

引用格式:穆壮壮,高福洋,余巍,等. Ti6321 合金激光-MIG 复合焊接接头组织和力学性能分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(1): 53-57.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212601
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

Ti6321 合金激光-MIG 复合焊接接头组织 和力学性能分析

穆壮壮, 高福洋, 余巍, 雷小伟

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039)

摘 要:对 6 mm 厚的 Ti6321 钛合金板开展激光-MIG 复合焊接试验,对焊接接头的微观组织和力学性能进行了测试分析。结果表明,焊缝区金相组织主要为粗大的 β 柱状晶和细小的针状 α' 相形成的网篮组织;热影响区金相组织分布不均匀,近焊缝区组织主要由针状马氏体 α' 相和等轴 α 相组成,而近母材区组织主要由等轴 α 相、针状马氏体 α' 相和少量残余 β 相组成。拉伸断裂发生在远离焊缝的母材处,抗拉强度均值为 935 MPa。焊缝和热影响区的硬度明显高于母材,最高硬度值出现在熔合线附近。

关键词:Ti6321 钛合金;激光-MIG 复合焊;微观组织;力学性能

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)01-0053-05

Microstructure and Mechanical Properties of Laser-MIG Hybrid Welded Joint of Ti6321 Titanium Alloy

MU Zhuangzhuang, GAO Fuyang, YU Wei, LEI Xiaowei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: Laser-MIG hybrid welding experiment was carried out for 6 mm thick Ti6321 titanium alloy plate, and the microstructure and mechanical properties of the welded joint were tested and analyzed. The result shows that the microstructure of the weld zone is mainly composed of coarse β columnar crystal and fine needle-like α' phase, and the microstructure of the heat affected zone is not uniform and the microstructure near the weld zone are needle-like α' phase and equiaxed α phase, there are equiaxed α phase, needle-like α' phase and a few of β residual phase near the base metal. The tensile fracture occurs at the base metal far from the weld, the average tensile strength is 935 MPa. The hardness of the weld and heat-affected zone is obviously higher than that of base metal, and the highest hardness appears near the fusion line.

Key words: Ti6321 titanium alloy; laser-MIG hybrid welding; microstructure; mechanical properties

钛及钛合金具有密度小、比强度和比刚度高、热导率小、耐腐蚀性好以及抗高温和蠕变性能好等一系列优异的性能,在航空航天、石油化工、汽车制造以及船舶海洋等重要关键军工领域有着广泛的应用,被誉为“太空金属”“海洋金属”“现代金属”和“战略金属”^[1-5]。焊接作为一种主要的热加工工艺,在提高材料利用率、降低成本、减轻构件重量及提高焊接质量等方面独具优势,包括传统的熔化焊接方法如 TIG 焊、MIG 焊以及 PAW(等离子弧焊)等,目

前在制造行业中占据主导地位,国内外研究学者对其研究相当成熟,而对于精密连接控制技术,例如激光焊、电子束焊等,在国内外研究甚少,因此对高能束焊接方法的研究具有十分重要的意义,为今后深入了解钛合金的焊接性以及大规模实际生产应用奠定理论基础。

近年来,研究学者将高能量密度的激光焊和宽加热范围的电弧焊有机结合起来对工件进行焊接,充分发挥两种热源各自的优势。当两种完全不同性质的热源、等离子体/金属蒸汽在同一空间位置相遇时,能够增强焊接缝隙桥接能力,提高焊接材料厚度,降低单独激光焊接产生的缺陷,从而获得强度-塑性匹配较好的焊接接头,即产生 $1+1>2$ 的效果^[6]。该技术作为特种先进制造方法之一,能够充分

收稿日期:2021-09-26

基金项目:河南省重大科技专项项目(MK200801)

作者简介:穆壮壮(1996-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向:钛合金激光焊接工艺;E-mail:2744633936@qq.com

通信作者:余巍,研究员,主要从事钛合金材料加工技术与理论的研究;E-mail:13700811736@163.com

提高钛合金结构件焊接的生产效率并降低钛合金热加工生产制造成本。本文开展中厚板高功率激光-MIG 复合焊接组织性能研究,能够进一步为工业生产提供一定的指导。

本文主要以 Ti6321 钛合金为研究对象,开展 6 mm 厚的钛合金 I 型坡口无间隙单道激光-MIG 复合对接试验,对焊接接头的显微组织和力学性能进行分析研究。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验采用 6 mm 厚的 Ti6321 退火态(M)板材。沿着轧制方向将板材切成大小为 200 mm×100 mm×6 mm 的试板,化学成分见表 1。

表 1 Ti6321 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of Ti6321 titanium alloy (wt%)

Al	Nb	Zr	Mo	Ti
6.1	2.9	1.9	1.0	余量

1.2 试验方法

试验采用的激光器是 YLS-20000 大功率掺镱多模光纤激光器,聚焦后的光斑半径为 0.30 mm,由 KUKA-KR60HA 六轴联动机器人带动激光头进行焊接试验。为了防止焊接过程中产生的飞溅和高温光致等离子体对激光头的污染,采用超音速气帘和保护镜片对激光头进行保护。

钛合金在高温下对空气中的 N、H 和 O 等杂质元素十分敏感,在 250℃ 开始吸收氢,450℃ 快速吸氧,650℃ 以上快速吸氮,因此需要对焊接试板进行焊接保护以及严格的焊前清理。清理工序为酸洗→清水冲洗→干燥→去除氧化膜→丙酮、酒精擦洗→待焊。用焊机点焊试板两端,保证装配间隙小于 0.2 mm。

激光功率、离焦量、焊接速度、光丝间距及电弧功率是激光-MIG 复合焊接 5 个重要的参数,本次试验激光功率为 4500 W,离焦量为 +15 mm,焊接速度为 1.3 m/min,光丝间距为 2 mm,电流为 180 A,焊接电压为 20.8 V。

焊接完成后,利用线切割沿焊缝垂直方向上进行取样(40 mm×10 mm×6 mm),依次用 80#、300#、800#、1200#、2000# 和 3000# 的砂纸进行打磨、抛光后,用腐蚀液(10%HF、30%HNO₃ 和 60%H₂O)进行

化学腐蚀,采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜进行显微组织观察;根据 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分:试验方法》,利用 Wilson VH3300 显微硬度计进行硬度分析,测量位置分别距离焊接表面 1、3 和 5 mm,相邻测量点间隔为 0.3 mm,加载载荷 0.98 N,加载时间 10 s。根据 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》,在 INSTRON 5587 万能材料试验机上进行拉伸测试试验,拉伸试样尺寸如图 1 所示。

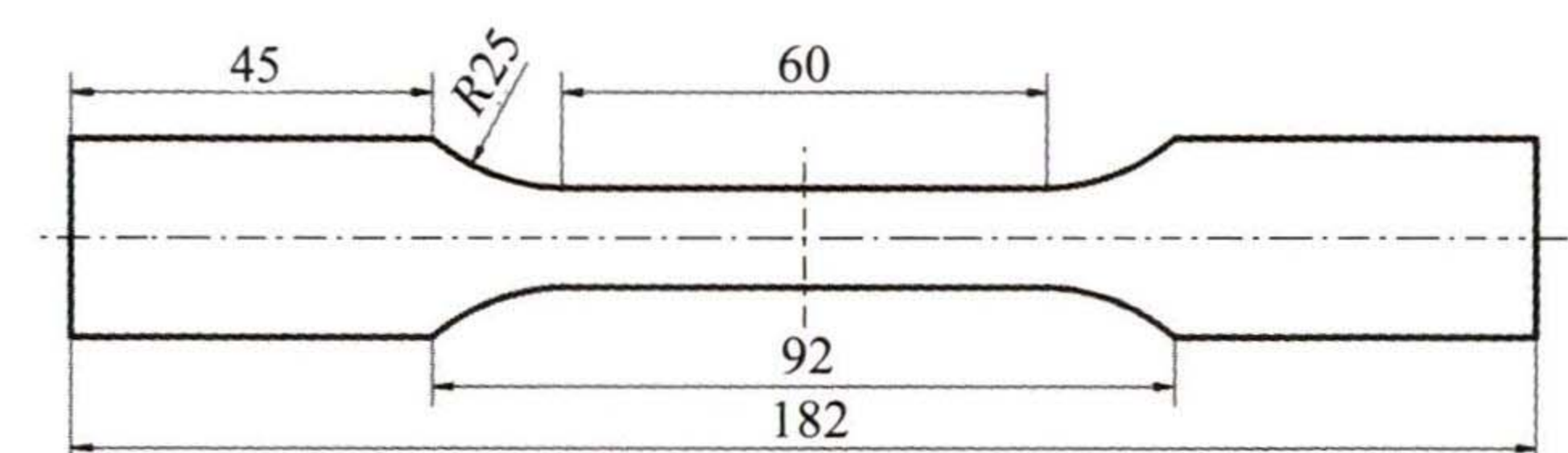


图 1 焊接接头拉伸试样尺寸(mm)

Fig.1 Sizes of tensile specimen of the welded joint (mm)

2 试验结果分析

2.1 接头宏观形貌

激光-MIG 复合焊接接头的宏观形貌如图 2 所示。该工艺条件下获得的焊接接头无咬边、气孔、表面裂纹以及驼峰等缺陷,焊接接头的质量较高,焊缝正面和背面均呈现银白色,能够满足 NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第 2 部分:射线检测》I 级合格要求,如图 3 所示。

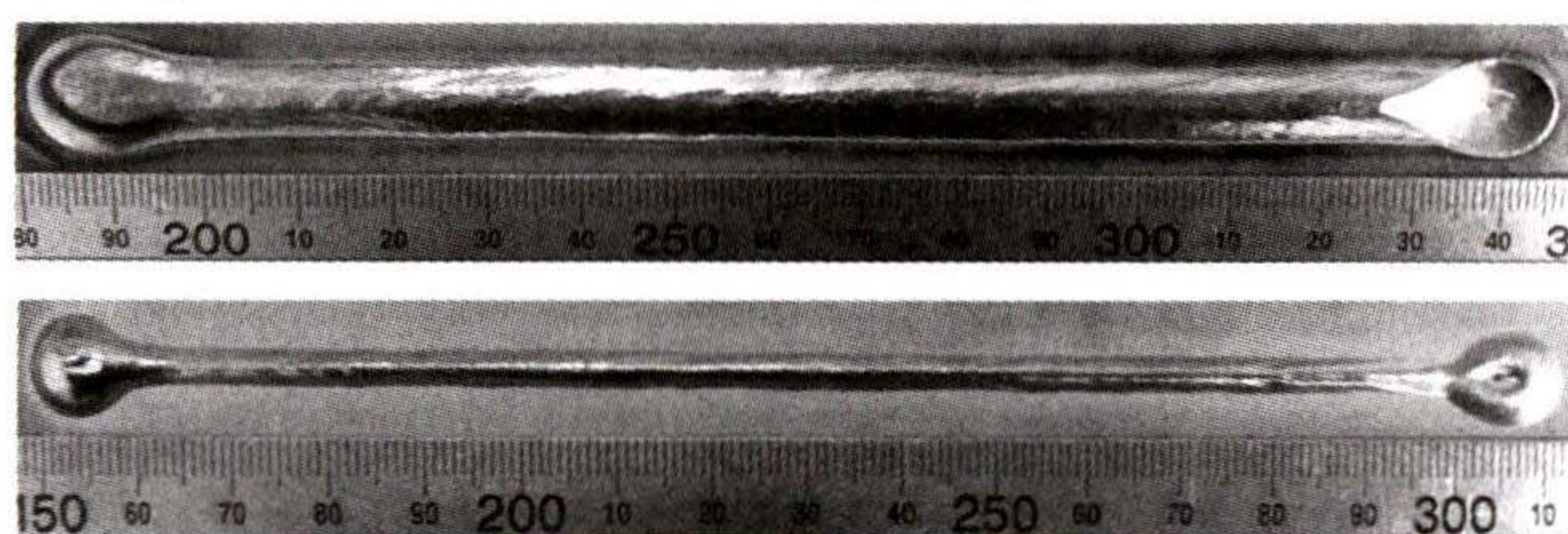


图 2 焊接接头的宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphologies of the welded joint



图 3 焊缝射线探伤结果

Fig.3 Radiographic test result of the weld

2.2 接头横截面宏观形貌

由图 4 可以看出,激光-MIG 复合焊接接头的横截面形状为典型的“沙漏形”,熔宽约为 10 mm,正面余高为 0.5 mm。根据焊接组织分布不均匀等特点,可以将激光-MIG 复合焊接接头分为焊缝区(welding zone, WZ)、熔合线(fusion line, FL)、热影响

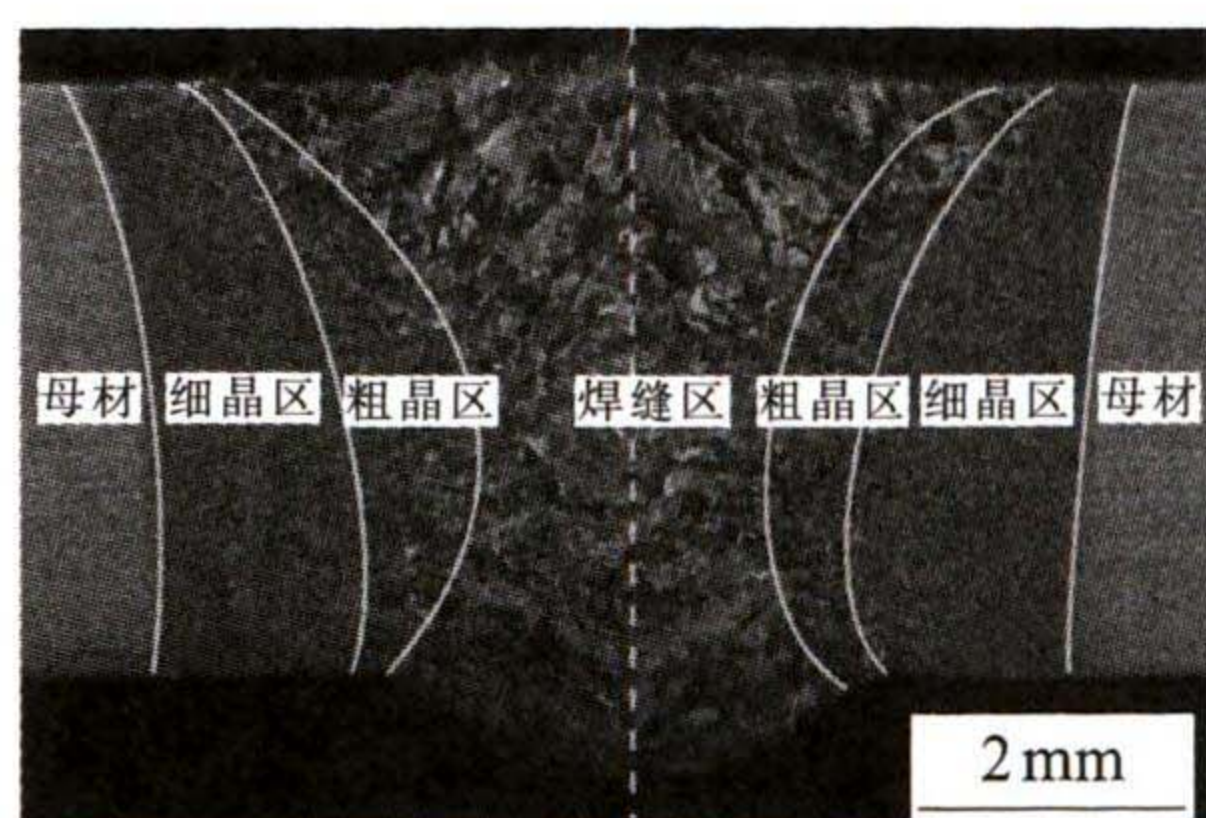


图4 接头横截面宏观形貌

Fig.4 Morphology of cross section of the welded joint

区(heat affected zone, HAZ)和母材四个区域,其边界清晰明显。靠近焊缝区和母材区的热影响区晶粒尺寸存在明显的差异,又可以将热影响区分为粗晶区和细晶区。由于激光-MIG复合焊是一种快速加热、短时凝固过程,各区域的组织形态和尺寸大小差异很大。由宏观形貌可知,焊缝区两侧主要为粗大的 β 柱状晶,从半熔化母材的晶粒表面联生结晶,并沿垂直于熔合线的方向长大。由于钛合金热导率小,对过热十分敏感,有利于柱状晶的长大,但是晶粒长大的方向有所差异。

在焊缝上部,柱状晶主要向焊缝表面生长,这是由于在焊接过程中,熔池上部与空气接触面积大,造成了较大的温度梯度变化。在焊缝中部,柱状晶主要沿着宽度方向生长,这是由于在焊缝中部热量分布较均匀,温度梯度较小,组织尺寸最小;在焊缝下部,由于底部热量散失较快,且高温停留时间很短,故柱状晶向焊缝底部生长。

2.3 接头不同区域的显微组织

钛合金的最终性能是由显微组织决定的,不同的组织对应不同的力学性能,而微观组织的形态主要取决于合金的化学成分、冷却速度以及热处理工艺。钛合金的基本相主要有两种:密排六方的低温 α 相和体心立方的高温 β 相。在激光-MIG复合焊接的快速冷却过程中,高温 β 相一般不会保留至室温,会发生同素异构转变,转变为 α 相或者成分相同、晶体结构不同的马氏体 α' 相。

Ti6321 钛合金母材的显微组织如图5所示。Ti6321 母材主要由三角晶界上的等轴 α 相、少量被 β 相中间层隔开的片状 α 相和晶间 α 相组成,部分 α 相沿着轧制方向被拉长,白色的 α 相和黑色的 β 相基体呈相间分布形态,是一种典型的近 α 型钛合金。

不同部位焊缝区的组织如图6所示,焊缝上部组织主要由粗大的 β 柱状晶晶粒和细小的针状 α'

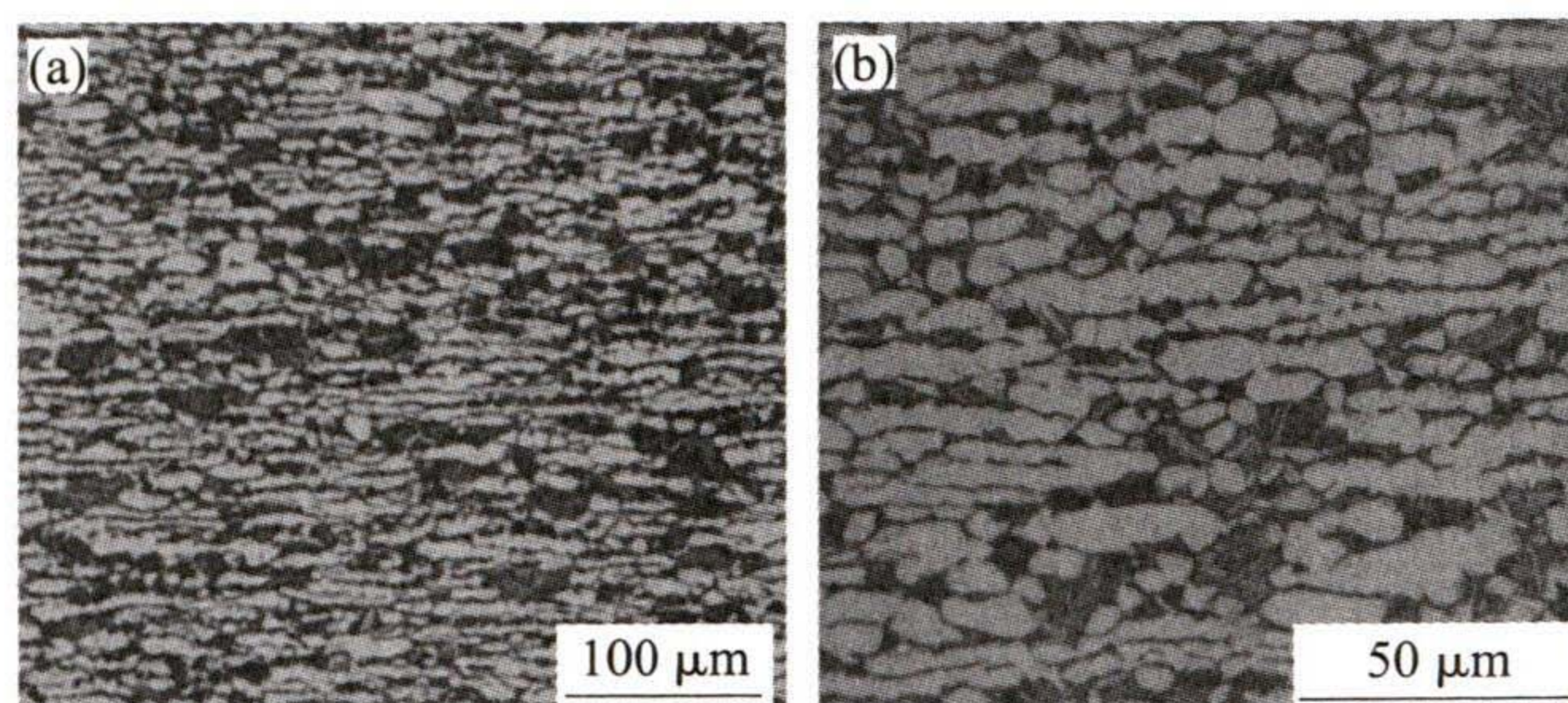


图5 Ti6321 钛合金母材的显微组织

Fig.5 Microstructure of Ti6321 titanium alloy base material

马氏体组成。在短时凝固过程中, β 相中的合金元素来不及扩散转变为 α 相,而是发生非扩散性相变,转变成了针状马氏体 α' 相。 α' 相在 β 柱状晶粒的内部和边界同时形核和长大,在长大过程中,首先形成若干相互平行的一次 α' 相,有的贯穿整个 β 柱状晶粒,遇 β 柱状晶界便停止生长,此时针状马氏体的长度近似等于 β 柱状晶的宽度。有的一次 α' 相并未充分长大,在一次 α' 之间生成了细小的二次针状 α' 相,一次 α' 相与其相遇便停止生长,最终形成了长短不一、纵横交错的网篮组织。该组织具有较高的蠕变强度、抗高温持久强度和较低的疲劳裂纹扩展速率 da/dN ,但塑性较低。

焊缝中部组织主要由等轴的 α 相和板条马氏体 α' 相组成。在激光-MIG复合焊接过程中,不同位置焊缝区的热输入量不同,在焊缝上部,热输入量较大, β 柱状晶有足够的时间长大,因此形成粗大的 β 柱状晶组织。在焊缝中部,柱状晶沿焊缝两侧垂直于半熔化状态的母材晶粒边界长大,在焊缝中部相遇,此区域温度梯度十分均匀,因此形成较为均匀的等轴 α 相,并且形成的细小针状马氏体逐渐长大为板条马氏体。

焊缝下部组织主要由相对细小的 β 柱状晶粒和针状马氏体组成。在焊缝下部,焊缝热输入量相对较少,热量散失较快,高温停留时间短,使得柱状晶粒没有充分的时间进行长大,最终形成了相对细小的 β 柱状晶粒。通过金相对比分析可知,不同的热输入量对于焊缝区柱状晶内部马氏体的形态和尺寸有着重要的影响,存在一定的规律性。在焊缝下部,热输入量较小,马氏体主要为单根或者多根相互平行的长条针状马氏体,并逐步长大为板条马氏体。针状马氏体在板条马氏体的边界形核长大,最终形成了许多较为细小的针状马氏体 α' 集束。

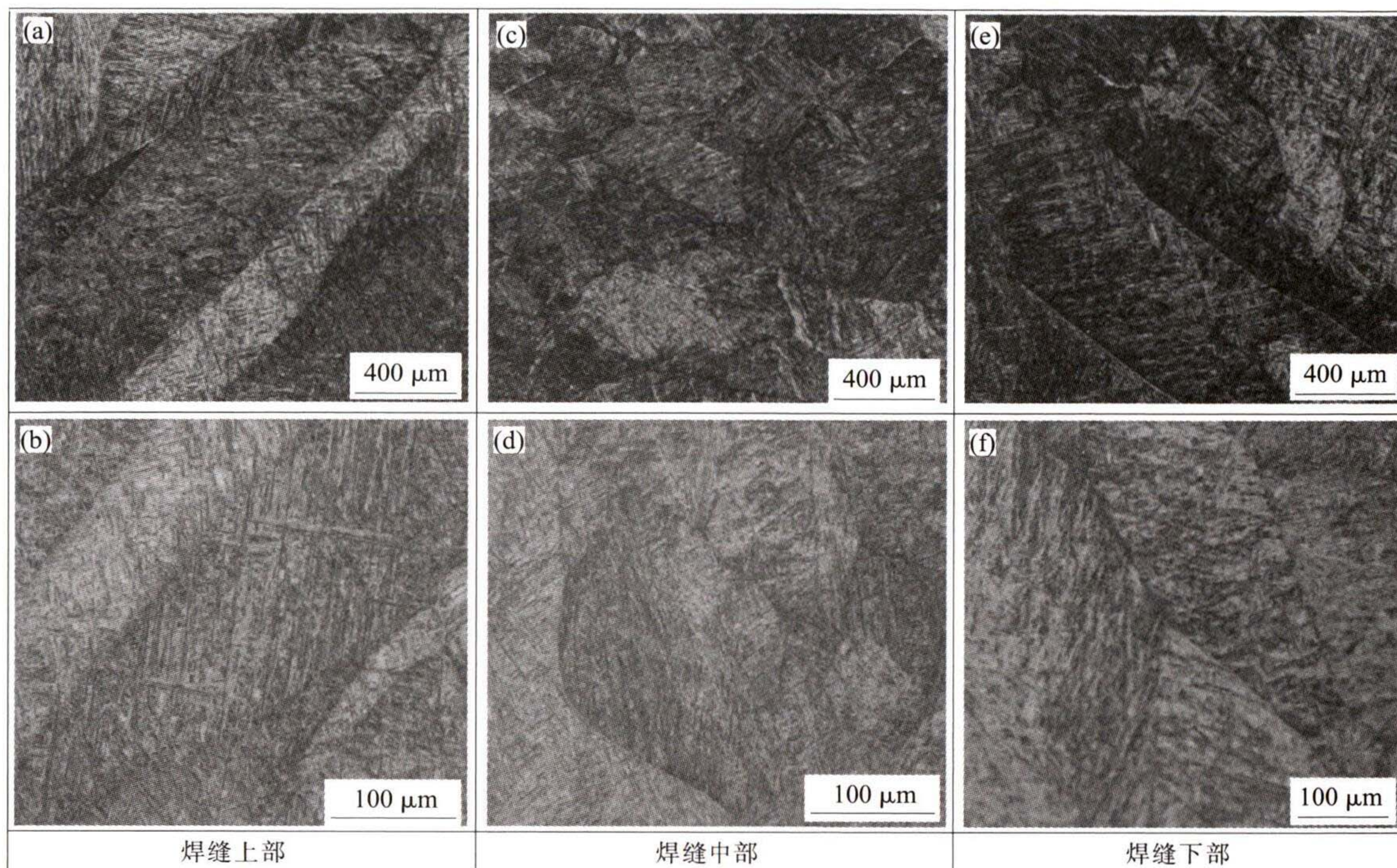


图 6 不同部位焊缝区的组织
Fig.6 Microstructure of WZ at different positions

在激光-MIG 复合焊接过程中,由于热传导作用且温度分布不均匀,热影响区不同部位的组织形态和尺寸差异很大。热影响区的显微组织如图 7 所示。粗晶区距离焊缝最近,温度迅速升高, α 相转变为高温 β 相,在随后的快速冷却过程中,部分 β 相来不及扩散转变为 α 相,而是通过非扩散切变转变为针状马氏体 α' 相,并且原始 β 晶粒的边界得以保留,其余的 β 相转变为等轴 α 相。因此近焊缝区的

粗晶区组织主要由针状马氏体 α' 相和等轴 α 相组成。而细晶区由于受焊接热循环作用较小,有的甚至未超过 β 相变温度,因此细晶区组织主要由等轴 α 相、针状马氏体 α' 相和少量残余 β 相组成。

2.4 力学性能分析

从图 8 接头显微硬度分布曲线可以看出,激光-MIG 复合焊接接头的显微硬度最高值出现在熔合

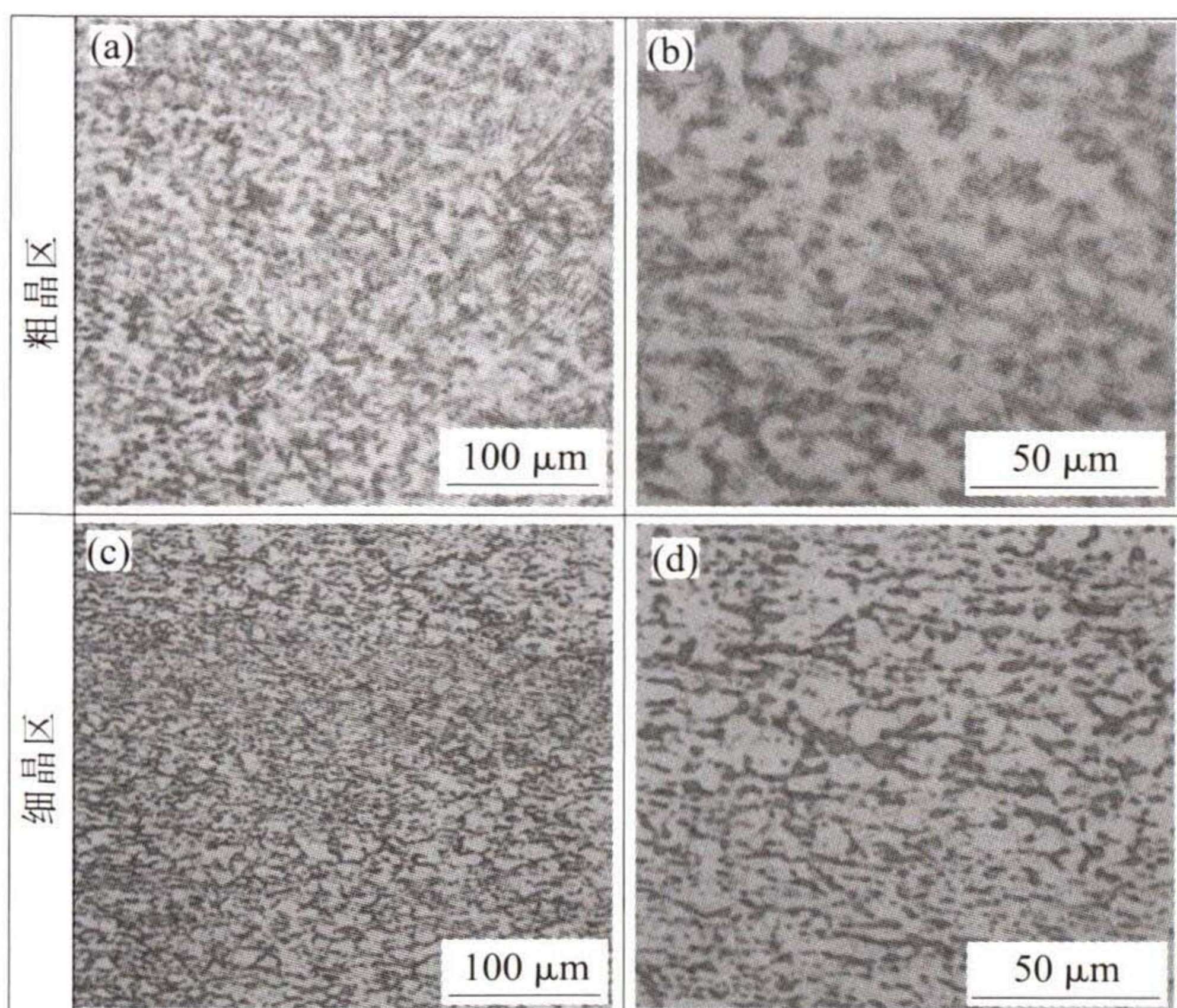


图 7 热影响区的显微组织
Fig.7 Microstructure of the heat affect zone

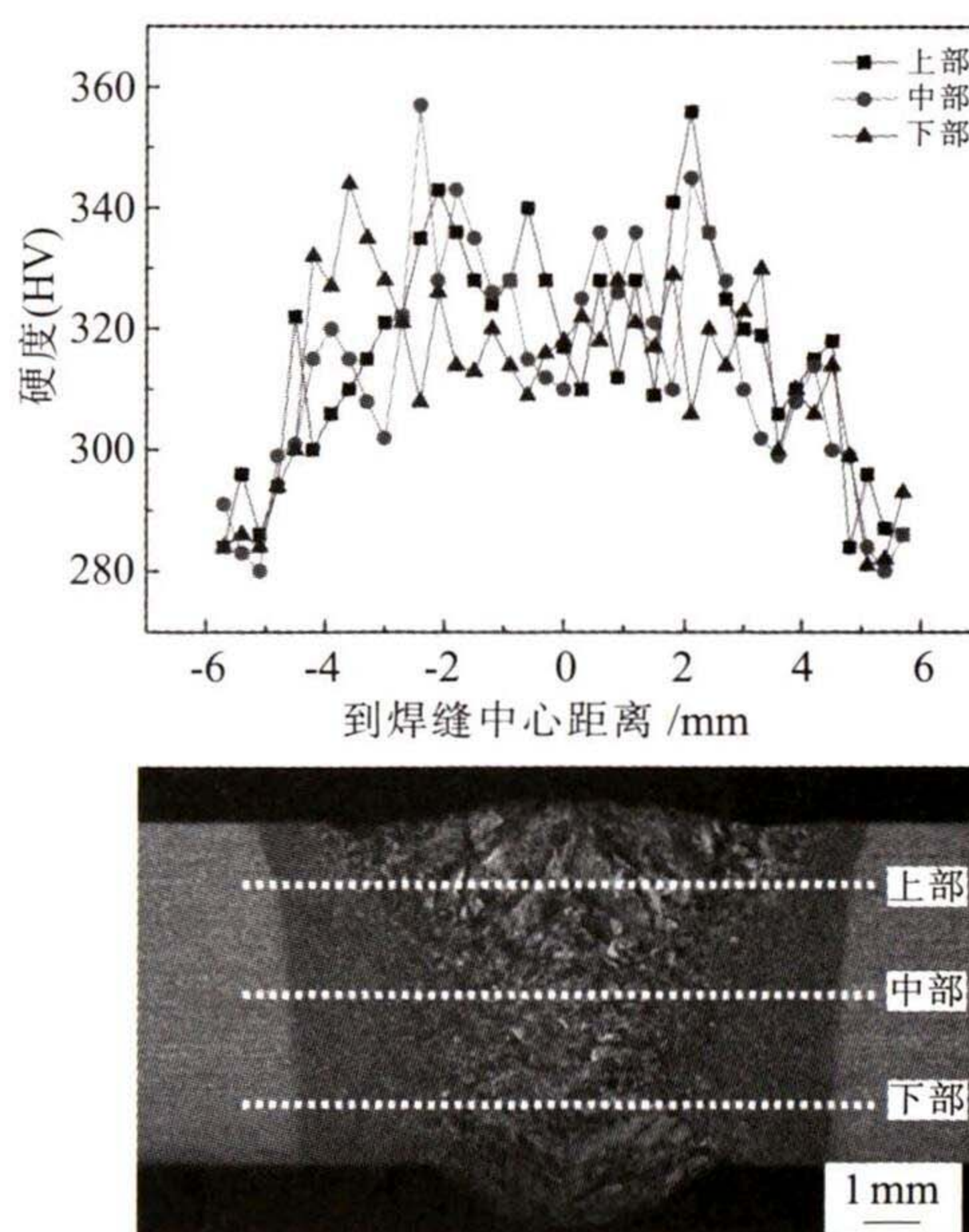


图 8 接头显微硬度分布曲线
Fig.8 Microhardness distribution of welded joint

线附近,整体硬度分布趋势相同,都呈“马鞍形”,母材处的显微硬度最低,约为 290HV,最高显微硬度值出现在熔合线附近,焊缝和热影响区的硬度明显高于母材,这与焊接过程中发生的相变有直接关系。焊缝和热影响区都出现了较多高硬度的针片状马氏体相 α' ,形成了相互交错内部存在大量位错的网篮组织,靠近熔合线附近的 α' 马氏体较多,因此出现了硬度最高值。热影响区的显微组织从粗晶区到细晶区主要由针状马氏体 α' 相向 α' 相和等轴 α 相逐渐演变,因此,热影响的显微硬度有逐渐下降的趋势。而母材的显微组织由等轴 α 相和 β 相组成,不含针状马氏体相,所以其硬度最低。

图 9 为拉伸后试样的形貌。Ti6321 钛合金激光-MIG 复合焊接接头的室温平均抗拉强度为 935 MPa,焊接接头的断裂位置发生在远离焊缝的母材处,说明激光-MIG 复合焊接接头的抗拉强度高于母材。



图 9 拉伸后试样的形貌

Fig.9 Morphologies of the samples after tensile test

3 结论

(1) Ti6321 母材是由等轴的 α 相和片状的 β

相组成的双态组织。焊缝组织主要为针状马氏体 α' 相形成的网篮组织,热影响区的组织受焊接热循环作用不均匀,呈逐渐演变的特点。

(2) 焊缝和热影响区的显微硬度明显高于母材的,最高硬度值出现在熔合线附近。显微硬度的大小与组织演变有着密切关系,焊缝和热影响区中出现了针状马氏体组织,因此其硬度最高,距离熔合线位置越远,显微硬度值越低。

(3) Ti6321 焊接接头的平均抗拉强度为 935 MPa,焊接接头的断裂位置发生在远离焊缝的母材处,说明焊缝的抗拉强度高于母材,焊缝中出现了大量的针状马氏体,导致其强度升高。

参考文献:

- [1] 赵永庆,陈永楠,张学敏,等. 钛合金相变与热处理[M]. 长沙:中南大学出版社,2012:215.
- [2] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[J]. 北京:化学工业出版社,2015.
- [3] Banerjee D, Williams J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia,2013,61(3):844-879.
- [4] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications [M]. Germany:Wiley Verlag, 2003:72-76.
- [5] Cui C, Hu B, Zhao L, et al. Titanium alloy production technology,market prospects and industry development [J]. Materials and Design,2011,32(3):1684-1691.
- [6] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京:科学出版社,2005. 

(上接第 52 页)

- [10] 李玉龙,李鹤,王裕波,等. 不锈钢表面镀铜对铝/钢 YAG 激光焊接的影响[J]. 激光与红外,2016,46(8):943-947.
- [11] 雷振,王旭友,游爱清,等. 铝/钢激光-MIG 复合热源熔-钎连接试验研究 [J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(S3): 229-233.
- [12] 杨旭东,石岩,刘佳. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接

焊接头质量的影响 [J]. 机械工程学报,2014,50(14): 143-149.

- [13] Lin S B, Song J L, Yang C L, et al. Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal[J]. Materials & Design,2010,31(5):2637-2642. 