

激光焊接条件下 SiC_w/6061Al 铝基复合材料界面反应研究

Study of Interface Reaction and Effecting Factor of Aluminium Matrix Composite under Laser Welding Condition

刘黎明 牛济泰 田艳红
(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室)

Liu Liming Niu Jitai Tian Yanhong
(National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, HIT)

[摘要] 研究了激光焊接条件下 SiC_w/6061Al 铝基复合材料的界面反应,探讨了激光输出功率、激光脉冲频率等焊接工艺参数对该材料界面反应的影响。结果表明:激光焊接条件下 SiC_w/6061Al 铝基复合材料可焊性差的原因主要是与基体6061Al 铝合金和增强相 SiC 晶须间的界面反应 $Al(l) + SiC(s) \rightarrow Al_4C_3(s) + Si(s)$ 有关,激光输出功率是影响界面反应程度的主要焊接工艺参数。在此基础上成功实现了 SiC_w/6061Al 铝基复合材料的激光焊接。

关键词 铝基复合材料 激光输出功率 界面反应

[Abstract] Interface reaction of aluminium matrix composite SiC/6061Al in the welded joint subjected to laser welding was studied. Effects of laser output power and pulse frequency welding parameters on interface reaction were also investigated. The results show that main reason for bad weldability of the composite concerns with interface reaction during the welding, that is: $4Al(l) + 3SiC(s) \rightarrow Al_4C_3(s) + Si(s)$. The study proves that the laser welding can be successfully used in the welding of SiC_w/6061Al aluminium matrix composite.

Keywords aluminium matrix composite laser output power interface reaction

铝基复合材料作为一种新兴材料,由于其具有高比强度、高比模量、耐高温、抗辐射、尺寸稳定性好等优异的综合性能而受到人们的广泛关注,并将逐步取代部分传统的金属材料而广泛应用于航空、航天、汽车制造业等领域,成为当今金属基复合材料发展与研究的主流。铝基复合材料的焊接是形成结构件必不可少的加工手段。由于该种材料基体与增强相间物理性质(如熔点、电阻率等)相差很大,在高温下基体与增强相之间极易发生界面反应,生成脆性化合物,很难形成优质焊接接头^[1,2]。所以,研究和控制在焊接条件下铝基复合材料的界面反应对该种材料的实际应用具有重要意义。

本工作通过系列试验研究了激光焊条件下铝基复合材料 SiC_w/6061Al 界面反应及其影响因素,指出了该种材料可焊性差的原因主要与焊接过程中基体与增强相间的界面反应有关,激光输出功率是影响界面反应程

度的主要焊接工艺参数。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用挤压铸造法制备铝基复合材料 SiC_w/6061Al。增强相 SiC 晶须平均直径为 0.5μm,体积比为 20%。该复合材料在退火状态下拉伸强度为 220MPa。基体 6061Al 的化学成分如表 1 所示。

表1 6061Al 的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical compositions of 6061Al alloy (wt%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
0.34	0.75	0.22	0.36	1.26	< 0.15	< 0.05	< 0.05	余

1.2 试验步骤

(1) 采用线切割的方法将材料加工成 2mm × 10mm × 30mm 焊件;

(2) 将试件进行对接平焊, 焊接设备为美国产 YAG 固体脉冲式激光加工机, 其最大功率为 400W, 脉冲频率 1 ~ 200Hz, 脉冲宽度 0.3 ~ 7.4ms, 波长 106μm;

(3) 在 Instron 公司产的电子万能试验机上进行焊接接头拉伸测试, 拉伸速度为 0.5mm/min;

(4) 分别采用光镜、SEM 和 TEM 分析在激光焊条件下铝基复合材料微观组织及界面反应生成物。

2 界面行为研究

图1为典型的激光焊条件下焊缝组织照片, 可以发现焊缝中出现了硅块, 晶须变得很细, 说明基体与增强相之间发生了界面反应。铝基复合材料 SiC_w/6061Al 母材与焊缝的透射电镜照片如图2所示, 母材中增强相

SiC 与基体 Al 间界面干净, 无反应物产生; 而焊缝中增强相 SiC 与基体 Al 间有反应物出现, 经衍射分析, 反应生成物为 Al₄C₃。

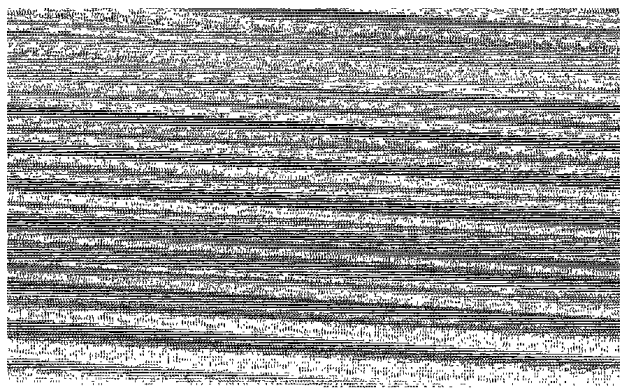


图1 SiC_w/6061Al 激光焊焊缝显微组织 × 1000

Fig. 1 Microstructure of SiC_w/6061Al welded joint at laser beam

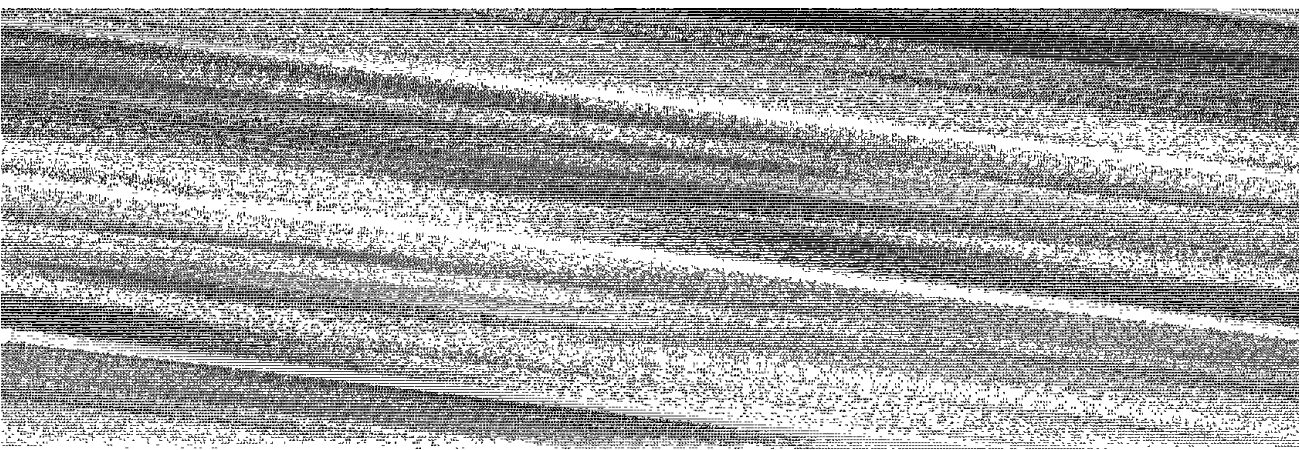


图2 母材及焊缝 TEM 照片 × 4500 (a) 母材; (b) 焊缝

Fig. 2 Transmission electron micrographs of parent (a) and weld (b) × 4500

这是由于, 在激光焊接铝基复合材料时, 复合材料依靠吸收激光束能量而熔化, 材料对激光束的吸收率 α 取决于其电阻率及激光的波长, 可用下式表示^[3]:

$$\alpha = 0.35 \frac{\rho}{\lambda}$$

式中: ρ 为电阻率, λ 为激光波长, α 为吸收率。

由上式可知, 在激光焊接铝基复合材料 SiC_w/6061Al 时, 由于增强相 SiC 的电阻率比基体 Al 大得多, 因此增强相 SiC 对激光的吸收率比基体 Al 大得多, 使得激光束照射处增强相 SiC 优先吸热, 被迅速加热到很高的温度, 再通过热传导加热基体铝合金, 这种加热机制使得增强相 SiC 及其附近的基体 Al 温度要远高于熔池的平均温度, 这就很容易发生界面反应。熔融的 Al

在较高温度下将与 SiC 发生如下反应^[4]:



在界面上生成细小针状或片状 Al₄C₃ 与 Si 块, 并且此反应是不可逆的, 反应生成物破坏了增强相 SiC 与基体 Al 间原始良好的结合界面, 使增强相 SiC 晶须难以起到对焊缝的强化作用, 同时生成的 Al₄C₃ 与 Si 块是极脆的物质, 又进一步削弱了焊缝的强度。有关研究^[5]表明, 采用挤压法制备的铝基复合材料 SiC_w/6061Al 中 SiC 晶须与 6061Al 合金基体结合十分完好, 界面干净, 基体与晶须间可能存在八种晶体位向关系。但是在激光焊焊缝中, 界面结合就发生了很大的变化, 原始基体与晶须界面已被破坏, 取而代之的是如图3所示的一种结合机理。

可见，焊缝中界面反应脆性生成相 Al_4C_3 相当于在基体与增强相间插入脆性中间层，阻碍二者间接合，焊缝中铝基复合材料界面的这种结合机制不仅减少了载荷的传递能力，而且还为裂纹的萌生和扩展提供了场地。可以认为，焊缝中基体与增强相间的界面反应是导致焊缝接头力学性能损失的重要原因。

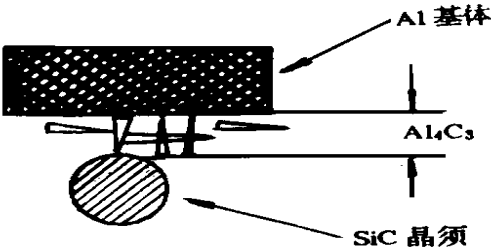


图3 激光焊焊缝中铝基复合材料界面示意图
Fig. 3 Scheme of interface of aluminium matrix composite in the weld of laser welding

因此，焊缝力学性能损失的原因可以归纳如下：①由于（1）式的反应，使得SiC 晶须数量减小，同时改变晶须与基体间结合机理，降低了焊缝接头的力学性能。②由于存在上述反应，使得基体组织发生变化，在基体中出现许多硅块，它的存在使基体的塑性下降。

3 工艺参数对界面反应的影响

（1）式反应的自由能公式为^[6,7]：

$$\Delta G \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1}) = 113900 - 12.06T \ln T + 8.92 \times 10^{-3} T^2 + 7.53 \times 10^{-4} T^{-1} + 21.5T + 3RT \ln \alpha_{Si}$$

式中： α_{Si} 为Si在液态Al中的活度，由上式可见 ΔG 受温度和 α_{Si} 两个因素影响，随着温度的升高， ΔG 减小。其反应趋势如图4所示。

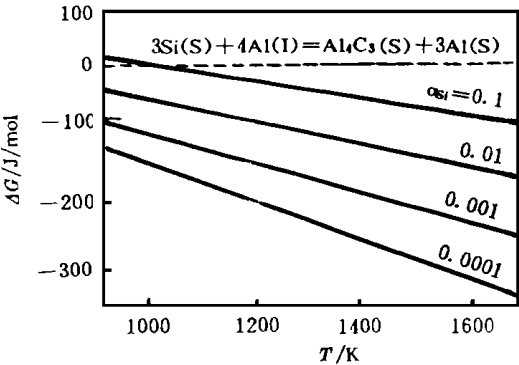


图4 激光焊熔池中 ΔG 与焊接温度 T 、硅活度 α_{Si} 的关系曲线

此式反映了焊接温度 T 、硅活度 α_{Si} 对 ΔG 的影响。焊接温度 T 越高， ΔG 也就越小，界面反应就越易进行；熔池中Si的浓度越大则 α_{Si} 的值越大， ΔG 也就越大，界面反应就越不易发生。此反应已被实践所证明，在1000K 以下， ΔG 较小，（1）式反应很小，这就是采用压铸法制造铝基复合材料过程中未出现界面反应物，而在激光焊焊缝中却出现界面反应的原因。

由于在激光焊接条件下铝基复合材料界面反应的宏观表现为焊缝力学性能的损失，因此通过测试焊缝接头强度的变化可间接表明焊接规范参数对铝基复合材料界面反应的影响。焊接规范对铝基复合材料焊缝接头强度的影响如图5所示。

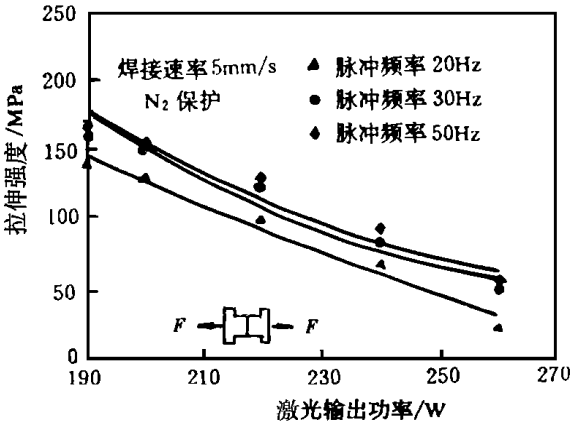


图5 激光焊接参数对接头强度的影响
Fig. 5 Effects of process parameters of laser welding on tensile strength of welded joint

可见伴随着激光功率的增加，使得接头强度明显减低。这是由于激光输出功率越大，熔池的温度就越高， ΔG 也就越小，使得（1）式反应就越容易进行，焊缝中基体与增强相间界面反应加剧，反应生成物 Al_4C_3 增多，导致激光焊中焊缝的力学性能损失严重。在图5中还可以看出，随着脉冲频率的增加，焊缝接头强度有所增加，但激光脉冲频率超过一定限度接头强度趋于稳定。这是由于在激光束总的输出能量不变的情况下，脉冲频率的增加意味着每次输出能量的减少，改善了熔池内部温度的分布，根据上述分析可知，（1）式反应将被抑制，减少Si块与 Al_4C_3 的生成，但与激光输出功率相比脉冲频率对接头强度的影响不显著。考虑到一定型号的激光焊机有其频率使用范围，而且频率选择应与焊接速度相匹配，故本试验均使用30Hz 脉冲频率。

可以认为，激光焊接铝基复合材料时激光束的输出功率是影响界面反应的主要工艺参数。（下转第44页）

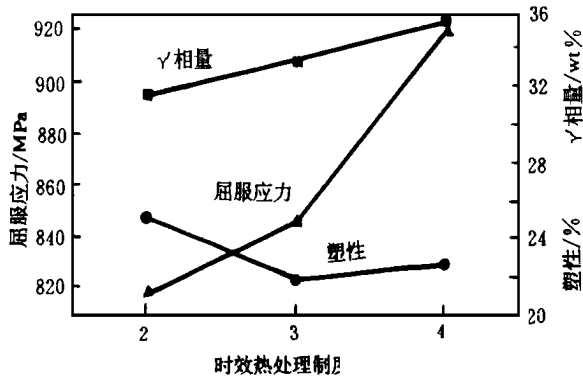


图4 相同固溶处理温度不同时效处理制度下 γ 相数量、大小及性能

Fig.4 The amount and size of γ phase and the properties for the different aging treatments at same annealing temperature

而析出的。

从图4中可以看出当固溶温度确定以后, 随着时效温度的降低和时间的延长, γ 相含量增加, 合金强度上升, 但塑性降低, 如2#和3#。但4#与3#的塑性相差很

小。显然4#的1050 时效处理过程中, 由于温度较高而出现较大的 γ 相, 正是这种大尺寸的 γ 相缓解了因 γ 相增加而引起的合金塑性的降低。

3 结论

(1) 采用较低的固溶处理温度使 γ 相不完全溶解而形成大小 γ 相共存的组织, 可以阻止晶粒长大, 提高合金的强度和塑性, 这种与传统高温合金使 γ 相完全溶解的固溶处理思路不同的方法对合金的性能尤其对改善合金的塑性具有重要的意义。

(2) 降低时效温度、增加时效时间, 可以增加 γ 相含量, 提高合金强度和降低合金塑性。

收稿日期: 1998-06-06

龙正东, 男, 1967年生, 工程师, 硕士。从事高温合金的生产加工工艺以及工艺、组织和性能关系研究。通讯地址: 北京钢铁研究总院高温材料所 (邮编: 100081)

* * * * *

(上接第40页)

从这一观点出发, 在保证熔透的前提下, 使用低能量输入是获得高质量 $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$ 铝基复合材料熔焊焊缝的重要手段, 同时通过选择硅含量高的铝合金作为基体或人为地增加熔池中硅的含量以此来提高熔池中硅的活度值, 可以大大改善 $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$ 铝基复合材料的可焊性, 为铝基复合材料熔焊指出了一条新的途径, 也为复合材料的制备技术提供某种借鉴。

4 结论

(1) 激光焊接 $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$ 铝基复合材料时, 造成该材料可焊性差的主要原因是焊缝中发生如下界面反应:



(2) 影响 $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$ 铝基复合材料激光焊焊缝强度的主要工艺参数是激光输出功率, 激光输出功率的大小直接影响着界面反应的程度, 功率越小, 则界面反应程度越轻, 焊缝的力学性能越好。

参考文献

1 广濑明夫. 复合材料の结合. 熔接学会志 65 (1996), 7: 6 ~ 10

2 牛济泰等. 碳化硅晶须增加铝复合材料焊接方法与工艺探讨. 中—日轻金属焊接研讨会论文集1990, 1~20
3 T. J. Lienerr, E. D. Brandon and J. C. Lippold, Laser and electron beam welding of SiC_p reinforced aluminum A-356 metal matrix composite. Scripta Metallurgica, 28 (1993), 1341~1346
4 T. Iseki, T. Kameda and T. Marayama, Interfacial reactions between SiC and aluminum during joining. Journal of Materials Science, 1984, 19: 1692~1698
5 耿林. 压铸 $\text{SiC}_w/\text{LD2}$ 复合材料中晶须及界面的微观结构, 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1990
6 潘龙修. 碳化硅晶须增强铝复合材料的激光焊研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1992
7 王慕珍等. $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$ 激光焊规范参数对接头强度的影响, 航天工艺 1991, 6: 1~5

稿件收到日期: 1998-10-03

修改稿收到日期: 1999-01-08

国家自然科学基金资助项目 (858800)

刘黎明, 男, 1967年11月出生, 博士, 工程师, 联系地址: 哈尔滨工业大学焊接教研室 (邮编: 150001)