

# 环路热管毛细芯热物性实验研究

李金旺, 邹勇, 程林

(山东大学热科学与工程研究中心, 山东省 济南市 250061)

## Experimental Study on Thermo Physical Properties of Capillary Wicks for Loop Heat Pipe

LI Jin-wang, ZOU Yong, CHENG Lin

(Institute of Thermal Science and Technology, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** Loop heat pipe capillary wicks with porosity in the range of 45%-80% were prepared using different forming pressure and different space-holder addition by powder metallurgy method. Thermal conductivity, thermal diffusivity and volume specific heat were studied using the transient plane source method. The relationships between thermo physical properties and porosity, forming pressure and space-holder addition were investigated. The result shows that thermal conductivity decreases with the increase of porosity, but there are no obvious relationship between thermal diffusivity, volume specific heat and porosity. Both thermal conductivity and volume specific heat of water saturated state capillary wicks are bigger than those of dry state ones, but there is no obvious similar rule for thermal diffusivity. Thermal conductivity increases while there are no obvious changing trends for thermal diffusivity and volume specific heat with the increase of forming pressure. Thermal conductivity and volume specific heat decrease while thermal diffusivity increases with the increase of space-holder addition.

**KEY WORDS:** capillary wick; thermal conductivity; thermal diffusivity; specific heat; transient plane source method

**摘要:** 采用粉末冶金的方法, 使用不同成型压力和不同造孔剂添加量制备了孔隙率为 45%~80% 的环路热管毛细芯。采用瞬态平面热源法, 研究了毛细芯的导热系数、热扩散系数和单位体积热容。总结得到了热物性参数与孔隙率以及制备这些毛细芯所使用的成型压力和造孔剂添加量之间的关系。结果表明, 随着孔隙率的增大, 导热系数呈现出单调下降的趋势, 但热扩散系数和单位体积热容却与孔隙率的关系并不明显。含水毛细芯的导热系数和单位体积热容均比相同参数下干态的要大, 但热扩散系数的情况却不一样。随着成型压力

的增大, 毛细芯的导热系数显著增大, 热扩散系数和单位体积热容变化情况不一。随着造孔剂添加量的增大, 毛细芯的导热系数和单位体积热容显著减小, 热扩散系数明显增大。

**关键词:** 毛细芯; 导热系数; 热扩散系数; 比热容; 瞬态平面热源法

## 0 引言

环路热管(loop heat pipe, LHP)是一种两相的高效传热装置, 具有传热温差小、传热性能高、远距离传输热量和控温特性良好等优点, 正逐渐被广泛应用于航天器控制和电子散热等领域<sup>[1-4]</sup>。LHP 利用蒸发器内的毛细芯产生的毛细力驱动回路运行, 进入蒸发器的热量使液体工质汽化, 然后沿蒸汽管路流动到冷凝器并释放给热沉, 实现环路热管内热量的正向流动; 与此同时, 不可避免有小部分热量以热传导的方式通过毛细芯进入蒸发器内核以及补偿器, 产生环路热管内热量的逆向流动, 从而降低了环路热管的性能。逆向流动的热量也称为热泄漏(heat leak)<sup>[5-7]</sup>。为减少环路热管的热泄漏, 应采用较小有效导热系数的毛细芯。但毛细芯的导热系数并不是孤立的, 设计毛细芯也要综合权衡毛细力、渗透率和导热系数等多个因素。

毛细芯是 LHP 最关键的部件之一<sup>[8]</sup>。不同成型压力和不同造孔剂添加量是 2 种用来制备不同参数毛细芯的最有效最常用的方法。成型压力越大, 压坯相对密度越大, 从而孔隙率越小, 因而, 为制备高孔隙率的毛细芯, 应使用较小的成型压力; 但是, 成型压力越小, 压坯的强度越差, 甚至无法成型<sup>[9]</sup>。此时, 为进一步提高孔隙率而不降低强度, 添加造孔剂是一种可行的办法。不同的制备参数必定会对毛细芯的热物性参数产生重要影响。对于多孔材料的导热系数, 前人提出了多种预测模型, 如 Series,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2007CB206900)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2007CB206900)。

Hadley, Parallel, Maxwell, Dul'nev 模型等等,但是这些模型的误差往往较大,不同模型之间的预测值甚至相差高达数十倍<sup>[10-12]</sup>。影响材料导热系数的物理、化学因素很多,很难采用理论方法进行估计,因此材料的导热系数数据主要依靠实验测量来获得<sup>[13]</sup>。Peterson 等人对镍芯和铜芯导热系数的研究表明导热系数是粉末材料、孔隙率、温度和含湿率的函数<sup>[14]</sup>。Bhattacharya 等人<sup>[15]</sup>和 Paek 等人<sup>[16]</sup>对金属泡沫材料导热系数的研究结果显示多孔材料导热系数受孔隙率影响,但与孔径尺寸的分布则关系不大。黄犊子等人<sup>[17]</sup>对建筑用砂与空气、水和冰组成的饱和多孔介质的有效热导率进行测量,结果表明砂的颗粒粒径大小对材料的有效热导率有较大影响。于明志等人<sup>[18]</sup>的研究表明,当含湿率低于 25% 时,使用 Hot Disk 热常数分析仪测量导热系数的结果误差较大,而含湿率高于 25% 时的结果则比较准确。现有文献中对导热系数的研究相对较多,但对热扩散系数和比热容的研究则较少,不同成型压力和造孔剂含量对毛细芯热物性的影响更是少有报道。鉴于此,本文首先采用粉末冶金的方法,以高纯镍粉为原料,使用不同成型压力和不同造孔剂添加量制备环路热管毛细芯,然后采用瞬态平面热源法研究这些毛细芯的导热系数、热扩散系数和单位体积热容,试图寻找这些热物性参数与孔隙率、成型压力和造孔剂添加量之间的关系。

## 1 实验方法

本文研究热物性参数主要采用了瞬态平面热源技术,它是由瑞典 Chalmers 理工大学的 Silas Gustafsson 等人在热线法的基础上发展起来的,其主要思想为,探头夹在试样之间,在探头上通过恒定的电流,由于温度的升高,探头的电阻将会发生变化,从而在探头两端将产生压差,通过记录一定时间内电流和电压的变化,从而可以得到探头和被测样品的热流信息,最终可计算得到被测样品的导热系数、热扩散系数和单位体积热容等热物性参数<sup>[19-21]</sup>。

实验时,探头以一定功率对试样进行加热,探头温度变化  $\overline{\Delta T(\tau)}$  与探头热阻  $R(t)$  的关系<sup>[19,21]</sup>为

$$R(t) = R_0 [1 + \alpha \overline{\Delta T(\tau)}] \quad (1)$$

式中:  $R_0$  为探头材料的初始热阻;  $\alpha$  为热阻系数;  $\overline{\Delta T(\tau)}$  为探头温度上升的平均值,其可由下式<sup>[19,21]</sup>进行计算:

$$\overline{\Delta T(\tau)} = P_0 D(\tau) / (\pi^{3/2} r k) \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为探头释放的热量;  $r$  为探头的半径;  $k$  为被测试样的导热系数;  $D(\tau)$  为探头几何形状特征函数,  $\tau$  为无量纲时间,可由下式进行计算:

$$\tau = \frac{\sqrt{at}}{r} = \sqrt{\frac{t}{\theta}} \quad (3)$$

式中:  $a$  为被测试样的热扩散系数;  $t$  为测试时间;  $\theta$  为特征测量时间,它可由下式<sup>[19]</sup>进行计算:

$$\theta = r^2 / a \quad (4)$$

因此式(1)可重写为

$$R(t) = R_0 + CD(\tau) \quad (5)$$

式中

$$C = aR_0P_0 / (\pi^{3/2} r k) \quad (6)$$

由以上分析得知,实验测量得到的  $R(t)$  和  $D(\tau)$  成线性关系,通过用不同的特征测量时间进行拟合,使得  $R(t)$  和  $D(\tau)$  的线性相关性达到最大值。最后,热扩散系数可由式(4)求得,导热系数则可由式(6)求得。单位体积热容则可由导热系数和热扩散系数的比值求得。此方法具有测试范围广、测量精度高、实验装置简单等优点,已被广泛应用于多孔介质、松散材料、液体等材料热物性参数的测量<sup>[13]</sup>。

本研究采用粉末冶金的方法制备实验所用的毛细芯。原料为 T-255 型高纯镍粉,造孔剂为微晶纤维素(microcrystalline cellulose, MCC)。烧结参数为:升温速度为 20 °C/min,烧结温度为 650 °C,烧结时间为 30 min。本文所有的热物性数值均是在室温(20.8 °C)时的测试值。

## 2 结果与讨论

环路热管正常工作时,毛细芯内是充满工作液体的。水是最常用的工作液体。本文对干态和含水(饱和) 2 种状态的毛细芯在室温下的导热系数进行了实验研究,结果如图 1 所示。文献[12]实验所测孔隙率为 55% 左右的含水多孔镍芯在室温下的导热系数的范围为 7.19~7.94 W/(m·K),本研究所测孔隙率为 54.6% 的含水多孔镍芯在室温下的导热系数为 7.29 W/(m·K),可见本文测试结果是可靠的。从图 1 可以看出,无论是干态的还是含水的毛细芯,随着孔隙率的增大,导热系数均呈现出单调下降的趋势,这与 Peterson 等人<sup>[14]</sup>对镍芯和铜芯导热系数的研究结果和文献[15-16]报道的金属泡沫材料的导热系数特性是吻合的。在其他参数相同的情况下,含水毛细芯的导热系数均比干态的要大。水的导热系数比空气的大,含水的毛细芯的导热系数自然会大于干态的。这与文献报道结果是一致的<sup>[12]</sup>。

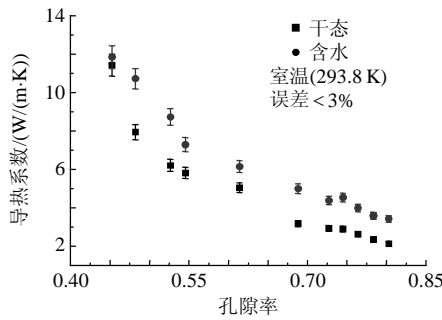


图 1 导热系数与孔隙率的关系

Fig. 1 The relationship between thermal conductivity and porosity

为减小环路热管内的热泄漏，毛细芯的导热系数应该尽量较小，增大孔隙率便是一种可行的办法。而在制备毛细芯时采用不同的成型压力是有效控制孔隙率的一种方法。本文对采用不同成型压力制备的毛细芯的导热系数进行了实验研究，结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，无论是干态的还是含水的情况，随着成型压力的增大，毛细芯的导热系数显著增大，因此，为获得较小的导热系数，制备毛细芯时应该采用较小的成型压力，但如果成型压力太小，将无法成功成型。在本实验中，发现当成型压力小于 10 MPa 时，脱模容易失败，难以成功。此时，为进一步提高孔隙率，添加造孔剂是一种可行的办法：配料时添加一定的造孔剂，在压制成型后造孔剂在一定条件下变成气体或溶解，从而可以增加孔隙率，烧结芯的性能也得到一定的改善。本文采用微晶纤维素作为造孔剂，成型压力固定为 20 MPa，当造孔剂添加量为 10%~40%(质量分数)时，制备出来的毛细芯的导热系数如图 3 所示。从图中可以看出，无论是干态的还是含水的情况，随着造孔剂添加量的增大，毛细芯的导热系数显著降低。

当造孔剂添加量一定(本研究固定为 40%)时，采用不同成型压力制备得到的毛细芯的导热系数如图 4 所示。从图中可以看出，无论是干态的还是

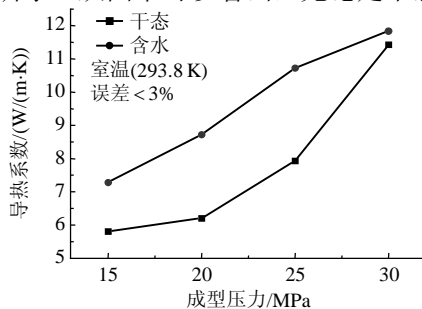


图 2 导热系数与成型压力的关系

Fig. 2 The relationship between thermal conductivity and forming pressure

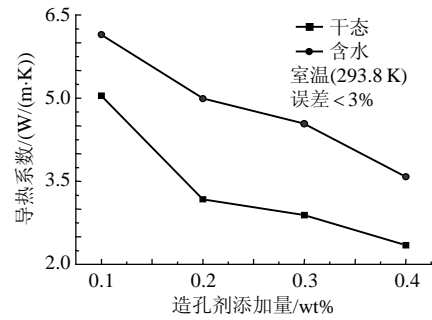


图 3 导热系数与造孔剂添加量的关系

Fig. 3 The relationship between thermal conductivity and space-holder addition

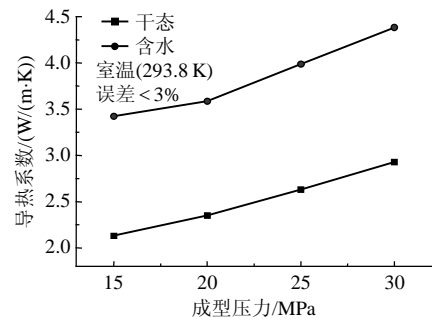


图 4 添加造孔剂情况下导热系数与成型压力的关系

Fig. 4 The relationship between thermal conductivity and forming pressure while using space-holder

含水的情况，随着成型压力的增大，毛细芯的导热系数显著增大，这与没有添加造孔剂情况下的变化趋势是一致的。然而，增加造孔剂后，即使采用较大的成型压力，仍可获得较小的导热系数的毛细芯。可见，采用添加适量造孔剂的方法，可以获得较大孔隙率、较高强度、导热系数较小的毛细芯。

热扩散系数和比热容也是十分重要的热物性参数，但关于毛细芯的这方面的研究却比较少。鉴于此，本文还对毛细芯在室温下的热扩散系数和单位体积热容进行了实验研究，结果分别如图 5 和图 6 所示。在图 5 和图 6 中，样品编号 1~4 为不同成型压力不添加造孔剂的情况，编号 5~8 为相同成型压力不同造孔剂添加量的情况，编号 9~12 为相同造孔剂添加量不同成型压力的情况，具体的参数数值见图 7。从图 5 和图 6 可以看出，热扩散系数和单位体积热容与成型压力和造孔剂添加量的变化关系并没有导热系数那么明显。但其中也有 2 点比较明显，一是当造孔剂添加量增大时，热扩散系数显著增大，单位体积热容与之相反；二是含水毛细芯的热扩散系数不一定比相同参数下干态的大，而含水毛细芯的导热系数和单位体积热容均比相同参数下干态的要大。毛细芯因存在结构复杂的孔隙，除了金属镍材料本身的电子热传导、声子热传

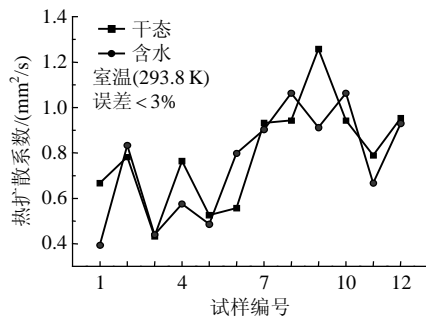


图5 不同毛细芯的热扩散系数

Fig. 5 Thermal diffusivity of different capillary wicks

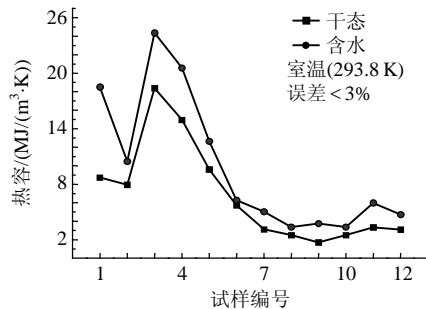


图6 不同毛细芯的单位体积热容

Fig. 6 Volume specific heat of different capillary wicks

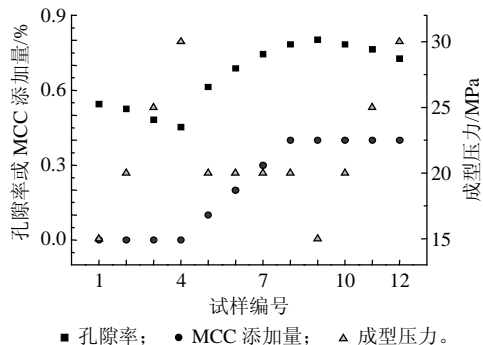


图7 毛细芯各试样对应参数

Fig. 7 Parameters of each capillary wick sample

导和光子热传导之外,还多了这些孔隙或填充这些孔隙的工作液体介质对热传导的阻碍(也即热阻),从而对毛细芯的热扩散系数和热容值产生了很大的影响。

### 3 结论

本文首先采用粉末冶金的方法,以高纯镍粉为原料,使用不同成型压力和不同造孔剂添加量制备了孔隙率为45%~80%的环路热管毛细芯。然后采用瞬态平面热源法,研究了室温下(20.8℃)干态和含水(饱和)2种状态的环路热管毛细芯的导热系数、热扩散系数和单位体积热容,总结得到了这些热物性参数与孔隙率、成型压力和造孔剂添加量之间的关系。对于烧结镍基毛细芯,在室温的情况下,可总结得到如下的规律:

1) 随着孔隙率的增大,导热系数呈现出单调下降的趋势,但热扩散系数和单位体积热容却与孔隙率的关系并不明显。

2) 含水毛细芯的导热系数和单位体积热容比同参数下干态的要大,但热扩散系数的情况却不一样。

3) 随着成型压力的增大,毛细芯的导热系数显著增大,热扩散系数和单位体积热容变化情况不一。

4) 随着造孔剂添加量的增大,毛细芯的导热系数和单位体积热容显著降低,热扩散系数明显增大。采用添加适量造孔剂的方法,可以获得较大孔隙率、较高强度、导热系数较小的毛细芯。

### 参考文献

- [1] Maydanik Y. Loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5-6): 635-657.
- [2] Vasiliev L, Lossouarn D, Romestant C, et al. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(1-2): 301-308.
- [3] Yeh C, Liu B, Chen Y. A study of loop heat pipe with biporous wicks[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, 44(12): 1537-1547.
- [4] 姚寿广, 马哲树, 陈如冰. 一种新型结构的热管式散热冷板性能的数值模拟试验与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 41-45. Yao Shouguang, Ma Zheshu, Chen Rubing. Numerical experimental study and analysis of performance for heat pipe cooling flat-plate with a newly structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 41-45(in Chinese).
- [5] Adoni A, Ambirajan A, Jasvanth V, et al. Thermohydraulic modeling of capillary pumped loop and loop heat pipe[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2007, 21(2): 410-421.
- [6] Bai L, Lin G, Zhang H, et al. Mathematical modeling of steady-state operation of a loop heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(13): 2643-2654.
- [7] Furukawa M. Model-based method of theoretical design analysis of a loop heat pipe[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(1): 111-121.
- [8] 任川, 吴青松. 孔隙率和渗透率对LHP主芯性能影响研究[J]. 工程热物理论, 2007, 28(4): 634-636. Ren Chuan, Wu Qingsong. Effect of porosity and permeability on performances of loop heat pipe's wick[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 634-636(in Chinese).
- [9] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.
- [10] Singh R, Akbarzadeh A, Mochizuki M. Effect of wick characteristics on the thermal performance of the miniature loop heat pipe[J]. Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME, 2009, 131(8): 082601-082610.
- [11] Atabaki N, Baliga B. Effective thermal conductivity of water-saturated sintered powder-metal plates[J]. Heat and Mass Transfer, 2007, 44(1): 85-99.
- [12] Mo S, Hu P, Cao J, et al. Effective thermal conductivity of moist porous sintered nickel material[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(1): 304-313.

- [13] 魏高升, 杜小泽, 于帆, 等. 瞬态热带法热物性测试技术中加热功率的选取[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 44-47.  
Wei Gaosheng, Du Xiaoze, Yu Fan, et al. Selection of heating power in thermophysical property measurement with transient hot-strip method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 44-47(in Chinese).
- [14] Peterson G, Fletcher L. Effective thermal conductivity of sintered heat pipe wicks[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1987, 1(4): 343-347.
- [15] Bhattacharya A, Calmidi V, Mahajan R. Thermophysical properties of high porosity metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(5): 1017-1031.
- [16] Paek J, Kang B, Kim S, et al. Effective Thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials[J]. International Journal of Thermophysics, 2000, 21(2): 453-464.
- [17] 黄犊子, 樊栓狮. 采用 HOTDISK 测量材料热导率的实验研究[J]. 化工学报, 2003, 54(增刊): 67-70.  
Huang Duzi, Fan Shuanshi. Experimental study of thermal conductivity measurement with HOTDISK[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(Suppl.): 67-70(in Chinese).
- [18] 于明志, 隋晓凤, 彭晓峰, 等. 含湿率对多孔介质热导率测量准确性的影响[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2768-2773.  
Yu Mingzhi, Sui Xiaofeng, Peng Xiaofeng, et al. Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(11): 2768-2773(in Chinese).
- [19] Gustafsson S, Karawacki E, Khan M. Transient hot-strip method for simultaneously measuring thermal-conductivity and thermal-diffusivity of solids and fluids[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1979, 12(9): 1411-1421.
- [20] Gustafsson S. Transient plane source techniques for thermal-conductivity and thermal-diffusivity measurements of solid materials [J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(3): 797-804.
- [21] Solorzano E, Reglero J, Rodriguez-Perez M, et al. An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25-26): 6259-6267.



李金旺

收稿日期: 2010-02-23。

作者简介:

李金旺(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事环路热管相关方面的研究, jinwang\_li@163.com;

邹勇(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事换热器抑垢、环路热管、金属材料等相关方面的研究, yzou@sdu.edu.cn;

程林(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者, 973 项目首席科学家, 主要从事强化传热与节能技术相关方面的研究, cheng@sdu.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)