ICS 27.180
F 11
备案号：33242-2011

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB / T 31006 — 2011

海上风电场钢结构防腐蚀技术标准

Technical code for anticorrosion of offshore wind farm steel structures

2011-08-06发布　　2011-11-01实施

国家能源局　发布

目　次

前言 …… II
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 2
4　总则 …… 3
5　防腐蚀措施 …… 4
6　防腐蚀要求 …… 4
7　检测与验收 …… 11
附录A（资料性附录）　露点计算 …… 14
附录B（资料性附录）　无涂层钢常用保护电流密度值和有涂层钢保护电流密度计算 …… 15
附录C（资料性附录）　阴极保护设计计算公式 …… 16
附录D（资料性附录）　热喷涂涂层结合强度检测方法 …… 19

前　言

本标准是在充分考虑海上风电场钢结构的腐蚀特点，总结和吸收国外海上风电场以及国内海洋工程钢结构防腐蚀方面的科技成果和先进经验，参考国内外有关标准的基础上制定的。

本标准由国家能源局提出。

本标准由能源行业风电标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：南京水利科学研究院、新源重工机械制造有限公司。

本标准主要起草人：朱锡昶、王政权、葛燕、李岩。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

海上风电场钢结构防腐蚀技术标准

1 范围

本标准规定了海上风电场钢结构（主要包括风力发电机组及变电站的固定式钢质支撑结构）表面预处理及涂料保护、热喷涂金属保护、阴极保护常用防腐蚀方法和相关技术要求。

本标准适用于海上风电场钢结构的防腐蚀设计、施工、验收和运行维护。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1740 漆膜耐湿热测定法

GB/T 1771 色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定

GB/T 1865 色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射暴露 滤过的氙弧辐射

GB/T 4948 铝—锌—铟系合金牺牲阳极

GB/T 4949 铝—锌—铟系合金牺牲阳极 化学分析方法

GB/T 4950 锌—铝—镉合金牺牲阳极

GB/T 4951 锌—铝—镉合金牺牲阳极 化学分析方法

GB/T 4956 磁性基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法

GB/T 5210 色漆和清漆 拉开法附着力试验

GB/T 6462 金属和氧化物覆盖层厚度测量 显微镜法

GB 6514 涂装作业安全规程 涂漆工艺安全及其通风净化

GB/T 7387 船用参比电极技术条件

GB/T 7388 船用辅助阳极技术条件

GB/T 7788 船舶及海洋工程阳极屏涂料通用技术条件

GB 8923 涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级

GB/T 9274 色漆和清漆 耐液体介质的测定

GB/T 10610 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法

GB 11375 金属和其他无机覆盖层 热喷涂 操作安全

GB/T 12608 热喷涂 火焰和电弧喷涂用线材、棒材和芯材 分类和供货技术条件

GB 12942 涂装作业安全规程 有限空间作业安全技术要求

GB/T 13288 涂装前钢材表面粗糙度等级的评定（比较样块法）

GB/T 13748 镁及镁合金化学分析方法

GB/T 17731 镁合金牺牲阳极

GB/T 17848 牺牲阳极电化学性能试验方法

GB/T 17850.1 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理用非金属磨料的技术要求 导则和分类

GB/T 18570.3 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第3部分：涂覆涂料前钢材表面的灰尘评定（压敏粘带法）

GB/T 18570.6 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第6部分：可溶性杂质的取样 Bresle 法

GB/T 18570.10 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第10部分：水溶性氯化物的现场滴定测定法

GB/T 18838.1 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理用金属磨料的技术要求 导则和分类

GB/T 19824 热喷涂 热喷涂操作人员考核要求

ISO 16276—1 Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating — Part 1: pull-off testing

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

海上风电场 offshore wind farm

建造在海洋环境中的由一批风力发电机组或风力发电机组群组成的电站。

3.2

风力发电机组的支撑结构 support structure of wind turbine generator system

风力发电机机舱以下的整个结构为支撑结构，支撑结构包括塔架、下部结构和基础。与海床直接接触（包括海床上和海床下）的部分为基础，位于水面以上的通道平台底部作为塔架和下部结构的分界线。

3.3

设计使用年限 design working life

设计规定的结构或结构构件不需要进行大修即可按其预定目的使用的时期。

3.4

涂料保护 coating protection

在物体表面能形成具有保护、装饰或特殊功能（如绝缘、防腐、标志等）的固态涂膜的方法。

3.5

热喷涂金属保护 thermal spraying metal protection

利用热源将金属材料熔化、半熔化或软化，并以一定速度喷射到基体表面形成涂层的方法。

3.6

阴极保护 cathodic protection

通过阴极极化控制金属电化学腐蚀的技术。阴极保护有牺牲阳极法和强制电流法。

3.7

表面处理 surface preparation

为提高涂层与基体间结合力及防腐蚀效果，在涂装之前用机械方法或化学方法处理基体表面，以达到符合涂装要求的措施。

3.8

附着力 adhesion

漆膜与被涂面之间（通过物理和化学作用）结合的坚固程度。

3.9

封闭剂 coat sealant

用以渗入和封闭热喷涂金属涂层孔隙的材料。

3.10

火焰喷涂 flame spraying

利用可燃气体与助燃气体混合后燃烧的火焰为热源的热喷涂方法。

3.11

电弧喷涂　arc spraying; electric spraying

利用两根形成涂层材料的消耗性电极丝之间产生的电弧为热源，加入熔化消耗性电极丝，并被压缩气体将其雾化喷射到基体上，形成涂层的热喷涂方法。

3.12

最小局部厚度　minimum local thickness

在一个工件主要表面上所测得的热喷涂层各局部厚度中的最小值。

3.13

结合强度　adhesive strength

热喷涂金属涂层和基体之间结合的坚固程度。

3.14

强制电流　impressed current

又称外加电流，通过外部电源施加阴极保护电流。

3.15

牺牲阳极　sacrificial anode

通过自身腐蚀的增加而提供阴极保护电流的金属或合金。

3.16

阴极保护电流密度　cathodic protection current density

单位面积达到完全阴极保护时所需要的电流。

3.17

阴极保护电位　cathodic protection potential

阴极保护时，使腐蚀微电池作用被迫停止所需要的阴极电位。

3.18

参比电极　reference electrode

在同样的测量条件下自身电位稳定的，用以测量其他电极电位的电极。

4　总则

4.1　海上风电场钢结构应采取有效的防腐蚀措施。

4.2　海上风电场钢结构的暴露环境分为大气区、浪溅区、全浸区和内部区。

a）　大气区为浪溅区以上暴露于阳光、风、水雾及雨中的支撑结构部分。

b）　浪溅区为受潮汐、风和波浪（不包括大风暴）影响所致支撑结构干湿交替的部分。浪溅区上限 SZ_U 和下限 SZ_L 均以平均海平面计。浪溅区上限 SZ_U 可按式（1）计算，浪溅区下限 SZ_L 可按式（2）计算。

$$SZ_U = U_1 + U_2 + U_3 \tag{1}$$

式中：

U_1 ——$0.6H_{1/3}$，$H_{1/3}$ 为重现期 100 年有效波高的1/3，m；

U_2 ——最高天文潮位，m；

U_3 ——基础沉降，m。

$$SZ_L = L_1 + L_2 \tag{2}$$

式中：

L_1 ——$0.4H_{1/3}$，$H_{1/3}$ 为重现期 100 年有效波高的1/3，m；

L_2 ——最低天文潮位，m。

c） 浪溅区以下部位为全浸区，包括水中和海泥中两个部分。

d） 内部区为封闭的不与外界海水接触的部分。

4.3 海上风电场钢结构在结构设计时应简洁，合理选用耐蚀材料。

4.4 海上风电场钢结构可采用但不限于增加腐蚀裕量、涂料保护、热喷涂金属涂层保护、阴极保护，以及阴极保护与涂层联合保护等防腐蚀措施。

4.5 防腐蚀系统的设计使用年限应考虑到风力发电机组的设计使用年限，一般不宜小于 15 年。

4.6 检测用仪器、设备、量具应经计量认证并在检定有效期内。

4.7 对海上风电场钢结构的腐蚀状况及防腐蚀效果应定期进行巡视检查和定期检测。巡视检查周期宜为三个月，内容主要包括大气区、浪溅区涂层老化破坏状况及结构腐蚀状况，全浸区阴极保护电位；定期检测周期一般为 5 年，可根据巡视检查结果的腐蚀状况适当缩短检测周期。检测应查明结构腐蚀程度，评价防腐蚀系统效果，预估防腐蚀系统使用年限，提出处理措施和意见。

5 防腐蚀措施

5.1 大气区

5.1.1 大气区宜采取涂料保护或热喷涂金属保护。

5.1.2 大气区应采取以下措施减少需要保护的钢表面积，并易于涂层施工。

a） 用管型构件代替其他形状的构件；

b） 金属构件组合在一起时采用密封焊缝和环缝；

c） 尽量避免配合面和搭接面。

5.1.3 设置涂层维修搭设脚手架用系缆环。

5.2 浪溅区

5.2.1 浪溅区应增加腐蚀裕量。

5.2.2 浪溅区宜采取热喷涂金属保护或涂料保护，或采取经实践证明防腐蚀效果优异的防腐蚀措施，如包覆耐蚀合金、硫化氯丁橡胶等。

5.3 全浸区

5.3.1 全浸区应采取阴极保护或阴极保护与涂料联合保护。

5.3.2 采用阴极保护与涂料联合保护时，海泥面以下 3m 可不采取涂料保护。

5.3.3 没有氧或氧含量低的密封的桩的内壁可不采取防腐蚀措施。

5.3.4 因结构复杂而无法保证阴极保护电连续性要求的钢结构应采取增加腐蚀裕量或其他措施。

5.4 内部区

5.4.1 内部区有海水时，与海水接触的部位宜采取阴极保护或阴极保护与涂料联合保护，水线附近和水线以上部位宜采取涂料保护。

5.4.2 内部区没有海水时，宜采取涂料保护措施。

5.4.3 内部区浇筑混凝土或填砂时，可不采取防腐蚀措施。

6 防腐蚀要求

6.1 腐蚀裕量

6.1.1 腐蚀裕量应根据工程所在地钢的腐蚀速度以及结构的维修周期和维修方式确定。

6.1.2 工程所在地无确切钢的腐蚀速度时，钢的单面平均腐蚀速度可按表 1 选取。

表 1 钢的单面平均腐蚀速度 单位：mm/a

区 域	平均腐蚀速度
大气区	0.05～0.10

表 1（续）

区　域		平均腐蚀速度
浪溅区		0.40～0.50
全浸区	水　下	0.12
	泥　下	0.05
内部区		0.01～0.10
注 1：表中平均腐蚀速度适用于 pH=4～10 的环境条件，对有严重污染的环境，应适当加大。 注 2：对年平均气温高、波浪大、流速大的环境，应适当加大。		

6.2 表面处理

6.2.1 实施涂料保护和热喷涂金属保护前应进行表面处理。

6.2.2 表面处理内容包括预处理、除油、除盐分、除锈和除尘。

6.2.3 预处理要求为：

a） 用刮刀或砂轮机除去焊接飞溅物，粗糙的焊缝需打磨至光滑；

b） 锐边要用砂轮打磨成曲率半径大于 2mm 的圆角；

c） 表面层叠、裂缝、夹杂物等需打磨处理，必要时进行补焊。

6.2.4 除油要求为：表面油污应采用清洁剂进行低压喷洗或软刷刷洗，并用洁净淡水冲洗掉所有残余物。也可采用火焰处理或碱液清洗，碱液清洗要用淡水冲洗至中性。小面积油污可采用溶剂擦洗。

6.2.5 除盐分要求为：除锈前钢材表面可溶性氯化物含量应不大于 70mg/m^2，超标时应采用高压洁净淡水冲洗。当钢材确定不接触氯离子环境时，可不进行表面可溶性盐分检测；当不能完全确定时，应进行首次检测。

6.2.6 除锈要求为：

a） 应采用磨料喷射清理方法除锈，不便于喷射除锈的部位可采用手工或动力工具除锈。

b） 除锈应在空气相对湿度不高于 85%、钢材表面温度至少高于露点 3℃的环境条件下作业。露点计算参见附录 A。施工环境的温度和湿度应用温、湿度仪测量，每工班测量次数不得少于 3 次。

c） 磨料要求为：

1） 喷射清理用金属磨料应符合 GB/T 18838.1 的要求；

2） 喷射清理用非金属磨料应符合 GB/T 17850.1 的要求；

3） 根据表面粗糙度要求，选用合适粒度的磨料。

d） 未涂覆过的钢材表面和清除原有涂层后的钢材表面处理等级要求为：

1） 热喷涂铝表面处理等级应达到 GB/T 8923 规定的 Sa3 级；

2） 热喷涂锌、无机富锌底漆处理等级应达到 GB/T 8923 规定的 Sa2 1/2 级～Sa3 级；

3） 环氧富锌底漆和环氧磷酸锌底漆处理等级应达到 GB/T 8923 规定的 Sa2 1/2 级；

4） 手工和动力工具除锈，处理等级应达到 GB/T 8923 规定的 St3 级。

e） 表面粗糙度要求为：

1） 热喷涂锌和热喷涂铝，钢材表面粗糙度在 Rz60μm～100μm 为宜；

2） 无机富锌底漆，钢材表面粗糙度在 Rz50μm～80μm 为宜；

3） 其他防护涂层，钢材表面粗糙度在 Rz30μm～75μm 为宜。

6.2.7 除尘：喷射处理完工后，使用真空吸尘器或无油、无水的压缩空气清理表面灰尘和残渣。清洁后的喷砂表面灰尘清洁度要求不大于 GB/T 18570.3 规定的 3 级。

6.2.8 表面处理后涂装时间的限定：涂料或锌、铝涂层宜在表面处理完成后 4h 内施工于准备涂装的表面；当所处环境的相对湿度不大于 60%时可以适当延时，但最长不应超过 12h。表面出现返锈现象应重新除锈。

6.3 涂料保护

6.3.1 涂料选择

6.3.1.1 大气区采用的面漆涂料应具有良好的耐候性。

6.3.1.2 浪溅区采用的涂料应具有良好的耐水性和抗冲刷性能。

6.3.1.3 全浸区采用的涂料应具有良好的耐水性和耐阴极剥离性能。

6.3.2 涂层配套

6.3.2.1 涂层配套推荐方案可按照表 2 选用。

表 2 涂层配套推荐方案

环境区域	配套涂层	涂料类型	涂层道数	干膜厚度 μm	涂层系统干膜厚度 μm
大气区	底层	有机富锌、无机富锌	1～2	≥60	≥320
	中间层	环氧类	2～3	≥160	
	面层	聚氨酯类、丙烯酸类、氟树脂类	1～2	≥100	
浪溅区	底层	有机富锌、无机富锌	1～2	≥60	≥560
	中间层和面层	环氧类	≥3	≥500	
全浸区	底层	有机富锌、无机富锌	1～2	≥60	≥460
	中间层和面层	环氧类	≥2	≥400	
内部区	底层	有机富锌、无机富锌	1～2	≥60	≥240
	中间层和面层	环氧类	2～3	≥180	

6.3.2.2 涂层（底层、中间层、面层）之间应具有良好的匹配性和层间附着力。后道涂层对前道涂层应无咬底现象，各道涂层之间应有相同或相近的热膨胀系数。

6.3.3 涂层体系性能

涂层体系性能应满足表 3 的要求。

表 3 涂层体系性能要求

腐蚀环境	耐盐水试验 h	耐湿热试验 h	耐盐雾试验 h	耐老化试验 h	附着力 MPa
内部区	—	—	1000	800	≥5[a]
大气区	—	4000	4000	4200	
浪溅区	4200	4000	4000	4200	
全浸区	4200	4000	—	—	

注 1：耐盐水性能涂层试验后不生锈、不起泡、不开裂、不剥落，允许轻微变色和失光。
注 2：人工加速老化性能涂层试验后不生锈、不起泡、不剥落、不开裂，允许轻度粉化和 3 级变色、3 级失光。
注 3：耐盐雾性涂层试验后不起泡、不剥落、不生锈、不开裂。

a 无机富锌涂层体系附着力大于等于 3MPa。

6.3.4 涂装要求

6.3.4.1 涂装环境

a） 相对湿度大于 85%及被涂基体表面温度低于露点 3℃时不得进行涂装作业。*如涂料技术要求另*

有规定，则按规定要求施工。露点计算参见附录 A；

b） 施工环境的温度和湿度应用温、湿度仪测量，每工班测量次数不得少于 3 次；

c） 涂装作业应保证周围环境的清洁，避免未表干的涂层被灰尘等污染。

6.3.4.2 涂料配制和使用时间

a） 涂料应充分搅拌均匀后方可施工，可采用电动或气动装置搅拌；对于双组分或多组分涂料应先将各组分分别搅拌均匀，再按比例配制后搅拌均匀；

b） 混合好的涂料按产品技术要求规定的时间熟化；

c） 涂料的使用时间按产品技术要求规定的适用期执行；

d） 工作环境温度应高于 5℃。

6.3.4.3 涂覆工艺

a） 大面积喷涂宜采用高压无气喷涂施工，细长、小面积以及复杂形状构件可采用空气喷涂或刷涂施工；

b） 涂装工艺安全及其通风净化应符合 GB 6514 的有关规定；在有限空间内进行涂装作业时的安全防护应符合 GB 12942 的规定。

6.3.4.4 涂覆间隔时间

每道涂层的间隔时间应符合材料供应商的技术要求。超过最大重涂间隔时间时需进行拉毛处理后涂装。

6.3.5 现场涂层质量

6.3.5.1 外观

涂层表面应平整、均匀一致，无漏涂、起泡、裂纹、针孔和返锈等现象，允许轻微橘皮和局部轻微流挂。

6.3.5.2 厚度

施工中应随时检查湿膜厚度。干膜厚度应同时满足以下要求：

a） 所有测点干膜厚度的平均值应不低于设计干膜厚度；

b） 所有测点的干膜厚度应不低于设计干膜厚度的 80%；

c） 80%以上测点的干膜厚度应达到设计干膜厚度的要求；

d） 如规定了最大干膜厚度，所有测点的干膜厚度应不大于规定的最大干膜厚度；如未规定最大干膜厚度，所有测点的干膜厚度不宜大于设计干膜厚度的 3 倍。

6.3.5.3 附着力

涂层附着力应满足设计文件的要求。

6.3.5.4 维修

运输、安装后，涂层破损处应采用原涂料、按原工艺进行修补。

6.4 热喷涂金属保护

6.4.1 热喷涂金属材料

6.4.1.1 热喷涂金属可选用锌、锌合金、铝和铝合金材料。

6.4.1.2 热喷涂金属材料应满足以下要求：

锌：符合 GB/T 12608 要求的 Zn 99.99，锌的含量大于或等于 99.99%；

锌合金：符合 GB/T 12608 要求的 ZnAl15，锌的含量为 84%～86%，铝的含量为 14%～16%；

铝：符合 GB/T 12608 要求的 Al 99.5，铝的含量大于或等于 99.5%；

铝合金：符合 GB/T 12608 要求的 AlMg5，镁的含量为 4.5%～5.5%。

6.4.1.3 喷涂用金属材料宜选用直径为 2.0mm 或 3.0mm 的线材，线材直径公差应满足 GB/T 12608 的要求。

6.4.1.4 热喷涂材料的力学性能、表面性能和可使用性应满足 GB/T 12608 的要求。

6.4.2 热喷涂涂层和涂层厚度

6.4.2.1 热喷涂涂层推荐最小局部厚度参见表 4。

表 4 热喷涂涂层最小局部厚度

环境区域	涂层类型	最小局部厚度 μm
海洋大气区	喷锌	200
	喷铝	160
	喷 AlMg5	160
	喷 ZnAl15	160
浪溅区、水下区	喷锌	300
	喷铝	200
	喷 AlMg5	200
	喷 ZnAl15	300

6.4.2.2 热喷涂涂层表面宜进行封闭处理并涂装涂料。封闭剂和涂装涂料应与热喷涂涂层相容。

6.4.2.3 热喷涂涂层表面宜采用人工封闭的方法对热喷涂层进行封闭处理，若采用自然封闭，腐蚀所生成的氧化物、氢氧化物和（或）碱性盐在金属涂层的暴露环境中应不会溶解。

6.4.2.4 封闭剂宜使用黏度小、易渗透、成膜物中固体含量高，能够使热喷涂涂层表面发生磷化的活性涂料或其他合适的涂料。

6.4.2.5 热喷涂涂层表面的涂装涂料可按表 2 选择中间层和面层涂料。涂料涂层的厚度宜为 240μm～320μm。

6.4.3 施工要求

6.4.3.1 热喷涂工作环境温度应高于 5℃或基体表面温度至少高于露点 3℃。露点计算参见附录 A。施工环境的温度和湿度应用温、湿度仪测量，每工班测量次数不得少于 3 次。

6.4.3.2 热喷涂涂层厚度应均匀，两层或两层以上涂层应采用相互垂直、交叉的方法施工覆盖，单层厚度不宜超过 100μm。

6.4.3.3 热喷涂锌及锌合金可采用火焰喷涂或电弧喷涂，热喷涂铝及铝合金宜采用电弧喷涂。

6.4.3.4 热喷涂金属后应及时进行封闭或涂装，最长不宜超过 4h。

6.4.3.5 热喷涂操作人员应按 GB/T 19824 的规定进行考核，热喷涂的操作安全应满足 GB 11375 的要求。

6.4.3.6 热喷涂涂层表面涂料涂装的施工要求见 6.3.4。

6.4.3.7 运输、安装后，涂层破损处应按原工艺修补。条件不具备时，热喷涂锌和锌合金涂层可用富锌底漆修补，热喷涂铝和铝合金涂层可用铝粉底漆修补。涂料涂层采用同样涂料修补。

6.4.4 涂层质量

6.4.4.1 外观

热喷涂涂层表面应均匀一致，无气孔或基体裸露的斑点，没有附着不牢的金属熔融颗粒和影响涂层使用寿命的缺陷。

6.4.4.2 厚度

热喷涂涂层厚度应满足设计文件提出的最小局部厚度要求。

完成涂料涂装后应进行涂层（热喷涂涂层＋涂料涂层）总厚度检测，应满足设计文件要求。

6.4.4.3 结合强度

热喷涂涂层结合强度应满足设计文件要求。

6.5 阴极保护

6.5.1 一般要求

6.5.1.1 阴极保护分为强制电流法和牺牲阳极法。推荐采用牺牲阳极法。

6.5.1.2 阴极保护系统的设计使用年限可根据钢结构的使用年限或维修周期确定。

6.5.1.3 每个独立被保护构件应至少设置一个阴极测量点，宜处于方便到达和易于测量阴极保护电位的位置。测量点应采用耐海水不锈钢或紫铜棒制作。

6.5.1.4 使用强制电流阴极保护时，应尽量减少施工期内钢结构的腐蚀。可使用临时电源对强制电流系统尽早供电或使用短期的牺牲阳极系统。

6.5.1.5 强制电流阴极保护宜与涂料保护联合使用。牺牲阳极阴极保护可单独使用，也可与涂料联合使用。

6.5.1.6 阴极保护可能会导致高应力高强钢的氢脆开裂。高强结构钢构件采取阴极保护时，宜使用涂料或热喷涂金属联合保护以降低氢脆风险。

6.5.1.7 密封的内部区采用阴极保护时，应避免产生大量的危险气体。

6.5.1.8 应防止阴极保护系统引起的涂料涂层的阴极剥离。

6.5.1.9 采用阴极保护的钢结构必须确保每一个设计单元或整体具有良好的电连续性。保证电连续性可采用直接焊接、焊接钢筋或电缆连接，连接点面积应大于电连接用钢筋或电缆芯的截面面积，连接电阻不应大于 0.01Ω。

6.5.1.10 采用阴极保护的钢结构应与水中其他金属结构物电绝缘，无法电绝缘时应考虑其他金属结构对阴极保护系统的影响，同时应避免阴极保护对邻近结构物的干扰。

6.5.2 阴极保护参数

6.5.2.1 阴极保护电流密度

阴极保护设计时应确定钢结构初期极化需要的保护电流密度、维持极化需要的平均保护电流密度和末期极化需要的保护电流密度。保护电流密度可通过有关经验数据或试验确定，无法确定时，可参照附录 B 选取和计算。

6.5.2.2 阴极保护电位

阴极保护电位应符合表 5 的规定。

表5 阴极保护电位

环境、材质			保护电位相对于 Ag/AgCl/海水电极 V	
			最正值	最负值
碳钢和低合金钢	含氧环境		-0.80	-1.10
	缺氧环境（有硫酸盐还原菌腐蚀）		-0.90	-1.10
不锈钢	奥氏体	耐孔蚀指数≥40	-0.30	不限
		耐孔蚀指数<40	-0.60	不限
	双相钢		-0.60	避免电位过负
高强钢（σ_s≥700MPa）			-0.80	-0.95
注：强制电流阴极保护系统辅助阳极附近的阴极保护电位可以更负一些。				

6.5.3 牺牲阳极系统

6.5.3.1 牺牲阳极材料

a） 常用牺牲阳极材料有铝基、锌基和镁基合金。铝合金适用于海水和淡海水环境，锌合金适用于海水、淡海水和海泥环境，镁合金适用于电阻率较高的淡水和淡海水环境；

b） 铝合金、锌合金、镁合金性能应分别符合 GB/T 4948、GB/T 4950、GB/T 17731 的要求。

6.5.3.2 牺牲阳极计算

牺牲阳极设计计算方法参见附录 C。

6.5.3.3 牺牲阳极布置

牺牲阳极的布置应使被保护钢结构的表面电位分布均匀，安装位置应满足下列要求。

a） 牺牲阳极不应安装在钢结构的高应力和高疲劳区域；

b） 牺牲阳极的顶高程应至少在最低水位以下 1.0m，底高程应至少高于泥面以上 1.0m。

6.5.3.4 牺牲阳极施工

a） 牺牲阳极应通过铁芯与钢结构短路连接，铁芯结构应能保证在整个使用期与阳极体的电连接，并能承受自重和环境所施加的荷载；

b） 连接方式宜采用焊接，也可采用电缆连接和机械连接；采用机械连接时，应确保牺牲阳极在使用期内与被保护钢结构之间的连接电阻不大于 0.01Ω；

c） 采用焊接法连接时，焊接应牢固，焊缝饱满、无虚焊；牺牲阳极采用水下焊接施工时应由取得合格证书的水下电焊工进行；

d） 当牺牲阳极紧贴钢表面安装时，阳极背面或钢表面应涂覆涂层或安装绝缘屏蔽层；

e） 牺牲阳极的工作表面不得沾有油漆和油污。

6.5.4 强制电流系统

6.5.4.1 供电电源

a） 供电电源应能满足长期不间断供电要求，供电不可靠时应配备备用电源或不间断供电设备；

b） 电源设备应具有可靠性高、维护简便，输出电流和电压连续可调，并具有抗过载、防雷、抗干扰和故障保护等功能；

c） 电源设备应置于通风良好、清洁的环境中，安装在户外时，应设置防尘、防水、防腐蚀的保护罩；

d） 电源设备可选用整流器或恒电位仪；当输出电流变化较大时宜选用恒电位仪；

e） 电源设备功率计算方法参见附录 C。

6.5.4.2 辅助阳极

a） 辅助阳极材料可参照 GB/T 7388 选用，也可选用通过技术鉴定的新型辅助阳极；

b） 辅助阳极的规格应根据钢结构的结构形式以及辅助阳极允许的工作电流密度、输出电流和设计使用年限等进行设计；

c） 辅助阳极计算方法参见附录 C；

d） 辅助阳极应安装牢固，不得与被保护钢结构之间产生短路。

6.5.4.3 参比电极

a） 阴极保护用参比电极应具有极化小、稳定性好、不易损坏、使用寿命长和适用环境介质等特性。参比电极的技术条件应符合 GB/T 7387 的规定；

b） 采用恒电位控制时，每台电源设备应至少安装一个控制用参比电极；采用恒电流控制时，每台电源设备应至少安装一个测量用参比电极；

c） 参比电极应安装在钢结构表面距辅助阳极较近和较远的位置。

6.5.4.4 电缆

a） 所有电缆应适合使用环境，并应采取相应的保护措施以满足长期使用的要求；

b） 辅助阳极电缆和阴极电缆宜采用铜芯电缆，控制用参比电极的电缆应采用屏蔽电缆；

c） 电缆截面积根据电缆的允许压降和机械强度等因素确定；

d） 辅助阳极、参比电极和电缆的接头以及钢结构和电缆的接头应进行密封防水处理，电缆间的接头应进行密封防水处理并不宜处于水中；

e） 阴极电缆和测量电缆不得共用。

6.5.4.5 阳极屏蔽层

为改善钢结构的电位分布可设置阳极屏蔽层，阳极屏蔽层性能应满足 GB/T 7788 的要求。

6.5.4.6 监控设备

a） 监控设备应能适应所处的环境。采用户外布置时，其保护性外壳应能抵御海水飞溅、盐雾、雨水、紫外线和海洋腐蚀介质的侵蚀，测量导线和仪器的连接点应绝缘密封。

b） 监控设备应具有测量并显示钢结构保护电位、电源设备的输出电流和输出电压等基本功能，有条件时，应采用具有远距离遥测、遥控和分析评估功能。

c） 监控设备应设有手动检测接线端子和备用参比电极接线端子。

7 检测与验收

7.1 表面处理

7.1.1 表面可溶性氯化物按 GB/T 18570.6 和 GB/T 18570.9 的规定进行抽样检测。

7.1.2 处理等级按 GB 8923 的规定进行，对所有表面进行检查。

7.1.3 粗糙度按 GB/T 13288 或 GB/T 10610 的规定进行，每 $10m^2$ 表面积检测一点，小于 $10m^2$ 的构件单独检测一点。

7.1.4 表面灰尘按 GB/T 18570.3 进行抽样检测。

7.2 涂料保护

7.2.1 实验室涂层体系性能检测

7.2.1.1 耐盐水性能试验按 GB/T 9274 的规定进行。

7.2.1.2 耐湿热性能试验按 GB/T 1740 的规定进行。

7.2.1.3 耐盐雾性能试验按 GB/T 1771 的规定进行。

7.2.1.4 耐老化性能试验按 GB/T 1865 的规定进行。

7.2.1.5 附着力试验按 GB/T 5210 的规定进行。

7.2.2 现场检测

7.2.2.1 对每道涂层的所有表面需目视检查涂层的外观。

7.2.2.2 涂层干膜厚度：

a） 连续涂装的表面作为一个检测区域；

b） 检测区域内的测点数量应满足表 6 的要求，在难以施工的区域应适当增加测点数量，测点位置应均匀分布在整个检测区域内；

c） 如果某测点的干膜厚度不满足 6.3.5.2 第 2 条和第 4 条的要求，在距该测点 10mm 以内的地方重复测量一次，用第二次测量结果作为该测点的干膜厚度；

d） 检测区域内允许的重复测量次数应满足表 6 的要求。

表 6 检测区域内的测点数量和重复测量次数要求

检测区域面积/长度 m^2/m	最少测点数量 个	检测区域内允许 重复测量的最大次数 次
≤1	5	1
1～3	10	2
3～10	15	3
10～30	20	4
30～100	30	6
>100	每增加 $100m^2$ 或 100m 或一个构件，增加 10 个测点	最少测点数量的 20%

7.2.2.3 涂层附着力

a） 如有需要可进行涂层附着力测量，按 ISO 16276—1 的规定进行；

b） 附着力可在结构物上测量，也可在同条件下制作的试件上测量，需经各方协商同意；

c） 在结构物上测量时，检测区域内有效测点数量应满足表 7 的要求；测点位置应具有代表性；

d） 测量试件的尺寸至少为 100mm×100mm×10mm；试件数量应满足表 7 规定的测点数量要求；

e） 附着力测量是破坏性的，在结构物上测量时，应对测量处进行涂层修复。

表 7 检测区域内有效测点数量

检测区域面积 m^2	最少有效测点数量 个
≤1000	每 250m^2 3 个
>1000	12 个，每增加 1000m^2 增加 1 个测点

7.3 热喷涂金属保护

7.3.1 热喷涂材料性能

为了评价一种热喷涂材料，可在供应商和用户间安排一次喷涂性能试验。

7.3.2 热喷涂涂层外观

对所有热喷涂涂层表面需进行目视外观检查，满足 6.4.4.1 要求。

7.3.3 热喷涂涂层厚度

7.3.3.1 涂层厚度宜采用磁性法测量。必要时可采用横截面显微镜法。磁性法按 GB/T 4956 的规定进行，横截面显微镜法按 GB/T 6462 的规定进行。

7.3.3.2 涂层有效面积在 1m^2 以上时，应在一个面积为 10cm^2 的基准面上测量 10 次，取其算术平均值为该基准面的局部厚度，测点分布见图 1；角钢、槽钢等杆形构件涂层有效面积在 1cm^2～1m^2 时，应在一个面积为 1cm^2 的基准面上测量 3 次，取其算术平均值为该基准面的局部厚度。

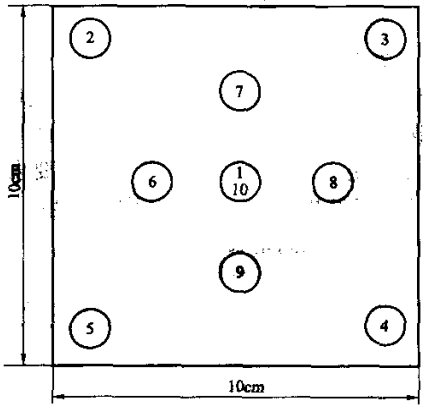

图 1 在 10cm^2 基准面内测量点的分布

7.3.3.3 为了确定热喷涂涂层的最小局部厚度，应在涂层厚度可能最薄的部位进行测量。

7.3.3.4 基准面数量的确定应使基准表面的总面积不小于有效表面面积的 5%，基准表面应均匀分布在整个有效表面上。

7.3.4 热喷涂涂层结合强度

热喷涂涂层结合强度可按照附录 D 进行定性检测，也可按照 ISO 16276—1 进行定量检测。

7.4 阴极保护

7.4.1 电连接

对阴极保护所有电连接点进行外观目视检查，抽样检测电连接电阻。

7.4.2 阴极保护电位

对每一个单元构件的阴极保护电位进行检测，检测点的分布应具有代表性。

7.4.3 牺牲阳极系统

7.4.3.1 牺牲阳极性能

a) 铝合金、锌合金和镁合金牺牲阳极的化学成分可分别按 GB/T 4949、GB/T 4951 和 GB/T 13748 的规定进行；

b) 锌合金、铝合金和镁合金牺牲阳极的电化学性能按 GB/T 17848 的规定进行；

c) 牺牲阳极的接触电阻按 GB/T 4948 或 GB/T 4950 的规定进行；

d) 铝合金、锌合金和镁合金牺牲阳极的表面质量、外形尺寸和重量分别按 GB/T 4948、GB/T 4950 和 GB/T 17731 的规定进行。

7.4.3.2 牺牲阳极施工

a) 牺牲阳极在水上施工时，应对所有牺牲阳极的施工质量进行目视检查；

b) 采用水下焊接法安装牺牲阳极时，应采用水下摄像或水下照相的方法检查焊缝长度、高度及连续性，检查数量应为总数的 5%～10%，且不少于 3 块。

7.4.4 强制电流系统

7.4.4.1 仪器设备的规格型号应采用目视检查，电源设备应逐件进行通电检查，监控仪器应采用经计量认证的仪表和校核过的参比电极进行逐件检查。

7.4.4.2 电缆的敷设线路和固定方式、参比电极的安装位置和固定方式采用目视方法进行检验。

7.4.4.3 所有电缆的规格应进行目视检查。

7.4.4.4 辅助阳极按照 GB/T 7388 选用时，按照其规定对辅助阳极进行检验。

附 录 A
（资料性附录）
露 点 计 算

A.1 露点计算公式

在不同空气温度 t 和相对湿度 φ 下的露点值 t_d 按式（A.1）计算（当 $t \geq 0$℃时有效）。

$$t_d = 234.175 \times \frac{(234.175+t)(\ln 0.01+\ln\varphi)+17.080\,85t}{234.175\times 17.080\,85-(234.175+t)(\ln 0.01+\ln\varphi)} \quad (A.1)$$

A.2 露点计算表

表 A.1 给出了部分空气温度 t 和相对湿度 φ 下的露点计算值。

表 A.1 露 点 计 算 表

相对湿度 %	空气温度 ℃									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
95	−0.7	4.3	9.2	14.2	19.2	24.1	29.1	34.1	39.0	44.0
90	−1.4	3.5	8.4	13.4	18.3	23.2	28.2	33.1	38.0	43.0
85	−2.2	2.7	7.6	12.5	17.4	22.3	27.2	32.1	37.0	41.9
80	−3.0	1.9	6.7	11.6	16.4	21.3	26.2	31.0	35.9	40.7
75	−3.9	1.0	5.8	10.6	15.4	20.3	25.1	29.9	34.7	39.5
70	−4.8	0.0	4.8	9.6	14.4	19.1	23.9	28.7	33.5	38.2
65	−5.8	−1.0	3.7	8.5	13.2	18.0	22.7	27.4	32.1	36.9
60	−6.8	−2.1	2.6	7.3	12.0	16.7	21.4	26.1	30.7	35.4
55	−7.9	−3.3	1.4	6.1	10.7	15.3	20.0	24.6	29.2	33.8
50	−9.1	−4.5	0.1	4.7	9.3	13.9	18.4	23.0	27.6	32.1
45	−10.5	−5.9	−1.3	3.2	7.7	12.3	16.8	21.3	25.8	30.3
40	−11.9	−7.4	−2.9	1.5	6.0	10.5	14.9	19.4	23.8	28.2
35	−13.6	−9.1	−4.7	−0.3	4.1	8.5	12.9	17.2	21.6	25.9
30	−15.4	−11.1	−6.7	−2.4	1.9	6.5	10.5	14.8	19.1	23.4

附 录 B
（资料性附录）
无涂层钢常用保护电流密度值和有涂层钢保护电流密度计算

B.1 无涂层钢常用保护电流密度值

无涂层钢常用保护电流密度值见表 B.1。

表 B.1 无涂层钢常用保护电流密度参考值

环 境 介 质	保护电流密度 mA/m^2		
	初期值	维持值	末期值
海水	150～180	60～80	80～100
海泥	25	20	20
海水混凝土或水泥砂浆包覆	10～25		

B.2 有涂层钢保护电流密度

有涂层钢保护电流密度可按式（B.1）计算。

$$i_c = i_b f_c \qquad (B.1)$$

式中：

i_c ——有涂层钢的保护电流密度，mA/m^2；

i_b ——无涂层钢的保护电流密度，mA/m^2；

f_c ——涂层的破损系数，$0 < f_c \leqslant 1$。

常规涂料初期涂层破损系数为：水中 1%～2%，泥中 25%～50%。涂层破损速率为每年增加 1%～3%。

附 录 C
（资料性附录）
阴极保护设计计算公式

C.1 牺牲阳极设计计算

C.1.1 牺牲阳极输出电流可按式（C.1）计算。

$$I_a=\frac{\Delta U}{R} \tag{C.1}$$

式中：

I_a ——牺牲阳极的输出电流，A；

ΔU ——牺牲阳极的驱动电压，V；

R ——回路总电阻，Ω。一般情况下其值近似等于牺牲阳极的接水电阻，可按附录 C.3 计算。

C.1.2 牺牲阳极数量可按式（C.2）计算。

$$N=\frac{I}{I_a} \tag{C.2}$$

式中：

N ——牺牲阳极的数量；

I ——金属结构的保护电流，A；

I_a ——单只牺牲阳极的输出电流，A。

C.1.3 牺牲阳极总的净质量可按式（C.3）计算。

$$m=\frac{8760I_m t}{q}K \tag{C.3}$$

式中：

m ——牺牲阳极总的净质量，kg；

I_m ——金属结构的平均保护电流，A；

t ——牺牲阳极的设计使用年限，a；

q ——牺牲阳极的实际电容量，（A·h）/kg；

K ——安全系数，一般取 1.1～1.2。

C.1.4 牺牲阳极寿命可按式（C.4）计算。

$$t=\frac{m_i f}{E_g I'_a} \tag{C.4}$$

式中：

t ——牺牲阳极的寿命，a；

m_i ——单只牺牲阳极的净质量，kg；

E_g ——牺牲阳极的消耗率，kg/（A·a）；

I'_a ——牺牲阳极在使用年限内的平均输出电流，A；

f ——牺牲阳极的利用系数，可采用下列数值：

长条状牺牲阳极：0.90～0.95；

手镯式牺牲阳极：0.75～0.80；

其他形状的牺牲阳极：0.75～0.90。

C.2 强制电流设计计算

C.2.1 电源设备功率可按式（C.5）计算。电源设备的输出电压可按式（C.6）计算。

$$P=\frac{IU}{\eta} \tag{C.5}$$

$$U=I(R_a+R_L+R_C) \tag{C.6}$$

式中：

P ——电源设备的输出功率，W；

I ——电源设备的输出电流，A；

U ——电源设备的输出电压，V；

η ——电源设备的效率，一般取 0.7；

R_a ——辅助阳极的接水电阻，Ω，可按附录 C.3 计算；

R_L ——导线电阻，Ω；

R_C ——阴极过渡电阻，Ω。

C.2.2 辅助阳极数量可按式（C.7）计算。

$$N=\frac{I}{I_a} \tag{C.7}$$

式中：

N ——辅助阳极的数量；

I ——金属结构的保护电流，A；

I_a ——单只辅助阳极的输出电流，A。

C.2.3 辅助阳极总的净质量可按式（C.8）计算。

$$m=KEI_m t \tag{C.8}$$

式中：

m ——辅助阳极总的净质量，kg；

K ——安全系数，一般取 1.1～1.5；

E ——辅助阳极的消耗率，kg/（A·a）；

I_m ——金属结构的平均保护电流，A；

t ——辅助阳极的使用年限，a。

C.3 阳极接水电阻

C.3.1 长条阳极

若 $L \geqslant 4r$，长条阳极接水电阻可按式（C.9）计算。

$$R_a=\frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right)-1\right] \tag{C.9}$$

若 $L<4r$，长条阳极接水电阻可按式（C.10）计算。

$$R_a=\frac{\rho}{2\pi L}\left\{\ln\left[\frac{2L}{r}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right)\right]+\frac{r}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right\} \tag{C.10}$$

式中：

R_a ——阳极接水电阻，Ω；

ρ ——介质电阻率，Ω·cm；

L——阳极长度，cm；

r——阳极等效半径，cm，对非圆柱状阳极，$r=\frac{c}{2\pi}$，c 为阳极截面周长，cm。

C.3.2 板状阳极接水电阻可按式（C.11）计算。

$$R_a=\frac{\rho}{2S} \tag{C.11}$$

式中：

R_a、ρ——同 C.3.1；

S——阳极长度和宽度的算术平均值，cm。

C.3.3 其他形状阳极接水电阻可按式（C.12）计算。

$$R_a=0.315\times\frac{\rho}{\sqrt{A}} \tag{C.12}$$

式中：

R_a、ρ——同 C.3.1；

A——阳极的暴露面积，cm^2。

C.4 阳极屏蔽层

C.4.1 圆形阳极屏蔽层的直径可按式（C.13）计算。

$$D=I_a\rho/[\pi(E_0-E)] \tag{C.13}$$

式中：

D——阳极屏蔽层的直径，m；

I_a——阳极的输出电流，A；

ρ——介质电阻率，Ω·m；

E_0——结构物的保护电位，V；

E——距阳极中心为 $D/2$ 处的结构物的电位，V，它取决于涂层的耐阴极电位值。

C.4.2 长条阳极屏蔽层边缘距长度为 L 的阳极边缘的最短距离可按式（C.14）计算。

$$D_e=2L/\exp[1+\pi L(E_0-E)/(\rho I_a)] \tag{C.14}$$

式中：

D_e——阳极屏蔽层边缘距长度为 L 的阳极边缘的最短距离，m；

L——阳极长度，m；

E_0——结构物的保护电位，V；

E——距阳极边缘为 D_e 处的结构物的电位，V，它取决于涂层的耐阴极电位值；

I_a、ρ——同 C.4.1。

附 录 D
（资料性附录）
热喷涂涂层结合强度检测方法

D.1 原理

将涂层切断至基体，使之形成具有给定尺寸的方形格子，涂层不应产生剥离。

D.2 装置

具有硬质刃口的切割工具，其形状如图 D.1 所示。

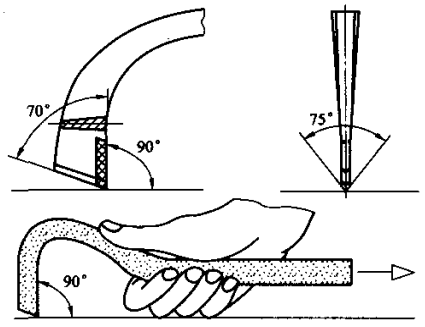

图 D.1 切割工具

D.3 操作

使用图 D.1 规定的刀具，切出表 D.1 中规定的格子尺寸。

切痕深度，要求应将涂层切断至基体金属。

切割成格子后，采用供需双方协商认可的一种合适粘胶带，借助于一个辊子施以 5N 的载荷将粘胶带压紧在这部分涂层上，然后沿垂直涂层表面方向快速将粘胶带拉开。

如不能使用此法，则测量涂层结合强度的方法应取得供需双方同意。

表 D.1 格 子 尺 寸

覆盖格子的近似表面 mm×mm	涂层厚度 μm	划痕之间的距离 mm
15×15	≤200	3
25×25	>200	5

D.4 检测结果

无涂层从基体上剥离或每个方格子的一部分涂层仍然粘附在基体上，并损坏发生在涂层的层间而不是发生在涂层与基体界面处，则认为合格。

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
海上风电场钢结构防腐蚀技术标准
NB / T 31006 — 2011
*
中国电力出版社出版、发行
（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn）
北京博图彩色印刷有限公司印刷
*
2011 年 10 月第一版 2011 年 10 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 1.5 印张 39 千字
印数 0001—3000 册
*
统一书号 155123・714 定价 **13.00** 元

敬 告 读 者
本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换
版 权 专 有 翻 印 必 究

155123.714
上架建议：规程规范/
电力工程/新能源发电