

# 带分支结构平板脉动热管的传热性能研究

邹惠芬,王宏伟,刘超翔

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 为了提高带有分支结构的平板脉动热管的启动性能和传热性能,对不同分支长度的平板脉动热管的热力特性进行研究。**方法** 通过设计并搭建可视化试验平台,控制工质类型、分支长度、充液率、加热功率及倾斜角等参数,对热管的启动、传热和工质流动特性进行研究,观察工质的流形及运行温度曲线,对比分析平板脉动热管的传热性能。**结果** 平板脉动热管的启动方式为渐进式启动,工质由泡状流演变为环状流;由于分支结构的存在,使管内工质分布均匀,缩短了热管的启动时间。**结论** 分支结构的存在极大地增加了热管的传热性能,最佳工况下(无水乙醇、充液率50%、120 W、26 mm)传热性能相比无分支型热管提升了15.3%。

**关键词** 脉动热管;分支结构;均匀加热;渐进式启动;传热性能

中图分类号 TU834;X51

文献标志码 A

**引用格式**:邹惠芬,王宏伟,刘超翔.带分支结构平板脉动热管的传热性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1054-1059.(ZOU Huifen, WANG Hongwei, LIU Chaoxiang. Study on heat transfer performance of flat plate pulsating heat pipe with extra branches[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2024,40(6):1054-1059.)

## Study on Heat Transfer Performance of Flat Plate Pulsating Heat Pipe with Extra Branches

ZOU Huifen, WANG Hongwei, LIU Chaoxiang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract**: In order to improve the start-up and heat transfer performance of flat pulsating heat pipes with branch structures, the thermal characteristics of flat pulsating heat pipes with different branch lengths were studied. By designing and building a visual experimental platform, controlling parameters such as the type of working fluid, branch length, filling rate, heating power, and tilt angle, the start-up, heat transfer, and flow characteristics of the heat pipe are studied. The manifold and operating temperature curve of the working fluid are observed, and the heat transfer performance of the flat pulsating heat pipe is compared and analyzed. The experimental results showed that the starting mode of the flat pulsating heat pipe was progressive, and the working fluid evolved from bubbly flow to annular flow. Due to the existence of branching structure, the

收稿日期:2023-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51978421)

作者简介:邹惠芬(1972—),女,教授,博士,主要从事建筑节能和空气品质保障技术等方面研究。

distribution of working fluid inside the tube is uniform, which shortens the start-up time of the heat pipe. The existence of branching structure greatly increases the heat transfer performance of the heat pipe, and under the optimal operating conditions (anhydrous ethanol, liquid filling rate of 50%, 120 W, 26 mm), the heat transfer performance is improved by 15.3% compared to the non branching heat pipe.

**Key words:** pulsating heat pipe; branch structure; uniform heating; progressive startup; heat transfer performance

长期以来,电子器件和设备的有效散热一直是传热技术改进的关键节点。据统计,超过50%的电子设备损坏都是因为温度过高造成的,当半导体元件的温度每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,系统的可靠性就会下降50%<sup>[1]</sup>。现阶段,热管被认为是一种独特的液冷散热技术,用于电子元器件冷却时不易出现超温及热量集中的现象。带分支结构平板脉动热管在电子冷却方面具有强大的应用前景,脉动热管工作时,其内部汽液相脉动流动非常复杂多变,其热力学特性与内部气、液塞的分布密切相关。众多研究表明<sup>[2-11]</sup>,加热功率的大小决定工质的流型和演化;管路结构的变化也极大地影响着脉动热管的传热性能。很多学者通过改变各种影响因素或是提出新型结构,以提高脉动热管的传热性能。M. Ebrahimi等<sup>[12]</sup>将平板脉动热管的相邻两通道在蒸发段和冷凝段进行连接,试验结果表明互联互通使工质具有单向性,增强了工质的混合以及减小了流动阻力,相比于普通型脉动热管传热性能提升了24%。J. Wang等<sup>[13]</sup>对波纹结构分别位于不同位置下的单环脉动热管进行研究,结果表明波纹结构位于蒸发段时,脉动热管具有最优的启动和传热性能。S. Thompson等<sup>[14]</sup>将特斯拉阀引入平板脉动热管,使得反向流动阻力大于正向,有效促进工质单向流动,且效果随加热功率的增大而提升,整体传热性能提高了15%~25%,但未对阀的设计、数量和集成方式等进行优化,而W. Wessel等<sup>[15]</sup>的研究则未发现特斯拉阀的促进作用。E. Erfan等<sup>[16]</sup>在脉动热管环路底端额外增加支管,并命名为分支结

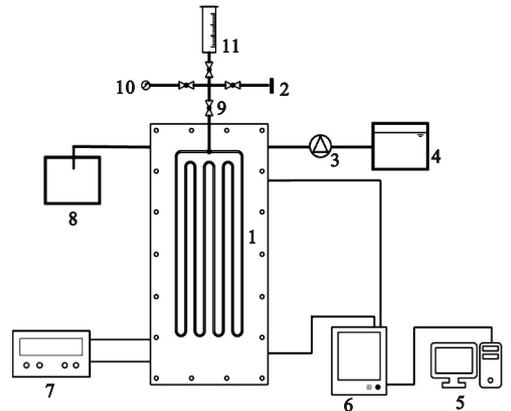
构平板脉动热管,对单一分支长度的脉动热管进行研究,结果表明,相较于无分支型平板脉动热管,充液率为50%条件下其传热性能提高了18%,分支结构优化了脉动热管的传热性能,并未对支管长度的影响进行研究。

综上所述,笔者设计并制作了带有三种不同分支长度的平板脉动热管,与无分支结构平板脉动热管对比,进行热力特性及强化传热研究,在均匀加热情况下,通过调整工质类型、充液率、加热功率及倾斜角等参数,观察工质的流动特征、运行温度曲线和传热热阻,对脉动热管的传热特性进行对比分析,得出各因素对平板脉动热管传热性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

试验平台如图1所示。该系统由脉动热管加热系统、冷却系统和数据采集系统组成。



1. 脉动热管;2. 真空泵;3. 循环水泵;4. 恒温水浴;5. 计算机;6. 数据采集仪;7. 直流稳压电源;8. 水池;9. 真空针阀;10. 真空表;11. 注射器。

图1 脉动热管试验平台

Fig. 1 Pulsating heat pipe experimental platform

加热系统采用四片  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  的聚酰亚胺加热膜,均匀贴于加热端底面,通过直流稳压电源进行加热。冷却系统采用长  $\times$  宽  $\times$  厚为  $70\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  的铝块加工成水冷板,贴于平板脉动热管背部的冷凝端。数据采集系统包括温度采集仪和摄录一体机,分别采集温度数据和管内工质流动可视化图像。

## 1.2 试验方法

因试验装置的气密性对于维持真空环境至关重要,所以要对其进行气密性检测。首先将与脉动热管连接的真空针阀关闭,利用真空泵对脉动热管抽真空。当脉动热管的真空度满足试验要求后,打开充液装置的阀门,由于此时平板脉动热管处于真空状态下,在负压的作用下注射器内的液体会自动进入脉动热管,此时需要控制工质进入脉动热管的速率,待注射器内液位达到标定线之后关闭阀门,完成充液工作。开启稳压电源并进行调节,保证加热膜的加热功率。打开冷却水循环泵,调节转子流量计使流速保持稳定。冷却水先由恒温水浴加热至设定温度并保持,再由循环水泵输送到水冷板与脉动热管底部的冷凝段进行换热,换热后的冷却水流入水池进行收集。同时打开数据采集系统,运行数据采集功能软件,对平板脉动热管的瞬态温度值进行采集,利用数码相机对平板脉动热管的流型进行拍摄,将采集到的数据输入计算机进行处理。因对脉动热管采取了保温措施,蒸发段底表面保温层和顶面的散热忽略不计。

图2为有无分支及不同分支长度的脉动热管结构设计示意图。0#试件为无分支结构的对照组,1#、2#、3#试件的平板脉动热管分别带有  $13\text{ mm}$ 、 $26\text{ mm}$ 、 $39\text{ mm}$  三种长度的分支结构。使用钻头在脉动热管底面开出约  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的沟槽,将热电偶放入槽中,以便热电偶探头更接近工质,从而更精确地测量试验中工质的瞬时温度。如图2所示,在

冷凝端布置两个温度测点  $c_1$ 、 $c_2$ ,在加热端布置四个测点  $h_1 \sim h_4$ 。分析不同充液率( $0$ 、 $30\%$ 、 $50\%$ 和 $70\%$ )、不同倾斜角( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ )、不同加热功率( $40\text{ W}$ 、 $80\text{ W}$ 、 $120\text{ W}$ )及不同工质(水、无水乙醇)对各种类型结构平板脉动热管传热性能的影响。

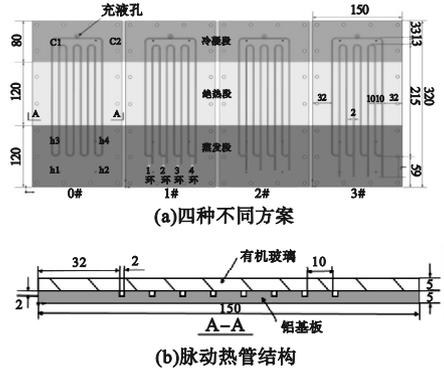


图2 脉动热管结构设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pulsating heat pipe structure design

## 1.3 数据处理

传热热阻的  $R$  计算公式为

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{Q} \quad (1)$$

式中: $\bar{T}_e$ 为蒸发段的温度平均值, $^\circ\text{C}$ ; $\bar{T}_c$ 为冷凝段的温度平均值, $^\circ\text{C}$ ; $Q$ 为蒸发段总电加热功率减去脉动热管损失的热量, $\text{W}$ 。

通过热平衡法计算总加热功率的不确定性,假定脉动热管的实际换热量为冷凝段中冷板所带走的热量,通过下式计算得到:

$$Q_c = \rho_c C q (\bar{T}_{c,\text{out}} - \bar{T}_{c,\text{in}}) \quad (2)$$

式中: $\rho_c$ 为冷却水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $C$ 为冷却水的定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; $q$ 为冷却水的体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\bar{T}_{c,\text{out}}$ 为冷板出口水温平均值, $^\circ\text{C}$ ; $\bar{T}_{c,\text{in}}$ 为冷板入口水温平均值, $^\circ\text{C}$ 。

通过计算得出,试验中脉动热管的实际传热量为总加热功率的  $83.1\% \sim 91.4\%$ 。

## 1.4 误差分析

主要误差来源于试验过程中的直接和间接测量误差。直接测量的数据有温度、流量、进出口水温、电热膜的输入电压和功率等,间

接测量数据主要为脉动热管的传热热阻。笔者通过不确定度对被测参数及误差进行分析。得到如下结果:①该系统的温度测量不确定度为1%;②间接测量的加热功率不确定度为1.8%;③体积流量的测量不确定度为2.3%;④计算传热量的不确定度为2.5%;⑤计算得到热阻的相对不确定度为11.2%。

## 2 影响因素的传热特性分析

### 2.1 分支结构及其长度

图3为分支结构形式及长度对热阻的影响。由图3可以看出,充液率为50%、分支长度不超过26 mm时,脉动热管热阻随分支长度增加而减小,并在分支长度为26 mm时在各加热功率下取得最低传热热阻 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。相比30%时,脉动热管传热性能提升更为明显。而在充液率70%条件下,脉动热管在120 W加热功率下,分支长度等于26 mm时热阻最低为 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ,当分支长度大于26 mm时,脉动热管热阻随分支长度增加而增大,但带有分支结构的脉动热管热阻要低于无分支结构的脉动热管。

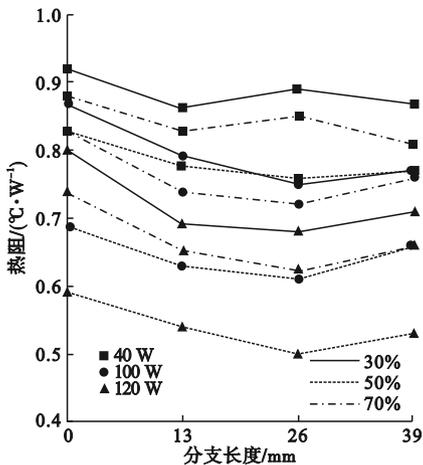


图3 分支结构对热阻的影响

Fig. 3 The influence of branch structure on thermal resistance

### 2.2 充液率

图4为不同功率下每个试件的热阻随着

液体填充率的变化情况。由图4可以看出,在40 W的加热功率下,1#和2#试件在充液率为50%时传热热阻最低,0#试件热阻最高;在80 W的加热功率下,4个试件在充液率为50%时达到最低热阻,而提高至70%时热阻不再降低反而上升,但低于充液率30%时的传热热阻;加热功率提升至120 W时,各试件均达到最低传热热阻,其中,1#和2#试件在充液率50%下传热性能最好,0#传热性能最差。

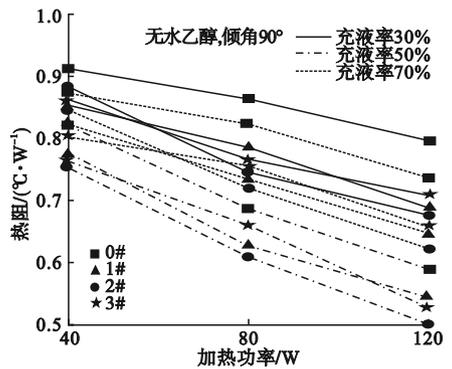


图4 不同加热功率下充液率对热阻的影响

Fig. 4 The influence of liquid filling rate on thermal resistance under different heating powers

由于充液率30%时工质量少,两侧环路内的工质极易蒸发,工质回流困难,所以其传热性能最差;当充液率提升至50%,此时管内工质的量适中,有足够空间生成气塞,气塞在压差的驱动下更容易推动工质运动,提升传热性能;充液率增加至70%,工质在重力的驱动下能快速回流,使得管内显热传热量增加,传热性能较30%时有所提升,但是过多工质也使液塞运动时的阻力增大,驱动力不足,工质流动减缓,传热性能下降。

### 2.3 倾斜角度

图5为以无水乙醇作为工质,充液率为50%时0#、2#试件在不同倾斜角度下加热功率与热阻的关系。由图5可以看出,无论是是否带有分支结构,脉动热管在倾角为 $90^{\circ}$ 情况下传热性能最佳,脉动热管热阻最小。与史维秀<sup>[17]</sup>的研究结果不同,本试验中倾角为

45°时脉动热管可以正常启动,但传热效果较竖直工作时有所降低。水平工作时,在80 W的加热功率下仅加热极短时间,脉动热管内的工质在加热端就出现烧干现象,不能正常启动,传热性能极差。倾角为0°时,0#和2#两个试件的传热热阻相差不大,且变化趋势基本一致;倾角为45°和90°时,热阻随加热功率的增大而减小,且在各加热功率下2#试件的热阻都要小于0#试件。

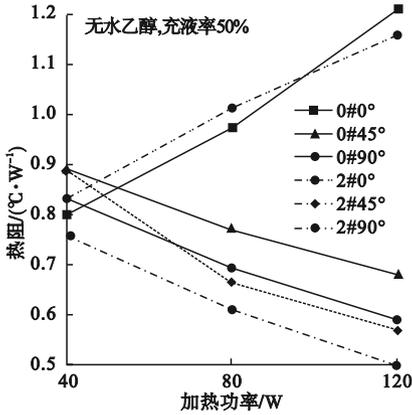


图5 不同倾角对热阻的影响

Fig. 5 The influence of different inclination angles on thermal resistance

### 2.4 工作介质

图6为倾斜角90°下不同工作介质的传热性能结果。以水和无水乙醇为工质的脉动热管热阻都会随加热功率的升高而减小。在40 W的加热功率下,脉动热管内部以不连续的泡状流为主,在相同的压力条件下,无水

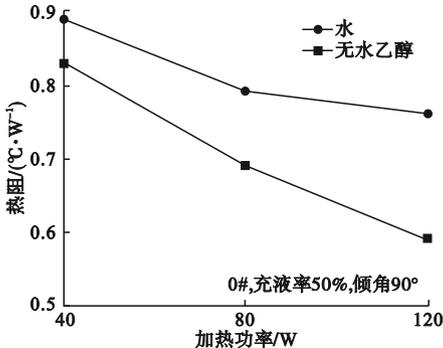


图6 工质物性参数对热阻的影响

Fig. 6 The influence of physical properties of working fluid on thermal resistance

乙醇的蒸发量比水的蒸发量大,以无水乙醇为工质的平板脉动热管具有更好的传热性能。在80 W的加热功率下,以无水乙醇作为工质的热管的热阻显著下降,说明其工作状态良好。当加热功率为120 W时,两种工质的热阻相差最大。在所有的加热功率下,以无水乙醇作为工质的脉动热管的热阻总是最低的,而使用水作为工质的脉动热管的热阻是最高的。

### 2.5 冷却温度

图7为不同冷却水温度下0#试件的热阻变化结果。由图7可以看出,当冷却水温度为25 °C时,且在相同的加热功率下,平板脉动热管的热阻要小于冷却水温度为20 °C时的热阻,而且在较高加热功率下,热阻与冷却温度的反比关系更为明显。该试验现象与F. Pagnoni等<sup>[18]</sup>的研究结果类似,在脉动热管没有烧干的前提下,冷却温度越高传热性能越好。

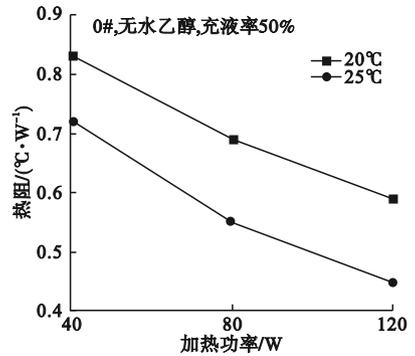


图7 冷却温度对热阻的影响

Fig. 7 The Influence of cooling temperature on thermal resistance

## 3 结论

(1)从热管的传热热阻来看,分支结构的存在能极大增加热管的传热性能,最佳工况下(无水乙醇、充液率50%、120 W、26 mm)传热性能相比无分支型热管提升15.3%;分支长度小于26 mm时,分支长度越长,热管传热性能越好。

(2)采用无水乙醇的脉动热管更容易启动,运行时的脉动速度也相对较快,在所有的加热功率下,以无水乙醇作为工质的脉动热管的热阻总是最低的;冷却温度越高传热性能越好。

## 参考文献

- [ 1 ] 吕永超,杨双根. 电子设备热分析、热设计及热测试技术综述及最新进展[J]. 电子机械工程,2007(1):5-10.  
(LYU Yongchao, YANG Shuanggen. Review and latest progress of thermal analysis, thermal design and thermal testing technology of electronic equipment [J]. Electronic and mechanical engineering,2007(1):5-10)
- [ 2 ] QU J, WU H Y. Flow visualization of silicon-based micro pulsating heat pipes [J]. Science China(technological sciences), 2010, 53(4): 984-990.
- [ 3 ] 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(5):596-598.  
(QU Wei, MA Tongze. Experimental study on flow and heat transfer characteristics of working fluid of pulsating heat pipes [J]. Journal of engineering thermophysics, 2002(5):596-598)
- [ 4 ] 薛志虎,陈思员,曲伟. 氨工质脉动热管的可视化启动和传热性能研究[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(9):999-1006.  
(XUE Zhihu, CHEN Siyuan, QU Wei. Study on visual start-up and heat transfer performance of ammonia working fluid pulsating heat pipe [J]. Science China TECH, 2015, 45(9): 999-1006)
- [ 5 ] 汪维伟,赵福云,王磊,等. GO-纳米流体在振荡热管中的气-液脉动现象及其传热特征[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(6):1789-1797.  
(WANG Weiwei, ZHAO Fuyun, WANG Lei, et al. Gas-liquid pulsation phenomenon and heat transfer characteristics of GO-nanofluids in oscillating heat pipes [J]. Journal of central south university (natural science edition), 2021, 52(6): 1789-1797)
- [ 6 ] ARAI T, KAWAJI M. Thermal performance and flow characteristics in additive manufactured polycarbonate pulsating heat pipes with novac 7000 [J]. Applied thermal engineering,2021,197:117273.
- [ 7 ] XUE Z H, QU W. Experimental and theoretical research on a ammonia pulsating heat pipe; new full visualization of flow pattern and operating mechanism study [J]. International journal of heat and mass transfer,2017,106:149-166.
- [ 8 ] KARTHIKEYAN V K, RAMACHANDRAN K, PILLAI B C, et al. Understanding thermo-fluidic characteristics of a glass tube closed loop pulsating heat pipe: flow patterns and fluid oscillations [J]. Heat and mass transfer, 2015, 51(12): 1669-1680.
- [ 9 ] SAHA N, DAS P K, SHARMA P K. Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe [J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 74: 238-250.
- [ 10 ] RITTIDECH S, TERDTON P, MURAKAMI M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition [J]. Applied thermal engineering, 2003(4): 497-510.
- [ 11 ] WU S C, ZHOU H, YAO F, et al. Experimental study on two-phase flow and thermal performance in pulsating heat pipes [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-energy, 2021(3): 113-123.
- [ 12 ] EBRAHIMI M, SHAFI M B, BIJARCHI M A. Experimental investigation of the thermal management of flat-plate closed-loop pulsating heat pipes with interconnecting channels [J]. Applied thermal engineering, 2015, 90: 838-847.
- [ 13 ] WANG J, MA H, ZHU Q, et al. Numerical and experimental investigation of pulsating heat pipes with corrugated configuration [J]. Applied thermal engineering, 2016, 102: 158-166.
- [ 14 ] THOMPSON S, MA H, WILSON C. Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with tesla-type check valves [J]. Experimental thermal and fluid science, 2011, 35(7): 1265-1273.
- [ 15 ] WITS W, GROENEVELD G, VAN GERNER H, et al. Experimental investigation of a flat-plate closed-loop pulsating heat pipe [J]. Journal of heat transfer-transactions of the asme, 2019, 141(9): 091807.
- [ 16 ] SEDIGHI E, AMARLOO A, SHAFII B, et al. Numerical and experimental investigation of flat-plate pulsating heat pipes with extra branches in the evaporator section [J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 126: 431-441.
- [ 17 ] 史维秀. 改进型回路脉动热管可视化及传热性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
(SHI Weixiu. Study on visualization and heat transfer performance of improved closed loop pulsating heat pipe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [ 18 ] PAGNONI F, AYEI V, ROMESTANT C, et al. Flat plate pulsating heat pipes with and without separating grooves; experimental investigation on adiabatic length, coolant temperature and orientation [J]. Iop conference series: materials science and engineering. iop publishing, 2021, 1139(1): 012005.  
(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)