



# 海岸港老码头钢管桩 牺牲阳极阴极保护系统的更换与维护

王飞朋<sup>1</sup>, 常纪磊<sup>1</sup>, 姜云姝<sup>1</sup>, 李军威<sup>2</sup>

(1. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 上海格麟倍科技发展有限公司, 上海 201100)

**摘要:** 对即将达到设计保护年限的防腐系统实施更换与维护是保证结构可靠性和良好技术状态的必要途径。针对海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统的更换与维护, 参考类似项目经验和相关规范标准, 探讨分析更换维护设计流程以及海水电阻率的影响、确定与修正, 保护面积和保护电流密度计算, 牺牲阳极布置与安装等重点难点。并提出关键技术问题的解决方法, 确保钢管桩防腐系统持续有效, 切实保障港口设施的正常使用和安全运行。

**关键词:** 海岸港老码头; 钢管桩; 牺牲阳极阴极保护系统; 更换与维护

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0066-07

## Replacement and maintenance of sacrificial anode cathodic protection system for steel pipe piles in old quay of coastal port

WANG Fei-peng<sup>1</sup>, CHANG Ji-lei<sup>1</sup>, JIANG Yun-shu<sup>1</sup>, LI Jun-wei<sup>2</sup>

(1. Ningbo China Communication Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. Shanghai GLB Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**Abstract:** The replacement and maintenance of the anticorrosive system which is about to reach the design protection period is the necessary way to ensure the reliability and good technical condition of the structure. Aiming at the replacement and maintenance of the sacrificial anode cathodic protection system for steel pipe piles in the old quay of coastal port, referring to the experience of similar projects and relevant codes and standards, we discuss key difficulties, including replacement and maintenance design procedures, the influence, determination and correction of seawater resistivity, protection area and protection current density calculation, sacrificial anode layout and installation, etc. Then, we put forward solutions to the key technical problems to ensure that the anticorrosive system for steel pipe piles is continuous and effective, and to practical ensure the normal use and safe operation of port facilities.

**Keywords:** old quay of coastal port; steel pipe pile; sacrificial anode cathodic protection system; replacement and maintenance

钢管桩因具有抗弯能力强、承载力高、沉桩性能好、自质量轻、对打桩船起吊能力要求低等优点而在沿海港口码头建设中广泛应用。为提高在海水强腐蚀环境中的耐久性, 钢管桩常采用预留腐蚀余量、加涂层、包覆有机复合材料和阴极保护等防腐措施。在即将达到设计保护年限时, 各防腐措施均须实施维护以使钢管桩能够得到持

续有效的保护, 避免结构存在安全隐患。目前, 针对老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换维护的研究较少, 尚无完善的理论体系和指导方法, 导致维护困难, 系统更换后的防腐效果也难以保证。本文主要探讨了海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统的更换维护设计流程, 海水电阻率的影响、确定与修正, 保护面积和保护电流密

收稿日期: 2020-04-12

作者简介: 王飞朋(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程设计。

度计算, 牺牲阳极布置与安装等重难点问题, 并提出关键技术的解决方法, 以便为类似项目提供参考。

1 牺牲阳极阴极保护系统常见问题

海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统在即将达到设计保护年限时, 通常会出现保护电位不足、牺牲阳极连接件松动或脱落缺失、输出电流异常、溶解不均匀或消耗殆尽、剩余使用寿命达不到预期设计保护年限、被淤积海泥掩埋或海洋生物覆盖而导致电流效率下降甚至发生钝化或逆转等问题, 从而影响阴极保护系统的可靠性和有效性, 如不及时更换维护, 钢管桩将加剧腐

蚀, 严重威胁结构的安全性和耐久性。

2 牺牲阳极阴极保护系统更换维护设计流程

鉴于老码头整体结构剩余使用寿命的减少, 为保证桩基和上部结构均安全可靠, 建议钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换维护的设计保护年限不超过 25 a, 后期根据码头使用状况再采取必要的维护措施。参照 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》(简称“设计标准”)对海水环境钢结构阴极保护的规定<sup>[1]</sup>, 构建海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换维护设计流程(图 1), 其中重难点及关键技术问题包括海水电阻率确定、保护面积和保护电流密度计算, 牺牲阳极布置与安装。

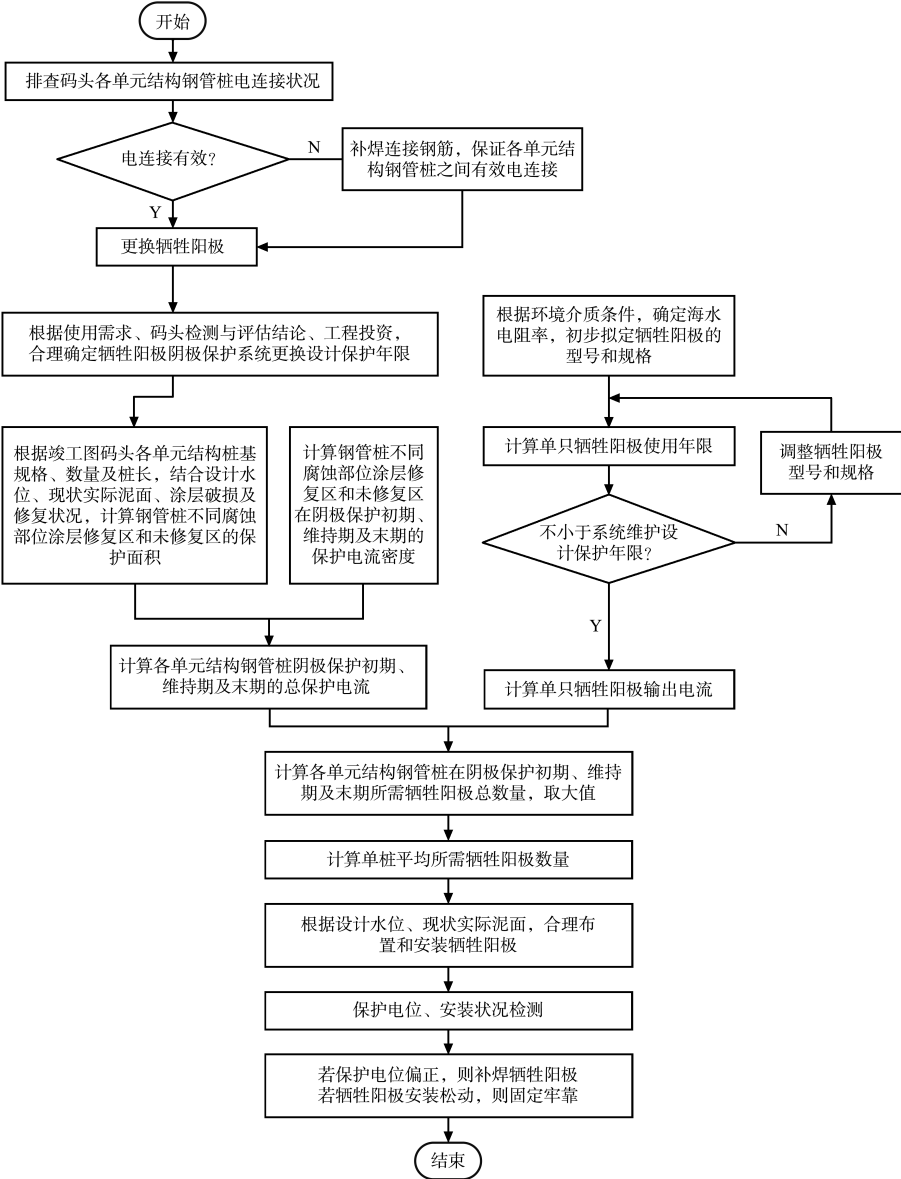


图 1 海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换维护设计流程

3 海水电阻率

海水电阻率是反映海水电阻特性并与温度、盐度有关的物理量,当盐度(温度)一定时,海水电阻率随温度(盐度)增高而减小。海水电阻率是海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统至关重要的基础设计参数,对系统初、末期牺牲阳极接水电阻、输出电流和使用数量以及单只牺牲阳极使用年限均有影响,其准确性关乎系统的可靠程度。若取值比实际低,则导致阳极使用数量偏少,钢管桩将因欠保护而达不到预期的防护效果;若取值比实际高,则导致阳极使用数量偏多而造成资源和投资浪费。

3.1 海水电阻率对牺牲阳极阴极保护系统影响

3.1.1 对阳极接水电阻和输出电流影响

海岸港码头钢管桩一般采用长条状( $L \geq 4r$ ,  $L$ 为阳极长度, $r$ 为阳极等效半径)高效铝合金(铝-锌-镉-镁-钛 Al-Zn-In-Mg-Ti)牺牲阳极作为阴极保护材料,该种阳极具有电容量大、电流效率高、工作电位稳定、消耗率低等优点,其接水电阻和输出电流均决定于海水电阻率。根据“设计标准”附录 L.0.1 和附录 L.0.2,单只牺牲阳极接水电阻和输出电流可按下式计算:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right] = k_1 \rho \tag{1}$$

初期时:  $r = r_c = \frac{C}{2\pi} \tag{2}$

末期时:  $r = r_m = r_c - \mu(r_c - r_i) \tag{3}$

$$I_a = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\Delta V}{R_a} = \frac{0.25}{k_1 \rho} = \frac{1}{4 k_1 \rho} \tag{4}$$

式中:  $R_a$ 为阳极接水电阻( $\Omega$ );  $\rho$ 为海水电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  $L$ 为阳极长度(cm);  $r$ 为阳极等效半径(cm),分为  $r_c$ (初期)和  $r_m$ (末期);  $k_1$ 为等效替代系数,  $k_1 = [\ln(4L/r) - 1] / (2\pi L)$ ,与阳极规格和铁芯尺寸有关;  $C$ 为阳极截面周长(cm);  $r_i$ 为铁芯半径(cm);  $\mu$ 为利用系数,取 0.90;  $I_a$ 为单只阳极输出电流(A);  $\Delta V$ 为驱动电压(V),取 0.25 V;  $R$ 为回路总电阻( $\Omega$ ),近似等于阳极接水电阻。

由式(1)~(4)可知,阳极接水电阻和输出电

流与自身属性和海水电阻率有关。当阳极型号选定后,其接水电阻和输出电流仅与海水电阻率成正、反比例关系,即海水电阻率越大(越小),接水电阻率越大(越小),输出电流越小(越大)。因此海水电阻率是影响阳极电流效率的重要因素。

3.1.2 对阳极初末期使用数量影响

根据“设计标准”附录 L.0.3,钢管桩牺牲阳极阴极保护初末期所需阳极数量  $N$  可按下式计算:

初期或末期:  $N = \frac{I}{I_a} = 4 k_1 I \rho \tag{5}$

式中:  $I$ 为钢管桩阴极保护在初期或末期所需的总保护电流(A);  $N$ 为初期或末期阳极数量。

由式(5)可知,钢管桩牺牲阳极阴极保护初末期所需阳极数量与总保护电流、阳极自身属性及海水电阻率有关。对于具体工程而言,总保护电流是一定的,因此当阳极型号选定后,阴极保护初末期所需阳极数量将直接与海水电阻率成正比,即海水电阻率是影响项目投资费用的关键。

3.1.3 海水电阻率对单只牺牲阳极使用年限影响

单只阳极使用年限不小于阴极保护系统设计保护年限是确保该系统在整个设计使用寿命周期内能够发挥防护效能的必要条件。根据“设计标准”附录 L.0.4,单只阳极使用年限可按下式计算:

$$t = \frac{W_i \mu}{E_g I_a'} = \frac{0.90 W_i}{3.37 \cdot 0.55 I_a'} = 1.94 W_i k_1 \rho \tag{6}$$

式中:  $t$ 为单只阳极使用年限(a);  $W_i$ 为阳极净质量(kg);  $E_g$ 为阳极消耗率( $\text{kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ),铝合金阳极取  $3.37 \text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{a})$ ;  $I_a'$ 为阳极在使用年限内平均输出电流(A),取初始输出电流的 0.55 倍。

由式(6)可知,单只阳极使用年限取决于自身属性和海水电阻率,并与阳极净质量密切相关。海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统常用海水电阻率为  $20 \sim 40 \Omega \cdot \text{cm}$ ,依此计算国标<sup>[2]</sup>推荐的 A211-1~12 型号阳极的使用年限(图 2)。当海水电阻率一定时,不同型号阳极使用年限主要决定于阳极净质量;同型号阳极使用年限与海水电阻率成正比,在不同海水电阻率情况下差异较大。

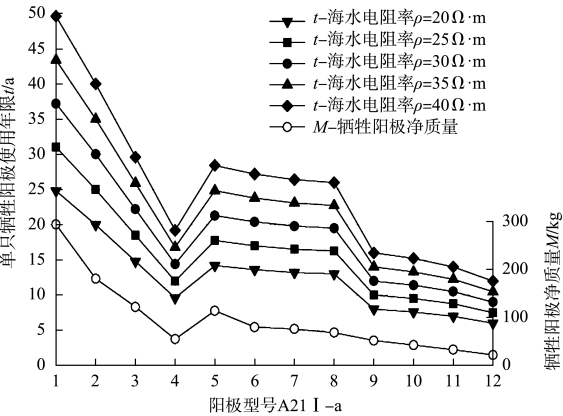


图 2 单只牺牲阳极使用年限(国标推荐型号)

对于具体海域而言,海水电阻率是一定的,单只阳极使用年限也因此确定,根据单只阳极使用年限确定阴极保护系统设计保护年限和阳极型号是保证系统正常运行的关键,建议原则为单只阳极使用年限不小于系统设计保护年限且两者相近为宜,既能保证阴极保护系统的防护效果和使用寿命,又能使得阳极充分利用,避免浪费和节省投资费用。

3.2 海水电阻率确定与修正

一般而言,海水盐度变化不大,但温度的季节性变化显著,较难通过短期实测数据准确确定海水电阻率,在实际工程中海水电阻率往往需要依据相关规范标准并结合项目附近已建海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统运行状况综合确定。

3.2.1 基于相关规范标准确定

我国沿海(除河口外)海水温度和盐度由北至南呈递增趋势,其中海水年平均温度 9~26℃,盐度 30‰~35‰。根据 DNV-RP-B401<sup>[3]</sup> 附录 A 中 30‰~40‰盐度的海水电阻率与温度关系图,查得海水电阻率为 19~31 Ω·cm(图 3),与“设计标准”条文说明第 6.6.2 节提供的普通海水电阻率(20~30 Ω·cm)基本一致。总体而言,我国沿海(除河口外)海水电阻率由北至南呈递减趋势。在实际应用中,可根据工程所处海域及其温度和盐度特征确定海水电阻率。

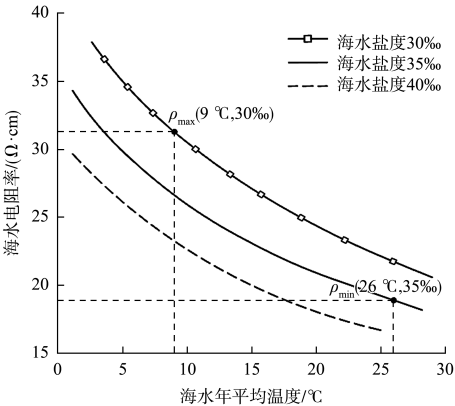


图 3 我国沿海(除河口外)海水电阻率上下限值

3.2.2 基于实际工程经验确定

海洋环境极其复杂,仅依据相关规范标准确定海水电阻率往往难以满足工程要求,若拟建项目附近已有实施海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统且经保护电位检测验证该系统运行状况良好,则其海水电阻率等基础设计参数的选取较为合理,具有重要借鉴意义,可考虑沿用该海水电阻率。根据不同地区已建海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统实施情况(表 1)<sup>[4-12]</sup>,在实际工程中海水电阻率取值一般为 20~40 Ω·cm。

表 1 已建海岸港码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统 海水电阻率取值	
已建海岸港码头项目	海水电阻率/ (Ω·cm)
海南洋浦 30 万吨级原油码头	20
天津港北港池滚装码头、福州港罗源湾港区码头	25
宁波北仑港区码头、舟山金塘大浦口集装箱码头、东营港码头、深圳盐田港集装箱码头	30
盐城大丰港一期码头、丹东港大东港区通用码头	35
上海金山码头、嘉兴乍浦陈山油库码头、洋山港码头、连云港码头	40

注:采用钢管桩+牺牲阳极阴极保护和涂层防腐。

3.2.3 基于阳极使用年限修正

由于在已建阴极保护系统工程中阳极使用年限主要决定于海水电阻率,在系统更换维护时可考虑通过原系统阳极实际可使用年限与设计使用年限的对比分析对海水电阻率进行修正。具体如下:1)随机检测原系统阳极残余尺寸,据此推算剩余净质量和剩余使用年限,再根据已使用年限



和剩余使用年限之和与设计使用年限的差异,判断原设计参数海水电阻率取值的合理性。2)若两者之和与设计使用年限相差不大,则表明原海水电阻率取值基本合理,系统更换维护时可沿用;若两者之和偏大(偏小),则表明原海水电阻率取值偏小(偏大),系统更换维护时可适当增大(减小)。

原阴极保护系统阳极残余尺寸检测要求和剩余净质量计算可按 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》附录 F.4 进行,剩余使用年限建议采用下式计算:

$$t_e=\frac{\mu Q_0-(Q_0-Q_e)}{Q_0-Q_e}\cdot t_1$$

(7)

式中:  $t_e$  为阳极剩余使用年限;  $Q_0$  为阳极初始净质量(kg);  $Q_e$  为阳极剩余净质量(kg);  $t_1$  为阳极实际已使用年限。

海水电阻率建议可按下式修正:

$$\rho'=\frac{t_1+t_e}{t}\rho_0$$

(8)

式中:  $\rho'$  为修正后海水电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}$ );  $t$  为原阴极保护系统单只阳极设计使用年限(a);  $\rho_0$  为原设计海水电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}$ )。

4 保护面积和保护电流密度

钢管桩总保护电流等于不同腐蚀部位保护面积与相应保护电流密度的乘积之和。在阴极保护系统更换维护项目中,准确计算总保护电流是避免钢管桩欠保护和控制工程投资费用的关键。为使保护电位分布均匀,应根据老码头各结构钢管桩之间的电连接状况划分设计单元,将电连接为一体的钢管桩所在结构作为独立设计单元,分别计算各独立设计单元钢管桩在不同时期所需的总保护电流。

4.1 保护面积

牺牲阳极阴极保护面积应包括水位变动区、水下区和泥下区钢管桩表面积。在海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换维护项目中,可按下列步骤计算钢管桩不同腐蚀部位的保护面积:1)根据老码头掩护条件、设计水位、波浪要素、现状泥面(若后期实施疏浚维护,应按疏浚维

护后的泥面考虑)等因素对钢管桩进行腐蚀部位划分,即确定水位变动区、水下区和泥下区;2)根据老码头竣工图中各独立设计单元的桩基规格、长度、数量计算钢管桩不同腐蚀部位的保护面积。

4.2 保护电流密度

钢管桩保护电流密度应根据不同腐蚀部位分别确定。海水区钢管桩保护电流密度与有无防腐涂层以及涂层破损率有关,有防腐涂层的钢管桩保护电流密度应在裸钢保护电流密度的基础上乘以涂层破损率;泥下区钢管桩保护电流密度按裸钢考虑。

4.2.1 裸钢保护电流密度

裸钢不同腐蚀部位的保护电流密度可参照“设计标准”表 6.6.4-1 确定(表 2)。考虑沿海潮汐涨落规律,水位变动区钢管桩处于水下时长约为水下区 1/2,使得该部位所需保护电流也近似为水下区 1/2,因此水位变动区钢管桩保护电流密度可考虑采用水下区的 1/2。

表 2 裸钢阴极保护电流密度

腐蚀部位	电流密度/(mA·m <sup>-2</sup> )		
	初始值	维持值	末期值
水位变动区	75~90	30~40	40~50
水下区	150~180	60~80	80~100
泥下区	25	20	20

4.2.2 有防腐涂层钢管桩保护电流密度

有防腐涂层钢管桩保护电流密度与涂层破损率有关。一般而言,海岸港码头钢管桩在泥面以上部分均有防腐涂层保护,但与新建工程不同,老码头钢管桩防腐涂层存在不同程度的破损,尤其桩顶至水位变动区范围内往往因防腐涂层大面积剥离脱落而导致钢管桩严重锈蚀。因此,在老码头钢管桩防腐体系二次维护时,牺牲阳极阴极保护系统更换和防腐涂层修复应同步实施。防腐涂层可修复范围和修复质量与涂料性能和施工控制密切相关,目前采用能够水下涂装固化的高性能涂料可使修复范围大幅增加,修复质量也能较好保证。为确保修复后的防腐涂层具有良好的保护效果,修复范围可考虑由桩顶至水位变动区以下 1 m 附近。总体而言,老码头钢管桩经二次维

护后的防腐涂层一般包括修复区和未修复区两部分, 应分别计算涂层破损率。

修复区涂层破损率建议按下式计算:

$$f_i = K(f_0 + \Delta f \cdot t)$$
(9)

式中:  $f_i$  为  $t$  时刻破损率(%);  $K$  为可靠系数, 考虑涂料性能和施工质量影响, 可取 1.1~1.2;  $f_0$  为初始破损率(%), 可取 2%;  $\Delta f$  为平均每年涂层破损率增加值(%), 可取 2%;  $t$  为时间(a)。计算结果为: 阴极设计保护年限为  $T(a)$ , 则防腐涂层修复区涂层破损率初期值为  $2K\%$ , 平均值为  $K(2+T)\%$ , 末期值为  $K(2+2T)\%$ 。

未修复区涂层破损率建议按下式计算:

$$f'_0 = f_0 + \Delta f \cdot T_0$$
(10)

$$f_i = f'_0 + \Delta f \cdot t$$
(11)

式中:  $f'_0$  为未修复区涂层初始破损率(%), 取原阴极保护涂层破损率末期值;  $T_0$  为原阴极保护设计保护年限(a)。计算结果为: 更换维护阴极保护设计保护年限为  $T(a)$ , 则防腐涂层未修复区涂层破损率初期值为  $2(1+T_0)\%$ , 平均值为  $[2(1+T_0)+T]\%$ ;  $T_0+T \leq 49$  a 时, 末期值为  $2(1+T_0+T)\%$ ,  $T_0+T > 49$  a, 末期值为 100%; 当涂层破损率达到 100% 时即按裸钢考虑。

5 牺牲阳极布置与安装

5.1 牺牲阳极布置

牺牲阳极布置是阴极保护设计的重要内容, 不同布置方式对钢管桩阴极保护电位分布和阳极溶解的均匀性影响较大, 布置不合理易加剧钢管桩的局部腐蚀, 导致突发性和灾难性事故。此外, 考虑到大多数老码头经长期运营后往往会产生不同程度的淤积, 致使水深变浅, 因此根据现状实际泥面布置牺牲阳极是阴极保护系统更换维护时需要特别注意的问题, 建议可参照以下布置原则:

1) 考虑布置阳极的情况。横向布置(图 4): 阳极宜绕桩身螺旋式等角度布置, 若单桩须安装  $n$  只阳极, 当  $n < 4$  时, 螺旋角度可取  $360^\circ/n$ ; 当  $n \geq 4$  时, 螺旋角度可取  $90^\circ$ 。

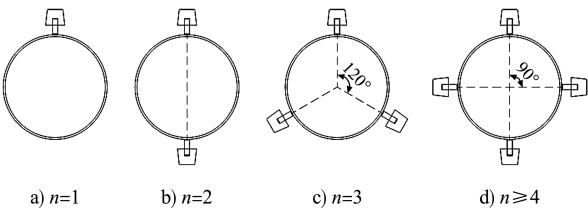


图 4 钢管桩牺牲阳极横向布置

竖向布置(图 5): 阳极宜等间距布置且相邻间距宜为 2~3 m, 最上层阳极顶部与设计低水位距离不小于 1.2 m、最下层阳极底部与海泥面距离不小于 1.0 m 并宜考虑备淤深度。当水深较浅时, 为满足规范布置要求, 应首先考虑减小阳极间距, 直至所有阳极均布置于同一高度; 再适当调整阳极与设计低水位和海泥面的距离, 保证阳极顶部低于设计低水位、底部高于海泥面即可。

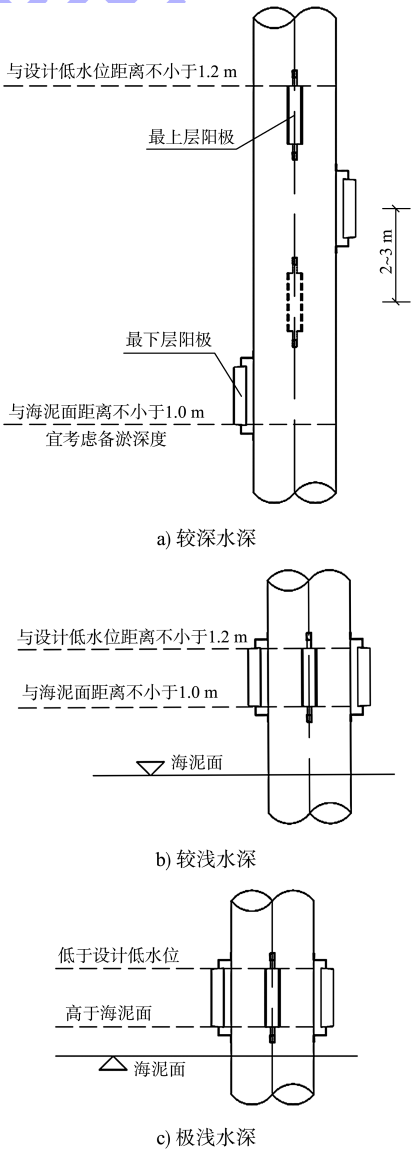


图 5 钢管桩牺牲阳极竖向布置

2)可不考虑布置阳极的情况。若淤积严重导致水深极浅,无论采取何种布置方式阳极始终高于设计低水位,该情况下可不考虑安装阳极,仅对钢管桩泥面以上部分的防腐涂层进行修复即可。由于钢结构在泥下区的腐蚀强度较弱,平均腐蚀速度仅为  $0.05\text{ mm/a}$ ,在使用寿命周期内不会严重威胁码头结构的安全性和耐久性。

## 5.2 牺牲阳极安装

牺牲阳极通常采用水下焊接安装,为保证焊接质量,须对焊接点处的附着物进行清除并敲除防腐层,直到露出光洁的钢管桩表面。阳极与钢管桩间的距离不宜小于  $100\text{ mm}$ ,一般通过调整阳极端部铁芯和弧形钢板/槽钢/角钢以满足距离要求,常见铁芯材质为钢管、螺纹钢、扁钢等(图 6)。牺牲阳极安装须确保在整个使用期内不松动、不脱落。

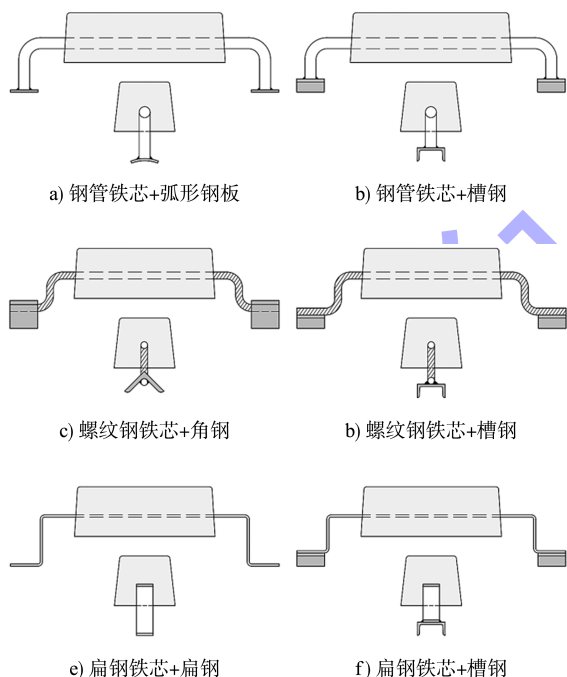


图 6 牺牲阳极常用铁芯及端部焊接形式

## 6 结论

1)海岸港老码头钢管桩牺牲阳极阴极保护系统更换与维护设计流程可参照本文图 1 执行,应注意桩身涂层破损、修复状况以及泥沙冲淤的影响。

2)海水电阻率对阴极保护初末期阳极的接水电阻、输出电流和使用数量以及单只阳极使用年

限均有影响,其值可根据相关规范标准和实际工程经验确定,可考虑通过老码头原阴极保护系统阳极实际可使用年限和设计使用年限的对比分析进行修正。

3)钢管桩保护面积和保护电流密度应根据不同腐蚀部位确定。海水区钢管桩保护电流密度与有无防腐涂层以及涂层破损率有关,对于维护类项目而言,涂层破损率须根据防腐涂层修复范围分为修复区和未修复区两个部分进行计算。

4)老码头钢管桩阴极保护系统更换维护须结合现状实际水深合理布置牺牲阳极,并可采用不同固定法通过水下焊接进行安装。

## 参考文献:

- [1] 中交四航工程研究院有限公司,中交水运规划设计院有限公司.水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S].北京:人民交通出版社有限公司,2015.
- [2] 中国船舶重工集团公司.铝-锌-钢系合金牺牲阳极: GB/T 4989—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [3] Det Norske Veritas. Recommended practice DNV-RP-B401 cathodic protection design[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010.
- [4] 任志杰.港口工程钢管桩阴极保护全寿命期方案[J].水运工程,2012(8): 77-81.
- [5] 于江,唐聪.天津港北港池滚装码头钢管桩阴极保护系统改造[J].港工技术,2016,53(S1): 58-60.
- [6] 毛利进,张胤祺.高桩码头钢管桩牺牲阳极防腐设计及施工[J].中国水运(下半月),2013,13(8): 290, 135.
- [7] 刘锐,戴维艾.东营港码头工程钢管桩防腐措施及应用[J].中国港湾建设,2008(3): 21-23.
- [8] 葛燕,陈辉,葛仁淦,等.深圳盐田港集装箱码头钢管桩牺牲阳极保护[J].水运工程,1997(3): 20-23.
- [9] 杨照兵,陆周,宋双.牺牲阳极阴极保护技术在码头桩基工程中的应用[J].水运工程,2011(7): 95-99.
- [10] 秦铁男,马化雄,陈韬,等.丹东港通用 1 号~3 号泊位工程钢管桩牺牲阳极阴极保护[J].中国港湾建设,2014(8): 41-43.
- [11] 林诗翔,先杰.钢管桩牺牲阳极阴极保护施工安装[J].中国水运(下半月),2016,16(8): 316-318.
- [12] 鲁进亮,张羿,郑伟.洋山港一期工程阴极保护效果及剩余使用寿命评估[J].水运工程,2014(8): 50-52.