

# 采用复合钎料加压钎焊 70%SiCp/Al 复合材料

张德库, 王恒, 康路路, 孙彪

(南京理工大学, 南京, 210094)

**摘要:** 采用机械球磨的方法制备了 Al-Si-xSiC( $x$  为体积分数) 复合钎料, 采用复合钎料实现了 70%SiCp/Al 复合材料的加压钎焊连接. 利用 SEM 和 EDS 确定了钎缝是由  $\alpha$ -Al, Si, SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等相组成. 结果表明, 在压力作用下 SiC 颗粒被固定在钎缝区而使得钎缝区的组织类似于复合材料, 钎缝中一定的 SiC 颗粒可以缓解母材与金属钎料之间的热膨胀系数之差, 从而减小了焊接残余应力, 可以提高接头的强度, 而钎焊施加一定的压力则可促进钎料与 SiC 颗粒的润湿性. 工艺适当时, 接头最高强度达到 125.7 MPa.

**关键词:** SiCp/6061Al 复合材料; 钎焊; 复合钎料; 加压

**中图分类号:** TG 454

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20190322003

## 0 序言

颗粒增强铝基复合材料具备较高的比强度、比硬度及耐磨性, 在航空航天、电子及交通运输等领域有重要的应用<sup>[1-6]</sup>. 由于该材料中陶瓷增强相的体积分数比较高, 与基体的物理化学性能差别大, 其焊接性很差, 成为制约该材料广泛运用的一大障碍. 钎焊时由于母材不熔化, 大大减弱了 SiC 颗粒与铝基体之间的反应, 从而成为一种常用的铝基复合材料的焊接方法. 由于常规钎料与母材之间线膨胀系数 (CET) 的错配使得接头中存在较高的残余应力, 导致获得的接头的强度比较低, 影响其使用性. 目前尽管已有一些专家针对铝基复合材料的钎料进行了一些研究<sup>[7]</sup>, 但大多集中在低体积分数铝基复合材料 (10%~55%), 对于高体积分数铝基复合材料的钎焊工艺研究得较少. 高体积分数铝基复合材料由于钎料与基体的线膨胀系数差异更大, 钎料的润湿性、流动性更差, 一般连接后的接头界面处会出现较高的残余应力, 导致接头强度大幅降低<sup>[8]</sup>. 为了缓解母材与钎料合金之间 CET 错配, 可以在钎料合金中加入一些低膨胀系数高温合金、陶瓷颗粒或纤维<sup>[9-11]</sup>, 相应地可以提高接头的强度.

文中采用在 Al-Si 钎料中加入一定的 SiC 颗粒的复合钎料钎焊连接 70%SiCp/Al 复合材料; 同时,

为了提高复合钎料与母材之间的润湿性, 在钎焊的过程中施加了一定的压力, 在此基础上研究接头内 SiC 含量对接头组织和性能的影响.

## 1 试验方法

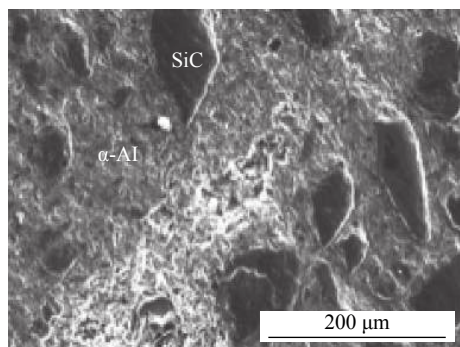
试验所采用的母材是 70%SiCp/6061Al 复合材料. 试验时用线切割的方法把母材加工成  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  和  $15\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的试样, 钎焊接头为 T 形接头. 钎焊时采用的钎料为自制的复合钎料, 其制备过程为: 将 Al 粉 (纯度不小于 99.0%)、Si 粉 (纯度不小于 99.0%) 按照共晶比例配置, 并且在其中加入一定的 SiC 颗粒, 放入球磨机中, 依靠球磨机的均匀搅拌混合成 Al-Si-xSiC( $x$  为体积分数) 复合钎料, 其中 SiC 颗粒的平均粒度为  $2\text{ }\mu\text{m}$ , 然后使用有机溶剂将复合钎料调制成膏状, 均匀的置于母材之间, 放入真空炉中. 钎焊温度为  $620\text{ }^\circ\text{C}$ , 保温时间为 30 min, 压力分别设定为 0, 1, 2, 3 MPa, 采用 SiC 颗粒体积分数分别为 0%, 5%, 10%, 15% 的复合钎料, 在真空度不低于  $3.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$  时进行加压钎焊连接试验.

采用扫描电镜 (SEM, FEI-Quanta-250-FEG) 分析焊缝的组织及接头断口形貌; 采用 X 射线衍射仪 (XRD, bruker-AXSD8-advance) 分析焊缝及断口中的组织类型; 利用型号为 SANSMT5105 的万能试验机来进行接头的剪切强度试验 (压头的运动速度设为  $0.5\text{ mm/s}$ ).

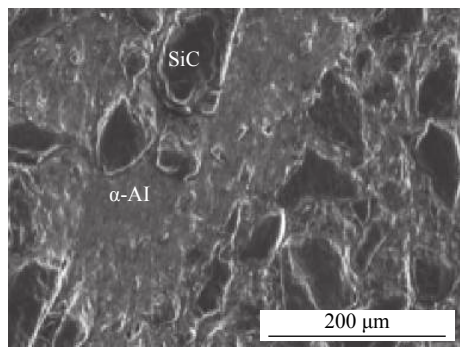
## 2 试验结果与分析

### 2.1 接头显微组织分析

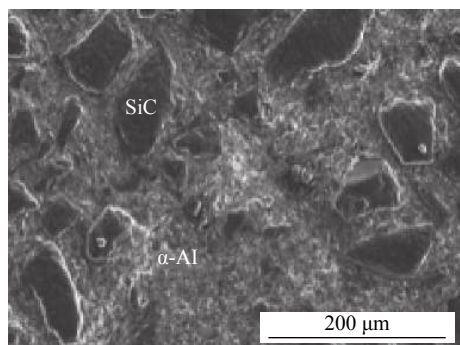
图 1 为采用复合钎料在钎焊温度为 620 ℃、压



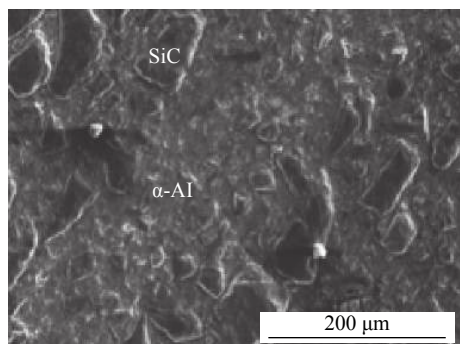
(a) Al-Si 共晶钎料



(b) Al-Si-5%SiC 复合钎料



(c) Al-Si-10%SiC 复合钎料



(d) Al-Si-15%SiC 复合钎料

图 1 复合钎料加压钎焊的接头形貌

Fig. 1 Joint microstructures of pressure brazing with composite solder. (a) Al-Si; (b) Al-Si-5%SiC; (c) Al-Si-10%SiC; (d) Al-Si-15%SiC

力为 2 MPa 时钎焊接头的低倍组织, 由图可知采用加压钎焊得到的钎缝区的组织类似于复合材料, 其中  $\alpha$ -Al 为基体, 而 SiC 为增强相, 并且随着复合钎料中 SiC 颗粒体积分数的增加, 钎缝区中的增强相的含量也逐渐提高. 图 2 为采用 Al-Si-5%SiC 复合钎料在钎焊温度 620 ℃、压力 2 MPa 时钎焊接头微观形貌. 由图可知钎缝组织致密, 未发现气孔、孔洞和微裂纹等缺陷, 未发现 SiC 颗粒偏聚现象.

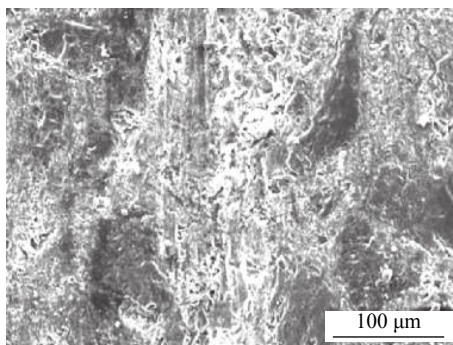


图 2 Al-Si-5%SiC 复合钎料加压钎焊接头形貌

Fig. 2 Joint microstructures of pressure brazing with Al-Si-5% SiC composite solder

试验中采用的钎料为 Al-Si-5%SiC 复合钎料, 在钎料熔化时施加了一定的压力, 由于母材与钎料之间 Si 元素的浓度存在着一定的差距, Si 元素会在压力和温度的作用下向母材中扩散, 这就导致钎缝区 Si 元素浓度含量相对降低, 此时钎缝区的铝硅合金是亚共晶合金, 冷却凝固时先析出铝的固溶体, 然后析出共晶的铝硅合金, 并且在压力作用下液态钎料可以润湿 SiC 颗粒, SiC 颗粒与钎料之间产生了一定的作用而被固定在钎缝中, 图 3 为该区域元素的扩散情况, 钎缝区 Al 元素和 Si 元素发生了明显的扩散并且交替变化. 为了更准确的确定接头内的反应产物, 对接头剪切后的断口表面进行了 X 射线衍射分析, 其结果如图 4 所示. 结果表明, 钎缝中含有  $\alpha$ -Al, Si, SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等相, 其中的  $\alpha$ -Al 相

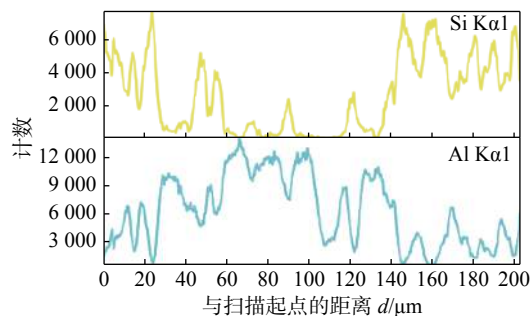


图 3 Al-Si-5%SiC 复合钎料钎缝元素扩散

Fig. 3 Diffusion of elements in seam with Al-Si-5% SiC composite solder



和 Si 相来自于母材和钎料; SiC 来自于复合钎料, 接头中出现了一定量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相, 虽然在焊接前已对母材进行去膜处理, 但由于铝对氧有很强的亲和力, 没有办法完全去除, 在钎焊过程中由于施加了一定的压力, 在温度较高时  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜会发生破碎, 有一部分的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  会被挤到钎缝中, 所以在钎缝中出现了一定量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相. 另外, 由于试验中所用的铝粉纯度为 99%, 可能存在部分氧化杂质, 也是造成钎缝中检测出  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的原因.

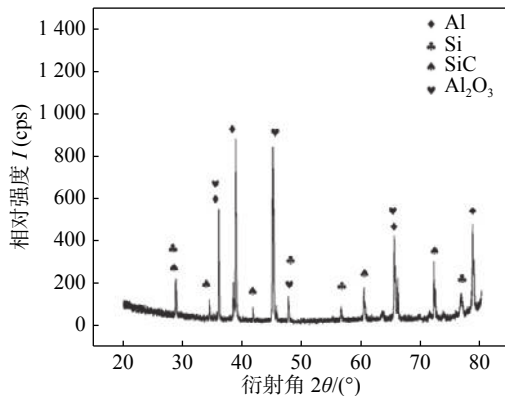


图 4 Al-Si-5%SiC 复合钎料钎缝区的 X 射线衍射图  
Fig. 4 X-ray diffraction pattern of the seam zone with Al-Si-5% SiC composite solder

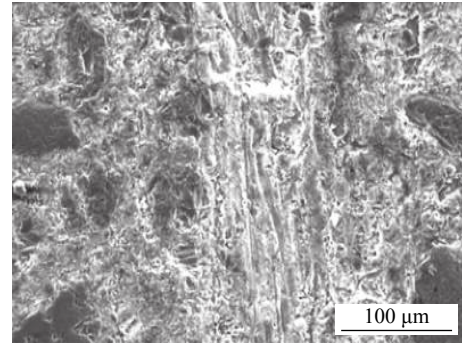
## 2.2 SiC 颗粒体积分数对界面结构的影响

在 Al-Si 共晶钎料中加入一定量的 SiC 颗粒后, 加压时改善了 Al-Si 共晶钎料与 SiC 颗粒的润湿性, 钎缝区颗粒的存在将会为  $\alpha$ -Al 相和 Si 相的形核提供大量的靠背, 大大减小了凝固过程中的形核功, 细化了晶粒, 钎缝区由原来的片层状变为细小的颗粒状, 如图 5 所示.

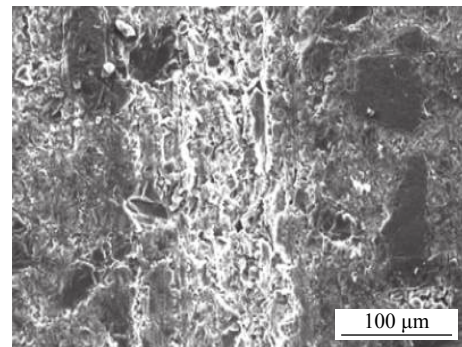
## 2.3 工艺参数对接头强度的影响

### 2.3.1 SiC 颗粒体积分数对接头性能的影响

接头抗剪强度与复合钎料中 SiC 颗粒体积分数的关系如图 6 所示. 由图 6 可知直接钎焊时随着复合钎料中 SiC 颗粒体积分数的增加, 接头强度越来越低, 并且 Al-Si 共晶钎料直接钎焊的抗剪强度也只有 23.3 MPa, 远远低于母材的抗剪强度. 试验的母材为高体积分数的 SiCp/6061Al 复合材料, 传统的 Al-Si 共晶钎料与 SiC 颗粒的润湿性很差, 并且虽然在焊接开始时已对母材进行了去膜处理, 但在母材的表面还会有层致密的氧化膜, 所以在钎焊过程中钎料熔化时与母材的结合较差, 此时由于 SiC 颗粒的加入, 钎料的流动性变差, 在钎缝中的 SiC 颗粒周围中出现了孔洞, 并且随着 SiC 颗粒体积分数的增加, 这种缺陷呈增加趋势, 故而强度越



(a) Al-Si 共晶钎料



(b) Al-Si-5%SiC 复合钎料

图 5 压力为 2 MPa 时接头形貌

Fig. 5 Joint microstructure when the pressure is 2 MPa. (a) Al-Si; (b) Al-Si-5%SiC

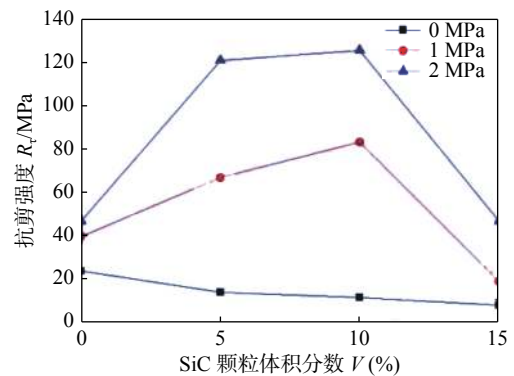


图 6 SiC 颗粒体积分数对接头强度的影响

Fig. 6 Effect of SiC particle volume fraction on the joint strengths

来越低. 焊接接头的微观组织如图 7 所示, 钎料并没有润湿 SiC 颗粒, SiC 颗粒的周围存在着明显的孔洞, 导致整个钎焊接头的强度很低.

当钎焊时施加一定的压力时随着钎料中 SiC 颗粒体积分数的增加, 接头抗剪强度逐渐增大, 体积分数为 10% 时达到最大值, 之后随着 SiC 颗粒体积分数的增加, 强度又开始下降. 这是由于施加一定的压力后, 提高了钎料的致密性, 钎料的熔化更加充分, 并且加压可以提高 SiC 颗粒和钎料的润湿性, 在钎料熔化的同时, 压力会挤走部分钎料, 使 SiC 颗粒固定在钎缝区, 钎焊完成后钎缝区的组织

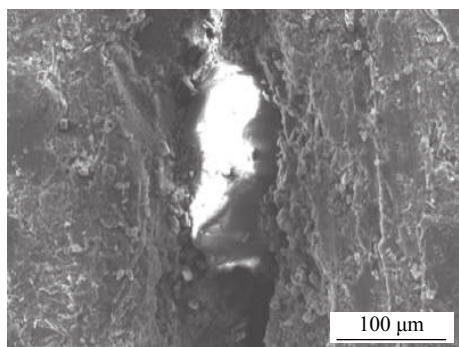


图 7 Al-Si-5%SiC 复合钎料钎焊接头形貌

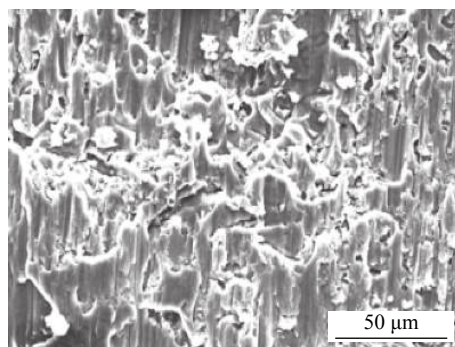
Fig. 7 Joint microstructure in seam with Al-Si-5% SiC composite solder

类似于复合材料,这种复合组织可以减少连接界面处母材和钎料之间的热膨胀系数错配,缓解了接头内应力集中程度,在一定范围内可以提高接头的强度<sup>[12]</sup>.但当复合钎料中的 SiC 颗粒体积分数达到 15%,在压力的作用下会挤走部分液态钎料,此时钎缝区内 SiC 颗粒体积分数已经不止 15%,钎缝区分布着大量的陶瓷颗粒会降低钎缝组织致密性(这点可以从断口分析中得到证实),从而使接头的强度迅速下降.

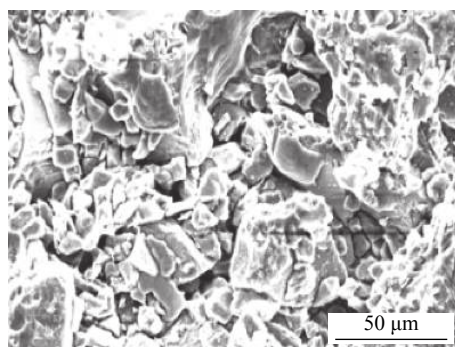
当采用 Al-Si 及 Al-Si-5%SiC, Al-Si-10%SiC 复合钎料时,得到的接头断裂位置均在靠近母材的近缝区,说明此种情况下 SiC 颗粒与 Al-Si 钎料的结合比较好,在这种模式下,一般都能获得比较理想的接头.如图 8 所示,从图可以发现,当复合钎料中 SiC 颗粒体积分数较低时得到接头的断口处有明显的撕裂痕迹,留下涟漪状的撕裂棱,塑性变形较大,界面结合比较紧密,断裂偏向为韧性断裂;而采用 Al-Si-15%SiC 复合钎料时,断裂主要发生在钎料层,断口面上存在着大量的 SiC 颗粒,在其周围存在着比较多的孔洞,此种情况下获得的接头性能较差.

### 2.3.2 压力对接头性能的影响

由图 6 还可以得出,随着压力的增加,钎焊接



(a) Al-Si-10%SiC 复合钎料



(b) Al-Si-15%SiC 复合钎料

图 8 Al-Si-SiC 复合钎料加压钎焊断口形貌

Fig. 8 Fractures of pressure brazing with Al-Si-SiC composite solder. (a) Al-Si-10%SiC; (b) Al-Si-15%SiC

头的强度在增加,究其原因主要是试验采用的是粉状钎料,成分不是很均匀,并且致密性比较差,而施加一定的压力后,提高了钎料的致密性,钎料的熔化更加充分,促进了钎料的流动性,有助于改善钎料和 SiC 颗粒的润湿性.另一方面,在钎料熔化的同时,压力会挤走部分钎料,在一定程度上提高钎缝中 SiC 颗粒的体积分数,使钎缝与母材的热膨胀系数差异降低,从而可以降低接头内部的残余应力<sup>[13]</sup>,提高接头的强度,但当压力过大时,接头的变形就比较严重,甚至在母材上出现了裂纹.

图 9 为不同压力下接头的低倍组织,从图中发现,随着压力的增加,钎缝的厚度越来越小,组织更

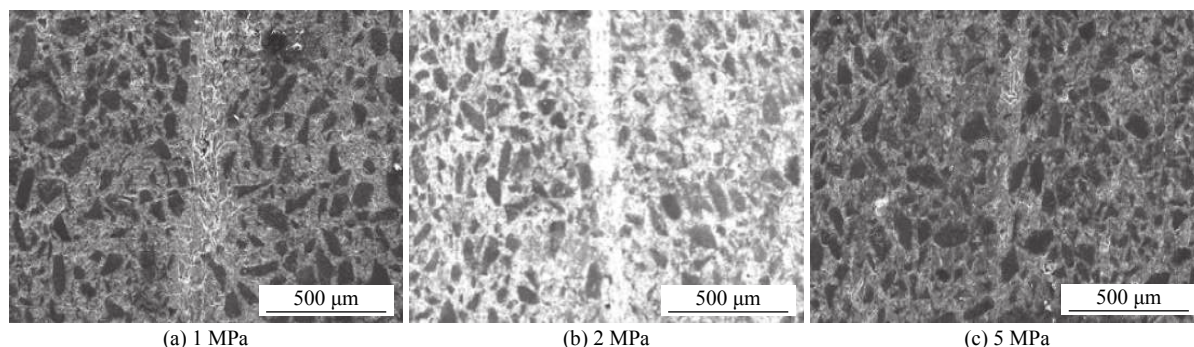


图 9 不同压力下接头的宏观形貌

Fig. 9 Macrostructure of joint with different pressures. (a) 1 MPa; (b) 2 MPa; (c) 5 MPa



加致密,但即使在 5 MPa 压力下,钎缝也不能完全消失,原因可能在于钎焊前已将母材表面的一层纯铝磨掉,在铝基体表面裸露出一些 SiC 颗粒,而这些颗粒与基体之间会存在一些小孔,由于这些小孔的存在,使得液态钎料在压力作用下往出流时受到了一定的阻碍,因此即使是在大压力作用下也会有一些钎料存在于钎缝中,故而出现了上述现象。

### 3 结论

(1) 采用 Al-Si-XSiC 复合钎料加压钎焊连接 70%SiCp/6061Al 复合材料,试验表明, SiC 颗粒与 Al-Si 组织结合紧密,未与钎料基体进行反应,在钎缝中分布比较均匀,形成了局部金属基复合材料组织,从而有利于提高钎缝的综合性能。

(2) 对钎缝进行 XRD 分析时发现钎缝是由  $\alpha$ -Al, Si, SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等相组成,其中的  $\alpha$ -Al 相和 Si 相来自于母材和钎料,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相由钎料及母材中 Al 元素氧化生成, SiC 来自于复合钎料。

(3) SiC 颗粒的体积分数、压力是影响接头强度的重要因素,复合钎料中一定的 SiC 颗粒可以缓解母材与金属钎料之间的热膨胀系数之差,从而减小了焊接残余应力,而一定的压力则可以促进钎料与 SiC 颗粒的润湿性。

### 参考文献

- [1] Çevik E, Sun Y, Ahlatci H, *et al.* Effect of magnesium additions on composites with Al and Al-12% Si matrices strengthened with B4C and prepared by infiltration under pressure[J]. *Metal Science & Heat Treatment*, 2016, 58(5-6): 1-5.
- [2] Yolshina L. Novel aluminum-graphene and aluminum-graphite metallic composite materials: synthesis and properties[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 663: 449-459.
- [3] Sharma V, Prakash U, Kumar B V M. Surface composites by friction stir processing: a review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 224: 117-134.
- [4] Zhang D, Zhan Z. Strengthening effect of graphene derivatives in copper matrix composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 654: 226-233.
- [5] Springer H, Aparicio Fernandez R, Duarte M J, *et al.* Microstructure refinement for high modulus in-situ metal matrix composite steels via controlled solidification of the system Fe-TiB2[J]. *Acta Materialia*, 2015, 96: 47-56.
- [6] Reeb A, Merzkirch M, Schulze V, *et al.* Heat treatment during composite extruded spring steel wire reinforced EN AW-6082[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 1-8.
- [7] 李娟,王克鸿,张德库.合金元素对 70%SiCp/Al 复合材料钎料性能的影响[J].*焊接学报*, 2015, 36(10): 73-76, 104.  
Li Juan, Wang Kehong, Zhang Deku. Effect of alloying elements on the 70% SiCp/Al composites solder properties[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(10): 73-76, 104.
- [8] 娄菊红,杨延清,原梅妮,等.金属基复合材料界面残余应力的研究进展[J].*材料导报*, 2009, 23(19): 75-78.  
Lou Juhong, Yang Yanqing, Yuan Meini, *et al.* Research progress on interfacial residual stress of metal matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2009, 23(19): 75-78.
- [9] 邵枫,郭福,申灏,等.纳米 Ag 颗粒增强复合钎料蠕变性能的研究[J].*稀有金属材料与工程*, 2010, 39(6): 1005-1008.  
Tai Feng, Guo Fu, Shen Hao, *et al.* Study on creep properties of Ag nanoparticles reinforced Sn-Cu composite solder[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(6): 1005-1008.
- [10] 杨俊,吴爱萍,邹贵生,等. TiN 改性钎料连接 Si3N4 陶瓷的接头高温性能[J].*焊接学报*, 2006, 27(7): 18-20.  
Yang Jun, Wu Aiping, Zou Guisheng, *et al.* The high temperature performance of TiN modified solder joint connection Si3N4 ceramic[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(7): 18-20.
- [11] Zhu M, Chung D D L. Improving the strength of brazed joints to alumina by adding carbon fibres[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(20): 5321-5333.
- [12] 宋晓国,曹健,陈海燕,等.颗粒增强复合钎料钎焊 TiAl 合金接头界面结构及性能[J].*焊接学报*, 2013, 34(7): 13-16.  
Song Xiaoguo, Cao Jian, Chen Haiyan, *et al.* Interface structure and properties of TiAl alloy joints brazed by particle reinforced composite brazing filler metal[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(7): 13-16.
- [13] 康路路.高体积分数 SiCp/Al 复合材料钎接-扩散复合连接工艺研究[D].南京:南京理工大学,2016.  
Kang Lulu. Research on Brazing and diffusion bonding welding technology of SiCp/Al composite materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

第一作者简介:张德库,1971 年出生,博士,副教授;主要从事先进材料连接方面的研究;发表论文 40 余篇;Email: [zdk@njjust.edu.cn](mailto:zdk@njjust.edu.cn).

(编辑: 崔炜)