

无缆水下机器人阴极保护设计*

史志明 林海潮 宋光铃 曹楚南

(中国科学院金属腐蚀与防护研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室 沈阳 110015)

摘 要 对“探索者号”深海水下机器人用材 POD919 与 LD31 铝合金阴极保护进行模拟实验研究的基础上,根据机器人的内部结构的紧密性与复杂性,对机器人的阴极保护进行了设计,选择适当形状的牺牲阳极,有效保护水下机器人免受海水腐蚀。

关键词 水下机器人 POD919 铝合金 LD31 铝合金 阴极保护设计

学科分类号 TG174.1

我国深海水下机器人的主要选材是高强度铝合金 POD919 与 LD31,它们都具有较高的比强度.由于铝合金在海水中表面钝化膜常因局部破坏而发生局部腐蚀,国内外对水下机器人的保护通常是在铝合金表面采用涂层加电化学保护的方法.但从已有的情况来看,由于选择牺牲阳极或布置不当,当表面涂层破裂时,难以对破损处实施有效的保护,典型的现象就是机器人出水后不久,在涂层破损处出现一些白斑点,干燥后有粉末.这可能造成机器人服役寿命缩短,或诱发突发性事故.

对铝合金的阴极保护设计与计算的报道^[1-3]较少,这是因为铝合金本身较活泼,在海洋环境中其抗蚀性较差;由于对铝合金实施阴极保护时,条件比较苛刻,常会因保护不当而加速铝合金的腐蚀.因此对铝合金进行阴极保护通常是比较慎重的.本文在对机器人用铝合金阴极保护进行模拟实验研究的基础上^[4],具体结合机器人的结构特点,探索了铝合金的阴极保护设计及实施的可行性.

1 阴极保护对象的基本情况

(1) 水下机器人的主要选材为 Pod 919 铝合金与 LD31 铝合金. Pod 919 铝合金在海水中的自腐蚀电位为 -0.86V (vs. SCE 下同),阴极保护所需的保护电流密度为 $0.1\sim 10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$, LD31 铝合金的自腐蚀电位为 -0.74V ,阴极保护所需电流密度为 $0.2\sim 6\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

(2) 机器人的尺寸为:直径 1190 mm,长度为 4400 mm.

(3) 海水电阻率为 $20\sim 30\ \Omega\cdot\text{cm}$.

(4) 机器人整体需要保护的面积为 $20\ \text{m}^2$ 左右.

(5) 机器人内部构架采用阳极氧化加涂层作为基本防护措施,涂层完好时,表面电阻大于 $10^6\ \Omega\cdot\text{m}^2$.

* 863 重点项目资助及中科院“百人计划”项目资助
收到初稿: 1999-04-08, 收到修改稿: 1999-06-08

- (6) 机器人内部结构复杂, 会产生屏蔽作用.
- (7) 机器人浮力材与构架之间紧密接触, 腐蚀介质为薄层海水.

2 阴极保护参数的确定

2.1 最小保护电流密度

通过实验室模拟实验得出, 对于无涂层的 POD919、LD31 铝合金阴极保护电流密度范围为 $0.1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 随着保护时间的延长所需的保护电流变小, 最后稳定在 $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

2.2 最佳保护电位

由于铝合金具有两性腐蚀, 即阳极溶解与阴极溶解, 阴极溶解的实质是铝合金表面由于阴极电位过负而引起表面 pH 值增高, 从而引起碱腐蚀. 通过实验证明, 铝合金的最佳保护电位范围在 $-0.95 \sim -1.15 \text{ V}$.

2.3 牺牲阳极的选择

通过实验筛选和对三类牺牲阳极: 镁系、铝系和锌系阳极的电化学性能测试分析, 结果表明镁系合金阳极由于驱动电压过高, 产生过保护从而引起铝合金的碱腐蚀; 铝系合金阳极在干湿交替的腐蚀环境中, 因铝合金在空气中氧化而失去活性; 锌系合金阳极电位适中, 能有效地保护这两种铝合金.

3 敞开体系下阴极保护方案的选择

正常状态下, 机器人构件如果处于敞开的海水体系中, 阴极保护不受屏蔽效应以及隙缝的影响, 则选择如下设计方案.

3.1 牺牲阳极的布置

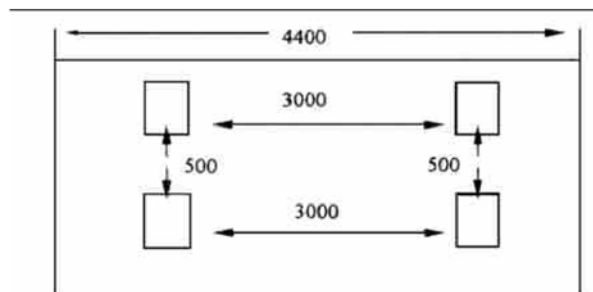
在机器人的下部布置 4 块锌阳极, 位置如图所示(单位: mm).

阳极的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 重量约为 456.96 g . 4 块阳极的总重量为 1.827 kg .

3.2 寿命估算

$$T_1 = 1.084 \text{ a/kg} \times 1.827 \text{ kg} = 1.98 \text{ a}$$

T_1 为机器人表面全裸露时连续浸泡于海水中的寿命; 当表面有涂层时, 由于保护所需电流要小 1 个数量级, 因此估计寿命要增加一个数量级, 即 20 多年; 当表面涂层破损达 30% 时, 寿命估计在 7 a 左右. 如果阳极消耗完, 可以重新安装新的阳极.



4 针对水下机器人的特点选择阴极保护方案

针对水下机器人的特点, 内部结构紧凑、复杂, 有屏蔽效应, 所以按常规敞开体系设计的牺牲阳极保护就不能有效对内部结构实施防护. 由于机器人内部构件与浮力材之间有许多隙缝, 成为阴极保护的“死角”, 我们在常规设计的基础上, 在屏蔽严重以及隙缝较小的地方辅助布置多个小阳极, 解决这一问题.

4.1 对于构架的防护

在构架的每一沟槽里布置 2 块小阳极, 规格为 $4\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 用螺钉紧固在构架上, 保持与构架的电连接.

4.2 对于泡桶的防护

在泡桶的四周布置带状阳极, 象腰带一样系在泡桶的四周, 带状阳极的尺寸 $0.5\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 用三根螺钉将阳极均匀固定在泡桶上保证阳极与泡桶之间的电连接.

参考文献

- 1 Gundersen R, Nisanciolo K. Corrosion, 1990, 46(4): 279
- 2 火时中. 电化学保护. 北京: 化学工业出版社, 1987, 13
- 3 Nisanciolo K, Holtan H. Corros. Sci., 1978, 18: 1011
- 4 史志明. 水下机器人的电化学防护研究, 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(4): 245

附 1 牺牲阳极设计与计算

1.1 确定机器人所需的保护电流

$$I = S \cdot i \quad (1)$$

I (单位 A) 为水下机器人所需的保护电流, S (单位: m^2) 为被保护的面积, i (单位: A/m^2) 为最小保护电流密度.

POD919 铝合金 $i = 0.1 \sim 10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1 \sim 100\ \text{mA}/\text{m}^2$, 达到稳定保护时为 $0.3\ \mu\text{A}/\text{cm}^2 (3\ \text{mA}/\text{m}^2)$.

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_i + \dots + S_n$$

S_i 为每个需要保护的单体的面积.

对于水下机器人被保护面积包括构架和泡桶的保护. 估计框架的面积 $S_f \approx 8\ \text{m}^2$, 每个泡桶面积为 $S_{b小} \approx 1.6\ \text{m}^2$, $S_{b大} \approx 2.4\ \text{m}^2$, 因此估计 $S_{总} = \sum S_i = 20\ \text{m}^2$. 故 $I_{总} = 3\ \text{mA}/\text{m}^2 \times 20\ \text{m}^2 = 60\ \text{mA}$.

当表面涂层完好时, 所需的保护电流小于裸露状态所需的保护电流.

1.2 阳极产生的电流

通过对锌系合金阳极的电化学性能测试, 参数为: 开路电位(vs. SCE) $-1.108\ \text{V}$, 驱动电压 $148\ \text{mV}$, 电流效率 92.6% , 理论电容量 $820\ \text{AH}/\text{kg}$, 实际电容量 $759.3\ \text{AH}/\text{kg}$. 因此单个阳极产生的电流可用下式进行估算(单个阳极重量为 $1.4\ \text{kg}$)

$$I_1 = (4000fy)/P_{海水} = (4000 \times 0.5 \times 0.8)/20 = 80\ \text{mA}$$

其中 f, y 为锌系阳极的尺寸与重量的系数, $P_{海水}$ 为海水的电阻率.

1.3 确定阳极所需的数量及保护的範圍

1.3.1 阳极数量的确定 阳极数量受到被保护体所需的总的保护电流、保护面积及结构特征的影响.

$$n = (aI)/I_1$$

其中 n 为所需的阳极的数量; a 为遮蔽系数, 范围一般在 $1.5 \sim 3.0$ 之间, I_1 为每单根阳极所产生的电流

$$n = 3 \times 60/80 \approx 3 \text{ (块)}$$

即若被保护体处于敞开体系, 所需阳极为 3 块($1.4\ \text{kg}$)

但由于机器人内部结构紧凑, 屏蔽作用强, 而且基材于薄层电解液的腐蚀, 因此使阴极保护的距離受到极大的影响, 单独选择 3 块阳极根本不可能有效进行保护.

1.3.2 阴极保护的範圍 在实验室中模拟薄层电解质中阴极保护时, 影响保护距离的主要因素为薄层的厚度、电解质的导电性以及表面涂层的电绝缘性.

在敞开体系中进行阴极保护时, 锌阳极的保护距离比较大, 但在水下机器人内部构件间仅有薄层电解质, 制约着保护电流的分布, 保护距离受到严重影响, 薄层越薄, 则保护距离越短, 电流分布越不均匀. 因此要根据隙缝的实际大小, 如浮力材与构架或浮力材与泡桶之间的距离, 合理分布牺牲阳极, 这样才能使机器人内部构件得到完全保护. 实验中得到如下结果:

隙缝液层厚度	保护距离
0.1 mm	10 cm
0.34 mm	15 cm
2.0 mm	50 cm

1.3.3 阳极使用年限的估计 牺牲阳极的使用寿命, 主要与阳极的重量有关, 重量愈大, 则使用寿命愈长. 对于水下机器人的阴极保护, 则要考虑过多增加阳极重量会影响机器人的动力性能. 因此只能取适量阳极, 一旦阳极消耗完, 还可继续更换.

$$T = WA\eta/8760 I_1 = (1 \text{ kg} \times 820 \text{ AH/kg} \times 92.6\%) / (8760 \times 80 \times 10^{-3}) \approx 1.084 \text{ a/kg} = 395 \text{ d/kg}$$

式中 T 为使用寿命, W 为牺牲阳极的重量, A 为理论电容量, η 为电流效率, I_1 为单个阳极的电容量.

上式说明, 当水下机器人在海水中连续浸泡, 每公斤阳极可维持 1.084 a(395 d) 左右, 在表面涂层完好时, 保护电流的需求量一般要小一个数量级.

附 2 不同部位的牺牲阳极的尺寸与形状

对于敞开部位, 采用块状阳极直接进行保护. 阳极尺寸为 20 mm × 40 mm × 80 mm, 重量约为 456.96 克/块

对于内部构件的保护, 采用在沟槽中布置小阳极块的方法实施保护. 阳极尺寸为 4 mm × 5 mm × 30 mm, 每块重约 42.8 g

对于泡桶部分的阴极保护, 采用锌带状阳极进行保护. 将带状阳极箍在泡桶的四周, 再与泡桶实施电连接, 每个桶需要 2~3 根阳极带. 带状阳极的规格为: 厚 0.5 mm, 宽 12 mm, 重量约为 43 g/m.

附 3 牺牲阳极安装注意事项

- 1 阳极必须紧密与被保护体连接在一起, 采用螺钉拧紧, 并固定在被保护体上, 防止牺牲阳极的脱落.
- 2 必须保证牺牲阳极与被保护体的电连接, 否则阴极保护系统就不会起作用.

DESIGN OF CATHODIC PROTECTION FOR NON-CABLE SUBMARINE ROBOT

SHI Zhiming, LIN Haichao, SONG Guangling, CAO Chu'nan

(State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Corrosion and Protection of Metals, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

ABSTRACT The research of corrosion behavior and cathodic protection of POD919 and LD31 aluminum alloys, for the deep-sea submarine robot was carried out in 3.5% NaCl solution. The related electrochemical parameters of three types sacrificial anodes have been determined by constant current discharge method. The results showed that one kind of zinc alloy sacrificial anode is suitable to the protection of submarine robot. For the compactness and completeness of the inner structure of the robot, the effects of crevice dimension on cathodic protection have been studied also. The results showed that smaller the crevice dimension the shorter the protection distance. Based on the achieved results, the design and regulation of the cathodic protection for robot has been suggested.

KEY WORDS submarine robot, POD919, LD31 aluminium alloy, design, cathodic protection