

文章编号:1007-6735(2013)06-0581-05

乙醇加入少量丙酮振荡热管传热性能实验分析

徐天潇, 崔晓钰, 李治华, 朱悦, 张春霞

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 通过实验研究充液率为45%, 55%, 62%, 70%和90%时, 乙醇丙酮体积配比为7:1和4:1的混合工质振荡热管的热阻特性, 与纯工质乙醇、丙酮进行对比, 结果表明: 小充液率(45%)下, 工质易发生烧干, 由于丙酮减弱了工质携带热量的能力, 混合工质振荡热管热阻大小在乙醇和丙酮纯工质之间; 充液率为55%时, 工质烧干功率增大, 受气液平衡影响, 混合工质振荡热管的热阻小于两种纯工质; 充液率增大到62%以上时, 没有出现烧干现象, 由于传质阻力较大, 混合工质振荡热管的热阻普遍大于纯工质, 随着充液率的增加, 这种影响减弱。

关键词: 乙醇; 丙酮; 振荡热管; 传热特性; 热阻

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

Experimental Study on Thermal Performance of Oscillating Heat Pipe with Mixture of Ethanol and Bits of Acetone

XU Tian-xiao, CUI Xiao-yu, LI Zhi-hua, ZHU Yue, ZHANG Chun-xia

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

Abstract: An experimental study on an oscillating heat pipe(OHP) with the mixture of ethanol and acetone was performed. The influence factors as mix ratios and filling ratios on characteristics and thermal resistance of OHP were analyzed, and the results were compared with those in the case of the pure working medium, ethanol or acetone. The experimental results show that at low filling ratio, the capability of working medium to carry energy is weakened by acetone because of the drying-out. The thermal resistance of the mixture OHP is less than the pure one. When the filling ratio is 55%, the drying-out power of the OHP is higher than the 45%, and the thermal resistance and the speed of drying-out of the mixture OHP is less than the pure one because of the gas-liquid equilibrium. It will not dry out when the filling ratio is more than 62% but the thermal resistance of the mixture OHP is higher than the pure one because of the mass transfer resistance. The influence of mass transfer resistance is weakened with the increase of filling ratio.

Key words: ethanol; acetone; oscillating heat pipe; thermal resistance

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076104)

第一作者: 徐天潇(1989-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 工程热物理. E-mail: xtx-123@163.com

通讯作者: 崔晓钰(1967-), 女, 教授. 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. E-mail: xycui2001@yahoo.com

电子元器件集成化程度的提高,导致热流密度急剧上升^[1],因此散热问题直接影响了其性能和使用寿命.振荡热管是一种高导热性能的散热元件,具有结构简单、当量传热系数较大、制造容易及成本低廉等特点^[2].由于其运行性能基本不受重力作用的影响,因此在航天航空领域也展示了广阔的应用前景.但振荡热管实际运行机理十分复杂,涉及气液两相流动和传热、液塞和气塞的产生以及烧干等现象,因此,影响其流动和传热性能的因素比较复杂.

工质的研究是振荡热管研究的重要方向之一,目前国内外研究主要集中在纯工质振荡热管.崔晓钰等^[3]研究表明不同物性在不同工况下对振荡热管的作用不同,主要取决于振荡热管热管发生振荡的难易和发生振荡后热阻性能的变化.崔晓钰等^[4]还研究水、甲醇、乙醇、丙酮4种工质不同工况的传热情况,表明加热功率较大,保证不烧干的前提下,振荡热管的热阻受充注何种液体,充液率大小影响较小.充液率较小时,热阻上升,发生个别管段局部烧干,但温度不会飞升,不致烧毁.Lin等^[5]研究表明,甲醇振荡热管在实验功率范围内热阻低于乙醇,指出这与甲醇饱和状态下,温度变化引起压力变态的程度大于乙醇,在管内气液塞之间产生较大压差,因此与驱动力较大有关.文献^[6]中对乙醇、丙酮纯工质振荡热管的实验表明,相同工况较大功率下,丙酮振荡热管的热阻较低.然而纯工质有其物性上的局限性,如比热和汽化潜热较大的某些工质虽然携带能量的能力较大,但沸点较高,不易启振.因此,将纯工质混合有可能为振荡热管的性能带来更多不同的影响.

但是,对于混合工质振荡热管的研究较少.Lin等^[7]探讨了银纳米颗粒-水流体振荡热管不同充液率及加热功率下的传热特性.但这种银纳米颗粒加入水中并不能影响工质的相变和流动,不是真正意义上的混合工质.史维秀等^[8]通过实验研究表明采用水/乙醇溶液的振荡热管热阻明显低于无水乙醇振荡热管的热阻,并且加热功率的极限值较高,但此研究仅限于充液率50%、水/乙醇配比为1:1的混合工质振荡热管.Burban等^[9]进行了水/正戊烷混合溶液振荡热管实验,但此文只对水/正戊醇一种混合溶液进行了研究,并且参与实验的充液率与配比也十分有限.

乙醇丙酮都属于挥发性介质,乙醇比热和汽化潜热较丙酮大,丙酮黏度小,沸点低,乙醇和丙酮在物性上有一定的互补性.乙醇丙酮溶液属于正偏差

溶液^[10],混合工质发生相变时,受相平衡关系的影响,会发生明显的浓度滑移.这两种物质的混合工质,有可能为振荡热管赋予更广泛的应用范围和更优良的传热特性.本文研究乙醇中加入一定量的丙酮,探讨混合工质振荡热管在不同充液率下的热阻特性.

1 实验装置及数据处理

实验装置如图1所示,主要由紫铜毛细管闭合回路振荡热管试件、抽真空及充液部分、加热和冷却装置、数据采集系统4部分组成.振荡热管自下而上分为蒸发段、绝热段和冷凝段,竖直放置.振荡热管热电偶测点的布置见图2.共布置20只热电偶,1只测蒸发段保温层外壁温度,另外19只测管外壁温,具体位置见图2.在侧管外壁温的19只热电偶中,编号1~6布置在冷凝段顶部弯道处,取平均值作为冷凝段的温度;编号7~11布置在蒸发段弯道处,取平均值作为蒸发段的温度;编号12~19布置在两根中间管不同位置,用于考察从蒸发段到冷凝段沿管纵向温度变化.本实验共分4种充液率分别为45%,55%,62%,90%,乙醇丙酮混合工质分2种配比分别为7:1,4:1.

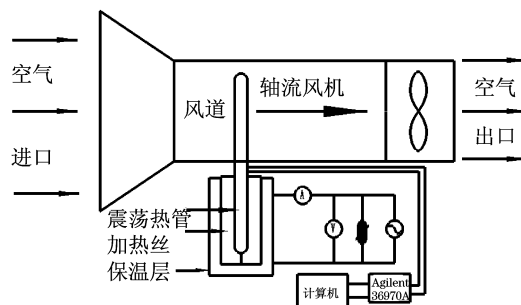


图1 振荡热管实验装置图

Fig.1 Experimental setup

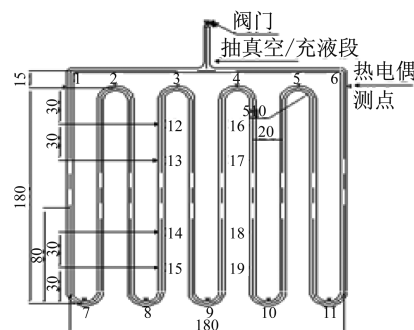


图2 热电偶分布示意图

Fig.2 Arrangement of thermocouples

实验数据通过采集仪器 Agilent 采集到计算机中,计算得出振荡热管的热阻

$$R = (T_e - T_c) / Q$$

式中, Q 为电加热丝的加热量, W ; T_c , T_e 分别为热管达到稳定运行时冷凝段、蒸发段各点的平均温度, $^{\circ}\text{C}$. 由分布在蒸发段与冷凝段的相应测点所采集到的温度叠加计算平均值得出

$$T_c = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 T_i, T_e = \frac{1}{5} \sum_{i=7}^{11} T_i$$

表 1 标准大气压下丙酮、乙醇工质物性表

Tab.1 Physical properties of ethanol and acetone at standard atmospheric pressure

工质	沸点 / $^{\circ}\text{C}$	液态密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	液态比热 / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	汽化潜热 / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$(dp/dT)_{\text{sat}} \times 10^3$ / $(\text{Pa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	动力黏度 $\times 10^6$ / $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	表面张力 $\times 10^3$ / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
丙酮	56.2	792.0	2.35	523	1.11	0.32	23.7
乙醇	78.3	789.6	2.39	846	3.51	1.20	22.4

能力大,且沸点高,小充液率下,不容易发生烧干.且乙醇 $(dp/dT)_{\text{sat}} \times 10^3$ 值较大,较小的温度变化引起较大的压差变化,因此产生的流动推动力较大.而丙酮黏度小,沸点低,表面张力小,在小功率下容易启振且流速较快.

相变特性是影响振荡热管传热特性的另一个方面.受气液平衡制约,混合工质在相变过程中并不是

2 乙醇丙酮混合工质物性和相变特性

标准大气压下, 20°C 时乙醇丙酮物性分析表^[11]见表 1. 其中饱和状态下温度变化与压力变化的关系值 $(dp/dT) \times 10^3$ 是由 rcfprop 软件计算得出.

如表 1 标准大气压下丙酮、乙醇工质物性表所示,乙醇比热和汽化潜热较丙酮大,因此携带热量的

按原配比气化,而是有一定的浓度滑移,见图 3 乙醇丙酮混合工质气液平衡图. 如图 3(a) 压力-组成图所示,以丙酮摩尔分数为 $x_{B,M}$ 的溶液为例,当温度一定的情况下 (25°C), 达到一定压力 17 kPa 时,气相中丙酮的摩尔分数只有 $x_{B,G}$, 而液相中丙酮摩尔分数则达到了 $x_{B,L}$. 同样的现象出现在图 3(b) 温度-组成图中.

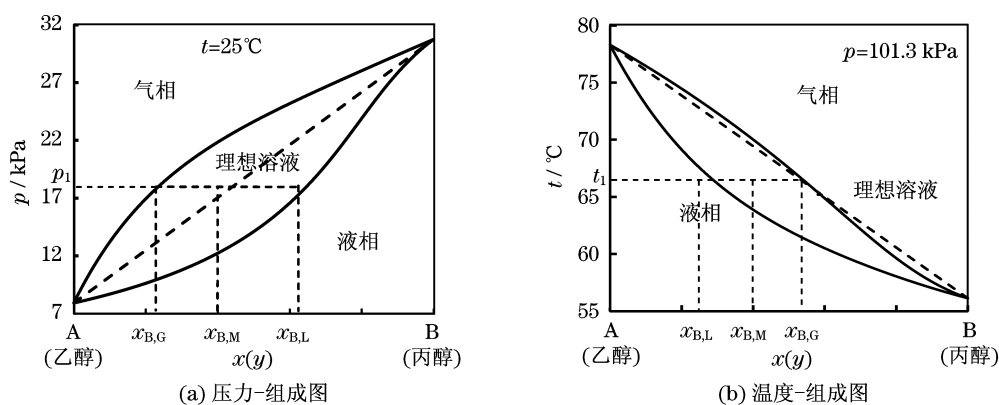


图 3 乙醇丙酮混合工质气液平衡图

Fig.3 Vapor-liquid equilibrium of water/acetone mixture

3 不同充液率下乙醇丙酮振荡热管的热阻规律

根据充液率的不同,振荡热管分为小充液率、中等充液率和大充液率. 充液率的不同会造成振荡热管热阻特性的影响因素的变化,中小充液率下,由于液体量少,易发生烧干,因此工质携带能量的能力以及相变过程中的相平衡特性起了主要作用. 而大充

液率下工质质量足够多,不易发生烧干,因此传质阻力的影响较大. 由于初始充液不均匀分布,小加热功率 (35 W 以下) 时振荡不充分,故虽然总体趋势一致,但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,所以只比较 35 W 以上整体热阻特性.

分析图 4(a) (见下页) 所示 45% 充液率 FR 下乙醇丙酮振荡热管热阻特性图. 当加热功率低于

35 W 时,所有工质振荡热管热阻随着加热功率的增大不断减小;当加热功率达到 35 W 以上时,所有工质的振荡热管热阻普遍出现上升现象.这是由于小充液率下,工质的量较少,在较大加热功率作用下,蒸发段工质大量气化,缺少充足液态工质回流而出现烧干,引起热阻上升.

分析纯工质与混合工质振荡热管热阻的区别,乙醇振荡热管的热阻始终小于丙酮,这与乙醇的比热和汽化潜热较大,携带能量的能力较强,导致蒸发段的热量能及时被带走有一定关系.而混合工质振

荡热管的热阻处于两纯工质之间,这说明由于丙酮的比热和汽化潜热较小,两物质混合后降低了工质携带能量的能力.因此,混合工质振荡热管的热阻较乙醇高,而丙酮含量较小,热阻比较接近乙醇振荡热管.但值得注意的是,小充液率下,虽然混合工质在相变过程中发生了浓度滑移,但由于工质很快发生烧干,因此工质的携带能量的能力影响较大,而混合工质其它特性并未表现出来.由此综合来看,45% 充液率下,在乙醇中加入丙酮并不利于改善振荡热管的传热性能.

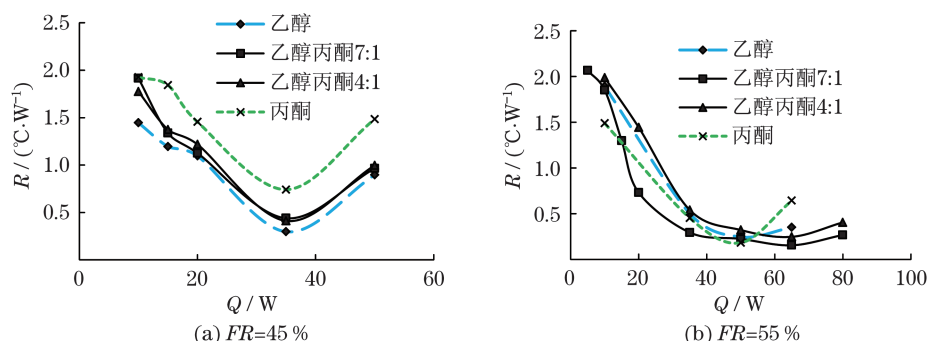


图 4 较小充液率下不同体积比乙醇丙酮混合工质振荡热管热阻特性

Fig.4 Thermal resistance vs. heating power for the mixture OHP and the pure working fluid OHP at small filling ratio

图 4(b) 为 55% 充液率下乙醇丙酮振荡热管热阻特性,在功率 45 W 之前,所有工质振荡热管热阻都随加热功率的增大而减小.但当功率增大到 45 W 及以上后,热阻开始出现上升现象,这仍然与工质在振荡热管中发生局部烧干有关.由于工质充注量提高,冷端液体回流,因此烧干功率较充液率 45% 时大.

丙酮振荡热管发生烧干时热阻上升最显著,乙醇次之,混合工质最缓慢.观察图 3 气液平衡相图可以发现,丙酮的加入抑制了乙醇的气化,使得在温度达泡点,混合工质相变时,乙醇和丙酮并不是按原配比从液相中气化,气相的丙酮含量比较多,具有较高沸点的乙醇大量保持在液态,从而保证了液态乙醇可以回流至蒸发段.同时,混合工质的饱和压力高于丙酮,

气栓压力比在相同温度下乙醇的饱和压力高,使混合工质中乙醇的饱和温度上升,因此,即使在高加热功率作用下,混合工质的气栓仍然能抑制乙醇的气化.

从图 3 可以看出,4:1 的工质更接近相图的中央,沸点线和泡点线张开程度更大,产生的浓度滑移更明显,上述抑制作用更大,因此配比为 4:1 的混合工质振荡热管热阻略小于配比为 7:1 的振荡热管.

由此可见,55% 充液率下,在乙醇中加入丙酮,提高了振荡热管的传热性能,降低了振荡热管的热阻.

如图 5 大充液率下乙醇丙酮振荡热管热阻特性所示,所有工质的振荡热管的热阻都随着加热功率的增大而减小.由于工质量比较多,冷凝段液体回流及时,因此不会出现局部烧干现象.

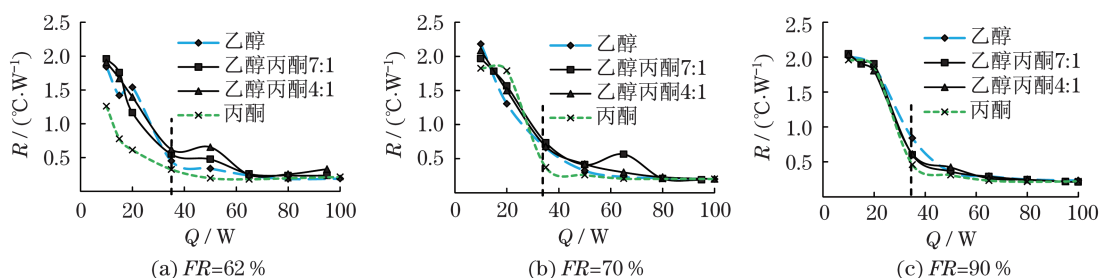


图 5 大充液率下不同体积比乙醇丙酮振荡热管热阻特性

Fig.5 Thermal resistance vs. heating power for the mixture OHP and the pure working fluid OHP at high filling ratio

综合考虑 62%, 70%, 90% 充液率, 丙酮振荡热管的热阻在较小功率下小于乙醇. 这是因为较小功率下工质流速较慢, 黏性力作用明显, 而丙酮较乙醇黏度小、流动快. 随着功率的增大, 工质流速加快, 黏性力作用减小, 由于丙酮和乙醇比热接近, 气化潜热较乙醇小, 因此丙酮振荡热管的热阻与乙醇差距越来越小.

对比混合工质和纯工质, 混合工质振荡热管的热阻在加热功率达到 35 W 之后普遍大于纯工质乙醇和丙酮, 由于乙醇的比热和汽化潜热较大, 因此热携带能力较强, 因此乙醇的振荡热管热阻小于混合工质是可以理解的. 然而丙酮振荡热管的热阻也小于混合工质, 分析其原因, 可能与工质的传质阻力有一定的关系. 乙醇丙酮混合工质具有极大正偏差性, 同一组分气液相间存在浓度梯度, 在界面处浓度梯度较大, 因此乙醇丙酮混合工质较纯工质在相变时存在附加的传质阻力, 两相间和不同气栓间压差均较小, 因此流动动力较小, 流速减慢.

对比不同充液率下的振荡热管的热阻特性曲线, 可以发现, 随着充液率的增加, 不同工质振荡热管的热阻变化越来越接近. 可见当充液率增大到一定程度时, 由于管内相变空间的减小, 压力发生变化, 会影响工质的传质能力, 进而影响推动力的变化. 因此上述传质阻力的影响是有限度的.

4 结 论

研究了不同充液率下, 不同体积配比的乙醇丙酮混合工质振荡热管的热阻特性, 实验蒸发段功率范围为 10~100 W, 分析实验结果表明, 混合工质对振荡热管的影响主要与混合工质物性、气液平衡和传质阻力有关. 具体结论如下:

a. 小充液率下, 由于工质很快发生烧干, 影响振荡热管热阻以及烧干的主要是工质携带能量的能力. 此时在乙醇中加入一定量的丙酮并不利于增强振荡热管的传热性能. 随着充液率的增大, 工质发生烧干的功率增大, 此时除了携带热量的能力外, 气液平衡的影响也显现出来. 丙酮对乙醇的相变有抑制作用, 乙醇丙酮混合工质存在明显的浓度滑移. 因此, 在充液率 55% 下, 混合工质振荡热管不易烧干, 热阻较小, 加热功率极限值较大.

b. 较大充液率下, 工质不会发生烧干. 混合工质由于界面传质阻力的影响, 产生的推动力小于纯工质, 因此混合工质振荡热管的热阻普遍大于纯工质, 但这种影响随着充液率的增大逐渐减小, 在充液率增大时, 所有工质振荡热管的变化趋于一致.

c. 乙醇中加入一定量的丙酮影响了振荡热管的相变和界面传质阻力, 在 55% 充液率下提高振荡热管的传热性能. 其它充液率下, 并不利于振荡热管传热性能的提高.

参考文献:

- [1] 邱成梯, 赵亨受, 蒋全兴. 电子设备结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [2] Akach H. Structure of a heat pipe[P]. US Patent, 4921041, 1990.
- [3] 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, 6(6): 2022-2028.
- [4] 崔晓钰, 王妍, 翁建华, 等. 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.
- [5] Lin Y H, Kang S W, Wu T Y. Fabrication of polydimethylsiloxane(PDMS) pulsating heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3): 573-580.
- [6] 李燕, 贾力, 张田田, 等. 脉动热管实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(11): 1901-1903.
- [7] Lin Y, Kang S W, Chen H L. Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(11/12): 1312-1317.
- [8] 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.
- [9] Burbán G, Ayel V, Alexandre A, et al. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 94-103.
- [10] 朱自强, 吴有庭. 化工热力学[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [11] 诸林, 刘瑾, 王兵, 等. 化工原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.

(编辑: 金 虹)