

纳米颗粒强化热虹吸管传热特性的实验研究

彭玉辉¹, 黄素逸¹, 黄锐剑²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖南 武汉 430074;

2. 湖南省高效热交换技术及设备重点实验室, 湖北 长沙 410000)

摘要: 随着纳米技术的飞速发展, 研究者逐渐把这一高新技术应用于热能动力领域。提出了在热虹吸管里面添加纳米颗粒。从理论和实验研究了这种热虹吸管蒸发段的工作特性, 结果表明, 与普通热管相比较, 这种新式热管具有很好的启动特性, 低的管壁温度, 换热系数提高了 47%~96%, 轴相热流率提高了 7.6%~15%, 其换热性能随纳米颗粒粒径的减小而提高, 随纳米颗粒加入量有所增加, 当超过一定量时换热性能反而降低了。这种新的方法简单而且容易应用于工业技术中。

关键词: 纳米流体; 纳米颗粒; 强化传热; 热虹吸管

中图分类号: TK124 文献标识码: A

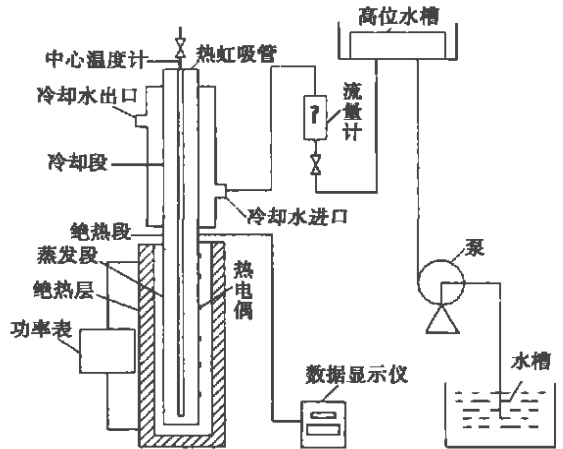


图 1 热虹吸管性能测试

1 引言

近年来, 随着纳米技术的飞速发展, 已有研究者把这一新技术应用于热能动力这一传统领域, 即把金属或金属纳米粉体分散到水、醇、油等传统换热介质中, 制备成均匀、稳定和高效热的新型换热介质。Lee 和 Wang 等人分别测试了纳米 SiC 粉、Al₂O₃ 粉、Cu 粉以及 TiO₂ 粉加入水、醇或机油中而制备成的悬浮液的导热系数^[1~3]。实验结果表明, 纳米粉体悬浮液的导热系数较不添加纳米颗粒流体有显著提高。同时, 由于纳米材料的小尺寸效应, 其行为接近于液体分子, 不会产生磨损或堵塞管路等不良结果。因此, 与液体中添加毫米或微米级粒子相比, 纳米流体更适于实际应用。

本文作者把纳米悬浮液加入两相闭式热虹吸管中, 经过长期反复的实验, 研究了该强化热管在蒸发段的轴相热流率、换热系数及管壁温度等方面的特性。

2 实验研究

2.1 实验材料

实验所采用的纳米材料为浙江舟山明日纳米材料有限公司所提供。

2.2 实验装置

测试装置如图 2 所示。

2.3 实验方法

试验管为铜水(纳米流体)热虹吸管。长 800 mm, 内径为 10 mm, 壁厚为 1 mm, 热虹吸管蒸发段长 450 mm, 绝热段长 50 mm, 冷凝段长 300 mm。通过稳压器, 由一个 250 W 的电加热袋供给热管蒸发段的热量, 冷凝段焊有水夹套, 用冷却水吸收热量。热虹吸管传输的热量按冷却水带走的热量为准计算的。为了保证冷却水流量稳定, 采用带溢流环 2 500 mm 高的高位水槽经转子流量计供给冷却水, 进出水温用 0.1 级精密温度计测量。热虹吸管的管壁温度均采用热电偶测量: 蒸发段管壁温度由 4 对镍铬—镍铜热电偶测量, 绝热段由一对镍铬—镍铜热电

收稿日期: 2004-06-28; 修订日期: 2004-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(G200026303)

作者简介: 彭玉辉(1977-)男, 湖南邵阳人, 武汉华中科技大学硕士研究生

偶测量。热虹吸管的顶部布置一对镍铬—镍铜热电偶, 目的是为了检验用蒸汽排气是否完全。

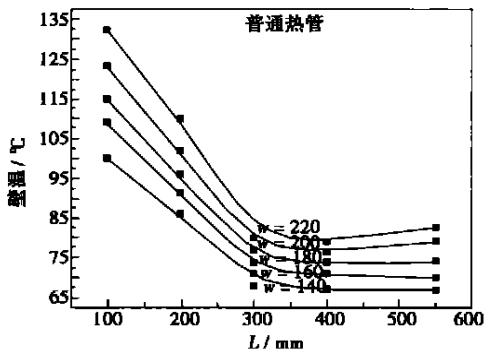


图 2 普通热管的管壁温度

3 实验结果和分析

3.1 管壁温度的比较

图 2 和图 3 为普通管与强化管蒸发段的壁温分布曲线。由图可明显的看出, 这两根热管的管壁温度分布曲线基本相似。但是, 在输入功率相同的情况下, 热管管壁的每一个相同点的温度相比较, 强化热管比普通热管的壁温低 3~10 °C, 强化管蒸发段的平均壁温比普通管蒸发段的平均壁温低 6~8 °C。在传输相同功率的情况下, 强化管蒸发段的壁温比普通虹吸管的低, 这对延长热管的工作寿命是非常有好处的。试验中, 强化热管热管表面温度由环境温度 12.8 °C 升高到热管稳定运行温度时, 所用时间约为 2 min, 而普通热管的表面温度由环境温度 12.8 °C 升高到热管稳定运行温度时, 所用时间约为 10 min。可见强化热管启动性能好, 对热源温度响应快。

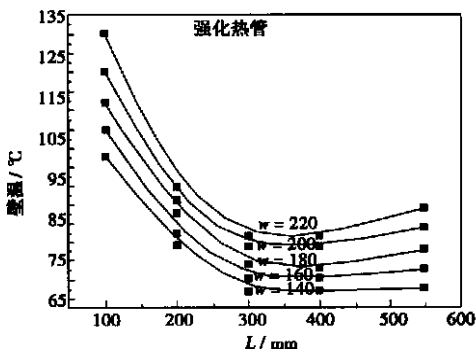


图 3 强化热管的管壁温度

3.2 加纳米颗粒对热虹吸管换热特性的影响

图 4~图 6 为热虹吸管加纳米颗粒后与普通热管的传热性能比较。从图 4 可知, 强化热管比普通热管的轴相热流率提高了 7.6%~15%, 普通热管在第一个点时的热流率比较小, 这说明在加热功率的工况下, 该热管的热流密度较小, 不能提供足够的热量使工作液体达到核态沸腾, 液池内工作液体所处状态为自然对流。然后, 随着输入功率的增加其变化曲线跟强化热管一样变化比较平稳。图 5 为改变输入功率时两热管蒸发段平均换热系数的比较。可以看出, 强化热管比普通热管的换热系数有了明显的提高, 其增加幅度为 47%~96%, 并且随着输入功率的增加换热系数增加的幅度也增大。图 6 为热管工作温度对换热系数的影响, 从该图可以看出, 在相同输入功率的情况下, 强化热管的工作温度低于普通热管, 而且换热系数相对于普通热管有显著的提高, 这进一步说明了加入纳米颗粒后强化了热虹吸管内部换热能力。

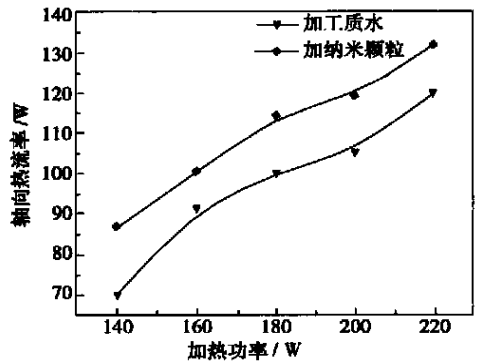


图 4 加纳米颗粒对轴向热流率的影响

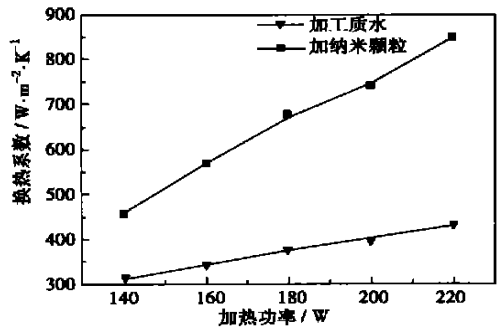


图 5 加纳米颗粒对换热系数的影响

3.3 纳米颗粒加入量对换热系数的影响

图 7 反应了纳米颗粒加入量对换热系数的影响。从图可知, 热管的换热系数开始随着纳米颗粒

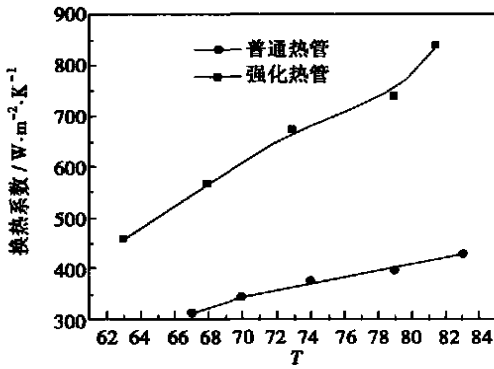


图 6 工作温度对换热系数的影响

加入量的增大而增大,但是当纳米颗粒加入量的体积分额超过一定量的时候,热管的换热系数反而下降了。这是由于当纳米颗粒加入量增大时,纳米悬浮液的导热系数也会随着增大。同时,由于纳米颗粒份额的增加也会产生两方面的负面影响:一方面使颗粒容易团聚,布朗运动减弱;另一方面使纳米流体的流动粘性增大^[4],管壁热边界层增厚,从而使热阻增大。当后两方面的影响大于导热影响时,热管的换热系数便会降低。

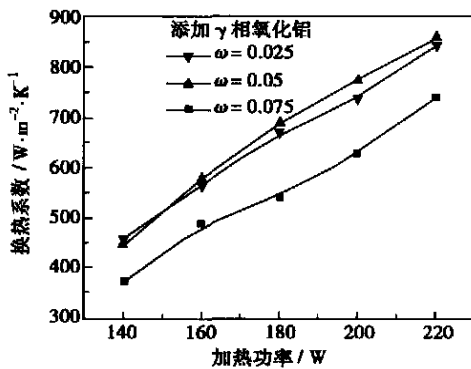


图 7 纳米加入量对换热系数的影响

3.4 纳米颗粒粒径对换热系数的影响

图 8 为纳米颗粒粒径对热管的换热系数的影响。从该图可以明显的看出,热管的换热系数随纳米颗粒粒径的减小而增大。这是由于纳米颗粒粒径减小,比表面急剧增大,纳米颗粒表面能随之增大,纳米颗粒因而具有更大的活性而使布朗运动增强,这样就会促使气泡更快的脱离加热壁面,对管壁边界层的扰动增大而强化传热。为了验证纳米颗粒对热管中传热的影响,我们还特意地进行了热管中加

入粒径为 5 μm 的铜颗粒的实验。结果表明,加入微米颗粒后,换热系数比加纳米颗粒的急剧下降。这进一步说明了正是纳米材料所具有的这种固有的特性才使水热管的传热性能得以强化。

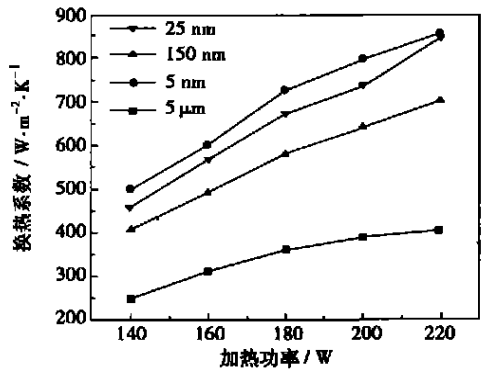


图 8 纳米颗粒粒径对换热系数的影响

4 纳米颗粒加入强化沸腾传热的初步机理分析

从实验结果分析可以得出:加纳米颗粒后水热管的换热性能得到了明显的改善。不少文献探讨过两相封闭式热虹吸管内部换热机理^[5-6],但是从未涉及过对热管中添加纳米颗粒的情况。作者初步分析认为:热管工作时,当在较低的热流密度下,加热面与液体之间的热交换是自然对流换热,加热面无气泡产生,此时由于纳米颗粒的加入使热管工质导热能力大幅度提高,从而使换热得以强化。当热流密度达到旺盛沸腾条件时,蒸发段内部进行的是核态沸腾,此时,加热壁面上气泡的产生和脱离过程是影响沸腾换热的决定因素。而气泡在加热壁上产生后对气泡的成长过程起决定作用的是气泡附近液体的蒸发。也就是说,加热面上液体沸腾的主要热阻来自微层液膜。纳米颗粒的加入,形成了均匀的纳米流体,纳米流体的导热系数大幅度的提高,从而降低了微层液膜的热阻。同时,因为纳米材料的比表面积很大而具有大的比表面能,当工作流体加热时,纳米颗粒的布朗运动速度很大,既增加了气泡的脱离频率,又使纳米颗粒在惯性力和布朗运动的共同作用下频频撞击加热壁面。这样,在蒸发段既加强了液体的扰动,直接破坏了热边界层,又增加了有效蒸发面积,从而使沸腾换热得以强化。

在冷凝段,纳米颗粒也会随着蒸汽一起进入冷凝段,从而对冷凝段液膜产生影响。一方面,液膜内

由于含有纳米颗粒, 导热系数提高, 减小了液膜的热阻。另一方面, 纳米颗粒的惯性力和布朗运动增加了冷凝段液膜的扰动, 破坏了冷凝段的热边界层, 从而强化了冷凝段的传热。综上可知, 在加入纳米颗粒后, 由于蒸发段和冷凝段的传热都得以加强, 所以两相闭式热虹吸管的传热比不加纳米颗粒的热管有了很大的提高。

5 结 论

(1) 提出了一种新的提高热传递的方法—在以水为工作液体的热虹吸管中加入一定数量的纳米颗粒, 并且实验研究了加热段的热传递特性, 这种新的热管能够简单、方便地应用于工程技术中。

(2) 与普通热管相比较, 加热段的换热系数提高了 47%~96%, 轴相热流率提高了 7.6%~15%, 具有很好的启动特性, 且管壁温度降低了 6~8 °C。

(3) 热虹吸管的换热系数随纳米颗粒粒径的减小而增大, 开始阶段随纳米颗粒加入量的增加有所增加, 当超过一定份额时热虹吸管换热性能减弱。

致谢: 本文在实验过程中得到了湖南省高效热交换技术及设备重点实验室 颜新民实验员的大力协助和指导, 谨在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] CHOI U S. Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles [A]. In **SIGNER D A, WANG H P eds. Developments and Application of Non-Newtonian Flow** [C]. New York: [s. n.], 1995. 99-105.
- [2] LEES, CHOI U S, LIS, *et al.* Measuring the thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [J]. **J Heat Transfer**, 1999, **121**: 280-289.
- [3] WANG X, XU X, CHOI U S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture [J]. **J Thermophys Heat Transfer**, 1999, **13**: 474-480.
- [4] 李 强, 宣益民, 姜 军, 等. 航天用传热强化工质导热系数和粘度的实验研究[J]. 宇航学报, 2002, **23**(6): 73-76.
- [5] 庄 骏, 张 红. 热管技术及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [6] 黄素逸, 魏保太. 汽液两相流与沸腾传热[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.

(渠 源 编 辑)

(上接第 137 页)

- [7] TORIKOSHI K, EBISU T. Evaporation and condensation heat transfer characteristics of R134a, R32, and a mixture of R32/R134a inside a tube - part I [J]. **Transactions ASHRAE**, 1993, **99**: 90-96.
- [8] YAN Y Y, LIN T F. Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in small pipe [J]. **Int J Heat Mass Transfer**, 1999, **42**(4), 697-708.
- [9] LIU X. Condensing and evaporating heat transfer and pressure drop characteristics of HFC-134a and HCFC-22 [J]. **Journal of Heat Transfer**, 1997, **119**(1): 158-163.
- [10] UDDIN M, PATRICK J, NEWLIN A. Variation of local condensation heat transfer coefficient for R134a in helically coiled tubes [A]. **Winter Annual Meeting of ASME** [C]. New York: ASME, 1994. 1-10.
- [11] ZAKI M, LIU Y Z, DONG Z F, *et al.* Condensation heat transfer of R-134a in helical pipe [A]. **ASME Heat Transfer Division Publication** [C]. New York: ASME, 1997. HTD-351:141-148.
- [12] KANG H J, LIN C X, EBADIAN M A. Condensation heat transfer of

R134a flowing inside helical pipe [J]. **Int J of Heat and Mass**, 2000, **43**(14): 2553-2564.

- [13] HAN J T, LIN C X, EBADIAN M A. Experimental investigation of condensation heat transfer of refrigerant R-134a in helical pipe [A]. **ASME Heat Transfer Division Publication** [C]. New York: ASME, 2000. HTD-366-4: 95-101.
- [14] BRIGGS E, YONG E H. Modified wilson plot techniques for obtaining heat transfer correlations for shell and tube heat exchangers [J]. **Chem Eng Progr Symp Ser**, 1969, **5**: 35-45.
- [15] SHAH R K. Assessment of modified wilson plot techniques for obtaining heat exchanger design data, heat transfer [A]. **ASME. Proceedings of the International Heat Transfer Conference** [C]. New York: Hemisphere Publication Corp, 1990. 51-56.
- [16] 柳重堪. 信号处理的数学方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 1992.
- [17] MOFFAT R J. Describing uncertainties in experimental results [J]. **Experimental Thermal Fluid Science**, 1988, **1**(1): 3-7.

(渠 源 编 辑)

tics data are of major theoretical significance and have a high practical value in engineering applications so far as the design modification and operation of such systems as refrigeration air conditioning units and heat pumps, etc. are concerned. The authors have carried out an experimental study regarding the condensation heat exchange and pressure-drop characteristics of the refrigerant R-134a in a spiral ring-shaped channel. As a result, experimental data, such as average condensation heat exchange factor and pressure-drop characteristics were obtained, which were compared with the test results of R-134a as reported in available literature concerning its condensation heat exchange in straight pipes and spiral pipes. The experimental data thus obtained can serve as a reference during the development, design and application of new types of spiral tube heat exchangers. **Key words:** condensation heat exchange, spiral ring-shaped channel, replacement refrigerant, pressure drop, phase-transition heat exchange

纳米颗粒强化热虹吸管传热特性的实验研究 = **Experimental Study of the Intensified Heat Transfer Characteristics of a Thermosiphon Through the Addition of Nanoparticles** [刊, 汉] / PENG Yu-hui, HUANG Su-yi (Institute of Energy and Power Engineering under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), HUANG Kun-jian (Hunan Provincial Key Laboratory of High-efficiency Heat Exchange Technology and Equipment, Changsha, China, Post Code: 410000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 138 ~ 141

With the rapid development of nanometer technology some research workers have gradually applied this high and new technology to the traditional realm of thermal energy and power. The authors have from a theoretical and experimental viewpoint studied the working characteristics of the evaporation section of a thermosiphon, to which nanoparticles have been added. The results of the study indicate that as compared with conventional heat pipes this type of innovative heat pipes features excellent start-up characteristics and low pipe-wall temperature with heat exchange factor being enhanced by 47% ~ 96% and axial heat flux rate by 7.6% ~ 15%. In addition, their heat exchange performance will increase with the decrease in nanoparticle diameter, and will slightly increase with the addition of nanoparticles. However, when the added nanoparticles have exceeded a certain amount, the heat exchange performance will on the contrary experience a degradation. This innovative method can be applied in industrial units easily and simply. **Key words:** nanofluid, nanoparticles, intensified heat transfer, thermosiphon

垂直布置 B30 波槽管管外膜状凝结的实验研究 = **Experimental Investigation of the Tube-outside Film-shaped Condensation in a Vertically Installed B30 Corrugated Tube** [刊, 汉] / ZHAO Ri Ge-tu, HUANG Wei-tang, LIU Feng (Institute of Power & Nuclear Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 142 ~ 144, 157

Under the condition of condensation at a pressure slightly higher than the atmospheric one an experimental investigation was conducted of the tube-outside film-shaped condensation heat exchange in a vertically installed corrugated tube. The results of the investigation indicate that the vertically installed corrugated tube enjoys definite heat-transfer intensification effectiveness. Within the range of the experiments the overall heat transfer factor of an optimum corrugated tube is higher than that of a bare tube by 27% ~ 43%, while its resistance factor is about 2.94 ~ 3.48 times that of a bare tube. The heat transfer intensification effectiveness of a vertically installed tube is inferior to that of a horizontally installed one. Through a regressive analysis of the test data an experimental correlation formula was obtained for the following items of the vertical tube: the tube-inside convection heat exchange, the tube-outside condensation heat exchange and the resistance factor. **Key words:** vertical, intensified heat transfer, corrugated tube, film-shaped condensation