

MOSS 罐型 FSRU 压载舱牺牲阳极设计与研究

何凡

上海中远船务工程有限公司, 上海 200231

DOI:10.61369/ERA.2025110025

摘要 FSRU 作为浮式储存和再汽化装置, 其一般长期靠泊码头, 源源不断的为岸上提供清洁能源。因此, 无论 FSRU 兼做航行船与否, 船级社均会要求使用水下检验代替坞检, 即 FSRU 将在服役年限内不进坞做特别检查。基于此, FSRU 压载舱牺牲阳极将无法及时得到检测和更换, 因此牺牲阳极设计寿命需满足 FSRU 服役年限要求。

关键词 FSRU; 压载舱; 牺牲阳极; 设计寿命

Design and Research of Sacrificial Anode for FSRU Ballast Tank

He Fan

COSCO (Shanghai) Shipyard Co., Ltd., Shanghai 200231

Abstract : As a storage and re-vaporization installation, FSRU usually berths at the jetty for a long time, continuously providing clean energy to the shore. Therefore, regardless of whether FSRU serves as a seagoing vessel or not, the classification society will require using of underwater inspections instead of dock inspections, meaning that FSRU will not conduct special inspections during its service life. Based on this, the sacrificial anode of the FSRU ballast tank will not be able to be inspected or replaced in a timely manner, and its design life needs to meet the service life requirements of the FSRU.

Keywords : FSRU; ballast tank; sacrificial anode; design lifespan

引言

FSRU 在运行过程中, 需保证其空载吃水和满载吃水变化不能过大, 避免卸料臂因高差较大变化而脱落造成泄漏事故。因此, FSRU 在因卸货吃水减少时, 需在压载舱打压载水来平衡其吃水, 这将导致压载舱在 FSRU 服务年限内频繁使用。

由于压载舱打入的是湿度较大、盐分较高的海水, 其对压载舱金属结构会产生严重的腐蚀。而 FSRU 一般需要连续服役 15 到 20 年以上, 因此, 需要在压载舱安装数量足够、位置合理的锌基阳极或铝基阳极, 以保护压载舱内部结构。本文将基于某 FSRU 压载舱结构特点及服务海区状况, 进行压载舱牺牲阳极的设计与研究,

一、FSRU 压载舱牺牲阳极计算

(一) 牺牲阳极选择及参考标准

本文涉及的 FSRU 为一艘大型的球罐型液化天然气船改装而成, 改装后设计寿命 20 年, 共有 23 个压载舱, 舱内钢结构表面积约 5500 m^2 ^[1]。

考虑到单位重量铝基牺牲阳极电化学性能优于锌基牺牲阳极, 优先选取铝阳极为压载舱牺牲阳极材质。在同等设计年限下, 铝阳极可减少额外重量, 对于对载重要求比较敏感的 FSRU 尤为重要。但同时需要注意到, 铝阳极高处坠落撞击后会产生火花, 而 FSRU 压载舱又紧邻危险区域的货舱干隔舱, 因此, 对于安装位置较高的阳极, 需要增加额外防坠落措施^[2]。

牺牲阳极计算参考世界权威广泛使用的挪威船级社标准:

DNVGL-RP-B401 阴极保护设计

DNVGL-RP-B101 浮式生产与储存装置的防腐要求

(二) 基本参数要求

1. 压载舱基本参数

本船服务海区为地中海东部港口, 根据当地气象条件, 压载舱内压载水正常温度 16°C , 最高 27°C , 压载舱浸透率取值 0.5, 压载舱牺牲阳极设计年限为 20 年, 使用铝基牺牲阳极进行保护。

2. 牺牲阳极化学成分

不同种类的牺牲阳极化学成份区别详见表 1, 本项目拟采用铝基牺牲阳极。

作者简介: 何凡 (1981—), 男, 湖北荆门人, 工程师, 本科, 主要从事船舶结构舾装机装设计。

表1 牺牲阳极化学成分表

合金 / 杂质元素	锌基	锌基 (高于50°C)	铝基	铝钙合金
Zn	主要材质	主要材质	2.5–5.75	≤ 0.20
Al	0.10–0.50	0.10–0.25	主要材质	主要材质
In	N/A	N/A	0.015–0.040	≤ 0.005
Cd	≤ 0.07	≤ 0.001	≤ 0.002	
Si	N/A	N/A	≤ 0.12	≤ 0.10
Fe	≤ 0.005	≤ 0.002	≤ 0.09	≤ 0.07
Cu	≤ 0.005	≤ 0.001	≤ 0.003	
Pb	≤ 0.006	≤ 0.006	N/A	
Mg		0.05–0.15		
Ga				≤ 0.09–0.15
其他		≤ 0.1		

3. 阳极电阻率

对于流体盐度与电阻率之间的关系，参考挪威船级社规范中的参数曲线。考虑到世界海水平局盐度为35g/kg，且本项目服务海区海水温度介于16°C和27°C，根据图1中曲线所示，牺牲阳极电阻率选25(ohm*cm)。

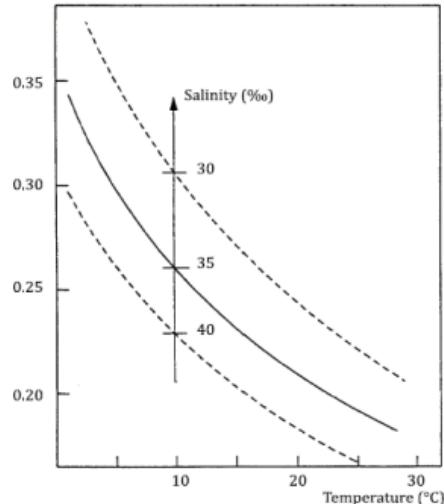


图1 海水电阻率与温度关系 (盐度为30%至40%)

4. 阳极形状特点

阳极形状会影响其电流释放从而影响保护效果，通常考虑两种不同形状的阳极，一种为长条直立形式，一种为扁平形式。其中，扁平形式适用于空间狭小区域，但不利用油漆作业。因此本船压载舱选用长条形牺牲阳极，其长度为800mm，截面为梯形，上宽80mm，下宽100mm，高度80mm，中心嵌入45x8扁铁，并两端延长，用以牢靠固定，固定形式可焊接也可以螺栓连接。阳极净重15kg，总重17.9kg。

(三) 阳极计算方法

1. 需求电流计算

压载舱钢结构表面保护所需的电流采用如下公式计算：

$$I_{cm} = A_c * i_{cm} * f_{cm}$$

$$I_{cf} = A_c * i_{cf} * f_{cf}$$

其中， A_c (m²) 阳极表面积

i_{cm} (A/m²) 设计平均电流密度

i_{cf} (A/m²) 设计最终电流密度

I_{cm} (A) 平均电流需求

i_{cf} (A) 最终电流需求

2. 阳极重量计算

单个压载舱所需阳极总重量采用如下公式计算：

$$M_a = \frac{8760 * t_f * I_{cm} * B_f}{u * \varepsilon}$$

其中， t_f (years) 设计寿命

μ 阳极效用系数

ε (Ah/kg) 阳极电化学容量

B_f 8760 压载系数
1年总小时数

3. 阳极电阻计算

对于长条型牺牲阳极，其电阻计算采用如下公式：

$$R_{af} = \frac{1.3 * \rho}{2 * \pi * L_f} * \left(\ln \frac{4 * L_f}{r_f} - 1 \right) = 0.275 \text{ (ohm)}$$

其中， ρ = 25(hm*cm) 环境电阻

L_f (cm) 阳极最终长度

r_f (cm) 阳极最终等效半径

4. 单个阳极输出电流计算

铝阳极最终输入电流计算采用如下公式：

$$I_{af} = \frac{E_c - E_a}{R_{af}}$$

其中， I_{af} (A) 最终输出电流

E_c 设计保护电位

E_a 设计闭路阳极电位

根据规范要求，设计保护电位取值为-0.8V，而铝阳极在海水环境下的设计闭路阳极电位取值为-1.05V

5. 阳极数量计算

阳极数量计算采用如下公式：

$$N1 = \frac{M_a}{m_a}$$

$$N2 = \frac{I_{cf}}{I_{af}}$$

其中， M_a (kg) 阳极总的净重量

m_a (kg) 单个阳极净重量

牺牲阳极数量需同时满足整个使用寿命内的电流需求和重量需求，即最终阳极数量应为：

$$N = \text{Max}(N_1, N_2)$$

以本船 NO.1 压载舱计算为例，其舱内钢结构物总面积为 5630m²，计算过程如下：

$$I_{cm} = A_c * i_{cm} * f_{cm} = 5630 * 0.014 = 78.82 \text{ A}$$

$$I_{cf} = A_c * i_{cf} * f_{cf} = 5630 * 0.031 = 174.53A$$

$$M_a = \frac{8760 * t_f * I_{cm}}{u * \varepsilon} * B_f = \frac{8760 * 20 * 78.82}{0.9 * 2000} * 0.5 = 3836kg$$

$$I_{af} = \frac{Ec - Ea}{R_{af}} = \frac{1.05 - 0.8}{0.275} = 0.91A$$

$$N1 = \frac{M_a}{m_a} = \frac{3836}{15} = 256$$

$$N2 = \frac{I_{cf}}{I_{af}} = \frac{174.53}{0.91} = 192$$

$$N = \text{Max}(N_1, N_2) = 256 \text{ (块)}$$

根据以上计算，本项目所有23个压载舱总计需要长条形牺牲阳极4954块，总重量约为74.3吨。同等情况下，相较于锌阳极，可以减少重量约130吨。

二、牺牲阳极布置

(一) 阳极固定方式

由于本船改装后要求运行20年不进坞，因此牺牲阳极在其服务年限内无法进行更换，由此可以采用焊接形式将阳极固定在压载舱内结构附件上，可确保电流的有效流动，从而起到较好保护效果。

但由于船东特殊要求，本项目牺牲阳极拟采用螺栓固定形式，并且每个端部需要1组2根螺栓，每个螺栓需要配备2个螺母。为固定阳极，需要在舱内结构附件上预先焊接固定支架，如图2所示。为保证牺牲阳极与结构之间的有效连接，每块阳极安装完成后需测量其与结构间的电阻情况，确保最大值不超过0.1欧姆。

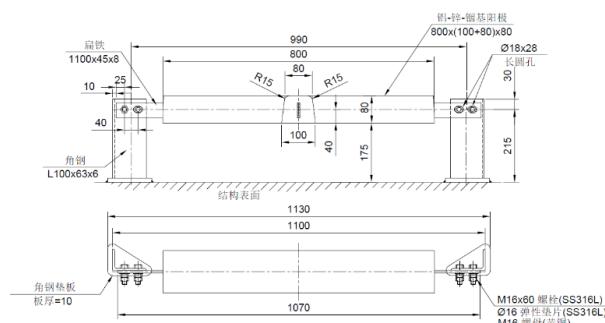


图2 长条形铝基牺牲阳极外形特点

(二) 阳极防坠落保护

FSRU压载舱紧邻货罐隔舱，而干隔舱作为本船货舱次屏蔽系统，由于可能存在可燃气体而被划入危险区域，相邻的压载舱理论上也可能存在可燃气体。

考虑到铝阳极撞击时会产生火花，因此，规范对于此类船舶压载舱使用铝阳极有了明确要求，即当阳极势能大于275J时，需额外增加阳极防坠落措施。换算下来，对于本船压载舱，对于高度大于1.87米存在坠落可能的牺牲阳极均需要进行额外保护。水平安装的阳极，拟采用图3所示的防坠落方案，且阳极向内口安装。垂直安装的牺牲阳极，拟采用图4所示的防坠落方案。

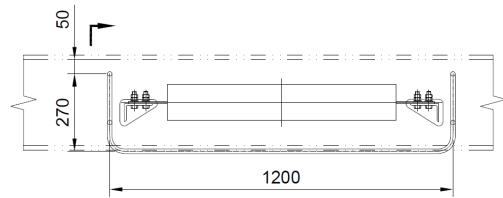


图3 牺牲阳极水平包住罩

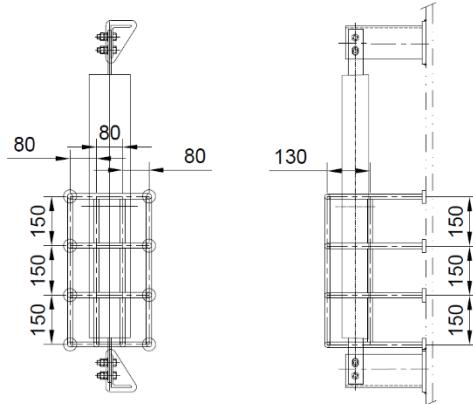


图4 牺牲阳极垂直保护罩

通过上图可以看出，除额外增加的防坠落构件外，铝阳极单边使用双螺栓固定，每个螺栓使用双螺母加弹性片，也可以有效的防止阳极坠落。

(三) 阳极布置要求

根据以上计算出的各舱所需阳极数量以及各舱结构特点，纵向均匀有效的布置牺牲阳极。高度方向上，靠近底部密布，靠近压载舱顶部增大布置间隙。牺牲阳极应固定在外板纵骨、舱壁纵骨的腹板上或者非水密纵桁和水平桁上，避免直接安装在外板和船底板。阳极典型布置如图5所示：

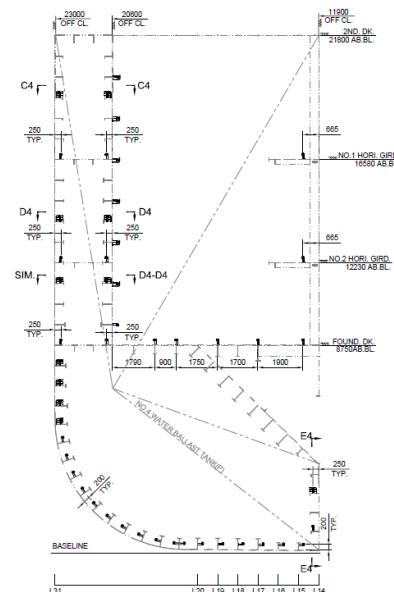


图5 牺牲阳极典型布置

图5中可以看出，基座甲板以下区域布置较密，外板纵骨几乎

每根均有布置，个别两侧有布置。高度大于1.8米且可能坠落的阳极，均增加了防坠落保护罩。绝大部分阳极布置在型材上，少量阳极布置在基座甲板上，反顶有对应的加强筋。基座甲板上方布置较稀，约每隔3档进行布置。

三、结束语

本文通过对某FSRU项目压载舱阴极保护进行分析计算和布置，通过选用铝基牺牲阳极，在保证使用要求前提下，同时极大的减少本船额外增加的重量，从而保证了本船有效的装载量。同

时还核算了海底阀箱处扁平型牺牲阳极的数量和布置，由于计算方法与本文类似，文中不做复述。

阳极腐蚀是个漫长的过程，期间受温度、湿度和盐度影响较大。而铝基阳极在空气中容易形成氧化铝保护膜，从而影响阳极的电流释放，因此，使用前需能确保所选阳极能长期有效释放电流。本项目在实施过程中，原船压载舱安装的锌阳极部分状况良好，对于位置较特殊的，采取保留措施。对于锌基阳极和铝基阳极共同保护效果，有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 挪威船级社 DNVGL-RP-B401 Cathodic protection design.2017.
- [2] 挪威船级社 DNVGL-RP-B101 Corrosion protection of floating production and storage units.2015.