

机载热管冷板传热性能与寿命预估试验研究

吕 倩¹, 胡家渝¹, 刘 娟², 成丹凤²

(1. 中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036; 2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为考察热管冷板在机载条件下的适用性, 设计一种温度循环试验方案对不同类型及同类型不同配置方式的 9 种热管冷板进行试验研究。根据温度循环前后红外热像仪测试结果分析不同热管冷板的传热性能差异, 并基于试验结果采用阿雷尼乌斯公式进行寿命预估。研究表明: 温度循环前后, 铝均温板因产生不凝性气体导致传热性能恶化, 普通铜水热管冷板与微热管阵列冷板传热性能均未发生改变, 可靠性较好; 未发生恶化的热管冷板在最高工作温度下预估寿命至少为 6 627 h, 可满足使用寿命要求。研究工作可为机载热管冷板的选择与设计提供参考依据。

关键词: 热管冷板; 温度循环试验; 传热性能; 寿命预估

中图分类号: TK124 文章编号: 1005-9830(2014)01-0111-07

Experimental study on heat transfer performance and life prediction of heat pipe cold plate on board

Lv Qian¹, Hu Jiayu², Liu Juan², Cheng Danfeng²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China; 2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to investigate the applicability of heat pipe cold plate under airborne environmental conditions, a temperature cycle test program is proposed to study the nine kinds of different heat pipe cold plates. According to the results tested by infrared thermal imager before and after temperature cycle, the performance differences of different heat pipe cold plates are analyzed. Based on the test results, the life time is predicted by the Arrhenius equation. The results show that the heat transfer characteristics of vapor chamber is deteriorated due to non-condensable gas generated before and after temperature cycle, but the performance of ordinary copper-water heat pipe cold plate and micro-heat pipe arrays have no change and they have better reliability; the estimated life time of unchanged heat pipe cold plates can be at least 6 627 hours at the highest operating tempera-

收稿日期: 2013-09-05 修回日期: 2013-11-03

作者简介: 吕倩(1975-), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 电子设备热设计, E-mail: lvqian1975@163.com。

引文格式: 吕倩, 胡家渝, 刘娟, 等. 机载热管冷板传热性能与寿命预估试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(1): 111-117.

投稿网址: <http://njlgdxxb.paperonce.org>

ture meeting the life requirements. The research can provide some foundation for the selection and design of the heat pipe cold plate used for cooling the airborne electronic equipment.

Key words: heat pipe cold plates; temperature cycle test; heat transfer characteristics; estimated life time

随着微电子技术高频化、集成化、高功率的飞速发展,机载电子设备呈现出高性能、小型化的趋势。作为电子设备核心的芯片,其工作的主频越来越快,消耗的功率越来越大,发出的热量也越来越多,散热问题成为制约其进一步发展的重要因素^[1-3]。如何解决电子设备散热问题及改善热量传导途径,是系统热设计的关键,也是机载设备可靠、稳定工作的保证。热管冷却技术因具有极高的导热性、优良的等温性、良好的环境适应性等优点,且可满足散热装置紧凑可靠、控制灵活等要求,成为解决目前机载电子设备散热的有效途径^[4,5]。热管冷却技术的研究工作已经大量开展,但研究对象仅针对某一特定热管冷板,且研究内容主要为热管冷板充液率、倾斜角度、重力等对其启动性能、传热性能的影响^[6-9],未分析热管冷板在机载高低温交替条件工作时的性能差异与寿命情况。

本文对不同类型及同类型不同配置方式的热管冷板进行温度循环试验研究,在此基础上根据阿雷尼乌斯公式预估其使用寿命,以考察不同热管冷板在温度循环下其传热性能、环境适应性等方面的差异,以期对机载电子设备冷却用热管冷板方案提供一定参考。

1 热管冷板结构

目前热管冷板的类型主要为普通热管冷板、微热管阵列冷板和均温板。普通热管冷板为普通铜水热管嵌入构成,结构材料主要为无氧铜,内部填充工作介质为水;微热管阵列冷板外形为薄板,内部并列多根独立运行的微细热管阵列,结构材料为纯铝,内部填充相对工作温度较低的有机溶剂氨水;均温板为内壁具有微结构的真空腔体,主要材料为铝 6061 和氨水。为对比分析不同类型及同类型不同配置方式热管冷板在温度循环前后的传热性能差异并预估寿命,针对上述 3 类热管冷板设计了共 9 种配置方式进行试验。9 种热管冷板样件的几何尺寸均为 120 mm×95 mm×4 mm,其结构如图 1 所示,其中图 1(a)~(d) 为普通铜水热管冷板

的不同嵌入形式,分别为一字排列、十字排列、米字排列和双 U 形排列;图 1(e)~(h) 为微热管阵列冷板的的不同嵌入形式,区别在于微热管阵列的宽度不同与是否带毛细结构;图 1(i) 为均温板。

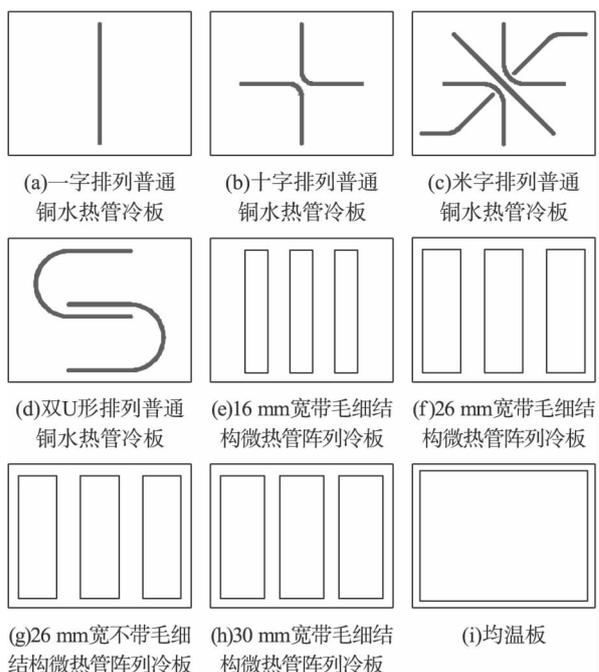


图 1 热管冷板结构示意图

对于机载热管冷板来说,质量是其考虑的一项重要因素,上述 9 种热管冷板的质量如表 1 所示。

表 1 热管冷板试验样件质量

热管编号	质量/g
a	128.3
b	137.0
c	146.9
d	145.3
e	120.8
f	107.4
g	105.3
h	116.3
i	103.0

由表 1 可知 9 种热管冷板样件中,铝均温板最轻,米字排列普通铜水热管冷板最重,微热管阵列冷板和均温板基本比普通铜水热管冷板轻约

1/4 ~ 1/5 ,且普通热管冷板质量均高于纯铝板。若仅考虑质量因素,铝均温板与 26 mm 宽微热管阵列冷板为较好的选择。但对于机载高可靠性要求,需判断热管冷板在机载条件下的综合性能。

2 试验方案及装置

温度循环试验旨在分析温度循环试验前后,热管冷板的传热性能是否发生显著变化,判断工作介质是否与结构材料发生反应产生不凝性气体而影响热管的传热能力,同时可用来预估热管冷板的使用寿命。

温度循环试验主要分 3 个步骤:(1) 在 20 ℃ 供液温度、25 W 热耗加载下,测试热管冷板样件的热点温度及红外云图;(2) 将热管冷板样件置于 -55 ℃ ~ 125 ℃ 循环温度试验箱中(如图 2 所示),模拟高低温工作变化,每个循环周期为 4 h,即高温 125 ℃ 工作 2 h 与低温 -55 ℃ 工作 2 h,将温度升降速率控制在 1 min 以内(如图 3 所示);(3) 高低温循环结束后,按照(1)的测试方法测量一遍热点温度及红外云图,观察其是否发生变化。

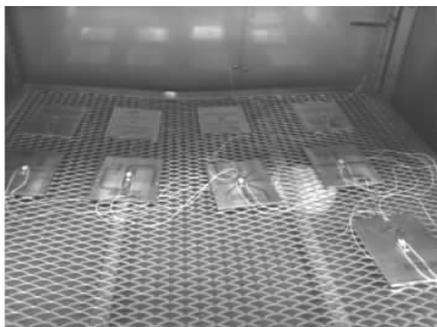


图 2 温度循环试验箱

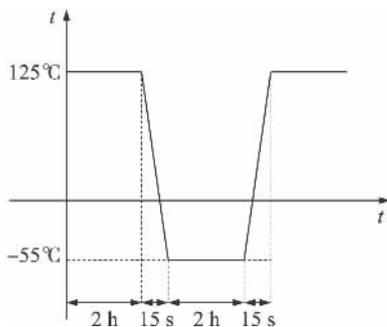


图 3 温度循环试验条件

温度循环试验中步骤(1)和(3)中的测试试验装置由热管冷板、模拟热源器件(发热电阻)、红外热像仪、数据采集仪、热电偶、液冷源、测试夹具等组成,方案原理如图 4 所示。其中,测试夹具主体

为类似小型液冷机箱结构,采用上下两层冷板配合恒温液冷源为测试热管冷板提供一个上下边缘等温的边界;液冷源由 YKK2 冷却循环机提供,设定温度为 20 ℃,冷却液为 65 号冷却液;电子模块发热由相同的发热电阻(25 Ω 微带电阻)模拟,发热电阻使用银浆粘合在热管冷板同一中心位置。

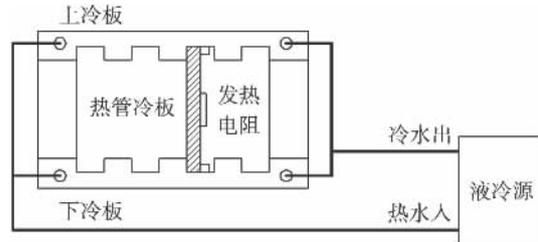
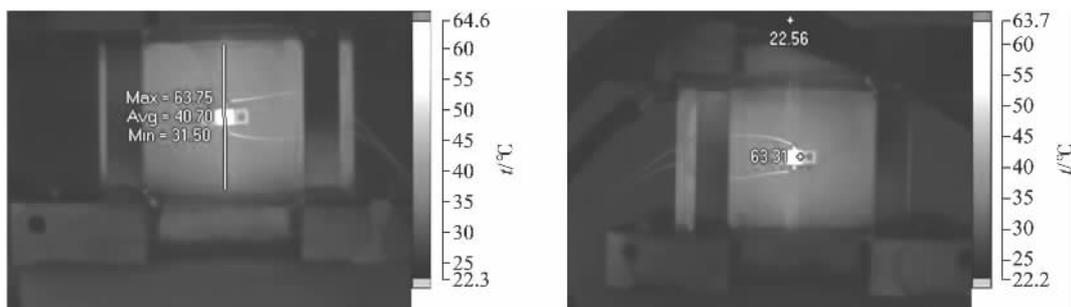


图 4 温度循环试验前后测试方案原理

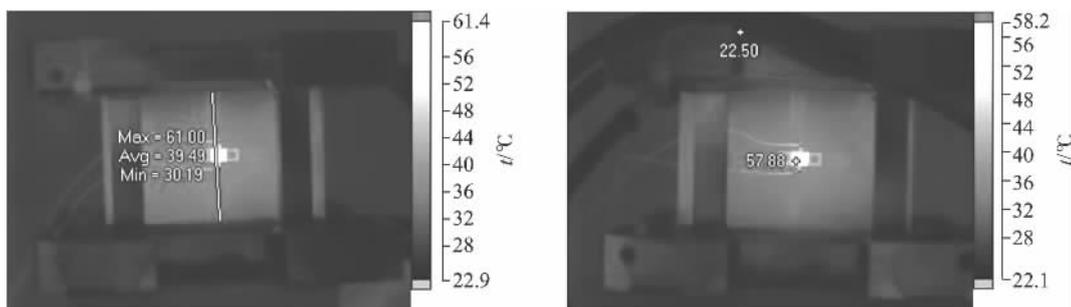
3 试验结果与分析

温度循环试验对热管冷板样件进行 68 个温度循环(共 272 h),循环前后红外热像仪测得各热管冷板的温度分布如图 5(a) ~ (i) 所示。其中,温度循环前即试验步骤(1)与循环后即步骤(3)测试的环境温度分别为 25 ℃ 和 22 ℃,热管冷板的发射率均校准为 0.95。

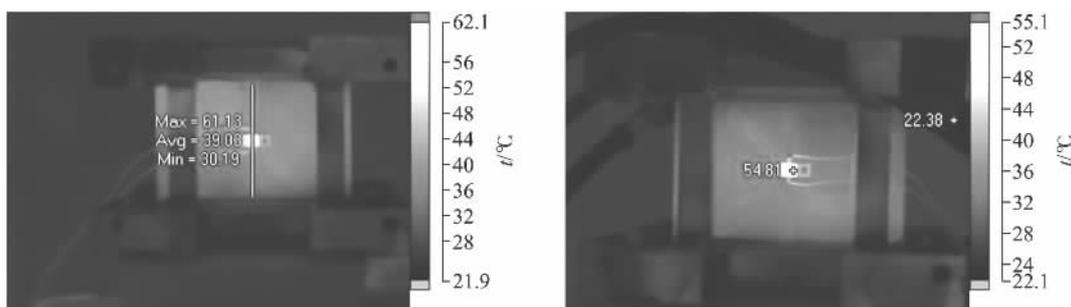
由图 5(a) ~ (i) 可知,温度循环前后 9 种热管冷板中热点温度变化最大的为 26 mm 宽不带毛细结构微热管阵列冷板,其热点温度由 83.75 ℃ 变为 100.00 ℃,考虑 3 ℃ 的环境温度影响,温差仍超过 10 ℃,该现象的产生可能是由于粘合微热管阵列冷板的导热胶失效所致。此外,均温板的热点温度在循环前后也发生显著变化,分别为 77.50 ℃ 和 84.69 ℃,相差 7.19 ℃,考虑环境温度的固有误差后仍相差较大,且均温板略微有膨胀现象发生,分析原因在于其内部产生少许不凝性气体,导致传热恶化,升温明显增加。均温板因质量轻而在机载应用中占据优势,故应加强生产工艺控制以提升其对机载条件的适应性。普通铜水热管冷板与其他微热管阵列冷板在温度循环前后热点温度变化不大,两次测量的温度考虑 3 ℃ 固有误差后低于 2 ℃ 可认为是测量误差,而非循环后热管冷板性能发生变化引起,因此普通铜水热管冷板与微热管阵列冷板在温度循环前后的传热性能均未发生改变。温度循环前后测得普通铜水热管冷板的热点温度均低于微热管阵列冷板的热点温度,由此可知普通铜水热管冷板在温度循环条件下的可靠性最高。



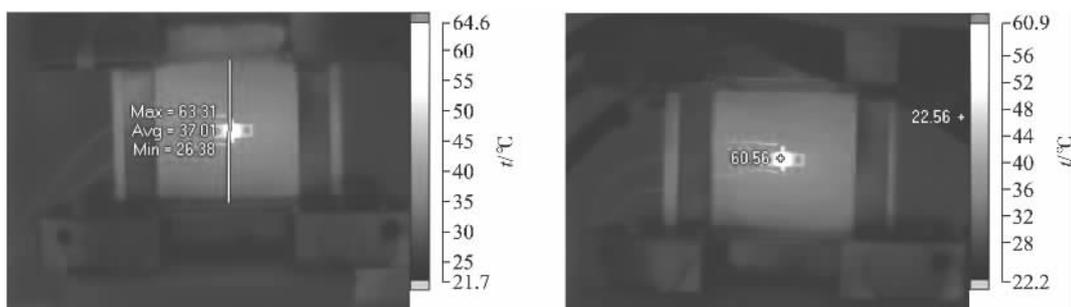
(a)一字排列普通铜水热管冷板



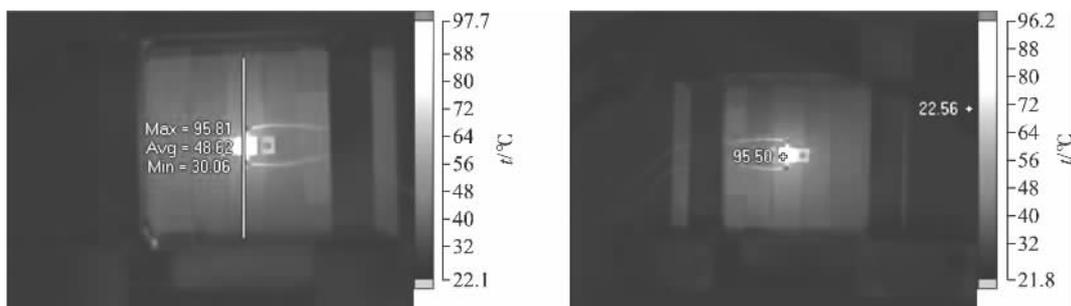
(b)十字排列普通铜水热管冷板



(c)米字排列普通铜水热管冷板



(d)双U形排列普通铜水热管冷板



(e)16 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板

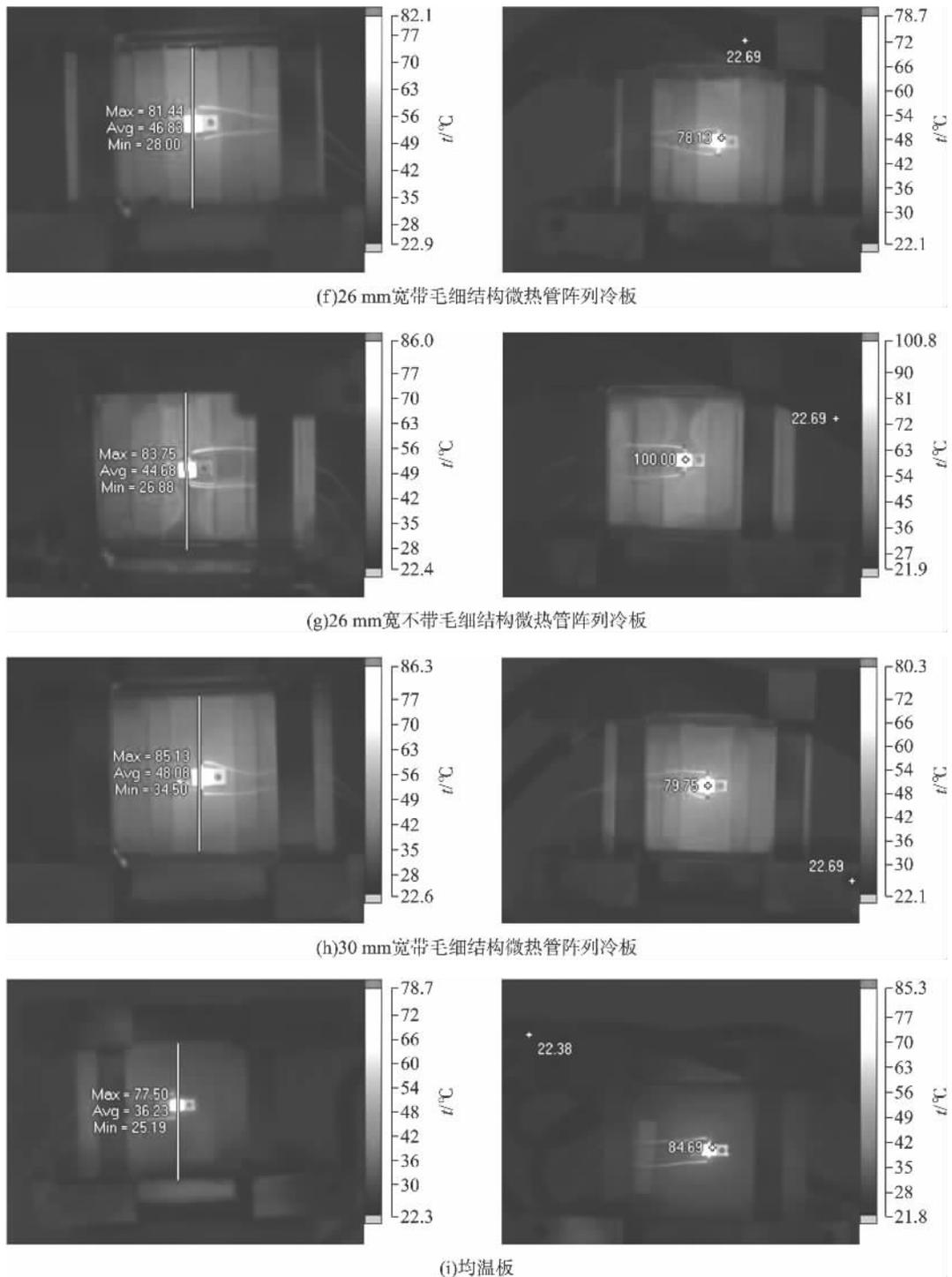


图 5 温度循环试验前(左)后(右)测试结果

4 热管冷板寿命预估

热管冷板寿命即为热管冷板的相容性问题。热管冷板的相容性是指在预期的设计寿命内,结构材料与内部工作介质不发生显著的化学反应或物理变化,或有变化但不足以影响其工作性能。

相容性在热管冷板的应用中具有重要意义,只有长期相容性良好,才能保证热管冷板稳定的传热性能、长期的工作寿命以及广泛的工业应用。总结影响热管冷板相容性的因素主要有 3 方面:(1) 产生不凝性气体;(2) 工作液体物性恶化;(3) 管壳材料的腐蚀、溶解。目前用于热管冷板的主要材料与工作介质的相容性如表 2 所示^[10]。

表 2 壳体材料与工作介质相容性

壳体材料	工作介质					
	水	丙酮	氨	甲醇	Dow-A	Dow-E
铜	C	C	X	C	C	C
铝	GNC	C	C	X	UK	X
不锈钢	GNT	C	C	GNT	C	C
镍	C	C	C	C	C	C

注: C 表示相容; GNC 表示产生气体; GNT 表示有氧化存在的情况下产生气体; X 表示不相容; UK 表示未知。

由表 2 可知, 研究对象普通铜水热管冷板、微热管阵列冷板与均温板均为相容性材料。

热管冷板在常温下通常要求有 10 年以上的寿命, 开展实际的寿命试验研究不现实, 一般采用加速寿命试验方法来预估寿命。影响热管冷板寿命的基本因素是化学反应, 普遍采用阿雷尼乌斯 (Arrhenius) 公式预计^[11], 即提高工作环境温度到 T_2 , 通过 Arrhenius 公式推测其在温度 T_1 的寿命。

$$EH_{T_1} = H \cdot T_2 \left(2e^{\frac{\delta T}{10}} \right) \quad (1)$$

式中: EH_{T_1} 为在温度 T_1 下的等效工作寿命, $H \cdot T_2$ 为在温度 T_2 (加速试验高温) 时的工作寿命, δT 为 T_1 与 T_2 的温差。

由温度循环试验结果可知, 9 种热管冷板在温度试验箱中经历高温 125 °C 2 h 与低温 -55 °C 2 h 交替循环 272 h 后, 除铝均温板因工艺问题发生传热恶化现象外, 其他热管冷板传热性能均未改变, 可用该结果来推测热管冷板是否满足寿命要求。

当实际工作环境温度为 70 °C 时, 电子元器件的安装面温度要求不高于 100 °C, 为保守估计热管冷板的使用寿命, 可假设其实际工作温度 T_1 为可达到的最高温度 100 °C, 加速试验高温 T_2 即为高温 125 °C。由于除铝均温板外的热管冷板在 272 h 温度循环后传热性能均未发生改变, 故可认为热管冷板在温度 125 °C 的等效工作寿命至少为 272 h。将数据代入式 (1), 即可计算得到热管冷板在 100 °C 温度下的工作寿命至少为 6 627 h。考虑到机载设备工作时间并非全年全天候工作, 且安装面温度并非全处于 100 °C, 若每年总的工作时间为 500 h, 则其寿命为 13 年, 能够满足寿命要求。

5 结论

本文对不同类型及同类型不同配置方式的 9

种热管冷板开展了温度循环试验研究, 考察了不同热管冷板在温度循环机载条件下的传热性能与环境适应性差异, 并根据试验结果对热管冷板寿命进行了预估, 得出以下结论:

(1) 均温板热点温度在温度循环前后发生显著变化, 且因内部产生少许不凝性气体而发生略微膨胀, 传热性能恶化, 但其质量轻, 若改善工艺则更适用于机载设备冷却。

(2) 普通铜水热管冷板与微热管阵列冷板在温度循环前后热点温度变化较小, 传热性能可认为未发生改变, 且普通铜水热管冷板的可靠性相对较高。

(3) 利用温度循环试验与阿雷尼乌斯公式预估除铝均温板外的热管冷板在最高工作温度下的寿命至少为 6 627 h, 可满足热管冷板使用寿命要求。

参考文献:

- [1] 赵忠超, 叶锐, 陈育平, 等. 高热流密度电子器件冷却用热管散热器传热性能的红外成像研究 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2012, 26(1): 40-44.
Zhao Zhongchao, Ye Rui, Chen Yuping, et al. Research on the heat transfer performance of heat pipe radiator in cooling electronic apparatus with high heat flux by infrared imaging [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(1): 40-44.
- [2] Garimella S V. Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics [J]. Microelectronics J 2006(37): 1165-1185.
- [3] Possamai F C, Setter I, Vasiliev L L. Miniature heat pipes as compressor cooling devices [J]. Applied Thermal Engineering 2009(29): 3218-3223.
- [4] 张亚平, 余小玲, 冯全科. 热管热性能的实验研究 [J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(2): 187-195.
Zhang Yaping, Yu Xiaoling, Feng Quanke. Experiment of heat pipe thermal performance [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2): 187-195.
- [5] 余莉, 韩玉, 曹业玲, 等. 电子设备散热用平板式热管的实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 628-631.
Yu Li, Han Yu, Cao Yeling, et al. Experiment investigation on flat-plate heat pipe in cooling electronic e-

- equipment [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics 2008 40(5):628-631.
- [6] 田金颖,牛建会. 新型热管电子器件散热器的实验研究和数值模拟 [J]. 制冷 2010 29(2):9-14.
Tian Jinying Niu Jianhui. Experimental study and numerical simulation on a novel heat pipe radiator for electronic element [J]. Refrigeration 2010 29(2):9-14.
- [7] Nikkanen K, Lu C G, Kawaji M. Effects of working fluid fill ratio and orientation on looped and unlooped pulsating heat pipes [A]. Heat Transfer [C]. San Francisco: ASME 2005:593-398.
- [8] Jiao A J, Ma H B, Crister J K. Evaporation heat transfer characteristic of a grooved heat pipe with micro-trapezoidal grooves [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2007(50):2905-2911.
- [9] Wang Shuangfeng, Chen Jinjian, Hu Yanxin, et al. Effect of evaporation section and condensation section length on thermal performance of flat plate heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering 2011 31(14/15):2367-2373.
- [10] 马永昌 张宽峰. 热管技术的原理、应用与发展 [J]. 变频器世界 2009(7):70-75.
Ma Yongchang, Zhang Xianfeng. Principle, application and development of heat pipe technology [J]. The World of Inverters 2009(7):70-75.
- [11] 陶汉中. 太阳能热水系统用热管的寿命试验方法 [A]. 第十二届全国热管会议论文集 [C]. 深圳: 中国工程热物理学会 2010:150-154.
- (上接第 110 页)
- [5] Guzhavina D V, Gulin E P. Experimental studies of low-frequency reverberation on the continental slope in the northwestern pacific ocean [J]. Acoustical Physics, 2001 47(4):398-404.
- [6] Vadov R A. Long-range sound propagation in the shallow-water part of the sea of okhotsk [J]. Acoustical Physics 2002 48(2):142-146.
- [7] Vadov R A. Long-range sound propagation in the north-eastern atlantic [J]. Acoustical Physics 2005 51(6):629-637.
- [8] Vadov R A. Long-range sound propagation in the north-western region of the pacific ocean [J]. Acoustical Physics 2006 52(4):377-391.
- [9] Vadov R A. Time structure of bistatic reverberation in the long-range propagation of explosion-generated signals [J]. Acoustical Physics 2007 53(2):172-180.
- [10] Sheng Zhenxin, Liu Rongzhong, Guo Rui. Reverberation generated by sequential underwater explosions [J]. Acoustical Physics 2012 58(2):236-242.