doi:10.11887/j.cn.202104013 http://journal.nudt.edu.cn

考虑腐蚀因素的船体结构寿命预测方法*

牟金磊,滑 林,张仲良,吴 梵,彭 飞,闵少松
(海军工程大学 舰船与海洋学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:为建立考虑腐蚀因素的船体结构寿命预测方法,在分析现有常用的船体结构腐蚀损伤时变模型的基础上,根据舰船维修保障实际情况建立了考虑腐蚀防护系统作用时间和维修时间等因素的腐蚀时变模型。根据相关规范选择了船体结构腐蚀寿命标准,并建立了一种计算船体结构腐蚀寿命的方法。该方法建立了船体结构腐蚀寿命与腐蚀防护系统作用时间和修理时间等因素之间的量化关系,可以用于预测均匀腐蚀条件下船体结构寿命,也可以反过来指导腐蚀防护系统设计指标的选择和船体结构维修策略的确定。

关键词:船体结构;腐蚀时变模型;寿命预测;腐蚀防护;船体修理
中图分类号:U661 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2021)04-102-06

Life prediction method of hull structures considering corrosion factors

MU Jinlei, *HUA Lin*, *ZHANG Zhongliang*, *WU Fan*, *PENG Fei*, *MIN Shaosong*
(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to establish a life prediction method for hull structures considering corrosion factors, based on the analysis of the existing time-varying corrosion damage models of ship hull structures, a time-varying corrosion model considering the factors of action time and maintenance time of corrosion protection system was established according to the actual situation of ship maintenance support. According to the relevant codes, the lifetime standard of hull structure was selected and a prediction method for calculating the lifetime of hull structures was established. The method established the quantitative relationship between the lifetime of hull structure and the factors such as the action time and repair time of corrosion protection system. This method can be used to predict the life of ship structure under uniform corrosion condition, and in turn can be used to guide the selection of design indexes of corrosion protection system and the determination of maintenance strategy of hull structure.

Keywords: hull structure; time-varying corrosion model; life time prediction; corrosion protection; hull repair

腐蚀是导致船体结构失效的主要原因之一,因此腐蚀也是决定船体结构寿命的重要因素[1-2]。要预测船体结构的使用寿命,必须准确描述船体结构腐蚀随时间变化情况。由于船舶结构腐蚀成因与发展规律都非常复杂,与船舶结构本身的材料特性,与温度、湿度、盐度等自然环境因素,与船舶腐蚀防护系统特性和维修保养措施等都密切相关,所以建立准确的腐蚀时变模型非常难,很多学者在该领域做了大量的理论、试验和统计等工作,建立了众多的腐蚀时变模型[3-7],但是每一种模型都有自己的局限性或有特定的适用范围。船体结构极限承载能力通常用船体梁横向剖面模数来表示[8],船体腐蚀会导致剖面模数发生变化,进而影响船体结构寿命。正因为腐蚀时变的复杂性,关于船体结构腐蚀寿命的预测和评估[1]研究多基于匀速腐蚀假设,从统计的角度来讲,得到了船体结构寿命的量化结论,但是寿命的变化趋势显然与实际情况有所不同。

本文在分析现有常用的船体结构腐蚀损伤时变模型的基础上,根据舰船维修保障实际情况建立了考虑腐蚀防护系统作用时间和维修时间等因素的腐蚀时变模型,并建立了考虑腐蚀因素的船体结构寿命计算方法,该方法可以用于预测船体结构腐蚀寿命,也可以反过来指导腐蚀防护系统设计指标的选择和船体结构维修策略的确定。

1 船体结构寿命定义

预测船体结构寿命,需要首先对船体结构的寿命进行定义。船体结构寿命[1]一般可以分为自然寿命、经济寿命和技术寿命。

船体结构自然寿命是指船体结构从开始投入使用起,仅考虑自然环境影响,导致船体产生耗

* 收稿日期:2019-11-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779261);海军工程大学自然科学基金资助项目(20161595)
作者简介:牟金磊(1980—),男,山东寿光人,讲师,博士,E-mail:mjl1007@163.com

损、破坏、直至报废所经过的时间。船体结构经济寿命是仅考虑经济因素分析船体结构的最佳使用时间。船体结构技术寿命是指从技术角度出发,船体结构从开始投入使用直至因技术落后而淘汰所经历的时间。由于在舰艇服役期间结构方面所花费的费用在总费用中占的比例较小,所以经济因素在确定船体结构寿命中的权重较低;船体结构技术较为成熟,较少出现由于船体结构技术落后而导致退役的现象。因此本文主要讨论船体结构的自然寿命。

船体强度是船体结构自然寿命的最重要的指标之一。在服役过程中,船体结构最常见的损伤形式主要有腐蚀、变形和裂纹三种类型,与变形和裂纹相比,腐蚀是导致金属船体强度降低的最为普遍的因素。金属船体的腐蚀又可以细分为:点腐蚀、局部腐蚀和均匀腐蚀。但是从对船体结构强度影响程度分析,点腐蚀和局部腐蚀可以通过局部修理予以恢复,对船体强度不会构成致命的威胁。均匀腐蚀无法避免且难以修复,会直接危及船体的总纵强度和局部强度,是船体结构强度降低最重要的影响因素。因此,本文主要在均匀腐蚀条件下对船体强度进行计算,进而对船体结构的自然寿命进行分析。

2　船体结构腐蚀损伤时变模型

2.1　现有腐蚀时变模型及其适用条件分析

船体腐蚀损伤时变模型是开展船体剩余使用寿命研究的基础,当前常用的腐蚀损伤模型有:Melchers 腐蚀模型、Guedes Soares 腐蚀模型、Paik 模型和秦圣平腐蚀模型。

1)Melchers 腐蚀模型。20 世纪 90 年代,学者 Melchers 通过观察金属腐蚀产物随时间的变化关系,在前人研究的基础上提出了三线性腐蚀模型[3],其计算公式为:

$$d(T)=\begin{cases}0.170T & 0\leqslant T<1\\ 0.152+0.018\,6T & 1\leqslant T<8\\ -0.364+0.083T & 8\leqslant T\leqslant 16\end{cases}\quad(1)$$

式中,$d(T)$ 为板的腐蚀厚度,单位为 mm;T 为舰艇服役时间,单位为 a。

Melchers 模型反映了不同时期腐蚀速率的不同,与匀速腐蚀假设相比更符合实际情况,但是该模型未考虑腐蚀防护系统的影响,仅适用于腐蚀防护的结构,因此该模型在船体结构腐蚀厚度预测中会有较大误差。

2)Guedes Soares 腐蚀模型。学者 Guedes Soares 基于板材的腐蚀损伤机理,将腐蚀损伤过程分为三个阶段:①无腐蚀阶段,由于腐蚀防护系统正常工作,Guedes Soares 认为该阶段构件没有发生腐蚀损伤现象;②腐蚀系统失效阶段,该阶段腐蚀系统失去作用,构件开始腐蚀且腐蚀速率最大;③腐蚀阶段,Guedes Soares 认为构件表面堆积的腐蚀物会阻止构件进一步腐蚀,构件的腐蚀速率逐渐下降。基于上述三个腐蚀损伤阶段,Guedes Soares 利用微分方程,提出了构件非线性腐蚀模型[4],对应的计算公式为:

$$d(T)=\begin{cases}0 & T\leqslant T_{st}\\ d_m\left[1-\exp\left(\dfrac{T_{st}-T}{\alpha}\right)\right] & T>T_{st}\end{cases}\quad(2)$$

式中:d_m 为构件的腐蚀最大允许值,单位为 mm;T_{st} 为腐蚀防护有效时间;α 为腐蚀防护系统开始失效到彻底失效的过渡时间,其大小为 $\alpha=d_m/k$(k 为构件开始腐蚀时刻曲线斜率)。

Guedes Soares 腐蚀模型由于考虑了腐蚀防护系统的作用,较 Melchers 腐蚀模型更为合理。但由于该模型认为腐蚀损伤防护系统是完全失去防护作用后构件才开始腐蚀,这就导致腐蚀速率发生跳跃,这与实际过程防护系统逐渐失效的实际情况不符。此外,Guedes Soares 在建立该模型过程中没有考虑海水冲刷引起的涂层脱落现象。综上,Guedes Soares 腐蚀模型在船体结构腐蚀计算中也会有出现与实际不符的情况。

3)Paik 腐蚀模型。Paik 通过对数十艘散货船的腐蚀损伤数据进行统计分析,建立了腐蚀损伤线性模型[6],即 Paik 双参数腐蚀模型。其计算公式为:

$$d(T)=c_1(T-T_{st})\quad T\geqslant T_{st}\quad(3)$$

式中:c_1 为腐蚀速率,满足威布尔分布。

随后,Paik 在数万个现役散货船腐蚀损伤数据的基础上,对 Paik 双参数腐蚀模型进行了修正,得到了 Paik 三参数腐蚀损伤模型,其计算表达式为:

$$d(T)=c_1(T-T_{st})^{c_2}\quad T\geqslant T_{st}\quad(4)$$

该模型将构件腐蚀过程明确分为两个阶段:当 $T<T_{st}$ 时为未发生腐蚀阶段;当 $T\geqslant T_{st}$ 时为腐蚀发生阶段,并假定在腐蚀防护失效后腐蚀立即开始。由于 Paik 腐蚀模型是基于实船腐蚀损伤数据拟合得到的,因此该模型在工程实际中应用较 Guedes Soares 腐蚀模型更为广泛。

4)秦圣平腐蚀模型。秦圣平、崔维成在 Guedes Soares 腐蚀模型和 Paik 腐蚀模型的基础上,提出了威布尔函数形式的腐蚀损伤模型[7],其表征形式为:

$$d(T)=\begin{cases}0 & 0\leqslant T\leqslant T_{\mathrm{st}}\\ d_{\mathrm{m}}\left\{1-\exp\left[-\left(\dfrac{T-T_{\mathrm{st}}}{\alpha}\right)^{\gamma}\right]\right\} & T_{\mathrm{st}}<T\leqslant T_{\mathrm{L}}\end{cases} \tag{5}$$

式中：T_{L} 为船体结构的使用寿命；d_{m} 为船体构件腐蚀所能达到的极限厚度，对于船体构件通常取板厚；α、γ 为根据统计数据确定的计算系数。

秦圣平腐蚀模型在描述海水全浸带钢材腐蚀进程中具有良好的适应性，腐蚀模型考虑到了腐蚀防护系统的作用，系统失效前无腐蚀现象发生，在腐蚀防护系统失效后存在加速、减速腐蚀阶段。这与有腐蚀防护系统的腐蚀损伤实际过程吻合较好。但当时间跨度较大时，未考虑腐蚀防护系统维修的情况，这与舰艇维修保障实际运行情况不符。

2.2 考虑维修因素的船体腐蚀损伤时变模型

现有的腐蚀时变模型在用于船体结构腐蚀计算时都有与实际不符的方面。根据国内外舰艇维修保障实际情况，在使用一段时间后，舰艇会进行不同级别的修理，其中腐蚀防护系统的修理是一个重要方面。由于秦圣平腐蚀模型在描述海水全浸带钢材腐蚀进程中具有良好的适应性，假设在一个修理周期内，腐蚀满足秦圣平腐蚀模型，腐蚀防护系统修理后则进入下一个腐蚀周期，其腐蚀时变特点根据修复后的腐蚀防护系统指标和上一个修理周期结构剩余厚度确定，根据这一思路，在舰艇全寿命周期内，船体结构腐蚀过程可以描述为分阶段多次运用秦圣平腐蚀模型的过程。在第 $i(i\geqslant 1)$ 个修理周期内的腐蚀厚度可以表示为：

$$d_i(T)=\begin{cases}0 & T_{i-1}\leqslant T\leqslant T_{i-1}+T_{\mathrm{st}}\\ d_{\mathrm{m}}\left\{1-\exp\left[-\left(\dfrac{T-T_{\mathrm{st}}-T_{i-1}}{\alpha}\right)^{\gamma}\right]\right\} & T_{i-1}+T_{\mathrm{st}}\leqslant T\leqslant T_i\end{cases} \tag{6}$$

则 T 时刻累计的腐蚀厚度 $d(T)$，应该是此前历次腐蚀的累加：

$$d(T)=\sum d_i(T) \tag{7}$$

其中：T_i 为第 i 次腐蚀防护系统修理时间，$T_0=0$，若等间隔修理，则 $T_i=T_{i-1}+\Delta T$，ΔT 为修理间隔；其余符号的含义均与秦圣平模型相同，这样，本模型是一个分段函数。实际上，秦圣平腐蚀模型是该修正模型 $i=1$ 条件下的特例。

文中的腐蚀模型数据均为随机变量，在模型建立过程中，结合秦圣平腐蚀模型，以实船典型结构腐蚀速率均值建立的腐蚀模型。防护失效时间的确应该是随机变量，但在实际操作中，很难确定其统计特征。为此，本文基于某型舰艇实际勘验的腐蚀损伤数据，选取了几个数值，探讨了腐蚀防护系统开始失效时间对船舶使用寿命的影响。初步确定腐蚀模型中的计算参数，α 取 9.0，γ 取 2.0，T_{st} 取 4 a，ΔT 取 6 a，利用秦圣平腐蚀模型和本文建立的修正模型预测的某舰钢板腐蚀厚度随时间变化的曲线如图 1 所示。秦圣平腐蚀模型能较好地模拟有腐蚀防护系统的腐蚀损伤过程，但是没有考虑腐蚀防护系统修理情况；修正模型在第一次修理之前与秦圣平模型完全重合，修理后腐蚀防护系统发挥作用，结构腐蚀减慢，直到腐蚀防护系统再次失效，结果显示修正模型与舰船实际运行更为相符。

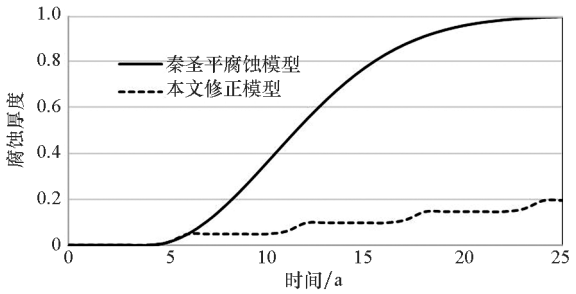


图 1 不同模型预测钢板腐蚀厚度随时间变化

Fig. 1 Prediction of corrosion thickness of steel plate with time by different models

需要说明的是，模型中的几个参数不是固定不变的，ΔT 表征维修间隔，属于维修管理问题，可根据计划修理时间确定；T_{st} 表示腐蚀防护系统的作用时间，α 和 γ 与腐蚀速度相关，可根据维修时舰船腐蚀勘验数据确定或修正。

3 船体结构腐蚀寿命预测方法

3.1 船体结构腐蚀寿命标准选取

船体结构腐蚀达到何种程度会导致船体结构无法正常使用，非常难以界定，这就需要首先确定或选择一个船体结构腐蚀寿命标准。

船体结构强度分为总强度和局部强度，两者都与结构尺寸有直接关系，所以船体结构腐蚀寿命可以分为船体总强度剩余寿命和局部强度剩余寿命，船体结构剩余寿命可选取两者中的小者作为船体结构剩余寿命。但是考虑到局部腐蚀可以通过换板修理予以恢复，对于水面战斗舰艇总纵强度是首要的，所以船体结构腐蚀寿命一般只考虑船体总纵强度，只有当局部强度无法恢复时，才考虑局部强度的影响。因此，重点分析总纵强度的船体结构腐蚀寿命。

无论是《舰船通用规范》(GJB4000 - 2000)还是中国船级社《钢质海船入级与建造规范》都没有明确的船体总纵强度剩余寿命标准。现参考中国船级社《现有船状态评估程序(CAP)指南》(2011),当船体梁实际的剖面模数 $W_{act} < 0.9W$ 时认为是不可接受的状态,其中 W 是建造尺寸船体梁剖面模数或现行规范要求的船体梁剖面模数。因此,选择船体梁剖面模数降低到 $0.9W$ 时作为船体结构腐蚀寿命的标准。

3.2　船体结构腐蚀寿命计算

舰艇服役一段时间后,船体结构会发生腐蚀,船体梁剖面模数会下降,为计算腐蚀后船体梁剩余剖面模数,需要首先作出以下基本假设:

1)船体各构件为均匀腐蚀,各构件按一定比例关系同步变化。

2)船体的计算载荷在使用时间内不发生改变。

3)船体结构材料的力学特性在使用时间内不发生改变。

4)基于均匀腐蚀假设,考虑到服役周期内维修因素的存在,船体构件不会出现大面积的严重腐蚀现象,因此船体剖面的中和轴位置变化比较小,为简化理论分析,可以假设位置不变。

5)船体构件的腐蚀量远小于船体尺寸,因此计算中构件的重心距中和轴的位置变化较小,可以假定不因腐蚀而改变。

根据以上基本假设,可以得到计算剖面处的剖面积 A、静矩 S 以及剖面相对于中和轴的惯性矩 I 随时间变化的计算公式:

$$\begin{cases} A(T) = \sum_{j=1}^{n} b_j[t_j - d_j(T)] \\ S(T) = \sum_{j=1}^{n} b_j h_j[t_j - d_j(T)] \\ I(T) = \sum_{j=1}^{n} b_j (h_j)^2[t_j - d_j(T)] + \sum_{j=1}^{n} \dfrac{b_j[t_j - d_j(T)]^3}{12} \end{cases} \tag{8}$$

式中,b_j 为计算剖面处构件 j 的宽度,t_j 为构件 j 的初始厚度,h_j 为构件 j 到参考轴之间的垂直距离。

腐蚀损伤后,计算剖面处的最小剖面模数为:

$$W_{min}(T) = \min\left[\frac{I(T) - \dfrac{S^2(T)}{A(T)}}{h_d - \dfrac{S(T)}{A(T)}}, \frac{I(T) - \dfrac{S^2(T)}{A(T)}}{h_b - \dfrac{S(T)}{A(T)}}\right] \tag{9}$$

式中,$S(T)$ 为 T 时刻计算剖面的静矩,$A(T)$ 为 T 时刻计算剖面的面积,$I(T)$ 为 T 时刻计算剖面相对于中和轴的惯性矩,h_d、h_b 分别表示主甲板和船底外板到参考轴的最大距离。

综上,舰船结构腐蚀寿命 T 可以通过求解以下不等式获得:

$$W_{min}(T) \leqslant 0.9W \tag{10}$$

同时,利用式(10)可以根据腐蚀防护系统的技术指标和事先设计的维修时间来预测船体结构的使用寿命,也可以根据需要的船体结构使用寿命来进行腐蚀防护系统指标确定和维修时机决策。

3.3　船体结构腐蚀寿命影响因素分析

根据前面建立的腐蚀损伤时变模型、船体梁剩余剖面模数计算方法和船体结构腐蚀寿命计算方法可以得到船体梁剩余剖面模数随时间变化的规律。下面重点分析腐蚀防护系统开始失效时间和维修时间两个因素对船体结构腐蚀寿命的影响。

1)腐蚀防护系统开始失效时间 T_{st}。现役舰船一般 5 ~ 6 a 进行小修,对腐蚀防护系统进行修复,因此假设 6 a 进行一次腐蚀防护系统修理,腐蚀防护系统开始失效时间 T_{st} 定义为腐蚀防护系统完全有效的时间。图 2 给出了不同 T_{st} 下船体梁剩余剖面模数随时间变化的曲线,由于腐蚀模型是阶段函数,所以剩余剖面模数随时间变化也是阶段函数。从图 2 中可以看出,船体结构剩余剖面模数均随时间逐渐减小,T_{st} 越大,剩余剖面模数减少得越缓慢。由此可以看出,在修理时间不变的前提下,船体结构的寿命随 T_{st} 的变大而变大,图 3 为不同 T_{st} 下船体结构腐蚀寿命的变化曲线,当 T_{st} = 3 a 时,船体结构腐蚀寿命仅为 5.8 a,当 T_{st} = 4.5 a 时,船体结构腐蚀寿命可以到 23.6 a,当 T_{st} = 5 a 的船体结构在 50 a 内都不会腐蚀到寿命标准。

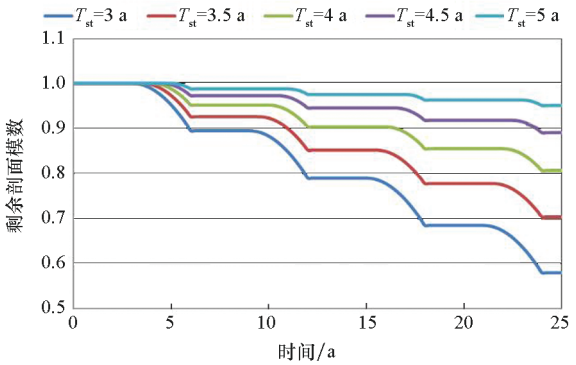


图 2　不同 T_{st} 船体梁剩余剖面模数随时间变化

Fig. 2　Modulus of residual section of hull girder changes with time under different T_{st}

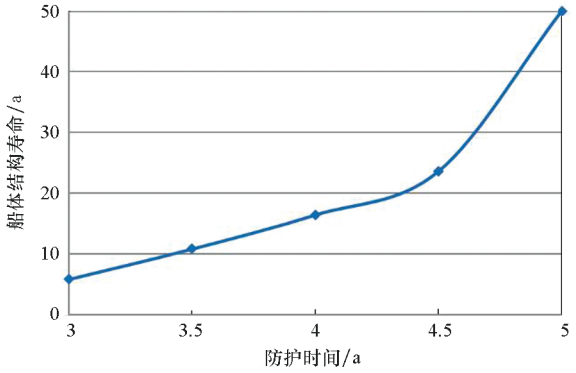


图 3 船体结构腐蚀寿命随 T_{st} 变化曲线

Fig. 3 Corrosion life curve of hull structure with T_{st}

由此可以看出,腐蚀防护系统完全防护时间对船体结构腐蚀寿命影响非常大,提高腐蚀防护系统的有效时间对提高船体结构腐蚀寿命有重要意义。

2)修理间隔 ΔT。在恶劣的海洋环境里,腐蚀防护系统的完全有效防护时间是有限的,因此在实际情况下往往通过舰船等级修理对腐蚀防护系统进行维修,恢复防护效果。为分析修理时间对船体结构剩余剖面模数、船体结构腐蚀寿命的影响,假设腐蚀防护系统的完全防护时间为 4 a,为简化计算假设采用等间隔修理,不同修理间隔 ΔT 情况下船体梁剖面模数随时间的变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出 ΔT 越大,船体梁剖面模数损失越快,船体结构腐蚀寿命随 ΔT 的变化如图 5 所示,$\Delta T=5$ a 时,船体结构腐蚀寿命约为 45 a,当 $\Delta T=7$ a 时,船体结构腐蚀寿命只能维持到 7 a 左右。

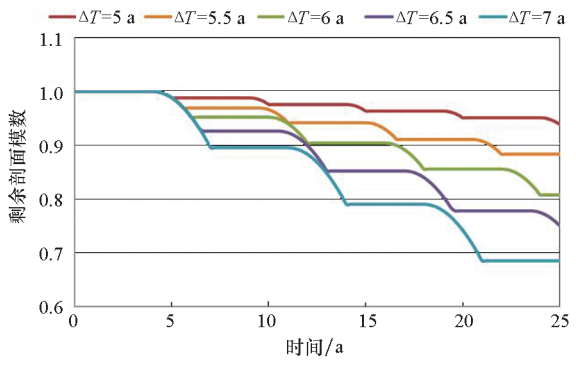


图 4 不同 ΔT 船体梁剩余剖面模数随时间变化

Fig. 4 Modulus of residual section of hull girder changes with time under different ΔT

由此可见,在腐蚀防护系统防护时间不变的情况下,缩短修理间隔能够大大提高船体结构的寿命,这与常识也是相符的。当然,船体结构腐蚀寿命应与舰船寿命相匹配,太短的修理间隔不利于舰船的在航率,经济性也较差,因此可以根据腐蚀防护系统的防护时间和舰船服役需求选择恰当的修理时间间隔。

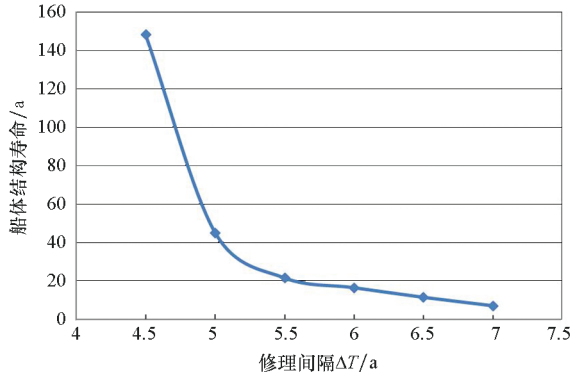


图 5 船体结构腐蚀寿命随 ΔT 变化曲线

Fig. 5 Corrosion life curve of hull structure with ΔT

需要指出的是,为简化计算本文仅仅分析了等间隔修理情况,本方法和结论对于非等间隔修理仍然适用。

4 结论

为分析腐蚀情况下船体结构的寿命,在现有腐蚀模型的基础上,根据舰船维修保障实际建立了船体结构腐蚀损伤时变模型,然后根据相关标准规范选择了船体结构的寿命标准,建立了考虑均匀腐蚀因素的船体结构腐蚀寿命计算方法,具有一定的工程实用性,并且简便易行,研究过程可以得到初步结论如下:

1)本文建立的腐蚀时变模型,综合考虑了腐蚀防护系统的作用时间、维修时间等多个因素,与舰船船体结构的维修保障实际相符。

2)船体结构腐蚀防护系统的开始失效时间、修理时间与船体结构腐蚀寿命密切相关,在已知这两个参数的前提下可以利用本文建立的方法进行船体结构腐蚀寿命预测。

3)本文建立的方法也可以在船体结构腐蚀寿命需求一定情况下对腐蚀防护系统的选择和修理时间的制定提供计算方法。

4)由于研究限于均匀腐蚀情况,因此本文建立模型适用于预报均匀腐蚀条件下船体结构寿命。

该方法主要是基于船体在均匀腐蚀条件下开展剩余剖面模数计算,未考虑不同位置结构腐蚀模型参数不一致的情形,对于该情况可以对不同位置构件细化不同的腐蚀时变模型进行计算,计算复杂性增加,但是思路一致。

参考文献(References)

[1] 邢涛, 宋保维, 赵志草, 等. 船体自然寿命分析[J]. 中国

造船, 2011, 52(3): 157 – 163.
XING Tao, SONG Baowei, ZHAO Zhicao, et al. Analysis of natural life of warship hull[J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(3): 157 – 163. (in Chinese)

[2] FENG G Q, HU B N, REN H L. Reliability of the ultimate strength of ship stiffened panel subjected to random corrosion degradation[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(1): 11 – 18.

[3] 郑如炎, 彭飞, 牟金磊. 基于 GM(1, N)模型的碳钢腐蚀速率预测[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 60 – 64, 113.
ZHENG Ruyan, PENG Fei, MU Jinlei. GM(1, N) model-based prediction of carbon steel corrosion rate[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(1): 60 – 64, 113. (in Chinese)

[4] MELCHERS R E. Probabilistic modeling of seawater corrosion of steel structures[C]//Proceedings of the International Conference on Applications Statistics and Probability in Structural and Geotechnical Engineering, Paris: ICASP, 1995: 265 – 270.

[5] SOARES C G, GARBATOV Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue under combined loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 52(1): 93 – 115.

[6] PAIK J K, KIMB S K, LEE S K. Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers[J]. Ocean Engineering, 1998, 25(10): 837 – 860.

[7] 秦圣平, 崔维成, 沈凯. 船舶结构时变可靠性分析的一种非线性腐蚀模型[J]. 船舶力学, 2003, 7(1): 94 – 103.
QIN Shengping, CUI Weicheng, SHEN Kai. A non-linear corrosion model for time variant reliability analysis of ship structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2003, 7(1): 94 – 103. (in Chinese)

[8] LI C F, FU P, REN H L, et al. Ultimate bearing capacity assessment of hull girder with asymmetric cross section[C]// Proceedings of ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2017.