

TC4-DT 合金电子束焊接接头低周疲劳性能研究

Research on EBW Joint Low Cycle Fatigue Property of TC4-DT Alloy

北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防重点实验室 唐振云 毛智勇 李晋炜
中国科学院金属研究所 马英杰

[摘要] 通过对 TC4-DT 钛合金母材、电子束焊接接头显微组织的分析及焊接接头不同位置疲劳性能的测试,研究了焊接接头显微组织特点,比较了母材与焊接接头不同位置处的低周疲劳性能,讨论了不同应变水平下接头的断口形貌。结果表明,当疲劳应变幅 $\Delta\varepsilon_f/2$ 小于 0.6% 时,TC4-DT 钛合金母材与接头的疲劳寿命 $2N_f$ 基本相同,当疲劳应变幅 $\Delta\varepsilon_f/2$ 大于 0.6% 时,随着塑性变形应变幅的增大,母材与焊接板材上、下层处的 $2N_f$ 差异逐渐明显,其中母材处的 $2N_f$ 最高,焊接板材上层处的 $2N_f$ 最低。

关键词: TC4-DT 电子束焊接 显微组织 低周疲劳

[ABSTRACT] The EBW joint of TC4-DT titanium alloy with thickness of 50mm is conducted to invest to the microstructures and fatigue properties in different location of joint, and compared with the base metal of TC4-DT titanium alloy. Based on the observation for microstructure and testing of fatigue property sample, it shows that the $2N_f$ fatigue span of TC4-DT titanium alloy EBW joint is equal basically to those of base metal when the $\Delta\varepsilon_f/2$ experimental strain amplitude is lower than 0.6%. With the increasing of plastic strain amplitude, the difference between the fatigue span of joint in the upper position and lower position and base metal occurs obviously, in which the $2N_f$ fatigue span of base metal is the highest, and the lowest in the upper position.

Keywords: TC4-DT Electron beam welding (EBW) Microstructure Low cycle fatigue

损伤容限性能已经成为先进飞机和发动机满足结构完整性要求的破损-安全设计概念和选材判据^[1]。TC4-DT 是在 TC4 钛合金基础上通过成分设计优化、纯净化熔炼和 β 热加工工艺等途径改善合金的损伤容限性能,具有代表性的 900MPa 强度级别、高断裂韧性的损伤容限型两相钛合金,在航空航天领域已

经得到了广泛应用。美国第四代战斗机 F/A-22 上 TC4 用量占整机结构质量的 25.6%,而 TC4-DT 合金占其中的 73%^[2-3]。具有高损伤容限性能的 TC4-DT 钛合金是未来飞机主承力零件的首选结构材料之一,而电子束焊接技术也将成为 TC4-DT 钛合金主承力构件整体制造的关键技术。本课题通过对 TC4-DT 钛合金的电子束焊缝的显微组织、疲劳力学性能的研究,为新型损伤容限 TC4-DT 钛合金的设计与评价提供了参考依据。

1 试验材料及方法

试验选用具有较高损伤容限性能的中强钛合金 TC4-DT,合金母材为细小的等轴组织(图 1)。TC4-DT 锻件经下料加工成厚度为 50mm 的焊接试验板材,对试板采用电子束下聚焦方式焊接,通过选择合理的焊接速度、电子束流、聚焦电流和电子束扫描偏摆等工艺参数,采用适宜的辅助工艺措施如电子束导弧块、垫板等优化并确定焊接工艺,见表 1。整个焊接过程中,熔池形成稳定,无明显飞溅,工艺性优良。X 光无损探伤检验表

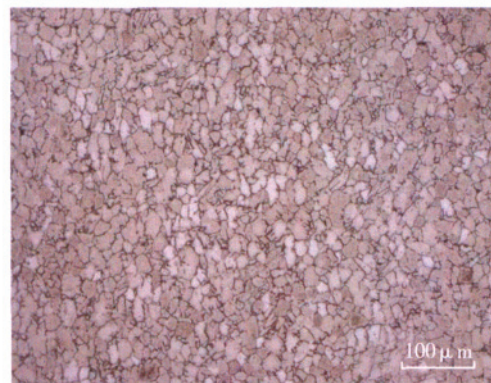


图1 TC4-DT 钛合金母材显微组织形态
Fig.1 Microstructure of base metal of TC4-DT

表1 TC4-DT 钛合金电子束焊接参数

| 试板厚度 δ/mm | 电压 U/kV | 聚焦电流 I/mA | 束流 I_f/mA | 焊接速度 $V/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 工作距离 h/mm | 扫描形式 | 扫描频率 f/Hz | 扫描幅值 |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|------|-----------------------|------|
| 50 | 150 | 350 ~ 359 | 90 ~ 95 | 0.3 | 134 | 圆 | 100 | 80 |

明,焊缝质量符合 GJB 1718A I 级焊缝质量的要求。在真空热处理炉内完成试板的热处理工作,其中焊前热处理规范为 960℃ /1.5h/FC,焊后热处理规范为 600℃ /4h/FC。将焊接试板沿熔深方向平均分为上、下 2 层,图 2 为取样示意图。对该合金母材及电子束焊接接头进行低周疲劳测试,并绘制应变-寿命曲线。试验温度为室温,加载应力比均采用 $R=-1$,载荷波形为正弦波,加载频率根据总应变进行调整。对试验测试获得的低周疲劳数据进行分析,比较母材和焊缝上、下熔合区 3 种条件下的低周疲劳性能。低周疲劳采用如图 3 所示的试样尺寸。

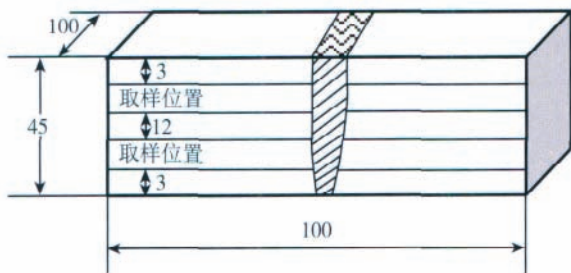


图2 焊接接头低周疲劳试样取样示意图

Fig.2 Sampling location of low cycle fatigue for the joints

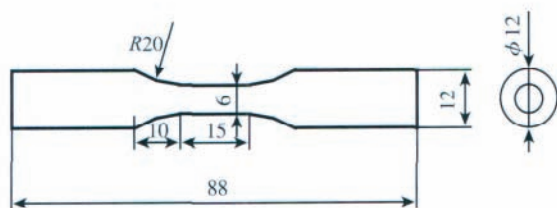


图3 低周疲劳试样尺寸

Fig.3 Dimension of low cycle fatigue sample

2 试验结果及分析

2.1 显微组织分析

对 TC4-DT 合金母材、电子束焊接接头熔合区及热影响区的显微组织进行了观察。其中图 4 是 TC4-DT 合金母材的显微组织,由于热处理的固溶温度为 960℃,TC4-DT 钛合金仍处于两相区,故所得组织为等轴初生 α 相和 β 相转变组织(β 转)构成的双态组织。这是由于试样在两相区热处理时 α 相没有转化成 β 相而被保留下来, α 相依然存在,晶界上连续的 β 相被破坏。从图 4 可以观察到双态组织中的 β 转内含有次生 α 相,呈片状、球状, α 相与 α 相之间存在残留 β 相。图 5 是 TC4-DT 合金电子束焊接接头热影响区的显微组织,从图中可以观察到其热影响区轮廓明显,包括粗晶区、细晶区和再结晶区,热影响区有等轴初生 α 相,其晶界模糊,等轴初生 α 相周围析出大量细小针

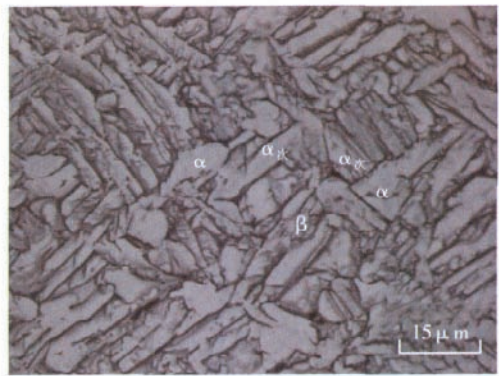


图4 热处理后母材显微形貌

Fig.4 Microstructure of base metal after heat treatment

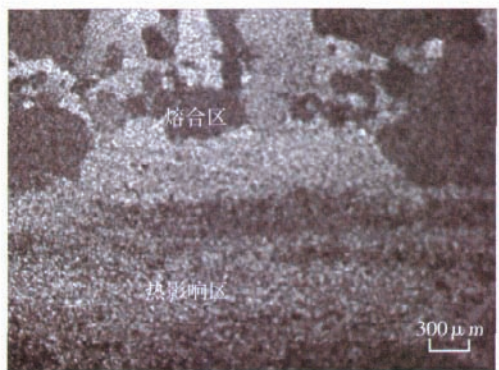


图5 焊接接头热影响区显微形貌

Fig.5 Microstructure of HAZ

状 α' 相; TC4-DT 合金电子束焊接接头熔合区受到电子束焊接热源作用而发生熔化,冷却时,由于电子束焊接熔池的冷却速度较快,焊缝 α' 针状马氏体在 β 柱状晶的晶粒边界和晶粒内部同时形核并长大。 α' 针状马氏体以若干 α' 针状集团的形式交织在一起,且纵横交错排列,形成典型的“网篮状”马氏体组织。在每个 α' 针状集团中,存在一根或若干根相互平行的、贯穿整个集团的马氏体长针,其周围则是一些较细小的马氏体针,如图 6 和图 7 所示。

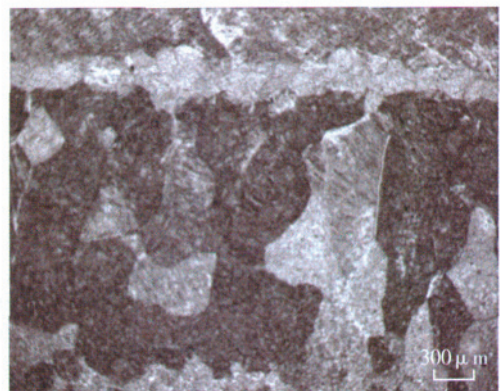


图6 焊接接头熔合区低倍显微形貌

Fig.6 Macrostructure of fusion zone of the joint

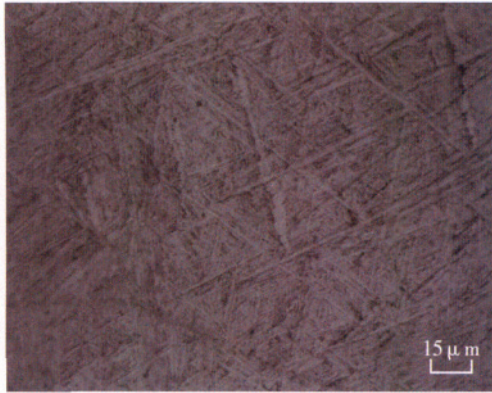


图7 焊接接头熔合区高倍显微形貌
Fig.7 Microstructure of fusion zone of the joint

2.2 低周疲劳性能研究

低周疲劳试样设计按照标准 GB/T 15248—1994《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》进行。将有效熔

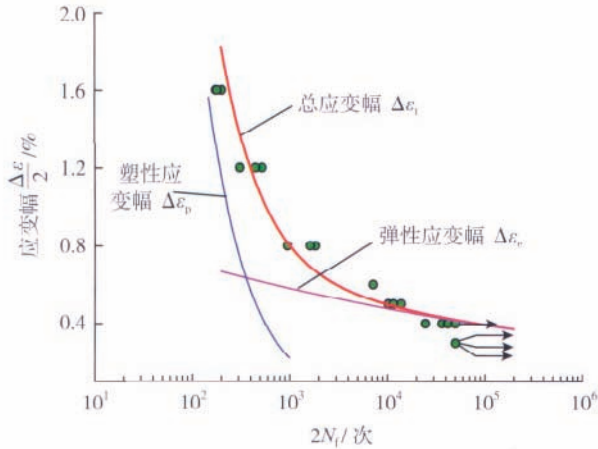


图8 TC4-DT钛合金母材处低周疲劳性能曲线
Fig.8 Low cycle fatigue curve of base metal of TC4-DT

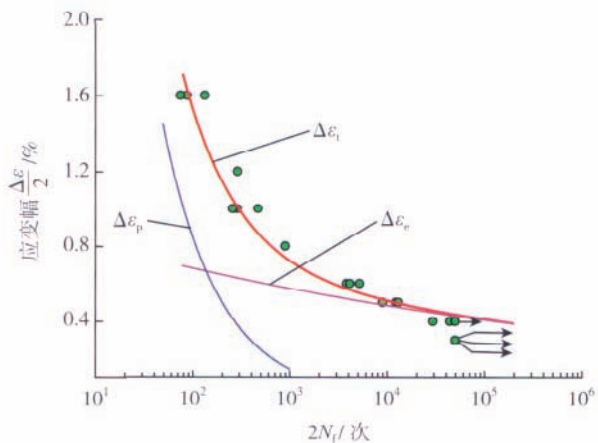


图9 TC4-DT电子束焊接上层试样低周疲劳性能曲线
Fig.9 Low cycle fatigue curve of the upper sample of TC4-DT joints

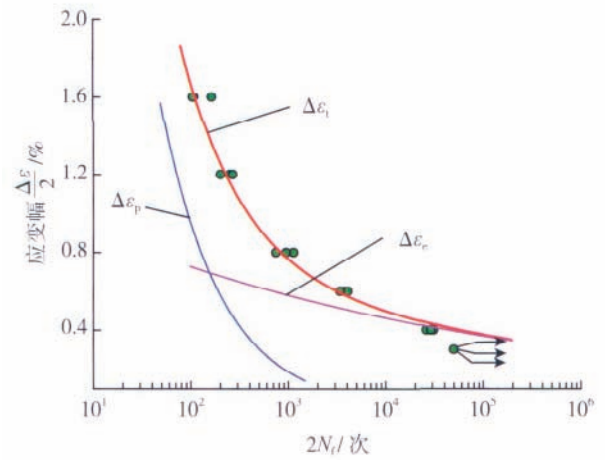


图10 TC4-DT电子束焊接下层试样低周疲劳性能曲线
Fig.10 Low cycle fatigue curve of the lower sample of TC4-DT joints

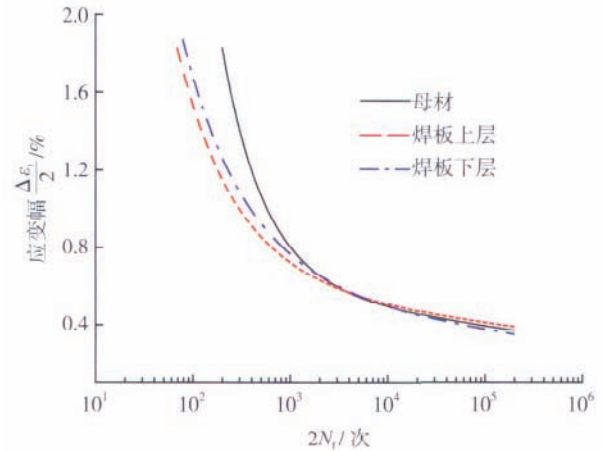


图11 TC4-DT母材及焊接试样 $\Delta \varepsilon_t/2-2N_f$ 曲线
Fig.11 Curve of $\Delta \varepsilon_t/2-2N_f$ of base metal and the joints

由图 11 可以看出,当疲劳应变幅 $\Delta \varepsilon_t/2$ 小于 0.6% 时,母材与焊接试样的疲劳寿命 $2N_f$ 基本上是相同的;当疲劳应变幅 $\Delta \varepsilon_t/2$ 大于 0.6% 时,随着塑性变形应变幅的增大,3 种位置处的 $2N_f$ 差异逐渐明显,其中母材处的 $2N_f$ 最高,而焊接接头上层处的 $2N_f$ 最低。图 12 为母材与焊接接头部分在 $\Delta \varepsilon_t/2$ 均为 1.6% 时的迟滞回线。由图 12 可以看出,在相同最大应变条件 ($\varepsilon = \pm 1.6\%$) 下,焊接试样所承受的外力高于母材,这是由于母材区的塑性变形能力较好,而接头部分塑性变形能力较差,从而使母材区在高塑性变形区域内具有较高的疲劳寿命。

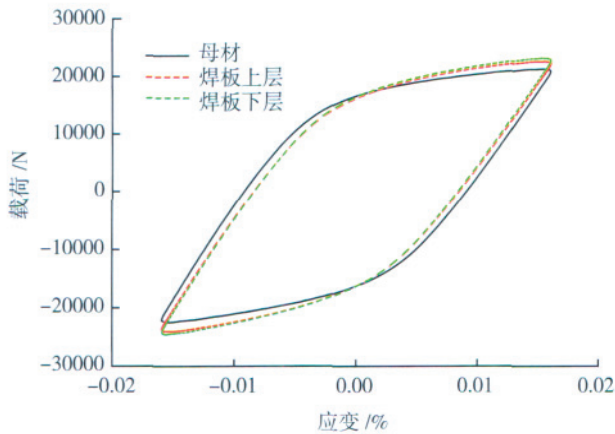


图12 TC4-DT母材区及接头部分迟滞回线
Fig.12 Hysteresis loop of base metal and the joints

2.3 断口形貌分析

图 13 和图 14 显示了母材及焊接试样低周疲劳后的断裂位置,可以看出母材区断裂位置均在试样平行段的中心,而焊接试样低周疲劳断裂基本在母材区。对电子束焊接后的试样进行普通拉伸时,断裂位置也发生在母材区。可以看出该热处理条件下焊缝位置处的强度要高于母材区,这是由于母材热处理后采用随炉冷却的方式,降低了母材的强度。焊缝处的强度较高是导致疲



(a) $\Delta \epsilon_f/2=0.46\%$, $2N_f=36274$ 次



(b) $\Delta \epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=176$ 次

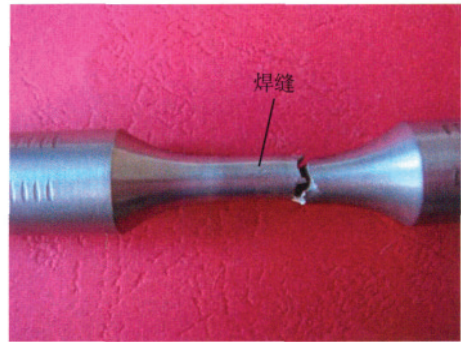
图13 TC4-DT厚板母材低周疲劳试样断裂宏观照片
Fig.13 Fatigue fracture photos of base metal sample of TC4-DT thick plate

劳断裂发生在母材区的主要原因。

在扫描电镜下对 TC4-DT 合金板材上下 2 层焊接试样的低周疲劳断口进行了观察,断口的整体形貌、裂纹萌生区、扩展区及瞬断区形貌见图 15~18。可以看出在应变较高时 ($\Delta \epsilon_f/2=1.6\%$) 裂纹扩展的区域较小,而应变较低时 ($\Delta \epsilon_f/2=0.4\% \sim 0.5\%$) 裂纹扩展区域较大。

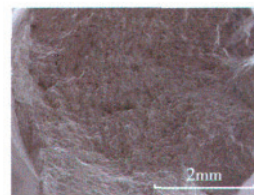


(a) $\Delta \epsilon_f/2=0.5\%$, $2N_f=9001$ 次

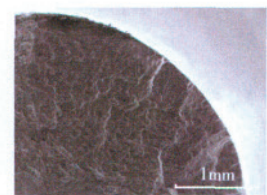


(b) $\Delta \epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=88$ 次

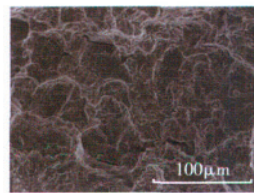
图14 TC4-DT焊接试样低周疲劳断裂宏观照片
Fig.14 Fatigue fracture photos of TC4-DT alloy joints



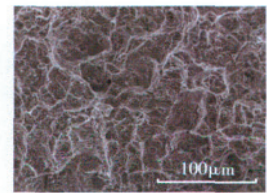
(a) 全貌



(b) 萌生位置



(c) 扩展区域



(d) 断裂位置

图15 TC4-DT上层焊接试样高应变条件下低周疲劳断口SEM形貌 ($\Delta \epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=88$ 次)

Fig.15 Fatigue fracture sections of the upper samples of TC4-DT alloy joints under high strain ($\Delta \epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=88$ cycle)

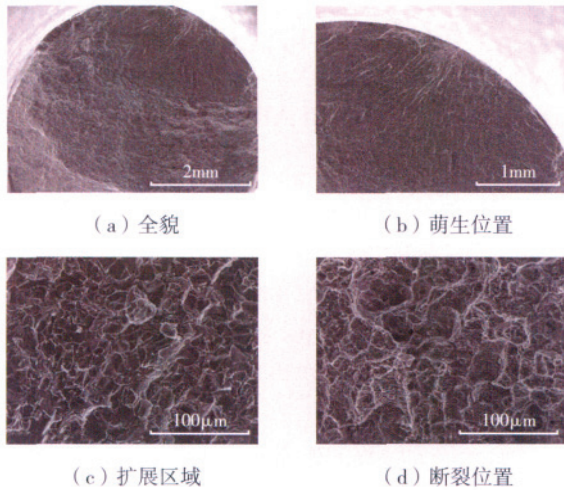


图16 TC4-DT上层焊接试样低应变条件下低周疲劳断口SEM形貌 ($\Delta\epsilon_f/2=0.5\%$, $2N_f=9001$ 次)
Fig.16 Fatigue fracture sections of the upper samples of TC4-DT alloy joints under low strain ($\Delta\epsilon_f/2=0.5\%$, $2N_f=9001$ cycle)

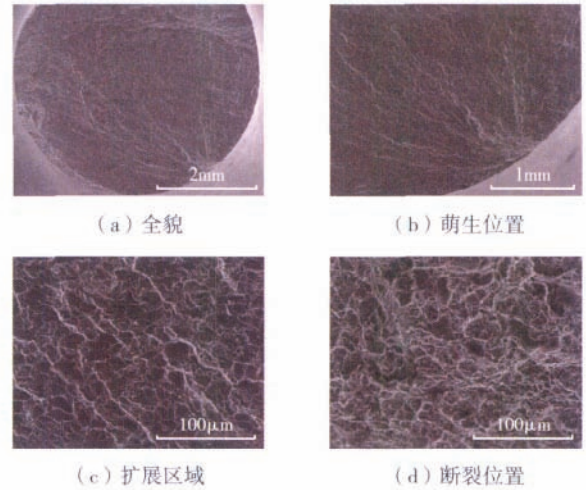


图18 TC4-DT下层焊接试样低应变条件下低周疲劳断口SEM形貌 ($\Delta\epsilon_f/2=0.4\%$, $2N_f=31075$ 次)
Fig.18 Fatigue fracture sections of the lower samples of TC4-DT alloy joints under low strain ($\Delta\epsilon_f/2=0.4\%$, $2N_f=31075$ cycle)

由于断裂位置均在母材区,因此疲劳裂纹扩展区的形貌较为平整,而瞬断区具有较大的韧窝,表现为明显的韧性断裂特征。

图19显示,虽然焊缝区并未最终断裂,但焊缝位置却存在大量的表面开裂及塑性滑移,且滑移大致与载荷呈现45°的方向。说明焊缝处发生了较为强烈的塑性变形,并且在靠近热影响区的位置塑性开裂最为明显。同时,对厚板焊接接头下层 $\Delta\epsilon_f/2=1.6\%$ 时焊缝区的形貌进行了观察,并未发现类似的较大程度的开裂,由于2种情况下变形量相同,开裂程度不同说明了接头上、下层塑性变形能力不同,下层的塑性变形能力较高,这是由于厚板焊接接头下层的晶粒尺寸比上层更为细小,从而具有较高的塑性变形能力。

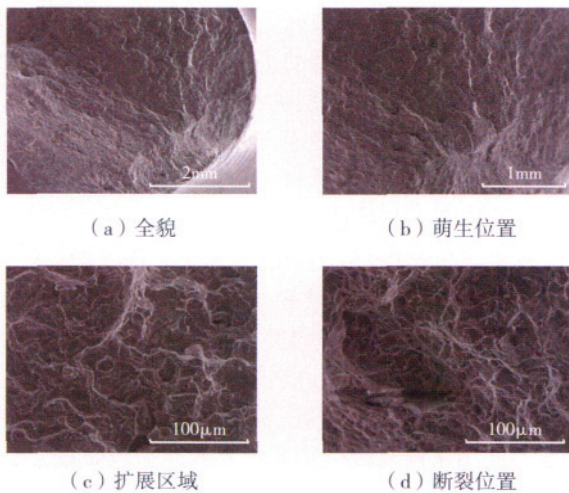


图17 TC4-DT下层焊接试样高应变条件下低周疲劳断口SEM形貌 ($\Delta\epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=109$ 次)
Fig.17 Fatigue fracture sections of the lower samples of TC4-DT alloy joints under high strain ($\Delta\epsilon_f/2=1.6\%$, $2N_f=109$ cycle)

3 结论

(1)TC4-DT 电子束焊接接头显微组织分析表明,TC4-DT 钛合金经焊前960℃/1.5h/FC 热处理后,焊缝

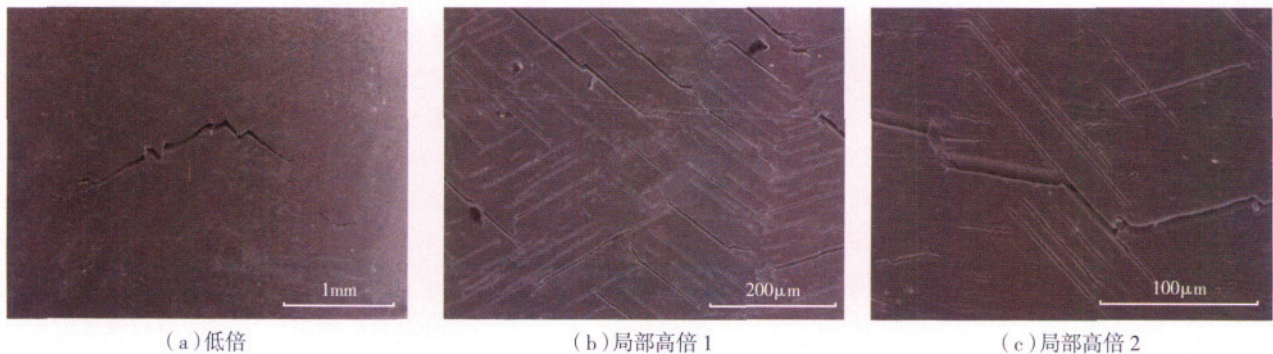


图19 厚板焊接接头上层 $\Delta\epsilon_f/2=1.6\%$ 时焊缝区的SEM形貌
Fig.19 Weld SEM image of the upper samples of the joints at $\Delta\epsilon_f/2=1.6\%$

(下转第118页)

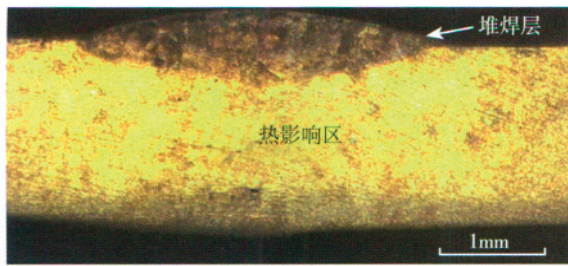


图3 氩弧焊层组织

Fig.3 Metal structure of argon arc welding layer

表1 试样拉伸试验结果

| 试样状态 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 延伸率/% |
|------|----------|----------|-------|
| 基体 | 1040.8 | 1014.4 | 12.9 |
| 模拟凹痕 | 1076.4 | 1050.8 | 10.1 |
| 模拟裂纹 | 1053.7 | 1029.1 | 7.6 |

表2 模拟裂纹氩弧焊修复拉伸试验结果

| 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 延伸率/% |
|----------|----------|-------|
| 820 | — | — |
| 995 | 937 | 2 |
| 940 | — | — |

复过程中过大的热输入对焊缝造成基体吸氢吸氧而变脆,使氩弧堆焊修复后抗拉强度、屈服强度和延伸率均低于激光修复。

2.3 疲劳试验

疲劳试验采用 MTS810 电液伺服疲劳试验机进行。试验条件为应力水平 650MPa, $R=0.1$, $f=25\text{Hz}$ 。试验结果如表 3 所示。

表3 试样疲劳试验

| 试样种类 | 疲劳周次平均值 | |
|------|---------|-------|
| | 激光熔覆修复 | 氩弧焊修复 |
| 模拟凹痕 | 20176 | 19701 |
| 模拟裂纹 | 15620 | 15582 |

从表 3 可以看出,由于基体组织的改变,材料硬度增加,导致激光修复后的试样疲劳寿命较基体有所降低,而与氩弧焊的疲劳寿命大致相当;模拟凹痕试样的疲劳寿命要高于模拟裂纹激光修复试样,这显然与修复面积的大小有关。

2.4 修复层与基体的结合力试验

弯曲试验主要考察涂层与基材的结合强度,观察在不同角度的弯曲条件下激光修复层是否有剥落、断裂

等现象。该弯曲试验采用三点弯曲法。结果表明,在 $0\sim 20^\circ$ 范围内,全部试样塑性变形均不明显;从 30° 到试样断裂角度范围内,试样都发生了明显的塑性变形,并伴有裂纹的产生和延长。在试样断裂前的任何弯曲角度下,激光修复涂层均未发生涂层翘起、剥落等现象,这表明该涂层与基材结合牢固。分析其原因,是由于涂层与基体之间是冶金结合,要比普通涂、镀层与基体间的物理或化学键结合要强许多。

3 结论

(1) 采用激光熔覆修复的钛合金试样,热影响区远小于氩弧焊修复的试样,且不变形。激光修复区无明显冶金缺陷,在修复层与基体有高强度冶金结合,采用弯曲法进行结合力测试,修复层不会剥落。

(2) 采用激光熔覆修复的钛合金试样的抗拉强度、屈服强度和疲劳强度与基体相比有所降低,但是与氩弧焊修复的试样相比抗拉强度、屈服强度有很大优势,且延伸率也远高于氩弧焊修复的试样,疲劳强度与氩弧焊大致相当。凹痕试样的疲劳强度要高于裂纹试样。

参考文献

[1] 曹立英,邓炬,洪权,等. 化铣对 TA2TC4 薄板性能的影响. 中国有色金属学报,1998,8(8):289-291.
 [2] 金蕾,李获. 钛合金化学铣切及电化学加工. 稀有金属材料与工程,1989(2):66-71.
 [3] 郑百战. 大型化铣零件的铣切加工技术. 西飞科技,2002(2):27-28.
 [4] 付明,侯朋. 化学铣切工艺在 15-5PH 精密机械零加工中的研究与应用. 航空兵器,2006(2):56-59.
 [5] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究. 北京:冶金工业出版社,2001. 78.

(责编 三丰)

(上接第 115 页)

熔合区内为“网篮状”马氏体组织。

(2) TC4-DT 电子束焊接接头疲劳裂纹扩展研究表明,当疲劳应变幅 $\Delta \epsilon_f/2$ 小于 0.6% 时,母材与接头的疲劳寿命 $2N_f$ 基本相同;当疲劳应变幅 $\Delta \epsilon_f/2$ 大于 0.6% 时,随着塑性变形应变幅的增大,母材与焊接板材上、下层处的 $2N_f$ 差异逐渐明显,其中母材处的 $2N_f$ 最高,焊接板材上层处的 $2N_f$ 最低。

参考文献

[1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展. 金属学报,2002,38(增刊):4-11.
 [2] Cheng Yali. Titanium application in aircraft. Beijing: Aviation Information Center in China, 1995.
 [3] 袁鸿,余槐,王金雪,等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能. 材料工程,2007(8):17-19.

(责编 良辰)