

非均匀截面自激振荡流热管内 热传输特性实验研究

商福民, 刘登瀛, 冼海珍, 杨勇平

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 针对两种不同截面结构的回路型自激振荡流热管, 其中, 一种内径为 3 mm 的均匀截面; 另一种是在此均匀截面的基础上, 将其加热段和绝热段断面加工成垂直交错布置的椭圆形非均匀截面。运用实验研究的方法, 在热管壁面不同部位分别布置了温度测点, 在不同功率的激光加热条件下, 通过对热管壁温监测数据的采集和分析, 研究了这种非均匀截面回路型自激振荡流热管内部的热传输性能, 并与均匀截面自激振荡流热管进行了对比分析。结果表明: 非均匀截面自激振荡流热管内的脉动机制以及热传输特性与均匀截面有很大不同, 在中、高负荷条件下, 非均匀截面结构热管可以明显起到强化传热效果, 与均匀截面结构热管相比, 热传输功率提高了 13.6%。

关 键 词: 非均匀截面自激振荡流热管; 热传输特性;
实验研究

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

自激振荡流热管(Self-Exciting Mode Oscillating-Flow Heat Pipe, 简称 SEMOS Heat Pipe), 即脉动热管(Pulsating Heat Pipe), 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, 其基本原理是: 当热管管径足够小时, 真空条件下封装在管内一定量的工作介质将在管内形成液、汽相间的柱塞。在加热段, 气泡或汽柱与管壁之间的液膜因受热而不断蒸发, 导致气泡膨胀, 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。当热管本身结构、内部工质以及外部热负荷等合适的条件下, 交错分布的汽-液柱塞, 就会在管内产生强烈的循环或往复振荡运动。其振荡频率远远高于传统热管内的汽-液循环频率, 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。实验研究表明, 这种自激振荡流热管的传

热能力是常规热管的几倍甚至几十倍^[1]。由于自激振荡流热管特殊的结构、优良的热传输性能以及巨大的应用潜力而日益受到国际传热学界的高度重视。但对自激振荡流热管的研究仍处于认识和揭示其工作过程阶段, 进一步改进、强化和控制其传递过程则还需很多的工作。

1 基本思想

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。

本实验研究是在前期研究工作的基础上^[1~4], 针对均匀截面和非均匀截面回路型自激振荡流热管, 通过在不同加热功率的条件下, 对这两种自激振荡流热管的传输功率以及监测壁温所表现出的一系列特性进行比较分析, 从而研究这种自激振荡流热管内部的热传输特性。

2 实验系统

2.1 研究对象及非均匀截面结构型式

本次实验研究对象为闭合回路的自激振荡流热管。其中: 一种是在内径为 $\Phi=3$ mm 的均匀截面自激振荡流热管; 另一种是在此均匀截面的基础上, 将热

管的加热段和绝热段加工成垂直交错布置的断面为椭圆形非均匀截面结构型式,如图 1 所示。热管材料为黄铜,管内的工作介质为高纯度蒸馏水,充液率 $\varphi=42\%$,热管倾角 $\theta=55^\circ$,充液前热管内的压力 $p=1.8 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。

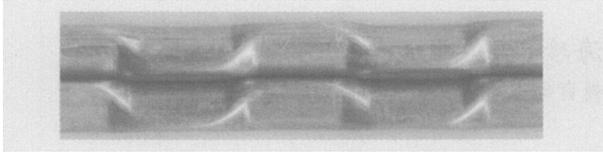
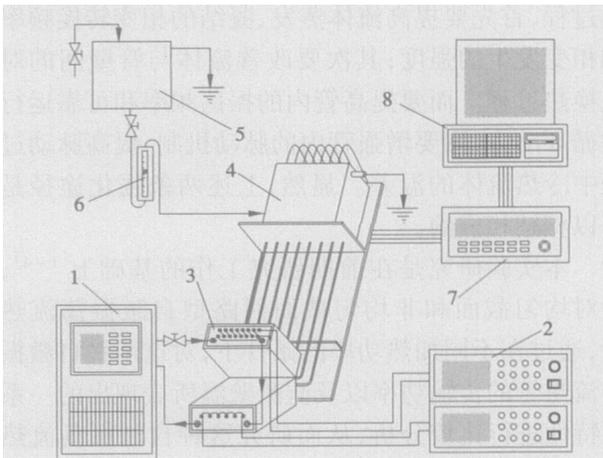


图 1 热管非均匀截面结构图

2.2 实验系统

本实验研究系统由激光器及附属的冷却和电源控制设备、热管实验台、数据采集及显示系统等部分组成,如图 2 所示。激光器为八通道量子阱二极管阵列型半导体激光器。其中:单通道最大输出功率为 50 W,加热电流范围为 5~40 A,激光波长为 940 nm。不同通道的激光可以单独或者进行组合作为实验热管的加热热源,本次实验加热热源所采用的为连续激光加热形式。在热管实验件冷、热端以及绝热段壁上不同位置共分别布置了 20 个直径为 1 mm 的 K 型铠装热电偶,通过 20 个数据通道进行实时采集。



1—循环制冷机组 2—激光器电源,3—激光器,4—自激振荡流热管实验台;5—高位水箱,6—高精度浮子式流量计;7—数据采集单元;8—数据显示单元

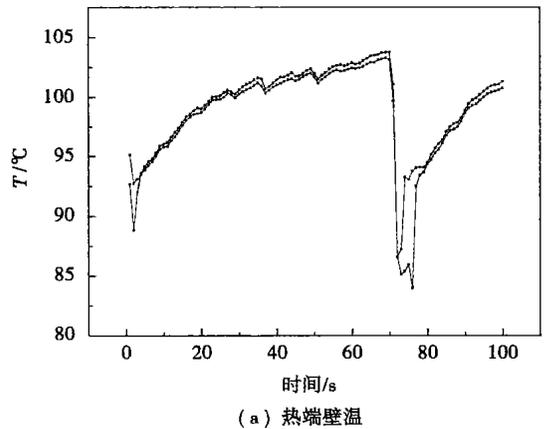
图 2 自激振荡流热管强化传热实验系统

3 实验结果分析

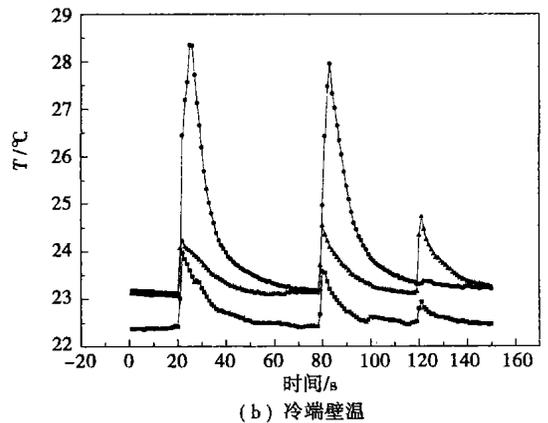
3.1 总体热输运特性

从对冷、热端壁温监测的数据能明显看出不同脉冲形式的波形,尤其是在低负荷和中等负荷条件

下比较明显。热端由于工质被加热,当局部工质吸收汽化潜热而被汽化时,壁面温度会突然降低,脉冲波形表现为“左坡右陡”;而在冷端当含汽柱的工质被冷却而放出汽化潜热时,壁面温度会突然升高,脉冲波形表现为“左陡右坡”,如图 6 所示。由于汽塞的长度和容积具有一定的随机性,所以从壁温的波形上看,脉冲峰谷温差时刻在变化的。而在远离加热及冷却区域的绝热段壁温波形与上面的情况相比有很大的不同,只是存在波动的现象。随着加热功率的提高,冷、热段以及绝热段脉冲及波动的频率都明显增加。而且热管稳定运行后,冷端和热端壁温有时会出现同步振荡的情况(见图 3(a)、(b));有时冷、热端壁温又会出现近似交替对称振荡的现象(见图 4(a)、(b))。



(a) 热端壁温



(b) 冷端壁温

图 3 热端及冷端壁温同步振荡情况

3.2 热输运特性的对比

通过实验对均匀截面和非均匀截面自激振荡流热管,在不同加热功率(加热电流 I)条件下的传输功率 $P_0(\text{W})$ 进行了比较,如图 5 所示。其中,传输功率:

$$P_0 = G_c p (T_2 - T_1) \tag{1}$$

式中: G —冷却水流量, kg/s ;

c_p —水的定压比热, $J/(kg \cdot K)$;
 T_2, T_1 —冷却水的出口、进口温度, $^{\circ}C$ 。

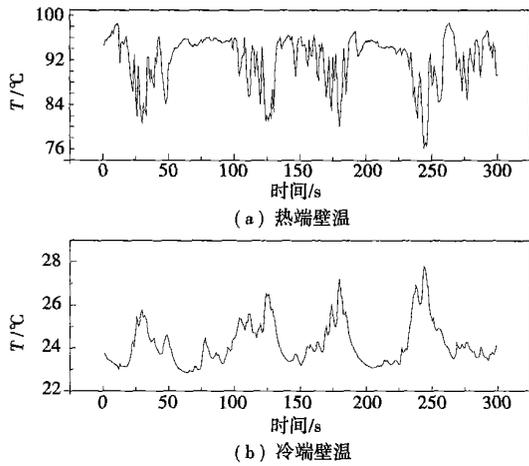


图 4 冷、热端壁温对称振荡情况

从图中可以明显看出: 在加热电流 I 比较小时, 非均匀截面热管的传输功率 P_0 低于均匀截面热管, 但随着激光器加热电流 I 的增加, 非均匀截面热管的传输功率 P_0 会超过均匀截面, 而且从传输功率 $P_0 \sim I$ 曲线的发展趋势来看, 随着加热功率的增加非均匀截面的传输功率 P_0 超出均匀截面的幅度会越来越大。在本实验所用的最大加热功率 (每个通道加热电流为 23 A, 约相当于 25.5 W) 时非均匀截面的传输功率比均匀截面平均大 13.6%。

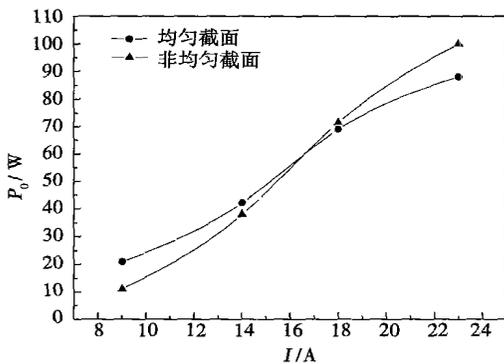


图 5 非均匀截面热管热输运性能与加热功率的关系

3.3 热输运特性分析

针对均匀截面和非均匀截面自激振荡流热管出现的随着加热功率的增加, 热输运性能存在差异的现象。通过分析冷、热端壁温监测数据的波形会发现:

在比较低的加热功率情况下 (加热电流小于 14 A 时), 非均匀截面热管的热端壁温明显高于均匀截面热管, 而冷端壁温则和均匀截面热管接近。非

均匀截面热管脉冲的波幅小于均匀截面热管, 尤其在热端这种差异比较明显 (见图 6(a)、(b)); 振荡频率上, 非均匀截面热管接近甚至小于均匀截面热管, 尤其在冷端。

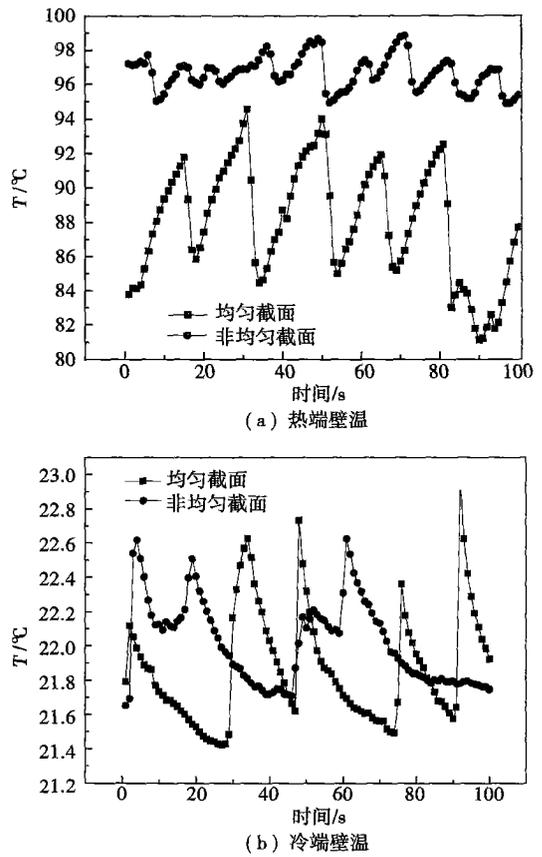


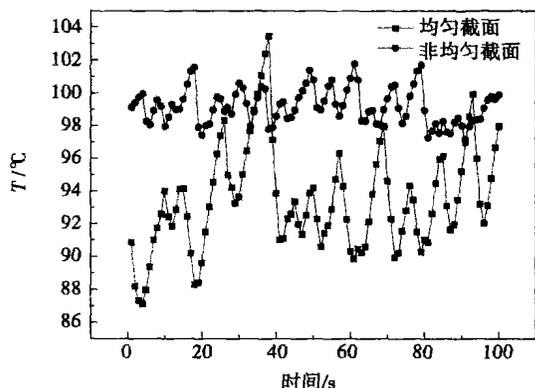
图 6 小加热功率下热端和冷端壁温典型变化情况

出现以上现象的原因, 主要是由于非均匀截面自激振荡流热管的断面结构使得汽—液流动的阻力明显高于均匀截面热管, 致使与均匀截面热管相比热量不能被及时地传递到冷端, 造成壁温明显高于均匀截面热管。

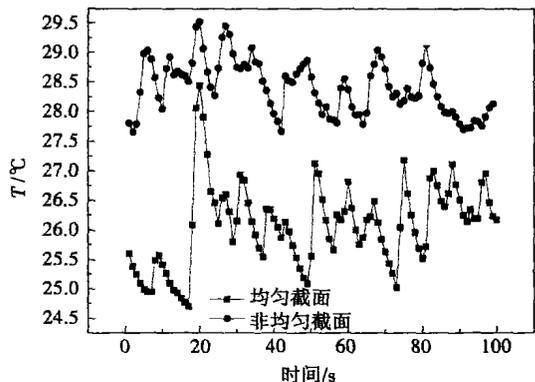
在比较高的加热功率情况下 (加热电流大于 18 A 时), 非均匀截面热管的热端壁温略高或接近于均匀截面热管, 而冷端壁温则明显高于均匀截面热管。非均匀截面热管脉冲的波幅仍小于均匀截面热管, 尤其在热端, 这种差异比较明显 (见图 7(a)、(b)); 振荡频率上, 非均匀截面热管与低加热功率时相比, 明显提高了。在相同的加热功率情况下, 非均匀截面热管的振荡频率有时接近甚至超过均匀截面热管, 尤其是在比较大的加热功率的情况下。

出现以上现象的原因, 主要是由于在高加热功率的情况下, 从非均匀截面和均匀截面自激振荡流

热管的振荡频率增加上可以反映出它们的循环动力都明显提高了。针对非均匀截面热管循环动力的提高,由于其断面的特殊结构,使得对强化传热的影响超过了由于流动阻力对传热所造成的负面影响,使得其热输运性能在高加热功率的情况下超过了均匀截面热管。表现在壁温上,尽管热端壁温比较接近,但冷端的壁温却明显高于了均匀截面热管。这也正是非均匀截面热管断面结构使得内部振荡频率、脉动机制以及流动特性对传热性能综合作用的结果。



(a) 热端壁温



(b) 冷端壁温

图 7 大加热功率下热端和冷端壁温典型变化情况

综上所述,自激振荡流热管的非均匀截面结构之所以能够强化传热,是因为采用了交叉缩放的非均匀截面结构后,使得管内形成了纵向涡,它增加了一个垂直于管壁的速度分量,即温度梯度场和速度矢量场出现了协同的机制,从而达到了强化传热的目的。但是采用非均匀截面结构,无疑增加了流动的阻力,因而,自激振荡流热管非均匀截面结构要想真正发挥强化传热的作用需要一定的输入功率。当纵向涡带来的强化作用大于因流动阻力而使循环动力下降为热管传输性能带来的负面影响时,非均匀截面自激振荡流热管的强化传热优势即可逐渐呈现出来。因而,这种非均匀截面自激振荡流热管更适

合于较高热流密度的输运。同时,这种细管内不稳定的膨胀与收缩过程,也必然伴随着垂直于管壁速度分量的交替产生与消失,使管内速度场剧烈振荡,从而使传热过程进一步强化。

4 结束语

(1) 回路型自激振荡流热管在满足一定的启动功率情况下,正常运行后热管内工质会出现循环流动的现象。而且运行后冷端不同测点和热端不同测点的壁温有时会出现同步振荡的现象,而冷、热端对应测点的壁温有时又会出现交替对称振荡的现象。

(2) 随着加热功率的增加,热管内部的振荡频率会明显提高。当加热功率达到一定时,非均匀截面自激振荡流热管的振荡频率要大于均匀截面自激振荡流热管。

(3) 自激振荡流热管的循环动力和振荡频率是影响其热输运性能的关键因素。

(4) 自激振荡流热管采用非均匀截面结构可以达到强化传热的目的,但必须满足一定的前提条件,即加热功率必须要达到使热管的循环动力足以克服由于非均匀截面所造成的流动阻力。

参考文献:

- [1] SHANG FUMIN, XIAN HAI ZHEN, LIU DENG YING, et al. Experimental investigation of enhanced heat transfer of self-Exciting mode oscillating flow heat pipe with non-uniform profile under laser heating // WIT Transaction on Engineering Sciences; Advanced Computational Methods In Heat Transfer IX [C]. Southampton; WIP Press, 2006. 241-248.
- [2] XIAN HAI ZHEN, SHANG FUMIN, LIU DENG YING, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement of SEMOS heat Pipe // Proceedings of the 13th International Heat Transfer Conference [C]. Sydney; Begell House, 2006. 266-269.
- [3] 商福民, 冼海珍, 刘登瀛, 等. 自激振荡流热管变截面结构强化传热实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 656-658.
- [4] 冼海珍, 商福民, 刘登瀛, 等. 自激振荡流热管脉冲加热强化传热实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 457-458.
- [5] 商福民, 冼海珍, 刘登瀛, 等. 振荡流热管自激强化传热的可行性分析 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 161-164.
- [6] 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, 2004, 22(6): 117-120.
- [7] 曹小林, 席战利, 周晋, 等. 脉动热管运行可视化及传热与流动特性的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 411-415.
- [8] 曲伟, 马同泽. 脉动热管的工质流动和传热特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 596-598.
- [9] 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.
- [10] 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.

(编辑 辉)

(Thermal Energy Engineering Research Center under Zhengzhou University, Zhengzhou, China, Post Code: 450002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 197 ~ 200

On the basis of a three dimensional thermal-mechanical coupled model, a study has been conducted of some key issues concerning the reliability simulation of heat exchangers by using probability finite-element Monte Carlo method and reaction surface method. It was found that a direct simulation method can more accurately simulate the reliability of the integral structure of a heat exchanger. Presented were uncertainty treatment skills for multiple variables under complicated boundary conditions and the TMC (thermal-mechanical coupled) process. By giving a definition of multi-dimensional tabular data functions, a sectioned linear interpolation method was adopted to realize an application of randomly-changed temperature boundary conditions. The simulation accuracy of fatigue life can be enhanced through a logarithmic transformation. A practical example of simulation calculation of industrial heat exchangers indicates that finite-element random simulation technology applied to the reliability calculation and fatigue life prediction of complicated structures can bring about a high confidence result regarding loads and materials as well as geometric uneven characteristics entirely reproducing the actual structures in service. **Key words:** heat exchanger, finite-element probability analysis, reliability, thermal-mechanical coupled

非均匀截面自激振荡流热管内热传输特性实验研究 = **Experimental Study of Heat Transmission Characteristics inside Self-excitation Oscillation Flow Heat-pipes of Non-uniform Section** [刊, 汉] / SHANG Fu-min, LIU Deng-ying, XIAN Hai-zhen, et al (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control under the North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 201 ~ 204

For two kinds of loop type self-excitation oscillation flow heat-pipes with different sectional structures, i. e. one of a uniform section with an inner diameter of 3 mm and another, on the basis of the above-mentioned uniform section, having an elliptical non-uniform section obtained by machining its heating and adiabatic segments into a vertically staggered arrangement, studied was the internal heat transmission performance of the above loop type heat-pipes of non-uniform section under the condition of being heated by laser with various power ratings. The study has been conducted by adopting an experimental study method and through an acquisition and analysis of temperature data monitored from the heat-pipe wall. To perform the above study, various temperature measurement points were arranged at different locations on the heat pipe wall. Furthermore, a contrast analysis has been conducted with respect to the performance of the uniform section self-excitation flow heat pipes. The results of the analysis show that the pulsation mechanism and heat transmission characteristics of the self-excitation oscillation-flow heat-pipes of non-uniform section are quite different from those of uniform section heat pipes. At medium and high loads, non-uniform section structured heat pipes can obviously strengthen heat transfer effect. Compared with heat pipes of uniform section, they can increase the heat transmission power by 13.6%. **Key words:** self-excitation oscillation flow heat-pipe of non-uniform section, heat transmission characteristics, experimental study

液-液射流雾化的数值模拟与实验研究 = **Numerical Simulation and Experimental Study of Liquid-liquid Jet-flow Atomization** [刊, 汉] / PENG Zheng-biao, LIANG Kun-feng, YUAN Zu-lin (College of Energy Source and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 205 ~ 212

A platform for numerical simulation of liquid-liquid atomization mechanism and another one for experimental study have been established. By employing the above platforms, water jet atomization mechanism in indissolvable solutions has been studied and its atomization process numerically simulated by using a VOF-CSF multi-phase flow model. An experimental verification and comparison was performed under identical working conditions. The study shows that the mathematical model set up by the authors can successfully simulate a continuous jet-flow atomization process and the simulation results are in extremely good agreement with the experimental ones. Through a combination of numerical simulation and experiments an exploratory study has been conducted of the influence of such key factors as jet-flow cone height, jet flow speed, indissolvable working-medium velocity etc. As a result, the following relevant law has been identified: under a certain