

不同蒸发冷凝段长度比下乙烷脉动热管传热性能研究

黄晶晶, 陈贝贝, 陈曦

上海城建职业学院, 上海 200438

DOI: 10.61369/ETR.2025310033

摘要 : 针对斯特林低温冰箱传热效率优化问题, 本文开展脉动热管蒸发段与冷凝段长度比对其传热性能的实验研究。搭建实验测试台, 在蒸发段、绝热段与冷凝段总长度恒定的条件下, 固定冷凝段长度为 40 mm, 设置蒸发段长度比 1:1、3:1、6:1, 探究不同结构参数下脉动热管的传热特性。结果表面: 在蒸发段冷凝段长度比为 1:1 和 3:1 的最佳加热功率为 30 W, 脉动热管在蒸发段冷凝段长度比为 6:1 的最佳加热功率为 25 W。

关键词 : 乙烷脉动热管; 长度比; 加热功率

Study on Heat Transfer Performance of Ethane Pulsating Heat Pipe under Different Length Ratios of Evaporation and Condensation Sections

Huang Jingjing, Chen Beibei, Chen Xi

Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 200438

Abstract : In order to optimize the heat transfer efficiency of Stirling low-temperature refrigerators, this paper conducts experimental research on the heat transfer performance of pulsating heat pipes by comparing the length of the evaporation section and the condensation section. Set up an experimental testing platform, with a fixed condensing section length of 40 mm and evaporating section length ratios of 1:1, 3:1, and 6:1, under the condition that the total length of the evaporating section, adiabatic section, and condensing section is constant, to explore the heat transfer characteristics of pulsating heat pipes under different structural parameters. The results show that the optimal heating power for the length ratio of 1:1 and 3:1 in the evaporation and condensation sections is 30 W, and the optimal heating power for the pulsating heat pipe in the length ratio of 6:1 in the evaporation and condensation sections is 25 W.

Keywords : ethane pulsating heat pipe; length ratio; power

引言

脉动热管 (Pulsating Heat Pipe, PHP) 作为一种依靠工质脉动流动实现高效传热的新型传热元件, 凭借其结构简单、适应性强、传热效率高等显著优势, 在能源利用、制冷空调、航空航天以及特种冷却等领域展现出巨大的应用潜力^[1]。随着工业技术的不断发展, 高热流密度设备的散热需求日益迫切, 尤其是在高温环境、极端热负荷及特殊工质应用场景中, 脉动热管的传热性能与运行稳定性成为研究焦点。

现有研究已围绕脉动热管的核心影响因素展开了多维度探索。在工质特性方面, 不同工质的选择对传热性能影响显著, 例如丙酮、乙醇、水等常规工质在大规模脉动热管中的表现, R32 工质的传热特性, 以及液态金属在高温条件下的应用和液氮在超导冷却领域的潜力, 均揭示了工质物理属性 (如沸点、导热系数、表面张力) 与传热效率的密切关联^[2-8]。同时, 填充率、绝热长度等结构参数的优化, 以及多通路联结构设计对热开关特性的调控, 为脉动热管的结构创新提供了方向^[9-10]。

尽管目前研究已覆盖工质、结构、工况等多方面, 但在复杂工况下 (如高温、高热流密度) 传热极限的内在机制、不同工质与结构参数的协同优化规律, 以及流型演变与传热性能的动态关联等方面仍需深入探究。然而目前, 学者们对于脉动热管的研究还依然停留在常温领域 (273 K 以上温区) 以及超低温领域 (50 K 以下温区), 相对于低温领域 (170~250 K 温区) 的探索还相对较少, 而目前低温领域的脉动热管可用于低温冷冻、低温医疗以及热管理等领域, 在低温冷冻冰箱方面, 可用于重要物质的低温保存。由于脉动热管具有高效的传热性能、简单紧凑的结构等优点, 脉动热管与低温冷冻冰箱的结合也会展现出良好的前景优势。

一、实验介绍

(一) 实验装置

脉动热管传热性能实验测试台主要由以下几个部分组成，主要包括脉动热管、数据采集系统、加热系统、冷却系统和绝热系统。其中，为增强管路的导热性以及测温的准确性，脉动热管由紫铜材料制作而成，脉动热管结构见图1。数据采集系统由安捷伦34970A 数据采集器、铂电阻 Pt100和计算机组成，将铂电阻贴至铜管管壁外侧实时采集温度数据，其中，铂电阻与铜导线焊接成一体，并通过真空腔底部的真空接插件与数据采集器连接进行采集数据。加热系统由直流电源、电加热丝和连接导线组成。冷却系统由脉管制冷机和恒温水槽组成。脉管制冷机的冷指与脉动热管的冷凝段相配合，将冷量导入至冷凝段。绝热系统由真空泵和真空腔组成，真空腔的材质为不锈钢。

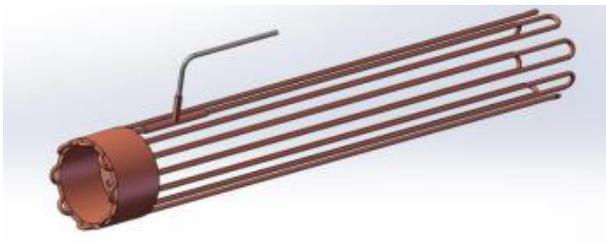


图1 脉动热管设计图

(二) 实验指标

本文为了研究将脉动热管用于低温冰箱的极限能力，保持冷凝段长度为 40 mm，将脉动热管的蒸发段长度分为三个长度，分别为 40 mm，120 mm 和 240 mm（弯头长度忽略不计），即脉动热管蒸发段冷凝段长度比分别为 1:1，3:1，6:1。本文所研究的脉动热管的背景为斯特林低温冰箱，重点在于蒸发段、绝热段和冷凝段三者总长度不变的情况下研究脉动热管的传热性能，将脉动热管应用于斯特林低温冰箱，进而改善斯特林低温冰箱的传热效率。由于斯特林型脉管制冷机的冷指的长度是一定的，为配合脉管型斯特林制冷机的冷指长度，因此在本文中冷凝段的长度也是一定的，长度为 40 mm。

二、实验结果与讨论

(一) 乙烷的热物性参数对传热性能的影响

图2展示了乙烷脉动热管在不同工作温区下的传热性能的热阻图。从图中可以看出，脉动热管的传热性能并不是随着工作温区的升高或下降而呈现出直线升高或下降的变化，而存在一个最佳工作温区能够让脉动热管的传热特性达到最优。温区的变化会使工质的热物性性质发生变化，因此工质的热物性性质影响了脉动热管的传热特性。

当蒸发段冷凝段长度比为 1:1 时，随着工作温区的升高，脉动热管的热阻先减小后增大之后又减小，主要在 -80 °C 和 -20 °C 工作温区下的热阻都较低，热阻最低时的工作温区为 -80°C。

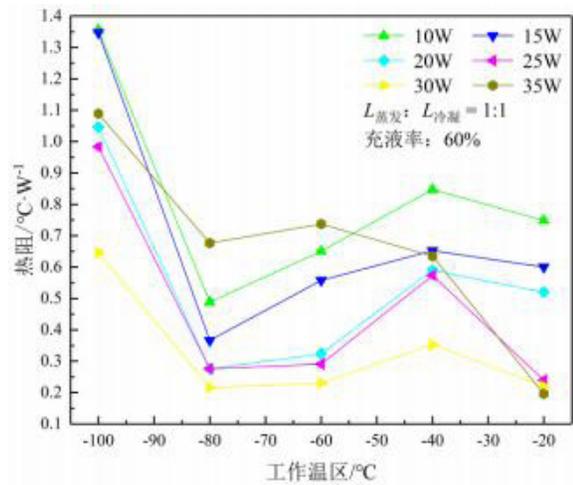


图2 脉动热管蒸发段冷凝段长度比为 1:1 的热阻

图3和图4显示，当蒸发段冷凝段长度比为 3:1 和 6:1 时，脉动热管的热阻随着工作温区的下降而持续增大。动力粘度、表面张力和比热容等四项不利因素在热量传递中占据了主要作用，另外，从实验也可以得出，蒸发段的长度大于冷凝段的长度的脉动热管更适用于工作温区较高时的工况。

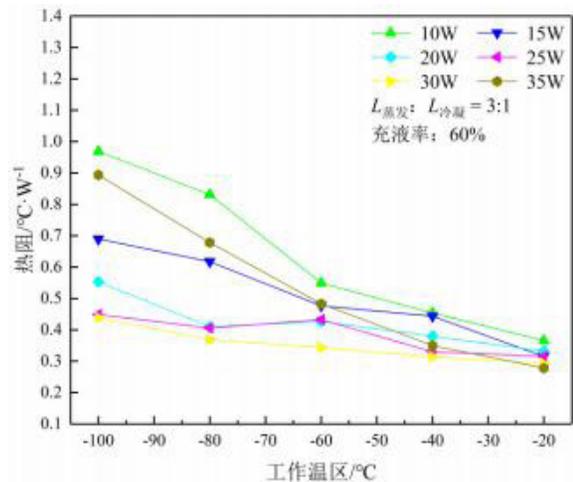


图3 脉动热管蒸发段冷凝段长度比为 3:1 的热阻

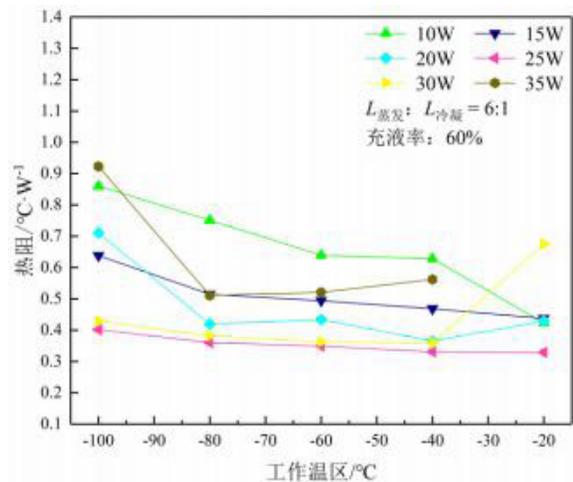


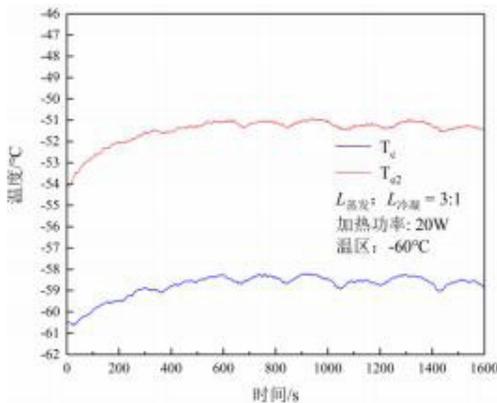
图4 脉动热管蒸发段冷凝段长度比为 6:1 的热阻

综上所述，当蒸发段和冷凝段长度相同时，最佳工作温区

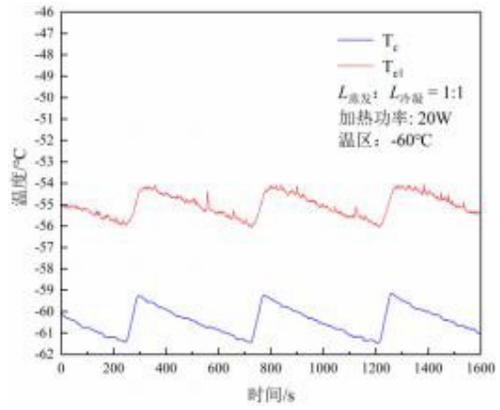
为 -80°C ，当蒸发段长度大于冷凝段长度时，最佳工作温区为 -20°C 。这表明对于最佳工作温区，不仅与工质热物理性质有关，也与脉动热管的蒸发段冷凝段长度比、加热功率、运行工况等共同影响所产生的结果。

(二) 不同蒸发段冷凝段长度比的温度波动特性

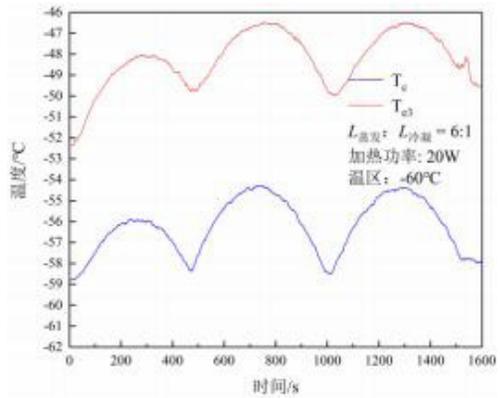
图5和图6分别给出了脉动热管在 20 W 和 30 W 的加热功率下不同蒸发段长度的温度波动特性。蒸发段长度为 40 mm 的脉动热管在输入了 20W 加热功率后，蒸发段有了明显的波动，此时脉动热管内部 40mm 长度蒸发段中的液体开始吸热生成气泡，造成管内形成压力的不平衡，但由于加热面的面积较小，生成的气泡有限，工质向冷凝段方向流动的速度极其缓慢。在图5(a)中蒸发段和冷凝段均出现了由于脉管制机的启停而存在的有规律的波动。脉管制冷机在达到设定温度后，停止工作，在加热功率的输入下，脉动热管的温度整体上升，上升到离设定温度差 1 K 时，脉管制冷机重新开始制冷。在蒸发段长度较短，输入的加热功率较小的情况下，脉动热管内部的工质还没有开始循环流动，气塞无法依靠自己的驱动力来跨越弯头，此时脉动热管振荡运动只出现在各自管道中。而当 40mm 蒸发段的脉动热管被输入 30 W 的加热功率后，蒸发段和冷凝段的波动幅度很小，这是由于脉动热管已经到达最佳传热阶段。图 5(b)和图 6(b)给出脉动热管在 20 W 和 30 W 的加热功率下，蒸发段长度为 120mm 的脉动热管的温度波动。需要注意的是，加热功率的输入主要为热流密度的输入，蒸发段的长度虽然加长，此时各个蒸发段的热流密度都是相同的。从图中可以看出，由于蒸发段长度的加长，受热面积变大，管内输入的热量也变得更多，也足以平衡脉管制冷机所提供的冷量。随着气泡的数量不断增多，管内的压力差越来越大，大到足以平衡推动气塞上方的液塞时，工质开始推动液塞开始运动，工质在管内进行不停的振荡运动，并随着工质的振荡运动出现了缓慢的流动。这种缓慢的流动使得脉动热管的蒸发段和冷凝段达到平衡状态，工质在蒸发段中持续吸热，在冷凝段中持续放热。随着蒸发段长度的进一步加长，脉动热管的平衡受到破坏。当蒸发段吸热生成蒸气向上运动时，液体在冷凝段放热，并且伴随着蒸气的驱动力和重力缓慢向蒸发段流动，在蒸发段吸热蒸发，当冷凝段的液体无法及时回流到蒸发段时，蒸发段局部壁面发生烧干，温度上升，随着冷凝段的不断冷凝，积聚的液体在足够多的情况下在重力的作用下回到蒸发段冲刷蒸发段壁面，局部烧干现象消失，蒸发段温度下降。



(a) 蒸发段冷凝段长度比 1:1

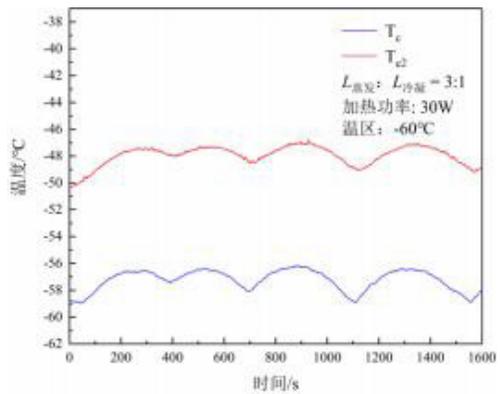


(b) 蒸发段冷凝段长度比 3:1

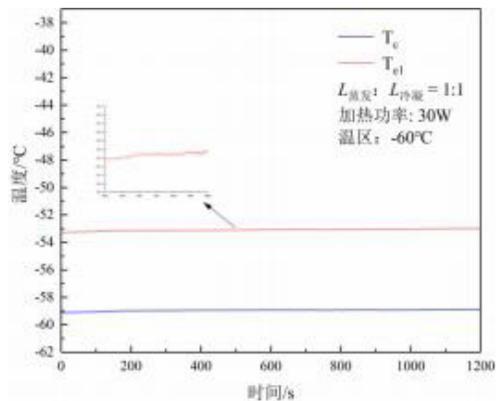


(c) 蒸发段冷凝段长度比 6:1

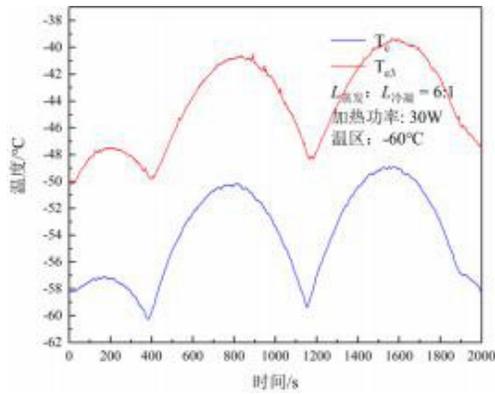
图 5 -60°C 的脉动热管 20 W 加热功率下不同蒸发段长度的温度波动特性



(a) 蒸发段冷凝段长度比 1:1



(b) 蒸发段冷凝段长度比 3:1



(c) 蒸发段冷凝段长度比6:1

图6 -60 °C的脉动热管30 W 加热功率下不同蒸发段长度的温度波动特性

三、结论

以低温工质乙烷为本实验的工作介质，开展了加热功率、蒸发段冷凝段长度比、工作温区等各个因素方面的传热性能研究，

为后来的学者在脉动热管低温领域的研究填补这一部分的空白，并提供有实际参考价值的资料及理论意义。脉动热管在各个工作温区下的降温过程，揭示了工质的存在减少了铜管本身的温度差异，展示了脉动热管在蒸发段冷凝段长度比为 1:1 和 3:1 的最佳加热功率为 30 W，脉动热管在蒸发段冷凝段长度比为 6:1 的最佳加热功率为 25 W，最后测试了不同工作温区和充液率对脉动热管的传热性能影响，发现在不同温区下工质的热物理性质会发生变化，热物理性质的变化使得脉动热管在不同温区下的传热性能有不一样的区别，不同充液率也会对脉动热管的传热性能产生一定的影响。

参考文献

- [1] Ji Y L, Wu M K, Feng Y M, et al. An experimental investigation on the heat transfer performance of a liquid metal high-temperature oscillating heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149(4):119198.
- [2] Cezary C, Andrzej I N, Przemysław B, et al. Experimental study on a large scale pulsating heat pipe operating at high heat loads, different adiabatic lengths and various filling ratios of acetone, ethanol, and water[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165(2):114534.
- [3] 王小鑫, 王博, 陈阳正, 等. 基于电容层析成像技术重构图像的两相流型识别 [J]. 计量学报, 2020, 41(08):942-946.
- [4] 龚志明, 王瑞祥, 邢美波. CTAB表面活性剂脉动热管性能研究 [J], 2020, 48(1):14-20.
- [5] 邢美波, 王瑞祥. 表面活性剂对脉动热管传热特性的影响 [J], 2020, 20(3):14-17.
- [6] Sagar K R, Naik H B, Mehta H B, et al. Numerical study of liquid nitrogen based pulsating heat pipe for cooling superconductors[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122(2):33-46.
- [7] 刘建红, 刘栋, 阎天海, 等. 脉动热管换热器传热性能试验研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2023, 24(04):69-73.
- [8] 李亚东, 纪玉龙, 庾春荣, 等. R32脉动热管传热性能实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2024, 45(09):2736-2741.
- [9] 毕天翔, 吕晏, 邵轩, 等. 多通路并联式脉动热管热开关特性研究 [J]. 制冷学报, 2025, 46(03):138-144.
- [10] 杨鑫, 纪玉龙. 高温脉动热管的传热特性及传热极限可视化实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2025, 59(03):558-565.