

金刚石与无氧铜钎焊接头界面微观组织和力学性能分析

李玉龙^{1,2}, 宋子明¹, 武齐¹, 林伟¹, 张琳², 潘攀², 雷敏¹

(1. 南昌大学, 先进制造学院, 南昌, 330031; 2. 中国电子科技集团公司第十二研究所微波电真空器件国家级重点实验室, 北京, 100015)

摘要: 采用 AgCuTi 钎料真空钎焊多晶金刚石与无氧铜, 研究了钎焊温度 (830、870、910、950 °C) 和保温时间 (1、10、30、60 min) 对接头界面组织和力学性能的影响, 解明了接头界面形成机理。结果表明, 钎焊接头的典型界面结构为金刚石/TiC/Cu(s,s)、Ag(s,s)/无氧铜, 钎焊温度对钎焊接头微观结构有显著影响, 当温度在 910 °C 以上时, AgCuTi 钎料与无氧铜基板的互溶与扩散现象明显, 剪切强度随着温度的升高先提高后降低, 870 °C 保温 10 min 的钎焊接头剪切强度最高, 为 223.6 MPa, 最后讨论了钎焊接头的断口位置和断口形貌。

创新点: (1) 探讨了钎焊过程中 AgCuTi 钎料与无氧铜基板的互溶与扩散现象的形成机制。

(2) 阐明了工艺参数对金刚石/AgCuTi/无氧铜钎焊接头组织性能的影响规律。

关键词: 金刚石; 无氧铜; 真空钎焊; 界面组织与力学性能。

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240415001

Microstructure and mechanical properties of interface between diamond and oxygen-free copper brazed joints

LI Yulong^{1,2}, SONG Ziming¹, WU Qi¹, LIN Wei¹, ZHANG Lin², PAN Pan², LEI Min¹

(1. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 2. State Key Laboratory of Microwave Electric Vacuum Devices of the Twelfth Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing, 100015, China)

Abstract: The vacuum brazing of polycrystalline diamond and OFC using AgCuTi brazing material was conducted. The effects of brazing temperature (830、870、910、950 °C) and holding time (1, 10, 30、60 min) on the interface structure and mechanical properties of the joint were studied, and the mechanism of interface formation was elucidated. The results show that the typical interface structure of brazed joints is diamond/TiC/Cu (s, s), Ag (s, s)/OFC; the brazing temperature has a significant impact on the microstructure of the brazed joint. When the temperature is above 910 °C, the mutual dissolution and diffusion phenomenon between AgCuTi brazing material and OFC substrate is obvious. The shear strength first increases and then decreases with the increase in temperature, and the highest shear strength of the brazed joint maintained at 870 °C for 10 minutes is 223.6 MPa. Finally, the fracture location and morphology of the brazed joint were discussed.

Highlights: (1) The formation mechanism of the mutual dissolution and diffusion phenomenon between AgCuTi brazing material and OFC substrate during the brazing process was explored.

(2) The influence of process parameters on the microstructure and properties of diamond/AgCuTi/OFC brazed joints was elucidated.

Key words: diamond; oxygen-free copper; vacuum brazing; interface organization and mechanical property

收稿日期: 2024 – 04 – 15

基金项目: 国家自然科学基金 (52105354 和 52065043); 江西省双千计划科技创新高层次人次项目 (jxsq2019201048); 微波电真空器件国家级重点实验室项目 (6142807210513)

0 序言

金刚石是集物理、化学和力学等优良性能于一身的材料^[1-2],金刚石除了极高的硬度和优异的耐磨性等力学性能外,电学、光学、热学、声学等方面也十分优异,在光电子封装、光学窗口和太赫兹传输领域有着重要应用^[3-5]。在实际的应用中,金刚石往往不会单独使用,需要连接在其他金属材料上才能充分发挥其性能。无氧铜具有高导电性、导热性和良好的韧性以及焊接性能^[6-7],将金刚石与无氧铜结合使用可以实现性能上的互补。例如,电子封装领域应用中的金刚石与无氧铜底座连接^[8],微波传输领域的金刚石窗口和水冷铜环连接^[9]。

钎焊工艺简单、成本低、接头变形小^[10],广泛应用于连接金刚石和金属材料,然而金刚石($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)热膨胀系数与无氧铜($17.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)相差较大,在钎焊过程中会产生很大的残余应力导致裂纹等缺陷,其次金刚石化学结构稳定,具有很高的界面能,表面几乎不与普通的钎料润湿,很难与其他金属和非金属发生化学反应,形成冶金结合,另外,在高温下钎焊金刚石表面可能会出现石墨化现象,对金刚石性能有一定的影响^[11-13]。

为解决上述问题,可以通过在钎料中加入活性元素(如 Ti, Cr, V),利用活性元素与金刚石反应形成碳化物,来改善钎料在金刚石上的润湿性并提高结合强度^[14-15]。WU 等人^[16]研究了 AgCuTi 钎料在金刚石上润湿铺展,AgCuTi/金刚石润湿体系在 880 °C 保温时间 40 min,平衡时润湿角约为 8°。Ti 与金刚石反应生成 TiC 界面反应层,最终润湿角和铺展动力学都由界面反应层的形成控制^[17];LIU 等人^[14]用 AgCuTi 活性钎料成功钎焊了 CVD (chemical vapor deposition) 纳米金刚石薄膜和 TC4 合金,钎焊接头完整,无明显缺陷;XU 等人^[18]通过在 AgCu 基钎料中添加 Ti, Sn 元素,提升了钎料在金刚石上的润湿性并降低了钎焊温度,使用 AgCu-10Sn-1Ti 钎料钎焊金刚石和无氧铜,接头最高剪切强度达到了 256.1 MPa。此外,钎焊工艺参数和气氛对接头连接质量有非常大的影响,根据 XU 等人^[19]试验结果显示,当钎焊温度低或保温时间短,由于钎料流动不充分以及层间流动性差,会形成一些凝固缺陷和金属间化合物簇,相反,当温度过高

或保温时间过长会导致钎料流失以及生成过厚的碳化物反应层,进而影响钎焊质量;WU 等人^[20]研究发现在 Ar 气保护和真空钎焊环境下,钎料不仅能充分润湿铺展,而且金刚石石墨化程度较小。上述研究表明可以采用活性钎焊的方法,在真空环境下调整合理的工艺参数,实现金刚石与无氧铜之间的高质量连接。

文中使用 AgCuTi 活性钎料在真空环境下钎焊连接金刚石与无氧铜,对无氧铜/金刚石钎焊接头界面的微观结构进行了表征,详细阐述了接头界面微观结构和组织演变的机理,分析了温度和保温时间对接头界面微观组织及力学性能的影响,最后,讨论了钎焊接头的力学性能和断裂模式。

1 试验方法

用尺寸 5 mm × 5 mm × 0.5 mm 和 5 mm × 5 mm × 1.5 mm 的 CVD 多晶金刚石分别用于钎焊试验和钎焊接头剪切强度测试,对应的无氧铜选用尺寸 15 mm × 15 mm × 1.5 mm 用于钎焊试验,15 mm × 15 mm × 3 mm 用于剪切试验。钎料选用 AgCu4.5Ti 箔片(50 μm 厚),熔点约为 780 °C,密度为 9.9 kg/cm³,热膨胀系数为 ($18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)。

试验前,需要用砂纸研磨基材和钎料,去除表面的氧化膜,然后在丙酮、酒精和 3%~5% 的氢氧化钠中按顺序超声清洗 10 min 去除表面油污和污染物。钎焊试验在 HHVC 1300 真空热压炉中进行,如图 1 所示,钎焊金刚石无氧铜装配方案见图 1(a),需要在金刚石上方搭载一块小压块,给试样提供压力防止钎焊过程中金刚石滑动并确保金刚石与钎料充分接触。剪切试验在万能拉伸试验机下进行,剪切示意图见图 1(b),位移速率为 1.5 mm/min,每组至少测实 3 个实样,取平均剪切强度。

钎焊完成后,研磨实样直至露出界面,抛光后使用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和 X 射线光谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 分析界面组织形态、反应物的组成成分。为确定接头中间层的反应相,进行 X 射线衍射 (X-Ray diffractometer, XRD) 分析,此外,通过光学显微镜、扫描电镜和能谱仪对钎焊接头的断裂位置和断口形貌进行分析。

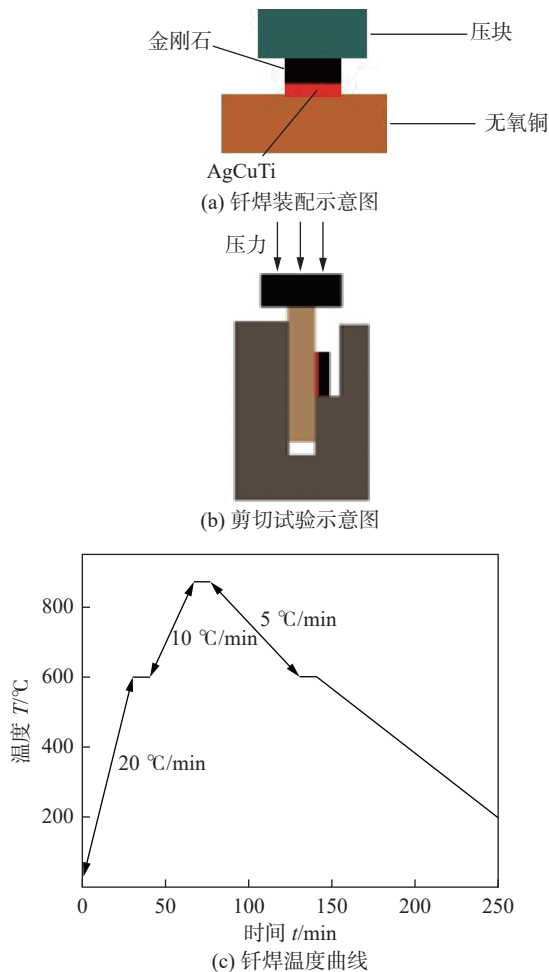


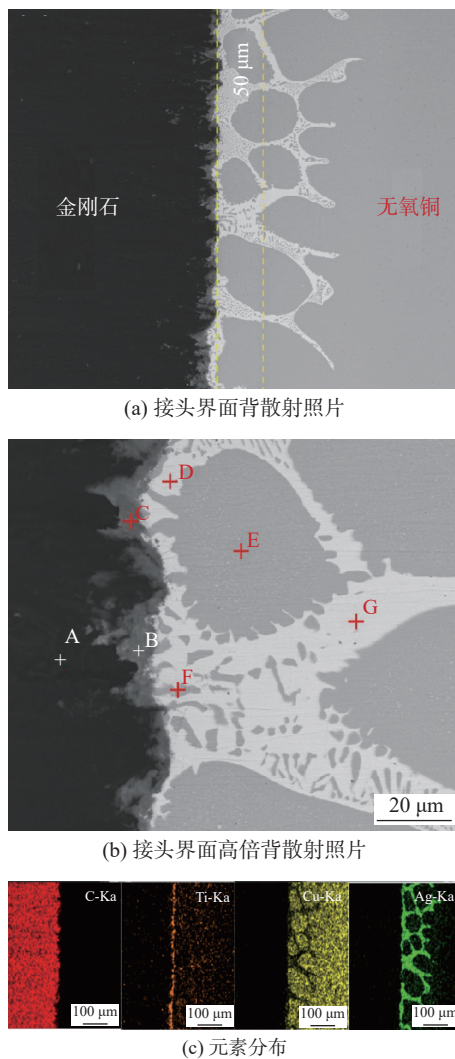
图 1 试验图

Fig. 1 Test diagram. (a) schematic diagram of brazing assembly; (b) schematic diagram of shear test; (c) brazing temperature curve

2 试验结果及分析

2.1 金刚石/AgCuTi/无氧铜钎焊接头界面微观结构

在 910 $^\circ\text{C}$ 保温 10 min 金刚石/AgCuTi/无氧铜钎焊接头界面微观结构和元素分布, 如图 2 所示。从图中可见, 接头结合良好, 几乎没有如气孔、裂纹、夹杂等缺陷。整个钎焊接头的结构为紧挨着金刚石的深灰色层, 由白色相和灰色相组成的中间层, 并且中间层与无氧铜基板之间没有明显的界面, 白色相像树枝一样延伸至无氧铜基板内部。图 2(c) 分别显示了 C 元素, Ti 元素, Cu 元素, Ag 元素的分布情况, 从图 2(c) 观察到 Ti 元素在金刚石一侧富集, 推测这是由于 Ti 和 C 反应生成了 TiC 反应层, 并且发现 Ag 元素向无氧铜基体中扩散, 同时无氧铜基板中的 Cu 元素向钎料方向扩散。



(c) 元素分布

图 2 金刚石/AgCuTi/无氧铜钎焊界面微观组织和元素分布 (910 $^\circ\text{C}$ 、10 min)

Fig. 2 Microstructural and elemental distribution of diamond/AgCuTi/OFC at the brazing interface. (a) backscattered images of the joint interface; (b) magnified backscattered images of the joint interface; (c) elemental distribution

金刚石和无氧铜之间的钎焊接头界面结构较为简单, 没有明显缺陷, 并且不同元素之间的相互作用和反应, 导致了元素富集和化合物形成以及 AgCuTi 钎料和无氧铜基板的相互溶解和扩散。

为了研究钎焊接头的界面微观组织, 图 2(b) 中各点的主要元素原子百分比见表 1, 在图 2(b) 中观察到金刚石一侧的深灰色相, 根据点 B 的 EDS 结果, 该相富含 Ti 和 C 元素, 并且 Ti 和 C 的原子百分比约为 1:1, 因此推测深灰色相为 Ti 和 C 反应生成的 TiC, TiC 的形成可以降低界面张力, 改善 AgCuTi 钎料在金刚石上的润湿性, 是金刚石与无氧铜高质量钎焊连接的关键。其中 C 标记的白色相以及 D 标记的灰色相分别为 Ag(s,s) 和 Cu(s,s)。因

此, 在钎焊温度 910 °C 保温 10 min 下得到的钎焊接头界面结构为金刚石/TiC/Cu(s,s)、Ag(s,s)/无氧铜。

表 1 图 2(b) 中标记区域的元素组成和可能相 (质量分数, %)

Table 1 Element composition and possible phases of the marked area in Fig 2 (b)

位置	Ag	Cu	Ti	C	可能存在的相
A	—	—	0.01	99.99	金刚石
B	1.24	1.84	45.81	41.11	TiC
C	82.64	8.14	9.21	—	Ag(s,s)
D	9.56	78.05	12.39	—	Cu(s,s)

2.2 钎焊温度和保温时间对金刚石/AgCuTi/无氧铜接头界面微观组织的影响

金刚石/AgCuTi/无氧铜接头在不同温度下保温 10 min 的界面微观结构, 如图 3 所示. 结果表明, 钎焊温度对钎焊接头界面微观结构有显著影响, 但是无论温度如何, 接头均未发现明显缺陷并且生成的反应物种类没有变化. 发现当钎焊温度 870 °C 以下时, 由 Cu(s,s)、Ag(s,s) 组成的中间层厚度分别为 54 μm 和 57.3 μm , 但当温度升至 910 °C 以上时中间层厚度增加到 152.5 μm 和 143.8 μm . 钎焊温度升高促进了钎料和无氧铜基板的互溶和扩散, 同时过高的温度会导致钎料和基板之间过度溶解扩散, Ag(s,s) 会相对减少见图 3(d).

在 870 °C 下, 不同保温时间钎焊接头界面, 如图 4 所示. 可以发现随着保温时间的增加, 接头的界面组织并没有明显变化, 但是过长的保温时间会造成部分钎料的流失见图 4(d), 并且发现随着保温时间的增加, 中间层的厚度没有明显变化, 但是温度升高中间层的厚度会明显增加, 见图 3(b) 和图 3(c), 因此, 钎料与基板的互溶和扩散主要取决于温度.

根据以上分析及相关文献, 接头界面微观结构的成型可以分为 3 个阶段, 如图 5 所示. 第 1 阶段主要涉及无氧铜基板和熔融钎料之间的原子扩散, 随着温度升高, 钎料开始融化, 熔融钎料和无氧铜基板中的原子相互扩散; 第 2 阶段主要发生在保温阶段, 在这个阶段, 无氧铜基板和熔融钎料之间的原子扩散持续进行, 钎料中的 Ag 元素在毛细作用下向无氧铜基板中扩散, 基板中的 Cu 元素在浓度梯度驱动下向钎料中扩散^[16], 造成了钎料与无氧铜基板的互溶和扩散, 同时, 熔融钎料中的 Ti 元素扩

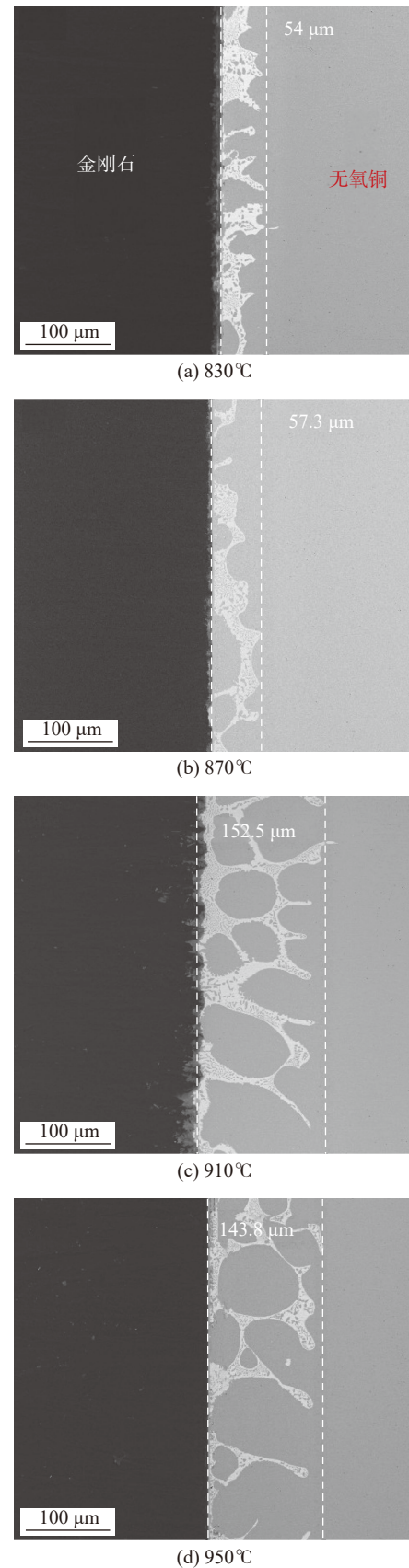


图 3 金刚石/AgCuTi/无氧铜接头在不同温度下保温时间 10 min 的界面微观结构

Fig. 3 Interface microstructure of diamond/AgCu Ti/OFC joint at different temperatures for 10 min. (a) 830 °C; (b) 870 °C; (c) 910 °C; (d) 950 °C

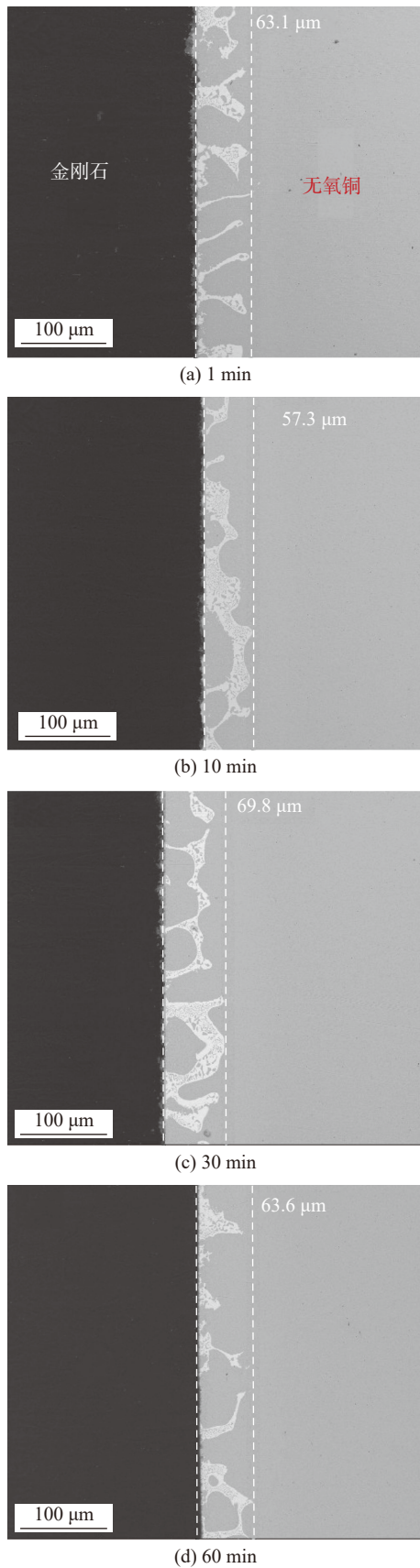


图 4 在 870 °C 下保温时间对金刚石/无氧铜接头界面微观组织的影响

Fig. 4 Effect of 870 °C insulation time on the microstructure of diamond/OFC joint interface. (a) 1 min; (b) 10 min; (c) 30 min; (d) 60 min

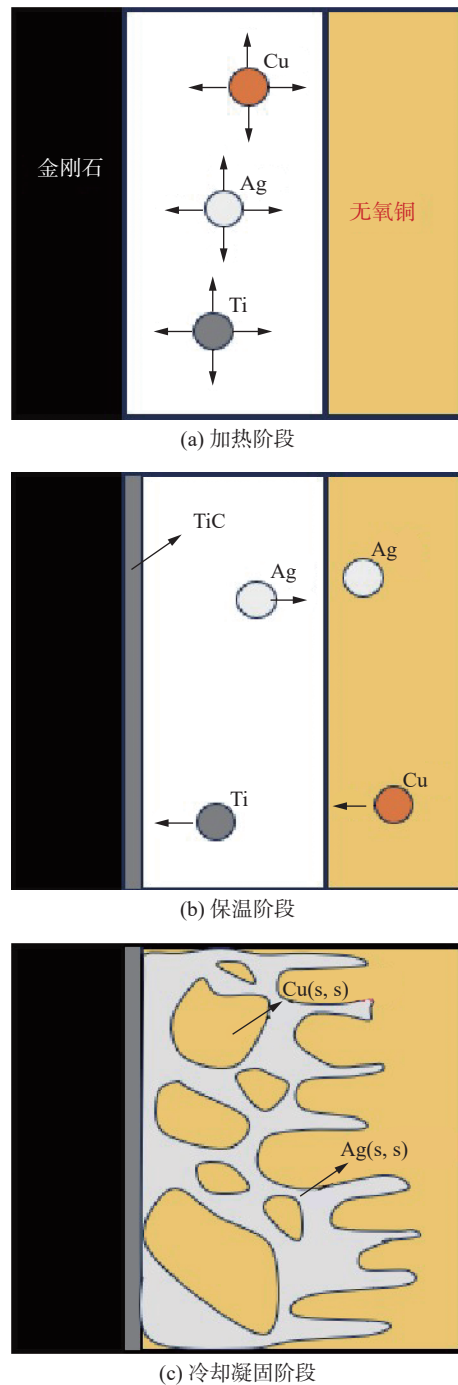


图 5 接头界面微观组织演变示意图模型

Fig. 5 Schematic diagram of the microstructure evolution of the joint interface. (a) heating stage; (b) Insulation stage; (c) cooling and solidification stage

散到金刚石表面并与其反应形成 TiC 反应层。



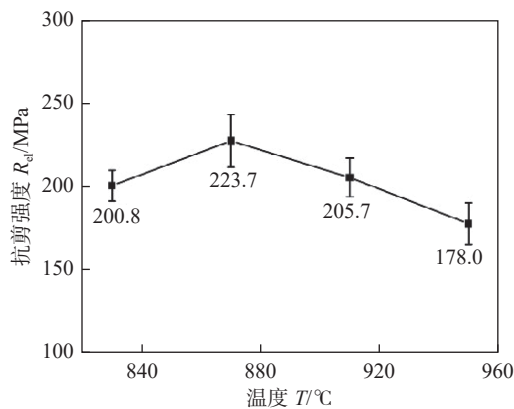
形成 TiC 吉布斯自由能远低于形成 Ti-Cu 金属间化合物 (TiCu , Ti_2Cu_3 , Ti_3Cu_4), 因此, Ti 可能更倾向于和 C 反应形成 TiC 反应层, 反应层的形成可以促进润湿, 并且可以和金刚石之间形成稳定的化学键和, 提高了钎焊接头的强度; 最后一个阶段是

关于熔融钎料冷却凝固的过程, 在凝固的过程中形成了 Ag(s,s) , Cu(s,s) .

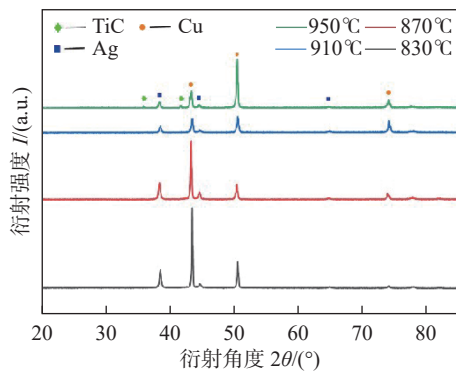
2.3 钎焊温度对接头力学性能的影响

为了评估钎焊接头的力学性能, 在室温下对不同钎焊温度的试验进行剪切强度试验, 如图 6 所示. 图 6(a) 为不同钎焊温度下钎焊接头的剪切强度, 观察到当温度从 $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 接头剪切强度先从 200.8 MPa 增加到峰值 223.7 MPa , 然而随着温度继续升高, 剪切强度开始降低, 当 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时剪切强度最低为 178 MPa .

不同温度保温 10 min 无氧铜一侧剪切面的 SEM 断口, 如图 7 所示. 发现当钎焊温度 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 断裂表面发现大量深灰色物质见图 7(d), 由表 2 中的 EDS 结果和图 7(b)XRD 分析结果表明深灰色物质为 TiC. $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时接头在 TiC 反应层处断裂, 为脆性断裂. 而在钎焊温度 $830\sim 910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时断裂表面成分均匀, 主要由钎料以及少量的脱落金刚石组成见图 7(a)~图 7(c), 由 Ag(s,s) 和 Cu(s,s) 组成的中间层具有良好韧性, 这个部位断裂表现出更高



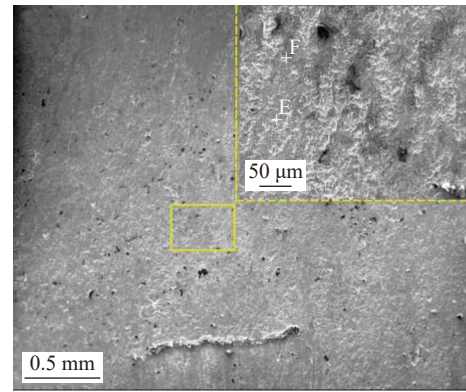
(a) 钎焊接头的抗剪强度



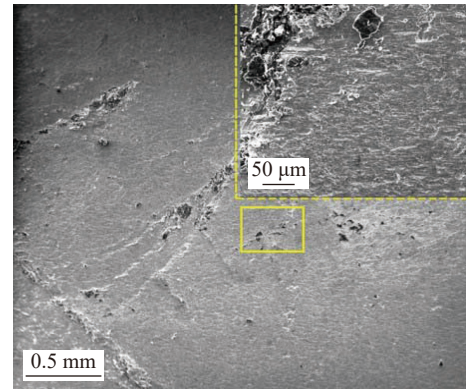
(b) 保温 10 min 无氧铜剪切面的 XRD 图谱

图 6 不同温度下的强度和 XRD 图谱

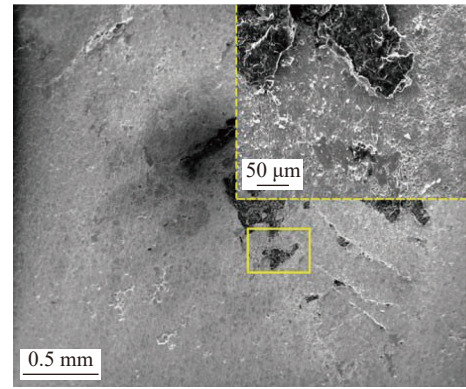
Fig. 6 Strength and XRD patterns at different temperatures. (a) shear strength of brazed joints; (b) XRD patterns of OFC shear surfaces at 10 min of insulation



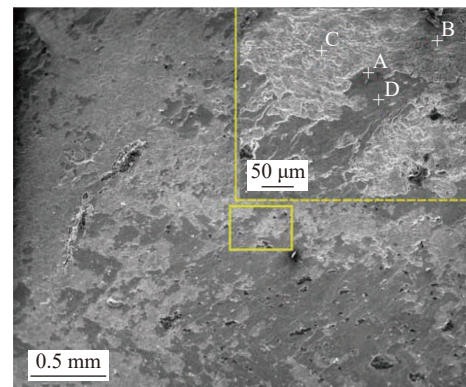
(a) $830\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $870\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $910\text{ }^{\circ}\text{C}$



(d) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 7 不同温度下金刚石/AgCuTi/无氧铜接头断口形貌
Fig. 7 Fracture morphology of diamond/AgCuTi/OFC joint at different temperatures. (a) $830\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $870\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $910\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $950\text{ }^{\circ}\text{C}$

表 2 图 7 中标记区域的元素组成和可能的相 (原子分数, %)
Table 2 Element composition and possible phases of the marked area in Fig 7

位置	Ag	Cu	Ti	C	可能存在的相
A	0.86	9.15	13.35	76.63	金刚石
B	3.70	65.93	1.80	28.57	Cu(s,s)
C	66.82	15.55	0.47	17.16	Ag(s,s)
D	18.55	3.60	36.81	41.05	TiC
E	64.46	8.76	6.91	19.87	Ag(s,s)
F	7.94	66.23	2.97	22.86	Cu(s,s)

的强度,为韧性断裂.

金刚石/无氧铜钎焊接头的剪切强度主要与以下两个因素有关,金刚石/钎料层界面结合强度,热膨胀差异引起的残余应力. 其中, TiC 反应层是影响接头高强度连接的关键因素之一,一方面 TiC 反应层在金刚石和钎料之间形成了稳定的化学键,提高了整个接头的强度和稳定性,但另一方面,由于 TiC 是脆性相,过厚的反应层会降低接头的剪切强度. 温度升高会促进 C 和 Ti 的反应,生成过厚的 TiC 反应层,导致 950 °C 时剪切强度明显降低. 残余应力也是影响接头连接强度的关键因素, AgCuTi 钎料能够有效缓解金刚石和无氧铜在钎焊过程中由于热膨胀差异引起的残余应力,但是当温度在 910 °C 以上时,钎料与无氧铜基板的互溶和扩散导致接头中钎料成分减小,进一步降低了接头的剪切强度.

3 结论

- (1) 钎焊接头的典型界面微观结构为金刚石/ TiC/Ag(s,s) + Cu(s,s)/无氧铜.
- (2) 钎焊温度对钎焊接头的微观结构有显著影响. 当温度在 910 °C 以上时, AgCuTi 钎料与无氧铜基板的互溶和扩散现象非常严重,但是在 870 °C,保温时间的增加对接头界面结构并没有明显的影响,钎料与无氧铜基板的互溶和扩散主要与温度有关.
- (3) 随着温度的升高,接头的剪切强度先增加后减少,在钎焊温度 870 °C 保温时间 10 min,剪切强度最高,可达 223.6 MPa,断裂主要发生在 TiC 反应层和钎料层.

参考文献

[1] ZHANG Z, GONG Y, LI K, *et al.* Investigation on fiber-based terahertz source[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(10): 2675 – 2680.

[2] SONG K, HE A, LIU J, *et al.* THz four-way power combiner based on HT branch circular waveguide mode conversion for high-power THz source[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2023, 44(3/4): 220 – 232.

[3] PACHECO-PEÑA V. Terahertz technologies and its applications [J]. *Electronics*, 2021, 10(3): 268.

[4] LI B, LONG Y, LIU H, *et al.* Research progress on Terahertz technology and its application in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 1 – 9.

[5] PAN P, ZHANG L, CUI H, *et al.* Terahertz power module based on 0.34 THz traveling wave tube[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(5): 816 – 819.

[6] ZHANG L, JIANG Y, LEI W, *et al.* A piecewise sine waveguide for terahertz traveling wave tube[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 10449.

[7] PAWAR A Y, SONAWANE D D, ERANDE K B, *et al.* Terahertz technology and its applications[J]. *Drug Invention Today*, 2013, 5(2): 157 – 163.

[8] DING M Q, LI L, DU Y, *et al.* Development of an extremely thin-diamond window for terahertz traveling wave tubes[J]. *Diamond and Related Materials*, 2017, 79: 173 – 178.

[9] ZHANG L. Filler metals, brazing processing and reliability for diamond tools brazing: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 651 – 668.

[10] MA W, XIAO H, WANG S, *et al.* Interface characteristics and mechanical properties of vacuum-brazed diamond with Ni–Cr + W composite filler alloy[J]. *Vacuum*, 2022, 198: 110897.

- 2020, 106: 2065 – 2078.
- [14] LI Y, HU M, WANG T. Visual inspection of weld surface quality[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 39(3): 5075 – 5084.
- [15] 刘政达. 复杂焊缝外观质量自动检测及评估方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- LIU Zhengda. Research on automatic inspection and evaluation method of complex weld appearance quality[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [16] 胡丹, 吕波, 王静静, 等. 焊缝表面缺陷激光视觉传感 HOG-SVM 的检测方法 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(1): 57 – 62,70.
- HU Dan, LU Bo, WANG Jingjing, *et al.* Study on HOG-SVM detection method of weld surface defects using laser visual sensing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(1): 57 – 62,70.
- [17] 方伟华. 基于 3D 视觉的机器人焊接智能轨迹规划关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- FANG Weihua. Research on key technology of intelligent trajectory planning for robot welding based on 3D vision[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [18] CHU H, WANG Y. A vision-based system for post-welding quality measurement and defect detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 86(9-12): 3007-3014.

第一作者: 王浩, 博士研究生; 主要研究方向为机器视觉、焊接轨迹识别与控制; Email: hwang22@mails.jlu.edu.cn.
通信作者: 赵小辉, 教授, 博士生导师; Email: zhaoxiaohui@jlu.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

(上接第 26 页)

- [11] ZHANG T, WANG Z, WANG Y, *et al.* Experimental study on the mechanical properties of oxygen-free copper used in high energy physics detectors and accelerators[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 935: 8 – 16.
- [12] ZHANG S, YUAN Y, SU Y, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of brazing carbon/carbon composites to stainless steel using diamond particles reinforced Ag-Cu-Ti brazing alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 719: 108 – 115.
- [13] TILLMANN W, OSMANDA A M. Production of diamond tools by brazing[C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2005, 502: 425 – 430.
- [14] LIU D, ZHOU Y, SONG X, *et al.* Interfacial microstructure and performance of nano-diamond film/Ti-6Al-4V joint brazed with AgCuTi alloy[J]. *Diamond and Related Materials*, 2016, 68: 42 – 50.
- [15] YANG Z, LIN J, WANG Y, *et al.* Characterization of microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$ joints vacuum-brazed with Ag-Cu-Ti + W composite filler[J]. *Vacuum*, 2017, 143: 294 – 302.
- [16] WU M, CHANG L, ZHANG L, *et al.* Wetting mechanism of AgCuTi on heterogeneous surface of Diamond/Cu composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325: 490 – 495.
- [17] EUSTATHOPOULOS N. Progress in understanding and modeling reactive wetting of metals on ceramics[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2005, 9(4-5): 152 – 160.
- [18] XU H, LI Y, WANG L, *et al.* Optimized AgCuSnTi filler alloy for brazing of diamond/copper combination used in microwave windows: Microstructure and mechanical performance[J]. *Vacuum*, 2023, 212(6): 112024.
- [19] XU H, LI Y, LU C, *et al.* An investigation on the vacuum brazed diamond film and copper using low-temperature Ag-Cu-Sn-Ti filler alloys: Interfacial microstructure and mechanical performance[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 581(8): 154439.
- [20] WU Q, DE Z H, ZHAN P, *et al.* Effect of brazing atmosphere on brazing performance of diamond[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(4): 51 – 57.

第一作者: 李玉龙, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为焊接工艺、3d 打印和光纤传感; Email: liyulong@ncu.edu.cn.

(编辑: 刘启明)