

Ag-Cu-Ti 合金制备技术及钎焊应用综述

王 轶, 贾志华, 郑 晶, 操齐高
(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要:介绍了 Ag-Cu-Ti 活性钎料的主要制备方法,常用的 Ag-Cu-Ti 活性钎料及熔化温度,Ag-Cu-Ti 钎料钎焊各种陶瓷与陶瓷或陶瓷与金属,Ag-Cu-Ti 活性钎料钎焊金刚石、石墨、玻璃、立方氮化硼、复合材料的应用研究进展及 Ag-Cu-Ti 活性钎料的改性研究。

关键词:金属材料; Ag-Cu-Ti; 活性钎焊; 接头强度

中图分类号: TG146.3⁺² **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2018)S1-0053-05

Review on Preparation Technology and Brazing Application of Ag-Cu-Ti Alloy

WANG Yi, JIA Zhihua, ZHENG Jing, CAO Qigao

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

Abstract: The main preparation methods of Ag-Cu-Ti active brazing filler metal are introduced. Ag-Cu-Ti active brazing filler metal and melting temperature are commonly used. Ag-Cu-Ti alloy brazing ceramics and ceramic or ceramic and metal joint strength. The research progress of Ag-Cu-Ti brazing diamond, graphite, glass, cubic boron nitride and composite materials and the modification of Ag-Cu-Ti active brazing filler metal. Ag-Cu-Ti alloy to add reinforced matrix made of composite solder to improve the brazing performance, the scope of application is also more and more widely. In the huge market prospects, there will be a very broad space for development.

Key words: metal materials; Ag-Cu-Ti; active brazing; joint strength

Ag-Cu-Ti 合金是一种活性钎料,主要应用于工程结构陶瓷间、陶瓷与金属间的钎焊。陶瓷材料的化学键主要是离子键和共价键,电子配位非常稳定,而活性金属 Ti 可以通过化学反应在陶瓷表面产生分解,形成由金属与陶瓷的复合物组成的界面反应层,在钎料与陶瓷之间形成新的化学键,强化了二者间的结合^[1]。以前钎焊陶瓷的主要方法是先用 Mo-Mn 法、PVD、CVD 法等把陶瓷表面进行金属预处理化,然后钎焊。这些处理方法工艺复杂、周期长、成本高,而活性钎料可实现陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属接头的直接钎焊,使钎焊效率大大提高。

1 Ag-Cu-Ti 活性钎料的制备技术

Ag-Cu-Ti 活性钎料的制备通常在 Ag、Cu 或 Ag-Cu 共晶合金中加入质量分数 1%~5%的 Ti。有

些还加入 In 或 Li,以改善流动性提高活性元素的活度。其种制备包括以下多种方法。

1) 合金熔炼法:合金熔炼法采用真空中频感应电炉或真空自耗电弧炉对按比例配置的 Ag、Cu、Ti 单质金属或 Ag-Cu 共晶合金加 Ti 直接熔炼,最常用的 Ag-Cu 共晶合金是 Ag-28Cu。由于 Ti 和 O 反应剧烈,因此要在真空条件下熔炼、浇铸。感应熔炼时铜钛化合物容易聚集上浮,合金凝固过程中 Ti 易偏析,造成钎料成分不均匀。自耗电弧炉熔炼可以减轻偏析情况,但 Ag 挥发严重。这两种熔炼方式的成品率都较低,因此熔炼法在制备 Ag-Cu-Ti 活性钎焊中并不多用^[2]。

2) 粉末冶金法:粉末冶金法制备 Ag-Cu-Ti 活性钎料是目前最常用的方法,成品率较高,可以达到 80%以上。把 Ag、Cu、Ti 粉末混合均匀后压制成板坯,在真空度不低于 2×10^{-2} Pa 条件下 750℃左

右真空烧结,烧结的板坯的道次加工率不大于 10%,总加工率不大于 50%。经 650~680℃/30 min 退火,可加工成 0.1 mm 以下的箔材。

3) 层状复合法: Ag-Cu-Ti 活性钎料可以按比例在 Ti 的外面包裹 AgCu 合金管,拉拔后制成复合丝,或把钛箔复合在 AgCu 合金板上制成复合板直接使用。

4) 膏状钎料: Ag-Cu-Ti 活性钎料可以把 Ag、Cu、Ti 粉末混合均匀后加入溶剂、触变剂、胶粘剂等调制成焊膏使用。

5) 非晶法: Ag-Cu-Ti 活性钎料还可以采用非晶制带设备在真空条件下把熔化的合金通过急冷辊直接加工成非晶带材。液态合金在偏离平衡状态下以极高的冷却速度进行非结晶凝固,从而获得在正常冷却速率下不能获得的组织结构、成分及特殊性能的非晶态薄带。但非晶带材受加工方式的限制,厚度通常较薄,在 5~15 μm 之间。

6) 热等静压-挤压法: Ag-Cu-Ti 活性钎料可以选取粒度一致的 AgCu 合金粉或 Ag 粉、Cu 粉和 Ti 粉在 Ar 气氛保护下进行高能球磨(机械合金化)。通过热等静压-挤压-冷轧(冷拉)工艺,将钎料加工成带材或丝材。在提高合金致密度的同时使合金成分更加均匀,提高了塑性加工性能^[3]。

2 Ag-Cu-Ti 合金应用于陶瓷的钎焊

1974 年, Bondley 等^[4-5]发现 Ag-Cu 丝中复合一定的 TiH₂ 后能润湿大部分氧化物或非氧化物陶瓷。后来在 Bender 等人的改进下, Ag-Cu-Ti 发展为连接陶瓷的常用钎料。洗爱平等^[6]采用 Ag-Cu-Ti 钎料在 830~980℃ 的温度范围内钎焊连接了 Si₃N₄ 陶瓷,得到的接头最高连接强度为 490 MPa。研究表明接头强度与 Ti/Si₃N₄ 界面处 Ti-N 反应层的厚度相关。Hanson^[7]采用不同 Ti 含量的 Ag-Cu-Ti 钎料连接了

Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂ 陶瓷(YSZ),研究指出:在钎焊过程中, Ti 元素与 ZrO₂ 母材发生反应,在钎焊界面处存在氧元素贫化,使 ZrO₂ 的颜色发生改变,但并不影响接头的四点弯曲强度。

随着研究的不断深入, Ag-Cu-Ti 活性钎料得到发展并广泛应用于工程结构陶瓷氧化铝、氮化硅、碳化硅以及部分稳定氧化锆(PSZ)陶瓷的钎焊以及陶瓷与金属间的钎焊。在汽车发动机增压转子上,活性钎料钎焊使 Si₃N₄ 陶瓷涡轮与金属轴和套筒连接为一个整体,使这种陶瓷与钢复合转子的重量轻 40%左右,且能耐受 1000℃ 的高温,提高了涡轮的加速性能和燃料的燃烧效率,减少了尾气的排放。NGK 火花塞公司和尼桑汽车公司推出的陶瓷/金属摇杆可使磨损比全金属件减少 5~10 倍,我国的复合陶瓷挺柱也在重载柴油发动机得以应用。在电子行业中,高纯度 Al₂O₃ 作为绝缘材料如火花塞、高压绝缘材料子、真空管外壳、整流器外壳也通过活性钎料的钎焊实现可伐合金、无氧铜等金属连接。此外, Ag-Cu-Ti 活性钎料还广泛应用于航空航天、机械、冶金、化工、核反应堆等领域。常用的 Ag-Cu-Ti 活性钎料及熔化温度如表 1 所列; Ag-Cu-Ti 钎料钎焊各种陶瓷与陶瓷或陶瓷与金属接头的强度如表 2 所列。

表 1 常用的 Ag-Cu-Ti 活性钎料成分及熔化温度

Tab.1 Compositions of Ag-Cu-Ti active brazing filler and their melting temperature

ω(Cu)/%	ω(Ti)/%	ω(In)/%	ω(Li)/%	ω(Ag)/%	熔化温度/℃
28	3	—	—	余	780~805
26.5	2	—	—	余	780~800
19.5	5	3	—	余	730~760
34.5	1.5	—	—	余	770~810
28	3	—	10	余	640~720

表 2 Ag-Cu-Ti 钎料钎焊各种陶瓷与陶瓷或陶瓷与金属接头的强度

Tab.2 Joint strength of Ag-Cu-Ti brazed ceramic and ceramic or ceramic and metal

被连接材料	连接强度/MPa	被连接材料	连接强度/MPa
Si ₃ N ₄ -Si ₃ N ₄	抗弯 184.2~225.2	Si ₃ N ₄ -1Cr13	抗弯 385~415
SiC-SiC	抗弯 85.2~107.3	PSZ-1Cr13	抗弯 377~514
AlN-AlN	抗弯 168.9	PSZ-40Cr	抗弯 407
Al ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	抗弯 225	SiC-SiC	抗弯 350
Al ₂ O ₃ -FeNiCo	抗弯 182	AlN-Cu	抗拉 50~110

续表 2 (Tab.2 continued)

被连接材料	连接强度/MPa	被连接材料	连接强度/MPa
Si ₃ N ₄ -AlSi304	抗弯 84	95 瓷-95 瓷	抗拉>90.8
AlN- FeNiCo	抗弯 36.5	95 瓷-无氧铜	抗拉 84.9~95.5
Si ₃ N ₄ -FeNiCo	抗弯 186	95 瓷-FeNiCo	抗拉 76.4~105.7
SiC-FeNiCo	抗弯 35	99 Al ₂ O ₃ -Ti	抗剪 120
Si ₃ N ₄ -40Cr	抗弯 400	99 Al ₂ O ₃ -Nb	抗剪 120

3 Ag-Cu-Ti 合金应用于其他非金属材料的钎焊

3.1 对金刚石、石墨、玻璃的钎焊

金刚石是目前世界上发现并在工业上能够大量使用的最硬材料。金刚石磨料和金刚石工具是应用最为广泛的,但由于金刚石润湿性差,钎焊时通常要加入活性金属。Ag-Cu-Ti 活性钎料可用于金刚石和金属的真空钎焊。有研究人员用 Ag-26.7Cu-4.5Ti 钎料在 850℃钎焊 D-58Fe-4Ni 合金等用于核反应堆的报道。裴夤等^[8]研究发现 Ag-Cu-Ti 钎料在金刚石表面金属化过程中对金刚石强度影响不大且有好的润湿效果。丁兰英等^[9]在 Ag-Cu-Ti 钎料中加入质量分数为 8%的微米级 TiC 颗粒,明显细化了 Ag-Cu-Ti 合金钎料的显微组织,复合钎料与细粒度金刚石磨粒间产生了化学冶金结合,适当降低了钎料对金刚石磨粒的浸润性,使细粒度金刚石磨粒钎焊后的露出高度得以保证。

石墨是碳的同素异形体,也具有难润湿、线胀系数低的特点。Ag-Cu-Ti 钎料可用于石墨和石墨、石墨和金属间的焊接。采用(Ag-28Cu)-Ti 钎料在 950℃可进行石墨和石墨的焊接。Ag-26Cu-8Ti 钎料可在 954℃下钎焊石墨与金属,并应用在核反应堆部件。Ag-Cu-Ti 钎料钎焊石墨与 95%氧化铝陶瓷,在 10⁻⁴~10⁻² Pa 真空条件下,接头经氦质谱检漏,漏气速率小于 10⁻⁶ Pa/(L·s)^[1]。

Guedes 等^[10]采用 Ag-34.5Cu-1.5Ti 料钎焊 TC4 和氟硅酸盐玻璃陶瓷,剪切强度在 60 MPa 左右。研究认为在玻璃陶瓷侧存在的大量 Ti 氧化物,说明进行了 SiO₂→2TiO₂+Si 的反应,而 TC4 侧反应层厚度以及中间层中 Ag 基固溶体及 Si 化合物的分布只受钎焊温度影响。刘多等^[11]采用 Ag-Cu-Ti 钎料活性钎焊 SiO₂ 玻璃陶瓷与 TC4 钛合金,研究发现:当钎焊工艺为 880℃/5 min 时,接头的最高抗剪强度为 23 MPa;当钎焊工艺温度为 900℃/5 min 时,接头的最高抗剪强度为 27 MPa。

3.2 钎焊立方氮化硼

立方结构的氮化硼(CBN)的硬度略低于金刚石,为 72~98 GPa,常用作磨料和刀具材料。1957 年,美国的温托夫首先研制成立方氮化硼。2013 年,燕山大学成功合成出纳米孪晶结构立方氮化硼新材料。这一新材料具有多种优良特性,其硬度超过金刚石单晶,韧性优于商用硬质合金,抗氧化温度高于立方氮化硼单晶本身,有望成为钢铁材料加工行业中新一代刀具材料,具有广阔应用前景。

肖冰等研究发现质量分数为 Ag-20Cu-12Ti 钎料,1000℃条件下真空钎 CBN 磨粒,Ag-Cu-Ti 合金对 CBN 表现出良好的浸润性和结合力。钎焊过程中 Ag-Cu-Ti 合金中的 Ti 向 CBN 磨料界面富集,并与 CBN 磨料表面的 N 和 B 元素反应生成 TiN 和 TiB,断口处则可以明显地看到存在塑性层状撕裂现象,呈塑性断裂,说明 CBN 与 Ag-Cu-Ti 合金材料界面上已形成了化学冶金结合^[12]。

丁文峰等^[13]用 95(Ag-28Cu)-5Ti 合金,钎焊直径为 150~180 μm YBN-65 型 CBN,在 920℃/5 min 真空条件下进行钎焊,研究表明钎料中的活性元素 Ti,以及组成磨粒的 B、N 元素在钎焊过程中发生了扩散偏聚,界面区域形成了 CBN/TiB₂/TiB/TiN/含 Ti 合金的显微组织分层结构,结合界面的新生化合物层减小了钎焊 CBN 磨粒内部的残余热应力,提高了 CBN 磨粒与 Ag-Cu-Ti 合金钎焊接头性能。从钎焊 CBN 磨粒剪切断口形貌可以明显看出,断裂发生在 CBN 磨粒处,界面结合强度已高于磨粒自身强度。

卢广林等^[14]研究 Ag-Cu-Ti 活性钎料钎焊 CBN 时发现保证活性元素的活性是非常重要的。CBN 的焊接性受到基活性钎料中 Ti 的含量和钎焊工艺参数的直接影响。钎焊温度 950℃,保温时间 20min 时,钎料对 CBN 单晶颗粒具有良好的工艺性能和焊接性,实现了活性钎料、C-BN 单晶颗粒与基体金属钢三者间的可靠连接。丁超等^[15]发明了一种立方氮化硼钎焊焊料及工艺,用 Ag-Cu-Ti 活性钎料钎焊和

CBN 颗粒混合均匀后在真空条件下加热可使钢基体表面形成耐磨的超硬复合层。

3.3 钎焊复合材料

复合材料的各个组成材料在性能上起协同作用, 具有单一材料无法比拟的优越综合性能。复合材料按基体相类型可分为金属基、陶瓷基、树脂基和高聚物基复合材料; 按增强相形态可分为粒子或晶须增强、纤维增强及层板增强复合材料; 按性能与用途可分为结构和功能复合材料。由于树脂基复合材料无法采用钎焊方法, 目前复合材料的钎焊主要在于结构用金属基复合材料、陶瓷基复合材料和碳碳复合材料。

Ag-Cu-Ti 活性钎料可用于 C/C 复合材料的钎焊, 秦优琼等^[16]采用熔化温度 830~850℃ 的 Ag-26.4Cu-4.6Ti 钎料, 在 900℃/10 min 条件下钎焊三维正交增强型 C/C 复合材料, 接头具有良好的抗剪性能, 试样均断于靠近钎缝的 C/C 复合材料基体上, 平均抗剪强度为 22 MPa, 数据与 C/C 复合材料基体强度相当, 在同等条件下钎焊准三维 C/C 复合材料与 TC4 钛合金, 接头抗剪强度为 25 MPa。

张洁等^[17]对冷压烧结结合热挤压工艺制备的 SiCp/Cu 复合材料, 选用 Ag-Cu-Ti 为钎料进行真空钎焊试验, 在 850℃/20 min 时抗剪强度最大, 可达到 61 MPa, 当 SiCp 含量超过 10% 时, 钎焊接头室温抗剪强度快速下降。刘多等^[18]发明的一种采用 Ag-Cu-Ti 钎料连接 Cf/LAS 复合材料的新方法可以显著增强焊接接头强度。

吴永志等^[19]采用 Ag-Cu-Ti+SiC 钎料对 C/SiC 复合材料与 Ti6Al4V 钛合金进行钎焊, 并对钎焊接头进行了室温抗剪强度测试和室温至 600℃ 热震试验。结果表明, 钎焊间隙为(0.55±0.05)mm 时, 接头平均抗剪强度值最高, 达到 141 MPa, 且未发现热震裂纹。

宋晓国等^[20]采用 Ag-Cu-Ti 钎料实现了 TiAl 与 Si₃N₄f/Si₃N₄ 复合材料的钎焊, 确定了钎焊接头的典型界面组织结构为 TiAl/AlCuTi/Ag(s,s)/TiN/Si₃N₄f/Si₃N₄。钎料对 Si₃N₄f/Si₃N₄ 复合材料有较好的润湿性, 活性元素 Ti 与 Si₃N₄ 基体及纤维发生反应, 形成连续的 TiN 化合物层。钎焊温度过高或保温时间过长会使钎缝中脆性的 AlCuTi 化合物增加, 在钎缝中产生微裂纹并降低钎焊接头的力学性能。当钎焊工艺为 850℃/10 min 时, 接头抗剪强度达到最大, 为 9.4 MPa, 超过 Si₃N₄f/Si₃N₄ 母材层间抗剪强度的 60%。

4 Ag-Cu-Ti 活性钎料的改性研究

Ag-Cu-Ti 活性钎料虽然适用范围比较广泛, 但由于钎焊基材的不同, 焊接接头的性能也不尽相同。为了进一步提高钎焊接头强度, 研究人员通过在 Ag-Cu-Ti 合金中添加其它增强相来改善接头应力, 提高钎缝元素扩散或减少脆性化合物的生成等使 Ag-Cu-Ti 活性钎料的钎焊性能得以提高。

4.1 Ag-Cu-Ti 加缓冲层

黄小丽等^[21]通过在 Ag-30Cu-4Ti 薄片钎焊 ZrO₂/40Cr 钢接头中分别插入 Cu 和 Ti 缓冲层后, 使钎焊接头强度提高。当加入厚度为 1.0 mm 的 Ti 缓冲层时, 最高接头强度为 120 MPa, 当加入厚度为 0.4 mm 的 Cu 缓冲层时最大接头强度为 155 MPa。

4.2 Ag-Cu-Ti 加增强基

胡旭等^[22]研究在 Ag-Cu-Ti 钎料中添加 TiN 颗粒, 1000℃ 下钎焊 Si₃N₄ 时, 随着 TiN 颗粒的增加, 焊缝宽度增加, 接头强度提高, 体积分数 15% 时接头强度达到 141.6 MPa, 随着保温时间的增加, 接头的剪切强度先上升再下降, 在 20 min 时接头的强度最高, 达到 126.4 MPa。在用 Ag-Cu-Ti 钎料添加 Ti/Al/Ti 复合层钎焊 Si₃N₄ 复相陶瓷时, 钎缝中生成了 AlCu₂Ti 金属间化合物增强颗粒, 提高了钎料的润湿性, 钎缝组织比较致密, 缺陷较少。

贺艳明等^[23]采用 Ag-Cu-Ti 加 SiCp 复合钎料焊接 Si₃N₄ 陶瓷, 研究表明接头组织和性能受钎焊工艺和钎料成分的影响。当钎焊温度较低或保温时间较短时, 界面反应不能充分进行。钎料中 Ti 质量分数为 4% 时, 随着 SiCp 的增加, 接头弯曲强度先增加后降低; 当钎料含 SiCp 的体积分数为 5% 时, 随着接头内 Ti 含量的提高, 接头弯曲强度也是先增加后降低。当钎料成分为(Ag-28Cu)-8Ti+5%SiCp, 在 900℃/10 min 工艺下, 接头的平均三点弯曲强度达到 506.3 MPa。使用 Ag-Cu-Ti 加 Mo 复合钎料连接 Si₃N₄ 陶瓷和 42CrMo 钢时, 当钎料内 Mo 体积分数为 10%, Ti 质量分数为 4% 时, 得到了最高的接头弯曲强度 587 MPa。

周英豪等^[24]用石墨烯纳米片(GNSs)增强 Ag-Cu-Ti 钎料并用该复合钎料连接了 C/C 复合材料与 TC4 钛合金, 获得了具有良好的界面组织和可靠连接质量的钎焊接头。试验表明: 加入 GNSs 可以降低钎料在 C/C 复合材料表面的润湿性, 细化界面组织, 并抑制 TiC 层的生长。钎焊接头的剪切强度

随 GNSs 含量的先增高后降低, 当 GNSs 质量分数为 0.3% 时, 880°C/10 min 条件下, 接头剪切强度最大, 为 23.3 MPa。900°C/10 min 条件下, 接头的剪切强度最大值为 30.2 MPa; 接头的断裂路径与 GNSs 含量和碳纤维方向有关; 接头的剪切强度随钎焊温度的升高或保温时间的延长出现先升高后降低的趋势。当增强相质量分数为 0.3%, 碳纤维方向与钎缝平行时, 断裂发生在 C/C 复合材料上; 当碳纤维垂直于钎缝时, 断裂大部分发生在不连续的 TiC 层; 增强相在基体中的弥散分布强化了钎缝。

5 结语

Ag-Cu-Ti 活性钎料通过形成金属与陶瓷的化合物组成界面反应层, 在钎料与陶瓷之间形成新的化学键, 强化了二者之间的结合, 从而实现了陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属之间的可靠连接, 使陶瓷材料的抗氧化、耐腐蚀、耐高温、绝缘性好的特点和金属构件的性能结合, 在航空航天、机械、电子、冶金、化工、原子能反应堆等领域得到广泛应用。但随着陶瓷及复合材料的高速发展, 对钎焊性能的要求也向越来越高。研究人员对 Ag-Cu-Ti 合金通过改进加工工艺、改善接头结构和钎焊方法、添加增强基制成复合钎料等使 Ag-Cu-Ti 活性钎料的钎焊性能得到很大提升, 应用范围也越来越广泛。随着复合材料、核工业、汽车、高速铁路的等领域的快速发展、大飞机项目、载人航天、深潜器、机器人结构件等项目的深入实施, 金属基、陶瓷基和碳(石墨)基以及功能复合材料的钎焊需求日益增加, 在巨大的市场牵引下, Ag-Cu-Ti 活性钎料将有很广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 393-395.
- [2] 毛明, 黄斐. 银铜钛活性钎料制备工艺的选择[J]. 科技创新与应用 2016, 1(1): 120.
- [3] 李再久, 谢明, 张吉明, 等. AgCuTi 活性钎料及其制备方法: CN105537799A[P]. 2016-05-04.
- [4] 刘会杰, 冯吉才. 陶瓷与金属的连接方法[J]. 焊接, 1999, 6(6): 5-9.
- [5] 洗爱平. 金属-陶瓷界面的润湿和结合机制[D]. 沈阳: 沈阳金属研究所, 1991: 132-141.
- [6] XIAN A P, SI Z Y. Joining of Si₃N₄ Using Ag₅₇Cu₃₈Ti₅ brazing filler metal[J]. Journal of materials science, 1990, 25(10): 4483-4487.
- [7] HANSON W B, IRONSIDE K I, FERNIE J A. Active metal brazing of zirconia[J]. Acta materialia, 2000, 48(18/19): 4673-4676.
- [8] 裴黄崑. 钎焊法金刚石表面金属化[J]. 焊接技术, 2010, 1(1): 39.
- [9] 丁兰英. Ag-Cu-Ti/TiC 复合钎料钎焊细粒度金刚石的研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(8): 1510-1514.
- [10] Guedes A, Pinto A, Vieira M, et al. The effect of brazing temperature on the titanium/glass-ceramic bonding[J]. Journal of materials processing technology, 1999, 92(1): 102-106.
- [11] 刘多, 张丽霞, 何鹏, 等. SiO₂ 玻璃陶瓷与 TC4 钛合金的活性钎焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 117-120.
- [12] 肖冰, 徐鸿钧, 武志斌, 等. AgCuTi 合金钎焊单层立方氮化硼砂轮[J]. 焊接学报. 2002, 23(2): 29-30.
- [13] 丁文锋, 徐九华, 傅玉灿, 等. 银铜钛合金与立方氮化硼磨粒钎焊界面显微分层结构及形成机理[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 62-64.
- [14] 卢广林. 立方氮化硼仿生耐磨复合材料的制备及其研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 117-118.
- [15] 丁超, 刘全泰. 一种立方氮化硼钎焊焊料及工艺: CN106031956A[P]. 2016-10-19.
- [16] 秦优琼. C/C 复合材料与 TC4 钎焊接头 组织及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 113-114.
- [17] 张洁. SiCp/Cu 复合材料的真空钎焊[J]. 焊接学报, 2007, 28(9): 87-90.
- [18] 刘多, 牛红伟, 宋晓国, 等. 一种采用 AgCuTi 钎料连接 Cf/LAS 复合材料的方法: CN104690386A[P]. 2015-06-10.
- [19] 吴永智. 钎焊间隙对 C/SiC 复合材料与 Ti6Al4V 合金接头组织和性能的影响[J]. 焊接, 2013, 2(2): 53-55.
- [20] 宋晓国. TiAl 与 Si-3N-(4f)/Si-3N-4 复合材料的钎焊接头界面结构及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(7): 1247-1250.
- [21] 黄小丽, 林实, 肖纪美. ZrO₂ 与 40Cr 钢钎焊中的缓冲层[J]. 材料科学与工程, 1996(3): 58-61.
- [22] 胡旭. SiN₄ 陶瓷真空钎焊工艺与接头强化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 54-55.
- [23] 贺艳明. Ag-Cu-Ti 基复合钎料钎焊氮化硅陶瓷的连接工艺和机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 117-118.
- [24] 周英豪. GNSs 增强复合活性钎料钎焊 C/C 复合材料与 TC4 的工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 63-64.