钒钛材料与应用

# 50 mm 厚板 TC4 及 TA17 钛合金真空电子束焊接工艺研究

李大东，白　威，邓　健，陈　容，耿乃涛

（钒钛资源综合利用国家重点实验室，攀钢集团研究院有限公司，四川 攀枝花 617000）

**摘　要：**采用 JMATPRO 热力学软件，在分析 TC4 和 TA17 钛合金的密度、比热和导热率等特性的基础上，开展了厚度 50 mm 的 TC4 和 TA17 钛合金真空电子束焊接试验，设计了高压和中压加速电压，不同焊接束流和焊接速度的参数变化，研究了焊接工艺参数对焊缝熔宽和熔深及焊缝成形系数的影响作用。试验结果表明，相同焊接工艺参数条件下 TC4 钛合金的熔深和焊缝成形系数较 TA17 高，焊接束流对熔深和焊缝成形系数影响能力最为突出，加速电压 150 kV 的高压更适合于大厚板钛合金的真空电子束焊接。

**关键词：**钛合金；TC4；TA17；真空电子束焊接

**中图分类号：**TG456.3,TF823　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004−7638(2022)03−0040−07

**DOI：**10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.007　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)：**

听语音　与作者互动　聊科研

# Study on vacuum electron beam welding process of 50 mm thick plate TC4 and TA17 titanium alloys

Li Dadong, Bai Wei, Deng Jian, Chen Rong, Geng Naitao

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the density, specific heat and thermal conductivity of TC4 and TA17 titanium alloys by using JMATPRO thermodynamic software, the vacuum electron beam welding experiments of TC4 and TA17 titanium alloys with a thickness of 50 mm were carried out. The parameters of high and medium voltage accelerating voltage, different welding beam current and welding speed were designed. The effects of welding process parameters on weld width, penetration and weld forming coefficient were studied. The test results show that the penetration and weld forming coefficient of TC4 titanium alloy are higher than TA17 under the same welding process parameters. The influence of welding beam current on penetration and weld forming coefficient is the most prominent. The high voltage of accelerating voltage 150 kV is more suitable for vacuum electron beam welding of large and thick titanium alloys.

**Key words:** titanium alloys, TC4, TA17, vacuum electron beam welding

## 0　引言

钛及钛合金具有高比强度、耐腐蚀、加工性能良好等特性，广泛应用于石油、化工、能源等领域的关键部件及管道[1−2]。而钛及其合金结构件于上述工程领域的应用更是离不开各类焊接技术。目前，

**收稿日期：**2021−11−23

**作者简介：**李大东（1963—），男，四川峨眉山人，教授级高工，研究方向：钛材真空电子束焊接工艺，E-mail: pzhpyyldd@163.com。

适宜于钛及其合金的焊接技术主要包括激光焊、钨极氩弧焊、搅拌摩擦焊、等离子弧焊及真空电子束焊。近年来, 钛合金在核能、载人深潜器、航空航天等尖端领域的大量应用, 更是对钛合金焊接缺陷防治、接头服役性能提升等方面提出了更高要求。对比研究表明[3−4], 真空电子束焊接工艺具有能量密度高、焊缝熔深大、焊接变形小、工艺重现性好等优势, 特别适合于对焊缝质量要求较高的厚板钛合金的焊接。为研究 50 mm 厚度的 TC4 和 TA17 为典型代表的钛合金真空电子束焊缝成形性, 建立焊接数据库快速应用于焊接工艺制定, 笔者开展了加速电压为 150 kV 高压和 85 kV 中压、不同焊接束流、不同焊接速度条件下的真空电子束焊接试验。

## 1　试验材料及物理特性差异

### 1.1　焊接试板及垫板

采用了实验室冶炼、锻造生产的 50 mm 厚度 TC4 和 TA17 钛合金材料, 其化学成分如表 1 所示, 产品技术标准满足 GB/T 3620.1—2007《钛及钛合金牌号和化学成分》相关要求。经机械加工成 650 mm×150 mm×50 mm 的焊接试板供真空电子束焊接试验。

**表 1　TC4 和 TA17 钛合金化学成分分析结果**

**Table 1　Chemical compositions of TC4 and TA17 titanium alloys**　　%

| 牌号 | Al | V | C | Fe | O | H | N | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TC4 | 6.26 | 4.02 | 0.016 | 0.110 | 0.120 | 0.000 6 | 0.006 6 | 余量 |
| TA17 | 3.90 | 2.57 | 0.012 | 0.026 | 0.070 | 0.000 6 | 0.006 0 | 余量 |

为了避免束流相对过大造成焊接试板严重穿透焊漏, 采用同样成分的 TC4 和 TA17 钛合金加工了 20.0 mm×15.0 mm 带 5.0 mm×2.0 mm 凹槽垫板辅助焊缝成形, 见图 1 所示。垫板有助于焊缝背部成形, 避免严重穿透焊漏, 以及消除底部气孔和钉尖缺陷, 提升焊缝成形质量。

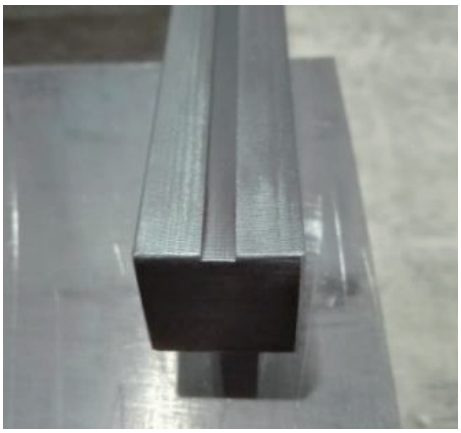


**图 1　焊缝垫板**

**Fig. 1　Weld backing plate**

### 1.2　物理特性

采用 JMATPRO 热力学软件分析了表 1 中 TC4 及 TA17 钛合金在 25 ~ 1 800 ℃ 加热温度下的密度、比热及热导率变化情况, 见图 2 和表 2 。特别是比热和热导率热物理性能的差异性评价, 为后续电子束焊缝成型研究提供理论依据和数据支撑。

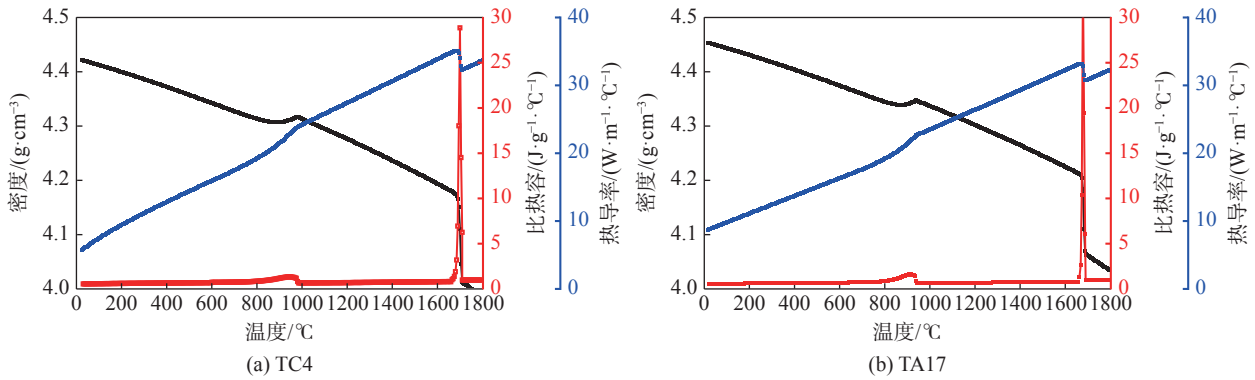



**图 2　TC4 和 TA17 钛合金热物理参数曲线**

**Fig. 2　Thermophysical parameter curves of TC4 and TA17 titanium alloys**

表 2 25~1 800 ℃ 温度区间内钛合金热物理参数对比

Table 2 Comparison of thermophysical parameters of titanium alloys in the temperature range of 25~1 800 ℃

| 材料 | 温度/℃ | 密度/(g·cm$^{-3}$) | 比热/(J·g$^{-1}$·℃$^{-1}$) | 热导率/(W·m$^{-1}$·℃$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| TC4 | 25 | 4.42 | 0.55 | 5.75 |
| | 500 | 4.36 | 0.67 | 14.39 |
| | 1 000 | 4.31 | 0.66 | 24.21 |
| | 1 500 | 4.22 | 0.77 | 32.23 |
| | 1 670 | 4.18 | 1.14 | 34.96 |
| | 1 800 | 3.99 | 0.98 | 33.67 |
| TA17 | 25 | 4.45 | 0.54 | 8.72 |
| | 500 | 4.39 | 0.66 | 14.92 |
| | 1 000 | 4.34 | 0.65 | 23.41 |
| | 1 500 | 4.25 | 0.76 | 30.68 |
| | 1 670 | 4.21 | 1.28 | 33.18 |
| | 1 800 | 4.04 | 0.97 | 32.22 |

由图 2 和表 2 可见，JMATPRO 热力学软件计算的 TC4 及 TA17 两种钛合金热物理参数均随着温度的上升而连续变化。温度在 1 670 ℃ 左右时，由于温度达到了材料熔点，导致钛合金的比热和热导率物理参数变化显著，TA17 钛合金的热导率却明显低于 TC4 钛合金。

## 2 真空电子束焊接试验

### 2.1 试验方法

厚度 50 mm 的 TC4 和 TA17 试板表面经机加工磨削后，用丙酮反复擦洗表面，以避免油污、杂质等对试板焊接质量的影响。同时垫板同样采取丙酮擦洗表面油污。

为节约钛合金焊接试板，安排焊缝长度沿试板 150 mm 宽度方向分布，焊缝横向间隔 30 mm，每条焊缝长度 110 mm。在焊接工件与电子束枪距离固定为 200 mm、表面下聚焦(表面聚焦后上聚焦电流减 20 mA)、电子束 X/Y 轴圆形扫描 200 Hz 的前提条件下，通过调整加速电压、束流、焊接速度针对 TC4 和 TA17 钛合金开展不同工艺条件下的电子束焊接试验，从而研究不同焊接工艺条件对钛合金焊缝表面形貌、熔宽、熔深及焊缝成形系数等的影响作用。

### 2.2 TC4 及 TA17 钛合金焊接工艺

表 3 为不同工艺下 TC4 及 TA17 钛合金电子束焊接工艺参数及焊缝背部成形对比情况。由表 3 可见，加速电压、束流、焊接速度三个主要的工艺参数对焊缝正背面成形质量影响最为显著。其中束流对焊缝熔深影响尤为突出，随着束流的增加，熔深显著增大，熔宽缓慢降低，试板背面逐渐被熔透。为确保焊件被充分熔透，应适当提升焊接束流。而当焊接速度过大时，由于功率不变，将导致热输入下降，有效熔深下降，不利于焊缝的熔透。TC4 和 TA17 钛合金焊缝分别用 C 和 A 表示。

#### 2.2.1 焊缝表面形貌

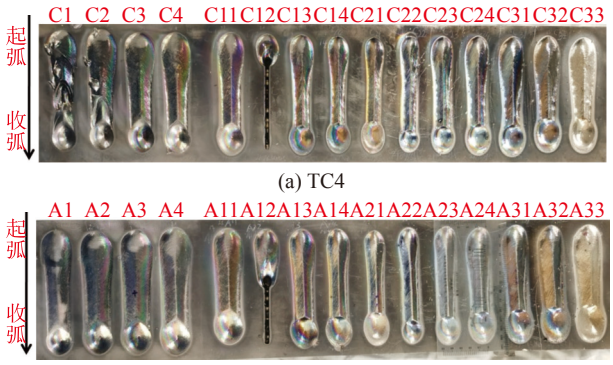
TC4 及 TA17 钛合金电子束焊缝表面形貌见图 3(a) 和图 3(b)。可见，焊接工艺参数变化直接影响到焊缝熔宽及表面成形，即使在同样工艺参数条件下，TC4 与 TA17 焊缝成形特别是熔透深度存在差异，主要体现在垫板背部匙孔的多与少，以及焊穿长度 95 mm 和 65 mm 的差异性。直观地表明，同样焊接参数条件下 TC4 较 TA17 钛合金容易熔透，这主要是相同温度条件下 TA17 热导率较 TC4 小的原因，TC4 更容易传热导致熔深相对较大。150 kV 高压和 85 kV 中压的真空电子束焊接相比，同样束流时，150 kV 高压真空电子束焊接的熔深相对较大。所以对于中厚板钛合金，应该首选 150 kV 的高压进行焊接。

采用 X 射线检验了 TC4 及 TA17 试板上的 28 条焊缝(焊漏的 C12、A12 焊缝除外)内在质量，确认全部焊缝无气孔缺陷，表明 TC4 及 TA17 钛合金在真空电子束工艺条件下焊接性能良好。

**表 3　TC4 及 TA17 电子束焊接工艺参数及焊缝成形情况**

**Table 3　EBW process parameters and weld forming situation of TC4 and TA17**

| 试样编号 | 加速电压/kV | 束流/mA | 上聚焦电流/mA | 下聚焦电流/mA | 焊接速度/(mm·min$^{-1}$) | 热输入/(kJ·cm$^{-1}$) | 焊件背面成形情况 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1<br>A1 | 150 | 60 | 400 | 510 | 150 | 36.0 | 试板背面未焊透 |
| C2<br>A2 | 150 | 70 | 400 | 510 | 150 | 42.0 | 试板背面未焊透 |
| C3<br>A3 | 150 | 80 | 400 | 510 | 150 | 48.0 | 垫板敲掉, 垫板无匙孔 |
| C4<br>A4 | 150 | 85 | 400 | 510 | 150 | 51.0 | 垫板与试板焊为一体, 垫板无匙孔 |
| C11<br>A11 | 150 | 90 | 400 | 510 | 150 | 54.0 | 垫板与试板焊为一体, 垫板上有密集匙孔<br>垫板与试板焊为一体, 垫板上未出现匙孔 |
| C12<br>A12 | 150 | 90 | 400 | 510 | 200 | 40.5 | 无垫板, 试板焊漏长度95 mm<br>无垫板, 焊漏长度65 mm |
| C13<br>A13 | 150 | 90 | 400 | 510 | 200 | 40.5 | 垫板与试板焊为一体, 垫板上有一个匙孔<br>垫板与试板焊为一体, 垫板上无匙孔 |
| C14<br>A14 | 150 | 90 | 400 | 510 | 250 | 32.4 | 垫板与试板焊为一体, 垫板无匙孔<br>垫板敲掉, 试板上有密集匙孔 |
| C21<br>A21 | 150 | 90 | 400 | 510 | 300 | 27.0 | 垫板与试板焊为一体, 无匙孔<br>垫板脱离, 试板后段密集匙孔 |
| C22<br>A22 | 85 | 90 | 370 | 330 | 150 | 30.6 | 垫板取掉, 试板背面未焊透 |
| C23<br>A23 | 85 | 120 | 370 | 330 | 150 | 40.8 | 垫板取掉, 试板背面未焊透 |
| C24<br>A24 | 85 | 140 | 370 | 330 | 150 | 47.6 | 垫板与试板焊为一体, 无匙孔 |
| C31<br>A31 | 85 | 150 | 370 | 330 | 150 | 51.0 | 垫板与试板焊为一体, 无匙孔 |
| C32<br>A32 | 85 | 160 | 370 | 330 | 150 | 54.4 | 垫板与试板焊为一体, 垫板上有少量匙孔<br>垫板与试板焊为一体, 垫板上有几个匙孔 |
| C33<br>A33 | 85 | 170 | 370 | 330 | 150 | 57.8 | 垫板与试板焊为一体, 垫板后端有密集匙孔<br>垫板与试板焊为一体, 垫板后端有几处匙孔 |




(a) TC4

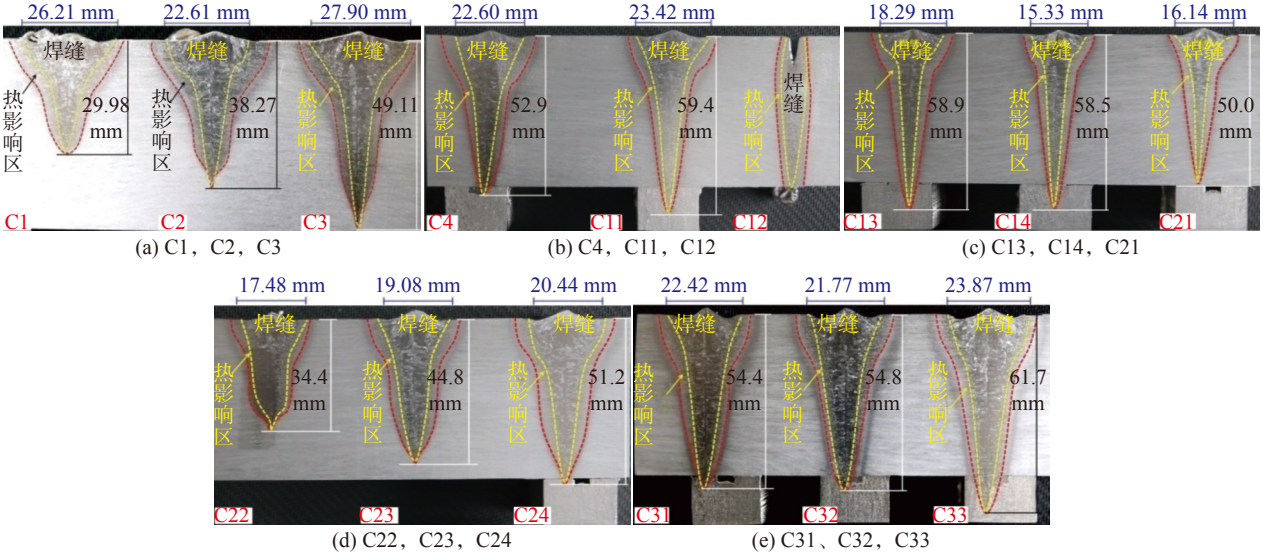
(b) TA17

**图 3　TC4 及 TA17 钛合金焊缝外观形貌**

**Fig. 3　Appearance of TC4 and TA17 titanium alloys weld**

### 2.2.2　焊缝横断面形貌

为了排除引弧和收弧处焊缝的不稳定性因素的影响, 在焊缝长度方向的中心处锯切取样 25 mm 厚度的焊缝试块, 磨削后制备焊缝横截面低倍试样。经 10%HF+13%$HNO_3$ 水溶液浸蚀后显示 TC4 和 TA17 焊缝横截面低倍宏观形貌, 见图 4、5。截面观察表明: 所有焊缝成形良好, 无气孔、夹杂及裂纹等常见缺陷。采用数显游标卡尺测量焊缝熔宽、熔深数据, 计算焊缝成形系数, 不同焊接工艺的焊缝熔宽、熔深及焊缝成形系数见表 4、5。

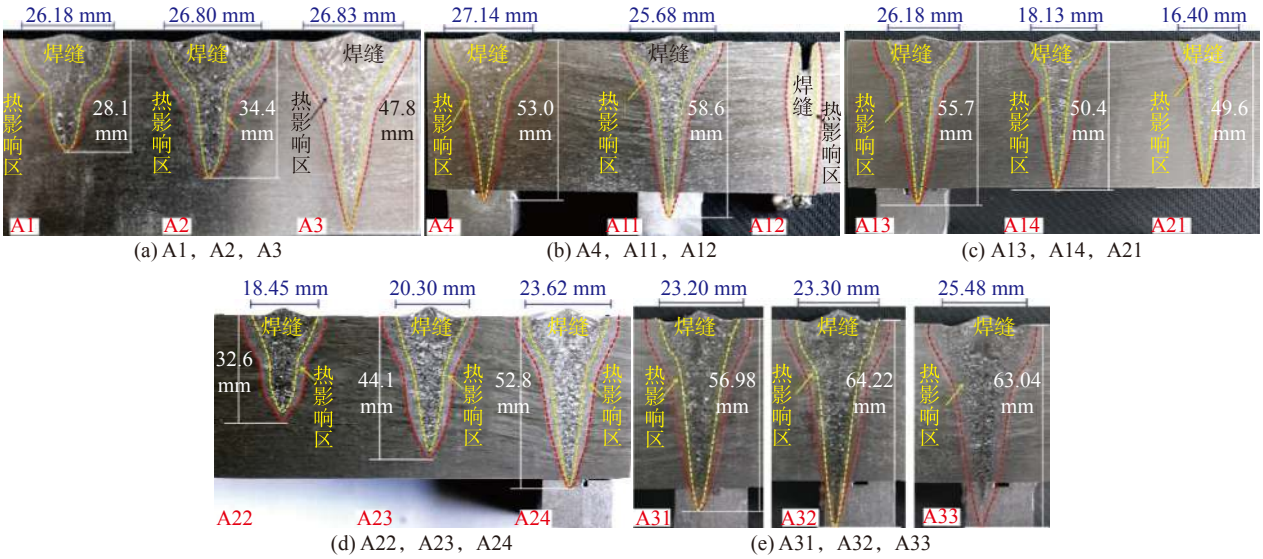



(a) C1，C2，C3　(b) C4，C11，C12　(c) C13，C14，C21

(d) C22，C23，C24　(e) C31、C32，C33

**图 4　TC4 焊缝截面宏观形貌**

**Fig. 4　Macroscopic morphology of TC4 weld section**




(a) A1，A2，A3　(b) A4，A11，A12　(c) A13，A14，A21

(d) A22，A23，A24　(e) A31，A32，A33

**图 5　TA17 焊缝截面宏观形貌**

**Fig. 5　Macroscopic morphology of TA17 weld section**

由表 4、5 可知，无论高压 150 kV 还是中压 85 kV 的真空电子束焊接试验结果表明，熔深随焊接束流增加而显著增加，焊缝成形系数随束流增加而缓慢增加。高压 150 kV 条件下的熔宽随束流增加而缓慢减少；中压 85 kV 条件下的熔宽随束流增加而缓慢增加。相同焊接工艺参数时，TC4 焊缝熔宽小于 TA17，但熔深大于 TA17，导致 TC4 焊缝成形系数大于 T17。

## 3　分析与讨论

表 1 中显示 TC4 钛合金化学成分中主要元素 Al、V 含量高于 TA17，导致了两种钛合金在 25～1 800 ℃ 温度区间的密度、比热、热导率等参数各不相同。总体而言，TA17 钛合金的密度略高于 TC4 钛合金，但其热物理参数，特别是热导率却明显低于 TC4 钛合金，表明 TA17 钛合金在真空电子束焊接热循环下的热传导性能将逊色于 TC4 钛合金，主要表现在相同焊接参数条件下，TC4 钛合金的熔深和焊缝成形系数大于 TA17。焊缝 C11 焊接后背部垫板出现密集型匙孔，而 A11 背部垫板却无匙孔，以及焊缝 C12 和 A12 焊穿长度差异达到 30 mm，这些宏观现象也证实了两种钛合金热传导性能导致的差异。表 4、5 更进一步详细地表明 TC4 和 TA17 钛合金成分差异导致相同焊接工艺参数条件下的熔深和焊缝成形系数之间的差异，TC4 相对 TA17 钛合金更容易焊接熔透。

表 4　TC4 和 TA17 电子束焊接不同焊接流速下的熔宽、熔深及焊缝系数

**Table 4　Weld width, penetration and weld forming coefficient of TC4 and TA17 using EBW at different welding beam current**

| 材料 | 加速电压/kV | 焊接速度/(mm·min$^{-1}$) | 焊接束流/mA | 熔宽/mm | 熔深/mm | 焊缝成形系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TC4 | 150 | 150 | 60 | 26.21 | 29.98 | 1.14 |
| | | | 70 | 22.61 | 38.27 | 1.69 |
| | | | 80 | 27.90 | 49.11 | 1.76 |
| | | | 85 | 22.60 | 52.90 | 2.34 |
| | | | 90 | 23.42 | 59.40 | 2.54 |
| | 85 | 150 | 90 | 17.48 | 34.40 | 1.97 |
| | | | 120 | 19.08 | 44.80 | 2.35 |
| | | | 140 | 20.44 | 49.20 | 2.41 |
| | | | 150 | 22.42 | 54.40 | 2.43 |
| | | | 160 | 21.77 | 54.80 | 2.52 |
| | | | 170 | 23.87 | 61.70 | 2.58 |
| TA17 | 150 | 150 | 60 | 26.18 | 28.10 | 1.07 |
| | | | 70 | 26.80 | 34.40 | 1.28 |
| | | | 80 | 26.83 | 47.80 | 1.78 |
| | | | 85 | 27.14 | 53.0 | 1.95 |
| | | | 90 | 25.68 | 58.60 | 2.28 |
| | 85 | 150 | 90 | 18.45 | 32.60 | 1.77 |
| | | | 120 | 20.30 | 44.10 | 2.17 |
| | | | 140 | 23.62 | 52.80 | 2.24 |
| | | | 150 | 23.20 | 56.98 | 2.46 |
| | | | 160 | 23.30 | 64.22 | 2.76 |
| | | | 170 | 25.48 | 63.04 | 2.47 |

表 5　TC4 和 TA17 电子束焊接不同焊接速度下的熔宽、熔深及焊缝系数

**Table 5　Weld width, penetration and weld forming coefficient of TC4 and TA17 using EBW at different welding speed**

| 材料 | 加速电压/kV | 焊接束流/mA | 焊接速度/(mm·min$^{-1}$) | 熔宽/mm | 熔深/mm | 焊缝成形系数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TC4 | 150 | 90 | 150 | 23.42 | 59.40 | 2.54 |
| | | | 200 | 18.29 | 58.90 | 3.22 |
| | | | 250 | 15.33 | 58.50 | 3.82 |
| | | | 300 | 16.14 | 50.0 | 3.10 |
| TA17 | 150 | 90 | 150 | 25.68 | 58.60 | 2.28 |
| | | | 200 | 26.18 | 55.70 | 2.13 |
| | | | 250 | 18.13 | 50.40 | 2.78 |
| | | | 300 | 16.40 | 49.60 | 3.02 |

高压 150 kV 加速电压条件下, 束流 90 mA 时, 当焊接速度在 150 ~ 300 mm/min 范围内变化, TC4 焊缝成形系数在 2.54 ~ 3.82, 呈倒“U”形先升后降, 在焊接速度 250 mm/min 时达到最大值 3.82, 再随焊接速度的提高, 熔深降低, 焊缝成形系数下降。而 TA17 随焊接速度增加, 焊缝熔宽显著降低、熔深

缓慢减小导致成形系数缓慢增加，但焊缝系数小于相同参数的 TC4，TA17 最大焊缝形成系数仅 3.02。在高压 150 kV、焊接速度 250 mm/min 条件下，90 mA 束流焊接的焊缝熔深和成形系数与中压 85 kV、束流 160 mA 基本相当，表明中压 85 kV 时电子束穿透效果大幅度降低，熔深/束流效率降低 43.8%。焊接速度 150 mm/min 条件下，高压 150 kV 熔深/束流达到 0.50 ~ 0.66 mm/mA，中压 85 kV 熔深/束流达到 0.34 ~ 0.38 mm/mA，高压的熔透效果最好。真空焊接时电子枪发射出来的电子束通过 150 kV 电场加速后的动能更大，撞击发热作用更大，电子束对厚板熔池的挖掘作用更强，更容易熔透大厚板的钛合金试板。所以，真空电子束高压焊接时束流大小对熔深的作用特别显著和突出，为了焊透大厚度的焊接试板，最有效的方法就是在 150 kV 高压条件下增加束流。

真空电子束焊接试验还表明增加焊接试板背面的垫板尤为重要，相同焊接参数，C12 和 A12 焊缝背面未添加垫板而焊漏，甚至成切割状态，TC4 焊缝焊穿长度 95 mm，而 TA17 焊缝焊穿 65 mm，由此表明 TA17 的热传导性能弱于 TC4，也表明真空电子束焊接时最好在焊缝背面采取垫板工艺措施，防止焊漏并保证焊缝成形。C13 和 A13 采取添加垫板后，焊缝成形优良呈钉形，TC4 焊缝成形系数 3.22，TA17 焊缝成形系数 2.13。与 C13 焊缝相比，A13 熔宽增加 7.89 mm，熔深减少 3.2 mm，焊缝成形系数降低 1.09。

## 4 结论

1）由于 TC4 和 TA17 钛合金成分的差异，导致 TC4 的热传导系数高于 TA17，致使相同焊接工艺参数条件下 TC4 熔深及焊缝成形系数均高于 TA17，TC4 钛合金相对更容易熔透。

2）无论是高压 150 kV 还是中压 80 kV，随着束流的增加，TC4 及 TA17 电子束焊缝低倍形貌均由“钟罩”形向“钉”形过渡且焊缝成形系数逐渐增大。150 kV 加速电压更适合于大厚板钛合金的真空电子束焊接。

3）焊接热输入的增加，熔深也随之增加，但束流对熔深和焊缝成形系数影响能力最为突出。

4）TA17 在 150 kV、焊接速度 150 mm/min 条件下熔深/束流达到 0.47 ~ 0.65 mm/mA，85 kV 条件下熔深/束流达到 0.36 ~ 0.40 mm/mA。与同样焊接工艺参数条件下的 TC4 相比，TA17 熔深/束流相差低约 0.1 ~ 0.3 mm/mA。

## 参考文献

[1] Zhao Yongqing. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. Materials China, 2010, 29(5): 1−8.
（赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1−8.）

[2] Wang Yating, Lin Naiming, Tang Bin. Development of thermal oxidation of titanium and titanium alloys[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(10): 965−970.
（王娅婷, 林乃明, 唐宾. 钛及钛合金热氧化工艺的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(10): 965−970.）

[3] Zhang Binggang, Wu Lin, Feng Jicai. Development status of EBW technology both at home and abroad[J]. Welding & Joining, 2004, (2): 5−8.
（张秉刚, 吴林, 冯吉才. 国内外电子束焊接技术研究现状[J]. 焊接, 2004, (2): 5−8.）

[4] Li Yajiang, Liu Kun. Application and advanced bonding technology of titanium alloy in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, (16): 34−37.
（李亚江, 刘坤. 钛合金在航空领域的应用及其先进连接技术[J]. 航空制造技术, 2015, (16): 34−37.）

编辑 邓淑惠