

低熔合金粉末对药芯银钎料钎焊过程的影响

王 蒙, 张冠星, 钟素娟, 沈元勋, 龙伟民, 董宏伟, 刘晓芳

(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, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为克服高锡含量的 AgCuZnSn 钎料因脆性大而难以加工成形的问题, 借鉴药芯焊丝的理念, 设计了添加 CuSn 合金粉粉芯的复合药芯银钎料, 研究了粉芯中添加质量分数 30%~70% Cu₆₀Sn₄₀ 合金粉对药芯银钎料的润湿性、紫铜/Q235 钢钎焊接头组织、界面显微硬度及抗拉强度的影响。结果表明, 钎焊过程中芯部 CuSn 合金粉和外层 BAg₃₀CuZnSn 原位反应合成高锡含量的 AgCuZnSn 钎料, 获得了成分均匀, 结合良好的接头。随着药芯粉芯中合金粉含量的升高, 复合药芯银钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿面积不断增大, Cu/Q235 钢钎焊接头显微硬度不断升高, 抗拉强度呈现先升高后降低的趋势。当药芯粉芯中 CuSn 合金粉的质量分数为 30%时, Cu/Q235 钢钎焊接头的抗拉强度取得最大值 (198.91 MPa), 提高了 23.4%。

关键词: 原位合成; 药芯银钎料; 润湿性; 显微组织; 抗拉强度

中图分类号: TG425

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2859-08

为满足工业界对钎料无毒无害的要求, 作为 AgCuZnCd 钎料替代品的绿色环保型 AgCuZnSn 钎料在 20 世纪 60 年代的英国应运而生^[1,2]。加入低熔点的 Sn 元素 (232 °C) 后, AgCuZn 系钎料的熔化温度显著降低, 熔化区间明显缩小, 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^[3]。但随着 Sn 元素含量的不断升高, 钎料组织中的 CuSn 脆性化合物明显增多, 因此钎料的脆性显著增大, 难以进行常规的塑性变形, 所以高锡含量的银钎料只能以铸造状态进行使用, 严重限制了该类钎料的推广及应用^[4]。因此在不影响钎料的成形加工性能的基础之上, 通过提高锡元素含量以改善 AgCuZnSn 钎料的钎焊性能是目前国内外钎焊领域的热点课题之一^[5]。

目前, 为克服钎料因自身加工性能差造成的高性能钎料难以充分推广应用的难题, 国内外研究人员纷纷采用新的钎料形态以解决高性能钎料难加工的行业难题^[6]。张冠星等人^[7]为克服 BAg₈₉PAg 钎料成本较高的问题, 开发设计出新型的药皮铜磷锡复合钎料, 实现了无需添加钎剂即可完成紫铜/黄铜之间的焊接, 焊后钎缝组织致密, 钎料与基体中的元素相互扩散, 形成了良好的过渡层, 减少了焊接工序, 降低了生产成本。龙伟民等人^[8,9]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。此外, 针对 Al-Si-Cu 基钎料合金组织中含有大量 CuAl₂ 脆性化合物, 无法进行常规塑性变形的难题, 龙伟民等人^[10]设计了一种通过外层 AlSi 合金包裹内层 CuAl 合金粉的复合焊丝, 进行感应钎焊 3A21 铝合金, 获得了成分均匀、界面良好的钎缝, 且接头抗剪切强度高于常规钎料。王星星等人^[11]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 处接头抗拉强度为 353 MPa。

针对高锡含量的 AgCuZnSn 钎料因脆性大而难以加工成形的问题, 为实现低熔速流型钎料的制备及使用一体化, 降低生产成本, 扩展 AgCuZnSn 钎料的应用范围, 本研究借鉴药芯焊丝的理念, 将混合后的钎剂与铜锡合金粉末由 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。钎焊过程中, 芯部的钎剂受热熔化, 流布焊缝表面, 去除母材及钎料表面氧化膜。继续升温, 外层塑性良好的 BAg₃₀CuZnSn 钎料箔带与芯部 CuSn 合金粉开始发生熔合与扩散, 进而原位合成高锡含量的 AgCuZnSn 钎料。

收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 中原科技创新领军人才项目 (ZYQR20180030); 郑州市重大科技创新专项 (2019CXZX0065)

作者简介: 王 蒙, 男, 1995 年生, 硕士生, 郑州机械研究所新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001, E-mail: wm18838150358@163.com

1 实验

试验过程中选用的金属外皮为 BAg30CuZnSn, 金属粉末粒度约为 50 μm (300 目) 的 Cu60Sn40 中间合金粉末, 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, 然后放入球磨混料机中进行混料 6 h, 混合均匀后采用卷制、拉拔等工艺由 BAg30CuZnSn 钎料箔带包裹混匀的药芯钎剂, 以获得直径为 3 mm 的复合型药芯银钎料, 试验中所用的复合药芯银钎料形态如图 1 所示。

截取一定长度的复合药芯银钎料置于石墨坩埚中熔化以获得同种成分的实心钎料, 取料进行化学成分分析以确定钎料的具体成分, 粉芯中钎剂与合金粉的比例及对应的化学成分如表 1 所示。为观察添加合金粉后药芯银钎料的动态润湿过程, 截取一定长度的复合药芯银钎料置于除油及打磨干净的紫铜板上, 采用感应焊机进行润湿试验, 并通过摄像机进行拍摄采集

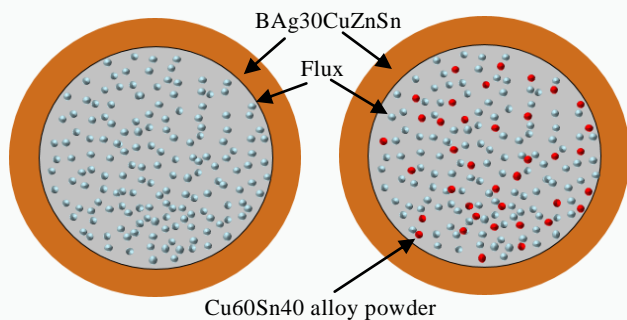


图 1 低熔速流型复合药芯银钎料

Fig.1 Low-melting-rate flow-type composite cored silver brazing filler metal

表 1 药芯银钎料粉芯成分比例及对应化学成分

Table 1 Composition ratio of powder core and corresponding chemical composition of flux cored silver brazing filler metal (ω/%)

Alloy	Core proportion		Chemical composition			
	Alloy powder	Flux	Ag	Cu	Zn	Sn
1	0	100	30.23	38.31	30.13	1.33
2	30	70	28.45	40.04	27.80	3.71
3	40	60	27.37	40.73	27.68	4.22
4	50	50	26.73	41.50	27.18	4.59
5	60	40	24.27	43.02	26.61	6.10
6	70	30	23.42	43.56	25.09	7.93

图像。截取相同长度的复合药芯银钎料, 外置 0.2 g 钎剂, 分别置于除油及打磨干净的 T2 紫铜板、Q235 钢板上放置于电阻炉中进行润湿试验。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, 清洗干净后通过体视显微镜测量钎料的润湿面积。钎焊接头的拉伸试验根据 GB/T 228.1-2010 《金属材料拉伸试验》进行, 紫铜板及钢板尺寸均为 60 mm×15 mm×2 mm。T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头界面硬度通过华银显微硬度计测试, 试验过程中载荷为 200 g, 加载时间为 20 s。

通过 SP-15 型高频感应焊机对 T2 紫铜/Q235 钢异种金属进行钎焊, 感应加热至钎料熔化后保温 20 s, 然后空冷至室温。钎焊完成后对接头进行清洗打磨, 然后通过 MTS E45.105 万能力学试验机进行拉伸试验, 拉伸速度为 2 mm/min。采用电火花线切割对接头进行取样, 依次进行打磨、镶嵌、粗磨、精磨、抛光后用 FeCl₃ 水溶液进行腐蚀, 然后通过扫描电镜及 EDS 能谱对钎焊接头微观组织及微区成分进行分析。

2 结果与分析

2.1 润湿性能分析

药芯粉芯中添加质量分数 30% Cu60Sn40 合金粉的药芯银钎料在 T2 紫铜板上的润湿过程如图 2 所示。当感应加热时间到 30 s 时, 药芯钎料中的白色复合钎剂开始流出, 继续延长感应加热时间至 35 s 时, 此时温度达到钎剂的熔化温度, 钎剂开始熔化, 流布到钎料周围, 去除紫铜板及钎料表面的氧化膜, 并浮于紫铜板及钎料表面抑制铜板及钎料在施焊过程中再次被氧化, 以改善钎料的润湿性能。随着钎焊温度的不断升高, 紫铜板逐渐由浅红色转变为深红色, 钎料开始熔化。当感应加热时间延长至 42 s 时钎料完全转变为熔融状态, 继续加热升温至 45 s 时, 在钎料周围出现润湿环, 表明该钎料在铜板表面具有良好的润湿性, 同时熔融钎料开始在铜板表面润湿流铺。当感应加热时间达到 51 s 时, 润湿环破裂。停止加热, 温度逐渐降低, 熔融钎料开始凝固, 室温时润湿形貌如图 2 中 Room Temperature 的所示。

对粉芯中添加不同比例 Cu60Sn40 合金粉的 BAg30CuZnSn 复合药芯银钎料在 T2 紫铜板及 Q235 钢板上的润湿性能进行测试, 其铺展面积如图 3 所示。可以看出, 随着粉芯中 Cu60Sn40 合金粉含量的不断增加, 复合粉芯药芯银钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿面积逐渐增大。未添加合金粉时, 钎料在 T2 紫铜板上的润湿面积达到 318.92 mm², 在 Q235 钢板上的润湿面积达到 237.08 mm²。加入 Cu60Sn40 合金

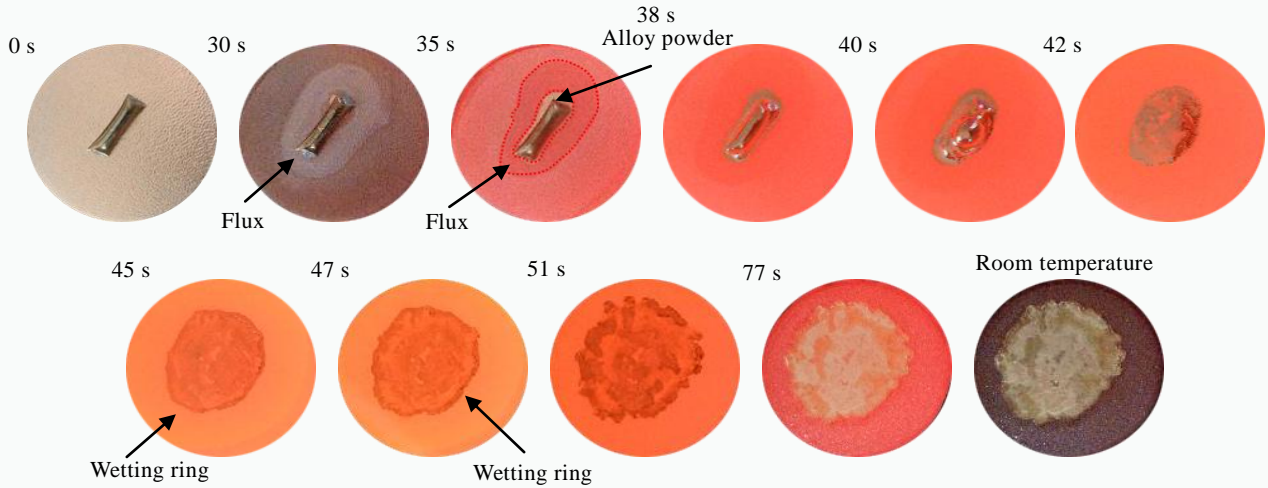


图 2 30% CuSn 合金粉芯药芯银钎料在铜板上的铺展润湿过程

Fig.2 Spreading and wetting process of 30% CuSn alloy core flux cored silver solder on copper plate

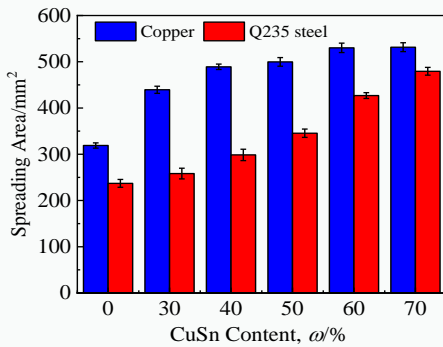


图 3 药芯粉芯中 CuSn 合金粉含量对润湿面积的影响

Fig.3 Effect of CuSn alloy powder content in flux core on wetting area

粉后复合药芯银钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿面积逐渐增大，当药芯银钎料粉芯中 Cu60Sn40 合金粉的比例达到 70%时，钎料在铜板及 Q235 钢板上的润湿面积分别达到了 531.53 和 479.41 mm²，相比于未添加 Cu60Sn40 合金粉的药芯银钎料分别提高了 66.7%和 102.2%，表明药芯粉芯中添加 Cu60Sn40 合金粉能够显著改善药芯银钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿性能；同时可以发现药芯银钎料在 T2 紫铜板上的润湿性能明显优于在 Q235 钢板上的润湿性能；此外由图 3 可知，随着合金粉含量的不断增加，复合药芯银钎料在 Q235 钢板上润湿面积的增加速率明显高于在 T2 紫铜板上润湿面积的增加速率，表明添加合金粉对药芯银钎料在 Q235 钢板上的润湿性能的改善能力优于紫铜板。现有研究表明 AgCuZn 系钎料中

加入 Sn 元素能够降低钎料的熔化温度，改善钎料的润湿性能^[12,13]。此外由图 2 中 30% Cu60Sn40 合金粉芯药芯银钎料在铜板上的铺展润湿过程可知，Cu60Sn40 合金粉在钎焊过程中先于外皮 BAg30CuZnSn 熔化，形成熔融的铜锡液态合金薄层，降低母材表面固液界面张力。随后熔化的外皮在熔融的铜锡液态薄层上铺展，两者之间发生溶质的传输与相互扩散以进行互相熔合，形成高锡含量的 BAg30CuZnSn 液态钎料，所以能显著改善钎料在 T2 紫铜板及 Q235 钢板上的润湿性能。

2.2 钎焊接头微观组织结构

图 4 为采用 30% Cu60Sn40 合金粉芯药芯银钎料感应钎焊获得的 T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头的界面组织及各元素的分布情况。根据图 4a 可以发现钎焊接头组织致密，无气孔、夹渣等宏观缺陷，说明添加复合粉芯的药芯钎料具有良好的焊接性能。此外，钎缝组织主要由深黑色大块状相，依附于块状相周围的白色相及黑白相间的层片状组织组成；在靠近紫铜侧界面处形成了厚度约 10 μm 的浅灰色过渡层，而密集的柱状深黑色大块状相依托于过渡层向钎缝中央延伸，在靠近 Q235 钢侧界面未发现明显的过渡层存在，主要由黑白相间的层片状组织及深黑色的大块状相组成。为了确定接头界面处所含元素的具体分布情况，对其进行 EDS 面扫描，其结果如图 4b~4f 所示，在靠近紫铜侧界面的浅灰色区域主要富集着 Cu 元素与 Zn 元素，钎缝中央区域黑白相间的层片状相主要分布着 Ag、Zn、Sn 元素，白色相区域为富 Ag 区域。对图 4a 中各相点进行能谱分析，各点 EDS 分析结果如表 2 所示，

可以发现深黑色大块状相为富 Cu 固溶体，白色相为富 Ag 相，黑白相间的层片状组织为 Ag-Cu 共晶组织。钎缝处熔融钎料在凝固过程中，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 相依托于两侧母材向钎缝中央形核生长，随后剩余液相与初生的 α -Cu 相反应生成 β -CuZn 相。温度继续降低，低熔点的富银液态合金将依附于首先凝固的大块状 Cu 基固溶体周围析出。当温度降低至 Ag-Cu 共晶温度时，开始生成层片状的共晶组织。

2.3 合金粉含量对钎焊接头微观组织的影响

分别采用粉芯中含有 0%、30%、40%、50%、60%、70% 的 Cu60Sn40 合金粉的复合药芯银钎料对 T2 紫铜/Q235 钢感应钎焊，获得的 T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头扫描电镜组织如图 5 所示，并对图 5 中各相点进行 EDS

能谱分析，其结果如表 3 所示。T2 紫铜/Q235 钢异种金属钎焊接头的组织主要分为 Q235 钢母材、Q235 钢侧界面、钎缝、T2 紫铜侧界面、T2 紫铜母材共 5 个区域。可以发现，加入 Cu60Sn40 合金粉后，钎缝的组织发生了显著变化。如图 5a 所示，未添加 Cu60Sn40 合金粉时，钎缝中央区域组织主要由块状的黑色 Cu 基固溶体，白色的富 Ag 相及黑白相间的共晶组织相间分布；紫铜侧界面处存在连续的灰黑色过渡层，深黑色的柱状 Cu 基固溶体依托于过渡层延伸指向钎缝；在 Q235 钢侧界面中未观察到过渡层的存在，其界面处组织主要为黑色的块状 Cu 基固溶体与层片状的共晶组织相间分布。如图 5b 所示，当 Cu60Sn40 合金粉含量为 30% 时，紫铜侧界面处过渡层厚度未发生变化，而柱状 Cu 基固溶体密度显著增大，且延伸至钎缝中心

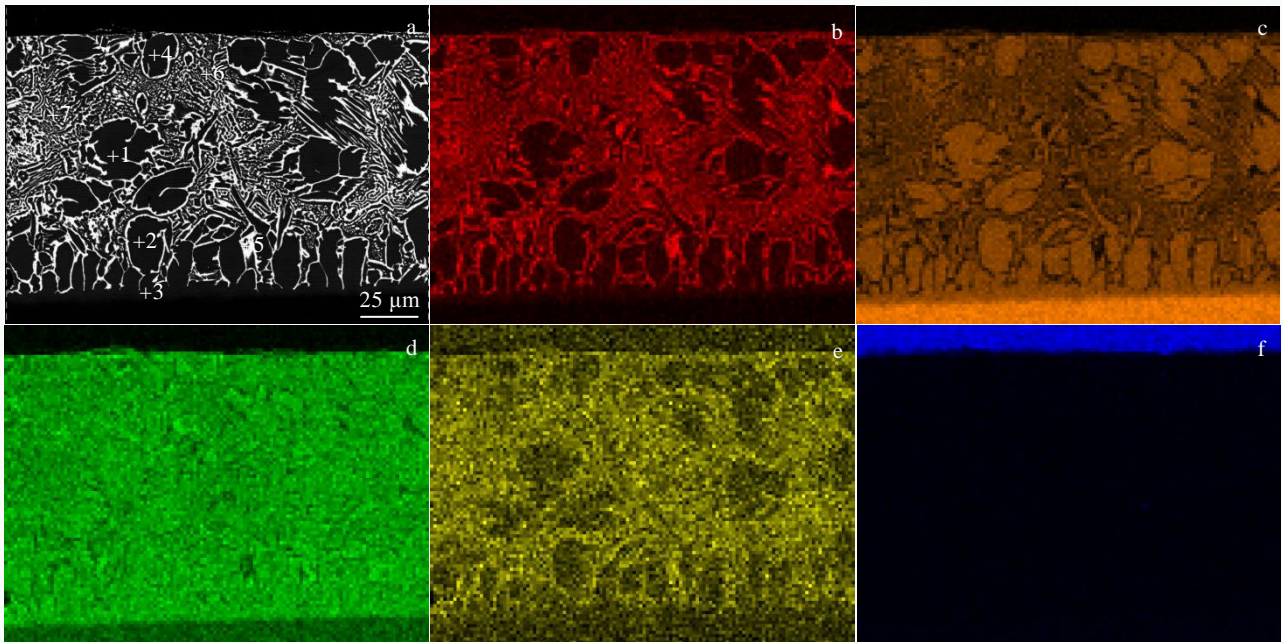


图 4 采用添加 30% CuSn 合金粉的复合药芯银钎料钎焊的 T2 紫铜/Q235 钢接头界面组织及元素分布

Fig.4 SEM microstructure (a) and distribution of alloying elements of T2 copper/Q235 steel joint brazed by composite flux cored silver filler metal with 30% CuSn alloy powder: (b) Ag, (c) Cu, (d) Zn, (e) Sn, and (f) Fe

表 2 图 4a 中各点 EDS 能谱分析结果

Table 2 EDS analysis results of each point in Fig.4a (wt%)

Point	Ag	Cu	Zn	Sn	Fe	Possible phase
1	11.30	59.74	27.87	-	1.09	(Cu)
2	11.57	58.70	28.73	-	-	(Cu)
3	9.26	64.32	26.42	-	-	(Cu)
4	11.26	58.85	27.10	1.18	1.61	(Cu)
5	62.12	12.32	18.55	7.01	-	(Ag)
6	36.64	35.53	24.09	2.74	1.00	Ag-Cu eutectic
7	21.47	41.22	33.01	4.30	-	Ag-Cu eutectic

的距离增加; 靠近 Q235 钢侧界面处的块状 Cu 基固溶体明显变大, 钎缝中央区域层片状共晶组织密集分布于 Cu 基固溶体周围。如图 5c 所示, 当 Cu60Sn40 合金粉含量达到 40% 时, 钎缝中央形成了黑色的大块状的 Cu 基固溶体以及白色相互连接的富 Ag 相, 共晶组织减少, 靠近紫铜侧界面处柱状 Cu 基固溶体尺寸变小。当合金粉含量超过 40% 时, 钎缝中央区域出现了粗大的块状 Cu 基固溶体, 灰黑色的锡青铜相及灰白

色的富 Ag 相, 共晶组织几乎消失, 而 Sn 元素主要分布于富 Ag 相及周围的灰色锡青铜相中, 如图 5d~5f 所示。由于成分过冷等因素, 银钎料在凝固过程中, 高熔点的富 Cu 相首先析出, 随后与 Zn 元素发生包晶反应生成 CuZn 相, 液态钎料中剩余的 Cu 元素与 Sn 元素发生反应以锡青铜的形式存在, 而低熔点的富 Ag 相被排挤在凝固合金的周围以离异共晶的形式存在于锡青铜相周围。

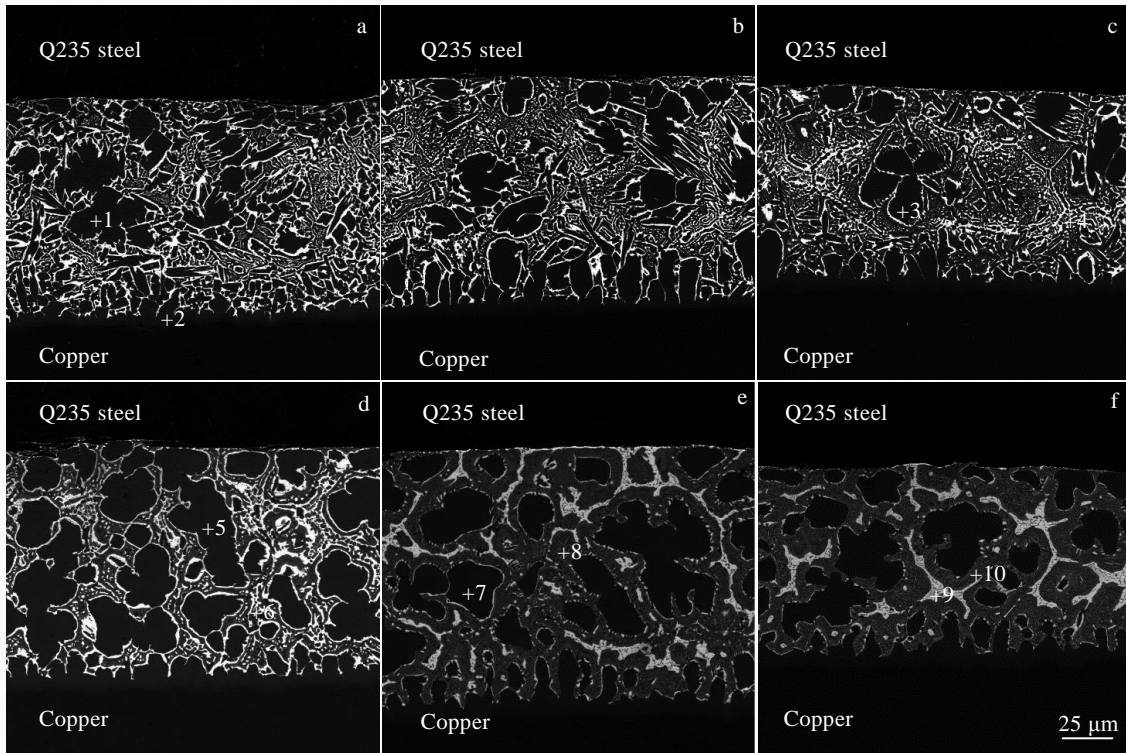


图 5 药芯粉芯中不同 CuSn 合金粉含量的 T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头组织

Fig.5 SEM microstructures of T2 Cu/Q235 steel brazed joint with different CuSn alloy powder contents in flux core: (a) 0%, (b) 30%, (c) 40%, (d) 50%, (e) 60%, and (f) 70%

表 3 图 5 中各点 EDS 能谱分析结果

Table 3 EDS analysis results of each point in Fig.5 (wt%)

Point	Ag	Cu	Zn	Sn	Fe	Possible phase
1	10.79	60.19	28.02	-	1.00	(Cu)
2	9.26	64.32	26.42	-	-	(Cu)
3	10.53	60.77	27.77	-	0.93	(Cu)
4	30.99	33.77	23.23	12.01	-	Ag-Cu eutectic
5	10.88	60.71	26.39	1.50	0.52	(Cu)
6	15.52	43.81	23.73	16.04	0.90	CuZn, CuSn
7	8.03	65.23	23.46	2.50	0.78	(Cu)
8	18.20	47.48	18.77	14.76	0.79	CuZn, CuSn
9	74.66	6.85	8.25	10.24	-	(Ag)
10	17.11	51.12	16.94	14.06	0.77	CuZn, CuSn

2.4 接头显微硬度分析

图 6 为复合药芯钎料中 CuSn 合金粉含量对 T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头界面显微硬度的影响，可以看出钎缝处整体显微硬度随着药芯粉芯中 CuSn 合金粉含量的增加不断升高，且靠近紫铜侧的硬度低于靠近 Q235 钢侧的硬度，钎缝中央的显微硬度高于靠近两侧母材界面处的显微硬度。结合图 5 中钎焊接头的微观组织可以看出加入 CuSn 合金粉后钎料的显微组织发生显著变化，随着添加的 CuSn 合金粉含量的不断增加，钎料组织中的共晶相消失，而锡青铜相及 CuZn 脆性化合物含量不断增加，故而钎缝处硬度显著升高。而由图 6 中添加 CuSn 合金粉含量为 70% 时，靠近 T2 紫铜侧界面显微硬度明显降低，观察图 7 中靠近 T2 紫铜侧的显微硬度压痕，发现压痕部分处于 T2 紫铜母材侧，部分处于钎缝中，所以显微硬度显著降低。

2.5 抗拉强度分析

对 T2 紫铜/Q235 钢钎焊接头抗拉强度进行测试，复合钎剂中 CuSn 合金粉含量对 T2 紫铜/Q235 钢接头抗拉强度及断口形貌的影响分别如图 8 及图 9 所示，断口中各点的具体化学成分如表 4 所示。随着药芯粉芯中 CuSn 合金粉含量的增加，接头的抗拉强度呈现先升高后降低的趋势。未添加合金粉时，接头的抗拉

强度为 161.14 MPa，结合图 5a 及图 9a 可以发现，断口组织主要由灰黑色的 Cu 基柱状固溶体及白色的富 Ag 相组成，而 Sn 元素主要分布于富 Ag 相中；此外，还可以发现在图 9a 中的灰黑色 Cu 基柱状固溶体表面还残留有撕裂下的白色富 Ag 相；当粉芯中加入含量为 30% 的 CuSn 合金粉时，接头的抗拉强度取得最大值（198.91 MPa），相比于未添加 CuSn 合金粉时提高了 23.4%。结合图 5 中的钎焊接头组织及图 9b 中的钎焊接头断口形貌进行分析，发现加入 30% 的 CuSn 合金粉后接头组织中 Ag-Cu 共晶组织增多，此外紫铜侧延伸至钎缝中央的柱状 Cu 基固溶体插入钎缝中，在受到外加载荷时起到钉扎作用，故而接头抗拉强度升高。图 9b 中的断口呈现沿晶断裂形貌，其中白色的富 Ag 相中 Sn 元素含量高达 8.36%；由图 5 中的接头组织可以看到加入 40% CuSn 合金粉时，钎缝中的共晶组织减少，同时柱状的 Cu 基固溶体尺寸减小，继续增加 CuSn 合金粉后，接头中的 Ag-Cu 共晶组织几乎消失，钎缝组织显著粗化，同时出现大量 CuSn 及 CuZn 脆性化合物。结合图 9c 中各点的能谱分析结果发现，Cu 基及 Ag 基固溶体中均存在大量的 Sn 元素分布，其中 Ag 基固溶体中 Sn 元素含量高达 11.80%，推断其断裂模式为低熔点金属的脆性断裂。钎焊接头受到外加载荷时，接头组织中的脆性化合物和粗大的组织周围容易产生应力集中，难以实现与钎料基体协调同步变形，容易萌生裂纹；此外，低熔点金属 Sn 原子的吸附作用使金属材料原子之间的剪切结合力降低，进而促进裂纹尖端及其附近处位错的形核与滑移，使得裂纹尖端处局部塑性增加，而局部塑性增加能够使钎焊接头整体的断裂应变降低，进而导致断裂的脆化，故接头强度不断降低^[14]。

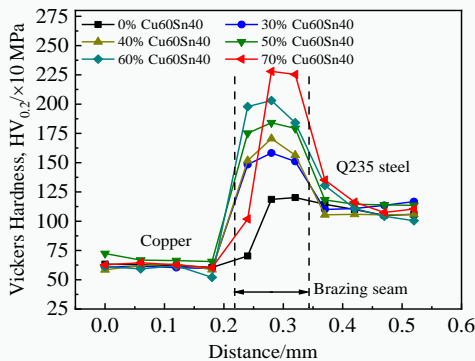


图 6 药芯粉芯中 CuSn 合金粉含量对接头显微硬度的影响
Fig.6 Effect of CuSn alloy powder content in flux core on microhardness of brazed joint



图 7 70% CuSn 合金粉复合药芯银钎料钎焊的接头显微硬度压痕
Fig.7 Micro-hardness indentation morphology of joint brazed with composite flux-cored silver brazing filler metal with 70% CuSn alloy powder

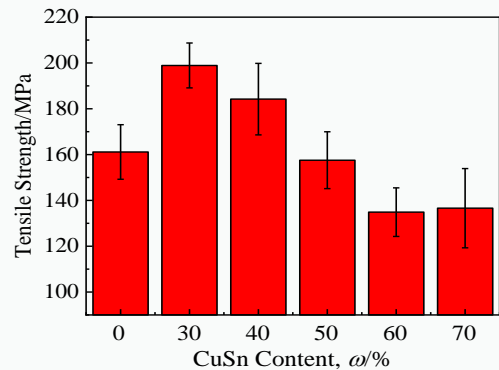


图 8 药芯粉芯中 CuSn 合金粉含量对接头抗拉强度的影响
Fig.8 Effect of CuSn alloy powder content in flux core on tensile strength of brazed joint

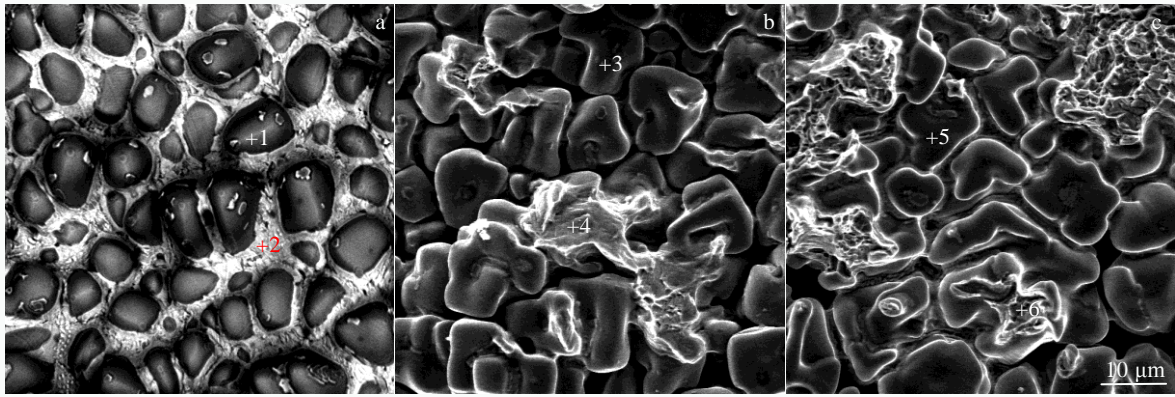


图 9 药芯粉芯中不同 CuSn 合金粉含量的钎焊接头断口形貌

Fig.9 SEM fracture morphologies of brazed joint with different CuSn alloy powder contents in flux core: (a) 0%, (b) 30%, and (c) 70%

表 4 图 9 中各点 EDS 能谱分析结果

Table 4 EDS analysis results of each point in Fig.9 (ω/%)

Point	Ag	Cu	Zn	Sn	Possible phase
1	10.78	60.72	28.5	-	(Cu)
2	70.98	10.58	13.96	4.48	(Ag)
3	10.79	65.63	23.58	-	(Cu), CuZn
4	59.66	19.52	12.46	8.36	(Ag), CuSn
5	6.12	71.88	15.28	6.72	CuZn, CuSn
6	64.65	17.39	6.16	11.80	(Ag), CuSn

3 结 论

1) 使用添加 CuSn 合金粉的复合药芯银钎料感应钎焊紫铜/Q235 钢能够通过原位反应获得成分均匀的 AgCuZnSn 合金钎缝，当 CuSn 合金粉含量为 30% 时，紫铜/Q235 钢钎焊接头组织均匀致密。

2) 随着粉芯中 CuSn 合金粉含量的不断增加，钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿面积不断增大。当 CuSn 合金粉含量为 70% 时，钎料在紫铜板及 Q235 钢板上的润湿面积分别达到了 531.53 和 479.41 mm²，相比于未添加合金粉的药芯银钎料分别提高了 66.7%、102.2%。

3) 随着粉芯中 CuSn 合金粉含量的不断增加，紫铜/Q235 钢钎焊接头的显微硬度不断升高，紫铜/Q235 钢钎焊接头的抗拉强度呈现先升高后降低的趋势，当药芯粉芯中合金粉含量为 30% 时接头强度达到最大值 (198.91 MPa)，提高了 23.4%。

参考文献 References

[1] Way M, Willingham J, Goodall R. *International Materials Reviews*[J], 2020, 65: 257
 [2] Li Shuai, Wang Xingxing, Liu Zhongying et al. *Journal of*

Materials Science-Materials in Electronics[J], 2020, 31(12): 9076

[3] Wang Xingxing(王星星), Peng Jin(彭 进), Cui Datian(崔大田) et al. *Materials Review(材料导报)*[J], 2018, 32(9): 1477
 [4] Wang Xingxing(王星星). *Study on Plating Preparation and Brazing Process of Supersaturated AgCuZnSn Filler Metals (过饱和银铜锌锡钎料的镀覆制备及其钎焊工艺性研究)*[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2015
 [5] Wang Xingxing(王星星), Peng Jin(彭 进), Xue Peng(薛 鹏) et al. *Materials Review(材料导报)*[J], 2017, 31(15): 87
 [6] Long Weimin, Li Shengnan, Du Dong et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(12): 3781
 [7] Zhang Guanxing(张冠星), Zhong Sujuan(钟素娟), Cheng Yafang(程亚芳) et al. *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2017, 38(12): 33
 [8] Long Weimin(龙伟民), Zhang Guanxing(张冠星), Zhang Qingke(张青科) et al. *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2015, 36(11): 1
 [9] Long W M, Zhang G X, Zhang Q K. *Scripta Materialia*[J], 2016, 110: 41
 [10] Long Weimin(龙伟民), Lu Quanbin(路全彬), He Peng(何 鹏)

- et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(6): 17
- [11] Wang Xingxing(王星星), Wang Bo(王 博), Han Linshan(韩林山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(1): 367
- [12] Yun Donghai(尹东海). *Influence of Tin and Gallium on Microstructure and Properties of Ag-Cu-Zn Brazing Filler Metal*(锡和镓对银基钎料组织及性能的影响)[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014
- [13] Wu Qianqian(武倩倩). *Influence of Indium and Stannum on Microstructure and Properties of BAg20CuZn Filler Metal*(铟和锡对 BAg20CuZn 钎料组织及性能的影响)[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014
- [14] Zhong Qunpeng(钟群鹏), Zhao Zihua(赵子华). *Fractography* (断口学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 220

Effect of Low-melt Alloy Powder on Brazing Process of Flux-cored Silver Brazing Filler Metal

Wang Meng, Zhang Guanxing, Zhong Sujuan, Shen Yuanxun, Long Weimin, Dong Hongwei, Liu Xiaofang
(State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To overcome the problem that AgCuZnSn filler metal with high tin content is difficult to form for its high brittleness, a composite flux-cored silver filler metal with CuSn alloy powder core was designed based on the concept of flux-cored wire. The effects of 30wt%~70wt% Cu60Sn40 alloy powder on the wettability, microstructure, interfacial microhardness and tensile strength of silver filler metal, copper/Q235 steel brazing joint were studied. The results show that AgCuZnSn filler metal with high tin content was in-situ synthesized by CuSn alloy powder in core and BAg30CuZnSn of outer layer during brazing process, and uniform composition with good joint structure was obtained. With the increase of the content of alloy powder in the core, the wetting area of composite flux-cored silver solder on copper plate and Q235 steel plate is promoted constantly, the microhardness of copper/Q235 steel brazing joint increases continuously, and the tensile strength increases firstly and then decreases. When the content of CuSn alloy powder in the powder core is 30wt%, the maximum tensile strength (198.91 MPa) of Cu/Q235 steel brazing joint is obtained, which is enhanced by 23.4% compared with the core silver brazing filler metal without alloy powder adding.

Key words: in-situ synthesis; flux-cored silver brazing filler metal; wettability; microstructures; tensile strength

Corresponding author: Zhong Sujuan, Researcher, State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, P. R. China, E-mail: sujuan_Zh@163.com