

充灌磁性液体的脉动热管试验研究

邱晟华, 何永清, 毕勤成

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 试验研究了充灌磁性液体的脉动热管的传热性能. 试验工质为颗粒体积分数为 1.39% 的水基 Fe_3O_4 磁性液体, 脉动热管由内径为 2.5 mm 的铜管制作, 加热功率为 40~150 W, 倾角固定为 60° . 将试验结果与充灌纯水及质量分数为 1.875% 的四甲基氢氧化铵水溶液(磁性液体中的表面活性剂)时的结果进行了比较, 发现充灌磁性液体时脉动热管的热阻最小, 并且最佳充灌率为 40%, 传热得到了强化. 此外, 当在脉动热管绝热段施加 0~60 kA/m 的均匀磁场时, 脉动热管的热阻略有增大.

关键词: 磁性液体; 脉动热管; 热阻; 磁场

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0006-03

Experimental Investigation on Pulsating Heat Pipes Filled with Magnetic Fluid

QIU Shenghua, HE Yongqing, BI Qincheng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experiment was conducted to investigate the heat transfer performance of a closed-loop pulsating heat pipe (CLPHP) filled with a magnetic fluid. The particle volume fraction of the magnetic fluid is 1.39%, and its surfactant is tetramethylammonium hydroxide (TMAH) aqueous solution. The CLPHP is made of a brass tube with an inner diameter of 2.5 mm. The CLPHP with an inclination angle of 60° runs at a heat input of 40-150 W. In addition, the experiment data were compared with those for using the solution of water and TMAH with the mass fraction of 1.875% filled in the heat pipe. The results show that the heat transport capability increases significantly when the CLPHP is filled with the magnetic fluid, and the optimum filling rate of the magnetic fluid is 40%. The thermal resistance of the heat pipe rises slightly when the uniform magnetic field with the strength of 0-60 kA/m is imposed on the bottom of the adiabatic section of the CLPHP.

Keywords: magnetic fluid; pulsating heat pipe; thermal resistance; magnetic field

电子元器件的散热问题是制约计算机硬件发展的一个瓶颈. 作为一种潜在的高效换热器, 脉动热管自 1990 年发明^[1]以来就一直受到众多学者的关注, 而将近年提出的新一代传热工质“纳米流体”充灌到脉动热管中, 则会显著提高其传热性能^[2-4].

Ma 等人^[2]首次将悬浮有金刚石纳米颗粒的水充灌到脉动热管中, 发现当输入功率为 80 W 时, 蒸

发段与冷凝段的温差比充灌纯水时要低 16.6°C . 之后, 该小组又对充灌体积分数为 1% 的金刚石纳米流体的脉动热管进行了研究, 发现脉动热管在 50% 充灌率时有最大的传热能力^[3]. Lin 等人^[4]则采用银-纳米流体作为工质, 在不同充灌率、不同加热功率下对脉动热管进行了试验, 他们得出的最佳充灌率为 60%.

磁性液体是悬浮有纳米磁性颗粒的胶体,由基液、表面活性剂及悬浮在基液中的纳米磁性颗粒 3 部分组成,在外加磁场作用下会对外显示磁性^[5]. 颗粒的材料一般为 Fe_3O_4 ,其导热系数较铜或银颗粒的低,但磁性液体稳定性好,颗粒尺寸要小于一般纳米流体中的颗粒尺寸(20~100 nm),且目前已有商业应用.

本文以颗粒体积分数为 1.39% 的磁性液体为工质,通过改变充灌率及加热功率对脉动热管进行了试验,并将试验结果与充灌纯水以及质量分数为 1.875% 的四甲基氢氧化铵水溶液(磁性液体中的表面活性剂)时的结果进行了对比,同时在脉动热管绝热段施加磁场,定性研究了磁场对脉动热管性能的影响.

1 试验装置与方法

试验系统装置如图 1 所示. 与普通脉动热管不同,绝热段底部间隔布置有 6 个线圈,通以直流电,调节直流电源的输出电压可改变磁场大小. 磁场方向朝上,指向脉动热管的冷凝段.

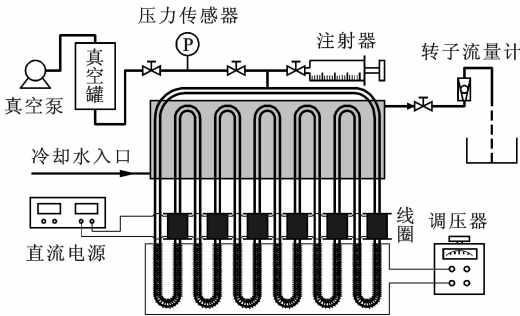
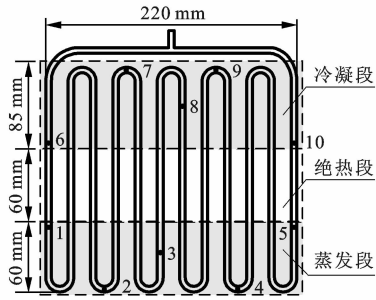


图 1 试验系统装置示意图

脉动热管由外径为 4 mm、内径为 2.5 mm 的铜管制作,为 11 个弯头的闭合回路,结构尺寸及测温点布置如图 2 所示. 采用底部加热、中部绝热、上部冷却的换热方式. 蒸发段采用外壁紧密缠绕镍硅丝的电加热方式,由交流调压器控制电压,可保证加热的均匀性. 蒸发段与冷凝段各布置有 5 个 T 型热电偶,通过点焊固定在铜管外壁上,冷凝段的焊点处涂有少量高导热系数的粘结剂,避免测点直接与冷却水接触,以消除冷却水流动对温度测量的影响. 文献[6-8]研究发现,脉动热管运行的最佳倾斜角为 60° ,本试验不探讨最佳倾斜角度,因此固定脉动热管倾斜角为 60° .

试验开始前先抽真空至绝对压力 400 Pa 左右,然后打开阀门,通过注射器向脉动热管注入一定量



1~10:测温点

图 2 脉动热管结构及测温点布置图

的工质. 工质的充灌率为 30%~70%,脉动热管的加热功率为 40~150 W. 试验过程中,冷却水的流量保持为 0.1 kg/min,入口温度恒定为 25°C . 试验工质为颗粒体积分数为 1.39% 的水基 Fe_3O_4 磁性液体,由化学共沉淀法制备,其中表面活性剂为四甲基氢氧化铵水溶液. 此外,脉动热管中还分别充灌了质量分数为 1.875% 的四甲基氢氧化铵水溶液和纯水进行对比试验. 试验对每组工况采集了 450 组瞬态数据(累计时间为 5 min),结果取其平均值.

2 试验结果与分析

定义脉动热管的热阻为蒸发段和冷凝段温差与加热功率之比

$$R = (T_e - T_c) / P$$

式中: R 表示热阻; T_e 和 T_c 分别表示蒸发段和冷凝段的温度; P 为加热功率.

图 3 反映了纯水在 30% 充灌率、4 种加热功率 ($P=60, 90, 120, 150\text{ W}$) 下,10 个测点温度的分布情况. 可以看出,脉动热管稳定运行后,各测点温度较为均匀,故可采用温度平均值来表征蒸发段及冷凝段的温度.

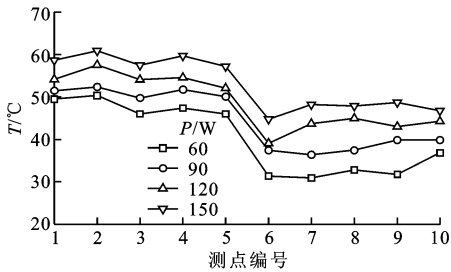


图 3 10 个测点在 4 种加热功率下的温度分布图

图 4 与图 5 分别比较了纯水和活性剂水溶液在不同充灌率下的热阻. 由图 4 可知,脉动热管中充灌纯水时,30% 充灌率下的热阻最小,并且热阻随充灌率增大而增大. 可以认为,在较高的真空度下,少量

的工质即可让脉动热管较好地运行. 由图 5 可知, 充灌活性剂水溶液后, 低功率下 30% 充灌率的热阻稍小于 40% 充灌率的热阻, 功率高于 100 W 后, 脉动热管的最佳充灌率为 40%. 这说明加热功率增大时, 脉动热管需要增加工质来维持良好的传热性能. 高功率下各充灌率的热阻差异较小, 变化趋势平缓, 即使加热功率增加, 蒸发段与冷凝段的温差也能维持在 16 ℃ 左右, 脉动热管在较广的充灌率范围内都能够达到优良的传热性能. 四甲基氢氧化铵水溶液汽化潜热比纯水小, 更容易发生相变换热, 同时四甲基氢氧化铵水溶液的表面张力比水小, 减小了流体在微小管道中的流动阻力, 以上两个因素均能强化传热. 当加热功率增大时, 单位质量的活性剂溶液携带的热量比纯水的少, 需要增加工质来提高传输热量的能力, 这解释了当加热功率增大时, 最佳充灌率从 30% 过渡到 40% 的原因.

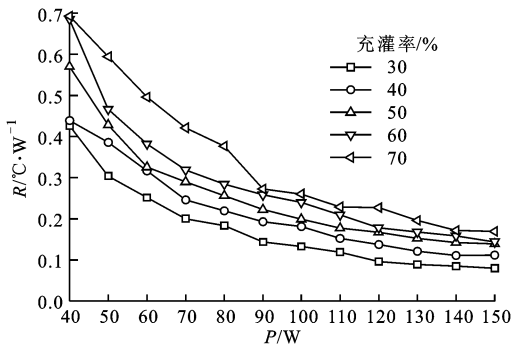


图 4 不同充灌率下纯水的热阻

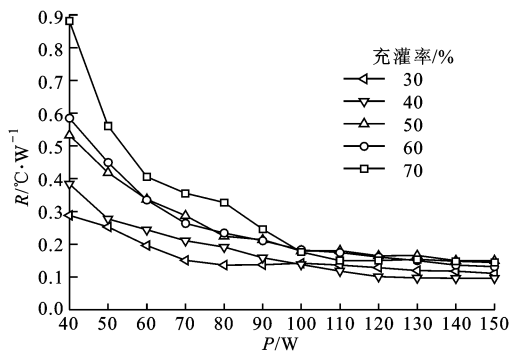


图 5 不同充灌率下活性剂水溶液的热阻

图 6 比较了颗粒体积分数为 1.39% 的磁性液体在不同充灌率下的热阻. 30% 与 40% 充灌率时, 脉动热管的热阻几乎相等, 都是最小的, 但 30% 充灌率时, 60 W 的热阻比 50 W 的高, 蒸发段可能出现局部烧干而导致热阻升高. 这种现象应该避免, 因为局部的过热会导致磁性液体中的活性剂成分(四甲基氢氧化铵)裂解, 进而会导致纳米磁性颗粒发生团聚与沉淀, 造成传热恶化, 因此充灌磁性液体的最

佳充灌率为 40%.

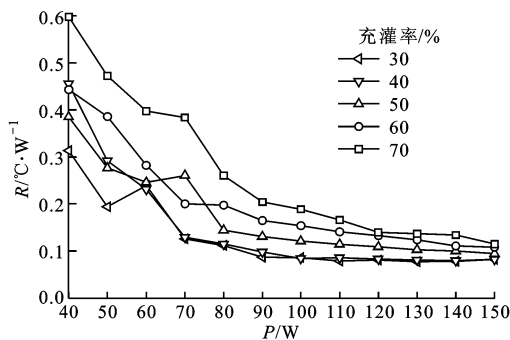


图 6 不同充灌率下磁性液体的热阻

图 7 比较了 3 种工质在 40% 充灌率下的热阻. 活性剂水溶液的热阻小于纯水的, 而磁性液体的热阻最小, 且在较低的加热功率(70 W)下脉动热管就已能达到良好的传热效果, 150 W 下脉动热管的热阻甚至减小到了 0.082 ℃/W. 这可以解释为, 一方面磁性液体中存在游离态的活性剂分子, 另一方面悬浮在水中的纳米磁性颗粒增大了磁性液体的有效导热系数, 两者均会强化蒸发段的沸腾传热, 增加汽化核心, 因此充灌磁性液体强化了脉动热管的传热.

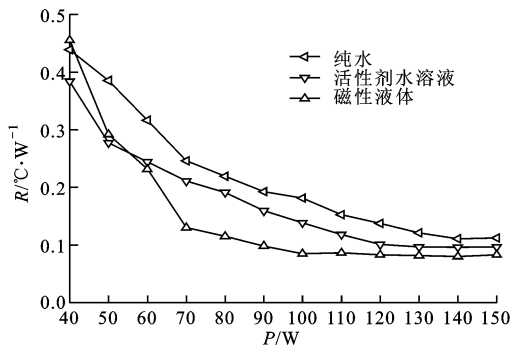


图 7 3 种工质在 40% 充灌率下的热阻

磁场会对磁性液体的流动传热产生明显的影响, 一般将磁性液体看作是具有一定磁化强度的均匀流体, 磁性液体的磁化强度与温度及外磁场均有关系. 图 8 比较了工质为磁性液体、充灌率为 40% 的脉动热管在 4 种磁场强度(0、20、40、60 kA/m)下的热阻, 磁场指向冷凝段, 在绝热段间隔分布. 由图 8 可知, 加热功率小于 100 W 时, 施加磁场会增大脉动热管的热阻, 但幅值较小, 规律不明显, 功率加大后, 磁场影响逐渐被削弱, 各磁场强度下的热阻趋于一致. 外磁场对管内磁性液体主要有两个作用, 一个是增大磁性液体的有效黏度, 另一个是施加磁体体积力. 低功率下, 管内磁性液体流速低, 磁场会增大流动阻力, 进而影响脉动热管的传热性能, 增大传热热阻. 工质流速增大后, 磁场的影响会逐渐减小. 磁体

积力与管内流型及磁性液体的磁化强度有关系,脉动热管中复杂的流动与传热过程使得磁体积力也变得不稳定,因此也就造成了脉动热管在传热性能上的波动.

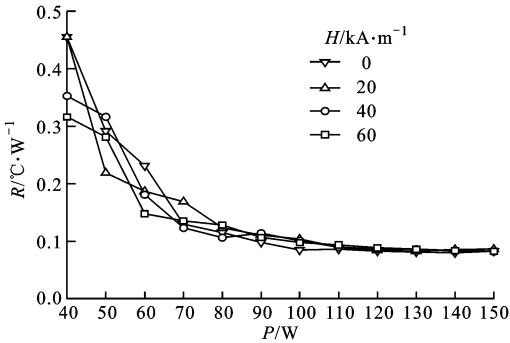


图 8 不同磁场强度下磁性液体的热阻

3 结 论

(1)以纯水为工质时,脉动热管的最佳充灌率为 30%. 充灌质量分数为 1.875% 的四甲基氢氧化铵水溶液与颗粒体积分数为 1.39% 的磁性液体时,脉动热管的最佳充灌率为 40%.

(2)较纯水及磁性液体中的活性剂水溶液,充灌磁性液体,脉动热管有更低的传热热阻,150 W 的加热功率下脉动热管的热阻甚至达到了 0.082 °C/W.

(3)施加磁场会略微削弱脉动热管的传热性能,这主要是由于外加磁场改变了磁性液体的物性及磁体积力的影响所致.

参考文献:

[1] AKACHI H. Structure of a heat pipe; US, 4921041 [P]. 1990-05-01.
[2] MA H B, WILSON C, BORGMEYER B, et al.

Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe [J]. Applied Physics Letters, 2006,88(14):3116.
[3] MA H B, WILSON C, YU Q, et al. An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2006,128(11):1213-1216.
[4] LIN Y H, KANG S W, CHEN H L. Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(11/12): 1312-1317.
[5] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1985.
[6] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al. Closed loop pulsating heat pipes, part A: parametric experimental investigations [J]. Applied Thermal Engineering, 2003,23(16):2009-2020.
[7] 曲伟, 马同泽. 脉动热管的工质流动和传热特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2002,23(5):596-598.
QU Wei, MA Tongze. Experimental investigation on flow and heat transfer of pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002,23(5):596-598.
[8] 曹小林, 周晋, 晏刚. 脉动热管的结构改进及其传热特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2004,25(5): 807-809.
CAO Xiaolin, ZHOU Jin, YAN Gang. Improvement on structure of pulsating heat pipe and experimental study on its characteristic of heat transfer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004,25(5):807-809.

(编辑 荆树蓉)