

# 基于失效机理的 UUV 结构贮存寿命评价

王小康

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

**摘要** 针对贮存环境下无人潜航器 (UUV) 结构的贮存寿命评估问题, 以某型无人潜航器主要耐压结构件材料 5A06 为例, 分析无人潜航器耐压壳体结构实际使用环境因素和贮存寿命期间腐蚀失效机理, 提出了一种评价无人潜航器壳体贮存寿命的加速寿命试验和评价方法。结果表明: 该方法考虑了该类型无人潜航器环境应力对贮存寿命的影响, 采用腐蚀加速寿命试验的评价方法可行, 具有准确度和可信度高的特点。

**关键词** 无人潜航器结构; 贮存寿命; 加速寿命试验; 评价方法

中图分类号 TB114.3 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2021)05-0426-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.05.015

## Evaluation of Structural Storage Life of UUV Based on Failure Mechanism

WANG Xiaokang

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract** In view of the storage life evaluation of Unmanned Underwater Vehicle (UUV) structure under storage environment, the practical environment factors and the corrosion failure mechanism during storage life period of UUV pressure hull structure are analyzed by taking the main pressure structural component material 5A06 of an UUV as an example. An accelerated life test and evaluation method for evaluating the storage life of UUV hull are proposed. The results show that the method takes into account the impact of environmental stress on the storage life of this type of unmanned underwater vehicle. The evaluation method for corrosion accelerated life test is feasible and it has the characteristics of high accuracy and reliability.

**Key words** unmanned underwater vehicle structure; storage life; accelerated life test; evaluation method

## 0 引言

无人潜航器 (UUV) 作为在水下无人驾驶、自动控制和执行任务的水下航行器, 具有无人、小型化、隐身性好、多功能和多用途等一系列优点, 可以代替人类进行深海探测、搜救、情报监视、侦察等任务, 在军事和民用领域均具有良好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

无人潜航器结构是潜航器各种设备和设施的安装载体, 是无人潜航器执行各种任务的前提与基础。若结构不能满足寿命期内承压、水密的要求,

会造成重大经济损失, 导致任务延误或失败, 甚至重大的安全事故。同时, 由于无人潜航器全寿命周期中各类电子设备均可以更换, 一条无人潜航器的寿命主要取决于结构寿命, 因此无人潜航器结构的寿命评价对无人潜航器的寿命评定起着决定性的作用<sup>[4-6]</sup>。

使用方和研制单位均迫切希望尽快评估无人潜航器寿命, 便于在研制阶段评估无人潜航器结构是否满足贮存寿命要求, 提高装备可靠性和保障性, 制定维修保养、定期更换易损件等预防性维修

措施及产品报废方案。本文以某型无人潜航器为例, 分析贮存寿命失效机理并设计加速寿命试验, 评估无人潜航器结构贮存寿命。

## 1 国内外研究现状

铝合金由于强度接近高合金钢, 具有良好的耐腐蚀性和可加工焊接性, 广泛应用于航空、航天、航海、交通运输等领域, 由于其优良的综合性能成为飞机蒙皮和框架、航天器主结构、无人潜航器耐压结构的首选材料<sup>[7-8]</sup>。

国内外学者针对采用铝合金材料的装备进行了结构服役寿命研究和大量腐蚀疲劳试验, 在飞机和航天器铝合金结构腐蚀疲劳机理、腐蚀疲劳影响因素及疲劳寿命变化等方面做了大量工作。早在 20 世纪 20 年代即开始大量铝合金大气环境腐蚀试验, 美国 Alcoa Laboratories 在 1928 年进行了约 2.5 万件铝合金加工件和铸造件的自然环境腐蚀试验<sup>[9]</sup>, 美国材料实验协会 B-3、B-7 委员会分别进行了长达 20 年和 30 年的大气环境铝合金材料腐蚀试验和研究, 获得了大量铝合金材料大气环境腐蚀数据。法国铝制造商 Pechiney 公司 1941 年在 6 个典型欧洲环境地区开展了 30 年铝及铝合金的自然环境腐蚀试验。我国针对飞机结构采用的 9 种典型铝合金材料在 7 个自然环境腐蚀挂片试验。文献[10]对飞机结构常用的 LY12-CZ 铝合金在我国海南万宁开展自然暴露试验, 文献[10]–[11]研究了飞机铝合金结构在服役环境下的寿命变化规律。

海洋装备方面, 文献[12]–[13]采用腐蚀时变模型对钢质海船、铝合金三体船进行了寿命评估。孙玉武<sup>[14]</sup>等对潜艇耐压壳体的低周疲劳问题进行了分析和研究, 并应用贝叶斯方法对潜艇耐压壳体疲劳热点的剩余疲劳寿命进行估算, 给出了一种在信息量不足的情况下进行统计推断的新途径, 在一定程度上弥补了传统方法的缺陷。张富刚<sup>[15]</sup>等考虑裂纹尺寸变异性, 运用裂纹扩展随机模型, 估算了潜艇耐压壳体在不同循环次数下疲劳热点的疲劳寿命, 同时使用建立极限状态方程的一阶二次矩法估算疲劳寿命, 对两者进行了比较和分析。黄小平<sup>[16]</sup>等给出了对压应力进行修正的应力强度因子计算

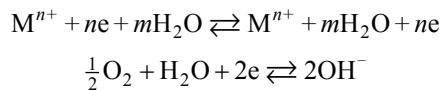
式, 考虑焊趾处应力集中以及焊接残余应力等影响, 在此基础上提出了一套受压弯应力焊接结构焊趾裂纹疲劳寿命计算方法。对初始表面裂纹形状和大小对疲劳寿命的影响进行了系列计算。计算结果表明, 本方法预估出的疲劳寿命与实验结果在数量级上是吻合的, 但在推向实用之前还需要做更多的实验验证。文献[17]探讨了谱载荷作用下潜艇用钢的疲劳扩展特性及焊缝的初始裂纹尺寸, 在此基础上提出了考虑压应力、焊缝应力集中、焊接残余应力等影响因素的潜艇结构疲劳寿命计算方法<sup>[7]</sup>。

姚鋆凡<sup>[18]</sup>以极限下潜深度 600 m 的潜艇为研究对象, 鉴于对潜艇历史下潜数据的收集较为困难, 通过拟合 Alvin 载人潜水器的下潜数据, 建立潜艇下潜深度分布的概率模型, 获得其疲劳载荷谱, 并将有限元分析结果与理论计算结果对比。对比结果表明: 耐压壳体疲劳载荷谱方法下的数值模拟寿命比极限载荷方法下的数值模拟寿命更加精准。在此基础上, 对耐压壳体的疲劳可靠性进行研究, 提出疲劳与稳定性共失效模式下的可靠性研究方法。

综上所述, 航空航天和水面舰船针对铝合金等材料进行了大量自然环境下腐蚀寿命研究, 但由于无人潜航器贮存环境不同于上述自然和海洋环境, 无人潜航器铝合金贮存环境下的寿命评估研究和试验较少。目前关于无人潜航器外壳壳体的寿命评估均采用模型仿真等方法, 通过疲劳寿命确定壳体的寿命。但在实际工程研究中, 无人潜航器壳体失效通常是因为腐蚀引起的。因此, 本文主要根据壳体失效模式及“腐蚀”的失效机理进行无人潜航器壳体贮存寿命研究。

## 2 无人潜航器耐压结构失效机理分析

无人潜航器耐压结构贮存期间失效机理主要为腐蚀原因, 由于壳体一般为进行“三防”涂覆工艺的金属结构, 如铝合金、不锈钢、钛合金等, 绝大多数金属腐蚀是由电化学反应引起的, 化学反应式为



影响海洋大气腐蚀的因素主要包括: 盐雾、温度、湿度等。

盐雾是海洋大气环境中最主要的腐蚀因素, 在金属表面产生吸湿潮解作用, 使金属表面液膜的电导增大。另外, 氯离子本身具有很强的侵蚀性, 因而加速金属腐蚀。

受海风及温度的影响, 海洋大气相对湿度较高。空气相对湿度愈大, 空气中的水汽凝结愈多, 愈易在金属表面凝结形成较厚的液膜, 溶解更多的氧和其他腐蚀性物质, 从而加速金属腐蚀。潮湿环境会使非金属材料和涂层系统体积膨胀、组织疏松、强度降低, 甚至起泡、破裂和老化, 同时引起金属材料的氧化、腐蚀<sup>[19]</sup>。

无人潜航器贮存在海岸附近, 在大气中一定水含量条件下, 盐雾 (NaCl) 这一强电介质, 可以加快金属的电化腐蚀。因此, 可以考虑采用 NaCl 溶液加速电化腐蚀过程, 设计加速寿命试验。

### 3 贮存寿命评价方法

无人潜航器在实际工程研究中, 会在工程研制机阶段进行一定年限的贮存或使用, 但实际贮存或使用年限一般远短于寿命要求年限。因此, 需要补充试验贮存数据, 为缩短时间, 通常采用加速试验的方式进行。

耐压结构贮存主要为库房存贮环境, 一般采用充氮密封包装, 根据 GJB78A 要求库房存储环境温度为 5~20 ℃、相对湿度 55%~65%, 故其贮存环境较为温和, 环境应力主要为温度和湿度应力, 该环境条件对产品的影响主要是腐蚀效应。

#### 3.1 加速试验方法

加速试验模拟一般从 4 个方面考虑: 1) 腐蚀过程电化学特性和机理一致; 2) 腐蚀二次过程及组滞特性一致; 3) 试样表面循环过程特点一致; 4) 腐蚀动力学规律一致<sup>[20-22]</sup>。

通过海洋大气腐蚀环境因素分析, 采用 NaCl 溶液湿润试验样机构成的循环加速试验环境谱, 可以模拟温度以及海洋环境中氯离子的影响。试验方法如下:

1) 编制贮存环境谱, 选定加速试验环境谱。

2) 将每年贮存环境的作用折算为 40 ℃、相对湿度 90% 的标准潮湿空气作用时间  $t_1$ , 即潮湿空气环境的寿命相对于标准潮湿空气的折算系数与对应温湿度谱的乘积之和。

工程上通常是测定不同温度、湿度下典型金属材料腐蚀电流来建立不同组合对应的当量折算系数, 对应折算系数  $\alpha_1$ , 如表 1 所示。

表 1 潮湿空气相对于标准潮湿空气的折算系数  
Table 1 Conversion coefficient of humid air relative to standard humid air

材料	相对湿度 /%	不同温度下的折算系数				
		20℃	25℃	30℃	35℃	40℃
铝合金	80	0.167 07	0.290 53	0.426	0.731 77	1.037 53
	90	0.110 45	0.207	0.299 95	0.649 97	1
钢	80	0.089 34	0.100 57	0.316 08	0.423 64	0.730 48
	90	0.058 37	0.229 19	0.406 47	0.709 59	1

国内某研究所在统计沿海某试验站近 10 年环境数据的基础上, 编制了典型沿海 / 海洋环境区的雨、雾、湿度累积谱 (低于 20 ℃的雨、雾、湿度作用时间均按 20 ℃考虑) 及大气环境谱, 见表 2<sup>[16]</sup>。

表 2 沿海某试验站雨、雾和温度积累谱  
Table 2 Rain, fog and temperature accumulation spectrum of a coastal test station

温度/℃	雨谱/h	雾谱/h	湿度谱 (RH 为 70%、80%、90%)
20	9	86.1	449.4
25	78.6	284.9	304.6
30	261.3	261.3	536.9

3) 将每年 (或每小时) 加速试验环境谱的作用折算为温度 40 ℃、相对湿度 90% 的标准潮湿空气作用时间  $t_2$ 。加速试验环境谱折算时应考虑温度、湿度、盐浓度和酸浓度等因素, 根据不同浓度盐溶液试验条件, 通过表 3 读取或计算折算系数 (当浓度不能直接对应时, 通过插值法进行计算), 则 NaCl 溶液浓度作用 1 h 相当于标准潮湿空气下的作用时间  $t_2$  为 1/折算系数。

不同浓度的盐、酸溶液与水介质下的腐蚀电流对当量折算系数见表 3。

表 3 不同浓度 NaCl 浓度与水介质的折算系数

Table 3 Conversion coefficients of different concentrations of NaCl and water medium

NaCl 浓度/%	折算系数	
	铝合金	钢
0.35	0.643	0.558
0.5	0.612	0.485
1.72	0.335	0.417
3.5	0.121	0.32
7	0.096 9	0.31

4)  $t_1/t_2$  为当量加速关系  $\beta$ , 即加速试验环境谱作用  $\beta$  a (或 h), 相当于实际环境中使用 1 a。

### 3.2 试验后功能性能检测

由于无人潜航器耐压结构最关注在规定潜航深度下的密封性是否完好, 因此在等效贮存时间达到寿命要求年限后, 对耐压结构进行规定水压条件的水密试验检测。若符合要求, 则可判决其贮存寿命达到要求。

## 4 某无人潜航器耐压结构贮存寿命评估应用

### 4.1 受试品情况及数据

受试品的存储库房环境温度为 5~20 ℃、相对湿度 55%~65%, 贮存期间产品处于非通电工作状态。

受试品耐压结构材料为铝合金 5A06。

已在工房自然环境搁置约 9 a, 要求贮存寿命  $\geq 20$  a。

### 4.2 试验方法

采集相同材料相似耐压结构工房自然搁置数据, 并选取搁置后的典型材料耐压结构补充进行高盐高湿加速贮存试验:

1) 采集的相同材料相似耐压结构工房自然搁置时间约 8.67 a, 按环境因子折合系数 (根据工房自然搁置环境条件与贮存条件, 根据 3.1 节表 1 的折算系数进行计算, 得到折算系数为 1.77) 折算为贮存环境时间, 为  $8.67 \times 1.77 = 15.3$  a;

2) 采用工房自然搁置后的典型耐压结构样件, 在温度为 40 ℃、5% 浓度的 NaCl 溶液中进行浸泡, 补充加速贮存试验。

### 4.3 加速贮存试验方案设计

1) 贮存环境条件为温度 5~20 ℃、相对湿度 55%~65%。

2) 将每年的贮存环境谱的作用折算为 40 ℃、相对湿度 90% 的标准潮湿空气作用时间  $t_1$ :

$$t_{1\text{铝合金}} = 0.16380 \times 365 \times 24 \text{ h} = 1434.9 \text{ h}$$

3) 由于加速腐蚀环境谱周期浸润试验的温度是 40 ℃, 因此加速腐蚀环境谱与标准潮湿空气的当量折算中, 只考虑环境对水介质的折算。NaCl 溶液浓度 (5%) 相对标准潮湿空气的折算系数。

$$\alpha_{\text{铝合金}} = 0.1066$$

即 NaCl 溶液浓度 (5%) 作用 1 h 相当于标准潮湿空气下的作用时间为

$$t_{2\text{铝合金}} = 1/0.1066 = 9.381 \text{ h}$$

4) 由以上海洋大气环境谱和加速腐蚀环境谱的当量折算、当量加速关系为

$$\beta_{\text{铝合金}} = t_{1\text{铝合金}} \times \alpha_{\text{铝合金}} = 152.96 \text{ h}$$

即对于铝合金耐压结构, 在温度为 40 ℃、5% 浓度 NaCl 溶液中浸润 152.96 等效为贮存 1 a。

5) 补充加速贮存试验时间:

$$t_{\text{铝合金}} = 5 \times 152.96 \text{ h} = 764.8 \text{ h}$$

### 4.4 试验评估结论

结合采信的耐压结构工房自然环境搁置时间和高盐高湿加速贮存补充试验时间, 等效贮存时间为  $15.3+5=20.3$  a, 大于 20 a, 且水密检查符合要求, 可认为耐压结构贮存寿命满足不低于 20 a 的要求。

## 5 结束语

本文分析了无人潜航器的贮存环境特点和失效机理, 建立了无人潜航器耐压结构腐蚀加速因子计算方法、加速试验方法和贮存寿命评价方法, 同时结合某型无人潜航器案例分析, 具体介绍了该产品耐压结构的组成寿命评价过程。

针对无人潜航器试验样本少、成本高的问题, 创新性地提出了无人潜航器结构腐蚀与贮存寿命加速试验方法, 同时纳入产品实际工程中已有的使用和贮存数据, 充分利用现有数据, 大大减少了结构寿命试验时间和研制经费, 也便于试验组织和实施。相较于其他水下平台利用仿真计算低周疲劳失

效的方法评价耐压结构寿命, 考虑因素更合理, 更切合实际贮存情况。通过无人潜航器贮存寿命评价项目的实践表明, 该贮存寿命评价方法准确度和可信度更高、工程实践效果优良。

## 参考文献

- [1] ALEXANDER G R. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109214.
- [2] NEIRA J, SEQUEIROS C, HUAMANI R, et al. Review on unmanned underwater robotics, structure designs, materials, sensors, actuators, and navigation control[J]. Journal of Robotics, 2021: 5542920.
- [3] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25 ( 4 ): 215-225.
- [4] 李奔, 刘洋. 国外深海无人潜航器装备及技术发展研究[J]. 中国造船, 2019, 60 ( 1 ): 419-425.
- [5] 边信黔, 牟春晖, 严渐平, 等. 基于故障树的无人潜航器可靠性研究[J]. 中国造船, 2011, 52(1): 71-79.
- [6] 孙碧娇, 何静. 美海军无人潜航器关键技术综述[J]. 鱼雷技术, 2006, 14 ( 4 ): 7-10, 31.
- [7] GUÉRIN M, ALEXIS J, ANDRIEU E, et al. Corrosion fatigue lifetime of aluminium-copper-lithium alloy 2050 in chloride solution[J]. Materials & Design, 2015, 87: 681-692.
- [8] 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50 ( 7 ): 106-118.
- [9] 马腾, 王振尧, 韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16 ( 3 ): 155-161.
- [10] 张天宇, 何宇廷, 李昌范, 等. 盐雾加速腐蚀与沿海大气环境的腐蚀等效关系研究[J]. 机械强度, 2018, 40 ( 3 ): 596-601.
- [11] 刘道庆, 吴超, 陈亮. 飞机腐蚀疲劳典型部位地面停放局部环境谱及当量折算[J]. 飞机设计, 2011, 31 ( 5 ): 15-17.
- [12] 周陈炎, 张佳宁, 陈玲, 等. 考虑腐蚀作用下的铝合金三体船疲劳强度直接计算分析[J]. 中国舰船研究, 2021, 16 ( 5 ): 1-8.
- [13] 牟金磊, 滑林, 张仲良, 等. 考虑腐蚀因素的船体结构寿命预测方法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43 ( 4 ): 102-107.
- [14] 孙玉武. 潜艇耐压壳体低周疲劳分析及贝叶斯寿命估算[J]. 中国造船, 2000 ( 4 ): 151-155.
- [15] 张富刚. 用裂纹扩展随机模型估算潜艇耐压壳体的疲劳寿命[J]. 华东船舶工业学院学报, 2004, 18 ( 1 ): 13-17.
- [16] 黄小平. 潜艇锥柱结合壳焊趾表面裂纹疲劳寿命计算[J]. 船舶力学, 2002, 6 ( 4 ): 63-68.
- [17] 黄小平. 大深度潜艇结构的疲劳寿命预测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [18] 姚鋆凡. 大潜深结构的低周疲劳可靠性研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [19] 左卫, 刘元海. 典型海洋环境当量加速试验环境谱研究[J]. 包装工程, 2011, 32 ( 23 ): 133-136.
- [20] 蔡健明, 刘明. 铝合金综合环境试验研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3 ( 3 ): 67-69.
- [21] 谭晓明, 王海东, 王刚. 当量加速腐蚀条件下 7 B04-T6 高强度铝合金疲劳裂纹扩展规律研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23 ( 2 ): 120-124.
- [22] 刘明, 蔡健平, 张晓云, 等. 2A12 铝合金模拟海洋大气腐蚀的加速试验研究[J]. 材料工程, 2010(z1): 348-351.

(责任编辑: 曹晓霖)