

电子束焊接热输入对 Ti-6Al-4V 组织结构的影响

吴会强, 冯吉才, 何景山, 张秉刚  
(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 利用 SEM、TEM 和显微硬度等方法对 TC4 的接头焊缝区域进行了分析。结果发现焊接热输入能量的大小与分布模式对焊缝晶粒尺寸有重要影响, 焊接热输入为 48.0 kJ/m 表面聚焦模式时, 焊缝组织较为均匀, 晶粒尺寸为 350 μm。随着焊接热输入的逐渐增大, 焊缝结晶形态由等轴晶向柱状形态演化, 粗大的针状 α+β 相和马氏体 α' 相从单向长针状转换为多向短针状。电子束的热输入模式亦对焊缝金属中的位错分布及形态有较大影响, 随着热输入的增大, 焊缝中产生的位错密度逐渐增大, 但与母材相比仍然较少。焊缝处显微硬度随电子束焊接热输入模式的不同会有明显的变化, 这可能与焊缝中形成针状 α+β 相的形态及分布方式有关。焊接热输入为 48.0 kJ/m 表面聚焦模式时显微硬度的分布较为均匀化(404—480HV)。

**关键词:** 电子束焊接; Ti-6Al-4V; 热输入模式; 组织结构

**中图分类号:** TG456.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)05-41-04



吴会强

0 序 言

由于 Ti-6Al-4V 具有比重轻、比强度高、耐腐蚀性和高温抗蠕变性能等特点, 使之早已成为航天航空工业和电力工业中最具魅力的材料。采用 TIG, MIG, PAW(等离子弧焊)等方法焊接此种材料时, 由于保护气氛、纯度及效果的限制, 带来接头含氧量增加, 焊后易在焊缝和热影响区出现原始 β 相的粗大晶粒和 β 相的低温转变产物 α' 相, 即针状马氏体, 使焊接的塑性和韧性大大下降<sup>[1, 2]</sup>。

电子束焊接具有能量密度高, 加热范围窄, 加热冷却速度极快和显著的锁孔效应特征, 这使得电子束焊接过程和普通熔化焊有明显的不同<sup>[3]</sup>。国内外很多研究学者对钛合金的电子束焊接特性进行了较为广泛深入得研究, 然而电子束焊接热输入模式与焊缝金属微观组织结构的关系鲜见报道<sup>[4~8]</sup>。文中深入研究了电子束焊接过程中聚焦位置及热输入

分布等不同热输入模式对 Ti-6Al-4V 组织结构演化的影响, 分析了接头区域的显微组织结构特征、形成机理及产生这些变化的原因。这对合理选择焊接参数, 有效地控制 Ti-6Al-4V 接头区域显微组织的变化, 有重要的理论及现实意义。

1 试验材料及方法

试验材料为 Ti-6Al-4V 热轧板材, 原始组织为 α+β 相。母材的化学成分及其热物理性能参数如表 1 所示。焊接试样尺寸为 60 mm×18 mm×1.5 mm。试验采用从法国 TECHMETA 公司引进的 MEDARD45 型脉冲电子束焊设备, 进行电子束熔透焊接。试验采用的焊接工艺参数见表 2。焊后在焊接接头区域利用线切割制取试样, 经打磨、抛光、腐蚀制备成一系列的金相试样。在光学显微镜及扫描

表 1 Ti-6Al-4V 材料的化学成分(质量分数, %)及热物理性能参数  
Table 1 Chemical composition and thermophysical mechanical properties of Ti-6Al-4V

C	O	N	H	Fe	V	Al	Ti	
0.01	0.19	0.05	0.0016	0.16	4.08	6.51	余量	
密度	泊松比	弹性模量	比热	热膨胀系数	热导率	屈服强度	抗拉强度	延伸率
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\nu$	$E / \text{GPa}$	$C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\alpha / (10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1})$	$\lambda / \text{W}(\text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\delta(\%)$
4440	0.3	103.4	611	9.1	6.8	967	1043	17.0

电镜下, 对焊缝附近区域组织进行观察。用线切割在母材及焊缝区域切取薄片磨制成厚度约为 50 μm

的薄片试样,通过电解双喷法减薄制成薄膜试样。电解双喷的溶液为:6%高氯酸+34%正丁醇+60%甲醇,电解液控制在 293 K,最后制成直径不大于 3 mm 的透射电镜试样。试样放在 Philips CM-12 型透射电镜下,观察焊缝区域显微结构特征。进行显微硬度测定时,试验载荷 200 g,加载时间 10 s。

表 2 试验用焊接工艺参数

Table 2 Experimental welding parameter

编号	电子束流 $I_f/\text{mA}$	加速电压 $U/\text{kV}$	聚焦电流 $I_f/\text{mA}$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	焊接热输入 $E/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1})$
01	3	55	2650	8	20.6
02	5	55	2620	6	34.4
03	7	55	2660	8	48.0
04	10	55	2660	10	68.8

2 试验结果与分析

2.1 热输入模式对焊缝晶粒尺寸的影响

Ti-6Al-4V 在室温下的母材组织为密排六方点阵结构的  $\alpha$  相和少量体心立方点阵结构  $\beta$  相的机械混合物,晶粒细小均匀,如图 1 所示。

试验中所采用的四种不同电子束焊接热输入模式下,焊缝外观都成形良好,色泽正常,焊缝余高很小,无咬边、凹陷、表面裂纹等缺陷的产生。当焊接热输入较小时( $E=20.6\text{kJ/m}$ )产生局部熔融区及很

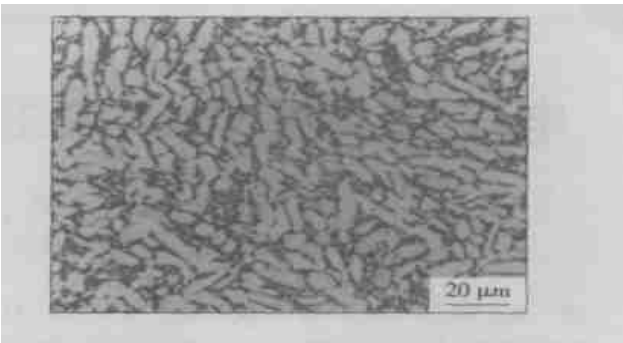


图 1 电子束焊接母材 Ti-6Al-4V 金相显微组织  
Fig. 1 Optical micrographs of Ti-6Al-4V base metal

小的热影响区,不超过 1 mm,随着焊接输入热能量的逐渐增大,热影响区的宽度及晶粒尺寸也逐渐变大。焊缝组织逐渐由等轴晶向柱状形态过渡(如图 2a、b、c 所示)。图 3 为电子束焊接热输入模式参量与焊缝晶粒、母材原始  $\beta$  晶粒尺寸的关系。如图可知,采用不同的焊接热输入能量与分布模式,焊缝晶粒度与基体差异较大。焊缝的晶粒大小主要与实际温度及在  $\beta$  转化温度以上的停滞时间有关。值得注意的是,当采用中等焊接热输入能量( $E=48.0\text{kJ/m}$ ),表面聚焦的焊接方式时,焊缝区域的晶粒,并没有发生严重的长大,主要是由于表面聚焦模式对其产生的影响,能量高度集中于一点,能量密度高、穿透力强,同时加热到  $\beta$  转化温度以上所需时间短、冷却速度较快,同素异形体转化过程中形成的晶粒就相对较细。

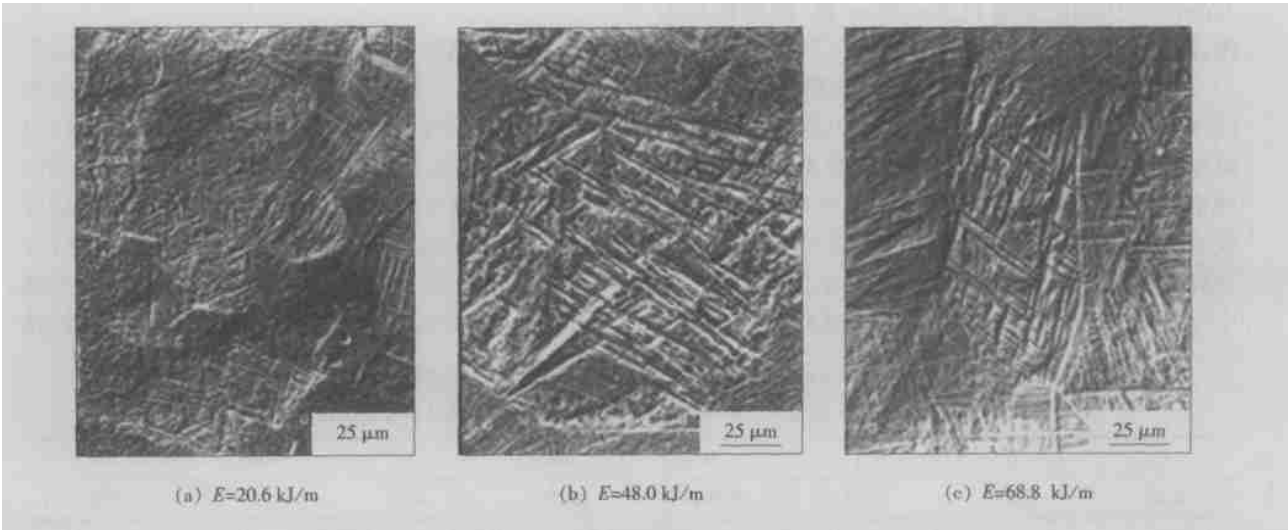


图 2 不同焊接模式下的焊缝 SEM 晶粒形态  
Fig. 2 Weld grain SEM micrographs in different heat input

2.2 热输入模式对焊缝精细结构的影响

透射电镜试验结果显示,母材中的原始精细组织为等轴的  $\alpha$  相基体,包容着细小残余  $\beta$  相如图 4a

所示。采用不同的焊接热输入模式下,形成的焊缝中  $\alpha$  相的形态及板条宽度有所不同(图 4b、c 所示)。采用中等焊接热输入能量( $E=48.0\text{kJ/m}$ )粗

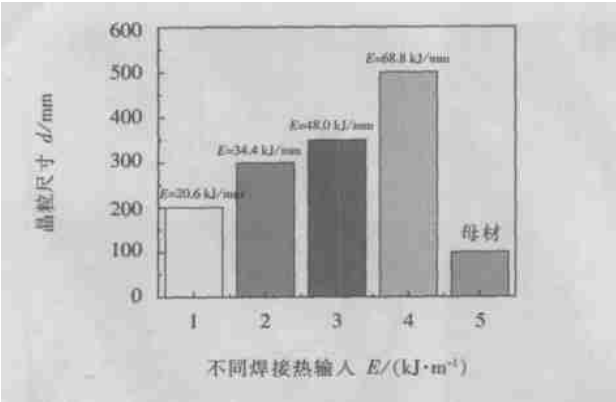


图3 不同焊接热输入模式下焊缝及母材的原始 $\beta$ 晶粒尺寸

Fig. 3 Relation between heat input and average maximum axis length of grains

大的针状 $\alpha+\beta$ 相从单向长针状转换为多向短针

状,这主要是由于电子束与焊接熔池交互作用产生的影响。一方面电子束的外输能量促使晶核的提前形成,另一方面电子束对熔池的搅拌作用也使成长中的枝晶破碎,使晶核数目增加,从而也细化了晶粒。焊缝精细结构中这种杂乱无序的排列方式,对提高接头的性能有着重要影响,因为在同样变形量下,变形会分散在更多的板条晶粒内部进行,晶粒内部和晶界附近的应变度相差较小,变形较均匀,引起的应力集中也减小。此外晶界的曲折性也有利于阻碍裂纹的传播,从而在断裂过程中可以吸收更多的能量,表现出较高的韧性。值得注意的是,当焊接热输入较小时( $E=34.4\text{ kJ/m}$ ),焊缝中的板条形态单向分布(如图4b所示),由此可知电子束的搅拌作用在较低焊接热输入作用下并不明显,因而电子束的外输能量对晶粒形态单向生长破损的影响,更具主导作用。

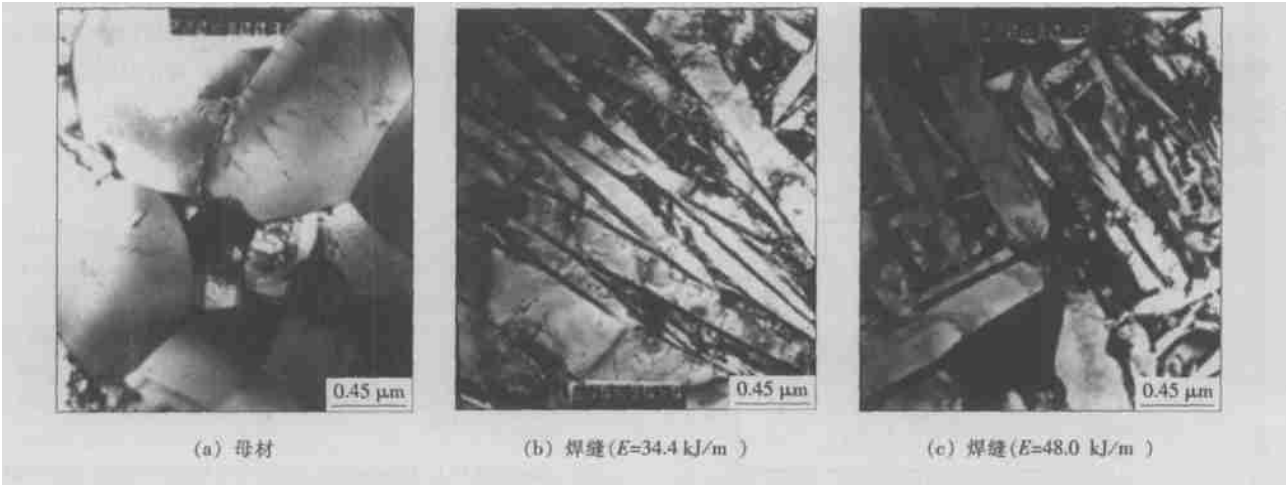


图4 Ti-6Al-4V电子束焊缝及母材的TEM组织结构特征

Fig. 4 TEM micrographs of base metal and weld

电子束热输入模式亦对焊缝金属中的位错分布及形态有较大影响。透射电镜试验发现,母材中包含大量的位错结构(如图5a所示),这可能是由于母材轧制供货状态所致。电子束焊接过程中,焊缝中的位错分布密度与母材相比呈明显下降趋势,但随着热输入的增大,焊缝中产生的位错逐渐增多(如图5b、c所示)。位错最终的分布及其密度,在很大程度上取决于电子束施加给焊缝金属的动压力以及凝固结晶前沿的稳定性的综合作用<sup>[8]</sup>。因此,当采用较高热输入( $E=68.8\text{ kJ/m}$ )时,焊缝金属为粗大柱状晶,电子束破坏了焊接凝固结晶过程的稳定性,高温下产生的大量位错,会保留在焊缝金属中;而当采用中等焊接热输入时,焊缝金属形成细小等轴晶时,电子束施加给凝固前沿的动压力,与凝固前沿稳

定性匹配,这样就有助于高温下相反符号的位错消失且形成亚晶界,使焊缝金属中只存在少量位错。

2.3 显微硬度的分布

试验中,选择的电子束焊接热输入模式不同,焊缝的显微硬度差异较大,如图6所示。单以颗粒大小作为基础,一般而言,焊缝区大颗粒结构应该比正常基体小颗粒结构柔软,但在电子束四种焊接热输入模式下,焊缝中心的显微硬度明显高于基体母材的显微硬度。这可能主要与形成针状 $\alpha$ 与 $\beta$ 相的形态以及亚稳定相数量及分布方式有关。当 $E=68.8\text{ kJ/m}$ 时,焊缝中心的硬度最高为536 HV,随两侧与焊缝中心的距离有关,硬度呈抛物线下降,焊接热输入增大时形成了密排粗大的针状 $\alpha+\beta$ 相和稳定的 $\alpha'$ 密排六方马氏体。随着焊接能量的降低( $E=48.0\text{ kJ/m}$ ),显微硬度的分布趋于均匀化(404~

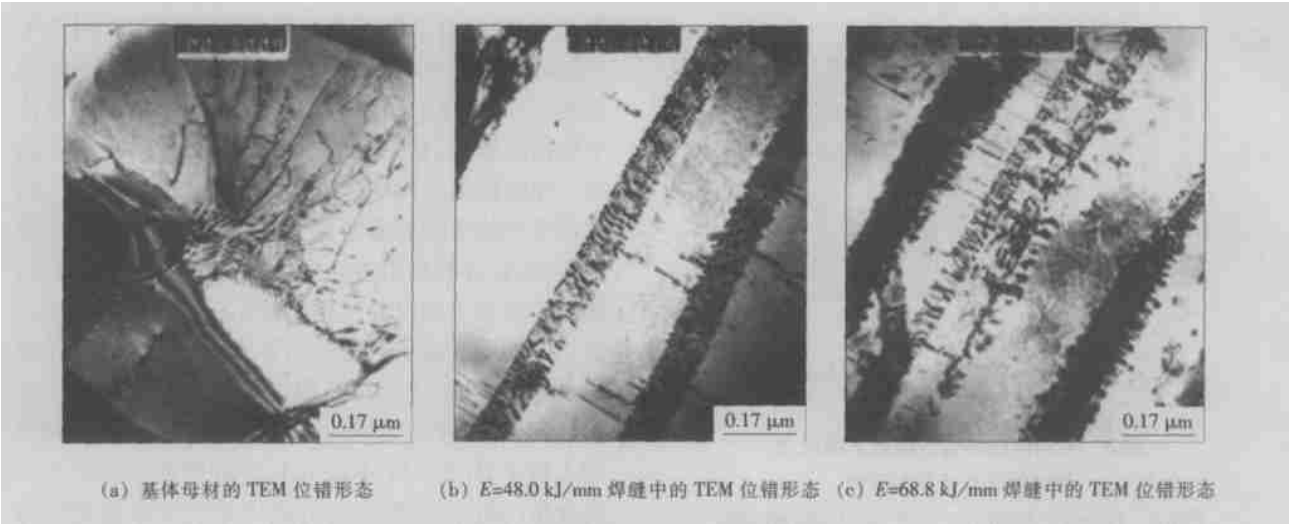


图 5 焊缝及母材的 TEM 位错分布方式

Fig. 5 Dislocation distribution of weld and base metal

480 HV)。焊接热输入继续降低时,相比而言热影响区处的显微硬度变化显得较为剧烈。四种焊接模式下,接头显微硬度值所表现出的巨大差异,主要与焊缝中心处微结构的变化有关,焊缝的组织结构可能在不同的电子束焊接模式下会产生复杂的演化机制,这还有待于进一步的研究证明。

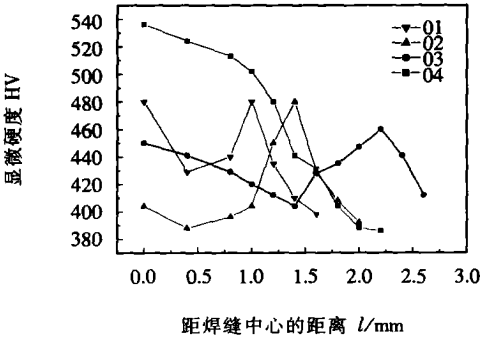


图 6 不同焊接热输入模式下接头显微硬度的分布

Fig. 6 Vickers microhardness vs distance from center of FZ in different heat input

3 结 论

(1) 焊接热输入能量的大小对焊缝晶粒尺度有重要影响。当采用中等焊接热输入( $E=48.0$  kJ/m)表面聚焦模式时,焊缝组织较为均匀,晶粒尺寸为 350 nm,粗大的针状  $\alpha+\beta$  相从单向长针状转换为多向短针状。

(2) 电子束的热输入模式亦对焊缝金属中的位错分布及形态有较大影响。随着热输入的增大,焊缝中产生的位错密度逐渐增大,但与母材相比仍然较少。

(3) 焊缝处显微硬度随电子焊接热输入模式的不同会有剧烈的变化。这可能与形成针状的  $\alpha+\beta$  相的形态、亚稳定相数量及分布方式有关。当采用中等焊接热输入( $E=48.0$  kJ/m)表面聚焦模式时显微硬度的分布较为均匀化(404~480 HV)。

参考文献:

[ 1 ] Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan. Electron beam welding laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet[ J ]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 177—181.

[ 2 ] Radhakrishna Ch, Reddy J, Raghurami, Rao K Prasad. Study on microstructures of electron beam and gas tungsten arc Ti—6Al—4V weld metals[ J ]. Practical Metallography, 1997, 34(4): 194—207.

[ 3 ] Dance B G L. Introduction to electron beam welding metallurgy [ J ]. Welding Research Abroad, 1995, 41(11): 19—23.

[ 4 ] Jinkeun Oh, Nack J Kim, Sunghak Lee, *et al.* Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti—6Al—4V welds [ J ]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340(1): 232—242.

[ 5 ] Messler R W. Electron beam weldability of advanced titanium alloy [ J ]. Welding Journal, 1981, 60(5): 79s—84s.

[ 6 ] Toshio Enjo, Toshio Kuroda, Masashi Nishizawa. Microstructure and mechanical properties in weld heat affected zone of Titanium alloy[ J ]. Transaction of JWRI, 1988, 17 (2): 113—118.

[ 7 ] Chen Xiaofeng, Han Zhong, Lou Xinfang *et al.* Equalization of Ti—6Al—4V alloy welded joint by scanning electron beam welding[ J ]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 1999, 9 (3): 535—540.

[ 8 ] 韩忠, 林海潮, 陈晓风. 钛合金电子束焊缝金属微观结构的 TEM 观察[ J ]. 电子显微学报, 1999, 18(5): 536—539.

作者简介: 吴会强, 男, 1977 年 9 月出生, 博士研究生。主要从事先进材料的电子束焊接性及其热过程的数值模拟研究, 发表论文多篇。

Email: huiqiangwu@hit.edu.cn