导热和自然对流对石蜡定向熔化特性的影响

方健, 冯文创, 丁斌*, 朱传勇, 巩亮

中国石油大学(华东)新能源学院, 青岛 266580

* 联系人, E-mail: dingbin@upc.edu.cn

2020-12-27 收稿, 2021-03-26 修回, 2021-03-30 接受, 2021-03-31 网络版发表

国家自然科学基金(51906257)和山东省自然科学基金(ZR2019ZD11)资助

摘要 相变散热器在有效保障功率瞬变、间歇性工作电子器件安全运行方面具有极大潜力. 针对现有相变散热器性能亟需进一步提升的问题, 本文通过改变加热位置和添加泡沫铜, 实验探究了石蜡在导热+自然对流、导热、导热增强+自然对流抑制以及导热增强4种作用条件下的定向熔化特性. 研究发现, 在导热和自然对流同时作用条件下, 石蜡的温度经历缓慢上升、极速上升、缓慢波动和继续上升4个阶段, 自然对流的作用可将相变散热器的有限保护时间从导热作用时的483 s延长至4400 s. 虽然添加泡沫铜能降低石蜡内部的温度梯度, 但会延长自然对流作用的起始时间、缩短作用时长以及削弱作用强度, 导致自然对流的作用权重比从8.1降至0.72, 有效保护时间仅提升80 s. 因此, 采用相变材料(phase change material, PCM)散热器冷却低热流密度的电子器件时, 应优先强化工质熔化过程中的自然对流, 随着热流密度的增加, 再逐渐强化其导热性能.

关键词 石蜡, 相变散热器, 自然对流, 熔化

21世纪以来, 电子产业得到前所未有的发展, 电子设备的应用越来越广泛. 伴随着电子技术发展带来便利的同时, 其工作过程中的发热量和热流密度随着系统集成度的提高而增大, 并且电子设备的发热量具有瞬变性、间歇性^[1]等特点. 如果不能及时散热, 电子器件温度会迅速升高, 其性能会受到一定程度的影响, 故障率也随之上升, 严重时会导致电子器件失效. 因此, 一些电子器件都会规定上限工作温度, 如IGBT(insulated gate bipolar transistor)模块的上限工作温度为125~150°C^[2,3], 弹载雷达系统的上限工作温度为130~150°C^[4]. 目前, 传统的散热器逐渐难以解决上述问题, 亟需开发能有效缓解热冲击的新型散热器. 研究表明, 具有热量储存作用的相变散热器, 在防止电子器件过热失效方面具有极大的应用潜力^[5,6].

目前, 常用的有机工质相变散热器因工质导热系

数过低, 严重阻碍了工作过程中热量的吸收和释放. 所以, 增强相变材料(phase change material, PCM)的换热效果、加快能量的吸收和释放速率、提升相变散热器的性能是近些年重要的研究方向, 其方法主要是通过PCM散热器中加入高导热性能的翅片^[7,8]、泡沫材料^[9-11]以及在制备PCM时加入金属类纳米粒子^[12]、碳基纳米材料^[13]等. 在引入翅片增强PCM散热器性能方面, Fan等人^[14]发现, 内交叉翅片的加入可将电子器件的最高温度降低10°C. 此外, Yang等人^[15]研制了一种耦合热管的PCM散热器, 并用熔点相近的合金和十八醇研究了不同热冲击下的散热性能, 发现增加翅片数量能有效提升PCM散热器的性能, 当翅片数从15个增加到22个时, 升温速率从1.5°C min⁻¹降至0.96°C min⁻¹. 在泡沫材料增强PCM散热器性能方面, Wang等人^[16]通过实验测试了纯石蜡和泡沫铜填充石蜡的热物性, 并

引用格式: 方健, 冯文创, 丁斌, 等. 导热和自然对流对石蜡定向熔化特性的影响. 科学通报, 2021, 66: 2758-2765

Fang J, Feng W C, Ding B, et al. Effects of thermal conduction and natural convection on directional melting characteristics of paraffin (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 2758-2765, doi: [10.1360/TB-2020-1666](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1666)

通过数值模拟得出泡沫铜可使石蜡储热时间缩短40%。同样地, Zheng等人^[17]发现, 金属泡沫的加入可将石蜡的熔化时间缩短20.5%。此外, Wang等人^[18]发现, 梯度孔隙率泡沫铜能在均匀泡沫铜的基础上将工质的熔化时间进一步缩短37.6%。在制备高性能复合PCM方面, Bayat等人^[19]通过在石蜡中添加氧化铝纳米颗粒制备了导热系数为 $0.21\sim 0.24\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ 的复合工质, 发现添加体积分数为2%的纳米颗粒可将PCM散热器的性能提升23%。此外, Farzanehnia等人^[20]在石蜡中加入碳纳米管, 发现可将PCM散热器的有效保护时间(发热壁面达到电子器件上限工作温度所需的时间)提升10%。值得注意的是, 导热和自然对流对石蜡等低熔点工质的熔化过程均具有显著的影响。然而, 上述措施在增强工质导热性能的同时会显著削弱熔化过程中的自然对流, 导致PCM散热器的有效保护性能难以进一步提升。

揭示导热和自然对流对PCM相变过程的影响规律, 探寻导热和自然对流协同强化的有效手段, 是进一步提升PCM散热器有效保护性能的可行手段之一。然而, 现有研究多关注PCM散热器加热位置或倾角对其有效保护性能的影响而非对自然对流的影响。例如, Kamkari和Groulx^[21]发现, 相同条件下水平放置时石蜡的熔化比例仅为垂直放置的一半。同样地, Yazici等人^[22]的研究表明, 倾角为 60° 时PCM散热器的性能最佳, 有效保护时间较倾斜角为 0° 时提升了10%。然而, Zennouhi等人^[23]发现, 随着倾角从 0° 逐渐增加至 90° , PCM的熔化速率逐渐减小。与之相反, Avci和Yazici^[24]发现, 增加倾角能加速液相区工质的混合, 导致倾角从 0° 逐渐增加至 90° 时PCM的熔化速率逐渐增加。值得注意的是, Korti和Guellil^[25]发现, 倾角会显著影响PCM熔化过程中的自然对流, 进而影响糊状区的迁移速率和

完全熔化时间。研究表明, 倾角为 90° 时自然对流最强烈, 且平均Nusselt数比倾角为 0° 和 45° 时大21%和10%。综上所述, 改变加热位置或倾角虽然能强化熔化过程中的自然对流, 但受PCM结构尺寸参数以及加热功率差异等参数的影响, 难以获得强化熔化过程中自然对流的通用方法(如某一特定的倾角)。更重要的是, 不同条件下自然对流在PCM熔化过程中的作用权重尚不明确。

基于此, 本文采用定向熔化实验研究石蜡的熔化特性。首先, 改变加热位置(顶部、底部), 通过分析温度场的差异, 探明了导热和自然对流对石蜡熔化过程的作用权重。随后, 在PCM散热器中添加泡沫铜, 探究了泡沫铜对导热的强化作用和熔化过程中自然对流的削弱作用。相关研究成果有望为高性能PCM散热器的设计提供理论指导。

1 实验系统及实验方法

1.1 实验装置

实验装置示意图如图1(a)所示, 主要包括加热模块、实验模块和测试模块。其中, 加热模块主要用于模拟电子器件的不同发热工况, 主要由直流电源(MESTEK DP6020)和内嵌加热棒的紫铜片组成。为了减小接触热阻, 加热棒与紫铜片之间填充了导热硅脂。实验模块中, 使用浇注法将液态石蜡注入泡沫铜, 泡沫铜底部和紫铜片用导热胶连接, 减小接触热阻。随后, 将相变材料和热源整体放在聚四氟乙烯腔体中($60\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 100\text{ mm}$), 为了方便后续可视化实验, 腔体两侧用聚碳酸酯板密封。实验过程中, 外部用保温材料覆盖, 相界面移动情况通过高清数码相机记录。此外, 紫铜片

图1 (网络版彩色)实验系统图(a)及热电偶分布图(b)

Figure 1 (Color online) Schematic of the experimental setup (a) and the thermocouple distribution (b)

的温度由内置的1根K型热电偶($\pm 0.1^\circ\text{C}$)测量,相变材料的温度场变化由距离紫铜壁面不同位置处(图1(b), $y=5、10、15、20、25、30、40、50、70\text{ mm}$)的9根K型热电偶($\pm 0.1^\circ\text{C}$)测得,所有温度数据均由数据采集器(Keithley 2700)反馈给计算机。

实验选用58号石蜡,采用差示扫描量热仪(美国TA, DSC25)测试其熔点、相变潜热、相变温度区间等相关物性参数,具体样品参数如表1所示。实验中采用的泡沫铜尺寸为 $58\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 95\text{ mm}$,孔隙度为15 PPI,孔隙率约为93%。

1.2 实验方法

实验前,将实验模块整体放入干燥箱中预热3 h,确保每次实验都保持在相同温度(27.5°C)下进行。实验开始时,用保温材料对实验装置进行包裹,每隔10 min打开保温材料快速拍摄记录相界面的变化,直至石蜡完全熔化。每种实验工况需要将实验装置正反放置分别记录内部工质温度场变化,以探究自然对流和导热对熔化过程的影响。为了保证实验的准确性,每种工况都进行3次重复性实验。

1.3 实验误差分析

整个实验系统的最大热损失($\eta=2\%$)可通过式(1)计算得出:

$$\eta = \frac{h_f A \Delta T}{P}, \quad (1)$$

其中, $P=15\text{ W}$ 为加热功率, $h_f=5\sim 20\text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 为空气自然对流换热系数, $A=0.05\text{ m}^2$ 为整个实验单元的外表面积, $\Delta T=0.3^\circ\text{C}$ 为保温材料外壁面与室温的平均温差。

表1 石蜡的物性参数

Table 1 Physical parameters of paraffin

物性参数	数值
液相线温度	63.6°C
固相线温度	56.9°C
相变潜热	167 J g^{-1}
导热系数(固相)	$0.23\text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [26]
导热系数(液相)	$0.15\text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [26]
密度(固相)	0.88 g cm^{-3} [26]
密度(液相)	0.78 g cm^{-3} [26]
比热容(固相)	$2\text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [26]
比热容(液相)	$2.3\text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [26]

通过对比3次实验过程中加热壁面的温度曲线,发现最大重复误差仅为1.6%,说明实验具有良好的可重复性。

2 结果与讨论

2.1 自然对流对石蜡定向熔化特性的影响

由于石蜡熔化后的密度小于固相,底面加热的情况下(实验模块垂直放置),自然对流对石蜡的熔化过程影响显著,相比之下,顶部加热时自然对流的影响可以忽略。因此,通过研究相同热流密度时($q=1.32\text{ W cm}^{-2}$)不同加热方式对石蜡温度场的影响,可获得自然对流对纯石蜡定向熔化过程的作用权重。图2(a)为底部加热时石蜡内部的温度场随时间的演变图。可以看出,不同位置处石蜡的温度均经历缓慢上升、极速上升、缓慢波动和继续上升4个阶段。以 $y=10\text{ mm}$ 处为例,温度在470 s内从 27.5°C 缓慢增加至 36°C ,升温速率为 $0.02^\circ\text{C s}^{-1}$,此时石蜡内部以固态导热为主。随后,温度在410 s迅速增加至 80°C ,升温速率增加至 $0.11^\circ\text{C s}^{-1}$ 。这是因为,在 $y<10\text{ mm}$ 位置处的石蜡逐渐熔化且靠近壁面处石蜡温度已达到 80°C ,自然对流的作用导致 $y=10\text{ mm}$ 处与加热壁面间的等效热阻迅速降低。此后, $y=10\text{ mm}$ 位置处的温度一直在 80°C 左右波动,这一阶段持续3220 s,这主要是因为自然对流和导热的耦合作用使加热壁面处的热量能迅速传递到 $y>10\text{ mm}$ 。最后,这一平衡在 $\tau=4100\text{ s}$ 时被打破, $y=10\text{ mm}$ 处的温度开始继续上升。此外,受石蜡熔化过程的影响,加热壁面的温度先迅速升温至 90°C ,随后缓慢升高并在 $106\sim 110^\circ\text{C}$ 波动,最终又继续升高。值得注意的是,腔体内的石蜡在 $\tau=3900\text{ s}$ 时已完全熔化,自然对流的存在使低温液相区石蜡的温度逐渐升高,并继续维持壁面温度稳定,直至腔体内石蜡的温度均超过 80°C 时,壁面温度才会继续上升($\tau>4100\text{ s}$)。

相比之下,顶部加热时石蜡熔化过程的温度场演变如图2(b)所示。可以看出,不同位置处固态石蜡的温度均线性增加。例如,在 $y=5\text{ mm}$ 处,石蜡的温度在800 s内从 27.5°C 线性增加至 52°C 。然而,通过对比不同加热方式下壁面的温度可以发现,自然对流时石蜡熔化的影响从 $\tau=315\text{ s}$ 时才开始显现(图2(b)的插图)。这意味着纯导热作用情况下, $y=0\sim 5\text{ mm}$ 段石蜡的熔化对 $y=5\text{ mm}$ 处石蜡换热的影响可以忽略。这也说明此时石蜡熔化造成的换热恶化(熔化后导热系数降低)刚好被熔化吸热抵消。此外,自然对流的缺失导致壁面温度一直迅速

图2 (网络版彩色)自然对流对石蜡熔化特性的影响. 石蜡定向熔化过程中温度场的演变: (a) 底部加热; (b) 顶部加热. (c) 导热和自然对流对PCM散热器有效保护时间的影响

Figure 2 (Color online) Effect of natural convection on the melting characteristics of paraffin. Temperature evolution during the paraffin melting: (a) Heating from the bottom surface; (b) heating from the top surface. (c) Effects of natural convection and thermal conduction on the effective protection time of the PCM heat sink

上升. 一般而言, IGBT和弹载电子器件的上限工作温度为125~150°C. 考虑到接触热阻的影响, 本文将其设为110°C, 并采用有效保护时间(发热壁面达到上限工作温度所需的时间)来定量分析导热和自然对流对石蜡熔化过程的作用权重. 从图2(c)可以看出, 导热作用下PCM散热器的有效保护时间仅为483 s, 自然对流的作用可将其提升至4400 s. 换言之, 自然对流与导热对PCM散热器性能的作用权重比为8.1.

2.2 增强导热对石蜡定向熔化特性的影响

在石蜡中添加泡沫铜是增强其导热性能的常用手段, 本节着重讨论添加泡沫铜这一导热增强手段对石蜡熔化特性的影响. 为便于比较, 加热壁面的热流密度仍设为 1.32 W cm^{-2} . 同样采用底部加热和顶部加热来探究导热和自然对流对石蜡熔化特性的影响. 图3(a)为底部加热时石蜡/泡沫铜定向熔化时的温度场演变. 可以看出, 不同位置处石蜡的温度演变过程同样保持一致, 可分为逐渐上升、快速上升、维持稳定和继续上升4个阶段. 仍以 $y=10 \text{ mm}$ 处为例, 石蜡的温度在995 s内从27.5°C逐渐增加至56.9°C(固相线温度), 随后其温度在850 s内快速增加至78°C. 换言之, 石蜡在固相区以非稳态固相导热为主, 在50~56.9°C间的平均升温速率为 $0.018^\circ\text{C s}^{-1}$, 而在糊状区和低温液相区的平均升温速率无显著差异, 并增加至 $0.025^\circ\text{C s}^{-1}$. 这说明石蜡熔化吸热和低温液相区自然对流的影响可以忽略(如图3(e)所示, 自然对流的作用起始时间为 $\tau=1587 \text{ s}$), 导热系数的变低导致 $y=10 \text{ mm}$ 处的热量难以往上部低温处石

蜡传递, 因此石蜡的升温速率会升高. 此后, 由于自然对流的作用, 石蜡的温度在78~80°C间波动, 并持续约1860 s. 最后, 腔体内的石蜡在 $\tau=3700 \text{ s}$ 完全熔化, 导致 $y=10 \text{ mm}$ 处的温度在 $\tau>3700 \text{ s}$ 时继续上升. 对应地, 壁面温度先逐渐增加至97°C, 随后缓慢增加至101.5°C, 并最终快速升高. 通过对比图2(a)和3(a)可以发现, 在当前实验条件下, 自然对流均需要在液相区温度达到80°C左右时才可发生作用. 泡沫铜的加入增强了石蜡的导热性能, 同时也延缓了其到达80°C的时间, 导致自然对流的整体作用时间缩短. 以 $y=10 \text{ mm}$ 处为例, 泡沫铜的加入将自然对流的作用时间缩短了42.2%.

为了进一步探究泡沫铜对石蜡内部温度场的影响, 选取 $\tau=1200 \text{ s}$ 时沿高度方向的温度分布进行比较(图3(b)). 可以看出, 泡沫铜的加入使石蜡内部的温度更加均匀, 以 $y=5\sim 25 \text{ mm}$ 处为例, 石蜡的平均温度梯度从 $2.24^\circ\text{C mm}^{-1}$ 减少至 $0.84^\circ\text{C mm}^{-1}$. 对石蜡/泡沫铜而言, 熔化的开始造成平均温度梯度从固相区时的 $0.73^\circ\text{C mm}^{-1}$ 转变为糊状区和低温液相区时的 $0.96^\circ\text{C mm}^{-1}$, 这归因于导热系数的降低(表1). 此外, 泡沫铜的加入还将石蜡糊状区的位置从20.5~21.7 mm处变为9.4~14.6 mm处. 对于纯石蜡, 其糊状区的位置还可通过实验过程拍摄的图片获得(图3(c)), 且结果与热电偶测量值吻合较好, 而泡沫铜的加入导致石蜡温度更加均匀, 难以通过颜色区分糊状区的位置, 仅能获得液相区的大小.

图3(d)为顶部加热时石蜡/泡沫铜内部的温度场演变. 可以看出, 加入泡沫铜后, 不同位置处石蜡的温度均逐渐增加, 且符合非稳态固相导热时的温度变化规

图3 (网络版彩色)增强导热对石蜡熔化特性的影响. 石蜡/泡沫铜定向熔化过程中温度场的演变: (a) 底部加热; (d) 顶部加热. (b) 泡沫铜对石蜡沿高度方向温度分布的影响(底部加热, $\tau=1200 \text{ s}$); (c) 石蜡熔化行为的可视化图像(底部加热, $\tau=1200$ 和 2400 s); (e) 泡沫铜和加热位置对壁面温度演变的影响; (f) 泡沫铜对PCM散热器有效保护时间的影响

Figure 3 (Color online) Effect of thermal conductivity enhancement on the melting characteristics of paraffin. Temperature evolution during the paraffin/copper foam melting: (a) Heating from the bottom surface; (d) heating from the top surface. (b) Effect of copper foam on the temperature distribution of paraffin along the vertical direction (heating from the bottom surface, $\tau=1200 \text{ s}$); (c) images of paraffin melting behaviors (heating from the bottom surface, $\tau=1200$ and 2400 s); (e) effects of copper foam and heating position on the temperature evolution of the heating surface; (f) effects of copper foam on the effective protection time of the PCM heat sink

律. 通过与图2(b)对比可以发现, 在仅导热作用的条件下, 加入泡沫铜可大幅降低石蜡内部的温度梯度, 进而降低加热壁面的温度. 以 $\tau=800 \text{ s}$ 为例, 可将 $y=5\sim 25 \text{ mm}$ 处石蜡的平均温度梯度从 $1.17^\circ\text{C mm}^{-1}$ 减少至 $0.68^\circ\text{C mm}^{-1}$, 加热壁面温度从 136.7°C 降至 78.6°C .

为了综合探究导热+自然对流、导热、导热增强+自然对流抑制以及导热增强对PCM散热器性能的影响, 对比加热壁面温度在这4种情况下的演变规律(图3(e)). 可以看出, 自然对流的作用均可大幅降低壁面温度的升温速率, 泡沫铜的加入使自然对流的作用起始时间从 $\tau=315 \text{ s}$ 延长至 $\tau=1587 \text{ s}$, 总体作用时间缩短了44.2%. 尽管如此, 泡沫铜的加入仍能保证在 $\tau<4542 \text{ s}$ 时加热壁面温度均低于纯石蜡工况. 虽然泡沫铜削弱了自然对流的作用强度, 但难以定量描述, 本文采用有效保护时间(上限工作温度为 110°C)来定量分析导热和自然对流对PCM散热器性能的作用权重(图3(f)). 可以看

出, 在导热作用条件下, 泡沫铜可将PCM散热器的有效保护时间从 483 s 大幅提升至 2600 s , 进一步说明泡沫铜可将导热性能提升约4倍. 相比之下, 在自然对流和导热协同作用时, 泡沫铜仅将PCM散热器的有效保护时间从 4400 s 提升至 4480 s , 这是因为泡沫铜在提升导热性能的同时, 对自然对流产生一定的抑制. 虽然添加泡沫铜会将石蜡的理论吸热量降低约7.5%, 但泡沫铜对自然对流的抑制是有效保护时间提升的主要原因, 其作用权重比从8.1降低至0.72.

综上所述, 采用PCM散热器冷却低热流密度且上限工作温度较高的电子器件时, 应优先强化工质熔化过程中的自然对流; 若上限工作温度较低, 需采用熔点较低的相变工质, 并在工质中适当添加梯度孔泡沫金属, 以期在保证液相区自然对流有效作用的前提下提升固相区的温度. 针对高热流密度且上限工作温度较高的电子器件, 强化相变工质的导热性能是延长保护

时间的有效手段;若上限工作温度较低,可将工质换为导热性能较好(比石蜡高两个数量级)的低熔点合金。

3 结论

本文实验研究了石蜡的定向熔化特性,通过改变加热位置和添加泡沫铜,获得了石蜡在导热+自然对流、导热、导热增强+自然对流抑制以及导热增强4种作用条件下的温度场演变。通过分析石蜡内部的温度场、加热壁面温度以及PCM散热器的有效保护时间,可以得到如下结论。

(1) 在导热和自然对流同时作用条件下,石蜡的温度经历缓慢上升、极速上升、缓慢波动和继续上升4个阶段;添加泡沫铜能有效降低石蜡内部的温度梯度,

且温度的变化转变为逐渐上升、快速上升、维持稳定和继续上升4个阶段。

(2) 添加泡沫铜不但会降低石蜡的理论吸热量,还会延长自然对流作用的起始时间、缩短作用时长以及削弱作用强度。在本文涉及的较低热流密度且较高上限工作温度条件下,自然对流的作用权重比从8.1降至0.72,导致PCM散热器的有效保护时间仅从4400 s提升至4480 s。在底部散热以及微重力等仅导热作用条件下,添加泡沫铜可将有效保护时间从483 s大幅延长至2600 s。

(3) 采用PCM散热器冷却低热流密度的电子器件时,应优先强化工质熔化过程中的自然对流,随着热流密度的增加,再逐渐强化其导热性能。

参考文献

- 1 Yang X H, Tan S C, He Z Z, et al. Evaluation and optimization of low melting point metal PCM heat sink against ultra-high thermal shock. *Appl Therm Eng*, 2017, 119: 34–41
- 2 Chen X, Zhou J Y, Wang H J. Effect of diffusion thermal resistance on IGBT heat dissipation unit performance of arc welding power supply (in Chinese). *Mech Electr Technol*, 2020, 3: 58–61 [陈啸, 周剑英, 王海军. 扩散热阻对弧焊电源IGBT散热单元性能的影响. *机电技术*, 2020, 3: 58–61]
- 3 Luo H Z, Gao H Y, Zhu C L, et al. Review and prospect of IGBT chip technologies for electric vehicles (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 18: 5718–5729 [罗皓泽, 高洪艺, 朱春林, 等. 电动汽车IGBT芯片技术综述和展望. *中国电机工程学报*, 2020, 18: 5718–5729]
- 4 Wang H J, Fu J. Research on thermal design of ballistic electronic equipment (in Chinese). *J Mech Electr Inf*, 2018, 18: 98–100 [王虎军, 付娟. 某弹载电子设备热设计研究. *机电信息*, 2018, 18: 98–100]
- 5 Kandasamy R, Wang X Q, Mujumdar A S. Application of phase change materials in thermal management of electronics. *Appl Therm Eng*, 2007, 27: 2822–2832
- 6 Baby R, Balaji C. Thermal performance of a PCM heat sink under different heat loads: An experimental study. *Int J Therm Sci*, 2014, 79: 240–249
- 7 Arshad A, Ali H M, Khushnood S, et al. Experimental investigation of PCM based round pin-fin heat sinks for thermal management of electronics: Effect of pin-fin diameter. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 117: 861–872
- 8 Mahdi J M, Lohrasbi S, Ganji D D, et al. Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al_2O_3 nanoparticles. *Energy Convers Manage*, 2019, 180: 949–961
- 9 Zhao C Y, Wu Z G. Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2011, 95: 636–643
- 10 Zhu F, Zhang C, Gong X. Numerical analysis and comparison of the thermal performance enhancement methods for metal foam/phase change material composite. *Appl Therm Eng*, 2016, 109: 373–383
- 11 Rehman T, Ali H M, Saieed A, et al. Copper foam/PCMs based heat sinks: An experimental study for electronic cooling systems. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 127: 381–393
- 12 Al-Jethelah M, Tasnim S H, Mahmud S, et al. Nano-PCM filled energy storage system for solar-thermal applications. *Renew Energy*, 2018, 126: 137–155
- 13 Praveen B, Suresh S, Pethurajan V. Heat transfer performance of graphene nano-platelets laden micro-encapsulated PCM with polymer shell for thermal energy storage based heat sink. *Appl Therm Eng*, 2019, 156: 237–249
- 14 Fan L W, Xiao Y Q, Zeng Y, et al. Effects of melting temperature and the presence of internal fins on the performance of a phase change material (PCM)-based heat sink. *Int J Therm Sci*, 2013, 70: 114–126
- 15 Yang X H, Tan S C, He Z Z, et al. Finned heat pipe assisted low melting point metal PCM heat sink against extremely high power thermal shock. *Energy Convers Manage*, 2018, 160: 467–476
- 16 Wang C, Lin T, Li N, et al. Heat transfer enhancement of phase change composite material: Copper foam/paraffin. *Renew Energy*, 2016, 96: 960–

965

- 17 Zheng H, Wang C, Liu Q, et al. Thermal performance of copper foam/paraffin composite phase change material. *Energy Convers Manage*, 2018, 157: 372–381
- 18 Wang Z, Wu J, Lei D, et al. Experimental study on latent thermal energy storage system with gradient porosity copper foam for mid-temperature solar energy application. *Appl Energy*, 2020, 261: 14472
- 19 Bayat M, Faridzadeh M R, Toghraie D. Investigation of finned heat sink performance with nano enhanced phase change material (NePCM). *Therm Sci Eng Prog*, 2018, 5: 50–59
- 20 Farzanehnia A, Khatibi M, Sardarabadi M, et al. Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management. *Energy Convers Manage*, 2019, 179: 314–325
- 21 Kamkari B, Groulx D. Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. *Exp Therm Fluid Sci*, 2018, 97: 94–108
- 22 Yazici M Y, Avcı M, Aydın O. Combined effects of inclination angle and fin number on thermal performance of a PCM-based heat sink. *Appl Therm Eng*, 2019, 159: 113956
- 23 Zennouhi H, Benomar W, Kousksou T, et al. Effect of inclination angle on the melting process of phase change material. *Case Stud Therm Eng*, 2017, 9: 47–54
- 24 Avcı M, Yazici M Y. An experimental study on effect of inclination angle on the performance of a PCM-based flat-type heat sink. *Appl Therm Eng*, 2018, 131: 806–814
- 25 Korti A I N, Guellil H. Experimental study of the effect of inclination angle on the paraffin melting process in a square cavity. *J Energy Storage*, 2020, 32: 101726
- 26 Kahwaji S, Johnson M B, Kheirabadi A C, et al. A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*, 2018, 162: 1169–1182

Summary for “导热和自然对流对石蜡定向熔化特性的影响”

Effects of thermal conduction and natural convection on directional melting characteristics of paraffin

Jian Fang, Wen-Chuang Feng, Bin Ding^{*}, Chuan-Yong Zhu & Liang Gong

College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

^{*} Corresponding author, E-mail: dingbin@upc.edu.cn

At present, electronic devices are increasingly prone to severe heat dissipation problems owing to higher integration and miniaturization. Generally, the performances and service lives of electronic devices both decrease with increase in the working temperatures. In contrast, the failure rates of electronic devices rapidly increase when the working temperature increases gradually. For instance, the working temperatures of insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules and missile-borne radar systems should be maintained below 150°C. Moreover, the heat fluxes of these systems present transient and intermittent characteristics. This indicates that the traditional finned radiators are increasingly failing to meet the cooling demands of these systems. Generally, the melting process of phase change materials (PCMs) requires a nearly constant temperature (or limited within a temperature range) and absorbs a large amount of latent heat; this hints that the PCM heat sink may possibly help prevent high-power thermal shock and ensure safe operation of electronic devices with variable heat fluxes.

To further improve the thermal shock resistances of PCM heat sinks, an experimental system (consisting of a heating unit, an experiment unit, and a measuring unit) was established to explore the directional melting characteristics of paraffin under four conditions (thermal conduction and natural convection, thermal conduction, thermal conduction enhancement and natural convection suppression, and thermal conduction enhancement) by changing the heating positions and adding copper foam. Specifically, paraffin with a phase change temperature of 56.9–63.6°C was adopted as the working medium. Moreover, copper foam of dimensions 58 mm × 20 mm × 95 mm and porosity 15 PPI was used to enhance the heat conduction performance of paraffin. It should be noted here that the natural convection in the melting process of paraffin is driven by buoyancy, i.e., natural convection can be ignored when paraffin is heated from the top. Besides, the maximum thermal loss and maximum uncertainty error of this experimental system were 2% and 1.6%, respectively.

These results indicate that the inside temperature of pure paraffin successively experiences a slow increase, rapid rise, slight fluctuation, and then gradual increase when the thermal conduction and natural convection concurrently affect the melting process. By contrast, these four stages of temperature evolution change to gradual increase, linear rise, remaining constant, and continued increase once the temperature gradient inside the paraffin significantly decreases owing to the copper foam. The protection time of the PCM heat sink is prolonged from 483 s to 4400 s once natural convection is used for the paraffin melting process. Generally, it can be considered that adding copper foam is an effective method of smoothing the temperature gradient inside paraffin. Meanwhile, the copper foam can significantly prolong the manifestation, shorten the duration, and weaken the influence of natural convection. Specifically, the protective time is only prolonged by 80 s owing to the decrease of the influence ratio of natural convection to thermal conduction from 8.1 to 0.72. Therefore, the natural convection of PCMs should be preferentially strengthened for electronic devices with low heat fluxes and high working temperatures, whereas the thermal conductivity should be appropriately enhanced with increasing heat fluxes.

paraffin, PCM heat sink, natural convection, melting

doi: [10.1360/TB-2020-1666](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1666)