

# TC4 钛合金电子束焊接焦点动态变化特性研究

付鹏飞<sup>1,2</sup>, 王亚军<sup>3</sup>, 毛智勇<sup>2</sup>, 巩水利<sup>2</sup>, 王春明<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024; 3 北京航空航天大学 机械制造工程与自动化学院, 北京 100191)

**摘要:** 为了探索电子束深熔穿透焊接原理, 针对 20mm 厚 TC4 钛合金中厚板材开展了电子束焊接工艺实验, 分析了电子束焊接过程焦点动态变化特性, 研究了焊接速度、工作距离对电子束焊接焦点动态变化特性的影响。结果表明, 随着焊接速度增加, 临界穿透束流增大, 焦点动态变化特征曲线上移; 随着工作距离的增加, 动态焦点逐渐向下移动; 保持其他参数恒定, 随着聚焦电流增加, 电子束焦点动态变化, 焊缝形貌由钉形向钟罩形过渡。

**关键词:** TC4 钛合金; 电子束焊接; 临界穿透束流; 焦点

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2009)04-0038-04

电子束焊接技术被广泛应用于航空航天领域, 尤其是钛合金铝合金等新型材料关键构件的研制<sup>[1-3]</sup>。电子束焦点状态的调控是影响高精密构件焊接质量的重要手段和措施之一, 焊接所采用的电子束聚焦后束流一般是先收敛后发散, 存在着一个最小的截面<sup>[4-6]</sup>, 如图 1 所示, 这个截面就是电子束的焦点。焦点截面半径最小、电子束能量密度最大。在焦点附近存在截面半径变化较小的活性区, 在该区域内束流穿透金属能力和焊接效果非常接近。

在电子束焊接动态过程中, 金属蒸气及等离子体影响了束流的传输和轨迹形状, 汇聚位置和汇聚处束流半径均将发生变化, 即影响了电子束焦点; 在焊接动态过程中无法测量束流焦点形状, 但从焊接效果上看总存在某一聚焦状态使电子束焊接的熔深最大。本文将这种现象称作电子束焊接焦点动态变化特性。

针对钛合金板材, 本研究通过最小临界穿透束流、聚焦电流等来表征电子束焊接的焦点动态变化特性, 将有助于探索航空制造领域中厚度钛合金电子束焊接原理及工艺优化调控, 改善和提高接头的焊接质量, 在武器装备制造领域及民用制造业中进一步推广电子束焊接技术的应用。

## 1 实验

采用厚度为 20mm 的 TC4 钛合金热轧平板, 化学成分见表 1, 试板尺寸为 200mm × 180mm。

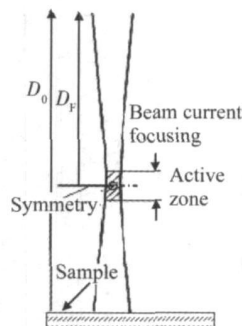


图 1 电子束流轨迹形状

Fig 1 Sketch of electron beam track

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4

Al	V	Fe	N	Ti
5.82	3.99	< 0.05	0.032	Bal

使用钢丝刷去除 TC4 钛合金表面氧化膜, 再用酒精或丙酮擦拭干净后, 放进 ZD150-15A 电子束焊机真空中, 沿试板长度方向进行焊接实验, 确保试板沿厚度方向焊透, 典型的焊接工艺参数见表 1。

通过改变工作距离、焊接速率等参数, 连续调节聚焦电流和输入束流获得临界穿透束流。图 2 为焦点状态电子束与钛合金材料作用照片。

收稿日期: 2009-03-15; 修订日期: 2009-05-20

作者简介: 付鹏飞 (1978—), 工程师, 博士研究生, 主要从事电子束加工工艺及设备方面的研究, (E-mail) fupengfe@163.com。

表 2 TC4 钛合金焊接工艺参数

Table 2 Processing parameters of EBW for TC4

Accelerated voltage $U_a$ /kV	Beam current $I_b$ /mA	Focus current $I_f$ /mA	Welding speed $v$ / (mm /min)
150	48	342	800
150	69	366	600
150	56	356	600
150	42	342	400

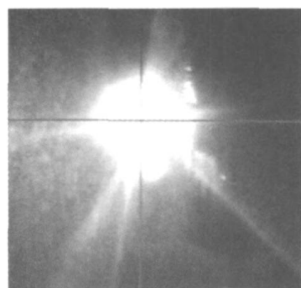


图 2 电子束焦点状态照片

Fig 2 Photograph of electron beam focus

切取接头金相试样, 通过显微镜观察焊缝整体形貌, 分析焦点变化对焊缝形貌的影响。

## 2 结果与分析

TC4 钛合金试板电子束焊缝表面成形良好, 试板达到临界焊透。

### 2.1 电子束焊接焦点动态特性

在加速电压  $U_a = 150\text{kV}$ , 焊接速率  $v = 600\text{mm/min}$  条件下, 连续调整聚焦电流和焊接束流使试板

达到临界穿透, 将聚焦电流及其对应焊透试板的临界穿透束流数据进行统计分析, 依次连接各数据点形成光滑曲线, 建立聚焦电流与临界穿透束流之间的关系, 如图 3 所示。

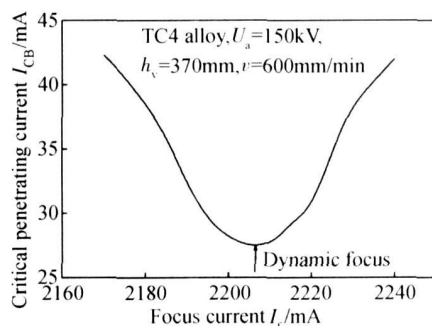


图 3 电子束聚焦电流与临界穿透束流之间关系

Fig 3 Relations between focus current & critical penetrating current

聚焦电流与临界穿透束流曲线中临界穿透束流的大小, 反映了焊接过程中随着聚焦电流的变化, 电子束焦点位置状态的变化。曲线向下凹且存在一个极小值点, 即最小临界穿透束流, 称作焦点动态变化特性曲线。极值点状态表示在此聚焦状态下用最小的输入束流可获得最大的熔深, 体现了电子束焊接最佳的工作状态。依据文献<sup>[7-9]</sup>, 将最小临界穿透束流所对应的焦点状态定义为电子束动态焦点状态。

### 2.2 焊接速率对焦点动态变化特性的影响

焊接速率变化将会对电子束焊接热输入、金属蒸汽及等离子体产生影响, 势必会影响束流的焦点状态及穿透能力。图 4 反映了焊接速率对电子束

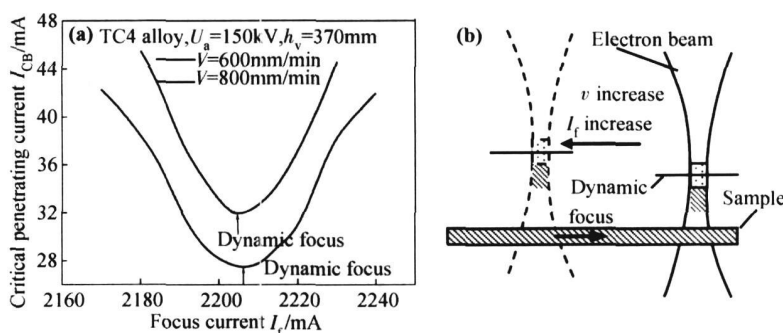


图 4 焊接速度对焦点动态变化的影响

Fig 4 Focus variation with different welding speeds (a) curve of electron beam focus

(b) sketch of electron beam focus variation

焦点动态变化特性的影响。可以看出: 随着焊接速率的增大, 在同一聚焦条件下临界穿透束流增大, 焦

点动态变化曲线整体向上平移; 随着焊接速率的增大, 最小临界穿透束流向聚焦电流增大的方向移动,

即动态焦点向上移动;随着焊接速率的提高,动态焦点附近聚焦电流的可调范围有所降低。

### 2.3 工作距离对焦点动态变化特性的影响

工作距离对电子束焊接焦点动态变化特性影响

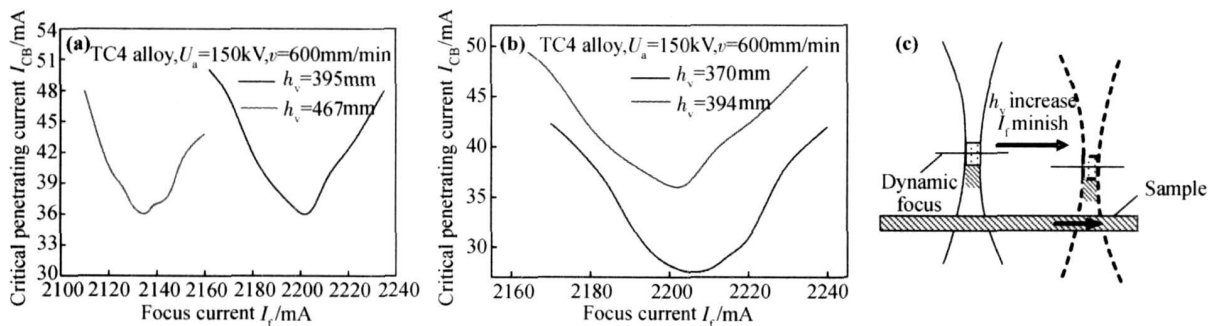


图 5 工作距离对焦点动态变化的影响

Fig 5 Focus variation with different distance (a)  $h_v = 395\text{mm}$  &  $h_v = 467\text{mm}$ ;

(b)  $h_v = 394\text{mm}$  &  $h_v = 370\text{mm}$ ; (c) electron beam focus dynamic variety

### 2.4 焦点动态变化对焊缝形貌及组织的影响

在速率  $v = 600\text{mm/min}$  相同的工作距离工艺条件下,随着聚焦状态变化及焦点状态的动态变化,电子束焊缝形貌也随着变化,如图 6 所示。动态焦点状态电子束焊缝呈钉形,如图 6a 所示,焊接所消耗的热输入最低,深宽比最大,熔宽最小;随着聚焦电流的增大,临界穿透束流逐渐增加,电子束焊缝趋于钟罩形,熔宽逐渐增加,深宽比逐渐降低。如图 7 所示不同焦点状态下,焊缝区均为针状  $\alpha'$  马氏体组织,说明焦点状态变化对焊缝组织性能没有明显影响。

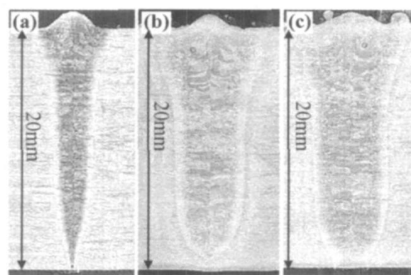


图 6 不同焦点状态下焊缝形貌

Fig 6 welds shape with different focus currents

(a)  $I_b = 50\text{mA}$ ,  $I_f = 342\text{mA}$ ; (b)  $I_b = 56\text{mA}$ ,

$I_f = 356\text{mA}$ ; (c)  $I_b = 69\text{mA}$ ,  $I_f = 366\text{mA}$

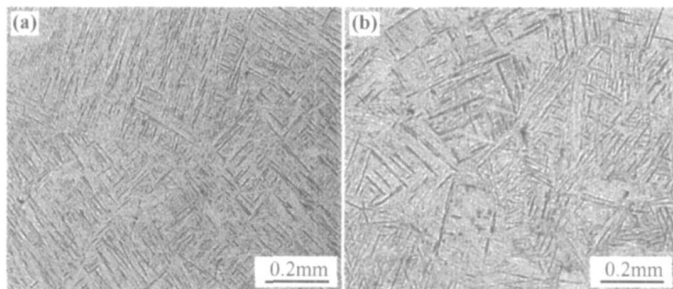


图 7 不同焦点状态焊缝组织

Fig 7 Welds microstructure with focus currents (a)  $I_b = 50\text{mA}$ ,  $I_f = 342\text{mA}$ ; (b)  $I_b = 69\text{mA}$ ,  $I_f = 366\text{mA}$

## 3 结论

(1) 20mm 厚钛合金电子束焊接焦点动态变化特征呈一条向下凹且存在极值点的曲线。随着焊接速率增大,临界穿透束流增大,焦点动态变化特性曲

如图 5 所示。随着工作距离增大,TC4 钛合金电子束焊接最小临界穿透束流略有增加,所对应聚焦电流相对减小,动态焦点有下移趋势。

线整体向上平移,极小值点向聚焦电流增大的方向移动,动态焦点向上移动;随着工作距离增大,最小临界穿透束流增大,对应的聚焦电流逐渐减小,动态焦点有下趋势。

(2) 在焊接速率、工作距离不变的条件,随着

聚焦电流逐渐增加, 电子束焦点状态动态变化, 焊缝形貌由典型的钉形逐渐转变为钟罩形, 熔宽增加、深宽比降低。但焊缝组织影响不大。

#### 参考文献:

- [1] 毛智勇, 李晋炜, 付鹏飞. TA15 钛合金电子束焊缝性能研究 [C] // 2004 全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文集, 北京: 中国电工技术学会电子束离子束专业委员会, 2004 216-220
- [2] 付鹏飞, 黄锐, 刘方军. TA12 钛合金电子束焊接组织性能及残余应力分析 [J]. 焊接学报, 2008 (2): 82-84
- [3] 魏志宇, 尹丽香, 生华, 等. Ti17 合金电子束焊接接头的力学性能 [J]. 焊接, 2008 (8): 32-35

- [4] SCHULTZ H. Electron beam welding [M]. Cambridge Abington Publishing, 2003
- [5] 王之康, 高永华. 真空电子束焊接设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990
- [6] 唐天同, 刘纯亮. 电子束与离子束物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- [7] 周琦, 刘方军, 关桥. 电子束流焦点和测量方法进展及分类 [J]. 焊接, 2004 (1): 5-10
- [8] 周琦, 刘方军, 关桥. 电子束流的动态焦点和深穿极值效应 [J]. 焊接学报, 2004 (4): 19-23
- [9] 周琦, 刘方军, 关桥. 变焦-临界穿透束流极值法测量电子束流动态焦点——一种焦点测量方法介绍 [J]. 焊接学报, 2004 (5): 77-79

## Study on Character of Electron Beam Dynamic Focus during EBW

FU Peng-fei<sup>1,2</sup>, WANG Ya-jun<sup>3</sup>, MAO Zhi-yong<sup>2</sup>, GONG Shui-li<sup>2</sup>, WANG Chun-ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 3. School of Mechanical Engineering & Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract** The processing of electron beam welding (EBW) was studied for TC4 titanium alloy with 20mm thickness and the character of dynamic behavior for electron beam focus was analyzed. The effects of welding speed and work distance on the dynamic behavior of the focus also were studied. The results show the critical penetrating currents increase comparatively and the curve of the focus behavior shifts up with the enhancement of welding speed. The dynamic focus shifts down with the increase of work distance. The increase of the focus currents and the changing of focus during EBW simultaneity contribute to the change of weld shapes from nail shape to bell shape.

**Key words** TC4 titanium alloy; electron beam welding; critical penetrating current; focus