

改进型脉动热管的研究进展

汪健生*, 马赫

(天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要:着重对目前国内外脉动热管结构改进方面的研究进行了归纳总结,分析了各种结构对脉动热管传热效果的影响,讨论了其应用背景。此外,总结了目前所共识的脉动热管运行机理,并对脉动热管的改进方向以及实现工业化所需进行的工作提出了展望。

关键词:脉动热管;改进;几何参数;运行参数;物理参数

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)12-0010-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2015.12.004

A review of improved pulsating heat pipe

WANG Jian-sheng*, MA He

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Current researches on the pulsating heat pipe (PHP) with improved structure parameters at home and abroad are introduced and summarized. The influences of different structures on the thermal performance of PHP are analyzed. The application background is also discussed. Moreover, the common mechanism of PHP is summarized. The direction for improvement of PHP and future studies needed for industrialization are proposed as well.

Key words: pulsating heat pipe; improvement; structure parameter; operation condition; physical property

1 脉动热管概述

脉动热管自20世纪90年代Akachi^[1]提出以来,作为一种新型高效的传热元件一直备受关注。其按照结构可分为闭式回路脉动热管、开放式脉动热管、带单向阀门脉动热管^[2]。基本结构如图1所示,由蒸发段、绝热段和冷凝段3部分组成。当管内工质在蒸发段受热后发生相变,在压力差的作用下产生运动,在冷凝段气泡遇冷收缩破裂,工质回流,如此反复在管内振荡运动。随着现代电子技术飞速发展,脉动热管凭借结构小巧、成本低廉的优势在电子元件冷却中的应用前景十分广阔。

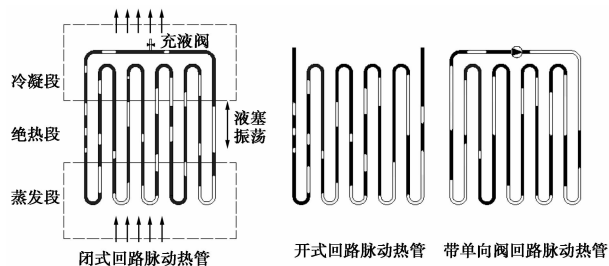


图1 脉动热管的基本结构

研究表明,影响脉动热管传热性能的主要因素包括管内径、弯头数目、截面形式、工质类型、倾斜角度、充液率、加热及冷却方式等^[2-5]。脉动热管的运行热阻是评价其性能优劣的重要物理量,计算公

式为:

$$R_{th} = (T_e - T_c)/Q \quad (1)$$

式中, T_e 为蒸发段温度平均值; T_c 为冷凝段温度平均值; Q 为加热功率。

本文中在分析总结脉动热管运行机理以及影响因素的基础上,主要从结构、运行、物性等方面对脉动热管改进的相关研究进行归纳,并评述其强化传热效果与影响。

2 几何参数改进

2.1 内径尺寸

脉动热管内工质主要以气柱和液塞形式运动,要求管径不能太大,否则无法形成有效的气液分布^[6]。但如果其内径过小,又会增加气、液流动的沿程阻力。因此脉动热管的内径 d 需要满足式(2)^[6-7]:

$$0.7 \sqrt{\sigma/[g(\rho_l - \rho_v)]} \leq d \leq 2 \sqrt{\sigma/[g(\rho_l - \rho_v)]} \quad (2)$$

式中, σ 为表面张力; g 为重力加速度; ρ_l 和 ρ_v 分别代表液相和气相密度。

在满足脉动热管内径的前提下,Kwon等^[8]对单环脉动热管采用左、右环路不同内径的改进方式,通过可视化实验考察其传热性能,如图2所示。实验发现,在充液率为50%的条件下,改进的脉动热管可以改善工质的流动,热阻降低了15%~45%。他们还给出单环脉动热管两侧管径之差存在一个最

佳范围公式,但在多回路脉动热管系统中是否适用还有待进一步验证。Tseng等^[9]对一个多回路脉动热管将其中一半截面形状改变,如图3所示。结果发现,交错式内径的脉动热管运行时液塞自激式周期振荡运动更强烈,从而可使脉动热管能够在较低的加热功率下启动,并增强了脉动热管与外界的热量交换,降低其运行热阻。因此在实际应用中可将以上2种改进方式加以结合,使脉动热管的启动性能和换热性能达到最佳。

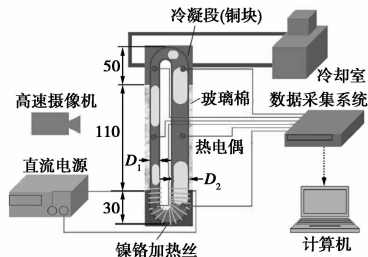


图2 非均匀管径单回路脉动热管

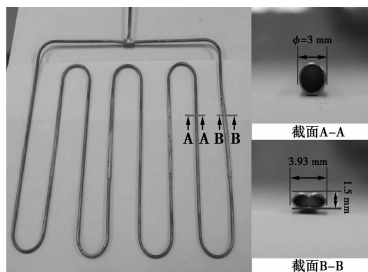


图3 交错式内径多回路脉动热管

2.2 截面形状

脉动热管的截面几何形状直接影响着脉动热管中的气、液塞的分布及毛细阻力等特性,对脉动热管的启动及传热效果产生直接影响。曹小林等^[10]将平板型脉动热管截面改进为深度一致但宽度不等的矩形槽道,发现通过合理匹配通道中的流动阻力可以实现工质稳定地单向流动。改进后的脉动热管提高了单位面积的传热极限,达到增强换热的效果,但这种改进结构在加热功率较大时热阻会急剧上升。Thompson等^[11]提出了截面为矩形的微通道三维交叉布置的平板脉动热管,如图4所示。研究加热面积、冷却温度、倾斜角度对脉动热管性能的影响。他

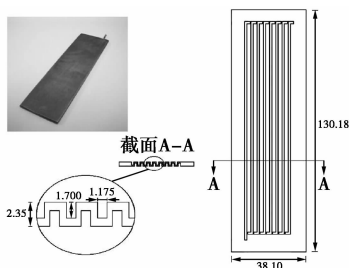


图4 三维交叉布置微通道平板式脉动热管

们提出了一种通过温度振荡曲线研究脉动热管影响因素的分析方法,发现脉动热管性能对方向的依赖性随着加热面积的增大而降低,且当工质为水时,FP-OHP的传热热阻最小。

2.3 弯头结构及数目

在脉动热管的稳定运行过程中,U型弯结构容易在高热流密度条件下发生干烧现象,对传热极限起到恶化作用。王宇^[12]对此从两相流分流的角度对弯头结构进行了改进(如图5所示),以达到管内合理分配工质的目的,并使工质及时回流至蒸发段,避免出现干烧,并达到了降低启动功率的效果。Charoensawan等^[13]研究了弯头数目对脉动热管启动特性的影响,发现临界弯头数目取决于脉动热管蒸发段的温度以及热管内径,他们的研究对于水平式多回路脉动热管的回路设计提供了实验依据。李惊涛等^[14]改变传统脉动热管的弯头连接方式,将脉动热管改进为立体环形结构,如图6所示。通过实验研究发现,这种改进型结构可以使热管在全热负荷变化范围内保持稳定,使工质流动得到改善,提高了脉动热管的传热性能。

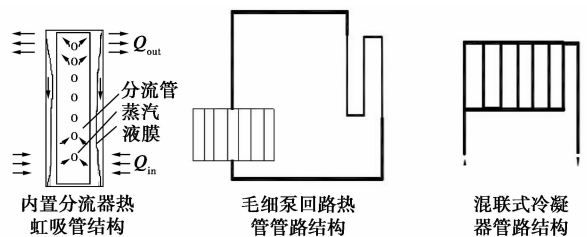


图5 改进型回路脉动热管

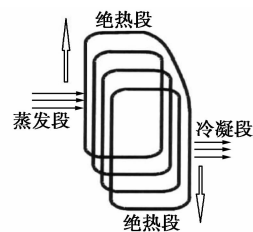


图6 立体环形结构脉动热管

2.4 局部结构改进

随着对脉动热管的运行规律的逐步研究与掌握,一些学者开始针对脉动热管的局部采取一定改进措施。徐德好等^[15-16]对板式脉动热管的蒸发段进行了改进,通过微槽道强化其局部散热(如图7所示),数值仿真出气柱/液塞在脉动热管内的流型演变和运动情况。结果表明,改进后的脉动热管热阻低于普通脉动热管,但由于翅片结构的存

条件下,保证管内的驱动力能够克服阻力,并在管内保持足够多的液体在管内稳定循环运行,才能使热量传递效率达到最高。模拟结果显示,脉动热管存在一个最佳充液率,其值约为 50%,该结果与文献 [3,17] 实验结果基本一致,可以为今后脉动热管的设计提供理论参考。

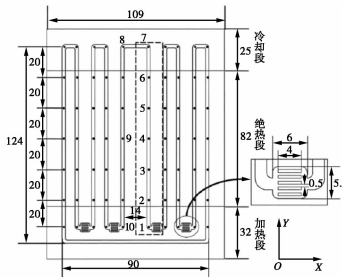


图 7 微槽道局部强化脉动热管

Thompson 等^[18]采用特斯拉型单向阀改进了板式脉动热管(TV FP-OHP)的绝热段,如图 8 所示。研究中以水作为工质,充液率为 70%,采用底部加热方式,利用中子射线成像技术研究发现,带有特斯拉型单向阀脉动热管能够促进工质在蒸发段内的流动,缩短工质运动中的静止时间,并提高工质在热管中的流动速率,使脉动热管传热热阻降低 15%~25%,达到了强化换热的目的。这种改进方式为板式脉动热管的设计提供了一个可行性的参考方案,但对于特斯拉阀的几何尺寸和数量仍需进一步研究和优化。

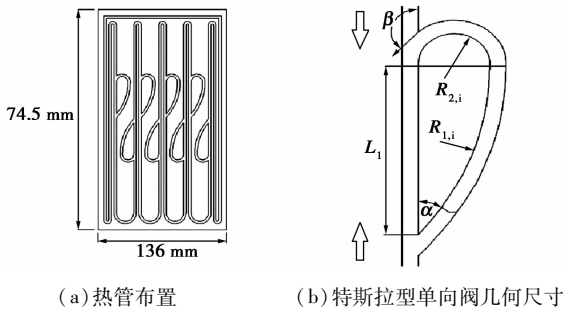


图 8 特斯拉型单向阀改进板式脉动热管

2.5 微型化改进

为了更好地适应电子芯片对散热元件的小型化要求,微型脉动热管的设计也是改进的重点方向之一。Chiang 等^[19]采用理论分析方法建立水平式脉动热管数学模型,研究不对称排列微通道脉动热管的振荡机理,考察了多种因素对脉动热管性能的影响,结果显示,非对称布置的微型脉动热管在较低弯头数目、较低充液率和较高环境温度下可产生更高频率的振荡。Qu 等^[20]采用可视化方法研究了具有梯形截面的微型硅制脉动热管(MPHPs),如图 9 所示,结果表明,MPHPs 能否正常启动主要取决于工

质的热物性,该研究为电子芯片的散热技术提供了一种有广阔前景的冷却方案。

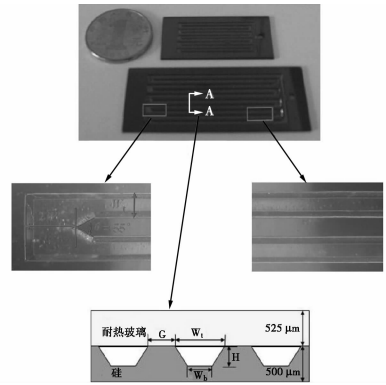


图 9 微型硅制脉动热管

3 操作参数改进

脉动热管的操作参数主要包括倾斜角度、加热方式等^[17]。Charoensawan^[13]通过实验研究了脉动热管的蒸发段长度对脉动热管传热性能的影响,发现对于水平式闭合振荡热管(HCLOHP),适当降低蒸发段长度有助于换热性能的提高,其原因是由于蒸发段长度降低,使得工质阻力压降降低,工质可以更容易从蒸发段流动到冷凝段。Qu 等^[21]实验研究了蒸发段长度对脉动热管换热特性的影响,发现蒸发段最佳长度与热管内径、工质类型、充液率以及加热功率有关。Wang 等^[22]利用数值模拟方法研究了多回路闭式脉动热管加热方式对启动特性的影响,结果显示,采用非均匀加热方式可以缩短脉动热管的启动时间,但热阻会有一定增加。文中建议在启动阶段对脉动热管采用非均匀加热方式,在稳定运行阶段采用均匀加热方式,有利于脉动热管的高效运行。

4 物理参数改进

对于同种工质,其充液率大小直接影响脉动热管能否正常运行^[23-24]。对于不同工质,物性参数也会对脉动热管的振荡特性、流型变化等产生一定影响^[25]。Zhu 等^[26]以水和丙酮依照不同比例混合作为工质,结果发现,采用水-丙酮混合工质的脉动热管的启动性能优于以纯水为工质的脉动热管,且热阻可降低 33.6%~68.9%。胡建军等^[27]采用实验方法研究了以汞-水混合物和纯水为工质的脉动热管在微倾角条件下的起振特性,发现适当比例混合物能使脉动热管实现微倾角启动,增强了脉动热管的运行可靠性。选用纳米流体作为工质是目前颇受重视的一种改进方案。主要采用的有碳纳米管纳米流体、银

纳米流体、氧化铝纳米流体^[28]等,研究发现,纳米流体有助于提升脉动热管传热性能,缩短启动时间。

5 结论及展望

作为新型高效的传热元件,目前对脉动热管的改进主要集中在结构、运行参数以及物理参数方面,这3个因素既有区别又互相联系,共同影响脉动热管的启动特性、流动特性以及换热特性。但是目前所进行的改进研究多处于实验分析阶段,要实现脉动热管的工业化应用,未来还需进行大量的工作。

(1) 继续完善脉动热管运行机制的理论分析,建立更加符合实际的预测模型,从两相流动理论上对脉动热管进行优化改进。

(2) 提高改进型脉动热管的普遍适用性,使之能适应不同工质和运行条件;积累更多的实验数据,为其优化和选型提供依据。

(3) 脉动热管的启动是影响脉动热管整体换热效率的关键,目前对于优化改进热管启动过程的研究较少,需要深入研究如何使脉动热管顺利启动的结构。

(4) 进一步研究如何提高微尺度脉动热管的传热性能,以适应微小空间的高热流密度散热要求,使其成为具有商业前途的散热技术。

参考文献

- [1] Akachi H. Structure of a heat pipe: US,4921041 A[P]. 1990.
- [2] Charoensawan Piyanun, Khandekar Sameer, Groll Manfred, *et al.* Closed loop pulsating heat pipes. Part A: Parametric experimental investigations[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2009-2020.
- [3] Saha Nandan, Das P K, Sharma P K. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74: 238-250.
- [4] Khandekar Sameer, Charoensawan Piyanun, Groll Manfred, *et al.* Closed loop pulsating heat pipes Part B: Visualization and semi-empirical modeling[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2021-2033.
- [5] 杨红梅, 韩洪达, Groll Manfred. 倾角及充液率对脉动热管运行性能的影响[J]. 动力工程, 2009, 29(2): 159-162.
- [6] Dobson R T, Harms T M. Lumped parameter analysis of closed and open oscillatory heat pipes[C]. Tokyo: Preceedings of the 11th International Heat Pipe Conference, 1999.
- [7] Miyazaki Y, Arikawa M. Oscillatory flow in the oscillating heat pipe [C]. Tokyo: 11th International Heat Pipe Conference, 1999: 143-148.
- [8] Gi Hwan Kwon, Sung Jin Kim. Operational characteristics of pulsating heat pipes with a dual-diameter tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 75: 184-195.
- [9] Tseng Chih Yung, Yang Kai Shing, Chien Kuo Hsiang, *et al.* Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 54: 85-92.
- [10] 曹小林, 周晋, 宴刚. 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.
- [11] Thompson S M, Cheng P, Ma H B. An experimental investigation of a three-dimensional flat-plate oscillating heat pipe with staggered microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 2951-2959.
- [12] 王宇. 回路脉动热管运行传热特性及管路结构改进的研究[D]. 天津: 天津大学环境科学与工程学院, 2011.
- [13] Charoensawan Piyanun, Terdtoon Pradit. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 460-466.
- [14] 李惊涛, 韩振兴, 李志宏, 等. 脉动热管运行和传热特性的可视化实验研究[J]. 现代化工, 2008, 28(11): 68-72.
- [15] 陈陶菲, 徐德好, 刘向东. 板式脉动热管强化传热方法研究[J]. 电子机械工程, 2011, 27(4): 5-8.
- [16] Xu Dehao, Chen Taofei, Xuan Yimin. Thermo-hydrodynamics analysis of vapor-liquid two-phase flow in the flat-plate pulsating heat pipe[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(4): 504-508.
- [17] Mamei Mauro, Manno Vincenzo, Filippeschi Sauro, *et al.* Thermal instability of a closed loop pulsating heat pipe: Combined effect of orientation and filling ratio[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59: 222-229.
- [18] Thompson S M, Ma H B, Wilson C. Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type check valves[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(7): 1265-1273.
- [19] Chiang Ching Ming, Chien Kuo Hsiang, Chen Han Ming, *et al.* Theoretical study of oscillatory phenomena in a horizontal closed-loop pulsating heat pipe with asymmetrical arrayed minichannel[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(7): 923-930.
- [20] Qu Jian, Wu Huiying, Cheng Ping. Start-up, heat transfer and flow characteristics of silicon-based micro pulsating heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 6109-6120.
- [21] Qu Jian, Wang Qian. Experimental study on the thermal performance of vertical closed-loop oscillating heat pipes and correlation modeling[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1154-1160.
- [22] Wang Jiansheng, Wang Zhenchuan, Li Meijun. Thermal performance of pulsating heat pipes with different heating patterns[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 64(1/2): 209-212.
- [23] Barua Himel, Ali Mohammad, Nuruzzaman Md, *et al.* Effect of filling ratio on heat transfer characteristics and performance of a closed loop pulsating heat pipe[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 88-95.
- [24] 李惟毅, 王宇. 充液率对单环路脉动热管启动运行的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 79-85.
- [25] Han Hua, Cui Xiaoyu, Zhu Yue, *et al.* A comparative study of the behavior of working fluids and their properties on the performance of pulsating heat pipes (PHP) [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 82: 138-147.
- [26] Zhu Yue, Cui Xiaoyu, Han Hua, *et al.* The study on the difference of the start-up and heat-transfer performance of the pulsating heat pipe with water-acetone mixtures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 834-842.
- [27] 胡建军, 徐进良. 汞-水混合工质脉动热管实验研究[J]. 化工学报, 2008, 59(5): 1083-1090.
- [28] 纪林林. 纳米流体的制备及其在脉动热管中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2014. ■