

文章编号: 100028055(2010) 062127 206

倾斜微槽道热管中纳米流体的应用

鲍 然, 刘振华
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为了研究热管倾斜角度和压力对热管蒸发段、冷凝段传热系数以及最大换热功率的影响, 对使用水基 CuO 纳米流体为工质的倾斜微槽道热管强化换热特性进行实验研究. 实验装置主要由带角度调节功能的微槽道热管和加热、冷却系统组成. 实验结果发现, 用水基纳米流体替代去离子水为工质时, 热管整体换热特性得到明显增强, 蒸发段、冷凝段传热系数以及最大功率都能大幅度提高, 总热阻明显降低. 倾斜水热管的蒸发段和冷凝段传热系数比水平水热管的有大幅提高, 但最大功率变化不大. 而倾斜纳米流体热管不但蒸发段和冷凝段传热系数比水平纳米流体热管有大幅提高, 而且最大功率更有接近一倍的增加. 对水和纳米流体两种工质, 对应于最佳换热特性的倾斜角都是 75°. 因此, 纳米流体对倾斜热管有良好的应用前景.

关 键 词: 热管; 纳米流体; 微槽道; 倾角; 强化传热
中图分类号: TK124 文献标识码: A

Application of nanofluids in an inclined axial miniature grooved heat pipe

BAO Ran, LIU Zhenhua

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

Abstract: An experiment was performed to investigate the thermal performance of inclined miniature grooved heat pipe using water-based CuO nanofluids. The study focused on the effects of the inclination angle and the operating pressure on the heat transfers of both the evaporator and condenser as well as the maximum heat flux of the heat pipe. The nanofluid consists of pure water and CuO nanoparticles with a mean diameter of 50nm. The mass concentration of the nanofluid was fixed at an optimal value of 1.0%. The experimental results show that the inclination angle has a very significant effect on both the total heat resistance and maximal power of the heat pipe using water, and only a slight effect on those of the heat pipe using nanofluids. There exists an optimal inclination angle which corresponds to the best thermal performance, and this angle is 75° for both heat pipes using water and nanofluids. For the inclined heat pipe using nanofluids, not only the evaporation and condensation heat transfer coefficients are greatly increased, but also the maximal power can be almost doubled as compared with those of the heat pipe using water. The present investigation discovers that the thermal performance of an inclined miniature grooved heat pipe can be evidently strengthened by using CuO nanofluids.

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

20 世纪 90 年代以来, 研究人员开始探索将纳米材料技术应用于强化传热领域的技术, 取得了一些成果. 1995 年, Chio^[1] 首次提出了“纳米流体”的概念, 即以一定的方式和比例在液体中添加

纳米级的金属或金属氧化物粒子, 形成一类新的传热冷却工质. 由于其高稳定性、分布均匀和高导热性的特点, 纳米流体在强化换热领域有值得期望的应用前景. 目前, 国内外对纳米流体应用于两相流流动与传热方面主要集中在管内强制单相流动、池内沸腾换热和其基本物性等基础研究上. 近年来, 其实际应用如热管应用的研究已逐步展开^[212].

随着电子产品集成化程度越来越高, 对散热器和传热能力提出了更高的要求, 需要具有高热流量、微尺寸、温度均匀和高稳定性特点的换热方式. 微槽道热管广泛用于电子器件散热和空间飞行器中, 是一种可靠有效的换热技术, 在满足传热性能要求的同时, 流动阻力小, 制造工艺简单. 随着热管应用的愈加广泛, 微型化的程度越来越高, 重力的影响也越来越不可忽视. 已有文献对倾斜热管的研究很少, 而对倾角对热管传热性能影响有两种截然不同的观点, 一种结论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^[13]、毫米量级当量直径的轴向槽道热管^[14]和环形热管(LHP)^[15], 另一种结论认为重力对热管传热性能的影响很小, 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^[16]和微槽道平板热管^[17].

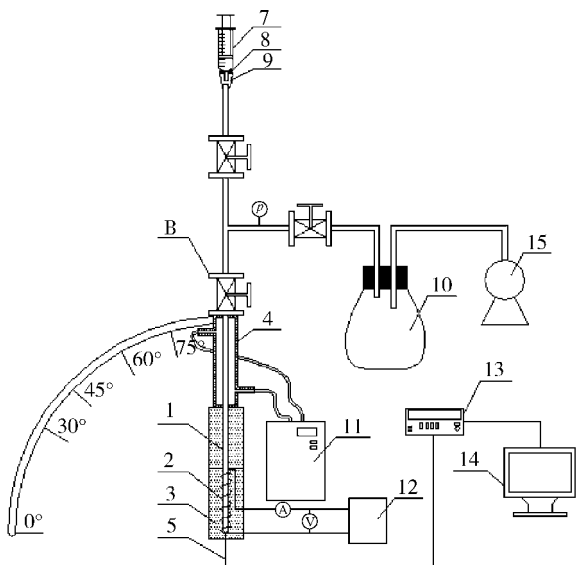
本文在已完成的水平微槽道轴向热管内纳米流体应用的研究基础上^[18], 考察了热管倾斜角度对以纳米流体为工质的微槽道热管换热特性的影响. 重点对不同运行压力 and 不同倾角对热管壁温分布特点、蒸发段和冷凝段换热特性、热管总热阻及最大功率等工作特性的影响进行一些基础性研究, 探讨在不同的倾角的条件下, 微槽道热管换热特性的变化规律. 以期掌握一些微槽道热管中纳米流体的基本换热规律, 为实际开发应用提供技术支持.

1 实验装置和方法

实验所用微槽道热管为哈尔滨晨怡公司所生产的矩形微槽道热管商业成品. 热管材料为紫铜, 管内外径 8 mm, 壁厚 0.6 mm, 圆周方向共有 60 个槽道, 槽道深约 0.3 mm, 宽 0.2 mm, 槽道在内管壁上呈螺旋状旋转. 根据预备实验结果, 充液率(工质容积和蒸发段容积的比)固定在 50%. 实验中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. 以纯水为基液, 添加纳米颗粒后, 用超声波震荡法制备

成纳米颗粒质量浓度不同的纳米流体, 基液中不添加分散剂. 纳米流体的黏性与基液几乎相同, 表面张力相比于基液减小 15% 左右, 且与纳米颗粒的质量浓度几乎无关. 导热系数随纳米颗粒质量浓度的增加而增加, 当颗粒质量浓度为 2% 时, 导热系数增加 8%.

实验装置如图 1 所示. 主要由抽真空装置、充液装置、微槽道热管实验段、加热系统、冷却系统、角度调节系统、数据采集系统和电源系统等组成. 微槽道热管实验段分蒸发段、绝热段和冷凝段三部分, 长度分别为 100, 100 mm 和 150 mm. 蒸发段采用电加热器均匀加热, 由可调交流电源提供电流, 电加热器外部用石棉层保温. 绝热段外包装石棉保温层, 保温效果良好. 冷凝段外焊接冷却水套管, 冷却水由恒温水浴循环提供. 通过改变冷却水的温度控制蒸汽压力, 使其稳定在设定工况. 实验工质通过针筒 7 注射进入实验管, 针筒用真空泥 8 和软橡胶塞 9 固定在连接管上. 在热管的蒸发段、绝热段和冷凝段分别布置 4 对、2 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, 取压孔设在微槽道热管绝热段中间位置. 实验中, 设定的热管运行压力分别为 71.45, 121.38 kPa 和 191.97 kPa (对应饱和温度 40, 50 °C 和 60 °C). 在热管的实验段布置 T 型热电偶测量管壁温度, 热电偶的轴向布置位置如图 2 所示. 蒸发段



1 微槽道热管; 2 电加热丝; 3 绝热保温层; 4 冷却水套管;
5 热电偶; 6 真空阀; 7 注射器; 8 真空泥; 9 橡胶软塞;
10 稳压箱; 11 恒温水浴; 12 可调交流电源; 13 数据采集仪;
14 实验计算机; 15 真空泵

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

和冷凝段上各热电偶测量平均值作为蒸发段和冷凝段平均壁温, 绝热段热电偶测量值为蒸汽饱和温度. 预备实验数据显示热电偶在圆周方向上所测得的温度几乎相等, 误差小于热电偶的校验误差, 可以近似认为壁温与圆周方向无关, 正式实验时热电偶布置点仅处于圆管的一侧.

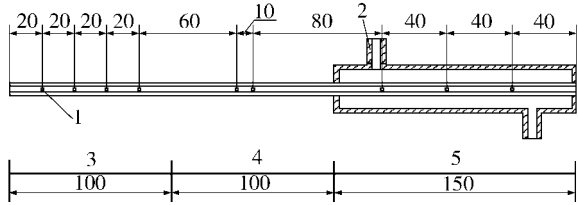


图 2 热电偶布置图

Fig. 2 Schematic diagram of thermocouples layout

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. 根据标准误差计算, 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 e, 传热系数误差小于 7%. 实验中根据压力传感器测量压力值确定蒸汽温度, 并与绝热段热电偶测量值比较, 两者相差最大 0.2 e. 实验中, 蒸汽饱和温度变化范围不超过 0.5 e.

2 实验结果和讨论

2.1 倾斜热管的壁温分布特性

前期完成的水平微槽道热管2CuO 纳米流体换热特性研究中, 已经发现存在一个使热管换热性能达到最佳的纳米颗粒质量浓度, 此质量浓度在 1% 左右^[18]. 本实验在垂直热管条件下, 进行了纳米颗粒质量浓度对热管换热特性影响的实验研究, 发现无论对蒸发段换热特性还是对冷凝段换热特性, 最佳质量浓度也是 1% 左右, 因此, 本文只介绍质量浓度为 1% 纳米流体的实验结果.

图 3 是水热管和纳米流体热管(工质分别为去离子水和 1% 质量浓度 CuO 和水的悬浮液)在运行压力 p_s 为 71.45 kPa, 加热功率 Q 为 80 W, 倾角分别为 0b(水平), 30b, 45b, 60b, 75b 和 90b 时的壁温分布曲线. 可以看出, 在相同运行压力和加热功率工况下, 倾角对两种热管轴向壁温分布都有较大影响, 说明重力对热管传热性能影响很大. 水平情况下, 蒸发段的平均壁温明显比在倾斜热管的情况下要高, 而热管只要有所倾斜, 蒸发段的平均

温度即明显下降, 在 75b 时, 蒸发段平均壁温达到最小. 水平情况下的冷凝段的平均壁温比倾斜热管的情况下更低, 随着倾斜角的增加, 冷凝段的平均温度有所上升, 在 75b 达到最大, 这说明在 75b 倾角时热管蒸发段和冷凝段的换热性能都达到最好.

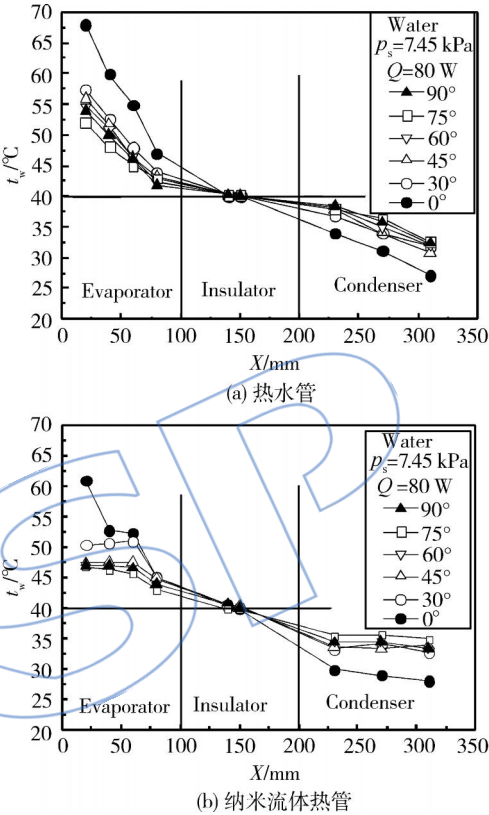


图 3 不同倾角下水热管和纳米流体热管的壁温分布
Fig. 3 Distribution of temperature on heat pipe at different inclination angles

使用纳米流体后, 热管蒸发段壁温明显降低, 冷凝段壁温明显上升, 且分布更平均, 说明加入纳米颗粒后的热管比纯水工质传统热管的换热特性更好. 而且也可以看出, 75b 倾角时, 蒸发段壁温最低. 因此, 纳米流体热管也同样在 75b 倾角时热管的换热性能最佳.

2.2 倾斜角度对蒸发传热系数的影响

图 4 显示了在运行压力 71.45 kPa 时, 倾角对水热管和纳米流体热管蒸发换热特性的影响. 对水热管, 倾角 75b 时的蒸发段传热系数最大, 比水平情况下增加了 70%. 在达到最佳倾角之前, 蒸发段传热系数随着热管倾角的增加而增加, 而到达最佳倾角后, 出现了少许的下降. 值得注意的是, 倾斜热管的最大热流密度没有随倾角发生很大变化, 也就是倾斜热管的蒸发传热系数显著增

加,而最大功率与倾角相关性很小.

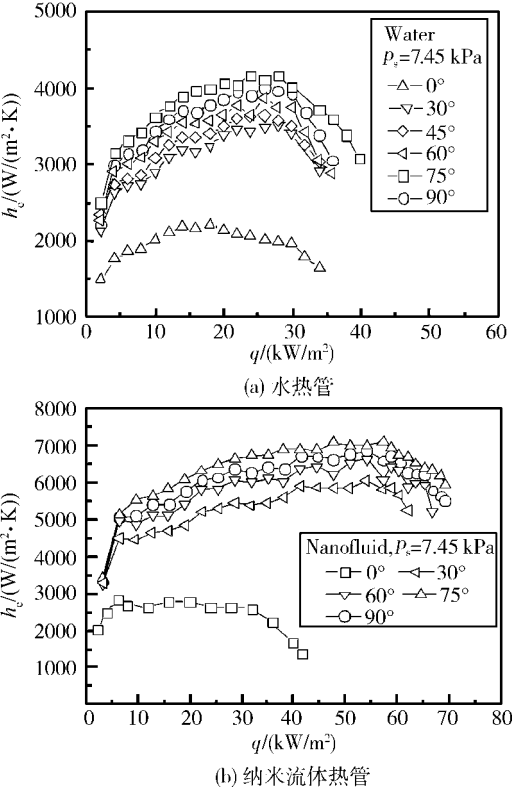


图 4 水热管和纳米流体热管的蒸发换热特性
Fig. 4 Evaporation heat transfer coefficient of inclined heat pipe

使用纳米流体后,热管蒸发传热系数有一个显著强化,总体强化率可达到 60% 以上.特别是热管的最大热流密度得到很大提高,而且最大功率与倾角几乎无关.而热管只要有所倾斜,纳米流体的强化换热作用变得更加显著.相对于倾斜水热管,倾斜纳米流体热管的最大功率可以提高将近一倍.

2.3 倾斜角度对冷凝传热系数的影响

图 5 显示了在运行压力 7.45 kPa 时,倾角对水热管和纳米流体热管冷凝换热特性的影响.可以看出只要有一些倾角,两种热管的冷凝传热系数都有一个飞跃增加.和水平情况相比,倾斜热管的冷凝传热系数可以提高 2~8 倍.水平管的冷凝传热系数随热流密度增加而上升,而倾斜管的传热系数随热流密度增加而逐渐下降.虽然倾角对换热特性影响很小,但可看出 75° 依然是最佳角度.

使用纳米流体后,热管冷凝传热系数同样有显著强化,其强化率要略超过蒸发段强化率.压力 7.45 kPa 时传热系数总体强化率可达到一倍左右.各倾角下的冷凝换热曲线基本重合,显示出纳

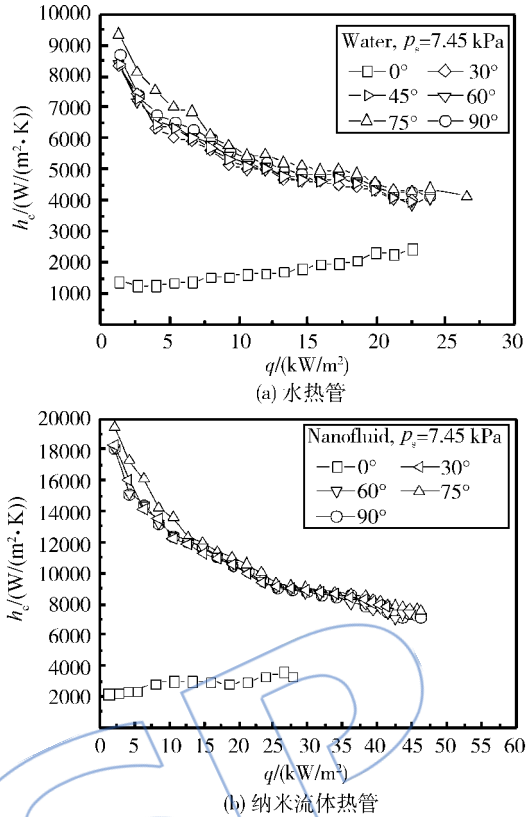


图 5 水热管和纳米流体热管的冷凝换热特性
Fig. 5 Condensation heat transfer coefficient of inclined heat pipe

米流体的强化换热效果要大于重力强化效果.图 5 的数据证明液体中的纳米粒子已随着液体蒸发而被带入蒸汽流中,在冷凝段再随着蒸汽被冷凝而进入冷凝段液膜中,从而强化了冷凝段传热.

从图 4 和图 5 的换热曲线可以确认,倾斜热管内的蒸发段和冷凝段的传热都属于液膜对流换热,没有沸腾出现.当倾斜管壁上的液膜流动属于层流时,蒸发传热系数将随热流密度增加,而冷凝传热系数随热流密度降低.

纳米流体强化换热机理可以解释如下:一是纳米流体有效导热系数的增加;二是纳米颗粒降低了液体气液表面张力和固液接触角,使得液体更容易在微槽中扩展,这也能强化液膜对流换热,同时固液接触角的降低也增强了热管毛细力.这两个原因属于物性变化.第三个原因是部分纳米颗粒沉积在壁面上形成一极薄的颗粒沉积层,从而降低了固液接触角^[18].最后,纳米颗粒在液膜中的布朗运动产生的液体搅拌作用将强化换热,这个原因可以归纳为纳米效应.

存在最佳质量浓度的机理可以做如下解释:质量浓度增加会增加导热系数,降低固液接触角.而降低固液接触角可以使液膜在槽道内更加扩

展,可以增加毛细力. 这些都是正效应. 但质量浓度增加会降低气液表面张力, 增加壁面颗粒沉积层厚度和粗糙度, 从而降低毛细力, 增加流动阻力. 这些都是负效应. 正负效应此长彼消, 存在一个最佳平衡点, 也就是最佳质量浓度.

单纯从重力影响角度考虑, 一般会认为垂直管的换热特性最好. 但过去有限的一些倾斜热管的实验也曾发现垂直管的换热特性并不是最好, 最佳倾角在 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ^{[14][17]}. 这是因为倾斜管内圆周方向液膜厚度不均匀, 液膜内存在周向二次流和气液界面的气液卷积现象都会引起换热强化, 使得热管带有一些倾斜角时传热效果更好. 本研究使用的热管槽道在管壁呈螺旋状排列, 很大程度上消除了圆周方向的传热不均匀因素, 使得最佳倾角接近 90° .

2.4 倾斜角度对热管总热阻的影响

图 6 给出了运行压力为 7.45 kPa 时倾角对两种热管总热阻的影响. 倾角对两种热管的总热阻都有明显影响, 只要热管略作倾斜, 总热阻即可大幅度降低. 对水热管, 不同倾角的总热阻还有一些明显区别, 75° 倾角时热管的总热阻达到最小, 同时倾角对最大功率影响很小. 即增加倾角只能降低热阻, 不能提高最大功率.

对于纳米流体热管, 同样只要热管略作倾斜总热阻即可大幅度降低. 但不同倾角的总热阻几乎相同, 即倾角对纳米流体倾斜热管的总热阻基本无影响. 倾角增加后, 不仅总热阻大幅度降低, 更重要的是最大功率几乎可以提高一倍左右, 其强化换热效果十分显著. 如将水平的水热管加入纳米颗粒, 再略微保持一个小倾角, 总热阻即可下降为原热管的三分之一, 而最大功率可增加一倍.

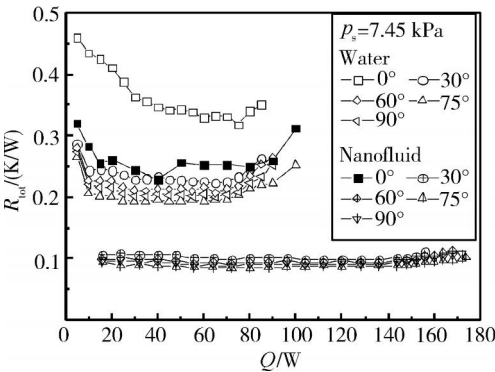


图 6 倾角对热管总热阻的影响
Fig. 6 Effect of heat pipe inclination angle on total heat resistant

2.5 压力对纳米流体热管最大热流密度强化率的影响

图 7 给出了压力对水平和垂直纳米流体热管最大热流密度强化率的影响. 纵坐标是纳米流体热管和水热管的最大热流密度比值, 横坐标是运行压力, 亦即管内工质蒸汽压力. 实验结果表明, 最大热流密度强化效果与压力有一定对应关系, 总体上压力越低强化效果越大. 采用纳米流体后, 水平管的最大热流密度可以最大提高 35% , 而垂直管的最大热流密度可以最大提高接近一倍. 结合图 4 可以发现, 最大热流密度强化率和倾角相关性不大, 但是只要管子有所倾斜, 最大热流密度就可以跃升一倍左右. 这说明在倾斜热管中使用纳米流体强化效果会更佳.

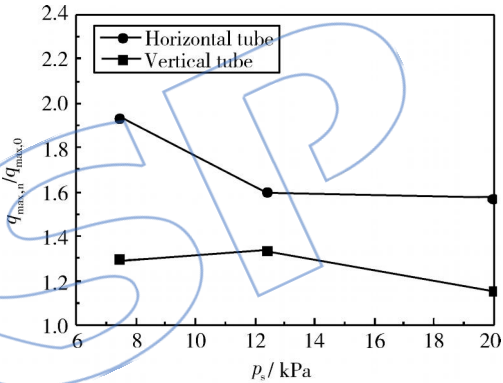


图 7 压力对最大热流密度强化率的影响
Fig. 7 Effect of operational pressure on critical heat flux

本研究进行了重复性实验, 在第一次实验完成一周后, 重新启动热管进行重复实验, 实验结果表明微槽道热管工作特性未发生改变. 其原因在于: 虽然纳米颗粒悬浮液经过长时间的静止放置后颗粒会有沉降现象, 但热管重新工作后纳米颗粒本身的热运动以及悬浮液中浮力使得沉降的纳米颗粒迅速重新回到悬浮液中, 再次形成均匀的纳米流体换热工质, 从而对热管工作性能基本没有影响.

3 结 论

- 1) 倾斜角对水热管的换热特性有明显影响. 随着倾斜角的增大, 蒸发段和冷凝段的传热系数逐渐增大, 并在 75° 时达到最大值, 比水平情况下增加了 $60\%\sim 80\%$ 左右. 但倾斜管的最大热流密度与水平管的相差很小.
- 2) 倾斜角对纳米流体热管的换热特性同样

有明显影响。随着倾斜角的增大,蒸发段和冷凝段的传热系数逐渐增大,并在75 μ s时达到最大值,比水平情况下增加了70%左右。但和水平管相比,热管只要略有倾斜,最大热流密度即可增加近80%左右,而倾角本身大小对最大热流密度影响很小。

3) 使用1%质量浓度的CuO水基纳米流体后,微槽道热管换热能力显著强化,对倾斜热管的换热强化效果更加明显。在同等压力和倾角条件下,纳米流体热管的热阻可以降低到水热管的一半左右,而最大功率可以提高一倍。

4) 压力对纳米流体热管的换热强化能力有明显影响。压力增高后传热系数强化率和最大功率强化率都有所下降。纳米流体热管更适合于低压热管。

参考文献:

- [1] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [J]. ASME FED, 1995, 231: 99210.
- [2] 彭玉辉, 黄素逸, 黄银剑. 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 Engineering, 2004, 11: 1768-1772. (in Chinese)
- [3] 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: 1462-1465.
- [4] Tsai C Y, Yang H Y. Effect of nanofluid concentration on heat pipe thermal performance [J]. ASME Transactions, 2005, 2: 1432-1439.
- [5] 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: 126.
- [6] 商福民, 刘登瀛, 冼海珍, 等. 振荡热管内不同形态纳米颗粒流动及传热特性[J]. 化工学报, 2007, 58(9): 2200-2204.
SHANG Fumin, LIU Dengying, XIAN Haizhen, et al. Flow and heat transfer characteristics of different forms of nanometer particles in oscillating heat pipe [J]. Journal of Chemical Industry Engineering, 2007, 58(9): 2200-2204. (in Chinese)
- [7] 薛怀生, 樊建人, 胡亚才, 等. 碳纳米管悬浮液在重力热管中的沸腾特性[J]. 化工学报, 2006, 57(11): 2562-2568.
XUE Huaisheng, FAN Jianren, HU Yacai, et al. Boiling characteristics of carbon nanotube suspension in gravity-assisted thermosiphon [J]. Journal of Chemical Industry Engineering, 2006, 57(11): 2562-2568. (in Chinese)
- [8] 吕伦春, 刘振华. 底部封闭竖直细管内纳米流体的沸腾特性和临界热通量[J]. 航空动力学报, 2007, 23(6): 892-897.
L B LUNCHUN, LIU ZHENHUA. Critical heat flux of nanofluids boiling in vertical small tubes with closed bottom [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 23(6): 892-897. (in Chinese)
- [9] 赵杰, 熊建国, 刘振华. 碳纳米管悬浮液强化重力型微槽道平板热管性能的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(8): 1409-1412.
ZHAO Jie, XIONG Jianguo, LIU Zhenhua. Experiment of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a miniature flat heat pipe evaporator with micro grooved surface [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1409-1412. (in Chinese)
- [10] 舒涛, 刘振华. 纳米流体在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): 1623-1627.
SHU Tao, LIU Zhenhua. Application of nanofluid in thermal performance enhancement of horizontal screen heat pipe [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1623-1627. (in Chinese)
- [11] Khandekar S, Joshi Y M, Mehta B. Thermal performance of closed two-phase thermosiphon using nanofluid [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47: 659-667.
- [12] Naphon P, Assadamongkol P, Borirak T. Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35: 1312-1319.
- [13] Said S A, Akshah B A. Experimental performance of a heat pipe [J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1999, 26(5): 679-684.
- [14] 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 small axially grooved heat pipe working at the liquid nitrogen temperature range [J]. Vacuum and Cryogenics, 2003, 9(3): 163-166. (in Chinese)
- [15] 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): 462-472, 483.
ZHANG Hongxing, LIN Guipin, CAO Jianfeng, et al. Ground experimental study on the performance of loop heat pipe [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(5): 462-472, 483. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 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): 124, 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): 124, 11. (in Chinese)
- [18] Yang X F, Liu Z H. Heat transfer performance of a horizontal micro grooved heat pipe using CuO nanofluid [J]. J. Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(3): 352-37.