

基于相变温度梯级布置的温控特性研究

杨萍 童旋 曾敏 王秋旺

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要 相变温控因为结构简单、性能可靠、经济节能等优点, 广泛应用于各类设备温控, 尤其是电子设备。本文针对电子芯片相变温控, 提出了基于相变温度梯级布置的温控新想法, 利用 COMSOL 软件数值模拟研究了温控效果, 结果表明, 梯度布置相变材料的相变温度具有优化控温的潜力, 且梯度温差并非越大或越小越好, 本文条件下梯度温差为 6 K 时控温优化效果最好, 相对无梯度布置的最优工况可延长芯片正常工作时间 188 s, 时间相对延长 10.7%。

关键词 梯级布置; 相变温控; 数值模拟

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 0253-231X(2022)06-1625-06

Numerical Investigation on Temperature Control Characteristics Based on Phase Change Temperature Gradient Arrangement

YANG Ping TONG Xuan ZENG Min WANG Qiuwang

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract With the advantages of simple structure, reliable performance and lower cost, phase-change temperature control is widely used in all kinds of equipment temperature control, especially electronic equipment. In this paper, a new idea of phase-change temperature control based on phase transition temperature gradient arrangement is proposed to optimize the temperature control and then the phase change heat transfer process is studied numerically by COMSOL software. It is proved that the new idea has the potential to optimize the temperature control, and the gradient temperature difference is not the greater or smaller the better. In this paper, the result is best when the gradient temperature difference is 6 K. Compared with the optimal condition without temperature gradient arrangement, the working time of the chip can be extended by 188 s, and the time can be extended by 10.7%.

Key words gradient arrangement; phase-change temperature control; numerical simulation

0 引 言

相变温控是利用相变材料的储能特性, 在相变过程中吸收/释放相变潜热, 而材料自身温度变化小以实现对物体温度的控制。相变温控能抑制环境温度波动的不稳定影响, 且具有结构简单、性能可靠、经济节能等优点^[1]。被广泛应用于航空^[2]、电子器件^[3]、军事^[4]多个领域, 吸引了众多国内外学者进行相变温控的相关研究。

谢标^[5]通过数值模拟方法研究了正十四烷/高导热碳碳蜂窝相变装置在航天器有周期性负载和外部热流条件下的温控问题, 设计出能实现温控要求的温控单元。王勇^[6]研究相变材料在导弹中的温控作用, 探究了相变材料在导弹飞行中不同姿态的

相变传热过程, 揭示了导弹飞行中倾斜角度与温控效果的非线性规律。康帅帅^[7]探究了以多孔介质为载体的相变材料温控效果影响因素, 结果表明孔隙率对温控效果有很大影响, 并提出了针对单向相变传热的最优多孔介质金属梯度设计。李得伦^[8]利用 FLUENT 软件研究了石蜡/膨胀石墨复合材料对电子芯片的温控作用, 研究表明芯片的散热和抗热冲击能力明显优于未使用相变材料的情形, 且分析了相变材料用量、加热功率对温控效果的影响。Zou 和 Liu 等^[9]使用石蜡/膨胀石墨复合相变材料对电池组温控管理, 结果表明, 对 36 块电池组成的电池组 3C 充电, 最高温度可限制在 317.6 K 且温

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51776157)

作者简介: 杨萍 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事相变材料强化传热及两相流沸腾传热研究。

通信作者: 曾敏, 教授, E-mail: zengmin@mail.xjtu.edu.cn。

度场最大温差仅为 0.8 K。Ping 和 Peng^[10] 结合新型金属翅片和相变材料对高温锂电池组进行温控管理, 探究了相变材料种类、翅片厚度、翅片形状和相变材料厚度对温控的影响, 最佳效果可以将最高温度限制在 313 K。然而从公开的文献来看, 目前关于相变温控优化主要集中于导热系数强化方面, 使用的相变材料基体大多为单一相变温度。

鉴于此, 本文提出了基于相变温度梯级布置的温控新想法, 通过实验和公开文献验证了模型的正确性, 利用 COMSOL 软件数值模拟证明了相变温度梯级布置可以优化控温效果, 并探究了梯度温差对优化效果的影响。本文研究为辅助优化控温提供了一种新的思路。

1 温控单元设计

工程中常用的有机相变材料如石蜡, 普遍存在导热系数低的问题, 温控应用时必须进行强化换热, 内插金属翅片是常用的强化换热方法。此外, 考虑相变材料在相变过程中存在泄漏问题, 故本文温控单元设计的整体思路是格栅腔体结构。采用均匀分割的方法, 形成 5×5 的小腔体分布, 以中心小腔体为起点外围拓展两层腔体, 小腔体尺寸结合电子芯片尺寸设计, 长宽高分别为 18 mm、18 mm 和 35 mm, 铝合金板约厚 2 mm。温控单元的三维模型图见图 1。

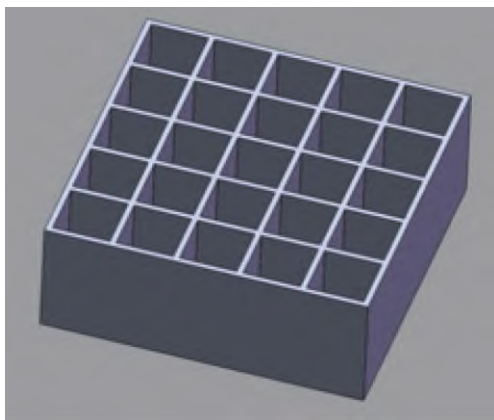


图 1 温控单元三维模型图

Fig. 1 Geometric model diagram of temperature control unit

2 数学物理建模

2.1 物理建模

由于实际模型是对称结构, 故简化为二维非稳态计算模型。

根据设计的温控单元尺寸进行物理几何建模,

物理模型图见图 2。蓝色代表铝合金腔体, 灰色代表相变材料, 模拟所用材料物性详见表 1。模拟常见电子器件发热, 通过调研将加热边界设置为 2.5 W/cm^2 的定热流密度, 其他腔体边界为自然对流散热, 温控单元各腔体均处于密封状态。温度测点布置在加热中心, 代表电子芯片工作时芯片温度随时间变化过程, 同时作为控温效果的重要指标。

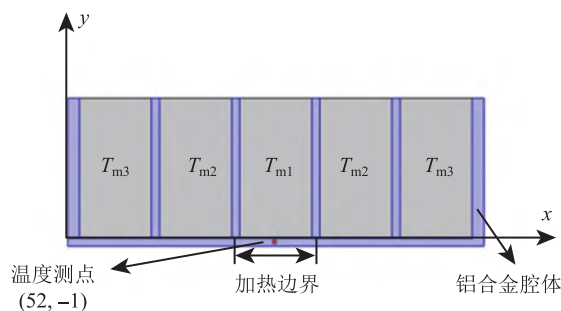


图 2 物理模型图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domain

表 1 材料物性表

Table 1 Properties of materials

	固态石蜡	液态石蜡	铝合金 6061
导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.15	0.21	155
比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2120	2120	896
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	780	780	2750
潜热/ kg kJ^{-1}		249	—
动力黏度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	—	0.003	—
体膨胀系数/ K^{-1}	0.0005		—

为简化计算, 还对模型做了如下合理假设:

- 1) 材料的导热系数、比热容、黏度、膨胀系数等物性均为常数, 不随温度、压力变化。
- 2) 相变材料液态时为不可压缩流体和牛顿流体, 流动为层流流动。
- 3) 相变材料液相密度满足 Boussinesq 假设, 考虑密度变化带来的浮升力影响。

2.2 数学建模

使用焓-多孔介质模型处理相变传热过程, 以温度作为因变量, 不分区建立控制方程, 而是将整个区域看作多孔介质, 并用液相分数作为判断标准, 液相分数为 0 时为固相, 液相分数为 1 时为液相, 液相分数介于 0~1 之间时为固液糊状区, 液相分数 β 由温度定义:

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_s 为相变温度范围下限, T_l 为相变温度范围上限。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0$$

(2)

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla P + \nabla(\mu \nabla \vec{U}) + \rho \vec{g} + F$$

(3)

$$F = -A_{\text{mush}} \vec{U}$$

(4)

$$A_{\text{mush}} = C(1 - \beta)^2/(\beta^3 + \varepsilon)$$

(5)

式中, C 为糊状系数常数, 常取值 $10^4 \sim 10^7$ 之间, 本文取为 10^5 , ε 为防止在计算时出现除以零的附加常数小量, 常取为 0.001。

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{U} \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) + S$$

(6)

3 结果与分析

3.1 模型验证

通过网格独立性检验, 网格使用数为 12280。随后为确定模型正确性, 本文首先通过实验测定单方腔相变加热过程, 依据实验设置模拟还原, 定性对比液相分布云图, 对比结果如图 3 所示, 模拟与实验结果吻合良好, 均是加热前期以热传导为主, 近壁面石蜡最先熔化, 随着加热持续液态石蜡增加, 自然对流作用逐渐显著, 上侧石蜡熔化加快, 形成图 3 所示相界面, 随后石蜡完全融化相界面消失。然后通过文献复现的方法进行模型定量验证, 复现文献 [11] 中方腔加热相变过程, 进行液相分数变化曲线定量对比, 对比结果如图 4 所示, 复现误差在 10% 以内。综上, 证明模型正确。

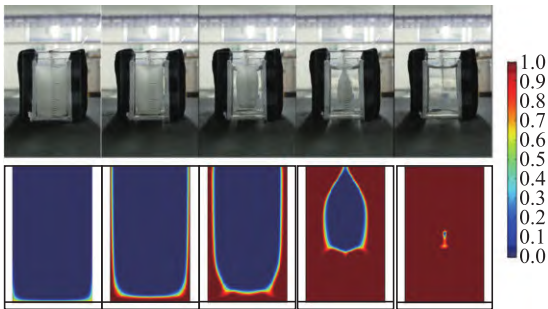


图 3 实验验证液相分数云图对比图
Fig. 3 The liquid fraction comparison between experiment and simulation

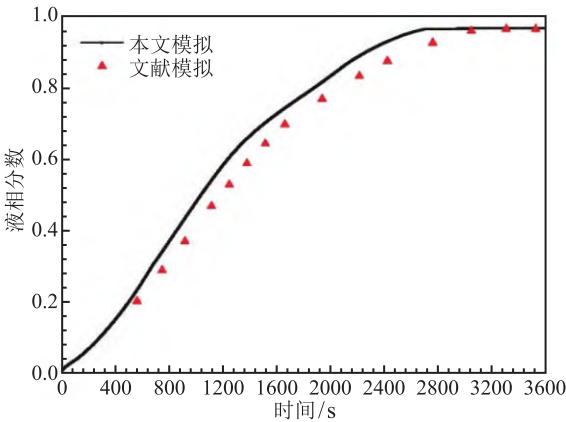


图 4 液相分数变化曲线与文献 [11] 对比图
Fig. 4 The liquid fraction comparison between literature [11] and simulation

3.2 结果分析

根据市场调研, 常见电子芯片如 CPU, 正常工作时温度一般维持在 323 K, 连续工作时最高温度不能超过 353 K, 为确保芯片安全可靠运行, 留有升温余量, 设置 343 K 为温度节点, 比较不同工况下测点温度到达温度节点所需要的时间, 所需时间越长说明控温效果越好, 即温控单元实现了延长芯片工作时间的作用。

为研究相变温度梯级布置的温控特性, 每组模拟设置了四种不同工况, 即温控单元内石蜡的相变温度由里层向外层依次降低, 形成梯度布置、相变温度由里层向外层依次升高, 形成反梯度布置、各层相变温度均为最低相变温度的对比工况 1、相变温度均为最高相变温度的对比工况 2, 模拟组 1 各工况详细设置见表 2。使用 COMSOL 软件模拟各工况相变传热过程, 绘制同一测点的温度-时间变化曲线, 分析比较各工况到达温度节点所需时间, 判断工况控温效果优劣。

表 2 模拟组 1(梯度温差 10 K) 详细设置表
Table 2 Detailed description of simulation group 1 (The gradient temperature difference is 10 K)

工况	相变温度布置	边界条件
工况 1 ("梯度布置")	$T_{m1}=331\text{ K}$	2.5 W/cm ² 加热 自然对流散热
	$T_{m2}=321\text{ K}$	
	$T_{m3}=311\text{ K}$	
工况 2 ("反梯度布置")	$T_{m1}=311\text{ K}$	2.5 W/cm ² 加热 自然对流散热
	$T_{m2}=321\text{ K}$	
	$T_{m3}=331\text{ K}$	
工况 3 (对比工况 1)	$T_{m1}=311\text{ K}$	2.5 W/cm ² 加热 自然对流散热
	$T_{m2}=311\text{ K}$	
	$T_{m3}=311\text{ K}$	
工况 4 (对比工况 2)	$T_{m1}=331\text{ K}$	2.5 W/cm ² 加热, 自然对流散热
	$T_{m2}=331\text{ K}$	
	$T_{m3}=331\text{ K}$	

此外,为探究梯度温差对控温效果的影响,控制其他影响因素不变,维持最低相变温度为 311 K 不变,仅依次改变各组梯度布置工况的梯度温差值为 10 K、8 K、6 K、4 K、2 K,然后对比分析梯度温差对控温效果的影响,确定最优相变温度布置搭配。各组测点温度变化曲线见图 5。

分析图 5 可知,五组模拟中均是梯度布置与均为最低相变温度的对比工况 1 的控温效果较好,且相较另外两组工况而言优化效果显著,所以下文分析主要聚焦于工况 1 与工况 3 的控温效果对比。由图 5(a) 可知,梯度布置的梯度温差为 10 K 时,其控温效果并没有优于工况 3 的控温效果,但两者效

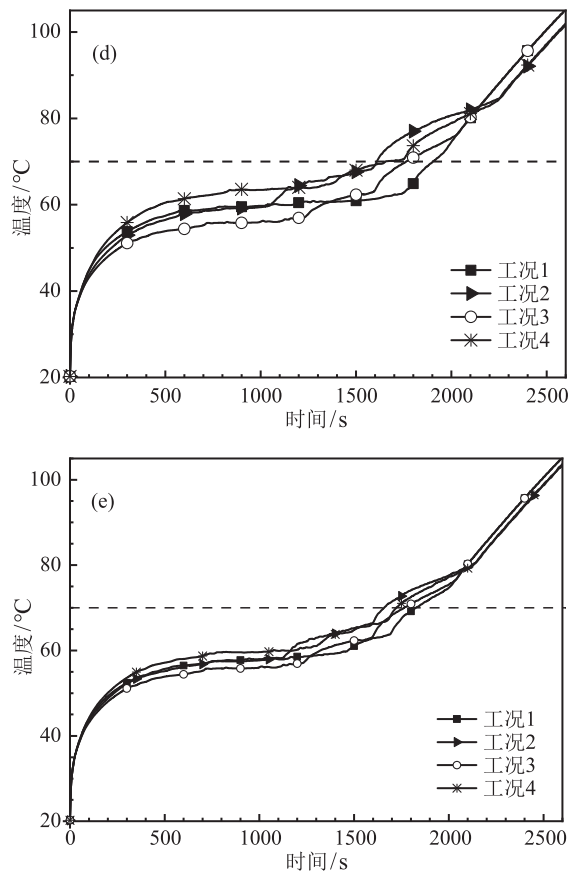
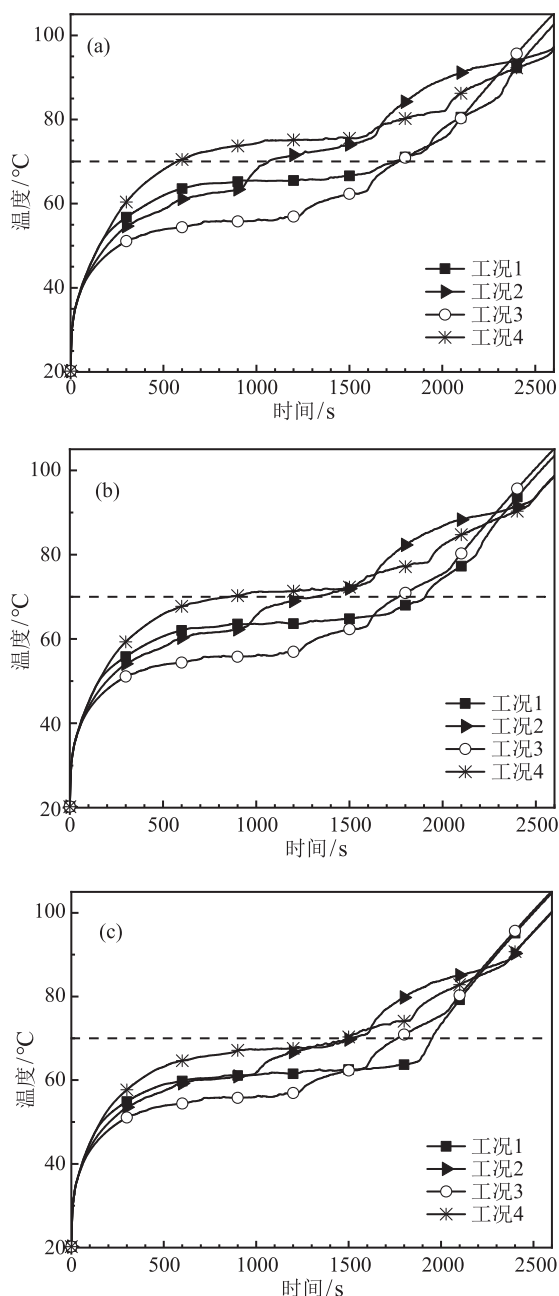


图 5 不同模拟组测点温度变化曲线图, (a)~(e) 梯度温差分别为 10 K、8 K、6 K、4 K、2 K

Fig. 5 The variation of temperature with different simulation group, (a)~(e) the gradient temperature difference is 10 K, 8 K, 6 K, 4 K, 2 K respectively

果很接近;分析图 5(b)~(e) 不难发现,当梯度温差为 8 K、6 K、4 K、2 K 时,梯度布置的控温效果均是最佳,这一结论说明相变温度梯级布置具有优化温控的潜力,在今后的相变温控应用中可以通过合理梯级布置不同相变温度的相变材料进一步提升温控效果,延长设备工作寿命。此外,由图 6 可知梯度温差对梯度布置的控温效果有较大影响,梯度温差太大或太小均不利于温控单元温控优化。在本文限定背景下,梯度温差为 6 K 时,梯度布置的控温效果最佳,与无梯度布置的最优工况相比可延长芯片正常工作时间 188 s,时间相对延长 10.7%。

进一步观察图 5 发现,每组模拟各工况的测点温度曲线都会出现明显的温度拐点,以图 5(a) 梯度温差 10 K 模拟组为例,四组工况均有 3 个温度拐点,但随着梯度温差降低,梯度布置的测点温度曲线拐点变化为 2 个、1 个、2 个,梯度温差 2 K 时又恢复为 3 个,其他工况测点温度曲线一直维持 3 个拐点不变。为分析拐点出现及消失原因,观察梯度温差 6 K 模拟组的梯度布置 (工况 1) 和工况

3 的液相云图变化图, 如图 7 所示, 发现由于不同层腔体放置材料的相变温度不同且距离热源远近不同, 每层相变材料完全熔化的时间并不相同, 工况 3 加热过程中存在明显的分三层熔化现象, 所以有 3 个温度拐点, 梯度温差 6 K 时梯度布置实现了整体石蜡同步熔化, 所以温度拐点变为 1 个。定量比较温度拐点出现时间和某一层相变材料完全融化时间如表 3 所示, 可知温度拐点出现时间基本与某一层相变材料完全融化时间基本一致。

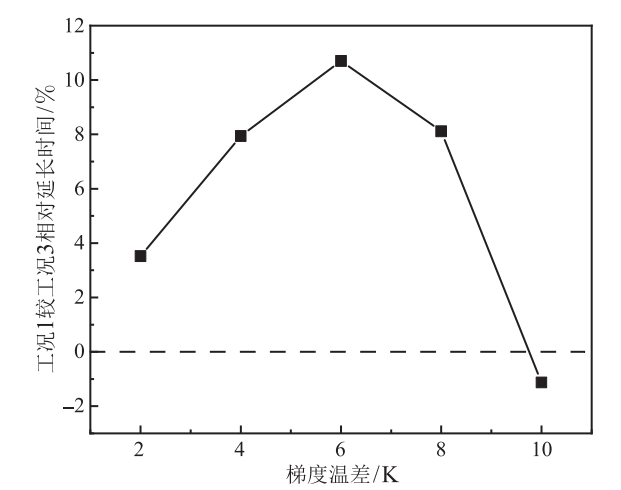


图 6 不同梯度温差下梯级布置工况的温控效果对比图
Fig. 6 Relative extension time variation with gradient temperature difference

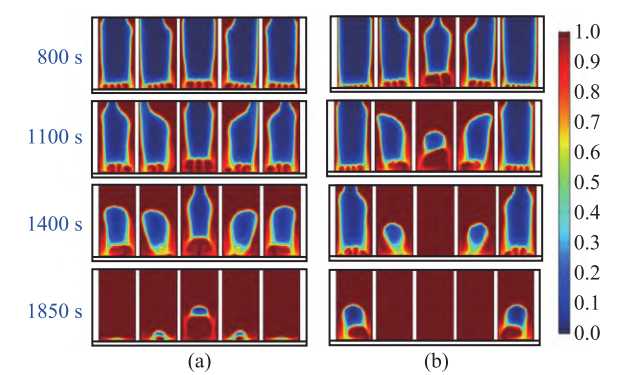


图 7 工况 1(梯度布置) (a) 和工况 3 (b) 液相分布变化图
Fig. 7 Distribution of liquid phase under different working conditions at different heated time (a) Case 1 (gradient arrangement); (b) Case 3

综上解释了温度拐点出现的原因, 材料相变温度不同、距离热源位置不同带来的分层熔化现象导致了温度拐点出现和消失。同时也揭示了相变温度梯级布置可以优化温控的原因, 由于局部加热使金属翅片温度分布不均匀, 所以合理布置相变温度, 实现所有相变材料同步熔化, 能够在前期充分利用相变潜热, 加快利用相变材料的储能特性, 降低芯片

温度, 而传统使用单一相变温度材料不能实现同步熔化, 虽然最终都发挥了相变潜热的作用, 但存在作用效果时间差, 所以梯度设置可以优化温控。

表 3 温度拐点出现时间-腔体熔化结束时间对比表
Table 3 Comparison of time of inflection point of temperature and the melting end time

工况	时间/s
工况 3-第一层腔体熔化结束时间	1242
工况 3-第一个温度拐点出现时间	1238
工况 3-第二层腔体熔化结束时间	1600
工况 3-第二个温度拐点出现时间	1602
工况 3-第三层腔体熔化结束时间	2040
工况 3-第三个温度拐点出现时间	2038
6K 组梯级布置-同步熔化结束时间	1938
6K 组梯级布置-温度拐点出现时间	1905

4 结 论

本文利用 COMSOL 软件数值模拟相变传热过程, 证明了相变温度梯级布置可以优化温控, 探究了梯度温差对控温效果的影响, 主要结论如下:

- 1) 在温控单元中梯度布置不同相变温度的相变材料, 若搭配合理可以实现温控优化, 延长设备工作时间;
- 2) 梯度布置可以优化温控的本质是温度梯级利用, 实现最佳优化的关键是实现温控单元所有相变材料熔化同步;
- 3) 梯度温差对温控效果有较大影响, 梯度温差太大或太小都不利于优化温控效果;
- 4) 本文设定背景下, 梯度温差为 6 K 时温控效果最佳, 梯度布置相较无梯度布置的最优工况可延长芯片正常工作时间 188 s, 时间相对延长 10.7%。

参 考 文 献

[1] 周伟, 张芳, 王小群. 相变温控在电子设备上的应用研究进展 [J]. 电子器件, 2007, 30(1): 344-348
ZHOU Wei, ZHANG Fang, WANG Xiaoqun. Prospect of Thermal Control Phase Change in Electronic Devices [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 30(1): 344-348

[2] Del Castillo L, Thrivikraman T, Hoffman J P, et al. Robust, Reworkable Thermal Electronic Packaging: Applications in High Power TR Modules for Space [C]//Aerospace Conference, 2013 IEEE. IEEE, 2013: 1-10

[3] Alshaer W G, Rady M A, Nada S A, et al. An Experimental Investigation of Using Carbon Foam-PCM-MWCNTs Composite Materials for Thermal Management of Electronic Devices Under Pulsed Power Modes [J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53(2): 569-579

[4] Price D C. Thermal Management of Military Fighter Aircraft Electro-Optics Pod: An Invited Paper [C]//Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003. Nineteenth Annual IEEE. IEEE,

- 2003: 341–350
- [5] 谢标. 复合相变材料储能及热控的理论和实验研究 [D]. 中国科学技术大学, 2016
XIE Biao. Theoretical and Experimental Study on Energy Storage and Thermal Control with Composite Phase Change Materials [D]. University of Science and Technology of China, 2016
- [6] 王勇. 相变温控材料热物性测量技术及实验研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2019
WANG Yong. Research on Measurement Technology and Experiment of Thermophysical Properties of Phase Change Materials for Temperature Control [D], Harbin Institute of Technology, 2019
- [7] 康帅帅. 面向相变温控的梯度多孔金属材料导热增强设计 [D]. 大连理工大学, 2017
KANG Shuaishuai. Design of Gradient Cellular Material as Thermal Conductivity Enhancer for PCM-Base Temperature Control [D]. Dalian University of Technology, 2017
- [8] 李得伦. 石蜡相变材料的传热与控温性能研究 [D]. 华南理工大学, 2012
LI Delun. Research on the Heat Transfer and Thermal Control Performance of Paraffin Phase Change Material [D]. South China University of Technology, 2012
- [9] Zou D, Liu X, He R, et al. Preparation of a Novel Composite Phase Change Material (PCM) and Its Locally Enhanced Heat Transfer for Power Battery Module [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 1196–1202
- [10] Ping P, Peng R, Kong D, et al. Investigation on Thermal Management Performance of PCM-fin Structure for Li-ion Battery Module in High-Temperature Environment [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 131–146
- [11] Changda Nie, Shengxiang Deng, Hua Guo, et al. Effects of Partially Thermally Active Walls on Simultaneous Charging and Discharging of Paraffin Wax in a Square Cavity [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 202: 112201