

# 连接参数对 Ti53311S 高温钛合金 TLP 连接接头性能的影响

张志伟<sup>1</sup> 王厚勤<sup>2</sup> 王文平<sup>1</sup>

(1 北京控制工程研究所,北京 100190)

(2 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001)

**文 摘** 采用 Cu 作为中间层实现了 Ti53311S 合金的 TLP 连接,通过 SEM、EDS 方法分析了接头界面的微观组织,研究了接头界面微观组织及力学性能随 TLP 连接温度及保温时间的变化规律。结果表明:TLP 连接接头的典型界面结构为 Ti53311S/ $\beta$ -Ti/Ti,Cu(Sn)金属间化合物/ $\beta$ -Ti/Ti53311S。随着 TLP 连接温度的升高或保温时间的增加,焊缝宽度逐渐增加,Cu 元素向母材侧的扩散程度更加充分,化合物相分解消失,接头室温抗拉强度先大幅升高后趋于稳定,连接工艺为 980℃/20 min 时,接头抗拉强度达到最大值 899 MPa。

**关键词** Ti53311S,TLP 连接,Cu,微观组织,力学性能

中图分类号:TC453+.9

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.016

## Effect of Bonding Parameters on the Properties of TLP Bonding Joints of Ti53311S Alloy

ZHANG Zhiwei<sup>1</sup> WANG Houqin<sup>2</sup> WANG Wenping<sup>1</sup>

(1 Beijing Institute of Control Engineering, Beijing, 100190)

(2 State Key Laboratory of Advanced Welding & Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Ti53311S alloy was successfully joined by TLP bonding with Cu filler metal. The interfacial microstructure was characterized by SEM and EDS. Effects of TLP bonding temperature and holding time on the joint microstructure and mechanical properties were investigated in details. The results showed that the typical interfacial microstructure was Ti53311S/ $\beta$ -Ti/Ti,Cu(Sn) intermetallic compound/ $\beta$ -Ti/Ti53311S. The mutual diffusion degree between base metal and Cu interlayer increased with the rise of TLP bonding temperature and increase of holding time, which caused the increase of the joint width and reduction of compound in the joint. The degree of diffusion affected the strength of the bonding greatly. The tensile strength of joints increased at first gradually and then tended to be stable at room temperature. The highest tensile strength, which was achieved at the bonding temperature of 980℃ holding for 20 min, was 899 MPa.

**Key words** Ti53311S, TLP bonding, Cu, Microstructure, Mechanical properties

### 0 引言

Ti53311S 合金是一种近  $\alpha$  型钛合金,在 550℃ 以下具有较好的综合力学性能,包括较高的瞬时强度、良好的热稳定性、优异的抗蠕变性能等,已经应用于航天器姿态控制发动机的喷注器<sup>[1-3]</sup>。由于喷注器具有结构复杂、精度要求高等特点,Ti53311S 合金的连接成为制造过程中的关键问题。TLP (Transient

Liquid Phase)连接方法综合了钎焊和固态扩散连接两者的优点,既能在较低温度下实现冶金连接,又能获得优异性能尤其是优异高温力学性能的接头<sup>[4-9]</sup>,适用于喷注器中 Ti53311S 合金的连接。因此,本文选用 Cu 作为中间层,对 Ti53311S 合金的 TLP 连接展开研究,分析了 TLP 接头的典型界面微观组织,较系统研究了钎焊温度、保温时间对 TLP 接头界面结构

和力学性能的影响规律。

## 1 实验方法

实验采用由西北有色金属研究院生产的 Ti53311S 合金,其主要合金元素及含量见表 1 所示。该合金显微组织为  $\beta$  相呈现岛状分布在基体  $\alpha$  相上。将 Ti53311S 合金棒材沿轴线加工成 44 mm×14 mm×14 mm 的方形试样,对待连接表面进行打磨抛光并放入丙酮中超声波清洗 20 min,然后通过电子束蒸镀的方法将纯 Cu 沉积待连接表面作为中间层,厚度约为 15  $\mu\text{m}$ 。

表 1 Ti53311S 合金主要元素及含量

Tab.1 Main elements content of Ti53311S alloy wt%

Al	Sn	Mo	Zr	Si	Nb	Ti
5.5	3.5	3	3	1	1	余量

将试样按照图 1 所示进行装配后,立刻放入炉中进行 TLP 连接。在连接过程中,真空度可达  $5 \times 10^{-3}$  Pa,轴向压力依靠上层零件自重实现。根据 Ti-Cu 二元相图,Ti、Cu 有两个共晶点,共晶温度分别为 875 和 960 $^{\circ}\text{C}$  [10-11],其中较低的共晶温度 875 $^{\circ}\text{C}$  是实现 TLP 连接的临界温度。

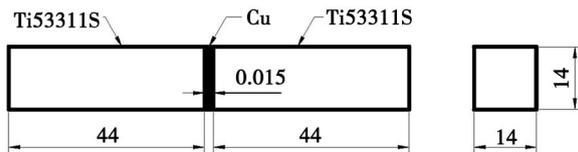


图 1 TLP 接头装配示意图

Fig.1 Assembly of TLP bonding joint

首先固定保温时间为 20 min,选取 880、930、980 $^{\circ}\text{C}$  三个温度对试样进行 TLP 连接,然后固定连接温度为 930 $^{\circ}\text{C}$ ,选取 10、20、30 min 三个时间对试样进行 TLP 连接。将连接好的试件按照图 2 加工为拉伸试样,采用 INSTRON MODEL 1186 电子万能试验机,选取加载速度为 0.5 mm/min,对同一工艺参数下连接的 5 个试样进行抗拉强度测试。采用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 对接头界面微观组织进行观察。

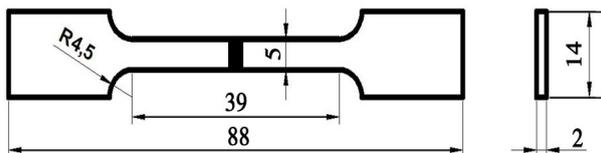


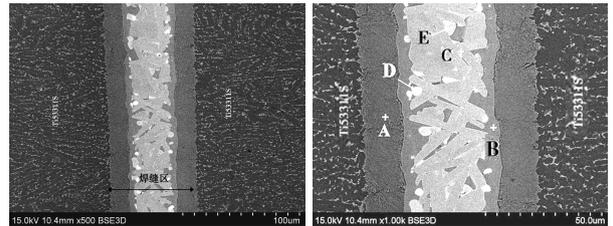
图 2 拉伸试样示意图

Fig.2 Specimen for tensile test

## 2 结果与分析

### 2.1 TLP 连接接头界面微观组织分析

采用 Cu 作为中间层在 880 $^{\circ}\text{C}$ /20 min 的连接工艺下获得的 Ti53311S 合金 TLP 连接接头的典型界面结构见图 3 所示。由图 3(a)可以看出,焊缝宽度大于原始中间层厚度(15  $\mu\text{m}$ ),这是由于 TLP 连接过程中母材向中间层 Cu 中的溶解造成的。由图 3(b)可以看出,以焊缝中心线为界,中心线与母材之间主要分为两层,主要相分别标记为 A 相和 B 相,其中 B 相中心区域还有不规则分布的 C 相,局部零星分布着球状的 D 相和 E 相。



(a) 500 $\times$

(b) 1 000 $\times$

图 3 Ti53311S 合金 TLP 连接接头界面微观组织

Fig.3 Interfacial microstructure of Ti53311S TLP bonding joint

通过 EDS 获得图中各点化学成分及可能相见表 2 所示,分析可知焊缝中的 A 相主要为固溶了一定 Cu 的  $\beta$ -Ti,此外还含有母材中的原有成分 Al 和 Zr; B 相主要为  $\text{Ti}_2\text{Cu}$ ; C 相主要为  $\text{Ti}_3\text{Cu}_4$ ; D 相主要为  $\text{Ti}_3\text{Sn}$ ; E 相是 Al、Zr 含量稍高的  $\text{Ti}_2\text{Cu}_3$ 。

表 2 图 3(b) 中各点化学成分及可能相

Tab.2 Chemical compositions and possible phase of each spot in Fig.3(b)

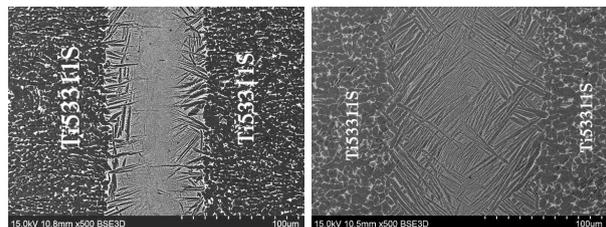
位置	元素					可能相
	Al	Zr	Sn	Ti	Cu	
A	11.22	1.10	2.09	75.14	10.45	$\beta$ -Ti
B	5.88	0.52	-	60.39	33.21	$\text{Ti}_2\text{Cu}$
C	6.38	2.83	-	39.89	50.90	$\text{Ti}_3\text{Cu}_4$
D	8.55	0.85	15.00	71.40	4.20	$\text{Ti}_3\text{Sn}$
E	19.68	4.47	-	22.75	53.10	$\text{Ti}_2\text{Cu}_3$

根据 Ti-Cu 二元相图 [12],当 TLP 连接温度升高到 875 $^{\circ}\text{C}$  时,在 Ti53311S 合金与中间层 Cu 的接触界面开始形成液相,Cu 通过液相向母材不断扩散,同时母材不断溶解,直至 Cu 含量耗尽。因此由焊缝的中心区域到两侧边缘,Cu 含量不断下降。在靠近母材的焊缝区域,Cu 含量仅为 10% 左右,而 Cu 属于  $\beta$  相

稳定元素,导致钛合金的同素异构转变温度显著降低<sup>[3]</sup>,在 TLP 连接过程中出现了  $\alpha$ -Ti $\rightarrow$  $\beta$ -Ti 转变,形成连续的  $\beta$ -Ti 层。在靠近焊缝中心的区域,Cu 含量超出了 Cu 在  $\beta$ -Ti 中的极限溶解度 13.49%,在 TLP 连接过程中生成了  $Ti_2Cu$  化合物。在焊缝中心区域,Cu 含量更高,根据 Ti-Cu 二元相图,在冷却过程中生成  $Ti_3Cu_4$ 、 $Ti_2Cu_3$  化合物,此外母材 Ti53311S 中的 Sn 元素与 Ti 反应生成  $Ti_3Sn$  化合物,导致焊缝中心区域主要由 Ti、Cu(Sn) 金属间化合物组成。

## 2.2 连接工艺对接头界面组织结构的影响

图 4 为采用 930℃/20 min、980℃/20 min 连接工艺下的接头界面微观结构。结合图 3、图 4 可以看出,当钎焊温度上升到 930℃时,母材溶解量增加,形成的焊缝宽度与 880℃时相比明显变宽,同时中间层 Cu 向母材中的扩散量增加,焊缝中心区域的 Cu 含量未超过 13.49% 的极限溶解度,因此组成相以  $\beta$ -Ti 为主。接近母材的焊缝区域由于 Cu 含量较低而出现了交叉分布的针状  $\alpha$ -Ti,但是该区域较窄。随着连接温度继续增加至 980℃,焊缝宽度进一步加大,接头界面微观结构也变得很均匀。接头中心区域仍以  $\beta$ -Ti 为主,但是由于 Cu 向母材中扩散距离进一步增加,使得界面处交叉分布的针状  $\alpha$ -Ti 增多,呈明显的针状形态。

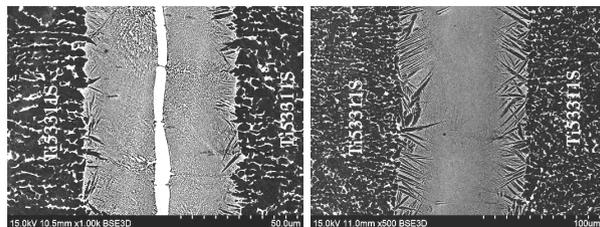


(a) 930℃/20 min (b) 980℃/20 min

图 4 Ti53311S 合金 TLP 连接接头界面微观组织

Fig. 4 Interfacial microstructure of Ti53311S TLP bonding joint

图 5 为采用 930℃/10 min、930℃/30 min 连接工艺下的接头界面微观结构。结合图 4、图 5 可以看出,随着连接时间的增加,焊缝宽度逐渐增大,界面均匀性不断提升,与连接温度增加时的变化规律基本一致,但是保温时间对接头界面微观结构的影响不如连接温度显著。当连接时间为 10 min 时,焊缝主体为  $\beta$ -Ti,焊缝中心区域出现一条 10  $\mu$ m 左右的  $Ti_2Cu$  层,局部会出现从  $Ti_2Cu$  层向  $\beta$ -Ti 层边缘生长的  $Ti_2Cu$  枝晶花样,靠近母材的焊缝区域略有针状的  $\alpha$ -Ti 产生。当连接时间为 30 min 时,焊缝与连接时间 20 min 相比未见明显变化,仅中间区域的成分更加均匀。



(a) 930℃/10 min (b) 930℃/30 min

图 5 Ti53311S 合金 TLP 连接接头界面微观组织

Fig. 5 Interfacial microstructure of Ti53311S TLP bonding joint

## 2.3 连接工艺对接头力学性能的影响

Ti53311S 合金 TLP 连接接头室温抗拉强度随连接温度的变化规律见图 6 所示,可以看出,接头抗拉强度随着连接温度的升高先迅速升高后趋于稳定。当 TLP 连接温度为 880℃时,接头平均强度仅为 415 MPa 左右。结合图 3 中界面微观组织可知,焊缝中心区域的脆性 Ti、Cu(Sn) 化合物层是接头强度较低的主要原因,拉伸过程中接头易在脆性化合物层发生断裂。随着连接温度增加到 930℃,脆性化合物层分解,接头界面组织均匀,强度也大幅度提升至 865 MPa,接头仍断裂于焊缝区域且无明显塑性变形。随后进一步增加连接温度到 980℃,焊缝界面组织虽然更加均匀,但是对接头强度的影响已经不明显,接头强度仅小幅增加至 899 MPa。

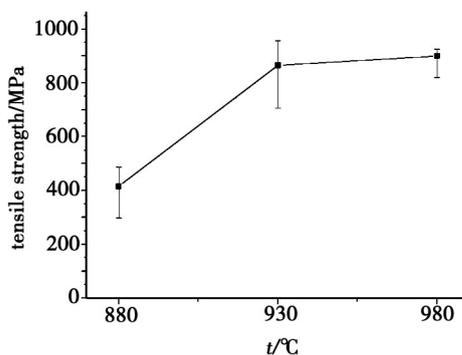


图 6 TLP 连接温度对 Ti53311S 合金接头抗拉强度的影响

Fig. 6 Relationship between tensile strength of Ti53311S TLP bonding joints and temperature

图 7 为不同保温时间下获得的 Ti53311S 接头室温抗拉强度。由图 7 可以看出,随着保温时间的延长,接头抗拉强度先迅速升高后趋于稳定。当连接时间为 10 min 时,接头平均强度仅为 526 MPa 左右且强度值较为分散,焊缝中心区域的脆性  $Ti_2Cu$  化合物层是接头强度较低的主要原因,拉伸过程中接头易在  $Ti_2Cu$  化合物层发生断裂。随着连接时间的延长至 20 min, $Ti_2Cu$  带消失,接头界面微观组织均匀,平均

强度也随之较大幅度提升到 864 MPa 左右,接头仍断裂于焊缝区域且无明显塑性变形。继续延长保温时间到 30 min,焊缝界面组织没有明显变化,因此接头平均强度值也基本维持不变。

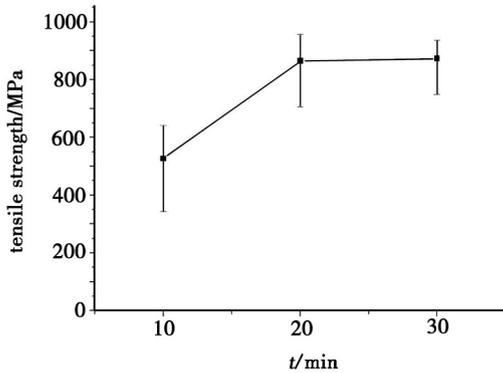


图 7 TLP 连接保温时间对 Ti53311S 合金接头抗拉强度的影响

Fig. 7 Relationship between tensile strength of Ti53311S TLP bonding joints and holding time

### 3 结论

(1) 采用 Cu 作为中间层,可以实现 Ti53311S 合金的 TLP 连接,接头典型界面微观组织为:Ti53311S/ $\beta$ -Ti/Ti、Cu(Sn) 金属间化合物/ $\beta$ -Ti/Ti53311S。

(2) 随着 TLP 连接温度的升高或保温时间的增加,焊缝宽度逐渐增加,Cu 元素向母材侧的扩散程度更加充分,化合物相分解消失。当连接温度大于 930℃、保温时间大于 20 min 时,接头界面微观组织为 Ti53311S/ $\alpha$ -Ti/ $\beta$ -Ti/ $\alpha$ -Ti/Ti53311S。

(3) 接头室温抗拉强度随着 TLP 连接温度的升高或保温时间的增加,先大幅升高后趋于稳定。连接工艺为 980℃/20 min 时,接头抗拉强度达到最大值 899 MPa。

#### 参考文献

[1] 倪沛彤, 韩明臣, 杨建朝, 等. 热处理制度对 Ti53311S 钛合金棒材显微组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 492

[2] 王成长, 杨建朝, 倪沛彤, 等. 热加工对 Ti53311s 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2009, 26(1): 20

[3] 宋晓国, 曹健, 李兆光, 等. TiZrNiCu 钎料钎焊 Ti53311S 高温钛合金接头界面结构及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8): 1694

[4] Tuah-Poku, Sollar M, Massalaki T B. A study of the transient liquid phase bonding process applied to Ag/Cu/Ag sandwich joint[J]. Metall. Trans., 1988, 19A(2): 675

[5] 邹贵生, 吴爱萍, 任家烈, 等. 连接压力在 Ti/Ni/Ti 复合层 TLP 扩散连接 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷中的作用机制[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 76

[6] 宁立芹, 梁德彬, 李海刚, 等. Zr 对 Ti<sub>3</sub>Al 基金属间化合物 TLP 扩散焊接头组织性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(2): 72

[7] 曲文卿, 张彦华, Sohail A. Khan, 等. SiC 颗粒增强 Al 基复合材料焊接工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(4): 46-47

[8] 邹贵生, 白海林, 谢二虎, 等. Ti<sub>2</sub>AlNb 相合金 Ti-22Al-25Nb 的 TLP 扩散连接[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(12): 2181

[9] Shalz M L, Dateish B J, Tomshia A P. Ceramic joining: Part I partial transient liquid-phase bonding of alumina via Cu/Pt/Cu multilayer[J]. J. Mater. Sci., 1994, 29(12): 1673-1684

[10] 吴铭方, 杨敏, 张超, 等. Ti/Cu 共晶反应液相铺展及组织[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 68-71

[11] 余春, 吴铭方, 于治水. Ti/Cu/Ti 接触反应钎焊溶解机理[J]. 焊接技术, 2004, 33(2): 17-19

[12] Massalski T B. Binary alloy phase diagrams[M]. Materials Park: ASM International, 1990

(编辑 任涛)

## 高承载、低摩擦、自润滑轴承技术

2014 年 10 月 28 日,由航天材料及工艺研究所承担的"高承载、低摩擦、自润滑轴承技术"项目通过了航天科技集团公司组织的成果鉴定。该项目是以型号为主要应用背景,通过对轴承材料、粘接技术及重载下轴承试验评价技术等方面的研究,突破了兼备高承载、低摩擦、自润滑、长时间、高可靠等多功能为一体的复合轴承技术,满足了型号研制中存在的复杂重载、低速摆动干摩擦工况条件下的载荷传递需求,综合性能满足了型号要求,具有自主知识产权。与会专家一致认为:该项目达到国内领先、国际先进水平,具有重大的社会效益。

· 罗焱 ·