

SiC 颗粒增强铝基复合材料的连接现状

牛济泰^{1,2,3}, 程东锋^{1,2}, 高增^{1,2}, 王鹏¹

(1. 河南理工大学 材料科学与工程学院 焦作 454003; 2. 河南省结构功能性金属基复合材料工程技术研究中心 焦作 454003; 3. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要: SiC 颗粒增强铝基复合材料因其具有成本低、耐磨性好、高比强度和比刚度、高谐振频率等优良的性能受到关注,但由于难于机械加工,特别是焊接性较差制约其在工程中的应用推广。文中通过对国内外 SiC 颗粒增强铝基复合材料的连接现状(焊接方法主要集中于熔化焊、扩散焊、搅拌摩擦焊和钎焊等)进行综述和评价。结果表明, SiC 颗粒和 Al 基体的较大物理化学性能差异是影响该种复合材料焊接性的主要因素;当 SiC 颗粒体积分数低于 35% 时,目前已取得令人基本满意的焊接效果,已具有小批量生产的趋势;但当 SiC 颗粒体积分数大于 35% 时,特别是针对高体积分数(55%~75%)的复合材料而言,传统的熔化焊方法很难获得高质量的接头,因此选择合适的连接方法和特殊的焊料成分则成为该种材料的重要创新方向。

关键词: SiC 颗粒;铝基复合材料;焊接方法

中图分类号: TG457 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400090

0 序 言

SiC 颗粒增强铝基复合材料(SiC/Al MMCs)具有制备相对容易、成本低、耐磨性好、高比强度比刚度、高谐振频率、性能和功能可设计性强等显著优点,在航空航天、交通运输、工程机械、电子信息等领域有广泛的应用价值^[1]。但是由于其难于进行机械加工,特别是焊接性差等问题,依然严重制约了它在工程中的使用^[2-3]。目前国内在铝基复合材料焊接性研究的投入仍远远适应不了复合材料迅猛发展的需求,急需加强该材料的焊接领域的研究工作,所以文献[4]指出:金属基复合材料近期发展方向中应优先考虑的资助领域,在成形工艺方面,主要指冲压和焊接。

自铝基复合材料诞生起,美国和日本等发达国家随之开展连续增强和非连续增强铝基复合材料的焊接工艺研究^[5]。国内焊接工作者自上世纪八十年代末期,也针对非连续增强铝基复合材料的焊接开展了有益的研究^[1-3,6]。目前,国内外对该材料的焊接方法在以下几个方面做了大量的探索与实践。

1 熔化焊

由于 SiC 和 Al 的物理、化学性质差距较大,且熔化时易发生界面反应,在 770 ℃ 以上将生成针状相 Al_4C_3 ,严重降低接头的强度,所以针对 SiC 颗粒增强铝基复合材料的熔焊研究更侧重于低体积分数的复合材料。根据热源的不同,熔焊研究主要集中于 TIG 焊^[7-10]、激光焊^[11-17]和等离子弧焊^[18-20]。

Ureña 等人^[7]分别对体积分数为 6%、13% 和 20% 的 SiC_p/2014Al 开展了 TIG 焊研究,通过改善工艺,焊接接头强度达到了母材强度的 50%,强度无法进一步提高原因在于接头中检测出了大量的 Al_4C_3 。冀国娟等人^[8]和汪喜和等人^[9-10]对体积分数为 10%~20% 的 SiC_p/6061Al 复合材料 TIG 焊研究中表明,热输入是影响接头强度的最主要因素,当热输入较低时,熔池流动性差,焊接缺陷(主要是气孔)较多但是界面反应小;当提高热输入时,熔池流动性改善,焊接缺陷减少,但界面反应剧烈^[8-9]。虽然在抑制界面反应的作用上,Al-Si 焊丝要优于 Al-Mg 焊丝,但是依旧很难改善焊缝中增强相分布不均和烧损的问题,文献[10]提出了“焊缝原位增强”的解决办法。通过添加自行研制含 Si、SiC、Ti、B 等元素的填充材料(成分如表 1 所示),在 Ti、Si 元素改善熔池流动性、抑制界面反应的基础上,焊

收稿日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51245008);科技部中小企业创新基金资助项目(11C26214105167);河南理工大学军工培育项目(672517/083)

缝中同时出现均匀分布的 SiC 和 TiB₂ 增强相, 弥补了普通焊丝焊接复合材料时焊缝增强相贫乏或稀疏, 局部团聚严重的缺点, 接头强度进一步提高, 可达母材的 80.2%。

表 1 原位增强焊丝化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of wire

SiC	Si	Ti	B	(Cu, Fe, Zn)	Al
6.5	7.0	1.4	0.2	<3	余量

在 SiC/Al 复合材料的激光焊研究中, 由于激光较高的输出功率, 焊缝中不可避免发生界面反应生成针状有害相 Al₄C₃, 且随着热输入的增加, 针状 Al₄C₃ 的尺寸随之增大^[11-15], 如图 1 所示^[14] (图中 PBZ 表示部分反应区, URZ 表示未反应区)。牛济泰等人^[13]发现高脉冲频率对界面反应有一定的抑制作用, 并提出了熔池中硅的活度的概念。随后, 该课题组又提出了添加金属钛进行原位增强激光焊接的办法^[14-15], 结果表明, 焊缝晶粒十分细小, 呈等轴结晶方式, 焊缝组织致密, 未观察到明显的微观气孔和裂纹, 更为重要的是焊缝中针状相 Al₄C₃ 被尺寸更为细小的 TiC 颗粒所取代, 从而进一步控制了界面反应, 提高了接头强度。李俐群、陶汪等人^[16-17]以 Ti-6Al-4V 金属薄片作为中间层填充材料, 对增强相体积分数为 45% 的 SiCp/Al 基复合材料进行激光焊的结果表明, 填充厚度为 0.5 mm 夹层钛合金进行 CO₂ 激光焊接时接头组织致密, 结合较好, 获得了以 Ti₃Al 为基体、Ti₅Si₃ 和 TiC 等反应产物为增强相的焊缝组织, 接头最高抗拉强度为母材的 50%。当钛合金夹层厚度增加到 0.8 mm 时, 焊缝出现气孔、未熔合缺陷, 界面反应不充分, 接头断裂位置位于结合界面, 抗拉强度较低, 断裂机制为脆性断裂, 不同中间夹层厚度的接头强度如图 2 所示^[17]。

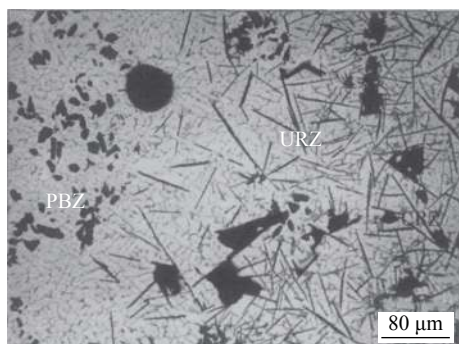


图 1 激光焊焊缝组织形貌

Fig. 1 Microstructure of laser welding

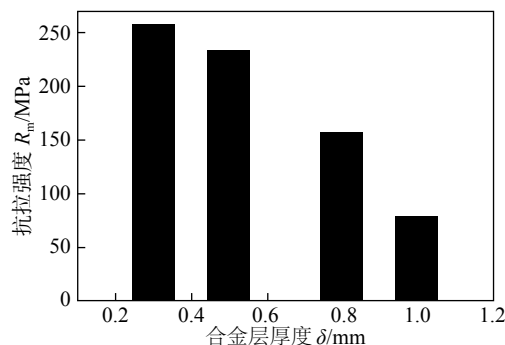


图 2 不同中间层厚度的焊缝抗拉强度

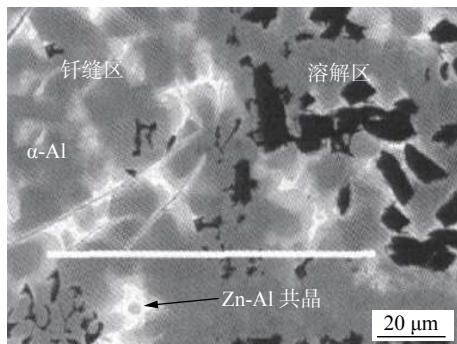
Fig. 2 Tensile strengths of different interlayer thickness

雷玉成等人^[18-20]在 SiC 颗粒增强铝基复合材料的等离子弧焊领域开展了大量的研究。研究发现以 Ti, Ti-Si, Ti-Ni, Ti-Al, Ti-Al-Si, Ti-Al-Si-Mg 作为填充金属能避免脆性相 Al₄C₃ 的形成, 改善熔池流动性, 增加熔池内部金属的润湿性, 进而形成稳定的熔池, 得到了以 TiN, AlN, TiC, MgAl₂O₄ 和细小棒状的 Al₃Ti 等为增强相的焊缝, 焊缝组织致密结合良好。在加入电弧超声后的等离子弧焊试验结果证明^[19-20], 电弧超声使焊缝组织更加细化, TiN, TiC 等颗粒分布更弥散, 且无气孔、裂纹等缺陷; 焊缝中心区硬度有一定程度下降; 焊接接头抗拉强度提高到 252 MPa, 比不加入超声 PAW 接头强度提高了约 7%; 同时拉伸断口韧窝数量明显增加, 呈现出良好的韧性断裂特征。

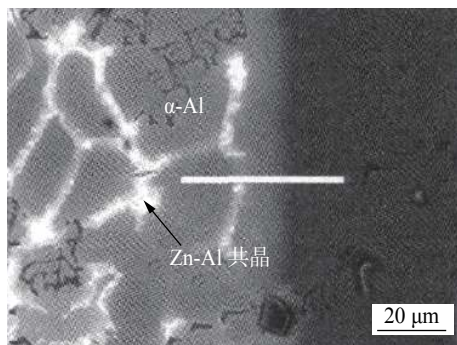
2 扩散焊

Askew 等人^[21]对 SiCp/2124 铝合金进行了瞬态液相 (TLP) 焊, 研究认为, 金属铜作为夹层时会对 SiC 颗粒产生隔层的效果; 当采用金属镍作为夹层时, 由于镍的高扩散性, 可使接头在选定的温度下快速等温凝固, 进而大幅的提高接头强度。赵祖德等人^[22]采用 Al-Ag-Cu-Ti 中间夹层在真空条件下对 SiCp/2009Al 复合材料进行了反应扩散连接的结果表明, 影响接头强度的主要因素为中间夹层 Ti 元素含量、连接温度和保温时间; 并在最佳的连接工艺下获得最高接头强度 120 MPa; 接头的断裂主要是由于焊缝中的金属间化合物产生裂纹源, 进而在焊缝中扩展导致接头失效。许惠斌等人^[23]利用超声原理, 采用施加两次低频振动辅助下半固态扩散焊成功地焊接了 SiCp/ZL101A 复合材料。第一次施加振动进行焊接时, 中间层被加热至固液态, 半固态中间层的获得, 使其在焊接中不易被挤出,

且加剧了对基体表面的摩擦作用,从而促进了基体表面的氧化膜的破碎;随后在施加 520 °C 的第二次振动,进一步排出焊缝中的气孔,将接头的抗剪强度提高到 160 MPa,其界面形貌如图 3 所示^[23]。



(a) 第一次超声震动后升温到 520 °C



(b) 520 °C时第二次超声振动 12 s 后

图 3 真空扩散焊中不同阶段界面微观结构

Fig. 3 Microstructure of interface at different stage in ultrasonic diffusion welding

3 搅拌摩擦焊

Uzun 等人^[24]研究了体积分数为 25% 的 SiC_p/AA2124 复合材料搅拌摩擦焊的焊接性,发现焊缝中同时存在着颗粒细小和颗粒粗大的 SiC,接头从外到内可分为四个区域:母材、热影响区、热力影响区和热核区。热核区存在着 SiC 分布均匀和聚集的形貌特征,在 SiC 的聚集区域发现了空隙和开裂的缺陷;与热核区相邻的热力影响区则发现了大量的塑性变形,存在着 SiC 颗粒的贫瘠区。陈华斌等人^[25]研究了体积分数为 15% 的 SiC_p/6066 Al 复合材料的搅拌摩擦焊,发现焊缝中心的晶粒明显比热影响区的晶粒细小;热影响区的晶粒随着离焊缝的距离增加而增大,逐渐过渡到母材。焊缝内部晶粒之所以比较细小,是由于搅拌摩擦焊的过程中,搅拌工具的特形指棒和复合材料接触面之间发生了强烈的相互啮合、粘接、剪切等作用,产生剧烈的剪切塑

性变形,使得初始摩擦接触面处的晶粒碎化。冯涛等人^[26]利用搅拌摩擦焊对 SiC_p/2024Al 复合材料进行了焊接,并采用急停试验分析母材瞬间移动行为,结果表明,焊缝中 SiC-Al 界面结合清晰,无脆性相生成,并且发现了破碎的 SiC 颗粒;接头形成 V 字型结构, SiC 颗粒因焊缝位置不同而分布不均:在热力影响区中, SiC 出现偏析;在焊核区, SiC 颗粒较少,若参数选择不当,焊核中心区出现颗粒消失的现象,如图 4 所示^[26]。

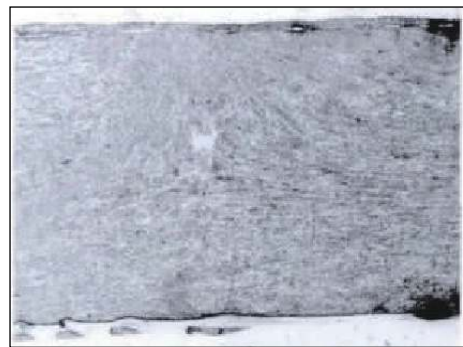


图 4 焊核中心 SiC 颗粒消失现象

Fig. 4 SiC particle disappearing in the welding nugget

4 钎焊

当增强相的体积分数高于 55% 时复合材料很难通过熔化焊进行连接,而钎焊由于不需母材熔化的优势成为该类材料的主要焊接方法。在复合材料的钎焊过程中,如何选择合适的钎料使其同时润湿 Al 合金和 SiC 陶瓷是其技术关键。国内外科研工作者就不同的钎焊方法以及制备各种新型的钎料开展了大量的工作。

张洋等人^[27-30]填加 Zn-Al-Cu 钎料对体积分数为 55% 的 SiC_p/A356 复合材料进行了超声波钎焊,结果表明,在超声波作用下, SiC 颗粒表面的液态钎料内产生空化作用,空化泡崩溃产生的高压破坏了材料表面的氧化膜及颗粒表面的气体,使液态钎料与 SiC 颗粒直接接触,形成一种由润湿而形成的金属键结合;最后通过选择合适的超声波钎焊工艺,增加液态钎料在母材表面扩散溶解所形成的半固液态溶解层的宽度,从而控制焊缝中增强相颗粒的体积分数,使得复合材料焊缝中的增强相体积分数由 7% 提高到 35%,压剪强度由 157 MPa 提高到 232 MPa。

牛济泰团队^[31-39]近五年在国家“863”项目、国家自然科学基金和总装备部预研项目资助下针对

高体积分数 (55% ~ 75%) SiC 颗粒增强铝基复合材料的真空钎焊做了大量研究工作, 主要集中在研发合适的钎料及获得相匹配的钎焊工艺, 同时还开展镀镍后的复合材料与可伐合金的连接工作. 结果表明, Al-Cu-Si-Mg-Ni 钎料对高体积复合材料在 560 °C 保温 3 min 的工艺参数下, 不但和铝合金基体形成冶金结合, 还实现了对 SiC 颗粒的润湿, 形成无气孔、夹杂、微裂纹的钎缝 (图 5a); 其接头最高抗剪强度为 102.3 MPa, 断口由河流状的解理面和结晶状的瞬间断裂区组成^[32]. 采用 Al-Cu-Si-Zn-Ti 钎料对含镀镍层的高体积分数复合材料的硬钎焊的最佳工艺参数为温度 570 °C, 保温 20 min, 获得最高抗剪强度为 141 MPa, 剪切断口发生在钎缝附近母材上, 断裂形式为脆性断裂; 用该种钎料对镀镍高体积与未镀镍低体积分数 (15%) 复合材料之间进行焊接, 最佳工艺参数为温度 575 °C, 保温 20 min, 最高抗剪强度为 98.14 MPa, 断裂发生在低体积复合材料一侧, 断裂形式为混合断裂, 其钎缝组织如图 5b 所示^[33]. 采用 In-48Sn 钎料软钎焊镀镍高体积与镀镍低体积复合材料最佳工艺参数为温度 190 °C, 保温 20 min, 接头最大抗剪强度为 57 MPa, 断口为韧性断裂, 接头失效于钎料处^[33]. 选择 Ag-Cu-In-Sn-Ti 钎料对高体积复合材料与可伐合金的

最佳工艺为钎焊温度在 580 °C, 保温 45 min 时, 接头抗剪强度能达到 96 MPa, 脆性断裂发生在钎料与复合材料的结合界面^[35]. 选择 Zn-Cd-Ag-Cu 软钎料, 采用 420 °C 保温 5 min 的工艺参数, 在氩气保护下对镀镍后的复合材料和可伐合金进行炉中钎焊, 得到完全冶金结合、组织致密的钎缝, 接头抗剪强度为 225 MPa, 断裂发生在靠近镀层的复合材料侧^[37, 39].

牛济泰等人还针对高体积分数铝基复合材料研究了扩散焊、电阻焊、激光钎焊工艺等并获得了多项中国专利^[40-46]和美国专利^[47], 哈尔滨工业大学的闫久春等人发明了有关铝基复合材料的振动焊、超声波毛细焊接等工艺^[48-49], 从而对碳化硅颗粒增强铝基复合材料的焊接开辟了新的研究思路.

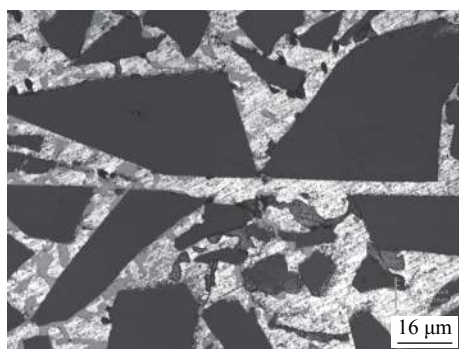
5 展 望

随着碳化硅颗粒增强铝基复合材料的优点日益被人们所接受, 相较于其制备技术, 其连接技术的发展在工业应用的推广中显得更为重要和紧迫. 目前, 由于 SiC 和 Al 之间的较大差异导致该种复合材料的连接技术面临着巨大的挑战, 但同时也有着难点不断被突破, 是一个极大的机遇. 当该类复合材料合适的连接工艺得以实现时, 不但为复合材料的基础理论研究带来突破与扩展, 同时也会产生较大的社会经济效益.

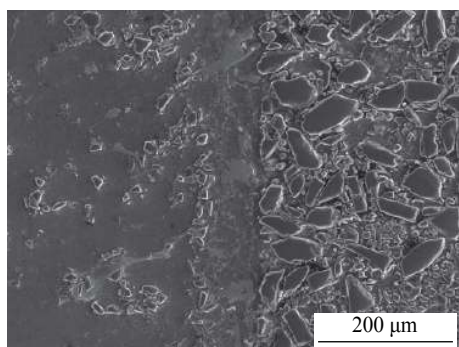
就 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料焊接现状而言, 当体积分数低于 35% 时所取得的焊接效果基本令人满意, 目前已实际应用于某些产品的部件上, 并且也有小批量生产的趋势; 而当体积分数高于 35% (尤其是体积分数在 55% ~ 75%) 时, 目前已经拥有的焊接方法从接头强度、气密性、及质量稳定性等方面还难以达到批量生产的要求. 因此, 进一步探讨更为有效的固相焊接方法与选择更为优异的焊接材料将成为该种材料的连接技术的主要研究趋势和创新方向. 同时, 进一步优化母材质量, 特别是增强相的均匀分布和尺寸控制, 以及母材被焊表面的预处理技术, 都是提高复合材料接头质量必须考虑的重要因素.

参考文献:

- [1] 陈国庆, 甄公博, 冯吉才. SiCp/Al 复合材料焊接技术的研究现状与展望 [J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 30 ~ 35.



(a) 高-高体积分数复合材料, 560 °C 保温 3 min



(b) 低-高体积分数复合材料, 575 °C 保温 20 min

图 5 不同体积分数复合材料钎缝微观结构

Fig. 5 Microstructure of brazing joint of SiC/Al MMCs

- Chen Guoqing, Zhen Gongbo, Feng Jicai. SiCp/Al composite welding technology research status and prospect[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2013, 43(3): 30 – 35.
- [2] 牛济泰, 刘黎明, 韩立红. 铝基复合材料焊接研究现状及展望[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1999(1): 130 – 132.
- Niu Jitai, Liu Liming, Han Lihong. Research status and prospect of aluminum matrix composites welding[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1999(1): 130 – 132.
- [3] 马宗义, 肖伯律, 王东, 等. 铝基复合材料焊接的研究现状与展望[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(4): 8 – 16.
- Ma Zongyi, Xiao BoLü, Wang Dong, *et al.* Research status and prospect of aluminum matrix composites welding[J]. *China Material Progress*, 2010, 29(4): 8 – 16.
- [4] 国家自然科学基金委员会, 自然科学学科发展战略调研报告-金属材料科学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] Ellis M. Joining aluminium based metal matrix composites[J]. *International Materials Reviews*, 1996, 42(2): 41 – 58.
- [6] 王少刚, 徐九华, 姜澄宇. 铝基复合材料焊接中的若干技术问题[J]. *宇航材料工艺*, 2006, 36(4): 1 – 6.
- Wang Shaogang, Xu Jiuhua, Jiang Chengyu. Several technical problems in the welding of aluminum matrix composites[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2006, 36(4): 1 – 6.
- [7] Ureña A, Escalera M D, Gil L. Influence of interface reactions on fracture mechanisms in TIG arc-welded aluminium matrix composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2000, 60(4): 613 – 622.
- [8] 冀国娟, 谢建刚, 薛文涛. SiCp/101 铝基复合材料的填加焊丝 TIG 焊[J]. *有色金属工程*, 2003(4): 21 – 23.
- Ji Guojuan, Xie Jiangang, Xue Wentao. SiCp/101Al aluminum matrix composite filler wire TIG welding[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2003(4): 21 – 23.
- [9] 汪喜和, 牛济泰, 周广涛, 等. 填加焊丝对碳化硅颗粒增强铝基复合材料钨极惰性气体保护焊缝成形及组织的影响[J]. *机械工程材料*, 2007, 31(5): 76 – 78.
- Wang Xihe, Niu Jitai, Zhou Guangtao, *et al.* Effects of filler wire on the formation and microstructure of tungsten inert gas shielded welding SiC particles reinforced aluminum matrix composites[J]. *Mechanical Engineering Materials*, 2007, 31(5): 76 – 78.
- [10] 程东锋. SiCp/6061Al 复合材料的氩弧焊工艺及机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [11] 刘黎明, 祝美丽, 徐卫平, 等. 铝基复合材料 SiC/6061Al 的激光焊接[J]. *焊接学报*, 2001, 22(4): 13 – 16.
- Liu Liming, Zhu Meili, Xu Weiping, *et al.* Laser welding of SiC/6061Al aluminum matrix composites[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(4): 13 – 16.
- [12] 陈彦宾, 张德库, 牛济泰, 等. 激光焊接铝基复合材料钛的原位增强作用[J]. *应用激光*, 2002, 22(3): 320 – 322.
- Chen Yanbin, Zhang Deku, Niu Jitai, *et al.* In-situ reinforcement effect of titanium on laser welding aluminum matrix composite[J]. *Applied Laser*, 2002, 22(3): 320 – 322.
- [13] 牛济泰, 王慕珍, 来忠红, 等. SiC/6061Al 铝基复合材料激光焊机理[J]. *焊接学报*, 2000, 21(1): 1 – 4.
- Niu Jitai, Wang Muzhen, Lai Zhonghong, *et al.* Mechanism of laser welding of SiC/6061Al aluminum matrix composites[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2000, 21(1): 1 – 4.
- [14] 陈茂爱, 武传松, 刘国栋. SiC_p/LD2 复合材料的激光焊缝组织及性能[J]. *焊接学报*, 2006, 27(9): 51 – 54.
- Chen Maoai, Wu Chuansong, Liu Guodong. Microstructure and properties of laser welded joint of SiC_p/LD2 composites[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(9): 51 – 54.
- [15] 刘峰. SiCp/LD2 复合材料激光焊缝组织及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(15): 34 – 36.
- Liu Feng. Study on Microstructure and properties of laser welded joint of SiCp/LD2 composites[J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(15): 34 – 36.
- [16] 李俐群, 左智成, 陶汪, 等. 高比 SiCp/2024 铝基复合材料激光原位焊接接头断裂行为[J]. *焊接学报*, 2012, 33(4): 61 – 64.
- Li Liqun, Zuo Zhicheng, Tao Wang, *et al.* Fracture behavior of laser welded joint of SiCp/2024 aluminum matrix composites with high SiC content[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(4): 61 – 64.
- [17] 陶汪, 李俐群, 王亚松, 等. 高体积分数 SiCp/2024Al 基复合材料添加 Ti-6Al-4V 中间层激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 104 – 108.
- Tao Wang, Li Liqun, Wang Yasong, *et al.* Laser welding characteristics with Ti-6Al-4V layer on high volume fraction SiCp/2024Al matrix composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 104 – 108.
- [18] Lei Y C, Yuan W J, Chen X Z, *et al.* In-situ weld-alloying plasma arc welding of SiCp/Al MMC[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(2): 313 – 317.
- [19] 雷玉成, 王志伟, 陈希章, 等. 电弧超声对 SiCp/AlMMCs 焊缝组织与性能的影响[J]. *焊接学报*, 2010, 31(10): 17 – 21.
- Lei Yucheng, Wang Zhiwei, Chen Xizhang, *et al.* Effect of arc ultrasonic on microstructure and properties of SiCp/AlMMCs welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(10): 17 – 21.
- [20] 薛厚禄, 雷玉成, 胡文祥, 等. 交流电弧超声对 SiCp/6061Al 焊接接头的作用机理研究[J]. *材料科学与工艺*, 2011, 19(5): 40 – 44.
- Xue Houlu, Lei Yucheng, Hu Wenxiang, *et al.* Study on mechanism of welding joint effected by AC arc ultrasound on SiCp/6061Al composites[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 19(5): 40 – 44.
- [21] Askew J R, Wilde J F, Khan T I. Transient liquid phase bonding of 2124 aluminium metal matrix composite[J]. *Materials Science and Technology*, 1998, 14(9-10): 920 – 924.
- [22] 赵祖德, 舒大禹, 黄继华, 等. Al-Ag-Cu-Ti 反应扩散连接 SiCp/2009Al 复合材料的接头强度与断裂特性[J]. *焊接学报*, 2008, 29(11): 100 – 104.
- Zhao Zude, Shu Dayu, Huang Jihua, *et al.* Joint strength and fracture properties of reactive diffusion bonding SiCp/2009Al composites with Al-Ag-Cu-Ti[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(11): 100 – 104.
- [23] 许惠斌, 闫久春, 李大成, 等. SiCp/ZL101A 复合材料半固态振

- 动扩散钎焊[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 16–20.
- Xu Huibin, Yan Jiuchun, Li Dacheng, *et al.* Semi-solid state vibration diffusion brazing of SiCp/ZL101A composites[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 16–20.
- [24] Uzun H. Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite[J]. Materials & Design, 2007, 28(5): 1440–1446.
- [25] 陈华斌, 严 铿, 李敬勇, 等. 颗粒增强铝基复合材料 SiCp/6066Al 搅拌摩擦焊[J]. 江苏科技大学学报自然科学版, 2004, 18(3): 62–64.
- Chen Huabin, Yan Keng, Li Jingyong, *et al.* Friction stir welding of SiC particle reinforced 6066Al matrix composites[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2004, 18(3): 62–64.
- [26] 冯 涛, 郁振其, 韩 洋, 等. SiCp/2024Al 铝基复合材料搅拌摩擦焊接头微观组织[J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 27–31.
- Feng Tao, Yu Zhenqi, Han Yang, *et al.* Microstructure of friction stir welded SiCp/2024Al aluminum matrix composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(4): 27–31.
- [27] 张 洋, 闫久春. 高体积分数 SiC 颗粒增强铝基复合材料的超声波钎焊[J]. 焊接, 2008(8): 29–31.
- Zhang Yang, Yan Jiuchun. Ultrasonic brazing high volume fraction of SiC particles reinforced aluminum composite[J]. Welding & Joining, 2008(8): 29–31.
- [28] 张 洋, 闫久春. SiCp/A356 复合材料的超声波辅助钎焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 89–92.
- Zhang Yang, Yan Jiuchun. Ultrasonic brazing of SiCp/A356 composites[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 89–92.
- [29] Zhang Y, Yan J C, Chen X G, *et al.* Ultrasonic dissolution of brazing of 55% SiCp/A356 composites[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2010(18): 20–23.
- [30] Zhang Y. Ultrasonic brazing of high fraction volume of SiC particulate reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials Science & Technology, 2009, 25: 379–382.
- [31] 牛济泰, 卢金斌, 穆云超. SiCp/ZL101 复合材料与可伐合金 4J29 钎焊的分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 37–40.
- Niu Jitai, Lu Jinbin, Mu Yunchao. Analysis on brazing SiCp/ZL101 composite and 4J29 alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 37–40.
- [32] Niu J, Luo X, Tian H, *et al.* Vacuum brazing of aluminium metal matrix composite (55vol. % SiCp/A356) using aluminium-based filler alloy[J]. Materials Science & Engineering B, 2012, 177(19): 1707–1711.
- [33] 陈 龙. T/R 模块用 SiCp/6063Al 复合材料真空钎焊工艺研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [34] Cheng Dongfeng, Niu Jitai, Gao Zeng, *et al.* Vacuum brazing of high volume fraction SiC particles reinforced aluminum matrix composites[J]. Modern Physics Letters B, 2015, 29(5): 156–161.
- [35] 罗相尉. 电子封装用铝基复合材料的钎焊研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [36] Wang P, Li Q, Niu J T. Investigation on soldering high volume fraction SiC particle reinforced aluminum metal matrix composites[J]. Advanced Materials Research, 2013, 853: 90–95.
- [37] Niu J T, Gao Z, Cheng D F, *et al.* Welding of aluminum matrix composites[J]. Materials Science Forum, 2013, 762(762): 476–482.
- [38] 王西涛. 高体积分数铝基复合材料与可伐合金的钎焊工艺研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2013.
- [39] 王 鹏. 活性元素对 SiCp/6063Al 复合材料钎焊质量的影响[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [40] 牛济泰, 刘黎明, 王慕珍, 等. 铝基复合材料的液相扩散焊接新工艺: ZL00107203. X[P]. 2003-04-23.
- [41] 牛济泰, 郭 伟, 翟瑾璠, 等. 铝基复合材料液相冲击扩散焊接新工艺: 200310118246[P]. 2006-05-03.
- [42] 李杏瑞, 牛济泰, 汤文博, 等. 铝基复合材料的电阻点焊新方法: 200910 065736[P]. 2011-01-30.
- [43] 牛济泰, 王西涛, 陈思杰, 等. 高体积分数颗粒增强铝基复合材料硬钎焊自钎钎料及其制备方法: 200910073303.5[P]. 2010-06-09.
- [44] 廉丕芬, 徐冬霞, 李 强, 等. 高体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料的火焰软钎焊方法: 20091 0073309.2[P]. 2012-08-03.
- [45] 牛济泰, 程东锋, 高 增, 等. 高体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料的激光诱导纳米钎焊方法: CN102699465B[P]. 2014-05-21.
- [46] 程东锋, 牛济泰, 陶星空, 等. 一种 Al 基非晶/纳米晶复合钎料及其制备方法: 中国 2015103697055[P]. 2015-10-03.
- [47] Niu Jitai, Cheng Dongfeng, Gao Zeng, *et al.* Laser guided nano-brazing method for reinforced aluminum composite material having high volume fraction silicon carbide particles: US9662729B2[P]. 2017-05-30.
- [48] 闫久春, 许志武, 许惠斌, 等. 填充复合焊料非连续增强铝基复合材料振动液相焊接方法: ZL200510131355.5[P]. 2008-01-23.
- [49] 闫久春, 许志武, 赵维巍, 等. 铝基复合材料超声波毛细焊接方法: 20051000 9644[P]. 2007-07-18.

第一作者简介:牛济泰,男,1941 年出生,教授,博士研究生导师,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际材料及热加工物理与数值模拟联合会主席.主要从事新型材料焊接性及焊接工艺研究.发表论文 300 余篇. Email: niujitai@163.com

通信作者简介:程东峰,男,1984 年出生,博士,讲师. Email: cdfax@163.com