

舰面电子设备机柜防护失效分析与对策研究

杨万均^{1,2,3}, 肖敏^{1,2,3}, 张燕¹, 胥泽奇^{1,2,3}

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039; 2. 国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039;
3. 重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039)

摘要: 针对某舰面电子设备与安装机柜在海洋大气自然环境试验中出现的内部凝露积水与表面腐蚀问题, 通过理论分析, 找到了其防护失效的主要原因, 并根据失效分析结果, 提出了工程上的改进措施与对策。

关键词: 海洋大气环境; 机柜; 积水; 腐蚀; 对策

中图分类号: TG174.3⁺1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0083-05

Failure Analysis and Countermeasure Study of Protection for Warship Electronic Equipment Cabinet

YANG Wan-jun^{1,2,3}, XIAO Min^{1,2,3}, ZHANG Yan¹, XU Ze-qi^{1,2,3}

(1. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. Natural Environmental Test and Research Center of Defense Science and Technology, Chongqing 400039, China;

3. Chongqing Engineering Institute for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at problems of surface corrosion, condensation, and seep inside of cabinets utilized to protect and dispose warship electronic equipment, which were founded in exposure test in marine atmospheric environment, the main causes of protection failure was founded through analysis. Countermeasures were put forward based on the results of failure analysis.

Key words: marine atmospheric environment; cabinet; seep; corrosion; countermeasure

电子设备机柜主要是为了电子设备的安装固定, 并为其提供一个适宜的工作微环境。机柜的设计既要求有足够的机械强度, 以适应电子设备服役的振动环境, 又要求能保证内部部署的电子设备散热性良好和防潮, 以满足电子设备可靠工作对温湿度的要求。对于部署于舰面的电子设备机柜, 往往会面临比陆上更加严酷的自然环境, 这对其维持内

部良好微环境的能力和耐腐蚀能力提出了更高的要求^[1]。

通过自然环境试验, 研究舰面电子设备防护机柜在严酷的海洋大气环境条件下的环境适应性, 掌握其失效模式, 开展失效分析, 寻找工程化的改进措施与对策, 对保证其内部所部署电子设备的工作可靠性和设备完好性具有十分重要的意义。

收稿日期: 2012-08-14

作者简介: 杨万均(1971—), 男, 四川绵竹人, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事环境适应性分析与研究。

1 试验设计

1.1 试验环境的确定

从舰面电子设备机柜服役的任务剖面来看,其主要面临的是海洋大气环境这一户外条件,承受高温、高湿、强太阳辐射、高浓度氯离子、大昼夜温差的影响^[2-3]。因此在试验环境上,选择了海南万宁试验站海洋户外平台以模拟其实际服役环境。该试验环境主要气候特征参数见表1。

表1 试验环境的主要气候特征参数
Table 1 Climatic characteristics of test site

氯离子浓度/(mg·100 cm ⁻² ·d ⁻¹)	年平均温度/℃	年平均相对湿度/%	总辐射量/(MJ·m ⁻²)	最大昼夜温差/℃
0.75	24.6	86	4826	20

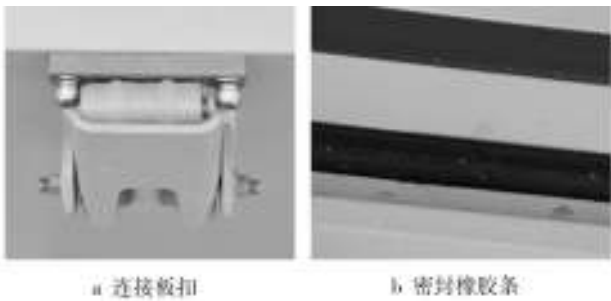


图1 局部机柜密封结构
Fig. 1 Part appearances of seal structure of cabinet

2 试验结果与失效模式

该电子设备机柜经过海洋平台上6个月的户外暴露试验,对监测内部温湿度以10 d一个周期统计出其最高温度和最低温度以及相应的湿度值,变化趋势如图2所示。

试验过程,定期对柜体外观进行检查。3个月时,盖板与箱体之间扣件上未含涂层金属件出现明显生锈现象,顶盖板螺钉孔上方明显起泡;试验6个月时,扣件上未含涂层金属件生锈现象进一步加重,而且顶盖板螺钉孔上方严重腐蚀起层,腐蚀形貌如图3所示。

试验6个月,打开柜体检查发现,柜体上盖板和柜体侧壁上出现了十分明显的凝露现象,柜体底部

1.2 试验方法的选择

试验的电子设备机柜为长方体结构。为便于对内部电子设备进行日常维护与维修,顶盖板与箱体之间采用扣件连接,中间用橡胶密封条密封,达到水密目的,如图1所示。为了能有效模拟该电子机柜在实际使用过程中的服役状态,试验过程中,柜体水平放置于海洋户外平台,底面用水泥条柱支垫,距离地面30 cm。柜体内安装温湿度自动记录仪,对内部微环境的温湿度进行连续监测。

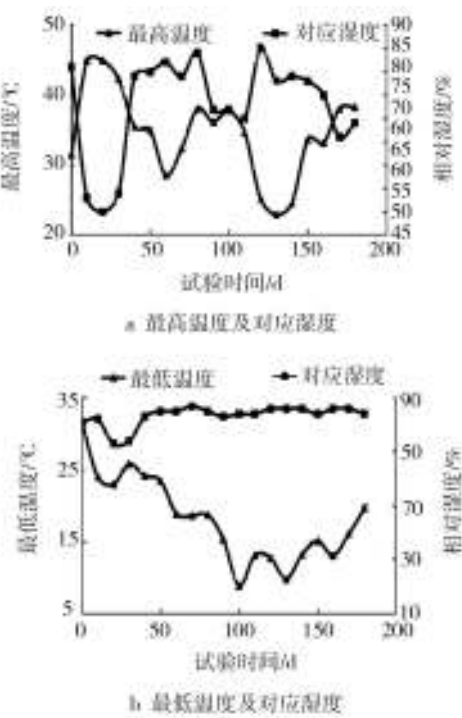


图2 机柜内部温湿度的变化趋势曲线
Fig. 2 The curves of temperature and humidity inside the cabinet

有大量积水,如图4所示。

从以上检查结果来看,该电子机柜的防护功能已经出现了明显失效,主要的失效模式为柜体腐蚀和内部凝露积水。下面将对这两种失效模式进行分析和讨论并提出工程化的改进建议。

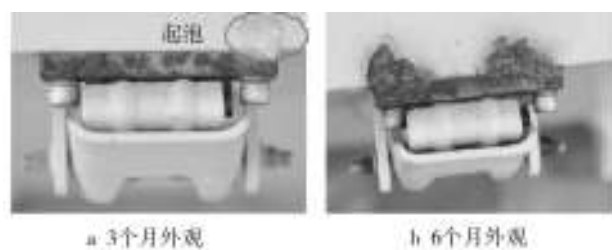


图3 柜体外观腐蚀形貌

Fig. 3 Appearances of cabinets exposed for 3 months and 6 months

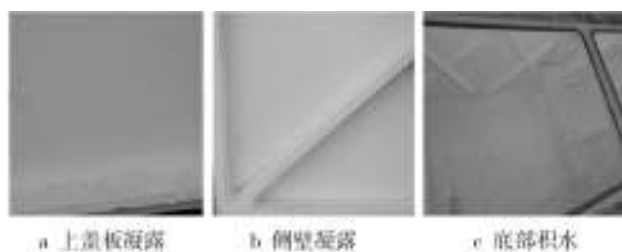


图4 柜体内部结露与积水

Fig. 4 Appearances of seep and condensation inside cabinet

3 失效分析与讨论

3.1 柜体腐蚀

柜体的腐蚀不但影响其外观,还将影响到整个机柜的机械强度,严重时将造成机柜的解体。从图3的腐蚀形貌可以看出,柜体腐蚀主要出现于扣件的无涂层垫块和柜体表面扣件螺钉安装处。从柜体的生产工艺知道,无涂层垫块采用1Cr18Ni9Ti不锈钢,上盖板采用LY12铝合金喷塑处理。虽然该型不锈钢在单独进行暴露试验时,有较好的耐海洋环境能力,但作为构件使用,还必须考虑局部微环境的作用。该垫块与盖体间的安装如图5所示,由于喷塑层的厚度不均匀和金属表面加工精度限制,在垫块和盖体之间不管是采用螺接还是铆接,都会不可避免地形成一个微小的缝隙。

不锈钢的耐蚀性主要依靠其能自修复的钝化膜,钝化膜由致密的 Cr_2O_3 和 CrO_3 构成,可以有效阻止内部Fe与 H_2O 和 O_2 的接触,达到“不锈的目的”。钝化膜主要靠不锈钢表面的富Cr层与 O_2 反应而修复。通常情况下,钝化膜的溶解和修复(再钝化)处

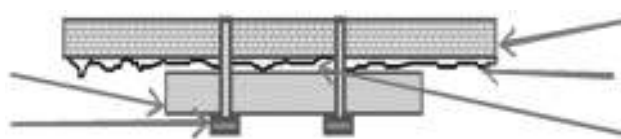


图5 不锈钢垫块与盖体安装

Fig. 5 Fixing of stainless steel mat and cover

于动平衡状态,但当钝化膜的溶解速率大于修复速率时,不锈钢将同其他金属一样产生腐蚀。研究表明,当构件之间存在微小缝隙时,在潮湿空气中,缝隙处会形成一个不易蒸发的水膜,妨碍空气中 O_2 补充。当水膜中溶解氧降到很低时,不锈钢钝化膜的自修复将基本停止。海洋大气中, Cl^- 的含量较高,一旦溶解开始, Cl^- 能优先有选择地吸附在钝化膜上,把氧原子排挤掉,然后和钝化膜中的阳离子结合成可溶性氯化物,结果在新露出的基底金属溶解区产生腐蚀^[4]。此时,溶解区与钝化膜区会形成闭塞电池,进一步加速溶解过程,失去钝化膜保护的不锈钢材料内部Fe将与 H_2O 、 O_2 和 Cl^- 反应,这就是不锈钢垫块产生严重腐蚀的机理和原因^[5]。

从试验检查结果来看,机柜盖板部件除螺钉孔上方严重腐蚀起层外,其他表面无明显变化,喷塑层也未出现明显老化现象。纵观该部位的腐蚀过程,不难看出,该部位首先出现了喷塑层下铝合金基体腐蚀。以往的试验表明^[6-7],LY12铝合金腐蚀主要是以剥蚀为主,产生的腐蚀产物造成表面喷塑层鼓泡脱落。分析基体腐蚀原因认为,螺钉旋入采用的是“干装配”工艺,且螺钉材料为1Cr18Ni9Ti不锈钢。“干装配”的方法在潮湿大气中螺纹内部不可避免会有水汽进入而形成不易干燥的水膜,两种金属接触时就会形成一个化学电池,产生电化学腐蚀。由于不锈钢的腐蚀电位可达1V左右,远高于铝合金的腐蚀电位,因此,低电位的铝合金会大量失去电子而产生严重腐蚀,相反不锈钢却会得到一定的保护。在图3中可以看到,盖体虽出现了明显腐蚀,但不锈钢螺钉仅出现了发暗现象。

3.2 柜体内部凝露与积水

电子设备机柜一个重要的功能便是为内装电子设备提供一个适宜的工作微环境^[1]。水汽的进入将使内部相对湿度升高,导致电路产生腐蚀,绝缘、耐

压等电气性能下降,一旦内部出现凝露或积水,就可能造成电气短路引起设备故障,甚至造成电子设备烧毁^[8]。试验的机柜主要利用铝合金柜体、盖板及相关部件一起构成一个水密的环境来达到微环境控制的目的。根据湿度理论,一定体积、温度下的空气中最大含水量是一个恒定的值,这个值通常称为饱和湿度,其大小可以通过式(1)来计算。

$$e_w(t) = \alpha \exp\left(\frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}\right) \quad (1)$$

式中: $e_w(t)$ 为温度 t 时的饱和含水量; α , β , λ 为Magnus参数。

从式(1)中可以看出,当温度 t 降低时,空气中的最大含水量亦会随之降低。对一个完全密封(气密)的箱体来说,由于内部体积一定,温度下降到空气中含水量超过饱和湿度时,多余的水分将以液态水的形式凝结出来,形成凝露。温度下降多少将会产生凝露,可以通过露点公式来计算,见式(2)。

$$t_d(t, RH) = \lambda \frac{\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}}{\beta - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}} \quad (2)$$

式中: $t_d(t, RH)$ 为密封容器中,温度为 t 、相对湿度为 RH 时的露点温度。

从图2中可以知道,该柜体在密封装配时,内部相对湿度为81%,温度为31.5℃,带入式(2),可以计算出其露点温度为27.84℃,即当温度降低到27.84℃以下时柜体将出现凝露现象。如果柜体内部为一个气密环境,而且温度变化周期较长时,柜体内水汽将会不停地在气液之间转换,内部总的含水量将不会改变。然而该柜体为了便于内部设备的维修维护,采用的是水密而非气密结构,根据相对湿度与温度的关系可知^[9],当温度升高时,内部相对湿度会降低。虽然此时低温阶段凝结出的水会逐渐蒸发,使内部相对湿度提高,但是低温阶段凝结出的水由于重力作用存在于柜体底部。由于柜体底部温度上升较慢,因此蒸发量将比较小。从图2a中可以看出,在高温段,柜体内的相对湿度最低达到50%左右,而对平台户外环境的相对湿度监测发现,在试验期间,该环境下的相对湿度平均为85%以上。从水汽透过原理可知,当密封容器处于比其内部水蒸气气压高(即容器内部湿度低于外部环境湿度)的环境中时,水汽分子会从高湿度的环境中通过密封容器

材料和密封界面逐渐向容器内部扩散^[10]。高温时段越长,透入容器内部的水汽质量就越多。当气温下降时,柜体各表面的温度会首先降低,容器内部空气中的水分子就会在柜体内部凝结成水珠,如图4a和图4b所示。这也是图2b中低温阶段柜体内相对湿度变化较小的一个原因。

水汽在高温时通过柜体密封界面进入柜体,低温时在柜体内表面凝结并流至柜体底部汇集,不断重复,形成了图4c中柜体底部严重积水的现象。

4 改进对策与建议

根据试验中电子机柜出现的两种主要失效模式和失效分析结果,提出以下的改进对策和建议。

针对柜体连接扣件垫块的腐蚀,虽然采用了不锈钢材料,但建议采用与柜体相同的表面防护工艺,或者对垫块进行涂漆处理,以防止连接出现缝隙时金属表面与腐蚀介质直接接触形成腐蚀电池^[11];对于柜体螺钉孔处的剥离腐蚀,可采用“湿装配”的方法,在螺钉上沾上油漆再进行安装紧固。

对于柜体内出现的凝露积水现象,一方面要选择透湿度小的橡胶作为密封条并增加其厚度以保证密封效果^[1];另一方面,建议在柜体内部放置细孔硅胶或分子筛吸湿剂,防止高温高湿环境中设备维护后,温度下降出现凝露现象。

5 结论

海洋大气环境下,户外部署的电子设备机柜的防护效果会直接影响所部署的电子设备工作可靠性和装备完好性。对于舰面使用的电子设备机柜,将面临更加恶劣的服役环境,在此环境下腐蚀防护失效和微环境控制失效是极易产生的两种主要失效模式。对于试验中受试机柜,腐蚀失效模式的产生原因主要是海洋大气环境微小缝隙内形成了含Cl⁻的水膜,阻止了不锈钢钝化膜的形成和异种金属“干装配”产生的电化学腐蚀。这种失效模式可以通过裸金属部件加防护涂层和采用“湿装配”方式加以克服;防护体系微环境控制失效模式的产生原因主要是密封界面透湿率过高、密封装配时环境湿度过大和环境温度高低交变。这种失效模式可以通过更换

密封材料、调整密封结构尺寸和内部放置适量干燥剂得到解决。

参考文献:

- [1] 孙海龙,王晓慧.舰载电子设备三防密封设计技术综述[J].装备环境工程,2008,5(5):49—52.
- [2] 穆山,李军念,王玲,等.海洋大气环境金属防护涂层技术与工艺研究[J].装备环境工程,2012,9(1):81—84.
- [3] 张先勇,舒德学,陈建琼.海南万宁试验站大气环境及腐蚀特征研究[J].装备环境工程,2005,2(4):77—79.
- [4] 郭洪涛,郭瑞光,郭小梅,等.氟对不锈钢钝化效果的影响[J].表面技术,2012,41(3):77—79,83.
- [5] 黄桂桥.不锈钢在海洋环境中的腐蚀[J].腐蚀与防护,

1999,20(9):392—394,407.

- [6] 苏艳,李凌杰,舒畅,等.高强铝合金海洋大气环境剥层腐蚀研究[J].装备环境工程,2010,7(6):180—182,198.
- [7] 韩德盛,李获.海洋大气湿度对LY12铝合金初期腐蚀的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2007,27(3):134—136.
- [8] 郭宁彪.温度、湿度应力在电气、电子产品失效中的作用[J].印制电路信息,2005(4):14—19,41.
- [9] 杨万均,魏小琴,肖敏.基于传感技术的密封包装容器透湿度测试方法研究[J].包装工程,2011,32(11):45—47.
- [10] 陈晓丽,周顺期.密封包装容器内湿度变化规律研究[J].包装工程,2004,25(6):21—23.
- [11] 张卫国,王玉坤,王斌,等.舰载光电设备的防护技术及设计[J].红外技术,2008,30(4):214—216.

(上接第28页)

力腐蚀敏感性较大。

综合应力腐蚀敏感性指数和拉伸断口的SEM形貌等因素考虑,4种焊接材料在石油沉积水介质中的应力腐蚀敏感性指数 $F(\delta)$ 和 $F(\psi)$ 都小于50,均不具有应力腐蚀高敏感性^[8-9]。B埋横焊的应力腐蚀敏感性最大,具有中等SCC抗力,在应用中应对其应力腐蚀问题进行适当关注;其余3种焊接材料的应力腐蚀敏感性较小,具有高的SCC抗力,在应用中通常可不考虑应力腐蚀问题。

3 结论

通过室内浸泡及应力腐蚀试验对4种焊接材料的耐蚀性进行对比,得出以下结论:

1) 在石油沉积水中,浸泡初期各焊接材料的腐蚀速率较大,随着浸泡时间的延长4种焊接材料的腐蚀速率均减小,在浸泡6个月时几种材料的腐蚀速率非常接近;

2) 在石油沉积水中,采用气体保护焊的耐蚀性最好,采用气电立焊的耐蚀性略差,将Q235+B610E埋弧平焊对接后由于存在电偶对,耐蚀效果最差,工程施工中应尽量避免异种金属焊接;

3) 在石油沉积水中,B埋横焊、B气保焊、B气电立焊以及B+Q埋平焊材料均不具有应力腐蚀高敏感

性,其中B埋横焊具有中等SCC抗力,而B气保焊、B气电立焊以及B+Q埋平焊具有高的SCC抗力。

参考文献:

- [1] 章小浒,王正东,涂善东.原油储罐用钢的开发与应用最新进展[J].压力容器,2006(3):38—43.
- [2] 于斐.压力容器的应力腐蚀及控制[J].管道技术与设备,2005(2):34—36.
- [3] 李云飞,李雪飞,陈慧.探讨国产12MnNiVR钢板代替进口SPV490Q钢板的可行性[J].石油化工建设,2006,28(4):23—24.
- [4] 张汉谦,江来珠.石油储罐工程用高强度钢研究和应用进展[C]//第十一次全国焊接会议论文集.2005:329—332.(余不详)
- [5] 米广生,陈得志,瞿帆.国产高强钢板(B610E)在15m³油罐中的焊接[J].石油化工建设,2007,29(5):25—32.
- [6] 洪敏,张国栋,张富巨,等.高强钢焊缝金属腐蚀行为研究[C]//湖北省第十届热处理年会.2006:70—73.(余不详)
- [7] 吴云龙,宋虎堂,陈小玲,等.SPV490Q低合金高强度钢板在125 dam³原油储罐上的应用[J].炼油技术与工程,2004,34(3):50—53.
- [8] 里维 R 温斯顿.尤利格腐蚀手册[M].杨武,译.北京:化学工业出版社,2005:835.
- [9] 王国凡.含钛18-8钢管循环水应力腐蚀裂纹分析[J].表面技术,2002,31(6):55—57.