



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.14

锡基钎料和银基钎料对石墨和无氧铜钎焊接头组织及性能的影响研究

贺佳伊^{1,2}, 玉 昆², 潘 朋², 刘 芳¹, 李志军^{2*}

1. 上海理工大学 材料与化学学院, 上海 200093
2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800

摘 要: 为克服石墨表面难以润湿的难题, 采用AgCuTi活性钎料焊膏在石墨表面进行金属化, 再采用典型的锡基钎料SnAgCu、银基钎料AgCuTi间接钎焊连接金属化的石墨和无氧铜。探究不同钎料在连接金属化石墨和铜上的工艺及剪切性能问题, 主要包括界面结合、组织形态和结合强度的问题。试验结果表明, 在真空850℃保温5 min的条件下成功实现了对石墨表面的金属化, 金属化层主要为银-铜共晶组织, 并在石墨表面形成了均匀的TiC层。钎焊结果表明: 使用银基钎料的接头, 钎料与金属化层结合较好, 无明显的缺陷。剪切断裂发生在石墨的母材侧, 最终形成的典型界面为铜/铜基固溶体+银基固溶体+TiCu/TiC/石墨。锡基钎料与金属化层间存在明显的缺陷, 剪切断裂发生在钎缝, 典型界面组织为铜/Cu₃Sn/Cu₆Sn₅/β-Sn/银-铜共晶/TiC/石墨。

关键词: 石墨; 钎焊; 无氧铜; 微观结构; 剪切性能

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0103-07

Study on the Influence of Tin-based and Silver-based Brazing Materials on the Microstructure and Properties of Graphite and Oxygen Free Copper Brazing Joints

HE Jiayi^{1,2}, YU Kun², PAN Peng², LIU Fang¹, LI Zhijun^{2*}

1. University of Shanghai for Science and Technology, School of Materials and Chemistry, Shanghai 200093, China
2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract: To address the challenge of wetting the graphite surface, AgCuTi active brazing filler metal is utilized for metallization, while typical tin-based solder SnAgCu and silver-based brazing filler metal AgCuTi are employed for indirect brazing to establish connections between metallized graphite and oxygen-free copper. Investigating the process and shear performance of various brazing materials for connecting metallized graphite and copper, primarily focusing on aspects related to interface bonding, microstructure, and bonding strength. Experimental results demonstrated successful metallization of the graphite surface under vacuum insulation conditions at 850℃ for 5 minutes. The metallization layer primarily consisted of a silver-copper eutectic, with a uniform TiC layer formed on the surface of the graphite. The brazing results indicate that the joint utilizing silver-based brazing material exhibits strong bonding between the brazing material and the metallized layer,

收稿日期: 2024-03-06 修回日期: 2024-07-03

基金项目: 中国科学院上海应用物理研究所科技之星项目(E2551130); 中国科学院青年创新促进会人才项目(E2292202)

作者简介: 贺佳伊(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事石墨与铜的钎焊工艺的研究。

通讯作者: 李志军, 男, 研究员, 博士, 主要从事核电材料的研究。E-mail: lizhijun@sinap.ac.cn。

with no apparent defects. Shear fracture occurs on the graphite's base metal side, forming a typical interface comprising copper/copper-based solid solution+silver-based solid solution+TiCu/TiC/graphite. Conversely, noticeable defects are observed between the tin-based brazing material and the metallized layer, resulting in shear fracture at the brazing seam. The typical interface structure consists of copper/Cu₃Sn/Cu₆Sn₅/β-Sn/silver-copper eutectic/TiC/graphite.

Keywords: graphite; brazing; copper; microscopic structure; shear properties

引用格式: 贺佳伊, 玉昆, 潘朋, 等. 锡基钎料和银基钎料对石墨和无氧铜钎焊接头组织及性能的影响研究[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 103-109.

Citation: HE Jiayi, YU Kun, PAN Peng, et al. Study on the Influence of Tin-based and Silver-based Brazing Materials on the Microstructure and Properties of Graphite and Oxygen Free Copper Brazing Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 103-109.

0 引言

石墨的原子键连接稳定, 其熔化温度很高, 具有耐高温、耐腐蚀、优异的导热性能以及较小的原子序数等特殊性能, 在冶金、航空航天以及核工业领域得到了广泛的应用^[1]。无氧铜因其良好的导电性、热传导性被用于和石墨结合形成铜-石墨接头, 广泛应用于多个领域^[2]。在热核聚变反应堆中, 石墨与铜的复合构件通常用于强化传热; 在汽车行业, 尤其在汽车部件换向器中, 石墨与铜的连接得到广泛的应用^[3]; 在大科学加速器装置中(如 X 射线自由电子激光装置), 大型石墨与铜的连接需求也日趋上升, 其需要在桶形结构竖直面实现大面积良好的钎焊连接, 需迫切寻求流动性好、成本合理的钎料体系以用于工程应用。

铜与石墨的钎焊方法可分为直接钎焊和间接钎焊两大类^[4]。直接钎焊是利用 Ti、Cr 等强碳活性元素在石墨表面形成碳化物, 从而改善钎料在石墨表面的润湿性^[5], 并与铜形成连接。朱艳^[6]利用 Ag-Cu-Ti 活性钎料对石墨/铜进行真空直接钎焊, 得到的接头组织结构为石墨/TiC/Ag-Cu 共晶组织/Cu 基固溶体/钎料与 Cu 的扩散层/铜。Zhang 等^[7]使用 Ag-68.8Cu-4.5Ti(wt-pct)合金钎焊到铜之前, 设计并加工了 C/C 复合材料的两种表面构型, 即直的和锥形的。按照常规钎焊方法, 直界面和锥形界面都获得了良好的接头。Singh 等^[8]利用 Ag-32.25Cu-1.75Ti 焊膏和箔成功制备了由 C/C 复合材料、高温碳(HTPoco)泡沫、钛板和钛管组成的钎焊三明治结构, 钎焊材料有效地润湿并与结构的所有构件反应, 特别是银基焊膏钎焊具有良好的钎焊接头性能。Cotoh 等^[9]人在 850 °C/10 min 的条件下采用

Cu-28Ag-2Ti 钎料真空钎焊 C/C 复合材料和 Cu, 当 OF-Cu(无氧铜)中间层厚为 1.5~5 mm 时, 钎焊接头抗剪强度值都在 22 MPa 左右。

然而在大面积的垂直钎焊、竖直有膨胀间隙的钎焊接头, 直接钎焊的方式并不适用, 石墨金属化后的间接钎焊有着不可替代的作用^[1]。间接钎焊一般使用 CVD(化学气相沉)、镀层、磁控溅射等方法将金属元素沉积在碳材料的表面, 然后将金属化的石墨与铜使用合适的钎料进行连接, 常见的用于碳材料表面金属化的元素有 Mo、W、Ni、Cu 等^[10]。Chen^[11]将活性元素 Cr 通过磁控溅射的方式预置于石墨表面, 对石墨进行表面改性也很大程度改善了非活性钎料 AgCu 对石墨的润湿。在真空条件下使用 AgCu 非活性钎料实现了石墨与铜的连接, 得到了较高的间接钎焊接头强度。当钎焊工艺参数为 900 °C/10 min 时, 获得最佳接头剪切强度 13.6 MPa。朱艳^[6]采用 Sn-Ag-Cu 钎料在较低温度下对镀 Ni 的石墨与铜进行感应钎焊连接, 得到的界面组织结构为石墨/Ni/(Cu_{1-y}Ni_y)₆Sn₅/β-Sn+(β-Sn+Ag₃Sn)的共晶组织/Cu₆Sn₅/Cu₃Sn/Cu。Song^[12]在使用在 950 °C 保温 30 min 的条件下, 用 Sn0.3Ag0.7Cu-9%Ti 锡基活性钎料在石墨表面成功地获得了一个致密且连续的金属化层, 并用锡基非活性钎料实现了在低温 250 °C 下对石墨与铜的钎焊。

综上所述, 银基活性钎料对石墨有较好的润湿性, 可作为石墨表面反应金属化的材料, 银基钎料多加入活性元素用于直接钎焊石墨与金属。锡基钎料成本较低, 在低温时就可以实现对铜的钎焊, 多用于低温间接钎焊金属化的石墨与金属。然而, 在同一金属化的石墨上, 分别采用银基和锡基钎料进行钎焊的对比研究却很少。本研究使用膏状活

性Ag-Cu-Ti钎料在真空条件下对石墨表面进行金属化,再分别采用流动性良好的银基钎料和成本较低的锡基钎料连接金属化石墨与无氧铜。对比研究两种钎料体系在连接质量、组织形态、结合强度等综合表现,以优选合适的钎料类型,为铜和石墨的大面积钎焊奠定基础。

1 试验方法

研究采用的石墨为高强石墨(牌号T952),铜为常规无氧铜(型号TU1)。将Ag70Cu25.5Ti4.5(wt.%)焊膏活性钎料手工涂抹在石墨表面,在850℃真空条件下保温5 min对石墨进行表面金属化。金属化石墨的尺寸为40 mm×40 mm×5 mm。之后用线切割加工成尺寸为8 mm×8 mm×5 mm的小块与尺寸为20 mm×10 mm×2 mm的无氧铜进行钎焊。钎焊前,无氧铜待焊面使用砂纸依次打磨至800#,并在丙酮中对两种母材进行超声清洗,然后在200℃烘烤炉中烘干备用。

金属化后的石墨利用厚度为0.1 mm的Ag70Cu25.5Ti4.5、Sn0.3Ag0.7Cu箔片与铜在真空的条件下进行钎焊,钎焊装配如图1a所示。银基的钎焊工艺为:加热速率10℃/min,加热到350℃保温30 min,然后以相同的加热速率加热到750℃保温30 min,最后在850℃下保温10 min。锡基钎料分别在真空300℃下保温5 min和500℃下保温10 min下进行钎焊,升温速率同样为10℃/min。

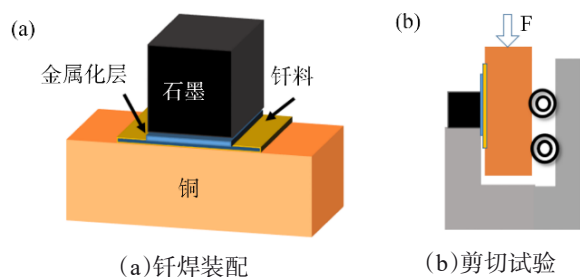


图1 钎焊装配及剪切示意

Fig. 1 Schematic diagram of brazing assembly and cutting

钎焊完成后,沿钎焊界面垂直方向切取金属化层及钎焊接头试样,镶样后得到金相样品。经过400#、800#、1200#、2000#砂纸磨光,采用0.05 μm颗粒的氧化铝抛光液进行10 min抛光处理。利用光

学显微镜对不同工艺参数下钎焊接头进行形貌观察,金属化层和钎焊接头的微观组织及相组成通过配备能谱仪(EDS)的电镜(Zeiss Merlin Compact)进行表征。利用万能材料试验机在室温下对钎焊接头进行抗剪切性能测试,剪切速率1 mm/min。利用夹具将焊件装配好(见图1b),每个试验工艺参数选取2个试样进行测试,将计算得到的抗剪强度平均值作为该参数下的最终抗剪强度值。

2 试验结果与讨论

2.1 石墨金属化层的微观组织

图2为试验中获得的石墨表面金属化宏观形貌,可以看出在石墨表面获得的金属化层表面比较平整均匀,并呈现金属光泽,呈现出了良好的铺展性,这说明试验的金属化参数可以实现在石墨的表面金属化。



图2 石墨表面金属化宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of graphite surface metallization

活性元素Ti的加入对其在石墨表面的润湿性起到决定性作用^[13],为了研究石墨反应金属化层的物相组成和反应机理,对金属化层的宏观和微观组织进行了分析。由图3a可以看出,金属化层在石墨基体上润湿良好,并且与石墨基体形成了良好的结合界面,在结合界面可以看到一层明显的反应层。由图3b、3c可以看出白色相金属化层主要由两部分组成,分别为灰白色区和灰黑色区。根据背散射图像的成像原理,推断此种物相可能为Ag基固溶体,灰白色相为Cu基固溶体。以往已经有文献报道过AgCuTi用于钎焊石墨^[6],推断金属化层/石墨的界面浅灰色相所代表的物相也就是反应层相,其可能为TiC相。为确定其物相种类对界面的反应层进行

EDS 分析,发现铜和碳的原子比为 1:1,证实反应层为 TiC。对金属层进行放大可以观察到在白色相和灰色相之间,零星分布一些深灰色的相,对其进行 EDS 点扫描,铜与钛的原子比为 1:1,为 TiCu 金属间化合物。

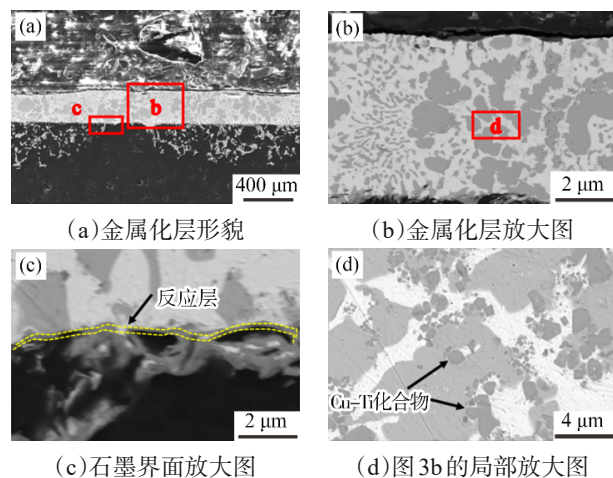


图 3 金属化层微观组织

Fig. 3 Microstructure of metalized layer

2.2 石墨/无氧铜间接钎焊接头的界面组织

图 4 为不同工艺下金属化石墨与铜的钎焊接头显微形貌。由图 4a 可以看出,银基钎料钎焊质量较好,没有发现明显的气孔、裂纹等缺陷。锡基钎焊质量较差,内部均存在明显的缺陷,如图 4b、4c 所示。对于银基钎料而言,钎焊后钎料与母材铜、金属化层之间发生了元素的相互扩散,没有了明显的界限。从宽度上来看,银基钎料的钎缝宽度远小于锡基的钎缝宽度,一方面因为银基钎料的熔点较高需要进行高温钎焊,反应更加剧烈;另一方面由于钎焊温度与石墨金属化的温度相同,导致金属化层重熔后与钎料混合组成钎焊钎缝,加剧了钎料从钎缝中流失。

图 5 为在 850 °C 保温 10 min 条件下获得的银基金属化石墨-无氧铜间接钎焊接头的微观组织。图 5a 为 AgCuTi 钎料的钎焊接头微观组织,可以看出接头结合良好,没有明显的钎料与金属化层的结合界面。甚至由于溶蚀的原因,发生了钎料中部分的银向铜母材溶入的现象。在该条件下,钎料可与石墨基体表面的金属化层实现良好的结合(见图 5b)。钎焊接头主要由三部分组成,分别为靠近无氧铜一侧的灰色相,钎缝中间白色的相,以及靠近石墨基

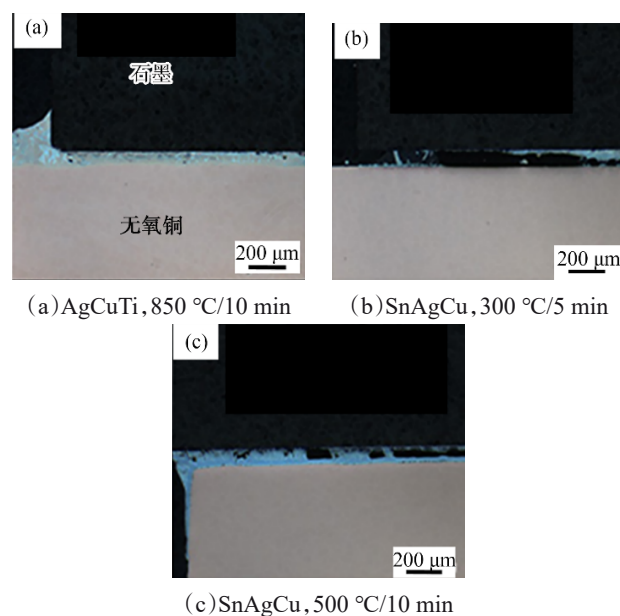


图 4 锡基、银基钎料在不同工艺参数的钎焊接头显微形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of tin-based and silver-based brazed joints under different process parameters

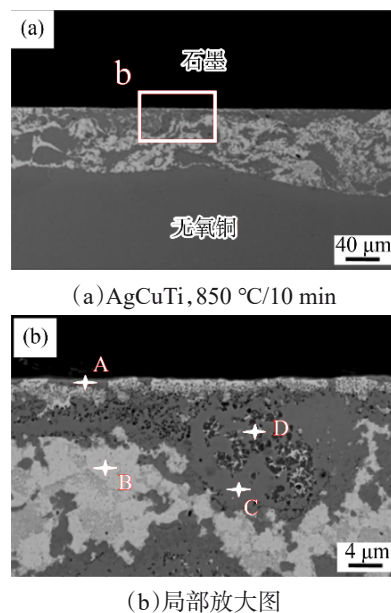


图 5 银基钎料钎焊接头的微观组织

Fig. 5 Microscopic structure of silver-based brazing joints

体的灰黑色相。对接头的石墨界面进行放大,在界面处可发现有深灰色的颗粒相的存在。对图 5b 中的白色相 A、界面反应层 B、灰色相 C 进行 EDS 点扫,结果如表 1 所示,证实了白色相为银基固溶体,灰色相为铜基固溶体,反应层为 TiC。由于 AgCuTi 钎料中的 Ti 含量更高,因此相较于 SnAgCu 钎料,AgCuTi 钎焊接头内部存在较多的 Ti-Cu 金属间化

合物。由表 1 可知,与金属化层内部一致为 TiCu。

表 1 图 5b 内各点的 EDS 结果(原子分数, %)

Table 1 EDS results for each point in Fig. 5b (at. %)					
位置	C	Ag	Cu	Ti	可能的物相
A	19.52	59.32	6.56	14.69	银基固溶体相、TiC
B	23.04	2.78	71.64	1.96	铜基固溶体
C	13.11	80.71	6.19	—	银基固溶体
D	—	0.94	51.11	47.95	TiCu

为了更好地探究钎焊接头中元素的相互作用以及接头的元素分布,对接头主要元素进行了面扫描分析,结果如图 6 所示。图 6b~6f 分别为元素的整体分布、Ti 元素分布、C 元素分布、Cu 元素分布以及 Ag 元素分布。由图 6c 可知, Ti 元素主要分布在靠近石墨母材的 Ti-C 化合物反应层上,说明在钎焊过程中熔融钎料中的 Ti 元素向石墨一侧扩散,并且与石墨发生反应生成 Ti-C 化合物。由图 6e~6f 可知, Ag 元素在无氧铜一侧发生了相互扩散,二者的形状与图 5a 中灰白色的反应层形状刚好吻合,说明在钎焊过程中大量的 Ag 元素向无氧铜母材一侧扩散。

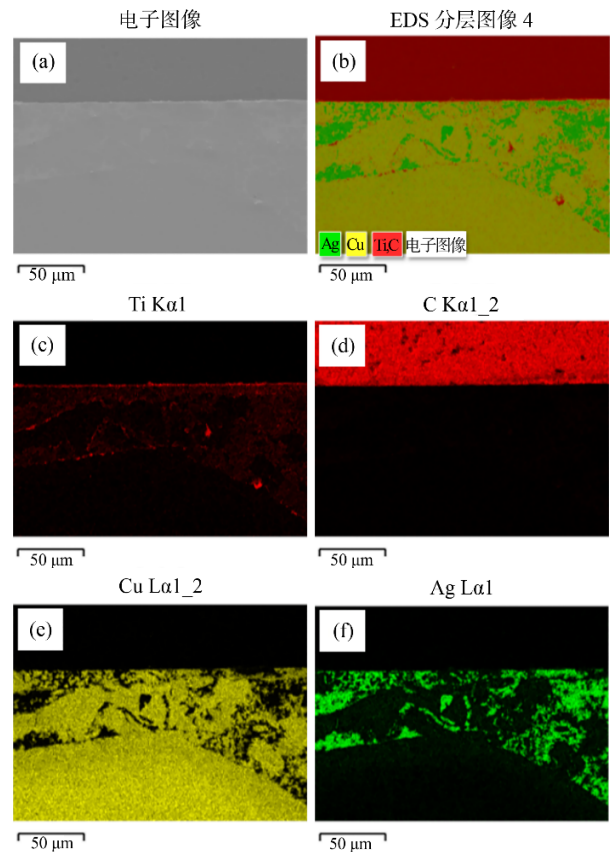


图 6 银基钎焊接头及元素分布

Fig. 6 Silver-based brazed joints and element distribution

无氧铜中 Cu 元素与钎料内 Ag 元素的相互扩散使得无氧铜母材能与钎料更好地结合在一起。

图 7 为不同工艺参数下锡基钎料的钎焊接头微观组织形貌。可以发现 SnAgCu 钎料在 300 °C 较短保温时间下,钎焊接头中均存在着明显的金属化共晶层,锡基的钎焊层与金属化层间存在明显的界限。在无氧铜母材一侧,钎料与铜间的界限也较为明显,并没有出现银基钎焊时出现的溶蚀现象。由图 7b、7d 可以看出钎焊接头可以分为四部分,金属化层、白色相层、浅灰色相层、深灰色相层。为鉴别接头各部分的物相,对图 7 中各点进行 EDS 点扫,结果如表 2 所示。

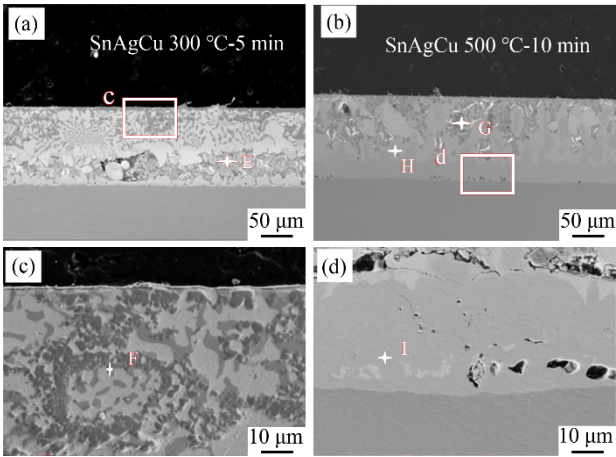


图 7 锡基钎料钎焊接头的微观组织形貌

Fig. 7 The microstructure and morphology of tin-based brazing joints

表 2 图 7 中各点的 EDS 结果(原子分数, %)

Table 2 EDS results of each point in Fig. 7 (at. %)						
位置	C	Sn	Ag	Cu	Ti	可能的物相
E	0.42	99.58	—	—	—	β-Sn
F	—	—	4.85	49.52	45.64	TiCu
G	—	91.24	—	8.76	—	β-Sn
H	—	44.51	—	55.49	—	Cu ₆ Sn ₅
I	—	24.83	—	75.17	—	Cu ₃ Sn

依据表 2 内各点处的元素含量原子比,可以推测黑灰色相为 β-Sn,浅灰色相为 Cu₆Sn₅、深灰色相为 Cu₃Sn。在锡基钎料的低温短时间保温下,可以明显看出钎缝与石墨金属化层间的界线。金属化层仍保留较为完整的银-铜的共晶结构,共晶结构内部分布着零散的 TiCu 相。即使温度在 500 °C 保温 10 min 下,仍可观察到金属化层。

300 °C/5 min 与 500 °C/10 min 相比,真空钎焊

获得的接头中多了 Cu_3Sn 相,这是因为 Cu_3Sn 是由 Cu_6Sn_5 分解获得,在 $300\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$ 钎焊时,由于钎焊温度低,保温时间短,生成的 Cu_6Sn_5 相少,还来不及分解便冷却下来所致^[4]。首先发生的反应为 $6\text{Cu}+5\text{Sn}\rightarrow\text{Cu}_6\text{Sn}_5$,随着钎焊温度的升高和保温时间的延长 Cu_6Sn_5 开始向 Cu_3Sn 转变: $\text{Cu}_6\text{Sn}_5\rightarrow 2\text{Cu}_3\text{Sn}+3\text{Sn}$ 。最终接头内的 $\beta\text{-Sn}$ 不断增多,因此相较于低温度、短时间下的钎焊,高温长时间下的钎焊钎缝内存在大量的 $\beta\text{-Sn}$ 相。且钎焊温度低,保温时间短时,使得 Cu 与 Sn 的反应不充分,生成的 Cu_6Sn_5 相对较少。

银基钎料金属化后的石墨与铜的间接钎焊,实际上是通过锡基或者银基与石墨表面金属化层和无氧铜发生反应,从而实现石墨与铜的连接。银基钎料间接钎焊时,由于成分与金属化层更加接近,钎焊时与金属层更容易发生相互扩散形成良好的接头质量。锡基钎料主要成分为 Sn ,与金属层的银基成分相差较大导致相容性较差。与银基钎料相比,锡基在低温钎焊时金属化层并未发生熔化,不易发生金属化层和钎料的相互扩散,因此金属化层/锡基钎料的界面更加明显。

2.3 钎焊接头的性能

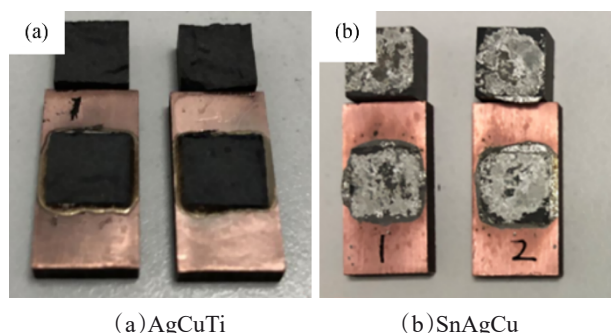
金属化的石墨/铜钎焊接头剪切测试结果如表3所示,两种钎料的接头表现出不同的强度。银基钎料的钎焊接头连接较好,断裂发生在石墨的母材部分(见图8a)。锡基钎料与金属化层连接较差,剪切试样均断裂在钎缝(见图8b)。随着温度和保温时间的延长,熔融的锡基钎料与金属化层间反应增强,形成较好地结合,其剪切强度有一定的提高。

表3 不同钎料钎焊接头的剪切强度

Table 3 Shear strength of brazed joints with different brazing materials

试样	剪切强度/MPa	断裂位置
SnAgCu 钎焊-1	13.31	钎缝
SnAgCu 钎焊-2	14.88	钎缝
AgCuTi 钎焊-1	8.95	石墨
AgCuTi 钎焊-2	9.96	石墨

分析断裂结果:银基钎料熔点更高,在高温钎焊时由于石墨与铜热膨胀系数差异较大,更容易在石墨的基体产生应力集中。这些应力集中的点,容易导致石墨的开裂,并且在剪切测试时成为首先开裂的地方^[14]。较低温度下,熔融的锡基钎料与石墨金属化层间并不能充分的熔合,钎缝内存在缺陷的



(a) AgCuTi

(b) SnAgCu

图8 钎焊接头剪切断裂试样

Fig. 8 Shear fracture specimen of brazed joints

位置容易成为首先断裂的位置。但相较于银基的高温钎焊,更低温度的锡基钎焊在石墨内产生的应力较小。断面主要为锡基的固溶体组织、锡-铜金属间化合物、少量的石墨基体,其断裂的主要原因为钎焊接头内部缺陷较多。位于石墨侧的锡-铜金属间化合物(见图7)都为硬脆相^[15],进一步恶化了接头的强度,接头含有部分的石墨基体。最终,虽然锡基钎料的钎焊接头的连接较差,其剪切强度稍优于银基钎料的钎焊接头。

3 结论

利用银基活性钎料对石墨进行反应金属化,并对银基和锡基钎料钎焊的金属化的石墨与铜的接头的组织与性能进行分析,结论如下:

(1)使用 AgCuTi 活性钎料在 $850\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$ 的真空条件下,可以实现对石墨表面的金属化。由于石墨对活性元素 Ti 的吸引作用,在石墨表面形成连续的反应层从而实现对石墨表面的润湿,金属化的界面为银铜共晶+ $\text{TiCu}/\text{TiC}/\text{石墨}$ 。

(2)锡基钎料间接钎焊接头出现孔洞等缺陷,且随着钎焊温度的升高,连接质量有所提升。但难以获得高质量接头,其接头界面组织为铜/ $\text{Cu}_3\text{Sn}/\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\beta\text{-Sn}/\text{银-铜共晶}/\text{TiC}/\text{石墨}$ 。

(3)相较于低温的锡基钎料间接钎焊,高温的银基钎料间接钎焊接头钎料与金属化层间熔合更加充分,其接头组织的界面组织为铜/铜基固溶体+银基固溶体+ $\text{TiCu}/\text{TiC}/\text{石墨}$ 。

(4)银基钎料虽然与金属层有更好地熔合,但在高温钎焊时石墨内产生有较大的残余应力,导致

钎焊接头剪切性能稍弱于锡基钎焊接头。

参考文献:

- [1] 张启运,庄鸿寿.钎焊手册[M].第3版.北京:机械工业出版社,2020.
- [2] ZHANG L X, ZHANG B, SUN Z, et al. Preparation of the graphene nanosheets reinforced AgCuTi based composite for brazing graphite and Cu[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 981–985.
- [3] 谢凤春. 石墨与铜的钎焊机理及新型低温活性钎料的制备[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2008.
XIE F C. The brazing mechanism of graphite and copper and the preparation of new low-temperature active brazing materials[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [4] 柴鉴航. 石墨反应金属化及其与紫铜间接钎焊工艺及机理研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2016.
CHAI J H. Research on Graphite Reaction Metallization and Its Indirect Brazing Process and Mechanism with Purple Copper[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] PATIL Y, SINGH K P, KHIRWADKAR S, et al. Studies on vacuum brazing of Graphite & CFC with Copper Alloy to fabricate Divertor Targets for fusion applications[C]//PLASMA-2009, NIT Hamirpur, At: NIT Hamirpur, India, 2009.
- [6] 朱艳. 石墨与铜钎焊工艺研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2006.
ZHU Y. Research on the brazing process of graphite and copper[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [7] ZHANG K X, XIA L H, ZHANG F Q, et al. Active Brazing of C/C Composite to Copper by AgCuTi Filler Metal[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(5): 2162–2176.
- [8] SINGH M, MORSCHER G N, SHPARGEL T P, et al. Active metal brazing of titanium to high-conductivity carbon-based sandwich structures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 498(1–2): 31–36.
- [9] GOTOH Y, OKAMURA H, KAJIURA S, et al. Development and material testing of OF-Cu/DS-Cu/OF-Cu triplex tube (dispersion strengthened copper clad with oxygen free-copper) and trial fabrication of a vertical target mock-up for ITER divertor[J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 258–263: 271–274.
- [10] LI S, DU D, ZHANG L, et al. A review on filler materials for brazing of carbon-carbon composites[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 92–111.
- [11] CHEN Z B, BIAN H, HU S P, et al. Surface modification on wetting and vacuum brazing behavior of graphite using AgCu filler metal[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 348: 104–110.
- [12] SONG X G, CHAI J H, HU S P, et al. A novel metallization process for soldering graphite to copper at low temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 696: 1199–1204.
- [13] FU W, HU S, SONG X, et al. Wettability and bonding of graphite by Sn0.3Ag0.7Cu-Ti alloys[J]. Carbon, 2017, 121: 536–543.
- [14] SINGH M, SMITH C, ASTHANA R, et al. Integration of High-Conductivity Graphite Foam to Metallic Systems Using Ag-Cu-Ti and Ag-Cu-Pd Braze Alloys[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2013, 10(5): 790–800.
- [15] 张亮, TU K N, 郭永环, 等. 时效对SnAgCu/SnAgCu-TiO₂焊点界面与性能影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 43–46+115.
ZHANG L, TU K N, GUO Y H, et al. The effect of aging on the interface and properties of SnAgCu/SnAgCu TiO₂ solder joints[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2013, 34(8): 43–46+115.