

文章编号: 1000-8055(2008)08-1409-04

碳纳米管悬浮液强化重力型平板 热管性能的实验

赵杰, 熊建国, 刘振华

(上海交通大学 机械工程与动力学院, 上海 200240)

摘 要: 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-多壁碳纳米管(CNT)组成的纳米悬浮液为工质, 在不同运行压力 and 不同悬浮液质量浓度下对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. 研究证明: 以水-多壁碳纳米管组成的纳米悬浮液可以明显地强化重力型平板热管蒸发器的换热特性. 沸腾换热系数强化率和 CHF 强化率随压力降低而大幅度增加. 悬浮液质量浓度对沸腾换热系数和 CHF 也有重要影响, 在低质量浓度时, 沸腾换热系数和 CHF 随质量浓度增加而缓慢增加. 但是在质量浓度超过2.0%时, 质量浓度的影响基本消失.

关 键 词: 碳纳米管悬浮液; 平板热管; 沸腾换热; 微槽道

中图分类号: TG156

文献标识码: A

Experiment of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a miniature flat heat pipe evaporator with micro grooved surface

ZHAO Jie, XIONG Jian guo, LIU Zhen hua

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

Abstract: Based on miniature flat heat pipe (MFHP) with the micro grooved surface, an experimental study was performed to understand the boiling characteristics and critical heat flux (CHF) of carbon nanotube (CNT) suspensions at different pressures and CNT mass concentrations. The experimental results indicate that, the concentration of CNT suspensions could enhance significantly the boiling heat transfer characteristics of flat heat pipe evaporator, and the heat transfer enhancement of CNT suspensions and CHF enhancement greatly increases with the decline of the test pressure. The concentration of suspensions has great influence on the boiling coefficient and CHF . At the lower concentration, boiling coefficient and CHF will grow slowly with the increase of concentration. But, if the concentration exceeds 2%, the influence of concentration will disappear.

Key words: carbon nanotube (CNT); suspensions; flat heat pipe; boiling; micro grooves

纳米流体(纳米颗粒悬浮液)作为一种新的功能性流体, 具有许多独特的性能, 把纳米技术应用

收稿日期: 2007-07-20; 修订日期: 2007-11-21

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目(04J14049)

作者简介: 赵杰(1982-), 男, 硕士生, 主要研究方向为强化传热计算.

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, 纳米流体在传热传质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], 而碳纳米管悬浮液在热能工程中的应用还是一个十分新颖的课题.

热管是一种高效换热装置, 在热能系统中有广泛应用. 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都着重于液芯材料和传热面. 在这方面已难有大的突破. 使用碳纳米管(CNT)悬浮液为热管工质, 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.

过去对小型平板热管传热面强化的研究较多, 实验研究证实了微槽平板热管具有较好的传热能力. 国内外对纳米流体应用于热管的研究还不多^[6-10]. 而这些实验都定性模拟热管运行工况, 热管运行压力不确定, 实验数据无法重复.

本文使用水基- 碳纳米管悬浮液为工质代替水, 在压力稳定的运行条件下进行热管蒸发器内沸腾换热特性试验, 对不同运行压力和纳米流体质量浓度对微槽道蒸发器内沸腾换热特性的影响进行一些基础性研究. 探讨碳纳米管悬浮液在重力型平板热管中实用可能性, 以期掌握一些基本换热规律, 为实际开发应用提供技术支撑.

1 实验装置和实验方法

本实验所采用的纳米材料为深圳纳米港科技有限公司生产的多壁碳纳米管, 型号 L- CNT- 1020, 线径 10~ 20 nm, 长度 5~ 15 μm , 本研究使用去离子水作为纳米悬浮液的基液. 不加任何表面扩散剂, 不进行酸化处理是本研究的技术关键. 纳米悬浮液仅仅将碳纳米管加入基液中混合而成.

为了实际工程的应用, 在使用新制备的悬浮液进行实验后, 停止一周时间, 然后再次启动实验, 发现实验结果跟第一次几乎相同. 其原因在于, 无论在首次还是以后的实验前, 碳纳米管基本都沉降在蒸发段底部. 在热管加热工作后, 相变换热产生的气泡使得沉降的碳纳米管迅速回到悬浮液中, 迅速形成均匀的悬浮液工质.

实验装置如图 1 所示. 实验传热体及热管的微槽道平板蒸发器结构简图如图 2 所示. 传热体为一竖直铜柱体, 上部尺寸缩小, 做成一凸型的正方体, 上表面开微槽道作为强化传热面, 微槽道宽 0.5 mm, 深 0.8 mm. 竖立的紫铜板壁与传热面连接密封组成平板热管的蒸发腔, 蒸发腔高 60

mm. 在蒸发腔上部有水冷式冷凝器对产生的蒸汽进行冷凝. 碳纳米管悬浮液工质从充液装置里面灌注, 充液率为蒸发腔的 50%. 根据前人研究, 最佳充液量在 40% ~ 60%, 在此范围之内, 充液量对换热特性基本无影响.

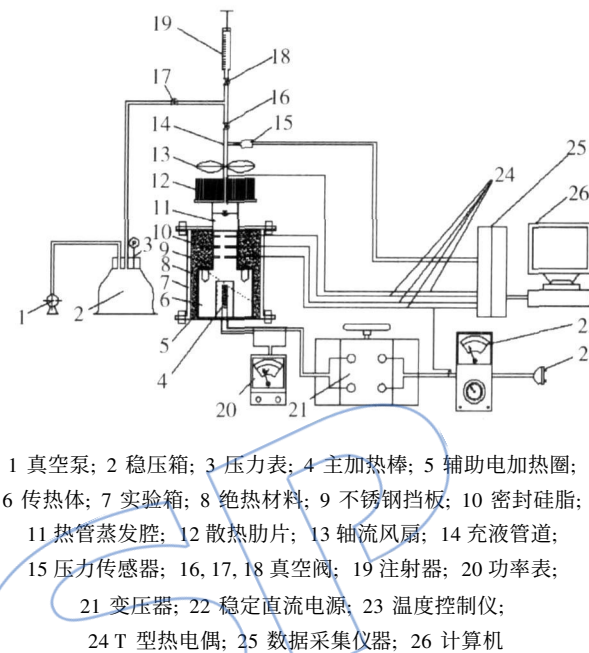


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

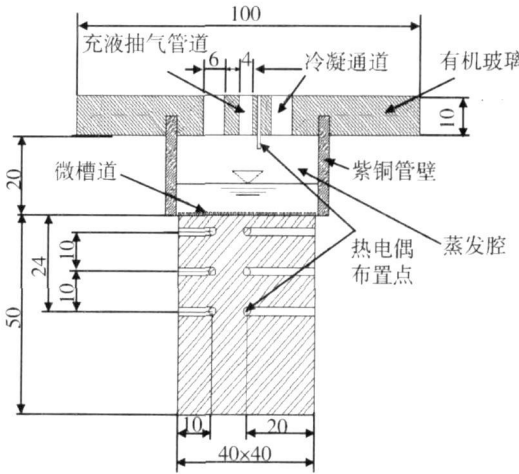


图 2 蒸发器结构测试简图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic configuration of evaporator
(Unit: mm)

竖立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片密封. 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 mm, 热电偶垂直间距离 10 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 100 kPa, 20.4 kPa 和 7.45 kPa 三个稳定压力下进行的. 实验时, 首先设定实验压力, 确定一个主加热器功率, 然后调节转子流量计调节冷却水流量来冷却蒸汽, 使得实验压力保持为设定压力. 传热面表面温度和热流密度由水平方向插入铜柱上凸部, 到达中心垂线以及离边缘 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. 本实验中, 加热体内垂直方向传热符合一维导热特性. 热电偶读数由数值采集系统处理后输入计算机, 即时显示传热面表面温度和热流密度. 在实验中, 当热流密度接近临界热通量时, 控制壁面热流密度以 5% 的速率增加, 当壁面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 1% 的速率缓慢增加壁面热流密度直到再次出现沸腾烧毁危机, 以最新一次稳定状态时的热流密度作为临界热流密度.

本实验针对平板热管蒸发器内的沸腾换热特性进行研究, 所需实验数据是传热面平均温度, 蒸汽饱和温度和壁面热流密度. 换热系数由以上 3 个基本数据换算得出. 平均壁面热流密度和平均壁温由 6 根热电偶的 6 个测量值按一维导热换算得出, 饱和蒸汽温度由插入热管腔体的热电偶测出. 热电偶测量值通过 Agilent 34970A 数据采集仪进行采集, 并用计算机进行数据处理.

本实验误差有热电偶校正误差、热电偶间距相对误差、铜柱内导热率计算误差、测量截断误差和仪器误差. 热电偶最大校正误差为 0.2 K, 热电偶间距最大相对误差为 1% 左右, 导热率计算误差 2%, 测量截断误差为 1% 左右, 仪器误差 0.5% 左右. 换算得到热流密度的最大测量相对误差为 9%, 换热系数误差有 12%.

2 实验结果和分析

图 3(a), (b) 和 (c) 分别为在运行压力 p 等于 100 kPa, 20.4 kPa 和 7.2 kPa 下, 碳纳米管悬浮液质量浓度 ω 变化时的换热系数和 $h \sim q$ 实验曲线. 图中实线是用于光滑面上池内沸腾换热特性 Kutateladze 计算式的计算值. 实验表明: 在大气压条件下, 微槽道强化表面对于水的沸腾换热有很好的换热强化效果, 换热系数大约可增加 40% 到 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.

悬浮液质量浓度对沸腾换热有很大的影响, 在一定的压力下, 随着悬浮液质量浓度增加, 其换热系数同水 ($\omega=0$) 相比逐渐提高, 且在 ω 为 2.0% 时沸腾换热系数提高最大. 但是当其质量浓度超过 2.0% 后其换热特性不再强化, 反而略有恶化趋势.

图 4 显示了压力对换热系数强化率的影响. 压力对换热强化有十分明显的影响, 压力越低, 强化效果越显著. 在最佳质量浓度条件下, 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 120% 左右.

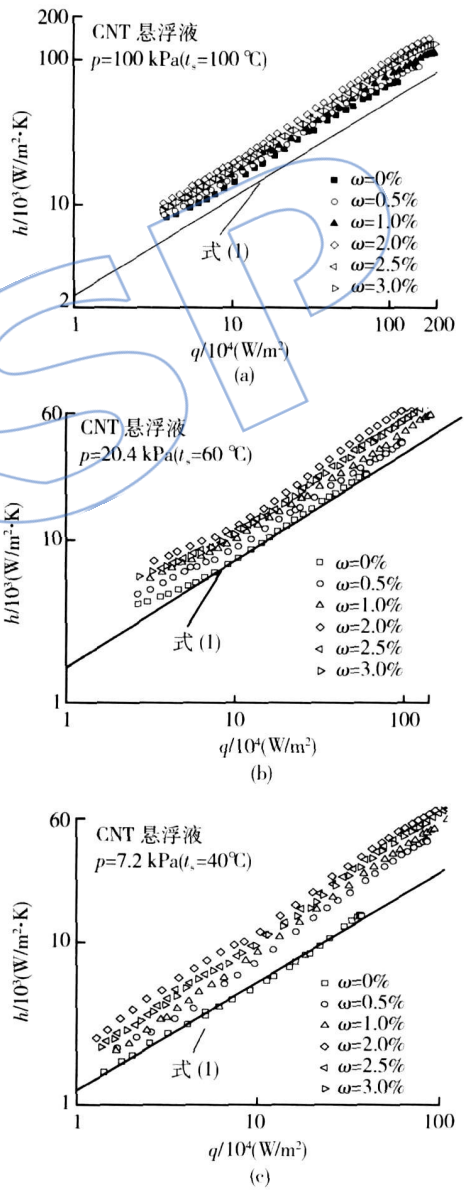


图 3 碳纳米管悬浮液质量浓度对沸腾换热特性的影响

Fig. 3 Boiling heat transfer of SWNT suspension under different pressures

图 5 显示了碳纳米管悬浮液质量浓度和压力对 CHF 强化率的影响. $q_{\max}$ 是不同质量浓度条件

下的碳纳米管悬浮液的 CHF , $q_{\max}$, 0 是饱和水的 CHF . 实验结果显示在悬浮液质量浓度较低时, CHF 随着颗粒质量浓度增加而增加. 但在颗粒质量浓度到达 2.0% 后, CHF 则不再增加, 达到一种饱和和稳定状态. 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, 悬浮液的 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 CHF 最大提高了 270% 左右. 低压下换热特性的强化效果非常显著.

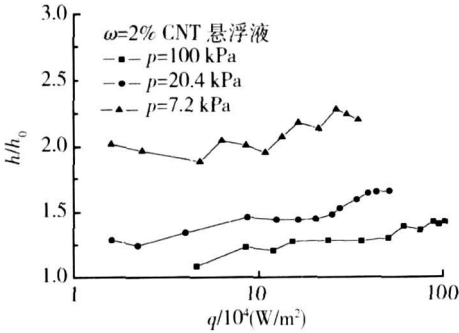


图 4 最佳质量浓度时压力对沸腾换热系数强化率的影响
Fig. 4 Effect of pressure on heat transfer coefficient for SWNT suspension with concentration of 2.0%

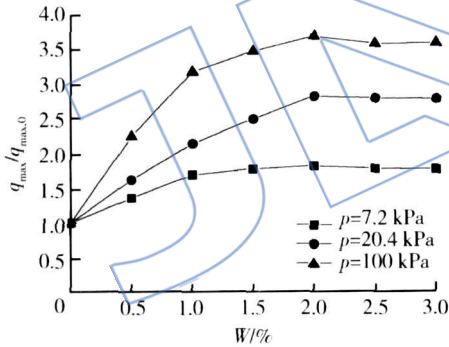


图 5 悬浮液质量浓度对临界热流密度的影响
Fig 5 Effect of concentration of CNT suspensions on CHF at different pressures

3 结 论

1) 多壁碳纳米管悬浮液质量浓度对重力型平板热管蒸发器的沸腾换热系数和 CHF 都有明显的影响, 在低压条件下, 悬浮液能够显著强化沸腾换热系数和 CHF , 存在一个最佳质量浓度. 当质量浓度较低时, 随着悬浮液质量浓度的增加, 沸腾换热系数和 CHF 都逐渐增大. 而在质量浓度超过最佳质量浓度后, 沸腾换热系数逐渐减小, 而 CHF 不再变化. 在所有的实验压力条件下, 最佳质量浓度都是 2.0%.

2) 压力对多壁碳纳米管悬浮液的沸腾换热系数和 CHF 都有明显的影响. 压力越低, 与水相比, 碳纳米管悬浮液对沸腾换热系数和 CHF 的强化效果越好. 在压力为 7.2 kPa 的时候, 换热系数最大增加 120%, CHF 增加 270% 左右. 如果换算成平板热管的功率, 其最大散热功耗可达到 130 W/cm².

3) 以碳纳米管悬浮液作为工质, 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. 以碳纳米管悬浮液组成的纳米流体是一种十分有希望的强化热管换热性能的新型工质.

参考文献:

[1] Xuan Y M, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 2000, 21: 58-64.
[2] Xuan Y M, Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids [J]. ASME J. Heat Transfer, 2003, 125: 151-155.
[3] Das S K, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2003, 46: 851-862.
[4] Bang I C, Chang S H. 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: 2407-2419.
[5] Wen D S, Ding Y L. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based alumina nanofluids [J]. J. Nanoparticles Research, 2005, 7: 265-275.
[6] 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)
[7] 彭玉辉, 黄素逸, 黄锟剑. 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)
[8] Xue H S, Fan J R. The interface effect of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a two phase closed thermosiphon [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100: 1-9.
[9] Wei W C, Tsai S H, Yang S Y. Effect of nanofluid concentration on heat pipe thermal performance [R]. ASME Transactions, 2005, 2: 1432-1439.
[10] Tsai C Y, Chien H T, Ding P P. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance [J]. Materials Letters, 2004, 58: 1461-1465.