

文章编号: 1000-8055(2009)04-0766-06

微小型振荡热管的流动可视化实验

屈 健, 吴慧英, 唐慧敏

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 利用高速电荷耦合器件 (CCD) 对管内径分别为 2.5, 2, 1, 0.5 mm 的振荡热管进行了可视化研究, 记录了不同加热功率下热管内工质准静止和大幅振荡随时间交替变化的情况以及管内工质的流型变化情况. 实验中观察到了泡状流、塞状流、半环状流、波环状流和环状流等. 结果表明管径对管内的流型变化具有明显的作用. 随着管径的减小, 汽塞在加热段的形成主要由微/小气泡间的聚合发展演变成以单个气泡的膨胀长大为主. 另外, 管径的减小还使加热段周围容易生长汽柱, 而冷凝段内的汽塞则易于发生变形和断裂. 对微细管径的热管来说, 毛细波环状流是其重要特征, 在冷凝段容易发生毛细波环状流向毛细塞状流的转变.

关 键 词: 振荡热管; 流动可视化; 流型; 充液率

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Flow visualization of micro/mini pulsating heat pipes

QU Jian, WU Hui-ying, TANG Hui-min

(School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Flow visualization was investigated for pulsating heat pipes (PHPs) of internal diameters (IDs) 2.5, 2, 1, 0.5 mm using a high speed charge coupled device (CCD). Under different heat inputs, both the alternating transformation of the quasi-static phase and oscillation phase vs. time lapse and the flow patterns were recorded. Bubbly flow, slug flow, semi-annular flow, wavy-annular flow and annular flow were observed. Results show that the ID has a significant effect on the flow patterns. As the ID decreases, the formation of the vapor slugs at the evaporation section due to the small/tiny bubbles aggregation is dominated by the single bubble growth and expansion. In addition, more elongated bubbles are observed in the evaporator section, and deformation and breakup of the vapor plugs will likely occur in the condenser section by reducing the ID of the PHP. For the micro PHP, the capillary wavy-annular flow is a fundamental flow pattern, and the transition from capillary wavy-annular to capillary slug flow occurs in the condenser section.

Key words: pulsating heat pipe; flow visualization; flow patterns; filling ratio

振荡热管 (Pulsating heat pipe, 简称 PHP) 是上世纪 90 年代初提出的一种新型热管技术^[1]. PHP 主要通过气液塞在闭合蛇形回路内的振荡

运动实现热量的传递, 由于其内部没有毛细芯、制作简单, 易于实现微小型化, 并具有极强的传热能力^[2], 因此在微电子设备散热冷却、空间飞行器热

收稿日期: 2008-04-11; 修订日期: 2008-08-07

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-06-0406); 上海市教委科研创新项目 (08ZZ10)

作者简介: 屈 健 (1980 -), 男, 江苏苏州人, 博士生, 主要从事微小尺度传热和微小型热管的研究.

通讯作者: 吴慧英 (1967 -), 女, 江苏常州人, 教授, 主要从事微纳尺度流动与传热传质的研究. E-mail: whysrj@sjtu.edu.cn

管理等领域有着良好的应用前景。

尽管 PHP 的结构非常简单,但其内部是极其复杂的汽液两相相变流动行为,理论上建立的各种模型^[3-5]仍难以对其运行做出准确全面的解释。而在实验上主要通过测量热管的传热特性^[6-8]和观察内部的两相流动^[9-11]来加深对其运行特征的认识。研究发现热管的运行受工质、充液率、管径、倾斜角和加热状况等多种因素的影响。而在可视化研究方面,Tong 等^[9]对内径 1.8 mm,甲醇为工质(充液率 $FR = 60\%$)的玻璃振荡热管进行了研究,实验中观察到了核态沸腾、气泡膨胀长大、聚合、汽塞的断裂等现象,并发现当加热量达到一定值后流体会形成稳定的单向循环运动。Xu 等^[10]利用高速电荷耦合器件(Charge coupled device,简称 CCD)对内径 2 mm 的玻璃振荡热管(充液率 $FR = 70\%$)进行了实验研究,记录了气泡位置和速度随时间变化的情况。

目前有关 PHP 的可视化实验大多是针对单个管径开展的^[9-11],缺乏对不同管径的比较研究,特别是对直径小于 1 mm 的微细管径 PHP 的可视化研究还较少有报道,而这方面的研究对 PHP 向更小尺度发展是必须的。另外,目前对 PHP 内工质的运动主要通过测量热管不同位置的温度变化和观察内部流动瞬态变化来获取的,而对不同功率下热管内的振荡和静止的交替转换情况还研究的较少。本文通过可视化研究,记录了不同加热功率下振荡热管内流体的运动特征,观察并分析了管径对管内流型的影响,特别考察了微细管径下 PHP 内流型的独特变化。

1 实验装置

本实验通过高速 CCD 配合以可调焦镜头来实现对耐热透明玻璃管 PHP 的拍摄。实验装置如图 1 所示,主要包括振荡热管系统、高速可视化系统、加热装置这 3 个部分。实验中发现振荡热管在倾角为 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间时传热效果最好,本实验取热管倾角为 70° 。

表 1 给出了实验中所用到的 4 组 PHP 管道几何尺寸的情况。4 组 PHP 均以底部加热,上部冷却的方式进行工作。在加热段,镍-铬金属丝均匀的缠绕在弯头顶端上侧玻璃管的外表面,整个加热段长度为 5 cm,通过直流电源对金属丝供电来提供热量。热管上部通过风扇强制对流将冷凝段热量释放到周围环境中,整个实验在 $(20 \pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 的空调环境中进行。PHP 在注入工质前需经过抽

真空处理,实验工质为无水乙醇。利用高速 CCD 来拍摄和记录热管内工质的流动和流型变化情况。

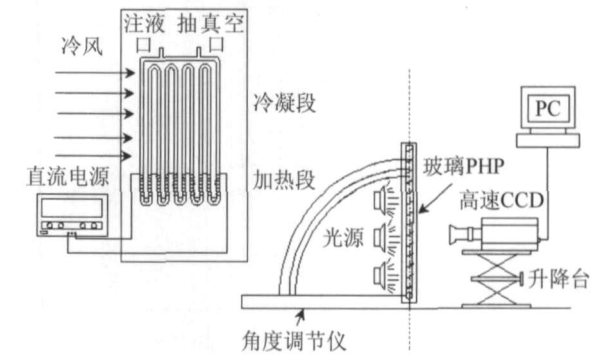


图 1 振荡热管可视化实验装置
Fig. 1 Experimental set-up for flow visualization of the PHP

表 1 各振荡热管的结构尺寸
Table 1 Structural size of the PHPs

PHP 编号	管内径 D_i / mm	管外径 D_o / mm	热管高度 H /cm	热管宽度 W /cm	弯头数目 n	总长度 L_t /cm
# 1	2.5	7	21	16	5	204
# 2	2	7	19	14	5	187
# 3	1	7	14.5	13	5	130
# 4	0.5	7	13	13	5	125

2 低加热功率和高加热功率下的热管运行情况

在 PHP 热启动的过程中,当加热段热量积累到一定程度后,管内流体会突然急剧振荡,一段时间后又慢慢平静下来,汽、液塞仅在某一位置处做小幅振荡而不会流动到相邻管中,期间甚至会出现完全静止不动的状态。为了和流体在管间大幅振荡的情形区分开来,将管内小幅振荡和完全静止的状态均称为准静止状态。图 2 反映了不同加热功率下热管内流体大幅振荡和准静止状态随时间的变化情况,其中 0-1 表示经历大幅振荡过程,1-0 表示准静止状态。图 3 对应于图 2 表示不同输入功率下热管大幅振荡时间在总时间中所占的比重,如果该比例超过 50 %则称此时的加热功率为高加热功率,反之则为低加热功率。

2.1 低加热功率

在低加热功率下(图 2 (a),(b)),振荡所占的

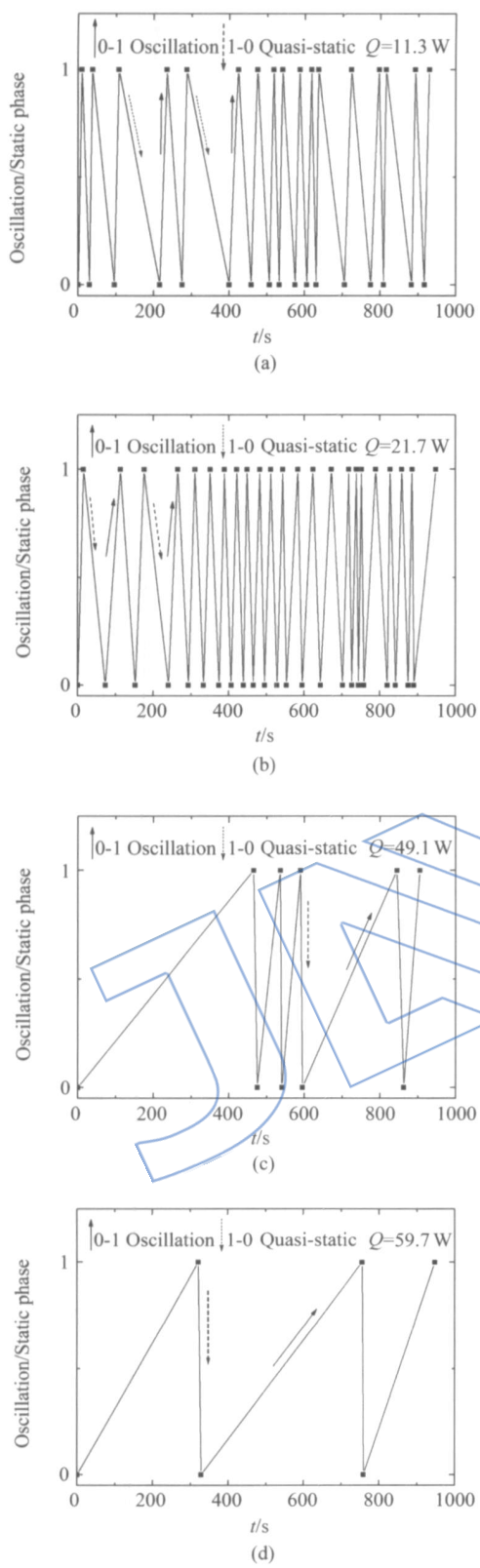


图 2 不同加热功率下工质振荡和准静止状态
随时间交替变化的情况 ($D_i = 2\text{ mm}$, $FR = 50\%$)

Fig. 2 Time lapse for liquid/ vapor oscillation phase
and quasi-static phase under different power input
($D_i = 2\text{ mm}$, $FR = 50\%$)

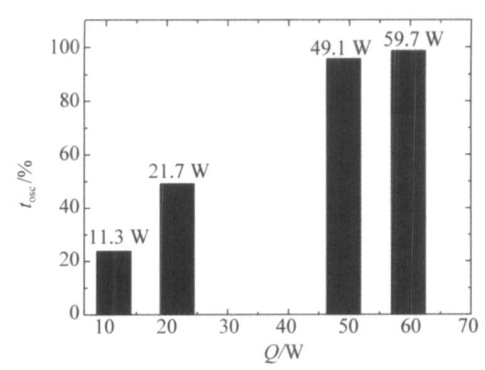


图 3 不同加热功率下工质振荡时间
在总时间中所占的比例 ($D_i = 2\text{ mm}$, $FR = 50\%$)

Fig. 3 Percentage of the oscillation phase time in the
total time under different power input
($D_i = 2\text{ mm}$, $FR = 50\%$)

时间明显较小(如图 3 所示, $Q = 11.3\text{ W}$ 时所占的比例不到 25%),热管在运行过程中时常出现小幅振荡甚至完全停滞的准静止状态,当聚集的能量达到一定程度后又可以克服管间的压差而出现大幅振荡.因为低功率下时常有停滞发生,所以充液率较小时加热段偶尔会出现短暂烧干的情况,但加热功率的进一步增大能增强管内的振荡,使准静止时间相应减少.

2.2 高加热功率

随着加热功率的增大,进入高加热功率(图 2 (c), (d))后,热管的运行就逐渐趋于稳定,管内以大幅振荡流动为主,在 $Q = 59.7\text{ W}$ 时这一比例已经超过了 98%(图 3 所示).但管内流体偶尔也会出现局部换向的行为,通过观察发现这主要是由加热段内核态沸腾生成的气泡在管内急速膨胀后推动底部弯头两侧流体向上运动引起的,从而导致其中一根管道内流体运动方向发生改变,这和微通道内沸腾流动的返流现象^[12]极其相似.

3 振荡热管内的流型分析

3.1 振荡热管内的流型

工质在 PHP 内的流动是非常复杂的,实验中主要观察到了塞状流、半环状流、环状流、波环状流等多种流型,同时还伴随着气泡的生成长大、聚合、分离和湮灭等.

加热段核态沸腾产生的小气泡经聚合长大膨胀后就会发展为汽塞,稳定工作情况下热管内的汽塞主要在该处孕育产生.随着加热功率的增大,会有更多的液体被蒸发,一些原来短的汽塞逐渐变长,管内的流型开始由塞状流过渡到塞状流和

环状流共存的状态,称之为半环状流. 在充液率不是太高,并且加热功率很大的情况下,管内的半环状流就会发展为环状流. 除此以外,在 PHP 内还观察到了泡状流和波环状流 (Wavy-annular flow) 等,它们的出现与加热功率、管径等因素有关,且常常成为流型演化过程中必不可少的一部分.

3.2 管径对流型的影响

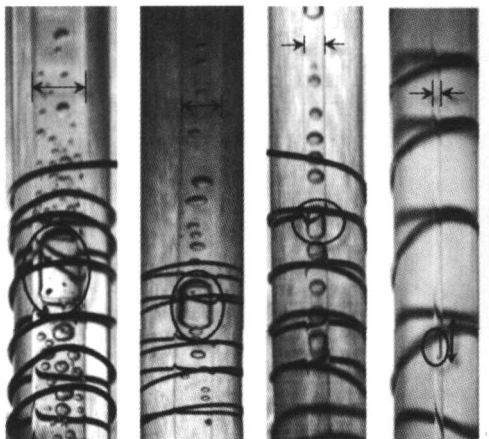
在加热功率较低和充液率较大的情况下, PHP 内的流型主要为塞状流,此时管内径要求满足 $D_i \leq 2 \sqrt{\sigma g (\rho - \rho_g)}$ [7], 因此管径对振荡热管内的流动和流型变化起着至关重要的作用. 对于不同的管径,实验发现流型变化有着明显的不同.

3.2.1 加热段

当加热段处生成的气泡膨胀到和管内径相当时就成为汽塞,形成汽塞过程中气泡所需达到的尺寸完全是由热管内径决定的. 图 4 显示了 4 种不同管内径下加热段处形成的汽塞,从图中可以清楚的看到大管径 (2.5 mm 和 2 mm) 内汽塞的形成主要是由诸多微/小气泡的合并发展而来的,而对于微细的管径 (1 mm 和 0.5 mm) 则主要是依靠单一气泡自身的膨胀长大形成的. 将管内的小气泡视为球形气泡,气泡的无量纲尺寸可以定义为

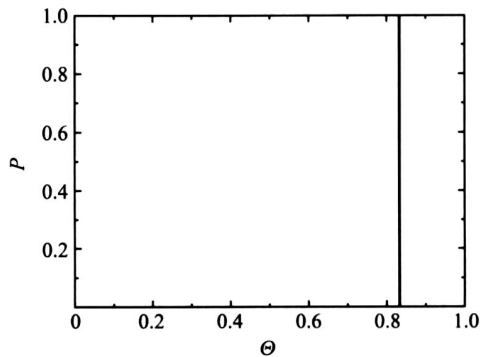
$$\Theta = d / D_i \tag{1}$$

式中 d 表示气泡沿管径径向的直径. 考虑到汽塞和热管内壁面间存在液膜,因此 Θ 的最大值小于 1. 通过对热管加热段处气泡产生、聚集、膨胀和形成汽塞过程的观察可以发现, Θ 在不同管内径下的分布具有明显的差异. 如图 5 所示,在微细管径 (0.5 mm, 1 mm) 下,大气泡在所有气泡中占有的

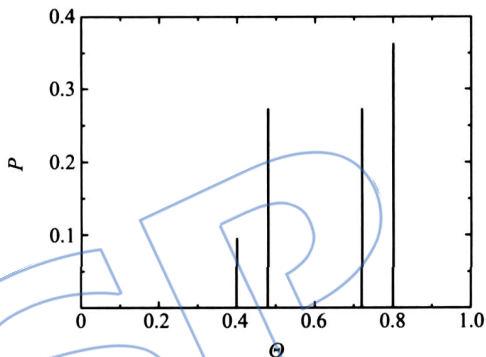


$D_i=2.5\text{ mm}$ $D_i=2\text{ mm}$ $D_i=1\text{ mm}$ $D_i=0.5\text{ mm}$

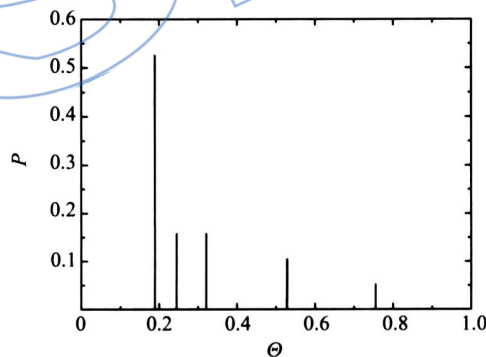
图 4 不同管径下加热段处汽塞的形成 ($FR = 50\%$)
Fig. 4 Formation of vapor plugs under different ID in the evaporator section ($FR = 50\%$)



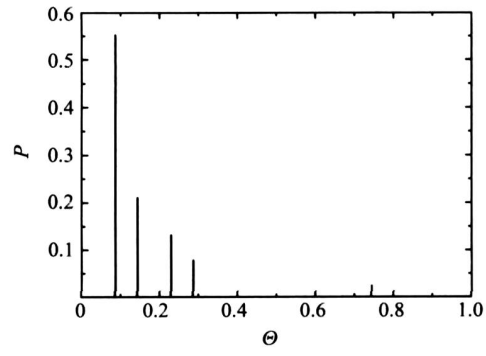
(a) $D_i=0.5\text{ mm}$



(b) $D_i=1\text{ mm}$



(c) $D_i=2\text{ mm}$



(d) $D_i=2.5\text{ mm}$

图 5 加热段不同尺寸的气泡在总气泡中所占的比例
Fig. 5 Proportion of the bubbles with different dimensionless diameter in the evaporation sections of PHPs

比例随着 θ 的增大而增加,而在大管径 (2 mm, 2.5 mm) 下情况则刚好相反. 另外,微细管径内所形成的气泡数量也相对较少.

3.2.2 冷凝段

在冷凝段的非弯头处,大管径 PHP 内的短汽塞主要是由长汽塞经冷凝后形成的,虽然经常有气泡-汽塞以及汽塞-汽塞之间的合并发生,但很少观察到长汽塞断裂为若干短汽塞的现象. 对于微细管径的 PHP 情况却有所不同,图6反映了内径 0.5 mm 的 PHP 在靠近冷凝段中间处流型从毛细波环状流向毛细塞状流转变的过程. 从图6中可以清晰的看到一连串液桥的形成过程,这和较大管径内工质环状流动时偶尔出现液桥的情形是不同的. 微细管径 PHP 内的长汽塞在离开加热段后,很容易因冷却断裂而变成短汽塞,在加热功率增大的情况下也较难实现向环状流的转变,这可能是由尺度效应凸显引起的. 管径的减小会使得表面张力的作用得到加强,重力的影响则相对减弱,此时汽芯外液膜的厚度 h 和管内径 D_i 相差不大,相界面易受开尔文-亥姆霍兹不稳 (Kelvin-Helmholtz instability) 的影响而呈波状流动,当某些位置液膜厚度接近内径的一半时,汽塞就会在表面张力的作用下被拉断,形成液桥.

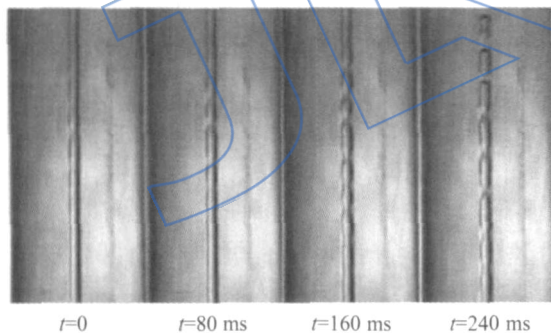


图6 毛细波环状流向毛细塞流的转变

($FR = 50\%$, $D_i = 0.5\text{ mm}$, $Q = 40\text{ W}$)

Fig. 6 Transition from capillary wavy-annular flow to capillary slug flow ($FR = 50\%$, $D_i = 0.5\text{ mm}$, $Q = 40\text{ W}$)

对于冷凝段弯头处汽塞的变形和断裂情况 (如图7所示), 根据 Xu 等^[10]的分析方法,可以得到汽塞最容易断裂部位的毛细数为

$$\left. \begin{aligned} Ca_{1-3} &\sim f_{1-3} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\delta}{1-\delta} \right]^2 \frac{3+4\Gamma}{1+\Gamma} \\ Ca_{4-3} &\sim f_{4-3} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\delta}{1-\delta} \right] \frac{\Gamma}{1-\Gamma} \\ Ca_{5-3} &\sim f_{5-3} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\delta}{1-\delta} \right]^2 \left[\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $\delta = \frac{2h\cos\theta}{D_i}$, $\Gamma = \frac{D_i/2\cos\theta - h}{R_b}$, θ 表示液固界面接触角, R_b 则表示弯头中心到管子中心线的曲率半径.

对于本实验中的 PHP, 有 $R_b > 12D_i$, 液膜厚度 h 取为 $0.2D_i$, 将式(2)中 f 对 D_i 进行一次求导, 结果均有

$$\frac{df_{k-3}}{dD_i} < 0, \quad k = 1, 4, 5 \quad (3)$$

由(2)和(3)两式可知,毛细数 Ca_{k-3} ($k = 1, 4, 5$) 随着管内径 D_i 的减小而增大,表明管径变小后汽塞在弯头处更容易发生断裂,这和实验中观察到的情况是一致的.

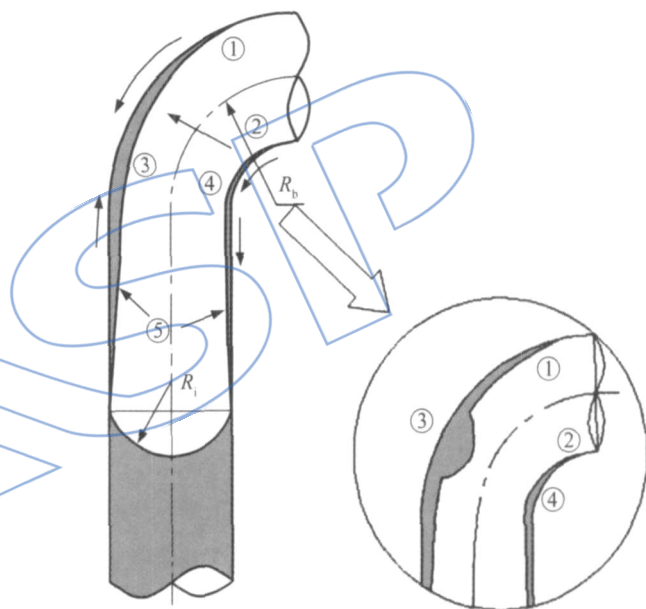


图7 汽塞在弯头处的变形和断裂过程

Fig. 7 Vapor plug deformation and breakup mechanism around the U-turn

4 结 论

本文利用高速 CCD 对 4 组不同管径的振荡热管进行了可视化研究,主要得到了以下结论:

1) 振荡热管内的工质在不同的加热功率下处于“准静止-大幅振荡”交替运行的状态,随加热功率的增大准静止时间所占比例逐步减小,而振荡时间逐步变大并最终趋于稳定的循环振荡流动的状态;

2) 随着加热功率的增大,热管内的流型也在发生着相应的变化,依次会经历塞状流、半环状流和环状流,同时还伴随着泡状流、搅拌流和波形环状流等;

3) 随着 PHP 管径的减小,汽塞在加热段的

形成主要以单个气泡的膨胀长大为主,并且加热段容易在短时间内处于烧干状态,而冷凝段(包括弯头处)的汽塞则易于发生变形和断裂的现象;

4) 对微细管径的 PHP 来说,容易产生毛细波环状流,并在冷凝段发生从毛细波环状流到毛细塞状流的转变。

参考文献:

- [1] Akachi H. Structure of a heat pipe : U. S. , 4921041 [P/OL]. 1990. <http://www.patentstorm.us/patents/4921041.html>.
- [2] Yang H H, Khandekar S, Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 49-59.
- [3] Shfi M B, Faghri A, Zhang Y. Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes [J]. J. Heat Mass Transfer, 2001, 123(6): 1159-1172.
- [4] Ma H B, Hanlon M A, Chen C L. An investigation of oscillation motions in a miniature pulsating heat pipe [J]. Microfluidics Nanofluidics, 2005, 2 (2): 171-179.
- [5] Qu W, Ma H B. Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe [J]. Int. J. Heat Mass Trans., 2007, 50: 2309-2316.
- [6] Rittidech S, Terdtoon P, Murakami M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillation heat pipe at normal operating condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 497-510.
- [7] Khandekar S, Dollinger N, Groll M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 707-719.
- [8] Cai Q J, Chen C L, Asfia J F. Operating characteristic investigation in pulsating heat pipe [J]. J. Heat Trans., 2006, 128(12): 1329-1334.
- [9] Tong B Y, Wong T N, Ooi K T. Closed-loop pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 1845-1862.
- [10] Xu J L, Li Y X, Wong T N. High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe [J]. Int. J. Heat Mass Trans., 2005, 48: 3338-3351.
- [11] 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.
CAO Xiaolin, XI Zhanli, ZHOU Jin, et al. Experimental investigation of the visualization of pulsating heat pipe operation as well as heat transfer and flow characteristics [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(4): 411-415. (in Chinese)
- [12] Wu H Y, Cheng P, Wang H. Pressure drop and flow boiling instabilities in silicon microchannel heat sinks [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16 (10): 2138-2146.