

微胶囊流体脉动热管的热输送性能^{*}

汪双凤 林梓荣 张伟保

(华南理工大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 将外径为 2.5mm、内径为 1.3mm 的铜管加工成四环脉动热管, 在不同工质 (3% 的 FS-39E 型微胶囊流体、乙醇、水) 和充液率 (40% ~ 80%) 下探讨了脉动热管的启动特性, 以及工质和充液率对脉动热管热输送性能的影响. 结果表明: 脉动热管的启动与充液率、热驱动力和工质有关; 相比于乙醇和水, 微胶囊流体作为工质时, 脉动热管具有较宽的工作范围, 尤其在高充液率的条件下, 热管表现出良好的启动性能和热输送性能.

关键词: 脉动热管; 充液率; 微胶囊流体; 热输送性能

中图分类号: TK172 4

文献标识码: A

脉动热管 (PHP) 是 Akachi 在 20 世纪 90 年代初提出的一种新型、高效、可用于微小空间、高热流密度条件下的传热元件. 它具有体积小、结构简单、热输送性能好等优点, 被誉为解决高热流密度散热问题最有前途的技术. 而改善和强化脉动热管的热输送性能更是学者们研究的热点. 在众多方法中, 探索工质及其充液率对脉动热管热输送性能的影响, 找出性能优越的工质及对应的最佳充液率来提高其热输送性能是最为直接、有效、简单的方法. 商福民^[1]和 Lin^[2]等发现以纳米流体作为脉动热管的工质能有效强化传热. 文中通过全新的实验装置, 采用微胶囊流体作为工质和水、乙醇加以对比, 探索工质和充液率对小尺寸脉动热管热输送性能的影响, 并进行分析讨论.

1 实验

以外径为 2.5mm、内径为 1.3mm 的铜管作为材料, 焊接成四环脉动热管, 其具体尺寸如图 1 所示, 实验装置如图 2 所示.

采用垂直底部加热的方式进行测试, 加热段长度为 35mm, 把电阻丝直接缠绕在加热段进行加热,

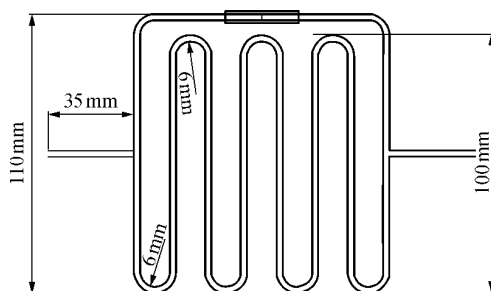


图 1 四环脉动热管的尺寸

Fig 1 Size of a four-turn pulsating heat pipe

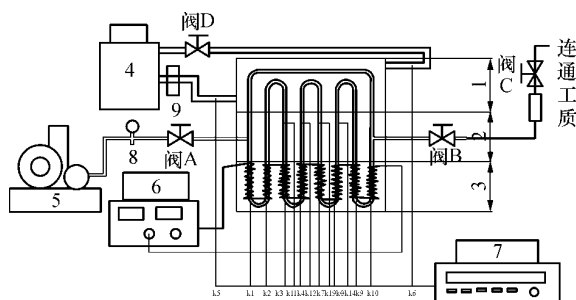


图 2 脉动热管的实验装置图

Fig 2 Experimental apparatus of PHP

1—冷凝段; 2—绝热段; 3—加热段; 4—天恒 SDC-6 数控低温恒温槽; 5—DTC-21 隔膜真空泵; 6—直流电源供应器; 7—Agilent 34970a 和模块 01 数据采集仪; 8—真空表; 9—液体流量计

收稿日期: 2008-04-24

^{*}基金项目: 国家基金广东省联合基金重点项目 (U083402)

作者简介: 汪双凤 (1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事多相流动与传热、微小尺度热管技术与热声效应的研究. E-mail: sfwang@scut.edu.cn

冷凝段采用水冷的方法进行冷却,冷凝段长度为 35mm。把数控低温恒温槽的温度(即冷却水的温度)设定在 (22.00 ± 0.05) , 用阀 D 控制水流量,然后在进出水口埋入 Omega-K 型热电偶(测量精度为 ± 0.1)测试水温的变化。实验前先把阀 B 关闭,打开阀 A,启动真空泵,将管内抽成真空(真空度为 1.0 kPa),然后关闭阀 A,打开阀 B 利用压差慢慢吸入工质,实验结束后再用天平进行校正。另外在加热段和绝热段埋入热电偶,测量不同加热功率下脉动热管的工作温度。

实验中所采用的微胶囊流体为日本三菱制纸生产的 FS-39E 型微胶囊相变材料。其相变温度为 39.66,相变潜热为 165.5 J/g,胶囊粒子的粒径在 1 μm 左右。实验时先把微胶囊粒子稀释为 3% (质量分数)的溶液,再进行充液比较。

2 实验结果与分析

实验中,采用电阻丝直接缠绕在加热段模拟发热工况,外面包保温棉以防止向环境漏热(热量损失小于 10%)。热平衡公式为:加热功率 = 脉动热管的热输送量 + 漏热。而不同加热功率下脉动热管的热输送量 $Q = \rho_k \times q_k \times q_{wk} \times \Delta t$ (ρ_k 为水的密度, kg/m^3 ; q_k 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q_{wk} 为体积流量, m^3/s ; Δt 是进出口水的温度差, $^{\circ}\text{C}$)。

2.1 脉动热管的启动特性

以水作为工质,充液率为 70% 的脉动热管加热段在不同加热功率下的温度曲线如图 3 所示。

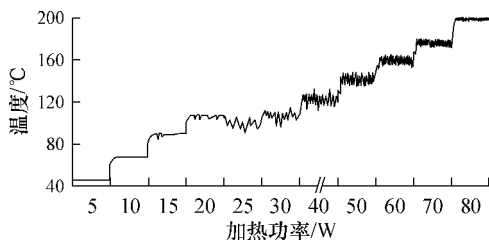


图 3 脉动热管加热段在不同加热功率下的温度曲线

Fig 3 Temperature curve of PHP heating section at different heating powers

由图 3 可见,当加热功率上升到 15W 时,出现温度突然下降的现象,此现象称为“起泡”,即脉动热管内的工质蒸发积累后冷凝回流到加热段,使加热段温度下降产生振动。但此时的振荡不能持续,往后的一段时间温度曲线再一次回到平静。加热功率升至 20W,温度骤降的现象再一次出现,且次数增

加,脉动热管处于间歇振动的状态;随后加热功率升至 25W,温度曲线的振动随之加剧,而且振动能够持续,此时加热段的平均温度比加热功率为 20W 时的还要低,该振动情况表示脉动热管进入稳定振荡状态;往后随着加热功率的升高,温度曲线的振动频率不断加大,但振动的幅度则渐渐趋于平缓。

各加热功率所对应的热阻如图 4 所示。由图 4 可见,随着加热功率的增加,脉动热管慢慢被激活,热阻逐渐降低。当加热功率升至 15W 时,热阻呈现出第一次下降趋势,对应脉动热管的“起泡”状态,热管开始被激活,但热阻还不到理想的状态;加热功率升至 20W 时,热阻再一次下降,对应其间歇振动状态,温度振动次数较“起泡”状态时多;再增大加热功率至 25W,热阻开始急剧下降,此后再增大加热功率,尤其是 40W 以后,热阻的降幅慢慢趋于平缓。事实上加热功率在 25W 之后,脉动热管进入稳定脉动的工作状态,热输送能力到达较佳状态。

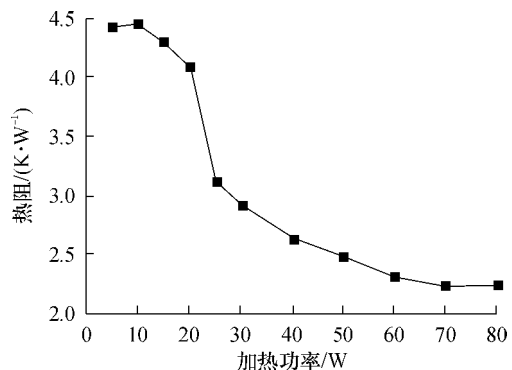


图 4 加热功率与热阻的关系

Fig 4 Relationship between heating power and thermal resistance

参阅以往相关脉动热管可视化的实验^[3-7],可以推断出脉动热管的启动经历泡状流(即起泡阶段,蒸发积累的工质沿壁面冷凝回流下来,偶尔形成温度的骤降)、弹状流(沸腾产生的气泡渐渐增大的阶段,对应温度曲线的间歇振动)、塞状流(形成气液柱随机分布的状态,脉动热管稳定振动)到搅拌流(在较大的加热功率下,脉动热管的高效运转阶段)的变化。根据脉动热管的启动过程把脉动热管的起泡温度和稳定脉动的温度作为判断脉动热管是否被激活,是否高效运转输送热量的标准。

2.2 工质及其充液率对脉动热管热输送性能的影响

脉动热管的起泡温度与管内工质的汽化温度

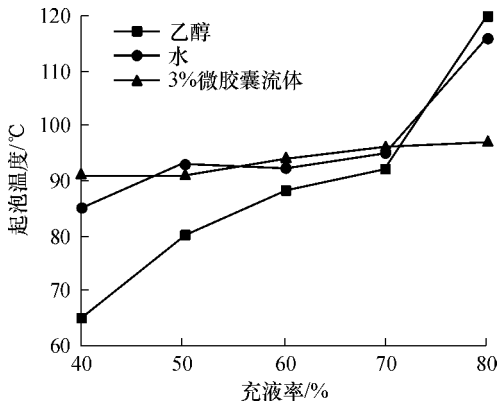


图 5 工质及充液率对起泡温度的影响

Fig 5 Effects of liquid filling rate and working fluid on foaming temperature

有关,理论上工质的汽化温度越低越有利于起泡.工质及其充液率对起泡温度的影响如图 5 所示.

由图 5 可见,随着脉动热管充液率的增大,起泡温度升高,原因可归结为脉动热管起振与管内工质的蒸发冷凝过程有关,充液率越大,管内工质越多,要加热使之产生蒸发的功率、温度越高.但对于不同的工质而言又有所差别,乙醇对充液率的敏感度高于水和 3%微胶囊流体,尤其在充液率为 80%时,水和乙醇的起泡温度都骤增,达到 120 ,而 3%微胶囊流体在充液率 40%~80%时都维持低于 100 的起泡温度.原因可能是微胶囊粒子与管壁接触更有利于形成汽化核心^[8-9].

工质及其充液率对脉动热管的稳定振动温度的影响如图 6 所示.

由图 6 可见,对于以水、乙醇作为工质的脉动热管来说,其稳定振动温度的规律如同起泡温度的规

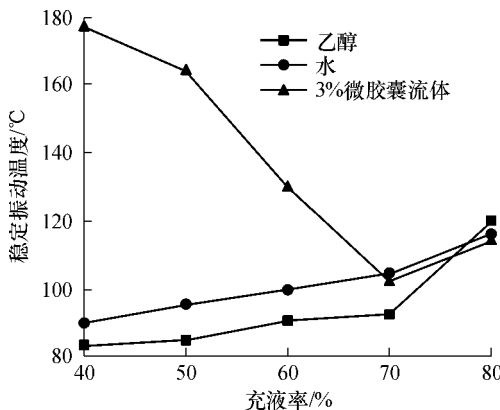


图 6 工质及充液率对稳定振动温度的影响

Fig 6 Effects of liquid filling rate and working fluid on stable oscillation temperature

律,随着充液率的增大,振动温度上升.但对于 3%微胶囊流体来说,其表现出不同的特点,在充液率为 40%到 70%的区间内,脉动热管稳定振动的温度不断下降,在 70%处达到最低,甚至比水的低,到充液率为 80%时又有所升高,但均低于水和乙醇在同样充液率下的振动温度.表明 3%微胶囊流体对于高充液率具有优势.这可能与微胶囊流体呈现乳胶状态有关,这是水和乙醇所不具备的,高充液率反而使微胶囊工质之间形成良好的链接结构,能够在较低的温度下形成连续的振动.

加热功率为 80W,即保证脉动热管高效运转时,采用不同工质的脉动热管热输送量、热阻与充液率的关系如图 7、8 所示.

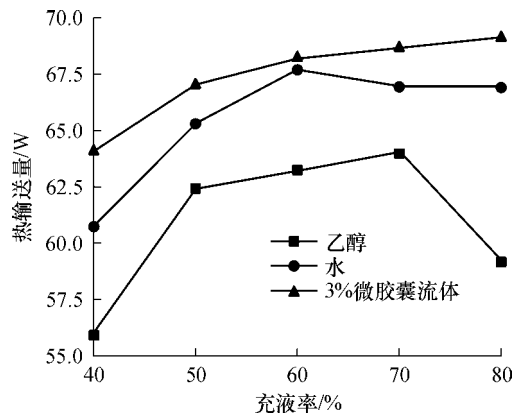


图 7 工质及充液率对热输送量的影响

Fig 7 Effects of liquid filling rate and working fluid on heat-transport capability

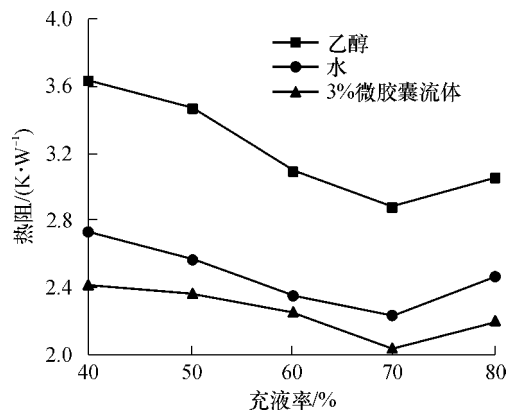


图 8 工质及充液率与热阻的影响

Fig 8 Effects of liquid filling rate and working fluid on thermal resistance

由图 7 可见,热输送能力大小顺序为 3%微胶囊流体 >水 >乙醇,从曲线的趋势来看,以水、乙醇作为工质时脉动热管的热输送量随充液率增加呈现

出先上升再下降的规律,大约在充液率为 70%时热输送量达到最大.而 3%微胶囊流体的曲线相对较平缓,随着充液率的增加,热输送能力不断提高.显然,3%微胶囊流体拥有更宽阔的工作范围.同样由图 8 可见,不同工质在充液率为 70%时热阻达到最低.而 3%微胶囊流体作为工质时,脉动热管的热阻也处于最低状态.因为脉动热管的热输送能力与工质的比热和汽化潜热、管内工质的流动速度、流动状态有关,所以将乙醇作为工质时热输送效果较差,可能是它的比热和汽化潜热相对较小所致,而 3%微胶囊流体热输送效果优于水可能是由于其稀释后比热、汽化潜热与水相当,但密度较水轻,在同样的加热功率下,管内工质运转速度更快所致的.此外也与图 5、6 的分析有关,微胶囊流体在脉动热管起振方面都有它的优势.

3 结论

通过不同工质及其充液率对脉动热管热输送性能影响的对比研究,结果发现:

(1)脉动热管的启动随着加热功率的增大经历了不同阶段,一定的热驱动力是脉动热管启动的条件.研究提出把起泡温度和稳定脉动的温度作为判断脉动热管是否被激活、是否高效运转输送热量的标准.

(2)在不同的工质对比中,微胶囊流体具有较宽阔的工作范围,尤其在高充液率的条件下,其表现出良好的启动性能和热输送性能,热阻小于水和乙醇.原因是微胶囊流体内含有微小的颗粒,有利于形成汽化核心,此外其比热和汽化潜热都较大,密度较小,呈乳胶状,有利于工质在管内产生振动.

(3)低充液率有利于脉动热管在较低的温度下启动,但此时脉动热管的热输送能力并未达到最佳.综合实验结果发现,当充液率在 60%~70%时对于不同的工质,脉动热管都表现出较佳的性能,热输送量较大,加热段的工作温度、热阻也较低.

参考文献:

[1] 商福民,刘登瀛,冼海珍,等.自激振荡流热管内 Cu 水纳米流体的传热特性[J].动力工程,2007,27(2): 233-236

- Shang Fu-min, Liu Deng-ying, Xian Hai-zhen, et al Heat transfer characteristics of Cu-water in self-exciting mode oscillating-flow heat pipe [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(2): 233-236
- [2] 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.
- [3] Tong B Y, Wong T N. Closed-loop pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(18): 1845-1862.
- [4] 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 Tong-ze. Experimental investigation on flow and heat transfer of pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 596-598
- [5] 杨洪海, Khandekar Sameer, Groll Manfred. 单回路闭式脉动热管内流型的实验研究[J].流体机械,2007,35(1): 60-63
Yang Hong-hai, Khandekar Sameer, Groll Manfred. Experimental investigation of the flow patterns in a single closed loop pulsating heat pipe [J]. Fluid Machinery, 2007, 35(1): 60-63
- [6] 曹小林,王伟,陈杰,等.环路型脉动热管的工质流动和传热特性实验研究[J].热科学与技术,2007,6(1): 56-59
Cao Xiao-lin, Wang Wei, Chen Jie, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer of pulsating heat pipe [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(1): 56-59
- [7] 徐荣吉,王瑞祥,丛伟,等.脉动热管实验台的搭建及可视化实验研究[J].流体机械,2007,35(6): 59-61
Xu Rong-ji, Wang Rui-xiang, Cong Wei, et al. Design of pulsating heat pipe experiment rig and visual experiment study [J]. Fluid Machinery, 2007, 35(6): 59-61
- [8] Qu W, Ma H B. Theoretical analysis of startup of a pulsating heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, (6): 2309-2316
- [9] 周岩,马鸿斌.尺度效应对脉动热管启动和运行的影响[J].工程热物理学报,2007,28(1): 140-142
Zhou Yan, Ma Hong-bin. Scale effects on startup and operation of looped pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 140-142

(下转第 66 页)

You Hai-ying, Ma Guo-guang, Huang Meng, et al Cascade utilization of LNG cold energy [J]. Natural Gas Technology, 2007, 1 (4): 65-68
[11] 华贲. 大型 LNG 接受站冷能的综合利用 [J]. 天然气

工业, 2008, 28 (3): 10-15

Hua Ben Comprehensive utilization of cold energy in large-scale LNG terminal [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28 (3): 10-15

Utilization of Cryogenic Energy of LNG in Ethylene Cryogenic Separation Process

Li Ya-jun Yin Hua

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: In the conventional ethylene cryogenic separation process, the compression refrigeration system consumes a lot of cryogenic energy. In order to solve this problem, the cryogenic energy of liquefied natural gas (LNG) is applied to ethylene cryogenic separation process to reduce the compression refrigeration load. Experimental results of a ethylene cryogenic separation system with an annual output of 300 kt/a indicate that the utilization rate of LNG cryogenic energy in the separation process reaches 76.5%, and that LNG provides a cryogenic energy of 22 472 kW, which results in a direct compression power saving of 11 968 kW and greatly reduces the energy consumption of ethylene cryogenic separation process.

Key words: liquefied natural gas; cryogenic energy utilization; ethylene; cryogenic separation; compression refrigeration

(上接第 61 页)

Heat-Transport Capability of Pulsating Heat Pipes for Microcapsule Fluid

Wang Shuang-feng Lin Zi-rong Zhang Wei-bao

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education,
South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: A four-turn pulsating heat pipe (PHP) was made from a copper tube with its outer diameter of 2.5 mm and inner diameter of 1.3 mm. The startup characteristics of the PHP were then investigated at various liquid-filling rates of 40% ~ 80%, respectively with 3% FS-39E microcapsule fluid, ethanol and water as the working fluids. Moreover, the effects of working fluid and liquid-filling rate on the heat-transport capability were analyzed. The results show that the startup of PHP is related to the liquid-filling rate, the thermal driving force and the working fluid, and that, as compared with ethanol and water, 3% FS-39E microcapsule liquid may result in a broader working range of PHP, and particularly at a high liquid-filling rate, the PHP possesses excellent startup characteristics and high heat-transport capability.

Key words: pulsating heat pipe; liquid-filling rate; microcapsule fluid; heat-transport capability