

# 工艺参数对 SiC<sub>p</sub>/101Al 复合材料电子束焊接头的影 响

季小辉, 王少刚, 董桂萍

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 以 SiC<sub>p</sub>/101Al 复合材料为研究对象, 采用真空电子束焊接技术, 研究在不同工艺参数条件下获得接头的组织与性能。通过拉伸试验, 研究不同工艺参数对获得接头力学性能的影响; 利用光学显微镜观察分析不同参数条件下接头区域的金相组织; 采用透射电镜观察 SiC-Al 界面微观结构; 利用扫描电镜观察接头断口形貌; 利用 X 射线衍射仪测定接头焊缝区的相结构。结果表明, 在保证试件完全焊透的情况下, 降低电子束的线能量, 可在一定程度上提高接头的强度; 接头中的气孔主要形成于熔合线区域, 快速焊接和电子束扫描可使气孔形成受到大大抑制; 进一步的修饰焊有利于提高焊接接头的质量。

**关键词:** 铝基复合材料; 电子束焊; 组织; 性能

**中图分类号:** TG456.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)09-1650-05

碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、耐磨损、导电导热性能好、热膨胀系数小等优点, 已成为当今世界金属基复合材料研究领域中的一个最为重要的热点, 并且日益向工业规模化生产和应用的方向发展<sup>[1~3]</sup>。目前, 研究用于铝基复合材料的焊接方法主要有电弧焊、电容放电焊、激光焊、扩散焊、钎焊和摩擦焊等。然而, 由于基体铝合金与 SiC 增强相之间的物理和化学性质相差较大, 因此, 采用常规的熔化焊方法很难获得优质的焊接接头。相比而言, 电子束焊接方法由于具有热循环速度快和工件热输入小等特点, 对母材的不利影响较小, 有助于减少焊接过程中所引发的各种缺陷<sup>[4,5]</sup>。已有的研究表明, 碳化硅颗粒增强铝基复合材料电子束焊接时的主要问题仍是焊缝成形及增强相 SiC 颗粒与基体 Al 合金之间的界面反应等, 鉴于此, 对 SiC<sub>p</sub>/101Al 复合材料的电子束焊接进行研究具有重要的理论意义及实际应用价值。

## 1 实 验

所用母材为 SiC<sub>p</sub>/101Al。其基体 101Al 合金化学成分为(质量分数, %下同): Si 6.5, Mg 0.25, Fe 1.4, Ce 0.1, Mn 0.35, Zn 0.3, Cu 0.2, Pb 0.05, Sn 0.01, Zr+Ti 0.25, Al 其余。拉伸试验测定, 母材的抗拉强度为 168 MPa。焊接试样尺寸为 45 mm×35 mm×2 mm。

采用 MEDARD45 型真空电子束焊机将两块试样沿长度方向进行对接, 电子枪额定功率为 6 kW, 加速电压 60 kV, 真空度小于 10<sup>-3</sup> Pa。试件在焊接前用丙酮超声波清洗 10 min, 接头间隙小于 0.5 mm。焊后, 利用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪测定接头中的相结构; 采用 MM6 型金相显微镜观察试件接头的显微组织; 利用 FEI Tecnai G2 型透射电镜观察焊缝接头微观结构形貌; 采用 HXS-1000A 型维氏硬度计测定焊接区显微硬度; 在 CMT5105 型电子万能试验机上进行接头拉伸试验, 测试时加载速度为 0.5 mm·min<sup>-1</sup>; 采用 Quana200 型扫描电镜观察拉伸试件断口形貌。

## 2 结果及分析

### 2.1 接头力学性能

#### 2.1.1 拉伸试验

测量不同工艺参数条件下所获各组电子束焊接头试样的室温抗拉伸强度, 其结果见表 1。由表 1 可以看出, 随着焊接速度的降低, 接头抗拉强度呈下降趋势。分析认为, 降低焊接速度, 接头热影响区处于高温的时间相对较长, 有利于气孔和脆性相的生成, 从而导致焊缝质量的下降。在焊接速度一定的条件下, 电子束功率过大或过小都不利于接头强度的提高。电子束功率过大, 容易造成热影响区过热严重, 铝基体熔化, 复合材料发生半固态变形, 试件背面出现上凹

收稿日期: 2008-09-13

基金项目: 江苏省自然科学基金资助(BK2002094)

作者简介: 季小辉, 男, 1984 年生, 硕士生, 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016, E-mail: jixiaohui198401@163.com

和正面近缝区隆起的现象。并且随着电子束功率的增加，接头组织中脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的尺寸和数量也会增多，导致接头性能恶化；如电子束功率过小，则接头熔深变浅，焊件的熔合区变窄，接头强度大幅度降低。对 C 组试样接头拉伸断口进行观察发现，电子束功率为 0.6 kW 时，焊件中心未完全焊透，这是导致接头强度下降的主要原因。

表 1 不同电子束工艺参数获得接头的室温抗拉伸强度

Table 1 Tensile strength of joint with different welding parameters at room temperature

Speciment	Power /kW	Welding speed /mm·s <sup>-1</sup>	Electron beam scanning or modification welding	Tensile strength /MPa
A	0.66	17	No	92
B	0.66	13	No	70
		15	No	81
C	0.70	17	No	87
	0.60		No	64
D	0.66	17	Electron beam scanning with $f=900$ Hz saw-tooth wave	96
			Modification welding with 6 mA surface focusing current	101

电子束扫描和修饰焊对接头强度也具有一定影响。在焊接过程中，通过电子束扫描可改善熔合区液态金属的流动性，虽然输入热量增多，轻度促进 SiC 颗粒和 Al 基体之间的界面反应，但是电子束扫描可有效抑制近缝区气孔的生成。很明显，焊缝中气孔的数量越多、尺寸越大，接头的有效承载面积越小，则接头强度将越低，气孔的数目和大小对接头强度有重要影响。D 组实验采用频率为  $f=900$  Hz 锯齿波对焊缝进行扫描，发现焊后所获接头强度的上升幅度并不是很明显，这主要是由于电子束扫描易形成断续的熔合，导致接头强度起伏较大。而在焊接过程中，采用表面聚焦电流为 6 mA 修饰焊对焊缝进行修饰，接头强度有所提高。这主要是由于在修饰焊过程中，焊缝上部金属重熔，焊接速度较深熔焊时减慢，熔池金属凝固速度降低，故熔池中的气体能通过重熔逸出金属表面，减少接头中细小气孔的产生。此外，从接头组织形态来看，修饰焊时的重熔将使得晶粒进一步细化，因此接头强度有一定程度的提高。

2.1.2 接头显微硬度测定

分别测试 D 组中采用频率为  $f=900$  Hz 锯齿波扫描和采用表面聚焦电流 6 mA 修饰焊时获得接头的显微硬度，其测试条件为：加载载荷 0.5 N，加载时间 15 s。

测试方法为沿垂直焊缝方向对“母材区-热影响区-焊缝金属区”依次测量，测量点之间的距离约为 0.1 mm，每个点均测量 3 次，然后取其平均值。测试结果如图 1 所示。

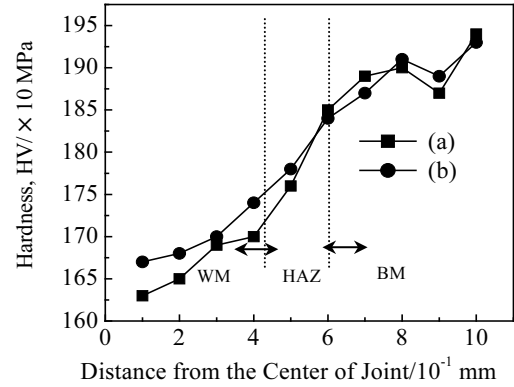


图 1 接头显微硬度分布曲线

Fig.1 Distribution of hardness of welded joint: (a) electron beam scanning with  $f=900$  Hz saw-tooth wave and (b) modification welding with 6 mA surface focusing current Note: WM-welded metal; HAZ-heat affected zone; BM- matrix

由图 1 可以看出，两种焊接工艺条件下获得接头从母材区、热影响区到焊缝金属区其显微硬度依次降低，焊缝中心部位的硬度最低，远离焊缝中心的硬度逐渐增加。分析其原因，主要是接头焊缝金属中的 SiC 颗粒含量较母材中减少所致；并且由于熔池温度从焊缝中心向边缘逐渐递减，故焊缝中心可能生成相对较多的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 脆性相。接头中气孔和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的生成，在一定程度上导致焊缝金属和热影响区的显微硬度降低，而远离焊缝中心的显微硬度逐渐增加。

2.2 接头显微结构分析

2.2.1 接头金相组织及 XRD 分析

对 A 组试样中采用功率为 0.66 kW，焊接速度为 17 mm·s<sup>-1</sup> 的电子束焊获得接头的金相组织进行观察，其接头的显微组织照片如图 2a 所示。可以看出，接头焊缝金属区的组织由 Al 基体、块状 SiC 颗粒、针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相和颗粒状 Si 相构成。进一步对接头焊缝金属进行 XRD 分析，其结果如图 3 所示。可以看出，接头焊缝金属区主要含有 Al、SiC、Si 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 等组成相。

由理论分析可知，接头中 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 和 Si 相的生成是由于在焊接高温条件下部分 SiC 颗粒会与基体 Al 发生界面反应，其反应式为， $4Al(1)+3SiC(s) \rightarrow Al_4C_3(1)+3Si(s)$ 。反应产物 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 为脆性相，会削弱接

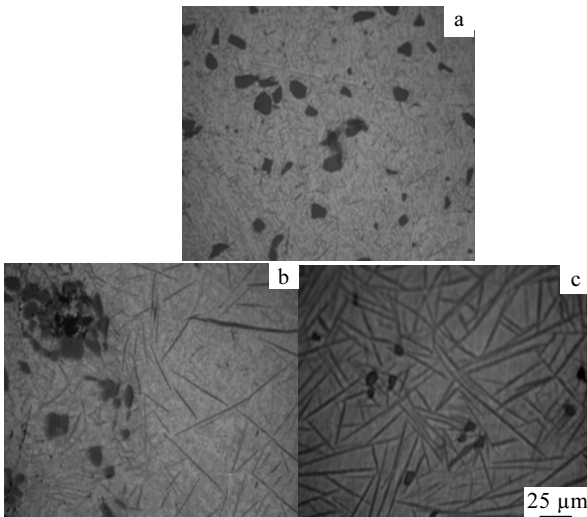


图 2 SiC<sub>p</sub>/101Al 电子束焊接头金相组织

Fig.2 Joint microstructure of SiC<sub>p</sub>/101Al: (a)  $Q=0.66$  kW,  $v=17$  mm·s<sup>-1</sup>; (b)  $Q=0.66$  kW,  $v=13$  mm·s<sup>-1</sup>; (c)  $Q=0.70$  kW,  $v=17$  mm·s<sup>-1</sup>.

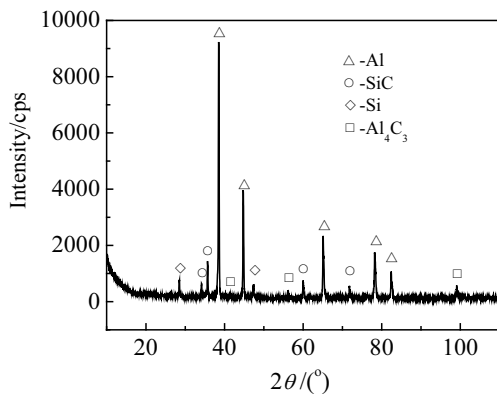


图 3 电子束焊接头的 XRD 图谱

Fig.3 XRD pattern of EBW joint

头的力学性能<sup>[6-8]</sup>。对 B、C 两组试样接头的显微组织分析表明,随着焊接速度的减小和电子束功率的增加,针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相的数目和尺寸明显增大,如图 2b~2c 中所示。分析其原因,是由于减小焊接速度,导致焊接热输入增加, SiC 颗粒在高温区的停留时间增加,因此针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的数目和尺寸随着增大;提高电子束功率,虽然能在一定程度上改善熔池金属的流动性,但会增大焊接热输入,增强 SiC 颗粒和基体 Al 之间的界面反应,故针状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的数目和尺寸也随之增加。因此,为了减少接头中脆性相的形成,以获得高质量的焊接接头,在焊接过程中,应采用合理的焊接工艺参数,严格控制焊接热输入。

### 2.2.2 断口 SEM 分析

在 Quanta200 型扫描电镜上分别观察 A 组和 D 组中采用表面聚焦电流 6 mA 修饰焊时获得接头的断口形貌,两组拉伸试件都断裂于接头近缝区处,其断口形貌如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,断裂面上有较浅的韧窝和微量的小气孔出现,接头区气孔等缺陷的存在是导致其力学性能降低的主要原因。观察图 4b 中断口,发现断裂面上有大量的韧窝存在,接头断口总体呈现韧性断裂特征;焊缝中有许多 SiC 颗粒分布,并且 SiC 颗粒被撕裂的铝基体包裹,说明获得的接头质量良好,能够满足实际使用要求。

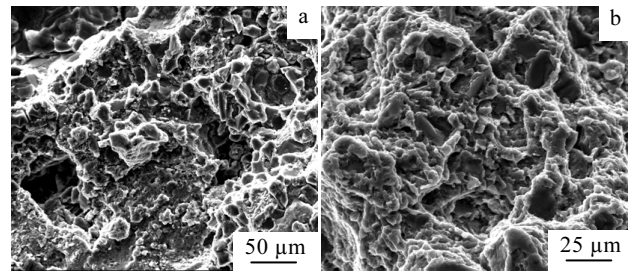


图 4 接头断口 SEM 照片

Fig.4 SEM images of joint fracture surface: (a) specimen A and (b) specimen D

### 2.2.3 TEM 观察

为了进一步分析电子束焊接头形成过程的机制,对 D 组中采用表面聚焦电流 6 mA 修饰焊时获得接头进行透射电镜观察,拍摄不同放大倍数照片,如图 5 所示。从图 5a, 5b 中观察发现,柱状 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相交错分布于 SiC-Al 界面,部分柱状的 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 相表面有块状 Si 相析出。结果表明,虽然采用合理的焊接工艺参数,严格控制焊接热输入,但是 SiC 颗粒与基体 Al 合金之间的界面反应仍无法完全避免。从图 5c 中还可以看出,部分 SiC-Al 界面附近有少量 Al-Si-Fe 共晶组织生成。焊缝中 SiC、Al-Si-Fe 共晶组织等增强相的存在对位错运动特别是短程滑移会产生强烈的阻碍作用,从而使微塑性变形不易产生,在一定程度上提高了电子束焊接头的力学性能。

## 2.3 工艺参数分析

### 2.3.1 工艺参数对焊缝成形的影响

对 B、C 两组获得接头进行焊缝成形宏观分析,发现电子束功率和焊接速度的变化都会造成焊接熔化区成形的改变。因此,需要综合考虑二者对焊缝金属成形的影响,结合接头的力学性能测试,以期获得最佳的焊接工艺参数。为此,以  $E$  表示单位长度上的输入能量:

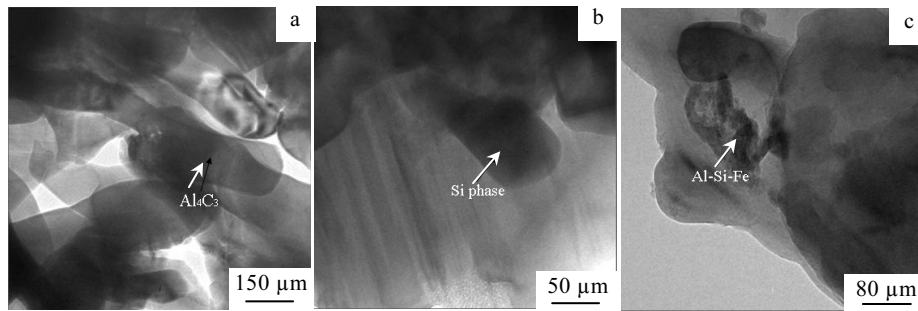


图5 电子束焊接头的 TEM 照片

Fig.5 TEM images of EBW joint: (a) Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> phase, (b) Si precipitated on surface of Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> phase, and (c) Al-Si-Fe eutectic structure

$$E = \frac{Q}{v} = \frac{UI}{v} \quad (1)$$

式中:  $E$  为焊接线能量(J/mm),  $Q$  为电子束功率(kW),  $U$  为加速电压(kV),  $I$  为电子束流(mA),  $v$  为焊接速度( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )。随着焊接线能量的增加, 焊缝单位长度上的输入能量不断加大, 电子束穿透深度逐渐增加, 从而导致接头熔深逐渐增大。由式(1)可知, 在焊接过程中, 对于增加焊接线能量  $E$  有两种方式: 一是提高电子束功率, 电子束功率与线能量成正比; 二是减小焊接速度, 焊接速度与线能量成反比。

由 B、C 两组实验表明, 在焊接速度不变的条件下, 通过提高电子束功率来增大输入热量, 可使焊缝熔深明显增大; 而如果只通过降低焊接速度来增大输入热量, 则熔深增大不明显。这是因为焊接速度降低后, 由热传导而造成的能量损失增大, 从而导致焊缝熔深增大不多。D 组焊接工艺实验发现, 焊接过程中通过采用修饰焊可明显改善焊缝表面成形, 有利于减少各种焊缝缺陷。图 6 为采用修饰焊时获得接头焊缝的宏观形貌。可以看出, 焊缝成形较好, 接头表面未发现未熔合等缺陷。

### 2.3.2 工艺参数对焊缝气孔的影响

焊缝中气孔形成的原因可能是由于母材中含有

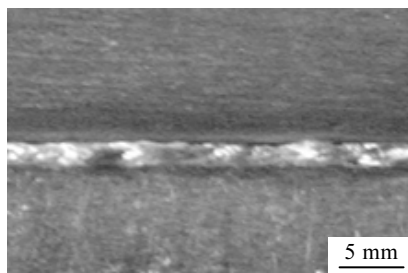


图6 电子束焊接头宏观形貌

Fig.6 Appearance of welded joint

易挥发合金元素的挥发所致, 焊接时如果金属蒸气来不及从熔池金属中逸出则会在接头中形成封闭的气孔。由于复合材料母材本身的粘度大, 熔池金属的流动性差, 气体逸出较困难, 所以气孔主要形成于接头热影响区中<sup>[9]</sup>。

B 组实验表明, 气孔对焊接速度十分敏感。焊接速度越低, 热影响区经受焊接热循环的加热作用越充分, 形成气孔的倾向增大。增大焊接速度, 会缩短部分液化母材及其附近 HAZ 区在高温停留的时间, 可在一定程度上减轻合金元素的挥发, 有利于减少形成气孔的体积和数目。D 组实验表明, 以一定波形和频率的电子束流对焊缝进行扫描, 可适当增加对焊缝的热输入, 改变焊缝的冷却速度。同时, 电子束流的搅拌作用还可以改善焊缝金属的流动性, 使熔池金属中的气体易于逸出, 从而大大抑制焊缝中气孔的形成。

## 3 结 论

1) 随着电子束功率减小和焊接速度增加, 接头中形成的脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 和气孔的尺寸和数量减少。降低电子束功率和提高焊接速度又会导致焊缝熔深变浅, 不利于保证获得接头的强度。

2) 电子束线能量可作为评价焊件接头强度的一个综合参数。在确保焊件完全焊透的情况下, 适当降低电子束的线能量, 有利于提高接头的强度。

3) 在本实验条件下, 电子束焊接参数为功率 0.66 kW, 焊接速度  $17 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 并采用表面聚焦电流 6 mA 修饰焊时, 获得接头焊缝表面成形良好, 接头组织中气孔等缺陷和脆性相 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 含量较少, 接头具有较高强度。

### 参考文献 References

[1] Ren Jialie(任家烈), Wu Aiping(吴爱萍). *Joining of Advanced*

- Materials*(先进焊接头材料)[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 186
- [2] Wang Shaogang(王少刚), Xu Jiuhua(徐九华), Wang Lei(王蕾) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34 (6): 978
- [3] Lin Lihua(林丽华), Tang Yiming(唐逸民), Gu Mingyuan(顾明元) *et al. Materials Science & Engineering* (材料科学与工程)[J], 1997, 15 (3): 23
- [4] Liu Chunfei(刘春飞), Zhang Yikun(张益坤). *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术) [J], 2003(1): 33
- [5] Wang H M, Chen Y L, Yu L G. *Materials Science and Engineering* [J], 2000, 293(1): 1
- [6] Ellis M B D. *International Materials Reviews* [J], 1996, 41(2): 41
- [7] Lienert T J, Brandon E D, Lippold J C. *Scripta Metallurgica et Materialia* [J], 1993, 28 (11): 1341
- [8] Maoai Chen, Chuansong Wu, Zengda Zou. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2006, 16 (4): 818
- [9] Huang R Y, Chen S C, Huang J C. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* [J], 2001, 32 (10): 2575
- [5] Wang H M, Chen Y L, Yu L G. *Materials Science and Enginee-*

## Effects of Electron Beam Welding Parameters on SiC<sub>p</sub>/101Al Welded Joints

Ji Xiaohui, Wang Shaogang, Dong Guiping

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites SiC<sub>p</sub>/101Al were welded by electron beam welding with different welding parameters, and the structure and properties of welded joints were investigated. The mechanical properties of welded joints with different welding parameters were studied through tensile test. The microstructure of weld metal was analyzed with optical microscope and the morphology of joint fracture was observed by SEM. The interfacial structure of SiC-Al was analyzed with TEM, and the phase constituent of welded joint was tested by XRD. The results show that the joint strength can be improved by decreasing the heat input power of electron beam when getting the penetration bead. Some pores appeared mainly near in the bond line, but porosity can be suppressed to a great extent by increasing welding speed or electron beam scanning. Moreover, the modification of welding is advantageous to improve the joint qualities.

**Key words:** aluminum metal matrix composites; electron beam welding; structure; property

Biography: Ji Xiaohui, Candidate for Master, College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China, E-mail: jixiaohui198401@163.com