

文章编号: 1000-8055(2008)10-1795-05

纳米流体在圆管型丝网热管换热强化中的应用

舒 涛, 刘振华

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 对纳米流体强化水平放置的丝网热管换热特性进行了实验研究. 实验工质为水基 CuO 纳米流体, 颗粒平均粒径 50 nm, 质量分数为 0.5%~2.0%. 实验在定压下进行, 压力为 7.45~19.97 kPa. 结果显示, 纳米流体替代去离子水后, 热管换热性能大幅度提高. 蒸发段换热系数提高了 170%~410%. 运行压力对热管换热特性有明显影响. 压力越小, 热管换热的强化越显著. 热管换热特性随纳米流体质量分数的增加而提高, 到达一定值后开始随之下降, 最佳质量分数在 1.0% 左右.

关 键 词: 纳米流体; 热管; 强化传热; 丝网

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Application of nanofluid in thermal performance enhancement of horizontal screen heat pipe

SHU Tao, LIU Zhen-hua

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

Abstract: The heat transfer characteristic of horizontal screen heat pipe using nanofluid was studied experimentally. The nanofluid consists of water and CuO nanoparticles having a mean diameter of 50 nm, the mass concentration of nanofluid ranges from 0.5% to 2.0%, and the operational pressures of the heat pipe varies from 7.45 kPa to 19.97 kPa. The experimental results show that the effect of the particle concentration on both evaporating and condensing heat transfer coefficients and the maximum heat flux is very significant. At the pressure of 19.97 kPa, the evaporating heat transfer coefficient rises from 170% to 410%. The operational pressure yields very significant effect on the heat transfer enhancement for the heat pipe. The lower operational pressure indicates more significant thermal performance enhancement of the heat pipe. The heat transfer characteristic improves with the rise of mass concentration, and then drops after reaching a certain value, while the optimal mass concentration is 1%.

Key words: nanofluid; heat pipe; heat transfer enhancement; screen

丝网热管是在航天领域应用十分广泛的一种热管, 其最大优点是可靠性高, 毛细力强, 并且加工制造工艺简单.

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^[1] 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. 近年来, 对纳米流体的研究主要集中在导热系数^[2], 强制对流^[3-4] 和沸腾换热特性方面^[5-7].

热管是一种高效换热装置, 在热能系统中有

收稿日期: 2007-09-28; 修订日期: 2007-12-27

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目 (04JC14049)

作者简介: 舒涛 (1983 -), 男, 山西太原人, 硕士生, 从事于电子器件散热研究.

广泛应用.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^[8-10].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.

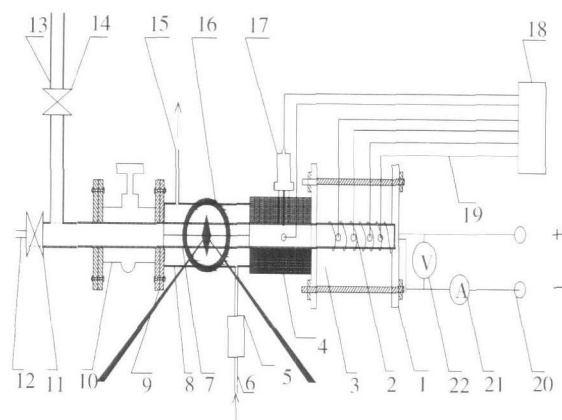
本文使用氧化铜纳米流体为工质代替水,在压力稳定的条件下进行水平放置的圆管型丝网热管换热特性试验,重点对不同运行压力和纳米粒子质量分数对热管蒸发段沸腾换热特性、冷凝段凝结换热特性、壁温分布特点及传热极限等工作特性的影响进行一些基础性研究.探讨纳米粒子悬浮液在轴向丝网热管中实用可能性.以期掌握一些基本换热规律,为实际开发应用提供技术支持.

1 实验装置与方法

实验装置如图1所示.丝网热管由哈尔滨晨怡热管公司提供商品成品,采用紫铜管加工而成,管外径为 $\phi 10$ 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100,100,150 mm.蒸发段采用电加热器加热,电加热器外采用石棉保温.绝缘段装于特氟龙园管内,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.

实验用纳米流体为CuO纳米流体.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,纳米流体中不添加任何扩散剂.CuO纳米颗粒平均粒径50 nm,颗粒质量分数 ω 分别为0.5%,1.0%,2.0%.本实验中的运行压力分别为7.45,12.38,19.97 kPa(对应饱和温度分别为40 °C,50 °C和60 °C).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.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.

热流密度实验误差主要由电流、电压测量误差、实验管几何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 ± 0.1 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查表确定蒸汽温度,并与绝热段热电偶测量值比较,两者相差最大0.2 °C



1 固定夹板; 2 电加热装置; 3,4 特氟龙外套; 5 流量计; 6 冷却水进口; 7 微槽道热管; 8 冷却水套; 9 安装法兰; 10 真空球阀; 11,14 真空阀; 12 充液孔; 13 抽气孔; 15 冷却水出口; 16 角度控制装置; 17 压力传感器; 18 数据采集仪; 19 热电偶; 20 接调压器; 21 电流表; 22 电压表

图1 实验装置图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

试验结束后,停止热管工作,一周后重新启动热管进行重复试验.试验结果表明热管工作特性未发生改变.其原因在于,纳米颗粒悬浮液经过长时间的静止放置,颗粒会有沉降现象,但热管重新工作后,纳米颗粒本身的热运动以及悬浮液中产生的气泡使得沉降的纳米颗粒重新回到悬浮液中,再次形成均匀的纳米流体换热工质,从而对热管的工作性能基本没有影响.

2 实验结果

2.1 热管壁温分布比较

图2中(a),(b)分别是运行压力 p 为19.97 kPa时普通热管(工质为去离子水)和强化热管(工质为纳米流体)壁温分布曲线.由图可知,在相同的压力和热流密度下,强化热管蒸发段平均壁温比普通热管明显降低,而冷凝段平均壁温比普通热管明显升高.故纳米流体对热管的蒸发段和冷凝段换热特性都有显著改善.

2.2 纳米流体质量分数对换热系数的影响

图3和图4给出了运行压力为19.97 kPa时,不同纳米流体质量分数对蒸发段和冷凝段换热系数的影响.从图3中可以看出,相同压力下,蒸发段纳米流体换热系数相对于水大幅度增加,平均增加180%左右,最大增400%.在纳米流体质量分数较小时,换热系数随质量分数的增大逐渐增加.当质量分数增大到1.0%左右后,换热特性开始有下降趋势.这说明存在一个最佳颗粒质

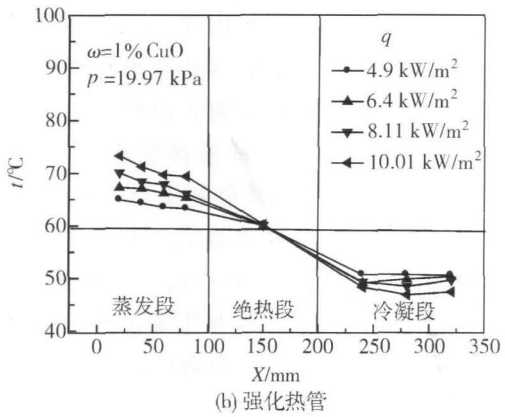
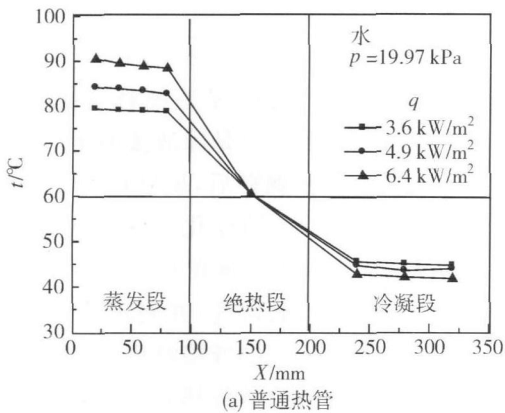


图 2 热管壁温分布

Fig. 2 Distribution of temperatures on heat pipe

量分数. 本实验中, 最佳颗粒质量分数约为 1.0 %.

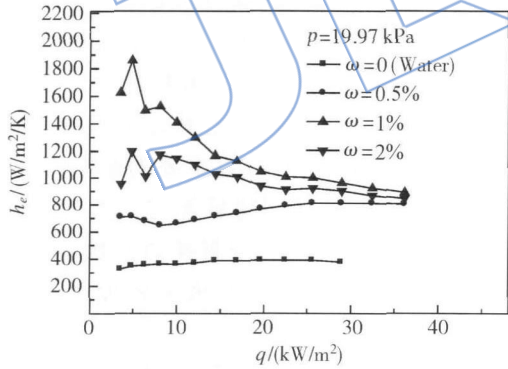


图 3 纳米流体质量分数对蒸发段换热系数的影响

Fig. 3 Effects of concentrations of nanofluids on the heat transfer coefficient in evaporator

从图 4 中可以看出, 相同压力下, 冷凝段纳米流体的冷凝换热强化特性与蒸发换热强化特性基本相似. 冷凝段换热系数相对于水大幅度增加, 增加幅度与蒸发段基本相当. 最佳颗粒质量分数也是 1.0 %.

2.3 运行压力对蒸发段换热系数的影响

图 5 给出了纳米流体质量分数为 1.0 %, 压

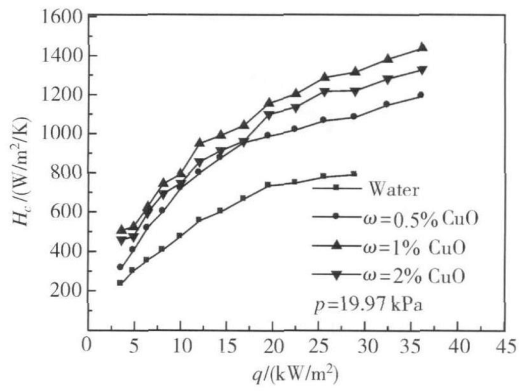


图 4 纳米流体质量分数对冷凝段换热系数的影响

Fig. 4 Effects of concentrations of nano-fluid on the heat transfer coefficient in condenser

力对蒸发段换热系数强化率的影响. 纵轴标是纳米流体的换热系数与水的换热系数之比值. 由图可知, 压力越小, 纳米流体对沸腾换热系数的强化作用越显著. 但在低热流密度下压力越大, 则换热系数越大. 换热系数最大提高了 170 %~410 %.

在冷凝段, 压力对冷凝换热系数强化率的影响定性上与图 5 十分相似, 不再详述.

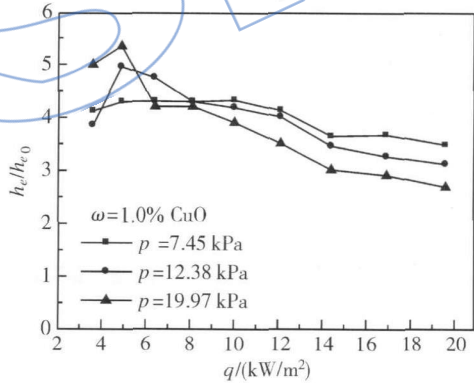


图 5 压力对蒸发段换热系数强化率的影响

Fig. 5 Effects of pressures on the heat transfer coefficient enhancement

2.4 运行压力对最大热流密度的影响

图 6 给出了压力和纳米流体质量分数对最大热流密度 q_{max} 的影响. 纵坐标是纳米流体的 q_{max} 与水的 $q_{max,0}$ 之比值. 实验结果表明, 随着质量分数的增大, q_{max} 强化率逐渐增大; 但当质量分数增加到 1.0 % 后, q_{max} 强化率变化很小, 并有减弱趋势. q_{max} 强化效果与压力也有一定对应关系. 压力越低, 强化效果越大. 采用纳米流体后, q_{max} 最大可以提高 35 %.

2.5 纳米流体质量分数对热管总热阻的影响

图 7 给出了运行压力 $p = 7.45 \text{ kPa}$ 时, 不同

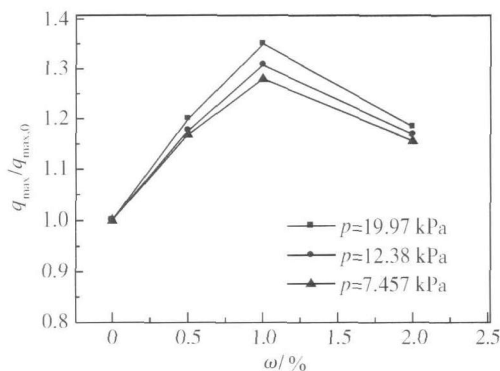


图 6 质量分数对最大热流密度强化率的影响

Fig. 6 Effects of pressures on the maximum heat flux enhancement

纳米流体质量分数对热管总热阻的影响. 纵坐标是总热阻, 横坐标是加热功率. 从图中可以看出, 相同压力下, 纳米流体为工质时的热管总热阻相对于水为工质的热管总热阻大幅度下降, 平均减小为原来的 45 %. 从图可见, 本实验中, 存在着一个最佳纳米颗粒质量分数和该值约为 1.0 %. 随着加热功率的增加, 纳米流体质量分数对热管总热阻降低率的影响逐渐减小.

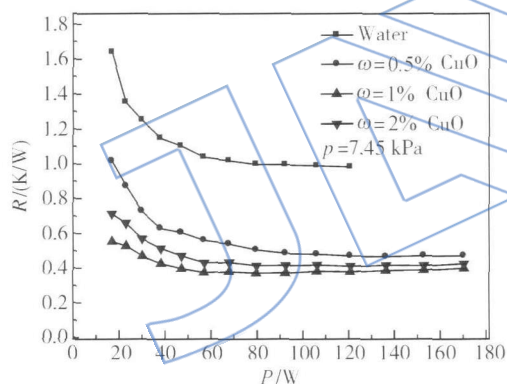
图 7 质量分数对热管总热阻的影响 ($p = 19.97 \text{ kPa}$)

Fig. 7 Effects of concentrations of nanofluids on the total heat resistance

本研究系统中, 蒸发段和冷凝段传热分别属于丝网内薄液膜表面对流蒸发和液膜表面对流冷凝. 纳米流体的导热系数的增加幅度很小, 其对换热强化的贡献不是主要因素. 水中添加纳米颗粒后, 纳米颗粒和纳米颗粒微团在薄液膜中的微扰动是强化液膜换热主因. 另外, 纳米颗粒降低了气液表面张力和固液接触角, 使得液体更容易在丝网内扩展, 这也能强化液膜对流换热, 由于在蒸发段和冷凝段的强化机理相同, 因此, 蒸发段和冷凝段的传热强化率几乎相同.

轴向丝网热管的传热极限是由最大毛细力极

限决定的.

$$P_{\text{cap,max}} = 2\sigma r = 2\sigma \cos \theta R \quad (1)$$

式中 σ 是气液表面张力, r 是毛细管当量半径, R 是丝网内气液界面半径, θ 是固液接触角.

工质中加入纳米颗粒后, R 可认为不变化. σ 降低 10 % 左右^[11]. 而 θ 的变化比较明显. 作者之一曾对水基氧化铜纳米流体在紫铜传热表面的池内沸腾特性进行过实验研究, 并测定了传热试验后的水-铜, 纳米流体-铜固液接触角. 水-铜平均固液接触角是 55° . 纳米流体传热试验后, 铜表面上有一层松散的颗粒层, 此时平均固液接触角是 23° . 这层松散的颗粒层很容易被水冲洗掉, 但依然有大量纳米颗粒镶嵌在铜表面缝隙中, 从而降低了表面粗糙度, 此时的固液接触角是 40° . 假如这些静态固液接触角测量值能够用于热管内的动态流动与传热过程中, 则最大毛细力极限增加 45 % 左右. 考虑到纳米颗粒引起的微槽道流动阻力, 气液界面蒸发、冷凝相变压降也会有所增加, 最大传热极限增加 35 % 是合理的.

3 结 论

1) 使用水基 CuO 纳米流体为工质, 丝网热管蒸发段壁面平均温度明显下降, 而冷凝段壁面平均温度明显上升.

2) 纳米流体质量分数对热管蒸发和冷凝换热特性都有明显影响, 存在一个最佳质量分数. 在各种运行压力下, 最佳质量分数都是 1.0 %.

3) 热管运行压力对蒸发和冷凝换热系数强化率以及最大热流密度有着重要的影响. 压力越小, 纳米流体的强化作用越显著. 在 19.97 kPa 压力下, 纳米流体的蒸发和冷凝换热系数相对于水平平均强化 180 % 左右. 最大热流密度强化 35 % 左右.

4) 使用纳米流体为工质后, 热管总热阻大幅度下降, 在 7.45 kPa 压力下平均减小为原来的 45 %. 纳米流体是一种适合在水平轴向丝网热管中使用的强化传热工质.

参考文献:

- [1] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. ASME FED, 1995, 231: 99-105.
- [2] 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.
- [3] 李强, 宣益民. 纳米流体热导率的测量[J]. 化工学报, 2003, 54 (1): 42-46.

- LI Qiang, XUAN YiMin. Measurements of thermal conductivity of nanofluid[J]. Journey of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54 (1): 42-46. (in Chinese)
- [4] 李强,宣益民. 铜-水纳米流体与对流换热特性[J]. 中国科学: E 辑, 2002, 32 (3): 331-337.
- LI Qiang, XUAN YiMin. The convection character of heat transfer and flow of Cu-Water nanofluid[J]. Science in China (Series E), 2002, 32 (3): 331-337. (in Chinese)
- [5] Das S K, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, 46: 851-862.
- [6] 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.
- [7] WEN Dongsheng, DING Yulong. Experimental investigation to the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids[J]. Journal of Nanoparticles Research, 2005, 7: 265-275.
- [8] Tsai C Y, Yang H Y. Effect of nanofluid concentration on heat pipe thermal performance [J]. ASME Transactions, 2005, 2: 1432-1439.
- [9] 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.
- [10] XUE Huaisheng, FAN Jianren. 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.
- [11] LIU Zhenhua, LIAO Liang. Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heated surface during pool boiling [J]. J. Shanghai Jiaotong University, 2007, 41 (3): 352-356.