

# 铝合金结构件应力腐蚀裂纹机理分析

王雁涛<sup>1</sup>, 杨钊<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻重庆地区军事代表局, 重庆 400042; 2. 总装备部驻重庆地区军事代表局, 重庆 400060)

**摘要:** 舰船电子装备铝合金结构件在焊接加工、安装中余留了大量应力, 并且长期工作于恶劣的腐蚀环境, 导致出现应力腐蚀裂纹, 使结构件强度或密闭性严重降低。分析了应力腐蚀裂纹发生的原因, 提出了工艺控制及改进的措施。

**关键词:** 铝合金; 应力腐蚀; 裂纹; 机理

**中图分类号:** TG172.9      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)01-0053-04

## Analysis on Stress Corrosion Crack Mechanisms of Aluminum Alloy Structure

WANG Yan-tao<sup>1</sup>, YANG Tian<sup>2</sup>

(1. Military Representative Bureau of Naval Equipment Department in Chongqing Region, Chongqing 400042, China;

2. Military Representative Bureau of General Equipment Department in Chongqing Region, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** There exist large amount of residual stresses when aluminum alloy structures of electronic equipments are welded and installed. Furthermore, stress corrosion cracks on the structures may emerge due to long period of working under serious corrosion environment, which makes the structure strength and impermeability severely drop. The causes for stress corrosion cracks of the aluminum alloy structures were analyzed. Some process control and improvement measures were put forward.

**Key words:** aluminum alloy; stress corrosion; crack; mechanism

舰船电子装备在设计制造过程中, 毫无疑问设计有大量不同需求的铝合金结构件来用作不同的零部件<sup>[1]</sup>。结构件在设计、制造和使用过程中, 特别是密闭或高强度要求的大型结构件, 需要进行焊接加工、螺栓固定安装等。因此, 在焊接、安装过程中工艺规范不合理或控制不严会余留大量焊接应力和安装应力, 加上高温、高湿和高盐雾等特殊工作环境因素造成材质发生化学反应, 导致出现应力腐蚀裂纹<sup>[2]</sup>, 结构件强度或密闭件密闭性降低而存在质量隐患。如何避免

应力腐蚀裂纹的产生要从结构设计、工艺控制等方面入手。

## 1 应力腐蚀裂纹机理与特征

### 1.1 应力腐蚀裂纹的概念

金属或合金在应力, 特别是拉伸应力的作用下, 同时又处在特定的腐蚀环境中(例如在有氯化物、海

收稿日期: 2012-11-07

作者简介: 王雁涛(1978—), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 主要研究方向为电子设备研制、生产。

洋气氛、氯化钠和双氧水混合水溶液等特定环境),材料虽然在外观上没有发生全面腐蚀或明显变形等,但实际上却产生了延迟破裂现象,这种现象称为应力腐蚀裂纹。事实上,在全面腐蚀较严重的情形下反而不易产生应力腐蚀裂纹,应力腐蚀裂纹是无明显外观变化的,发展迅速且很难预测,具有极大的危险性。

## 1.2 应力腐蚀裂纹的分类

人们通常所说的应力腐蚀是针对其广义范畴,而实际应力腐蚀裂纹一般分为狭义的应力腐蚀裂纹和氢脆裂纹,两者现象相同但实际上有本质区别。应力腐蚀裂纹是指金属材料在特定的腐蚀环境中,受到应力作用,沿着金属内微观路径在有限范围内发生腐蚀而出现裂纹的现象;氢脆裂纹是指金属材料受到应力作用,由于腐蚀反应的产物——氢被金属吸收,积聚在金属的晶粒界面,产生巨大压力产生氢脆脆化,出现裂纹的现象<sup>[9]</sup>。

应力腐蚀裂纹和氢脆裂纹两者可以用腐蚀环境加上应力的再现方法、电化学方法或音响鉴别方法进行鉴别。其中,氢脆裂纹属于机械性破坏,有声响,而应力腐蚀裂纹是金属溶解造成的破坏,不会发生音响。在实际运用中,应力腐蚀裂纹很复杂,在大多数情况下对两者不进行区别,一律看作广义的应力腐蚀裂纹。

## 1.3 应力腐蚀裂纹的机理特征和影响因素

### 1.3.1 应力腐蚀裂纹形成机理

金属材料或合金并不是在所有的腐蚀环境中都能产生应力腐蚀裂纹的,需要不同的腐蚀环境。随着金属材料、合金的广泛运用与人们对应力腐蚀裂纹的认知,目前,对应力腐蚀的产生主要有机械化学效应、闭塞电池理论、表面膜理论和氢脆理论4种理论研究。

1) 机械效应理论认为,金属材料在应力作用下于应力集中的地方迅速变形而成为腐蚀电池的阳极区,与金属表面腐蚀电池的阴极区构成小阳极大阴极,使金属沿特定的狭窄区域迅速溶解开裂。

2) 闭塞电池理论认为,某些几何因素使金属裂纹引发处由于电解液流动不畅形成闭塞电池,此处为阳极,其它地方为阴极,闭塞区内的金属缓慢溶

解。之后,自催化作用使金属加速溶解,产生裂纹。

3) 表面膜理论认为,金属表面膜在应力作用下受到破坏,露出新表面,新表面因与有保护膜部分存在电位差异而构成腐蚀电池阳极,发生溶解形成裂纹源,加之应力集中,使裂纹进一步发展。

4) 氢脆理论认为,金属在应力作用下腐蚀生成的氢被金属吸收,产生氢应变铁素体或高活性氢化物,使金属材料脆化而出现裂纹,并沿氢脆部位向前扩展导致破裂。

### 1.3.2 应力腐蚀裂纹基本特征

应力腐蚀有自己的显著特征,与全面腐蚀、缝隙腐蚀、孔蚀不同。产生应力腐蚀的金属主要是合金,纯金属较少。引起应力腐蚀的主要是拉应力,压应力虽能引起应力腐蚀,但并不明显。应力腐蚀裂纹呈枯枝状、锯齿状,其走向为垂直应力方向。应力腐蚀裂纹根据金属材料所处的腐蚀环境,可以分为晶向型、穿晶型或混合型。

### 1.3.3 应力腐蚀裂纹环境因素

化学工业中的应力腐蚀,是由原材料中所含的杂质或在各工序中经过分解、合成等过程生成的腐蚀性成分造成的。例如,原材料中有硫、硫化物、氯化钠和氯化锰等无机盐、脂环酸、氮化合物等杂质;为防止腐蚀所加入的碱,再生重整等过程中使用的催化剂,也是引起应力腐蚀物质的一种。因此,电子装备处在高温、高湿和高盐雾的海洋气氛环境,合金结构件在生产过程中带有硫化物等杂质,毫无疑问具备了发生应力腐蚀的化学因素。

## 2 储液箱裂纹故障及仿真分析

### 2.1 储液箱故障现象

储液箱为铝合金材质,在使用过程中,发现不同批次共计6个都有不同程度的漏液,导致漏液的裂纹如图1所示,存在以下特点。

1) 裂纹集中发生在基材螺栓孔处且垂直贯通焊缝,远离焊缝及固定区域没有任何裂纹;2) 大多数裂纹方向垂直于焊缝呈内方向发展的趋势,从裂纹趋势可以看出基材先开裂后延伸并通过焊缝;3) 裂纹主要发生在与储液箱底部支撑加强结构中间,即螺栓开孔薄弱区域;4) 裂纹尖部很尖且有错叉(符合应力腐

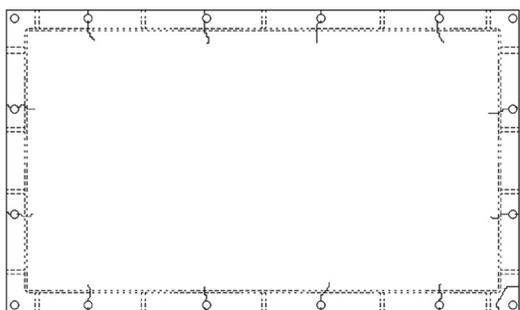


图1 储液箱裂纹

Fig. 1 Cracks of loading liquid bin

蚀特征,同时排除由于疲劳破坏产生裂纹);5)从断口看不到塑性变形过程,属于脆性断口。

## 2.2 储液箱故障分析

储液箱漏液主要原因是基材和焊缝产生裂纹,下面从结构、应力、工艺和环境4个方面着手分析原因。

### 2.2.1 储液箱结构分析

储液箱为一个整体采用铝板焊接的六面体密闭结构,为保证强度要求,在底部外侧和顶部焊接有加强筋。

### 2.2.2 储液箱应力仿真分析

储液箱用来装载防冻液,主要承受两个方面外力作用:1)防冻液对四周箱壁不但会造成垂直箱壁的压力,而且由于倾斜压力会作用四周接缝处的弯曲力矩;2)紧固螺栓造成垂直于安装面的正压力和作用在安装孔上的局部弯曲力矩。

对箱体垂直方向载荷进行了应力仿真分析,结果显示:1)边界条件很苛刻的条件下,整个箱体在螺栓连接开孔处存在应力集中;2)四角开孔处相对中间开孔应力并不大多少;3)开孔应力主要在孔的上部靠近内侧集中;4)如图2所示,在1000 N载荷下,应力最大值在十几兆帕这一数量级。

对箱体受翻转力矩作用进行了应力仿真分析,结果显示:1)相同边界条件下,同样在螺栓连接开孔处存在应力集中;2)受翻转拉应力一侧开孔出现的应力基本相同;3)开孔应力主要在孔的底部靠近内侧集中;4)如图3所示,在500 N·m翻转载荷下,应力最大值在十几兆帕这一数量级。

经过两种仿真结果发现,第一种情况箱体受力

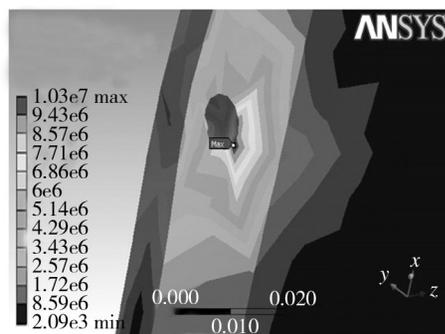
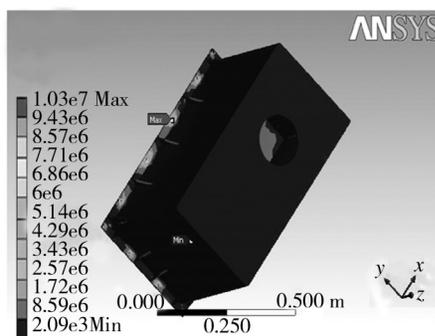


图2 垂直载荷分析

Fig. 2 Analysis of vertical loads

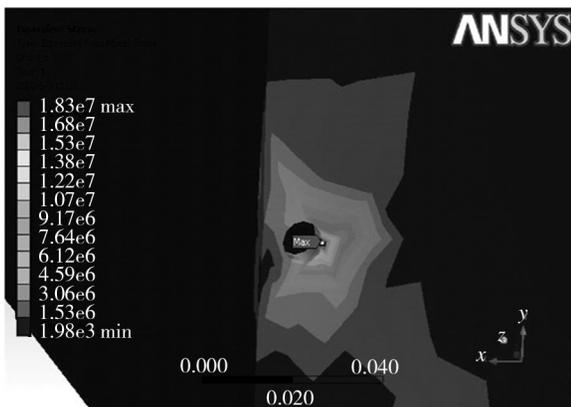
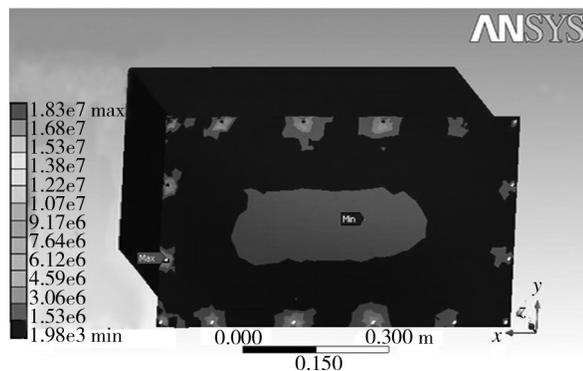


图3 力矩载荷分析

Fig. 3 Analysis of moment loads

趋向中间螺纹开孔,四角较小,不应该在此处存在裂纹,与实际不符合,同时箱体曾做过振动冲击试验;第二种情况由于安装箱体底部不平整,在承受翻转力矩时仅仅局部几个甚至单个螺栓承受翻转力矩,若翻转力矩增大10倍则应力集中会增大到200多兆帕,并且箱体并没有做翻转试验。

### 2.2.3 储液箱工艺分析

储液箱在焊接变形和焊接后进行热处理,余热未施放干净时会使箱体残余很大内部应力<sup>[4]</sup>。一是由于底板和侧壁的板厚不同,焊接时变形较大产生应力;二是这种封闭箱体焊接过程中产生大量的焊接应力无法释放,后续的热处理并没有完全消除这部分应力。

### 2.2.4 储液箱环境分析

储液箱属于舰载设备散热循环系统,处在高湿、高温和高盐碱度等恶劣环境,例如介质主要为海洋空气、氯化物等<sup>[5]</sup>;箱体材质为铝合金 LF6,有应力腐蚀开裂倾向。

## 3 储液箱应力腐蚀裂纹解决措施

针对4个方面的原因分析,焊接和安装应力残留箱体,加之高温、高湿和高盐碱环境和金属铝合金材料等综合因素是造成储液箱裂纹的主要原因,应该属于典型的应力腐蚀裂纹。

针对应力腐蚀裂纹产生的几种因素,由于储液

箱材质和所处环境因素不便进行更改或完善,因此只有从加工工艺和安装上消除应力,严格控制工艺过程。

1) 提高热处理温度值。在进行热处理时,考虑箱体强度和刚度承受值,适当提高热处理温度。

2) 减少安装的应力值。在安装时,可采取垫橡胶垫等消除底部安装间隙,防止产生安装应力。

3) 加大防腐处理和过程检查控制。一是在生产过程中要进行介质隔离、介质处理、电化防腐和定期检查等工作;二是在进行表面处理前,要用放大镜严格检查焊缝和螺纹孔周边基材,确认无裂纹后再进行表面处理,一旦有裂纹应做相应处理或评估是否报废。

经过外场使用,后续生产的产品未出现过应力腐蚀裂纹现象。

### 参考文献:

[1] 赵立华. 超高强度铝合金研究现状及发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(10): 147—150.

[2] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 12.

[3] 张亮. 管线钢应力腐蚀机理的研究现状[J]. 装备环境工程, 2007, 4(6): 1—6.

[4] 陈旭. 管线钢应力腐蚀开裂的影响因素[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 21—26.

[5] 杨超. 海军电子装备设计建议[M]. 北京: 海潮出版社, 2008: 8.

(上接第32页)

以下为主,湿度方面则有近一半的时间和空间处于高湿状态,且容易形成盐雾,这说明在进行东海海域设备环境适应性设计和加工时应该有所侧重,更加关注潮湿所引起的设备锈蚀、霉菌和老化等问题。

### 参考文献:

[1] SCHMIDT C G, CROCKER J E, GIOVANOLA J H, et al. Characterization of Early Stages of Corrosion Fatigue in Aircraft Skin[R]. Washington: Federal Aviation Technical Center, 1996.

[2] SMITH S H, CHRISTMAN TK, BRUST FW, et al. Accelerated Corrosion Fatigue Test Methods for Aging Aircraft[C]//

1991 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics. 1991.(余不详)

[3] 舒畅, 苏艳, 吴龙益, 等. 自然环境谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 93—06.

[4] 张泰峰, 张川, 杨晓华, 等. 基于模糊聚类理论的海洋环境谱编制研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(3): 373—378.

[5] 侯英南, 张佳华, 延昊, 等. 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度[J]. 气象, 2010, 36(4): 75—79.

[6] 陈修治, 陈水森, 李丹, 等. 被动微波遥感反演地表温度研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 827—835.

[7] 李克让. 中国近海及西北太平洋气候[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 509—600.