

# 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

宁立芹 梁德彬 李海刚 毛建英

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 采用 TiZrNiCu非晶态箔状钎料过渡液相(TLP)扩散连接 Ti<sub>3</sub>Al基金属间化合物,通过对接头的力学性能及微观结构的分析,研究了中间层合金 TiZrNiCu中 Zr元素对 Ti<sub>3</sub>Al基金属间化合物 TLP扩散连接接头组织和性能的影响规律和机理。结果表明,在连接工艺相同条件下,随着中间层合金中添加元素 Zr含量减小,Ti<sub>3</sub>Al基 TLP扩散焊接头强度增大;通过延长后续扩散处理时间,可以减小 Zr元素对接头组织性能的不利影响。

**关键词** Zr, Ti<sub>3</sub>Al, TLP扩散焊,组织和性能

## Effect of Zr on Microstructure and Properties of Ti<sub>3</sub>Al-Based Alloy TLP/DB Joints

Ning Liqin Liang Debin Li Haigang Mao Jianying

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** In this paper microstructure and mechanical properties of TLP diffusion bonding joints of Ti<sub>3</sub>Al-based alloy with bonding materials of TiZrNiCu foils are analyzed, and effect of Zr bonding materials on microstructure and mechanical properties of the joints is investigated. The results show that, at the same bonding process, along with the content of Zr bonding materials decreasing, the strength of Ti<sub>3</sub>Al-based alloy TLP diffusion bonding joints increases; via prolonging subsequent diffusion-treating time, disadvantageous effects of Zr in bonding materials on microstructures and properties of joints may decrease and even disappear.

**Key words** Zr, Ti<sub>3</sub>Al, TLP/DB, Microstructures and properties

### 0 引言

Ti<sub>3</sub>Al基金属间化合物具有轻质、高的高温比强度比模量和抗高温氧化及高温蠕变的优点,可在 600~750 甚至更高的条件下使用。此材料近几年已进入工程化应用,主要用于制造航天航空飞行器高温结构件<sup>[1~3]</sup>。研究表明采用过渡液相(TLP)扩散焊方法连接 Ti<sub>3</sub>Al基金属间化合物可获得与基体强度相近的接头,此连接方法的显著特点是在较低的连接温度、较小的焊接压力下可获得高的接头强度。而实现 TLP扩散焊方法的关键是中间层合金的成分及含量<sup>[4~6]</sup>。

本文采用 TiZrNiCu非晶态箔状钎料作为中间层连接 Ti<sub>3</sub>Al基合金,通过研究分析中间层合金中添加

元素 Zr对 Ti<sub>3</sub>Al基合金接头组织性能的影响,探讨对接头组织性能影响规律和机理。

### 1 试验

#### 1.1 材料

焊接母材为钢铁研究总院提供的 TAC-1B(超<sub>2</sub>)合金棒材,材料的主要成分及性能如表 1、表 2 所示。

表 1 TAC-1B合金的主要化学成分

Tab 1 Main content of TAC-1B alloy

% (质量分数)					
Nb	Al	O	N	H	Ti
30.62	12.98	0.054	0.04	0.0012	余

收稿日期:2007-06-08

作者简介:宁立芹,1964年出生,高级工程师,主要从事高温真空钎焊、扩散焊研究工作

表 2 TAC - 1B合金的力学性能

Tab 2 Mechanical properties of TAC - 1B alloy

测试温度 /	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\delta_{10}$ /%
室温	1060	745	14	15
650	800	645	17	29

1.2 TLP连接材料

采用了四种成分不同中间层合金,形式为非晶态箔材。箔材采用快速凝固特种工艺制备而成,厚度约40  $\mu\text{m}$ 。

1.3 试验方法及设备

方法:将TAC - 1B合金加工成16 mm的对接试样,焊后进行微观分析及接头力学性能测试。微观

组织和断口分析采用 Neophot32 光学显微镜图像分析系统、场发射式 JSM - 6301F扫描电镜和 CSM - 950型扫描电镜。

物相分析仪器,日本理学 D/max - RB型 X射线衍射仪。

设备:XL92 - 2861真空钎焊炉,真空压力  $2 \times 10^{-2}$  Pa。

2 结果及分析

2.1 添加元素 Zr对接头力学性能的影响

在 Ni Cu总量保证基本不变的条件下,通过调整合金中 Zr元素的含量制备了四种合金。四种合金 TLP扩散焊连接的接头室温拉伸试验结果见表 3。

表 3 四种合金拉伸试验结果

Tab 3 Stretch-resistance strength of four alloys

试样编号	合金组成	不同扩散处理时间的拉伸强度 /MPa				断裂位置
		980 /15 ~ 30 min + 920				
		60 min	90 min	120 min	360 min	
1#	Ti - Cu - Ni - 38Zr	134	-	-	-	焊缝
2#	Ti - Cu - Ni - 28Zr	222	213	300	-	焊缝
3#	Ti - Cu - Ni - 13Zr	434	685	787	840	过渡区
4#	Ti - Cu - Ni	743	820	825	-	过渡区

由表 3可知,在相同连接工艺条件下,随着 Zr含量的不断增加, Ti<sub>3</sub>Al基合金的接头强度逐渐减小;为实现连接区的组织和成分的均匀化,继续延长后续扩散处理时间。结果表明:高 Zr合金(1#、2#)连接的接头即使延长后续扩散处理时间,其接头强度增加的幅度也不明显,只有当 Zr含量降低到 13%时,连接接头在后续扩散处理时间延长到 360 min时,接头强度提高到 840 MPa。因此 TLP扩散焊接 Ti<sub>3</sub>Al基合金接头时,采用含 Zr元素的中间层合金要获得高强接头,扩散处理时间往往要比无 Zr的长几倍。

2.2 添加元素 Zr对接头组织的影响

TLP扩散焊焊缝包括过渡区、区、区和区,残留液态金属冷却转变而成的区,使用扫描电镜能谱对比分析 1#、2#和 3#焊缝与母材组织成分,试验结果如表 4所示。从表 4中可以看出,随着中间层合金中 Zr含量的降低,焊缝液态残留区 Zr含量迅速降低,焊缝宽度迅速增大,这说明焊缝扩散效率更快。图 1为在相同的连接工艺下,采用四种合金连接的接头组织形貌。可以看出,随着 Zr含量的逐渐降低,接头的焊接区组织与扩散区的差别越来越小,液相残区越变越窄,以致消失。

表 4 中间层合金对应接头的连接区宽度与组织成分

Tab 4 Bonding zone width and microstructure composition of joints with different bonding material

试样编号	中间层 Zr 质量分数 /%	宽度 / $\mu\text{m}$	组织成分 /%						相组成
			Al	Ti	Ni	Cu	Nb	Zr	
1#	38	62.1	6.2	26.4	19.1	16.1	3.2	29.1	液态残留相
			6.1	56.7	3.4	5.3	22.6	5.5	B <sub>2</sub> 相
			5.3	63.2	1.5	4.9	17.1	7.8	$\gamma_2$ 相 + B <sub>2</sub> 相
2#	28	65.4	6.5	24.9	18.7	20.0	2.4	27.4	液态残留相
			6.5	55.4	2.1	3.6	26.6	5.8	B <sub>2</sub> 相
3#	13	91.1	1.5	11.2	4.6	77.5	0.9	4.3	液态残留相
			0.5	6.9	3.7	85.2	1.3	2.4	液态残留相

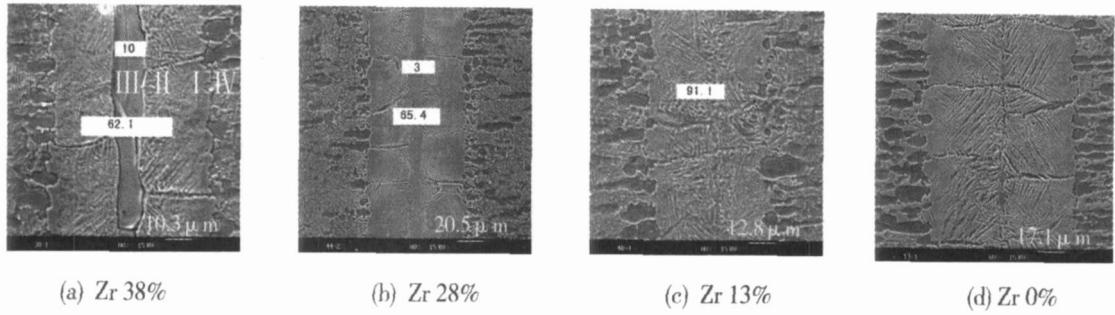
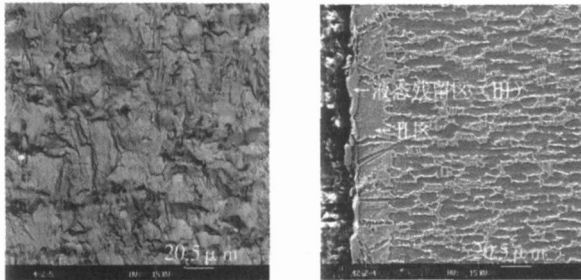


图 1 采用不同中间层合金接头组织形貌

Fig 1 Joints micrograph of different bonding materials

图 2 为采用中间层合金 2<sup>#</sup>的焊接接头的拉伸断口形貌。图 2(a)显示接头室温拉伸断口形貌呈河流花样,为脆性断裂。能谱分析表明,各区的成分相近且与接头中液态残留部分的组织成分接近,断裂发生在液态残留层 [图 2(b)],这说明液态残留层是脆性层且为接头的薄弱环节。



(a) 拉伸断口 (b) 断口截面

图 2 2<sup>#</sup>合金接头室温拉伸试验典型断口形貌

Fig 2 R. T. stretched fracture micrograph of alloy 2<sup>#</sup>

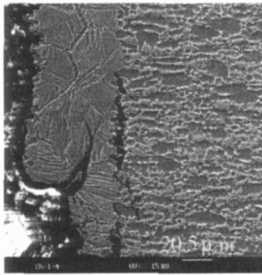


图 3 4<sup>#</sup>合金接头室温拉伸试验典型断口形貌

Fig 3 R. T. stretched fracture micrograph of alloy 4<sup>#</sup>

采用 4<sup>#</sup>合金连接 Ti<sub>3</sub>Al 基合金,可获得高的接头强度。母材与连接区达到充分互扩散,形成了成分和组织均匀的连接区,此时,接头拉伸时断裂由连接区过渡到近界面的母材过渡区 (B区),见图 3,且强度较高。

由以上分析可知,随着中间层合金中添加元素 Zr 含量的减小,焊接接头焊缝区液态残留层变窄,TL P 扩散焊接头常温拉伸强度逐渐增大。

### 2.3 合金元素 Zr 含量对接头组织性能影响机理分析

连接区组织的 XRD 峰和物相标定如图 4 所示,XRD 物相分析和能谱分析结果表明,连接区的物相主要是针状的 B<sub>2</sub>相 + α<sub>2</sub>相 + O 相,残留液相的室温组织为 Ti<sub>3</sub>(Cu,Ni)与 Ti(Cu,Ni)双相组织,均为脆性的铸造组织,故液相残留区强度低,容易发生脆断,因此焊接过程中应控制该区的生成。

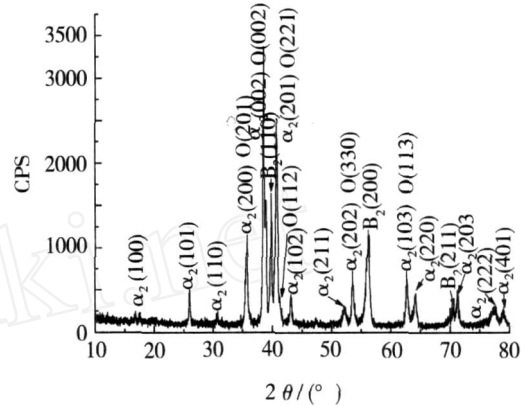


图 4 接头连接区 XRD 衍射峰及物相标定 (3<sup>#</sup>)

Fig 4 XRD diffractive apex and phase demarcating of joint bonding zone of alloy 3<sup>#</sup>

由表 4 可以看到,液相残留层与中间层合金中 Zr 元素含量有关,Zr 元素含量越高,液相残留层越宽,接头性能越差。分析认为采用 TiZrNiCu 四元合金作为中间层合金连接 Ti<sub>3</sub>Al 基合金,由于金属间化合物 Ti<sub>3</sub>Al 基合金为有序结构,合金中的 Ni 可以与 Ti<sub>3</sub>Al 基合金中的 Ti 发生置换而迅速扩散到母材中,而 Zr 的原子半径大,Zr 扩散能力小,Zr 的添加虽然降低了合金钎料熔点,但减小了固态下扩散速度,导致在相同 TL P 扩散连接工艺条件下,高温残留的液态金属增多,Zr 含量越多,连接区成分和组织均匀化需要的时间越长。因此随着 Zr 元素添加及含量的增大,接头性能下降,虽然接头强度随后续扩散处理时间延长而有所提高(表 3);但是后续扩散处理时间延长势必增加生产周期和导致母材出现组织粗大甚至明显脆化。

### 3 结论

(1)在同一焊接工艺条件下,添加元素 Zr 含量减小,Ti<sub>3</sub>Al 基合金 TL P 扩散焊接头的液态残留层变

窄,室温拉伸强度逐渐增大。

(2) Zr作为钎料的添加元素之一,可有效降低钎料熔点。通过延长 ILP扩散焊扩散处理时间,可获得与采用无 Zr元素钎料(Ti-Cu-Ni合金)等强接头。

#### 参考文献

- 1 陈国良,林均品著.有序金属间化合物结构材料物理金属学基础.北京:冶金工业出版社,1999:50~150
- 2 李世琼.航天运载火箭发动机用 Ti<sub>3</sub>Al基金属研究.材料导报,2001;15(2):10
- 3 邹敦叙,李世琼,仲增墉.航空航天理想新材料 Ti<sub>3</sub>Al和 TiAl金属间化合物合金研究开发新进展.钢铁研究学报,

1997;9(增刊):45

4 潘晖,毛唯,王英华. Ti<sub>3</sub>Al对 TiCu15Ni15钎料组织的影响.稀有金属,2004;28(1):86

5 Bird R K, Hoffman E K. Evaluation of the transient liquid phase (ILP) bonding process for Ti<sub>3</sub>Al-based honeycomb core sandwich structure NASA/TP-1998-208421:46

6 Cadden C H, Yang N Y C, Headley T H. Microstructural evolution and mechanical properties of brazed joints in Ti-13.4Al-2.2Nb. Welding Journal, Welding Research Supplement, 1997; (8): 316s

(编辑 李洪泉)

(范本)

## 《宇航材料工艺》编辑部 论文著作权转让书

论文中文文题:

论文英文文题:

作者(代表)联系电话:

电子邮箱:

全体作者姓名:

遵照《中华人民共和国著作权法》,上述论文全体作者同意将该论文之著作权中的财产权(含各种介质、媒体,以各种语言、各种形式出版的使用权),在全世界范围内转让给《宇航材料工艺》编辑部。本转让书自作者签字之日起生效。

若从《宇航材料工艺》编辑部收到本转让书之日起,作者在90日之内没有收到上述论文的修改意见或录用通知,则本转让书自动失效。

在签署本转让书时作者作如下保证并对其负全部责任:

- (1)上述论文是作者独立创作的原创性作品,未曾在国内外书刊上公开发表过;
- (2)该论文符合国家有关保密的规定(航天系统作者须同时附本单位的保密审查证明);
- (3)该论文不侵犯任何第三方的著作权及其他合法权利。

同时承诺:

(1)《宇航材料工艺》没有向作者做出修改、录用或退稿通知之前(在前述限定的时间内),不将上述论文投往其他刊物;

(2)签字作者保证其本人具有签署本转让书并做出各项承诺之全权;

(3)有证据能证明未签字之作者授权签字作者代表其签署本转让书;本转让书对全体作者均有约束力。

作者(代表)签字:

年 月 日于 (地点)