

# 钎料形态对半固态加压反应钎焊接头的影响

李娟<sup>1,2</sup>, 秦庆东<sup>1,2</sup>, 龙琼<sup>1,2</sup>, 张英哲<sup>1,2</sup>

(1. 贵州理工学院 贵州省特种功能材料 2011 协同创新中心, 贵阳 550003;  
2. 贵州理工学院 贵州省轻金属材料制备技术重点实验室, 贵阳 550003)

**摘要:** 采用自制不同形态的 Al-Si-Mg-Cu-Ti 钎料对 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行了半固态加压反应钎焊, 阐述了该焊接方法的内涵, 分析了接头组织性能。结果表明, 填充粉末钎料时, 钎缝组织为铝合金基体、深灰色环状和块状 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub> 和块状 Ti; 填充片状钎料时, 钎缝组织为铝合金基体和短棒状 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub>。接头界面结合情况是影响接头性能的主要因素。填充粉末钎料时, 钎料与母材结合充分, 原子扩散通道多, 接头界面结合好, 没有明显分界线, 接头力学性能好, 抗剪强度达 92.1 MPa, 断口属于韧脆混合断口; 填充片状钎料时, 界面处有明显分界线, 接头力学性能差, 抗剪强度为 43.9 MPa, 断口为脆性断口。

**关键词:** 钎料形态; 半固态加压反应钎焊; 接头界面; 力学性能

中图分类号: TG 425+.2; TF 125

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400250

## 0 序言

70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料因具有高导热率、高比强度、高比刚度、低热膨胀系数、低密度等优点, 在军事防弹、航空航天精密仪器等领域具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。因 SiC 颗粒增强相与金属基体之间物理化学性能差异大, 该材料在焊接过程中存在焊缝金属流动性差, 易发生界面反应生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 针状脆性相、气孔、润湿性差等问题<sup>[4-6]</sup>。大量的 SiC 颗粒使得该复合材料硬度大、导电性差、熔池金属少、润湿性差, 因此电弧焊、搅拌摩擦焊、电子束等焊接方法在其应用中受到很大的限制, 钎焊、扩散焊也无法获得质量良好的接头<sup>[7-9]</sup>。为了提高 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的焊接质量, 提出了一种半固态加压反应钎焊方法, 研制了一种 Al-Si-Mg-Cu-Ti 钎料, 其熔化区间为 573~628 °C<sup>[10]</sup>。

半固态加压反应钎焊与钎焊和扩散焊既具有相似性又具有本质区别。钎焊时, 钎料呈液态, 主要依靠液态钎料在母材表面的润湿形成接头界面连接。扩散焊时, 母材/母材界面或母材/中间层界面为固态或瞬间液态, 主要依靠扩散形成接头界面连接。半固态加压反应钎焊过程中, 钎料为固液共存

状态, 填充粉末钎料时主要依靠钎料的加压液相反应烧结、润湿、扩散、反应形成焊缝金属及其与母材的连接; 填充片状钎料时, 主要依靠润湿、扩散、反应形成接头界面。

文献表明<sup>[10-12]</sup>, 超过 650 °C 时, SiC 与 Al 会反应生成针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性化合物, 超过 700 °C 时 Ti 和 Al 会反应生成 TiAl<sub>3</sub> 脆性化合物, 温度不低于 580 °C 时, Ti, Si, Al 能反应生成 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub> 有益化合物。为了避免生成 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 和 TiAl<sub>3</sub> 脆性化合物, 并获得 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub> 化合物, 焊接温度应低于钎焊温度, 高于扩散焊温度, 因而只能进行半固态焊接。同时, 采用半固态加压反应钎焊方法焊接 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料避开了其润湿性差的问题。

文献和前期的研究表明含钛铝基钎料适合于 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料半固态加压反应钎焊<sup>[10, 13-15]</sup>, 但目前还没有关于钎料形态对其接头组织性能影响的相关研究。因此文中分别填充粉末状和片状钎料对 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料进行半固态加压反应钎焊, 对其接头组织、性能和断口进行分析, 得到适用于该复合材料半固态加压反应钎焊的钎料形态, 探明决定其接头性能的关键因素, 为 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的焊接提供技术支持, 为建立半固态加压反应钎焊方法知识体系提供理论支撑。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

试验所用高体积分数铝基复合材料是采用真空浸渗技术制备的 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, 其中铝合金体积分数为 30%, SiC 颗粒为 70%, 热导率不小于 180 W/(m·K), 热膨胀系数为  $(7.00 \pm 0.25) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ( $30 \sim 100^\circ\text{C}$ ), 密度为  $(3.02 \pm 0.01) \text{ g/cm}^3$ . 所用钎料成分如表 1 所示. 粉末钎料由 Al, Si, Mg, Cu, Ti 粉末球磨而成, 片状钎料由上述粉末钎料经真空微波熔化、凝固后通过线切割而得, 组织为均匀的棒状  $\text{Ti}_7\text{Al}_5\text{Si}_{12}$  化合物和铝合金基体组成. 钎料的熔化特性如图 1 所示, 其熔化区间为 573 ~ 628 °C.

表 1 钎料成分(质量分数, %)  
Table 1 Composition of the filler metal

Si	Mg	Cu	Ti	Al
7.5 ~ 8.5	≤ 0.2	0.8 ~ 1.6	19.5 ~ 20.5	余量

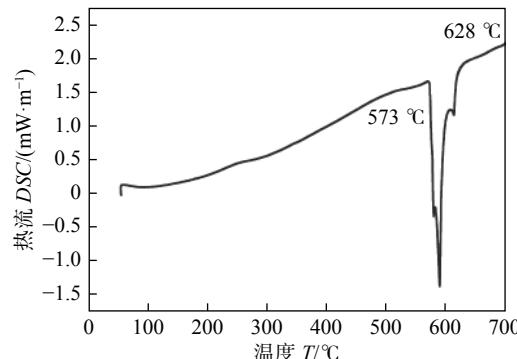


图 1 Al-Si-Mg-Cu-Ti 钎料的熔化特性

Fig. 1 Melting characteristics of Al-Si-Mg-Cu-Ti filler metal

### 1.2 半固态加压反应钎焊方法

半固态加压反应钎焊是指采用金属材料作为钎料, 将焊件和钎料加热到半固态温度, 施加压力, 并进行保温, 通过烧结、液相润湿、原子扩散和化学反应等过程形成焊缝金属及其与母材的连接. 填充粉末钎料时, 半固态加压反应钎焊的实质是粉末钎料的加压液相反应烧结. 填充片状钎料时, 其实质是半固态加压反应扩散. 半固态加压反应钎焊与钎焊和扩散焊的区别如表 2 所示.

表 2 半固态加压反应钎焊与钎焊和扩散焊的异同

Table 2 Similarities and differences between semi-solid pressure reactive brazing, brazing and diffusion welding

类别	相似点	区别		
		半固态加压反应钎焊	钎焊	瞬间液相扩散焊(TLP)
冶金过程		加压液相反应烧结、润湿、扩散、反应	润湿、扩散	扩散、反应
压力		较大压力, 增大压力有利于形成钎缝及其与母材的连接	无压或微压	允许使用较低的扩散压力, 压力过大将液相挤出
钎料或中间层形态	都在真空炉内加热、保温、加压	粉末最佳, 也可为箔状	粉末、箔状、丝状等	箔状、涂层
液相的获得方式		钎料自身局部区域共晶反应或熔化	钎料熔化	异种母材之间或中间层与母材之间的共晶反应
液相的存在形式		呈不规则球状分布在整个焊缝区域	整个钎缝区域	以连续液相薄膜存在于接头界面处
液相的作用		提高扩散焊速度, 促进化学反应, 使钎料中粉末发生重排, 提高钎缝致密度	填充整个钎缝, 连接两侧母材	填充整个接头间隙, 连接两侧母材或母材与中间层

半固态加压反应钎焊的具体步骤如下.

(1) 根据母材的性质设计和制备钎料, 对其进行 DSC 测试, 测得其产生液相的最低温度为  $a$  °C, 其完全熔化的温度为  $b$  °C.

(2) 打磨清洗待焊试样, 冷风吹干备用.

(3) 在待焊试样表面之间填充配制好的钎料, 放入真空热压炉内进行合理的装配.

(4) 抽真空, 设定参数, 所需真空度与母材和钎料成分相关, 然后加热加压, 目标温度为  $a \sim b$  °C 之

间的某一温度, 达到目标温度后进行保温.

(5) 随炉冷却, 获得接头.

### 1.3 试验方法

焊前, 先采用水磨机打磨复合材料试块表面, 再用 280 号砂纸继续打磨, 最后用丙酮超声清洗后, 冷风吹干备用. 半固态加压反应钎焊时, 将清洗好的试块置于真空炉内操作台上, 在试样上铺上自制的 Al-Si-Mg-Cu-Ti 钎料, 在其上再放置一块处理好的较小的试块, 如图 2 所示. 焊接温度为 600 °C,

保温时间为1.5 h, 压力为10 MPa。所得接头采用线切割方式沿垂直于焊缝的方向进行切割, 一半用于金相观察, 另一半用于剪切试验, 采用万能试验机进行剪切试验。对金相试样进行研磨、抛光, 采用0.5%的HF水溶液腐蚀, 采用装配有EDS的FEI Quanta 250F场发射环境扫描电镜观察焊缝组织。

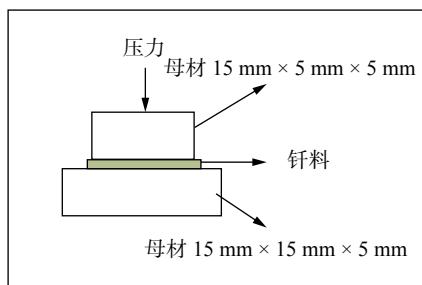


图2 半固态加压反应钎焊装配示意图

Fig. 2 Assembly schematic of the samples for semisolid pressure reaction brazing

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 对钎缝组织的影响

对填充不同形态钎料的半固态加压反应钎焊接头进行了钎缝组织观察, 如图3所示, 对图中各点进行了能谱分析, 结果如表3所示。图3a为填充粉末钎料所得接头组织, 钎缝致密, 没有明显缺陷。钎缝中深灰色环状组织1为 $Ti_7Al_5Si_{12}$ , 被1包围的浅灰色块状组织2为Ti, 深灰色块状组织3为 $Ti_7Al_5Si_{12}$ , 这些组织分布在铝合金基体组织4上。环形 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 尺寸较大, 约60 μm, 块状Ti约36 μm, 块状 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 尺寸较小。图3b为填充片状钎料所得接头组织, 孔隙缺陷较多。钎缝主要由长度约为18 μm的短棒状 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 和铝合金基体组成。

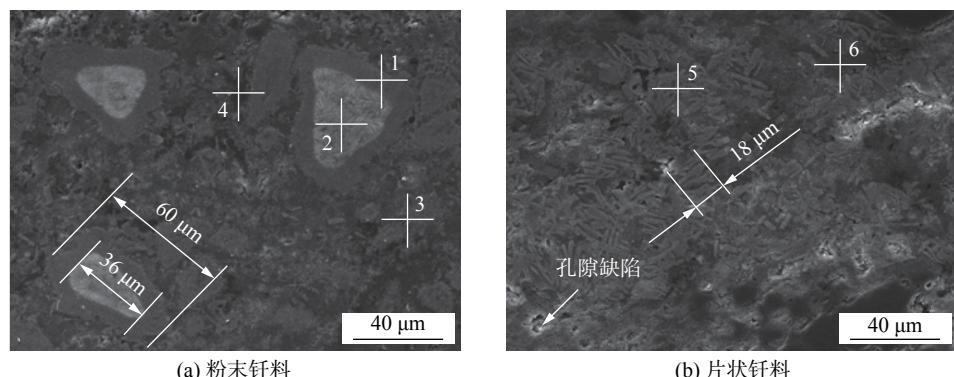


图3 填充不同形态钎料所得接头钎缝组织

Fig. 3 Microstructure of the joints filled with different forms of filler metal

表3 图3中各点EDS分析结果(质量分数, %)

Table 3 EDS analysis results of points in Fig.3

位置	Ti	Si	Al	Mg	相
1	50.32	40.07	9.55	0.08	$Ti_7Al_5Si_{12}$
2	96.17	—	3.8	0.03	Ti
3	49.19	37.85	12.96	—	$Ti_7Al_5Si_{12}$
4	0.44	—	99.56	—	Al
5	50.86	37.20	11.93	—	$Ti_7Al_5Si_{12}$
6	0.85	2.85	93.49	2.80	Al

由此可见, 填充粉末钎料时, 钎缝致密度高, 缺陷少, 钎缝中的 $Ti_7Al_5Si_{12}$ 为尺寸较大的环状和块状, 存在块状Ti导致钎缝成分不均匀; 填充片状钎料时, 钎缝中孔隙缺陷较多, 没有Ti存在, 成分相

对较均匀,  $Ti_7Al_5Si_{12}$ 数量多, 呈尺寸相对较小的短棒状。填充不同形态钎料所得接头存在巨大的差异, 主要是由于受热过程不同, 粉末钎料只经历了焊接的热过程, 而片状钎料先后经历了制备和焊接两个热过程, 两种接头组织各有优劣。

### 2.2 对接头界面的影响

对填充不同形态钎料的70% $SiC_p/Al$ 复合材料半固态加压反应钎焊接头界面进行了观察, 结果如图4所示, 其中图4a, 4b是钎料为粉末状时所得接头界面形貌, 钎料与复合材料之间结合紧密, 没有明显缺陷, 不具有明显分界线; 图4c, 4d是钎料为片状时所得接头界面形貌, 钎料与复合材料之间结合紧密, 没有明显缺陷, 但有明显分界线。

填充粉末钎料时, 钎料与母材之间浑然一体,

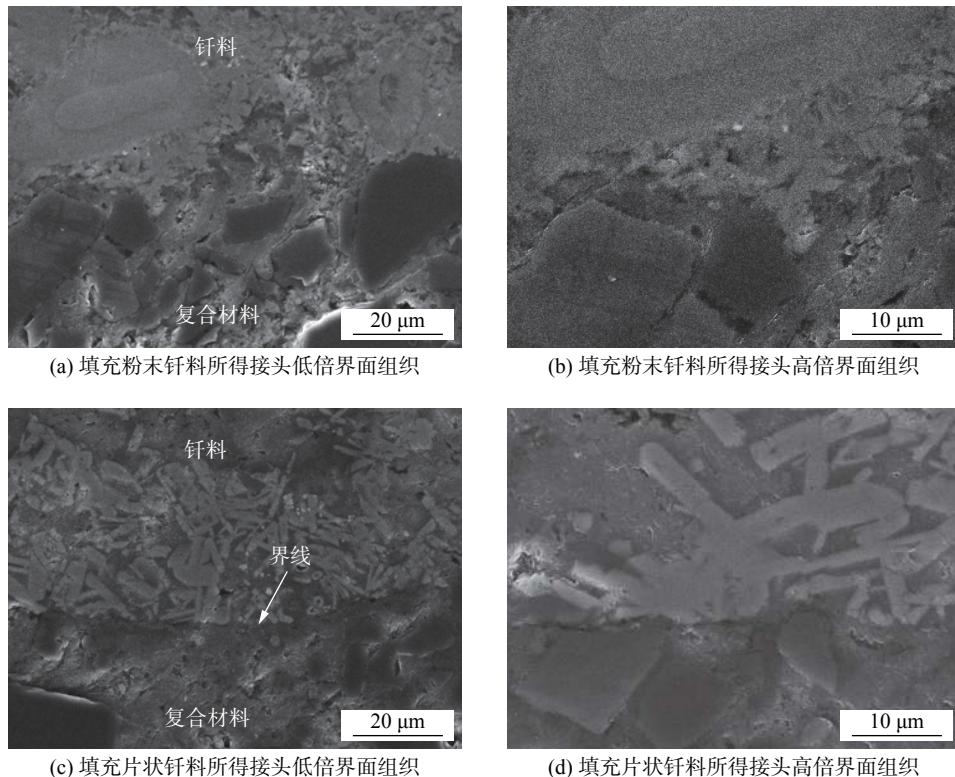


图 4 填充不同形态钎料所得接头界面组织

Fig. 4 Interfaces microstructure of joints filled with different forms of filler metal

无明显分界线。这是因为一方面固体表面总是存在一定的粗糙度, 存在一定程度的凹凸不平, 粉末钎料在压力作用下变形填充能力强, 所以填充粉末钎料时, 复合材料表面与钎料接触充分, 原子扩散通道多, 界面处原子需要跨越的距离小, 原子扩散更容易; 另一方面在填充粉末钎料的半固态加压反应钎焊过程中, 钎缝中和接头界面处均发生剧烈的化学反应, 生成大量的  $Ti_7Al_5Si_{12}$ , 此过程消耗了大量的 Si 元素, 使得母材中大量的 Si 原子向钎缝中扩散, 极大的加剧了界面处的原子扩散。

填充片状钎料时, 钎料与母材之间有明显分界线。这是因为一方面在半固态下片状钎料变形填充能力较差, 且  $SiC_p/Al$  复合材料表面  $SiC$  颗粒多, 抗热压变形能力强, 即使在压力作用下, 钎料与母材之间的接触也不够充分, 原子扩散通道相对较少, 界面处原子需要跨越的距离相对较大, 原子扩散相对较难; 另一方面填充片状钎料时, 在钎料制备过程中就已经生成  $Ti_7Al_5Si_{12}$ , 因此焊接过程中不会发生剧烈的化学反应以加速原子扩散。

总而言之, 无论填充粉末钎料还是片状钎料,  $70\% SiC_p/Al$  复合材料半固态加压反应钎焊所得接头界面均没有缺陷。填充粉末钎料时, 接头界面处原子扩散剧烈, 钎料与母材之间浑然一体, 不具有

明显分界线; 填充片状钎料时, 钎料与母材之间具有明显分界线。由此可知, 填充粉末钎料的半固态加压反应钎焊接头界面情况明显优于填充片状钎料的接头界面。

### 2.3 对接头力学性能的影响

对填充不同形态钎料的  $70\% SiC_p/Al$  复合材料半固态加压反应钎焊接头进行了剪切试验, 结果如图 5 所示, 由图可知, 填充粉末钎料所得接头强度明显优于填充片状钎料的接头, 填充粉末钎料时, 接头抗剪强度达 92.1 MPa, 填充片状钎料时, 抗剪强度为 43.9 MPa。结合前面钎缝组织和接头界面分析

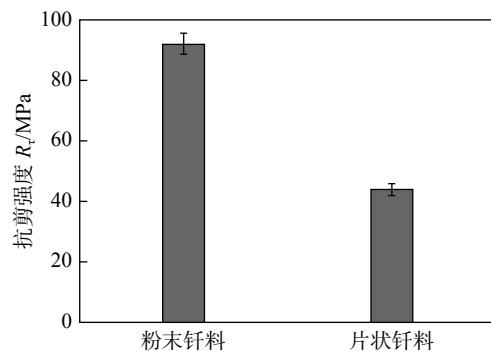


图 5 填充不同形态钎料所得接头的抗剪强度

Fig. 5 Shear strength of the joints filled with different forms of filler metal

结果可知,接头界面结合情况是影响 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料半固态加压反应钎焊接头强度的关键因素.

#### 2.4 对断口的影响

对接头进行了断口分析,结果如图 6 所示. 图 6a, 6b 是填充粉末钎料所得接头断口形貌, 断裂发生在钎料与复合材料的结合界面, 断面不平整, 有大量撕裂痕, 少量区域有韧窝, 显示韧性断裂特征, 局部区域呈光滑颗粒状, 具有脆性断裂特征, 可见填充粉末钎料 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料半固态加压反应钎焊接头断口属于韧脆混合断口. 图 6c, 6d 是填充片状钎料所得接头断口形貌, 断裂也发生在

钎料与复合材料的结合界面, 断面平整, 沿晶界具有光滑颗粒状形貌, 这主要由于是片状钎料在制备过程中发生了晶界偏析而使得晶界成分发生变化, 熔点降低, 在随后的焊接过程中, 这些区域发生了过热, 因而断口呈现出沿晶光滑颗粒的形貌, 接头断口整体具有脆性断裂特征, 可见填充片状钎料的 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料半固态加压反应钎焊接头断口属于脆性断口. 填充两种形态的钎料所得接头断口差异较大, 这主要是由于填充片状钎料所得接头界面扩散不够充分, 结合强度较低, 界面周边还未发生塑性变形断裂既已发生.

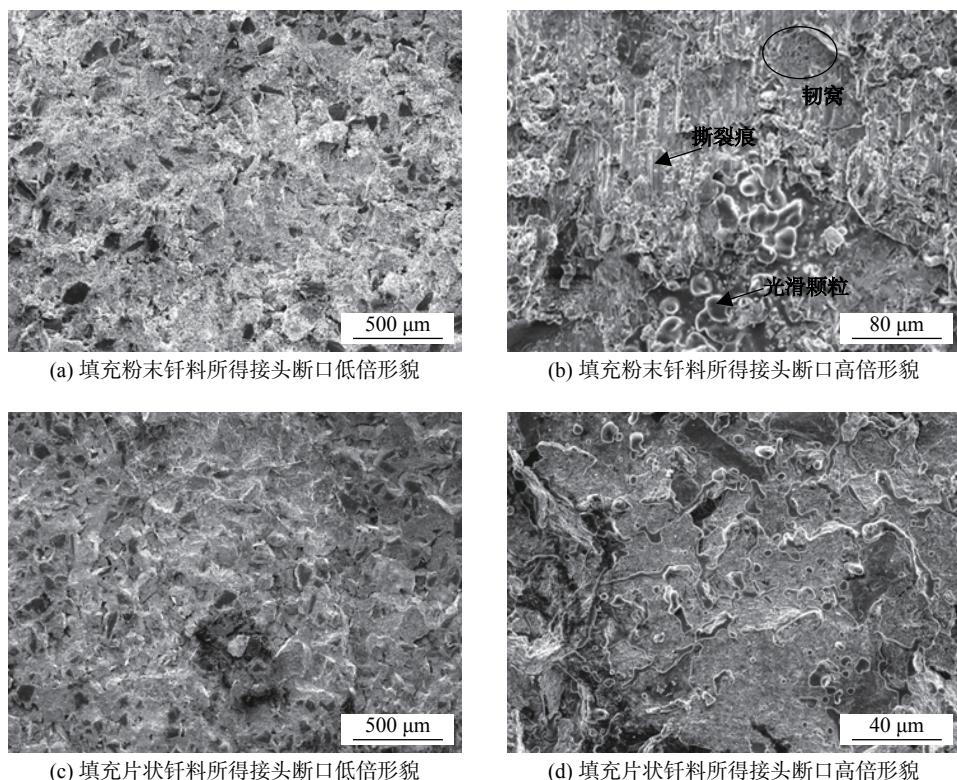


图 6 填充不同形貌钎料所得接头断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of the joint filled with different forms of filler metal

综上所述, 填充不同形态钎料对 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料半固态加压反应钎焊接头钎缝组织、接头界面、力学性能及断口类型均有影响, 其接头强度主要取决于接头界面结合情况, 填充粉末钎料的接头界面相比填充片状钎料时界面结合更好, 剪切强度更高, 断口形貌也更好. 由此可见粉末钎料更适合半固态加压反应钎焊.

### 3 结 论

(1) 填充粉末钎料时, 钎缝致密度高, 缺陷少,

由环状和块状 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub>、块状 Ti 和 Al 基体组成, 成分不均匀; 填充片状钎料时, 钎缝缺陷多, 由短棒状 Ti<sub>7</sub>Al<sub>5</sub>Si<sub>12</sub> 和 Al 基体组成, 成分相对均匀.

(2) 填充粉末钎料时, 钎料与母材接触充分, 原子扩散通道多, 界面结合好, 无明显分界线; 填充片状钎料时, 钎料与母材之间有明显分界线.

(3) 接头强度主要取决于接头界面结合情况. 填充粉末钎料所得接头抗剪强度为 92.1 MPa, 断口属于韧脆混合断口; 填充片状钎料所得接头抗剪强度为 43.9 MPa, 断口属于脆性断口. 粉末钎料更适合半固态加压反应钎焊.

## 参考文献:

- [1] Cui Y, Jin T Z, Cao L G, et al. Aging behavior of high volume fraction SiCp/Al composites fabricated by pressureless infiltration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 233 – 239.
- [2] 高 增, 冯建广, 王 鹏, 等. 钎焊温度对 SiCp/Al 复合材料焊接接头组织与性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(05): 57 – 61.  
Gao Zeng, Feng Jianguang, Wang Peng, et al. Effect of brazing temperature on microstructure and performance of brazed joint of SiC<sub>p</sub>/Al composite[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(05): 57 – 61.
- [3] Zhu C M, Gu P, Wu Y Y, et al. Surface roughness prediction model of SiCp/Al composite in grinding[J]. International Journal of Mechanical Science, 2019, 155: 98 – 109.
- [4] Zhang X Z, Wu X L, Liu G W, et al. Wetting of molten Sn-3.5Ag-0.5Cu on Ni-P(-SiC) coatings deposited on high volume fraction SiC/Al composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(9): 1784 – 1792.
- [5] Zhang X X, Wu L H, Andrä H, et al. Effects of welding speed on the multiscale residual stresses in friction stir welded metal matrix composites[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(5): 824 – 832.
- [6] Kang Y Q, Shen H R, Fu Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the SiP/Zn-Al composite joints by ultrasonic-assisted soldering in air[J]. China Welding, 2018, 27(2): 39 – 44.
- [7] Huang Z Y, Du H Q, Liu L, et al. Ultrasonic effect mechanism on transient liquid phase bonding joints of SiCp reinforced Mg metal matrix composites using Zn-Al-Zn multi-interlayer[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 43: 101 – 109.
- [8] Cui W, Li S Q, Yan J C, et al. Microstructure and mechanical performance of composite joints of sapphire by ultrasonic -assisted brazing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 1 – 6.
- [9] Zhang X Z, Zhao S T, Liu G W, et al. Review on brazing of high volume fraction SiCp/Al composites for electronic packaging applications[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(10): 2812 – 2819.
- [10] 李 娟, 王克鸿. 采用 Al-Si-Ti-Cu-In 钎焊 70% SiCp/Al 复合材料工艺研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 59 – 66.  
Li Juan, Wang Kehong. Study on vacuum brazing of 70% SiCp/Al composites using Al-Si-Ti-Cu-In filler metal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 59 – 66.
- [11] 陈晓光. SiC 陶瓷与 Ti-6Al-4V 合金超声波辅助钎焊的润湿结合机制及工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [12] Lee J C, Ahn J P, Shim J H, et al. Control of the interface in SiC/Al composites[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(8): 895 – 900.
- [13] Li J, Wang K H, Zhang D K, et al. Mechanism of interfacial reaction between Ti and Al-ceramic[J]. Materials and Design, 2016, 105: 223 – 233.
- [14] 李 娟, 王克鸿, 张德库. 合金元素对 70% SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料钎料性能的影响 [J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 73 – 76.  
Li Juan, Wang Kehong, Zhang Deku. Effect of alloying elements on filler metal for brazing of 70% SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 73 – 76.
- [15] Zhang G F, Cai J, Chen B Q, et al. Availability of in-situ reinforced active-transient liquid phase bond with good wettability for 70 vol.% SiC<sub>p</sub>/A356 composite using Al-Mg-Ga-Ti interlayer[J]. Materials and Design, 2016, 110: 653 – 662.

**第一作者简介:** 李娟, 女, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要从事新材料焊接和焊接新方法方面的科研和教学工作。发表论文 6 篇。Email: [lijuanashenghuo@163.com](mailto:lijuanashenghuo@163.com)