

振荡流热管自激强化传热的可行性分析

商福民, 冼海珍, 刘登瀛, 杨勇平
(华北电力大学 动力工程系, 北京 102206)

摘 要: 围绕自激振荡流热管的工作特性, 联系目前国内外纳米流体及非均匀截面结构在强化传热研究方面的最新进展, 分析了在自激振荡流热管内的复杂相变换热条件下, 通过采用纳米流体工质与非均匀管截面以实现振荡流热管自激强化传热的可行性, 并提出了纳米流体的浓度、相容性、充液率以及管截面结构等需要解决的关键性技术问题。为下一步有针对性的强化传热实验研究和新型自激振荡流热管换热器的设计与开发提供了必要的理论依据。

关 键 词: 自激振荡流热管; 纳米流体; 非均匀截面; 自激强化传热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 前 言

热管(Heat Pipe)作为一种高效的传热元件, 自 20 世纪 60 年代问世以来, 已在航天、航空、电子、电力、化工、医药、食品、机械等众多领域得到了广泛的应用, 对于促进这些领域的技术发展和节约能源, 发挥了巨大的作用。随着现代高新技术的发展, 许多受热设备单位面积上的热负荷越来越高, 如超大功率集成电路、发电用高温燃料电池、核反应堆、大功率微型动力机械、微小型燃气轮机、超导发配电设备以及载人飞船等航天器, 其单位热负荷都在 100 W/cm^2 以上, 甚至达到 $10^3 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。而在这些承受高热负荷的场合, 又常常需要冷却或换热设备微型化。然而, 传统热管微型化后又受到携带极限的限制。

自 20 世纪 90 年代以来, 随着纳米材料科学的迅速发展, 研究人员开始探索将纳米材料技术应用于强化传热领域, 研究新一代高效传热技术。1995 年美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等人提出了“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金属或金属氧化物粒子。研究表明: 在液体中添加纳米粒子, 显著增加了液体的导热系数和热容量。

本文围绕自激振荡流热管的工作特性, 结合纳米流体以及非均匀截面结构在强化传热方面的技术, 探讨实现进一步强化这种热管传热的可能性和可行性, 为下一步有针对性的强化换热实验研究和开发新型的自激振荡流热管换热器提供必要的理论基础。

2 自激振荡流热管的强化传热特性

2.1 自激振荡流热管的特性

1994 年, 日本学者赤地(H. Akachi)发明了一种全新概念的脉动热管(Pulsating Heat Pipe), 从而揭开了热管发展的新篇章。后来, 统称为自激振荡流热管(Self-Exciting Mode Oscillating-Flow Heat Pipe, 简称 SEMOS Heat Pipe)。据相关报道, 内径为 0.5 mm , 以 R141b 为工质的自激振荡流热管, 其单位面积传输的热量已达到 1000 W/cm^2 , 即相当于常规热管最高传热能力的 20 倍。自激振荡流热管虽然诞生才刚刚十年, 但因其巨大的应用潜力而日益受到国际传热学界的高度重视。

这种新型热管比传统毛细芯热管还有下列突出优点:

- (1) 管径和体积都很小, 易于实现微型化。
- (2) 结构简单, 不需要毛细芯, 有利于降低成本。
- (3) 运行可靠, 液体回流自适应性很强, 不容易烧干。
- (4) 可以进行随意弯曲, 应用范围非常广泛。
- (5) 克服了传统热管一般只能底部加热的缺点, 可以采用不同的加热方式和加热位置。
- (6) 启动迅速, 热敏感性强。

2.2 自激振荡流热管的工作原理

自激振荡流热管按其循环系统的不同, 可分为首尾连成闭合回路的回路型(Looped)和首尾端不相

连的非回路型(Un looped)两种,如图1所示。SE-MOS HP 运行的基本原理是:当热管管径足够小时,真空条件下封装在管内的工作介质(通常液体工质的充装率小于60%~80%)将在管内形成液、汽相间的柱塞。在加热段,汽泡或汽柱与管壁之间的液膜因受热而不断蒸发,导致汽泡膨胀,并推动汽-液柱塞流向冷凝端冷凝收缩,从而在冷热端之间形成较大的压差。由于汽-液柱塞交错分布,因而在管内产生强烈的往复振荡运动(若在某些直管段上加装部分单向阀,亦可形成单向振荡运动)。其振荡频率远远高于传统热管内的汽-液循环频率。而且,其工作介质与热管壁面间的对流换热过程也因受到剧烈脉动流的作用而大大强化。

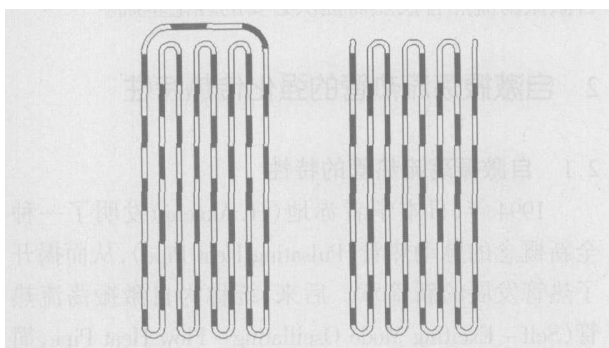


图1 自激振荡流热管结构示意图

2.3 自激振荡流热管目前国内外研究状况

迄今为止,国内外关于自激振荡流热管的研究主要集中在以下几方面:

- (1) 管内流动状态的可视化观察与流速、压力、温度等脉动参数的测定^[1]。
- (2) 结构参数对传热效果的影响,如管径、加热段与冷凝段长度、弯头数量、热管倾斜角等。
- (3) 运行参数对传热效果的影响,如工质种类、液体充装率、加热功率、加热端位置、冷热端温差以及非冷凝气体的增长率等。
- (4) 进行流动与传热过程的理论分析,主要根据动量方程、能量方程和连续方程、求解其管内的振荡流场和温度场以及振荡周期和频率。还有学者采用人工神经网络模型来分析加热功率和充液率对传输性能的影响^[4]。

目前,已有日本、美国、德国、俄罗斯、乌克兰、南非、韩国、新加坡等国的学者发表了数十篇研究论文。这种新一代高效传热元件正在成为国际相变传热前沿领域的一个引人瞩目的研究热点。但自激振荡流热管的研究尚处于初创时期,迄今所做的研究

仅仅在于认识和揭示这种热管的工作过程,而对于如何进一步改进、强化和控制其传递过程则未见报道。

2.4 进一步强化自激振荡流热管传热的途径

从自激振荡流热管的工作原理可以看出,要进一步强化其热量传递过程,有两个基本途径:一是强化管内汽-液介质与管壁之间的传热;二是提高其振荡频率和运行的循环动力。这种自激振荡流热管的管内流体与管壁间的传热,实质是带有非稳态相变过程的两相流体与壁面间的传热,要强化这一传热过程,首先要提高流体蒸发、凝结的相变转换频率和相变发生的强度,其次要改善流体与管壁间的对流换热过程。而要提高管内的振荡频率和可靠运行的循环动力,则要增强管内的脉动机制,提高脉动过程中冷热流体的温差。显然,上述两条强化途径是可以相辅相成的。

3 纳米流体作为热管工作液的可行性

3.1 纳米流体强化传热的机理

在液体工质中添加纳米粒子,可显著提高液体工质的传热性能。其重要原因是在液体中添加纳米粒子后,增加了液体的表面面积、热容量和液体的导热系数。另外,在液体中添加纳米粒子,粒子与粒子、粒子与液体、粒子与壁面间的相互作用及碰撞,使得液体截面速度分布平坦,减少了层流底层,增强了流动湍流强度,强化了纳米流体内部的能量传递过程,传热能力增强。

与传统的悬浮毫米或微米级固体颗粒的两相流体相比,虽然由于纳米颗粒的小尺寸效应,纳米流体的行为更接近于流体,不会像毫米或微米级粒子易产生磨损和堵塞等现象。但由于纳米流体中存在着重力、布朗力、液体和颗粒间摩擦力等因素的影响,布朗扩散、沉淀、热扩散等现象可能共存于纳米流体的主流中。这就意味着液体和粒子间的相对滑移速度不为零,其实质还是一种两相流体,可能具有液-固两相流体的一些共有的特性。

总之,纳米粒子存在的微运动现象是强化纳米流体能量传递过程的关键因素。在纳米流体内部,纳米粒子的行为及运动受到作用在粒子上微作用力的支配,这些微作用力包括范德瓦耳斯力、粒子表面的静电力以及驱动粒子的布朗力等,粒子与液体间微运动的强弱程度受这些力共同作用的影响。

3.2 纳米流体的制备工艺

纳米流体不是简单的液-固混合物, 在纳米粒子的悬浮液中, 由于颗粒表面的活性使它们很容易团聚在一起, 形成带有若干弱连接界面的较大团聚体。因此, 如何使纳米粒子均匀、稳定地分散在液体介质中, 形成分散性好、稳定性高、持久及低团聚的纳米流体是非常关键的。

一般来说, 有 3 种方法用来解决纳米流体的悬浮稳定性问题。一是要改变悬浮液的 pH 值; 二是要使用表面活性剂和分散剂; 三是使用超声振动。所有这些方法的目的在于通过改变粒子的表面活性, 抑制粒子团聚的发生, 以获得悬浮稳定的纳米流体。目前, 通过纳米 Al_2O_3 粉、 SiC 粉、 Cu 粉以及 TiO_2 粉加入水、醇或机油中已经制备成了相应的纳米流体。

3.3 纳米流体强化传热目前实验研究情况

(1) 通过不同温度条件下水和 Cu -水纳米流体导热系数实验验证: 流体加入纳米颗粒以后可显著提高纳米流体的导热系数, 而且纳米流体的导热系数随着温度增加的幅度要比原流体大^[4], 如图 2 所示。

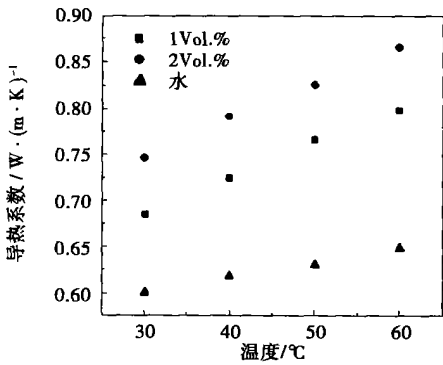


图 2 不同温度水和 Cu -水纳米流体导热系数

的单相、两相流体的导热系数计算的物理模型相差甚远^[4]。到目前为止, 还没有一个比较精确计算纳米流体导热系数的经验公式。

(3) 管内流体加入纳米粒子后, 不管在层流区或是湍流区内都相应提高了纳米流体对管壁的对流换热系数^[5], 如图 3 和图 4 所示。

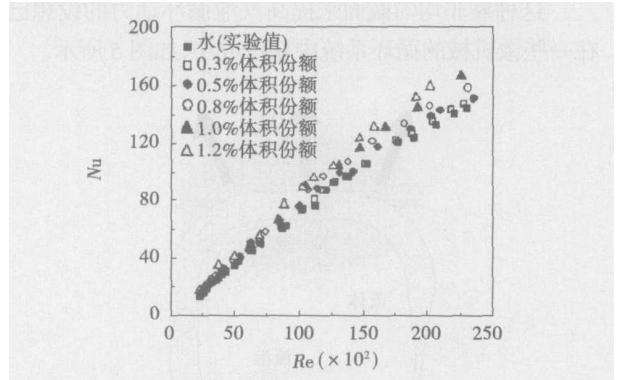


图 4 湍流区 Cu -水纳米流体 Nu 随 Re 变化情况

(4) 整理纳米流体对流换热关联式^[5]:

$$Nu_{nf} = c_1 (1.0 + c_2 \phi^{m_1} Pe_d^{m_2}) Re_{nf}^{m_3} Pr_{nf}^{0.4} \quad (1)$$

式中: ϕ —纳米粒子的体积份额;

Pe_d —纳米粒子的贝克来数;

Re_{nf} 、 Pr_{nf} —纳米流体的雷诺数和普朗特数;

c_1 、 c_2 、 m_1 、 m_2 、 m_3 —系数和指数。

总之, 通过对纳米粒子强化流体传热性能的理论分析并结合目前国内的实验研究成果来看, 纳米流体完全可以作为热管的工作液, 尤其对于微尺度的自激振荡热管更具有其自身的优势。由于纳米粒子的小尺度效应, 使得纳米流体成为了近似于单相流体又不同于单相流体的液-固两相流, 纳米粒子在范德瓦耳斯力、静电力和布朗力作用下的微运动是强化纳米流体能量传递的关键。

4 非均匀截面实现自激强化传热的可行性

从自激振荡流热管的工作原理可以看出, 要想进一步强化其传热量过程, 除了强化管内汽-液介质以及汽-液介质与管壁之间的传热外, 另一个是要提高其振荡频率和运行的循环动力。

从提高运行的循环动力出发, 可以采用两种大小不同的管径交替布置, 以构成非均匀截面的自激振荡流热管, 使管内流体在加热端受热后沿较大的管径快速膨胀, 并流向冷凝端。而在冷凝端冷凝后的液体则沿着较细管道流回加热端。由于大小管径

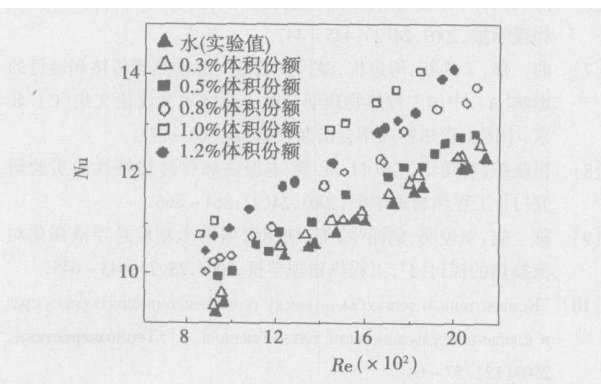


图 3 层流区 Cu -水纳米流体 Nu 随 Re 变化情况

(2) 纳米流体的导热系数理论计算模型与传统

的曲率半径不同,其液膜产生的表面张力也不同,由此获得的附加循环动力为:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R_1} - \frac{2\sigma}{R_2} \quad (2)$$

式中: σ —表面张力系数;

R_1, R_2 —不同管径的曲率半径。

这种靠非均匀截面来提高汽泡循环动力的设想已有一些微机械的循环系统中获得成功,如图5所示。

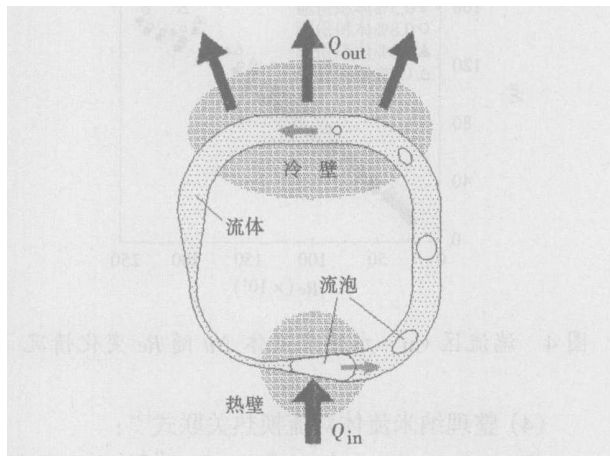


图5 非均匀截面提高汽泡循环动力原理图

从提高振荡频率的角度出发,还可以采用其它不规范的非均匀截面结构型式。仿照过增元院士提出的场协同强化传热原理^[11],自激振荡的频率肯定和管截面型式存在着某种协同的机制。而且,从强化传热的角度来说,这个协同关系肯定存在一个最佳值。这种热管不一定是回路型式的,布置起来可能更加灵活。当然,这需要在今后的理论分析和实验研究当中加以验证。

5 进一步的实验研究工作

从前面的理论分析和实验中可以看出:纳米流体确实有着超常的传热特性,纳米流体作为微型自激振荡热管的工作液是可行的,也是可以实现的。但是热管毕竟有着它自身的特殊性,况且将纳米流体用于热管在国内外还没有这样的研究先例。自激振荡纳米流体热管在工作特性上和常规热管肯定存在很大差异,比如纳米流体封装后工作特性的变化、纳米流体与热管的相容性、纳米颗粒的浓度、充液率等等,很多关键的技术问题需要在今后的实验研究工作当中加以解决。

另外,从非均匀截面强化传热的角度出发,如何增加成型非均匀截面型式自激振荡流热管工作的稳

定性和寻找增加自激振荡频率的非均匀截面结构型式等,也都需要在今后的实验研究当中加以解决。

6 结束语

从以上的分析中可以看出:目前,自激振荡流热管的研究尚处于初创时期。迄今为止国内外所做的研究仅仅局限于认识和揭示这种热管的工作过程,而对于如何进一步改进、强化和控制其传递过程还需要做很多的工作。这种状况类似于传热学发展的初期阶段,自激振荡流热管的发展也必将像传热学发展那样,从目前的“认识”阶段,向更深入的“强化”与“控制”阶段过渡。

因此,这里提出的“纳米流体”和“非均匀截面”实现振荡流热管自激强化传热无疑对这种热管的工作特性提出了更高的要求,也使得此方面的研究工作更具有挑战性。通过前面的分析和目前国内外研究的成果可以看出:非均匀截面自激振荡纳米流体热管强化传热是可行的,当然还需要做很多的工作,还会有很多新的问题需要在今后的实验研究工作中加以解决。

参考文献:

- [1] 杨蔚原,张正芳,马同泽.脉动热管运行的可视化实验研究[J].工程热物理学报,2001,22(6):117-120.
- [2] 崔晓钰,翁建华,GROLL M.基于神经网络的振荡热管传热性能建模[J].化工学报,2003,54(9):1319-1322.
- [3] 宣益民,李强.纳米流体强化传热研究[J].工程热物理学报,2000,21(4):466-470.
- [4] 李强,宣益民.纳米流体强化导热系数机理初步分析[J].热能动力工程,2002,17(6):568-571.
- [5] 李强,宣益民.纳米流体对流换热的实验研究[J].工程热物理学报,2002,23(6):721-723.
- [6] 白凤武,卢文强.潜热型热功能流体强化换热分析[J].工程热物理学报,2003,24(3):445-447.
- [7] 曲伟,丁铁新,傅忠传.微尺度效应对脉动热管传热和运行的影响[A].中国工程热物理学会第十届学术会议论文集[C].北京:中国工程热物理学会出版社,2004.568-571.
- [8] 崔晓钰,翁建华,GROLL M.铜/水振荡热管传热特性的实验研究[J].工程热物理学报,2003,24(9):864-866.
- [9] 陈骁,李俊明,戴闻亭,等.细圆管内纳米颗粒悬浮液强化对流换热的探讨[J].工程热物理学报,2004,25(7):643-645.
- [10] Конвективный теплообмен между потоками топкодисперсных сред в клапанно-пульсационном теплообменнике[J].Теплоэнергетика,2003(12):57-64.
- [11] 过增元.对流换热的物理机制及其控制:速度场与温度场的协同[J].科学通报,2000,45(19):2118-2122.

(辉 编辑)

outlet total temperatures being drafted and the compressor operating condition curves calculated. On this basis, the surge boundary line of the compressor was determined. A quantitative calculation of the impact of inlet guide vanes (IGV) on compressor general characteristic curves was conducted. During the model building process the influence of air relative humidity on compressor general characteristic curves has been taken into account. A calculation example indicates that the model under discussion features relative high precision and can be used to calculate the off-design performance of a compressor fitted with IGV. The work described above has laid a solid foundation for the further study of off-design performance of compressors. **Key words:** compressor, off-design operation, elementary cascade method, characteristic curves, relative humidity

滴状翅片管传热及阻力特性的试验研究= **Experimental Study of the Heat Transfer and Resistance Characteristics of Drop-shaped Finned Tubes**[刊, 汉]/ZHOU Wen-zhu, OUYANG Xin-ping, LIU Dao-ping (College of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 156 ~ 160

Tests were conducted of the heat transfer and resistance performance of drop-shaped finned tubes and test results obtained under different air velocities and temperatures are presented. A method for the separation of convection heat exchange factors is explored. On the basis of the actually measured data the convection heat exchange factor for the tube group swept by the tube-outside air was separated from the heat transfer factor. The tube-outside convection heat exchange characteristics and resistance characteristics are analyzed and studied. Moreover, they have been processed into a dimensionless criterion. The results of the test indicate that the drop-shaped finned tubes feature a relatively low resistance and the test sample performance has attained an international advanced level. **Key words:** drop-shaped finned tube, heat transfer characteristics, resistance characteristics, experimental research

振荡流热管自激强化传热的可行性分析= **Feasibility Analysis of Self-excited Intensified Heat Transfer of an Oscillating-flow Heat Pipe**[刊, 汉]/SHANG Fu-min, XIAN Hai-zhen, LIU Deng-ying, et al (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 161 ~ 164

In connection with the operating features of self-excited oscillating-flow heat pipes and recent advances of nano-fluid and non-uniform section structures in the study of intensified heat transfer both at home and abroad analyzed is the feasibility of realizing self-excited intensified heat transfer by an oscillating-flow heat pipe. The intensified heat transfer is attained through the use of nano-fluid working media and a non-uniform pipe section under the condition of complicated phase-transformation heat exchange in a self-excited oscillating-flow heat pipe. Moreover, the authors have put forward a variety of key technical problems yet to be solved, such as the nano-fluid concentration and compatibility, fluid filling rate and pipe section structures, etc. All the above has provided an essential theoretical basis for the further experimental study of intensified heat transfer as well as for the design and development of innovative self-excited oscillating-flow heat pipe-based heat exchangers. **Key words:** self-excited oscillating-flow heat pipe, nano fluid, non-uniform section, self-excited intensified heat transfer