

TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构钎焊工艺研究

Brazing Process of TC4/TA18 Titanium Alloy Honeycomb Sandwich Construction

中航工业北京航空制造工程研究所航空焊接与连接技术航空科技重点实验室

高兴强 吕好学 岳喜山
静永娟 李智渊

[摘要] 针对 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构,采用 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 非晶箔带钎料,研究钎焊温度和保温时间对 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构接头微观组织及力学性能的影响,优化出 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构较优的钎焊工艺为 920℃/保温 90min 和钎料添加量 80 μm,该工艺参数下钎焊接头的室温拉脱强度平均值最高,可达 19.82MPa,破坏部位为 TA18 钛合金蜂窝芯。

关键词: TA18 钛合金 蜂窝夹层结构 钎焊

[ABSTRACT] TC4/TA18 titanium alloy honeycomb sandwich construction is brazed by amorphous foil solder Ti-37.5Zr-15Cu-15Ni (mass fraction). The effect of brazing temperature and holding time on the microstructure of brazing interface and the tensile strength of TC4/TA18 titanium alloy honeycomb sandwich construction is researched. The optimized brazing technology is 920℃/90min with 80 μm solder in depth. With the optimized brazing technology, the average value of the tensile strength of specimens is 19.82MPa, and the honeycomb core is the weak part.

Keywords: TA18 titanium alloy Honeycomb sandwich construction Brazing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.109

蜂窝夹层结构具有超轻质、高比强度和比刚度、消音、隔热等诸多优点,国内外现已广泛应用于航空航天等领域,如飞机机身、舵翼面、发动机舱门等^[1-2]。钛合金蜂窝夹层结构在较高温度下能够长时间使用,并具有良好的疲劳寿命和耐腐蚀性能,可以满足现代飞机在某些特殊条件下的使用要求^[3-4]。钛合金蜂窝夹层结构一般用钎焊方法将上下面板与中间蜂窝芯连接起来,如图

1 所示^[5]。钛合金蜂窝夹层结构钎焊常用的钎料有钛基钎料、铝基钎料和银基钎料,因钛基钎料具有更高的高温性能和更好的耐腐蚀性而受到普遍关注^[6]。TA18 (Ti-3Al-2.5V) 钛合金是从 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金演变而来的近 α 型 α + β 型钛合金,虽不及 TC4 钛合金强度高,但由于其具有优异的冷成形性能和焊接性能、良好的高温性能和耐腐蚀性能,已在航空航天领域广泛应用^[7]。TA18 钛合金冷成形性优良,易于制备蜂窝芯所用波纹带,因而 TC4/TA18 蜂窝夹层结构具有良好的应用前景。

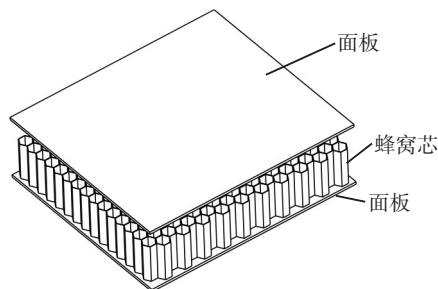


图1 典型蜂窝夹层结构示意图

Fig.1 Diagram of typical honeycomb sandwich construction

本文主要针对 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构,采用 Ti-Zr-Cu-Ni 非晶箔带钎料进行真空钎焊,研究钎焊温度、保温时间对 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构钎焊界面微观组织的影响,分析钎焊界面的微观组织特征,并对钎焊接头进行拉脱性能测试。

1 试验条件和方法

试验件上下面板均为 TC4 钛合金,蜂窝芯材料为 TA18 钛合金,二者的化学成分如表 1 所示。试验件蜂窝芯尺寸(D)为 6.4mm,芯格壁厚(t)为 0.08mm,蜂窝

表1 TC4钛合金与TA18钛合金的化学成分(质量分数)

合金	合金元素			杂质元素(≤)						
	Al	V	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	其他
TC4	5.5~6.8	3.5~4.5	余量	0.3	0.15	0.1	0.05	0.01	0.2	0.5
TA18	2.0~3.5	1.5~3.0	余量	0.25	—	0.08	0.05	0.015	0.12	0.3

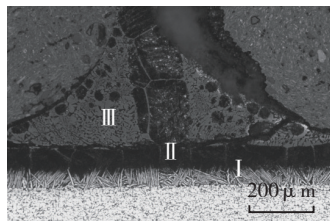
芯高度(h)为 15mm,面板厚度为 0.8mm。

钎焊温度明显高于基体材料的相变温度时,基体材料发生相变,长时间保温使基体组织粗化,导致基体材料机械性能显著下降;钎焊温度过低时,钎料的流动性差,不能获得满意的钎焊接头,因而钎焊温度的选择需综合考虑钎料的熔点和基体材料的相变温度。试验选用钎料为 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 非晶箔带钎料,其熔点为 830℃~840℃,TA18 钛合金的相变温度在 920℃~930℃左右。本文选择 880℃、920℃和 960℃ 3 个钎焊温度,60min、90min 和 120min 3 个保温时间进行研究,分析钎焊界面的微观组织特征,并进行拉脱性能测试。

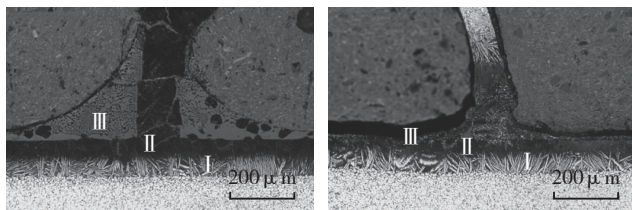
试验在真空钎焊炉中进行,钎焊时真空度优于 4×10^{-3} Pa。将试样钎焊界面制作成金相试样,在光学显微镜下观察钎焊界面微观组织特征,分析钎焊界面对试件力学性能的影响。参照 ASTM C297 将焊后的试样用线切割分别切为 50mm × 50mm 试验件,进行拉脱性能测试,为保证试验的准确性,每组试验取 5 个试验件。

2 钎焊界面微观组织分析

TC4/TA18 蜂窝钎焊接头微观组织大致可分为 3 个区域,如图 2 (a) 所示,靠近 TC4 面板一侧为扩散区,主要由 $\alpha + \beta$ 相组成的针状魏氏组织,在钎焊接头中由于钎料中的 Cu 和 Ni 元素向面板母材扩散,Cu 和 Ni 为 β 相稳定元素,降低了 α 相向 β 相的相变温度,从而形成图 2 (a) 中所示 I 区所示的魏氏组织;紧邻扩散区的区域为未扩散均匀区,该区主要为 β 钛,其中 Cu、Ni 元素未扩散完全,可能存在 Ti 与 Cu、Ni 元素的金属间化合物,如图 2 (a) 中所示黑色区域 II 区;靠近 TA18 蜂窝芯的区域为钎料凝固区,钎料凝固区与钎料的原始



(a) 880℃ /60min



(b) 920℃ /60min

(c) 960℃ /60min

图2 不同钎焊温度下钎焊接头的微观组织

Fig.2 Microstructure of joint brazed at different temperatures

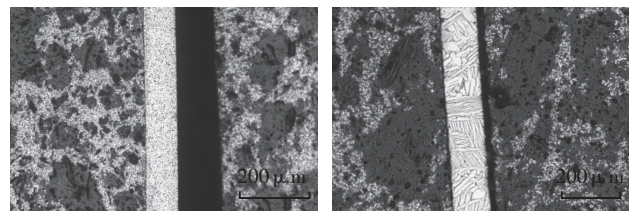
非晶状态大不相同,其中主要为黑色圆形的 Ti 的固溶体和灰色的 $TiNi_2$ (Cu, Zr) 金属间化合物,如图 2 (a) 中所示 III 区^[5]。

2.1 钎焊温度对接头微观组织的影响

钎焊温度是影响钎焊接头质量的重要因素,分别选取钎焊温度为 880℃、920℃、960℃,钎焊保温时间为 60min 时,钎料添加量为 80 μ m,接头的微观组织如图 2 所示。图 2 (a) 所示为 880℃ /60min 时钎焊接头的微观组织,由于钎焊温度较低,原子扩散能力较差,针状的魏氏组织区域宽度只有约 50 μ m,未扩散均匀区中形成的金属间化合物较多,该金属间化合物为脆性相,该区域为钎焊接头的薄弱环节,宽度大约有 80 μ m;当 920℃ /60min 时,钎焊接头微观组织如图 2 (b) 所示,从中可以明确看出在母材靠近焊缝附近有一层长大的等轴状晶粒,此时扩散能力较 880℃ /60min 时有所提高,扩散区增大,约为 65 μ m,未扩散均匀区中脆性金属间化合物较少,该区域约为 50 μ m,钎料凝固区变化不大,蜂窝芯的微观组织如图 3 (a) 所示;960℃ /60min 时,原子扩散能力强,扩散区约有 80 μ m,未扩散均匀区仅有 30 μ m,如图 2 (c) 所示,而此时钎焊温度远高于蜂窝芯基体材料的相变点,钎焊过程中基体发生相变,晶粒长大粗化,如图 3 (b) 所示,严重影响钎焊接头机械性能,此时 TA18 钛合金蜂窝芯体成为整个接头的薄弱环节。

2.2 保温时间对接头微观组织的影响

保温时间也是钎焊的一个重要参数,延长保温时间,有利于元素的扩散。选取钎焊保温时间分别为 60min、90min、120min,钎焊温度为 920℃,钎料添加量为

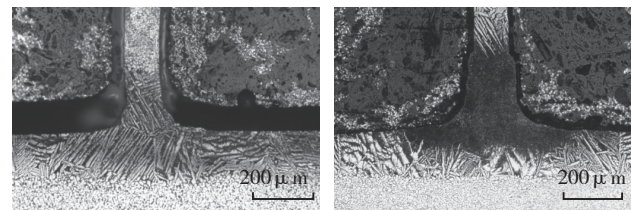


(a) 920℃ /60min

(b) 960℃ /60min

图3 不同钎焊温度下蜂窝芯的微观组织

Fig.3 Microstructure of honeycomb core brazed at different temperatures



(a) 920℃ /90min

(b) 920℃ /120min

图4 不同保温时间下钎焊接头微观组织

Fig.4 Microstructure of joint brazed for different holding time

80 μm 时, 920 $^{\circ}\text{C}$ /60min 接头的微观组织如图 2 (b) 所示。920 $^{\circ}\text{C}$ /90min、920 $^{\circ}\text{C}$ /120min 接头的微观组织如图 4 所示。从图 4 (a) 中可看出, 920 $^{\circ}\text{C}$ /90min 时, 钎料扩散更加充分, 未扩散均匀区几乎完全消失, 接头主要为 $\alpha + \beta$ 相组成的魏氏组织, 其宽度大约为 120 μm , 此钎焊界面为较理想钎焊界面。当保温时间延长到 120min 时, 钎焊接头也主要为 $\alpha + \beta$ 相组成的魏氏组织, 但由于保温时间过长, 针状的魏氏组织及蜂窝芯组织有所长大, 如图 4 (b) 所示。

3 钎焊接头强度研究

3.1 钎焊温度对接头强度的影响

钎焊温度为 880 $^{\circ}\text{C}$ 、920 $^{\circ}\text{C}$ 、960 $^{\circ}\text{C}$, 钎焊保温时间为 60min, 钎料添加量为 80 μm 时, 蜂窝夹层结构钎焊接头的室温拉脱强度如表 2 所示。由表中可以看出, 接头的室温拉脱强度随钎焊温度的升高先增大后减小。钎焊温度为 880 $^{\circ}\text{C}$ 和 920 $^{\circ}\text{C}$ 时, 钎焊接头的室温拉脱强度, 平均值分别为 10.43MPa 和 16.20MPa, 接头的破坏方式均为蜂窝芯与面板开焊, 蜂窝芯与面板的连接界面为整个接头的薄弱环节, 这可能是由于接头钎焊界面形成较多脆性金属间化合物; 钎焊温度升高到 960 $^{\circ}\text{C}$ 时, 接头的室温拉脱强度略有降低, 平均值为 14.69MPa, 接头破坏方式为蜂窝芯坏, 强度下降是由于钎焊温度过高, 蜂窝芯基体发生相变, 晶粒长大粗化, 而使蜂窝芯成为整个接头的薄弱环节。

3.2 钎焊保温时间对接头强度的影响

选取钎焊保温时间分别为 60min、90min、120min, 钎焊温度为 920 $^{\circ}\text{C}$, 钎料添加量为 80 μm 时, 蜂窝夹层结构钎焊接头的室温拉脱强度如表 3 所示。钎焊保温时间为 60min 时, 由于钎焊界面存在脆性金属间化合物

表2 不同钎焊温度下接头的室温拉脱强度 MPa

试验条件	拉脱强度 /MPa					平均值	破坏形式
	9.57	11.15	9.66	10.72	11.03		
880 $^{\circ}\text{C}$	9.57	11.15	9.66	10.72	11.03	10.43	蜂窝芯与面板开焊
920 $^{\circ}\text{C}$	17.58	17.13	15.54	15.97	14.78	16.20	蜂窝芯与面板开焊
960 $^{\circ}\text{C}$	15.93	13.98	13.87	15.87	13.80	14.69	蜂窝芯坏

表3 不同钎焊保温时间下接头的室温拉脱强度 MPa

试验条件	拉脱强度 /MPa					平均值	破坏形式
	17.58	17.13	15.54	15.97	14.78		
60min	17.58	17.13	15.54	15.97	14.78	16.20	蜂窝芯与面板开焊
90min	20.07	18.23	19.75	21.00	20.04	19.82	蜂窝芯坏
120min	16.58	16.13	14.54	14.97	13.78	15.20	蜂窝芯与面板开焊

而使接头强度较低; 当保温时间延长至 90min 时, 钎料中元素扩散充分, 焊缝中主要为针状的 $\alpha + \beta$ 相组成的魏氏组织, 此时蜂窝芯为整个接头的薄弱环节, 接头强度有大幅提高, 平均值约为 19.82MPa; 保温时间增加至 120min 时, 由于钎焊界面组织长大, 接头强度有一定程度的降低。由此可见, 钎焊温度为 920 $^{\circ}\text{C}$ 时, 钎焊保温时间为 90min 为最优工艺, 此时接头的破坏形式为蜂窝芯坏, 如图 5 所示。

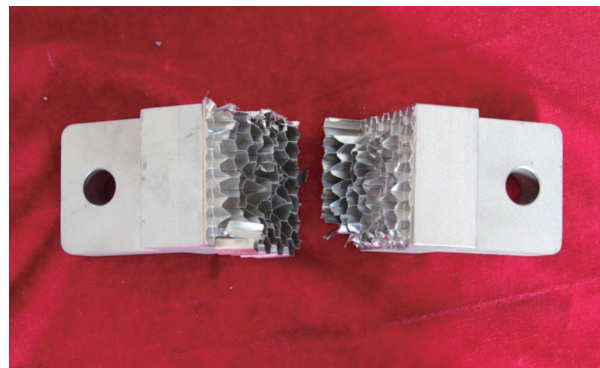


图5 采用920 $^{\circ}\text{C}$ /90min参数时接头室温拉脱破坏形式

Fig.5 Mode of tensile failure of joint brazed at 920 $^{\circ}\text{C}$ /90min at room temperature

4 结论

本文通过分析 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构接头微观组织, 研究钎焊温度、钎焊保温时间对接头的影响, 优化出适用于该规格 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构的钎焊工艺, 并通过测试接头的拉脱强度, 验证了优化的钎焊工艺。

(1) 钎焊温度为 880 $^{\circ}\text{C}$ 时, 保温时间为 60min 时, 钎料中的 Cu、Ni 元素扩散不充分, 易在钎焊界面形成脆性金属间化合物; 钎焊温度升高至 960 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 60min 时, TA18 钛合金蜂窝芯发生相变, 晶粒长大粗化; 保温时间增加至 120min, 钎焊温度 920 $^{\circ}\text{C}$ 时, 焊缝晶粒粗化。脆性金属间化合物生成及晶粒粗化均对接头产生不利的影响。

(2) 在 920 $^{\circ}\text{C}$, 保温 90min, 添加钎料 80 μm 时, 钎料中的 Cu、Ni 元素扩散较充分, 接头为 $\alpha + \beta$ 相组成的魏氏组织, TA18 钛合金蜂窝芯与焊缝魏氏组织均不发生粗化。920 $^{\circ}\text{C}$ 、保温 90min、添加钎料 80 μm 为 TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构的最优钎焊工艺, 在该工艺参数下接头的室温拉脱强度平均值最高, 可达 19.82MPa, 破坏形式为蜂窝芯坏。

参考文献

[1] 张敏, 于九明. 金属夹芯复合板及其制备技术的发展. 焊

(下转第 118 页)

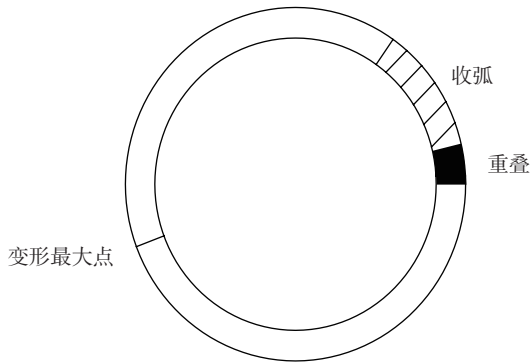


图3 焊接重叠和收弧导致焊接变形

Fig.3 Welding deformation due to overlap angle and crater angle

表3 焊接工艺参数

参数方案	重叠角度 / (°)	收弧角度 / (°)	端面跳动 / mm	备注
1	12	90	0.32	
2	8	90	0.27	
3	8	45	0.22	
4	8	25	0.22	收弧处有圆点状凹坑

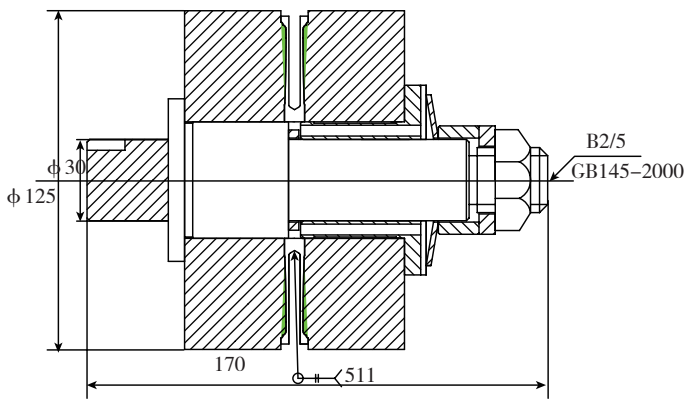


图4 焊接散热工装示意图 (mm)

Fig.4 Heat dissipation fixture of welding diagram (mm)

效地控制焊接变形,使焊接时超过 1mm 的变形降低到 0.3mm 以内。

参考文献

[1] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册第 4 卷钛合金·铜合金(第 2 版). 北京: 中国标准出版社, 2001.
 [2] 康文军, 梁养民. 电子束焊接在航空发动机制造中的应用. 机械制造文摘(焊接分册), 2008(6):72-75.
 [3] 宫平, 毛智勇. TC4 钛合金电子束焊接工艺参数对焊缝形状的影响. 航空制造技术, 2008(6):72-75.
 [4] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册第 4 卷钛合金(第 2 版). 北京: 中国标准出版社, 2002:104-131.
 [5] 王之康, 高永华. 真空电子束焊接设备及工艺. 北京: 原子能出版社, 1990.

(责编 亿霖)

(上接第 108 页)

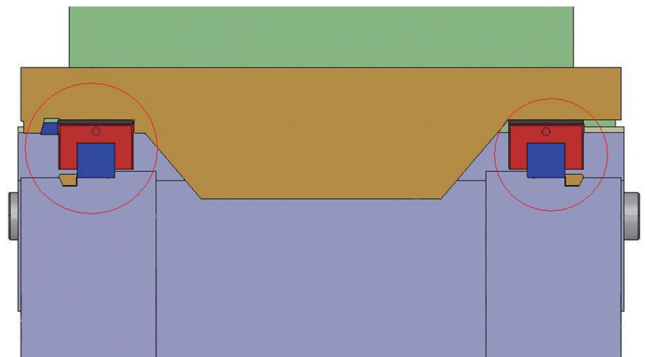


图13 顶锻滑台的导轨定位设计

Fig.13 Guide rail position design of forging slid platform

动载荷为 289kN,前端 4 个滑块的理论承载力为以前 2 个滑块承载力的 4.3 倍,显著提高了滑台承载能力。

4 结论

(1) 设备床身靠近振动源的 A 点和远离振动源的 B 点空振阶段振幅基本相同; 焊接阶段 A、B 点的振幅均有所增长,且 B 点振幅增长稍大。说明床身和地基的刚性连接结构具有较好的可靠性。

(2) 顶锻夹具前端是刚性薄弱环节,当前试验条件下,其振幅达到床身 A 点振幅的 3.6 倍。

(3) 为现有设备的改造或未来新设备的开发设计提供了可显著提高顶锻滑台前端承载力的结构方案。

参考文献

[1] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004(11):56-58.
 [2] 徐灏. 机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1992.

(责编 叶枫)

(上接第 111 页)

接技术, 2003(6):21-23.

[2] 吴昌忠, 陈静, 陈怀宁, 等. 钛合金高温钎焊接头的组织性能及影响因素评价. 宇航材料工艺, 2005(3):17-20.

[3] Woodward J R. Titanium honeycomb sandwich fabrication process//Proceedings of Fifth National SAMPLE Technical Conference. New York, 1973: 432-437.

[4] Huang X, Richards N L. Activated diffusion brazing technology for manufacture of titanium honeycomb structures—a statistical study. Welding Research, 2004(3): 73-81.

[5] 静永娟, 李晓红, 岳喜山. TC1 钛合金蜂窝夹层结构的钎焊工艺研究与分析. 航空制造技术, 2012(13): 137-139.

[6] 岳喜山, 欧阳小龙, 侯金保, 等. 钛合金蜂窝夹层结构钎焊工艺. 航空制造技术, 2009(10): 96-98.

[7] 陈逸, 李金山, 孙峰, 等. 冷轧 TA18 管材变形过程中微观组织及织构. 塑性工程学报, 2012, 19(1): 35-39.

(责编 一帆)