

两种奥氏体不锈钢酸性盐雾腐蚀行为研究

石瑶, 黄子琳, 袁珂

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: **目的** 研究 0Cr18Ni9 (钝化) 不锈钢与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 不锈钢在酸性盐雾条件下的腐蚀行为, 为发动机零件选材及防护措施的改进提供依据。**方法** 按 GJB 150.11A—2009《军用装备环境试验方法盐雾试验》进行, 调节溶液 pH 到 3.5 ± 0.5 , 以 24 h 喷雾润湿+24 h 干燥为一个循环, 分别开展 2 (96 h)、4 (192 h)、5 (240 h) 个循环的酸性盐雾试验。采用目视、称量、X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 对盐雾腐蚀后试样进行观察及分析。**结果** 0Cr18Ni9 (钝化) 与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 两种奥氏体不锈钢均发生了轻微的腐蚀, 主要为局部腐蚀及均匀腐蚀。**结论** 两种金属在酸性盐雾条件下耐蚀性良好, 且可满足目前海军型发动机对材料耐酸性盐雾腐蚀的要求, 0Cr18Ni9 (钝化) 略优于 0Cr18Ni10Ti (钝化)。

关键词: 奥氏体不锈钢; 酸性盐雾试验; 0Cr18Ni9 (钝化); 0Cr18Ni10Ti (钝化); 腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.009

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0051-07

Corrosion Behavior of Two Kinds of Austenitic Stainless Steel in Acid Salt Spray Test

SHI Yao, HUANG Zi-lin, YUAN Ke

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the corrosion behavior of 0Cr18Ni9 (passivated) and 0Cr18Ni10Ti (passivated) stainless steel in acid salt spray test to provide basis for selection and protection of engine parts. Based on GJB150.11A-2009 "Environmental Test Methods for Military Material-Salt Spray Test", the pH of the solution was adjusted to 3.5 ± 0.5 . With 24h mist spray plus 24h drying as a cycle, two cycles (96 h), 4 cycles (192 h) and 5 cycles (240 h) of acid salt spray tests were carried out. The specimens after acid salt spray test was observed and analyzed by visual check, weighing, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). Both 0Cr18Ni9 (passivated) and 0Cr18Ni10Ti (passivated) had slight corrosion in acid salt spray test. The corrosion is mostly local corrosion and uniform corrosion. Both 0Cr18Ni9 (passivated) and 0Cr18Ni10Ti (passivated) have well corrosion resistance and can meet the requirement of navy engine on acid salt spray corrosion resistance salt spray of materials. But 0Cr18Ni9 (passivated) is a little better than 0Cr18Ni10Ti (passivated).

KEY WORDS: austenitic stainless steel; acid salt spray test, 0Cr18Ni9 (passivated); 0Cr18Ni10Ti (passivated); corrosion

近年来, 各国航空航天工业高速发展, 对金属材料^[1]的耐腐蚀要求越来越高。飞机发动机在服役条件

收稿日期: 2020-03-11; 修订日期: 2020-03-31

Received: 2020-03-11; Revised: 2020-03-31

作者简介: 石瑶 (1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空发动机材料与工艺。

Biography: SHI Yao (1987—), Female, Master, Engineer, Research focus: aero engine materials and technology.

下面临复杂、严酷的自然环境,其腐蚀问题不容忽视。服役在沿海一带的发动机,由于处在高温、高湿、高盐的海洋环境下^[2],其腐蚀问题更为突出。奥氏体不锈钢广泛应用于航空发动机零件,尤其是发动机外部管路、接头等零件。此类零件与外界大气接触,要求在海洋环境下具有良好的耐腐蚀性能。

奥氏体不锈钢中铬的质量分数一般在 0.18 以上,镍的质量分数在 0.08 以上^[3],同时含有钼、铜、硅、铌、钛等合金元素,室温下具有单相奥氏体组织。该类不锈钢在中性盐雾环境下具有良好的耐腐蚀性能^[4],但其在酸性条件下的耐腐蚀性能缺乏研究。0Cr18Ni9 不锈钢与 0Cr18Ni10Ti 不锈钢目前广泛应用于航空发动机外部零件。0Cr18Ni10Ti 在不锈钢工业应用初期,为解决常规 18-8 型奥氏体不锈钢的晶间腐蚀问题,发展了用 Ti 稳定化的奥氏体钢。随着二次精炼工艺引入不锈钢以来,超低碳不锈钢的生产已变得容易,且成本可以接受,钢的耐腐蚀性能较 1Cr18Ni9Ti 优越。

发动机外部零件选用了较多的奥氏体不锈钢,由于直接与外界大气接触,对材料的耐腐蚀性能提出了较高的要求。由于前期各种限制,奥氏体不锈钢酸性盐雾试验研究较少,尤其是长时酸性^[5]条件下的盐雾试验数据较为缺乏。发动机在海洋环境下使用时,选材依据及经验不足^[6]。文中考虑发动机实际服役环境^[7],以国军标为基础,调整盐雾试验 pH 值,选用发动机常用奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9 (钝化)与 0Cr18Ni10Ti (钝化),开展酸性盐雾试验条件下的腐蚀行为研究,为发动机选材提供设计依据。

1 试验

1.1 材料

试验材料为 0Cr18Ni9 与 0Cr18Ni10Ti 试片,规格为 100 mm×50 mm×(2~4) mm,按 HB 5292—1984 对试片表面进行钝化处理,表面粗糙度为 0.6~1.8 μm。两种材料在经过盐雾腐蚀试验之前,使用酒精和超纯水清洗。清洗完毕后,使用冷水吹干,放置于清洗干净的实验容器中,等待下一步酸性盐雾腐蚀实验。

1.2 酸性盐雾试验

按照 GJB 150.11A—2009《军用装备环境试验方法盐雾试验》^[8]进行盐雾试验。采用盐雾腐蚀机 OLT-60A (宁波欧林特机电有限公司)进行,调节盐雾试验箱温度为(35±2)℃,使用稀盐酸(化学纯)或氢氧化钠(化学纯)调整 pH 值到 3.5±0.5。以 24 h 喷雾润湿+24 h 干燥为一个循环,分别开展 2 (96 h)、4 (192 h)、5 (240 h) 个循环的酸性盐雾试验,采用 40%的硝酸清洗 5 min 来去除腐蚀产物。为了保证

盐溶液的沉降率为 1~3 mL/(80 cm²·h),在整个喷雾期间,盐雾沉降率和沉降溶液的 pH 值至少每隔 24 h 测量一次。每种材料分别在经过 96、192、240 h 试验后,各取出 3 片,采用目视、称量、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对盐雾腐蚀后试样进行观察及分析。

2 结果及分析

2.1 腐蚀速率

通过式(1)计算金属材料的腐蚀速率 v_t :

$$v_t = \frac{8.76}{\rho} v \quad (1)$$

式中: v_t 为年腐蚀深度,mm/a; ρ 为实验金属材料的密度,g/cm³; v 为质量损失速率,g/(m²·h)。

通过式(2)计算质量损失速率 v :

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (2)$$

式中: m_0 为腐蚀前试件的质量,g; m_1 为经过一定时间的腐蚀除去表面产物后试件质量,g; S 为试件暴露在腐蚀环境中的面积,m²; t 为试件腐蚀的时间。试样的腐蚀深度选取 3 个不同时间段的 9 个值取平均进行计算,试样腐蚀速率见表 1。

从表 1 中可知,0Cr18Ni10Ti (钝化)的腐蚀速率高于 0Cr18Ni9 (钝化),两种材料的 Cr、Ni 含量相近,腐蚀速率的差异可能是因为 Ti 元素的加入导致不锈钢表面钝化膜的不均匀,促进了点蚀的发生。

2.2 腐蚀形貌分析

0Cr18Ni9 (钝化)与 0Cr18Ni10Ti (钝化)酸性盐雾腐蚀 96、192、240 h 后的外观形貌如图 1 和图 2 所示。随着酸性盐雾腐蚀试验时间的增加,两种不锈钢中间表面开始出现黑色轻微的局部腐蚀^[9],试件边缘出现腐蚀产物。这是由于试件边缘粗糙度大于中间部位,腐蚀优先在粗糙度高的位置产生。盐雾对金属材料表面的腐蚀是由于盐雾沉积在试样表面后,为试样表面创造了一个电解质环境。仅盐雾而言,含有的氯离子穿透金属表面的氧化层和防护层与内部金属发生电化学反应引起腐蚀。同时,氯离子含有一定的水合能,易被吸附在金属表面的孔隙、裂缝处,排挤并取代氧化层中的氧,把不溶性的氧化物变成可溶性的氯化物,使钝化态表面变成活泼表面,对产品造成极坏的不良反应。通常情况下,多组分合金会因为不同组分间生成的氧化物类型不同,而在钝化膜里因晶格错配产生应力及缺陷,在一定程度上增加钝化膜中离子的扩散速率而增加腐蚀速率,所以在缺陷处容易产生点蚀^[10]。盐雾中的氯离子会通过钝化膜中的缺陷,如阳离子空位、晶格间隙等,造成钝化膜中的局部电中性的不平衡,因此增加整体的离子运输,增加

表 1 腐蚀速率
Tab.1 Corrosion rates

Materials	Num-ber	0 h	96 h		192 h		240 h		Density/ (g·cm ⁻³)	Surface area/cm ²	Corrosion rate/ (mm·a ⁻¹)
		Weight/g	Weight/g	Lose weight/g	Weight/g	Lose weight/g	Weight/g	Lose weight/g			
0Cr18Ni9 (passivated)	1-1	121.04	121.0131	0.0269	—	—	—	—	7.93	58	0.041
	1-2	121.3729	121.3482	0.0247	—	—	—	—			
	1-3	119.6614	119.6351	0.0263	—	—	—	—			
	1-4	120.9085	—	—	120.8729	0.0356	—	—			
	1-5	120.513	—	—	120.4827	0.0303	—	—			
	1-6	121.0615	—	—	121.0313	0.0302	—	—			
	1-7	119.0203	—	—	—	—	118.9826	0.0377			
	1-8	119.335	—	—	—	—	119.2893	0.0457			
	1-9	119.7649	—	—	—	—	119.6987	0.0662			
0Cr18Ni10Ti (passivated)	2-1	161.4064	161.3718	0.0346	—	—	—	—	7.95	62	0.0564
	2-2	157.7117	157.6776	0.0341	—	—	—	—			
	2-3	165.4356	165.4008	0.0348	—	—	—	—			
	2-4	152.0631	—	—	152.0138	0.0493	—	—			
	2-5	159.5896	—	—	159.5207	0.0689	—	—			
	2-6	176.5178	—	—	176.4571	0.0607	—	—			
	2-7	171.3767	—	—	—	—	171.3059	0.0708			
	2-8	161.1366	—	—	—	—	161.0742	0.0624			
	2-9	156.758	—	—	—	—	156.6876	0.0704			

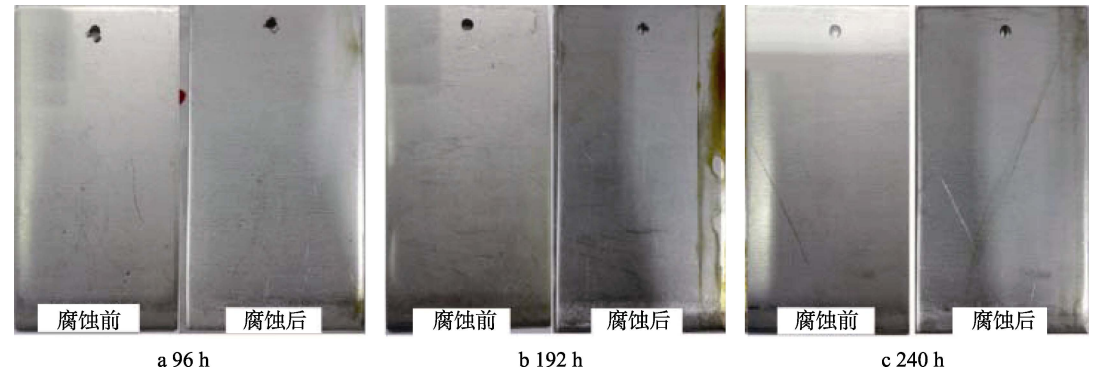


图 1 0Cr18Ni9（钝化）不同盐雾时间对比
Fig.1 Comparison of 0Cr18Ni9 (passivated) after different acid salt spray time

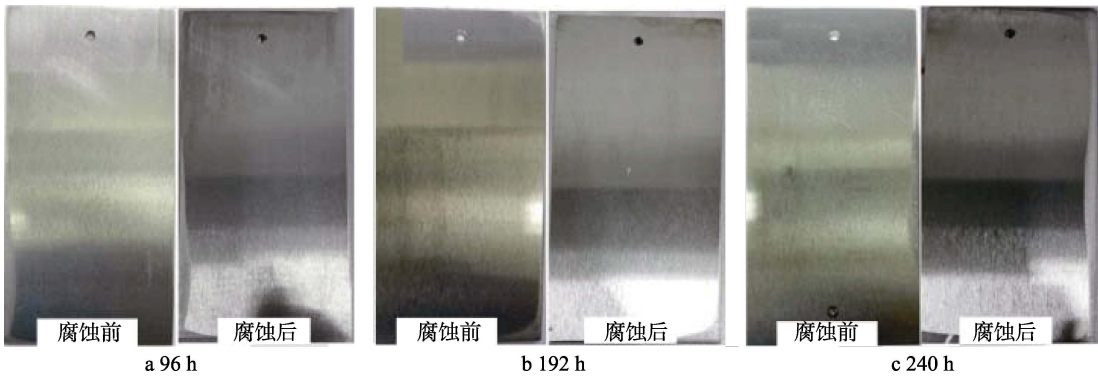


图 2 0Cr18Ni10Ti（钝化）不同盐雾时间对比
Fig.2 Comparison of 0Cr18Ni10Ti (passivated) after different acid salt spray time

不锈钢的腐蚀速率。

0Cr18Ni9 (钝化) 与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 酸性盐雾腐蚀 96、192、240 h 后的 SEM 形貌如图 3 和图 4 所示。经 240 h 酸性盐雾试验后, 0Cr18Ni9 (钝化) 及 0Cr18Ni10Ti (钝化) 表面均出现不同程度的点状腐蚀坑。这是由于在腐蚀时间足够长的时候, 试样表

面以点状腐蚀坑^[11]的形式开始破损, 说明试样在酸性盐雾条件下, 局部的耐蚀性较差, 钝化膜破裂, 出现点蚀。0Cr18Ni10Ti (钝化) 表面的腐蚀坑较 0Cr18Ni9 (钝化) 大, 原因可能是因为虽然 0Cr18Ni10Ti 的 Ti 元素为控制晶间腐蚀的稳定化元素, 但会导致钝化膜的不均匀, 促进点蚀的发生。

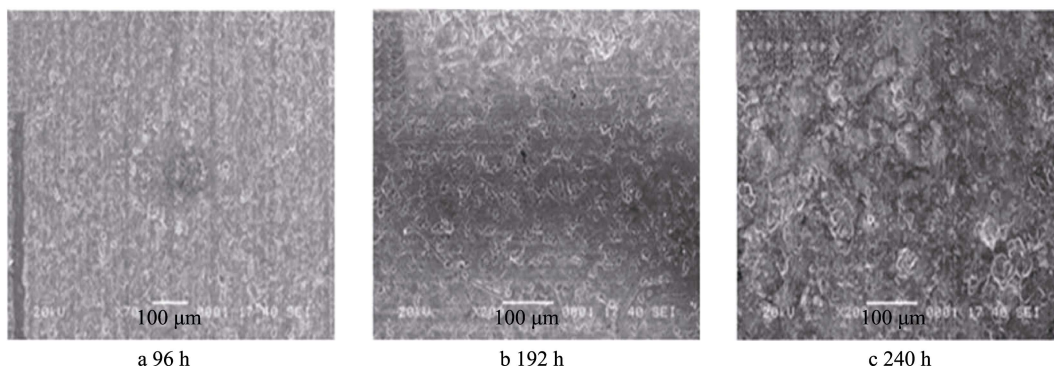


图 3 0Cr18Ni9 (钝化) 经不同时间盐雾试验后的 SEM 形貌
Fig.3 SEM images of 0Cr18Ni9 (passivated) after different acid salt spray time

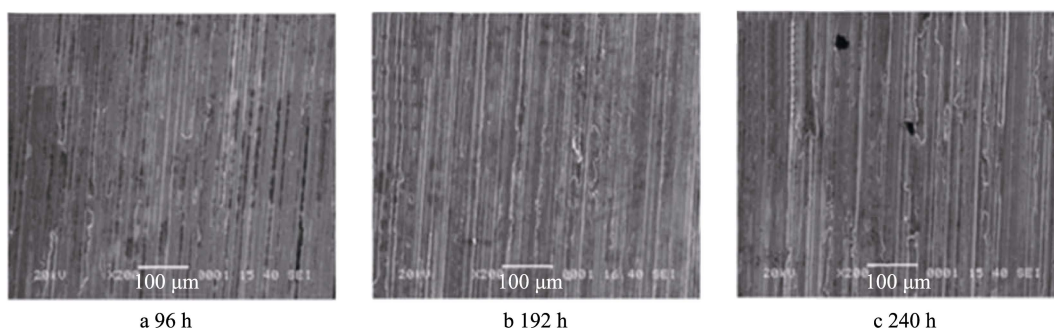


图 4 0Cr18Ni10Ti (钝化) 经不同时间盐雾试验后的的 SEM 形貌
Fig.4 SEM images of 0Cr18Ni10Ti (passivated) after different acid salt spray time.

2.3 XRD 分析

0Cr18Ni9 (钝化) 与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 酸性盐雾腐蚀 96、192、240 h 后的 XRD 分析结果如图 5 所示。随着盐雾时间的增加, 0Cr18Ni9 (钝化) 试样衍射峰发生变化, 位置略有偏移, Cr1.07Fe18.93 峰宽变大, 原因是少量腐蚀产物的夹杂导致结晶度变差^[12]。合金峰强变化不大, 证明钝化膜的厚度较小, 在 X 射线的穿透范围之内。0Cr18Ni10Ti (钝化) 试样衍射峰变化较小, 位置略有偏移, 说明腐蚀产物晶格常数发生变化, 但 XRD 曲线并未检测到有氧化铁, 说明氧化膜较薄。腐蚀过程的本质是一个扩散过程, 在盐雾腐蚀的过程中, 大多数阴离子 (如 Cl^- 、 OH^-) 不断地通过氧化膜进入基体。一般认为, 是通过氧化膜中晶粒的晶界和阴离子空位机制这样的扩散过程进入基体, 因此基体的浅表面内能固溶更多的其他种类离子。对于本工作试样而言, 生成致密的钝化膜是试样耐腐蚀性的根本, 其生成一个致密稳定、均一可靠的钝化膜是防止试样失效的保证。通常, 不锈钢主要依靠生成致密的 Cr_2O_3 来保证钢铁试样具有

较好的耐腐蚀性, 铁本身产生的氧化膜疏松^[13], 不具备防护性能, 而且 Cr_2O_3 这种氧化膜具有自我修复性, 所以不锈钢中 Cr 的含量很大程度上决定了不锈钢的耐腐蚀性^[14], 其机理与其他含 Cr 合金类似 (如 Co-Cr 合金、NiCrB 自熔性合金等)。酸性盐雾环境, 一般不会改变同种金属的腐蚀机制。酸性离子 (H^+) 的存在, 增加了电解质中离子的浓度, 因此增加了整体反应的强度, 导致腐蚀加强^[15]。同时, 因为 H^+ 会扩散到钝化膜^[16]的晶格中, 改变局部电中性, 增加了钝化膜晶粒中的缺陷, 因此提高了离子输运的速度, 所以腐蚀也会加强。虽然从 SEM 的结果来看, 0Cr18Ni10Ti (钝化) 的点蚀较 0Cr18Ni9 (钝化) 严重, 但根据 XRD 的结果, 除点蚀部位外, 其表面整体的腐蚀较 0Cr18Ni9 (钝化) 轻。

2.4 EDS 分析

对 192 h 酸性盐雾腐蚀后 0Cr18Ni9 (钝化) 与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 试样的腐蚀部位进行 EDS 分析, 结果如图 6 所示。可以发现, 两种试样的主要腐蚀产

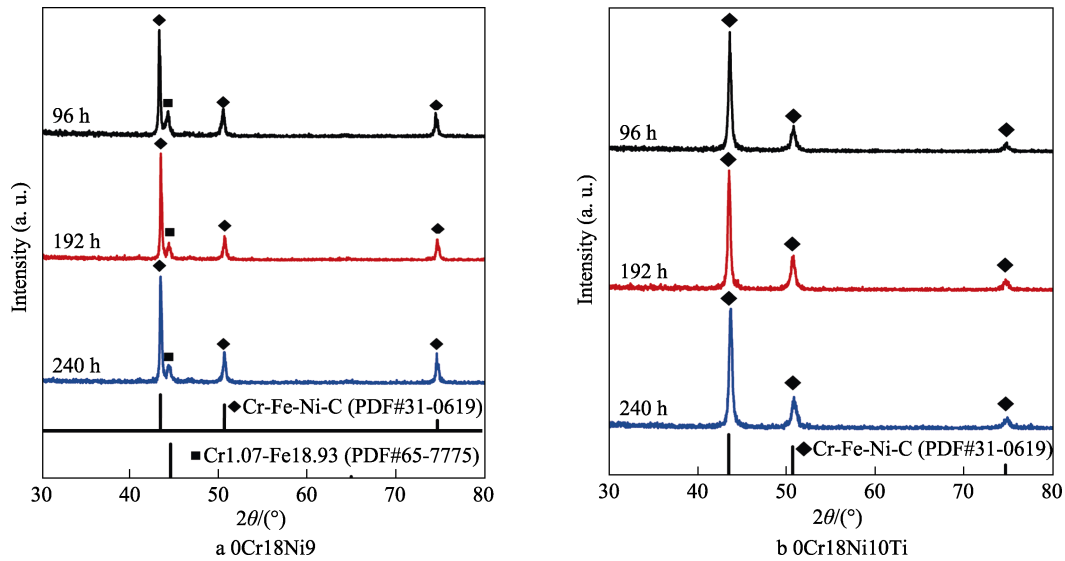


图 5 两种不锈钢在不同时间盐雾试验后的 XRD 图
Fig.5 XRD diagram of two kinds of stainless steel after different acid salt spray time

物为铁的氧化物、铬的氧化物和镍的氧化物^[17]，主要为 Fe_2O_3 、 NiO 、 Cr_2O_3 等。盐雾腐蚀过程中，盐雾中的 OH^- 与基体发生反应，生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 及 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 。氢氧化物发生水解，最后以氧化物的形式留在试样表面。检测到的三种金属成分在合金中均存在，说明在腐蚀过程中三种元素均会被腐蚀。铬和镍元素是不锈钢获得耐腐蚀性能最主要的合金元素^[18]，使不锈钢在氧化性介质中生成一层十分致密的氧化膜，使不锈钢钝化，降低不锈钢在氧化性介质中的腐蚀速度，使不锈钢的耐腐蚀性能提高^[19]。两种材料的能谱分析结果中，Cr 元素比铁元素少，说明 Cr

的氧化膜可能发生了破坏，使得外界腐蚀物质与 Fe 发生反应，生成了 Fe 的氧化膜；或者可能是外界的 Cl^- 穿过 Cr 和 Ni 的钝化膜^[20]，到达金属表面，并与金属相互作用，形成了可溶性化合物，使氧化膜的结构发生变化，金属产生腐蚀。结合表面形貌，说明这两种奥氏体不锈钢材料局部在酸性盐雾环境的耐受性一般，具有良好耐受性的钝化膜已经被破坏或外界腐蚀物质穿过钝化膜后腐蚀金属。由于奥氏体不锈钢的 Cr 含量较高，出现这种情况的原因可能是试样表面的质量存在差异，腐蚀优先在有缺陷的位置形成。

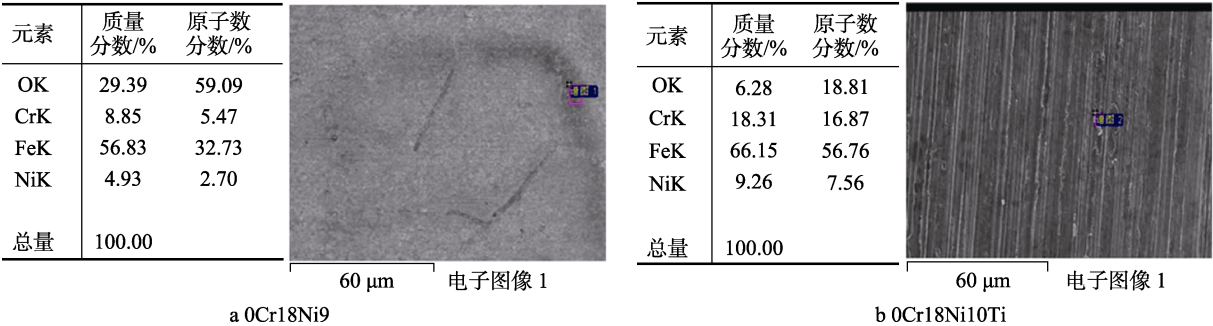


图 6 两种不锈钢经 192 h 盐雾腐蚀后腐蚀产物的 EDS 分析
Fig.6 EDS analysis of two kinds of stainless steel corrosion product after 192 h salt spray corrosion

3 结论

- 1) 0Cr18Ni9 (钝化) 试样局部发生腐蚀，主要以均匀腐蚀为主，腐蚀产物主要为铁的氧化物。随着盐雾时间变长，衍射峰发生变化，位置略有偏移，Cr1.07Fe18.93 峰宽变大，原因是少量腐蚀产物的夹杂导致结晶度变差。经 XRD 分析可知，腐蚀产物主要为氧化铁和铬的氧化物。
- 2) 0Cr18Ni10Ti 试样局部耐蚀性较差，钝化膜发

生破裂或腐蚀物质穿过钝化膜与金属发生反应，出现点蚀。随着时间的增加，点蚀坑尺寸变大，且向内部扩展。Ti 元素的加入会导致钝化膜不均匀，促进点蚀的发生。XRD 曲线并未检测到有氧化铁，随着盐雾时间变长，衍射峰变化较小，位置略有偏移，说明表面腐蚀较轻，腐蚀产物较少，腐蚀产物氧化膜较薄。

3) 0Cr18Ni9 (钝化) 与 0Cr18Ni10Ti (钝化) 两种奥氏体不锈钢均发生了轻微的腐蚀，主要为局部腐蚀及均匀腐蚀。从腐蚀速率来看，0Cr18Ni9 (钝化)

的腐蚀较轻。从 SEM、XRD 及 EDS 的结果来看, 0Cr18Ni9 (钝化) 的局部腐蚀较轻。除点蚀部位外, 0Cr18Ni10Ti (钝化) 表面整体的腐蚀较轻。两种奥氏体不锈钢在文中酸性盐雾条件下耐腐蚀能力相当, 0Cr18Ni9 (钝化) 略优于 0Cr18Ni10Ti (钝化)。

4) 两种金属在酸性盐雾试验条件下耐蚀性良好, 且可满足目前海军型发动机对材料耐酸性盐雾腐蚀的要求。结合发动机实际使用情况, 若两种材料在酸性盐雾环境下长时间使用, 尤其是 0Cr18Ni10Ti, 需重点关注局部腐蚀问题, 提高零件表面质量, 减少表面缺陷, 必要时需增加如涂层等表面防护措施。

参考文献:

- [1] 李松梅, 刘建华, 孙忠志, 等. 模拟服役环境中航空导管连接件耐蚀性能研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(4): 430-433.
LI Song-mei, LIU Jian-hua, SUN Zhong-zhi, et al. Study on Corrosion Resistance of Aviation Conduit Connectors in Simulated Service Environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31 (4): 430-433.
- [2] DHANAPAL A, RAJENDRA BOOPATHY S, BALASUBRAMANIAN V. Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AZ61A Magnesium Alloy Welds Immersed in NaCl Solutions[J]. Transaction Nonferrous Metal Society China, 2012(22): 793-802.
- [3] 黄玲艳, 唐强, 张波. 不锈钢螺栓法兰连接失效分析及预防措施[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 1-4.
HUANG Ling-yan, TANG Qiang, ZHANG Bo. Analysis and Preventive Measures on Connection Failure of Stainless Steel Bolt Flange[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 1-4.
- [4] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社 2016.
LIU Dao-xin. Corrosion and Protection of Materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2016.
- [5] 孙盛坤, 孙志华, 汤智慧, 等. 舰载飞机腐蚀控制与防护技术[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 18-22.
SUN Sheng-kun, SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, et al. Corrosion Control and Protection Technology of Carrier-borne Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 18-22.
- [6] 郭振华, 宋岩, 胡湘洪. 机载产品盐雾试验结果评定判据分析与探讨[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 1-5.
GUO Zhen-hua, SONG Yan, HU Xiang-hong. Evaluation Criterion of Salt Spray Test Results about Airborne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 1-5.
- [7] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 65-69.
MA Chang-li, MA Rui-ping, BAI Yun-hui. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 65-69.
- [8] GJB 150. 11A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾[S].
GJB 150. 11A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Material—Part 11: Salt Fog Test[S].
- [9] 彭文山, 侯健, 郭为民, 等. 西沙海洋大气环境中典型材料腐蚀形貌识别[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 1-7.
PENG Wen-shan, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Corrosion Morphology Identification of Typical Materials in Xisha Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 1-7.
- [10] 任勇, 成光. 海洋环境金属材料腐蚀与防护仿真研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 93-98.
REN Yong, CHENG Guang. Research Progress on Corrosion and Protection Simulation of Metal Materials in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 93-98.
- [11] 丁康康, 郭为民, 张彭辉, 等. 几种典型金属材料西沙海洋飞溅区腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 51-57.
DING Kang-kang, GUO Wei-min, ZHANG Peng-hui, et al. Corrosion Behavior of Typical Metal Materials in Xisha Marine Splash Zone[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(2): 51-57.
- [12] 倪晓蕊. 水化学因子对 304 不锈钢钝化膜的修复影响[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2004.
NI Xiao-rui. The Effect of Hydrochemical Factor on the Repair of 304 Stainless Steel Passivation Film[D]. Baoding: China Electric Power University (Hebei), 2004.
- [13] 杨丽媛, 徐璐, 高蒙, 等. 直升机结构钢涂层体系防护性能在模拟海洋大气环境中的变化[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 49-53.
YANG Li-yuan, XU Lu, GAO Meng, et al. Degradation of Protective Properties of Coatings on Structural Steel Used on Helicopter in Simulated Ocean Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 49-53.
- [14] 张晓东, 胡裕龙, 卜世超, 等. 船体钢海水腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 33-40.
ZHANG Xiao-dong, HU Yu-long, BU Shi-chao, et al. Research Progress in Seawater Corrosion of Hull Structural Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(6): 33-40.
- [15] 范林, 丁康康, 王锐, 等. 10CrNi3MoV 船用钢港口环境腐蚀行为对比研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 14-19.
FAN Lin, DING Kang-kang, WANG Rui, et al. Comparison on Marine Corrosion Behavior of 10CrNi3MoV Steel in Typical Harbors of China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 14-19.

- [16] 刘殿宇, 王毛毛, 张亮, 等. 316L 不锈钢在海洋深水环境中的局部腐蚀规律[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 102-106.
LIU Dian-yu, WANG Mao-mao, ZHANG Liang, et al. Localized Corrosion Law of 316L Stainless Steel in Deep Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(1): 102-106.
- [17] 魏刚, 韩新罡, 雷其林, 等. ZL114A 微弧氧化膜层的耐蚀性能研究[J]. 加工制造技术, 2017, 46(14): 180-182.
WEI Gang, HAN Xin-gang, LEI Qi-lin, et al. Research on Corrosion Resistance of Micro-arc Oxidation Film on ZL114A[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(14): 180-182.
- [18] 石振家, 王雷, 陈楠, 等. 耐候钢表面锈层及其稳定化处理现状与发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 503-508.
SHI Zhen-jia, WANG Lei, CHEN Nan, et al. Current Situation and Development Trend of Surface Rust Layer and Stabilization Treatment of Weathering Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 503-508.
- [19] 夏昕鸣, 邢路阔, 宋泓清, 等. 模拟南海大气环境下耐候钢腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 39-44.
XIA Xin-ming, XING Lu-kuo, SONG Hong-qing, et al. Corrosion Resistance of Weathering Steels in Simulated South China Sea Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 39-44.
- [20] 李超, 吴恒, 张波, 等. 典型不锈钢在淡化海水中的耐腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 67-71.
LI Chao, WU Heng, ZHANG Bo, et al. Corrosion Resistance of Stainless Steel in Desalinated Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(2): 67-71.