

平板热管微槽道传热面上纳米流体沸腾换热特性

熊建国, 刘振华

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Boiling Heat Transfer Characteristics of Nanofluids on Flat Heat Pipe Evaporator With Micro-grooved Surface

XIONG Jian-guo, LIU Zhen-hua

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Aim at cooling problem of electric power and electronic equipment with high heat flux, experimental study was performed to understand the nucleate boiling heat transfer and the critical heat flux (CHF) of the water based on CuO nanoparticles suspension (nanofluids) in the evaporator of a miniature flat heat pipe (MFHP) with micro-grooved surface at different pressures and particle concentrations of nanofluids. Results show that pressure has great influence on boiling heat transfer and CHF. The heat transfer enhancement effects of nanofluids increase greatly with the decrease of the pressure. The concentration of nanofluids also has significant influence on the boiling heat transfer of the nanofluids and the CHF. The heat transfer and the CHF increase slowly with increase of the concentration at low concentration. However, when the concentration exceeds to 1.0%, the CHF is basically close to a constant, and the heat transfer deteriorates. The study confirmed that the boiling heat transfer characteristics of MFHP's evaporator can be strengthened evidently by using water/CuO nanofluids.

KEY WORDS: cooling; nanofluid; boiling; flat heat pipe

摘要: 针对高热流密度负荷下大功率电力电子设备散热冷却, 该文以带有微槽道强化传热面的小型重力型平板热管蒸发器为研究对象, 以水-氧化铜纳米颗粒组成的纳米流体为工质, 在不同运行压力和不同纳米流体浓度下对平板热管蒸发器的沸腾换热特性以及临界热通量(CHF)进行了实验研究。结果表明: 压力对平板热管蒸发器的沸腾换热特性和 CHF 有强烈影响, 沸腾换热系数和 CHF 随压力降低而大幅度增加。纳米流体浓度对沸腾换热系数和 CHF 也有重要影响, 在低浓度时, 沸腾换热系数和 CHF 随浓度增加而缓慢增加。但是在浓度超过 1.0%时, 浓度对 CHF 的影响基本消

失, 换热特性反而恶化。研究证明, 以水-氧化铜纳米颗粒组成的纳米流体可以明显地强化重力型热管蒸发器换热特性。

关键词: 散热冷却; 纳米流体; 沸腾换热; 平板热管

0 引言

纳米流体作为一种新的功能性流体, 具有许多特性, 把纳米技术应用于热能工程中的各类高效换热装置, 是一项创新性的研究。目前, 纳米流体在传热领域的研究主要集中在管内单相强制对流传热^[1-2]。对相变传热的研究近年来也有一些报道, 但十分有限, 而且全部集中在池内沸腾方面^[3-5]。

热管是一种高效换热装置, 在电力系统中有广泛应用, 如余热锅炉、省煤器等。能源领域的高效换热也是一个跨学科的问题, 长期以来国内对其研究和开发重视不够, 一直是一个薄弱环节^[6-11]。目前, 热管都使用纯液体为工质, 强化热管换热性能的技术方法着重于液芯材料和传热面。将纳米流体作为热管工质, 利用纳米流体的特殊性能强化热管换热能力是一种新的技术尝试。本研究作为一种基础研究, 首先对纳米流体在重力型平板热管蒸发器中的沸腾换热特性进行实验研究, 以期掌握一些基本换热规律。为实际开发应用提供技术支撑。

过去对小型平板热管的研究较多, Plesch^[12]、Cao^[13] 和Faghri^[14]等对几种微槽平板热管进行了实验研究, 证实了此种热管具有较好的传热能力。近年来, 国内外已有一些对纳米流体应用于热虹吸管的研究, 但尚无统一结论^[15-19]。刘俊红等对含有磁性纳米颗粒的磁性流体应用于热虹吸管进行了实验研究。实验结果表明磁性纳米流体应用于热管减

弱了热管的传热性能；而彭玉辉等^[16]人的实验结果表明采用Cu-水纳米流体为热虹吸管工质后热虹吸管的换热性能有较大提高。两者实验都定性模拟热管运行工况。

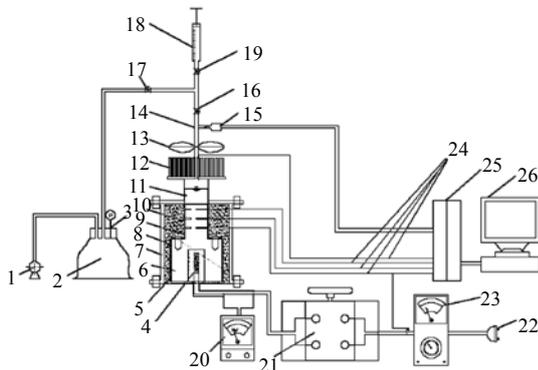
本文使用水基氧化铜纳米流体为工质代替水，在压力稳定的运行条件下进行小型重力型平板热管蒸发器中微槽道传热面上的换热特性实验，对运行压力和纳米流体浓度对沸腾换热特性的影响进行一些基础性研究。探讨纳米流体在重力型热管中实用可能性。

1 实验装置及实验方法

本实验所采用的纳米材料为安徽工业大学方圆纳米研究所生产的平均粒径50 nm的CuO纳米颗粒，使用去离子水作为纳米悬浮液的基液，添加CuO纳米颗粒，用超声波振荡法制备成纳米颗粒质量浓度不同的悬浮液为研究对象。

图1为实验装置简图。主要由真空泵、充液装置、冷凝装置、微槽道平板蒸发器、传热体、不锈钢实验箱、数据采集系统、电源系统等组成。

实验传热体及热管的微槽道平板蒸发器结构如图2所示。传热体为一竖直铜柱体，上部尺寸缩小，做成一凸型的长方体，上表面开微槽道作为强化传热面，微槽道宽0.5mm，深0.8mm，通过不锈钢盖板与传热面连接密封组成平板热管的蒸发腔。在蒸发腔上部外表面焊上铜散热肋片，在肋片外用轴流风扇散热。纳米流体系工质从充液装置里面灌注，充液率为蒸发腔的40%。根据前人研究^[20]，最佳充液率在40%~60%，在此范围之内，充液量对换热



1、真空泵 2、稳压箱 3、压力表 4、主电加热棒 5、辅助电加热圈 6、传热体 7、实验箱 8、绝热材料 9、不锈钢挡板 10、密封硅脂 11、热管蒸发腔 12、散热肋片 13、轴流风扇 14、充液管道 15、压力传感器 16、17、18、真空阀 19、注射器 20、功率表 21、变压器 22、稳定直流电源 23、温度控制仪 24、热电偶 25、数据采集仪器 26、计算机

图1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

特性基本无影响。

竖直铜柱外面包裹一层云母片，云母片上套上一个电加热圈作为辅助加热器，铜柱底部中心插入一根电加热棒作为主加热器。传热体四周添满石棉绝热。传热面和不锈钢盖板间用硅胶密封。热电偶插孔用线切割法精确加工。顶部热电偶距传热面距离4.0 mm，热电偶垂直间距离10.0 mm。在铜柱底部也插入一个热电偶监测铜柱内部温度。所有热电偶连接温度控制器。

实验是在不同的稳定压力下进行的。实验时，首先设定实验压力，确定一个主加热器功率，然后仔细调节辅助加热器功率，使得根据铜柱内热电偶读数确定的传热面热量等于主加热器产生的热量。然后调节风扇功率使得实验压力保持为设定压力。传热面壁温和热流密度由水平方向插入铜柱上凸部，到达中心以及离边缘1/4处的6根热电偶的测量平均值和垂直方向一维稳态导热方程换算得出。热电偶读数由数值采集系统处理后输入计算机，及时显示传热面壁温和热流密度。实验中，当热流密度接近CHF时，控制热流密度以前次热流密度的5%的速率增加，当过热度出现大幅度跳跃超过100 K，也就是出现沸腾烧毁危机时，电源自动断开。然后从前一次稳定状态时的热流密度开始再次以前次热流密度的1%的速率缓慢增加直到出现沸腾烧毁危机，以最新一次稳定状态时的热流密度作为临界热流密度。此外，当铜柱内部温度超过300℃时电源自动断开。

本实验中，实验数据已经确认对各种实验条件，加热体内垂直方向的温度值始终保持良好的线性关系，也就是垂直方向传热很好地符合一维导热特性。壁面热流密度和传热面表温由6根热电偶的平均测量值，按一维导热换算得出。饱和蒸汽温度 T_s 由插入热管腔体的热电偶测出。由于实验是针对平板热管蒸发器内的沸腾换热特性进行研究，因而，所需测量是传热面壁面热流密度、壁温和蒸汽饱和温度。

实验热电偶最大校正误差为0.2 K，实验中垂直方向布置的热电偶间的温差超过10 K，由热电偶测量温差引起的热流密度误差有4%，热电偶间距离最大相对误差为1%左右，测量截断误差为1%左右，仪器误差0.5%左右，壁面热流密度的最大测量相对误差为6.5%左右，整个实验的最大不确定度为13%左右。

实验中使用热电偶测量蒸汽的饱和温度，并且

在测量饱和蒸汽温度的同时也配置一个压力传感器来测量蒸发腔里面的饱和压力。同时测饱和温度和饱和压力是为了确认测定饱和温度与测定压力所对应的计算饱和温度之间的误差。计算表明他们之间的误差 ≤ 3%。

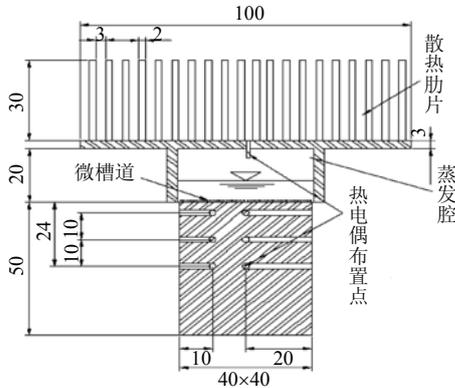


图 2 蒸发器结构测试简图
Fig. 2 Schematic configuration of evaporator

2 实验结果和讨论

图 3 是去离子水在不同压力条件下的沸腾换热系数 α 与热流密度 q 关系的实验曲线。图 3 中直线由 Rohsenow 式(1)，按不同压力计算得出，用来代表光滑传热面上的沸腾换热特性。

$$\frac{c_{pl}\Delta t}{Pr_1^s} = C_{wl} \left[\frac{q}{\mu_l r \sqrt{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} \quad (1)$$

式中： s 为经验指数，纯水取 1.0； C_{wl} 为加热表面—液体组合经验常数，取 0.013； c_{pl} 为饱和液体的定压比热容，J/(kg·K)； r 为汽化潜热，J/kg； g 为重力加速度，m/s²； q 为热流密度，W/m²； Pr_1 为饱和液体的普朗特准则数； Δt 为壁面过热度，K； μ_l 为饱和液体的动力粘度，kg/(m·s)； ρ_l 、 ρ_v 为相应饱和液体和饱和蒸汽的密度，kg/m³； σ 为液体—蒸汽界面的表面张力，N/m。

实验中，光滑面上的沸腾换热实验值与计算值十分接近，平均误差不超过 15%，实验点没有标示。

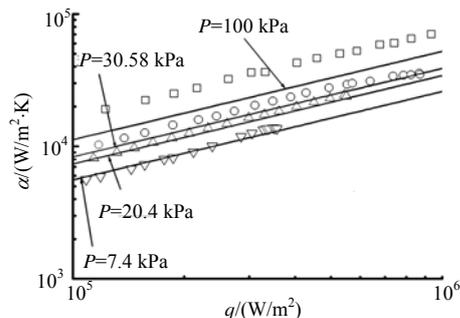


图 3 不同压力下水的沸腾换热特性
Fig. 3 Influence of pressure on boiling heat transfer

从图 3 可见，在大气压条件下，微槽道强化表面对水的沸腾换热有很好的强化效果，换热系数大约可增加 40%~50%。但是在低压条件下，微槽道强化表面对水的沸腾换热基本没有强化作用。

图 4(a)、(b)和(c)分别为运行压力在大气压、20.4 kPa 和 7.2 kPa 下，5 种不同浓度的纳米流体的 α - q 实验曲线，纳米流体浓度 ω 范围为 0.1%~2.0%。实验表明：纳米流体浓度对沸腾换热有很大的影响，大气压和 20.4 kPa 压力下，在很低的纳米流体浓度时，换热特性和水相比反而略有劣化。当纳米流体浓度超过 0.5%后，其换热性能同水相比提高，且在 ω 为 1.0%时蒸发器的沸腾换热特性提高最大，换热系数最大能增加一倍左右。但是当其浓度继续增加后，其换热特性不再强化，反而略有恶化趋势。存在一个最佳纳米颗粒浓度，对所有的实验压力，最佳浓度都是 1.0%。根据式(1)分析，纳米流体宏观物性的变化对沸腾换热特性影响很小。纳米流体的强化换热作用应该来自于微观机理，比如粒子的布朗运动。

从图 4 中还可看出，压力对换热特性有明显的影响，压力越低，强化效果越显著。在大气压下，高浓度纳米流体的换热系数比水的换热系数略有增加，而低浓度纳米流体的换热系数比水的换热系数反而略有下降，纳米流体并没有表现出很好的换热强化效果。而在 7.2 kPa 的低压时，所有实验浓度的纳米流体的换热特性都比水增强。在大气压下，纳米流体浓度为 1.0%时，换热系数最大增加 40%左右，而在 7.2kPa 时，换热系数最大增加一倍左右。压力影响的机理还不清楚。推测其原因可能是在低压下，水分子和纳米颗粒间的束缚力减小，纳米颗粒的布朗运动加强。

图 5 显示了纳米流体中颗粒浓度对CHF的影响。 q_{max} 是不同浓度条件下的纳米流体的CHF，而 $q_{max,0}$ 是水的CHF。实验结果显示纳米流体的CHF在颗粒浓度较低时随着颗粒浓度增加而增加。但在颗粒浓度到达 1.0%后，CHF则不再增加，达到一种饱和稳定状态。同时实验研究还表明压力越小，其CHF强化效果越大。在大气压下，纳米流体的CHF和水相比最大提高了 50%左右，在压力为 7.2 kPa 时，纳米流体的CHF和水相比最大提高了 2 倍左右。

本实验结果说明以水基 CuO 纳米流体作为工质，能够显著强化低压运行条件下的重力型平板热管蒸发器的沸腾换热系数和提高其最大功率。

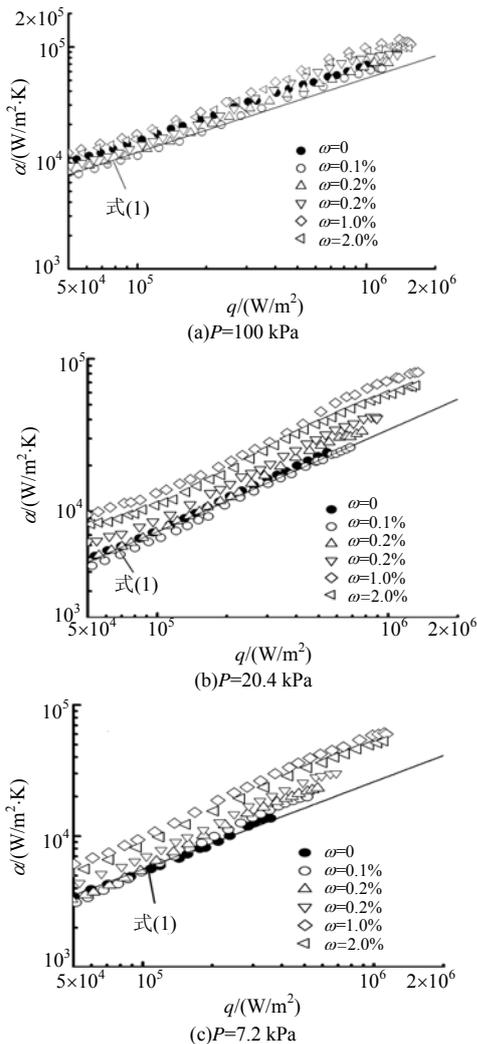


图 4 不同压力下纳米流体的沸腾换热特性

Fig. 4 Boiling heat transfer of nanofluids at different pressure

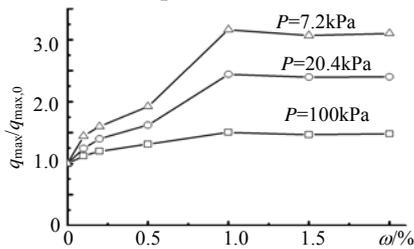


图 5 纳米流体对 CHF 的强化效果

Fig. 5 Effect of nanofluids on CHF enhancement ratios

3 结论

(1) 与光滑传热面相比,在大气压下,微槽道传热表面能够明显强化水的沸腾换热性能。但是,在低压下,微槽道传热表面对水的沸腾强化作用基本消失。

(2) 纳米流体浓度对纳米流体的沸腾换热系数和 CHF 都有明显的影响,存在一个最佳纳米颗粒浓度,对所有的实验压力,最佳浓度都是 1.0%。在

大气压下,换热系数最大增加 40%左右,而在 7.2 kPa 时,换热系数最大增加一倍左右。

(3) 压力对纳米流体的沸腾换热系数和 CHF 都有明显的影响,压力越小,沸腾换热系数和 CHF 提高越大。在大气压下,CHF 最大提高了 50%左右,在压力为 7.2kPa 的时候 CHF 最大提高了 200%左右。如果换算成平板热管的功率,其最大散热功耗可达到 112 W/cm²。

(4) 水基以 CuO 纳米流体作为工质,能够显著强化低压运行条件下的重力型平板热管蒸发器的沸腾换热系数和提高其最大功率。

参考文献

- [1] Xuan Y M, Li Q, Heat transfer enhancement of nanofluids [J]. Int. J. Heat and Fluid Flow, 2000, 21(1): 58-64.
- [2] Xuan Y M, Li Q, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids[J]. ASME J. Heat Transfer, 2003, 12(5): 151-155.
- [3] Das S K, Putra N, Roetze I W. Pool boiling characteristics of nanofluids[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, 46(5): 851-862.
- [4] Bang I C, Chang SH, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nanofluids from a plain surface in a pool[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2005, 48(12): 2407-2419.
- [5] Wen D S, Ding Y L. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids[J]. Journal of Nanoparticles Research, 2005, 7(2): 265-275.
- [6] Sathe. Review of recent developments in some practical aspects of air-cooled electronic packages[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions ASME, 1998, 120(4): 830-838.
- [7] Markstein H W. Cooling techniques for today's electronics [J]. EP&P, 1997, 37(2): 78-82.
- [8] Namba K, Kimura N, Niekawa J, et al. Heat-pipes for electronic devices cooling and evaluation of their thermal performance[C]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, New York, 2000.
- [9] Sauciu B. Design and testing of the super fiber heat pipes for electronics cooling applications[C]. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, CA, USA, 2000.
- [10] 胡志勇. 当今电子设备冷却技术的发展趋势[J]. 电子机械工程, 1999, 24(1): 2-5.
Hu Zhiyong. The development trend of today electronic equipment [J]. Electronic Mechanical Engineering, 1999, 24(1): 2-5(in Chinese).
- [11] 姚寿广, 马哲树, 陈如冰. 一种新型结构的热管式散热冷板性能的数字模拟试验与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 41-45.
Yao Shouguang, Ma Zheshu, Chen Lubin. Numerical Experimental study and analysis of performance for heat pipe cooling flat-plate with a newly structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 41-45(in Chinese).
- [12] Plesch D E, Bier W, Seidel D, et al. Miniature heat pipes for heat removal from microelectronic circuits [C]. Proceedings of ASME Annual Meeting, Atlanta: GA, 1991.

- [13] Cao Y, Gao M, Beam J E, et al. Experiments and analyses of flat miniature heat pipes [J] AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(2): 158-164.
- [14] Hopkins R, Faghri A, Khrustalev D. Flat miniature heat pipes with micro capillary grooves[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1999, 12(1): 102-109.
- [15] 刘俊红, 顾建明, 刘辉, 等. 纳米级固体颗粒应用于热管的试验研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(3): 268-271.
Liu Jun-hong, Gu Jian-ming, Liu Hui, et al. Experimental study of heat pipe of nanometer particles[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(3): 268-271(in Chinese).
- [16] 彭玉辉, 黄素逸, 黄锬剑. 纳米颗粒强化热虹吸管传热特性的实验研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 138-141.
Peng Yuhui, Huang Suyi, Huang Kunjian, Experimental study of the intensified heat transfer characteristics of a thermosiphon through the addition of nanoparticles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(2): 138-141(in Chinese).
- [17] Wei W C, Tsai S H, Yang S Y, et al. Effect of nanofluid concentration on heat pipe thermal performance[J]. IASME Transactions, 2005, 58(2): 1432-1439.
- [18] Tsai C Y, Chien H T, Ding P P, et al. Effect of structural character of gold nano- particles in nanofluid on heat pipe thermal performance [J]. Materials Letters, 2004, 58(9): 1461-1465.
- [19] Xue HS, Fan J R. The interface effect of carbon nanotubes suspension on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon [J]. Journal of Applied. Physics, 2006, 100(1): 1- 5.
- [20] Imura H, Sasaguchi K, Kozai H. Critical heat flux in a closed two-phase thermosiphon[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1983, 26(8): 1181-1188.

收稿日期: 2007-03-15。

作者简介:

熊建国(1982—), 男, 重庆市人, 硕士研究生, 现从事于电力电子设备高效散热冷却技术的研究, jianguox82@gmail.com;

刘振华(1956—), 男, 江苏无锡市人, 教授, 博士生导师, 现主要从事于传热传质学研究。

(编辑 王庆霞)