

加热工况及倾斜角影响单环路脉动热管 稳定运行的实验研究

王宇, 李惟毅

(天津大学热能工程系, 天津市 南开区 300072)

Experimental Investigations on the Influence of Heating Condition and Inclination Angle on Stable Operation of a Single Loop Pulsating Heat Pipe

WANG Yu, LI Weiyi

(Department of Thermal Engineering, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: An experimental setup based on a single loop pulsating heat pipe (SLPHP) was established and a series of experimental observations were conducted to study the operational performance in the tested SLPHP within water. Hot water bath and cold water bath were adopted as thermal conditions in the experimental investigations. The influence characterization was studied for the variation of heating condition in the evaporator section (different water bath temperature and different flow rate) and inclination angel (30°, 45°, 60°, 90°) of the SLPHP. The heat-transfer performance of the tested SLPHP was mainly evaluated by thermal resistance which related to temperature distributions of both evaporator and condenser sections of the tested SLPHP, also related to the heat transfer between the both sections. The results show that dry-out phenomena appears when the tested SLPHP operate under heating condition with large flow rate(40 g/s)and high temperature in evaporator section, and that more and more dry-out phenomena appear as the heating water temperature grow up weakened heat-transfer; SLPHP operates in stable under heating condition with lower flow rate (4 g/s); the gravity affects SLPHP very much, the tested SLPHP operates with lowest thermal resistance at vertical orientation.

KEY WORDS: single loop pulsating heat pipe; stable operation; heating condition; inclination angle

摘要: 针对单环路脉动热管建立实验平台, 实验中采用水浴加热及冷却方式作为热管运行测试的热工条件, 着重考察了单环路脉动热管在不同的加热工况(不同加热温度及加热水循环流量)及不同倾斜角度下(30°, 45°, 60°, 90°)的

运行情况。主要通过传热量及运行热阻来评价热管的传热效果。实验结果表明, 蒸发段加热工况在大流量(40 g/s)和较高温度加热条件下会出现局部干烧现象, 且随着加热温度的升高干烧现象逐步加剧, 进而影响热管的稳定运行和传热效果; 蒸发段在较小热水流量(4 g/s)时保持稳定地运行; 重力因素严重影响到单环路脉动热管稳定运行, 垂直地面底部加热条件下运行效果最好。

关键词: 单环路脉动热管; 稳定运行; 加热工况; 倾斜角度

0 引言

脉动热管(pulsating heat pipe, PHP), 也称之为振荡热管(oscillating heat pipe, OHP), 20世纪90年代由 Akachi 提出^[1], 由于其结构简单且具备超高的传热能力, 近20年来受到研究人员的广泛关注。相关实验研究发现^[2-3], 单环路脉动热管(如图1所示^[2])与典型的多弯环路脉动热管相比管内工质具有相同的热力流动特性, 且便于观察工质流型特征, 分析脉动热管的运行及传热机制。同时, 在应用研究中也出现了适用于电子功率器件冷却的单环路脉动热管散热器(如图2所示)的实用开发^[4]。因而单环路脉动热管的实验研究具备应用基础研究的积极意义。

实验研究中, 影响脉动热管启动运行的参数可归为3类^[2]: ①几何参数, 包括管径、管截面形状、环路中弯段数等; ②操作参数, 包括放置位置、倾斜角度、加热/冷却方式等; ③物理参数, 包括工质热物性、充液率等。本研究着重考察操作参数中加热工况及倾斜角度对单环路脉动热管稳定运行的影响。

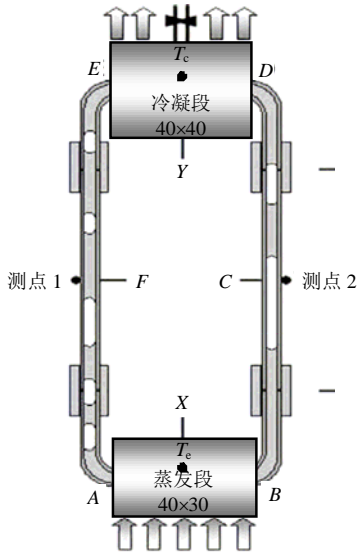


图 1 单环路脉动热管

Fig. 1 Single loop pulsating heat pipe

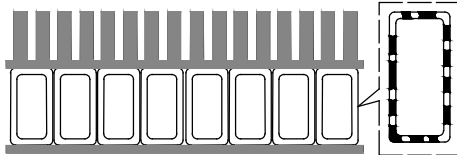


图 2 应用于散热器件的单环路脉动热管

Fig. 2 Single loop pulsating heat pipe applied in heat sink

1 实验装置

实验选用石英玻璃制作单环路脉动热管试件。试件管径由式(1)^[5]确定：

$$0.7 \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{liq} - \rho_{vap})g}} \leq D \leq 1.8 \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{liq} - \rho_{vap})g}} \quad (1)$$

式中： σ 为工质表面张力； ρ_{liq} 为工质液相密度； ρ_{vap} 为工质气相密度； D 为管径。

实验选用去离子水作为工质，因而按照上述公式确定的选用管径范围为 1.9~4.9 mm。

最终制成试件的主要几何参数如下：测试用 SLPHP 总长为 1230 mm；热管内径为 2.66 mm；热管外径为 6.2 mm；蒸发段长度为 18.0 cm；冷凝段长度为 19.5 cm。

脉动热管的运行测试需要相关的热工条件，即一定的加热及冷却方式，本实验采用蒸发段水浴加热、冷凝段水浴冷却的测试条件^[6-9]。实验装置流程如图 3 所示，主要包括以下几个组成部分：单环路脉动热管试件测试系统、蒸发段热水循环加热装置、循环水流量称重计量环节和温度采集系统。脉动热管试件上、下各安装了透明的有机玻璃夹套，并留有进出口，分别连接加热循环水管和冷却水管；试件顶部预留口连接四通阀件，连接压力表、充液阀及真空泵，便于抽真空和工质充灌；试件及附属装置被安装固定到可调节倾斜角度的工作平台上，便于测试过程中调整试件倾斜角；试件内蒸发段、冷凝段、中间绝热段各布置 2 个温度测点(测点设在管内，接触工质测温)，蒸发、冷凝夹套进出口也分别布置温度测点，共计 10 个温度测点，采用“T”型热电偶(精度 0.2 °C)，引线连接至数据采集器(Agilent, 34970A)，通过计算机通讯采集记录温度测点数据。

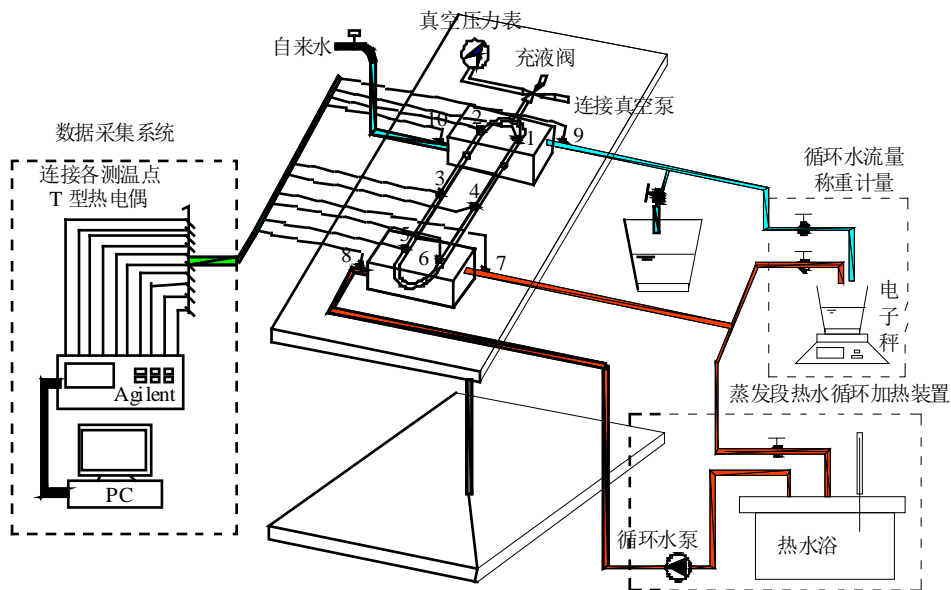


图 3 实验装置流程图

Fig. 3 Schematic of the single loop pulsating heat pipe experimental setup

2 实验步骤及数据处理

将试件的蒸发段、冷凝段卡装上夹套固定在实验台架上,倾角设置为 90° (垂直地面,蒸发段在下方),而后对其抽真空(真空度至 -0.09 MPa)并充液,充液率是影响到脉动热管启动运行的一个重要因素,通常允许的充液率为 $20\%\sim 80\%$ ^[10],对于单环路脉动热管,充液率在 $30\%\sim 80\%$ 内,稳定运行中传热功率变化不大^[11],本实验选取 50% 左右充液率,观察试件的运行状况。

倾斜角也是影响到脉动热管运行情况的操作参数,在实际的应用中也是与散热器安装方式相关的关键因素,文献[7,12]的研究结果均得到 $70^\circ\sim 90^\circ$ 的倾角时脉动热管运行性能较好,本次实验分别考察 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 下单环路脉动热管的运行情况。工质充灌完毕、倾角调整后,分别调整热水及冷却水循环流量(为保证冷凝夹套进出口存在明显的换热温差,便于计算试件传热量,冷却水流量调整至 $2\sim 3\text{ g/s}$),逐步加热循环热水,开启数据采集程序记录存储测点温度,同时实时称量冷却水量(称重精度 0.1 g),计算传热量。

按照上述步骤进行一系列实验测试过程(如表1所示),试验1中加热工况为大循环流量,试验2,试验3中加热工况均为小流量,试验3是在试验2基础上调整一系列倾斜角度完成的测试。

表1 脉动热管试件实验考察

Tab. 1 Experimental investigations on the tested PHP

| 测试过程 | 蒸发段热水流量/(g/s) | 热水浴水温/ $^\circ\text{C}$ | 倾斜角度/ $^\circ$ |
|------|---------------|-------------------------|----------------|
| 试验1 | 40 | 60~90 | 90 |
| 试验2 | 4 | 60~90 | 90 |
| 试验3 | 4 | 60~90 | 30, 45, 60 |

上述测试过程中脉动热管试件的传热效果由以下2指标进行评价:

1) 传热量,测试过程中蒸发段夹套内水温过高,对环境散热难以确定,而冷凝段水流稳定且与外界环境温差小(室温 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,自来水温度接近室温),故而通过试件冷凝段的冷凝换热量获得,由式(2)确定:

$$Q = \dot{m} c_p (\bar{T}_{c,\text{out}} - \bar{T}_{c,\text{in}}) \quad (2)$$

式中: \dot{m} 为冷凝夹套中水质量流量; c_p 为水的定压比热; $\bar{T}_{c,\text{out}}$ 和 $\bar{T}_{c,\text{in}}$ 分别为进出口水温测点的平均温度,即 $\bar{T}_{c,\text{out}} = \bar{T}_9$, $\bar{T}_{c,\text{in}} = \bar{T}_{10}$ 。

2) 运行热阻,由式(3)定义^[13-16]:

$$R_{\text{PHP}} = (\bar{T}_e - \bar{T}_c) / Q \quad (3)$$

式中: \bar{T}_e 和 \bar{T}_c 分别为蒸发段和冷凝段的平均温度, $\bar{T}_e = (\bar{T}_5 + \bar{T}_6) / 2$, $\bar{T}_c = (\bar{T}_1 + \bar{T}_2) / 2$ 。

3 实验结果及分析讨论

3.1 加热工况对于单环路 PHP 稳定运行的影响

通过试验1和试验2的测试分析,可以明确蒸发段加热工况影响到脉动热管的稳定运行;通过试验3的测试过程,则可以了解到倾斜角度变化给脉动热管运行情况带来的影响。

测试过程试验1中,随着蒸发段加热温度的升高,试件内间隔随机分布的气塞-液塞开始出现左右的振荡,进而随着振荡的加剧,管内工质呈现出较稳定的定向流动。而随着加热温度的进一步升高,热管运行稳定性受到影响,流经蒸发段的气塞周围的液膜迅速蒸干,蒸发段底部会形成较大的气泡挤压两管臂内的工质,定向流动的工质会受到该大气泡形成的阻力,出现缺液区使得传热恶化,该处温度测量值会呈现出飞升情况,即干烧现象。此时管内工质基本上还能呈现出定向的循环流动,冷凝段回流液体工质以环状膜流型进入蒸发段,由于管内工质的两相不稳定流动,会出现环状膜逐渐加厚形成小段塞状流。故而呈现的传热恶化(即干烧现象)会得到一定程度的缓解,可以认为出现了局部的干烧现象。但是随着加热段温度的进一步升高,蒸发段输入热量增加,会形成大段气塞的聚集,使得冷凝段液体工质回流阻力进一步增加,回流环状膜迅速蒸发而难以形成小段液塞,管内工质也不再有明显定向流动,出现左右振荡的流动,即出现了局部干烧现象的加剧。

图4所示为试验1中出现干烧现象后管内工质流动状态的变化以及主要测点温度的变化情况,按照水浴加热温度的不同测试过程中存在3个相对稳定的工况,即工况1-1、1-2、1-3。由图4可以看出,蒸发段测点5、6的变化详实地反映出局部干烧现象出现的情况,即干烧现象出现后,管壁温度会飞升接近水浴加热温度,若此时温度测点处为缺液区,则测试温度便会飞升接近热夹套内水温,如图4中阴影框内温度变化情况;若管内工质流动过程中始终有液膜沁润测点,则测点温度会在某一确定温度范围内波动。

通过3个工况的对比可以看出,随着蒸发段加热温度的上升,局部干烧现象的出现也在逐步的加剧,加热温度由 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $78\text{ }^\circ\text{C}$ 再到 $84\text{ }^\circ\text{C}$ 的过程中,

蒸发段测点温度接近于热水浴温度的频度在逐步增强。局部干烧现象的出现一定程度上会使传热恶化，由于冷凝段水流稳定，可以从冷却水温差(测点 9、10)看出，出现局部干烧现象时，冷却水换热温差有所降低，即传热量下降。

图 5 所示为试验 2 中主要测点温度的变化，同试验 1 相比，试验 2 中调小了加热循环水流量，在热水逐步加热过程中，呈现出与试验 1 中相对应的 3 个相对稳定的工况，即工况 2-1、2-1、2-3，与试验 1 中相近热水浴温度下出现的 3 个工况相比而言，试验 2 中的 3 个工况均未出现干烧现象。

图 6 进一步分析比较了试验 1 和试验 2 两个测试过程中脉动热管试件的传热效果。从图 6 可以看

出，试验 2 中传热效果呈现出较明显的规律，随着加热水温升高，传热量明显增加，热阻明显降低；而试验 1 中随着加热温度的升高，传热量增加幅度剧减，热阻在减小一定程度后又有所增加，其中工况 1-2 到工况 1-3 的过程中热阻明显升高，反映出局部干烧现象加剧进一步恶化传热，这与多弯环路脉动热管出现传热极限时热阻的变化情况一致^[15]。试验 1 中由于采用了较大的加热水量，具有较大的热流密度，相对试验 2 中相近的加热温度下产生了传热恶化，达到的传热极限。反映了热流密度对单环路热管传热极限的影响，需要进一步改变加热方式来明确单环路脉动热管达到传热极限时的热流密度条件，实际应用中也应根据热流密度大小合理

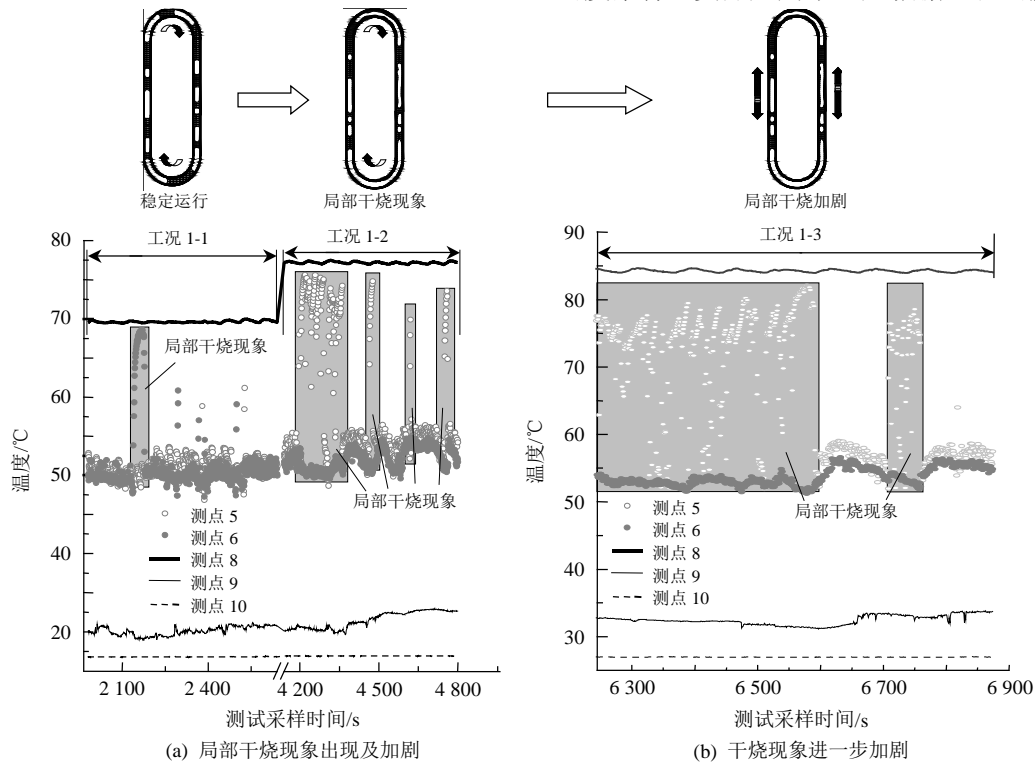


图 4 试验 1 中局部干烧现象后主要测点温度变化

Fig. 4 Main tested temperatures variations in test1 when local dry-out appeared

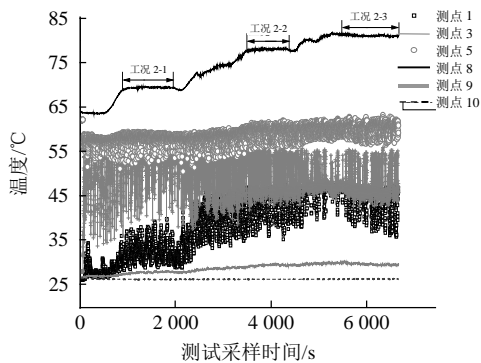


图 5 试验 2 中主要测点温度变化

Fig. 5 Main temperatures variations in Test2

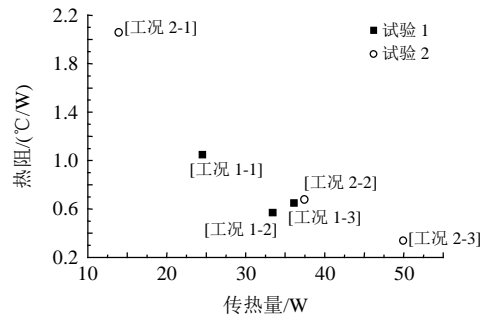


图 6 不同加热工况下脉动热管试件传热效果比较

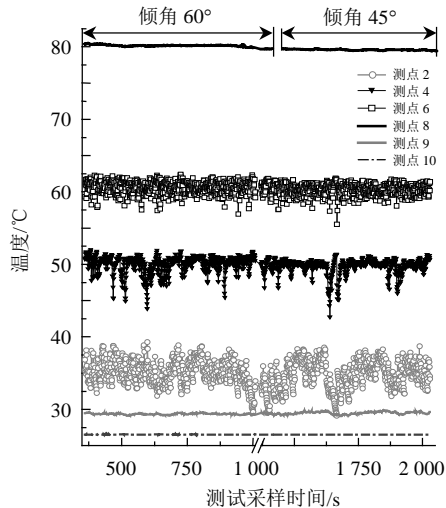
Fig. 6 Heat transfer performance comparison of the tested PHP under different heating condition

布置热管数量。

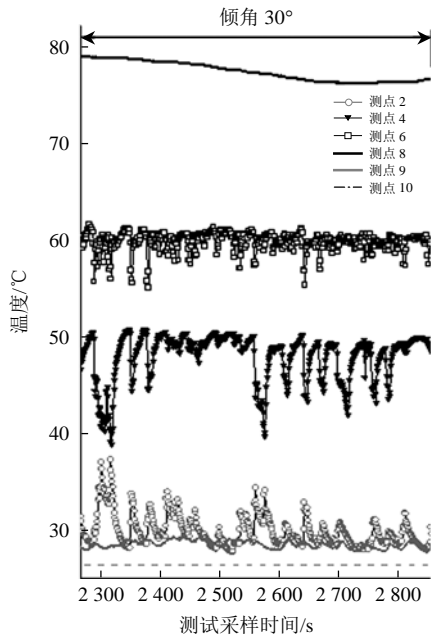
对照试验2测试过程,由图6中还可看出,加热温度升高的同时,传热量增加,但增加的幅度在减小,且试验2中传热量增加同时热阻降低程度在变小,与多弯环路脉动热管呈现出相似的特性^[15],这很大程度上说明单环路脉动热管稳定运行中随着传热量增加,热阻变化越来越小,存在传热极限。

3.2 倾斜角度对于单环路 PHP 稳定运行的影响

测试过程试验3是在测试过程试验2基础上调整实验台倾斜角度后进行的,倾斜角度调整后主要测温点的变化情况如图7所示。由图7可知,倾角由60°调整至45°后,测点2波动的幅度在增大,频率在降低,同时观察到试件内工质单向循环流速在



(a) 60°至45°倾角测试情况



(b) 30°倾角测试情况

图7 试验3中主要测温点温度变化

Fig. 7 Main temperatures variations in test3

降低;倾角由45°调整至30°后,2、4、6测点温度波动幅度都在增大,频率在降低,同时观察到管内工质流动速度进一步降低,冷却水温差明显降低,说明传热效果明显恶化。

倾角变化影响脉动热管试件管内工质流动状态,进而影响到其传热效果,图8所示为试验3中不同倾角下试件的传热热阻。由图8可知,30°~90°倾斜角变化过程中,传热热阻不同程度地降低,倾角为90°(垂直地面)时,传热热阻最低;相比而言,多弯环路脉动热管在30°~90°倾角变化中传热性能几乎不发生变化^[17],这种情况说明重力对于单环路脉动热管的运行起到较重要的作用,在应用中建议90°放置。

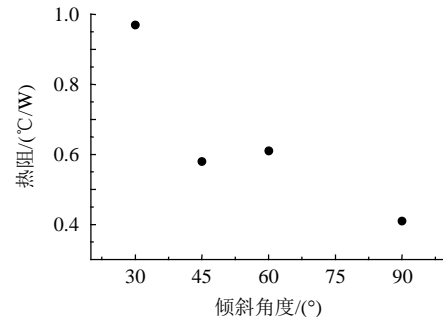


图8 不同倾角下脉动热管试件传热效果比较

Fig. 8 Heat transfer performance comparison of the tested PHP at different inclination angle

4 结论

通过本次实验研究,关于单环路脉动热管的稳定运行可得到如下结论:

1) 蒸发段在较大的热水循环流量加热工况下会导致高热流密度,进而出现干烧现象,且随着热水温度的增加干烧现象加剧,传热恶化。

2) 同多弯环路型脉动热管相比,单环路脉动热管存在相似的传热特征,随着传热量的增加,传热热阻不断降低,但降低幅度在减小。

3) 重力很大程度上影响到单环路脉动热管的运行效果和传热特性。随着倾角的减少,管内工质定向循环流动速率在降低,传热热阻也呈现升高趋势。

本次实验所采用的加热方式不能有效控制加热功率,对单环路脉动热管出现干烧现象,达到传热极限的条件不能定量分析,建议进一步采用控制加热功率的方式进行测试分析,为其应用设计提供切实依据。

参考文献

- [1] Miyazaki Y, Akachi H. Heat transfer characteristics of looped

- capillary heat pipe[C]//Proceeding of 5th international heat pipe symposium, Melbourne, Australia, 1996: 378-383.
- [2] Khandekar S, Groll M. An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes[J]. International Journal of Thermal Science, 2004, 43(1): 13-20.
- [3] Khandekar S, Gautam A P, Sharma P K. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe[J]. International Journal of Thermal Science, 2009, 48(3): 535-546.
- [4] 刘静, 马坤全. 以低熔点金属及普通流体作流动工质的脉冲热管散热器: 中国, ZL200520127289. X[P]. 2007-2-28.
- [5] Dobson R T, Harms T M. Lumped parameter analysis of closed and open oscillatory heat pipes[C]//Proceedings of the 11th International Heat Pipe Conference, 1999: 137-142.
- [6] 刘利华, 张光玉, 姜守忠, 等. 定壁温闭式环路型自激振荡热管传热性能的实验研究[J]. 流体机械, 2008, 36(4): 85-89.
Liu Lihua, Zhang Guangyu, Jiang Shouzhong, et al. Experimental investigation on heat transfer of closed loop self-oscillating heat pipe at constant temperature condition[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(4): 85-89(in Chinese).
- [7] 曹小林, 王伟, 陈杰, 等. 环路型脉动热管的工质流动和传热特性实验研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(1): 56-59.
Cao Xiaolin, Wang Wei, Chen Jie, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer of pulsating heat pipe[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(1): 56-59(in Chinese).
- [8] Rittidech S, Terdtoon P, Murakami M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(4): 497-510.
- [9] Piyanun C, Sameer K, Manfred G, et al. Closed loop pulsating heat pipes. Part A: parametric experimental investigations[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2009-2020.
- [10] Zhang Yuwen. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes[J]. Heat Transfer Engineering, 2008, 29(1): 20-44.
- [11] 苏磊, 张红. 回路型脉动热管稳定运行传热模型建立及分析[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2718-2725.
Su Lei, Zhang Hong. Analysis of steady state model for loop pulsating heat pipe[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(11): 2718-2725(in Chinese).
- [12] 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.
Ma Yongxi, Zhang Hong. Heat transfer characteristics of oscillating heat pipes with under-critical turns[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(4): 87-90(in Chinese).
- [13] 李惊涛, 李志宏, 韩振兴, 等. 脉动热管的流型及流向分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(3): 347-351.
Li Jingtao, Li Zhihong, Han Zhenxing, et al. An analysis of flow patterns and directions of a pulsating heat pipe[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(3): 347-351(in Chinese).
- [14] 尹大燕, 贾力. 振荡热管管内流型对传热性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(3): 363-368.
Yin Dayan, Jia Li. The influence of flow patterns on heat transfer characteristic of oscillating heat pipe[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(3): 363-368(in Chinese).
- [15] Yang Honghai, Khandekar S, Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(1): 49-59.
- [16] Khandekar S, Dollinger N, Groll M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(6): 707-719.
- [17] 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).



王宇

收稿日期: 2010-09-17。

作者简介:

王宇(1980), 男, 博士研究生, 主要从事强化换热及节能技术研究工作, wy41523@126.com。

(责任编辑 张媛媛)