

海上风电用电气设备的防腐设计

文/西安西电开关电气有限公司 史方颖 汪楠 杨哲

介绍了海洋环境的特点及对电气设备在防腐方面的要求，从电气设备的结构设计、表面防腐处理及标准电气元件的选择三个方面，阐述了电气设备在应对海洋环境所进行的特殊设计及特殊工艺。

近年随着资源、环境和气候问题的日益严峻，国家对于清洁能源的开发和应用日益关注。我国海上风能储量丰富，但对风电设备防腐技术的研究还处于初级阶段，在一定程度上制约了海上风电设备的研发和应用。与陆上相比，海洋环境具有高湿热、高盐雾和频繁振动的特点，尤其是环境中大量的盐类具有极强的腐蚀性，在设备金属外壳的表面形成水雾凝结，其中的氯离子与金属离子发生化学反应，形成腐蚀点。随着温度、湿度和光照条件等因素的综合作用，腐蚀长期积累后会影响到设备的寿命。

参照欧洲海上平台使用经验，海上电气产品寿命通常为25年，因此电气设备的防腐设计也以25年使用寿命为依据，按照GB/T 30790相关规定，使防腐达到C5-M级。

本文以防腐为目的，对海上电气产品从结构设计、表面防腐处理和标准电气元件的选择三个方面进行论述。

电气设备防腐蚀的结构设计

1. 外壳的选材及结构设计

升压站电气设备外壳主要有焊接钢壳体、焊接铝合金壳体和铸造铝合金壳体三类。其中铸造铝合金壳体（A356）在不做防腐涂层的情况下，其防腐性能完全能够满足C5-M级要求。因此在选材时优先选用铸造铝合金作为设备外壳。但是由于受使用数量或特殊结构所限，选用铸造铝合金为外壳的零部

件占用比例较少，大部分外壳还是选用焊接的钢或铝合金。这两种材料壳体要满足防腐要求，除表面涂层外，还要注意结构的设计，尽量避免容易造成腐蚀蔓延的结构。

缝隙和重叠连接部位容易造成水气的滞留，是形成腐蚀的诱因。在设计该类型结构时，优先采用整体结构或者满焊，如图1所示。如果缝隙不可避免，则须采用密封措施来避免或降低水气滞留。

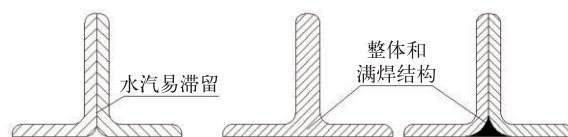


图1 缝隙结构

凹槽结构不利于水的排泄，容易使盐水或杂质长期滞留沉积，形成腐蚀环境，如图2所示。针对该问题，常用的措施是采用倾斜面或斜角设计并在长槽结构上打孔，在交叉位置开缺口或开孔，避免盐水或污垢滞留在凹陷处，如图3所示。

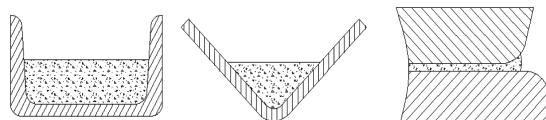


图2 易积水结构

所有内外边缘尽量采用圆角过渡，不易积水并有助于表面处理的连续施工，使边缘容易被涂层均匀覆盖，在设计和制造过程中，多采用圆角结构。



图3 免积水、积垢结构

在焊接结构设计时，避免出现不易被防护涂层覆盖的结构，如焊缝凹凸不平、搭接拼焊等。在焊接后，焊缝应打磨光滑，拼焊时易采用对焊并打磨焊缝，如图4所示。

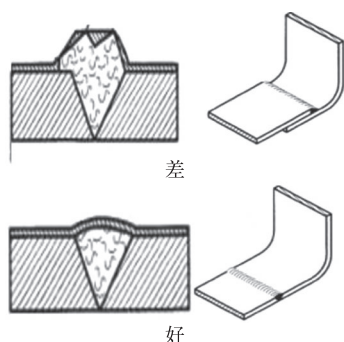


图4 避免焊接表面缺陷结构

加强筋类零部件设计时，在加强筋和加强组件之间交叉点设置缺口，避免水和沉积物滞留，利于零部件表面涂装时涂料流动，如图5所示。

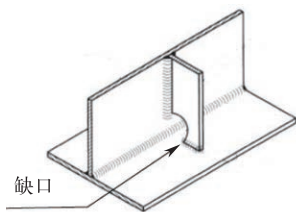


图5 加强筋结构设计

2. 柜体类的设计

在海洋环境中，箱体类零部件一般要求采用316(L)不锈钢材，柜体应具有好的密封性能，防护等级应达到IP55。在进行细节设计时，应注意以下几点。

1) 拼装结构柜体优于焊接结构柜体。如果选择焊接结构，焊缝尽量满焊，采用点焊或不连续焊接时，注意缝隙的封闭。

2) 容易造成水滞留的地方不要开设孔类结构。如在箱体顶盖上面设置螺栓及吊装环，在使用时会造成漆膜的破损和凹槽，容易积水形成锈蚀点，长时间发生穿透性锈蚀，造成箱体进水。因此在箱体

设计时，顶盖采用斜坡式无螺栓结构，利于排水。

3) 螺栓连接要加装防水垫圈或防水帽，或装配后涂抹防水胶，避免水渗入连接缝隙形成腐蚀点。

4) 因箱体板材断面多且薄，板材边缘在防腐处理时缺陷多，箱体体和五金配件等尽量避免碳钢材料，避免形成易蚀点。

5) 机构箱体内的所有二次元件须采用海工规格产品。

6) 机构内的零部件进行表面处理，推荐的电镀方式为锌镍合金，镀层厚度为10~12 μm。

7) 机构箱体需要反复拆装的部位慎用不锈钢螺钉，推荐锌镍合金镀层与防水胶涂抹配合使用。

8) 机构箱体带呼吸器和加热器，防止冷凝。

9) 电缆进出线安装导向密封管，防止潮气进入电缆绝缘层。

10) 螺钉、螺栓、螺母和垫圈采用316不锈钢材质。

3. 防电偶腐蚀设计

两块不同电位金属连接时，连续暴露在潮湿环境下，电位低的活泼金属会被加快腐蚀。在产品设计时，尽量避免电位差较大的两种金属直接连接，如果不可避免，可采用下列方法减小腐蚀速率：

1) 活泼金属面积大于非活泼金属面积，以延长耐腐蚀时间。

2) 避免接触面暴露在潮湿环境。在产品的实际设计中，会有很多不同类型金属的相互连接。如钢-铝法兰连接时，在缝隙内容易积水，而且水分不易蒸发，就形成电偶腐蚀。设计这类不可避免的结构，在安装后对接间隙涂防水胶密封，避免缝隙内积水，如图6所示。

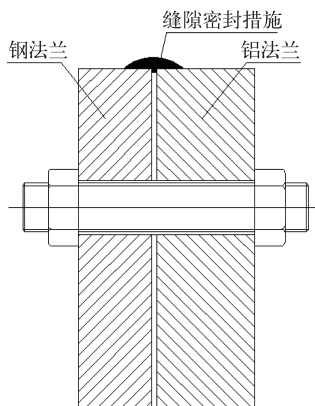


图6 钢-铝法兰连接面的密封

3) 在两种不同类金属接触面上采用电隔离措施,即在接触面中间加装不导电绝缘隔板。

4. 螺栓孔设计

由于海工产品防腐要求高,涂层的厚度较大,产品装配或紧固螺栓时很容易引起漆膜开裂而形成易腐蚀点。为避免该缺陷产生,在螺栓孔的油漆面设计沉台结构,如图7所示。沉台深度约2 mm,直径大于垫片直径2 mm。

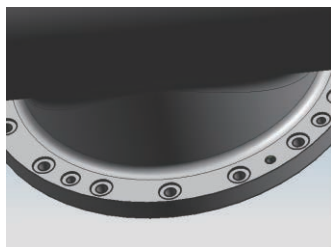


图7 螺栓孔沉台

电气设备表面防腐处理

在海洋C5(H)环境下,电气设备金属材料表面防腐处理常用的有涂装(非金属涂层处理)和镀层(金属涂层处理)两种方式。

1. 涂装

电气设备常用金属类零件涂层设计见表1。

表1 常用金属件涂层设计

序号	零部件类	底漆	面漆
1	钢材	环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆	BS磁漆
2	铝材	环氧锌黄或环氧云铁底漆	BS磁漆
3	铜材、不锈钢	环氧锌黄底漆	浅黄磁漆

在高温、高湿和高盐雾环境下,为保证涂层的防护作用,一般采用有机溶剂性船用涂料,不采用水性涂料。常用涂料见表2。

表2 涂装用涂料

序号	材料名称	型号或规格	组分
1	环氧富锌底漆	H06-4	双组分
2	环氧云铁中间漆	842	双组分
3	环氧锌黄自干漆	H06-3	双组分
4	丙烯酸聚氨酯磁漆	ST-7/8509	双组分

涂装前为保证涂装效果,须除去原材料表面残存的氧化皮、油污、金属屑和尘土等。根据表面原材料不同采取相应工艺方法,处理方式及质量要求

如下:

1) 钢材采取喷丸(砂)处理,使表面无可见油污、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物。

2) 铝材采用清洗和打磨或喷砂处理,并经酸碱液清洗,使表面无油污、无氧化膜。

3) 铜材采用酸洗和打磨处理,除去表面油污和氧化膜,再打磨使表面粗化。

4) 敷铝锌板采取打磨方式,使表面粗化并清理表面灰尘。

喷涂作业常规流程如图8所示。喷涂后涂层外观平整、光滑,色泽均匀一致,无漏涂、气泡、剥落和裂纹等缺陷。涂层厚度按GB/T 4957、GB/T 4956规定要求测定,涂层附着力按GB/T 9286/ISO 2409规定进行测定。

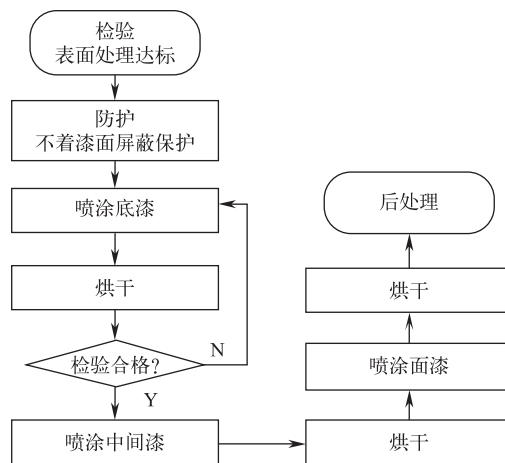


图8 表面喷涂流程

2. 镀层

海洋环境产品表面镀层处理主要有电镀层和热镀层。根据零部件材质和使用功能不同,采用不同的镀层工艺。

钢材类结构件采用热浸锌镀层,镀层厚度大于200 μm;轴类、机构类运动件钢材不仅要求防腐,也需具备一定的耐磨性,因此零部件表面采用镀锌镍合金的处理方法,含镍量控制在15%左右,同时对碱性镀锌镍合金工艺加工的弹性件进行驱氢处理。

为保证防腐性能和良好的导电性,铜材接地线采用镀(搪)锡工艺,厚度大约20 μm。

在镀层的检验中,热镀锌层厚度按照GB/T 4956进行;镀层附着力强度按GB/T 13912要求进行测定。电镀锌镍合金层外观要求细致牢固,镀层

无黑斑、磕碰和钝化膜脱落等缺陷；结合力检验按照GB/T 5270中2.12.2进行；中性盐雾试验按照ISO 12944（也可用GB/T 10125进行替代）进行。镀锡层外观应为银白色光亮状态，锡层应结晶细致、结合力良好，不允许有漏镀、粗糙、毛刺或起皮等缺陷。镀锡层结合力检查按GB/T 5270进行和判定。

标准型电气元件的选择

电气元件对海上风电电气产品的安全运行和可靠控制起关键作用，如果电气元件防护等级低，则容易锈蚀霉变（见图9），严重影响产品的可靠性。



图9 电气元件受潮霉变

为保证电气产品的可靠性，电气元件的选择要

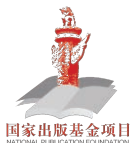
遵循以下原则。

- 1) 电气元件尽量选用海工类产品，元件要有防潮、防盐雾和防霉菌性能，且具备海洋环境防腐的相关试验认证、运行业绩。
- 2) 电气元件尽量选用机电一体化设计，有效减少机外连线。
- 3) 箱柜体应密封良好，达到IP55防护等级，同时应具备加热、除湿功能。
- 4) 暴露在大气环境中的标准件选用奥氏体不锈钢，在箱柜体内的标准件除了选不锈钢外，还可选用镀锌镍合金的标准件。

结束语

高湿热、高盐雾和频繁振动的海洋环境对海上电气设备的考核是全方位的，任何一个环节的疏漏都会成为设备潜在的危险点。设备的设计、生产、安装、试验和运维任何一个环节都需要慎重考虑，选择最优方案，确保产品在海上运行的可靠性。

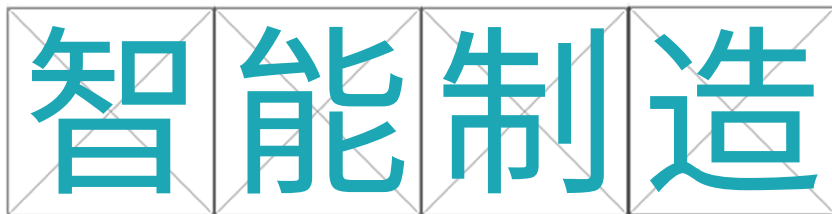
EA



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

新书推荐

中国战略性新兴产业研究与发展系列丛书



..... Smart manufacturing

本书系统研究了智能制造的内涵、特征，回顾了我国智能制造发展的历程，剖析了我国智能制造发展情况及存在的短板，同时充分研究了主要工业发达国家智能制造发展态势及趋势，对比提炼出推动我国智能制造向纵深发展的对策建议。通过分析新形势下我国在智能制造方面的发展机遇及面临的挑战，提出我国智能制造发展的总体思路、发展重点和政策措施等。本书适合政府部门和行业决策机构在制定相关政策法规、规划研究方向时参考，也适合企业决策者、技术及管理人员，以及从事与智能制造相关工作的各界人士阅读。

作者：左世全

工业和信息化部装备工业发展中心政策规划处处长，兼任北京艾迪智联科技有限公司执行董事、总经理，中国增材制造产业联盟副秘书长。
长期从事装备制造业、智能制造和先进制造业等产业战略、规划和政策研究，负责或参与研究并起草《增材制造产业发展行动计划（2017—2020年）》《智能制造发展规划（2016—2020年）》《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》《“十四五”重大技术装备高质量发展规划》《制造强国战略研究》《“十四五”智能制造发展规划》等20余项。在《学术前沿》《经济纵横》《科学管理研究》等期刊发表学术文章40余篇。参与编辑和翻译出版《中国装备工业蓝皮书》《新工业革命》《3D打印》等图书。

机械工业出版社
China Machine Press



扫码看详情
购买有优惠

八折包邮
原价98元
现价78元