

# 海军导弹环境试验的风险源辨识分析

洪亮, 张福光, 邱立军

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

**摘要:** **目的** 研究海军导弹环境试验风险辨识问题。**方法** 根据海军导弹装备环境试验流程, 针对试验设计、试验实施和试验结果评估等进行风险源辨识分析。**结果** 分析得出了“试验设计—试验实施—试验结果评估”的风险源, 并重点针对高温、低温、湿热、盐雾等海军导弹典型环境试验类型进行了风险源辨识分析。**结论** 可为海军导弹装备环境试验风险管理提供技术基础支撑。

**关键词:** 导弹环境试验; 风险辨识; 风险管理

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.008

**中图分类号:** TJ760.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)04-0038-06

## Risk Source Identification of Navy Missiles Environmental Test

HONG Liang, ZHANG Fu-guang, QIU Li-jun  
(Naval University of Aeronautical, Yantai 264001, China)

**ABSTRACT: Objective** To study problem in risk identification of environmental test for navy missiles. **Methods** According to the flow of environmental test for navy missiles, the risk sources were identified and analyzed in allusion to design, implementation and result evaluation of test. **Results** The risk sources of ‘environmental test design, test implementation and test result analysis’ were presented. The risk sources were identified and analyzed for typical environmental tests for navy missiles on high temperature, low temperature, humidity-heat and salt spray. **Conclusion** It could provide technological basis for risk management for environmental test of naval missiles.

**KEY WORDS:** missiles environmental test; risk identification; risk management

随着海军舰艇执行出访、演习、打击海盗、人道主义救援等行动任务日益频繁, 远海长航趋于常态化, 海军导弹历经“三高”(高温、高湿、高盐雾)、甚至超出设计使用环境条件的时间更长<sup>[1]</sup>, 不仅要求导弹装备的可靠性高, 而且对导弹在极限环境条件下正常工作的能力(即环境适应性)提出了更高的要求。环境试验作为海军导弹设计定型试验的重要组成部分, 是海军导弹环境工程的主要任务<sup>[2]</sup>, 是确保海军导弹环境适应性达到研制总要求和研制合同规定要求的重要手段之一。目前, 在海军导弹装备环境试验的风险控制方面, 还缺乏系统的理论研究, 缺少对导弹装备环境试验风险辨识研究, 因此, 开展海军导弹环

境试验风险源辨识分析具有非常重要的理论意义, 可为装备环境试验风险管理理论与实践提供有益的探索。

## 1 海军导弹环境试验及应用

海军导弹环境试验的流程一般可以分为试验设计、试验实施和试验结果分析三个阶段<sup>[3]</sup>。

### 1.1 试验设计

试验设计是根据导弹研制要求确定的环境试验方法, 包括导弹产品试验对象、技术状态、试验目的、试验项目、试验工况、环境条件、试验内容、测试数

据等内容，最终形成试验方案、试验大纲、试验实施方案。试验设计的正确性、合理性是决定试验充分性和数据覆盖性的根本因素，是重要的风险源。通过控制试验方案、试验大纲、试验实施方案等的技术风险，能有效地规避试验设计技术风险。

### 1.2 试验实施

试验实施是按照试验大纲、试验方案获取试验数据的整个过程和活动，涉及试验系统、试验边界、产品测试、数据记录、试验人员、试验环境等多种因素。试验中模拟的边界、试验系统产生的环境应力等决定了与导弹飞行及服役等环境的接近程度，具有非常强的专业性和技术性。导弹测试项目和数据的记录决定了是否能获取需要的数据，试验环境的偏差、试验人员的操作熟练程度对试验结果影响非常大，最终形成的试验数据包要求准确、完整、正确、有效，且满足精度要求。试验实施的全过程应接受监督控制，可有效保证试验质量，增加试验数据有效性，降低试验实施过程的技术风险。

### 1.3 试验结果评估

试验结果评估是对通过试验获取的一系列数据进行分析评估的过程，主要是在试验报告中进行试验

结果评估。试验方在试验报告中，应详细描述试验过程，分析试验数据包的完整性、有效性，给出不确定度分析结果。任务提出方在试验总结报告中应分析试验是否达到研制目的，还应对试验与任务书的符合性、试验充分性、测试覆盖性等进行分析评价，给出试验是否成功的结论。尽量降低试验数据的测量不确定度、采用正确的试验数据处理方法，能有效降低试验结果评估的技术风险。

## 2 海军导弹环境试验风险源辨识

风险源，又称风险因子或风险事件，是促使或引起风险事件发生的条件，以及风险事件发生时，致使损失增加、扩大的条件。风险源是风险事件发生的潜在因素，是造成损失的间接和内在原因。基于对导弹环境试验流程，以“环境试验结果不能达到预定目标要求”为顶事件将环境试验风险分解为 3 个阶段的技术风险<sup>[4]</sup>，建立海军导弹环境试验的风险树。对每个风险事件进行分析、讨论、细化，识别出导弹环境试验每个阶段可能的风险源，如图 1 所示。根据海军导弹环境试验的风险源分析，结合对海军导弹的主要承研承制单位的调研情况，对海军导弹环境试验的各个风险源进行辨识分析。

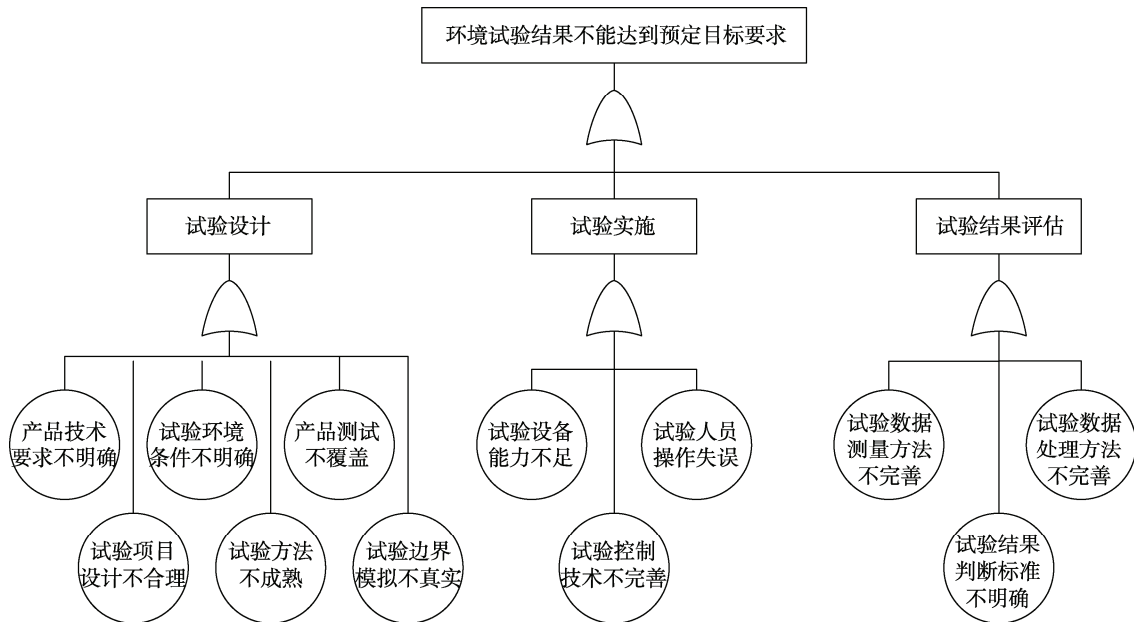


图 1 海军导弹环境试验的风险源

## 3 试验设计风险源分析

### 3.1 试验项目设计不合理

试验项目主要是根据试验目的确定需要开展的项目，试验项目设计不合理主要表现为试验项目不充分和试验顺序不合理两种情况。

#### 3.1.1 试验项目不充分

试验项目不充分主要包括缺少试验项目，或是对试验标准方法剪裁不当，从而导致试验考核不充分。海军导弹各分系统、各部组件的试验项目大多以型号研制经验为基础，试验选取、考核目的缺乏依据<sup>[5]</sup>。具体表现在：

- 1) 自然环境试验方面，缺乏可依据的国军标，

在环境试验项目的选取方面缺乏有效性和科学性<sup>[6]</sup>。海军导弹型号中有部分进行了自然环境试验,试验项目不尽相同。部分型号进行了海洋环境自然环境试验,部分型号进行了寒区、高原的自然环境试验。参试产品包括材料试片、器件、发动机、发控设备(含发射箱)等,各个型号也不尽相同。

2)使用环境试验方面,同样缺乏可依据的国军标。海军导弹型号开展的使用环境专门试验较少,主要是结合导弹交付部队,在实际使用环境中进行性能测试和环境测量,或结合鉴定试验项目的运输试验,进行全弹的跑车试验和分系统的运输试验。贮存试验作为可靠性试验项目,试验件多为整弹。一般不进行整个武器系统的环境适应性试验(使用环境)。

3)实验室环境试验方面,主要是依据 GJB 150A。GJB 150A 是一个剪裁式标准,不再明确规定试验条件等,除试验方法外基本上不能直接引用,因此在使用中易出现试验标准方法剪裁不当的风险。海军导弹实验室环境试验中,由于缺乏能够指导全过程研制的试验项目、试验条件、试验方法的剪裁指南<sup>[7]</sup>,不具备充足的自然和平台环境数据。因此在环境条件制定、环境项目的选取方面有较大的不确定性,存在一定的风险。

### 3.1.2 试验顺序不合理

在项目顺序的选择上,试验样品的使用环境是能够为人们所预知的,其试验的顺序应与产品在生产、贮存、运输、使用中的环境条件出现的顺序保持一致,以实现产品的最佳考核。试验样品的使用环境不能为人们所预知,其试验的顺序应首先从影响力最大的试验项目开始。在试验过程中,要考虑前一个试验项目对后一个试验项目的影晌。

海军导弹环境试验中试验顺序不合理的风险一般是因为试验设计时没有考虑产品全寿命任务历程所致,没有按照产品全寿命周期内经历的环境、事件的顺序设计试验项目顺序,试验顺序不合理可能导致试验结果不真实,不能真实反映产品的特性,影响到后续各种决策。当前导弹环境鉴定试验的一般做法是:按照惯例先开展损伤低的试验项目温度试验,后开展损伤高的振动、冲击试验,最后开展湿热、盐雾、霉菌等试验项目,这种顺序不一定与产品真实历程一致。

## 3.2 试验边界模拟不真实

试验设计时,应确保试验边界尽量模拟实际的状态。试验边界主要与产品状态有关,由试验设备、试验工装、悬挂支撑系统、载荷模拟等构成。在海军导弹研制阶段,一方面因为真实飞行的环境数据不完善,在有限的环境数据基础上制定的试验环境条件存在不准确的可能;另一方面实测数据不可能涵盖所有产品,根据舱段或典型部位测得的数据来制定所有产

品的环境条件,需要借助计算、外推等手段,与真实环境条件有差异;而试验环境条件的制定方法也决定了试验环境条件与真实环境的不同。目前各型导弹环境条件要求不尽相同,部分型号对于环境的部分指标如风速、噪声、降雨强度、电场强度等没有明确规定,给后续的环境试验带来风险。

对海军导弹来说,试验中存在全弹飞行状态、产品+振动台试验状态、产品+运动边界状态,需要对同样的控制条件、不同的边界条件下产品的随机振动响应进行分析。由于全弹振动试验难度大、成本高,因此往往只针对关键部段如仪器舱等进行振动环境试验<sup>[8]</sup>。在相同的界面加速度控制条件下、相同位置处的点在不同的边界条件下会在不同频率处出现大小不同的共振峰。每个共振峰都是由该系统的动态特性所决定的,地面振动试验状态、基础激励状态均不能复现值班、运输、发射飞行状态时的响应,出现了地面振动试验“过试验”和“欠试验”现象。

## 3.3 试验环境条件不准确

环境试验反映的是产品在规定试验条件下的功能、性能和特性,试验设计时提出的试验环境条件对试验结果有巨大影响,不同的环境条件会产生不同的试验结果<sup>[9]</sup>。环境条件过高导致过试验,环境条件过低导致欠试验,在不合理的试验条件下得到的试验结果不能真实反映产品的特性。以盐雾环境试验为例,目前海军导弹研制时采用盐雾试验都是采用模拟大气盐雾环境的实验室环境试验方法,目的在于考核确定材料保护层和装饰层的有效性,确定产品物理和电气性能抗盐雾大气影响的能力。目前型号盐雾试验多在材料级进行,鲜有设备级或系统级的盐雾试验,还不能充分考核海军导弹装备对盐雾环境的环境适应性。标准盐雾试验条件与实际服役盐雾环境条件的等效关系未知,上述试验时间可能不满足长期贮存、值班的需求。盐雾浓度受包装、遮挡等的影响较大,导弹装备设备的位置不同,其服役的盐雾环境也不同,试验环境条件与实际服役环境相差较大。

## 3.4 技术状态要求不明确

导弹装备的整个研制阶段中,产品设计方案不断完善,导弹试验对象的技术状态是不断改变的过程,改变的可能是产品的功能、性能、接口、元器件、原材料和工艺状态等。试验目的不同,对产品技术状态的要求也不同。研制试验只要求试验考核的对象真实即可,如舱段级力学摸底试验中可以采用舱段为真实件、仪器设备为模拟件的技术状态开展试验;鉴定试验要求产品的技术状态与最终定型的技术状态一致,如可靠性鉴定试验要求产品为基本定型的状态;验收试验则要求产品为最终交付的产品状态。如果试验设

计时没有明确提出产品技术状态要求,就可能出现不符合技术状态要求的产品参加了试验,大大降低了试验效果,甚至可能达不到试验验证目的。例如,技术状态要求不明确时,可能出现没有通过力学环境试验的产品去参加可靠性增长试验的情况。这种情况一方面可能在可靠性增长试验中暴露产品在结构力学布局方面的缺陷,从而改进设计延长了试验周期和增加了故障样本,影响可靠性评估结果;另一方面可能将环境适应性方面的缺陷留在飞行阶段、使用阶段中暴露,增加了飞行风险。

### 3.5 试验方法不成熟

试验方法是指在环境试验过程中应用的试验技术。海军导弹型号研制阶段需要攻克多项关键技术研究,这些关键技术不仅需要深入的理论分析,也需要百分之百进行地面试验验证。这些关键技术中可能涉及新材料、新工艺、新技术、新产品,对应的环境试验一部分可采用传统试验方法开展,还有相当一部分需要研发新试验方法<sup>[10]</sup>。这部分新试验方法的技术成熟度较低,存在较大的技术风险。目前海军导弹部分型号环境试验中开始采用多维振动的试验方法。与普通的单维振动试验结果比较表明,多维同时激振确实比传统的单维顺序激振更能找出产品的薄弱环节,但在高精度多维振动控制算法、非线性控制算法、多维振动试验条件制定方法等方面还存在不确定性因素,在试验方法上存在潜在的风险。

### 3.6 产品测试不覆盖

导弹进行环境试验的目的是获得在给定的试验条件下各项特性的数据,从而分析判断试验对象的设计方案等是否满足要求。因此试验设计时应明确规定产品的测试内容和要求,确保数据能覆盖所有参数,可充分反映技术状态及变化趋势。造成产品测试不覆盖的原因,一方面是认知缺陷,受技术水平限制,产品的某些关键特性缺少测试手段,无法做到百分之百完全测试;另一方面是对试验目的理解不透彻,对产品测试项目剪裁不当造成的。产品测试覆盖性不完整可能带来较大的技术风险,比如关键参数没有监测会导致故障不能及时发现,甚至将故障带入下一环节,扩大故障后果。如在可靠性试验初期,只考虑到可靠性增长的目的,选择了基本的测试项目,未能完全覆盖研制技术要求,导致后期提出代替可靠性鉴定试验时,由于测试项目覆盖性差,达不到鉴定试验的要求,只能重新开展可靠性鉴定试验。

## 4 试验实施风险源分析

### 4.1 试验设备能力不足

试验设备能力是决定能否实现试验方案各项要

求的关键环节。由于技术水平和设备能力的限制,部分试验设备难以满足产品研制需要,尤其是综合环境应力试验设备,如全天候自然环境模拟设备、热+振动复合环境试验设备、热+噪声复合环境试验设备等存在严重不足。当试验设备能力不能实现试验提出的高量级环境条件时,一般采用预计、数据外推等方法获得要求环境条件下的数据,会给试验结果评价带来一定的技术风险。当试验测量设备在精度、容量等方面难以满足试验要求时,往往按照确保关键点测量数据的原则,舍弃部分测点,导致获取的试验数据不全面,给试验结果分析带来技术风险。另外当试验设备的工作可靠性不能满足试验要求时,试验设备的故障可能导致严重过试验,甚至导致产品损伤、人员受伤等意外发生。

### 4.2 试验人员操作失误

试验人员作为试验实施的主体,负责操作试验设备、记录试验数据、控制状态转换、处理试验异常等工作,其技术水平、熟练程度、责任心等对试验结果影响较大。参加试验的人员中如果有新人,对试验方案理解不透彻,在试验过程中容易出现操作失误,如试验参数装订不正确,试验数据记录不完整、不及时或者不正确,试验异常处理不及时、不正确,可能导致不可逆转的错误,带来较大的技术风险。目前海军导弹装备在定型鉴定时采用第三方实验室质量管理和质量控制方法,在严格的中立第三方质量控制可以保证环境试验的有效开展。因此在海军导弹实验室环境试验实施方面,目前对试验的控制和管理都有较为齐全的规定、规章,保证试验的开展。

### 4.3 试验控制技术不完善

试验过程中,会随着试验的进展,经常出现试验状态、试验条件、试验程序、试验数据处理规程等内容的变更,这些变更如果不涉及试验基线的变更,就属于现场技术问题处理的范畴。典型的一种情况是试验能力不足,需要降低试验条件开展试验;另一种常见的情况是试验完成阶段性的工作后,试验各方对试验数据、产品状态等进行检查分析。如果试验数据表明存在过试验或欠试验的情况,就需要调整后续试验的状态或条件。如果此时不能及时发现存在的技术问题,或者提出的改进方案不合理,就会给试验带来技术风险。例如湿热试验后,自然恢复1h,就认为已经恢复至正常大气条件;低温试验后跳过试后恢复过程,直接进行高温试验,主观认为这样做省时省力,高温试验中就对试件进行了烘干。这些做法对试件产生了过应力,对试件的组件造成严重影响,为试件测试结果的准确性造成风险。

## 5 试验结果评估风险源分析

### 5.1 试验数据测量方法不完善

试验中一般采用测量不确定度来定量说明试验数据的可信性和有效性。试验数据的测量不确定度主要由试验测量方法、试验环境、试验仪器设备存在的不确定因素引起,如小样本量、试验环境控制不严、仪器设备精度不够、模拟仪器设备读数误差、引用常量参量不准、测量方法假定性、测量重复观察值变化等。试验数据的准确性、正确性在很大程度上取决于不确定度的大小,不确定度越小,测量准确度越高,测量结果的使用价值越高,反之亦然。试验数据存在的测量不确定度给试验结果分析评价带来一定的技术风险。

### 5.2 试验数据处理方法不完善

试验数据处理方法对试验结果有重大影响,不同的处理方法会给出不同的结果,不合理的数据处理方法甚至可能导致颠覆性的试验结果。工程上经常借用软件工具进行数据处理,但在处理过程中也有不少地方需要设计人员进行辨识和干预,如果对数据处理原理方法掌握不到位,就可能选择不合理的计算公式。另外,工程上经常采用工程简化方法进行数据处理,简化可能导致分析结果偏差。因此在给出试验数据分析结果时,一般同时要给出评价结果的置信度水平。

### 5.3 试验结果判断标准不明确

海军导弹环境试验是为了分析判断在一定的试验条件下,试验对象的设计方案等是否满足规定的的环境要求,因此需要根据试验环境因素的作用机理,建立合理、科学的判断标准来对试验结果进行分析研究。如果试验结果判断标准不明确,将不能分析给出试验得出的试验现象与试验条件之间的关系,不能判断试验对象的设计方案等是否满足规定的的环境要求。对温度环境而言,需要分析温度及其变化导致了何种物理过程变化,最终导致损坏。如温度引起结构变形和应力、材料成分变化等。根据上述分析的表征,建立产品性能基线和相应的容差范围,在产品试验中根据测量结果、趋势得出结论。

## 6 海军导弹典型环境试验风险源分析

根据前述对海军导弹环境试验风险源的辨识分析,文中针对海军导弹高温、低温、湿热、盐雾等典型环境试验进行具体分析。

### 6.1 高温试验

高温环境是海军导弹在全寿命周期内各任务阶段经受的主要环境因素之一,对导弹武器装备的性能

具有重要影响<sup>[1]</sup>。因而,高温环境试验也是考核海军导弹环境适应性必须开展的试验。810G及最新的GJB 150A中给出了世界范围内基本热和热两种气候类型的高温循环数据,可以看出,对于热气候类型,其日最高诱发环境温度达到71℃,可见海军导弹装备在运输状态下可能暴露于71℃的高温下。美国捕鲸叉导弹电子设备的高温度试验条件最高达到77℃,而美国对服役期间的捕鲸叉导弹的温度测量研究表明,该导弹在舰艇上温度高达83℃,MIL-STD-810D也指出,对于日常温度到极高温度的各种气候条件下产生的温度是60~85℃。

目前的环境条件没有真实地给出试验边界,不能满足导弹装备在热带地区长期值班、运输的要求。如果都按此温度进行高温环境试验,则对于不需在热带地区运输的导弹可能存在过试验的风险。

### 6.2 低温试验

低温试验分为低温贮存和低温工作两种试验程序。低温贮存环境试验的试验条件应覆盖海军导弹装备在非工作状态可能遇到的低温环境条件。低温工作环境试验的试验条件应覆盖海军导弹装备工作时(主要是射前准备和发射飞行阶段)可能遇到的低温环境条件。

目前在设计试验时一般应根据相关的标准规范或型号技术要求进行设计。GJB 150A—2009未规定低温贮存、工作试验温度,需根据装备贮存使用情况剪裁确定,这就使得试验条件的确定存在随意剪裁的风险。810G及最新的GJB 150A中给出了世界范围内低温统计数据,低温极值-54℃的出现概率为10%,20%概率下的低温极值为-51℃,5%概率下的低温极值为-557℃,1%概率下的低温极值为-561℃。从这些数据看,低温贮存采用-555℃,满足或高于GJB 150A建议的低温条件,但上述标准低温工作的条件部分偏低,存在欠试验的风险。应按照最新的GJB 150A根据导弹装备的使用区域确定低温工作条件,并制定相关标准,避免欠试验和随意剪裁的风险。

### 6.3 湿热试验

湿热是海洋气候环境的重要特点之一,因此,充分有效的湿热环境试验对于验证海军导弹武器装备的环境适应性十分必要。与其他环境试验一样,湿热试验也是根据相关标准规范或型号技术要求进行设计的。常用的湿热试验方式有两种:恒定湿热和交变湿热。恒定湿热是指温湿度条件在整个试验期间恒定不变,试验样品的受潮主要由于吸附、吸收和扩散三种作用。因此当产品在使用中如果不考虑表面凝露和呼吸作用所引起潮湿时,可以用恒定湿热试验来考核,较适合于考核电介质材料在潮湿大气中是否能保

持所需的电气性能。交变湿热试验是指温湿度在一个周期中交替地作高温高湿和低温高湿条件的变化,它除了和恒定湿热试验一样具有吸附、吸收和扩散作用外,还有呼吸作用和升温阶段的凝露。适用于以凝露为主要受潮机理或呼吸作用能加速水汽进入的试验样品进行试验。交变湿热对湿热效应的考核更全面。

GJB 150.9A—2009 规定的湿热试验条件为: RH 为 95% 下 60 °C 和 30 °C 交变湿热试验, 每个循环 24 h, 至少 10 个周期。实际型号试验中, 有的按此执行, 有的则按照型号系统要求执行, 如进行 40 °C、RH 为 95%, 96 h 的恒定湿热试验。根据世界范围内热区大气温度统计, 最高为 49 °C。GJB 150A 规定的试验条件中, 60 °C、RH 为 95% 的组合在实际自然环境中不可能出现, 但这一组合可发现装备存在的潜在问题, 虽然相对于导弹长期值班试验来说, 该试验的试验时间仍不足以反映期间可能出现的问题, 但满足极值考核的要求。40 °C、RH 为 95%, 96 h 的试验设计则可能不能覆盖装备可能遇到的湿热极值条件, 存在欠试验的风险。对于值班湿热环境的长期适应性可在值班可靠性验证试验中考核, 但应充分调研世界范围内的湿热环境, 明确规定型号产品湿热试验环境条件要求, 避免随意剪裁和欠试验。

## 6.4 盐雾试验

盐雾是海洋气候环境的重要特点之一, 盐雾的形成主要是由于风引起海水掀起的波浪, 以及浪击浪或浪拍击船体而腾起的浪花水沫, 在气流的作用下被粉碎为细微的液滴, 向海域上空飘散而形成。风力越大, 盐雾含量会越高。如南海的西沙群岛海域多有 3~6 级风, 空气中盐雾的质量浓度高达 0.3~1.5 mg/m<sup>3</sup>, 我国渤海、黄海、东海和南海海域年平均盐雾质量浓度分别为 0.0389, 0.1381, 0.118, 0.1275 mg/m<sup>3</sup>。我国南海、东海和北海海面上空气中盐雾质量浓度在 0.33~23.6 mg/m<sup>3</sup> 之间。

目前海军导弹研制时采用盐雾试验都是采用标准中规定的模拟大气盐雾环境的实验室环境试验方法。标准中盐雾试验的目的在于考核确定材料保护层和装饰层的有效性, 确定装备产品物理和电气性能抗盐雾大气影响的能力。各个国家、行业的盐雾试验标准在试验标准参数(盐溶液浓度、pH 值、盐雾沉降量、试验温度等)的选择上基本一致((35±2) °C, 5%±1%氯化钠溶液喷雾), 但在试验时间和连续喷雾时间上存在差异。GJB 150.11 盐雾试验至少进行连续

的 48 h 喷雾暴露试验, 之后在空气中暴露 48 h。美军标 810F 指出交替进行的 24 h 的盐雾暴露和 24 h 的干燥条件, 比连续暴露于盐雾大气中更真实, 且具有更高的破坏潜力。标准盐雾试验条件与实际服役盐雾环境条件的等效关系未知, 上述试验时间可能不满足长期贮存、值班的需求。目前型号盐雾试验多在材料级进行, 鲜有设备级或系统级的盐雾试验, 且盐雾浓度受包装、遮挡等的影响较大, 导弹装备设备的位置不同, 其服役的盐雾环境也不同, 因此盐雾试验不能充分考核海军导弹装备对盐雾环境的环境适应性。

## 7 结语

根据海军导弹装备环境试验流程, 针对海军导弹装备环境试验的试验设计、试验实施和试验结果评估等进行风险辨识分析, 分析得出了“试验设计—试验实施—试验结果评估”的风险源, 并重点针对高温、低温、湿热、盐雾等海军导弹典型环境试验类型进行了风险辨识分析, 可为海军导弹装备环境试验风险管理提供技术基础支撑。

### 参考文献:

- [1] 洪亮, 杨志宏, 崔旭涛. 海军导弹环境试验标准体系研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 65-66.
- [2] 蔡健平. 环境工程与可靠性工程的关系初探[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 66-68.
- [3] GJB 4239, 装备环境工程通用要求[S].
- [4] 鲁宇. 航天工程技术风险管理方法与实践[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 314-326.
- [5] [祝耀昌, 王涛. GJB 4239 介绍与分析[J]. 军用标准化, 2002(1): 20-22.
- [6] 宣卫芳, 朱蕾, 张伦武. 自然环境试验在型号研制生产中的应用[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3): 51-55.
- [7] 祝耀昌, 李明. 谈谈环境工程剪裁和环境试验剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 479-485.
- [8] 邢天虎. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003: 73-77.
- [9] 沈卫东. 军事环境工程[M]. 重庆: 重庆通信学院出版社, 2006: 81-86.
- [10] 张仁群. 环境工程与试验技术发展动态综述[J]. 装备环境技术, 2011(4): 38-40.
- [11] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416-422.