

doi: 10.7690/bgzdh.2019.12.002

海洋大气环境下装备腐蚀量预测

赵建印, 王 玺, 刘 星

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264000)

摘要: 针对装备腐蚀影响战备值班时间、技术状态完好性等问题, 提出一种装备腐蚀剩余寿命的预测方法。在分析海洋大气环境要素对装备腐蚀影响的基础上, 结合金属大气腐蚀量随时间变化的幂函数方程, 建立不同环境特征下的环境当量谱, 利用加速腐蚀折算方法, 按照等效原理, 采用实验室环境的加速腐蚀, 预测装备在海洋大气实际环境下的腐蚀寿命。结果表明: 该模型具有良好的拟合效果, 有一定的可靠性。

关键词: 海洋大气环境; 装备腐蚀; 腐蚀量预测; 环境当量谱; 定量幂函数

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Prediction of Equipment Corrosion Amount in Marine Atmosphere Environment

Zhao Jianyin, Wang Xi, Liu Xing

(College of Naval Coast Defense Army, Navy Aviation University, Yantai 264000, China)

Abstract: Aiming at the problems of equipment corrosion affecting combat readiness time and technical integrity, a prediction method of equipment corrosion residual life is proposed. Based on the influence of marine atmospheric environmental factors on equipment corrosion, combined with the power function equation of metal atmospheric corrosion amount with time, the environmental equivalent spectra in different environmental characteristics are established. According to the accelerated corrosion conversion method and the equivalent principle, a model is used to predict the corrosion life of equipment in the actual marine atmospheric environment by using the accelerated corrosion of laboratory environment. The results show that the model has good fitting effect and certain reliability.

Keywords: marine atmospheric environment; equipment corrosion; prediction of corrosion amount; environmental equivalent spectrum; quantitative power function

0 引言

环境是影响装备质量状态、可靠性的重要因素。海军装备使用主要为海洋与海上岛礁及跨越温带到热带海洋气候的环境。海洋大气环境具有长期高温、高湿、高盐雾、雨量充沛、日照时间长和太阳辐射强度大等特征。高温、高湿、高盐雾、淋雨、高太阳辐射和沙尘等应力综合作用, 会对飞机、舰船舰面装备、岸基装备等带来强烈的腐蚀效应, 影响装备使用的可靠性; 因此, 腐蚀问题是目前海军装备可靠性工作中面临的关键问题之一。

在环境谱及加速腐蚀研究方面, 文献[1]研究了某飞机半封闭部位局部环境谱的构建及当量加速关系; 文献[2]对当量加速腐蚀条件下飞机结构耐久性评估方法进行了研究; 文献[3-6]研究了当量加速环境谱编制方法; 文献[7-10]对飞机或其他结构件在腐蚀环境下的寿命预测、评估问题进行了研究。从文献上看, 对装备开展海洋环境下的腐蚀寿命预测的研究并不多, 笔者结合装备任务特点, 基于腐蚀试验原理, 研究基于腐蚀当量理论下的装备腐蚀量

预测方法, 可为海军各类装备腐蚀寿命预测、维修保养等工作提供支持。

1 海洋大气环境下装备腐蚀问题分析

1.1 海洋大气环境腐蚀因素分析

海洋大气湿度较大。和浸在电解质溶液内的腐蚀有所不同, 海洋大气腐蚀是一种液膜下的电化学腐蚀。金属在潮湿的大气环境下, 由于毛细管作用、吸附作用或化学凝聚作用在金属表面上形成一层薄液膜。这层薄液膜溶解了足量的氧, 形成饱和氧的电解液薄膜, 进而构成腐蚀性水膜。

1) 大气相对湿度。

金属表面水膜的厚度会直接影响金属的腐蚀速率和腐蚀机理。不同的水膜厚度对应不同的腐蚀类型。海洋环境中, 大气水分的含量决定大气环境的湿度。湿度不同, 形成的水膜厚度也不同, 不同海域的海洋大气腐蚀类型也不相同。同一般的大气腐蚀相比, 由于海洋大气环境具有较高的湿度, 金属表面形成较厚的水膜; 因此, 腐蚀类型也与普通的

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-09-21

作者简介: 赵建印(1976—), 男, 河北人, 博士, 副教授, 从事装备可靠性、环境工程与综合保障研究。E-mail: 13791182798@163.com。

大气腐蚀类型不同，腐蚀情况更恶劣。海洋环境中的雨、雾、露中的水分经过日晒风吹等不同方式影响大气的相对湿度，改变金属表面的水膜厚度，进而影响金属的大气腐蚀过程。水膜厚度与腐蚀速度的关系如图 1 所示。

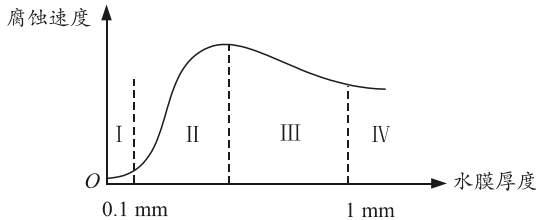


图 1 大气腐蚀速度与金属表面水膜厚度之间的关系

图中：I 区为干大气腐蚀；II 区为潮大气腐蚀；III 区为湿大气腐蚀；IV 区的金属零件表面水膜厚超过 1 mm，相当于金属全浸在水中的腐蚀，随水膜厚度进一步增加，金属的腐蚀速度不再变化。

2) 大气温度。

金属表面水蒸汽的凝聚、液膜中腐蚀气体和盐类的溶解度、液膜的电阻、大气的相对湿度等都和大气温度有关，海洋大气温度及其变化通过这些因素来影响金属材料的腐蚀。海洋大气腐蚀环境中，由于空气湿度常常高于金属的临界相对湿度，空气中的水分会以凝露的形式聚结在金属的表面上，为金属腐蚀提供良好的条件。此时温度对腐蚀的影响十分明显，温度每升高 10 °C，反应速度提高到 2 倍。

金属都会出现临界相对湿度和温度，表明金属表面已生成一层具有吸附功能的电解液膜，使金属的腐蚀性质发生了突变，从普通的化学腐蚀变成了电化学腐蚀，从而腐蚀速度大大增强。如图 2 所示，大多数金属和合金存在 2 个临界相对湿度。第一临界湿度的出现主要是因为金属表面出现腐蚀产物。这一湿度值取决于大气中水分含量和 SO₂ 的比例。第二临界湿度取决于腐蚀产物吸收和保持水分的性能。

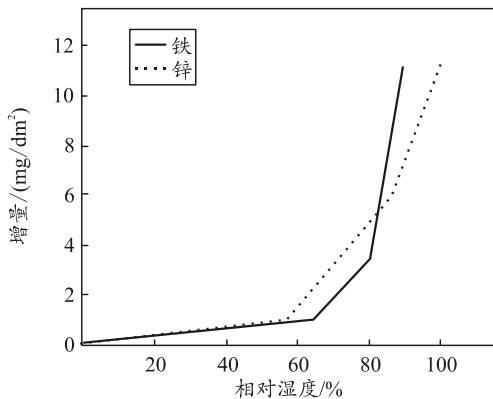


图 2 铁和锌的 2 个临界相对湿度

3) 大气含盐量。

由于蒸发，海洋大气中富含大量的海盐粒子，比如氯化钠和氯化镁。这些盐粒子会溶解在金属表面的水膜中，使这层水膜成为强腐蚀性的电解质溶液，从而加速金属腐蚀。海洋大气区的含盐量会随着风浪、距离海面的高度和在空气中暴露时间的长短而发生改变，进而改变腐蚀进程和腐蚀速率。研究表明：与干净的大气相比，海洋环境上方的大气能使钢的腐蚀速度增加 8 倍。

4) 氧。

空气中含有大量的氧气，在电解液薄膜下微电池的电化学腐蚀过程中，氧是以阴极去极化剂的作用，使金属产生腐蚀。

5) 二氧化硫。

大气腐蚀的过程主要取决于大气的成分、温度和湿度。空气中的污染物也是腐蚀的重要影响因素。对大多数工业结构的合金来说，最影响腐蚀过程的是二氧化硫、硫化氢等含硫的污染物，其对腐蚀的影响主要是起促进、加速腐蚀过程。

高盐雾浓度是海军装备使用环境最显著的特点之一，也是引起装备损坏的主要环境因素，例如我国东南沿海地区的温度、湿度和盐雾构成具有较强腐蚀性的盐雾环境，主要环境条件为：高温记录极值为 40 °C；高露点温度记录极值为 26~28 °C；最大相对湿度 100%；年平均湿度为 86% (海南加积地区平均)；年降水量 2 077 mm (海南加积地区 19 a 平均)；年日照时间为 2 225 h，太阳辐射量为 136 kcal/cm²。

高盐雾浓度，海南榆林基地大气中氯化钠含量见表 1。

表 1 海南榆林基地大气中的氯化钠含量

距海边距离/m	0.5~0.8	20	200	800
盐含量/(mg NaCl/L)	0.38	0.157	0.071	0.04

1.2 装备腐蚀分析

海军装备的腐蚀问题主要为装备裸露部位，包括各种结构件、螺钉铆钉、紧固件和铭牌等部位的腐蚀生锈。从装备中出现的腐蚀来看，腐蚀形态主要有以下几种：

1) 全面腐蚀：即均匀腐蚀 (general corrosion) 是指在整个金属表面均发生腐蚀，既可以是均匀的又可以是不均匀的。在海洋性气候中，金属表面缺乏有效的防护或金属表面防护层失效，都极易发生全面腐蚀。导弹装备中由于漆层脱落 (漆层老化、磕

碰等原因), 往往会导致此类腐蚀。

2) 电偶腐蚀: 由于腐蚀电位不同, 异种金属彼此接触或通过其他导体连通, 处于同一介质中, 造成异种金属接触部位的局部腐蚀, 就是电偶腐蚀。

3) 缝隙腐蚀: 以铆接、焊接、螺钉紧固等方式连接时, 在连接部位会形成缝隙, 缝隙处金属发生强烈的选择性腐蚀破坏。

4) 剥蚀: 即腐蚀沿着晶界进行, 是一种晶间腐蚀的类型。通常在涂层破损的地方发生。

装备裸露表面生锈主要由表面漆龟裂、裂开表面鼓泡等问题导致, 原因如下:

1) 涂漆前用腻子刮平舱体外表面, 腻子较厚, 容易吸潮或干燥不够, 涂层干燥胀裂所致;

2) 在底漆尚未干透的情况下喷面漆将导致面漆粘结不牢;

3) 喷涂底漆前清洗不到位, 外表面残留有油液、灰尘和水汽等, 导致底漆粘附不牢固, 出现裂纹或脱落现象; 底漆的浓度对面漆的粘附影响较大, 过稀, 面漆粘固不牢, 过稠, 面漆呈块状, 有裂纹。

金属件锈蚀或局部出现锈迹是由于舱表面漆脱落, 使金属层直接暴露于大气, 引起锈蚀。大部分导弹装备有不同程度的掉漆和锈蚀现象, 主要有以下原因:

1) 使用中经常磕碰, 导弹装备表面掉漆;

2) 表面漆与底漆附着不紧造成;

3) 掉漆后未及时补漆, 引起锈蚀;

4) 部分死角表面处理不到位, 引起锈蚀。

铭牌长期暴露于空气中和太阳辐射下, 引起变色; 由于未及时涂油, 铭牌锈蚀; 对于经常涂油维护的铭牌, 油脂容易吸附空气中的灰尘和其他杂质, 使油脂变黑, 铭牌字体被黑色油脂覆盖。

电缆绝缘层及护套有裂纹、破损、掉漆, 主要有以下原因:

1) 电缆绝缘层和护套长期暴露于空气和太阳辐射条件下, 容易老化, 经常插拔、弯曲, 导致外皮出现裂纹, 甚至破损;

2) 电缆护套为可伸缩形式, 表面不平整, 漆层不易附着在护套外表, 弯曲后容易掉漆;

3) 电缆盘局部锈蚀是由于电缆盘暴露于潮湿空气中, 活动部位(如电缆盘锁)润滑不够, 易腐蚀。

2 装备腐蚀寿命预测

腐蚀生锈一方面影响装备外观和性能, 另一方面会影响力学特性。装备腐蚀破坏的主要形态是应

力腐蚀和点蚀。金属的应力腐蚀会导致结构中裂纹的产生及断裂。应力腐蚀破坏是一种自发过程, 当处于腐蚀环境的金属或合金承受工作应力时, 就可能产生应力腐蚀破坏。

腐蚀条件下的装备寿命一般包括腐蚀潜伏期和腐蚀扩展期 2 个阶段。腐蚀潜伏期是指腐蚀出现前的时间, 潜伏期与金属表面的漆层/镀层、装配密封等腐蚀防护手段密切相关。腐蚀扩展期则指腐蚀自可检状态扩展至因为腐蚀降低至限制载荷时的时间。由于装备进入扩展期后, 其腐蚀防护层已经被破坏, 腐蚀速率主要决定于结构材料种类和腐蚀环境介质。研究装备腐蚀寿命的重点是装备在特定腐蚀环境下的腐蚀速率, 因此, 只考虑腐蚀扩展期。1916 年起, 美国试验与材料学会通过积累大量腐蚀数据的规律分析, 认为金属的大气腐蚀量和时间满足以下幂函数方程^[11]:

$$W = A \cdot t^n \quad (1)$$

其中: W 为腐蚀量; t 为腐蚀扩展时间; A 、 n 为模型参数。我国于 1995 年开始建立大气腐蚀试验数据。更多实验数据表明: 金属(包括金属镀层)在土壤、海水、河水等环境条件下腐蚀量和时间之间的关系, 均可用幂函数形式表示^[12]; 因此, 研究装备腐蚀寿命预测时, 采用幂函数方程来表征其腐蚀扩展规律。

衡量装备腐蚀损伤的物理量一般取蚀坑深度、失重、腐蚀面积和表面涂层的绝缘电阻等, 这些量之间存在统计关系, 可选取某一个量作为腐蚀量。

在文献[13-15]中, 为了预测装备在实际使用中的腐蚀寿命, 通过建立不同环境特征下的环境当量谱, 利用加速腐蚀折算的方式, 基于实验室加速腐蚀寿命来计算装备实际腐蚀寿命。由于一方面海洋大气环境复杂较难用部分环境因素特征来表征; 另一方面由于装备结构问题, 装备腐蚀的局部环境特征与当地大气环境特征差异很大, 导致利用当量谱预测海洋大气环境下的装备腐蚀寿命误差较大。笔者根据当量折算理论, 设计一种通过周期性监测装备腐蚀量来预测装备腐蚀剩余寿命的方法。

对同一种材料和结构件, 根据腐蚀损伤等效原理, 使其在服役环境条件中的腐蚀量 Q 等于在另一环境条件下(如实验室环境)的腐蚀量 Q' , 可建立 2 种环境条件下的等当量关系, 即

$$Q = Q' \quad (2)$$

当前常用的当量折算法是基于金属电化学腐蚀

规律的方法，其基本原理是在电化学反应过程中电荷的转移与反应物质的变化量之间有着严密的等量关系，服从法拉第定律，对腐蚀量 Q ，有

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^T I_c d\tau \quad (3)$$

式中： F 为法拉第常数； I_c 为腐蚀电流； T 为环境作用时间。

对金属材料，若在某一环境下腐蚀电流为 I_c ，环境作用时间为 T ，对应产生的腐蚀量为 Q ；在另一种环境条件下腐蚀电流为 I'_c ，作用时间为 t ，腐蚀量为 Q' ，根据式(3)，则有

$$Q' = \frac{1}{F} \int_0^t I'_c d\tau \quad (4)$$

根据腐蚀量等效准则 $Q = Q'$ ，进一步有

$$\frac{1}{F} \int_0^T I_c d\tau = \frac{1}{F} \int_0^t I'_c d\tau \quad (5)$$

大量实验表明：金属材料在一定环境作用时间范围内， I_c 、 I'_c 随时间变化很小，可近似认为是常数，故有 $I_c T = I'_c t$ ，进一步有 $t = \frac{I'_c}{I_c} T$ ，记 $\alpha = \frac{I'_c}{I_c}$ 为 2 种腐蚀环境折算因子(简称环境因子)，则有

$$t = \alpha \cdot T \quad (6)$$

其中环境因子 α 由 2 种腐蚀环境决定。

式(6)表明，2 种环境下产生相同的腐蚀量所用时间成比例。

再根据式(1)，仍然标记 2 种环境产生相同腐蚀量的作用时间分别为 t 和 T ，则有

$$A_1 \cdot t^n = A_2 \cdot T^n \quad (7)$$

进一步有

$$\frac{A_1 \cdot t^n}{A_2 \cdot T^n} = \frac{A_1 \cdot (\alpha T)^n}{A_2 \cdot T^n} = \frac{A_1 \cdot \alpha^n \cdot T^{n-n_2}}{A_2} = 1 \quad (8)$$

即 $\frac{A_1}{A_2} \cdot \alpha^n \cdot T^{n-n_2} = 1$ 与腐蚀时间无关，有 $n_1 = n_2$ ，

由此，当金属腐蚀服从法拉第定律，腐蚀电流随时间变化很小，模型(1)中的参数 n 受环境影响很小，主要与金属特性有关，由此设计装备腐蚀剩余寿命预测方法如下：

- 1) 基于加速腐蚀试验或相同材料历史数据，根据模型(1)，统计模型中的参数 n 估计值；
- 2) 采集装备在实际服役环境中的腐蚀数据，根据第一步确定的 n ，计算模型(1)中的参数 A 估计值；
- 3) 根据所确定的 2 个参数估计值，预计给定时

刻 t 的腐蚀量，进而预测装备腐蚀剩余寿命。

3 示例分析

设对某金属结构件，取 5 个样品在腐蚀试验箱中进行加速腐蚀试验，每 1 个样品为 1 组，在试验箱内每进行 1 h 实验作为一个实验周期，每个周期后取一组试件对腐蚀情况进行检测，以失重率为参数，5 个周期后的实验结果如表 2。

表 2 加速腐蚀试验下试验件腐蚀失重 g

实验周期/h	腐蚀前质量	腐蚀后质量	腐蚀失重
1	3 678.544	3 678.343	0.201
2	3 671.312	3 671.010	0.302
3	3 669.875	3 669.543	0.332
4	3 676.462	3 676.112	0.350
5	3 677.148	3 676.716	0.432

金属结构件失重数据及其拟合结果见图 3。

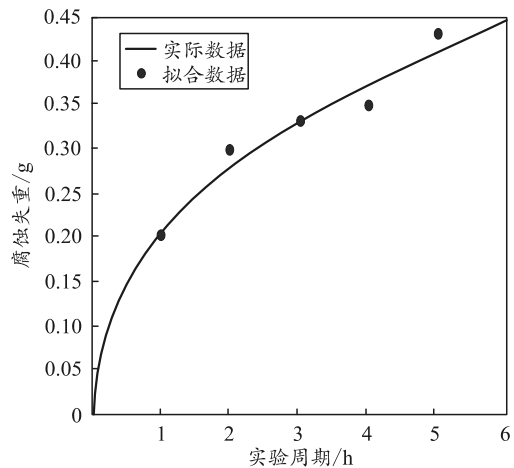


图 3 金属结构件失重数据拟合

拟合函数为

$$W = 0.2 \times t^{0.45} \quad (9)$$

即该金属结构件对应的模型(1)中的参数 $n = 0.45$ ，进一步假设该结构件在服役环境下 2 月的腐蚀失重为 0.2 g，根据模型(1)，可直接求出模型(1)中参数 $A = 0.1464$ ，则在该服役环境下服役 1 a，腐蚀失重为 $W = 0.1464 \times 12^{0.45} = 0.4479$ g，根据预计的腐蚀失重量可评估在腐蚀失重 0.4479 g 时的结构件寿命。

4 结束语

目前，装备腐蚀是海军装备在使用过程中面临的关键问题之一，不仅影响装备的作战效能，而且影响了装备维修、保障等工作。笔者针对装备在海洋大气环境中的腐蚀问题，给出了装备腐蚀量预测方法，可用于装备腐蚀寿命预测提供技术支持，也可为海军装备维修保障等工作提供技术参考。

参考文献:

- [1] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. $\times\times$ 飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 24-29.
- [2] 谭晓明, 王德, 衣俸贤, 等. 当量加速腐蚀条件下飞机结构耐久性评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 84-89.
- [3] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
- [4] 张栋. 确定飞机日历寿命用的当量环境谱研究[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 128-132.
- [5] 张福泽. 飞机停放日历寿命腐蚀温度谱的编制方法和相应腐蚀介质的确定[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 359-362.
- [6] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 50-59.
- [7] 陈跃良, 卞贵学, 郁大照, 等. 腐蚀环境下飞机结构疲

劳全寿命评估模型[J]. 机械强度, 2012, 34(1): 137-143.

- [8] 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002: 55-60.
- [9] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.
- [10] 陈刚, 蒋浦宁. 汽轮机部件应力腐蚀寿命评估方法研究[J]. 热力透平, 2012, 41(3): 179-184.
- [11] 丁国清, 张波. 钢在自然环境中的大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 42-47.
- [12] 张大全. 大气腐蚀和气相腐缓蚀剂应用技术[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(3): 273-277.
- [13] 刘嘉焜. 应用随机过程[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 1-355.
- [14] COX D R, MILLER H D. The Theory of Stochastic Processes[J]. Mathematical Gazette, 1966, 51(377): x-262.
- [15] 谭晓明, 穆志韬, 张丹峰, 等. 海军飞机结构当量加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 9-12.

(上接第 4 页)

6 结束语

笔者将单机个体的路径跟踪控制与多机群体的集中控制相结合, 设计并实现了多架无人机空中自动协同编队飞行, 可有效解决军事对抗训练过程中使用无人机对多战机协同编队飞行进袭态势的模拟问题。该方法适用于具备空中组网通信或地面集中通信的亚音速和低速无人机。目前, 该方法已在工程实践得以应用, 协同编队控制效果较好, 可满足实际使用需求。

参考文献:

- [1] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
- [2] 刘超. 无人机协同编队队形保持控制算法研究[D]. 沈

阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 3.

- [3] 王晋云, 魏瑞轩, 董志兴, 等. 无人机编队飞行控制仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(3): 34-38.
- [4] 欧超杰. 多无人机编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 3.
- [5] 沈佩璐. 小型高速无人机及其协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 3.
- [6] 赵国立. 无人机三维编队队形结构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 3.
- [7] 秦昂, 张登成, 魏扬. 多无人机编队队形保持优化控制仿真研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(6): 44-48.
- [8] 李知宇, 刘爱东, 王丰. 基于无人机的嵌入式标校系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 6-9.
- [9] 李腾. 有人/无人机协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 3.