhu Zhiqiang* Chen Shuling[†] Liu Qiusheng^{*,2)} Tong Shaoli[†]

*(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Microgravity, Beijing 100190, China)

[†](School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A typical binary aqueous solution with positive surface tension-temperature gradient was experimentally and numerically studied. In this present paper, the surface tension of a 1-pentanol aqueous solution was found to grow with the increase of the temperature under specific concentration and temperature range. To verify this special phenomenon, flow fields of the 1-pentanol aqueous solution under different horizontal temperature gradients were visualized and measured in a rectangular cavity by means of PIV method. And an inverse Marangoni convection different from that in pure liquid layer was investigated. For comparison, a numerical simulation was carried out to obtain the velocity distribution along the free surface of the 1-pentanol aqueous solution layer under same horizontal temperature gradients. Both results obtained by the experimental observation and numerical simulation were found to display similar tendency.

Key words binary mixture liquid, marangoni convection, surface tension, PIV method, numerical simulation

Received 2 August 2010, revised 15 December 2010.

1) The project supported by the National Nature Science Foundation of China(10772185, 50890182, 11072249)and the Knowledge Innovation Project of Institute of Mechanics, CAS.

2) E-mail: liu@imech.ac.cn