ICS 47.020.01
A 29

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 16166—2013
代替 GB/T 16166—1996

# 滨海电厂海水冷却水系统牺牲阳极阴极保护

**Sacrificial anode cathodic protection for seawater cooling system in coastal power station**

2013-11-27 发布　　2014-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会　发布

# 前　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 16166—1996《滨海电厂海水冷却水系统牺牲阳极阴极保护》，与 GB/T 16166—1996 相比主要技术变化如下：

——增加了不锈钢结构物的保护方法（见 4.1.6）；增加了铁阳极的规格尺寸（见表 1）；增加了不锈钢、铜及铜合金相对于不同参比电极的电位范围（见表 3）；

——修改了阳极的驱动电压（见 4.3，1996 年版的 4.3）；修改了保护电位（见第 3 章，1996 年版的第 3 章）；修改了试片称重的称量精度（见 7.2，1996 年版的 7.2）；修改了牺牲阳极更换的条件（见 7.4，1996 年版的 7.4）；修改了阳极安装的技术要求（见 6.3，1996 年版的 6.3）；

——删除了冷却器的保护电流密度（见表 2，1996 年版的表 2）；

——修改了滨海电厂埋地管网阴极保护，作为规范性附录（见附录 A，1996 年版的附录 A）。

本标准由中国船舶重工集团公司提出。

本标准由全国海洋船标准化技术委员会船用材料应用工艺分技术委员会（SAC/TC 12/SC 4）归口。

本标准起草单位：中国船舶重工集团公司第七二五研究所、青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司、中国核电工程有限公司、华东电力设计院、华北电力设计院、沈阳电力机械总厂。

本标准主要起草人：王廷勇、尹萍、汪相辰、常娥、陈凯、许立坤、李贵年、王明韧、李海珠、符滨、曾小超、任军兵。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 16166—1996。

# 滨海电厂海水冷却水系统牺牲阳极阴极保护

## 1 范围

本标准规定了滨海电厂海水冷却水系统在海水和土壤环境中牺牲阳极阴极保护的设计准则、安装、验收、保护效果检测及更换等。

本标准适用于滨海电厂海水冷却水系统牺牲阳极阴极保护。对滨海其他化工厂、河口电厂和高电导率地下水地区的内陆电厂冷却水系统牺牲阳极阴极保护亦可参照使用。

## 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 4948 铝-锌-铟系合金牺牲阳极

GB/T 4950 锌-铝-镉合金牺牲阳极

GB/T 17731 镁合金牺牲阳极

DL/T 5394 电力工程地下金属构筑物防腐技术导则

SY/T 0029 埋地钢质检查片腐蚀速率测试方法

## 3 保护电位准则

3.1 碳钢、不锈钢、铸铁、铜合金等组成的设备、部件和管道，保护电位范围应达到－0.85 V～－1.10 V(相对于铜/饱和硫酸铜参比电极，下同)。

3.2 钛与钢、铸铁、铜合金等组成的设备，钛表面保护电位不应负于－0.80 V。

3.3 不锈钢制成的设备、部件和管道，保护电位范围应达到－0.35 V～－1.10 V。

3.4 铜及铜合金制成的设备、部件和管道，保护电位范围应达到－0.50 V～－0.65 V。

## 4 牺牲阳极阴极保护设计

### 4.1 牺牲阳极材料的选择

4.1.1 阳极应选用符合 GB/T 4948、GB/T 4950、GB/T 17731 等有关规定的材料，或电化学性能优于上述标准规定并通过鉴定的材料。

4.1.2 电阻率为小于 100 Ω·cm 的海水和淡海水介质中，应采用铝合金牺牲阳极。

4.1.3 电阻率为 100 Ω·cm～200 Ω·cm 的淡海水介质中，应采用锌合金牺牲阳极或适宜的铝合金牺牲阳极。

4.1.4 电阻率大于 200 Ω·cm 的冷却水中，应采用镁合金牺牲阳极或适宜的铝合金牺牲阳极。

4.1.5 海水冷凝设备的保护应选用适合高温介质中使用的铝合金牺牲阳极。

4.1.6 在海水中单独使用的不锈钢、钛合金、铜合金及其混合结构物，宜采用铁阳极。

### 4.2 牺牲阳极规格的确定

阳极的规格应根据设备、部件、管道的结构、检修间隔的时间、需要保护的年限来确定。推荐的铁阳极、铝合金牺牲阳极规格见表1。

**表1 不同设备的阳极选型和布置原则**

| 设备名称 | 阳极种类 | 常用阳极规格/ mm×mm×mm | 阳极布置原则 | 阳极使用寿命[a]/ a |
|---|---|---|---|---|
| 取水头及引水钢管 | 铝合金阳极 | (200+280)×150×800 | 栅条支撑梁后架及钢管内壁 | 15～20 |
| | 铝合金阳极 | (200+280)×150×1 200 | | 25～30 |
| 粗格栅 | 铝合金阳极 | (115+135)×130×500 | 低潮位以下的导轨两侧和栅条上均匀分布 | 6～8 |
| | 铁阳极 | 85×(80+100)×500 | | 4～5 |
| 细格栅 | 铝合金阳极 | (115+135)×130×500 | 导轨和栅条的背面 | 6～8 |
| | 铁阳极 | 85×(80+100)×500 | | 4～5 |
| 旋转滤网 | 铝合金阳极 | 80×100×1 000 | 平均低潮位以下的导轨和框架 | 6～8 |
| | 铁阳极 | 85×(80+100)×500 | | 4～5 |
| 二次滤网 | 铝合金阳极 | (115+135)×130×500 | 沿钢管内壁圆周方向均布 | |
| 凝汽器 | 铝合金阳极 | 500×120×40 | 水室均匀分布，钛合金管的凝汽器底、侧、顶板上的阳极安装在距管板大于600 mm处，铜合金管的凝汽器底、侧、顶板上的阳极安装在距管板小于400 mm处 | |
| | 铁阳极 | 85×(80+100)×500 | | |
| 收球网 | 铝合金阳极 | (115+135)×130×500 | 要装在不影响栅网启、闭的筒体上，维修时更换阳极也可装在紧接设备两端母管上 | |
| 管道 | 铝合金阳极 | (115+135)×130×1 000<br>(115+135)×130×500 | 管道内壁均匀布置，阀门处加装一块，人孔处加装一块 | 10～12 |
| | 铝合金阳极 | (200+280)×150×800<br>(200+280)×150×1 200 | | 15～20 |

[a] 是介质电阻率为25 Ω·cm～35 Ω·cm范围内的阳极使用寿命。

### 4.3 牺牲阳极发生电流量计算

阳极发生电流量按公式(1)计算：

$$I_f = \Delta E / R \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$I_f$ ——每支阳极发生的电流的数值，单位为安培(A)；

$\Delta E$——阳极驱动电位的数值，单位为伏特(V)；锌合金阳极取 $\Delta E$=0.20 V，铝合金阳极取 $\Delta E$=0.25 V，镁合金阳极取 $\Delta E$=0.65 V，铁阳极取 $\Delta E$=0.25 V；

$R$ ——阳极接水电阻的数值，单位为欧姆(Ω)。阳极接水电阻根据阳极安装方式，平贴阳极按公式(2)计算，支架阳极按公式(3)计算：

$$R=\frac{\rho}{L+B+2H} \qquad \cdots\cdots(2)$$

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left(\ln\frac{4L}{r}-1\right) \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中：

$\rho$ ——海水介质电阻率的数值，单位为欧姆厘米(Ω·cm)；

$L$ ——阳极长度的数值，单位为厘米(cm)；

$B$ ——阳极宽度的数值，单位为厘米(cm)；

$H$——阳极高度的数值，单位为厘米(cm)；

$r$ ——阳极截面当量半径的数值，单位为厘米(cm)；按公式(4)计算：

$$r=C/2\pi \qquad \cdots\cdots(4)$$

式中：

$C$——阳极截面周长的数值，单位为厘米(cm)。

### 4.4 牺牲阳极使用寿命核算

牺牲阳极的使用寿命应符合表1的要求。阳极使用寿命应能达到设备检修间隔时间的整数倍，可按公式(5)计算：

$$Y=\frac{Q\cdot G}{8\,760\,I_m}\times\frac{1}{K} \qquad \cdots\cdots(5)$$

式中：

$Y$ ——阳极设计寿命的数值，单位为年(a)；

$Q$ ——阳极实际电容量的数值，单位为安培小时每千克(A·h/kg)；锌合金阳极取 $Q=780$ A·h/kg，铝合金阳极取 $Q\geqslant 2\,400$ A·h/kg，镁合金阳极取 $Q=1\,100$ A·h/kg，铁阳极取 $Q\geqslant 900$ A·h/kg；

$G$ ——每支阳极净重的数值，单位为千克(kg)；

$I_m$ ——每支阳极平均发生电流的数值，单位为安培(A)；按公式(6)计算：

$$I_m=(0.6\sim 0.8)I_f \qquad \cdots\cdots(6)$$

$1/K$——阳极利用系数，取值0.85。

### 4.5 保护面积计算

4.5.1 根据几何尺寸分别计算不同材质、不同表面状态的被保护设备、部件、管道的浸水面积。

4.5.2 凝汽器等管束式冷却设备的管束保护内表面积按公式(7)计算。

$$S=12n\pi D^2 \qquad \cdots\cdots(7)$$

式中：

$S$ ——管束保护内表面积的数值，单位为平方米($m^2$)；

$n$ ——每个水室中管束的根数；

$D$——冷凝管的内径数值，单位为米(m)。

### 4.6 保护电流密度的选取

保护电流密度按表2选取。

表 2　不同设备、部件、管道的保护电流密度　　单位为毫安每平方米

| 设备名称 | 材质表面状态 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 钢、铸铁 | | 铜合金 | 钛合金 | 不锈钢 | | 钢筋混凝土内钢筋 |
| | 涂漆 | 裸露 | | | 涂漆 | 裸露 | |
| 取水头部及引水钢管 | 40～50 | 80～100 | — | — | — | — | — |
| 粗格栅及细格栅 | | | — | — | — | 150～200 | 2～5 |
| 旋转滤网 | | | — | — | 70～80 | | |
| 二次滤网 | 20～30 | — | — | — | — | | — |
| 凝汽器 | 10～30 | — | 150～200 | 50～60 | — | — | — |
| 收球网 | | — | — | — | — | 150～200 | — |
| 管道 | 25～35 | — | — | — | — | — | — |

### 4.7　保护电流的计算

被保护设备、部件、管道所需要的保护电流按公式(8)计算：

$$I=\frac{\sum i_n \cdot S_n}{1\ 000} \qquad \cdots\cdots(8)$$

式中：

$I$ ——保护电流的数值，单位为安培(A)；

$i_n$ ——被保护设备、部件、管道内各种材质及不同表面状态下的保护电流密度的数值，单位为毫安每平方米($mA/m^2$)；

$S_n$ ——被保护设备、部件、管道内各种材质及不同表面状态浸水面积的数值，单位为平方米($m^2$)。

### 4.8　牺牲阳极数量计算

被保护设备、部件、管道所需用的阳极数量按公式(9)计算：

$$N=I/I_f \qquad \cdots\cdots(9)$$

式中：

$N$ ——阳极数量。

### 4.9　牺牲阳极布置

4.9.1　阳极采用均匀、对称布置，阳极安装位置应考虑到电流屏蔽作用。

4.9.2　有关设备、部件、管道用阳极布置见表 1。

## 5　埋地管网外壁的牺牲阳极阴极保护设计

埋地管网外壁的牺牲阳极阴极保护设计按附录 A 规定。

## 6　牺牲阳极验收、存放及安装

### 6.1　验收

阳极质量应按有关标准、订货合同要求验收。

### 6.2 存放

阳极应存放在库房内，防潮，防水，不应接触酸、碱和盐，工作表面不应沾有油污和油漆。

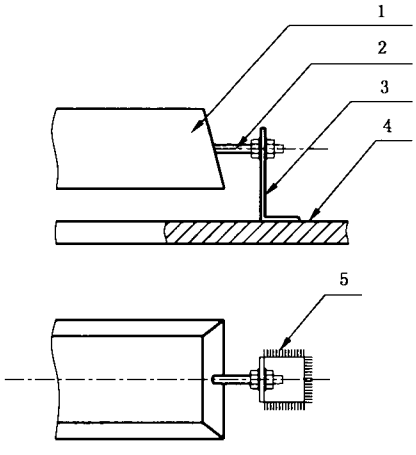
### 6.3 安装

6.3.1 按阳极布置图安装阳极，焊接应牢固，螺栓应拧紧，确保电性连接良好。安装方式见图1、图2和图3。

6.3.2 对于平贴安装的阳极，安装前阳极的背面应涂刷涂料，漆膜厚度不小于100 μm。

6.3.3 采用螺栓固定的阳极，需要用涂料对连接处进行防腐处理，同时应保证良好的电性连接，连接电阻不应高于0.01 Ω。

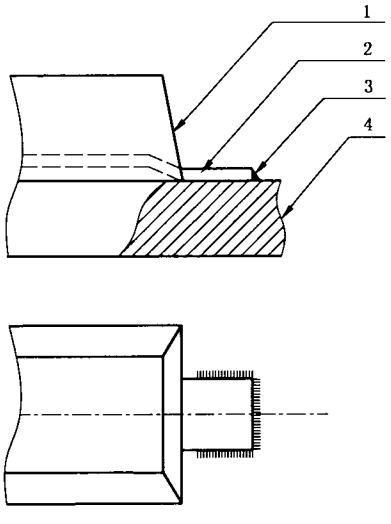
6.3.4 安装前，阳极工作面不应涂装或污染油污。




说明：

1——阳极；
2——铁芯；
3——支架；
4——钢板；
5——焊缝。

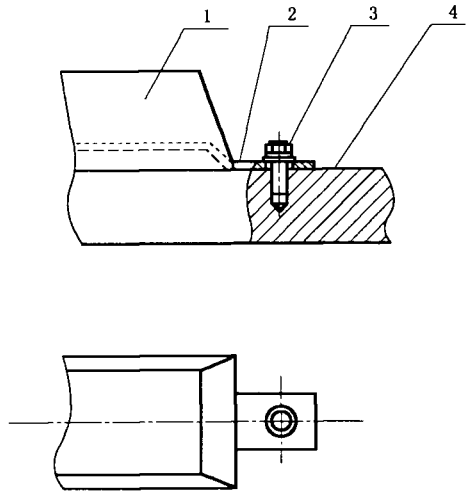
图1 支架阳极安装示意图




说明：

1——阳极；
2——铁芯；
3——焊缝；
4——钢板。

图2 平贴阳极安装示意图




说明：

1——阳极；

2——铁芯；

3——螺栓；

4——钢板。

**图 3　平贴式阳极螺栓安装图**

## 7　保护效果检测和牺牲阳极更换

### 7.1　保护电位测量

7.1.1　粗格栅、旋转滤网、细格栅等敞开式结构可使用便携式铜/饱和硫酸铜参比电极定期测量水下结构的保护电位，电位应符合 3.3 的规定。

7.1.2　管道、凝汽器等设备使用固定式锌参比电极或银/氯化银参比电极，保护电位应符合 3.1 和 3.2 规定。

7.1.3　钢、不锈钢、钛、铜及铜合金相对于三种参比电极的保护电位范围见表 3。

**表 3　相对于三种参比电极的保护电位范围**

| 材料种类 | 保护电位，相对不同类型参比电极/V | | |
|---|---|---|---|
| | 铜/饱和硫酸铜参比电极 | 锌参比电极 | 银/氯化银参比电极 |
| 钢 | −0.85～−1.10 | 0.00～+0.25 | −0.80～−1.05 |
| 不锈钢 | −0.35～−1.10 | 0.00～+0.75 | −0.30～−1.05 |
| 钛 | ≥−0.8 | ≥+0.30 | ≥−0.75 |
| 铜及铜合金 | −0.50～−0.65 | +0.45～+0.60 | −0.45～−0.60 |

### 7.2　保护度测量

安装两组与被保护体材质相同的检测试片，两组试片的尺寸和表面状态一致，一组与被保护体电性连接，另一组电性绝缘。检测试片的制作与处理可参照 SY/T 0029 埋地钢质检查片腐蚀速率测试方法。定期测量两组试片的腐蚀失重，称量精度为 0.001 g。按公式(10)计算保护度，保护度应大于 90%。

$$\eta=\frac{Q_C-Q_P}{Q_C}\times 100\% \qquad \cdots\cdots(10)$$

式中：

$\eta$ ——保护度，%；

$Q_C$——绝缘试片的腐蚀失重的数值，单位为克(g)；

$Q_P$——电性连接试片的腐蚀失重的数值，单位为克(g)。

### 7.3 停机检查保护效果

检查设备、部件、管道的腐蚀程度，彻底清除阳极表面的腐蚀产物，观察阳极的溶解情况和剩余量。

### 7.4 牺牲阳极更换

通常在保护期满后全面更换牺牲阳极，如果在使用期间出现以下情况之一时，应及时更换：

a) 阳极剩余量已不足保护下次检修间隔期所需用量时；

b) 阳极使用期间内，表面不溶解且被保护结构电位达不到最小保护电位时；

c) 阳极铁芯明显外露，短期内将会造成阳极体脱落时；

d) 阳极的消耗量超过初始量的70%时。

# 附 录 A
（规范性附录）
滨海电厂埋地管网阴极保护

## A.1 保护范围

电厂埋地金属结构复杂，保护范围包括埋地管道、接地网、铠装动力电缆、钢质桩基和金属储罐罐底等，其中以保护埋地管道及接地网为主。

阴极保护分为牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护。当被保护结构面积较小、土壤电阻率较低且分布均匀时，埋地管网及接地网宜采用牺牲阳极阴极保护；当被保护结构面积较大、土壤电阻率较高且分布不均匀时，埋地管网、接地网宜采用外加电流阴极保护。外加电流阴极保护相关实施细则可参照DL/T 5394。

## A.2 保护电位准则

对管网外壁或接地网在实施阴极保护时，保护电位（相对铜/饱和硫酸铜参比电极，简称CSE参比电极），应达到下列指标之一：

a) 施加阴极保护后，测得的保护电位至少应达到－0.85 V或更负，测量电位时应考虑IR降的影响；
b) 采用断电法测得的极化电位应达到－0.85 V或更负；
c) 施加阴极保护后，通常管道或接地网的保护电位不应负于－1.2 V；
d) 在阴极保护极化形成或衰减时，被保护管道或接地网的阴极极化值不小于100 mV；
e) 存在微生物腐蚀时，保护电位值应达到－0.95 V或更负，测量电位时，应考虑IR降的影响；
f) 在沙漠地区或土壤环境干燥的情况下，土壤电阻率比较高，当土壤电阻率为100 Ω·m～1 000 Ω·m时，阴极保护电位宜达到－0.75 V或更负；当土壤电阻率大于1 000 Ω·m时，阴极保护电位宜达到－0.65 V或更负，测量电位时应考虑IR降的影响。

## A.3 牺牲阳极

### A.3.1 阳极材料的选择

土壤电阻率不大于10 Ω·m时，采用锌合金牺牲阳极；土壤电阻率大于10 Ω·m时，采用镁合金牺牲阳极。

### A.3.2 牺牲阳极填充料

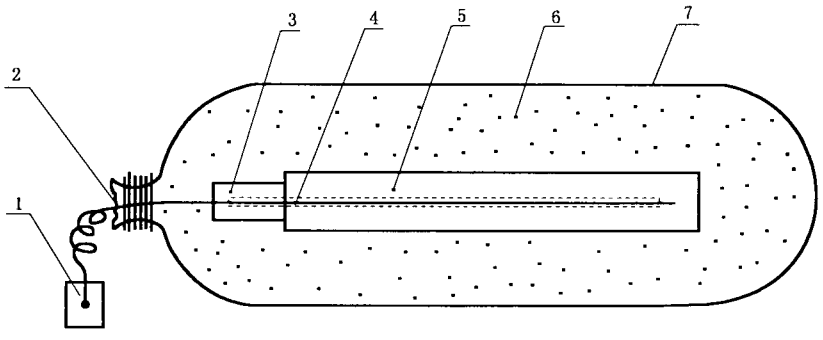
锌合金、镁合金阳极的填充料配方见表A.1。

**表A.1 锌合金、镁合金阳极填充料配方**

| 阳极 | 填充料成分 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 膨润土 | $MgSO_4$ | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ |
| | 含量/% | | | |
| 锌合金阳极 | 50 | — | 25 | 25 |
| 镁合金阳极 | | 25 | | — |

### A.3.3 牺牲阳极的组装

组装后的阳极见图 A.1。




说明：

1——接线片；
2——阳极电缆；
3——密封接头；
4——铁芯；
5——阳极；
6——填充料；
7——布袋。

图 A.1 埋地阳极组装示意图

### A.3.4 牺牲阳极选型

根据土壤电阻率和使用年限选择阳极规格型号。常用阳极规格见表 A.2。

表 A.2 常用埋地阳极的规格型号

| 阳极 | 型号 | 规格/<br>mm×mm×mm | 质量/<br>kg | 填充料质量/<br>kg |
|---|---|---|---|---|
| 锌阳极 | ZAC-D1 | 1 000×(58.5+78.5)×68 | 33 | 50 |
| | ZAC-D2 | 800×(56+74)×64 | 25 | 50 |
| 镁阳极 | MAZ-D1 | 700×(130+150)×125 | 22 | 50 |
| | MAZ-D2 | 700×(100+120)×105 | 14 | 50 |
| | MAZ-D3 | 700×(75+85)×80 | 8 | 30 |

### A.3.5 牺牲阳极发生电流

每支阳极的发生电流按公式(A.1)计算：

$$I_f = \Delta E / R \qquad \cdots\cdots (A.1)$$

式中：

$I_f$ ——每支阳极的发生电流的数值，单位为安培(A)；

$\Delta E$——阳极驱动电位的数值，单位为伏特(V)；锌阳极取 $\Delta E = 0.25$ V，镁阳极取 $\Delta E = 0.65$ V；

$R$ ——阳极接地电阻的数值，单位为欧姆(Ω)；按公式(A.2)计算：

$$R=\frac{\rho}{2\pi L}\left[\ln\frac{2L}{D_1}\left(1+\frac{\frac{L_1}{4t}}{\ln^2\frac{L_1}{D_1}}\right)+\frac{\rho_1}{\rho}\ln\frac{D_1}{D}\right] \quad \cdots\cdots(A.2)$$

式中：

$L$ ——阳极长度的数值，单位为米(m)；

$L_1$——填料包长度的数值，单位为米(m)；

$D$ ——阳极当量直径的数值，单位为米(m)；

$D_1$——填料包直径的数值，单位为米(m)；

$\rho$ ——土壤电阻率的数值，单位为欧姆米(Ω·m)；

$\rho_1$ ——填充料的电阻率的数值，单位为欧姆米(Ω·m)；

$t$ ——从地面至阳极中心的埋深的数值，单位为米(m)。

### A.3.6 牺牲阳极使用寿命

阳极使用寿命按公式(A.3)计算：

$$Y=\frac{Q\cdot G}{8\,760\,I_m}\times\frac{1}{K} \quad \cdots\cdots(A.3)$$

式中：

$Y$ ——阳极使用寿命的数值，单位为年(a)；

$Q$ ——阳极实际电容量的数值，单位为安培小时每千克(A·h/kg)；

$G$ ——每支阳极质量的数值，单位为千克(kg)；

$1/K$——阳极利用系数，取0.85；

$I_m$ ——每支阳极平均发生电流的数值，单位为安培(A)；按公式(A.4)计算：

$$I_m=(0.6\sim0.8)I_f \quad \cdots\cdots(A.4)$$

### A.3.7 保护电流密度及阳极数量计算

A.3.7.1 加强级涂层保护的新建钢质管道保护电流密度取(2～3)mA/m²。

A.3.7.2 对于碳钢及镀锌碳钢接地网，保护电流密度选择如下：

a) 土壤电阻率在20 Ω·m及以下时，电流密度大于20 mA/m²；

b) 土壤电阻率在(20～50)Ω·m时，电流密度取(10～20)mA/m²；

c) 土壤电阻率在50 Ω·m以上时，电流密度取10 mA/m²。

A.3.7.3 当土壤的氧化还原电位在－200 mV以下的厌氧条件下，易受到硫酸盐还原菌的作用而加速腐蚀，应结合情况增加电流密度。

A.3.7.4 当pH值小于4.5时，土壤的腐蚀性增强，应结合情况增加保护电流密度。

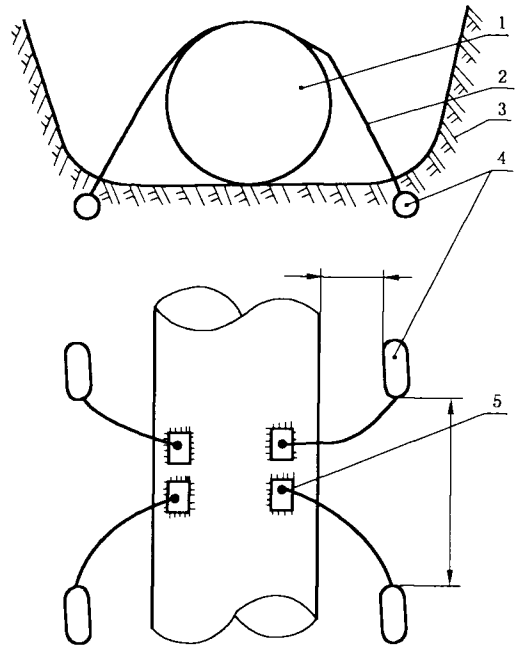
A.3.7.5 在技术经济合理时可采用铜材作为接地体，可以不采用阴极保护。

A.3.7.6 保护面积、保护电流、阳极数量的计算方法同4.5、4.7和4.8。

### A.3.8 牺牲阳极的布置、安装

A.3.8.1 阳极一般成对均匀布置，也可在土壤电阻率低的位置相对集中地成组安装。

阳极安装方法见图A.2。




说明：

1——管道；

2——阳极电缆；

3——土壤；

4——阳极；

5——接线片。

**图 A.2　阳极布置安装示意图**

A.3.8.2　阳极安装注意事项

阳极安装时应注意的事项：

a）　阳极搬动和埋设时，不准提拉阳极电缆，以免密封接头断裂；

b）　阳极焊接片应焊接牢固，焊接处应补做防腐层，且防腐等级不低于原防腐层；

c）　阳极填充料浇水浸透；

d）　阳极填料包周围应回填粘土，不能混有砂、砂石和杂物。

## A.4　测试桩和参比电极

A.4.1　为了检测阴极保护参数，应在全厂有代表性的区域设置测试桩和参比电极，测试桩的标志应醒目。

A.4.2　测试桩的埋设要牢固稳定。测试桩可用不锈钢、玻璃钢、混凝土等制作。

A.4.3　采用埋地型参比电极。在牺牲阳极保护系统中，参比电极可检测管道或接地网的保护电位、牺牲阳极的开路电位、工作电位。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
**滨海电厂海水冷却水系统牺牲阳极阴极保护**
GB/T 16166—2013
*
中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销
*
开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 22 千字
2014年4月第一版 2014年4月第一次印刷
*
书号:155066·1-48256 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107

GB/T 16166-2013

打印日期:2014年5月9日 F009A