



DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170652

环路热管中 Ti64ELI 毛细芯传热能力的实验研究

孙琦¹,陈曦¹,谢荣建²,张畅²,吴亦农²

(1上海理工大学能源与动力工程学院,上海 200093; 2中国科学院技术物理研究所,上海 200083)

摘要: 在环路热管(LHP)中,蒸发段的结构最为复杂,而其中的毛细芯是直接影响热管工作性能的部分,因此 有很大的研究价值。为模拟 LHP 中毛细芯的真实运行情况,设计了一台在常温下测定毛细芯工作时表面温度的实 验装置,对环路热管蒸发段毛细芯的传热能力进行独立的实验研究,分别采用乙醇和水为工质,在不同的加热功 率下,计算毛细芯的有效热导率。研究发现,在低加热功率下,含乙醇的毛细芯的有效热导率要高于含水的毛细 芯的有效热导率: 而在高加热功率下,实验结果正好相反。本次实验的结论对于毛细芯传热性能的评估具有一定 参考价值,也可以为 LHP 蒸发器的模拟仿真提供一定的实验数据。

关键词: 稳态; 蒸发; 有效热导率; 多孔介质; 环路热管

中图分类号: TK 124 文献标志码:A

文章编号: 0438-1157 (2018) 04-1391-07

Experimental study on heat transfer capability of Ti64ELI capillary wick in loop heat pipe

SUN Qi¹, CHEN Xi¹, XIE Rongjian², ZHANG Chang², WU Yinong²

(¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ²Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In the loop heat pipe (LHP), the structure of the evaporation section is the most complex, and the capillary wick is a part that directly affects its working performance, so it has a great research value. To simulate the real operation of the capillary wick in LHP, an experimental device was designed to measure the surface temperature during the operation at room temperature. The heat transfer capacity of the capillary wick in the evaporative section of LHP was studied independently. The experimental study consisted of measuring the effective thermal conductivity using ethanol and water as working fluid at different heating power. It was found that the effective thermal conductivity of the ethanol-containing capillary wick is higher than that of the water-containing capillary wick at low heating power, while the results were reversed at high heating power. The conclusion of this experiment has a certain reference value for the evaluation of the heat transfer performance of the capillary wick, and it can also provide some experimental data for the simulation of the LHP evaporator.

Key words: steady state; evaporation; effective thermal conductivity; porous media; loop heat pipe

引 言

环路热管(LHP)是一种高效的相变传热装置,

它由蒸发器、补偿器及冷凝器组成,通过气液传输 管路连接成回路,利用蒸发器内的毛细芯产生的毛 细力驱动回路运行,具有传热量大、传输距离远、

Corresponding author: CHEN Xi, chenxistudy@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50906054).

²⁰¹⁷⁻⁰⁵⁻¹⁶ 收到初稿, 2017-11-07 收到修改稿。 联系人: 陈曦。第一作者: 孙琦(1992—), 女, 硕士研究生。 基金项目: 国家自然科学基金项目(50906054)。

Received date: 2017-05-16.

反重力能力强、结构紧凑等优点^[1]。在环路热管中, 毛细芯是蒸发器的关键部件,为系统提供循环动力 和相变区域^[2]。毛细芯的参数将直接决定环路热管 的传质与传热特性,影响着环路热管的性能及运行 特性^[3]。毛细芯的孔径,渗透率决定着其传质能 力^[4],毛细芯的有效热导率会影响温度分布及热量 传递讨程^[5]。

在 LHP 蒸发器中,毛细芯热质传递机制非常复杂,有效热导率则是表征毛细芯传热能力的重要参数。LHP 利用毛细芯产生的毛细力驱动回路运行,绝大部分热量使进入蒸发器的液体工质汽化,然后沿气体管路流动到冷凝器释放给热沉,一小部分热量以热传导的方式进入毛细芯到达蒸发器内核以及补偿器,引起 LHP 热泄漏,导致补偿室温度升高,降低了环路热管性能^[6]。因此,研究毛细芯的有效热导率对调节毛细芯内气液蒸发界面位置及控制热 泄漏程度具有重要意义。

针对于多孔介质有效热导率的研究主要有建 立解析解模型、数值模拟和实验分析等方法。Chi 等[7-14]把多孔介质中孔隙简化为规则形状,使用热 电类比的方法导出有效热导率。由于多孔介质内部 复杂的孔隙结构,该模型只能给出近似描述,精度 不高^[15]。Adler 等^[16-17]采用分形理论对多孔介质进 行数值模拟,但只从宏观角度给出了热导率与填充 率的关系,没有考虑孔隙的微观结构。在实验分析 方面, Mo 等^[18]用热常数分析仪测量了含有不同充 液率的水、乙二醇和甘油的多孔烧结镍芯的有效热 导率。研究发现,湿芯有效热导率随着孔隙中流体 比重的增加而增加。当液体比重低时,热导率随着 水分饱和度的增加而迅速增加,但当饱和度增加到 一定值时,热导率增加变缓。Bonnefoy 等^[19]设计了 一个实验装置,使用了3种工质(空气、水、甲醇), 测量了在真空下 11 个烧结金属芯样品的有效热导 率,旨在找到一个更好的预测有效热导率的模型。

综上所述,对毛细芯有效热导率的研究都是在 干饱和状态或含湿状态下,很少在毛细芯的工作状 态下。本文为了模拟 LHP 中毛细芯的真实运行情况, 设计了一台在常温下测定毛细芯工作时表面温度的 实验装置,分别采用乙醇和水为工质,在不同加热 功率下计算有效热导率。

1 有效热导率的实验测试原理

为便于控制蒸发器内工质工况,实验观察及数 据测量,对环路热管蒸发段进行了独立的实验研究, 即本实验装置是不包括冷凝段的开式环路系统。其 运行情况与环路热管极为相似,主要区别在于:环 路热管的工质循环流动,掺杂了气液管路压降、初 始气液分布、冷凝器性能等方面影响;开式系统则 避开了这些因素的干扰,只专注研究毛细芯对整个 环路热管的影响,研究结果对环路热管系统有一定 参考价值。

本文采用稳态法进行热导率测量。假设毛细芯 在宏观上均匀且各向同性,在表面等间距取若干温 度测点,则毛细芯的有效热导率在加热条件稳态工 况下有^[20]

$$k_{\rm eff} = \frac{q_{\rm in} l_{\rm eff}}{A_x (T_e - T_{\rm pool})} \tag{1}$$

2 实验系统及实验测试方法

2.1 实验系统介绍

本实验首次采用 3D 打印的钛合金毛细芯,材 料为 Ti64ELI 粉末,逐层打印。相比粉末或金属烧 结的多孔芯,优势在于其内部孔隙分布可控且均匀 (图 1)。该毛细芯平均粒径为 30 µm、尺寸为¢20 mm×80 mm、液体流道尺寸为¢8 mm×75 mm、孔隙 率为 0.6(图 2)。陶瓷加热片贴在毛细芯顶端表面, 7 个铂电阻 (pt1000) 以 30°、等距 10 mm 的方式沿 轴向环绕贴在毛细芯表面测温 (图 3)。



图 1 光学显微镜下的毛细芯横截面(放大 100 倍) Fig.1 Cross section of capillary wick under optical microscope(enlarge 100 times)

测试容器内部如图 4 所示,毛细芯顶部通过悬 挂法竖直固定在容器上部,底部 5 mm 浸没在工质 中。毛细芯上的测温电阻通过连接数据采集仪和电 脑每隔 10s 自动记录一次温度变化(图 5)。容器内 置流通冷却水的冷却铜管、翅片管,从而控制工质 维持在恒定温度。实验时,毛细芯克服重力抽吸工 质,施加加热功率后,当工质温度达到蒸发温度时,

• 1392 •

pressure guage

finned tube capillary wick

water-cooled copper



杯盛装的乙醇和水中,观察毛细芯的抽吸现象。然 后,打开加热电源,分别调至1.98、4.88、6.72W, 观察液-固界面上升高度和蒸发现象并用相机拍摄 记录。第2部分:实验系统连接完毕后,打开数据 采集仪,水冷温度调节到15℃。待观察电脑屏幕上 液池温度稳定后,再打开加热电源,调节到不同加 热功率。每次改变加热功率后,若10min内整个测 试容器的温度变化不超过±0.5℃,即可认为达到稳 态,记录此时的加热功率和平衡时间。

实验测试容器剖面

temperature safety

element

valve

2.3 数据处理方法及误差分析

图 4

本实验轴向布置铂电阻间距的最大误差为土 0.1 mm。毛细芯表面温度的测量误差来源主要包括 温度测量误差和功率测量误差。实验中采用铂电阻 对温度进行测量,相对误差为0.1%。功率由稳压电 源测量,相对误差为0.5%。由导热、对流及辐射引 起的热流损失由以下公式校正

> $q=q_{in} + q_{in,loss}$ (2)



图 5 实验系统图 Fig.5 Measuring of effective thermal conductivity for experiment

第1部分:首先,把毛细芯底部分别浸在用烧

8 mm 20 mm

图 3 毛细芯侧截面图

Fig.3 Side section of capillary wick

工质在毛细芯表面蒸发,产生蒸汽遇翅片管凝结成

水珠回落到液池,保证液面高度恒定,完成系统

加热功率下毛细芯的液-固界面变化,第2部分测

量不同加热功率下毛细芯的温度分布,计算有效

实验分两部分进行,第1部分观察装置外不同

循环[21]。

热导率。

2.2 实验方法

qin.loss=qcond + qconv + qrad (3) 毛细芯采用悬挂法固定在容器上方,导热损失 很小,可忽略不计。由自然对流和辐射换热引起的 加热损失根据 Churchill-Chu 自然对流关系式 (*Ra*_L ≤ 10⁹)^[22]和两同心圆柱表面间的辐射传热公式校正, 用于计算 *Ra*_L 的驱动温差是基于下部区域中的平均 表面温度和恒定的腔体温度而定,而 *L* 是加热片和 液池之间芯的暴露长度。计算中使用的气体物性采 用腔体压力进行评估。则有

$$\overline{N}u_{l} = 0.68 + \frac{0.670Ra_{L}^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$
(4)
$$q_{rad} = \frac{\delta(T_{s}^{4} - T_{a}^{4})}{\frac{1 - \varepsilon_{1}}{A_{1}} + \frac{1 - \varepsilon_{2}}{A_{2}}}$$
(5)

3 实验结果与讨论

3.1 毛细芯蒸发现象

用针管分别抽取少量乙醇和水滴落在毛细芯 表面,观察工质对毛细芯的浸润程度。当把乙醇滴 在毛细芯表面时,乙醇液滴立刻浸润毛细芯,毛细 芯表面潮湿,说明乙醇对钛合金的润湿性良好,如 图 6(a)所示;当把水滴在毛细芯表面时,水的表面 张力大且润湿能力差^[23],水珠附着在毛细芯表面, 接触角 θ > 90°,没有浸润毛细芯,说明工质水对钛 合金的润湿性不好,如图 6(b)所示。



(a) ethanol as working fluid



(b) water as working fluid图 6 工质滴落在毛细芯表面现象Fig.6 Phenomenon of working fluid dropping on capillary wick

把毛细芯底部分别浸在乙醇和水中,当浸在工 质乙醇中,由于毛细芯毛细力的作用,乙醇会很快 从底部被抽吸上升一定高度直到两端压差平衡^[24], 润湿毛细芯,可以在毛细芯表面观察到明显的液-固 界面,如图 7(a)所示;而当把它浸在工质水中,水 很难从底部抽吸上来,毛细芯不会润湿,这是因为 在常温下水和钛合金表面产生的接触角为钝角,工 质不会上升,所以在毛细芯的表面没有产生液-固界 面,如图 7(b)所示。





(b) water as working fluid

(a) ethanol as working fluid

图 7 毛细芯抽吸工质现象 Fig.7 Phenomenon of suction working fluid

当对毛细芯顶部加热时,由于热量输入,浸润 毛细芯的液体分子迅速扩散,无论是工质乙醇或水, 在加热条件下,毛细芯的液-固界面都会消失。当加 热功率缓慢增至4.88 W,采用乙醇作为工质时,毛 细芯表面几乎全部润湿,而采用水,在同样加热功 率下,表面仍没有明显润湿。再次调大加热功率至 6.72 W,此时,浸在水中的毛细芯底部润湿,用手 触碰明显感到其外表面潮湿,水对毛细芯的浸润性 提高。这是因为随着热源功率的增加,温度的不断 上升,水的动力黏度明显下降,接触角减小,毛细 力提高。而工质乙醇在6.72 W 的加热功率下,随着 温度的升高,可以观察到毛细芯顶部有小气泡溢出, 工质在毛细芯内蒸发,如图 8 所示。

3.2 有效热导率的测量

当加热功率 q 较小时,毛细芯的温度上升较迅速,稳定在较低的温度值;随着加热功率 q 的增大, 毛细芯温度上升的速度减小,达到平衡的温度值增 大,稳定的时间却随之减少,当加热功率超过一定 值时,毛细芯的温度基本不会再出现明显的稳定段。 如图 9(a)所示,采用乙醇为工质,加热功率达到 14.1

• 1394 •



Why Wh









W时,可以看出测点1温度不断波动,当加热功率 增至18.38W,测点1损坏,已达到铂电阻的测温 上限。

由上述实验可知在常温下乙醇可以很好地浸 润钛合金毛细芯,随着加热功率 q 的增加,毛细芯 表面温度上升,可以明显地观察到乙醇在毛细芯表 面蒸发,因此采用乙醇作为工质可以很好地测定毛 细芯在工作状态下的有效热导率。对图 10(a)中毛细



different heating power

芯上测点的温度分布采用指数函数进行曲线拟合, 拟合程度良好,可知毛细湿芯上的温度大致呈指数 分布。

图 9(b)采用水作为工质进行实验。在不同加热 功率下,测点1的温度远高于其他测点温度,如图 10(b)所示,这是由于测点1的位置较高,接近加热 片且水对钛合金的润湿性不好,导致此点温度偏高。 因此,下文在计算有效热导率时,无论水和乙醇, 都刨除测点1的值进行计算,会使实验结果更加准 确。除此之外,在 6.97 W 功率以上曲线斜率非常接 近,但输入功率却不同,说明此时工质水蒸发,限制 了温度的增加,因此高功率下计算得出的毛细芯的 有效热导率值很大,与低功率下的热导率值会有一 个明显的差别。

根据式(2)计算出不同功率下毛细芯的有效热导率绘制成图11,当工质为乙醇时,加热功率从1.85 W 增加到11.86 W,润湿毛细芯的平均有效热导率呈增大趋势,之后毛细芯的平均有效热导率下降,随着加热功率 q 的增加,毛细芯的表面温度逐渐升





Fig.11 Effective thermal conductivity of capillary wick under different heating power

高,达到乙醇的沸点发生沸腾,沸腾会持续一段时间,毛细芯温度较高的区域被蒸干^[25],导致了在高加热功率下,毛细芯的平均有效热导率减小。由此我们可知,随着加热功率q的不断增加,毛细芯的平均有效热导率大体的趋势是先增加后减小。

而当采用水作为冷源,有效热导率值在5W以 内一直处于较稳定状态,说明此时水还没有浸润毛 细芯,但当加热功率超过5W时,毛细芯的平均有 效热导率显著增加,这是由于常温下水的表面张力 高且润湿能力较差,导致毛细芯对水的抽吸能力减 弱。因此,在低加热功率下,含乙醇的毛细芯的热 导率要高于含水的毛细芯的热导率;而在高加热功 率下,含乙醇的毛细芯的热导率要低于含水的毛细 芯的热导率。

4 结 论

本文首次采用 3D 打印的钛合金毛细芯,利用 稳态法计算了毛细芯工作状态下的有效热导率,研 究了不同加热功率和工质对其热导率的影响,为毛 细芯性能的提高提供了参考数据。主要结论如下。

(1) 钛合金毛细芯对工质乙醇的润湿能力良好,可以看到明显的液-固界面,但对工质水的润湿能力较差,没有固-液界面产生。当有热量输入毛细芯时,固-液界面会消失不见。

(2)随着热源功率的增加,毛细芯的有效热导率呈先增大再减小的趋势。在低加热功率下,含乙醇的毛细芯的有效热导率要高于含水的毛细芯的有效热导率;而在高加热功率下,实验结果正好相反。

(3) 由于空气的热导率远低于乙醇或水的热

导率,因此干态毛细芯的有效热导率远低于含湿毛 细芯的有效热导率。

符号说明

 A_1 ——毛细芯表面积, m²

 A_2 ——测试容器內壁表面积, m²

 A_x ——毛细芯横截面积, m²

 A_x ——毛细芯有效长度, m

 q ——输入功率, W

 q ——输入功率, W

 q cond ——由导热引起的加热损失, W

 q conv ——由对流引起的加热损失, W

 q in ——输入到毛细芯的真实加热功率, W

 q_{ins} ——总加热损失, W

 q_{rad} ——由辐射引起的加热损失, W

 T_a ——腔体内温度, K

 T_s ——毛细芯下端表面的平均温度, K

 ϵ_1 ——毛细芯的发射率

 ϵ_2 ——测试容器的发射率

- 2——例风谷郁的汉刘平
- σ ——Stefan-Boltzmann 常数, 5.67×10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴

References

- 曲燕.环路热管技术的研究热点和发展趋势[J].低温与超导,2009, 37(2): 7-14.
 QU Y. Hot study and development trend of loop heat pipes[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2009, 37(2): 7-14.
- [2] XU J, ZOU Y, FAN M, et al. Effect of pore parameters on thermal conductivity of sintered LHP wicks[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55(9/10): 2702-2706.
- [3] 曲付龙. 平板式环路热管毛细芯的研制及性能表征[D]. 济南:山东大学, 2012.

QU F L. The development and performance characterization of flat plate heat pipe capillary core [D]. Jinan: Shandong University, 2012.

- [4] 徐计元,邹勇,程林. 烧结镍毛细芯的孔参数控制及其对抽吸性能的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(2): 463-469.
 XUJY, ZOUY, CHENGL. Pore parameters control and the influence on the capillary pumping performance of sintered nickel wicks[J]. CIESC Journal, 2012, 63(2): 463-469.
- [5] 崔可航,辛公明,程林,等.环路热管毛细芯有效热导率的实验研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(9):1543-1546.
 CUI K H, XIN G M, CHENG L, *et al.* Effective thermal conductivity of loop heat pipe wicks[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1543-1546.
- [6] 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 57-61.
 LI J W, ZOU Y, CHENG L. Experimental study on thermo physical properties of capillary wicks for loop heat pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 57-61.
- [7] CHI S W. Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook[M]. Washington, London: Hemisphere Pub., 1976.
- [8] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism(Vol. 2)[J]. Nature, 2014, 7(182): 478-480.
- [9] GORRING R L, CHURCHILL S W. Thermal conductivity of

第4期

heterogeneous materials[J]. Chemical Engineering Progress, 1961, 57(7): 5359.

- [10] DUL'NEV G N. Heat transfer through solid disperse systems[J]. Journal of Engineering Physics, 1965, 9(3): 275-279.
- [11] LORDRAYLEIGH S R S. LVI. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium[J]. Philosophical Magazine, 1976, 34(211): 481-502.
- [12] BERENSON P J, GRAUMANN D W, SOLIMAN M M. Effective thermal conductivity of dry and liquid-saturated sintered fiber metal wicks[J]. Mechanical Engineering, 1970, 92(11): 64.
- [13] ALEXANDER E G. Structure-property relationships in heat pipe wicking materials[D]. Raleigh, North Carolina : North Carolina State University, 1972.
- [14] PETERSON G, FLETCHER L. Effective thermal conductivity of sintered heat pipe wicks[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 1987, 1(4): 343-347.
- [15] 马超,刘艳峰. 多孔介质有效热导率研究进展[OL]. [2014-12-01]
 中国科技论文在线. http://www.paper.edu.cn.
 MA C, LIU Y F. Review of Effective Thermal Conductivity of Porous
 Media[OL]. [2014-12-01] Sciencepaper Online http://www.paper.
 edu.cn.
- [16] ADLER P M. Transports in fractal porous media[J]. Journal of Hydrology, 1996, 187(1): 195-213.
- [17] ADLER P M, THOVERT J F. Fractal porous media[J]. Transport in Porous Media, 1993, 13(1): 41-78.

- [18] MO S P, HU P, CAO J F, *et al.* Effective thermal conductivity of moist porous sintered nickel material[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(1): 304-313.
- [19] BONNEFOY M, OCHTERBECK J, DROLEN B, et al. Effective thermal conductivity of saturated sintered nickel loop heat pipe wicks[C]// AIAA Thermophysics Conference, Portland, Oregon, 2006.
- [20] IVERSON B D, GARIMELLA S V. Experimental measurements of heat and mass transport in heat pipe wicks[C]// ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. North Carolina, USA, 2004: 209-217.
- [21] IVERSON B D, DAVIS T W, GARIMELLA S V, et al. Heat and mass transport in heat pipe wick structures[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2012, 21(2): 392-404.
- [22] SINGH A K, SINGH R, CHAUDHARY D R. Prediction of effective thermal conductivity of moist porous materials[J]. Pharmacogenomics, 2000, 14(6): 455-457.
- [23] XIN G, CUI K, ZOU Y, et al. Reduction of effective thermal conductivity for sintered LHP wicks[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, 53(13/14): 2932-2934.
- [24] DENG D X, LIANG D J, YONG T, et al. Evaluation of capillary performance of sintered porous wicks for loop heat pipe[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2013, 50(10): 1-9.
- [25] MUGHAL M P, PLUMB O A. An experimental study of boiling on a wicked surface[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1996, 39(4): 771-777.