

# 乙醇-水双工质脉动热管传热性能实验研究

吕绍凡<sup>1</sup> 苏磊<sup>1</sup> 张红<sup>2</sup>

(1. 南京工业大学 能源学院, 江苏 南京 211816; 2. 常州工学院, 江苏 常州 213002)

**摘要:** 通过对乙醇-水双工质脉动热管在风冷条件下进行的实验研究, 探讨了加热功率、体积配比和充液率对热管振荡和传热性能的影响。结果显示, 在实验条件下, 功率小于100 W时, 充液率、体积配比和加热功率对热管传热性能的影响较明显; 中高功率时热管稳定性与热管中液态水体积份额有关, 且随水份增大热阻降低。而水份低于21%时, 热管稳定性较差, 且水的份额越小, 不稳定出现时的功率越低。50%~70%充液率热管的传热性能要优于30%充液率的热管, 体积配比相当的热管振荡特性和传热性能相对较差。

**关键词:** 双工质脉动热管; 传热性能; 振荡特性; 充液率; 体积配比

中图分类号: TK172.4 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.004

## 引言

电子行业的迅猛发展使得电子元器件的散热问题日益凸显。比较常规热管, 20世纪90年代初Akachi提出的一种新型传热元件——PHP(脉动热管), 其易于微型化和可灵活布置的特点, 以及其良好的传热性能, 受到越来越多学者的重视<sup>[1~2]</sup>。近几年, 它一直是国内外众多学者关注和研究的热点问题。

目前, 单工质脉动热管传热性能的研究较多<sup>[3~6]</sup>。Xue等研究了倾斜角对氨脉动热管传热性能的影响<sup>[7]</sup>, 发现传热热阻随着倾角的增加而减小; 热管水平运行时, 高输入功率的传热性能很差, 加热段易烧毁; Yin等通过对脉动热管最大充液率的理论分析<sup>[8]</sup>, 发现热管的启振功率取决于充液率, 并随充液率的增加而增大, 但充液率存在一个上限, 此上限取决于工质的属性。对于单回路和多回路中工质种类、充液率、倾角、管径、加热方式和弯管数等因素对脉动热管运行及传热性能的影响, 不同

工质的最佳充液率在25%~65%之间; 在运行压力过低和弯头数较少时, 脉动热管在水平状态下无法启动; 且工质的热物性直接影响热管的振荡特性和传热性能<sup>[9~11]</sup>。

由于工质的物性限制, 想要再提高纯工质脉动热管的传热能力较为困难, 而将物性差异较大的工质进行混合并形成互补, 其产生的温度滑移与浓度滑移特性有助于提高脉动热管的传热性能。混合工质脉动热管强化传热的研究还相对较少。Hu等通过不同倾斜角对加热段壁面温度波动的影响<sup>[12]</sup>; 发现相同充液率下的汞-水混合工质比纯水工质脉动热管传热性能更有优势。同样, 将甲醇、乙醇、丙酮和正戊烷等工质与水混合形成的混合工质脉动热管, 其传热热阻也要低于纯工质脉动热管, 因为工质混合后, 分子间的氢键结构具有了多样性, 分子间作用力的变化使其传热性能得到相应的改善, 且混合工质脉动热管传热特性与充液率及混合工质配比有关, 对比对传热特性的影响主要表现为气液平衡、物性及缔合作用<sup>[13~16]</sup>; 同时, Lin、Qu等研究了以纳米流体为工质的脉动热管传热性能<sup>[17~19]</sup>, 发现虽然纳米流体导热系数大, 理论上可以带走更多的热量, 但是高浓度导致高粘度, 高粘度使得汽泡难以形成, 并且导致液塞和壁面的摩擦力增大, 热管传热性能下降。

本研究通过乙醇-水双工质脉动热管壁温振荡特性的实验研究, 揭示加热功率、体积配比及充液率对热管传热性能的影响, 并从传热热阻、壁温波动曲线、振幅、振频的角度进行了对比分析, 得到壁温振荡与热管传热性能之间的内在关系。

## 1 实验装置及内容

实验装置主要由五部分构成: 脉动热管、测温及

收稿日期: 2015-08-12; 修订日期: 2015-11-19

作者简介: 吕绍凡(1990-)男, 江苏南京人, 南京工业大学硕士研究生。

测速装置、加热及保温装置、冷却装置和数据采集装置。冷却装置由冷却风道、风扇、风扇驱动电源、热线风速仪组成。加热装置包括绝缘电加热丝(直径 0.4 mm 材料为镍铬合金)、可调直流电源(GPC-6030D)和抽真空隔热罩;测温系统包括 OMEGA 牌 K 型热电偶(测温精度  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ )、惠普数据采集仪(HP 34970A)和电脑,实验系统如图 1 所示。

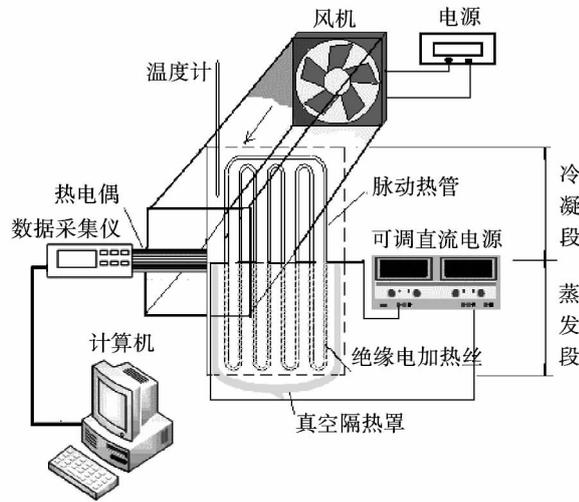


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

实验热管为 4 弯路紫铜热管,总长 2.125 m,管内径 3 mm,外径 4 mm,热管总高  $H=0.25\text{ m}$ ,无绝热段,节蒸发段高度 0.13 m;热管共 7 根,充液工质为乙醇-水双工质,充液率分别为 30%、50% 和 70%,如表 1 所示。热管加工过程:(1) 将清洁干净的热管安装上充排阀门;(2) 用真空泵对热管进行抽真空(真空度达到  $10^{-4}$ );(3) 按充液率和体积配比计算出工质的充液质量;(4) 最后完成热管充液过程。

表 1 中的体积份额指双工质中每种组分工质的液态体积占热管内部总容积的比例,计算方法为充液率乘以工质的体积配比,如 PHP1 中水的体积份额  $=0.7 \times 30\%$  (文中所有图表里出现的 PHP 为脉动热管的简称)。

热管外壁上均匀布置了 20 根热电偶,其中蒸发段和冷凝段各 10 个测点,如图 2 所示。实验中热管垂直放置,底部蒸发段放在抽真空保温玻璃罩中,由绝缘电加热丝紧密缠绕并加热,上部冷凝段置于冷

却风道中,冷却风温在  $10.6 \sim 11.3\text{ }^\circ\text{C}$  之间,因装置加热段保温性能良好,可忽略散热损失,则热管的传热功率等于加热功率。实验中数据采集间隔时间为 0.05 s。

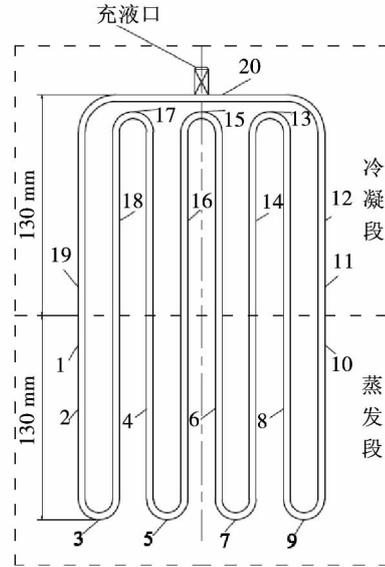


图 2 测温点分布

Fig. 2 Distribution of thermocouples

表 1 实验脉动热管

Tab. 1 PHPs in the experiment

实验项目	工质	充液率/%	体积配比	体积份额	
				乙醇	水
PHP1	乙醇-水	30	0.3:0.7	0.09	0.21
PHP2			0.5:0.5	0.15	0.15
PHP3			0.9:0.1	0.27	0.03
PHP4	50	50	0.3:0.7	0.15	0.35
PHP5			0.5:0.5	0.25	0.25
PHP6			0.9:0.1	0.45	0.05
PHP7	70	70	0.3:0.7	0.21	0.49

## 2 实验结果分析

实验测试了加热功率从 0.5 W 增到 280 W 时热管达到每个稳定运行工况时 20 个测点的壁温波动数据,需要说明的是:实验中当加热功率低于 10 W 时,管内工质运动比较慢,初始充液的随机分布对实验结果影响较大,实验重复性比较差,因此本研究取 10 W 加热功率以上的实验结果进行分析。

热管传热性能参数主要包括管壁温、传热温差和传热热阻, 计算公式如下:

蒸发段均温  $t_{mh}$ :

$$t_{mh} = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_i}{10} \quad (i: 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (1)$$

冷凝段均温  $t_{mc}$ :

$$t_{mc} = \frac{\sum_{i=11}^{20} t_i}{10} \quad (i: 11, 12, 13, \dots, 20) \quad (2)$$

热管均温  $t_m$ :

$$t_m = \frac{t_{mh} + t_{mc}}{2} \quad (3)$$

传热温差  $\Delta t_m$ :

$$\Delta t_m = t_{mh} - t_{mc} \quad (4)$$

传热热阻  $R$ :

$$R = \frac{\Delta t_m}{Q} \quad (5)$$

式中:  $t_i$ —1 ~ 20 个测点的壁温, °C;  $R$ —热管传热热阻, °C/W;  $Q$ —热管传热功率, W。

### 2.1 热管的传热热阻

图 3 (a) 显示了热管传热热阻随加热功率的变化, 可看到传热热阻随功率的增加呈现快速下降到稳定的变化特点; 体现在 100 W 以上功率时, 7 根热管的传热热阻接近且都稳定在 0.07 °C/W 左右; 而 100 W 以下功率时, 传热热阻差别较明显。说明加热功率、工质体积配比和充液率对传热热阻的影响主要体现在较小功率范围。

#### 2.1.1 低功率时

实验数据处理显示, 7 根热管的启振功率集中在 10 ~ 20 W 之间; 30 W 以下时, 30% 充液率热管的传热热阻明显大于 50% 和 70% 的热管; 而 100 W 以下时, 50% 充液率 0.3:0.7 和 0.9:0.1 乙醇 - 水热管, 以及 70% 充液率配比为 0.3:0.7 热管的传热热阻明显低于其它热管, 并在 50 W 左右热阻就已接近于稳定时的热阻。

由于加热功率相对较小, 管内工质汽化量很少, 此时热管传热过程中显热起主要作用, 而热管充液率为 30% 时, 工质质量较少, 在相同的传热量下, 蒸发段和冷凝段的平均温差会比较大, 且工质流动速度很快, 由式 (5) 可知, 热管的传热热阻势必会较大, 热管启动运行需要的功率更高。随着热管充液率增加到 50% 和 70% 时, 工质质量增加明显, 流速

减慢, 同理可知, 热管的传热热阻减小, 传热性能得到改善。

由图 3 (a) 可知, 低功率下, 充液率为 50%, 配比为 0.3:0.7 热管热阻一直是最小的, 传热性能最佳, 而 70% 充液率配比为 0.3:0.7 热管的热阻不是最小的, 说明热管的充液率并不是越大越好。因为充液率过大, 伴随着工质质量明显增大, 流动需要的推动力更大, 可能造成流动速度减缓, 传热性能下降; 且随充液增多, 相变空间受限, 热管的汽化潜热传热受到抑制, 将会进一步恶化传热效果。

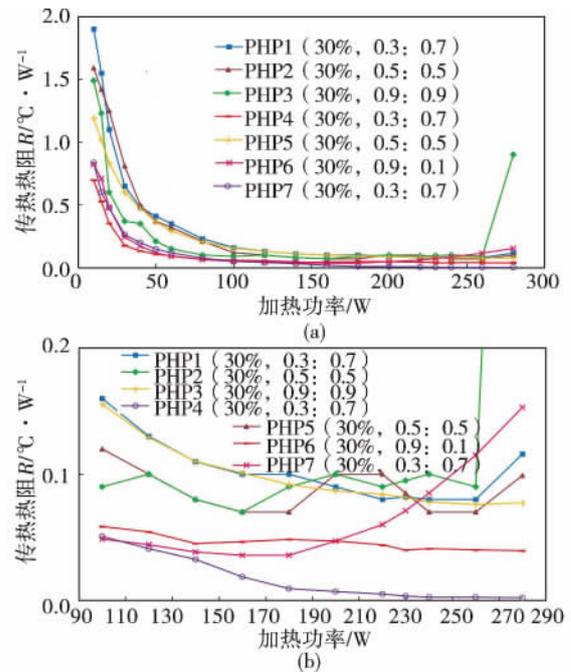


图 3 加热功率与传热热阻关系

Fig. 3 Relationship between heating power and heat transfer resistance

#### 2.1.2 中高功率时

图 3 (b) 显示了热管在中高功率下 (100 ~ 280 W) 的传热热阻的变化。发现当功率大于 100 W 时, 7 根热管传热热阻虽都集中在较小热阻 0.05 ~ 0.1 °C/W 区间, 但其变化规律有明显不同。

随着加热功率的增大, 管内工质运动剧烈, 汽化潜热传热比例明显提高, 而水的沸点高、比热容和汽化潜热大, 相比乙醇工质不易烧干, 且动力黏度又略小一些, 无论从热量携带能力还是运动阻力都具有优势, 再结合表 1 对比可知, 在高功率下, 水工质占热管总容积的份额对热管的稳定性显得尤为重要。

30% 充液率的 3 根热管由于充液量太少, 加热

功率很高时,工质显热和汽化潜热传热能力很容易达到极限,出现烧干现象,热管热阻也较高,且稳定性差;50%充液率、0.9:0.1热管的充液量虽然增大,但水工质占热管总容积的份额仅有5%,热管工质接近于纯乙醇状态,乙醇沸点低、比热容和汽化潜热小的物性特点,使热管在高功率下也容易出现烧干现象,热阻不断波动上升,传热性能下降。而水份份额超过25%的3根热管,其传热热阻很稳定,并随水份份额的增加而传热热阻减小。

综上所述,对于乙醇-水脉动热管,充液率和体

积对比对热管传热性能的影响与加热功率有关,且合理的充液率和体积配比能大大降低低功率时的热管传热热阻,提高中高功率时传热热阻的稳定性。

### 2.2 体积对比对振荡特性的影响

因工质体积对比对传热热阻的影响主要体现在中小功率范围,取充液率为50%, $\rho.3:0.7$ 、 $0.5:0.5$ 和 $0.9:0.1$ 三种体积配比的乙醇-水脉动热管,研究其在稳定运行时,30和80W时管壁2个测点的温度波动随时间的变化特性,如图4和图5所示。

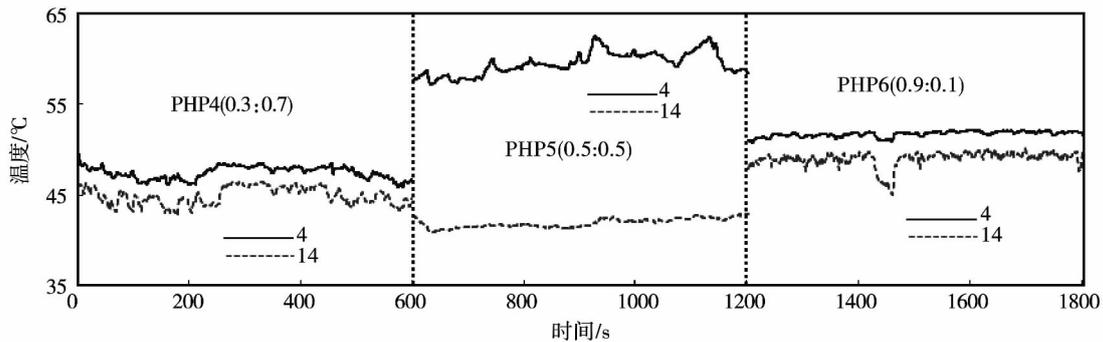


图 4 30 W 时的壁温波动

Fig. 4 Wall temperature fluctuation at 30 W

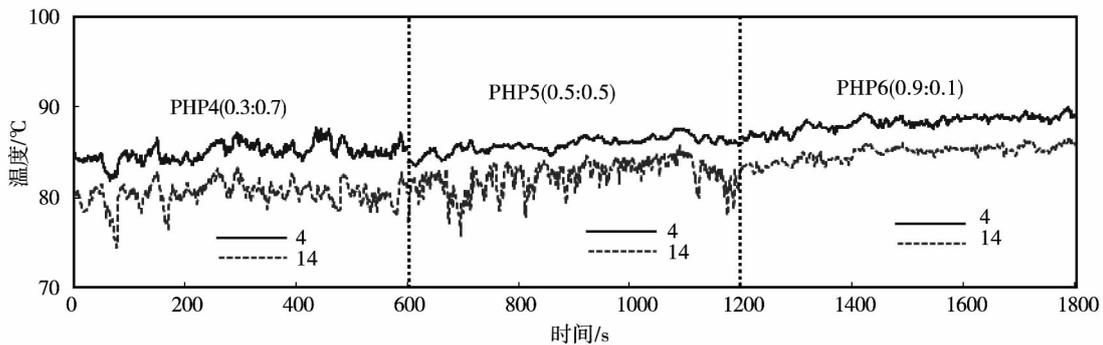


图 5 80 W 时的壁温波动

Fig. 5 Wall temperature fluctuation at 80 W

表 2 显示了三种体积配比的热管在 30、80 W 时的壁温振幅和振频。

图 4 和图 5 显示,30 W 时  $0.3:0.7$  和  $0.9:0.1$  配比的 2 根热管的冷热端都已启振,而  $0.5:0.5$  热管的蒸发段端启振,但冷凝段还没启振,因此冷热段温差较大;3 根热管的壁温整体振荡较小且不规律。而 80 W 时,3 根热管的壁温振荡明显比 30 W 剧烈

且平稳。结合表 2 中的振幅和振频可知,两种功率下  $0.9:0.1$  热管相比另外两种配比的热管振幅都最小,而振频最大;其次为  $0.3:0.7$  热管,而  $0.5:0.5$  热管的振幅最大,振频最小。再结合图 3 中的热阻看,30 W 时  $0.3:0.7$  热管的热阻低于  $0.9:0.1$  热管,而 80 W 时相反,但  $0.5:0.5$  热管的热阻最大。

综合看,在中小功率下,双工质中乙醇份额高会

明显降低工质振幅, 增大振频; 相同体积配比的乙醇 - 水热管振荡特性最差。从热阻对比看, 中小功率下, 振荡性能最好的 0.9:0.1 热管的热阻并非一定最小, 说明好的振荡特性能改善传热性能, 但不是决定传热热阻的唯一因素。

### 2.3 充液率对振荡特性的影响

因充液率对传热热阻的影响也主要体现在中小功率范围内, 选取配比为 0.3:0.7 的乙醇 - 水热管, 研究 30 W 和 80 W 时, 30%、50% 和 70% 三种充液

率热管的壁温波动特性, 如图 6 和图 7 所示。

表 2 不同体积配比热管在两种功率下的壁温振幅和振频  
Tab. 2 Amplitude and frequency of temperature oscillation for PHP with different volume ratios at 30 W and 80 W

工质体积配比	30 W		80 W	
	振幅	振频	振幅	振频
0.3:0.7(50%)	1.087 2	0.129 4	1.454 8	0.188 2
0.5:0.5(50%)	1.593 4	0.101 8	1.474 1	0.175 4
0.9:0.1(50%)	0.509 8	0.207 2	0.652 4	0.193 7

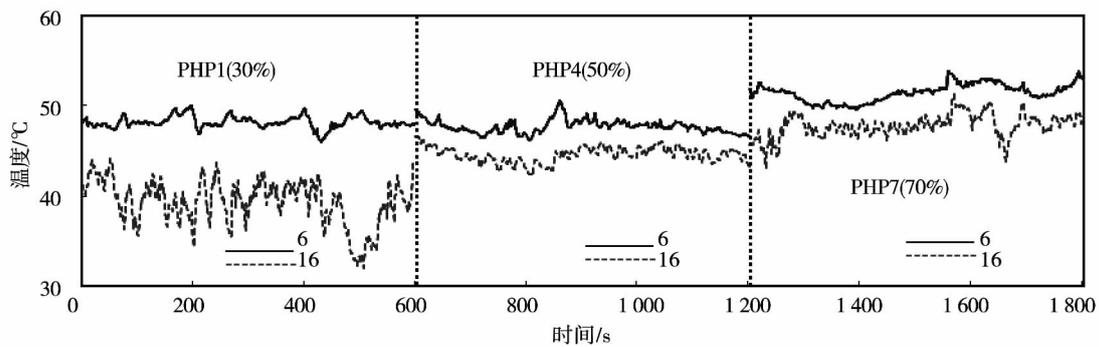


图 6 30 W 时的壁温波动

Fig. 6 Wall temperature fluctuation at 30 W

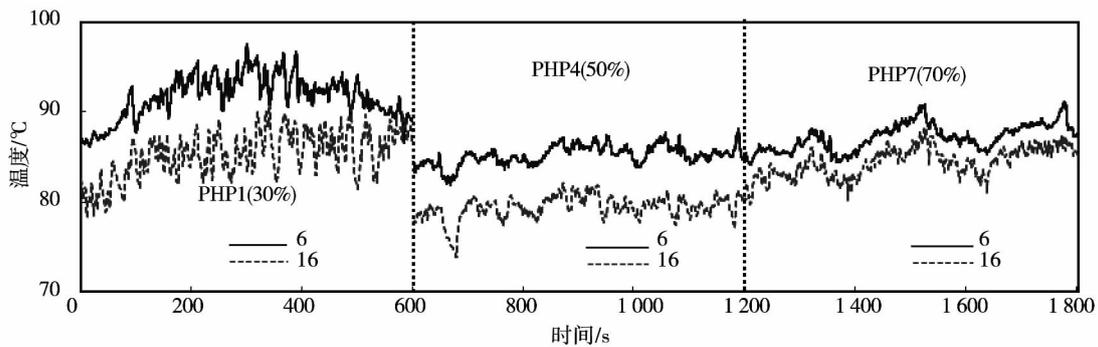


图 7 80 W 时的壁温波动

Fig. 7 Wall temperature fluctuation at 80 W

表 3 显示了三种充液率的 0.3:0.7 的乙醇 - 水热管在 30 和 80 W 时的壁温振幅和振频。

从图 6 和图 7 的壁温波动曲线看, 三种充液率的 0.3:0.7 乙醇 - 水热管在两种功率下都有较明显的振荡, 但 50% 和 70% 充液率热管壁温振荡效果接近, 振幅比 30% 充液率热管均匀且小。从表 3 中的振频对比结果看, 同功率下, 热管充液率增加, 壁温振频增大, 且振频和振幅也增大。从传热热阻看, 30 和 80 W 时, 分别是 50% 和 70% 充液率热管的热阻最小, 而两种功率下的 30% 充液率热管的热阻最

大。综合看, 中小功率和相同体积配比时, 中高充液率热管内的工质振荡明显优于小充液率热管, 表现为较小的振幅、较大的振频和较优的传热性能; 并且高充液率热管随功率增大表现出更好的传热性能。

原因可分析为: 中小功率下, 热管内工质运动以振荡为主, 当充液率小于 50% 时, 工质质量较少, 管内工质汽化量也很少, 此时管内汽塞长于液塞, 而汽态工质运动粘性系数又远大于液态工质, 致使工质振荡阻力较大, 振频降低; 另外, 长汽塞与管壁的换热能力没液塞强, 表现为同振频下较大的壁温振幅。

表 3 三种充液率热管在两种功率下的壁温振幅和振频  
Tab.3 Amplitude and frequency of temperature oscillation for OHP with three kinds of filling ratios at 30 W and 80 W

充液率	30 W		80 W	
	振幅	振频	振幅	振频
30% (0.3:0.7)	1.437 7	0.109 4	2.959 1	0.166 1
50% (0.3:0.7)	1.087 2	0.129 4	1.454 8	0.188 2
70% (0.3:0.7)	1.231 5	0.158 8	1.398 0	0.212 4

### 3 结 论

研究了乙醇-水双工质脉动热管在不同充液率、体积配比和加热功率下的传热性能和壁温振荡特性 结论如下:

(1) 乙醇-水脉动热管的充液率、体积配比和加热功率对传热性能的影响主要体现在中小功率范围内(如本实验测得的 100 W 以内);中高功率时,加热功率、充液率和体积对比对热管传热性能的影响很小;

(2) 中小功率时,乙醇-水脉动热管的充液率不宜过低,应控制在 50%~70%;在中高功率时,水工质占热管总容积的份额对热管的稳定性起显著作用,且水份额越大,传热热阻越小,传热性能越佳;

(3) 在中小功率时的振荡流中,乙醇份额高会明显降低工质振幅,增大振频;相同体积配比的乙醇-水热管的振荡特性相对较差,但振荡性能不是降低传热热阻的唯一因素,其还受工质其它热物性的影响。

#### 参考文献:

[1] J. Qu ,H. Y. Wu ,P. Cheng ,X. Wang ,Non-linear analyses of temperature oscillations in a closed-loop pulsating heat pipe ,International Journal of Heat and Mass Transfer [J]. 2009 52( 15 - 16) : 3481 - 3489.

[2] J. Qu ,H. Y. Wu ,P. Cheng ,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.

[3] M. Mameli ,M. Marengo ,S. Khandekar ,Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe [J]. Int. J. Therm. Sci 2014 ,75: 140 - 152.

[4] M. Mameli ,M. Marengo ,S. Zinna ,Numerical model of a multi-turn closed loop pulsating heat pipe: effects of the local pressure losses due to meanderings [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2012 ,55(4) : 1036 - 1047.

[5] Sarangi R K ,Rane M V. Experimental investigations for start up and maximum heat load of closed loop pulsating heat pipe [J]. Pro-

cedia Engineering 2013 51: 683 - 687.

[6] K. H. Chien ,Y. T. Lin ,Y. R. Chen ,K. S. Yang ,C. C. Wang ,A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations [J]. Int. J. Heat Mass Transfer ,2012 ,55( 21 - 22) : 5722 - 5728.

[7] Z. H. Xue ,W. Qu ,Experimental study on effect of inclination angles to ammonia pulsating heat pipe [J]. Chinese Journal of Aeronautics 2014 27( 5) : 1122 - 1127.

[8] D. Yin ,H. Rajab ,H. B. Ma ,Theoretical analysis of maximum filling ratio in an oscillating heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2014 74: 353 - 357.

[9] 苏 磊 张 红 ,丁 锐 ,等. 单回路脉动热管温度振荡特性实验研究 [J]. 中国电机工程学报 2011 31( 20) : 67 - 74.

SU Lei ,ZHANG Hong ,DING Rui. Experimental study on temperature oscillation characteristic of single-loop pulsating heat pipe [J]. Proceedings of the CSEE 2011 31( 20) : 67 - 74.

[10] Khandekar S ,Gautam A P ,Sharma P K. Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe [J]. International Journal of Thermal Sciences 2009 48( 3) : 535 - 546.

[11] X. D. Liu ,Y. P. Chen ,M. H. Shi ,Dynamic performance analysis on start-up of closed-loop pulsating heat pipes ( CLPHP) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2013 ,65: 224 - 233.

[12] 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.

HU Jian-jun ,XU Jin-liang. Experimental study of pulsating heat pipe with mercury and water as working fluid [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering 2008 59( 5) : 1083 - 1090.

[13] 史维秀 李惟毅 潘利生 ,等. 乙醇水溶液脉动热管传热特性研究 [J]. 机械工程学报 2011 47( 24) : 117 - 121.

SHI Wei-xiu ,LI Wei-yi ,PAN Li-sheng ,et al. Study on heat transfer properties of aqueous ethanol pulsating heat pipe [J]. J. Mech. Eng 2011 47( 24) : 117 - 121.

[14] 隋 缘 崔晓钰 韩 华 ,等. 水-乙醇混合工质振荡热管的传热特性研究 [J]. 制冷学报 2014 35( 3) : 50 - 57.

SUI Yuan ,CUI Xiao-yu ,HAN Hua ,et al. Experimental study on thermal performance of pulsating heat pipe with aqueous ethanol fluids [J]. Journal of Refrigeration 2014 35( 3) : 50 - 57.

[15] Y. Zhu ,X. Y. Cui. 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.

[16] G. Burbani ,V. Ayel ,A. Alexandre ,P. Lagonotte ,Y. Bertin ,C. Romestant ,Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications [J]. Appl. Therm. Eng 2013 50( 1) : 94 - 103 .

[17] Lin Y ,Kang S ,Chen H. Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance [J]. Applied Thermal Engineering 2008 28( 11 - 12) : 1312 - 1317.

[18] J. Qu ,H. Y. Wu ,P. Cheng ,Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer 2010 37: 111 - 115.

[19] J. Qu ,H. Y. Wu ,P. Cheng ,Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO<sub>2</sub>/water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids [J]. International Journal of Thermal Sciences ,2011 ,50: 1954 - 1962.

( 陈 滨 编辑)

**Relationship between Leakage Fault State of Heat Exchanger and its AE Emission Signal Feature** [刊, 汉] LI Lu-ping, WU Hao, HUANG Zhang-jun, JIN Feng-hua, RAO Hong-de ( School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 15 ~ 20

Based on the early characteristic of heat exchanger internal leakage, mainly aperture leakage, an experimental test rig for detecting the inner-leakage of heat exchanger through acoustic emission signal was designed and built. The effect of differential pressure between aperture ends on leakage was simulated by changing the inlet pressure of the heat exchanger. The experimental data obtained under inlet pressures of 0.1 MPa ~ 0.6 MPa were analyzed by Wavelet decomposition techniques. Then the relationship between inlet pressure and spectrum characteristics for the acoustic emission signal of aperture leakage under different entrance conditions was determined. The quantitative correlation between leakage and acoustic emission energy was fitted as follows:  $Q_x = (19.17E_s^3 - 9.76E_s^2 + 2.14E_s - 0.072)^{0.365}$ . This correlation can provide a theoretical and experimental reference for detecting the internal leakage of heat exchanger. **Key words:** heat exchanger, internal leakage, acoustic emission signals, wavelet decomposition

**乙醇-水双工质脉动热管传热性能实验研究 = Experimental Study on the Thermal Performance of Ethanol-water Double-medium Pulsating Heat Pipe** [刊, 汉] LV Shao-fan, SU Lei ( College of Energy Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 211816) ZHANG Hong ( Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu, China, Post Code: 213002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 21 ~ 26

Through experimental study of pulsating heat pipe with ethanol-water double working medium in air-cooled mode, the effects of heating power, volume ratio, and filling ratio on heat pipe oscillation and heat transfer performance have been discussed. Under the experimental conditions, results show that with power less than 100 W, filling ratio, volume ratio, and heating power have relatively apparent effects on heat transfer performance of heat pipe, while under medium or high power, the stability of such heat pipe is related to volumetric quota of liquid water. The thermal resistance decreases with the increase of water quota. When water quota is below 21%, heat pipe has relatively poor stability and its power upon occurrence of instability decreases with the decrease of water quota. The thermal performance of heat pipe with 50% ~ 70% filling ratio is better than the one with 30% filling ratio, while the heat pipe of equal volume ratio demonstrates the worse oscillating characteristics and heat transfer performance. **Key words:** double working medium pulsating heat pipe, heat transfer performance, oscillating characteristics

**半圆形微通道内纳米流体流动与传热特性 = Heat Transfer and Flow Characteristics of Nanofluids Flowing**