

焊后热处理对 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头组织性能的影响

Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties in TC4-DT EB Joint

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 韩鹏 毛智勇 付鹏飞 王西昌

[摘要] 对 70mm 厚的 TC4-DT 损伤容限钛合金进行电子束焊接,焊后采用不同的热处理工艺,对两种状态下 TC4-DT 焊接接头及母材进行力学性能试验,并对母材、热影响区、焊缝进行显微组织分析。结果表明:(980℃/10min, AC+720℃/2h, AC) 双重退火更有利于提高 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的冲击强度,同时保持接头的抗拉强度与母材基本相当。

关键词: TC4-DT 钛合金 电子束焊接 显微组织

[ABSTRACT] 70mm thickness damage tolerance titanium alloy TC4-DT is welded by EB and different heat treatment is conducted after welding process. Mechanical properties of TC4-DT EB joint and the base are investigated, and the microstructure of the base, HAZ and welding zone are analyzed. The results show that double annealing under 980℃/10min, AC+720℃/2h, AC can enhance the impact toughness of TC4-DT EB joints and in the meanwhile keep the tensile strength close to that of the base.

Keywords: TC4-DT titanium alloy Electron beam welding Microstructure

Ti-6Al-4V ELI (TC4-DT) 合金是一种损伤容限型钛合金,目前在航空航天领域已经得到了广泛应用。TC4-DT 钛合金是在 Ti-6Al-4V 基础上开发的低间隙钛合金,其成分特征为合金元素允许波动范围较窄,杂质允许含量较低,从而带来较小的冶金缺陷、较高的塑性和韧性、较好的焊接性能及较长的使用寿命,在美国第 4 代战机 F-22、F/A-18E/F 等, Ti-6Al-4V ELI 钛合金的应用已经进入采用更大型整体模锻件的成熟阶段。F-22 战斗机 Ti-6Al-4V 钛合金零件占飞机总质量的 25.6%, Ti-6Al-4V ELI 又占其中的 73%。F-22 后机身整体式隔框(重 1590kg、长 3.8m、宽 1.7m、投影面积 5.53m²)是目前世界上最大的钛合金闭式模锻件^[1-4]。我国由于技术原因还无法整体锻造这么大的框类结构,因此电子束焊接成为 TC4-DT 钛合金构件整体制造的一项关键技术。对于 TC4-DT 钛合金电子束焊接,焊缝

组织、性能及焊后热处理对性能的影响,国内外很多学者进行了研究和报道。但是 60mm 以上的大厚度钛合金电子束焊缝组织、性能的研究报道很少。本文选用 70mm 厚 TC4-DT 钛合金锻件进行电子束焊接,焊接后采用两种不同热处理制度对焊接接头进行退火处理,研究两种热处理状态下焊接接头组织状态及接头力学性能,从而为实际零件的生产制造提供参考。

1 试验材料和试验方法

试验材料为 TC4-DT 钛合金锻件,锻件为双重退火供应状态, TC4-DT 钛合金锻件主要化学成分如表 1 所示。采用真空电子束焊接对 70mm 厚 TC4-DT 钛合金锻件进行焊接,电子束焊接采用对接接头形式,焊后对接头采用分别采用真空退火(700~750℃/2~4h, FC)和空气炉双重退火(980℃/10min, AC+720℃/2h, AC)。

对 TC4-DT 钛合金电子束焊接厚板进行取样,70mm 厚度 TC4-DT 钛合金电子束焊缝宏观形貌见图 1。为了全面研究电子束大厚板接头力学性能和显微组织,

表1 TC4-DT 钛合金主要化学成分 %

合金	Al	V	Fe	C	O	N	H
TC4-DT	5.80	3.90	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.13	≤ 0.03	≤ 0.01

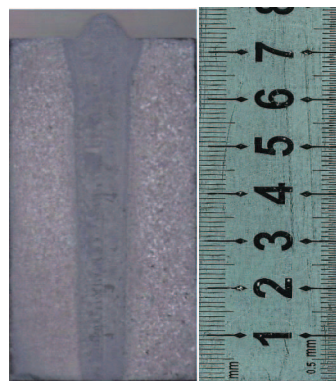


图1 79mm厚TC4-DT钛合金电子束焊缝宏观形态
Fig.1 Morphology of TC4-DT electron beam weld seam (70mm thickness)

本文采用分层取样的方式进行研究,即针对 70mm 厚电子束焊接接头,分为上、中、下 3 层进行取样,取样方式如图 2 所示。同时,对上、中、下 3 层试件分别截取试样,经过打磨、抛光、腐蚀制成金相样品,在光学显微镜下对母材,热影响区和焊缝各个区域的微观组织进行观察。

按照国家标准 GB/T 228-2002《金属室温拉伸试验方法》及 GB/T 229-1994《金属夏比冲击试验方法》,对 3 层试样进行拉伸及冲击强度测试。

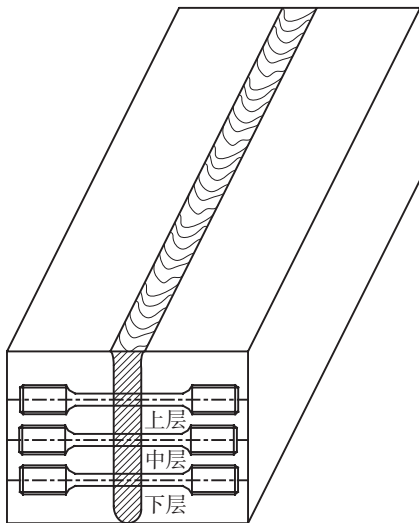


图2 大厚度电子束焊缝取样示意图

Fig.2 Samples from EB weld seam with large thickness

对焊接接头这两项指标的性能影响不大。另外,在本试验条件下,通过对焊接接头进行分层取样,可以发现焊缝上、中、下 3 层的拉伸强度、屈服强度、断面收缩率及延伸率基本相当,而焊缝下层的上述所有指标略高。

2.2 冲击试验结果分析

TC4-DT 钛合金母材及两种热处理状态下电子束焊接接头的室温冲击试验结果见表 3。由表 3 可知,经过一次退火后焊接接头的冲击强度远低于母材,只有母材的 44%。经过双重退火后焊接接头的冲击强度与母材相当,约为母材的 97.8%。

2.3 显微组织分析

对 70mm 厚度电子束焊缝显微组织进行研究时,需要对焊缝进行分层处理,将深熔电子束焊缝分为 3 层,分别以 1/4 熔深处、1/2 熔深处以及 3/4 熔深处作为上、中、下 3 层的中心线,同时,分别对焊缝上、中、下 3 层的焊缝、热影响区以及基体母材进行显微组织研究,研究结果发现,针对同一状态下的电子束焊缝上、中、下 3 个位置的焊缝显微组织状态一致,同样,焊缝上、中、下 3 层的热影响区以及母材基体显微组织也具有同样的规律。因此,在两种热处理状态下的焊接接头均选择接头中部区域进行显微组织分析和研究。

2.3.1 母材显微组织

图 3 为两种状态下街头母材显微组织,对经过两种热处理状态的接头试件的母材进行显微组织分析,发现

表2 母材及电子束焊接接头的室温拉伸试验结果

材料状态	取样位置	抗拉强度 R_m /MPa		规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa		断后伸长率 A %		断面收缩率 Z %		拉断位置
母材	母材	855.7		772.7		12.3		32.7		—
一次退火后焊接接头	焊缝上层	846.7	855.6	796.7	800.6	10.3	10.7	43.5	41.8	母材
	焊缝中层	848.3		788.3		10.0		36.7		母材
	焊缝下层	871.7		816.7		11.8		45.2		母材
双重退火后焊接接头	焊缝上层	835	847.9	758	770	13.3	12.8	46.5	44.9	母材
	焊缝中层	848.8		771		12.8		44.8		母材
	焊缝下层	860		781		12.4		43.3		母材

2 试验结果分析

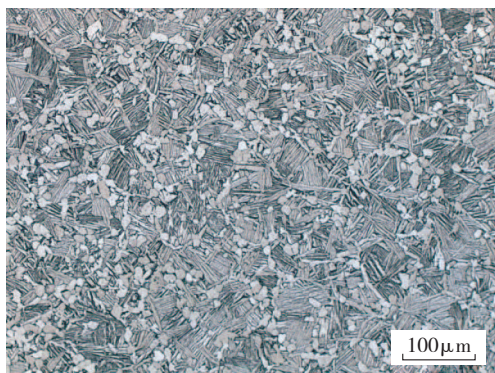
2.1 拉伸试验结果分析

TC4-DT 钛合金母材及两种热处理状态下电子束焊接接头的室温拉伸试验结果见表 2。由表 2 可知,经过一次退火后焊接接头的抗拉强度与母材相当,而屈服强度高于母材。经过双重退火后焊接接头的抗拉强度略低于母材,屈服强度和断后伸长率与母材相当,断面收缩率高于母材。总体来说,两种热处理状态下焊接接头的抗拉强度及屈服强度基本相当,说明两种热处理制度

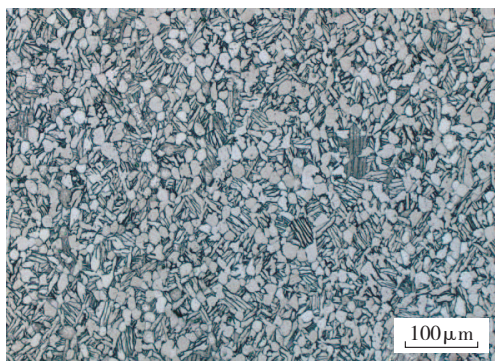
表3 母材及焊接接头的室温冲击试验结果

材料状态	取样位置	冲击吸收功 A_{KV} /J	
母材	母材	56.3	
一次退火后焊接接头	焊缝上层	27.6	24.8
	焊缝中层	24.4	
	焊缝下层	22.3	
双重退火后焊接接头	焊缝上层	50.7	55.1
	焊缝中层	52.8	
	焊缝下层	61.8	

两种状态下母材显微组织均为典型的双态组织结构,一次退火状态下接头母材组织特点是等轴的 α 颗粒镶嵌在 β 转变组织基体上, β 转变组织由高温 β 相转变而成,存在连续或近似连续的晶界 α 相,内部为由 $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ 相变形成的“三明治”结构,见图 3 (a),双重退火状态下接头母材组织的特点是图 3 (b)中等轴 α 相体积分数较图 3(a)多,使得原始 β 晶粒尺寸较小,其内部 α 板条变得更短。



(a)一次退火状态下接头母材组织



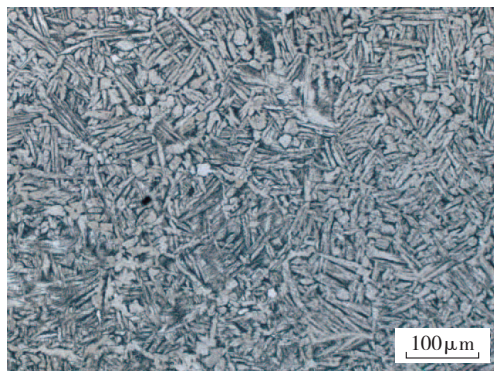
(b)双重退火状态下接头母材组织

图3 两种状态下接头母材显微组织

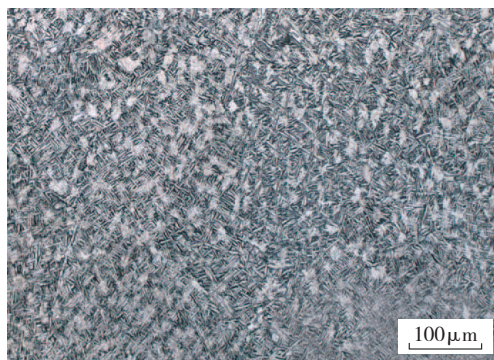
Fig.3 Microstructure of joint base materials at 2 states

2.3.2 热影响区显微组织

图 4 为两种状态下接头热影响区显微组织,从图中可以看出,热影响区仍保留了图 3 (a)母材区的原始 β 晶粒轮廓,但晶粒内部 α 片厚度变窄,形貌变得模糊。热影响区材料在瞬时升温 and 降温过程中, α 相发生了部分 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ 相变,形成图 4 (a)所示显微组织形貌。双重退火处理焊接接头热影响区显微组织与焊后 730°C 热处理有所差异:虽然等轴 α 仍然模糊而且晶界不光滑,但其周围 β 转变组织中 α 片却清晰可见,而且这些 α 片呈交错排列的编织状,说明双重退火使热影响区形成的 α' 相发生了完全分解,即 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$,在原来 α' 相的位置生成了 α 和 β 相,由于 α' 相形核位置的关系,使图 4 (b)中的 α 片呈



(a)一次退火状态下接头热影响区组织



(b)双重退火状态下接头热影响区组织

图4 两种状态下接头热影响区显微组织

Fig.4 Microstructure of HAZ in EBW joint at 2 states

现出与图 3 (b)母材区不同的编织状形态。

2.3.3 焊缝熔合区显微组织

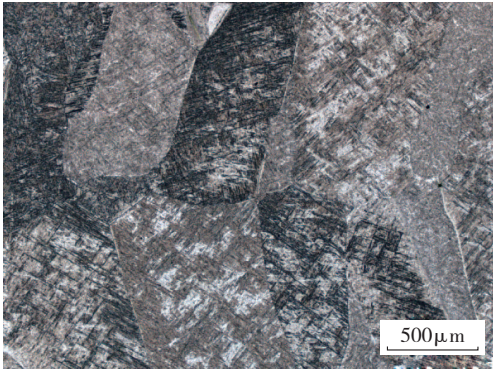
图 5 为两种状态下接头熔合区显微组织形貌,从图 5 (a)中可以看出,一次退火不会改变柱状晶组织特点,也没有改变柱状晶内马氏体相形貌。由一系列等轴晶和与等轴晶排列方向近似垂直的柱状晶组成,这些等轴晶和柱状晶内部均为针状马氏体相。

图 5 (b)是双重退火后焊缝熔合区仍呈柱状晶组织形貌特征,同一次退火熔合区组织相比,其最大不同是其柱状晶内部不再是马氏体相,而是交错排列的、长宽比较大的 α 相和相间其中的 β 相,这说明在双重热处理过程中 α' 相分解,使得原有柱状晶之间的衬度差别消失,柱状晶不容易辨认,但仍然存在。

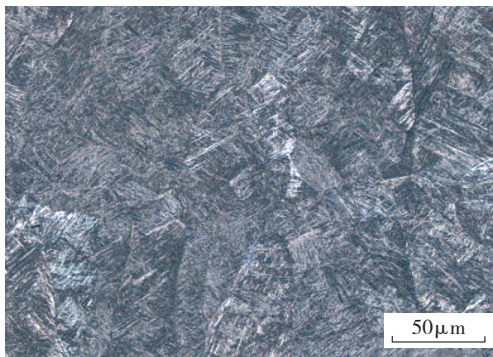
2.4 微观组织对性能的影响

TC4-DT 钛合金在同种电子束焊接工艺下,经过不同热处理过程,母材、焊缝及热影响区得到不同的微观组织,这是由于在焊接过程中不同区域温度的变化及随后的冷却速度不同造成的,而焊后热处理会改善这 3 个区域的组织形态。

TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的拉伸性能基本与母材相当,主要是由于在热影响区及焊缝区生成针状 α 马氏体,使接头的抗拉强度增加,从而使室温拉伸时



(a) 一次退火状态下接头熔合区组织



(b) 双重退火状态下接头熔合区组织

图5 两种状态下接头熔合区组织

Fig.5 Microstructure of weld zone in EBW joint at 2 states

断裂都发生在基体上。经过双重退火后,焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内 α' 相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的 α 相和相间其中的 β 相,这种组织状态基本接近母材基体,因此,双重退火后的焊接接头的冲击强度基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。而经过一次退火后的焊接接头组织不发生改变,焊接接头熔合区组织仍为马氏体组织。因此,可以解释一次退火后焊接接头的强度高于双重退火后的焊接接头,而塑性强度低于双重退火后焊接接头。

3 结论

(1) 70mm 厚 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头沿焊缝从上至下,焊缝组织具有良好的一致性,同时,焊缝上、中、下 3 层的抗拉强度、屈服强度以及冲击强度基本相当。

(2) 经过 700~750℃ /2~4h, FC 热处理制度退火的焊接接头组织状态未发生转变,熔合区组织仍由针状马氏体相构成;而经过 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 热处理制度双重退火的焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内 α' 相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的 α 相和相间其中的 β 相,这种组织状态基本接近母材基体,双重退火后的焊接接头的冲击强度

基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。

(3) TC4-DT 钛合金为一种损伤容限钛合金,在工程应用中,为了尽量维持 TC4-DT 钛合金电子束焊接构件具有较高的损伤容限性能,建议在实际应用中优先选用 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 的双重退火制度对 TC4-DT 钛合金焊接件进行退火。

参考文献

- [1] 王金友. 航空用钛合金. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [2] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展. 金属学报, 2002, 38(Z): 4-6.
- [3] 李成功. 航空材料概论. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 张晓峰. 钛合金的设计方法及其研究进展. 材料导报, 2005, 19(3): 1-3.

(责编 亦非)

(上接第 89 页)

参考文献

- [1] 李行志, 胡树兵, 肖建中, 等. TA15 钛合金电子束焊接接头不同区域的疲劳裂纹扩展行为研究. 航空材料学报, 2010, 30(1): 52-56.
- [2] 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, 2006, 26(11): 43-46.
- [3] 李清华, 胡树兵, 李行志, 等. TC4 钛合金焊接接头组织不均匀性与疲劳性能. 材料工程, 2010, (1): 62-68.
- [4] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. 电子束焊接 Ti-6Al-4V 接头断裂行为机制. 焊接学报, 2004, 25(4): 59-62.
- [5] 刘鹏涛, 赵秀娟, 刘昕, 等. 氢对 TC4 钛合金电子束焊接接头疲劳裂纹扩展速率的影响. 航空材料学报, 2011, 31(3): 52-55.
- [6] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. Ti-6Al-4V 电子束焊接焊缝区域精细组织特征. 航空材料学报, 2005, 25(3): 21-24.

(责编 亿霖)

(上接第 92 页)

- [3] 左铁钊, 肖荣诗, 陈铠, 等. 高强铝合金的激光加工. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 崔丽, 李晓延, 贺定勇, 等. 光纤激光-MIG 复合焊参数对钛合金焊缝成形的影响. 航空制造技术, 2009(9): 120-125.
- [5] 陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] Wang S H, Wei M D, Tsay L W. Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C. Materials Letters, 2003, 57: 1815-1823.
- [7] Li Z, Gobbi S L, Norris I, et al. Laser welding techniques for titanium alloy sheet. Journal of materials processing technology, 1997, 65: 203-208.
- [8] 陈新松, 姚伟, 巩水利. 钛合金激光填丝焊接. 中国激光, 2007, 34(Z): 235-238.
- [9] 许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 铝合金激光修饰焊缝成形特征. 应用激光, 2010, 30(5): 374-377.

(责编 亦非)