

# 海洋钢筋混凝土结构牺牲阳极保护 系统电极行为的研究\*

季明棠 倪湘毓 杨芳英

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

**提 要** 于 1989—1990 年在室内条件下, 用牺牲阳极保护浸泡于海水中的多种钢筋混凝土试件, 测试不同试件中钢筋极化与阳极布局、涂层质量、涂层厚度及试件浸水情况的关系。结果表明, 牺牲阳极能有效地保护全浸海水中的混凝土试件, 对间断浸淋海水的试件也有一定的保护作用, 通过改善阳极安装工艺, 保护作用可望提高; 电偶电流在各阴阳极上的分布将随涂层质量、涂层厚度和试件浸水情况不同而异; 回路中电阻和电极极化情况是影响电流分布的主要因素。

**关键词** 海洋钢筋混凝土 牺牲阳极保护 电极行为

阴极保护被认为是防止海洋钢筋混凝土构筑物腐蚀的可行方法(Estel, 1985; Bemcett, 1986; Wyatt et al., 1987), 但是, 由于混凝土结构中钢筋表面覆有电阻率较大的厚混凝土层, 给阴极保护的实施带来一系列困难, 致使该类结构的阴极保护技术至今仍未成熟。Gjrv 等(1980)报道了混凝土平台因钢筋消耗了保护电流而引起牺牲阳极消耗增加的结果; Heuze (1980) 也提出, 在混凝土平台上安装牺牲阳极保护的设计构想, 但有关钢筋混凝土结构应用牺牲阳极保护的成功经验和有关研究尚很少报道。本文试图通过有关室内研究, 为最终实施海洋钢筋混凝土结构牺牲阳极保护进行技术探讨。

## 1 实验方法

**1.1 钢筋混凝土试件制备** 制备以下几种混凝土涂层厚度和质量不同的钢筋混凝土试件: 一组、 $\Phi$  为 10cm,  $h$  为 12cm 质地不同的 3 种混凝土柱状体: A 质地坚实(水泥:砂石:水 = 1:4.00:0.27), B 孔隙率高(水泥:砂石:水 = 1:9.26:0.15), C, C' 多孔性(水泥:砂石:水 = 1:6.4:0.20); 3 种柱状体中部均埋置一  $\Phi$  为 10mm 的钢筋, 在靠近钢筋处, 埋置一端部用薄水泥封闭的塑料导管, 导管另一端引出柱体外, 导管中储有含 1%  $\text{Cl}^-$  的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液, 作为盐桥。二组为二块 10cm  $\times$  10cm  $\times$  13cm 长方体试件: D 质地坚实(水泥:砂石:水 = 1:5.0:0.55), E 质料同 C 试件中分别埋置二块 5cm  $\times$  10cm 的  $A_3$  钢板, 焊接绝缘导线并引出试件外。三组为 15cm  $\times$  20cm  $\times$  20cm 长方体试件 F, 质料同 D; 在试件内深度分别为 5, 10 和 15cm 处各埋置一块 5cm  $\times$  10cm 的  $A_3$  钢板, 焊接绝缘导线并引出试件外, 试件 5 个面均用环氧树脂涂封, 使海水仅能通过一面渗入试件。制备 45cm  $\times$  13cm  $\times$  6cm 的试件 G, 在距试件底端分别为

\* 中国科学院“七五”重大项目, 87-18-04号。季明棠, 男, 出生于 1939 年 8 月, 副研究员。

收稿日期: 1993 年 5 月 13 日, 接受日期: 1994 年 3 月 29 日。

10, 20, 30 和 40cm 处理尺寸为  $5\text{cm} \times 10\text{cm}$  的  $A_3$  钢板;在试件一表面距底部 18 和 38cm 处各镶嵌一尺寸为  $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 3\text{cm}$  的方块形铝阳极;在上部铝阳极边周刻有宽 3mm、深 5mm 的沟槽,根据需要沟槽中可填充吸水性纤维;试件质料为水泥:砂石:水 = 1:5.00:0.65。各试件结构示于图 1。

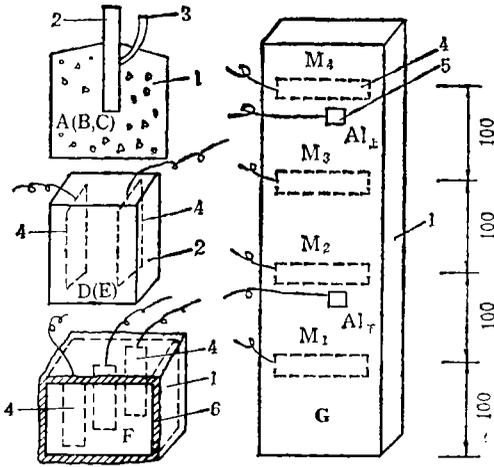


图 1 混凝土试件结构图

Fig. 1 Structure of concrete specimens for electrochemical measuring

1. 水泥块; 2. 钢筋; 3. 塑料管; 4.  $A_3$  钢板; 5. 铝阳极;  
6. 环氧树脂涂层。  $M_1-M_4$ , 不同部位的钢板试样;  
 $Al_+$ , 上部铝阳极;  $Al_-$ , 下部铝阳极。

**1.2 实验方法** 将以上试件分别浸泡于盛海水的试验槽中,海水每周更换一次。在室温条件下测试以下项目。

**1.2.1 电位检测** 将饱和甘汞电极分别插入 A, B 试件上部塑料管中,测钢筋腐蚀电位随时间的变化。

**1.2.2 保护实验** 任试件 C 自由腐蚀,而将 C' 与一铝阳极相连进行保护,200d 后破碎试件,观察钢筋腐蚀结果。

**1.2.3 电偶电流与涂层质量的关系** 密实试件 D 和疏松试件 E 浸泡海水中 3d 后,将 D 试件中两钢样(密<sub>1</sub>、密<sub>2</sub>)及 E 中钢样(松<sub>1</sub>、松<sub>2</sub>)分别与铝阳极瞬间偶接,而后互相并连再与铝阳极偶接,测量电偶电流及钢样极化电位随时间的变化。用 FC4 电偶腐蚀计测量电流。用瞬间断电法测量电位。参比电极为 Ag/AgCl 电极。

**1.2.4 电偶电流与涂层厚度的关系** 将试件 F 中各钢样与铝阳极相偶接,测量电偶电流在涂层厚度不同钢样上的分布及其变化。

**1.2.5 电偶电流与阳极布局及安装方法的关系** 将试件 G 直立放置,先使其下部约 10cm 部分浸入海水中,测定钢样与水下区阳极瞬间偶接电偶电流;13d 和 20d 时分别加注海水,至浸泡深度分别达 16cm 和 24cm;每天从试件顶部喷淋海水两次;实验后期用脱脂棉塞满镶嵌的阳极与试件间的沟槽,改善阳极与试件间的导电环境;在上述条件下分别测定水下区及水淋区阳极与试件中各钢样间电偶电流及钢样电位。

## 2 结果及讨论

**2.1 钢筋电位随时间的变化** 结果(图 2)表明,坚实混凝土试件 A 中钢筋电位开始较正,为  $-200\text{mV}$ (S.C.E., 下同)左右,但 20 余天以后,也开始缓慢变负,至 210d 已负移至近  $-600\text{mV}$ 。多孔混凝土试件 B 中钢筋电位初期即较负,为  $-600\text{mV}$  左右,但至 210d 后,基本无大变化。这与 A 质地密实,海水不易渗入,钢筋在高浓度  $(\text{OH}^-)$  环境下钝化较好有关。而 B 由于多孔,保护性差,海水很快渗入,破坏钢筋钝化。A 中钢筋电位未能保持稳定也缓慢变负是由  $\text{Cl}^-$  逐渐渗透,造成钢筋钝化膜逐渐破坏所致。说明质量较好的混凝土在海水中暴露足够长时间后,钢筋也会遭受腐蚀,有必要进行防护。

**2.2 牺牲阳极保护效果** 试件 C 自由腐蚀, C' 用铝阳极保护 200d 后,破碎试块,发现未保护的钢筋腐蚀相当严重而受保护的钢筋基本保持原有的光泽,说明牺牲阳极对抑

制海洋混凝土中钢筋的腐蚀是有效的,在混凝土试件质量不好存有多孔的情况下,牺牲阳极保护可有效地抑制因钢筋腐蚀所可能导致的构件的毁坏。

**2.3 电偶电流与涂层质量的关系** 坚实试件 D 和疏松试件 E 中各钢样单独与铝阳极及组合后与铝阳极瞬时偶接电偶电流(表 1)表明,涂层厚度和质量相同的钢样(密<sub>1</sub>与密<sub>2</sub>,松<sub>1</sub>与松<sub>2</sub>)电偶电流分别等同,这与钢样所处环境基本一样有关。松<sub>1</sub>、松<sub>2</sub>电流大于密<sub>1</sub>、密<sub>2</sub>,是因后者混凝土层坚实,回路电阻大于前者之故。

另外,多个钢样并接后再与阳极偶接,电偶电流并不等于单个电偶电流的简单加合,这是由于电偶电流是由驱动电压、回路电阻及氧去极化作用多种因素决定的。在由分别偶接变为并接偶接时,上述因子的变化不是一个简单的加合,这在设计中应当注意。图 3 表明,由质量不同的混凝土与牺牲阳极所构成的电偶体系中,流经质量好试件(密<sub>1</sub>)的分电流小于质量差试件(松<sub>2</sub>)的。这一规律对于真实保护体系是有利的,因涂层差的部位将优先得到保护。图 3 还显示,偶接延续 1d 多后,两种钢样电位均极化至  $-1\ 000\text{mV}$  以下,说明钢样得到了有效保护。另外,各分电流随时间推延逐渐减小,这可由钢样电位明显负移,阴极产物形成解释。以上现象表明,牺牲阳极保护混凝土结构系统中,存在有电流自调整作用,这对于真实混凝土结构的保护是有利的。

表 1 铝阳极与涂层质地不同钢样(包括组合后)偶接时电偶电流

Tab. 1 Galvanic current of couple of sacrificial anode and steel specimens in various mix concrete

偶接方式	铝+密 <sub>1</sub>	铝+密 <sub>2</sub>	铝+松 <sub>1</sub>	铝+松 <sub>2</sub>	铝+密 <sub>1</sub> + +密 <sub>2</sub>	铝+松 <sub>1</sub> + +松 <sub>2</sub>	铝+密 <sub>1</sub> +密 <sub>2</sub> + +松 <sub>1</sub> +松 <sub>2</sub>
电偶电流 ( $\mu\text{A}$ )	3 600	3 600	4 800	4 800	4 700	5 500	6 600

**2.4 电偶电流与涂层厚度的关系** 试件 F 中涂层厚度不同的 3 块钢样与阳极并接后各分电流随时间的变化(图 4)说明,电流分布与阴极钢样涂层厚度关系很大,涂层最薄的试样 C<sub>1</sub>(厚 5cm)获电流最大,而 C<sub>2</sub>(厚 10cm)和 C<sub>3</sub>(厚 15cm)则依次减小。这与上述钢样回路电阻依次增加有关。显然,实际结构保护的设计中应设法使阳极布局尽量合理,减小被保护各部回路电阻差异,以达保护电流均匀分布的目的。图 4 还显示,随着通电时间的推延, C<sub>1</sub> 电流逐渐减少, C<sub>3</sub> 电流有所增加,两者差异逐渐减小。这主要是 C<sub>1</sub> 极化充分,电位负移较大并可能有阴极产物生成,导致电流下降;而 C<sub>3</sub> 极化较弱,没有这一过程,并相反因海水更大程度地渗入,回路电阻降低,电流有所增加。可以推测,实际保护系统中,不同部位钢筋的极化电流及极化电位,初期可能差异较大,随着保护时间的推移,这些差异也会趋向减少,变得较为均匀,正如海水中钢结构阴极保护系统中所见那样。

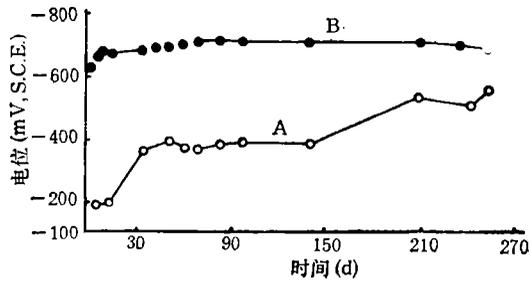


图 2 混凝土试件 A, B 中钢筋腐蚀电位随时间的变化  
Fig. 2 Potential-time curves of steel bar in concrete specimens A and B

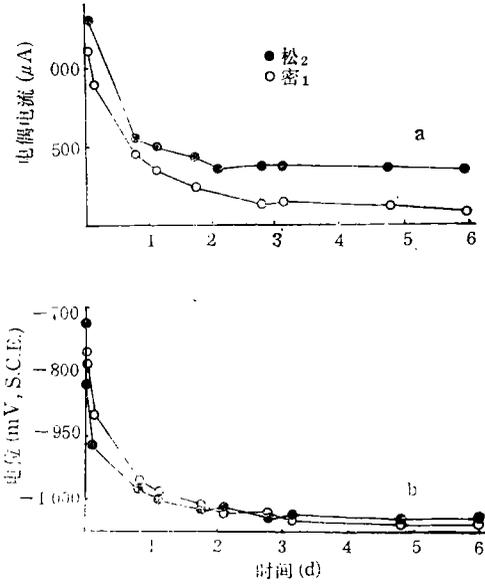


图 3 D,E 试件中涂层质地不同两钢样电偶电流 (a)和极化电位(b)随时间的变化

Fig. 3 Galvanic current-time (a) and potential-time (b) curves of two steel specimens in solid and porous concretes contacted with sacrificial anode in D, E

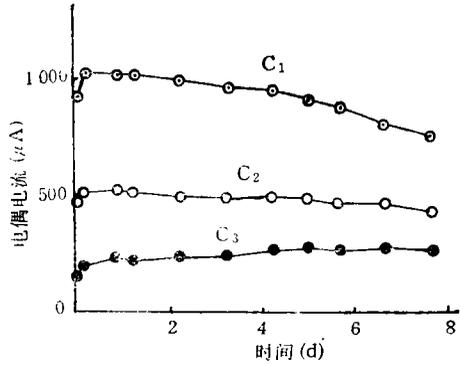


图 4 试件 F 中涂层厚度不同的钢样电偶电流随时间的变化

Fig. 4 Galvanic current-time curves of steel specimens of C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, in various thickness concrete contacted with sacrificial anode in F

2.5 电偶电流与阳极布局及安装方法的关系

试件 G 下部阳极 (Al<sub>下</sub>) 与下部两钢样 (M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>) 瞬间偶接电偶电流随时间变化见图 5a。可见,在前十几天,各钢样电流都不大,而在近 20d 时,电流大增。这是因近 20d 时,阳极和钢样由从被海水部分浸泡变为完全浸泡,回路电阻明显降低之故。其中 M<sub>2</sub> 电流大于 M<sub>1</sub>, 是因阳极 Al<sub>下</sub> 更为靠近 M<sub>2</sub>。可见,阳极和钢样被海水浸泡情况以及阳极与钢样的相对位置是影响电偶电流大小的主要

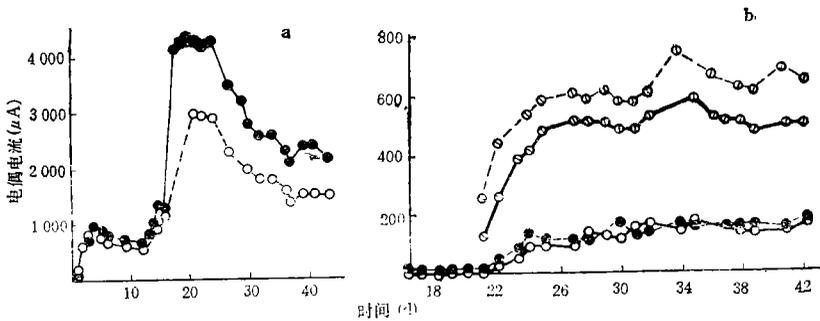


图 5 试件 G 铝阳极与钢样偶合瞬间电流随时间的变化

Fig. 5 Momentary galvanic current-time curves of couple of sacrificial anode and steel specimen in G

a. 下部铝阳极 (Al<sub>下</sub>) 与下部钢样: M<sub>1</sub>—○—; M<sub>2</sub>—●—。 b. 上部铝阳极 (Al<sub>上</sub>) 与上部钢样: M<sub>3</sub>, 不淋水, —○—; M<sub>3</sub>, 淋水—①—; M<sub>4</sub>, 不淋水, ---●---; M<sub>4</sub>, 淋水---①---。

因素。试件 G 上部铝阳极 ( $Al_{\perp}$ ) 与上部钢样  $M_3, M_4$  瞬间偶接电偶电流随时间变化见图 5b。当阳极和钢样所在区处于干燥状态, 电偶电流值很小, 可以肯定, 处于水区阳极, 此时难以发挥作用, 而当在该区喷淋海水后, 电偶电流则有较大上升, 特别是第 23d 在阳极边周填塞吸水纤维后, 电偶电流升值更大。可见, 对于混凝土结构的潮差区, 牺牲阳极通常难于发挥作用, 但只要在阳极设计和安装工艺方面进行一些改进, 改善系统的导电条件, 例如将阳极加工成细长条形, 沿垂直方向镶嵌于结构表面, 并在阳极边周和阳极与混凝土界面间预制沟槽, 添加高吸潮和储水性填充物或涂敷导电性好的涂层, 都有可能提高潮差区牺牲阳极的保护效果, 达到实用目的。

下部阳极与并接的  $M_1, M_2$  连续偶接电流-时间曲线以及相应的  $M_1, M_2$  电位-时间曲线表明, 随着偶接时间的推延, 偶接电流逐渐下降(图 6a)。这同样是与钢样极化电位负移, 阴极产物逐渐生成有关, 与熟知的海水中钢铁设施牺牲阳极保护规律一致。另外, 偶接不足一天,  $M_1, M_2$  电位均负于  $-900$  mV, 并且此后一直维持在  $-1000$  mV 以下(图 6b), 可见, 钢样得到了有效保护。以上电位极化情况进一步证明牺牲阳极保护水下区钢筋混凝土结构的可靠性。

### 3 结论

在室内进行的用牺牲阳极保护海洋钢筋混凝土试件的实验研究, 可以初步得出以下结论。

**3.1** 混凝土中的钢筋在海水长期作用下将会逐渐失去钝性, 遭受腐蚀, 其表现之一为电位逐渐负移。涂层质量越好, 厚度越大, 这一过程越缓慢。牺牲阳极保护能抑制腐蚀过程的发展。

**3.2** 牺牲阳极保护混凝土结构系统中, 电流在各阴、阳极上的分布主要由影响回路中电阻的诸因子以及电极化情况决定。牺牲阳极保护系统的设计应以此为依据进行。

**3.3** 牺牲阳极能有效地抑制全浸区钢筋混凝土结构的腐蚀, 对于潮间区钢筋混凝土结构通常由于导电条件不佳, 牺牲阳极难于发挥作用, 通过改善阳极设计和安装工艺, 能有助于阳极效能的发挥, 值得进一步研究开发。

### 参 考 文 献

- Bemcett, J., 1986, Corrosion of reinforcing steel in concrete and its prevention by cathodic protection, *Anticorrosion*, **33**(11): 12-15.
- Estel, P. F., 1985, Revised criteria for prevention of corrosion in offshore concrete structures, *Matier. Pref.*, **24**(7): 12-17.

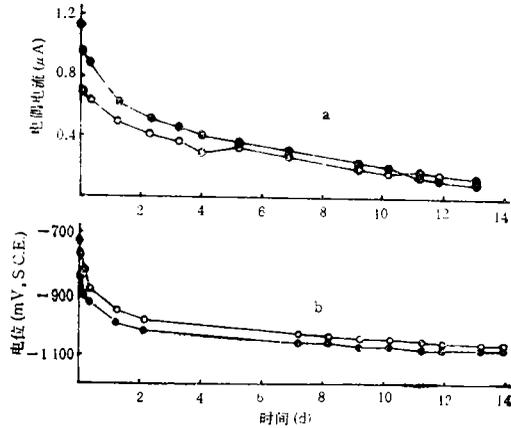


图 6 试件 G 下部铝阳极与钢样连续偶合时钢样电偶电流(a)及电位(b)随时间变化

Fig. 6 Galvanic current-time (a) and potential-time (b) curves of continuous couple of steel specimen and sacrificial anode in concrete in lower body of G

- Gjrv, O. E. et al., 1980, Cathodic protection of steel in offshore concrete platforms, *Mater. Perf.*, **19**(5): 49—52.
- Heuze, E., 1980, Cathodic protection of concrete offshore platforms, *Mater. Perf.*, **19**(5): 24—37.
- Wyatt, B. S. and Iruine, D. J., 1987, A review of cathodic protection of reinforced concrete, *Mater. Perf.*, **26**(11): 12.

## A STUDY ON ELECTRODE BEHAVIOUR OF SACRIFICIAL ANODE PROTECTION SYSTEM FOR MARINE REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Ji Mingtang, Ni Xiangyu, Yang Fangying

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071*)

### ABSTRACT

A 1989—1990 laboratory study was made on electrode behaviour and the feasibility in a protection system for reinforced concrete specimen using sacrificial anodes. Concrete specimens with various quality and thickness of the concrete layer were used in a protection system which can produce various electric couples according to the requirements of test were designed. The galvanic current produced by the Al basic sacrificial anodes under different conditions, the current distribution on the cathodic bar, and the polarization behaviour of the cathode were measured.

The results showed that the current distribution on each cathode and anode was different according to the quality, thickness and the submerged condition of concrete specimen and the electric condition around the sacrificial anode. The galvanic current level depended mainly on the resistance and polarization behaviour of the electrode. The bar embedded in the concrete can effect full cathodic polarization, by the Al sacrificial, and the corrosion of the concrete specimen could be controlled effectively.

For concrete specimens submerged intermittently, the sacrificial anode can't play effectively due to the poor electric condition, but the protection provided by the sacrificial anode could be raised by improving the design and installation methods of the sacrificial anodes.

**Key words** Marine reinforced concrete structure    Sacrificial anode protection    Electrode behaviour