

零切角曲面微热管传热性能的实验研究

李银惠, 唐琼辉, 徐进良

(中国科学院广州能源研究所, 广东省广州市 510640)

Experimental Study on the Thermal Performance of Wire-bonded Flat Micro Heat Pipe

LI Yin-hui, TANG Qiong-hui, XU Jin-liang

(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640,
Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In this paper, a novel wire-bonded flat micro heat pipe is presented and a detailed experimental study on its performance is executed. The investigation covers the influence of fill ratios, inclination angles and working fluids on the effective thermal conductivity. It is indicated that for the working fluid of methanol, effective thermal conductivity at fill ratio of 25% is the largest compared with the others; while for acetone the optimal value is obtained at fill ratio of 20% for the lower heating powers and 25% for the higher heating powers. The inclination angle has great effect on the thermal performance of the micro heat pipe. Micro heat pipes with methanol perform much better than those with acetone. Besides, thermal oscillation is discovered and investigated with this new type of micro heat pipe.

KEY WORDS: thermal power engineering; zero contact angle; flat micro heat pipe; working fluid; inclination angle; fill ratio; oscillation

摘要: 提出一种新型的平板式零切角曲面微热管结构, 并对其性能进行了详细的实验研究。研究了充液比、倾角和工质对微热管有效导热系数的影响。结果表明, 甲醇在 25% 充液比时效果最好; 丙酮较低功率时充液比 20% 的热性能较好, 较高功率时 25% 的充液比较好。倾角对传热性能有一定的影响。以甲醇为工质的微热管性能优于丙酮为工质时的性能。此外实验研究过程中还发现了微热管的温度脉动现象, 并进行了理论分析。

关键词: 热能动力工程; 零切角曲面微热管; 工质; 倾角; 充液比; 脉动; 电子器件散热

0 引言

热管技术自 20 世纪 60 年代诞生以来, 以其传

基金项目: 广东省科技计划基金项目 (2003C33103)。

热效率高和温度均匀的优势在工业界获得了广泛的应用。目前常规尺寸的热管研究已经发展得比较充分, 建立了比较完整的理论体系; 科研人员针对具体实际应用进行了大量的实验和数值模拟工作^[1-2], 使热管获得了广泛的应用。随着电子信息的迅速发展, 电子器件趋向于高密集度和微型化, 单位面积上的发热量非常高, 同时器件运行的稳定性亦要求保证各部分温差维持在一定范围内, 从这个角度上看, 热管传热能力强和温度均匀的特点正好可以满足电子器件的要求。1984 年 Cotter 首次提出微热管的概念^[3], 并提出将这种微热管技术与电子器件相结合, 以提高电子器件的散热能力并改善其各部分温度的均匀性。此外, 充分运用微热管温度均匀的优势, 在实践中也将其作为均温器使用。

徐进良^[4]对外径 2 mm 的微型脉冲热管进行实验研究, 分析了热管倾斜角度和加热方式对其传热性能的影响。研究表明倾斜角度在 30°~90° 范围内脉冲热管性能比较稳定, 并且非均匀加热方式优于均匀加热方式。

微热管的“微”主要针对热管内部通道的尺寸而言。Cotter 将微热管定义为工质气液界面的弯月面平均曲率半径 r_c 与流体通道水力半径 r_h 处于同一个数量级的热管, Chen 等人^[5]则将微热管定义为 Bond 数大于等于 2 的热管。

微热管以内腔尖角区作为液态工质回流的通道, 通过尖角区产生的轴向毛细压差将液态工质从冷凝段压回到热管的蒸发段, 从而完成工质的循环。目前主要采取通过在微热管的基板上开出一簇微细三角形或矩形槽道的方法获得尖角区^[6-7], 这就要求

在很小的面积上开出若干微细槽道，因而加工精密度高，制造成本不菲。本文借鉴 Wang 的研究结果^[8]提出的零切角曲面微热管，采用在两块基板间焊接金属细丝的方法，细丝和平板之间相切的区域形成尖角区，由于该尖角区极易存储液体工质，蒸发段液体不易蒸干；加工工艺也比较简单，制造成本低；最重要的一点是具有一定的灵活性，例如可以根据细丝的粗细调整通道的尺寸，根据细丝的长度调整微热管的长度，以及根据细丝的数量调整微热管的宽度等。这个特点大大扩展了其适用范围，是一种值得推广的微热管技术。

1 零切角曲面微热管的原理和结构

零切角曲面微热管的原理如图 1 所示，将工质按一定的充液比充入微热管腔体内，本文中充液比定义为充入微热管内的液体工质的体积和微热管内总容积的比值。由于表面张力的作用，工质气液界面的弯月面和细铜丝与基板相切的部分形成一个液体通道，其横截面由两个曲面和一个平面构成，除了液体通道外，相邻两根铜丝和铜基板所围成空腔的其它空隙部分形成蒸汽通道。由于铜丝和基板相切，其夹角为零并且液体通道的横截面由两个曲面和一个平面构成，故称为零切角曲面微热管。微热管沿铜丝轴向分为蒸发段和冷凝段两部分。如图 2 所示，对蒸发段基板上方的加热块进行电加热，液态工质沿气液界面不断蒸发，被蒸发的气体由于压差的作用进入冷凝段，与冷凝段的热沉进行热交换，并冷凝为液体，冷凝液通过表面张力的作

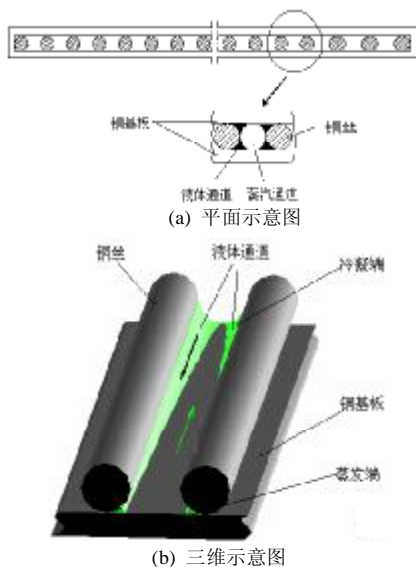


图 1 零切角曲面微热管原理
Fig. 1 Theory of the wire-bonded flat micro heat pipe

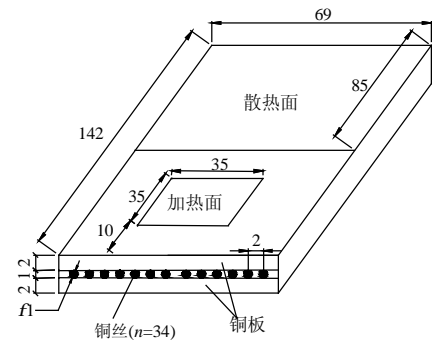


图 2 零切角曲面微热管结构示意图 (单位: mm)
Fig. 2 Structural sketch of the wire-bonded flat micro heat pipe (mm)

用克服液体的粘性力和气液两相的剪切力等阻力回流到蒸发段，如此反复形成气、液两相循环。

本文设计的零切角曲面微热管实验件结构如图 2 所示。在外形尺寸为 142 mm×69 mm×2 mm 的两块铜基板之间平铺直径为 1 mm 的细铜丝，铜丝之间的轴心距为 2 mm，基板和细铜丝之间采用特殊的铜焊工艺焊接，蒸发段终端及周围采用焊料或者粘合剂密封，冷凝段终端采用小铜管密封，小铜管同时作为抽真空和充装工质的通道。将微热管抽真空后按设定的充液比充装一定量的工质。

2 实验系统

图 3 为根据零切角曲面微热管的原理和结构建立的实验装置，装置分为 3 部分：微热管，高速动态数据采集系统和加热系统。其中加热系统由稳压器、调压器及功率计组成，普通供电系统提供的 220V 电压经稳压器稳定后，输出 220V 恒定电压作为调压器的输入电压，通过调压器后输出实验需要的不同的加热功率。功率计界面显示施加在加热段的电压、电流及功率。高速数据采集系统将采集到的数据传送到计算机进行处理。

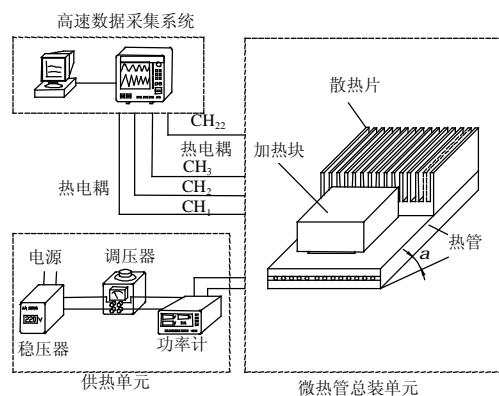


图 3 实验系统图
Fig. 3 Experimental setup

热电偶的布置如图4所示。其中编号为1的热偶用来测量加热块的温度，编号为2~22的热偶(其温度分别为 $T_1 \sim T_{22}$)分布在加热块和散热片所固定基板背侧的另一块基板上，按照蒸发段到冷凝段的顺序为热偶进行编号。由于微热管的几何结构沿铜丝径向呈中心对称分布，因此仅在左半侧布置热偶。

在微热管一端，与微热管紧密粘接在一起的是用作热沉的铝散热片，其尺寸为 $69 \text{ mm} \times 82 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$ ，风扇固定在热沉之上，将铝散热片散发的热量通过风扇形成的强迫对流释放到周围环境中。加热块直接与基板接触部分的尺寸是 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ，由编号为1的热偶置于其中进行温度测量；不与基板直接接触部分的尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，于其中插入3根加热丝用来加热。热沉和加热块的几何尺寸如图5所示。

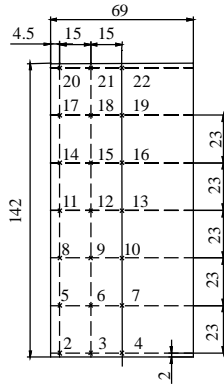


图4 热电偶布置图(单位: mm)
Fig. 4 Distribution of the thermocouples (mm)

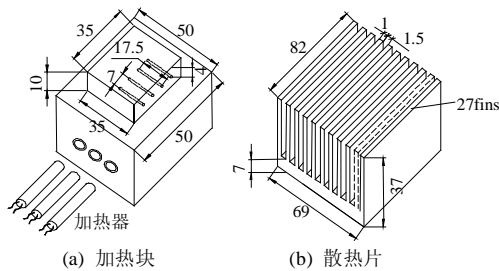


图5 零切角曲面微热管的加热和冷却装置
Fig. 5 Heating and cooling device for the micro heat pipe

微热管组件置于旋转平台上，可以方便地调整微热管平板面与水平面的夹角。抽真空、注液由本实验室研制的专用设备(已报国家专利，申请专利号为 ZL03223886.X)完成，其中真空泵采用美国 Boc Edwards 公司生产的极低真空度真空泵，真空度可达到绝对压力 10^{-3} Pa 。选择甲醇和丙酮作为工质，2种工质在 0.1 MPa 下和饱和温度下的物性如表1所示。

表1 两种工质在 0.1 MPa 下饱和温度下的热物理性质
Tab. 1 Saturated thermophysical properties of the working fluids at 0.1 MPa

工质	$T_{\text{sat}}/^\circ\text{C}$	$\rho_l/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\rho_g/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_{p,l}/(\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	$H_{fg}/(\text{kJ}/\text{Kg})$	$s/(\text{N}/\text{m})$
甲醇	64.7	749.36	1.41	2,620	1,098	18.53×10^{-3}
丙酮	56.29	748.21	2.02	2,305	512.9	19.08×10^{-3}

整个装置处于 24°C 的室温，通过室内空调将室温误差控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。温度测量采用美国 OMEGA 公司生产的 K 型高精度热偶，其测量误差在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 范围内。加热功率误差为 $\pm 0.7 \text{ W}$ ，几何尺寸的测量误差为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。根据本文定义的热管有效导热系数计算公式： $K_{\text{eff}} = QL / ((T_e - T_c)A)$ ，其中 A 为热管的截面面积(包括两块铜基板截面面积)， T_e 和 T_c 分别为蒸发段和冷凝段终端的温度，温度 Q 为热管蒸发段的加热功率， L 为热管沿铜丝轴向的长度。由于直接测量误差引起的有效导热系数的间接误差计算公式为

$$\frac{\Delta K_{\text{eff}}}{K_{\text{eff}}} = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + 2 \left| \frac{\Delta T}{T} \right| \quad (1)$$

故可根据相应测量值的直接误差计算得到有效导热系数的间接误差。

3 微热管的工作极限

根据 Chi^[9]在 1976 年提出的稳态下适用于微热管的常规表征方程不等式

$$\Delta p_{c,\text{max}} \geq \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_e + \Delta p_c + \Delta p'_c \quad (2)$$

式中： $\Delta p_{c,\text{max}}$ 为弯月面半径差值所能提供的最大轴向毛细压头； Δp_v ， Δp_l ， Δp_e ， Δp_c ， $\Delta p'_c$ 分别为蒸汽和流体的流动压力损失、界面蒸发和冷凝引起的压差以及冷凝段末端气液界面毛细压差。由重力引起的工质流动压力损失在 Δp_v ， Δp_l 中予以考虑，界面压差 Δp_e ， Δp_c 与流动压力损失相比非常小，可以忽略不计。

最大轴向毛细压头的表征式为

$$\Delta p_{c,\text{max}} = 2s \left(\frac{1}{r_{c,e}} - \frac{1}{r_{c,c}} \right) \quad (3)$$

其中 $r_{c,e}$ 、 $r_{c,c}$ 分别指蒸发段末端和冷凝段末端气、液界面弯月面半径。该表征式说明在一维模型中，液体工质从冷凝段到蒸发段的轴向流动是毛细流动，其驱动力是汽、液界面弯月面半径的轴向变化，毛细压力必须大于或等于蒸汽和液体的流动压力损失，以及气、液界面蒸发、冷凝压力损失之和，才能形成微热管内工质的循环，否则如果管内液体工质不能顺利回流到蒸发段，蒸发段会

由于不断受热蒸发而出现“干烧”现象，导致热管不能正常工作；而冷凝段末端则出现液体堵塞现象，致使实际有效冷凝工作长度缩短。

根据本文中微热管有效导热系数的定义，文中 T_e 取 T_2 、 T_3 、 T_4 的算术平均值， T_c 取 T_{20} 、 T_{21} 、 T_{22} 的算术平均值。

4 充液比对传热性能的影响

微型热管对充液比相当敏感，如果充装的液体过多，被冷凝的液体工质来不及流向蒸发段，容易在冷凝段产生堵塞，被堵塞的部分不能参与正常的汽、液两相流循环，相当于缩短了热管的长度；而如果充装的液体过少，蒸发段蒸发的液体不能及时补充，则容易产生“干烧”现象，蒸发段产生的热量不能及时散出，导致微热管蒸发段温度持续上升，不能保证工况稳定，此时表明微热管内的通道已经超过了毛细极限，导致有效导热系数降低。总而言之，充液比过高或过低都严重降低微热管的传热性能，研究表明，微热管的最佳充液比一般为 20%~30%，对于本文研究的零切角曲面微热管，在微热管内分别充装甲醇和丙酮，充液比介于 18% 至 30% 之间。图 6 表示微热管垂直放置时($\alpha=90^\circ$) 分别采用甲醇和丙酮的情况下充液比对传热性能的影响。从图中可见，对于甲醇，在充液比为 25% 时微热管的有效导热系数最高，特别是当加热功率达到 50W 时优势较其

它充液比更明显；对于丙酮，当蒸发段加热功率小于 60 W 时，则以充液比为 20% 时导热效果较好，而当加热功率大于 60 W 时，充液比为 25% 时的微热管呈现出较明显的优势。从图 6(b)也可以看出，对于丙酮，在能够保证微热管工况稳定的加热功率范围内，充液比为 18%、20%、22% 时有效导热系数分别在 20~40 W 之间达到最大值，超过这个最大值后逐渐下降，表明传热性能降低。而对于充液比为 25% 的情况则有比较明显的上升趋势，因此，对于加热功率较大的情况下用充液比 25% 较好。但是当加热功率达到一定限度时，难以保证工况正常，所以总的来说采用丙酮为工质时以 20% 的充液比最佳。

5 倾角对传热性能的影响

微热管不同于普通热管的原因最主要的问题在于出现了微尺度效应。普通尺度下，汽、液相变中浮升力起主要的作用，表面张力的作用较小可以忽略不计；而在微尺度下，汽、液两相的转变中表面张力的作用凸现出来，浮升力和表面张力的关系可以用无量纲准则数爱特威数来表达

$$Eo = \frac{(r_L - r_G)gD^2}{s} = \frac{\text{浮升力}}{\text{表面张力}} \quad (4)$$

其中 D 为当量水力直径

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (5)$$

其中： r_L 、 r_G 分别指工质的液相密度和气相密度； g 表示重力加速度； s 为表面张力； A_c 和 P 分别为通道的横截面积和湿周周长。对于本文研究的零切角曲面微热管，当量水力直径为 0.946 mm，在一个标准大气压下，甲醇和丙酮两种工质达到饱和温度时的爱特威数 Eo 分别为 0.354 和 0.363，这说明表面张力和浮升力处于同一个数量级，并且表面张力比浮升力的作用更明显；同时也表明重力作用仍占比较重要的地位，对微热管的性能有一定的影响。

由于决定 Eo 数的各参数除了水力直径外其它均为工质的物性，因此如果能够有效地减少水力直径 D ，使得 $Eo < 0.1$ 甚至 $Eo < 0.01$ ，则表面张力跃升至主导地位，浮升力作用可以忽略，微热管的性能将不随倾角改变^[10]。而改变水力直径可以通过改进装置的结构参数如金属细丝的直径、金属细丝的间距来获得，则零切角曲面微热管的应用范围可以得到很大扩展。本文仅讨论金属细

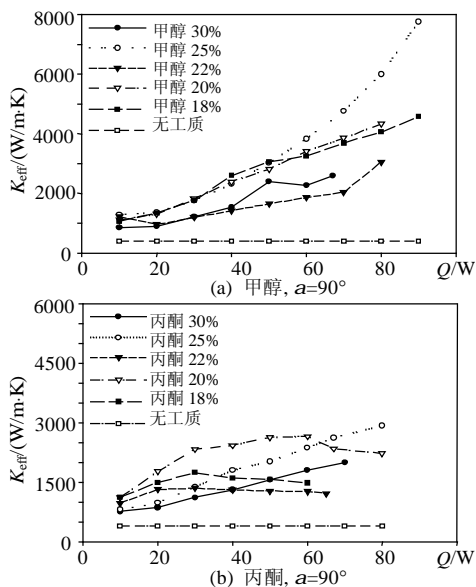


图 6 甲醇和丙酮的充液比对有效导热系数的影响
Fig. 6 Effect of fill ratio on the effective thermal conductivity

丝直径为 1 mm, 金属丝轴心距为 2 mm 的情况。

图 7 给出倾角对微热管传热性能的影响。从图中可以看出, 当微热管水平放置时, 对于不同的加热功率, 其有效导热系数比较接近, 均介于 800 W/(m·K)和 1500 W/(m·K)之间, 对比无工质情况下的导热(即纯铜的导热系数, 20℃下纯铜的导热系数为 398 W/(m·K)), 有效导热系数增加了 2~3.5 倍, 当微热管平板从水平向垂直方位逐渐倾斜时, 有效导热系数有所增加。而且, 随着加热功率的增大, 有效导热系数增加的幅度也越大。当加热功率达到 70 W 时, 采用甲醇时有效导热系数最大可以达到无工质下的 12 倍。从图中还可以发现, 有效导热系数的增加主要发生在 0°~30°之间, 而在 30°~90°之间则基本保持一个相对固定的范围内。

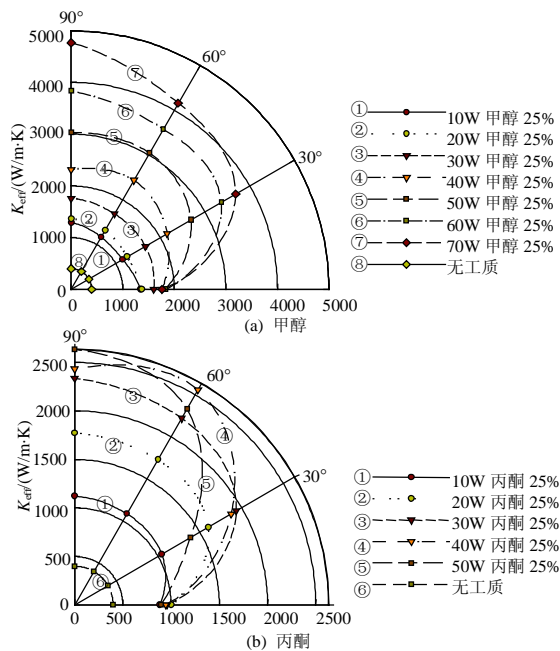


图 7 倾角对有效导热系数的影响

Fig. 7 Effect of inclination angle on the effective thermal conductivity

从以上的分析可以看出, 由于 Eo 数接近于 1/3, 表面张力处于主导地位, 但重力仍然是一个比较重要的影响因素。在实际应用中, 如果条件允许, 可适当选择一个小于 30° 的倾角如 15° 等, 以获得较理想的导热效果。

6 工质对传热性能的影响

图 8 表示微热管采用不同工质时的传热性能。从图中可以看出, 在同样的充液比下, 以甲醇为工质的微热管的有效导热系数比丙酮高, 这一特征在加热功率处于较低范围内时尚不明显, 当加热到一

定功率(如 40 W 以上)时, 甲醇为工质的微热管有效导热系数是以丙酮为工质时的 1.5 倍以上。而且随着加热功率的增加, 甲醇为工质的微热管有效导热系数呈上升趋势; 相比之下, 丙酮基本上在较小的功率范围内有效导热系数已经达到峰值, 出现逐渐下降的趋势。这种趋势不仅难以掌控, 而且也不利于实际应用。从微热管的最大热容量来看, 甲醇为工质时微热管可以耐受 90 W 的加热功率, 而丙酮为工质时微热管可耐受的加热功率不超过 80 W。实验分析表明, 采用甲醇为工质时的微热管性能优于以丙酮为工质的微热管性能。

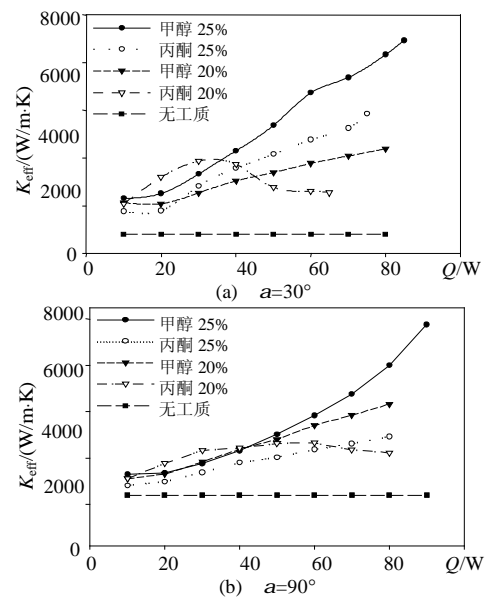


图 8 工质对有效导热系数的影响

Fig. 8 Effect of working fluid on the effective thermal conductivity

从工质热物理性质的角度进行分析, 同样可以得到以上的结论。将 0.1MPa 下饱和温度下两种工质进行比较发现, 甲醇的表面张力 (18.53×10^{-3} N/m) 虽略小于丙酮 (19.08×10^{-3} N/m), 但是甲醇的蒸发潜热 (1098 kJ/kg) 超过丙酮的两倍 (512.9 kJ/kg), 热容值亦大于丙酮, 说明甲醇气、液相变时工质容纳热量的能力强, 能使冷热两端的温差保持在较低的水平, 同时微热管耐受的最大加热功率也更高。

7 零切角曲面微热管的脉动现象分析

除以上根据有效导热系数进行的热性能分析外, 实验研究还发现, 在正常运行工况下, 零切角曲面微热管的温度呈脉动现象^[11-12]。图 9 所示为丙酮在 30% 的充液比下垂直放置(倾角为 90°)时, 蒸发段加热功率为 40W 时温度随时间的变化情况。取沿

铜丝轴向、位于微热管中心位置的热偶温度 T_4 、 T_{10} 、 T_{13} 、 T_{19} 进行分析, 可以看出从蒸发段到冷凝段均出现了温度脉动现象, 而且在蒸发段脉动比较明显, 从蒸发段向冷凝段过渡的阶段, 热管温度的脉动加剧, 到了冷凝段, 温度变化又逐渐恢复到比较平缓的状态。其中 T_4 点(蒸发段)的温度脉动周期为 0.69s, T_{10} 点的温度脉动周期上升到 0.90 s, 到了位于冷凝段的 T_{13} 点时, 脉动周期又下降为 0.55s, 至接近冷凝器端点的 T_{19} 点, 仍可发现温度的脉动现象, 但是脉动幅度较小, 基本保持比较平缓的状态。

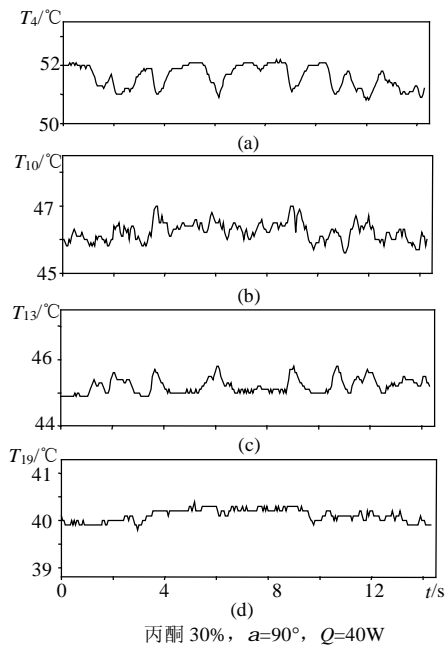


图 9 零切角曲面微热管通道内的热脉动
Fig. 9 Thermal oscillation in the channel of the wire-bonded flat micro heat pipe

为了进一步揭示这一规律, 作者对微热管进行了可视化分析, 采用高速可视化装置跟踪微热管内工质的相变传热现象。结果表明, 当微热管达到稳定的运行状态时(温度呈有规律的脉动, 不会出现一直上升的现象), 微热管通道内出现若干段柱状的“汽弹”, 并且这些汽弹产生于蒸发段, 并在逐渐长大的同时向冷凝段移动, 到达冷凝段后汽弹逐渐缩短, 最终破裂并冷凝成为液体。

根据热管的定义, 热管在表面张力和重力的作用下, 将冷凝段的液体抽吸到蒸发段, 蒸发段的液体受热达到饱和温度后成为蒸汽, 蒸汽流向冷凝段重新凝结成液体, 如此往复形成微热管内工质的循环, 达到将热量从蒸发段传至冷凝段的目的。由图 1 可知, 液体在曲面尖角区域内流动, 蒸汽则在由曲面尖角区边界和平板内壁围成的空间内流动。由

于工质粘性力和惯性力等的影响, 实际上蒸汽不是在一个从蒸发端到冷凝端贯通的充满蒸汽的通道内流动, 而是形成一个个汽弹从蒸发段向冷凝段移动, 对于热管的某一点, 当汽弹通过该点时, 由于汽弹和平板之间相隔一层薄液膜, 薄液膜的换热系数远大于液体工质的换热系数($a_{\text{film}} > a_{\text{liquid}}$); 而加热段由于从液体工质相变到气态工质, 需要吸收蒸发潜热才能成为蒸汽, 因此蒸汽的温度 T_g 低于液态工质的温度 T_f , 即 $T_f > T_g \geq T_{\text{sat}}(P_g)$ (T_{sat} 为一定蒸汽压下的饱和温度)。

这 2 种因素的综合作用下, 假定汽弹通过平板上蒸发段的某一点, 则平板内壁面上该点的温度为

$$T_{w,\text{in}1} = T_g + \frac{q_{w,\text{in}}}{a_{\text{film}}} \quad (6)$$

平板上某一点的内壁面充满液体时, 此时该点的温度为

$$T_{w,\text{in}2} = T_f + \frac{q_{w,\text{in}}}{a_{\text{liquid}}} \quad (7)$$

其中: $T_{w,\text{in}1}$ 为汽弹通过平板上某一点内壁面时该点的温度(不考虑平板的导热热阻); $T_{w,\text{in}2}$ 为汽弹离开该点内壁面重新充满液体时该点的温度; $q_{w,\text{in}}$ 为在蒸发段平板内壁某一点的热流密度。由上面的分析可知 $T_{w,\text{in}1} < T_{w,\text{in}2}$, 经过一段时间, 下一个汽弹再次通过该点, 温度又从 $T_{w,\text{in}2}$ 降为 $T_{w,\text{in}1}$ 。这种现象往复下去, 就形成了温度的脉动。对冷凝段进行分析也可以得到此类现象。这种脉动在微热管的中间段, 液体工质和气体工质均占较大体积的情况下更加明显, 从图 9 的 T_{10} 和 T_{13} 较其它点尤为剧烈的温度脉动现象可以证实这一点。

另外, 从图中的温度脉动还可以看出, 温度的脉动频率均保持在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的范围内, 这说明微热管平板的温度总体上来说是比较均衡的, 并没有产生大的波动。

8 结论

本文对一种新型的微热管, 零切角曲面微热管进行了理论实验研究, 研究充液比、倾角、工质对微热管性能的影响及其温度变化规律。所得研究结论如下:

(1) 充液比存在一个最佳值, 并且部分工质的最佳充液比受加热功率的影响。实验采用甲醇和丙酮两种工质, 结果表明, 甲醇的最佳充液比为 25%; 而丙酮在加热功率处于较低值时, 最佳充液比为

20%；当加热功率大于一定值时，最佳充液比为25%。这个结论与采用其它结构的微热管最佳充液比介于20%~30%之间相符。

(2) 倾角对传热性能有一定的影响。有效导热系数随倾角的增加而增加，而且当倾角从 0° 增加到 30° 时有效导热系数增加幅度最大，从 30° 增加到 90° 的过程中有效导热系数的增加幅度比较小。说明采用这种结构的微热管，在条件允许的情况下，建议将其置于 30° 左右倾角的位置，可获得较好的传热性能。

(3) 对比无工质的情况，微热管充装工质后的传热性能有很大的提高。随倾角不同，对比无工质时传热性能提高的幅度可达到2~12倍；采用甲醇为工质的有效导热系数是丙酮的1.5倍以上；此外，在微热管正常运行的加热功率范围内，甲醇的有效导热系数一直呈上升的趋势，而丙酮的有效导热系数在达到一定的值后逐渐下降。因此，作为微热管工质，甲醇的性能优于丙酮。

(4) 零切角曲面微热管的温度有脉动现象。这是由于蒸汽在通道内以汽弹方式从蒸发段向冷凝段移动产生的。但微热管的这种热脉动幅度保持在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内，不影响微热管的正常工作。

参考文献

- [1] 姚寿广, 马哲树, 陈如冰. 一种新型结构的热管式散热冷板性能的数字模拟试验与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 41-45. Yao Shouguang, Ma Zheshu, Chen Rubing. Numerical experimental study and analysis of performance for heat pipe cooling flat-plate with a newly structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 41-45(in Chinese).
- [2] 易杰, 刘振华. 竖直细管内高速空气-过冷水环状两相流的蒸发-对流耦合传热特性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 183-186. Yi Jie, Liu Zhenhua. Evaporation and convection coupled heat transfer for annular two-phase flow of water and air in a small vertical tube [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 183-186(in Chinese).
- [3] Cotter T P. Principles and prospects for micro heat pipe[C]. Proceedings of 5th International Heat Pipe Conference, Tsukuba, Japan, 1984, 416-420.
- [4] 张显明, 徐进良, 施慧烈. 倾斜角度及加热方式对脉冲热管传热性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 222-227. Zhang Xianming, Xu Jinliang, Shi Huilie. The effect of the heating power and the inclination angle on the pulsating heat pipe [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 222-227(in Chinese).
- [5] Chen H J, Groll M, Rosler S. Micro heat pipes experimental investigation and theoretical modeling[C]. Proceedings of the 8th International Heat Pipe Conference, Beijing, China, 1992: 396-400.
- [6] Plesch D E, Bier W, Seidel D, et al. Miniature heat pipes for heat removal from microelectronic circuits[C]. Proceedings of ASME Annual Meeting, Atlanta, GA, 1991.
- [7] Cao Y, Gao M, Bean J E, et al. Experiments and analyses of flat miniature heat pipes[J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(2): 158-164.
- [8] Wang Y X. The theoretical analysis and experimental investigation of a flexible, light weight radiator with micro heat pipes [D]. Texas: A&M University, 2001.
- [9] 马同泽, 侯增祺, 吴文铤. 热管[M]. 北京: 科学出版社, 1983, 46-50.
- [10] 甘云华, 徐进良, 周继军, 等. 微尺度相变传热的关键问题[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 399-407. Gan Yunhua, Xu Jinliang, Zhou Jijun, et al. Critical issues of the microscale phase change heat transfer[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 399-407(in Chinese).
- [11] Zhang X M, Xu J L, Zhou Z Q. Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol, and waters as working fluids[J]. Experimental Heat Transfer, 2004, 17(1): 47-68.
- [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. Xu Jinliang, Zhang Xianming, Shi Huilie. Thermal oscillation and experimental investigations of the pulsating heat pipe[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 436-441(in Chinese).

收稿日期: 2006-01-11。

作者简介:

李银惠(1980—), 男, 硕士研究生, 从事微热管及电子冷却器方面的研究工作;

唐琼辉(1976—), 女, 博士研究生, 从事微热管及微尺度多孔介质方面的研究工作, tangqh@ms.giec.ac.cn;

徐进良(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事微尺度传热方面的研究工作。

(编辑 贾瑞君)