

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170618

烧结参数对镍粉毛细芯性能的影响

宋赫, 董景明, 韩志涛, 陈旭立, 李策略, 潘新祥

(大连海事大学轮机热能工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 毛细芯(多孔介质)是环路热管的核心部件, 金属粉末烧结是目前制备毛细芯的常用方法, 研究烧结参数对毛细芯性能的影响有利于提高环路热管的性能。以镍粉为原料, 利用烧结的方法制备了具有不同烧结参数的毛细芯, 实验研究了烧结参数对毛细芯微观结构和性能参数的影响。实验表明, 烧结参数对毛细芯的微观结构和性能参数具有明显的影响。随着烧结温度的升高和保温时间的延长, 毛细芯的孔隙率、平均孔径和渗透率呈下降趋势; 毛细芯的抽吸质量和抽吸速率与毛细芯的渗透率呈正相关; 在 750~800℃ 范围内改变烧结温度和 40~50 min 范围内改变保温时间, 毛细芯结构和性能参数变化明显。

关键词: 毛细芯; 烧结; 孔隙率; 渗透率; 毛细抽吸性能; 制备

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) S1—0178—06

Effects of sintering parameters on performance of Ni porous wick

SONG He, DONG Jingming, HAN Zhitao, CHEN Xuli, LI Celue, PAN Xinxiang

(Institute of Marine Engineering and Thermal Science, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Sintered nickel porous wick is a key component in the loop heat pipe system, metal powder sintering is a common method to product porous wicks, performance of loop heat pipe will be improved by investigating the effects of sintering parameters on the microstructures and characteristics of wicks. In this paper, sintered nickel porous wicks were fabricated, besides, effects of sintering temperature and time on the microstructure and characteristics of wicks were studied. Sintering temperature changed from 750℃ to 850℃ and sintering time varied in the range of 30—40 min. Results reveal that sintering parameters affect the microstructure and characteristics of wicks obviously. Voidage, average pore size and permeability decreases with increasing sintering temperature and time. Capillary pumping amount and capillary pumping speed are positive to permeability of the wick. Moreover, the microstructure and characteristics of wicks are sensitive to sintering temperature of 750—800℃ and sintering time of 40—50 min.

Key words: porous wick; sintering; voidage; permeability; capillary pumping characteristic; preparation

2017-05-15 收到初稿, 2017-05-22 收到修改稿。

联系人: 董景明。第一作者: 宋赫 (1992—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51409034); 辽宁省自然科学基金项目 (2014025013); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (3132016337)。

Received date: 2017-05-15.

Corresponding author: DONG Jingming, dmudjm@hotmail.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51409034), the Natural Science Foundation of Liaoning Province (2014025013) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132016337).

引言

随着电子产品技术的飞速发展，相同功耗下的热通量急剧增加，为了保证电子产品安全有效地工作，必须及时将多余的热量快速散出。热管是一种依靠系统内部工质发生相变传递热量的高效传热元件，因传热能力强、传递距离远和布置灵活等优点已成为有效的散热途径之一，在航空航天、高密度电子器件散热和余热回收利用等领域都有广泛的应用。环路热管又因其与发热元器件良好的贴合性成为热管的一大主要研究方向。毛细芯的孔隙率、渗透率、平均孔径等参数对环路热管的性能具有不同程度的影响^[1-8]。然而，目前针对毛细芯微观结构和性能优化的研究较少^[9]。王德志等^[10]通过改变烧结温度和保温时间等条件制备具有不同微观结构和性能的烧结镍粉毛细芯，研究烧结参数对毛细芯平均孔径、孔隙率、渗透率和毛细压力的影响规律，获得了综合性能优良的毛细芯。Wu 等^[6]研究了烧结参数对毛细芯平均孔径、渗透率等参数的影响，指出升温阶段是烧结过程中最关键的阶段并直接影响毛细芯的性能。Huang 等^[11]对双孔径镍粉毛细芯的渗透率、孔隙率、比表面积和微观形貌进行测试，并分析了烧结温度对基体和上层镍粉毛细芯孔径的影响，结果表明烧结温度不影响基体孔径，而对上层毛细结构的孔径影响较大。赵雅楠等^[12]依据达西定律搭建渗透率测试实验台，通过向液体施压的方式改变驱动压力，较为准确地测量了烧结不锈钢毛细芯的渗透率。Deng 等^[13-14]同样用改变驱动压力的方法测试了 V 形沟槽毛细芯的渗透率，同时通过采用热成像仪观察毛细芯内部工质上升高度随时间变化规律的方法测试了毛细芯的抽吸性能。Chan 等^[15]较早地提出了静压测量毛细压力的理论，Huang 等^[11]根据该理论设计了实验装置测试双孔径毛细芯的毛细压力，但上述方法所需的毛细芯长度较大。李金旺等以烧结镍粉毛细芯为研究对象实验研究了毛细芯的抽吸特性与其孔隙率和渗透率之间的关系^[16]，同时依据达西定律 (Darcy's law) 建立了数学模型，推导毛细抽吸质量随时间的变化关系，并进行了实验验证^[17]，最后依据抽吸模型提出一种测量毛细芯渗透率的方法^[18]。徐计元等^[19]采用溶盐造孔的方法制备孔隙率和孔径分布可控的烧结镍粉毛细芯，并研究了熔盐质量和粒径对毛细芯抽吸性能的影响，结果表明

抽吸性能同时受到孔隙率和孔径分布的影响，在孔隙率相近的条件下孔径较小且分布集中的毛细芯具有更好的毛细抽吸性能。

目前，针对烧结参数对毛细芯微观结构和性能参数影响的研究较少。本工作以平均粒径为 12 μm 的镍粉作为原料，分别制备了一组具有不同烧结温度和一组具有不同保温时间的毛细芯，并分析了烧结温度和保温时间对毛细芯的孔隙率、渗透率、平均孔径和毛细抽吸性能等参数的影响。

1 实验材料和方法

1.1 毛细芯的制备

实验使用改装后的 P310 型高温炉作为烧结炉，使用平均粒径为 12 μm、纯度大于 99% 的镍粉作为原料，采用松散烧结的方法制备毛细芯。制备过程中，首先向石墨模具中加入质量一定的镍粉，通过称重的方法控制加入模具的镍粉质量为 8.5 g±0.1 g；随后，将模具密封后放置于振料机上振匀镍粉；最后，将装有镍粉的模具放入烧结炉中烧结，烧结过程中向烧结炉内通入氢气含量为 5.00% 的标准气体作为保护气。

采用控制变量法，每次只改变单一烧结参数。实验所采用的烧结参数变化见表 1。

表 1 实验烧结参数
Table 1 Sintering parameters

Sample number	Sintering temperature/℃	Sintering time/min	Heating rate/℃·min ⁻¹
1	750	40	10
2	800	40	10
3	850	40	10
4	800	30	10
5	800	50	10

1.2 孔隙率的测量

实验采用 Archimedes 法^[20-21]测量毛细芯的孔隙率。分别通过浸润和干燥处理测得毛细芯的饱和湿重 m_2 和干重 m_1 。同时，由于毛细芯宏观形状规则，直接利用几何关系计算毛细芯体积 V 。

由式 (1) 可计算得到孔隙率 ϵ

$$\epsilon = \frac{m_2 - m_1}{\rho V}$$

(1)

1.3 平均孔径的测量

实验中，使用扫描电镜对同一样品的多个区域进行观察，分别测得 500 倍、2000 倍、3000 倍和 5000 倍的微观形貌图。使用 Nano measurer 软件

对一个样品不同部位的 2000 倍扫描图进行统计分析, 最终获得平均孔径的值和孔径分布。

1.4 渗透率的计算

分别采用经验公式法与实验方法对渗透率进行计算和比较。对于经验公式法, 选用 Kozeny-Carman 经验公式, 直接将粉末原始粒径和孔隙率的值代入式 (2) 即可得到毛细芯渗透率, 记为 K_1 。

Kozeny-Carman 经验公式

$$K = \frac{d_p^2 \epsilon^3}{C(1-\epsilon)^2} \quad (2)$$

对于实验法, 采用如图 1 所示的实验装置对单位时间内通过毛细芯的工质体积流量进行测量, 随后通过 Darcy 黏性损失方程计算毛细芯的渗透率, 记为 K_2 。

Darcy 黏性损失方程^[20-21]

$$\frac{\Delta p}{e} = \frac{\mu v}{AK} \quad (3)$$

推导出

$$K = \frac{e \mu v}{A \Delta p} \quad (4)$$

实验中, 使用硅胶板和密封胶对毛细芯边缘进行双面密封, 防止工质通过毛细芯与装置壳体的缝隙渗漏。在稳定状态下测量 10 min 内通过毛细芯的体积流量, 并重复多次, 计算得到工质的体积流动速率 v 。

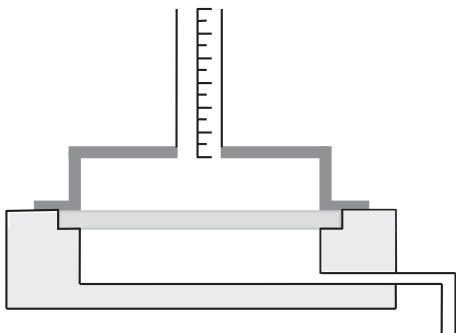


图 1 体积流量测试装置

Fig. 1 Volume flow rate test apparatus

1.5 抽吸性能测试

依据文献 [9, 11, 22], 自制了如图 2 所示的毛细芯抽吸性能实验测试装置。

实验中, 使用固定装置将毛细芯放入烧杯中, 通过控制固定装置高度使毛细芯浸入水中的深度为 1 mm, 测量毛细芯抽吸质量随时间的变化情况, 使用录像机记录整个抽吸过程。

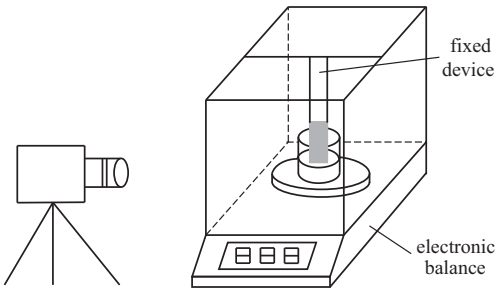


图 2 抽吸性能实验测试装置

Fig. 2 Capillary performance test apparatus

2 实验结果与讨论

2.1 毛细芯内部结构和渗透率的变化规律

根据表 1 的烧结参数制备了具有不同烧结参数的毛细芯, 并通过实验和计算得到了毛细芯的孔隙率、平均孔径和渗透率的值, 见表 2。

表 2 实验测量及计算结果

Table 2 Experiment results

Sample number	Voidage / %	Pore size / μm	Permeability, K_1/m^2	Permeability, K_2/m^2
1	77.2	5.83	1.59314×10^{-11}	4.04672×10^{-10}
2	74.8	4.45	1.18625×10^{-11}	3.65334×10^{-10}
3	72.8	4.25	9.38704×10^{-12}	3.26416×10^{-10}
4	76.0	4.61	1.37180×10^{-11}	3.47340×10^{-10}
5	71.0	3.85	7.66040×10^{-12}	3.15954×10^{-10}

表 2 中样品编号 1、2、3 的数据为改变烧结温度制备的毛细芯的参数值。从中可以看出孔隙率、平均孔径和渗透率随烧结温度的升高都呈下降趋势。烧结温度由 750℃ 升高到 800℃ 时, 孔隙率下降了 3.1%, 平均孔径减小了 23.7%; 烧结温度由 800℃ 升高到 850℃ 时, 孔隙率下降了 2.7%, 平均孔径减小了 4.5%, 孔隙率和平均孔径的下降速率都减缓。由此可见烧结温度的变化对平均孔径的影响大于对孔隙率的影响。同时, 烧结温度超过 800℃ 后, 烧结温度对毛细芯孔隙率和平均孔径的影响程度降低。由烧结理论可知, 烧结温度的升高不仅提高了金属粉末的活性, 而且为其提供了较多的能量。在金属粉末粒径相同的条件下, 随烧结温度的升高, 金属粉末所获得的能量随之升高, 活性也随之增大^[23], 金属粉末间的结合程度增大, 结合更加紧密, 孔隙继续收缩, 最终表现为孔隙率和渗透率降低、平均孔径减小。当烧结温度高于 800℃ 时, 金属粉末间的结合趋于平缓, 此时烧结温度的升高对毛细芯孔隙的影响减小。最后, 比较

由经验公式和黏性损失方程计算得到的渗透率结果，两者所反映的趋势一致，验证了本实验使用的毛细芯渗透率测定方法的可行性。

毛细芯微观形貌的变化规律验证了上述烧结温度对孔隙率和平均孔径的规律。图 3 为使用扫描电镜在放大倍数为 500 倍条件下观察得到的毛细芯微观形貌。图 3 (a)、(b)、(c) 分别代表烧结温度为 750、800、850℃条件下烧结的毛细芯的微观形貌。结合微观形貌图分析上述孔隙率和平均孔径变化率的趋势可见，与烧结温度为 750℃时烧结获得的毛细芯相比，烧结温度为 800℃时烧结获得的毛细芯内部孔隙明显减小，850℃烧结获得的毛细芯的微观形貌与 800℃烧结获得的毛细芯的微观形貌相比内部孔隙稍有减小但减小的幅度并不明显，这与上述分析得到的变化规律相吻合。

由表 2 中样品编号 4、2、5 的数据可以看出，

随着保温时间的延长，孔隙率、平均孔径和渗透率同样呈下降趋势。进一步分析孔隙率和平均孔径的变化率可以发现，保温时间由 40 min 变为 50 min 时孔隙率和平均孔径的变化率明显高于保温时间由 30 min 变为 40 min 时孔隙率和平均孔径的变化率。图 4 (a)、(b)、(c) 分别为保温时间在 30、40、50 min 时毛细芯的微观形貌图。结合表 2 和图 4 可以看出，保温时间超过 40 min 后，孔隙收缩速率加快，平均孔径减小的趋势明显。分析其原因可知，保温时间的延长使得金属粉末可以较长时间地获得能量，原子间的迁移和结合更加充分，烧结颈数目增多、尺寸增大，最终导致孔隙率降低^[23-24]，而且保温时间超过 40 min 后粉末间结合速率加快。

综上所述，烧结温度在 800℃以下时改变烧结温度对毛细芯结构参数和渗透率的影响较大，烧结温度在 800℃以上时该影响程度减小。保温时间大

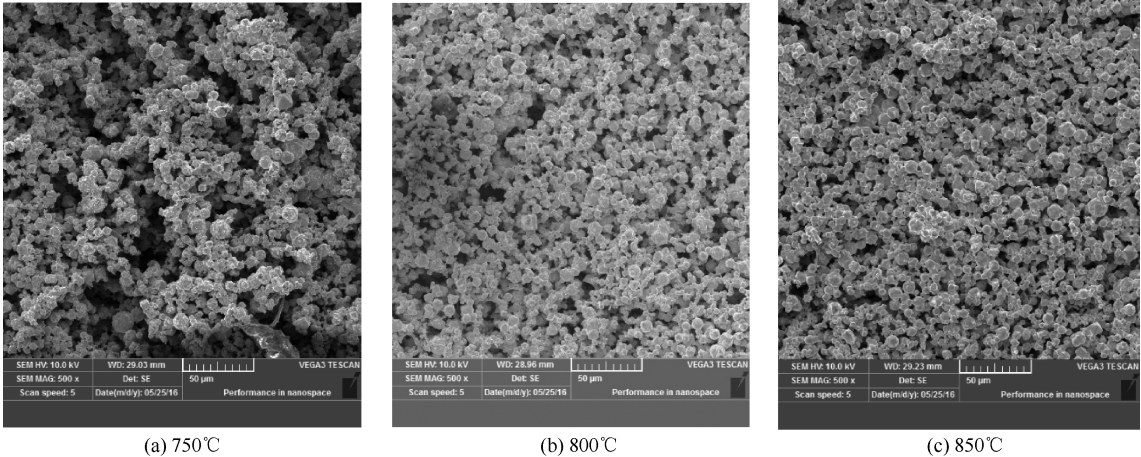


图 3 不同烧结温度下毛细芯的微观形貌

Fig. 3 SEM image of Ni wicks with different sintering temperature

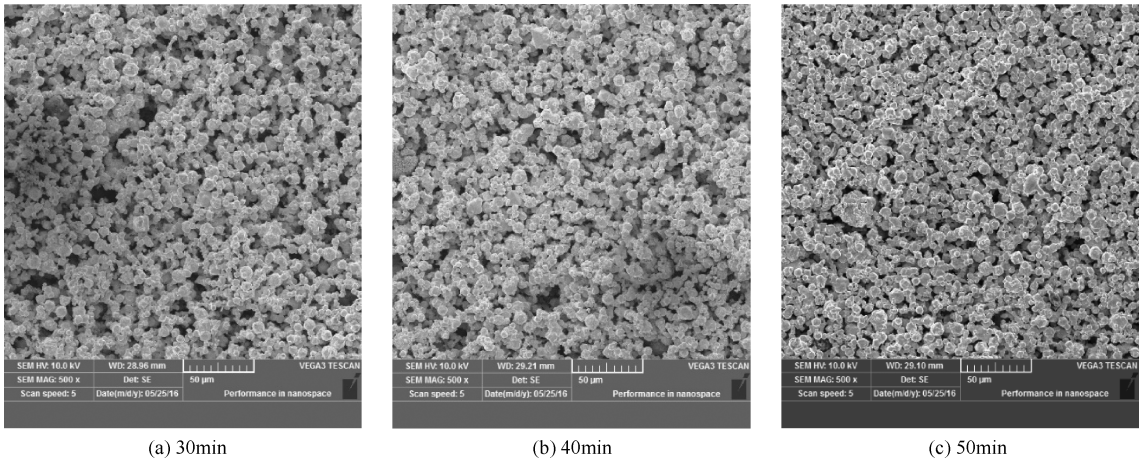


图 4 不同保温时间下毛细芯的微观形貌

Fig. 4 SEM image of Ni wicks with different sintering time

于 40 min 时容易得到较小孔径的毛细芯,从而获得更高的毛细压力,但此时渗透率的下降趋势也较明显,从而造成透过性能降低。因此,烧结时应按需求选择保温时间是否高于 40 min。

2.2 毛细芯抽吸性能随烧结参数的变化规律

采用图 2 所示的实验装置对毛细芯的抽吸性能进行测试,毛细芯抽吸工质的质量随时间的变化曲线如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知,随着烧结温度的升高,毛细芯抽吸液体的速率降低,抽吸液体质量的最大值也下降,并由实验数据计算可得烧结温度由 750℃ 升高为 800℃ 和由 800℃ 升高为 850℃ 时抽吸速率的降低率分别为 7.6% 和 5.4%。

由图 6 可知,随着保温时间的延长,毛细芯抽吸质量的最大值和抽吸速率都下降。由实验数据计算可知,保温时间由 30 min 延长至 40 min 和由 40 min 延长至 50 min 时平均抽吸速率的变化率分别为 4.6% 和 8.3%。由此可见,随着烧结温度的升

高和保温时间的延长,毛细芯的渗透率降低,渗透性能下降,导致工质在毛细芯内的流动阻力增加,抽吸速率减缓,毛细芯的抽吸性能下降。

分析图 5 和图 6 可知,达到饱和前,毛细芯的抽吸速率基本呈现指数增长规律,抽吸曲线的拐点都出现在 40~50 s 之间。由此可见改变烧结参数引起的毛细芯微观结构的变化对毛细芯达到抽吸饱和的时间影响较小。拐点代表液体爬升到毛细芯最高点,拐点之前,液体通过毛细芯内部孔道迅速爬升,但未能完全浸润所有的孔隙空间,此时抽吸速率较高,工质在孔隙内快速扩散,基本充满所有孔隙空间;拐点之后,液体在毛细芯内部缓慢扩散,直至达到抽吸饱和状态,此阶段抽吸速率明显降低,最终达到抽吸平衡状态。

总体而言,毛细芯的抽吸质量和抽吸速率与烧结温度和保温时间呈负相关,即与毛细芯的渗透率呈正相关,在毛细芯达到饱和前抽吸速率呈指数曲线规律变化,在达到饱和后抽吸质量基本保持不变,与时间无关,曲线存在明显的拐点。

3 结 论

采用实验方法对烧结镍粉毛细芯的孔隙率、平均孔径、渗透率和毛细抽吸性能等参数进行了测试与计算,分析烧结参数对毛细芯的微观结构和性能参数的影响规律,得到如下结论。

(1) 随着烧结温度的升高和保温时间的延长,毛细芯的孔隙率、渗透率和平均孔径都呈下降趋势,具体表现为烧结温度每升高 50℃ 孔隙率下降 3% 左右,保温时间超过 40 min 后毛细芯的平均孔径明显减小。

(2) 毛细芯的抽吸质量和抽吸速率随烧结温度和保温时间增加而降低,即与毛细芯的渗透率呈正相关,毛细芯达到饱和前抽吸速率呈指数曲线规律变化,在达到饱和后抽吸质量基本保持不变,曲线存在明显的拐点。

(3) 本实验条件下,在 750~800℃ 范围内改变烧结温度和在 40~50 min 范围内改变保温时间对毛细芯的微观结构和性能参数影响较大。

符 号 说 明

A——垂直于流体流动方向的有效多孔材料的面积, m^2

C——常数,与工质种类有关

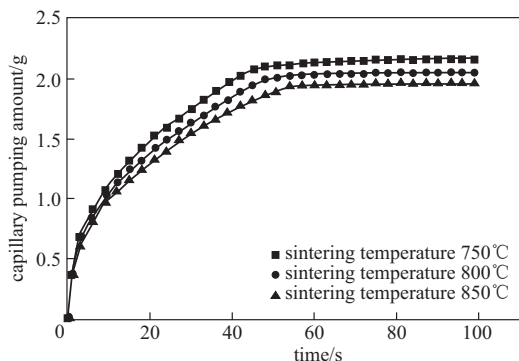


图 5 烧结温度对抽吸性能的影响

Fig. 5 Effect of sintering temperature on capillary pumping performance

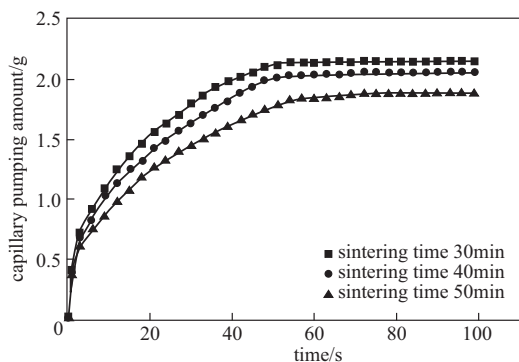


图 6 保温时间对抽吸性能的影响

Fig. 6 Effect of sintering time on capillary pumping performance

d_p ——原始金属粉末的平均粒径, μm

e ——流体通过的毛细芯的厚度, m

K ——渗透率, m^2

K_1 ——使用 Kozeny-Carman 公式计算得到的渗透率, m^2

K_2 ——使用 Darcy 黏性损失方程计算得到的渗透率, m^2

m_1 ——干燥状态下毛细芯的质量, kg

m_2 ——饱和状态下毛细芯的质量, kg

Δp ——流体通过多孔材料两端的压差, Pa

V ——毛细芯体积, m^3

ϵ ——孔隙率, %

μ ——牛顿定律确定的流体动力学黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

ρ ——实验条件下蒸馏水的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

ν ——工质的体积流动速率, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

References

- [1] 任川, 吴清松. 孔隙率和渗透率对 LHP 主芯性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2007, **28** (4): 634-636.
REN C, WU Q S. Effect of porosity and permeability on performances of loop heat pipe's wick[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, **28** (4): 634-636.
- [2] 李强, 周海迎, 宣益民. 复合结构毛细蒸发器传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2008, **29** (1): 148-150.
LI Q, ZHOU H Y, XUAN Y M. Investigation on heat transfer characteristic of composite capillary evaporator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, **29** (1): 148-150.
- [3] RANDEEP S, ALIAKBAR A, MASATAKA M. Effect of wick characteristics on the thermal performance of the miniature loop heat pipe[J]. Journal of Heat Transfer, 2009, **131** (8): 30-40.
- [4] ZAN K J, ZAN C J, CHEN Y M, *et al.* Analysis of the parameters of the sintered loop heat pipe[J]. Heat Transfer, 2004, **33** (8): 515-526.
- [5] SINGH R, NGUYEN T, MOCHIZUKI M. Capillary evaporator development and qualification for loop heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, **63** (1): 406-418.
- [6] WU S C, LO K C, CHEN J R, *et al.* Effect of sintering temperature curve in wick manufactured for loop heat pipe with flat evaporator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **595**: 24-29.
- [7] XU J Y, ZHANG L, XU H, *et al.* Experimental investigation and visual observation of loop heat pipes with two-layer composite wicks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **72**: 378-387.
- [8] REN C, WU Q, HU M. Heat transfer in loop heat pipe's wick: effect of porous structure parameters[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2007, **21** (4): 702-711.
- [9] 徐计元, 邹勇, 杨得帅, 等. 环路热管镍钛双孔隙毛细芯的性能优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, **33** (5): 73-78.
XU J Y, ZOU Y, YANG D S, *et al.* Properties optimization of Ni-Ti biporous wicks for loop heat pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, **33** (5): 73-78.
- [10] 王德志, 王小鹰, 周盼, 等. 烧结工艺对环路热管用 Ni 多孔毛细芯性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, **19** (5): 687-694.
WANG D Z, WANG X Y, ZHOU P, *et al.* Effect of sintering process on properties of Ni porous capillary wicks for loop heat pipe[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014, **19** (5): 687-694.
- [11] HUANG X, FRANCHI G, CAI F. Characterization of porous bi-modal Ni structures[J]. Journal of Porous Materials, 2009, **16** (2): 165-173.
- [12] 赵雅楠, 闫涛, 梁惊涛. 低温回路热管吸液芯渗透率测试及分析[J]. 工程热物理学报, 2010, **31** (7): 1093-1096.
ZHAO Y N, YAN T, LIANG J T. Permeability measurement and analysis for the porous wick in cryogenic loop heat pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, **31** (7): 1093-1096.
- [13] DENG D X, TANG Y, HUANG G H, *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.
- [14] DENG D, LIANG D J, 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.
- [15] CHAN C, SALT H. Capillary head and permeability of wicks with single or multiple sized pores[C]// Advances in Heat Pipe Science and Technology: Proceedings of the 8 th International Heat Pipe Conference. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 1989: 33-38.
- [16] 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.
- [17] LI J W, ZOU Y, CHENG L. Experimental study on capillary pumping performance of porous wicks for loop heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, **34** (8): 1403-1408.
- [18] 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. Development and experimental verification of capillary pumping model for porous structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, **32** (11): 95-99.
- [19] 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.
XU J Y, ZOU Y, CHENG L. Control of pore parameters and influence on capillary pumping performance of sintered nickel wicks[J]. CIESC Journal, 2012, **63** (2): 463-469.
- [20] 奚正平, 汤慧萍. 烧结金属多孔材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 103-130.
- [21] XI Z P, TANG H P. Sintered Metal Porous Materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 103-130.
- [22] 刘培生, 马晓明. 多孔材料检测方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 100.
- [23] LIU P S, MA X M. Testing Method of Porous Materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 100.
- [24] 王野, 纪献兵, 郑晓欢, 等. 环路热管烧结毛细芯的抽吸特性[J]. 高校化学工程学报, 2016, **30** (3): 560-565.
WANG Y, JI X B, ZHENG X H, *et al.* Capillary pumping characteristics of sintered porous wicks for loop heat pipes[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, **30** (3): 560-565.
- [25] 康新婷, 汤慧萍, 王建永, 等. 成形压力对 $\text{Fe}_{16}\text{Al}_2\text{Cr}$ 多孔材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, **40** (10): 1732-1736.
- [26] KANG X T, TANG H P, WANG J Y, *et al.* Effect of pressing pressure on performance of $\text{Fe}_{16}\text{Al}_2\text{Cr}$ porous materials[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2011, **40** (10): 1732-1736.
- [27] 王小鹰. 环路热管用多孔毛细芯的制备及性能分析[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
WANG X Y. Preparation and properties of porous wick for loop heat pipe[D]. Changsha: Central South University, 2014.