

钛合金薄板对接及锐角接电子束焊接

Electron Beam Welding of Titanium Alloy Sheet Butt and Acute Corner Joint

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司技术中心 陈 华 杨 磊 倪家强 刘新宇 赵忠华 张春光

[摘要] 针对 TC4 钛合金薄板对接接头和 TC1 钛合金薄板锐角接头进行电子束焊接工艺研究,得到 TC4 及 TC1 钛合金薄板的电子束焊接工艺参数。通过常规力学性能测试和 X 射线检查,TC4 钛合金对接焊缝的拉伸强度平均为 1050MPa,达到了母材强度的 95% 以上。试验结果证明,上述工艺参数得到的焊缝,满足设计及相关文件的要求。

关键词: 钛合金薄板 电子束焊接 锐角接头

[ABSTRACT] The electron beam welding of TC4-thin-sheet butt joints and TC1 acute corner joints is investigated, the electron beam welding parameters of them are acquired. The conventional mechanical test and X-ray examination indicate that the average strength of the TC4 butt joints is 1050MPa, more than 95% that of the body material. The experimental results show that the weld of the parameters meet requirements of the design and other documentation.

Keywords: Titanium alloy sheet Electron beam welding Acute angle joint

钛合金材料具有比强度和比刚度高、耐腐蚀性和冲击韧性好、较高温度环境下具有较好的承载能力^[1]等优点,在航空制造领域中被广泛采用。某型号机尾罩和大口盖零件,采用的就是 TC1 钛合金薄板和 TC4 钛合金薄板,连接方式为真空电子束焊接^[2]。

机尾罩材料为 TC1,厚度为 1.2mm,其中过渡缘条和机尾罩主体之间的焊缝接头处角度很小,为 15° 左右。焊缝要求外侧成型,焊缝位置距顶边距离较大,采用高压真空电子束焊有效焦距约为 500mm,能够达到焊缝的位置。因此 TC1 的焊接采用高压电子束焊接。锐角接头组对边的控制、锐角接头焊接程序的编制及焊接工艺参数的选择优化、电子束焊接聚焦电流的确定是完成该零件焊接的关键。

大口盖的材料为 TC4,厚度为 1mm。由于其厚度较小,且要求进行单面焊双面成型,焊后要进行超塑成型。由于零件为平板对接,故 TC4 的焊接采用中压真空电子束焊接。钛合金薄板电子束焊接边的加工方式选择与

间隙控制, $\delta 1.0\text{mm}$ 的钛合金薄板电子束焊接工艺参数优化是完成该零件焊接的关键。

1 试验

1.1 焊前准备

焊接接头的质量在很大程度上取决于待焊件的焊接区域清洁度,因此焊接试板、模拟件以及零件焊前必须保证焊接区域表面无任何油污、污染物、水印及氧化皮等污物,以避免产生气孔和裂纹等缺陷。因此焊件在酸洗后和焊接前需做如下处理:

(1) 采用不锈钢丝刷打磨待焊处,包括待焊件端面 and 焊接区域 50~60mm 处,至呈现金属光泽。

(2) 采用不起毛的白布蘸丙酮擦拭待焊处,同时擦拭工装夹具及工作台,直至白布不变色。

(3) 装卡待焊件,对接接头组对间隙 $\leq 0.05\text{mm}$,局部错边量 $\leq 0.02\text{mm}$; 角接接头组对间隙 $\leq 0.05\text{mm}$,局部错边量 $\leq 0.10\text{mm}$ 。

1.2 电子束焊接工艺

高压定枪式(电压为 150kV)真空电子束焊机,利用示教模式及变焦点方式进行焊接。高压电子束焊接可达性好,允许焊枪距离焊缝位置较远,因而能够实现一般焊接方法的焊炬、电极等难以接近部位的焊接。通过编制焊接程序控制电子束流、聚焦电流、焊接速度等的随时变化,可实现复杂接缝的自动焊接。TC1 钛合金,厚度为 1.2mm,由于焊缝接头处角度很小(为 15° 左右),焊缝要求外侧成型,焊缝位置距顶边距离较大,故 TC1 采用高压电子束焊接。

中压动枪式(电压为 60kV)真空电子束焊机,电子枪沿 Y、Z 轴方向运动,工件沿 X 轴运动。中压电子束焊接的束流较高压的柔和,容易控制实现焊缝的正反面成型,焊缝较宽且与母材过渡圆滑。TC4 钛合金,厚度为 1mm。由于其厚度较小,且要求进行单面焊双面成型,焊后要进行超塑成型。由于零件为平板对接,所以 TC4 的焊接采用中压真空电子束焊接。

1.3 电子束焊接工艺技术研究

根据电子束焊接的特点及零件的具体要求,电子束焊接工艺的主要技术关键包括以下几个方面。

1.3.1 高压电子束焊接工艺的技术关键

(1) 锐角接头组对边的研合;

(2) 锐角接头焊接程序的编制及焊接工艺参数的选择优化;

(3) 电子束焊接聚焦电流的确定。

1.3.2 中压电子束焊接工艺的技术关键

(1) 钛合金薄板电子束焊接边的加工方式选择与研合;

(2) $\delta 1.0\text{mm}$ 的钛合金薄板电子束焊接工艺参数优化。

1.4 试验过程

1.4.1 试验材料

TC1 ($\delta 1.2\text{mm}$) 钛合金和 TC4 ($\delta 1.0\text{mm}$) 钛合金的成分见表 1^[3]。

表1 TC4钛合金的化学成分 %

材料牌号	Ti	Al	Mn	V	Fe	Si	C	N	H	O
TC1	基	1.0~2.5	0.7~2.0	0	0.30	0.15	0.10	0.05	0.012	0.15
TC4	基	5.5~6.8	0	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20

1.4.2 试件的制备

(1) TC1 高压电子束试件的制备。

· 试片采用激光切割制成,长 300mm,宽 200mm。模拟件的尺寸长 500mm,宽 200mm。

· 利用与实际零件相同厚度的平板,通过简易工装使试片模拟零件状态,将试片装配出相应角度进行焊接。

(2) TC4 中压电子束试件的制备。

为了保证接头组对间隙,采用激光切割和剪板机切割两种方法,待切割完成后进行酸洗,再利用刮刀进行研合保证间隙。试片尺寸长 300mm,宽 150mm。模拟件的尺寸长 900mm,宽 200mm。

1.4.3 试件的焊接

焊前按照钛合金焊前准备的要求对试件进行焊前准备工作。

由于 TC1 零件的接头形式较为复杂,因此,试验时首先测试出最低点和最高点,分别摸索出两点的工艺参数。利用平板试片水平放置模拟零件的状态装卡在简易工装上,通过变化电子束焊接参数中的一个参数进行试验,分别摸索出最低点和最高点的焊接工艺参数。

TC1 钛合金模拟件的焊接程序分段示意如图 1 所示。零件的焊缝距焊枪的距离由大变小,再由小变大,且焊接程序中焦点和高度值均接近线性变化。在接头

的间隙研合合格后,按照最低点和最高点的工艺参数及焊接接头的轨迹用示教编程,程序只改变聚焦电流^[4]。在起弧点输入相应的聚焦电流开始焊接,沿焊缝每走 15mm 聚焦电流增加 2mA,直到 X1 位置;从 X1 到 X2 时,每走 15mm 聚焦电流增加 1mA;从 X2 到 X3 位置时聚焦电流保持不变;从 X3 到 X4 位置时,每走 15mm 聚焦电流下降 1mA;从 X4 到终点位置时,每走 15mm 聚焦电流下降 2mA,焊接工艺参数见表 2。

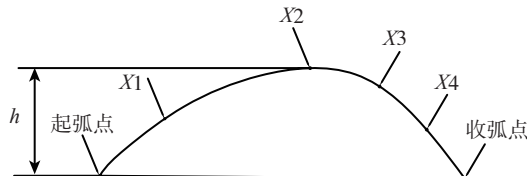


图1 零件的焊接程序示意图

Fig.1 Diagram of welding procedure

表2 TC1钛合金模拟件的电子束焊接参数

工艺	电压 U/kV	聚焦 I _f /mA	电流 /mA	速度 / (mm·s ⁻¹)
定位点焊	120	2109	2	20
封焊	120	2109	5	20
焊接	120	2109	11	20

由于 TC4 零件的接头为对接形式,采用中压电子束焊机进行焊接。首先将研合好的零件组对装配到焊接工装上,保证组对间隙不大于 0.05mm。根据待焊接头的具体位置及状态编制焊接程序,进行焊接束流、焊接速度、扫描幅值和聚焦电流等工艺参数优化。优化后的电子束焊接工艺参数见表 3。

表3 电子束焊接模拟件的参数

工艺	电压 /kV	电流 /mA	聚焦 /A	速度 / (mm·min ⁻¹)	扫描	振幅	频率 /Hz
定位焊	55	5	2.17	1500	双余弦	1.5	120
焊接	55	6	2.17	380	双余弦	1.5	120

1.4.4 焊接试件退火热处理

试件的退火热处理采用真空热处理炉进行。焊接试件清洗干净后,装炉进行热处理。退火热处理规范如下:

- (1) 真空度: $6.66 \times 10^{-2} \sim 6.66 \times 10^{-3} \text{Pa}$;
- (2) 加热: 620°C , 保温 120min;
- (3) 随炉冷却至 200°C 左右出炉。

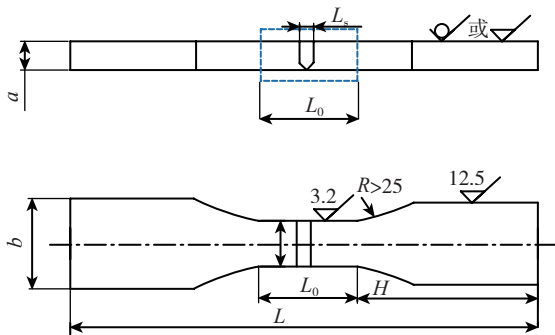
2 检测

2.1 焊缝目视和 X 射线检测

试件焊接后,按相应标准对焊接接头进行质量检验。首先进行焊接接头的目视检查,然后再进行 X 光检测。检查结果表明,焊接试件的所有焊缝均成形良好,无任何缺陷、表面无氧化现象。达到该标准中的一级焊缝质量标准。

2.2 TC4 焊缝静力拉伸性能检测

试验件在 X 射线检测合格后,进行退火消除应力热处理,按相关文件对其力学性能检测。按照图纸的技术要求,对接头主要检测拉伸性能。拉伸试样按照 Q/1ALH-1-2006 标准中对二级焊缝的检验要求制作,如图 2 所示。表 4 为该试验件的尺寸。



注: L_w 为焊缝宽度,尺寸按工艺规范要求

图2 拉伸试样的图形及尺寸

Fig.2 Size and graphics of tensile specimen

表4 试验件尺寸

基体金属厚度	试样厚度 a	工作部宽度 b	工作部长度 L_0	夹持部宽 B	夹持部 H	试样总长 L
≤ 6	等于基体金属厚度	15 ± 0.5	50	25	60	170
$<6\sim 10$	等于基体金属厚度	20 ± 0.5	60	30	70	200
$>10\sim 25$	等于基体金属厚度	25 ± 0.5	100	35	80	260

注:对于基体金属厚度超过 10mm 的接头,建议采用圆形试样。

经检测 TC4 钛合金母材在退火状态下的室温的拉伸强度平均为 1080MPa,延伸率为 12%。试验件与母材的测试数据见表 5。

3 试验研究结果分析

3.1 TC1 钛合金焊接试验结果分析

锐角接头处的研合状态以及束流较好的对中接缝是焊缝成形良好的关键因素。通过试验发现,焊接前采用激光切割、机械打磨方式对接头处进行贴模研合,避免焊缝正反面存在尖角分离导致烧穿,保证焊缝背面有一定的平面区域且组对间隙 $\leq 0.05\text{mm}$,焊缝正面错边

表5 试验件抗拉强度数据

件号	项目	
	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%
1	1039	15.0
2	1043	15.5
3	1059	16.0
4	1047	18.0
5	1065	17.5
6	1049	16.0
母材	1080	12.0

量 $\leq 0.10\text{mm}$, 然后进行酸洗、装配,以保证焊缝的焊接质量。

在试验过程中,由于试片形状的特殊性,在焊接过程中焊接束流很大,试片反射光线强导致不易观察束流是否对中,因此需要采用小束流进行对中。焊接时从最低点到最高点再到最低点,分段线性变化聚焦电流可以满足零件的焊接要求。

TC1 锐角角接焊缝焊后目视检查合格后,按 CAQB903-013 标准的规定进行焊缝质量检验,焊缝质量合格。

3.2 TC4 钛合金焊接试验结果分析

由于 TC4 板材厚度较薄,采用电子束焊接对焊接组对间隙要求严格,为了实现很好的焊接,试验要求研合后的间隙为 $\leq 0.05\text{mm}$,以避免焊接时产生咬边、烧穿等缺陷。采用剪板机切割的试片研合后的组对间隙不能满足焊接要求,容易产生烧穿等缺陷。经过多次反复试验,最终确定模拟件的最佳切割方式是采用激光切割。

从表 5 数据可以看出,所有的力学性能符合图纸及相关标准要求,焊缝的抗拉强度平均值为 1050MPa,达到了母材强度的 95% 以上^[5]。

4 结论

经过大量的试验和验证,得出如下结论:

(1)对于 $\delta 1.0\text{mm}$ 的 TC4 钛合金对接接头采用激光切割方式制备接头,能够很好的保证组对间隙,采用带扫描程序焊接能大大减少气孔及裂纹的产生,保证焊接接头的质量。

(2)采用中压电子束焊接 $\delta 1.0\text{mm}$ 的 TC4 钛合金对接焊缝能够保证焊接质量,焊接接头的拉伸强度平均为 1050MPa,达到了母材强度的 95% 以上,符合图纸及技术文件的要求。

(3)对于 $\delta 1.2\text{mm}$ 的 TC1 钛合金角接接头采用激光切割方式、贴模研合制备接头,采用示教模式及变焦点焊接程序能够焊接出符合图纸及文件要求的零件。

(下转第 121 页)

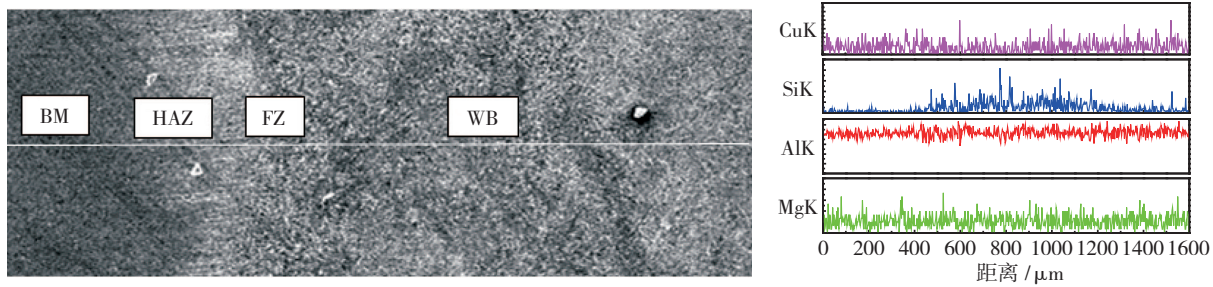


图5 焊接接头ESEM能谱线扫位置与谱线图

Fig.5 ESEM line scanning position and spectral line diagram of welding joint

晶体中的硅就会使得 Si 的含量就会下降。

元素含量的变化在一定程度上也反映显微组织的变化。从结晶学的角度分析,较理想的状态是溶质元素均匀地分布在固溶体之上,这种形态的显微组织是均匀的,此时的力学性能才是最好的。由于焊接成形过程的特殊性,使得各元素的含量一定存在着某种程度的偏析,偏析容易形成缺陷,成为焊接接头的薄弱环节,拉伸断裂往往断裂于此,因此,成分分布状态和接头性能是存在一定关系的。不过从本文扫描结果来看,焊缝偏析现象不明显,只有 Si 元素存在一定的偏析现象。

4 结论

本文针对某一新型铝合金 T 形结构双激光束双侧同步焊接接头的微观组织进行了分析。初步得出如下结论:

(1) 通过金相观察,焊缝中不同区域组织形态特征明显,且与母材组织有显著差别。

(2) 接头存在两个明显的熔合区,且两个熔合区组织性能有差异。

(3) 从线扫描结果看出 Al、Cu、Mg 元素在接头区域内变化比较均匀, Si 元素在焊缝中略有增加。

(4) 初步研究表明,本文所研究的新型铝合金对激光深熔焊接具有较好的工艺适应性,但对于蒙皮桁条 T 形连接结构的双激光束双侧同步焊接,还有诸多问题有待深入研究。

参考文献

- [1] Norris I. Laser welding developments. *Welding Review*, 1998(4): 20-22.
- [2] 肖荣诗,陈铠,左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展. *应用激光*, 2002, 22(2): 206-208.
- [3] 陈彦宾. 现代激光焊接技术. 北京: 科学技术出版社, 2005.
- [4] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接. 北京: 机械工业出版社, 2006: 272-182.
- [5] 张志勇,田志凌,彭云. 铝合金先进焊接工艺. *焊接*, 2003(7): 5-9.
- [6] 杜汉斌,胡伦骥,胡席远. 激光填丝焊技术. *航空制造技术*, 2002(11): 60-63.

(责编 深蓝)

(上接第 114 页)

参考文献

- [1] 张小明. 钛及钛合金的焊接. *稀有金属快报*, 2005(5): 17-20.
- [2] 董宝明,郭德伦,张田仓. 钛合金焊接结构在先进飞机制造中的应用与发展 [A]// 航空、航天焊接国际论坛论文集 [C], 2004, 447-453.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 (4 卷). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 周琦,刘方军,关桥. 电子束流的动态焦点和深穿极值效应. *焊接学报*, 2004(4): 19-23.
- [5] 胡礼木. TC4 钛合金电子束焊接接头的性能研究. *陕西工学院学报*, 1997, 13(4): 43-47.

(责编 亦非)

(上接第 117 页)

4 结束语

本文以航空机床产品为例,研究其形态元素及其语意特征,并通过实验测试获得机床的语意认知集合,根据统计规则和推理公式推导出机床样本的形态语意特征,在此基础上构建了机床形态的形态语意空间,这不仅可以帮助设计师快速定位设计方向,同时也利于设计师了解用户的需求。这种语意空间的构建方法也可推广应用应用到其它产品的形态语意研究中去。

参考文献

- [1] 高敏,谢庆森. 工业艺术造型设计. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 余隋怀,苟秉宸,于明玖. 设计数学基础. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [3] 陈慎任. 设计形态语意学. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] Chan C S. An examination of the forces that generate a style. *Design Studies*, 2001, 22 (4): 319-346.
- [5] 盛骤. 概率论与数理统计 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用. 北京: 科学出版社, 2006.

(责编 小城)