

组织不均匀性对 TA15 电子束焊接接头疲劳裂纹扩展的影响

李行志, 胡树兵, 肖建中, 籍龙波

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 采用一种水平切取疲劳试样的方法, 研究厚板 TA15 合金电子束焊接接头的焊缝(WS)和热影响区(HAZ)的显微组织、硬度、疲劳裂纹扩展速率以及疲劳断口形貌。结果表明: 在距焊缝顶端同样高度时, 热影响区的组织不均匀性最大; 从焊缝顶端到底部, 焊缝的 α' 马氏体组织细化, 但焊缝的组织不均匀性增大; 受较高的组织不均匀性的影响, 热影响区的疲劳裂纹扩展速率比焊缝的高, 疲劳断口形貌反映了这种宏观上的差别。

关键词: TA15 钛合金; 电子束焊接; 组织不均匀性; 疲劳裂纹扩展; 疲劳断口形貌

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of microstructure heterogeneity on fatigue crack growth of TA15 electron beam welded joint

LI Xing-zhi, HU Shu-bing, XIAO Jiang-zhong, JI Long-bo

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By a means of horizontally intercepting fatigue specimen, the microstructure, hardness, fatigue crack growth rate and fatigue fractograph in the welding seam (WS) and heat-affected zone (HAZ) of thick TA15 alloy electron beam (EB) welded joint were studied. The results indicate that on the same height from the top of WS, the microstructure heterogeneity is the most severe in HAZ, from the top to root of WS, the microstructure heterogeneity increases with decreasing α' martensite size. Attributed primarily to the effect of microstructure heterogeneity, the fatigue crack growth rate (FCGR) is faster in HAZ than that in WS. The fatigue fractographs show this macroscopical difference by scanning electron microscopy (SEM) analyses.

Key words: TA15 titanium; electron beam weld (EBW); microstructure heterogeneity; fatigue crack growth; fatigue fractograph

钛合金以其比强度高、耐腐蚀好、可焊性好、工作温度范围大等优点在航空航天及其他行业得到广泛应用^[1-3]。钛合金作为航空航天用的一种重要结构材料, 对其疲劳性能的研究是非常重要的, 它影响着飞行器的使用安全和使用寿命, 是结构设计中需要考虑的重要指标。众所周知, 影响疲劳性能的因素非常多, 主要有载荷、实验方式和材料微观组织等^[4-6]。有关钛合金的疲劳性能已有较多的研究, 但这些研究大多数是针对均匀材料或是从宏观力学的角度来分析和统计

疲劳性能和规律^[7-9], 并未从焊接接头内部的微观组织变化特点对焊接接头疲劳性能的影响做较多研究。吴崇周等^[10]研究发现, TA15 钛合金在 β 区模锻的显微组织有较低的疲劳裂纹扩展速率。刘昌奎和刘新灵^[11]对 TA15 钛合金氩弧焊的焊缝与热影响区的疲劳裂纹扩展行为进行扫描电镜原位观察。这种观察方式受到试样的尺寸限制较大, 且氩弧焊与厚板的电子束焊接形成的接头有一定差别。相对于其它焊接方式和均匀材料, 电子束焊接大厚度钛合金形成的焊接接头的组织

不均匀性更大;对于焊接接头的两个重要区域:热影响区与焊缝,研究它们的组织特点、不均匀性的大小对疲劳裂纹扩展的影响有较大的意义。在采用损伤容限设计中,组织对疲劳裂纹扩展的影响有重要的参考价值。因此,本文作者以 TA15 电子束焊接接头为例,研究焊接接头组织变化引起的不均匀性对疲劳裂纹扩展的影响。

1 实验

实验采用 TA15 钛合金轧制厚板,厚度为 45 mm,其主要成分如表 1 所列。利用电子束沿垂直于锻造方向进行焊接,接头形式为对接拼焊。焊接加速电压 150 kV,聚焦电流 2 174 mA,电子束流 92 mA,焊接速度为 300 mm/min。焊后进行真空 650 ℃、4 h 的去应力退火处理,消除焊接过程产生的残余应力。

表 1 TA15 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy (mass fraction, %)

Al	Zr	V	Mo	O	H	Ti
6.56	2.15	2.10	1.62	0.08	0.004	Bal.

焊接后去除余高,由焊缝顶部平面开始,分别在总厚度(h)的 $1/6$ 、 $3/6$ 、 $5/6$ 位置处于平行焊接方向切取疲劳试样,试样切取位置及试样规格如图 1 所示(见图 1(b)中阴影部分表示热影响区),厚度为 2 mm。将疲劳实验打磨抛光,用 HF、HNO₃、H₂O(混合腐蚀剂体积比为 1:3:7)腐蚀焊接接头部位,顺着焊接方向利用线切割加工分别于焊缝(WS)和热影响区(HAZ)中央开 0.2 mm 深的缺口。疲劳实验在 Shimadzu EA-10 实验

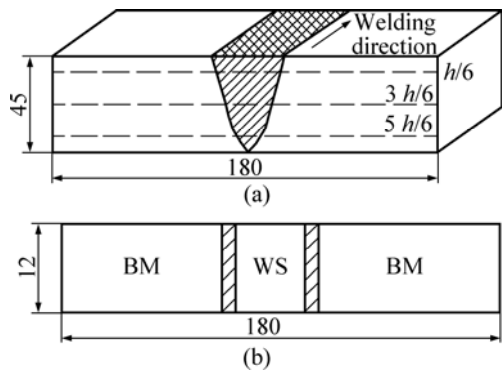


图 1 疲劳试样切取方式及尺寸示意图(mm)

Fig.1 Intercepting orientation diagram (a) and schematic illustration of geometry (b) of specimen (mm)

机上进行,利用数字显微镜测量疲劳裂纹长度。试样夹持时使预开缺口处于试样自由部分的中央。疲劳实验条件为室温空气状态,施加最大应力为 380MPa,采用载荷控制的正弦波,应力比 $R=0.1$,频率 $f=5$ Hz。

显微硬度在 DHV-1000 显微硬度仪上测定,采用 Olympus 金相显微镜进行组织观察,在 Sirion 200 型场发射扫描电子显微镜(FSEM)下观察疲劳试样断口。

2 结果与分析

2.1 焊接接头显微组织及硬度

电子束焊接后再经真空退火的 TA15 合金的显微组织如图 2 所示。TA15 是一种近 α 型钛合金,因此,经真空退火处理后,母材(BM)组织由大量长条片状的

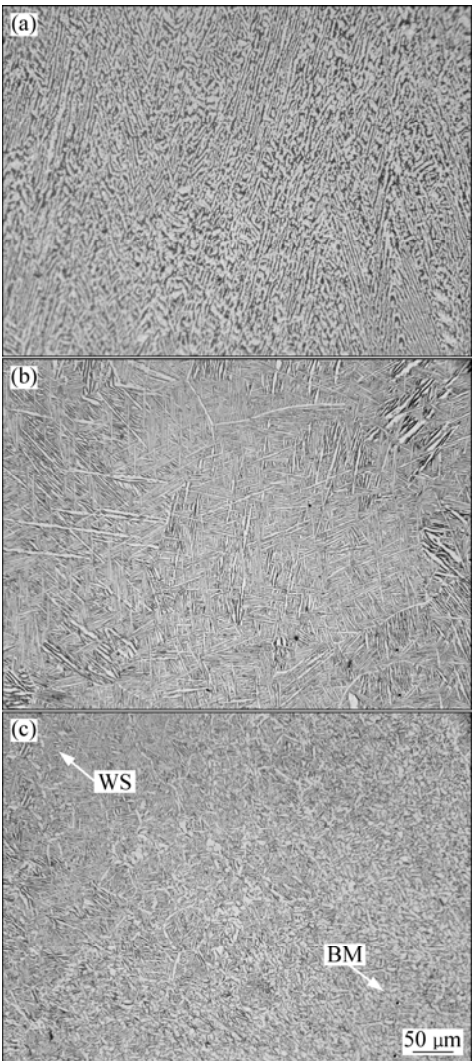


图 2 TA15 电子束焊接接头的显微组织

Fig.2 Microstructures of different zones in TA15 electron beam welded joint: (a) BM; (b) WS; (c) HAZ

α 相和少量的 β 相组成, 其中黑色的 β 相夹杂在白色的片状 α 相之间。一些片状的 α 聚集在一起形成片状的 α 束, 同一束内的 α 片取向基本相同, 但不同束之间的 α 片取向并不一致, 如图 2(a) 所示。由于电子束具有很高的能量密度, 焊接时输入的总热量较小, 焊后的冷却速度很快。在焊缝 (WS) 处, 加热温度超过钛合金的熔化温度, 初始凝固后形成晶粒非常粗大的 β 柱状晶粒; 因冷却速度较快, 在 β 相转变温度以下, β 柱状晶粒转变为粗大的针状 α' 马氏体相。针状 α' 马氏体相处于原始 β 柱状晶粒边界之内, 这种组织在真空退火处理过程中并未发生大的改变, 如图 2(b) 所示。热影响区 (HAZ) 处, 由于存在温度梯度, 该区域在冷却过程中形成了梯度式过渡组织。在接近焊缝处, 当温度高于 β 相转变温度时, 组织中含有更多的 α' 马氏体相; 靠近母材处, 温度低于 β 相转变温度时, 含有较多的条片状 α 相, 其晶粒粗大程度也介于焊缝和母材之间, 如图 2(c) 所示。图 2(c) 中箭头所指表示与 HAZ 相接的焊缝与母材区所在方向。由于电子束焊接输入的总热量很小, 相比其他普通的焊接方式, 其焊接形成的热影响区更为狭窄^[12]。由图 1 可知, 对于较大厚度板材的焊接, 焊接接头从焊缝顶部到根部处, 熔宽由大到小, 变化较大; 对应焊缝处 α' 马氏体相的尺寸也由大到小。距离焊缝顶部不同高度处 (1h/6、3h/6 和 5h/6) 的 α' 马氏体相平均长度如表 2 所列。

表 2 距焊缝顶部不同高度处的 α' 马氏体相平均长度

Table 2 Average length of aciculate α' on different height from top of WS

Distance	Average length/ μm
1h/6	397.7
3h/6	330.1
5h/6	96.4

在不同高度上测得的焊接接头显微硬度如图 3 所示。无论是 1/6、3/6 还是 5/6 高度处, 由母材、热影响区到焊缝的硬度由低到高, 焊缝的硬度比母材的硬度约高 40~50HV。主要是因为焊缝中的相为 α' 马氏体相, 比母材中条片状 α 相的硬度更高。研究表明^[13], 电子束焊接接头的抗拉强度高于母材的, 但塑性比母材的有所降低。而母材的强度虽然稍低, 但有较好的塑性。热影响区的强度和塑性介于焊缝和母材之间。这与各区域的组织及其相的组成是密切相关的。热影响区为母材与焊缝之间的一个过渡区域, 其组织和硬度也介于两者之间。由于电子束焊接形成热影响区的宽度非常狭窄, 热影响区的组织和硬度变化反而最大,

即其非均匀程度更大。从焊缝顶部到根部处, 这种硬度的变化范围也逐渐缩小。1h/6 高度处距焊缝顶部更近, 熔宽较大, 组织和硬度的变化处在一个较宽的范围; 5h/6 高度距焊缝顶部最远, 熔宽很小, 组织和硬度的变化处在一个狭窄的范围内。这表明从焊缝顶部到根部处, 组织和硬度的变化率在加大, 因此, 相对于组织均匀的母材, 在焊接接头附近, 下部 5h/6 高度处组织和硬度的非均匀程度更大, 这种非均匀性对疲劳性能有重要的影响。

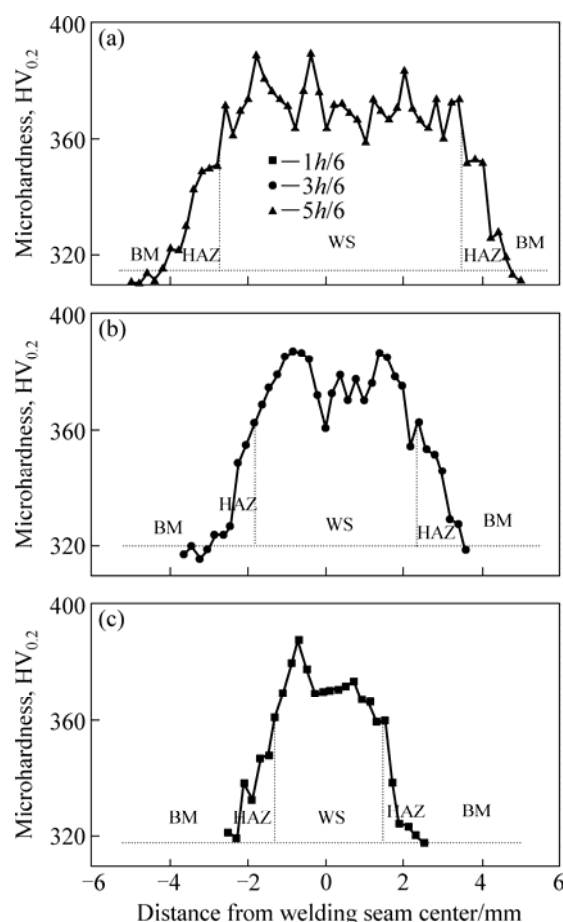


图 3 焊接接头不同高度上的显微硬度

Fig.3 Microhardness of welded joint on different heights

2.2 相同高度下 WS 与 HAZ 的疲劳扩展速率

为比较焊缝与热影响区的疲劳裂纹扩展特性, 分别在焊缝和热影响区开微小缺口, 以此对疲劳裂纹扩展位置给予限定。利用有限宽度单边直裂纹的应力强度因子幅 ΔK 的计算公式得到 da/dN — ΔK 关系曲线。不同高度上热影响区与焊缝的疲劳扩展速率 da/dN — ΔK 关系曲线如图 4 所示。在双对数坐标中, da/dN — ΔK 类似于直线关系, 曲线大部分处于 Pairs 区域。在裂纹扩展的初始阶段, 扩展速率均较小, 为 10^{-8} 量级。但在一个较小的 ΔK 变化范围内, 疲劳裂纹扩展速率

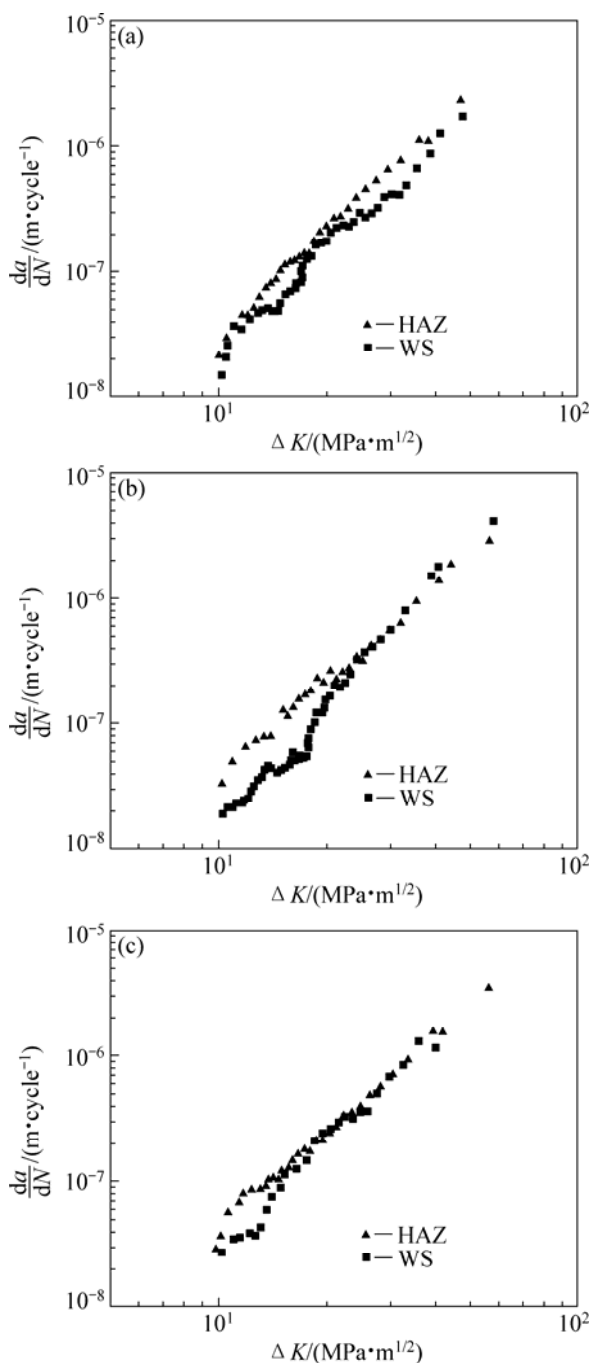


图4 不同高度时焊缝与热影响区的 da/dN — ΔK 曲线

Fig.4 da/dN — ΔK curves of WS and HAZ at different heights: (a) 1h/6; (b) 3h/6; (c) 5h/6

(FCGR)迅速加快,进入较快的中速扩展阶段,裂纹扩展速率增大为 10^{-7} 量级左右。这个阶段占据裂纹整个扩展过程的比例很大。当裂纹扩展速率达到 10^{-6} 量级时,疲劳裂纹扩展速率较大,裂纹长度增大较快;当裂纹达到失稳扩展的临界长度以上,试样因裂纹失稳扩展而迅速断裂。而且在图4中均可发现:在同样的应力强度因子幅 ΔK 下,疲劳裂纹在热影响区的扩展

速率高于焊缝的。

在外加载荷、频率等外界条件一致的情况下,疲劳裂纹扩展速率的大小和方式主要取决于材料内部组织的特点和性能。疲劳裂纹扩展的大小是材料内在组织性能的宏观外在表现,显微组织对宏观疲劳裂纹的扩展及其疲劳特性有明显的影响^[14-17]。实验中采取载荷控制方式,材料处于线弹性变形范围内。在预开小缺口根部产生一定的应力集中,导致疲劳裂纹由此扩展。疲劳裂纹的扩展微观上首先由位错的滑移开始,在外加循环载荷的作用下,由于裂纹尖端的局部应力场较高,此处位错首先不断运动产生滑移带。随着循环次数的增多,滑移带加深变宽,并逐渐形成疲劳微裂纹,导致宏观疲劳形成并扩展。随着疲劳裂纹的扩展增长,同样的循环应力下,裂纹尖端的应力集中程度加大,即应力强度因子幅 ΔK 也不断增大,所以疲劳裂纹扩展速率 da/dN 也逐渐升高(见图4)。

在疲劳裂纹向前扩展过程中,扩展路径总是选择最有利、最容易的方向。对于热影响区而言,它是一种包括较软的片状 α 相和较硬的 α' 马氏体相的混合组织(见如图2(c)),非均匀程度较大。这使得在裂纹扩展过程中,较软的片状 α 相最容易在裂纹尖端的应力场下首先产生位错的滑移,形成较大的塑性变形,成为裂纹扩展优先选择的路径。电子束焊接形成的狭窄的热影响区,不均匀性较大,加剧了裂纹尖端局部的应力集中。而对于焊缝区,裂纹尖端周围均为较硬的 α' 马氏体相,其晶格强度相对较高,抵抗位错滑移的能力较强,使得裂纹向前扩展较为困难。所以,宏观上表现出在同样高度下,焊缝的疲劳裂纹扩展速率低于热影响区的。

2.3 疲劳断口形貌

图5~10所示均为1h/6高度处的焊缝和热影响区的疲劳断口形貌。由图5可见,疲劳裂纹的起始点都发源于预制缺口根部,呈现特有的放射状花样。图5(a)中小白色箭头表示实验时外加循环载荷方向;图5(b)中的箭头表示宏观主裂纹的扩展方向。图6所示为焊缝和热影响区在裂纹扩展起始阶段的断口形貌,此时断口上疲劳辉纹不很明显。在图6(a)中,焊缝断口出现较多的二次微裂纹;在图6(b)中,热影响区断口显示河流花样及滑移特征。此时应力强度因子幅 ΔK 较小,循环次数较少,对应于图4(a)中曲线的左下端,扩展速率 da/dN 很小,甚至有可能在本实验中观察不到裂纹的扩展现象。

在图7~9中,焊缝和热影响区的断口形貌上均可以看到较明显的疲劳辉纹,而且疲劳辉纹的间距逐渐

增大。宏观表现为在图 4(a)曲线中随 ΔK 的增大, 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 也逐步增大。而且比较同时期的焊缝与热影响区的断口形貌可见: 一般焊缝的疲劳

辉纹相比较为细小些, 这也符合焊缝的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 低于热影响区的。图 7 中显示大量的二次裂纹, 这是导致在此阶段疲劳裂纹扩展速率较低的主

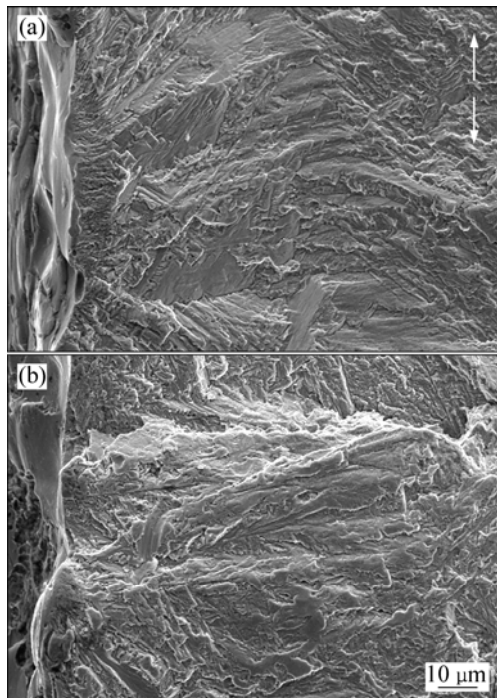


图 5 裂纹扩展起始点处的形貌

Fig.5 SEM fractographs at crack initiation spot: (a) WS; (b) HAZ

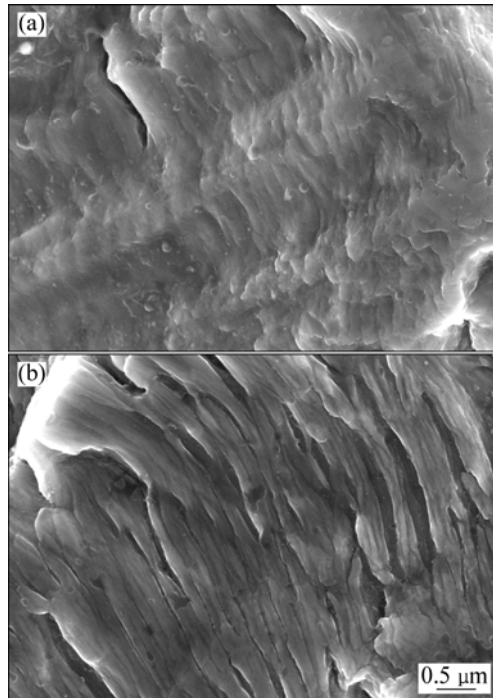


图 7 裂纹低速扩展阶段的疲劳条带形貌

Fig.7 Fatigue striation morphologies at stage of low FCGR: (a) WS; (b) HAZ

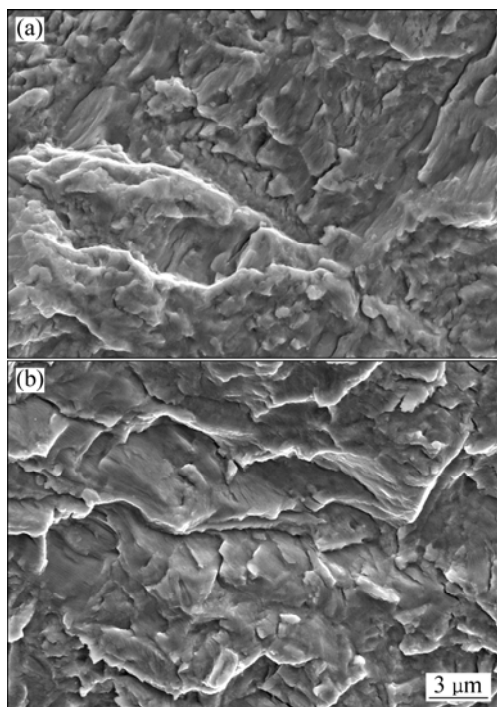


图 6 裂纹扩展初始阶段的疲劳条带形貌

Fig.6 Fatigue striation morphologies at initial crack growth stage: (a) WS; (b) HAZ

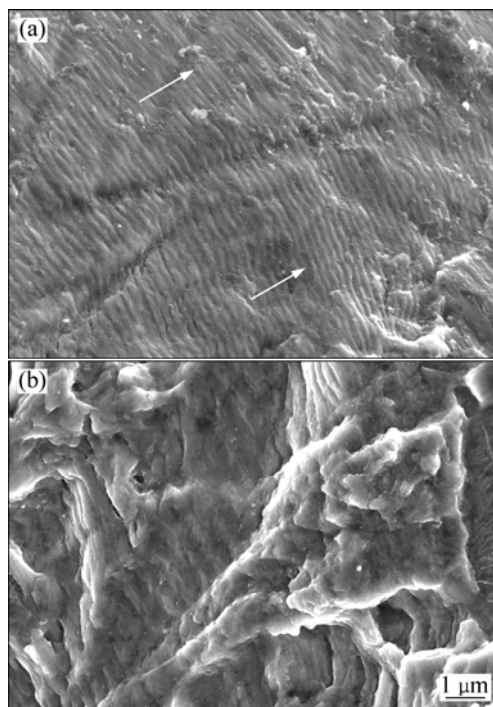


图 8 裂纹中速扩展阶段的疲劳条带形貌

Fig.8 Fatigue striation morphologies at stage of medium FCGR: (a) WS; (b) HAZ

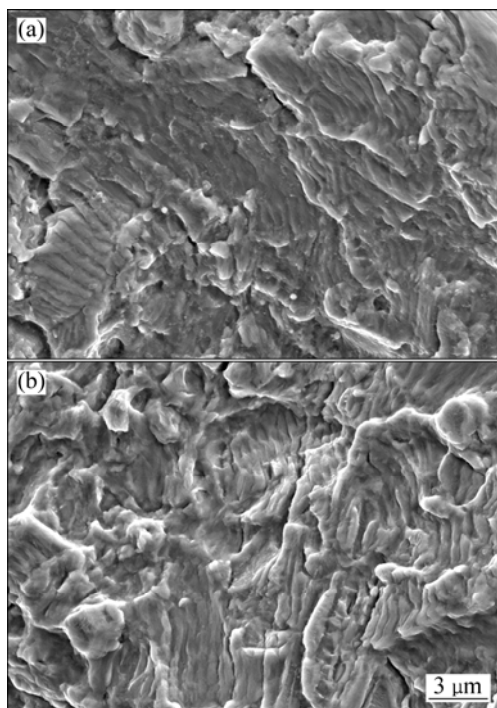


图 9 裂纹快速扩展阶段的疲劳条带形貌

Fig.9 Fatigue striation morphologies at stage of rapid FCGR: (a) WS; (b) HAZ

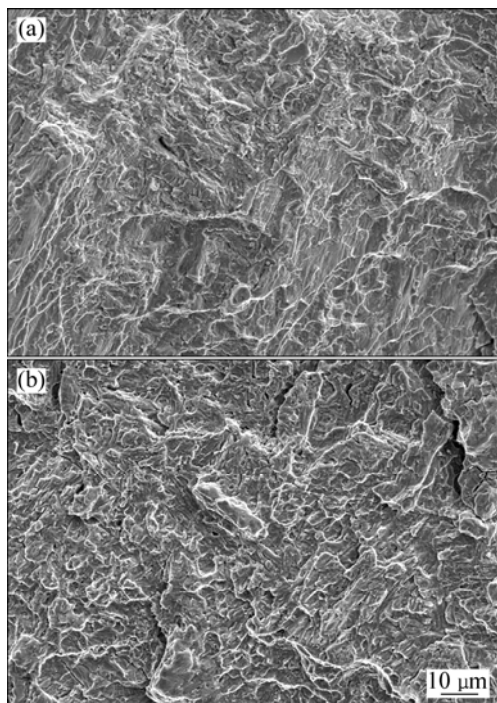


图 10 失稳扩展区的疲劳断口形貌

Fig.10 Fatigue fractographs of instability crack growth: (a) WS; (b) HAZ

要原因。微观疲劳辉纹与宏观裂纹扩展方向并不总处于同一方向，因受到晶体取向、晶界等内部显微组织

特点的影响，裂纹扩展路径较为曲折。由图 8 可以看出：在相邻不同取向的晶粒中因疲劳辉纹的法线方向有所不同，如小箭头所示。图 8(a)中显示组织均匀的焊缝的疲劳辉纹更为细小。图 9(a)显示疲劳裂纹在扩展过程中由一个平面转移到另一个平面，疲劳辉纹分布在不同高度，不同方向的各个平面上。材料的内部微观组织特点对疲劳裂纹的扩展速率和扩展路径有这重要的影响。图 10 所示为焊缝和热影响区的疲劳瞬断区断口形貌，此时裂纹高速扩展不断增长，达到临界裂纹长度后快速失稳扩展而断裂。图 10 中断口呈现出混合特点，均有较浅的韧窝和韧性断裂形成的碎片。微观形貌主要表现为瞬时断裂特征，但局部依然存在很少量的疲劳辉纹。

3 结论

1) TA15 钛合金电子束焊接接头焊缝组织为由粗大的 β 柱状晶转变的粗针状 α' 马氏体组织，母材为条片状的 α 相和少量的 β 相，热影响区组织为 α' 马氏体组织和条片状的 α 相和 β 相，由接近熔合区组织向母材组织过渡。

2) 母材的硬度较低，焊缝平均硬度最高，热影响区的硬度介于两者之间，而热影响区的组织不均匀性最大。

3) 厚板钛合金电子束接头，由焊缝顶部到根部处，晶粒逐渐细化，而组织不均匀性增大。

4) 疲劳裂纹扩展速率高低与其显微组织特点密切相关。在同样高度处，疲劳裂纹扩展速率曲线和断口微观形貌均表明焊缝比热影响区有较高的抗疲劳裂纹扩展能力，而这主要是因为热影响区的组织不均匀性较高。

REFERENCES

- [1] ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 393: 204-212.
- [2] GUNAWARMAN B, NIINOMI M, AKAHORI T. Mechanical properties of Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe and possibility for healthcare applications[J]. Materials Science and Engineering C, 2005, 25: 296-303.
- [3] SCHUBERT E, KLASSEN M, ZERNER I. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. Materials Processing

- Technology, 2001, 115: 2–8.
- [4] 任旭东, 张永康, 周建忠, 顾永玉, 张新权. 激光冲击工艺对钛合金疲劳寿命的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(9): 1486–1489.
- REN Xu-dong, ZHANG Yong-kang, ZHOU Jian-zhong, GU Yong-yu, ZHANG Xin-quan. Influence of laser-shock processing on fatigue life of titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(9): 1486–1489.
- [5] KISHORE B N, GANESH-SUNDARA-RAMAN S, SRINIVASA-MURTHY C V, MADHUSUDHAN-REDDY G. Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 471(1/2): 113–119.
- [6] 李士凯, 惠松骁, 叶文君, 于洋, 熊柏青. 微观组织对 TA15 ELI 钛合金损伤容限性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1119–1123.
- LI Shi-kai, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, YU Yang, XIONG Bai-qing. Effects of microstructure on damage tolerance properties of TA15 ELI titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1119–1123.
- [7] POLLAK R D, PALAZOTTO A N. A comparison of maximum likelihood models for fatigue strength characterization in materials exhibiting a fatigue limit[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2009, 24(2): 236–241.
- [8] HURLEY P J, EVANS W J. A methodology for predicting fatigue crack propagation rates in titanium based on damage accumulation[J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 681–684.
- [9] JONES R, MOLENT L, KRISHNAPILLAI K. An equivalent block method for computing fatigue crack growth[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 1529–1542.
- [10] 吴崇周, 李兴无, 黄旭, 马济民, 曹春晓. TA15 钛合金疲劳裂纹扩展与显微组织的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12): 2128–2131.
- WU Chong-zhou, LI Xing-wu, HUANG Xu, MA Ji-min, CAO Chun-xiao. Relationship of fatigue crack propagation and microstructure for TA15 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(12): 2128–2131.
- [11] 刘昌奎, 刘新灵. TA15 钛合金焊缝及热影响区疲劳裂纹扩展行为[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(1): 10–13.
- LIU Chang-kun, LIU Xin-ling. Fatigue crack propagation behavior in FZ and HAZ of TA15 titanium alloy welds[J]. Failure Analysis and Prevention, 2007, 2(1): 10–13.
- [12] OH J K, KIM N J, LEE S H. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340(1/2): 232–242.
- [13] 王利发, 刘建中, 胡本润. TA15 钛合金电子束焊焊接接头力学性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(1): 97–100.
- WANG Li-fa, LIU Jian-zhong, HU Ben-run. The mechanics properties of TA15 electron beam welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1): 97–100.
- [14] SINHA V, SOBOYEJO W O. An investigation of the effects of colony microstructure on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319/321: 607–612.
- [15] SCHROEDER G, ALBRECHT J, LUETJERING G. Fatigue crack propagation in titanium alloys with lamellar and bi-lamellar microstructures[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319/321: 602–606.
- [16] FILIP R, KUBIAK K, ZIAJA W. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Materials Processing Technology, 2003, 133(1/2): 84–89.
- [17] NIENDORF T, CANADINC D, MAIER H J. The role of grain size and distribution on the cyclic stability of titanium[J]. Scripta Materialia, 2009, 60: 344–347.

(编辑 龙怀中)