

DOI: 10.3901/JME.2014.18.148

甲醇/丙酮振荡热管的传热性能研究*

乔铁梁 崔晓钰 韩 华 李治华

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要: 作为高效传热元件, 振荡热管在解决微小空间但热通量较高的电子器件散热方面具有独特的优势, 其工质的选取对振荡热管的传热性能具有重要影响。采用甲醇、丙酮纯工质及两者不同配比(7:1, 4:1, 1:4, 1:7)的混合工质, 对不同充液率(45%, 62%, 70%)和加热功率(10~100 W)工况时的热阻特性进行试验, 分析甲醇、丙酮工质的物性及其相互作用特性对振荡热管传热性能的影响, 得到甲醇/丙酮二元混合工质振荡热管的传热特性。结果表明: 小充液率时, 振荡热管蒸发段均出现明显的烧干现象, 混合工质振荡热管烧干时热阻较纯工质小, 即在 50 W 时, 甲醇、丙酮纯工质振荡热管热阻分别为 1.509 °C/W、1.484 °C/W, 而甲醇/丙酮 1:7 时振荡热管热阻为 0.88 °C/W, 其他配比时热阻在纯工质及混合工质配比 1:7 之间, 特别是在丙酮中加入少量甲醇(比如甲醇/丙酮 1:7)能有效地改善振荡热管的烧干情况; 大充液率下, 混合工质振荡热管热阻随着加热功率的增大变得较为平缓且相互之间相差不是不大, 传热性能普遍较好。

关键词: 振荡热管; 二元混合工质; 传热特性; 热阻

中图分类号: TK124

Research of the Heat-transfer Performance on Methanol/Acetone Oscillating Heat Pipe

QIAO Tieliang CUI Xiaoyu HAN Hua LI Zhihua

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

Abstract: As a high efficient heat transfer element, the oscillating heat pipe(OHP) has unique advantages in solving the problem of electronic device heat dissipation with tiny space and high heat flux and its heat transfer performance is greatly affected by its working medium. The methanol/acetone binary mixture, as well as the pure methanol, acetone, have been selected as working mediums of OHP, then the heat transfer characteristics of methanol/acetone OHP has been researched by analysing the physical properties of the working mediums and its interaction characteristics on heat transfer performance of OHP under different ratios(7:1, 4:1, 1:4, 1:7), filling ratios(45%, 62%, 70%)and heat inputs(10-100 W). The results show that all evaporator sections of OHP are dried out obviously with small filling ratios. Compared with pure working mediums, the thermal resistance of mixture working medium is smaller when dried out, namely when the heat input is 50 W, the pure methanol, acetone are 1.509 °C/W and 1.48 °C/W, the methanol/acetone 1:7 thermal resistance is 0.88 °C/W, between them are the thermal resistances of the rest ratios. In addition, the effect is more obvious when little methanol is added into acetone as working medium (such as methanol/acetone 1:7); With large filling ratios, the thermal resistances of mixture working mediums increased with little gradient and get close to each other as heat inputs increased gradually, the heat transfer performances are generally great.

Key words: oscillating heat pipe; binary mixture; heat transfer performances; thermal resistance

0 前言

振荡热管(Oscillating heat pipe, OHP)又称脉动

热管(Pulsating heat pipe, PHP)、弯曲毛细管热管、自激振荡流热管等, 是由日本学者 AKACHI 等^[1]于 20 世纪 90 年代初提出的。利用其管径小、体积小以及传热性能好等^[2]优点, 可有效解决高热流密度电子器件的散热问题。其工作原理如下^[3]: 小管径真空下, 管内的充注工质将在管内形成气、液相间的柱塞。在加热段, 液膜因受热而不断蒸发, 气

* 国家自然科学基金(51076104)和 2012 年度“科技创新行动计划”高新技术领域基金(12dz1143800)资助项目。20131012 收到初稿, 20140320 收到修改稿

泡膨胀, 推动气液柱塞向冷凝端冷凝收缩, 从而在冷、热端之间形成较大的压差。由于气液柱塞交错分布, 故在管内可产生强烈的定向循环振荡运动, 从而实现高效热传递。

徐进良等^[4]将影响振荡热管传热特性的参数归结为三类: ① 几何参数, 包括管径、管道界面形状、弯头数、总长、蒸发/冷凝段长度等; ② 物理参数, 包括工质热物性、充液率等; ③ 操作参数, 包括放置位置、加热/冷却方式、是否带有单向阀等。文献[5]则给出了它们之间的相互作用, 这为振荡热管的研究提供了方向。而这其中, 工质物性参数, 包括工质的表面张力、比热容、汽化潜热、黏度、密度、饱和状态下压力随温度的变化率等诸多因素, 对振荡热管的影响较复杂, 而且与充注率也有直接的联系。例如, 曲伟等^[6]研究了以水为工质的振荡热管的传热性能和振荡特性, 发现在大加热功率时, 振荡热管能够稳定振荡运行, 这时显热传热的作用比潜热传热的作用大。另外, 汽化潜热主要影响气液塞振荡流动的驱动力、工质循环振荡流动的速率和温度的振幅; MIYAZAKI 等^[7]研究了工质为 R142b 的有 60 个平行通道的闭合回路铜振荡热管, 试验研究了在三种不同的倾角下充液率的变化对振荡热管性能的影响。研究发现充液率对振荡热管的运行有重要的影响: 底部加热方式的充液率范围会更大, 而顶部加热方式的最佳充液率是 35%, 研究还发现传统热管经常出现的传热限制在振荡热管中并没有遇到; 文献[8]采用一根内径 2 mm、外径 4.2 mm、长 1.6 m 的铜管弯成 10 段直段蛇形弯管, 测定了 R123、乙醇、水, 在不同加热功率, 不同充液率下的热阻。结果发现振荡热管的激励和传热特性与工质的物性包括饱和温度、比热容、汽化潜热及饱和温度下压力随温度的变化率有关, 得出工质饱和温度、比热容和汽化潜热越小而 $(dp/dT)_{sat}$ 越大, 其激励振荡所需要加热功率越小, 而在启动振荡的情况下, 随加热功率进一步增大, 温度振荡频率和幅度差别渐渐缩小, 黏性作用渐弱, 此时, 比热及汽化潜热大的工质振荡热管传热性能较好。

人们对纯工质振荡热管传热特性进行了比较多的研究, 总结出了纯工质一些物性作用于振荡热管的特性, 但也正是由于物性的限制, 想要找到一种能进一步提高振荡热管传热性能的纯工质已非常困难, 混合工质渐渐受到一些关注。比如, 史维秀等^[9]研究了乙醇/水在配比为 1:1, 充液率为 50% 时, 振荡热管在不同加热功率和倾角下的传热特性。结果发现, 与无水乙醇相比, 乙醇/水混合工质振荡热管的传热效果更好: ① 乙醇水混合工质振荡热管稳

定运行的加热功率高于无水乙醇振荡热管; ② 当倾角为 90° 时, 采用乙醇水混合工质的振荡热管热阻值最低约 0.1 °C/W, 传热极限约为 300 W, 而采用无水乙醇的振荡热管最低热阻值约为 0.3 °C/W, 传热极限约为 210 W。

甲醇/丙酮混合工质是正偏差溶液, 除了在一定范围配比下甲醇/丙酮可形成共沸混合物外, 相变过程中大部分配比下各成分在气液相中的浓度不同, 并随着配比与温度的变化而变化。同时由于甲醇与丙酮物性的差异(比如甲醇具有高汽化潜热, 而丙酮具有低动力黏度), 可能会带来互补的优于纯工质传热特性的效果。目前国内外还没有针对该混合工质振荡热管系统的试验研究, 本文以此为基础, 对甲醇/丙酮混合工质的振荡热管进行试验, 研究其在不同配比(4:1、7:1、1:4、1:7)、不同充液率(45%、55%、62%、70%)以及不同加热功率(10~100 W)下的热阻特性, 对比甲醇、丙酮纯工质, 分析混合工质的性质对振荡热管传热性能的影响。

1 试验装置及工质物性

1.1 试验装置描述

试验系统主要包括振荡热管元件、抽真空及充液装置、加热冷却装置及数据采集装置四部分, 如图 1 所示。振荡热管分为加热段、绝热段和冷凝段, 各段长度固定, 分别为 80 mm、20 mm、80 mm, 弯头半径为 10 mm, 相邻管的中心距为 20 mm。振荡热管垂直放置, 蒸发段采用电加热丝缠绕底部加热; 蒸发段和绝热段置于封闭透明的腔体中以减少试件向环境散热; 冷凝段放入小型风道中央进行强制风冷, 风速 1.5 m/s; 抽真空和充液共用一个管段, 通过上部的阀门分别连接真空表和滴定管。

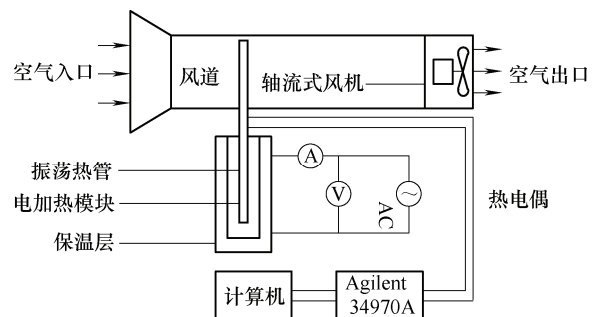


图 1 振荡热管试验台系统图

振荡热管热电偶的分布如图 2 所示, 试验系统共布置 20 根热电偶, 其中 1 根用于测保温层外壁温, 19 根用于测管外壁温。19 根测管外壁温的热电偶中, 1~6 热电偶布置在冷凝段顶部弯道处, 7~11

热电偶布置在蒸发段弯道处,分别取平均值作为冷凝段和热管蒸发段的壁面温度;在4号管和7号管上各布置4根热电偶,用于考察温度沿管长方向的变化。

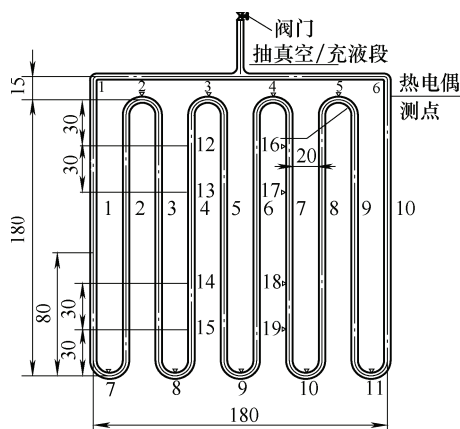


图2 振荡热管尺寸及热电偶分布

1.2 试验数据处理与误差分析

试验采用 Agilent 34970 数据采集仪,数据采集周期为 1.5 s。不同充液率时,在每个加热功率下稳定运行 10 min 左右,保存最后稳定运行的数据,对蒸发段、冷凝段取平均,计算其热阻值,然后将各功率下的热阻值汇总,制成平滑的散点图。

振荡热管的热阻可由式(1)得到

$$R = (T_e - T_c) / Q = \left(\frac{1}{5} \sum_{i=7}^{11} T_i - \sum_{j=1}^6 T_j \right) / Q \quad (1)$$

$$Q = UI \quad (2)$$

式中 T_c ——振荡热管稳定运行时冷凝段各点的平均温度;

T_e ——振荡热管稳定运行时蒸发段各点的平均温度;

T_i, T_j ——振荡热管稳定运行时热电偶第 i, j 测点的时均温度;

R ——振荡热管的传热热阻;

Q ——电加热丝的加热量。

在测量过程中,不管使用多么精密的仪器,多么完善的测量方法都会不可避免地产生误差。测量误差会直接影响到试验的结果,因此对测量误差进行分析,判断测量结果的可靠性很有必要。

1.2.1 误差传递理论

直接测量误差可由测量仪器的测量误差 δ 直接给出。当测量系统的有关数据传递分量相互不相关且彼此独立不能写出函数关系式时,根据误差传递理论可知,间接测量值 y 的合成相对误差 δ_y 为各传递分量误差 δx_i 的平方和根值,由式(3)计算

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2} \quad (3)$$

对于间接测量量 y ,如果为 n 个彼此独立的测量量的函数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

间接测量量 y 的绝对误差 δ_y 与各直接测量参数 $x_i (i=1, 2, \dots)$ 的绝对误差 δx_i 的关系为

$$\delta_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \delta x_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \delta x_n^2} \quad (5)$$

而相对误差为

$$\frac{\delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \left(\frac{\delta x_1}{y} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \left(\frac{\delta x_2}{y} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \left(\frac{\delta x_n}{y} \right)^2} \quad (6)$$

1.2.2 试验中的误差分析

加热功率的相对误差。用于测量功率的电压表和电流表的精度等级均为 0.5。电功率的计算公式为 $Q = UI$,当最小加热功率为 10 W 时,采用电压表 75 V 量程测得电压为 31.1 V,电流表 1 A 量程测得电流为 0.32 A,故加热功率的最大相对误差为

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.5\% \times 75}{31.1} \right)^2 + \left(\frac{0.5\% \times 1}{0.32} \right)^2} = 2.0\% \quad (7)$$

热阻的相对误差。标定后热电偶的测温误差为 ± 0.1 °C,根据热阻的计算公式,且在最小加热功率 10 W 时, $T_e - T_c$ 的最小值为 13.4 °C,热阻的最大相对误差为

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_e}{T_e - T_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_c}{T_e - T_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2} = \sqrt{2 \times \left(\frac{0.1}{13.4} \right)^2 + 0.02^2} = 2.3\% \quad (8)$$

1.3 工质物性及其作用的一般分析

表 1 列出了甲醇、丙酮纯工质在标准大气压下的一些热物理性质,根据以往对纯工质振荡热管的试验研究可知^[10-11]:工质的蒸发和冷凝是引起振荡的原因,振荡的难易则取决于工质饱和温度,只有达到相应压力下的饱和温度才有气泡产生,从而引起振荡流动;工质汽化潜热越小,蒸发和冷凝则越活跃,更有利于气泡的产生和瓦解,振荡流动也越强烈,但是小汽化潜热反过来也说明工质携带能量

能力小；比热容是影响振荡热管传热的又一主要因素，一方面比热容小的工质升降温都比较快，另一方面工质比热容小，等量液体同样的温升流动运输的热量比较小；工质饱和状态下压力随温度的变化率 $(dp/dT)_{sat}$ 的大小反映了压力随温度变化的程度，若 $(dp/dT)_{sat}$ 较大，那么小的温度变化就会引起大的压力波动，振荡效果就越好，反之，振荡效果就越差；动力黏度也是影响振荡热管传热的重要因素，小动力黏度会减小工质沿壁面的切应力，因而工质具有较小的流动阻力。

对于甲醇、丙酮纯工质而言，甲醇的液态比热

容及汽化潜热较丙酮大，其携带能量能力也相对较强，同时甲醇 $(dp/dT)_{sat}$ 值较大，易于产生压差推动工质流动；而丙酮动力黏度较甲醇小，从而工质具有较小的流动阻力，并且丙酮沸点及汽化潜热较小，有利于产生振荡。由以上分析可知，甲醇和丙酮纯工质具有互补的物性，由此可以推测甲醇和丙酮混合很可能使振荡热管具有更好的传热特性，因此，选择甲醇、丙酮混合工质进行振荡热管试验，研究其传热性能。

表 1 标准大气压下不同工质的热物性

工质	沸点 $t_s/$ °C	液态密度 $\rho_l/$ (kg/m ³) (20 °C)	液态比热容 $C_{p,l}/$ [kJ/(kg · K)] (20 °C)	热导率 $\lambda_l/$ [W/(m · K)] (20 °C)	汽化潜热 $H_{fg}/$ (kJ/kg)	$(dp/dT)_{sat}/$ (kPa/°C) (60 °C)	动力黏度 $\nu_l/ \times (10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s})$ (20 °C)	表面张力 $\sigma/(\times 10^3 \text{ N/m})(20 \text{ °C})$
甲醇	64.7	790.9	2.50	202.3	1 176.6	3.55	0.58	22.7
丙酮	56.2	790.2	2.13	170.0	539.2	3.10	0.32	23.7

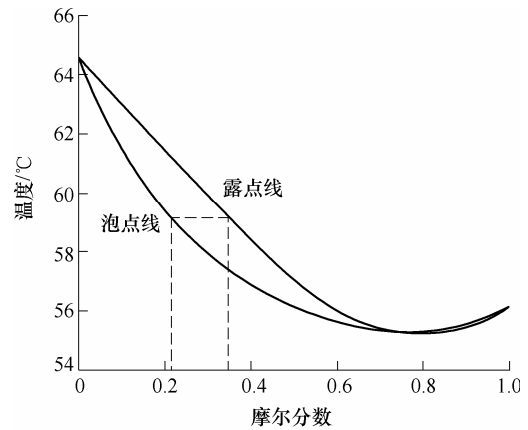
2 混合工质振荡热管的传热性能

2.1 甲醇丙酮混合工质的相图分析

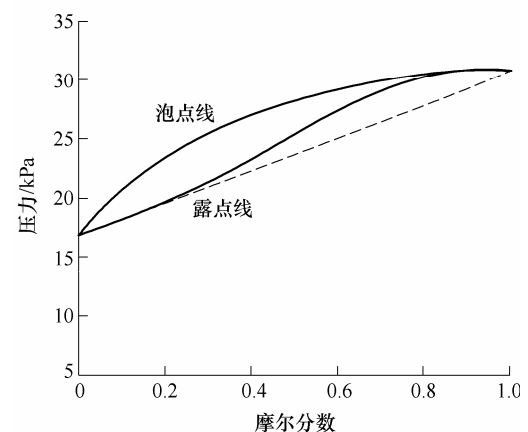
图 3a 为定压条件下甲醇/丙酮气液平衡相图，图 3b 为定温条件下甲醇/丙酮气液平衡相图。图 3 中横坐标是易挥发组分(丙酮)的摩尔分数，泡点线亦称液相线，以图 3a 为例，泡点线表示定压条件下泡点温度与液相组成的关系，泡点线以下是液相区，而露点线以上则为气相区，两线之间的区域为气液两相共存区^[12]。由于甲醇/丙酮溶液中异种分子间的作用力小于同种分子间的作用力，异种分子间的排斥起主导作用，当其排斥倾向增大到一定程度，在一定的配比下，甲醇(沸点 64.7 °C)和丙酮(沸点 56.2 °C)可形成最低共沸物，比如在标准大气压下，甲醇与丙酮的质量分数分别是 12%与 88%，换算成相应的体积比，则为近似的 1:7，此时可形成共沸混合物。此时，共沸点的压力均大于两种纯组分的蒸气压，泡点线跟露点线相切，相应的，在温度-摩尔分数曲线上有温度的最低点，其共沸温度为 55 °C^[13]。随着丙酮比例进一步的提高，甲醇/丙酮形成近共沸混合物，泡点线跟露点线很接近。

2.2 纯工质振荡热管的传热特性

图 4 为不同充液率下甲醇、丙酮纯工质振荡热管的热阻特性曲线，其中实线表示甲醇，虚线表示丙酮。由于充注伊始阶段，工质在管中分布的不均匀性，故在加热功率较小时(大致在 35 W 之前)，工质局部流动特点明显，试验可重复性差，因此只对稳定流动(大致 35 W 之后)的加热功率工况进行研



(a) 温度-摩尔分数(定压, $p=101.33 \text{ kPa}$)



(b) 压力-摩尔分数(定温, $T=298.15 \text{ K}$)

图 3 甲醇/丙酮气液平衡相图

究。由图 4 可知，在小充液率下，工质较少，容易发生局部烧干现象，比如 45%充液率下，甲醇以及丙酮纯工质振荡热管在 50 W 左右就出现了烧干现象，而在大充液率下，则不会出现此类现象。同时

在 45% 充液率下 35 W 之后, 甲醇的传热特性明显不如丙酮, 究其原因, 是因为甲醇黏度较大, 冷凝段液体回流较差, 故传热特性没有丙酮好。

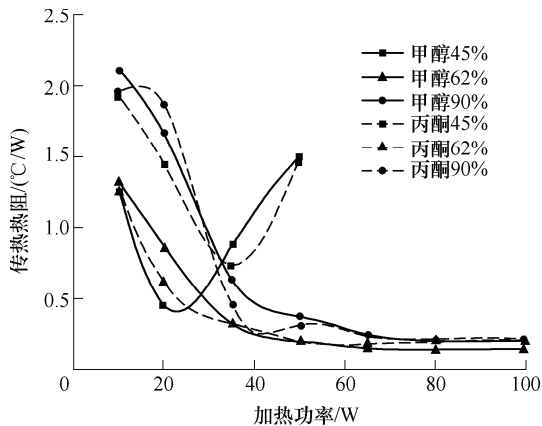


图 4 充液率对纯工质振荡热管热阻的影响

随着充液率的逐步增大, 35~65 W 加热功率下, 62% 充液率时, 甲醇与丙酮纯工质振荡热管热阻相近, 90% 充液率时, 丙酮振荡热管的热阻比甲醇略小, 而在 65 W 以后, 不同充液率下甲醇振荡热管的热阻则普遍略低于丙酮振荡热管的热阻。究其原因, 则是由于在小加热功率下, 甲醇的比热容及汽化潜热较丙酮大, 其携带能量能力较强, 但是甲醇的动力黏度比丙酮大, 导致其在管内的流动速度不如丙酮, 两者相互影响, 致使丙酮振荡热管热阻接近或略低于甲醇振荡热管的热阻。而随着加热功率的增大, 在 65 W 以后, 由管内压力的不平衡造成纯工质的流动速度加快, 惯性力的作用开始增强, 而黏性作用相对较弱, 这时工质的携带能量能力对振荡热管传热性能起关键作用。因此, 65 W 后, 甲醇振荡热管的传热特性略优于丙酮振荡热管。

2.3 不同配比甲醇丙酮振荡热管传热特性

图 5 为 45% 充液率下甲醇、丙酮纯工质及其不同配比混合工质热阻随加热功率的变化规律。由图 5 可知, 小充液率下, 纯工质振荡热管热阻在 35 W 前均已出现拐点, 由下降改为上升, 达到 50 W 左右振荡其热管蒸发段已出现严重的烧干, 传热性能大幅下降, 而在相同加热功率下, 随着加热功率的增大, 各配比混合工质振荡热管热阻较纯工质振荡热管小, 表现出了一定的优越性。究其原因, 则是由于小充液率下, 丙酮沸点及汽化潜热较甲醇低, 更易启动振荡, 在相变过程中气塞中所含丙酮较多, 从图 3b 也可以看出, 当丙酮较多时, 混合工质所对应的饱和压力比纯甲醇的饱和压力更大, 导致振荡热管内气塞压力升高, 提升了甲醇的饱和蒸发温度, 有效抑制了甲醇的气化, 使振荡热管中总有液态甲醇的存在。综合来说, 小充液率下, 混合工质振荡

热管较之纯工质更不易烧干。

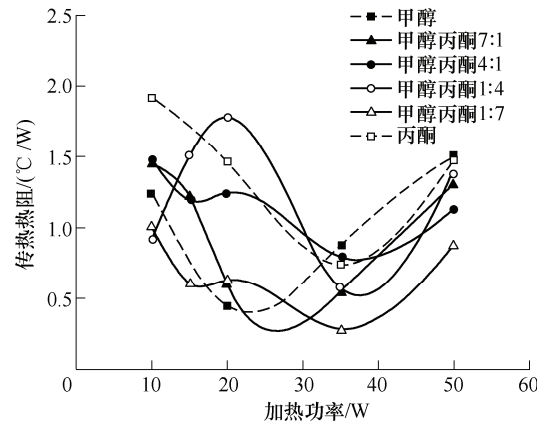


图 5 甲醇/丙酮振荡热管热阻随加热功率的变化 (冲液率为 45%)

在丙酮中加入少量甲醇(如甲醇/丙酮 1:7)能更有效地改善振荡热管烧干的情况。这是由于丙酮含量较高的混合工质, 如图 3b 所示, 其所对应的饱和压力与纯甲醇的饱和压力差距较大, 气栓压力较高, 甲醇的饱和温度上升幅度较大, 液栓中的甲醇更不易大量气化, 被裹挟于循环振荡流中, 润湿蒸发段。与此相反, 少量丙酮与甲醇混合而成的工质(如甲醇/丙酮 7:1)对振荡热管烧干情况的改善则不明显。

图 6 为 62% 及 70% 充液率下甲醇、丙酮纯工质及其不同配比混合工质热阻随加热功率的变化规律。由图 6 可知, 大充液率时, 无论是纯工质还是不同配比混合工质振荡热管, 均无出现烧干现象。分析比较不同配比混合工质以及甲醇、丙酮纯工质振荡热管热阻的差别, 可以发现, 在大充液率下, 甲醇/丙酮不同配比混合工质振荡热管热阻曲线均随着加热功率的增大而趋于平缓, 热阻均维持在较低水平, 但基本介于甲醇与丙酮纯工质振荡热管热阻之间, 相互之间相差不是很大。从工质流动特性分析, 此时由于管内压力的不平衡造成各混合工质的流动速度加快, 惯性力的作用开始增强, 而黏性作用相对较弱, 这时混合工质的流动换热能力对各配比振荡热管传热性能影响已不是很大。但仔细观察可以发现, 大充液率下, 配比的不同对振荡热管传热特性的影响依然存在, 随着甲醇/丙酮混合工质振荡热管中甲醇比例的逐步增大, 其热阻也呈现出减小的趋势。从工质携带能量能力方面分析, 影响工质携带能力的因素主要为工质的液态比热及汽化潜热, 由表 1 可知, 混合工质中随着甲醇比例的增大, 其比热容及潜热均相对较大, 所以, 其振荡热管工质携带能量的能力也较优, 传热性能也相对较好。

对比甲醇/丙酮不同配比振荡热管, 小充液率时, 从图 5 可以看到, 不同配比工质的传热性能则

体现出其在配比上的差异; 大充液率时, 从图 6 可以看到, 随着加热功率的增大, 甲醇与丙酮纯工质及各配比混合工质振荡热管的热阻均变得较为平缓, 虽有上述分析的有规律差异, 但不是相差很大, 传热性能均较优。

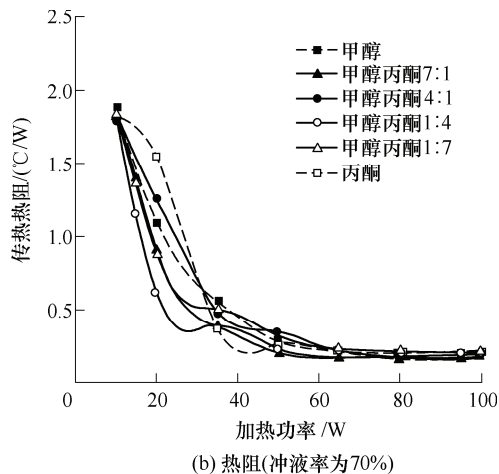
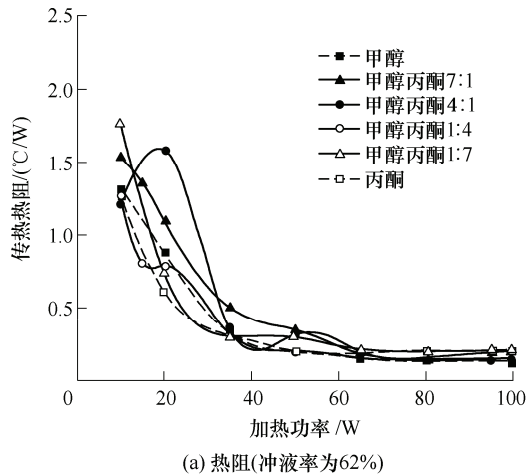


图 6 大充液率下甲醇/丙酮振荡热管热阻随加热功率的变化

3 结论

本文根据甲醇、丙酮纯工质所独有的特性, 进行了甲醇、丙酮纯工质及甲醇丙酮不同配比混合工质振荡热管在不同加热功率与充液率时的试验研究, 通过比较热阻曲线, 分析了混合工质物性及其他因素对振荡热管振荡流动、传热特性的影响, 得到如下结论。

(1) 对于纯工质振荡热管, 在小充液率时, 丙酮振荡热管的传热特性优于甲醇振荡热管, 而在大充液率时, 35~65 W 加热功率下, 62%充液率时, 甲醇振荡热管热阻与丙酮振荡热管热阻相近, 90%充液率时, 丙酮振荡热管的热阻比甲醇振荡热管热阻略小, 而在 65 W 以后, 不同充液率下甲醇振荡热管的热阻则普遍略低于丙酮振荡热管的热阻, 传

热性能也略比丙酮好。

(2) 小充液率下, 混合工质与纯工质振荡热管相比, 烧干热阻较小, 特别是在丙酮中加入少量甲醇, 其传热性能可得到大幅提升。

(3) 大充液率下, 加热功率增加到一定程度, 此时热阻随加热功率的增加趋于平缓, 对于甲醇/丙酮混合工质振荡热管, 配比的的不同虽对振荡热管传热性能产生一定规律的影响, 但已不是那么明显。

参 考 文 献

- [1] AKACHI H, POLASEK F, STULC P. Pulsating heat pipe [C]//Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia, 1996: 208-217.
- [2] NISHIO S, NAGATA S, KUBOTA T. Study of thermal performance of SEMOS heat pipe [C]//Proceedings of the 39th National Heat Transfer Symposium. Sapporo, Japan, 2002: 127-128.
- [3] 杨洪海, KHANDEKAR S, GROLL M. 脉动热管技术的研究现状及前沿热点[J]. 东华大学学报, 2006, 32(3): 134-138.
YANG Honghai, KHANDEKAR S, GROLL M. State of the art on pulsating heat pipes[J]. Journal of Donghua University, 2006, 32(3): 134-138.
- [4] 徐进良, 张显明, 施慧烈. 脉冲热管中的热力型脉动现象及实验测量[J]. 自然科学进展, 2004, 14(4): 436-441.
XU Jinliang, ZHANG Xianming, SHI Huilie. The pulsating phenomenon and experimental measurement in the pulsating heat pipes[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 436-441.
- [5] RITTIDECH S, TERDETOON S, TANTAKOM P. Effect of inclination angles, evaporator section lengths and working fluid properties on heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe[C]//Proceedings of the 6th International Heat Pipe Symposium, Chiang Mai, Thailand, 2000: 413-421.
- [6] 曲伟, 马同泽. 振荡热管的工质流动和传热特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 596-598.
QU Wei, MA Tongze. Characteristic of heat transfer and fluid flow in the pulsating heat pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 596-598.
- [7] MIYAZAKI Y, AKACHI H. Heat transfer characteristics of looped capillary heat pipe[C]//Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia, 1996: 378-383.
- [8] 崔晓钰, 王妍, 翁建华. 不同工质振荡热管的传热性能[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(6): 539-543.

- CUI Xiaoyu, WANG Yan, WONG Jianhua. Experimental study on pulsating heat pipe with different working fluids[J]. Journal of University of Shanghai For Science and Technology, 2009, 31(6): 539-543.
- [9] 史维秀, 李惟毅, 潘利生, 等. 乙醇水溶液振荡热管传热特性研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 117-121.
SHI Weixiu, LI Weiyi, PAN Lisheng, et al. Study on heat transfer properties of aqueous ethanol pulsating heat pipe[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 117-121.
- [10] 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, 32(9): 2035-2042.
CUI Xiaoyu, LI Zhihua, SUN Shende, et al. Thermal resistance variation and dryout phenomenon of pulsating heat pipe[J]. CIESC Journal, 2013, 32(9): 2035-2042.
- [11] 崔晓钰, 于洋, 朱悦, 等. 振荡热管传热特性与工质物性关系分析[J]. 化工进展, 2009, 31(6): 539-543.
CUI Xiaoyu, YU Yang, ZHU Yue, et al. Correlation study on physical properties of working fluids and heat transfer performance of pulsating heat pipes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 31(6): 539-543.
- [12] 褚红蕊, 谢国珍, 刘蕾. 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 & Air-condition, 2011, 25(3): 216-219.
- [13] 姜斌, 吴菲, 隋红, 等. 甲醇-丙酮共沸物分离的研究进展[J]. 化工进展, 2010, 29(3): 397-398.
JIANG Bin, WU Fei, SUI Hong, et al. Development in separation of acetone-methanol azeotrope[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(3): 397-398.

作者简介: 乔铁梁, 男, 1989 年出生。主要研究方向为传热传质。

E-mail: tieliangqiao@163.com

崔晓钰, 女, 1967 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为制冷与空调技术、计算传热与流体流动、强化传热传质技术及高效换热器。

E-mail: xycui2001@yahoo.com