

文章编号:1674-8190(2019)01-124-08

钛合金加强框真空电子束焊接应用研究

李晓龙,潘建东,乔忠生,张海

(成都飞机设计研究所 结构研究部,成都 610091)

摘要: 钛合金加强框是飞机结构的重要构件,其在框段组合时机械连接与潜弧焊焊接方式均存在不足。真空电子束焊接(EBW)是实现钛合金框段组合的新型制造方式,具有显著优势。采用“积木式方法”展开系列试验研究:首先针对不同热处理制度下的 TC4-DT 焊接试样进行拉伸试验,通过标的参数对比获取合理的焊后热处理制度;然后通过系列焊接标准试样拉伸试验、断裂韧度试验及裂纹扩展率试验,获取基础性试验数据,并对焊接性能进行判断;最后经过短梁试验、部件试验以及机上应用,完成 TC4-DT 钛合金加强框 EBW 工程应用。结果表明:TC4-DT 钛合金加强框 EBW 接头力学性能良好,较机械连接质量收益明显。

关键词: 加强框;TC4-DT 钛合金;真空电子束焊;力学性能;试验

中图分类号: V222

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.016

Electron Beam Welding Application on Titanium Alloy Bulkhead Frame

Li Xiaolong, Pan Jiandong, Qiao Zhongsheng, Zhang Hai

(Structure Department, Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: The titanium alloy bulkhead frame is one kind of the important components in the aircraft structure. It could be fabricated by using the new method of electron beam welding(EBW) for parts assembly. An introduction is taken on the disadvantages of mechanical joints and submerged arc welding for titanium bulkhead frame parts assembly, and the advantage of EBW is distinct compared to the other two methods above. The building block approach is adopted in the research of series tests. Firstly, based on the welding specimen tension tests, the heat treat procedure of TC4-DT after welding is obtained according to specific parameter comparison. Secondly, the data base is built by doing series of experiments of standard specimen in tension, also for fracture toughness and crack growth rate. Finally, the EBW of TC4-DT titanium alloy bulkhead frame is successfully applied on the specific aircraft after doing short beam experiments and component experiments. Results show that good mechanical properties of the welding joints is verified, and the weight reduction is distinct compared to the mechanical joints.

Key words: bulkhead frame; TC4-DT titanium alloy; electron beam welding; mechanical properties; test

0 引言

加强框是飞机结构的一类重要构件,其失效或破坏通常会严重影响飞机飞行安全。TC4 钛合金

由于其良好的物理性能和力学性能,逐渐成为战斗机加强框的热门选材。过去,我国航空工业的锻造能力不足,钛合金加强框常被分段设计,采用机械连接或潜弧焊焊接方式组合。机械连接方案装配

收稿日期:2018-03-13; 修回日期:2018-04-17

通信作者:李晓龙,ossca1@163.com

引用格式:李晓龙,潘建东,乔忠生,等. 钛合金加强框真空电子束焊接应用研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 124-131.

Li Xiaolong, Pan Jiandong, Qiao Zhongsheng, et al. Electron beam welding application on titanium alloy bulkhead frame[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 124-131. (in Chinese)

关系复杂,需排布较多的紧固件以传递载荷,紧固件孔不仅造成框的截面积大幅缩减,也降低了结构效率,增加了结构质量。潜弧焊单面焊接的极限厚度为 40 mm,焊缝及热影响区域较宽^[1],焊缝处应力状态复杂,且存在热影响区材料性能降低现象,因此焊接件安全裕度通常设计得比较大^[2]。加强框的组合方式选择,不仅与加强框的质量相关,还与加强框整体性能密切相关,因此,研究钛合金框段的新型组合方式将有助于设计性能优异的钛合金加强框。

国内外对钛合金的焊接工艺进行了大量研究,发现采用真空电子束焊接(Electron Beam Welding,简称 EBW)技术可获得性能良好的焊接接头^[3]。真空电子束焊接是利用加速和聚焦的电子束轰击置于真空中的焊件产生的热能进行焊接。电子束穿透能力强,可无坡口实现单面大厚度焊接,焊接速度快,焊缝窄而深(如图 1 所示),热影响区小。

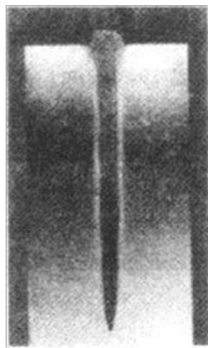


图 1 真空电子束焊接典型焊缝

Fig. 1 Typical welding joint of EBW

美国 F-22 飞机的主承力钛合金结构大量运用了 EBW 技术,整机焊缝总长超过 3 000 in^[4](1 in = 0.025 4 m)。但目前,关于钛合金加强框采用真空电子束焊接方式拼接的研究仍鲜见报道。

本文采用“积木式方法”展开系列试验研究,通过对 EBW 焊后热处理制度的探索、系列的标准试样试验验证获取试验数据基础,并通过短梁试验、加强框部件试验以及机上验证等步骤,完成 EBW 技术在某型飞机 TC4-DT 钛合金加强框设计上的应用。

1 钛合金加强框设计

钛合金是伴随着航空工业快速兴起的一种重要结构金属,具有比强度大、热稳定性好、耐腐蚀、焊接性能优异等特点。有观点认为,钛合金的用量与航空装备先进性是正相关的。经典机型苏-27 机体结构钛合金占比约 18%,美国第四代战机 F-22 钛合金的用量为机体质量的 41%^[5]。TC4 钛合金是一种应用广泛的商用钛合金,可用于加强框的制造。TC4-DT 是一种我国自主研发的中强度高损伤容限型钛合金,其名义成分与 TC4 相同。

与 TC4 相比,TC4-DT 降低了氧元素的含量,元素 Al、V 仅在小范围内波动,如表 1 所示^[6]。间隙元素成分的改变,使 TC4-DT 具有较高的断裂韧性(K_{IC})和较低的裂纹扩展率(da/dN)。准 β 热处理可以大幅提升 TC4-DT 材料的综合性能^[7]。综上所述,TC4-DT 非常符合现代飞机结构设计中,加强框对损伤容限的要求。

表 1 TC4 与 TC4-DT 钛合金成分对比

Table 1 Chemical compositions of TC4 and TC4-DT alloy

牌 号	各成分质量分数/%							Ti
	Al	V	Fe	C	N	H	O	
TC4	5.50~6.80	3.5~4.5	≤0.300 0	≤0.100 0	≤0.050 0	≤0.015 0	≤0.200 0	其余
TC4-DT	5.60~6.35	3.6~4.4	≤0.250 0	≤0.050 0	≤0.030 0	≤0.012 5	≤0.150 0	其余

合理选材是保证加强框性能的必要条件之一,制造方式的选择同样与加强框性能密切相关。过去,由于我国钛合金锻造能力不足,加强框只能采

取分段锻件组合的设计方式。国内某两型飞机 TC4 钛合金框,分别用对合、套合方法将各框段连接,如图 2 所示。

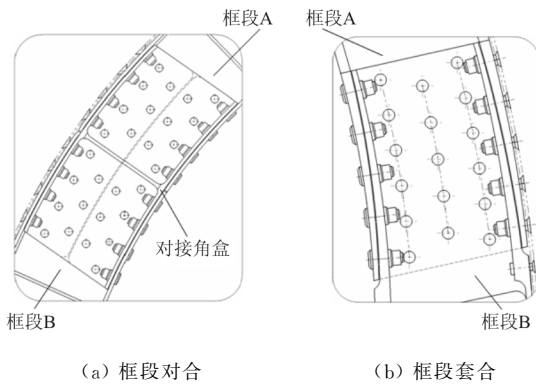


图 2 钛合金加强框框段组合

Fig. 2 Parts assembly of titanium alloy bulkhead frame

20 世纪 90 年代后,我国引进了潜弧焊焊接技术^[1]。某型飞机 TA15 主承力钛合金框,采用潜弧焊工艺将 6 锻件焊接为整框^[8]。

但无论采用机械连接还是潜弧焊焊接方式组合加强框框段,都存在其不足之处。机械连接配合关系复杂、结构效率低,潜弧焊焊缝及焊接影响区宽。随着我国锻造能力的不断提升,整体框等温精锻件外形尺寸可达 1 570 mm×1 500 mm×80 mm^[10]。8 万吨、4 万吨锻压机的建成与投产,使我国具备了生产投影面积大于 5 m² 钛合金整体框锻件的能力。整体锻件金属流线连续,无连接处应力集中,可靠性高。但超大型整体钛锻件模具和工装成本较高,过度依赖巨型锻压机,制造周期长,存在加工风险富集问题。合理控制锻件尺寸,运用新型焊接技术拼接框段,可作为一种与整体锻造并存的钛合金加强框制造方法。

近年来,国内陆续引进了真空电子束焊接技术,这是一种先进的高能束流焊接方法。零件以某种方式焊接在一起,多是出于节约成本或减轻结构质量的需要^[9]。将真空电子束焊接应用于 TC4-DT 钛合金加强框组合,不仅可以解决增重问题,还能解决焊缝及热影响区过宽带来的连接设计问题。因此,在新型飞机加强框设计中探索真空电子束焊接技术的应用意义重大。

2 TC4-DT 加强框焊接设计

某型飞机 TC4-DT 加强框如图 3 所示,其承受较大静载荷、动载荷及交变载荷。

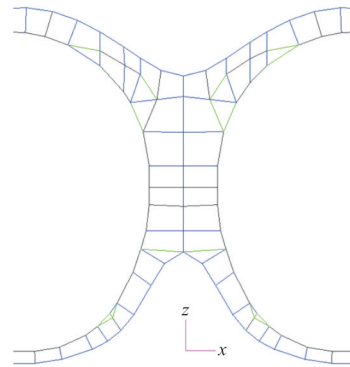


图 3 某 TC4-DT 加强框板、杆模型(局部)

Fig. 3 Numerical modeling of the TC4-DT bulkhead frame (partial)

焊接接头失效会造成灾难性后果,故选定为 I 级焊接。I 级焊接选取自动化机械完成,易于实现均匀焊缝和较高焊缝质量。焊缝表面应光洁,与母材圆滑过渡;不允许表面缺陷残留,避免应力集中。

由于焊缝处应力复杂,常规焊接多将焊缝设计为受剪切或受压缩载荷。EBW 可用于特殊拉伸连接^[2],TA15 钛合金框,潜弧焊焊缝正交于框缘条^[1],存在受拉工况。为了简化对接工艺、提高对接精度,本文选取竖直(z 轴方向)对接缝设计。参考相关设计规范,焊缝及影响区的材料性能影响系数为 0.9。经过计算分析,框段采取 CXC 分段,如表 2 所示。

表 2 加强框分锻件轮廓尺寸

Table 2 Dimension of the bulkhead forging parts

框分段	轮廓尺寸
C	1 520 mm×1 000 mm×70 mm
X	1 520 mm×1 300 mm×70 mm
C	1 520 mm×1 000 mm×70 mm

根据 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论^[11],某一应力水平所引起的疲劳损伤正比于该应力水平作用的循环数与同应力水平导致最终破坏所需的载荷循环总数之比。

Palmgren-Miner 假设:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{当 } D = 1 \text{ 时破坏发生}) \quad (1)$$

式中: D 为疲劳寿命利用比(损伤比); n_i 为第 i 级应力水平的载荷循环数; N_i 为在第 i 级应力水平下出现破坏的载荷循环数; k 为分析中所用应力水平数。

从式(1)可以看出:使焊接结构处于较低应力

水平可以获得较高的疲劳寿命。本文焊缝处设计应力水平不超过 290 MPa。

为了验证 TC4-DT 钛合金加强框真空电子束焊接技术,获得相关数据,针对焊后热处理制度、拉伸强度、断裂韧性及裂纹扩展率开展一系列验证试验。本文遵循试片级、典型元件试验,部件验证程序,实现 EBW 技术的工程化应用。

3 真空电子束焊接试验验证研究

3.1 焊后热处理制度研究

钛合金力学性能和使用性能不仅取决于相组

成,还取决于相的形貌、分布及相的精细结构^[12]。金属部件焊接时,由于焊接处温度梯度变化、热膨胀及冷却等因素,焊接区域会存在复杂的残余应力,而焊后热处理是改善焊接区域性能的重要措施^[9]。某 TC4 电子束焊接试片采用特定热处理措施,可去除 85% 以上的残余应力^[13]。对不同试样拉伸强度进行分析,以获得合适的焊后热处理制度。自由锻件 EBW 拼焊后制备的焊接试样如图 4 所示,部分试验结果如表 3 所示。以断裂延伸率与截面收缩率为主要研究指标,获得焊后热处理制度为 730 °C/(3.5 h)。

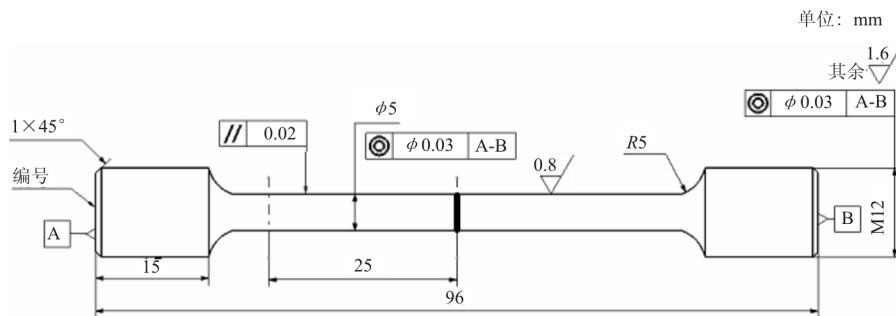


图 4 EBW 拉伸试样

Fig. 4 EBW specimen in tension

表 3 热处理试验($K_t=1$,室温)

Table 3 Experiments of hot treatment ($K_t=1$, room temperature)

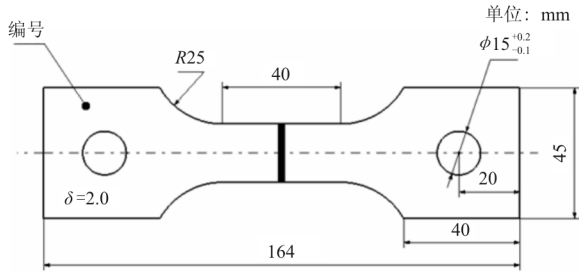
试验组	焊后热处理	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	备注
1	550 °C/4 h, 炉冷	826.0	769.0	9.7	34.2	焊缝下部取样,组平均值
2	600 °C/2 h, 炉冷	820.0	725.0	9.4	27.2	焊缝下部取样,组平均值
3	600 °C/4 h, 炉冷	836.0	760.0	7.6	24.8	焊缝下部取样,组平均值
4	650 °C/2 h, 炉冷	860.0	803.0	8.9	23.8	焊缝下部取样,组平均值
5	650 °C/4 h, 炉冷	887.0	797.0	9.4	30.7	焊缝下部取样,组平均值
6	680 °C/4 h, 炉冷	813.0	710.0	9.3	30.4	焊缝下部取样,组平均值
7	730 °C/3.5 h, 炉冷	871.7	816.7	11.8	45.2	焊缝下部取样,组平均值

注: R_m 为抗拉强度; $R_{p0.2}$ 为屈服强度;A 为延伸率;Z 为收缩率。

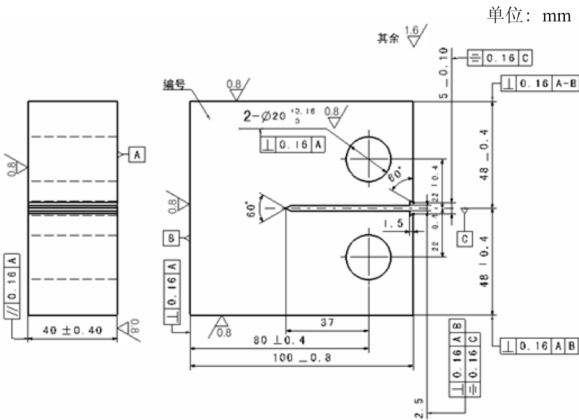
3.2 EBW 焊接接头力学性能试验研究

以 3.1 节焊后热处理制度为基础,开展对试片拉伸强度、断裂韧性及裂纹扩展率的研究。选用 $d\alpha/dN$ 较小的材料,是实现机体结构长寿命和高可靠性的必要条件^[14]。在相同的组织类型、应力

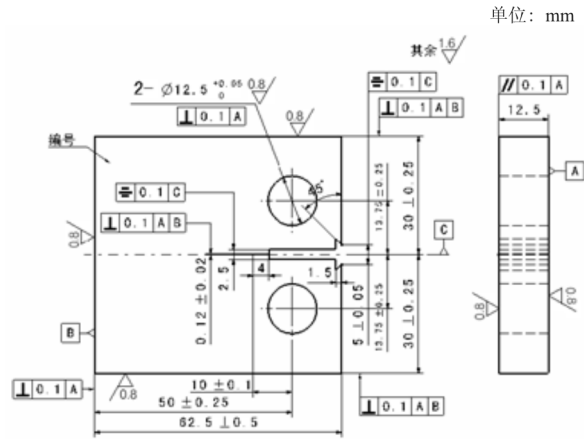
比等条件下,TC4-DT 钛合金疲劳裂纹扩展抗力明显高于 TC4 钛合金^[15]。本文所有试片均采用同一批次 TC4-DT 锻件制造,母材与焊接接头试片尺寸相同,如图 5 所示。试验在室温条件下实施,母材与焊接接头试验结果如表 4 所示。



(a) 拉伸试样



(b) 断裂韧性试样



(c) 裂纹扩展率试样

图 5 力学性能试样

Fig. 5 Specimens of mechanical properties

表 4 拉伸强度与断裂韧性试验

Table 4 Experiments of tension and fracture toughness

研究项目	材料情况	试样数量	标的参数	结论
拉伸强度	锻件,母材/焊接件,焊缝上、中、下取样	母材 9 件 焊件 24 件	$R_m, R_{p0.2}, A, Z$	焊缝拉伸强度略高于母材,焊缝延伸率相当于母材的 60%,其余参数相当
断裂韧性	锻件,母材/焊接件,焊缝上、中、下取样	母材 4 件 焊件 8 件	K_{Ic}	焊接接头断裂韧性低于母材

裂纹扩展率研究情况如图 6 所示,焊缝上、中、下取样。

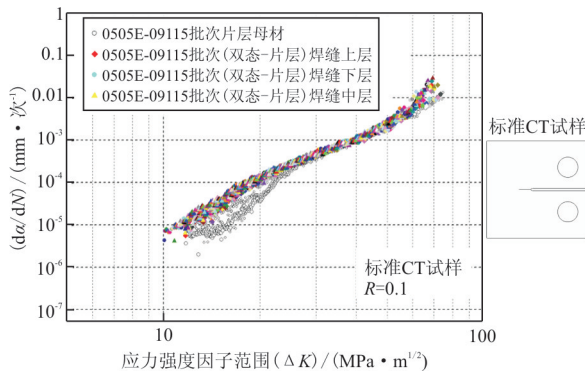


图 6 TC4-DT 钛合金母材与电子束焊接接头标准 CT 试样裂纹扩展

Fig. 6 Fatigue crack propagation rate for TC4-DT alloy and TC4-DT EBW joints

从图 6 可以看出:疲劳裂纹扩展曲线重合,表明大厚度电子束焊接接头从焊缝顶端至焊缝底端抗疲劳裂纹扩展能力与母材相当。

3.3 四点弯曲加载梁试验研究

3.3.1 短梁局部参数优化设计

四点弯曲加载短梁:缘条受拉、压,腹板受剪,符合加强框典型载荷特征。最初,短梁试验件焊缝处上、下缘条厚度尺寸相同。加载试验以上缘条受压失稳形式失效(无法考核焊缝力学性能),试验件及分析如图 7 所示。而后,对短梁缘条参数改进设计,如图 8 所示,以确保短梁下缘条以焊缝处或近焊缝受拉破坏形式失效。

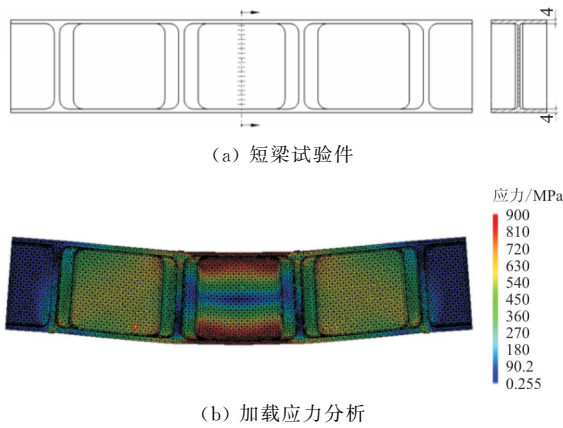


图 7 短梁试验件及加载应力分析
Fig. 7 Short EBW beam of TC4-DT and stress analysis

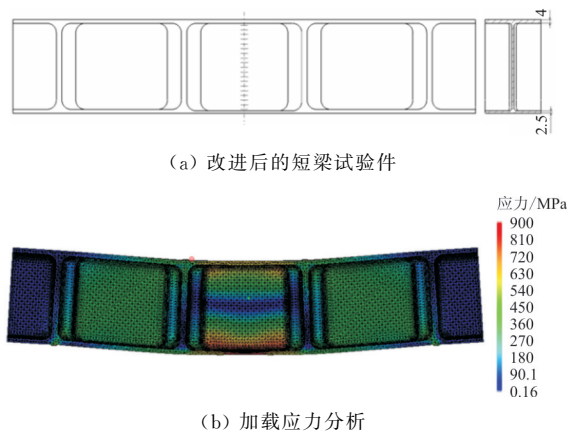


图 8 短梁试验件改进及加载应力分析
Fig. 8 Modified short EBW beam of TC4-DT and stress analysis

3.3.2 短梁组试验结果分析

根据 3.3.1 中的结果,调整部分参数,设计若干组短梁对比试验。短梁对称位置处的截面参数如图 9 所示,电子束焊缝被设计在短梁对称位置处。图 9 中,长度 A 和 B 的取值如表 5 所示。

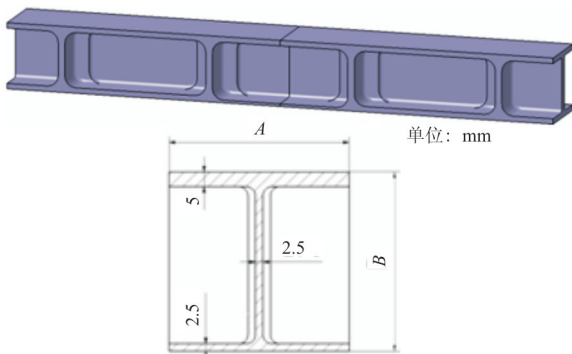


图 9 短梁试验件
Fig. 9 Dimension of EBW short beams

表 5 图 9 中成组短梁试验件参数表

Table 5 Dimension of EBW short beams as shown in Fig. 9

长度 A/mm	长度 B/mm
60	60
52	60
30	60

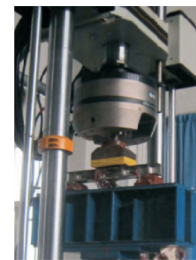
焊接结构疲劳破坏通常起源于焊接接头应力集中区,焊接接头中通常存在未焊透、夹杂、咬边、裂纹等焊接缺陷,焊接结构疲劳实际为细节部位疲劳问题^[16]。短梁成组试验如表 6 所示,从现场观察结果来看,焊缝表面划痕造成短梁过早失效,故获得的有效试验数据较为有限。

表 6 短梁成组试验

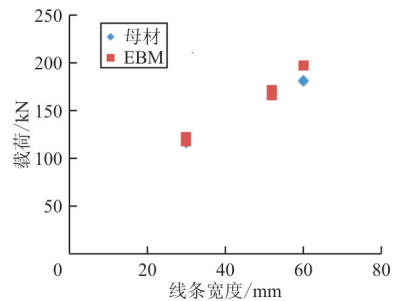
Table 6 Short beam group tests

试验类型	截面参数 A/mm	母材短梁数/件	EBW 短梁数/件
静力	30	3	3
	52	3	3
	60	3	3
疲劳	30	4	6
	52	6	7
	60	5	7

短梁静力试验照片及结果如图 10 所示。



(a) 试验照片



(b) 试验结果

图 10 短梁静力试验结果

Fig. 10 Ultimate strength of short beams

从图 10 可以看出:真空电子束焊接接头拉伸强度略高于母材。

52 mm 宽的缘条焊接试验件疲劳破坏情况如图 11 所示,正弦波加载、应力比为 0.1。

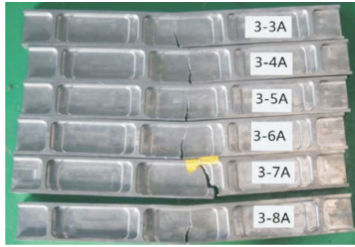


图 11 缘条 52 mm 宽电子束焊接疲劳试验件
Fig. 11 EBW short beam fatigue experiments with flange width of 52 mm

短梁下缘条最大循环应力为 650 MPa。按照 HB5287 成组试验法,缘条 52 mm 宽母材/EBW 短梁试验结果如表 7 所示。从工程应用角度讲,需要大量的试验数据作为依据,才能获得可信度高的曲线。在试验数据有限的情况下,可行的方法是测定具有 50%可靠度的中值疲劳寿命,并据此对焊接接头的疲劳性能进行评定^[17]。本文中,具有 95%置信度的 EBW 焊件短梁中值疲劳寿命为母材短梁中值疲劳寿命的 84.4%。

表 7 缘条 52 mm 宽短梁试验结果

Table 7 Experiments of short beams with flange width of 52 mm

应力水平 σ_{\max} /MPa	短梁类别	试件编号	疲劳寿命/次	中值疲劳寿/次	置信度(γ)/%
650	母材	1-1	57 613	98 169	95
		1-2	145 865		
		1-3	138 671		
		1-4	78 941		
		1-5	100 729		
		1-6	97 147		
650	EBW	3-3A	138 964	82 843	95
		3-4A	85 098		
		3-5A	55 757		
		3-6A	98 738		
		3-7A	113 010		
		3-8A	43 937		

3.4 焊接加强框工程应用

以短梁试验为基础,TC4-DT 钛合金加强框框段 EBW 焊接件随后完成了部段试验。目前,EBW 焊接加强框已经通过全机静力试验,并经千余飞行小时监测无异常。该方案同机械连接预案相比,减重比率约为 2.56%。

4 结 论

(1) TC4-DT 锻件 EBW 接头采用 730 °C 保温 3.5 h 的焊后热处理制度,可以大幅提升焊接接头性能。

(2) TC4-DT 锻件 EBW 接头的拉伸强度略高于母材,断裂延伸率与断裂韧度略低于母材,裂纹扩展率与母材相当。

(3) 真空电子束焊接技术可用于钛合金加强

框框段组合设计,是替代机械连接与潜弧焊焊接的有效手段,且质量收益显著。

目前,对钛合金加强框采用 EBW 技术的研究仍很有限,需进一步就分析方法和数值模拟加大研究力度。对于 EBW 焊接中表层气孔的修复问题,仍然缺乏统一的修复标准。对于 EBW 钛合金加强框在机型中服役的情况,也需要长期的跟踪研究。

参考文献

- [1] 都强,倪家强,刘艳梅,等. 潜弧焊极限厚度接头工艺试验[J]. 工具技术, 2016, 50(6): 76-79.
Du Qiang, Ni Jiaqiang, Liu Yanmei, et al. Research on limit thickness welding technology of submerged arc welding[J]. Tool Engineering, 2016, 50(6): 76-79. (in Chinese)
- [2] 牛春匀,冯振宇,程小泉,等. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 268-270.

- Niu Chunyun, Feng Zhenyu, Cheng Xiaoquan, et al. Airframe stress analysis and sizing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 268-270. (in Chinese)
- [3] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 140-143.
- Zhu Zhishou. Research and development of New-brand titanium alloys of high performance for aeronautical applications[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 140-143. (in Chinese)
- [4] James H Lee. Applications and development of EB welding on F-22[R]. SAE Technical Paper 972201. Warrendale: SAE International, 1997.
- [5] 郭灵, 王淑云, 林海. 先进航空材料及构件锻压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 292-293.
- Guo Ling, Wang Shuyun, Lin Hai. Forging techniques of advanced aeronautical materials and components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 292-293. (in Chinese)
- [6] 芦伟, 史耀武, 李晓延, 等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的拉伸性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1945-1948.
- Lu Wei, Shi Yaowu, Li Xiaoyan, et al. Tensile properties of electron beam welded thick TC4-DT joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9): 1945-1948. (in Chinese)
- [7] 王文杰. 准 β 热处理工艺对 TC4-DT 钛合金组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 33(1): 23-27.
- Wang Wenjie. Effect of quasi-beta heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 33(1): 23-27. (in Chinese)
- [8] 郭鸿镇, 姚泽坤, 魏迎光, 等. 等温精密锻造技术的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 570-576.
- Guo Hongzhen, Yao Zekun, Guo Yingguang, et al. Research progress of isothermal precision forging technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 571-576. (in Chinese)
- [9] Ralph I Stephens, Ali Fatemi, Robert R Stephens, et al. Metal fatigue in engineering[M]. 2nd ed. New York: Wiley Interscience, 2000: 401-425.
- [10] 阮立新. TA15 钛合金整体框等温精密锻件的试制研究[J]. 新技术新工艺, 2014(3): 19-23.
- Ruan Lixin. Research on trail production of equal temperature precision die forging of TA15 titanium alloy entity frame[J]. New Technology & New Process, 2014(3): 19-23. (in Chinese)
- [11] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945: 159-164.
- [12] E. A. 鲍利索娃, 陈石卿. 钛合金金相学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- E. A. Борисова, Chen Shiqin. Titanium alloy metallography[M]. Beijing: National Defense Press, 1986. (in Chinese)
- [13] 史建军, 马洪炯. TC4 钛合金电子束焊接接头的真空去应力退火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 120-122.
- Shi Jianjun, Ma Hongjiong. Performance research on vacuum destressing annealing of TC4 electron beam welded joint[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(9): 120-122. (in Chinese)
- [14] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册: 第 10 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 135.
- General editorial board of *Aircraft design handbook*. Aircraft design handbook: Volume 10[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 135. (in Chinese)
- [15] 朱知寿, 马少俊, 王新南, 等. TC4-DT 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 11-13.
- Zhu Zhishou, Ma Shaojun, Wang Xinnan, et al. Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(6): 11-13. (in Chinese)
- [16] 张彦华. 焊接结构疲劳分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 48-96.
- Zhang Yanhua. Fatigue analysis of welded joints[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 48-96. (in Chinese)
- [17] 李晓延, 巩水利, 陈俐. 钛合金薄板激光焊接头的疲劳性能[J]. 航空制造技术, 2007(增刊 1): 165-169.
- Li Xiaoyan, Gong Shuli, Chen Li. Fatigue performance of titanium alloy sheet for laser beam welded joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(S1): 165-169. (in Chinese)

作者简介:

李晓龙(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:结构设计。

潘建东(1980—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:结构设计。

乔忠生(1978—),男,学士,工程师。主要研究方向:结构设计。

张海(1980—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:金属材料。

(编辑:马文静)