

脉动热管及其传热特性影响因素研究进展

方书起, 史启辉

(郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002)

摘要:介绍了脉动热管的结构、特点、工作原理,分析了运行中的主要现象和管径、弯折数、工质物性、充液率、倾角范围和加热方式等影响其运行的主要参数。概括了脉动热管的国内外研究现状,指出理论模型研究和工业实践应用将会成为今后脉动热管研究的热点。

关键词:脉动热管;流型;影响参数;理论模型

中图分类号:TQ051.5

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2007)02-0027-04

Advances in pulsating heat pipe and its heat transfer characteristics

FANG Shu-qi, SHI Qi-hui

(College of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The structure, characteristics and principle of a pulsating heat pipe (PHP) are introduced, and the phenomena observed during its operation are described. The affecting factors such as inner diameter, physical characteristics of the working fluid, filling ratio, heating mode and the numbers of the turns, are analyzed. The present status of the experimental and theoretical investigation is also summarized, and it is pointed out that theoretical research and industrial application will be the development highlight.

Key words: pulsating heat pipe; flow patterns; affecting factors; theoretical modeling

由于电子工业的飞速发展,芯片的集成度越来越高,外观尺寸越来越小,功耗越来越大,导致热流密度持续增加,常规散热器已明显不能满足如此高的热流条件。脉动热管(Pulsating Heat Pipe, PHP)是由日本 Actronics Kabushiki Kaisha 公司^[1-3]于 20 世纪 90 年代提出的一种新型、高效的传热元件,被认为是用于微小空间、高热流密度条件下的一种十分有前途的传热元件,受到各国工程和理论界的普遍关注。脉动热管结构十分简单,但运行机理却非常复杂。其传热特性受多种因素影响,涉及多学科理论知识。在一定的条件下脉动热管具有优良的传热特性,但其内部的传热机理还未能被很好地解释。本文介绍了脉动热管的结构特点、工作原理,分析了运行中观察到的主要现象和影响其运行的主要参数,概括了脉动热管的国内外研究现状,并指出了进一步研究方向。

1 结构特点和运行机理

1.1 结构特点

脉动热管的结构特点和工作原理与普通热管有很大不同,它是由一根内径足够小的长毛细管反复弯折,形成多个互相平行的通路且管内充入部分工

质,由于表面张力的作用形成汽塞和液栓在管内的随机分布,蒸发段和冷凝段正好分布在这些弯折处。脉动热管有 2 种基本形式:闭合回路型和非闭合回路型。综上所述,构成脉动热管必须满足 2 个基本条件,即小管径和回路的反复弯折。与普通热管相比,脉动热管具有多个加热段和冷却段,管内不需要使工质回流的吸液芯,绝热段亦可有可无。

1.2 运行机理

在抽成真空的毛细管中充入部分工质,由于表面张力的作用在管内形成不受外部控制的汽塞和液栓的随机分布。当加热段有热量输入时,工质受热发生相变,压力升高。由于汽液栓分布的随机性和局部传热的不均匀性,管内产生不均匀的压力分布驱动汽液两相流动。不同管内产生的压力波动相互作用,形成二次/三次影响^[4]。加热段持续地有热量输入的同时冷凝段不断带走热量,从而维持管内的压力不均现象,驱动工质运动形成周而复始的振荡,最后达到管内工质的“不稳定平衡运动状态”。

与普通热管相比,脉动热管具有如下优点:①体积小,结构简单,易于实现微型化。脉动热管是由毛细管构成,决定了其尺寸小,不需要使工质回流的毛细吸液芯,因此管内没有反汽液两相流,决定了其结

构简单。②驱动力和传热系数高^[5]。脉动热管内的驱动力是热驱动和毛细驱动的共同作用,其传热过程也是蒸发/冷凝传热和强制对流传热的共同作用,即同时传递潜热和显热。脉动热管由于具有这些独特的性质,可以获得很高的热流密度。有报道^[6]称,内径为 0.5 mm、充有 50% R142b 的脉动热管,在竖直工作时的热流密度可达 1 000 W/cm²,显著高于普通吸液芯热管。③适应性好。脉动热管可以根据使用工况弯折成适宜形状,有多个加热段和冷凝段,绝热段可有可无,可有多种加热方式。这些特性大大拓宽了其应用领域。④没有普通热管的传热极限^[7],不会出现长时间的干涸现象。

2 管内流型与影响参数

2.1 初始汽液栓

毛细管中部分充入工质,在表面张力的作用下工质会断裂成一系列长短不一的液栓和汽塞。由于液栓两边接触角的不同产生毛细压差克服重力的影响,初始汽液栓的分布状态和数量将会影响到达稳态振荡所需的时间。Shafii 等^[8]对竖直管内的液栓进行受力分析,建立动量方程求解液栓的初始长度,但该方程只适合液栓处于静力平衡时的状态。通常在小管径毛细管中需要应用液膜不稳定理论和毛细阻塞现象来预测初始液栓的长度^[9]。

2.2 管内流型

有热量输入后,蒸发段汽塞压力升高,这主要是因为:液栓气化进入相邻的汽塞导致汽塞密度和压力升高;蒸发段的加热也会使汽塞的温度和压力升高;另外,相邻液栓的运动压缩也会使汽塞压力升高。汽塞压力升高的同时产生体积膨胀推动邻近的液栓运动,该液栓的运动又会引起下游汽塞的压缩,同时由于汽塞在冷凝段的冷凝,会引起压力的传递和波动,产生振荡,最终形成汽液栓流,压力波动的大小取决于液栓运动的速度和汽塞在冷凝段的冷凝程度。

在启动阶段,当蒸发段有热量输入时液栓发生爆炸性沸腾^[10],发出刺耳的响声,产生大幅度振荡。当达到稳定状态后,管内建立起工质整体性的单向循环流动和单个汽液柱的局部振荡,不会再有像启动阶段的大幅度振荡。一旦循环运动建立起来,工质循环的方向就是不变的,但却是随机的,这是由于初始汽液栓分布具有随机性。循环速度与输入的热功率有关,随着加热功率的增加而增加。蒸发段的主要流型是气泡的产生、长大、分离和合并等;在冷

凝段主要是气泡的凝结、消失和小气泡的合并等。

Tong 等^[10]和 Lee 等^[11]都在可视化实验中观察到核态沸腾现象,但 Lee 等没有在实验中观察到工质的循环流动,只是发现工质沿轴向振荡。杨蔚原等^[12]在实验中观察到当脉动热管稳定运行后,在加热段气泡的迅速膨胀是管内的典型现象,底加热模式下观察到工质的单向流动和局部振荡,期间有周期性的徘徊和停顿,但没有观察到核态沸腾现象。Khandekar 等^[13]和 Zhang 等^[14]都在液栓运动过程中观察到“拖尾”现象,即有工质沿管壁从液栓流出,形成液膜。曲伟等^[15]在可视化实验中发现,当输入功率较大时管壁会出现环雾状流,在管壁形成小溪流-雾流-小溪流-雾流这样流型的不断转换。

2.3 传热特性影响参数

目前对脉动热管的实验研究主要集中在对管内流型的可视化研究、管壁温度的测量以及对单个参数影响的实验测量。传热特性影响参数大致可分为以下 3 类^[16]:①几何参数,包括管径、横截面形状、弯道数、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、是否带单向阀等;③物理参数,包括工质热物性、充液率等。

2.3.1 管径

对脉动热管来说,形成液栓和汽塞是其正常运行所必需的。如果管径过大将出现汽液分层现象,不能有效形成液栓和汽塞。因此要求脉动热管的管径必须足够小。Hosoda 等^[17]对气泡几何尺寸进行了研究,提出了能够形成汽塞所需的最大内径 (D_{\max}) 为:

$$D_{\max} \leq 1.84 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

式中, σ 为工作液体的表面张力, N/m; ρ_l, ρ_v 分别为工质的液、气相密度, kg/m³; g 为重力加速度, N/kg。

但需要说明的是,管径越小,需要克服的毛细阻力就越大。另外有研究^[18]表明,增大管内径有助于增强传热,因此应该在最大内径范围内选择合适的内径尺寸。

2.3.2 弯折数

目前很多实验中都采用弯折数较少的脉动热管进行研究,但 Akachi 等^[19]发现了临界弯道数的存在,即当脉动热管的弯折数大于某一值时,倾斜角度和加热方式对传热的影响很小。在他们的实验条件下,临界弯道数为 80。Charoensawan 等^[20]在实验中也发现了类似临界值的存在,内径为 2.0 mm、蒸发段长度为 15 cm、以乙醇为工质的脉动热管的临界弯

道数为16。当弯道数小于临界值时,脉动热管在水平位置不能很好地运行,在垂直放置底加热的情况下传热量最大。当弯道数大于临界值时,可以获得较宽的最佳倾角范围。在倾角大于 60° 时的传热量和垂直放置时保持相当,作者认为临界弯道数与工质物性和毛细管的尺寸有关,也可能与输入热流的大小有关。

2.3.3 工质物性

影响脉动热管传热特性的工质物性主要包括气化潜热、表面张力、比热、黏度、密度、饱和蒸汽压等,其中气化潜热是最主要的影响因素。工质的蒸发和冷凝是引起脉动的原因,工质气化潜热越小,蒸发和冷凝变得越活跃,能够形成较大的压力脉动,振荡传热的效果就会越好。有研究^[8,14]表明,脉动热管内的传热主要取决于显热的传递,潜热的作用主要在于汽液栓的振荡。因此比热也应是影响传热的一个重要物性。表面张力是能够形成汽液栓的原因,但在脉动热管稳态运行后,其对传热的影响是可以忽略的。

Charoensawan等^[20]研究了工质物性和几何尺寸对传热的综合影响,发现管径为2.0 mm时,水的传热特性要好于R123和乙醇;但管径为1.0 mm时,水的传热效果最差,R123和乙醇的传热效果相当。

2.3.4 充液率

充液率是指充入工质的体积占脉动热管内容积的百分比。最佳充液率与加热方式、弯道数、工质物性等因素有关。Akachi等^[19]认为,振荡热管的充液率要远大于普通热管,通常应大于50%。加热方式对充液率的影响比较显著。通常认为当充液率小于20%或大于80%时,工质不能产生有效的振荡。

2.3.5 倾角和加热方式

倾角和加热方式对脉动热管的运行有显著的影响。从Charoensawan等^[20]的实验可以看出,脉动热管在竖直放置底加热的模式下运行最好, $60^\circ \sim 90^\circ$ 为较理想的倾角范围。马永锡等^[21]得出了相似的结论。杨蔚原等^[12]认为,脉动热管在竖直放置底加热的模式下运行最好,而在竖直放置顶加热模式和水平放置时不能很好地运行,这主要是因为竖直放置底加热时,重力可使液体沿壁面向下回流,避免了烧干现象的发生,此外重力对压力波动也有很大帮助。Miyazaki等^[22]的可视化研究表明,水平加热下只观察到工质的振荡,没有发生单向循环。

3 理论研究现状

由于脉动热管内部运行的复杂性和随机性,目

前还未能很好地揭示其运行机理。已有一些学者提出了初步的理论模型,但都是在大量假设的基础上得出的。Zuo等^[23]将管内汽液栓的振荡简化成“单弹簧-质量-阻尼”系统,并用一个二阶微分方程来描述汽液栓的振荡。在此基础上,Wong等^[24]提出了“多弹簧-质量-阻尼模型”,用拉格朗日法研究了管内汽液栓的运动特性。但该模型没有考虑传热和相变过程,因此具有很大的局限性。Shafii等^[8]和Sakulchangsattajai等^[18]以液栓和汽塞为控制体,应用质量、动量和能量守恒方程建立了脉动热管的传热和运动模型,并应用有限差分的方法进行求解,得出了温度、压力、位移、传热量的周期性振荡。但该模型没有考虑液膜的存在及气泡的生成、合并,液栓的断裂等复杂现象,并认为最终汽塞的数量将减少到和加热段一样的数量,这与实际情况不符。Ma等^[5]认为蒸发段和冷凝段的温差(压力差)是脉动热管运行的驱动力,他们考虑了惯性力、摩擦力和需要克服的气泡压缩力,得出一个类似于强迫阻尼振动的二阶非齐次微分方程模型,该模型中认为脉动热管两端温差是影响管内振荡的主要因素。Maewawa等^[25]认为在某些条件下,脉动热管的运行特性属于混沌现象,但该模型不能预测脉动热管的传热特性。Khandekar等^[26]和崔晓钰等^[27]利用人工神经网络建立模型,并通过实验数据训练该网络。但当脉动热管的影响参数变化不大时,传热特性有可能发生跳跃性变化,此时就不能盲目地使用神经网络做预测。人工神经网络其实是采用“黑箱”的方法,必须经过大量的可靠的数据的训练,该网络的预测才可能是可行的。Holley等^[28]提出了采用变直径结构对脉动热管进行强化传热的想法,建立模型并进行了数值求解,但其可行性仍有待实验证明。商福民等^[29]提出了脉动热管强化传热的2个途径:即强化管内介质与管壁之间的传热或提高振荡频率和运行的循环动力,并由此提出了采用纳米流体和变截面结构强化脉动热管传热的想法。

4 结语

在一定条件下,稳定运行的脉动热管具有优良的传热特性,且具有结构上的优势。但由于脉动热管的运行涉及带有沸腾和冷凝的汽液两相流动,影响参数众多,所以在研究上有较大难度,对其运行机理的研究还很不成熟。在已有研究和数据累积的基础上,今后应该从以下几个方面进行深入研究:①寻找脉动热管的最佳工作条件,对各个参数的交互影

响进行系统研究;②改进现有的理论模型,考虑多因素影响,尽可能逼近管内实际运行情况,更好地从本质上认识脉动热管的工作过程;③经历过目前的“认识”阶段后,必将向更深入的“强化”与“控制”阶段过渡,因此脉动热管的强化传热与控制将会成为重要研究内容;④将脉动热管应用到工业实践中,对各运行参数进行优化,在实际工业使用中发现问题并进行改进。综上所述,理论模型研究和工业实践应用将会成为今后脉动热管研究的热点。随着研究的深入,相信脉动热管将会在传热领域发挥巨大的作用。

参考文献

- [1] Actronics Kabushiki Kaisha. Structure of a heat pipe: US, 4921041 [P]. 1990 - 05 - 01.
- [2] Actronics Kabushiki Kaisha. Structure of micro-heat pipe: US, 5219020 [P]. 1993 - 06 - 15.
- [3] Actronics Kabushiki Kaisha. L-type heat sink: US, 5490558 [P]. 1996 - 02 - 13.
- [4] Khandekar S, Dollinger N, Groll M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipe: An experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(6): 707 - 719.
- [5] Ma H B, Hanlon M A, Chen C L. An investigation of oscillating motions in a miniature pulsating heat pipe [J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2006, 2(2): 171 - 179.
- [6] Nishio S, Nagata S, Baba S, *et al.* Thermal performance of SEMOS heat pipes [C] // Taine J. Heat transfer 2002: Proceeding of 12th international heat transfers conference. Grenoble: Elsevier, 2002: 477 - 482.
- [7] Miyazaki Y, Akachi H. Heat transfer characteristics of looped capillary heat pipe [C] // Andrews J. Heat pipe technology: Proceeding of 5th international heat pipe symposium. Melbourne: Pergamon Elsevier, 1996: 378 - 383.
- [8] Shafii M B, Faghri A, Zhang Yuwen. Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2001, 123(6): 1159 - 1172.
- [9] Teng H, Cheng P, Zhao T S. Instability of condensate film and capillary blocking in small diameter thermosyphon condensers [J]. International Journal Heat Mass Transfer, 1999, 42(16): 3071 - 3083.
- [10] Tong B Y, Wong T N, Ooi K T. Closed-loop pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(18): 1845 - 1862.
- [11] Lee W H, Jung H S, Kim J H, *et al.* Flow visualization of oscillating capillary heat pipe [C] // Advanced Research Institute of Science and Engineering: Proceeding of 11th international heat pipe conference. Tokyo: Japan Association for Heat Pipes, 1999: 131 - 136.
- [12] 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.
- [13] Khandekar S, Charoensawan P, Groll M, *et al.* Closed loop pulsating heat pipes: Part B. Visualization and semi-empirical modeling [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2021 - 2033.
- [14] Zhang Yuwen, Faghri A. Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(4): 755 - 764.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Hosoda M, Nishio S, Shirakashi R. Study of meandering closed-loop heat-transport device [J]. JSME Int J, 1999, 24(2): 737 - 743.
- [18] Sakulchangsatjatai P, Terdtoon P, Wongratanaphisan T, *et al.* Operation modeling of closed-end and closed-loop oscillating heat pipes at normal operating condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(7): 995 - 1008.
- [19] Akachi H, Polasek F, Stule P. Pulsating heat pipe [C] // Andrews J. Proceeding of 5th international heat pipe symposium. Melbourne: Pergamon Elsevier, 1996: 208 - 217.
- [20] Charoensawan P, Khandekar S, Groll M, *et al.* Closed loop pulsating heat pipes: Part A. Parametric experimental investigation [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2009 - 2020.
- [21] 马永锡, 张红. 低于临界通道弯数振荡热管的传热特性 [J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(4): 87 - 90.
- [22] Miyazaki Y, Arikawa M. Oscillatory flow in the oscillating heat pipe [C] // Advanced Research Institute of Science and Engineering: Proceeding of 11th international heat pipe conference. Tokyo: Japan Association for Heat Pipes, 1999: 131 - 136.
- [23] Zuo Z J, North M T, Wert K L. High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2): 220 - 225.
- [24] Wong T N, Tong B Y, Lim S M, *et al.* Theoretical modeling of pulsating heat pipe [C] // Advanced Research Institute of Science and Engineering: Proceeding of 11th international heat pipe conference. Tokyo: Japan Association for Heat Pipes, 1999: 159 - 163.
- [25] Maezawa S, Nakajima S, Gi K, *et al.* Experimental study on chaotic behavior of thermohydraulic oscillation in oscillating thermosyphon [C] // Andrews J. Heat pipe technology: Proceeding of 5th international heat pipe symposium. Melbourne: Pergamon Elsevier, 1996: 131 - 137.
- [26] Khandekar S, Cui X, Groll M. Thermal performance modeling of pulsating heat pipes by artificial neural network [C] // Maidanik Yu. Proceeding of 12th international heat pipe conference. Moscow: Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of The Russian Academy of Sciences, 2002: 215 - 219.
- [27] 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.
- [28] 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(13): 2635 - 2651.
- [29] 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. ■