



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

一种低成本相变材料热沉的设计与仿真

方进晖 刘浩 林佳 余宏坤

Design and simulation of a low-cost PCM heat sink

FANG Jinhui, LIU Hao, LIN Jia, YU Hongkun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023153>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种复合相变热沉设计与散热性能分析

Design of a phase change material heat sink and analysis of its heat dissipation performance

航天器环境工程. 2020, 37(4): 390–396 <https://doi.org/10.12126/see.2020.04.012>

无人机电子设备舱热环境仿真分析

Thermal environment simulation analysis of UAV electronic equipment cabin

航天器环境工程. 2024, 41(2): 144–150 <https://doi.org/10.12126/see.2023049>

某弹载天线热管PCM热控装置参数分析

Parameter analysis of a heat pipe/PCM thermal control device for missile-borne antenna

航天器环境工程. 2019, 36(1): 33–39 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.006>

不锈钢板式热沉液压胀形工艺参数仿真分析

Simulation of hydro-bulging process of stainless-steel plate heat sink

航天器环境工程. 2022, 39(1): 33–39 <https://doi.org/10.12126/see.2022.01.005>

某航天器电子设备减振设计与试验验证

Design and testing of avibration isolator for a spacecraft electronic devices

航天器环境工程. 2020, 37(3): 286–292 <https://doi.org/10.12126/see.2020.03.013>

结构参数对不锈钢板式热沉流动传热性能影响的仿真研究

Simulation of the effect of structural parameters on flow and heat transfer of stainless steel plate heat sink

航天器环境工程. 2023, 40(4): 374–379 <https://doi.org/10.12126/see.2023023>

一种低成本相变材料热沉的设计与仿真

方进晖, 刘浩, 林佳, 余宏坤

(中国电子科技集团第二十九研究所, 成都 610036)

摘要: 针对现有电子设备使用复合材料相变热沉成本较高的问题, 通过对某电子设备模块相变热沉的导热筋厚度、沿传热路径的布置方式、导热筋打孔孔径和孔隙率等对相变热沉传热的影响进行设计与仿真, 提出一种低成本、轻量化的相变材料热沉设计策略, 即导热筋仅在主要热传导方向布置、通过打孔增加比表面积。与8%膨胀石墨-高碳醇复合相变热沉相比, 以该策略设计得到的相变热沉对非临界结温状态的芯片温度影响很小, 温差不超过3.2℃, 且质量只增加5%, 而成本仅为复合相变热沉的1/3。以上研究为相变材料热沉降低成本、推广使用提供了一种新方法。

关键词: 电子设备; 热管理; 相变材料热沉; 低成本设计

中图分类号: TK124; TP391; TB34 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2024)04-0430-09

DOI: [10.12126/see.2023153](https://doi.org/10.12126/see.2023153)

Design and simulation of a low-cost PCM heat sink

FANG Jinhui, LIU Hao, LIN Jia, YU Hongkun

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: Due to the high cost of composite phase change heat sink in existing electronic devices, a low-cost and light-weight phase change materials (PCM) heat sink design was proposed, in which the thermal beads were only arranged in the main heat conduction direction, and the specific surface area was increased by drilling holes. For the PCM heat sink of an electronic device module, the influence of the thickness, arrangement along the heat transfer path, the perforation diameter and porosity of the thermal beads, on the heat transfer were designed and simulated. Compared with the 8% expanded graphite-high-carbon alcohol composite PCM heat sink, the proposed PCM heat sink has little effect on the chip temperature in the noncritical junction temperature state in that the temperature difference does not exceed 3.2 °C, and the mass increases by only 5%. In addition, the cost is only one-third of the composite phase change heat sink. The research may provide a way for the PCM heat sinks to reduce their cost and popularize their use.

Keywords: electronic device; thermal management; PCM heat sink; low-cost design

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2024-07-30

引用格式: 方进晖, 刘浩, 林佳, 等. 一种低成本相变材料热沉的设计与仿真[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(4): 430-438
FANG J H, LIU H, LIN J, et al. Design and simulation of a low-cost PCM heat sink[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(4): 430-438

0 引言

随着集成电路的快速发展，芯片性能得到大幅提升的同时也带来发热量显著增加的问题，特别是芯片体积缩小带来高热流密度散热的挑战^[1-2]。根据 NASA 的统计数据，55% 的电子器件失效是由温度过高引起的^[3]。特别是周期性工作电子设备，具有热流密度高、升温快的工作特点，且其质量、体积受限，内部空间密闭、狭小，无法使用风冷、液冷等换热/散热方法^[4-5]，传统依靠自身结构件散热的方式已无法满足其散热需求。因此，散热问题已成为当前高功率、高集成度电子设备发展的技术瓶颈和亟待解决的问题^[6]。

相变材料(Phase Change Materials, PCM)具有体积和质量小、相变潜热高的特点，在发生相变时，不仅能吸收大量热量，还能保持近似等温，已经在电子设备中得到广泛应用^[1,6-9]。但是，由于 PCM 自身的导热系数比较低，导致设备产生的热量不能及时在材料中传递、吸收，易产生积热影响设备的正常工作，从而限制了 PCM 的应用。目前，研究人员经过大量工作主要探索出 3 种提高 PCM 导热系数的方法。第 1 种方法是在 PCM 内增加导热金属材料。张明等^[10]研究了不同金属翅片对石蜡 PCM 传热的影响，发现金属翅片能改善石蜡传热的均匀性，缩短石蜡熔化时间。Arshad 等^[11]在二十烷 PCM 中添加铝制翅片强化导热，优化得到了最佳的翅片参数。第 2 种方法是将 PCM 与高导热材料复合。为了能在增加导热系数的同时尽可能保证复合材料中的 PCM 含量，多使用高导热的多孔材料与 PCM 复合。杨乔森等^[6]使用膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 作为热沉，设计了一种能用于高功耗电子设备的相变热沉盒体结构。第 3 种是在 PCM 中添加纳米颗粒。Sun 等^[12]在石蜡基 PCM 中添加纳米石墨和纳米椰壳碳来增强材料的导热能力，使石蜡熔化速度加快了 21%。然而，上述 3 种增强 PCM 导热能力的方法均存在一些无法避免的缺陷。使用导热金属会增大设备质量，在对质量有严格限制的电子设备中应用受限；较多的导热金属会占据 PCM 的空间，限制 PCM 的解热能力；尽管目前已有采用点阵结构的导热金属结构，但是点阵结构只能通过 3D 打印的方式得到，成本较高。复合 PCM 虽然与添加金属材料相比兼具质量和吸热能力的优势，但是成本过高。添加纳米材料需要克服

纳米材料的团聚、沉积问题，而且材料成本也较高，目前还未有此类工业产品的实际应用。

本文针对现有电子设备使用复合相变热沉成本高的情况，利用仿真方法提出一种具有与复合相变热沉性能相当且成本较低的相变热沉设计策略，并对设计完成的相变热沉进行优化验证。

1 物理模型及工作环境

1.1 模块物理模型

某电子设备为 2 个模块叠拼结构，如图 1 所示，受空间限制，仅在模块 2 内部局部空间填充 PCM，印刷电路板(PCB)的上下表面均无 PCM 填充。2 个模块功率器件产生的热量通过模块盒体传递到 PCM。

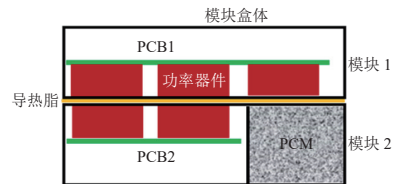


图 1 模块结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the module structure

2 个模块的总热耗约为 117.7 W，模块内各功率器件的热耗分布如图 2 和表 1 所示。

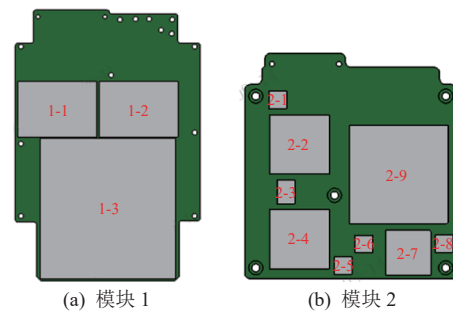


图 2 两模块中的功率器件分布

Fig. 2 Layout of power devices in two modules

表 1 各功率器件的热耗统计

Table 1 Heat consumption statistics of power devices

器件编号	热源功耗/W	允许结温/°C
1-1	16.0	120
1-2	6.0	
1-3	52.0	135
2-1	0.5	125
2-2	3.3	
2-3	1.2	
2-4	2.2	
2-5	1.0	
2-6	1.3	
2-7	4.0	
2-8	0.2	
2-9	30.0	

1.2 工作环境

上述电子设备的模块盒体材料为铝合金 5A06, 要求设备在无风、无液环境下工作 5 min 后各个器件温度不超过其允许结温。本文使用 Mentor Graphics 公司开发的针对电子设备内热流流动和散热的工程热分析软件 FloEFD 对整个模块工作 5 min 后的温度分布进行仿真, 所有仿真的边界条件均为初始温度 60 °C, 仅考虑热传导。仿真得到仅依靠铝合金盒体自身热容充当热沉的器件温度云图, 如图 3 所示。可以看出, 工作 5 min 后 2 个模块中器件的最高温度均已超过允许结温, 表明铝合金热沉无法满足实际的使用需求。由于铝合金已是目前所用金属材料中传热能力较强的一种, 同时受限于模块体积和质量, 所以相变热沉是铝合金热沉的较优替代方案。

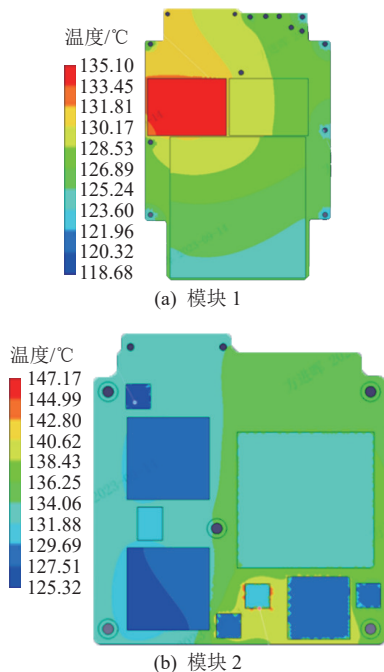


图3 铝合金盒体充当热沉时的模块温度云图
Fig. 3 Temperature nephogram of the module when aluminum alloy box acted as a heat sink

2 相变热沉模块设计及优化

2.1 PCM 选择与仿真方法

由于本研究中模块的起始工作温度为 60 °C, 所以 PCM 的相变温度须高于 60 °C; 此外, 还应考虑 PCM 的工艺性、稳定性和价格等。故本文 PCM 选择相变温度较高、性能稳定且低价无毒的高碳醇^[6]。另外, 将 PCM 与具有高导热系数的膨胀石墨复合, 可以提高 PCM 的导热系数, 故考虑使用某研究所

提供的 8% 膨胀石墨与高碳醇制成复合 PCM。高碳醇及复合 PCM 的热物性参数如表 2 所示^[7]。

表 2 高碳醇以及 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 的热物性参数

Table 2 Thermo-physical parameters of high-carbon alcohol and composite PCM made of 8% expanded graphite & high-carbon alcohol

参数	高碳醇	8%膨胀石墨-高碳醇复合PCM
密度/(kg·m ⁻³)	910	约940
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1920	1830
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.3	4.2
潜热/(kJ·kg ⁻¹)		>240
相变温度/K		358

在进行相变热沉具体设计前, 需先计算整个模块热沉的理论蓄热值。以器件温度达到 125 °C 为限, 考虑传热梯度的影响, 假设模块热沉达到 120 °C 的均温体, 计算其理论蓄热值^[8]为

$$Q = \sum m_i c_i \Delta T_i + m_p I_p, \quad (1)$$

其中: m_i 为模块中各组分(包括盒体、固态 PCM 和液态 PCM 等)的质量, g; c_i 为各组分的比热容, J·(kg·K)⁻¹; ΔT_i 为相变前后各组分的温差, °C; m_p 为 PCM 的质量, g; I_p 为 PCM 的相变潜热, kJ·kg⁻¹。

将热沉参数代入式 (1) 计算, 模块热沉(即高碳醇 PCM 热沉)升温至 120 °C 吸收的热量为 133.77 kJ, 能够支持模块(总发热量 117.7 W)正常工作约 19 min。考虑实际工作中热传导速率、PCM 传热和熔化迟滞等影响因素, 认为设计的相变热沉能够满足使用要求。

针对 PCM 的仿真热流流动和散热问题, 将 PCM 等效为均匀材料, 认为相变前后其密度不变, 其控制方程包括动量方程、连续性方程和能量方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot k \nabla T + S. \quad (4)$$

其中: ∇ 为矢量微分算子; \mathbf{u} 、 ρ 、 μ 、 c_p 、 k 分别为材料的速度、密度、动力黏度、比热容和导热系数; P 为材料压力, Pa; T 为材料温度, °C; S 为源项。

对于固-液 PCM, 有 VOF 法、焓-多孔介质法和等效比热法 3 种建模方法。本文使用消耗资源最少且满足工程使用计算精度的等效比热法作为建模方法, 将 PCM 的相变潜热等效为比热容, 认为实

实际相变过程发生在一定温度区间内, 该温度区间的等效热容为有限值。等效比热法的数学表达式为

$$c^* = c_s + \frac{H}{\Delta T}, \quad (5)$$

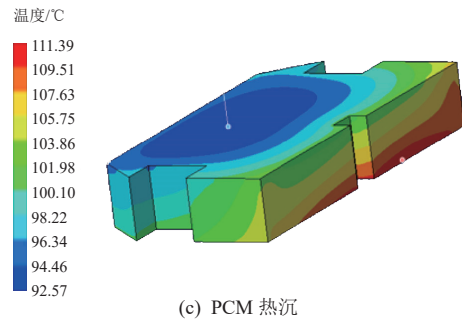
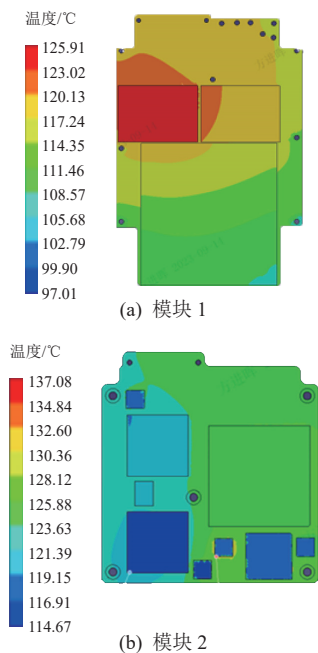
其中: c^* 为等效比热容; c_s 为固态时 PCM 的比热容; H 为 PCM 的相变潜热; ΔT 为相变温度范围。根据之前的实验和文献, 得到高碳醇的等效比热容为^[7]

$$c^* = \begin{cases} 1620, & (T < 76^\circ\text{C}) \\ 1620 + 22\,666.6(T - 76), & (76^\circ\text{C} \leq T < 85^\circ\text{C}) \\ 1620 + 102\,000(87 - T), & (85^\circ\text{C} \leq T \leq 87^\circ\text{C}) \\ 1920, & (T > 87^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (6)$$

将以上数据导入 FloEFD 工程数据库, 作为后续的仿真参数进行仿真。

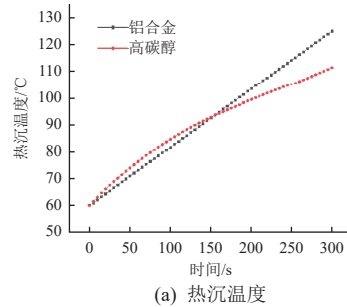
2.2 相变热沉导热筋设计

图 4 和图 5 分别为添加高碳醇 PCM 热沉后的模块温度云图及关键点温升曲线。图 4 与图 3(a)(b) 对比可见, 相较于用铝合金箱体充当热沉, 加入高碳醇 PCM 热沉后, 器件最高、最低温度均降低约 10°C 。由图 5 可以看到, 在初始阶段, 由于铝合金热导率高、热容利用率高, 铝合金热沉的温度较低; 进入相变温度范围后, PCM 的相变潜热导致 PCM 温度升高变缓, 故 PCM 热沉的温度明显低于铝合金热沉的; PCB1 和 PCB2 上器件最高温度与 PCM 热沉温度具有相同的温升趋势, 说明 PCM 热沉较铝合金热沉有显著热控优势。

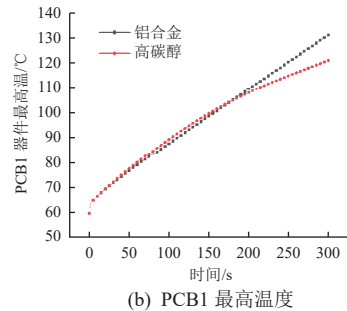


(c) PCM 热沉

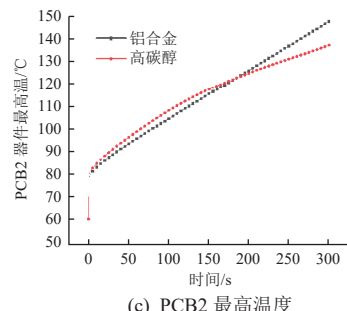
图 4 添加 PCM 热沉后的模块和 PCM 热沉温度云图
Fig. 4 Temperature nephograms of modules with PCM heat sink and PCM heat sink itself



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(c) PCB2 最高温度

图 5 添加 PCM 热沉前/后的关键点温升曲线
Fig. 5 Key point temperature rise curves of before/after adding PCM heat sink

由图 4(c) 可以看出, PCM 的导热系数低, 导致 PCM 热沉的温度梯度较大, 未能充分利用 PCM 的相变潜热。故考虑在 PCM 箱体中添加导热金属筋条来增加 PCM 的导热系数, 为探究导热筋布置形式对 PCM 传热的影响, 设计了 2 种导热筋的布置形式——交错布置和单向布置(如图 6 所示), 其中单向布置方向选择最长传热路径方向。

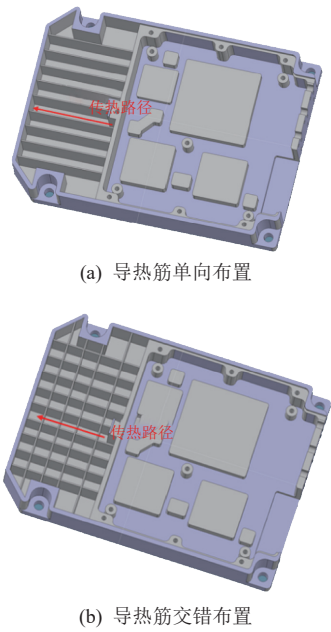


图 6 导热筋布置形式及传热路径示意

Fig. 6 Schematic of the arrangement and the heat transfer path of thermal beads

仿真得到不同导热筋布置形式下的关键点温升曲线如图 7 所示, 芯片温度及导热筋质量如表 3 所示。从图和表中数据可以看出, 相比单向布置, 交错布置的导热筋虽能提高 PCM 在非主要传热路径的导热能力, 但是提升非常有限(芯片温度降低不超过 3 °C), 还会增加热沉的整体质量(导热筋质量增幅将近 50%)、制造成本和 PCM 封装难度。可见单向导热筋布置形式更经济实惠, 因此本文后续只研究单向导热筋布置形式。

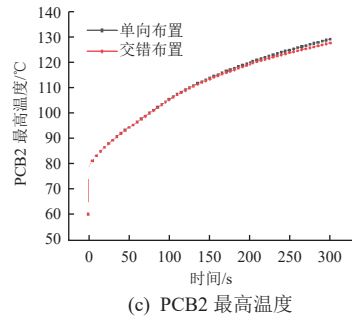


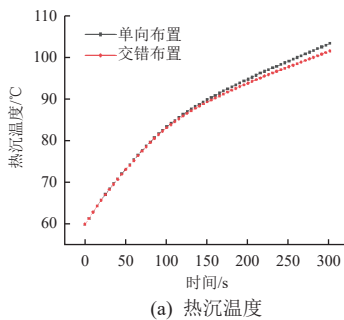
图 7 不同导热筋布置形式下的关键点温升曲线

Fig. 7 Temperature rise curves of key points under various thermal bead arrangement

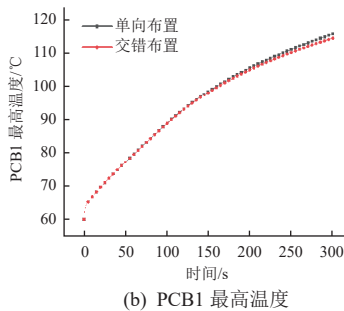
表 3 不同导热筋布置形式下的芯片温度及导热筋质量
Table 3 Chip temperatures and thermal bead masses under various thermal bead arrangement

导热筋布置形式	PCB1温度/°C		PCB2温度/°C		导热筋质量/g
	最低	最高	最低	最高	
单向	103.0	122.4	110.6	131.5	6.2
交错	100.1	120.5	108.2	129.1	9.1
差值	+2.9	+1.9	+2.4	+2.4	-2.9

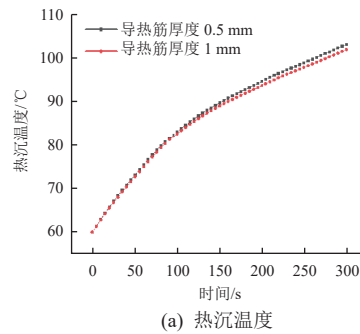
暂不考虑导热筋的受力, 仿真分析 0.5 mm 和 1.0 mm 两种导热筋厚度对 PCM 传热的影响, 关键点温升曲线如图 8 所示, 芯片温度及导热筋质量如表 4 所示。从图和表中数据可以看出, 导热筋厚度对 PCM 传热的影响非常小(增加导热筋厚度后芯片温度降低不足 1 °C, 可忽略不计), 相比导热筋质量的成倍增加, 用更厚的导热筋并不划算。



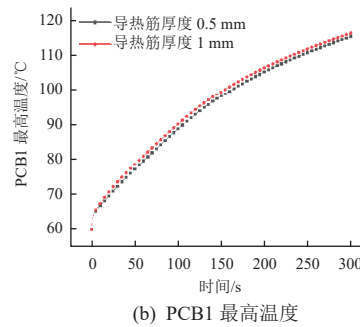
(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度

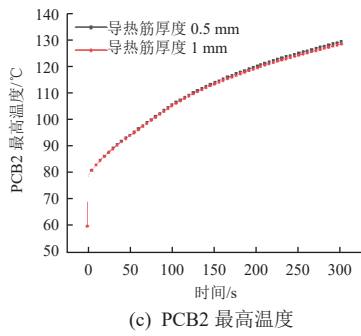


图 8 不同导热筋厚度下的关键点温升曲线

Fig. 8 Temperature rise curves of key points under various thicknesses of thermal beads

表 4 不同导热筋厚度下的芯片温度及导热筋质量

Table 4 Chip temperatures and bead masses under various bead thicknesses

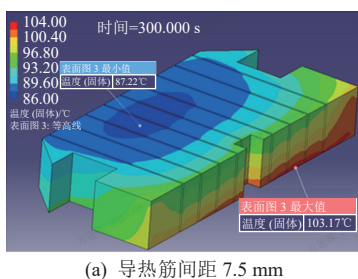
导热筋厚度/mm	PCB1温度/°C		PCB2温度/°C		导热筋质量/g
	最低	最高	最低	最高	
0.5	103.0	122.4	110.6	131.5	6.12
1.0	102.5	122.0	110.0	131.0	12.40
差值	+0.5	+0.4	+0.6	+0.5	-6.28

导热筋布置密度将直接影响传热路径数量和 PCM 与导热筋的换热面积,但导热筋的布置密度受到质量、安装空间和 PCM 含量的限制。当按照导热筋间距分别为 7.5 mm、15 mm 和 20 mm 设置 3 种导热筋密度时,仿真得到芯片温度及导热筋质量如表 5 所示,PCM 热沉的温度分布如图 9 所示,关键点温升曲线如图 10 所示。从图和表中数据可以看出,随着导热筋密度的增加,PCM 热沉靠近热源处的积热情况得到明显改善,热沉整体温度更低且分布更加均匀,芯片温度也得到明显降低。

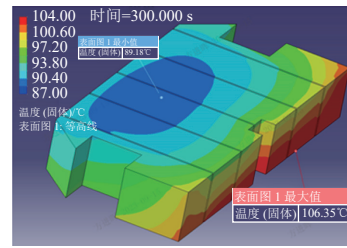
表 5 不同导热筋布置密度下的芯片温度及导热筋质量

Table 5 Chip temperatures and bead masses under various bead densities

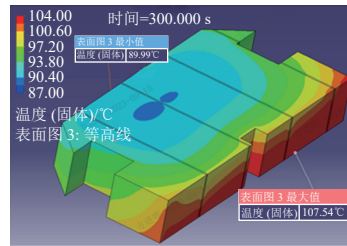
导热筋间距/mm	PCB1温度/°C		PCB2温度/°C		导热筋质量/g
	最低	最高	最低	最高	
7.5	100.0	120.4	108.0	129.0	6.2
15	103.0	122.4	110.6	131.5	3.4
20	104.2	123.2	111.6	132.5	2.5



(a) 导热筋间距 7.5 mm



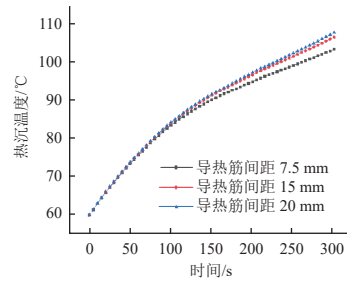
(b) 导热筋间距 15 mm



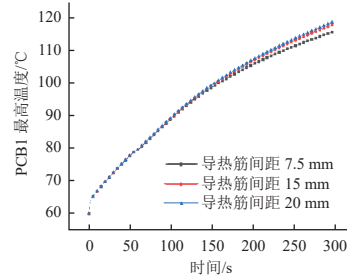
(c) 导热筋间距 20 mm

图 9 不同导热筋布置密度下的 PCM 热沉温度云图

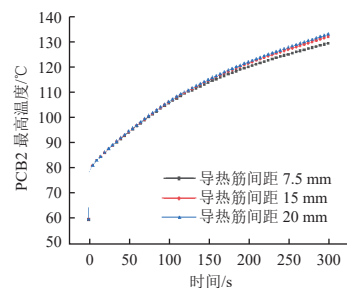
Fig. 9 PCM heat sink temperature nephograms under various densities of thermal bead arrangement



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(c) PCB2 最高温度

图 10 不同导热筋布置密度下的关键点温升曲线

Fig. 10 Temperature rise curves of key points under various densities of thermal bead arrangement

但是相较于复合 PCM,添加导热筋仍不具备质量和散热性能优势,需要对其进一步优化,以期

望得到能与复合 PCM 性能接近的 PCM 热沉。

2.3 相变热沉优化

2.3.1 导热筋打孔

2.2 节设计的高碳醇 PCM 热沉体积较小, 不易看出导热筋质量优化的趋势, 但是对于较大型的 PCM 热沉、对质量要求苛刻的使用环境, 质量优化就显得极为重要。从之前的分析可以发现, 0.5 mm 厚度的导热筋传热能力已经远大于热量输入, 因此, 考虑在导热筋上激光打孔(如图 11 所示)后再激光焊接在盒体上, 可以牺牲一部分导热筋的传热能力来减小热沉质量。此外, 打孔能增加 PCM 和导热筋的换热面积, 增强 PCM 的流动, 即增强 PCM 材料之间对流换热, 从而增强热沉的传热能力^[10]。定义比表面积 α 为

$$\alpha = \frac{S + n \cdot 2\pi R(h - R)}{S}, \quad (7)$$

其中: S 为导热筋表面积, mm^2 ; n 为导热筋上的打孔个数; R 为孔半径, mm ; h 为导热筋厚度, mm 。

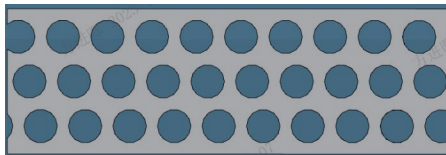


图 11 导热筋打孔示意

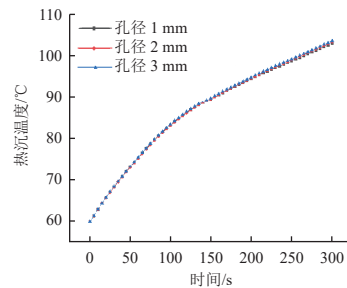
Fig. 11 Schematic of thermal bead drilling

综合考虑相变热沉体积、加工难度和成本, 导热筋上打孔的孔径取 1 mm、2 mm、3 mm, 同时保持布置形式单向、导热筋厚度 0.5 mm, 布置密度 7.5 mm。仿真得到不同导热筋打孔孔径下的芯片温度、导热筋质量及比表面积如表 6 所示, 关键点温升曲线如图 12 所示。从图和表中数据可以看出: 随着比表面积的增大, PCB1 和 PCB2 的最高温度和最低温度均下降; 1 mm 孔径和 2 mm 孔径下的比表面积差距很小, 仅相差 8.8%, 因此 PCM 的导热性能也差异很小, 温升曲线几乎重合; 而 3 mm 孔径下的比表面积比 2 mm 孔径下的少 21.3%, 相差较大, 因此温升曲线也有明显差别。从式 (7) 可以看出: 当孔径 $> 1 \text{ mm}$ 时, 增加孔数会减小比表面积, 不利于 PCM 换热; 孔径为 1 mm 时, 孔数不影响换热面积; 当孔径 $< 1 \text{ mm}$ 时, 比表面积与孔数成正相关。

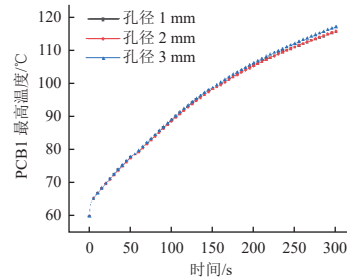
表 6 不同导热筋打孔孔径下的芯片温度、导热筋质量及比表面积

Table 6 Chip temperatures, thermal bead masses, and specific surface areas under various bead perforation apertures

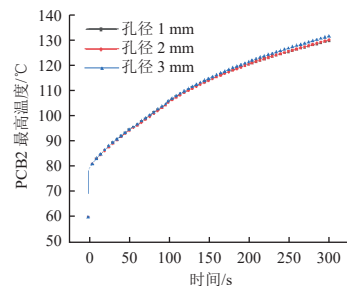
打孔孔径/mm	PCB1 温度/ $^{\circ}\text{C}$		PCB2 温度/ $^{\circ}\text{C}$		导热筋质量/g	比表面积/%
	最低	最高	最低	最高		
1	100.2	120.4	108.1	129.0	5.9	100.0
2	100.6	120.2	108.4	129.2	5.1	91.2
3	102.1	121.8	109.8	130.7	3.7	72.5



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(c) PCB2 最高温度

图 12 不同导热筋打孔孔径下的关键点温升曲线

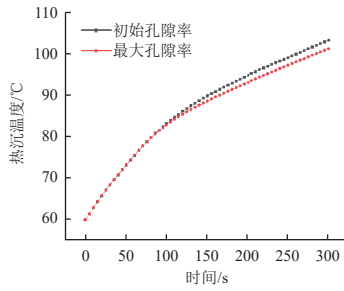
Fig. 12 Temperature rise curves of key points under various perforation apertures of thermal beads

2.3.2 改变导热筋孔隙率

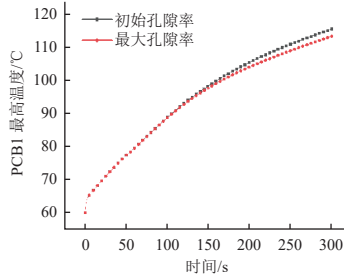
从加工成本和 PCM 液态流动性考虑, 选取导热筋打孔孔径 0.75 mm, 对初始和最大孔隙率进行仿真, 仿真数据如表 7 所示, 关键点温升曲线见图 13。从表中数据可以看出, 当导热筋具有最大孔隙率时, 也具有最大比表面积; 较大的比表面积能增大换热面积, 且增大孔隙率也能增强 PCM 的对流换热, 同时还利于减小热沉质量和降低芯片温度。

表 7 两种孔隙率下的芯片温度、导热筋质量及比表面积
Table 7 Chip temperatures, bead masses, and specific surface areas under two porosities

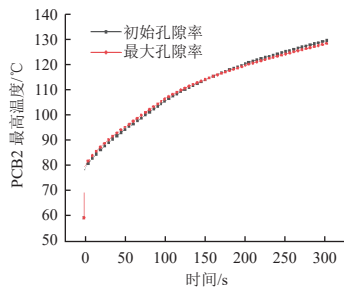
孔隙率	PCB1温度/°C		PCB2温度/°C		导热筋质量/g	比表面积/%
	最低	最高	最低	最高		
初始	100.6	120.2	108.4	129.2	5.1	100.0
最大	98.2	118.1	105.9	128.1	3.6	114.8
差值	-2.4	-2.1	-2.5	-1.1	-1.5	+14.8



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(c) PCB2 最高温度

图 13 两种孔隙率下的关键点温升曲线

Fig. 13 Temperature rise curves of key points under two porosities

2.3.3 优化效果分析

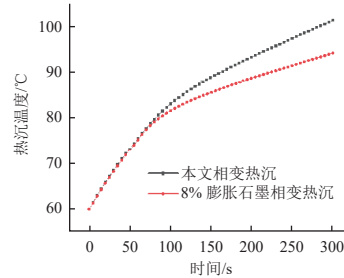
为验证上述优化效果，比较本文设计的单向布置、导热筋厚 0.5 mm，导热筋间距 7.5 mm、孔径 0.75 mm、最大孔隙率的 PCM 热沉，与不含有导热筋结构、仅使用 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 热沉的温度等参数对比如表 8 所示，关键点温升曲线如图 14 所示。从图和表中数据可以看出，相较于 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 热沉，本文 PCM 热沉 2 块 PCB 的最低温和最高温均只升高 3 °C 左右，对于非临界结温状态的芯片温度影响很小；本文 PCM 热沉的质量只增加 2 g，相对热沉整体质量

而言只增加 5%；二者的成本差异主要是 PCM 以及导热筋自身及其激光打孔和激光封焊等加工成本，折算后本文 PCM 热沉的成本只有 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 热沉的 1/3。综上，对于非极限散热条件，本文相变热沉具有显著的价格优势以及与复合 PCM 热沉接近的散热能力及质量，是一种低成本相变热沉解决方案。

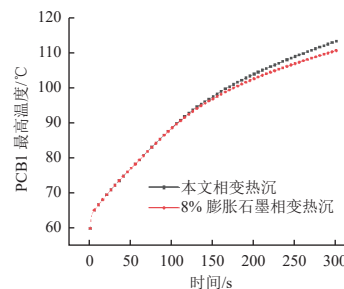
表 8 本文 PCM 热沉和 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 热沉测试结果

Table 8 Test results of the proposed PCM heat sink and the 8% expanded graphite-high-carbon alcohol composite PCM heat sink

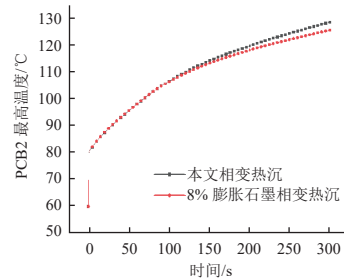
相变热沉种类	PCB1 温度/°C		PCB2 温度/°C		热沉质量/g	成本/元
	最低	最高	最低	最高		
本文相变热沉	98.2	118.1	105.9	128.1	39.0	100
8%膨胀石墨-高碳醇复合PCM热沉	95.0	115.0	103.0	125.0	37.0	300
差值	+3.2	+3.1	+2.9	+3.1	+2.0	-200



(a) 热沉温度



(b) PCB1 最高温度



(c) PCB2 最高温度

图 14 本文相变热沉和 8% 膨胀石墨-高碳醇复合 PCM 热沉的关键点温升曲线

Fig. 14 Temperature rise curves of the proposed PCM heat sink and the 8% expanded graphite-high-carbon alcohol composite PCM heat sink at key points

3 结束语

现有电子设备使用的复合 PCM 热沉成本较高,限制了其应用。为了降低相变热沉的制造成本,同时保证相变热沉的传热性能,本文从某电子设备模块入手,提出一种基于导热筋的低成本相变热沉设计策略,通过仿真发现:

1)导热筋布置采用单向布置方式即可,方向应沿着主要热传导最长路径方向;导热筋厚度对热沉传热能力的影响不大;导热筋布置密度在保证相变热沉材料灌封工艺性和质量限制前提下应尽可能密。对于散热困难的极限场合,也可在非主要传热方向增加导热筋。

2)可在导热筋上打孔来提高导热筋的比表面积,增加相变热沉的换热面积,强化相变热沉液态对流换热,提高 PCM 热沉的整体性能。此外,打孔能显著减小导热筋的质量,降低制造成本。

与复合 PCM 相比,按照本文提出的策略设计优化得到的高碳醇 PCM 热沉模块尽管在质量和散热能力等方面稍处劣势,但其制造成本大幅下降,且能够应用于除极限工况外的大部分工况。后续将进一步优化导热筋形式并进行实验验证,指导其在实际工程中的应用。

参考文献 (References)

- [1] 侯煦,邢玉明,郝兆龙,等.高碳醇/膨胀石墨复合相变热沉多目标优化[J].北京航空航天大学学报,2021,47(9):1866-1873
HOU X, XING Y M, HAO Z L, et al. Multi-objective optimization of a high alcohol/expanded graphite composite PCM based heat sink[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1866-1873
- [2] 杨泽.相变材料蓄热过程强化数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2021
- [3] YE H L T. Review of heat transfer technologies in electronic equipment[J]. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 1995, 117(4): 333-339
- [4] 陈建辉,白小峰,张忠政,等.弹载功放相变储热热沉的数值分析与实验研究[J].低温与超导,2018,46(10):67-71
CHEN J H, BAI X F, ZHANG Z Z, et al. Numerical and experimental study on phase change materials heat sink in missile electronics[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2018, 46(10): 67-71
- [5] 李伟健,白敏丽,吕继组,等.间歇性大功率相变热沉研究[J].热科学与技术,2020,19(6):537-547
LI W J, BAI M L, LÜ J Z, et al. Research of intermittent high power phase change heat sink[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2020, 19(6): 537-547
- [6] 杨乔森,王爽,周振凯,等.基于复合相变热沉的一体化设计[J].电子机械工程,2023,39(4):25-28
YANG Q S, WANG S, ZHOU Z K, et al. Integrated design based on composite phase change heat sink[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2023, 39(4): 25-28
- [7] 林佳,江兴旺,谭继勇,等.复合相变热沉在电子设备热管理中的应用[J].航天器环境工程,2017,34(2):150-155
LIN J, JIANG X W, TAN J Y, et al. Application of composite PCM in thermal management of electronic equipment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(2): 150-155
- [8] 尹本浩,刘芬芬,王延.弹载电子设备相变热沉装置散热性能研究[J].电子机械工程,2015,31(6):6-10
YIN B H, LIU F F, WANG Y. Study on heat dissipation performance of phase change material heat sink in missile electronics[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2015, 31(6): 6-10
- [9] 林佳,刘云峰,尹本浩,等.一种复合相变热沉设计与散热性能分析[J].航天器环境工程,2020,37(4):390-396
LIN J, LIU Y F, YIN B H, et al. Design of a phase change material heat sink and analysis of its heat dissipation performance[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(4): 390-396
- [10] 张明,陈宝明,常钊,等.不同结构金属翅片对石蜡相变传热的影响[J].煤气与热力,2022,42(1):15-21
ZHANG M, CHEN B M, CHANG Z, et al. Effect of metal fins with different structures on phase-change heat transfer of paraffin[J]. *Gas and Heat*, 2022, 42(1): 15-21
- [11] ARSHAD A, ALI H M, YAN W, et al. An experimental study of enhanced heat sinks for thermal management using n-eicosane as phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 52-66
- [12] SUN X, LIU L, MO Y, et al. Enhanced thermal energy storage of a paraffin-based phase change material (PCM) using nano carbons[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115992

(编辑:冯露漪)

一作简介:方进晖,工程师,主要从事电子设备结构设计及热管理工作。