

取激光直焊缝与斜焊缝试件各 13 个,参考 HB5287—1996《金属材料轴向加载疲劳试验方法》,在 MTS810-100KN 电液伺服材料疲劳试验机上进行试验,试验环境为:空气,温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 $RH<50\%$;应力比 $R=0.06$,加载波形为正弦波,加载频率为 10 Hz. 激光焊接试件的静力拉伸性能如表 2 所示,取 55% 直焊缝抗拉强度 576 MPa 作为疲劳加载的最大应力.

表 2 激光直、斜焊缝试件拉伸性能

Table 2 Tensile properties of straight and oblique weld

试件类型	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	弹性模量 E/MPa
激光直焊缝	1 048	953	107
激光斜焊缝	1 043	953	106

用线切割在疲劳断裂处截取用于断口分析的试件,用 KYKY-2800B 型扫描电镜观察焊接试件的疲劳断口微观形貌.

表 3 激光直、斜焊缝试件疲劳寿命试验结果

Table 3 Fatigue life test results of straight and oblique laser weld

试件类型	循环次数 N (次)	中值疲劳寿命 N_{50} (次)	对数寿命 平均值 $\bar{x}$	标准差 S	子样变异 系数 C_v	安全寿命 $\hat{\Lambda}_{99.9}$ (次)
激光直焊缝	32 554, 33 682, 33 992, 37 468, 39 426, 40 438, 42 260, 43 994, 45 208, 51 146, 60 942, 64 744, 80 964	44 949	4. 652 721	0. 120 253	0. 025 846	18 764
激光斜焊缝	52 988, 59 246, 72 190, 72 272, 72 964, 73 692, 84 378, 86 398, 100 258, 101 408, 101 884, 112 686, 121 486	83 165	4. 919 941	0. 108 046	0. 021 961	37 937

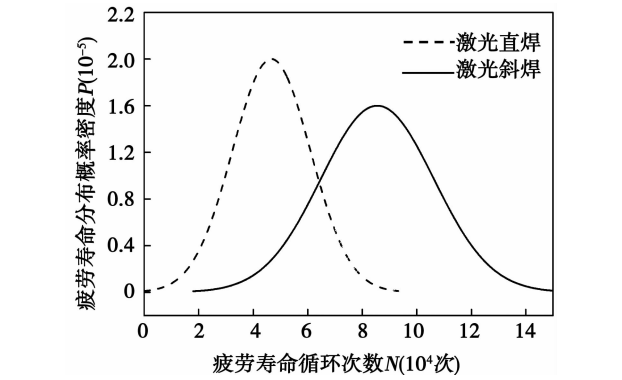


图 2 激光直斜焊缝试件疲劳寿命分布概率密度

Fig. 2 Life probability density function distribution of laser weld specimens

2.2 疲劳断口分析

图 3 所示为典型激光直、斜焊缝试件宏观疲劳断裂,激光直焊缝试件的断面相对激光斜焊缝较为平坦. 裂纹总体沿垂直于拉应力方向扩展,直焊试

2 试验结果与讨论

2.1 低周疲劳试验结果与分析

试验结果见表 3,根据激光直、斜焊缝疲劳试件疲劳寿命试验数据,利用统计分析方法对 S-N 数据进行处理分析,并对比计算疲劳寿命. 由于“正态概率密度函数”常用于疲劳寿命可靠性分析,母体的分散性较小,因此可以采用子样数据估计总体参数.

通常钛合金材料疲劳性能观测值服从正态分布规律,图 2 为激光直、斜焊缝试件的疲劳寿命分布概率密度,可以看出,激光直焊缝试件的疲劳寿命分布密度函数曲线窄而高,而激光斜焊缝试件疲劳寿命分布密度函数曲线则宽而低,且斜焊缝试件的曲线在直焊缝试件的右边,说明斜焊缝试件的寿命普遍高于直焊缝试件,直焊缝试件的疲劳寿命相比斜焊缝的分散性小. 通过疲劳寿命对比计算可知,在 99.9% 存活率下,TC4 钛合金激光斜焊缝的中值疲劳寿命是直焊缝的 1.98 倍.

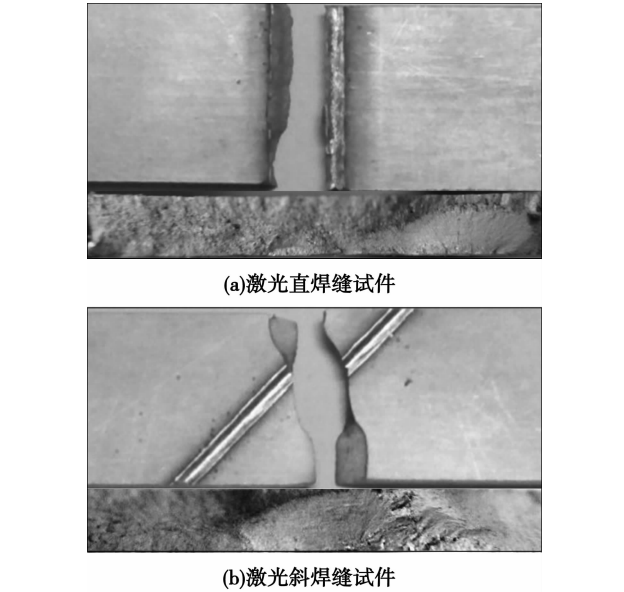


图 3 宏观断口形貌

Fig. 3 Macroscopic fracture appearance

件裂纹在焊缝内扩展直至断裂,而对于斜焊试件,裂纹在焊缝处形成后,穿过焊缝继续在母材内扩展直至断裂. 直焊试件疲劳断口比较平缓,而斜焊试件的疲劳断口与母材相近,为典型的剪切断裂.

图 4 为激光直、斜焊缝宏观断口相对应的微观疲劳断裂位置,从图中可以看出直、斜焊缝的裂纹均在硬度最低的热影响区产生并导致最终的断裂.

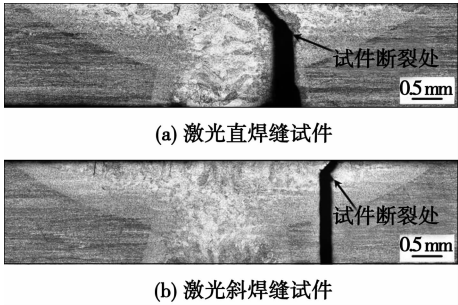


图 4 微观断裂位置

Fig. 4 Microcosmic fatigue fracture location

斜焊缝长于直焊缝,理论上同等条件下焊缝越长可能存在的缺陷越多,疲劳寿命越短,但在相同应力条件下,轴向力沿斜焊缝方向分解,垂直于焊缝方向上的应力为轴向力的分力,应力水平较直焊缝所受应力降低约 30%,如图 5 所示,所受载荷减小是斜焊试件疲劳寿命高于直焊试件的重要原因.

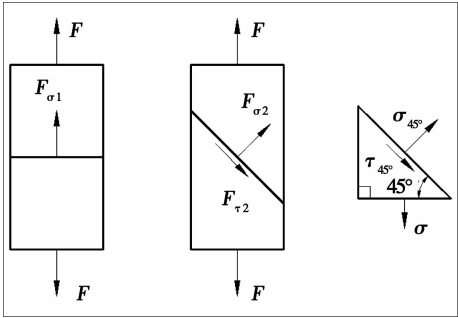


图 5 激光直、斜焊缝处受力分析示意图

Fig. 5 Stress distribution of straight and oblique laser welding joints

疲劳断裂过程可以分成三部分:疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和疲劳瞬断区. 激光直、斜焊缝试件疲劳源区断口形貌如图 6 所示,根据图中的辐射状条纹可知两者裂纹均起源于试件表面,图 6c 和图 6d 显示断口上有大量散射状条纹,表明裂纹于表面形成后往试件内部扩展. 激光直、斜焊缝试件的疲劳源均起始于焊缝热影响区,此区域硬度最低,在疲劳过程中更容易形成滑移带的挤入和挤出并导致位错

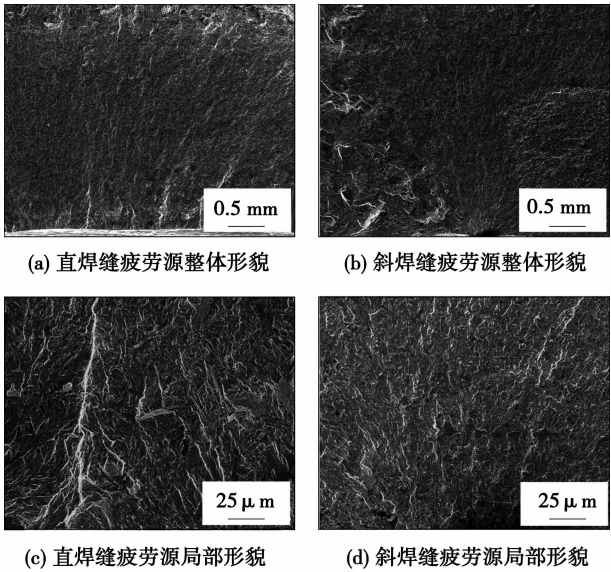


图 6 激光直、斜焊缝试件疲劳源断口形貌

Fig. 6 Fracture appearance of initiation sites of straight and oblique welding joint specimens

的形成,疲劳源由滑移带的个别晶粒侵入沟或挤出脊首先形成,再沿最大切应力方向扩展.

疲劳裂纹形成之后很快进入裂纹扩展区,图 7a 和图 7c 分别为典型激光直、斜焊缝试件疲劳裂纹扩展初期断口形貌,两者开始均在焊缝内扩展,扩展区微裂纹基本成“之”字形曲折扩展,裂纹扩展初期扩展速率很慢,甚至有些微裂纹不扩展,扩展方向逐渐向垂直于主应力方向过渡,疲劳裂纹呈扇形,在裂纹扩展区有明显的疲劳辉纹,辉纹间距很小且伴有二次裂纹产生. 初期裂纹扩展还伴有脆性解理特征,这是由于焊缝显微组织的变化引起的. 随着裂纹扩展的深入,试件的裂纹扩展速率均加快,直焊缝试件的裂纹扩展区依然总体起伏较大,在裂纹扩展过程中仍伴随有脆性解理断裂,如图 7b 所示;而对于斜焊缝试件来说,疲劳裂纹扩展后期裂纹穿过焊缝进入母材区扩展,从图 7d 中可以看出,此时的裂纹扩展区同样有垂直于裂纹扩展方向、明暗相交且相互平行、成波浪形并具有一定间距的疲劳辉纹产生,不同于直焊缝、斜焊缝裂纹扩展后期整体相对平坦,这是韧性材料典型的疲劳裂纹扩展特征. 由于母材相较焊缝表现出更好的韧性特征,在一定程度上降低了斜焊试件裂纹扩展速率,增加了斜焊试件的疲劳寿命.

在裂纹扩展后期,当扩展区面积超过材料所能承受外加循环载荷时,试件发生瞬断,与裂纹扩展区不同的是,疲劳瞬断区有大量的韧窝,两者不同的是,激光直焊缝试件的韧窝少而浅,而激光斜焊缝试件瞬断区位于母材,出现大量微孔聚集型的韧窝,数

量多且密度大,表现出更好的韧性断裂特征(图 8)。

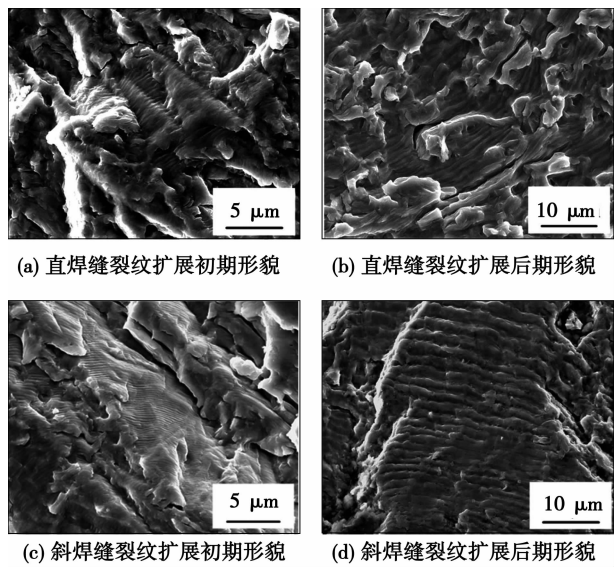


图 7 激光直、斜焊缝试件疲劳裂纹扩展区断口形貌
Fig. 7 Fracture morphology of propagation areas in straight and oblique weld specimens

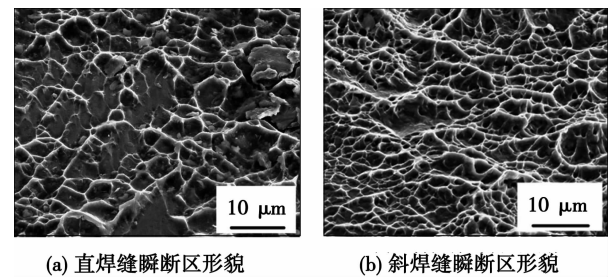


图 8 激光直、斜焊缝试件疲劳瞬断区断口形貌
Fig. 8 Fatigue rupture regions of straight and oblique weld specimens

3 结 论

- (1) 载荷方向对钛合金焊缝疲劳性能的影响明显,在相同应力水平下,激光直焊缝试件的疲劳寿命相比斜焊缝的分散性小,在 99.9% 存活率下,斜焊缝试件的中值疲劳寿命是直焊缝试件的 1.98 倍。
- (2) TC4 激光直焊缝试件宏观断口比斜焊缝相对平整;两者疲劳裂纹源均起始于热影响区表面;裂纹扩展区的微观断口有疲劳辉纹产生,直、斜焊缝试

件在裂纹扩展初期均有脆性解理特征,扩展速率相近,裂纹扩展后期速率明显加快,斜焊缝裂纹进入母材扩展,疲劳辉纹有明显的韧性特征,相对直焊缝试件,扩展速率减慢;斜焊缝试件疲劳瞬断区与直焊缝相比韧窝多且密,呈现出更好的韧性断裂特征。

参考文献:

[1] Caiazza F, Curcio F, Daurelio G, *et al.* Ti-6Al-4V sheets lap and butt joints carried out by CO₂ laser; mechanical and morphological characterization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1): 546–552.

[2] Cheng C, Chan L C, Chow C L. Weldment properties evaluation and form ability study of tailor welded blanks of different thickness combinations and welding orientations [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(15): 5982–5990.

[3] Pasang T, Amaya J M S, Tao Y, *et al.* Comparison of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr welds performed by laser beam, electron beam and gas tungsten arc welding[J]. Procedia Engineering, 2013, 63(1): 397–404.

[4] 姚 伟, 巩水利, 陈 俐, 等. 钛合金激光焊接接头的组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2006, 27(2): 69–72.

Yao Wei, Gong Shuili, Chen Li, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of titanium alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(2): 69–72.

[5] 杨武林, 杨晓华, 李晓延, 等. TC4 钛合金薄板激光焊接接头的疲劳寿命及断口分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 105–108.

Yang Wulin, Yang Xiaohua, Li Xiaoyan, *et al.* Analysis on fatigue property and fracture mechanism of TC4 titanium alloy joint during laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 105–108.

[6] 陈水生, 林建平, 辛立久, 等. 拼焊板焊缝方向对其单向拉伸性能的影响研究[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(4): 480–485.

Chen Shuisheng, Lin Jianping, Xin Linjiu, *et al.* Effect of welding orientation on tensile properties of tailor welded blanks [J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(4): 480–485.

作者简介: 许 良,男,1965 年出生,硕士,副教授,硕士研究生导师。主要从事航空材料与结构强度方面的科研和教学工作。发表论文 30 余篇。Email: sysyxu@163. com

通讯作者: 回 丽,女,博士,教授。Email: syhuili@126. com