

用于定标黑体的相变热沉实验研究与数值分析

李亚宁,韩东,司泽田,郑明瑞

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对航空器件内部散热效率低的问题,设计一种圆柱形相变热沉,以石蜡为相变材料,通过实验和仿真研究肋片结构对热沉内部瞬态熔化和加热面温度变化的影响。结果表明,增大肋片长度和数目均可使热沉内部温度分布更加均匀、降低热沉加热面温度,但增加内部阀杆直径影响很小。当临界温度较低时,增加肋片在热沉内的占比可延长工作时间。

关键词:圆柱形;相变热沉;石蜡;肋片;临界温度

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0196-04

Experimental and Numerical Investigation of PCM-based Heat Sink Used for Calibrating Blackbody

LI Yaning, HAN Dong, SI Zetian, ZHENG Mingrui

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A cylindrical PCM-based heat sink is proposed in regard to low efficiency of heat dissipation from internal aeronautical devices. With paraffin wax as the phase change material, experiments and simulations are conducted to study the effects of fins structure on transient melting inside heat sink and the change of heating surface temperature. The results show that the increase of fins in number and length can bring about more uniformed internal temperature distribution and lower heating surface temperature of heat sink, but little effect on base temperature despite the increase of diameter of the internal stem. The results also reveal that the increase of fin proportion in heat sink can extend working time when the critical temperature is low.

Keywords: cylindrical; PCM-based heat sink; paraffin; fins; critical temperature

0 引言

黑体定标是实现红外相机在轨非均匀性校正的主要手段,其中小面源黑体多采用半导体制冷器对其进行制冷,以达到和维护定标点^[1]。半导体制冷片的散热方式为风冷和水冷散热,但对于航空器件内部狭小密闭的工作环境难以正常工作^[2]。与传统风冷、水冷散热技术相比,相变热沉散热技术最大的优点是较大的潜热储热能力及近乎恒温的储热、放热过程。但相变材料的导热系数低^[3],导致了蓄放热过程中换热效率低,热量常常无法快速蓄存与释放。因此如何强化其传热能力,已成为学者们研究的热点。

诸多方法中,在相变装置中添加金属肋片等传热元件被认为是最简单、有效的。AKHILESH R^[4]利用数值计算方法,模拟分析了利用垂直金属肋片对石蜡传热性能的强化作用。结果表明,通过添加垂直金属肋片能够大幅度地提高材料的传热性能。ISMAIL K A R等^[5]分析了嵌入竖直肋片对柱状蓄热单元放热特性的影响,发现肋片的长度、数量与相变材料的过热度相对于肋片的厚度对热沉的放热时长影响更大。ARSHAD A等^[6]以石蜡为相变材料,

分析了体积占比都为9%、直径不同的针肋在不同的恒定热流加热下相变热沉的性能,探究了PCM的体积分数、针肋直径对热沉工作时间、热容量和导热系数的影响。HU Z P等^[7]通过数值模拟研究了矩形外壳的顶部和底部的长度比对熔化过程的影响。与普通外壳相比,当长径比为5.5时,热流密度提高了45.7%。ABDI A等^[8]使用数值模拟研究了肋片的不同放置方法对矩形散热器熔化过程的影响。与水平肋片相比,垂直肋片在熔化过程中不会抑制内部PCM的自然对流。除了对矩形热沉的研究之外,近年来学者还提出了圆柱相变热沉。SRIDHARAN S等^[9]提出了一种圆柱形相变热沉。通过实验和仿真方法将该模型与矩形散热器进行了比较,发现该模型具有更好的热性能。

综上所述,目前相变热沉的研究主流为矩形相变热沉,本文的目的是研究圆柱形相变热沉在航空器件内部的工作特性。通过仿真研究了径向肋片的数量、径向肋片的长度和内部阀杆的直径对内部PCM熔化速度、热沉底面温度分布的影响。此外,还分析了两种不同临界温度下的强化率。在此基础上,实验研究30W恒热流加热下热沉底面温度的变化,验证仿真结果的正确性,为航天器件内部相变热沉的设计提供一定的参考依据。

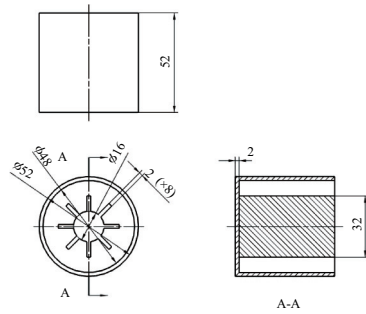
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NP2018107)

第一作者简介:李亚宁(1996—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为节能减排。

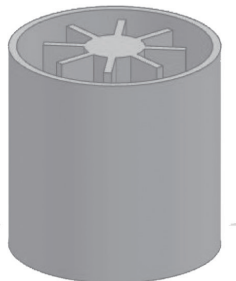
1 数学模型

1.1 几何模型

图1为本文所选用的热沉结构示意图。本文主要对不同肋片数目、长度和阀杆直径开展研究。表1为热沉的具体参数。热沉材料为铝,所用的PCM为石蜡,物性参数如表2所示。



(a) 热沉尺寸示意图



(b) 热沉模型示意图

图1 热沉结构示意图

表1 热沉的参数

参数	径向肋数目 N_f	径向肋长度 L_f/mm	阀杆直径 D_s/mm
Case A	0,4,6,8	8	8
Case B	8	4,8,12	8
Case C	8	8	6,7,8,9

表2 石蜡与铝的物性参数

参数名称	石蜡	铝
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	57~60	
潜热/(kJ/kg)	200	
比热/(kJ/(kg·K))	1 500	0.87
密度/(kg/m ³)	900	2 719
导热系数/(W/(m·K))	0.3	202.4
热膨胀系数/(1/K)	0.001 5	

1.2 计算模型与边界条件

对PCM来说,控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t_e} + \rho(\nabla \cdot v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t_e} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_e}(\rho h_e) + \nabla \cdot (\rho v h_e) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

由糊状区孔隙度降低引起的动量降低可以通过以下公式计算^[10]:

$$S = \frac{(1-\gamma^2)}{(\gamma^3+C)} A_{\text{mushy}} v \quad (4)$$

式中: ρ 为密度,kg/m³; h_e 为焓,kJ/kg; ν 为动力黏度,m²/s; v 为流体速度,m/s; t_e 为时间,s; γ 为液相率; A_{mushy} 为糊状区常数,m/s。

假设热沉的外表面绝热,底面通过与实验相同的30 W恒定热流输入进行加热。采用Solidification & Melting模型,糊状区常数设置为 10^5 ,初始温度为310 K,监视残差值。当动量方程残差值 $<10^{-3}$ 、能量方程残差值 $>10^{-5}$ 时结束计算。

1.3 风格无关性验证

在初步计算时,必须验证网格的独立性,本文以Case A中 $N_f=8$ 的情况为例进行验证。模拟在30 W加热功率下,800 s内液相率的变化,并记录了最终液相率,如图2所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者),307 289个网格和489 960个网格的最终液相率差别 $<1.5\%$ 。因此,选择307 289网格进行数值模拟。

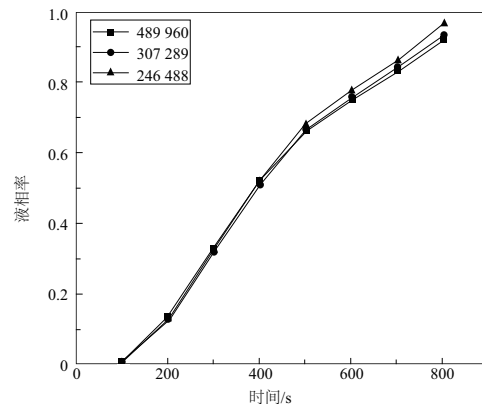


图2 网格独立性验证

2 结果与分析

2.1 热沉熔化特性

Case A的温度和液相率的云图如图3所示。在初始阶段,PCM仅在壁面附近开始熔化。肋片数目的增加可以使热沉温度更加均匀,因为铝的导热率远大于PCM,使得一部分热量被铝吸收并传递到上部PCM。在此阶段,导热是传热的主要方式。随着熔化过程的继续,在热沉中底部和侧壁出现大量液相PCM,潜热逐渐成为主要的能量存储方式,自然对流成为主要的传热方法。由于自然对

流效应,温度较高的的液相 PCM 向上移动,并且接触了固液界面加速了熔化过程。

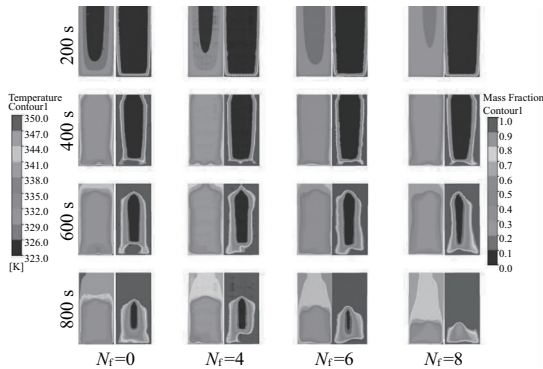


图3 Case A 的温度(左)和液相率(右)的云图

图4显示了不同的热沉结构对底面温度的影响。对于 Case A,随着肋片数量的增加,热沉工作过程中温度曲线的斜率减小,在潜热阶段,温度更低。同样,Case B 和 Case C 具有相同的趋势,区别在于阀杆直径的变化对底面温度影响很小。这是因为与增加散热片的数量和长度相比,增加内部阀杆的直径后所增加的传热面积十分有限。

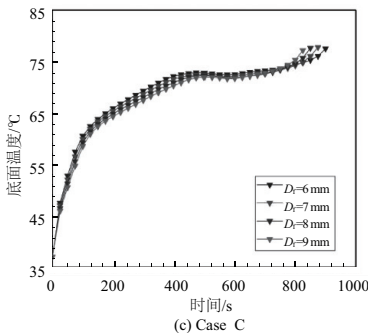
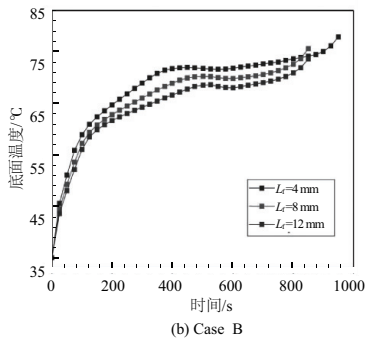
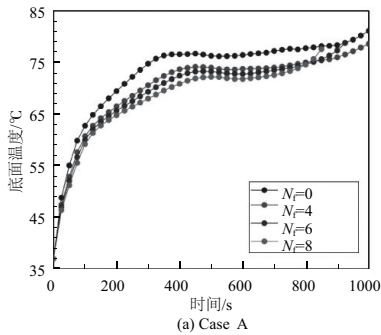


图4 不同模型的底面温度变化

2.2 临界温度强化率

图5显示了在两种不同的临界温度(70 °C 和 75 °C)下强化率。强化率的定义是带肋片的热沉底面达到临界温度所需的时间除以不带肋片的:

$$E_R = \frac{T_{cr,withfin}}{T_{cr,withoutfin}} \quad (5)$$

从图5可以看出,当临界温度为70 °C时,随着肋片长度、数量和内部阀杆直径的增加, E_R 也随之增加。其中,增加肋片长度是降低底面温度最有效的方法。当临界温度从70 °C变为75 °C时,强化率总体上得到了很大的提高。在更高的临界温度下,肋片结构的改变对强化率的影响效果更加明显。但是,当临界温度为75 °C时,肋片结构的改变并不一定会延长临界时间。结合前文的分析,增加肋片比例可以使热沉温度更加均匀,PCM 的质量决定工作时间。因此,临界温度较低时,可以增加肋片在热沉内的占比,以延长工作时间。当临界温度较高时,适当增加PCM 的质量可以更好地利用潜热的优势,确保系统的安全运行。

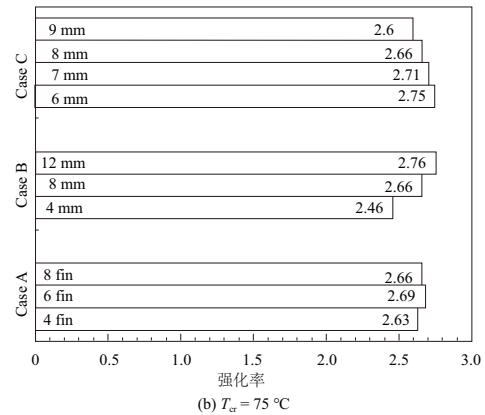
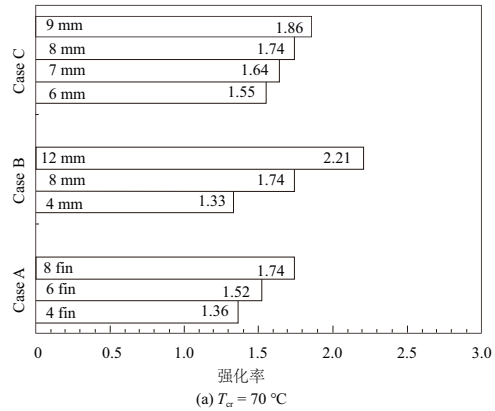


图5 不同临界温度的对比

3 实验研究

为了验证仿真结果的正确性,设计并搭建了相变热沉加热实验台,如图6(a)所示。该系统主要由相变热沉、加热系统以及温度采集系统三部分组成。相变热沉聚酯胺纤维外壳包裹,所用的相变材料石蜡存储在铝制的热沉

内。实验中所用的加热器为直径 50 mm 的不锈钢云母加热板,并位于相变热沉底部,作为 PCM 的热源,由型号为 Zhaoxin KXN-6020D 的直流稳压器控制。热沉底部的温度由 4 个 K 型热电偶检测,数据采集仪型号为 Keysight-34972A。相变热沉和加热器的初始温度为环境温度 26℃ (± 0.2 ℃)。

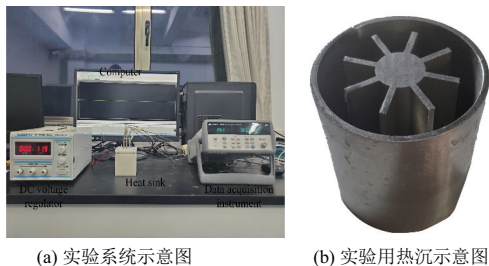


图 6 实验系统图及实物图

图 7 为在 30 W 加热功率下热沉的底面温度变化曲线。在初始阶段底面温度都会迅速升高,此时热沉内部的 PCM 主要是显热吸收热量。之后,温度在一段时间内基本保持不变,此时 PCM 的相变潜热吸收了几乎全部的热量,进入潜热阶段。在此之后,温度再次升高,PCM 全部完成相变,再度进入显热阶段。从图中可以看出,实验值与模拟值具有相同的温度变化趋势,其相对误差最大处在 925 s,值为 16.2%。因此,可以验证仿真结果的正确性。

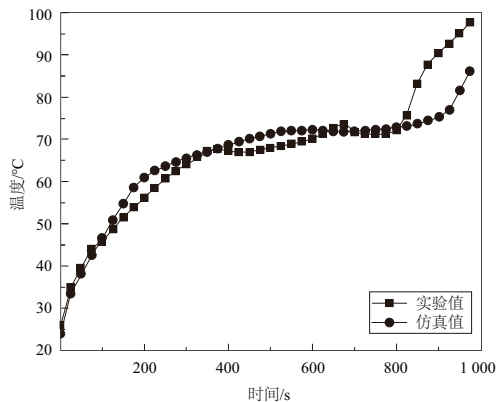


图 7 30 W 加热下热沉底面温度的变化

4 结语

本文通过模拟和实验验证相结合的方法研究不同结构分布对热沉性能的影响,从中得出如下结论:

1) 肋片数目的增加可以使热沉内部温度分布更加均匀,同时也可以加强自然对流效应,提高下部 PCM 的熔化速度。

2) 增加肋片的长度和数目都可以显著降低热沉工作过程中底部加热面的温度,但增加内部阀杆直径对其几乎没有影响。

3) 比较了在临界温度 70℃ 和 75℃ 时热沉的强化率。当临界温度较低时,可以增加肋片的比例以延长工作时间。当允许临界温度处于较高值时,适当增加 PCM 的占比可以更好地利用潜热的优势,以确保系统长时间安全运行。

4) 实验值与模拟值具有相同的温度变化趋势,其相对误差最大处在 925 s,值为 16.2%,据此可以验证仿真结果的正确性。

参考文献:

- [1] 付智红. 一种用于星上半导体制冷器的温度控制方法[J]. 空间电子技术, 2016, 13(3):76-80.
- [2] 胡锦炎. 固液相变储能热沉的理论及实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- [3] 于永生, 井强山, 孙雅倩. 低温相变储能材料研究进展[J]. 化工进展, 2010, 29(5):896-900, 913.
- [4] AKHILESH R, NARASIMHAN A, BALAJI C. Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(13):2759-2770.
- [5] ISMAIL K A R, ALVES C L F, MODESTO M S. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(1):53-77.
- [6] 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 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117:861-872.
- [7] HU Z P, LI A G, GAO R, et al. Effect of the length ratio on thermal energy storage in wedge-shaped enclosures [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 117(2):807-816.
- [8] ABDI A, MARTIN V, CHIU J N W. Numerical investigation of melting in a cavity with vertically oriented fins [J]. Applied Energy, 2019, 235:1027-1040.
- [9] SRIDHARAN S, SRIKANTH R, BALAJI C. Multi objective geometric optimization of phase change material based cylindrical heat sinks with internal stem and radial fins [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 5:238-251.
- [10] VOLLER V R, BRENT A D, PRAKASH C. Modelling the mushy region in a binary alloy [J]. Applied Mathematical Modelling, 1990, 14(6):320-326.

收稿日期:2020-09-25