

模拟深海环境中 TC4 ELI 合金的 蠕变-疲劳行为

边 舫¹, 刘 珂², 李梦莎^{1,3}, 王志炜¹, 王 起¹, 孙冬柏^{1,3}

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519001; 2. 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用
国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 中山大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要:针对 TC4 ELI 钛合金在深海多因素耦合环境下的蠕变-疲劳损伤机制不明问题, 通过高压腐蚀试验系统, 模拟南海 200、600 m 和 6 000 m 海水环境, 系统研究了 TC4 ELI 合金的循环应力-寿命响应及损伤演化规律。试验给出了不同环境条件下 TC4 ELI 合金的循环应力-疲劳寿命数据。结果表明, 模拟深海环境中蠕变-疲劳的循环应力-寿命关系可以用 Basquin 方程表征; 有保载时间的蠕变-疲劳比纯疲劳的疲劳寿命显著降低; 同等加载条件下疲劳过程的断裂应变相当, 疲劳寿命取决于应变增加的速率。扫描电镜观察到断口表面多源裂纹萌生, 无明显扩展区, 疲劳寿命主要为裂纹萌生寿命, 表明深海环境与空气中裂纹萌生机制不同。

关键词:深海环境因素; 蠕变-疲劳; 疲劳寿命; 裂纹萌生

中图分类号: TF823, TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)05-0184-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.05.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

The creep-fatigue behavior of TC4 ELI alloy under simulated deep-sea environments

BIAN Fang¹, LIU Ke², LI Mengsha^{1,3}, WANG Zhiwei¹, WANG Qi¹, SUN Dongbai^{1,3}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519001, Guangdong, China; 2. Pan-gang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: To address the unknown creep-fatigue damage mechanism of TC4 ELI titanium alloy in deep-sea multi-factor coupled environment, a high-pressure corrosion test system was used to simulate the seawater environment at 200, 600 m, and 6000 m in the South China Sea, and the cyclic stress life response and damage evolution law of TC4 ELI alloy were systematically studied. The experiment provided the cyclic stress-fatigue life data of TC4 ELI alloy under different environmental conditions. The results show that the cyclic stress-life relationship of creep-fatigue in the deep-sea environment can be characterized by the Basquin equation. The creep fatigue life with guaranteed load time is significantly reduced compared to that of pure fatigue; Under the same loading conditions, the fracture strain during the fatigue process is equivalent, and the fatigue life depends on the rate of strain increase. The stable stage of the cyclic strain-time curve shows the superimposed response of the creep rate and the plastic deformation of pure fatigue. Multiple-source crack initiations were observed on the fracture sur-

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-04-07; 接受日期: 2025-04-14

作者简介: 边舫, 1972 年出生, 女, 辽宁辽阳人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 材料疲劳断裂性能测试, E-mail: bianfang@sml-zhuhai.cn。

face by Scanning Electron Microscopy, with no obvious crack propagation zone. The fatigue life is mainly the crack initiation life, indicating that the crack initiation mechanism is different in deep-sea environments and air.

Key words: deep-sea environmental factors, creep-fatigue, fatigue life, crack initiation

0 引言

TC4 ELI(Ti-6Al-4V ELI)合金是一种低间隙元素的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 通过降低传统 TC4 钛合金中的 O、N、C 等间隙元素及 Fe 等置换元素含量, 显著提升其断裂韧度、抗蠕变性能及焊接性能, 成为深海装备(如载人深潜器耐压壳体)的核心材料之一^[1-2]。深海装备在服役过程中需承受极端静水压力、低温、低溶解氧及高浓度 Cl 腐蚀介质的耦合作用, 同时因频繁上浮下潜而遭受交变载荷的循环加载, 导致材料面临复杂的蠕变-疲劳交互损伤问题^[3-4]。此类损伤的累积可能引发耐压结构的低周疲劳失效, 直接威胁装备的服役安全。因此, 明确 TC4 ELI 合金在深海环境下的蠕变-疲劳行为规律, 对保障深海装备的可靠性和寿命评估至关重要。

尽管已有研究针对 TC4 ELI 合金的室温蠕变及低周疲劳性能开展了部分工作^[5-6], 但其成果多基于单一环境或简化试验条件, 难以真实反映深海多因素耦合环境的复杂性。现有研究表明, 深海环境因素(如静水压力、温度梯度、溶解氧含量)会显著影响材料的腐蚀疲劳机制: 静水压力可能加速裂纹扩展速率, 低温环境抑制位错运动, 而溶解氧浓度则与局部腐蚀行为密切相关^[7-8]。然而, 受限于高压腐蚀试验设备的匮乏, 当前针对深海环境蠕变-疲劳交互作用的系统性研究仍存在明显空白, 尤其是不同深度海水环境(如 200、600、6 000 m)对材料损伤演化规律的影响尚未明晰^[9-10]。此外, 现有蠕变-疲劳寿命预测模型(如 Basquin 方程)在深海环境下的适用性仍需试验验证, 且保载时间与疲劳寿命的定量关系缺乏数据支撑。

基于此, 通过高压腐蚀环境模拟试验系统, 开展了 TC4 ELI 合金在模拟南海不同深度海水环境中的蠕变-疲劳行为研究。通过分析循环应力-寿命曲线、应变演化规律及断口形貌特征, 揭示了深海环境下材料的疲劳损伤机制, 并建立适用于深海条件的蠕变-疲劳寿命预测模型。研究成果可为深海装备耐压结构的优化设计、寿命评估及安全运维提供关键数据支撑, 同时为深海工程材料的性能优化与新型合金开发提供理论依据。

1 材料及方法

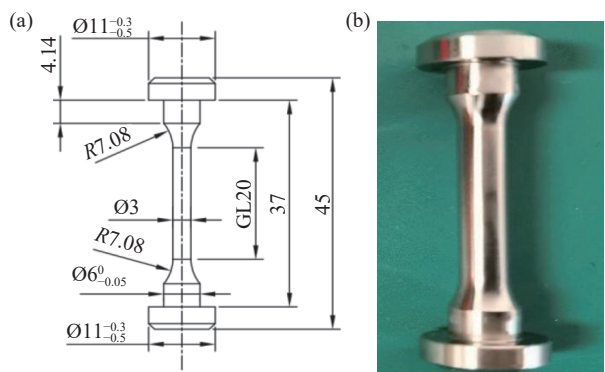
1.1 试验材料

试验材料选用热加工退火态的 TC4 ELI 钛合金板材, 其化学成分(质量分数, %)见表 1。主要力学性能如下: 弹性模量 110 GPa, 密度 4.44 g/mm³, 泊松比 0.34, 屈服强度 780 MPa, 抗拉强度 849 MPa, 延伸率 18%, 断面收缩率 35%。蠕变-疲劳试样为圆棒状, 如图 1 所示, 样品轴向长度沿板材轧制方向切割成型。试样标距段直径 3 mm, 标距长度 20 mm, 表面经金刚石研磨抛光处理, 粗糙度 $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$ 。试验材料原始组织形貌如图 2 所示, 观察位置为板材横向(T 面)和纵向(R 面), 试样横向截面原始组织由大量的等轴 α 相和夹杂其中的少量 β 相组成, 见图 2(a); 试样纵向截面见图 2(b), 观察到沿着轧制方向晶粒被明显拉长, 有流线型微结构。

表 1 试验材料的合金成分

Table 1 Chemical composition of TC4 ELI titanium alloy %

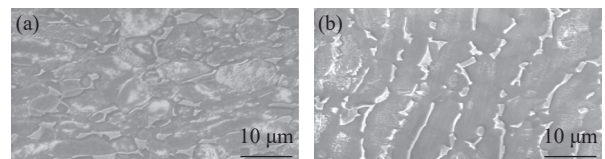
Al	V	Fe	N	H	O	Ti
5.99	3.91	0.034	0.003 6	0.002 4	0.050	Bal.



(a) 试样规格示意; (b) 实物

图 1 蠕变-疲劳试样

Fig. 1 Geometry of samples for creep-fatigue



(b) 横向; (b) 纵向

图 2 试验材料原始组织形貌

Fig. 2 Microstructure of as-received TC4 ELI alloy

1.2 试验方法

选择 3.5%NaCl 水溶液作为模拟海水液体环境,参考中国南海某海域实际海水测试数据,对溶液环境的静水应力、温度和溶解氧三个关键参数范围进行精确调控。试验系统静水压力最高可达 100 MPa,控制精度 ± 1 MPa;制冷系统控制压力釜中溶液温度,温度控制范围 0~120 $^{\circ}\text{C}$,精度 ± 2 $^{\circ}\text{C}$;通过氮气和氧气流量自动调整控制溶液中溶解氧含量。溶解氧质量分数控制范围 0~ 2×10^{-5} ,控制精度 $\pm 10\times 10^{-9}$ 。主要控制参数设定值见表 2。

表 2 三种不同试验环境控制参数设定

Table 2 Three sets of environment parameters for test

Serial number	Simulated water depth/m	Hydrostatic pressure/MPa	Dissolved oxygen/ $\times 10^6$	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$
1	200	2	8	27
2	600	6	2	9
3	6 000	60	4	3

蠕变疲劳试验在高压腐蚀环境模拟试验系统中进行,试验设备见图 3。试验样品安装在充满溶液的密闭压力釜中,压力釜中的加载装置量程为 0~10 kN,测量精度 ± 50 N;加载速率范围为 $2\times 10^{-7}\sim 2\times 10^{-3}$ mm/s。疲劳试验采用轴向载荷控制,应力比 R 为 0.1,采用梯形波加载,在拉伸峰值载荷时保载。三角波加载周期 T 为 120 s;梯形波蠕变疲劳的保载时间 t_0 分别为 10、30 s 和 60 s。以空气中试验结果作为空白对照,海水环境中采用单点试验法进行比对。



图 3 高压腐蚀溶液环境模拟试验系统

Fig. 3 Environmental simulation test system for high-pressure corrosive solution

2 试验结果

2.1 蠕变-疲劳寿命曲线

图 4 为 TC4 ELI 合金在空气和三种模拟海水不同深度下的蠕变-疲劳寿命曲线。疲劳试验加载应力选择 TC4 ELI 钛合金板材屈服强度低、中、高三种倍数,峰值应力分别设定为 821、849 MPa 和 877 MPa,梯形波加载,峰值应力保载时间 60 s。图 4 中分别给出了空气 air(σ_0)、200 m(σ_1)、600 m(σ_2)和 6 000 m(σ_3)水深环境的蠕变疲劳数据,以系统评估应力水平与海水深度的交互效应。

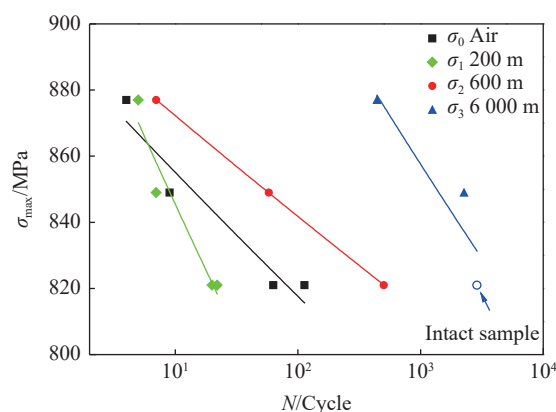


图 4 空气和三种海水环境中蠕变-疲劳寿命曲线

Fig. 4 Creep-fatigue peak stress-cycles curves in air and three seawater environments

如图 4 所示,TC4 ELI 合金在模拟深海环境中的疲劳寿命随海水深度的增加显著延长。在峰值应力为 821 MPa 条件下,6 000 m 深海环境下的循环寿命超过 2 800 周次样品未断裂,较 200 m 和 600 m 环境循环寿命显著提升。在较高应力水平下,200 m 海水环境中试样的疲劳寿命与空气环境中试样的疲劳寿命相近。但在低应力水平条件下,200 m 海水环境中试样的疲劳寿命略低于空气环境中试样的疲劳寿命,两者试验环境的温度相同,表明低静水压力与溶解氧的协同作用可能加速裂纹萌生。随着海水深度增加,温度降低导致疲劳性能提高的原因待进一步分析。虽然材料的化学成分、微观结构、强度等性质都会影响其疲劳寿命,疲劳寿命测试也存在一定的分散性。但从图 4 的试验结果能够看出不同环境中材料的应力-疲劳寿命曲线的变化规律是一致的,都可以用描述材料疲劳行为应力-寿命关系的 Basquin 方程(式(1))拟合分析^[11]。

$$\sigma = K' N^n \quad (1)$$

式中 K' 是疲劳强度系数, n 是疲劳强度指数, K' 和 n 是试验数据拟合得到的常数,与材料性质、应力比、加载方式等有关。Basquin 方程是一种材料学中应用广泛的经验公式,用循环应力-疲劳寿命关系式表征疲劳行为特性,可以用来预测材料在循环加载条件下的疲劳寿命。蠕变-疲劳试验结果拟合方程如表 3 所示。比较 Basquin 方程中的材料常数,海水环境条件下 K' 均高于空气条件,6 000 m 海水环境 K' 最高。可使用应力-寿命拟合方程进行深海环境中材料的蠕变-疲劳寿命预测与评估。

2.2 蠕变-疲劳保载效应

钛合金蠕变-疲劳保载效应具有时间敏感性。采用三角波和 10、30、60 s 不同保载时间的梯形波,在峰值应力 849 MPa 时保载,进行了蠕变-疲劳保载

时间试验研究。图 5 是空气、200 m 海水、600 m 海水三种环境中的试验结果。

表 3 试验环境中蠕变-疲劳的应力-寿命方程($t_d=60$ s)
Table 3 Stress-life equation for creep fatigue in the test environment ($t_d=60$ s)

Test depth/m	Peak stress-fatigue life equation
Air	$\sigma_0 = 894N^{-0.0195}$
200	$\sigma_1 = 930N^{-0.0414}$
600	$\sigma_2 = 904N^{-0.0154}$
6 000	$\sigma_3 = 1\,050N^{-0.0294}$

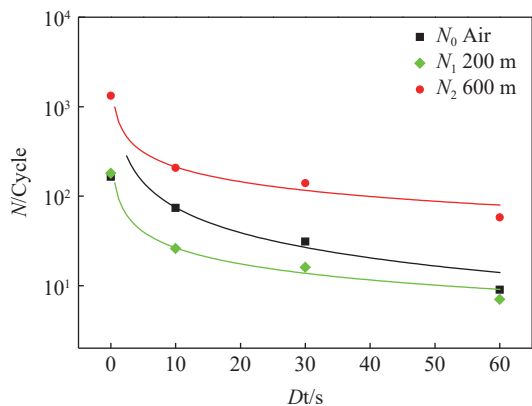
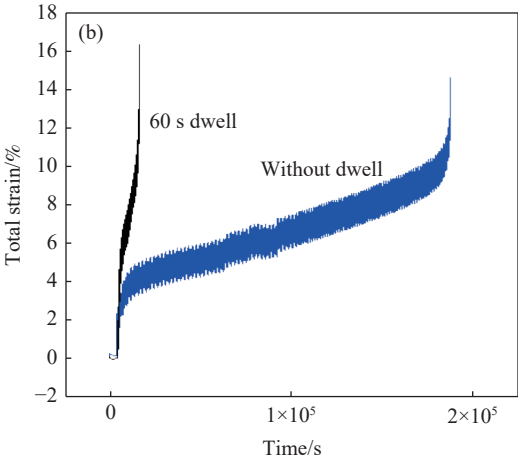
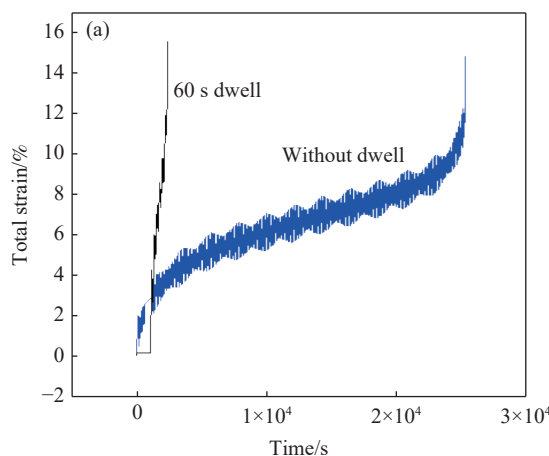


图 5 不同环境中保载时间-疲劳寿命试验结果
Fig. 5 Dwell time-fatigue life tests results in different environments

在给定应力水平下, TC4 ELI 合金的疲劳寿命随着保载时间延长呈显著非线性衰减。如图 5 所示,



(a) 水深 200 m; (b) 水深 600 m
图 6 保载对疲劳加载过程总应变的影响
Fig. 6 Dependence of fatigue loading total strain on the dwell time

2.3 蠕变-疲劳应变分析

在蠕变-疲劳过程中, 弹塑性变形与蠕变变形的交互作用是材料损伤累积的核心机制。在循环应力作用下, 金属材料内部的损伤会逐渐累积, 这种损伤

当保载时间 t_d 从 0(三角波)增至 60 s 时, 空气中试样的疲劳寿命下降 48%, 而 600 m 深海环境中仅下降 32%。这一现象揭示了深海高压环境可部分抑制保载阶段引发的损伤累积。结合文献^[12]的机理分析可知, 梯形波疲劳试验在保载阶段会发生微小的蠕变变形, 高应力状态下微小蠕变会促进裂纹的扩展; 同时, 随着保载时间延长, 蠕变变形量增加, 新鲜变形表面受腐蚀作用时间延长, 在较短时间保载下($t_d \leq 30$ s), 保载时间延长疲劳寿命下降; 但是, 当保载时间增加到一定程度($t_d \geq 60$ s)时, 蠕变量增加不明显且形变表面已经发生完全钝化, 疲劳寿命衰减趋于平缓, 表明材料表面钝化膜形成与蠕变-腐蚀交互作用的动态平衡。

图 6 是在峰值应力 849 MPa、保载时间 60 s, 200 m 和 600 m 两种海水环境中疲劳试样的总应变-时间曲线。从图 6 可以看出, 疲劳过程的应变曲线与蠕变曲线非常相似, 也有三个阶段, 初始和结束阶段短暂且应变速率较快。在相对稳定的中间阶段, 总应变峰值出现锯齿形波动, 随着加载时间增加, 总应变保持连续上升趋势; 不保载样品的加载时间明显高于保载样品, 说明保载显著降低了蠕变-疲劳试样的断裂时间; 不同环境中保载和不保载样品总应变最大值范围相当, 为 5% ~ 10%; 最终断裂的总应变值也相近, 证明保载主要影响材料损伤累积速率而非最终塑性变形能力。

主要表现为塑性变形、蠕变变形、微裂纹的形成和扩展。因为 6 000 m 深海模拟环境中试验材料表现出优异的疲劳性能, 所以选择 6 000 m 深海环境中的典型试样, 对其加载过程中的变形行为进行分析。

图7是加载过程稳定循环的应力-应变曲线。循环加载过程的应力-应变曲线形成一个接近封闭的回路,称为滞回环。每个滞回环反映了试样在单次循环过程中的应力应变行为特征。图7(a)是第一个稳定的单周循环应力-应变曲线,加载过程中总应变依顺序沿着 ε_1 - ε_2 - ε_3 - ε_4 变化。

图7(b)和图7(c)分别给出了典型样品半寿命前后各500个稳定循环的应力-应变曲线。循环稳定阶段多个滞回环曲线基本重合。滞回环最高点出现总应变最大值 $\varepsilon_{\max}$,滞回环最低点显示总应变最小值 $\varepsilon_{\min}$ 。把滞回环最大宽度定义为塑性应变范围 $\Delta\varepsilon_p$,把 ε_3 与 ε_2 的差值定义为蠕变应变 ε_c 。可以从稳定循环应力-应变曲线估算应变特征值变化规律:第一周循环 N_1 、稳定循环 N_{half} 和 $N_{\text{half}+}$ 总应变峰值分别为7.4%、10.9%、10.9%;塑性应变范围

$\Delta\varepsilon_p$ 分别为0.34%、0.14%、0.14%;蠕变应变 ε_c 分别为0.17%、0.06%、0.06%。比较可知,初始循环总应变快速增加,塑性应变和蠕变应变也快速增加;稳定循环塑性应变基本保持不变;蠕变应变前期增加较快,后期减弱达到饱和值,与材料蠕变速率变化规律一致^[13-14]。

图8给出了空气和6000 m深海两种环境条件下的总应变~时间曲线。两条曲线试验条件均为峰值应力849 MPa 保载60 s的梯形波加载,只是样品加载环境不同。结果显示,空气环境中总应变快速上升直至样品断裂;6000 m深海环境中样品总应变缓慢增加并逐渐趋于稳定,经历长时稳定循环后总应变迅速增加至样品失稳断裂。材料在深海环境下循环加载总应变保持长时稳定,是其疲劳寿命高于空气环境的根本原因。

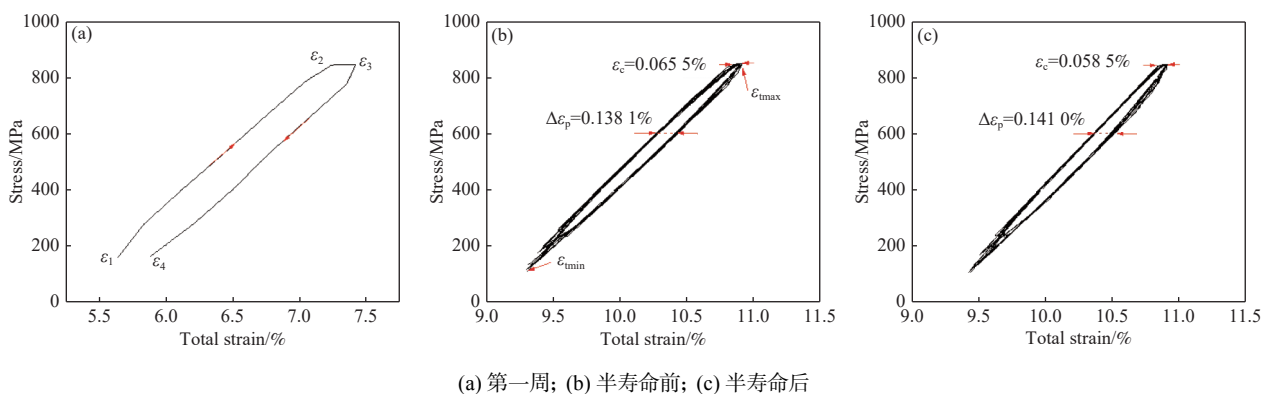


图7 第一周及半寿命稳定循环的应力-应变曲线($\sigma_{\max}=819$ MPa, $t_b=60$ s)

Fig. 7 The stress-strain curves for the first cycle and stable half-life cycle ($\sigma_{\max}=819$ MPa, $t_b=60$ s)

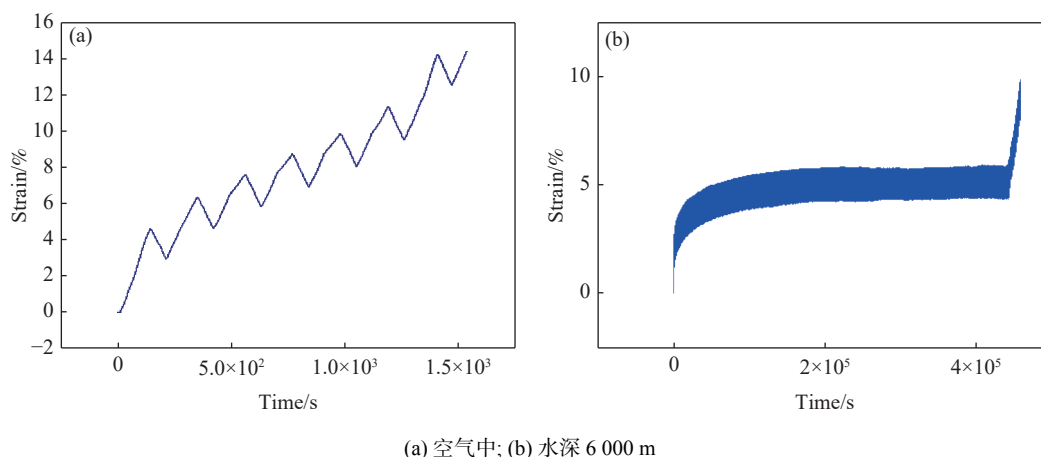


图8 蠕变疲劳的总应变-时间曲线

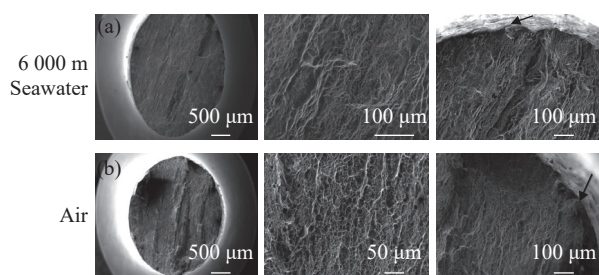
Fig. 8 The curve of total strain-time during creep-fatigue

2.4 蠕变-疲劳的断口

选择6000 m深海与空气两种环境下的疲劳断口进行分析。样品加载条件相同,峰值应力849 MPa,保载时间60 s。图9中宏微观断口形貌表明,蠕变疲劳的断口由裂纹萌生区、亚临界扩展区以及中心

韧窝型瞬断区构成,符合低周疲劳断裂特征。低倍下宏观断口呈椭圆形,平行于椭圆长轴方向有条带状准解理断裂区,无明显的颈缩变形,表明疲劳断口的失效模式以脆性断裂为主导。深海样品相对平坦,空气样品表面粗糙,小部分准解理断裂区呈沟槽状,

说明局部有一定的塑性变形;样品中心部位具有韧脆混合的断裂特征,大量的小韧窝,少部分条带状准解离界面,反映出微织构在高应力作用下,相界面脱粘发生脆性断裂;边部是裂纹萌生区形貌,二者裂纹都起源于试样边缘,在试样表面局部塑性变形集中区域或缺陷处首先形成微裂纹,表明疲劳寿命对表面缺陷及应力集中具有高度敏感性。图中箭头指向裂纹源区,可以看出深海样品裂纹萌生于试样表面微小裂纹;空气中样品是表面局部剧烈的塑性变形集中区域,导致裂纹萌生及开裂。



(a) 水深 6 000 m; (b) 空气中

图 9 典型样品的蠕变-疲劳断口

Fig. 9 The morphology and microstructure of the creep-fatigued typical samples

现有研究^[15]认为,在金属形变过程滑移带中的应力集中区域发生塑性变形累积,逐渐产生微小的裂纹,导致疲劳裂纹萌生。微裂纹在循环应力作用下,沿着最大切应力方向或者通过晶界(或相界面)

进行亚稳扩展,当裂纹扩展到一定程度时导致突然断裂。虽然疲劳损伤的机理相同,但是环境导致了样品表面变形过程的差异。深海环境促进了样品表面微裂纹萌生,具有更高的裂纹萌生寿命,而且抑制了样品表面局部塑性变形,所以 TC4 ELI 合金能够在深海环境中保持较高的疲劳强度。

3 结论

揭示了 TC4 ELI 钛合金在模拟深海多因素耦合环境下的蠕变-疲劳行为规律,主要结论如下:

1)随着海水深度由 200、600 m 增加到 6 000 m,同样加载条件下,TC4 ELI 合金的蠕变-疲劳寿命延长,6 000 m 深海环境中材料的蠕变疲劳性能更好。深海环境条件下,蠕变疲劳应力-寿命关系可以用 Basquin 方程描述;

2)随着蠕变疲劳保载时间由 0 s 增加到 60 s,蠕变-疲劳寿命降低,下降趋势逐渐缓和;不同环境下蠕变疲劳样品的断裂总应变相近,蠕变疲劳寿命取决于加载过程的形变速率。

3)蠕变疲劳断口呈现韧脆混合型疲劳断裂特征。6 000 m 深海试样裂纹源于表面微小疲劳裂纹;空气中样品裂纹萌生于试样表面局部塑性变形集中区域。裂纹萌生机制不同,导致深海环境中疲劳寿命远高于空气中疲劳寿命。

参考文献

- [1] ZHAO Y Q. Phase transformation and heat treatment of titanium alloys[M]. Changsha: Central South University Press, 2012. (赵永庆. 钛合金相变及热处理[M]. 中南大学出版社, 2012.)
- [2] FENG Y Q, JIA S X, WANG W Q, *et al.* Development of TC4 ELI titanium alloy hemisphere shell for manned submersible[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(1): 19-22. (冯雅奇, 贾栓孝, 王伟琪, 等. 深潜器载人舱用 TC4 ELI 钛合金半球壳的研制[J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 19-22.)
- [3] LI Y H, YANG R, QING D G, *et al.* Effect of microstructure on tensile creep behavior of TC4ELI titanium alloy at room temperature[J]. World Nonferrous Metal, 2018(23): 180-181. (李有华, 杨蓉, 庆达嘎, 等. 显微组织对 TC4ELI 钛合金常温拉伸蠕变行为影响研究[J]. 世界有色金属, 2018(23): 180-181.)
- [4] XI G Q, QIU J K, LEI J F, *et al.* Room temperature creep behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(12): 881-892. (席国强, 邱建科, 雷家峰, 等. Ti-6Al-4V 合金的室温蠕变行为[J]. 材料研究学报, 2021, 35(12): 881-892.)
- [5] DONG Y C, FANG Z G, CHANG H, *et al.* Service performance of titanium alloy in marine environment[J]. Materials China, 2020, 39(3): 185-190. (董月成, 方志刚, 常辉, 等. 海洋环境下钛合金主要服役性能研究[J]. 中国材料进展, 2020, 39(3): 185-190.)
- [6] ZHOU J L, LI X G, CHENG X Q, *et al.* Research progress on corrosion of metallic materials in deep sea environment[J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2010, 22: 47. (周建龙, 李晓刚, 程学群, 等. 深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22: 47.)
- [7] FU Z X, LI X F, LUO L Z. Research progress on corrosion fatigue of metal materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 71-75. (符朝旭, 黎小锋, 罗来正. 金属材料腐蚀疲劳研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 71-75.)
- [8] LIN J H, DAN Z H, LU J F, *et al.* Research status and prospect on marine corrosion of titanium alloys in deep ocean environments[J]. Rare Met. Mater. Eng., 2020, 49: 1090. (林俊辉, 谈振华, 陆嘉飞, 等. 深海腐蚀环境下钛合金海洋腐蚀的发展现状及展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49: 1090.)

(下转第 204 页)

- magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3): 104-110.
(刘志雄. 白马钒钛磁铁矿提质降杂研究及工业实践[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(3): 104-110.)
- [8] LIU J S, XING Z X, CHENG G J, *et al.* Oxidation behavior of low-grade vanadiferous titanomagnetite concentrate with high titanium[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31: 329-341.
- [9] CHENG G J, XUE X X, GAO Z X, *et al.* Key technologies for the comprehensive utilization of high - vanadium and high - titanium magnetite resources in western Liaoning[C]// The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 12th China Steelmaking Conference.
(程功金, 薛向欣, 高子先, 等. 辽西高钒高钛型磁铁矿资源综合利用关键技术[C]// 中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会论文集.)
- [10] XING B, HU X M, ZHANG J L, *et al.* Experimental study on the mineral processing of a vanadium - titanium magnetite in Chaoyang[J]. Contemporary Chemical Industry Research, 2021(15): 172-174.
(邢波, 胡秀明, 张金良, 等. 朝阳某钒钛磁铁矿选矿试验研究[J]. 当代化工研究, 2021(15): 172-174.)
- [11] DONG Z H, LI W B, LI Y J. Experimental study on the pre - enrichment of weathering - shell type vanadium - titanium magnetite in western Liaoning[J]. Metal Mines, 2019(2): 150-155.
(董振海, 李文博, 李艳军. 辽西风化壳型钒钛磁铁矿预富集试验研究[J]. 金属矿山, 2019(2): 150-155.)
- [12] XU C B, ZHANG Y M, LIU T, *et al.* Process mineralogy study of a vanadium - titanium magnetite in western Liaoning[J]. Nonferrous Metals (Ore Dressing Section), 2018(3): 1-5, 41.
(许承宝, 张一敏, 刘涛, 等. 辽西某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2018(3): 1-5, 41.)
- [13] ZHONG X, SHI Z X, GAO J. Process mineralogy discussion of the Baima vanadium - titanium magnetite in Western Sichuan[J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41(10): 29-35.
(钟祥, 史志新, 高健. 攀西地区白马钒钛磁铁矿工艺矿物学探讨[J]. 冶金分析, 2021, 41(10): 29-35.)
- [14] YU H D, WANG L N, QU J K, *et al.* Process mineralogy characteristics and ore value of typical Chinese vanadium - titanium magnetites[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 275-281.
(于宏东, 王丽娜, 曲景奎, 等. 中国典型钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征与矿石价值[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41(2): 275-281.)

编辑 邓淑惠

(上接第 189 页)

- [9] LI Y H, ZHANG W X, CHEN X L, *et al.* Research and application status of titanium alloys for marine engineering[J]. Titanium Industry Progress, 2022, 39(1): 43-48.
(李永华, 张文旭, 陈小龙, 等. 海洋工程用钛合金研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 43-48.)
- [10] ZHU S P, HUANG H Z, HE L P, *et al.* Improved generalized strain energy damage function method for high temperature low cycle fatigue-creep[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1445-1452.
(朱顺鹏, 黄洪钟, 何俐萍, 等. 高温低周疲劳-蠕变的改进型广义应变能损伤函数方法[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1445-1452.)
- [11] LIU Y Y, ZHAO Z H, WANG G S, *et al.* Effect of the over-aging degree on high cycle fatigue properties of an ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2024, 918: 147428.
- [12] TANG S J. Study on microstructure, properties and room temperature creep of TC4 ELI sheet[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
(汤苏晋. TC4 ELI 板材组织性能及室温蠕变研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.)
- [13] WANG L, WANG K, LI Y Q, *et al.* Low-cycle fatigue properties of TC4 ELI titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(2): 17-21.
(王雷, 王琨, 李艳青, 等. TC4 ELI 钛合金低周疲劳性能研究[J]. 钛工业进展, 2018, 35(2): 17-21.)
- [14] HONG Y S, FANG B. Microscopic process and description for the initiation and propagation of short fatigue cracks[J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 468-486.
(洪友士, 方彪. 疲劳短裂纹萌生及发展的细观过程和理论[J]. 力学进展, 1993 23(4): 468-486.)
- [15] SUN Y Y, CHANG H, FANG Z G. *et al.* Effect of microstructure on low cycle fatigue property of TC4 ELI titanium alloy[J]. Rare Met. Mater. Eng, 2020, 49(5): 1623-1628.

编辑 唐肖