

烧结多孔管的制作及其沸腾传热研究

周述璋¹, 侯亭波², 潘敏强², 韩尧¹, 陈妍¹

(1. 华南理工大学 设计学院, 广州 510006;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: **目的** 研究烧结多孔管表面多孔层的制造工艺, 并对铜粉烧结多孔层表面的传热性能进行测试。**方法** 利用烧结模具在铜管外面烧结铜粉层, 并通过实验计算出多孔烧结管的热通量和强化换热系数。**结果** 铜粉烧结后的铜管在酒精中的强化传热效果达到了光管的10倍左右。**结论** 烧结铜粉粒径越小, 烧结管的热通量越大, 其传热性能越好。

关键词: 沸腾传热; 烧结多孔层表面; 铜粉粒径

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.019

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0091-05

Production of Sintered Porous Tube and the Study of Boiling Heat Transfer

ZHOU Shu-zhang¹, HOU Ting-bo², PAN Min-qiang², HAN Yao¹, CHEN Yan¹

(1. School of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the manufacturing process of porous surface coating of sintered porous tube, and the heat transfer properties of copper sintered porous layer surface were measured. **Methods** Copper powder was sintered on the outside layer of brass using sintering mold, and the heat flux and enhanced heat transfer coefficient of the porous sintered tube were calculated through experiments. **Results** The obtained results showed that the enhanced heat transfer effect of the brass after sintering copper reached about 10 times as high as that of the light pipe in alcohol. **Conclusion** The smaller the particle size of sintered copper powder, the greater the heat flux of sintered tube and the better the heat transfer performance.

KEY WORDS: boiling heat transfer; sintered porous layer surface; particle size of copper powder

收稿日期: 2014-02-07; 修订日期: 2014-03-25

Received: 2014-02-07; Revised: 2014-03-25

基金项目: 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目(132021); 广东省工业攻关项目(2012B010500021); 广州市珠江科技新星项目(2013J2200060)

Fund: Heniy For Education Foundation for Young Teachers in Colleges and Universities Fund Project(132021); Guangdong Province Industrial Research Project(2012B010500021); Guangzhou Pearl River Technology Star Project(2013J2200060)

作者简介: 周述璋(1970—), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为强化沸腾传热。

Biography: ZHOU Shu-zhang(1970—), Male, from Shaoyang, Hunan, Master, Associate professor, Research focus: strengthening the boiling heat transfer.

通讯作者: 潘敏强(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机械制造。

Corresponding author: PAN Min-qiang, Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: machinery manufacturing

我国人口众多,能源紧缺,环境污染日益严重,因此如何节约能源,提高能源利用率,保护环境,是保证我国经济可持续发展最为有利的措施。在诸多资源消费中,能源消费是不可或缺的,而且其人均消费量在不断上升。由于环境污染大部分来自能源生产和消费过程中排放的废弃物,因此,节能不仅具有节约资源的意义,而且具有保护环境的作用。实践表明,不只是直接节能可以保护环境,尽可能地减少产品消耗也同样有利于保护环境,因为所有产品的生产都要消耗能源。因此,在生产和生活的每一个环节,我们都应该大力推广节能降耗技术,节约资源,保护环境。

当今世界普遍重视能源的节约和利用,因而如何降低能耗和提高传热效率,保护环境,已经成为一个非常重要的研究课题。管壳式换热器大量应用于各种换热装置,其主要的换热元件就是各种规格的换热管,因此,研究高性能的换热管是当前强化传热的一个主要研究方向。多孔层表面管就是一种高性能换热管,与光滑管相比,能成 10 倍的提高换热系数,临界热负荷提高近 2 倍。它适用于沸腾传热,尤其适用于小温差、多效蒸发的过程,对水、氟利昂、液氮、烯烃类、苯、石油、乙醇等多种工质的沸腾传热均有显著的强化作用。多孔层表面管有多种制作方法,如烧结法、机械加工法、火焰喷涂法、化学腐蚀法等。烧结型表面强化管是 20 世纪 70 年代发展起来的一种高效强化沸腾传热管,它是在金属表面烧结多孔层金属,形成多孔层,对多种工质具有显著的强化作用^[1-10]。

本文采用烧结炉在高温下快速地在铜管表面烧结金属铜粉层,由于多孔层材料与基体管采用同一种材料,提高了其粘结性,保证了其烧结质量,并且通过传热实验,研究了多孔层烧结管的传热性能。

1 烧结工艺方法

1.1 烧结模具的选用

烧结模具应选用耐高温、易于机械加工且容易脱模的材料制作。因此本文的烧结模具采用石墨制造,石墨作为烧结模具具有以下优点:首先,石墨硬度低,易于机械加工;其次,石墨易于脱膜,有很高的熔点,在烧结温度内有很好的稳定性,在加工石墨的

时候表面会残留石墨的微小粉末,有一定的润滑作用,从而使烧结之后的结构更容易脱模;再次,石墨模具具有很高的耐用性和重复性,加工一次模具可进行多次烧结,且能够保证烧结出的样品的一致性。

1.2 烧结方法的选用

实验前对烧结温度为 850,900 ℃,烧结保温时间为 0.5,1 h 的烧结样品经多次对比实验得出如下结论。

1) 烧结温度为 850 ℃时,无论是保温 30 min 或 60 min,都不能满足烧结之后结合强度的要求,即烧结后结构强度差,铜粉不容易结合在一起。

2) 烧结温度为 900 ℃时,保温 30 min 的铜粉结合强度有了一定的提高,具有良好的孔隙结构,这种良好的孔隙有利于沸腾效果的提高,但经验证,结合强度依然不能满足要求。

3) 烧结温度为 900 ℃,保温 60 min 时能满足实验结合强度的要求,具有较好的强度并且仍能保证其孔隙结构。

故本实验的烧结方法为:烧结到 900 ℃并保温 1 h。

1.3 烧结的具体步骤

多孔烧结管的制备装置如图 1 所示。

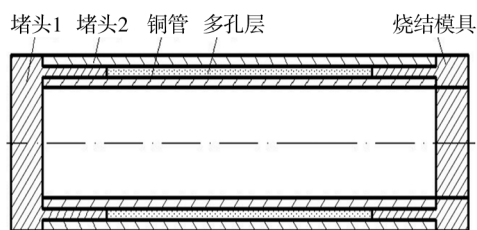


图 1 多孔烧结管的制备装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the preparation device of porous sintered tube

采用阶段式的加热方式,以保证整根铜管的加热均匀,其烧结工艺如图 2 所示。

首先,对紫铜管表面进行清洗除油,以保证铜粉与其外表面的良好接触,也将有利于烧结过程铜粉与表面的结合。在紫铜管两侧套入不锈钢堵头,堵头的内径和管壳外径间隙配合,外径和烧结模间隙配合。然后将套有堵头的紫铜管放入烧结模具中,

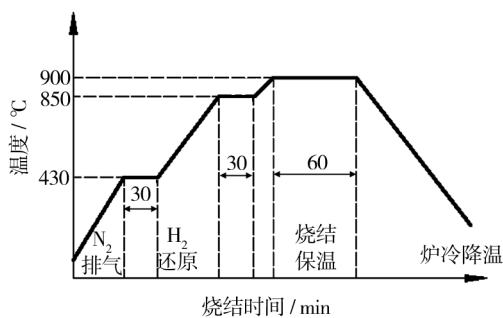


图 2 烧结工艺
Fig. 2 Sintering process

烧结模具是由易脱模、耐高温的石墨材料制成。之后在紫铜管与烧结模具所形成的环形空间中均匀填入紫铜粉末,填充过程中要不停地震动整个装置,以保证所填充的金属粉末均匀、充分,烧结模内半径与金属圆管外半径之差为铜粉层厚度。

填充好铜粉后即可放入烧结炉内烧结,烧结温度为 900 ℃,并保温 1 h,1 min 内烧结温度最多升高 5 ℃。在烧结过程中,需通入还原气体以防止铜粉在高温下氧化。

通入气体和烧结的过程如下:首先加热至 430 ℃,保温 30 min,再以 5 ℃/s 的速度加热至 850 ℃。在 850 ℃ 时保温 30 min,再以 5 ℃/s 的速度升到 900 ℃,在 900 ℃ 时保温 1 h,此时加热停止,待炉内冷却至一定温度即可取出烧结工件。打开烧结模具,去除两端堵头,得到强化沸腾传热管。

在刚开始加热时,同时向炉内冲入氮气,由于氮气密度高,因而可以排除炉内空气。在炉内温度到达 400 ℃ 时,松开氮气减压阀,关闭电磁阀,同时打开氢气电磁阀,拧紧减压阀至 0.3 MPa,向炉内冲入氢气保持高温烧结中氢气还原气氛。同时在炉内空冷至室温的降温过程中,当温度降至 400 ℃ 时以相同的方法冲入氮气排除氢气,以免开炉时发生爆炸。

在整个烧结过程中,始终保持填充气体压力为 0.3 MPa,开炉时打开排气阀给炉内气体泄压。

2 传热性能实验

2.1 实验过程

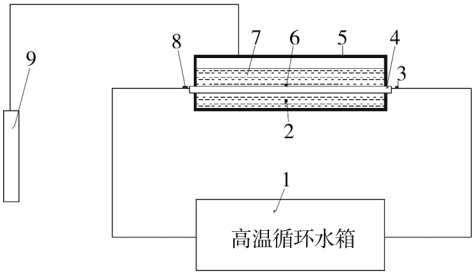
实验过程中采用恒温热水在管内加热,管外是实

验用无水乙醇液体。热水在管内以一定的流速和温度流动,无水乙醇液体从铜管管壁获得热量而沸腾。

热水通过高温循环水箱加热,其温度可直接由高温循环水箱设定。热水经高温循环水箱所自带的水泵循环流经多孔烧结管内时,无水乙醇液体通过管壁吸收热量而沸腾,所产生的蒸汽通过冷凝管回收在计量筒中。

通过计算计量筒中的冷凝液体量就可知道一定时间内无水乙醇液体的蒸发量。用热电偶可测得管壁及沸腾液体的温度,并进一步可计算出温差(多孔烧结管管壁的温度与管外液体的温度差),最后可计算出强化沸腾换热系数。这是评价多孔表面管沸腾传热效果的常用方法^[11—14]。

实验装置如图 3 所示。



1. 恒温水箱 2. 测无水乙醇温度的热电偶 3. 出水口热电偶 4. 测试管 5. 沸腾容器 6. 测试管管壁热电偶 7. 无水乙醇液体 8. 进水口热电偶 9. 冷凝液收集容器

图 3 测试装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the test device

热通量的计算公式为:

$$q = V \left(\frac{60}{t} \right) \frac{\rho_L \gamma \times 4.188 \times 10^{-6}}{\pi D L} \quad (1)$$

式中: q 为热通量, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; V 为收集的无水乙醇体积, mL ; t 为蒸出时间, min ; ρ_L 为无水乙醇密度, kg/m^3 ; γ 为无水乙醇汽化潜热, kJ/kg ; D 为管外径, m ; L 为换热管长度, m 。

沸腾传热系数 α 的计算公式为:

$$\alpha = q / (\theta_w - \theta_L) \quad (2)$$

式中: α 为沸腾传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃})$; θ_w 为管外壁温度, ℃ ; θ_L 为管外沸腾液体的温度, ℃ 。

2.2 实验结果

多孔烧结管的几何参数见表 1,分 4 个样本进

行实验。1 号样本是没有烧结多孔层的光滑管,2,3,4 号样本的烧结层厚度均为 1 mm。

传热性能实验的实验结果见表 2,多孔管的热通量及入口温度之间的关系曲线如图 4 所示。

由表 2 可知,在入水口温度为 85 ℃时,烧结管的热通量为光滑管的热通量的 5~10 倍;在入水口温度为 95 ℃时,烧结管的热通量为光滑管的热通量的 3 倍。从图 4 可以看出,2 号管的热通量最大,1 号管最小。

表 1 多孔烧结管的几何参数

Table 1 Geometric parameters of porous sintered tube

编号	烧结层厚度/mm	金属粉末粒径/ μm
1	0	0
2	1	<54
3	1	54~75
4	1	75~100

表 2 多孔烧结管的热通量

Table 2 Heat flux of porous sintered tube

	入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	管外沸腾液体温度/ $^{\circ}\text{C}$	管外壁温度/ $^{\circ}\text{C}$	蒸出时间/ $^{\circ}\text{C}$	无水乙醇体积/mL	热通量/ $(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	传热系数
1	85	75.5	80.7	25	0	3 671	706
	90	77.5	82.5	25	15	3 935	787
	95	77.1	79.4	13	71	36 401	15 827
2	85	77	76.6	8	24.5	46 057	115 142
	90	77	76.5	8	112	114 330	228 660
	95	77.1	76.5	8	130	112 792	187 987
3	85	77.1	76.6	8	39	33 838	67 676
	90	77.1	76.7	8	100	86 763	216 908
	95	77.2	76.7	8	126	108 888	217 776
4	85	76.8	76.4	8	24	19 336	48 340
	90	76.8	76.4	8	95	76 538	191 345
	95	77.0	76.5	8	131	105 541	211 082

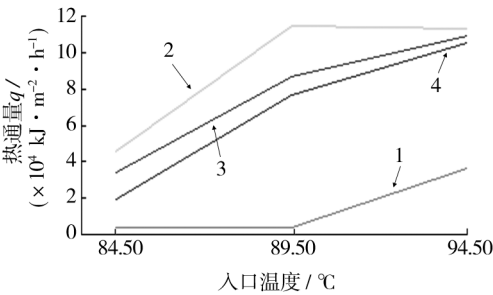


图 4 多孔管的热通量及入口温度之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the inlet temperature and the heat flux of the porous tube

3 结 论

将不同粒径范围的铜粉进行烧结,并探讨了铜粉颗粒的粒径大小对烧结管传热性能的影响,得到如下结论。

1) 实验过程中,烧结管中的工质在 1 min 左右就进入了沸腾状态,而光滑管只有在入水口温度为 95 ℃时,需要 25 min 左右才开始沸腾,说明烧结管比光滑管容易进入沸腾状态。

2) 在实验过程中发现,烧结管的热通量和传热系数明显大于光滑管。

3) 烧结管热通量的提高随着加热液体温度的升高而减小。

4) 烧结管热通量的大小跟烧结粉末粒径大小有关,烧结金属粉末粒径越小,烧结管的热通量越大,其传热性能越好。

参考文献

[1] CHEN Zhen-xing, CAI Qi-feng. Research on Boiling Heat Transfer of Sintered Porous Surface Tubes[J]. Light Metal, 1994(4):10—14.

- [2] TANG Y, TANG B, LI Q, et al. Pool-boiling Enhancement by Novel Metallic Nanoporous Surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 194—198.
- [3] 郭兆阳. 表面强化管轴向均匀与变热流密度条件下池沸腾传热特性实验研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- GUO Zhao-yang. Experimental Study of Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Surface Enhanced Tube under Axial Uniformity and Variable Heat Flux [D]. Shanghai: East China University of Technology, 2013.
- [4] 徐宏, 戴玉林, 夏翔鸣, 等. 高通量换热器研制及在大型石化装置中的节能应用 [J]. *太原理工大学学报*, 2010, 41(5): 577—580.
- XU Hong, DAI Yu-lin, XIA Xiang-ming, et al. Development of High-flux Heat Exchanger and Its Energy Saving Applications in Large-scale Petrochemical Plant [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2010, 41(5): 577—580.
- [5] 曾勇, 徐宏, 侯峰, 等. 火焰喷涂型表面多孔管的性能研究 [J]. *化工机械*, 2010, 37(2): 141—145.
- ZENG Yong, XU Hong, HOU Feng, et al. Performance Studies of Flame Spraying Surface Porous Tube [J]. *Chemical Machinery*, 2010, 37(2): 141—145.
- [6] 谭华玉, 高春阳, 刘立新. 多孔表面的制造方法及其强化沸腾传热效果的比较 [J]. *流体机械*, 2006(1): 80—85.
- TAN Hua-yu, GAO Chun-yang, LIU Li-xin. Manufacturing Method of Porous Surface and the Comparison of Its Enhancement of Boiling Heat Transfer Effect [J]. *Fluid Mechanics*, 2006(1): 80—85.
- [7] 刘阿龙, 徐宏, 王学生, 等. 复合粉末多孔表面管的沸腾传热 [J]. *石油机械*, 2008, 36(5): 61—66.
- LIU A-long, XU Hong, WANG Xue-sheng, et al. Boiling Heat Transfer of Composite Powder Porous Surface Tube [J]. *Petroleum Machinery*, 2008, 36(5): 61—66.
- [8] 王宏智. 烧结型表面多孔管沸腾传热性能实验研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- WANG Hong-zhi. Experimental Study of Boiling Heat Transfer Properties of Sintered Surface Porous Tube [D]. Shanghai: East China University of Technology, 2010.
- [9] CHI Y L, BONG J Z, KWANG J K. Morphological Change of Plain and Nano-porous Surfaces during Boiling and Its Effect on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 40: 150—158.
- [10] LI H C, LI T, KANNY B. Two-phase Heat Transfer Enhancement on Sintered Copper Microparticle Porous Structure Module Surface [C]//ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference, Shanghai, 2009.
- [11] JANUSZ T C. Nucleate Pool Boiling on Porous Metallic Coatings [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002(25): 557—564.
- [12] LI Long-mei, HUANG Wen-yi. Study of Enhancing Heat Transport Mechanics of Porous Surface Coating Tube [J]. *Journal of Fuzhou University*, 1997, 25(6): 102—107.
- [13] CHEN Zhen-xing. Study of Flow Boiling Test of Porous Surface Coating Tube [J]. *Nonferrous Metals*, 1997(5): 29—32.
- [14] ALBERTSON C E. Boiling Heat Transfer Surface and Method; US, 4018264 A [P]. 1977-04-19.

(上接第86页)

- MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Corrosion Protection Coating Technologies of Metal in Marine Atmosphere [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 10(1): 81—84.
- [6] 虞兆年. 防腐蚀涂料与涂装 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- YU Zhao-nian. Anti Corrosion Coatings and Painting [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [7] 刘宏宇, 张松, 何巍. 沿海钢结构设施的防腐研究 [J]. *装备环境工程*, 2010, 7(5): 152—155.
- LIU Hong-yu, ZHANG Song, HE Wei. Study of Anticorrosion of Steel in Coastal Regions [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(5): 152—155.
- [8] 姜才兴, 周福根. 氟碳涂料在杭州湾跨海大桥钢箱梁防腐工程中的应用 [J]. *现代涂料与涂装*, 2009(4): 25—28.
- JIANG Cai-xing, ZHOU Fu-gen. Application Fluorocarbon Coating on the Steel-box Girder in the Hangzhou bay Bridge [J]. *Modern Paint & Finishing*, 2009(4): 25—28.
- [9] 穆山, 李军念, 王玲, 等. 海洋大气环境金属防护涂层技术与工艺研究 [J]. *装备环境工程*, 2012, 10(1): 81—84.
- MU Shan, LI Jun-nian, WANG ling, et al. Corrosion Protection Coating Technologies of Metal in Marine Atmosphere [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 10(1): 81—84.