

机载热管冷板振动与加速度试验研究

吕倩¹ 胡家渝¹ 成丹凤² 刘娟² 蒋彦龙²

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都, 610036; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要: 为了考察机载振动与加速度环境对热管冷板传热性能的影响, 以不同结构形式的普通铜水热管冷板与微热管阵列冷板为研究对象, 搭建振动与加速度试验台进行试验。试验结果表明: Z 向振动与加速度较 X 向与 Y 向对热管冷板传热性能的影响大, 但振动的影响基本可以忽略, 微热管阵列冷板受加速度的影响大于双 U 型普通热管冷板; 加速度量级的增加对热管冷板传热性能的影响较小; 双 U 型普通热管冷板在振动与加速度条件下的性能最优。

关键词: 热管冷板; 振动; 加速度; 传热性能; 试验研究

中图分类号: V248.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)02-0316-06

Experimental Study of Airborne Heat Pipe Cold Plate Under Vibration and Acceleration Conditions

Lü Qian¹, Hu Jiayu¹, Cheng Danfeng², Liu Juan², Jiang Yanlong²

(1. The No. 10 Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, 610036, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to investigate the influence on heat transfer performance of heat pipe cold plate under vibration and acceleration conditions, ordinary copper-water heat pipe cold plate and micro-heat pipe array cold plate with different structures are chosen as the research objects, and the vibration test bed and acceleration test bed are established. The experimental results show that the Z-direction vibration and acceleration have the greater impact on heat transfer performance of the heat pipe cold plate than X-direction and Y-direction vibration and acceleration, but the effects of vibration can be ignored, and acceleration has more effect on micro-heat pipe array cold plate than on the double-U copper-water heat pipe cold plate. Also, the acceleration increase has little effect on the heat transfer characteristics of heat pipe cold plate. The double-U heat pipe cold plate has the best performance under vibration and acceleration conditions.

Key words: heat pipe cold plate; vibration; acceleration; heat transfer performance; experimental research

热管是利用介质相变潜热的高效换热元件, 对环境有较高的适应性, 因此广泛应用于航空航天、计算机、电子通信等领域。随着航空技术的发展, 4 代战斗机大量使用高热流密度电子设备, 对电子器件散热技术提出了更高的要求^[1-2]。热管具有较好的传热性、热流方向可逆且体积小等优点, 为解决机载电子设备散热的有效途径^[3]。热管技术的

不断发展, 促使性能更佳的热管冷板成为电子散热领域研究与开发的热点技术。由于机载条件复杂多变, 冷却电子设备用的热管冷板也面临着振动与加速度环境的影响。目前中国国内对热管冷板传热性能的试验研究工作已经开展较多^[4-6], 但主要考虑的是热管冷板自身参数变化对其传热性能的影响, 而未对热管冷板在机载振动与加速度条件下

的传热性能进行研究。

本文搭建振动与加速度试验台对不同类型的热管冷板进行试验研究,以考察振动与加速度环境对热管冷板性能的影响,以期为机载电子设备冷却用热管冷板的设计与选择提供参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验原理及装置

热管冷板分为蒸发端和冷凝端,蒸发端受热时液体蒸发汽化,压力变大,蒸汽流在压力牵引下向冷凝端流动并凝结为液体,同时放出大量热量,最后借助毛细力回到蒸发端,完成一个循环^[7]。目前广泛应用热管冷板来解决电子设备的冷却问题,为研究不同热管冷板在机载振动与加速度条件下的传热性能差异,选择普通热管冷板和微热管阵列冷板为研究对象。普通热管冷板为采用钎焊工艺将铜水管嵌入冷板中,主要结构材料为无氧铜,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热管微细阵列,具有相对较大的表面积且全表面蒸发与凝结,其主要结构材料为铝,工作介质为氨水^[8-10]。

热管冷板试验样品的几何尺寸为 120 mm × 95 mm × 4 mm,其中普通热管冷板包括双 U 型与十字型嵌入方式(图 1);微热管阵列冷板包括 26 mm 宽带毛细结构微热管阵列与 26 mm 宽不带毛细结构微热管阵列(图 2),两者在外观上无差别。

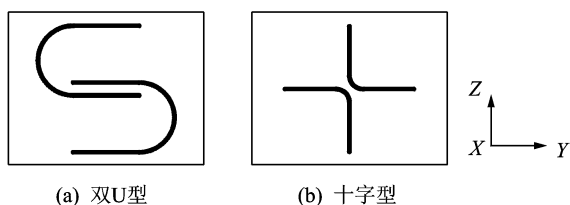


图 1 普通热管冷板结构示意图

Fig. 1 Structure of normal heat pipe cold plate

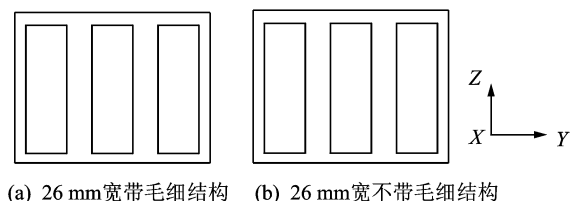


图 2 微热管阵列冷板结构示意图

Fig. 2 Structure of micro-heat pipe array cold plate

1.2 振动试验方案

振动试验旨在判别不同热管冷板在不同强度的随机振动条件下传热性能的变化情况,并考察热

管冷板的耐久性及其在振动条件下的疲劳损伤程度,以此对机载电子设备冷却热管冷板的类型与布局进行指导与选择。

振动试验装置主要有热管冷板、模拟热源器件(发热电阻)、液冷源、测试夹具、振动台、动态信号分析仪、加速度传感器、数据采集仪、热电偶、铂电阻等,其方案原理如图 3 所示。热管冷板安装于设计的测试夹具中,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 °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 Ω 微带电阻)模拟,电压加载统一为 20 V。热管冷板吸收的热量由液冷源流经上下冷板的冷水带走,因此蒸发端为热管冷板中心位置,冷凝端为热管冷板上下端^[11]。振动条件对热管冷板性能的影响可通过振动前后热管冷板的特征点温度变化情况来衡量,特征点选为热管冷板中心发热电阻处(测点 A)与发热电阻至边缘的中间位置(测点 B)。其中,测点 A 采用 T 分度热电偶测量发热电阻处的温度,即热点温度;测点 B 采用铂电阻 Pt100 测量,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偶测量中导线的测量误差。本次试验为随机振动试验,振动谱如图 4 所示,其中纵坐标表示功率谱密度(Power spectral density, PSD),点划线表示谱斜率为 +4 dB/倍频程,虚线表示谱斜率为 -6 dB/倍频程。

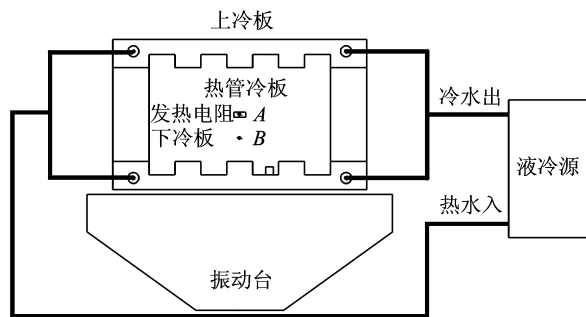


图 3 振动试验方案原理

Fig. 3 Schematic diagram of vibration test

1.3 加速度试验方案

加速度试验旨在考察瞬时加速度条件下,热管冷板传热性能的差异。加速度试验装置的液冷机架夹具与振动试验装置的主体部分相同,热管冷板安装于夹具上下冷板之间。不同之处在于,加速度试验的冷却系统采用热电制冷(Thermoelectric cooler, TEC)模块和齿轮泵进行循环,将从机架冷

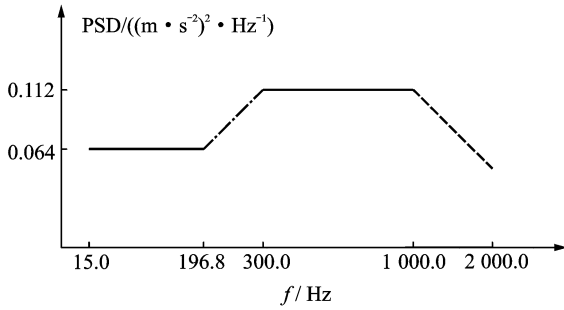


图4 振动谱

Fig. 4 Vibration spectrum

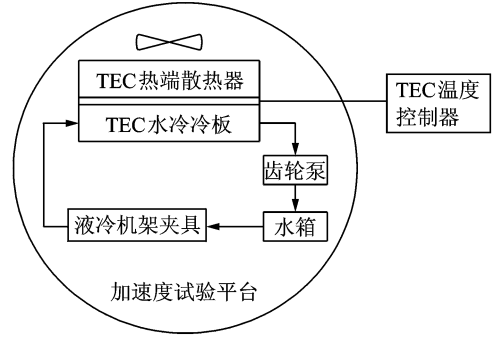


图5 加速度试验方案原理图

Fig. 5 Schematic diagram of acceleration test

板出来的热水通过齿轮泵循环到 TEC 冷却模块中,借助热电制冷功能,将冷却水中的热量抽出来由风扇和散热器带入空气,同时被吸热后的水循环到水箱中。水箱采用聚四氟乙烯制造,绝热性能优良,管路采用硅胶管,配合绝热套管,可防止制冷后的水变热而降低 TEC 控制模块降温能力,冷却后的冷水从水箱再次循环进入冷板夹具中。冷板夹具入口处配置有 Pt100 传感器,传感器信号进入 TEC 控制模块,对入口水温进行控制,从而为机架冷板提供定温热沉。加速度试验方案原理如图 5 所示。

2 试验结果及分析

2.1 振动试验结果及分析

热管冷板在机载条件下会受到来自各个方向的振动,因此振动试验需考察不同方向振动条件对

热管冷板传热性能的影响。图 1 与图 2 对热管冷板的 X,Y,Z 三个方向进行了定义,Z 向因与传热路径同向,被作为试验的重点部分,而 X 向与 Y 向与传热路径垂直,且试验前分析知 X 向与 Y 向振动对传热性能影响较小,故仅选取 X 向进行试验。

机械振动是物体或质点在其平衡位置附近所作的往复运动。振动的强弱用振动量来衡量,振动量可以是振动体的位移、速度或加速度。本试验以加速度大小来表征振动量,表示受试物体在往复运动过程中受到的最大加速度^[12]。为分析振动量级对传热性能的影响,开展量级分别 9.3g 与 12.4g ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$)的振动试验。在试验过程中,两种量级的 Z 向振动试验结果显示量级的增加并未对热管冷板传热性能产生重大影响,因此 X 向仅进行较大量级 12.4g 的振动试验。各个方向的振动试验分别进行 30 min,试验前后测得的数据如表 1 所示。

表 1 振动试验结果

Tab. 1 Results of vibration test

| 热管冷板类型 | Z 向/°C | | | | | | | | X 向/°C | | | |
|---------------|--------|------|------|------|-------|------|------|------|--------|------|------|------|
| | 9.3g | | | | 12.4g | | | | 12.4g | | | |
| | 振动前 | | 振动后 | | 振动前 | | 振动后 | | 振动前 | | 振动后 | |
| | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 双 U 型 | 38.0 | 32.3 | 37.7 | 33.0 | 37.8 | 33.1 | 37.9 | 33.0 | 39.1 | 31.9 | 39.2 | 32.0 |
| 十字型 | 42.0 | 34.7 | 42.2 | 34.7 | 42.1 | 34.8 | 42.2 | 34.7 | 42.1 | 33.3 | 42.0 | 33.2 |
| 26 mm 宽带毛细结构 | 41.0 | 32.3 | 41.1 | 32.4 | 40.8 | 32.2 | 40.9 | 32.3 | 42.2 | 32.1 | 42.1 | 32.0 |
| 26 mm 宽不带毛细结构 | 51.8 | 39.4 | 51.9 | 39.3 | 51.9 | 39.5 | 51.9 | 39.4 | 49.7 | 36.6 | 49.8 | 36.5 |

由表 1 可知,各热管冷板样品在 Z 向振动前后各测点温度相差较小,最大温差仅为 0.7 °C,发生于 9.3g 下的双 U 型普通热管冷板的测点 B 处,说明 Z 向振动对热管冷板传热性能影响较小;X 向振动前后各测点温度差最大为 0.1 °C,验证了试验前的传热性能分析,说明 X 向与 Y 向振动对热管冷板传热性能的影响可忽略不计。分析其主要

原因为:热管冷板内部液态工作介质由蒸发端吸收热量后在冷凝端冷凝,通过毛细力流回蒸发端,振动条件相当于对工作介质施加一个往复的力,Z 向振动因与热管冷板传热路径同向,对回液过程造成干扰而对传热效果的影响最大,振动前后温差最大;X 向与 Y 向振动同传热路径垂直,故对传热效果的影响微小。且各热管冷板样品在振动试验结

束后,均未发生液体外泄、破损等现象,由此说明设计的4种热管冷板在9.3g与12.4g振动条件下均具有较好的机械强度,且耐久性较好,疲劳损伤程度较小。

此外,双U型普通热管冷板在各试验条件下测得各测点的温度均低于其他热管冷板相应测点的温度,其次是26mm宽带毛细结构微热管阵列冷板,可知双U型普通热管冷板的传热性能最优,其次是带毛细结构微热管阵列冷板。

2.2 加速度试验结果及分析

考虑到加速度试验装夹过程复杂,且同类型热管冷板在加速度条件下性能差异不大,加速度试验仅选取性能较好的双U型普通热管冷板和26mm宽带毛细结构微热管阵列冷板作为试验对象。因热管冷板在X,Y,Z三个方向对称,故开展+X,+Y与+Z方向的试验即可满足要求。加速度的加载由离心机实现,离心机在某一时刻从0 r/min增加至额定转速69.5 r/min(即加速度为9g),整个试验过程中通过数据采集仪记录热管冷板的热点温度随时间的变化。

双U型普通热管冷板与26mm宽带毛细结构微热管阵列冷板在+X,+Y与+Z方向9g加速度下热点温度随时间变化的试验结果分别如图6与图7所示。

由图6可知,双U型普通热管冷板加速度试验的起始温度为40.7℃,在正常运行110s后开始加载,其在Z向加速度下的温差最大,约为1.1℃,在X向与Y向加速度下温度变化较小,温差均小于0.6℃;X,Y,Z向从加载至稳定的时间分别约为240,290,200s。由图7可知,26mm宽带毛细结构微热管阵列冷板加速度试验的起始温度为49.2℃,在正常运行160s后开始加载,Z向

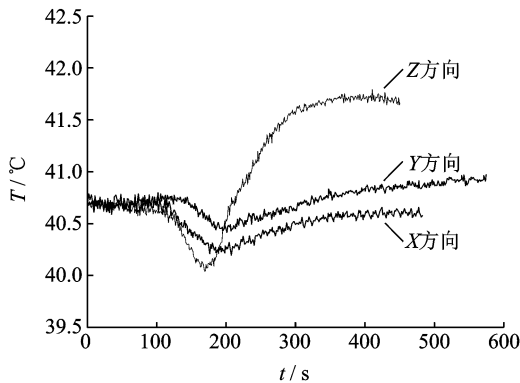


图6 双U型普通热管冷板热点温度变化曲线

Fig. 6 Temperature curves of double-U heat pipe cold plate

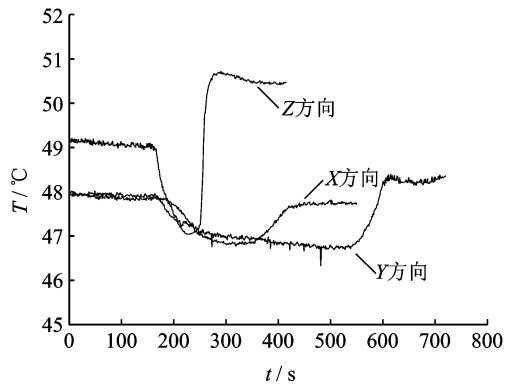


图7 26mm宽带毛细结构微热管阵列冷板热点温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of 26 mm micro-heat pipe array cold plate with capillary structure

加速度对其传热效果的影响最大,试验前后温差达到4.4℃,而在X向与Y向加速度下温差分别为1.8,2.8℃;X,Y,Z向从加载至稳定的时间分别约为280,460,140s。双U型普通热管冷板在加速度加载前后的温度变化较微热管阵列冷板的小,且稳定时间除Z向稍大于微热管阵列冷板外,均可较快地达到稳定状态。

分析其原因在于:热管冷板的工作介质在冷凝端放热冷凝后借助毛细力流回蒸发端,施加不同方向的加速度后,热管冷板将受到相应方向的离心力作用。因Z向与热管冷板传热路径同向,毛细力不仅受热管自身阻力的影响,还需克服离心力的作用,不利于工作介质回流,使得传热恶化,故测点温度较试验前升高。而X向与Y向加速度产生的离心力与传热路径垂直,对毛细力的影响不大,故试验前后测点温差较小。尤其对于微热管阵列冷板来说,其Z向较双U型普通热管冷板Z向更严格的与传热路径同向,因此加速度对其传热性能的影响更大。

此外,由X,Y,Z向试验曲线可知,热管冷板在转速开始提升时温度都有不同程度的降低,这是由于加速度转台使用普通滑环,旋转时产生热量导致滑环温度升高,因电阻与温度成正比,且整个供电及信号回路的电阻较大,导致发热电阻电压偏小,发热量略微降低,测点温度也随之降低;而后因加速度的施加使热管冷板回液困难,一定时间后,传热恶化使温度增加的效果大于电阻增加后温度降低的效果,则出现温度升高的过程。

上述试验表明Z向加速度对测点温度的影响最大,为进一步观察加速度大小对热管冷板传热性

能的影响,对性能最佳的双U型普通热管冷板增大加速度至 117.5 r/min(即 13.5g)进行试验(双U型普通热管冷板最大温差为 1.1℃,低于 26 mm 宽带毛细结构微热管阵列冷板的最大温差 4.4℃)。实验条件与 9g 加速度时相同,起始温度为 40.7℃,在正常运行 110 s 后开始加载,不同加速度量级下的实验结果对比如图 8 所示。

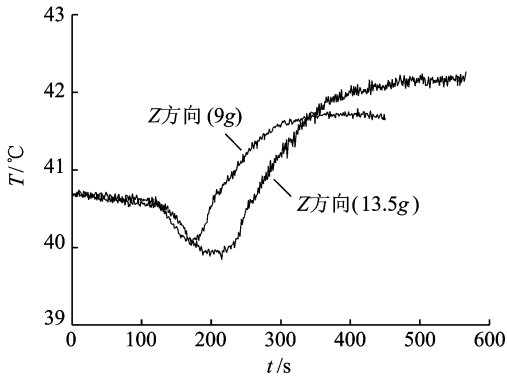


图 8 双U型普通热管冷板不同Z向加速度量级性能对比

Fig. 8 Performance comparison of double-U heat pipe cold plate under different Z-direction acceleration

由图 8 可知,Z 向加速度量级由 9g 增加至 13.5g 后,双U型普通热管冷板稳定后的温度升高,试验前后的温差相应增大,且达到稳定工作状态的时间增加,该现象产生的原因在于加速度量级增加使离心力作用增强,从而对传热性能的影响加大。但试验前后的温差与稳定时间差别不大,因此在该加速度量级范围内,加速度大小对热管冷板传热性能的影响较小。

3 不确定度分析

不确定度 u 由 A 类不确定度 u_A 和 B 类不确定度 u_B 两部分组成,其中 A 类不确定度是对随机误差的统计处理,与试验数据标准差有关,B 类不确定度是由仪器误差引起的不确定度。不确定度的计算公式为

$$u_A = S_x / \sqrt{n} \quad (1)$$

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (2)$$

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

通过计算得出振动试验 A 类不确定度为 0.1%,加速度试验 A 类不确定度为 0.09%。试验用仪器主要有振动试验台、加速度试验机、加速度传感器、数据采集仪、热电偶、铂电阻等,误差分别

为 0.5%,0.6%,0.2%,0.1%,0.1%,0.1%。振动试验与加速度试验均使用了后四种仪器,则振动试验不确定度为

$$u = \sqrt{0.001^2 + (0.005^2 + 0.002^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2)} = 0.6\%$$

温度平均值为 38.7℃,因此振动试验中温度不确定度 $u = 38.7 \times 0.6\% = 0.23\text{℃}$,即 $\Delta T_{\text{振}} = \pm 0.23\text{℃}$ 。

加速度试验不确定度为

$$u = \sqrt{0.0009^2 + (0.006^2 + 0.002^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2)} = 0.7\%$$

温度平均值为 41.1℃,因此加速度试验中温度不确定度 $u = 41.1 \times 0.7\% = 0.29\text{℃}$,即 $\Delta T_{\text{加}} = \pm 0.29\text{℃}$ 。

4 结 论

本文以不同结构形式的普通铜水热管冷板与微热管阵列冷板为研究对象,搭建了振动与加速度试验台对其传热性能进行了试验研究,得出以下结论:

(1)Z 向振动与热管冷板传热路径同向,对热管冷板传热性能有一定程度的影响;X 向与 Y 向振动与传热路径垂直,对传热性能影响可忽略;热管冷板在振动试验条件下均未发生破损,具有较好的机械强度。

(2)Z 向加速度对热管冷板传热性能的影响较 X 向与 Y 向加速度的影响大,是由于 Z 向加速度产生的离心力削弱了毛细力作用,使传热恶化,温差增大;26 mm 宽带毛细结构微热管阵列冷板受加速度的影响比双U型普通热管冷板大。

(3)Z 向加速度增大使双U型普通热管冷板试验前后温差增大,稳定时间增长,但在试验量级范围内,加速度大小对热管冷板传热性能的影响较小。

(4)双U型普通热管冷板的在振动与加速度条件下的传热性能优于其他热管冷板。

参考文献:

[1] 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): 627-631.

Yu Li, Han Yu, Cao Yeling, 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.
- [2] 单英杰. 新型微小平板热管的制备与传热特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- Shan Yingjie. Fabrication and investigation of heat transfer performance of a new-style miniature flat heat pipe[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [3] 王玉洁. 热管制冷原理以及热管冷板的设计[J]. 科技信息, 2008(30): 243.
- Wang Yujie. The cooling principle of heat pipe and the design of heat pipe cold plate[J]. *Science & Technology Information*, 2008(30): 243.
- [4] 马哲树, 姚寿广, 明晓. 热管冷板启动性能和均温性能的试验研究[J]. 自然杂志, 2004, 26(2): 122-123.
- Ma Zheshu, Yao Shouguang, Ming Xiao. Experimental study of startup performance and temperature evenness of the heat pipe cold plate[J]. *Nature Magazine*, 2004, 26(2): 122-123.
- [5] Wang Y, Vafai K. Experimental investigation of the transient characteristics on a flat plate heat pipe during startup and shutdown operations[J]. *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, 122(3): 525-535.
- [6] 赵晓军. 热管在动载状态下的传热研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- Zhao Xiaojun. Study on heat-transfer of the heat pipe under dynamic load[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautic & Astronautics, 2008.
- [7] Gao M, Cao Y. Flat and u-shaped heat spreaders for high-power electronics[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2003, 24(3): 57-65.
- [8] 邓月超, 全贞花, 赵耀华, 等. 基于微热管阵列的平板太阳能热水器的性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 222-227.
- Deng Yuechao, Quan Zhenhua, Zhao Yaohua, et al. Performance experiments for flat plate solar water heater based on micro heat pipe array[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4): 222-227.
- [9] Azad E. Theoretical analysis to investigate thermal performance of co-axial heat pipe solar collector[J]. *Heat Mass Transfer*, 2011, 47(12): 1651-1658.
- [10] 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.
- [11] 张孟瑞. 歼击机机载电子设备用热管散热时重力与惯性力影响其性能的探讨[J]. 航空电子技术, 1984(2): 1-6.
- Zhang Mengrui. The influence of gravity and inertia force on performance of airborne heat pipe for fighter plane electronic equipment[J]. *Avionics Technology*, 1984(2): 1-6.
- [12] 王世旺, 喻衍, 肖春. 工程机械电气系统振动台的测试和研究[J]. 工程机械, 2011, 42(9): 16-21.
- Wang Shiwang, Yu Yan, Xiao Chun. Testing and research for vibration table of mechanical and electrical system[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2011, 42(9): 16-21.