

引用格式:胡金亮,胡永俊,曾才有,等.大厚度TA17钛合金磁控窄间隙TIG焊接接头组织和力学性能[J].热加工工艺,2023,52(9):42-46+50.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20210612  
http://www.rjgy.net rjgy@vip.163.com

# 大厚度TA17钛合金磁控窄间隙TIG焊接接头组织和力学性能

胡金亮<sup>1,2</sup>, 胡永俊<sup>1</sup>, 曾才有<sup>2</sup>, 张宇鹏<sup>1,2</sup>, 董春林<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省科学院中乌焊接研究所 广东省现代焊接技术重点实验室, 广东 广州 510650)

**摘要:**对120 mm厚的TA17钛合金板进行了磁控窄间隙TIG焊接试验,系统表征了该焊接接头不同区域的显微组织和力学性能,并阐明接头显微组织演变过程及其对力学性能的影响。结果表明沿接头横向存在显著的组织不均匀性:靠近焊缝的母材区主要由拉长的 $\alpha$ 晶粒和沿晶界分布的 $\beta$ 相构成,接头热影响区组织为粗大 $\alpha$ 集束构成的魏氏组织,熔合区为细小 $\alpha$ 片层交错组成的网篮组织。沿接头厚度方向,显微组织差异较小,接头上层熔合区观察到少量马氏体片层组织。接头熔合区硬度显著低于母材区的,拉伸过程中熔合区优先发生屈服,随后成为塑性变形集中区域,导致接头强度和塑性较母材降低。

**关键词:**TA17钛合金;窄间隙TIG焊接;显微组织;力学性能

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)09-0042-05

## Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of TA17 Ti Alloy by Magnetically Controlled Narrow-Gap TIG Welding

HU Jinliang<sup>1,2</sup>, HU Yongjun<sup>1</sup>, ZENG Caiyou<sup>2</sup>, ZHANG Yupeng<sup>1,2</sup>, DONG Chunlin<sup>2</sup>

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** The magnetically controlled narrow-gap TIG welding experiment was conducted for the 120 mm thick TA17 titanium alloy plate. The microstructure and mechanical properties of different regions of the welded joint were characterized systematically, and the evolution process of the microstructure and its influence on the mechanical properties were clarified. The results show that the microstructures of the joint in the transverse direction have significant difference. The base metal area near the weld zone is mainly composed of elongated  $\alpha$  grain and  $\beta$  phase which is distributed along grain boundary. The heat affected zone is the Widmannian structure composed of large  $\alpha$  cluster, and the fusion zone is a net basket structure composed of interlaced  $\alpha$  lamellar. In the thickness direction of the joint, there is almost no difference in the microstructure, and a small amount of martensite lamellar microstructure is observed in the upper fusion zone of the joint. The hardness of the fusion zone is significantly lower than that of the base metal zone. During tensile process, the fusion zone yields first, and then becomes the area where the plastic deformation concentrates, resulting in the decrease of the joint strength and plasticity.

**Key words:** TA17 titanium alloy; narrow-gap TIG welding; microstructure; mechanical properties

近 $\alpha$ 相TA17钛合金具有轻质高强、良好的焊

接性、优异的耐腐蚀和抗蠕变等特性,已被广泛应用于海洋工程和航空航天工程<sup>[1-2]</sup>。随着海洋经济的发展,对于大型钛合金海工装备的需求越来越显著。窄间隙焊接成型工艺为大型钛合金海工装备制造提供了高效的解决方案。磁控窄间隙TIG焊接技术(magnetically controlled narrow-gap TIG welding, MCNG-TIG)成为大厚度钛合金焊接首选技术之一。此工艺具有焊枪结构简单,设备造价低廉,工艺稳定性佳等优点。通过交变磁场控制电弧在两侧壁之间做周期性摆动,引导电弧热量在侧壁均匀分布,能有

收稿日期:2021-03-09

基金项目:广东省科学院专项项目(2020GDASYL-20200103122);广东省科技计划项目(20158050502008);广东省科技发展专项项目(2016B070701025);攀钢外协项目(2015-10)

作者简介:胡金亮(1995-),男,广西贵港人,硕士研究生,研究方向:钛合金先进焊接工艺;电话:15211040915;

E-mail:jnliang.hu@foxmail.com

通讯作者:曾才有(1990-),男,博士,研究方向:先进钛合金设计及先进加工成型方法;E-mail:zengcy@gwi.gd.cn

效解决大厚度窄间隙焊接侧壁熔合不良等问题<sup>[3-4]</sup>。

除宏观尺度的焊接成形缺陷(气孔、裂纹等)外,窄间隙焊接工艺会在大厚度钛合金结构中引入显著区别于母材的微观结构组织,导致接头不同区域力学性能的差异显著,进而影响整体结构服役安全性能<sup>[5]</sup>。因此,大厚度钛合金窄间隙焊接接头显微组织演变须格外重视。本研究系统表征了 120 mm 厚 TA17 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接接头各区域的显微组织和室温力学性能,阐明了焊接过程中的组织演变及其对接头塑性变形的影响机理。

## 1 试验材料与方法

母材采用锻造+退火态的近 $\alpha$ 相 TA17 钛合金,其化学成分如表 1 所示。焊接工件尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)为 450 mm $\times$ 150 mm $\times$ 120 mm。利用磁控窄间隙

TIG 焊技术实现大厚度 TA17 钛合金板的高质量焊接,所采用的焊接工艺参数如表 2 所示,保护气体为 Ar,气流量为 0.6 MPa。本研究中的窄间隙焊接采用 I 型坡口,采用直径 3 mm 的 TA17 实心焊丝,所获得的 TA17 钛合金接头照片如图 1 所示。焊缝由 18 层熔覆金属堆焊而成,焊缝宽度约 8 mm,沿接头厚度方向可分为上、中、下三部分。

表 1 TA17 合金化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of TA17 alloy (wt%)

Al	V	Si	Fe	C	N	H	O	Ti
4.0~5.0	1.9~2.5	<0.04	$\leq 0.1$	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$	$\leq 0.0003$	$\leq 0.08$	余量

表 2 磁控窄间隙 TIG 焊接工艺参数

Tab.2 Process parameters of MCNG-TIG welding

焊接道数	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	磁场强度 /( $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ )	磁场频率 /Hz
18	260~270	25~26	417	6.5	6

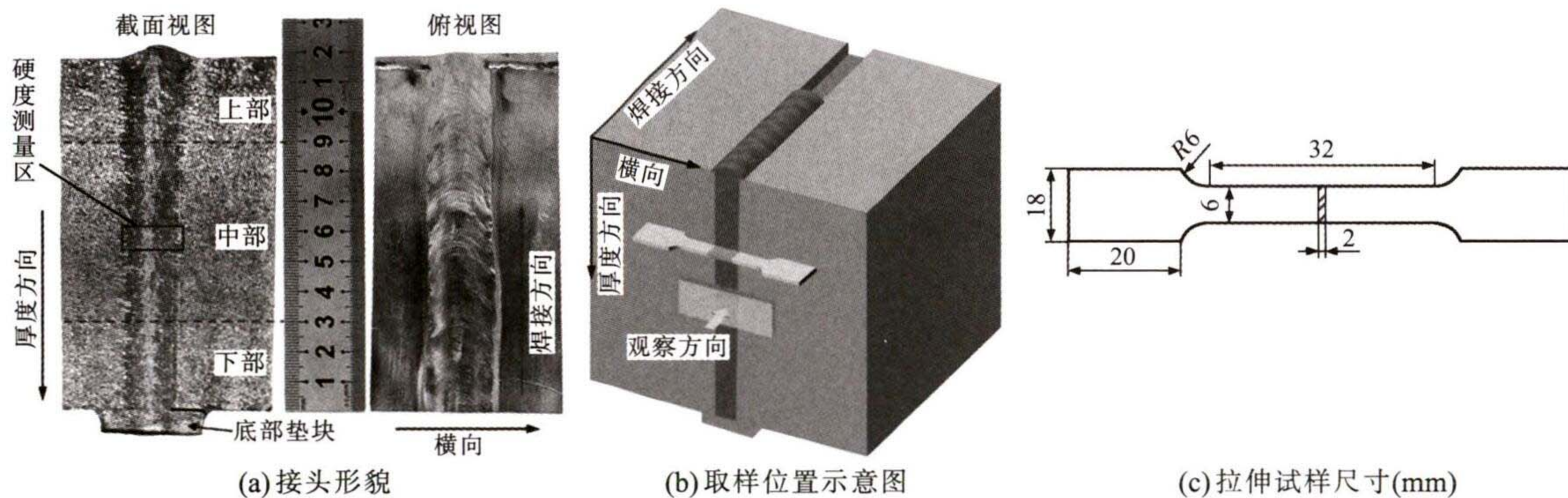


图 1 TA17 合金磁控窄间隙 TIG 焊接头及取样位置图

Fig.1 TA17 alloy magnetron narrow gap TIG joint and schematic of sampling position

TA17 钛合金焊接前后的相组成通过 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 DISCOVER)测定。利用扫描电镜(SEM, FEI XL30 FEG ESEM)背散射电子信号对接头各区域显微组织进行表征。组织表征用样品先通过机械磨平,最后利用电解抛光技术获得成像质量较好的样品。电解抛光电压为 20 V,温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ ,电解液配比为 6 vol%高氯酸+34 vol%乙醇+60 vol%甲醇。使用 Buehler VH1202 硬度计测量 TA17 磁控窄间隙 TIG 焊接头的维氏显微硬度,测试所用载荷为 0.49 N,加载时间为 10 s。硬度测试区域如图 1(a)中矩形框所示,沿厚度方向和水平方向分别以 1.0 mm 和 0.5 mm 为间隔进行打点测试,并通过 Matlab 软件进行处理,得到硬度分布图。采用 Shimadzu AG-X plus 万能试验机对接头进行单轴拉伸测试,拉伸初始应变速率为 0.5 mm/min,取样方式和试样尺寸分别如图 1(b)、(c)所示。拉伸过程中试

样应变分布通过数字关联图像技术(digital image correlation, DIC)获得,所使用的 DIC 设备型号为新拓三维 XTOM-MATRIX-3M。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 显微组织

XRD 谱图表明 TA17 钛合金母材(base metal, BM)基体主要由大量的密排六方(HCP) $\alpha$ 相和少量的面心立方(BCC) $\beta$ 相构成,如图 2(a)所示。从图 2(b)所示的 SEM 图像中可以清楚地看到 TA17 钛合金母材基体为典型的锻造+退火态组织,由拉长的初生 $\alpha$ 晶粒和沿 $\alpha$ 晶界分布的细 $\beta$ 条(深色)构成。通过截线法定量统计初生 $\alpha$ 晶粒的平均宽度,结果为 $(8.2\pm 1.3)\mu\text{m}$ 。焊后 TA17 接头热影响区(HAZ)和熔合区(FZ)的 XRD 结果如图 3 所示。接头热影响区和熔合区全部由 $\alpha$ 相构成,未能探测到 $\beta$ 相的衍射峰。

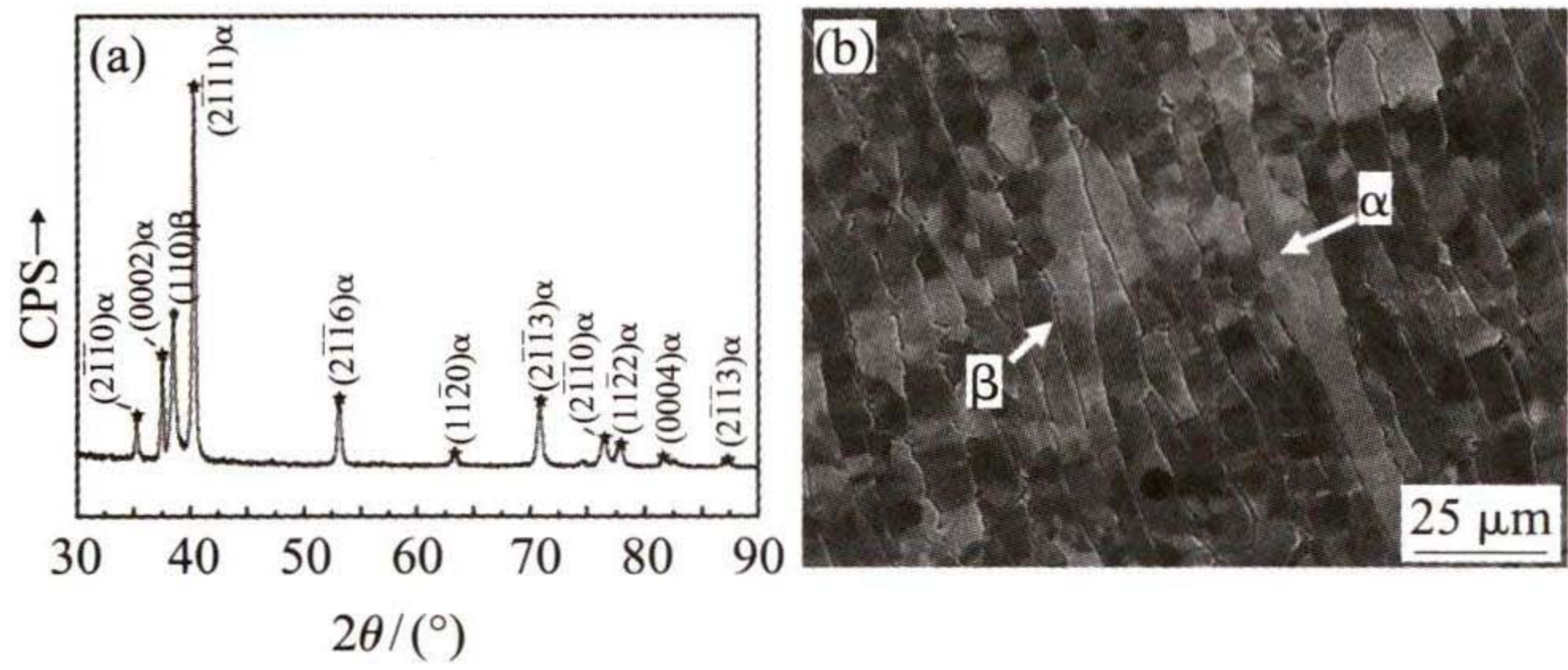


图2 TA17钛合金母材 XRD 图谱(a) 和 SEM 图像(b)  
Fig.2 XRD pattern (a) and SEM image (b)  
of TA17 titanium alloy base metal

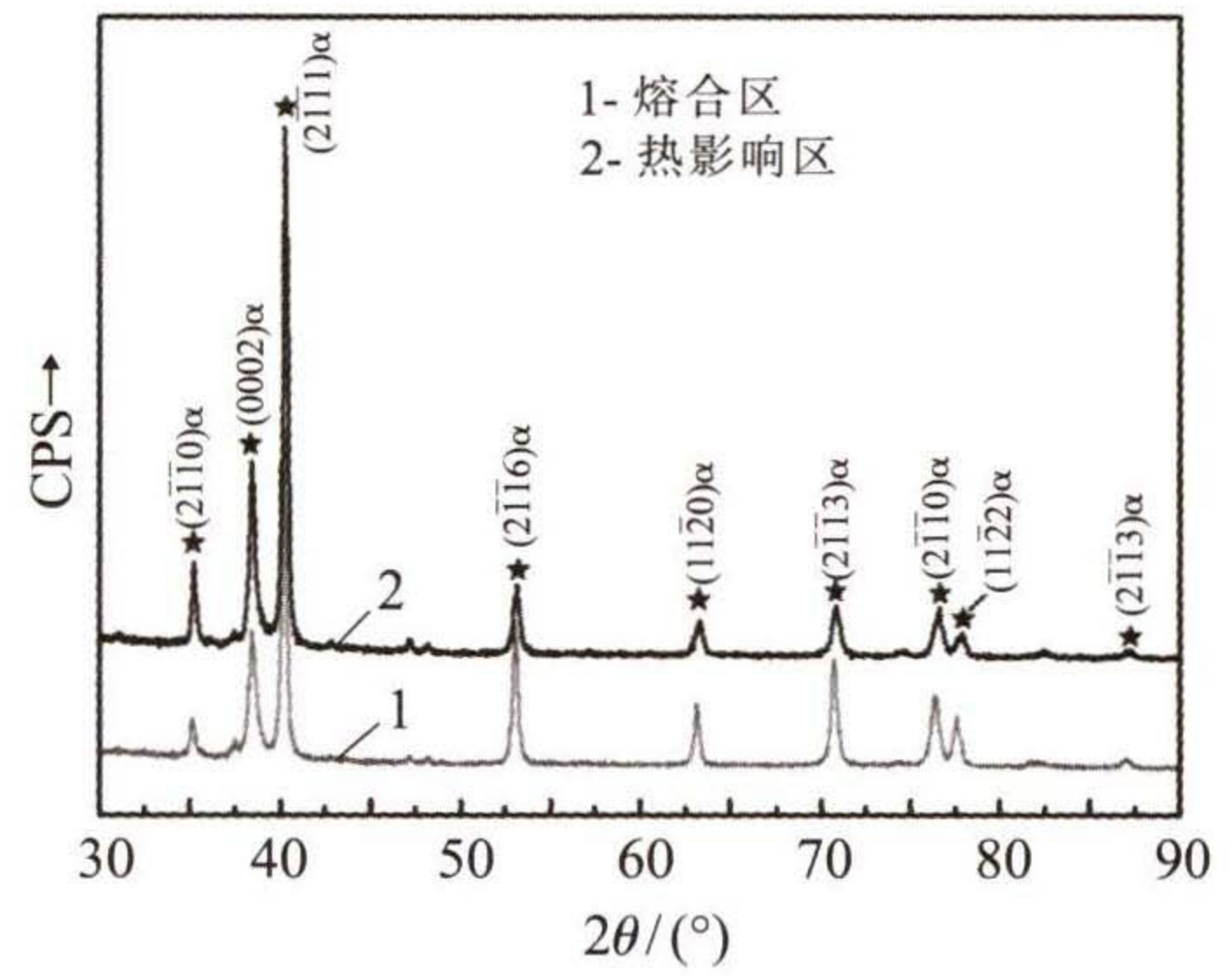


图3 TA17钛合金接头熔合区和热影响区的 XRD 谱图  
Fig.3 XRD pattern of FZ and HAZ  
of TA17 titanium alloy joint

焊后接头各区域的显微组织如图 4 所示。从图 4(a)、(d)和(g)可以看出,靠近焊缝的母材区主要由拉长的  $\alpha$  晶粒和沿晶界分布的  $\beta$  相构成。沿接头厚度方向,此区域的组织差异不明显。需要注意的是,相较于未焊接的 TA17 钛合金母材组织,焊缝附近母材区的晶界  $\beta$  条形态更加不连续,出现了更多的短棒状晶界  $\beta$  相。从图 4(b)、(e)和(h)可以看出,沿

厚度方向上、中、下各部位热影响区 (heat affected zone, HAZ) 皆由网篮组织构成,但在原始  $\beta$  晶粒内部也可观察到择优取向排列的粗大  $\alpha$  片层集束。熔合区 (fusion zone, FZ) 由不同取向的  $\alpha$  片层交织排列构成的典型网篮组织。在接头上部熔合区还观察

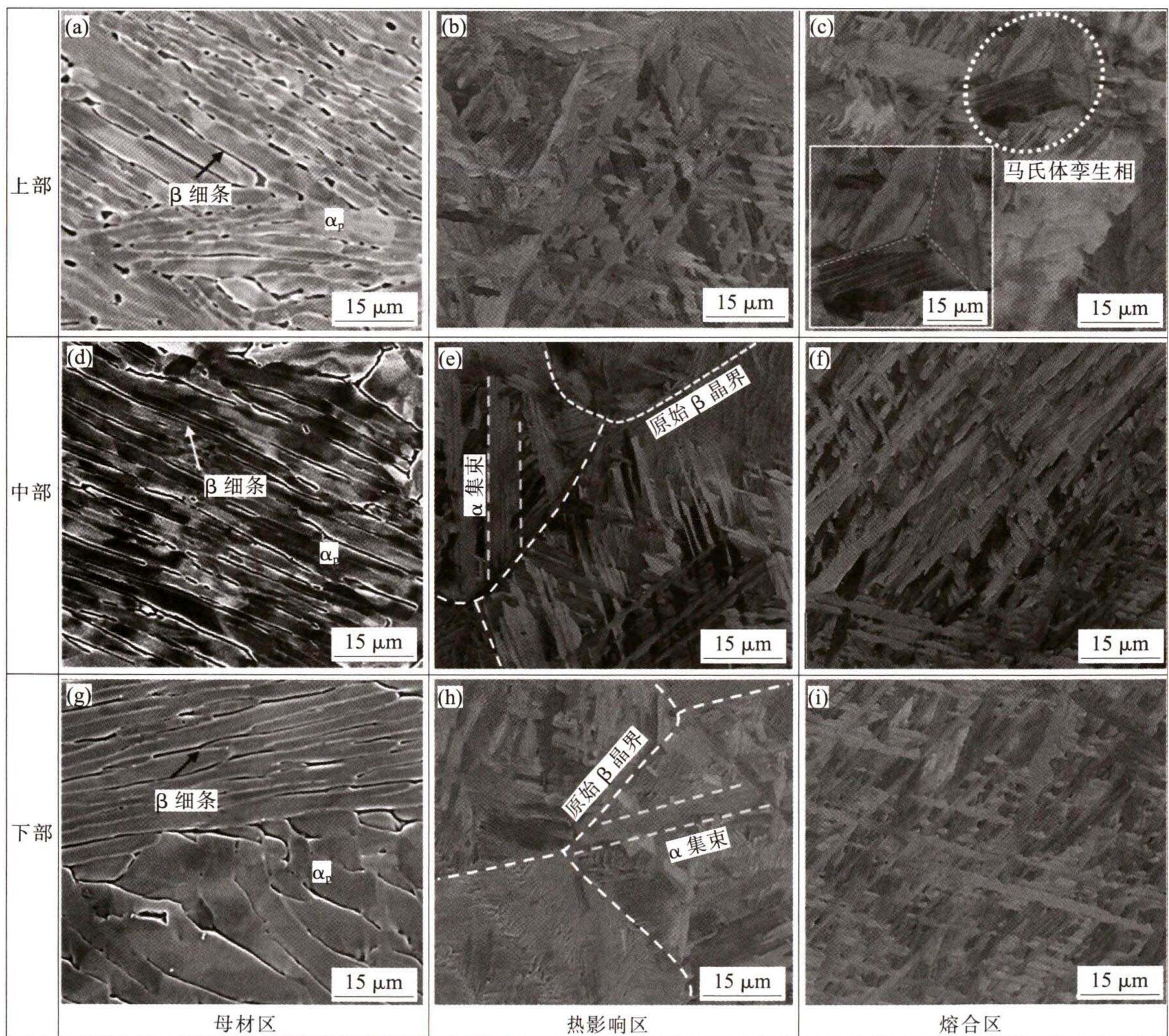


图4 TA17 接头不同区域的显微组织  
Fig.4 Microstructure of different regions of the TA17 joint

到少量马氏体孪晶结构,如图4(c)中小插图所示。值得注意的是,热影响区和熔合区都未观察到 $\beta$ 相,此现象与XRD结果吻合。由以上结果可得:120 mm厚TA17钛合金磁控窄间隙TIG焊接头沿厚度方向上的显微组织差异性较小,沿接头横向显微组织不均匀性较显著。

接头母材区和熔合区合金元素分布能谱探测结果如图5所示。焊后接头附近母材区存在Al和V元素偏聚,如图5(a)所示。可以清楚地观察到,Al元素在拉长的 $\alpha$ 晶粒内偏聚,而在晶界 $\beta$ 相中几乎为零,而V元素在 $\beta$ 相中的含量显著高于 $\alpha$ 相。图5

(b)为焊后熔合区元素分布情况,在熔合区中未观察到明显的元素偏聚现象。焊前高温退火处理为合金元素进行长程扩散提供足够的驱动力,由于Al和V分别是典型的 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相稳定元素,Al和V在高温退火过程中分别倾向溶入 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相中,最终导致母材区显著的合金元素偏聚;而焊缝区金属首先经电弧高温熔化,合金元素在液相中无序均匀分布,随焊接结束熔合区金属经历快速冷却凝固,合金元素无法充分扩散,未形成显著的元素偏聚。由于无V元素偏聚,无法达到 $\beta$ 相临界形核尺寸,致使熔合区完全由 $\alpha$ 相构成,这会对该区域的力学性能带来

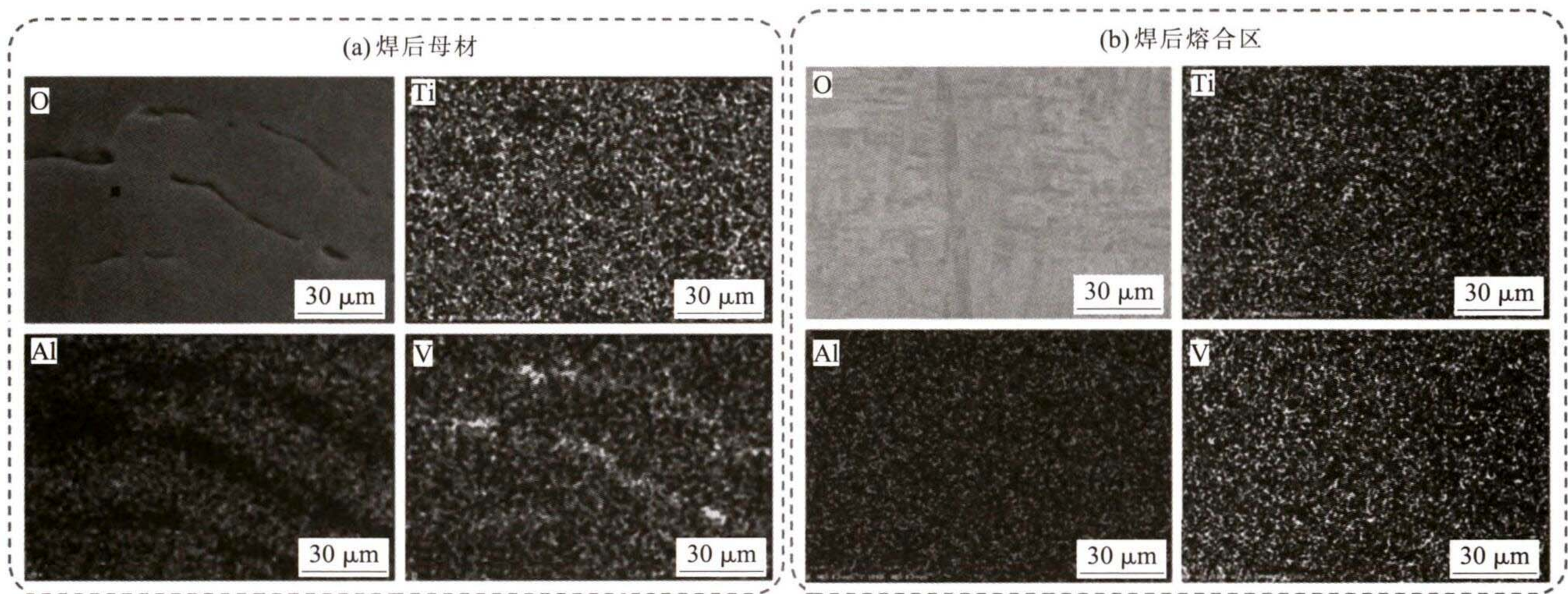


图5 TA17磁控窄间隙TIG接头母材区和熔合区的合金元素分布  
Fig.5 Alloy element distribution of the BM and FZ in TA17 MCNG-TIG joint

显著影响。

## 2.2 力学性能

对TA17磁控窄间隙TIG焊接接头各区域显微硬度分布进行测定,接头硬度分布如图6所示。可以看出,接头不同区域之间硬度值分布存在显著差异。接头硬度低值区出现在熔合区,其平均硬度为 $(213.9\pm 12.0)$  HV0.5;母材区整体硬度最高,平均硬

度为 $(276.2\pm 17.9)$  HV0.5;热影响区硬度介于熔合区和母材区之间,平均硬度为 $(244.2\pm 30.5)$  HV0.5。从以上结果可以清楚地看出:磁控窄间隙TIG焊接后焊缝较母材发生显著软化。这可归因于焊缝区原始 $\beta$ 晶粒在焊接过程中发生显著粗化,魏氏组织中粗大的 $\alpha$ 集束以及熔合区 $\alpha$ 片层之间以小角度晶界为主,对基体强度贡献有限;相比而言,母材区为塑性加工+退火态组织,晶粒相对均匀细小,存在大量的大角度晶界,可起到显著的强化效果。另外,分布于拉长 $\alpha$ 晶界处的细小 $\beta$ 相可作为“硬相”,起到一定的析出强化作用<sup>[5]</sup>。综上,焊缝区相对母材区偏软。

TA17磁控窄间隙TIG焊接头不同厚度部位的单轴拉伸性能如表3所示。沿接头厚度方向,接头力学性能差异较小,接头中部强度和伸长率相比上部和下部略高。接头各部位强度和伸长率相较母材显著降低,接头中部的屈服强度因子、抗拉强度因子和伸长率因子分别为0.84、0.88和0.77。DIC表征结果

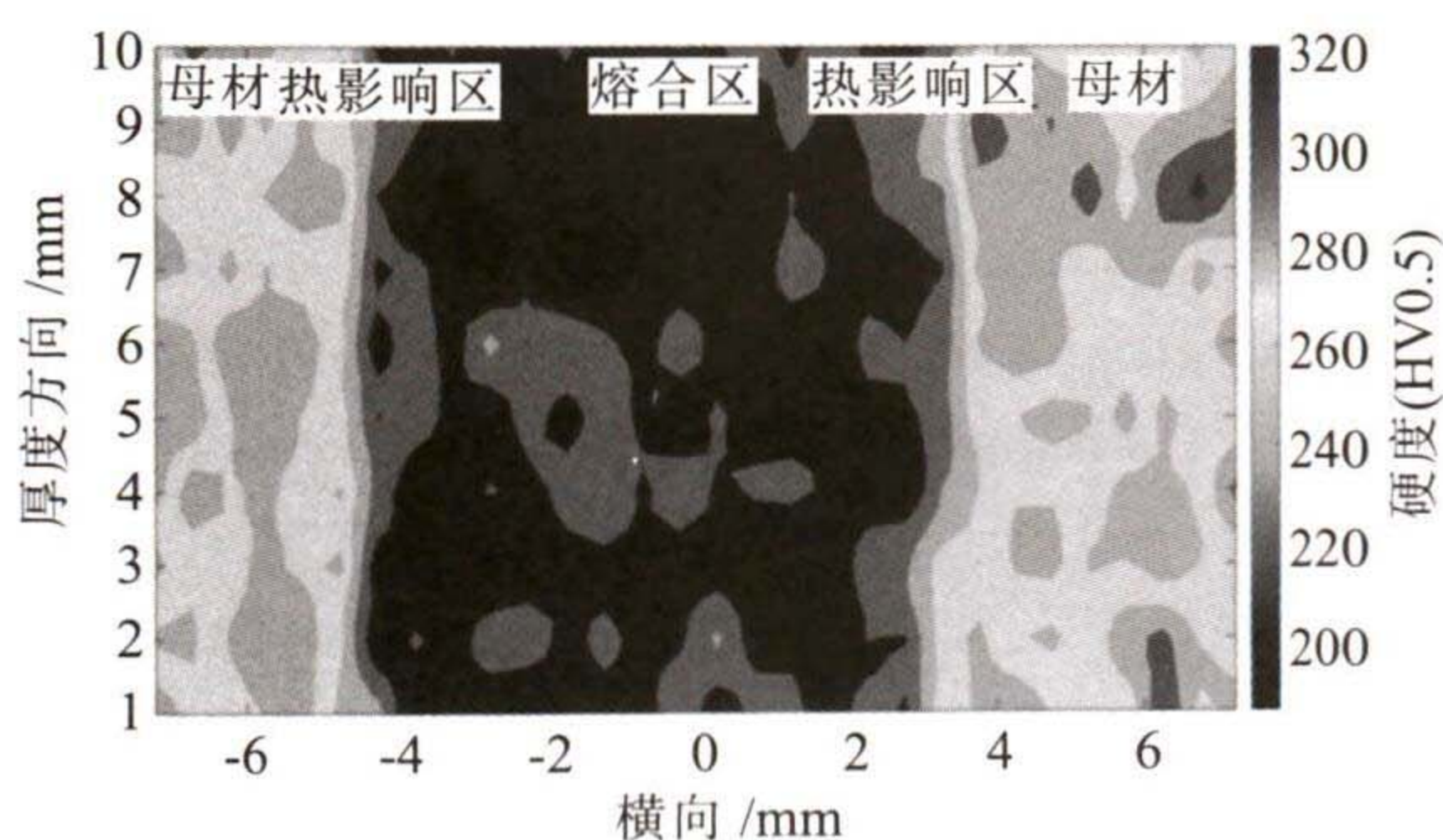


图6 TA17磁控窄间隙TIG焊接头硬度分布  
Fig.6 Hardness distribution of the TA17 MCNG-TIG joint

表 3 接头各区域的拉伸性能  
Tab.3 Tensile properties of each part of the joint

试样位置	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)
母材	680.7±3.2	739.3±7.4	12.5±0.2
上部	555.6±4.1	614.1±3.5	9.0±0.5
中部	574.1±5.3	653.4±6.2	9.6±0.6
下部	542.8±7.6	609.3±4.4	8.7±0.4

揭示了拉伸过程中应变分布演化过程,如图 7 所示(彩图见电子版)。由于接头存在显著的组织不均匀性,各区域强度差别较大,尤其是熔合区较母材显著软化,在拉伸过程中较软的熔合区优先发生屈服,致使接头整体屈服强度降低;在后续拉伸过程中,塑性变形主要集中于试样中间的熔合区,而其他区域应变较低;最终,剧烈的不均匀塑性变形导致熔合区过早地萌生裂纹,并最终断裂,致使接头整体均匀变形十分有限,接头塑性显著降低。

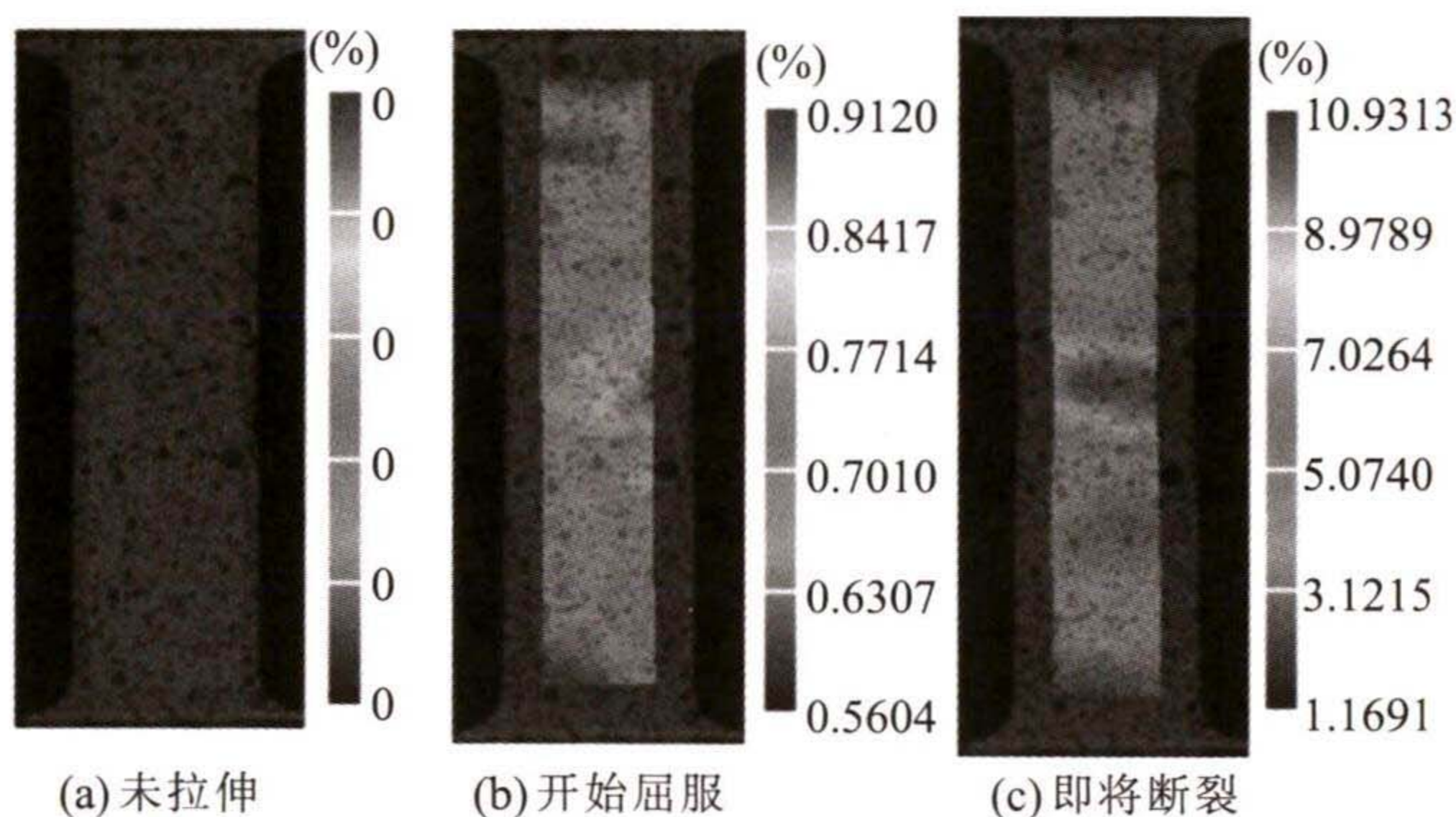


图 7 TA17 磁控窄间隙 TIG 焊接头单轴拉伸应变分布演变  
Fig.7 Change of strain distribution of the TA17 MCNG-TIG joint during tensile test

### 2.3 接头显微组织演变

以往文献报道:钛合金经熔焊后接头熔合区通常以粗大针状  $\alpha'$  马氏体组织为主<sup>[6-8]</sup>。本研究观察到 120 mm 厚 TA17 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接头熔合区显微组织主要为全  $\alpha$  相网篮组织。提出磁控窄间隙 TIG 焊接过程 TA17 钛合金接头熔合区显微组织演变过程模型,如图 8 所示。焊接过程中,熔敷金属被加热至液相,受侧壁冷金属和空气对流强制冷却作用,液相金属首先凝固成粗大的柱状  $\beta$  晶粒;在进一步冷却至室温过程中,较大的冷却速度导致  $\beta$  相只能通过原子切变的方式转变成针状  $\alpha'$  马氏体相<sup>[9]</sup>;后续焊接道次对前道次熔敷金属重新加热,起到类似于回火处理效果,由于  $\alpha'$  马氏体相为非平衡相变产物,回火过程将促使  $\alpha'$  马氏体相转变

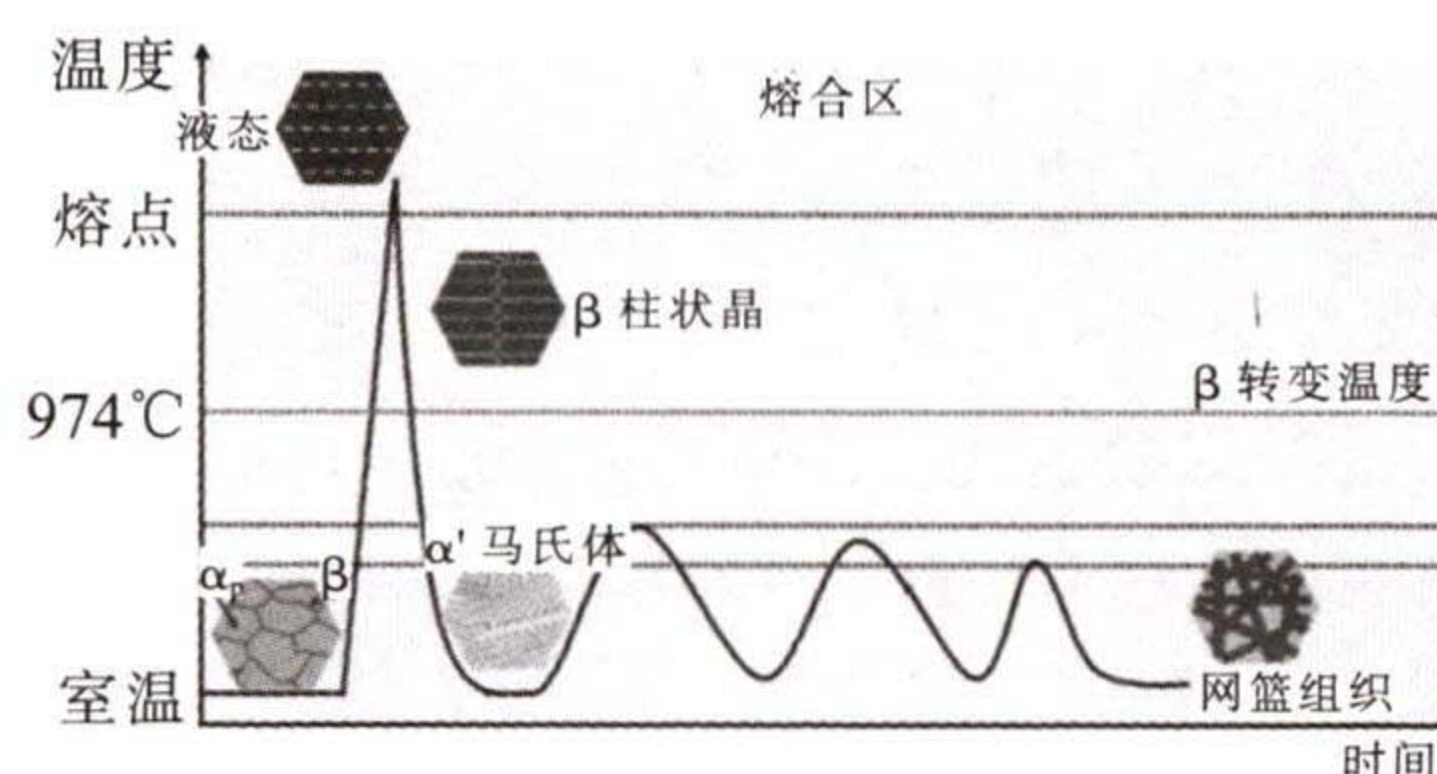


图 8 磁控窄间隙 TIG 焊接过程接头熔合区组织演变机理  
Fig.8 Microstructure evolution mechanism of FZ in joint during MCNG-TIG process

成更加稳定的  $\alpha$  相网篮组织<sup>[10]</sup>。由于接头上部受到后续道次回火效应较小,以此可解释在接头上部熔合区能观察到少量马氏体组织的实验结果(图 4(c))。

### 3 结论

(1) 120 mm 厚 TA17 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接接头热影响区和熔合区主要由全  $\alpha$  相网篮组织构成,未观察到明显的合金元素偏聚;沿接头横向显微组织不均匀性显著,而沿接头厚度方向,显微组织差异不明显。

(2) 磁控窄间隙 TIG 焊接后 TA17 钛合金接头熔合区硬度显著低于母材,接头中部的屈服强度因子和塑性因子分别为 0.84 和 0.77。接头力学性能恶化可归因于熔合区软化致使接头提前屈服和发生塑性变形集中现象。

(3) 磁控窄间隙 TIG 焊接过程中后续焊接道次对前道次熔敷金属产生回火处理效果,促使非平衡  $\alpha'$  马氏体相转变成更加稳定的  $\alpha$  相网篮组织。

### 参考文献:

- [1] 于宇,李嘉琪. 国内外钛合金在海洋工程中的应用现状与展望[J]. 材料开发与应用,2018(3):111-116.
- [2] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [3] 何旌,黄健康,余淑荣,等. 窄间隙电弧摆动焊接方法研究现状[J]. 热加工工艺,2017,46(23): 5-9.
- [4] Sun Qingjie, Wang Jianfeng, Cai Chunwei, et al. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86 (1/4): 761-767.
- [5] 李双,李锋,徐望辉,等. 焊接电流对 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊缝成形及组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(23): 35-38.

(下转第 50 页)

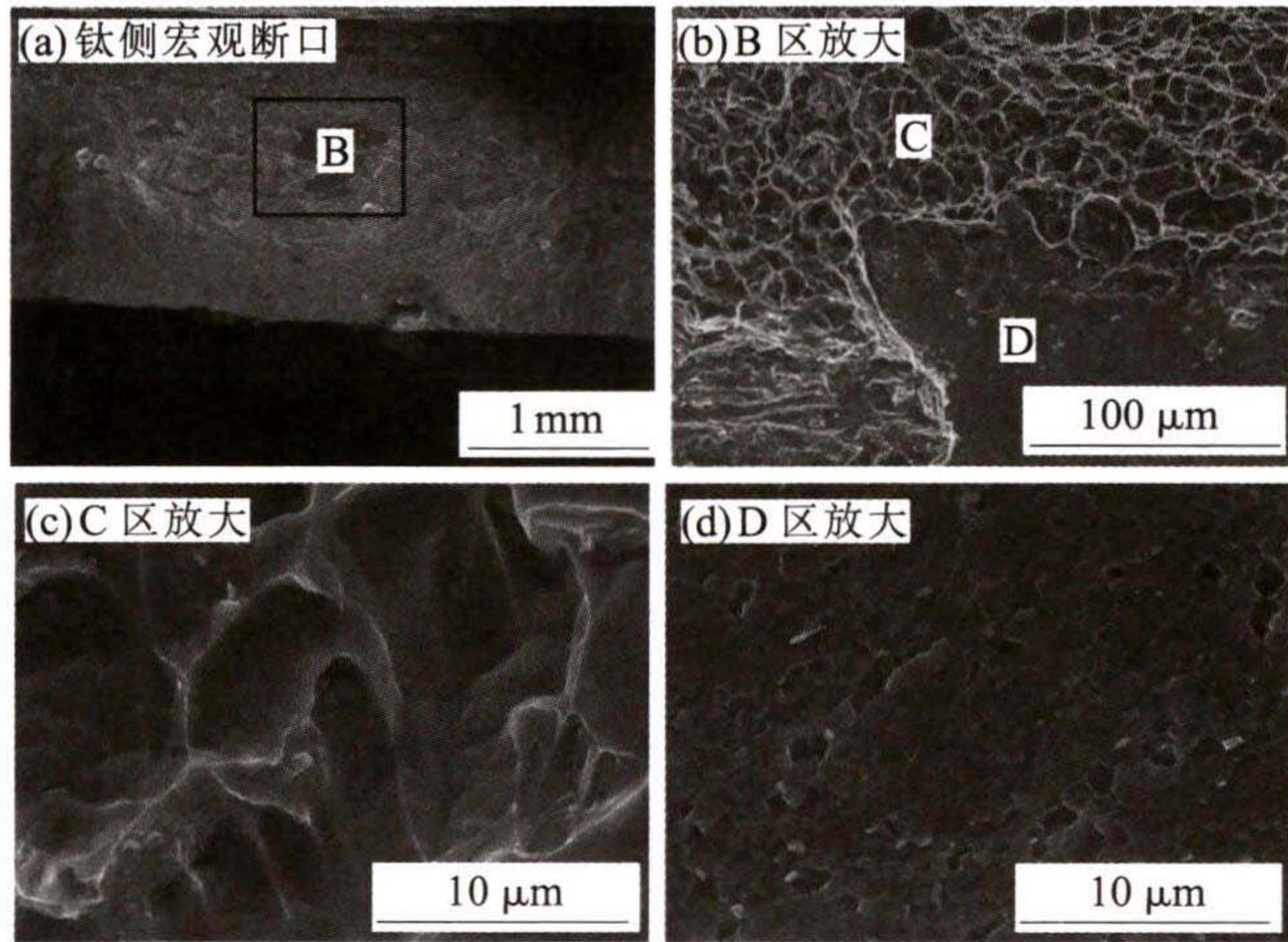


图8 热输入 107 J/mm 钛铝异种接头断口形貌  
Fig.8 Fracture morphologies of Ti/Al dissimilar joint  
with heat input of 107 J/mm

大图,可以看出断口 C 区域的铝合金部分由大量的韧窝结构组成,D 区域为界面组织区域,其表面光滑,经能谱检测其主要为  $TiAl_3$  金属间化合物。由图 8(c)C 区域、8(d)D 区域的局部放大图可以看到,断口处铝合金组织的断裂为韧性断裂,断口处界面区域依旧十分平整,为脆性的解理断裂,因此钛铝异种接头为韧脆混合断裂。

由以上结果可以看出,热输入对于钛铝异种接头组织以及力学性能有着较为显著的影响,当热输入大于 107 J/mm 时,界面层金属间化合物为  $TiAl_2$ 、 $TiAl_3$ ,钛铝异种接头的界面层金属间化合物呈短棒状,并出现金属间化合物进入熔池的现象,使得钛铝异种接头的抗拉强度出现明显的下降。当焊接热输入小于 107 J/mm 时,钛铝界面层金属间化合物呈现锯齿形且金属间界面层厚度在  $1\mu m$  左右,界面层化合物为  $TiAl_3$ 。钛铝异种合金接头抗拉强度可达到铝合金母材强度的 60%以上,但热输入在 89 J/mm 时,钛铝异种接头的焊缝成形变差,使得接头的拉伸性能有所下降。

### 3 结论

(1) 使用激光自熔钎焊技术对 TC4/6061 钛铝异种合金进行对接试验,获得了成形良好的钛铝异种合金接头。

(2) 当热输入低于 107 J/mm 时,界面层脆性金属间化合物为  $TiAl_3$ ,呈现锯齿状,当热输入高于 107 J/mm,界面层脆性金属间化合物为  $TiAl_2$ 、 $TiAl_3$ ,化合物形态为短棒状。

(3) 随热输入增加,钛铝异种合金接头强度先增加后下降,当热输入为 107 J/mm 时,钛铝异种合金接头的抗拉强度达到最大,为 212 MPa,约为铝合金母材的 63%,此时接头断裂为韧脆混合型断裂。

#### 参考文献:

- [1] 田银宝,申俊琦,胡绳荪,等. 钛/铝异种金属冷金属过渡增材制造[J]. 焊接学报,2019,40(8):13-17.
- [2] 陈玉华,曹文明,周兴汶,等. 搅拌头偏移对 Ti/Al 异种金属搅拌摩擦焊接头成形及拉伸强度的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(1):67-74.
- [3] Zhang C Q, Robson J D, Prangnell P B. Dissimilar ultrasonic spot welding of aerospace aluminum alloy AA2139 to titanium alloy TiAl6V4 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231:382-388.
- [4] Zhou X, Duan J A, Zhang F, et al. The study on mechanical strength of titanium-aluminum dissimilar butt joints by laser welding-brazing process[J]. Materials, 2019, 12(5):712.
- [5] 陈树海. Ti/Al 异种合金激光熔钎焊工艺与连接机理 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [6] Chen Y, Chen S, Li L. Influence of interfacial reaction layer morphologies on crack initiation and propagation in Ti/Al joint by laser welding-brazing [J]. Materials & Design, 2010, 31(1):227-233.
- [7] Dressler U, Biallas G, Alfaro Mercado U. Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3 [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 526:113-117.

(上接第 46 页)

- [6] 胡海峰. 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接设备及工艺研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [7] 吕世雄,崔庆龙,黄永宪,等. 厚板钛合金窄间隙 TIG 焊接头组织与性能[J]. 焊接学报,2012,33(8):81-84.
- [8] 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.
- [9] Yang T, Xu D, Chen W, et al. Microstructure evolution and deformation resistance of heavy-thickness Ti-6Al-4V narrow-gap welded joints[J]. Materials Letters, 2019, 250:116-118.
- [10] 闫宾. TA17 钛合金板微观组织与成形性能研究[D]. 北京:北京科技大学,2020.