

文章编号: 0253-4339(2015) 01-0070-07

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.070

## 水-甲醇混合工质振荡热管温度振荡及传热特性研究

徐天潇 崔晓钰 李治华 孙慎德

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘 要** 通过实验研究了水-甲醇混合工质振荡热管充液率分别为 55%、62%、70%、90% 下, 体积比分别为 13:1、4:1、1:1、1:4、1:13 时的温度振荡以及热阻特性, 并与水、甲醇纯工质振荡热管进行了对比。研究表明, 混合工质振荡热管的振幅较纯工质大且较为均匀; 较大充液率时(62% 及以上), 大多数混合工质振荡热管热阻大于两种纯工质; 中等充液率时, 部分振荡热管出现烧干现象, 受黏度影响, 大多数混合工质振荡热管出现烧干现象时的功率较小, 热阻较纯工质大。但是, 在水中加入少量甲醇(13:1)做工质的振荡热管在充液率为 55% 下不易发生烧干, 且热阻较其他工质低。振荡热管的热阻特性受工质黏度、气液相平衡等因素的共同作用, 在不同工况下, 各因素作用效果不同。

**关键词** 传热特性; 振荡热管; 混合工质; 实验分析

**中图分类号**: TB61<sup>+</sup>2; TB657.5

**文献标识码**: A

## Experimental Investigation on Thermal Performance of Oscillating Heat Pipe with Water/Methanol Mixture as Working Fluids

Xu Tianxiao Cui Xiaoyu Li Zhihua Sun Shende

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai, 200093, China)

**Abstract** An experimental investigation was performed on the oscillating characteristics and thermal resistances of the oscillating heat pipe(OHP) with water/methanol mixture under varied mixing ratios (i. e. 13:1, 4:1, 1:1, 1:4 and 1:13) and filling ratios (i. e. 90%, 70%, 62% and 55%), which is compared with the pure working medium, water and methanol. Experimental results showed that the amplitude of the OHP with mixture was larger than the pure working fluid. Generally, the thermal resistance of the OHP with the mixture working medium was mostly higher than that with pure one when the filling ratio was more than 62%. The OHP with mixture was easier to dry out than that with pure one. When the filling ratios were 55%, the thermal resistance of the OHP with mixture rises faster. Specially, the working medium with little methanol (13:1) and much water was ideal because of the high heating power when dry out in 55% filling ratio. The thermal resistance of the OHP was mainly determined by the viscosity of working medium, phase equilibrium and so on. The primary factor changes in different working conditions.

**Keywords** heat transfer performance; oscillating heat pipe; mixture working fluids; experimental investigation

二十世纪九十年代, Akachi<sup>[1]</sup>发明了振荡热管, 其导热能力远远超过任何已知金属<sup>[2]</sup>, 且具有结构紧凑、热响应快等优点, 为解决空冷强迫对流微小空间高热流密度的散热问题提供了一种极具前途的传热元件。其结构简单、价格低廉、传热性能好、可随意弯曲等优点, 在未来航空航天电子设备散热领域具有良好的应用前景。尽管振荡热管的结构非常简单, 但

其运行机理复杂。振荡热管的运行原理可以概括为由于冷热两端间存在压差以及相邻管间存在压力不平衡, 使得工质在加热段和冷凝段之间振荡流动, 从而实现热量的传递<sup>[3]</sup>。因此其涉及驱动振荡热管运行的热力学、控制两相振荡流的流体动力学以及流动和相变过程中的传热传质学等, 因此影响振荡热管传热性能的因素众多。

基金项目: 国家自然科学基金(51076104)和 2012 年度“科技创新行动计划”高新技术领域项目(12dz1143800)资助。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51076104) and 2012 Project of High Tech Field-Action Plan of Science and Technology Innovation (No. 12dz1143800).)

收稿日期: 2014 年 4 月 14 日

振荡热管的研究最早仅限于纯工质。崔晓钰等<sup>[4]</sup>对水、甲醇、乙醇、丙酮四种工质不同工况的传热情况作了研究,结果表明,在加热功率较大且保证不烧干的前提下,振荡热管的热阻受充注何种液体及充液率大小影响较小。充液率较小时,热阻增大,个别管段出现局部烧干现象,但温度不会飞升,不致烧毁。R K Sarangi 等<sup>[5]</sup>以水、乙醇为工质研究了振荡热管启动振荡加热功率、最大加热功率和最佳充液率。实验结果表明,启动振荡功率与充液率无关,最大加热功率与充液率有关。对于相同工作温度,最大加热功率情况下得到的最佳充液率与工质种类有关。Yuh-sing Lin 等<sup>[6]</sup>利用高清摄像机拍摄并研究了甲醇和乙醇在 60% 充液率,不同加热功率下振荡热管的传热特性。研究表明,甲醇振荡热管在实验功率范围内热阻低于乙醇,文中指出这主要与甲醇 $(dp/dT)_{sat}$ 值大于乙醇有关。然而纯工质有其物性上的局限性,例如比热和汽化潜热较大的某些工质虽然携带能量的能力比较大,但沸点高,不易启振。因此将工质混合可能为振荡热管的性能带来更多不同的影响。

混合工质在相关领域应用中所呈现的特性,可以为混合工质振荡热管的研究提供参考。魏琪等<sup>[7]</sup>发表了水-甲醇混合工质两相闭式热虹吸管传热特性的文章,认为混合工质的浓度对比对热管性能影响较大。陈东等<sup>[8]</sup>研究了动力型可分离式热管的特性,其采用非共沸混合工质,得到了非共沸混合工质的变温相变特性能够较好匹配冷热源温度的波动,使热管具有了稳定的传热性能。Raffaele Savino 等<sup>[9]</sup>发现选择合适的两组元溶液可提高普通热管传热能力。这些领域的混合工质都为相关设备带来了新的特性,表现出了不同于纯工质的性质。

对混合工质振荡热管的研究目前比较少。褚红蕊等<sup>[10-11]</sup>提出振荡热管对二元混合工质的要求:1) 二元混合工质应满足振荡热管的应用场合的工作温度的要求,并具有适当的饱和压力。2) 二元混合工质与管材应相容,且具有良好的热稳定性,以免产生不凝性气体。3) 二元混合工质的 ODP(破坏臭氧层潜能值)应尽可能为 0, GWP(温室效应潜能值)尽可能小。

水与甲醇混合后的物性与纯工质有明显的不同。J Will Thompson 等<sup>[12]</sup>利用新型黏度计测量水-甲醇黏度,得到了混合物黏度与不同体积配比关系,研究发现水-甲醇混合工质的黏度比两种纯工质普遍升高。另外,水-甲醇溶液具有正偏差性<sup>[13]</sup>,相变迁移特征表现出显著的浓度滑移,物性改变和特殊的相变迁移特征使得水-甲醇混合工质振荡热管可表现出独

特的规律。

本文讨论了不同体积比的水-甲醇振荡热管振荡特性及热阻特性,并进一步分析了影响振荡热管特性的因素,阐述了产生这些特性的原因。

## 1 实验装置及方法

选择水-甲醇体积比为 13:1, 4:1, 1:1, 1:4, 1:13 的不同工质,用热电偶测量充液率在 90%、70%、62%、55%、35% 下的振荡热管各测点的温度。实验系统如图 1 所示。主要包括振荡热管、加热装置、冷却装置及数据采集装置四部分。振荡热管由内径 2.0 mm, 外径 4.0 mm, 总长 2.1 m 的毛细紫铜管制成,弯道数为 5,总高度为 180 mm,垂直放置;加热装置采用镍铬电加热丝加热,加热功率为 20 ~ 100 W,功率可调;蒸发段和绝热段都放置在双层真空有机玻璃保温层中,并包裹锡箔纸减小热辐射。冷凝段放入小型风道中央进行强制风冷。由热电偶、Agilent 34970A 数据采集仪和计算机组成。数据采集仪接收热电偶的电势信号转换为温度信号,信号通过 RS-232 串口输入计算机,再使用 Labview 程序语言平台进行数据的显示、处理及保存。

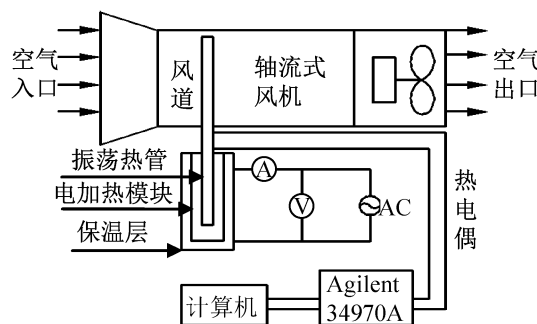


图 1 振荡热管的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

实验开始阶段采用真空泵对振荡热管抽真空,用滴管为振荡热管充注事先配好的工质,打开电脑和数据采集仪,打开加热装置及风扇,待冷热端温度稳定波动后,采集最后 10 min 数据,即刻增加加热功率,进行下一个工况的实验。

振荡热管尺寸和热电偶的分布见图 2,实验系统共布置 20 根热电偶,其中 19 根测管外壁温,1 根测双层真空有机玻璃保温层外壁温。19 根热电偶中,5 根布置在蒸发段弯道处,取平均值作为蒸发段的壁面温度;6 根布置带冷凝段顶部弯道处,取平均值作为冷凝段的壁面温度;此外,为方便考察温度沿管长方向的变化,在 4 号管和 7 号管各布置 4 根热电偶。

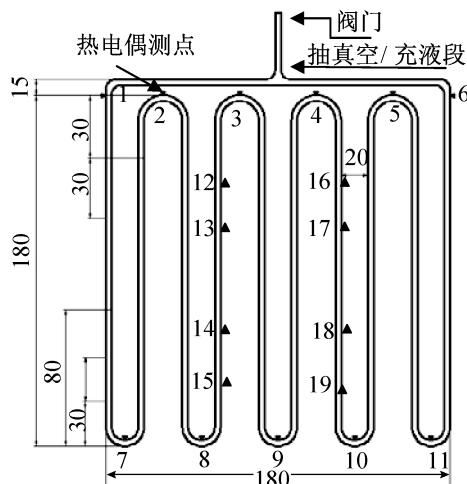


图 2 振荡热管尺寸及热电偶分布

Fig. 2 Size of the OHP and arrangement of thermocouples

2 水-甲醇混合工质物性及相变特性

标准大气压下不同工质的物性见表 1。

表 1 标准大气压下水、甲醇的热物性<sup>[14]</sup>

Tab. 1 Thermophysical property of water and methanol in standard atmospheric pressure

| 工质 | 沸点<br>$t_s / ^\circ\text{C}$ | 密度(液体)<br>$\rho_l / (\text{kg}/\text{m}^3)$<br>(20 $^\circ\text{C}$ ) | 比热(液体)<br>$c_{pl} / (\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$<br>(20 $^\circ\text{C}$ ) | 汽化潜热<br>$H_{fg} / (\text{kJ}/\text{kg})$<br>(20 $^\circ\text{C}$ ) | $(dp/dT)_{\text{sat}} \times 10^{3*}$<br>$/ (\text{Pa}/\text{K})$ (20 $^\circ\text{C}$ ) | 黏度<br>$\eta_l / (\text{Pa}\cdot\text{s})$<br>(20 $^\circ\text{C}$ ) |
|----|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 水  | 100.0                        | 998                                                                   | 4.18                                                                                | 2257                                                               | 0.145                                                                                    | 1.01                                                                |
| 甲醇 | 64.7                         | 791                                                                   | 2.48                                                                                | 1101                                                               | 0.703                                                                                    | 0.60                                                                |

注:该数据是由 REFPRO 软件计算输出得来。

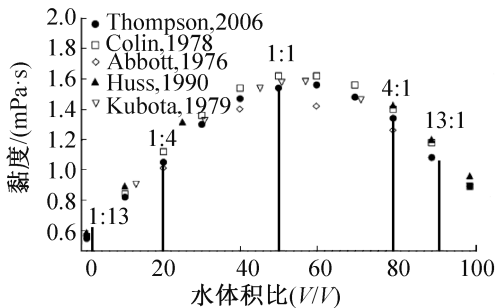


图 3 水-甲醇的黏度与不同体积配比关系图<sup>[11]</sup> (25  $^\circ\text{C}$ )

Fig. 3 Viscosity vs. proportion for water/methanol mixture (25  $^\circ\text{C}$ )

振荡热管在振荡流动过程中,伴随着工质的相变。受相平衡关系的影响,气液相中的各组分比例也随着相变有所改变。当压力一定时(如图 4(a)),对于一定配比(b)的工质气相中甲醇含量( $b_2$ )较原溶液多,水含量较原溶液少,而液相中甲醇含量( $b_1$ )

由该物性表可以看出,与水相比,甲醇的沸点低,在振荡热管运行过程中,比较容易启振,产生振荡流动,同时,甲醇的黏度较小,运动时摩擦阻力较小。但甲醇的比热和汽化潜热都较小,流动时携带能量的能力较小。从上述对物性比较上看,甲醇与水存在互补性。同时,也必须考虑甲醇与水混合后分子间相互作用造成的物性影响。在考察水与甲醇混合后物性变化时,发现混合后粘性表现较特殊。

关于黏度特性变化见图 3,水-甲醇的黏度与不同体积配比关系图<sup>[12]</sup>。该图是由 J Will Thompson 等<sup>[12]</sup>利用新型黏度计测量水甲醇黏度,并与传统的理论研究进行比较生成的。从图中可见,水-甲醇在混合之后,混合物的黏度普遍上升,在体积比大约 1:1 时达到最大,而且曲线并不对称。结合振荡热管实验时所用体积配比关系,可以看出,水-甲醇各体积配比下黏度大小关系的排序为 1:1 > 4:1 > 1:4 > 13:1 > 水 > 1:13 > 甲醇。

较原溶液多,水含量较原溶液少。同样情况也存在于温度一定的气液相平衡图中(如图 4(b))。这种浓度滑移说明两种工质相变过程中并不同步。

溶液的相变过程不同于纯工质,由于相变过程中浓度梯度的存在,相比纯工质,增加了一重传质阻力。而且水-甲醇溶液是非共沸溶液,变温相变温度区间大,在沸腾时低沸点组分甲醇与水相比相对较多地转移到气相中,在凝结时正好相反,在这个两元体系中,水的汽化受到抑制,更多保留在液相中。

3 水-甲醇混合工质的振荡特性及其分析

在 62% 的充液率下水-甲醇混合工质与水、甲醇纯工质振荡热管的温度振荡特性曲线见图 5。

对比以水为工质的振荡热管和水甲醇混合工质振荡热管的可以发现,在水中加入甲醇后,温度振荡曲线情况有了明显的不同。

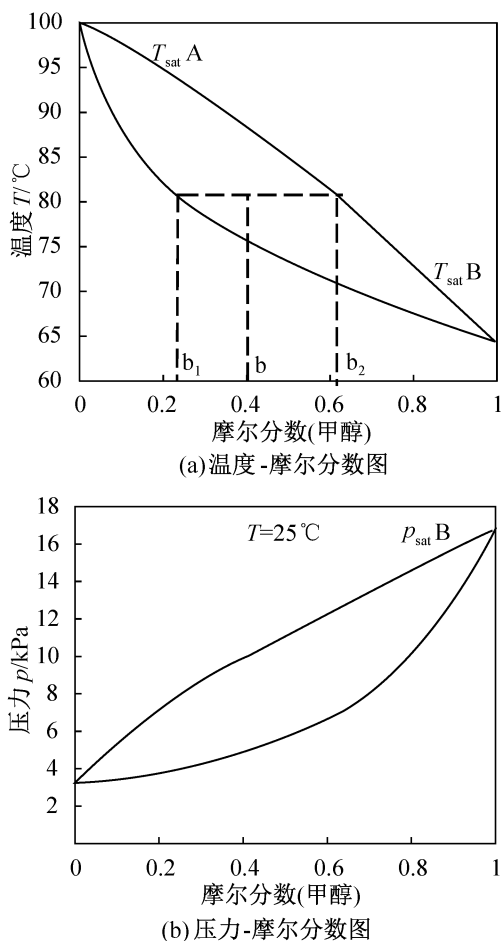


图 4 水-甲醇混合工质气液平衡相图

Fig. 4 Vapor-liquid equilibrium of water/methanol mixture

小功率(20 W 以下)时,以水为工质的振荡热管振荡曲线比较平稳,而混合工质振荡热管则存在小幅波动,这种温度波动是由测点处气液相工质不断交替更新造成的。混合工质中甲醇的存在降低了工质的沸点,使得工质易沸腾,产生较多的气泡,因此测点处温度产生波动。但这种波动并没有引起冷热段温差的减小,这是由于此时加热功率较低,产生的气泡较小,推动力不足,因此振荡热管中并没有产生稳定的宏观环流,因此冷热段的热量交换没有显著提高。

在大功率下(20 W 及以上),混合工质和纯工质振荡热管都有振荡,但与纯工质相比,混合工质振荡热管存在以下两个特点:第一,蒸发段和冷凝段的波动增加,振幅增大。这说明混合工质振荡热管中的气泡的生长状态与纯工质有了不同。在蒸发段,工质由液相转化为气相,由于气相中甲醇组分较多,气泡与周围液体产生浓度差,抬高了周围液体的泡点,相对于气泡来说,气泡周围液体是过冷的,气泡的生长也相比纯工质更加缓慢。而在冷凝段,工质有气相转化

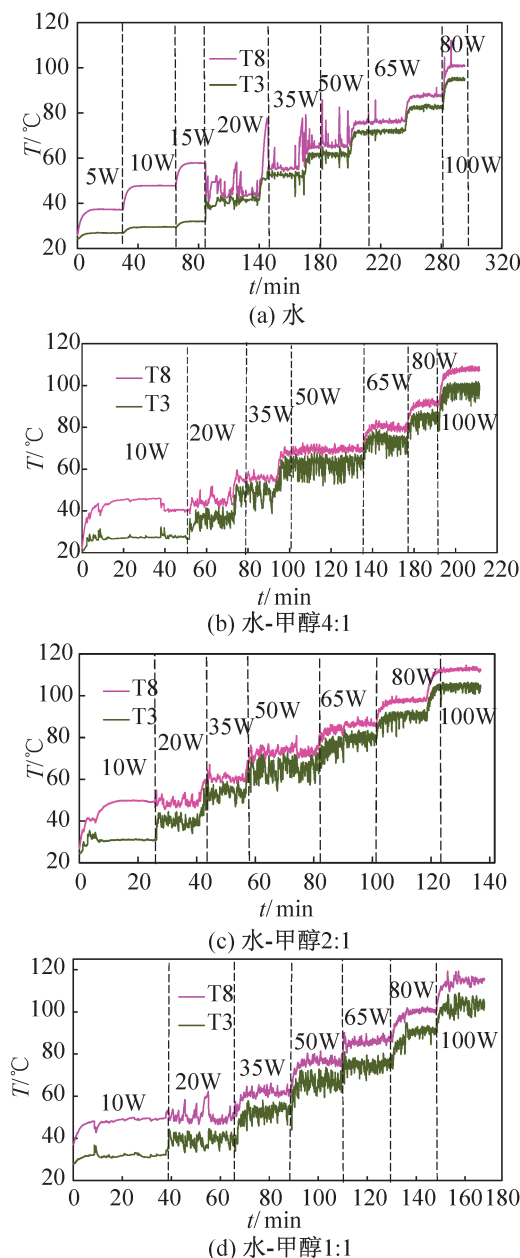


图 5 水、甲醇以及水-甲醇混合工质 62% 充液率下振荡热管温度振荡曲线

Fig. 5 Temperature variations of evaporator and condenser for OHPs with mixtures and pure working fluids

为液相,气泡中水较甲醇更多的冷凝,剩余气相的露点温度不断降低,难于冷凝,减慢了气泡的消减过程。其中,混合工质对冷凝段的影响更大,甲醇的存在相对于水来说,在某种程度上相当于不凝性气体,对传热的影响更大;第二,混合工质振荡热管的蒸发段和冷凝段的振幅相比纯工质较均匀。特别是蒸发段没有出现类似纯工质振荡热管的温度偶尔飙升现象。由于蒸发段一般贴附在电子元器件上,蒸发段温度平稳波动对设备的热冲击较小,有利于电子元器件的安全可靠运行。

## 4 水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性及其分析

由于振荡热管中初始充液时液体分布不均匀,小加热功率(35 W 以下)时振荡不充分,虽然振荡热管中热阻曲线总体趋势一致,但具体测点数据的实验结果可重复性不好,各配比混合工质振荡热管热阻相对差异不稳定,所以只讨论 35 W 以上整体热阻特性。

### 4.1 较高充液率下振荡热管热阻特性

根据振荡特性整理出下图 6 充液率为 62% 的水、甲醇、水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性。

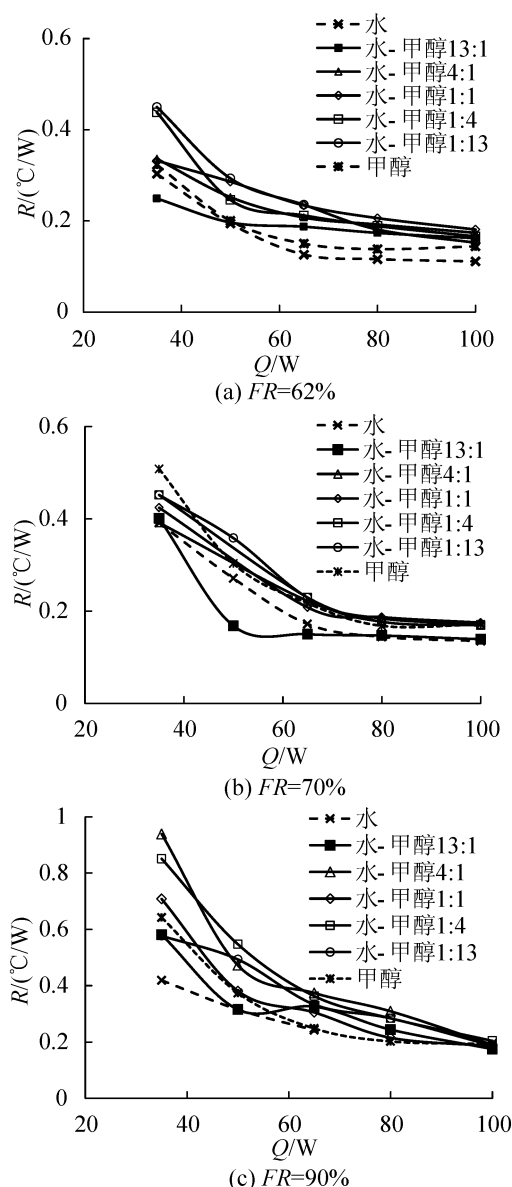


图 6 较高充液率下的水、甲醇、水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性

Fig. 6 Thermal resistance vs. heating power for mixtures and pure working fluids

如图 6 所示,较大充液率下,所有工质振荡热管热阻随加热功率的增大而减小。比较两种纯工质振荡热管热阻曲线可知:在 35 W 以后,水振荡热管热阻小于甲醇。这是由于水的比热和汽化潜热较甲醇大,携带能量的能力较强,冷热端换热更加充分,因此 35 W 之后,水振荡热管热阻小于甲醇。

比较混合工质和纯工质振荡热管热阻曲线可以发现:35 W 之后,由于不同工质振荡热管普遍启振,振荡的差异对热阻的影响减小,此时热阻的差异主要与工质及其流动特性有关。混合工质在发生相变时气液相浓度不同,水-甲醇混合工质具有极大正偏差性,同一组分气液相间存在浓度差,而且在界面处浓度梯度较大,水甲醇混合工质较纯工质发生相变时传质阻力较大,造成混合工质传热传质特性不如纯工质活跃,流动动力较小;加之混合工质普遍黏度较大,混合工质较纯工质在振荡热管中流速较慢,因此混合工质振荡热管传热性能不如纯工质理想,热阻较大。

### 4.2 中等充液率下振荡热管热阻特性

图 7 为充液率为 55% 时水、甲醇和水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性。振荡热管热阻在小功率下随加热功率的上升而减小,除体积比为 13:1 的混合工质外,其他振荡热管在功率增大后出现了热阻上升的现象,这是由于中等充液率下工质的量较少,在大加热功率作用下,管内工质气化,缺少充足液态工质回流蒸发段而出现局部烧干的原因。

图 7 为充液率为 55% 时水、甲醇和水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性。振荡热管热阻在小功率下随加热功率的上升而减小,除体积比为 13:1 的混合工质外,其他振荡热管在功率增大后出现了热阻上升的现象,这是中等充液率下工质的量较少,在大加热功率作用下,管内工质气化,缺少充足液态工质回流蒸发段而出现局部烧干的原因。比热和汽化潜热大,携带能量能力强的工质由于在同样加热量下吸收的热量较多,工质流动过程中可以在加热段带走较多的热量,因此不容易局部过热导致烧干。反之,则较容易发生烧干。

对比纯工质,甲醇振荡热管较水发生烧干现象的功率较小,热阻较大。这是由于水的沸点、比热和汽化潜热较其他工质均高,携带能量的能力强,蒸发段的能量及时被带出,冷凝段液体及时回流,因此振荡热管冷热段间换热较充分,不容易发生烧干。

水/甲醇之比为 13:1 的混合工质振荡热管没有发生烧干,且热阻较低。由图 3 可见,相比其他体积比的混合工质,一方面,该配比的工质黏度与水比较接近,并没有明显的黏度增大。另一方面,由于该体

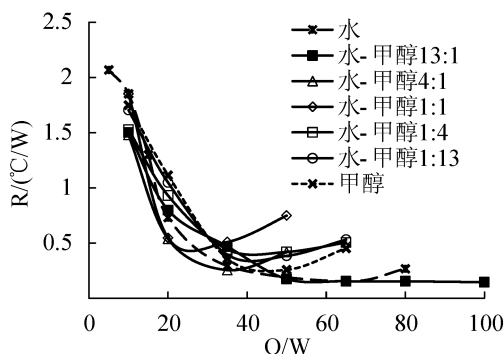


图 7 充液率为 55% 的水、甲醇和水-甲醇混合工质振荡热管的热阻特性

Fig. 7 Thermal resistance vs. heating power for mixtures and pure working fluids (FR = 55%)

积比含水较大,比热气化潜热较大,携带能量的能力比较大。另外,与纯工质相比,由于甲醇量较少,比热和汽化潜热与纯水相差不大,而从图 4 可以看出,由于浓度滑移,甲醇抑制了水的汽化作用,更多的水处于液相。由于具备了以上特性,水/甲醇 13:1 的混合工质振荡热管抵御烧干的能力较强,且热阻较低。可见,55% 充液率下在水中加入少量的甲醇,对振荡热管的传热性能产生了有利的影响。

其余配比的混合工质振荡热管开始烧干现象的功率较纯工质小,且整体热阻较高。在相变过程中,虽然甲醇的存在一定程度上抑制了水的汽化,使得更多的水保持在液态,但该配比下工质由于受黏度和工质携带能量的能力影响较大,使抑制作用影响不明显。配比为 1:1 和 4:1 的工质虽然水含量比较多,但出现烧干现象的功率最小,这是由于这两种配比的黏度最大,工质流速低,热端的能量不容易被工质携带出,冷端回流也较慢,因此容易发生局部烧干现象,导致振荡热管的热阻增大。水/甲醇体积配比为 1:4 和 1:13 的工质黏度略大于甲醇,因此较甲醇容易烧干,黏度与水比较接近,但仍然较水容易烧干。这是由于这几种配比甲醇含量较大,工质携带能量的能力较差,因此也较容易发生烧干现象。

当充液率进一步减小时,由于液体总量小,极易出现烧干现象,且所有实验配比下振荡热管热阻较大,振荡热管传热性能较差,不利于实际中工程应用。

## 5 结论

本文分析了不同充液率,不同配比下振荡热管温度振荡特性曲线和热阻特性曲线,并阐述了产生这些现象的原因,得出以下结论:

1) 水甲醇混合工质在温度振荡特性方面与纯

工质有所不同。较小功率(10 W)下,由于甲醇沸点较低,不同于纯工质,混合工质振荡热管温度振荡曲线有明显波动,但这种波动未引起冷热端温差的减小。较大功率(20 W 及以上)下,由于混合工质黏度增大,以及受到相变时浓度滑移的影响,混合工质振荡热管在冷热端的波动增加,振幅增长,且振幅较为均匀。这样的特性可以减少对敏感的元件的热冲击。

2) 在较大充液率下(62% 以上),由于混合工质在相变过程中界面处浓度梯度较大,传质阻力比纯工质大,且混合工质黏度较大,因此混合工质振荡热管的热阻普遍大于纯工质,只有甲醇组分较小的 13:1 混合工质振荡热管热阻与水相当。

3) 在中等充液率下(55%),大部分工质均出现烧干现象,水甲醇比为 13:1 的混合工质振荡热管由于黏度与水相当,且相变过程中甲醇对水的抑制作用,其抵御烧干的能力较强,而其他混合工质由于黏度远大于纯工质,在较小加热功率下均出现烧干现象。

## 参考文献

- [1] Akachi H. Structure of a heat pipe: US, 4921041 [P]. 1990-05-01.
- [2] Cao Y, Gao M, Beam J E. Experiments and analyses of flat miniature heat pipes[J]. AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(2): 158-164.
- [3] 唐鑫, 张华, 沙丽丽, 等. 脉动热管实验与理论研究进展[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 1-9. (Tang Xin, Zhang Hua, Sha Lili, et al. Development of experimental and theoretical study on pulsating heat pipe[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 1-9.)
- [4] 崔晓钰, 李治华, 孙慎德, 等. 振荡热管的热阻变化规律及烧干特性[J]. 化工学报, 2013, 64(6): 2022-2028. (Cui Xiaoyu, Li Zhihua, Sun Shende, et al. Thermal resistance variation and dryout phenomenon of pulsating heat pipe[J]. CIESC Journal, 2013, 64(6): 2022-2028.)
- [5] R K Sarangi, M V Rane. Experimental investigations for start up and maximum heat load of closed loop pulsating heat pipe[J]. Procedia Engineering, 2013, 51(1): 683-687.
- [6] Yuhshing Li, Shungwen Kang, Tsungyu Wu. Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2): 573-580.
- [7] 魏琪, 袁朗. 水-甲醇混合工质两相闭式热虹吸管传热特性的研究[J]. 力学与实践, 2000, 22(2): 49-52. (Wei Qi, Yuan Lang. On heat transfer in a closed two-

(下转第 112 页)

- 术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 20-22.
- [13] Xianghui Tan, Dongsheng Zhu, Guoyan Zhou, et al. Experimental and numerical study of convective heat transfer and fluid flow in twisted oval tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55 (17/18): 4701-4710.
- [14] Moffat R J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment[J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, 107 (2): 173-178.
- [15] 刘健鑫, 崔汉国, 代星, 等. 换热器设计方案多级可拓综合评价[J]. 化工学报, 2011, 62 (7): 1970-1976. (Liu Jianxin, Cui Hanguo, Dai Xing, et al. Multilevel comprehensive evaluation for heat exchanger design schemes based on extension theory[J]. CIESC Journal, 2011, 62 (7): 1970-1976)
- [16] 何雅玲, 陶文铨, 王煜, 等. 换热设备综合评价指标的研究进展[C]//工程热物理学会传热传质学学术会议. 西安: 工程热物理学会, 2011.
- [17] Webb R L. Heat transfer and friction characteristics of internal helical-rib roughness[J]. Journal of Heat Transfer, 2000, 122: 134-142.
- [18] Webb R L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surface in heat exchanger design[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24 (4): 715-726.
- 作者简介**  
黄媛媛, 女, 硕士研究生, 华东理工大学机械与动力工程学院, 15901871622, E-mail: yyhuang111@126.com. 研究方向: 高效节能设备与强化传热研究.
- About the author**  
Huang Yuanyuan, female, master candidate, School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, + 86 15901871622, E-mail: yyhuang111@126.com. Research fields: heat transfer enhancement and high efficiency heat exchanges.
- 
- (上接第75页)
- phase thermosiphon working with mixture of water and methanol[J]. Mechanics and Engineering, 2000, 22 (2): 49-52.)
- [8] 陈东, 王越, 刘振义, 等. 热环非共沸循环工质的优选[J]. 节能技术, 2000, 18 (2): 15-16. (Chen Dong, Wang Yue, Liu Zhenyi, et al. Selection of non-azeotropic mixture fluids for circuit[J]. Energy Conservation Technology, 2000, 18 (2): 15-16.)
- [9] Raffaele S, Nicola di F, Rainondo F, et al. Heat pipes with binary mixtures and inverse marangoni effects for microgravity application[J]. Acta Astronautica, 2007, 61 (1/6): 16-26.
- [10] 褚红蕊, 解国珍, 刘蕾. 用于脉动热管的二元混合工质热力特性探讨[J]. 制冷与空调, 2010, 10 (6): 21-25. (Chu Hongrui, Xie Guozhen, Liu Lei. Discussion on thermodynamic properties of binary mixture as working fluid for pulsating heat pipe[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2010, 10 (6): 21-25.)
- [11] 褚红蕊, 解国珍, 刘蕾. 混合工质热力参数特性与脉动热管适应性研究[J]. 制冷与空调, 2011, 25 (3): 216-219. (Chu Hongrui, Xie Guozhen, Liu Lei. Discussion on thermodynamic properties of binary mixture adaptation of pulsating heat pipe[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2011, 25 (3): 216-219.)
- [12] J Will Thompson, Theodore J Kaiser, James W Jorgenson. Viscosity measurements of ethanol-water and acetonitrile-water mixtures at pressures up to 3500 bar using a novel appillary time-of-flight viscometer[J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1134 (1): 201-209.
- [13] 朱自强, 吴有庭. 化工热力学[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 224-273.
- [14] 王淑波, 蒋红梅. 化工原理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012: 184-189.
- 通信作者简介**  
崔晓钰, 女, 教授, 上海理工大学博士研究生导师, + 8621-55271568, E-mail: xycui2001@yahoo.com. 研究方向: 制冷与空调技术, 电子设备热分析与管理, 计算传热与流体流动, 强化传热传质技术及高效换热器.
- About the corresponding author**  
Cui Xiaoyu, female, professor and doctoral tutor, University of Shanghai for Science & Technology, + 86 21-55271568, E-mail: xycui2001@yahoo.com. Research fields: refrigeration and air conditioning technology, electronic equipment thermal analysis and management, calculation of heat transfer and fluid flow, heat and mass transfer technology and efficient heat exchanger.