

The Contrast of Simulation and Experiment of Heat Pipe with Heat Storage Material

Jiangfeng Lu, Tong Zhu, Hai Wang

School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: lstar5101@sina.com

Received: Dec. 27th, 2013; revised: Jan. 13th, 2014; accepted: Jan. 17th, 2014

Copyright © 2014 Jiangfeng Lu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Jiangfeng Lu et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Heat storage material combined with heat pipe is a new type of heat pipe used in spacecraft. Taking full advantage of heat storage characteristics of phase change material and the excellent transfer performance of heat pipe, it offers new ideas for spacecraft thermal control design on high-power and short-term operation equipment or intermittent work equipment. By modeling and contrasting the simulation and experiment results, the heat pipe with heat storage material has a good effect on temperature control.

Keywords: Heat Storing Materials; Heat Pipe; Simulation; Experiment

带相变蓄热材料热管仿真与试验对比研究

陆江峰, 朱彤, 王海

同济大学机械与能源工程学院, 上海
Email: lstar5101@sina.com

收稿日期: 2013年12月27日; 修回日期: 2014年1月13日; 录用日期: 2014年1月17日

摘要: 带相变蓄热材料热管是一种新型的航天器用热管, 它充分利用了相变材料的相变蓄热特性和热管优异的等温性, 为航天器大功率短时工作单机或脉冲式工作单机的热控设计提供新思路。本文对这种新型热管建立了空间应用模型, 并通过计算及试验对比, 表明该热管具有良好的热控效果。

关键词: 相变蓄热材料; 热管; 仿真; 试验

1. 引言

带相变蓄热材料热管是一种新型的航天器用热管^[1], 它充分利用了相变材料的相变蓄热特性^[2]和热管优异的等温性^[3], 为航天器大功率短时工作单机或脉冲式工作单机的热控设计提供了新的思路。对于航天器来说, 能源的供应、管理及高效利用一直是航天技术发展的热点^[4]。针对今后月球探测及地月系以外的航天活动来说, 如何合理利用航天器上能源、充分

利用单机产生的热能, 是该类型探测活动的关键问题所在。而利用相变蓄热材料存储、释放热量^[5,6]来控制单机的温度, 或抑制其温变速率及温度波动, 是解决此问题的一种简单而有效的方法^[7,8]。

本文针对已经研制出来的某种型号带相变蓄热材料热管^[9], 在典型的大功率短时工作单机热控方案基础之上, 建立了该热管的空间应用模型, 模拟出了该热管在轨应用的状况; 同时通过该热管实物模型的摸底试验, 与仿真结果做出了对比, 分析研究了带相

变蓄热材料热管的使用效果。

2. 带相变蓄热材料热管

本文所设计的带相变蓄热材料热管采用矩形管状结构(如图 1 所示), 包含 1 个热管通道和 4 个相变蓄热材料腔体。该热管的管壳材料为铝合金, 热管通道内工质为氨, 相变蓄热材料可根据温度控制要求进行选择。本文仿真分析及试验中选用的相变蓄热材料均为正十六烷石蜡(C16H34), 其固-液相变温度为 16.7℃, 潜热为 237.1kJ/kg^[10]。长度为 1 米、充装正十六烷的带相变蓄热材料热管的蓄热能力为 71.77 kJ。

3. 空间应用模型

根据典型的某大功率短时工作单机热控方案, 带相变蓄热材料热管的应用方式为: 带相变蓄热材料热管预埋到仪器安装板内, 热管一面通过仪器板的铝表板与若干大功率短时工作单机良好热接触, 另一面通过铝表板向散热面板辐射散热, 而热量最终只通过散热面板向空间辐射出去, 模型的其余面均有多层隔热组件包覆。同时, 为了充分展现带相变蓄热材料热管

的使用效果, 在仪器安装板上还设计了若干小功率短时工作单机, 同样与仪器板有着良好的热接触, 只是其接触的仪器板区域内没有预埋相变蓄热材料热管。空间应用模型如图 2 所示。

使用西门子 NX 软件的 TMG 模块建立了上述空间应用的 1:1 模型, 对模型进行了如下假设: 只考虑仪器安装板与带相变蓄热材料热管接触面的接触导热, 不考虑其它接触面导热的影响; 各表面均为灰体; 忽略安装螺钉、多层边缘等的漏热。整个空间应用模型的传热方式只有热传导和热辐射。大功率短时工作单机与安装板间的接触传热系数取 500 W/(m²·℃), 热管上下表面与铝表板的接触传热系数取 100 W/(m²·℃), 热管通道的当量导热系数取 8000 W/(m·℃), 多层隔热组件的当量导热系数取 0.0005 W/(m·℃), 其余部件的导热系数均按材料物性选取^[11]。

整个空间应用模型共划分 2614 个网格, 其中带相变蓄热材料热管划分了 576 个体网格, 728 个面网格; 其余部分均为面网格。按照表 1 工作模式(每 97 min 为一个周期)和图 3 的外热流施加曲线分别计算了充装正十六烷和不充装相变蓄热材料两种情况下模型

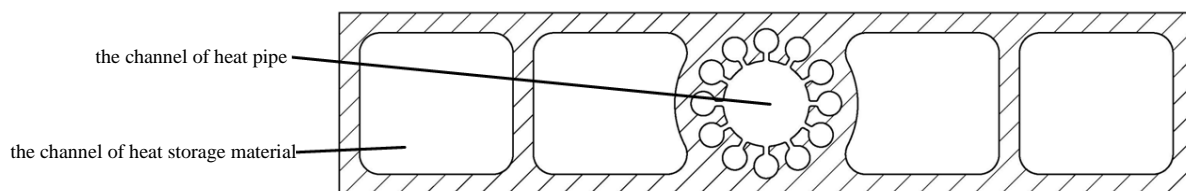


Figure 1. The section of heat pipe with heat storage material
图 1. 带相变蓄热材料热管截面示意图

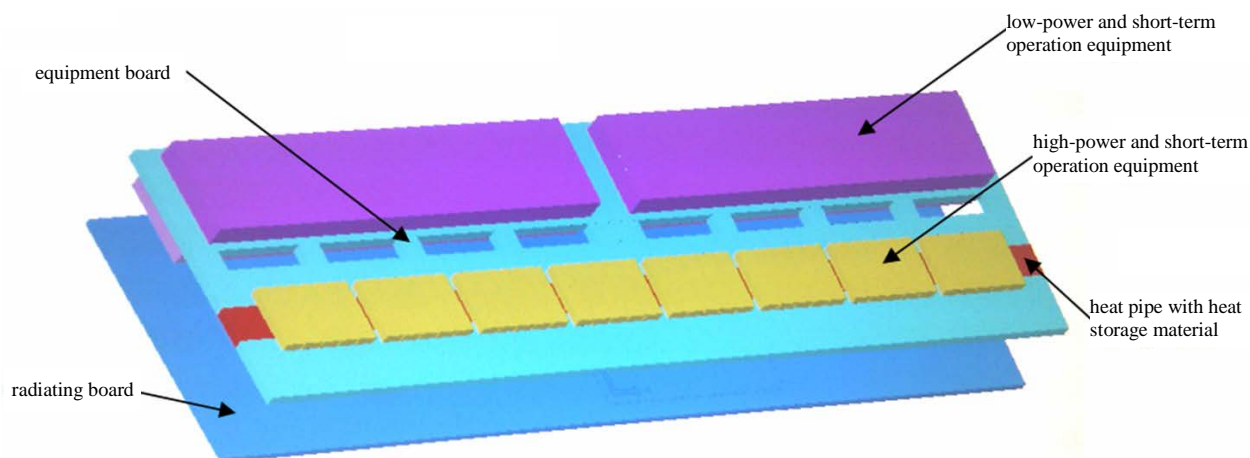


Figure 2. The space application model of heat pipe with heat storage material
图 2. 带相变蓄热材料热管的空间应用模型示意图

Table 1. Working model of short-term operation equipment
表 1. 短时工作单机工作模式

Equipment	Dimension (mm × mm × mm)	Number	Weight (kg)	Short-term power (W)	Working hours (min)
High-power equipment	110 × 100 × 5.1	8	0.15	23	8
Low-power equipment	120 × 420 × 10.7	2	1	3.75	8

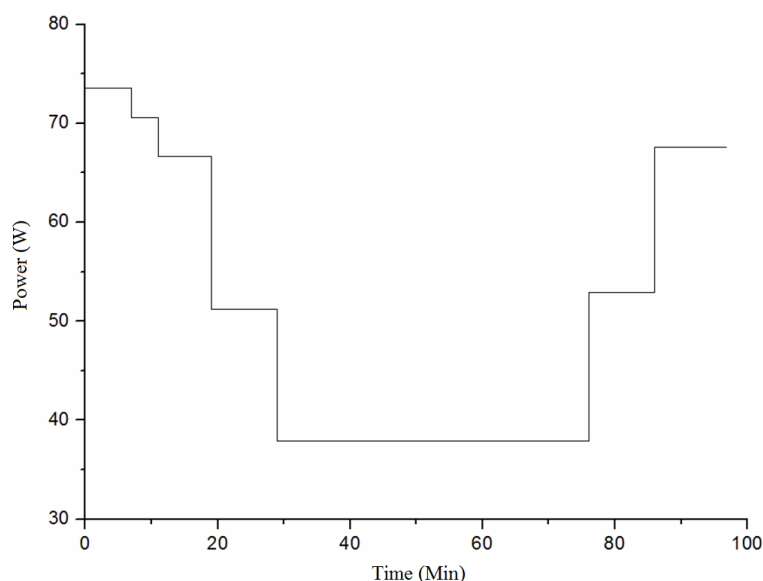


Figure 3. Curve: External heat flux on radiating board
图 3. 散热面外热流施加曲线

平衡后的温度情况。

4. 仿真与试验对比

4.1. 热仿真结果

图 4 分别对应充装正十六烷和不充装相变材料热管模型平衡后的仿真温度曲线, 可见充装正十六烷后, 能使大功率短时工作单机的峰值温度由 41.4℃ 降低到 29.1℃, 相变蓄热材料对大功率单机的峰值温度抑制效果达到 12.3℃。两个模型的温度变化幅度对比也较明显, 充装正十六烷的热管温度曲线更平缓, 温度波动更小。

4.2. 与试验结果对比

按照图 2 的空间应用模型制作了实物模型, 并在真空罐内进行了应用摸底试验, 单机工作模式、外热流施加都按表 1 和图 3 进行, 测量得到的温度曲线见图 5。仿真与试验的数据对比见表 2。

由表 2 可见仿真结果与试验结果一致性较好, 大功率单机的温度误差小于 4℃, 小功率单机及散热面

的温度误差为 2℃ 以内。图 6 单独对比了带正十六烷相变蓄热材料热管的仿真温度和试验温度。在相变区域内, 由于升温时间较短、升温较快(8 分钟内升温 5℃), 而降温时仅靠单纯的辐射散热, 因此图 6 中所示的相变升温过程很短, 而相变降温过程比较漫长。但图 6 显示仿真的结果与试验的结果较接近, 说明仿真所选用的参数、所做的简化比较有效, 仿真结果能反映实际应用效果。

5. 误差分析

由图 6 可以得知, 仿真与试验间存在 4℃ 以内的误差, 经分析, 产生误差的原因如下:

1) 试验存在漏热。具体为多层边缘、安装螺钉、支架等漏热, 而仿真则作了相应简化, 忽略各种漏热影响;

2) 外热流施加存在差异。仿真所施加的外热流为连续变化, 而试验中由于技术限制, 只能施加阶梯式热流(见图 3), 即使该热流值为仿真热流值折算后的数值, 也只能比较接近仿真值。

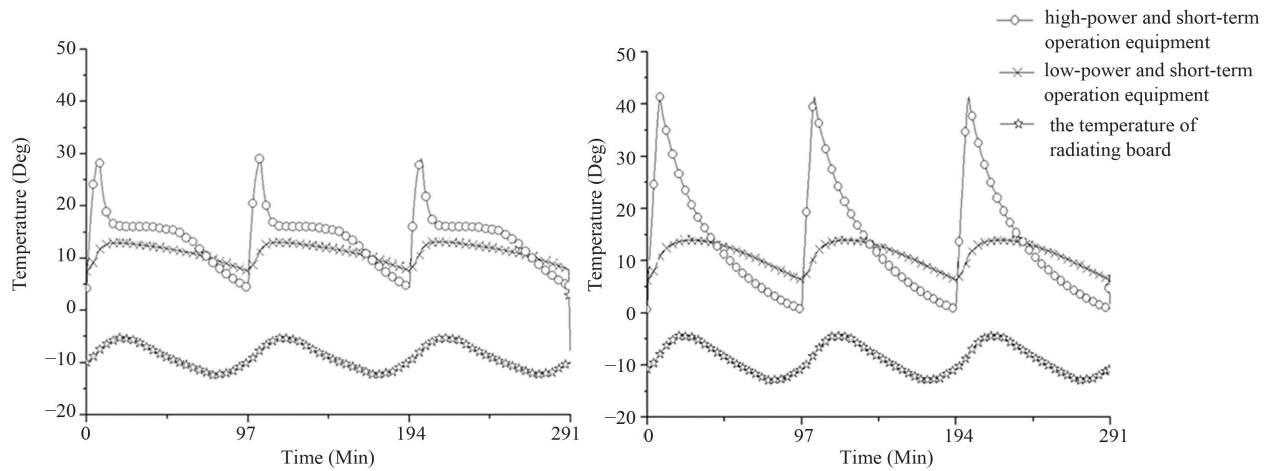


Figure 4. Curve: Simulation result of heat pipe with heat storage material(left) and normal heat pipe(right)
 图 4. 充装正十六烷(左)和不充装相变蓄热材料(右)热管的仿真温度曲线

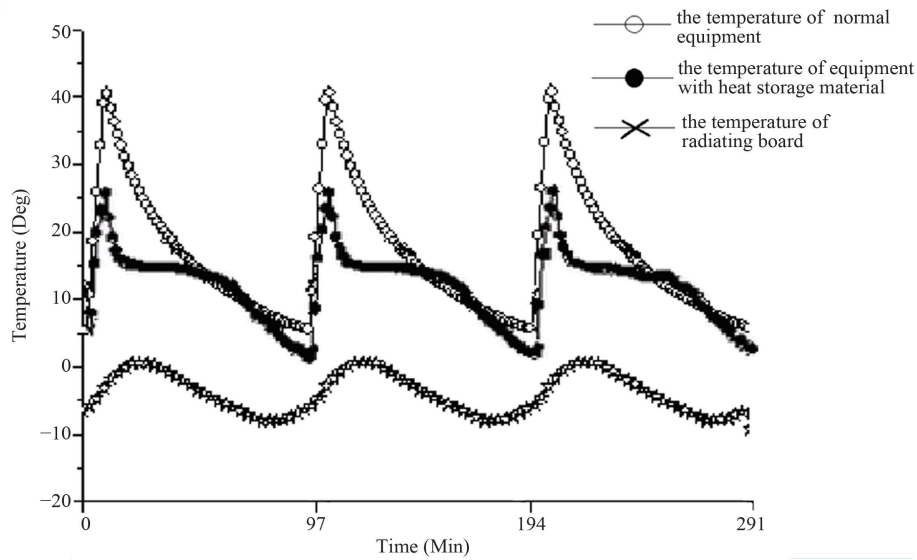


Figure 5. Curve: Experiment result of heat pipe with heat storage material and normal heat pipe
 图 5. 充装正十六烷和不充装相变蓄热材料热管的试验温度曲线

Table 2. Contrast of simulation result and experiment result
 表 2. 仿真与试验数据对比

Equipment	Heat pipe with heat storage material					Normal heat pipe				
	Simulation temperature (°C)		Experiment temperature (°C)			Simulation temperature (°C)		Experiment temperature (°C)		
	Min	Max	Position	Min	Max	Min	Max	Position	Min	Max
High-power and short-term operation equipment	4.2	29.1	1	6.5	25.5	1.7	41.4	1	5.3	41.9
			2	7.1	25.1			2	4.6	41.9
Low-power and short-term operation equipment	7.4	13.1	1	7.1	11.8	6.3	14.0	1	7.1	11.8
			2	8.9	13.3			2	8.9	13.3
Radiating board	-12.4	-5.2	1	-10.9	-3.6	-12.9	-4.4	1	-10.0	-1.2
			2	-9.0	-1.8			2	-10.1	-0.9
			3	-9.7	-2.2			3	-9.5	-0.6

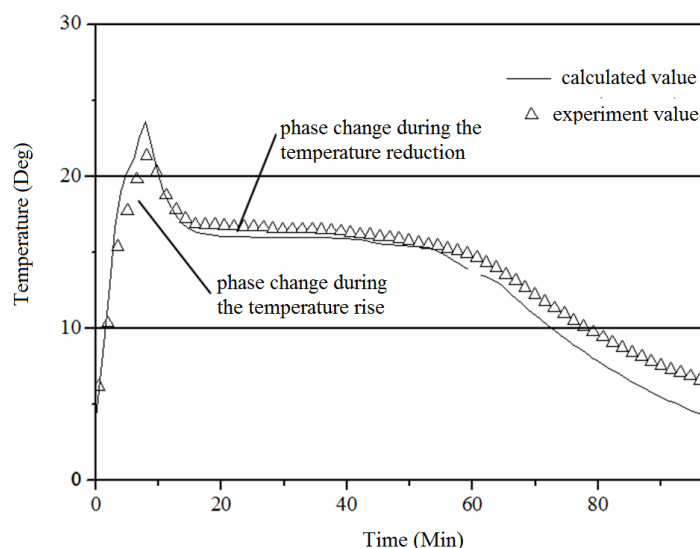


Figure 6. Curve: Contrast of simulation result and experiment result
图 6. 带正十六烷相变蓄热材料热管仿真与试验温度曲线对比

3) 温度环境不同。仿真所设置的环境为 4 k 的冷环境，而试验时考虑到经济、安全及技术水平，最终选取 -170°C 的低温环境，由此会产生一定的误差。

4) 蓄热材料相变点不同。仿真所设置的固-液相变温度为 16.7°C ，而材料的真实相变温度在 16.7°C 左右，并不是一个绝对固定的值，由此也会产生一定的误差。

虽然由于上述原因，仿真与试验有一定误差，但是，该误差已经大大优于航天器热试验的国军标，并且稍优于美军标，表明该仿真比较接近实际应用情况。

6. 结论

本文对一种新型热管——带相变蓄热材料热管的空间应用模型进行了热仿真分析，并与实物模型试验结果进行了对比，得出结论：热仿真与试验结果一致性较好，最大误差小于 4°C ；通过热仿真与试验结果，均清晰地表明相变蓄热材料热管对大功率短时工作单机的温变速率和温度波动能起到明显的抑制作用。

参考文献 (References)

- [1] 侯增祺, 胡金刚(2007) 航天器热控制技术——原理及其应用. 中国科学技术出版社, 北京.
- [2] 张寅平 (1996) 相变贮能理论和应用. 中国科学技术大学出版社, 合肥.
- [3] 陶汉中, 张红, 庄俊 (2007) 小型轴向槽道热管蒸发段换热系数研究. *热科学与技术*, **6**, 60-65.
- [4] 李明广, 张洋, 李月锋, 张东 (2011) 相变蓄热单元的研究进展. *材料研究与应用*, **4**, 77-81.
- [5] 周志强 (2008) 中国能源现状、发展趋势及对策. *能源与环境*, **6**, 9-10.
- [6] 张仁元 (2009) 相变材料与相变储能技术. 科学出版社, 北京.
- [7] 张东, 周剑敏, 吴科如 (2006) 相变储能材料的相变过程温度模型. *同济大学学报*, **34**, 928-932.
- [8] 苗建印 (2009) 高效深低温热收集和热传输技术. 卫星热控技术研讨会, 北京, p. 257.
- [9] 于树轩, 章学来, 陆钧 (2009) 石蜡相变材料强化传热技术进展. *制冷空调与电力机械*, **1**, 15-19.
- [10] 徐祖耀 (2009) 材料热力学. 高等教育出版社, 北京.
- [11] 范含林 (2003) 神州飞船热设计及飞行温度数据分析. *航天器工程*, **1**, 8-26.