

# 异种状态 TC4 钛合金电子束焊接性能分析

陈新民<sup>1</sup> 耿雅辉<sup>2</sup> 何迎春<sup>2</sup> 张益坤<sup>2</sup> 顾 皞<sup>2</sup>

(1 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

(2 首都航天机械公司,北京 100076)

**文 摘** 针对相对疏松的铸造钛合金和相对密实的锻造钛合金的焊接问题,开展了两种状态的 TC4 钛合金电子束焊接工艺研究,对比了不同焊接参数对焊接质量的影响。研究表明,采用方波扫描可以较好地实现铸造钛合金与锻造钛合金的连接,焊缝成形良好,内部无缺陷;焊接接头力学性能分析表明,拉伸断裂位置全部在铸件母材区一侧。实焊结果证明,电子束焊接可以实现异种状态 TC4 钛合金焊接的工程化应用。

**关键词** 电子束焊接,异种材料状态,钛合金

中图分类号: TG406

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.009

## Property of Electron Beam Welded Joints in Different States of TC4 Alloy Plates

CHEN Xinmin<sup>1</sup> GENG Yahui<sup>2</sup> HE Yingchun<sup>2</sup> ZHANG Yikun<sup>2</sup> GU Hao<sup>2</sup>

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract** In order to investigate the welding property of relatively loose casted and comparatively dense-grained forged TC4, the electron beam weld processing of two states of TC4 alloy plates was studied. The influence of different scanning wave form on the weld seam formation was also analyzed. The results show that, with different scanning wave forms, the cross section appearances of the weld seam of the casted and forged TC4 are all shaped. And there was also no oxidation in the joint. The tensile property testing of welded joint indicated that the fracture of joint was in the side of casted TC4. It was shown that welding structure of different states TC4 on the engineering application could be achieved by electron beam weld.

**Key words** Electron beam weld, Different states, TC4 alloy

### 0 引言

钛合金具有比强度和比模量高,高温性能好,抗蚀性能优异等特点,已经成为航空航天产品的重要结构材料。由于钛合金原材料成本高,机械加工难度大,一般采用铸造、锻造或粉末冶金等近静成形的工艺方法进行制造,但需要解决铸造与锻造等不同状态下的钛合金进行焊接问题。

钛是一种活性元素,易与氧、氮等发生反应,钛合金焊接时易产生接头脆化、裂纹等缺陷<sup>[1-3]</sup>。电子束焊接在真空下进行,避免了钛合金焊接接头与氧、氮的反应;同时,电子束焊接能量密度集中,焊接热输入量较小,可以减少焊接热影响区 $\beta$ 晶长大程度,能够保证焊接接头良好的力学性能,在钛合金材料连接上的应用广泛<sup>[4-8]</sup>,是异种材料状态钛合金焊接的首选。

铸造 TC4 与锻造 TC4 相比,在材料密度、晶粒度、组织组成等均有所不同,铸造 TC4 材料的组织疏松、杂质较多,而锻造 TC4 材料组织密实,电子束焊接时会产生焊缝成形的不均匀,并且铸造组织在真空环境下焊接材料中杂质挥发剧烈,焊缝成形不好,需采用合理的工艺控制。

本文研究了 TC4 钛合金在铸造和锻造两种状态下的电子束焊接工艺,并探讨了异种状态焊接结构件的工程化应用前景。

### 1 工艺焊接试验

为便于比较,采用两种状态钛合金试片,对不同工艺方法下的焊接特性和力学性能影响进行对比研究。从 XX 铸造产品与 XX 锻造产品中制作各 2 件熔敷焊的平板试片,确定基本焊接规范。开展了多组铸造和锻造两种状态平板对接接头焊接的比较试验。

收稿日期:2015-06-08

作者简介:陈新民,1972 年出生,研究员,主要从事飞行器设计方面的研究工作。E-mail:13501075785@163.com

## 1.1 试验材料

铸造与锻造 TC4 钛合金焊接试片的厚度为 3 mm,焊接前采用酸洗去除钛合金表面的杂质。锻造 TC4 钛合金的主要成分见表 1,室温力学性能见表 2。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

wt%								
Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	余量

表 2 TC4 钛合金的室温力学性能

Tab.2 Room temperature mechanical properties of TC4 titanium alloy

热处理状态	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冷弯角度/(°)
退火	900	10	30
—	淬火、时效	1080	8

## 1.2 试验设备

表 3 3 mm 厚度 TC4 试板熔敷焊与对接焊电子束焊接参数和焊缝成形

Tab.3 Welding parameters and weld formation in 3 mm thickness TC4 test plate

焊工	试样	加速电压 /kV	电子束流 /mA	焊接速度 /mm·min <sup>-1</sup>	焦点位置	扫描参数	焊缝成形
电熔敷焊	1#	80	25	500	表面	圆形波扫描,扫描频率 18Hz,无修饰焊	成形光滑,两侧有轻微咬边
	2#	80	25	500	表面	方形波扫描,18 Hz,加 30 mA 修饰焊,上散 60 格	成形光滑,焊缝较宽,无咬边
	3#	80	25	500	表面	圆形波扫描,扫描频率 18Hz,无修饰焊	成形光滑,两侧有轻微咬边
对接焊	4#	80	25	500	表面	圆波扫描,扫描频率 18Hz,无修饰焊	成形光滑,铸造侧有明显咬边
	5#	80	25	500	表面	方波扫描,扫描频率 18Hz,无修饰焊	成形光滑,轻微咬边

## 2 结果与分析

### 2.1 焊接参数对焊缝表面质量的影响



(a) 方波扫描



(b) 圆波扫描

图 1 3 mm 厚铸造与锻造 TC4 试板电子束对接焊缝

Fig.1 Electron beam butt welding seam of 3 mm thickness casting and forging TC4

针对钛合金材料的特点,焊接使用了不同的扫描波形电子束焊接参数。扫描电子束能够对熔池进行充分搅拌,将熔池中成长的晶粒打碎,增多形核中心,从而细化晶粒,提高焊缝强度,同时电子束扫描还有助于减少气孔的产生。对于组织疏松的地方,通过电子束扫描可以使组织重新结晶,夹杂物挥发,提高接头成分一致性,组织均匀细化,起到电子束熔炼、提纯

所用电子束焊机为 THDW-30 型号中压型真空电子束焊机,其主要技术参数为:加速电压调节范围:60~80 kV;电子束流:450 mA,真空室尺寸:1.8 m×1.8 m×6 m;电子束功率:30 kW,最大焊接深度:≥35 mm(不锈钢),真空度:5×10<sup>-2</sup> Pa;设备总功率:200 kW。

### 1.3 试验参数

先分别进行单状态材料平板试板的熔敷焊接,确定基本的焊接参数。根据焊缝正面和背面成形情况,选择焊缝外观成形好及 X 射线检查焊缝内部缺陷少的焊接参数,然后进行正式对接试板的焊接。

铸造 TC4 和锻造 TC4 正式试板模拟实际产品的接头形式采用平板对接焊接方式。铸造和锻造 TC4 试板对接焊接前将对接面铣加工平整。根据熔敷焊接的工艺参数和效果,筛选确定了对接焊的工艺参数,焊接工艺参数和焊缝成形见表 3。

图 1 是用熔敷焊试验确定的焊接参数进行铸造与锻造 TC4 对接焊的试板。

作用。这一点对于杂质含量较多、材质相对疏松的铸造材料效果更加明显。从实焊效果看,由于在真空中焊接,钛合金电子束焊接焊缝表面为银白色,无氧化色,同时焊缝的鱼纹鳞均匀分布,无焊瘤飞溅。采用圆波扫描时焊缝的一侧有明显咬边,分析原因是采用圆波焊接时能量在焊缝两侧集中叠加,产生熔蚀沟槽(咬边)。而采用方波扫描时能量相对均匀,焊缝两

侧只有轻微咬边。为减轻钛合金扫描焊接时焊缝的咬边情况,正式焊接后需增加低功率密度的表面修饰焊,以改善焊缝成形,消除咬边并与焊缝两侧圆滑过渡。图2是修饰焊后焊缝形状放大图。

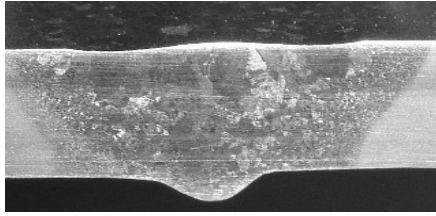


图2 修饰焊后焊缝形状  
Fig.2 Weld shape after modification

表4 3 mm 厚度 TC4 试板电子束焊接接头拉伸测试结果

Tab.4 Tensile test results of 3 mm TC4 test plate for tensile test of electron beam welded joints

试样编号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%	断裂位置	试样编号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%	断裂位置
1#-1	960	2.5	熔合线区	4#-1	885	4.0	熔合线区
1#-2	950	3.0	熔合线区	4#-2	825	2.5	熔合线区
1#-3	985	3.0	熔合线区	4#-3	880	2.5	熔合线区
2#-1	960	5.0	焊缝区	5#-1	930	6.0	母材区
2#-2	925	4.5	焊缝区	5#-2	910	6.0	母材区
2#-3	975	6.0	焊缝区	5#-3	860	5.5	母材区
3#-1	875	2.5	母材区				
3#-2	885	5.0	母材区				
3#-3	905	4.0	母材区				

### 2.3 拉伸断口分析

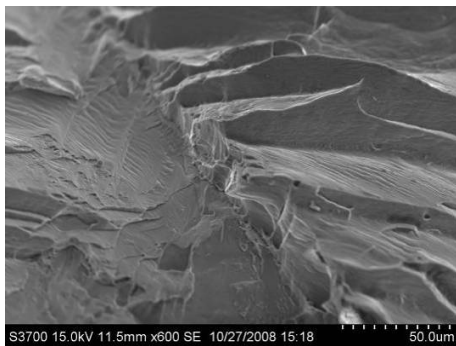
对接接头拉伸试样基本上断裂在母材上,宏观上观察拉伸断口,断口区域有明显的颈缩现象,断口表面呈纤维状粗糙不平,且灰暗无明显的金属光泽,外侧有撕裂棱,说明试样在拉伸断裂前经过了充分的塑

### 2.2 力学性能分析

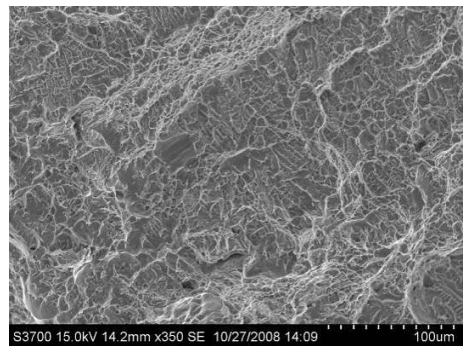
表4是铸造与锻造钛合金熔敷焊及铸锻钛合金之间焊接力学性能结果。可以看出,不管是熔敷接头还是对接接头,只要焊缝的表面质量好,接头的强度系数都达到90%以上。锻件TC4比铸件TC4的接头拉伸强度高。铸造TC4与锻造TC4对接焊接头的拉伸断裂位置全部在铸件一侧。4#试样由于焊缝铸造侧有明显咬边,拉伸强度有所降低。采用修饰焊和未采用修饰焊的接头拉伸强度变化不大,但是采用修饰焊的接头由于热输入量加大,接头软化区增加,延伸率有所提高。

性变形。

任选一组规范的断口进行高倍观察,断口剪切唇和纤维区呈现以滑移为主加韧窝的断裂模式,显现出良好的塑性,见图3,属于塑性断口,韧性断裂。



(a) 断口塑性滑移



(b) 韧窝断口

图3 断口形貌

Fig.3 Fracture surface after tensile testing

### 2.4 金相组织分析

铸造与锻造TC4钛合金电子束焊对接接头选取两个截面进行金相分析,见图4。铸造TC4母材显微组织由 $\alpha+\beta$ 两相组成,为典型的片层组织特征,晶粒比锻造TC4母材粗大[图4(d)]。电子束焊缝为晶

粒内析出大量的细针状 $\alpha'$ 相, $\alpha'$ 相为过饱和的针状马氏体组织。其原因是电子束焊时,处于高温的 $\beta$ 相快速冷却时,原始的 $\beta$ 晶粒再结晶形成针状的 $\alpha'$ 相组织,焊缝形成网篮状马氏体组织[图4(b)]。

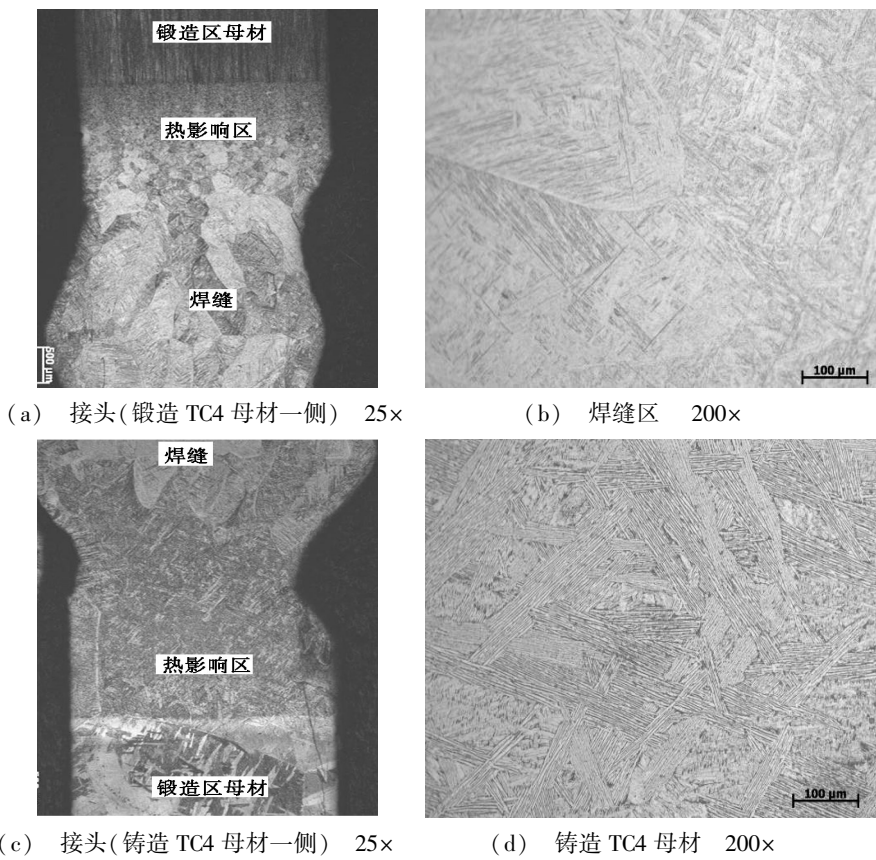


图4 铸造与锻造 TC4 钛合金电子束焊对接接头金相组织

Fig. 4 Microstructure of butt welded joint of TC4 titanium alloy by casting and forging

热影响区是由初生的  $\alpha$  相和针状马氏体组成, 焊接过程中以熔合区为中心的温度梯度的存在造成热影响区组织分布的不均匀性, 热影响区靠近熔合线部分较之远离熔合线的区域晶粒更为粗大, 针状马氏体数量多且更密集[图 5(a)(c)]。

## 2.5 接头显微硬度分析

对铸造 TC4 与锻造 TC4 对接焊接头区域进行显微硬度(HV0.2)测试, 结果见表 5。4# 试样和 5# 试样各取 2 个截面, 硬度位置见图 5。

表 5 铸造 TC4 与锻造 TC4 电子束焊对接接头显微硬度测试结果

Tab. 5 Microhardness test results of TC4 and forged TC4 electron beam welded joint

试样	测试部位	试验结果(HV <sub>0.2</sub> )			试样	测试部位	试验结果(HV <sub>0.2</sub> )		
		1 点	2 点	3 点			1 点	2 点	3 点
4#-1	锻造母材区	316	307	319	5#-1	锻造母材区	309	301	314
4#-1	热影响区 (锻造母材区侧)	314	314	304	5#-1	热影响区 (锻造母材区侧)	327	314	330
4#-1	焊缝区	345	339	333	5#-1	焊缝区	335	318	321
4#-1	热影响区 (铸造母材区侧)	332	314	334	5#-1	热影响区(铸造母材区侧)	306	333	333
4#-1	铸造母材区	312	331	340	5#-1	铸造母材区	322	318	302
4#-2	锻造母材区	314	310	310	5#-2	锻造母材区	308	311	320
4#-2	热影响区 (锻造母材区侧)	311	309	316	5#-2	热影响区 (锻造母材区侧)	304	306	315
4#-2	焊缝区	328	326	345	5#-2	焊缝区	333	355	318
4#-2	热影响区 (铸造母材区侧)	337	328	324	5#-2	热影响区 (铸造母材区侧)	-	-	-
4#-2	铸造母材区	312	321	325	5#-2	铸造母材区	289	275	274

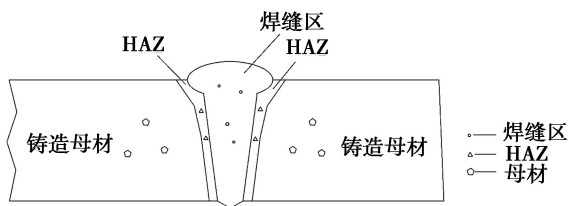


图5 硬度测试位置示意图

Fig. 5 Diagram of hardness test position

由表5可知,焊缝显微硬度高于基体母材。焊缝和基体硬度值之间的差异,与其组织状态密切相关。焊接在快速冷却条件下进行,发生马氏体转变, $\beta$ 相向针状 $\alpha'$ 相转变,而由于针状 $\alpha'$ 相具有很高的位错密度和孪晶,使得焊缝硬度提高。

从硬度测试结果看出,不同的焊接参数对接头区域的硬度影响不明显。锻造母材区和铸造母材区的硬度差值不大,但是焊缝区的整体硬度值比两侧母材区高。硬度的测试值间接地反映接头各区域强度的对比,这也证明了拉伸断裂位置在母材区,能获得高强度比的铸造与锻造TC4钛合金电子束焊对接接头。

### 3 工程化应用分析

根据铸造与锻造TC4钛合金平板对接接头试板焊接结果,进行了某型号壳体(锻造)和后段(铸造)的电子束焊接,壳体与后段焊接区的厚度为3mm(图6)。



图6 壳体与后段焊缝

Fig. 6 Shell and rear section weld

由于壳体铸造变形和后段加工的误差,导致壳体与后段装配后接头存在错边,为了保证错边焊缝充分

焊透,采用束流偏向厚度较大一侧焊缝进行焊接。焊接采用扫描电子束焊接方式,进行定位焊、小束流弥缝焊、正式穿透束流焊接。正式焊接后采用修饰焊保证焊缝表面成形。焊后产品如图7所示,焊缝成形良好。围绕该新产品开展了相关性能试验,并完成了飞行试验。综合试验结果表明,该种工艺方法具有很好的适应性。

### 4 结论

(1) 铸造TC4与锻造TC4材料使用电子束扫描焊接等工艺措施,能有效细化焊缝晶粒,改善接头性能,减少内部气孔,焊缝表面成形良好;

(2) 铸造TC4与锻造TC4材料真空电子束焊接接头的强度系数达到90%以上。拉伸断裂位置在铸造母材区域,断口形貌属于塑性断口,韧性断裂;

(3) 焊缝组织为网篮状马氏体组织,热影响区组织由初生的 $\alpha$ 相和针状马氏体组成;

(4) 焊缝区显微硬度略高于基体母材,采用修饰焊可消除咬边缺陷。

### 参考文献

- [1] 赵红凯,王春亮,任飞,等. 钛合金焊接的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5A): 342-348.
- [2] 董宝明,郭德伦,张田仓. 钛合金焊接结构在先进飞机中的应用及发展[J]. 航空材料学报, 2003, 23(Suppl): 447-453.
- [3] 董宝明,张田仓,郭德伦. 俄罗斯飞机制造中钛合金先进焊接技术[J]. 稀有材料金属与工程, 2005, 34(Suppl. 3): 470-474.
- [4] 张翥,于洋,惠松骁,等. TB10钛合金的焊接组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(Special 1): 183-187.
- [5] 胡伟民,李国林,刘希林,等. 钛合金厚板窄间隙TIG焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 21(Special 1): 48-53.
- [6] 陈华,杨磊,倪家强,等. 钛合金薄板对接及锐角接电子束焊接[J]. 航空制造技术, 2013(1/2): 112-121.
- [7] 陈玉华,谢吉林,郑南松,等. 扫描波形对TC4钛合金电子束焊接焊缝成形的影响[J]. 南昌航空大学学报, 2014, 28(1): 39-43.
- [8] 陈华,杨磊,倪家强,等. 大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 107-112.