

文章编号: 1672-8785(2016)07-0043-06

直热管传热系统热阻的试验研究

韩娜丽^{1,2} 陈跃勇^{1,2} 徐红艳¹ 张 添^{1,2} 董德平¹

(1. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 对常温直热管传热系统的总热阻进行了试验研究, 着重分析了真空和大气环境下该系统裸接并用不同的螺钉扭矩安装时热管的总热阻及热管与热端安装面、冷端安装面的热阻。研究表明, 试验环境对该系统的传热能力有一定的影响, 热端和冷端安装面在真空中的热阻均比在大气环境中的大。螺钉的安装扭矩会影响接触面的热阻。两种环境中, 在一定的热负荷下, 冷端安装面在扭矩为 0.4 Nm 时的热阻约是扭矩为 1.2 Nm 时的 2.4 倍。

关键词: 直热管; 螺钉扭矩; 安装面; 热阻

中图分类号: TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.07.008

Experimental Investigation of Thermal Resistance of Straight Heat Pipe Heat Transfer System

HAN Na-li^{1,2}, CHEN Yue-yong^{1,2}, XU Hong-yan¹, ZHANG Tian^{1,2}, DONG De-ping¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The total thermal resistance of a straight heat pipe heat transfer system at room temperature is studied experimentally. The total thermal resistance of the heat pipe and the resistances of heat pipe and heat-end and cold-end mounting surfaces when the system is installed with different torques are analyzed mainly. The research result shows that test environment has a certain influence on the heat transfer capability of the system. The thermal resistances of the heat-end and cold-end mounting surfaces are greater in vacuum than those in atmosphere. The mounting torque of the screw used may affect the thermal resistances of contact surfaces. In both environments, the thermal resistance of the cold-end mounting surface with a torque of 0.4 Nm is about 2.4 times greater than that of it with a torque of 1.2 Nm under a certain heat load.

Key words: straight heat pipe; bolt torque; mounting interface; thermal resistance

0 引言

热管具有较高的等温性, 可在小温差下传递大热流。因此在卫星热控、空间辐射散热、红外探测器低温制冷光学元件表面的热控系统中, 热管能起到均匀温度场的效果。直热管常被用

在红外探测器与空间环境进行辐射换热的辐射器上。由于其具有小温差的优势, 可以使辐射器表面的温度分布达到均匀。

然而, 热管的传热过程必然存在着温差。

[1] 热管的温差是由热管在整个传热过程中的许

收稿日期: 2016-04-14

作者简介: 韩娜丽 (1987-), 女, 河南沈丘人, 博士研究生, 主要从事卫星载荷热控制研究。

E-mail: nalihanjoy@163.com

多热阻造成的。文献 [2] 把热管的热阻分成了 10 个部分, 包含热管与热源、热沉的外部热阻以及热管自身管壁热阻、吸液芯热阻、气液分界面热阻和蒸汽腔热阻, 这些热阻被看成是一个串联形式, 总热阻可以决定热管传递的热量。由此可见, 热管与热源、冷源之间的接触热阻也是热管传热性能的关键。

根据文献 [2-5] 的调研可知, 对热管自身热阻的研究已有很多报道, 但对热管与外部的热阻的研究却很少。因此, 本文将根据工程需要, 对常用的直热管与外部热源、热沉之间的外部接触热阻进行试验研究。把热管传热系统传热过程中的热阻分为两类: 一类为外部热阻, 即热管与热源、热沉之间由于接触产生的接触热阻; 另一类为热管自身的传热热阻。本文研究的带翅片的热管自身的传热热阻是指热管蒸发段翅片与相应壳体之间的热阻、热管冷凝段翅片与相应壳体之间的热阻以及蒸发段与冷凝段之间的热阻。

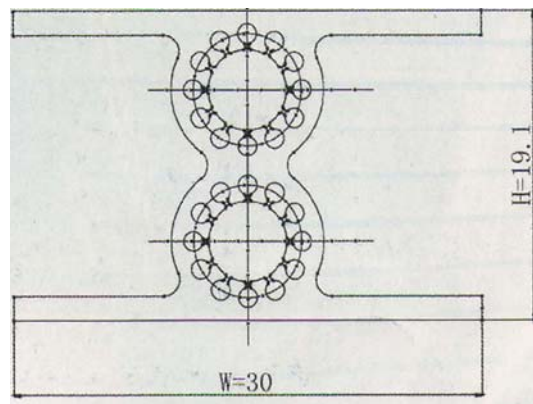
接触热阻与两接触面的接触情况息息相关, 测试件所处的环境对接触热阻也有一定的影响。因此, 本文将模拟工程直热管传热系统, 将蜂窝板作为热管实际安装时热源的外壁安装板, 即模拟热源通过蜂窝板传递给热管, 并经热沉热管冷凝段传递给热沉。这里的模拟热沉采用铜盘管内嵌的水冷板, 热管与蜂窝板、冷板之间不采用任何导热填料, 仅研究环境对接触热阻的影响。

1 试验材料和装置

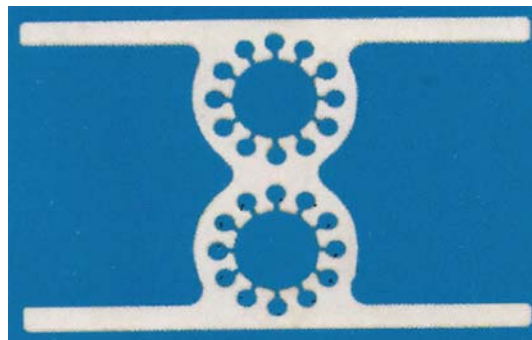
试验时, 将热管安装在蜂窝板的蒙皮表面, 并用螺钉通过预埋件的螺纹孔将其与热管的翅片连接。热管与蜂窝板、冷板采取裸接的方式连接, 即热管翅片与安装面直接接触, 它们之间不

存在任何导热材料。直热管的截面图和具体参数分别见图 1 和表 1, 蜂窝板的相关参数见表 2。

试验用热管为 $\Phi 10$ 双孔、长 720 mm 的 Ω 形铝氨直热管。热管蒸发段与冷凝段分别安装在蜂窝板和内附紫铜盘管的冷板上, 热端安装面翅片的尺寸为 $30\text{ mm} \times 405\text{ mm}$, 安装孔的间距为 90 mm , 冷端安装面翅片的尺寸为 $30\text{ mm} \times 159\text{ mm}$, 安装孔的间距为 48 mm , 热管的外观图如图 1 所示。铝蜂窝板用作热管蒸发段的安装板, 其一面蒙皮上粘贴有薄膜加热器以作为模拟热源。蜂窝夹心层内置有预埋件, 通过蒙皮覆盖在蜂窝上, 蜂窝板的具体参数见表 2。



(a) 热管的截面图



(b) 热管切片照片

图 1 热管外观图

表 1 热管的技术参数

产品规格	20 °C 单孔最大 传热能力 (278 W/m)	管壳材料	管材重量 (g/m)	设计寿命 (a)	封头长度 (mm)
30×19.1(Ω)	278	6063	344	15	25

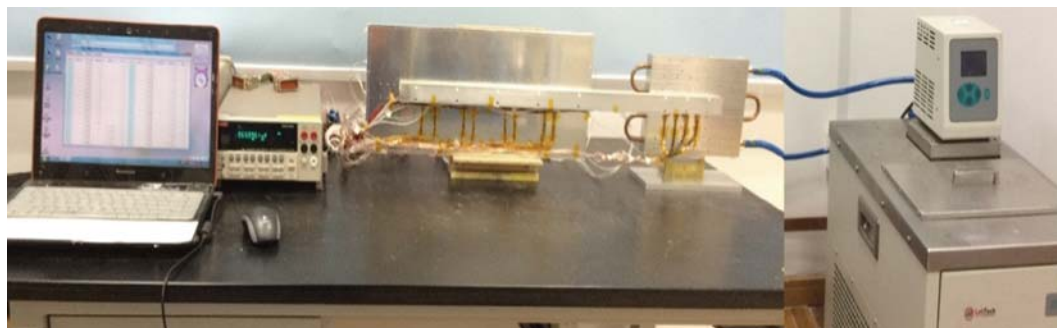
试验装置的实物图如图 2 所示, 装置由热管、冷源和蜂窝板、系统安装支架、温度测量和采集系统、水冷机组和直流稳压电源及真空系统等组成。热管翅片与蜂窝板、冷板通过不锈钢螺钉连接, 热管蒸发段使用 10 个 M3×10 不锈钢螺钉与蜂窝板预埋件连接, 热管冷凝段用 6 个 M3×10 不锈钢螺钉与冷板连接。冷端安装板为

铝材平板 (160 mm×200 mm×25 mm), 其内部装有连接水冷机组的紫铜盘管, PID 控温器用于控制出水温度。

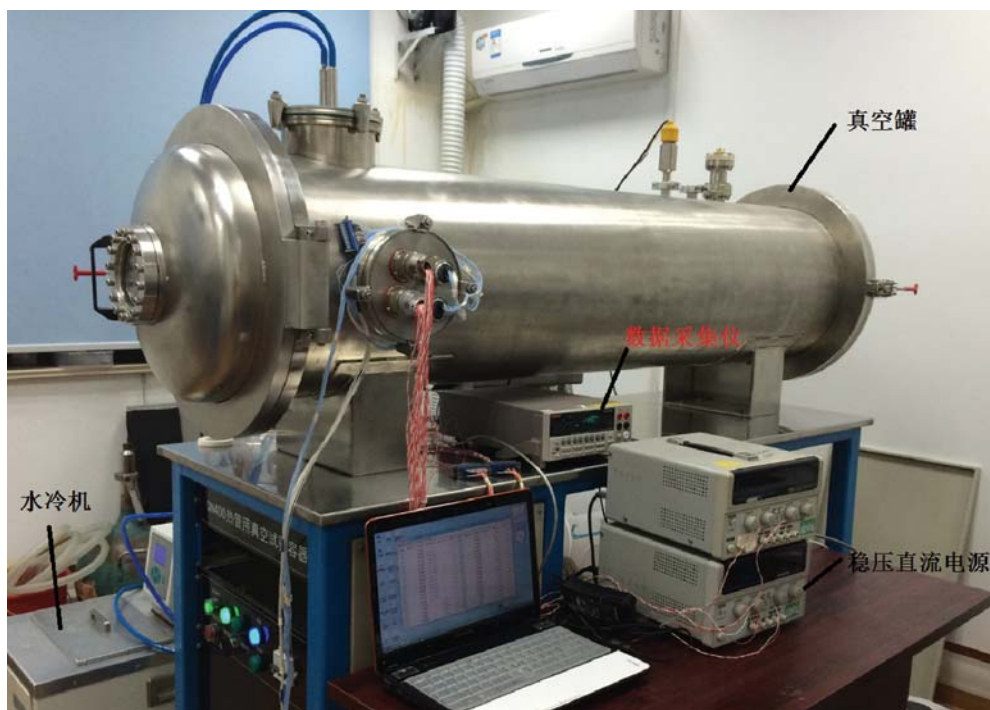
在蜂窝板、冷板、翅片和管壳上布设有多个 Pt1000 铂电阻及薄膜 T 型热电偶, 它们是用来实现温度测量的, 试验中各个测点的分布如图 3 所示。

表 2 铝蜂窝板的详细参数

结构形式	蜂窝尺寸 (mm)	铝面板厚度 (mm)	外形尺寸 (mm)
平面	4×0.04×19.3	0.3	20×50×19.9



(a) 大气环境下的试验装置实物图



(b) 真空中的试验装置实物图

图 2 试验装置实物图

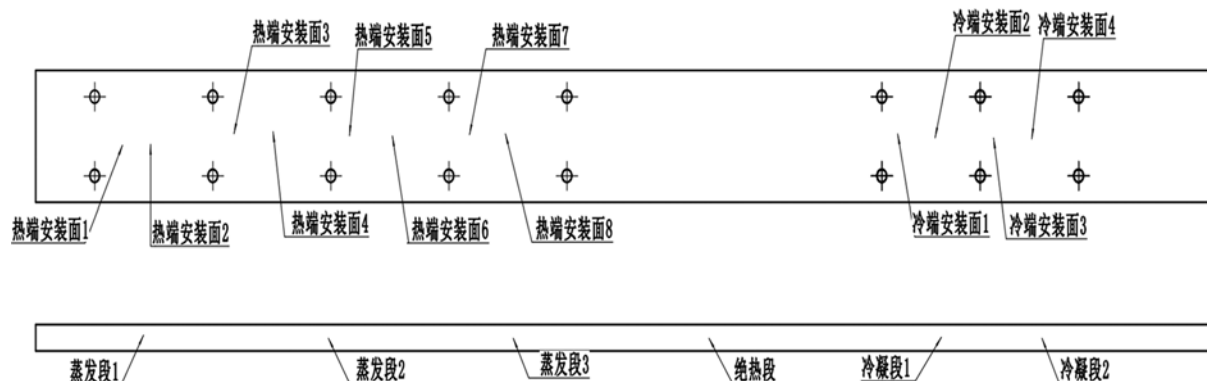


图 3 试验各测点的分布

通过安装支架可以调整热管冷热端的高度,使冷热端保持在相同的高度,保证热管自身的传热能力。在大气环境中,使用导热系数较低的 3 cm 厚的橡塑保温隔热板包覆装置以减小对流引起的漏热。在真空环境中,在用由隔热性能极好且发射率低(即高反射率)的反射屏和低热导率的间隔物交替叠合而成的 10 层多层隔热材料包裹装置。

大气和真空环境下的试验装置如图 2 所示。

2 试验过程及工况

在真空和大气环境中,当直槽道热管采用不同的连接方式连接时,对传热系统的传热能力、传热温差及传热热阻进行了相关的试验研究,搭建了合适的热管传热系统测试平台,如图 2 所示。试验中,采用聚酰亚胺薄膜加热片模拟加热热源,并用恒温水循环系统提供恒温冷源。试验使用的热管为双孔槽道热管,由热管上下两孔热管的管壁上黏贴的若干 PT1000 铂电阻测量热管管壳的轴向温度分布。把薄膜 T 型热电偶黏贴在连接蜂窝板的一孔热管的翅片上及相应的蜂窝板蒙皮上,以测量下热管两端翅片与蜂窝板蒙皮、冷板模拟安装板表面的温度分布。在测量系统达到稳定的状态后,记录下热管管壁的温度、冷却水的温度及热管翅片与安装面的温度数据。具体试验流程如下:

安装调试试验装置,调节安装扭矩,调整热管冷热端的高度,以保证热管能够正常工作。然后包裹橡塑保温隔热板,开始试验:

(1) 开启数据采集系统,测试初始状态时的温度测量误差;

(2) 开启水冷机组,将冷板的温度控制在 18 ± 0.5 °C;

(3) 开启直流稳压电源,输入恒定功率以模拟发热;

(4) 待热管传热系统的温度稳定后,改变试验工况,重新试验。等温度稳定后 ($\Delta T/\Delta t \leq 0.5$ K/h),记录数据。本实验共有 20 个实验工况,通过改变薄膜加热器的功率得到不同的测试基准温度(加热器的功率从低向高调节)。每个工况大约需要 3.5 h 的稳定时间。

(5) 固定扭矩时,改变热负荷,分别设置功率 10 W、20 W、30 W、40 W 和 50 W;

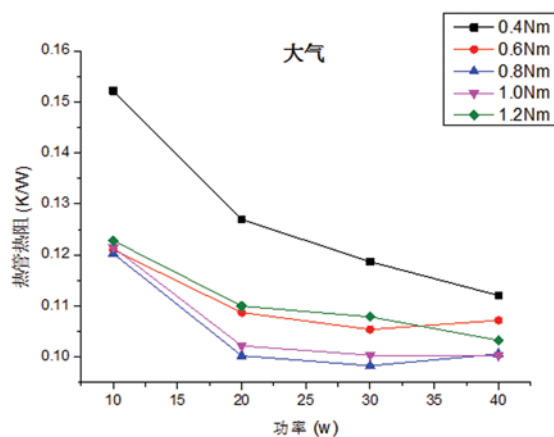
(6) 为考虑安装面压力变化对传热性能的影响,将螺钉扭矩分别改变为 0.6 Nm、0.8 Nm、1.0 Nm 和 1.2 Nm,进行重复试验。

大气环境试验结束后,将热管传热系统改用多层绝热材料包裹,然后将整个装置置于真空罐中进行上述(1)~(6)的操作。在第(3)步之前,要开启机械泵抽真空,待真空度小于 10 Pa 时,开启分子泵;当真空度达到 10^{-3} Pa 时,开启直流稳压电源。待热管试验系统稳定后,关闭加热电源。待系统恢复常温后,关闭真空机组。在真空罐恢复常压后打开罐,更改螺钉的扭矩,以进行下一组扭矩工况试验。

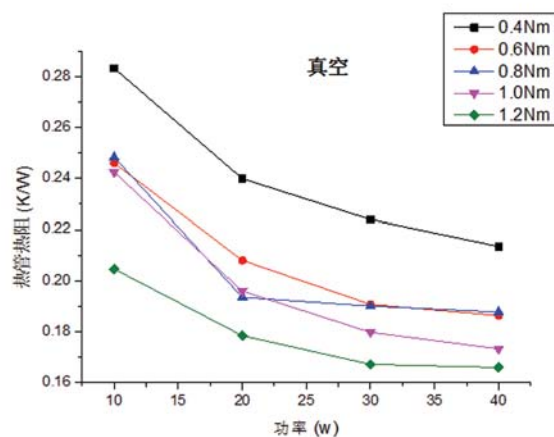
3 试验结果分析

3.1 热管热阻

图 4 是不同环境下热管热阻随热负荷变化的曲线, 这里的热阻指从热管蒸发段翅片到热管冷凝段翅片的总热阻。从图中可以看出, 热管的总热阻随热负荷增大而减小。另外, 在螺钉扭矩为 0.4 Nm 时, 热管的热阻较大, 可见安装热管的螺钉扭矩对热管的总热阻有一定的影响。扭矩越小, 影响就越大。



(a)



(b)

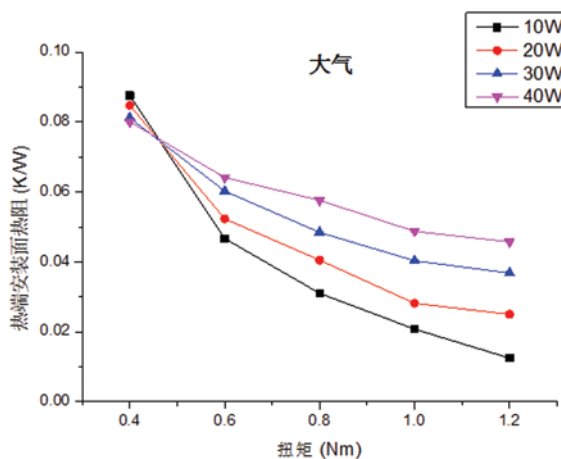
图 4 不同环境下热管热阻随热负荷变化的曲线

3.2 热管安装面与翅片的热阻

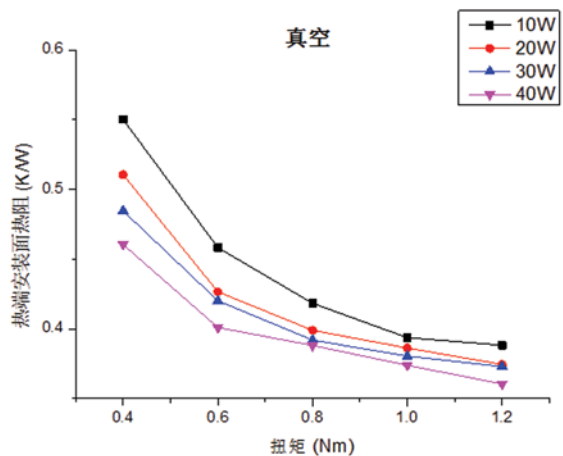
螺钉的安装扭矩越大, 安装面之间的压力就越大, 实际接触的面积就会增大。这样, 两接触面热量传输的通路就会增多, 接触面的热阻就会相应减少。这里所说的热阻是指两个接触面

之间的热阻, 也常称为接触热阻。因此, 增大安装热管翅片所用的扭矩, 热管安装面的热阻与冷端安装面的热阻均会减少, 也就是说, 热管安装面的热阻随扭矩的增大逐渐减小, 具体的趋势如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 对于热管的同一端, 真空中的接触面热阻均比大气中的大, 这是因为较高的真空度使两接触面之间的接触只剩下固体间的点接触。对两者进行比较, 真空中热端安装面的热阻和冷端安装面的热阻都比大气环境中的大, 可见环境对安装面的热阻的影响不可忽略。

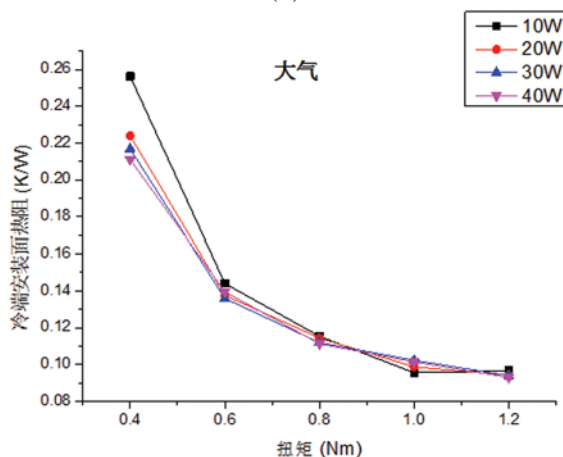
表 3 列出了不同环境下热管安装面接触热阻的情况。由结果可知, 在大气环境中, 热端安装面的接触热阻在螺钉扭矩从 0.4 Nm 增大到 1.2 Nm 时的变化比在真空环境中的大, 而且较小的负荷下热阻减小地更明显。两种环境中在一定的热负荷下, 扭矩为 0.4 Nm 时, 冷端安装面的接触热阻约是扭矩为 1.2 Nm 时的 2.4 倍。安装面的接触热阻随螺钉扭矩增大而不断减小, 扭矩增大时其值开始减小很快, 随着扭矩的进一步增大, 减小的幅度逐渐趋缓, 因此建议工程上在材料和连接强度允许的情况下应尽可能增大螺钉的扭矩, 以有效地减小接触热阻。



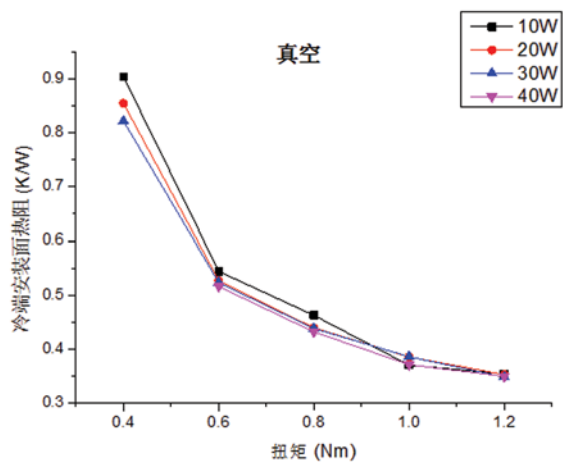
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 不同环境下热管安装面的热阻随热扭矩变化曲线

表 3 不同环境下热管安装面热阻的比较

安装面	热负荷 (W)	热阻(K/W)			
		大气		真空	
		0.4Nm	1.2Nm	0.4Nm	1.2Nm
热端	10	0.088	0.012	0.550	0.388
	40	0.080	0.046	0.461	0.360
冷端	10	0.256	0.097	0.903	0.354
	40	0.211	0.093	0.802	0.349

4 小结

设计了合适的试验装置。在真空和大气环境中,当直热管传热系统的热阻裸接时,对其进行了试验研究。对比了两种环境下热管的热阻、热端安装面的热阻以及冷端安装面的热阻。结果表明,对于同一工况,安装热管的螺钉扭矩对热管的总热阻有一定的影响;真空中的两端接触面热阻均比大气中的大。这些结果将可以对实际的工程热控仿真提供一定的帮助。该课题仍需继续深入研究,如可在热管安装时通过在接触面使用导热性能好的导热材料来减小接触面的热阻等。

参考文献

- [1] 闵桂荣, 张正纲, 何知朱. 卫星热控制技术[M]. 中国宇航出版社, 2009.
- [2] 张任平, 朱旺法. 燕尾形轴向槽道热管瞬态特性实验研究及热阻模型 [J]. 制冷技术, 2012,40(5): 79-84.
- [3] 张正芳, 霍秀和, 赵嘉琪. 重力辅助热管的性能及热阻的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 1982,3(1):67-75.
- [4] 张程宾, 陈永平, 施明恒, 等. Ω 形微槽热管传热性能的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2009,30(9): 1534-1536.
- [5] 张程宾, 陈永平, 施明恒, 等. “ Ω ” 形轴向槽道热管的热阻分析 [C]. 第 11 届全国热管会议, 2008.