

# TC4 钛合金电子束焊接接头中值疲劳寿命研究

## Study on Median Fatigue Life of Electron Beam Welding Joints of TC4 Titanium Alloy

大连交通大学材料科学与工程学院 赵大伟 赵秀娟 罗宇  
 北京航空材料研究院 王亚军  
 北京航空制造工程研究所 刘昕  
 高能束流加工技术国防科技重点实验室

**[摘要]** 研究了 TC4 钛合金母材及 2 种不同焊接工艺电子束焊接接头的拉伸性能和疲劳性能,测试了同一应力水平下的疲劳寿命。疲劳测试试验结果表明:与母材相比,TC4 钛合金电子束焊接后拉伸性能提高,延伸率降低。

**关键词:** 钛合金 电子束焊 中值疲劳寿命

**[ABSTRACT]** The tensile and fatigue properties of TC4 titanium alloy and the joints welded by two different welding parameters with Electron Beam Welding are investigated. The fatigue life values of the electron beam welding joints under the same stress level, are evaluated by statistic approach. The results show that the tensile strength of electron beam welding joints increases and the elongation rate decreases compared with the base metal.

**Keywords:** Titanium alloy Electron beam welding Median fatigue life

具有高比强度和高比刚度的钛合金越来越多地成为航空航天的关键结构材料,特别适用于飞机承力结构和系统零件。钛合金在军机、民机和运输机上的用量不断增加,尤其是在新型战斗机的机体结构上的用量已经超过铝合金,如在美国的 F-22 新型战斗机中,钛合金用量已达整机结构重量的 41%。众多钛合金中,TC4 (Ti-6Al-4V) 的应用最为广泛,超过全世界钛合金总量的 50%。在良好的保护条件下,TC4 钛合金可以采用 TIG、MIG、PAW、LBW 和 EBW (电子束焊接) 等多种焊接方法。但对 TC4 钛合金中厚板的焊接,EBW 具有更大的优势。现今的研究大多集中在钛合金本身的断裂和疲劳行为,对中厚板焊接接头的疲劳性能研究却不多<sup>[1-4]</sup>。

本文对 20mm 厚 TC4 钛合金电子束焊接接头的疲劳强度进行了研究,根据疲劳试验统计分析方法<sup>[5]</sup>,分析了不同工艺对焊接接头疲劳寿命的影响,并进行了相应的分析。

### 1 试验方法及条件

TC4 钛合金的化学成分如表 1 所示。试验用 20mm 厚 TC4 钛合金板材,退火状态供货。TC4 钛合金电子束焊接试件尺寸为 200mm × 90mm × 20mm。焊接前,对进行了固溶时效处理的试件进行清理和装配,用钢丝刷打磨试板表面,去除氧化膜、油污和杂物。试件处于无拘束状态平放于 ZD150-30A 的工作台上,沿垂直轧制方向进行焊接,焊接工艺参数如表 2 所示。焊后经 X 射线质量检测,符合标准 HB5484-91 的 I 级焊缝技术条件要求。随后进行去应力退火处理,退火温度(600 ± 5)℃,保温时间 4h,真空炉中随炉冷却。为了比较母材和焊接接头的断裂行为,对母材亦进行同种工艺的热处理。

表 1 TC4 钛合金的化学成分 w/%

TC4 钛合金	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
质量分数	6.06	3.92	0.3	0.013	0.014	0.001 4	0.15	余量

表 2 TC4 钛合金电子束焊接工艺参数

序号	加速电压 $U_a$ /kV	焊接速度 $V$ /(mm·min <sup>-1</sup> )	电子束流 $I_b$ /mA	聚焦电流 $I_f$ /mA	工作距离 $D$ /mm
工艺 1	90	600	61.1	1 685	370
工艺 2	90	750	57.3	1 654	370

拉伸试验和疲劳试验在室温中进行,用 MTS810 试验机进行测试,试样几何形状和尺寸如图 1 所示。疲劳试验在应力水平为 0.6,载荷为三角波,加载频率为 20Hz,应力比  $R=0.1$  下进行。疲劳试验后,将疲劳试样在 HITACHIS-3500 型扫描电镜上进行断口分析。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 试验结果统计

母材及 2 种不同焊接工艺的焊接接头拉伸性能试验结果如表 3 所示。疲劳寿命试验结果在表 4 中给出。

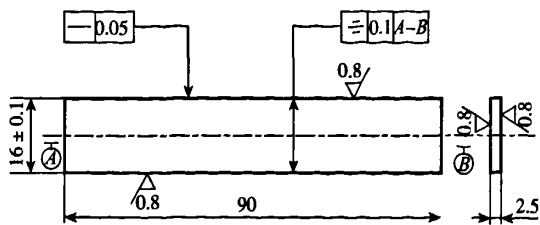


图1 试件的几何形状、尺寸  
(疲劳及拉伸性能测试试样图)

Fig.1 Geometry and dimension of specimen

表3 TC4 母材及电子束焊接接头拉伸试验结果

分类	母材	工艺1	工艺2
抗拉强度 /MPa	860.08	882.79	908.91
延伸率 δ/%	17.38	11.27	11.47

表4 TC4 母材及电子束焊接接头  
疲劳性能试验数据

分类	疲劳寿命 / 周(N <sub>f</sub> )	对数疲劳寿命(X <sub>i</sub> = lgN <sub>f</sub> )
母材	50 529	4.703 541
	87 635	4.942 678
	63 091	4.799 967
工艺1	156 822	5.195 407
	64 096	4.806 831
	67 058	4.826 451
	245 255	5.389 618
	132 549	5.122 376
工艺2	20 133	4.303 908
	124 779	5.096 142
	10 697	4.029 262
	80 298	4.904 705
	35 552	4.550 864
	69 703	4.843 251
	18 107	4.257 847
44 216	4.645 579	
43 104	4.634 518	
32 654	4.513 936	

2.2 数据处理及分析

根据表4中疲劳试验结果,用公式(1)和公式(2),分别计算每组试样的子样平均值和子样标准差S:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n-1}}, \quad (2)$$

在置信度 γ=90%, 相对误差 δ<sub>max</sub>=5% 情况下, 观测值的个数 n 应满足:

$$\frac{\delta_{\max} \sqrt{n}}{t_r} \geq \frac{S}{\bar{x}}. \quad (3)$$

在试验中, 每组试验的观测个数均满足要求, 因此可得到每组试样的中值疲劳寿命, 统计分析结果见表5。

对比拉伸试验数据可以看出, 试样焊接后的抗拉强度均高于母材, 但是延伸率却降低。工艺1和工艺2的焊接接头的抗拉强度与母材相比, 平均提高了20~50MPa。许鸿吉<sup>[6]</sup>等研究认为TC4母材组织为α相和β相的机械混合物, 而焊缝组织由较粗大的原始β相转变为α'相, 使接头的强度升高, 延伸率下降。从图2中可以明显看出, 焊接后, 疲劳寿命发生了明显的变化, 但是2种焊接工艺对疲劳寿命的影响不一样。与母材的中值疲劳寿命相比, 工艺1焊接接头的中值疲劳寿命提高了45%, 工艺2焊接接头的中值寿命却降低了46%。通过对比2种不同焊接工艺的接头(如图3所示), 2种工艺的接头焊缝余高相近, 但是工艺1的焊缝正面熔宽远大于焊接工艺2的焊缝正面熔宽, 工艺2的深宽比增加, 从中看出正面熔宽和深宽比对焊接接头的拉伸性能和疲劳寿命有很大的影响。

表5 TC4 母材及电子束焊接接头中  
值疲劳寿命参数表

分类	均值 $\bar{x}$	标准差 S	变异系数(S/ $\bar{x}$ )	最少观测个数	log $\tilde{N}_{50}$	$\tilde{N}_{50}$
母材	4.815 395	0.120 1	0.024 9	≥ 3	4.815 395	65 373
工艺1	4.976 657	0.331 02	0.066 5	≥ 7	4.976 657	94 767
工艺2	4.547 495	0.289 3	0.063 62	≥ 7	4.547 495	35 277

2.3 断口分析

试验过程中发现起裂发生在焊缝根部、靠近熔合线附近。疲劳试验后, 对疲劳寿命较低的试样在HITA-CHIS-3500型扫描电镜上进行断口分析。通过观察断口照片可知, 焊缝根部聚集多处小气孔。这些气孔的尺寸一般都小于150μm, 所以按照标准HB5484-91的I级焊缝技术条件进行检测时, 不能发现这些缺陷。疲劳微裂纹首先在尺寸较大的气孔处萌生, 在循环应力的作用下, 最终演变成以气孔为中心、向外辐射状的断口。

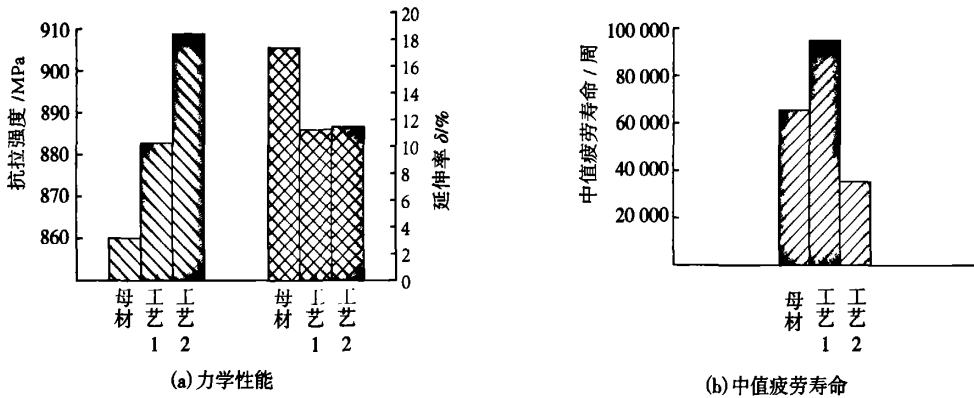


图2 焊接工艺对力学性能及中值疲劳寿命的影响  
Fig.2 Effects of welding parameters on mechanical properties and median fatigue life

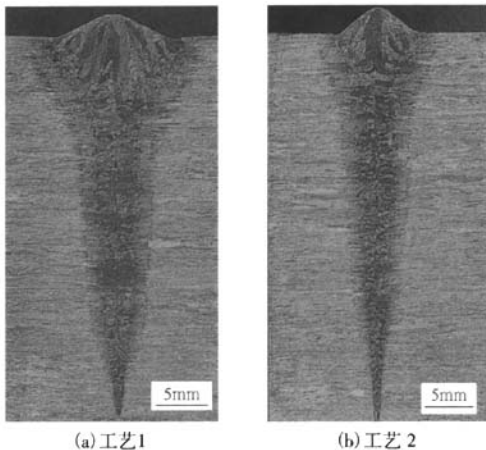


图3 2种不同焊接工艺的TC4钛合金电子束焊接的接头形状  
Fig.3 Two different joints shape of TC4 titanium alloy welded by EBW

### 3 结论

- (1) TC4钛合金电子束焊接,2种不同工艺的焊接接头的抗拉强度均高于母材,平均提高了20~50MPa,但延伸率降低35%。
- (2) 在置信度 $\gamma=90\%$ 、相对误差 $\delta_{max}=5\%$ 的情况下,焊接工艺1的接头中值疲劳寿命比母材高45%,工艺2的接头中值疲劳寿命比母材低46%。
- (3) 在TC4钛合金电子束焊接接头成形性方面,正面熔宽和深宽比对焊接接头的拉伸性能和疲劳寿命影响很大。

### 参 考 文 献

- [1] B. E. 巴顿. 飞机制造中的焊接技术. 北京:北京航空制造工程研究所,2002 (7): 315.
- [2] 李成功,傅恒志,于翹,等. 航空航天材料. 北京:国防工业出版社,2002: 42-44.
- [3] Barreda J L, Santamarmia F, Azpiroz X, et al. Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate. Vacuum 2001 (62): 143.
- [4] 李晓延,巩水利,陈刚. TC4钛合金薄板高能束流焊接接头疲劳性能研究. 航空材料学报,2005,25 (4): 26-29.
- [5] HB/Z112-86,材料疲劳试验统计分析方法.
- [6] 许鸿吉,尹丽香,李晋炜,等. TC4钛合金电子束焊接接头组织和性能. 焊接学报,2005,26 (11): 43-46.

(责编 黄盖)

### 亚洲顶尖机床展将在上海开幕

第11届上海国际机床展将于7月15~18日在上海新国际博览中心隆重举行。有工作母机之称的机床成为所有产业振兴的工具,由此产生的中国市场巨大商机吸引了全球近千家著名机床企业,均携顶级产品集聚上海。

本届国际机床展在十年成功举办的基础上,展区规模达80 000m<sup>2</sup>,其中海外展区20 000m<sup>2</sup>,预计专业观众逾10万人。

各参展企业纷纷带来各自的精品和新品。展品集中体现了高速、精密、环保、四轴、五轴联动等趋势,并覆盖车、钻、镗、磨、铣、刨、插、拉、锯、齿轮加工、螺纹加工、花键加工、特种加工和刻线机等各类机床技术,涵盖机床产业完整产业链。

(本刊记者 傅芷)