

实际海洋条件下铝基牺牲阳极性能研究*

张 经 磊 郭 公 玉

(中国科学院海洋研究所)

铝基牺牲阳极是防止钢铁结构(尤其是海水中的)腐蚀的有效材料,它比镁基、锌基阳极具有更多的优越性^[2],在某些方面也比外加电流阴极保护法为好^[2]。所以近十几年来,在国外有了很大的发展^[2,8-16,18-22]。在我国,科学工作者也作了不少研究,并已开始应用^[1,3-5,7]。但是,有关阳极的各项性能参数,过去大部分是在实验室条件下测定的,至于在海洋工程实际应用条件下的各项参数及其与海水物理化学性质之间的关系,则尚未见报道。本工作是在室内研究的基础上^[7]进一步在实际海洋条件下进行的研究。通过此研究,弄清了主要合金成分和有关海水物理化学因素对阳极性能的影响以及工程设计中应注意的问题。

一、实验方法

1. 实验地点及环境因子

(1) 地点: 青岛中港,水深 7 米左右。

(2) 水温: 用普通水银温度计在现场测定,每天一次。

(3) pH: 每周用采水瓶在现场采水一次,带回实验室后立刻进行测定。仪器为 PS-2 型 pH 计。

(4) 电导率: 采水方法同(3)。水样采回后先保存起来,在整个试验期间分两批集中测定。在第二次测定时,把第一次测定后保存下来的水样重新进行测定,与第一次的结果相比较,未发现保存时间对结果有什么影响。使用仪器为 601MK III 型海水电导仪。

(5) 盐度: 根据国际海洋学常用表^[17]由电导率换算得出。

2. 试验阳极样品制备

(1) 冶炼: 用自动控温电炉在石墨坩埚中熔炼。经过精炼后在水冷模具中浇铸成上端略粗下端略细的棒状体,形状和尺寸如图 1 所示。

(2) 加工: 在阳极粗端中心打孔旋入一根 $\phi 12 \times 300$ 毫米的铜棒,棒上端弯成钩形作导电及悬挂阳极之用,联接导线焊接在此棒上端。阳极实验面积为 470 平方厘米。表面未经加工,保持原始状态。其余面积、铜棒及导线接头全部用环氧树脂、塑料密封带和沥青封固。同时称取阳极重量作为实验前的原始重量。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 745 号。

本文得到纪明侯教授指导,特此致谢。

本刊编辑部收稿日期: 1981 年 4 月 29 日。

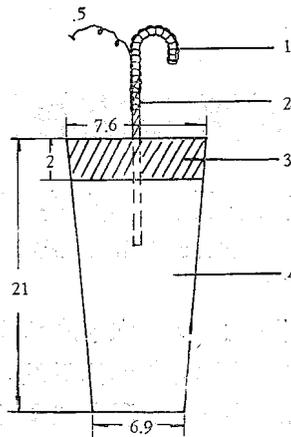


图1 铝基阳极构造示意图(尺寸:厘米)

1.用沥青塑料封固的铜棒;2.密封交接部位;3.环氧树脂封固部位;4.铝阳极裸露部位;5.导线

(3) 成分: 实验共选9种不同成分的阳极。1号阳极用L₀₃级铝锭熔炼(99.99%Al, 0.003%Fe, 0.0025%Si, 0.005%Cu), 其余8种均用L₁级铝锭熔炼(99.7%Al, 0.16%Fe, 0.16%Si, 0.01%Cu)。成分分析结果列于表1。

表1 阳极材料合金成分(%)

序号	Zn	In	Cd	Sn	Bi	Mg	Ga	Zr	Be	B	杂质		Al
											Cu	Fe	
1	2.87	0.024	0.015								<0.01	0.16	余
2	2.87	0.024	0.015								<0.01	0.16	余
3	4.64	0.034	0.013								<0.01	0.17	余
4	2.64	0.023									<0.01	0.17	余
5	2.55	0.035						0.0011	0.001	0.0036	<0.01	0.16	余
6	2.52	0.024							0.0008	0.0027	<0.01	0.17	余
7	0.52	0.030				2.91				0.0022	<0.02	0.17	余
8	4.82			0.09			0.024				<0.01	0.14	余
9	9.95			0.57	0.55		0.069				<0.01	0.14	余

3. 试验安装 选用钢筏作为阴极(保护对象)。筏的水下面积为65.5平方米。准备好的阳极用棕绳悬挂于海水中。阳极导线和阴极导线分别连接在三个测试箱中。每种阳极平行试样三块。阳极布置如图2所示。

4. 阳极输出电流和阴、阳极电位测量

(1) 阳极输出电流测量: 如图3所示, 每块阳极在测试箱中分别通过一个开关与阴极相连。测量时将电流表跨接于开关两端, 然后切断开关, 此时电流表读数为该阳极的输出电流。记录读数后, 先接上开关再断开电流表, 这样可以使阳极回路一直处于闭合状态, 防止产生冲击电流。所用电流表是用零阻电流表校正过的低阻电流表。测量周期为每天一次。

(2) 阳极电位: 用高内阻MF-10型万用电表测定。参比电极为Ag/AgCl电极。每

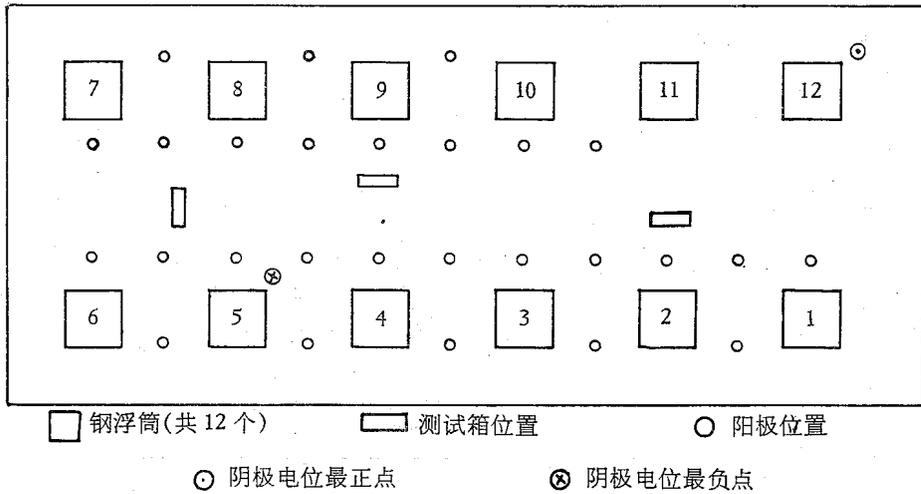


图 2 阳极布置示意图

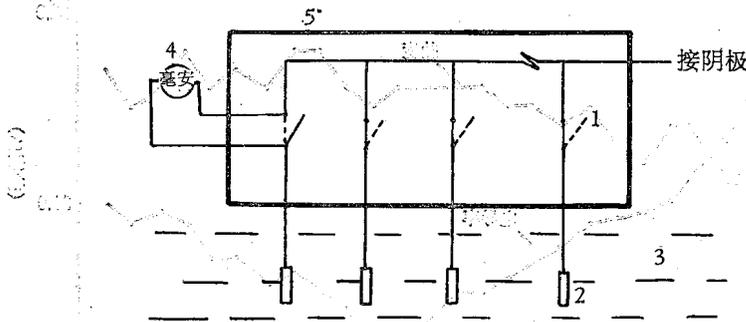


图 3 阳极输出电流测试示意图

1. 开关; 2. 阳极; 3. 海水; 4. 毫安表; 5. 测试箱

周测量一次。

(3) 阴极电位：使用仪器和测量周期同(2)。

5. 阳极消耗量的测定 将试验过的阳极拍照并详细记录阳极表面溶解特征以后，先用软刷刷去较疏松的腐蚀产物，再去掉封固物和导线等。然后用化学方法^[6]清洗阳极，除去腐蚀产物，水洗、干燥并称重。根据阳极的原始重量计算阳极的消耗量。

二、实验结果

1. 环境因子 试验期间海水的温度、pH、电导率及盐度随时间的变化示于图 4、5。由图可以看出，海水温度和电导率随时间的变化较大，温度最高为 20℃ 以上，最低为 0℃ 以下；电导率最高值为 46 毫姆欧/厘米以上，最低为 24 毫姆欧/厘米左右；而 pH 和盐度随时间的变化则较小，曲线基本是平的。

2. 阳极输出电流和阴、阳极电位

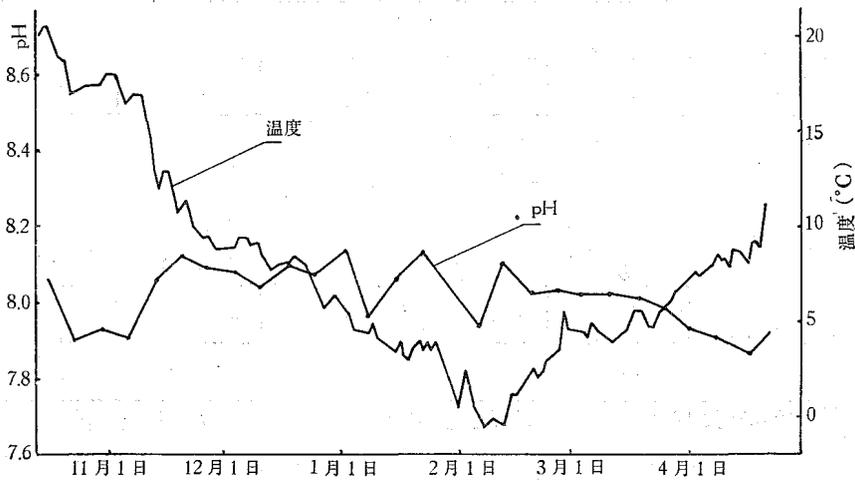


图4 海水温度、pH 随时间的变化

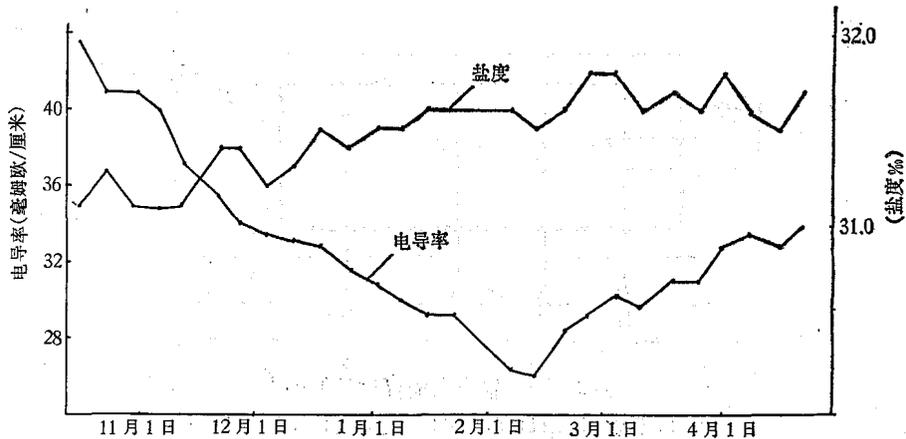


图5 海水电导率、盐度随时间的变化

(1) 阳极输出电流: 9种阳极的输出电流随时间变化的规律基本一致, 只是大小有所不同, 现以1号阳极为代表绘出其变化曲线如图6。

(2) 阳极电位: 9种阳极的稳定电极电位列于表2第3栏中, 其随时间变化的规律示于图7,8,9。由图可知1—6号阳极的稳定电位都在-1.050伏以上, 而7—9号阳极的电位较正, 在-1.000伏左右。

(3) 阴极电位: 由于钢筏已下水几年, 表面长满了铁锈及附着生物, 其自由腐蚀电位偏正, 其值为-600毫伏阳极接通后两天, 阴极电位均达到-800毫伏以上。图10为钢筏电位最正点和最负点随时间的变化曲线。由图可看出, 钢筏各部位一直处于完全保护电位之内。

3. 阳极溶解特征 试验结束后, 在去除腐蚀产物之前和之后对阳极表面的溶解特征进行了详细观察、记录和拍照。观察记录结果列于表3, 照片见图版I。

4. 阳极的电流效率 阳极的平均消耗量(实验后阳极的失重)和实际发电量(根据

表2 铝基阳极性能及与锌、镁基阳极的比较

阳极号	平行试样号	阳极电位(伏) (Ag/AgCl)	电流效率 (%)	平均电流效率 (%)	平均电容量 毫安·小时/公斤	铝阳极电容量	铝阳极电容量
						锌阳极电容量 ¹⁾	镁阳极电容量 ²⁾
1	1	1.08	83	83	2404	3.1	2.18
	2	1.08	84				
	3	1.08	83				
2	1	1.07	78	81	2358	3.03	2.13
	2	1.07	86				
	3	1.07	79				
3	1	1.05	80	75	2169	2.78	1.96
	2	1.05	73				
	3	1.05	73				
4	1	1.07	78	80	2340	3.00	2.12
	2	1.07	78				
	3	1.07	85				
5	1	1.06	73	75	2168	2.78	1.96
	2	1.06	78				
	3	1.06	73				
6	1	1.06	77	79	2299	2.95	2.08
	2	1.06	81				
	3	1.06	79				
7	1	1.01	72	75	2199	2.82	1.99
	2	1.01	74				
	3	1.01	78				
8	1	0.98	42	43	1236	1.59	1.12
	2	0.98	43				
	3	0.98	44				
9	1	0.97	61	47	1588	2.04	1.44
	2	0.97	53				
	3	0.97	58				

1) 与效率为 95% 的 Zn-Al-Cd 阳极相比。

2) 与效率为 50% 的镁基合金阳极相比。

阳极的输出电流用累计法计算)列于表 4。

根据法拉第定律用下式计算阳极的理论发电量 $Q_{理}$ 。

$$Q_{理} = 96500 W_{失} \left(\frac{n_A}{W_A} \times A\% + \frac{n_B}{W_B} \times B\% + \frac{n_C}{W_C} \times C\% + \dots \right)$$

式中: W_A, W_B, W_C, \dots 分别为阳极合金中组分 A, B, C, \dots 的克原子量;

n_A, n_B, n_C, \dots 分别为阳极合金中组分 A, B, C, \dots 的价数;

A%, B%, C%, \dots 分别为阳极合金中组分 A, B, C, \dots 的百分含量。

阳极的电流效率由下式求得:

$$E = Q_{实} / Q_{理} \times 100\%$$

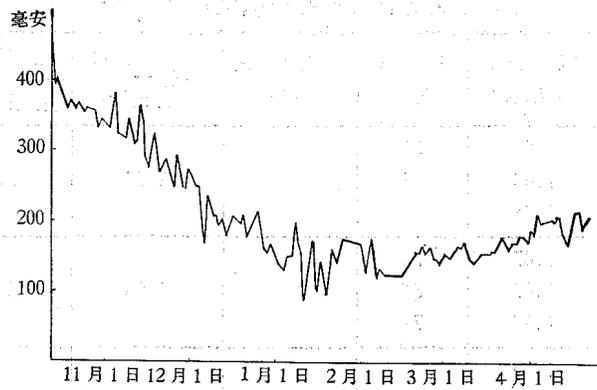


图6 1号阳极输出电流随时间的变化

表3 试验后的阳极表面特征

阳极号	试验后阳极表面特征	清洗后阳极表面特征	腐蚀产物溶解情况
1	表面基本无腐蚀产物,呈均匀细小的麻点腐蚀,整个表面呈银灰色。	与清洗前基本相同	最好
2	表面有较厚的腐蚀产物,白色,疏松,可用木片刮掉,有1/5面积露出腐蚀过的基体金属,能看到明显的蚀坑。	坑状腐蚀明显,分布均匀	好
3	同2号	同2号	好
4	腐蚀产物白色、疏松,可用木片刮掉,其下为较硬的灰色产物;有1/2的面积露出腐蚀过的基体金属。	同2号	好
5	在腐蚀产物上附着水草状植物,但不多;个别部位露出基体金属,其余情况同4号。	同2号	好
6	同5号	同2号	好
7	腐蚀产物疏松,白色,在阳极下端3厘米左右及端面未起作用,保持原始状态。	下端未起作用,其余同2号	较好
8	腐蚀产物为冻粉状,刷清后可看到有60%以上的面积仍保持原始状态;在冻粉状下面为坚硬的,用木片刮不动的深灰色腐蚀产物。	产物很难清洗,大部分(60%)表面未活化	差
9	腐蚀产物特征同8号;但保持原始表面状态的面积比8号多一些。	基本同8号	差

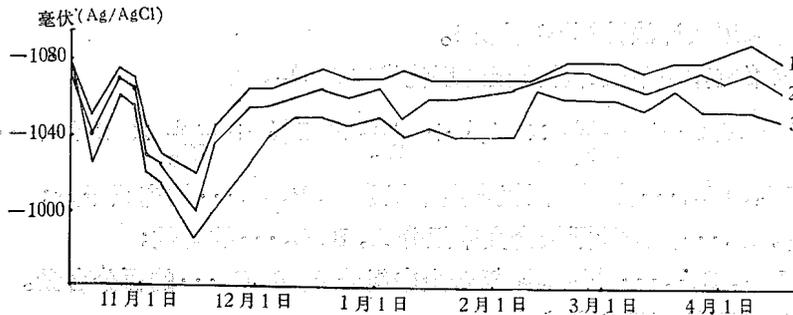


图7 1, 2, 3号阳极电位随时间的变化

表 4 试验期间阳极的总发电量($Q_{\text{实}}$)和失重($W_{\text{失}}$)

阳极号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_{\text{实}}$ (10^4A)	355	295	255	263	254	288	178	92	.66
$W_{\text{失}}$ (g)	409.0	349.2	327.7	313.2	325.5	348.4	224	206.7	115.7

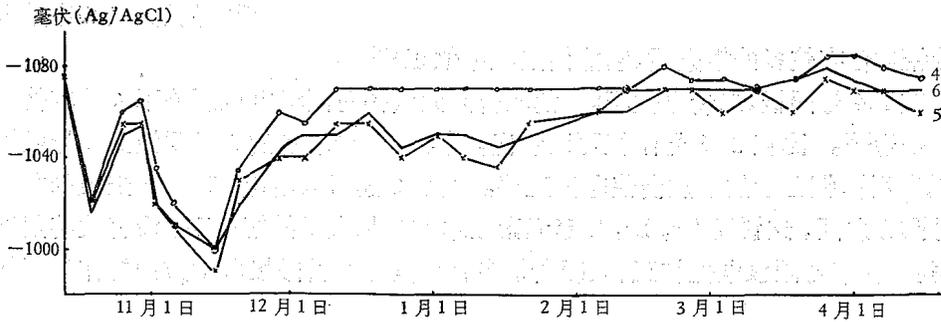


图 8 4, 5, 6 号阳极电位随时间的变化

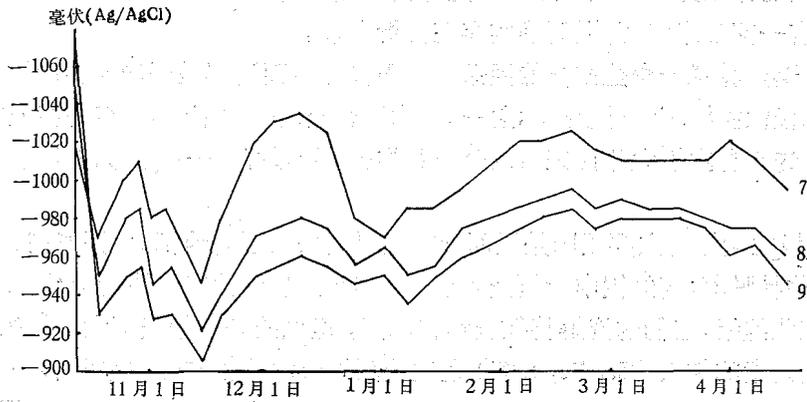


图 9 7, 8, 9 号阳极电位随时间的变化

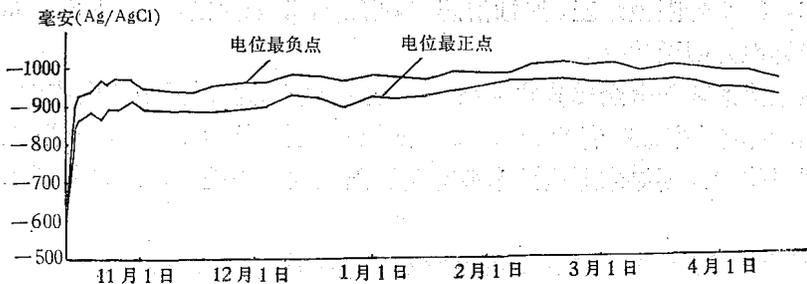


图 10 阴极电位随时间的变化

9 种阳极的电流效率和单位重量的电容量列于表 2 第 4—6 栏。

三、讨 论

1. 阳极电位与合金成分的关系 由表 2 和图 7, 8, 9 可知, 9 种阳极的闭路电位由负到正的排列次序为 1, 4, 2, 5, 6, 3, 7, 8, 9。1 号阳极最负为 -1.08 伏, 9 号阳极最正为 -0.97 伏。

比较 1, 2 号阳极, 其合金成分相同, 只是铝的纯度不同, 可见二者电位的不同主要是由于铝的纯度所引起。很明显, 用纯度高的铝锭冶炼阳极有利于电位的负移, 这是因为纯度低的铝中含有较多的铜杂质, 它能使阳极电位正移^[17]。

比较 2, 4 号阳极, 二者电位相同, 说明合金元素镉对阳极电位影响不大。其他学者也有类似报道^[19]。比较 2, 3 号阳极可以看出, 锌、镉含量较多的 3 号阳极比 2 号阳极电位正, 这说明锌、镉含量的增加会使电位正移。由表 2 还可以看出, 5, 6 号阳极的电位值在 3, 4 号阳极之间, 这说明 Zr, Be, B 等元素在本实验加入量的情况下, 没有改善阳极电位的作用。7, 8, 9 号阳极电位较正, 表明所加各种元素在改善阳极电位方面的作用不如镉明显。

7 号阳极含有镁, 一般认为镁可以使阳极电位负移, 并且效果比较明显; 但我们这次实验结果, 镁的作用并不明显。这可能是浇铸时偏析所致。从阳极的溶解状态(表 3 和图版 I)可知, 有一部分未溶解, 说明确实存在偏析现象。

2. 阳极溶解特征与合金成分的关系 阳极的表面溶解是否均匀和产物是否容易脱落是衡量阳极性能好坏的重要指标之一。由于合金成分的不同。溶解特征有很大的不同。所研究的 9 种阳极大体说来可以分成四类: 1 号最好, 2—6 号为好, 7 号较好, 8, 9 号为差。

1 号阳极性能好的主要原因是里面含有镉以及采用了高纯铝。镉能使表面溶解均匀, 腐蚀产物易脱落; 高纯铝中含铜杂质少, 不容易引起腐蚀产物的附着^[20]。2—6 号阳极采用的是工业纯铝, 它们的溶解特征虽稍有不同, 但总的来说相差不大; 这说明在本实验条件下某些元素的加入 (Zr, Be, B 等) 在改善阳极溶解性能方面的作用不明显。7 号阳极含有 2.91% 镁, 但如前所述, 由于存在偏析, 在阳极下部有一部分未起作用; 其余部分溶解产物虽较疏松, 但与上述几种相比, 其粘附性稍大一些; 如要进一步研究, 必须首先改进冶炼工艺。8, 9 号阳极最差, 腐蚀溶解产物坚硬, 很难除去, 这说明 Sn, Ga, Bi 元素在改善阳极溶解性方面无效果。

3. 阳极电流效率与合金成分的关系 合金成分不同, 对阳极的电流效率影响很大。由表 2 可知, 电流效率最高者为 83% (1 号阳极), 最低者为 43% (8 号阳极)。本实验的一个重要目的就是要寻求那些元素最有利于阳极效率的提高, 以选出最好的阳极配方。

从表 2 可知, 1, 2, 4, 6 号阳极的电流效率都比较高, 在 80% 左右; 3, 5, 7 号阳极次之, 在 75% 左右; 8, 9 号最差。与表 1 的合金成分对照可知, 1, 2, 4, 6 号阳极的锌、镉含量基本相同, 而其他元素则不完全一样。这一点可以说明锌、镉对阳极性能起着主导作用, 其他元素加入的作用不明显。在这四种中, 1 号阳极的电流效率最高, 说明铝的纯

度对提高阳极效率有一定的作用。3, 5, 7 号阳极中钢的含量基本相同, 但比上述四种高(见表 1), 其他元素含量也不相同, 这说明钢在这三种合金中起着主要作用, 而其他元素的有无或增减影响并不大。根据文献[20]报道, 锌可以在一个较大的范围内(0.5—15%)变化, 而对阳极效率无明显影响。所以, 1—7 号阳极的电流效率实际上主要受钢含量控制。后 3 种的效率低, 说明钢含量的增加不利于电流效率的提高。由实验结果可知, 钢含量控制在 0.024% 比较好, 超过 0.03% 电流效率就会明显下降。

8, 9 号阳极不含钢, 而含锡、镓等元素, 其电流效率比其他阳极明显下降。说明这些元素在本实验加入量情况下对提高效率作用不大。

表 2 还列出了由阳极效率换算成的阳极电容量, 以及与锌基、镁基阳极的比较结果。1—7 号阳极的电容量是锌基阳极的 3 倍左右, 是镁基阳极的 2 倍左右。所以, 从电流效率和电容量来衡量, 1—7 号阳极都是很好的阳极材料。

4. 影响阳极电流输出的因素 阳极输出电流的大小, 直接影响阳极所能保护的面积和使用寿命, 是一个很重要的设计参数。在实际应用中, 影响阳极电流输出的因素比较多, 归纳起来主要有三个方面: (1) 阳极材料性能; (2) 阴极材料性能; (3) 环境因子。

比较表 2 中的阳极电位, 表 3 中的溶解特征及表 4 中的阳极实际输出总电量, 可以看出, 凡是闭路电位负, 溶解产物易脱落的阳极, 其输出总电量就大; 反之则小。这主要是因为阳极电位负时输出电流的驱动力大, 溶解产物易于脱落使回路电阻减小。

不同阴极材料的保护电位不同, 凡要求校正保护电位的材料, 其阳极的输出电流就大。

为了研究阳极输出电流与某些环境因子的关系, 本实验测定了海水的 pH、温度、电导率及盐度随时间的变化, 定性观察了海水流动、风浪及污染(主要指海水混浊变脏)情况, 并将这些结果与阳极输出电流进行了比较。由图 4, 5, 6 可知, 电流输出随时间变化的曲线与海水电导率、温度随时间变化的曲线趋势基本一致。这充分说明阳极输出电流与海水的电导率和温度密切相关。电导率高、温度高, 则阳极的输出电流大。从变化曲线看, 似乎海水盐度和 pH 与阳极输出电流无关。但是, 海水电导率除温度的影响外, 也受盐度和 pH 的影响。所以, 阳极电流输出大小除受电导率、温度影响外, 也必定受盐度和 pH 的影响, 只是在本实验中没有显示出来。

另外, 从定性观察中发现, 水流速度和污染对阳极电流输出也有一定影响。凡是风浪大、流速高及海水透明度高时, 阳极电流输出就大, 反之则小。导致这一现象的原因可能是, 风浪和流速大时, 海水中的溶解氧增加, 使阴极的去极化作用加强, 阴极和阳极之间的电位差变大; 同时, 由于冲刷作用使阳极溶解产物易于脱落, 减少了回路电阻。图 6 中阳极输出电流曲线的跳跃波动, 就是由上述原因引起的。海水污染的影响比较复杂, 需要进一步研究。

上述关系对于工程设计非常有用。例如, 在风浪大、温度高、电导率高的南海, 阳极的电流输出相对要大些, 在电导率小、风浪小的河口地区, 阳极的电流输出要小些。工程设计中计算阳极寿命时必须注意这点。

在工程设计时, 有人还用 Dwight 经验式^[15, 21]来计算阳极的电流输出。该方程为:

$$I = \frac{\Delta E L \rho}{0.0626 \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)}$$

其中, I 为阳极输出电流(安培);

ΔE 为阴、阳极之间的闭路电位差(伏);

L 为阳极长度(英寸);

ρ 为海水电导率(姆欧/毫米);

r 为阳极有效半径(英寸);

0.0626 为换算因子,当其他量采用不同单位时,其值要作相应变动。

为了验证该方程,我们将实验测定值与该方程的计算值进行了比较,见表 5。

表 5 阳极电流实测值与计算值的比较¹⁾

电流 (毫安) 项目	阳极								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
实 测	199	136	115	134	108	142	50	16	5
计 算	191	153	115	162	115	143	48	10	4

1) 由于各参数经常变动,为便于比较,本表根据一天内测得的参数进行计算和比较。

由表 5 可知,两者相当吻合。因此,在实际工程中,可以用该方程来估算阳极的输出电流和确定阳极的使用寿命。但有三点必须注意:(1) 电导率 ρ 的取值。由图 5 可知,海水电导率在一年内变化很大,如果取某一次的测定值进行计算,可能造成很大的误差,所以,必须取常年平均值。(2) 阳极长度和有效半径应取使用过程中的平均值(因为阳极不断溶解,长度和半径不断减小)。计算阳极最小输出电流时,应取其最终尺寸。(3) 在海水中保护钢铁结构时 ΔE 取 0.2 伏,即取阳极的闭路电位 -1.05 伏,保护电位 -0.85 伏。如果阳极电位不同(即闭路电位不同)或者阴极保护电位要求不同时(例如对铜保护), ΔE 必须根据实际情况进行适当修正。

四、结 论

1. 综合考虑阳极的电流效率、闭路电位、溶解特征和输出电流,其性能最好者为 1 号,其次为 2,4,6 号,再次为 3,5,7 号,最差为 8,9 号。其中 1—6 号可作为海洋工程中钢铁构筑物阴极保护用阳极材料。

2. 所推荐的 6 种阳极材料的电容量与目前国内外所用的最好的锌基阳极相比高 3 倍左右,与镁基阳极相比高 2 倍左右,所以,是很有经济意义的阳极材料。

3. 合金元素铟对阳极效率有明显影响,用高纯铝锭加 3%Zn, 0.024%In, 0.015%Cd 熔炼的阳极性能最好。铟含量达到 0.03% 后,其性能便出现明显下降。

4. 阳极电流输出大、小除受阳极本身性能影响外,海水电导率,温度以及风浪等的影

响也很大。工程设计时，必须考虑不同地点的有关物理化学因素。阳极输出电流可以根据实测参数，用 Dwight 方程计算，其结果与实测值基本一致。

参 考 文 献

- [1] 大庆石油科学研究设计院,1979. 铝合金牺牲阳极试验与应用. 金属腐蚀与防护4: 21—25.
- [2] 上海交大560教研组,1979. 牺牲阳极法阴极保护之现状及前景. 同上1, 2: 52—57.
- [3] 上海交大560教研组,1979. 铝合金牺牲阳极. 同上4: 1—7.
- [4] 天津大学化工系防腐教研组,1979. 铝合金牺牲阳极性能小结. 同上4: 8—14.
- [5] 北京有色金属熔炼厂技术科牺牲阳极组,1979. 铝基牺牲阳极在防腐工程上的应用. 同上4: 25—29.
- [6] 张经磊,郭公玉,1980. 铝基牺牲阳极清洗除锈方法. 海洋科学4(总14): 19—21.
- [7] 郭公玉,张经磊,1979. 铝基牺牲阳极在海水中电化学性能的研究. 金属腐蚀与防护4: 15—20.
- [8] 小林豊治,1976. 電気防食の応用と展望. 防錆管理 20(12): 23—27.
- [9] 太田元久ら,1966. Al 陽極による港湾施設の電気防食. 防食技術 15(3): 102—107.
- [10] 日本学術振興会編,1972. 金属防蚀技術便覧(新版). 日刊工業新聞社, 588—590.
- [11] 特許公報,昭50-21285, 1975,7.
- [12] 筧 建彦,1974. 海洋開発設備の腐食と防食について. 防錆管理 18(8): 11—22.
- [13] 筧 建彦,1975. 電気防食技術の最近の話題. 金属 45(8): 17—21.
- [14] Butgbacher, J. A., 1968. Cathodic proteion of offshore structures. *Materials Protection* 5(12): 15—17.
- [15] Dugdale, P. J., 1973. Culeulations of the resistance to earth of vertical galvanic anodes. *Anti-Corrosion* 20(1): 15—18.
- [16] Lennox, T. J. Jr. et al., 1968. A Study of Electrochemical efficiencies of aluminum galvanic anodes in sea water. *Materials Protection* 7(2): 33—37.
- [17] National Institute of Oceanography of Great Britain and UNESCO, 1966. International Oceanographic Table.
- [18] Ponchel, B. M. et al., 1968. Performance of Al-Zn-Sn alloy anodes in sea water service. *Materials Protection* 7(3): 38—41.
- [19] Reding, J. T. et al., 1966. The influence of alloying elemants on aluminum anodes in sea water. *Ibid.* 5(12): 15—17.
- [20] Sakano, T. et al., 1966. Tests on the effects of indium for high performance aluminum anodes. *Ibid.* 5(12): 45—50.
- [21] Schrieber, C. F. et al., 1967. Field Testing a new Aluminum Anode. *Ibid.* 6(5): 33—36
- [22] Бибииков, Н. Н. Е. Я. Люблинский Л. В. Ловарова, 1971. Электрохимическая защита морских судов от коррозии. издательство Судостроение, Ленинград, Стр. 96—129.

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF AL-BASIC SACRIFICIAL ANODES IN THE SEA*

Zhang Jinglei and Guo Gongyu

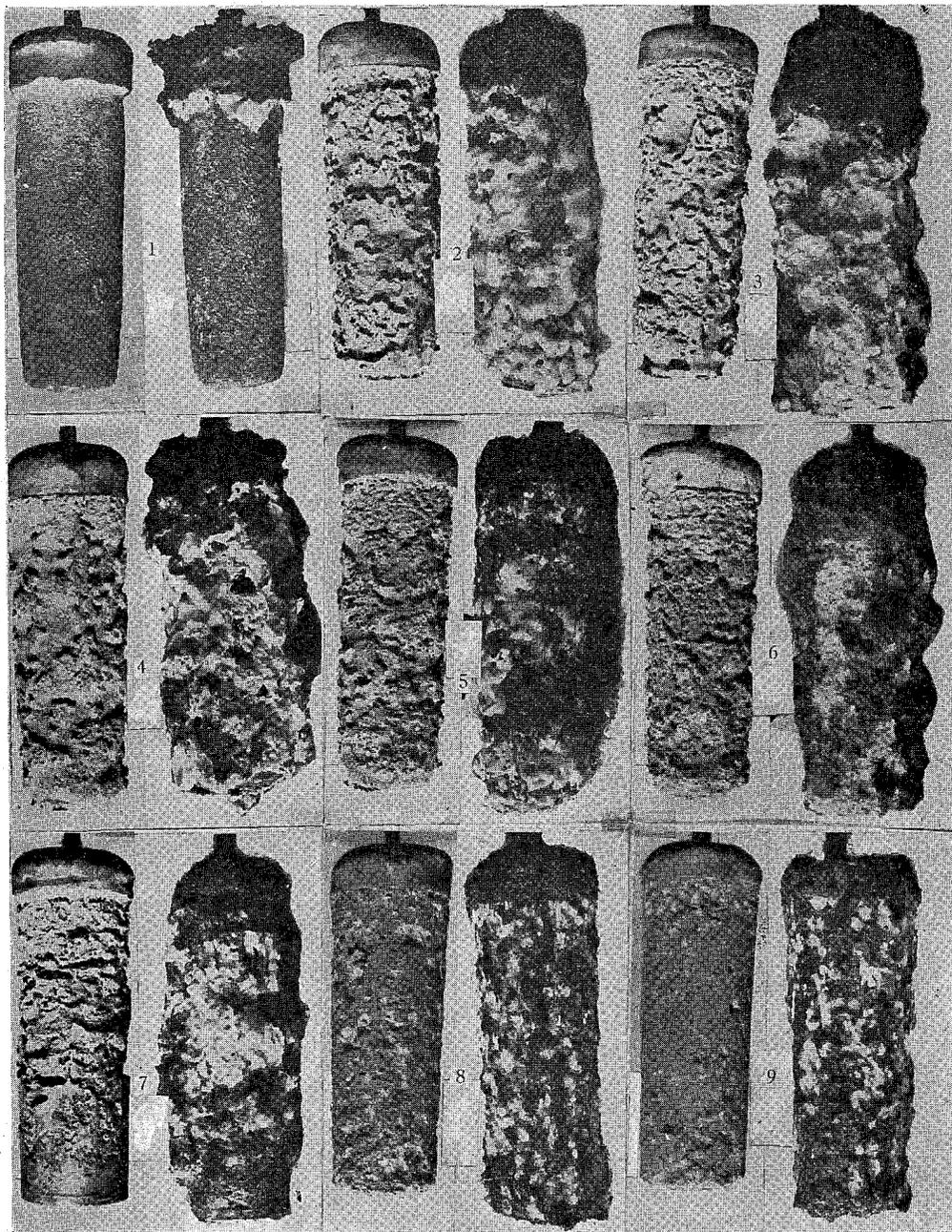
(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

On the basis of laboratory investigation, 9 types of Al-basic sacrificial anodes with different compositions are selected and studied in the harbour. Anodic closed circuit potential and output currents are also measured. Anodic surface resolved characteristics are recorded in detail at the end of experiment. Current efficiencies and discharge capacities of anodes are calculated. Environment factors: temperature, conductivity, pH and salinity of sea water are measured too.

It can be seen from the results that (1) properties of No. 1 anode are the best, next come Nos. 2,4,6,3,5,7,8,9 in that order. Nos. 1—6 anodes may be applied to protect marine constructions as anodic materials in marine engineering and their discharge capacities are 2—3 times as large as Mg-basic and Zn-basic anodes; (2) effect of alloy element In (indium) on anodic properties is evident, content of In being controlled at about 0.024%. If content of In exceeds 0.03%, properties of anode deteriorate; (3) output currents are affected by anodic properties themselves, also by temperature and conductivity of sea water. When temperature and conductivity come down, anodic output current decreases.

* Contribution No. 745 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.



试验后阳极表面状态
右：酸洗前；左：酸洗后