

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260518002

双端梯度孔吸液芯均热板热学性能研究

彭江龙 陈志新 黄仁超

(东华理工大学电子与电气工程学院 南昌 330013)

摘要 为研究双梯度吸液芯最佳配置以电子设备散热需求,本文以纯铝和100目、200目球形铝粉为原材料,制作了4种相同孔隙率不同孔径梯度结构双吸液芯均热板,增加梯度影响参数 Δp ,以均热板均温性、热阻、启动响应时间等作为测试目标对均热板进行测试。实验发现,蒸发端与冷凝端吸液芯结构分别为从外到里孔径递减和从外到里孔径递增的均热板C均温性能最优,两端面内温差比无梯度均热板两端对应面内温差分别降低了24.02%和26.07%; Δp 证实了合理的梯度结构对均热板有促进作用,C均热板($\Delta p > 0$)实现了驱动与流动阻力的正向协同,在高功率下(80 W)获得了最低热阻0.11 °C/W与最短启动响应时间385 s;脉冲加载下,低功率下温度降幅几乎不受结构影响,但随脉冲周期的增长而增加,当脉冲周期从360 s增至1 200 s时,降幅从57.70%增至82.21%。

关键词 铝;孔径梯度吸液芯;脉冲加载;热累积

中图分类号: TB61⁺1;TK124;TK172.4

文献标识码: A

Thermal Performance of Vapor Chamber with Dual-Gradient Pore Wicks

Peng Jianglong Chen Zhixin Huang Renchao

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract

Objective Previous studies have demonstrated that gradient wick vapor chambers exhibit high temperature uniformity, low thermal resistance, and a high capillary limit. However, most reported vapor chambers with gradient wicks are fabricated from copper; they typically employ either a single gradient wick layer or a dual-section gradient structure connecting the condenser and evaporator sides. By contrast, aluminum vapor chambers incorporating two gradient wick layers are rarely investigated. In this study, an aluminum vapor chamber featuring two gradient wicks was fabricated to investigate its performance under specific operating conditions and varying wick gradient orientations. The findings provide a thermal-management reference for electronic devices in typical operating scenarios.

Method Aluminum powder was used as the working material. A 2×2 factorial design was established based on the gradient orientations at the evaporator and condenser sections, and four aluminum vapor chambers with dual-gradient wicks were fabricated accordingly. A test platform was established for porosity, permeability, thermal resistance, and temperature uniformity characterizations. Meanwhile, Δp was introduced to quantify the gradient difference between the upper and lower wick structures.

Results and Discussion Experiments show that under general operating conditions, the vapor chamber C—featuring inward-decreasing pore sizes at the evaporator end and outward-increasing pore sizes at the condenser end—exhibits excellent heat transfer and start-up performance. This is because the evaporator-end design directionally guides the working fluid backflow, thus reducing the risk of “dry-out”; additionally, the high permeability at the center of the condenser end accelerates heat exchange between the working-fluid vapor and condensate. At 80 W, vapor chamber C achieved the fastest start-up response time of 385 s. Compared with the start-up response time of 657 s for a nongradient vapor chamber, the structure of vapor chamber C enables more efficient working fluid circulation, thus accelerating start-up. Under pulsed operating conditions, thermal accumulation is governed by the structure. As the number of pulses increases, thermal accumulation decreases rapidly, with the reduction rate positively correlated with the pulse period. Under pulse periods of 360, 600, 960, and 1200 s, thermal accumulation during the third pulse decreased by 57.70%, 72.85%, 78.77%, and

收稿日期:2026-05-18;修回日期:2026-06-14;录用日期:2026-07-14 责任编辑:

基金项目:国家自然科学基金(52365054)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52365054).)



移动阅读

82.21% compared with that during the first pulse, respectively.

Conclusions Vapor chamber C—featuring inward-decreasing pore sizes at the evaporator end and outward-increasing pore sizes at the condenser end—exhibited optimal temperature uniformity. Compared with a non-gradient vapor chamber, the in-plane temperature differences at both ends of vapor chamber C were 24.02% and 26.07% lower. Δp values confirmed that an optimized gradient structure significantly enhanced the vapor chamber performance. For vapor chamber C ($\Delta p > 0$), the graded structure successfully balanced the capillary driving force and viscous pressure drop. Under high power (80 W), vapor chamber C attained a minimum thermal resistance of 0.11 °C/W and the shortest start-up response time of 385 s. Under pulsed loading, the temperature drop at low power was almost unaffected by the structure but increased with the pulse period. As the pulse period increased from 360 to 1200 s, the temperature drop increased from 57.70% to 82.21%.

Keywords aluminum; gradient pore-size wick; pulsed loading; thermal accumulation

随着电子科学技术的进步,高端电子设备的集成度越来越高^[1-2]。一些设备如激光雷达,5G射频单元,数据中心等在运行过程中会出现短时间的极高热负荷,导致相当一部分电能被用于发热^[3-4]。相比于传统散热方案,相变散热更满足当下电子领域散热需求。均热以相变传热原理,吸热端吸收热量,内部受热气化的工质上升至冷凝端,遇冷液化后通过吸液芯流回吸热端,从而快速分散并降低受热端表面的温度^[5]。吸液芯结构可以直观反映均热板的性能,常见的吸液芯类型有:粉末烧结吸液芯、丝网吸液芯等^[6]。其中粉末烧结吸液芯具有孔隙率大与毛细力大的特点在市场上被广泛运用。均匀吸液芯毛细力和比表面积大,抗重力与传热性能好,但渗透性能相对较差。钱帮兴等^[7]在梯度结构吸液芯性能实验中,制备了单条铝合金颗粒烧结梯度毛细芯,发现毛细爬升高度与粒径呈非线性关系,相比于平均粒径相同的普通吸液芯,综合性能提高了30%。Xia Yujuan等^[8]对比含单块梯度吸液芯与无梯度吸液芯和无吸液芯3种均热板发现,有梯度吸液芯在热阻和均温性上表现更佳。同时研究者在梯度方向上进行了研究。纵向梯度上,Yin Liaofei等^[9]制造了一种梯度双吸液芯均热板并进行启动性能分析,发现这种结构均热板不仅能提高均温性还能降低热阻。Bu Shichao等^[10]制作了和Yin Liaofei等^[9]类似结构的均热板,发现梯度吸液芯能改善蒸发区液体供应,表现出低热阻并拥有管理极高功率芯片散热的能力。吴少如^[11]以铜粉和镍粉为原材料,烧结单块双层不同材料复合烧结吸液芯,发现大层厚比可提高双层梯度孔吸液芯的毛细抽吸性能。在横向梯度上,柳洋等^[12-13]研究孔径递变复合毛细芯热管发现,相比于孔径递增的毛细芯,孔径递减的毛细芯表现出更好的换热特性和更低的表面温度,证实了沿工质运动方向孔径递减的毛细有利于提高环路热管在高负荷下的性能。

综上所述,相关研究已证明梯度结构在强化回

流、降低热阻和改善均温性方面具有明显优势,但多数工作仍集中于单一梯度方向或单端结构优化,对两端均为梯度吸液芯结构的铝均热板及其脉冲工况下的研究较为稀缺。因此本研究以100目、200目铝粉作为烧结材料,通过构建蒸发端梯度方向与冷凝端梯度方向的2×2组合实验矩阵,设计4种两端均为梯度吸液芯的均热板,并以100目与200目的铝粉等量均匀混合,制备一种均匀吸液芯均热板为对照组。研究轻质双端吸液芯梯度均热板的梯度布局在不同加热功率下的传热,启动性能和脉冲工况下的热学性能表征,研究最佳梯度组合,为工程上选择均热板提供参考。

1 实验与方法

1.1 铝均热板设计

均热板由上下壳板和上下吸液芯构成,其结构如图1所示。

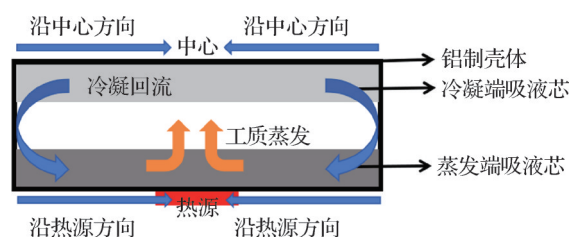


图1 均热板结构

Fig.1 Structure of the vapor chamber

选用1060为均热板的壳板材料,兼顾轻量化与成本控制。上下壳板样品由铣床加工制成,均热板外部尺寸为78 mm×78 mm×4 mm,内部尺寸为60 mm×60 mm×2.5 mm。球形粉末在同体积下有更小的比表面积,同时有较高的堆叠密度,有利于形成规则的孔隙结构^[14]。因此选用球形铝粉作为烧结原材料。实验中用粒径为100目与200目的球形铝粉,在该粒径范围内烧结效果较好^[15]。为消除粒径差异导致孔隙率差异的影响,在保证烧结强度下,以大粒

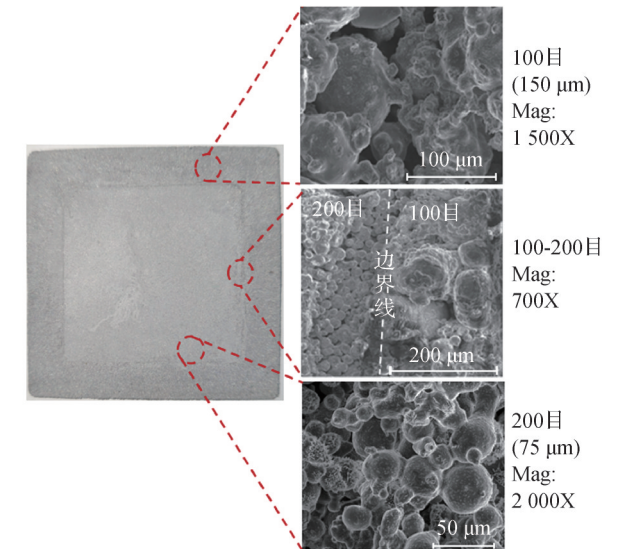
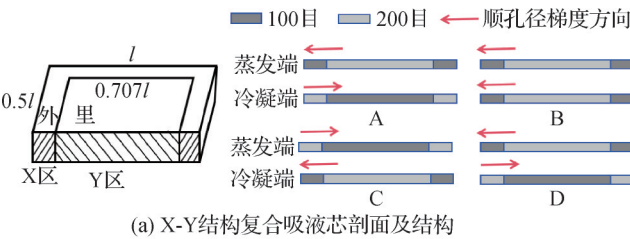
径烧结吸液芯孔隙率为基准,通过添加造孔剂(微晶纤维素)设计小粒径吸液芯孔隙率,使不同粒径烧结的吸液芯孔隙率在误差范围内近似相等,制得吸液芯尺寸为60 mm×60 mm×0.8 mm。工质选用与铝材相容性较好的无水乙醇,参考前人研究,注入液体体积与吸液芯孔隙体积比为1:1^[16]。

将双端梯度结构分解为2个独立设计因素,制备4种双端均为梯度吸液芯的均热板,结果如表1所示。表1中“100-200”表示从外到里烧结吸液芯铝粉目数依次为100目、200目。将吸液芯结构100-200和200-100对应记作X-Y格式。X-Y结构如图2(a)所示,图2(b)为100-200吸液芯实物图和扫描电镜下的特征图。将100目与200目铝粉按质量比1:1均匀混合,制备一种无梯度吸液芯。

表1 均热板类型配置

Tab.1 Configuration of vapor chamber types

均热板名称	冷凝端吸液芯	蒸发端吸液芯
A	200-100	200-100
B	100-200	100-200
C	200-100	100-200
D	100-200	200-100
无梯度均热板	均匀吸液芯	均匀吸液芯



(b) 100-200吸液芯实物及微观特征图

图2 均热板细节

Fig.2 Details of vapor chamber structure

1.2 测试系统与数据处理

1.2.1 测试系统

为测试均热板在单一热源下不同工况下的热学性能,搭建了如图3所示的测试平台,其中加热块接触面积为15 mm×15 mm。



图3 测试平台

Fig.3 Test platform

采用风扇空气对流方式对均热板进行散热,室温与风温维持25℃,控制风扇转速2 000 r/min。将均热板安装在该实验平台上,接触面涂有导热系数为6.0 W/(m·K)的导热硅脂,按图4所示位置固定K型热电偶(精度:±0.5℃)并将其连接至多温路升温测量仪,由电脑读数。

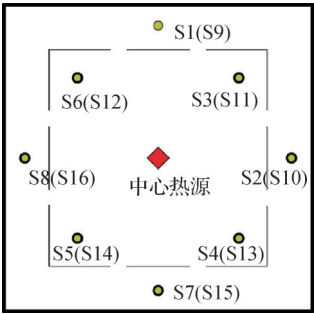


图4 传感器粘贴位置

Fig.4 Sensor pasting location

图4中S1~S8为冷凝端热电偶,S9~S16为蒸发端热电偶。以上所有热电偶用标准温度计校准,并允许热电偶温度在室温下有±0.5℃的波动。考虑到均热板设计面向电路散热,当工作温度超过125~130℃时电路效率大幅下降^[16],因此所有均热板蒸发端温度超过130℃后停止测试。

1.2.2 数据处理

孔隙率(ε)是吸液芯多孔特征的参数之一,采用称重法测量计算每块复合吸液芯孔隙率。

$$V_{fl} = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{\rho} \quad (1)$$

$$\varepsilon = V_{fl}/V \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = a\varepsilon_X + (1 - a)\varepsilon_Y \quad (3)$$

式中: $m_{\text{wet}}, m_{\text{dry}}$ 分别为吸液芯吸液后和干燥时的质量, kg; $V_{\text{孔}}$ 为吸液芯孔隙体积, m^3 ; V 为吸液芯外表体积, m^3 ; ρ 为室温下去离子水密度, kg/m^3 ; a 为X区域占总吸液芯的体积分数; $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_s$ 分别为吸液芯X与Y区域孔隙率及复合吸液芯的孔隙率。

对于铝粉烧结的吸液芯渗透率的计算, 可用 Blake-Kozeny^[17]方程表征。

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150(1 - \varepsilon)^2} \quad (4)$$

式中: K 为吸液芯渗透率, m^2 ; d_p 为烧结粉末的平均粒径, mm。在复合吸液芯中, 100–200 结构吸液芯由外到里渗透率减小, 与 200–100 结构吸液特征相反。孔隙率测试和平均渗透率计算结果如表 2 所示。

表 2 孔隙率测试结果及渗透率测试结果

Tab.2 Test results of porosity and permeability

吸液芯名称/ 类型	100 目 占比/%	200 目 占比/%	孔隙率/%	平均 渗透率/ m^2
100	100	0	47.60±2.0	4.52×10 ⁻¹¹
200	0	100	46.85±2.2	1.13×10 ⁻¹¹
100–200	50	50	47.23±1.49	2.22×10 ⁻¹¹
200–100	50	50	47.23±1.49	2.22×10 ⁻¹¹
均匀吸液芯	50	50	48.46±2.6	2.22×10 ⁻¹¹

考虑到梯度结构的特殊性, 定义参数 Δp (Pa) 来描述两端梯度增强对均热板的影响。

$$\Delta p = 2\sigma \cos \theta \left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (5)$$

式中: σ 为表面张力, N/m; θ 为接触角, ($^\circ$)。在理想状态下, 将孔径等效为直圆管, r_e 和 r_c 分别为蒸发端和冷凝端毛细管的等效直径, m。 r_e 和 r_c 可通过 Poiseuille 方程求出, 如式(7)所示。

$$R_f \propto l/r^4 \quad (6)$$

$$\frac{l_1 + l_2}{r^4} = \frac{l_1}{r_1^4} + \frac{l_2}{r_2^4} \quad (7)$$

式中: R_f 为流动阻力, Pa/m; l 为流经长度, m; l_1 和 l_2 分别为 100 目烧结区域和 200 目烧结区域的流道长度, m; r 为流经孔径, r_1 和 r_2 分别为 100 目和 200 目烧结区域内的流经孔径, m。在理想状态下将流经通道等效为圆管模型, 这种模型是一种理想堆积假设, 100 目与 200 目烧结区域孔径保持 2:1。实际烧结成型中受粉末烧结颈生长及颗粒沉积不均等因素影响, 真实孔径比通常小于 2。本文采用该理想化模型的目的是为提取孔径梯度对毛细极限的定性影响规律, 为进一步评估理想化带来的偏差, 引入经验收缩系数 λ 。

假设 200 目区域的烧结孔径为 D , 则 100 目烧结孔径为 $2\lambda D$, 根据图 2(a) 的尺寸可以求出该状态下结构为 100–200 目的等效孔径为 $1.08\lambda D$, 结构为 200–100 目的等效孔径为 $1.31\lambda D$ 。考虑烧结收缩导致的致密化, λ 取值为 0.6~0.9。

工质在均热板中稳定运行模型如式(9)所示。

$$p_{\text{cap}} = 2\sigma \cos \theta / r_{e, \text{eff}} \quad (8)$$

$$\Delta p + p_{\text{cap}} \geq \Delta p_1 + \Delta p_v + \Delta p_{\text{lost}} + \Delta p_{\text{cr}} \quad (9)$$

式中: p_{cap} 为吸液芯驱动液体流动毛细压力, Pa; $r_{e, \text{eff}}$ 为等效孔径, m; Δp_1 为回流压降, Pa; Δp_v 为蒸气流动压阻, Pa; Δp_{lost} 为压力损失, Pa; Δp_{cr} 为气液逆流压阻, Pa。

热阻和均温性可以评估均热板热传导性能。式(12)可计算出不同加热功率下的稳态热阻, 式(13)和式(14)以面内最大温差来反映蒸发端和冷凝端的均温性。

$$T_{e-a} = \frac{1}{8} (T_{S1} + T_{S2} + \cdots + T_{S8}) \quad (10)$$

$$T_{e-a} = \frac{1}{8} (T_{S9} + T_{S10} + \cdots + T_{S16}) \quad (11)$$

$$R = \frac{T_{e-a} - T_{c-a}}{Q} \quad (12)$$

$$T_{e-\max} = \max \{ T_{Si} \} - \min \{ T_{Si} \}, i = 9, 10, \cdots, 16 \quad (13)$$

$$T_{c-\max} = \max \{ T_{Si} \} - \min \{ T_{Si} \}, i = 1, 2, \cdots, 8 \quad (14)$$

式中: T_{Si} 为各个传感器读取温度, $^\circ\text{C}$; T_{e-a} 为蒸发端平均温度, $^\circ\text{C}$; T_{c-a} 为冷凝端平均温度, $^\circ\text{C}$; R 为稳态热阻, $^\circ\text{C}/\text{W}$; Q 为输入功率, W; $T_{e-\max}$ 和 $T_{c-\max}$ 分别为蒸发端内与冷凝端内的各自温差, $^\circ\text{C}$ 。

以上所有测试工具实验前均已校准, 根据参考文献[18]不确定度可由式(15)确定。

$$\delta X = \left[\sum \left(\frac{\partial X}{\partial V_i} \delta V_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中: V_i 为参数 X 的自变量; δV_i 为自变量 V_i 的不确定度, 通过分析最大不确定度, 最终确定最大不确定度为 7%。

2 结果与分析

2.1 不同均热板的传热性能

图 5(a)所示为不同功率下均热板的热阻, 可以发现 C 均热板热阻表现为 5 种均热板中最佳, 在 80 W 时蒸发端达到 $130\text{ }^\circ\text{C}$, 热阻为 $0.11\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$, 是同等功率下无梯度均热板热阻的 57.89%。

通过图 5 中(b)和(c)可以发现蒸发端的温差与冷凝端的温差随着功率的增加而增大。B、C 均热板各自的蒸发端面内最大温差的平均值相对于无梯度

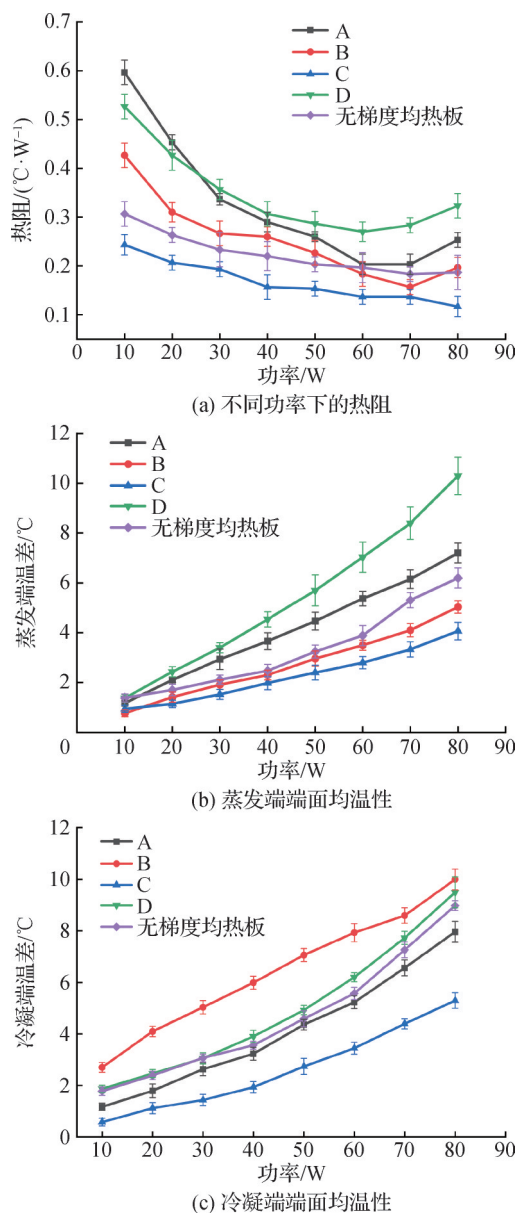


图5 不同功率下均热板传热性能

Fig.5 Thermal transfer performance of vapor chamber at different power levels

均热板面内最大温差降低了 24.02%; A、C 均热板各自冷凝端面内最大温差的平均值相对无梯度均热板冷凝端面内温差降低了 26.07%, 表现出良好的均温性。B、C 均热板蒸发端毛细力为四周低中心高的设计, 能提供定向的毛细抽力使工质定流到热源上方, 持续补液降低烧干风险。A、C 均热板冷凝端从外向里孔径递增的吸液芯的中心具有更大的孔径和渗透率, 能迅速冷凝传热, 工质在蒸发端或冷凝端的顺毛细压力梯度流动, 定向引导使得 C 均热板在蒸发端和冷凝端表现出较好的温度均匀性。

2.2 不同均热板的启动性能

均热板从启动至达到稳态的全过程可用一阶单

位阶跃响应函数式(16)描述^[19]。

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (16)$$

式中: τ 定义为蒸发端平均温度发生单位阶跃响应达到稳态温度的 63.2% 所需时间, s。 τ 越小系统响应速度越快, 当 $t=\tau$ 时, 认为系统已经响应启动。

图 6 所示为不同均热板的启动响应时间随功率的变化。启动响应时间随功率的增加呈非线性减小。加载功率增至 70 W 时, C 均热板的启动时间为 413 s, 其余均热板出现了启动时间增长现象, 结合图 5 分析原因, 推测其余均热的加载功率可能已经超过各自的极限功率, 回流不足出现局部“烧干”, 最终导致启动响应时间增加。C 均热板在 20 W 后实现更快启动响应的同时保持更佳的均温性方面具有一定优势。

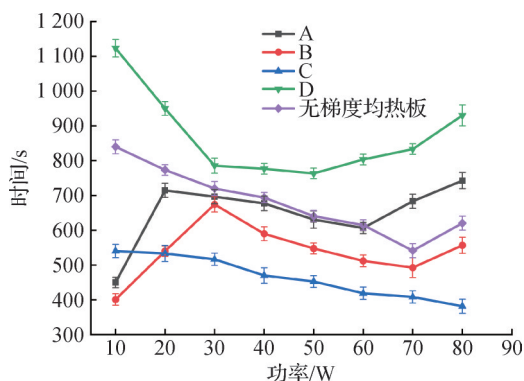


图6 不同均热板启动响应时间随功率的变化

Fig.6 Start-up response time of chamber varies with power levels

均热板的启动时间受加载功率下回流阻力的大小和梯度吸液芯的梯度增强效果的影响。A 均热板蒸发端的毛细力结构呈“四周高、中心低”的分布特征, 在较低功率下工质挣脱高毛细的束缚, 从而引起热源中心区域补液速度慢。此外, 上下吸液芯结构一致, 无法在上下工质传递中体现梯度的变化 ($\Delta p \approx 0$)。随着功率继续增加, 强蒸发促进工质回流, 启动响应时间随之缩短。B 均热板冷凝端也有相似缺陷。D 均热板中工质在蒸发端与冷凝端流动均需克服由小孔径向大孔径流动时的高毛细阻力。无梯度均热板蒸发端与冷凝端无孔径梯度变化, 流动阻力恒定, 同时上下吸液芯结构一致没有 Δp 的增益效果。C 均热板蒸发端中心小孔径使工质持续聚集至热源上方, 冷凝端中心大孔径加快传热同时可通过冷凝端四周高毛细力加快回流, 形成低阻力闭环, 最终减少了均热板启动响应时间。

为了验证式(5)与式(9)的梯度差模型, 将理想

模型与测得启动响应时间和热阻关联,得到定性分析曲线如图7所示。

由图7可知,随着 Δp 从负值向正值增加,启动响应时间和热阻均呈现明显下降趋势;C型($\Delta p > 0$)有较

低的启动响应时间及较低的热阻;A、B型及无梯度均热板($\Delta p \approx 0$),缺乏上下梯度协同,性能居中;D型($\Delta p < 0$)反向压差是导致启动最慢且热阻高的重要原因。

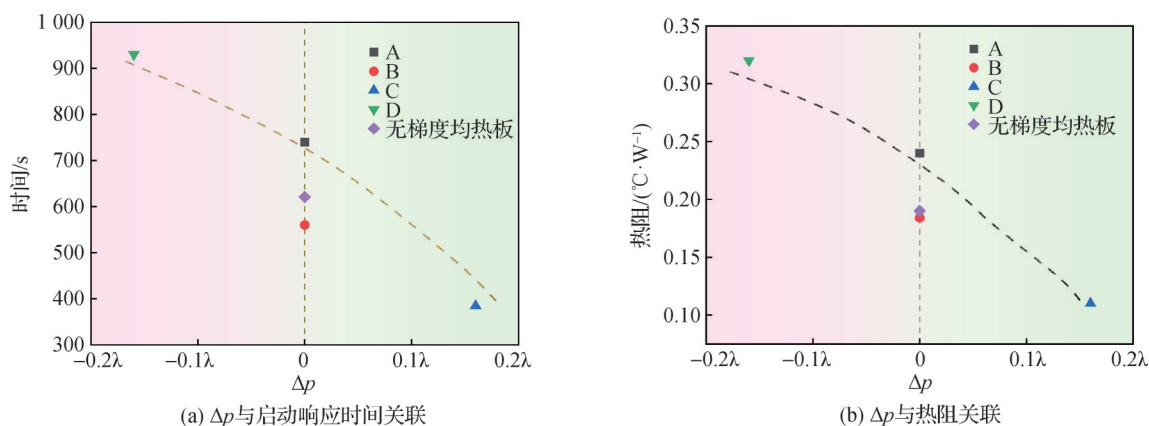


图7 80 W功率下 Δp 与启动响应时间及热阻的关联

Fig.7 Startup response time and thermal resistance as a function of Δp at 80 W

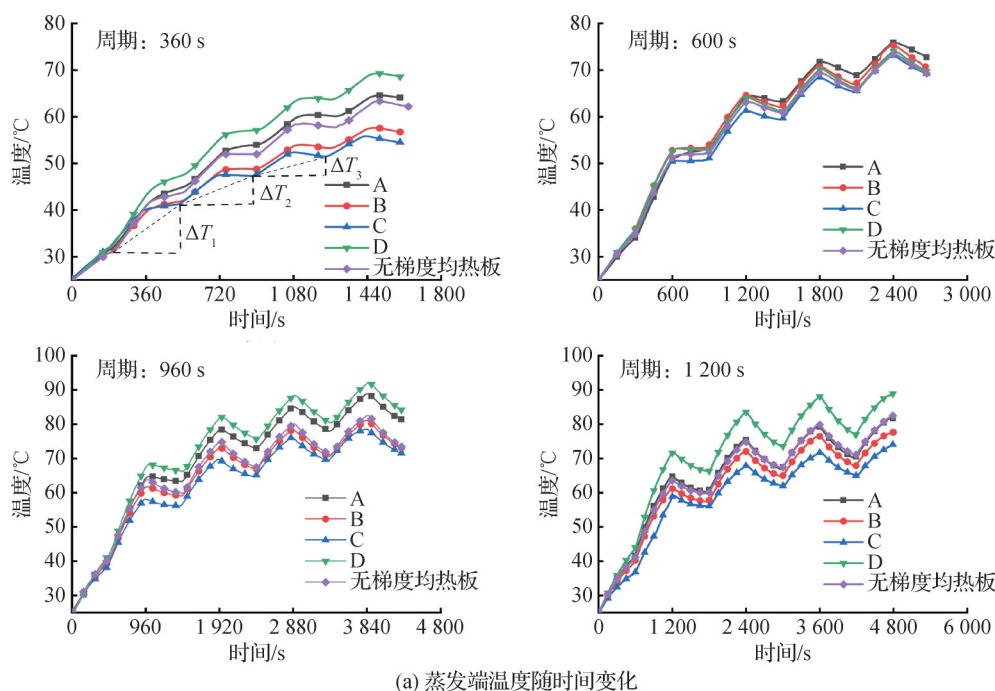
这一关联结果证实了式(9)表达的正确性,同时此理想模型下得出了与Bu Shichao等^[10]相似的结论。证明了双端梯度配置通过获取正向 Δp 实现毛细驱动力与流动阻力的最优匹配,是提升均热板的启动与传热性能的关键之一。

2.3 不同均热板脉冲工况下的性能表现

开关或基站等设备频繁运行过程中受工作模式影响,功率表现出脉冲变化。为研究梯度均热板在脉冲工况下的热学性能表现,在占空比为50%,不同

周期的方波脉冲为20 W-40 W-20 W条件下进行测试,测试结果如图8所示。

由图8(a)可知,蒸发端结构为从外到里孔径递增的A、D均热板蒸发端平均温度大于无梯度均热板蒸发端平均温度,但与A、D蒸发端结构梯度相反,B、C相对无梯度均热板保持了更低的表面温度。如在脉冲周期为1 200 s,第3轮脉冲结束时,A、B、C、D均热板温度分别为无梯度均热板的101.32%、94.24%、89.16%和110.11%。说明蒸发端吸液芯结构从外到里孔径递减更有利于获得较低的表面温度。



(a) 蒸发端温度随时间变化

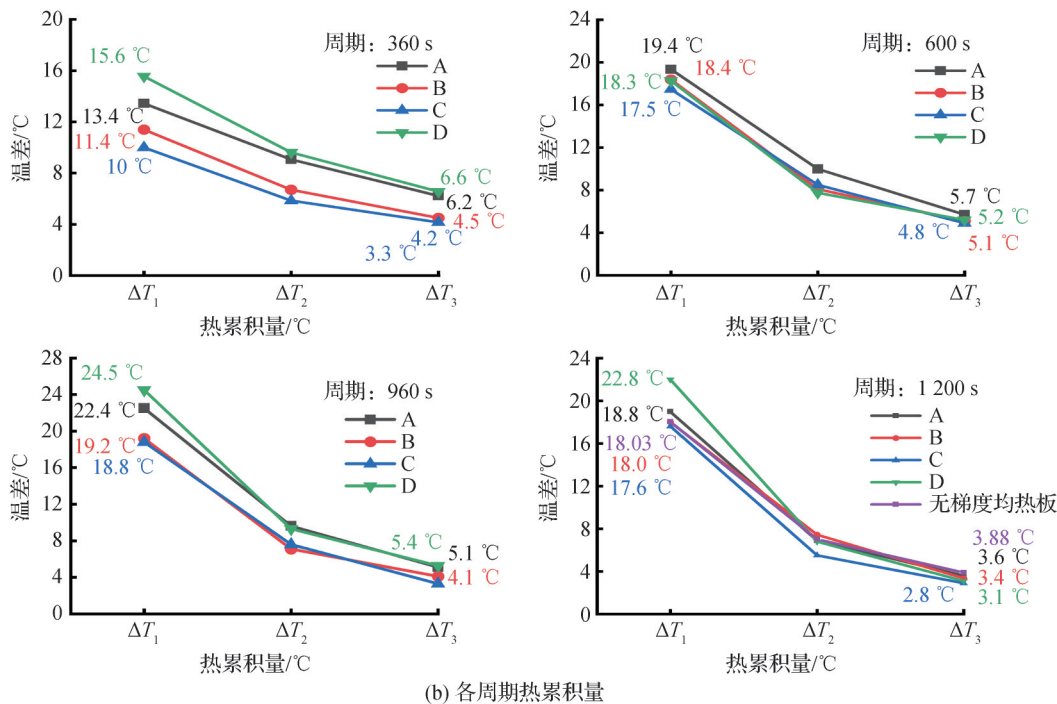


图8 脉冲周期加载测试结果

Fig.8 Pulsed cyclic loading test results

由于功率突变后的半个周期时间内无法达到当下功率下的热平衡,所以每次脉冲结束后均有热累积产生。图8(a)中, ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 为热累积量,表示脉冲进入40 W时的温度与前一个脉冲进入40 W时温度的温差,可用式(17)描述。

$$\Delta T_i = T_{(0.5P + P \times i)} - T_{(0.5P - P \times i)}, i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

式中: P 为脉冲周期,s。数据结果如图8(b)所示,不同结构的均热板热累积量不同。相同脉冲周期内的不同结构均热板,从 ΔT_1 到 ΔT_3 的降幅近似相同,降幅最大相差值为5.8%,可见结构与降幅无高度关联。因此,可将4块均热板在当前脉冲功率下的平均 ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 等效为1块不考虑梯度结构的均热板的 ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 。脉冲周期为360、600、960、1 200 s时, ΔT_3 相对于 ΔT_1 的降幅分别为57.70%、72.85%、78.77%、82.21%。由此可知,均热板热累积量的降幅随脉冲周期长度的增长而增加。各结构均热板中,C均热板首轮脉冲和末次脉冲热累积量几乎最低,且各脉冲周期下 ΔT 降幅低于平均 ΔT ,拥有更快的温度稳定性,适合用于脉冲工况下。

2.4 本文工作与文献对比

为全面了解表现最佳的C均热板的传热性能,将其与其他同类研究中均热板进行对比分析,如表3所示,热阻结果如图9所示。

由图9可知,4种均热板中,虽然Xia Yujuan等^[8]等制备的均热板使用功率更大,极限热流密度为

表3 不同均热板热学性能对比

Tab.3 Comparison of heat transfer performances of different vapor chambers

项目	尺寸/mm	结构	工质	材料	冷却
Xia Yujuan等 ^[8]	Φ110×9	单梯度单吸液芯	丙酮	铝	
Jiang Da等 ^[20]	Φ110×9	单梯度单吸液芯	丙酮	铜	风冷
本文C均热板	78×78×4	多梯度双吸液芯	乙醇	铝	

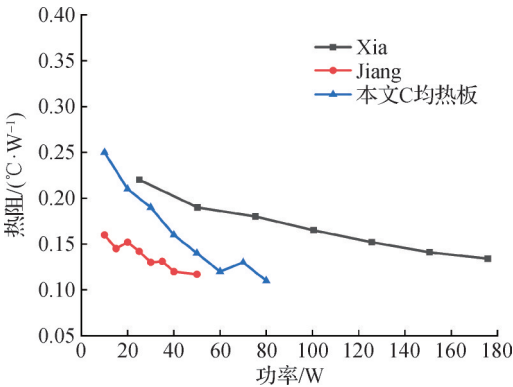


图9 C均热板与其他均热板对比

Fig.9 Comparison of C vapor chambers with other vapor chambers

20 W/cm²,但具有较高的热阻和较大的尺寸,而C均热板在80 W时热流已经达到了35.5 W/cm²。在25 W内Jiang Da等^[20]制备的铜均热板有更高的传热系数,该均热板比C均热板内的热阻低,但C均热板热阻下降的趋势明显大于该均热板。因此对于蒸发

端吸液芯从外到里孔径递减的单吸液芯的铝均热板而言,冷凝端添加结构为从外到里孔径递增的吸液芯能承载更高的热流密度并具有更低的热阻,表现出良好的热学性能。

3 结论

1)双端梯度吸液芯配置显著影响均热板传热性能。蒸发端从外到里孔径递减的吸液芯结构与冷凝端从外到里孔径递增的吸液芯结构相较于无梯度均热板蒸发端与冷凝端各面内温差降低了24.02%和26.07%。

2)双端梯度配置通过获得正向 Δp ,实现毛细驱动力与流动阻力的最优匹配,提升均热板的启动性能并降低热阻。其中C均热板的蒸发端吸液芯结构为从外到里孔径递减,冷凝端吸液芯结构为从外到里孔径递增,在80 W下获得了385 s的启动响应时间及0.11 °C/W的热阻。

3)脉冲工况下,均热板热累积量大小与梯度结构有关。C均热板结构具有较低的热累积与较快的温度收敛,适合用在工程上。

4)均热板梯度结构与多轮脉冲后的热累积量降幅无高度关联。热累积量降幅随脉冲周期时长的增加而增加。脉冲周期从360 s转为1 200 s后,第3轮热累积量相对于首轮热累积量的降幅从57.70%增至82.21%。

参考文献

- [1] 王宙,银了飞,丁艺,等.具有梯度结构吸液芯的均热板传热特性[J].工程热物理学报,2023,44(2):532-539. (Wang Zhou, Yin LiaoFei, et al. The heat transfer characteristics of vapor chambers with gradient structured wicks [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2): 532-539.)
- [2] 康明魁,王小明,李海涛,等.某主板的铝基均热板设计、仿真与实验研究[J].制冷学报,2020,41(2):107-114. (Kang Mingkui, Wang Xiaoming, Li Haitao, et al. Design, simulation, and experimental study of aluminous vapor chamber based on a motherboard [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 107-114.)
- [3] Erkek T Ü, Erkek M, Aydın M B, et al. Experimental performance characterization of R-454B and R-410A in data center server rack mount cooling unit: Energy efficiency and environmental impact assessment [J]. International Journal of Refrigeration, 2026, 182: 469-481.
- [4] Skach M, Arora M, Tullsen D, et al. Virtual melting temperature: managing server load to minimize cooling overhead with phase change materials [C]//2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2018: 15-28.
- [5] 郝剑,朱崧,吴胜,等.均热板的研究现状及应用前景[J].铜业工程,2023(6):104-116. (Hao Jian, Zhu Song, Wu Sheng, et al. Research progress and application prospects of vapor chamber [J]. Copper Engineering, 2023 (6): 104-116.)
- [6] 陈恭,汤勇,张仕伟,等.超薄均热板的研究现状及发展趋势[J].机械工程学报,2022,58(12):197-212. (Chen Gong, Tang Yong, Zhang Shiwei, et al. Development status and perspective trend of ultrathin vapor chamber [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (12): 197-212.)
- [7] 钱帮兴,文紫薇.梯度结构吸液芯性能[J].当代化工,2025,54(8):1873-1877. (Qian Bangxing, Wen Ziwei. Performance of gradient structure wick [J]. Contemporary Chemical Industry, 2025, 54(8): 1873-1877.)
- [8] Xia Yujuan, Yao Feng, Wang Mengxiang. Experimental investigation on thermal performance of vapor chambers with diffident wick structures [J]. Energies, 2023, 16 (18): 6464.
- [9] Yin Liaofei, Li Jiachen, Wang Zhou, et al. Experimental study on the heat transfer performance of vapor chamber with uniform/gradient wicks [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 66: 105801.
- [10] Bu Shichao, Li Haoran, Yang Xiaoping, et al. A novel vapor chamber with gradient capillary wick and larger expansion area [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 246: 127021.
- [11] 吴少如.双层梯度孔吸液芯的制备与流动传热分析[D].广州:华南理工大学,2017. (Wu Shaoru. Fabrication and analysis of heat transfer and flow characteristic on the bi-layer composite porous wick [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.)
- [12] 柳洋,陈岩,杨博文,等.孔径递变复合毛细芯的蒸发特性研究[J].工程热物理学报,2019,40(7):1627-1631. (Liu Yang, Chen Yan, Yang Bowen, et al. Investigation on evaporation for composite wicks with changing pore size [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(7): 1627-1631.)
- [13] 张劲草.功能梯度毛细芯研制及性能研究[D].济南:山东大学,2018. (Zhang Jincao. Investigation on functional gradient porous wicks for loop heat pipe [D]. Jinan: Shandong University, 2018.)
- [14] 张爵灵,王林山,郑逢时,等.粉末冶金多孔铝的研究进展[J].材料导报,2023,37(12):126-133. (Zhang Jueling, Wang Linshan, Zheng Fengshi, et al. Research and development of porous aluminum produced by powder

- metallurgy[J]. Materials Reports, 2023, 37(12): 126–133.)
- [15] 李鑫. 粉末烧结式吸液芯铝均热板的制造及其传热性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. (Li Xin. Manufacture and heat transfer performance of powder sintered liquid core aluminum vapor chamber [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.)
- [16] Rodrigues C F, Blaga L, Klusemann B. Thermal degradation and decomposition of FR4 laminate PCB substrates joined by friction riveting [J]. Applied Composite Materials, 2025, 32(3): 879–893.
- [17] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N, et al. Notes on transport phenomena[M]. New York: Wiley, 1958.
- [18] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3–17.
- [19] Liu Xiangdong, Chen Yongping, Shi Mingheng. Dynamic performance analysis on start-up of closed-loop pulsating heat pipes (CLPHPs) [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 65: 224–233.
- [20] Jiang Da, Bian Naipu, Wang Liang, et al. Experimental study on performance enhancement in gradient wick vapor chambers [J]. Microgravity Science and Technology, 2025, 37(5): 50.

通信作者简介

陈志新,男,博士,教授,东华理工大学电子与电气工程学院, 13755757343, E-mail: zhxchen@ecit.cn。研究方向: 复合材料。

About the corresponding author

Chen Zhixin, male, Ph. D., professor, School of Electrical and Electronic Engineering, East China University of Technology, 86–13755757343, E-mail: zhxchen@ecit.cn. Research fields: composite material.