

# TC4 钛合金承重框双道双侧不等熔深 EBW 接头组织与性能研究

庄明祥<sup>1</sup>, 刘永强<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 王维贤<sup>1</sup>, 龙健<sup>2</sup>, 张林杰<sup>2</sup>

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对 140 mm 厚 TC4 钛合金镂空承重框的结构特征提出双道双侧不等熔深的电子束焊接 (EBW) 方案, 进行焊接试验并对接头组织性能进行了分析。发现焊缝区组织性能在厚度方向有较明显的不均匀现象, 两道焊缝根部重叠区是最值得关注的部位。两道焊缝根部重叠区存在大量针状  $\alpha'$  相和点状离散分布的  $\beta$  相, 针状相短小、相互交错现象明显; 接头中其它焊缝区域观察到针状  $\alpha'$  相和分布在原始  $\beta$  晶界的  $\alpha$  相, 但板条较长且排列具有较明显方向性。两道焊缝根部重叠区显微硬度比接头其它焊缝区域显微硬度 (3410~3460 MPa) 高出约 10%。两道焊缝根部重叠区的焊缝室温冲击功比接头中其它焊缝区域室温冲击功 (约 47 J) 低约 11%。两道焊缝根部发生重叠的区域焊接接头抗拉强度最低。结合有限元仿真发现大厚度 TC4 双道双侧不等熔深 EBW 接头焊缝根部重叠区在 900 °C 附近冷却速度高于焊缝其它区域, 是导致重叠区域与焊缝其它区域之间组织性能差异的重要原因。接头拉伸都断裂在母材区。研究表明采用双道双侧不等熔深 EBW 焊接方案制造大厚度镂空钛合金承重框是可行的, 建议实践中可采取提高母材厚度方向组织性能均匀性、严格控制两道次焊接之间时间间隔等有益措施。

**关键词:** 钛合金; 厚壁镂空承重框; 电子束焊接; 双道双侧不等熔深; 组织性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2933-08

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、韧性及耐疲劳性能好等诸多优点, 在航空航天工业中有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>, 其中 TC4 钛合金是应用最为广泛的一种  $\alpha+\beta$  型钛合金<sup>[6-9]</sup>。大厚度镂空钛合金承重框应用于飞机主起落架传动横梁等承重件具有显著轻量化效果, 而当其长度较大时这些大厚度钛合金工件必须采用拼焊来获得。真空电子束焊 (EBW) 具有能量密度高、热输入低、焊缝深宽比大、焊接残余变形小等优点, 已经在航空和航天飞行器制造领域得到了广泛的运用<sup>[10-12]</sup>。同时, 考虑到钛合金的化学性质比较活泼, 电子束焊的真空环境对实现钛合金的清洁无污染焊接更具有独特的优势<sup>[13-15]</sup>。

N. Saresh 等人在采用电子束焊方法焊接壁厚 17.5 mm 球形 TC4 钛合金容器时, 由于设备可获最大熔深只有 12.5 mm, 导致无法完全穿透, 单面不完全焊透焊缝中出现根部气孔、焊缝凹陷、咬边等缺陷问题<sup>[16]</sup>。为此 N. Saresh 等人提出了一种双道双侧等熔深电子束焊接方案, 在较小的焊接功率下可实现球形 TC4 钛合金容器熔透焊接, 并应用于航天飞行器。受

N. Saresh 等人研究启发, 针对某 140 mm 厚承重框拼焊需求, 本实验拟采用如图 1 所示的双道双侧不等熔深焊接方案对其进行拼焊。双道双侧不等熔深焊接带来两方面益处: 一方面, 电子束深熔焊接时缺陷通常易出现在焊缝根部区域, 且熔深越大出现根部缺陷几率越大。采用图 1 所示的方案时熔深较小的第 2 道焊

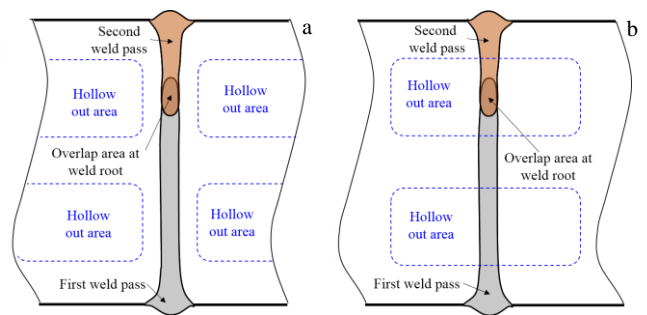


图 1 140 mm 厚 TC4 双道双侧不等熔深电子束焊方案示意图  
Fig.1 Schematics of double-side and double-pass unequal penetration EBW welding: (a) the root overlap zone is retained and loaded and (b) the root overlap zone is cut off

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51775416)

作者简介: 庄明祥, 男, 1982 年出生, 高级工程师, 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089, 电话: 029-86844526, E-mail: 115550455@qq.com

接过程中出现根部缺陷几率较小，同时第 2 道焊接过程中会使已凝固的第 1 道焊缝根部区域重新熔化，从而使可能存在于第 1 道焊缝根部区域的缺陷上浮逸出。另一方面，采用不等熔深焊接方案时两道焊缝易出现缺陷的根部区域可能同时位于如图 1b 中虚线所示的镂空区域，焊接后该区域将被切削去除掉。双面焊接的优点还包括在相同设备条件下可以使最大可焊板厚成倍提高。

某 140 mm 厚承重框拼焊结构服役时可能同时存在图 1a 和 1b 所示的 2 种工况。目前关于大厚度钛合金电子束焊接接头组织性能的研究虽然较多，但是对两道不等熔深焊缝根部的重叠区附近力学性能的深入研究还很少。因此，本实验以 140 mm 厚 TC4 钛合金双道双侧不等熔深电子束焊接接头为研究对象，对接头的组织性能进行分层研究，为其工程化应用提供数据支撑。

## 1 实验

EBW 试验采用的材料为 TC4 钛合金锻件，化学成分如表 1 所示，尺寸为 300 mm×100 mm×140 mm。焊接设备为 GENOVA98 型真空电子束焊机，焊接工艺参数见表 2。焊接实验完成后，对工件进行去应力退火，然后沿垂直焊缝方向切取接头横截面并观察组织形貌，如图 2 所示。

图 2a 为焊接接头横截面宏观形貌，接头中包括两道焊缝，第 1 道焊缝(图 2a 上表面一侧)深度约为 95 mm，第 2 道焊缝深度约为 55 mm，两道焊缝的重合区域在距离上表面约 90 mm 区域。图 2b 给出了厚度方向上 3 个典型区域的光学金相组织，3 个典型区域的具体位置如图 2a 中所示。定义到工件上表面距离 0~20 mm 区域为 Layer 1，到工件上表面距离 80~100 mm 区域为 Layer 2，到工件上表面距离 120~140 mm 区域为

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy (ω/%)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Si	Ti
5.90	4.20	<0.25	0.028	0.0042	0.0011	0.0395	<0.026	Balance

表 2 TC4 钛合金电子束焊接参数

Table 2 Electron beam welding parameters for TC4 alloy

Welding position	Voltage, U/kV	Focus current, I <sub>f</sub> /mA	Velocity, v/mm s <sup>-1</sup>	Beam current, I <sub>b</sub> /mA
First pass	60	2108	4	600
Second pass	60	2108	6	350

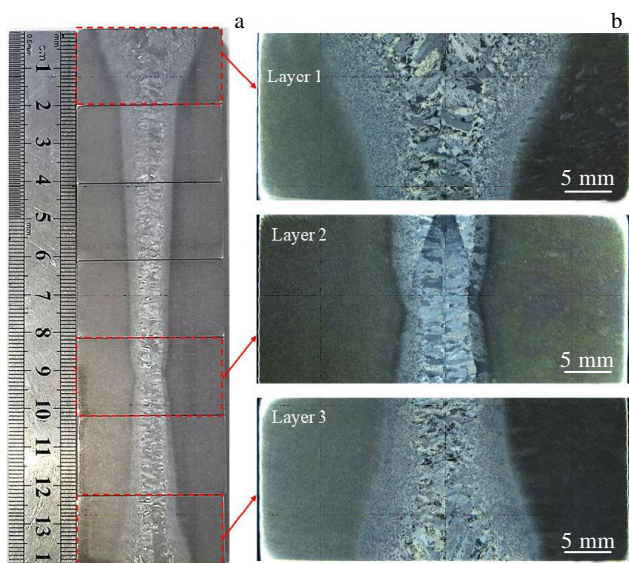


图 2 双面电子束焊接接头分层方案示意图

Fig.2 Different layers of the EBW joint: (a) macro-cross section and (b) three typical regions (Layer 1, Layer 2 and Layer 3)

Layer 3，如图 2b 所示。其中 Layer 2 是两道焊缝根部的重叠区域。

按标准程序制备接头横截面金相试样，腐蚀剂为凯勒试剂(HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=3:7:90)，腐蚀时间约为 20 s。对每个典型区域横截面上的 3 个代表性位置进行微观组织观察，依次为：母材 (BM)，热影响区 (HAZ) 和焊缝区 (WM)。分析设备为 ECLIPSE MA200 倒置金相显微镜和 FEI Verios460 场发射扫描电镜。对横截面上典型区域的显微硬度分布进行检测，载荷为 200 g，加载时间为 10 s。按 GB/T229-2007《金属夏比缺口冲击试验方法》制备冲击试样，检测每个典型区域焊缝金属的室温冲击韧性。按 GB/T2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》制备拉伸试样(图 3 和 4)，检测 3 个典型区域的抗拉强度。拉伸试验设备是 INSTRON1195 电子拉伸试验机，拉伸速率恒定为 0.5 mm/min。

拉伸试验完成后在 SU3500 扫描电镜下观察各区域拉伸试样断口的显微形貌。

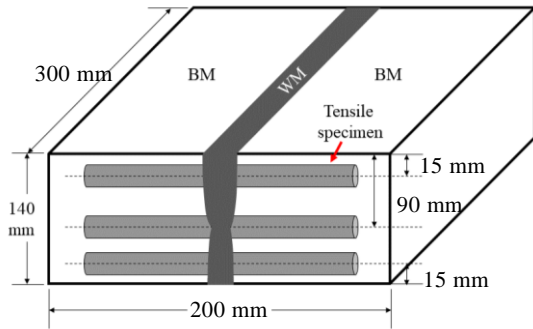


图 3 拉伸试样和冲击试样分区取样位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of specimens from the workpiece

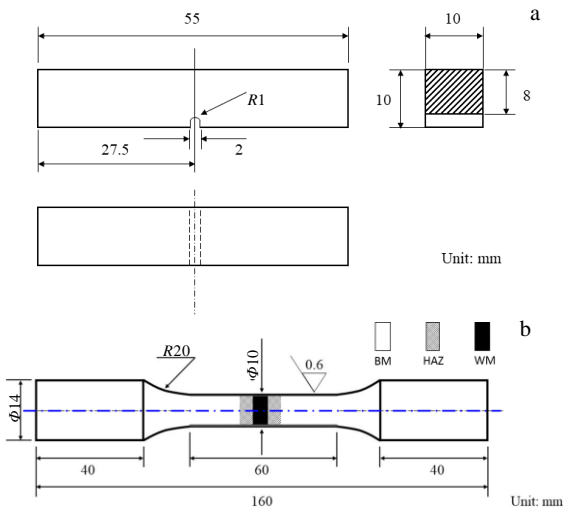


图 4 接头冲击试样和拉伸试样尺寸示意图

Fig.4 Dimensions of specimens of Charpy impact (a) and tensile test (b)

## 2 实验结果

### 2.1 横截面组织形貌

图 5 是 140 mm 厚度 TC4 钛合金双面电子束焊接接头中 3 个典型位置处的横截面组织形貌。

如图 5 所示，Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的母材组织相似，都为片状  $\alpha$  相+等轴  $\beta$  相的双相组织。同时也可以看出 140 mm 厚 TC4 锻件厚度方向上不同位置处的母材组织也略有差异，主要表现为两相数量比例的变化。

焊后 Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的 HAZ 区  $\alpha$  相基体上都有锯齿状  $\alpha'$ 相析出， $\alpha$  相和  $\beta$  相界面轮廓变得模糊，其中 Layer 2 的 HAZ 区中表现的最为明显，可能与 Layer 2 的 HAZ 所经历的多次焊接热循环有关。

从图 5 还可以看出，Layer 1 和 Layer 3 的焊缝区主要为粗大的柱状晶组织，其内部是由针状  $\alpha'$ 相和分布在原始  $\beta$  晶界的  $\alpha$  相组成，且板条较长并排列具有较明显的方向性。Layer 2 焊缝组织和其它 2 个区域焊缝组织有明显差异，Layer 2 焊缝针状组织更加短小、相互交错的现象十分明显。

### 2.2 显微硬度

图 6 所示是钛合金双面电子束焊接接头各层的显微硬度分布。

各层母材区硬度值差异较小，Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的母材区显微硬度平均值分别为 3170、3220 和 3110 MPa。各层热影响区的显微硬度值波动较大，这与 HAZ 区域组织不均匀性有关。各层焊缝区显微硬度值有

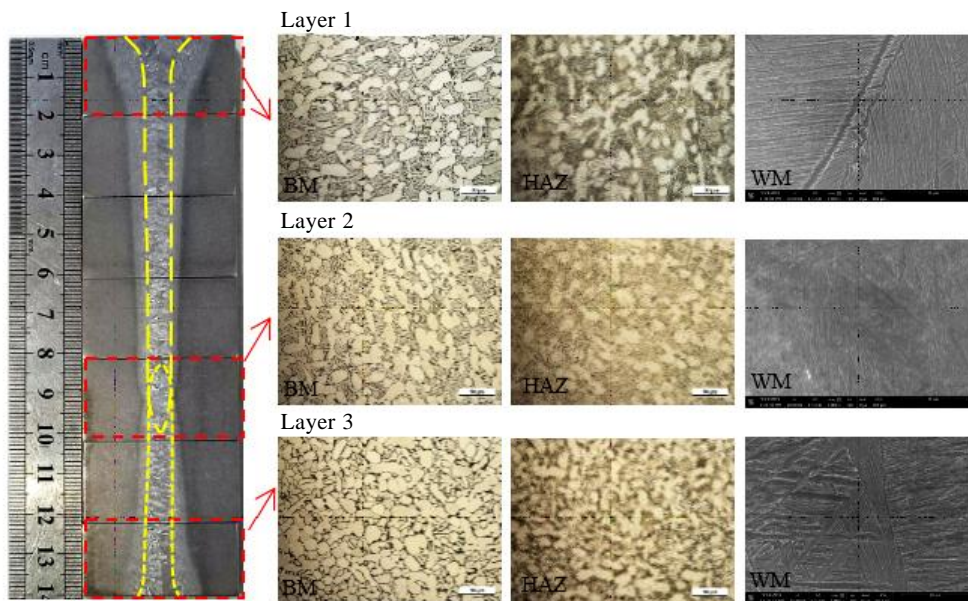


图 5 接头 Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的显微组织比较

Fig.5 Comparison of microstructure morphologies of Layer 1, Layer 2 and Layer 3

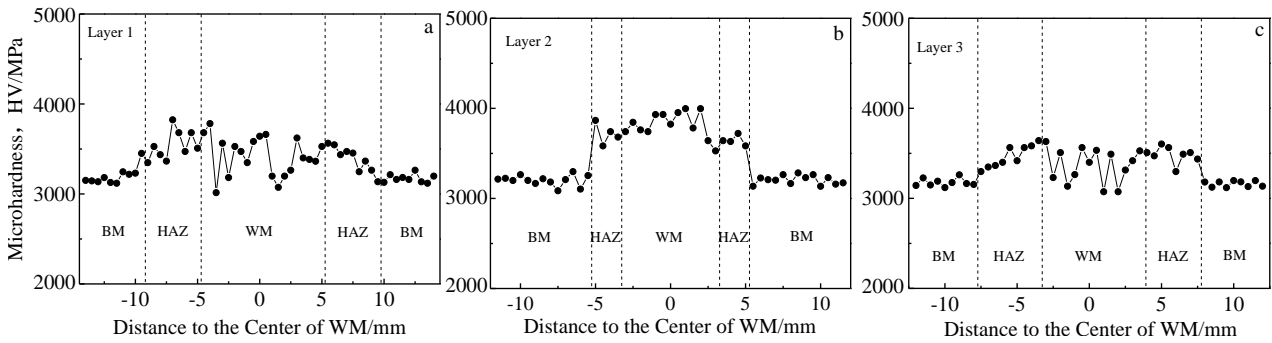


图 6 接头各层的显微硬度分布

Fig.6 Microhardness distribution of various layers of the joint: (a) Layer 1, (b) Layer 2, and (c) Layer 3

明显差异, Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的焊缝区显微硬度平均值分别为 3460、3780 和 3410 MPa, Layer 2 的比其他层高出约 10%。

### 2.3 拉伸试验

图 7 给出了 140 mm TC4 钛合金双面电子束焊接接头各层的拉伸试验结果 (每层各取 4 个试样)。从试验结果来看, Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的抗拉强度平均值分别为 944.63、900.41 和 911.54 MPa。两道焊缝根部发生重叠的 Layer 2 区的抗拉强度最低。

Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的延伸率总体上差别不大。其中 Layer 2 和 Layer 3 的延伸率平均值相近, Layer 1 的延伸率平均值略大于其它两层材料的平均延伸率。

图 8 是扫描电镜下观察到的接头各层拉伸断口显微形貌。Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的断口上都存在大量韧窝,均为韧性断裂。比较 Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的宏观断口形貌,发现 Layer 1 断口宏观形貌起伏较大,而 Layer 2 和 Layer 3 断口宏观形貌都比较平坦。

### 2.4 室温冲击韧性

图 9 是 140 mm TC4 钛合金双面电子束焊接接头各层的室温冲击韧性试验结果。从试验结果来看, Layer 1、

Layer 2 和 Layer 3 的冲击功平均值分别为 47.8、42.1 和 47.5 J。两道焊缝根部发生重叠的 Layer 2 区的冲击功平均值最低比其他层低约 11%, Layer 1 和 Layer 3 的冲击功平均值相近。

## 3 分析与讨论

### 3.1 两道焊缝根部重叠区域组织性能分析

从上述试验结果来看,和钛合金单道穿透 EBW 接头相比,厚壁钛合金双道双侧不等熔深 EBW 接头的不同之处主要在于两道焊缝根部的重叠区域。具体表现为根部重叠区焊缝的硬度升高、冲击韧性降低,如图 6 和图 9 所示。

图 10 是高倍扫描电镜下 140 mm 厚 TC4 钛合金双面电子束焊接接头第 2 层焊缝区域的显微组织形貌。由图可知接头焊缝区主要由大量针状组织组成,此外有很多点状离散分布的  $\beta$  相。

T. Ahmed 等人系统地研究了冷却速度对  $\alpha+\beta$  型钛合金相变行为的影响,发现 900 °C 附近冷却速度对室温组织有显著影响<sup>[17]</sup>。当冷却速度较高时( $\geq 410$  °C/s)室温组织是完全的  $\alpha'$  相;当冷却速度较低时( $\leq 20$  °C/s)则会形成魏氏组织;如果冷却速度介于二者之间,则

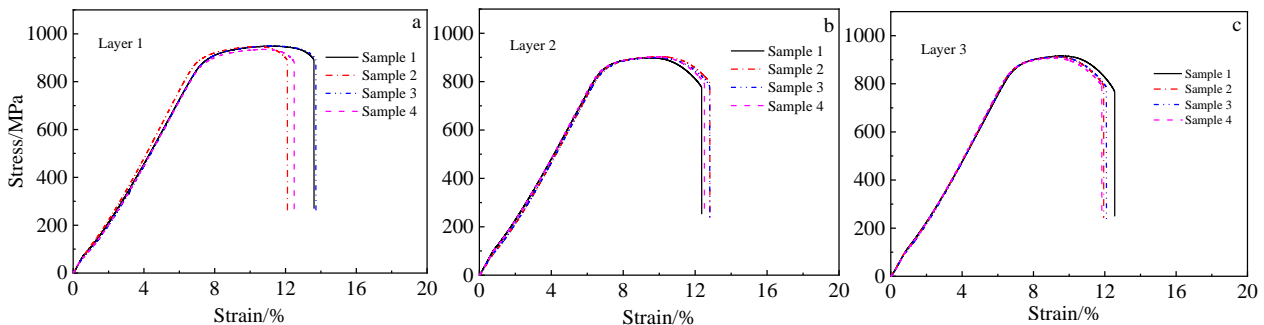


图 7 接头各层拉伸试验结果

Fig.7 Tensile test results of various layers of the joint: (a) Layer 1, (b) Layer 2, and (c) Layer 3

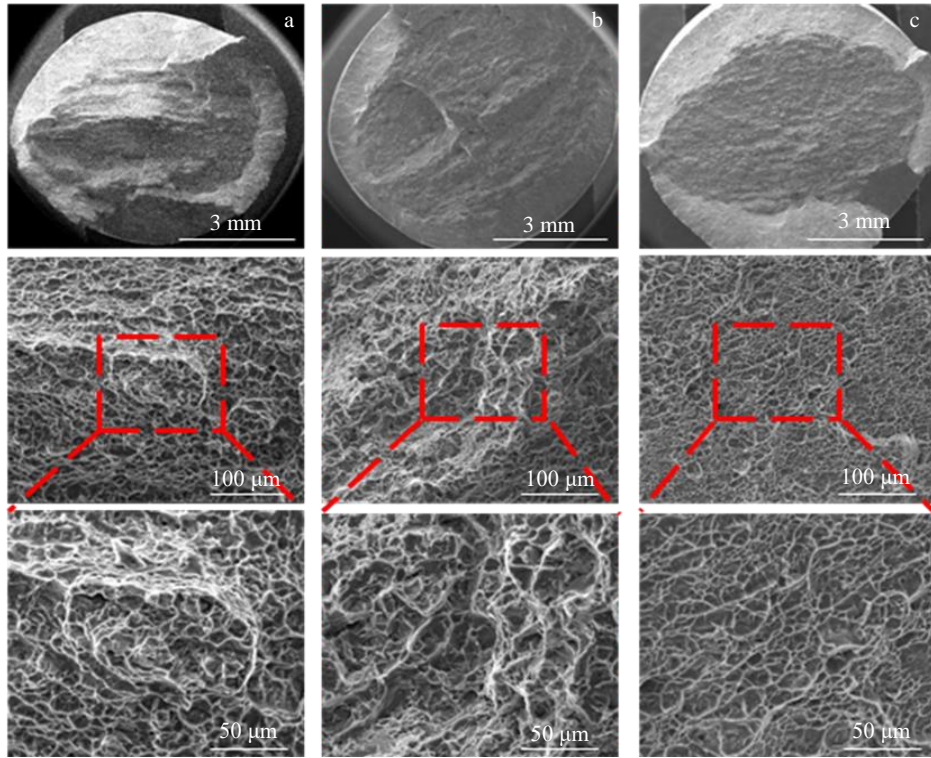


图 8 接头各层的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies and their magnification of each layer of joint: (a) Layer 1, (b) Layer 2, and (c) Layer 3

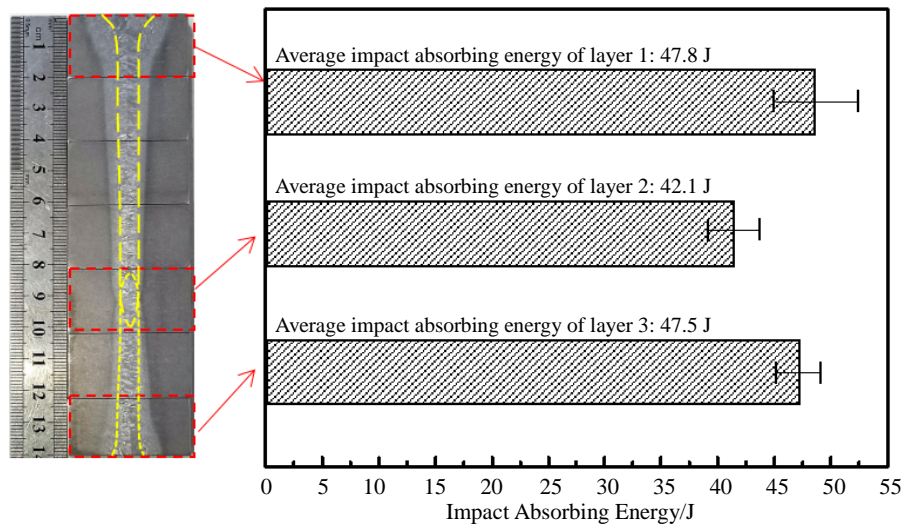


图 9 双面电子束焊接接头各层室温冲击韧性试验结果

Fig.9 Impact absorbing energy of each layer of welded joint obtained at room temperature

室温组织由  $\alpha$ 相和次生  $\alpha$ 相混合组成。潘博等人曾在研究 TC4 钛合金多次激光修复时发现经多次修复重熔后在熔敷区形成了魏氏组织，并导致熔敷区显微硬度高于母材<sup>[18]</sup>。H. Paydas 等人采用大功率大光斑和小功率小光斑 2 种 YAG 激光源进行了 TC4 钛合金的激光填粉修复研究<sup>[19]</sup>，结果也表明随热输入减小焊缝从魏氏组织和马氏体混合组织逐渐变为几乎全为马氏体组织。

为了理解两道焊缝根部的重叠区域组织性能的形成原因，采用有限元仿真分析了大厚度钛合金双道双侧不等熔深 EBW 焊接热循环特性，材料参数和边界条件等细节参见作者发表的论文<sup>[20]</sup>。根据生产实际共计算了 3 种工况：Case I：第 1 道焊完后马上焊第 2 道；Case II：第 1 道焊完后冷却 1 h 再焊第 2 道；Case III：第 1 道焊完后冷却 3 h（工件完全冷却）再焊第 2 道。然后提取焊

缝 1/2 长度处横截面上 Point 1、Point 2 和 Point 3 三个位置（见图 11a）的热循环曲线仿真结果，分别如图 11b、11c 和 11d 所示。从图 11b 可见,3 种工况下 Point 1 在 900 °C

附近冷却速度都约为 20.9 °C/s，这是因为 Point 1 焊后迅速冷却到 900 °C 以下，因此第 2 道焊接不会影响 Point 1 在 900 °C 附近的冷却速度。从图 11d 可见，随着第 1 道焊缝焊接后间隔时间（冷却时间）的增长，Point 3 在 900 °C 附近冷却速度逐渐从 25.6 °C/s 单调增大到 27.6 °C/s。总体上 Point 1 和 Point 3 在 900 °C 附近冷却速度相差不大。从图 11c 可见，当两道次焊接之间间隔时间分别是 0, 1 和 3 h 时，Point 2 在 900 °C 附近冷却速度分别是 38.9, 61.9 和 65.6 °C/s，明显高于 Point 1 和 Point 3 在 900 °C 附近冷却速度，并且随着两道次焊接之间间隔时间增长而明显增大。分析认为，本研究中两道焊缝根部重叠区域显微硬度偏高、冲击韧性偏低的原因很可能是在该区域焊后冷却过程中散热条件的独特性有关。大厚度工件非穿透焊接时焊缝根部区域不仅向焊缝两侧散热、还可以向焊缝底部区域散热，因此根部冷却速度比焊缝其它区域冷却速度高，使两道焊缝根部重叠区域室温  $\alpha'$  相增多，最终导致了重叠区域组织性能与远离重叠区焊缝组织性能的差异<sup>[17]</sup>。

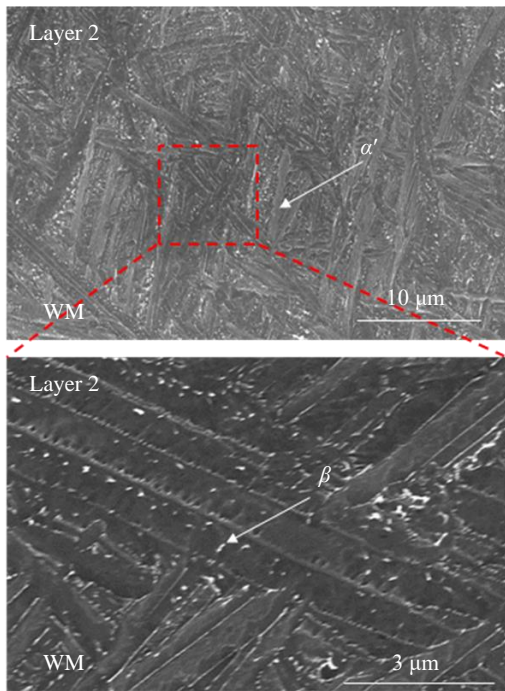


图 10 接头第 2 层焊缝区域的显微组织 SEM 照片  
Fig.10 SEM images for WM of Layer 2 of the joint

### 3.2 厚度方向接头抗拉强度不均匀现象的分析

分层拉伸试验结果表明，Layer 1 的抗拉强度平均值最高，Layer 3 次之，两道焊缝根部发生重叠的 Layer 2 区的抗拉强度最低。观察各层接头断裂失效位置，发现拉伸试验中各层接头的断裂位置均为母材区，如图 12 所示。

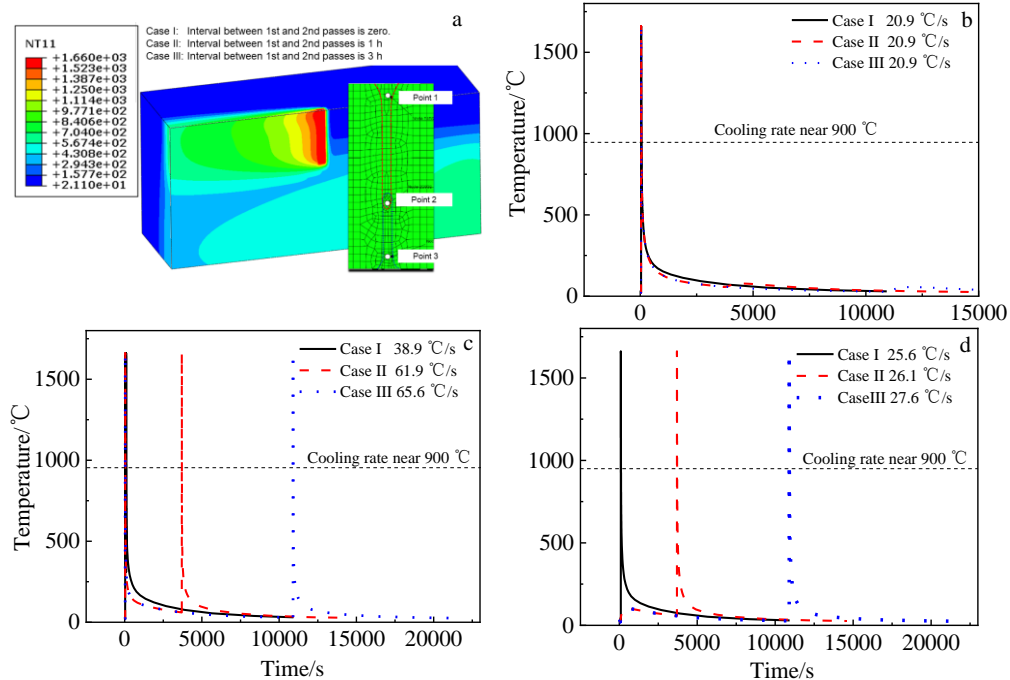


图 11 接头各层焊缝区在 900 °C 附近冷却速度的有限元分析

Fig.11 Finite element analysis of cooling rate near 900 °C in each layer of joint: (a) position distribution; (b) point 1, (c) point 2, and (d) point 3



图 12 接头各层的拉伸断裂位置

Fig.12 Tensile fracture position of each layer

已有的研究表明,由于大厚度 TC4 钛合金变形加工道次少,会导致铸坯中粗大、不均匀组织无法得到充分改良,并最终遗传到锻件中。其中,过热组织等缺陷即使采用热处理方法也无法改善,最终导致锻件厚度方向组织性能不均匀。同时,TC4 钛合金还对变形温度和变形速率极为敏感,这使得热加工工艺窗口狭窄<sup>[21]</sup>。在变形加工过程中,坯料表层和心部变形不均匀导致变形热效应,局部区域温度发生较明显波动,而这种波动甚至可能跨越  $\beta$  相变点而加剧厚度方向的组织和性能不均匀性问题。当材料的厚度的幅面尺寸较大时,大变形后水冷细化、镦粗等改善钛合金组织均匀性的方法也无法取得显著改善效果<sup>[22]</sup>。从图 5 可以清楚看到,各层材料母材区的组织有着比较明显的差异。因此,本研究中虽然各层焊接接头都是断裂在母材区,但是接头整体的抗拉强度却不同。

## 4 结 论

1) 两道焊缝根部重叠区的焊缝存在大量针状  $\alpha'$  相和点状离散分布的  $\beta$  相,针状相短小、相互交错现象明显;接头中其它焊缝区域观察到针状  $\alpha'$  相和分布在原始  $\beta$  晶界的  $\alpha$  相,但板条较长并排列具有较明显的方向性。

2) 两道焊缝根部重叠区的显微硬度(3780 MPa)比接头中其它焊缝区域显微硬度(3410~3460 MPa)高出约 10%。两道焊缝根部重叠区的焊缝室温冲击功(约 42 J)比接头中其它焊缝区域室温冲击功(约 47 J)低约 11%。原因是厚工件非穿透焊时焊缝根部重叠区域冷却速度高于焊缝其它区域。

3) Layer 1、Layer 2 和 Layer 3 的抗拉强度平均值分别为 944.63、900.41 和 911.54 MPa,即两道焊缝根部发生重叠的区域焊接接头抗拉强度最低。考虑到所有接头拉伸时都断裂在母材区,认为可能是因为大厚度锻件组织性能在厚度方向上的不均匀性而导致的结果。

4) 基于上述研究结果,采用双道双侧不等熔深 EBW 焊接方案制造大厚度镂空钛合金承重框是可行的,同时建议采用提高母材厚度方向组织性能均匀性、严格控制(减小) 两道次焊接之间间隔时间等措施。

## 参考文献 References

- [1] Guan Feng(关峰), Ni Jiaqiang(倪家强), Liu Guangxin(刘广鑫) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2017, 60(3): 74
- [2] Gao Fuyang(高福洋), Gao Qi(高奇), Jian Peng(蒋鹏) et al. *Scientia Sinica, Technologica*(中国科学: 技术科学)[J], 2017, 47(9): 941
- [3] Wang Jinxue(王金雪), Yuan Hong(袁鸿) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2016, 59(3): 5
- [4] Lu Wei(芦伟), Shi Yaowu(史耀武), Lei Yongping(雷永平) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(1): 54
- [5] Lu Wei(芦伟), Shi Yaowu(史耀武), Li Xiaoyan(李晓延) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1945
- [6] Wen Jingzhi(温锦志), Bu Wende(卜文德), Li Jianping(李建萍) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2016, 45(17): 66
- [7] Wang Houqin(王厚勤), Zhang Binggan(张秉刚), Wang Ting(王廷) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2015, 36(5): 13
- [8] Lu Ying(陆莹), Qiao Hongchao(乔红超), Qu Nan(曲楠) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 254
- [9] Fan Jikang(范霁康), Qi bojin(齐铂金), Li Xiaopeng(李晓鹏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 4026
- [10] Zhuang Mingxiang(庄明祥), Li Xiaoman(李小曼), Xu Mei(徐梅) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2017, 60(6): 100
- [11] Zhuang Mingxiang(庄明祥), Li Shangliang(李善良), Wan Tianli(王天立) et al. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 2017, 36(S1): 91
- [12] Hui Yuanyaun(惠媛媛), Zhang Min(张敏), Zhuang Mingxiang(庄明祥) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(08): 104
- [13] Fang Weiping(房卫萍), XiaoTie(肖铁), Zhang Yupeng(张宇鹏) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(12): 121
- [14] Li Xiaolong(李晓龙), Pan Jiandon(潘建东), Qiao Zhongsheng(乔忠生) et al. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*(航空工程进展)[J], 2019, 10(1): 124
- [15] Huang Feng(黄锋), Zhao Ganyao(赵刚要), Shuai Gewang(帅歌旺) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(3): 53
- [16] Saresh N, Gopalakrishna Pillai M, Mathew Jose et al. *Journal of*

- Materials Processing Technology*[J], 2007, 192(S): 83
- [17] Ahmed T, Rack H J. *Materials science and Engineering A*[J], 1998, 243(1): 206
- [18] Pan Bo(潘博), Huang Yichen(黄怡晨), Li Liqun(李俐群) et al. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光)[J], 2019, 46(10): 1 002 011
- [19] Paydas H, Mertens A, Carrus R et al. *Materials and Design*[J], 2015, 85(15): 497
- [20] Zhang L J, Zhang J X, Serizawa H et al. *Transactions of JWRI*[J], 2010, 39(2): 187
- [21] Li Liang(李梁), Sun Jianke(孙健科), Meng Xiangjun(孟祥军). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2004, 21(5): 19
- [22] Yao Zekun(姚泽坤), Guo Hongzhen(郭鸿镇), Su Zuwu(苏祖武). *Journal of Northwestern Polytechnical University*(西北工业大学学报)[J], 1992, 10(4): 487

## Microstructure and Properties of Double-side and Double-pass Unequal Penetration EBW TC4 Joint in Hollowed-out Load-bearing Thick Beam

Zhuang Mingxiang<sup>1</sup>, Liu Yongqiang<sup>1</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Wang Weixian<sup>1</sup>, Long Jian<sup>2</sup>, Zhang Linjie<sup>2</sup>

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd, Xi'an 710089, China)

(2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** According to the structural characteristics of 140 mm thick hollowed-out load-bearing TC4 titanium alloy beam, a double-side and double-pass electron beam welding (EBW) scheme with unequal penetration was proposed. The welding test was carried out and the microstructure and properties of the obtained joint were analyzed. It is found that the microstructure of the weld zone is obviously non-uniform in the direction of thickness, and the overlapping zone at the root of the two welds is the most noteworthy part. There are a lot of needle  $\alpha'$  phase and scattered  $\beta$  phase in the overlapping area of the root of the two welds, while the needle phase is short and the interlacing phenomenon of  $\alpha'$  phase is obvious. The needle  $\alpha'$  phase and  $\alpha$  phase distributed in the original  $\beta$  grain boundary are observed in other weld areas of the joint, but the laths are longer and arranged in a more obvious direction. The microhardness of the weld in the overlap zone of the root of the two welds is about 10% higher than that of the other weld zones in the joint (3410~3460 MPa). At room temperature, the impact energy of the weld in the overlap zone at the root of the two welds is about 11% lower than that of the other weld zones in the joint (about 47 J). The area where the roots of the two welds overlap is the area where the joint have the lowest tensile strength. With the aid of finite element simulation, it is found that the cooling rate around 900 °C of the overlapping area of the root of the two welds is higher than that of the other areas of the welds, which is an important reason for the difference in the microstructure and performance between the overlapping area and the other areas of the welds. It is noted that all joints are broken in the base material area during tensile tests, and it is believed that the inhomogeneity of microstructure and properties of large-thickness forgings in the direction of thickness result in the inhomogeneity of tensile strength of joints. The results show that it is feasible to use double-side and double-pass unequal penetration EBW welding scheme to fabricate thick hollowed-out load-bearing TC4 titanium alloy beam. Meanwhile, some beneficial measures such as improving the uniformity of microstructure and property of the base material and strictly controlling the interval time between two passes of welding are recommended.

**Key words:** titanium alloy; hollowed-out load-bearing thick beam; electron beam welding; double-side and double-pass unequal penetration EBW welding; microstructure and properties

---

Corresponding author: Zhang Linjie, Professor, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82668614, E-mail: zhanglingjie@xjtu.edu.cn