

# 环路热管碳纤维毛细芯表面改性性能对比

刘峻瑜<sup>a</sup>, 栾涛<sup>a</sup>, 刘龙飞<sup>a</sup>, 邹勇<sup>b</sup>

(山东大学 a.能源与动力工程学院 b.材料科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:**目的 改善碳纤维表面亲水性能以应用于平板型环路热管毛细芯, 并对比两种方法的优劣。方法 采用两种方法对碳纤维表面进行改性——化学镀铜法(在碳纤维表面形成均匀铜镀层)、火焰喷涂金属粉末法(在碳纤维表面形成金属涂层), 采用高速摄像机(High-speed Camera)、电子扫描显微镜(SEM)和红外成像仪(IR Camera)等表征设备, 比对了处理后的表面形貌、亲水性能以及毛细抽吸力。通过 IR 图片测量吸液高度, 建立数学模型, 定量计算出两种方法改性后碳纤维的毛细抽吸性能。结果 通过两种方法改性后的碳纤维, 内部多孔结构均未被破坏且亲水能力都得到明显的提高, 液滴接触碳纤维表面后迅速吸入纤维内部。化学镀层非常紧密平整, 火焰喷涂涂层没有开裂, 极少剥落。化学镀碳纤维的抽吸压为 3.2 kPa, 渗透率为  $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 火焰喷涂金属涂层碳纤维的抽吸压为 2.94 kPa, 渗透率为  $8.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 说明通过两种方法改性得到的碳纤维均达到了平板型环路热管毛细芯的要求。结论 通过化学镀和火焰喷涂对碳纤维进行表面处理均可以使碳纤维的浸润性得到明显改善, 从而使其内部固有的多孔结构发挥出对水的毛细抽吸力, 鉴于碳纤维作为一种厚度灵活的柔性材料, 不受蒸发器尺寸的限制, 可以成为传统烧结和金属丝网毛细芯的替代方法。

**关键词:** 环路热管; 碳纤维; 化学镀; 火焰喷涂; 毛细力; 浸润性

**中图分类号:** TG174.442; TQ153.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0175-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.023

## Comparative Study of Surface Modified Carbon Fiber Capillary Wicks in Loop Heat Pipe

LIU Jun-yu<sup>a</sup>, LUAN Tao<sup>a</sup>, LIU Long-fei<sup>a</sup>, ZOU Yong<sup>b</sup>

(a.School of Energy and Power Engineering, b.School of Material Science and Engineering,  
Shandong University, Jinan 250061, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the wet ability of carbon fiber applied in copper-water flat loop heat pipes and compare the advantages of different modified methods. The electroplate copper and flame spraying process metal powder were respectively used to form uniform copper plate and metal coating on the carbon fiber to modify the surface of carbon fiber. The treated surface morphology, improved wet ability and pumping of capillary wicks were characterized by high-speed camera, SEM and IR camera. The suction range was measured by IR image and mathematical model was established to quantitatively calculate the capillary pumping properties of carbon fiber after modification by two methods. As for the modified carbon fiber wicks by two methods, the internal porous structure was not damaged and the wet ability was improved significantly. The liquid

收稿日期: 2018-09-24; 修订日期: 2018-11-29

Received: 2018-09-24; Revised: 2018-11-29

作者简介: 刘峻瑜(1989—), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为多孔介质、传热传质。

**Biography:** LIU Jun-yu (1989—), Male, Ph. D. candidate, Research focus: porous media, heat and mass transfer.

通讯作者: 栾涛(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为传热传质、大气污染物控制。邮箱: purehabour@hotmail.com

**Corresponding author:** LUAN Tao (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: heat and mass transfer, air pollutant control. E-mail: purehabour@hotmail.com

drop could be absorbed into the fiber quickly after falling on the carbon fiber. The electroless plating was dense and flat and the flame spraying coating was free from crack and peeling off. The capillary pressures and permeability of the electroless plated carbon fiber capillary wicks were 3.2 kPa and  $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , while those for flame spraying metal coated carbon fiber were 2.94 kPa and  $8.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  respectively. These two methods both made the carbon fiber meet the requirements of flat loop heat pipe capillary wicks by modification. The treatment to the surface of carbon fiber by electro plating and flame spraying can improve the wettability of carbon fiber and then make the internal porous structure exhibit the capillary pumping ability for water. Carbon fiber can be used to replace the traditional sintering and metal mesh capillary wicks due to the flexible thickness not being limited by the evaporator size.

**KEY WORDS:** loop heat pipe; carbon fiber; chemical-plating; flame spraying; capillary force; wet ability

近年来,有限空间内高热流密度电子设备的热控问题逐渐突出,人们应用一些两相流散热装置来解决这些问题。环路热管是一种通过蒸发器内毛细芯产生的毛细力来驱动工作介质流动,利用工作介质的相变过程来传递热量的高效传热装置。经过多年的发展,其技术日趋成熟,并逐步应用于空间飞行器、电子设备等领域的热控系统中<sup>[1-3]</sup>。

环路热管主要由蒸发器、毛细芯、储液室、液体管线、蒸汽管线和冷凝段组成,蒸发器是环路热管中的关键部件,毛细芯是蒸发器的核心部分。毛细芯一方面需提供足够的毛细驱动力来循环工质,另一方面毛细芯需及时将产生的蒸汽转移至蒸汽管道,进而实现热量的正向传递。平板式环路热管的蒸发器为平板,其受热面积大,所占空间高度小,且有利于与发热元件贴合,尤其适用于内部空间有限、发热量大、热流密度高的电子器件的散热<sup>[4-7]</sup>。

近年来,金属丝网、泡沫、陶瓷材料和金属粉末烧结材料等广泛应用于环路热管毛细芯<sup>[8-14]</sup>,特别是复合毛细芯环路热管研究也逐渐增多<sup>[17-18]</sup>。应用最广泛的烧结毛细芯具有刚性大、脆性高的特点,在用于平板式环路热管毛细芯时,往往面临着毛细芯与蒸发器接触不紧密的难题,由此影响了热量的有效传递,降低了启动和运行的效率。同时由于平板热管的特点,其毛细芯成平板状,机械强度不高,限制了其使用场合。对于单一孔径的毛细芯,无法满足工质高效蒸发和降低热泄漏对毛细芯热导的不同需求,复合毛细芯也成为了毛细芯发展的热点研究课题。碳纤维作为一种柔性材料,强度很高且自身具有多孔结构,具有作为环路热管毛细芯的特征。工业化生产的碳纤维按前驱体原料的不同可以分为聚丙烯腈基(PAN-based)、黏胶基、沥青基碳纤维和气相生长碳纤维。聚丙烯腈基碳纤维,因其优异的性能而被广泛地用于增强材料<sup>[15]</sup>。然而,碳纤维在未经表面处理前,其活性比表面积小,表面能低,是一种憎水材料,并不能发挥其内部多孔结构的抽吸特性。因此,需要对碳纤维表面进行改性处理,使其对水具有优越的抽吸性能,以满足铜-水环路热管的要求。

本文对比了两种碳纤维表面改性处理方式:通过

化学镀的方法在表面及浅层纤维丝覆盖一层铜;通过火焰喷涂在碳纤维表面覆盖一层铜-铝涂层。通过对比分析,总结了碳纤维经过两种方法改性后作为环路热管毛细芯不同的优势,提出了通过引入涂层改性以达到制备复合毛细芯的思路,为碳纤维应用于环路热管,特别是平板式环路热管中,提供了参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 碳纤维材料及前处理

通过表面处理使碳纤维表面的纤维丝被金属附着,提高碳纤维的亲水特性,是使碳纤维能够用于环路热管毛细芯的主要过程。本文所使用碳纤维毡材料为 PAN 基碳纤维毡,热传导率小于  $0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,含碳量 90%~95%,灰分 0.765%。通过高温处理,对尺寸为  $6.7 \text{ cm} \times 2.3 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$  的碳纤维进行表面预处理,破坏附着于表面的有机胶,然后在 10% (质量分数) 的 NaOH 溶液中均匀搅拌 15 min 左右,将有机胶充分溶解后,用蒸馏水清洗,并在室温下晾干备用。

### 1.2 化学镀实验

化学镀是基于氧化还原反应,利用还原剂将溶液中的金属离子还原成金属单质沉积在材料表面而形成镀层。化学镀是一种简单易行的表面处理方法,常用的化学镀溶液有铜离子溶液、银离子溶液、镍离子溶液、钴离子溶液等。由于改性后的碳纤维最终用作毛细芯,故选择导热性良好又廉价的铜离子溶液<sup>[16]</sup>。碳纤维表面镀铜,作为毛细芯,可获得比铜丝网更好的工作性能,因碳纤维比铜丝更纤细,所获得的毛细芯更柔软,孔径更小,孔隙率更大,此外其制备工艺难度小,减少了制造成本。具体操作过程如下:①高温处理取出表面胶体,将样品放入  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的马弗炉中进行处理;②溶解表面有机杂质;③粗化;④中和醋化过程中残留的酸性溶液;⑤敏化;⑥活化;⑦放入镀液中进行镀铜处理。在镀铜过程中,缓慢加入氢氧化钠粉末,当镀液 pH 值达到 8~10 时,将碳纤维放入镀液中并不断搅拌,整个过程持续 30 min。以上过程所需要的溶液如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 化学镀过程中溶液及条件  
Tab.1 Solutions and conditions used for electro plating

Process	Time/min	Temperature/℃	Solution
Dissolving	10	80	30 g/L Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +50 g/L NaOH
Coarsening	20	25	50 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> +(1.84 g/cm <sup>3</sup> , 200 mL/L) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Neutralizing	10	25	240 g/L NaOH
Sensitization	20	40	50 g/L SnCl <sub>2</sub> +50 mL/L HCl
Activation	20	25	0.1 g/L PdCl <sub>2</sub>
Copper-plating solution	20	40~50	20 g/L CuSO <sub>4</sub> +20 g/L Anhydrous sodium carbonate+40 mL/L HCHO+ 10 g NaOH+45 g/L NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O

1.3 火焰喷涂实验

火焰喷涂主要是通过将金属粉末喷入火焰中，利用高压高温火焰将金属粉末喷涂到碳纤维表面。火焰喷涂所采用的金属粉末可以是多种金属或金属氧化物的混合物，这样就可以根据碳纤维表面本身的特点和不同的要求，利用火焰喷涂制作出性能各异的毛细芯。碳纤维表面制备涂层以提高纤维的抗氧化、耐高温性能，可拓宽其在高温领域的应用<sup>[17-18]</sup>，然而将火焰喷涂技术应用于碳纤维表面涂层以制备环路热管毛细芯的技术，国内文献尚未报道。本文讨论的是将铜-铝混合粉末喷涂至碳纤维表面，以达到改善其亲水性的目的。具体操作是在火焰喷枪前放置一个额外注射头，将铝粉喷入带有铜粉的火焰中。所使用的火焰喷涂设备为 Flame Spray Technologies, P5II, Duiven, Netherlands。喷枪由计算机控制，以保证涂层的均匀性，氢气作为喷枪的燃料。

喷涂参数如表 2 所示，铜粉粒径为 53~88 μm（99.9%，Alfa aesar），铝粉粒径为 35~63 μm（99.9%，Praxair surface technologies）。在将铝粉混入铜粉中时，用氮气作为载气射入到喷涂火焰中，注射铝粉的注射头位置在火焰喷枪的出口处。粉末通过数个狭窄的轨道，使得涂层中的铜铝粉末混合得更均匀。铜粉的进粉速度保持 14 g/min，铝粉的进粉速度设定为 10 g/min。表 2 列出了铜-铝粉末混合涂层实验参数。

表 2 火焰喷涂金属粉末参数  
Tab.2 Parameters of flame spraying metal powder

Items	Cu-Al coating
Fuel flow rates (Oxygen)/(L·min <sup>-1</sup> )	28
Fuel flow rates (Hydrogen)/(L·min <sup>-1</sup> )	56
Gas pressure/Pa	344737.9
Cu feed rate/(kg·s <sup>-1</sup> )	2.3×10 <sup>-4</sup>
Al feed rate/(kg·s <sup>-1</sup> )	1.6×10 <sup>-4</sup>
Spray distance/mm	100
Number of passes	10

1.4 毛细抽吸测试平台

将碳纤维进行改性的目的是改变其对水的亲疏特性，本文对改性碳纤维的抽吸性能进行了试验研究和分析。实验前，用醋酸分别对改性后的样品进行清洗，然后在室温下自然晾干。利用红外摄像机（FLIR ThermalCAM SC 5000）和电子天平捕捉改性碳纤维薄层抽吸蒸馏水的过程：红外摄像机可以观察水在碳纤维薄层上的上升过程，而电子天平可以测量所吸入的水的质量。试验台设置如图 1 所示，电子天平 and 红外摄像机与计算机连接记录数据。应用 Altair thermal imaging software 按照时间截取图片，然后通过图像分析软件（ImageJ, National Institutes of Health, USA）测量水面高度，以测定毛细抽吸力 $\Delta P_{\text{capillary}}$ 和渗透系数  $k$ 。摄像机测温范围为-20~3000 ℃，精度为 1%。记录图像速率为每秒 10 帧。实验过程中将毛细芯长条样品水平悬挂在电子天平下，缓慢将水槽上升至水面与样品接触，水在毛细力的作用下被吸入样品，并沿样品上升。实验过程中，由于吸入液体占水槽中总水量的比例很小，可以认为水平面位置恒定。

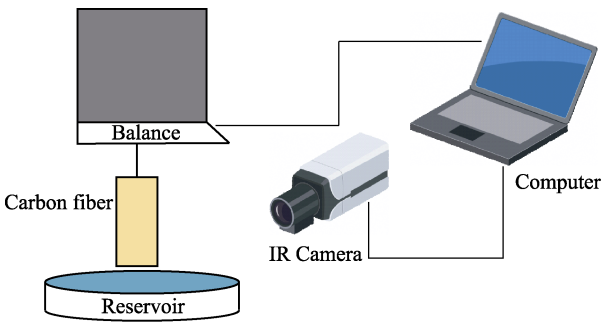


图 1 改性后毛细芯抽吸力测定实验台示意图  
Fig.1 Schematic diagram of experiment platform to quantify the capillary pumping rate of the modified capillary wick

1.5 改性前后性能对比及微观特性试验

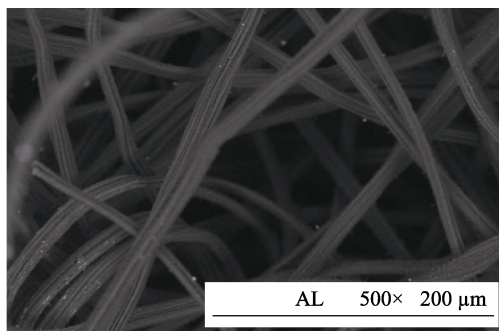
将碳纤维改性前后的浸润性进行了对比。利用高速摄像机（FastcamSA5, Photron, CA, USA）分别记录了未改性、化学镀铜处理和火焰喷涂处理的三种

碳纤维样品的液滴滴入过程。通过扫描电镜 (TM3000, HITACHI, USA) 对处理前后的碳纤维表面结构进行观察, 并对观察结果进行分析比较。

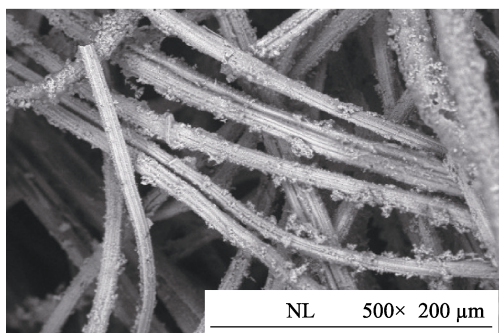
## 2 结果及分析

### 2.1 微观结构和浸润性对比

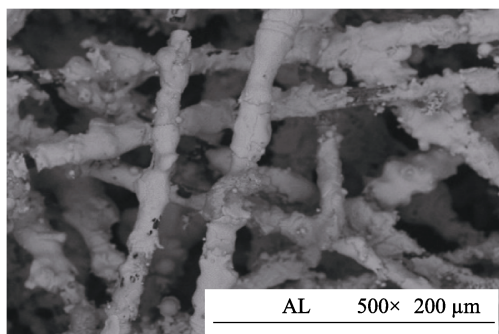
图 2 展示了表面未经任何处理、化学镀铜、表面火焰喷涂铜-铝混合涂层三种碳纤维的电镜扫描图片, 放大倍数均为 500 倍。如图 2a 所示, 碳纤维本身是由直径为 200  $\mu\text{m}$  的纤维长丝编制而成, 从而形成了各种不规则的孔结构。但是碳纤维作为一种非亲水材料, 对水不具有抽吸性, 无法满足铜-水环路热管的应用要求。



a 表面未作处理碳纤维丝



b 表面化学镀铜处理碳纤维丝



c 表面火焰喷涂Al-Cu粉末处理碳纤维丝

图 2 未表面处理和表面改性后碳纤维 SEM 图

Fig.2 SEM micrographs of original and modified carbon fiber: (a) original carbon fiber; (b) carbon fiber modified by copper chemical-plating; (c) carbon fiber modified by flame spraying Al-Cu mixed powder

图 2b 展示了经过化学镀表面处理的碳纤维微观结构。表面镀铜后, 会形成一种类似于金属丝网的结构, 金属层与碳纤维接触非常紧密。图 2c 展示了表面通过火焰喷涂后, 铜-铝混合涂层与碳纤维结合情况的扫描电镜图片。单根碳纤维丝上面的涂层厚度与喷涂次数有关, 为了达到覆盖均匀并使涂层不会因过厚而导致脱落, 需要对喷涂次数进行严格控制, 经多次试验后发现, 喷枪对碳纤维进行 10 次循环喷涂时效果最佳, 此时涂层厚度适中且基本将碳纤维丝全部覆盖。通过电镜图片可以观察到, 经两种改性方法处理后, 碳纤维丝都没有出现断丝, 碳纤维原有的多孔结构没有被破坏。化学镀的方法在碳纤维丝表面形成的镀层较为平滑, 覆盖均匀。

图 3 为通过高速摄像机捕捉到的改性前后碳纤维对水滴浸润性的图片。从图 3a 中可以直观地看出, 碳纤维本身对水不具有任何浸润性, 是一种疏水材料。而无论是化学镀铜后的碳纤维, 还是火焰喷涂铜-铝涂层后的碳纤维, 都表现出非常好的亲水性, 可以发挥其本身固有的多孔介质特性, 从而满足作为铜-水环路热管毛细芯的要求。

影响固体表面浸润性的因素主要是表面自由能和表面微观结构 (表面粗糙度)。固体的表面自由能  $\gamma_{sv}$  越大, 越易被液体所润湿。Zisman 等<sup>[19]</sup>通过实验得出, 固体的临界表面张力  $\gamma_c$  是反映低能固体表面润湿性能的一个极重要的经验常数。具体来说, 只有表面张力等于或者小于固体临界表面张力  $\gamma_c$  的液体才能在该固体表面上浸润。碳纤维的表面能数量级与水大致相当。而常见金属及其氧化物有较高的表面自由能 (表面张力), 比如本文所镀金属铜, 表面自由能大约 1.36 J/m<sup>2</sup>, 很容易被水所浸润<sup>[20]</sup>。表面粗糙度能够增强表面的浸润性, 对于亲水性表面, 表面的接触角将随着表面粗糙度的增大而减小。在图 3 的扫描电镜图片中可以看到, 单根碳纤维丝的表面粗糙度在表面处理 (镀铜或喷涂) 后较处理前有明显的增加。

### 2.2 毛细力的比较结果

碳纤维本身是多孔结构, 在表面亲水性得到改善后, 可以发挥多孔介质的抽吸特性, 达到环路热管毛细芯对吸水性能的要求。Deng 等<sup>[21]</sup>提出了通过测量抽吸液体的高度获得多孔介质抽吸力的方法, 基于该方法, 本文对镀铜改性后的碳纤维进行了抽吸力的测量。

液体在毛细芯内由于毛细抽吸压克服了重力压头和黏性力而上升, 根据能量守恒定律和受力平衡, 表达式为:

$$\Delta P_{\text{capillary}} = \frac{\mu \varepsilon}{k} \cdot h \cdot \frac{dh}{dt} + \rho g h \quad (1)$$

其中右边第一项是黏性摩擦损失, 根据多孔介质达西定律, 第二项为重力压。方程 (1) 中,  $\mu$  是液体的黏度,  $k$  是材料的固有渗透性,  $h$  是一定时间内



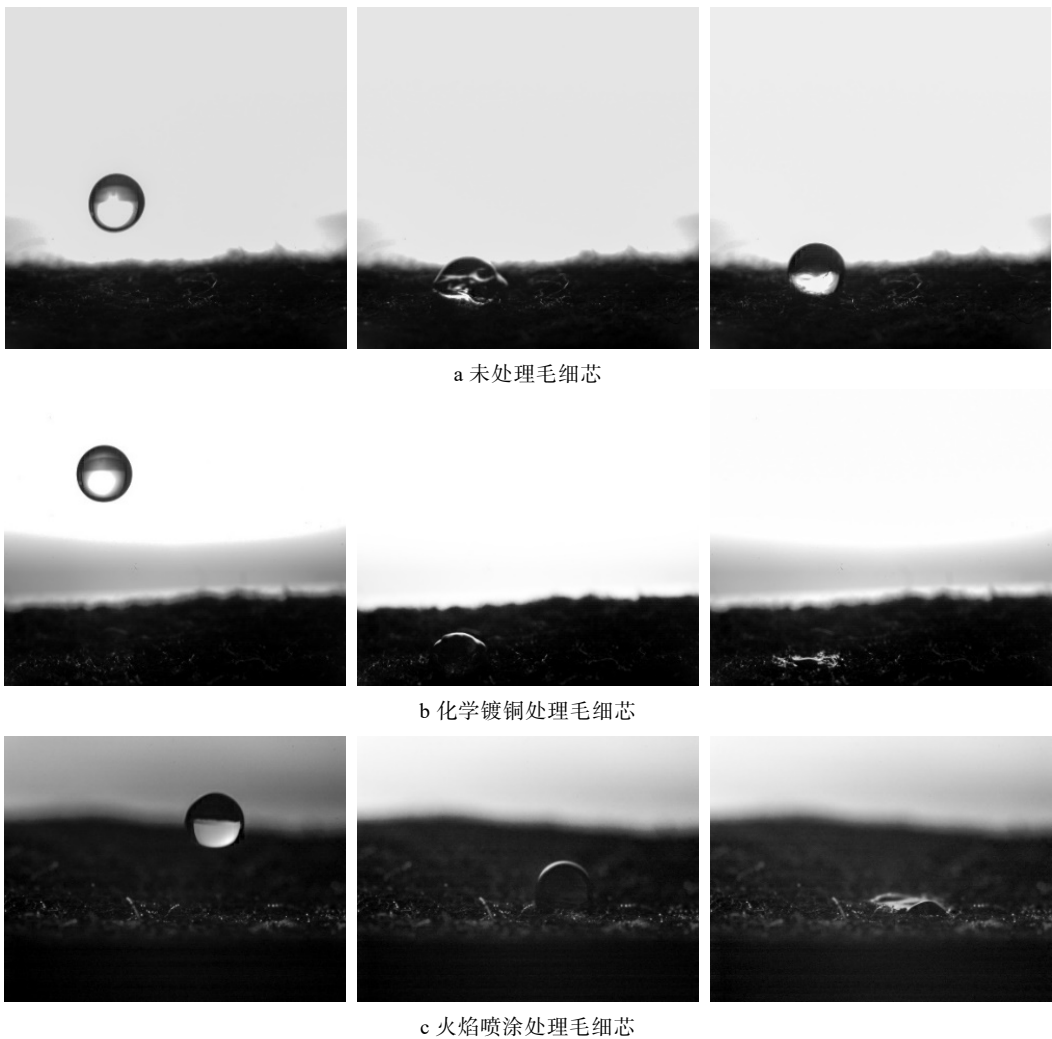


图 3 高速摄像机捕捉水滴浸润性的图片  
Fig.3 Pictures of wettability of water drop on the carbon fiber surface by high-speed camera:  
(a) Non-modified wick; (b) Wicks modified by copper chemical-plating; (c) Wicks modified by flame spraying

的毛细抽吸高度， $\frac{dh}{dt}$  是毛细芯中液体上升的速度， $\rho$  是液体密度， $g$  是重力加速度， $\varepsilon$  是有效孔隙率，实验中使用的碳纤维孔隙率  $\varepsilon=0.83$ 。将方程改写为：

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Delta P_{cap} \cdot k}{\mu \varepsilon} \cdot \frac{1}{h} - \frac{\rho g k}{\mu \varepsilon}$$

(2)

方程（2）中有两个未知参数：一是毛细芯的抽吸压  $\Delta P_{cap}$ ，另一个是液体本身的渗透率  $k$ 。利用红外摄像机捕捉吸液高度和时间的关系，拟合出  $h-t$  函数关系并描绘出上升曲线。液体在毛细芯中的上升速率

可以从上升曲线求导获得  $\left(\frac{dh}{dt}\right)$ 。令  $x = \frac{1}{h}$ 、 $y = \frac{dh}{dt}$  分别代表上升高度的倒数和毛细抽吸速率，方程可以改写为：

$$y = \frac{\Delta P_{cap} \cdot k}{\mu \varepsilon} \cdot x - \frac{\rho g k}{\mu \varepsilon}$$

(3)

借助 Matlab 的拟合回归计算，最终得到抽吸压合渗透率的实验测定值。

利用公式（3）对两种改性后的碳纤维抽吸性能进行计算，计算结果见表 3。Matlab 软件拟合结果的

表 3 化学镀铜和火焰喷涂处理碳纤维线性回归分析结果  
Tab.3 Fitting results of the linear regression analysis for carbon fiber modified by copper chemical-plating and flame spraying

Item	$\frac{\Delta P_{cap} \cdot k}{\mu \varepsilon} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\frac{\rho g k}{\mu \varepsilon} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta P_{cap} \cdot k / (\times 10^{-8} \text{ N})$	$\Delta P_{cap} / \text{kPa}$	$k / (\times 10^{-11} \text{ m}^2)$
Chemical	0.000 12	0.000 37	9.6	3.2	3
Sparying	0.0003	0.001	24	2.94	8.16

吻合度 ( $R=0.99$ ) 显示拟合结果理想, 非常接近实际情况。所测碳纤维的长度、宽度和厚度的测量误差分别约为 1%、1%、2%, 红外摄像机测量的高度误差为 1.5%, 测量的上升速率误差为 2.5%。

Deng 等<sup>[22]</sup>列出不同材料毛细芯抽吸压的范围为 1.19~5.14 kPa。对比本实验所得结果, 采用化学镀方法改性的碳纤维抽吸压略高于火焰喷涂方法改性的碳纤维。而两种处理方法改性的碳纤维, 都符合作为环路热管毛细芯的毛细抽吸压和渗透率的要求。

### 2.3 化学镀改性和火焰喷涂改性的对比

通过以上的试验和分析, 化学镀方法和火焰喷涂方法均可以作为碳纤维的改性方法, 经两种方法改性后的碳纤维都具有良好的抽吸性。根据表 3 结果显示, 虽然碳纤维材料在经过两种方法处理后的毛细抽吸压结果相近 (镀铜 3.2 kPa, 喷涂 2.94 kPa), 火焰喷涂试样的渗透率明显大于化学镀铜试样。这与火焰喷涂过程中高温火焰直接与样品接触, 对碳纤维结构造成一定的冲击有关。化学镀的制样过程较为缓和, 较好地反映了碳纤维固有的渗透率。通过实验值的对比, 化学镀铜碳纤维具有较高的毛细抽吸力及较低的渗透率, 在理论上比火焰喷涂样品的毛细特性更优异。

但是在实际应用中, 就工艺过程而言, 化学镀铜方法对实验设备的要求低, 但是对每一步工艺过程的要求高, 为了获得较好的镀层, 需要精确掌握每一步的操作时间, 对溶液配制的精度也有极高的要求, 这种方法适合实验室制作。而火焰喷涂的制作过程较为简单, 但是其对实验设备的要求较高。相比较镀铜的方法, 火焰喷涂更适合大规模制作。

更需要说明的是采用火焰喷涂的另外一个突出特点。火焰喷涂可以在碳纤维正反两侧获得不同金属和金属氧化物的涂层, 因而使两侧的热传导率不同, 从而满足毛细芯蒸汽侧和储液室侧对热传导率的不同要求, 实现复合毛细芯的功能, 达到改善平板型环路热管漏热的目的。而这对于通过溶液制备的化学镀铜碳纤维来说难以达到。限于本文所报道的中心和篇幅, 本文并未就复合毛细芯的制备和实验分析进行进一步报道, 将在以后的论文中重点介绍。

## 3 结论

1) 通过化学镀铜和火焰喷涂方法均可以使碳纤维获得良好的亲水性, 其亲水性与改性前有着明显的不同。

2) 通过化学镀铜方法得到的镀层较为平滑, 贴合更加密实, 而通过火焰喷涂方法得到的涂层较为粗糙。

3) 两种改性方法得到的碳纤维, 对水均具有较高的抽吸性能, 都符合环路热管对毛细芯的要求。通

过实验测定值分析, 在理论上, 以环路热管毛细芯的标准衡量, 化学镀铜方法制备的碳纤维抽吸特性更为优异。

4) 化学镀的方法对工艺要求更高, 而火焰喷涂工艺流程更简单且更容易实现规模化生产制作; 火焰喷涂可以使毛细芯在蒸汽侧和储液室侧覆盖不同的涂层, 有利于满足毛细芯对两侧导热系数的不同要求, 实现复合毛细芯的功能。

### 参考文献:

- [1] YU F, MAYDAN I K. Loop heat pipes[J]. Applied thermal engineering, 2005, 25: 635-657.
- [2] CHERNYSHEVA M A, VERSHININ S V, MAYDANIK Y F. Operating temperature and distribution of a working fluid in LHP[J]. International journal of heat & mass transfer, 2007, 50: 2704-2713.
- [3] VERSHININ S V, MAYDANIK Y F. Hysteresis phenomena in loop heat pipes[J]. Applied thermal engineering, 2007, 27: 962-968.
- [4] LIU J, ZHANG Y, FENG C, et al. Study of copper chemical-plating modified polyacrylonitrile-based carbon fiber wick applied to compact loop heat pipe[J]. Experimental thermal and fluid science, 2019, 100: 104-113.
- [5] MAYDANIK Y F, CHERNYSHEVA M A, PASTUKHOV V G. Review: Loop heat pipes with flat evaporators[J]. Applied thermal engineering, 2014, 67(1-2): 294-307.
- [6] JASVANTH V S, ADONI A A, JAIKUMAR V, et al. Design and testing of an ammonia loop heat pipe[J]. Applied thermal engineering, 2017, 111: 1655-1663.
- [7] FUKUSHIMA K, NAGANO H. New evaporator structure for micro loop heat pipes[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 106: 1327-1334.
- [8] WANG Y, CEN J, JIANG F, et al. LHP heat transfer performance: A comparison study about sintered copper powder wick and copper mesh wick[J]. Applied thermal engineering, 2016, 92: 104-110.
- [9] LI H, WANG X, LIU Z, et al. Experimental investigation on the sintered wick of the anti-gravity loop-shaped heat pipe[J]. Experimental thermal and fluid science, 2015, 68: 689-696.
- [10] ZHANG H, PAN Q, ZHANG H. Multi-scale porous copper foams as wick structures[J]. Materials letters, 2013, 106: 360-362.
- [11] ZOU S, WAN Z, LU L, et al. Bending behavior of porous sintered stainless steel fiber honeycombs[J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(2): 744-751.
- [12] WANG H, WANG F, LI Z, et al. Experimental inves-

- tigation on the thermal performance of a heat sink filled with porous metal fiber sintered felt/paraffin composite phase change material[J]. *Applied energy*, 2016, 176: 221-232.
- [13] LING W, ZHOU W, YU W, et al. Capillary pumping performance of porous copper fiber sintered wicks for loop heat pipes[J]. *Applied thermal engineering*, 2018, 129: 1582-1594.
- [14] LI Y, HE H, ZENG Z. Evaporation and condensation heat transfer in a heat pipe with a sintered-grooved composite wick[J]. *Applied thermal engineering*, 2013, 50(1): 342-351.
- [15] WANG C, CHEN L, LI J, et al. Enhancing the interfacial strength of carbon fiber reinforced epoxy composites by green grafting of poly (oxypropylene) diamines[J]. *Composites part A*, 2017, 99: 58-64.
- [16] 姚怀, 郭军华, 崔文聪, 等. 碳纤维化学镀镍表面改性研究[J]. *表面技术*, 2014, 43(5): 16-20.
- YAO Huai, GUO Jun-hua, CUI Wen-cong, et al. Study on electroless nickel plating for surface modification of carbon fiber[J]. *Surface technology*, 2014, 43(5): 16-20.
- [17] 龙国宁, 黄小忠, 陈金. 碳纤维表面 h-BN 耐高温涂层的制备及表征[J]. *表面技术*, 2015, 44(9): 84-88.
- LONG Guo-ning, HUANG Xiao-zhong, CHEN Jin. Preparation and characterization of h-BN high-temperature resistant coating on the surface of carbon fibers[J]. *Surface technology*, 2015, 44(9): 84-88.
- [18] 王云英, 孟江燕, 陈学斌, 等. 复合材料用碳纤维的表面处理[J]. *表面技术*, 2007, 36(3): 53-57.
- WANG Yun-ying, MENG Jiang-yan, CHEN Xue-bin, et al. Surface treatment of carbon fiber for composites[J]. *Surface technology*, 2007, 36(3): 53-57.
- [19] ELLISON A H, FOX H W, ZISMAN W A. Wetting of fluorinated solids by hydrogen-bonding liquids[J]. *The journal of physical chemistry*, 1953, 57(7): 622-627.
- [20] DYNES P J, KAEHLBLE D H. Surface energy analysis of carbon fibers and films [J]. *Journal of adhesion*, 2017, 84: 64.
- [21] DENG D, LIANG D, TANG Y, et al. Evaluation of capillary performance of sintered porous wicks for loop heat pipe[J]. *Experimental thermal and fluid science*, 2013, 50: 1-9.
- [22] DENG D, TANG Y, HUANG G, et al. Characterization of capillary performance of composite wicks for two-phase heat transfer devices[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2013, 56(1-2): 283-293.