

舰载机的腐蚀失效及其预防

陶春虎^{1,2}, 刘昌奎^{1,2}

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095)

摘要:介绍了舰载机点蚀、丝状腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀和氢脆5种常见的腐蚀失效模式及其形成机理、失效现象与特征、影响因素等,列举了与设计、制造工艺、材料等因素相关的导致飞机构件腐蚀失效的典型实例,并根据实例的失效原因提出舰载机腐蚀失效的预防与改进措施,以及在设计、制造工艺和选材方面的一些建议。结果表明,飞机的腐蚀控制是一项系统工程,设计中需要充分考虑对导致腐蚀的因素进行有效控制,并注意细节防腐设计;飞机构件在进行合理的防腐设计的同时,材料的工艺状态和材料的选择与环境之间,及材料与工艺之间,应在防腐方面有科学严谨的匹配。

关键词:舰载机;腐蚀;失效;设计;工艺;材料

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0623-06

Corrosion Failure and Prevention of Carrier-Based Aircraft

TAO Chunhu^{1,2}, LIU Changkui^{1,2}

(1. AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China)

Abstract: Pitting, filiform corrosion, intergranular corrosion, stress corrosion and hydrogen embrittlement are the common corrosion failure modes in the carrier-based aircraft. The formation mechanisms, failure phenomena, failure characteristics and influencing factors of these five failure modes are introduced in this paper. Several typical cases of corrosion failure which are induced by design, manufacturing processes, materials and other factors are presented respectively. The prevention and improvement measures are given, according to the failure reason in each case. Some recommendations for the design, manufacturing processes and materials selection are also discussed here. The results shows that the corrosion control of the aircrafts is a systematic project. In the design, it is necessary to take full account of controlling the factors which affect the corrosion, and pay attention to the details of the anti-corrosion design; In the selection of reasonable anti-corrosion processes, the material and process should get a mutual appropriate match, furthermore, the material and its process should adapt to the environment demands.

Key words: carrier-based aircraft; corrosion; failure; design; process; material

1 前言

航空母舰舰载机是航母最为主要的攻击武器。舰载机在海洋环境下服役,它不同于陆基飞机,不仅受到海洋气氛、海水及持续的干/湿交替循环的侵蚀,还会受到舰艇燃烧废气、舰载机发动机废气等的腐蚀,特别是这些废气与海洋盐雾组合成pH值达到2.4~4.0范围的

高酸性潮湿液膜,使得其受到的环境腐蚀问题相当严峻。如我军某舰载直升机的服役寿命不及陆上的20%;某型飞机由于不适应海南的高温湿热环境,出勤率低于20%,这些充分说明海军航空舰载机遭受腐蚀的严重性^[1-4]。

腐蚀问题给装备带来重大的经济损失,资料表明^[5],美国海军估计每年用于腐蚀防护及研究的费用在20~30亿美元,其中飞机部件的防腐费用占到全年维修费用的1/3。腐蚀不仅造成巨大的经济损失,同时也影响到装备的安全使用。如美海军F14飞机前起落架汽缸支柱上发生腐蚀导致一等事故,从而造成F14雄猫飞机全面停飞。

收稿日期: 2014-06-16

第一作者: 陶春虎,男,1956年生,研究员,博士生导师

通讯作者: 刘昌奎,男,1976年生,博士,高级工程师, Email: changkuiliu621@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.13

2 腐蚀失效常见模式及其特点

舰载机在实际工程应用中,主要的腐蚀失效模式包括点蚀、丝状腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀和氢脆 5 种^[6-10]。

2.1 点蚀

点蚀是腐蚀表面呈点坑状,腐蚀点多、比较浅,但发生在表面有限面积上的腐蚀,其腐蚀很深、成巢穴。发生点蚀损伤与金属构件表面组织结构的不均匀性,尤其与表面的夹杂物、表面保护膜的不完整性有关。点蚀坑的扩展不仅包括金属的溶解过程,而且包括通过已溶解的金属离子的水解使腐蚀坑底部具有较高的酸度使坑底扩展这一过程。

点蚀坑边沿基本比较平滑,因腐蚀产物覆盖,坑底呈深灰色,很多时候由于腐蚀产物覆盖,从表面无法看到点蚀坑的存在。垂直于蚀坑表面观察,蚀坑多呈半圆形或多边形,图 1 显示 1Cr15Ni4Mo3N 螺栓长期使用后表面出现腐蚀坑,即为典型的皮下变形闭口蚀坑。很多腐蚀坑由于腐蚀产物覆盖其特征不明显,如图 1a 所示,清洗后则清晰可见,如图 1b 所示。

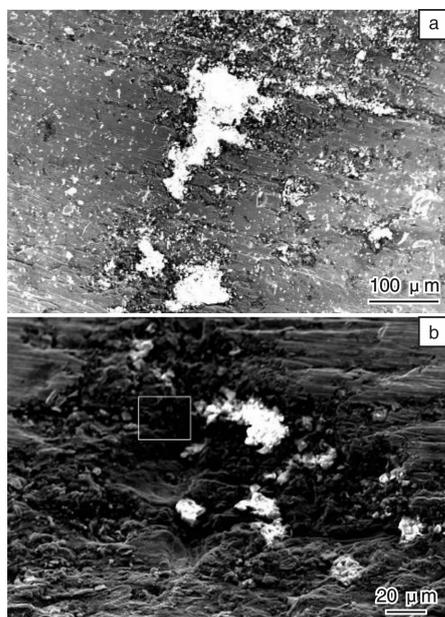


图 1 螺栓表面腐蚀坑清洗前后的 SEM 照片: (a) 清洗前, (b) 清洗后

Fig. 1 SEM micrographs of corrosion pits morphology on the bolt surface: (a) before cleaning and (b) after cleaning

点蚀并不一定择优沿晶界扩展。菊花形点蚀坑往往外小内大,犹如蚁穴般,所以点蚀损伤对金属结构件的危害很大。

点蚀多发生在与表面生成钝化膜的金属材料上(如

不锈钢、铝、铝合金)或表面有阴极性镀层的金属上(如碳钢表面镀锡、铜、镍)。点蚀导致的失效大多都是氯化物或含氯离子的氯气所引起的,特别是次氯酸盐的腐蚀性更强。溶液中的氯离子浓度越高,合金越易于发生点蚀。而舰载机正是处于氯离子浓度很高的环境中,F/A-18 飞机即存在点状腐蚀。

2.2 丝状腐蚀

丝状腐蚀是一种在氧浓差控制下的电化学腐蚀,一般发生在涂漆的铝底层。丝状腐蚀先以涂膜的破损处(如从舰载机的紧固件周围和涂覆层已经破裂的蒙皮边缘)开始,首先形成点状腐蚀,在点蚀处,由于凝结水膜、氧及腐蚀介质的作用,腐蚀向周边膜下扩展,凝点在扩展中形成了氧浓差电池致激发丝状腐蚀的形成,某产品 7A04 铝合金表面的丝状腐蚀形貌见图 2。

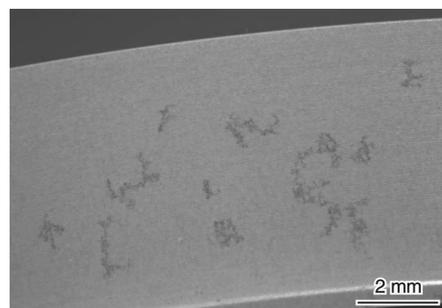


图 2 7A04 铝合金表面的丝状腐蚀特征的宏观照片

Fig. 2 Macrophoto of filiform corrosion characteristics on 7A04 aluminium alloy surface

丝状腐蚀的产生主要与环境、表面涂料、金属基表面处理工艺等因素有关。如环境因素中,相对湿度较大有利于丝状腐蚀产生。研究表明,铝合金在相对湿度大于 80% 时,丝状腐蚀的丝迹随着相对湿度的增加而加宽。此外,腐蚀介质中的氯离子、二氧化硫等对丝状腐蚀的产生和发展起着促进作用。

舰载机机身蒙皮出现不同程度的丝状腐蚀,不但增加了飞机的防腐维修费用,而且,丝状腐蚀可能会导致点蚀和晶间腐蚀,甚至会危及飞机的飞行安全。

2.3 晶间腐蚀

晶间腐蚀是腐蚀沿晶界发生并扩展。晶间腐蚀不仅降低材料的机械性能,而且由于难以发现,易于造成突然失效。大多数的金属和合金,如不锈钢、铝合金,由于碳化物分布不均匀或过饱和固溶体分解不均匀,引起电化学不均匀,从而促使晶界成为阳极区而在一定的腐蚀介质中发生晶间腐蚀。金属构件的晶间腐蚀损伤起源于表面,裂纹沿晶扩展。图 3 给出了 1Cr17Ni2 不锈钢晶界腐蚀表面晶粒和截面的 SEM 照片。晶间腐蚀的一种常见的形式是剥落腐蚀,也称为层状腐蚀。这类腐蚀

大多出现在平面状的铝合金中。

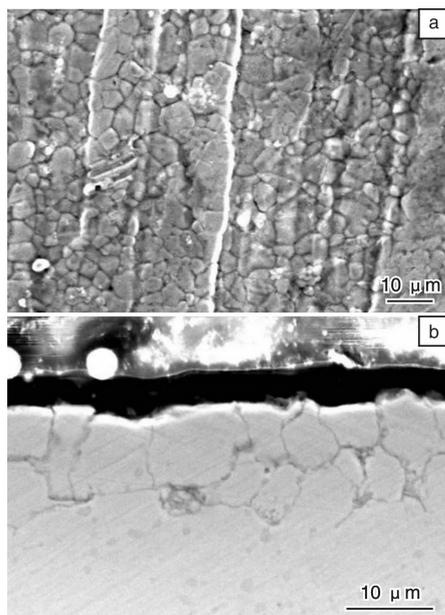


图3 1Cr17Ni2 不锈钢晶间腐蚀的 SEM 照片：(a) 表面，(b) 截面

Fig. 3 SEM micrographs of intergranular corrosion in stainless steel 1Cr17Ni2: (a) surface and (b) cross-section

2.4 应力腐蚀

应力腐蚀是指金属构件受拉应力作用并在特定介质中，由于腐蚀介质与应力的共同作用所导致的腐蚀。飞机结构中，铝合金、钢等结构件（如框梁、紧固件、卡箍等）大多数都承受拉应力的作用，并且均在一定腐蚀气氛环境下服役，因此，应力腐蚀导致开裂也是飞机结构，特别是舰载机结构中常见的一种失效模式。由于应力腐蚀开裂是典型的滞后破坏形式，对于结构的安全危害很大。

金属构件发生应力腐蚀开裂需具备3个条件：材料的应力腐蚀敏感性、特定腐蚀环境和拉伸应力。应力腐蚀是一种局部腐蚀，而且腐蚀裂纹常常被腐蚀产物所覆盖，从外表很难观察到。裂纹源处常有腐蚀产物或点蚀坑，表明应力腐蚀裂纹源于点蚀、晶间腐蚀等化学损伤缺陷。应力腐蚀断口的微观形态可以是解理或准解理、沿晶断裂或混合型断裂。应力腐蚀裂纹扩展过程中会发生裂纹分叉现象。图4是2Cr13Mn9Ni4 不锈钢卡箍应力腐蚀裂纹扩展形貌的 SEM 照片。影响构件发生应力腐蚀开裂失效的因素是多方面的，包括材质因素、环境因素和受力状态等。

2.5 氢脆

由于氢渗入金属内部导致损伤，从而使金属零件在

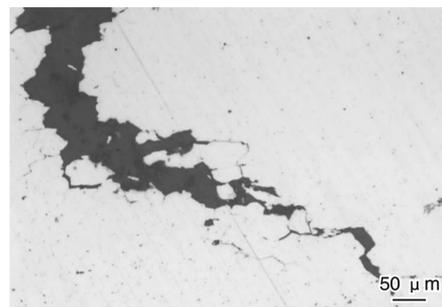


图4 2Cr13Mn9Ni4 不锈钢卡箍应力腐蚀裂纹扩展形貌的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrograph of crack propagation of stress corrosion in stainless steel 2Cr13Mn9Ni4 clamp

低于材料屈服极限的静应力作用下导致的失效称为氢致损伤，亦称氢脆。氢脆是飞机结构中高强度结构件（如紧固件等）的重要失效的形式之一。由于氢脆多为脆性断裂，失效无法预先判知，危害很大。

氢脆根据氢的来源不同，可分为内部氢致损伤和环境氢致损伤。内部氢致损伤是指材料在冶炼、电镀、酸洗等工艺过程中，由于氢渗入金属内部，同时在工作应力或残余应力的作用下出现的氢致损伤。环境氢致损伤是指在紧固件在使用环境下氢渗入金属内部，并在拉应力作用下出现的氢致损伤。

氢脆断裂多发生在应力集中处，断口微观形貌一般显示沿晶断裂，也可能是穿晶断，断裂具有延迟性，并且其工作应力主要是拉应力，特别是三向静拉应力。高强度钢氢脆沿晶断裂晶面上典型的“鸡爪痕”特征如图5所示。影响紧固件氢致延迟开裂的因素较多，包括氢含量、工艺因素，材料组织状态、材料强度、应力因素等。

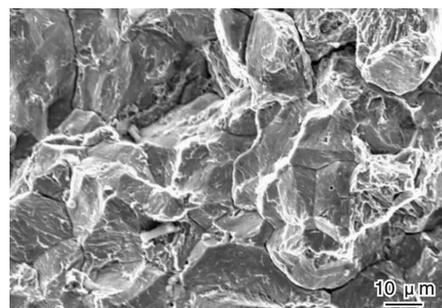


图5 氢脆断口晶面上的“鸡爪痕”特征的 SEM 照片

Fig. 5 SEM micrograph of “chicken claw marks” on the intergranular fracture plane induced by hydrogen embrittlement

3 腐蚀失效及其预防

由腐蚀导致飞机构件失效的微观机理包括晶间腐

蚀、应力腐蚀、氢脆、腐蚀疲劳等。产生腐蚀的原因主要是：①构件结构设计存在缺陷；②制造构件材料的工艺状态不合理；③制造构件的材质选择不当^[11-15]。本文作者根据因飞机构件腐蚀失效造成事故的几个具体案例，阐述飞机构件腐蚀失效的机理及预防措施。

3.1 设计

案例 某型外贸机机身 25~27 框接头耳片裂纹

埃及空军对某型机定检时发现 25~27 LD5 铝合金框接头耳片裂纹(见图 6)，普查发现大量飞机存在类似裂纹。25~27 框采用表面阳极化处理。失效分析结果表明，接头耳片裂纹性质为应力腐蚀裂纹，接头耳片螺栓孔与钢衬套的过盈配合量过大导致耳片受到较大的拉应力，以及耳片厚度大于钢衬套配合段长度，导致在耳片内侧的螺栓孔内表面有长 0.5~1 mm 暴露在空气中失去保护，这是导致应力腐蚀裂纹产生的主要原因(图 7)。此外，螺栓孔打孔是在接头阳极化处理后进行的，导致在耳片内侧表面产生金属卷边和阳极化膜局部破裂(图 8)，这也促进了应力腐蚀裂纹的产生。

类似的故障在我国歼 8 飞机也出现过，这类故障一方面是由于海洋恶劣的腐蚀性环境等外部因素，更主要的是在结构设计中存在缺陷。在设计中没有充分考虑导致腐蚀的因素进行有效控制。主要是过大的过盈配合导致拉应力、衬套与孔配合导致金属裸露、打孔工艺不合理等多个不合理的设计因素。

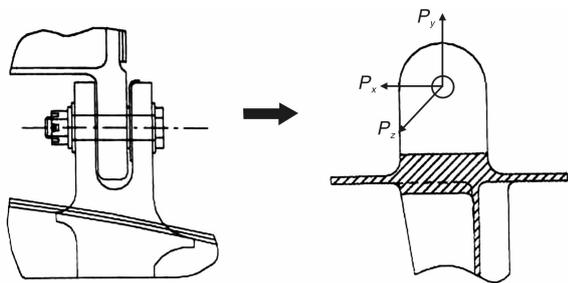


图 6 接头耳片结构形式

Fig. 6 The structure of connection lug



图 7 耳片孔与衬套配合形式

Fig. 7 The combining form of lug hole and bush

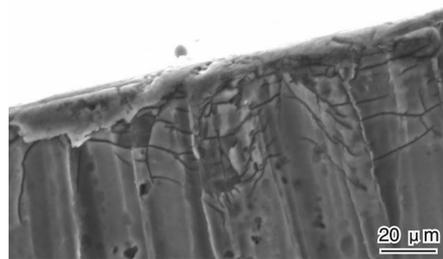


图 8 耳片孔边金属卷边和阳极化膜开裂的形貌照片

Fig. 8 Micrograph of crimping of the lug edge and cracking of anodized film

飞机的腐蚀控制是一项系统工程，其控制过程总的来说包括补救性控制和预防性控制 2 个主要方面。补救性控制是指当发现飞机结构产生腐蚀后设法消除，显然这是一种被动的办法。预测性控制是指预先采取必要的措施，最为关键的是从结构方案设计开始，根据飞机将来可能的使用环境和功能要求来制定腐蚀控制方案。与设计相关的一些防腐技术主要有：①采取密封的结构形式，防止海水、雨水、盐雾、潮湿空气等进入结构内部；②控制和消除残余应力、装配应力和应力集中，防止应力腐蚀；③尽可能避免不同金属，特别是电势相差较大的金属互相接触，不可避免时需增加防护层；④采用排水设计，对不可避免的雨水渗入或冷凝水汇集，应有导流通道排除；⑤在机体其他便于检查的部位应适当地设置排水孔、放油孔等，确保机内腐蚀积液能顺利排出；⑥采用通风设计，全机结构应设置必要的舱门、口盖，以便通风排气；⑦在紧固连接中，可采用涂润滑油(脂)或涂底漆，如安装螺栓、螺母及对铆钉墩头时，涂底漆等防腐蚀密封技术。

3.2 工艺

案例 某型飞机 1Cr17Ni2 不锈钢螺栓应力腐蚀失效

某沿海机场使用的 1Cr17Ni2 飞机卡箍螺栓发生断裂失效，磁粉检查发现更多的螺栓存在裂纹，裂纹位于 T 型卡箍螺栓光杆部位，呈周向分布。失效分析结果表明，卡箍螺栓失效性质为应力腐蚀(表面沿晶开裂形貌见图 9)，卡箍螺栓的回火处理是在脆性区进行的，这种回火工艺会导致表面脱碳(见图 10)致使材料耐腐蚀性下降，是螺栓发生应力腐蚀的主要原因。

案例 2Cr13Mn9Ni4 不锈钢卡箍钢带应力腐蚀失效

某型飞机用不锈钢卡箍钢带使用一段时间后表面出现大量的裂纹，钢带使用状态为冷硬态。失效分析结果表明，钢带裂纹性质为应力腐蚀裂纹(见图 11)。金相组织分析表明，2Cr13Mn9Ni4 钢带在冷硬态状态下使

用, 具有明显的晶间腐蚀倾向, 而该钢带经过重新固溶处理后晶间腐蚀倾向消失, 说明该钢带选用了不合理的工艺状态(冷态)是导致其发生应力腐蚀的主要原因。

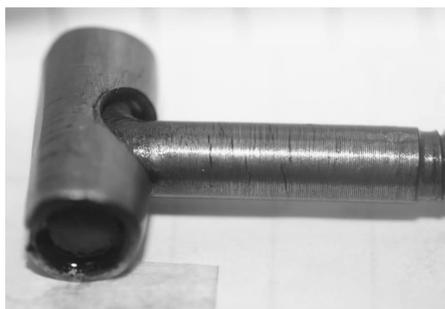


图9 卡箍螺栓裂纹外观

Fig. 9 The crack appearance of the clamp bolt

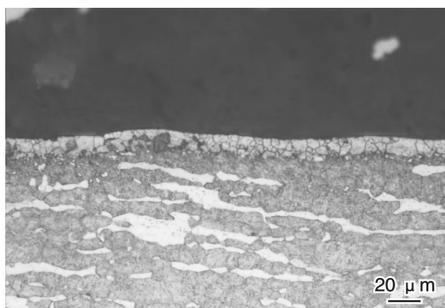


图10 螺栓光杆部位脱碳层组织形貌照片

Fig. 10 Micrograph of the morphology of decarburized layer on the bolt rod



图11 2Cr13Mn9Ni4 不锈钢卡箍应力腐蚀裂纹外观形貌

Fig. 11 The appearance of the stress corrosion cracking on the 2Cr13Mn9Ni4 stainless steel clamp

上述案例表明, 在合理的防腐设计基础上, 还需要对材料采用合理的防腐工艺措施, 包括: ①金属表面选择合适的涂镀层, 通常选择在钢制零件上镀锌、镉, 在铝制构件上进行表面氧化、化学镀镍, 选择镀覆时应考虑零件与零件之间, 镀层金属与基体金属之间的接触电偶; ②在制造过程中, 所采用的工艺应不损伤材料固有的耐腐蚀性能; ③在满足设计强度的条件下选用耐蚀性

好的热处理工艺; ④通过对金属材料采用相应的表面强化技术, 如喷丸强化、激光冲击强化、挤压强化等; ⑤采用低温消应力退火; ⑥合理地提高对构件表面粗糙度的要求。

3.3 选材

案例 BΦ-2 胶致 30CrMnSiNi2A 结构钢螺栓在雨水环境中断裂

30CrMnSiNi2A 结构钢螺栓在使用中多次断裂, 失效分析结果表明, 螺栓断裂性质为应力腐蚀, 主要原因是螺纹部位接触 BΦ-2 胶, 并有雨水环境。试验表明, BΦ-2 胶中除含有大量的酒精和水外, 还含有游离酚(石碳酸)。这种游离酚对多种合金尤其是高强度钢具有腐蚀作用, 说明选材不合理是导致螺栓发生应力腐蚀的主要原因。

同样由于选材问题, 某型飞机 42 框也发生过由于软油箱涂层浸泡液呈碱性, 腐蚀作用较强, 在其它多种因素联合作用下导致该型飞机 42 框发生严重的晶间腐蚀, 飞机大面积停飞。材料的选择, 需要根据其工作环境, 包括外界环境和飞机局部环境进行选择。为满足防腐要求, 飞机选材一般需注意: ①在满足技术指标的前提下, 尽可能选用耐蚀性好的材料; ②承受高载荷的结构件, 选用对应力腐蚀、腐蚀疲劳、氢脆等敏感性小的材料; ③高强度结构钢在满足技术指标的前提下, 尽可能使强度值处于技术条件的中下限, 降低氢脆敏感性。

4 结 语

舰载机在恶劣的腐蚀性海洋环境条件下长期工作, 腐蚀问题十分突出。我国舰载机的应用时间较短, 对于舰载机的腐蚀规律及其控制技术的掌握还不够深入和全面, 需要全面调研、跟踪和研究舰载机在全寿命过程中的腐蚀失效模式及其形成机理, 搞清舰载机全寿命期间不同阶段腐蚀失效规律及其演化机理, 并不断地从防腐设计、工艺和材料选择等多方面深入摸索。在此基础上, 形成舰载机腐蚀控制技术体系和标准体系, 将腐蚀控制技术贯穿于舰载机的设计、制造、使用和维护的全过程。

参考文献 References

- [1] Jiang Tao(姜涛), Yu Yang(于洋), Yang Sheng(杨胜), et al. 从失效案例探讨不锈钢的应力腐蚀问题[J]. *Corrosion and Protection* (腐蚀与防护), 2011, 32(4): 297-300.
- [2] Zhu Xiangrong(朱相荣), Wang Xiangrun(王相润). *Marine Corrosion and Protection of Metal Materials* (金属材料的海洋腐蚀与防护)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.

- [3] Mu Zhitao(穆志韬), Tan Xiaoming(谭晓明), Liu Zhiguo(刘志国). 海军现役飞机的腐蚀损伤失效分析及腐蚀防护[J]. *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程), 2009, 6(1): 43-68.
- [4] Chen Y L, Jin P. Study Oil Load Environmental Spectrum and Accelerated Corrosion Equivalent Spectrum of Aircraft Structure [C]. *Fatigue'99*, 1999: 2 353-2 358.
- [5] Wen Bangwei(文邦伟), Gong Weiqiang(龚伟强), Zhu Lei(朱蕾), et al. 航母舰载机用高强、高韧、耐蚀不锈钢[J]. *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程), 2007, 4(6): 82-85.
- [6] Tao Chunhu(陶春虎), Liu Gaoyuan(刘高远), En Yunfei(恩云飞), et al. *Failure Analysis Technical Manual of Military Products*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [7] Tao Chunhu(陶春虎). *Failure Analysis of Fastener and its Prevention*(紧固件的失效分析及其预防)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [8] Yoshino K, McMahon J R N J. The Cooperative Relation Between Temper Embrittlement and Hydrogen Embrittlement in a High Strength Steel [J]. *Metall Trans A*, 1974, 5A(2): 1 363-1 370.
- [9] Shu Dexue(舒德学), Pi Yulong(皮玉龙), Luo Yong(罗勇). 涂膜下铝合金的丝状腐蚀[J]. *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程), 2004, 1(3): 75-78.
- [10] Liu Changkui(刘昌奎), Zang Jinxin(臧金鑫), Zhang Bing(张兵), et al. 30CrMnSiA 螺栓断裂原因分析[J]. *Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防), 2008, 3(2): 42-47.
- [11] Li Xing(李星), Wang Xiaohui(王晓慧). 舰载机三防设计技术研究综述[J]. *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程), 2006, 3(4): 12-15.
- [12] He Zhiliang(何志良), Cai Zengjie(蔡增杰), Zhou Lijian(周立建). 环境因子对舰载机金属构件维修检查间隔期的影响[J]. *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程), 2011, 8(5): 47-55.
- [13] Zheng Yueming(郑月明), Chen Yanxiao(陈艳晓). 浅谈海军飞机的防腐蚀设计及措施[J]. *China New Technologies and Products*(中国新技术新产品), 2013, 7: 18-19.
- [14] Pei Chengxin(裴承信). 某系列飞机机翼结构腐蚀与防护分析研究[J]. *Aeronautical Science & Technology*(航空科学技术), 2006, 6: 23-25.
- [15] Hu Fangyou(胡芳友), Wang Maocai(王茂才), Wen Jinglin(温景林). 沿海飞机铝合金结构件腐蚀与防护[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*(腐蚀科学与防护技术), 2003, 15(2): 97-100.