

引文格式: 吴迪, 岳喜山, 权银洙, 等. 扩散焊工艺参数对Ti<sub>2</sub>AlNb焊接接头组织性能与变形的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 65–71.

WU Di, YUE Xishan, QUAN Yin Zhu, et al. Effect of diffusion welding process parameters on microstructure, properties and deformation of Ti<sub>2</sub>AlNb joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 65–71.

# 扩散焊工艺参数对Ti<sub>2</sub>AlNb焊接接头组织性能与变形的影响

吴 迪<sup>1</sup>, 岳喜山<sup>1</sup>, 权银洙<sup>2</sup>, 高兴强<sup>1</sup>, 常川川<sup>1</sup>, 黄孟成<sup>1</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024;

2. 中国人民解放军 93160 部队, 北京 100076)

[摘要] 针对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金, 本文开展了扩散焊工艺参数对焊接接头组织性能与变形影响的研究。结果表明, 当焊接温度、压力、保温时间较低时, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头焊缝线明显, 力学性能较低。随着焊接温度、压力、保温时间的增加, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊焊缝区新生等轴状  $\alpha_2$  相尺寸增大, 焊缝线逐渐模糊, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头力学性能增强, 焊接变形率增加。综合焊缝界面组织、焊接变形率和接头力学性能, 确定最佳的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺为 960 °C、5 MPa、120 min, 此时焊接变形率为 5.4%。Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头组织由 B<sub>2</sub> 相基体、较粗板条状和等轴状  $\alpha_2$  相, 以及分布在 B<sub>2</sub> 相基体中的少量 O 相组成, 室温及 700 °C 高温下抗拉强度达到 891 MPa 和 464 MPa。

关键词: Ti<sub>2</sub>AlNb 合金; 扩散焊; 显微组织; 力学性能; 焊接变形率

中图分类号: V25; TG44

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.065

## Effect of Diffusion Welding Process Parameters on Microstructure, Properties and Deformation of Ti<sub>2</sub>AlNb Joint

WU Di<sup>1</sup>, YUE Xishan<sup>1</sup>, QUAN Yin Zhu<sup>2</sup>, GAO Xingqiang<sup>1</sup>, CHANG Chuanchuan<sup>1</sup>, HUANG Mengcheng<sup>1</sup>

(1. Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. No. 93160 Unit of the PLA, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] The effect of diffusion welding process parameters on the microstructure, mechanical properties and deformation of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy welded joints was studied. The results show that when the welding temperature, pressure, and holding time are low, the weld line of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welding joint is distinct, and the mechanical properties are inferior. With the increase of welding temperature, pressure, and holding time, the size of the newly formed equiaxed  $\alpha_2$  phase in the welding zone enlarges, the weld line gradually becomes indistinct, and the mechanical properties, the welding deformation rate of the Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joint increase. Based on the microstructure of the weld interface, welding deformation rate, and mechanical properties, the optimal Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welding process parameters are 960 °C, 5 MPa, and 120 min. Under this condition, the welding deformation rate is 5.4%. The Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joint consists of B<sub>2</sub> phase matrix, some coarse lath-like  $\alpha_2$  phase, some equiaxed granular  $\alpha_2$  phase and some O phase distributed within the B<sub>2</sub> phase matrix. The tensile strength reaches 891 MPa at room temperature and 464 MPa at 700 °C.

**Keywords:** Ti<sub>2</sub>AlNb alloy; Diffusion bonding; Microstructure; Mechanical properties; Welding deformation rate

Ti<sub>2</sub>AlNb 合金是一种密度低、比强度高、抗氧化性强,可长时间在 650~750 ℃高温环境下服役的高性能材料<sup>[1-3]</sup>。Ti<sub>2</sub>AlNb 合金在保持较好高温性能的同时,密度比传统 Ni 基高温合金低 40%~60%,在航空航天领域有广阔的应用前景<sup>[4-7]</sup>。钎焊、扩散焊是 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金常用的焊接手段。由于钎焊引入的钎料中含有与母材相异的元素,接头界面区域会形成脆性的金属间化合物,导致接头强度大幅降低。此外,钎焊工艺对钎料的选择要求较高。相比之下,扩散焊能减少杂质元素的引入,得到室温及高温下强度较好的焊接接头。研究发现,焊接温度、压力、保温时间是影响 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头组织和性能的主要因素<sup>[8-10]</sup>。付明杰等<sup>[11]</sup>在研究 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺对焊合率的影响时指出,工艺参数对焊合区的影响程度从大到小依次是温度、压力、保温时间,并优化得出工艺参数为 950 ℃、2.0 MPa、2 h。卜志强等<sup>[12]</sup>研究了压力对 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊的影响,采用 960 ℃、60 MPa、120 min 的直接扩散焊工艺进行试验,得到室温抗拉强度达到 972 MPa 的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头。现有研究主要讨论了焊接工艺参数对接头组织及力学性能的影响,而关于焊接工艺参数对 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头焊接变形率的报道较少。在实际工程应用中,扩散焊工艺设计不仅需考虑接头组织及力学性能,焊接变形率同样是重要的指标要求。焊接变形率较小可能直接影响接头组织及力学性能,焊接变形率较大时,对焊接设备要求较高。并且,对于空心结构,焊接变形率较大降低零件空心率,影响空心结构综合性能,通常需要进行限位处理来控制焊接变形率。

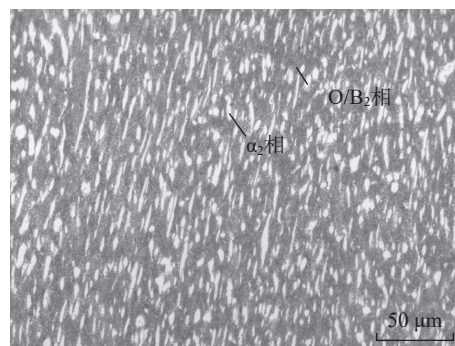
本文通过选用不同焊接温度、压力、保温时间进行扩散焊工艺试验,分析焊接工艺参数对 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头微观组织、力学性能及焊接变形率的影响。在保证扩散焊接头强度不低于母材强度 80% 的同时,将焊接变形率控制在 6% 以内,据此优化得出合适的焊接工艺参数,为 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金扩散焊空心结构的实际应用提供参考。

## 1 试验材料及方法

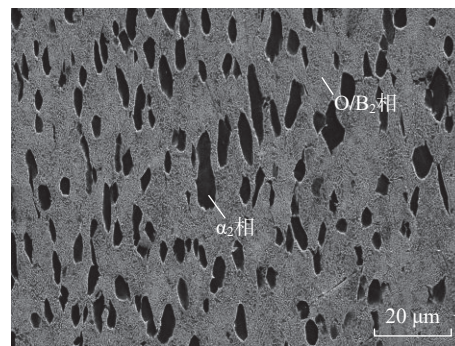
Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的母材实测成分为 Ti-11.7Al-36.1Nb (质量分数, %),焊前加工成圆柱状,直径为 36.0 mm,高度为 24.7 mm。室温下 Ti<sub>2</sub>AlNb 母材显微组织如图 1 所示,母材由 B<sub>2</sub> 相基体、位于 B<sub>2</sub> 相内的颗粒状 O 相、等轴颗粒,以及较粗板条状的  $\alpha_2$  相组成。Ti<sub>2</sub>AlNb 母材在室温和 700 ℃的高温下,抗拉强度分别为 1093 MPa 和 507 MPa。试验前将各 Ti<sub>2</sub>AlNb 母材经 800 目砂纸打磨抛光,并用无水乙醇对表面进行擦拭,去除母材表面杂质。试验在真空扩散焊炉内进行,扩散焊过程真空度低于  $8 \times 10^{-3}$  Pa,扩散焊试样装配如图 2 所示。

试验中,扩散焊温度选取在  $\alpha_2$ +B<sub>2</sub> 相区内,尽可能远离 B<sub>2</sub> 单相区<sup>[2]</sup>。同时需考虑焊接温度对原子扩散效率的影响。温度较低时,原子扩散效率低,难以实现界面扩散焊接,温度过高则容易引起晶粒粗大,从而影响力学性能。焊接压力会影响界面连接和接头变形。焊接压力过低不利于界面连接,焊接压力过高不仅会导致接头产生较大变形,且对设备提出更高的要求。保温时间主要影响原子的充分扩散与晶粒生长。本试验中, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺参数设计如表 1 所示。

焊接试样在扩散焊前、后采用数显卡尺测量试样高度,每个试样测量点不少于 3 个,取平均值作为该试样



(a) 400倍, 光学显微镜



(b) 1000倍, 扫描电子显微镜

图1 Ti<sub>2</sub>AlNb 母材显微组织图

Fig.1 Microstructure of Ti<sub>2</sub>AlNb base material

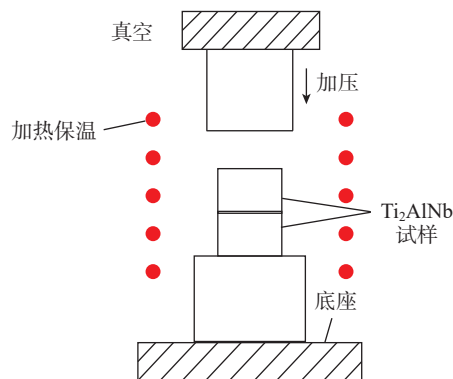


图2 扩散焊试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of diffusion welding experiment

高度。 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头的焊接变形率为

$$\eta = (H - h) / H \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为焊接变形率;  $H$  为焊前装配试样高度;  $h$  为焊后试样高度。

从扩散焊的试样焊缝处取金相试样, 制样后采用光学显微镜观测金相组织, 并采用扫描电子显微镜观测焊缝处显微组织。从扩散焊的试件焊缝处取拉伸试样, 如图 3 所示, 依据标准 GB/T 228.1—2021 和 GB/T 228.2—2015, 使用电子万能材料试验机分别进行室温和 700 °C 高温拉伸试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 扩散焊接头典型组织形貌

图 4 为扩散焊温度 960 °C、压力 5 MPa、保温时间 60 min 条件下得到的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  焊接接头焊缝处显微组织形貌。可以观察到, 在此工艺参数下可以完成  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的扩散焊接。  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头由白色的  $\text{B}_2$  相基体、分布在  $\text{B}_2$  相基体中的少量  $\alpha_2$  相, 以及黑色的板条状/块状  $\alpha_2$  相组成。焊缝为一条模糊的线, 将两侧组织分开。

表 1  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  试样扩散焊焊接工艺参数

Table 1 Diffusion welding process parameters of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  samples

| 试样编号 | 温度/°C | 压力/MPa | 保温时间/min |
|------|-------|--------|----------|
| 1#   | 1000  | 10     | 90       |
| 2#   | 960   | 10     | 90       |
| 3#   | 920   | 10     | 90       |
| 4#   | 960   | 5      | 90       |
| 5#   | 960   | 3      | 90       |
| 6#   | 960   | 5      | 60       |
| 7#   | 960   | 5      | 120      |
| 8#   | 960   | 5      | 150      |

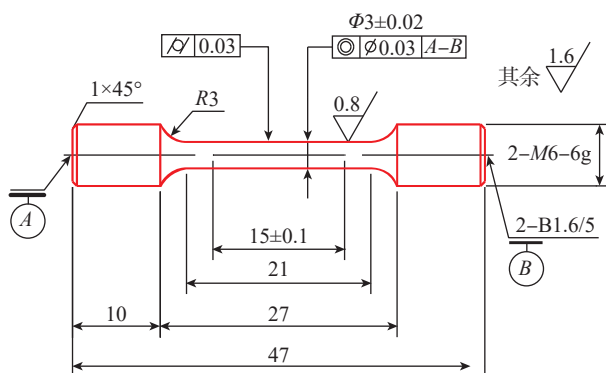


图 3 拉伸试样图 (mm)

Fig.3 Tensile specimen diagram (mm)

### 2.2 扩散焊温度对 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 焊接接头组织和性能的影响

图 5 为压力 10 MPa、保温时间 90 min, 不同扩散焊温度下的焊缝处显微组织图像。当焊接温度为 920 °C 时, 焊缝线明显, 不利于形成良好的焊接接头。保持压力和保温时间不变, 扩散焊温度升高时, 焊缝处显微组织中黑色的  $\alpha_2$  相晶粒尺寸增大,  $\text{B}_2$  相基体中的  $\alpha_2$  相区域晶粒尺寸减小。当焊接温度达到 960 °C 时, 焊缝线变得模糊, 扩散焊接头质量得到提高。扩散焊温度增加会提高原子扩散能力, 从而提高接头的强度, 但过高的焊接温度会导致相变, 应在焊接过程中尽量避免<sup>[2]</sup>。当焊接温度升高到 1000 °C 时,  $\alpha_2$  相会更快地分解为  $\alpha_2$  相和  $\text{B}_2$  相, 对原材料性能的影响更加明显。因此试验确定的最佳焊接温度为 960 °C, 在此温度下接头焊缝两侧组织差异较小, 焊缝连接线模糊, 同时可避免母材相变导致的性能变化。

在压力 10 MPa、保温 90 min 的条件下, 对上述不同扩散焊温度下得到的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头进行室温和 700 °C 拉伸试验, 得到的结果如图 6 所示。随着扩散焊温度升高, 原子扩散更充分,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头的抗拉强度、断后伸长率和焊接变形率均提高。在扩散焊温度为 920 °C 时, 得到的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头室温和 700 °C 高温抗拉强度分别为 857 MPa 和 450 MPa, 断后伸长率分别为 2.2% 和 6.8%, 焊接变形率仅有 2.7%; 当扩散焊温度升至 960 °C 时, 接头在室温和 700 °C 的高温抗拉强度可达到 879 MPa 和 461 MPa, 断后伸长率达到 5.3% 和 12.7%, 焊接变形率明显提高, 达到 12.5%; 虽然扩散焊温度为 1000 °C 时可以得到力学性能更好的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头, 但此时的焊接变形率达到 19.0%, 焊接变形率过高。综上所述, 在工艺设计时, 选取焊接温度 960 °C。

### 2.3 扩散焊压力对 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 焊接接头组织和性能的影响

图 7 为焊接温度 960 °C、保温时间 90 min, 不同扩散焊压力条件下,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  试样焊接件焊缝处显微组织图像。当压力为 3 MPa 时, 可以观察到较大的板条  $\alpha_2$

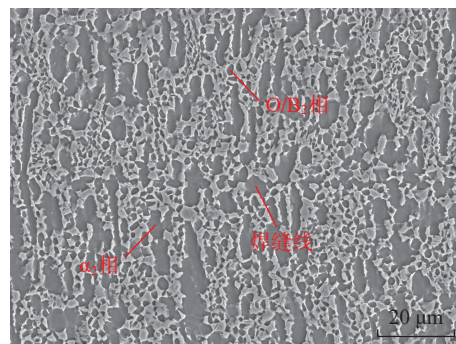


图 4  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头显微组织图

Fig.4 Microstructure of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  diffusion welded joint



相和细小的颗粒状  $\alpha_2$  相,焊缝线明显。因此,扩散焊压力较低时焊接界面接触不紧密,原子扩散效率低,得到的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头焊接质量较低。随着压力增大,接头组织中原始板条状  $\alpha_2$  相尺寸减小,等轴颗粒状  $\alpha_2$  相尺寸增大,这是由于在较高的温度和压力条件下,施加压力导致材料发生塑性变形,焊接表面有效贴合,从而提高扩散效率。从图 7 (b) 可以看出,当压力为 5 MPa 时,接头组织中焊缝线依然可见,而原始板条状  $\alpha_2$  相和等轴颗粒状  $\alpha_2$  相尺寸差距减小。当压力达到 10

MPa 时,焊缝线变得模糊,原始板条状  $\alpha_2$  相与等轴颗粒状  $\alpha_2$  相尺寸差距进一步减小。对于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金,  $\text{B}_2$  相为富 Nb 贫 Al,而  $\alpha_2$  相则为富 Al 贫 Nb<sup>[12]</sup>。在扩散焊过程中,Al 原子扩散能力远高于 Nb 原子,保温过程中 Al 原子扩散使得  $\text{B}_2$  相基体中出现更多的  $\alpha_2$  相形核区域。因此,当温度和保温时间不变时,压力越大,焊接表面周围晶格的变形和内应力越大,在保温过程中得到的新生等轴颗粒状  $\alpha_2$  相尺寸越大。

对不同压力下得到的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头进行室

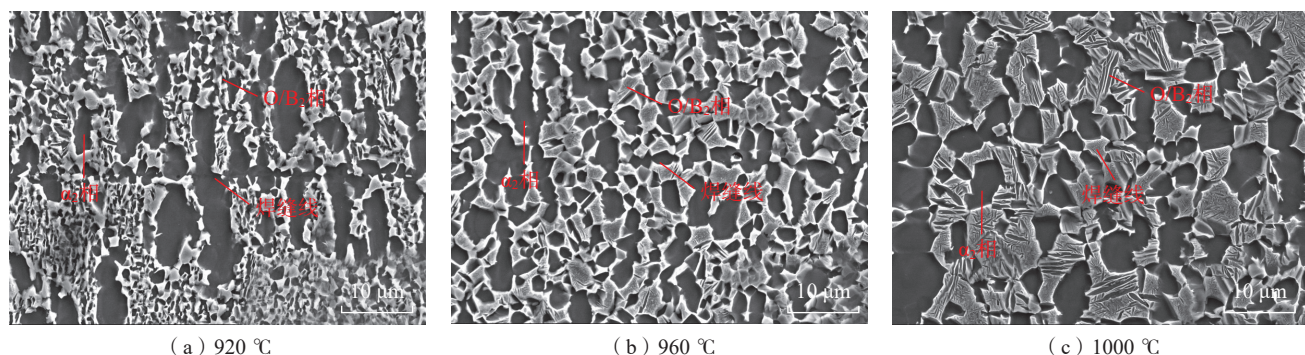


图 5 不同温度下  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊焊缝处显微组织

Fig.5 Microstructure in  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  diffusion welded joints at different temperatures

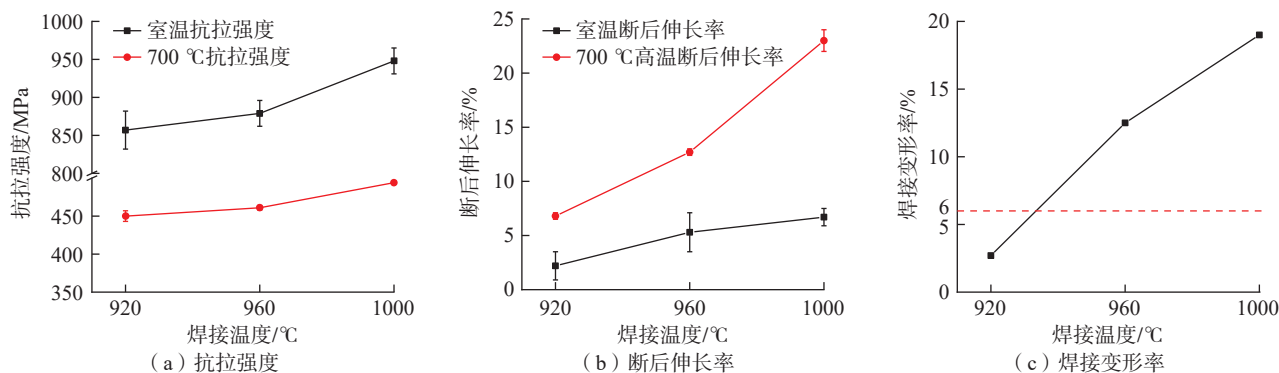


图 6 不同扩散焊温度对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊接头在室温和 700 °C 下力学性能与变形的影响

Fig.6 Effect of different diffusion welding temperatures on the mechanical properties and deformation of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  diffusion welded joints at room temperature and 700 °C

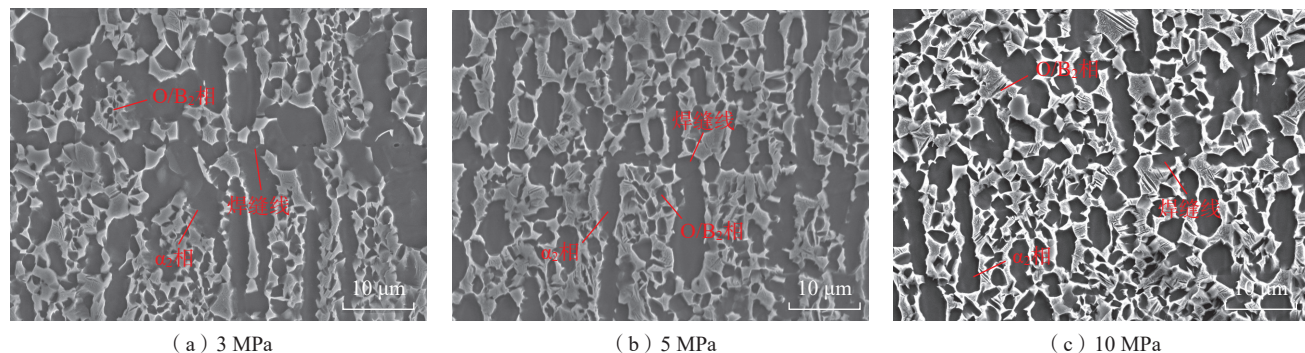


图 7 不同压力下  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  扩散焊焊缝处显微组织

Fig.7 Microstructure in  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  diffusion welded joints at different pressures



温和 700 °C 拉伸试验,得到的结果如图 8 所示。可以看出,焊接压力提升会使焊接面接触更充分,扩散焊接头力学性能提高,焊接变形率逐渐提高。但焊接压力较高时,这种力学性能的提升带来的效果变得有限。因此,随着焊接压力的提高, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头强度先明显提高,随后仅略微提高。当焊接压力从 3 MPa 升至 5 MPa 时,室温下抗拉强度从 825 MPa 升至 869 MPa, 700 °C 高温下抗拉强度从 444 MPa 升至 453 MPa,断后伸长率的变化则不明显,焊接变形率从 2.4% 升至 4.4%。当焊接压力为 10 MPa 时, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温和 700 °C 高温的断后伸长率均有明显提高,分别为 5.3% 和 12.7%,焊接变形率大幅提高,达到 12.5%,抗拉强度提升较小。因此试验优化的焊接压力为 5 MPa。

#### 2.4 扩散焊保温时间对 Ti<sub>2</sub>AlNb 焊接接头组织和性能的影响

图 9 为焊接温度 960 °C、压力 5 MPa,不同保温时间条件下, Ti<sub>2</sub>AlNb 试样扩散焊焊缝处的显微组织图像。保温时间为 60 min 时,颗粒状  $\alpha_2$  相的尺寸较小。可以看出,随着保温时间的增加,得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 焊接接头显微组织中  $\alpha_2$  相的尺寸增大。这是因为保温时间能够影响扩散程度和晶粒生长情况,保温时间越长,原子扩散越充分,加速了再结晶过程,进一步促进了新生的  $\alpha_2$

相晶粒生长,最终形成完整的块状和板条状  $\alpha_2$  相。当保温时间为 120 min 时,原子的扩散过程和晶粒的生长过程进行得更加充分,得到尺寸更大的  $\alpha_2$  相组织,焊缝线也变得模糊。当保温时间达到 150 min 时,原子的扩散过程和晶粒的生长过程已经足够充分,与保温时间 120 min 相比,接头焊缝处显微组织差异并不大。由于试验温度未达到 O 相完全溶解温度,在该温度下存在部分 O 相向  $\alpha_2 + B_2$  相的转变,保温时间的延长不会显著改变相的组成,仅考虑影响晶粒的尺寸与形貌。因此,保温时间较长,其显微组织图像中的  $\alpha_2$  相尺寸略微偏大,而整体形貌高度相似。

在压力 5 MPa、温度 960 °C 条件下,对不同保温时间下得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头进行室温和 700 °C 拉伸试验,得到的结果如图 10 所示。可以看出,保温时间影响原子的扩散和晶粒的尺寸, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头抗拉强度、断后伸长率和焊接变形率均随着保温时间的增加稳定增加。当保温时间为 60 min 时,保温时间较短使得原子扩散不充分,焊接接头的力学性能较低,室温和 700 °C 高温的抗拉强度为 832 MPa 和 438 MPa,断后伸长率分别为 1.5% 和 5.7%,焊接变形率仅为 3.5%。当保温时间增加到 120 min 时,原子扩散逐渐均匀,焊缝处焊合较好,焊接接头在室温和 700 °C 高温的抗拉强

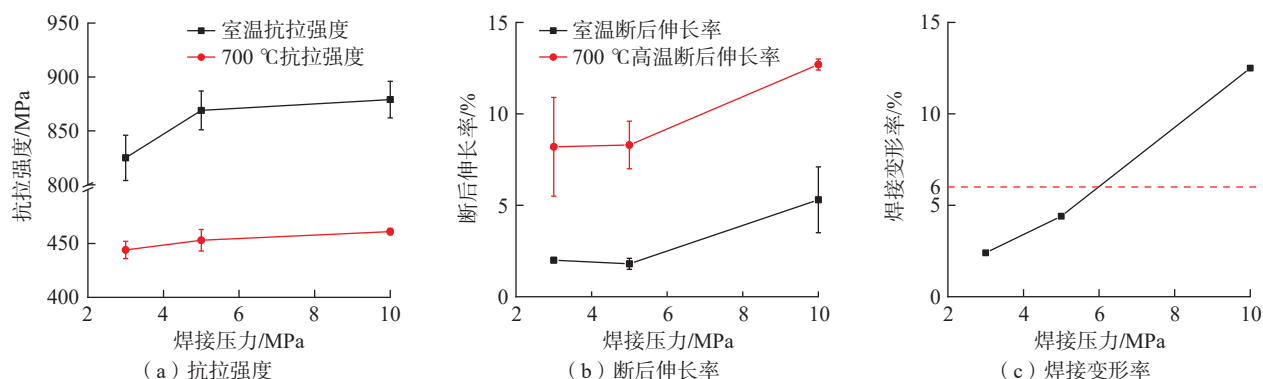


图 8 不同压力对 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温和 700 °C 下力学性能与变形的影响

Fig.8 Effect of different pressures on the mechanical properties and deformation of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joints at room temperature and 700 °C

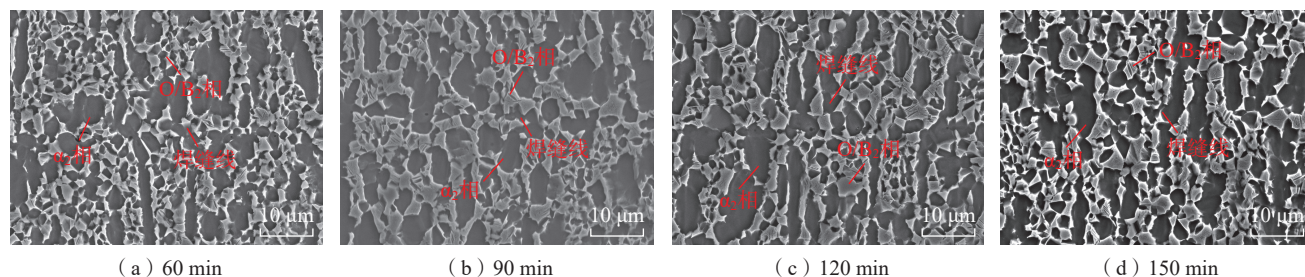


图 9 不同保温时间下 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊焊缝处显微组织

Fig.9 Microstructure of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joints at different holding time

度达到 891 MPa 和 464 MPa,断后伸长率达到 3.5% 和 8.8%,此时的焊接变形率为 5.4%。当保温时间达到 150 min 时,焊接接头在室温和 700 °C 高温的抗拉强度分别为 896 MPa 和 470 MPa,断后伸长率分别为 3.8% 和 9.0%。与保温时间 120 min 的焊接接头相比,保温时间为 150 min 时,焊接接头的性能在室温和 700 °C 高温下的提升十分有限,此时的焊接变形量达到 6.7%,超出规定所控制的 6%。因此试验确定的最佳保温时间为 120 min。

## 2.5 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头的断裂特征

试验优化出的最佳 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺参数为焊接温度 960 °C、压力 5 MPa,保温时间 120 min。图 11 为该工艺下得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温及 700 °C 高温下的断口图像。可以看出,断裂发生在拉伸试样

中心,即焊缝区。室温及 700 °C 高温下的拉伸试样断裂后均没有明显的颈缩现象。采用扫描电子显微镜可以观测到断口处由多个小河流花样组成,在拉伸时同时发生断裂。因此该工艺参数下得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温和 700 °C 高温拉伸时均表现为脆性断裂。

## 2.6 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺对比

表 2<sup>[9-10,12]</sup> 为本文工艺与部分现有文献中 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺性能对比。Ti<sub>2</sub>AlNb 母材中元素成分含量对其性能有较大影响,且现有的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺优化通常追求更高的室温强度。由于试验中采用的 Ti<sub>2</sub>AlNb 成分不同,母材性能存在差异,扩散焊工艺不同,扩散焊接头性能也不同。本试验优化的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺,同时考虑室温强度、700 °C 高温强度和焊接变形量 3 方面因素,具有实际工程应用价值。

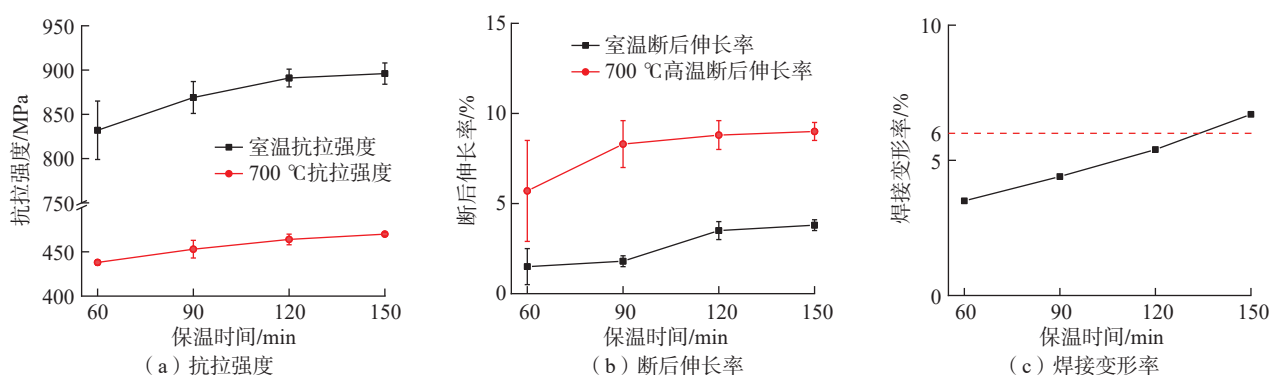


图 10 不同保温时间对 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温和 700 °C 下力学性能与变形的影响

Fig.10 Effect of different holding time on the mechanical properties and deformation of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joints at room temperature and 700 °C

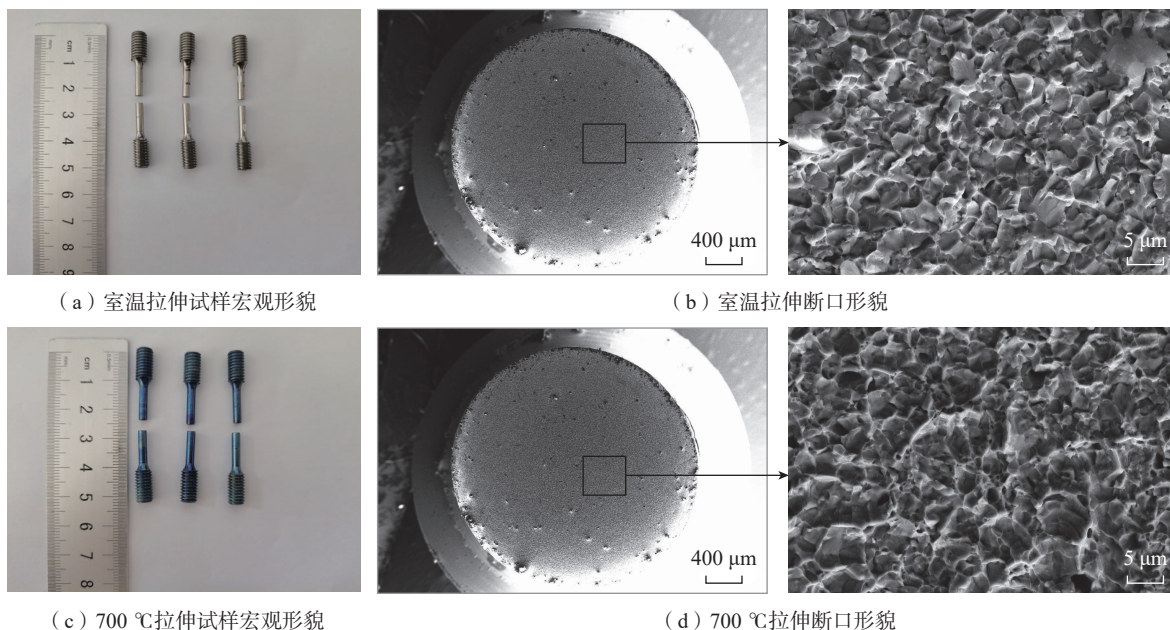


图 11 960 °C、5 MPa、120 min 焊接工艺参数下得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头断口图像

Fig.11 Fracture image of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welded joints under the welding process parameters of 960 °C, 5 MPa and 120 min



表2 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺对比  
Table 2 Comparison of Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welding process

| Ti <sub>2</sub> AlNb 材料成分<br>(质量分数, %) | 扩散焊工艺参数              | 扩散焊接头性能                                              | 焊接质量评价                            | 文献   |
|----------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|------|
| Ti-11.7Al-36.1Nb                       | 960 ℃、5 MPa、120 min  | 室温和 700 ℃高温下, 抗拉强度达到焊前母材的 81.5% 和 91.5%, 焊接变形量为 5.4% | 同时关注室温、700 ℃高温下, 抗拉强度、断后伸长度和焊接变形量 | 本文   |
| 未报道                                    | 950 ℃、15 MPa、120 min | 室温下抗拉强度大于 1100 MPa                                   | 未关注高温下强度                          | [9]  |
| Ti-11.3Al-41.7Nb                       | 1020 ℃、7 MPa、30 min  | 室温和 650 ℃高温下, 抗拉强度达到焊前母材的 84% 和 81%, 焊接变形量为 3.0%     | 焊接温度较高, 高温力学性能较低                  | [10] |
| Ti-10.64Al-39.32Nb-1.8Zr-1.72Mo        | 960 ℃、60 MPa、120 min | 室温下抗拉强度达到母材的 98%                                     | 焊接压力较高, 对设备要求高                    | [12] |

### 3 结论

(1) Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头典型组织由 B<sub>2</sub> 相基体, 较粗的板条状/颗粒状 α<sub>2</sub> 相, 以及分布在 B<sub>2</sub> 相基体中的 O 相构成。焊缝线较模糊, 表现为将两侧母材分开的分界线。

(2) 在焊接温度、压力、保温时间较低时, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头焊缝处焊缝线较明显, 焊接不充分, 焊接接头力学性能较低。随着焊接温度、压力、保温时间的升高, Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头焊缝处焊缝线逐渐模糊, 焊接接头的力学性能提高。

(3) 综合考虑焊缝组织、力学性能和焊接变形率, 最佳的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊工艺为焊接温度 960 ℃、压力 5 MPa、保温时间 120 min, 此时的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头焊接变形率为 5.4%。在室温及 700 ℃高温下, 抗拉强度达到 891 MPa 和 464 MPa, 分别为母材在相同温度下抗拉强度的 81.5% 和 91.5%, 断后伸长率分别为 3.5% 和 8.8%。该工艺参数下得到的 Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散焊接头在室温和 700 ℃高温下拉伸时均表现为脆性断裂, 断口由多个小河流花样组成, 断裂发生在焊缝区。

### 参考文献

- [1] CAI X Q, WANG Y, YANG Z W, et al. Transient liquid phase (TLP) bonding of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy using Ti/Ni interlayer: Microstructure characterization and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 679: 9-17.
- [2] 邹俭英, 李洪宇. Ti<sub>2</sub>AlNb 基金属连接性问题综述[J]. 中国材料进展, 2019, 38(7): 710-716.
- [3] ZOU Jianying, LI Hongyu. Review on weldability of Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy[J]. Materials China, 2019, 38(7): 710-716.
- [4] 张建伟, 梁晓波, 程云君, 等. 航空发动机用 Ti<sub>3</sub>Al 合金和 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金研制进展[C]//第十二届中国高温合金年会论文集. 成都, 2011: 565-568.
- [5] ZHANG Jianwei, LIANG Xiaobo, CHENG Yunjun, et al. Development progress of Ti<sub>3</sub>Al alloy and Ti<sub>2</sub>AlNb alloy for aeroengine[C]//Proceedings of the 12th Annual China Superalloy Conference. Chengdu, 2011: 565-568.
- [6] 李骁. Ti<sub>2</sub>AlNb 合金电流辅助超塑成形/扩散连接工艺及机

理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

LI Xiao. Study on process and mechanism of current assisted superplastic forming/diffusion connection of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[5] KUMPFERT J. Intermetallic alloys based on orthorhombic titanium aluminide[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(11): 851-864.

[6] LI P, WANG L S, YAN S L, et al. Temperature effect on the diffusion welding process and mechanism of B<sub>2</sub>-O interface in the Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy: A molecular dynamics simulation[J]. Vacuum, 2020, 173: 109118.

[7] HE Y S, HU R, LUO W Z, et al. Microstructure and mechanical properties of a new Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy after aging treatment[J]. Rare Metals, 2018, 37(11): 942-951.

[8] 魏红梅, 李万青, 何鹏, 等. Ti<sub>3</sub>Al/Ti/Ti<sub>2</sub>AlNb 扩散连接工艺及性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 5-8, 70, 113.

WEI Hongmei, LI Wanqing, HE Peng, et al. Technology and properties of Ti<sub>3</sub>Al/Ti/Ti<sub>2</sub>AlNb diffusion welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 5-8, 70, 113.

[9] 李贝贝, 王斌, 李萍, 等. Ti<sub>2</sub>AlNb 基金属固态扩散连接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 662-667.

LI Beibei, WANG Bin, LI Ping, et al. Solid diffusion bonding of Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 662-667.

[10] 邹贵生, 白海林, 谢二虎, 等. O 相合金 Ti-22Al-25Nb 固态扩散连接[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 577-582.

ZOU Guisheng, BAI Hailin, XIE Erhu, et al. Solid diffusion bonding of Ti-22Al-25Nb O phase alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 577-582.

[11] 付明杰, 曾元松, 钱健行, 等. Ti-22Al-25Nb 合金扩散连接工艺及连接机制研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(12): 1233-1239.

FU Mingjie, ZENG Yuansong, QIAN Jianhang, et al. Diffusion bonding process and mechanism of Ti-22Al-25Nb alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(12): 1233-1239.

[12] 卜志强, 马秀萍, 李然, 等. 压力对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金扩散焊接头组织与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2023, 43(2): 51-58.

BU Zhiqiang, MA Xiuping, LI Ran, et al. Effect of pressure on microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of Ti<sub>2</sub>AlNb alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(2): 51-58.

通信作者: 岳喜山, 研究员, 研究方向为金属蜂窝壁板结构制造技术及工程应用。

(责编 七七)