

基于银焊膏电流烧结的航天功率分立器件气密封装

章永飞 李欣 梅云辉

(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

文 摘 由于传统气密封装方法在封装的过程中会给电子器件带来不利的影响,本文基于银焊膏电流烧结快速互连技术,提出了一种新型的气密封装方法,可用于航天功率分立器件的密封。本文研究了通电过程中接头温度、微观形貌以及剪切强度的变化。在银焊膏电流烧结的过程中,随着有机物的去除,烧结银层升温速率急剧下降,并且最初被有机物分离的银颗粒逐渐相互接触。随着通电时间延长,烧结银接头越来越致密,伴随着接头强度的不断提高。最终获得的烧结银密封接头可以满足封装器件对气密性的要求。

关键词 银焊膏, 电流烧结, 气密封装, 分立器件

中图分类号: TG454

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.04.009

A Hermetic Packaging Method for the Aerospace Power Discrete Device Based on Current Assisted Sintering of Silver Paste

ZHANG Yongfei LI Xin MEI Yunhui

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract Due to the traditional hermetic packaging methods would have adverse effects on electronic devices during the packaging process, a new hermetic packaging method based on current assisted sintering of silver paste was proposed, which can be used for the hermetic sealing of the aerospace power discrete device. In this paper, the changes of temperature, microstructure and shear strength of the sintered joint during the process of current assisted sintering of silver paste have been studied. During the process of current assisted sintering of silver paste, the heating rate drops dramatically after the removal of organics. It facilitates the initially separated silver particles to contact with each other. With the prolongation of current-on time, the sintered silver joint becomes denser, which leads to the improvement of shear strength of sintered silver joint. Finally, the sealing performance of sintered joint can meet the requirements of hermeticity.

Key words Silver paste, Current assisted sintering, Hermetic packaging, Discrete device

0 引言

随着科学技术的发展,微电子器件被广泛应用于航空航天、油气开采等重要领域。由于使用环境的特殊性,一旦环境中的气体和水分进入器件内部,通常会使得封装体内部芯片及电路受到外部环境的腐蚀,进而导致设备退化和过早失效^[1]。为了确保微电子器件内部保持恒定的环境,以获得最佳的操作性能和更长的使用寿命,需要对封装的气密性状况严格把控,并通过气密性封装以保护电子电路免受应用环境的恶劣影响^[2]。

Au80Sn20合金焊料因其高熔点(280℃)、良好的机械性能和抗疲劳性能,被广泛应用于电子器件的气密封装^[3-4]。然而在气密封装之前,在管壳的内部已经完成好了芯片、元器件与基板的互连,Au80Sn20合金焊

料封装过程需要升温至300℃以上^[5],高温可能会造成芯片的破坏以及焊点的重熔^[6]。相比之下,平行封焊和电阻焊技术可以通过熔化盖板和管壳的接触面再冷却凝固形成密封接头,可以实现连接接头局部区域的加热,而无需将整个器件加热到高温^[2,7]。然而电阻焊在气密封装过程中会破坏器件表面保护镀层,在潮湿或盐雾环境中使用时密封接头会受到腐蚀。银焊膏作为一种新型的互连材料被广泛应用于电子封装领域中^[8-9],它可以通过电流烧结的方式实现快速连接^[10-12],过程与电阻焊类似,可以实现接头局部区域加热,与电阻焊不同的是通电过程不会熔化母材,避免保护镀层被破坏。

本文提出一种新型的气密封装方法,该方法基于银焊膏电流烧结快速互连技术,可以避免传统气密封

收稿日期:2021-01-08

基金项目:国家自然科学基金(No. 51401145);国家高技术研究发展计划(No. 2016YFB0100602)

第一作者简介:章永飞,1995年出生,硕士研究生,主要从事功率电子器件气密封装工作。E-mail: yfzhang96@163.com

通信作者:李欣,副教授,主要从事功率电子封装的工艺与可靠性工作。E-mail: xinli@tju.edu.cn

装方法的缺点,可以有效降低封装过程对电子器件本身性能的不利影响,以满足航天功率器件高可靠性要求。

1 试验

1.1 试验材料

本文用于气密封装的航天功率分立器件如图1所示,其中图1(a)为盖板,图1(b)为管壳。管壳和盖板均由 Kovar 合金制成,表面镀有 Ni/Au 层,用来提高器件的抗腐蚀性能。本文所用银焊膏由微小银颗粒和有机物混合而成,有机物包含分散剂、黏合剂和稀释剂,分散剂用来防止银颗粒的聚合和团聚,黏合剂用来确保聚合物稳定,稀释剂用来提高焊膏流动性以便于印刷^[13]。

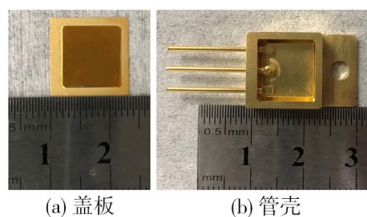


图1 航天功率分立器件示意图

Fig. 1 Schematic of aerospace power discrete devices

1.2 试样制备

密封样品的制备过程包含以下几个步骤:首先,将焊膏通过钢网印刷到盖板上,印刷图案和尺寸依据管壳上面需要密封的区域;然后对焊膏进行预干燥处理,防止在电极压力下出现溢出的情况,在 90 °C 下预干燥 20 min;最后,使用本课题组自行设计的焊接机头对银焊膏进行通电烧结,电极压力设定为 10 MPa。试样的制备过程如图2所示。因为温度对烧结银接头性能影响很大,因此用红外热相机记录了电流烧结过程中焊膏层的温度变化。

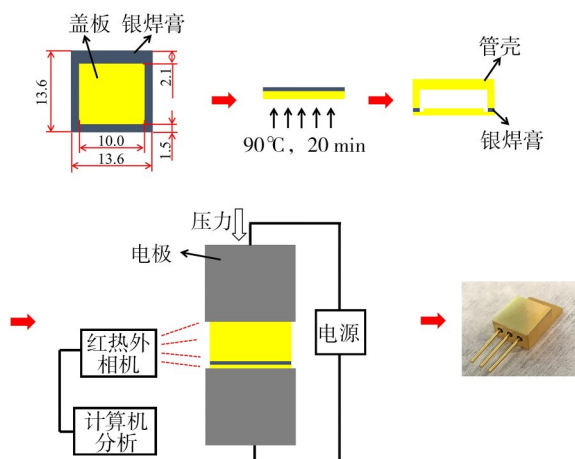


图2 基于银焊膏电流烧结的电子组件气密封装过程示意图
Fig. 2 Schematic of the hermetic packaging process of electronic components based on current assisted sintering of silver paste

1.3 性能表征

利用 Hitachi S4800 扫描电子显微镜对电流烧结银接头的微观结构进行了表征,分析通电过程银焊膏的

变化情况。为了评价接头的连接质量,采用 XTZTEC-Condor150 型剪切试验机,在 $4 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的剪切速度下测定了接头的剪切强度。为了评估密封电子组件的气密性,根据 GJB 548B—2005 标准中规定的方法,利用氦质谱仪对密封电子组件进行泄漏率的检测与氟油粗检。

2 结果与讨论

2.1 通电过程接头温度变化

图3显示了在 5.0 kA 电流条件下通电 2 500 ms 烧结银接头温度变化曲线,可以明显地看出来,通电结束前曲线分为两个阶段:快速升温阶段和慢速升温阶段。在快速升温阶段,银焊膏中含有大量的有机物,导致其电阻较高,通电时会产生大量的焦耳热。而随着温度的不断升高,焊膏内的有机物会不断地烧蚀和挥发,会造成银焊膏电阻下降,电阻的下降造成了升温速率的降低^[11]。图4为本文所用银焊膏热重分析(TGA)结果,当温度大于 300 °C 时,焊膏的质量不再减少,说明焊膏中的有机物已经挥发完毕。通电 500 ms 时接头温度达到了 298.5 °C,焊膏中的有机物基本挥发完毕,导致升温速率出现了明显的下降。

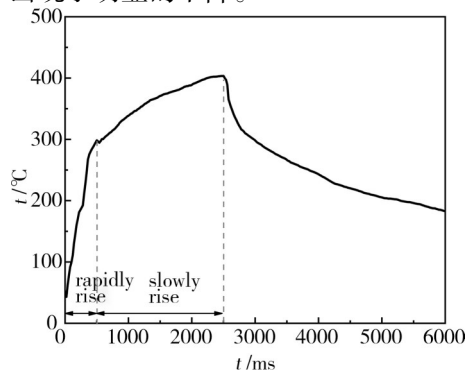


图3 烧结接头温度曲线

Fig. 3 Temperature profile of sintered joint

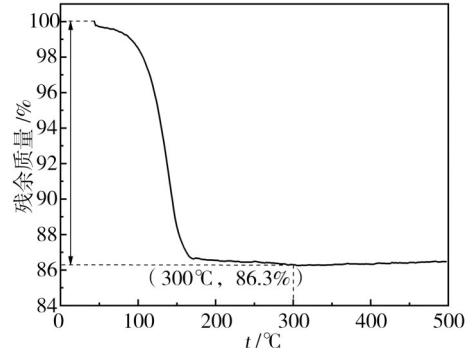


图4 银焊膏热重分析(TGA)

Fig. 4 Thermogravimetric analysis of silver paste

2.2 微观分析

图5分别给出了通电时间为 200、500、1 500、2 000 和 2 500 ms 的烧结银接头的微观图片。通电 200 ms 时,接头温度仅到达了 170.2 °C,根据图4中 TGA 分析,此时银焊膏内的有机物未完全逸散,有机物会阻碍银颗粒之间的聚集,从图5(a)中可以发现此时银颗粒之间相互独立,接头中存在大量分散的

银颗粒,它们彼此之间没有形成连接。通电 500 ms,根据 2.1 中的分析,有机物基本完全逸散,银颗粒之间的接触程度会增加,如图 5(b)所示,银颗粒聚集程度增加,银颗粒之间出现了颈连,但是仍然存在分散的银颗粒。继续增加通电时间,彼此接触的银颗粒会通过扩散逐渐形成颈连接,并且接头温度也会继续增加,温度越高越有利于银原子的扩散,银颗粒之间的充分扩散有利于银焊膏的充分烧结,从而促进了烧结银接头的致密化^[14],越致密的烧结接头越有利于提高接头的性能。如图 5(c)、(d)和(e)所示的烧结接头中独立的银颗粒逐渐消失,银颗粒之间的连接程度逐渐增加,烧结银接头越来越致密。

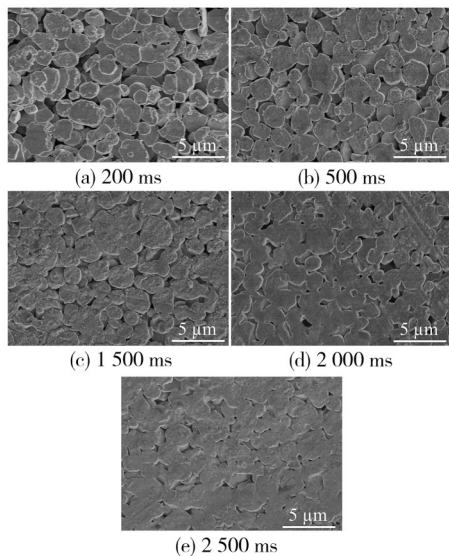


图 5 不同通电时间下烧结银接头微观形貌

Fig. 5 Microstructure of sintered silver joints fabricated at different current-on time

除此之外,有研究表明烧结银接头的屈服强度会随着温度的升高而减小^[15]。Mei 等人^[16]研究银焊膏电流烧结接头的致密化机制发现当接头的温度超过 400 °C,烧结银接头在电极压力的作用下会发生塑性变形,大的或者连续的孔洞会被变形的颗粒分割、填充并被挤压闭合,烧结银接头进一步致密化。当通电 2 500 ms 时,接头的温度达到了 403.4 °C,在如此高的温度下,烧结银接头会在 10 MPa 的电极压力下发生塑性变形,消除一些连续的孔隙,从而增加了银颗粒之间的接触面积,从而增强了致密化。图 5(e)所示通电烧结 2 500 ms 的接头中孔隙趋于闭合,形成了非常致密的接头。致密程度越高越有利于提高接头的剪切强度,同时对提高密封性能也有好处。

此外,通电 500 ms 时接头温度达到了 298.5 °C,根据 TGA 曲线,此时焊膏中的有机物几乎完全挥发。而根据微观形貌分析,此时烧结银接头未致密化,接头中有大量的孔隙,未形成密封接头,挥发的有机物可以很容易地逸散至腔体外。有机物挥发完全后,烧结银接

头才逐渐致密化形成密封接头。因此,在形成致密的密封接头之前,有机物可以很容易地逸散至腔体外,气密封装后样品内部几乎无有机物残留。

2.3 接头强度

图 6 给出了不同通电时间下烧结银接头的剪切强度,当通电 1 000 ms 时接头强度仅仅为 11.1 MPa。随着通电时间的增加,烧结银接头的剪切强度不断增加。通电时间增加到 1 500 ms,剪切强度增加到 25.2 MPa。通电时间进一步增加,通电 2 000 ms 和 2 500 ms 时,剪切强度分别为 38.6 MPa 和 46.5 MPa。接头温度随着通电时间的增加而不断增加,温度越高越有利于银原子的扩散^[17],从而越有利于银焊膏的充分烧结。因此,烧结接头会随着通电时间的增加越来越致密,使得接头的剪切强度也会随着通电时间的增加而增大。剪切测试结果与微观分析结果一致。

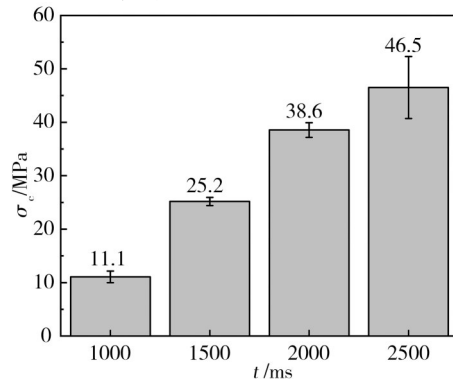


图 6 同通电时间下烧结银密封接头的剪切强度

Fig. 6 Shear strength of sintered silver joints fabricated at different current-on time

2.4 气密性表征

气密封装最关键的是要保证接头的密封性能,如果接头中存在明显的气孔或裂纹等缺陷,那么无法保证封装器件的气密性。利用超声扫描显微镜面扫描模式(C-scanning acoustic microscope, C-SAM)对烧结银层进行检测,观察是否有气孔、裂纹等缺陷。5.0 kA 下通电 2 500 ms 的烧结银接头的 C-SAM 检测结果如图 7 所示,其中外围深色的环形区域表示烧结银密封环,可以看出密封环颜色均匀一致,表明烧结银层无明显裂纹和孔洞等缺陷。烧结银层与盖板和管壳的界面紧密结合,未发生分层。

为了定量地分析银焊膏电流烧结气密封装器件的气密性,利用氦质谱仪对密封器件进行了泄漏率的检

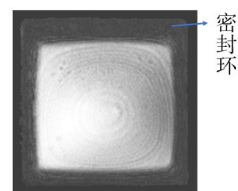


图 7 烧结银密封环 C-SAM 检测图片

Fig. 7 C-SAM testing image of sintered silver seal ring

测,6个密封样品的泄漏率值见表1。检测的样品中泄漏率最大值为 $3.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,低于GJB 548B—2005规定的拒收泄漏率极限 $5.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (拒收极限依据密封腔体体积)。并且6个样品经过氟油粗检时,未发现有连续的气泡从腔体中冒出,表明粗检合格。

表1 泄漏率检测结果

Tab. 1 Result of leak rate testing

编号	泄漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	编号	泄漏率/ $\text{Pa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	3.9×10^{-4}	4	3.6×10^{-3}
2	4.5×10^{-4}	5	6.1×10^{-4}
3	7.6×10^{-4}	6	4.8×10^{-4}
平均泄漏率		1.0×10^{-3}	

3 结论

本文基于银焊膏电流烧结快速互连技术对航天功率分立器件进行了气密封装,分析了电流烧结过程中接头温度的变化情况,结合温度变化分析了通电过程中银焊膏烧结的过程以及接头剪切强度的变化情况,最后对该气密封装方法的密封性能进行了表征,得出以下结论:

(1)在通电烧结的过程中,焊膏层的升温速率随着有机物的排出而急剧下降。

(2)焊膏中的有机物排出以后,原本被有机物隔离的银颗粒之间开始相互接触,并逐渐形成颈连接。通电时间继续延长,温度继续上升,银颗粒之间的连接越来越明显,接头逐渐致密化。

(3)与烧结银接头微观结构变化情况一致,接头的剪切强度随着烧结银致密程度的提高而增加。

(4)基于银焊膏电流烧结气密封装的航天功率分立器件的气密性达到标准要求。

参考文献

[1] AU K Y, ZHI D M, CHIDAMBARAM V, et al. High temperature durable hermetic sealing material selection and reliability comparison for IR gas sensor module packaging [C]// 2016 IEEE 18th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2016.

[2] KHANNA P K, BHATNAGAR S K, GUST W. Analysis of packaging and sealing techniques for microelectronic modules and recent advances [J]. *Microelectronics International*, 1999, 16(2): 8-12.

[3] 刘文胜, 黄宇峰, 马运柱. Au80Sn20合金焊料的制备及应用研究进展[J]. *材料导报*, 2013, 27(11): 1-6.

LIU W S, HUANG Y F, MA Y Z. Research progress in preparation and application of Au80Sn20 solder alloy [J]. *Materials Review*, 2013, 27(11): 1-6.

[4] 王刘珏, 薛松柏, 刘晗, 等. 电子封装用Au-20Sn钎料研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(15): 2483-2489.

WANG L J, XUE S B, LIU H, et al. Research progress of Au-20Sn solder for electronic packaging [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(15): 2483-2489.

[5] ZHANG H, LIU Y, WANG L, et al. A new hermetic sealing method for ceramic package using nanosilver sintering technology [J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 81: 143-149.

[6] 严伟. 微电子组装技术在现代雷达中的应用[J]. *微电子学*, 1994, 24(1): 59-63.

YAN W. Application of microassembly technology to modern radar [J]. *Microelectronics*, 1994, 24(1): 59-63.

[7] WANG J, HE X, LI X, et al. Hermetic packaging of Kovar alloy and low-carbon steel structure in hybrid integrated circuit (HIC) system using parallel seam welding process [C]// 2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. Chengdu, 2014: 347 - 351.

[8] PENG P, HU A, GERLICH A P, et al. Joining of silver nanomaterials at low temperatures: processes, properties, and applications [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(23): 12597-12618.

[9] HU B, YANG F, PENG Y, et al. Effect of SiC reinforcement on the reliability of Ag nanoparticle paste for high-temperature applications [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(3): 2413-2418.

[10] LU G, LI W, MEI Y, et al. Measurements of electrical resistance and temperature distribution during current assisted sintering of nanosilver die-attach material [C]// 2014 International Conference on Electronics Packaging. Chengdu, 2014: 538 - 543.

[11] LU G Q, LI W, MEI Y, et al. Characterizations of Nanosilver Joints by Rapid Sintering at Low Temperature for Power Electronic Packaging [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2014, 14(2): 623-629.

[12] MEI Y, CAO Y, CHEN G, et al. Rapid sintering nanosilver joint by pulse current for power electronics packaging [J]. *IEEE Transactions on Device & Materials Reliability*, 2013, 13(1): 258-265.

[13] 姜涵宁, 李欣, 梅云辉. 基于低温烧结银的航天功率模块基板大面积连接工艺改进[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(6): 91-94.

JIANG H N, LI X, MEI Y H. Improvement of low temperature large-area sintering silver process for aerospace power module substrate bonding [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2019, 49(6): 91-94.

[14] AKADA Y, TATSUMI H, YAMAGUCHI T, et al. Interfacial bonding mechanism using silver metallo-organic nanoparticles to bulk metals and observation of sintering behavior [J]. *Materials Transactions*, 2008, 49(7): 1537-1545.

[15] CHEN X, LI R, QI K, et al. Tensile behaviors and ratcheting effects of partially sintered chip-attachment films of a nanoscale silver paste [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(10): 1574-1579.

[16] MEI Y, LI L, LI X, et al. Electric-current-assisted sintering of nanosilver paste for copper bonding [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(12): 9155-66.

[17] BAI J G, LEI T G, CALATA J N, et al. Control of nanosilver sintering attained through organic binder burnout [J]. *Journal of Materials Research*, 2007, 22(12): 3494-3500.