

# TC1 钛合金蜂窝夹层结构的钎焊工艺研究与分析

## Research and Analysis of Processing Parameter for Brazing Honeycomb Sandwich Construction in Titanium Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 静永娟 李晓红 岳喜山

**[摘要]** 研究了 TC1 钛合金蜂窝夹层结构试件的钎焊工艺,通过对系列工艺下钎焊界面组织进行观察得出,在 930℃/保温 15min 和一定钎料添加量的条件下,界面析出了  $\text{TiNi}_2$  (Cu, Zr) 化合物,且尺寸细小、分布弥散,因而相应钎焊试件的室温拉脱强度平均值较高,可达 17MPa。在钎焊过程中,Cu 和 Ni 元素由钎料向母材扩散,使母材  $\beta$  相变温度降低,导致界面魏氏体组织的产生;芯体波纹带间受钎料熔化热影响较大,导致此处魏氏体组织粗大,成为试件的薄弱部位。

**关键词:** 钛合金 蜂窝夹层结构 钎焊

**[ABSTRACT]** Processing parameter for brazing honeycomb sandwich construction in titanium alloy is studied. The microstructure and the strength of the welded interface are observed and tested. The fine and dispersing  $\text{TiNi}_2$  (Cu,Zr)-compound is found by TEM in the interface, which is benefit for the strength of the brazing welded samples. The sample strength is up to 20MPa. The Widmanstatten structure in the interface is caused by  $\beta$  phase transition temperature decreasing, which induces by Ni and Cu elements diffusing from brazing filler to matrix. And the honeycomb core is the weak link because of the rough Widmanstatten structure.

**Keywords:** Titanium alloy Honeycomb sandwich construction Brazing

通过钎焊方法将蜂窝芯体和上、下面板连接可形成金属蜂窝夹层结构<sup>[1-2]</sup>。钛合金蜂窝夹层结构由于具有高比强度、耐蚀、耐温和耐热等优点,目前已经在国内外航空、航天领域得到广泛研究和应用,如应用于飞机机身、机翼、发动机短舱排气喷嘴等部位<sup>[3-4]</sup>。TC4 和 TC1 钛合金是航空航天常用的钛合金。已有研究表明,随钎焊温度升高或保温时间延长,TC4 钛合金蜂窝夹层结构试件的室温拉脱强度先增大后减小,强度可达 15.43MPa<sup>[5]</sup>。与 TC4 钛合金相比,TC1 合金组织中  $\beta$  相比较多,对  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$  相转变起到抑制作用,易于利用  $\alpha$  相和  $\beta$  相在钎焊过程中相互互扎作用,避免母材晶

粒长大,并获得具有均匀、细小晶粒的焊缝组织。此外,TC1 合金的室温塑性较好,有利于蜂窝芯用波纹带成型。因此,TC1 钛合金蜂窝夹层结构具有较好的工程应用前景,有必要开展其钎焊工艺研究。

本文研究了 TC1 钛合金蜂窝夹层结构的钎焊工艺,结合钎焊界面组织观察和元素分布测试结果,分析和讨论了钎焊工艺对 TC1 钛合金蜂窝夹层结构试件室温平面拉脱强度和界面特征的影响。

### 1 试验材料及方法

采用 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 非晶箔带作为试验用钎料。当钎焊温度高于母材相变点时,母材在钎焊过程中易产生相变,而钎焊保温时间较长易导致母材组织粗化,使机械性能下降并产生脆性接头。通过以上分析,根据 TC1 合金的相变温度(950~960℃)和钎料的熔点(830~840℃),确定试验方案如下。

试件的蜂窝芯格内切圆直径为 6.4mm、芯体高度为 15mm、胞壁厚度为 0.10mm;面板的规格为 50mm × 50mm × 0.8mm,如图 1(a)所示。在保温 15min、钎料厚度为 80 $\mu\text{m}$  的条件下(采用钎料厚度表征钎料添加量),选择 930℃和 960℃进行钎焊,并对试件进行拉脱强度测试。采用适当温度,选择保温时间 5min 和 30min 进行钎焊,对所得试件进行拉脱强度测试,以选出适当保温时间。在以上优化工艺参数的基础上,研究钎料添加量变化(钎料厚度为 40 $\mu\text{m}$ 、80 $\mu\text{m}$ 、120 $\mu\text{m}$ )对试件拉脱强度影响。

试验使用真空钎焊炉钎焊蜂窝夹层结构试件,真空度不低于  $4 \times 10^{-3}$ Pa。每种条件下测试试件的数量为 3~4 个。参照 GJB130.4—86《胶接铝蜂窝夹层结构和铝蜂窝芯子性能试验方法》,通过 Z100 电子万能材料试验机进行拉伸强度测试。将钎焊界面制备为组织观察面,如图 1(b)中位置 1 和 2。位置 1 为蜂窝芯体内波纹带之间的钎焊界面,位置 2 为蜂窝芯体与面板的钎焊界面。采用扫描电子显微镜对界面微观组织进行观察,通过能谱对界面元素分布进行半定量分析。并结合透射分析结果,研究了非晶钎料焊后的组织转变,分析讨

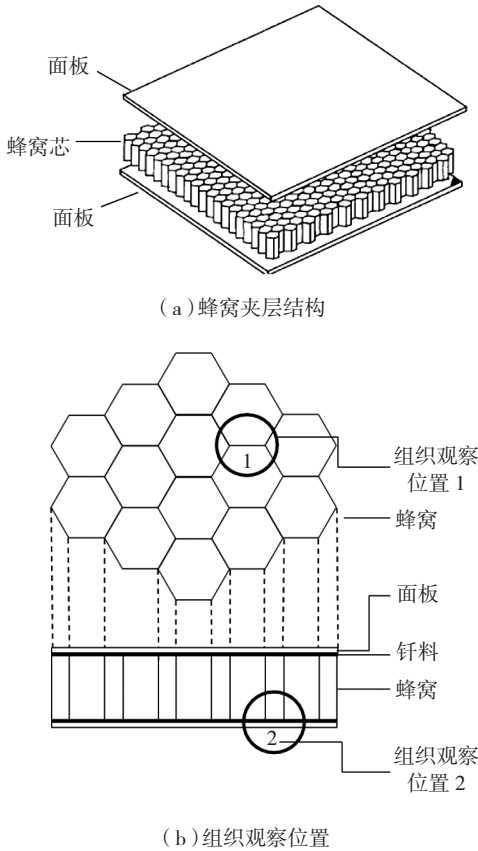


图1 蜂窝夹层结构示意图

Fig.1 Diagram of honeycomb sandwich construction

论其对钎焊界面性能的影响。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 钎焊工艺优化

蜂窝夹层结构试件室温拉脱强度测试结果及其均方差列于表1。在930℃下随保温时间由5min、15min至30min延长,试件的平均拉脱强度先增加后减少,峰值强度相应保温时间为15min。由此确定钎焊温度和时间分别为930℃和15min。在930℃/15min钎焊工艺下,当钎料添加量由40μm、80μm至120μm逐渐增多时,钎焊试件平均强度分别为20.7MPa、17.75MPa和

表1 试件拉脱强度测试结果

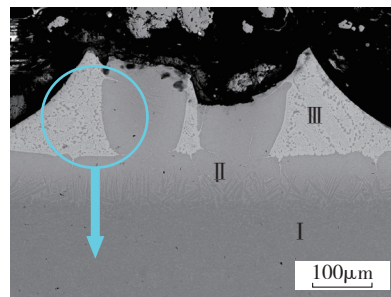
试验条件		拉脱强度 /MPa				平均值	均方差
温度 /℃	930	17.26	17.76	17.93	18.06	17.75	0.3036
	960	15.32	15.86	16.20	16.46	15.96	0.4260
时间 /min	5	12.97	15.96	21.02	18.45	17.24	2.3106
	30	14.44	15.22	19.45	-	16.37	2.2010
钎料增加量 /μm	40	17.66	18.48	25.96	-	20.70	4.4819
	120	15.98	18.08	19.90	22.14	19.03	2.2710

19.03MPa,均方差依次为4.4819、0.3036和2.2710。这表明钎料添加量对试件强度及其分散度均产生较大影响,为获得强度稳定、强度水平较高的钎焊试件,通过对比不同工艺参数下试件强度测试结果及其均方差,确定出930℃、保温15min并采用80μm厚度钎料,为本试验优化出的TC1蜂窝夹层结构的钎焊条件。

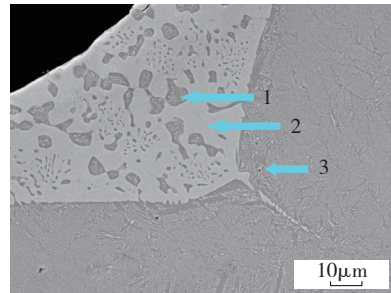
### 2.2 界面组织分析

对钎焊界面组织进行观察。观察位置包括:蜂窝芯体和面板之间的连接界面,及蜂窝芯体波纹带之间的连接界面,即图1(b)中位置1和2。

在优化工艺下,靠近界面的母材受钎料熔化和凝固的影响,其发生局部组织长大。其平均宽度约20μm,为相对母材较粗大的等轴α组织,如图2(a)中I区。蜂窝芯体和面板之间的钎焊界面可划分为钎料凝固区和扩散区,如图2(a)所示。扩散区位于界面中心、为针状α+β魏氏体组织,平均宽度约80μm,如图2(a)中II区。钎料凝固区位于如图2(a)中III区,该区域



(a) 蜂窝芯和面板之间界面组织



(b) 蜂窝芯体界面组织

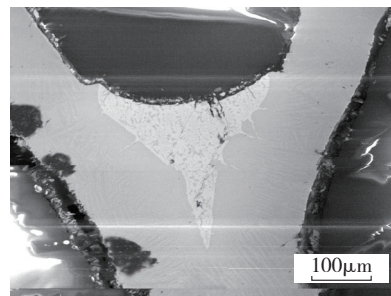


图2 钎焊界面背散射电子成像(优化工艺下)

Fig.2 BSE image of brazing interface (with optimized proceeding)

内含较多 Zr 元素,在背散射电子下,其成像衬度较大、呈亮白色,而 I 和 II 区 Ti 元素相对较多导致衬度较低。

蜂窝芯波纹带之间的焊接界面组织如图 2(b) 所示。与蜂窝芯体和面板之间的钎焊界面相比,该钎焊界面扩散区魏氏组织更加粗大。在相同热作用下,薄壁件温升较快、内部温度较高,组织更易粗化。由于蜂窝芯体是采用点焊连接的金属箔带经钎焊形成的,因而,在一定钎料熔化热影响下,蜂窝芯内波纹带之间的钎焊界面扩散区面积大、扩散区组织也更加粗大。

对比焊后母材和界面内各元素含量(见表 2、图 2(a)),可见,在钎焊过程中, Ti 元素由母材向钎料扩散, Zr、Cu 和 Ni 元素由钎料向母材扩散。参考合金元素对钛合金作用的研究结果: Zr 为中性元素, Cu 和 Ni 元素为  $\beta$  相稳定元素,因此, Cu 和 Ni 元素由钎料向母材扩散会使  $\beta$  相变温度降低,促进界面魏氏体组织的产生。

表2 界面元素含量的能谱分析结果(质量分数) %

材料	位置	Ti	Zr	Cu	Ni
钎料	1	78.17	12.73	5.58	2.49
	2	37.27	31.74	18.00	12.24
母材	3	72.30	17.33	6.56	2.66

在其他工艺下,钎料凝固区,即 III 区,呈现不对称分布,如图 3 所示,导致界面两侧组织在均匀性上存在差异,此外,两侧 III 区出现局部联通现象,以上是导致试验测试结果分散度较大的主要原因。

### 2.3 钎料组织转变

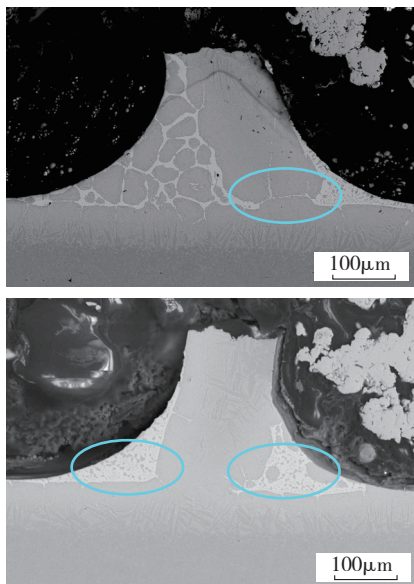
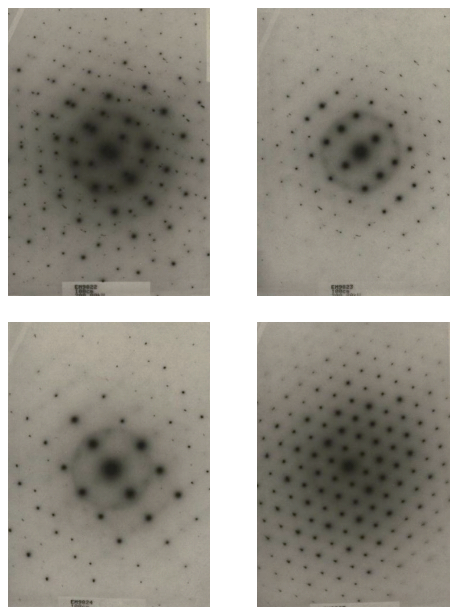
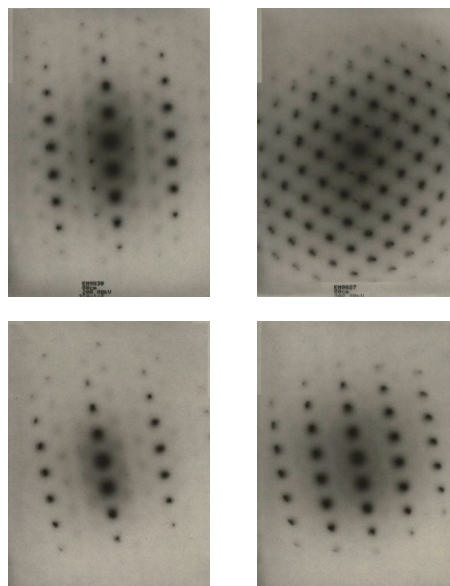


图3 钎焊界面背散射电子成像(其他工艺下)  
Fig.3 BSE image of brazing interface  
(with un-optimized proceeding)

对钎料凝固区进行观察和能谱分析发现(见图 2(a) 和表 2),钎料区以灰白色组织为基体,椭圆状、细条状和点状的黑色组织均匀分布在其中。灰白色组织含有 Zr、Cu、Ni 元素较多,黑色组织含有 Ti 元素较多,可见,这种非晶钎料已不再是非晶态组织;且与钎料成分 Ti-37.5Zr-15Cu-10Ni 相比,这种非晶钎料的成分也不再均匀分布。采用 X 射线衍射分析方法来确定钎焊后钎料中黑色相和灰色相的晶体结构,其衍射花样,如图 4 所示。其中图 4(a) 为黑色相的衍射花样,图 4(b) 为灰



(a) 黑色相的衍射花样



(b) 灰白色相的衍射花样

图4 钎料的X射线衍射花样

Fig.4 Diffraction patterns by X-ray of brazing filler

(下转第 152 页)

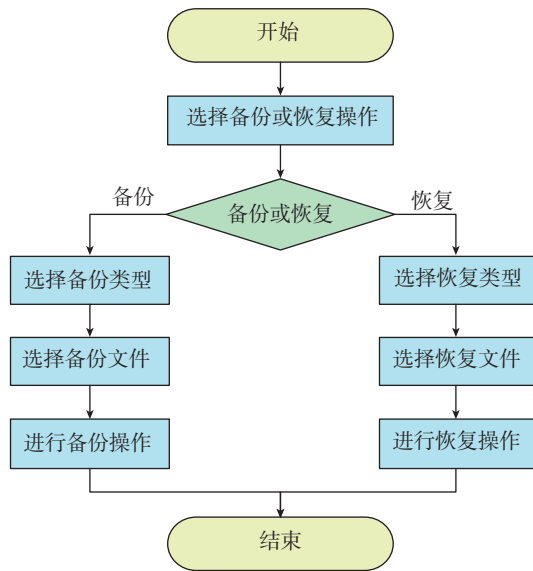


图11 备份、恢复流程图

Fig.11 Flow chart of backup and restore data

用系统访问数据库,使数据库更加安全。

#### 4 结束语

(1) 针对研究焊接结构完整性的需要,经过合理地程序设计,实现了焊接数据的管理,为焊接结构完整性研究提供有效的数据积累平台,同时为专家系统提供了数据调用接口。

(2) 研究了以焊接接头性能数据库作为知识源的自动知识获取专家系统。系统基于英国 BS7910 标准,充分利用典型焊接接头数据库,具有对带缺陷结构进行安全评定的功能。

#### 参考文献

[1] 威廉, S. 佩利尼. 结构完整性原理. 北京: 国防工业出版社, 1983.

[2] 马敬东, 李亚宁. 国际缺陷评定方法研究进展. 材料导报, 2006, 20(4): 86-89.

[3] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[4] 张彦华. 焊接力学与结构完整性原理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

[5] 陈丙森. 计算机辅助焊接技术. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[6] 刘军. 数据库应用系统开发技术. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[7] 付荣华, 康慧, 曲平. 焊接专家系统的应用现状及发展. 热加工工艺, 2006, 35(3): 53-55.

[8] 万晓慧, 赵海涛, 王晓丽. 焊接结构完整性数据库系统的设计与实现. 电焊机, 2008(1): 1-4.

[9] BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2005.

(责编 良辰)

(上接第 139 页)

白色相的衍射花样,分别相应图 2(a)中 1 点和 2 点。分析表明,富集钎料元素的灰白色相为六方晶体结构,为是  $TiNi_2$  化合物, Cu 元素和 Zr 元素固溶于  $TiNi_2$  中;富 Ti 元素的黑色相为 bcc 晶体结构,其余元素固溶于其中。因此,钎焊后钎料形成  $TiNi_2 (Cu,Zr)$  化合物和一种 Ti 基固溶体。

通常,焊接界面组织中的化合物对接头产生脆化,  $TiNi_2$  化合物可能不利于接头的韧性;具有 bcc 结构的 Ti 基固溶体具有较好的塑性,因而,这两种相的尺寸和分布情况是接头强度和塑性的主要影响因素。当化合物尺寸较大、或分布不均匀时,加剧接头脆化,如图 3 所示;而当化合物相尺寸细小、且弥散分布时,可降低脆性化合物对接头性能的不利影响,如图 2(a)所示,因此试件具有较高强度,相应工艺为本试验优化出的 TC1 蜂窝夹层结构钎焊工艺。

#### 3 结论

本文试验研究了 TC1 钛合金蜂窝夹层结构的钎焊工艺,并对优化工艺下钎焊界面组织进行观察和分析,得出以下结论。

(1) 在  $930^{\circ}C$ 、保温 15min、钎料添加量适当的条件下,钎焊界面中  $TiNi_2 (Cu,Zr)$  化合物相尺寸细小、且弥散分布,因此钎焊 TC1 蜂窝夹层结构试件拉脱强度平均值较高、达 17MPa。

(2) 在钎焊过程中, Cu 元素和 Ni 元素由钎料向母材扩散,使  $\beta$  相变温度降低,促进界面魏氏体组织的产生;非晶钎料经钎焊后形成  $TiNi_2 (Cu,Zr)$  化合物和一种 Ti 基固溶体。

(3) 芯体波纹带间受钎料熔化热影响较大,导致此处魏氏体组织粗大,成为试件的薄弱部位。

#### 参考文献

[1] 符定梅, 韩静涛, 刘靖, 等. 钢质蜂窝夹芯板的研究进展. 航空精密制造技术, 2004(3): 14-15.

[2] 张敏, 于九明. 金属夹芯复合板及其制备技术的发展. 焊接技术, 2003(6): 21-23.

[3] Huang X, Richards N L. Activated Diffusion Brazing Technology for Manufacture of Titanium Honeycomb Structures - A Statistical Study. Welding Research, 2004(3): 73-81.

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

[5] 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.

(责编 良辰)