

引文格式: 施绍森, 赵甘泉, 李壮, 等. 新型Ti-3773合金激光焊接接头力学性能与腐蚀性能的研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(3): 25020204.

SHI Shaomiao, ZHAO Ganquan, LI Zhuang, et al. Study on mechanical properties and corrosion resistance of laser welded joint of novel Ti-3773 alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(3): 25020204.

新型Ti-3773合金激光焊接接头力学性能与 腐蚀性能的研究

施绍森¹, 赵甘泉², 李 壮¹, 张道义¹, 胡国贤¹, 张雨时¹, 王 勇¹

(1. 文山学院冶金与材料学院, 文山 663099;

2. 云南交通职业技术学院, 昆明 650500)

[摘要] 新型 Ti-3773 合金采用激光自熔焊接试验, 利用 XRD 衍射分析仪、光镜、扫描电镜、硬度计与万能拉伸试验机研究了其焊接性能和力学性能; 通过极化曲线测定, 研究了其腐蚀性能。结果表明, 新型 Ti-3773 合金激光自熔焊接最佳的焊接参数范围: 焊接功率为 2300 W、2400 W、2500 W, 焊接速度为 10 mm/s; 焊接功率为 2600 W、2700 W、2800 W, 焊接速度为 14 mm/s。Ti-3773 合金经最佳参数焊接后, 焊缝中心由单一粗大的 β 相组成, 在热影响区组织转为细小的 β 晶粒和少量的弥散 α 相; 焊接接头的抗拉强度平均值是母材的 71.38%, 伸长率平均值是母材的 265.67%, 焊接接头表现出更好的塑性变形能力。热影响区部位因 β 晶粒细小造成细晶强化以及 α 相析出的沉淀强化, 其硬度达最高。热影响区的耐腐蚀性能最差, 其腐蚀电流密度达 $3.6191 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。Ti-3773 合金焊接后, 不同区域的耐蚀性表现为: 母材 > 焊缝区 > 热影响区。

关键词: Ti-3773 合金; 激光自熔焊接; 焊接接头; 焊接性能; 力学性能; 腐蚀性能

中图分类号: V26; TG457

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020204

Study on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Laser Welded Joint of Novel Ti-3773 Alloy

SHI Shaomiao¹, ZHAO Ganquan², LI Zhuang¹, ZHANG Daoyi¹, HU Guoxian¹,
ZHANG Yushi¹, WANG Yong¹

(1. School of Metallurgy and Materials, Wenshan University, Wenshan 663099, China;

2. Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming 650500, China)

[ABSTRACT] Laser self-fusion welding experiments were performed on the novel Ti-3773 alloy. The welding performance, mechanical properties, and corrosion resistance were investigated by X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), hardness tester, universal tensile testing machine, and potentiodynamic polarization measurement. The results showed that the optimum welding parameter ranges for the novel Ti-3773 alloy are as follows: Welding powers of 2300 W, 2400 W, and 2500 W with a welding speed of 10 mm/s; welding powers of 2600 W, 2700 W, and 2800 W with a welding speed of 14 mm/s. Under the optimum welding process conditions, the weld center of Ti-3773 alloy consisted of a single phase of coarse β grains, while the heat-affected zone was composed of fine β grains and a small amount of dispersed α phase. The average tensile strength and elongation of the welded joint were 71.38% and 265.67% of those of the base metal, respectively, indicating that the welded joint exhibits superior

收稿日期: 2025-06-30; 退修日期: 2025-07-25; 录用日期: 2025-08-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA03A501)

通信作者: 张道义, 讲师, 研究方向为有色金属加工。

李壮, 教授, 博士, 研究方向为金属材料组织与性能。

plastic deformation capacity. The hardness of the heat-affected zone reaches the highest value, which is attributed to fine-grain strengthening induced by refined β grains and precipitation strengthening from α phase precipitation. The corrosion resistance of the heat-affected zone is the worst, with a corrosion current density of $3.6191 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. After welding, the corrosion resistance of different zones of the Ti-3773 alloy follows the order: Base metal > weld zone > heat-affected zone.

Keywords: Ti-3773 alloy; Laser self-melting welding; Welded joint; Welding performance; Mechanical properties; Corrosion resistance

钛合金因其密度小、比强度高、热稳定性能好等优异的综合性能成为航空发动机结构件、飞行器整体叶盘、叶轮、骨架、起落架等飞机结构部件的主选材料^[1-3]。此外,它还广泛应用于生物医学、原子核、石油化工、海洋、医疗等领域^[4-5]。钛合金通常可以分为 α 型、 $\alpha+\beta$ 型和 β 型钛合金。 β 型钛合金按照钼当量(Mo_{eq})和亚稳态相组成为3类^[6]:稳定 β 型钛合金、亚稳定 β 型钛合金和近 β 型钛合金。合金钼当量大于25%时,合金没有热处理效应,属于稳定 β 型钛合金;合金钼当量在13.8%~25%时,合金为亚稳定 β 型钛合金,亚稳定 β 型钛合金从 β 相区固溶处理后快速冷却可以得到亚稳 β 相;钼当量在8.5%~10.8%时,合金为近 β 型钛合金^[7]。高强度亚稳态 β 型钛合金凭借良好的力学性能与优异的热处理工艺性,在航空航天工业被广泛用作结构零件^[8-9]。Ti-3773属于这类亚稳态 β 型钛合金。

针对钛合金优良的耐腐蚀性能^[10-11],陈跃良等^[12]研究了不同浓度NaCl溶液下典型铝/钛合金电偶腐蚀当量折算关系。赵平等^[13]研究了TC4钛合金的电化学腐蚀行为。彭文山等^[14]研究了TA2纯钛在流动海水中的腐蚀性能。显然,对新型亚稳态 β 型钛合金Ti-3773腐蚀性能进行深入研究也是必要的。

焊接是钛合金零部件生产过程中的一个关键技术。在所有的焊接方法里,激光焊接具有能量密度高,热影响区小,焊接速度快以及自动化潜力高等优点^[15]。学者们围绕焊接工艺对激光焊接质量的影响展开探讨^[16-17]。针对钛合金激光自熔焊,研究人员也在不断探索其工艺特性以及自熔焊后的组织性能^[18-19]。目前,对新型亚稳态 β 型钛合金,尤其是对Ti-3773合金激光焊接接头的相关研究仍处于空白,关于该合金焊接接头力学性能与腐蚀性能的研究工作仍需进一步开展。

针对新型Ti-3773合金,本文采用激光自熔焊接试验,利用XRD衍射分析仪、光镜与电镜对其焊接接头组织进行观察,并使用硬度计、万能拉伸试验机测试了其硬度与力学性能,最后在3.5%NaCl溶液中进行了极化曲线测定,对其腐蚀性能进行了研究。

1 试验及方法

1.1 试验材料与激光焊接试验

采用真空自耗电弧炉熔炼出Ti-3773合金锭作为试验材料,化学成分见表1。将钛锭经过1050℃保温5h后开始锻造,终锻温度为900℃,最终得到厚60mm的板材。

锻造板材经电火花线切割获得50mm×40mm×3mm的试样。使用RFL-C4000X型4000W连续光纤激光器,焊接工艺参数:(1)焊接功率为1900W、2200W、2400W、2700W、2900W,焊接速度为14mm/s;(2)焊接功率为2200W、2300W、2400W、2500W、2600W,焊接速度为10mm/s。分别使用流量38L/min和15L/min的氩气作为焊缝正面和背面的保护气,离焦量设为+10mm。

1.2 Ti-3773合金激光焊接接头组织性能分析

分别利用COIC-ZSA403连续变倍体视显微镜、Olympus-GX71金相显微镜、Zeiss-Sigma型扫描电子显微镜分析Ti-3773激光焊接接头附近的显微组织,利用Rigaku-Ultima IV XRD衍射分析仪进行物相分析。在母材与焊接接头位置分别截取3块拉伸试样,如图1所示。拉伸试验由RG3050微机控制电子万能试验机完成,拉伸速率为0.5mm/min;硬度检测采用

表1 Ti-3773合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Ti-3773 alloy (mass fraction) %

| Al | Mo | V | Cr | Fe | C | O | H | Ti |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 3.290 | 6.900 | 7.050 | 3.240 | 0.038 | 0.044 | 0.130 | 0.002 | 余量 |

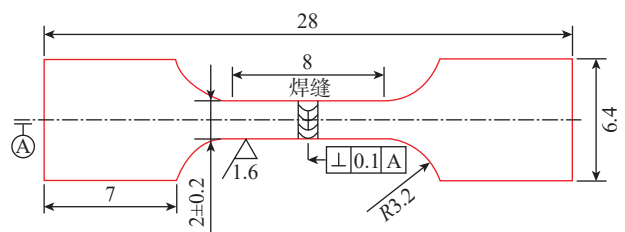


图1 Ti-3773合金拉伸试样示意图(mm)

Fig.1 Schematic diagram of Ti-3773 alloy tensile specimen (mm)

HVS-1000 数显维氏硬度计, 载荷 1 kg, 加载时间 15 s。

1.3 Ti-3773 合金激光焊接接头极化曲线测定

Ti-3773 合金试样激光焊接后, 从其焊缝、热影响区、母材沿焊缝中心部位分别截取 3 个尺寸为 10 mm × 10 mm × 3 mm 的试样。焊接接头微观截面的整体形貌如图 2 所示。

试样经过处理后, 在室温下采用 Auto-Lab 电化学工作站, 根据标准 ASTM G5 在 3.5% NaCl 溶液中进行极化曲线测定。试验采用三电极体系, 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 辅助电极为铂电极。电化学腐蚀具体试验参数: 扫描速率 0.06 mV/s、测量电势 -800~+120 V, 全浸泡腐蚀时间 30 min。

2 结果与分析

2.1 焊接性能

Ti-3773 合金在焊接功率 1900 W、2200 W、2400 W、2700 W, 焊接速度 14 mm/s 工艺参数下, 自熔焊焊接接头微观截面如图 3 所示。当焊接功率 1900 W 时, 接头未被完全焊透 (图 3 (a)); 当焊接功率增加到 2200 W、2400 W 时, 合金被焊透, 此时焊缝呈“丁”字形, 焊缝下

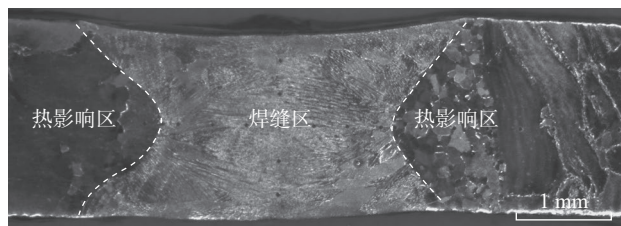
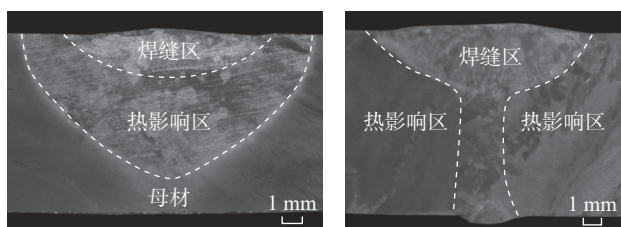
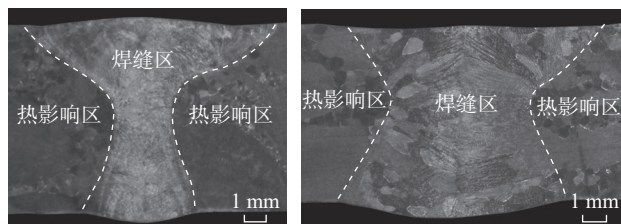


图 2 Ti-3773 合金激光焊接接头微观截面
Fig.2 Microsection of laser welded joint of Ti-3773 alloy



(a) 1900 W

(b) 2200 W



(c) 2400 W

(d) 2700 W

图 3 Ti-3773 合金在不同焊接功率下焊接接头的微观截面
Fig.3 Microsections of laser welded joints of Ti-3773 alloy under different welding powers

端变窄 (图 3 (b) 和 (c)); 当焊接功率增加到 2700 W 时, 焊缝呈“X”或“沙漏”形 (图 3 (d)), 此时, 焊缝平整, 纹理连续、清晰, 无各种缺陷。

合金以焊接速度 10 mm/s、焊接功率 2200 W 焊接时, 焊缝呈“丁”字形, 与图 3 (b) 和 (c) 一致; 以焊接速度 10 mm/s、焊接功率 2300~2500 W 焊接时, 自熔焊微观截面与图 3 (d) 一致。

合金分别在焊接功率 2600 W、焊接速度 10 mm/s 和焊接功率 2900 W, 焊接速度 14 mm/s 焊接后, 拉伸性能见表 2, 可以看出, 合金的强度明显降低。

2.2 显微组织

图 4 为焊接前 Ti-3773 合金的原始组织。经过锻造后, 钛合金 β 晶粒较为粗大且变形。由于钛锭体积大, 在空冷过程中冷却较慢, 少量细小的 α 相在变形 β 晶粒及其晶界处析出。

图 5 为 Ti-3773 合金经过焊接功率 2400 W, 焊接速度 10 mm/s 激光焊接后的显微组织。焊缝中心为非常粗大的 β 晶粒 (图 5 (a)); 在焊缝中心上表面仍可见粗大 β 晶粒 (图 5 (b)); 而在热影响区, β 晶粒碎化, 几乎找不到较大的 β 晶粒 (图 5 (c))。焊缝截面中心呈树枝晶的铸造组织 (图 6 (a)); 细小的 α 相在热影响区出现 (图 6 (b))。

表 2 Ti-3773 合金在不同焊接参数下的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of laser welded joints of Ti-3773 alloy under different welding parameters

| 拉伸性能 | 母材 | 焊缝 | |
|----------|---------|---------------------------|---------------------------|
| | | 焊接功率 2600 W, 焊接速度 10 mm/s | 焊接功率 2900 W, 焊接速度 14 mm/s |
| 抗拉强度/MPa | 1083.14 | 563.15 | 558.74 |
| 屈服强度/MPa | 694.82 | 435.56 | 427.67 |
| 断后伸长率/% | 9.93 | 18.31 | 18.64 |

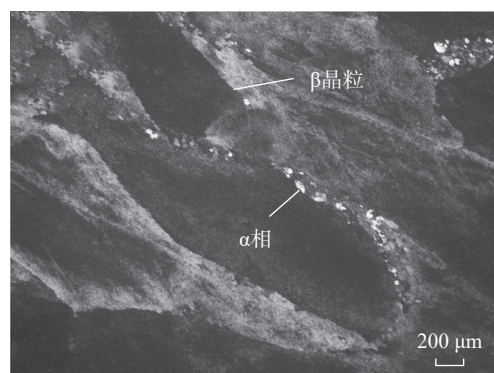


图 4 Ti-3773 合金原料的光镜组织
Fig.4 Optical microstructure of Ti-3773 alloy raw material

2.3 物相分析

Ti-3773 合金的 XRD 衍射图谱如图 7 所示。Ti-3773 合金中含 β 相稳定元素 V、Cr, 尤其有质量分数 6.9% 的 Mo 元素(表 1)。钛合金中的 α 相属于密排六方结构, β 相以及 Mo、V、Cr 元素同属于体心立方结构。根据晶体结构分析, Ti-3773 合金经过激光焊接后母材与焊缝中强度较大的衍射峰为 β 相以及 Mo、V、Cr 元素, 母材中应含 β 相和 α 相; 而焊缝中 α 相的衍射峰则很弱, 几乎完全看不到。焊缝中只存在 β 相, 无 α 相(图 7)。由 XRD 衍射图可以推断, 焊缝中心应该由单一的 β 相组成。

2.4 最佳焊接参数下的拉伸性能与硬度结果

Ti-3773 合金的拉伸性能如图 8 所示。3 块母材试样的抗拉强度分别达到了 1231.53 MPa、1161.47 MPa 和 1203.91 MPa; 3 块焊接接头则仅为 721.29 MPa、987.55 MPa 和 858.65 MPa。焊接接头的抗拉强度平均值为母材的 71.38%。3 块焊接接头试样的伸长率分别达 20.37%、14.56% 和 15.68%; 而 3 块母材的伸长率则仅分别为 5.38%、7.46% 和 6.21%。焊接接头的伸长率

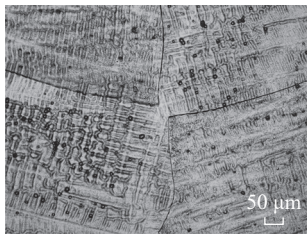
平均值是母材的 265.67%, 这说明 Ti-3773 合金焊接接头具有更好的塑性。

图 9 为该试样激光焊接后母材与焊接接头拉伸时的应力-应变曲线。Ti-3773 合金焊接接头 3 块试样在拉伸过程中, 其应力-应变曲线均延伸的较长, 而母材 3 块试样的应力-应变曲线虽延伸的较短, 但表现出较高的应力值。

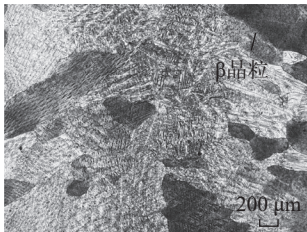
图 10 为 Ti-3773 合金焊接接头各区域硬度分布示意图。热影响区表现出硬度最高值 (301.1HV₁₀); 母材有的部位表现出较高的硬度 (296.9HV₁₀), 有的部位硬度又为最低值 (280.8HV₁₀)。热影响区的平均硬度 (296.4HV₁₀) 远高于母材和焊缝(图 11)。

2.5 断口特征

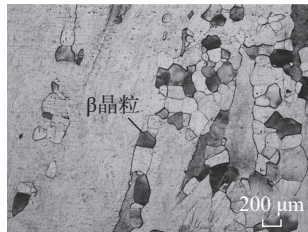
图 12 为 Ti-3773 合金母材与焊接接头扫描电镜拉伸断口。母材的断口为韧窝断口形貌(图 12(a)), 说



(a) 焊缝中心



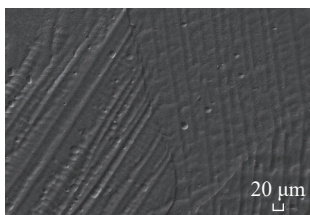
(b) 焊缝中心上表面



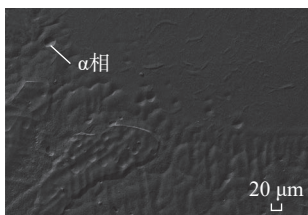
(c) 热影响区

图 5 Ti-3773 合金激光焊接后的显微组织

Fig.5 Microstructures of Ti-3773 alloy after laser welding



(a) 焊缝中心



(b) 热影响区

图 6 Ti-3773 合金激光焊接后扫描电镜组织

Fig.6 SEM microstructures of Ti-3773 alloy after laser welding

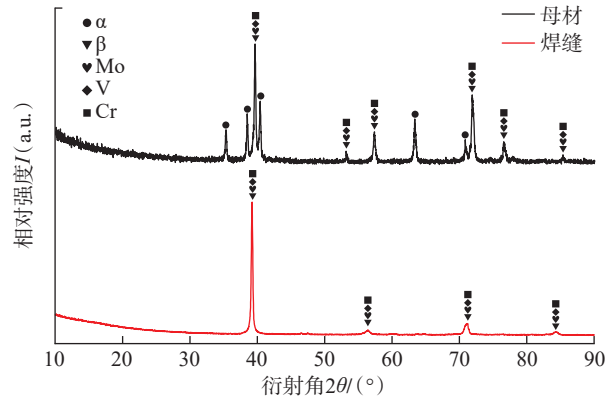


图 7 Ti-3773 合金母材与焊缝的 XRD 衍射图

Fig.7 X-ray diffraction patterns of base metal and welded seam of Ti-3773 alloy

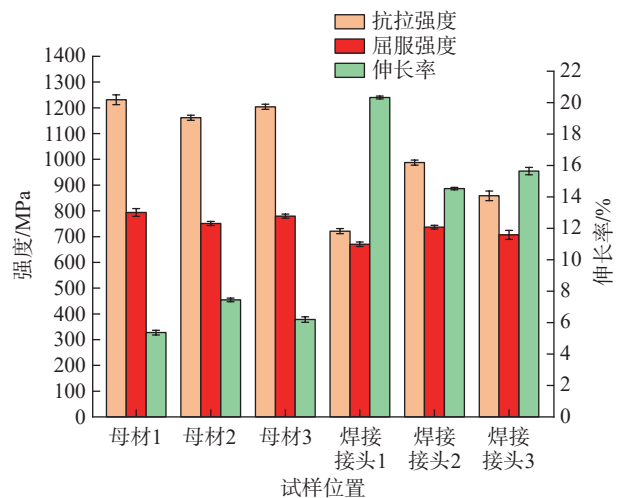


图 8 Ti-3773 合金焊接试样母材与焊接接头的拉伸性能

Fig.8 Tensile properties of base metal and welded joint of Ti-3773 alloy welded specimens

明母材经过相当程度的塑性变形；焊接接头的韧窝孔洞明显加深(图 12 (b)),表明与母材相比,激光焊接接头的塑性变形能力更好。

2.6 极化曲线结果

Ti-3773 合金母材与焊接接头极化曲线如图 13 所示。尽管从热影响区和焊缝处取样测其极化曲线存在误差,但母材、热影响区及焊缝的耐腐蚀性能仍明显不同。表 3 为从动电位极化曲线数据上测算出的腐蚀参数。

从表 3 可以看出, Ti-3773 合金焊接后,其母材、焊

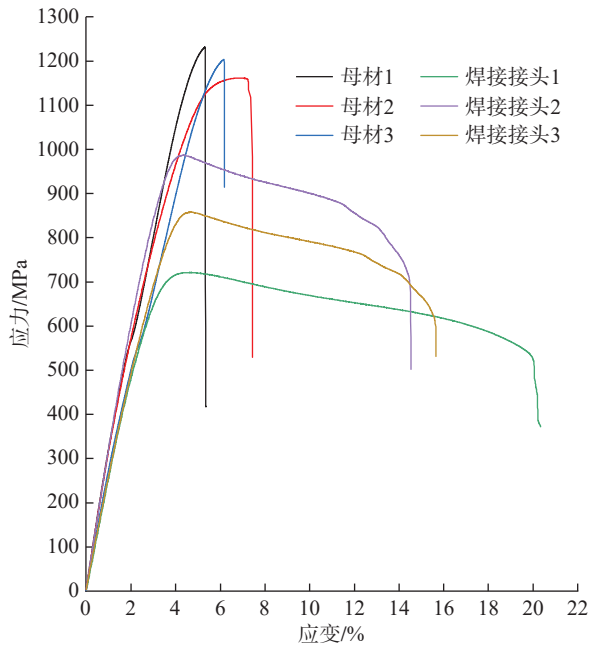


图 9 Ti-3773 焊接试样母材与焊接接头拉伸后的应力-应变曲线
Fig.9 Stress-strain curves of base metal and welded joint of Ti-3773 alloy welded specimens after tensile testing

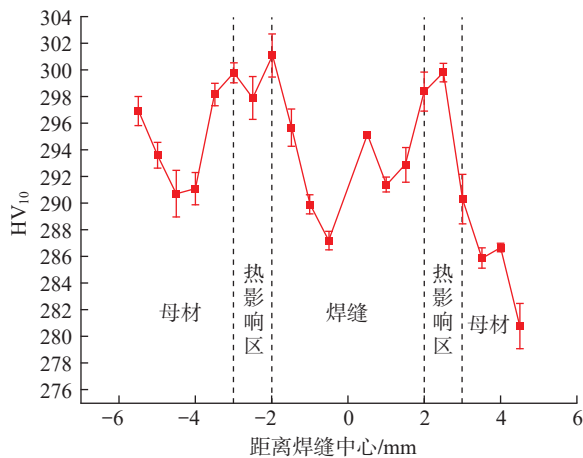


图 10 Ti-3773 合金焊接接头硬度分布示意图
Fig.10 Schematic diagram of hardness distribution in welded joint of Ti-3773 alloy

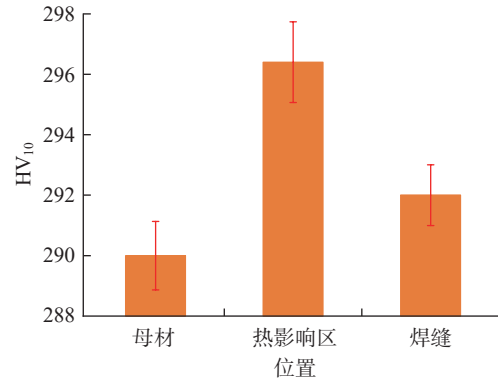


图 11 Ti-3773 焊接接头各区域硬度平均值
Fig.11 Average hardness values of each zone in welded joint of Ti-3773 alloy

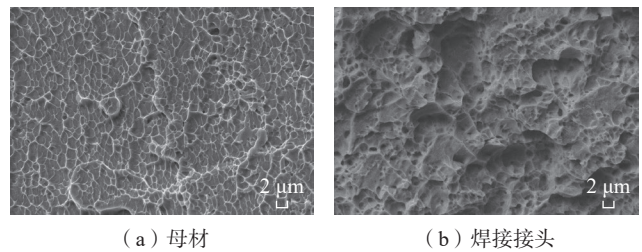


图 12 Ti-3773 合金断面形貌
Fig.12 Fracture morphologies of Ti-3773 alloy welded joints

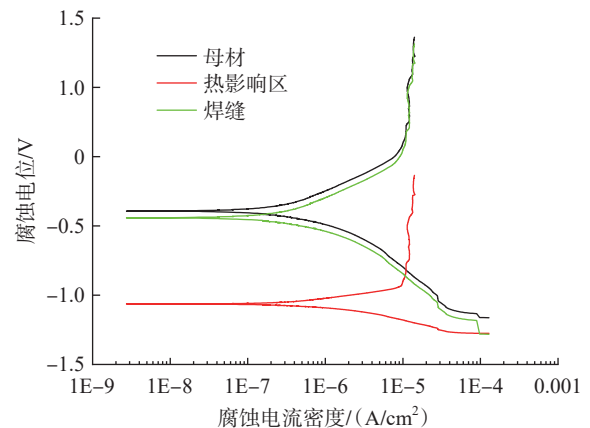


图 13 Ti-3773 合金母材与焊接接头的动电位极化曲线
Fig.13 Potentiodynamic polarization curves of base metal and laser welded joints of Ti-3773 alloy

表 3 Ti-3773 合金动电位极化曲线估算的腐蚀参数
Table 3 Estimated corrosion parameters from potentiodynamic polarization curves of Ti-3773 alloy

| 试样名称 | 自腐蚀电位/V | 腐蚀电流密度/($\times 10^{-7}$ A/cm 2) |
|------|---------|---------------------------------------|
| 母材 | -0.3929 | 1.97515 |
| 焊缝 | -0.4416 | 1.97515 |
| 热影响区 | -1.066 | 3.6191 |

缝与热影响区部分的自腐蚀电位差异明显,而腐蚀电流密度母材与焊缝完全一致,均为 $1.97515 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。Ti-3773 合金自腐蚀电位最高的是母材金属,为 -0.3929 V ,最低的是热影响区,为 -1.066 V ,该处腐蚀电流密度最高,达 $3.6191 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

2.7 焊接性能、拉伸性能与腐蚀性能分析

2.7.1 焊接性能

分别以焊接速度 10 mm/s 、 14 mm/s 进行焊接,当焊接功率较小时,焊缝呈“丁”字形,此时不利于薄板之间的对接焊,容易发生未熔合、组织成分偏析等焊接缺陷。当焊接功率增加,焊缝呈“X”形(图 3(d)),此时焊缝质量最好。焊接功率继续增加,焊缝拉伸性能变差(表 2),这源于焊接功率过大,焊接区域过热所致。由于过热导致晶粒粗大,强度降低,其抗拉强度仅为最佳焊接参数下的 50%。因此, Ti-3773 合金最佳的焊接参数范围:焊接功率为 2300 W 、 2400 W 、 2500 W ,焊接速度 10 mm/s ;焊接功率为 2600 W 、 2700 W 、 2800 W ,焊接速度为 14 mm/s 。

2.7.2 拉伸性能

Ti-3773 合金焊接后,焊缝中心由平行生长的胞状树枝晶铸态组织组成(图 5(a))。在焊接热循环下,已经凝固的焊接熔池温度下降缓慢,熔池内游离的籽晶以熔合线上局部熔化的母材作为形核的基底进行非自发行核,而这些基底的取向互不相同,取向与热流方向平行的枝晶相对于取向不利的枝晶生长速度更快,它们会占据更多的生长空间,抑制了取向不利的枝晶生长,从而使晶体表现出竞争性生长。焊接完成后 β 相在凝固时充分生长结果,使焊缝表面存在较大的 β 晶粒(图 5(b))。

本研究钛合金含有的 Mo、V、Cr 是 β 相稳定元素, Mo 的质量分数为 6.9%(表 1), Mo 的添加使钛合金强度提高^[20]。根据文献[21], Mo 当量的计算公式为

$$\text{Mo}_{\text{eq}} = 1.00[\text{Mo}] + 0.28[\text{Nb}] + 0.22[\text{Ta}] + 0.67[\text{V}] + 1.60[\text{Cr}] + 2.90[\text{Fe}] + 1.00[\text{Al}] \quad (1)$$

式中,各数字表示相应元素的质量分数。根据式(1)进行计算, Ti-3773 合金中,钼的质量分数为 20.46%。根据文献[22],此 β 钛合金可以获得 100% 的 β 相,并且激光焊接熔池的冷却速度极快, α 相来不及析出,所以可以确定试验钛合金的激光焊接焊缝物相为单一的 β 相(图 7)。如前文所述,在焊接热循环下,焊缝为粗大的 β 晶粒(图 5(a))。根据霍尔-佩奇公式^[23],晶粒粗大则强度降低,而伸长率提高。一方面, Ti-3773 合金中的 Al、Mo、V、Cr 元素,本身不仅细化晶粒,对合金起着细晶强化的作用,同时对合金还有固溶强化的作用;另一方面,母材中除 β 晶粒还有细小 α 相析出(图 4),

对于这种亚稳态 β 型钛合金,其强度主要来源于 α 相的沉淀行为^[8],也就是说母材中还存在着沉淀强化。然而,强度提高的同时也会损失塑性。因此,合金激光焊接后母材的强度远高于焊接接头,而焊接接头的伸长率则高于母材(图 8 和 9),激光焊接接头表现出了更好的塑性变形能力(图 12)。

热影响区部位 β 晶粒尺寸较焊缝区小(图 5(c)),因其晶界密度增加,造成细晶强化;在焊接热循环影响下, β 晶界部位 α 相析出(图 6(b)),造成沉淀强化^[8]。因此,热影响区的硬度达到了最高值(图 10 和 11)。由于母材部位存在 α 相的沉淀强化作用,当硬度测试时硬度计压头恰好打在 α 相沉淀析出的点上,致使其表现出较高的硬度;由于细小 α 相的沉淀析出是少量的,当压头恰好没有打在 α 沉淀相的析出部位,而仅仅打在粗大的 β 晶粒内部时,会使其表现出最低值。因此,焊缝左右侧的母材硬度差异较大(图 10)。

2.7.3 腐蚀性能

Mo 的添加改善了焊接钛合金的腐蚀性能^[20],同时, Ti-3773 合金激光焊接后的腐蚀性能还直接受其显微组织所影响。晶粒细化能够加速材料的腐蚀速度^[24],平均晶粒尺寸降低,钛合金的耐腐蚀性变差^[25]。焊接接头热影响区存在 α 、 β 两个相,这两个相的标准电极电位不同,因此在腐蚀溶液中会形成腐蚀微电池,加速焊接接头的腐蚀。热影响区的组织最细,其微电池数目最多,自腐蚀电位最低,热影响区耐腐蚀性能最差。晶粒平均尺寸越大的材料,其耐腐蚀性越高^[26]。晶粒尺寸增大后晶界能的减少使得腐蚀表面的宏观总体缺陷数量减少^[27],耐蚀性提高。材料的自腐蚀电位越高,同时腐蚀电流密度值越低,其耐腐蚀性能越好。母材的 β 晶粒粗大,其微电池数目最少,因此自腐蚀电位最高(图 13 和表 3),其耐蚀性最好。

Ti-3773 合金焊接后,将母材、焊缝区与热影响区部分的极化曲线(图 13)以及其自腐蚀电位和腐蚀电流密度进行比较(表 3),母材的自腐蚀电位高于焊缝区与热影响区,母材具有相对较弱的腐蚀倾向。经过激光焊接后,合金焊接接头部位的耐蚀性变差,热影响区的自腐蚀电位值最低(表 3),而腐蚀电流密度最高,说明热影响区具有最差的耐腐蚀性能。因此,由于微电池作用, Ti-3773 合金的母材、热影响区与焊缝区中,母材的耐腐蚀性能最好。经过激光焊接后, Ti-3773 合金不同区域的耐蚀性表现为:母材 > 焊缝区 > 热影响区。

3 结论

(1) 本文研究新型 Ti-3773 合金激光自熔焊接最佳的焊接参数范围:焊接功率为 2300 W 、 2400 W 、 2500 W ,

焊接速度为 10 mm/s ; 焊接功率为 2600 W、2700 W、2800 W, 焊接速度为 14 mm/s。

(2) 在焊接功率 2400 W, 焊接速度 10 mm/s 下, 合金母材组织为粗大的 β 晶粒和少量的细小 α 相。激光焊接后, 焊缝中心由单一粗大的 β 相组成, 在热影响区处转为细小的 β 晶粒和少量的弥散的 α 相。

(3) 在焊接功率 2400 W, 焊接速度 10 mm/s 下, 合金激光焊接接头的抗拉强度平均值为 855.83 MPa, 为母材处抗拉强度平均值 (1198.97 MPa) 的 71.38%, 其伸长率平均值为 16.87%, 是母材伸长率平均值 (6.35%) 的 265.67%。热影响区部位因 β 晶粒细小造成细晶强化以及 α 相析出的沉淀强化, 其硬度达最高。激光焊接接头表现出了更好的塑性变形能力。

(4) 在最佳的焊接参数下, Ti-3773 合金经过激光焊接后, 母材的自腐蚀电位最高, 为 -0.3929 V, 其耐蚀性最好。热影响区的腐蚀电流密度达 3.6191×10^{-7} A/cm², 其耐蚀性能最差。经过激光焊接后, Ti-3773 合金的耐蚀性为母材 > 焊缝区 > 热影响区。

参考文献

- [1] 曹正, 柴艳, 何光宇, 等. 压气机抗冲蚀涂层对钛合金疲劳性能的影响[J]. 航空学报, 2024, 45(19): 312-324.
- [2] CAO Zheng, CHAI Yan, HE Guangyu, et al. Effect of anti-erosion coatings on fatigue performance of titanium alloys in compressor blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19): 312-324.
- [3] 戎杰, 牛秋林, 高航, 等. 钛合金铣削加工中MQL参数优化与切削性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(3): 106-114.
- [4] RONG Jie, NIU Qiulin, GAO Hang, et al. Research on MQL parameter optimization and cutting performance in milling titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(3): 106-114.
- [5] SRIVASTAVA M, JAYAKUMAR V, UDAYAN Y, et al. Additive manufacturing of titanium alloy for aerospace applications: Insights into the process, microstructure, and mechanical properties[J]. Applied Materials Today, 2024, 41: 102481.
- [6] PASANG T, BUDIMAN A S, WANG J C, et al. Additive manufacturing of titanium alloys—Enabling re-manufacturing of aerospace and biomedical components[J]. Microelectronic Engineering, 2023, 270: 111935.
- [7] KUMAR R R, GUPTA R K, SARKAR A, et al. Vacuum diffusion bonding of α -titanium alloy to stainless steel for aerospace applications: Interfacial microstructure and mechanical characteristics[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111607.
- [8] MATSUMOTO H, NISHIHARA T, IWAGAKI Y, et al. Microstructural evolution and deformation mode under high-temperature-tensile deformation of the Ti-6Al-4V alloy with the metastable α' martensite starting microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 661: 68-78.
- [9] BENOÎT APPOLAIRE, AEBY-GAUTIER E, DEHMAS M, et al. Modeling of phase transformations in beta-metastable Ti alloys[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [10] TIAN T, XU X F, YANG X H, et al. Refinement of α precipitates assisted by accelerating ω phase under electropulsing in metastable β titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 924: 147804.
- [11] FAN Y D, TAN C S, FAN H N, et al. Achieving synergy between strength and ductility in metastable β -titanium alloy through a novel multi-morphological microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177863.
- [12] LI H, WANG B G, YANG J S, et al. Corrosion behavior of TC18 titanium alloy with different initial microstructures in salt spray[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1619-1628.
- [13] ZHAO Y X, XU J K, WANG G T, et al. Multifunctional titanium alloy moth-eye nanostructures for anti-corrosion and anti-reflection[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1016: 178939.
- [14] 陈跃良, 王哲夫, 卞贵学, 等. 不同浓度NaCl溶液下典型铝/钛合金电偶腐蚀当量折算关系[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 420450.
- [15] CHEN Yueliang, WANG Zhefu, BIAN Guixue, et al. Equivalent conversion of galvanic corrosion of typical aluminum-titanium alloy in NaCl solution with different concentrations[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 420450.
- [16] 赵平平, 宋影伟, 董凯辉, 等. 不同离子对TC4钛合金电化学腐蚀行为的协同作用机制[J]. 金属学报, 2023, 59(7): 939-946.
- [17] ZHAO Pingping, SONG Yingwei, DONG Kaihui, et al. Synergistic effect mechanism of different ions on the electrochemical corrosion behavior of TC4 titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(7): 939-946.
- [18] 彭文山, 邢少华, 钱晓, 等. 流动海水冲刷下TA2纯钛管路钝化膜腐蚀特性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(4): 1038-1046.
- [19] PENG Wenshan, XING Shaohua, QIAN Yao, et al. Effect of flowing seawater on corrosion characteristics of passivation film on TA2 pure-Ti pipes[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(4): 1038-1046.
- [20] DUAN Y H, WANG J F, YIN X, et al. Documenting weld pool behavior differences in variable-gap laser self-melting and wire-filling welding of titanium alloys[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 210: 109550.
- [21] 魏守征, 饶文姬, 段庆阳, 等. 背面焊缝激光重熔处理对Ti/Al高速FA-MIG焊接接头组织性能的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 117-124.
- [22] WEI Shouzheng, RAO Wenji, DUAN Qingyang, et al. Influence of laser remelting for back weld on microstructure properties of high speed FA-MIG welded Ti/Al joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 117-124.
- [23] 马旭颀, 段爱琴, 芦伟, 等. 热输入对双光束激光焊接Ti-6Al-4V合金T型接头焊接过程、焊缝成形、组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(7): 2300-2307.
- [24] MA Xuyi, DUAN Aiqin, LU Wei, et al. Influence of heat input on welding processes, weld formation, microstructure, and mechanical properties of double-sided laser beam welded Ti-6Al-4V alloy T-joints[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(7): 2300-2307.
- [25] 张峰, 杜永勤, 祝晓辉, 等. 工业纯钛激光自熔焊接工艺及气孔形成机理研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(1): 40-45.
- [26] ZHANG Feng, DU Yongqin, ZHU Xiaohui, et al. Study on the mechanism of porosity formation and laser fusion welding technology of commercial pure titanium[J]. Journal of Jiangsu University of Science and

Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(1): 40–45.

[19] 张世伟, 王珏, 佘好学, 等. TC4钛合金激光自熔焊接组织及性能[J]. 焊接, 2024(6): 33–39, 46.

ZHANG Shiwei, WANG Jue, SI Haoxue, et al. Microstructure and properties of TC4 titanium alloy joined by laser autogenous welding[J]. Welding & Joining, 2024(6): 33–39, 46.

[20] LIU D S, LI C, HUANG J X, et al. Influence of Mo additive on microstructure and corrosion behavior of TC4 metal-cored welding overlay[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 2554–2567.

[21] SADEGHPOUR S, ABBASI S M, MORAKABATI M. Deformation-induced martensitic transformation in a new metastable β titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 22–29.

[22] (德) C. 莱茵斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 33–34.

CHRISTOPH L. Titanium and titanium alloys[M]. CHEN Zhenhua, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 33–34.

[23] 赖祖涵. 金属的晶体缺陷与力学性质[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

LAI Zuhan, Crystal defect and mechanical property of the metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.

[24] 汪兵, 刘清友, 贾书君, 等. 晶粒尺寸对普碳钢耐工业环境下大气腐蚀性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(4): 193–196.

WANG Bing, LIU Qingyou, JIA Shujun, et al. Effect of grain size on the atmospheric corrosion resistance of carbon steel in industrial environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(4): 193–196.

[25] 张曼雪, 景然, 张雄, 等. 铸态Ti–20Zr–10Nb–xMo合金的微观组织和耐腐蚀性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 147–151.

ZHANG Manxue, JING Ran, ZHANG Xiong, et al. Microstructure and corrosion resistance of as-cast Ti–20Zr–10Nb–xMo alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(3): 147–151.

[26] SOLEIMANI M, MIRZADEH H, DEHGHANIAN C. Effect of grain size on the corrosion resistance of low carbon steel[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 016522.

[27] 汪兵, 刘清友, 王向东. 晶粒尺寸对超低碳IF钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(5): 601–606.

WANG Bing, LIU Qingyou, WANG Xiangdong. Effect of grain size on atmospheric corrosion resistance of ultralow carbon IF steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(5): 601–606.

(责编 七七)