

TC4 钛合金电子束连接组织与性能演变

苗金芳¹ 王爱琴¹ 吕逸帆² 余 巍² 谢敬佩¹ 柳 培¹ 廖志谦²
(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.中国船舶重工集团公司第七二五研究所)

摘 要 对厚 20 mm 的 TC4 钛合金板真空电子束连接过程温度场进行数值模拟,并对其进行退火处理。采用光学显微镜、显微硬度仪、拉伸试验机、冲击试验机等分析了退火前后电子束接头的显微组织和力学性能。结果表明,TC4 钛合金真空电子束连接过程中连接区及其附近热影响区存在较大的温度梯度,可高达 1 000 ℃;退火处理后接头组织为针状马氏体 α' 相,热影响区组织为针状马氏体 α' 相和原始的 α 相与 β 相,电子束接头显微组织组成相未发生变化,但其晶粒尺寸细化;退火处理消除了电子束接头热影响区到母材区的硬度突变现象,接头抗拉强度达到母材的 98%,冲击韧度较退火前提高了 6.0% 以上。

关键词 TC4 钛合金;电子束连接;退火处理;组织性能

中图分类号 TG456.3;TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Performance Evolution of Electron Beam Bonding of TC4 Titanium Alloy

Miao Jinfang¹, Wang Aiqin¹, Lü Yifan², Yu Wei², Xie Jingpei¹, Liu Pei¹, Liao Zhiqian²

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.The 725th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation)

Abstract: The temperature field of TC4 titanium alloy plate with thickness of 20 mm during vacuum electron beam bonding was numerically simulated, and subsequent annealing treatment was performed. The microstructures and mechanical properties of the joint before and after annealing were analyzed by optical microscope, microhardness tester, tensile tester and impact tester. The results indicate that there exists a large temperature gradient in the joining zone and adjacent heat affected zone during vacuum electron beam bonding of TC4 titanium alloy, which reaches up to 1 000 ℃. After annealing treatment, the microstructure of the joint is composed of acicular martensite α' phase, and that of heat-affected zone consists of acicular martensite α' phase and the original α and β phases. The phase composition of electron beam joint remains stable, while grain size is refined. The abrupt phenomenon of hardness from the heat affected zone to the base metal zone of the electron beam joint is eliminated by annealing treatment, where the tensile strength of the electron beam joint reaches 98% of base metal, and the impact toughness is over 6.0% higher than that of ones before annealing.

Key Words: TC4 Titanium Alloy, Electron Beam Bonding, Annealing Treatment, Microstructure and Performance

TC4 钛合金是 $\alpha + \beta$ 双相组织钛合金,具有高比强、优异的耐腐蚀性,被广泛应用于航空航天、汽车、化工和海洋工程等领域^[1-4]。钛合金在高温下对 O、C、H、N 等有很强的亲和力,容易产生裂纹和气孔,造成接头强度和塑韧性下降,连接变形大,还会使接头脆化,抑制了其在工程上的应用。真空电子束连接与传统连接方法相比具有能量密度大、热影响区小、连接效率高、连接变形小等特点^[5-6],在钛合金连接方面得到了广泛应用。电子束连接具有深宽比大的特点,是厚板钛合金连接的

优选方式^[7],目前大厚板钛合金的连接多使用真空电子束连接。

近年来随着计算机技术的发展,采用数值模拟的方法来模拟复杂的连接过程取得了很大的进展,对 20 mm 厚的 TC4 钛合金真空电子束连接过程进行数值模拟,对其温度场进行分析,发现接头在连接过程中存在很大的温度梯度,且钛合金厚度方向上存在热作用,使得电子束连接前后容易造成组织性能不同,力学性能不均匀等问题^[8]。为了改善电子束接头性能和力学性能,需要

收稿日期:2022-11-22;修改稿收到日期:2022-12-11
基金项目:郑洛新自创区专项基金资助项目(201200211400)
第一作者简介:苗金芳,女,1998 年出生,硕士研究生,河南洛阳(471000),E-mail:2391561211@qq.com
通信作者:王爱琴,女,1964 年出生,教授,河南洛阳(471000),E-mail:aiqin_wang888@163.com
引用格式:苗金芳,王爱琴,吕逸帆,等. TC4 钛合金电子束连接组织与性能演变[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 485-1 492.
MIAO J F, WANG A Q, LÜ Y F, et al. Microstructure and performance evolution of electron beam bonding of TC4 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 485-1 492.

对连接板进行连接后处理。连接后可以采用不同的热处理工艺对接头以及整个工件进行热处理,从而调控显微组织,提高材料的力学性能和理化性能,使材料满足不同的需求^[9-10]。王悔改等^[11]对 3 mm 厚的 TC4 钛合金进行连接后热处理,分析了其显微组织和力学性能,发现退火处理后,合金组织由 α 相与 α 相晶粒间弥散的细小等轴状 β 相组成,由于消除了内应力,合金塑性和组织稳定性提高,但强度和硬度有所降低;付鹏飞等^[12]对 12.5 mm 厚的 TC4 钛合金进行电子束连接后局部热处理,发现电子束局部热处理后接头的组织形态基本相同,但连接区的晶粒组织细化,使得显微硬度分布较平稳,抗拉强度得到提高,但拉伸塑性降低;LIU J 等^[13]对 1.8 mm 厚的 TC4 钛合金进行钨极气体保护连接,研究了一次两步高温连接后热处理对 TC4 接头微观组织的影响,发现接头组织由层状马氏体 α 相、保留 β 相和初生 α 相组成,且在晶粒和晶界均出现了球化 α 相,改善了连接区的力学性能。

综上,大多数研究主要针对薄板和中厚板钛合金进行连接后处理,对厚板的研究较少,且多对显微硬度和抗拉强度进行测试,对冲击韧度的测试较少。因此,本研究对厚 20 mm 的 TC4 钛合金板真空电子束接头进行退火处理,并对冲击韧度进行测试,分析了退火处理后接头显微组织和力学性能的变化,为厚板 TC4 钛合金电子束连接件的工程应用提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为厚 20 mm 的轧制态 TC4(Ti-6Al-4V)钛合金,其化学成分见表 1,供货时为退火态,母材的显微组织见图 1a。可以看出,TC4 钛合金母材为 $\alpha + \beta$ 双

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy							%
ω_B							
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.29	4.00	0.099	0.007	0.009	0.001 1	0.146	余量

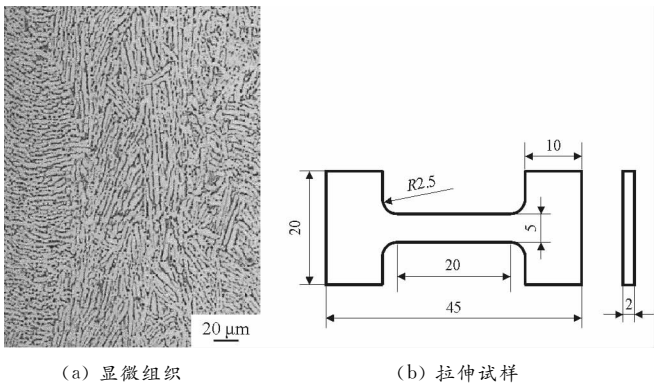


图 1 TC4 钛合金母材的显微组织及拉伸试样尺寸示意图
Fig.1 Microstructure of TC4 titanium alloy base metal and tensile specimen

相组织组成,其中 α 相为长条状, β 相分布在 α 相晶间。

TC4 钛合金真空电子束连接试验在大功率电子束焊机上进行。电子束连接工艺参数:电压为 150 kV,电流为 120 mA,连接速度为 1 200 mm/min。退火试验在 SX2-4-10A 高温电阻炉中进行,退火工艺为 600 $^{\circ}\text{C} \times 4 \text{ h} + \text{炉冷}$ 。

采用线切割加工金相试样,依次用不同型号的砂纸打磨试样,然后使用粒度为 2.5 μm 的抛光膏抛光,采用 Kroll 试剂(HF 、 HNO_3 、 H_2O 体积比为 1 : 3 : 10)腐蚀 15 s,采用 Axio Vert A1 型倒置金相显微镜观察试样的金相组织。采用 MH-3 型显微硬度计测试接头显微维氏硬度,载荷为 1.96 N,加载时间为 10 s,记录母材、热影响区和连接区的显微硬度,并测量接头厚度方向即从接头顶到根部的显微硬度;退火完成后,取接头和母材区制备拉伸试样,接头沿厚度方向上下取样,在 SHIMADZU AG-I250kN 精密万能电子拉伸试验机上对 TC4 钛合金电子束接头、母材试样进行室温拉伸试验,在试验前用砂纸打磨掉线切割痕迹,拉伸速度为 1 mm/min,结果取 3 组试样的平均值;采用夏比 V 形缺口对接头和母材进行冲击试验,试验在 JBN-300B 型冲击试验机上进行,试样尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm,见图 1b。接头试样缺口分别开在母材区、热影响区和连接区。

2 数值模拟计算

2.1 模型尺寸及参数

采用 ABAQUS 软件对 TC4 钛合金电子束连接过程温度场进行数值模拟,试样尺寸为 50 mm $\times$ 200 mm $\times$ 20 mm,TC4 钛合金的热导率和比热容^[14]见表 2。

表 2 TC4 合金的热物性参数

Tab.2 Thermo-physical parameters of TC4 alloy		
温度/ $^{\circ}\text{C}$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
20	611	6.8
200	653	8.7
400	691	10.3
600	713	13.7
700	725	14.4
800	735	15.8
1 000	754	18.3
1 200	771	21.7
1 400	787	24.5
1 540	800	25.3
1 650	806	20
1 800	806	20
$>1\ 800$	806	20

2.2 有限元模型建立

为更好地模拟电子束连接过程中的形貌和深度方

向的特点,选用高斯面热源+高斯旋转体热源组合热源模型,热源模型见图 2,高斯面热源为了模拟试样表面的热作用,高斯旋转体热源则为了模拟试样在厚度方向的热作用^[15-16]。

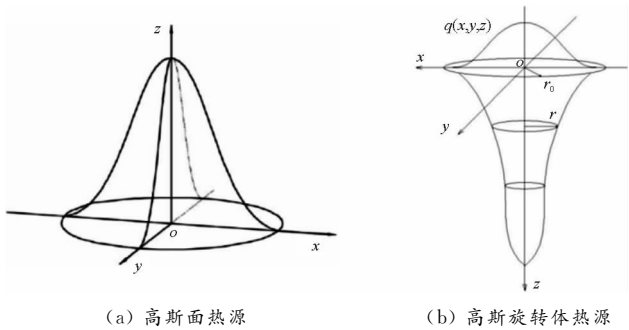
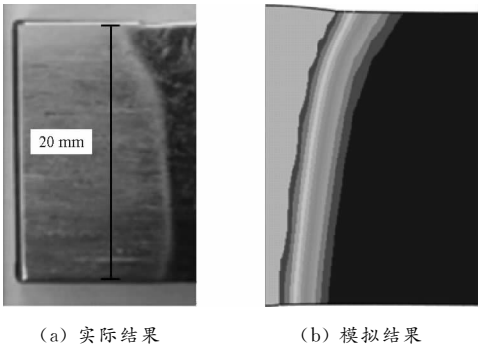


图 2 热源模型示意图

ABAQUS的二次开发一般用Python,而ABAQUS中应用到的子程序用 Fortran 编写。ABAQUS 的子程序接口比较多,在焊接模拟时对热源的描述只能采用子程序的方式进行加载。热源载荷分布分别为加热步和冷却步,由于板长为 50 mm,且热源加载速度为 0.02 m/s,因此加热步时间为 2.5 s,而冷却步时间则为 1 000 s。

热源校核结果见图 3,模拟得到的电子束连接形貌



(a) 实际结果 (b) 模拟结果

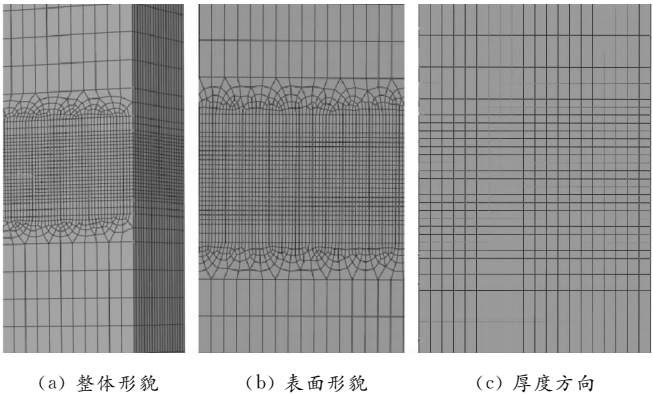
图 3 电子束接头形貌的模拟结果与实际结果对比图

Fig.3 Morphology comparison between simulated and actual results of electron beam joint

与实际焊缝形貌相符合,证明了热源模型的可行性。

2.3 网格划分

电子束连接具有峰值温度高、热源集中的特点,在连接区和热影响区具有较大的温度梯度。为保证计算精度和计算效率,对模型进行过渡网格划分原则,即在连接区进行较为密集网格划分,网格尺寸为 0.5 mm;在远离连接区的母材区域进行稀疏网格划分,网格尺寸为 2 mm,两者之间区域采取过渡网格划分,网格尺寸为 1 mm,单元类型选择 8 节点三维实体类型 C3D8T。网格划分见图 4。



(a) 整体形貌 (b) 表面形貌 (c) 厚度方向

图 4 有限元网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of finite element meshing

2.4 电子束接头温度场分析

2.4.1 电子束连接过程温度场云图

电子束连接接头不同时刻温度场分布见图 5。可以看出,在电子束连接刚开始,TC4 钛合金板温度在熔点 1 668 ℃ 以下,未发生熔化;电子束作用 0.12 s 时,TC4 钛合金板温度迅速上升并达到熔点,接头中心发生熔化,形成接头;随着电子束移动,形成椭圆形熔池。还可以看出,在熔池前方,温度梯度大,等温线分布密集,在熔池后方,温度梯度小,等温线分布稀疏,说明电子束连接能量密度大、热源集中。

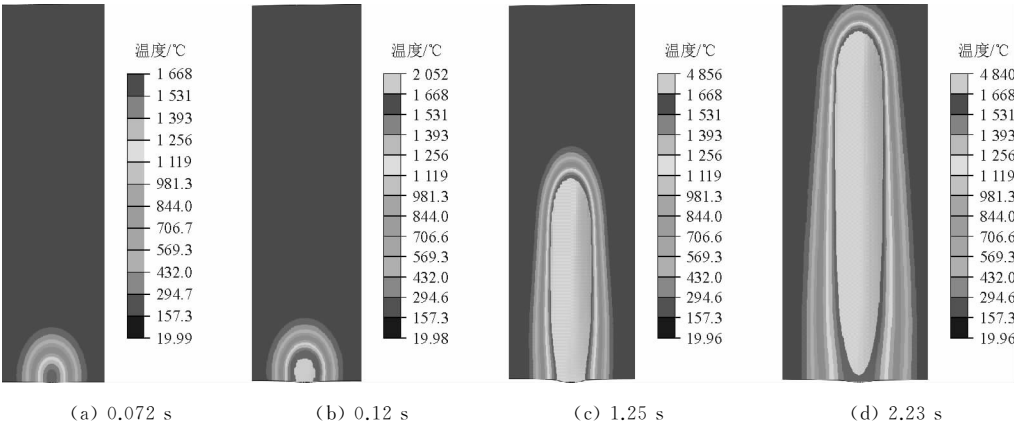


图 5 电子束连接接头不同时刻的温度场

Fig.5 Temperature field of electron beam joint at different moments

2.4.2 沿连接方向各点热循环曲线分析

为分析 TC4 钛合金电子束连接过程模拟结果,沿连接方向提取表面的 5 个点(*a*~*e*)进行分析。图 6 为各点温度场及热循环曲线。可以看出,在电子束连接过程中,各点热循环趋势一致。在连接的初始阶段,温度场处于不稳定状态,熔池中心的峰值温度在 3 500 ℃左右,随着连接过程的进行,峰值温度随着热源的作用上升,熔池中心的峰值温度保持在 4 500 ℃左右。

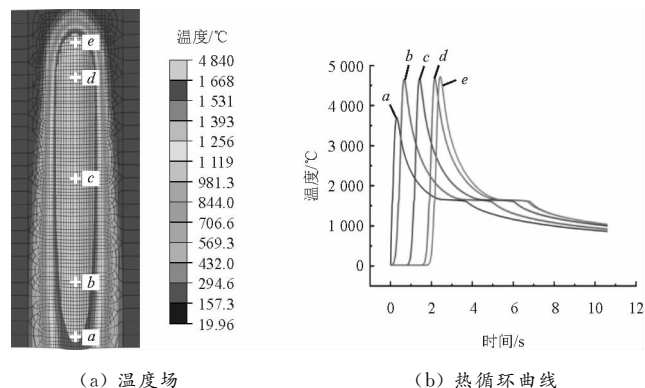


图 6 TC4 钛合金电子束连接头沿连接方向的温度场和热循环曲线

Fig.6 Temperature field and thermal cycle curves of TC4 titanium alloy electron beam joint along the bonding direction

2.4.3 垂直连接方向各点热循环曲线分析

在电子束连接 1.25 s 时,垂直连接方向提取不同点(*A*~*F*)进行热循环曲线分析。图 7 为 TC4 钛合金电子束连接头垂直连接方向的温度场和热循环曲线。可以看出,在电子束连接过程中,随着电子束到达各节点温度在短时间内迅速升高达到峰值,距离连接中心越近的高温区的曲线越陡,峰值温度也最高。*A* 点在连接中心,电子束能量作用最强,峰值温度也最高,达 4 500 ℃;*B* 点位于电子束连接区域但距连接中心有距离,电子束能量作用有所降低,但峰值温度达 3 000 ℃,

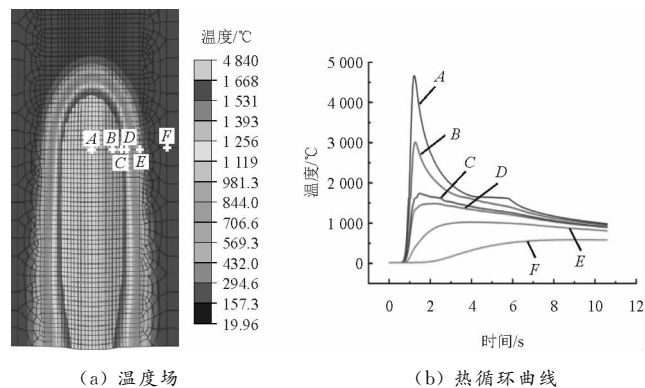


图 7 TC4 钛合金电子束连接头垂直连接方向的温度场和热循环曲线

Fig.7 Temperature field and thermal cycle curves of TC4 titanium alloy electron beam joint in vertical bonding direction

超过了 TC4 钛合金的熔点;*C* 点、*D* 点位于热影响区附近,受到的热作用小,峰值温度在 TC4 钛合金熔点附近甚至低于熔点;*E* 和 *F* 点距离连接中心较远,受到的热作用最小,峰值温度远低于 TC4 钛合金的熔点。可以看出,连接区附近峰值温度梯度大,可高达 1 000 ℃。

当电子束离开后,各节点温度先迅速下降,然后下降趋缓,这是因为电子束离开各节点后,各节点不再受电子束能量的作用,温度迅速下降,但又受熔池热作用以及工件内部热作用,温度下降缓慢并慢慢降至室温^[17]。表明电子束连接热源集中,连接区域周围温度梯度大,距离连接区越远,温度下降越快。

分析可知,在连接过程中,连接区及其附近区域有较大的温度梯度变化,从而引起组织变化,最终导致接头的性能下降,需对接头进行退火处理。

3 试验结果及分析

3.1 退火前后接头显微组织演变

TC4 钛合金接头的宏观形貌见图 8。可以看出,接头分为母材、热影响区和连接区。退火处理前后 TC4 钛合金接头的组织见图 9。可以看出,退火处理前母材组织为 $\alpha + \beta$ 双相组织,热影响区的组织为较少的针状马氏体 α' 相和原始的 α 相与 β 相组成,连接区组织为针状马氏体 α' 相;退火处理后,母材组织仍为 $\alpha + \beta$ 双相组织,热影响区的组织为较少的针状马氏体 α' 相和原始的 α 相和 β 相组成,接头组织仍为针状马氏体 α' 相。退火前后 TC4 钛合金电子束接头的显微组织一致。

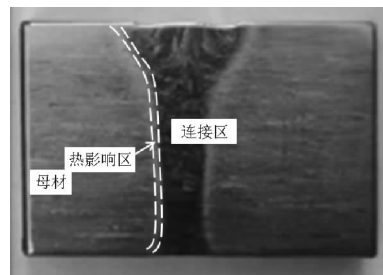


图 8 TC4 钛合金接头组织宏观形貌图
Fig.8 Macro morphology of TC4 titanium alloy joint

从图 9 可以看出,退火前连接区显微组织内部为交错排列的针状马氏体 α' 相,而且针状马氏体的尺寸更为粗大^[18]。退火处理后,连接区内部析出更多的针状马氏体 α' 相且分布更加均匀。由于退火处理的退火温度没有达到 β 相的转变温度且冷却速度较慢,所以连接区的 β 晶界仍然明显,并没有太大变化,但在长时间的保温过程中原始针状马氏体 α' 相的周围析出 α' 相,使得组织分布更加细密。

退火前连接区上部组织较中部和下部粗大,是因为在电子束连接过程中上部受热最严重;退火后从连接区

上部到下部的组织分布均匀,且上部组织较中部和下部组织分布更细密,且针状马氏体 α' 相的含量更高,是因为接头上部受到热量的作用温度最高,时间最长,在退

火处理作用过程中析出了更多的针状马氏体 α' 相,而接头中部和下部受到的热作用时间短,针状马氏体 α' 相的含量低且分布较上部稀疏。

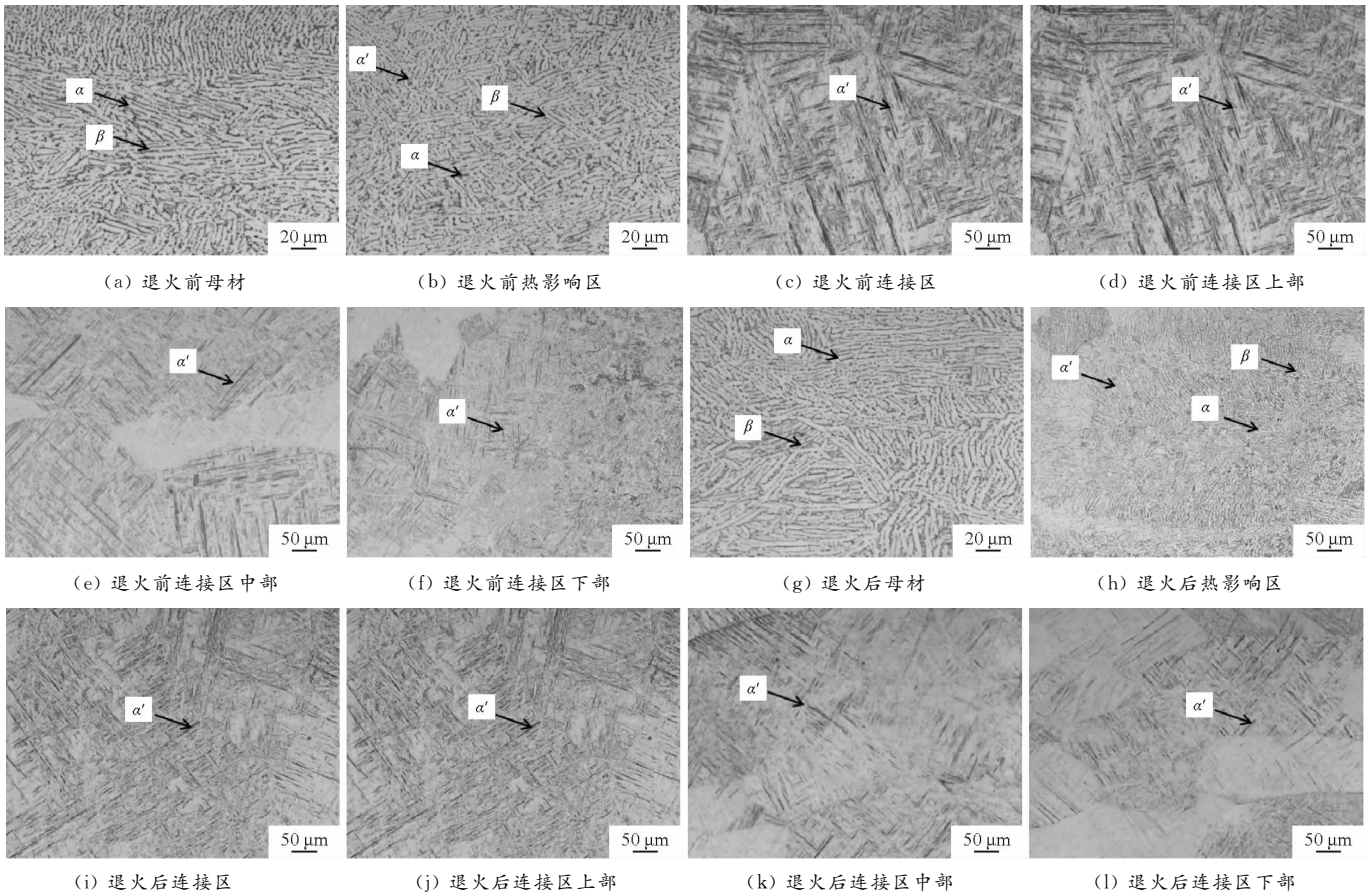


图 9 退火前后 TC4 钛合金电子束连接接头的显微组织

Fig.9 Microstructure of electron beam bonding joint of TC4 titanium alloy before and after annealing

退火前热影响区的组织由针状马氏体 α' 相和原始的 α 相与 β 相组成,是因为热影响区靠近连接区受高温的影响温度达到了熔点,在快速冷却中有少量针状马氏体 α' 相析出。而热影响区靠近母材的区域由于距离连接区远,温度低,连接过程中温度没有达到熔点,组织未转变为高温 β 相,在冷却过程中初始 β 相大部分都转变成了 α 相,只有小部分保留了下来。退火后热影响区组织和退火前组织组成一样,但退火处理温度低,保温时间长,使得针状马氏体 α' 相组织细小且更均匀。

退火前母材区组织为 $\alpha + \beta$ 双相组织,是因为母材区远离连接区,所受电子束热源作用小、温度低,组织未发生转变;退火处理后由于保温时间长、冷却速度慢,母材组织中冷却前就已经有初生 α 相,冷却使 α 相沿着初生 α 相边界析出并粗化^[19],但整体组织组成不变,仍为 $\alpha + \beta$ 相组织。

TC4 钛合金电子束连接过程中,从母材区到热影响区再到连接区,电子束连接过程中所受温度越来越高,原始的 α 相和 β 相在高温作用下转变为高温 β 相,并在快速冷却过程中通过切变的方式转变为针状马氏

体 α' 相^[20],温度越高则转变的 α' 相越多,而连接区域所受的温度最高并超过熔点,因此连接区域的组织全部为针状马氏体 α' 相且含量最多,热影响区次之,母材则不含针状马氏体 α' 相。退火处理温度为 600 ℃,低于 β 相转变温度,未发生 β 相转变,组织也没有发生再结晶,且冷却速度慢,因此,退火处理后接头显微组织并没有发生变化,分布更加均匀。

厚板钛合金的连接组织和中厚板、薄板的组织组成一样,母材组织为 $\alpha + \beta$ 相组织,热影响区组织为原始的 α 相、 β 相和针状马氏体 α' 相,接头组织为针状马氏体 α' 相。但厚板钛合金连接过程中由于厚度方向所受热量不同,使得组织上部较下部粗大,且上部组织含量较高。对于厚度方向存在的组织差异,可以通过改变电子束连接工艺参数进行调节。可以适当降低热输入,使晶粒尺寸减小,如采用提高连接速度等措施。

3.2 退火前后 TC4 钛合金接头的力学性能

3.2.1 显微硬度分析

TC4 钛合金电子束接头水平方向和厚度方向的显

微硬度测量位置见图 10。退火处理前后 TC4 钛合金电子束接头水平方向和厚度方向显微硬度见图 11。可以看出,在水平方向,退火处理前连接区硬度>热影响区>母材区,且热影响区到母材区的显微硬度存在突变;退火处理后显微硬度分布趋势不变,但接头各区域的显微组织分布更加均匀、稳定^[21],所以显微硬度分布也更为均匀,消除了热影响区到母材区的硬度突变。主要原因是在 600 ℃ 进行退火处理,退火温度并没有达到 β 相的相变点,且保温时间长,连接区和热影响区的针状马氏体 α' 相更细小且分布更为均匀,退火处理只是改变了接头的组织分布,对组织的尺寸影响不大,因此进行退火处理后接头水平方向显微硬度并没有太大变化。退火前后水平方向显微硬度分布趋势一致,是因为 TC4 钛合金在电子束连接过程中,连接区温度最高,原始的 $\alpha+\beta$ 组织在高温下通过相变和再结晶转变为高温 β 相^[22]。在快速冷却过程中,高温 β 相切变为针状马氏体 α' 相组织,且大部分的 β 相都能转变为针状马氏体 α' 相,而热影响区只有靠近连接区域在高温作用下部分组织转变为针状马氏体 α' 相,母材组织则仍为 α 相和 β 相^[23],因此连接区的针状马氏体 α' 相含量高于热影响区和母材,且显微硬度分布规律为针状马氏体 α' 相> α 相> β 相^[24],所以连接区的显微硬度高于热影响区和母材。

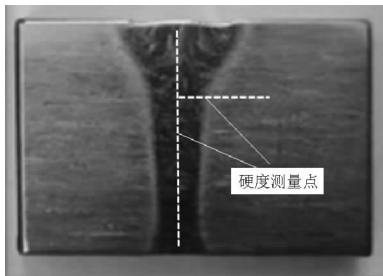


图 10 显微硬度测量位置分布图

Fig.10 Microhardness measurement locations

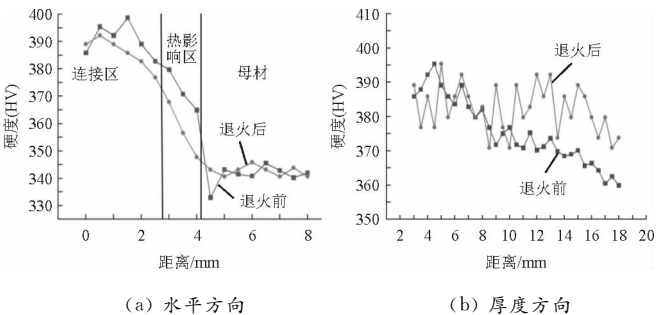


图 11 退火前后 TC4 钛合金电子束接头显微硬度对比

Fig.11 Microhardness comparison of TC4 titanium alloy electron beam joint before and after annealing

在厚度方向,退火处理前从连接区上部到下部显微硬度逐渐降低;退火处理后显微硬度(HV)变化趋势均

匀,在 370~390 之间波动,显微硬度分布均匀,说明退火处理使得接头显微组织分布均匀,硬度值也更为均匀。

3.2.2 力学性能分析

TC4 钛合金电子束接头退火处理前后的力学性能见图 12。可以看出,退火处理后的接头抗拉强度与退火前相比略有下降,降幅约为 2.9%,但抗拉强度达到了母材的 98%;屈服强度与退火前相比下降约为 0.4%,说明退火处理后接头强度较好。伸长率和断面收缩率较退火处理前有所提高,分别提高了约 5.8%和 4.3%,使得接头的塑性得到提升。表明 TC4 钛合金电子束接头经过退火处理后,虽然接头强度变化不大,但塑性得到了提高。

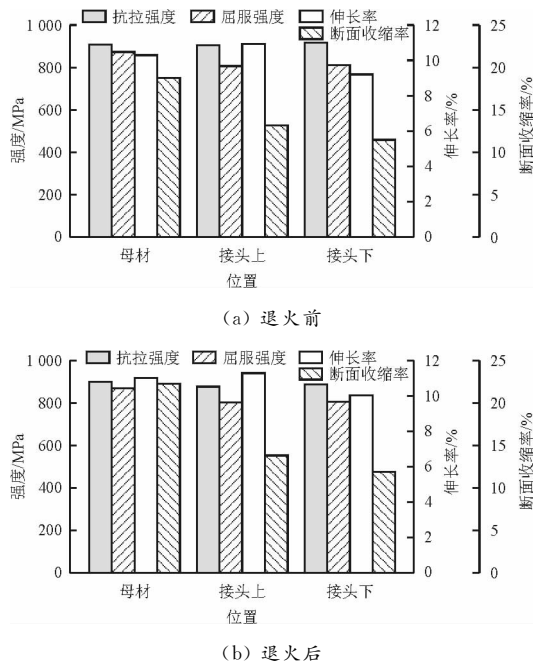


图 12 退火前后 TC4 钛合金电子束接头力学性能分析

Fig.12 Mechanical properties of electron beam joint of TC4 titanium alloy before and after annealing

结合显微组织进行分析,接头经过退火处理后,接头连接区晶粒经过退火处理后组织得到细化,分布更加均匀,而且由于退火处理温度低,使得连接区组织未发生再结晶,连接区组织仍为针状马氏体 α' 相,所以接头的强度与退火前相比略有下降,塑性却得到了提高。

通过对退火处理前后的 TC4 钛合金电子束接头进行拉伸试验,发现均断裂在热影响区靠母材处,表明接头具有良好的拉伸性能。对母材和接头退火前后的拉伸试样断口形貌进行观察,见图 13。可以看出,拉伸断口分布着许多大小不一的韧窝,表明接头断口具有韧性断裂特征。退火前的拉伸断口韧窝大而浅,且数量少;退火后的韧窝大小均匀且多而深,说明退火后接头的塑性得到改善,与伸长率和断面收缩率的测试结果一致。

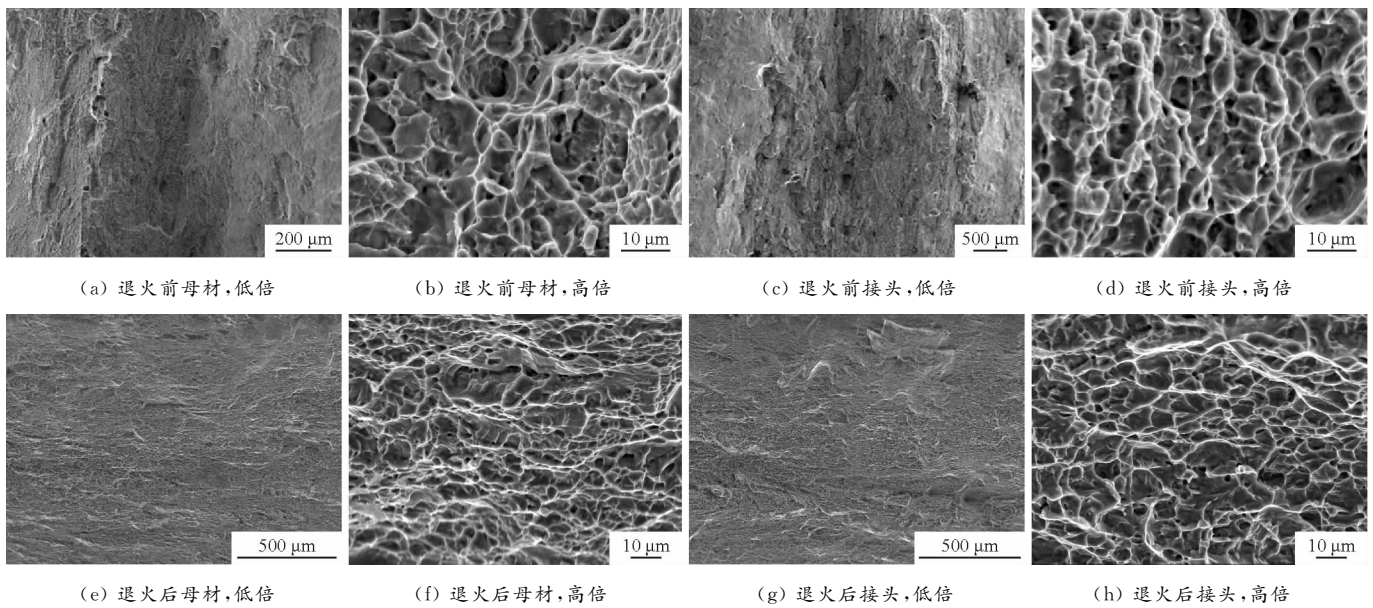


图 13 退火前后 TC4 钛合金电子束接头拉伸断口形貌
Fig.13 Tensile fracture morphologies of TC4 titanium alloy electron beam joint before and after annealing

3.2.3 冲击性能分析

图 14 为 TC4 钛合金电子束接头退火前后冲击断口形貌。退火前后 TC4 钛合金电子束接头各部分的冲击功见图 15。从图 15 可以看出,母材的冲击功高于热影响区和连接区。退火处理后,冲击功均有所提高,

母材、热影响区、连接区分别提高约 6.7%、6.0% 和 7.4%,表明退火处理后接头的韧性得到了提高。主要是由于退火处理使电子束接头的组织细化、均匀,并消除电子束连接的残余应力,在强度略有损失同时提高了韧性。

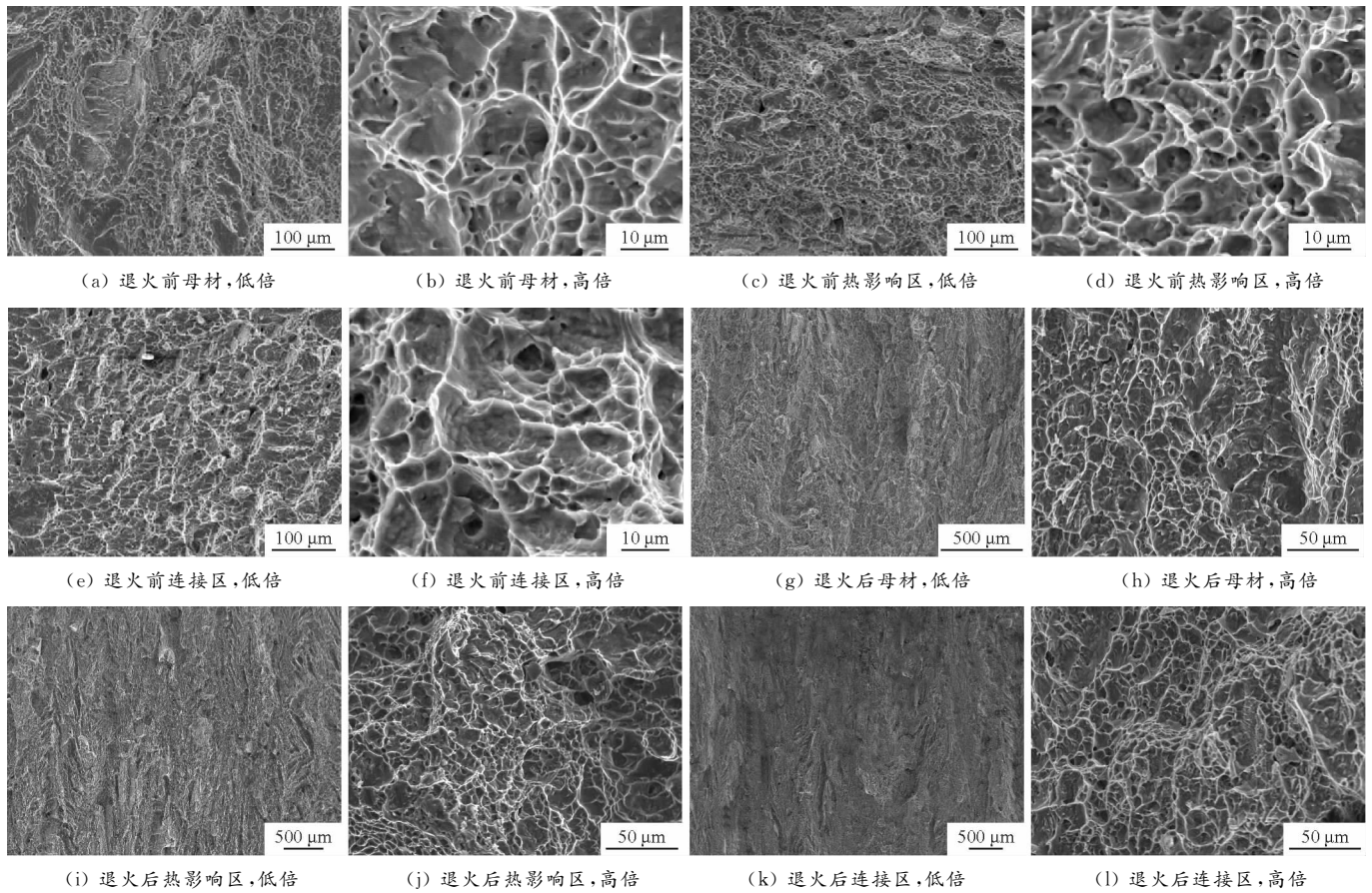


图 14 退火前后 TC4 钛合金电子束接头冲击断口形貌
Fig.14 Impact fracture morphologies of TC4 titanium alloy electron beam joint before and after annealing treatment

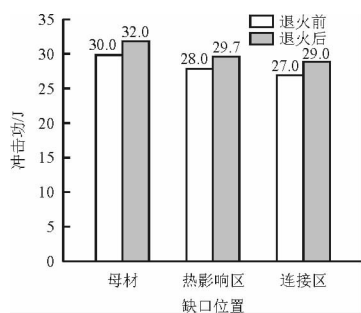


图 15 退火前后 TC4 钛合金电子束接头冲击功
Fig.15 Impact power of TC4 titanium alloy electron beam joint before and after annealing

从图 14 可以看出,退火前的冲击断口韧窝数量少且韧窝较浅,而退火处理后断口韧窝多而深,缺口开在母材的断口韧窝比缺口开在热影响区和连接区的大而深,因此母材冲击功较高,但总体来看冲击试样为韧性断裂,冲击韧度较好。说明经过退火处理,冲击韧性得到了提高。

4 结 论

(1)对 TC4 钛合金电子束连接温度场进行数值模拟,垂直连接方向的热循环曲线表明,在连接区及其周围有很大的温度梯度,峰值温度随距连接区的距离而迅速下降,两点间的温度差可高达 1 000 ℃。

(2)TC4 钛合金真空电子束接头退火前接头组织为针状马氏体 α' 相,热影响区的组织由针状马氏体 α' 相和 $\alpha+\beta$ 相组成;经 600 ℃×4 h 退火处理后其组织组成与退火前一致,退火处理使接头各区域组织细化且分布更加均匀。

(3)TC4 钛合金真空电子束接头退火处理前,接头的显微硬度分布不均,接头抗拉强度厚度方向从上部到下部逐渐增大,分别达到 908.5 MPa 和 920 MPa,屈服强度从上到下由 809 MPa 增加到 814 MPa,冲击功大于 28 J;退火处理后,接头的显微硬度均匀分布,抗拉强度虽略有下降但仍然达到母材的 98%,屈服强度下降了约 0.4%,伸长率和断面收缩率较退火处理前分别提高了约 5.8%和 4.3%,接头塑性提高,冲击韧度较退火处理前提高了 6.0%以上。

参 考 文 献

[1] SARESH N, PILLAI M G, MATHEW J. Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 83-88.
[2] THOMAS G, RAMACHANDRA V, GANESHAN R, et al. Effect of pre-and post-weld heat treatments on the mechanical properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(18): 4 892-4 899.

[3] PENG H L, LI X F, CHEN X, et al. Effect of grain size on high-temperature stress relaxation behavior of fine-grained TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(3): 668-677.
[4] YANG X, WANG W L, MA W J, et al. Corrosion and wear properties of micro-arc oxidation treated Ti6Al4V alloy prepared by selective electron beam melting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2 132-2 142.
[5] 龚玉兵,王善林,李娟,等.TC4 钛合金厚板电子束焊接接头的组织与性能[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(3): 324-329.
[6] DAI H L, DU R Z, HE Y, et al. Microstructure appearance of TC4 titanium alloy welded joint by pulsed electron beam[J]. Materials Science Forum, 2020, 4 920(982): 143-150.
[7] 温锦志,卜文德,李建萍,等.厚板 TC4 钛合金电子束焊接头组织和力学性能研究[J].热加工工艺, 2016, 45(17): 66-69.
[8] 房卫萍,黎小辉,张宇鹏,等.热处理对 100 mm 厚 TC4 钛合金电子束焊接接头性能的影响[J].电焊机, 2017, 47(6): 82-87.
[9] 黄剑锋. 高强高塑 TC4 钛合金板材热轧与热处理的组织和性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
[10] 胡美娟,刘金合,康文军,等. 电子束局部热处理对 TC4 钛合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 104-107.
[11] 王梅改,冷文才,李双晓,等.热处理工艺对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J].热加工工艺, 2011, 40(10): 181-183.
[12] 付鹏飞,毛智勇,李晋伟,等.电子束局部热处理对 TC4 钛合金焊接接头组织及力学性能的影响[J].新技术新工艺, 2004(9): 45-47.
[13] LIU J, QIAO H, HU Y, et al. The influence of post weld heat treatment on microstructure of TC4 weld joints[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S5): 585-587.
[14] 黄雷雷. 钛合金筒件真空电子束焊接变形数值模拟及控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
[15] PAVELIC V, TANBAKUCHI R, AUYEHARA O. Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates[J]. Welding Journal Research Supplement, 2001, 48(7): 295-305.
[16] 吴甦,赵海燕,王煜,等.高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J].焊接学报, 2004(1): 91-94.
[17] 毛蓝宇. 真空轧制复合电子束焊接封装数值模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2019.
[18] 卜文德,刘容光,宋锋涛,等.电子束局部热处理工艺对 TC4 钛合金焊接接头组织及硬度的影响[J].焊接学报, 2017, 38(9): 102-106, 133.
[19] 赵大伟.热处理对 TC4/TA15 焊接接头组织和力学性能影响的研究[D]. 辽宁大连:大连交通大学, 2008.
[20] 房卫萍,肖铁,张宇鹏,等.超厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头应力腐蚀敏感性[J].焊接学报, 2019, 40(12): 121-128, 166.
[21] 闻雅. TC4 钛合金球壳体电子束焊接接头性能及应力分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
[22] 刘华栋,刘伟军,卞宏友,等.局部热处理对 TC4 钛合金电子束焊接接头性能的影响[J].现代机械, 2021(3): 90-94.
[23] 娄宇航,蔺广学,刘俞平,等.TC4 真空电子束焊后热处理对接头组织性能的影响[J].热加工工艺, 2013, 42(19): 179-182.
[24] 张翥. 钛的金属学和热处理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.

(编辑:刘晨辉)