

Effect of Sn Content on Brazing Properties of Ag Based Filler Alloy

Xiaorong Wang*, Dingkun Yu, Yanming He*, Shisheng Huang, Rong Chen

Research and Development Center, Hangzhou Huaguang Advanced Materials Co., Ltd., Hangzhou
Email: *wangxiaorong@cn-huaguang.com, *heyanning1984@yahoo.com.cn

Received: Nov. 16th, 2012; revised: Dec. 7th, 2012; accepted: Dec. 18th, 2012

Abstract: Sn and Ni element were introduced into Ag-Cu-Zn filler alloy, and the effect of Sn content on microstructure and brazing properties of Ag based filler alloy was analyzed by OM, SEM and XRD. The results indicated that the Ag-Cu-Zn filler alloy was mainly comprised of Ag based solid solution, Cu based solid solution and CuZn compounds. A trace amount of Ag_2Cu_2O occurred in the filler alloy while the content of Sn exceeded 4 wt% in the filler. However, the Cu-Sn intermetallics were not detected in the range of composition in the research. By using DSC analysis, the melting temperature of the filler alloy was decreased with increasing Sn content. The wettability test showed that the stainless steel could be wetted by the Ag-Cu-Zn based filler alloy with different Sn content. Besides, this kind of filler alloy was used to join stainless steel by torch brazing, and a compact bonding could be obtained at the substrates/filler alloy interface. The maximum joint strength could reach 450 MPa while the filler contained 3.0 wt% Sn element. While the content of Sn exceeded 3.0 wt% in the filler, the joint strength decreased sharply due to the existence of few oxides.

Keywords: Ag Based Filler Alloy; Sn Content; Microstructure; Mechanical Properties

Sn 含量对银钎料焊接性的影响

王晓蓉*, 余丁坤, 贺艳明*, 黄世盛, 陈 融

杭州华光焊接新材料股份有限公司研发中心, 杭州
Email: *wangxiaorong@cn-huaguang.com, *heyanning1984@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012 年 11 月 16 日; 修回日期: 2012 年 12 月 7 日; 录用日期: 2012 年 12 月 18 日

摘 要: 通过往 Ag-Cu-Zn 系钎料内添加适量的 Sn 和 Ni 元素, 利用 OM、SEM、XRD 研究了钎料内 Sn 含量对钎料组织与焊接性能的影响。结果表明: Ag-Cu-Zn 系钎料内主要成分为: Ag 基固溶体; Cu 基固溶体; CuZn 化合物; 当 Sn 含量达到 4 wt% 时, 出现少量的 Ag_2Cu_2O 化合物。在本研究设计的成分范围内, 钎料内并未出现 Cu-Sn 金属间化合物。差热分析表明: 随着 Sn 含量的增加, 钎料的固液相线温度均出现不同程度的下降。润湿试验表明: 相同的加热温度下, 不同 Sn 含量的银钎料均可对不锈钢形成良好的润湿。此外, 采用该系列钎料手工火焰钎焊了不锈钢与不锈钢, 得到的接头内母材/钎料界面处形成了致密的连接, 无缺陷存在; 当 Sn 含量为 3.0 wt% 时, 得到接头的最高拉伸强度达到了 450 MPa; 当 Sn 含量超过 3.0 wt% 时, 由于钎料内少量氧化物的存在使接头性能出现大幅度下降。

关键词: 银钎料; Sn 含量; 显微组织; 力学性能

1. 引言

近年来, 电子信息产业、家电、汽车、军工和建

*通讯作者。

筑装饰材料等行业发展迅猛, 钎焊技术在这些产业中扮演了重要的作用, 钎料行业也由此获得了高速发展^[1,2]。银钎料是目前工业生产中应用最广泛的一类中温

硬钎料。该类钎料熔点适中；润湿性和填缝能力好；钎料本身的强度高，塑性好，导电性、导热性和耐腐蚀性均优良，能用来钎焊几乎所有的黑色金属和大部分有色金属，如低碳钢、高温镍基合金、铜及铜合金等^[3]。该类钎料以不同 Ag 含量为基础，配合一定量的 Cu 和 Zn 以满足钎料对熔化温度和力学性能的要求。其中，Cu 是最主要的合金元素，添加 Cu 可降低 Ag 的熔化温度，又不会形成脆性相；添加 Zn 可进一步降低钎料的熔化温度。为了降低 Ag-Cu-Zn 三元合金的熔化温度，缩小熔化温度区间，改善钎焊工艺性，可在此基础上添加 Cd、Sn、Ga、In 等元素^[4,5]。其中，含 Cd 银钎料以其优异的性能，如低的熔化温度，优良的润湿能力，成为银钎料中最具活力的钎料，在工业领域获得过广泛的应用。但 Cd 的毒性及对环境的危害引起人们广泛地关注，欧盟、美日等国以及国内均已明令禁止使用含 Cd 材料^[6]。如何在提高钎料内 Ag 含量的前提下(Ag 是贵金属资源，属于国控资源)，开发出具有绿色环保的新型银基无镉中温钎料势在必行，成为中温硬钎料研发的热点。

这些替代 Cd 的元素中，Ga、In 和 Sn 由于其特殊性质引起人们的广泛关注。Ga 熔点仅 29.8℃，放入手心就可熔化，但沸点却高达 2403℃；且 Ga 的化学性质不活泼，常温下几乎不与氧和水发生反应，也不溶于强酸和强碱。但前期试验表明，钎料内加入 Ga 后容易引起成分不均匀，由此可以导致钎料熔点的变化。In 熔点也仅有 156℃，加入银钎料中可降低钎料的固、液相线温度；同时可使钎料熔化温度区间缩小，并提高钎料的流动性^[7]。但 In 价格昂贵，影响其在工业上的大范围应用。Sn 的熔点为 232℃，添加 Sn 可显著地降低 Ag-Cu-Zn 三元合金的固、液相线及熔化温度区间；同时可改善钎料的流动性和润湿能力；与 Ga 和 In 相比，Sn 价格低廉。现已开发了系类 Ag-Cu-Zn-Sn 钎料，但对该系钎料内各相的形成机制却鲜有文献报道，同时对钎料内 Sn 含量的最佳范围也缺乏深入研究。

本研究在 BAg20CuZn 钎料内添加一定的 Sn 和 Ni，添加 Sn 的目的是降低钎料的熔化温度和改善钎料的润湿性；添加少量 Ni 的目的是增强钎料的可成型性及高温抗氧化能力。在此基础上，研究了钎料内 Sn 含量对钎料组织和焊接性的影响。

2. 实验

本研究采用的原材料为 Ag, Cu, Zn, Sn 和 Ni，其中 Cu 为电解铜；Ag, Zn, Sn 和 Ni 的纯度均为 99.99%。表 1 为不同成分的 BAg20CuZnSnNi 钎料。熔炼是钎料制备中最关键的一环，本研究采用的熔炼工序如下：熔炼的起始阶段，将 Ni, Cu 和 Ag 加入中频感应炉内；熔清后快速加入 Zn 和 Sn，同时加入少量的稀土元素来细化晶粒，并进行搅拌和捞渣；熔体出炉前加覆盖剂覆盖，出炉后继续搅拌捞渣，然后浇注。

测定钎料的熔点：采用德国耐驰公司的差热分析仪测定钎料的熔点，其中样品重量为 20 mg，升温速度和降温速度分别为 20℃/min。

润湿性实验：按照 GB/T11364-2008 的标准进行铺展性试验，基体为不锈钢。其中烘箱温度设置为 850℃，保温 45 s。

钎焊试验：采用本研究配置的不同 Sn 含量的 BAg20CuZnSnNi 钎料手工火焰钎焊不锈钢与不锈钢，并采用拉伸试验评价接头性能的高低。

显微组织观察和物相鉴定：采用扫描电镜观察钎料内的显微组织，借助能谱仪确定各相的成分；采用 XRD 确定钎料内的物相。

3. 结果与讨论

3.1. BAg20CuZnSnNi 钎料的显微组织

图 1 为 BAg20-1.5Sn 钎料的背散射电子像(注：以 BAg20-1.5Sn 为例，说明该类钎料的显微结构特点)。如图所示，钎料内组织均匀，不存在气孔和夹杂缺陷。由图 1(b)可知，钎料内存在三种典型的组织，表 2 为这几种组织的能谱分析结果。一种为灰色的基体组织，如箭头 1 所示，能谱显示其成分为 Cu47.08Zn40.54Ag9.53Sn1.57Ni1.28 (wt%)，该区域主要含 Cu 和 Zn，

Table 1. Composition of BAg20CuZnSnNi filler alloy in the experiments

表 1. 试验用 BAg20CuZnSnNi 钎料成分

序号	成分(wt%)				
	Ag	Cu	Zn	Sn	Ni
BAg20-1.5Sn	19.1	41.5	38	1.5	1.3
BAg20-2.2Sn	20	43	33.5	2.2	1.3
BAg20-3Sn	20	42	33.5	3	1.5
BAg20-4Sn	19.5	39	36.5	4	1.2

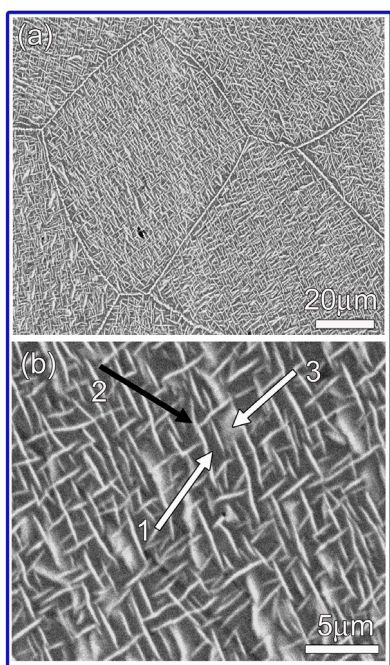


Figure 1. Back scattered electron micrographs of BAg20-1.5Sn filler alloy: (a) Low magnification; (b) High magnification
图 1. BAg20-1.5Sn 钎料的背散射电子像: (a) 低倍; (b) 高倍

Table 2. Composition at different positions shown in Figure 1(b)
表 2. 图 1(b)中不同位置的成分分析结果

标号	成分(wt%)					可能相
	Ag	Cu	Zn	Sn	Ni	
1	9.53	47.08	40.54	1.57	1.28	CuZn; Cu
2	11.42	45.85	40.44	1.12	1.16	Ag; CuZn
3	24.32	37.67	35.79	1.09	1.13	Ag; CuZn

结合后续 XRD 分析可知该区域应该是 Cu 基固溶体和 CuZn 化合物, 两者内分别固溶了一定的 Ag, Sn 和 Ni 元素; 第二种为灰白色的针状组织, 这种组织在钎料内纵横交错, 构成钎料的主体组织, 如箭头 2 所示。能谱分析表明该区域主要含 Ag, Cu 和 Zn, 其中 Ag 含量相比区域 1 明显提高, 结合后续研究可知该区域主要由 Ag 基固溶体和 CuZn 化合物组成; 钎料内第三种组织如箭头 3 所示的大块灰白色相, 其中 Ag 含量相比区域 2 明显提高, 达到了 24.32 wt%, Cu 和 Zn 含量出现了下降, 比例接近 1:1, Sn 和 Ni 含量在两区域中含量差异不大, 该区域主要组成也为 Ag 基固溶体和 CuZn 化合物, 与区域 2 相比, Ag 基固溶体在该区域中所占的比例较高。

在熔炼过程中, 当熔融的液态钎料开始凝固时, 由于 Cu 的熔点较高(1083℃), 凝固组织中首先析出初

生 α -Cu。当凝固温度降至 902℃时, 参考 Cu-Zn 二元相图^[8]可知二者间可发生包晶反应, 剩余液相与初始 α -Cu 作用生成 β 相, 其实质为 CuZn 化合物。 β -CuZn 相位于初始 α -Cu 和液相之间, 对继续进行包晶反应有阻碍作用, 因此最后的包晶产物中将残留一部分初始 α -Cu 相。这过程中, Ag, Sn 和 Ni 可部分逐渐固溶于 α -Cu 和 CuZn 化合物中。由于 Sn 和 Ni 在钎料内的含量较低, 随着温度的下降将不会有富余的 Sn 和 Ni 往外排出。但 Ag 会逐渐被排挤至边缘, 当凝固温度降至 780℃时, Ag 与 Cu 将发生共晶反应^[8], 生成不规则形态的共晶相。这里存在两种类型的共晶反应, 一种是 α -Cu 与其周围析出的 Ag 发生的共晶反应, 由此导致了固溶于富 α -Cu 中的 Ag 呈针状析出, 具有一定的方向性, 如箭头 2 所示; 另一种是剩余液相中 Ag 与 Cu 发生共晶反应, 由此导致了钎料内大块的富 Ag 相出现, 如箭头 3 所示。

3.2. Sn 含量对钎料显微组织的影响

图 2 为不同 Sn 含量钎料的背散射电子像。由图可知, 不同 Sn 含量钎料的组织均匀, 无气孔杂质存在。当 Sn 含量小于 4 wt%时, 钎料内主要由 Cu 基固溶体, CuZn 化合物及针状或大块状的 Ag 基固溶体组成; 随着钎料内 Sn 含量的增加, 大块状组织(其实质为 Ag 基固溶体和 CuZn 化合物)明显增多; 此外,

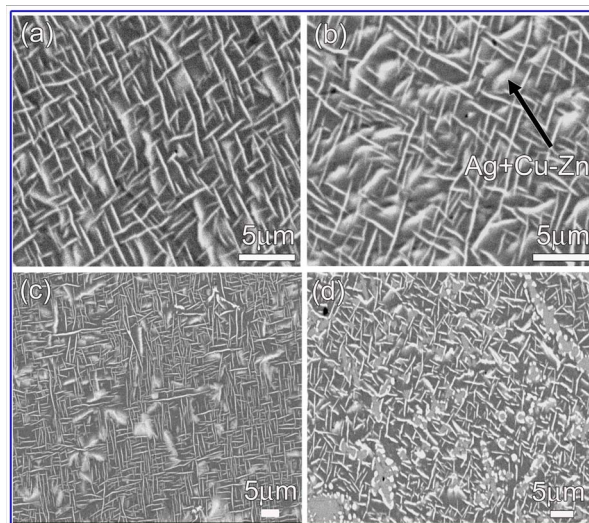


Figure 2. Back scattered electron micrographs of the filler alloy with different Sn content: (a) 1.5 wt% Sn; (b) 2.2 wt% Sn; (c) 3 wt% Sn; (d) 4 wt% Sn
图 2. 不同 Sn 含量钎料的背散射电子像: (a) 1.5 wt% Sn; (b) 2.2 wt% Sn; (c) 3 wt% Sn; (d) 4 wt% Sn

能谱显示大块相中固溶的 Sn 也逐渐增多。当含 3.0 wt% Sn 时, 大块相内固溶 Sn 达到了 1.7 wt%, 与含 1.5 wt% Sn 的钎料内大块相中的 0.66 wt% 大幅度提升。当含 4 wt% Sn 时, 钎料内不仅仅存在 Cu 基固溶体, CuZn 化合物及 Ag 基固溶体, 还出现部分白色的颗粒状相, 如图 2(d) 所示。

为了进一步分析 BAg20CuZn-4Sn 钎料内各元素的分布情况, 这里进行了面分布分析, 结果如图 3 所示。由图可以发现, 当钎料内含 4 wt% Sn 时, 显微组织由以下四部分组成: 灰色的基体组织, 其组成为 Cu 基固溶体和 CuZn 化合物; 针状的 Ag 基固溶体和 CuZn 化合物; 大块相(Ag 基固溶体和 CuZn 化合物); 白色颗粒状相。其中前三种组织在上述部分已做过分析, 这里重点分析白色颗粒的组成。由图 3(a) 可看出, 这种颗粒状相主要分布在块状相周围(包括晶界上的块状相以及晶粒内的块状相)。参考图 3(b)~(f) 可知, 这种颗粒状相主要富 Ag, Cu, Zn 和 Sn; 结合能谱可知该颗粒状相的主要组成为: Cu17.82Zn26.68Ag53.21Sn-1.98Ni0.03 (wt%)。由后续 XRD 结果可知, 这种颗粒状相主要由 Ag 基固溶体和 Cu-Zn 化合物组成, 与块状相相比, 其中的 Ag 含量更高。当制备 Sn 含量高的

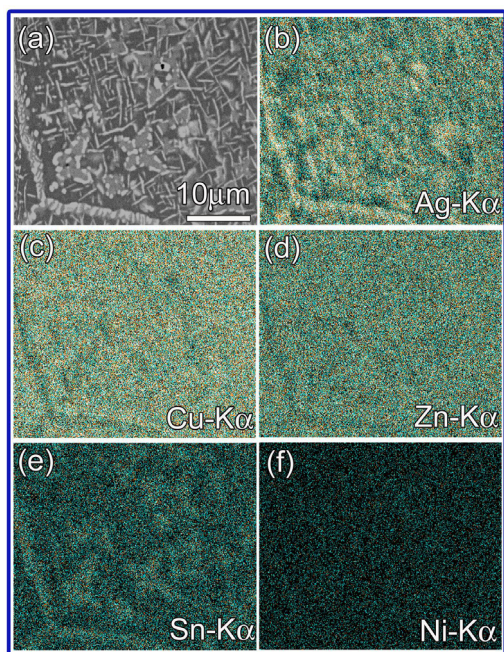


Figure 3. SEM and elemental distribution images of BAg20-4Sn filler alloy: (a) SEM morphology; (b)~(f) Elemental distribution images of Ag, Cu, Zn, Sn and Ni, respectively
图 3. BAg20-4Sn 钎料内的 SEM 照片与元素面分布图: (a) SEM 形貌图; (b)~(f) Ag, Cu, Zn, Sn 和 Ni 的面分布图

钎料时, 所需的熔化温度较低, 由此可发生较快的冷却作用, 在强烈的非平衡凝固作用下, 部分 Ag 和 Sn 包裹在初始形成的 α -Cu 中。随后在继续冷却过程中, 部分块状相中将发生非连续脱溶现象, 过饱和的 Ag 和 Sn 元素将逐渐在其外围呈颗粒状析出。

图 4 为 BAg20-1.5Sn 和 BAg20-4Sn 两种钎料的 X 射线衍射结果。对比两种 Sn 含量钎料的 X 射线结果发现, 衍射峰位置基本相近, 仅强度存在差异。当含 1.5 wt% Sn 时, 钎料内主要由富 Cu 相, 富 Ag 相, CuZn 相组成; 当 Sn 含量增至 4.0 wt% 时, 钎料内除含有上述三种相外, 还存在 Cu_5Zn_8 及 $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}$ 化合物, 其中氧化物 $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}$ 在四种相中占的质量比约为 2.9 wt%, 主要是 Ag 和 Cu 在高温下氧化所致。这里得到 X 射线结果与上述分析结果相符合。

前期文献^[9]报道 BAgCuZnSn 钎料内可能存在 Cu-Sn 化合物, 参考 Cu-Sn 二元合金相图^[8]可知, 当凝固温度降至 798℃ 时, 液相可与初始 α -Cu(其内固溶了一定的 Sn) 发生包晶反应, 生成 β 相, 其实质为 $\text{Cu}_{5.6}\text{Sn}$ 金属间化合物; 随着温度进一步下降, β - $\text{Cu}_{5.6}\text{Sn}$ 在 586℃ 时发生共析反应, 生成 α -Cu 和 γ 相, γ 相也只在高温下存在; 当凝固温度降至 520℃ 时, γ 相发生共析反应生成 α -Cu 和 δ 相, 其中 δ 相实质为 $\text{Cu}_{40.5}\text{Sn}_{11}$ 金属间化合物。本研究中, 通过能谱和 X 射线并未在钎料内观察到 Cu-Sn 化合物的存在, 应该是钎料内 Sn 含量还不高(最高仅 4 wt%), 此种情况下, Sn 分别固溶于 Ag 或 Cu 基固溶体中(注: 固溶 Sn 的 Cu 基固溶体也即是锡青铜的主要成分)。一般来说, 金属间化合物脆且硬, 含这种化合物的钎料往往不易

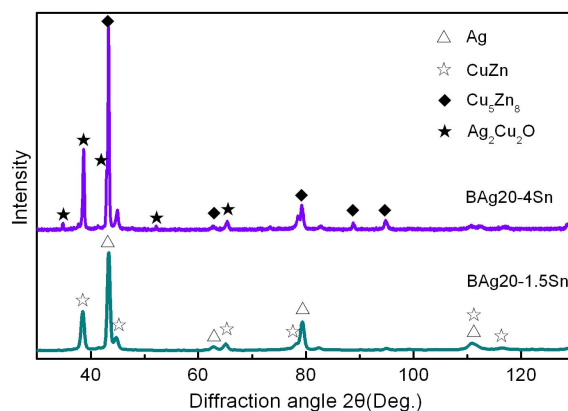


Figure 4. X-ray diffraction patterns for BAg20-1.5Sn and BAg20-4Sn filler alloy
图 4. BAg20-1.5Sn 和 BAg20-4Sn 钎料内的 X 射线结果

加工, 因此希望钎料内的金属间化合物越少越好。由本研究的结果以及前述本单位的经验总结, 钎料内 Sn 含量不应超过 4 wt%, 否则会导致钎料的脆性, 难以满足工业化生产的需求。

3.3. Sn 含量对钎料熔化温度的影响

图 5 为采用 DSC 得到的 BAg20-1.5Sn 和 BAg20-4Sn 两种钎料的固液相线区间。由图可看出, 当 Sn 含量由 1.5 wt% 增加到 4 wt% 时, 固液相线温度都有所下降, 其中固相线温度下降了 67°C; 液相线温度也降低了 16°C。钎料较低的熔化温度可避免钎焊过程中母材晶粒的粗化, 提高接头的连接强度。本研究设计的钎料体系降低了钎料内 Ag 含量, 通过 Sn 的适量添加也降低了钎焊温度, 满足客户的要求。

3.4. Sn 含量对钎料铺展性能的影响

图 6 为不同 Sn 含量的 BAg20CuZnSnNi 钎料在不锈钢上的铺展结果(与紫铜相比, 不锈钢更难于被钎料所润湿)。可以看出, 不同 Sn 含量钎料均可对不锈钢形成良好的润湿, 钎料铺展平整, 光滑, 基本呈圆形。此外, 随着 Sn 含量的提升, 钎料在不锈钢上的铺展面积逐渐增大。当含 1.5 wt% Sn 时, 铺展面积仅 33.09 mm²; 随着 Sn 含量增至 4 wt%, 铺展面积相应扩大到 67.83 mm²。可以理解为: 随着钎料内 Sn 含量的提高, 钎料的熔化温度逐渐降低。当试验温度一定时, 含 Sn 量高的钎料较早熔化, 在高温停留时间长, 从而引起液态钎料的粘度降低, 流动性增强, 有利于钎料的

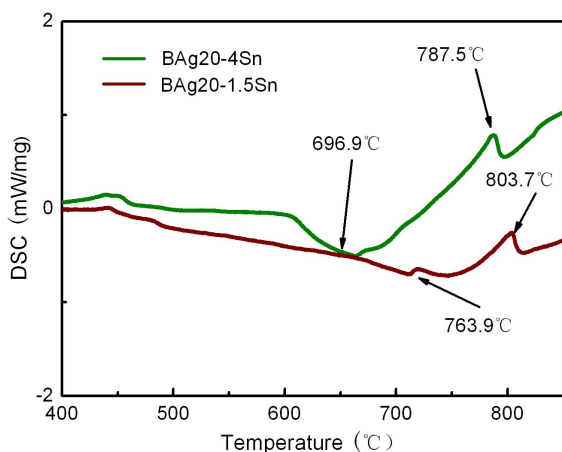


Figure 5. Results of DSC for BAg20-1.5Sn and BAg20-4Sn filler alloy
图 5. BAg20-1.5Sn 和 BAg20-4Sn 钎料的 DSC 结果

铺展。值得注意的是, 在后三种 Sn 含量条件下, 铺展钎料的周围存在明显的环晕。“润湿环”是钎料中某些合金元素以固态原子扩散方式沿母材晶界或毛细磨痕导先钎料快速扩散的结果。润湿过程中产生环晕, 表明钎料的润湿良好, 因为环晕中优先铺展的部分发生传质作用降低了母材与钎料之间的表面张力。

3.5. 钎焊试验

图 7 为采用不同 Sn 含量钎料得到的不锈钢/不锈钢接头的拉伸强度(拉伸试样尺寸为 $\Phi 10 \times 100$, 采用对接的形式)。由图可知, 随着钎料内 Sn 含量的增加,

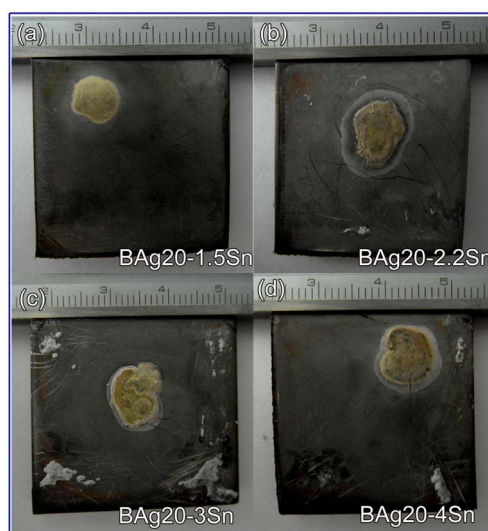


Figure 6. Results of wettability for the filler alloy with different content of Sn: (a) 1.5 wt%; (b) 2.2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%
图 6. 不同 Sn 含量钎料的铺展试验结果: (a) 1.5 wt%; (b) 2.2 wt%; (c) 3 wt%; (d) 4 wt%

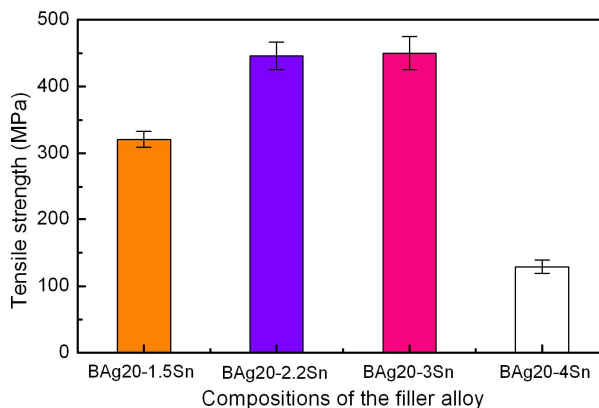


Figure 7. Tensile strength for the joint brazed with different Sn content
图 7. 不同 Sn 含量钎料钎焊接头的拉伸强度

接头强度先增后减。但含 3 wt% Sn 时, 得到最高的接头强度 450 MPa。以下两点因素导致了接头性能的大幅度提升: 1) 随着 Sn 含量增加, 降低了钎料的熔化温度。钎焊时可采用较低的温度, 较低的焊接温度将使连接区域母材晶粒不容易粗大, 同时也使接头内产生小的残余应力, 有利于提升接头连接强度; 2) 钎料内 Sn 的添加能在一定程度上提高接头的力学性能。由于 Sn 的原子半径较大, 在银钎料内只能以置换固溶体的形式存在。置换固溶体中由于溶质原子与溶剂原子之间存在尺寸上的差异, 随着 Sn 的引入会使得原来固溶体的弹性应变, 也即是点阵畸变。这种畸变可形成柯氏气团, 而柯氏气团有钉扎位错和阻碍位错滑移的作用^[10], 从而使得接头强度提高。当钎料内 Sn 含量提升至 4 wt% 时, 接头性能出现大幅度下降, 仅 129 MPa。由上述 XRD 结果可知, 该条件下钎料内出现少许的 $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}$, 这样氧化物的存在影响了钎料的流动能力, 成为接头内缺陷的来源。

4. 结论

1) BAg20CuZnSnNi 钎料主要由以下几部分组成: Ag 基固溶体, Cu 基固溶体, CuZn 化合物; 当含 4 wt% Sn 时, 钎料内出现 $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}$ 化合物。在本研究采用的 Sn 含量范围内, 钎料内并未出现 Cu-Sn 金属间化合物。

2) 差热分析表明: 添加 Sn 后, 钎料的固液相线温度明显下降, 降温效果明显; 相同条件下, 高含 Sn 量钎料铺展效果也优于低含 Sn 量钎料。

3) 采用不同含 Sn 量钎料手工火焰钎焊了不锈钢与不锈钢, 发现当钎料内含 3 wt% Sn 时, 获得的接头

拉伸强度达到了 450 MPa, 满足客户的使用要求。

4) 本研究发现: 钎料内 Sn 元素的添加量不应高于 4 wt%, 在此范围内可获得优质的钎焊接头, 满足了客户的要求(降低钎料内 Ag 含量的同时不提高钎焊温度); 当 Sn 含量超过此范围时, 钎料内出现氧化物和金属间化合物, 钎料的成型加工困难, 焊接效果差。

5. 致谢

感谢中国计量学院舒康颖教授在试验研究和理论分析上的热情协助。此外, 这里对其他对该论文有帮助的人也一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 李卓然, 刘彬, 冯吉才. 含银 20% 的银基无镉中温钎料配方的优化设计[J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 5-8.
- [2] J. L. Wiese. Strength of metal-to-metal brazed joints. MIT, 2000: 30-35.
- [3] 王星平, 赖忠民, 薛松柏, 张亮, 卢方焱. 合金元素对 Ag-Cu-Zn 系钎料影响的研究现状及发展趋势[J]. 电焊机, 2009, 39(11): 1-6.
- [4] 甘卫平, 陈慧, 杨伏良. Ag-Cu-In-Sn 钎料加工工艺的研究[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 156-158.
- [5] 卢方焱, 薛松柏, 赖忠民, 张亮, 顾立勇, 顾文华. 镉对 Ag-CuZn 钎料组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 56-59.
- [6] 赖忠民, 薛松柏, 张亮, 皋利利, 顾立勇, 顾文华. Ag-Cu-Zn-Sn-xGa-yIn 钎料性能与显微组织[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 73-76.
- [7] 韩宪鹏. 镉对无镉银钎料性能影响的研究[D]. 南京航空航天大学, 2008: 11-13.
- [8] 崎诚三, 平林真, 刘安生. 二元合金状态图籍[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [9] 矫宁. 新型低银无镉中温钎料组织与性能的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007: 30-36.
- [10] 赖忠民. Ga/In 与稀土 Ce 对 Ag30CuZnSn 钎料显微组织及钎焊接头性能影响的研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.