

# 高密度金属微通道散热器成形及封装工艺研究\*

赵雯<sup>1</sup>, 吕辉<sup>2</sup>, 翟科<sup>1</sup>, 宋满仓<sup>1</sup>, 魏壮壮<sup>1</sup>, 姬学超<sup>1</sup>, 杜立群<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;

2. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 南京 210039)

**[摘要]** 对高密度金属微通道散热器的成形及封装工艺进行了研究。基于 UV-LIGA 技术制作了通道宽度为 100 $\mu\text{m}$ 、高度大于 500 $\mu\text{m}$  的高密度金属微通道底板, 并将微通道底板与盖板进行封装。针对高密度金属微通道散热器封装中存在的封装面无法完全贴合的问题, 提出了一种基于过渡层补偿的封装方法。为了满足封装气密性及强度的要求, 制作了标准试样, 进行了剪切试验, 对比了银浆、环氧树脂和金属锡浆 3 种过渡层材料的剪切强度。结果表明金属锡浆的剪切强度最大, 并进一步探究了封装面的表面粗糙度对结合强度的影响。基于上述工艺制作出了金属微通道散热器, 经 2MPa 水压密封性检测无泄漏, 满足使用要求。

**关键词:** 散热器; 微通道; 封装; UV-LIGA; 密封性

## Research on Forming Process and Packaging Technology of High Density Metal Microchannel Heat-Sink

ZHAO Wen<sup>1</sup>, LÜ Hui<sup>2</sup>, ZHAI Ke<sup>1</sup>, SONG Mancang<sup>1</sup>, WEI Zhuangzhuang<sup>1</sup>, JI Xuechao<sup>1</sup>, DU Liqun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

**[ABSTRACT]** The processing technology of high density metal microchannel heat-sink was studied. Based on UV-LIGA technology, the high density metal microchannel plate with 100 $\mu\text{m}$  in width and over 500 $\mu\text{m}$  in height was fabricated. Then the microchannel plate and the cover plate were packaged. Aimed at the problem that the sealing surface of the high density metal microchannel heat-sink can not be completely bonded when packaging, a novel method based on transition layer compensation was proposed. In order to meet the requirements of air tightness, a shear experiment was carried out in which the shear strength of silver paste, epoxy resin and solder paste were compared. The result shows that the solder paste has the largest shear strength and effect of surface roughness on the bonding strength was further explored. A metal microchannel heat-sink was fabricated based on above technologies. There is no leakage in 2MPa hydraulic seal test, which satisfies the design requirement.

**Keywords:** Heat-sink; Microchannel; Packaging; UV-LIGA; Seal

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.19.092

随着雷达等电子设备逐渐向小型化、高集成化发展, 各种元器件的工作频率越来越高, 封装密度越来越大, 导致电子器件热流密度急剧上升。这些热量若无法及时散出, 会造成器件内部芯片温度过高, 严重影响其工作的可靠性。因此, 高效散热是保障各电子器件正常工作的关键<sup>[1-3]</sup>。1981 年, Tuckerman 和 Pease<sup>[4]</sup> 首次提

出了水冷微通道散热的方法, 自此微通道散热技术以其更高的散热效率得到越来越广泛的关注。

微通道散热器的材料一般为硅<sup>[5]</sup>和金属。但由于硅材料易碎、导热性差。而金属材料具有更好的机械性能和导热性能, 因此金属微通道散热器得到更广泛的应用。微通道散热器的主要结构包括微通道底板和盖板两部分, 一般先在底板上制作出微通道结构, 再将微通道底板与盖板封装, 形成密封的微通道腔。其中金属微

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51375077, 51475245); 大连理工大学创新团队项目(DUT16TD20)。

通道的制作可以采用微铣削<sup>[6]</sup>、微细电解<sup>[7]</sup>等加工方式。但是这些微细加工方式得到的金属微通道宽度较大,表面质量差,而且密集度不高。有研究表明,随着微通道线宽的减小和密集度的增加,其散热效率逐渐增大<sup>[8]</sup>。因此,小线宽、高密集度是微通道散热的发展方向。基于UV-LIGA技术中紫外光刻和微电铸的技术优势,利用电化学沉积可以得到线宽小、深宽比大、侧壁光滑、表面粗糙度小的金属微通道结构,为金属微通道散热器的研制提供了新的解决途径。

目前金属微通道散热器的封装主要采用焊接成形的方式。许业林等<sup>[9]</sup>在分析设计液冷流道结构的基础上,采用搅拌摩擦焊成形了一种蛇形冷却流道。这种方法受搅拌头限制,腔体内微通道间肋条无法焊接,难以实现高密集微通道结构的整体焊接成形。杨鑫鑫等<sup>[10]</sup>通过优化扩散焊工艺的方法,制作了通道铝合金冷板。然而此种固相焊对焊件表面质量及平整度要求较高,若焊件平面度较差,会导致封装面间存在缝隙,进而使得焊接工艺无法实施。李春林<sup>[11]</sup>等利用矩形槽道微通道冷板氮气铝钎焊焊接技术,得到了密封良好且侧壁无变形的冷板。但此种方法对结构的选材有一定的限制,并且此过程对设备的要求较高。如果设备性能不稳定,会造成钎焊焊着率低,进而达不到焊缝强度要求。因此,焊接成形的工艺方法无法适用于结构密集、平面度较大的微通道底板与盖板间的高强度封装。

本文针对高密集金属微通道散热器的成形工艺进行了研究。基于UV-LIGA技术制作了通道宽度为 $100\mu\text{m}$ 、高度大于 $500\mu\text{m}$ 的高密集金属微通道底板,并将微通道底板与盖板封装成形。针对高密集金属微通道散热器封装中存在的封装面缝隙问题,提出了一种基于过渡层补偿的封装方法,并通过剪切试验选择了结合强度合适的过渡层材料,解决了封装面的间隙问题,实现了高密集金属微通道的高强度封装。

## 1 微通道散热原理及制作

### 1.1 微通道散热原理

金属微通道散热在高热流密度电子设备的热交换中表现出很大优势。图1为微通道散热器的系统图,冷却工质由工质供给系统运输,从微通道散热器一侧进入。被冷却器件产生的热量首先通过底板传导至微通道结构,随后被冷却工质“吸收”并运输至通道另一侧,最后由外部散热系统散逸,实现系统循环<sup>[12]</sup>。其中,散热器主要由盖板和微通道底板两部分组成。微通道底板加工成形后,再覆上盖板封装成形,使两部分封闭形成平行排布的矩形截面微通道腔。

### 1.2 微通道底板制作工艺

本文设计了如图2所示的微通道散热器,材料为具有优良导热性能的紫铜。散热器底板的外形尺寸为 $66\text{mm} \times 57\text{mm} \times 3\text{mm}$ ,通道宽度为 $100\mu\text{m}$ ,高度为 $500\mu\text{m}$ ,通道之间肋条的宽度分别为 $400\mu\text{m}$ 、 $1\text{mm}$ 。为便于封装,微通道四周分布了宽度为 $2\text{mm}$ 的边框。

由于本文制作的金属微通道线宽小、深宽比大,因此采用基于SU-8胶紫外光刻和微电铸的UV-LIGA技术进行制作,制作流程如图3所示。具体步骤如下:

(1) 胶膜制作。在预处理后的铜基底上旋涂SU-8光刻胶,经前烘、紫外曝光、显影等工艺步骤后,得到厚度大于 $500\mu\text{m}$ 的图形化胶膜。

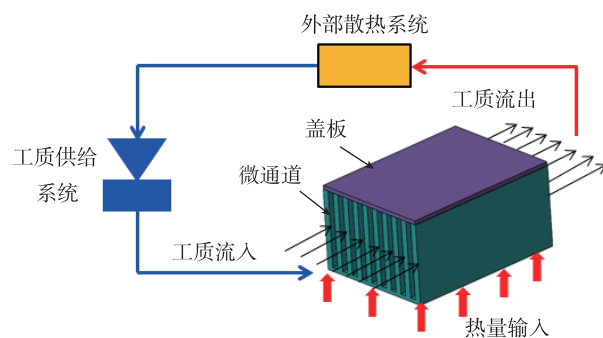


图1 微通道散热器散热系统图

Fig.1 Microchannel heat-sink cooling system

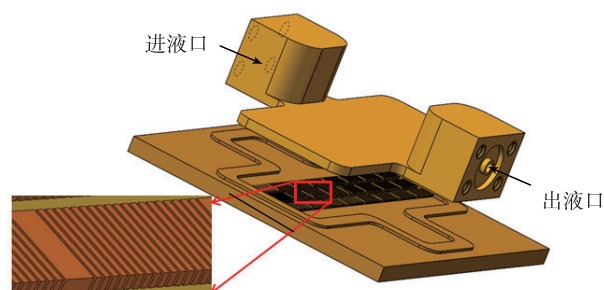


图2 微通道散热器示意图

Fig.2 Schematic diagram of microchannel heat-sink

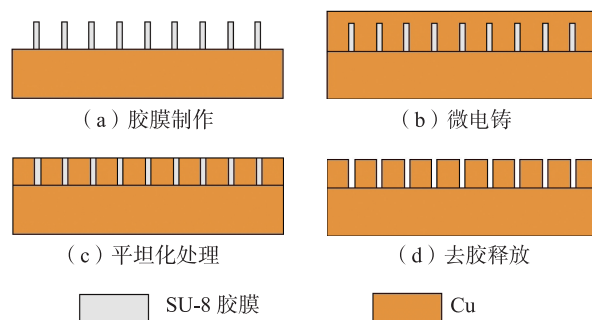


图3 金属微通道制作流程

Fig.3 Fabrication process of metal microchannel

(2) 微电铸。基于电化学原理,在图形化胶膜的空腔中沉积金属铜,直至铜铸层高度大于胶膜厚度。

(3) 平坦化处理。利用细粒度砂纸对电铸完成后的微通道结构进行研磨,使铸层高度达到指定要求,并减小表面粗糙度。

(4) 去胶释放。将处理后的结构浸入 SU-8 去胶液中并水浴加热,去除交联的 SU-8 胶后即得到微通道结构,如图 4 所示。

## 2 微通道散热器封装工艺

### 2.1 封装难点

微通道底板成形后,需与盖板封装形成密闭的微通道腔。在封装过程中,要避免密集分布的微通道出现变形、阻塞等缺陷。同时为避免微通道内冷却工质流动过程的“串扰”,保证散热效率,还要使微通道与盖板完全贴合、无缝隙。最后,微通道散热系统在工作时,散热工质需以一定压力流入。为保证正常工作,封装好的微通道散热器需在 1.5MPa 水压下无渗漏<sup>[13]</sup>。

本文制作的微通道底板外形尺寸较大,在现有加工技术下,这样尺寸的微通道底板和盖板在宏观上往往呈

现中间高两边低的翘曲形貌,平面度很难达到无缝封装的要求<sup>[14]</sup>。此外,由于微通道阵列结构在底板表面分布范围较广,平坦化处理后的微通道底板往往存在高度差异。图 5 为微通道结构和盖板封装面的三维轮廓图,微通道结构的平面度为 36 $\mu\text{m}$ ,盖板的平面度为 34 $\mu\text{m}$ 。由于微通道结构、微通道底板以及盖板不平整问题的存在,导致微通道结构与盖板的封装间存在缝隙,封装面无法完全贴合。这就使得扩散焊等焊接工艺在微通道底板的封装过程中无法实施,所以解决封装面缝隙问题是封装工艺的难点。

### 2.2 基于过渡层补偿的微通道封装工艺

为解决高密集金属微通道散热器封装过程中存在的封装面缝隙问题,本文提出了一种基于过渡层补偿的封装方法。封装原理如图 6 所示,封装前由于微通道结构和盖板的平面度差,封装面存在缝隙,无法完全贴合,如图 6 (a) 所示;采用基于过渡层补偿的方法封装后,缝隙被过渡层材料填满,微通道底板与盖板实现完全贴合,如图 6 (b) 所示。

#### 2.2.1 过渡层材料的选择与结合强度测试

为保证过渡层能够均匀涂覆至盖板表面,且不使微

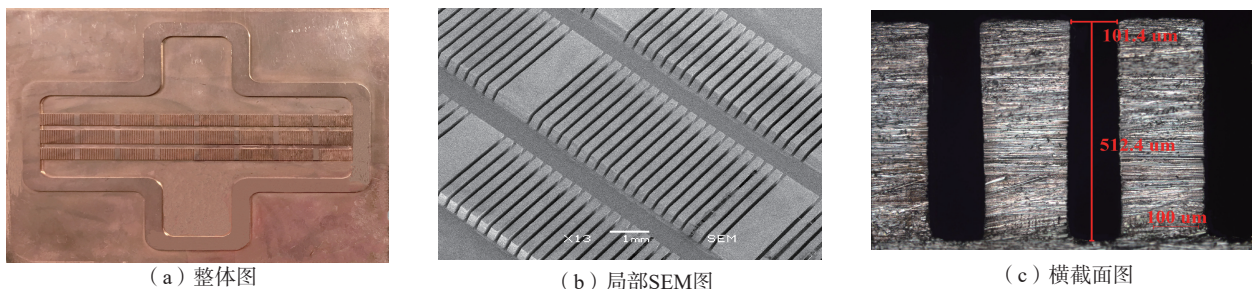


图4 制作后的微通道底板  
Fig.4 Fabricated microchannel plate

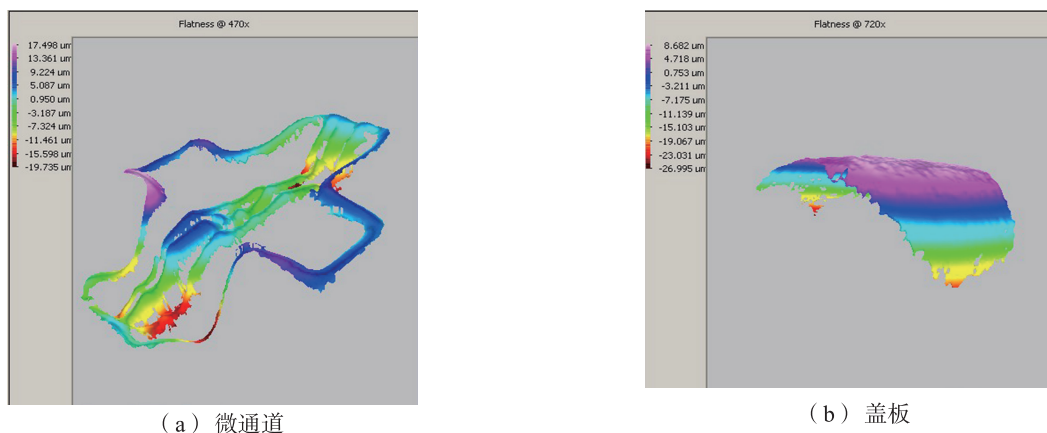


图5 微通道和盖板封装面的三维轮廓图  
Fig.5 Three dimensional outline of microchannel and cover plate package surface

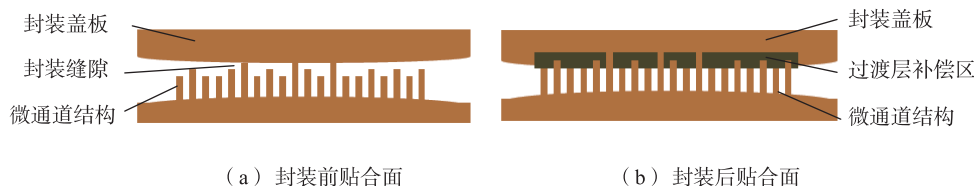


图6 微通道散热器封装原理图

Fig.6 Schematic of microchannel heat-sink packaging

通道发生阻塞,本文选取具有一定黏度的浆料作为过渡层材料,初步选定为银浆、环氧树脂和金属锡浆。此外,过渡层材料必须要满足封装后的气密性检测要求。因此,本文首先对3种过渡层材料的力学性能进行测试,以便判断结合强度是否满足要求并选出最佳的过渡层材料。

依据国家标准 GB 7124—86《胶粘剂拉伸剪切强度测定方法(金属对金属)》制备拉伸剪切试样,选取铜为基板,如图7所示。剪切强度测试试验共分3组,为排除试验过程中的偶然因素干扰、减小试验误差,每组测试样片试验3次。对每组的两片铜板进行相同的预处理,即使用丙酮清洗去除表面油污并用去离子水冲洗干净,之后分别涂覆相同量的3种过渡层浆料。其中,银浆和金属锡浆在涂覆后需要进行高温加热处理,以达到粘接要求。最后使用WDW-50E微型电子万能试验机测量试样的拉伸剪切强度,测试结果如表1所示。由测试结果可知,银浆粘接的样片剪切强度最小,只有0.5MPa,不满足强度要求;虽然环氧树脂样片的剪切强度大于1.5MPa,但考虑到金属锡浆样片的剪切强度为15.4MPa,远大于强度要求,因此最终选择金属锡浆作为过渡层材料。测试样片如图8所示。

金属的表面处理对结合性能有较大影响<sup>[15]</sup>,为进一步提高金属锡浆与铜板间的结合强度,本文对不同表面粗糙度的铜板与金属锡浆的结合性能进行了测试。样片制备标准同上,使用不同型号的砂纸(80#、320#、800#)对铜板试样进行抛磨处理,分别测出抛磨后的表面粗糙度。图9为铜板粗糙度与剪切强度的关系。可知,随着铜板表面粗糙度的增大,剪切强度也在增加。这是由于铜板的表面粗糙度增大时,其表面积也在增大,与金属锡浆发生相互作用的面积也增大,最终使得二者的结合强度增加。然而经过80#砂纸抛磨的铜板表面划痕较深,不利于后续使用。因此,本文选择采用320#砂纸在封装前对金属盖板与微通道结构表面进行处理,以进一步提高结合强度。图10为不同表面粗糙度的测试样片。

依据上述试验结果,本文最终选择金属锡浆作为过渡层材料,并在预置过渡层前,采用320#砂纸对封装面进行抛磨处理。

### 2.2.2 基于过渡层补偿的工艺方法

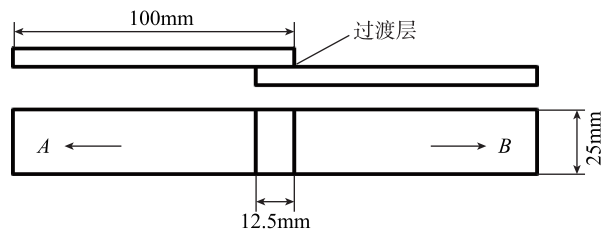


图7 拉伸剪切试样

Fig.7 Sketch map of tensile shear specimen

表1 不同过渡层测试结果

Table 1 Different transition layer test results

过渡层	银浆	环氧树脂	金属锡浆
平均剪切力 /kN	0.15	0.69	4.62
平均剪切强度 /MPa	0.5	2.4	15.4



图8 不同过渡层材料测试样片

Fig.8 Test samples for different transition layer materials

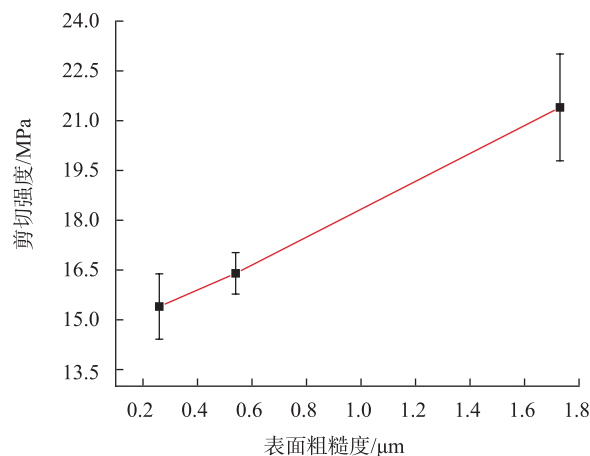


图9 基板粗糙度与剪切强度的关系

Fig.9 Relationship between roughness and shear strength of copper plate

封装过程的基本工艺方法步骤如图 11 所示,详细描述如下:

(1) 依据微通道整体结构尺寸,在盖板与微通道的贴合位置通过铣削加工出凹槽。为保证封装后无缝隙,凹槽的深度应大于等于微通道底板及盖板的平面度值之和。依据封装难点中平面度测试结果,凹槽深度确定为  $70\mu\text{m}$ 。图 12 (a) 和 (b) 分别为加工凹槽前后的盖板。

(2) 采用 320# 砂纸对盖板凹槽及微通道表面进行抛磨处理,以适当提高表面粗糙度。

(3) 在加工好的凹槽内均匀预置过渡层金属锡浆。为保证金属锡浆铺展的均匀性,本文采取喷涂的方式将金属锡浆均匀涂覆于凹槽内。同时为了消除封装缝隙,涂覆的金属锡浆要将凹槽填满。

(4) 将预置金属锡浆的盖板和微通道底板进行装卡。

为了提高封装时的定位精度,并防止金属锡浆进入微通道内发生堵塞,本文设计了如图 13 所示的卡具。

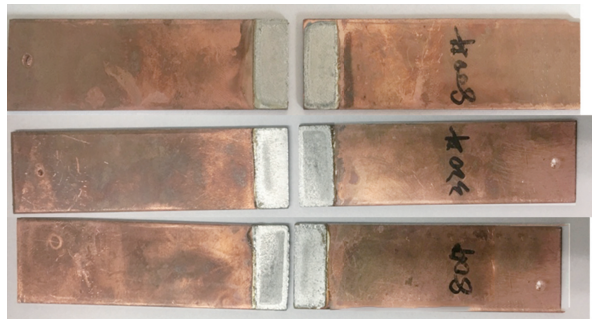


图 10 不同粗糙度测试样片

Fig.10 Different roughness test samples

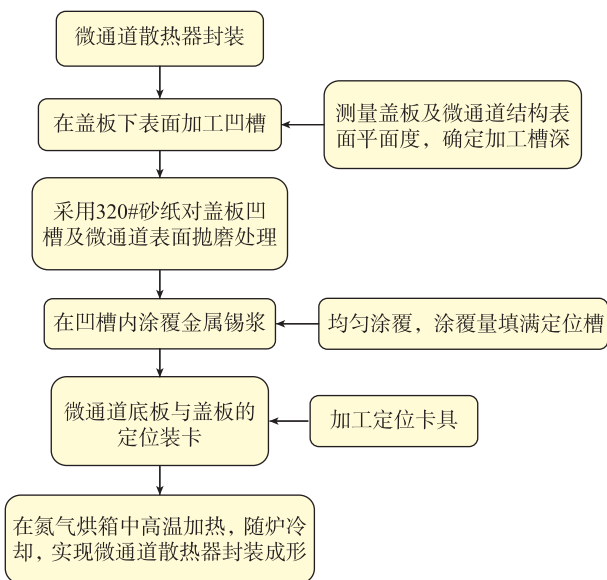


图 11 微通道散热器封装工艺流程

Fig.11 Packaging process flow of microchannel heat-sink

卡具包括卡具压板、卡具基座、定位板、紧定螺钉和紧固螺栓。定位板上加工有盖板定位槽、微通道底板定位槽、紧固螺栓孔以及紧定螺钉螺纹孔。其中定位板上的定位槽根据盖板及微通道底板的外形尺寸加工而成,定位板两侧使用紧定螺钉以保证定位精度。微通道底板定位槽的深度小于微通道底板的厚度,以通过紧固螺栓提供一定的压紧力。

装卡时,先将预置金属锡浆的盖板底面向上水平放置在定位板的定位槽内,旋紧两侧的紧定螺钉,以另两边为定位基准。然后将微通道底板水平放置在盖板表面,盖上卡具压板并拧紧紧固螺栓。

(5) 将装卡后的封装体置于氮气烘箱中高温加热后随炉冷却并拆装,实现盖板与微通道底板的封装。封装成形后的微通道散热器如图 14 所示。

### 3 微通道散热器密封性测试

本文采用直接压力法进行气密性检测,检测原理如图 15 所示。在密闭的微通道腔体内通入一定压力的气体,并将微通道散热器浸入水中,经过开阀充气、关阀稳定的过程,观察是否有气泡产生,并在一段时间间隔内观测压力值的变化。不同压力条件下的气密性测试结果如表 2 所示。测试结果表明,微通道散热器在 2MPa 压力下保持 30min,无气泡产生,密封性良好,能够满足 1.5MPa 工况的使用要求。



图 12 封装盖板

Fig.12 Package cover plate

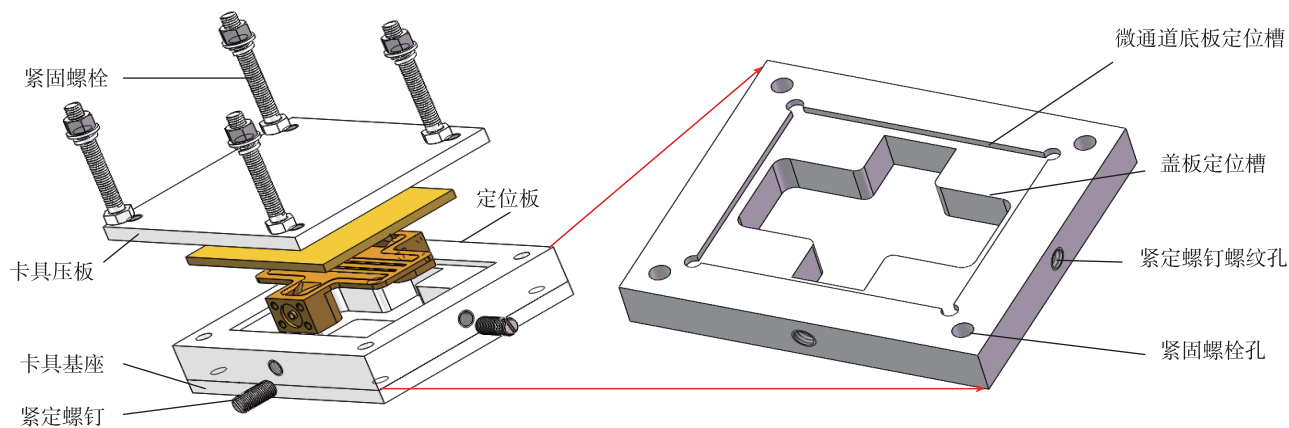


图13 微通道散热器封装卡具  
Fig.13 Microchannel heat-sink package fixture

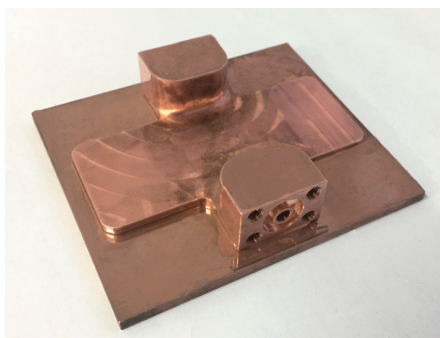


图14 封装成形的微通道散热器  
Fig.14 Packaged microchannel heat-sink

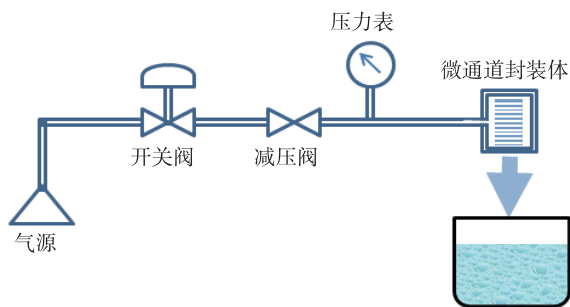


图15 检测原理图  
Fig.15 Detection schematic diagram

表2 不同压力条件下气密性的测试结果

Table 2 Air tightness test results in different pressure conditions

压力 /MPa	5min	15min	30min
0.8	无泄漏	无泄漏	无泄漏
1.0	无泄漏	无泄漏	无泄漏
1.5	无泄漏	无泄漏	无泄漏
2.0	无泄漏	无泄漏	无泄漏

## 4 结论

(1) 基于 UV-LIGA 技术制作了高密集金属微通道底板,微通道的宽度为 100 $\mu\text{m}$ ,高度大于 500 $\mu\text{m}$ 。

(2) 提出了基于过渡层补偿的封装方法,通过剪切试验比较了银浆、环氧树脂和金属锡浆的结合强度,最后选择剪切强度最大的金属锡浆作为过渡层材料,成功消除了微通道底板和盖板封装面的缝隙,并设计制作了封装夹具。

(3) 为进一步提高结合强度,比较了不同表面粗糙度的铜样片在使用金属锡浆粘结下的剪切强度,最后选择 320# 砂纸对盖板和微通道结构进行抛磨处理。

(4) 基于上述结果完成了高密集金属微通道散热器的成形与封装,并进行了密封性测试,满足使用要求。

## 参考文献

- [1] MAHAJAN R, NAIR R, WAKHARKAR V, et al. Emerging directions for packaging technologies[J]. Intel Technology Journal, 2002, 6(2): 62-75.
- [2] 过增元. 当前国际传热界的热点——微电子器件的冷却[J]. 中国科学基金, 1988(2): 24-29.  
GUO Zengyuan. Hot subject of the international heat transfer community—microelectronic cooling[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 1988(2): 24-29.
- [3] 周海峰, 邱颖霞, 鞠金山, 等. 电子设备液冷技术研究进展[J]. 电子机械工程, 2016, 32(4): 7-10.  
ZHOU Haifeng, QIU Yingxia, JU Jinshan, et al. Research development of liquid cooling techniques for electronic equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(4): 7-10.
- [4] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [5] YU J, CHENG P, MA Z, et al. Fabrication of miniature silicon wafer fuel cells with improved performance[J]. Journal of Power Sources, 2003, 124(1): 40-46.
- [6] VÁZQUEZ E, RODRIGUEZ C A, ELIAS Z, et al. An

experimental analysis of process parameters to manufacture metallic micro-channels by micro-milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(9-12): 945-955.

[7] LEE Y M, LEE S J, LEE C Y, et al. The multiphysics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 227-232.

[8] XIA G D, JIANG J, WANG J, et al. Effects of different geometric structures on fluid flow and heat transfer performance in microchannel heat sinks[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 80: 439-447.

[9] 许业林, 江海东, 雷党刚. 搅拌摩擦焊在液冷流道制造中的应用[J]. 电子工艺技术, 2012(5): 300-302.

XU Yelin, JIANG Haidong, LEI Danggang. Application of FSW to liquid cooling channel manufacturing[J]. Electronics Process Technology, 2012(5): 300-302.

[10] 杨鑫鑫, 侯凯. 高效散热窄通道铝合金冷板扩散焊接及成型技术研究[J]. 制导与引信, 2016, 37(1): 49-52.

YANG Xinxin, HOU Kai. Research on diffusion welding and forming technology of high efficient heat dissipation aluminum alloy cooling plate with narrow passageway[J]. Guidance and Fuse, 2016, 37(1): 49-52.

[11] 李春林. 矩形槽道微通道冷板制造工艺技术[J]. 电子机械工程, 2009, 25(4): 38-40.

LI Chunlin. Microchannel cold-plate processing technology[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(4): 38-40.

[12] 王艳. 基于 MEMS 加工工艺的复杂结构微通道散热器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

WANG Yan. Investigation of microchannel heat sink with complicated channel structure based on MEMS technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[13] 赵仁祥. 高效散热微通道液冷冷板焊接技术及成形工艺研究[J]. 电子机械工程, 2008, 24(4): 33-36.

ZHAO Renxiang. Study on brazing technique and formation technology of cold plates with efficiently radiating liquid cooling microchannels system[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2008, 24(4): 33-36.

[14] 范建华, 邓永波, 宣明, 等. PC 微流控芯片黏接筋与溶剂的协同辅助键合[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 708-713.

FAN Jianhua, DENG Yongbo, XUAN Ming, et al. Synergistic bonding process of solvent and tendon for PC-based microfluidic chips[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 708-713.

[15] CEVIK P, KARACAM N, ERASLAN O, et al. Effects of different surface treatments on shear bond strength between ceramic systems and metal brackets[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017, 31(10): 1105-1115.

通讯作者: 杜立群, 博士、教授, 研究方向为微机电系统、微细加工, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第91页)

### 参考文献

[1] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 96-99.

YUAN Hongxuan. Manufacturing technology of connecting hole

in aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(1): 96-99.

[2] 何胜强. 大型飞机数字化装配技术与装备[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

HE Shengqiang. Digital assembly technology and equipment for large aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[3] DEVLIEG R. Robotic trailing edge flap drilling system[J/OL]. SAE Technical Papers, 2009, https://www.electroimpact.com/WhitePapers/2009-01-3244.pdf.

[4] ROOKS B. Automatic wing box assembly developments[J]. Industrial Robot, 2001, 28(4): 297-302.

[5] 王一军. 基于工业机器人的飞机壁板高速精确制孔系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

WANG Yijun. Study on high-speed accurate drilling system of aircraft panels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[6] 魏明哲. 机器人自动制孔控制系统软件开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

WEI Mingzhe. Control-software development of robot drilling system[D]. Hagnzhou: Zhejiang University, 2012.

[7] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(24): 61-64.

BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(24): 61-64.

[8] 陈海峰, 李海伟, 徐骥, 等. 自动制孔设备在某飞机尾翼装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 74-78.

CHEN Haifeng, LI Haiwei, XU Jian, et al. Research and application of automatic drilling equipment in empennage assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 74-78.

[9] 刘顺涛, 陈雪梅, 郭喜锋, 等. 飞机蒙皮自动制孔工艺设计研究[J]. 制造业自动化, 2017(4): 87-90.

LIU Shuntao, CHEN Xuemei, GUO Xifeng, et al. Research on the process of automatic holing for air-plane skin[J]. Manufacturing Automation, 2017(4): 87-90.

[10] 刘军. 机器人自动制孔技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 104-107.

LIU Jun. Application of robot automatic drilling technology in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 104-107.

[11] 徐银超, 陈浩, 曾滔, 等. 切削参数对碳纤维复合材料制孔质量的影响[J]. 硬质合金, 2016(5): 336-339.

XU Yinchao, CHEN Hao, ZENG Tao, et al. Influence of process parameters on drilling quality of CFRP materials[J]. Cemented Carbide, 2016(5): 336-339.

[12] MOHAN N S. Machining of fiber-reinforced thermoplastics: influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2005, 24(12): 1247-1257.

[13] DAVIM J P. 复合材料加工技术[M]. 安庆龙, 陈明, 宦海洋, 译. 北京: 国防工业出版社, 2016.

DAVIM J P. Machining composite material[M]. AN Qinglong, CHEN Ming, HUAN Haixiang, trans. Beijing: National Defence Industry Press, 2016.

通讯作者: 薛宏, 硕士、工程师, 研究方向为飞机数字化装配技术, E-mail: 490311912@qq.com.

(责编 大漠)