

# TC18 钛合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究

朱玉琴<sup>1,2</sup>, 苏艳<sup>1,2</sup>, 舒畅<sup>1,2</sup>, 舒德学<sup>1,2</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.环境效应与防护重庆重点实验室, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 为 TC18 钛合金应用范围扩展和产品结构的设计与选材提供有益的借鉴和参考。**方法** 采用宏观腐蚀形貌、静态力学性能、断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率研究 TC18 钛合金在海洋大气环境下暴露 6 年的腐蚀行为。**结果** TC18 钛合金在微观形貌上未见点蚀坑等明显腐蚀, 抗拉强度和断裂韧性随海洋环境试验时间的延长呈下降趋势, 试验 4 年, TC18 断裂韧性下降了 6.7%, 其断口形貌表现为准解理断口。在  $da/dN-\Delta K$  双对数坐标中, 2, 4, 6 年三个试验周期中两者均呈现很好的线性关系, Paris 公式  $da/dN=C(\Delta K)^n$  中, 参数分别为  $C_1=5.846 \times 10^{-11}$ ,  $n_1=2.320$ ,  $C_2=6.01 \times 10^{-14}$ ,  $n_2=3.48$ ,  $C_3=1.81 \times 10^{-13}$ ,  $n_3=3.30$ 。**结论** TC18 钛合金在海洋大气环境下表现出较低的腐蚀敏感性。

**关键词:** TC18 钛合金; 海洋大气环境; 断裂韧性; 疲劳裂纹扩展速率; 腐蚀敏感性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.007

**中图分类号:** TJ04; TG172 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)03-0035-04

## Corrosion Behaviors of TC18 Titanium Alloy in Marine Atmosphere Environments

ZHU Yu-qin<sup>1,2</sup>, SU Yan<sup>1,2</sup>, SHU Chang<sup>1,2</sup>, SHU De-xue<sup>1,2</sup>

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. Chongqing Key Laboratory for Environmental Effect and Protection, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT: Objective** To provide useful references for the expansion of applications for TC18 titanium alloy as well as design and selection of product structure. **Methods** Atmospheric corrosion behaviors of TC18 titanium alloy in marine atmosphere environments for 6 years were investigated in virtue of the macro-micro corrosion morphology, static mechanical property, fracture toughness and fatigue crack growth rate. **Results** In microscopic, there was no visible corrosion as pitting. The tensile strength and fracture toughness decreased with the increase of marine atmosphere environment test time. The fracture toughness decreased by 6.7% after 4 years of test. The fracture morphology was quasi-cleavage; fatigue crack growth rate data and stress intensity factor range presented high linear relationship under  $da/dN-\Delta K$  log-log plot for three test cycles of 2, 4 and 6 years. The parameters of Paris law  $da/dN=C(\Delta K)^n$  were  $C_1=5.846 \times 10^{-11}$ ,  $n_1=2.320$ ,  $C_2=6.01 \times 10^{-14}$ ,  $n_2=3.48$ ,  $C_3=1.81 \times 10^{-13}$ ,  $n_3=3.30$ . **Conclusion** TC18 titanium alloy exhibits low corrosion susceptibility in marine atmosphere environment.

**KEY WORDS:** TC18 titanium alloy; marine atmosphere environments; fracture toughness; fatigue crack growth rate; corrosion susceptibility

TC18 钛合金属于  $\alpha+\beta$  型钛合金, 该合金具有高强度、高淬透、可焊性好等突出优点, 适用于制造飞机起落架、拦阻钩、接头、框和梁等关键承力构件<sup>[1-5]</sup>。目前关于 TC18 钛合金的性能有部分研究<sup>[6-7]</sup>, 主要集

中在组织和性能与热处理制度的关系, 而在户外大气环境中的腐蚀行为报道非常少。随着装备全天候、多地域服役要求, 研究 TC18 钛合金在我国典型自然大气环境下的大气腐蚀性能变得非常迫切。文中研究了

TC18 钛合金在我国海洋大气环境下的大气腐蚀性能,揭示 TC18 钛合金腐蚀形貌、抗拉强度、断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率在户外暴露 6 年过程中的变化规律,以期为 TC18 钛合金应用范围扩展和产品结构的设计与选材提供有益的借鉴和参考。

## 1 试验

### 1.1 试样

试验所用材料为近  $\beta$  型钛合金 TC18,其化学成分

表 1 化学成分(质量分数)

| 主要成分 |         |         |         |         |       |         |       | 杂质    |       |       |        | 其他元素  |       |
|------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Ti   | Al      | Mo      | V       | Cr      | Si    | Fe      | Zr    | O     | C     | N     | H      | 单一    | 总和    |
| 基材   | 4.4~5.7 | 4.0~5.5 | 4.0~5.5 | 0.5~1.5 | ≤0.15 | 0.5~1.5 | ≤0.30 | ≤0.18 | ≤0.08 | ≤0.05 | ≤0.015 | ≤0.10 | ≤0.30 |

### 1.2 试验方法

试验选择湿热海洋环境海南万宁试验站同时开展海洋平台户外和近海户外暴露试验,其中平板试样暴露于近海户外,暴露地点距海 90 m,其余试样均暴露于平台户外,海洋平台暴露场入海 25 m。

试验参照 GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求》的相关规定执行。近海户外大气暴露试验和海洋平台户外大气暴露试验的样品在户外朝南与水平面 45°角放置,无背板暴露,其中断裂韧性(紧凑 C(T)试样)和疲劳裂纹扩展试样(标准 C(T)试样)预期的裂纹扩展方向向下。试验总时间为 6 年,每 2 年为 1 周期,定期取样进行宏微观形貌、拉伸性能、断裂韧性、疲劳裂纹扩展速率等力学性能检测,最终对试验结果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 宏微观形貌

TC18 钛合金耐蚀性能优良,长期暴露于大气环境中主要表现为金属光泽下降和发黄发暗,微观下未见点蚀坑等明显腐蚀现象,如图 1 所示。

### 2.2 力学性能

#### 2.2.1 静态拉伸性能

参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》开展拉伸性能测试。TC18 的抗拉强度及断后伸长率随试验时间的变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,海洋大气环境对 TC18 的静态拉伸性能有一定影响,但不显著。

分见表 1。将材料加工成 100 mm×50 mm×3 mm 平板、 $\phi$ 10 mm 拉伸样、紧凑 C(T)、标准 C(T)试样等四种型号规格,采用挂牌方式进行试样标识。试验前所有试样用丙酮清洗掉试样表面的油污。

其中紧凑 C(T)试样参照 GB/T 4161—2007《金属材料平面应变断裂韧性 KIC 试验方法》,将厚板加工成标准紧凑拉伸试样,厚度  $B$  为 25 mm,宽度  $W$  为 50 mm。标准 C(T)试样参照 GB 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》,将厚板加工成标准 C(T)试样,厚度  $B$  为 12.5 mm,宽度  $W$  为 50 mm。

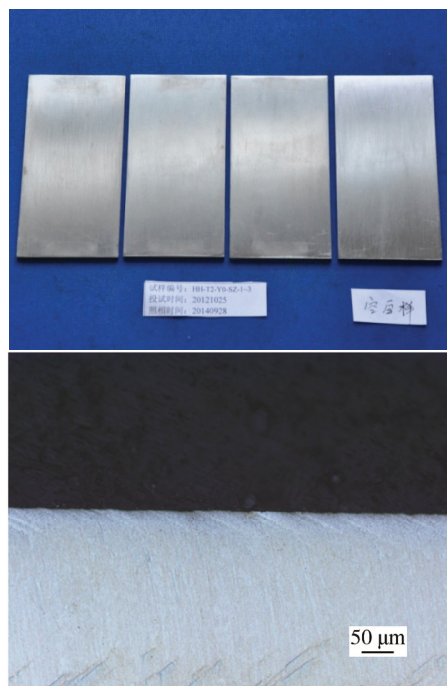


图 1 TC18 近海户外暴露 2 年的宏微观形貌

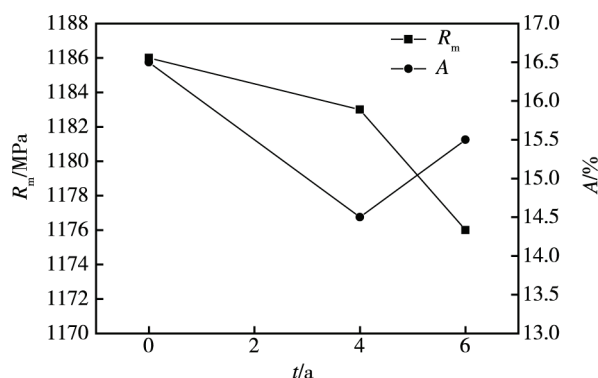


图 2 TC18 力学性能随时间变化曲线

### 2.2.2 断裂韧度

参照 GB/T 4161—2007 对原始样、海洋平台户外大气暴露 2 年和 4 年试样进行断裂试验, 得到断裂韧度变化数值见表 2。从表 2 可以看出, 经 4 年海洋大气环境试验后, 海洋大气环境对钛合金的断裂韧度有一定影响, TC18 断裂韧度随试验时间的延长呈下降趋势, 但下降幅度较小。试验 4 年后, TC18 断裂韧度平均值为  $58.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 相比原始值下降了 6.7%, 最小值为  $54.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 相比原始最小值下降了 0.2%。

表 2 TC18 断裂韧度测试结果

| 材料牌号 | 取样方向 | 试验时间/a | $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ |      |
|------|------|--------|--|------|
|      |      |        | 实测值                                      | 平均值  |
| TC18 | LT   | 原始     | 54.3 ~ 70.5                              | 62.9 |
|      |      | 2      | 54.3 ~ 62.1                              | 57.6 |
|      |      | 4      | 54.4 ~ 63.9                              | 58.7 |

利用扫描电子显微镜 (SEM) 对户外暴露 4 年的试验样品的断口自裂纹源区到扩展区进行观察, 裂纹源处有台阶纹, 疲劳裂纹扩展区有垂直于裂纹扩展方向的二次裂纹, 其断口形貌表现为准解理断口<sup>[8-10]</sup>, 如图 3 所示。

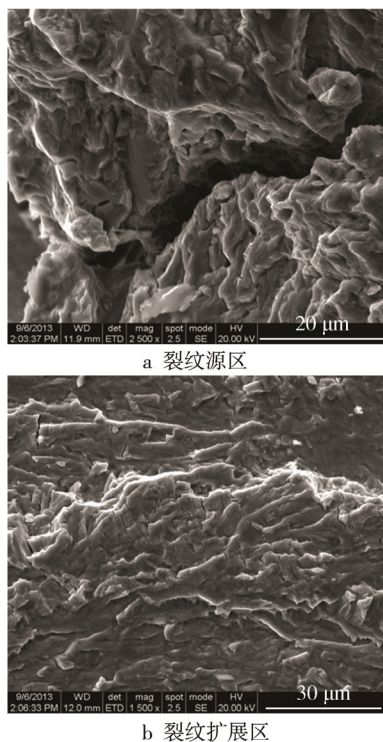


图 3 TC18 海洋平台户外暴露 4 年的断口形貌

### 2.2.3 疲劳裂纹扩展速率

参照 GB 6398—2000 开展疲劳裂纹扩展速率性能。通过对 TC18 暴露 2, 4, 6 年试样的裂纹长度、循环数、裂纹尖端应力强度因子等试验数据处理得到

$da/dN-\Delta K$  关系, 其中采用拟合  $a-N$  曲线求导的方法确定  $da/dN$ , 再用线性回归的方法拟合  $\lg(da/dN)-\lg(\Delta K)$  数据点。由图 4 可见, 在双对数坐标中两者均呈现较好的线性关系, 对曲线进行线性拟合可得到应力比为 0.1 时的 Paris 公式, 其中暴露 2 年:  $da/dN=C_1(\Delta K)^{n_1}$ ,  $C_1=5.846\times 10^{-11}$ ,  $n_1=2.320$ ; 暴露 4 年:  $da/dN=C_2(\Delta K)^{n_2}$ ,  $C_2=6.01\times 10^{-14}$ ,  $n_2=3.48$ ; 暴露 6 年  $da/dN=C_3(\Delta K)^{n_3}$ ,  $C_3=1.81\times 10^{-13}$ ,  $n_3=3.30$ 。Paris 公式能很好地描述疲劳裂纹扩展速率与应力强度因子幅度之间的关系, 应力强度因子幅度  $\Delta K$  是疲劳裂纹扩展的主要控制量, 绝大部分金属材料的疲劳裂纹扩展参数  $n$  在 2~4 之间, 该试验测得的  $n$  值分别为 2.320, 3.48, 3.30, 结果是完全合理的<sup>[11-13]</sup>。

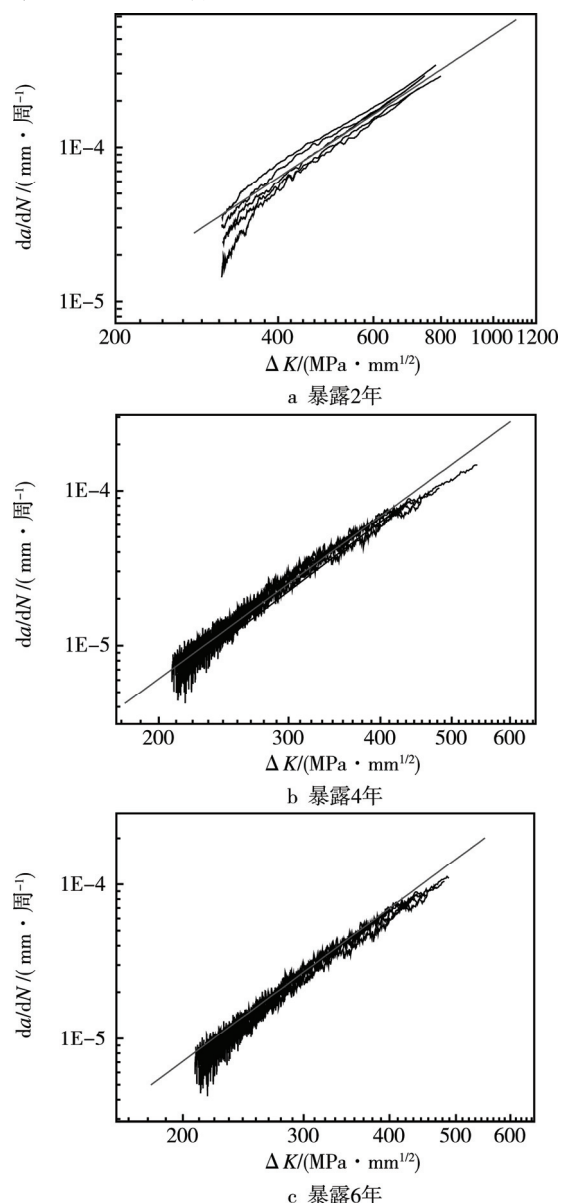


图 4 TC18 海洋平台户外不同暴露时间的  $da/dN-\Delta K$  曲线

对断口进行微观形貌分析, 裂纹源处有撕裂细小韧窝, 断口边沿有明显的腐蚀产物<sup>[14]</sup>。扩展区有明显的疲劳贝壳纹, 断口为准解理断裂。瞬间断裂区断口

为韧窝的韧性断裂,是在拉伸载荷作用下形成的,撕裂棱保护得很好,如图5所示。

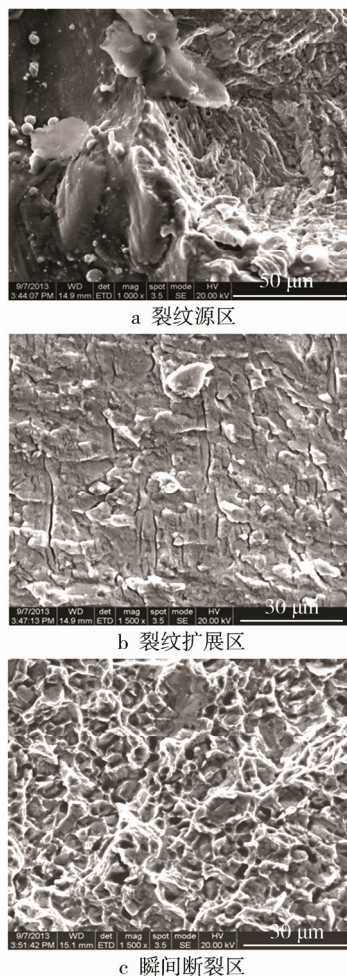


图5 TC18 裂纹扩展试样海洋平台暴露6年断口形貌

### 3 结论

1) TC18 钛合金耐蚀性能优良,长期暴露于海洋大气环境中主要表现为金属光泽下降和轻微发黄,微观下未见点蚀坑等明显腐蚀现象。

2) 海洋大气环境对 TC18 钛合金力学性能有一定影响,随着试验时间的延长,其抗拉强度和断裂韧性均有一定程度降低。其中试验4年,TC18 断裂韧性平均值相比原始值下降了6.7%。

3) 在  $da/dN-\Delta K$  双对数坐标中两者均呈现很好的线性关系,应力比为0.1时的Paris公式为:暴露2年  $da/dN=C_1(\Delta K)^{n_1}$ ,  $C_1=5.846 \times 10^{-11}$ ,  $n_1=2.320$ ;暴露4年  $da/dN=C_2(\Delta K)^{n_2}$ ,  $C_2=6.01 \times 10^{-14}$ ,  $n_2=3.48$ ;暴露6年  $da/dN=C_3(\Delta K)^{n_3}$ ,  $C_3=1.81 \times 10^{-13}$ ,  $n_3=3.30$ 。

4) 疲劳裂纹扩展试样断口形貌显示,裂纹源处有撕裂细小韧窝,断口边沿有明显的腐蚀产物,扩展区有明显的疲劳贝壳纹,断口为准解理断裂,瞬间断裂区断口为韧窝的韧性断裂。

### 参考文献:

- [1] LI C, ZHANG X Y, LI Z Y, et al. Hot Deformation of Ti-5Al-5Mo-5 V-1Cr-1Fe Near  $\beta$  Titanium Alloys Containing Thin and Thick Lamellar  $\alpha$  Phase[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 573: 75-83.
- [2] NYAKANA S L, FANNING J C, BOYER R R. Quick Reference Guide for  $\beta$  Titanium Alloys in the 00s[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 799-811.
- [3] BOYER R R, BRIGGS R D. The Use of  $\beta$  Titanium Alloys in the Aerospace Industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.
- [4] IVASISHIN O M, MARKOVSKY P E, MATVIYCHUK YU V, ET AL. A Comparative Study of the Mechanical Properties of High-strength  $\beta$ -titanium Alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2008, 457: 296-309.
- [5] IVASISHIN O M, MARKOVSKY P E, SEMIATIN S L, et al. Aging Response of Coarse and Fine-grained  $\beta$  Titanium Alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 405: 296 - 305.
- [6] 张乐, 刘莹莹, 史晓楠, 等. TC18 钛合金的显微组织及拉伸性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(6): 54-60.
- [7] 官杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. TC18 钛合金的组织与性能与热处理制度的关系[J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 78-82.
- [8] 舒畅, 张帷, 苏艳, 等. 海洋大气环境对钛合金 TA15 断裂韧度的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 54-57.
- [9] 商国强, 王新南, 费跃, 等. 新型低成本钛合金高周疲劳性能和断裂韧性[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(2): 74-78.
- [10] 张庆玲, 李兴无. TA15 钛合金两类组织对疲劳性能和断裂韧度的影响[J]. 材料工程, 2007(7): 3-5.
- [11] 朱知寿, 马少俊, 王新南, 等. TC4-DT 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 22(6): 10-13.
- [12] 吉楠, 卫遵义, 白小亮, 等. TC11 钛合金全范围疲劳裂纹扩展速率表征[J]. 理化检验-物理分册, 2016, 52(7): 439-442.
- [13] 张亚娟, 姚易, 刘海燕. Ti-6Al-4V 钛合金的疲劳裂纹扩展规律[J]. 理化检验-物理分册, 2011, 47(12): 752-755.
- [14] 吴崇周, 李兴无, 黄旭, 等. 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.