

热带海洋环境中 5083 铝合金腐蚀行为研究

彭文山, 段体岗, 马力, 谭振江, 辛永磊, 孙明先

(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)

摘要: **目的** 研究某岛礁不同海洋区带环境中 5083 铝合金的腐蚀规律。**方法** 在某岛礁进行海洋多区带腐蚀试验, 利用表面微观形貌观测、腐蚀产物分析、质量损失测试及点蚀深度测量等手段, 对比分析铝合金在不同海洋区带中的腐蚀形貌、腐蚀速率和点蚀深度。**结果** 5083 铝合金在某岛礁海洋全浸区带环境中的腐蚀速率最大, 大气区带中的腐蚀速率最小, 在潮差区带的腐蚀速率介于二者之间。试样在海洋不同区带主要发生局部腐蚀, 大气区试样的最大点蚀深度最大, 而潮差区试样的最大点蚀深度最小。在不同海洋区带, 铝合金腐蚀产物和附着物的混合物中均含有钙元素, 大气区钙元素含量远低于潮差区和全浸区, 潮差区和全浸区铝合金表面的腐蚀产物和附着物混合物中主要含有 CaCO_3 、 CaSiO_3 和 Al_2O_3 。**结论** 不同海洋区带环境中, 5083 铝合金的腐蚀速率差别较大, 潮差区和全浸区材料表面附着大量污损生物和矿物质。

关键词: 岛礁环境; 海洋区带; 铝合金; 海洋腐蚀; 点蚀

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0077-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.03.010

Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy in Tropical Marine Environment

PENG Wen-shan, DUAN Ti-gang, MA Li, TAN Zhen-jiang, XIN Yong-lei, SUN Ming-xian

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute (LSMRI), Shandong Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion law of 5083 aluminum alloy in different marine zones in a reef environment. Multi-zone corrosion tests were carried out in a reef. The corrosion morphology, corrosion rate and pitting depth of aluminum alloy in different marine zones were compared and analyzed by methods of surface morphology observation, corrosion product analysis, weight loss test and pitting depth measurement. The results showed that the highest corrosion rate of 5083 aluminum alloy occurred in the full immersion zone of a reef, and the lowest occurred in the atmospheric zone. The corrosion rate in the tidal range zone was between the other two zones. In different marine zones, the samples mainly had local corrosion. The maximum pitting depth of the samples in the atmospheric zone was the largest, while the maximum pitting depth of the samples in the tidal range zone was the smallest. The mixture of aluminum alloy corrosion products and attachments in different marine zones contained calcium. The content of calcium in the atmospheric zone was much lower than that in the tidal range zone and the full immersion zone. The mixture of corrosion products and attachments on the surface of aluminum alloy in the tidal range zone and the full immersion zone mainly contained CaCO_3 , CaSiO_3 and Al_2O_3 . The corrosion rate of 5083 aluminum

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-07-27

Received: 2022-03-25; Revised: 2022-07-27

作者简介: 彭文山(1987-), 男, 博士。

Biography: PENG Wen-shan (1987-), Male, Doctor.

引文格式: 彭文山, 段体岗, 马力, 等. 热带海洋环境中 5083 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 077-083.

PENG Wen-shan, DUAN Ti-gang, MA Li, et al. Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy in Tropical Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 077-083.

alloy in different marine zones varies greatly, and a large number of fouling organisms and minerals are attached to the material surface in the tidal range zone and the full immersion zone.

KEY WORDS: reef environment; marine zone; aluminum alloy; marine corrosion; pitting corrosion

铝合金密度低、耐蚀性好、比强度高、易加工,在海洋工程及船舶工业中得到广泛应用^[1-3]。采用铝材制造船体及上层建筑可以提高载货量或提高航速,降低运输成本。铝合金以其优异的性能越来越多地应用到岛礁等严酷海洋环境中。岛礁环境严酷复杂,在该环境中服役的材料受到高温、高盐、高湿的大气腐蚀^[4-6]。除此之外,海水飞溅、潮水冲刷以及海水浸泡都对装备造成严重腐蚀。随着我国海洋权益维护的需要,热带岛礁上装备设施的腐蚀老化日益成为重点关注及亟待解决的重大问题。

国内外学者对于铝合金在海洋大气环境以及海水全浸环境中腐蚀规律的研究较多^[7-13],国外研究主要集中于环境因素如盐度、pH 等变化对铝合金腐蚀的影响,获得铝合金腐蚀行为规律^[3,14]。国内中船七二五所、北京科技大学、兵器五九所等单位的研究人员在某岛礁开展了多区带、多周期的自然环境暴露试验,获得了铝合金材料的腐蚀规律,分析了铝合金的腐蚀种类及腐蚀原因,并研究了腐蚀速率以及腐蚀产物成分。董超芳等^[15]通过盐雾试验研究了 7A04 铝合金海洋大气腐蚀初期规律,发现 Cl⁻可显著加速铝合金的腐蚀。刘海霞等^[16]研究了 A1060 纯铝在万宁等模拟大气环境和实际大气环境中的腐蚀形貌、腐蚀产物和腐蚀动力学之间的相关性。苏霄^[17]采用干湿周期浸润试验和盐雾试验研究了 1050A 铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为机理。在海水全浸腐蚀方面,陈珊等^[18]研究了 5083 铝合金在不同 pH 值 NaCl 溶液中的腐蚀性能,发现 5083 铝合金在强酸强碱溶液中发生均匀腐蚀,而在中性或者弱酸弱碱溶液中发生局部腐蚀。戴芸等^[19]采用浸泡试验与电化学循环极化曲线测试,研究了 7020 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中的点蚀行为,发现最大点蚀深度随时间呈 S 形曲线变化,呈缓慢增长-快速增长-保持稳定的过程。

以上研究主要是采用模拟试验方式获取铝合金的大气和全浸腐蚀规律,实际暴露试验主要针对于大气环境腐蚀,研究结论无法全面获取铝合金多区带自然环境腐蚀规律。与大气区及全浸区不同,潮差区环境动态变化频繁^[20],其腐蚀老化规律与大气、全浸存在较大差别,而对于这个区带铝合金的腐蚀规律研究较少。某岛礁由于其特殊苛刻的海洋环境,与一般海洋环境存在较大差别,特别是不同海洋区带的腐蚀行为之间也有显著不同,岛礁上装备设施极易遭受腐蚀损伤,造成安全隐患。由于 5083 铝合金以其较好的耐蚀性能被广泛应用于海工设施及船舶,因此本文对某岛礁不同海洋区带环境中 5083 铝合金的腐蚀行

为进行了对比研究,分析其腐蚀规律,对于某岛礁上海工设施以及航行船舶的可靠性评价和腐蚀防护具有重要意义。

1 试验

试验材料为 5083 铝合金,其成分见表 1。试样经切割、钻孔、抛光处理,尺寸为 100 mm×50 mm,厚度约为 4 mm,试样的长边垂直于板材轧制方向。投放前进行去油处理,并对试样尺寸和质量进行精确测量和记录。试验海域为热带某海岛,主要气候条件:某群岛位于我国某海域西北部大陆坡上,广泛发育碳酸盐岩。投样岛礁位于热带中部,炎热湿润,年平均气温为 26.5 ℃,年总降雨量约 1 500 mm,相对湿度达 82%,属于热带季风气候。根据试验区域实际条件选择布放方式,进行不同海洋区带暴露试验,试验区带分别为大气区、潮差区和全浸区,试验周期为 1 a。试验前,对试样尺寸和质量进行测量,并作好记录。每个区带设置平行样,共 3 件。暴露试验结束后,将试样取回,参照 GB/T 16545—2015 规定的方法,去除腐蚀产物,然后进行质量损失测量,取平行样的平均质量损失量作为腐蚀速率的计算数据。采用 GB/T 18590—2001 中的显微法测量点蚀深度。采用数码相机拍摄试样除锈前后形貌。采用蔡司扫描电子显微镜观察试样表面的微观形貌,并采用自带的能谱分析仪分析腐蚀产物组成。采用 HIROX KH-8700 三维视频显微镜观察除锈后试样的表面形貌,并测量点蚀深度。采用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪分析腐蚀产物组成。

表 1 5083 铝合金主要化学成分(质量分数)
Tab.1 Chemical composition of 5083 aluminum alloy
(mass fraction)

								%
Al	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Si	Ti
94.789	0.032	4.175	0.009	0.498	0.074	0.346	0.046	0.021

2 结果与分析

2.1 不同海洋区带宏观腐蚀形貌分析

大气区试样去除腐蚀产物前后表面的宏观腐蚀形貌如图 1a 所示。可以看出,在海洋大气区,试样表面出现深色锈斑,去除腐蚀产物后,试样表面点蚀坑呈分散分布,个别小点蚀坑连接成片,形成面积较大的腐蚀坑。铝合金尽管可以自钝化,但是对于含氯

离子的液膜没有很高的耐蚀能力。海洋大气环境相对湿度和氯离子沉积速率都较高, 共同加重了铝合金的腐蚀。由于铝合金具有较好的耐蚀性, 最终腐蚀产物没有覆盖整个表面, 整个暴露过程中始终表现为局部腐蚀。潮差区试样清洗前后表面的宏观腐蚀形貌如图 1b 所示。可以看出, 海洋潮差区试样表面附着大量污损生物, 污损生物主要为绿藻等藻类, 污损生物下方

有灰黑色腐蚀产物层。将污损生物以及腐蚀产物清除干净后, 可以发现, 试样表面部分位置出现腐蚀缺陷, 但整体上腐蚀并不严重。全浸区试样清洗前后表面宏观腐蚀形貌如图 1c 所示。可以看出, 海洋全浸区试样表面污损生物附着较多, 主要为绿藻等藻类。另外, 试样表面还有灰白色污损物质, 可能是钙镁沉积层。除去表面腐蚀产物及附着物后, 试样表面腐蚀不明显。

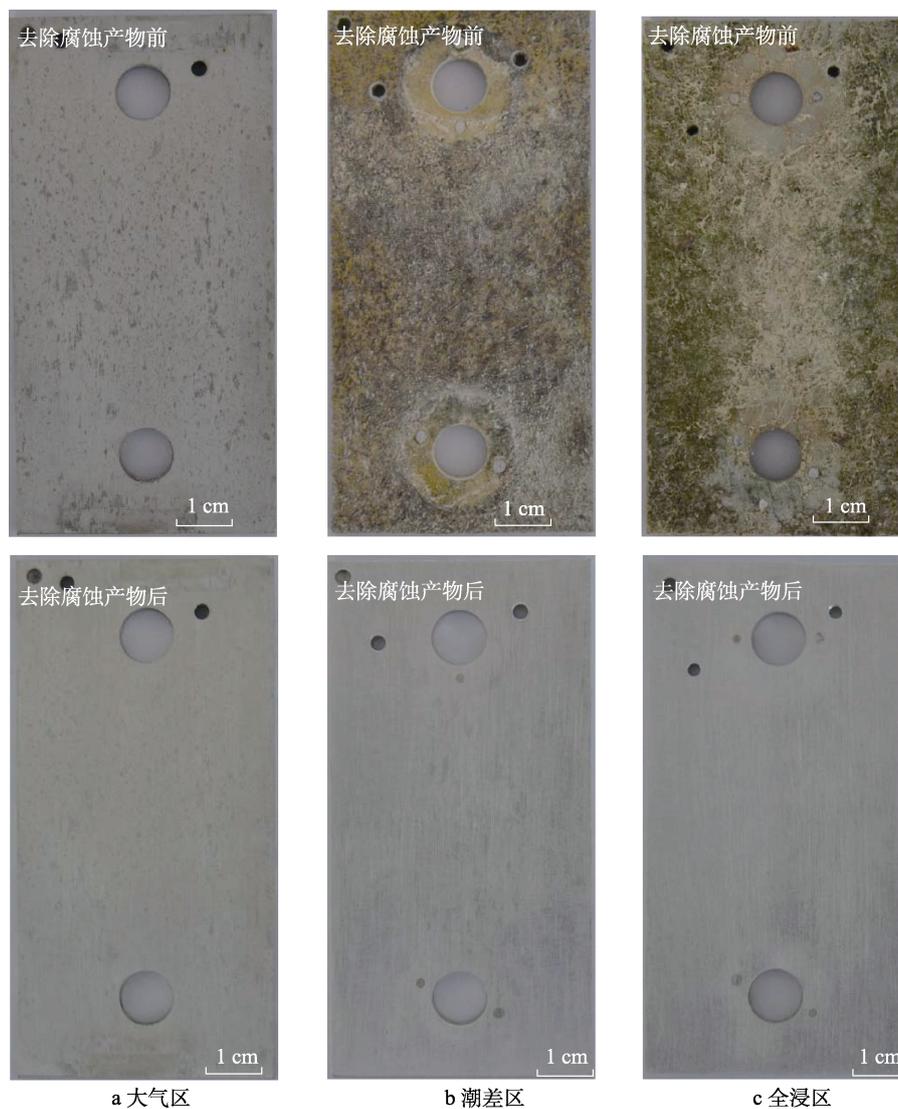


图 1 不同海洋区带试样后表面宏观腐蚀形貌

Fig.1 Macro corrosion morphology of sample surface in different marine zones before and after removing corrosion products: a) atmospheric zone; b) tidal range zone; c) full immersion zone

2.2 微观腐蚀形貌分析

试样表面的 SEM 形貌如图 2 所示。在大气环境下, 铝合金表面的腐蚀产物较少, 腐蚀产物均发生了龟裂现象, 腐蚀产物附着力较差。这主要是由于某岛礁大气温度较高, 试样表面液膜快速蒸发, 腐蚀产物脱水, 产生较大拉应力所致。潮差区 5083 铝合金试样微观腐蚀形貌如图 2b 所示, 其表面腐蚀产物与附着海生物及矿物质掺杂在一起, 主要是绿藻等藻类以

及钙镁沉积物等。全浸区 5083 铝合金试样微观腐蚀形貌如图 2c 所示。对于海洋全浸区试样, 试样表面附着大量腐蚀产物, 腐蚀产物较疏松, 表面有裂缝分布, 腐蚀产物呈团簇状分布。

对于大气区试样, 去除腐蚀产物后, 试样的表面形貌如图 3a 所示。试样表面腐蚀并不明显, 海洋大气导致的腐蚀主要以腐蚀斑形式呈现, 腐蚀区域颜色变暗, 失去金属光泽, 腐蚀坑深度较浅。潮差区试样去除腐蚀产物后, 其表面形貌如图 3b 所示。试样表

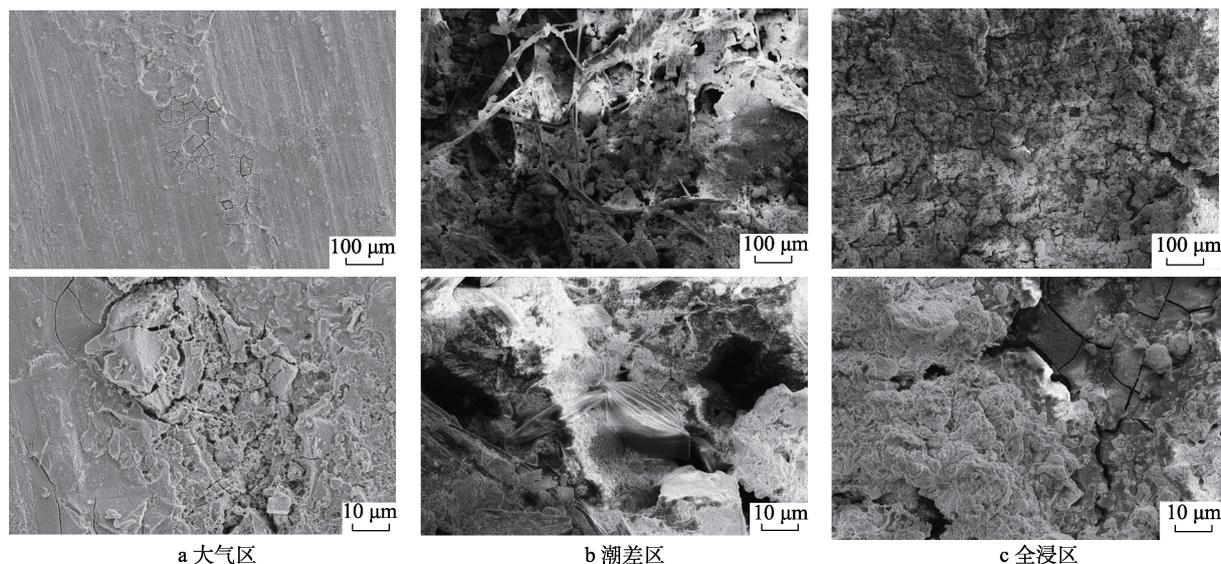


图2 不同海洋区带 5083 铝合金试样微观腐蚀形貌

Fig.2 Micro corrosion morphology of 5083 aluminum alloy sample in different marine zones:

a) atmospheric zone; b) tidal range zone; c) full immersion zone

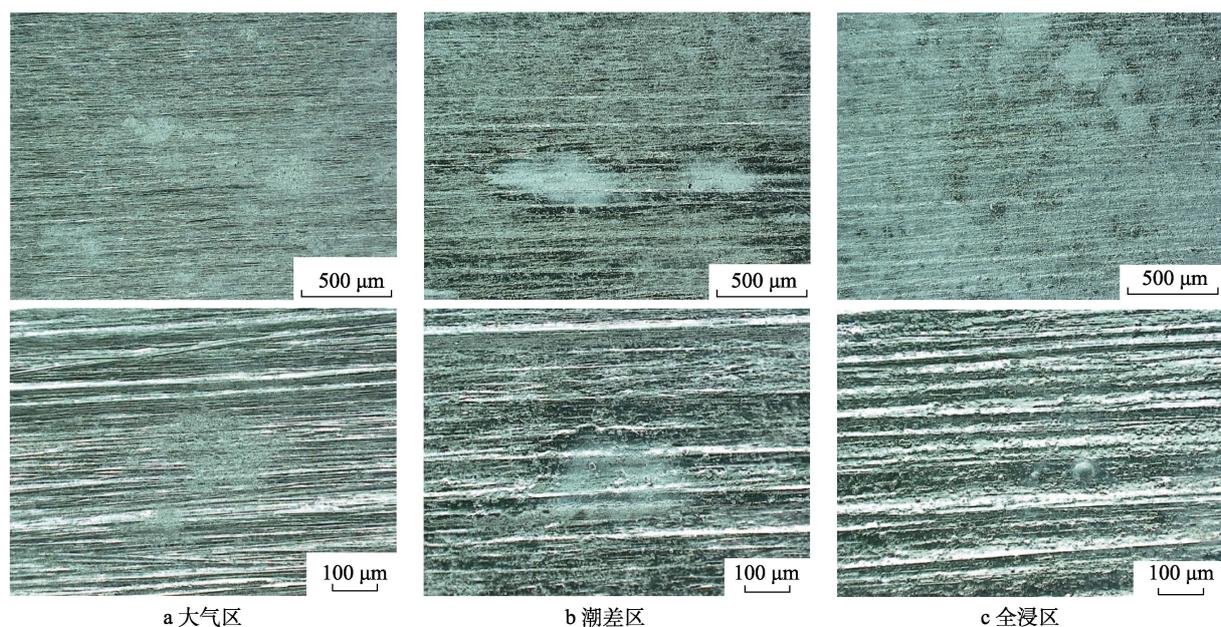


图3 不同海洋区带 5083 铝合金去除腐蚀产物后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of 5083 aluminum alloy after removing corrosion products in different marine zones:

a) atmospheric zone; b) tidal range zone; c) full immersion zone

面腐蚀程度高于海洋大气区,这主要是由于海水周期性冲刷以及对试样的润湿造成的。由于潮差区试样表面附着大量污损生物,试样的腐蚀除了海水腐蚀性离子造成的腐蚀外,还有氧浓差腐蚀等。海水全浸区试样去除腐蚀产物后的形貌如图 3c 所示。试样表面腐蚀较明显,表面密布腐蚀斑点,试样表面点蚀坑较多,尺寸大小不一,点蚀坑呈圆形。这主要是由于 5083 铝合金在海水中受到氯离子作用,氧化膜破坏,导致基体进一步腐蚀。

2.3 腐蚀产物分析

铝合金腐蚀产物 EDS 分析如图 4 所示,其元素

原子分数结果见表 2。由表 2 可知,腐蚀产物主要由 Al 和 O 元素组成,推测为 Al_2O_3 和 $\text{AlO}(\text{OH})$ 的混合物。另外,腐蚀产物中出现了含量较多的 Cl、Na、Ca 等元素。这可能是因为试样表面有沉积的 NaCl 颗粒,或者有少量的 AlCl_3 及碳化物,而少量的 Mg、Si、S 也是由海洋大气中的固体颗粒在试样表面沉积造成的。腐蚀产物中的 Cl 和 Na 元素主要是海洋大气的高含量氯化钠在试样表面沉积并溶解造成的,而腐蚀产物中的硅和钙主要来自于岛礁沙土中,岛礁上湿度很大,砂石微粒容易附着在基体和腐蚀产物上。这个现象与实验室模拟环境中铝合金表面腐蚀产物存在显著不同,实验室模拟环境中,特别是潮差和海水

浸泡环境下, 铝合金腐蚀产物和附着物的混合物中 Ca 含量极少, 甚至没有^[21], 而在该岛礁海洋环境暴

露下, 试样表面 Ca 含量较高, 这与其典型环境特征有直接关系。

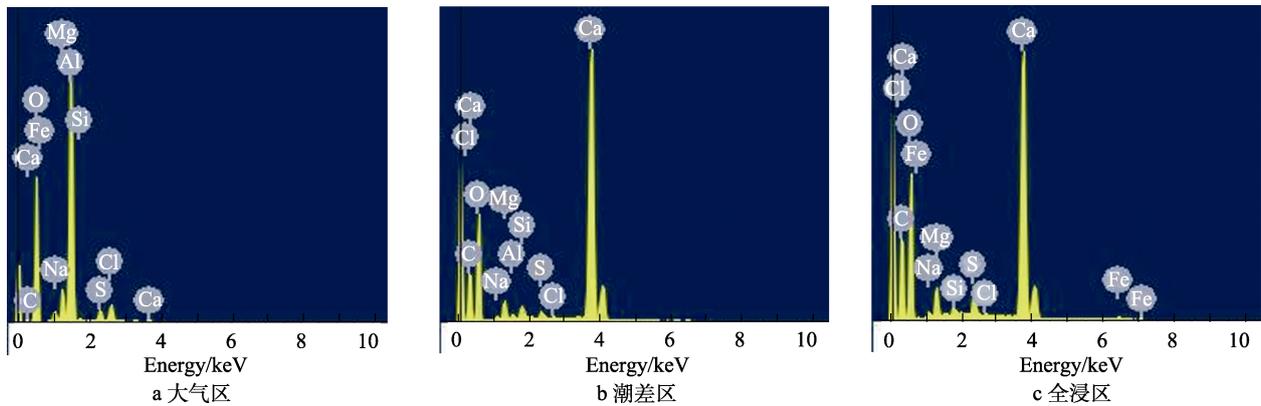


图 4 不同海洋区带腐蚀产物 EDS 分析

Fig.4 EDS analysis of corrosion products in different marine zones: a) atmospheric zone; b) tidal range zone; c) full immersion zone

表 2 5083 铝合金不同区带 1 a 腐蚀产物元素含量 (原子分数)

Tab.2 Element content of corrosion products of 5083 aluminum alloy in different marine zones after exposing for 1 a (atomic fraction) %

元素	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe
大气区	0.60	66.09	1.42	3.22	24.97	0.29	1.34	1.85	0.13	0.10
潮差区	2.45	76.34	0.41	1.48	0.23	0.60	0.31	0.13	18.05	—
全浸区	3.77	77.08	0.47	2.04	—	0.29	0.98	0.14	14.89	0.34

根据 EDS 分析结果, 腐蚀产物中 Ca 和 O 元素含量均较高。结合图 5 中 XRD 测试结果, 表明其表面附着物质主要由 CaCO₃ 和 Al₂O₃ 组成。全浸区 XRD 分析结果与潮差区类似, 表面腐蚀产物和附着物质混合物中含有 CaCO₃。

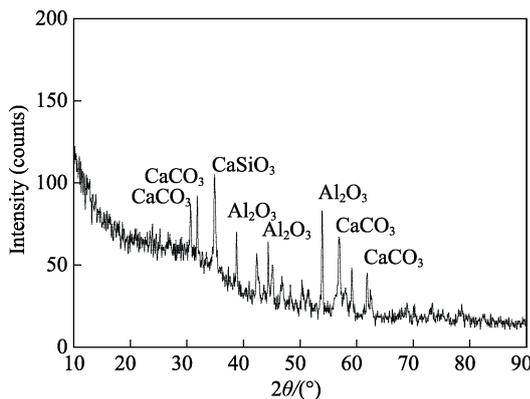


图 5 潮差区腐蚀产物 XRD 分析

Fig.5 XRD analysis of corrosion products in tidal range zone

3 腐蚀速率与点蚀深度分析

海洋不同区带中铝合金的腐蚀速率如图 6 所示。由图 6 可知, 腐蚀速率从大到小依次为: 全浸区、潮差区、大气区。暴露在潮差区的试样处于周期性的干湿交替浸泡状态, 表面供氧充分, 有利于铝合金表面

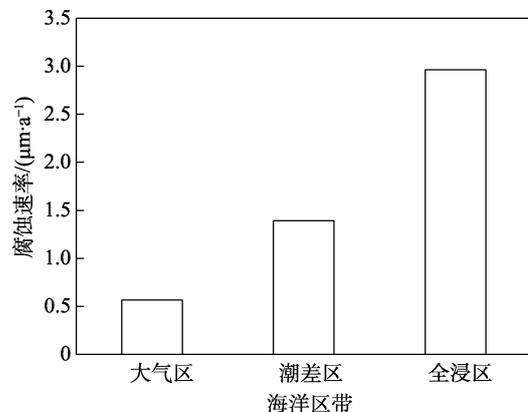


图 6 5083 铝合金在不同海洋区带的腐蚀速率

Fig.6 Corrosion rate of 5083 aluminum alloy in different marine zones

膜破损后的修复, 因此其腐蚀速率低于全浸区。

试样在海洋不同区带的最大点蚀深度如图 7 所示。大气区试样的最大点蚀深度最大, 而潮差区试样的最大点蚀深度最小。这主要是由于在该岛礁海洋大气区, 腐蚀行为的发生是在金属表面薄层电解液下进行的。在大气环境中, 氯离子是促进铝合金点蚀形成和发展的主要原因。氯离子首先吸附在铝合金表面的活性位置 (如氧化膜不完整或材质不均匀处), 发生吸附的粒子与氧化膜发生化学反应, 氧化膜减薄、破裂、裸露铝的直接溶解。氯离子通过竞争吸附^[22], 经过一系列反应, 最终产物为可溶于水的 AlCl₃。

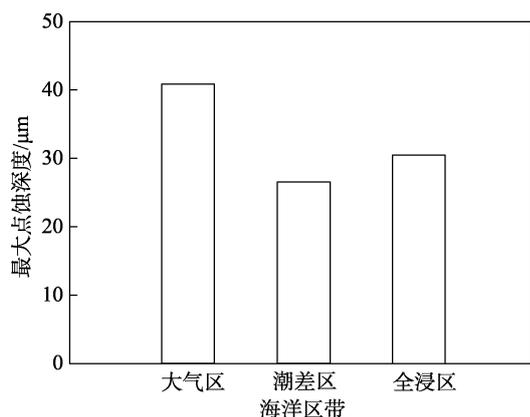


图7 5083 铝合金在不同海洋区带的最大点蚀深度
Fig.7 Maximum pitting depth of 5083 aluminum alloy in different marine zones

4 结论

1) 在某岛礁不同海洋区带环境中, 5083 铝合金的腐蚀速率由大到小依次为: 全浸区、潮差区、大气区。

2) 5083 铝合金在某岛礁不同海洋区带环境中的腐蚀形式以局部腐蚀为主, 大气区试样的最大点蚀深度最大, 潮差区试样的最大点蚀深度最小。

3) 在岛礁不同海洋区带, 试样的腐蚀产物中均含有钙元素, 大气区钙元素含量远低于潮差区和全浸区, 潮差区和全浸区表面腐蚀产物和附着物中主要含有 CaCO_3 、 CaSiO_3 、 Al_2O_3 。

参考文献:

- [1] LIANG Meng-xia, MELCHERS R, CHAVES I. Corrosion and Pitting of 6060 Series Aluminium after 2 Years Exposure in Seawater Splash, Tidal and Immersion Zones[J]. Corrosion Science, 2018, 140: 286-296.
- [2] DAN zhen hua, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Parameters on Marine Corrosion of Aluminium Alloys[J]. Advanced Materials Research, 2012, 569: 95-98.
- [3] EZUBER H, EL-HOUD A, EL-SHAWESH F. A Study on the Corrosion Behavior of Aluminum Alloys in Seawater[J]. Materials & Design, 2008, 29(4): 801-805.
- [4] 崔中雨, 葛峰, 王昕. 几种苛刻海洋大气环境下的海工材料腐蚀机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 403-409.
CUI Zhong-yu, GE Feng, WANG Xin. Corrosion Mechanism of Materials in Three Typical Harsh Marine Atmospheric Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 403-409.
- [5] 赵伊, 曹京宜, 方志刚, 等. 耐蚀高熵合金在岛礁装备中的应用前景[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 42-50.
ZHAO Yi, CAO Jing-yi, FANG Zhi-gang, et al. Application Prospects of Corrosion-resistant High-entropy Alloys in Island and Reef Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 42-50.
- [6] 向永华, 王争荣, 曹京宜, 等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 28-34.
XIANG Yong-hua, WANG Zheng-rong, CAO Jing-yi, et al. Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 28-34.
- [7] SIDDIQUI R A, ABDUL-WAHAB S A, PERVEZ T. Effect of Aging Time and Aging Temperature on Fatigue and Fracture Behavior of 6063 Aluminum Alloy under Seawater Influence[J]. Materials & Design, 2008, 29(1): 70-79.
- [8] 杨博均, 魏木孟, 邓玉, 等. 铝及铝合金在自然水环境中的腐蚀行为对比研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 106-116.
YANG Bo-jun, WEI Mu-meng, DENG Yu, et al. Comparative Study on Corrosion Behavior of Aluminum and Aluminum Alloy in Natural Water Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 106-116.
- [9] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 7B04 铝合金在模拟海洋大气环境下的腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2017, 37(1): 59-64.
WANG Chen-guang, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Corrosion Behavior of 7B04 Al-Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(1): 59-64.
- [10] 邓涛, 王茂川, 许斌, 等. 7050 铝合金硬质阳极氧化膜热带海洋大气环境耐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 101-109.
DENG Tao, WANG Mao-chuan, XU Bin, et al. Corrosion Resistance of 7050 Aluminum Alloy Hard Anodic Oxide Film in Tropical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 101-109.
- [11] 涂扬帆, 冯立明, 方志刚, 等. 海水环境中典型阴离子对 5083 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 电化学, 2017, 23(4): 466-472.
TU Yang-fan, FENG Li-ming, FANG Zhi-gang, et al. Influences of Typical Anions in Seawater Environments on Corrosion Behaviors of 5083 Aluminum Alloy[J]. Journal of Electrochemistry, 2017, 23(4): 466-472.
- [12] 亓云飞, 孙丹丹, 董彩常. 基于数量关系研究铝合金船体点蚀对拉伸性能的影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 59-64.
QI Yun-fei, SUN Dan-dan, DONG Cai-chang. Study on the Effect of Pitting Corrosion of Aluminum Alloy Hull on Tensile Properties Based on Quantitative Relationship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 59-64.
- [13] 胡晓黎, 韩方运, 牛林, 等. 海洋和沿海环境铝大气腐

- 蚀特征及影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 849-853.
- HU Xiao-li, HAN Fang-yun, NIU Lin, et al. Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Corrosion of Aluminum in Marine and Coastal Environments[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(11): 849-853.
- [14] ZAID B, SAIDI D, BENZAIID A, et al. Effects of pH and Chloride Concentration on Pitting Corrosion of AA6061 Aluminum Alloy[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1841-1847.
- [15] 董超芳, 安英辉, 李晓刚, 等. 7A04 铝合金在海洋大气环境中初期腐蚀的电化学特性[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 346-352.
- DONG Chao-fang, AN Ying-hui, LI Xiao-gang, et al. Electrochemical Performance of Initial Corrosion of 7A04 Aluminium Alloy in Marine Atmosphere[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(2): 346-352.
- [16] 刘海霞, 程学群, 李晓刚, 等. A1060 纯 Al 的海洋大气环境腐蚀寿命预测模型研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(4): 349-356.
- LIU Hai-xia, CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang, et al. Prediction Model for Corrosion of Aluminum 1060 in Marine Atmospheric Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(4): 349-356.
- [17] 苏霄. 典型铝合金在模拟海洋大气环境中腐蚀规律研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- SU Xiao. Corrosion Behavior Study of Typical Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.
- [18] 陈珊, 李国明, 常万顺, 等. NaCl 溶液 pH 值对 5083 铝合金腐蚀的影响研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 5-7.
- CHEN Shan, LI Guo-ming, CHANG Wan-shun, et al. Influence of NaCl Solution pH on Corrosion Behavior of AA5083[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 5-7.
- [19] 戴芸, 刘胜胆, 邓运来, 等. 7020 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中的点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(3): 279-286.
- DAI Yun, LIU Sheng-dan, DENG Yun-lai, et al. Pitting Corrosion of 7020 Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(3): 279-286.
- [20] 赵昆璞, 刘宗民, 毛继泽. 潮差区、浪溅区混凝土中的氯离子输运模型及仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7): 950-954.
- ZHAO Kun-pu, LIU Zong-min, MAO Ji-ze. Modeling and Simulation of Chloride Transport in Concrete in Intertidal and Splash Zone Conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(7): 950-954.
- [21] 肖宝靓, 曲凤娇, 尤媛, 等. 船舶用 5083 铝合金在静态海水中的腐蚀性能研究[J]. 有色金属加工, 2020, 49(6): 7-10.
- XIAO Bao-liang, QU Feng-jiao, YOU Yuan, et al. Study on Corrosion Behavior of 5083 Aluminum Alloy for Ships in Static Seawater[J]. Nonferrous Metals Processing, 2020, 49(6): 7-10.
- [22] 方乙君, 柳松, 王雄文, 等. 沿海地区变电站腐蚀现状及防腐措施研究[J]. 电气技术, 2018, 19(12): 97-99.
- FANG Yi-jun, LIU Song, WANG Xiong-wen, et al. Study on Corrosion Status and Anti-Corrosion Measures of Substations in Coastal Areas[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(12): 97-99.

责任编辑: 刘世忠