

脉动热管启动及运行问题研究进展

刘玉东, 周跃国, 周小三, 王超生

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030)

摘要: 闭式循环型脉动热管作为一种高效、微型换热元件, 被广泛应用于高热流密度电子器件的冷却. 论文首先对近年来脉动热管启动问题的研究成果做了全面总结, 并分析了影响脉动热管启动运行的一些因素; 然后结合热流型脉动理论对启动运行时的脉动现象进行了分析; 最后指出现有研究中存在的一些不足并给出了建议.

关键词: 脉动热管; 启动; 电子器件

中图分类号: TK172.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)01-0067-07

Advances in Start-up Studies and Operation of Pulsating Heat Pipe

LIU Yu-dong ZHOU Yue-guo, ZHOU Xiao-san, WANG Chao-sheng

(School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract Closed-loop pulsating heat pipe is widely used as a new effective heat transfer equipment in the cooling of electronic devices. The current studies on the start-up issues of pulsating heat pipe are firstly summarized. The main factors influencing the start-up and steady operation characteristics of pulsating heat pipe are then analyzed. The pulsating phenomenon observed in the stage of start-up is explained with the adoption of the thermal pulsating theory. Finally the shortcoming in the existing researches and some suggestions are made clear.

Key words pulsating heat pipe; start-up; electronic devices

0 引言

电子产品的散热关系到电子设备的可靠性和使用寿命, 它已经成为当今电子工业发展的一个瓶颈问题. 随着电子产品向高性能、微型化、集成化的发展, 功耗也越来越大^[1], 散热问题越来越突出. 工业界的分析家曾预言: 在不远的将来, 散热方案的优劣将成为电子产品商业销售成败的关键, 因为它决定着产品的成本及产品能否在较短的时间进入市场^[2]. 1990年, 日本学者 Akachi^[3]提出了一种新型热管——脉动热管. 这种热管凭借其高效的传热能力、简单的结构、不需毛细结构、没有传统热管的毛细极限等诸多优点而被看作是最具应用前景的电子产品的冷却设备.

脉动热管(pulsating heat pipe, 简称 PHP)是一种不平衡热传输装置, 结构如图 1 所示, 其工作原理可简述为: 将管内抽成真空并充入部分工质后, 由于管径足够小, 管内将形成不均匀分布的汽柱和液柱. 在蒸发端, 工质吸热产生气泡. 气泡膨胀升压推动液柱和汽柱从蒸发段流向冷凝段. 汽柱到冷凝段后遇冷收缩并破裂, 被冷凝成液体. 在压差推动下, 冷却液体从冷凝段回流到蒸发段, 从而实现热量从热端到冷端的传递.

脉动热管的工作过程可以划分为启动过程和稳态运行过程. 从加热开始到稳定运行状态的形成是脉动热管的启动过程, 启动阶段是一个动态的传热传质过程, 对此过程的实验研究及机理认识对电子设备启动过程的稳定性具有重要意义, 而迄今为止对脉动热管启动过程的研究报道还比较少. 论文将对近几年来

收稿日期: 2009-08-24 基金项目: 重庆市自然科学基金(项目编号: CSTR, 2007BB6191); 重庆大学博士启动基金(项目编号: 0903005104992).

第一作者简介: 刘玉东(1972-)男, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向: 冰蓄冷相变材料及空调系统节能研究.

E-mail: ydlu2000@163.com

的研究成果进行概括总结,从中发现不足之处,为以后的研究寻找切入点.

1 脉动热管启动特性

虽然脉动热管与其它微型热管如环路热管等均属于气液相变传热,但是由于内部结构的不同,它们的启动和运行机理也很不相同.脉动热管的运行包括不稳定的启动过程和稳定运行过程 2 个阶段.一些研究者对脉动热管的启动现象进行了描述并分析了影响启动的各个因素. T. N. Tong^[4]和 K. Katsuhiko^[5]等人发现脉动热管启动开始阶段,当蒸发段输入热量后可以听到一个明显的声响,实验观察表明,存在一个最小热启动负荷,使流体在回路中能沿某个固定方向循环流动.曲伟等^[6, 26]通过理论分析认为脉动热管毛细壁面和内部蒸汽泡之间的过热度温差是启动脉动热管的一个临界条件,而过热度和热水平取决于内壁面的凹穴尺寸及初始形成的气泡及它们的形状.当对内壁面进行涂层处理、增加粗糙度都能够使脉动热管迅速启动.

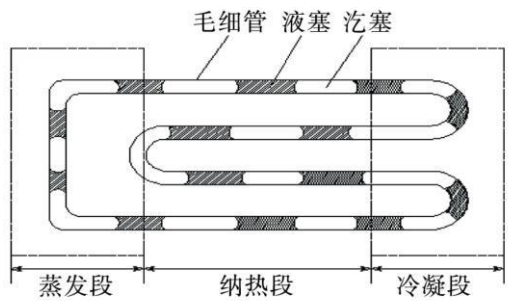


图1 脉动热管结构示意图 Fig.1 Schematics of a closed loop pulsating heat pipe

启动时间和启动温升作为脉动热管启动特性的 2 个评价指标.启动时间定义为脉动热管受热开始到循环开始所经历的时间,时间越短则脉动热管启动越迅速,进入稳态运行的时间越早.启动温升则指启动前的最高温度和稳定运行时的温度之差,启动温升太高会超出设备允许的温度范围,从而影响设备的性能.短时间内的迅速启动和合适的温升将决定脉动热管在实际中的应用.

2 脉动热管启动运行影响因素

对于脉动热管的实验研究采取了与常规热管像类似的方法. Khandekar^[7]将影响脉动热管传热特性的参数归结为 3 类: ①几何参数,包括管径、管道界面形状、弯头数、总长、蒸发/冷凝段长度等; ②操作参数,包括放置位置、加热/冷却方式、是否带有单向阀等; ③物理参数,包括工质热物性、充液率等.

2.1 加热功率对脉动热管启动运行的影响

2.1.1 不同功率下的启动运行

文献 [8]中作者把脉动热管的启动过程分为 2 类:一类是低加热功率下伴随有明显温度波动的显热启动过程,一类是高加热功率下的光滑连续启动过程,这 2 类启动过程如图 2 3 所示.

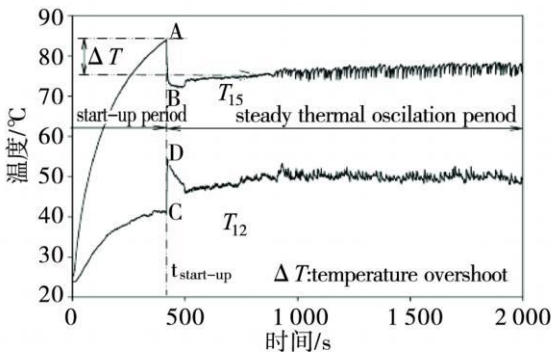


图2 加热功率为10.0W时的启动过程 Fig.2 Start-up of the PHP at lower power of 10.0W

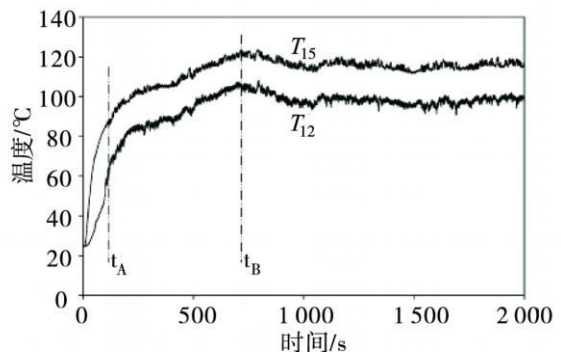


图3 加热功率为25.0W时的启动过程 Fig.3 Start-up of the PHP at high heating power of 25.0W

其中 T_{15} 为加热端温度, T_{12} 为冷却端温度. 图 2 中 $t = 0$ 到 $t = t_{start-up}$ 代表脉动热管的启动过程,在此过程中, T_{15} 和 T_{12} 都是随着时间的延长而上升的,但没有任何的振荡,这表明此时管内没有流体的运动. 在 $t = t_{start-up}$ 处 T_{15} 迅速地由 A 点的 85°C 下降到 B 点所对应的 75°C , 而 T_{12} 则由 C 点迅速升高到 D 点,这说明热量通过流体的流动由加热端流向了冷却端. 图 3 说明了高加热功率下脉动热管的启动过程,很明显它与低加热功率下的启动过程存在着很大的差异. 其过程可分为 3 个阶段, $t \leq t_0$ 是启动过程,这和图 2 的启动

过程相似, 不同之处在于没有温度波动, 说明此时脉动热管内流体保持静止而无脉动. 从 $t = t_1$ 到 $t = t_2$ 是第 2 个阶段, 此段时间内流体开始流动, 加热端和冷却端的温度都是随着时间的延长而上升的, 但是增加的幅度要小于第 1 个阶段. 第 3 个阶段从 t_2 开始. 通常把前两个过程看成是脉动热管的启动过程.

2.1.2 定加热功率下的启动运行

文献 [10] 中指出, 当对蒸发端施加要求的加热功率 (20W) 时, 通常能观察到 2 类启动过程: ①缓慢启动. ②突然迅速启动.

在缓慢启动过程中, 通常需要相当长的时间流体才开始振荡. 蒸发端温度保持稳定地升高直到蒸发端和冷凝端之间形成足够大的温度梯度以推动流体流动为止. 热而轻的流体混合物的浮力和蒸发/冷凝区域内气泡的生成/破裂都有利于脉动热管的启动. 它们会导致冷热流体的混合, 进而引起冷凝温度的迅速上升和蒸发温度的降低; 在突然迅速启动过程中, 上述一些列现象发生在相对较短的时间内, 也就是说, 蒸发端加入热量之后, 流体的振荡马上就开始了.

脉动热管的缓慢启动和突然迅速启动可能依赖于毛细管内工质最初的两相分布. 初始时刻, 蒸发端内存在的汽液新月面、局部空隙率、和两相分布可能是影响启动过程的重要参数.

2.2 放置方式的影响

目前许多研究者都对处于竖直状态下的脉动热管启动问题进行了研究. 大部分研究者^[11~14]都实现了脉动热管在有重力作用时的正常运行, 并研究了影响其传热性能的诸多因素.

文献 [7] 研究了脉动热管在水平和垂直放置时的启动和运行特性. 脉动热管在垂直方式下运行时, 由于重力的作用, 液柱和汽泡均处于静止状态, 且长短不一, 此时平行毛细管内的体积分数 (或质量分数) 相同的可能性很小; 另外, 需要沿循环回路的全部静压之和必须为 0 为了满足这 2 种情况, 每个新月面的形状必须不同. 由于在平行毛细管中的质量分配是彼此不同的, 相应地推动流体反时针方向运行的动压降也是不同的. 随着气泡在蒸发段的形成和膨胀, 一个优先的运动方向将根据最小热阻的路径自动建立起来, 这可解释 2 相流循环中的启动方向. 而在水平方向放置时, 重力的影响可以忽略, 如果蒸发段的气泡膨胀, 明显的内/外部动荡和接触滞后角都会消失, 此时没有较明确的最小热阻方向. 同时也得到了与文献 [8] 类似的蒸发端温度随时间和加热功率变化的曲线图.

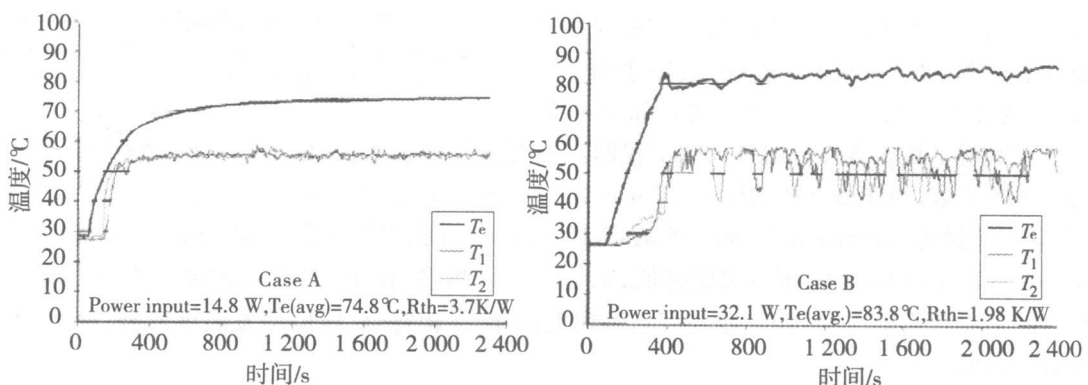


图4 不同工况下, 蒸发端温度和冷凝端温度随时间的变化图
Fig. 4 The correlation of evaporation temperature and condensing temperature versus time at different working conditions

其中 T_e 为蒸发端平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), 而 T_1 和 T_2 分别表示不同平行绝热段的温度. 通过观察图 4 中的情况 B, 可发现蒸发端温度的波动发生在 85°C 左右, 这与图 2 的结果几乎相同. 这个温度波动对脉动热管的实际应用很重要, 因为在很多情况下集成电路的温度都要求低于 84°C , 温度高于这个值就会导致集成电路芯片过热, 从而使工作性能下降, 甚至烧坏芯片. 因此, 在实际的应用中应当避免脉动热管在启动过程中产生这样的温度波动.

文献 [15] 的研究表明当热源处于闭式自激励循环型脉动热管的上端或与冷源水平放置时, 管内的脉

动现象几乎没有或不明显,要使脉动热管在水平方向的运行成为可能,需要一定的临界弯头数,这个临界弯头数为垂直和水平方向的性能建立了联系,有助于增加水平方向的内部扰动.当热源位于闭式自激励循环型脉动热管的下端时,在一定输入功率范围内,管内容易发生脉动现象.这说明了重力对脉动循环有着重要的影响.

2.3 充液率

充液率是一个重要参数,在给定的工况下,需要对它进行优化以实现最大的传热性能和最小的传热热阻.文献[4]的作者认为:对于水平放置式脉动热管和竖直放置、顶部加热式脉动热管最合适的充液率为 50%~65%,而对于竖直放置、底部加热式脉动热管来说,情况却很复杂.在加热负荷很低时,最佳的充液率为 15%,此时脉动热管的传热热阻也最小,这是因为装置此时是作为 2 相闭式虹吸管工作而不是作为脉动热管而工作的.在加热负荷较大充液率增加时,脉动热管在自激励驱动力的作用下开始运行,最佳的传热特性对充液率在 40%~70% 之间变化时的影响不敏感.

西安交大徐容吉等^[16]采用控制恒定热流密度和冷凝温度的方法对平板开槽型脉动热管的启动过程进行了系统的实验研究.针对他们的实验装置,存在一个供脉动热管启动迅速而且达到稳定运行状态时广义热阻最小的最佳充液率、最佳管体倾斜角度和最佳的加热功率.热管冷却段冷却水流量对脉动热管启动性能影响较小.

淡江大学 Lin Yu-Hsing 等^[17]将不同浓度的银纳米流体填充在内径为 2.4mm 的铜质脉动热管中,比较了不同浓度和充液率对脉动热管性能的影响.结果表明,浓度相同时的最佳充液率为 60%,充液率相同时的最佳浓度为 100×10^{-6} ,如果加热功率与充液率相同,则对于 100×10^{-6} 的银纳米流体,加热端与冷凝端的温差比纯水低 7.79°C ,热阻比纯水低 0.092°C/W .

2.4 弯头数

文献[18]在常规条件下,通过各种参数研究了水平放置式脉动热管的传热特性.从所得的实验结果中发现水平放置式脉动热管的启动运行取决于蒸发温度,而蒸发温度又和弯头数有关.2 者的关系如图 5 所示.

图 5 不仅发现了临界弯头数而且加深了我们对弯头数的理解.临界弯头数是脉动热管作为传热设备运行时的最小弯头数.当 $T_e \geq 70^\circ\text{C}$,内径为 2mm 时,水平放置式脉动热管只有在临界弯头数为 11 时才开始运行;而对于内径为 1.5mm 和 1mm 的脉动热管来说,只有临界弯头数达到 16 时才能运行.所有的蒸发段长度都表现出了这种趋势:蒸发温度越低,临界弯头数越多.在 $T_e = 60^\circ\text{C}$,内径为 2mm 时,水平放置式脉动热管的临界弯头数增加到 16 这与以前的研究结果^[19]相符合,所以蒸发温度越高,管子内径越大,临界弯头数就越低.

2.5 工质种类

林玉兴^[20]以乙醇和甲醇为工质对自制的聚乙烯脉动管进行了测试,结果表明,以甲醇为工质时,脉动热管在垂直放置时的性能最好,输入功率为 3W 时,热阻比以乙醇为工质时低 4.5°C/W ;输入功率为 4W 时,加热段平均温度也比以乙醇为工质时低 15°C .通过观察本脉动热管发现,垂直放置比水平放置时容易启动.杨洪海^[21]等人的研究表明:脉动热管充注 R123 时最容易启动,也最容易烧干;以水为工质时热管启动较慢,但是稳定运行后,热阻较小,也不容易烧干.

一些研究者^[22-24]考察了纳米流体对脉动热管性能的影响.文献[22]对加入了银、二氧化钛纳米流体的脉动热管的性能进行了研究.结果表明:①工质不同,所观察到的弹状气泡形状也不同,水为子弹状,银与二氧化钛纳米流体为椭圆与琵琶状.②在倾角为 90° 、填充率为 30% 时,纳米流体所对应的热阻均比水好.③经过长时间的测试,纳米流体的性能趋近与水,故不利于长久使用.文献[23]以体积分数为 1% 的

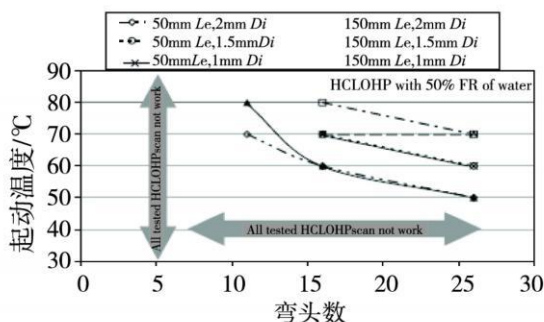


图5 弯头数与启动运行温度关系图
Fig. 5 Relationship between number of turns and operation start-up temperature

T_{D2} /H₂O 和 C₁₀O /H₂O 纳米流体及水工质, 充液率为 55% 时的脉动热管性能进行了实验研究, 结果表明, 与水相比, 纳米流体脉动热管的最小启动功率低, 启动时间较短, 工作温度低, 传热热阻小, 温度波动振幅小、频率高; 纳米流体能大幅度提高脉动热管的传热性能. 文献 [24] 等研究了脉动热管在以 3% 的 FS-39E 性微胶囊流体、乙醇、水 3 种工质, 40% ~ 80% 充液率下的启动性能以及工质和充液率对脉动热管热输送性能的影响. 结果表明: 脉动热管的启动与充液率、热驱动力和工质有关; 相比于乙醇和水, 微胶囊流体为工质时, 脉动热管具有较宽的工作范围, 尤其在高充液率条件下, 热管表现出良好的启动性能和热输送性能.

2.6 其它因素

文献 [26] 中作者对影响脉动热管启动的主要因素做了理论分析. 结果发现: 壁面形状、蒸发段的蒸发状况、过热度、气泡的生长、毛细管内壁的粗糙度对气泡的捕获能力, 均影响脉动热管的启动和运行. 而过热度和热流水平又取决于壁面的粗糙度和已有的气泡和它们的形状. 当对毛细管内表面进行涂层处理或增加表面粗糙度时, 脉动热管很容易启动. 另外, 内部工质对脉动热管的启动也有重大的影响.

3 启动运行过程的理论分析

脉动热管的启动问题可以通过热力型脉动理论^[8]来解释. 所谓热力型脉动就是由于相变系统中流量等参数的脉动引起壁面传热系数的变化, 从而引起金属温度有规律的脉动. 脉动可能造成金属过热或疲劳损坏, 所以在设备运行中应避免.

由于脉动热管管壁较薄, 故内外壁温差极小, 外壁温度的测量值能够很好代表内壁的温度值. 下面分两种情况对脉动热管内热力型脉动产生的机理进行分析.

1) 加热段金属壁面被汽柱冲刷时, 如图 6 所示.

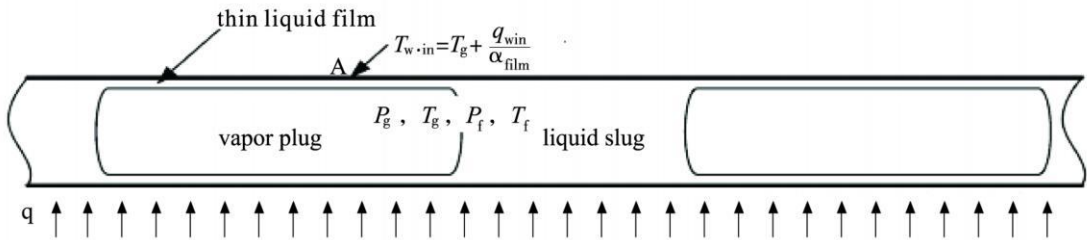


图6 加热段壁面被汽柱冲刷
Fig.6 Local wall surface immersed in the vapor plug region, heating section

在毛细管中, 汽柱和液柱共存, 在汽柱区, 管壁存在一液体薄层, 将汽柱和管壁分隔开来. 薄液层提供了非常高的传热系数, 沸腾发生在汽液界面处. 跨过汽液界面, 汽侧与液侧压力差

$$p_g - p_f = \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

式中 p_g 一为气体侧压力 (Pa); p_f 一液体侧压力; r 一为汽液界面的曲率半径 (m); σ 一为液体表面张力 (N/m).

汽侧温度 T_g 至少大于或等于对应压力 p 下的饱和温度 $T_{sat}(p_g)$, 因为沸腾发生在汽液界面处, 热量传递的方向是从液体传递到汽液界面, 因而

$$T_f > T_g > T_{sat}(p_g) \quad (2)$$

局部点 A 处的金属温度为:

$$T_{wi} = T_g + \frac{q_{wi}}{\alpha_{fl}} \quad (3)$$

其中 T_{wi} 一为金属管子外壁温度 ($^{\circ}\text{C}$), q_{wi} 一为内壁热流密度 (W/m^2), α_{fl} 一为薄液膜传热系数 (W/m^2

2) 加热段金属壁面被液柱冲刷时如图 7 所示:

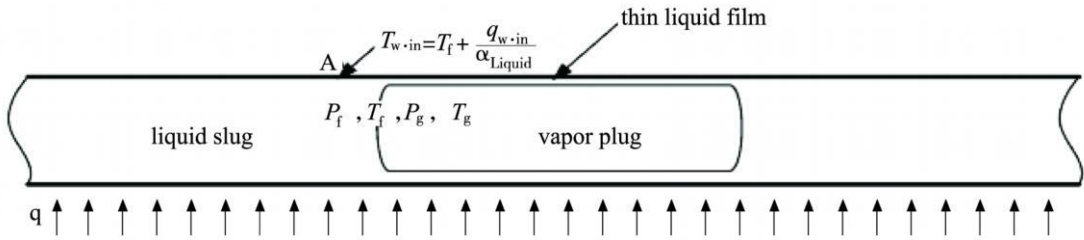


图7 加热段壁面被汽柱冲刷

Fig.7 Local wall surface immersed in the liquid slug region ,heating section

此时,局部点 A 处的金属温度为:

$$T_{wi} = T_f + \frac{q_{wi}}{\alpha_l} \quad (4)$$

式中 α_l —为液体对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$).

因为 $T_f > T_g$, $\alpha_{fl} > \alpha_b$, 所以对固定金属壁面的某点 A 当该点被汽柱冲刷时, 显示较低的温度值. 当脉动热管工作时, 局部点间歇地被汽柱或液体冲刷, 所以局部点温度时而上升, 时而下降, 形成有规律的脉动, 这就是脉动热管产生热力型脉动的原因.

在冷凝段也会产生类似的热力型脉动现象, 但是由于热量是由汽液介质传递给外界环境, 产生的过程与加热段相反, 即局部点被液体冲刷时, 显示较低的温度, 而被汽柱冲刷时, 显示较高的温度. 由于金属壁面间歇地被汽柱和液柱冲刷, 形成了冷凝段的热力型脉动现象. 在绝热段, 由于工质与外界环境几乎无热交换, 因而, 热力型脉动的幅度比较小.

4 结 论

脉动热管作为一种新型热管散热技术, 大量的实验研究和理论模拟研究都证明了其优越性, 但是要想在实际中得到广泛的应用还依赖于以下问题的解决.

1) 虽然对脉动热管启动运行问题已有部分实验研究, 但多是对启动现象的描述和启动原理的推测, 由于脉动热管的启动关系到脉动热管的整体运行特性, 故需要对它的运行机理做进一步的分析研究.

2) 对影响脉动热管启动的因素分析存在着一定的局限性, 较普遍的采用了单因素轮换法来研究各个参数对启动运行特性的影响, 这显然与脉动热管的实际运行情况不符合, 在现实中脉动热管的启动往往是几个因素共同作用的结果. 因此有必要同时考虑几个因素对脉动热管启动过程的影响, 采用多因素分析法, 将多个因素进行关联, 最终确定一个影响脉动热管启动的综合指标. 例如可以采用正交试验设计^[26]来分析各因素与指标的关系, 分清各因素对指标影响的主次顺序, 确定影响因子, 找到主导影响因素, 从而找出优化方案.

3) 如何确定脉动热管的启动条件, 从而实现脉动热管在各个方向上的顺利启动既是脉动热管稳定、可靠运行的关键又是脉动热管应用领域扩展的前提.

4) 如何对脉动热管的结构进行优化以提高其传热能力需要进一步的研究. 商福民等^[27]通过实验发现不等径结构自激励脉动热管在中、低负荷情况下, 可以起到明显的强化传热作用, 而当不等径位置在热管的最下面, 热源位置在变径区域的下部时强化传热效果最佳. 曹小林等^[28]对脉动热管的结构进行了改进, 他们把脉动热管的流道截面由正方形改为矩形, 并把大小流道相间布置, 通过对比试验发现, 在相同条件下, 改进后的脉动热管的传热效果要优于改进前的.

参考文献:

[1] 赵晓军, 余菊. 热管的电子设备冷却技术 [J]. 世界科技研究与进展, 2007, 29(6): 19-23

[2] Guenin B.M. Packaging Designing for Thermal Performance [J]. Electronics Cooling, 1997, 3(2): 14-19

- [3] Akachi H. Structure of a Heat Pipe United State, 4921041[P]. 1990- 05- 01.
- [4] Tong B Y, Wang T N, Ooi K T. Closed- Looped Pulsating Heat Pipes[J]. Applied Thermal Engineering 2001, 21(18): 1845- 1862
- [5] Katsuhiko K, Morifumi T. Explosive in Two Phase Closed Thermosyphons with and Without a Non- Volatile Liquid[C] // Proceedings of 11th International Heat Pipe Conference, Tokyo, Japan 1999: 104- 109
- [6] Qu W, Ma H B. Theoretical Analysis of Start up of a Pulsating Heat Pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2007, 50(11): 2309- 2316
- [7] Khandekar S, Groll M. An Insight into Thermo- Hydrodynamic Coupling in Closed Loop Pulsating Heat Pipes[J]. International Journal of Thermal Sciences 2004, 43(1): 13- 20
- [8] Xu J L, Zhang X M. Start- Up and Steady Oscillation of a Pulsating Heat Pipe [J]. Heat Mass Transfer 2005, 41(8): 685- 694
- [9] 郑博轩. 二甲基矽氧混合铜粉之震荡热管研制 [D]. 台湾: 淡江大学, 2008
- [10] Khandekar S, Gautam P A, Shama P K. Multiple Quasi- Steady States in a Closed Loop Pulsating Heat Pipe [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(3): 535- 546
- [11] Khandekar S, Schneider M, Schafer P, et al. Thermal Fluid Dynamic Study of Flat Plate Closed- Loop Pulsating Heat Pipes [J]. Micro- scale Thermo Physical 2002, 6(4): 303- 317.
- [12] 徐进良, 张显明, 施慧烈. 脉冲热管中的热力型脉动现象及实验测量 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(4): 436- 441.
- [13] 曹小林, 席站利, 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
- [14] Khandekar S, Manyam S, Groll M, et al. Two- Phase Flow Modeling in Closed Loop Pulsating Heat Pipes[C] // Proceedings of the 13th International Heat Pipe Conference, Shanghai, China 2004: 275- 282
- [15] Groll M, Khandekar S. Pulsating Heat Pipes: Progress and Prospect[C] // Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment, Shanghai, Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003: 723- 730
- [16] 徐荣吉, 王瑞祥, 丛伟, 等. 脉动热管启动过程的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 530- 533
- [17] Lin Y H, Kang S W, Chen H L. Effect of Silver Nano- Fluid on Pulsating Heat Pipe Thermal Performance[J]. Applied Thermal Engineering 2008, 28(11): 1312- 1317.
- [18] Charoensawan P, Terdtoon P. Thermal Performance of Horizontal Closed- Loop Oscillating Heat Pipes [J]. Applied Thermal Engineering 2008, 28(5): 460- 466
- [19] Charoensawan P, Khandekar S, Groll M, et al. Closed Loop Pulsating Heat Pipes part A: Parametric Experimental Investigations[J]. Applied Thermal Engineering 2003, 23(16): 2009- 2020
- [20] Lin Y H, Kang S W, Wu T Y. Fabrication of polydimethylsiloxane (PDM S) Pulsating Heat Pipe[J]. Applied Thermal Engineering 2009, 29(2): 573- 580
- [21] 杨洪海, 万勍, 韩洪达, 等. 常规工况下多万头数脉动热管运行性能的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 77- 80
- [22] 陈建廷. 应用银、二氧化钛奈米流体增强脉动式热管性能之研究 [D]. 台湾: 国立台北科技大学, 2008
- [23] 冯建超, 曲伟. 纳米流体脉动热管的性能试验 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(1): 50- 56
- [24] 汪双凤, 林梓荣, 张伟保. 微胶囊流体脉动热管的热输送性能 [J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(3): 58- 61.
- [25] 曲伟, 周岩, 马鸿斌. 尺度效应对脉动热管启动和运行的影响 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 140- 142
- [26] 方开泰, 张兴. 正交与均匀实验设计 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2001
- [27] 商福民, 刘登瀛, 等. 采用不登记结构自激励振荡流热管实验强化传热 [J]. 动力工程, 2008, 28(1): 100- 103
- [28] 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