

CuSn 预合金粉芯复合银钎料的润湿铺展机理

钟素娟^{1,2}, 秦建², 王蒙³, 崔大田^{2,4}, 龙伟民^{2,3}

(1. 河南科技大学, 洛阳, 471000; 2. 郑州机械研究所有限公司, 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州, 450000;
3. 中机智能装备创新研究院(宁波)有限公司, 宁波, 315700; 4. 华北水利水电大学, 郑州, 450045)

摘要: 研究了添加质量分数为 30%~70% CuSn 预合金粉复合银钎料在 T2 紫铜基体上的润湿铺展过程, 并讨论了 CuSn 预合金粉复合银钎料在紫铜基体上的润湿铺展机理。结果表明, 在与紫铜基体的润湿铺展过程中, 初始接触角由 30%CuSn 的 119°降低到 70%CuSn 的 94°。最终接触角由 30%CuSn 的 15°下降到 70%CuSn 的 7°。当粉芯中 CuSn 合金粉含量为 60% 时, 钎料在铜板上的润湿面积达到 530.04 mm², 相比于未添加 CuSn 合金粉时提高了约 66%。由于低熔点 CuSn 预合金粉的前驱润湿作用使复合银钎料表面张力降低, 初始接触角和最终接触角随着 CuSn 预合金粉含量的增加而减小。CuSn 预合金粉在钎焊过程中先于 BAg30CuZnSn 钎料外皮熔化, 形成熔融的铜锡液态合金薄层, 降低了固液界面张力。随后, 熔化的 BAg30CuZnSn 箔带在先期熔化的铜锡液态薄层上铺展, 并与其发生溶质原子的扩散反应, 最终形成液态复合钎料。低熔点 CuSn 预合金粉的加入, 使复合银钎料在铜上的润湿性能显著改善。添加 40%CuSn 预合金粉复合银钎料与铜基体的反应润湿界面均匀致密, 其中白色富 Ag 相互连接, Sn 元素主要分布于富 Ag 相和周围的锡青铜相中。

创新点: (1) 设计并制备了基于原位合成的高性能 CuSn 预合金粉芯复合银钎料。
(2) 研究了 CuSn 预合金粉芯复合银钎料在铜基体上的润湿铺展机理。

关键词: 银钎料; CuSn 预合金; 铺展面积; 界面组织; 润湿机理

中图分类号: TG 454

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220908001

0 序言

以低熔点 Sn 元素代替 Cd 元素后制备的绿色环保型 AgCuZnSn 钎料, 较 AgCuZn 钎料熔化温度显著降低, 且润湿性能显著改善, 广泛应用于钎焊低碳钢、不锈钢、铜合金、高温合金、难熔合金等材料^[1-3]。但高 Sn 含量的银钎料由于脆性较大, 难以进行常规的塑性变形, 使其应用受限^[4-6]。为此, 国内外研究人员围绕高性能银钎料难加工的行业难题, 在银钎料的设计与制备方法上开展了大量的研究。Long 等人^[7-8]设计了 AgCuZn/ZnCuAgSn/AgCuZn 复合焊片, 在感应钎焊过程中原位合成 AgCuZnSn 高强度钎料, 对不锈钢进行感应钎焊发现接头强度高于常规钎料钎焊后的连接强度。王星星等人^[9]通过化学镀覆的方式在 BAg45-CuZn 钎料表面镀覆

了一层微米锡层, 以该钎料采用火焰钎焊的方式对 H62 黄铜进行钎焊, 发现钎焊接头中母材与钎缝紧密结合, 接头的抗拉强度随着镀锡含量的增加先升高后降低, 在质量分数 6.0%Sn 时接头抗拉强度为 353 MPa。为实现低熔速流型高锡含量 AgCuZnSn 钎料的制备及使用一体化, 扩展 AgCuZnSn 钎料的应用范围, 作者借鉴药芯焊丝的理念^[10-13], 将钎剂与铜锡合金粉混合而成的预合金粉芯由 BAg30CuZnSn 钎料箔带进行卷制、拉拔等工艺获得低熔速流型复合药芯银钎料。

钎料的润湿性是指液态钎料在固态母材基板表面润湿铺展的能力, 是用来评价钎料性能的重要指标之一。一般来说, 钎料合金液态金属在金属基板上的润湿铺展大多数为反应润湿, 主要受反应、扩散、溶解和吸附等因素控制, Kozlova 等人^[14]研究了 AgCu 共晶钎料在 Cu 基板上的润湿行为, 雷敏等人^[15]在 AgCu 合金的基础上添加了 Zn, 研究了 Zn 元素含量对 AgCuZn 钎料在 TiC 金属陶瓷表面润湿性的影响。Dudiy 等人^[16]采用第一性原理方

法计算了不同晶面的 TiC 和 Ag, Cu 界面的体系总能量, 结果发现, 不同的润湿试验中 Cu 和 Ag 在 TiC 陶瓷上润湿性差异很大, 这一现象与界面处局部原子的相互协调有关。在 AgCuZnSn 钎料润湿性能的研究方面, 大多围绕钎料合金成分展开, 不适用于文中设计的基于原位合成的合金粉芯药芯钎料的润湿铺展过程。目前, 新型的预合金粉芯药芯复合银钎料在基体上的润湿铺展过程研究较少, 预合金粉芯药芯复合 AgCuZnSn 钎料的润湿铺展机理还不清楚。文中将钎剂与不同质量分数 CuSn 预合金粉混合, 由 BAg30CuZnSn 钎料箔带进行卷制、拉拔制备复合药芯银钎料, 并采用该钎料在 T2 紫铜表面进行润湿试验。通过测量钎料在 T2 紫铜表面润湿角和对 AgCuZnSn 钎料/T2 紫铜润湿界面微观组织观察, 分析 CuSn 预合金粉含量对复合钎料在铜基体表面润湿铺展性能的影响, 并讨论 CuSn 预合金粉芯复合银钎料的润湿铺展机理。通过对上述内容的研究为后续高 Sn 含量的高性能银钎料的设计与制造提供一定的参考价值。

1 试验方法

复合银钎料选用的金属外皮为 BAg30CuZnSn, 预合金粉芯中 Cu60Sn40 合金粉末粒度约为 50 μm (300 目), 钎剂为自制的复合型硼酸盐钎剂。将钎剂与 Cu60Sn40 中间合金粉末按照设定的质量比例进行称量, 然后放入高能球磨机中进行混料, 混料时间为 6 h。混合均匀后的预合金粉芯由 BAg30CuZnSn 钎料箔带包裹, 采用卷制、拉拔等工艺获得直径为 3 mm 的复合银钎料, 钎料界面示意图如图 1 所示。为观察 CuSn 预合金粉芯复合银钎料的动态润湿过程, 截取等质量等长度的复合银钎料采用坐滴法考察了 CuSn 预合金粉芯复合银钎料对紫铜的润湿行

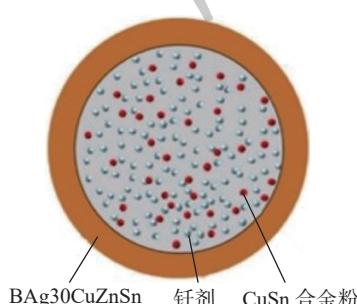


图 1 复合粉芯药芯银钎料截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of composite powder cored silver based filler metal

为。在 PZ-1500 型高温高真空接触角测量仪上进行了钎料润湿性试验。室温下抽真空至 1×10^{-5} Pa, 然后引入高纯氩气, 在测试过程中防止氧化。试验开始时, 在室温下重新抽真空至 1×10^{-5} Pa, 然后以升温速率 10 K/min 加热至 1123 K 后保温 20 min。用接触面测量仪 CCD 相机观察 300 s, 结合图形分析软件测定钎料的润湿角。所有的测试至少采用 3 个样本, 以提高结果的统计显著性。

另截取相同质量和长度的复合银钎料, 外置 0.2 g 钎剂, 置于洁净的 T2 紫铜板上放置于鑫涵 SX-2-5-13C 型电阻炉中进行铺展试验。将处理好的待测试样放入炉温为 850 °C 的箱式电阻炉中, 保温 2 min 后取出空冷至室温, 清洗干净后通过 SteREO-V8 型体视显微镜测量钎料的润湿面积。铺展完成后, 对样品进行清洗打磨, 采用电火花线切割对润湿界面进行取样, 依次进行打磨、镶嵌、粗磨、精磨、抛光后用 FeCl 水溶液进行腐蚀。通过 Phenom-XL 型扫描电子显微镜及配套自带能谱仪对润湿界面微观组织和微区成分进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 CuSn 预合金粉芯复合银钎料的润湿性能

图 2 为 1123 K 时不同 CuSn 预合金粉含量下复合银钎料在 T2 紫铜片上的接触角随时间的变化规律。所有曲线由 3 个动力学阶段组成, 润湿动力学可以以接触角的值为特征。在第 1 阶段 (低于 15 s), 接触角随时间增加而减小的趋势较为平缓; 在第

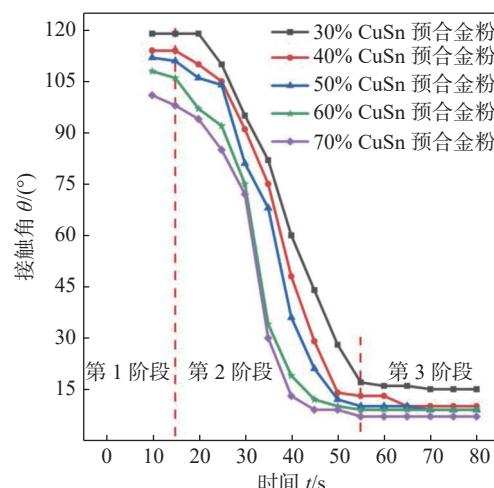


图 2 不同 CuSn 预合金粉含量下银钎料接触角变化规律

Fig. 2 Change law of contact angle of silver solder with different CuSn pre-alloyed powder

2 阶段 (15~55 s), 不同成分钎料合金的接触角均明显减小; 在第 3 阶段 (55~300 s), 接触角保持稳定, 随着时间的延长变化不大。

图 3 为不同 CuSn 预合金粉含量的复合粉芯银钎料在紫铜上初始接触角和最终接触角的变化规律。随着 CuSn 预合金粉含量的增加, 初始接触角和最终接触角明显减小。初始接触角由 30%CuSn 的 119° 降低到 70%CuSn 的 94°, 最终接触角由 30%CuSn 的 15° 下降到 70%CuSn 的 7°。这表明 CuSn 预合金粉的加入有助于提高药芯银钎料对铜基体的润湿性。

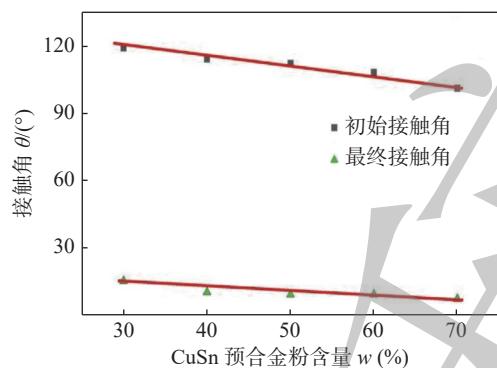


图 3 接触角随 CuSn 预合金粉含量的变化规律

Fig. 3 Variation of contact angle with CuSn pre-alloyed powder content

2.2 CuSn 预合金粉芯复合银钎料的铺展性能

为研究 CuSn 预合金粉添加量对钎料在铜板上的铺展性能, 对内置添加不同比例 CuSn 合金粉的 BAg30CuZnSn 复合银钎料在铜板上的铺展面积进行测量, 如图 4 所示。图 5 为添加不同比例 CuSn 预合金粉的复合银钎料在铜板上的铺展形貌。从图 5 可以看出, 随着粉芯中 CuSn 预合金粉含量的不断增加, 复合粉芯银钎料在紫铜板上的铺展面积

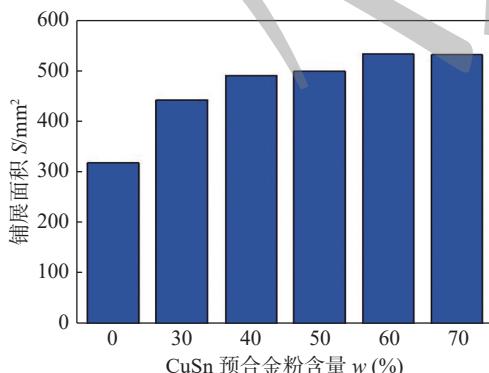


图 4 CuSn 粉含量对铺展面积的影响

Fig. 4 Effect of CuSn pre-alloyed powder content on the spreading areas

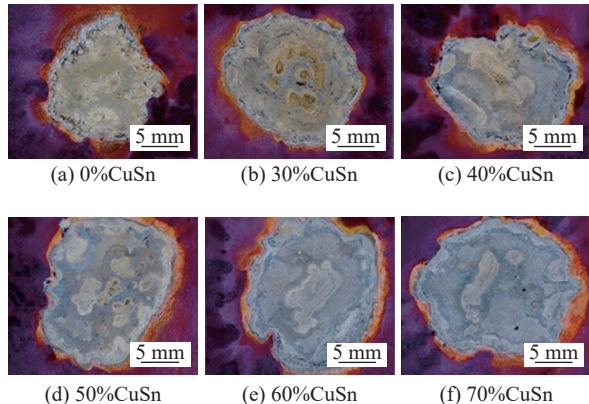


图 5 CuSn 预合金粉含量对复合银钎料铺展形貌的影响

Fig. 5 Effect of CuSn pre-alloyed powder content on the spreading morphology of composite silver filler metal. (a) 0%CuSn; (b) 30%CuSn; (c) 40%CuSn; (d) 50%CuSn; (e) 60%CuSn; (f) 70%CuSn

逐渐增加。未添加 CuSn 合金粉时, 钎料在 T2 紫铜板上的润湿面积为 318.92 mm^2 。当粉芯中加入 CuSn 合金粉后钎料在铜板上的润湿面积不断增大, 当粉芯中 CuSn 合金粉含量为 30% 时, 钎料在铜板上的润湿面积达到 439.40 mm^2 , 相比于未添加 CuSn 合金粉时提高了 37%; 当粉芯中 CuSn 合金粉含量为 60% 时, 钎料在铜板上的润湿面积达到 530.04 mm^2 , 相比于未添加 CuSn 合金粉时提高了约 66%。

2.3 CuSn 预合金粉复合银钎料的润湿机理

图 6 为 40%CuSn 预合金粉芯复合银钎料在紫铜板上的润湿铺展过程。将含有 40% CuSn 预合金粉的药芯银钎料置于 T2 紫铜板上, 随着感应加热开始至感应加热时间 18 s 后, 粉芯中的钎剂开始流铺至钎料外皮周围, 去除母材和钎料表面的氧化皮, 同时内部的合金粉芯也随之流出。继续升温至外皮液相线温度, 外皮开始熔化; 延长感应加热时间至 34 s, 温度不断升高, 固态钎料外皮转变成液态金属熔滴, 开始与先熔化的低熔点预合金金属熔液相互熔合, 两者之间发生二次冶金反应。继续延长感应时间至 36 s, 钎料开始润湿铺展。当感应加热时间延长至 38 s 时, 熔融钎料周围开始出现润湿环, 润湿铺展面积不断增加。继续加热, 当感应加热时间为 40 s 时, 润湿环开始破裂。停止加热, 温度不断降低, 钎料开始凝固, 室温下润湿形貌如图 6 所示。由图 6 中 40%CuSn 预合金粉复合银钎料在铜板上的铺展润湿过程可知, CuSn 合金粉在钎焊过程中先于 BAg30CuZnSn 钎料外皮熔化, 形成熔融的铜锡液态合金薄层, 降低了固液界面张

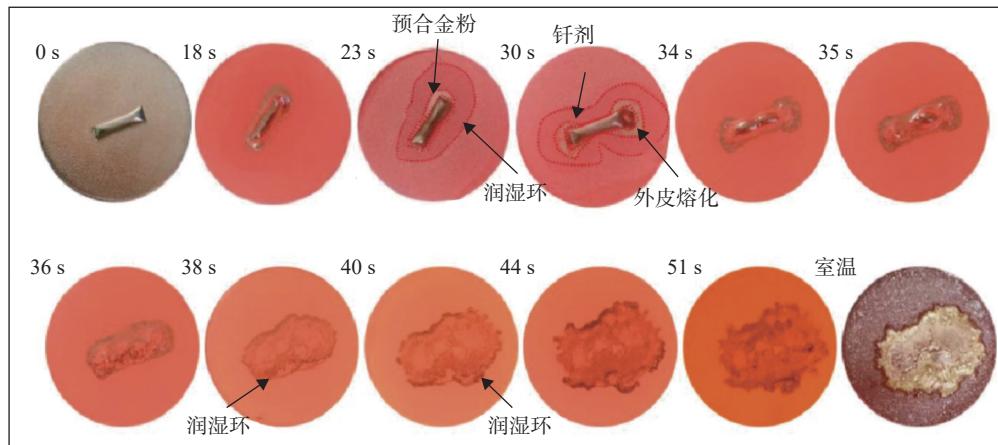


图 6 40%CuSn 粉芯复合银钎料在铜板上的润湿铺展过程

Fig. 6 Wetting and spreading process of 40%CuSn powder cored composite silver filler metal on the copper plate

力. 随后, 熔化的 BAg30CuZnSn 箔带在先期熔化的铜锡液态薄层上铺展, 并与其发生溶质原子的扩散反应, 最终形成液态复合钎料, 内置低熔点粉芯使药芯银钎料在铜板上的润湿性能显著改善.

图 7 为 CuSn 预合金粉芯复合银钎料与铜基体的润湿后截面组织与铺展过程示意图. 当处于第 1 阶段时 (图 7b), 紫铜母材未发生溶解时, 钎剂不断去除钎料与基板表面氧化膜, 液态金属表面张力与固-液界面张力发生改变, 产生铺展驱动力 F_d , 液态金属开始铺展, 接触角随时间变化呈线性关系, 符合 Dezellus 模型, 表明润湿主要受控于界面处氧化膜的破除^[17-18].

$$F_d = \sigma_{SV} - \sigma_{SL} - \sigma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

$$\cos \theta_e - \cos \theta = (\cos \theta_e - \cos \theta_0) \exp(-kt) \quad (2)$$

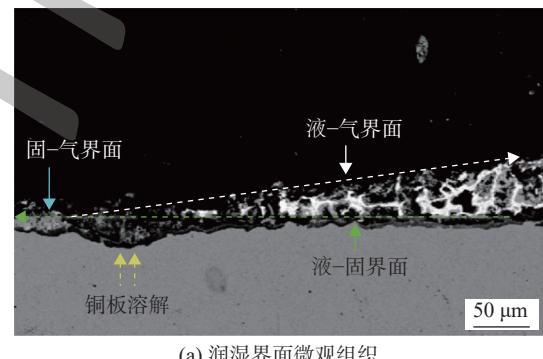
式中: F_d 为润湿过程中铺展驱动力; σ_{SV} , σ_{SL} 与 σ_{LV} 分别为基板的表面张力、固-液界面张力和液态金属表面张力; θ , θ_e 与 θ_0 分别为动态接触角、最终接触角与初始接触角; k 为动力学常数; t 为时间. 第 2 阶段时, 接触角急剧减小, 基板向液态金属中不断溶解, 界面上发生强烈的传质作用, 呈现非平面状, 如图 7c 所示; 液态金属中成分不均匀造成浓度差 (ΔC), 而表面张力发生变化, 在液态金属内部和三相线处产生表面张力梯度, 引发 Marangoni 对流, 增加液态金属流动性, 促进液态金属铺展^[19-20], 且 Sn 含量越高, 铺展速率越快, 接触角 θ , θ_e 与 θ_0 将变小.

$$u = 1.2(v/h)R_{ec}^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

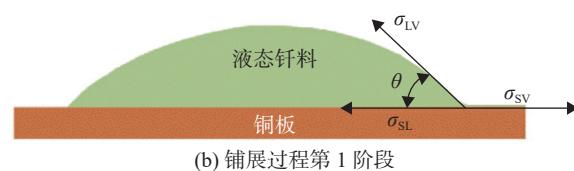
$$R_{ec} = \sigma_C(\Delta C/r_0)h^2/\rho_{LV}v^2 \quad (4)$$

式中: u 为液态金属铺展速率; v 为运动粘度; h 为流

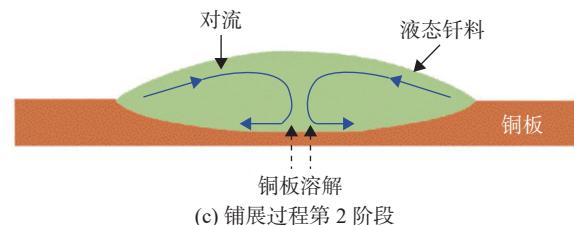
体层厚度; R_{ec} 为 Reynolds-Marangoni 数; ΔC 为液态金属顶部与三相线处的合金成分浓度差; r_0 为溶解阶段开始时的液滴底部半径; ρ_{LV} 为液态金属密度; σ_C 为溶质驱动力. 当加热至 55 s 后, 润湿行为达到第三阶段, 液态金属中溶质浓度达到饱和, 基体不再溶解, 固-气-液三相在三相线处接近平衡时, 铺展驱动力趋于 0, 而接触角趋于定值.



(a) 润湿界面微观组织



(b) 铺展过程第 1 阶段



(c) 铺展过程第 2 阶段

图 7 润湿界面微观组织和铺展过程示意图

Fig. 7 Microstructure at the interface after wetting and schematic diagram of the spreading process. (a) microstructure at the interface after wetting; (b) spreading process during the first stage; (c) spreading process during the second stage

图 8 为 40%CuSn 预合金粉芯的复合银钎料与铜基体润湿界面的元素面扫描分布情况。从图 8 可以发现, 接头组织较为致密, 未发现夹渣、气孔等宏观缺欠, 说明添加 CuSn 预合金粉的复合银钎料与铜基体具有良好的反应润湿性能。此外, 原位合成后钎料组织主要由深灰色大块状相, 依附于块状相的白色相和黑白相间的层片状组织组成。钎缝处熔

融的钎料在凝固过程中, 液态钎料以两侧固相母材作为非自发形核的基体, 首先析出的 α -Cu 相依托于母材向钎料液态金属中央形核生长, 随后剩余液相与初生 α -Cu 相反应生成 β -CuZn 相。随着温度继续降低, 低熔点的液态富银钎料依附于大块状 Cu 基固溶体析出。当温度降低至 Ag-Cu 共晶温度, 开始生成层片状的共晶相。

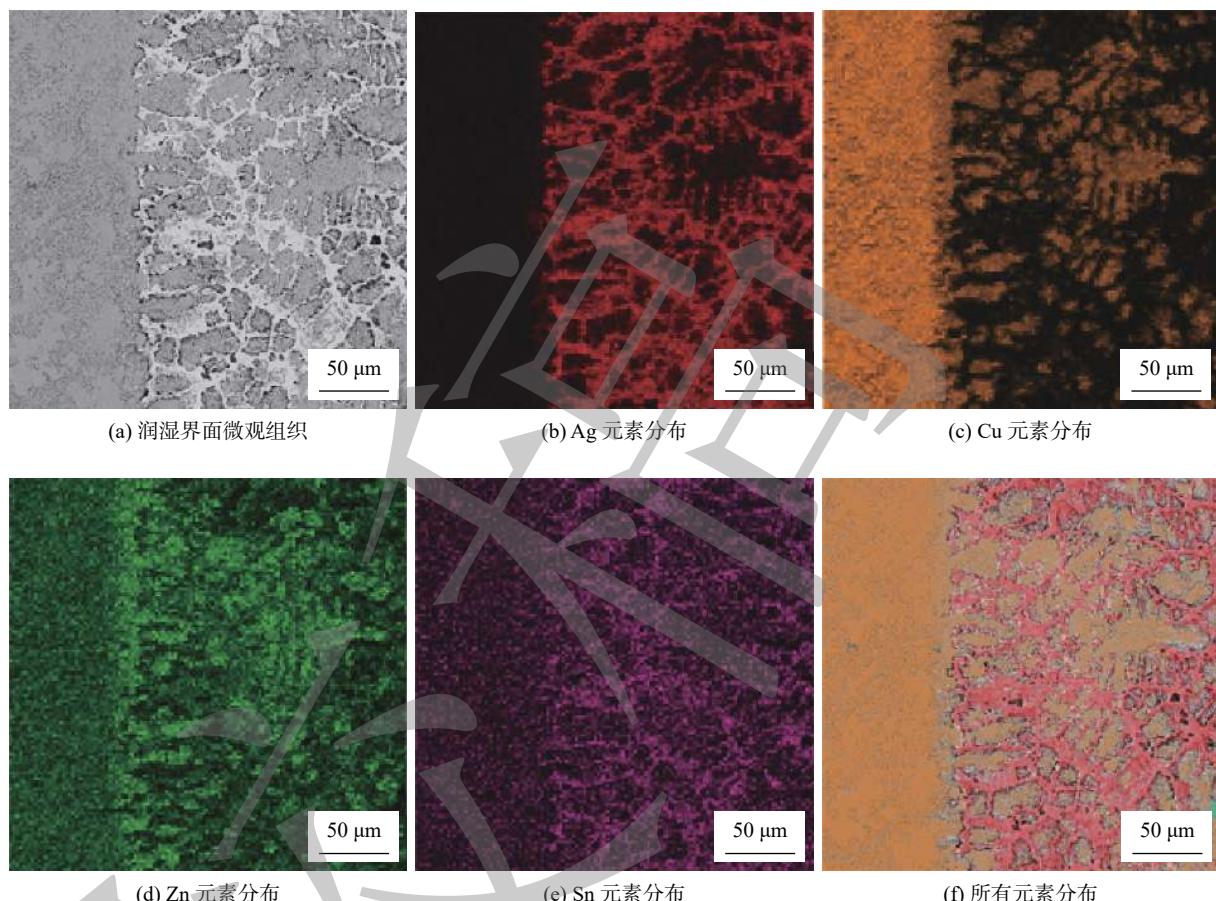


图 8 40%CuSn 粉芯复合钎料与铜基体润湿界面的元素分布

Fig. 8 Element distribution at the interface between composite silver based filler metal with 40% CuSn pre-alloyed powder core and the copper matrix. (a) microstructure of wet interface; (b) distribution of Ag element; (c) distribution of Cu element; (d) distribution of Zn element; (e) distribution of Sn element; (f) distribution of all element

3 结论

(1) 在温度 1123 K 下, 研究了 CuSn 预合金粉芯复合银钎料与紫铜的润湿过程, 结果表明, 初始接触角和最终接触角随 CuSn 预合金粉含量的增加而减小。初始接触角由 30%CuSn 的 119°降低到 70%CuSn 的 94°, 最终接触角由 30%CuSn 的 15°下降到 70%CuSn 的 7°。

(2) 复合银钎料在紫铜板上的铺展面积随着粉

芯中 CuSn 预合金粉含量的增加而增加。当粉芯中 CuSn 预合金粉含量为 30% 时, 其在紫铜上的铺展面积较未添加时增加了 37% (从 318.92 mm^2 增加 439.40 mm^2); 当粉芯中 CuSn 预合金粉含量为 60% 时, 钎料在铜板上的润湿面积达到 530.04 mm^2 , 相比于未添加 CuSn 预合金粉时提高了约 66%。

(3) CuSn 预合金粉在钎焊过程中先期熔化形成熔融的铜锡液态合金薄层降低了固液界面张力。随后, 熔化的 BAg30CuZnSn 箔带在铜锡液态薄层上铺展, 并与其发生扩散与熔合, 低熔点 CuSn 预合金

粉的加入使复合银钎料在铜上的润湿性能显著改善。添加40%CuSn预合金粉复合银钎料与铜基体的反应润湿界面均匀致密,其中白色富Ag相互连接,Sn元素主要分布于富Ag相及周围的锡青铜相中。

参考文献

- [1] 李卓然, 矫宁, 冯吉才, 等. 合金元素对AgCuZn系钎料合金组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 65–68.
Li Zhuoran, Jiao Ning, Feng Jicai, et al. Effect of alloying elements on microstructure and property of AgCuZnSn brazing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 65–68.
- [2] Zou H F, Yang H J, Zhang Z F. Morphologies, orientation relationships and evolution of Cu_6Sn_5 grains formed between molten Sn and Cu single crystals[J]. Acta Materialia, 2008, 56(11): 2649–2662.
- [3] Huang Xiaomeng, Song Wenjie, Qi Yuefeng, et al. Study on high frequency brazing of brass-red copper[J]. China Welding, 2020, 29(2): 60–64.
- [4] Ma Chaoli, Xue Songbai, Wang Bo. Study on novel Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metal bearing Ga[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 854–862.
- [5] 张冠星, 钟素娟, 程亚芳, 等. 基于紫铜/黄铜钎焊的新型无银铜磷锡复合钎料[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 33–36.
Zhang Guanxing, Zhong Sujuan, Cheng Yafang, et al. Compound non-silver copper-phosphorus-tin filler metals used for brazing brass/copper[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(12): 33–36.
- [6] 彭宇涛, 李佳航, 李子坚, 等. 低银无镉Ag-Cu-Zn钎料的合金化改性[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(2): 166–172.
Peng Yutao, Li Jiahang, Li Zijian, et al. Alloying modification of low silver and cadmium-free Ag-Cu-Zn solder[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(2): 166–172.
- [7] Long Weimin, Zhang Guanxing, Zhang Qingke. In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process[J]. Scripta Materialia, 2016, 110: 41–43.
- [8] 龙伟民, 张冠星, 张青科, 等. 钎焊过程原位合成高强度银钎料[J]. 焊接学报, 2015, 36(11): 1–4.
Long Weimin, Zhang Guanxing, Zhang Qingke, et al. In-situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during brazing process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(11): 1–4.
- [9] 王星星, 彭进, 李帅, 等. 电镀锡银钎料的均匀腐蚀性和抗氧化性分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 37–40.
Wang Xingxing, Peng Jin, Li Shuai, et al. Analysis on corrosion behavior and oxidation resistance of Sn-electroplated silver brazing filler metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(12): 37–40.
- [10] 张俊雄, 薛松柏, 薛鹏, 等. Ga_2O_3 对CsF-RbF-AlF₃钎剂/ZnAl钎料在铝和钢表面润湿铺展性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(7): 1900–1904.
Zhang Junxiong, Xue Songbai, Xue Peng, et al. Effect of Ga_2O_3 on the wettability and spreading properties of CsF-RbF-AlF₃/Zn-Al solder on the surface of aluminum and steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(7): 1900–1904.
- [11] 浦娟, 薛松柏, 吴铭方, 等. Ga_2O_3 对Ag30CuZnSn药芯银钎料钎缝组织及钎焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 46–52.
Pu Juan, Xue Songbai, Wu Mingfang, et al. Effect of Ga_2O_3 on microstructure and properties of brazed joints obtained by Ag30CuZnSn flux cored brazing filler metal and brass[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 46–52.
- [12] 王蒙, 张冠星, 钟素娟, 等. 低熔合金粉末对药芯银钎料钎焊过程的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(8): 2859–2866.
Wang Meng, Zhang Guanxing, Zhong Sujuan, et al. Effect of low-melt alloy powder on brazing process of flux-cored silver brazing filler metal[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(8): 2859–2866.
- [13] 王晨充, 黄明浩, 张秋红, 等. Al-Mg合金在2D-石墨纤维织物上的润湿性及铺展动力学分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 1907–1914.
Wang Chenchong, Huang Minghao, Zhang QiuHong, et al. Wetability and spreading dynamics analysis of Al-Mg alloys on 2D-Gr fabrics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 1907–1914.
- [14] Kozlova O, Voytovych R, Protsenko P, et al. Non-reactive versus dissolutive wetting of Ag-Cu alloys on Cu substrates[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(8): 2099–2105.
- [15] 雷敏, 张丽霞, 李宏伟, 等. Zn元素含量对AgCuZn钎料在TiC金属陶瓷表面润湿性的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 41–44.
Lei Min, Zhang Lixia, Li Hongwei, et al. Influence of Zn content on wettability of TiC cermet by AgCuZn alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 41–44.
- [16] Dudiy S V, Lundqvist B I. Wetting of TiC and TiN by metals[J]. Physical Review B, 2004, 69(12): 125421.
- [17] Mortensen A, Drevet B, Eustathopoulos N. Kinetics of diffusion-limited spreading of sessile drops in reactive wetting[J]. Scripta Materialia, 1997, 36(6): 645–651.
- [18] Dezellus O, Hodaj F, Eustathopoulos N. Chemical reaction-limited spreading: the triple line velocity versus contact angle relation[J]. Acta Materialia, 2002, 50(19): 4741–4753.
- [19] Saiz E, Tomsia A P. Atomic dynamics and Marangoni films during liquid-metal spreading[J]. Nature Materials, 2004, 3: 903–909.
- [20] Protsenko P, Garandet J P, Voytovych R, et al. Thermodynamics and kinetics of dissolutive wetting of Si by liquid Cu[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 6565–6574.

第一作者: 钟素娟, 博士研究生, 研究员; 主要研究方向新型钎焊材料的设计与开发; Email: sujuan_zh@163.com.

通信作者: 龙伟民, 博士, 研究员; Email: brazelong@163.com.