

· 机械电子工程 ·

热管冷板常温与高低温性能试验研究

吕倩

(中国西南电子技术研究所 成都 610036)

【摘要】为了研究热管冷板在机载条件下的传热性能与环境适应性,针对不同类型及同类型不同配置方式的9种热管冷板,搭建了常温与高低温试验台,对不同热管冷板的常温传热性能与高低温启动性能及稳态性能进行试验研究。结果表明:常温试验中,双U形普通铜水热管冷板的传热性能最佳,均温板次之;高低温试验中,双U形普通铜水热管冷板的启动时间与稳态温度均低于微热管阵列冷板,但受环境温度影响最大,带毛细结构微热管阵列冷板的启动时间与稳态温度均低于不带毛细结构微热管阵列冷板,且受环境温度影响最小。研究结论可为机载电子设备冷却热管冷板的选择与设计提供依据。

关键词 热管冷板; 传热性能; 高低温试验; 常温试验; 稳态性能; 启动性能

中图分类号 TK124

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.03.026

Experimental Study on the Performance of Heat Pipe Cold Plate under Normal and High-Low Temperature

LÜ Qian

(Southwest China Institute of Electronic Technology Chengdu 610036)

Abstract Heat pipe cold plate is an effective way to cool down electronic equipment. In order to study the heat transfer characteristics and service life of heat pipe cold plate under airborne conditions, nine kinds of different heat pipe cold plates are designed and manufactured, then normal temperature test-bed is developed to investigate the heat transfer characteristics at normal temperature, and high and low temperatures test-bed is built to study the start-up performance and stable-state performance at high and low temperature. The results of normal temperature tests show that the double-U ordinary copper-water heat pipe cold plate has the best heat transform characteristics and the vapor chamber followed. The high and low temperature tests show that both the start-up time and stable temperature of double-U ordinary copper-water heat pipe cold plate are lower than micro-heat pipe arrays, but most affected by temperature, and the same performance of micro-heat pipe arrays with capillary structure are better than that without capillary structure, and least affected by temperature. The research work 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 plate; heat transfer characteristics; high and low temperature test; normal temperature test; stable-state performance; start-up performance

随着航空工业与电子集成技术的快速发展,机载电子设备呈现多功能、高密度封装、高速工作等特点,由此带来电子元件的发热量不断提高,体积要求不断减小。高热流密度元件的散热问题已经成为影响电子设备设计的关键技术问题之一^[1-4],也是机载设备在特定环境条件下能够可靠、稳定工作的保证。在四代战机中,高密度航空电子设备大量使用商业现货(commercial off-the-shelf, COTS)器件,为满足其高可靠性要求采用可靠性高的液冷技术,但仍无法避免泄漏、堵塞等立即引起系统过热导致热沉失效的情况。在一些现场可更换模块(line

replaceable module, LRM)模块化液冷机箱中,可能出现机架冷板表面温度与模块温度相差超过30℃~40℃的现象,说明即使有很好的热沉,若模块内扩散热阻解决不好,系统整体的散热仍存在问题。

考虑到机载条件的复杂多变性,热管技术极高的导热性、优良的等温性、热流密度可变性、流动方向可逆性、恒温性、良好的环境适应性等优点,采用热管作为液冷机架冷板与器件间的热通路成为有效的办法^[5]。热管技术的研究已经开展较多,但多集中于风速、充液率、倾角等对热管或热管冷板性能的影响^[6-11],未系统地开展不同热管冷板在机载

收稿日期: 2013-09-03; 修回日期: 2014-03-06

作者简介: 吕倩(1975-),女,高级工程师,主要从事电子设备热设计方面的研究。

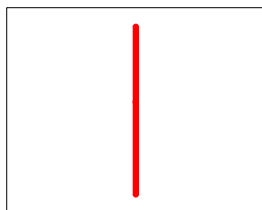
条件下性能差异的研究。

本文设计了不同类型及同类型不同配置方式的热管冷板, 进行常温与高低温条件下的试验研究, 以考察不同热管冷板在常温及高低温机载条件下的传热、环境适应性等方面的性能差异, 以期为机载电子设备冷却方案提供一定的参考。

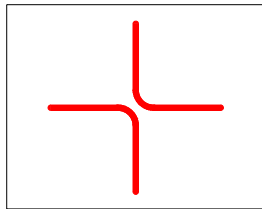
1 热管冷板结构

目前, 用于电子设备冷却的热管冷板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冷板中, 结构材料主要为无氧铜, 填充工作介质为水; 微热管阵列冷板是外形为薄板、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。

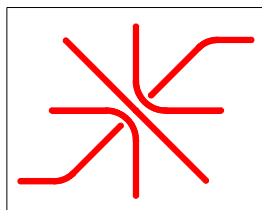
为了对比分析不同类型及同类型不同配置方式的热管冷板性能, 针对上述3类热管冷板设计了9种配置方式进行试验。9种冷板的几何尺寸均为120 mm×95 mm×4 mm, 结构如图1所示, 其中图1a~图1d为普通铜水热管冷板的不同嵌入形式, 分别为一字排列、十字排列、米字排列和双U形排列; 图1e~图1h为微热管阵列冷板的不同嵌入形式, 区别在于微热管阵列的宽度不同与热管是否带毛细结构; 图1i为均温板。此外, 试验还将测量4 mm厚的铝板在相同条件下的传热情况, 以其温度作为参考基准。



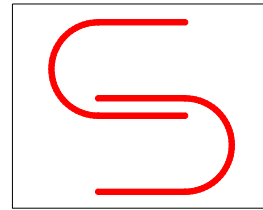
a. 一字排列普通铜水热管冷板



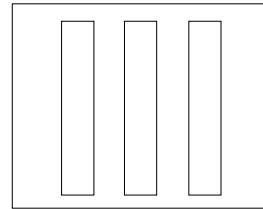
b. 十字排列普通铜水热管冷板



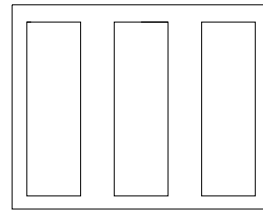
c. 米字排列普通铜水热管冷板



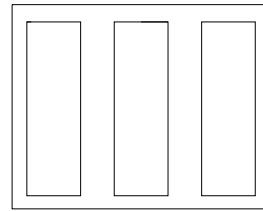
d. 双U形排列普通铜水热管冷板



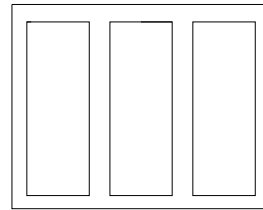
e. 16 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板



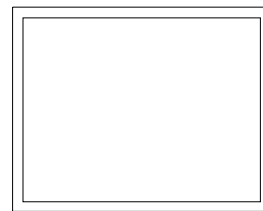
f. 26 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板



g. 26 mm宽不带毛细结构微热管阵列冷板



h. 30 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板



i. 均温板

图1 热管冷板结构示意图

2 试验方案及装置

2.1 常温试验

常温试验旨在通过测量热管冷板上的发热电阻热点温度与特征点温度来衡量其基本传热性能, 热阻大、最大传热量小其性能就差, 热点温度和特征点温度相对就高。

常温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、铂电阻、液冷源等组成,其方案原理如图2所示。液冷源由YKK2冷却循环机提供,设定温度为 20°C ,冷却液为65号冷却液;电子模块发热由位于冷板表面中心的发热电阻($25\ \Omega$ 微带电阻)模拟;采用铂电阻Pt100及

红外热像仪测量各热管冷板的温度,考虑到两线制测量方式的误差偏高达 3°C 以上,测量时均采用四线制以消除热电阻测量中导线的测量误差。铂电阻Pt100用银浆粘结在冷板上,银浆干后使用硅橡胶对各器件及引线进行加固,布置位置如图3所示。其中,Pt100-3用于试验前校准红外热像仪的发射率。

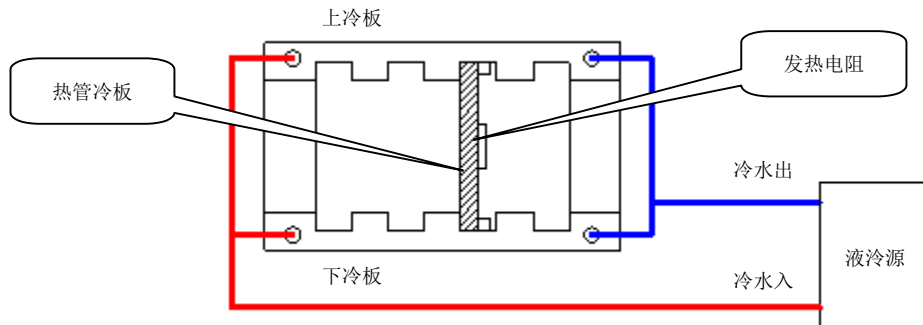


图2 常温试验方案原理

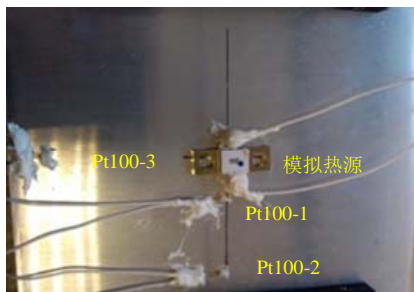


图3 温度测点布置

2.2 高低温试验

高低温试验的主要目的是测试低温与高温条件下热管冷板的启动性能与稳态性能,以考察热管冷凝(即完全冻结)与高温条件下的启动时间、稳态温度与常温条件下的差别,是衡量热管冷板能否用于某

些高热流密度器件,且不出现瞬间热点温度过热现象的关键。

高低温试验装置的主体部分与常温实验装置相同,不同之处是将主体部分置于温度试验箱中,且不需要液冷源,其试验原理如图4所示。当温度试验箱内稳定到低温、常温或高温时,打开电源,通过数据采集仪测量热点温度随时间变化的数据,以比较不同环境条件下热管冷板的性能差异。由于需要保证热管的工作温度为所设定的温度,在外部水冷条件下,冷板温度基本不与环境温度相关,因此,对试验机架采取自然对流传导方式进行试验,而不需要液冷源供循环冷却液。

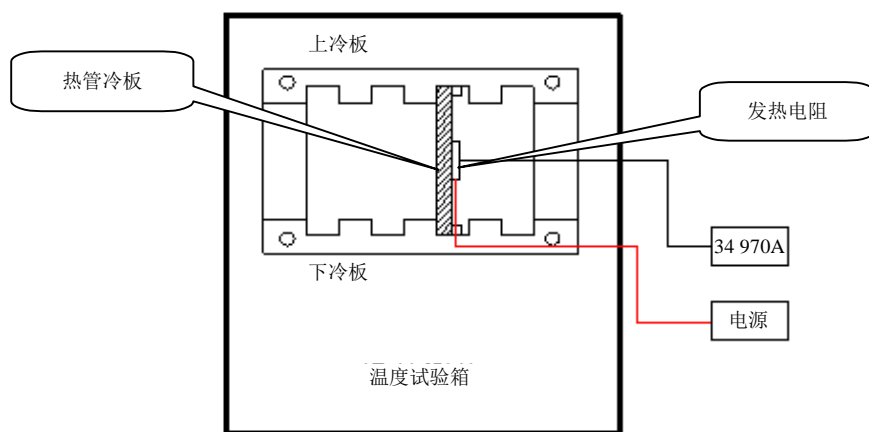


图4 高低温试验方案原理

3 试验结果及分析

3.1 常温试验结果及分析

常温试验的环境温度为 23°C ,加热功率为 $35\ \text{W}$ 。

在该条件下,不同热管冷板安装发热电阻侧的热点、特征点Pt100-1和Pt100-2的温度测量结果,以及背面未安装发热电阻侧红外热像仪测得的最高温度如表1所示。

分析表1试验数据可知, 常温试验研究的10种热管冷板中, 同等条件下双U形普通铜水热管冷板的热点温度62.13℃最低, 因此传热性能最好。其次是均温板, 其他形式热管冷板的传热性能较差, 甚至不如铝板。分析其原因在于热管的传热性能与其长度、折弯半径、折弯角度、倾斜角度、打扁量等因素有关, 且不同因素对热管性能的影响规律不同。根据热管性能检测试验可知, 对于上述热管冷板, 热管长度是影响其传热性能最主要的因素, 长度越长热管的热超导特性越明显, 传热性能越好; 若长度减短, 则需提高充液量才能保证其与原热管的启动温度和最大传热量相同。

表1 常温性能测试结果

热管冷板类型		热点 /℃	Pt100-1 /℃	Pt100-2 /℃	背面最高温度/℃
普通铜水热管冷板	一字排列	64.81	44.75	38.81	40.50
	十字排列	65.19	42.06	36.13	41.31
	米字排列	95.56	39.63	33.19	43.31
	双U形排列	62.13	39.63	35.69	41.50
微热管阵列冷板	16 mm宽带毛细结构	102.50	63.25	39.88	47.56
	26 mm宽带毛细结构	77.31	46.81	36.31	45.56
	26 mm宽不带毛细结构	89.63	51.00	36.88	51.19
微热管阵列冷板	16 mm宽带毛细结构(背面安装)	78.38	42.50	29.69	44.75
	26 mm宽带毛细结构(背面安装)	85.44	45.81	34.25	47.13
	30 mm宽带毛细结构(背面安装)	77.06	44.13	32.81	45.75
均温板	66.25	33.00	30.88	33.00	
铝板	75.6	42.06	31.50	47.63	

注: 热管冷板嵌有热管的一面为正面, 普通铜水热管冷板的发热电阻均安装于正面, 微热管阵列冷板对发热电阻正面安装与背面安装进行对比。

双U形普通铜水热管冷板因热管长度最长而传热性能最好, 其他形式热管冷板的热管长度较短而导致传热性能低于铝板。在LRM模块中使用嵌入热管时, 应适当增加热管长度来提高传热能力, 热管长度应不低于100 mm。此外, 对于微热管阵列冷板, 带毛细结构微热管阵列冷板传热性能优于不带毛细结构微热管阵列冷板, 且微热管阵列宽度越大传热性能越好, 这是由于毛细结构增大了热管阵列冷板的传热面积。

3.2 高低温试验结果及分析

为了研究热管冷板在机载高低温条件下的性能差异, 选择常温性能最佳的双U形普通铜水热管冷板与性能较好且重量较轻的26 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板, 进行高低温性能试验, 同时为考察有无毛细结构对微热管阵列冷板性能的影响, 选择

26 mm宽不带毛细结构微热管阵列冷板进行对比。高温、常温、低温分别设置为+70℃、+25℃与-55℃, 3种热管在不同温度下的启动性能与稳态性能如图5~图7所示。

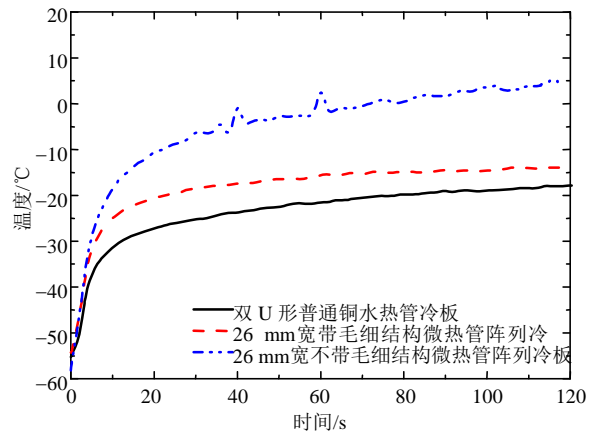


图5 3种热管冷板低温性能对比

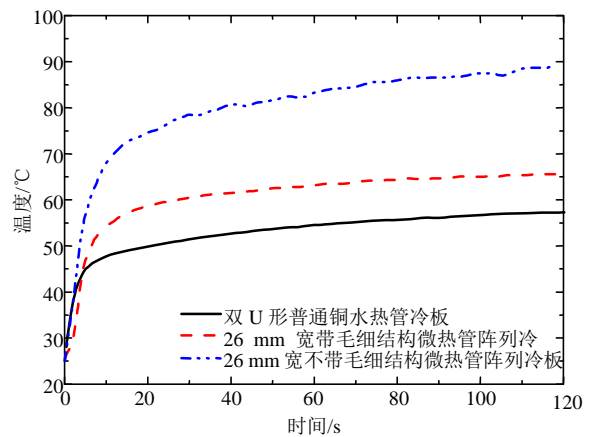


图6 3种热管冷板常温性能对比

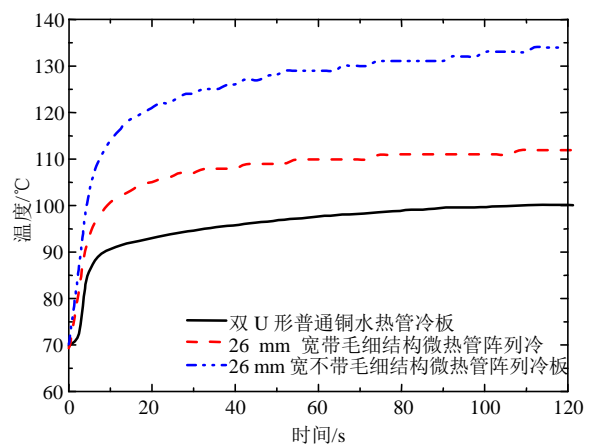


图7 3种热管冷板高温性能对比

由图5~图7可知, 低温、常温与高温条件下, 双U形普通铜水热管冷板的启动时间均短于其他两种微热管阵列冷板的启动时间, 且稳定后的工作温度比26 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板的分别低约5℃、8℃与10℃。比较26 mm宽带毛细结构与不

带毛细结构的微热管阵列冷板,在不同温度下的启动性能可知,带毛细结构微热管阵列冷板的启动时间比不带毛细结构微热管阵列冷板短,且稳定后的工作温度在低温条件下比不带毛细结构微热管阵列冷板低 15°C 左右,在常温与高温条件下低 20°C 左右。由此可知,在高低温机载条件下,双U形普通铜水热管冷板的启动性能与稳态性能比微热管阵列冷板的好,带毛细结构微热管阵列冷板的启动性能与稳态性能优于不带毛细结构微热管阵列冷板。

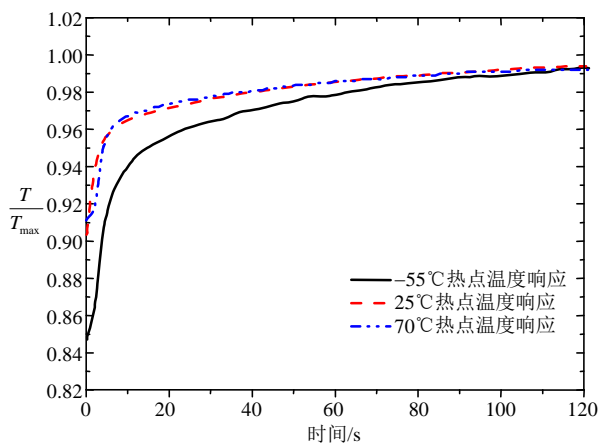


图8 双U形普通铜水热管冷板高低温启动性能对比

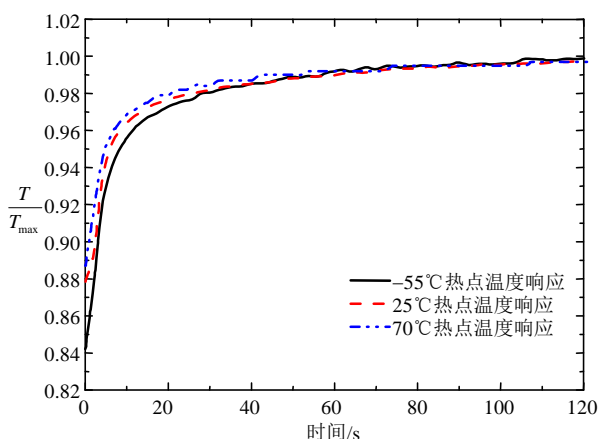


图9 26 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板高低温启动性能对比

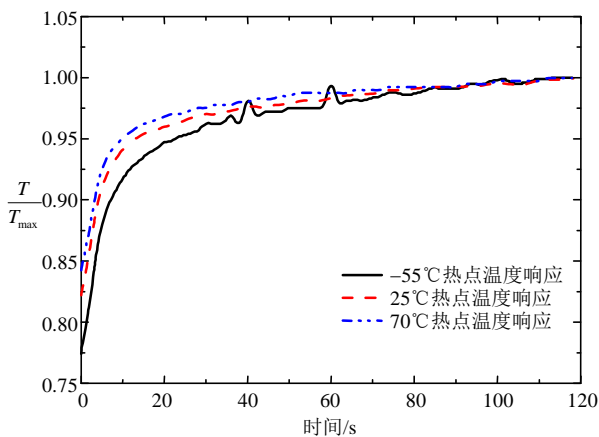


图10 26 mm宽不带毛细结构微热管阵列冷板高低温启动性能对比

为了更清楚地表明不同环境条件下同类型热管冷板启动性能的差异,对数据采集仪采集的随时间变化的温度进行归一化处理,即 T/T_{\max} (变化过程中的温度值/稳定的最高温度值),3种热管冷板试验过程中热点温度归一化处理后如图8~图10所示。

由图8~图10可知,双U形普通铜水热管冷板在低温下,启动速度明显低于常温与高温下的启动速度,常温与高温状态的启动速度相差无几;26 mm宽带毛细结构微热管阵列冷板在低温、常温与高温下,启动速度均差别不大;26 mm宽不带毛细结构微热管阵列冷板在低温下,启动速度低于常温与高温下的启动速度,且存在几处温度波动,常温与高温下的启动速度相差不大。综合分析可知,双U形普通铜水热管冷板受环境温度的影响大于微热管阵列冷板,带毛细结构微热管阵列冷板受环境温度的影响最小,3种热管冷板在常温与高温下的启动性能相差不大。

4 结论

本文对不同类型及同类型不同配置方式的热管冷板进行了常温与高低温试验研究,以考察不同热管冷板在常温与高低温状态下的性能差异与环境适应性,试验得出以下结论:

1) 常温条件下,双U形普通铜水热管冷板的传热性能最佳,其次是均温板,其他形式热管冷板的传热性能较差甚至不如铝板,性能差异产生的主要原因在于热管长度的不同,在LRM模块中使用嵌入热管时,热管的长度应不低于100 mm。

2) 带毛细结构微热管阵列冷板传热性能优于不带毛细结构微热管阵列冷板,且微热管阵列宽度越大传热性能越好。

3) 高低温条件下,双U形普通铜水热管冷板的启动时间与稳定工作温度均低于两种26 mm宽微热管阵列冷板,带毛细结构微热管阵列冷板的启动时间与稳定工作温度均低于不带毛细结构微热管阵列。

4) 双U形普通铜水热管冷板受环境温度的影响最大,带毛细结构微热管阵列冷板受环境温度的影响最小,3种热管冷板在常温与高温下的启动性能相差不大。

参考文献

- [1] 张娅妮,陈菲尔,田沅.机载电子设备冷却散热技术的发展[J].航空计算技术,2012,42(4):113-116.
ZHANG Ya-ni, CHEN Fei-er, TIAN Feng. Development on heat dissipation technology of airborne electronic

- equipment[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 42(4): 113-116.
- [2] GARIMELLA S V. Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics[J]. Microelectronics J, 2006(37): 1165-1185.
- [3] 寇志海, 白敏丽, 杨洪武, 等. 一种微槽群平板热管传热性能的数值和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(35): 92-100.
KOU Zhi-hai, BAI Min-li, YANG Hong-wu, et al. Numerical and experiment investigation on flat heat pipes with integral micro-grooved wicks[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(35): 92-100.
- [4] 马哲树, 姚寿广, 明晓. 新型热管冷板传热性能的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 169-173.
MA Zhe-shu, YAO Shou-guang, MING Xiao. Experiment study of heat transfer performance on newly-designed heat pipe cold plate equipment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautic & Astronautics, 2004, 36(2): 169-173.
- [5] 赵晓军, 余莉. 热管的电子设备冷却技术[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(6): 19-23.
ZHAO Xiao-jun, YU Li. Cooling technology of the electronic equipment in heat pipe[J]. World SCI-TECH R&D, 2007, 29(6): 19-23.
- [6] 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 Ye-ling, et al. Experiment investigation on flat-plate heat pipe in cooling electronic equipment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautic & Astronautics, 2008, 40(5): 628-631.
- [7] NIKKANEN K, LU C G, KAWAJI M. Effects of working fluid, fill ratio and orientation on looped and unlooped pulsating heat pipes[C]//Heat Transfer. 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] 蒋朝勇, 夏侯国伟. 新型微型平板热管的传热性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2009, 6(1): 65-67.
JIANG Chao-yong, XIAHOU Guo-wei. The thermal performance of a new-style miniature flat heat pipes[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 6(1): 65-67.
- [10] 赵耀华, 王宏燕, 刁彦华, 等. 平板微热管阵列及其传热特性[J]. 化工学报, 2011, 62(2): 336-343.
ZHAO Yao-hua, WANG Hong-yan, DIAO Yan-hua, et al. Heat transfer characteristics of flat micro-heat pipe array[J]. CIESC Journal, 2011, 62(2): 336-343.
- [11] 莫冬传, 吕树申, 金积德. 高热流密度均温板的传热特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 317-319.
MO Dong-chuan, LÜ Shu-shen, JIN Ji-de. Experiment study on heat transfer characteristics of high heat flux vapor chamber[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 317-319.

编辑 黄 莘