

高硅铝合金真空钎焊接头组织与性能测试研究

陈潇潇, 侯玲, 徐道荣

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: 选用 Cu 箔、Zn 及 BA188SiMg 片状钎料作为填充金属, 采用真空加热方法进行高硅铝合金的钎焊连接, 对接头进行光学金相、显微硬度、扫描电子显微等测试、分析、研究。结果表明: 3 种钎料钎焊高硅铝合金, 通过凝固、结晶等过程形成冶金结合, 生成共晶体和固溶体组织, 形成可靠的连接接头, 外观良好。

关键词: 高硅铝合金; 真空钎焊试验; 接头显微分析

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)04-0013-04

Microstructure and Properties Testing of Hypereutectic Si-Al Alloy Vacuum Brazed Joint

CHEN Xiao-xiao, HOU Ling, XU Dao-rong

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Hypereutectic Si-Al Alloys were connected by vacuum soldering with the filler of BA188SiMg, pure copper and zinc, and the joints of brazing were analyzed and researched by optical microscope, Vickers and scanning electron microscopy. The results show that hypereutectic Si-Al alloys can be connected hard with the solid solution and eutectic by the process of solidification and crystallization with three brazing filler metals, and reliable joints with good surface are formed.

Key words: hypereutectic Si-Al alloy; vacuum brazing experiment; microstructure analysis of joint

由于微电子技术的迅猛发展, 电子封装也不断向小型化、轻量化和高性能方向发展^[1], 高硅铝合金(Si 的质量分数达 60%~80%)就是由此而开发出来的新一代电子封装材料。它的主要作用是密集的电子线路提供机械支撑以及作为导电连接介质。高硅铝合金的热膨胀系数和大多数半导体材料相匹配, 高热传导率也满足电子器件对封装材料的散热要求, 低的密度使其在航空航天系统的运用中产生了良好的经济效益。高硅铝合金还具有合理的刚度和良好的机加工性能, 由此类合金加工而成的封装结构具有广阔的应用前景^[2-4]。

高硅铝合金的焊接方法有真空电子束焊、真空钎焊、激光焊等^[5-6]。文中试验选用 Cu 箔、Zn 和

BA188SiMg 片状钎料, 采用真空加热方式进行高硅铝合金的钎焊试验, 探讨不同钎料和中间层对高硅铝合金进行钎焊时的元素扩散行为和其对所形成的接头组织形貌与性能的影响。

1 试验准备和工艺参数

母材选用 Si 的质量分数达 65% 的高硅铝合金并将其切割成 14 mm×8 mm×3 mm 的薄块。钎料分别选用 Cu 箔、Zn 和 BA188SiMg 片状钎料。焊前采用机械和化学相结合的方法去除母材及钎料表面的氧化膜和油垢。

钎焊温度、钎料厚度和保温时间是真空钎焊 3

收稿日期: 2012-01-10

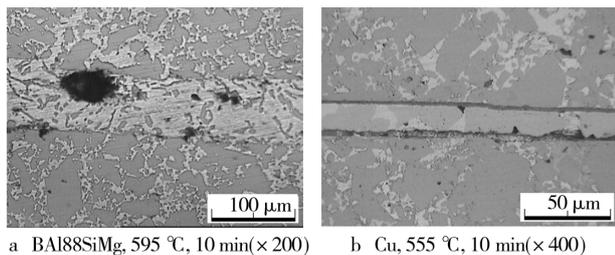
作者简介: 陈潇潇(1987-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为钎焊、激光焊等先进焊接方法和工艺。

个重要的工艺参数。试验中,钎焊温度选用高于钎焊共晶温度或钎料熔化温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;根据 Moffatt 和 Wulff 发表的关于接头厚度和强度的函数曲线^[7],钎料厚度选取在 0.05 mm 左右;加热至设定温度后均保温 10 min 。

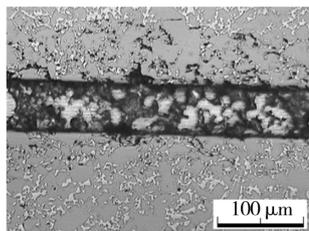
2 试验结果和讨论分析

2.1 接头金相分析

BA188SiMg 钎料与高硅铝合金的基本成分相近,具有良好的冶金相容性。从图 1a 中可以看出,钎料母材连接较好,接合面的气孔、裂缝少,说明钎料对母材的润湿性好。由于真空钎焊冷却速度较慢,长期存在的液态钎料会与母材发生强烈的扩散反应,钎料中的 Al 元素浓度大于母材中的 Al 元素浓度,导致母材扩散区的 Al 元素含量升高,而钎焊温度没有达到 Al, Si 发生共晶反应的温度,这些扩散到母材中的 Al 元素会形成 Al 基固溶体。在图 1 中可以看到钎缝中出现了较大的孔洞,这可能是因为钎焊时钎缝中的气体未能及时逃逸。Cu 是重要的合金元素,有一定的固溶强化效果,此外,时效析出的 CuAl_2 形成均匀分布的硬质质点,对位错切过产生阻力,使强度增加,韧性降低。当钎焊温度达到 Al-Si-Cu 三元共晶温度时,在 Al 晶界表面首先生成液相,之后扩展到整个界面, Cu, Al 原子相互扩散,形成金属间化合物。在图 1b 中看到焊缝两侧明



a BA188SiMg, $595\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min ($\times 200$) b Cu, $555\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min ($\times 400$)



c Zn, $385\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 min ($\times 200$)

图 1 钎焊接头金相照片

Fig. 1 Metallographic photo of brazed joint

显的冶金反应区。用 Zn 片作中间层金属钎焊高硅铝合金的金相图片如图 1c 所示, Zn, Al 之间的相互溶解度很大。这样在润湿的开始阶段就会出现猛烈的浸蚀,使填充材料的粘度升高,不能充分流动达到毛细管较远的部位。在这种情况下冷凝时,焊缝及其两侧的扩散区出现细小的缩孔和缩松。钎缝中亮白色的不规则块状物可能是未扩散溶解的残余 Zn, 灰黑色物相是依托这些 Zn 骨架长出的 Al 在 Zn 中的固溶体组织。

2.2 接头区能谱分析

为了了解焊缝中元素的扩散与分布,对试样进行了线扫描和能谱分析。

Zn 片作中间层的接头区线扫描图如图 2a 所示,可以看出接头元素的成分变化为: Si 元素从母

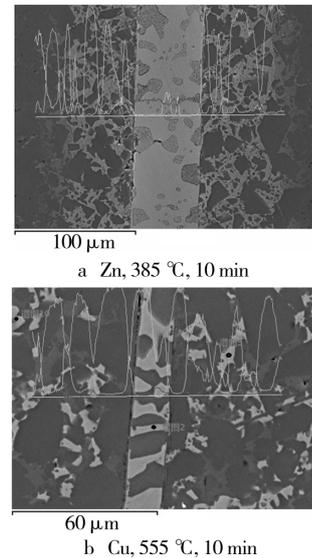


图 2 钎焊接头区扫描图谱

Fig. 2 Scan maps of brazed joint

材区到扩散区成分基本没有变化,在钎缝区明显减少,只有微量,这说明 Si 元素基本没有参加元素间的扩散迁移,少量融入 Al, Zn 形成混合相。Al 元素在母材区含量最高,从扩散区到钎缝中心区含量逐渐减少,而 Zn 元素在中心区含量高,扩散区中的 Zn 分布均匀, Zn 元素向母材中大量扩散,这表明母材钎料反应充分,元素扩散均匀。在钎缝中心区和扩散区中 Zn 元素含量大于 Al 元素含量,最后冷凝生成大量的单质 Zn 和 Zn 基固溶体以及 Zn-Al 共晶组织。从图 2 中看出 Zn-Al 固溶体大多为大小不一

的灰色不规则块状物,分布在焊缝中心区及扩散区,而在固溶体的间隙中夹杂的条状白色物相是共晶组织。Zn-Al 固溶体能使基体晶格畸变,导致滑移面“粗糙”,增加了位错运动的阻力,因此提高了塑性变形的抗力,强化了钎焊接头。

能谱分析 Cu 钎焊接头区,Cu,Al 2 种元素均匀地分布在钎缝中心区和扩散区。钎焊扩散区范围很宽,这是母材钎料相互渗透的结果,说明 Cu,Al 2 种元素互扩散比较充分。由于中间层 Cu 箔较薄,扩散区的 Cu 元素相对于铝元素较少,形成了 Al-Si-Cu 三元富 Al 区,在 548 °C 发生共晶转变 L→α+θ (Al₂Cu)。从表 1 中可以看出,在 3 个谱图中 Cu 原

子占总原子的百分比为 22.30%,21.26%,21.94%,Al 原子占总原子的百分比为 56.20%,41.62%,43.76%,钎接头区中 Cu,Al 原子个数百分比大约是 1:2,这就证实了文中试验的金属间化合物大多是 Al₂Cu。Al₂Cu 是硬脆相,分布均匀的 Al₂Cu 硬质颗粒有利于提高接头的强度,而过多的 Al₂Cu 聚集生长则会导致接头变脆,强度大幅下降,因此要严格控制钎焊温度和保温时间,防止钎焊中金属间化合物的长大聚集加剧应力集中,导致组织容易萌生裂纹。在钎缝的中心区还发现了微量的从母材中扩散过来的 Si 元素,适量的 Si 元素在钎缝中能减少缩松、缩孔等缺陷。

表 1 铜钎焊接头区元素分布

Table 1 Element distribution of copper brazed joints

谱图 2			谱图 5			谱图 10		
元素(线系)	质量分数/%	原子数分数/%	元素(线系)	质量分数/%	原子数分数/%	元素(线系)	质量分数/%	原子数分数/%
C K	6.69	18.00	C K	9.80	25.34	C K	8.40	22.19
O K	1.20	2.43	O K	0.91	1.77	O K	1.15	2.28
Al K	46.91	56.20	Al K	36.18	41.62	Al K	37.20	43.76
Si K	0.53	0.61	Si K	8.57	9.47	Si K	8.05	9.09
Ni K	0.83	0.46	Ni K	1.02	0.54	Ti K	0.40	0.27
Cu K	43.84	22.30	Cu K	43.52	21.26	Ni K	0.87	0.47
						Cu K	43.94	21.94

2.3 接头区硬度分析

使用 MH-3 型电子显微硬度计测量 3 个试样,试验载荷为 200 g,加载时间为 10 s,分别测定试样钎缝中心区、扩散区和母材区的维氏硬度,x=0 处为钎缝正中心,得到的硬度分布规律如图 3 所示。钎缝中心区和扩散区的硬度大约为 100HV,硅铝合金本体硬度,一般在 250HV 以上。这主要是由于母材中的 Si 含量高,Si 相的硬度较大,在焊接过程

中 Si 元素的扩散有限,在焊缝中心区只有微量的 Si 元素。3 个试样中以 Cu 为中间层的钎焊接头扩散区硬度最高,这是因为扩散区中均匀分布着很多硬质金属间化合物,这些金属间化合物提高了焊接接头扩散区的硬度。BA188SiMg 钎料由于含有少量 Si 元素,与 Al 形成的固溶体强化了焊缝组织,所以钎缝中心区的硬度在 3 个试样中最高。Zn 的本身硬度较低,试验中 Zn 中间层的厚度最大,形成的焊缝中心区及扩散区最宽,接头平均硬度最低。

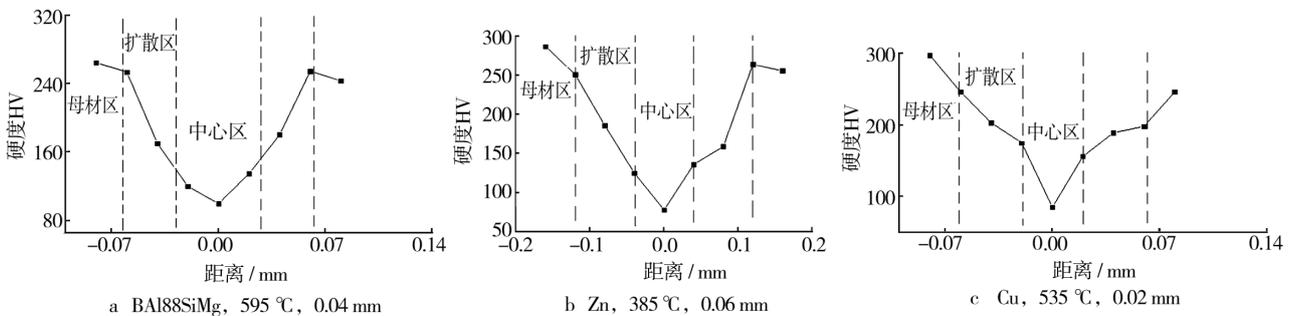


图 3 钎焊接头区硬度曲线

Fig. 3 The curves of brazed joints' hardness

2.4 接头区形貌分析

采用 Zn 中间层的钎缝区 SEM 形貌如图 4a 所示,在钎缝中心区中出现了很多大小不一、形状不规则的灰色物相,这些是母材中扩散来的 Al 与 Zn 形成的 Zn 基固溶体,起着强化钎缝的作用。在扩散区,黑色块状物是 Si 相,分布在其四周的是 Zn-Al 固溶体。从图 4 中可以看出钎焊接头的扩散区较宽,说明钎料与母材冶金反应比较充分,由于 Zn 与 Al 的电极电位差异不大,从母材到钎缝中心的电极电位过渡平缓,抗电化学腐蚀性能得到提高。

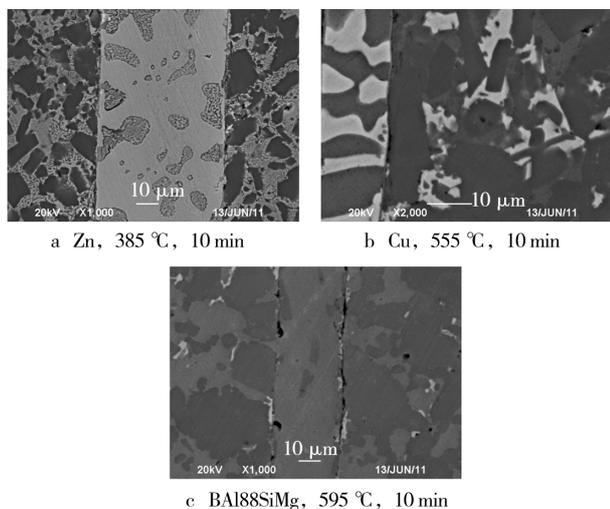


图 4 钎焊接头的显微组织(SEM)

Fig. 4 Microstructures of interface zone of brazed joints

Cu 中间层的接头区形貌如图 4b 所示,主要由黑色的 Si 相,深灰色的富 Al 相和白色的 Cu-Al 固溶体组成。在母材扩散区中,黑色 Si 相和深灰色的富 Al 相相互连接决定了扩散区的主要性能,白色区域由 Al_2Cu , AlCu 等金属间化合物和 Cu-Al 固溶体组成,呈不规则形状镶嵌分布在扩散区中。图 4b 中钎焊接头扩散区出现了少量微裂纹,这主要是硬脆的金属间化合物在冷凝时受到应力的作用,导致开裂。

BA188SiMg 钎料钎焊接头区形貌如图 4c 所示,可以看到在界面区有一条深灰色冶金反应带依托于母材向钎缝生长,在钎缝一侧呈波浪状。这是由于钎缝在冷凝时,与母材同成分的 Al 元素最易以母材中的 Al 晶粒为晶核外延生长,形成的枝晶犬牙交错获得了十分牢固的冶金结合。同时钎料中的第二相 Si 必然会向 Al 晶粒做一定程度的晶间渗透,适量的晶间渗透能使钎缝更加牢固。BA188SiMg

钎料与母材成分相似,具有良好的冶金相容性,所形成的接头抗腐蚀性优于用完全不同种类的钎料钎焊高硅铝合金所形成的接头。从图 4c 中还可以看出部分间隙未填满的缺陷,这是由于机械去除氧化膜时母材或钎料表面凹凸不平,间隙不均造成的。

3 结语

1) 使用 Cu 箔、Zn 片和 BA188SiMg 片状钎料真空钎焊高硅铝合金均能获得外观良好的接头。

2) 在文中的试验条件下,母材中的 Si 元素基本没有参与冶金反应。在母材中的 Al 元素与钎料的相互扩散中,形成了大量的固溶体基体相,强化了接头区组织。

3) 3 种钎焊接头钎焊中心区和扩散区硬度均比母材低,硬度值曲线呈“U”形。用 Cu 中间层钎焊时生成的 Al_2Cu , AlCu 等 Cu-Al 金属间化合物是硬脆相,能提高扩散区硬度,而 BA188SiMg 钎料中的少量 Si 元素提高了接头中心区的 Si 元素含量,该钎焊接头中心区硬度相对最高。

4) 以 Zn 为中间层,钎焊温度低,较适用于电子元器件的封装焊接;Cu 钎焊接头中易生成 Al_2Cu 等金属间化合物,能提高钎焊接头的硬度,但大量的 Al_2Cu 相会降低接头强度,并易导致微裂纹出现;BA188SiMg 钎料拥有良好的冶金相容性,所得接头比软钎焊接头强度高。

参考文献:

- [1] 黄强,顾明元. 电子封装用金属基复合材料的研究现状[J]. 电子与封装,2003,10(3):23-25.
- [2] 杨会娟,王志法,王海山,等. 电子封装材料的研究现状及进展[J]. 材料导报,2004,18(6):86-90.
- [3] 甘卫平,陈招科,杨伏良,等. 高硅铝合金轻质电子封装材料研究现状及进展[J]. 材料导报,2004,18(6):79-82.
- [4] 张济山. 新型喷射成形轻质、高导热、低膨胀 Si-Al 电子封装材料[J]. 材料导报,2002,16(9):1-4.
- [5] 韩莉,姜伟. Al-Mg-Sc 合金与 LY12ZC 合金激光焊接工艺的研究[J]. 表面技术,2008,37(4):52-53.
- [6] 曹丽杰. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷的研究进展[J]. 表面技术,2009,38(3):68-71.
- [7] 康显澄,沈勇将,潘健武. 真空冶金学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982:496.