

TC4 钛合金电子束焊接工艺参数对焊缝形状的影响*

Effect of TC4 Titanium Alloy Electron Beam Welding Parameters on Weld Shape

大连交通大学 宫平 罗宇
高能束流加工技术国防科技重点实验室 王亚军 毛智勇

[摘要] 对 TC4 钛合金厚板电子束焊接焊缝形状进行了试验研究,分析了电子束焊接过程中不同工艺参数对焊缝形状的影响。结果表明,电子束聚焦电流对焊缝形状的影响较大,随着聚焦电流的变化,焊缝形状变化各异;焊接速度对焊缝形状的影响较聚焦电流要小,焊接速度不同,焊缝整体形状有所不同,但差异不大;电子束流对焊缝形状的影响作用较小,焊缝形状的变化近似于整体缩放。

关键词: TC4 钛合金 电子束焊 工艺参数 焊缝形状

[ABSTRACT] Weld shape of TC4 titanium alloy thick plate by electron beam welded is investigated experimentally. The effects of different welding parameters on weld shape is analyzed. It is found that the focus current has a large influence on weld shape, and change of focus current leads to difference of weld shape. The effect of welding speed on weld shape is less than that of the focus current. The integral shape of weld differs, but there is no much greater change in weld shape with changing welding speed. Beam current has a little influence on weld shape. With various beam current, the change of weld shape approximates integral reduction and enlargement.

Keywords: TC4 titanium alloy Electron beam welding Technical parameter Weld shape

TC4 钛合金是 α 型钛合金的典型代表,具有比强度高、耐腐蚀性好、热强性高等优点,在航空航天领域得到了越来越多的应用,特别是用于飞机机体和发动机中要求强度高及热强性好的部位^[1]。但与其他金属相比,TC4 钛合金导热性差,电阻系数大,热容量小,所以熔焊时应采用能量集中的热源^[2-3],因此电子束焊无疑成为 TC4 钛合金焊接加工的首选方法之一。

电子束焊是高能量密度的焊接方法,具有熔深

大、熔宽小、焊接速度高和焊件变形小等优点,被广泛应用于制造领域,特别是在大批量生产、大厚度焊接,以及一些复杂的特殊构件的焊接中显示出独特的优越性^[4-5]。针对 TC4 钛合金厚板,本文通过试验研究找出电子束焊接工艺参数对焊缝形状的影响规律,通过调整焊接工艺参数控制焊缝形状,进而控制焊接接头性能,这对于钛合金电子束焊接的基础研究和工程应用有重要意义。

1 试验条件及方法

试验材料为 20mm 厚的 TC4 钛合金板材,退火状态供货,母材化学成分见表 1。试验采用 ZD150-30A 型高压电子束焊设备,焊接方式为电子束堆焊。试验时无外加拘束,试验过程中通过编程实现焊缝焊接工艺参数的连续变化,焊后计算得出焊缝不同位置对应的焊接工艺参数,然后在焊缝不同位置区域利用线切割切取试样,经过打磨、抛光和腐蚀后利用扫描仪对焊缝形状进行观察。焊接工艺参数见表 2。

表 1 TC4 钛合金化学成分 w/%

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.06	3.92	0.3	0.013	0.014	0.001 4	0.15	余量

表 2 电子束焊接工艺参数

编号	加速电压 U_a/kV	电子束流 I_b/mA	聚焦电流 I_f/mA	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
01	90	48.8	1 640~1 690	10
02	90	36~56	1 670	10
03	90	40.6	1 650	5~15

2 试验结果与分析

2.1 电子束聚焦电流对焊缝形状的影响

聚焦电流是影响焊缝形状的关键因素,通过变化聚焦电流可以得到不同的焊缝形状。试验过程中,设 $U_a=90kV$,电子束流 $I_b=48.8mA$,焊接速度 $v=10mm/s$,

* 重点实验室基金资助项目(9140C4501010601)。

聚焦电流 I_f 由 1 640mA 变化到 1 690mA, 得到不同的焊缝。焊缝形状如图 1 所示, 形状参数见表 3。

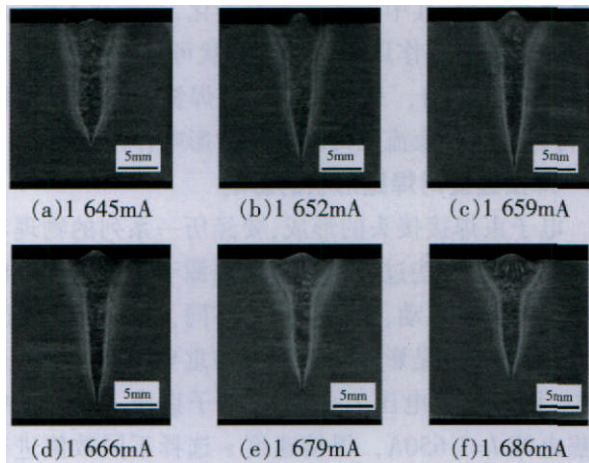


图 1 不同聚焦电流下的 TC4 钛合金
电子束焊接焊缝形状

Fig.1 Weld shape of TC4 titanium alloy welded
by electron beam under different focus current

表 3 TC4 钛合金电子束焊接焊缝形状参数
($U_a=90\text{kV}$, $v=10\text{mm/s}$, $I_b=48.8\text{mA}$)

编号	聚焦电流 I_f/mA	熔深 H/mm	熔宽 B/mm	焊缝宽度 W/mm	深宽比 H/B
01-1	1 645	15.47	2.67	6.93	5.80
01-2	1 652	17.60	2.40	6.67	7.33
01-3	1 659	18.67	2.08	6.40	8.97
01-4	1 666	18.18	1.82	7.27	10.00
01-5	1 672	18.54	1.82	7.64	10.20
01-6	1 679	16.36	1.81	8.36	9.00
01-7	1 686	14.54	2.18	8.73	6.67

图 2 为聚焦电流 I_f 与焊缝形状参数(焊接熔深、熔宽、焊缝宽度、深宽比)关系曲线。由图可见, 随着聚焦电流的增大, 焊接熔深先增加后减小, 聚焦电流约在 1 665mA 上下变动时, 焊接熔深最大, 1 665mA 为聚焦电流值, 可见电子束焦点在工件表面附近时, 焊接熔深有最大值, 随着焦点位置的上移或者下移, 焊接熔深逐渐减小, 即随着散焦量的增加, 焊接熔深呈减小趋势。电子束焦点上下附近存在一段电子束流活性区, 焊接熔深最大时, 可能是由于电子束活性区作用于工件上的范围增大所致^[4]。

而由聚焦电流 I_f 与焊接熔宽 B 及焊缝宽度(焊缝表面两焊趾之间的距离) W 的关系曲线可见, 随着聚

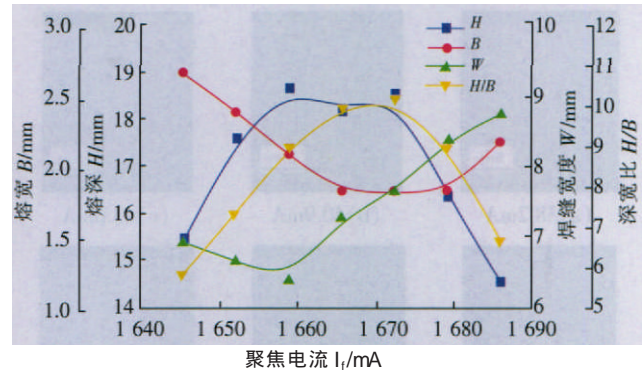


图 2 聚焦电流对焊缝形状参数的影响

Fig.2 Effect of focus current on weld
shape parameters

焦电流的增大, 焊接熔宽先减小后增大, 只是各自最小值对应的聚焦电流值不同。对于焊接熔宽, 随着下散焦的增大而显著变宽, 上散焦以较大散焦量为起点增大时, 焊接熔宽才开始变宽; 对于焊缝宽度, 随着上散焦的增大而显著变宽, 下散焦以较大散焦量为起点增大时, 焊缝宽度才开始变宽。散焦量较大时, 束流作用于工件表面的加热面积增大, 因此焊缝宽度变宽, 同时随着散焦量的增加, 焊接熔深变小, 对于一定厚度工件来说, 熔宽位置向工件表面偏移, 必然受到散焦带来的工件表面加热面积增大的影响, 因此也有变宽的趋势。而焊接熔宽和焊缝宽度最窄的时候, 可能是由于电子束活性区的头部或者尾部与工件表面有一定距离的关系, 此时电子束穿透力较强, 而对焊接熔深或焊缝宽度的影响起次要作用所致。

深宽比(H/B)是描述焊缝形状特征的重要参数, 随着聚焦电流的变化, 深宽比明显变化。由聚焦电流 I_f 与深宽比的关系曲线可见, 随着聚焦电流的增加, 深宽比先增大后减小。可见, 聚焦电流对焊缝形状的影响作用很大, 聚焦电流不同, 焊缝形状各异。

2.2 电子束流对焊缝形状的影响

实际焊接中, 工件尺寸和结构已定, 当加速电压、聚焦电流和焊接速度也基本确定时, 则需要调节电子束流值, 以达到一定焊接熔深, 满足加工要求, 因此, 电子束流也是影响焊缝形状的重要因素。试验过程中, 令 $U_a=90\text{kV}$, 聚焦电流 $I_f=1\ 670\text{mA}$, 焊接速度 $v=10\text{mm/s}$, 电子束流 I_b 由 37mA 变化到 57mA, 得到系列焊缝, 焊缝形状如图 3 所示, 形状参数见表 4。

图 4 是电子束流 I_b 与焊缝形状各参数的关系曲线。随着电子束流的增大, 焊接熔深、熔宽和焊缝宽度都呈明显增加趋势。这是因为其他焊接参数不变时,

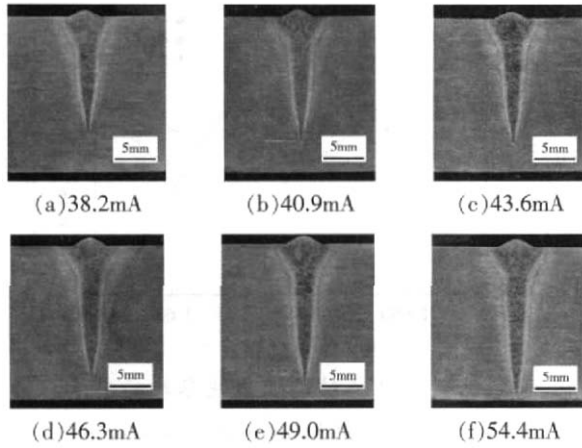


图3 不同电子束流下的 TC4 钛合金
电子束焊接焊缝形状

Fig.3 Weld shape of TC4 titanium alloy welded
by electron beam under different beam current

表4 TC4 钛合金电子束焊接焊缝形状参数
($U_a=90kV, I_f=1\ 670mA, v=10mm/s$)

编号	电子束流 I_b/mA	熔深 H/mm	熔宽 B/mm	焊缝宽度 W/mm	深宽比 H/B
02-1	38.2	14.96	1.60	6.53	9.32
02-2	40.9	16.05	1.71	6.80	9.37
02-3	43.6	15.86	1.66	6.72	9.58
02-4	46.3	16.87	1.71	7.07	9.84
02-5	49.0	17.24	1.69	7.10	10.20
02-6	51.7	18.27	1.72	7.24	10.60
02-7	54.4	19.66	1.87	7.24	10.56

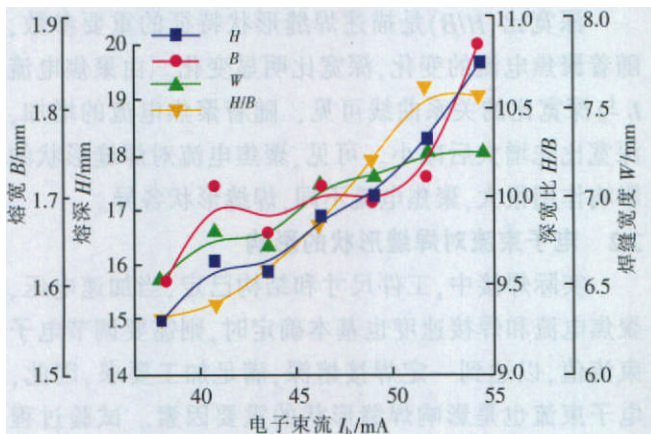


图4 电子束流与焊缝形状参数的影响
Fig.4 Effect of beam current on weld
shape parameters

增大电子束流会增加焊接热输入,因此熔深、熔宽和焊缝宽度同时增加,但是熔深增加显著,而熔宽略有

增加,所以深宽比随电子束流的增大而增加。

随着电子束流变化,焊接熔深、熔宽和焊缝宽度都呈规律变化,其中深宽比虽有变化,却变化不大。对比不同电子束流作用下的焊缝形状可见,电子束流对焊缝形状的影响,只是近似于对焊缝形状的整体缩放,可以说电子束流对焊缝形状的影响作用不大。

2.3 焊接速度对焊缝形状的影响

电子束焊接接头的形成,要经历一系列的物理和化学反应,而这些过程得以实现则源于焊接工件与电子束流的相对移动,且移动速率不同,过程行为不同,因此,焊接速度是影响焊缝形状的重要因素。试验过程中,设定加速电压 $U_a=90kV$,电子束流 $I_b=40.6mA$,聚焦电流 $I_f=1\ 650A$,焊接速度 v 选择不同数值进行焊接试验,得到系列焊缝。焊缝形状如图5所示,形状参数如表5所示。

图6 是焊接速度 v 与焊缝形状各参数的关系曲

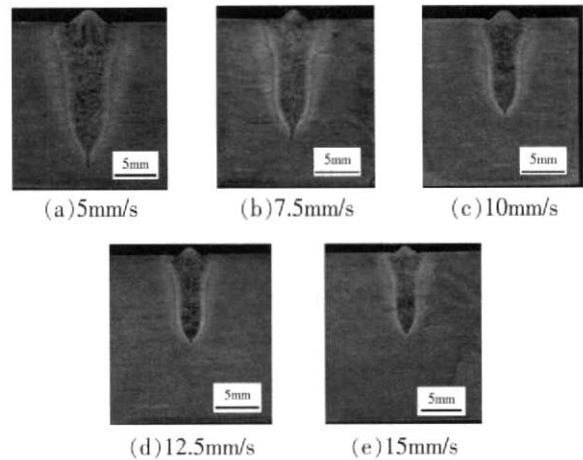


图5 不同焊接速度下的 TC4 钛合金
电子束焊接焊缝形状

Fig.5 Weld shape of TC4 titanium alloy welded
by electron beam under different welding speed

表5 TC4 钛合金电子束焊接焊缝形状参数
($U_a=90kV, I_b=40.6mA, I_f=1\ 650mA$)

编号	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	熔深 H/mm	熔宽 B/mm	焊缝宽度 W/mm	深宽比 H/B
03-1	5	16.75	3.79	8.85	4.47
03-2	7.5	13.23	2.92	7.08	4.53
03-3	10	12.00	2.55	6.46	4.69
03-4	12.5	11.28	2.39	5.64	4.72
03-5	15	11.25	2.34	5.31	4.80

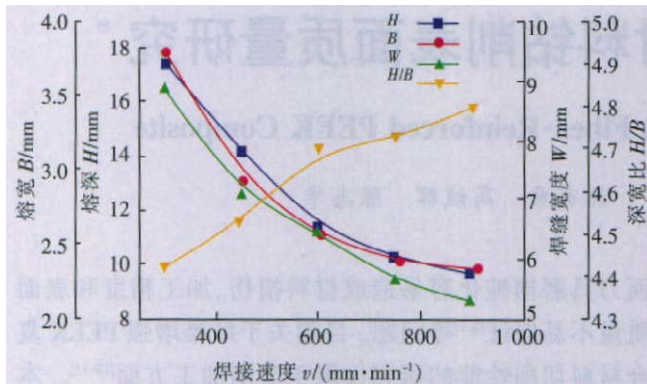


图6 焊接速度对焊缝形状参数的影响

Fig.6 Effect of welding speed on weld shape parameters

线。由图可见,随着焊接速度的增快,焊接熔深、熔宽和焊缝宽度都呈明显减少趋势,这是因为其他参数一定时,随着焊接速度的增快,降低了单位时间输入的热量,因此焊接熔深、熔宽和焊缝宽度必定减小。从焊接温度场角度来说,焊接速度的增快,焊接温度场等温线的范围变小,即温度场的长度和宽度都变小,但宽度的减小更大些,所以温度场的形状变得细长^[9],因此焊接熔宽和焊缝宽度呈减小趋势。

加快焊接速度时,虽然焊接熔深和熔宽都减小,但焊接深宽比却随焊接速度的加快而增加,这说明在此过程中焊接熔宽的减小更大些。同时可以观察到,当焊接速度很小时,焊缝形状有向“三角形”过渡的趋势,这在以往的焊接生产和试验研究中都已得到了验证。

2.4 其他影响因素

影响焊缝形状的因素还有加速电压、工作距离和真空度等;另外,扫描焊接时的扫描波形、频率和幅度,脉冲焊接时的束流峰值、脉冲宽度和重复频率等也是影响电子束焊接焊缝形状的重要因素。至于这些因素,有的尚需进一步试验论证,这里只对加速电压、工作距离和真空度的影响作简要论述。

2.4.1 加速电压的影响

同样的设备,选择150kV加速电压,做了相似的焊接试验。发现在加速电压150kV条件下,聚焦电流、电子束流和焊接速度对焊缝形状的影响规律与90kV条件下的基本相同。只是150kV高压焊接时,电子束穿透能力更强。这是因为加速电压升高,电子束功率密度随之提高,因此电子束穿透能力增强。

2.4.2 工作距离的影响

电子束焊接时,工作距离变化后,为了获得最佳聚焦条件,必须调节聚焦电流。当工作距离增大后,在其它规范参数不变的条件下,聚焦电流要减小,因而束斑增大,导致电子束功率密度减小,所以焊接熔深相应减小;反之,减小工作距离,则焊接熔深相应增加^[4]。

2.4.3 真空度的影响

按被焊工件所处环境的真空度进行分类,可区分为高真空电子束焊接、低真空电子束焊接和非真空电子束焊接。高真空条件下,电子束功率密度高,穿透能力高,随着真空度的降低,电子束的穿透能力减弱。同一台焊接设备进行焊接时,每次焊接真空度一般相差不多,当真空度变化范围不大时,对焊缝形状的影响比较微弱。

3 结论

(1) 聚焦电流对焊缝形状的影响作用很大,聚焦电流不同,焊缝形状各异。当控制聚焦电流使电子束焦点落在工件表面附近一定区域内时,焊接熔深、熔宽和焊缝宽度各于不同焦点位置处达到最大值或最小值,尔后随着焦点位置的上移或下移,焊接熔深和深宽比 H/B 不断减小,熔宽和焊缝宽度不断增加。

(2) 焊接速度对焊缝形状的影响作用较聚焦电流要小。当焊接速度增加时,焊接熔深、熔宽和焊缝宽度都减小,深宽比变化不大。当焊接速度很小时,焊缝形状有向“三角形”过渡的趋势,可见焊接速度不同,焊缝形状有所不同,但差异不大。

(3) 电子束流对焊缝形状的影响作用较小。电子束流增加,焊接熔深、熔宽和焊缝宽度都增加,变化趋势一致,而深宽比变化不大。因此,电子束流变化,焊缝形状的变化近似于整体缩放。

参 考 文 献

- [1] 李成功,傅恒志,于翹,等. 航空航天材料. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 古列维奇 C.M. 有色金属焊接手册. 邱斌, 刘中青, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [3] 牛济泰, 王式正. 焊接基础. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1986.
- [4] 刘金合. 高能密度焊. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [5] 刘春飞, 张益坤. 电子束焊接技术发展历史、现状及展望. 航天制造技术. 2003(5): 51.
- [6] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理). 北京: 机械工业出版社, 1997.

(责编 微凉)