文章编号:0253-4339(2019) 03-0031-06 **doi**:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.03.031

# 蠕动泵驱动的毛细管环路传热系统的性能研究

#### 莫海军'冯晨'万珍平'付永清'汤勇'

#### (1 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640; 2 华南理工大学设计学院 广州 510640)

**摘 要** 液态工质在满足一定内径要求的毛细管内会形成稳定的液柱——气塞系统。本文提出利用蠕动泵驱动毛细管内气液 相间隔的工质单向循环流动,形成一个具有脉动热管效应的新型两相传热系统。搭建了系统实验装置,以去离子水为工质,当毛 细管内径为3 mm,管内工质流速恒定为7 m/min时,实验研究了不同充液率的两相传热系统在加热功率分别为60 W &0 W 和 100 W 时的传热特性。结果表明:该传热系统的最佳充液率为20%,在加热功率为60、80、100 W 时,充液率为20%的传热系统达 到稳态时的热阻分别为0.52、0.38、0.30 ℃/W,相比于传统的水冷传热系统其热阻分别降低了32.5%、45.7%、50%。 关键词 两相传热系统;蠕动泵驱动;传热特性;充液率;毛细管

中图分类号:TK124; TQ051.5

文献标识码:A

# Performance of Capillary Loop Heat Transfer System Driven by Peristaltic Pump

Mo Haijun<sup>1</sup> Feng Chen<sup>1</sup> Wan Zhenping<sup>1</sup> Fu Yongqing<sup>2</sup> Tang Yong<sup>1</sup>

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

**Abstract** A stable liquid column-air plug system forms when liquid working fluid flows in a capillary tube that meets specific requirements for the inner diameter. In this paper, a novel two-phase heat transfer system with a pulsating heat pipe is proposed for the scenario in which a liquid-vapor two-phase working fluid in the capillary tube is driven by a peristaltic pump and one-way flow forms. The heat transfer characteristics of the system with different liquid filling ratios are investigated experimentally by a self-designed experimental setup with deionized water as the working fluid under 60 W, 80 W, and 100 W conditions. The inner diameter of the capillary tube is 3 mm, and the working fluid flows in a capillary tube with a constant flow rate of 7 m/min. The experimental results show that the optimum liquid filling ratio is 0. 52 C/W, 0. 38 C/W, and 0. 30 C/W, respectively, which is reduced by 32. 5%, 45. 7%, and 50%, respectively, compared with that of the traditional water-cooled heat transfer system.

Keywords two-phase heat transfer system; peristaltic pump; heat transfer characteristic; liquid filling ratio; capillary tube

随着电子元器件的体积小型化且热流密度越来 越大,迫切需要小型高效的热传输设备来解决其散热 问题<sup>[1]</sup>。为解决高热流密度微小型电子元器件的散 热问题,相变传热因其较高的传热效率受到众多学者 的青睐。

目前,在相变传热的研究和应用中,主要以热管 和用泵作为驱动力的两相传热系统为主。热管技术 因其成熟的工艺和优异的性能具有广阔的应用前景, 包括传统热管、脉动热管、吸附式热管、毛细泵热管和 环路热管等<sup>[2-4]</sup>。然而,无论热管的形式和结构如何 变化,一直存在传热距离短、极限功率小等问题,在某 些情况下热管启动所需的温度甚至超过元器件所能 承受的最大温度<sup>[5-6]</sup>。此外,在分散式多热源的工况下,热管已不能满足实际需求。因此,用泵作为驱动力的两相传热系统成为热控技术方面的研究热点。

对于用泵作为驱动力的两相传热系统,国内外学 者做了相关的研究工作。刘杰等<sup>[7-10]</sup>对机械泵驱动 的回路式传热系统的启动特性进行实验研究,发现启 动过程中会产生液体过热现象,启动温度越低,产生 的过热度越大。郑小平等<sup>[11]</sup>提出一种传热系统,利 用蒸汽驱动涡轮,使与涡轮相连的机械泵正常工作, 通过机械泵驱动冷凝液返回到蒸发器。研究表明该 系统的传热能力由蒸发段的沸腾极限决定。J. H. Ambrose 等<sup>[12]</sup>研究了一种用泵驱动的热管冷凝板,测

收稿日期:2018-02-25;修回日期:2018-06-16

试结果表明该装置不受重力的影响且适用于更高热 流密度的工况。Zhou Feng 等<sup>[13]</sup>针对废气中能量的 回收提出并设计了一种用泵来驱动的环路热管,减少 了空调系统在新鲜空气处理时所消耗的能量。马跃 征等[14-15]研究了磁力泵驱动两相冷却环路的启动特 性和换热性能随温差的变化规律,并搭建了一种磁力 泵驱动的两相冷却复合制冷装置。马国远等<sup>[16-17]</sup>提 出了一种泵驱动回路热管的能量回收装置,分析了工 质质量流量、换热器传热面积、换热器迎面风速以及 工质种类对换热量、温度效率和性能系数等参数的影 响。郭振江等<sup>[18]</sup>研究了机械泵驱动分离式热管对空 调系统的冷量回收和除湿能力的影响,结果表明,机 械泵驱动分离式热管可以显著提高空调系统的除湿 能力,降低系统能耗。尽管国内外学者对用泵作为驱 动力的两相传热系统做了较多研究,但这些系统尚不 适用于微电子元件或芯片的冷却,在微电子领域依然 普遍采用风冷、水冷以及集成热管的冷却方式。随着 微电子元件不断向小型化和高功率化趋势的发展,用 泵作为驱动力的两相传热系统在小体积和高功率方 面的要求已迫在眉睫。

本文提出利用蠕动泵<sup>[19]</sup>驱动毛细管内气液相间 隔的工质以恒定的流速单向循环流动,形成一个具有 脉动热管效应的新型两相传热系统。该系统具有结 构简单、适应性强、尺寸微小、成本低廉、传热性能好 等优点,适用于解决未来分散式高热流密度微电子元 件的散热问题。本文阐述了蠕动泵驱动的毛细管环 路传热系统的组成和工作原理,搭建该两相传热系统 的实验装置,研究了其在不同充液率和不同加热功率 下的传热特性。

## 1 新型两相传热系统

图1所示为蠕动泵驱动的毛细管环路传热系统。 该系统由金属毛细管、硅胶毛细管和蠕动泵组成,其 中硅胶毛细管与金属毛细管之间密封连接,形成一个 真空闭环回路。毛细管内径尺寸必须小于一个最大 临界值,由于表面张力的作用,工质在满足此要求的 毛细管内形成稳定的液柱即气塞系统。

最大临界内径 D<sub>c</sub>的计算公式<sup>[20]</sup>:

$$D_{c} \approx 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{l} - \rho_{v})}} \tag{1}$$

式中: $D_e$ 为临界内径,m; $\sigma$ 为表面张力,N/m;g为重力加速度,N/kg; $\rho_l$ 为工质液相密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_v$ 为工质气相密度,kg/m<sup>3</sup>。

闭环回路的截面直径、长度、形状和环路数等 由实际使用情况确定,其中截面直径必须满足公式 — 32 —



图 1 蠕动泵驱动的毛细管环路传热系统 Fig.1 The heat transfer system of capillary loop driven by peristaltic pump

(1)的要求。金属毛细管用于与外界换热,硅胶毛 细管嵌入在蠕动泵之内。蠕动泵的电机轴由电机 驱动,电机轴带动转子转动,通过蠕动泵的转子依 次循环挤压硅胶毛细管的管壁,既能驱动毛细管内 的液态工质流动又能驱动毛细管内的气态工质流 动。毛细管内工质的流速和质量流量可通过改变 蠕动泵电机的转速和硅胶毛细管的内径来调节。 在蠕动泵驱动力的作用下,毛细管内气液相间隔的 工质不断地单向循环流动,工质在加热段吸热升温 汽化,在冷凝段散热降温液化,如此反复完成热量 的传输。蠕动泵驱动的毛细管环路传热系统具有 脉动热管效应,在传热过程中既存在相变传热又存 在对流换热,具有结构简单、传热效率高、运行可靠 且工作不受重力约束等优点。

## 2 传热特性研究

### 2.1 实验装置和方法

图 2 所示为实验装置原理。实验中,工质采用去 离子水,在加热端温度为 80 ℃的情况下,根据公式 (1)计算得到毛细管的最大内径尺寸为 5.12 mm。 因此,本文金属毛细管选择内径为 3 mm、外径为 4 mm的紫铜毛细管,硅胶毛细管尺寸选择内径为 3 mm、外径为 5 mm。紫铜毛细管包括 3 部分:加热 段、绝热段和冷凝段。在加热段的紫铜毛细管 (100 mm长)由加热块加热,加热块放在绝热的电木 内,加热块中间插有加热棒,加热棒依次与功率计和 变压器连接,通过调节变压器的输出电压可以改变加 热棒的加热功率。在绝热段的紫铜毛细管(长度为 100 mm)由隔热棉包裹,防止与外界环境进行热交 换。在冷凝段的紫铜毛细管(长度为 100 mm)采用 水冷块冷却,冷却水的温度恒定为 25 ℃,以 2 m/s 的 速度不断在水冷块和恒温水箱之间循环流动。

紫铜毛细管的壁面温度由贴合在其表面的 K 型



Fig.2 The principle of experimental device

热电偶测试,紫铜毛细管表面的热电偶等距分布。整 个实验在 25 ℃恒温环境下进行,加热段、绝热段和冷 凝段置于同一水平面上。蠕动泵驱动的毛细管环路 传热系统的整个闭环回路处于完全密封状态,并与真 空计连接,用于检测闭环回路内部的真空度。实验开 始,关闭充液阀,打开真空阀,用真空泵对回路进行抽 真空,管内真空度达到 3 Pa 后,关闭真空阀,打开充 液阀,灌注定量的工质,注射器的刻度显示灌注量。 当环路传热系统的充液率为 100%时,相当于传统的 水冷环路系统。实验测试了工质流速恒定为 7 m/min时,不同充液率的传热系统在不同加热功率 下(60、80、100 W)的传热特性。工质的循环流速通 过蠕动泵上的液晶屏显示。

蠕动泵流速的误差为 1%, K 型热电偶的误差为 0.3 ℃, 温度采集系统的误差为 0.05 ℃, 变压器输出 电压的误差为 0.2%, 变压器输出电流的误差为 0.3%。按照 R. J. Moffat<sup>[21]</sup>的不确定性分析计算, 加 热功率的最大误差为 2.9%, 温差的最大误差为 0.2%, 热阻的最大误差为 3.6%。由于加热块由绝热 电木完全包裹, 绝热段由隔热棉包裹, 故可忽略系统 的散热损失。

#### 2.2 传热特性分析

在 15 个测温点中,  $T_2 \sim T_6$  的 5 个测点的平均温 度代表稳态时加热段的壁面温度  $T_e$ ,  $T_7 \sim T_9$  的 3 个测 点的平均温度代表稳态时绝热段的壁面温度  $T_a$ ,  $T_{10}$ ~ $T_{14}$ 的 5 个测点的平均温度代表稳态时冷凝段的壁 面温度  $T_e$ 。两相传热系统加热段和冷凝段之间的温 差  $\Delta T = T_e - T_e$ 。加热功率为 Q 时, 两相传热系统的热 阻  $R = \Delta T/Q$ 。

#### 2.2.1 充液率对传热系统性能的影响

图 3 所示为不同加热功率时,壁面温度随充液率 的变化。由图 3 可知,在加热功率不变时,稳态时  $T_e$ 随充液率的变化很小,由于冷凝段是通过温度恒定为 25 ℃的冷却水冷却,冷却性能较好。相比于高充液 率下稳态时加热段的壁面温度  $T_e$ ,低充液率下稳态 时  $T_e$ 更低。其中,充液率为 20%时稳态下  $T_e$  最低, 充液率为 100%时稳态下  $T_e$  最高。具体表现为:当加 热功率分别为 60、80、100 W 时,充液率为 20%的传 热系统稳态时  $T_e$ 分别为 83.53、90.77、97.25 ℃;充 液率为 100%的传热系统其稳态时  $T_e$ 分别为 96.76、 115.64、128.30 ℃。



图 3 不同加热功率时,加热段和冷凝段壁面温度 随充液率的变化

#### Fig.3 The heating section and the cooling section of wall temperature change with liquid filling ratio under different heating power

图 4 所示为不同加热功率下, 传热系统的温差 ΔT 和热阻 R 随充液率的变化。





Fig.4 Temperature difference  $\Delta T$  and thermal resistance R change with the liquid filling ratio under different heating power

由图 4 可知,当加热功率不变时,在传热系统的 充液率为 20%时,传热温差  $\Delta T$  和传热热阻 R 最小, 充液率低于或高于 20%时, $\Delta T$  和 R 均增大。当充液 率为 100%时, $\Delta T$  和 R 最大。由此可知,相比于传统 的水冷传热系统,两相传热系统的传热性能更好,且 两相传热系统的最佳充液率为 20%。具体表现为: 当加热功率为 60、80、100 W 时,在充液率为 20%时, 传热系统稳态时的 R 分别为 0.52、0.38、0.30 °C/W; 在充液率为 100%时,传热系统稳态时热阻 R 分别为 0.77、0.70、0.60 °C/W。相比于传统的水冷传热系 统,当充液率为 20%时,两相传热系统在加热功率为 60、80、100 W 时热阻 R 分别降低了 32.5%、45.7%、 50.0%。

原因是蠕动泵驱动的毛细管环路传热系统具有 脉动热管效应,既存在相变传热又存在对流换热。低 充液率时,管内蒸气空间大,环路传热系统以相变传 热为主、对流换热为辅,高充液率时反之。由于相变 传热的效率比对流换热的效率高,所以在低充液率时 加热段产生的热量能更高效地传递到冷凝段,导致 ΔT 和 R 较低。然而,随着充液率不断减小,工质携带的热量有限,甚至出现局部烧干的现象,使传热效率降低。因此,存在一个最佳充液率使两相传热系统的传热效率最高。

#### 2.2.2 加热功率对传热系统性能的影响

由前文可知,当充液率为 20% 时传热系统的传 热效率最高,当充液率为 100% 时传热效率最低。图 5 所示为不同加热功率下,传热系统的充液率从 20% 增至 100% 时加热段和冷凝段之间的传热温差  $\Delta T$  的 增量。由图 5 可知,加热功率越大,传热系统的充液 率从 20% 增至 100% 时温差  $\Delta T$  的增量越大。具体表 现为:当充液率从 20% 增至 100% 时,在加热功率为 60 W 下,加热段和冷凝段之间的温差  $\Delta T$  增大了 15.02 °C;在加热功率为 80 W 下,加热段和冷凝段之 间的温差  $\Delta T$  增大了 25.88 °C;在加热功率为 100 W 下,加热段和冷凝段之间的温差增大了 29.36 °C。结 果表明,与传统水冷系统的传热性能相比,当加热功 率越大时,该系统在最佳充液率下的传热性能优势越 明显。



#### 图 5 充液率从 20%增至 100%时传热温差 ΔT 增量 Fig.5 Increment of the temperature difference when the liquid filling ratio increases from 20% to 100%

图 6 所示为当充液率为 20%和 100%时, 传热温 差  $\Delta T$  和传热热阻 R 随加热功率的变化。由图 6 可 知,该系统的传热热阻 R 随加热功率的增大而减小, 与热管的传热特性一致。当充液率为 20%时, 加热 功率的增大对传热温差  $\Delta T$  影响不大; 当充液率为 100%时,  $\Delta T$  随加热功率的增大而增大。因为在低充 液率(20%)时, 随着加热功率的增大, 潜热所占的比 例越来越大, 系统的传热效率越来越高, 因此加热功 率对  $\Delta T$  的影响不大; 在高充液率(100%)时, 潜热传 热所占的比例较小, 系统以显热传热为主, 随着加热 功率的增大, 传热系统通过增大  $\Delta T$  来提升传热 效率。



图 6 当充液率为 20%和 100%时,传热温差 ΔT 和传热热阻 R 随加热功率的变化 Fig.6 When the liquid filling ratio is 20% and 100%, the temperature difference ΔT and thermal resistance

*R* change with the different heating power

## 3 结论

本文利用蠕动泵驱动真空毛细管内气液相间隔 的工质单向循环流动,形成一个具有脉动热管效应的 新型两相传热系统,该传热系统在运行过程中既有相 变传热又有对流换热。通过蠕动泵驱动 3 mm 毛细 管内的工质以 7 m/min 的速度匀速运行,实验测试了 不同充液率的传热系统在加热功率分别为 60、80、 100 W 时的传热性能,得到如下结论:

1)充液率 20% 为该两相传热系统的最佳充液 率,此时加热段稳态时的壁面温度、传热温差和传热 热阻均最小。

2)当加热功率分别为 60、80、100 W 时,充液率 为 20%的传热系统其稳态时的热阻分别为 0.52、
0.38、0.30 ℃/W。

3)相比于传统的水冷传热系统,充液率为 20% 的两相传热系统在加热功率为 60、80、100 W 时,热

阻分别降低了 32.5%、45.7%、50.0%。

4) 当充液率为 20% 时, 加热功率对加热段和冷凝段之间的温差影响不大; 当充液率为 100% 时, 加热段和冷凝段之间的温差随加热功率的增大而增大。

本文受广东省科技计划(2016B090918096)项目资助。 (The project was supported by the Program of Guangdong Province Science and Technology (No. 2016B090918096).)

#### 参考文献

- GARIMELLA S V, FLEISCHER A S, MURTHY J Y, et al. Thermal challenges in next-generation electronic systems
   [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(4): 801–815.
- [2] COTTER T P. Theory of heat pipes [J]. Theory of Heat Pipes, 1965, 25(5):1366-1373.
- [3] TONG B Y, WONG T N, OOI K T. Closed-loop pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21 (18):1845-1862.
- [4] BAZZO E, RIEHL R R. Operation characteristics of a small-scale capillary pumped loop [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(6):687-705.
- [5] ZHU Lin, YU Jianlin. Simulation of steady-state operation of an ejector-assisted loop heat pipe with a flat evaporator for application in electronic cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95:236-246.
- [6] BAI Lizhan, LIN Guiping, ZHANG Hongxing, et al. Mathematical modeling of steady-state operation of a loop heat pipe[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(13): 2643-2654.
- [7] 刘杰,裴念强,郭开华,等.机械泵驱动两相冷却系统启动特性的实验研究[J].中国空间科学技术,2008,28
  (1):64-70. (LIU Jie, PEI Nianqiang, GUO Kaihua, et al. Experimental investigation on start-up characteristics of mechanically pumped two-phase cooling system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2008, 28(1):64-70.)
- [8] 刘杰,李廷勋,裴念强,等.两相冷却系统过热现象与启动温度关系分析[J].制冷学报,2007,28(6):23-28.
  (LIU Jie, LI Tingxun, PEI Nianqiang, et al. Analysis on relationship between superheat phenomena and startup temperature for two-phase cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(6):23-28.)
- [9] 刘杰,李廷勋,郭开华,等.并行蒸发器机械泵驱动两相 冷却系统特性的实验研究[J].制冷学报, 2008, 29
  (6):5-8. (LIU Jie, LI Tingxun, GUO Kaihua, et al. Experiment on two-phase cooling system with dual-evaporator driven by mechanical pump[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6):5-8.)

- [10] 刘杰,裴念强,郭开华,等.机械泵驱动两相冷却系统特性分析和实验研究[J].制冷学报,2007,28(2):27-31.
  (LIU Jie, PEI Nianqiang, GUO Kaihua, et al. Theoretical and experimental investigation on characters of mechanical pumped two phase cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(2):27-31.)
- [11] 郑小平,丁信伟,喻健良.新型涡轮-泵驱动式回路热管 设计及热力学分析[J].大连理工大学学报,2006,46 (4):495-498. (ZHENG Xiaoping, DING Xinwei, YU Jianliang. Design of a novel turbine-pump-driven loop heat pipe and its thermodynamic analysis[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(4):495-498.)
- [12] AMBROSE J H, FEILD A R, HOLMES H R. A pumped heat pipe cold plate for high-flux applications [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 10(2):156-162.
- [13] ZHOU Feng, DUAN Wei, MA Guoyuan. Thermal performance of a pump-driven loop heat pipe as an air-to-air energy recovery device [J]. Energy and Buildings, 2017, 151: 206-216.
- [14] 马跃征,马国远,张双.磁力泵驱动两相冷却环路的换热 特性[J].化工学报,2015,66(11):4388-4393.(MA Yuezheng, MA Guoyuan, ZHANG Shuang. Heat transfer characteristics of two-phase cooling loop driven by magnetic pump[J]. CIESC Journal, 2015, 66(11):4388-4393.)
- [15] 马跃征,许树学,马国远,等.磁力泵驱动两相冷却复合 制冷系统特性分析和实验研究[J].制冷学报,2016,37
  (3):1-5. (MA Yuezheng, XU Shuxue, MA Guoyuan, et al. Characteristic analysis and experimental study on a hybrid system with magnetic pump-driven two phase cooling system[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3):1-5.)
- [16] 马国远,段未,周峰.泵驱动回路热管能量回收装置的工作特性[J].北京工业大学学报,2016,42(7):1095-1101. (MA Guoyuan, DUAN Wei, ZHOU Feng. Operating characteristics of a pump-driven loop heat pipe energy recovery device[J]. Journal of Beijing University of Technol-

ogy, 2016, 42(7):1095-1101.)

- [17] 段未,马国远,周峰.泵驱动回路热管能量回收装置性能的影响因素[J].化工学报,2016,67(10):4146-4152.
  (DUAN Wei, MA Guoyuan, ZHOU Feng. Factors influencing energy recycle performance of pump-driven loop heat pipe loop device [J]. CIESC Journal, 2016, 67(10): 4146-4152.)
- [18] 郭振江,邵杰,王伟,等.机械泵驱动分离式热管应用于 空调冷量回收[J].建筑节能,2016,44(3):10-12.
  (GUO Zhenjiang, SHAO Jie, WANG Wei, et al. Mechanically pump-driven separate heat pipe employed in air conditioning system for cooling energy recovery[J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(3):10-12.)
- [19] 王道臣,陈志军,韩玉明,等.蠕动泵流量的理论计算与 试验验证[J].化工自动化及仪表, 2015(2):186-187, 216. (WANG Daochen, CHEN Zhijun, HAN Yuming, et al. Theoretical calculation and experimental investigation of peristaltic pump flow [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2015(2):186-187,216.)
- [20] AKACHI H, POLASEK F, STULC P. Pulsating heat pipes
   [C]//5th International Heat Pipe Symposium. Melbourne, Australia, 1996: 208-217.
- [21] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [ J ]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1):3-17.

### 通信作者简介

莫海军,男,博士,副教授,华南理工大学机械与汽车工程学院,(020)87114023,E-mail: mohj@scut.edu.cn。研究方向:传热学和机器人动力学。

#### About the corresponding author

Mo Haijun, male, doctor, associate professor, School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, +86 20-87114023, E-mail: mohj@scut.edu.cn. Research fields: heat transfer and robot dynamics.