

文章编号: 1674-2869(2016)06-0594-05

# 碳纳米管纳米流体对液冷式CPU换热性能的改善

郑周<sup>1,3</sup>, 叶晓江<sup>1,2\*</sup>, 侯志坚<sup>3</sup>, 张艺雪<sup>1</sup>, 郑星文<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1,3</sup>

1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 深圳职业技术学院机电学院, 广东 深圳 518055

**摘要:** 针对液冷式CPU(central processing unit)散热器散热效果差的问题, 设计了液冷式CPU散热器的换热性能实验系统. 该实验系统使用基液乙二醇-水,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体和多壁碳纳米管(MWCNTs)纳米流体进行换热实验, 采用单变量法对实验条件进行控制. 当加热功率为18.26 W时, 基液乙二醇-水的热阻值为0.859 °C/W, 质量分数0.135%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的热阻值为0.751 °C/W, 质量分数0.135%的多壁碳纳米管纳米流体的热阻值为0.739 °C/W, 质量分数0.32%的MWCNTs纳米流体的热阻值为0.457 °C/W. 结果表明: 在基液中添加纳米粒子能提高基液的换热能力, MWCNTs纳米流体的换热效果随着质量分数的增加而增强.

**关键词:** 碳纳米管流体; 液冷CPU; 换热性能; 热阻

中图分类号: TB383

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.06.015

## Improvement of Heat Transfer Properties of Liquid-Cooled Entral Processing Unit by Nanofluids Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes

ZHENG Zhou<sup>1,3</sup>, YE Xiaojiang<sup>2\*</sup>, HOU Zhijian<sup>3</sup>, ZHANG Yixue<sup>1</sup>, ZHENG Xingwen<sup>1</sup>, CHENG Fei<sup>1,3</sup>

1. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** Aiming at the problem of poor heat dissipation in the liquid-cooled central processing unit(CPU) radiator, we designed the heat transfer performance experiment system in the liquid-cooled CPU radiator, by using propylene glycol-water based fluid, and nanofluids containing alumina and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) to conduct heat transfer experiment, and we optimized the experimental conditions through the single variable method. When the heating power is 18.26 W, the thermal resistance of propylene glycol-water fluid, alumina nanofluids with mass fraction of 0.135%, and MWCNTs nanofluids with mass fraction of 0.135% and 0.32% were 0.859 °C/W, 0.751 °C/W, 0.739 °C/W and 0.457 °C/W, respectively. The results show that the heat transfer capability of the based fluid improves by adding nanoparticles, and the heat transfer effect of MWCNTs nanofluids enhances with the mass fraction increasing.

**Keywords:** MWCNTs nanofluids; liquid-cooled CPU; heat transfer performance; thermal resistance

## 1 引言

液冷式CPU的散热器最早出现于20世纪80

年代末90年代初, 采用的是直径为4 cm的铝制散热片. 从1993年开始, 风扇开始普遍使用在液冷式CPU散热器上. 随着电子技术发展, CPU频率和晶

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 武汉工程大学第七届研究生教育创新基金(CX2015091)

作者简介: 郑周, 硕士研究生. E-mail: 1689806431@qq.com

\*通讯作者: 叶晓江, 博士, 教授. E-mail: xiaojiangye@foxmail.com

体管集成规模上升,CPU的温度也成倍地增长,以往的散热器已远不能满足CPU散热的需要,于是如何提高液冷式CPU散热器的换热性能,成为了研究热点。

在众多的冷却技术中,液冷技术非常实用。自Choi<sup>[1]</sup>等提出纳米流体的概念后,已有研究表明,在液体中添加纳米粒子,可以提高液体的导热系数,增强对流换热<sup>[2-7]</sup>。Masuda<sup>[8]</sup>等发现体积分数4.3%的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数比水提高了30%;李强<sup>[9]</sup>等分别测量了 $\text{Al-H}_2\text{O}$ 纳米流体和 $\text{Cu-H}_2\text{O}$  ( $d_n=20\text{ nm}$ 左右)纳米流体的导热系数,测得体积分数2%的 $\text{Al-H}_2\text{O}$ 纳米流体导热系数比水的导热系数提高了6.3%;而添加体积分数为2%的Cu纳米粒子后其导热系数比水的导热系数提高了23%。郑立国<sup>[10]</sup>测定认为MWCNTs- $\text{H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数比水的导热系数大。其中,使用阿拉伯胶法制得的体积分数3%的MWCNTs- $\text{H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数比水的导热系数增加12.7%;混酸法制得的体积分数3%的MWCNTs- $\text{H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数比水的导热系数增加了7.1%。而且,MWCNTs- $\text{H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数随碳纳米管浓度的增加而增加,随流体温度的升高而增加。

为研究MWCNTs纳米流体换热性能,利用不同质量分数的MWCNTs纳米流体进行CPU散热实验,比较了不同质量分数的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、MWCNTs纳米流体的散热效果,分析了不同种类的纳米粒子对换热效果的影响,其结果为MWCNTs纳米流体在传热与换热系统中的应用提供一定的实验基础。

## 2 实验部分

### 2.1 MWCNTs纳米流体换热性能实验系统

MWCNTs纳米流体换热性能测试实验系统如图1所示,主要由水泵、散热器、模拟CPU(包括保温层、模拟芯片、云母片、绝热层、铜板等)、数据采集仪、管路、电脑、调压器、热电偶等组成。模拟CPU长度为38.6 mm,宽度为27.1 mm。实验液体选用丙二醇-水(PG- $\text{H}_2\text{O}$ ,体积比3:1)为基液的MWCNTs流体,质量分数分别为0.135%、0.32%,质量分数为0.135%、0.32%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体和PG- $\text{H}_2\text{O}$ (体积比3:1)作为实验对照液体。

模拟CPU的加热功率通过调压器调节,测试段共设置了11个T型热电偶,分别布置在加热主板和边缘、水冷头的正面、侧面及进出口处。

### 2.2 实验

#### 2.2.1 PG- $\text{H}_2\text{O}$ 冷却液

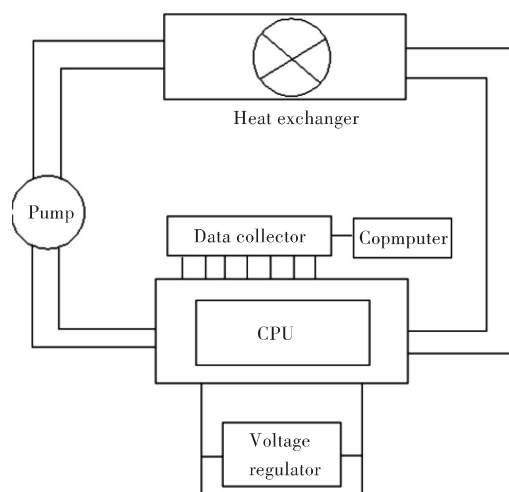


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test system

3:1)作为冷却液,在热流密度为 $1.94\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $31.04\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 下,模拟CPU平均温度的变化状况。从图1中可以看出,模拟CPU的平均温度稳定在 $37\text{ }^\circ\text{C}\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度随着热流密度的升高而升高。热流密度为 $31.04\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时的温降幅度远高于前者,在 $31.04\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 热流密度下,温降幅度为 $43\text{ }^\circ\text{C}$ ;而在 $1.94\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 热流密度下,温降幅度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

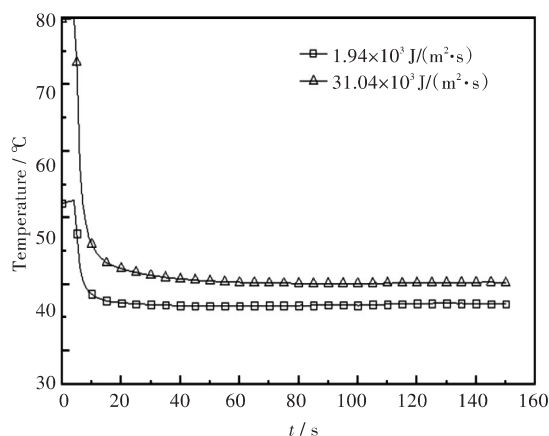


图2 PG- $\text{H}_2\text{O}$ 冷却液平均温度变化曲线

Fig. 2 Mean temperature curves of PG-water coolant liquid

2.2.2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体冷却液 采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体时,不同热流密度下模拟CPU的平均温度变化如图3所示。当模拟CPU平均温度处于稳定状态时,随着质量分数的增加, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体的换热能力有所下降。以热流密度为 $31.04\times 10^3\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时为例,质量分数0.32% $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体温度稳定于 $40.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,比质量分数0.135%的温度高 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。说明 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体质量分数的增加会改变流体的传热性质,导致了纳米流体传热性能的下降。本文制

备纳米流体时采用的颗粒质量分数,计算时再将其转化为体积分数,其转化公式<sup>[11]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{\rho_f \varphi_m}{\rho_d(1 - \varphi_m) + \rho_f \varphi_m} \quad (1)$$

式(1)中,  $\varepsilon$  为纳米流体的体积分数,  $\rho_f$  为纳米流体的密度,  $\rho_d$  为基液密度,  $\varphi_m$  为纳米流体的质量分数.

纳米流体的粘度计算公式<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\mu_f}{\mu_d} = \frac{1}{(1 - \varepsilon)^{2.5}} \quad (2)$$

由此可看出,随着纳米流体质量分数的增加,粘度也随之增加.

Pak<sup>[13]</sup>等也指出,纳米流体的粘度会影响其强化传热效果. MadhusreeKole<sup>[14]</sup>等研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -汽车冷却液纳米流体的粘度与温度和纳米颗粒体积分数之间的关系,结果表明纳米流体的粘度随温度

的升高而减小,随颗粒体积分数的增加而增大.

**2.2.3 MWCNTs 纳米流体冷却液** 如图4所示, MWCNTs 纳米流体作为冷却液时具有极佳的散热效果. 使用质量分数 0.135% MWCNTs 纳米流体时,在热流密度为  $31.04 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下,模拟 CPU 的平衡温度为  $34.3^\circ\text{C}$ ,而对照组质量分数 0.135%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的温度为  $38.6^\circ\text{C}$ , PG- $\text{H}_2\text{O}$  (体积比 3:1) 的温度为  $40.2^\circ\text{C}$ . 在热流密度为  $31.04 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  下,质量分数 0.32% MWCNTs 纳米流体工作时,最高温降可达  $48^\circ\text{C}$ . 而且,在所进行的实验中,随质量浓度的增加, MWCNTs 纳米流体散热效果越明显. 在相同热流密度 ( $17.46 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 下,质量分数为 0.135% 的 MWCNTs 纳米流体的平均温度稳定在  $34.4^\circ\text{C}$ ,而质量分数为 0.32% 的 MWCNTs 纳米流体的温度稳定在  $32.3^\circ\text{C}$ .

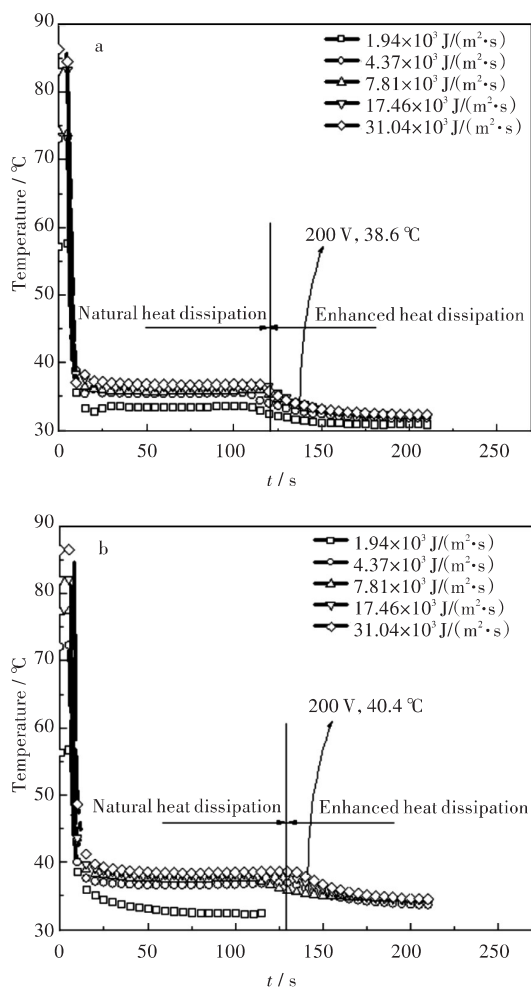


图3 质量分数为(a)0.135%和(b)0.32%的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体冷却液平均温度变化曲线

Fig. 3 Mean temperature curves of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids coolant liquid with mass fraction of (a) 0.135% and (b) 0.32%

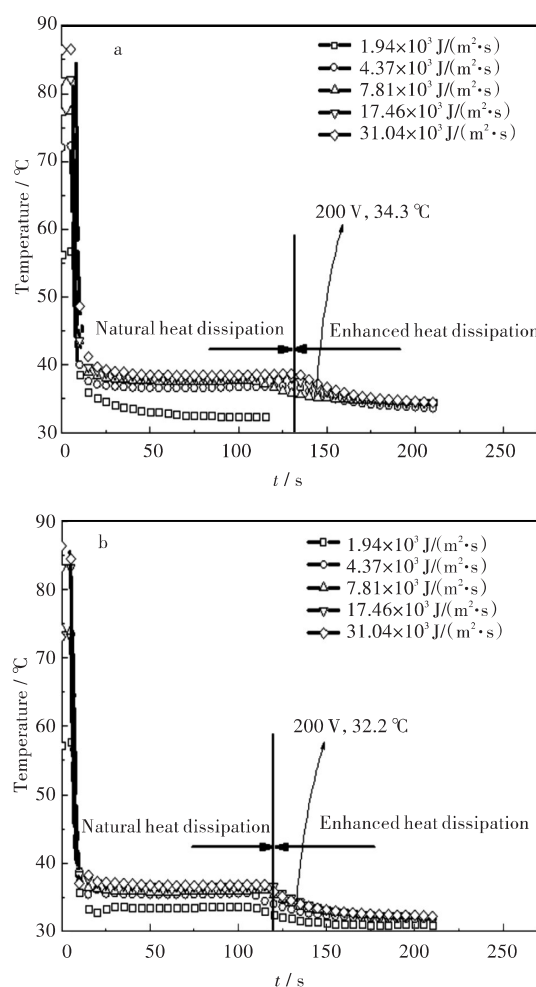


图4 质量分数为(a)0.135%和(b)0.32%的 MWCNTs 纳米流体冷却液平均温度变化曲线

Fig. 4 Mean temperature curves of MWCNTs nanofluids coolant liquid with mass fraction of (a) 0.135% and (b) 0.32%

### 3 结果与讨论

对比图3和图4可知,与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体相比,相同质量分数MWCNTs纳米流体作用下的模拟CPU平均温降幅度更大,达到平衡温度的时间更短.例如,质量分数为0.135%时,在不同热流密度作用下, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的温度稳定在 $35.6\text{ }^\circ\text{C} \sim 38.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,MWCNTs的温度稳定在 $32.3\text{ }^\circ\text{C} \sim 34.3\text{ }^\circ\text{C}$ .在同一热流密度 $[31.04 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 下,MWCNTs的温度稳定为 $34.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,而 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 稳定在 $38.6\text{ }^\circ\text{C}$ .由图5可知,MWCNTs纳米流体的换热性能优于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体.

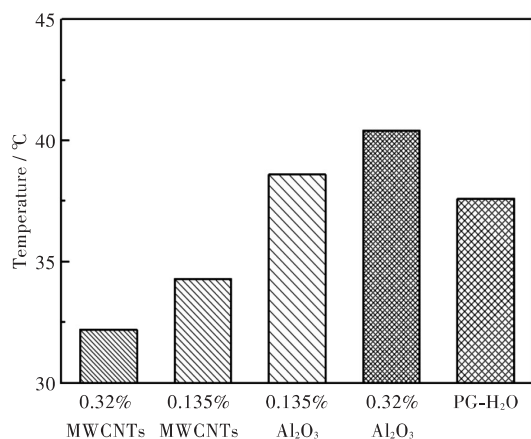


图5 在相同热流密度下5组冷却液的平均温度  
Fig. 5 Mean temperature of five groups of coolant liquid at same heat flux

热阻能够反映阻止热量传递能力的大小,因此在评价换热性能时常使用热阻作为评判指标<sup>[15]</sup>.一般情况下,热阻越小,物质的传热能力越强.散热器热阻计算公式为

$$R = \frac{T_c - T_m}{Q} \quad (3)$$

式(3)中, $T_c$ 为散热器底面最高的温度; $T_m$ 为进出口温度平均值; $Q$ 为改为热源产生的热量; $R$ 为计算出散热器的总热阻.

根据公式(3)计算出的结果如图6所示.

当模拟CPU功率为32.47 W时,载入MWCNTs(质量分数0.32%)纳米流体的散热器热阻值为 $0.269\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,是测试液体中热阻值最小的;与常用的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米粒子相比,MWCNTs纳米粒子的换热能力更强.当功率为2.03 W时,MWCNTs纳米流体(质量分数0.32%)的热阻值是 $2.908\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体(质量分数0.32%)热阻值是 $6.517\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ .随着质量分数的增加,MWCNTs纳米流体的换热效

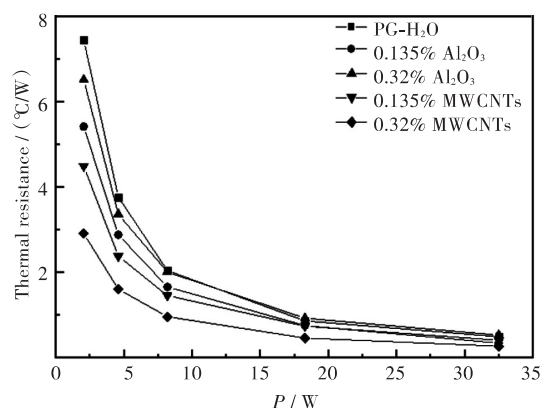


图6 在不同功率下5组冷却液的热阻值  
Fig. 6 Thermal resistance of five groups of coolant liquid at different powers

果增强,在模拟CPU功率为8.17 W时,MWCNTs纳米流体(质量分数0.32%)的热阻值是 $0.96\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,MWCNTs纳米流体(质量分数0.135%)热阻值是 $1.454\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ .质量分数0.32%的MWCNTs纳米流体的热阻值在相同工况下均小于质量分数0.135%.在相同功率(2.03 W、4.57 W、8.17 W)作用下,不同冷却液工作时的散热器热阻值排序如下,该结果与实测温度变化一致.

$$R_{0.32\text{MWCNTs}} > R_{0.135\text{MWCNTs}} > R_{0.135\text{Al}_2\text{O}_3} > R_{0.32\text{Al}_2\text{O}_3} > R_{\text{PG-H}_2\text{O}}$$

而在功率18.26 W、32.47 W时,不同冷却液工作时的散热器热阻值排序如下:

$$R_{0.32\text{MWCNTs}} > R_{0.135\text{MWCNTs}} > R_{0.135\text{Al}_2\text{O}_3} > R_{\text{PG-H}_2\text{O}} > R_{0.32\text{Al}_2\text{O}_3}$$

为了定量评估添加纳米粒子对液体传热性能的影响,将MWCNTs纳米流体(质量分数0.135%、0.32%)与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体(质量分数0.135%、0.32%)的热阻值( $R_1$ )与相同工况下的基液(PG- $\text{H}_2\text{O}$ )的热阻值( $R_0$ )之比,定义为纳米粒子影响因子 $E$ :

$$E = R_1 / R_0 \quad (4)$$

图7给出了填充不同纳米粒子的纳米流体 $E$ 随功率值的变化规律.

从图7可以看出,对于MWCNTs纳米流体, $E$ 分别为0.602到0.828(质量分数0.135%)和0.39到0.549(质量分数0.32%),说明碳纳米管粒子增强了基液(PG- $\text{H}_2\text{O}$ )的换热性能,且在高质量浓度时强化效果更明显.对于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体(质量分数0.135%), $E$ 在全部工况下全小于1,说明在低浓度时, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒子强化了换热性能;而质量分数0.32%



的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体在功率为 18.26 W、32.47 W 时,  $E$  分别为 1.078、1.077, 两者均大于 1, 说明粘度对换热性能的恶化作用大于纳米粒子对换热性能的提高, 质量分数的提升增大了纳米流体的粘度。

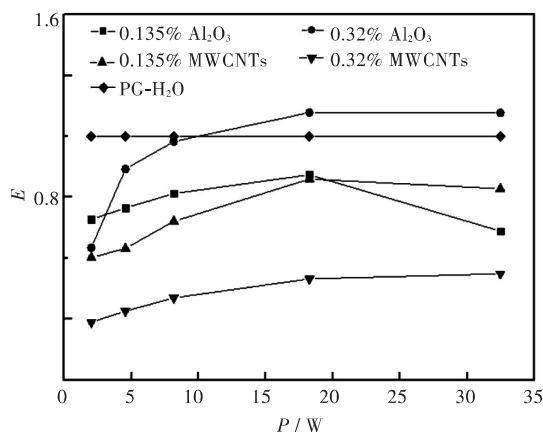


图7 在不同功率下5组纳米流体的影响因子

Fig. 7 Impact factor of five groups of nanofluids at different powers

## 4 结 语

使用 MWCNTs 纳米流体进行液冷式 CPU 散热器的换热性能实验. 实验结果表明, MWCNTs 纳米流体具有良好的换热性能. 在功率为 32.47 W 下, MWCNTs 纳米流体(质量分数 0.32%)温度稳定为 32.2 °C, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米流体(质量分数 0.32%)稳定在 40.4 °C. 在液体中添加碳纳米管粒子能提升液体的换热能力. 在相同功率(18.26 W)下, PG- $\text{H}_2\text{O}$  流体的热阻值是 0.859 °C/W, MWCNTs 纳米流体(质量分数 0.32%)的热阻值为 0.457 °C/W. 在相同功率下, MWCNTs 纳米流体的  $E$  值全小于 1. 由此表明, 随着质量分数的增加, MWCNTs 纳米流体的换热效果有所增强. 在相同功率的情况下, 相同质量分数的 MWCNTs 流体的热阻值最小, 换热能力最强.

### 参考文献:

- [1] CHOI S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. Office of scientific & technical information technical reports, 1995, 231(1): 99-105.
- [2] LI Y, ZHOU J E, TUNG S, et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization[J]. Powder technology, 2009, 196(2): 89-101.
- [3] LI C H, PETERSON G P. Experimental investigation of temperature and volume fraction on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)[J]. Journal of applied physics, 2006, 99(8): 93-102.
- [4] LI X F, ZHU D S, WANG X J. Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions[J]. Journal of colloid & interface science, 2007, 310(2): 456-463.
- [5] 何钦波, 童明伟, 刘玉东. 低温相变蓄冷纳米流体成核过冷度的实验研究[J]. 制冷学报, 2007, 28(4): 33-36.  
HE Q B, TONG M W, LIU Y D. Experimental study on super-cooling degree of nanofluids for cryogenic cool storage[J]. Journal of refrigeration, 2007, 28(4): 33-36.
- [6] DAS S, PUTTA N, THIESSEN P, et al. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids[J]. Journal of heat transfer, 2003, 125(4): 567-574.
- [7] EASTMAN J A, CHOIS U S, LI S. Novel thermal properties of nanostructured material[J]. Journal of metastable & nanocrystalline materials, 1999, 2(6): 629-634.
- [8] MASUDAH, EBATA A, TERAMAE K, et al. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersed ultra-fine particles (dispersion of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  ultra-fine particles)[J]. NetsuBussei, 1993, 7(4): 227-233.
- [9] 李强. 纳米流体强化传热机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [10] 郑立国. 碳纳米管-水纳米流体重力热管传热性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [11] 宣益民, 李强. 纳米流体能量传递理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solution[J]. Journal of chemical physics, 1952, 20(4): 571.
- [13] PAK B C, CHOI Y L. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles[J]. Experimental heat transfer, 1998, 11(2): 151-170.
- [14] KOLE M, DEY T K. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant[J]. Experimental thermal & fluid science, 2010, 34(6): 677-683.
- [15] 陆正裕, 熊建银, 屈治国, 等. CPU 散热器换热特性的实验研究[J]. 工程热物理论, 2004, 25(5): 862-863.  
LU Z Y, XIONG J Y, QU Z G, et al. An experimental study on two kinds of heat sinks of CPU[J]. Journal of engineering thermophysics, 2004, 25(5): 862-863.

本文编辑: 陈小平