

# 海军导弹装备结构件腐蚀寿命预测研究

赵建印, 王玺, 刘星

(海军航空大学, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 针对装备腐蚀影响导弹战备值班时间、技术状态完好性等问题, 通过分析海军导弹装备结构件腐蚀特点及服役环境特点, 基于 Wiener-Einstein 过程随机理论, 研究给出了导弹结构件腐蚀量增长下的退化失效模型, 基于腐蚀量数据特点, 给出了腐蚀寿命模型参数估计方法, 该方法可为海军导弹装备腐蚀寿命预测、岛礁导弹装备维修决策、保障等工作提供技术支持和理论指导。

**关键词:** 导弹装备; 腐蚀; 寿命预测; 腐蚀控制

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.04.009

**中图分类号:** TG172.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)04-0051-04

## Corrosion Life Prediction of Naval Missile Structure Parts

ZHAO Jian-yin, WANG Xi, LIU Xing

(Naval Aviation University, Yantai 264000, China)

**ABSTRACT:** Aiming at equipment corrosion affecting missile operational readiness time and technical condition integrity, the degradation failure model of missile structural parts under the increase of corrosion amount was given based on Wiener-Einstein process stochastic; parameter estimation method for corrosion life model was given based on the characteristics of corrosion amount data according to the analysis of the corrosion characteristics and service environment characteristics of naval missile structural parts. This method can provide technical support and theoretical guidance for corrosion life prediction of naval missile equipment, maintenance and support of island-reef missile equipment.

**KEY WORDS:** missile equipment; corrosion; life prediction; corrosion control

海军导弹装备在服役过程中会反复经历运输、库房贮存、阵地值班等不同任务, 导弹装备在阵地上值班过程中的质量状态、可靠性水平是表征其作战效能的重要方面。环境是影响导弹装备质量状态、可靠性的重要因素。导弹装备使用环境主要为我国东南沿海及海上岛礁, 属于亚热带、热带海洋性气候, 具有长期高温、高湿、高盐雾、雨量充沛、日照时间长、太阳辐射强度大等特征。高温、高湿、高盐雾、淋雨、高太阳辐射、沙尘等应力综合作用, 会产生强烈的腐蚀效应, 因此, 腐蚀问题是目前海军导弹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]则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][3][5]研究了当量加速环境谱的编制方法; 文献[7-10]对飞机或其他结构件腐蚀环境下的寿命预测、评估问题进行了研究。从文献上看, 对岸防导弹装备开展腐蚀寿命预测的研究并不多, 文中结合导弹装备任务特点, 基于加速腐蚀试验原理, 研究了基于加速腐蚀的导弹装备腐蚀寿命预测方法, 提出的方法可为岸防导弹装备腐蚀寿命预测、维修保障等工作提供支持。

## 1 腐蚀问题分析

高盐雾浓度是海军导弹装备使用环境最显著的

特点之一,也是引起导弹装备损坏的主要环境因素。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。我国东南沿海地区主要环境条件:高温记录极值为 40℃;高露点温度记录极值为 26~28℃;最大相对湿度为 100%;年平均湿度为 86%(海南加积地区平均值);年降水量为 2077 mm(海南加积地区 19 年平均值);年日照时间为 2225 h,太阳辐射量为 568.75 kJ/cm<sup>2</sup>;高盐雾浓度,海南榆林基地大气中的氯化钠含量见表 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
NaCl 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.38	0.157	0.071	0.04

海军导弹装备的腐蚀问题主要为各类车辆底盘、车舱、结构件、螺钉铆钉、紧固件、铭牌等部位的腐蚀生锈。车辆底盘腐蚀生锈主要存在于尾气管、支架、蹬车踏板等部位;车上方舱腐蚀生锈主要存在于舱口踏板、基座下部、结构件、紧固螺栓(含放松垫圈)、舱外绞件、电缆插头、液压管路和阀件等部位。

从导弹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,即遍布金属整个表面或连成一片的腐蚀破坏。在海洋性气候中,缺乏有效防护的金属表面或表面防护层失效,被破坏的金属表面极易发生此类腐蚀。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,不同腐蚀电位的两种或两种以上金属(或同一个金属的两个部位),在电解质溶液中接触时,造成局部腐蚀。

3) 缝隙腐蚀,铆接、焊接、螺钉紧固等方式连接时,在连接的部位会形成缝隙,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。

车辆舱表面生锈主要是表面漆龟裂、裂开表面鼓泡等问题导致的,表面漆龟裂、裂开是由于以下原因: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;在底漆尚未干透的情况下喷面漆,导致面漆粘结不牢;喷涂底漆前清洗不到位,外表面残留有油液、灰尘、水汽等,导致底漆粘附不牢固,出现裂纹或脱落现象;底漆的浓度也对面漆的粘附影响较大,过稀则面漆粘固不牢,过稠则面漆呈块状,有裂纹。

舱表面鼓泡是由于方舱铆钉封堵不充分造成水积累,形成水泡。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:使用中经常磕碰,导弹装备表面掉漆;表面漆与底漆附着不紧造成掉漆;掉漆后未及时补

漆,引起锈蚀;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。

液压系统零部件变色腐蚀主要有以下原因:运动部件经常摩擦,表面润滑油容易消耗掉,失去油脂的保护,使部件生锈;油缸部件由于材料耐腐蚀性能不高,易锈蚀;在整车喷砂处理过程中,被少量砂粒击中,表面镀层受到影响。

电缆绝缘层及护套有裂纹、破损、掉漆主要有以下原因: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;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;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 腐蚀寿命模型

结构件产生腐蚀生锈一方面影响导弹装备外观,另一方面会影响导弹装备的力学性能。导弹装备结构件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件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。

腐蚀条件下的导弹装备结构件寿命一般包括腐蚀潜伏期和腐蚀扩展期两个阶段:腐蚀潜伏期是指腐蚀出现前结构件的寿命区间,潜伏期的长短与结构件金属表面的漆层/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结构件因为腐蚀降低至限制载荷时的寿命区间。由于导弹装备进入扩展期后,其腐蚀防护层已经被破坏,其腐蚀速率主要决定于结构材料种类和腐蚀环境介质。研究导弹装备的腐蚀寿命的重点是研究导弹装备在特定腐蚀环境下的腐蚀速率,因此,这里只考虑腐蚀扩展期。1916年起,美国试验与材料学会通过积累的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<sup>[11]</sup>:

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

式中: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,更多试验数据表明,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<sup>[12]</sup>。因此,研究岸防导弹装备结构件腐蚀寿命预测时,采用幂函数方程来表征其腐蚀扩展规律。

衡量结构件腐蚀损伤的物理量一般取蚀坑深度、质量损失、腐蚀面积、结构表面涂层的绝缘电阻等,

这些量之间是存在统计关系的，这里取蚀坑深度作为腐蚀量。由于海岛及海岸腐蚀环境恶劣，腐蚀时间较短（时间单位按天计算，而非按年），所以这里近似认为  $n=1$ ，即  $W=A \cdot t$ 。由于个体间差异的随机性，同一类构件在同一种环境下表现出来的腐蚀情况也有所不同。一般来说，随着使用时间的增长，各产品个体间腐蚀差异会越来越大，呈喇叭口状。一维情况下的 Brown 运动被称为 Wiener-Einstein 过程<sup>[13]</sup>，设  $w(t)$  表示  $t$  时刻微粒的坐标， $w(0)=0$ 。设  $t>s$ ，则位移  $w(t)-w(s)$  是许多相互独立的微小位移之和。由中心极限定理，应服从正态分布，根据 Brown 运动的特性，有  $E[w(t)-w(s)]=0$ ，而方差与  $(t-s)$  成正比，即  $D[w(t)-w(s)]=\sigma^2(t-s)$ ，因此， $w(t)-w(s) \sim N(0, \sigma^2 \cdot |t-s|)$ 。另外，该位移过程具有独立增量，即对于任意  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$  ( $n > 2$ )，诸增量  $w(t_2)-w(t_1), \dots, w(t_n)-w(t_{n-1})$  相互独立，这就是 Wiener-Einstein 过程。根据该随机过程的特性，可以用它来描述构件腐蚀个体间状态差异随时间的变化情况。

根据式 (1)，构件腐蚀均值函数为  $E[W]=A \cdot t$ ，则可将  $t$  时刻容值退化量表示为：

$$W = A \cdot t + w(t) \tag{2}$$

其中  $w(t)$  服从 Wiener-Einstein 过程，即  $w(t) \sim N(0, \sigma^2 t)$ ， $\sigma$  为未知参数。

当腐蚀达到某阈值  $l$  的时刻，即为腐蚀失效，即： $T = \inf\{t | W \geq l, t \geq 0\}$  \tag{3}

该式的含义为： $W(0)=0$ ， $W(t) < l$  ( $0 \leq t < T$ ) 且  $W(T)=l$ ，即：

$$P\{T \geq t\} = P\{W(\tau) < l \ (0 \leq \tau < t), W(t) \leq l\} \tag{4}$$

设  $t$  时刻  $W$  的分布密度为  $g_c(x, t)$ ，则：

$$P(W(\tau) < l \ (0 < \tau < t), W(t) \leq x) = \int_{-\infty}^x g_w(\xi, t) d\xi \tag{5}$$

设结构件的失效概率分布密度函数为  $f(t)$ ，则：

$$\begin{aligned} f(t) &= -\frac{\partial}{\partial t} P(T \geq t) \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} P(W(\tau) < l \ (0 \leq \tau < t), W(t) \leq l) \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^l g_w(\xi, t) d\xi; \ t > 0 \end{aligned} \tag{6}$$

求  $f(t)$  的关键是求出  $g_w(x, t)$ 。文献[13]在研究 Wiener-Einstein 过程首次达时分布时，通过在  $x=l$  处定义一个吸收栏，利用 Kolmogorov 前向方程给出了  $g_w(x, t)$  的形式， $g_w(x, t)$  为：

$$\begin{aligned} g_w(x, t) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-A \cdot t)^2}{2\sigma^2 t}\right] - \right. \\ &\left. \exp\left[\frac{2Al}{\sigma^2} - \frac{(x-2l-At)^2}{2\sigma^2 t}\right] \right\} \end{aligned} \tag{7}$$

则：

$$\begin{aligned} f(t) &= -\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^l g_w(\xi, t) d\xi \\ &= -\frac{d}{dt} \left[ \Phi\left(\frac{l-At}{\sigma\sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2Al}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-l-At}{\sigma\sqrt{t}}\right) \right] \\ &= \varphi\left(\frac{At-l}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2Al}{\sigma^2}\right) \varphi\left(\frac{-l-At}{\sigma\sqrt{t}}\right); \ t > 0 \end{aligned} \tag{8}$$

其中  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ ，为标准正态分布函数， $\varphi(x)$  为其密度函数。

对应的结构件的失效分布函数为：

$$F(t) = \Phi\left(\frac{At-l}{\sigma\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2Al}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-l-At}{\sigma\sqrt{t}}\right) \ t > 0 \tag{9}$$

式中： $A$ 、 $\sigma$  为失效分布函数的未知参数； $l$  为退化失效阈值，已知。

### 3 腐蚀寿命模型参数估计方法

可利用结构件随时间变化的腐蚀数据对其寿命模型进行估计，即利用统计数据，估计模型 (8) 中的未知参数  $A$  与  $\sigma$ 。一般腐蚀数据形式可为  $\{w_{ij}; i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n\}$ ，其中  $w_{ij}$  表示第  $i$  个样品的第  $j$  次测量所得的腐蚀数据。

由于  $W(t) \sim N(At, \sigma^2 t)$ ，可以采用极大似然估计法进行求解。

由式 (2) 可得，不同时刻  $t_i$ 、 $t_j$  ( $t_i < t_j$ ) 时的腐蚀量的差  $W(t_j)-W(t_i) = A(t_j-t_i) + [w(t_j)-w(t_i)]$ ，服从正态分布  $N(A(t_j-t_i), \sigma^2 \cdot (t_j+t_i))$ ，因此利用数据  $\{w_{ij}; i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n\}$ ，可得各测量时刻间的腐蚀增量为  $\Delta x_{ij} = w_{ij+1} + w_{c_{ij}}$ ，( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n-1$ )。由此腐蚀增量数据，可得到未知参数  $A$  与  $\sigma$  的似然函数：

$$\begin{aligned} L(A, \sigma) &= \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_{j+1}-t_j)}\sigma} \\ &\exp\left[-\frac{(\Delta x_{ij} - A(t_{j+1}-t_j))^2}{2\sigma^2 \cdot (t_{j+1}-t_j)}\right] \end{aligned} \tag{10}$$

利用方程组  $\frac{\partial \ln(L(A, \sigma))}{\partial A} = 0$ ， $\frac{\partial \ln(L(A, \sigma))}{\partial \sigma} = 0$  即可求得参数  $A$  与  $\sigma$  极大似然估计值  $\hat{A}$ ， $\hat{\sigma}$ 。

### 4 结语

导弹装备腐蚀目前是海军导弹装备在使用过程中面临的重要关键问题之一，腐蚀问题不止影响导弹装备的作战效能，对导弹装备维修、保障等工作也影响巨大。文中针对导弹装备腐蚀问题，基于导弹装备结构件腐蚀机理，给出了结构件腐蚀寿命的概论模

型,并进一步给出了模型参数求解方法。该方法可为海军导弹装备腐蚀寿命预测、岛礁导弹装备维修保障等工作提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 张勇,陈跃良等,樊伟杰. × 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. 腐蚀累积损伤理论研究与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [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.
- [14] COX D R, MILLER H D. The Theory of Stochastic Processes[M]. London: Methuen and Company, 1965.