

## 第4章 船舶的阴极保护

### 4.4.1 概 述

金属腐蚀的基本原理表明:当两种不同的金属在电解质溶液中电性连结时,电极电位较负(即化学性质较活泼)的金属总是成为阳极受到腐蚀,而电极电位较正的金属总是成为阴极而不会受到腐蚀。

钢铁浸在海水中时,由于钢铁并不是单纯的理想金属,而是由铁与碳及其他金属元素共同构成的合金,因此将形成许多微电池。其中铁的电位较负成为微阳极受到腐蚀,碳或其他金属元素成为微阴极则不会腐蚀。在钢铁中铁是主要成分,铁不断腐蚀,导致钢铁总体上不断受到腐蚀。

如果采用比钢铁的电极电位更负的金属与钢铁电性连结,使钢铁整体上成为阴极;或给钢铁不断地加上一个与钢铁腐蚀时产生的腐蚀电流方向相反的直流电,同样使钢铁在整体上成为阴极,并且得到极化,则可使钢铁免遭腐蚀,即得到保护。这种电化学的保护方法,称之为阴极保护法。

对于钢铁制成的船舶来说,阴极保护法有两种,即牺牲阳极保护和外加电流阴极保护。

### 4.4.2 阴极保护的基本参数

在阴极保护中,有两个最基本的也是最重要的参数——保护电位和保护电流。可以根据这两个参数值的大小判断金属是否达到完全保护,也可以根据某一金属在某种腐蚀环境中所需的最小保护电位和单位面积所需的最小保护电流(即最小保护电流密度),进行相应的阴极保护的设计。

#### 1. 保护电位域

保护电位域是使被保护结构达到指定防蚀率的电极电位范围。其介于最小保护电位和最大保护电位之间。

最小保护电位是使被保护结构达到指定防蚀率所必须的电极电位临界值。

最大保护电位是不引起被保护结构表面涂层鼓泡脱落或不引起铝等两性金属碱性腐蚀所允许的最负电位值。

铁元素的标准电极电位为 $-0.44\text{V}$ 。在 $\text{pH}$ 约8.2的海水里,相对于标准氢电极,钢铁的最小保护电位为 $-0.53\text{V}$ ,其最大保护电位为 $-0.68\text{V}$ ,因此钢铁在海水里相对于标准氢电极的保护电位域为 $-0.53\text{V} \sim -0.68\text{V}$ 。

保护电位域的值与所选用的参比电极的种类有关。钢铁在海水里相对于不同参比电极的保护电位域如下:

氢电极:	$-0.53\text{V} \sim -0.68\text{V}$
饱和甘汞电极:	$-0.77\text{V} \sim -0.92\text{V}$
海水/银/氯化银:	$-0.78\text{V} \sim -0.93\text{V}$
铜/饱和硫酸铜:	$-0.85\text{V} \sim -1.00\text{V}$
锌电极:	$+0.25\text{V} \sim +0.10\text{V}$

#### 2. 保护电流密度

在阴极保护过程中,使被保护结构达到保护电位域时所需要的电流叫做保护电流。保护电流的大小与被保护的金属结构的表面积有直接关系,通常采用单位面积的保护电流值——保护电流密度作为表征。

通常,钢铁在静止的海水中的腐蚀速度为 $0.1\text{mm}/\text{年}$ ,假定其为速度恒定的均匀腐蚀,根据理论计算可知其腐蚀电流密度为 $0.086\text{A}/\text{m}^2$ 。而实验结果表明,在静止的海水中,钢铁的保护电流密度为 $0.1\text{A}/\text{m}^2 \sim 0.15\text{A}/\text{m}^2$ 。这与理论上要求保护电流必须大于腐蚀电流的概念是一致的。

在钢铁结构的阴极保护实践中得知保护电流密度与下列许多因素有关:

##### 1) 涂层

钢质船舶或结构物表面一般都有涂层保护。涂层基本上是绝缘体,它将钢铁与海水隔绝,但并非密不透水,而且涂层还经常会受到损坏。因此在涂层与阴极保护联合进行保护时,仍需要一定的保护电流,通常,有涂层保护时的保护电流密度可为裸钢的保护电流密度的几分之一到几分之一。

##### 2) 阴极沉积物

用阴极保护时,阴极表面将产生许多氢氧根离子,使 $\text{pH}$ 值升高,海水中的钙、镁等碱土金属分子会生成不溶性的碱土化合物沉积于钢材表面,这对钢铁有一定的保护作用,即能抑制钢铁的腐蚀,降低钢铁的腐蚀电流,因此可以降低所需要的保护电流密度。

##### 3) 流速

海水的流动会增加氧的去极化作用,使腐蚀速度增加。航行中的船舶其保护电流密度约为停航时的两倍左右,高速航行的舰艇则可达3倍~4倍。

##### 4) 其他因素

海水的温度、盐度、风浪大小、污染程度等对保护电流密度也有一定的影响。DNV推荐的资料《阴极保护设计》RP. B401介绍,裸钢在世界各海域要求保护电流密度差异很大,通常为 $130\text{mA}/\text{m}^2$ ,有的海域如印度尼西亚、墨西哥湾可为 $110\text{mA}/\text{m}^2$ ,有的海域如北海北部(北纬 $57^\circ \sim 62^\circ$ )则高达 $180\text{mA}/\text{m}^2$ 。

因此,保护电流密度的选择除了根据有关标准的规定外,还要综合考虑各种有关因素,以决定取标准规定值的上限还是下限,或两者之间的一个相当的值。

### 4.4.3 牺牲阳极保护

牺牲阳极保护法,是采用一种比被保护的金属电位更负(化学性更活泼)的金属或合金和被保护的金属连接在一起,依靠该金属或合金不断地腐蚀溶解所产生的电流使其他金属获得阴极极化而受到保护的方法。而这种自身被腐蚀的金属或合金,称为牺牲阳极。

#### 1. 牺牲阳极的材料与种类



- 铜 - 锡 - 镁等几种。

我国的国家标准 GB/T4948—85《铝 - 锌 - 铜系合金牺牲阳极》及 GB/T4949—85《铝 - 锌 - 铜系合金牺牲阳极化学分析方法》规定了铝 - 锌 - 铜系合金阳极的化学成分(见表 4.4.3.7)和电化性能(见表 4.4.3.8)。

表 4.4.3.7 铝 - 锌 - 铜系合金牺牲阳极化学成分

化学元素 种类	化 学 成 分/%								
	Zn	In	Cd	Sn	Mg	Si	Fe	Cu	Al
铝 - 锌 - 铜 - 镉 (AZI - Cd)	2.5 ~ 4.5	0.018 ~ 0.050	0.005 ~ 0.020	—	—	< 0.13	< 0.16	< 0.02	余量
铝 - 锌 - 铜 - 锡 (AZI - Sn)	2.2 ~ 5.2	0.020 ~ 0.045	—	0.018 ~ 0.035	—	< 0.13	< 0.16	< 0.12	余量
铝 - 锌 - 铜 - 硅 (AZI - Si)	5.5 ~ 7.0	0.025 ~ 0.035	—	—	—	0.10 ~ 0.15	< 0.16	< 0.02	余量
铝 - 锌 - 铜 - 锡 - 镁 (AZI - SnMg)	2.5 ~ 4.0	0.020 ~ 0.050	—	0.025 ~ 0.075	0.50 ~ 1.00	< 0.13	< 0.16	< 0.02	余量

表 4.4.3.8 铝 - 锌 - 铜系合金牺牲阳极电化性能

项 目	开路电位/V	工作电位/V	实际电容量 (A·h·kg <sup>-1</sup> )	电流效率/%	溶解状况
电化性能	-1.18 ~ -1.10	-1.12 ~ -1.05	> 2400	> 85	腐蚀产物容易脱落, 表面溶解均匀

注: 1. 参比电极: 饱和甘汞电极;  
2. 介质: 人造海水

标准还规定了铝 - 锌 - 铜系合金牺牲阳极的型号规格。其中有船用型号规格 12 种(见表 4.4.3.9)和海洋工程、港工设施、海水压载舱用型号规格 12 种(见表 4.4.3.10)。

表 4.4.3.9 船用铝合金阳极型号与规格

型 号	规 格	固定方式	铁 芯	质 量/kg
	长 × 宽 × 高/mm			
AZI - □ - C1	800 × 140 × 40	焊接	钢板	9.5
AZI - □ - C2	500 × 140 × 35			5.3
AZI - □ - C3	500 × 100 × 40			5.0
AZI - □ - C4	400 × 120 × 35			4.0
AZI - □ - C5	400 × 100 × 35			3.5
AZI - □ - C6	300 × 100 × 35			2.1
AZI - □ - C7	250 × 100 × 35			1.7
AZI - □ - C8	180 × 70 × 35			1.3
AZI - □ - C9	180 × 80 × 12	螺钉固定	无铁芯	0.4
AZI - □ - C10	280 × 150 × 70			4.8
AZI - □ - C11	230 × 75 × 40			1.1
AZI - □ - C12	180 × 60 × 30			0.5

注: 在型号 AZI(表示铝 - 锌 - 铜)三个字母后有 - □ - 的标记, 该□代表第四种元素, 如第四种元素为锡则以 Sn 代替 □, 其型号就应为 AZI - Sn - X

表 4.4.3.10 海洋工程、港工设施、海水压载舱用铝合金阳极型号与规格

型 号	规 格	固定方式	铁 芯	质 量/kg
	(上底 + 下底) × 长 × 高/mm × mm × mm			
AZI - □ - H1	(220 + 240) × 2300 × 230	焊接	钢管	275
AZI - □ - H2	(200 + 210) × 1600 × 220			165
AZI - □ - H3	(170 + 200) × 1500 × 180			144
AZI - □ - H4	(200 + 280) × 800 × 150		螺纹钢	80
AZI - □ - H5	(115 + 135) × 1250 × 130			50
AZI - □ - H6	(150 + 170) × 900 × 160		钢管	53
AZI - □ - H7	(115 + 135) × 1000 × 130			45
AZI - □ - H8	(115 + 135) × 750 × 130		螺纹钢	34
AZI - □ - H9	(160 + 180) × 420 × 170			32
AZI - □ - H10	(115 + 135) × 500 × 130		钢板	22
AZI - □ - H11	(110 + 130) × 500 × 120			20
AZI - □ - H12	(52 + 58) × 1100 × 56		钢板	9

## 2. 牺牲阳极保护的设计

关于牺牲阳极保护的设计, 我国已制订了以下标准:

- ① CB/T3855 - 1999《海船牺牲阳极 阴极保护设计和安装》;
- ② GJB156 - 86《港工设施牺牲阳极保护设计和安装》;
- ③ GJB157 - 86《水面舰船牺牲阳极保护设计和安装》。

以及中华人民共和国交通部 1990 年颁布的 JTJ230 - 89《海港工程钢结构防腐技术规定》(试行)

按照上述标准和技术规定, 对牺牲阳极保护设计的主要技术要求和做法归纳介绍如下:

### 1) 保护面积计算

船舶的牺牲阳极保护一般用于外板的浸水部位、螺旋桨、舵、海底阀箱和压载水舱等部位。在设计的一开始应首先算出它们各自的面积。

#### a. 外板浸水区

外板浸水区的面积  $S_1$  (m<sup>2</sup>) 可按式(4.4.3.1)计算:

$$S_1 = \frac{(4T + B)L/2}{1.625 - C_B} \quad (4.4.3.1)$$

式中  $L$  —— 两柱间长(m);

$B$  —— 型宽(m);

$T$  —— 满载吃水(m);

$V$  —— 满载排水体积(m<sup>3</sup>);

$C_B$  —— 方型系数,  $C_B = \frac{V}{L \cdot B \cdot T}$ 。

通常, 外板浸水区面积  $S_1$  (m<sup>2</sup>), 可按式(4.4.3.2)作近似计算:

$$S_1 = 1.77L_{wl} + V/T \quad (4.4.3.2)$$

式中  $T$  —— 满载吃水(m);

$L_{wl}$  —— 满载水线长(m);

$V$ ——满载排水体积( $m^3$ )。

#### b. 螺旋桨

螺旋桨表面积  $S_2(m^2)$  可按式(4.4.3.3)计算:

$$S_2 = \frac{n\pi}{2} d_1^2 \eta + n\pi d_2 l \quad (4.4.3.3)$$

式中  $n$ ——螺旋桨数量;

$d_1$ ——螺旋桨直径(m);

$\eta$ ——螺旋桨展开盘面比;

$d_2$ ——轴毂直径(m);

$l$ ——轴毂长度(m)。

#### c. 其他

舵、海底阀箱、压载水舱内表面等面积应根据有关图纸进行计算。

通常底部水舱和双层底压载水舱装载压载水时,整个舱内都注满水,因此舱顶的面积应列入被保护面积之中。而舷侧边水舱、顶边水舱、首尖舱、尾尖舱等压载海水时,一般不会满至舱顶,故舱顶的面积可不列入被保护面积。

#### 2) 保护电流密度的选定

船舶的建造说明书如果对保护电流密度作出了规定,则应按规定的要求进行设计。如果没有作出明确规定,则可根据被保护部位的具体情况(表面涂层情况、保护年限、航行海区、航速等)按有关标准选定。

表 4.4.3.11 是我国制定的有关标准对采用牺牲阳极方法进行保护时保护电流密度的选择所作出的规定。

表 4.4.3.11 船舶与钢结构的保护电流密度

保 护 对 象	表面涂层情况	保护电流密度 $I_i$ /(mA·m <sup>-2</sup> )	标 准 来 源
船体外板	涂漆	8~18	GB8841-88
船用钢板	涂沥青系漆	6~8.5	GJB157-86
	涂环氧沥青系漆	6~10	
	涂氯化橡胶漆		
	裸露	250~300	
螺旋桨	裸露	300~400	GB8841-88
青铜、黄铜	裸露	300~350	GJB157-86
不锈钢	裸露	300~350	
舵	有涂层	100~250	GB8841-88
舵、水翼、导流罩等	有漆膜(易脱落)	50~100	GJB157-86
钢桩码头(海水中)	裸露	70~100	GJB156-86
钢桩码头(海土中)	裸露	15~30	
钢趸船	涂漆	30~50	
水鼓	涂漆	40~80	
舰船洞库防护门	水泥包覆	20~25	

#### 3) 牺牲阳极材料与型号的选择

##### a. 阳极材料选择

船舶的建造说明书中对牺牲阳极材料一般都有明确规定,应遵守这些规定。如果建造说明书未作规定,或提供多种材料供选择,则应根据牺牲阳极的安装部位、保护年限、价格、材料来源等作出适当选择。

通常船用牺牲阳极、港工设施用牺牲阳极可以采用锌合金阳极或铝合金阳极,但是铝合金阳极在某些场合受到一定的限制。中国船级社和各国船级社对铝阳极的应用都有相似的限制规定(见本篇第1章4.1.6),而锌合金阳极的应用,各国船级社均没有限制。

##### b. 阳极型号选择

阳极型号的选择主要是根据使用的部位和保护年限,船体外板、螺旋桨、舵、海底阀箱等的保护应选用平板状阳极,压载水舱、港工设施应选用长条形阳极,如果标准中的型号不合适,也可另行设计合适的规格形状。

阳极型号初步确定后应计算其寿命是否符合保护年限的要求,应选择使用寿命略大于保护年限的型号与规格。

#### 4) 牺牲阳极的发生电流计算

牺牲阳极的发生电流  $I_i(mA)$  一般可以从有关标准或标准附录中查到。有些规格的阳极如查不到  $I_i$ , 或另行特定设计的阳极, 则其发生电流  $I_i$  可按式(4.4.3.4)计算:

$$I_i = \frac{\Delta E}{R} \times 1000 \quad (4.4.3.4)$$

式中  $\Delta E$ ——牺牲阳极的驱动电位(V), 选用锌合金阳极时  $\Delta E = 0.20V$ , 选用铝合金阳极时  $\Delta E = 0.25V$ ;

$R$ ——牺牲阳极的接水电阻( $\Omega$ );

关于牺牲阳极的接水电阻  $R$  可按下式计算:

a. 对于长条形阳极(阳极离保护体表面距离大于30cm时):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (4.4.3.5)$$

式中  $\rho$ ——海水电阻率, 通常取值为  $25\Omega \cdot cm$ ;

$L$ ——牺牲阳极的长度(cm);

$r$ ——牺牲阳极的当量半径(cm),

$$r = \frac{C}{2\pi} \quad (4.4.3.6)$$

式中  $C$ ——牺牲阳极横截面周长。

b. 对于平板状阳极(紧贴被保护体安装时):

$$R = \frac{\rho}{2S} \quad (4.4.3.7)$$

式中  $\rho$ ——海水电阻率, 通常取值为  $25\Omega \cdot cm$ ;

$S$ ——阳极的当量长度(cm),

$$S = \frac{L+B}{2} \quad (4.4.3.8)$$

式中  $L$ ——阳极长度(cm);

$B$ ——阳极宽度(cm)。



c. 对于其他形状或手锯状牺牲阳极的接水电阻  $R(\Omega)$  还可式(4.4.3.9)计算

$$R = \frac{0.315\rho}{\sqrt{A}} \quad (4.4.3.9)$$

式中  $\rho$ ——海水电阻率,通常取值为  $25\Omega\cdot\text{cm}$ ;

$A$ ——阳极的暴露面积( $\text{cm}^2$ )。

#### 5) 牺牲阳极的寿命计算

牺牲阳极的寿命  $t$ (年)可按式(4.4.3.10)计算:

$$t = \frac{mQ \times 1000}{I_m \times 8760} \frac{1}{K} \quad (4.4.3.10)$$

式中  $m$ ——每块牺牲阳极质量(kg);

$Q$ ——牺牲阳极实际电容量( $\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$ );

$I_m$ ——牺牲阳极平均发生电流;

对于保护年限较长的港工设施:  $I_m = (0.5 \sim 0.55) I_i$ ;

对于一般的舰船:  $I_m = (0.6 \sim 0.7) I_i$ ;

$\frac{1}{K}$ ——牺牲阳极的利用系数,通常取 85%。

#### 6) 牺牲阳极的用量计算

牺牲阳极的用量可按式(4.4.3.11)计算:

$$N_i = \frac{I_i S_i}{I_a} \quad (4.4.3.11)$$

式中  $N_i$ ——被保护部位所需的阳极块数;

$I_i$ ——保护电流密度( $\text{mA}/\text{m}^2$ ),查表 4.4.3.11;

$S_i$ ——被保护部位的面积( $\text{m}^2$ );

$I_a$ ——牺牲阳极的发生电流( $\text{mA}$ )。

一般船舶如有几个不同的部位需要保护,则应根据式(4.4.3.11)分别计算出各部位需要的牺牲阳极的数量。

#### 7) 牺牲阳极的布置

牺牲阳极的布置应遵循以下原则:

a. 船体外板所需的牺牲阳极应均匀对称地布置在舭龙骨和舭龙骨前后的流线上。

b. 螺旋桨和舵所需的牺牲阳极应均匀地布置在尾部船外板及舵上。但是,距螺旋桨叶梢 300mm 范围内的船外板上和单螺旋桨船的无阳极区(见图 4.4.3.1)不得布置牺牲阳极。

c. 海底阀箱、声呐换能器阱所需的牺牲阳极应布置在箱、阱内部。

d. 压载水舱或其他液货/压载舱的牺牲阳极布置应该注意以下几点。

① 铝合金阳极的布置应注意船级社规范的要求

② 阳极应固定在舱内的扶强材或水平构件上,长条形阳极的走向应与扶强材的走向相一致;

③ 阳极不能固定在船外板上,一根阳极也不能跨越安装在两根扶强材上;

④ 在液舱的垂直方向上,阳极的布置应由下而上均匀递减,而在同一水平方向上要注意对称分布和均匀分布。

⑤ 阳极布置的位置应照顾到安装的方便,在人孔和舱梯周围亦不宜布置阳极。

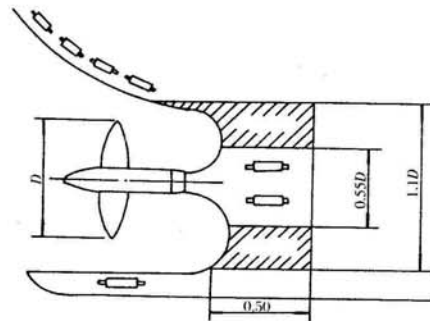


图 4.4.3.1 船体无阳极区示意图

#### 8) 牺牲阳极的安装

牺牲阳极可采用焊接或螺栓固定两种方式安装。一般说来焊接固定方法简单、安装牢度高、接触电阻小,而螺栓固定则容易更换,更换时可不损坏周围及钢板反面的涂层。

船体外板、螺旋桨、舵、海底阀箱等保护用的平板状阳极应紧贴外板固定。安装前,在紧贴船外板的阳极表面上应涂装两道防锈漆(一般用环氧沥青涂料较好),待油漆干燥后才能安装。

阳极安装后,其表面不得沾染上油漆或油污。一旦受到沾染,必须随时进行清除。

#### 主要参考文献

- 1 汪国平、洪栋煌. 船舶与钢结构的涂装及防蚀技术. 北京:国防工业出版社,1993
- 2 刘宝俊. 材料的腐蚀及其控制. 北京:航空航天大学出版社,1989
- 3 邓舜扬. 金属防腐蚀对话. 北京:冶金工业出版社,1988
- 4 王锡春、何萧、蔡云露. 涂装技术. 北京:化学工业出版社,1988
- 5 (德)波纳斯 H. 采用牺牲阳极和外加电流的阴极保护. 陈丽娟译. 北京:舰船材料编辑室《造船材料译丛第二十一辑》,1983
- 6 (日)前田富等. 飞溅区和干湿交替区的保护. 杨汝钧译. 北京:舰船材料编辑室《造船材料译丛第二十一辑》,1983
- 7 查理森 R. 飞溅区的腐蚀控制. 段淑娥译. 北京:舰船材料编辑室《造船材料译丛第二十一辑》,1983
- 8 (日)竹彦垣见. 海洋及港湾钢结构物的腐蚀控制. 章荃译. 北京:舰船材料编辑室《造船材料译丛第二十三辑》,1985
- 9 (日)长崎作治. 海洋钢结构物飞溅区的腐蚀控制. 吴始栋、邓树滨译. 北京:舰船材料编辑室《造船材料译丛第二十三辑》,1985
- 10 船舶设计实用手册编委会. 船舶设计实用手册:第3分册 舾装设备. 北京:国防工业出版社,1963
- 11 王朝晨等. 舰船及海上设施阴极保护. 北京:舰船材料编辑室,1984
- 12 SSPC. Surface Preparation Specifications. U.S.A.: Steel Structures Painting Council, 1982