环境及其效应

湿热盐雾大气环境典型局部环境监测与防腐对策

王洪伦[1]，张东玖[1]，王俊[2]，张邦双[1]，涂齐勇[1]

（1.中国人民解放军 63790 部队，海口 571126；2.中国电器科学研究院股份有限公司，广州 510663）

摘要：目的 通过监测得到高湿热、高盐雾的海洋大气环境下不同局部环境的数据，并对不同材质、结构和部件针对性地提出防腐需求。**方法** 开展温度、湿度、盐雾沉降率的监测以及高精度测试片、标准试验件的腐蚀试验，分析 1 年时间内湿热盐雾海洋大气环境不同工作环境下监测参数的趋势，研究不同局部工作环境下各时间段的腐蚀性，进行环境评估分级。**结果** 海南某濒海区域常年高温、高湿、高盐雾，根据两种试验方法判断，该区域大气腐蚀等级达到了最严酷的等级（CX 或 GX）。室内大厅和机房环境也是长期高温、高湿，明显可检测到海盐粒子，高精度测试片有腐蚀现象，但与室外严酷环境至少相差 1 个等级。室内机电控制柜内环境腐蚀等级一般为 G1，温度相对较高、湿度相对较低。**结论** 可根据不同使用环境防腐需求制定防护方案，既能满足长期防腐和设备稳定运行的要求，又能避免过度防护，合理有效地利用资源，节约成本。

关键词：湿热；盐雾；海洋大气；局部环境；防腐

中图分类号：TG172；X823 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2021)02-0095-08

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2021.02.017

Typical Local Environmental Monitoring and Anti-corrosion Countermeasures in Damp and Hot Salt Spray Atmospheric Environment

WANG Hong-lun[1], *ZHANG Dong-jiu*[1], *WANG Jun*[2], *ZHANG Bang-shuang*[1], *TU Qi-yong*[1]

(1. Unit 63790, PLA, Haikou 571126, China;
2. China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: To obtain the data of different local environments in the marine atmospheric environment with high damp and heat and high salt spray through monitoring, and put forward anticorrosion countermeasures appropriately for different materials, structures and components, this paper carries out the monitoring of temperature, humidity and salt spray sedimentation rate as well as corrosion tests of high-precision test pieces and standard test pieces. The trend of monitoring parameters under different working environments in damp and hot salt spray marine atmospheric environment within one year is analyzed. And the corrosivity of different periods under different local working environments is studied to carry out environmental assessment and classification. The research shows that the atmospheric corrosion level of a coastal area in Hainan has reached the severest level (CX or GX) according to two test methods, which are high temperature, high humidity and high salt spray all year round. The indoor hall and machine room environment are also high temperature and humidity for a long time. Sea salt particles can be ob-

收稿日期：2020-07-14；**修订日期：**2020-08-28

Received：2020-07-14；**Revised：**2020-08-28

作者简介：王洪伦（1981—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为装备环境适应性研究。

Biography：WANG Hong-lun (1981—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: equipment environmental adaptability research.

引文格式：王洪伦，张东玖，王俊，等. 湿热盐雾大气环境典型局部环境监测与防腐对策[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 095-102.

WANG Hong-lun, ZHANG Dong-jiu, WANG Jun, et al. Typical local environmental monitoring and anti-corrosion countermeasures in damp and hot salt spray atmospheric environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 095-102.

viously detected. The high-precision test piece has corrosion phenomenon, but it is at least one grade different from the harsh outdoor environment. The level of environmental corrosion in the indoor electromechanical control cabinet is generally G1 with relatively high temperature and relatively low humidity. So protection schemes can be formulated according to the anti-corrosion requirements of different use environments, which can not only meet the requirements of long-term anti-corrosion and stable operation of equipment, but avoid over-protection to reasonably and effectively utilize resources and save costs.

KEY WORDS: damp and hot; salt spray; marine atmosphere; local environment; anti-corrosion

由于海洋中海水剧烈地扰动，风浪破碎，产生大量的泡沫、气泡，破裂时一部分随气流升入空中，形成大气盐核。其直径一般较小，大多在 2 μm 以下，有 90%以上小于 5 μm，其组成主要是氯化物、钠和硫酸盐离子[1]。因此，频海区域盐雾浓度距海岸距离呈现一定的分布规律，增加了自然环境对材料的腐蚀性，特别是在高温、高湿环境的融合加强下，使大气的腐蚀性更加严酷，给我国南海频海区域材料使用及设备的腐蚀防护带来很大的挑战[2-3]。

濒海区域使用的材料和设备因为工作位置的不同会有着不同的局部环境，而局部环境的不同会对材料设备的腐蚀影响有很大不同。例如室内、室内机电柜的局部环境与室外完全不同，室外也有自然暴露区、棚下区等不同环境，因此不同局部环境下设备对腐蚀防护的需求大不相同[4-7]。文中通过对不同局部环境的数据监测和分析，评估湿热盐雾海洋大气环境的不同工作环境下设备腐蚀程度和环境等级，根据濒海区域不同服役环境设备防腐需求，提出应采取的防腐措施，为设备的腐蚀防护技术手段的选择提供参考，从而在有限经费条件下达到良好的防腐效果。

1 环境及腐蚀的监测

1.1 监测地点

在高温、高湿、高盐雾的自然大气环境中，由于人工建筑物的存在，设备的局部环境也有很大不同。根据设备使用位置的不同，局部环境可分为室外自然暴露区、建筑棚下区、室内区、机电柜内区等不同环境。因此，在选择监测地点时，主要分为自然暴露区、棚下区、室内区等局部环境进行监测。同时，考虑到离海岸线的远近、高大建筑物的垂直高度，共设置试验点 21 处。

1.2 监测内容

腐蚀环境因素包括大气环境因素和大气污染环境因素。大气环境因素主要包括温度、湿度、太阳辐射、风速风向及雨、露等天气现象，大气污染环境因素主要包括 Cl^-、SO_2、NO_x、雨水 pH 值及降尘等[8-9]。结合前期研究经验和监测点实际局部环境条件情况，文中监测内容主要包括温度、相对湿度、盐雾沉降量以及金属测试片腐蚀等因素[10]。

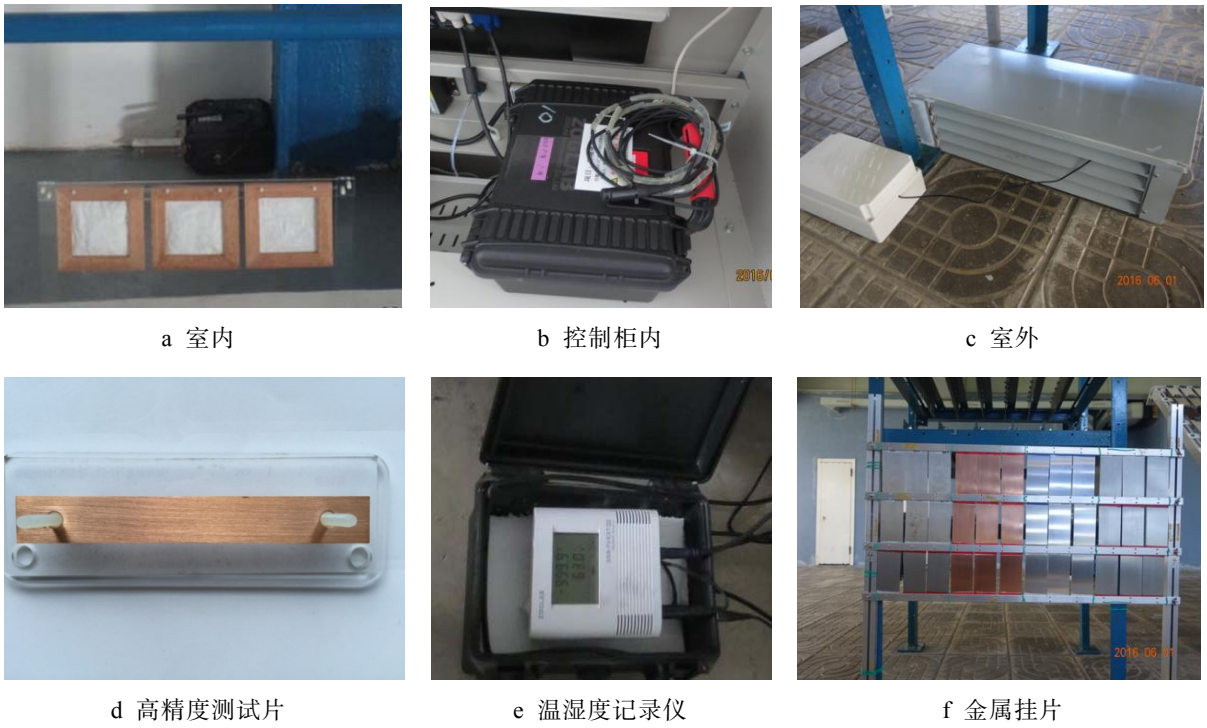
1.3 监测方法

对于温度和相对湿度（以下简称湿度），采用带有长期记录功能的温湿度记录仪监测。对于盐雾沉降量，采用滤膜法进行监测，现场放置海盐粒子双层滤膜，每月定期取回实验室用分光光度计测量。对于金属腐蚀程度，采用高精度测试片和传统金属挂片相结合的方式来监测[11-13]。由于室内设备服役环境的腐蚀性比较微弱，金属表面形成的腐蚀产物膜厚度一般在 10~200 nm。传统金属挂片的质量变化在 0.001 g 量级，通过计算质量损失测量腐蚀速率，误差较大，而且周期长，因此传统腐蚀性表征方法在室内使用存在一定的局限性。文中以铜作为表征材料，采用电解还原法测量铜表面形成腐蚀产物膜的速率，来更加精确地评价服役环境的腐蚀性[13]。经综合考虑，在配电柜、控制柜、阀控箱等封闭空间内部放置温湿度记录仪、高精度测试片，在室内房间放置温湿度记录仪、高精度测试片、滤膜，在室外自然暴露区和棚下区放置温湿度记录仪、高精度测试片、滤膜以及金属挂片，以监测局部不同环境的相关参数，如图 1 所示。

2 监测数据及分析

2.1 温度

试验点不同局部环境下每月平均温度的变化趋势及相关比较如图 2 所示。从全部试验点来看，室内外环境温度曲线基本一致，6—9 月份温度最高，2 月份温度最低，但是月平均温度几乎全年处于 20 ℃以上。室内温度受设备运行及空调环境影响较大，如图 2a 中，相对于室外和房间来说，室内控制柜温度要高一些，且温度变化较小，是因为控制柜内电子设备长期处于工作状态，散发热量使柜内温度升高。图 2c 中，某机房月平均温度明显高于其他试验点，是因为室内机房很多大型设备常年工作，散发出大量热量，最高月平均温度超过 33 ℃。图 2d 中，某机房月平均温度变化不大，这是因为该机房长期处于空调环境。

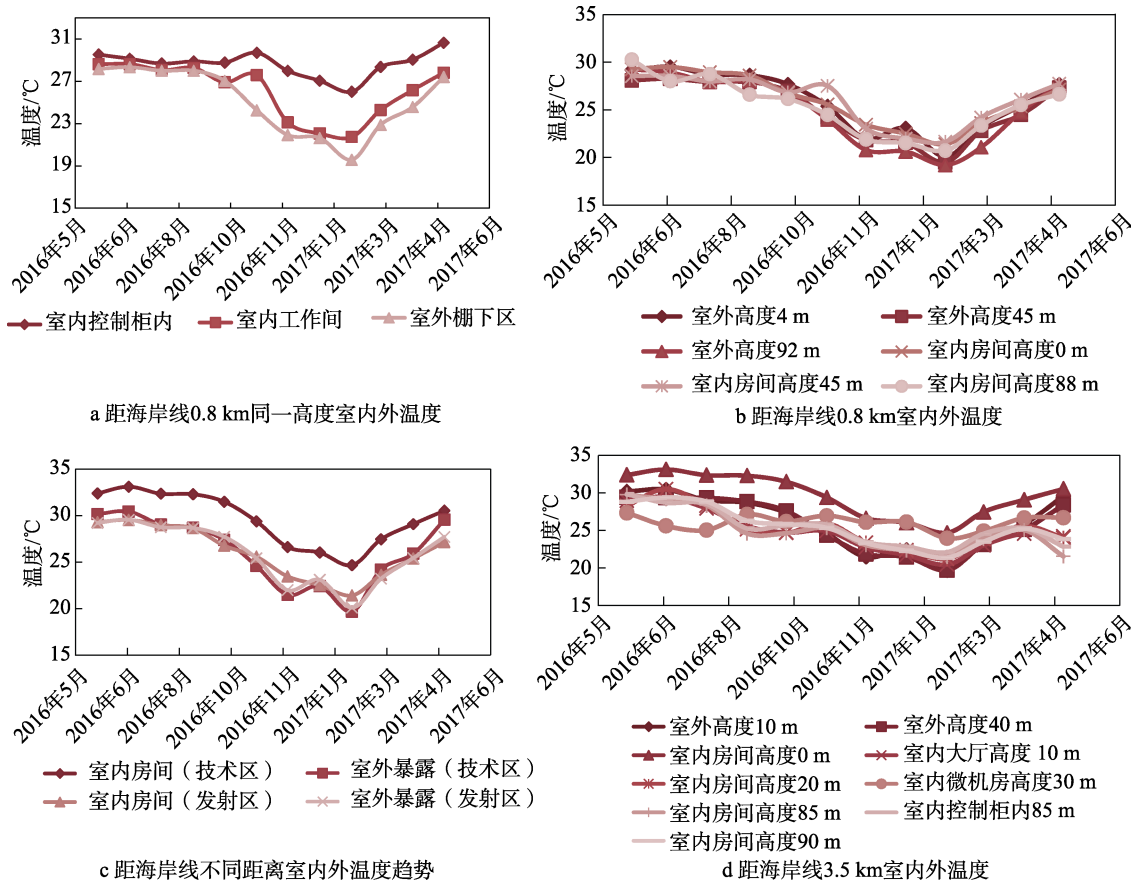


a 室内　　b 控制柜内　　c 室外

d 高精度测试片　　e 温湿度记录仪　　f 金属挂片

图 1　部分监测点监测设备

Fig.1 Monitoring equipment for some monitoring points: a) indoor; b) inside the control cabinet; c) outdoor; d) high-precision test piece; e) temperature and humidity recorder; f) metal hanging plate



a 距海岸线0.8 km同一高度室内外温度

b 距海岸线0.8 km室内外温度

c 距海岸线不同距离室内外温度趋势

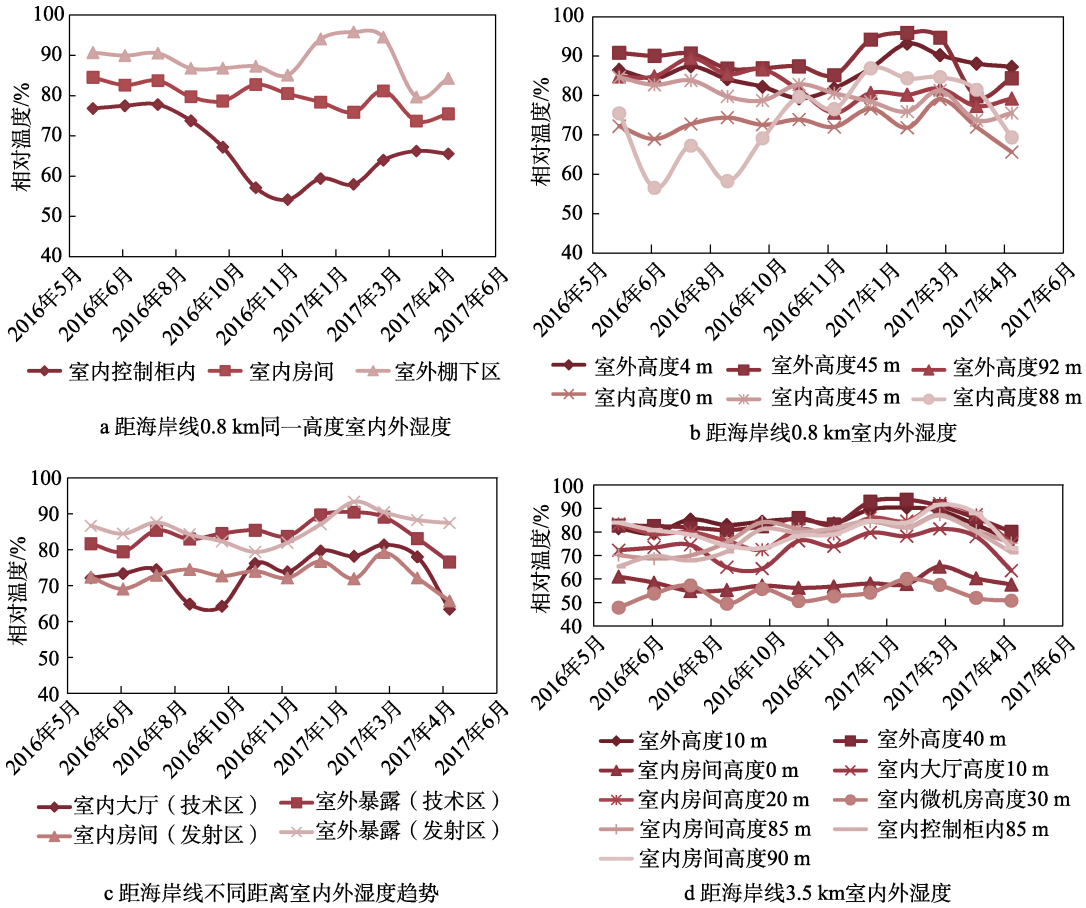
d 距海岸线3.5 km室内外温度

图 2　温度监测数据及其分析

Fig.2 Temperature monitoring data and analysis: a) indoor and outdoor temperature trends at the same altitude 0.8 km from the coastline; b) indoor and outdoor temperature trends at different altitudes 0.8 km from the coastline; c) indoor and outdoor temperature trends at different distances from coastline; d) indoor and outdoor temperature trend of 3.5 km from coastline

2.2　湿度

试验点在不同局部环境下每月平均相对湿度的变化趋势及相关比较如图 3 所示。从全部试验点来看，室内控制柜、室内、室外湿度依次升高，监测点月平均相对湿度全年基本在 70%以上，室外棚下区全年湿度 85%以上，多数月份甚至 90%以上，其中 12—2 月份的相对湿度较高。室内试验点，特别是室内控制柜内，保持相对较低的湿度。室内湿度受设备运行及空调环境影响明显，如图 3b 中，90 m 高度室内机房湿度起伏较大，可能是除湿机断续工作。图 3d 中，有两个室内试验点湿度明显低于其他试验点，这是因为 0 m 高度机房大型设备常年处于工作状态，而 30 m 高度微机房常年有空调、除湿环境保障。需要说明的是，室外监测点最大相对湿度均达到了 100%，室内某些监测点湿度波动比较大，具有干湿交替的特点。



a 距海岸线0.8 km同一高度室内外湿度　　b 距海岸线0.8 km室内外湿度

c 距海岸线不同距离室内外湿度趋势　　d 距海岸线3.5 km室内外湿度

图 3　相对湿度监测数据及其分析

Fig.3 Relative humidity monitoring data and analysis: a) indoor and outdoor humidity at the same height 0.8 km from the coastline; b) indoor and outdoor humidity 0.8 km from coastline; c) indoor and outdoor humidity trends at different distances from coastline; d) indoor and outdoor humidity 3.5 km from coastline

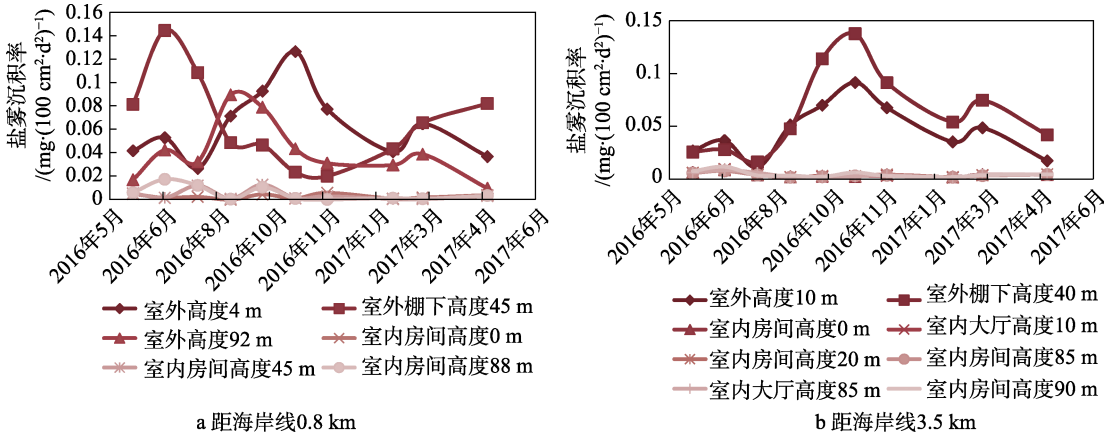
2.3　盐雾沉降

试验点不同局部环境下的盐雾沉降量数据变化趋势及相关比较如图 4 所示。其中图 4a 为距海岸线 0.8 km 室内外盐雾沉降率对比，图 4b 为距海岸线 3.5 km 室内外盐雾沉降率对比。可以看出，室外盐雾沉降速率比室内高得多，有着数倍、数十倍甚至数百倍的差距。相对来说，距海岸线 3.5 km 的盐雾沉降率比距海岸线 0.8 km 的盐雾沉降率略低一些，且曲线趋势较为一致。距海岸线 0.8 km 的某一试验点盐雾沉降率趋势与其他试验略不一致，这是因为距海岸线比较近的区域受风向、潮汐等因素影响较大。

2.4　高精度测试片

采用电解还原法测量计算无氧铜片表面形成的腐蚀产物膜的厚度，根据 ISA 71.04–2013[14]中对环境腐蚀性的分级，对设备服役环境的腐蚀性进行评价，见表 1。高精度测试片监测前后的宏观形貌表面对比如图 5 所示，可以看出，室内外宏观形貌有明显差别。

21 个试验点高精度测试片通过测量腐蚀产物得到的局部环境下的腐蚀程度及其环境分级见表 2。可以看出：1）距海岸线不同距离的室外试验点，其腐蚀程度比室内试验严重得多，至少是室内机房的 10 倍以上，且环境分级几乎均为最严酷的 GX 级；2）



a 距海岸线0.8 km　　b 距海岸线3.5 km

图 4　盐雾沉降率监测数据及其分析

Fig.4 Monitoring data of salt spray sedimentation rate and analysis: a) 0.8 km from coastline; b) 3.5 km from coastline

表 1　ISA 71.04–2013 标准中对环境腐蚀性的分级

Tab.1 Classification of environmental corrosivity in standards ISA 71.04–2013

$T_{总}$/(nm·30^{-1}·d^{-1})	腐蚀性	等级
$0 < T_{总} < 30$	轻微，环境不会影响设备正常运行	G1
$30 \leqslant T_{总} < 100$	中度，环境对设备有一定影响，将作为设备可靠性评价的一项要素	G2
$100 \leqslant T_{总} < 200$	严重，需要对环境进行控制，或对设备进行定制以及采用保护箱	G3
$T_{总} \geqslant 200$	剧烈，必须对设备进行定制以及采用保护箱	GX

表 2　试验点局部环境下腐蚀程度及环境分级

Tab.2 Corrosion degree and environmental classification in local environment of test site

序号	位置	距离海岸线/km	高度/m	腐蚀程度/(nm·30^{-1}·d^{-1})			
				6—8 月	9—11 月	12—2 月	3—5 月
1	室外棚下区	0.8	10	434.9(GX)	442.6(GX)	636.3(GX)	470.9(GX)
2	室外棚下区	0.8	50	651.0(GX)	391.6(GX)	470.8(GX)	490.7(GX)
3	室外棚下区	0.8	97	323.9(GX)	443.9(GX)	567.3(GX)	378.1(GX)
4	室内机房	0.8	0	19.7(G1)	37.2(G2)	29.7(G1)	29.2(G1)
5	室内厂房	1	0	46.4(G2)	37.7(G2)	37.4(G2)	29.5(G1)
6	室内机房	0.8	50	37.4(G2)	21.0(G1)	20.1(G1)	20.5(G1)
7	室内机房	0.8	90	22.3(G1)	26.8(G1)	44.2(G2)	24.5(G1)
8	室内控制柜内	0.8	0	14.4(G1)	8.6(G1)	9.1(G1)	8.8(G1)
9	室内控制柜内	0.8	50	19.1(G1)	15.3(G1)	10.6(G1)	7.8(G1)
10	室内控制柜内	0.8	90	7.7(G1)	12.8(G1)	9.1(G1)	10.0(G1)
11	室外棚下区	3.5	10	351.6(GX)	366.4(GX)	674.3(GX)	276.2(GX)
12	室外棚下区	3.5	40	208.7(GX)	569.3(GX)	582.6(GX)	374.0(GX)
13	室内机房	3.5	0	24.1(G1)	20.0(G1)	55.4(G2)	47.4(G1)
14	室内大厅	3.5	10	35.4(G2)	28.1(G1)	45.7(G2)	20.5(G1)
15	室内机房	3.5	20	25.8(G1)	33.4(G2)	101.2(G3)	32.6(G2)
16	室内微机房	3.5	30	5.9(G1)	17.1(G1)	8.8(G1)	11.7(G1)
17	室内大厅	3.5	85	19.1(G1)	30.6(G2)	55.3(G2)	15.7(G1)
18	室内大厅	3.5	85	55.4(G2)	31.4(G2)	47.7(G2)	29.7(G1)
19	室内大厅	3.5	90	30.7(G2)	27.4(G2)	37.5(G2)	11.8(G1)
20	室内控制柜内	3.5	20	24.2(G1)	17.6(G1)	33.8(G2)	16.8(G1)
21	室内控制柜内	3.5	85	15.8(G1)	18.2(G1)	41.8(G2)	14.1(G1)

a 监测前　　b 室内监测点监测后　　c 室外监测点监测后

图 5　高精度测试片监测前后的宏观形貌表面对比

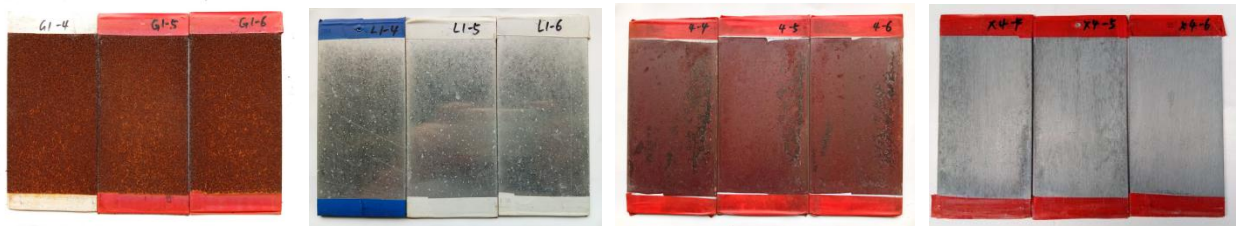
Fig.5 The surface comparison of macroscopical morphology before and after the monitoring of high precision test sheet: a) before monitoring; b) after monitoring at indoor monitoring points; c) after monitoring at outdoor monitoring points

室内房间试验点比室内控制柜试验点腐蚀程度要高，室内房间约 1/2 试验点环境分级为 G2，有的甚至达到 G3，其他环境分级为 G1，而室内控制柜或机电柜内环境分级几乎全部为 G1 级；3）各试验点 1—3 月腐蚀程度相对较高，除有空调保障外，室内机房或大厅的环境分级也均达到 G2 以上。主要是因为此时间段环境湿度较大，薄液膜厚度增大，有助于腐蚀介质的溶解和离子的迁移。

2.5　金属挂样

室外的纯铜、纯锌、A3 钢、纯铝金属挂片试验 3、6 个月及 1 年分三批进行取样检测[15-16]。纯铜、纯锌、A3 钢为均匀腐蚀，表面形成较厚的腐蚀产物膜，而纯铝则为局部腐蚀，如图 6 所示。

室外金属挂片进行腐蚀试验后进行检测，得到挂片腐蚀速率及环境腐蚀分级的情况（见表 3）。需说明的是，根据 GB/T 19292.1—2003 大气腐蚀等级划分标准，在 5 个室外监测点中，距海岸线 3.5 km 环境腐蚀等级一般为 C3—C4，距海岸线 0.8 km 环境腐蚀等级一般为 C4—C5。在这 4 种标准金属挂片中，大气对纯铜的腐蚀性最严重，其中两个监测点已超出评级标准范围。



a 纯铜　　b 纯锌　　c A3 钢　　d 纯铝

图 6　某室外试验点金属挂片取样记录

Fig.6 Metal hanging plate sampling record of an outdoor test site: a) copper; b) zinc; c) A3 steel; d) aluminium

表 3　室外金属挂片腐蚀速率及环境腐蚀分级

Tab.3 Corrosion rate and environmental corrosion classification of outdoor metal hanging plate

试验点位置	纯铜		纯锌		A3 钢		纯铝	
	腐蚀速率 /(μm·a^{-1})	腐蚀等级	腐蚀速率 /(μm·a^{-1})	腐蚀等级	腐蚀速率 /(μm·a^{-1})	腐蚀等级	腐蚀速率 /(μm·a^{-1})	腐蚀等级
距海 3.5 km (高 10 m)	3.18	C5	1.95	C3	38.83	C3	1.55	C3
距海 3.5 km (高 40 m)	5.13	C5	1.56	C3	42.91	C3	3.1	C4
距海 0.8 km (高 10 m)	4.74	C5	2.16	C4	51.67	C4	2.69	C4
距海 0.8 km (高 50 m)	6.78	CX	3.12	C4	128.88	C5	5.61	C5
距海 0.8 km (高 97 m)	7.99	CX	3.53	C4	98.66	C5	6.44	C5

注：挂片试样上下两端固定，为防止固定部位对试验产生不良影响，采用了封边保护措施，腐蚀速率计算时进行了综合考虑，不会影响腐蚀速率测试结果

3　腐蚀防护需求与对策

本项目通过对湿热盐雾海洋大气环境下装备不同的局部服役环境进行了监测，其温度、湿度、盐雾沉降率不同，腐蚀严酷度等级大不相同。因此，其防腐需求也不同，区别室外、室内不同使用环境，不同材质、结构设备实际防腐手段执行过程中，需分别制订防腐对策，采取不同的防腐手段[17-20]。

3.1　室外环境

室外环境使用的设备设施，必须采取重防腐手

段。特别是棚下区环境下使用的设备，在湿润无阳光或少阳光的环境下设备表面经常长期结露，大大促进了腐蚀的产生和发展。

1）碳钢、合金钢大型结构件。应采用重防腐涂料，例如丙烯酸类、聚氨酯类、富锌类涂料，可采用 5 层或 3 层重防腐涂装体系，膜厚不得少于 280 μm。涂装施工时，必须严格控制施工环境、涂装前基体表面处理、涂装层数、单道厚度、膜干时间、涂后防护等施工工序。

2）不锈钢设备。304、321 等不锈钢材料不能在室外环境裸用，特别是棚下环境区域，应对其进行表面防护以隔绝水与空气，建议采用透明疏水涂料防护，例如纳米防腐涂料、水性防护漆（改性聚氨酯涂料）等。设备更新换代时，可采用耐蚀性能更好的材料，例如 316L 不锈钢、镍基合金、钛合金等。

3）金属焊缝部位。在工程现场，由于焊接工艺不佳或涂装施工困难，碳钢、合金钢、不锈钢等金属焊缝部位经常优先发生腐蚀。碳钢、合金钢焊接部位，除重防腐涂装防护外，还可采用氧化聚合型包覆等防腐技术进行防护。不锈钢焊接部位，除防腐涂装和包覆技术等方法外，还应改进焊接工艺，减小热影响区敏化区的宽度，防止晶粒长大和碳化物析出，以减小焊缝晶间腐蚀倾向。

4）活动件和联接件。插销、行轮、齿轮等活动零部件，为防止锈死无法活动，可采用镀锌、镀铬、渗锌等工艺处理，同时涂抹防锈油。螺栓、铆钉等联接紧固件，涂装防护不易施工，涂层容易掉落，可采用渗锌工艺处理、复合涂层、包覆技术等手段防护，或采用更加耐蚀的材料，例如 316L 不锈钢、钛合金等[21]。紧固件安装时必须防止电偶腐蚀，采取隔离措施（如增加橡胶垫等）。

5）仪器仪表和电气控制元器件。传感器、压力表等仪器仪表以及变频器、断路器、接触器、输 PLC、接口板等电气控制元器件应采用“三防”设计和涂镀层防护，应选用经 CCS 认证的产品，仪表和元器件防护等级应达到 IP65 以上，且产品对环境要求不能过高。

3.2　室内环境

室内环境包括机电设备内环境，可分为无空调、除湿机保障环境，空调、除湿机断续保障环境以及有空调、除湿机保障环境。

1）无空调、除湿机保障环境。应重视设备防腐，采用略低于室外防腐标准的措施。如涂装可采用 3 层涂装体系，304 不锈钢可选择铬镍含量高、杂质含量少的高品质材料，紧固件可热镀锌或渗锌工艺处理，但仪器仪表和电气控制元器件防护措施应尽量与室外一致。

2）有空调、除湿机断续保障环境。采取防腐措施应与无空调、除湿机保障的室内环境防腐措施一致。

3）有空调、除湿机保障环境。温湿度、盐雾浓度要比无空调、除湿机保障环境低得多，防腐要求低，可以不采取额外的防腐措施，但是运输、安装过程中必须注意设备的防护。

降温除湿措施能有效控制室内环境的温湿度，降低环境的腐蚀性，因此重要测试、控制间可采取控温控湿措施营造良好的工作环境。

4　结语

文中对海南东部濒海区域不同局部工作环境的腐蚀性进行了研究，分析了不同环境变化趋势和腐蚀规律，提出了腐蚀防护建议，为濒海区域发射场设备设施的防腐和维护方案制订提供了科学依据。可根据不同使用环境的需要，既满足长期防腐和设备稳定运行的要求，又避免过度防护，合理有效地利用资源，节约成本。

参考文献：

[1] 黄建业, 阮红梅, 黄建军, 等. 滨海发射场电子电器设备环境腐蚀性表征评价技术研究[C]// 中国宇航学会发射试验专业委员会学术年会论文集. 北京: 中国宇航学会, 2016.
HUANG Jian-ye, RUAN Hong-mei, HUANG Jian-jun, et al. Research on evaluation technology of environmental corrosion characterization of electronic and electronic equipment in coastal launch site[C]// Proceedings of the annual conference of launch test committee of Chinese Astronautical Society, Beijing: Chinese Astronautical Society 2016.

[2] 穆山.海洋大气环境对航天发射场建设影响与对策研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 62-65.
MU Shan. Research on influence and strategies of seashore atmosphere to the space launch site[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6 (1) : 62-65.

[3] 王旭东, 张立伟, 张小红, 等. 海运及沿海发射期间航天产品的腐蚀风险与应对策略[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(4): 451-456.
WANG Xu-dong, ZHANG Li-wei, ZHANG Xiao-hong, et al. Corrosion risks of aerospace products during shipping and coastal period[J]. Spacecraft environmental engineering, 2015, 32 (4) : 451-456.

[4] 秦德华, 李坤强. 滨海电厂控制系统电器设备的大气腐蚀与防护[J]. 广东电力, 2011, 24(10): 88-91.
QIN De-hua, LI Kun-qiang. Atmospheric corrosion and protection of electrical equipment of control system of power plant in coastal areas[J]. Guangdong electric power, 2011, 24 (10): 88-91.

[5] 田世爱, 迟宏伟. 室内电子控制设备的腐蚀与防护[J]. 洁净与空调技术, 2006(1): 12-15.

TIAN Shi-ai, CHI Hong-wei. Corrosion and protection of indoor electronic control equipment[J]. Cleaning and air conditioning technology, 2006(1): 12-15.

[6] 程玉峰. 电子设备的大气腐蚀[J]. 材料防护, 1995, 28(12): 16-19.
CHENG Yu-feng. Atmospheric corrosion of electronic equipment[J]. Materials protection, 1995, 28(12) : 16-19.

[7] 鲁远曙, 左卫. 东南沿海气候条件对电子设备的影响及环境适应性对策[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 46-51.
LU Yuan-shu, ZUO Wei. The influence of climatic conditions on electronic equipment and the countermeasures of environmental adaptability in southeast coastal areas[J]. Equipment environmental engineering, 2004, 1 (3) : 46-51.

[8] 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): 93-96.
SHU Chang, SU Yan, WU Long-yi, et al. Research of establishment method of natural environmental spectrum[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(2): 93-96.

[9] GB/T 4797.6—1995, 电工电子产品自然环境条件尘、沙、盐雾[S].
GB/ T 4797.6—1995, Environmental conditions appearing in nature for electric and electronic products dust, sand, salt mist[S].

[10] 李钊, 祁庆琚, 马朝晖, 等. 湿热海洋大气环境下的钢铁腐蚀影响因素[J]. 宝钢技术, 2015(1): 77-80.
LI Zhao, QI Qing-ju, MA Zhao-hui, et al. Factors affecting corrosion of steels in hot and humid marine atmospheric environment[J]. Baosteel technology, 2015, (1) : 77-80.

[11] 唐其怀. 海洋大气腐蚀性分类分级[J]. 环境技术, 2003(1): 2-4.
TANG Qi-huan. Classification and rating of corrosiveness of marine atmosphere[J]. Environmental technology, 2003(1): 2-4.

[12] 闫杰, 刘丽红, 纪春阳, 等. 国内外自然大气环境试验的发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 29(1): 69-75.
YAN Jie, LIU Li-hong, JI Chun-yang, et al. Development of natural atmospheric environment tests in the world[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 29(1): 69-75.

[13] GB/T 19292.1—2018, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分: 分类、测定和评估[S].
GB/T 19292.1—2018, Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmosphere—Part 1: Classification, determination and estimation[S].

[14] ISA 71.04—2013, 空气中的污染物: 过程测量和控制系统环境条件[S].
ISA 71.04—2013, Airborne contaminants: Environmental conditions for process measurement and control systems[S].

[15] GB/T 19292.4—2018, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定[S].
GB/T 19292.4—2018, Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Determination of corrosion rate of standard specimens used for the evaluation of corrosivity[S].

[16] FUENTE D D L, DIAZ I, SIMANCAS J, et al. Long-term atmospheric corrosion of mild steel[J]. Corrosion Science, 2011, 2(2): 604-617.

[17] 曹备, 高瑾, 朱蕴辉, 等. 防腐蚀监理工程师应用手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 219-265.
CAO Bei, GAO Jin, ZHU Yun-hui, et al. Application manual of corrosion prevention supervision engineer[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 219-265.

[18] GB/T 28699—2012, 钢结构防护涂装通用技术条件[S].
GB/T 28699—2012, Steel structure protection general requirements of coatings[S].

[19] JT/T 722—2008, 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件[S].
JT/T 722—2008, Specifications of protective coating for highway bridge steel structure[S].

[20] GB/T 30790.05—2014, 色漆和清漆—防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第 5 部分: 防护涂料体系[S].
GB/T 30790.05—2014, Paints and varnishes—Corrosion protection of steel structures by protective paint systems—Part5: Protective paint systems[S].

[21] 王洪伦, 林志峰, 张邦双. 濒海环境钢质紧固件防腐技术试验对比研究[J].装备环境工程, 2019, 16(4): 93-97.
WANG Hong-lun, LIN Zhi-feng, ZHANG Bang-shuang. Comparative test on anti-corrosion technology of steel fasteners in coastal environment[J].Equipment environmental engineering, 2019, 16(4): 93-97.