

# 工业纯钛(TA<sub>2</sub>)在南海三亚海洋环境试验站海水全浸的生物污损与腐蚀

马士德<sup>1,6</sup>, 郭为民<sup>2</sup>, 刘欣<sup>3</sup>, 王在东<sup>4</sup>, 刘会莲<sup>1</sup>, 符策鹄<sup>5</sup>, 李科<sup>1</sup>,  
任海涛<sup>5</sup>, 程坤<sup>3</sup>, 李文军<sup>5</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237; 3. 青岛科技大学材料科学与工程学院, 山东 青岛 266042; 4. 青岛东启机械设备有限公司, 山东 青岛 266071; 5. 三亚海洋环境试验站, 海南 三亚 572000; 6. 中国老教授协会海洋防腐防污专业委员会, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 为探明工业纯钛 TA<sub>2</sub> 在热带海域中的腐蚀与污损, 在南海三亚海洋环境试验站进行了为期 0.5 年、1 年、2 年、3.5 年四个周期的全浸试验。对 3.5 年周期的试验样品, 利用解剖镜鉴定了生物污损群落的组成、利用金相显微镜观察、X 射线衍射、扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)及红外光谱分析技术分析了基体和腐蚀产物的微观形貌, 确定了钛板表面的元素和产物。结果表明, 钛板表面由基底的二氧化钛膜、管柄多毛类、微藻等的微型生物和有机、无机颗粒组成的腐蚀产物皮膜所覆盖。和同纬度热带海域相比生物污损轻微, 试板上(可视生物)仅有 3~5 个而且种类少、数量少、个体小。钛板基体表面未发生局部腐蚀。

**关键词:** 工业纯钛; 生物污损; 耐蚀性; 三亚试验站

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)10-0023-08

**DOI:** 10.11759/hyhx20180301002

我国钛(Ti)资源丰富, 已探明的钛矿储量位居世界之首<sup>[1]</sup>。钛在地壳中藏量仅次于 Al、Mg、Fe 而位居金属矿藏的第 4 位, 因其在强腐蚀介质中出色的耐蚀性、优良的机加工性能和高的比强度, 使其在航空、化工、海洋领域的应用拥有明显优势。金属钛素有“抗海水腐蚀之王”的美称<sup>[2]</sup>, 它的问世, 冲破了早期金属材料传统使用模拟“空中铝”、“地下铁”、“海中铜”的格局。钛在天然海洋环境中自然形成的氧化膜致密、不易破坏, 即使有破损, 其自修复能力也极强。有研究表明钛在流动海水中 4~5 年后, 其失重非常小, 超出了分析天平能够测量的精确度<sup>[3-4]</sup>。此外, 众多文献工作表明, 金属钛在各种海洋环境中的应用和研究都证实了钛优异的耐蚀性<sup>[5-7]</sup>。

20 世纪 50 年代钛及其合金已规格化、商品化, 但在海水管道的应用中面临着因海洋生物的附着而降低其热交换效率, 甚至堵塞管道的问题, 如果尝试将其作为船壳使用仍会遭受海洋生物的污损, 使船速降低, 燃料消耗量增大, 给钛及其合金的应用带来了十分不利的影[8-9]。

污损生物是栖息于海洋设施表面, 对其功能或寿命造成危害的一类海洋底栖生物, 发育完整的污损群落组成依生长方式可分为固着类、附着类、寄生类、沉积类可视生物和表层的微型生物膜<sup>[10]</sup>。近代已形成海洋生物学的分支——海洋污损生物学<sup>[11]</sup>, 污损生物研究已成为海洋腐蚀学和海洋生物学的研究热点之一。污损生物是热带海洋环境试验站主要环境生物, 成为三亚海洋环境试验站研究的主要内容。

有研究表明, 钛在还原性酸(如盐酸)以及有机酸(如醋酸)中有腐蚀发生<sup>[12-13]</sup>。在生物污损严重的海域, 在钝性材料表面会形成多种生物构成的稳定污

收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(59471054, 59071040), 国家海洋局公益性项目(201405013-4), 国家重点基础研究项目(2014CB643304)  
[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, National Natural Science Foundation of China, No. 59471054, No. 59071040; Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean, No. 201405013-4; State Key Programme for Basic Research of China, No. 2014CB643304]

作者简介: 马士德(1938-), 男, 汉族, 研究员, 从事海洋腐蚀与污损及其控制研究, E-mail: qdmashide@163.com; 郭为民, 通信作者, 男, 高级工程师, 从事海洋环境腐蚀研究, E-mail: guowm00@163.com

损生物群落,在污损生物群落层/材料界面会有硫酸盐还原菌产生  $H_2S$ ,使局部环境酸化;由微生物作用产生的有机酸,可能会引起局部腐蚀,这些现象均需长期、反复地开展十年以上的长期实海试验证实。

南海是我国面积最大的海域,丰富的石油、天然气等资源亟待开发。在南海投入的海洋设施设计使用寿命少则 10 余年,长则 50~100 年,可是众多海洋金属结构物在热带海洋环境中遭受着严重的腐蚀和生物污损的侵害<sup>[14-17]</sup>,因此研究热带海洋环境中的腐蚀与污损是当务之急。本文以工业纯钛( $TA_2$ )试板为例,分析了金属钛耐海水腐蚀与耐生物污损的性能,研究了其在水体和生物污损协同侵蚀下的耐蚀性机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 天然海水全浸试验

参照国标 GB/T6384-2008,将钛板加工成  $200 \times 100$  mm 的标准试样并编号,用无水乙醇将钛板表面的油污洗净,干燥包装待用。

2012年3月,用螺栓将钛板固定在试片架上(图 1a),将装好的钛板架垂直固定在试验槽,随后沿滑道将框架放入海水中(图 1b),全浸框架上试片浸入海水深度为 1 m。

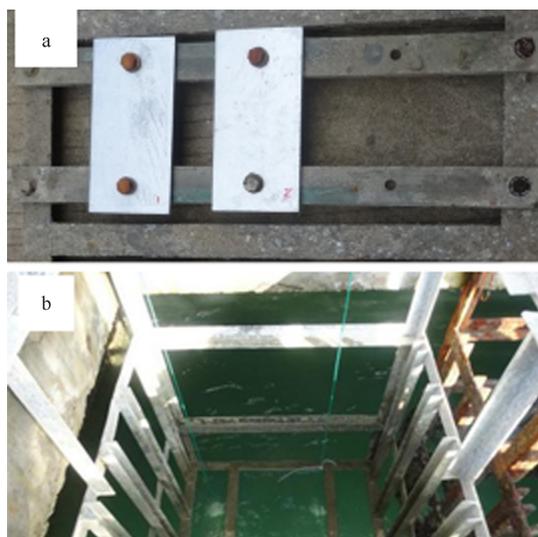


图 1 试片的装架与挂放

Fig. 1 Rack and hang test tablets

注: a: 钛板固定示意图; b: 钛板架垂直固定示意图

### 1.2 腐蚀检测

从浸海 3.5 年的钛板挂件上切取  $10 \times 10$  mm<sup>2</sup> 的小试样,利用扫描电子显微镜(JSM-6700F,日本电子公

司)观察其形貌。刮取钛板表面的腐蚀产物,对基体钛板和腐蚀产物进行了 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试(D/max-rA 型 X 射线衍射仪,日本理学株式会社),扫描  $2\theta$  角为  $5^\circ \sim 90^\circ$ ,扫描速度为  $10^\circ/\text{min}$ 。采用傅立叶变换红外光谱仪(BRUKER TENSOR 27 型,德国布鲁克公司)进行红外光谱结构分析。其具体参数设置如下:光源光谱范围为  $500 \sim 4\,000$   $\text{cm}^{-1}$ ;光源波数精度为  $0.01$   $\text{cm}^{-1}/2\,000$   $\text{cm}^{-1}$ ;分辨率参数为  $0.4 \sim 1$   $\text{cm}^{-1}$ ;信噪比参数为  $4\,000:1$ (p/p 值);吸收精度参数为  $0.01\%$ T。

此外,还对浸海 3.5 年的试板表面产物及试板基体进行了能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)、金相显微镜(XJP-200,南京江南光电股份有限公司)等表征检测,确定腐蚀产物的形貌、结构、成分及钛板的金相组织变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钛试板污损检测与分析

#### 2.1.1 试板腐蚀与污损检测

分别在 2013 年 11 月(图 2a)、2014 年 4 月(图 2c)、2015 年 4 月(图 2e)时提取试板,进行观测并拍照记录。

2016 年 11 月 4 日把浸海 3.5 年的  $TA_2$  板框架从全浸池中取出,拍照并检测记录生物污损和腐蚀状况(图 3, 4)。

#### 2.1.2 污损生物检测

将取出的试验框架立即拍照,检测可视污损生物的种类、状态等。随后取试板表面沉积物,用解剖镜检测混于表面沉积物中的微小污损生物。

从浸海 0.5 年、1 年、2 年、3.5 年 4 个周期取样,由照片结果可知:大型污损生物较少,以浸海 3.5 年为例,如图 3 所示,每块板约有 3~5 个可视污损生物,为牡蛎(Ostreadiae)、海绵(Porifera)、冒贝(Patellidae)、苔藓虫(Bryozoa)及盘管虫(Hydroides)等。 $TA_2$  板表层为颗粒状的生物泥,约有 2~5 mm 厚。将板自然干燥,待生物泥中 90% 以上的水分挥发后,余下的“生物泥”厚度约为 0.5~1.5 mm(图 5)。经检测,“生物泥”是由微型生物、海水中的有机、无机颗粒沉积粘附、微藻和苔藓虫幼体、管栖多毛类的泥管和石灰质管(图 5)组成。其具体形成是因为以细菌、硅藻为主体的微生物膜加上海水中有机、无机微颗粒的运动、黏附和沉积作用,使微生物膜增厚。大型生物幼体在膜上附着,以微生物为饵料繁衍,多种生物竞争和自然淘汰,最后微生物以其量大、繁殖力强为优势,

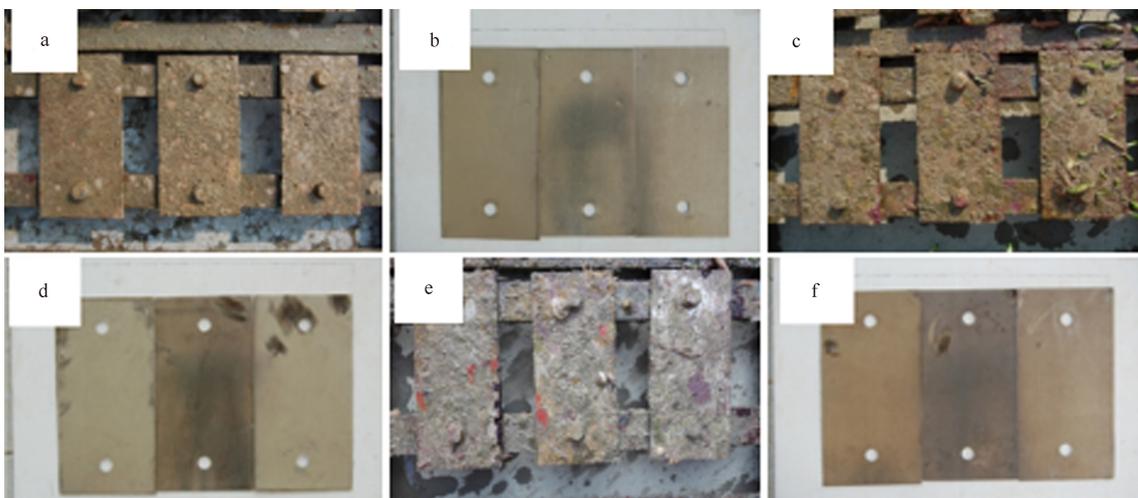


图2 试板提取照片

Fig. 2 Photos of test tablets taken out of the sea

注: a: 浸海 0.5 年板清洗前; b: 浸海 0.5 年板清洗后; c: 浸海 1 年板清洗前; d: 浸海 1 年板清洗后; e: 浸海 2 年板清洗前; f: 浸海 2 年板清洗后



图3 浸海 3.5 年 TA<sub>2</sub> 板框架照片

Fig. 3 Photos of TA<sub>2</sub> plate frame immersed in the sea for 3.5 years

对有机体分解, 无论时间多久它仍旧为海水介场的常客, 不断在海水介场中生成生物膜。本试验站的管栖多毛类为底栖匍匐生长常见种群, 笔者前期研究

发现该站水泥壁被海水浸渍 20 年后, 潮汐带区才形成以咬齿牡蛎(*Saccostrea mordax*)为优势的大型污损生物群落(未发表数据), 因此该海域在 3~5 年内难以形成大型污损生物种群, 其原因有待于进一步研究。

以上污损生物检测表明, 该试板的生物污损轻微, 试板上(可视生物)仅有 3~5 个且种类少、数量少、个体小, 不仅是 TA<sub>2</sub> 材料如此, 其他材质如碳钢、不锈钢等的试验结果与之类似<sup>[18-19]</sup>。20 世纪 60 年代对海南岛污损生物调查<sup>[20]</sup>表明: “这里海水平均温度高、盐度高、透明度高, 污损生物种类多、附着季节长、附着量较大。”该项调查是基于榆林港 3 年以上的实海挂件实验, 与本文的南海三亚实验海域环境相近, 但本试验中钛板表面生物污损轻微, 与上述调查得出的该海域“污损生物种类多、附着量较大”的一般污损规律不同, 二者显然是矛盾的。

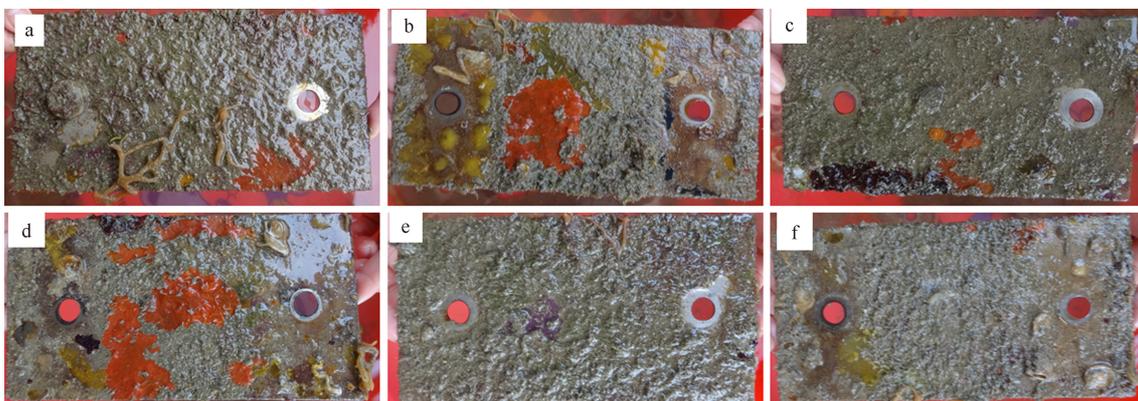


图4 浸海 3.5 年钛板正反面照片

Fig. 4 Positive and negative photos of Ti plate immersed in the sea for 3.5 years

注: a: 1 号板正面; b: 1 号板反面; c: 2 号板正面; d: 2 号板反面; e: 3 号板正面; f: 3 号板反面

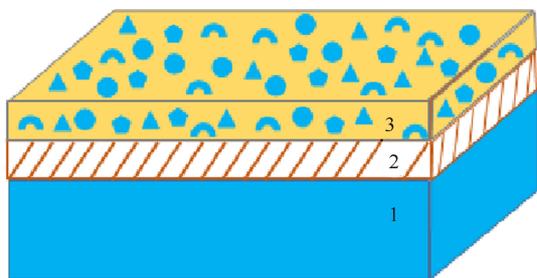


图 5 TA<sub>2</sub> 在三亚试验站全浸三年半形成的腐蚀产物膜组成结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the corrosion composition product film formed by TA<sub>2</sub> at the Sanya test station for 3.5 years

注: 1: 基体; 2: TiO<sub>2</sub> 产物膜; 3: 微型生物、有机颗粒、无机颗粒、微藻和苔藓虫幼体、管栖多毛类的泥管和石灰质管

余勉余等<sup>[21]</sup>于 1980~1987 年对广东省(含海南岛)海岸带及海滩涂进行了 7 年的资源综合调查, 其报告指出: 1980~1985 年海南岛海岸段年均潮间带生物量为 73.05 g/m<sup>2</sup>, 附着密度为 159 ind./m<sup>2</sup>, 不同类型的岸滩有较大差异, 岩礁岸年均生物量为 1820.41 g/m<sup>2</sup>, 生物密度为 774 ind./m<sup>2</sup>, 而沙质滩涂的生物量仅为 90.04 g/m<sup>2</sup>, 生物密度为 448.79 ind./m<sup>2</sup>。本试验站属于沙质滩涂, 试验结果与上述报告有相同规律, 原因有待进一步探讨。

## 2.2 钛试板腐蚀表征结果分析

### 2.2.1 SEM 形貌表征及 EDS 元素分析

对试板进行了 SEM 形貌表征, 如图 6 所示, 图中颜色较暗的部位为钛板基体的氧化物膜, 较致密; 白亮部分为腐蚀产物, 腐蚀产物分散在钛板表面, 形状不同, 尺寸不一。

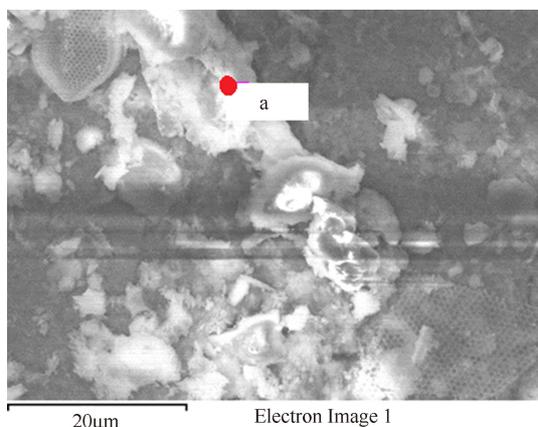


图 6 试片的 SEM 图

Fig. 6 SEM image of test tablets

注: a 点所示位置表示钛板表面腐蚀产物

对钛板表面腐蚀产物(图 6 中 a 点所示位置)进行了 EDS 元素测试, 测试结果如图 7 所示, 其 EDS 元素扫描结果表明, 腐蚀产物主要含有 Mg、Ca、O、K、Na、Cl、S、Ti 等元素。其中 Mg、Ca、O 元素的出现可能是由于海水中镁盐、钙盐与 OH<sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等离子结合形成了难溶的腐蚀产物, 附着于钛板表面; 检测到的 K、Na、Cl 等元素表明海水中钾盐、钠盐在钛板表面形成了结晶析出物; S 元素的出现则表明钛板表面有微生物附着; 微量元素 Ti 应为基体钛板的氧化膜 TiO<sub>2</sub> 组分所含有的。

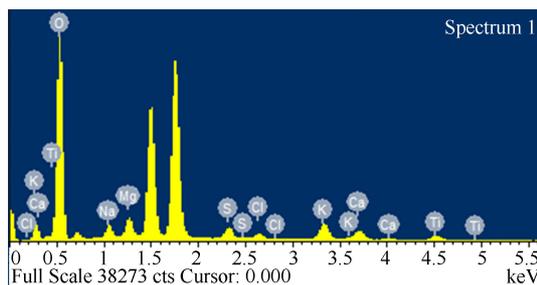


图 7 腐蚀产物的 EDS 测试图

Fig. 7 EDS test chart for corrosion products

上述分析结果表明钛板表面形成了均匀的氧化物膜, 氧化物膜表面又附着上了各种无机盐类和微生物, 与前面的分析结果一致。

### 2.2.2 XRD 物相分析

为进一步验证钛板的氧化腐蚀和污损情况, 对试板进行了 XRD 分析。钛板基体的 XRD 测试结果(图 8a)显示, 钛板表面形成了 TiO<sub>2</sub> 氧化膜, 腐蚀产物的分析(图 8b)则检测到 CaCO<sub>3</sub>、MgCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 等氧化物, 即为腐蚀产物的主要组成, 与 EDS 分析结果基本一致。

### 2.2.3 傅里叶红外检测

红外光谱结构分析时在钛板表面依据腐蚀产物的颜色差异采取了三个位置的腐蚀产物(图 9), 三个位置的红外图谱中峰位基本一致(表 1, 图 10)。

表 1 中所示官能团为多糖、蛋白质和腐植酸等复杂有机物的常见官能团, 佐证了钛板表面污损的生物情况。

### 2.2.4 金相显微镜观测

将试板腐蚀产物膜刮除, 在实验室用稀盐酸(浓盐酸: 水=1: 19)浸泡 30 分钟, 清洗试样上的牢固附着物和腐蚀产物, 干燥后在 MR500 型倒置金相显微镜下观察钛板表面形貌并拍照记录, 如图 11 所示。

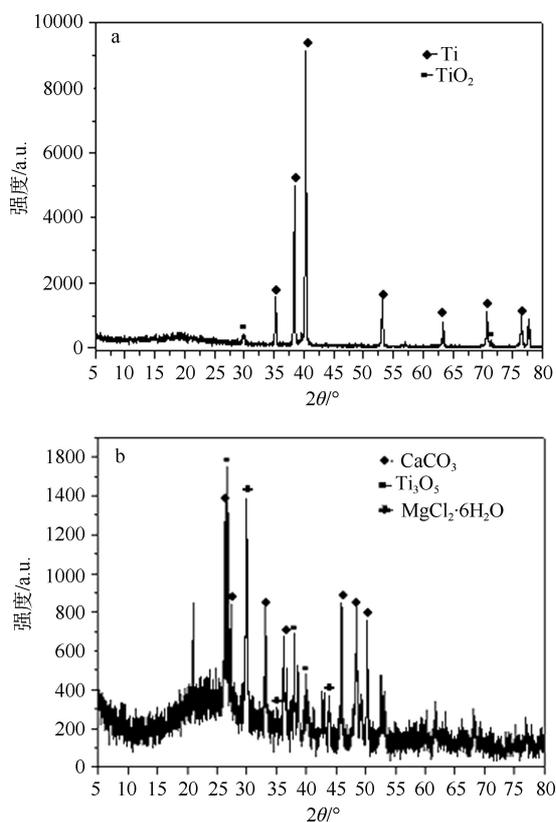


图8 钛板基体(a)和腐蚀产物(b)的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns for titanium plate matrix (a) and corrosion products (b)

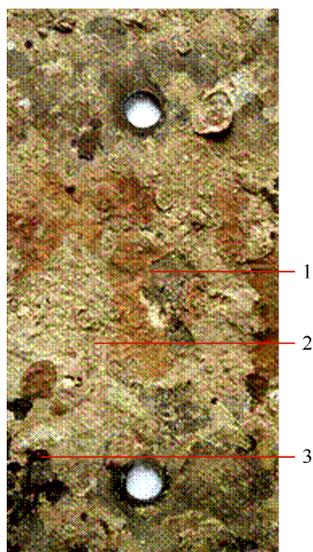


图9 钛板表面的腐蚀产物

Fig. 9 Corrosion products of Ti plate

注: 1: 深褐色产物; 2: 土色产物; 3: 黑色产物

在金相显微镜下观察, 白色部分为钛板, 黑色部分为金属间化合物, 无明显点蚀发生, 表明了钛板自身良好的耐腐蚀性能。

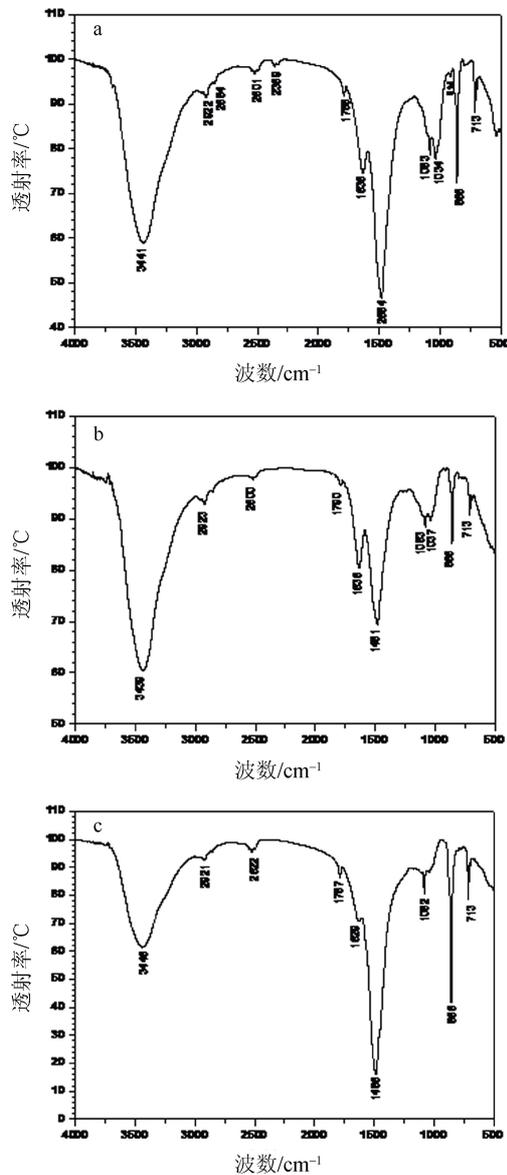


图10 腐蚀产物的傅里叶红外图谱

Fig. 10 Fourier infrared spectrum of corrosion products

注: a: 深褐色产物; b: 土色产物; c: 黑色产物

### 3 结论

(1) 由 TA<sub>2</sub> 试板在三亚试验站三年多的全浸试验腐蚀表征(SEM、EDS、XRD 及金相)检测结果表明, 钛板表面未发现点蚀裂纹等局部腐蚀现象。

(2) TA<sub>2</sub> 板在三亚试验站三年多全浸海水试验中虽然未形成大型污损群落, 但表面依然附着了部分污损生物, 海水介面基本由微生物、多种有机质、无机盐以及管栖多毛类及其分泌的黏性物质组成的污损生物皮膜组成。

本文的研究表明 TA<sub>2</sub> 在三亚试验站海水中腐蚀

产生的钛氧化物膜虽然是致密的、稳定的，起到了防腐作用，但在污损群落的变化，特别是局部环境 pH 变化后，其防腐作用难以保证其稳定性和长期性，

因此钛合金的海洋生物污损问题亟待研究和解决，这项工作也将为海洋工程中钛合金的广泛应用提供理论指导。

表 1 吸收峰位置对应基团

Tab. 1 Corresponding group of absorption peak position

吸收峰/cm <sup>-1</sup>	基团	吸收峰/cm <sup>-1</sup>	基团
3 446	羟基	1 479	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
2 922、2 854、2 501、2 359	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1 083	C-O 伸缩振动
1 788	羰基	1 034	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
1 636	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	914	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
856	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	800~1 200	Si-O 伸缩振动(SiO <sub>4</sub> )四面体吸收区间

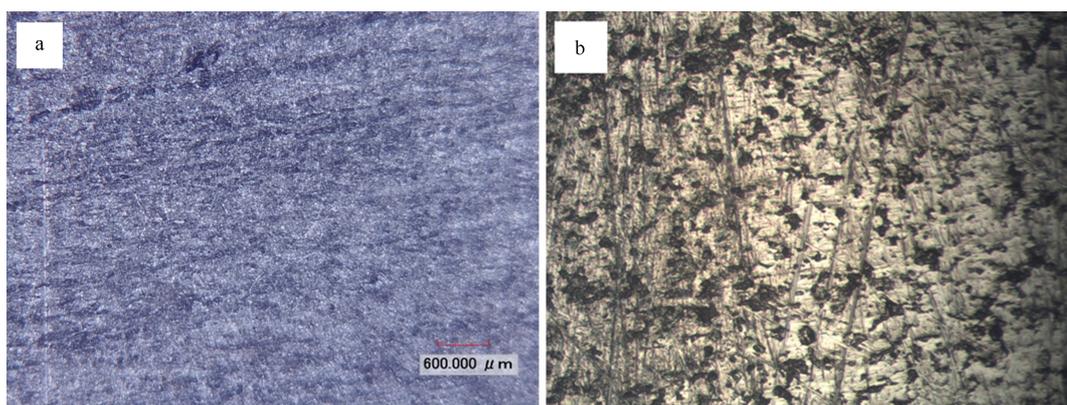


图 11 刮取腐蚀产物前(a)、后(b)的金相照片

Fig. 11 Metallographic pictures before (a) and after (b) scraping corrosion products

参考文献:

- [1] 訾群. 钛合金研究新进展及应用现状[J]. 钛工业进展, 2008, 25(2): 23-27.  
Zi Qun. New development of Titanium alloy and its application actuality[J]. Tanium Industry Progress, 2008, 25(2): 23-27.
- [2] 马士德. 藤壶对低合金钢腐蚀影响的研究[J]. 海洋通报, 1985, 4(6): 45-47.  
Ma Shide. Effect of barnacle on the corrosion of low alloy steel[J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(6): 45-47.
- [3] Bomberger H B, Cambourelis P J, Hutchinson G E, 1954. Corrosion properties of titanium in marine environments [J]. J Electrochem Soc, 101(9): 442-447.
- [4] F · W · 芬克, W · K · 博伊德. 海洋环境中的金属腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 1976.  
Fink F W, Boyd W K. The Corrosion of Metals in Marine Environments[M]. Beijing: Science Press, 1976
- [5] 马云风, 2004. 钛在前苏联冶金工业中的应用[J]. 钛工业进展, 2004, 21(3): 14-15.  
Ma Yunfeng. The applicatons of Titanium in the metal-lurgical industry in the former USSR[J]. Tanium Industry Progress, 2004, 21(3): 14-15.
- [6] 范丽颖, 刘俊玲, 安红. 钛在海洋工程上的应用现状及前景展望[J]. 中国金属通报, 2006, (39-40): 25-28.  
Fan Liying, Liu Junling, An Hong. Application status and prospect of Titanium in marine engineering[J]. China Metal Bulletin, 2006, (39-40): 25-28.
- [7] Yan S K, Song G L, Li Z X, et al. A state-of-the-art review on passivation and biofouling of Ti and its alloys in marine environments[J]. J Mater Sci Technol, 2018, 34(3): 421-435.
- [8] Schenk R. The corrosion properties of titanium and titanium alloys[C]//Brunette D M, Tengvall P, Textor M: Titanium in Medicine. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, 145-170.
- [9] Pang J J, Blackwood D J. Corrosion of titanium alloys in high temperature near anaerobic seawater[J]. Corros Sci, 2016, 105: 17-24.
- [10] 马士德, 阎永江, 王在东, 等. 海洋生物腐蚀及其研究的前提条件初探(1)[C]//2014 中国涂料工业协会防腐涂料分会年会, 第六届国际海洋与重防腐涂料及涂装技术研讨会暨第三届中国涂料技术创新高峰论坛论文集. 青岛: 中国涂料工业协会, 2014, 218-224.

- Ma Shide, Yan Yongjiang, Wang Zaidong, et al. Preliminary Study on Marine Biological Corrosion and Its Prerequisites (1)[C]//Proceedings of the Third China Coatings Technology Innovation Summit Forum. Qingdao, China Coatings Industry Association: 2014, 218-224.
- [11] 马士德. 海洋腐蚀与海洋污损论谈 I ——分支学科形成回顾[C]//第四届国际海洋与重防腐涂料及涂装技术研讨会论文集. 厦门: 中国涂料工业协会, 2010, 1-17.
- Ma Shide. Marine corrosion and marine pollution I. Review of the formation of subdisciplines[C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine and Heavy-duty Anticorrosive Coatings and Painting Technology. Xiamen, China Coatings Industry Association: 2010, 1-17.
- [12] Been J. Titanium corrosion in alkaline hydrogen peroxide environments[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1998.
- [13] Craig B D, Anderson D S. Handbook of Corrosion Data[M]. Metals Park, OH: ASM International, 1989, 3935-3946.
- [14] Beech I B, Cheung C W S, Johnson D B, et al. Comparative studies of bacterial biofilms on steel surfaces using atomic force microscopy and environmental scanning electron microscopy[J]. Biofouling, 1996, 10(1-3): 65-77.
- [15] Wahshat T M. Sulfur mortar and polymer modified sulfur mortar lining for concrete sewer pipe[D]. Ames: Iowa State University, 2001.
- [16] 张海丽. TA<sub>2</sub> 工业纯钛在海水管系中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010, 5-8.
- Zhang Haili, 2010. Application and research of TA<sub>2</sub> industrial pure Titanium in seawater piping system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 5-8.
- [17] 马士德, 王在东, 刘会莲, 等. 国产热浸锌锚链的耐腐蚀性研究( I ): 热浸锌锚链的海港试验[J]. 海洋科学集刊, 2017, 52: 104-113.
- Ma Shide, Wang Zaidong, Liu Huilian , et al. Research on the corrosion resistance of domestic hot-dip galvanizing chain (I): test for hot-dip galvanizing chain at sea port[J]. Studia Marina Sinica, 2017, 52: 104-113.
- [18] 马士德, 郭为民, 赵霞, 等. 南海海水腐蚀站站位变迁对腐蚀及生物污损的影响初探[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(3): 202-208.
- Ma Shide, Guo Weimin, Zhao Xia, et al. Preliminary study on corrosion and biofouling influenced by position change of the South China Sea seawater corrosion station[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 202-208.
- [19] 王毅, 张盾. 船舶的微生物腐蚀与防护技术[J]. 海洋科学集刊, 2016, 51: 58-68.
- Wang Yi, Zhang Dun. Microbial influenced corrosion in ship and protection technology[J]. Studia Marina Sinica, 2016, 51: 58-68.
- [20] 黄宗国, 蔡如星. 海洋污损生物及其防除[M]. 北京: 海洋出版社, 1984, 137.
- Huang Zongguo, Cai Ruxing. Marine Fouling and Its Prevention[M]. Beijing: China Ocean Press, 1984, 137.
- [21] 余勉余, 李茂照, 梁超愉, 等. 广东省潮间带生物调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 23.
- Yu Mianyu, Li Maozhao, Liang Chaoyu, et al. Intertidal Zone Biological Survey Report of Guangdong Province[M]. Beijing: Science Press, 1990, 23.

# Biofouling and corrosion analyses of industrial pure Titanium (TA<sub>2</sub>) immersed in seawater at Sanya marine environmental test station in South China Sea

MA Shi-de<sup>1, 6</sup>, GUO Wei-min<sup>2</sup>, LIU Xin<sup>3</sup>, WANG Zai-dong<sup>4</sup>, LIU Hui-lian<sup>1</sup>, FU Ce-hu<sup>5</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, REN Hai-tao<sup>5</sup>, CHENG Kun<sup>3</sup>, LI Wen-jun<sup>5</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Materials Research Institute (LSMRI), Qingdao 266237, China; 3. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 4. Qingdao Dongqi mechanical equipment Co., Ltd, Qingdao 266071, China; 5. Sanya Marine Environmental Testing Station, Sanya 572000, China; 6. China Association of Professors of the Old Marine Anti-Fouling and Anti-Fouling Specialized Committee, Qingdao 266071, China)

**Received:** Mar. 1, 2018

**Key words:** industrial pure titanium; biofouling; anticorrosion; Sanya test station

**Abstract:** To investigate the corrosion and fouling of industrial pure titanium TA<sub>2</sub> in the tropical waters, a full immersion test was carried out for four cycles within 6 months, 1 year, 2 years, and 3.5 years at the Sanya marine environmental test station in the South China Sea. For the 3.5 year cycle test samples, the biofouling community composition was identified by anatomical imitation, and the microstructure of the matrix and corrosion products were observed by metallographic microscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM), and infrared spectroscopy, and the elements and products on the titanium surface were determined. The results show that the surface of the titanium plate substrate was covered with TiO<sub>2</sub> film; microorganism such as tubular hairy and microalgae; and a corrosion product film composed of organic and inorganic particles. Compared with the tropical waters of the same latitude, the biological contamination in the test station is slight. There were only 3–5 visible organisms on the test plate, and the numbers of species and individuals were few. Moreover, there was no local corrosion on the titanium plate surface.

(本文编辑: 罗璇 丛培秀)