

SiC 颗粒增强 Al 基复合材料焊接工艺研究

曲文卿 张彦华 Sohail A. Khan

(北京航空航天大学 702 教研室 北京 100083)

姚君山

(首都航天机械公司 北京 100076)

文 摘 通过 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料与 Al 合金的焊接工艺试验研究,重点分析了材料组合、保温工艺、连接时间等工艺参数对连接接头性能的影响以及连接接头的微观组织及成分分布。研究表明,ILP 扩散连接是一种适用于复合材料连接的重要方法,在相同工艺条件下,LF6/SiC_p-6061Al 的接头性能明显优于 LF6/SiC_p-2024Al。连接时间过短或过长,都将影响到接头性能,并且连接时间对不同材料组合的影响也不同。采用二次保温工艺可以较大幅度地提高接头性能。

关键词 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料, Al 合金, ILP 扩散连接

Study of Welding Process of SiC Particle Reinforced Al-based Composite

Qu Wenqing Zhang Yanhua Sohail A. Khan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083)

Yao Junshan

(Capital Aeronautics Mechanic Company Beijing 100076)

Abstract Welding process of SiC_p composite with aluminium alloy was studied, and the effect of the process parameters such as materials combinations, holding temperature, bonding time on the bonds properties is analyzed, the microstructure and concentration profile of the bonds are also analyzed. The results show that ILP diffusion bonding is an important process to join composite. Under the same conditions, the properties of LF6/SiC_p-6061Al bonds are superior to that of LF6/SiC_p-2024Al bonds. Too long or too short bonding time will affect the bond property, and the effect of time on bond property is different for different material combinations. Using two temperature holding process can improve the bond property significantly.

Key words SiC particle reinforced Al - based composite, Aluminium alloy, ILP diffusion bonding

前言

金属基复合材料,特别是非连续体(如颗粒、纤维和晶须等)增强金属基复合材料具有较高的比强度、比模量及良好的断裂韧性、耐腐蚀性以及耐磨性等重要性能,因而近年来在工程实际中得到了广泛

的应用^[1]。由于复合材料增强体和基体之间以及复合材料与金属或合金之间的物理化学以及力学性能差异太大,其连接问题一直是阻碍该种材料走向实用化的关键问题^[2]。

目前一种新型的焊接方法——过渡液相(Tran-

收稿日期:2002-01-04

曲文卿,1972年出生,博士,主要从事石油管道焊接质量评定与接头完整性分析、异种材料界面连接力学失配性以及异种材料的钎焊、扩散连接和 ILP 连接等方面的研究工作

sient Liquid Phase,简称 TLP)连接方法^[3]开始在复合材料的焊接中得到应用,该方法利用接触熔化现象,在低于母材和中间过渡层熔点的温度下,通过母材与中间层金属发生低熔点共晶,形成组织均匀的焊缝接头。TLP 连接一般利用共晶或包晶合金系统,以降低连接温度;因而具有焊接温度低、时间较长、不需或只需很小压力以及不需要严格的表面加工等特点,是一种非常适合于复合材料连接的方法,TLP 连接方法已经广泛应用到耐热合金、异种材料和复合材料的焊接中^[4,5]。

SiC 颗粒增强 Al 基复合材料(以下简称为:SiC_p

- Al)是近年来发展的新型复合材料,以其较高的比强度、比模量、良好的热稳定性和较低的热膨胀系数,成为空间技术领域中理想的结构材料。随着 SiC_p - Al 在卫星部件中的大量应用,进行 SiC_p - Al 与 Al 合金的 TLP 连接工艺的试验研究,对于设计制造满足使用要求的高性能结构具有重要意义。

1 SiC_p - Al 与 Al 合金的焊接工艺试验

1.1 试验材料

试验材料组合为 SiC_p - Al (其中包括 SiC_p - 2024Al、SiC_p - 6061Al)与铝合金 LF6,其成分及性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 2024Al、6061Al 和 LF6 的化学成分

Tab. 1 The chemical composition of 2024, 6061 and LF6

%(质量分数)

牌号	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Ti	Fe + Si	Be	Al
2024Al	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	0.5	0.5	0.3	0.1	0.15	0.7		余
6061Al	0.2~0.6	0.4~0.9	0.15~0.35	0.5	0.5~1.2	0.2		0.15			
LF6	0.1	5.8~6.8	0.5~0.8	0.4	0.4	0.2		0.02~0.1		0.0001~0.005	余

表 2 母材 SiC_p - Al 及 LF6 的室温拉伸性能

Tab. 2 The room temperature properties of SiC_p - 6061Al and LF6

材料	SiC _p 含量/ % (体积分数)	SiC _p 尺寸/ μm	σ _b / MPa	σ _{0.2} / MPa	ε / %
SiC _p - 2024Al	15	20	490.71	364.54	9.20
SiC _p - 6061Al	15	20	416.2	334.28	10.6
LF6	0	0	320	170	15

1.2 试件制备

试件尺寸:复合材料的直径为 15 mm;铝合金的外径为 18 mm,内径为 15 mm。试件连接时的示意图如图 1 所示。

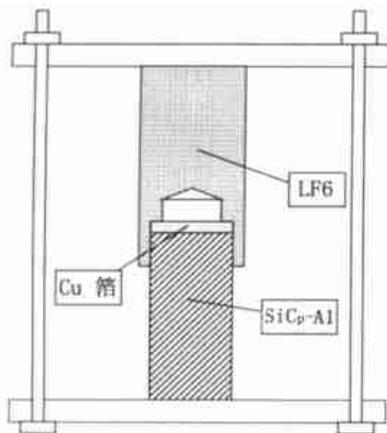


图 1 试件装配及专用焊接夹具示意图

Fig. 1 Schematic representation of sample assembly and welding set

1.3 试验

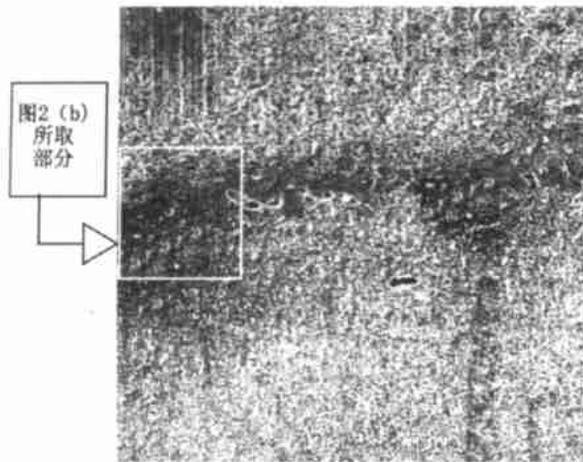
中间层材料采用 Cu 箔,厚度为 30 μm;因为对于 Al 基复合材料和 Al 合金来讲,应选择能够和基体 Al 形成共晶系统的元素 Cu。对于 Al - Cu 二元共晶系统,母材是 Al,中间层是 Cu,共晶温度是 548 ℃,基体的熔化温度为 660 ℃,连接温度应当选择 548 ℃以上,本试验连接温度选择 554 ℃。试验选择两种保温工艺:工艺 1(一次保温)是直接加热到连接温度,保温一定时间,最后自然冷却到室温;工艺 2(二次保温)是加热到连接温度,保温一段时间,降温到稍低的温度,再保温一定时间,最后自然冷却到室温。

试验首先进行试件的表面处理,然后进行 TLP 扩散连接,焊接结束后,对接头进行力学性能测试及微观组织成分的观察和分析。

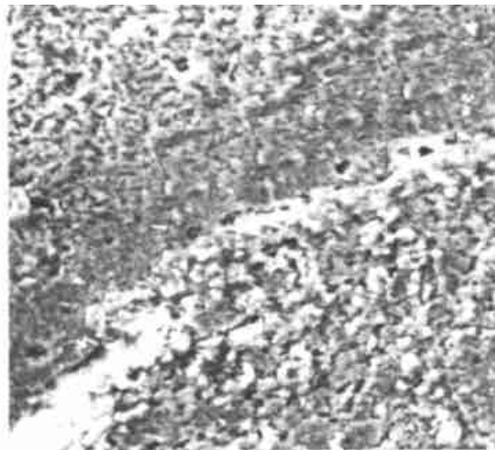
2 接头微观组织观察及成分测试

2.1 接头区域微观组织观察

图2给出了Al合金与SiC_p-6061Al的TLP扩散连接接头(连接温度:554,时间:30min)的微观组织。由图2(a)中可以看出, SiC_p-Al(图中下半部分)和Al合金(图中上半部分)已经完美地结合到一起,连接界面部分颜色稍深于两种基体材料。为了更准确地观察,从图2(a)中取出一部分放大见图2(b),可以看出,中间层部分和Al合金已经连接为一个整体,而复合材料与中间层之间还可以看到一个比较明显的界面,这可能是由于复合材料中SiC_p存在的原因。



(a) 连接接头 400 ×



(b) 图(a)中所选界面部分 2 000 ×

图2 Al合金与SiC_p-6061Al的连接接头的微观组织

Fig. 2 Joint microstructure of aluminium alloy with SiC particles reinforced 6061 based composite

2.2 接头区各元素浓度分布

图3给出了Al合金与SiC_p-6061Al的TLP扩散连接接头(连接温度:554,时间:30min)区域各

元素的浓度分布。从图中可见,各元素在界面两侧的浓度分布基本上是比较对称的,远离界面的两端分别是LF6与SiC_p-6061Al复合材料,各自成分比较均匀,基本保持了基体的成分。从距离界面150 μm的位置开始,应当为界面连接区域,在该区域中可以看出,各元素都发生了较大的变化,尤其是Al、Si、Cu等元素。在复合材料一侧(即界面的右侧)出现了一种异常的波动,Al、Si、O、Mg和Cu元素出现较大的波动,Al元素大幅下降,从80%以上的水平先是上升到95%左右,然后陡降至60%,对应的是Si元素从10%左右的水平下降到接近于0,然后陡升至20.5%;其它O、Mg、Cu等元素也随之发生变化。分析可知,距离界面100 μm的位置可能是SiC_p与基体6061Al的接合部分(即晶界),因此Al元素含量大幅上升,而Si元素则大幅下降;距离界面150 μm的位置可能正好是SiC_p。

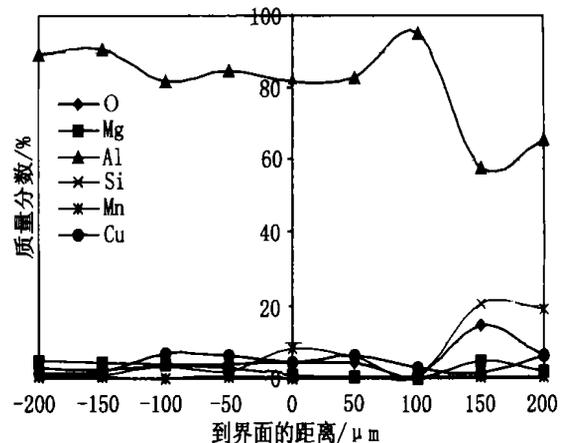


图3 接头区各元素浓度分布曲线图

Fig. 3 Elemental concentration profile in joint area

3 分析与讨论

3.1 材料组合的影响

复合材料的基体对连接接头性能具有较大的影响,本结构所采用的是2024Al和6061Al为基体,其组织成分以及性能都有着明显的差异,添加SiC_p形成复合材料后,其焊接性能也存在明显的差别。图4给出了LF6铝合金与上述两种复合材料TLP扩散连接性能的接头性能的对比。从图中可以看出,在采用相同的工艺参数下,LF6/SiC_p-6061Al接头强度达到了200 MPa以上,明显优于LF6/SiC_p-2024Al

接头的 163.63 MPa;性能最差的接头(强度为 85 MPa 左右)也是 LF6/ SiC_p - 2024Al 接头。

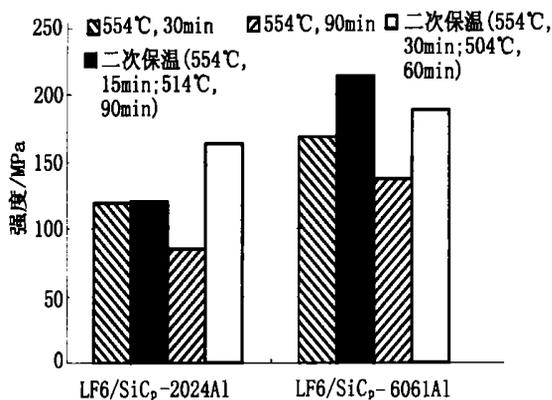


图 4 不同材料试件强度比较
Fig. 4 Comparison of bonds strength of two material combinatins

3.2 保温工艺的影响

由于 Al 基复合材料熔点都都比较低,而连接温度一般都要选择在 550 以上,因此在此温度下保温时间过长必然会影响到接头的性能。本研究采用了二次保温工艺,即在连接温度 554 时保温较短时间,使得接头形成液相即可,然后降温到 554 以下,再进行保温,以获得良好的性能。图 5 和 6 分别给出了保温工艺对 LF6/ SiC_p - 2024Al 及 LF6/ SiC_p - 6061Al 的连接接头性能的影响;其中,工艺一为一次保温工艺 554 保温 30min;工艺二为 554 保温 15min, 514 保温 90min;工艺三为 554 保温 30min, 504 保温 60min。

从图 4、图 5 和图 6 可见,上述复合材料与 Al 合金在使用了二次保温工艺以后,接头强度都有了不同程度的提高。但是对 SiC_p - 2024Al 与 Al 合金来讲,采用工艺二后,接头强度相对于一次保温工艺的接头性能未能提高多少,其主要原因是在连接温度下保温时间只有 15 min,中间层铜箔未能与母材完全形成液相,有部分残余的铜未能溶解,从而影响到液相区的宽度。采用工艺三后,接头强度有明显的提高。而对于 SiC_p - 6061Al 与 Al 合金来讲,采用了二次保温工艺后,接头强度大幅上升,分别达到了 214.4 MPa 和 189.34 MPa,说明二次保温工艺对 SiC_p - 6061Al 与 Al 合金的连接有着更明显的影响。

宇航材料工艺 2002 年 第 4 期

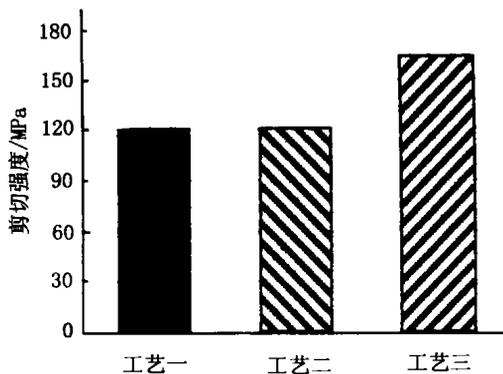


图 5 保温工艺对 LF6/ SiC_p - 2024Al 接头性能的影响
Fig. 5 The effect of holding process on the properties of LF6/ SiC_p - 2024Al bonds

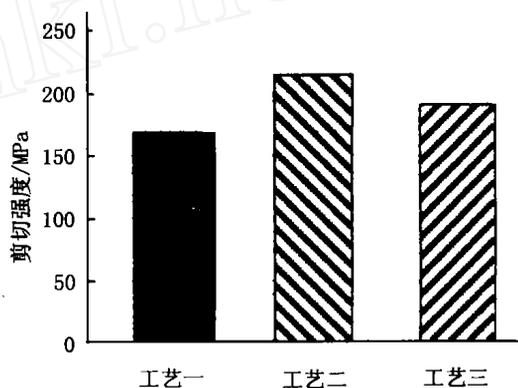


图 6 保温工艺对 LF6/ SiC_p - 6061Al 接头性能的影响
Fig. 6 The effect of holding process on the properties of LF6/ SiC_p - 6061Al bonds

3.3 保温时间的影响

连接时间是影响复合材料与 Al 合金 TLP 扩散连接的最重要的工艺参数之一。图 7 给出了连接时间对复合材料与 Al 合金连接接头性能的影响。由图可见,连接时间过长,接头性能反而会明显下降,如对于 SiC_p - 2024Al 与 LF6 的 TLP 扩散连接来讲,在 554 下保温 90 min 后,其强度只有 84.88 MPa;时间过短,在 554 下仅保温 15 min 后,其性能也没有得到提高,说明时间也不能过短。对于 SiC_p - 6061Al 与 LF6 来讲,连接温度下保温 15 min 对接头性能没有影响,说明在保温 15 min 时,Al 和 Cu 已经完全溶解,因而对接头性能没有影响,这也是不同基体的性能不同的原因引起的,但连接时间过长,同样会影响 LF6/ SiC_p - 6061Al 连接接头的性能。综合分析强度下降的原因,可能主要是由于保温时间过长,导致复合材料组织性能恶化,从而影响到接头性能。

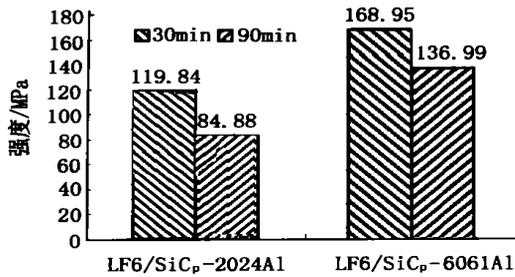


图7 连接时间对接头性能的影响

Fig.7 The effect of time on the bonds properties

4 结论

ILP 扩散连接是一种适用于复合材料、异种材料连接的重要方法,能够获得比较优良的焊接接头。在相同连接工艺参数条件下,LF6/SiC_p-6061Al 接头的性能明显优于 LF6/SiC_p-2024Al 接头的性能。

连接时间是影响复合材料与 Al 合金 ILP 连接的重要因素。连接时间对不同材料组合的影响也不同。相同连接温度下,时间过短或过长,都将影响到接头性能。鉴于此,应当采用二次保温工艺来焊接 SiC_p-Al 与 Al 合金,在一定规范下,可以较大幅度

地提高接头性能。

LF6 与 SiC_p-6061Al 的 ILP 扩散连接最佳工艺参数:二次保温工艺,连接温度 554,保温时间 15 min;二次保温温度 514,保温时间 90 min;中间层材料为 Cu 箔,厚度 30 μm。LF6 与 SiC_p-2024Al 的 ILP 扩散连接最佳工艺参数:二次保温工艺,连接温度 554、保温时间 30 min;二次保温温度 504、保温时间 60 min;中间层材料为 Cu 箔,厚度 30 μm。

参考文献

- 1 赵稼祥. 先进复合材料的进展与展望. 见:张志民主编. 第九届全国复合材料学术会议论文集(上),北京:世界图书出版公司,1996:21
- 2 何康生,曹雄夫. 异种金属焊接. 北京:机械工业出版社,1986:15
- 3 Tuahr-Poku, Dollar M, Massalaki T B. A Study of the transient liquid phase bonding process applied to Ag/ Cu/ Ag sandwich joint. Metall. Trans., 1988; 19A(2): 675
- 4 林丽华,唐逸明,顾明元等. 金属基复合材料焊接技术及其发展动向. 材料科学与工程,1997; 15(3): 23
- 5 MacDonald W D, Eagar T W. Transient liquid phase bonding. Annu. Rev. Mater. Sci., 1992; (22): 23~46

(编辑 任涛)

(上接第 35 页)

同基体树脂 PTFE 相比,增强粒子 Ba₂Ti₉O₂₀ 的弹性模量很高,根据混合法则,随着 Ba₂Ti₉O₂₀ 粒子含量增多,复合材料的弹性模量增大。陶瓷粒子含量大于 30% 时,弹性模量下降,这是由于陶瓷粒子含量较大时,陶瓷粒子之间靠 PTFE 结合的几率减少,粒子间的结合力很差,且陶瓷粒子含量高也使材料致密化困难,这使得材料的弹性模量下降很快。

3 结论

(1) Ba₂Ti₉O₂₀/PTFE 复合材料中,Ba₂Ti₉O₂₀ 的加入对 PTFE 的熔点影响不大,但随含量的增加,PTFE 的熔限变窄;并使 PTFE 的结晶温度提高,在 PTFE 结晶过程中起异相成核作用。

(2) 近于球形的 Ba₂Ti₉O₂₀ 粒子均匀地分散在 PTFE 树脂基体中,组织中存在微小气孔。

(3) 随 Ba₂Ti₉O₂₀ 含量的增加,复合材料的抗弯强度、弹性模量单调升高,当其含量达到 30% 时均达

到峰值,分别为 16.4 MPa、4.6 GPa。

参考文献

- 1 Zhang Z, Aglan H. Fracture and fatigue analysis of 15% chopped glass fiber reinforced PTFE. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998;17(8): 752~771
- 2 周洪庆,刘敏,杨南如,凌志达. 微波复合介质制备及性能测试研究. 功能材料, 1997;28(1): 78~80
- 3 Tonkin B A, Hosking M W. The dielectric constant and thermal expansion of the ceramic-filled plastic RT Duroid at low temperatures. J Mat. Sci. Lett., 1996;15(23): 2030~2032
- 4 王亚明,贾德昌,周玉. Ba₂Ti₉O₂₀/PTFE 微波介电复合材料的制备及性能. 压电与声光,2002;24(3): 225~228
- 5 Lawrence E. Fabricating the future with composite materials Part III. Matrix Resins. Mater. Eng., 1987;104(2): 23~27
- 6 周履,王震鸣,范赋群. 复合材料及其结构的研究进展. 广州:华南理工大学出版社,1991:229~242
- 7 熊传溪,闻荻江. 刚性粒子/聚合物复合体系的增韧增强作用. 材料导报,1999;13(3): 60~62

(编辑 李洪泉)