

# 铝基复合材料焊接中的若干技术问题

王少刚<sup>1</sup> 徐九华<sup>1</sup> 姜澄宇<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学,南京 210016)

(2 西北工业大学,西安 710072)

**文 摘** 针对目前用于铝基复合材料焊接的几种常用方法如氩弧焊、激光焊和扩散焊等中存在的问题进行了全面综述,展示了铝基复合材料焊接研究的最新成果,提出了解决这些问题的可能措施,以及该类材料未来焊接研究的发展动向。

**关键词** 铝基复合材料,焊接,存在问题,发展动向

## Several Technical Problems During Welding Aluminium Matrix Composites

Wang Shaogang<sup>1</sup> Xu Jiuhua<sup>1</sup> Jiang Chengyu<sup>2</sup>

(1 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** Several problems are discussed comprehensively in the course of aluminium matrix composites (Al-MMCs) welding process such as Tungsten Inertia Gas (TIG), Laser beam welding and Diffusion bonding etc. The new research results of Al-MMCs welding are illustrated. Finally, some possible ways on how to solve these problems and the trend of welding research for these materials in the future are put forward.

**Key words** Aluminium matrix composite, Welding, Problems, Development trend

### 1 引言

铝基复合材料中由于增强体的引入,使得其焊接工艺过程变得相当困难,主要原因是增强体与基体铝合金之间的物理和化学性能如熔点、导电性、导热性和线膨胀系数等存在巨大差异,导致采用普通的焊接方法焊接时容易出现气孔、夹杂、成分偏析和焊缝成形不良等缺陷。尽管目前有许多焊接工作者正在致力于开展铝基复合材料的焊接研究工作,但是,迄今为至,人们还没有找到行之有效的焊接方法成功实现此类材料的高质量连接,成为铝基复合材

料走向实用化的瓶颈。基于此,本文就铝基复合材料在熔化焊及扩散焊领域的研究现状进行了全面总结,根据目前焊接中存在的主要问题,提出了解决问题的可能措施以及未来焊接研究的发展动向,以期能为从事金属基复合材料焊接研究的技术人员提供参考。

### 2 熔化焊接

#### 2.1 主要问题

氩弧焊和激光焊方法是目前铝基复合材料焊接中研究较多的两种方法,氩弧焊由于其操作简单,焊

收稿日期:2005-03-24

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2002094)

作者简介:王少刚,1966年出生,博士,主要从事金属基复合材料的焊接及材料表面改性研究工作

接成本相对较低,应该是最有潜力方法之一。氩弧焊分为非熔化极氩弧焊(TIG)和熔化极氩弧焊(MIG)。氩弧焊用于铝合金的焊接中取得了令人满意的焊接质量,但用于铝基复合材料的焊接却不尽人意,对于颗粒增强铝基复合材料熔化焊接主要存在以下技术问题。

(1)熔池金属的流动性。在氩弧焊接过程中,母材焊接区熔化以后,有大量的固态增强体如SiC、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒存在于熔融的液态铝基体中,大大降低了熔池金属的流动性,使其发生黏滞,易产生夹杂并影响焊缝成形,同时给熔池的温度控制带来困难,并且黏滞的熔池金属使得扩散氢不易逸出,残留于焊缝中造成大量气孔,对于采用粉末冶金法制备的铝基复合材料,如果焊前未经严格的除气处理,则接头焊缝金属中气孔现象相当严重<sup>[1-3]</sup>。

(2)增强体/基体之间的界面反应。对于焊接SiC<sub>p</sub>/Al复合材料,在氩弧焊的高温条件下,增强体与基体之间很容易发生如下界面反应<sup>[4]</sup>:



反应产物 $\text{Al}_4\text{C}_3$ 为针状脆性化合物,更为严重的是 $\text{Al}_4\text{C}_3$ 还会与水起反应,释放出乙炔,严重降低接头的性能<sup>[5]</sup>;另外,在焊缝中还发现生成了大量的 $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{C}_5$ <sup>[6]</sup>。

(3)焊缝结晶动力学。在焊缝冷却结晶过程中,熔池金属中增强相颗粒如SiC颗粒的存在,使焊缝结晶动力学状态复杂化。具体表现为:增强体颗粒不能成为结晶核心,被生长的液/固界面所排斥并聚集于最后结晶的焊缝中心或母材与焊缝金属的熔合线处,极易引发结晶裂纹;对于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Al复合材料的焊接,基体铝合金对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的润湿性差,易造成焊缝金属中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒偏聚和产生固体夹杂、未熔合等缺陷。

(4)接头的等强性。由于通常采用的焊接填充材料为不含增强体的铝合金焊丝,接头形成以后,难以达到与母材等强。

此外,熔化焊用于纤维增强铝基复合材料焊接时,在电弧高温作用下,会产生增强纤维的断裂和移位等问题,因而难以获得高质量的焊接接头<sup>[7]</sup>。

## 2.2 解决措施

针对SiC<sub>p</sub>/Al复合材料界面反应问题,根据最新的研究进展,普遍认为,可以采取以下措施。

(1)采用能量集中的焊接方法如激光焊、电子

束焊<sup>[8]</sup>和等离子焊<sup>[6]</sup>等焊接方法,通过对焊接区域实施快速加热和冷却,减少熔池金属在高温停留的时间,从而可大大降低SiC<sub>p</sub>/Al复合材料之间界面反应的发生;此外,在激光焊接中,采用脉冲激光焊接法,微量脉冲的加入有利于改善熔池金属的流动性,提高基体金属对增强颗粒的润湿性,接头性能因而提高。

(2)焊接SiC<sub>p</sub>/Al复合材料时,在填充材料的选择上,通常是采用Al-Si焊丝,这主要是因为式(1)反应的自由能变化为<sup>[4,9]</sup>:

$$G = 113900 - 12.06T \ln T + 8.92 \times 10^{-3} T^2 + 7.53 \times 10^{-4} T^{-1} + 2.15T + 3RT \ln [\text{Si}] \quad (2)$$

式中,  $[\text{Si}]$ 为Si在液态Al中的活度。

从式(1)中可以看出,熔池金属中的Si含量越大,界面反应受到抑制的程度也越大;另外,熔池金属中含有一定量的Si还可提高焊缝金属的流动性及接头的抗裂性;根据式(2)反应的自由能变化可知,温度越高,越容易发生界面反应,为抑制界面反应的发生,焊接方法宜采用能量集中的激光焊和电子束焊等。牛济泰<sup>[10]</sup>等人在研究SiC<sub>w</sub>/6061Al激光焊接时,提出了临界硅活度 $[\text{Si}]_{\text{min}}$ 的概念,温度越高,临界硅活度 $[\text{Si}]_{\text{min}}$ 也越大,只要熔池中 $[\text{Si}]$ 的值超过相应温度下临界硅活度 $[\text{Si}]_{\text{min}}$ ,则SiC<sub>p</sub>/Al复合材料界面之间的反应将被抑制掉。

(3)南京航空航天大学徐九华<sup>[11]</sup>等人,采用激光诱发反应的方法焊接SiC<sub>p</sub>/Al复合材料,在一定条件下能够完全抑制界面脆性相 $\text{Al}_4\text{C}_3$ 的形成,同时在接头区域形成稳定的TiC,既能提高基体材料的润湿性,TiC又能充当焊缝金属中新的增强体颗粒,接头性能因而提高。而王华明和陈永来等人采用Ti-Ni等合金化填充材料,在激光焊接中通过合金元素“原位”反应,来抑制SiC<sub>p</sub>/Al界面反应发生,同时在焊缝金属中生成了TiC、 $\text{Ti}_3\text{Si}_2$ 、 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 等新的增强体颗粒,研究取得了一定进展,但在焊缝中心仍存在粗大气孔<sup>[12-13]</sup>。他们所做的工作,在一定程度上有利于提高焊缝金属的强度,使焊接以后接头强度尽量与母材相等。

(4)对于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Al复合材料的焊接,为了改善熔池金属的流动性,防止焊接过程中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒产生偏聚,应采用含Mg量高的焊丝,焊丝中Mg的含量应不低于3.5%,文献[1]中采用含5%Mg的焊丝,是为了提高焊缝金属的抗热裂性能。

在 Al-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系中,在一定温度下,Mg 在结合界面上与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生如下的反应<sup>[16-17]</sup>:



上式反应为置换反应,Mg 在此体系中为活性合金元素,由于 Mg 的存在,使铝基体表面的氧化膜发生分解,转化成 Al 与细小 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 颗粒,改善了界面状况,对基体原子的阻碍作用减小,从而改善 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合材料的润湿性,有利于接头强度的提高。

为了提高熔池金属的流动性,改善焊缝金属对增强体颗粒的润湿性,用脉冲钨极氩弧焊方法焊接 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合材料时,在焊接操作上,与通常的焊接操作有所不同,填充材料应直接插入到熔池金属之中<sup>[1]</sup>;另外,当试样厚度 > 4 mm 时,开单面 V 型坡口的角度应 > 90°,且采用熔化极氩弧焊方法施焊获得接头的质量要好于非熔化极氩弧焊<sup>[1]</sup>。

综上所述,采用氩弧焊方法焊接 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 复合材料问题相对较少,在工艺上采取一定措施后,可提高熔池金属的流动性,以改善基体金属对增强体颗粒的润湿性,减轻 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的偏聚现象。而对于 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料,不管是氩弧焊还是激光焊,界面反应问题是其主要问题,即使是激光焊接,虽然具有一定的适应性,但界面反应仍然不能完全避免,在焊接过程中激光输出功率需要精确控制;其次还有气孔问题等,加之其成本相对较高,使其应用受到一定限制。为了减轻增强体与基体之间的界面反应,改善基体金属对增强体的润湿性,在复合材料的制备过程中,采用对增强体进行预处理的方法,如对 SiC 纤维表面进行涂敷涂层而对 SiC 颗粒进行热暴露处理,在颗粒表面形成一层 SO<sub>2</sub>。这一研究思路随后为 Du J. H. 等人<sup>[16]</sup>采用:在 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料焊接区表面预先刷镀 Ni 涂层,可避免焊接过程中激光与母材直接接触,以抑制激光焊过程中 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料之间发生界面反应,防止脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的形成,其原理示意图见图 1。

在采用熔化焊方法焊接铝基复合材料时,未来的研究工作重点仍然应是操作简单、成本相对低廉的氩弧焊方法。从前述可知,要采用氩弧焊方法实现高质量铝基复合材料连接,可采用如下技术措施:

(1) 如脉冲激光焊一样,可在氩弧焊中加入脉冲,即采用脉冲氩弧焊方法,以增加电弧对熔池的搅拌性,对提高焊缝金属的流动性和改善基体金属对增强体颗粒的润湿性有利;(2) 可以借鉴激光诱发反应和

合金“原位”反应的方法,一方面能抑制 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料界面反应,另一方面焊接过程中新生成的增强体颗粒可弥补所加填充材料不含增强体颗粒的不足,有利于提高接头强度,该工艺如获得成功,将有望降低焊接成本,大大加快铝基复合材料在实际生产中的应用进程;(3) 研究一种含增强体颗粒的专用焊丝,在铝基复合材料的焊接过程中能直接加入到接头金属中,以提高焊缝金属的强度。此项研究工作的难度不在焊丝的研制上,而是需要在焊接方法上和焊接工艺过程中如何保证增强体颗粒不遭受破坏,且能顺利过渡到熔池金属中去。

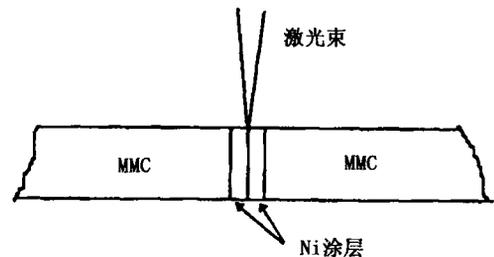


图 1 复合材料表面刷镀 Ni 涂层后激光焊接示意图

Fig 1 Schematic of laser welded composite after brush plating of Ni on surface

### 3 扩散焊接

#### 3.1 主要问题

扩散焊用于铝基复合材料的连接中,近年来国内外焊接工作者进行了大量研究工作,取得了较大进展,对于焊接纤维增强铝基复合材料,实际上是转化为基体铝合金的扩散焊接,焊接过程相对容易实现。与氩弧焊、激光焊等熔化焊方法相比,由于焊接温度相对较低,在焊接 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料时,虽然界面反应问题不是此类焊接中的主要问题,但由于该种工艺方法自身具有的特点,加之铝基复合材料的特殊性,使得铝基复合材料在扩散焊接时,仍然存在以下一些技术问题。

(1) 工艺参数优化。由于扩散焊接中有温度、压力和时间等几个主要参数,加之要焊接的复合材料种类繁多,常用增强体有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC 等颗粒和 SiC 晶须,而且增强体颗粒的大小和在复合材料中占的体积分数根据需要理论上可以有无穷多,基体有纯铝、锻铝、硬铝和超硬铝等,由于不同的增强体与铝合金基体之间的相互组合,就可以得到各种复合材料,所以要实现每一种复合材料的可靠扩散连接都存在工艺参数优化问题。此外,由于扩散焊接头性

能与接头表面的处理状态、焊接时的真空度等参数有关,在复合材料的扩散焊接中,如何处理众多的规范参数不是一件容易的事,因为任何一个参数都可能影响到最终获得接头的性能。由于接头性能对工艺参数的变化非常敏感,文献[17]报道,温度变化10 K或压力变化1 MPa都会引起接头强度的显著下降。牛济泰<sup>[18]</sup>等人在采用扩散焊方法连接 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料的研究中发现,在一定试验条件下,随着焊接温度的提高、焊接压力的增大和保温时间的延长,接头强度相应提高,通过试验,得到了优化的焊接工艺参数。进一步的处理方法还可以采用正交试验方法,在这一系列参数当中,先找到主要影响参数,逐步筛选,直到最后获得最佳工艺参数。由于扩散焊接过程涉及到真空操作,所以每进行一次试验都将花费很长的时间,成本相对较高。

(2)接头表面氧化膜。由于铝基复合材料的基体是铝合金,与铝合金的扩散焊接一样,在铝基复合材料的表面也存在一层致密难熔的氧化膜。与钨极氩弧焊不同,在阴极的负半波里,电弧有自动寻找金属氧化膜的作用,产生阴极破碎,很好清除工件表面的氧化膜,获得优质接头。而在扩散焊接中没有这种清理作用,接头表面存在的氧化膜,使得原子的扩散过程难以进行,易在接头金属中产生氧化膜夹杂;另外,采用机械方法清理,可能造成增强体颗粒发生破坏,因此,铝基复合材料扩散焊接较为困难。牛济泰<sup>[19]</sup>等人在研究扩散焊条件下 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 复合材料中氧化膜的行为时发现,当扩散焊的温度高于铝基复合材料基体的固相线温度时,接头区域的氧化膜细化,含量减少,接头强度提高。

(3)接头界面连接行为。由于铝基复合材料是由基体铝合金与增强体颗粒通过采用一定手段复合而成的,因此,可以把铝基复合材料看成是增强体-基体(R-M)通过微连接形成的,即存在R-M连接。在扩散焊接过程中,除存在R-M连接外,还可能存在颗粒-颗粒(R-R)和基体-基体(M-M)连接,如图2所示。

在这三种连接形式中,M-M连接就如正常铝合金扩散焊接一样,对提高接头性能起有利作用;而R-M和R-R连接属于弱连接,接头性能如拉伸强度的降低主要是由于R-R接触造成的,在R-R接触部位容易萌生裂纹。为此,如何在铝基复合材料的扩散焊接中减少R-R连接的比例,而改为R

-M或M-M连接,以提高接头性能,一直是焊接工作者致力于研究的课题之一,也是颗粒增强铝基复合材料扩散焊接的难点所在。文献[20~21]报道,采用非夹液相扩散焊成功实现了铝基复合材料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{6061Al}$ 连接,该工艺过程的机理是:介于基体合金液、固两相温度区间进行扩散焊接时,氧化膜逐渐消失,同时在结合区产生一定数量的液相基体,它的出现不仅加速了原子的扩散,而且还对增强相进行润湿,对增强相直接接触部位进行渗透,从而改R-R接触为R-M接触,接头性能因而提高。另外,在实践中人们很自然地想到,如果能在R-R之间加入一薄夹层,扩散焊过程中夹层熔化,就可以改R-R接触为R-M接触,既提高了对增强体的润湿性,又可以加速原子之间的扩散,接头质量因而提高,文献[22]中采用 $15\ \mu\text{m}$ 纯Al作中间过渡层扩散焊接 $\text{SiC}_p/\text{2024Al}$ ,而文献[23]中采用加 $0.10\ \text{mm}$ 纯铜箔作为中间合金层真空扩散连接 $\text{SiC}_p/\text{Al}$ 复合材料。结果表明,界面结合状况明显改善,可得到质量较高的扩散焊接头。

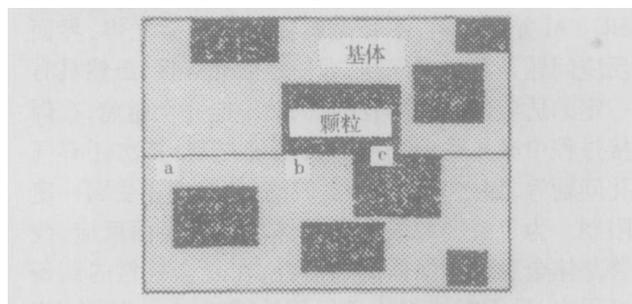


图2 连接界面的不同形式

Fig 2 Different types of bond interface

(a)M-M; (b)M-R; (c)R-R.

(4)其他影响因素。由于扩散焊接需要真空系统,设备投资大,成本高,且工艺过程复杂,对接头质量的影响因素多,易造成接头质量不稳定;此外,扩散焊接一般采用搭接接头形式,对构件的大小和形状尺寸有一定要求,这在一定程度上限制了它在实际生产中的应用。

### 3.2 扩散焊接新发展

为了进一步降低焊接生产成本,简化扩散焊接工艺过程, Lee C. S等人<sup>[24~25]</sup>研究开发出了一种叫非真空扩散连接的新工艺,用于铝基复合材料的焊接。原理是基于在扩散连接过程中,对母材进行原位表面处理——在连接前对试样施加一预载荷,在

所加载荷作用下使一个试样相对于另一个试样在平行于连接面的方向发生旋转,这样可使母材表面的氧化物层破碎和分散得以去除,并在扩散焊接过程中能保持一个清洁的连接界面,在非真空条件下实现铝基复合材料的可靠连接。

原位表面处理过程可用如图 3和图 4所示的示意图进行描述,图中的三角形或四边形块代表试样、粗线条( )代表脊峰。

初始状态如图 3所示,一个试样位于另一个试样的峰刃上,图中是假定上部试样与下部试样呈垂直排列。

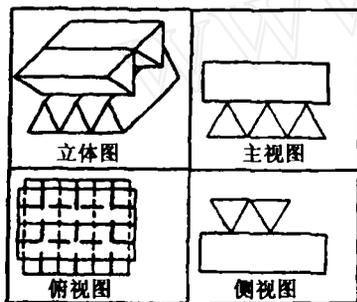


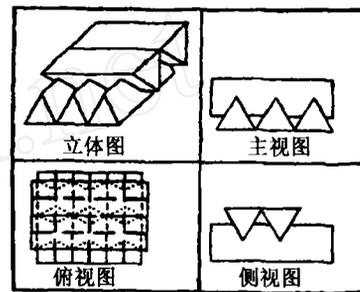
图 3 初始状态连接界面示意图

Fig 3 Schematic of joint interface at initial condition

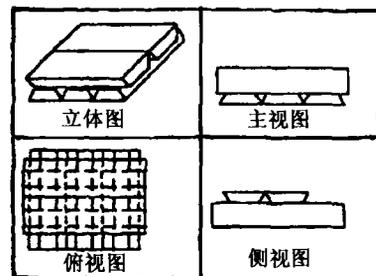
开始时,试样受到小于材料压缩屈服应力的预载荷作用,由于上试样与下试样之间的实际接触区域局限在峰刃接触点上,而不是在接头界面的整个表面区域,所以在接头界面试样将受到比材料本身屈服应力高几倍的压应力作用。高压应力和硬峰刃的综合作用导致试样相互剪切成彼此的软脊,如图 4(a)所示。由于原位表面处理时,剪切应力施加在试样沿连接平面的方向上,因此,在预载荷作用下,剪切应力所造成的连接使分布的硬峰刃嵌入到相反方向软基体的较深部位,使试样的表面形态从一系列的三角形峰变成四边形峰,如图 4(b)所示。

此外,在原位表面处理过程中,四边形峰还将进一步受到所加剪切应力和压缩应力的综合作用。界面相互作用的结果是:或者表面产生磨损,其余的发生剪切,或两者兼而有之。经过相互 90 度旋转循环使得界面相互作用可能发生从峰刃剪切到连接表面磨损的变化,而且峰刃剪切的范围是随着旋转循环次数的增加和每一次旋转循环而减小。这是因为在每次循环之间试样有足够的时间发生相互剪切,随时间的延长和旋转循环次数的增加试样接触面积增

加。如果压应力不足以使峰刃发生剪切,仅在第一次旋转循环后就可能产生表面磨损。在原位表面处理过程中,主要界面相互作用是连接表面的磨损。在第一个旋转循环的初始阶段,主要的界面相互作用是峰刃剪切,作用的结果使连接表面变平整。



(a) 相互剪切成软脊



(b) 嵌入软基体较深部位

图 4 施加预载荷原位表面处理前连接界面示意图

Fig 4 Schematic of joint interface after pre-load and before in-situ surface treatment

为了进一步验证非真空扩散连接工艺用于铝基复合材料扩散连接的可行性,文中对获得接头进行显微组织观察和力学性能测试以评价接头质量。结果表明,尽管母材表面存在黏着性强的氧化物层,但通过焊接过程中的原位表面处理能够提供一个洁净的连接表面,获得的接头可达到平均 90.5%的连接效率和 77.7%的接合区百分数。金相观察显示,穿过连接线产生了扩散连接并在拉伸断口中观察到韧性断裂,从而证实试样中产生了扩散连接。因此,对铝基复合材料进行非真空扩散连接是可行的。

此外,为了进一步拓展扩散焊方法在铝基复合材料连接中的应用,一种介于扩散焊与钎焊之间的新方法——瞬间液相连接(Transient liquid phase bonding, TLP)也得到了发展<sup>[26-28]</sup>。文献[27]研究了采用 Cu/Ni/Cu 多层箔作为中间连接层在 923 K 温度下进行 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的 TLP,在连接过程中

对试样施加 0.2 MPa 的压力,得到的接头强度可达 189.6 MPa,约为母材强度的 85%。为了解决采用 Cu 夹层 TLP 过程中易造成增强体颗粒如 SiC 在连接区域产生偏析而使接头强度降低的问题, A skew J R<sup>[28]</sup> 等人研究了采用 Ni 作为中间层对 17% SiC<sub>p</sub> / 2124Al 复合材料进行 TLP 可行性研究。结果表明,由于 Ni 在 Al-MMCs 中容易扩散,加速了在连接温度下的等温结晶过程,使得接头中未出现 SiC 颗粒的偏析等,采用薄 Ni 夹层(厚度为 13 μm)时,接头剪切强度接近母材强度。

#### 4 结束语

铝基复合材料尤其是颗粒增强铝基复合材料,采用通常的氩弧焊、激光焊和扩散连接虽然取得了一定进展,有其适应性的一面,但还存在诸多问题,如 SiC<sub>p</sub> / Al 复合材料熔化焊接中的界面反应问题;扩散焊接中的颗粒直接接触现象即 R-R 连接等,这些都是铝基复合材料在未来焊接研究中需要解决的主要问题。如果采用普通的氩弧焊方法,能成功实现铝基复合材料的高质量连接,将能大大降低生产成本,使该类材料在航空航天、兵器、汽车等工业领域的应用范围将不断扩大,且是一种很有潜力的方法之一。

#### 参考文献

- Herbert Staufer Problems by welding aluminium matrix composites In: European conference on laser treatment of materials, Hanover, Germany, 1998: 259 ~ 264
- 陈茂爱,陆皓,唐逸民等. SiC<sub>p</sub> / LD2 Al 合金复合材料电弧焊的焊接性. 金属学报, 2000; 36(7): 770 ~ 774
- Aheam J S, Cooke C, Fishman S G Fusion welding of SiC-reinforced Al composites Metal Construction, 1982; 14(4): 192 ~ 197
- Urena A, Rodrigo P, Gil L Interfacial reactions in an Al-Cu-Mg (2009) / SiC<sub>w</sub> composites during liquid processing Journal of Materials Science, 2001; 36(2): 429 ~ 439
- 李文澜. 连接铝金属基复合材料. 航空制造工程, 1995; (5): 25 ~ 26
- Ellis M B D. Joining of aluminium based metal matrix composites International Materials Reviews, 1996; 41(2): 41 ~ 58
- Goddard D M, Pepper R T, Upp J W et al Feasibility of brazing and welding aluminum-graphite composites Welding Journal, 1972; 51(4): 178 ~ 182
- Huang R Y, Chen S C, Huang J C Electron and laser beam welding of high strain rate superplastic Al-6061/SiC composites Metallurgical and Materials Transactions A, 2001; 32(10): 2575 ~ 2584
- 张永俐,罗素华. SiC-Al 界面 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的生成及其控制. 材料科学与工程, 1998; 16(1): 32 ~ 35

- 牛济泰,王慕珍,来忠红等. SiC<sub>w</sub> / 6061Al 铝基复合材料激光焊机理. 焊接学报, 2000; 21(1): 1 ~ 4
- 徐九华,范炯,林祥丰. 金属基复合材料激光诱发反应焊接研究. 航空学报, 1999; 20(6): 573 ~ 576
- Wang H M, Chen Y L, Yu L G ' In-Situ ' weld-alloying / laser beam welding of SiC<sub>p</sub> / 6061Al MMC Materials Science & Engineering A, 2000; A293(1 ~ 2): 1 ~ 6
- 陈永来,于利根,王华明. 合金化填充材料 Ni 对 SiC<sub>p</sub> / 6061Al 复合材料激光焊接焊缝显微组织的影响. 复合材料学报, 2000; 17(17): 63 ~ 65
- 郭义,刘鹏,何治经. Al-C 纤维复合材料微结构钎焊连接. 焊接学报, 1993; 14(4): 233 ~ 239
- McLeod A D, Gabriel C M Kinetics of the growth of spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> on alumina particulate in aluminum alloys containing magnesium Metallurgical Transactions A, 1992; 23A: 1279 ~ 1283
- Du J H, Yue T M, Man H C Electroplating of aluminium-based composites for eliminating carbides formation in laser welding In: 42<sup>nd</sup> International SAMPE Symposium, 1997: 783 ~ 792
- Toshio E, Kenji I, Yotaro M et al Diffusion bonding of Al-Mg-Si series 6063 alloy reinforced with alumina short fibers Transaction of JWRI, 1987; 16(2): 57 ~ 64
- 牛济泰,刘黎明,孟庆昌等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / 6061Al 复合材料焊接工艺参数的优化及接头组织. 焊接学报, 1999; 20(1): 28 ~ 32
- 牛济泰,王慕珍,刘黎明等. 扩散焊条件下 Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> / 6061Al 复合材料中氧化膜的行为. 材料研究学报, 2000; 14(3): 244 ~ 248
- 刘黎明,牛济泰. 采用非夹层液相扩散焊连接铝基复合材料 Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> / 6061Al 焊接技术, 1999; 28(5): 1 ~ 3
- 刘黎明,牛济泰,姜传海等. 采用非夹层液相扩散焊连接铝基复合材料. 焊接, 1999; (5): 12 ~ 15
- 赵明九,吕毓雄,陈礼清等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料 (SiC<sub>p</sub> / 2024Al) 的扩散焊研究. 材料研究学报, 2000; 14(2): 136 ~ 140
- 张兴平,魏巍,权高峰. SiC<sub>p</sub> 增强 Al 基复合材料的真空扩散焊接. 金属学报, 1999; 35(2): 198 ~ 202
- Lee C S, Li H, Chandel R S Vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite. Journal of Materials Processing Technology, 1999; 89 ~ 90(5): 326 ~ 330
- Lee C S, Li H, Chandel R S Stimulation model for the vacuum-free diffusion bonding of aluminium metal matrix composite. Journal of Materials Processing Technology, 1999; 89 ~ 90(5): 344 ~ 349
- Shirzadi A A, Wallach E R New approaches for transient liquid phase diffusion bonding of aluminium based metal matrix composites Materials Science and Technology, 1997; 13(2): 135 ~ 142
- 陈铮,金朝阳,赵其章. SiC<sub>p</sub> 颗粒增强 Al 基复合材料的瞬间液相连接. 焊接学报, 2001; 22(6): 57 ~ 60
- Askew J R, Wilde J F, Khan T I Transient liquid phase bonding of 2124 aluminium metal matrix composite Materials Science and Technology, 1998; 14(9/10): 920 ~ 924

(编辑 李洪泉)

宇航材料工艺 2006年 第4期