

几种结构钢和不锈钢的耐海洋 大气腐蚀性能研究

杨丽媛¹, 赵春玲², 邸士雄², 孙志华¹, 詹中伟¹, 赵明亮¹

(1.北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: **目的** 研究服役于海洋大气环境中的几种典型钢材的耐腐蚀性能。**方法** 通过酸性盐雾、湿热、酸性大气等试验方法研究钢材在海洋大气环境服役过程中的耐腐蚀性能。**结果** 在海洋大气环境中, 通常含铬量较高的不锈钢耐腐蚀性能较为优异, 含铬量较低的不锈钢材料耐腐蚀性能较差。结构钢在海洋大气环境下易腐蚀。钝化处理能明显提高不锈钢的耐腐蚀性能, 但仍然难以保护不锈钢在长期海洋大气环境作用下不受侵蚀, 无机铝涂料对钢材具有优异的防护性能, 而镀银层将加剧钢材基体腐蚀。此外, 粗糙表面易诱发不锈钢发生腐蚀。**结论** 在海洋大气环境服役时, 不锈钢应采取钝化处理, 提高其耐腐蚀性能。对于结构钢和铬含量较低的不锈钢, 可采取涂覆无机铝涂层的方式, 通过牺牲阳极作用有效保护基体免受侵蚀。在设计阶段, 还应注意外露部位的表面粗糙度设计, 尽量防止或减小不锈钢腐蚀现象的发生。

关键词: 不锈钢; 结构钢; 耐腐蚀性; 海洋大气环境

中图分类号: TJ85; TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0009-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.06.002

Corrosion Resistance of Some Structural Steels and Stainless Steels in Ocean Atmospheric Environment

YANG Li-yuan¹, ZHAO Chun-ling², DI Shi-xiong², SUN Zhi-hua¹, ZHAN Zhong-wei¹, ZHAO Ming-liang¹

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation

Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

ABSTRACT: This paper aims to study corrosion resistance of some structural steels and stainless steels that serves in ocean atmospheric environment. Corrosion resistance of some steels in ocean atmospheric environment was evaluated via several environmental test methods for simulation of the typical ocean environment characteristics. Generally, the corrosion resistance of stainless steel with high chromium content was excellent, while the corrosion resistance of stainless steel with low chromium content was poor in ocean atmospheric environment. Structural steels are susceptible to corrosion in ocean atmospheric environment. Passivation treatment obviously improved the corrosion resistance of stainless steel. However, it was still difficult to

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-24

Received: 2021-03-25; Revised: 2021-05-24

作者简介: 杨丽媛(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空发动机腐蚀防护与控制、环境试验等。

Biography: YANG Li-yuan (1991—), Female, Master, Engineer, Research focus: corrosion protection and control of aeroengine, environmental test.

引文格式: 杨丽媛, 赵春玲, 邸士雄, 等. 几种结构钢和不锈钢的耐海洋大气腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 009-016.

YANG Li-yuan, ZHAO Chun-ling, DI Shi-xiong, et al. Corrosion resistance of some structural steels and stainless steels in ocean atmospheric environment[J]. equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 009-016.

protect stainless steel from corrosion under long-term ocean atmospheric environment. Inorganic Aluminum Coating has excellent protection performance for steels, while silver plating accelerated the corrosion of steel substrate. In addition, the corrosion problems were likely to occur on the rough surface. When serving in ocean atmospheric environment, stainless steels should be passivated to improve the corrosion resistance. Inorganic Aluminum Coating can be used to protect structural steels and stainless steel with low chromium content from corrosion by the anodic protection, it is also notable to the design of the surface roughness in the design stage. The above methods can prevent or reduce the occurrence of stainless steel corrosion.

KEY WORDS: stainless steel; structural steel; corrosion resistance; ocean atmospheric environment

与内陆大气环境相比,海洋大气潮湿,盐雾重,使得在海洋环境服役的航空发动机经受着严酷的腐蚀考验^[1-4]。目前,不锈钢和结构钢在航空发动机中用量仍然较多,其腐蚀严重影响了发动机的服役寿命,因此多种钢材的耐海洋大气腐蚀性能成为值得关注的问题^[5]。

航空发动机常用典型钢材的主要类型有结构钢、马氏体不锈钢、奥氏体不锈钢。钢是通过形成钝化膜来抵御腐蚀作用的,但钝化膜不是完全均匀致密的,往往在出现缺陷、夹杂物、贫铬区、晶界、位错等的地方,钝化膜性能最差。

海洋大气环境中,Cl⁻具有极强的穿透性,从薄弱部位破坏了钝化膜结构,进而引起了钢的腐蚀,如点蚀^[6-8]等。针对航空发动机不锈钢的腐蚀问题,通常采用钝化处理、防腐涂层等方法进行防护。其中,防腐涂层是在现有发动机部件的表面涂覆一层涂层,以减缓或阻止海洋环境等对部件基体的腐蚀^[9]。欧美国家对航空发动机压气机叶片表面的防护广泛应用了无机盐铝涂层材料体系。该类防护涂层具有耐冲刷、抗腐蚀的特点,可以在一定温度范围内(一般≤

650℃)保护钢和铁基合金材料。该类产品包括英国的IP9183(底涂料)+IP9444(光滑面层涂料),美国的SermeTel-W铝涂层^[10],国内北京航空材料研究院开发的TWL-12底层+TWL-20面漆无机盐铝涂层^[11]、北方工程设计研究院有限公司的TW7系列涂层等。目前,针对上述航空发动机用钢及其防护工艺耐海洋大气腐蚀性能的数据积累和相关研究尚不充足,因此笔者课题组近几年对多种航空发动机用钢材及其典型防护工艺的耐海洋大气环境性能开展了评价研究。文中总结归纳了近几年的相关研究成果,并探讨了材料成分、表面防护和表面状态等对钢材的海洋大气腐蚀行为的影响。

1 试验

1.1 方法

采取酸性盐雾、湿热、酸性大气等试验方法研究海洋大气环境下典型腐蚀因素的腐蚀作用,采取自然大气环境暴露试验方法研究真实海洋大气环境的综合腐蚀作用。具体腐蚀试验方法见表1。

表1 腐蚀试验方法
Tab.1 Corrosion test methods

序号	试验名称	参考标准	主要试验条件和要求
1	盐雾试验(酸性)	GJB 150.11A—2009 ^[12]	盐溶液质量浓度为(50±5) g/L,采用硫酸或氢氧化钠调节pH值为3.5±0.5,试验温度为(35±2)℃,80 cm ² 水平面积的平均沉降率为1.0~3.0 mL/h。单次循环周期为48 h(24 h连续喷雾+24 h干燥),循环次数为4次/8天(192 h)
2	湿热试验	GJB 150.9A—2009 ^[13]	以24 h为1个循环,循环方式为第0~2 h温度由30℃升至60℃,第4~8 h保温,第8~16 h由60℃降至30℃,第16~24 h保温,除了在温度下降期间相对湿度可以降至85%外,在其他所有时间内,相对湿度应保持为95%±5%,循环15次
3	酸性大气试验	GJB 150.28—2009 ^[14]	溶液浓度为(11.9 mg 硫酸+8.8 mg 硝酸)/4 L,采用盐酸或氢氧化钠调节溶液pH值为3.5±0.5,试验温度为(35±2)℃,80 cm ² 水平面积的平均沉降率为1.0~3.0 mL/h。单次循环周期为喷雾2 h、贮存22 h,循环3次
4	自然大气环境暴露试验	GB/T 14165—2008 ^[15]	在西沙/南沙棚下进行,试验时间为6个月

1.2 耐腐蚀性能评价

目测检查（试验件外观）借用放大镜进行，试验件表面的宏观腐蚀现象采用 NiKon D50 数码相机在荧光灯下进行拍照记录。采用 VHX-100K 视频显微镜，对腐蚀过程中的表面微观形貌进行观察分析和腐蚀深度测量。按照 GB/T 16545—2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》^[16]对不锈钢表面的腐蚀产物进行清除，然后用去离子水和乙醇进行超声清洗，用吹风机吹干后称量。

2 结果及分析

2.1 材料成分的影响

几种钢的腐蚀试验结果统计见表 2。经过 192 h 酸性盐雾试验后，40CrNiMoA 结构钢表面生成大量红锈，并出现红锈剥落现象，腐蚀面积达 100%，发生严重腐蚀，如图 1a 所示。经过 72 h 酸性大气试验后，3Cr13 不锈钢表面约 90%面积出现红锈，发生较严重腐蚀，如图 1b 所示。经过 192 h 酸性盐雾试验后，0Cr17Ni4Cu4Nb 和 0Cr18Ni9 不锈钢表面考核区域未出现腐蚀现象，1Cr17Ni7 不锈钢表面仅轻微腐蚀，腐蚀面积约 5%，如图 1c、d 所示。由此可见，结构钢和 Cr 含量较低的不锈钢耐海洋大气环境性能较差，Cr 含量较高的不锈钢耐海洋大气环境性能相对较好。原因是：钢是通过形成钝化膜来抵御腐蚀作用的，而海洋环境中的 Cl⁻具有极强的穿透性，能够

破坏钝化膜的结构。Cr 元素能够使金属钝化膜的自身修复能力明显提高，因此 Cr 含量是影响不锈钢耐腐蚀性能的关键因素之一。40CrNiMoA 结构钢的 Cr 含量较低，无法形成钝化膜，因此耐蚀性很差。3Cr13 不锈钢的 Cr 含量为 12%~14%（质量分数）时，在海洋环境下钝化膜的自愈合能力不足，依然无法抵抗酸性大气的侵蚀。对于 0Cr17Ni4Cu4Nb、0Cr18Ni9 和 1Cr17Ni7 不锈钢，Cr 含量不低于 17%，同时在 Ni 等有益合金元素的作用下，使金属钝化膜的自身修复能力明显提高，不锈钢的耐腐蚀性能明显提高。

表 2 几种钢的腐蚀试验结果
Tab.2 Corrosion test results of several steels

序号	类型	合金实例	试验项目	结果
1	结构钢	40CrNi-MoA	酸性盐雾试验	严重腐蚀，腐蚀面积 100%
2	马氏体不锈钢	3Cr13	酸性大气试验	严重腐蚀，腐蚀面积约 90%
3	马氏体沉淀硬化不锈钢	0Cr17Ni4-Cu4Nb	酸性盐雾试验	无明显变化（孔周围腐蚀，不考核）
4	奥氏体不锈钢	1Cr17Ni7	酸性盐雾试验	轻微腐蚀，腐蚀面积约 5%
5	奥氏体不锈钢	0Cr18Ni9	酸性盐雾试验	无明显变化（孔周围腐蚀，不考核）

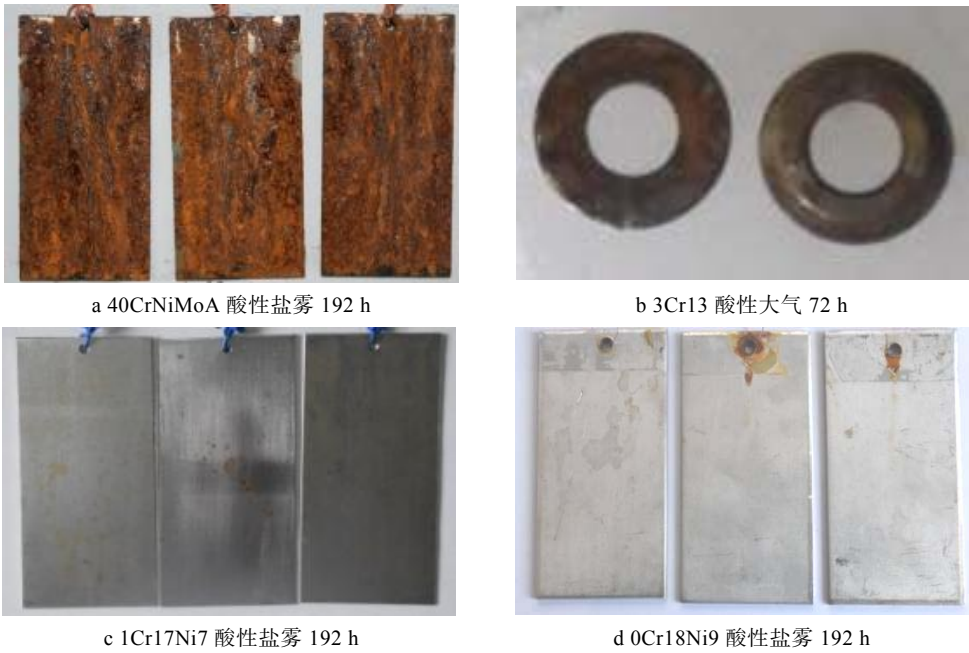


图 1 几种钢腐蚀试验后的外观

Fig.1 Pictures of several steels after corrosion tests: a) 40CrNiMoA after 192 h acidic salt spray test; b) 3Cr13 after 72 h acidic atmosphere test; c) 1Cr17Ni7 after 192 h acidic salt spray test; d) 0Cr18Ni9 after 192 h acidic salt spray test

2.2 表面防护技术的影响

1) 钝化处理。提高不锈钢耐腐蚀性能最常用的方式是采取钝化处理。该部分对比了几种不锈钢在钝化和未钝化两种状态下的腐蚀试验结果,见表3。经过酸性盐雾、酸性大气、湿热腐蚀试验后,钝化和未钝化状态下的0Cr17Ni4Cu4Nb、0Cr18Ni9和316L等3种不锈钢合金,均未发生腐蚀,说明3种不锈钢合金自身的耐腐蚀性能良好。在西沙、南沙海洋大气自然环境试验中,

未钝化处理和钝化处理后的0Cr17Ni4Cu4Nb合金均发生腐蚀,但钝化处理后合金的腐蚀面积相对较小,说明钝化处理有效提高了0Cr17Ni4Cu4Nb合金的耐海洋大气环境腐蚀性能,如图2所示。原因是:进行钝化处理时,在氧化性介质中,不锈钢表面会形成一层致密、均匀的 Cr_2O_3 钝化膜,使得膜层中铬元素的含量明显增加。这不仅提高了钝化膜的稳定性,而且使膜层自修复能力大大提高^[17-18]。

表3 钝化/未钝化不锈钢腐蚀试验结果
Tab.3 Corrosion test results of passivated/non passivated steels

序号	材料和表面处理	试验项目	试验结果
1	0Cr17Ni4Cu4Nb/未钝化	酸性盐	无明显变化(除打孔处)
2		酸性大气	无明显变化
3		西沙海洋大气环境暴露	1个月轻微腐蚀,腐蚀面积10% 3个月明显腐蚀,腐蚀面积30% 6个月明显腐蚀,腐蚀面积30%
4		南沙海洋大气环境暴露	1个月轻微腐蚀,腐蚀面积10% 3个月明显腐蚀,腐蚀面积20% 6个月明显腐蚀,腐蚀面积30%
5	0Cr17Ni4Cu4Nb/钝化	酸性盐雾	无明显变化(除打孔处)
6		湿热	无明显变化
7		酸性大气	无明显变化
8		西沙海洋大气环境暴露	1个月轻微腐蚀,腐蚀面积低于5% 3个月明显腐蚀,腐蚀面积20% 6个月明显腐蚀,腐蚀面积20%
9		南沙海洋大气环境暴露	1个月轻微腐蚀,腐蚀面积低于5% 3个月明显腐蚀,腐蚀面积20% 6个月明显腐蚀,腐蚀面积20%
10	0Cr18Ni9/未钝化	酸性盐雾	无明显变化(除打孔处)
11		湿热	无明显变化
12		酸性大气	无明显变化
13	0Cr18Ni9/钝化	酸性盐雾	无明显变化(除打孔处)
14		湿热	无明显变化
15		酸性大气	无明显变化
16	316L(022Cr17Ni12Mo2)/未钝化	酸性盐雾	无明显变化
17		酸性大气	无明显变化
18	316L(022Cr17Ni12Mo2)/钝化	酸性盐雾	无明显变化

为了进一步对比分析钝化处理对不锈钢耐腐蚀性能的提高程度,选取南沙海洋大气暴露试验结果进行分析,如图3所示。进行试验的不锈钢腐蚀区域表面局部存在较多点蚀坑,点蚀坑大小不一,未钝化的合金表面腐蚀坑更加密集、数量更多。未钝化和钝化的0Cr17Ni4Cu4Nb试片的平均腐蚀深度分别为17.4、14.4 μm ,腐蚀深度减小程度约为17%。未钝化处理和经过钝化处理的0Cr17Ni4Cu4Nb合金的腐蚀速率分别为23.45、8.93 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,腐蚀速率降低程度达到60%以上。由此可见,钝化处理明显提高了0Cr17Ni4Cu4Nb合金的耐海洋大气环境腐蚀性能,但仍然难以保护不锈钢在长期海洋大气环境作用下不受侵蚀。

2) 无机盐铝涂层。针对几种常见的无机铝涂层开展腐蚀试验,结果见图4和表4。可以看出,分别涂覆IP9183底涂料+IP9444面涂料、TWL-12底层+TWL-20面层、TW-7无机漆的不锈钢试片经过酸性盐雾、湿热、海洋大气环境暴露等试验后,仅涂层出现少量白色腐蚀产物,钢基体(包括耐蚀性较差的30Cr3MoA结构钢)未出现红锈,说明几种涂层均具有优异的防护性能。无机铝涂层的防护机理是基于涂层中的铝对钢基体的电化学保护作用,电极较低的Al首先发生氧化,因失去电子不断遭受腐蚀,而电位较高的钢基体是阴极,因不断得到电子而受到保护。

3) 镀银。镀银表面处理在航空发动机不锈钢上

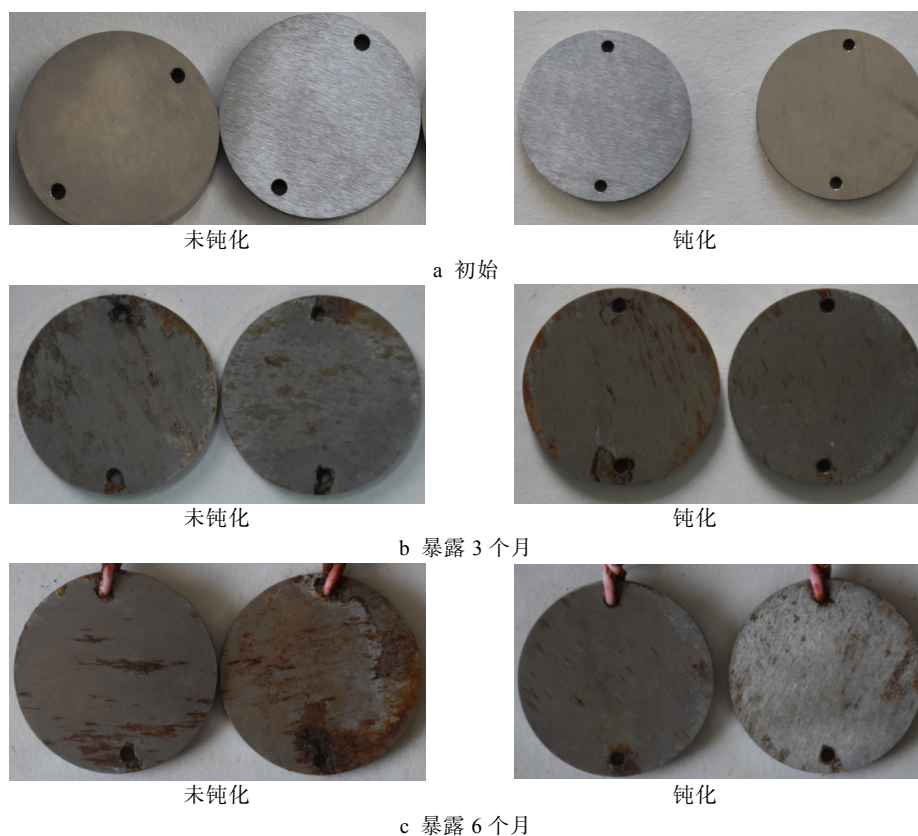


图 2 0Cr17Ni4Cu4Nb 未钝化/钝化试片南沙海洋大气环境暴露试验照片

Fig.2 Pictures of passivated/non passivated 0Cr17Ni4Cu4Nb samples after marine atmospheric corrosion testing in Nansha: a) original; b) exposed for 3 months; c) exposure for 6 months

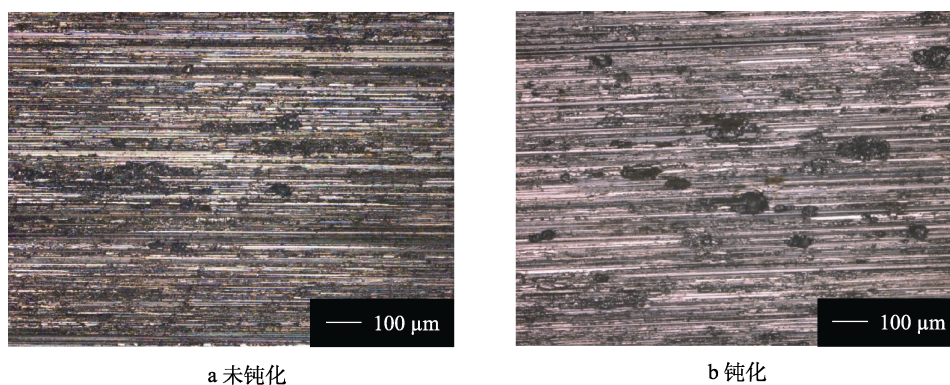
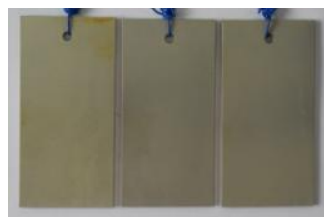
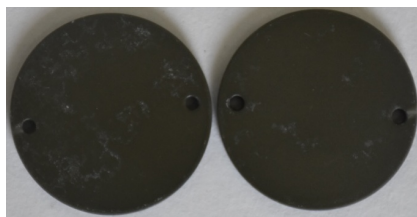


图 3 0Cr17Ni4Cu4Nb 未钝化/钝化试片南沙海洋大气环境暴露试验 6 个月后的点蚀形貌

Fig.3 Optical images of corrosion pits on (a) passivated, (b) non passivated 0Cr17Ni4Cu4Nb sample after 6 months of marine atmospheric corrosion testing in Nansha



a 13Cr15Ni4Mo3N+(IP9183 底涂料+ IP9444 面涂料)酸性盐雾 192 h



b 0Cr17Ni4Cu4Nb+(TWL-12 底层+ TWL-20 面层)西沙海洋大气环境暴露试验 6 个月



c 0Cr18Ni9+TW-7 无机漆酸性盐雾 192 h

图 4 涂覆无机铝涂料的钢材腐蚀试验照片

Fig.4 Pictures of steels coated with inorganic aluminum coatings after corrosion test: a) 13Cr15Ni4Mo3N+(IP9183+ IP9444) after 192 h acidic salt spray test; b) 0Cr17Ni4Cu4Nb+(TWL-12+ TWL-20) after 6 months of marine atmospheric corrosion testing in Xisha; c) 0Cr18Ni9+TW-7 after 192 h acidic salt spray test

表 4 涂覆无机铝涂料的钢材腐蚀试验结果

Tab.4 Corrosion test results of steels coated with inorganic aluminum coatings

序号	材料及表面处理	试验项目	试验结果
1	13Cr15Ni4Mo3N+(IP9183 底涂	酸性盐雾	无明显变化
2	料+ IP9444 面涂料)	湿热	基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物
3	1Cr16Co5Ni2MoWVNbN+	酸性盐雾	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
4	(TWL-12 底层+ TWL-20 面层)		
4	0Cr17Ni4Cu4Nb+(TWL-12 底	西沙海洋	1 个月基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物, 腐蚀面积低于 5%
	层+ TWL-20 面层)	大气环境	3 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积 5%左右
		暴露	6 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积 5%左右
5		南沙海洋	1 个月基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物, 腐蚀面积低于 5%
		大气环境	3 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 5%
		暴露	6 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 5%
6		西沙海洋	1 个月基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物, 腐蚀面积低于 5%
		大气环境	3 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 10%
		暴露	6 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 10%
7		南沙海洋	1 个月基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物, 腐蚀面积低于 5%
		大气环境	3 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 10%
		暴露	6 个月基体未腐蚀, 涂层腐蚀面积低于 10%
8	30Cr3MoA+TW-7 无机漆	酸性盐雾	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
9		湿热	基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物
10		酸性大气	无明显变化
11	1Cr12Ni3Mo2V+TW-7 无机漆	酸性盐雾	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
12		湿热	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
13		酸性大气	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
14	0Cr18Ni9+TW-7 无机漆	酸性盐雾	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
15		湿热	基体未腐蚀, 涂层出现少量白色腐蚀产物
16		酸性大气	基体未腐蚀, 涂层出现微量白色腐蚀产物

表 5 表面镀银的钢材腐蚀试验结果汇总

Tab.5 Corrosion test results of silver-plate steels

序号	材料及表面处理	试验项目	试验结果
1	40CrNiMoA+镀银	酸性盐雾	严重腐蚀
2		湿热	轻微腐蚀
3	1Cr17Ni2+镀银	酸性盐雾	明显腐蚀
4		湿热	无明显变化
5		酸性大气	轻微腐蚀
6	1Cr18Ni9Ti+镀银	酸性盐雾	明显腐蚀
7		湿热	轻微腐蚀, 出现若干红锈点
8		酸性大气	轻微腐蚀, 大量细小红色锈蚀点



a 40CrNiMoA+镀银酸性盐雾 192 h



b 1Cr17Ni2+镀银酸性盐雾 192 h



c 1Cr18Ni9Ti+镀银酸性盐雾 192 h

图 5 表面镀银的钢材腐蚀试验照片

Fig.5 Picture of silver-plate steels after corrosion tests: a) silver-plate 40CrNiMoA after 192 h acidic salt spray test; b) silver-plate 1Cr17Ni2 after 192 h acidic salt spray test; c) silver-plate 1Cr18Ni9Ti after 192 h acidic salt spray test

使用较为广泛,多用于紧固件等连接零件。文中汇总了几种钢镀银试片的腐蚀结果,见表 5 和图 5。中可以看出,表面镀银的钢在酸性盐雾环境下表面出现大量红锈,说明钢基体腐蚀严重,耐盐雾腐蚀性能较差。在湿热、酸性大气作用下,仅有少量锈点出现,说明钢基体腐蚀轻微,具有一定的耐湿热、酸性大气腐蚀性能。镀银层受制备工艺限制,通常存在孔隙,在腐蚀环境作用下,水分子等腐蚀介质通过孔隙渗透到钢基体。由于基体与镀银层相比电位较低,在镀银与基体界面处,形成大阴极、小阳极的电偶腐蚀对,加速了基体的腐蚀。盐雾环境与湿热、酸性大气环境相比,因氯离子的作用,基体腐蚀更加严重。

2.3 表面粗糙度的影响

某螺栓套试验件采用 0Cr17Ni4Cu4Nb 制成,中间凹槽为机加面,表面粗糙度较低,完整性较好;外表面为非机加面,粗糙度较高,有明显的粗加工痕迹。在 192 h 盐雾试验后,中间凹槽未腐蚀,而外表面已明显腐蚀,如图 6 所示。0Cr17Ni4Cu4Nb 为马氏体不锈钢,铬含量较低,在盐雾试验中存在腐蚀风险。当零件表面粗糙度较大时,与腐蚀性气体或液体直接接触的面积增大,同时也易积液,这导致 Cl^- 、水分子等腐蚀介质作用加强,易造成表面腐蚀^[19-20]。因此,由于螺栓套外表面部位表面粗糙度较大或局部存在缺陷,导致外表面耐腐蚀性能较差,出现了红色腐蚀产物,而中间凹槽部位粗糙度较小,所以耐腐蚀性较好,没有出现腐蚀现象。由此可知,不锈钢的耐腐蚀性能与材料的表面粗糙度存在一定关系,因此在设计阶段,应考虑外露或管道部位的表面粗糙度设计,尽量防止或减小腐蚀现象的发生。



图 6 螺栓套盐雾试验 192 h 后照片

Fig.6 Picture of bolt sleeves after 192 h acidic salt spray test

3 结论

通过总结归纳多项腐蚀试验结果,对比分析了材料成分、表面防护技术和表面粗糙度等对发动机典型钢材的耐海洋大气腐蚀性能的影响,得出以下结论。

1) 不锈钢的铬含量对材料耐腐蚀性能的影响显

著,通常含铬量较高的不锈钢耐腐蚀性能较为优异,含铬量较低的不锈钢材料耐盐雾性能较差,结构钢在海洋大气环境下易腐蚀。

2) 钝化处理能明显提高不锈钢的耐腐蚀性能,但仍然难以保护不锈钢在长期海洋大气环境作用下不受侵蚀。无机铝涂料通过电化学保护作用,能够有效保护基体不发生腐蚀,具有优异的防护性能。镀银层在海洋大气环境下将加剧钢材基体的腐蚀。

3) 不锈钢的表面粗糙度会对不锈钢材料在海洋大气环境下的耐腐蚀性产生影响。

参考文献:

- [1] 丁伟,李喆,曹利松.舰载机机载设备腐蚀因素分析与防护控制[J].机械研究与应用,2020,33(3): 185-187+190.
DING Wei, LI Zhe, CAO Li-song. Corrosion factor analysis and protection control of shipboard airborne equipment[J]. Mechanical research and application, 2020, 33(3): 185-187+190.
- [2] 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.
- [3] 胡建军,陈跃良,卞贵学,等.飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J].腐蚀与防护,2011,32(11): 900-904.
HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-yue, et al. Corrosion of aircraft structure material in accelerated simulating environment and service environment[J]. Corrosion and protection, 2011, 32(11): 900-904.
- [4] 霍武军,孙护国.海航发动机压气机叶片腐蚀与防护措施[J].航空工程与维修,2002(6): 39-41.
HUO Wu-jun, SUN Hu-guo. Corrosion and precaution for blades of aeroengine compressor in the navy air arm[J]. Aviation maintenance, 2002(6): 39-41.
- [5] 石瑶,黄子琳,袁珂.两种奥氏体不锈钢酸性盐雾腐蚀行为研究[J].装备环境工程,2020,17(6): 51-57.
SHI Yao, HUANG Zi-lin, YUAN Ke. Corrosion behavior of two kinds of austenitic stainless steel in acid salt spray test[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(6): 51-57.
- [6] GONZÁLEZ-GARCÍA Y, BURSTEIN G T, GONZÁLEZ S, et al. Imaging metastable pits on austenitic stainless steel in situ at the open-circuit corrosion potential[J]. Electrochemistry communications, 2004, 6(7): 637-642.
- [7] 杜楠,田文明,赵晴,等. SO_4^{2-} 浓度对 304 不锈钢在 NaCl 溶液中点蚀行为影响的研究[J].材料工程,2012(7): 64-70.
DU Nan, TIAN Wen-ming, ZHAO Qing, et al. Effect of

- SO_4^{2-} concentration on the 304 stainless steel pitting corrosion in NaCl solution[J]. Journal of materials engineering, 2021(7): 64-70.
- [8] LI Hua-bing, JIANG Zhou-hua, YANG Yan, et al. Pitting corrosion and crevice corrosion behaviors of high nitrogen austenitic stainless steels[J]. International journal of minerals metallurgy and materials, 2009, 16(5): 517-524.
- [9] 金帅, 张振兴. 海军用航空发动机的腐蚀与防护[J]. 内燃机与配件, 2019(2): 121-122.
JIN Shuai, ZHANG Zhen-xing. Corrosion and protection of naval aeroengine[J]. Internal combustion engine and parts, 2019(2): 121-122.
- [10] 徐可君, 江龙平. 海军用航空发动机的腐蚀及涂层[J]. 航空科学技术, 1998(3): 19-21.
XU Ke-jun, JIANG Long-ping. Corrosion and coating of aeroengine for navy[J]. Aeronautical science and technology, 1998(3): 19-21.
- [11] 张鹏飞, 杨瑞, 原玲, 等. 无机盐铝涂料及其性能研究[J]. 涂料工业, 2013, 43(8): 69-73.
ZHANG Peng-fei, YANG Rui, YUAN Ling, et al. Study on properties of inorganic aluminum coating[J]. Paint and coatings industry, 2013, 43(8): 69-73.
- [12] GJB 150. 11A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分: 盐雾试验[S].
GJB 150. 11A—2009, Laboratory environmental test methods for military materiel Part 11: Salt fog test[S].
- [13] GJB 150. 9A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 9 部分: 湿热试验[S].
GJB 150. 9A—2009, Laboratory environmental test methods for military materiel Part 9: Damp heat test[S].
- [14] GJB 150. 28—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 28 部分: 酸性大气试验[S].
GJB 150. 28—2009, Laboratory environmental test methods for military materiel Part 28: Acidic atmosphere test[S].
- [15] GB/T 14165—2008, 金属和合金 大气腐蚀试验现场试验的一般要求[S].
GB/T 14165—2008, Corrosion of metals and alloys—Atmospheric corrosion testing—General requirements for field tests[S].
- [16] GB/T 16545—2015, 金属和合金的腐蚀腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
GB/T 16545—2015, Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens[S].
- [17] LI Guo-min, GUO Xing-peng, ZHENG Jia-shen. Pitting corrosion behavior of stainless steel 304 in carbon dioxide environments[J]. Iron and steel research, 2004, 11(4): 47-51.
- [18] 王杰. 不锈钢表面耐点蚀性钝化膜的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Jie. Electrochemical formation of highly pitting resistant passive films on stainless steel surface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [19] 王梅丰, 魏红阳, 陈东初, 等. 表面粗糙度对硝酸钝化 304 不锈钢点蚀行为影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1156-1160.
WANG Mei-feng, WEI Hong-yang, CHEN Dong-chu, et al. Influence of surface roughness on pitting corrosion behaviors of stainless steel passivated with nitric acid[J]. Corrosion and protection, 2015, 36(12): 1156-1160.
- [20] 骆鸿, 李晓刚, 肖葵, 等. 304 不锈钢在西沙海洋大气环境中的腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2013(3): 332-338.
LUO Hong, LI Xiao-gang, XIAO Kui, et al. Corrosion behavior of 304 stainless steel in the marine atmosphere environment of Xisha islands[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013(3): 332-338.