

# AgCuGaInSn 钎料的制备及其钎焊性能研究

雷睿超<sup>1,2</sup>, 操齐高<sup>1</sup>, 王瑞红<sup>2</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 近几年随着制造行业的发展, 换热器制造所用材料也在更新换代, 这促使了新型 Ag 基钎料的开发。Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr 合金具有高导热和高强度特性, 被用来制作新型高性能换热器, 但过高的钎焊温度会降低合金强度。Ga, In 和 Sn 等元素可以显著地降低 Ag 基钎料的钎焊温度, 有效提高钎焊后 Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr 合金的强度。以 AgCu28 为基础合金, 通过加入 Ga, In 和 Sn 元素设计并制备了 AgCuGaInSn 系列带材钎料, 研究了 Ga, In 和 Sn 元素对钎料物相和熔化性能的影响。同时优选了 Ag<sub>61</sub>.2Cu<sub>23</sub>.8Ga<sub>3</sub>In<sub>10</sub>.5Sn<sub>1.5</sub> 钎料钎焊 Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr 合金, 通过研究接头组织和力学性能, 评价了 AgCuGaInSn 钎料对 Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr 合金的钎焊性能。研究表明: 当 Ga, In, Sn 总质量分数增大至 15% 时, 钎料液相点降至 700 °C 以下; 当 Ga, In, Sn 总质量分数为 15%, 且 Ga 与 In 原子比为 2:7 时, 优选钎料 Ag<sub>61</sub>.2Cu<sub>23</sub>.8Ga<sub>3</sub>In<sub>10</sub>.5Sn<sub>1.5</sub> 液相点最低, 为 675 °C。该钎料加工性能良好, 经历旋锻、退火、冷轧后可制成厚度为 0.05~0.2 mm 带材。Ag<sub>61</sub>.2Cu<sub>23</sub>.8Ga<sub>3</sub>In<sub>10</sub>.5Sn<sub>1.5</sub> 钎料在 675~735 °C 可以成功钎焊钎缝宽度为 0.2 mm 的 CuAgZr 合金的接头, 接头组织呈现 2 种不同类型, 分别为富 Ag 相+富 Cu 相以及富 Ag 相+富 Cu 相+AgCu 共晶组织。675 °C 下钎焊, 接头剪切强度为 275 MPa, 剪切断面呈现韧性断裂特征。接头组织表征和剪切性能检测结果证明 AgCuGaInSn 钎料适用于 Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr 合金的钎焊。

**关键词:** CuAgZr 合金; Ag 基钎料; 中温钎料; 钎焊; 剪切性能; 换热器

**中图分类号:** TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)08-0601-06

**引用格式:** 雷睿超, 操齐高, 王瑞红. AgCuGaInSn 钎料的制备及其钎焊性能研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(8): 601-606.  
LEI R C, CAO Q G, WANG R H. Study on Preparation and Brazing Performance of AgCuGaInSn Brazing Filler[J]. Materials China, 2022, 41(8): 601-606.

## Study on Preparation and Brazing Performance of AgCuGaInSn Brazing Filler

LEI Ruichao<sup>1,2</sup>, CAO Qigao<sup>1</sup>, WANG Ruihong<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. College of Material Science & Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In recent years, with the development of manufacturing industry, the raw materials used in heat exchange are also being updated. This has prompted the development of new Ag based brazing filler. Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr alloy has high thermal conductivity and strength, and is used to make new high performance heat exchangers. But too high brazing temperature will reduce the strength of the alloy. The elements such as Ga, In and Sn can significantly reduce the brazing temperature of Ag based filler metal and effectively improve the strength of Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr alloy after brazing. In this paper, AgCuGaInSn was designed and prepared by adding Ga, In and Sn elements to base alloy AgCu28. The effects of Ga, In and Sn elements on the phases and melting properties of the filler metal were studied. Afterwards, Ag<sub>61</sub>.2Cu<sub>23</sub>.8Ga<sub>3</sub>In<sub>10</sub>.5Sn<sub>1.5</sub> was optimized for brazing Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr alloy, and the brazing performance of AgCuGaInSn filler to Cu<sub>3</sub>Ag0.5Zr alloy was evaluated

by investigating microstructure and mechanical property of joints. The results show that when the total mass fraction of Ga, In, Sn increases to 15%, the liquidus points of fillers decrease to below 700 °C. When the total mass fraction of Ga, In, Sn is 15% and the atomic ratio of Ga:In is 2:7, that is, the optimal filler Ag<sub>61</sub>.2Cu<sub>23</sub>.8Ga<sub>3</sub>In<sub>10</sub>.5Sn<sub>1.5</sub> liquidus point is the lowest, 675 °C. And this filler has good processability with which filler can form strips with 0.05~0.2 mm thickness after rotary forging, annealing,

收稿日期: 2021-07-14 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0305702)

第一作者: 雷睿超, 男, 1995 年生, 硕士

通讯作者: 操齐高, 男, 1982 年生, 教授级高级工程师, 硕士生导师, Email: caoqigao@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202107020

cold rolling. The joints of CuAgZr alloy with gap width of 0.2 mm can be brazed successfully by Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5 filler at 675~735 °C. The joints have two different varies of microstructures, which are Ag-rich phase+Cu-rich phase and Ag-rich phase+Cu-rich phase+AgCu eutectic structure respectively. The shear strength is around 275 MPa in joints brazed at 675 °C with 0.2 mm gap width, and the fracture is ductile fracture. The microstructure characterization and shear properties tests of the joints show that the AgCuGaInSn brazing filler is suitable for the brazing of Cu3Ag0.5Zr alloy.

**Key words:** CuAgZr alloy; Ag based brazing filler; intermediate temperature filler; brazing; shear strength; heat exchange

## 1 前言

Cu3Ag0.5Zr(数字表示对应元素质量百分数,下同)合金主要被用于制作航天发动机尾喷管再生冷却系统推力室内壁,其高强度、高导热的特性能够充分满足再生冷却系统的服役条件<sup>[1]</sup>。基于以上特性,Cu3Ag0.5Zr合金被用来设计制造高性能板翅式换热器,以满足高性能换热器的力学和导热要求。

在板翅式换热器的制作过程中,翅片和隔板之间的钎焊工艺会直接影响到换热器的换热效率、工作可靠性和安全性<sup>[2,3]</sup>。因此,在CuAgZr合金换热器的设计和研发中,合适的钎料选择和合理的钎焊工艺设计具有重要地位。除此之外,钎焊后CuAgZr基材的力学性能也会发生变化,最终影响换热器的整体性能。

为了明确CuAgZr合金的钎焊温度区间,将轧制加工率为50%的Cu3Ag0.5Zr合金拉伸试样分别在400,500,600,700和800 °C下保温10 min,进行氩气保护退火。定义非比例伸长率为0.2%时的应力为屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ ,上述不同保温温度下退火试样的 $\sigma_{p0.2}$ 如表1所示。从表1可以看出,相较于800 °C,当钎焊温度降至700 °C时,母材的屈服强度提升了接近一倍。进一步降低钎焊温度,母材在400~500 °C处可以获得更高的屈服强度,但是适用于该钎焊温度的钎料一般为Zn-Al基钎料,且此温度下钎焊接头的力学性能较差(剪切强度约为100 MPa)<sup>[4-6]</sup>,不能有效保证换热器的稳定服役。

Ag-Cu基钎料具有适中的钎焊温度(600~1000 °C)、较高的强度、良好的塑韧性和加工性等优点<sup>[7]</sup>。采用Ag-Cu基钎料钎焊可以在获得较高接头强度的同时提高基材强度。因此设计并开发适用于700 °C钎焊温度的Ag-Cu基钎料是提高基材强度,进而提高换热器整体性能的核心问题之一。

表1 不同保温温度下Cu3Ag0.5Zr退火试样屈服强度

Table 1 Yield strength of Cu3Ag0.5Zr samples annealed at different temperatures

Anneal temperature/°C	400	500	600	700	800
$\sigma_{p0.2}$ /MPa	343	179	91	101	55

Ag-Cu基钎料的钎焊温度主要由钎料的液相点决定,

而钎料的液相点主要通过合金元素的种类和含量实现调控。在AgCu28(熔点780 °C)的基础上,加入In,Sn,Ga,Zn等低熔点金属元素可以极大地降低钎料液相点,从而降低钎焊温度。

Ag-Cu基钎料中加入少量Sn和In元素时,钎料组织基本由富Ag的 $\alpha$ 相和富Cu的 $\beta$ 相构成,Sn和In含量过多则会生成金属间化合物, $\beta$ 相和金属间化合物都属于脆性相,因此Sn和In含量过多会造成钎料塑性下降、难以加工成型<sup>[8]</sup>。对于综合性能最优的Ag-Cu-In-Sn钎料(液相点为554~604 °C<sup>[9]</sup>),有报道采用大变形热挤压开坯—热轧—冷轧—退火—冷精轧的工艺,成功制得厚度在0.1 mm以下的带材<sup>[10]</sup>。昆明贵金属研究所研究人员<sup>[11,12]</sup>针对不能以轨制-退火工艺加工的Ag-22.4Cu-20Sn钎料,开发了叠轧复合-扩散合金化制备方法,成功制备了可以冲裁加工的片状钎料,该钎料的液相点约为555 °C。非晶甩带法由于其可用于制备脆性材料的优点,在中温钎料领域被广泛研究和应用<sup>[13]</sup>。基于粉末烧结成型的粉末电磁压实技术也受到了相当的关注<sup>[14]</sup>。

近年来,也有研究者开发了Ag-Cu-Ga体系钎料。柳旭等<sup>[15]</sup>研究了Ga含量为5%~20%(质量分数,下同)的AgCuGa钎料,开发了有望取代AgCu28的Ag-55Cu-5Ga钎料。该研究表明,Ag-55Cu-5Ga钎料由富Ag相、富Cu相和AgCu共晶组织组成,Ga主要固溶于富Cu相中。使用该钎料钎焊无氧铜形成剪切接头,结合处的剪切强度大于基材剪切强度。5% Ga的加入在保持接头连接强度的同时降低了钎料的液相点;当Ga含量增至20%时,Ag-40Cu-20Ga液相点相较于AgCu28降低了约130 °C,可见Ga对AgCu基钎料液相点有较大影响。卢方焱<sup>[16]</sup>较为系统地研究了In,Ga元素对Ag-Cu-Zn-Sn钎料熔化特性和钎焊性能的影响,研究表明,加入3%的Ga可以使AgCuZnSn钎料液相点降低约70 °C;而加入3%的In可以使AgCuZnSn钎料液相点降低约60 °C;当Ga含量为3%、In含量为1.5%~2%时,焊料综合性能最佳。但是该钎料中含有Zn,不适用于真空钎焊。曲文卿等<sup>[17]</sup>以AgCu合金为基础合金,加入了总含量为12%~15%的Ga和In,成功研制了高塑性的AgCuGaIn合金。该系列合金液相点在723~732 °C之间,Ga在Cu中和In在Ag中有较大的固溶度是该系列钎料塑性较高的主要原因。

总之, Ag-Cu-In-Sn 系钎料合金的液相点较低但脆性较大; 而 Ag-Cu-Ga-In 系钎料合金具有较高的塑性和较高的液相点。为了得到液相点较低且塑性较好的钎料, 本文以 Ag-Cu-In-Sn 钎料以及 Ag-Cu-Ga-In 钎料的研究工作为基础, 以 Cu3Ag0.5Zr 合金制板翅式换热器翅片与隔板之间的钎焊连接为研究对象, 尝试通过 Ga, In, Sn 的混合加入得到液相点较低(700 ℃ 以下) 且塑性较好、适于 Cu3Ag0.5Zr 合金换热器钎焊的 AgCuGaInSn 钎料, 最后初步探究该钎料对 Cu3Ag0.5Zr 的钎焊性能。

## 2 实 验

### 2.1 钎料成分设计

首先设计并熔炼了如表 2 成分的钎料, 编号为 A1~A4, 熔炼钎料所采用的原料均为杂质含量小于 0.01% 的 AgCu28 以及纯 Ga, In, Sn 锭。将各钎料的原料在氩气保护感应熔炼炉中进行熔炼, 在熔炼过程中利用感应线圈产生的交变磁场对充分熔化的液态钎料进行电磁搅拌, 搅拌时长约 1 min, 使用吸铸将液态钎料铸成直径约为 6 mm、长度约为 20 cm 的铸态钎料棒材。其次, 对铸态钎料棒材进行旋锻加工, 初始加工每道次加工率约为 6%, 总加工率约为 52%; 其中 A4 钎料加工至直径为 5 mm 时断裂, 如图 1 所示, 因此 A4 钎料塑性较差, 加工周期较长。

表 2 不同 Ga, In, Sn 总含量的 AgCuGaInSn 钎料成分表 ( $W_{Ga}:W_{In}:W_{Sn}=6:3:1$ )

Table 2 Composition table of AgCuGaInSn filler with different total content of Ga, In, Sn ( $W_{Ga}:W_{In}:W_{Sn}=6:3:1$ )

Filler number	Mass fraction/%				
	Ag	Cu	Ga	In	Sn
A1	68.4	26.2	3.0	1.5	0.5
A2	64.8	25.2	6.0	3.0	1.0
A3	61.2	23.8	9.0	4.5	1.5
A4	57.6	22.4	12.0	6.0	2.0



图 1 旋锻过程中横断的 A4 钎料

Fig. 1 Cross-breaking of A4 filler during rotary forging

考虑到加工周期, 将 Ga, In, Sn 总含量控制在 15%, 调控 Ga 与 In 比例, 筛选出综合性能最优的钎料,

编号为 B3~G3, 各钎料成分见表 3。采用高频熔炼和吸铸成型将表 3 中各钎料铸成直径和长度与 A1~A3 相同的棒材, 并进行旋锻。将旋锻后 A1~A3 和 B3~G3 钎料棒材进行退火和拉拔, 退火工艺为 600 ℃ 保温 2 h, 拉拔每道次直径减少量为 0.1 mm, 拉至直径为 1 mm 后进行冷轧。最后对各钎料丝材进行轧制和退火。将除 A4 以外的钎料加工成 0.05~0.2 mm 厚的带材。

表 3 不同  $W_{Ga}:W_{In}$  比值的 AgCuGaInSn 钎料成分表

Table 3 Composition of AgCuGaInSn filler with different  $W_{Ga}:W_{In}$  (total content of Ga, In, Sn is 15%)

Filler number	Mass fraction/%					Ga : In : Sn
	Ag	Cu	Ga	In	Sn	
B3	61.2	23.8	8.18	5.45	1.37	6 : 4 : 1
C3	61.2	23.8	7.5	6.0	1.5	5 : 4 : 1
D3	61.2	23.8	6.0	7.5	1.5	4 : 5 : 1
E3	61.2	23.8	4.5	9.0	1.5	3 : 6 : 1
F3	61.2	23.8	3.0	10.5	1.5	2 : 7 : 1
G3	61.2	23.8	1.5	12.0	1.5	1 : 8 : 1

### 2.2 钎料组织和熔化特性分析

带材微观组织分析: 利用 X 射线衍射仪(日本岛津 XRD-7000) 对厚度为 0.4 mm 钎料带材进行物相分析。在扫描电子显微镜(SEM, 日本电子株式会社 JSM-6460) 下观察钎料铸态组织形貌和带材纵向截面的组织形貌, 并利用能谱仪进行微区域成分分析。

钎料熔化特性分析: 取各钎料直径为 4 mm 的丝材, 使用角磨机在各丝材上切取约 1 mm 厚的钎料薄片, 将薄片在 W80 砂纸上打磨平整, 然后使用无水乙醇对打磨后薄片进行超声清洗, 制备热分析试样, 并使用差式量热仪(德国耐驰 STA449F5) 测试各热分析试样的熔化特性。

### 2.3 钎焊实验

分析钎料的差示扫描量热分析(differential scanning calorimetry, DSC) 曲线, 明确各钎料固相线和液相点; 选择液相点最低的钎料作为 AgCuGaInSn 系钎料中最适用于钎焊 CuAgZr 合金的钎料; 采用真空钎焊工艺进行润湿实验和钎焊, 测试钎料润湿特性、接头剪切性能; 观察接头金相组织和断口形貌, 评价 AgCuGaInSn 钎料对 CuAg-Zr 合金的钎焊性能。

设置钎焊温度为钎料液相点温度以及液相点温度以上 30~60 ℃; 采用不锈钢箔控制钎缝宽度, 使钎缝宽度均为 200 μm; 钎焊保温时间为 20 min。钎焊接头的搭接方式和剪切性能测试方法如图 2 所示。钎焊接头的力学性能测试在万能力学试验机(上海拓丰 TFW-10S) 上进行, 采用 SEM 和金相显微镜对接头组织和剪切断口进行观察。

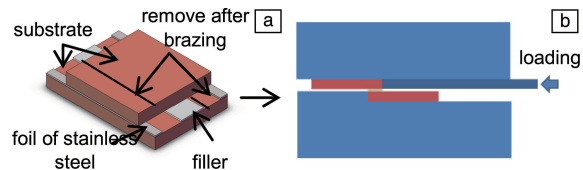


图 2 钎焊试样装配(a)与钎焊接头剪切强度测试方法(b)示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of brazing joint assembly (a) and shear strength test method (b)

3 结果与讨论

3.1 钎料物相和熔化特性分析

不同成分的 AgCuGaInSn 钎料轧制态带材的 XRD 图谱如图 3 所示。从 XRD 图谱可以看出,总含量在 15%以内、不同 Ga,In 和 Sn 比例的 Ga,In,Sn 加入到 AgCu28 后,钎料主要由 Ag 和 Cu 两种固溶体组成。随着 Ga,In,Sn 总含量增加至 15%,并未发现有新相的形成。

各钎料 DSC 曲线如图 4 所示,从图 4a 中可以看出,当 Ga,In,Sn 总含量从 5%(A1)增长至 10%时(A2),钎料液相点从 764 ℃降低至 741 ℃,降低并不明显;但是 Ga,In,Sn 总含量增加至 15%时(A3),钎料液相点则较大

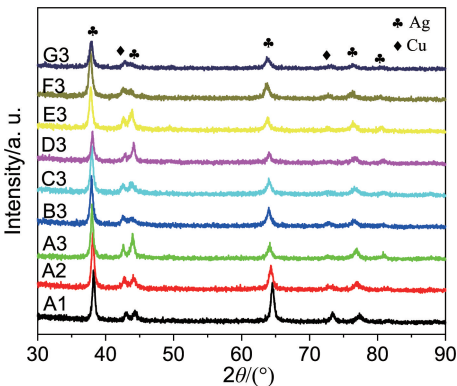


图 3 各钎料轧制态带材 XRD 图谱  
Fig. 3 XRD patterns of different filler strips

幅度降至 693 ℃。而从图 4b 可以看出,在保持 Ga,In,Sn 总含量恒定(15%)的情况下, $W_{Ga}:W_{In}$  分别为 4:5(D3)和 2:7(F3)时,钎料液相点最低,约为 675 ℃。考虑到 Ga 为稀散金属且价格较高,优选含 Ga 量较低的 F3 钎料 Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5 作为 AgCuGaInSn 系列中用于钎焊 CuAgZr 合金的钎料。

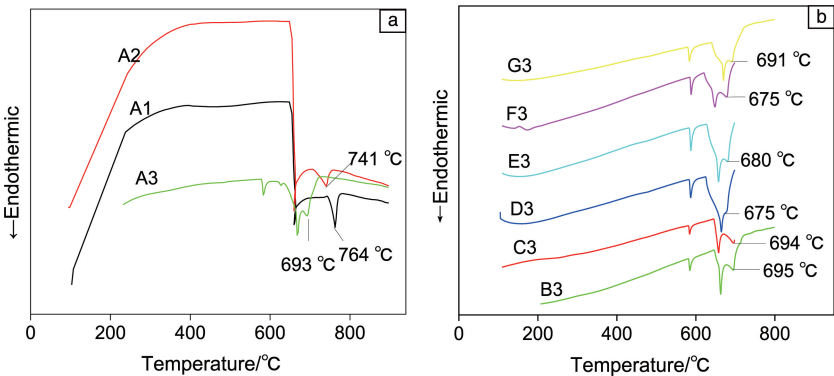


图 4 AgCuGaInSn 钎料差示扫描量热分析曲线: (a)  $W_{Ga}:W_{In}:W_{Sn}=6:3:1$ , 不同 Ga,In,Sn 总含量; (b) Ga,In,Sn 总含量为 15%, 不同  $W_{Ga}:W_{In}$  比例  
Fig. 4 Differential scanning calorimetry curves of AgCuGaInSn brazing fillers: (a) different Ga,In,Sn total content with  $W_{Ga}:W_{In}:W_{Sn}=6:3:1$  respectively; (b) different  $W_{Ga}:W_{In}$  with 15% total content of Ga,In,Sn

3.2 钎料组织分析

图 5 为 F3 钎料铸态横截面(图 5a 和 5b)和带材轧制退火态纵截面(图 5b 和 5c)组织二次电子成像照片,表 4 给出了 F3 钎料铸态和轧制退火态组织的局部能谱成分分析结果(对应图 5b 和 5c)。结合 XRD 图谱(图 3)和能谱仪检测结果(表 4)可以得出,钎料铸态组织由初晶富 Ag 相和 AgCu 共晶组织组成;对比铸态组织,带材轧制退火态组织为织构组织,衬度较深的富 Cu 相和衬度较浅的富 Ag 相均沿轧制方向被拉长,表明组成钎料的 2 种相均有一定的塑性,这是 F3 钎料具有良好加工性的内在原因。

对比铸态的成分可知,经过冷加工和退火处理的 F3

表 4 F3 钎料铸态(图 5b)和轧制退火态(图 5c)标注位置微区成分分析  
Table 4 Energy dispersive spectroscopy composition analysis of the micro-areas in the cast state (marked in Fig. 5b) and rolled and annealed state (marked in Fig. 5c) of F3 filler

Micro-areas	Mass fraction/%				
	Cu	Ag	Ga	In	Sn
A	66.87	4.32	21.67	3.79	3.34
B	3.45	80.54	0.78	15.23	—
C	64.53	3.82	31.65	—	—
D	4.61	80.70	1.05	13.63	—



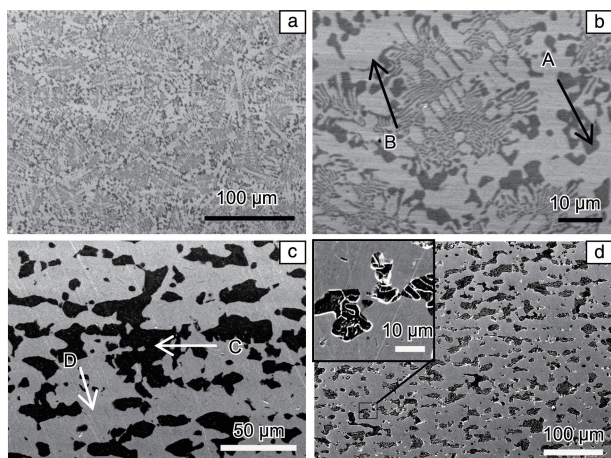


图 5 F3 钎料铸态横截面(a, b)和带材轧制退火态纵截面(c, d) SEM 照片: (a)低倍, (b)高倍; (c)未腐蚀, (d)腐蚀  
Fig. 5 SEM images of F3 filler in as-cast (a, b) and rolled and annealed state (c, d): (a) low magnification, (b) high magnification; (c) uncorroded, (d) corroded

钎料带材中 Ga 仍主要固溶于富 Cu 相中, In 仍主要固溶于富 Ag 相中, 富 Ag 相中也固溶了少量的 Ga; 而富 Ag 相和富 Cu 相中均没有检测出 Sn 元素。

### 3.3 钎焊实验

在钎焊实验之前, 首先在 675 °C 钎焊温度和保温

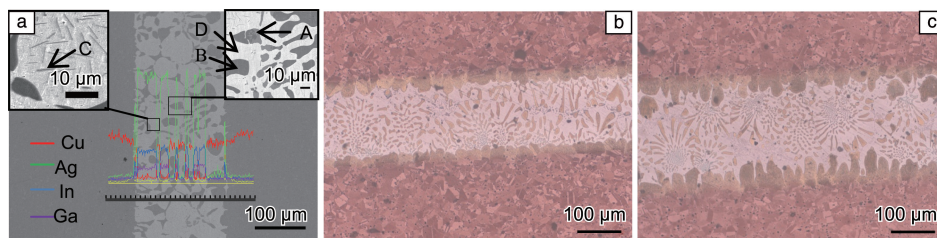


图 7 F3 钎料在不同钎焊温度下钎焊 CuAgZr 合金的接头组织的 SEM 照片(200 μm 钎缝宽度): (a)675 °C, (b)705 °C, (c)735 °C

Fig. 7 SEM images of CuAgZr alloy joints with 200 μm gap width brazed with F3 filler at different temperatures: (a) 675 °C, (b) 705 °C, (c) 735 °C

表 5 图 7a 中各标注点的能谱微区成分分析

Table 5 Energy dispersive spectroscopy composition analysis of local positions as marked in Fig. 7a

Micro-areas	Cu	Ag	Ga	In	Sn
A	63.27	3.83	17.24	—	15.66
B	1.53	81.01	—	15.96	1.50
C	35.11	46.13	6.98	9.72	2.05
D	77.26	5.18	17.56	—	—

钎焊过程中, 母材和液态钎料之间的互扩散使液态钎料的 Cu 浓度增加, Cu 浓度越大, AgCu 共晶组织越显著。而 Cu 浓度与钎焊温度有关, 钎焊温度越高扩散速率越大, Cu 浓度越高。钎焊温度较低时(675 °C), 扩散速

10 min 的工艺条件下, 对 F3 钎料对 CuAgZr 基材的润湿性能进行测试, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, F3 钎料熔化并在 CuAgZr 基材表面漫流铺展, 说明 F3 钎料对 CuAgZr 基材具有良好的润湿性能, 可以采用 F3 钎料钎焊 CuAgZr 合金。



图 6 F3 钎料在 675 °C 时对 CuAgZr 基材的润湿性  
Fig. 6 Wettability of F3 filler on CuAgZr substrate at 675 °C

F3 钎料在 675~735 °C 钎焊 CuAgZr 合金接头截面的 SEM 照片如图 7 所示, 图 7a 中各标注点的成分分析结果见表 5。从图 7a 可以看出, 在 675 °C 钎焊温度下接头连接区域组织主要由富 Ag 相和富 Cu 相组成, 其中富 Ag 相中弥散分布了针状富 Cu 相, 同时连接区域中间也存在少量 Sn 的偏析区域。

率较小, 液态钎料的 Cu 浓度较低, 凝固过程中首先结晶出富 Ag 相, 温度降至共晶点时, 较少的共晶液相通过离异共晶反应生成富 Cu 相, 凝固后的组织为如图 7a 所示的初晶富 Ag 相和 AgCu 离异共晶组织。钎焊温度提升至 705 °C 时, Cu 浓度较高, 温度降至共晶点时剩余的共晶液相较多, 凝固后出现 AgCu 共晶组织(图 7b), 进一步提升至 735 °C, AgCu 共晶组织更加显著(图 7c)。

在 675 °C 下钎焊 200 μm 钎缝宽度接头, 剪切强度约为 275 MPa。剪切断面 SEM 照片如图 8 所示, 接头呈现韧性断裂特征, 属于微孔聚集型断裂, 表明 Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5 钎料在 675 °C 下钎焊 CuAgZr 合金时不会产生弱化连接强度的脆性化合物, 这

种韧性连接将会保证换热器的工作可靠性和安全性。另外,在断口处也观察到一些微孔洞,这是由钎焊温度较低,钎料的流动性不佳导致的。

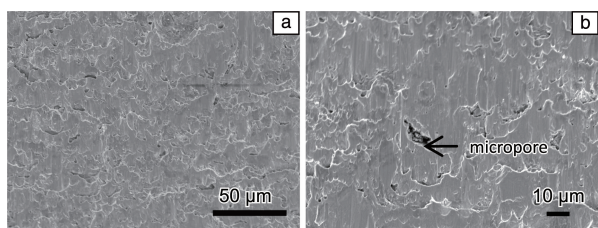


图 8 F3 钎料在 675 °C 下钎焊 200 μm 钎缝宽度接头的剪切断口形貌  
Fig. 8 Shearing fracture of brazing joint with 200 μm width brazed with F3 filler at 675 °C

使用 AgCuGaInSn 钎料可以成功在 700 °C 左右钎焊 CuAgZr 合金,该温度下钎焊 CuAgZr 合金可以使基材的屈服强度达到 100 MPa 左右(表 1),相比于 800 °C 以上钎焊,基材的屈服强度提升了接近一倍,并且该钎焊温度下接头具有较高的剪切强度和较好的韧性,同时 AgCuGaInSn 钎料中不含高蒸气压元素,因此 AgCuGaInSn 钎料适用于 CuAgZr 合金的真空钎焊。

## 4 结 论

(1) Ga, In, Sn 总含量为 5%~15%(质量分数),Ga 和 In 在质量比 6:3~1:8 之间的 AgCuGaInSn 系列钎料具有良好的加工性能和较低的钎焊温度(700 °C 左右)。其中 Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5(数字表示对应元素质量百分数,下同)钎料液相点最低,为 675 °C,该钎料组织由富 Ag 相和富 Cu 相组成,这 2 种相均具有良好的塑性,从而使该钎料具有良好的加工性能。

(2) Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5 钎料可以在 675~735 °C 之间钎焊 CuAgZr 合金,接头组织主要由富 Ag 相和富 Cu 相组成,随着钎焊温度的升高,连接区域逐渐出现 AgCu 共晶组织。675 °C 下钎焊 200 μm 钎缝,接头可获得约 275 MPa 剪切强度。接头的断裂为韧性断裂,这种韧性断裂可以提高换热器的工作可靠性和安全性。

(3) 使用 Ag61.2Cu23.8Ga3In10.5Sn1.5 钎料钎焊 CuAgZr 合金可以降低钎焊温度,提升 CuAgZr 合金的屈服强度,进而提升换热器的整体性能。

## 参考文献 References

[1] 邹鹤飞,徐坤和,张芦梅,等. 航空制造技术[J], 2015, 495(S2): 56-62.  
ZOU H F, XU K H, ZHANG Q M, *et al.* Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2015, 495(S2): 56-62.  
[2] NUTTAWUT L, LOONG K K, CHUAN S, *et al.* International Journal of Refrigeration[J], 2019, 101: 81-89.

[3] JIANG W, GONG J, TU S, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2009, 209(2): 1105-1110.  
[4] ZHANG M. Crystals[J], 2020, 10(4): 248.  
[5] FENG J I, XUE S B, LOU J Y, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2012, 22(2): 281-287.  
[6] CHEN X, XIE R, LAI Z, *et al.* Materials & Design[J], 2016, 95 (Apr.): 296-305.  
[7] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2008, 6: 91-96.  
ZHANG Q Y, ZHUANG H S. Brazing and Soldering Manual(2nd Edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2008, 6: 91-96.  
[8] 刘泽光. 贵金属[J], 1992, 13(2): 29-33.  
LIU Z G. Precious Metals[J], 1992, 13(2): 29-33.  
[9] 颜秀文,丘泰,张振忠. 真空电子技术[J], 2005(4): 41-43.  
YAN X W, QIU T, ZHANG Z Z. Vacuum Electronics[J], 2005(4): 41-43.  
[10] 甘卫平,陈慧,杨伏良. 材料导报[J], 2007(3): 156-158.  
GAN W P, CHEN H, YANG F L. Materials Reports[J], 2007(3): 156-158.  
[11] 赵明,许昆,张海龙,等. 贵金属[J], 2016, 37(3): 11-17.  
ZHAO M, XU K, ZHANG H L, *et al.* Precious Metals[J], 2016, 37 (3): 11-17.  
[12] 王春琴,许昆,刘毅,等. 贵金属[J], 2018, 39(3): 51-58.  
WANG C Q, XU K, LIU Y, *et al.* Precious Metals[J], 2018, 39(3): 51-58.  
[13] 张惠. Ag-Cu-In-Sn 低温钎焊料制备技术的研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.  
ZHANG H. Study on Preparation Technology of Ag-Cu-In-Sn Low Temperature Brazing Material[D]. Changsha: Central South University, 2008.  
[14] 廖行. 无镉中温银基钎料电磁压制制备技术与组织性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.  
LIAO X. Study on Electromagnetic Compaction Preparation Technology, Microstructure and Properties of Cadmium-Free Silver-Based Intermediate Temperature Filler Metals[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.  
[15] 柳旭,黄晓猛,张国清,等. 焊接[J], 2020(3): 58-61.  
LIU X, HUANG X M, ZHANG G Q, *et al.* Welding & Joining[J], 2020(3): 58-61.  
[16] 卢方焱. 镓、铟及稀土对银铜钎料组织和性能影响的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.  
LU F Y. Effects of Ga, In and Rare Earth on Microstructures and Properties of AgCuZn Filler Metals[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.  
[17] 曲文卿,吕锡霄,牟国情,等. 一种低熔点高塑性的银基钎料: CN110695567A[P]. 2020-01-17.  
QU W Q, LV X X, MOU G Q, *et al.* A Silver Base Filler with Low Melting Point and High Plasticity: CN110695567A[P]. 2020-01-17.

(编辑 费蒙飞)