

脉动热管运行和传热特性的 可视化实验研究

李惊涛, 韩振兴, 李志宏, 刘 石

(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:通过 3 种不同结构脉动热管的可视化实验, 研究管内工质的运行机理与传热特性。另外, 在流型和流向研究的基础上, 对脉动热管进行结构改进, 以实现工质稳定的单向循环流动。实验结果表明: 在不同工作条件下, 流型会出现塞状流、混合流和环状流, 流向则会出现脉动流和循环流, 流型和流向具有自适应传热量变化的特性; 两种改进型脉动热管, 一种设计成内径交错变化, 一种设计成立体环型结构, 具有更宽的循环流工作范围和更好的传热性能。

关键词:脉动热管; 运行机理; 传热特性; 结构改进

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)11-0068-05

Visual experiment study on operation and heat transfer characteristics of pulsating heat pipes

LI Jing-tao, HAN Zhen-xing, LI Zhi-hong, LIU Shi

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A series of visual experiments are performed on three types of closed-loop pulsating heat pipes (PHPs), intending to investigate the operational mechanism and the heat transfer characteristics of the working fluid. On the basis of the foregoing experimental study of flow patterns and flow directions, two improved PHPs are developed to achieve reliable circulation of the working fluid. The experiment results indicate that there might exist three flow patterns, i. e. bubble-liquid slug flow, semi-annular flow and annular flow, corresponding to different working conditions. In terms of the flow directions, there might exist local oscillatory flow and bulk circulatory flow in a PHP. And for a given geometry and an adequate fill ratio, the PHPs have the self-adjusting characteristic for the flow patterns and flow directions to meet the demands of the increasing heat input. The two improved PHPs, one with alternately varying channel diameter, and the other with 3D loop configuration, operate in the circulatory manner across a wide range of heat input and exhibit higher thermal performance.

Key words: pulsating heat pipe; operational mechanism; heat transfer characteristic; structure improvement

脉动热管(pulsating heat pipe, PHP)是热管家族中最新也是最独特的一种热管^[1], 被视为目前解决微小空间高热流密度的散热方案中一种很有希望和前景的传热元件。

脉动热管内工质的流动状况决定了其运行机理和传热特性, 弄清流动规律是深入进行理论分析和建立数学模型的基础。近年来, 国内外学者对脉动热管的流动现象进行了大量的实验研究和理论分析, 一般用自激振荡的分析模型来解释其运行机理^[2], 压力振动和脉动流动之间的互相耦激驱使工质以液柱-气塞串的形式在蒸发段与冷凝段之间作脉动运动, 实现热量传递。

Groll 等^[3-4]指出: 脉动热管内工质的流型不仅存在塞状流一种流型, 随着热负荷的增加, 塞状流

将逐渐转变为环状流。流型的改变导致脉动热管运行机理和传热特性发生改变。显热和潜热所占比例、脉动热管的总体热性能等都和管内工质的流型密切相关。目前, 各国学者对脉动热管的研究一般只涉及塞状流, 对环状流以及两者共存的混合流的研究还很少。

从流动方向来看, 脉动热管内工质的流动可分为脉动流和循环流^[5]。工质在管内的单向循环流动, 可以改善由蒸发段到冷凝段的工质输送, 强化热量传递, 提高脉动热管的传热性能。但是实际运行中稳定的单向循环流是难以维持的, 通常和局部脉动、停滞、反向倒流等流态交错出现, 运行情况十分复杂。

本文的研究内容主要包括 3 个方面: ①加宽充

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50736002)

作者简介: 李惊涛(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事多相流及高效传热研究, lijingtao2003@126.com。

液率和热负荷变化范围以研究更多的流态,对流型(塞状流、混合流、环状流)以及流向(脉动流、循环流)进行研究;②在流型和流向研究的基础上,对脉动热管运行机理与传热特性进行分析;③对脉动热管的结构改进做探索性研究,设计出几种不同结构的脉动热管,以实现工质稳定的单向循环流动。

1 实验装置及过程

脉动热管系统如图1所示,由玻璃脉动热管、抽气充液装置、框架、底部的电加热系统、顶部的冷却水箱、温度点1~8和采集系统,以及摄像机(未标出)组成。其中热管的顶部管段置于1个流通冷却水的冷却水箱作为冷凝段,而底部的蒸发段则采用电阻丝加热,以隔热材料密封。

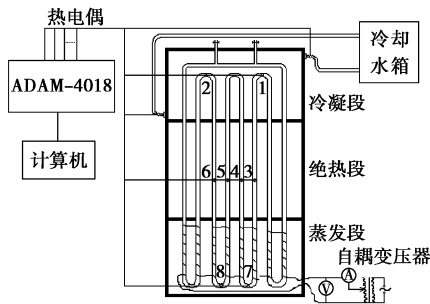


图1 脉动热管实验台

脉动热管采用耐热玻璃管制成,弯数为8,高250 mm,管道内径为1.6 mm,外径为8.0 mm,总宽200 mm。每个竖直段分为蒸发段、绝热段和冷凝段3部分,长度分别是60、110、80 mm。热管顶部水平管上留有抽气/充液端口和真空计端口。抽气充液装置包括真空泵、真空阀、真空计、充液装置等。热管充液时的真空度为5 kPa(绝对压力)。

从蒸发段到冷凝段共装有8个K型(镍铬-镍硅)热电偶,安装位置如图1所示。采集信号通过8路热电偶输入模块ADAM-4018(精度 $\pm 0.1\%$)输入主机处理。高速摄像机对准绝热段中部。

实验中采用无水乙醇作为工质。在不同充液率下,改变加热功率,对管内流动现象及换热特性进行测量研究。脉动热管先抽真空,充装一定量工质。实验中调节加热电压改变蒸发段的输入热量,从10 W开始,一直到125 W。同时,调节冷却水流量,维持冷却水箱温度不变。每次调节电压和流量后,等脉动热管达到新的热平衡,保持10 min,准备下步测试。改变充液率(10%~100%),重复上述过程。整个实验过程中,温度采集系统持续采集数据,摄像

仪拍摄管内工质流动状况。

2 流型与流向分析

2.1 流型

图2是用摄像机对脉动热管实拍的不同流型的图片。不同工作条件下,出现3种流型:塞状流、环状流和介于两者之间的混合流。

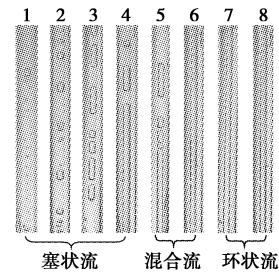


图2 3种流型的对比图片

流型为塞状流时,管内工质以液柱-气塞串的形式存在,气塞的存在形态有离散气泡(1)、小气泡(2)、气塞(3)、长气塞(4);离散气泡和小气泡由蒸发段的核态沸腾所产生,或因气塞冷凝变短或气塞分裂。离散气泡直径远小于脉动热管内径,小气泡直径则接近热管内径。气塞的直径接近于管道内径,但其长度大于管道内径。长气塞的长度可以和脉动热管高度相比,难以稳定存在,因为壁面液流易失稳生成液桥,将长气塞分裂成尺寸较小的短气塞。

流型为环状流(7、8)时,管道中心蒸汽流动,凝结液顺管壁流动。

流型为混合流(5、6)时,环状流开始形成,但还不能维持稳定,会由于液桥作用形成液柱,转化为塞状流。管内塞状流和环状流共存,相互转化。

加宽充液率和热负荷变化范围,通过一系列实验得出表1,说明流型随充液率(FR)和加热功率(Q)的变化情况,其中:S代表塞状流,SA代表混合流,A代表环状流,F代表脉动热管未能启动,X代表加热功率超出脉动热管传热极限。

表1 流型随充液率和加热功率的变化

$FR/\%$	Q/W							
	10	20	30	45	60	80	100	125
10	SA	A	X					
20	S	SA	SA	X				
30	S	S	SA	SA	SA	A	X	
40	S	S	SA	SA	SA	A	X	
50	S	S	S	SA	SA	SA	SA	A
70	F	S	S	S	SA	SA	SA	SA

由实验结果可以看出:

(1)脉动热管内工质流型和几何尺寸、传热量、充液率等密切相关。对于几何尺寸特定的脉动热管,适当的充液率下(如 50%),随着传热量的增加,塞状流将逐渐过渡到混合流,继而转化为环状流。出现环状流时,热交换强度得以强化。同时,充液率的大小和流型也有密切关系,一定的传热量下,充液率的增加会使流型转向塞状流。

(2)流型的变化导致热量传递中显热和潜热的比例发生变化,从而脉动热管的传热机理也发生变化。流型为塞状流时,显热传递(流动传热)居于主导地位;流型为混合流时,环状流成分越多,潜热传递(相变传热)所占份额就越大;流型为环状流时,潜热传递居于主导地位。

2.2 流向

从流动方向来看,环路型脉动热管内工质的流态可分为脉动流和循环流。

脉动流是指工质在平衡点附近来回振荡流动,并间歇停滞。脉动流分为 2 种运行方式:

(1)各个通道内的脉动。当加热量较小时,脉动热管相邻管道之间相互影响较小,液柱和气塞会在各个通道内的蒸发段与冷凝段之间呈现不规则脉动运行。

(2)多通道内的互影响脉动。当加热量较大时,脉动热管各个管道内的工质脉动增强,相邻通道内的工质运行开始互相影响,并在脉动热管的通道内形成互相作用的脉动运行。

循环流是指工质总的流动方向确定,在环路内循环流动。同时,脉动热管非稳态压力平衡的本质决定了管内流动的不稳定性,会周期性的出现停滞或倒流。

通过一系列实验,得出表 2 所示结果,说明脉动流、循环流随加热功率和充液率的变化情况。O 代表脉动流,C 代表循环流,F 代表脉动热管未能启动,X 代表超出脉动热管传热极限。

表 2 流向随充液率和加热功率的变化

FR/%	Q/W							
	10	20	30	45	60	80	100	125
10	O	O	X					
20	O	O	O	X				
30	O	O	O	O	O	O	X	
40	O	O	O	O	O	O	X	
50	O	O	O	O	O	O	C	X
70	F	O	O	O	O	O	C	C

由实验结果可以看出:

(1)从流动方向来看,脉动热管内工质的流动可分为脉动流和循环流。工质在管内的单向循环流动,可以改善由蒸发段到冷凝段的工质输送,强化热量传递,提高脉动热管的传热性能。

(2)传热量和充液率的增加有利于形成循环流。对于普通脉动热管,只有在高充液率、高传热量的情况下,循环流才会出现。

2.3 单环路脉动热管

前面分别对流型和流向做了可视化实验研究。实际上,流型和流向是有机耦合、相互影响的,应该统一分析^[6]。为了更清楚地说明脉动热管的流型、流向及传热特性的对应关系,将其简化为单环路脉动热管。

实验研究证明:单环路和多弯数脉动热管的流动、传热特性具有基本相同的变化规律。在适当的充液率下,随输入热量的增加,流型呈塞状流、混合流、环状流的变化趋势,流向则是呈小幅度振颤、大幅度脉动、循环流动(不稳定,会周期性的出现停滞或倒流)、稳定单向循环流动的变化趋势。单环路脉动热管的流动特性如图 3 所示^[7]。

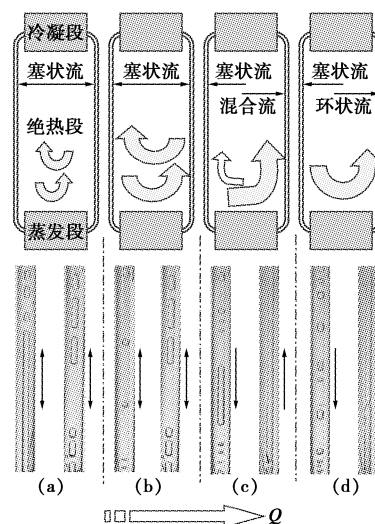


图 3 单环路脉动热管流动特性

图 3(a):输入热量很小,流型为塞状流,液柱和气塞在平衡位置小幅度振颤,传热性能差。

图 3(b):输入热量增加,流型仍为塞状流,脉动热管各个管道内的工质脉动增强,相邻通道内的工质运行开始互相影响,并在脉动热管的通道内形成互相作用的脉动运行,传热性能得以提升。

图 3(c):输入热量进一步增加,循环流开始形成,但还不能维持稳定,会周期性的出现停滞或

倒流。由蒸发段到冷凝段的工质输送得到改善,传热性能进一步提升。绝热段温度开始有明显的差异。其中,上升管温度较高,下降管温度较低。在温度较高的上升管中,环状流开始形成,但还不能维持稳定,会由于液桥作用形成液柱,转化为塞状流,称之为混合流。

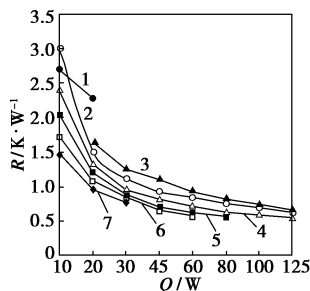
图3(d):输入热量增加到一定程度后,稳定的单向循环流形成,反向倒流完全消失,温度较高的上升管维持稳定的环状流,温度较低的下管内为塞状流。由蒸发段到冷凝段形成稳定的工质输送,传热性能好。

3 运行特性与传热性能分析

脉动热管运行时,可以根据总热阻估算其传热性能,定义总热阻为蒸发段和冷凝段的温度差与总传热量(即扣除掉散热损失后的加热功率)之比:

$$R = (T_e - T_c) / Q \quad (1)$$

图4说明脉动热管A的总热阻随加热功率和充液率的变化情况。



FR/%: 1—10; 2—100; 3—70; 4—50; 5—40; 6—30; 7—20

图4 热阻随加热功率和充液率的变化

充液率 $FR \leq 10\%$ 时,管内工质流型以环状流为主,相变传热居于主导地位。由于充液率太低,液体太少,在管道中难以形成液塞。蒸发段容易回液不足,发生烧干现象,因此传热性能差,总热阻高,传热极限低。

充液率 FR 为 $20\% \sim 70\%$ 时,脉动热管真正以脉动方式运行,流型随传热量和充液率的变化而变化。在这个范围内,充液率越低,相同传热量的情况下热阻越小,但同时传热极限越低。因此存在一个最佳充液率,在此最佳充液率下,热量传递中潜热、显热所占比例合理,既充分利用了气泡的驱动作用和相变传热,又有足够的液体参与流动传热,使蒸发段回液充分,从而使得脉动热管启动性能好,运行稳定,总热阻小,传热极限高。本文实验条件下,充液率为 $40\% \sim 50\%$ 时能够满足这些条件。

充液率 $FR > 70\%$ 时,管内工质流型以塞状流为主,流动传热居于主导地位。没有足够的气泡为工质的运动提供驱动力,流动摩擦阻力大,启动困难,难以稳定运行,传热性能显著恶化。

充液率 $FR = 100\%$ 时,脉动热管实际上成为单相闭式热虹吸管,依靠浮力驱动工质作循环流动来传递热量,由于传热过程中少了相变传热的贡献,与充液率适当的脉动热管(例如 $FR = 50\%$) 相比,传热性能有所下降。

4 结构优化

通过前面的分析可知:循环流能够改善工质输送,强化热量传递。然而,对于常规的脉动热管,循环流是难以形成的,只有在高充液率、高传热量的情况下才会出现。本文对脉动热管的结构改进做了探索性研究,设计出2种不同结构的脉动热管,就是为了加宽循环流的工作范围^[8-10]。常规脉动热管和2种改进型脉动热管的结构如图5所示。

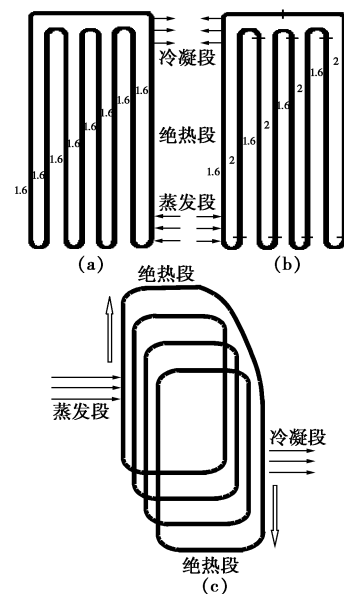


图5 3种脉动热管的结构图

图5(a)为常规脉动热管,内径保持 1.6 mm 不变,流道均衡,结构对称;图5(b)为改进型脉动热管,沿流动通道内径交错变化,相邻管道内径分别为 1.6 mm 和 2.0 mm ;与前面2种脉动热管都是平面结构不同,图5(c)将脉动热管设计成立体环型结构,管道不是都在1个平面内,而是在立体空间内首尾相接形成1个闭环,蒸发段和冷凝段分别位于左右两侧相对的平行直段,上下两弯头为绝热段。

通过一系列实验,得出表3和表4所示结果,说明脉动流、循环流随加热功率和充液率的变化情况。

可以看出:

(1)相对于普通脉动热管 a,改进型脉动热管 b 有利于循环流的形成和维持,具有更宽的循环流工作范围。

(2)在适当的充液率下(如 40%~50%),改进型脉动热管 c 启动即为循环流,且在全热负荷变化范围内保持稳定。

表 3 脉动热管 b 流向随充液率和加热功率的变化

FR/%	Q/W							
	10	20	30	45	60	80	100	125
10	O	O	X					
20	O	O	O	X				
30	O	O	O	C	C	C	X	
40	O	O	C	C	C	C	X	
50	O	C	C	C	C	C	C	X
70	F	C	C	C	C	C	C	C

表 4 脉动热管 c 流向随充液率和加热功率的变化

FR/%	Q/W							
	10	20	30	45	60	80	100	125
10	O	O	X					
20	O	C	C	X				
30	O	C	C	C	C	C	X	
40	C	C	C	C	C	C	X	
50	C	C	C	C	C	C	C	X
70	F	C	C	C	C	C	C	C

对于常规脉动热管 a,蒸发段布置在底部 U 型弯头处,这样液体的流动就有 2 个选择,沿着左边的管上升或沿着右边的管上升,因此,对于内径保持不变的普通脉动热管,流道的对称性使 2 个流动方向的概率基本相同,难以形成稳定的循环流。

对于内径交错变化的改进型脉动热管 b,有利于循环流的原因在于两方面:

(1)减少了流道的对称性和均衡性。液体在 U 型蒸发段蒸发成蒸汽,体积急剧膨胀,由于通道粗细相间,蒸汽将选择粗通道高速上升,到冷凝段部分蒸汽冷凝成液体,并在惯性力的作用下,冲击顶部的液体,使之沿细通道向下回流,从而形成单向循环流动。

(2)合理匹配了流动阻力。相同质量的工质在粗管中的摩擦压降和重力压降较小,因此流动阻力较小,引导工质向粗管方向运动,形成单向循环流动。

对于立体环型结构的改进型脉动热管 c,蒸发段布置于一侧的竖直段,工质的流动只有 1 个选择,就是向上流动(克服重力的影响,加热功率达到启动功率后),在另一侧的冷凝段,由于重力作用,工质向下流动,然后再通过弯头把流体输送到蒸发段,如此循环。

5 结论

(1)在适当的充液率下,随输入热量的增加,流型呈塞状流、混合流、环状流的变化趋势,流向则是呈小幅度振颤、大幅度脉动、循环流动(不稳定,会周期性的出现停滞或倒流)、稳定单向循环流的变化趋势。

(2)流型和流向具有自适应传热量变化的特性。流型为环状流时,潜热传递(相变传热)所占份额大;流向为循环流时,由蒸发段到冷凝段的工质输送得到改善,脉动热管的传热性能得以提高。

(3)改变脉动热管流道的对称性和均衡性,合理匹配流动阻力,合理布置蒸发段和冷凝段的位置,有利于循环流的形成和维持。

参考文献

- [1] Akachi H, Polásek F. Pulsating heat pipes [C]//9th IHPC, Albuquerque, 1995.
- [2] 方书起,史启辉.脉动热管及其传热特性影响因素研究进展[J].现代化工,2007,12(2):27-30.
- [3] LEE W H. Flow Visualization of oscillating capillary tube heat pipe [C]//11th IHPC, Tokyo, 1999.
- [4] Khandekar S, Charoensawan P, Groll M. Closed looped pulsating heat pipes: Part B: Visualization and semi-empirical modeling[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(5): 2021-2033.
- [5] Tong B Y, Wong T N. Closed-looped pulsating heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(6): 1845-1862.
- [6] 李惊涛.脉动热管流型的电容层析成像识别及换热特性研究[D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2007.
- [7] Khandekar S, Groll M. An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes[J]. Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(1): 13-20.
- [8] Liu Shi, Li Jingtao, Dong Xiangyuan, et al. Experimental study of flow patterns and improved configurations for pulsating heat pipes[J]. Journal of Thermal Science, 2007, 16(1): 56-62.
- [9] Holley B, Faghri A. Analysis of pulsating heat pipe with capillary wick and varying channel diameter[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 2635-2651.
- [10] 曹小林,周晋,晏刚.脉动热管的结构改进及其传热特性的实验研究[J].工程热物理学报,2004,25(5):807-809. ■