

TC4 钛合金扩散焊接头剪切疲劳性能研究

招文龙, 刘小刚, 谢佩玉, 郭海丁
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210000)

摘要: 为了研究钛合金扩散焊接头在航空航天领域焊接性能的稳定性, 制备了双搭接形式的接头试样, 在温度为 910 °C、压力为 3.4 MPa 条件下对 TC4 钛合金板材进行扩散连接, 并对双搭接接头试样开展静强度试验, 获得试样在焊缝界面处的平均剪切强度约为 199.4 MPa, 试样断裂前后接头没有发生明显的塑性变形。此外, 对双搭接接头试样还开展了不同载荷水平下的疲劳性能试验。结果表明: 疲劳试样存在 3 种不同破坏模式。在高载荷水平下, 试样会在切应力主导下发生基板与搭接板的完全脱焊; 在低载荷水平下, 试样会在正应力主导下发生基板沿厚度方向的断裂; 在中等载荷水平下, 试样先发生局部脱焊随后沿基板厚度方向断裂。在上述失效模式分析的基础上, 结合疲劳寿命试验数据分别得到接头的正应力-寿命和切应力-寿命曲线。

关键词: 扩散连接; 钛合金; 搭接接头; 剪切疲劳寿命; 疲劳性能试验; 静强度试验; 航空发动机

中图分类号: V261.3*4 **文献标识码:** A **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.018

Study on Shear Fatigue Performance of TC4 Titanium Alloy Diffusion Bonded Joints

ZHAO Wen-long, LIU Xiao-gang, XIE Pei-yu, GUO Hai-ding

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to study the stability of the welding performance of titanium alloy diffusion bonded joints in aerospace field, a double lap joint specimen was prepared. Diffusion bonding of TC4 titanium alloy plates was carried out at temperature of 910°C and pressure of 3.4MPa. A static strength test was carried out on the specimen of double lap joint, and the average shear strength of the specimen at the weld interface was about 199.4 MPa, and no obvious plastic deformation occurred before and after fracture of the specimen. Fatigue performance tests at different loading levels were also carried out on the specimen of double lap joint. The results show that there are three different failure modes in fatigue samples. At the high load level, the specimen will undergo complete dewelding between the substrate and the lap plate under the shear stress. At the low load level, the fracture of the substrate along the thickness direction occurs under normal stress. At the medium load level, local de-welding occurs first and then fracture along the substrate thickness direction. Based on the above failure mode analysis, the normal stress-life and shear stress-life curves of the joints are obtained by combining the fatigue life test data.

Key words: diffusion bonding; titanium alloy; lap joint; shear fatigue life; fatigue performance test; static strength test; aeroengine

0 引言

扩散焊连接作为 1 种精密的固相连接方法, 具有焊接质量好, 热应力变形小, 能够实现大面积稳定焊接等优点, 被广泛用于钛合金等高性能合金、陶瓷、异种材料等精密构件的连接^[1-2]。特别是对于钛合金, 只要选取合适的工艺参数便能够得到性能稳定的焊接接头, 因此被应用于航空领域重要部件的连接^[3-4]。

随着钛合金扩散焊结构在航空航天领域的应用

日益增多, 国内外学者开展了相关研究并取得一些成果。Glatz 等^[5]在温度为 1000 °C、压力为 20~40 MPa、保温时间为 1~3 h 的条件下对某钛合金板材进行扩散连接, 获得无损伤的焊接接头; 贺跃辉等^[6]对细晶粒的 TiAl 基合金进行扩散连接, 得到与母材相一致的相组织, 并且拉伸时的断裂位置位于母材处; Cam G^[7]在 1100 °C 下对 γ -TiAl 合金进行扩散连接, 获得性能良好的扩散焊构件; Wickman H A 等^[8]对 TiAl 基复合

收稿日期: 2019-03-26

作者简介: 招文龙(1993), 男, 硕士, 研究方向为结构强度与完整性; E-mail: 1772070047@qq.com。

引用格式: 招文龙, 刘小刚, 谢佩玉, 等. TC4 钛合金扩散焊接头剪切疲劳性能研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 99-102. ZHAO Wenlong, LIU Xiaogang, XIE Peiyu, et al. Study on shear fatigue performance of TC4 titanium alloy diffusion bonded joints[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 99-102.

材料、钛合金、Al₂O₃ 陶瓷材料进行扩散连接,并研究了加工温度对钛合金的影响;Kurt 等^[9]对 TC4 钛合金及碳素体不锈钢进行扩散焊,研究加工温度对焊接区域微观组织及剪切性能的影响;Calvo 等^[10]对 TC4 钛合金进行固相扩散连接,并从抗拉强度、剥离强度及抗剪强度 3 个方面研究不同工艺下焊接接头的力学性能。

目前,对钛合金扩散焊接头的研究大多针对扩散焊工艺参数的优化,而对于接头的力学性能特别是疲劳性能的研究较少^[11-12],尤其是针对钛合金扩散焊接头剪切性能的研究相对缺乏。航空发动机中钛合金扩散焊构件的工作环境比较复杂,不可避免地会受到剪切载荷的作用。本文以发动机中常用的 TC4 钛合金为研究对象,进行扩散连接,并设计搭接试验件,对扩散焊焊缝的抗剪切疲劳性能进行试验研究。

1 扩散焊接头剪切强度试验

1.1 扩散焊接头试件制备

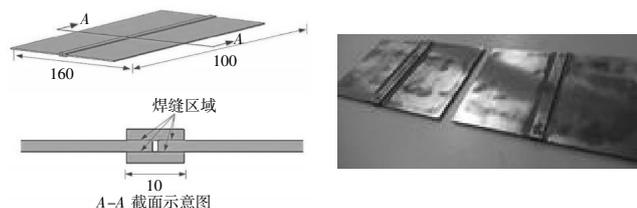
试件材质为 TC4 钛合金板材,材料基本力学性能和化学成分见表 1、2。扩散连接试验在 ZC-ZK-YL150 真空扩散炉中完成,焊接温度为 910 ℃,焊接压力为 3.4 MPa,保温时间为 1 h,具体的扩散连接过程见文献[13]。制备好的板材搭接的形式和尺寸以及实物如图 1 所示。2 块基板尺寸为 160 mm × 100 mm × 2 mm,用 2 块尺寸为 10 mm × 100 mm × 2 mm 的搭接板上下搭接,每处搭接区域的宽度为 4.5 mm,中间留有 1 mm 的缝隙。

表 1 TC4 钛合金室温力学性能

弹性模量 / GPa	泊松比	屈服极限 / MPa	抗拉强度 / MPa
110	0.34	870	925

表 2 TC4 钛合金化学成分

合金元素			杂质元素			wt%
Al	V	Fe	C	O	N	
5.50~6.75	3.50~4.50	0.50	0.10	0.20	0.05	



(a) 搭接板形式及尺寸 (b) 搭接板实物

图 1 扩散焊板双搭接板材

1.2 静强度试验

从上述制备的 TC4 钛合金焊接板材上取样,进行搭接接头的静强度试验。静拉伸试件采用双搭接形式,几何形状及尺寸如图 2 所示。双搭接接头的设计保证了试验过程中作用力始终在同一轴线上,避免接头拉伸变形后受到附加弯矩^[14-15]的影响。

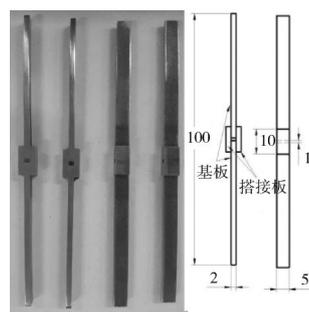


图 2 双搭接拉剪试样

双搭接试样共有 4 块焊接区域,当试件两端承受拉力 F 时,每个搭接面积会分别承受 $F/2$ 的剪切力,如图 3 所示。试验在 MTS793 液压伺服材料试验机上进行,共进行 5 次重复性试验,各试样实际断裂情况如图 4 所示。

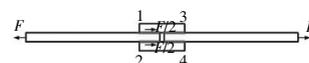


图 3 拉剪试样受力



图 4 拉剪试样断裂模式

在拉伸过程中,随着载荷逐渐增大,焊接接头部分没有出现明显的塑性变形,而是在载荷到达最大值后直接在焊接的薄弱区域发生脱焊,并导致整个焊接区域脱焊。从图 4 中可见,试样存在 3 种破坏形式:单面脱焊、搭接板双面脱焊和 3 面脱焊。其中 4 号和 5 号试样分别为单面脱焊和搭接板双面脱焊,但并未完全发生破坏,而且在试验过程中也形成了弯矩,造成试件弯曲变形。

为此本文以单侧基板完全脱焊为有效试验,即基板完全脱焊分离。选取 1、2、3 号 3 根试件试验数据作为评价焊缝剪切强度的依据,试件的切应力 - 应变曲线如图 5 所示。其试验结果重复性较好,扩散焊接头试件的平均剪切强度达到 199.4 MPa,见表 3。

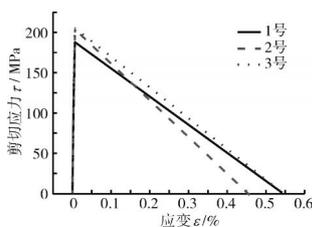


图 5 试样切应力 - 应变曲线

表 3 剪切强度试验结果

试件编号	剪切强度 τ_n / MPa	平均剪切强度 $\bar{\tau}$ / MPa
1	188.0	199.4
2	204.3	199.4
3	205.8	199.4

2 扩散焊接头剪切疲劳性能试验

2.1 疲劳试验方案

疲劳试验同样在 MTS793 试验机上进行,疲劳试

样与静强度试样相同。试验设定载荷以试验得到的剪切强度为依据,最大循环载荷 F_{max} 分别选取 2.4 kN (30%)、2.8 kN (35%)、3.6 kN (45%)、4.0 kN (50%)、4.4 kN (55%)、4.8 kN (60%) 6 个载荷级别。采用拉-拉正弦波载荷,应力比为 0.1,频率为 10 Hz。每个载荷级别至少进行 2 次重复试验,记录疲劳破坏寿命。

2.2 剪切疲劳试验结果及分析

试验得到的双搭接接头的剪切疲劳寿命结果如图 6 所示。疲劳寿命数据分散性较小,且寿命随疲劳载荷的增大明显降低。在双对数坐标系下,疲劳载荷 F 与寿命 N 呈较好的线性关系,通过拟合,得到载荷-寿命曲线方程为

$$\lg F = -0.1647 \lg N + 1.1767 \quad (1)$$

疲劳试验后试件的失效模式如图 7 所示。通过观察将失效模式大致分为 3 种:(1)基板和搭接板的焊接区域发生小面积脱焊,基板表面产生裂纹源,并沿着母材厚度方向扩展,最终基板发生断裂,如图 7(a)所示;(2)基板与搭接板的焊接区域发生大面积脱焊,随后基板产生裂纹并沿着母材厚度方向扩展,最终导致基板断裂,如图 7(b)所示;(3)基板直接与上、下 2 个搭接板完全脱焊分离,致使试样破坏,如图 7(c)所示。

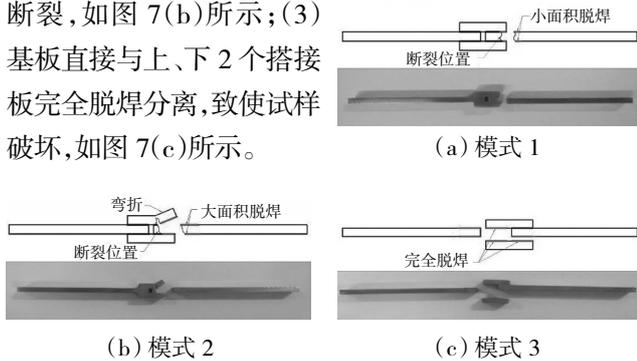


图 7 疲劳试样典型失效模式

试件发生的疲劳失效模式与疲劳载荷水平的高低有直接关系。模式 1 主要发生在 30%、35% τ_b 低载荷级别下;模式 2 则发生在 40%、50% τ_b 中等载荷级别下;模式 3 发生在 55%、60% τ_b 高载荷级别下。失效模式的不同说明在不同载荷水平下试件疲劳失效的机理也不同:无论在何种载荷水平下,对于双搭接试件,一方面焊接区域会承受剪切应力;另一方面,基板本身也会承受正应力。2 种应力都会导致试件破坏失

效,二者在试验过程中是 1 种竞争模式,由于受应力集中的影响,裂纹开裂会最先发生在搭接板与基板的直角过渡处,但在低载荷水平时,正应力起主导作用,裂纹会向基板的厚度方向扩展,直至整个基板沿着厚度方向发生断裂,随后失效,即模式 1 的破坏形式;在高载荷下,剪切应力的作用更加明显,因此在切应力的主导下试样直接发生焊接面整体脱焊、基板拔出现象,即模式 3;而模式 2 是正应力和剪切应力同时作用以及不断竞争所导致的,在中等载荷下,裂纹会在切应力的作用下不断沿着焊接面向里扩展,同时,正应力也导致裂纹有向基板厚度方向扩展的倾向,最终产生试件搭接面发生大面积脱焊后,沿着基板厚度方向断裂的现象。

因此,在进行双搭接扩散焊接头疲劳寿命数据处理时,应对 2 种应力破坏模式加以区分考虑。根据搭接接头疲劳试件失效模式的不同,将其区分为正应力主导破坏以及切应力主导破坏 2 种形式。根据试验结果分别得到搭接接头正应力-寿命曲线和切应力-寿命曲线,如图 8 所示。对应的曲线方程分别为

$$\lg \sigma = -0.2119 \lg N + 3.4189 \quad (2)$$

$$\lg \tau = -0.6585 \lg N + 2.2581 \quad (3)$$

3 结论

(1) 本文设计并制备了 TC4 钛合金双搭接扩散焊接头,通过静强度试验获得接头的剪切强度约为 199.4 MPa。在试验过程中焊接接头没有明显发生塑性变形,当载荷达到最大值时,焊接面瞬时脆性脱焊,试件破坏。

(2) 通过开展疲劳试验研究了搭接接头剪切疲劳性能,获得应力比 $R=0.1$ 下的载荷-疲劳寿命曲线。研究表明,在不同载荷水平下,搭接接头存在 3 种疲劳破坏模式:基板与搭接板焊合面发生小面积脱焊,沿基板厚度方向断裂;基板与搭接板发生大面积脱焊,沿基板厚度方向断裂;基板与搭接面完全脱焊,基板整体拔出。

(3) 双搭接接头在拉伸载荷作用下,一方面焊接区域承受剪切应力;另一方面,基板本身也会承受正

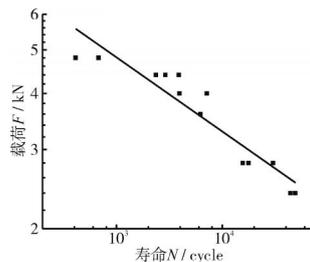


图 6 疲劳试样载荷-寿命曲线

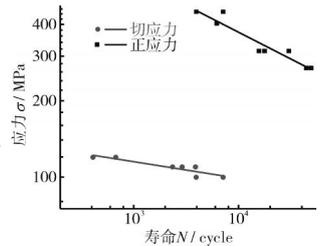


图 8 试样的应力-疲劳寿命曲线

应力。在高载荷下,出现以剪应力为主导的焊接区脱焊失效;在低载荷下,出现以正应力为主导的基板断裂失效。根据试样疲劳破坏机制不同,对试验数据进行处理,分别得到接头正应力-寿命和切应力-寿命曲线。

参考文献:

- [1] 栾亦琳,刚铁. TiAl/40Cr 扩散焊接头强度评价与预测[J].焊接学报, 2016,37(4):35-38.
LUAN Yilin, GANG Tie. Strength evaluation and prediction of TiAl and 40Cr diffusion bonding joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016,37(4):35-38.(in Chinese)
- [2] 周媛,熊华平,陈波,等. 以铜和 Cu-Ti 作为中间层的 TiAl/GH3536 扩散焊[J].焊接学报,2012,33(2): 17-20.
ZHOU Yuan, XIONG Huaping, CHEN Bo, et al. Diffusion bonding of TiAl and GH3536 superalloy with Cu and Cu-Ti as interlayers [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012,33(2):17-20.(in Chinese)
- [3] 陈光. 航空发动机发展综述[J].航空制造技术,2000(6):24-34.
CHEN Guang. Survey on aeroengine development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2000(6):24-34. (in Chinese)
- [4] 王向民,乔宦文. 钛合金 SPF/DB 技术在航空工业中的应用[J]. 钛工业进展,1998(1):8-11.
WANG Xiangmin, QIAO Huanwen. Application of titanium alloy SPF/DB technology in aviation industry[J]. Titanium Industry Progress, 1998 (1):8-11.(in Chinese)
- [5] Glatz W, Clemens 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.
- [6] 贺跃辉,黄伯云,王彬,等.TiAl 基合金的固态焊接[J].金属学报, 1998,34(11):1167-1172.
HE Yaohui, HUANG Baiyun, WANG Bin, et al. Solid-state joining of TiAl based alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica,1998,34 (11): 1167-1172.(in Chinese)
- [7] Cam G, Clemens H, Gerling R, et al. Diffusion bonding of r-TiAl Sheets [J]. Intermetallics, 1999, 7(9): 1025-1031.
- [8] Wickman H A, Chin E S C. Diffusion bonding of titanium-titanium aluminide-alumina sandwich [C]/Nevada, USA: Proceedings of the TMS. Annual Meeting on Gamma Titanium Aluminides, 2005.
- [9] 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.
- [10] Calvo F A, De Salazar J M G, Urena A. Diffusion bonding of Ti-6Al-4V alloy at low temperature: metallurgical aspects[J]. Journal of Materials Science, 1992,27(2):391-398.
- [11] Kato H, Abe S, Tomizawa T. Interfacial structures and mechanical properties of steel-Ni and steel-Ti diffusion bonds [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(19): 5225-5232.
- [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[J]. 机械强度,1998,20(2):112-137.
ZHOU Keyin, XU Lai, LIN Zhaorong, et al. Fatigue and fracture characteristics of titanium alloy boards bonded by diffusion [J]. Journal of Mechanical Strength, 1998,20(2):112-137.(in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 程亚婷. 激光透射焊接塑料强度测试方法设计与实验研究 [D]. 长春:吉林大学,2014.
CHENG Yating. Strength test method design and experiment research of laser transmission welding of plastics[D]. Changchun:Jilin University,2014.
- [15] 张新,张靖安. PP 塑料激光透射焊接剪切强度测试方法研究[J].激光与红外,2014,44(6):619-623.
ZHANG Xin, ZHANG Jing'an. Study on tensile-shearing strength test method of polypropylene jointed by laser transmission welding [J]. Laser & Infrared,2014,44(6):619-623.(in Chinese)

(编辑:贺红井)