

TC4 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头的高周疲劳性能

陈立佳¹, 宁浩楠¹, 张志鹏¹, 张宇鹏², 周 舸¹

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广州 510651)

摘要: 为了确定厚板 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的疲劳性能, 对焊接接头三层位置的样品分别进行了室温高周疲劳 (HCF) 试验, 利用扫描电镜与透射电镜对疲劳断口形貌及断口附近的微观组织进行观察与分析. 结果表明: 三层焊接接头的疲劳极限依次为 420、390 和 400 MPa; 第一层焊接接头的疲劳裂纹萌生于样品表面, 位错组态以位错网络和位错阵列为主要; 第二层焊接接头的疲劳裂纹萌生于样品表面与焊接缺陷处, 位错组态主要为位错缠结; 第三层焊接接头的疲劳裂纹萌生于样品表面与近表面焊接气孔位置, 位错组态主要为位错阵列及位错缠结.

关键词: TC4 钛合金; 高周疲劳; S-N 曲线; 疲劳极限; 窄间隙 TIG 焊; 断口形貌; 疲劳裂纹; 位错组态

中图分类号: TG 146 文献标志码: A 文章编号: 1000-1646(2023)04-0397-06

High cycle fatigue properties of narrow gap TIG welded joint of thick TC4 titanium alloy plate

CHEN Li-jia¹, NING Hao-nan¹, ZHANG Zhi-peng¹, ZHANG Yu-peng², ZHOU Ge¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. China-Ukraine Institute of Welding of Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China)

Abstract: In order to determine the fatigue properties of narrow gap TIG welded joint of thick TC4 titanium alloy plate, the high cycle fatigue (HCF) tests at room temperature were carried out with the samples at three layers of welded joint, respectively. The morphologies of fatigue fracture surfaces and the microstructures near the fracture surface were observed and analyzed with scanning electron microscope and transmission electron microscope. The results show that the fatigue limits of three-layer welded joints are 420 MPa, 390 MPa and 400 MPa, respectively. For the first layer of welded joint, the fatigue crack initiation position is the sample surface, and the dislocation configuration is mainly dislocation network and dislocation array. For the second layer of welded joint, the fatigue crack initiation positions are both sample surface and welding defects, and the dislocation configuration is mainly dislocation tangles. For the third layer of welded joint, the fatigue crack initiation positions are sample surface and near-surface welding pores, and the dislocation configuration is mainly dislocation array and tangles.

Key words: TC4 titanium alloy; high cycle fatigue; S-N curve; fatigue limit; narrow gap TIG welding; fracture surface morphology; fatigue crack; dislocation configuration

TC4 钛合金属于($\alpha + \beta$)型双相钛合金, 具有比强度高、密度低、韧性好、超塑性好、耐蚀性强以及疲劳强度高和可焊性好等特点, TC4 钛合金综合性能优良, 可满足大多数行业对零件性能的需求,

现已广泛应用于航空、船舶、汽车、医疗、军事等领域^[1-5]. 当前现代工业设备趋于高性能化、大型化, 钛合金厚板焊接需求量日益增大^[6]. 窄间隙 TIG 焊作为钛合金厚板的首选焊接工艺, 具有

收稿日期: 2021-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805335).

作者简介: 陈立佳(1963-), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 主要从事金属材料组织与性能等方面的研究.

焊接过程稳定、填充材料少、焊接质量优异以及可全位置焊接等优势^[7]. 国内外学者已对钛合金窄间隙 TIG 焊接展开了研究,乌克兰巴顿焊接技术研究所研制出了磁控窄间隙 TIG 焊接设备,可将焊接过程中的热损失降到最低并解决了侧壁熔融不良的问题,进而获得高质量焊接接头^[8]. 李双等^[9]研究了焊接电流对 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头成形的影响,结果表明,随着焊接电流的增大,焊缝熔深及熔宽增加,焊缝表面凹陷程度加大.

为确保材料在服役期间的安全性,对材料疲劳行为的研究十分必要. Hornberger 等^[10]研究发现,经氧扩散硬化后钛的疲劳性能下降,这主要是由表面氧化物团簇成为裂纹萌生有利部位所导致的. 杲宁等^[11]提出不同应力比对应不同疲劳失效机理,当应力比为 0.1 时,TC4 钛合金存在表面失效和内部失效两种失效形式,而当应力比为 -1 时,TC4 钛合金只存在表面失效. 刘小龙等^[12]研究了微结构和应力比对 TC4 钛合金高周疲劳行为的影响,结果表明,全等轴和等轴双态 TC4 钛合金的高周疲劳行为相似,不同应力比下应力疲劳曲线均为单线形或双线形,随着应力比的增加,高周疲劳的破坏机制均由滑移机制转变为解理机制. Zhu 等^[13]研究了 TC4 钛合金在不同应力水平下的疲劳小裂纹行为,发现应力水平对小裂纹扩展速率无明显影响,疲劳总寿命与裂纹萌生寿命之间存在线性关系. 迄今为止,有关 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头疲劳行为的研究较少. 由于在厚板材焊接接头的不同位置容易形成性能差异,故将 TC4 钛合金焊接接头分为上中下三层,分别对每层样品进行室温高周疲劳试验,研究上中下三层样品的高周疲劳性能,以期为此类钛合金厚板材焊接接头的工程应用提供可靠的理论依据.

1 材料与方法

试验所用材料为厚 100 mm 的 TC4 钛合金板. 采用磁控窄间隙 TIG 焊接工艺,选用 I 型坡口(坡口间隙为 10 mm),焊缝采用与母材相同的材料,焊接时利用带保护气的喷管焊枪,通过外加交变磁场来驱动电弧摆动,以多层焊接方式实现 TC4 钛合金厚板的连接^[14]. 将 TC4 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头分为上中下三层,每层分别切取条状试样,取样方式如图 1 所示(单位:mm). 将上述条状试样分别加工成棒状高周疲劳试样,尺寸如图 2 所示(单位:mm),并对试样标距部分进行机械抛光(粗糙度低于 0.2 μm)和磁粉探伤

处理. 利用电磁加载微机控制高频疲劳试验机分别对三层 TC4 钛合金焊接接头进行室温高周疲劳试验. 疲劳试验机参数为:单向最大负荷 100 kN,最大动态幅值 ± 50 kN,静态负荷精度 $\pm 1\%$,平均负荷波动度 $\pm 1\%$,载荷幅值波动度 $\pm 2\%$,试验频率范围 50 ~ 250 Hz. 进行疲劳试验时,采用应力控制拉-拉加载模式,循环频率约为 100 Hz,循环波形为正弦波,应力比为 0.1. 对每层 TC4 钛合金接头选定 6 个应力水平进行高周疲劳试验,每个应力水平至少进行 4 ~ 5 组平行试验,确定疲劳极限时需要进行 3 组平行试验.

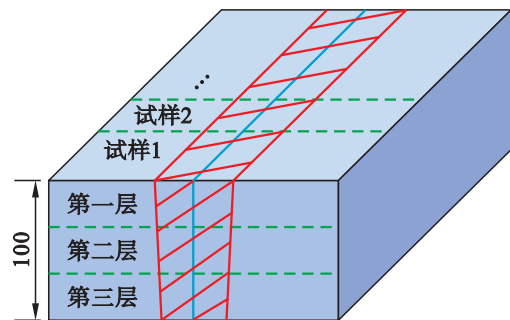


图1 厚板 TC4 钛合金焊接接头取样示意图

Fig. 1 Schematic sampling for welded joint of thick TC4 titanium alloy plate

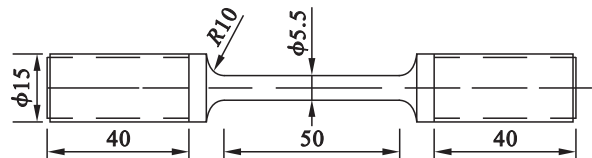


图2 高周疲劳试样尺寸

Fig. 2 Geometry of HCF specimen

利用超声波清洗机清洗高周疲劳断口,并利用 ZEISS Gemini SEM300 型扫描电子显微镜观察疲劳断口形貌. 在断口附近切取薄片,采用电解双喷减薄仪制成透射试样,利用 JEM-2100 型透射电子显微镜对微观组织结构进行观察与分析.

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 3 为 TC4 钛合金基体与不同位置焊缝的显微组织. 可见,基体和焊缝区的显微组织主要由 α 相和 β 相组成,但焊缝区的显微组织比基体略为粗大.

2.2 高周疲劳性能

图 4 为上中下三层位置的 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头循环加载时最大循环应力 σ_{\max} 与相应疲劳寿命 N_f 之间的关系曲线,即 S-N 曲线. 由图 4 可知,随着循环应力的增大,上中下三

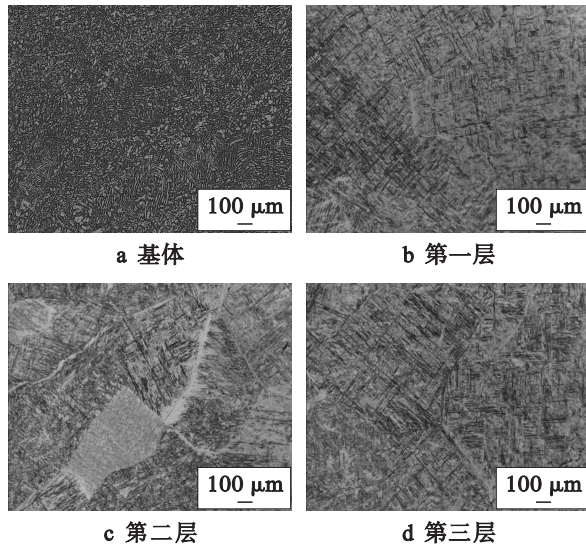


图 3 基体与不同位置焊缝显微组织
Fig. 3 Microstructures of matrix and welds at different positions

层位置的 TC4 钛合金接头的室温疲劳寿命均随之降低. 图 4 中箭头表示样品经过 10^7 次循环加载后, 疲劳试样未发生断裂, 且此时所对应的最大循环应力为钛合金接头的疲劳极限. 由此可以确定: 第一、二和三层 TC4 钛合金焊接接头的疲劳极限分别为 420、390 和 400 MPa. 显然, 第一层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的疲劳极限最高, 第三层次之, 而第二层最低.

通常高周疲劳加载条件下, 材料的疲劳寿命 N_f 与循环应力幅 σ_a 之间的关系可用幂函数形式^[15]表示, 即

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

式中: σ'_f 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数.

图 5 为三层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的循环应力幅与室温高周疲劳寿命之间的双对数关系曲线. 可见, 在相同循环应力幅下, 第一层焊接接头的疲劳寿命最高, 第三层次之, 第二层最低. 分别对三层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的疲劳数据进行线性拟合, 即可得到每层焊接接头的 σ'_f 和 b 值, 结果如表 1 所示. 可见, 第三层焊接接头的疲劳强度系数最大, 第二层次之, 第一层最小; 第二层焊接接头的疲劳强度指数最大, 第三层次之, 第一层最小.

2.3 高周疲劳断口形貌

TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的高周疲劳断口通常分为三个区域, 即疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区. 焊接接头在不同应力下的高周疲劳源区形貌如图 6 所示 (箭头所指为裂纹源). 由图 6 可见, 三层 TC4 钛合金焊接接头的疲劳源区均比较平整, 但不同层间的疲劳源区形貌不尽

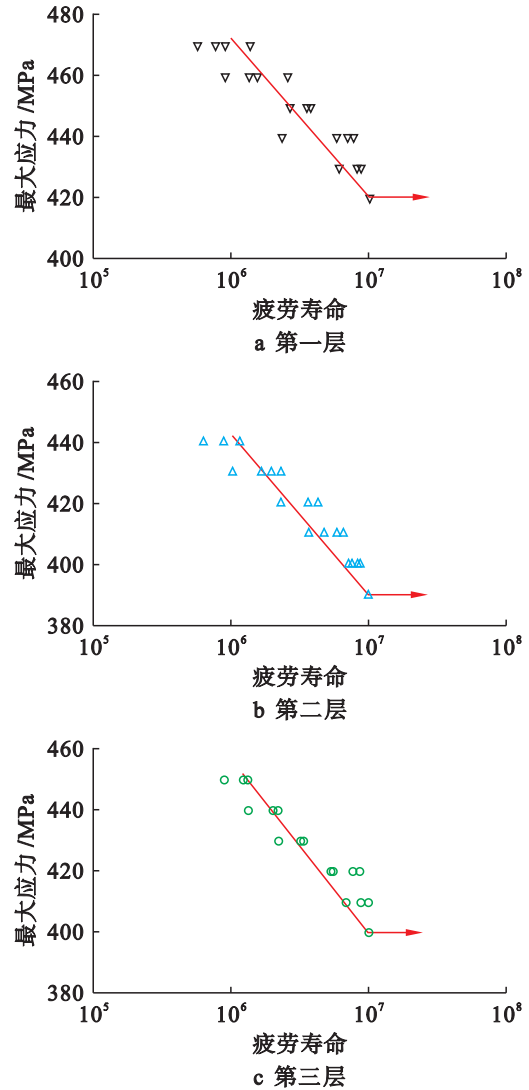


图 4 焊接接头的 S-N 曲线

Fig. 4 S-N curves of welded joints

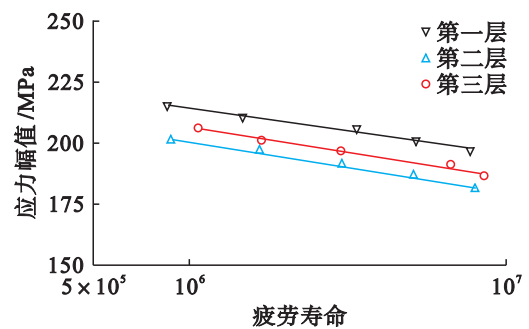


图 5 焊接接头的循环应力幅与高周疲劳寿命双对数曲线
Fig. 5 Double logarithm curves for cyclic stress amplitude versus high cycle fatigue life of welded joints

表 1 焊接接头的疲劳参数

Tab. 1 Fatigue parameters of welded joints

焊接接头层数	σ'_f	b
第一层	6.015 2	0.028 2
第二层	6.399 8	0.042 3
第三层	6.426 9	0.041 0

相同. 第一层 TC4 钛合金焊接接头的疲劳源均位于疲劳试样表面, 疲劳裂纹从试样表面向内部扩展(见图 6a~c). 第二层焊接接头的疲劳源除位于试样表面之外(见图 6d), 亦可出现在疲劳试样内部的焊接裂纹(见图 6e) 以及由于未焊接完全等造成的焊接缺陷处(见图 6f). 第三层焊接接头的疲劳源除位于疲劳试样表面之外(见图 6g), 亦可出现在近表面的焊接气孔处(见图 6h、i). 实际上, 焊缝处容易产生气孔、未焊接完全与焊接裂纹等缺陷, 焊接缺陷是导致疲劳失效的主要原因, 因而会降低试样的疲劳寿命. 一般焊接厚度较大的板材时, 易在厚板中心出现裂纹、气孔等焊接缺陷, 且随着板厚度的增加以及焊接层数的增多, 缺

陷形成倾向随之增大. 综上所述, 第一层 TC4 钛合金焊接接头疲劳裂纹主要萌生于疲劳试样表面, 故第一层焊接接头的疲劳寿命和疲劳极限更高; 第二层焊接接头的疲劳裂纹可同时萌生于试样表面与试样内部焊接缺陷处, 而焊接缺陷可加快焊接接头的疲劳失效, 故第二层焊接接头的疲劳寿命和疲劳极限最低; 第三层焊接接头的疲劳裂纹可同时萌生于试样表面与近表面的焊接气孔处, 而近表面焊接气孔尽管降低了疲劳试样的有效承载面积, 但其引起的应力集中程度相对于试样内部焊接缺陷造成的危害要小得多, 故第三层焊接接头的疲劳寿命和疲劳极限高于第二层, 但低于第一层.

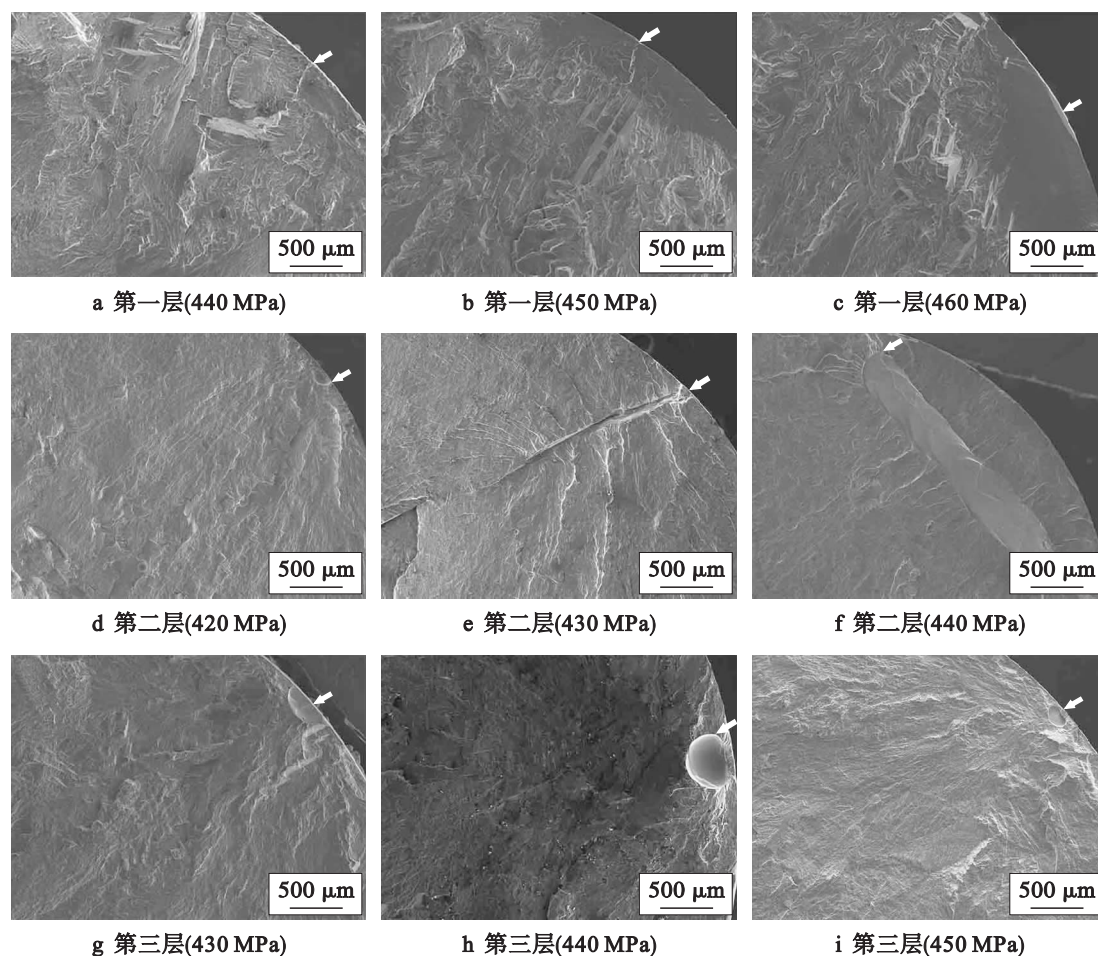


图 6 焊接接头在不同应力下的高周疲劳源区形貌

Fig. 6 Morphologies of high cycle fatigue crack initiation regions of welded joints at different stresses

图 7 为焊接接头在不同应力下的高周疲劳裂纹扩展区形貌. 由图 7 可见, 对于三层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头而言, 其在不同应力下的疲劳裂纹扩展区均存在疲劳辉纹, 表明室温高周疲劳加载条件下, 三层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头的疲劳裂纹均以穿晶方式扩展.

2.4 位错组态

对相同应力水平下 ($\sigma_{\max} = 430 \text{ MPa}$) 高周疲

劳断裂后的三层 TC4 钛合金焊接接头断口附近的微观结构进行了透射电镜观察, 结果如图 8 所示. 由图 8a 可见, 第一层 TC4 钛合金焊接接头中的板条 α 相内部存在大量位错, 且形成了四边形的位错网络, 同时一些沿着同一方向运动的位错构成了位错阵列. 由图 8b 可见, 第二层焊接接头中不同取向的板条 α 相交叉分布, 板条 α 相内部存在位错缠结. 由图 8c 可见, 第三层焊接接头

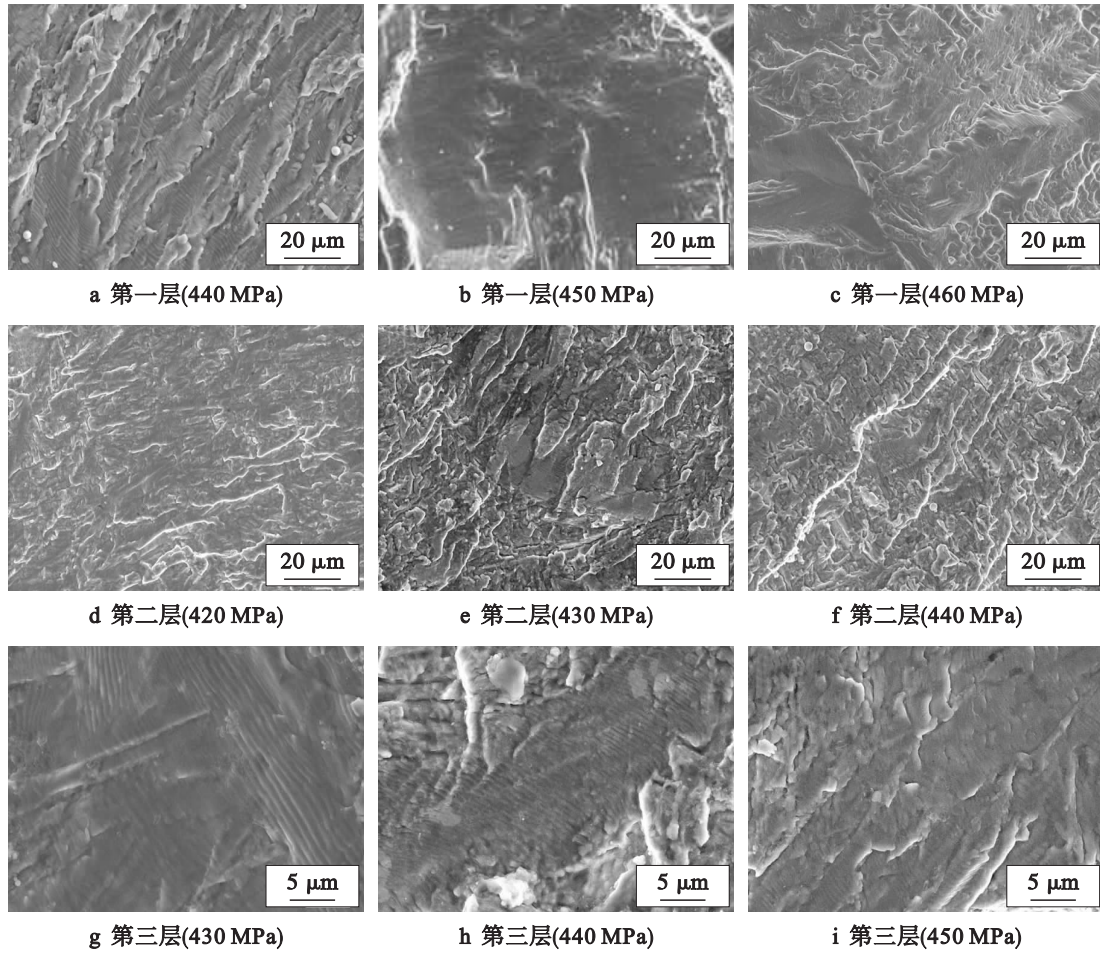


图 7 焊接接头在不同应力下的高周疲劳裂纹扩展区形貌

Fig. 7 Morphologies of high cycle fatigue crack propagation regions of welded joints at different stresses

中板条 α 相内部存在着位错阵列和位错缠结. 综上所述,三层 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊接接头高周疲劳断裂后的位错形态主要为位错阵列、位错网络与位错缠结,这就意味着 TC4 钛合金焊接接头

的室温高周疲劳变形机制主要为平面滑移. 显然,相比位错缠结,位错阵列和位错网络更有利于疲劳变形抗力的提升,故第一层 TC4 钛合金焊接接头的疲劳极限和疲劳寿命最高,而第三层最低.

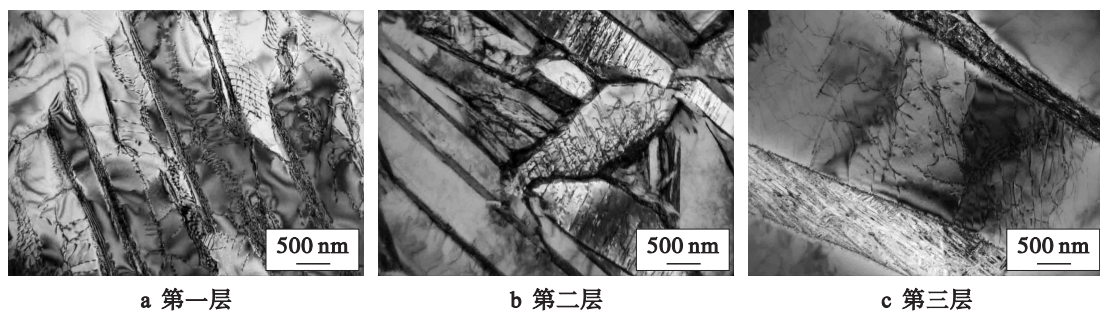


图 8 焊接接头疲劳断裂后的位错组态

Fig. 8 Dislocation configurations of welded joints after fatigue fracture

3 结 论

通过以上分析可以得出如下结论:

1) 对于 TC4 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头而言,上中下三层焊接接头的疲劳极限不同,第

一层最高,第二层最低,而第三层居中.

2) 第一层焊接接头的疲劳裂纹萌生位置为疲劳试样表面,而第二、三层焊接接头的疲劳裂纹萌生位置为疲劳试样表面、内部焊接缺陷与近表面焊接气孔处;三层焊接接头的疲劳裂纹均以穿晶方式扩展.

3) 第一层焊接接头中的位错组态主要为位错网络和位错阵列,第二层主要为位错缠结,而第三层主要为位错阵列与位错缠结。

参考文献(References):

- [1] 原国森, 兗利鹏, 韩艳艳. 钛合金的应用进展 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 13-16.
(YUAN Guo-sen, YAN Li-peng, HAN Yan-yan. Application progress of titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(4): 13-16.)
- [2] 郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 22-28.
(GUO Li, HE Wei-xia, ZHOU Peng, et al. Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 22-28.)
- [3] 王鑫, 刘金亮, 周舸, 等. Ti-6Al-4V 合金超塑性变形行为的人工神经网络预测 [J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(2): 163-168.
(WANG Xin, LIU Jin-liang, ZHOU Ge, et al. Artificial neural network prediction for superplastic deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(2): 163-168.)
- [4] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展 [J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 77-94.
(LIU Shi-feng, SONG Xi, XUE Tong, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 77-94.)
- [5] 郭佳明, 梁精龙, 沈海涛, 等. 生物医用钛合金材料制备方法及应用进展 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(20): 30-34.
(GUO Jia-ming, LIANG Jing-long, SHEN Hai-tao, et al. Preparation methods and application progress of biomedical titanium alloy materials [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(20): 30-34.)
- [6] 安飞鹏, 王其红, 李士凯, 等. 钛合金厚板窄间隙焊接技术的现状 [J]. 焊接技术, 2014, 43(12): 1-5.
(AN Fei-peng, WANG Qi-hong, LI Shi-kai, et al. Present situation of narrow gap welding technology of titanium alloy thick plate [J]. Welding Technology, 2014, 43(12): 1-5.)
- [7] 张富巨, 郭嘉琳, 张国栋. 三种窄间隙焊接技术的特性比较与应用选择 [J]. 电焊机, 2017, 47(6): 23-27.
(ZHANG Fu-ju, GUO Jia-lin, ZHANG Guo-dong. Characteristic comparison and application selection of three narrow gap welding technologies [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(6): 23-27.)
- [8] Hori K, Watanabe H, Myoga T, et al. Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire-research on pulse heated hot wire TIG welding processes [J]. Welding International, 2004, 18(6): 456-468.
- [9] 李双, 李锋, 徐望辉, 等. 焊接电流对 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊缝成形及组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(23): 35-38.
(LI Shuang, LI Feng, XU Wang-hui, et al. Effect of welding current on weld formation and microstructure of TC4 titanium alloy narrow gap TIG weld [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(23): 35-38.)
- [10] Hornberger H, Randow C, Fleck C. Fatigue and surface structure of titanium after oxygen diffusion hardening [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 630: 51-57.
- [11] 杲宁, 李伟. 应力比对 TC4 钛合金超高周疲劳失效机理的影响 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 254-260.
(GAO Ning, LI Wei. Effect of stress ratio on the very high-cycle fatigue failure mechanism of TC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(2): 254-260.)
- [12] 刘小龙, 孙成奇, 周砚田, 等. 微结构和应力比对 Ti-6Al-4V 高周和超高周疲劳行为的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(8): 923-930.
(LIU Xiao-long, SUN Cheng-qi, ZHOU Yan-tian, et al. Effects of microstructure and stress ratio on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 923-930.)
- [13] Zhu L, Hu X T, Jiang R, et al. An investigation of small fatigue crack behavior in titanium alloy TC4 under different stress levels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(15): 5567-5578.
- [14] 胡金亮, 曾才有, 余陈, 等. 厚板钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接技术发展现状 [J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 10-20.
(HU Jin-liang, ZENG Cai-you, YU Chen, et al. Progress in magnetically-controlled narrow-gap TIG welding of thick-plate titanium alloys [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(4): 10-20.)
- [15] 张哲峰, 刘睿, 张振军, 等. 金属材料疲劳性能预测统一模型探索 [J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1693-1704.
(ZHANG Zhe-feng, LIU Rui, ZHANG Zhen-jun, et al. Exploration on the unified model for fatigue properties prediction of metallic materials [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11): 1693-1704.)

(责任编辑: 尹淑英 英文审校: 尹淑英)