

文章编号: 1672-8785(2017)06-0030-06

一种铝基平板热管特性的研究实验

廖 星^{1,2} 吴亦农^{1,2} 谢荣建¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 上海科技大学, 上海 201210)

摘 要: 制造了一台铝基平板热管原理样机, 并搭建了测试装置。利用该测试装置对样机的特性进行了系统性的实验研究。实验表明, 热管对温度响应迅速, 能够快速地实现温度平衡; 200 W 功率时, 冷热面上的温差仅为 0.87 °C 和 1.37 °C。随着热流密度的增加, 热管温度均匀性的优势变得更加明显, 热阻仅为 0.100 °C /W。该热管样机具备优秀的启动性能、均温性能和良好的传热性能。

关键词: 平板热管; 均温板; 蒸气腔体

中图分类号: TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.06.006

Experimental Investigation on the Properties of an Aluminous Flat Plate Heat Pipe

LIAO Xing^{1,2}, WU Yi-nong^{1,2}, XIE Rong-jian¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201210, China)

Abstract: An aluminous flat plate heat pipe prototype was manufactured and a test device was built for the prototype. The properties of the prototype were experimentally investigated by using the test device. The experimental results showed that the heat pipe had quick response to temperature and could realize temperature equilibrium rapidly. For the power of 200 W, the temperature differences on cooling surface and heating surface were only 0.87 °C and 1.37 °C respectively. With the increase of heat flux, the advantages of temperature evenness of the heat pipe became more evident. Its thermal resistance was only 0.100 °C /W. This heat pipe prototype had excellent starting performance, temperature evenness and heat transfer performance.

Key words: flat plate heat pipe; thermal spreader; vapor chamber

0 引言

平板热管是一种异形热管, 其原理与热管相同, 均是在真空腔体内利用工质相变和毛细力推动工质循环的两相高效换热装置, 具有优异的启动、传热和均温性能。由于其特殊的平板式结构, 可将传统的一维传热转化为三维传热, 相

对于普通热管, 具备更好的安装性能与热扩散性能。随着空间红外遥感探测技术的进步, 红外焦平面等光学载荷所需的冷量越来越大, 多载荷热管理的需求也越来越多, 光学载荷表面对温度场均匀性的要求也越来越高。平板热管传热技术是实现更大冷量传输、多载荷热管理以

收稿日期: 2017-03-17

作者简介: 廖星(1989-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星载荷热控制技术。

E-mail: liaoxing@shanghaitech.edu.cn

及载荷表面均温的有效途径。同时, 星载红外光电遥感仪器的精密辐射定标是准确判读和利用其红外遥感图像的先决条件。随着星载红外光电遥感仪器应用的不断深入, 对相机辐射定标的精度要求也越来越高。作为辐射定标系统标准装置的黑体辐射源对温度的均匀性、控温的稳定性等的要求也越来越高。由于平板热管具有良好的温度响应性能、均温性能和较轻的重量, 用平板热管黑体控温系统取代传统的黑体控温系统, 可以减轻定标系统尤其是星上定标系统的复杂程度和重量, 符合星上红外光电遥感装置及其定标系统的小型、轻型和高精度化发展趋势^[1]。

许多学者都对平板热管进行了各种实验与理论研究。Koito 等^[2]提出了一种平板热管三维传热与流动的简化数值分析模型, 并以一块铜—水烧结式平板热管进行了实验验证, 该模型目前已被广泛应用。徐鹏程等^[3]通过实验验证了一种金属纤维毡吸液芯的平板热管, 该热管的蒸发端与冷凝端均具有良好的均温性能, 他们还分析了不同工质对热管性能的影响。李红传等^[4]依据仿生学原理设计并制作了一种锥形毛细芯的铜—水平板热管, 新型的吸液芯使得该热管的传热能力大大增强。Lips^[5]研究了不同充液率、不同热流以及不同腔体高度对平板热管表面温度场的影响; 实验结果表明, 充液率以及腔体高度对平板热管的性能有显著的影响。

本文将模拟平板热管传热系统, 并搭建合适的实验装置, 然后研究一种铝基平板热管样机的启动性能、均温性能以及不同工况下的传热性能等性能特性。

1 实验材料和装置

本文所用平板热管的结构如图 1 所示, 其外形尺寸为 200 mm×200 mm×17.5 mm。在热管基板上烧结 2 mm 厚的 80 目铝粉以构成其吸液芯。内部焊接五个对称分布的 $\phi 10$ mm 加强筋以增加其承压能力。同时为了使热管具备反重力工作能力, 在其内部对称安装了 16 个 $\phi 10$ mm 的烧结铝粉柱体, 并将侧边连接起来, 形成连续的

毛细结构。烧结柱体的加入使工质回流液体路径和时间变短, 增强了传热能力, 同时增强了平板热管的强度。上下基板与加强筋通过氩弧焊连接, 选择丙酮为热管工质, 采用充装后除气的方法充入约 68 g 丙酮, 充液率约为 120%。

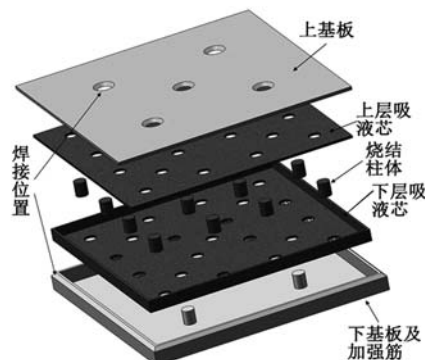


图 1 铝基平板热管的结构示意

实验装置如图 2 所示, 该装置主要由实验件、加热部件、直流电源、水冷块与水冷机组、温度测量和采集系统组成。加热部件为一定制的紫铜块, 上端面的面积为 50 mm×50 mm。紫铜块底部布有 5 根直径为 6 mm、加热功率为 92 W 的电加热棒, 紫铜块的四周均填充气凝胶以进行绝热, 减少大部分漏热。因此, 可将紫铜块上端等效为一维稳态导热。在紫铜块的顶部布置了三根 T 型热电偶, 用于监控顶部的热流和推算加热表面的温度。两台四路程控直流稳压电源用于调节和显示电加热棒的加热功率。因为实验所用功率较大, 选用水冷块来冷却平板热管, PID 控制器中控制出水温度的冷水机组为其提供循环水。为减少接触热阻对实验结果的影响, 在接触面上涂了高热导率的导热硅脂, 并通过实验台上的推拉力计读取并控制压紧力, 以使各接触面紧密接触。

为避免影响平板热管的强度, 未在表面开槽布置测温点, 而是在水冷板上打孔后安装了 T 型铠装热电偶, 然后在辅以压紧措施后测量与水冷板接触的平板热管上表面的温度。下表面的各测点不在接触面上, 所以采用将 T 型裸线热电偶贴附于其上的办法进行测温。

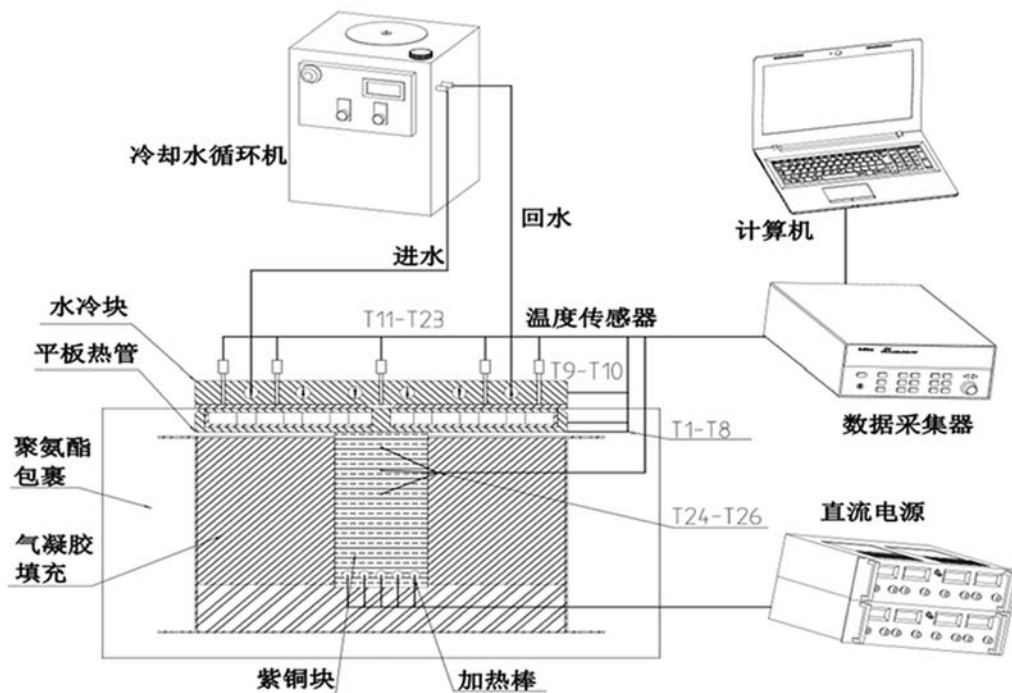


图 2 平板热管性能研究的实验装置示意图

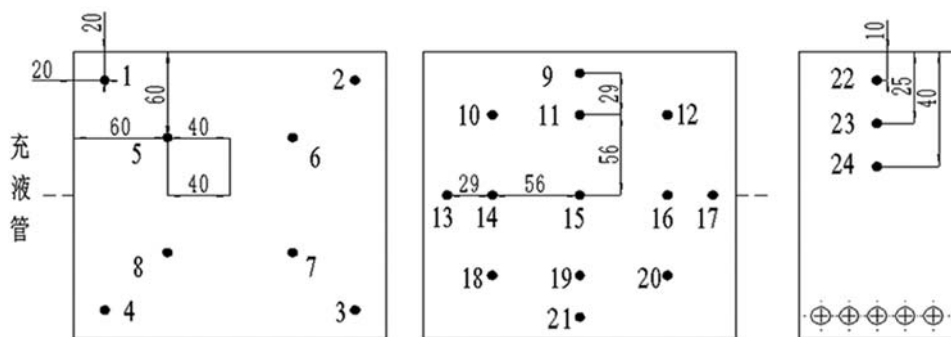


图 3 实验测点布置示意图

平板热管和加热铜块的测点分布如图 3 所示。依照对称分布的原则在平板热管的蒸发面、冷凝面上各布置了 8 个和 13 个温度测点。这种布置既可以相互验证各测点的准确性,也可以避免因个别测点损坏而必须中止实验的情况。测点的温度数据由 Keithley 2701 数据采集器采集,并由计算机上的 Keithley Kick Start 软件读取和自动保存。

2 实验过程和工况

本实验从平板热管在不同加热功率、不同冷却温度和不同工作角度下的特性出发,研究平板热管在不同工况下的启动性能、均温性能

以及传热性能。考虑到所制作的紫铜块加热器的性能,选取实验的加热功率范围为 25 W 至 450 W,对应的热流密度为 $1 \text{ W/cm}^2 \sim 18 \text{ W/cm}^2$ 。

实验步骤如下:

- (1) 开启温度测量和采集系统,随后开启冷却水循环系统,调节出水温度至所需温度。
- (2) 开启直流稳压电源,根据工况所需功率,调节各通道加热电压及电流以控制紫铜块底部的电加热棒的输出功率,实现模拟发热。
- (3) 待各温度测点的温度稳定后 (300 s 内各测点的温度波动小于 $0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$),取稳定区间内的均值为记录值。完成当前工况,记录结束时间并调节直流稳压电源,进入下一工况。

根据傅里叶导热定律推算紫铜块顶面中心的温度:

$$T_h = \frac{1}{2} \left(T_{22} - \frac{x_1}{x_2 - x_1} (T_{23} - T_{22}) \right) + \frac{1}{2} \left(T_{23} - \frac{x_2}{x_3 - x_2} (T_{24} - T_{23}) \right) \quad (1)$$

式中, x_1 、 x_2 、 x_3 为紫铜块上各测点到上端面的距离, 分别为 10 mm、25 mm、40 mm。

引入 Hsieh 等^[6]提出的热阻定义作为量测平板热管传热性能的指标:

$$R_{vc} = (T_h - T_{c,ave})/Q \quad (2)$$

式中, Q 为总加热功率, $T_{c,ave}$ 为工况稳定时冷凝面各测点的平均温度。

$$Q = \sum_{i=1}^5 U_i I_i \quad (3)$$

$$T_{c,ave} = \left(\sum_{i=9}^{21} T_i \right) / 13 \quad (4)$$

3 实验结果和讨论

3.1 启动性能

启动性能表示热管启动所需时间的长短, 是一项重要的热管性能。为验证该平板热管在变功率下的启动性能, 本实验分别在 25 W~250 W (每次加大功率 25 W) 以及 250 W~450 W (每次加大功率 50 W) 下进行了实验。图 4 为平板热管在各个加热功率下的加热中心温度和冷凝面平均温度随时间的变化曲线。在较低的加热功率下 (25 W), 热管的温度响应缓慢, 2000 s 内不能达到热平衡, 因为此时平板热管内的工质相变非常不充分, 同时还需克服水冷块、平板热管、各层绝热材料的热容影响。但随着功率的加大, 平板热管对功率的增加有较迅速的响应。加热量每增加 25 W, 各测点的温度均能在 300 s 左右达到基本平衡, 并在该工况时间内 (1500 s~2000 s) 内达到完全平衡。加热量每增加 50 W, 热管

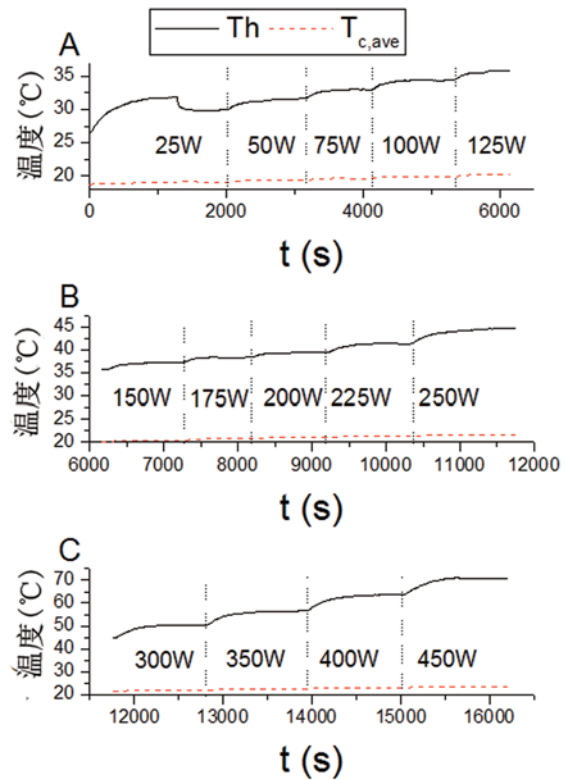


图 4 变功率下热管的温度响应曲线

各测点的温度也都能 600 s 左右达到基本平衡, 并且同样在工况时间内达到完全平衡。

3.2 均温性能

为了研究均温性能, 引入一块同尺寸同材料的铝合金板作为对比。为了直观显示其均温性能, 图 5 给出了在典型加热功率 (200 W) 下平板热管与铝合金板的各测点温度对比。可以看出, 铝合金板和平板热管各温度测点的温度分布趋势基本一致, 但铝合金板上的波动值更大, 因而温差更大 (加热面的为 3.30 °C, 冷却面的为 2.29 °C), 而平板热管的温差相对较小 (加热面的为 1.37 °C, 冷却面的为 0.87 °C)。

更多加热功率下的温差对比如图 6 所示。在较低的加热功率和热流密度下, 平板热管开始显现出在均温性能上的优势。而随着热流密度的增大, 蒸发面与冷凝面的最大温差均逐渐变大。但铝合金板的最大温差几乎呈线性增长, 而平板热管的则较缓慢增加, 其在均温性上的优势越来越明显。

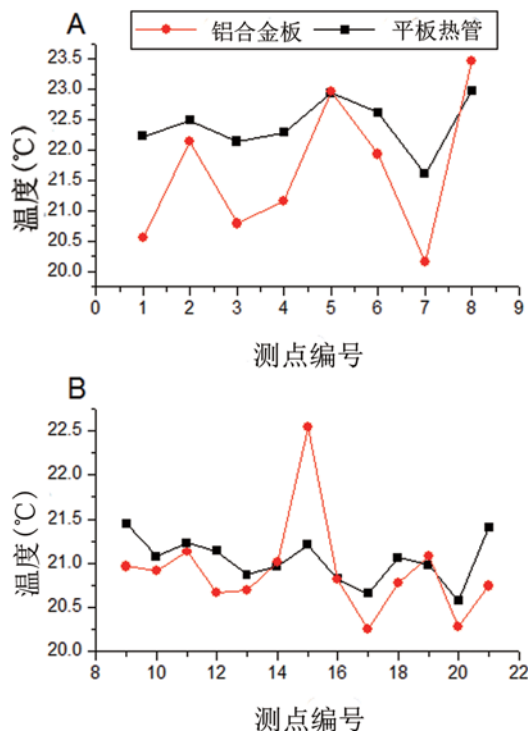


图 5 200 W 下各测点的温度对比

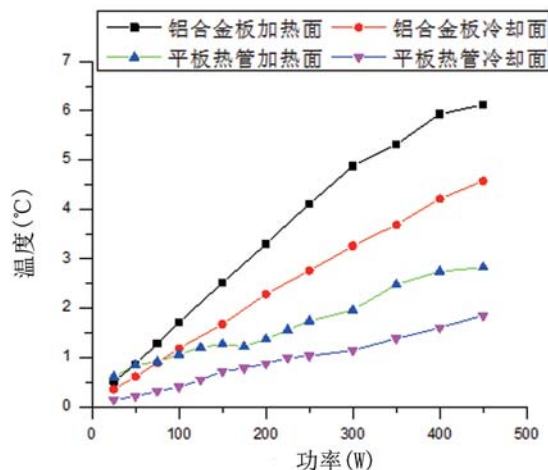


图 6 各功率下加热面、冷却面的温差

3.3 传热性能

本文以热阻值的大小来判断平板热管径向传热能力的大小。热阻越小，冷热面之间的温差越小，传热性能也越好。平板热管的传热能力与许多因素有关，如充液率、吸液芯的材料和结构、蒸气空腔的高度、管壁的厚度、工作角度等等。本文从不同加热功率、冷却条件和工作角度出发，研究铝基平板热管的传热性能。

通过提供改变冷水循环系统的出水温度来实现不同的冷却条件。图 7 展示了三种不同水冷

出水温度 (6 °C、18 °C 和 30 °C) 下平板热管的热阻。各温度下热阻均呈现先大幅下降、再趋于平稳的趋势。这是由于在较低的加热功率和热流密度下，平板热管内部工质相变尚不充分，随着输入功率的增加，工质相变进行的程度加深，相变传热在整个传热过程中占的比例越来越大，工质相变的换热能力远大于材料的热传导能力，使得平板热管的热阻大幅下降。当输入功率足够大，工质相变进行得足够充分时，尽管加热功率和热流继续增加，平板热管的热阻却趋于平稳。在较低的冷却温度 6 °C 下，平板热管的热阻要大于其它两种冷却温度，传热能力相对较差，一是由于温度降低，工质密度增加，导致工质充液率略微不足；二是由于热管工作温度降低后，内部不凝性气体分压增大，影响了热管的传热性能。

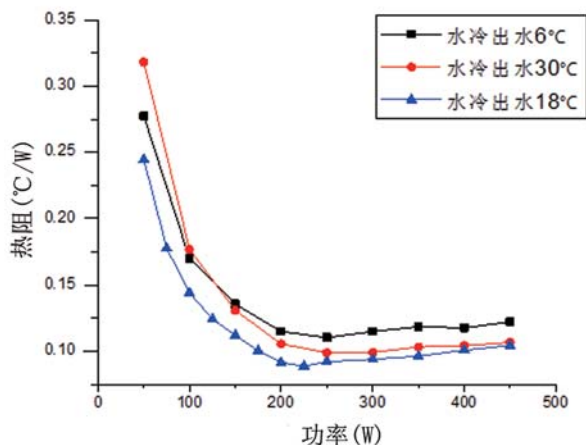


图 7 不同水冷出水温度下的热阻

若要使热管能正常工作，必须满足：

$$\Delta p_c \geq \Delta p_l + \Delta p_v + \Delta p_g \quad (5)$$

即热管内部工质的毛细驱动力 Δp_c 必须足以克服液体压力降 Δp_l 、蒸气压力降 Δp_v 以及重力压降 Δp_g 。分别在 0°、90° 与 180° 三种工作角度下进行了传热性能的实验研究。各角度下的热阻曲线如图 8 所示。平板热管的传热性能从好到差依次为 0° 工作角下的 0.100 °C/W、180° 下的 0.125 °C/W 与 90° 下的 0.225 °C/W。重力压降 Δp_g 是造成这一差别的主要原因，在 180° 与 90° 工作角下，热管分别需要克服大约 10 mm 与 200 mm 的重力压降，导致传热能力下降。尤其

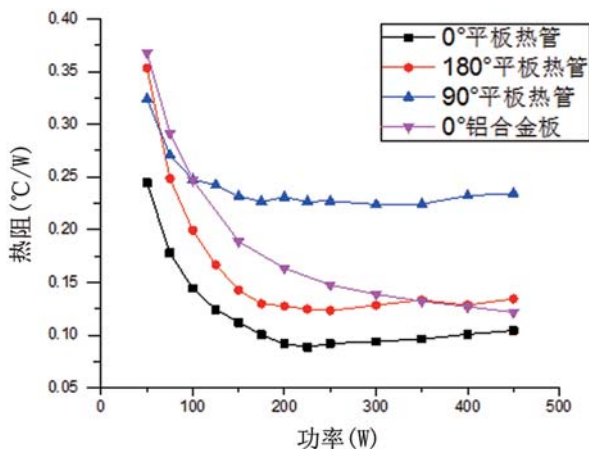


图 8 不同工作角度下的热阻

在 90° 时, 热管并不足以完全克服 200 mm 的重力压降, 实验时工质不能在整个毛细芯内完全循环, 而是在重力辅助下进行部分循环, 传热性能也变差。

特别地, 本文将不同角度下的热阻与同样实验条件下的铝合金板的热阻进行了对比。在 180° 工作角下, 热管的传热能力与铝合金板的 (约 0.131 °C/W) 相当。在 90° 工作角下, 不如同尺寸铝合金板。在 0° 工作角下, 热阻仅降低 24%, 不能显著地展示平板热管在传热能力上的优势。类似地, 张明等^[7]研究对比了铜-水平板热管与同尺寸铜板的热阻; 当平板热管较厚时, 其热阻相对铜板的优势减少, 甚至不如铜板。由此可见, 我们应优化铝基平板热管的加工工艺, 进一步减小其厚度。针对散热应用优化设计, 可进一步提升其传热性能。

4 结论

设计并搭建了合适的实验装置, 对一种铝基平板热管的各项特性进行了研究, 实验结果表明:

(1) 铝基平板热管具有良好的启动性能, 在足够大的热流密度下, 能在 2000 s 内迅速启动并实现稳态, 具备良好的温度响应特性。

(2) 相对于同尺寸的纯铝合金板, 平板热管显示出了优良的均温性能。在 200 W 功率下, 其冷凝面的温差仅为 0.87 °C, 蒸发面的温差仅为 1.37 °C, 远好于铝合金板的 2.29 °C 和 3.30 °C。并且随着加热热流的增加, 均温性能的优势越来越明显。

(3) 铝基平板热管具有相对较好的传热性能。与铝合金相比, 其热阻板有 24% 的减少。该热管具有一定的反重力工作能力, 但不足以完全克服重力工作, 需要进一步优化设计, 改进加工, 以实现完全的反重力工作能力和更优的传热性能。

参考文献

- [1] 查鹏. 空间相机星上辐射定标技术的研究 [J]. 红外, 2006, 27(3): 32-38.
- [2] Koito Y, Imura H, Mochizuki M, et al. Numerical Analysis and Experimental Verification on Thermal Fluid Phenomena in a Vapor Chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14-15): 1669-1676.
- [3] 徐鹏程, 陶汉中, 张红. 水和丙酮工质的金属纤维毡蒸气腔热管的传热性能 [J]. 化工学报, 2015, 22(2): 522-529.
- [4] 李红传, 纪献兵, 郑晓欢, 等. 锥形毛细芯平板热管传热特性研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 132-138.
- [5] Lips S, Lefevre F, Bonjour J. Combined Effects of the Filling Ratio and the Vapour Space Thickness on the Performance of a Flat Plate Heat Pipe [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(4): 694-702.
- [6] Heish S, Lee R, Shyu J, et al. Thermal Performance of Flat Vapor Chamber Heat Spreader [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(6): 1774-1784.
- [7] 张明, 刘中良, 马国远. 新型槽道式平板热管的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 818-820.