

文章编号: 1000-8055(2009)04-0783-05

纳米流体强化倾斜丝网热管换热特性

马 琦, 刘振华

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 对纳米流体强化不同倾角轴向丝网热管的换热特性进行了实验研究, 实验以水基 CuO 纳米流体作为工质, 在稳压条件下运行, 运行压力为 7.45, 12.38 和 19.97 kPa (对应的蒸汽饱和温度为 40 °C, 50 °C 和 60 °C). 实验结果表明, 纳米流体质量浓度对倾斜热管的总热阻有明显的影响, 存在一个使热管热阻最小的最佳质量浓度, 此质量浓度为 1.0 %. 倾角对热管的换热特性有很大的影响, 倾角为 45° 左右时, 热管的蒸发换热系数强化率最大. 在此倾角下, 蒸发换热系数最大增加了 20 %, 热管的总热阻大约降低了 15 %. 而最大热流密度的强化效果则随着热管倾角的增大而增强, 最大增加 25 % 左右.

关 键 词: 热管; 纳米流体; 倾角; 强化传热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Thermal performance enhancement of inclined screen heat pipe using nanofluid

MA Qi, LIU Zhen-hua

(School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An experiment was performed to investigate the effect of the inclination angle on thermal performance of screen heat pipe using nanofluid. The study key were the effects of the inclination angle and operating pressure on the heat transfer of both evaporator and condenser as well as the maximum heat flux of the heat pipe. The nanofluid consisted of water and CuO nanoparticles having a mean diameter of 50 nm. The concentrations of nanofluid ranged from 0.5wt % to 2.0wt % and the operational pressures of the heat pipe varied from 7.45 kPa to 19.97 kPa which corresponds to saturated temperature ranged 40 °C to 60 °C. The experimental results show that the effect of the particle mass concentration has a significant influence on the heat pipe thermal resistance. There exists an optimal concentration which corresponds to the minimum value of thermal resistance and this optimal concentration is 1 % for all inclination angles. The inclination angle also has a very significant effect on the heat transfer enhancement effect for the heat pipe using nanofluid. There exists an optimal inclination angle which corresponds to the maximum enhancement of the thermal performance and this angle is. At the pressure of 7.45 kPa, the evaporating heat transfer coefficients can be maximally enhanced about 20 %, and the maximum heat flux averagely increased about 25 %, while the thermal resistance decreased about 15 %, when horizontal tube was replaced by the inclined tube of 45°.

Key words: heat pipe; nanofluid; inclination angle; heat transfer enhancement

收稿日期: 2008-04-16; **修订日期:** 2008-08-12

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目 (04JC14049)

作者简介: 马琦 (1983 -), 男, 河南漯河人, 硕士生, 从事于电子器件散热研究. E-mail: liuzhenh@sjtu.edu.cn

丝网热管是迄今为止在航天领域应用非常广泛的一种热管,其最大优点是可靠性高,并且加工工艺简单。

热管倾角对传热性能有很大影响,而这方面的研究还十分缺少。已有文献中关于倾角对热管传热性能影响的结论截然不同。一种观点认为重力对热管的传热性能影响较大,其中的实验热管包括厘米量级当量直径的铜水热管^[1]、毫米量级当量直径的轴向槽道热管^[2]、LHP^[3];另一种观点认为重力的影响可以忽略,其中的实验热管包括毫米量级当量直径的微型铜水热管^[4]和微槽平板热管^[5]。Sugumar 等人^[6]在对等边三角形和曲边菱形为热管微槽道形状的研究中发现,前者所受的重力影响要比后者明显增加。

近年来,随着纳米科技的飞速发展,研究人员把纳米科技引入到换热领域,产生了良好的效果。1995年,Choi^[7]首次提出了“纳米流体”的概念,即以一定的方式和比例在传统液体如水、醇、油中添加纳米级金属或非金属氧化物粒子,形成一类新的、分布均匀、稳定及高导热的传热冷却工质。

使用纳米流体为热管工质,利用这种功能流体的特殊性能强化热管换热能力是一种全新的技术尝试。国内外对纳米流体应用于热管的研究还很少^[8-15]。这些实验都定性模拟热管运行工况,运行压力不确定,他人无法重复试验。

本研究使用氧化铜纳米流体为工质代替水,在运行压力稳定的条件下,在前期的水平丝网热管试验^[13]的基础上进行不同倾角下轴向圆管型丝网热管换热特性试验,重点对不同运行压力和不同倾角对热管壁温分布特点,蒸发段和冷凝段换热特性及传热极限等工作特性的影响进行一些基础性研究,探讨在不同的倾角的条件下,丝网热管换热特性的变化规律,以期掌握一些丝网热管中纳米流体的基本换热规律,为实际开发应用提供技术支持。

1 实验装置与方法

实验装置如图1所示,丝网热管使用哈尔滨晨怡热管公司的商品成品,热管由紫铜管加工而成,管外径为 $\Phi 8$ mm,壁厚0.6 mm,管内装有两层160目的铜丝网,蒸发段、绝热段、冷凝段长度分别为100 mm,100 mm和150 mm。蒸发段采用电加热器加热,电加热器外采用石棉保温。绝缘段装于特氟龙圆管内,保温效果良好。冷凝段外焊接冷却水套,通过调节冷却水的温度控制热管内蒸

汽压力,使其稳定在设定工况。实验使用的纳米流体为CuO-离子水混合液。使用CuO的理由是:CuO纳米粒子和金属纳米粒子相比价格十分低廉;安全;不会氧化;密度低,易于悬浮。试验过程中,直接把CuO纳米颗粒添加到去离子水中,再利用超声波震荡器震荡6~8 h制备而成。CuO纳米颗粒平均粒径50 nm,颗粒质量浓度 ω 分别为0.5%,1.0%,2.0%。本实验运行压力分别为7.45,12.38,19.97 kPa(对应蒸汽饱和温度分别为40℃,50℃,60℃)。热管选取的倾角的角度分别为0°,30°,45°,60°和90°。在热管的蒸发段、绝热段和冷凝段分别布置4对、1对和3对T型热电偶测量壁温。采用压力传感器测量系统运行压力,取压孔设在丝网热管绝热段中间位置。

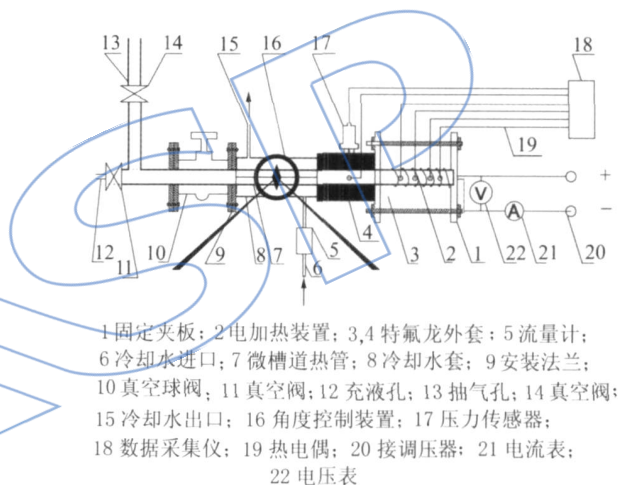


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

热流密度实验误差主要由电流、电压测量误差、实验管尺寸误差以及热管外表面散热损失引起的误差组成。根据标准计算,热流密度误差小于4%。热电偶全部经过标准温度计校准,壁温测量误差为 ± 0.2 K,换热系数误差小于7%。实验中根据压力传感器测量压力值确定蒸汽饱和温度,并与绝热段热电偶测量值比较,两者相差最大0.2 K。

2 实验结果

2.1 纳米流体浓度对热管总热阻的影响

前期完成的水平热管-纳米流体换热特性研究中,已经发现存在一个使热阻最小的纳米颗粒质量浓度和此浓度在1%左右^[16]。本试验对不同倾角下,纳米颗粒质量浓度对热管换热特性的影响进行了试验研究。图2给出了对于竖管

在 19.97 kPa 的压力下,纳米流体浓度对热管总热阻的影响.图中横坐标为加热功率,纵坐标为热管的总热阻.图中可见,以纳米流体作为工质的热管热阻要比以去离子水为工质的热阻大幅度降低,最高降低 60 %左右.随着纳米颗粒浓度的增加,热管的热阻呈现出先增大后减小的趋势.最佳质量浓度是 1 %.试验说明倾角对纳米流体最佳浓度无影响.

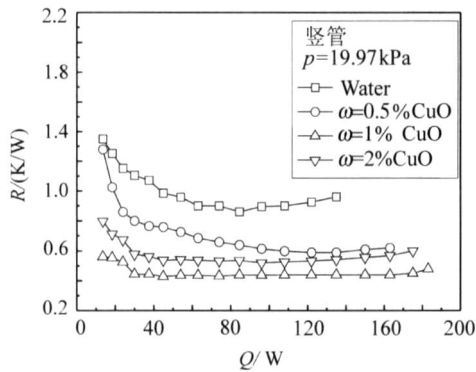


图 2 质量浓度对竖直热管总热阻的影响 ($p = 19.97 \text{ kPa}$)
Fig. 2 Effects of concentrations of nanofluids on the total heat resistance of vertical tube ($p = 19.97 \text{ kPa}$)

2.2 热管壁温的分布

图 3 为热管压力为 7.45 kPa 时,分别以水和纳米流体为工质的丝网热管在不同倾角(水平倾角为 0°)下的热管轴向壁温分布图.由图中可知,在蒸发段,纳米流体热管的壁温比水热管的壁温大幅度降低;而在冷凝段,纳米流体热管的壁温比水热管的壁温明显增加.这说明纳米流体对蒸发换热和冷凝换热都有强化作用.倾角对水和纳米流体热管换热特性的影响近乎相同:在蒸发段,两种热管都是在倾角为 45°时壁温最低;而在冷凝段,倾角对壁温基本无影响.因此,本文只讨论倾角对纳米流体热管的影响.

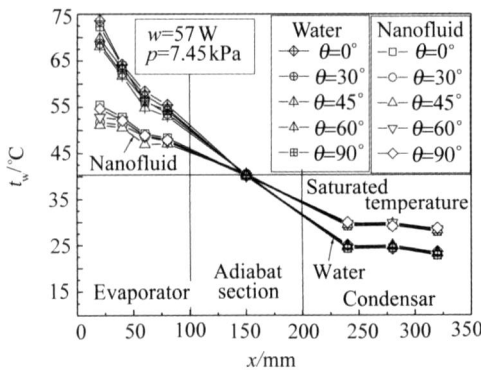


图 3 热管壁温分布图
Fig. 3 Distributions of wall temperatures on heat pipe

2.3 倾角对换热系数及最大热流密度的影响

定压下热管稳态传热过程中,管内蒸汽处于饱和状态.蒸发和凝结段的平均换热系数定义如下:

$$h_e = q / (\overline{T_e} - T_v) \tag{1}$$

$$h_c = q / (T_v - \overline{T_c}) \tag{2}$$

式中 $\overline{T_e}$ 和 $\overline{T_c}$ 分别是蒸发段和冷凝段平均壁温, T_v 是饱和蒸汽温度, q 是热流密度.

图 4 显示了压力为 7.45 kPa,纳米流体质量浓度为 1 %的条件下,倾角对平均蒸发段换热系数的影响.图中表明在倾角小于 45°时,平均蒸发换热系数随着倾角的增大而增加.当倾角等于 45°时达到最大值,和水平管相比,蒸发换热系数大约增加 20 %.随着倾角的进一步增加,换热系数又开始逐渐降低.值得注意的是,在所有非水平管试验数据中,竖管的平均蒸发换热系数都是最低的,几乎与水平管的相同.而最大热流密度则是随着倾角增加而不断增大,最大可提高 23 %.

图 5 显示了倾角对冷凝段换热系数的影响.

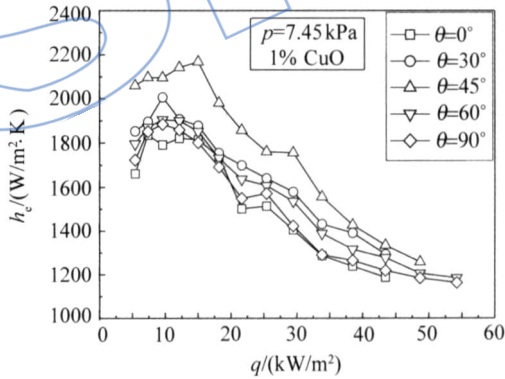


图 4 倾斜角对热管蒸发换热系数的影响

Fig. 4 Effect of inclined angle on evaporating heat transfer

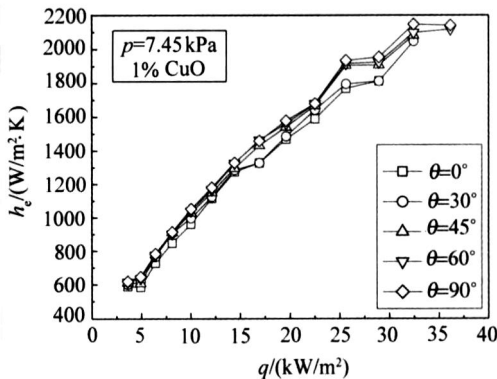


图 5 倾斜角对热管冷凝换热系数的影响

Fig. 5 Effect of inclined angle on condensing heat transfer

倾角对平均冷凝换热系数的影响与其对蒸发换热系数的影响完全不同. 在低热流密度时倾角影响可以忽略. 当热流密度大于 20 kW/m^2 时, 影响逐渐明显, 平均冷凝换热系数随倾角的增大而不断增加, 在竖管时达到最大值, 平均大约提升了 5% 左右, 最大提升了 10% .

2.4 倾角对最大热流密度的影响

图 6 显示了不同压力条件下倾角对最大热流密度的影响. 可以明显看出, 不同压力下, 热流密度都随着倾角增大而不断增加. 随着压力升高, 倾角对最大热流密度的影响程度也略有增加. $p = 7.45\text{ kPa}$ 时, 竖管的最大热流密度大约比水平管的增加了 23% , 而 $p = 19.97\text{ kPa}$ 时, 竖管的最大热流密度大约比水平管的增加了 28% .

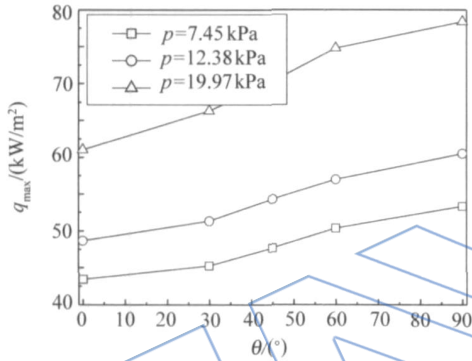


图 6 不同压力下倾角对最大热流密度的影响

Fig.6 Effect of inclined angle on maximum heat flux

2.5 倾角对热管总热阻的影响

本研究中定义热管的总热阻为蒸发热阻和冷凝热阻之和

$$R = (\overline{T_e} - \overline{T_c}) / Q \tag{3}$$

式中 $\overline{T_e}$ 和 $\overline{T_c}$ 分别是蒸发段和冷凝段平均壁温, Q 是热负荷.

图 7 为 7.45 kPa 压力下, 1% 浓度纳米流体在不同倾角下的热管总热阻实验曲线. 图中表明, 倾斜管的热阻比水平管的热阻平均减少 $10\% \sim 15\%$. 而且随着倾角的不断增大, 热管的总热阻呈现先减小后增加的趋势, 在倾角为 45° 时达到最小值, 其总热阻约为水平热管的 85% . 丝网热管倾角对热阻的影响是显著的.

丝网热管倾角对换热特性的影响非常复杂, 从现有的换热特性试验结果还很难推测其换热机理. 我们提出一些粗糙的推测以求抛砖引玉. 随着热管倾角增加, 工质受到重力作用在液芯中的轴向流速加快, 液膜变薄而强化了蒸发段换热. 另一方面, 随着倾角增加, 增发段液膜的周向分布变得

不均匀, 这又降低了液膜换热. 两种作用相重叠, 产生一个最佳倾角.

最大热流密度取决于热管的传热极限, 水平丝网热管的传热极限是毛细极限, 随着热管倾角的增大, 重力承担了一部分工质回流的动力, 从而增大了毛细极限, 因此在竖直状态时传热极限最大.

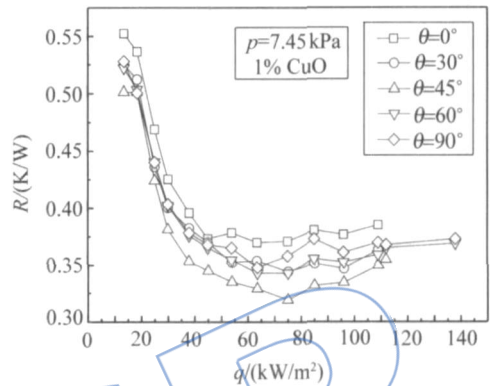


图 7 倾斜角度对热管总热阻的影响 ($p = 7.45\text{ kPa}$)

Fig.7 Effect of inclined angle on heat resistance ($p = 7.45\text{ kPa}$)

3 结 论

- 1) 对所有倾角, 当纳米流体质量浓度为 1% 时热阻达到最小值, 纳米流体的换热强化效果最好.
- 2) 倾角较小时蒸发段换热系数随倾角的增加而增加, 当倾角超过 45° 后蒸发换热系数随着倾角的增加而减小, 在 45° 时取得最大值, 比水平管增加 20% 左右.
- 3) 冷凝段换热系数受倾角的影响较小, 在低热流密度时倾角影响可以忽略; 在高热流密度时, 冷凝换热系数随倾角的增大而不断缓慢增加, 竖管时的冷凝换热系数约增加 10% .
- 4) 最大热流密度随倾角的增加而增加, 竖管时的最大热流密度约增加 25% .
- 5) 热管总热阻随着倾角的增加而降低, 当倾角超过 45° 后热阻随着倾角的增加而增加, 在 45° 时取得最小值, 其总热阻约为水平热管的 85% .

参考文献:

[1] Said S A, Aksah B A. Experimental performance of a heat pipe [J]. Int Comm. Heat Mass Transfer, 1999, 26(5): 679-684.

[2] 张利红, 梁惊涛. 液氮温区小型轴向槽道热管的实验研究 [J]. 真空与低温, 2003, 9(3): 163-166.

ZHANG Lihong, LIANG Jingtao. Experimental studies of

- the smallaxially grooved heat pipe working at the liquid nitrogen temperature range [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2003, 9(3): 163-166. (in Chinese)
- [3] 张红星, 林贵平, 曹剑峰, 等. 回路热管性能的地面实验研究[J]. *宇航学报*, 2003, 24(5): 468-472, 483.
ZHANG Hongxing, LIN Guiping, CAO Jianfeng, et al. Ground-experimental study on the performance of loop heat pipes[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(5): 468-472, 483. (in Chinese)
- [4] Moon S H, Hwang G. Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon [J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, 44: 315-321.
- [5] 范春利, 曲伟, 杨立, 等. 微槽平板热管传热性能的实验研究[J]. *海军工程大学学报*, 2004, 16(2): 1-4, 11.
FAN Chunli, QU Wei, YANG Li, et al. Experimental study on thermal performance of flat miniature heat pipe [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2004, 16(2): 1-4, 11. (in Chinese)
- [6] Sugumar D, Tio K K. Thermal analysis of inclined micro heat pipes[J]. *Int. J. Heat of Transfer*, 2005, 48: 2407-2419.
- [7] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. *ASME FED*, 1995, 231: 99-105.
- [8] Murshed S M S, Leong K C, Yang C. Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids[J]. *Int. J. Thermal Sciences*, 2005, 44: 367-373.
- [9] 李强, 宣益民. 铜-水纳米流体流动与对流换热特性[J]. *中国科学(E辑)*, 2002, 132(3): 331-337.
LI Qiang, XUAN Yimin. Fluid flow and heat transfer properties of Cu-water nanofluids[J]. *Science in China (Series E)*, 2002, 132(3): 331-337. (in Chinese)
- [10] Bang I C, Chang S H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nanofluids from a plain surface in a pool [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48: 2407-2419.
- [11] 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 Junhong, GU Jianming, LIU Hui, et al. Experimental study of heat pipe of nanometer particles [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, 26(3): 268-271. (in Chinese)
- [12] 彭玉辉, 黄素逸, 黄锬剑. 热管中添加纳米颗粒[J]. *化工学报*, 2004, 11: 1768-1772.
PENG Yuhui, HUANG Suyi, HUANG Kunjian. Experimental study on thermosiphon by adding nanoparticles to working fluid[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 11: 1768-1772. (in Chinese)
- [13] Tsai C Y, Yang H Y. Effect of nanofluid concentration on heat pipe thermal performance [J]. *ASME Transactions*, 2005, 2: 1432-1439.
- [14] Tsai C Y, Chien H T, Ding P P. Effect of structural character of gold nano-particles in nanofluid on heat pipe thermal performance [J]. *Materials Letters*, 2004, 58: 1461-1465.
- [15] Xue H S, Fan J R. The interface effect of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100: 1-6.
- [16] 舒涛, 刘振华. 纳米流体在水平圆管型丝网热管换热强化中的应用[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(10): 1795-1799.
SU Tao, LIU Zhenhua. Heat transfer performance enhancement of horizontal screen heat pipe using nanofluid [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(10): 1795-1799. (in Chinese)