

TC17/Ti60 异种钛合金激光焊接接头微观组织和低周疲劳性能研究

张群兵¹, 张阔¹, 于佳恩², 李帆¹, 吕泉霖¹, 行海波¹, 孙康¹, 张建勋³

(1. 西安航空学院 材料工程学院, 陕西 西安 710077)

(2. 陕西省印刷科学技术研究所有限责任公司, 陕西 西安 710077)

(3. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用激光焊接技术焊接 TC17/Ti60 异种钛合金, 对焊接接头的宏观形貌、微观组织、显微硬度、拉伸性能和低周疲劳性能进行研究。结果表明: TC17/Ti60 合金焊接接头母材、焊缝、热影响区之间的微观组织存在较大差异; TC17 钛合金母材为 $\alpha+\beta$ 双相组织, β 相内存在较多次生 α' 相; Ti60 合金母材组织以等轴 α 相为主, β 相主要分布在等轴 α 晶粒周围; 焊缝微观组织为针状次生 α' 相; 随着距焊缝距离的减小, TC17 钛合金热影响区 α' 相逐渐消失、 α 相逐渐转变为 β 相, Ti60 合金热影响区 β 相逐渐消失、 α 相逐渐转变为针状次生 α' 相; TC17/Ti60 合金焊接接头拉伸断裂位置在 TC17 钛合金热影响区; 由于焊接接头的焊缝下部存在较多气孔缺陷, 低周疲劳断裂位置则位于焊缝处。

关键词: 异种钛合金; 激光焊; 气孔; 微观组织; 低周疲劳性能

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)04-023-07

Microstructure and Low-cycle Fatigue Properties of TC17/Ti60 Dissimilar Titanium Alloy Laser Welded Joint

Zhang Qunbing¹, Zhang Kuo¹, Yu Jiaen², Li Fan¹, Lv Quanlin¹, Xing Haibo¹, Sun Kang¹, Zhang Jianxun³

(1. School of Materials Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(2. Shaanxi Academy of Printing Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

(3. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Laser welding was carried out on TC17/Ti60 dissimilar titanium alloy, and the macro morphology, microstructure, microhardness, tensile properties and low-cycle fatigue properties of the welded joint were studied. The results show that there are large differences in microstructure among the base material (BM), weld zone (WZ) and heat-affected zone (HAZ) of TC17/Ti60 alloy welded joint. The TC17 titanium alloy BM is $\alpha+\beta$ two-phase structure, and there are lots of secondary α' phases in β phase. Ti60 BM structure is mainly composed of equiaxed α phase, and β phase is mainly distributed around the equiaxed α grain. The microstructure of WZ is acicular secondary α' phase. With the decreases of the distance to the center of WZ, the α' phase in the TC17 HAZ gradually disappears, the α phase gradually changes to β phase, and the β phase in Ti60 HAZ gradually disappears and the α phase gradually changes to the acicular secondary α' phase. The tensile fracture location of TC17/Ti60 alloy welded joint is in TC17 HAZ. There are porosity defects in the lower part of the WZ of TC17/Ti60 alloy welded joint, which lead to the fracture location is in the WZ under the low-cycle fatigue test.

Key words: dissimilar titanium alloy; laser welding; gas pore; microstructure; low-cycle fatigue property

TC17 钛合金具有强度高、淬透性好、断裂韧性优

等特点, 长期服役温度可达 427 °C, 可用作航空发动机低压压气机盘、风扇等^[1]; Ti60 合金具有优异的蠕变抗力和疲劳强度^[2], 可在 600 °C 下长期服役, 适合用作航空发动机高压压气机盘、叶片等。将 TC17 与 Ti60 合金进行焊接, 可充分发挥各自优势, 提高飞行器的推重比。

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2019JQ-915, 2019JQ-224); 西安市科技局高校院所人才服务企业项目 (2023JH-GXRC-0232)

通信作者: 张群兵 (1985—), 男, 讲师。

目前, TC17/Ti60 异种钛合金的焊接方法主要有真空电子束焊和摩擦焊^[3]。真空电子束焊具有功率密度高、深宽比大、焊接质量好等特点, 非常适合钛合金的焊接, 但是对于异种钛合金的焊接依然存在一些问题。高福洋等人^[4]对 Ti60/Ti700sr 合金电子束焊接接头进行研究, 在 Ti60 合金侧熔合区和热影响区均发现了稀土元素聚合现象, 焊接接头室温拉伸断裂位置在 Ti60 合金热影响区。Cheng 等人^[3]进行了 TC17/Ti60 合金电子束焊接研究, 发现焊缝中存在气孔缺陷, 这些气孔是焊接接头高周疲劳裂纹萌生的主要原因。王世清等人^[5]开展了 TC4/TC17 异种钛合金电子束焊接研究, 发现焊缝出现了粗大的柱状晶。与电子束焊接相比, 摩擦焊具有热输入少、焊缝区间窄、接头力学性能好等优点。Zhao 等人^[6]开展了 TC17/TC11 钛合金线性摩擦焊研究, 发现焊缝 TC17 钛合金侧晶粒粗大、硬度较低, TC11 钛合金侧晶粒细小、硬度较高; 经固溶和双重时效处理后, 焊缝两侧显微硬度的差异减小^[7]。高山等人^[8]对 TC17/Ti60 异种钛合金进行了惯性摩擦焊研究, 发现焊缝两侧的热影响区均存在流线形貌, 经热处理后流线形貌消失, 焊态与热处理态试样的室温拉伸断口均呈现解理断裂特征。杜随更等人^[9]研究发现, TC17/TC11 异种钛合金线性摩擦焊焊接接头弯曲性能的薄弱区为熔合区及 TC17 钛合金侧变形区, 弯曲断口呈脆性断裂特征; 摩擦焊接头中气孔等缺陷较少, 但是对焊接接头的尺寸和形状都有较高的要求。

与电子束焊、摩擦焊相比, 激光焊具有能量密度高、焊接变形小、热影响区窄、可达性好、易于实现自动化等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车、微电子、生物医药等领域^[10-11]。基于大数据的全球焊接热点研究进展^[12]表明, 激光焊已经成为最受关注的焊接工艺之一, 钛合金是主要的研究对象之一, 微观组织和力学

性能是焊接学科的核心研究方向。姜毅等人^[13-14]研究了 1.2 mm 厚 TC4 钛合金薄板的激光焊接, 结果表明, 激光功率是影响焊缝熔深、宽度、宏观形貌和气孔数量的主要因素之一。王猛等人^[15]在特定功率下对增材制造和锻造的 1.6 mm 厚 TC11 钛合金进行了激光焊接, 发现焊缝无明显气孔缺陷, 母材的组织状态对焊缝微观组织无明显影响。Xiong 等人^[16]在特定功率下对 2 mm 厚 Ti-22Al-25Nb/Ti-6Al-4V 异种钛合金进行激光焊接研究, 发现焊缝存在气孔缺陷, 接头拉伸断裂位置在焊缝处。Xu 等人^[17]研究了 2.5 mm 厚 TC4/TA15 异种钛合金激光焊接, 在焊缝中同样发现了气孔缺陷, 但接头拉伸断裂位置在 TC4 钛合金母材处。陈永城等人^[18]对 3 mm 厚 TC4/TA17 异种钛合金进行激光焊接, 发现焊缝为片状 α' 马氏体组织, 其上部 and 下部均存在气孔缺陷, 焊接接头拉伸断裂位置在 TC17 钛合金母材处。

通过上述研究可以发现, 随着钛合金厚度的增加, 焊缝出现气孔的几率增加, 从而对接头的拉伸、疲劳等力学性能造成影响。然而, 目前鲜有关于 TC17/Ti60 异种钛合金激光焊接的研究报道。因此, 以 5 mm 厚 TC17、Ti60 钛合金试板为研究对象, 对二者进行激光焊接, 并对焊接接头的微观组织、气孔缺陷及其分布特征、接头拉伸性能和低周疲劳性能进行探索, 以期对 TC17/Ti60 异种钛合金焊接接头组织和力学性能的调控提供参考。

1 实验

实验材料为 TC17、Ti60 合金锻件, 其化学成分和物理性能分别如表 1 和表 2 所示。首先, 将 TC17、Ti60 合金锻件切割成厚度为 5 mm 的试块, 然后用清洗液 (90 mL 纯水 + 6 mL HNO₃ + 4 mL HF) 浸泡 2 min 去除表面污渍, 最后用无水乙醇擦拭表面, 自然干燥。

表 1 TC17、Ti60 合金化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of TC17 and Ti60 alloy

Alloy	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	Nd	Ta	Si	O	C	Ti
TC17	5.15	1.98	2.01	3.83	3.80	0.024	—	—	—	0.10	0.02	Bal.
Ti60	5.31	3.97	1.98	0.78	—	—	1.00	0.30	0.30	—	0.09	Bal.

表 2 TC17、Ti60 合金室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC17 and Ti60 alloy at room temperature

Alloy	E /MPa	μ (Poisson ratio)	R_m /MPa	A /%
TC17	113	0.29	1020	12.3
Ti60	115	0.30	1033	9.4

采用 YLS-4000 型光纤激光器和 YASKAWA 焊接机器人进行异种钛合金激光焊接。基于前期试验探索, 激光功率为 3.5 kW, 焊接速度为 900 mm/min, 激光离焦量为 0 mm, 保护气体为纯度 99.99% 的氩气, 焊接示意图如图 1 所示。

焊接试验完成后, 以焊缝为中心, 使用电火花线切割设备和磨床将焊接接头加工成金相试样、拉伸试

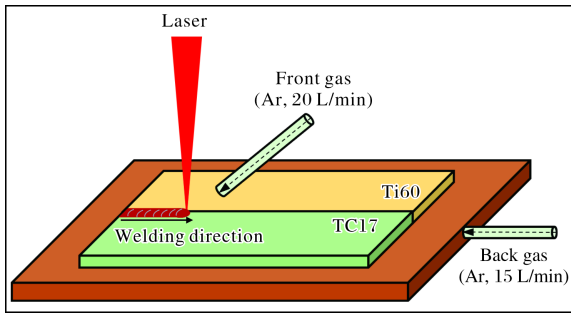


图 1 TC17/Ti60 异种钛合金激光焊接示意图

Fig.1 Laser welding process diagram of TC17/Ti60 dissimilar titanium alloy

样和疲劳试样。拉伸试样按照标准 ISO 4136:2022 制备，低周疲劳试样按照标准 ISO 12106:2017 制备。经过加工后，拉伸和疲劳试样的最终厚度约为 3 mm，试样尺寸如图 2 所示。低周疲劳试验设备为 PLS-100 电液伺服动静试验机，控制方式为应力控制，波形为三角波，应力比为 $R=1$ ，频率为 0.125 Hz，应力幅值为 900 MPa。拉伸试验设备为 UTM5305 电子万能试验机，拉伸速率为 5 mm/min。硬度试验设备为 TMVS-1 维氏显微硬度计，载荷为 1.96 N，保载时间为 15 s。为消除试验误差，所有力学性能试验均重复 3 次，取平均值作为试验结果。

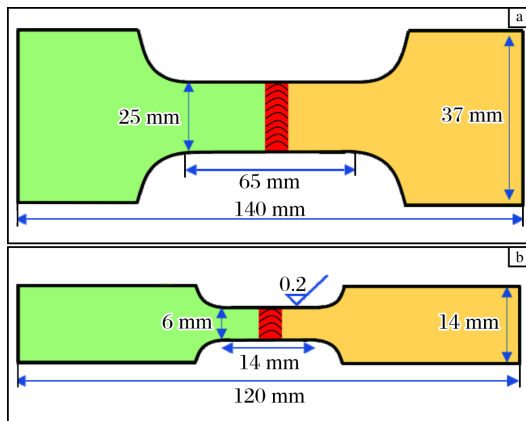


图 2 拉伸试样和疲劳试样尺寸示意图

Fig.2 Diagrams of sample size: (a) tensile sample; (b) fatigue sample

金相试样用砂纸逐级打磨至 2000 目，再用 SiO_2 悬浊液进行抛光，最后用腐蚀液（80 mL 纯水 + 15 mL HNO_3 + 5 mL HF）浸蚀 3 min。采用 HIROX-200 超深场光学显微镜、JSM-6510A 扫描电镜（SEM）对焊接接头的宏观形貌、微观组织及断口形貌进行观察和分析。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

TC17/Ti60 合金激光焊接接头横截面的宏观形貌

如图 3 所示。由图 3a 可以看出，焊接接头由焊缝（WZ）、热影响区（HAZ）、母材（BM）3 部分组成；焊缝上部较宽、下部较窄，整体呈 X 型；焊缝下部存在较多圆形冶金气孔缺陷，上部未发现气孔缺陷。焊缝的 X 型形貌是由匙孔效应造成的：在激光深熔焊接过程中，焊缝中心的液态金属受热气化，形成匙孔，随着激光焊接线能量的增加，匙孔的深度变深，当匙孔深度超过样品厚度时，样品的下表面被穿透，金属蒸气从匙孔的顶部和底部同时向外喷出，带动熔池内的液态金属沿匙孔壁分别向上和向下流动，在熔池顶部和底部分别形成相对独立的 Marangoni 涡流，如图 3b 所示，从而导致熔池顶部和底部的宽度大于中部，形成 X 型焊缝。

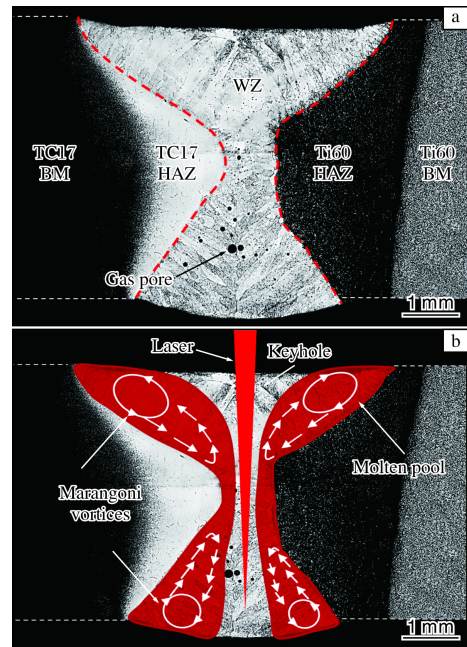


图 3 TC17/Ti60 合金激光焊接接头横截面的宏观形貌及 X 型焊缝形成原理示意图

Fig.3 Macrostructure of TC17/Ti60 alloy laser welded joint in cross-section (a) and schematic diagram (b) of formation principle of X-type weld zone

焊接过程中，部分氩气在涡流的作用下进入熔池^[9]，并在冷却过程中从液态熔池析出。在 X 型熔池的上部，氩气离上表面较近，较容易逸出，因此焊缝上部基本没有产生冶金气孔；而在 X 型熔池的下部，氩气离上表面较远且向上逃逸的通道狭窄，难以逸出，因此在熔池的快速冷却过程中，下部未能逃逸的氩气被滞留在固态焊缝中，形成冶金气孔。

2.2 微观组织

焊缝、热影响区、母材三者之间宏观色泽的不同

是由微观组织的差异所导致的。图 4 为 TC17/Ti60 合金激光焊接接头不同区域的微观组织。如图 4a 所示, TC17 钛合金母材的微观组织为 β 相 + 等轴 α 相, 平均晶粒尺寸约为 $4\ \mu\text{m}$, β 相内存在较多次生 α' 相; 图 4b、4c 分别为 TC17 钛合金远热影响区 (离焊缝较远) 和近热影响区 (离焊缝较近) 的微观组织, 可以看出, 随着距焊缝距离的减小, 热影响区次生 α' 相逐渐消失, α 相逐渐转变为 β 相, β 相晶粒尺寸逐渐增大, 晶粒内部残留少量 α 相; 图 4d 是 TC17 钛合金热影响区与焊缝的熔合区, 可以看出, 熔合线两侧微观组织差异较大, 熔合线左侧的 TC17 钛合金热影响区为等轴 β 晶粒, 熔合线右侧的焊缝无明显晶界, 晶内隐约可见细小针状次生 α' 相; 由图 4e 焊缝中心的微观组织可以看出, 焊缝中心由大量针状次生 α' 相组成, 与 TC17 钛

合金熔合线右侧焊缝相比, 焊缝中心的次生 α' 相尺寸增大; 图 4f 是焊缝与 Ti60 合金热影响区的熔合区, 熔合线左侧是焊缝, 右侧是 Ti60 合金热影响区, 可以看出熔合线两侧的微观组织均为针状次生 α' 相, 但是熔合线右侧 Ti60 合金热影响区的针状次生 α' 相尺寸显著大于熔合线左侧的焊缝, 与此同时, Ti60 合金熔合线左侧焊缝区域的针状次生 α' 相尺寸显著大于焊缝中心; 由图 4i 可以看出, Ti60 合金母材的微观组织以等轴 α 相为主, 平均晶粒尺寸约为 $13\ \mu\text{m}$, α 相晶粒周围分布大量 β 相; 图 4h、4g 分别为 Ti60 合金远热影响区 (离焊缝较远) 和近热影响区 (离焊缝较近) 的微观组织, 可以看出, 随着距焊缝距离的减小, Ti60 合金热影响区 β 相逐渐消失, 等轴 α 相逐渐转变为针状次生 α' 相。

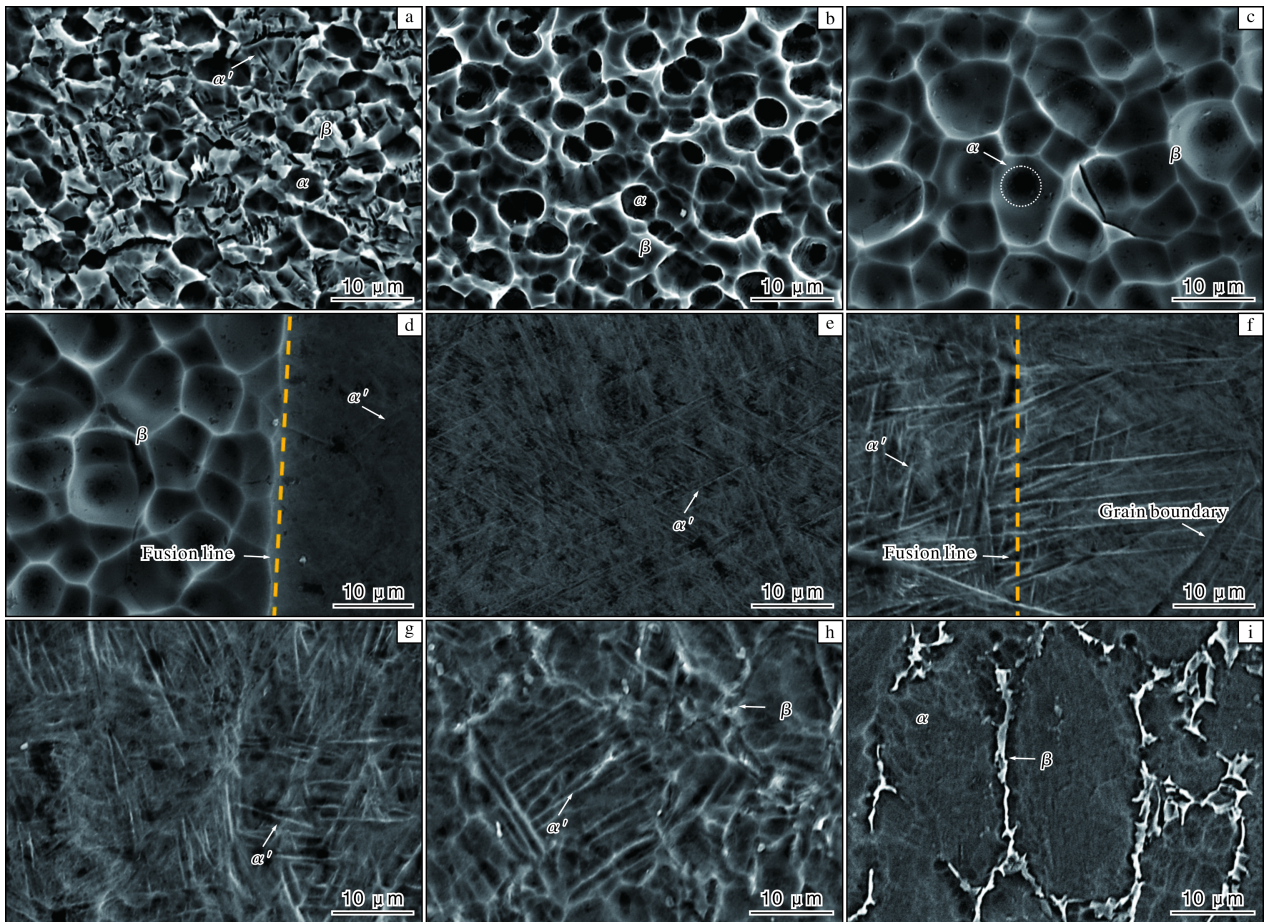


图 4 TC17/Ti60 合金激光焊接接头不同区域的微观组织

Fig.4 Microstructures of TC17/Ti60 alloy laser welded joint: (a) TC17 BM; (b) TC17 far-HAZ; (c) TC17 near-HAZ; (d) fusion line between WZ and TC17 HAZ; (e) center of WZ; (f) fusion line between WZ and Ti60 HAZ; (g) Ti60 alloy near-HAZ; (h) Ti60 far-HAZ; (i) Ti60 BM

从图 4d~4f 可以看出, TC17/Ti60 合金焊缝组织存在一定的不均匀性, 从 TC17 钛合金熔合线至焊缝中心, 再到 Ti60 合金熔合线, 针状次生 α' 相尺寸逐渐增

大。这是因为激光焊焊后冷却速度快, TC17/Ti60 焊缝原始 β 相转变为针状 α' 相^[20], 但是在相同的条件下, 由于 TC17 钛合金的热导率大于 Ti60 合金^[21-22],

从而导致焊缝近 TC17 钛合金一侧的冷却速度大于近 Ti60 合金一侧, 因此从 TC17 钛合金熔合线至焊缝中心, 再到 Ti60 合金熔合线, 冷却速度逐渐降低, 针状 α' 相生长时间逐渐延长, 尺寸逐渐增大。

2.3 力学性能

图 5 是 TC17/Ti60 合金激光焊接接头横截面的显微硬度曲线。从图 5 可以看出, TC17 钛合金母材和 Ti60 合金母材硬度相当, 平均值分别约为 375HV、360HV; TC17 钛合金热影响区和 Ti60 合金热影响区显微硬度呈现出截然不同的变化趋势, 离焊缝越近, TC17 钛合金热影响区硬度越低, 而 Ti60 合金热影响区硬度越高, 这是由于随着距焊缝距离的减小, TC17 钛合金热影响区 α 相和次生 α' 相逐渐消失, β 相尺寸逐渐增大, 从而导致 TC17 钛合金热影响区硬度逐渐降低, 但是 Ti60 合金热影响区等轴 α 相逐渐转变为针状次生 α' 相, 从而导致其硬度逐渐升高; 焊缝的显微硬度显著高于 TC17 钛合金母材、TC17 钛合金热影响区和 Ti60 合金母材; 与此同时, 从 TC17 钛合金熔合线到焊缝中心, 再到 Ti60 合金熔合线, 硬度存在一定的差异, 这是由于不同区域针状次生 α' 相尺寸和数量之间存在差异造成的。

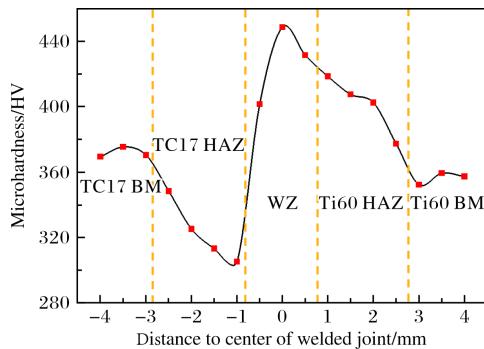


图 5 TC17/Ti60 合金激光焊接接头横截面的显微硬度曲线

Fig.5 Microhardness curve of TC17/Ti60 alloy laser welded joint in cross-section

室温拉伸性能测试结果显示, TC17/Ti60 合金激光焊接接头的室温拉伸强度为 905 MPa, 断裂位置在 TC17 钛合金热影响区; 低周疲劳断裂寿命为 704 周次, 断裂位置在焊缝处。

2.4 断口形貌

TC17/Ti60 合金激光焊接接头的拉伸断口形貌如图 6 所示。从图 6 可以看出, 宏观断口表面较为平整 (图 6a); 断口边缘光滑 (图 6b), 这是由于受到垂直于拉伸方向的切向应力作用造成的; 断口内部为类似于韧窝的非典型拉伸断口形貌 (图 6c)。对比拉伸断口形貌 (图 6c) 与 TC17 近热影响区微观组织 (图

4c) 可以发现, 断口韧窝尺寸与 TC17 近热影响区晶粒尺寸基本一致, 韧窝周围的撕裂棱与 TC17 近热影响区晶界 β 相尺寸一致。 β 相具有体心立方结构, 滑移面较多, α 相具有密排六方结构, 滑移面较少, 因而在拉伸试验过程中, 晶界 β 相塑性变形程度大, 晶粒内部的 α 相塑性变形程度小, 二者塑性变形的差异导致形成了图 6c 所示的韧窝状形貌。

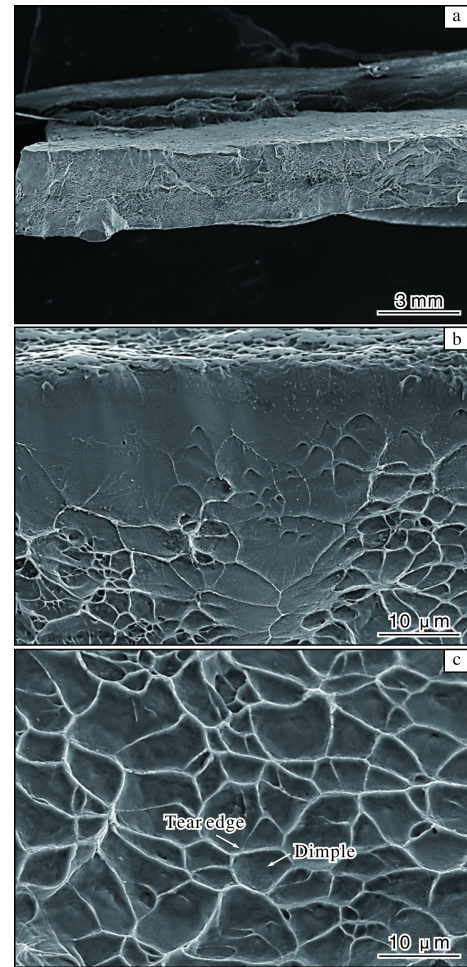


图 6 TC17/Ti60 合金激光焊接接头的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphologies of TC17/Ti60 alloy laser welded joint: (a) macro morphology; (b) edge of fracture; (c) interior of fracture

图 7 是 TC17/Ti60 合金激光焊接接头低周疲劳断口形貌。如图 7a 所示, 疲劳断口宏观形貌较为平整, 断口边缘和内部均可观察到气孔缺陷。由于气孔缺陷只存在于焊缝 (图 3), 说明 TC17/Ti60 合金焊接接头低周疲劳断裂位于焊缝处。在断口边缘, 可发现如图 7b 所示的疲劳裂纹启裂区, 可以看出裂纹启裂区表面平整, 不存在加工缺陷和气孔, 说明疲劳裂纹产生的主要原因是试样在疲劳交变拉压应力作用下, 位于试样表面的晶粒发生了晶面滑移, 形成了微裂纹, 进

而导致疲劳裂纹的扩展。由图 7c 所示的疲劳裂纹扩展区形貌可以看出, 断口表面存在较多疲劳条纹, 一条疲劳条纹代表一次疲劳循环。疲劳条纹是低周疲劳断口的特征形貌, 是塑性材料在交变拉压应力作用下, 裂纹尖端不断张开与闭合导致的。与此同时, 在疲劳裂纹扩展区表面可观察到气孔缺陷。图 7d 是疲劳

试样最终断裂区的形貌, 随着疲劳裂纹的不断扩展, 试样的承载能力不断降低, 当疲劳裂纹扩展到一定长度时, 试样的承载能力低于疲劳试验的加载外力, 此时, 试样会被快速拉断, 形成类似于拉伸试样断口的韧窝状形貌。同样的, 在最终断裂区也观察到了气孔缺陷。

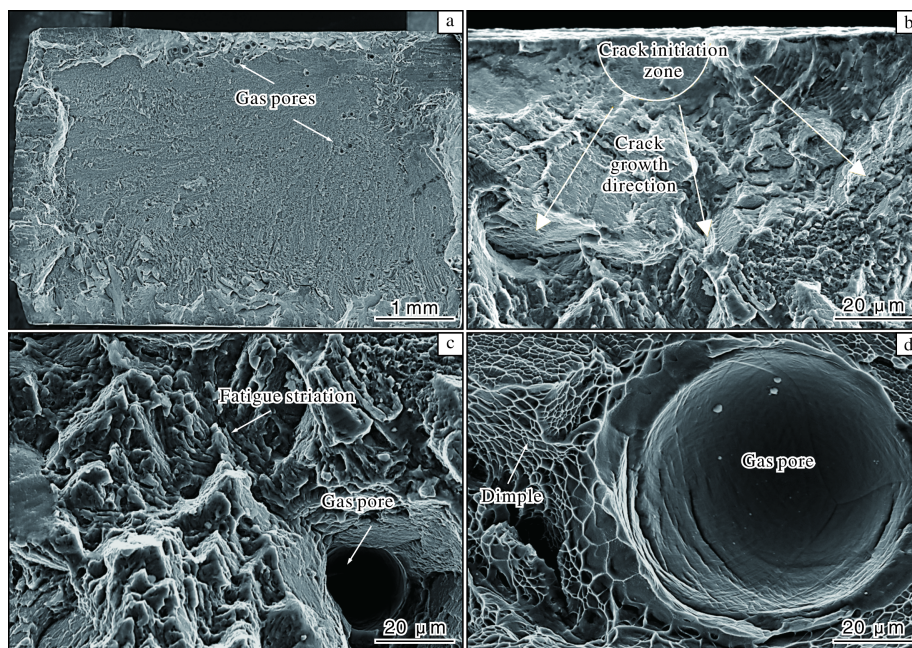


图 7 TC17/Ti60 合金激光焊接接头的低周疲劳断口形貌

Fig.7 Low-cycle fatigue fracture morphologies of TC17/Ti60 alloy laser welded joint: (a) macro morphology; (b) crack initiation zone; (c) crack growth zone; (d) final fracture zone

3 结 论

(1) TC17 钛合金母材微观组织由 β 相 + 等轴 α 相组成, β 相内存在较多次生 α' 相; Ti60 合金母材微观组织以等轴 α 相为主, α 晶粒周围分布有大量 β 相; TC17/Ti60 合金焊缝微观组织由大量针状次生 α' 相组成, 从 TC17 钛合金熔合线至 Ti60 合金熔合线, 次生 α' 相尺寸逐渐增大; 随着距焊缝距离的减小, TC17 钛合金热影响区 α' 相逐渐消失、 α 相逐渐转变为 β 相, Ti60 合金热影响区 β 相逐渐消失、 α 相逐渐转变为针状次生 α' 相。

(2) 受微观组织的影响, 焊接接头各区域的显微硬度变化趋势为: 焊缝 > Ti60 合金热影响区 > TC17 钛合金母材 > Ti60 合金母材 > TC17 钛合金热影响区。焊接接头试样拉伸断裂位置在 TC17 钛合金热影响区。

(3) TC17/Ti60 合金焊缝宏观形貌为 X 型。X 型焊缝上部无气孔缺陷, 下部有较多气孔缺陷。焊接接头低周疲劳断裂位置在焊缝处。

参考文献 References

- [1] 郭萍, 强菲, 王欢, 等. 热处理工艺对大规格 TC17 钛合金棒材组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2024, 41(3): 19-23.
- [2] 赵会宇, 张媚, 于佳石, 等. 石墨烯/Ti60 复合材料组织与力学性能研究[J]. 钛工业进展, 2022, 39(2): 29-32.
- [3] Cheng C, Yu B B, Chen Z Y, et al. Mechanical properties of electron beam welded dissimilar joints of TC17 and Ti60 alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(10): 1859-1866.
- [4] 高福洋, 高奇, 韩林举, 等. 异种高温钛合金电子束焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 73-78.
- [5] 王世清, 焦迎香. TC4/TC17 电子束焊接接头组织及高温拉伸性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2716-2720.
- [6] Zhao P K, Wei C, Xiao X D, et al. Thermal deformation mechanism of TC11/TC17 linear friction welded joint during isothermal compression[J]. Materials Characterization, 2021, 178: 111319.

- [7] Zhao P K, Wei C, Li Y, et al. Effect of heat treatment on the microstructure, microhardness and impact toughness of TC11 and TC17 linear friction welded joint[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 803: 140496.
- [8] 高山, 袁明强. Ti60/TC17 异种钛合金惯性摩擦焊接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 115-121.
- [9] 杜随更, 徐婉婷, 高漫. TC17-TC11 异种钛合金线性摩擦焊接头弯曲性能分析与改善[J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 200-210.
- [10] Ai Y W, Wang Y Y, Yan Y C, et al. The evolution characteristics of solidification microstructure in laser welding of Ti-6Al-4V titanium alloy by considering transient flow field[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110195.
- [11] 程东海, 张夫庭, 刘士伟, 等. 稀土 Yb_2O_3 对 TC4 钛合金激光焊接头超塑变形行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(12): 4361-4366.
- [12] 罗丹青, 罗震, 孙佳奇, 等. 基于大数据的全球焊接热点研究进展[J]. 焊接技术, 2024, 53(1): 7-12.
- [13] 姜毅, 张颖云, 朱胜利, 等. 激光功率对 TC4 钛合金薄板对接焊缝形貌的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 16-18.
- [14] 孔斌, 杜心伟, 海沁雨, 等. Ti6Al4V 薄板脉冲激光拼焊的焊缝成形及力学性能[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2022(5): 1-7.
- [15] 王猛, 张立平, 赵琳瑜, 等. 增材制造和锻造 TC11 钛合金激光焊接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(10): 102-110.
- [16] Xiong L D, Mi G Y, Wang C M. Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of Ti-22Al-25Nb/Ti-6Al-4V dissimilar titanium alloys[J]. Journal of Laser Applications, 2018, 30(3): 032412.
- [17] Xu W F, Ma J, Luo Y X, et al. Microstructure and high-temperature mechanical properties of laser beam welded TC4/TA15 dissimilar titanium alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 160-170.
- [18] 陈永城, 张宇鹏, 罗子艺, 等. TC4/TA17 异种钛合金激光焊接接头显微组织和力学性能[J]. 电焊机, 2017, 47(11): 82-86.
- [19] 刘巨锋, 王维新, 唐众民, 等. GH4169/1Cr18N9Ti 异种材料激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 241-244.
- [20] Sun F, Li J S, Kou H C, et al. Phase transformation during the continuous cooling in near α titanium alloy Ti60[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 848-853.
- [21] 刘美琴. TC17 钛合金线性摩擦焊残余应力数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [22] 戴毅, 曹江海, 秦羽满, 等. Ti60 合金 VAR 熔炼过程熔体流动与宏观偏析的数值模拟研[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(3): 701-708.

行业动态

2024 年 1—6 月中国钛产品进出口统计

项 目	进口数量/kg	进口金额/美元	出口数量/kg	出口金额/美元
钛矿砂及其精矿	2 226 098 395	668 370 616	44 271 944	40 337 098
钛的氧化物	4 056 017	17 347 674	27 399 386	56 937 556
钛白粉金(红石型含量 $\geq 99.8\%$ 且明度(干粉 L*) $\geq 99.0\%$)	33 676 932	102 646 399	182 736 447	434 498 440
其他钛白粉	14 015 314	51 334 925	789 750 640	1 752 043 277
海绵钛	200	16 905	2 425 628	18 457 639
其他未锻轧钛	63 849	5 595 006	891 120	12 124 116
钛粉末	37 257	1 191 518	287 901	3 893 539
钛条、杆、型材及异型材	1 188 664	59 010 411	5 016 605	113 104 237
钛丝	156 793	13 436 417	781 137	16 910 271
厚度 ≤ 0.8 mm 的钛板、片、带、箔	571 776	14 385 132	536 923	13 828 447
厚度 > 0.8 mm 的钛板、片、带	713 592	47 133 267	5 353 845	116 662 399
钛管	290 204	10 690 384	1 618 505	43 203 198
其他锻轧钛及钛制品	369 356	204 408 908	2 132 516	132 942 091

来源: 海关总署官网