

小型平板蒸汽腔的实验研究

胡 润¹ 朱晓磊¹ 郭庭辉¹ 罗小兵^{1,2}

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要 平板蒸汽腔的加工工艺一直都有待改进, 其工艺的质量直接影响着工作性能。本文基于平板蒸汽腔的工作原理, 设计、加工了一种小型平板蒸汽腔, 并进行了实验研究。文中介绍了其工作原理, 加工工艺以及实验结果。结果表明: 该小型平板蒸汽腔具有较好的工作性能, 其厚度为 5 mm, 当输入热流为 22.1 W 时, 平板蒸汽腔的热阻低至 0.01°C/W。

关键词 平板蒸汽腔; 铜粉烧结; 扩散焊接; 热阻

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)04-0637-04

Experimental Research on Small Flat Plate Vapor Chamber

HU Run¹ ZHU Xiao-Lei¹ GUO Ting-Hui¹ LUO Xiao-Bing^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The fabrication technologies of the flat plate vapor chamber has been developed all along the time, which determine the working performance of the flat plate vapor chamber directly. Based on the working mechanism, the paper designed and fabricated a kind of flat plate vapor chamber and conducted experimental research. The working mechanism, fabrication processes and experimental results were presented. The results showed that the flat plate vapor chamber has good working performance and its thickness is only 5 mm. When the input flux is 22.1 W, the thermal resistance of the flat plate vapor chamber is only 0.01°C/W.

Key words flat plate vapor chamber; copper powder sintering; diffusion bonding; thermal resistance

0 引 言

随着电力电子技术的发展, 电子元器件的发展趋势是小型化、高功率化, 因此其单位面积的热流越来越大。高密度热流使电子器件局部或整体处于较高的温度, 如果热量不能及时散走, 将使得电子器件失效或损坏。不均匀的温度分布还会使得电子器件产生热应力, 最终导致热疲劳损坏或机械变形。在这种情况下, 常规的散热方式已经不能满足散热要求, 发展新型的高效散热方式成为了目前研究的重点。

平板蒸汽腔是一种新型的热沉, 引起了人们极大的研究兴趣。Zhang 等人^[1] 讨论了用于冷却电子封装的空冷蒸汽腔热沉和液冷热沉在 140 W 时的传热特性, 研究结果显示空冷蒸汽腔热沉的总热阻为 0.72~0.61°C/W, 最大传热量在 100 W 左右; 而液冷热沉的系统热阻为 0.42~0.35°C/W。Glover 等人^[2] 研究了蒸汽腔的各种加工方法, 分析了其区别和

不足, 并与传统热管进行了比较。Horiuchi 等人^[3] 研究了一种针对 CPU 的微槽道蒸汽腔结构, 其结果表明微型蒸汽腔的传热特性较相同尺寸的铜板提高 30%左右, 并可减小热阻 0.1°C/W 左右。Hsieh 等人^[4] 通过实验研究了用于电子封装的平板蒸汽腔在不同热流、不同工作压力下的扩散热阻, 结果表明当热流为 220 W/cm² 时, 其扩散热阻为 0.2°C/W。Huang 等人^[5] 实验研究了以自然对流方式应用在大功率 LED 的蒸汽腔的传热特性, 并与相同尺寸的铜板和铝板进行了对比。

本文基于平板蒸汽腔的工作原理, 设计加工了一种小型平板蒸汽腔, 并进行了实验研究, 还介绍了其工作原理、加工工艺以及实验结果。

1 平板蒸汽腔的原理

图 1 所示的是平板蒸汽腔的工作原理。如图 1

收稿日期: 2011-01-12; 修订日期: 2011-03-19

基金项目: 国家 973 资助项目 (No.2009CB320203)

作者简介: 胡 润 (1987-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 主要从事电子散热与封装的研究。

所示,热量从热流传递到蒸汽腔的底部的蒸发区域,工作介质吸热相变为气体,扩散到整个平板蒸汽腔的腔体,到达腔体内部上表面冷凝,放出热量,将热量传递到翅片热沉而散走,冷凝下来的工作介质在内部毛细芯的作用下,回流到蒸发区域进行下一轮工作循环。如此循环往复,将小面积的热源的高密度热流扩散到大面积的翅片热沉上,降低了热流密度,增强了翅片的温度的均匀性,并提高了其散热效率。

平板蒸汽腔的工作原理与热管类似,唯一的区别在于热管是一维传热,热量沿着热管的轴向传递,而平板蒸汽腔是二维传热,热量在整个平板蒸汽腔的腔体内部传递,因此较热管,平板蒸汽腔具有更佳的传热特性。

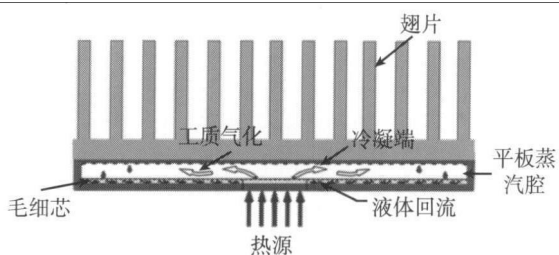


图 1 平板蒸汽腔的工作原理图

Fig. 1 Working mechanism of flat plate vapor chamber

平板蒸汽腔的工作原理已经不是一个新的概念,目前影响其工作特性的主要是其加工工艺,其内部结构的工作性能直接决定着平板蒸汽腔的传热特性,因此需要对其加工工艺进行研究。

2 平板蒸汽腔的加工

由平板蒸汽腔的工作原理可见,影响了整个系统的工作性能的因素主要是内部结构的加工工艺,比如内部毛细芯的加工、腔体的密封、抽真空和灌液等。图 2 是本文平板蒸汽腔的加工流程图。如图 2 所示,平板蒸汽腔的腔体加工好后,首先需要对其进行清洗,主要是为了去掉表面的灰尘和油污,然后对腔体和盖板进行铜粉烧结制作内部毛细芯结构,再进行扩散焊接,保证其密封性。经过正压检漏和负压检漏之后,才可以进行抽真空、灌液工艺,完成最后的系统封装。

2.1 铜粉烧结工艺

由于平板蒸汽腔的冷凝区域的冷凝液体是通过毛细芯的毛细力回流到蒸发区域而构成工作循环,其回流效率决定着内部工作循环的连贯性,因此毛细芯的质量起到至关重要的作用。目前,可以充当内

部毛细芯的结构有铜丝网、微槽道和铜粉烧结。铜丝网的流动阻力比较大,而且必须保证网层和网层之间、网层与管壁面之间的紧贴,否则其工作性能无法保证。微槽道结构复杂,加工困难,且其回流效率与槽道结构有很大关系。因此,本文选用铜粉烧结工艺来实现内部毛细芯。要实现良好工作性能的铜粉烧结结构,其主要控制参数是铜粉烧结层的铜粉颗粒的规格、铜粉烧结层的厚度和均匀度、烧结温度和烧结压力,这些都是影响最终的工作性能的关键技术指标。

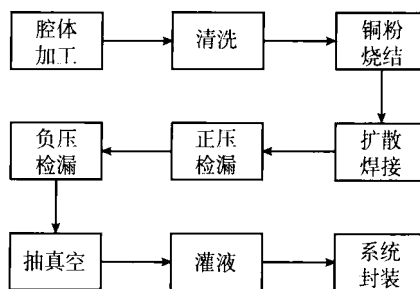


图 2 平板蒸汽腔的加工流程图

Fig. 2 Fabrication processes of flat plate vapor chamber

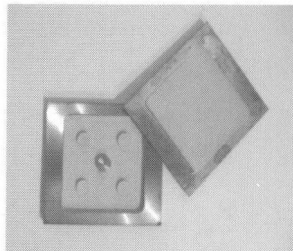


图 3 铜粉烧结样品

Fig. 3 Sintered copper powder sample

图 3 所示的是铜粉烧结的样品。从图中不仅可以看出本文的平板蒸汽腔的腔体的内部表面都烧结了一层厚度为 0.5 mm 的铜粉,还可以看出平板蒸汽腔的内部结构。如图所示,平板蒸汽腔内部有五个高度为 3 mm、直径为 10 mm 的圆柱,最中间一个是铜实体,周围四个是用铜粉烧结的。这五个圆柱体具有两方面的作用:(1) 支撑作用。在腔体后续的加工过程中,需要将腔体抽真空,内部的圆柱体可以起到支撑作用,以免腔体发生形变;(2) 缩短部分液体回流路径。旁边四个圆柱体是用相同颗粒尺寸的铜粉烧结而成,同样具有一定的毛细力,可以使中心冷凝的工质通过这四个圆柱体直接回流,缩短其回流路径和回流时间。

2.2 扩散焊接工艺

在后续加工过程中,需要对腔体进行抽真空,因

此需要对腔体进行密封加工。扩散焊接是在真空或保护气中,在一定的焊接温度和压力下,使接触面之间的原子互相扩散从而实现焊接的一种方法^[6]。扩散焊接较传统的密封方法,具有更好的密封性能,并可以承受更大的工作压力。本文采用扩散焊接技术,将烧结好铜粉后的腔体和盖板进行扩散焊接,并注水来测验其承压能力。

2.3 工作介质的选择

平板蒸汽腔内部工作介质对系统工作性能也具有重要影响。良好的工作介质应具有以下的特点:(1)与毛细芯、腔体材料能长期相容,化学性质稳定,对人体环境污染小;(2)汽化潜热高,热容小,启动特性好;(3)工作温度在正常沸点附近,有合适的饱和蒸汽压;(4)润湿性好,毛细力强;(5)导热系数高,传热性能强,热阻小。目前一般充当工作介质的主要有水、乙醇、甲醇、丙酮、氨水等。根据本文的平板蒸汽腔的材料特性和工作特点,选用丙酮作为工作介质。

3 实验测试及分析

按照上述的加工工艺,完成平板蒸汽腔的系统封装后,需要进行实际测试来验证加工工艺的质量。如图4是本文采用的实验测试台架示意图。平板蒸汽腔放置在加热棒上表面,通过支架与风扇连接起来,然后用旋转手柄压紧固定。

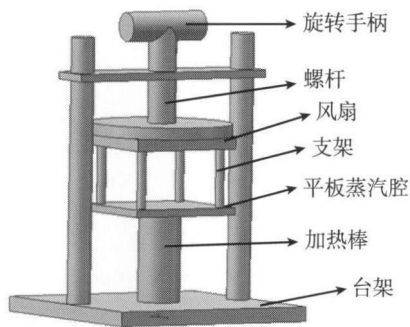


图4 实验台架简图

Fig. 4 Schematic of experimental setup

加热棒用棉花紧紧包围,防止热量沿加热棒的径向散走,保证热量是沿着加热棒的轴向传递,这样加热棒就可以看成是一维导热。加热棒上钻有等距的5个小孔,以插放热电偶,测量加热棒的温度分布,采用最小二乘法计算温度梯度。已知加热棒材料的导热系数 λ ,根据傅里叶定律,热流 q 为

$$q = -\lambda dT/dx \quad (1)$$

散热量 Q 为

$$Q = qA = q\pi r^2 \quad (2)$$

图5是平板蒸汽腔和铜板的顶部温度曲线图。从图中可以看出,平板蒸汽腔的顶部温度均匀性很好,各个热电偶测得的温度变化趋势相同,而铜板顶部的温度不均匀,温度梯度大。当开始输入热流时,平板蒸汽腔的温度增加得很快,随着时间的延长,温度的增长逐渐缓慢,最终达到稳态。

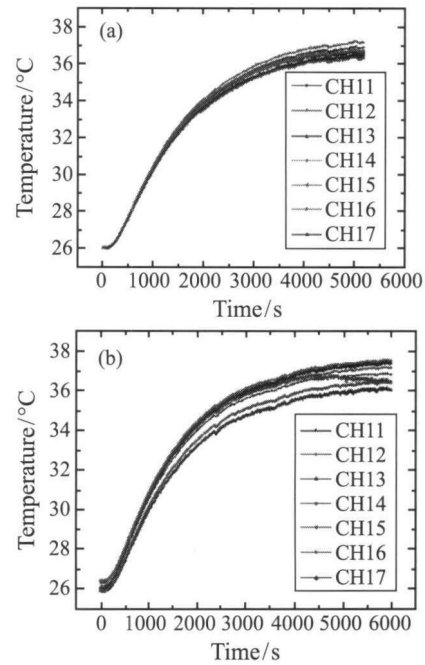


图5 平板蒸汽腔(a)和铜板(b)顶部温度与时间关系曲线
Fig. 5 Variation of the temperatures of the top surfaces of flat plate vapor chamber (a) and copper plate (b)

热阻一般是用来衡量传热性能的一个重要指标。图6是本实验中平板蒸汽腔测试结构部分的热阻图。 T_m 是加热棒的上表面的温度, T_{j1} 、 T_{j2} 是导热膏上下表面的温度, T_{cr} 是平板蒸汽腔底部中心的温度, T_{top} 、 T_{bot} 是平板蒸汽腔的上下表面的平均温度, T_{sur} 是环境温度。

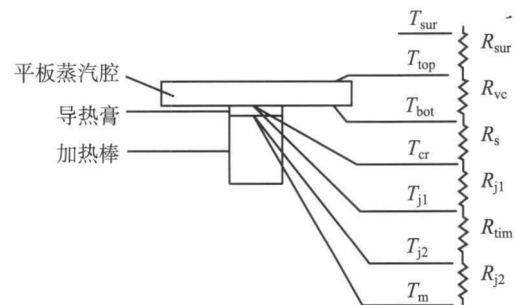


图6 平板蒸汽腔的实验测试系统热阻示意图
Fig. 6 Schematic of thermal resistance network of experimental setup

由图可知, 导热膏与加热棒的接触热阻为

$$R_{j2} = (T_m - T_{j2})/Q \quad (3)$$

导热膏的体热阻为

$$R_{tim} = (T_{j2} - T_{j1})/Q \quad (4)$$

导热膏与平板蒸汽腔的接触热阻为

$$R_{j1} = (T_{j1} - T_{cr})/Q \quad (5)$$

平板蒸汽腔的扩散热阻为

$$R_s = (T_{cr} - T_{bot})/Q \quad (6)$$

平板蒸汽腔的体热阻为

$$R_{vc} = (T_{bot} - T_{top})/Q \quad (7)$$

环境热阻为

$$R_{sur} = (T_{top} - T_{sur})/Q \quad (8)$$

在实际测量中, 由于加热棒和平板蒸汽腔的交界面上难以布置热电偶, 因此 T_{j1} 、 T_{j2} 、 T_{cr} 、 T_m 是不能测量的。但是在加热棒的温度场测量之后, 根据其温度梯度, T_m 是可以计算得到。因此, 这几项热阻之和为

$$R_{sa} = R_{j2} + R_{tim} + R_{j1} + R_s = (T_m - T_{bot})/Q \quad (9)$$

通过调节加热棒的电压, 即变化输入热流, 可以得到不同情况下的热阻值。图 7 是热阻 R_{sa} 和 R_{vc} 随着输入热流而变化的曲线图。从图中可以看出, 随着热流增大, 热阻逐渐减小。当输入热流从 3.4 W 变化到 22.1 W 时, R_{sa} 从 0.42°C/W 减小到 0.3°C/W, 而 R_{vc} 从 0.023°C/W 减小到 0.01°C/W。为了验证平板蒸汽腔的低热阻特性, 本文还采用相同的实验装置测量了铜板的热阻。如图 8 所示, 在输入相同的

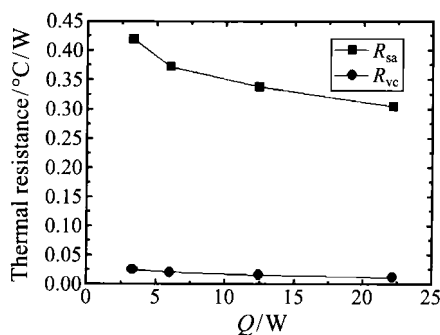


图 7 平板蒸汽腔的热阻与输入热流的曲线图

Fig. 7 Variation of the thermal resistance with the increase of input flux of flat plate vapor chamber

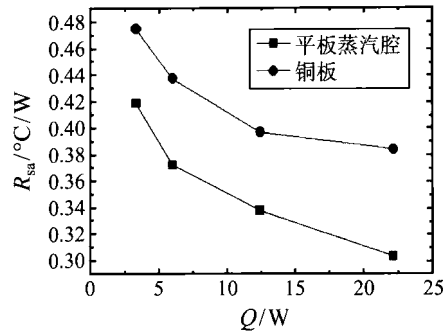


图 8 平板蒸汽腔与铜板的 R_{sa} 与输入热流的关系曲线图

Fig. 8 Comparison of the R_{sa} between flat plate vapor chamber and copper plate with the increase of input flux

热流的情况下, 平板蒸汽腔的热阻较铜板要小, 且热阻都随着输入热流的增大而减小。

4 结 论

本文根据平板蒸汽腔的工作原理, 采用铜粉烧结工艺、扩散焊接工艺进行平板蒸汽腔的加工, 并进行了实验测试。实验结果表明, 随着输入热流的增加, 平板蒸汽腔的热阻逐渐减小, 当输入热流为 22.1 W 时, 平板蒸汽腔的热阻为 0.01°C/W。实验中, 平板蒸汽腔还显示出良好的温度均匀性。本文还对相同厚度的铜板进行了实验测试, 发现其热阻较平板蒸汽腔的大, 这也就验证了平板蒸汽腔的低热阻特性。这种小型平板蒸汽腔可以应用到高密度热流的电力电子器件、大功率 LED 灯具等应用场所中去, 具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang H Y, Pinjala D, Teo P S. Thermal Management of High Power Dissipation Electronic Packages: from Air Cooling to Liquid Cooling [C]//IEEE, Electronics Packaging Technology Conference. 2003: 620-625
- [2] Glover G, Chen Y G, Luo A, et al. Thin Vapor Chamber Heat Sink and Embedded Heat Pipe Heat Sink Performance Evaluations [C]//25th IEEE SEMI-THERM Symposium. 2009: 30-37
- [3] Horiuchi Y, Mochizuki Ma, Mashiko K, et al. Micro Channel Vapor Chamber for High Heat Spreading [C]//10th Electronics Packaging Technology Conference. 2008: 749-754
- [4] Hsieh S S, Lee R Y, Shyu J C, et al. Thermal Performance of Flat Vapor Chamber Heat Spreader [J]. Energy Conversion and Management, 2008(49): 1774-1784
- [5] Huang H S, Chiang Y C, Huang C K, et al. Experimental Investigation of Vapor Chamber Module Applied to High-Power Light-Emitting Diodes [J]. Experimental Heat Transfer, 2009(22): 26-38
- [6] Shirzadi Amir A. Diffusion Bonding Aluminum Alloys and Composites: New Approaches and Modeling [D], U. K, University of Cambridge, 1997