

## TA15 钛合金扩散钎焊界面微观组织及性能研究

## Study on Microstructure and Property of TA15 Titanium Alloy Diffusion Brazing Joint

首都航天机械公司 李雪飞 邹鹤飞 陈志凯 岳海金 高晶 邢斌 王硕

**[摘要]** 采用钛基钎料 Ti37.5Zr15Cu10Ni 作为中间层对 TA15 钛合金进行了真空扩散钎焊,对扩散钎焊接头界面微观组织进行了分析,同时测试了接头室温和液氮低温力学性能。试验结果表明:钎料与 TA15 基体发生了快速的互扩散,焊缝微观组织全部呈针状,接头室温和液氮低温状态下均脆断于焊缝,室温拉伸强度达到基体材料拉伸强度的 93.8%。

**关键词:** 扩散钎焊 TA15 钛合金 力学性能 微观组织

**[ABSTRACT]** TA15 alloy is vacuum brazed with Ti37.5Zr15Cu10Ni filler metal. The microstructure of interface diffusion welding brazing is analyzed. Meanwhile, the mechanical properties of the joint are tested at room temperature and low temperature of liquid nitrogen. The results show that the fast diffusion between the solder and the TA15 alloy occurs, and the microstructure of weld is needle like. The joints are brittle fracture in the joint at room temperature and low temperature of liquid nitrogen. The tensile strength of the joints at room temperature reaches 93.8% of the base material.

**Keywords:** Diffusion brazing TA15 titanium alloy Mechanical properties Microstructure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.073

钛合金由于具有高比强度、耐蚀、耐温和耐热等优点,在国内外航空、航天领域得到广泛研究和应用。TA15 钛合金是前苏联研制的近  $\alpha$  钛合金,其名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V,属于高铝当量近  $\alpha$  型合金<sup>[1]</sup>。TA15 钛合金在俄罗斯的飞机和发动机上得到大量应用,该合金兼有  $\alpha$  型和 ( $\alpha + \beta$ ) 型钛合金的优点,具有良好的热稳定性,长时间工作温度可达 500℃。其工艺塑性接近于 ( $\alpha + \beta$ ) 型钛合金,具有较好的加工性能,可以制成薄板、厚板、型材、锻件和模锻件等<sup>[2]</sup>。另外,TA15 钛合金具有良好的焊接性能和工艺塑性,其焊接结构件在航空、航天领域具有良好的应用前景。

扩散钎焊又称瞬间液相扩散焊、过渡液相扩散焊,是一种精密的连接方法,特别适用于异种金属材料、耐

热合金和新材料等的连接。其金属学原理由 Duvall D S<sup>[3]</sup> 于 1974 年首次汇总采用相图解释。扩散钎焊兼备扩散焊和钎焊的特点:焊接过程加压、焊接过程有液相形成,并具有以下优点:焊缝组织近于母材组织、接头强度近于母材强度、焊缝高温性能好、焊前表面质量要求较低、能实现精密连接。由于以上特点,扩散钎焊现已广泛应用于航天、航空、核能等各个领域。

本研究以 TA15 钛合金棒料为试验材料,以钛基非晶箔带作为中间层,对 TA15 钛合金扩散钎焊接头进行了界面微观组织研究,对扩散钎焊接头的室温和液氮低温力学性能进行了分析。

## 1 试验材料及方法

本试验所用材料为 TA15 钛合金圆棒,化学成分如表 1 所示。扩散钎焊试件规格为  $\phi 31 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,试件待焊端面需保证光洁度,焊接前试件表面进行酸洗处理。扩散钎焊试棒端面按图 1(a) 所示对齐装配,按图 1(b) 所示装配到工装夹具上进行加压。TA15 钛合金扩散钎焊中间层选用钛基钎料为 Ti-Zr-Cu 体系的 Ti37.5Zr15Cu10Ni,钎料相关信息如表 2 所示,扩散钎焊工艺参数如表 3 所示。

钎焊后,将 TA15 合金扩散钎焊试件采用机械加工方式制成拉伸试样,分别进行室温和液氮低温拉伸试验,拉伸试件示意图如图 2 所示。本试验扩散钎焊设备采用 WZQH-30 真空钎焊炉,采用扫描电镜及能谱分析

表1 TA15钛合金化学成分(质量分数)

Al	Zr	Mo	V	Ti
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	余量

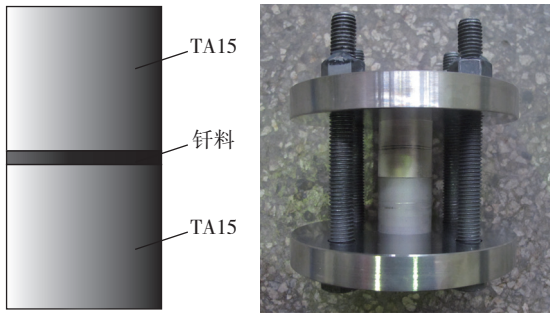
表2 钛基钎料Type1510

牌号	分类	主要成分	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃
Type1510	Ti-Zr-Cu	Ti37.5Zr15Cu10Ni	815	950

表3 TA15钛合金扩散钎焊工艺参数

焊接温度 /℃	保温时间 /min	钎料厚度 / $\mu\text{m}$	真空度 /Pa
950	30	30	$< 1 \times 10^{-2}$

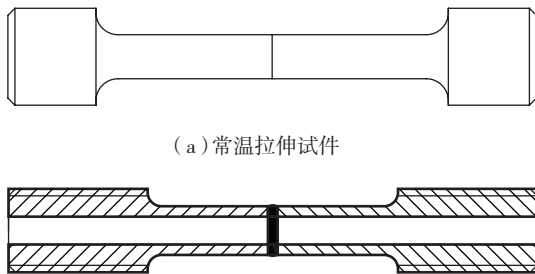
仪进行界面微观组织、断口形貌及成分分析。



(a) 装配示意图 (b) 实物装配图

图1 TA15钛合金扩散钎焊装配图

Fig.1 TA15 alloy diffusion brazing assembly drawing



(a) 常温拉伸试件

(b) 液氮低温拉伸试件

图2 拉伸试件示意图

Fig.2 Diagram of tensile specimen

## 2 试验结果及分析

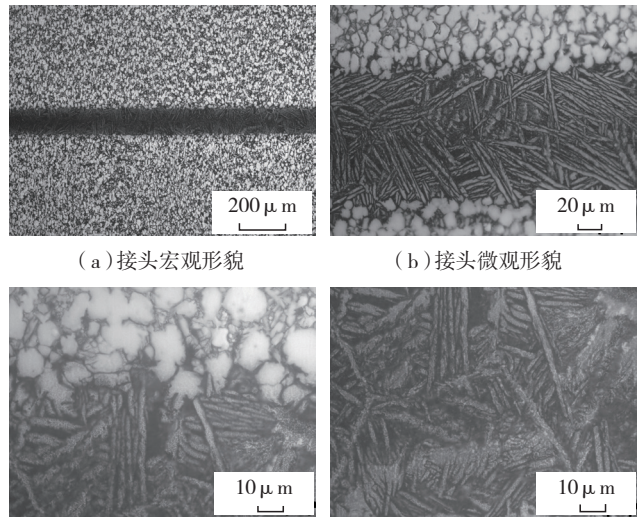
### 2.1 界面微观组织分析

图3为TA15钛合金扩散钎焊界面微观组织形貌。从图3中扩散钎焊接头宏观形貌可以看出,基体的原始界面已经全部弱化,在两侧TA15钛合金之间形成了宽度约为120 $\mu\text{m}$ 左右的焊缝区域,而焊接前基体之间预置的钎料厚度为30 $\mu\text{m}$ ,可见扩散钎焊过程中钎料与TA15基体发生了快速的互扩散,这是因为钎料中含有与Ti元素产生强烈作用的Cu、Ni元素,钎焊时会快速扩散到基体金属中与Ti元素形成扩散层<sup>[4]</sup>。

从焊缝微观组织可以看出,扩散钎焊接头轮廓清晰,焊缝与基体之间存在明显的界面,基体保持原始的球状 $\alpha$ 相,焊缝组织全部由针状的组织组成,焊缝内部无残留钎料剩余,说明钎料与基体之间发生了充分的互扩散并形成了有效的冶金结合。

### 2.2 接头力学性能分析

将TA15钛合金扩散钎焊试件按图2所示尺寸加工成室温和液氮低温标准拉伸试样,对焊接接头进行了力学性能测试,测试结果如表4所示。从表4中可以看出,扩散钎焊接头室温和液氮低温拉伸试验都断裂在焊缝部位,说明室温和液氮低温下钎焊接头的强度低于基



(a) 接头宏观形貌

(b) 接头微观形貌

(c) 界面微观形貌

(d) 焊接微观组织形貌

图3 TA15钛合金扩散钎焊界面微观组织形貌

Fig.3 Microstructure of TA15 alloy diffusion brazing

体材料。扩散钎焊接头室温拉伸强度最低为910MPa,TA15钛合金基体的室温拉伸强度为970MPa,可见扩散钎焊接头室温拉伸强度已达到基体材料拉伸强度的93.8%。扩散钎焊接头在液氮低温下的拉伸强度达到1100MPa以上,说明在液氮低温状态下钎焊接头的强度有所提高。但是,液氮低温下拉伸试样的延伸率与室温下相比较低,最低值仅为1.5%,不到室温拉伸试样延伸率最低值的50%,几乎观察不出试样断面收缩量,且室温拉伸试样延伸率远低于基体,所以扩散钎焊接头的塑性变形性能较差。通过对接头力学性能进行分析得出,TA15钛合金采用本文所用的钎料及工艺参数获得的扩散钎焊接头拉伸性能良好,能够很好地满足TA15钛合金连接强度的技术指标。

表4 TA15钛合金及扩散钎焊接头力学性能

试验编号	试验温度 / $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%	断裂位置
基体	室温	970	16	母材
1	室温	910	4.0	焊缝
2	室温	910	4.5	焊缝
3	室温	925	9.0	焊缝
4	液氮温度	1110	1.5	焊缝
5	液氮温度	1110	2.5	焊缝
6	液氮温度	1090	-	焊缝

### 2.3 钎焊接头的断口分析

图4为室温、液氮低温拉伸试样断裂后的宏观照片,可以看出,扩散钎焊接头在室温和液氮低温下的宏观断口没有明显的塑性变形,断口比较平齐,室温和液氮低温都断裂在钎焊缝。对比室温和液氮低温断口微

观形貌(分别如图 5、6 所示)发现,室温断口的微观不平度要高于液氮低温断口的不平度,说明了室温拉伸试样的延伸率高于液氮低温的延伸率。同时,在室温和液氮低温断口均能观察到大量条状微观组织,这与焊缝金相微观组织呈针状形貌对应,说明焊缝断裂在焊缝处。根据拉伸试样宏观和微观形貌分析可知,室温和液氮低温断裂特征均为脆性断裂。



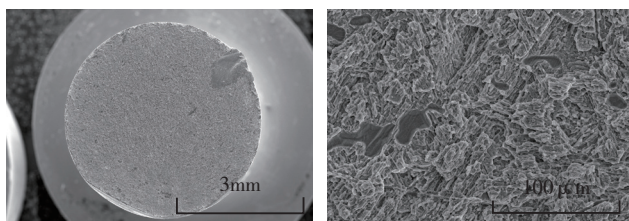
(a) 室温拉伸试样



(b) 液氮低温拉伸试样

图4 钎焊接头断裂试样

Fig.4 Fracture photographs of brazing joint



(a) 断口低倍形貌

(b) 断口微观形貌

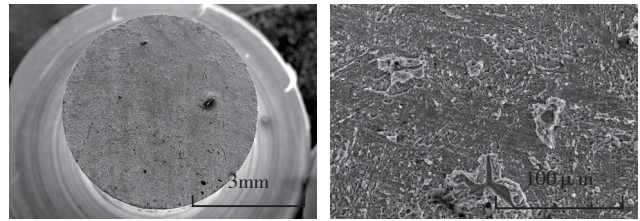
图5 室温下拉伸断口形貌

Fig.5 Microstructure of fracture surface at room temperature

### 3 结论

(1) 采用钛基钎料 Ti37.5Zr15Cu10Ni 以及 950℃/30min 的扩散钎焊工艺参数能够实现 TA15 钛合金的扩散钎焊,接头界面可形成有效的冶金结合。

(2) TA15 钛合金经过 950℃/30min 的扩散钎焊后,钎料与 TA15 基体发生了快速的互扩散,焊缝组织全部由针状组织组成。



(c) 断口低倍形貌

(d) 断口微观形貌

图6 液氮温度拉伸断口形貌

Fig.6 Microstructure of fracture surface at low temperature of liquid nitrogen

(3) TA15 钛合金扩散钎焊接头室温和液氮低温状态下均断裂在焊缝,断裂方式都为脆性断裂,室温拉伸强度可达到基体材料拉伸强度的 93.8%,液氮低温拉伸强度高于室温状态,扩散钎焊接头力学性能满足 TA15 钛合金连接强度的技术指标。

### 参考文献

- [1] 王群骄. 有色金属热处理技术. 北京: 化学工业出版社, 2008-01.
- [2] 曹京霞, 方波, 黄旭, 等. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响. 稀有金属, 2004, 28(2): 362-364.
- [3] Duvall D S, Owczarski W A, Paulonic D F. TLP bonding: a new method for joining heat resistant alloys. Welding Journal, 1974, 53(4): 203-214.
- [4] 孙晓亮, 马光, 李银娥, 等. 钛基非晶态钎焊料发展评述. 钛工业进展, 2008, 25(6): 11-14.

(责编 亿霖)

(上接第 68 页)

- texture on different scales. Acta. Materialia, 2008, 56: 3951-3962.
- [6] Atsushi S, Yoshihiko U, Masahiro J. Fatigue crack growth behavior on Ti-6Al-4V alloys under variable amplitude load sequences. In: Blom A F. Fatigue 2002, Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress. Stockholm: EMAS, 2002: 2911.
  - [7] 张纪奎, 郦正能, 邱志平, 等. 钛合金结构损伤容限设计可行性研究. 航空学报, 2009, 30(4): 763-767.
  - [8] 李晓华, 张军, 韩秀全, 等. 钛合金层合梁 SPF/DB 制造工艺研究. 航空制造技术, 2011, 16: 66-69.
  - [9] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用与发展现状. 北京航空制造工程研究所, 2004, 11: 50-52.
  - [10] 侯红亮, 王耀奇, 李晓华, 等. 先进钣金成形技术在航空航天领域的应用(上). 金属加工, 2008, 13: 22-24.
  - [11] 贺小帆, 刘彦毛, 刘文斑, 等. 含孔钛合金扩散连接止焊层合板裂纹扩展特性试验. 航空材料学报, 2011, 31(5): 77-80.
  - [12] 周克印, 徐来, 林兆荣, 等. TC4 钛板扩散连接后的疲劳断裂特性. 机械强度, 1998, 20(2): 112-115.
  - [13] Tuppena S J, Bachea M R, Voice W E. A fatigue assessment of dissimilar titanium alloy diffusion bonds. International Journal of Fatigue, 2005, 27: 651-658.

(责编 叶枫)