

# TC4 钛合金扩散焊接头的力学性能

刘小刚<sup>1</sup>, 谢佩玉<sup>1</sup>, 郭海丁<sup>1</sup>, 杨 波<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;  
2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

**摘 要:** 在温度为 910℃, 压力为 3.4 MPa 条件下对 TC4 钛合金板材进行了扩散焊接, 对获得的扩散焊接头取样进行金相观察, 仅在接近接头表面材料深度为 1 mm 范围内发现未焊合缺陷, 其余部分焊合较好, 表明在给定工艺下可获得质量良好的焊接头。随后对 TC4 扩散焊接头的力学性能进行了试验研究, 分别开展了静拉伸试验、断裂韧性试验及焊缝附近区域的纳米压痕试验。试验结果表明, 所制得的 TC4 扩散焊接头屈服强度为 887 MPa, 抗拉强度为 948 MPa, 断裂韧性为 101.9 MPa·m<sup>1/2</sup>, 均与原材料的性能相差不大。纳米压痕试验的结果显示, 接头焊缝区和母材区的显微弹性模量分别为 180.2 GPa 和 178.0 GPa。

**关 键 词:** 扩散焊(DB); 钛合金; 抗拉强度; 弹性模量; 断裂韧性

中图分类号: V261.3<sup>+</sup>4

文献标志码: A

## Mechanical properties of TC4 titanium alloy diffusion bonded joints

LIU Xiaogang<sup>1</sup>, XIE Peiyu<sup>1</sup>, GUO Haiding<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,  
College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. School of Instrument Science and Engineering,  
Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The diffusion bonding of TC4 titanium alloy plate was conducted under the condition of 910℃ temperature and 3.4 MPa pressure. Specimens were cut from the gained joints to conduct metallographic analysis. It indicated that the sound joints can be achieved under selected process parameters, since several microscopic defect only existed within the depth of 1 mm from the surface of the joints. Subsequently, the mechanical properties of diffusion bonded joints were studied. The static tensile test, fracture toughness test and nano indentation test were carried out for diffusion bonded joints. The results show that the yield strength of the gained diffusion bonded joints is 887 MPa, its tensile strength is 948 MPa and fracture toughness is 101.9 MPa·m<sup>1/2</sup>, presenting little difference of properties with raw materials. The results of nano indentation tests indicate that the micro elastic modulus of the bond line and the based metal region are 180.2 GPa and 178.0 GPa respectively.

**Key words:** diffusion bonding(DB); titanium alloy; tensile strength; elastic modulus; fracture toughness

收稿日期: 2015-10-04

基金项目: 航空科学基金(2012ZB52028); 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230114)

作者简介: 刘小刚(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构疲劳与断裂力学方面研究。

引用格式: 刘小刚, 谢佩玉, 郭海丁, 等. TC4 钛合金扩散焊接头的力学性能[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1342-1348. LIU Xiaogang, XIE Peiyu, GUO Haiding, et al. Mechanical properties of TC4 titanium alloy diffusion bonded joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1342-1348.

钛合金具有比强度高、耐蚀性好、密度小、韧性和焊接性较好等优点,在航空工业中应用广泛<sup>[1-3]</sup>.作为一种重要的结构材料,其应用时也经常会涉及与同质或异质材料的连接.扩散焊技术因具有焊接质量好、加热温度低、应力变形小、容易实现大面积搭接结构等优点,而成为钛合金与各类材料连接的重要方法之一<sup>[4-5]</sup>.近年来,在航空制造领域,为满足现代航空发动机高推质比、高可靠性、长寿命、低成本的要求<sup>[6]</sup>,扩散焊接作为一种重要的连接技术,已在新材料的连接及复杂精细结构件的制造中得到广泛应用,如某发动机转子<sup>[7]</sup>、多孔层板结构<sup>[8]</sup>、涡轮叶片等<sup>[9-10]</sup>的制造过程都采用了扩散焊技术.此外,超塑性成形与扩散焊接(SPF/DB)组合工艺还可用于制造几何形状复杂的钛合金宽弦空心风扇叶片<sup>[11-12]</sup>.

随着扩散焊接在航空发动机承力部件的日益广泛应用,扩散焊接头的力学性能也受到越来越多的关注.Glatz 等<sup>[13]</sup>对某钛合金板材进行了扩散焊接,在温度为 1 000 ℃,压力为 20~40 MPa,扩散焊时间为 1~3 h 条件下,获得了无损伤的扩散焊接头;同时,通过不同温度下的静拉伸试验验证了扩散焊接头的质量,结果表明接头抗拉强度接近母材的强度.Kurt 等<sup>[14]</sup>对 TC4 钛合金和碳素体不锈钢进行扩散焊,并重点研究了加工温度对焊接区域微观组织及剪切性能的影响.研究结果表明,在一定温度范围内,扩散焊接头的剪切强度会随着加工温度的升高而增大.Tuppen 等<sup>[15]</sup>则进一步研究了 TC4 与 Ti550 的扩散焊接头的疲劳性能.通过观察焊接截面附近区域的金相组织、成分组成及显微硬度考查接头的质量,通过不同载荷水平下的单向拉伸疲劳试验探究了扩散焊接头的低周疲劳性能.杨荣娟等<sup>[16]</sup>对 TiAl 与 TC4 进行了扩散焊接,实现了两种材料的冶金结合.在室温、400 ℃和 500 ℃等不同温度下,接头抗拉强度均达到 TiAl 母材的 90% 以上.吕涛等<sup>[17]</sup>则采用 Ni 基非晶态合金作为中间层对 TC4 钛合金进行了不同工艺参数的真空搭接扩散焊试验,并研究了扩散焊工艺参数对接头性能的影响规律.

本文在国内外已有研究成果的基础上,对航空发动机常用 TC4 钛合金材料进行了扩散焊接,并通过静拉伸试验、断裂韧性试验及纳米压痕试验对扩散焊接头相关力学性能进行了试验研究,以期为此类构件的强度评估提供参考.

# 1 钛合金扩散焊试验

## 1.1 扩散焊连接

试验材质为 TC4 钛合金板材,厚度为 25 mm,是中等强度的  $\alpha+\beta$  型钛合金,其各化学成分的质量分数如表 1 所示.

表 1 TC4 钛合金化学成分的质量分数(单位:%)  
Table 1 Mass fraction of each composition of titanium  
TC4 alloy (unit: %)

| 合金元素      |         |      | 杂质元素 |      |      |
|-----------|---------|------|------|------|------|
| Al        | V       | Fe   | C    | O    | N    |
| 5.50~6.75 | 3.5~4.5 | 0.50 | 0.10 | 0.20 | 0.05 |

扩散焊接在 ZC-ZK-YL150 型真空扩散炉中进行.先将 TC4 钛合金板材切割成大小为 70 mm×140 mm×25 mm 的金属块,然后将待焊接面表面进行加工以满足扩散焊接表面粗糙度要求,最后还需对待焊表面进行碱洗和酸洗,以除去油污、表面杂质等,并使待焊接表面光滑、平整.为避免施压过程中相互接触的待焊接面发生相对错动,可预先将两块待焊金属块的四周用点焊连接,以固定两块待焊板材的相对位置.将固定好后的板材放入模具中,保证焊接过程中平稳施加压力.模具应能承受焊接过程中的高温、高压环境,文中采用石墨材料,插槽长为 150 mm,宽为 27 mm,深为 138 mm,模具总宽度为 210 mm,其设计图纸如图 1 所示.将已安装好待焊板材的模具放入真空炉中进行扩散焊接,焊接温度为 910 ℃,焊接压力为 3.4 MPa,保温时间为 1 h,最终获得 3 块扩散焊接板材.

## 1.2 金相试验

已制备的扩散焊接头可能存在缺陷,为检验

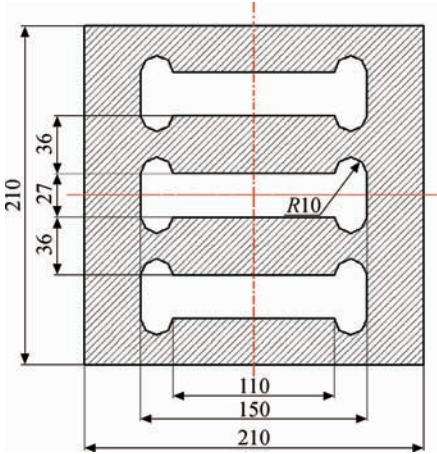




图 1 模具设计尺寸及实物照片(单位:mm)

Fig. 1 Design dimensions and photo of mould  
(unit: mm)

其焊接质量,可对焊缝处的显微组织进行观察.从扩散焊接后的板材两侧取样,制备金相试样并观察其显微组织,取样位置见图 2.对制备好的试样,使用金相显微镜沿着焊缝方向由外侧向内侧逐渐移动视野进行观察.各试样腐蚀后的表面及金相照片如图 3、图 4 所示,放大倍数均为 400 倍.



图 2 金相试验取样示意图

Fig. 2 Sampling method for metallographic test

由金相照片可以看出,焊缝附近钛合金的组织结构由等轴  $\alpha$  相晶粒以及聚集在晶界处的  $\beta$  相组织构成,未因扩散焊工艺而发生明显变化.焊缝附近的晶粒有一定细化倾向.此外,在靠近板材边缘的位置,由于扩散焊接面无法充分接触,因此焊缝处出现了孔隙缺陷,孔隙大小约为  $5\mu\text{m}$ ,见图 3 (b)及图 4(b).靠近焊板边缘处的焊合缺陷严重,孔隙横穿过整张金相照片,但随着观察向内侧深入,离开边缘一定距离后,焊合面的焊接质量有了很大的改善,金相显微镜中几乎看不到焊缝的位置,焊缝处的孔隙完全消失.

由上述试验可知,由于加工及工艺过程中存

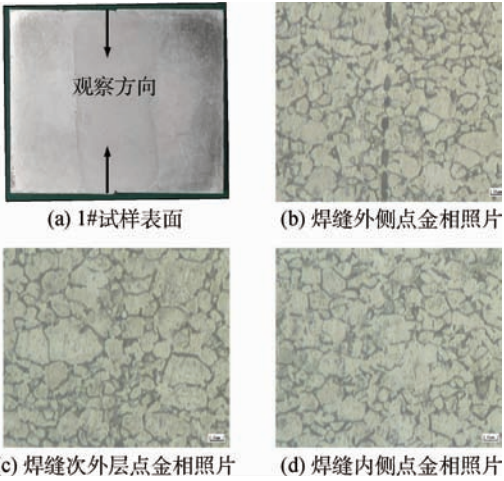


图 3 1# 试样金相照片

Fig. 3 Metallographic microstructure photo of the 1# specimen

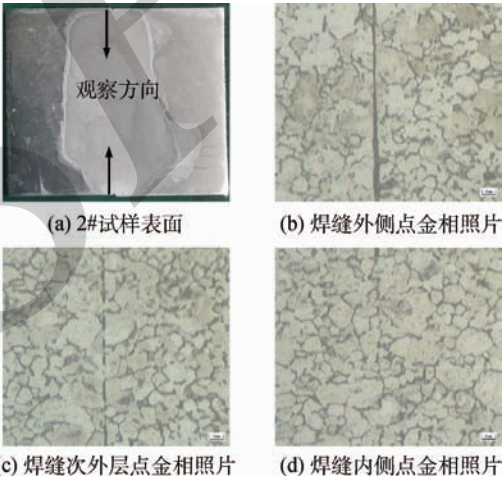


图 4 2# 试样金相照片

Fig. 4 Metallographic microstructure photo of the 2# specimen

在不可避免的误差,焊缝在靠近板材边缘深度约 1 mm 范围内焊接质量较差,而靠近中心区域焊接质量良好,去除焊缝处两侧及表面材料后,焊接头满足试验要求.

## 2 焊接头力学性能试验

### 2.1 静拉伸试验

为了研究钛合金扩散焊接头的静力学性能,文中从上述获得的焊接板材上取样,进行了接头的静拉伸试验.试样的几何尺寸如图 5 所示.试验在 MTS793 液压伺服材料试验机上进行,共拉伸两件试样.

静拉伸试验得到的应力-应变曲线如图 6 所示,由图可见 TC4 焊接头拉伸过程中并未发生明

显的屈服,而且两次试验的重复性非常好.图 7 给出了试件断口位置,其中 S1# 试样断于焊缝附近区域,S2# 试样正好断于焊缝处.

将处理后得到的焊接头的力学性能数据列于表 2,表中同时给出了原材料的性能参数(由材料供应商提供).由表 2 可见,在本文工艺条件下获得的扩散焊接头其静强度性能与原材料性能基本

相当,其中扩散焊接头抗拉强度  $\sigma_b=948\text{ MPa}$ ,比原材料降低约 2.8%;而屈服强度  $\sigma_{0.2}=887\text{ MPa}$ ,比原材料约提高 29 MPa.

2.2 断裂韧性试验

材料的断裂韧性表征其抵抗裂纹失稳扩展的能力,文中采用紧凑拉伸(compact tension)试样进行了原材料和扩散焊接头的断裂韧性试验.试样设计参照 GB/T4161-2007<sup>[18]</sup>,其几何尺寸及实物如图 8 和图 9 所示,其中预制裂纹长为 1.5 mm,由线切割方式加工出.对于扩散焊接头试样预制裂纹面正好位于扩散连接面上.

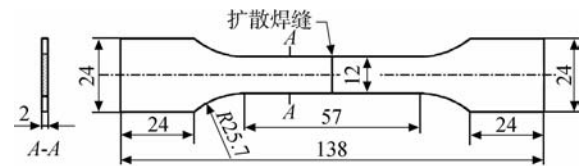


图 5 静拉伸试样几何尺寸(单位:mm)  
Fig. 5 Geometry dimensions of the static tensile specimen (unit: mm)

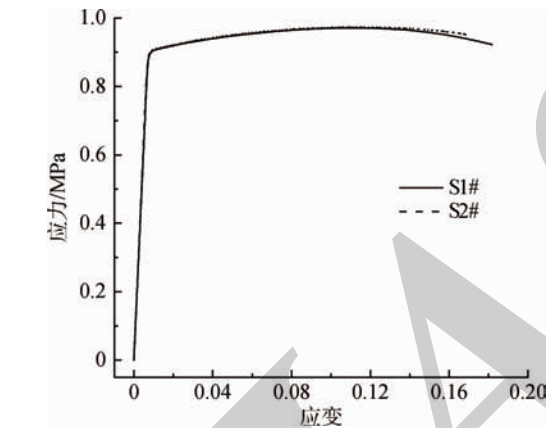


图 6 应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curve

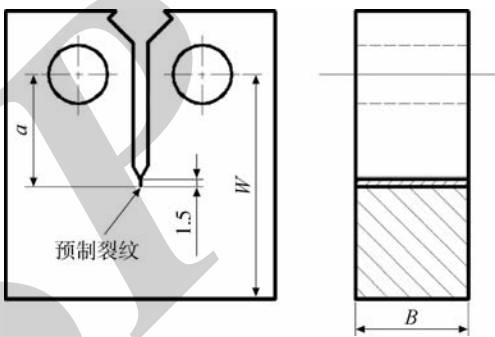


图 8 紧凑拉伸试样尺寸图(单位:mm)  
Fig. 8 Geometry dimensions of compact tension specimen (unit: mm)

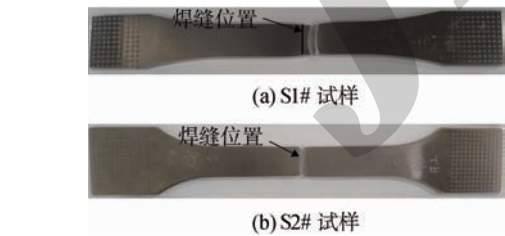


图 7 试样断口位置图  
Fig. 7 Fracture location of specimens

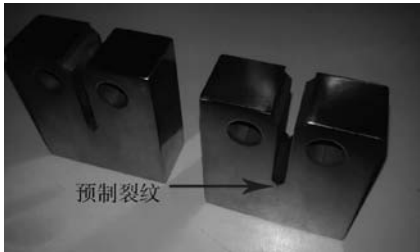


图 9 紧凑拉伸试样实物照片  
Fig. 9 Photo of compact tension specimens

表 2 静拉伸试验结果  
Table 2 Results of static tensile test

| 参数                        | 试样  |     | 平均值 | 原材料 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                           | S1# | S2# |     |     |
| $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | 887 | 887 | 887 | 858 |
| $\sigma_b/\text{MPa}$     | 941 | 955 | 948 | 976 |

试验同样在 MTS793 上完成,共进行了 4 件,其中原材料与焊接头各 2 件.试验时采用自行设计的 U 型钩进行装夹.试验加载速率参考文献<sup>[18]</sup>取 0.5 kN/s,加载直至试样完全断裂.记录试验过程中的载荷-位移曲线,如图 10 所示.由图可见,不论是原材料还是焊接头,均表现为脆性断裂特征,即达到最大载荷后裂纹面瞬间完全断裂;此外,原材料的断裂载荷略高于扩散焊接头.根据文献<sup>[18]</sup>中的方法对试验数据进行处理,得到试样的断裂韧性.试样主要尺寸、最大拉伸载荷  $P_{\max}$  及断裂韧性值  $K_{IC}$  结果列于表 3.

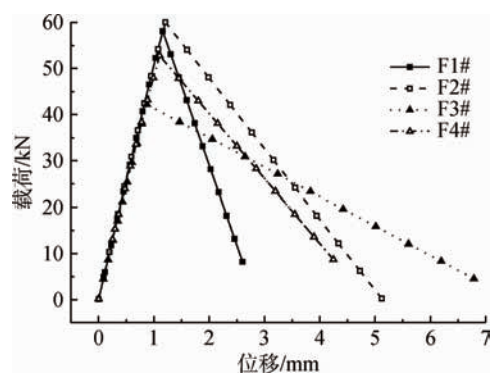


图 10 断裂韧性试验的载荷-位移曲线  
Fig. 10 Load-displacement curves of fracture toughness test

由表 3 可知,TC4 钛合金原材料断裂韧性较高,均值达到  $107.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,其抵抗裂纹扩展的能力较强;经过扩散焊接后,焊缝处的断裂韧性略有下降,F4 # 试样达到  $101.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .此外,原材料两次试验数据重复性很好,而焊接头 F3 # 试样结果仅为  $81.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,明显偏低.文中对 F3 # 试样断口进行观察发现,在焊接面的右上角存在明显的焊合缺陷,如图 11,该缺陷呈椭圆形,大小为  $2 \sim 3 \text{ mm}$ ,可能是因为此处焊接前存在杂质所致.正是由于上述焊接缺陷的存在,导致 F3 # 试样断裂韧性有较明显的下降.

表 3 紧凑拉伸试样尺寸及断裂韧性值  
Table 3 Dimension and fracture toughness value of compact tension specimens

| 类型      | 编号   | B/mm   | W/mm   | a/mm   | $P_{\max}/\text{kN}$ | $K_{\text{IC}}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ |
|---------|------|--------|--------|--------|----------------------|---------------------------------------------------|
| TC4 原材料 | F1 # | 24.093 | 48.300 | 24.000 | 58.1                 | 106.0                                             |
|         | F2 # | 24.080 | 48.360 | 24.000 | 60.0                 | 109.5                                             |
| 扩散焊接头   | F3 # | 23.193 | 46.200 | 23.000 | 42.2                 | 81.7                                              |
|         | F4 # | 23.280 | 46.240 | 23.000 | 52.8                 | 101.9                                             |

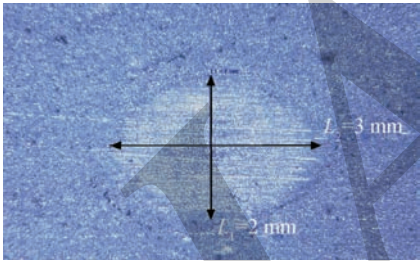
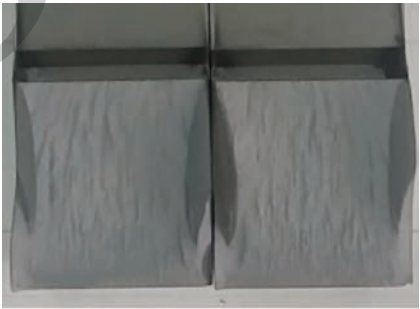


图 11 断口未焊合区  
Fig. 11 Defect on fracture surface

图 12 给出了原材料断口与扩散焊接头断口的对比,由图可见 TC4 原材料试样断口为典型的部分斜断口,断面比较粗糙呈撕裂状;而扩散焊接头试样为平断口,断面非常平整,明显沿着焊合面发生了开裂.从试验得到的载荷-位移曲线可以看出,试样在加载过程中裂纹尖端没有发生明显的屈服,在试验力达到峰值后试样瞬间发生断裂,表明不论是 TC4 原材料还是扩散焊接头,对缺陷均比较敏感.

2.3 纳米压痕试验

为研究扩散焊接头焊缝附近显微弹性模量变化规律,文中还对扩散焊接头取样进行了纳米压痕试验,以此评价接头抵抗变形的能力和接头处原子结合强度.纳米压痕试验在安捷伦公司的



(a) 原材料断口



(b) 扩散焊接头断口

图 12 试样断口形貌

Fig. 12 Fracture surfaces of specimens

NaNo Indenter G200 型试验机上进行.制备的纳米压痕试样及取点位置如图 13 所示,在焊缝上沿焊缝方向设置 6 个测点( $P_1 \sim P_6$ ),在母材区垂直焊缝方向设置 4 个测点( $P_7 \sim P_{10}$ )进行测量.共对

两块试样(N1#和N2#)进行了测试.记录各测点的弹性模量-位移曲线,取测量数据的平均值作为最终测量值.

压痕试验得到的两试样的弹性模量-位移曲线如图 14 所示,其中  $P_1 \sim P_6$  测点位于焊缝上, $P_7 \sim P_{10}$  测点位于 TC4 母材上且其位置垂直于焊缝.

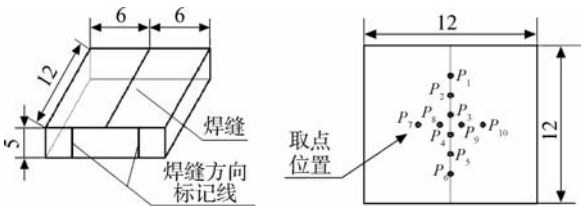


图 13 纳米压痕试样(单位:mm)  
Fig. 13 Specimen for nano indentation test (unit: mm)

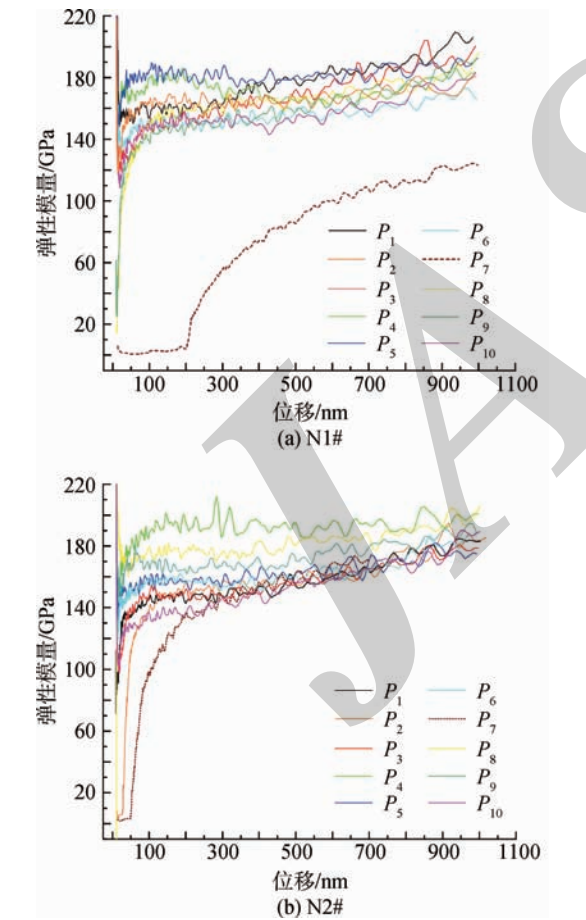


图 14 各试样弹性模量-位移曲线  
Fig. 14 Elastic modulus-displacement curve of specimens

由图 14 可见,各测点弹性模量数值有一定波动,但波动范围并不大.其中 N1# 试样  $P_7$  测点的测量结果明显异常,可能是由于压痕打点时正好打在缺陷或晶界上所致,可视为不合理数据予

以舍弃.对试验数据进行处理,得到焊缝及母材上各测点的弹性模量,分别如表 4 和表 5 所示.由表中结果可知,母材区的弹性模量约为 178.0 GPa,扩散焊焊缝处的弹性模量为 180.2 GPa.扩散焊焊缝处的显微弹性模量与母材基本相当,这也说明了焊接头处的原子在经过自由扩散后结合良好,有较强的抗变形能力.

表 4 接头焊缝区测点显微弹性模量(单位:GPa)  
Table 4 Micro elastic modulus of the test points on bond line (unit:GPa)

| 试样  | 测点    |       |       |       |       |       | 平均值   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ |       |
| N1# | 175.1 | 192.6 | 190.6 | 177.4 | 186.0 | 165.0 | 181.1 |
| N2# | 177.0 | 177.0 | 173.5 | 197.0 | 173.6 | 177.9 | 179.3 |

表 5 TC4 母材区测点显微弹性模量(单位:GPa)  
Table 5 Micro elastic modulus of the test points on based metal region (unit:GPa)

| 试样  | 测点    |       |       |          | 平均值   |
|-----|-------|-------|-------|----------|-------|
|     | $P_7$ | $P_8$ | $P_9$ | $P_{10}$ |       |
| N1# |       | 175.0 | 178.6 | 172.5    | 175.4 |
| N2# | 177.7 | 191.5 | 183.5 | 169.3    | 180.5 |

3 结 论

本文在给定工艺条件下对 TC4 钛合金进行了扩散焊接,继而对制备的扩散焊接头研究了其拉伸力学性能、断裂韧性及显微弹性模量等,并与原材料性能进行了对比.本文主要研究结论如下:

- 1) 采用焊接温度为 910℃,压力为 3.4 MPa,保温时间为 1h 的工艺参数对 TC4 钛合金板材进行扩散焊接,可获得质量良好的焊接头;经过扩散焊接后,材料的微观组织结构没有发生明显的变化,焊缝处的组织由等轴的  $\alpha$  相晶粒与聚集在晶界上的  $\beta$  相组织构成,晶粒有细化倾向.
- 2) 试验测得上述工艺条件下获得的扩散焊接头其抗拉强度为 948 MPa,比原材料性能略降低约 2.8%,而屈服强度为 887 MPa,比原材料约提高 29 MPa.

3) TC4 原材料具有较高的断裂韧性,达到  $107.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,经过扩散焊接后焊缝处的断裂韧性虽然有所下降,但仍保持在较高水平,达到  $101.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .焊接缺陷对接头断裂韧性有较

大影响,会使其显著降低。试样在加载过程中没有发生明显的屈服,说明 TC4 原材料与扩散焊接头均对裂纹比较敏感。

4) 文中制得的扩散焊接头其母材区的显微弹性模量为 178.0 GPa,焊缝区为 180.2 GPa,几乎与母材一致,证明 TC4 扩散焊接头具有较强的抵抗变形能力且焊缝处原子经过自由扩散后结合良好。

## 参考文献:

- [1] 黄旭,朱知寿,王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [2] AYDIN K, KAYA Y, KAHRAMAN N. Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper[J]. Materials and Design, 2012, 37: 356-368.
- [3] 刘全明,张朝晖,刘世锋,等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.  
LIU Quanming, ZHANG Zhaohui, LIU Shifeng, et al. Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 杨瑞,朱雨生,高福洋. 钛合金的扩散焊连接技术[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(5): 109-115.  
YANG Rui, ZHU Yusheng, GAO Fuyang. Diffusion bonding for titanium alloy[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(5): 109-115. (in Chinese)
- [5] 陈思杰,朱春莉. 钛及钛合金先进连接技术研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 18-24.  
CHEN Sijie, ZHU Chunli. Study on advanced connection technology for titanium and titanium alloys[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 18-24. (in Chinese)
- [6] 郭海丁,邹华芝,刘观日. TC4 钛合金焊接接头疲劳损伤演变模型研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 206-210.  
GUO Haiding, WU Huazhi, LIU Guanri. A research of fatigue damage evolution of TC4 alloy welded joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 206-210. (in Chinese)
- [7] 刘振岗,郭健,杨建民. 扩散焊技术的应用[J]. 航空科学技术, 2004(2): 38-40.  
LIU Zhengang, GUO Jian, YANG Jianmin. The application of pervasion weld technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2004(2): 38-40. (in Chinese)
- [8] 孔庆吉,曲伸,邵天巍,等. 钎焊及扩散焊技术在航空发动机制造中的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2010(24): 82-84.  
KONG Qingji, QU Shen, SHAO Tianwei, et al. Application & development of brazing and diffusion welding technology in aeroengine manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24): 82-84. (in Chinese)
- [9] 熊华平,毛建英,陈冰清,等. 航空航天轻质高温结构材料的焊接技术研究进展[J]. 材料工程, 2013(10): 1-12.  
XIONG Huaping, MAO Jianying, CHEN Bingqing, et al. Research advances on the welding and joining technologies of light-mass high-temperature structural materials in aerospace field[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(10): 1-12. (in Chinese)
- [10] 李晓红,毛唯,熊华平. 先进航空材料和复杂构件的焊接技术[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 276-282.  
LI Xiaohong, MAO Wei, XIONG Huaping. Welding technologies of advanced aeronautical materials and complex-shaped structural components[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 276-282. (in Chinese)
- [11] XUN Y W, TAN M J. Applications of superplastic forming and diffusion bonding to hollow engine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99 (1/2/3): 80-85.
- [12] 王营,陶智,杜发荣,等. 宽弦空心风扇叶片流固耦合作用下的叶片响应分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2177-2183.  
WANG Ying, TAO Zhi, DU Farong, et al. Response analysis of fluid and solid coupling characteristics for a wide-chord hollow fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2177-2183. (in Chinese)
- [13] GLATZ W, CLEMED H. Diffusion bonding of intermetallic Ti-47Al-2Cr-002Si sheet material and mechanical properties of joints at room temperature and elevated temperatures[J]. Intermetallics, 1997, 5(6): 415-423.
- [14] KURT B, ORHAN N, EVIN E, et al. Diffusion bonding between Ti-6Al-4V alloy and ferritic stainless steel[J]. Materials Letters, 2007, 61(8/9): 1747-1750.
- [15] TUPPEN S J, BACHE M R, VOICE W E. A fatigue assessment of dissimilar titanium alloy diffusion bonds[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(6): 651-658.
- [16] 杨荣娟,黄源珣,薛志勇,等. TiAl 与 TC4 扩散焊接接头的组织与性能[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 77-80.  
YANG Rongjuan, HUANG Yuanxun, XUE Zhiyong, et al. Structure and joint properties of diffusion bonded TiAl alloy and TC4 alloy[J]. Aerospace Materials and Technology, 2013, 43(3): 77-80. (in Chinese)
- [17] 吕涛,杨武林,林鹏. 采用 Ni 基合金为中间层的 TC4 钛合金扩散焊接工艺[J]. 焊接技术, 2011, 40(9): 27-31.  
LÜ Tao, YANG Wulin, LIN Peng, et al. Diffusion bonding process of TC4 titanium alloy with Ni based alloy as the interlayer[J]. Welding Technology, 2011, 40(9): 27-31. (in Chinese)
- [18] 中国国家标准化管理委员会. GB/T4161-2007 金属材料平面应变断裂韧度  $K_{IC}$  试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2007: 3-6.

(编辑:陈 越)