

# 热带岛礁大气环境车辆装备腐蚀规律 与防护设计及控制措施

郭强

(北京机械设备研究所 北京 100854)

**摘要:** **目的** 提高车辆装备在热带岛礁大气环境中的耐腐蚀性能, 为车辆装备在热带岛礁大气环境长期稳定的服役提供防腐蚀设计与改进依据。**方法** 通过对岛礁大气环境特点的分析 and 典型车辆装备腐蚀规律研究与总结, 制定相应的腐蚀防护设计及措施, 并在车辆装备上进行应用与验证。**结果** 根据腐蚀特点, 车辆装备划分为结构类腐蚀、电气类产品腐蚀、材料和涂层腐蚀等 4 类, 其中, 结构类腐蚀是最主要的腐蚀行为, 结构类腐蚀类型主要包括缝隙腐蚀、电偶腐蚀、应力作用下腐蚀、磨损腐蚀、结构外形及空腔结构造成的腐蚀等。根据腐蚀环境进行划分, 将整车划分为舱外完全暴露结构区域、底盘底部区域、发动机舱区域和舱内区域等 4 个腐蚀区域。在车辆装备上采取相应的腐蚀防护设计与措施, 包括典型结构类防腐蚀设计、电气类产品腐蚀防护设计、材料与涂层搭配选用、维护保养和腐蚀监测措施, 在热带岛礁大气环境中取得了良好的应用验证效果。**结论** 根据不同腐蚀类型, 采取相应的结构类、电气类产品, 材料与涂层合理搭配选用等腐蚀防护设计, 加严环境试验考核, 以及维修维护、腐蚀监测等腐蚀控制措施, 车辆装备在热带岛礁环境中将取得长效且良好的环境适应性。

**关键词:** 热带岛礁; 大气环境; 车辆装备; 腐蚀规律; 防腐蚀设计; 腐蚀控制措施

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)11-0121-12

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.016

## Corrosion Rule, Prevention Design and Control Countermeasures of Vehicle Equipment in Tropical Island-reef Atmospheric Environment

GUO Qiang

(Beijing Institute of Machinery and Equipment, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve anti-corrosion properties of vehicle equipment in tropical island-reef atmospheric environment, so as to provide evidence of anti-corrosion design and modification for long-term stable service of vehicle equipment in tropical island-reef atmospheric environment. Under analysis on island-reef environment characteristics and research and summary on corrosion rule of vehicle equipment, corresponding corrosion protection design and countermeasures were formulated and then applied to the vehicle equipment for verification. According to corrosion characteristics, vehicle equipment corrosion was classified into four types, including structure corrosion, electrical product corrosion, material corrosion and coating corrosion. Structure corrosion was the major corrosion behavior. The main kinds of corrosion types of structure corrosion were

收稿日期: 2022-10-19; 修订日期: 2023-08-24

Received: 2022-10-19; Revised: 2023-08-24

引文格式: 郭强. 热带岛礁大气环境车辆装备腐蚀规律与防护设计及控制措施[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 121-132.

GUO Qiang. Corrosion Rule, Prevention Design and Control Countermeasures of Vehicle Equipment in Tropical Island-reef Atmospheric Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 121-132.

crevice corrosion, galvanic corrosion, corrosion caused by structural edge and water-logging structure, etc. In terms of corrosion environment, the vehicle equipment was divided into four areas, which consisted of fully exposed structure outside the cabin, bottom of chassis, area inside engine cabin and area in cabin. The corresponding corrosion protection design and countermeasures were adopted to the vehicle equipment, including corrosion protection design of classical structure and electric product, optimal selection of materials and coatings, measures of maintenance, corrosion monitoring technique, which achieved good results in practical applications. According to different types of corrosion, corresponding corrosion protection designs and countermeasures, such as structure and electric anti-corrosion design, reasonable selection of material and coating, anti-corrosion method of repair and maintenance, strict environmental testing, and corrosion monitoring, can be adopted to help vehicle equipment maintain long-term and good environmental adaptability in tropical island-reef environment.

**KEY WORDS:** tropical island-reef; atmospheric environment; vehicle equipment; corrosion rule; anti-corrosion design; corrosion control countermeasures

相对于我国常见的海洋大气环境特点,热带岛礁(特指纬度 $\leq 17^{\circ}\text{N}$ )大气环境是一种较为特殊的腐蚀环境,其常年具有高温、高湿、高盐雾、强太阳辐射、多降水、多台风等热带海洋大气环境特征<sup>[1-5]</sup>。与我国大陆沿海及海南岛相比,热带岛礁纬度低、距离赤道较近,太阳辐射强度高、热带气旋多<sup>[6-7]</sup>,无高纬度冷空气过境;而且其为浩瀚海洋内远离大陆的一片孤岛,地域狭小、仅高于海平面数米,四面环海且无地形阻挡,浪击浪以及海浪拍击礁石形成的浪花飞沫、破裂的气泡在空中形成的高浓度盐雾从四周海岸线向岛礁内逐级沉降,以及各方向产生的对流云会飘向岛礁形成降雨。因此,不同方向的环境因素都会影响到岛礁环境,其自然环境变幻莫测,暴晒、降水交替频繁且难以预测。岛礁周围海域面积广阔,海水热容高、蒸发量大,使得孤立狭小的陆地常年保持较高且波动范围较小的相对湿度、温度等。而我国东南沿海及海南岛的陆地面积广阔,往往只有一个方向受到海洋气候的影响,受到包括地区、海拔高度、海岸线的距离、山体、风向、防风林、楼宇等自然地理相关的经纬度、地势、地形地貌、季风等因素以及人为的如植被、建筑物等因素的影响,所以,一般地,太阳辐射强度、氯化物浓度、降水频率、平均温度、平均湿度、风力及风向等环境参数都会显著降低,其腐蚀(老化)作用也相应减弱。

热带岛礁是车辆装备面临的更加严酷的服役环境,其与我国大陆及海南岛车辆装备腐蚀规律及腐蚀防护设计、腐蚀控制措施等存在较大差异<sup>[8-9]</sup>。车辆装备(两栖车辆装备除外,下同)通常完全暴露在户外大气环境中,承受自然环境以及局部环境等多种环境因素的腐蚀(老化)作用,既有常温腐蚀,也有高温腐蚀,有冲击、磨损、拉伸、弯曲、疲劳等载荷谱作用,还有外加极化电位、热偶结构、积水结构等腐蚀的影响,多因素、多系统和复杂结构造成车辆装备多样且复杂的腐蚀问题。因此,需要针对车辆装备腐蚀规律、机理及其相应腐蚀防护设计、方法、措施进行分类、归纳和总结。本文针对热带岛礁环境特征、

车辆装备腐蚀规律、腐蚀防护设计及控制措施、应用及验证效果进行讨论。

## 1 热带岛礁大气环境特征

热带岛礁大气环境主要的环境因素包括温度、湿度、太阳辐射、氯化物浓度、降水、风力/风向等,其环境特征与我国大部分地区存在较大不同。部分环境因素月平均值相对比较恒定,例如,月平均温度一般在 $27\sim 30^{\circ}\text{C}$ ,每月最高温度不超过 $34^{\circ}\text{C}$ ,且每月最高和最低温度相差 $10^{\circ}\text{C}$ 以内;月平均湿度在 $76\%\sim 85\%$ ,每月最高湿度 $100\%$ ,最低 $55\%$ ,大部分时间的湿度保持在 $80\%$ 以上。然而,其中一些环境因素月平均值在一年四季存在规律性波动。例如,降水主要集中在下半年, $8\sim 12$ 月份降水量较高, $2\sim 5$ 月份较少。受到南下寒潮的波及,以及台风造成海平面陡然上升,形成风暴潮,使得盐雾沉降率在 $11\sim 2$ 月份达到极高值<sup>[10]</sup>。太阳直射点在南北回归线之间移动,随着直射时间增长,太阳辐射强度不断增强,一般在北纬夏季最高,而冬季最低,夏季紫外辐射量占全年 $30\%$ 以上,一年中月平均最高紫外辐射量达到 $36\text{ MJ/m}^2$ 。同时,高强度红外辐射使得产品表面温度在短时间暴晒后会达到 $60^{\circ}\text{C}$ 以上,高温加快了腐蚀(老化)速率。因此,高分子材料或树脂基复合材料在夏季老化速率较快,金属材料在冬季腐蚀速率急剧增加<sup>[11-12]</sup>。

相对于我国北回归线附近沿海岛屿,热带岛礁各季节环境因素值变化幅度相对较小,昼夜温差小,不会像前者在昼夜更替或一定季节冷热云团交锋时,因湿度高、温差大而频繁,出现大量的冷凝水,这为舱内设备防护提供了较好的环境条件。

我国海南岛万宁濒海地区、某热带海域 I 和 II 的年平均环境参数对比见表 1。某热带海域 I、II 年日照时间、 $\text{Cl}^-$ 沉降率、年降水量、年平均温度都高于万宁,海域 II 的  $\text{Cl}^-$ 沉降率、降水量远高于海域 I 和万宁,但年平均相对湿度和润湿时间少于万宁。这主要由于热带海域的太阳辐射量较高、降水和暴晒频

表 1 万宁、某热带海域的年平均环境参数<sup>[3,10]</sup>  
Tab.1 Average annual environmental factors of Wan Ning and tropical sea<sup>[3,10]</sup>

地点	年平均温度/℃	年相对湿度/%	年润湿时间/ (h·a <sup>-1</sup> )	年降雨量/ (mm·a <sup>-1</sup> )	年日照时间/ (h·a <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> 沉降率/ (mg·100 <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
万宁	24	86	6 700	1 500	2 000	0.4
海域 I	27	82	5 600	1 500	2 700	1.1
海域 II	29	84	6 100	2 800	2 700	1.8

繁。干湿交替频繁是热带岛礁大气环境中金属腐蚀速率较快和有机高分子材料吸水量高、老化速率快的一项重要原因。参照 ISO 9223-9226, 热带海域大气环境已经达到了极高腐蚀等级 CX, 万宁为 C4 级或 C5 级<sup>[3]</sup>。总体而言, 热带海域的腐蚀严酷度高于我国海南岛以及东南沿海地区。

## 2 车辆装备腐蚀类型及腐蚀规律

为更好地归纳和说明相应的措施, 将结构相关的腐蚀行为总结归纳为结构类腐蚀。按照腐蚀特点, 车辆装备可以分为结构类腐蚀、电气类产品腐蚀、材料及其涂层腐蚀(老化)等四大类。其中, 结构类腐蚀是车辆装备最为突出的腐蚀行为。某型运输车辆装备使用频次较高, 其结构特点具有通用化、典型性, 对该型车辆(简称“该车辆”, 下同)的腐蚀问题进行勘验、统计和归纳。从总体情况分析, 该车辆腐蚀形式占比如图 1 所示。相对来说, 电气类产品占比最少, 其次为材料及涂层, 占比最多的是结构类腐蚀。

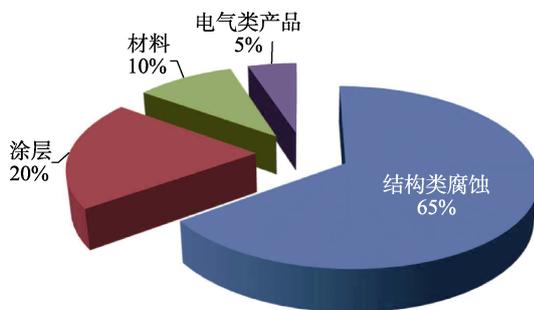


图 1 某型车辆装备腐蚀类别占比  
Fig.1 Proportion of corrosion types for one kind of vehicle equipment

### 2.1 腐蚀类型

与结构类腐蚀相关的腐蚀类型主要包括在机械结构中产生的缝隙腐蚀、接触腐蚀、焊接腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀, 还有结构外形(包括直角边角、直角边缘、锐角锐边、弧形结构, 以及盲孔、封闭凹槽等积水结构)和空腔结构等造成的腐蚀。

电气类产品腐蚀主要涉及舱外电气元器件腐蚀(老化)和舱内电气设备的组(部)件在湿热、盐雾等环境条件下的腐蚀行为, 主要涉及材料、涂层和结

构之间的点蚀、晶间腐蚀、电偶腐蚀、微孔腐蚀、应力腐蚀、微生物腐蚀、焊接腐蚀、微动腐蚀以及杂散电流造成的外加极化电位腐蚀等。

材料腐蚀(老化)行为主要指的是金属材料腐蚀、高分子材料及树脂基复合材料的老化现象。涂层一般指的是阳极氧化层、化学氧化层、金属镀覆层、涂料等。金属及其涂层腐蚀类型包括均匀腐蚀、点蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀、剥蚀、丝状腐蚀、霉菌腐蚀、环境氢脆等。高分子材料老化表现为粉化、开裂、变色等现象。树脂基复合材料老化形式包括基体开裂、分层损伤、纤维断裂、树脂降解等现象。

### 2.2 腐蚀规律

#### 2.2.1 典型易腐蚀结构

典型易腐蚀结构主要包括了缝隙结构、双金属结构、热偶结构、结构外形、焊接接头、磨损结构、空腔结构等。缝隙结构主要包括搭接结构和对接结构、螺纹和单面焊、断续焊等产生的结构间隙。电偶腐蚀主要发生在钢铝、铜铝、不锈钢与低合金钢、金属与树脂基碳纤维增强复合材料等异种金属(或导电材料)之间, 或与高温部件连接的金属之间等。结构外形造成的腐蚀主要是由于直角边角或边缘、锐角锐边、折弯或冲压过渡处等易产生材料微观组织缺陷、表面处理缺陷、海盐聚集造成的腐蚀, 例如不锈钢等裸露材料在上述过渡处因塑性变形电极电位较低造成该部位易发生腐蚀; 由于直角边角、边缘或锐边锐角易产生电镀层缺陷, 涂料表面张力造成涂层变薄和因内应力产生的裂纹等缺陷, 所以结构边角和边缘造成的腐蚀尤为明显。一般地, 结构背阴面润湿时间较长, 是易发生腐蚀的结构部位, 阴面结构会比阳面腐蚀更加严重, 尤其是水平状态下弧形结构如圆柱体或圆管及类圆形的结构件等弧面起到了引流作用, 腐蚀性盐随着液膜流淌聚集在下弧面底部, 盐浓度较高、润湿时间长, 所以, 弧形结构底部材料或涂层易产生腐蚀损伤, 同理, 一些易引流的阴面结构也易引起腐蚀, 如平整立面或斜面底部等; 积水结构易造成水、沙、尘、盐及污浊物等聚集, 长期浸润作用下腐蚀显著。空腔结构是一种常用的轻量化结构形式, 主要涉及驾驶室的骨架、车身覆盖件, 设备舱金属骨架等, 罩体, 部分承力结构等, 内腔结构往往无法表面处理或者处理不到位, 且容易积水、积盐等。焊接腐蚀主

要指断续焊、点焊等焊接接头造成的腐蚀, 不锈钢、铝合金等材料焊接接头分别产生晶间腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳等现象。焊接接头往往前处理效果不佳, 漆膜缺陷多, 长期暴露后水分子和氯离子向涂层内部渗透, 所以表面漆膜在短时间内宏观腐蚀不明显, 但长时间暴露后腐蚀数量会显著增加。磨损腐蚀主要包括了铰链、滑轨、门锁、齿轮、导向槽(孔)、轴、销等磨损部件。对于传动机构易产生腐蚀疲劳(如底盘传动轴)、应力腐蚀开裂(如连接杆等)等行为的发生; 高强度钢紧固件在装配结构中形成的局部腐蚀环境易造成应力腐蚀开裂的发生<sup>[2]</sup>。

### 2.2.2 电气类产品

电气类产品主要为舱外元器件或舱内电气设备, 舱外元器件包括开关、传感器等, 舱内设备包括组合、印制板、传感器、电缆、电连接器、面板等, 及接线柱、插件、接线板等电气组部件。其腐蚀主要集中于材料及其涂层的腐蚀、焊接腐蚀、接头等腐蚀等。电气类产品含有较多的贵金属和稀有金属等有色金属、黑色金属、石墨, 元器件、焊点等主要发生电偶腐蚀、应力腐蚀。电气组件的腐蚀涉及外加电位极化造成的电偶腐蚀, 如电连接器、开关、传感器中, 内部湿度较大, 在外加电位极化的作用下, 腐蚀速率急剧增加, 造成插针、端子等结构的腐蚀。电连接器等存在着磨损腐蚀的问题, 在大气环境腐蚀和磨损的双重作用下, 涂层损伤较快, 容易造成基体腐蚀。

### 2.2.3 材料与涂层

常用裸露金属材料如不锈钢(如 201、304、316L、321、410、PH17-4、PH15-5 等)、铝合金、铜合金及其他等, 都会发生不同程度的腐蚀<sup>[13-18]</sup>, 主要发生晶间腐蚀、应力腐蚀开裂、点蚀等。影响不锈钢腐蚀速率的主要环境参数包括  $MgCl_2$ 、 $NaCl$  浓度和紫外辐射强度等。铝合金 5A06、3A21、6061 等通常主要发生晶间腐蚀、丝状腐蚀、点蚀<sup>[19-21]</sup>。铜及铜合金如紫铜和海黄铜 H62 等主要发生点蚀、应力腐蚀开裂<sup>[22-23]</sup>。

高分子材料老化速率的主要影响因素是太阳辐射、高湿、高温等, 因此相比于我国东南沿海及海南岛地区, 高分子材料如塑料、橡胶受到强紫外辐射和高湿度等多因素作用下老化速率较快, 例如油管、电缆外皮、密封圈(垫)、元器件外壳等, 短时间内会出现粉化、开裂、变色等现象。聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等耐老化性能较低, 不适合长期暴露在岛礁环境使用。纤维增强树脂基复合材料会出现抗拉强度、冲击强度、弯曲强度等性能降低<sup>[24]</sup>。

钢铁化学氧化或转化(如发蓝、磷化处理等),

钢铁电镀铬<sup>[25-26]</sup>、电镀锌<sup>[27]</sup>、渗氮、碳氮共渗等耐磨性涂层等, 铜合金电镀镍, 铝合金化学镀镍、镀铬, 不适合单独长期暴露在岛礁环境中使用。漆膜及阳极氧化涂层丝状腐蚀较为明显, 环氧树脂涂料耐长期腐蚀性能较低<sup>[28]</sup>。排烟管等有机硅铝粉漆的孔隙率较高, 钢铁基体易腐蚀, 涂层易大面积开裂、脱落<sup>[29-31]</sup>。

## 3 车辆装备主要腐蚀区域

### 3.1 主要腐蚀区域划分

车辆装备一般由底盘、舱(箱)、设备和结构等主要部分组成。根据车辆装备结构和局部环境特点, 车辆装备腐蚀区域可划分为 4 个主要区域, 分别为舱外完全暴露结构(上装)区域、底盘底部区域、底盘发动机舱及其相关的高温影响的区域、舱(箱)内区域等。一般情况下, 舱外完全暴露结构区域的腐蚀问题最多, 舱内腐蚀问题相对较少。

该车辆舱外完全暴露结构区域占比 45% 以上, 发动机舱及其相关部件区域、底盘底部区域、舱内区域分别占到 15%、30% 和 10% 左右, 如图 2 所示。从图 2 中可发现, 舱外完全暴露的结构腐蚀占比最多, 其次为底盘底部区域。

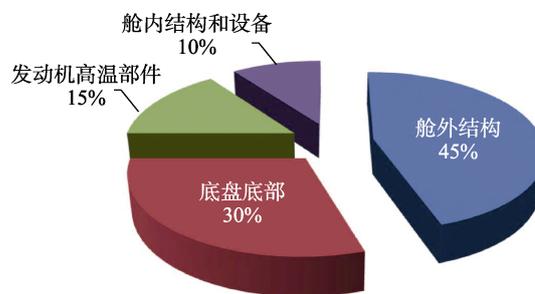


图 2 车辆装备典型腐蚀区域腐蚀比重

Fig.2 Corrosion proportion in typical corrosion area of vehicle equipment

### 3.2 舱外完全暴露结构区域

舱外完全暴露结构区域主要指舱外完全暴露在常温大气环境中的机械结构。在舱外完全暴露的结构中, 缝隙腐蚀占到该区域腐蚀问题中 35% 左右, 其次为结构外形造成的腐蚀约占 30%, 电偶腐蚀占 10%, 焊接结构、材料与涂层的腐蚀数量分别约占 10%, 如图 3 所示。该区域主要的腐蚀问题是结构类腐蚀问题, 其他类腐蚀问题占比相对较少。舱外结构腐蚀问题中集中在缝隙腐蚀、电偶腐蚀、磨损腐蚀、结构外形和积水结构造成的腐蚀。舱外结构越复杂, 易腐蚀结构越多, 结构腐蚀占比越大, 腐蚀防护越困难。

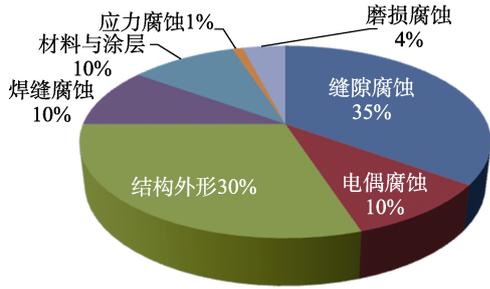


图 3 舱外结构腐蚀问题数量比例图

Fig.3 Quantitative proportion charts of corrosion problems of body structures outside cabin

### 3.3 底盘底部区域

底盘底部结构包括悬架、车轮、挡泥板、护板、车架、底板、下挂箱（舱）等，这些结构会经常性承受沙石、泥水冲击或冲刷的作用，底盘底部结构会集聚污泥、沙尘、腐蚀性盐等物质，沙石冲击造成涂层冲击损伤、金属材料及其锈层的破坏，加速材料与涂层的腐蚀，并且由于底盘底部处于阴面，长时间处于润湿状态，以及底盘的缝隙结构、电偶结构、焊缝、积水结构、复杂外形结构，难以维护保障到位，所以底部腐蚀速率较快，短时间内腐蚀发展已较为严重。该车辆底盘底部缝隙腐蚀数量占 35%，砂石冲击腐蚀损伤占到 20%，焊接腐蚀、结构外形、电偶腐蚀分别占 15%、13%和 10%，另外，积水腐蚀占到 5%，磨损腐蚀约占 2%，腐蚀数量占比如图 4 所示。由于缝隙结构较多，缝隙腐蚀仍然是底盘底部主要发生的腐蚀类型，底盘底部涂层损伤和腐蚀较快与砂石冲击、涂层耐腐蚀性能低有关，底盘底部焊缝周围腐蚀较快，也与焊缝易腐蚀、涂层防护效果差有关。另外，磨损腐蚀主要发生在铰链等活动部件中。

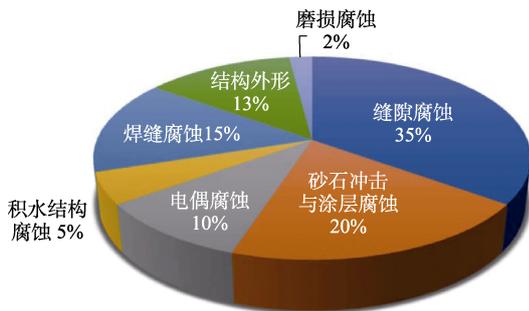


图 4 底盘底部结构腐蚀数量占比

Fig.4 Quantitative proportion of corrosion problems of structures under chassis

### 3.4 发动机舱内区域

发动机及其附属部件主要包括发动机、冷却系统、发电机、变速器、管路、线路等。在发动机启动过程中，其连接的结构长时间承受高温的作用，比如发动机排烟管、消音器等承受温度可达到 600℃，高温和常温腐蚀频繁交替，两者相互协同作用极大促进

了高温部件的氧化损伤和腐蚀速率。排烟管通常采用有机硅铝粉漆进行防护，但涂层孔隙率较高，在岛礁环境中易发生腐蚀，需要经常性除锈补漆。另外，不同结构或同种结构温度差也易形成热偶原电池。发动机舱腐蚀涉及结构类腐蚀、材料与涂层腐蚀问题。该车辆发动机舱内，结构边缘造成的腐蚀最为明显，占所有腐蚀问题的 34%，缝隙腐蚀和材料腐蚀分别占 22%，电偶腐蚀和涂层腐蚀分别占 11%左右，如图 5 所示。结构边缘是由于边缘涂层在高温腐蚀和常温腐蚀交替作用下易发生腐蚀损伤，缝隙腐蚀主要发生在螺纹、搭接等缝隙结构中，材料腐蚀主要是指不锈钢的点蚀现象，电偶腐蚀是主要发生在热偶结构以及不锈钢和低合金钢之间，涂层腐蚀主要涉及排烟管、冷却管路等涂层在高温和常温腐蚀交替作用下损伤和腐蚀（老化）。

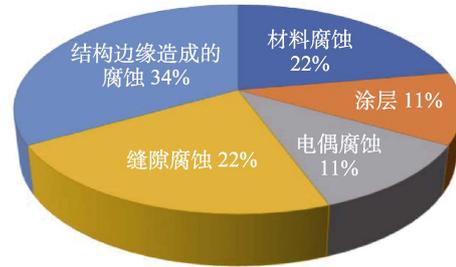


图 5 高温腐蚀部件腐蚀问题数量比例

Fig.5 Quantitative proportion of corrosion problems of high temperature parts

### 3.5 舱内区域

舱内环境一般指的是封闭的环境，是具有良好的保温、密封的环境。一般地，具有防水性能的金属箱体也认为是舱内环境，但温度受到自然环境影响较大。舱内环境与外界沟通的环境因素只涉及温度、湿度、盐雾等三种环境因素，所以，舱内环境主要是防盐雾、防湿热、防霉菌（简称“三防”）环境。舱内腐蚀主要涉及舱内结构件、电气类产品等腐蚀问题。该车辆的元器件腐蚀、焊点和压接端子腐蚀分别占到 30%、10%和 10%，另外舱内结构件材料和涂层腐蚀问题占 20%、30%，材料的腐蚀主要是以点蚀、电偶腐蚀为主，而涂层主要是丝状腐蚀、点蚀等，如图 6 所示。焊点、压接端子主要发生缝隙腐蚀、微孔腐蚀、杂散电流造成的腐蚀等等。

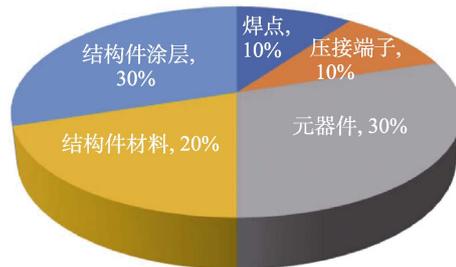


图 6 舱内区域腐蚀问题数量比例

Fig.6 Quantitative proportion of corrosion problems of equipment and structures inside cabin

## 4 腐蚀防护设计、措施

针对车辆装备结构、组成等特点,列举部分、典型或主要的结构类腐蚀防护设计、电气类产品腐蚀防护设计、材料与涂层腐蚀防护设计、维护保养和腐蚀在线监测等控制措施等。

### 4.1 典型结构腐蚀防护及控制设计

优化结构布局和几何形状,减少舱外结构类型,尽量采用整体设计,减少螺接、铆接、点焊等连接设计,避免锐角锐边、尖角棱角、凹槽等设计,工件结构边缘圆滑过渡。铸造件不同壁厚过渡平滑。竖直的间隙适当增大间距且通畅,以减少缝隙腐蚀和防止积水。盲孔改为通孔,内腔、导向孔、内六角螺钉

头、凹槽、导轨、散热片、铸造件加强框等易积水结构应增加排水口(槽)、斜面设计或完全填充,防止积水、积盐及沙尘等,箱(舱)外接插件转接板改为斜面放置,便于及时排水,防止电缆引流,见图7a~7d。在内腔或管状等结构件中增加排水口,防止空腔结构积水积尘积盐造成腐蚀。

对于外露的缝隙结构、搭接面等,采用密封胶、橡胶垫等进行密封防护,铆钉、螺栓、螺钉等紧固件装配采用胶、漆等进行湿装配<sup>[2]</sup>。机加工直角边角、装配直角边角和半封闭的孔或死角、拐角、凹坑等填充或填角密封、结构边缘的封边密封,如图7e~7h所示。底盘底部的搭接缝隙结构进行严格密封,并将搭接面与飞溅方向相反,对凹坑、死角等进行填充处理,增加排水设计,防止水、泥、沙等缝隙结构处聚集。

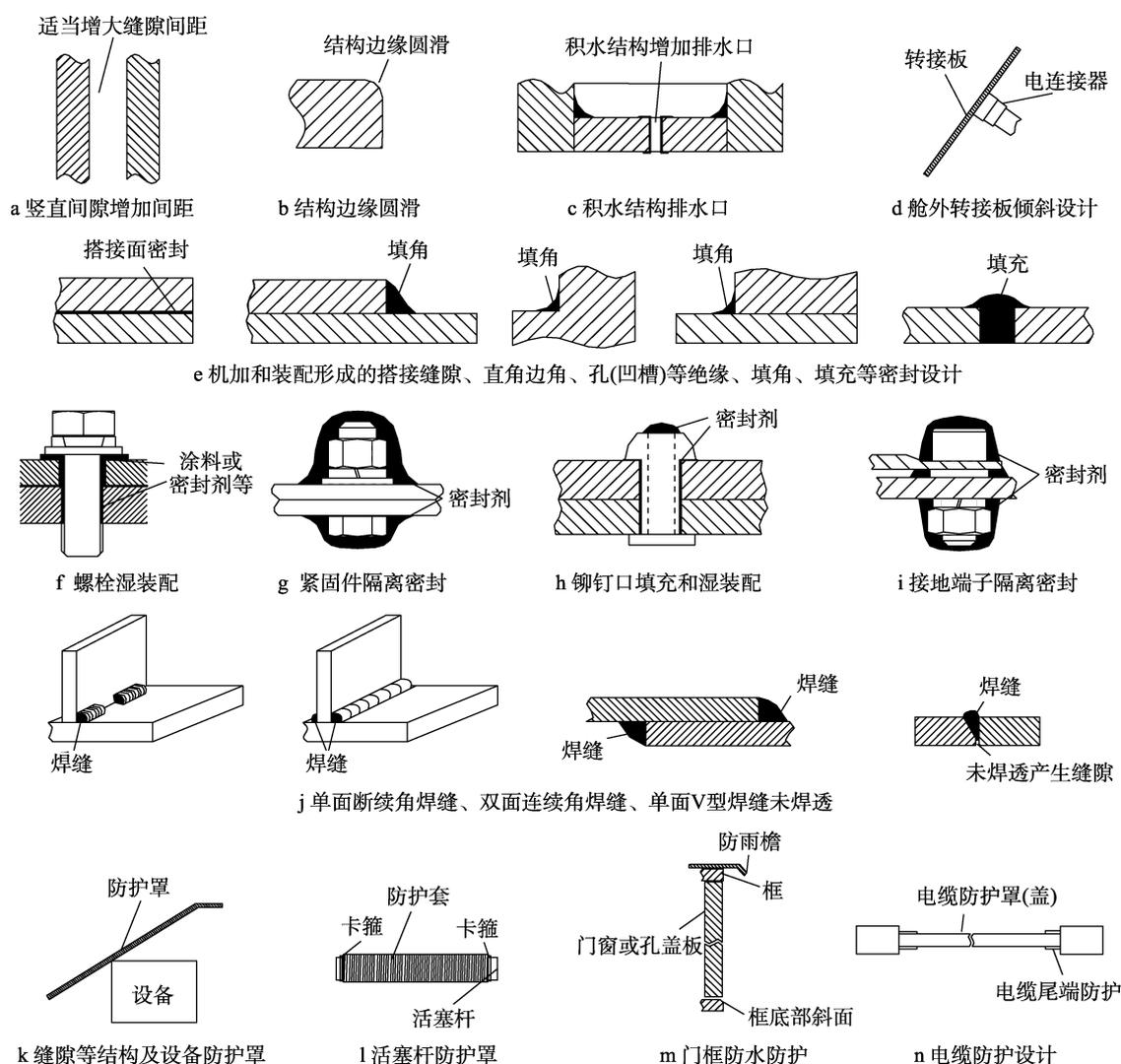


图7 典型结构类及电气产品防腐蚀设计类型示例

Fig.7 Examples of typical structural and electrical product anti-corrosion design types: a) Increase vertical clearance; b) smooth boundary; c) drainage outlet of waterlogging structure; d) Inclined design of adapter plate; e) Seal design of insulation, filling corners and filling-in for overlap gaps, right angle edge, pole, groove formed by ma-chining and assembly; f) wet assembly of bolts; g) fastener isolation seal; h) rivet head filling-in and wet assembly; i) separation sealing of ground terminal; j) intermittent fillet welding of single side, continuous fillet welding of both side, single side V welding of lack of penetration; k) shield cover of some structure and equipment; l) protective sleeve of piston rod; m) protective drainage design of door frame; n) protection design of cable

复合材料切割边缘采用密封剂进行密封等。门框等使用的密封条、密封垫与金属接合面采用密封胶粘接进行密封处理,防止橡胶圈(条)和金属门框之间出现缝隙腐蚀。舱外立壁或立管中间避免存在缝隙、凹槽等结构,若存在缝隙或直角边角、凹槽等,应进行密封、填充等处理,底部应设计斜面,及时将水、腐蚀性盐等引流排导。

双金属结构、碳纤维复合材料与金属材料之间应采用缓蚀剂、橡胶、密封胶、电泳漆、陶瓷等进行绝缘处理。避免出现平垫圈、弹垫圈、螺栓(螺钉)和螺母等采用不同的材料的情况,比如弹垫圈采用不锈钢,而平垫圈、螺栓等采用低合金钢和阳极性镀层,否则需要采取绝缘隔离措施。不能绝缘的 2 种金属连接时,阳极材料面积大于阴极材料,避免大阴极、小阳极结构,或者采用过渡金属涂层或金属降低电极电位差。

采用双面连续焊代替单面焊缝或断续焊,避免单面 V 形焊缝出现未焊透形成的缝隙,如图 7j 所示。尽可能采用焊缝专用底漆或密封剂对长期暴露的焊缝进行防护处理,防止焊接腐蚀的发生。点焊、断续焊缝间隙和未焊透的缝隙采用密封胶密封处理,焊接零部件不形成缝隙或积水的结构。高强度钢、高强度铝合金等部件过渡处或连接结构(焊接、螺接等)避免应力集中或产生较大的残余应力,避免拉应力与易发生应力腐蚀开裂的晶体取向形成垂直,或降低承力结构件许用应力,低于应力腐蚀门槛值对应的应力值。

采用舱、箱、盖、罩、篷布等对设备或结构进行防护,减少盐雾、太阳辐射、降水和风力风向等环境因素对产品腐蚀作用,可显著提高车辆装备腐蚀防护性能,并且如果防护盖(罩)具有一定的热反射或隔热功能和通风设计,可防止局部温度和湿度增加加速腐蚀。例如,采用可伸缩防护套加强对油缸伸缩杆的防护,减少氯化物沉降等腐蚀作用;在易积水机构增加倾斜盖板防水装置设计等;在液压设备上增加防尘罩,降低管路接头和阀块等氯化物沉积和积水;底盘发动机及周边高温部件、传动轴、发电机等增加了防护装置,防止积水和砂粒沉积;门窗或开口上部增加防雨檐,底部门框增加斜面,实现排水设计,在电缆转接板外增加防雨布等,如图 7k~7m 所示。

在结构设计中,焊缝、缝隙和结构密封区域等具有良好的可达性、可见性,能够满足后续方便维修维护的要求。其他在设计要求中应注明的腐蚀控制措施包括消除机加工毛刺、减小焊趾 R 角、消除机加工和焊接残余应力等。

## 4.2 电气类产品腐蚀防护设计

设备舱采用了除盐雾和除湿设备进行舱内环境控制,或采用除湿材料,对设备内部进行除湿。箱体

加强密封设计,采用密封胶、密封条等。箱(舱)等采用水密设计。箱体底部增加排水设计,边角结构采用密封胶进行填充处理,并增加圆滑过渡,表面涂装添加防霉剂的涂料。电气设备组合中印制板、元器件等采用耐老化性能优良的三防漆或聚对二甲苯(Parylene C)进行防护<sup>[5]</sup>;采用耐腐蚀优良的焊剂进行焊接;印制板连接器焊点、触点和压接端子采用密封胶或三防漆密封或防护处理。元器件严格密封,选择耐霉菌腐蚀性能好的密封胶,或者添加防霉剂的涂层。接地端子采用密封胶包覆。舱外电缆应对连接器焊点进行密封,密封材料选用耐老化性能较好的有机硅、聚氨酯、聚硫类等绝缘密封剂;热缩套管应具有良好的电绝缘性、耐老化性能等。蓄电池舱等供电电缆压接端子、接地线端子等搭接部位采用全密封隔离保护措施,如图 7(i)所示。舱外电气设备保证暴露器件的材料具有较好的耐腐蚀(老化)性能,并具有良好的水密性能,线缆连接接线端处于完全隔离密封的状态,例如,电缆尾端采用整体成型密封防护,另外电缆采用电缆罩加强防护,减少紫外线对电缆外皮老化的作用,如图 7(n)所示。

## 4.3 材料与涂层

耐蚀铝合金选用 5×××系铝合金、部分 3×××系和 6×××系铝合金;不锈钢选用奥氏体不锈钢 316L、沉淀硬化不锈钢如 PH15-5(应力腐蚀敏感性随着成分、热处理和结构形式发生变化)等,以及氮化不锈钢如 316LN、304LN 等。高分子材料需要添加防老化剂,常用的塑料包括聚四氟乙烯、聚酯、聚亚酰胺等,橡胶材料选用氟橡胶、硅橡胶等,胶粘剂采用改性环氧和复合橡胶等胶粘剂等,密封剂采用硫化聚硫、硅橡胶、氟橡胶等。碳纤维复合材料装配用紧固件选用不锈钢或高合金钢等材料。

200、300、400、600 系不锈钢采用专用氟碳涂料涂装加强防护;2×××系、5×××系、6×××系和 7×××系变形铝合金结构件采用阳极氧化、微弧氧化、Alodine 化学氧化或磷化和喷涂或电泳涂装等。舱外钢铁结构件采用金属涂覆层和重防腐涂料组成复合涂层防护体系,满足长效防护的目标,例如大型架体采用热喷涂、涂装的复合涂层体系。高强度材料结构件采用无铬锌铝合金涂层、渗锌代替电镀锌<sup>[32-34]</sup>。油缸活塞杆电镀硬铬采用乳白铬/硬铬的双层电镀铬工艺<sup>[26]</sup>,电镀锌镍合金、硬铬采用封闭剂对镀层微裂纹进行封闭处理提高耐腐蚀性能<sup>[26,35-36]</sup>。执行结构的运动部件采用耐磨耐腐蚀优良的涂层等,如等离子、爆炸喷涂或超音速火焰喷涂 WC、CrC 涂层,激光熔覆涂层等。底盘底部可采用耐腐蚀耐砂石冲击装甲涂料提高抗冲击耐腐蚀性能。高温部件选用耐高温耐腐蚀涂层进行防护,包括耐高温耐腐蚀涂料、热喷涂高温涂层等。空腔结构、冲压件采用电泳涂装的方法保证

内腔、边缘涂层均匀,防止内腔表面金属基体腐蚀后向外部蚀穿或金属边缘腐蚀等。在箱(舱)顶部增加耐腐蚀反辐射涂层,降低太阳辐射对舱、箱等内部温度的影响。加强结构背阴面的防护,尤其是水平圆柱形的结构的下弧面,采用增加涂装道数(涂层厚度)或金属底层等方法增加该部位的涂层耐蚀性。

#### 4.4 维护保养措施

根据不同结构和服役环境、工作特点,制定相应的日常维护保养措施,例如对活动部件、内腔、沟槽等,定期采用防锈油、润滑脂等增强防护;对易腐蚀金属结构,定期采用防锈油、缓蚀剂等加强防护;在电镀硬铬表面定时涂刷油脂加强防护;对排水孔(槽)进行及时清理维护;及时清理边角或封闭结构中盐、尘、积水等,对车体外侧可采用含有缓蚀清洗剂进行冲洗或擦洗,尤其是易积水结构采用加入缓蚀剂、清洗剂的淡水进行清洗,清洗后使用高压压缩空气进行吹干处理。对腐蚀损伤的涂层进行原位修复。根据不同季节的环境因素的变化规律,加强维护保养要求,例如,夏季采取必要措施降低太阳辐射对高分子材料或树脂基复合材料的老化作用;冬季加强对焊接接头、缝隙结构、半封闭结构、凹槽、结构边缘、磨损部位、舱内区域等易腐蚀结构清洗、维护等措施。

#### 4.5 腐蚀在线监测措施

加强车辆装备腐蚀在线监测,实时监控腐蚀状态和环境状态变化,对车辆装备进行健康监测,尤其避免一些灾难性腐蚀问题的发生。例如在不易检修、关键结构或部件位置安装腐蚀传感器,对可能发生的点蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳等局部腐蚀进行在线监测,实时监控材料或结构件的腐蚀状态,确保产品的使用安全。在舱(箱)内外安装环境腐蚀特性监测传感器,对舱内外环境因素进行在线监测,随时对环境参数的动态变化进行预警,在极端天气或强风等条件下,及时报警,并采取环境控制或其他防护措施。

### 5 验证结果

在样车上采取上述相应的腐蚀防护设计及措施,对该车辆进行了1a以上的腐蚀监测。验证结果表明,该车辆外观良好,腐蚀面积和数量显著减少,采取的腐蚀防护方法取得了良好的验证效果。

#### 5.1 舱外完全暴露结构区域

舱外结构整体外观得到了显著改善,在相同时间内,腐蚀面积减少了90%以上,腐蚀总数量降低了85%以上。舱外结构中缝隙腐蚀减少了95%以上,紧固件连接的结构基本未出现腐蚀,很少量结构存在积水腐蚀的现象。焊接接头腐蚀明显得到了改善,材料和涂层只存在与机械损伤有关极少量腐蚀。

#### 5.2 发动机舱及周边高温部件区域

发动机舱腐蚀数量减少了75%以上。高温部件采用的高温涂层存在一定程度的腐蚀,相较于改进前,防护效果显著提升,但仍需要进一步改善。

#### 5.3 底盘底部区域

底盘底部腐蚀数量减少了85%以上。大部分区域的缝隙腐蚀、积水造成的腐蚀、结构边缘的腐蚀等结构腐蚀问题得到了解决。底盘底部在耐腐蚀装甲涂料防护下,虽然有砂石冲击作用下,车架底部、翼子板、挡泥板、下挂舱等表面涂层没有明显的损伤,车架螺栓和焊缝部位没有出现大面积的腐蚀,断续焊的焊接接头没有出现腐蚀。但少量的结构(如冲压件积水机构、车桥缝隙结构等)由于无法进行处理和维护,存在明显的腐蚀现象。

#### 5.4 舱(箱)内区域

舱内设备保持较好的状态,未出现明显的腐蚀。舱内设备电气设备机箱机柜、机械结构等外表面未出现宏观腐蚀,电气设备组合中印制板、元器件等外观良好,未出现宏观腐蚀现象。密封胶填充了缝隙、接头或元器件等,未出现宏观可见的腐蚀。箱内电气设备表面状态良好,元器件和线缆表面状态良好,存在少量的点蚀和丝状腐蚀,但没有出现大面积腐蚀。箱体顶部的反辐射涂层能够显著降低箱内温度,保证箱内温度保持在30℃以内,使得箱内保持较好的工作环境。

### 6 讨论

车辆装备是不同材料、结构外形、装配设计、连接方式以及复杂结构、液压和电气设备等组成的机电液一体化地面设备,是多种材料、结构、系统等组成的整体。通过分析、总结和归纳车辆装备腐蚀规律,采取针对性的腐蚀防护及控制方法,才能从根本上解决车辆装备在岛礁的腐蚀防护问题,包括:重视结构类、电气类防腐蚀设计在产品阶段的作用,合理选定材料与涂层防腐蚀搭配方案,并加严环境试验考核,将维护维修及腐蚀监测技术等防腐蚀要求贯穿于车辆装备服役周期内。

#### 6.1 结构类防腐蚀设计

在热带岛礁大气环境中,常年高氯离子沉降量、高湿度、高温度、强太阳辐射、频繁干湿交替等因素作用下,与结构相关的局部腐蚀行为较为显著。因此,车辆装备上出现的大多数腐蚀行为都与产品结构有关,包括应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳、磨损腐蚀、环境腐蚀导致的氢脆等,以及电偶腐蚀、缝隙腐蚀、结构外形造成的腐蚀等。结构类腐蚀是车辆装备主要的腐

蚀问题,应在设计阶段引起足够的重视,作为首要的防腐蚀设计问题进行关注。长期以来,人们将结构造成的腐蚀与材料自身腐蚀行为混淆在一起,其结果是在防腐蚀设计时,设计师更加注重于材料的腐蚀防护,而忽略了结构防腐蚀设计的重要性。将结构类防腐蚀设计与材料本身的腐蚀防护区分开来,更加有助于结构设计师加强对产品的腐蚀防护设计,更加有利于从根本上解决机械产品的防腐蚀问题。只有在研制阶段中将防腐蚀结构设计贯彻实施,才能避免后续持续不断的、巨大的财力、物力、人力、时间等防腐蚀保障成本投入。

在产品阶段,应改进或避免采用易腐蚀的结构,并采用相应的防腐蚀设计或措施,对零部件外形、装配设计、连接设计、防(排)水设计、防腐蚀密封设计、防电偶腐蚀设计、防应力腐蚀设计、防高温腐蚀设计等防腐蚀设计。其中,防腐蚀密封设计是结构设计以外结构类防腐蚀设计中一项重要内容,能够避免氯离子环境中缝隙腐蚀、电偶腐蚀、应力腐蚀、积水造成腐蚀等腐蚀行为的发生,显著提高机械产品在热带岛礁大气环境中的耐腐蚀性能。车辆装备整车总体设计时,尽可能将设备放置在舱、箱或防护罩下,并在某些情况下考虑防太阳辐射、通风设计,更加有利于车辆装备长期稳定服役。

由于产品结构复杂多样,结构类防腐蚀设计在产品应用上更加的灵活、多变。结构类防腐蚀设计方法应在设计师队伍中贯彻实施,设计人员应熟悉结构造成的腐蚀类型,对防腐蚀设计方法融会贯通,将不同腐蚀类型的防腐蚀方法在各类产品设计中进行运用。在结构设计中改进或采用腐蚀防护方法,不仅节省了成本,而且从本质上显著提升了机械产品环境适应性,取得了更加良好的应用效果,能够满足车辆装备长期免维护服役的使用要求。

## 6.2 材料与涂层选用

相对于结构类防腐蚀设计,材料和涂层往往通过手册选用,其选用原则和范围较为固定。一般地,在防腐蚀结构设计难以解决,或在设计、制造、维护等成本,以及设计中结构强度、刚度、轻量化和使用要求、使用环境、耐腐蚀性能要求以及腐蚀控制综合效益等多方面综合考虑下,合理选用耐蚀材料、涂层,并采用材料和涂层最优化搭配方案,满足不同结构、强度、装配公差和使用环境等需要。在选用涂层方面,可以考虑新涂层技术和复合涂层,新涂层技术则需要较长时间的验证,而复合涂层体系可采用金属涂层和有机或无机涂层配合组成,能够综合2种涂层优点,互补性较强,适应性更好。

在产品设计中,人们往往更加注重材料的防腐蚀设计,采用高耐蚀材料加强产品的耐腐蚀性能,成本投入提高,但综合效益较低,从长远发展角度来说不

可取,不仅不能从根本上解决腐蚀问题,而且会产生危害性更大的局部腐蚀行为。例如,不锈钢成本、密度高,用不锈钢代替低合金钢、铝合金等,整机产品生产和维修成本、质量将大幅增加,没有消除腐蚀行为,反而会造成点蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀等灾害性局部腐蚀行为发生。因此,从实用角度考虑,不能简单地采用高耐蚀材料替代不耐蚀材料,需要综合考虑材料特性、工件尺寸、结构形状、用途、使用工况和防护涂层等条件。比如,选用永久不拆卸或不经常拆卸的标准件时,采用耐腐蚀涂层(如陶瓷涂层)或防腐蚀密封等设计方法的低合金钢紧固件,则比不锈钢紧固件实用性更好。

## 6.3 电气类产品防腐蚀设计

舱内电气类产品主要是对元器件、印制板、线缆连接、焊接和接线端等方面加强防护,关注每个元器件、印制板、电连接器、线缆等防腐蚀设计。保证印制板、元器件焊点、底部和缝隙等部位形成均匀、致密的膜层,可实现对电气类产品的有效防护。线缆连接的各行程开关、电连接器等接头处采用密封隔离可达到有效保护的目的。舱内设备通过环境控制能够保证良好的工作环境,降低温度、湿度和盐雾,电气类产品的腐蚀防护效果更加可靠。箱内设备主要依靠防护涂层和密封材料等产品进行防护,保证风力/风向、盐雾和降水等环境因素不影响箱内环境,则箱内电气类产品能够满足长期安全稳定使用的要求。验证结果表明,在现有防护技术和环境控制条件下,电气类产品能够满足长期使用的要求。

## 6.4 环境试验考核

在设计阶段,采用自然环境和实验室加速腐蚀试验进行产品环境适应性验证,但往往环境因素、试验条件与实际服役环境存在差别,试验考核结果与实际服役状态存在差异,包括材料与涂层试片环境试验忽略了不同的结构、载荷对其耐腐蚀性能影响;结构件或组件也缺少实际产品中存在的载荷、温度、外加极化、相对运动、摩擦磨损等对其的影响,整机试验件也没有实际服役中电流、载荷等加载或相对运动过程对其作用,所以在实装实地验证后会得出与试验过程不同的结果<sup>[31]</sup>。另外,自然环境试验地点的环境因素与实际服役环境存在差异。在现有技术条件下,实验室加速试验缺少多因素综合试验条件。因此,试验件可考核特定的技术指标,但不能完全评价在产品中实际服役状态,产品设计阶段应尽可能考虑更多考核因素,并在对设计的产品进行环境验证过程中,对试验条件进行加严考核。例如,GJB 150.11A—2009中96 h 间歇盐雾试验时间远远不能满足产品在热带岛礁考核要求,达到720 h 甚至1500 h 以上才能满足金属构件的最低盐雾腐蚀试验要求。金属及金属涂层

在海洋大气环境暴露试验可采用浪花飞溅区暴露试验代替等。

## 6.5 维修维护和腐蚀监测

维修维护是一项重要的加强产品腐蚀控制措施,及时清理腐蚀性盐、水膜等能够极大减缓腐蚀的发展。此外,及时清理沉积的海砂,因为海砂混合物的成分中可能含有 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 和羟基磷灰石、氯化物等,具有较高的黏性,可吸附更多氯化物溶解和聚集。在日常维护项目中,应关注盐、海砂等定期清理维护。另外,由于受风面降水量更高、腐蚀性盐沉积更多,腐蚀速率相对较快,在日常维护时应加强受风面的维护保养频次。缓蚀剂、防锈油及油脂等是经常维护使用的防腐蚀材料,对于缝隙结构、外露基体、磨损部位等易腐蚀结构具有良好的缓蚀效果或保护作用。腐蚀监测一般针对环境参数以及对关键件、重要件、易腐蚀结构腐蚀速率及微裂纹的监测,是预防灾难性局部腐蚀行为的重要手段,为后续的腐蚀防护方法制定提供一定的方向。

## 7 结论

1) 热带岛礁大气环境腐蚀严酷度高于我国大陆沿海及海南岛等常见的海洋大气环境,其对车辆装备腐蚀防护设计与腐蚀控制措施要求显著提高。

2) 通过车辆装备在岛礁腐蚀统计、归纳和总结,根据腐蚀特点,将车辆装备腐蚀划分为结构类防腐蚀设计、电气设备防腐蚀设计、材料与涂层等4类,其中结构类腐蚀是车辆装备主要的腐蚀问题。根据腐蚀环境,车辆装备划分为舱外完全暴露区域、发动机舱、底盘底部和舱内区域等4个区域,其中舱外完全暴露区域的腐蚀数量占较大比例。车辆装备首要腐蚀防护设计 requirements 是解决车辆装备完全暴露区域与结构相关的腐蚀问题。

3) 在设计阶段中,通过结构类防腐蚀设计、电气类防腐蚀设计、合理材料与涂层搭配选用等,并提高环境试验考核要求;在日常使用过程中,采用合理的维护保养和腐蚀监测等腐蚀控制措施,能够显著提高整车在热带岛礁环境中腐蚀防护的效果,满足车辆装备长效服役的目的。

### 参考文献:

[1] 杨波,俞少行,井建鑫,等. 滨海发射场低温管路法兰连接螺栓环境腐蚀断裂失效机理[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 86-92.  
YANG Bo, YU Shao-xing, JING Jian-xin, et al. Failure Mechanism of Environmental Corrosion and Fracture of Flange Connection Bolts of Low-Temperature Pipelines in Coastal Launch Site[J]. Equipment Environmental En-

gineering, 2021, 18(9): 86-92.  
[2] 郭强. 低纬度热带岛礁大气环境中高强度不锈钢螺栓断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(6): 415-420.  
GUO Qiang. Fracture Analysis of High Strength Stainless Steel Bolts in Atmospheric Environment of Tropical Island Reef at Low Latitude[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(6): 415-420.  
[3] 向永华,王争荣,曹京宜,等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 28-34.  
XIANG Yong-hua, WANG Zheng-rong, CAO Jing-yi, et al. Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 28-34.  
[4] 孙颖,刘威. 南海大气环境对战术导弹结构可靠性的影响浅析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 72-75.  
SUN Jie, LIU Wei. Influences of the South China Sea Atmosphere Environment on Structural Reliability of Tactical Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 72-75.  
[5] 郁大照,张代国,王琳,等. 南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 8-12.  
YU Da-zhao, ZHANG Dai-guo, WANG Lin, et al. Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 8-12.  
[6] 刘国孝,刘国忠,方晓祖,等. 常规兵器在热带海岛地区腐蚀问题的探讨[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(3): 131-134.  
LIU Guo-xiao, LIU Guo-zhong, FANG Xiao-zu, et al. Corrosion Problems of Conventional Weapons in Tropical Island[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(3): 131-134.  
[7] 张梦龙,赵志敏. 东南海域岛礁环境对武器装备的影响及对策研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 20-25.  
ZHANG Meng-long, ZHAO Zhi-min. The Influence and Countermeasures Study of Weapon Equipment Influenced by Island-Reef Environment in the Southeastern Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 20-25.  
[8] 徐安桃,李锡栋,周慧. 岛屿环境下车辆金属材料的腐蚀及防护对策研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 66-69.  
XU An-tao, LI Xi-dong, ZHOU Hui. Corrosion and Protection of Vehicle Metals in Island Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(7): 66-69.  
[9] 赵建印,王玺,刘星. 海军导弹装备结构件腐蚀寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 51-54.  
ZHAO Jian-yin, WANG Xi, LIU Xing. Corrosion Life Prediction of Naval Missile Structure Parts[J]. Equipment

- Environmental Engineering, 2019, 16(4): 51-54.
- [10] 张军, 苗学问, 宋岳恒, 等. 热带岛礁大气环境对飞机环境适应性的影响分析研究[J]. 强度与环境, 2022, 49(4): 58-64.  
ZHANG Jun, MIAO Xue-wen, SONG Yue-heng, et al. Influence of atmospheric environment on aircraft environmental adaptability of tropical islands [J]. Structure & environment engineering, 2022, 49(4): 58-64.
- [11] 郭强, 白鹏英, 孟庆保, 等. 电镀锌镍合金与热渗锌涂层热带海洋大气环境腐蚀规律对比分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 127-134.  
GUO Qiang, BAI Peng-ying, MENG Qing-bao, et al. Comparative Analysis on Corrosion Rule of Electrodeposited Zn-Ni Alloy and Hot Diffusion Zinc Coatings in Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 127-134.
- [12] 夏昕鸣, 邢路阔, 宋泓清, 等. 模拟南海大气环境下耐候钢腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 39-44.  
XIA Xin-ming, XING Lu-kuo, SONG Hong-qing, et al. Corrosion Resistance of Weathering Steels in Simulated South China Sea Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 39-44.
- [13] 段体岗, 彭文山, 丁康康, 等. 南海岛礁环境下 304 不锈钢腐蚀行为分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 51-57.  
DUAN Ti-gang, PENG Wen-shan, DING Kang-kang, et al. Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in the Sea Environment of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 51-57.
- [14] 李慧心, 李大朋, 王毛毛, 等. 316L 不锈钢在南海环境中的缝隙腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1): 98-103.  
LI Hui-xin, LI Da-peng, WANG Mao-mao, et al. Crevice Corrosion of 316L Stainless Steel in Coastal Waters of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(1): 98-103.
- [15] 刘亚鹏, 张慧霞, 王洪伦, 等. 2507 双相不锈钢南海大气腐蚀行为研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(S1): 106-113.  
LIU Ya-peng, ZHANG Hui-xia, WANG Hong-lun, et al. Corrosion Behavior of 2507DSS in the Atmospheric Environment of the South China Sea[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(S1): 106-113.
- [16] 张宇, 刘亚鹏, 李开伟, 等. 南海大气环境下 304 不锈钢的点蚀特性研究[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 44-50.  
ZHANG Yu, LIU Ya-peng, LI Kai-wei, et al. Pitting Characteristics of 304 Stainless Steel in the Atmospheric Environment of the South China Sea[J]. Surface Technology, 2018, 47(12): 44-50.
- [17] 黄云, 胡其高, 张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究[J]. 国防科技, 2018, 39(3): 50-63.  
HUANG Yun, HU Qi-gao, ZHANG Shuo-yun. Research on the Marine Environmental Impact on Reef Structures Maintenance[J]. Defense Technology Review, 2018, 39(3): 50-63.
- [18] 彭文山, 张彭辉, 李开伟, 等. 南海岛礁海洋环境中典型不锈钢浪花飞溅区腐蚀规律[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 35-41.  
PENG Wen-shan, ZHANG Peng-hui, LI Kai-wei, et al. Corrosion Behavior of Typical Stainless Steels in Marine Environment of Island in the South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 35-41.
- [19] 王玲, 赵全成, 杨万均. 海洋大气环境对铝合金电连接器壳体腐蚀及电气性能影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(5): 85-89.  
WANG Ling, ZHAO Quan-cheng, YANG Wan-jun. Effects of Marine Atmospheric Environment on Corrosion and Electrical Performance of Aluminum Alloy Electrical Connector Shell[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(5): 85-89.
- [20] 潘峤, 杨丽媛, 孙志华, 等. 涂漆铝合金铆接件在美济礁大气环境中初期失效行为[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 13-17.  
PAN Qiao, YANG Li-yuan, SUN Zhi-hua, et al. Degradation Behaviors of Coated Riveted Structure during the Early Stages of Exposing to Marine Atmospheric Environment at Mischief Reef[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 13-17.
- [21] 刘马宝, 王巧云, 张勇, 等. 铝合金结构腐蚀传感器综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 29-34.  
LIU Ma-bao, WANG Qiao-yun, ZHANG Yong, et al. Review on Corrosion Sensors for Aluminium Alloy Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 29-34.
- [22] 崔中雨, 肖葵, 董超芳, 等. 西沙严酷海洋大气环境下紫铜和黄铜的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 742-749.  
CUI Zhong-yu, XIAO Kui, DONG Chao-fang, et al. Corrosion Behavior of Copper and Brass in Serious Xisha Marine Atmosphere[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 742-749.
- [23] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 等. 铜合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1211-1218.  
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion Behavior of Copper Alloys in Deep Ocean Environment of South China Sea[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1211-1218.
- [24] 丁康康, 杜建平, 王振华, 等. 严酷海洋大气环境下玻璃纤维复合材料腐蚀老化规律研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 10-17.  
DING Kang-kang, DU Jian-ping, WANG Zhen-hua, et al. Study on Corrosion Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Composites in Severe Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 10-17.
- [25] 周黎, 李敏, 文明, 等. 液压缸活塞杆表面耐腐蚀性研究

- 及应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(2): 97-101.  
ZHOU Li, LI Min, WEN Ming, et al. Research and Application of Corrosion Resistance on the Surface of Piston Rod of Hydraulic Cylinder[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(2): 97-101.
- [26] 郭强. 活塞杆镀铬层封闭技术南海海洋大气耐腐蚀性能分析[J]. 电镀与精饰, 2023,45(9): 37-41.  
GUO Qiang. The Corrosion Resistance Analysis of the Sealing Technique on Chromium-Electroplating Coating on Cylinder Piston Rod in Nanhai Marine Atmosphere[J]. Plating and Finishing, 2023,45(9): 37-41.
- [27] 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.
- [28] 王海庆, 李丽, 庄光山. 涂料与涂装技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 1-7.  
WANG Hai-qing, LI Li, ZHUANG Guang-shan. Coatings and Coating Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1-7.
- [29] 杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 金属表面耐高温防腐涂料的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 216-222.  
YANG Hong-bo, LIU Zhao-hui, DING Yi-dong, et al. Research Progress of High Temperature Resistant Anti-corrosive Coatings on Metal Surface[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 216-222.
- [30] 南方, 林安, 甘复兴, 等. 耐高温防腐涂料的研制[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 17-22.  
NAN Fang, LIN An, GAN Fu-xing, et al. Development of a New Type High Temperature Anti-Corrosion Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 17-22.
- [31] 郭强, 李海峰. 底盘发动机排烟管高温涂料耐腐蚀性能对比分析与应用[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 83-91.  
GUO Qiang, LI Hai-feng. Comparative Corrosion Resistance Analysis and Application of High Temperature Coatings on Exhaust Pipes of Engines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 83-91.
- [32] 李海洪, 赵永韬, 王洪仁, 等. 海洋环境中渗锌层和镀铬涂层的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 14-16.  
LI Hai-hong, ZHAO Yong-tao, WANG Hong-ren, et al. Study on Corrosion Resistance of Sherardizing and Zinc-Chromium Coating in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 14-16.
- [33] 黄燕滨, 黄俊雄, 王期超, 等. 钢制紧固件稀土镧改性渗锌层的制备与性能研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 60-64.  
HUANG Yan-bin, HUANG Jun-xiong, WANG Qi-chao, et al. Preparation and Properties of Sherardizing Layer on Steel Fasteners Modified by Rare Earth Lanthanum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 60-64.
- [34] 东晓林, 时小军, 黄燕滨, 等. 稀土镧不同化合物对渗锌层耐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 193-197.  
DONG Xiao-lin, SHI Xiao-jun, HUANG Yan-bin, et al. Effect of Different Compounds of Rare Earth Lanthanum on Corrosion Resistance of Zinc Layer[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 193-197.
- [35] 陈伟, 唐凌燕, 周英, 等. 锌镍合金镀工艺优化及镀层耐腐蚀性的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 110-114.  
CHEN Wei, TANG Ling-yan, ZHOU Ying, et al. Research on Process Optimization of Zn-Ni Alloy Plating and Coating Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 110-114.
- [36] 王亚伟, 乔永莲, 沙春鹏, 等. 航空用 30CrMnSiNi2A 高强度电镀锌-镍合金层及其对氢脆性能的影响[J]. 材料保护, 2013, 46(12): 61-62.  
WANG Ya-wei, QIAO Yong-lian, SHA Chun-peng, et al. Effect of Electroplated Zinc-Nickel Alloy Coating on Hydrogen Embrittlement Behavior of High Strength Steel Used in Aviation Industry[J]. Materials Protection, 2013, 46(12): 61-62.

责任编辑: 刘世忠