

## 钢浮筏牺牲阳极保护研究\*

张经磊 孙可良 郭公玉 侯保荣

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

**提要** 本文研究了海水中钢浮筏的阴极保护。浮筏由船板钢制造, 表面涂9道油漆。所用牺牲阳极为棒状悬挂式、远距离铝基牺牲阳极。试验得出该浮筏的平均保护电流密度为  $14 \text{ mA/m}^2$ 。在本研究中, 作者采用了一种测定长导线电压降的方法测定阳极的电流输出。所测得的阳极电流输出值与由 Dwight 修正式计算的结果大体相当。

在海水中, 钢铁的保护电流密度受很多因素影响, 例如水流速度、海水温度、溶解氧浓度、污染、pH、盐度、涂层等。但其中最主要的是海水的流速及金属表面的涂覆情况<sup>1)</sup>。若海水流速大, 则氧到达金属表面的速度加快, 去极化能力增强, 因而需要的保护电流密度就大。例如, 加利福尼亚沿岸和墨西哥海湾的石油平台, 由于海水相对平静, 只需要  $65 \text{ mA/m}^2$  的保护电流密度。在阿拉斯加库克湾的钢铁设施, 由于有  $10 \text{ m/s}$  左右的潮流速度, 需要的保护电流密度高达  $484 \text{ mA/m}^2$ <sup>1)</sup>。还有文献报道, 当流速为  $12 \text{ m/s}$  时, 需要的保护电流密度为  $11000 \text{ mA/m}^2$ <sup>2)</sup>。国内, 渤海石油平台的保护电流密度为  $65 \text{ mA/m}^2$ <sup>3)</sup>, 青岛黄岛油码头钢桩设计的保护电流密度为  $120 \text{ mA/m}^2$ <sup>4)</sup>。

钢铁表面的涂层可阻止氧向钢铁表面的扩散, 能大大降低所需要的保护电流密度<sup>5)</sup>。例如在静止的海水中, 无涂层的钢板的保护电流密度为  $80-100 \text{ mA/m}^2$ , 涂上几层乙烯树脂后, 保护电流降到了  $10-15 \text{ mA/m}^2$ <sup>2)</sup>。

由此可见, 海水中的钢铁结构随海水流速和涂覆情况的不同, 保护电流密度相差很大, 高者可达  $11000 \text{ mA/m}^2$ , 低者为  $10 \text{ mA/m}^2$  左右, 两者相差达 1100 倍。

本文所研究的钢制浮筏, 长年固定于海上, 用来进行各种材料的水下腐蚀和油漆性能及海洋大气暴露试验。为了延长其使用寿命, 决定采用阴极保护。这就须先确定所需要的保护电流密度。为此我们进行了试验性保护来确定浮筏的保护电流密度, 并同时测定了阳极的放电情况, 确定了阳极的输出电流量。

### 一、材料与方 法

#### 1. 浮筏

浮筏由船板钢制造, 两边为大浮体, 中间由角钢连接(图1)。四角用锚链将浮筏固定于港内, 整个浮筏随涨落潮浮动, 因此, 无潮差区。总浸水面积为  $150 \text{ m}^2$ 。表面涂了3道

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1354 号。

收稿日期: 1986年7月30日。

1) J. A. 莱曼, 1983。大西洋发电站的阴极保护, 阴极保护在工程中的应用(造船材料 21 辑)。舰船材料编辑室, 114—112 页。

底漆、3 道防腐漆、3 道防污漆。

## 2. 环境条件

浮筏位于青岛中港盐化厂和油脂码头之间,海水有些污染,实验期间海水最低月平均温度为 8.9℃,最高为 26℃。海水 pH 值在 7.9—8.2 之间。海水盐度为 30‰ 左右。水深平均 7m 左右。

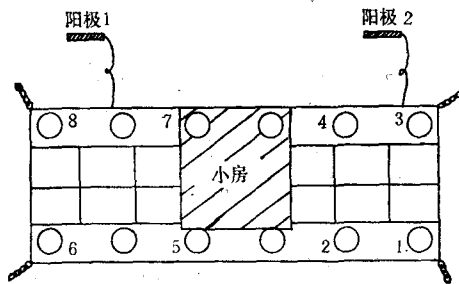


图1 浮筏的构造示意图

1—8为电位测量点

Fig. 1 Scheme of steel floating raft

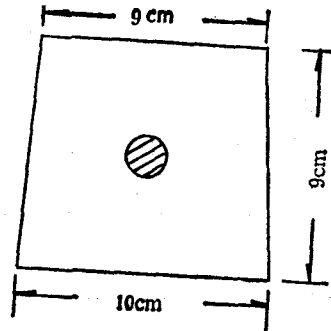


图2 阳极横截面的形状及尺寸

Fig. 2 Shape and size of cross section of the anode

## 3. 牺牲阳极材料

牺牲阳极材料选用中国科学院海洋研究所研制的铝基牺牲阳极<sup>[3,6]</sup>。阳极尺寸是根据铸造厂的现有模具选取的。长度为 66cm,截面形状为梯形(见图 2),等效半径为 5.2 cm,长度与半径的比值为:  $L:r = 12.7$ 。

## 4. 阳极输出电流的测定

根据浮筏上其他实验的要求,本浮筏采用远阳极保护(阳极离浮筏大于 3m)。牺牲阳极悬挂于附近一结构物上,用  $1 \times 19/0.64$  的塑料铜导线将阳极与浮筏连起来。所有焊接接头全部用环氧树脂和无碱玻璃布带封固,以防漏水和腐蚀脱落。

用 DT-830 型数字万用电表(最小读数为 0.1 mV) 定期测量连接导线上 60cm 长一段的电压降,同时记录测量时的环境温度。由铜导线的长度、直径和环境温度计算测量段上的实际电阻,再根据欧姆定律,由测得的电压降计算阳极的电流输出值。

## 5. 保护电位的测量

用 Ag/AgCl 参比电极和 DT-830 型数字万用电表定期测量被保护体的电位。测量是在均匀选取的 8 个点上进行,测点位置如图 1 所示。

# 二、实验结果

1. 在长 0.6m,截面积为  $6\text{mm}^2$  的多股铜导线上测量的电压降和计算的电阻、电流、保护电流密度列于表 1。20℃ 的电阻由公式  $R_{20} = \rho L/S$  求得。然后,根据环境温度和温度校正公式<sup>[9]</sup>计算测量时导线的实际电阻值。

$$R_{\text{实}} = R_{20}[1 + \alpha(t_{\text{实}} - 20)]$$

此处  $R_{\text{实}}$  为测量时导线的实际电阻,  $R_{20}$  为 20℃ 时导线的电阻;  $\alpha$  为铜导线的电阻温度系数 (0.0043/度);  $t_{\text{实}}$  为测量时的环境温度。阳极电流随时间的变化示于图 3。

表 1 0.6 m 长, 截面积为 6mm<sup>2</sup> 导线上的电阻、电流、电压降及浮筏保护电流密度

Tab. 1 Resistance, current and voltage drop on the leader cable 0.6 m long and 6 mm<sup>2</sup> section, and protective current density of the floating raft

| 时 间<br>(月.日) | 环境温度<br>(°C) | 实际电阻<br>(mΩ) | 1 号阳极         |                | 2 号阳极         |                | 浮筏保护<br>电流密度<br>(mA/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------------------------------|
|              |              |              | 电 压 降<br>(mV) | 输 出 电 流<br>(A) | 电 压 降<br>(mV) | 输 出 电 流<br>(A) |                                      |
| 4.13         | 15           | 1.66         | 1.5           | 0.904          | 1.2           | 0.723          | 10.8                                 |
| 5.7          | 20           | 1.70         | 1.7           | 1.000          | 1.4           | 0.824          | 12.2                                 |
| 5.29         | 28           | 1.76         | 1.8           | 1.020          | 1.5           | 0.852          | 12.5                                 |
| 6.29         | 31           | 1.78         | 2.2           | 1.240          | 1.9           | 1.070          | 15.4                                 |
| 7.23         | 27           | 1.75         | 2.0           | 1.140          | 1.8           | 1.030          | 14.5                                 |
| 9.6          | 25           | 1.74         | 2.4           | 1.380          | 2.1           | 1.210          | 17.3                                 |
| 10.5         | 21           | 1.71         | 2.1           | 1.230          | 2.0           | 1.170          | 16.0                                 |

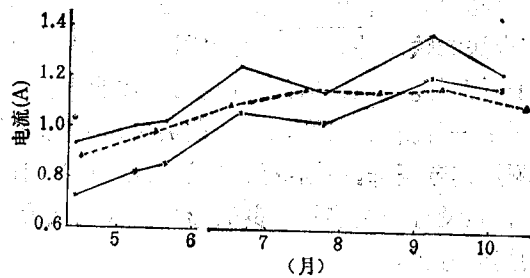


图 3 阳极电流随时间的变化

Fig. 3 Anodic current-time curves.

●—● 1号阳极; ×—× 2号阳极; △...△ Dwight 修正式计算值。

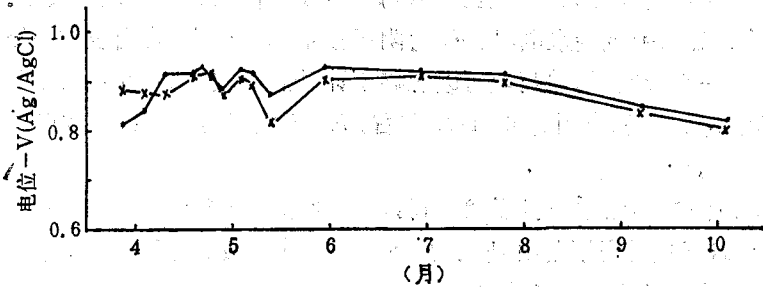


图 4 浮筏保护电位随时间的变化

Fig. 4 Protective potential-time curves on the floating raft

× 电位最高点; ● 电位最低点。

2. 浮筏的保护电位值随时间的变化示于图 4 (只绘出最高电位值与最低电位值)。

3. 浮筏的保护电流密度随时间的变化列于表 1, 其平均保护电流密度为 14.1mA/m<sup>2</sup>。

### 三、讨 论

#### 1. 保护电流密度

本浮筏在保护电位范围内所需要的保护电流密度只有  $14.1 \text{ mA/m}^2$  左右, 相当于普通裸体碳钢保护电流密度的  $1/10$ , 与文献 [2] 所报道的数值基本一致。保护电流密度较小, 其原因可能是: (1) 浮筏所处的位置是胶州湾内的中港, 海水相对平静; (2) 浮筏涂了 9 道油漆, 漆膜较厚, 这样, 氧的扩散速度较慢, 因而其去极化作用较弱。然而在胶州湾西侧黄岛油码头钢桩的设计保护电流为  $120 \text{ mA/m}^{2[1]}$ 。可见, 在本浮筏的保护中, 油漆起了主要作用。

#### 2. 阳极输出电流的测定

测定阳极输出电流的方法目前有: (1) 标准电阻法<sup>[8,10]</sup>; (2) 零阻电流表法<sup>[11]</sup>; (3) 低阻电流表法<sup>[3]</sup>。标准电阻法的缺点是使回路电阻增加, 在某种程度上降低了阳极的放电量, 使测量结果偏低。零阻电流表法从理论上讲是很准确的, 但在实际测量中, 由于在回路中加了一个开关, 在现场进行长期测量时, 海上空气湿度大, 开关接点处很易生锈而接触不良, 致使回路电阻增加, 而且很不稳定, 因此阳极电流测量的精确度变差。同时, 目前零阻电流表的性能还不十分稳定, 所以该法目前还存在一些实际应用方面的问题。低阻电流表法除具备零阻电流表法的缺点外, 本身还有电阻, 当接到回路中后, 由于改变了回路电阻, 测量结果只是一个近似值。该法只有进行校正后才能用。

本工作中, 我们采用了一种新的测试方法, 即在阴极和阳极间的连接导线上, 取定长线段, 用精确的电压表测量其电压降, 根据导线电阻, 由欧姆定律计算阳极的输出电流值。该法既不增加回路电阻, 也没有开关接触不良的影响。我们认为用该法测定远阳极的输出电流优于目前所用的其他方法。

#### 3. 阳极实际输出电流与理论输出电流的比较

阳极的理论输出电流值是根据欧姆定律计算的, 即  $I = \Delta E/R$ , 此处,  $I$  为阳极输出电流值;  $\Delta E$  为驱动电压;  $R$  为阴阳极间的总电阻。在海水中, 驱动电压等于阳极闭路电位和被保护体保护电位之间的差值。欧姆电阻从理论上讲包括以下几项:  $R = R_a + R_c + R_m$ , 此处,  $R_a$  为阳极接水电阻;  $R_c$  为阴极接水电阻;  $R_m$  为阴极和阳极之间的电缆和结构电阻。在一般情况下, 后两项可以忽略不计<sup>[14]</sup>。但在本实验中, 由于是远阳极, 阴阳极之间的导线有 5m 长, 电阻为  $0.014\Omega$  左右,  $R_m$  不能忽略。所以本实验中阳极输出电流为  $I = \Delta E/(R_a + R_m)$ 。

在近海阴极保护中, 由于阳极形状不同, 用来计算阳极接水电阻的公式很多<sup>[14]</sup>。一般说来, Dwight 修正式适用于自由悬挂的、细长的棒状 (截面为圆形、梯形或矩形) 远阳极<sup>[8,9,13]</sup>。在有关青岛海域的研究报道<sup>[3]</sup>也证明该公式是适用的。Dwight 修正式为:

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

将各参数代入公式求出  $R_a$ , 加上  $R_m$  后再根据欧姆定律计算阳极的输出电流。计算结果为  $I = 0.885\text{A}$  (由于两阳极相距较远, 忽略了阳极间的相互影响)。与表 1 中的阳极电流实测值比较, 可以看出, 该计算值和实测值基本近似, 但实测值偏高一些。我们认为

其原因主要是在用 Dwight 修正式计算  $R_s$  时, 所用的海水电阻率为常年平均值 ( $30\Omega \cdot \text{cm}$ ), 而本实验是在 4 月至 10 月间进行的, 在这段时间, 海水温度较高, 电阻率值比全年平均值低造成的。为此, 我们根据在实验期间海水的月平均温度和盐度, 按国际海洋学常用表<sup>[12]</sup>计算了海水的月平均电阻率和阳极的月平均电流输出值 (图 3、表 2)。由计算结果可以清楚地看出, 计算值和实测值是非常近似的。这说明, 在这一类型的阴极保护系统的设计中, 可以用 Dwight 修正式来估算阳极的电流输出值。但必须指出, 准确测量现场海水电阻率是非常重要的, 否则会给计算结果带来较大的偏差。

表 2 海水的月平均温度、盐度、电阻率及阳极输出电流

Tab. 2 The monthly mean temperature, salinity and resistivity of the sea water, and the output current of the anode

| 月 份 | 海水月平均温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 海水月平均盐度<br>(%) | 海水月平均电阻率<br>( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) | 阳极输出电流<br>(A) |
|-----|-----------------------------------|----------------|--|---------------|
| 4   | 8.9                               | 31.26          | 30.0                                     | 0.885         |
| 5   | 13.5                              | 31.25          | 26.7                                     | 0.985         |
| 6   | 18.3                              | 31.26          | 23.9                                     | 1.090         |
| 7   | 22.1                              | 30.86          | 22.4                                     | 1.160         |
| 8   | 26.0                              | 29.41          | 22.6                                     | 1.150         |
| 9   | 25.1                              | 29.13          | 22.2                                     | 1.170         |
| 10  | 21.0                              | 29.53          | 23.8                                     | 1.100         |

#### 4. 其他

由表 1 和图 3 可以看出, 两块阳极的电流输出值有些差异, 这可能是由于阳极性能以及回路电阻的差异引起的。另外, 还发现阳极的电流输出除随海水电阻率变化外, 还随海水的流速、温度、污染程度等发生随机波动。这与文献[3]所观察到的现象一致。

在长期保护中, 由于油漆的老化脱落和阳极半径的变小, 可能会导致保护不足, 需定期测量保护电位, 并根据情况进行适当调整。

## 四、结 论

1. 浮筏在保护电位范围内(涂 9 道油漆)的保护电流密度值为  $14.1 \text{ mA/m}^2$  左右。
2. 本实验用的悬挂式远阳极的电流输出值与用 Dwight 修正式的计算值近似。在设计中, 可用该公式估算阳极的输出电流值。
3. 在阴、阳极之间的连线上, 以测定定长导线上的电压降来计算阳极的实际输出电流的方法是方便可行的。

## 参 考 文 献

- [1] 交通部第一航务工程局科学研究所、中国科学院海洋研究所, 1979。黄岛钢管桩码头外加电流阴极保护。金属腐蚀与防护 3: 57—61。
- [2] 张经磊, 1984。海水管内壁阴极保护——外加电流法。海洋科学 8(4): 56—58。
- [3] 张经磊, 郭公玉, 1984。实际海洋条件下铝基牺牲阳极性能研究。海洋科学集刊 22: 315—328。
- [4] 张经磊, 孙可良, 李乐绥, 白秀华, 1987。遥测浮标牺牲阳极保护。海洋与湖沼 18(6): 590—595。
- [5] 周文森, 郑景山, 陆业铨, 1981。简明电工手册。机械工业出版社(北京), 第 27 页。
- [6] 郭公玉, 张经磊, 1979。铝基牺牲阳极在海水中电化性能的研究。金属腐蚀与防护 4: 16—21。

- [7] Dismuke, T. D., S. K. Coburn, C. M. Hirsch, 1981. Handbook of Corrosion Protection for Steel Pile Structures in Marine Environments. American Iron and Steel Institute (Washington, D. C.), 111. pp.
- [8] Grandstaff, C. M. and H. L. Craig, Jr., 1971. Offshore Testing of Aluminum Anodes. *Materials Protection and Performance* 10(5): 29—33.
- [9] Kemal Nisancioglu, 1984. An Analysis of Resistance Formulas for sacrificial Anodes. *Materials Performance* 23(12): 36—44.
- [10] Lennox, T. J. Jr., R. E. Groover and M. H. Peterson, 1971. Electrochemical Characteristics of Six Aluminum Galvanic Anode Alloys in the Sea. *Materials Performance* 10(9): 39—44.
- [11] Mansfeld, F., and J. V. Kenkel, 1976. Galvanic and Pitting Corrosion—Field and Laboratory Studies. American Society for Testing and Materials (Philadelphia), pp. 20—47.
- [12] National Institute of Oceanography of Great Britain and UNESCO, 1966. International Oceanographic table.
- [13] NACE, 1983. Corrosion Control of Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production. *Materials Performance* 22(5): 9—36.
- [14] Roe Strommen, 1985. Evaluation of Anode Resistance Formulas by Computer Analysis. *Materials Performance* 24(3): 9—15.

## INVESTIGATION OF SACRIFICIAL ANODE PROTECTION OF FLOATING STEEL RAFT\*

Zhang Jinglei, Sun Keliang, Guo Gongyu and Hou Baorong

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

### ABSTRACT

A protection experiment of a floating steel raft located in Zhonggang Port, Qingdao, was conducted by slender rod Al-basic sacrificial anode 66 cm long and 10.4 cm equivalent dia.. The floating steel raft is made of shipbuilding steel plate and was given nine coats of paint. The anodes were suspended in sea water of 8.9°C the lowest month mean temperature, 26°C the highest, pH 7.9, salinity 30‰, and more than 3 m away from floating raft. A new, simple method was adopted to measure the anodic output current, (i.e., to measure the voltage drop on the leader cable given length) then to calculate the output current of anode by the ohm's law. The value of anode current measured by the method mentioned above is roughly the same as the anodic current value calculated by modified Dwight formula. When the potential of the floating raft is in the protective range, the mean protective current density is about 14 mA/m<sup>2</sup>.

\* Contribution No. 1354 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.