

弹上设备湿热试验典型失效机理分析及建议

周洁, 陈津虎, 赵帅帅, 张涛

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 分析影响弹上设备湿热试验典型外观不合格的原因及失效机理, 给出弹上设备适应湿热大气的相关建议。**方法** 给出某型号湿热鉴定试验过程中, 弹上设备出现的三种典型外观不合格现象——漆层起泡、螺钉锈蚀和电连接器锈蚀。通过建立与漆层起泡、螺钉锈蚀和电连接器锈蚀不合格现象相对应的故障树, 分析3种典型外观不合格的失效原因, 并得到相应的失效机理。**结果** 总结了弹上设备湿热试验后外观发生不合格的原因, 并从设计、选材、介质隔离角度给出了弹上设备适应湿热大气的相关建议。**结论** 为提高弹上设备耐湿热环境的能力, 进而提高装备的贮存可靠性, 使其能够从贮存状态直接转入能使用状态, 从而提高其贮存可靠性、战备完好性和系统效能提供了指导。

关键词: 弹上设备; 湿热试验; 失效机理; 故障树

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)07-0007-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.002

Typical Failure Mechanism Analysis and Suggestions Caused by Damp Heat Test of Equipment on Missile

ZHOU Jie, CHEN Jin-hu, ZHAO Shuai-shuai, ZHANG Tao

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: To analyze the reasons and failure mechanisms that affect the typical unqualified appearance of the equipment on missile caused by the damp heat test and provide relevant suggestions for the missile equipment to adapt to the heat and humid atmosphere. Three typical unqualified appearances of the equipment on a certain missile caused by the damp heat test are given, namely blistering of paint, corrosion of screws and corrosion of electrical connectors. By establishing fault trees corresponding to the phenomenon of paint blistering, screw corrosion and electrical connector corrosion failures, the failure causes of three typical unqualified appearances are analyzed, and the corresponding failure mechanism is obtained. The reasons of the unqualified appearance of the missile equipment caused by the damp heat test are summarized. Relevant suggestions for the missile equipment to adapt to the heat and humid atmosphere from the perspective of design, material selection and media isolation are provided. It provides guidance for improving the ability of equipment on missile to withstand heat and humidity, and thus improving the storage reliability of the equipment, so that it can be directly transferred from storage state to usable state, thereby improving its storage reliability, operational readiness and system effectiveness.

KEY WORDS: equipment on the missile; damp heat test; failure mechanism; fault tree

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-02-16

Received: 2021-01-11; Revised: 2021-02-16

作者简介: 周洁(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境与可靠性试验技术。

Biography: ZHOU Jie (1990—), Female, Master degree candidate, Research focus: environment and reliability test technology.

引文格式: 周洁, 陈津虎, 赵帅帅, 等. 弹上设备湿热试验典型失效机理分析及建议[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 007-014.

ZHOU Jie, CHEN Jin-hu, ZHAO Shuai-shuai, et al. Typical failure mechanism analysis and suggestions caused by damp heat test of equipment on missile[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 007-014.

导弹武器装备具有“长期贮存，一次使用”的特点，在其贮存期内，要反复经历装卸、运输、贮存、待机、检测、维修和战备值班等过程^[1]。在这些过程中，装备会受到自然环境和诱发环境的影响。自然环境主要包括高温、低温、低气压、湿热、盐雾、霉菌、沙尘、辐射等；诱发环境主要包括振动、冲击等。弹上设备安装在导弹内部，在贮存期内，会受到这些环境的影响，由此引起外部损伤和内部应力的变化，造成相关材料发生腐蚀、老化、霉变，导致电气性能、力学性能、密封性能和物化性能退化，甚至失效，最终导致贮存可靠性、战备完好性和系统效能的降低。在诸多的环境因素中，湿热是影响武器装备贮存可靠性的重要因素。由此发展起来的湿热试验是考核装备耐湿热环境影响能力的一种试验方法^[2-3]，其在研制、定型阶段发挥了重要的作用。

为了提高弹上设备耐湿热环境的能力，弹上设备通常要进行“三防”（防湿热、防霉菌、防盐雾）设计^[4]。通过采取防腐蚀的结构设计，选择耐腐蚀的原材料，

对基材表面进行“三防”处理，以提高装备的环境适应能力，使其满足在机载、陆基、海洋等环境服役的弹上设备的使用或长期贮存的需求。文中总结了某型号弹上设备在湿热鉴定试验过程中发生的典型外观不合格现象，通过建立故障树，分析了湿热试验对弹上设备外观的影响机理，总结了弹上设备湿热试验后外观发生不合格的原因，并给出了弹上设备适应湿热大气的相关建议。

湿热环境对装备的影响大部分是温度和湿度综合作用的结果。温、湿度的变化，会使装备及其材料内部或表面出现凝露、吸附、吸收、扩散、呼吸等物理现象^[5]，会产生凝露和游离水，从而引起材料吸潮膨胀、物理强度降低和电气绝缘性能降低等材料性质的改变；导致金属发生氧化或电化学腐蚀、加速化学反应等表面效应，造成金属腐蚀生锈；导致元器件发生漏电、电接触不良、短路或击穿等。由温、湿度引起的物理现象及其产生原因、特点、影响因素见表 1^[5-8]。

表 1 湿热试验引起的物理现象及产生原因
Tab.1 Physical phenomena caused by damp heat test and causes

物理现象	产生原因	特点	影响因素
凝露	装备表面温度低于周围空气露点温度	凝露现象常见于升温阶段	相对湿度；试件表面温度与环境温差；装备体积；热容量
吸附	相对湿度很高时，水分子在温度比露点高的表面黏附	与吸收同时发生，但影响不如吸收	材料类型；表面结构；水蒸气压力
吸收	材料通过吸附作用将水分子吸入内部而积聚	吸收往往与吸附、扩散现象同时存在，吸收速度随温度的上升而提高	周围空气中水的含量；温度
扩散	高温高湿下，由于装备与周围环境的水蒸气压力差而造成水分子在材料中移动	同一相对湿度下，温度越高，水汽含量越多，扩散越剧烈	水蒸气压力；温度
呼吸	高湿条件下，温度变化使装备内部气体发生热胀冷缩而形成空气交换的现象	呼吸作用通常会使装备内腔产生凝露现象	温度交变循环次数；相对湿度；装备外壳密封性能

1 问题概述

某型号弹上设备的湿热鉴定试验按 GJB 150.9A—2009^[5]的要求进行，外观合格判据为：允许金属结构件轻度变暗和变黑，但不得腐蚀；金属结合处无腐蚀；允许涂漆层光泽颜色减退和有少量直径不大于 0.5mm 的气泡，但不应有起皱，开裂及涂漆层脱落现象，且基底金属不得出现腐蚀；非金属材料无明显泛白、膨胀、起泡、皱裂、脱落及麻坑等。

在湿热鉴定试验过程中发现的不合格项，80%以上是产品的外观不符合要求，主要的不合格现象为：金属腐蚀生锈；表面涂层起泡、脱落。文中主要介绍 3 种典型的外观不合格现象。

按照上述试验条件进行湿热试验后发现，某弹上电子设备侧面位于测试插头接口 X4-X7 边缘棱角处

的漆层出现起泡，如图 1a 所示；电子设备电连接器安装螺钉下方外壳表面出现腐蚀生锈现象，如图 1b 所示；温度传感器电连接器的螺钉出现腐蚀生锈现象，如图 1c 所示。

2 失效机理分析

2.1 侧面漆层起泡

对该弹上电子设备侧面进行外观检查，发现出现起泡现象的漆层均为内接电连接器口侧面漆层，且上下端面起泡程度不同，上端面起泡程度比下端面严重。

针对侧面漆层起泡的失效原因，建立了侧面漆层起泡故障树^[9]，如图 2 所示。

1) 防护措施不到位因素 (X1) 分析。升温阶段，



图 1 弹上设备湿热试验后典型外观不合格现象

Fig.1 Unqualified phenomenon of typical appearance caused by damp heat test of equipment on missile: a) foaming appearance of side paint; b) corrosion and rust appearance of electrical connectors; c) corrosion and rust appearance of electrical connector's screws

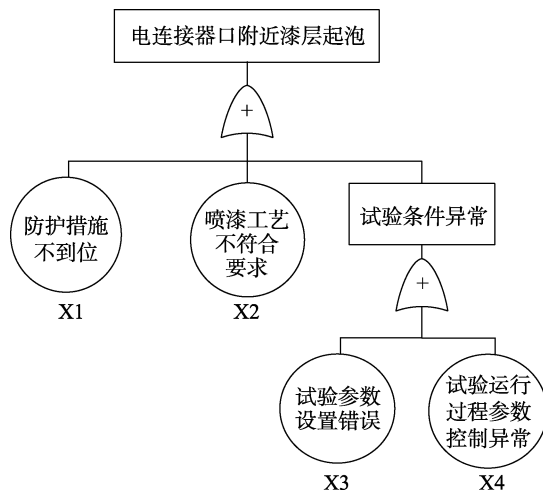


图 2 侧面漆层起泡故障树

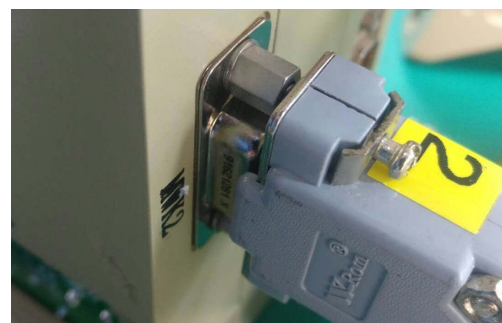
Fig. 2 Fault tree of foaming on the side paint

由于产品的热惯性，产品温度的上升滞后于试验箱的温度，其表面会产生凝露^[6]。电缆插头外壳上下端面与产品表面漆层之间形成窄缝（见图 3a）。窄缝处空间狭小，凝水在其间不断聚集、静滞，使得漆层与插头端面接触的部位长时间浸润于凝水当中，并处于高低温交替循环的试验状态，加大了漆层参与湿热试验的严酷度，可能会造成漆层起泡。从上述分析可知，不能排除由于防护措施不到位造成漆层起泡的原因。

2) 喷漆工艺不符合要求因素 (X2) 分析。经查，操作者按照工艺流程，使用规定的工艺参数进行喷涂作业，喷漆工艺符合要求。此外，若喷涂工艺不符合要求，湿热试验后，设备外壳漆层整体会出现均匀起



a 内装电连接器



b 外装电连接器

图 3 电连接器与电缆插头连接状态

Fig.3 Connection status between electrical connector and cable plug: a) built-in electrical connector; b) external electrical connector

泡现象，通过观察设备湿热试验后的起泡现象可知，喷漆工艺符合要求。该工艺已成熟应用在其他航天产品上，且多批次产品均进行过与该设备相同试验条件的湿热试验，未发生类似问题。从上述分析可以说明喷漆工艺符合要求。因此，可以排除该因素。

3) 试验参数设置错误因素 (X3)、试验运行过程参数控制异常因素 (X4) 分析。对该湿热试验过程进行复查, 该湿热试验是按照 GJB 150A—2009 进行的, 试验设备以及使用的控制、测量传感器均在检定期内, 并且工作正常。温湿度允差满足 GJB 150.1A—2009 要求, 操作人员为持证上岗, 且在有效期内, 试验条件加载正确, 试验数据合理可信。因此, 可以排除试验参数设置错误、试验运行过程参数控制异常因素。

综合上述分析, 防护措施不到位是造成侧面漆层起泡的原因。在交变湿热试验过程中, 升温阶段, 受试产品表面会产生凝露现象, 加大了漆层参与湿热试验的严酷度, 导致漆层软化、膨胀, 膜分子单元间隙增大。水分子通过膜分子单元增大的间隙, 不断浸入

底漆与面漆中间。水分子进入固体材料内部后, 会改变固体材料的晶格形状, 导致固体材料晶格内部膨胀变形, 使外层漆面起泡^[10-14]。连接器上下端面起泡的差异主要是电连接器端面与框架接触宽度有差异所致。下侧接触面小或无接触, 凝水不易聚集, 因此轻微起泡或无起泡。与内接电连接器相比, 外接电连接器与周围漆层 (见图 3b) 之间空间较大, 不会有凝水聚集, 因此没有出现起泡现象。

2.2 外壳表面腐蚀生锈现象

拆卸螺钉附件后, 进行外观检查, 发现螺钉未出现腐蚀生锈现象。采用电子显微镜对其外壳进行外观检查, 发现壳体侧面靠近法兰盘平面的根部转角位置呈现黑色, 无银白色镀层覆盖, 如图 4 所示。



图 4 电连接器拆卸后外壳及镀层腐蚀部位

Fig.4 Schematic diagram of the corroded parts of shell and the coating after the electrical connector is disassembled

对电连接器镀层异常和正常区域成分进行分析, 分析结果分别如图 5、6 所示。通过对电连接器镀层正常区域和异常区域进行对比分析发现, 镀层异常区域含 Fe 为 14.98% (质量分数), 氧为 21.46%。因此可以确定电连接器外壳侧面靠近法兰盘平面的根部转角位置的铁基体材料存在腐蚀现象。

针对电连接器外壳锈蚀, 建立如图 7 所示的故障树^[9]。

1) 设计选材不合理因素 (X1) 分析。该电连接器壳体材料为 SPCC 碳素钢, 其组装完成后, 随弹上电子设备按照 GJB 150A—2009 进行湿热试验。对该标准中的湿热试验条件与生产单位所执行的 GJB1217A—2009^[15]进行比对, 湿热试验均为 10 个循环, 累计 240 h, 试验湿度要求两者基本一致, 均为 95%±5%, GJB 1217A—2009 的温度变化幅度为 25~65 °C, 而 GJB 150A—2009 为 30~60 °C。综合比

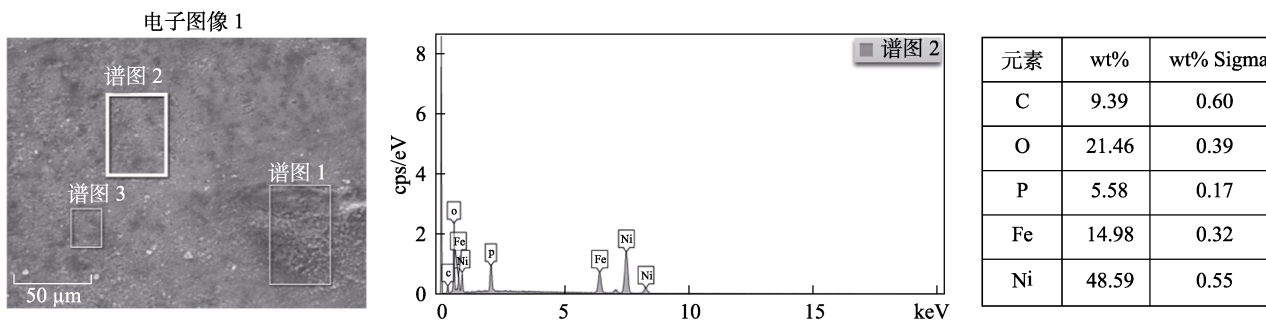


图 5 镀层异常区域材料成分

Fig. 5 Material composition of abnormal area of the coating

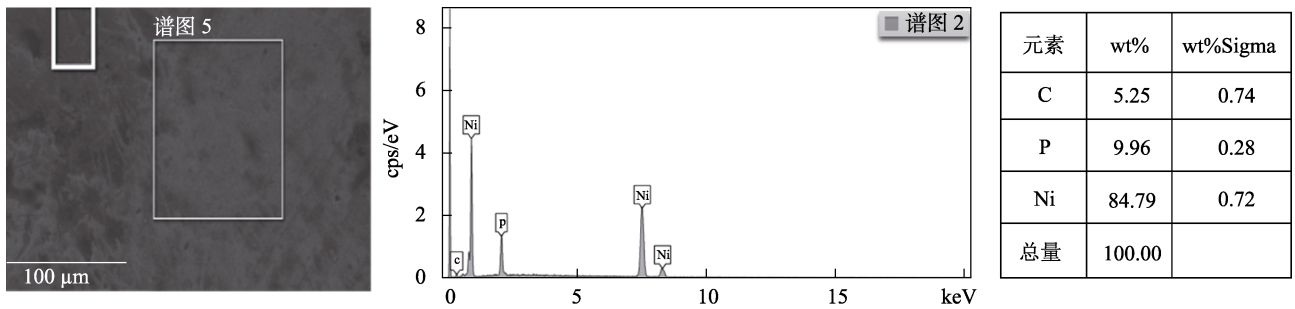


图 6 镀层正常区域材料成分
Fig. 6 Material composition of normal area of the coating

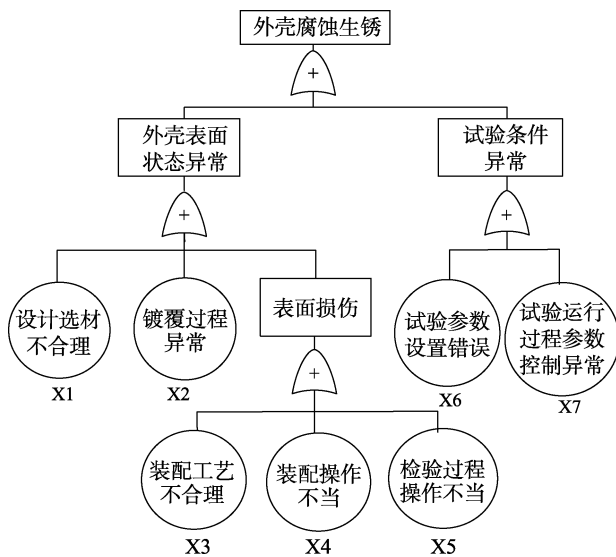


图 7 某电连接器外壳锈蚀故障树

Fig.7 Fault tree of a certain corroded electrical connector shell

较可知，该电连接器所执行的湿热试验标准的试验条件相对鉴定试验要略微严酷。因此，设计选材不合理的因素可以排除。

2) 镀覆过程异常因素 (X2) 分析。经查相关操作记录，镀覆操作人员为持证上岗，且在有效期内。零件电镀过程的工艺参数都在工艺规定范围内，无异常反馈。因此，排除镀覆过程异常。

3) 装配工艺不合理因素 (X3) 分析。该装配工艺按照工序卡片进行，从未发现该等级产品在例行试验湿热或盐雾项目中壳体腐蚀生锈的现象，且该工艺应用多年，成熟可靠。因此，装配工艺不合理因素可以排除。

4) 装配操作不当因素 (X4) 分析。该批次装配人员为持证上岗，且在有效期内。该批次完工检查流程卡相关检测内容正常，无异常情况。同时复查实际腐蚀生锈部位并非外壳翻铆作用区域，因此装配过程操作不当因素可以排除。

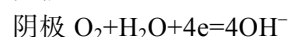
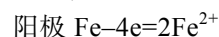
5) 检验过程操作不当因素 (X5) 分析。产品完工检查合格后，提交质量部进行逐批检验。其中进行机械检查项目时，要求检验人员将产品组装成附件

后，再与夹具进行互换性对接，以模拟用户实际使用状态。组装附件时需要采用工装夹具将六角螺钉固定，再拧紧尾端螺母。从图 4 腐蚀部位照片可以看出，发生生锈的部位为外壳根部。在进行逐批检验的互换性项目测试时，需组装六角螺钉附件，而组装过程中使用工工会对外壳镀层造成磨损或损伤。通过复查发现，互换性项目测试时的专用工装夹具曾出现过异常记录，具体表现为端面及内六方变形无法正常使用，现场作业人员为了保障生产，对原不合格工装进行了自行修理。由于返修后的工装端面存在锐边，该工装使用时，其端面与外壳表面会直接接触，其表面锐边会对壳体产生一定正压力与剪切力，导致接触部位的镀层产生破损。该电连接器锈蚀部位位于外壳转角处，属于专用工装与外壳直接接触部位范围，因此检验过程中因检验工装操作不当致使外壳镀层损伤的因素不可以排除。

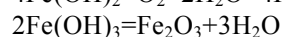
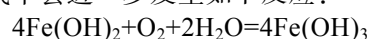
6) 试验参数设置错误因素 (X6)、试验运行过程参数控制异常因素 (X7) 分析。同侧面漆层起泡失效机理分析中的 3)，因此，可以排除该两项因素。

综合上述分析，检验过程操作不当是造成电连接器安装螺钉下方外壳表面出现腐蚀生锈现象的原因。电连接器基体为 SPCC 冷板铁合金，镀覆要求为镀镍。由于铁的电极电位低于镍，所以电镀镍层对于铁合金为阴极性镀层，即在出现腐蚀时，基体会优先于镀层出现腐蚀。对于阴极性镀镍层，镀层完整时，可以有效将腐蚀物质隔绝在外，能够为基体提供良好的防护；当镀层完整性受到破坏，基体能接触到腐蚀性物质，耐腐蚀性会降低。

在装配过程中，由于组装附件时对工装夹具操作不当，致使外壳转角处镀层受损，镀层损伤位置基体裸露在外。当遇见由空气中的水汽溶解二氧化碳形成的电解液，通常会发生如下反应：



生成的 Fe^{2+} 是以 $4\text{Fe}(\text{OH})_2$ 形式存在，在含水的空气中会进一步发生如下反应：



由于腐蚀产物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 或者 Fe_2O_3 的体积为原来金属 Fe 体积的数十倍, 腐蚀物会沿着裂纹溢出, 于是出现图 1b 的现象。

2.3 螺钉锈蚀现象

观察该电连接器的结构, 电缆罩与电缆夹通过螺钉、垫圈固定在一起, 在使用时起到对线缆的夹紧固定作用, 仅螺钉出现腐蚀生锈现象。针对电连接器螺钉锈蚀, 建立故障树^[9], 如图 8 所示。

1) 螺钉自身质量缺陷因素 (X1) 分析。经复查, 所用螺钉出厂检验记录和入厂复验记录均合格。随机抽取了 10 只库存的镀锌螺钉进行 8 h 盐雾试验。试验后, 螺钉表面无锈蚀现象 (如图 9 所示)。因此, 螺钉自身质量缺陷的可能因素 X1 可以排除。



图 9 镀锌螺钉 8 h 盐雾试验后外观

Fig.9 Appearance of galvanized screw after 8 h salt spray test

2) 设计选材不合理因素 (X2) 分析。该螺钉属于钢质镀锌螺钉, 产品电缆罩和电缆夹零件为铜质镀镍。镀锌层为阳极镀层, 电化学腐蚀过程中, 通过腐蚀镀锌层来保护基体材料不被腐蚀, 有腐蚀较慢的优点, 在一般大气及工业大气条件下具有较好的防护性能。该螺钉自身较小, 外表面非平整平面, 因此镀层较薄, 无法完全满足更高耐腐蚀环境中使用的要求。因此, 设计选材不合理因素 X2 不能排除。

3) 试验参数设置错误因素 (X3)、试验运行过程参数控制异常因素 (X4) 分析。同侧面漆层起泡失效机理分析中的 3), 因此, 可以排除该两项因素。

综合上述分析, 设计选材不合理是造成螺钉锈蚀的原因。该电连接器所用螺钉镀层结构属于钢基体上镀锌, 该镀层在腐蚀介质中为阳极性镀层。锌 (标准电极电位 -0.76 V) 电极电位更负, 是阳极, 铁 (标准电极电位 -0.44 V) 是阴极。在发生腐蚀时, 锌镀层先受到腐蚀。

锌本身是较为活泼的金属, 锌的表面与周围的潮湿空气接触, 会首先与潮湿水汽发生化学反应, 生成一层多孔的胶黏状 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 腐蚀产物。随后, 一部分 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 会进一步与大气中的二氧化碳反应, 生成腐蚀产物 ZnCO_3 ; 而另一部分 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 在干燥环境下会

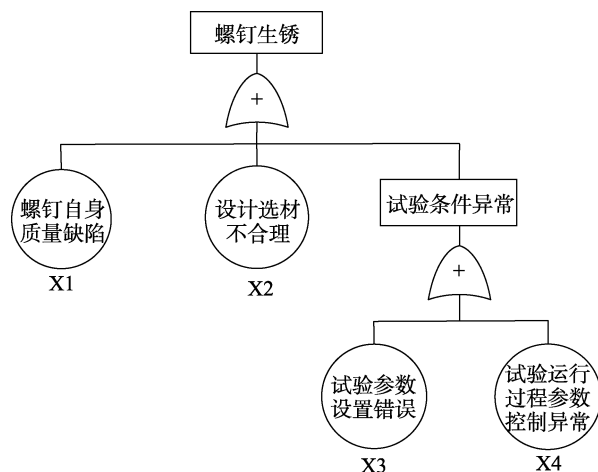
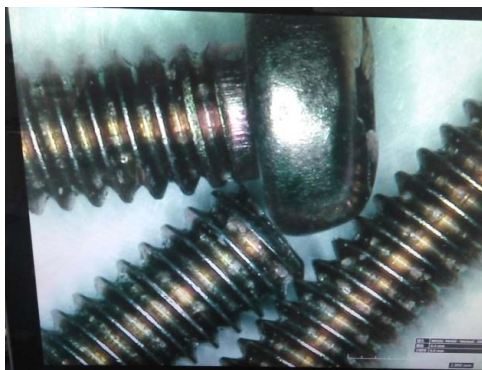


图 8 某电连接器螺钉锈蚀故障树

Fig.8 Fault tree of a corroded electrical connector screw



失去结晶水, 变成 ZnO 。 ZnO 和 ZnCO_3 会进一步发生复杂的物理化学反应, 最终产生一层薄的、非致密的、有一定黏附性的碱式碳酸锌 ($\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) 和氧化锌的混合物, 可以阻止镀层进一步腐蚀。

环境中的挥发性气体 (有机酸、硫化氢、氯化氢、氨等) 以及外来的有机酸、盐等物质, 在潮湿的环境下, 对锌镀层的腐蚀起到加速作用, 易产生白色腐蚀物质, 即白斑现象^[16-17]。当长时间处于潮湿环境时, 锌镀层被腐蚀后, 钢基体在没有镀层防护的情况下, 会和水、空气产生氧化腐蚀现象, 生成褐色的铁的氧化物, 主要成分为 Fe_2O_3 , 即螺钉表现为锈蚀现象。

3 不合格原因总结

综合上述分析, 湿热试验过程中, 产品外观不符合要求的原因主要有以下几种:

1) 在产品的设计阶段, 对环境适应性分析不到位, 未充分考虑到产品在使用条件下, 在湿热试验过程中接插件尾罩与壳体间形成的积水效应, 造成漆膜起泡问题, 使产品不能满足外观要求。

2) 产品在生产或者检验过程中, 由于使用了经过异常处理的工装, 在进行装配操作时, 致使产品表

面的镀层受损,产品镀层的耐腐蚀性能下降,基底金属暴露在大气中,与空气中的水、氧气发生化学反应,使产品不能满足外观要求。

3) 在产品选材阶段,产品的材质不能完全满足相应耐湿热腐蚀环境的使用要求。

4) 产品表面有镀层,在流转、运输、交付过程中,造成了镀层的划伤、破坏,使基底金属暴露在大气中,与空气中的水、氧气发生化学反应,导致产品不能满足外观要求。

4 弹上设备适应湿热大气的相关建议

从以上分析可以看出,弹上设备湿热试验过程中受湿热环境的影响,其外观不合格的原因具有一定的规律。为了保证导弹的可靠性,使其能够从贮存状态直接转入能使用状态,提高其贮存可靠性、战备完好性和系统效能,在产品的设计、维护保养和贮存环境维护上就应该科学管理,合理分配资源。

1) 对于导弹这种具有“长期贮存、一次使用”特点的武器装备,必须使其达到高可靠、长寿命的要求。纵观各类导弹贮存及其延寿信息,许多贮存失效模式是由于受湿热环境的影响。分析这些失效的原因,很大一部分是因设计不当造成的。因此,在研制阶段应考虑产品全寿命周期内所经历的各种环境因素,从源头做起,高度重视产品可靠性的设计工作,开展充分的设计验证,保证产品可以满足实际使用环境要求。

2) 环境中的温度、湿度、盐雾、霉菌是影响弹上设备贮存可靠性的关键因素。在选材上,要选择能够提高环境适应能力的元器件和原材料,避免使用某些不能满足湿热环境要求的材料。如碳钢基体+镀锌的表面处理工艺,不能够满足湿热环境条件下不发生锈蚀的要求,在全寿命周期内有湿热环境的产品不建议采用该材料。其次,在介质隔离上,产品的表面应该进行“三防”设计。

3) 各类弹上设备的贮存失效模式和失效机理可能存在差异,但其主导原因却大同小异,都是由于环境应力(温湿度、电应力和机械应力)的作用,导致弹上设备的腐蚀、老化^[18-19]。这2种失效是导弹贮存中最常见的失效,如能控制腐蚀、老化的发生,即可大幅度提高导弹的贮存可靠性。因此,必须采取措施控制贮存仓库、简易库房等处的贮存“大环境”,通过密封包装、充氮气等途径来控制导弹的贮存“小环境”和“微环境”,从而尽量减小温、湿度等环境因素给产品带来的影响^[20]。

5 结语

文中对某型号弹上设备在湿热鉴定试验过程中出现的典型外观不合格现象,采用故障树分析方法明

确了失效原因,并对失效机理进行了分析。给出了弹上设备适应湿热大气的相关建议,为提高弹上设备的耐湿热环境能力,进而提高装备的贮存可靠性、战备完好性和系统效能提供了指导。

参考文献:

- [1] GJB 1181—91, 军用装备包装、装卸、贮存和运输通用大纲[S].
GJB 1181—91, General outline for packaging, handling, storage and transportation of military equipment[S].
- [2] 胡志强. 环境与可靠性试验应用技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2016.
HU Zhi-qiang. Environmental and reliability test application technology[M]. Beijing: China Metrology Press, 2016.
- [3] GREY D E. Development, test and evaluation of materiel for extreme climatic conditions[J]. Machine design, 1995(5): 116-119.
- [4] 肖军, 廖志忠, 吴连锋. 空空导弹弹体结构海洋环境腐蚀防护[J]. 航空兵器, 2019, 26(6): 86-92.
XIAO Jun, LIAO Zhi-zhong, WU Lian-feng. Study on corrosion protection on structure of air-to-air missiles in marine environment[J]. Aviation weapons, 2019, 26(6): 86-92.
- [5] GJB 150. 9A—2009, 军用装备实验室环境试验方法, 第9部分: 湿热试验[S].
GJB 150. 9A—2009, Military equipment laboratory environmental test method, Part 9: Damp heat test[S].
- [6] 马志宏, 李金国. 湿热环境应力下产品失效机理分析[J]. 环境防护, 2006(5): 31-33.
MA Zhi-hong, LI Jin-guo. Failure analysis for the effect on products in the humidity's and temperature's environmental stress[J]. Environmental protection, 2006(5): 31-33.
- [7] 许凡. 交变湿热试验中的呼吸效应[J]. 环境条件与试验, 1983(4): 16-23.
XU Fan. Respiratory effect in alternating damp heat test[J]. Environmental conditions and tests, 1983(4): 16-23.
- [8] 翁雷, 白显毅. GJB 150A 湿热试验中若干问题探讨[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(2): 209-212.
WENG Lei, BAI Xian-yi. Discussion on some problems in GJB 150A damp heat test[J]. Spacecraft environmental engineering, 2013, 30(2): 209-212.
- [9] GJB/Z 768A—98, 故障树分析指南[S].
GJB/Z 768A—98, Fault tree analysis guide[S].
- [10] 姚春蓉. 某电子设备湿热试验油漆起泡原因及对策[J]. 电子机械工程, 2012, 28(4): 54-48.
YAO Chun-rong. Causes and countermeasures for blistering of paint in a damp heat test of an electronic equipment[J]. Electronic mechanical engineering, 2012, 28(4): 54-48.

- [11] 毛喆, 黄红武, 胡剑锋. 漆层湿热试验中起泡原因分析及控制措施[J]. 材料保护, 2017, 50(9): 99-102.
MAO Zhe, HUANG Hong-wu, HU Jian-feng. Cause analysis and control measures of blistering in paint layer damp heat test[J]. Material protection, 2017, 50(9): 99-102.
- [12] 章文捷, 马静. 金属结构件表面三防清漆附着问题的解决[J]. 电子工艺技术, 2017(1): 49-52.
ZHANG Wen-jie, ma jing. solution to the Adhesion Problem of Three-proof Varnish on the Surface of Metal Structure[J]. Electronic process technology, 2017(1): 49-52.
- [13] 刘四平, 黄立恒, 唐雨. 直升机机载产品环境试验考核结果浅析[J]. 环境技术, 2019(5): 29-33.
LIU Si-ping, HUANG Li-heng, TANG Yu. A brief analysis on the results of environmental test of helicopter airborne products[J]. Environmental technology, 2019(5): 29-33.
- [14] LANDSBERG H Grey. Principles of meteorological analysis[J]. Materials science and engineering, 2001(7): 43-49.
- [15] GJB1217A—2009, 电连接器试验方法[S].
GJB1217A—2009, Electrical connector test method[S].
- [16] 王荣. 镀锌方管表面白斑起因分析[J]. 腐蚀与防护, 2009(4): 285-287.
WANG Rong. Cause analysis of white spots on zinc-plated square tube[J]. Corrosion and protection, 2009(4): 285-287.
- [17] 雷军, 李剑, 吴晓军, 等. 三防涂覆印制板组件异物滋生问题的研究[J]. 电子工艺技术, 2016(5): 291-294.
LEI Jun, LI Jian, WU Xiao-jun, et al. Research on the breeding of foreign matter in three-proof coated printed board components[J]. Electronic process technology, 2016(5): 291-294.
- [18] 李久祥, 申军, 侯海梅, 等. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
LI Jiu-xiang, SHEN Jun, HOU Hai-mei, et al. Equipment storage life extension technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2007.
- [19] 孟涛, 张仕念. 导弹武器装备贮存延寿评述[J]. 科技研究, 2009, 25(1): 10-13.
MENG Tao, ZHANG Shi-nian. Review on storage life extension of missile weaponry[J]. Scientific and technological research, 2009, 25(1): 10-13.
- [20] 张仕念, 何敬东, 颜诗源, 等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41.
ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, et al. Technical approaches and key technologies for missile storage life extension[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(4): 37-41.