

振动环境对相变组件热控性能影响的实验

罗叶刚, 邢玉明, 赵亮, 刘鑫

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了研究振动环境对相变组件热控性能的影响,制备了基于纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜复合相变材料的两种相变热控实验件,并进行了静止和振动环境中的热控实验。实验结果表明:泡沫铜的存在能够有效地强化相变组件的热控性能,在 5000 W/m^2 时,添加泡沫铜后平衡温度降低了 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效热控时间延长了 19.4% ;在振动环境下,纯硬脂酸实验件的平衡温度降低了 $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,有效热控时间延长了 13.2% ;硬脂酸/泡沫铜实验件的有效热控时间延长了 10.5% ,振动带来的强迫对流能够有效强化相变组件的热控性能;并且相对于振动频率,振幅变化对影响结果的扰动较小,在一定的频率范围内,振动的影响随着频率的增加而变大。该研究可以为机载电子设备相变热控技术的应用提供参考。

关键词: 振动环境;硬脂酸;相变组件;泡沫铜;热控性能

中图分类号: V245; TK124

文献标志码: A

Experiment on the thermal management performance of phase change material under vibration environment

LUO Yegang, XING Yuming, ZHAO Liang, LIU Xin

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the thermal management performance of phase change material based heat sinks under vibration environment, two heat sinks based on pure stearic acid and stearic acid/foam copper phase change materials were prepared and experimentalized under static and vibrational environments. The experimental results showed that the presence of copper foam can effectively enhance the thermal performance of phase change material based heat sinks. When the heat flux was 5000 W/m^2 , the equilibrium temperature decreased by $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ after adding copper foam, and the effective thermal control time was extended by 19.4% . Under the vibration environment, the equilibrium temperature of pure stearic acid test specimen was reduced by $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the effective thermal control time was extended by 13.2% , and the effective thermal control time of the stearic acid/foam copper test specimen was extended by 10.5% . Hence forced convection caused by vibration can enhance the thermal performance of phase change material based heat sinks. With respect to the vibration frequency, the amplitude variation had less influence on the result, and in a vibration frequency range, the influence of vibration became larger with the increase of frequency. This

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 航空科学基金(20172851018)

作者简介: 罗叶刚(1994—),男,硕士生,主要从事相变材料热控与蓄热技术研究。

引用格式: 罗叶刚,邢玉明,赵亮,等. 振动环境对相变组件热控性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 592-599. LUO Yegang, XING Yuming, ZHAO Liang, et al. Experiment on the thermal management performance of phase change material under vibration environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 592-599.

study can provide a reference for the application of phase change materials thermal control technology for airborne electronic equipment.

Key words: vibration environment; stearic acid; phase change materials; copper foam; thermal management performance

目前,机载电子设备朝着小型化、高热流方向发展,但其又受到热控技术的制约。美国空军部门^[1]曾调研得到,由温度引起的电子器件失效率高达 55%,并且随着温度每增加 1℃,电子设备的可靠性下降 5%^[1]。因此,热管理系统在电子设备中显得至关重要,它不但控制着设备的温度,更影响着电子设备的稳定性与可靠性。

而相变材料由于其稳定的化学性能、高相变潜热和恒温性,在电子设备热控系统有着广泛的应用前景^[2-4]。而且相比传统的主动热控模式,基于相变材料的被动热控模式在减少系统复杂度和避免过热方面更有潜力。Hussain 等^[5]对锂电池的热管理系统的实验研究表明,在使用了相变材料后,相对于自然空气对流,电池的表面温度降低了 31%。Wang 等^[6]数值研究表明,基于相变材料的热控系统可以使电子设备运行时的温度更加稳定。然而,导热系数低制约了相变材料在高功率器件中的应用。为了克服这一问题,研究人员提出了大量可以增强相变材料导热系数的方案。Fok 等^[7]提出增加内部翅片可以使热分布更加均匀,但同时也增加了系统质量和加工成本,并且针对相变材料用量需要有效的优化方法。赵亮等^[8]研究了高导热系数的低熔点合金用于电子设备热控的可能性,表明在对质量要求不那么严格的情况下,低熔点合金作为相变温控材料具有很大的前景。

目前研究最多是在多孔介质中嵌入相变材料,以增强传热性能,泡沫石墨和泡沫金属是目前最常用的两种基体材料。张鹏等^[9]研究了泡沫铜/石蜡和泡沫镍/石蜡两种复合相变材料,结果表明,泡沫金属孔隙率为 95%时,泡沫镍/石蜡和泡沫铜/石蜡复合相变材料的导热系数是纯石蜡的 3 倍和 15 倍。迟蓬涛等^[10]等将翅片和泡沫铜结合,分析得其导热系数为泡沫铜/石蜡和纯石蜡的 3.7 倍和 42.2 倍;填充泡沫金属和肋都能很好地提高相变材料的导热性能,但前者更具有优势。Lafdi 等^[11]研究了泡沫铝孔隙率和孔径的影响,表明有效孔隙率越高,复合相变材料的性质越稳定,并指出针对不同情况,孔隙率和孔径有一个最

优值。李廷贤等^[12-14]针对硬脂酸相变材料,研究了泡沫石墨和添加纳米粒子等多种强化方案,结果表明,硬脂酸/泡沫石墨复合相变材料不仅性能稳定,效导热系数更是提高了 130 倍左右。并且对比各种纳米粒子,添加 5.0%的石墨纳米强化效果最明显,与纯硬脂酸相比,其融化和凝固速率分别提高约 37%和 320%。Zhou 等^[15]研究指出泡沫金属和泡沫石墨都可以提高相变材料的传热速率,而泡沫金属具有比泡沫石墨更好的传热性能。不过 Mills 等^[16]发现泡沫基复合相变材料的两个方向上的导热系数具有明显的差异。Luo 等^[17]数值研究表明这种导热系数的明显差异会对相变换热产生不利的影响。

除了导热系数,外部条件也对相变材料的热控性能有一定影响。例如热源分布、重力条件和环境温度等。Binet 等^[18]曾指出离散热源可以缩短相变材料的熔化时间。然而 Zhu 等^[19]的数值模拟表明该结论只是对于纯相变材料的融化过程有效,对于复合相变材料,离散热源并不能加速相变材料的融化。张靖驰等^[20]数值仿真结果表明,重力对纯相变材料的融化过程有着较大的影响,而对于复合相变材料融化过程的影响可以忽略不计。

此外,相变热控系统在航空航天及船舶中均有大量应用,使用过程中不可避免的处于振动环境。而振动环境对相变组件热性能的影响并不清楚,目前更是少有学者研究。本次实验研究以硬脂酸为相变材料,泡沫铜作为增强基体,制备了以纯相变材料和复合相变材料为基础的两种热控实验件,并实验研究了两种组件在振动条件下的热控性能,明晰了振动环境对相变热控组件的影响。该研究对振动环境条件下相变热控技术的应用提供指导。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本实验中所选用的相变材料为硬脂酸,国药集团化学试剂有限公司提供,药品纯度等级为分析纯度。泡沫铜孔隙率为 95%,孔密度为 20PPI,

吉林卓尔新型金属材料有限公司提供,材料的物性参数如表 1 所示,表中 l,s 分别表示液态和固态。

表 1 硬脂酸、泡沫铜的热物性参数

Table 1 Thermo-physics of parameters of stearic acid and copper foam

热物性参数	硬脂酸	泡沫铜
密度/(kg/m ³)	848(l)、965(s)	8 920
导热系数/ (W/(m·℃))	0.172	401
熔点/℃	69~70	
潜热值/(kJ/kg)	202.5	

仪器设备包括:PT100 热电阻(测温误差±0.1℃);数据采集系统(研华科技 ADAM-4015 温度测试模块);聚酰亚胺加热膜;电源(电压为 0~220 V,电流为 0~6 A;常州兆立威电源有限公司);可调电磁振动台(广东海达公司);振动测试仪(兰泰;频率为 10~1kHz;振幅为 0.01~2.0mm)。

采用铝合金(5052)对相变材料进行封装,泡沫铜基体的尺寸为 100 mm×100 mm×21 mm。根据泡沫铜尺寸设计铝合金封装壳体,壳体壁厚均为 2 mm。采用真空灌装和真空电子束焊接方法密封灌装口,相变材料的实际填充率为 93%。实验件如图 1 所示。

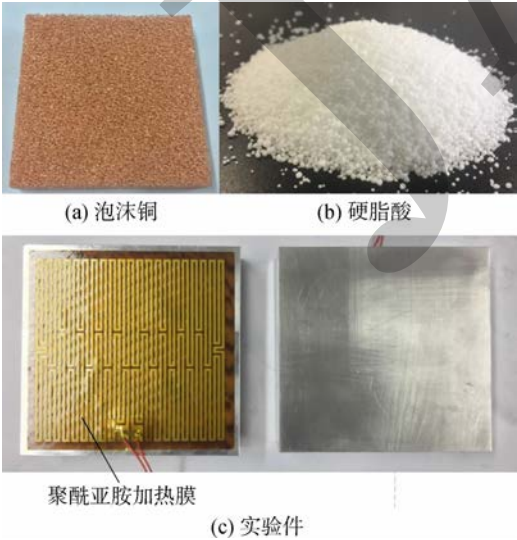


图 1 实验件实物图

Fig.1 Pictures of the test specimen

1.2 实验方法

为了研究振动环境对相变控组件热控性能的影响。搭建了图 2 所示的实验台。

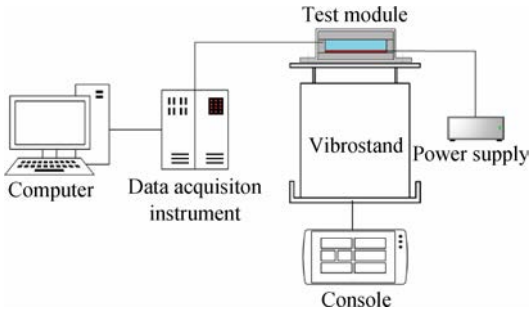


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

实验所用的聚酰亚胺加热膜贴于相变热控组件的下方,并将 PT100 热电阻粘贴于聚酰亚胺加热膜上,另一端与综合数据采集系统相连,系统每隔 2s 采集一次数据。总共布置了 5 个 PT100 热电阻,取 5 个热电阻的平均值作为热源温度测量值,热电阻分布情况如图 3 所示。整个热控组件用隔热材料(针织毯)包裹放于工装内,并利用螺栓将工装与振动台连接起来。采集实验过程中热源处的温度,通过升温曲线来评价相变组件的热性能。

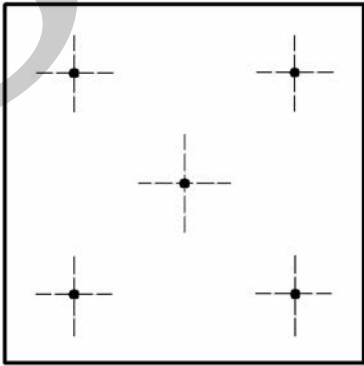


图 3 PT100 热电阻分布示意图

Fig.3 Location of PT100 resistance temperature detector

1.3 实验条件

实验针对纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫相变热控组件,选取 3 000、5 000 W/m² 和 7 000 W/m² 三种不同热流密度作为加热条件。采用定频正弦垂直振动作为所需的振动模式,选取了 4 种不同频率,一共 5 种参数作为振动环境条件,其具体参数如表 2 所示。

表 2 实验振动环境参数

Table 2 Vibrational parameters of experiment

频率/Hz	20	30	30	40	50
振幅/mm	1.5	0.9	0.5	0.3	0.1

2 实验结果与讨论

2.1 纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜相变热控组件热性能分析

首先对静止环境下纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜两种热控组件的升温曲线进行对比分析。图 4(a)~图 4(c)为两个实验件在 3 000、5 000 W/m² 和 7 000 W/m² 三种不同热流密度 q 下热源处的升温曲线对比。相变组件的热控过程包括三个阶段:固相导热阶段(I)、固液两相储热阶段(II)和液相自然对流阶段(III)。

由图 4 中可以看出,在 I 阶段,三种不同热流密度条件下纯硬脂酸的升温速率均大于硬脂酸/泡沫铜。这是因为在该阶段,传热方式为单一的热传导,而由于纯硬脂酸的导热系数较低,只有 0.2 W/(m·℃),热量不能有效地传入,使得热源处的温度上升较快。而在添加了泡沫铜作为导热增强基体后,有效导热系数得到了很大提高,能够很好地传热,使得热源处的温度上升较慢,升温速率较小。

在 II 阶段,硬脂酸开始融化,热量主要通过潜热储存。此时升温速率明显降低,温度保持在相对平稳的范围内,该阶段的传热方式包括液相自然对流和固相热传导。从图 4 中可以看到纯硬脂

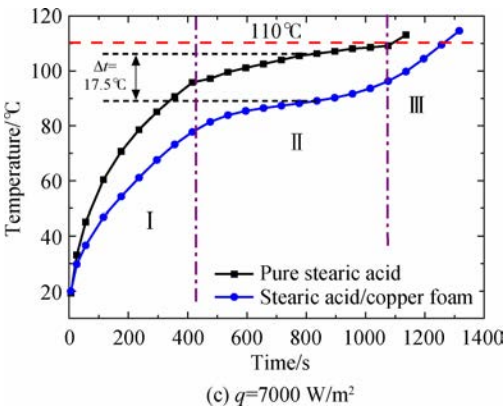


图 4 泡沫铜对相变组件热控性能的影响

Fig. 4 Influence of copper foam on the performance of phase change material based heat sinks

酸和泡沫铜/硬脂酸实验件的平衡温度之间存在明显的温差。在热流密度为 3 000、5 000 W/m² 和 7 000 W/m² 时,其最大温差分别达到了 15.1、19.8℃和 17.5℃;并且泡沫铜/硬脂酸相变组件热源处平衡时的温度能够较好维持在 77、80℃和 85℃。而纯硬脂酸实验件只能在 3 000 W/m² 时能够较好地保持在 85℃左右,在 5 000 W/m² 和 7 000 W/m² 时都不能够较好地保持平衡温度。

在 III 阶段,热传导方式主要为液相自然对流。通过热控时间来判定热性能,根据目前相关芯片所能耐受的温度,选定 110℃作为温度阈值。三种热流密度条件下,纯硬脂酸实验件热源处到达阈值的时间分别为 2 762、1 502 s 和 1 080 s;而在与泡沫铜进行复合后,其到达阈值的时间分别为 3 393、1 783 s 和 1 265 s,相应延长了 22.8%、19.4%和 17.1%。这表明泡沫铜的存在有效地延长热控时间,并且随着热流密度越低,有效延长的时间增加。

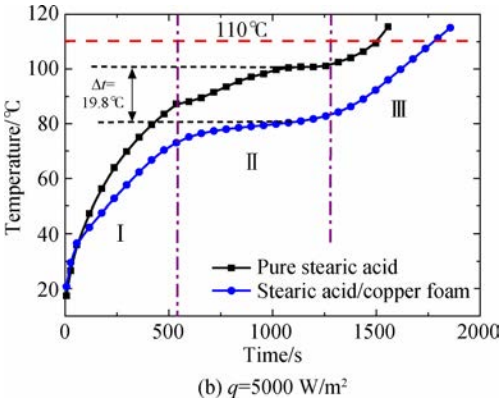
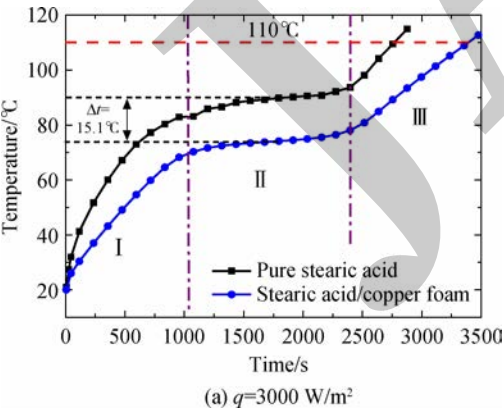
综合以上所述,对于硬脂酸这类导热系数较低的有机相变材料,在与泡沫铜复合后不仅降低了平衡时的温度,还有效的延长了到达温度阈值的时间,使相变组件的热控性能得到了极大的改善。

2.2 振动环境对相变组件热控性能的影响

为了研究振动环境对相变组件热控性能的影响,分别进行了不同热流密度条件下静止和振动环境中的热控实验。选用的振动频率为 30 Hz;振幅为 0.9 mm。

2.2.1 振动对纯硬脂酸相变组件热控性能的影响

图 5(a)~图 5(c)为不同热流密度条件下纯硬脂酸相变组件处于静止和振动环境中热源处的



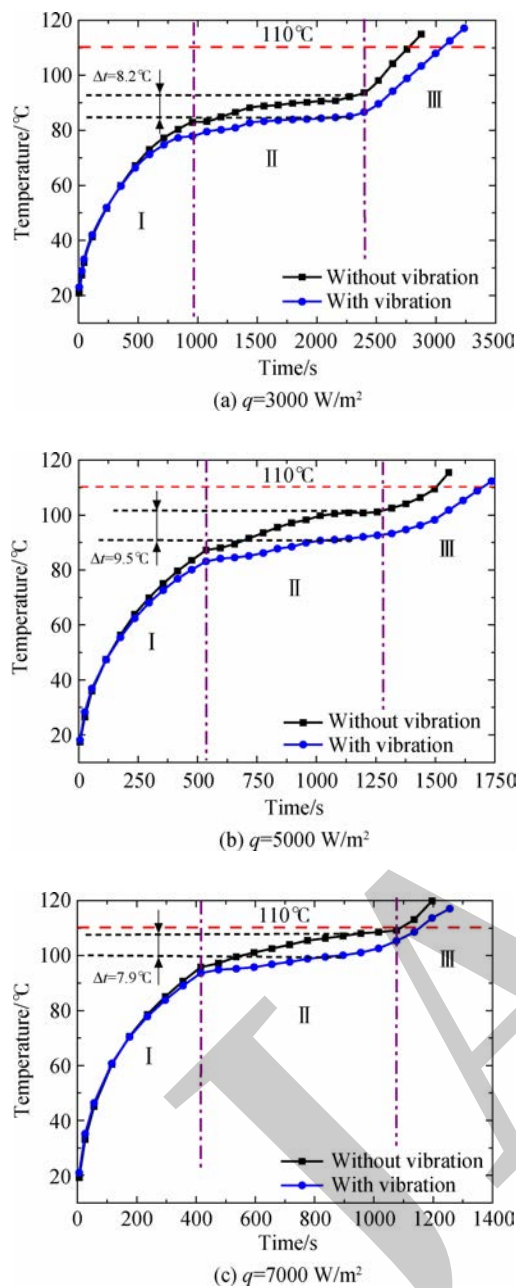


图 5 振动对相变组件热控性能的影响(纯硬脂酸)
Fig. 5 Influence of vibration on the performance of phase change material based heat sinks (pure stearic acid)

升温曲线对比。由图 5 中可以看出,振动环境对纯硬脂酸相变组件的热控过程有着明显的影响。

在 I 阶段,静止和振动环境下的升温曲线完全重合,说明振动在该阶段对组件的热控性能并没有产生明显影响。因为在该阶段,硬脂酸还没有开始融化,硬脂酸整个为固体,振动环境对固态硬脂酸的热传导并不会产生影响。

在 II 阶段,静止和振动环境下的升温曲线出现了明显的差别。在热流密度为 3 000、5 000 W/m² 和 7 000 W/m² 时,两种环境中相变组件热源处的温差最大达到了 8.2、9.5℃ 和 7.9℃。这

说明振动环境的影响是有益的,能够强化相变材料间的传热,使得平衡是温度有所降低。

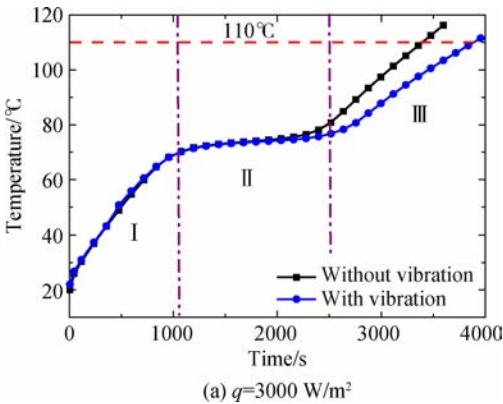
在 III 阶段,对比到达 110℃ 温度阈值的时间可得,三种热流密度条件下,静止环境中热源处到达阈值的时间分别为 2762、1502s 和 1080s,而振动环境中到达温度阈值的时间分别为 3 068、1701s 和 1 156 s,相应地延长了 11%、13.2% 和 7%,同样延长随着热流密度的越低而增加。

从平衡温度和实验热控时间来看,振动环境中纯硬脂酸相变组件的热控性能要明显优于静止环境。这是因为振动的存在会引起强迫对流,与静止情况下硬脂酸的自然对流相比,强迫对流带来的换热效果更好。并且由于铝合金的导热系数远大于纯硬脂酸,在热控过程中,硬脂酸会从四周慢慢往里融化,振动引起了中心固体硬脂酸的晃动,加强了液体的对流,强化了换热。

2.2.2 振动对硬脂酸/泡沫铜相变组件热控性能的影响

鉴于纯硬脂酸的导热系数较低,在电子设备的热控系统中已经很少单独使用,使用更多的是与多孔介质复合而形成的复合相变材料,研究振动对多孔介质基复合相变材料的影响更具有现实意义。图 6(a)~图 6(c)为不同热流密度下硬脂酸/泡沫铜相变组件热源处静止和振动环境下的升温曲线对比。

对比图 5 和图 6 可以看出,与纯硬脂酸实验件相比,振动环境对含泡沫铜实验件的热性能影响较小。在 I、II 阶段,两曲线基本重合,振动环境对实验件的热控性能并没有产生影响。而在 III 阶段,振动的影响开始逐渐显现出来,振动环境下的升温速率小于静止环境。接着对比到达温度阈值的时间,在三种热流条件下,静止环境下到达阈值的时间分别为 3 393、1783s 和 1265s,而振动环境下到达温度阈值的时间分别为 3 883、1971s 和



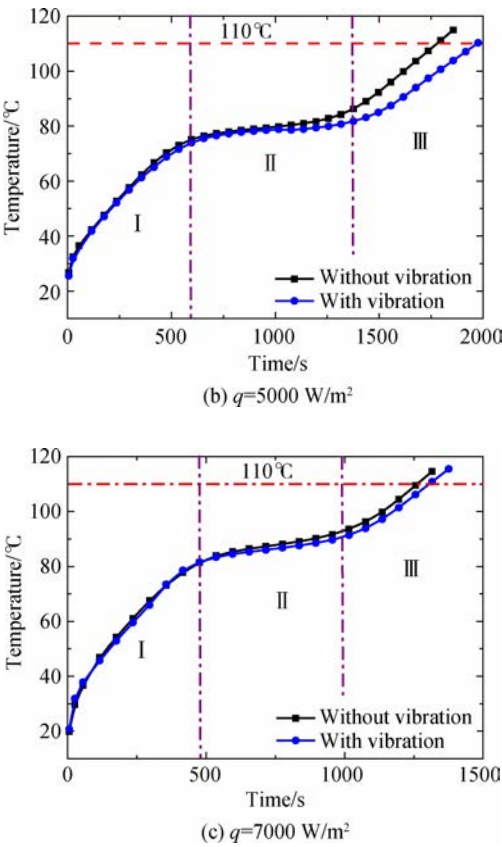


图 6 振动对相变组件热控性能的影响(硬脂酸/泡沫铜)
Fig. 6 Influence of vibration on the performance of phase change material based heat sinks (copper foam/stearic acid)

1316s,相应延长了 14.4%、10.5%和 4%,并且延长时间同样随着热密度的增加而减少。

出现这种现象是因为在硬脂酸完全熔化前,泡沫铜将硬脂酸分割成一个小单元,并且它存在阻碍了单元间相变材料的流动,起到了一种禁锢作用,使得由振动引起的强迫对流很弱,在 I、II 阶段不能产生明显的影响。在 III 阶段,相变材料完全熔化后,由于液态硬脂酸的密度小于固态,此时液相体积有所增加,泡沫铜完全浸泡在硬脂酸液体中,禁锢作用消失,对流作用加强,振动环境强化传热的影响又显现了出来。

对比不同热流密度条件还可以看出,热流密度越大,振动环境带来的影响越小。这是因为在较高热流密度下,振动带来的强迫对流传热与泡沫铜的热传导相比所占份额很小,造成的影响也变弱。

2.3 不同振动条件对相变组件热控性能的影响

频率和振幅是评价振动的两个重要标准,在相变组件的实际应用中,会遇到各种不同的振动环境,需要根据相应情况对此的研究。为了

更好地对比分析,实验所用热流密度统一选取为 5000 W/m^2 。

2.3.1 振幅对相变组件热控性能的影响

选取频率为 30 Hz,振幅分别为 0.5 mm 和 0.9 mm(记为:30 Hz-0.5 mm、30 Hz-0.9 mm)的两种振动环境进行实验,结果对比如图 7(a)~图 7(b)所示。由图 7 可以看出,在不同振幅条件下的升温曲线相重合。这说明,在固定频率下,振幅的变化对纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜相变组件热控性能的影响不大。这可能是因为硬脂酸本身的粘度就比较大,振幅变化对于强迫对流作用有限,所带来的影响体现不出来。

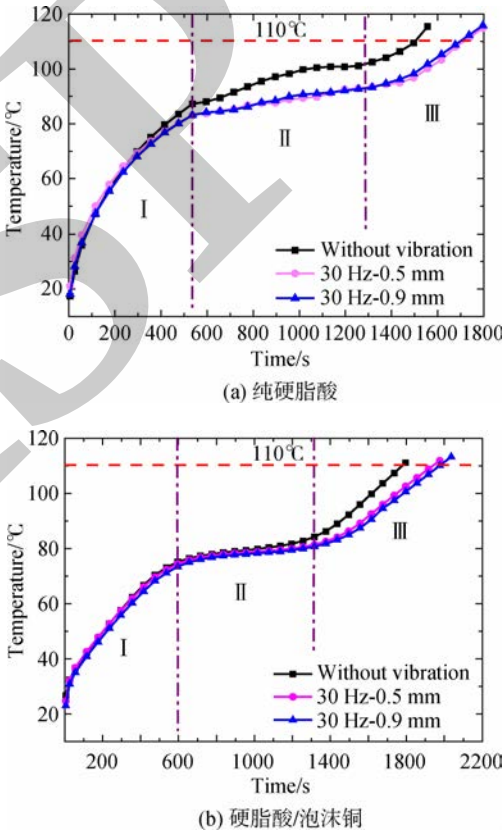
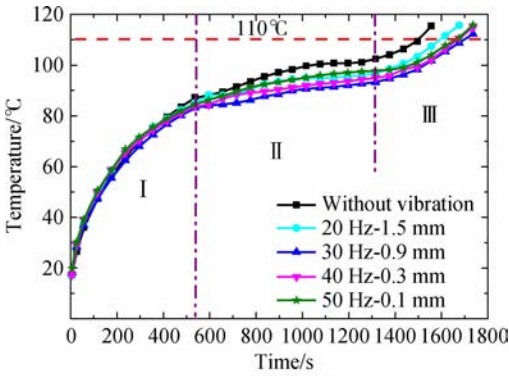


图 7 振幅对相变组件热控性能的影响
Fig. 7 Influence of amplitude on the performance of phase change material based heat sinks

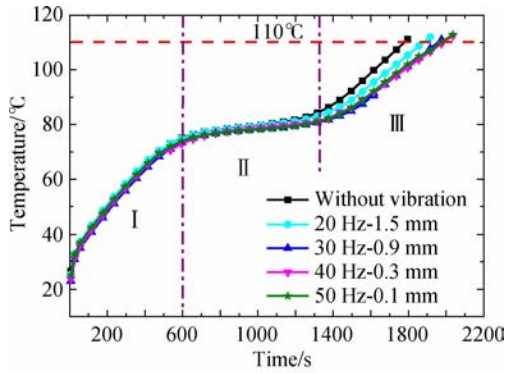
2.3.2 频率对相变组件热控性能的影响

由于振动台性能的限制,并不能做到定振幅变频率分析,在明确振幅变化的影响较小时,分别进行 20 Hz-1.5 mm、30 Hz-0.9 mm、40 Hz-0.3 mm 和 50 Hz-0.1 mm 四种振动环境下的振动实验,实验结果如图 8(a)~图 8(b)所示。

由图中可以看出,频率变化对硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜两种相变组件热控性能影响的趋势一



(a) 纯硬脂酸



(b) 硬脂酸/泡沫铜

图 8 频率对相变组件热性能的影响

Fig. 8 Influence of frequency on the performance of phase change material based heat sinks

致。由图 8(a)分析可得,频率为 20 Hz 时,纯硬脂酸相变组件平衡时的温度高于 30,40 Hz 和 50 Hz,到达阈值温度 110 ℃的时间也小于另外三种频率。而对比频率为 50、40 Hz 和 30 Hz 时的热控性能可以看出,频率为 50 Hz 时的热控性能最差,30 Hz 时的热控性能最好。

由图 8(b)可以看出,对于硬脂酸/泡沫铜相变热控组件,频率为 20 Hz 时,相变组件的热控效果最差;频率为 30、40 Hz 和 50 Hz 三种条件下的升温曲线完全重合,即三种不同振动频率环境下的影响相同。分析以上结果可得,在一定范围内,振动环境对相变组件热控性能的影响随着频率的增加而变大,存在一个最大影响频率。针对本实验所研究的纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜相变组件,对热控性能影响最大的振动频率为 30 Hz。

3 结 论

本文基于纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜制作了两种热控实验件,并进行了不同热流密度、不同振幅和不同频率下的振动实验,并对其实验结果进行了分析讨论。主要结论如下:

1) 泡沫铜的添加可以有效地改善相变组件的热控性能,在平衡温度和到达温度阈值 110 ℃的时间上都有着很好的表现。

2) 振动对纯硬脂酸相变组件的影响较大,并且影响是有益的,表现为强化了相变组件的热控性能。振动的存在不仅能够降低平衡时的温度,还可以延长温度阈值的时间。而对于硬脂酸/泡沫铜相变组件,振动的强化作用表现在能够延长到达温度阈值的时间,并不能降低平衡时的温度。

3) 振幅变化对纯硬脂酸和硬脂酸/泡沫铜相变组件热控性能的影响不大。而频率变化对热控性能的较大,并且在一定范围内,频率越高,强化作用越明显,对于本次试验所用热控组件,其最大影响频率为 30 Hz。

参考文献:

[1] YEH L T. Review of heat transfer technologies in electronic equipment[J]. Journal of Electronic Packaging, 1995,117(4):333-339.

[2] 闵桂荣,郭舜. 航天器热控制[M]. 北京:科学出版社, 1998:320-357.

[3] 潘艾刚,王俊彪,张贤杰. 相变温控技术在航天热控领域中的应用现状及展望[J]. 材料导报,2013,27(23):113-119.

PAN Aigang,WANG Junbiao,ZHANG Xianjie. A review on development and applications of metal phase change technology in thermal control for aeronautics[J]. Materials Review,2013,27(23):113-119. (in Chinese)

[4] 张芳,王小群,杜善义. 相变温控在电子设备上的应用研究[J]. 电子器件,2007,30(5):1939-1942.

ZHANG Fang,WANG Xiaoqun,DU Shanyi. Investigation on application of phase change thermal control in electronic devices[J]. Chinese Journal of Electron Devices,2007,30(5):1939-1942. (in Chinese)

[5] HUSSAIN A,TSO C Y,CHRISTOPHER Y H,et al. Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite[J]. Energy,2016,115:209-218.

[6] WANG Xiangqi,MUJUMDAR A S,YAP C. Effect of orientation for phase change material (PCM)-based heat sinks for transient thermal management of electric components[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2007,34(7):801-808.

[7] FOK S C,SHEN W b,TAN F L. Cooling of portable handheld electronic devices using phase change materials in finned heat sinks[J]. International Journal of Thermal Sciences,2010,49(1):109-117.

[8] ZHAO Liang,XING Yuming,WANG Ze,et al. The passive thermal management system for electronic device using low-melting-point alloy as phase change material[J]. Applied Thermal Engineering,2017,125:317-327.

[9] ZHANG Peng,MENG Z N,ZHU H,et al. Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam[J]. *Applied Energy*,2017,185:1971-1983.

[10] 迟蓬涛,高红霞,余建祖,等. 翅片-泡沫铜复合结构的导热增强作用[J]. *航空动力学报*,2012,27(4):854-860.
CHI Pengtao,GAO Hongxia,YU Jianzu,et al. Heat transfer enhancement of fin-copper foam composite structure [J]. *Journal of Aerospace Power*,2012,27(4):854-860. (in Chinese)

[11] LAFDI K,MESALHY O,SHAIKH S. Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials[J]. *Journal of Applied Physics*,2007,102(8):083549. 1-083549. 6.

[12] LI Tingxian,LEE J H,WANG Ruzhu,et al. Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2014,75(7):1-11.

[13] LI Tingxian,LEE J H,WANG Ruzhu,et al. Enhancement of heat transfer for thermal energy storage application using stearic acid nanocomposite with multi-walled carbon nanotubes[J]. *Energy*,2013,55(1):752-761.

[14] WU S,LI T X,YAN T,et al. High performance form-stable expanded graphite/stearic acid composite phase change material for modular thermal energy storage[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2016,102:733-744.

[15] ZHOU D,ZHAO C Y. Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials[J]. *Applied Thermal Engineering*,2011,31(5):970-977.

[16] MILLS A,FARID M,SELMAN J R,et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix[J]. *Applied Thermal Engineering*,2006,26(14/15):1652-1661.

[17] LUO Jianfeng,YIN Hongwi,LI Wenyu,et al. Numerical and experimental study on the heat transfer properties of the composite paraffin/expanded graphite phase change material [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2015,84:237-244.

[18] BINET B,LACROIX M. Numerical study of natural-convection-dominated melting inside uniformly and discretely heated rectangular cavities[J]. *Numerical Heat Transfer: Part A Application*,1998,33(2):207-224.

[19] ZHU Feng,ZHANG Chuan,GONG Xiaolu. Numerical analysis and comparison of the thermal performance enhancement methods for metal foam/phase change material composite[J]. *Applied Thermal Engineering*,2016,109:373-383.

[20] 张靖驰,盛强,任维佳,等. 微重力条件下泡沫复合相变材料蓄热装置数值仿真[J]. *空间科学学报*,2016,36(3):336-343.
ZHANG Jingchi,SHENG Qiang,REN Weijia,et al. Numerical simulation of thermal storage device of foam composite phase change material in microgravity[J]. *Chinese Journal of Space Science*,2016,36(3):336-343. (in Chinese)

(编辑:李岩梅)