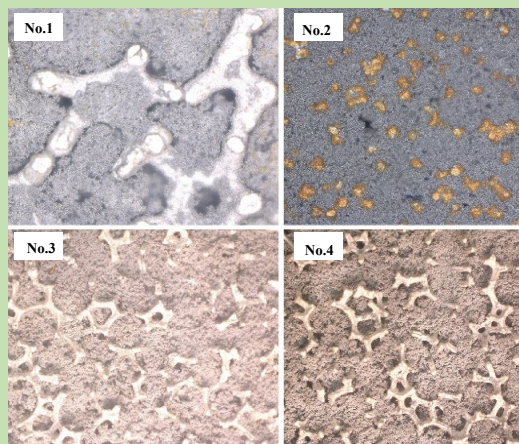


Physical properties test of a composite porous wick based on foam metal

Dongdong WANG*, Pengjie LIU, Huaqiang CHU, Jinxin WANG, Houyang LU

School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract: In order to improve the heat and mass transfer performance of porous wicks, a composite porous wick was prepared by using copper or nickel foam as the skeleton and filling with the dendritic copper or nickel powders in this work. The foam metal can provide reliable porous framework and good heat transfer performance. And the dendritic metal powders can regulate the pore structure and pore size distribution inside the foam metal. The physical properties of the composite porous wick, including the porosity, capillary pumping capacity, effective thermal conductivity and evaporating rate, were studied experimentally. The prepared composite porous wicks had high porosity and low effective thermal conductivity in the range of 4.1~9.8 W/(m·K). According to the filling amount of metal powders and the microstructure of samples, the foam nickel and dendritic nickel powder were the most suitable combination for loose sintering of composite porous wick. Porosity had little effect on capillary pumping capacity of the composite porous wicks, but the porous structure and pore size distribution of porous wicks can cause the obvious effect. Due to the use of metal foam as skeleton, partial evaporation can be formed locally on the surface of composite porous wicks, and heat transfer equilibrium can be achieved by surface evaporation at low heat load of 30 W. Increase the heat load to 50 W or 70 W, local temperature on composite porous wick was over 100 °C, and heat transfer entered the meniscus evaporation inside composite porous wick. Based on capillary pumping characteristics, effective thermal conductivities and evaporating rates in these porous samples, the composite porous wick with nickel foam as the skeleton and the mass ratio of dendritic nickel powder to the pore former of 5:5 had the best performance. The simple preparing method for the composite porous wick was proposed, and it was expected to be used for further practical application in loop heat pipe.



Key words: foam metal; composite porous wick; capillary pumping characteristics; effective thermal conductivity; evaporating rate

收稿: 2019-10-09, 修回: 2019-11-17, 网络发表: 2019-12-09, Received: 2019-10-09, Revised: 2019-11-17, Published online: 2019-12-09
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51706001); 安徽省自然科学基金资助项目(编号: KJ2016A095)
作者简介: 汪冬冬(1987-), 男, 安徽省桐城市人, 讲师, 工程热物理专业, E-mail: wangdd526@163.com.

引用格式: 汪冬冬, 刘朋杰, 楚化强, 等. 基于泡沫金属的复合毛细芯的物性测试. 过程工程学报, 2020, 20(7): 852-859.
Wang D D, Liu P J, Chu H Q, et al. Physical properties test of a composite porous wick based on foam metal (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(7): 852-859, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219310.

基于泡沫金属的复合毛细芯的物性测试

汪冬冬*, 刘朋杰, 楚化强, 王金新, 卢厚杨

安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002

摘要: 为改进毛细芯的传热传质性能, 以泡沫金属铜或镍为骨架, 在其内部填充树形金属铜粉或镍粉, 通过树形金属粉末调控泡沫金属内的孔隙结构及孔径分布, 制备出一种以金属泡沫为基底的复合毛细芯, 并对制备的复合毛细芯的孔隙率、抽吸性能、有效热导率及蒸发率进行研究。结果表明, 这种结构的复合毛细芯孔隙率较高, 有效热导率为 $4.1\sim 9.8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。从毛细芯毛细抽吸、有效热导率和蒸发率综合来看, 以金属泡沫镍为骨架、树形镍粉末与造孔剂质量比为 5:5 的复合毛细芯性能最好。

关键词: 泡沫金属; 复合多孔毛细芯; 抽吸性能; 有效热导率; 蒸发率

中图分类号: TK172.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)07-0852-08

1 前言

环路热管(Loop Heat Pipe, LHP)是一种高效被动的相变传热装置, 在航天器热控及电子器件散热等领域具有良好的应用前景^[1]。毛细芯是 LHP 的核心部件, 为系统提供循环动力和相变界面, 直接决定 LHP 的运行性能。

毛细芯的孔隙结构和物性直接影响 LHP 的运行性能。毛细芯的高孔隙率对应着高渗透率, 同时毛细芯内拥有较多的孔隙空间, 从而可容纳更多的流体工质满足内部相变时的供液。在孔隙率一致的情况下, 毛细芯内部的孔径分布可能有所不同。毛细芯内较小的孔径可保证较高的毛细抽力, 但会增加工质在其内部的流动阻力。而毛细芯内的大孔径对应着高渗透率, 即更好的工质传输能力, 这样 LHP 能适应更高的热负荷。但同时毛细芯的大孔径会造成毛细抽力不足, 甚至在某些方位下无法启动 LHP 系统。LHP 运行过程中, 毛细芯的热物性也直接影响其运行性能。当毛细芯的有效热导率较高时, 穿过毛细芯向补偿腔的热泄露较严重, 甚至在毛细芯的背面发生相变产生气泡, 影响其向加热面的供液, 造成 LHP 启动或运行失败。

为提高毛细芯的工作性能, 国内外学者对毛细芯材料、结构和制备工艺等进行了相关研究^[2-4]。Kurt 等^[5]通过实验研究了烧结参数对毛细芯孔隙率的影响, 发现孔隙率随烧结温度和烧结时间增加而降低。李金旺等^[6-8]对烧结镍粉毛细芯进行实验研究, 发现当成型压力增大 10 MPa 时, 孔隙率降低 6.32% 。通过分析毛细芯孔隙率和渗透率与抽吸特性的关系, 结合理论提出了一种毛细芯抽吸模型, 并根据达西定律推导出抽吸质量随时间的

变化关系式, 最后依据抽吸模型提出了一种测量毛细芯渗透率的方法。为保证毛细芯的高孔隙率和高渗透率, 制备过程中的成型压力不宜过高。

通过不同的造孔方法及不同材料间的混合烧结, 可降低毛细芯的有效热导率^[9-11]。孔隙率越高, 毛细芯有效热导率越低; 孔隙率相同时, 孔径较小, 孔径分布更集中的毛细芯有效热导率较低。崔可航等^[12]采用瞬态平面热源法测量了烧结镍毛细芯的干态和湿态有效热导率, 实验测得干态下毛细芯的有效热导率为 $11.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 湿态下有效热导率为 $13.9\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。烧结毛细芯的有效热导率相对制备用的金属粉末降低很多。为降低有效热导率, 可提高毛细芯的孔隙率, 或采用不同的金属粉末混合烧结。

为保证毛细芯内部的工质蒸发和传热及毛细芯的高抽吸性能, 要求其具有较小的孔径和较高的局部导热系数, 同时具有较低的有效热导率。基于以上考虑, 本工作提出了一种以金属泡沫为基底的复合毛细芯。采用泡沫金属铜或镍为骨架, 在其内部填充树形金属铜粉或镍粉制备复合多孔毛细芯, 通过树形金属粉末调控泡沫金属内的孔隙结构及孔径分布。泡沫金属具有质轻和孔隙率高的特点, 但其孔径一般高于 LHP 内毛细芯的要求(常用的毛细芯孔径在几微米到几十微米)。通过在泡沫金属的孔隙内填充树形金属粉末, 可减小其孔径, 同时泡沫金属的骨架可保证成型后的毛细芯仍然具有较高的孔隙率。预期制备的泡沫金属复合毛细芯具有较低的热导率, 同时金属材料又能保证较高的局部热导率强化表面蒸发。对制备的复合毛细芯样品进行孔隙率、抽吸性能、有效热导率和蒸发率测量, 分析比较复合材料、结构对毛细芯传热传质特性的影响。

2 实验

2.1 毛细芯制备

本实验选用金属泡沫铜或泡沫镍(隆圣宝电子材料有限公司)为骨架,在其内部填充树形结构的金属铜粉

或镍粉(佳诺金属材料有限公司)。图 1 为泡沫金属样品的显微镜放大图。可以看出,金属泡沫铜和泡沫镍的孔隙结构相似,且孔隙率均较高。每一个大的泡沫孔隙均与多个大孔隙相邻,有利于金属粉末与造孔剂(广诺化学科技有限公司)的混合粉末在其内部填充。

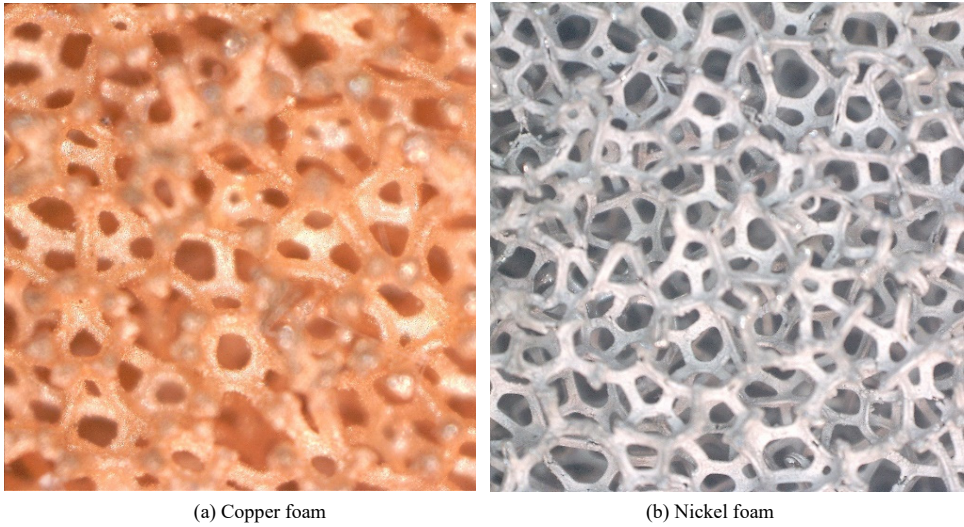


图 1 泡沫金属样品的显微镜照片
Fig.1 Microscopic images of foam metal samples

表 1 复合毛细芯制备材料及配比
Table 1 Material and proportion for preparing composite porous wick

Sample	Skeleton	Diameter×height/(mm×mm)	Dendritic powder	Mass ratio of dendritic powder to spherical pore former
No.1	Nickel foam	40.0×11.0	Nickel	5:3
No.2	Copper foam	40.0×9.0	Nickel	5:3
No.3	Nickel foam	40.0×11.0	Nickel	5:4
No.4	Nickel foam	40.0×11.0	Nickel	5:5
No.5	Nickel foam	40.0×11.0	Copper	5:3
No.6	Copper foam	40.0×9.0	Copper	5:3

为保证毛细芯的高孔隙率,将树形金属粉末与球形造孔剂先按照一定比例混合后再填充进入泡沫金属内。本实验中所用树形铜粉松装密度为 2.31 g/cm³,树形镍粉密度为 1.00 g/cm³。实际的孔隙填充率与泡沫金属内部的孔隙大小有关。由于树形镍粉具有较大的长径比,可方便地填充泡沫金属,而电解得到的树形铜粉的长径比相对较低,单个树形铜粉在孔隙内的体积占比更高。根据设定的孔隙填充及前期的毛细芯制备基础,设定了金属粉末与造孔剂的配比,为制备方便转换成质量比进行称量。另外,泡沫金属镍具有更低的热导率,有利于得到有效热导率更低的复合毛细芯。因此,通过不同材料和配比的组合,制备了 6 个复合毛细芯样品,其基本参数见表 1。可以看到,选用的泡沫金属直径均为 40.0 mm,其中泡沫铜内部的孔径约为 0.2 mm,孔隙率为

91.6%,泡沫镍内部的孔径约为 0.7 mm,孔隙率为 95.1%。对泡沫铜和泡沫镍填充相同的树形镍粉末得到复合毛细芯样品 1 和 2;对泡沫镍填充不同比例的混合粉末得到样品 3 和 4;对泡沫铜和泡沫镍填充相同的树形铜粉末得到复合毛细芯样品 5 和 6。

2.2 毛细抽吸测量装置

烧结毛细芯的毛细抽吸力通常较大,而应用的毛细芯实际高度均较小,完成抽吸过程所需时间较短。且毛细抽吸高度在毛细芯内部可能是不均匀的。因此,本工作通过测量多孔毛细芯的毛细抽吸质量随时间变化的特性,比较了不同毛细芯的抽吸性能。

通过如图 2 所示的自制毛细抽吸质量测量装置进行不同毛细芯的抽吸性能对比实验。实验时,缓慢下降毛细芯直至其下表面接触 JJ523BC 型电子天平(常熟市双

杰测试仪器厂)上储液池的液面, 此时毛细抽吸过程快速发生, 很快完成抽吸使毛细芯达到饱和。通过记录抽吸过程中电子天平的质量变化计算毛细芯的抽吸质量。由于不同复合毛细芯的高度有所不同, 其总抽吸质量也不同。为比较不同毛细芯的抽吸性能, 对单位体积复合毛细芯的抽吸质量进行对比。

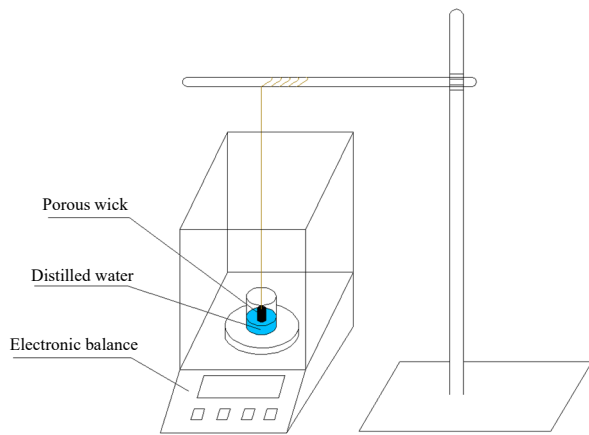


图 2 毛细抽吸质量测量装置
Fig.2 Measuring equipment for capillary pumping mass

2.3 有效热导率测量装置

利用标准样本参比法测试复合毛细芯的有效热导率, 选择紫铜块(马钢下属加工厂的纯铜棒)为标准样本, 将烧结毛细芯固定在上下铜块之间, 上铜块利用加热棒进行加热, 下铜块底部浸入冰水混合物中, 在装置外包裹保温材料, 在测试系统两侧从上到下依次对称地布置 8 个热电偶进行测温, 如图 3 所示。系统温度稳定后, 利用傅里叶一维稳态导热基本定律计算毛细芯有效热导率。

2.4 蒸发率测量装置

通过自制的实验装置对毛细芯蒸发率进行测量, 如图 4 所示。将毛细芯固定在加热块底部与蒸汽槽道紧密贴合, 将其放置在固定架上并保持水平。将装有蒸馏水的透明容器置于电子天平上, 称量 400 g 蒸馏水, 然后将毛细芯浸入天平上方的蒸馏水中。热量经过加热面传至毛细芯, 工质在毛细芯内受热开始蒸发而形成相变界面。由于毛细力的作用, 工质克服重力及毛细芯内部阻力流向毛细芯上部进行供液蒸发。

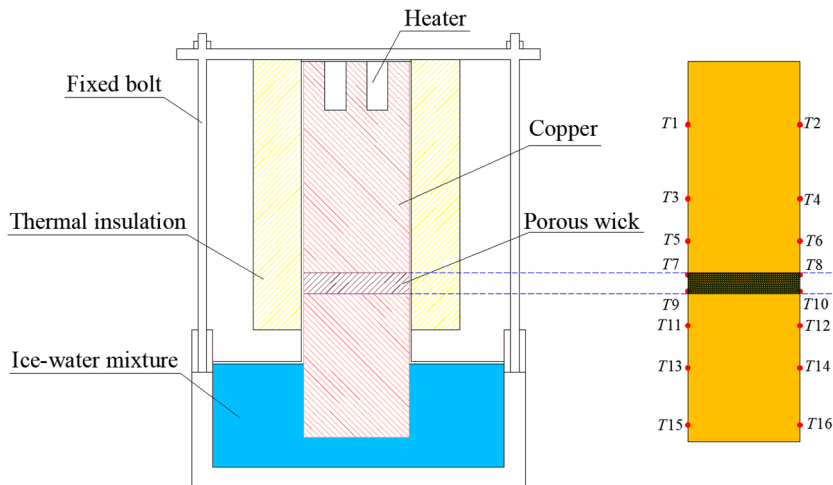


图 3 有效热导率测量装置
Fig.3 Measuring equipment for effective thermal conductivity

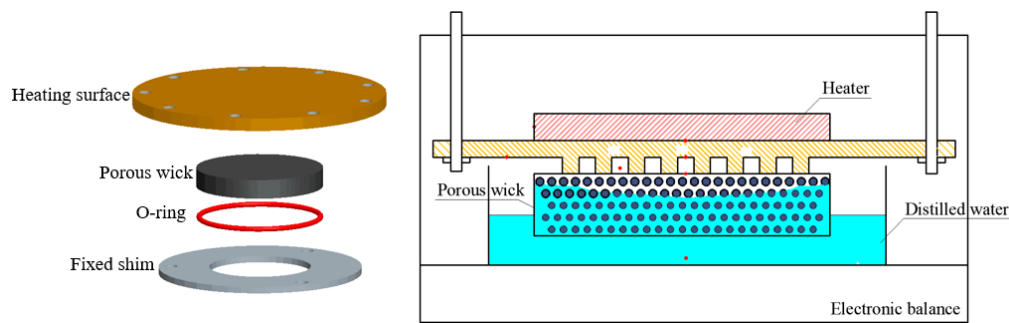


图 4 蒸发率测量装置
Fig.4 Measuring equipment of evaporating rate

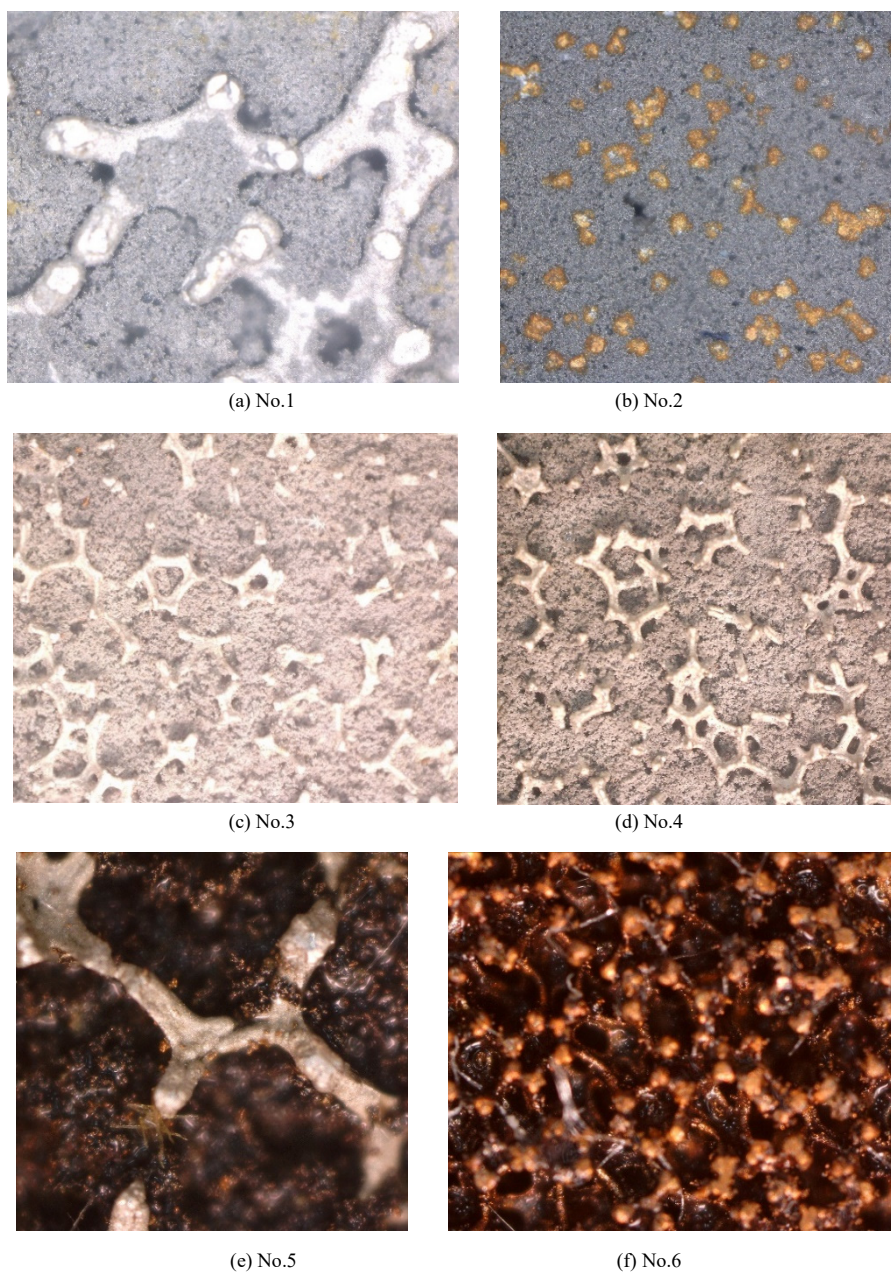


图 5 泡沫金属复合毛细芯样品的显微镜照片

Fig.5 Microscopic images of composite porous wick samples based on foam metal

2.5 毛细芯样品形貌特征

通过对泡沫铜和泡沫镍填充混合粉末进行烧结,用显微镜得到的复合毛细芯样品形貌特征如图 5 所示。可以看到,树形镍粉在泡沫金属内有较好的填充效果(样品 1~4),而树形铜粉在泡沫金属内的填充效果相对较差(样品 5, 6),填充的树形粉末主要依附在泡沫金属的骨架上。以金属泡沫为基底的复合毛细芯内部孔隙包括填充的树形粉末间形成的小孔隙及造孔剂带来的大孔隙。另外,填充的金属粉末与泡沫金属的骨架间也有孔隙存在,且在泡沫金属的支架与结合处具有不同的孔隙特征。

3 结果与讨论

本工作主要测量复合毛细芯的孔隙率、抽吸性、有效热导率和蒸发率。

3.1 孔隙率

为比较填充前后的孔隙率变化,将泡沫金属填充前的骨架孔隙率和填充后的样品孔隙率进行对比,结果如图 6 所示。可以看出,由于采取了松装烧结并添加了造孔剂,制备出的各个复合毛细芯样品的孔隙率仍较高,均约达 80%。6 号泡沫铜与树形铜粉的复合毛细芯样品孔隙率变化最小,仅有 5.1 个百分点。这是由于泡沫铜

内部的孔径相对较小, 且未进行冷压处理, 混合粉末不容易进入泡沫金属内部, 而是主要填充在泡沫金属外层, 因此所得复合毛细芯的孔隙率较高。值得注意的是, 在造孔剂占比相同的情况下, 2 号泡沫铜与金属镍复合芯样品与 5 号泡沫镍与金属铜复合芯样品的孔隙率变化较大, 分别提高 14.2 和 13.7 个百分点。这两个样品为不同种金属的组合, 表明不同种金属的复合有利于金属粉末在泡沫金属内的烧结成型。且在烧结时, 铜与镍发生互溶产生镍铜合金相^[12], 在烧结过程中融合在孔隙内形成光滑的表面, 有利于内部小孔隙的抽吸, 从而表现出更高的孔隙率。

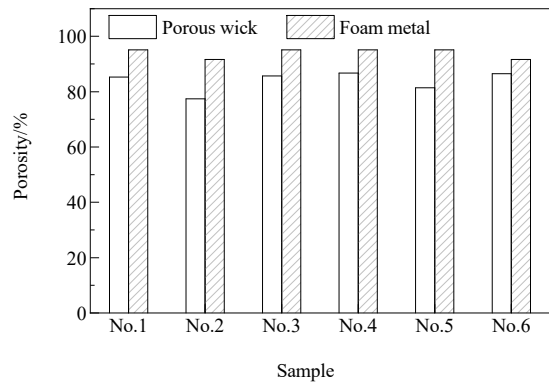


图 6 复合毛细芯样品孔隙率的比较
Fig.6 Comparison of porosity of composite porous wick samples

3.2 毛细抽吸性能

图 7 为各毛细芯样品单位体积抽吸质量与孔隙率。可以看出, 虽然 1 号毛细芯的孔隙率较高, 且由实验测得总抽吸质量较大, 但该毛细芯单位体积抽吸质量却最小, 表明 1 号毛细芯的抽吸性能相对较差。1, 3, 4 和 6 号毛细芯样品的孔隙率较大, 其中 3 和 4 号毛细芯样品的单位体积抽吸质量较大, 而 1 和 6 号毛细芯样品的单位体积抽吸质量较小, 表明孔隙率并不能决定抽吸能力的大小。对比 1, 3 和 4 号毛细芯样品可知, 虽然三者孔隙率相近, 但其单位体积最大抽吸质量随造孔剂含量增加而增加。孔隙率相同时, 各样品的孔径分布有所不同, 表明复合毛细芯内孔隙结构对抽吸性能有显著影响^[13]。比较 2 和 6 号毛细芯样品的单位体积抽吸质量, 可知在泡沫铜内添加树形镍粉有利于毛细抽吸。

3.3 有效热导率

由表 2 可以看出, 1, 3, 4, 5 号这四个以泡沫镍作为骨架的毛细芯有效热导率十分相近。而 2 和 6 号这两个以泡沫铜作骨架的毛细芯样品有效热导率相对较高。

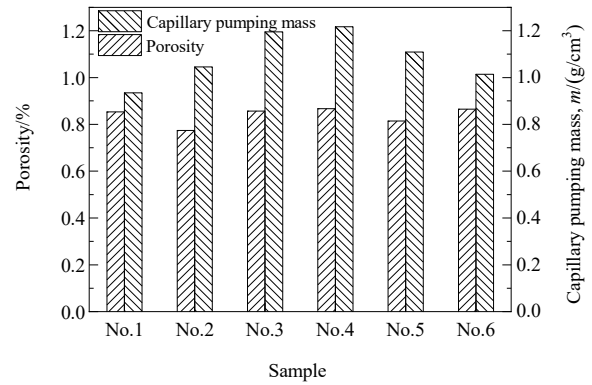


图 7 复合毛细芯单位体积抽吸质量及孔隙率
Fig.7 Comparison of capillary pumping mass in unit volume and porosity of composite porous wick samples

其中, 2 号样品热导率最高, 达 9.8 W/(m·K)。为研究泡沫骨架对热导率的影响, 对原泡沫骨架也进行了热导率测量, 得泡沫镍骨架有效热导率为 1.5 W/(m·K), 而泡沫铜骨架有效热导率较高, 为 7.0 W/(m·K)。虽然泡沫镍孔径较大, 其中的孔隙对有效热导率有所影响, 但不可否认的是, 由于材料的影响, 泡沫铜骨架的导热性能更强, 这直接影响了各样品的有效热导率。值得注意的是, 6 号毛细芯样品有效热导率与原泡沫金属热导率较接近, 可认为 6 号粉末填充量很小且填充的粉末较分散。

表 2 复合毛细芯的有效热导率
Table 2 Effective thermal conductivities of composite porous wick samples

Sample	Effective thermal conductivity/[W/(m·K)]
No.1	4.9
No.2	9.8
No.3	4.5
No.4	4.2
No.5	4.1
No.6	7.1

对比 1, 3 和 4 号毛细芯样品可以发现, 随造孔剂占比提高, 复合毛细芯的有效热导率逐渐降低。这是因为造孔剂含量增加, 造成毛细芯的平均孔径增大, 导致其有效热导率减小。2 和 5 号毛细芯样品有效热导率相对其制备材料(纯铜和镍)的单独热导率降低很多, 可见不同种类金属复合有利于毛细芯有效热导率的降低。推测在烧结时, 铜与镍由于 Kirkendall 效应发生互溶, 产生镍铜合金相。而合金的导热率低于其各组元的导热率, 因此烧结所得复合毛细芯的有效热导率仍较低。

3.4 蒸发率

图8为系统在不同热负荷下达到稳态后各样品的蒸发率。为减小随机误差的影响,采用各加热功率下稳态工况的100组质量变化数据,计算后取平均值得其蒸发率。可以看出,除1号毛细芯样品在70 W的蒸发率较低外,其余样品在各加热功率下蒸发率均较接近。

在30 W热负荷下,各毛细芯样品蒸发率均较低。由于热负荷较低,各样品在达到稳定工况后30 min内,毛细芯最高温度的上表面处仍未达100℃。此时,毛细芯内部没有形成相变界面,主要通过蒸汽槽道和毛细芯的外表面进行蒸发传热,这种工况下的蒸发率较低。其中,2号毛细芯样品蒸发率最大。这是由于该复合毛细芯具有较高的有效热导率,有利于毛细芯表面的温升从而促进表面蒸发。另外,金属泡沫铜具有较高的热导率,同时内部的树形镍粉填充较充分,均有利于毛细芯的表面蒸发,造成该毛细芯在低热负荷下的蒸发传热效果较好。

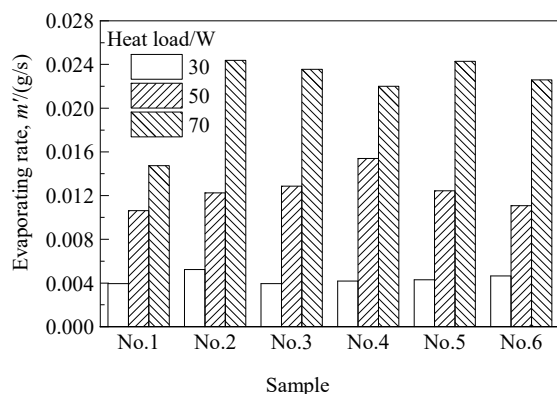


图8 复合毛细芯的稳态蒸发率

Fig.8 Evaporating rates of composite porous wick samples in steady stage under different heat loads

在50 W热负荷下,相较于30 W时各毛细芯样品的蒸发率大幅上升。此时,毛细芯的上表面温度超过100℃,实验中观察到蒸汽槽道已无液体工质存在,表明蒸发界面深入毛细芯的内部,在毛细芯内部形成弯液面进行蒸发。由于毛细芯内部存在较多的孔隙结构,可提供更多的蒸发界面,有利于弯液面的蒸发传热,因此此时的蒸发率较高。其中,4号毛细芯样品的蒸发率最大,这是因为其孔隙率和抽吸性能均较好。且4号毛细芯的有效热导率较低,穿过毛细芯进入储液器的漏热减小,这也有利于毛细芯内的弯液面蒸发。

在70 W热负荷下,除1号毛细芯外各样品蒸发率都很大,均可达0.020 g/s以上。其中,4号毛细芯样品蒸发率略低。这是因为前期蒸发较快,毛细芯在实验达

到稳态时已部分脱离工质液面,造成蒸发供液的流动阻力增大,导致毛细芯蒸发率有所降低。热负荷为50和70 W时,4号毛细芯样品经历蒸汽槽道内蒸发、沸腾及进一步在毛细芯内形成弯液面的转化阶段,该热负荷区间处于相变传热模式的转变区域,受到初始条件的影响较大,从而出现这两种热负荷下蒸发率规律不一致的情况。

总体而言,除了1号毛细芯外,其余样品在各功率下表现均较好,其中4号毛细芯的真实蒸发率最高。而1号毛细芯由于内部的孔隙未达预期的烧结效果,这点从毛细抽吸质量也可看出,从而造成蒸发传热过程中的供液较差,恶化了传热效果。

对于毛细芯的综合性能,单位体积抽吸质量越高,表明其抽吸能力越强;低有效热导率有利于降低毛细芯的漏热;高蒸发率有利于提升毛细芯内工质相变的热量传递。从上述实验结果综合考虑比较,4号复合毛细芯的综合性能最好,表明这种复合毛细芯较优的制备条件为以金属泡沫镍为骨架、树形镍粉末与造孔剂质量比5:5。

4 结论

以泡沫金属铜或镍为骨架,在其内部填充树形金属铜粉或镍粉,制备了一种泡沫金属基底的复合毛细芯。通过对复合毛细芯的孔隙率、抽吸性、有效热导率及蒸发率进行研究,得到以下结论:

- (1) 从金属粉末填充量和样品微观形貌看,松装烧结时泡沫镍与金属镍粉末的复合形式最适合。
- (2) 以泡沫金属为骨架制备的复合毛细芯孔隙率较高。孔隙率对毛细抽吸性能的影响较小,而孔隙结构的影响较明显。
- (3) 泡沫金属复合毛细芯样品有效热导率为4.1~9.8 W/(m·K)。不同种类金属的复合也有助于有效热导率的降低。
- (4) 在30 W热负荷下,由于毛细芯内部未发生相变,蒸发率较低,而在50和70 W的热负荷下进入毛细芯内的弯液面蒸发,蒸发率较高。
- (5) 从毛细芯的毛细抽吸性能、有效热导率和蒸发率综合来看,以金属泡沫镍为骨架,树形镍粉末与造孔剂质量比为5:5的复合毛细芯性能最好。

参考文献

- [1] Li H, Liu Z C, Chen B B, et al. Development of biporous wicks for flat-plate loop heat pipe [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2012, 37(2): 91-97.

- [2] Liu Z C, Liu W, Nakayama A. Flow and heat transfer analysis in porous wick of CPL evaporator based on field synergy principle [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2007, 43(12): 1273–1281.
- [3] Ren C, Wu Q S, Hu M B. Heat transfer in loop heat pipe's wick: effect of porous structure parameters [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2012, 21(4): 702–711.
- [4] Ahmed Y M Z, Riad M I, Sayed A S, et al. Correlation between factors controlling preparation of porous copper via sintering technique using experimental design [J]. *Powder Technology*, 2007, 175(1): 48–54.
- [5] Kurt A, Ates H. Effect of porosity on thermal conductivity of powder metal materials [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(1): 230–233.
- [6] 李金旺, 邹勇, 赵亮, 等. 环路热管吸液芯毛细抽吸特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(5): 839–841.
Li J W, Zou Y, Zhao L, et al. Capillary pumping characteristics of porous wick for loop heat pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(5): 839–841.
- [7] Li J W, Zou Y, Cheng L. Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2010, 34(8): 1403–1408.
- [8] 李金旺, 邹勇, 程林. 多孔结构毛细抽吸性能及渗透率测量实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(11): 95–99.
Li J W, Zou Y, Cheng L. Experimental study on capillary pumping performance and permeability measurement of porous structure [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(11): 95–99.
- [9] Xu J Y, Zou Y, Fan M X, et al. Effect of pore parameters on thermal conductivity of sintered LHP wicks [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(9/10): 2702–2706.
- [10] Qu Y, Zhou K, Zhang K F, et al. Effects of multiple sintering parameters on the thermal performance of bi-porous nickel wicks in loop heat pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 99: 638–646.
- [11] Xin G M, Cheng L. Investigation of lower thermal conductivity Ni–Cu wicks for loop heat pipes [C]//ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2012: 2731–2734.
- [12] 崔可航, 辛公明, 程林, 等. 环路热管毛细芯有效导热系数的实验研究 [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.
- [13] 余廷芳, 柳阿亮, 张莹, 等. 孔隙分布对多孔介质内流动和传热的影响 [J]. *过程工程学报*, 2018, 18(3): 469–476.
Yu T F, Liu A L, Zhang Y, et al. Effect of pore distribution on flow and heat transfer in porous media [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(3): 469–476.