



硅基微型振荡热管的流动可视化实验研究

屈健, 吴慧英*, 郑平

上海交通大学机械与动力工程学院动力机械工程教育部重点实验室, 上海 200240

* E-mail: whysrj@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-11; 接受日期: 2009-08-07

国家杰出青年科学基金(批准号: 50925624)、上海市教委科研创新项目(批准号: 08ZZ10)和上海市曙光计划跟踪项目(批准号: 08GG05)资助

摘要 利用MEMS技术, 首次在硅基芯片上加工制作了梯形截面的微型振荡热管. 借助摄像机, 对以FC-72为工质的两个通道水力直径分别为352 μm (#1)和394 μm (#2)的微型振荡热管的启动和稳定情况下的运动特征和流型等进行了可视化观察. 结果发现微型振荡热管的启动相当迅速, 在启动过程中没有观察到明显的核化现象, 蒸发段内的汽塞主要通过液塞断裂而产生; 进入稳定阶段后, 微型振荡热管对倾斜角度的适应性较强, 在 $10^\circ\sim 90^\circ$ 的范围都可实现持续稳定的大幅振荡, 但只在#2热管内明显地观察到工质的单向循环运动. 实验中观察到泡状流、塞状流、环状流、半环状流和波环状流等, 而核态沸腾只发生在#2热管的蒸发段, 在其冷凝段还观察到了喷射流.

关键词

微型振荡热管
流动可视化
流型
喷射流

随着微电子和通讯信息产业的快速发展, 各种相关产品和设备的高度集成化和微小型化已成为发展趋势, 由此带来的单位面积发热量的增加和温度的升高对设备的可靠性造成极大的威胁. 除了最高温度以外, 电子产品对温度的均匀性也有很高的要求, 例如在芯片设计过程中如何优化热量分布、减少局部“热点”往往成为保证其安全运行的关键所在^[1]. 由此可见, 热控制技术(thermal management)在这些产业的发展过程中正扮演着日益重要的角色.

而微热管技术正是近年来为了适应这种需要而发展起来的一门新兴技术^[2]. 因微热管体积很小, 故可以直接集成到芯片上而成为芯片的一部分^[3], 这对提高芯片的导热性能和温度的均匀性是非常有利的. 振荡热管没有毛细芯、结构简单、容易制作, 且能实现对高热量的快速传递^[4], 因此被认为是发展微热管的理想选择之一. 而就微加工来说, 板型振荡热管更

容易实现这一点, 且以往的研究^[5-7]证明板型振荡热管具有很好的传热效果. 最近 Borgmeyer和 Ma^[8]以及 Lin等人^[9]的工作都已将基板上的振荡热管加工的相当小, 并都能很好的运行. Borgmeyer和 Ma^[8]在76.2 mm $\times$ 76.2 mm的铜板上, 制作了通道尺寸为1.5785 mm的振荡热管; 而 Lin等人^[9]则利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作了尺寸56 mm $\times$ 50 mm、内径为2 mm的振荡热管. 但目前对板型振荡热管的研究还主要停留在毫米管径和普通材质上, 即普通小尺度范畴, 而对水力直径小至百微米级别的微尺度板型振荡热管的研究还鲜有报道.

本文报道了一种基于MEMS技术加工的硅基微型振荡热管(silicon-based micro pulsating heat pipe, SMPHP), 通道尺寸和毫米级的小型振荡热管相比大为减小, 主要利用可视化技术对其内部工质的流动情况进行了相关研究. 通过和以往小型振荡热管的

可视化实验研究^[10~12]相比较, 观察到了一些工质运动的新特征, 丰富了对振荡热管的认识. 由于微型振荡热管的传热特性和其内部工质的流动状况密切相关, 因此本研究对微型振荡热管传热能力的认识和其应用具有一定的指导意义.

1 实验系统

实验的测试段硅片振荡热管采用标准的MEMS工艺制作而成. 如图1(a)所示, 在46 mm×19 mm的范围内, 硅片上刻有的 $2n$ 根平行微槽道在两侧各形成 n 个U型弯头. 构成热管的硅片梯形截面微槽道采用湿法刻蚀工艺加工而成, 结构如图1(b)所示. 通过阳极扩散焊工艺, 将刻有微槽道的硅片上侧面与7740耐热玻璃键合处理后即可形成硅基微型振荡热管, 由此工艺制作得到的热管密封性极好, 内部可承受超过1 MPa的压力而不发生泄漏. 在热管运行过程中, 主要通过透明玻璃对管内工质两相流动进行可视化观测. 和图1(b)对应的两个硅基微型振荡热管的相关结构参数已由表1给出, 两热管微通道的水力直径(D_H)分别为352和394 μm .

图2为实验系统示意图, 主要由硅基微型振荡热

管、多通道数据采集系统、可视化系统、电加热和水冷装置这五个部分组成. 热管的蒸发段、绝热段和冷凝段的长度分别为8, 23和15 mm(见图1(a)); 采用底端加热, 上端冷却的方式进行工作, 其倾斜角度可以由水平到垂直位置调整, 本文中为了可视化拍摄效果的需要如未作说明实验中拍摄时热管均置70°位置. 在硅片热管底部从蒸发段向冷凝段方向均匀布置了6个直径0.1 mm、精度0.1℃的T型热电偶, 可以用来测量其壁面温度. 硅片蒸发段的热量是由底部的金属加热膜通过直流加热的方式供应的; 硅片和加热膜间放有一薄电绝缘层, 用来保证热电偶测温信号不受干扰. 在加热膜的两端还布置有用来精确测量其输入电压的数字万用表. 为减少散热损失, 硅片四周及加热膜底部均布置有绝热材料. 热管主要通过水冷的方式进行冷却, 冷却水的入口温度由恒温槽控制, 本实验定为25℃. 为观察热管微通道内的工质运动情况, 在热管玻璃正上方垂直的地方布置着带有放大镜头的摄像机, 由拍摄得到的图形可直接输入电脑.

本实验中选择电子冷却液FC-72作为工质, 实验前的抽真空和注液均由自制的装置完成. 热管的充液率定义为充注液体容积与通道内总容积的比值, 实验中#1和#2热管的充液率分别为55%和58%.

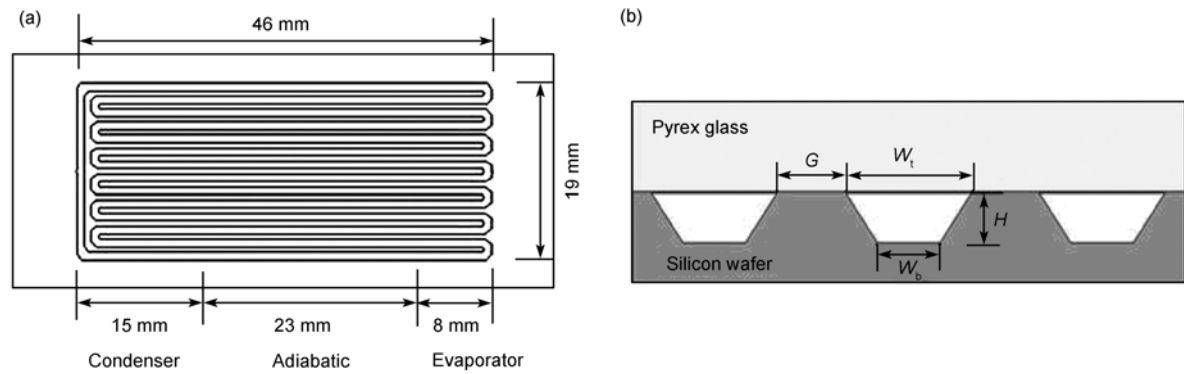


图1 测试段示意图

(a) 微型振荡热管; (b) 热管通道横截面

表1 硅基微型振荡热管的通道尺寸和弯头数

SMPHP	$W_b/\mu\text{m}$	$W_t/\mu\text{m}$	$G/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$D_H/\mu\text{m}$	n
#1	294	820	578	303	352	7
#2	485	1020	978	303	394	5

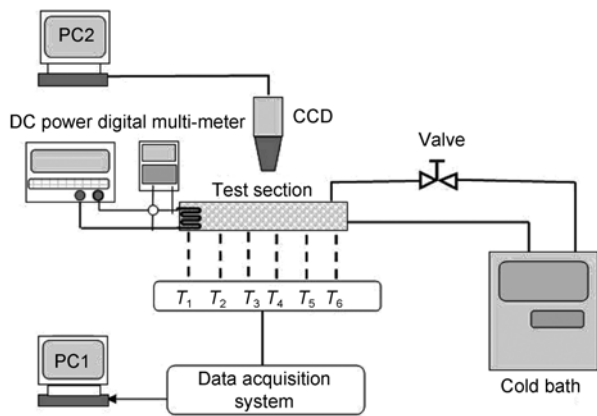


图 2 实验装置示意图

2 实验结果和讨论

和小型振荡热管相比, 硅基微型振荡热管的内径尺寸大幅减小, 其内部工质的运动表现出了一些新的特征. 下面将分别从热管的热启动、稳定运行下的整体流动特征和流型等方面对其进行分析.

2.1 热管的启动

当一个均匀恒定的热流加到热管的蒸发段后, 在热管的冷热端之间就会建立起温差, 以此来驱动管内的汽/液塞发生运动, 并最终实现热管的启动. 为了较详细的认识微型振荡热管的启动过程, 下面的介绍主要集中在启动的开始和完成这两个阶段.

2.1.1 启动开始阶段

蒸发段汽塞的产生和膨胀为振荡热管的启动提供了必要的动力. 图 3 跟踪了#2 微型振荡热管部分通道(A~D 四根通道)在热启动初始阶段管内汽/液塞运动变化情况, 加热功率为 6.9 W. 初始时刻六段液塞(1~6)和它们的运动方向已在图 3(a)中标出, 经过时间间隔 0.36, 0.68 和 1.12 s 后相应液塞的位置和运动方向则分别由图 3(b)~(d)给出. 在 t 时刻, 通道 A 和 D 内的汽塞发生膨胀, 推动液塞 2, 3 和 6 向上运动; 经过 0.36 s 后(见图 3(b)), 通道 D 内的汽塞进入 C 和 D 间 U 形弯头的底部, 而液塞 1 和 2 以及 2 和 3 间的汽塞则因冷凝而缩短; 在 $t+0.68$ s 时刻, 前面时刻(见图 3(b))中的液塞 5 底部因表面张力的作用而在此时断裂为新的液塞 5 和 7, 同时液塞 2 和 3 则合并成了新的液塞 2; 在最后的 $t+1.12$ s 时刻, 液塞 5 和 7 间的汽

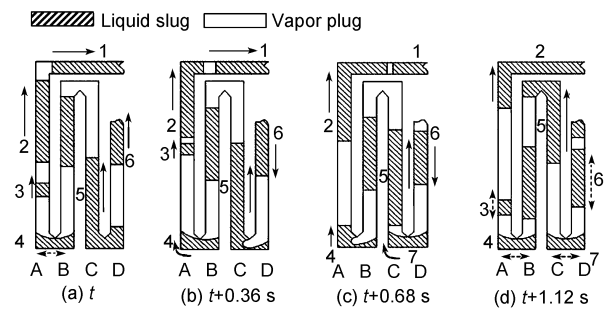


图 3 #2 微型振荡热管热启动的初始阶段

塞迅速膨胀推动液塞 5 快速向上运动, 而 A 和 B 间 U 形弯头底部则发生了和 $t+0.68$ s 时刻类似的情况, 前面的液塞 4 断裂为新的液塞 3 和 4. 此时, 蒸发段没有发现核化现象, 汽塞无法因气泡的产生和膨胀而形成, 而主要依靠蒸发段 U 形弯头处的结构和表面张力的作用使液柱断裂而产生. 这是该处汽塞形成的重要特征, 并为热管内汽/液塞的不稳定振荡和运动创造了条件.

2.1.2 启动完成阶段

微型振荡热管启动的同时也伴随着蒸发段温度的上升和冷热端温差的不断提高, 并导致冷热端和通道间压差的提高. 当压差足够大的时候, 通道内工质就能够克服流动阻力而实现大幅振荡, 并引起加热段温度的突然下降^[13]. 而这种大幅振荡开始时可能只局限在某几个通道内, 但随着振荡幅度的进一步增强, 汽/液塞就会跨过 U 形弯头进入到相邻通道内, 并最终使振荡扩展至所有通道. 图 4 中给出了#2 微型振荡热管在启动完成前的一系列照片(拍摄速度为 25 帧/s), 其中的箭头表明了液塞的运动方向(可通过比较拍摄得到的邻近图片中的液塞位置变化来确定). 在图 4(a)~(c)中, 热管内汽/液塞的运动主要局限在左边八根通道内, 最右边两根通道内的长液塞则基本保持不动. 而在图 4(d)中, 最右边两根通道内的长液塞已被左侧相邻通道内的汽塞推至最左侧, 此时其它通道内的液塞运动幅度则很大, 已经扩展至相邻通道. 随着运动幅度的进一步增强, 上述长液塞也开始运动起来, 并发生了断裂(见图 4(e)~(h)). 最终, 长液塞消失(见图 4(i)), 各通道内的汽/液塞在冷热端间均实现大幅振荡, 热管的启动完成. 两个热管的启动都相当快, 从启动开始到完成所经历的时间只有数分钟.

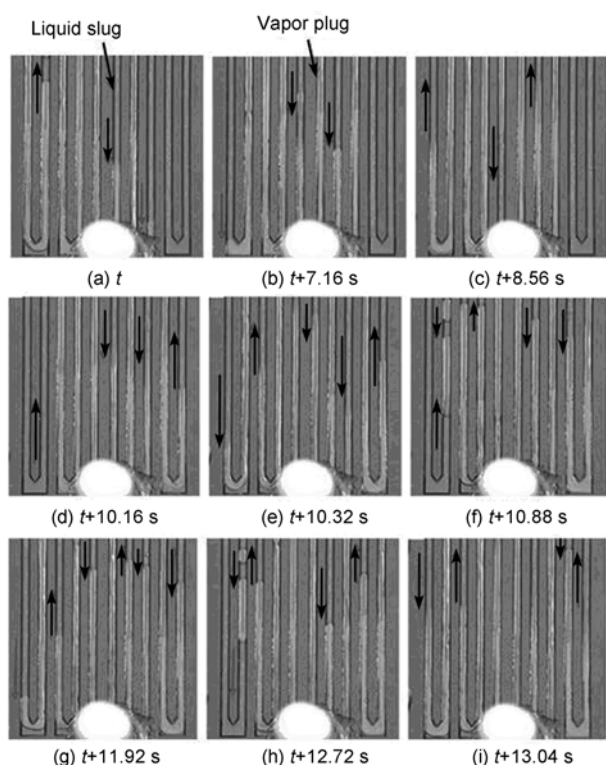
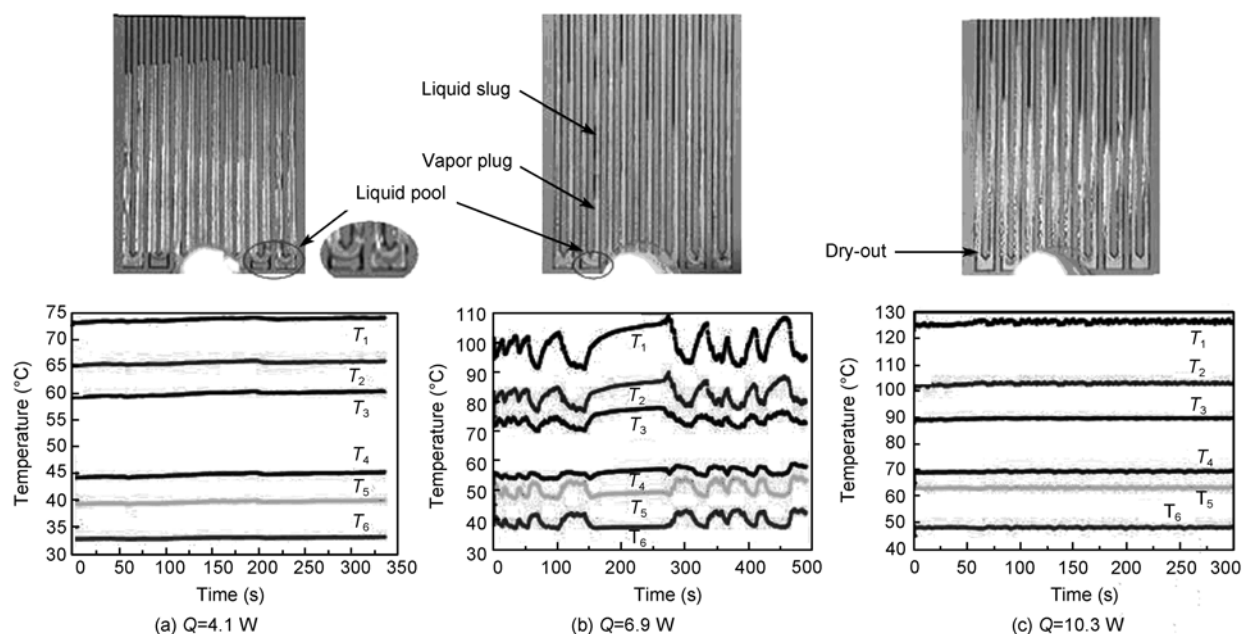


图 4 #2 微型振荡热管启动的完成阶段

2.2 稳定状态下热管的运行

热启动完成以后, 微型振荡热管就进入了稳定的运行阶段, 但其运行情况又和小型振荡热管有所区别. 小型振荡热管进入稳定阶段后蒸发段因能及时得到液塞的补充, 所以不容易发生“烧干”现象, 并容易出现管内工质的整体循环运动^[12]. 而微型振荡热管运行时液塞在绝热段和冷凝段的分布明显要比蒸发段多, 因此蒸发段更容易被“烧干”. 图 5 给出了 #1 微型振荡热管内汽、液相分布状况随加热功率变化的情况: 在加热功率较低时, 热管蒸发段 U 形弯头底部会形成液池(见图 5(a)), 随着加热功率的增加, 液池的数量逐渐减小(见图 5(b)), 最后完全消失而使整个蒸发段呈“烧干”状态(见图 5(c)). 另外, 图 5 还给出了不同加热功率下 6 个热电偶测点温度随时间的变化情况. 在 $Q = 4.1 \text{ W}$ 的情况下, 热管的振荡幅度很小, 液相主要通过其截面尖角的毛细力和重力回流到加热段, 类似于平行分布的热虹吸管, 因此温度基本保持不变; 而当 $Q = 6.9 \text{ W}$ 时, 热管内就观察到了明显的大幅振荡, 测点温度也相应发生了较大幅度的脉动, 特别是蒸发段 T_1 的脉动振幅已经超过了 9°C ; 进一步增大功率到 $Q = 10.3 \text{ W}$ 时, 热管蒸发段已处于“烧干”


 图 5 #1 微型振荡热管在(a) $Q = 4.1 \text{ W}$, (b) $Q = 6.9 \text{ W}$ 和(c) $Q = 10.3 \text{ W}$ 三种加热功率下通道内的汽、液塞分布以及对对应情况下各热电偶测点的温度变化状况

状态, 液相无法进入其中而被局限在冷凝段及其附近, 振荡被抑制, 温度又恢复稳定但会变得很高。

虽然两个微型振荡热管内的工质在冷热段间均能发生大幅快速振荡, 但明显的单向循环却只出现在#2 热管内, 这和两者的结构尺寸密切相关。与#2 热管相比, #1 热管的水力直径比较小, 因此充液率接近的情况下工质在其内部运动过程中的阻力会明显提高, 因此较难实现单向循环运动。另外, 实验发现在 #2 加热段底部更容易形成液池, 而#1 热管则容易在较高加热功率下提前发生“间歇性烧干”甚至“烧干”现象。对振荡热管来说, 工质在管内的循环运动往往发生在加热功率较高的时候, 这就要求此时热管的蒸发段未发生“烧干”。显然#1 热管较之#2 热管更容易发生“烧干”, 这也是只有在#2 热管中能明显观察到工质单向运动的另一个原因。除了加热功率以外, 工质类型和充液率也会对振荡热管内的单向循环运动产生影响, 所以这里并不排除#1 热管在选用其它工质或者充液率情况下能实现单向运动的可能性。

图 6 是#2 热管内工质整体单向循环运动的示意图, 加热功率 $Q=10.5\text{ W}$ 。此时相邻通道内的工质运动状况具有明显的差别, 由蒸发段流向冷凝段的工质以半环状流和环状流为主; 但是由冷凝段流向加热段的工质则以塞/泡状流为主, 进入蒸发段后则转化为环状/半环状流。热管内两种主要流型在相邻管间交

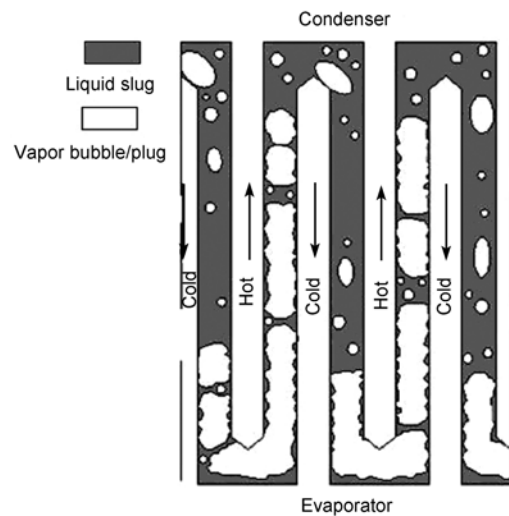


图 6 工质在#2 微型振荡热管内的循环运动示意图

替分布、清晰可辨, 工质沿着逆时针或顺时针方向快速流动, 并且通道间温度也会呈冷热交替状态变化^[7]。

此外, 实验中发现热管在水平放置情况下也能发生大幅振荡, 但当振荡突然停止后就难以恢复, 需要倾斜一定角度后才能重新运行。图 7 是#1 热管在水平位置时在绝热段处拍摄得到的管内工质由快速振荡到停止过程的一组照片, 加热功率 $Q=4.5\text{ W}$ 。在图 7(a)~(e)中管内汽、液塞的振荡速度逐渐减慢, 到图 7(f)后就基本停止了运动, 表明热管仍受重力的影响。而热管倾斜

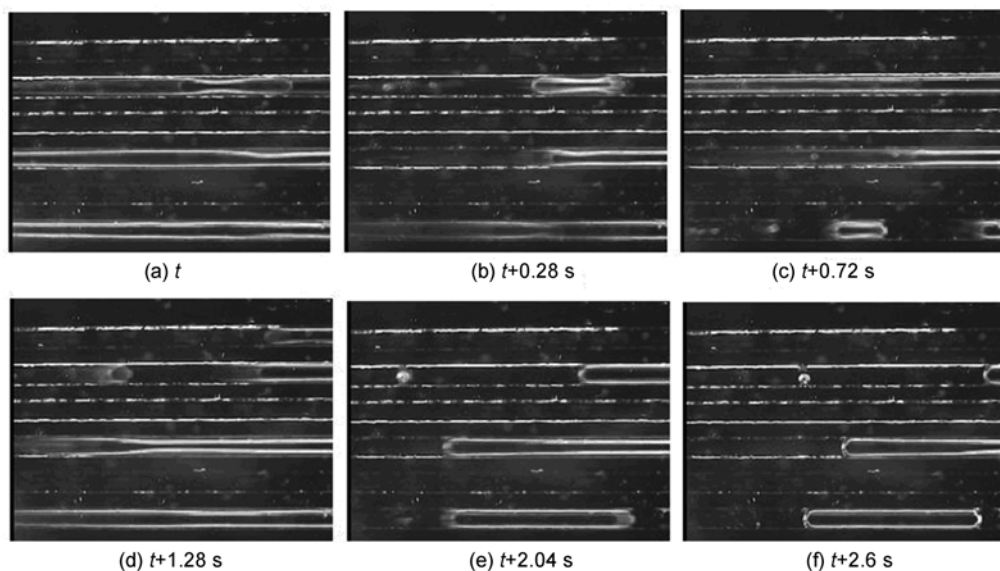


图 7 水平放置下#1 热管内的工质由快速振荡到停止运动的过程($Q=4.5\text{ W}$)

角度大于 10° 后自我恢复能力则明显提高, 停止运动后无需借助外力改变状态即能自行恢复. 如此大角度范围内热管都能稳定运行, 说明其对角度变化具有很好的适应性.

2.3 热管内的流型

虽然实验中所研究的两个微型振荡热管的水力直径相差不大, 充液率接近, U 形弯头数也只相差 2, 但两者的流型却有较大的差别, 尤其在蒸发段和冷凝段更加明显.

2.3.1 蒸发段

对于微型振荡热管来说, 因截面尖角的作用^[7], 环状流(见图 8(a))和半环状流是其蒸发段的主要流型特征. 另外, 由于通道尺寸较小, 蒸发段附近汽液界面易受开尔文-亥姆霍兹不稳(Kelvin-Helmholtz instability)的影响而产生和文献[14]中相似的波环状流.

除了如图8(a)所示的环状流以外, 因液桥等影响在蒸发段还会偶尔出现塞状流(见图8(b)). 但塞/泡状流却主要出现在能发生核态沸腾的#2热管中(见图8(c)), 而在#1热管中则未明显地观察到. 显然, 形成核态沸腾需要足够大的过热度, 因此蒸发段的温度会比较高, 要求满足^[15]:

$$T_w > T_{\text{sat}} + \frac{2\sigma}{r} \frac{T_{\text{sat}}}{\lambda \rho_g} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right), \quad (1)$$

式中 T_w , T_{sat} , r , σ , λ , ρ_l , ρ_g 分别表示壁面温度、饱和温度、核化半径、表面张力、汽化潜热、液相和汽相密度. 因为#1和#2热管内表面的材质相同, 所用工质相同, 所以在充液率接近的情况下发生核态沸腾所需的壁面温度也应相近. 我们通过测量确定了#2热管蒸发段处发生核态沸腾的温度, 但发现#1热管的蒸发段在达到此温度前已经“烧干”, 液塞无法进入此区域, 因此核态沸腾也就难以发生. 另外, 核态沸腾产生的小气泡迅速长大并成为汽塞, 这也是形成塞状流的重要原因.

2.3.2 冷凝段

由于在蒸发段产生的环状流/半环状流进入冷凝段后会逐渐缩小甚至消失, 因此塞泡状流是其重要流型, 除此以外还在#2热管中观察到了喷射流^[16]. 图9给出了#2热管内某通道由绝热段流入冷凝段处

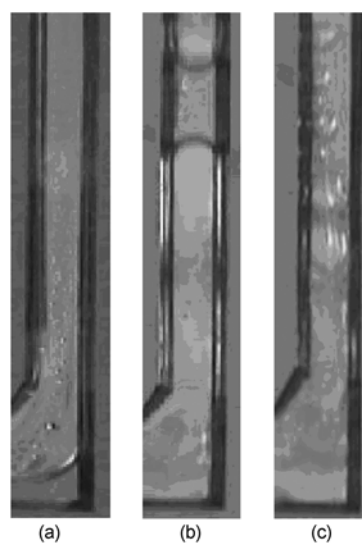


图8 热管蒸发段的流型

(a) 环状流; (b) 塞状流; (c) 塞/泡状流

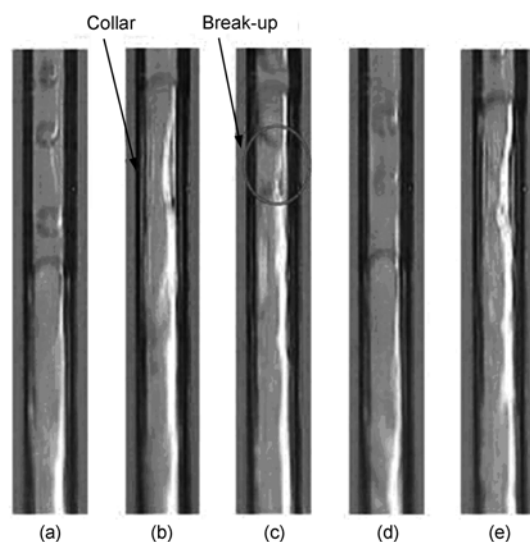


图9 喷射/泡状流($\Delta t = 0.033$ s)

喷射流产生过程的一系列照片, 拍摄时间间隔为 $\Delta t = 0.033$ s. 图9(a)中出现了环状流和泡状流, 随着工质向上流动, 经过时间间隔 Δt 后气泡消失(见图9(b)); 又经过 Δt 后前面的长汽塞呈喷射状断裂, 生成了新的汽塞(见图9(c)); 断裂后的汽塞又冷凝为气泡, 而下游的长汽塞则在表面张力作用下迅速收缩, 并为后面的喷射断裂提供准备(见图9(d)和(e)). 喷射流是环状流向塞泡状流转变的过渡流型, 其发生的位置相对比较固定, 这在小型振荡热管中还未见报道.

另外, 实验中观察到喷射流的产生还和工质在通道内的定向运动相关. 因为#1 热管内工质难以实现定向运动, 所以未见有明显的喷射流现象, 而只是发生汽塞断裂过程. 汽塞的普通断裂和发生喷射流时相比明显较慢, 且其发生断裂的位置靠近长汽塞的下游.

3 结论

本文主要从启动、稳定情况下的运动特点和流型等方面对硅基微型振荡热管内工质的流动特征进行了可视化研究, 主要得到以下结论:

1) 微型振荡热管的启动阶段没有观察到明显的

核化现象, 汽塞在蒸发段主要通过液塞在表面张力作用下的断裂而形成; 热管的整个启动过程相当快;

2) 和小型振荡热管相比, 微型振荡热管的蒸发段更容易被“烧干”, 但在#2 热管内观察到了工质的整体单向循环运动;

3) 微型振荡热管对倾斜角度的适应性比较好, 热管在 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的范围都能持续稳定的大幅振荡, 但在水平放置时停止运动后就难以恢复;

4) 在微型振荡热管内能观察到泡状流、塞状流、环状流、半环状流和波环状流等, 但核态沸腾只发生在#2 热管内;

5) 在#2 热管的冷凝段发现了持续稳定的喷射流, 但在#1 热管内其被一般的长汽塞断裂所取代.

参考文献

- 1 李腾, 刘静. 芯片冷却技术中的微/纳米材料与结构的研究进展. 微纳电子技术, 2004, 41(8): 21—27
- 2 张亚平, 冯全科, 余小玲. 微热管在电子器件冷却中的应用. 国外电子元器件, 2006, 9: 11—14
- 3 Cotter T P. Principles and prospects of micro-heat pipes. Proceedings of the 5th International Heat Pipe Conference, Tsukuba, 1984
- 4 Yang H H, Khandekar S, Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. Appl Therm Eng, 2008, 28(1): 49—59
- 5 Cao X L, Cheng P. A novel design of pulsating heat pipes with improved performance. 13th International Heat Pipe Conference (13th IHPC). Shanghai: IHPC, 2004. 302—307
- 6 Qu W, Zhou Y, Li Y, et al. Experimental study on mini pulsating heat pipes with square and regular triangle capillaries. Proc. 14th International Heat Pipe Conference (IHPC). Florianopolis: IHPC, 2007
- 7 Yang H H, Khandekar S, Groll M. Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders. Int J Therm Sci, 2009, 48(4): 815—824
- 8 Borgmeyer B, Ma H B. Experimental investigation of oscillating motions in a flat plate pulsating heat pipe. Therm heat transfer, 2007, 21(2): 405—409
- 9 Lin Y H, Kang S W, Wu T Y. Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe. Appl Therm Eng, 2009, 29(2-3): 573—580
- 10 Tong B Y, Wong T N, Ooi K T. Closed-loop pulsating heat pipe. Appl Therm Eng, 2001, 21(18): 1845—1862
- 11 曹小林, 席战利, 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. 热能动力工程, 2004, 19(4): 411—415
- 12 Xu J L, Li Y X, Wong T N. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe. Int J Heat Mass Trans, 2005, 48(16): 3338—3351
- 13 Lin Z R, Wang S F, Zhang W B. Experimental study on microcapsule fluid oscillating heat pipe. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(6): 1601—1606
- 14 屈健, 吴慧英, 唐慧敏. 微小型振荡热管的流动可视化实验研究. 航空动力学报, 2009, 24(4): 766—771
- 15 Whalley P B. Boiling, Condensation and Gas-Liquid Flow. Oxford: Oxford University Press, 1987
- 16 Wu H Y, Cheng P. Condensation flow patterns in silicon microchannels. Int J Heat Mass Trans, 2005, 48(16): 2186—2197