

牺牲阳极阴极保护设计在码头工程中的应用

邢博文¹, 王 震²

(1. 辽宁筑港交通工程技术研究有限公司, 辽宁 大连 116023; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 钢桩作为重要的港口工程结构物, 在港口工程中的应用越来越广泛, 但由于港口工程的钢桩长期处于复杂的海洋(河流)环境, 面临着严重的化学腐蚀。钢桩常用的防腐措施有: 涂层保护、金属热喷涂保护、包裹有机复合层保护、牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护等方法。在众多防腐措施中, 牺牲阳极阴极保护法是国内外最常用、最有效的方法之一, 常用于水下区及泥下区。针对钢桩因腐蚀导致钢桩强度降低, 对港口工程的结构安全性产生重要影响的问题, 进行了牺牲阳极阴极保护技术在码头工程中的应用研究。采用理论分析与现场经验相结合的方法, 通过电位检测等手段评估铝锌铟系阳极的保护效果。结果表明: 保护电位维持在 $-1.05 \sim -0.85$ V (相对于 Cu/CuSO₄ 电极) 时, 钢桩腐蚀速率降低约 90%; 单根桩的阳极体使用寿命可达约 30 a, 牺牲阳极系统可显著延长码头钢桩结构的使用寿命。

关键词: 钢桩; 海洋(河流)环境; 牺牲阳极阴极保护法; 水下区及泥下区

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0124-06

Application of sacrificial anode cathodic protection design in wharf engineering

XING Bowen¹, WANG Zhen²

(1. Liaoning Port Design Institute for Transportation Engineering Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: As an important port engineering structure, steel piles are more and more widely used in port engineering. However, due to the long-term exposure to complex marine (river) environment, steel piles in port engineering face serious chemical corrosion. The commonly used anti-corrosion measures for steel piles include: coating protection, metal thermal spraying protection, wrapped organic composite layer protection, sacrificial anode cathodic protection, impressed current cathodic protection and other methods. Among the many anti-corrosion measures, the sacrificial anode cathodic protection method is one of the most commonly used and effective method at home and abroad, which is commonly used in underwater area and mud area. In view of the problem that the strength of steel piles is reduced due to corrosion, which has an important impact on the structural safety of port engineering, the application of sacrificial anode cathodic protection technology in wharf engineering is studied. The protection effect of aluminum-zinc-indium anode is evaluated by combining theoretical analysis with on-site experience through means such as potential detection. The results show that when the protection potential is maintained at $-1.05 \sim -0.85$ V (relative to the Cu/CuSO₄ electrode), the corrosion rate of the steel pile is reduced by about 90%. The service life of the anode body of a single pile can reach about 30 years, and the sacrificial anode system can significantly prolong the service life of the steel pile structure of the wharf.

Keywords: steel pile; marine (river) environment; sacrificial anode cathodic protection method; underwater area and mud area

钢桩是由钢材制成的桩, 通常由薄壁钢管或钢板制成, 形状既有规则的, 也有不规则的, 在港口工程中被广泛应用, 特别是在高桩码头、板

桩码头设计与施工中发挥着至关重要的作用, 多应用在外海大型港口的码头设计与施工中, 其施工工艺相对简单, 可保证施工效率, 有效缩短工

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 邢博文(1999—), 男, 助理工程师, 从事港口、航道工程设计工作。

期。这一类型的码头在施工及日后使用过程中受洋流、潮汐、冰凌及波浪影响较大, 且钢桩不仅要承受上部荷载, 还要承受来自船舶、波浪等横向冲击力带来的影响。综上, 利用钢桩可以保证施工效率的同时也一定程度上保护了结构安全性。

由于港口工程中的桩基长时间处于水下环境中, 其出现腐蚀的可能性较大, 若钢桩产生严重的腐蚀, 会对结构安全性带来严重影响, 因此, 钢桩的防腐措施是影响钢桩使用寿命及稳定性的重要因素。在众多防腐措施中, 牺牲阳极阴极保护的优势: 1) 防腐蚀效果显著; 2) 投资少, 收效明显; 3) 保护周期长; 4) 适应性强; 5) 维护管理简便。

本文结合上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(简称罗泾改造一期工程)案例, 从多方面考虑并根据项目对同直径、不同长度的钢桩设计牺牲阳极保护系统, 旨在为相似的工程设计提供参考与借鉴。

1 项目概况

上海罗泾港区位于长江入海口, 与崇明岛隔江相望, 罗泾改造一期工程是在原罗泾煤炭码头的基础上改造的集装箱码头。过程中, 原桩基多为预应力方桩, 无法完全拔除, 对原桩基采取了截断部分桩长, 剩余部分保留在水中或泥中, 这样大大增加了拆除后新建结构打桩的难度。设计

过程中发现由于原桩基分布集中且密集, 新桩基的桩位布置困难。为不影响新结构与原结构的安全性、使用性等多方面性能, 降低打设施工难度, 改造方案中采用了较多的钢桩。

工程所在区域受潮汐影响显著, 夏季偶发罕见咸潮入侵, 导致氯化物浓度骤升, 盐度变化波动范围较大, 直接影响腐蚀介质渗透性。同时长期受无机氮、活性磷酸盐污染, 水体富营养化显著。高温环境下, 营养盐促进微生物繁殖, 其代谢产物(如有机酸、硫化物)加速金属腐蚀进程, 因此需作牺牲阳极阴极保护的钢桩防腐设计。

2 技术设计

2.1 分类

牺牲阳极按形状分为条状、板状、手镯状等, 其中条状为港口工程中常用的形状之一^[1]。牺牲阳极按其材料成分分为 5 种, 包括铝-锌-镉-镉合金牺牲阳极、铝-锌-镉-锡合金牺牲阳极、铝-锌-镉-硅合金牺牲阳极、铝-锌-镉-锡-镁合金牺牲阳极、铝-锌-镉-镁-钛合金牺牲阳极^[2]。

2.2 化学成分

常用阳极材料种类有 5 种, 及其化学成分主要为铝-锌合金, 见表 1。锌元素的加入改善合金铸造性能, 细化晶粒结构, 使阳极溶解更均匀; 镉或锡等活化剂(如 Al-Zn-In 系)可防止铝表面形成致密氧化膜, 避免钝化失效, 确保持续放电。

表 1 化学成分
Tab. 1 Chemical constituents

种类	化学成分/%										
	Zn	In	Cd	Sn	Mg	Si	Ti	杂质			Al
								Si	Fe	Cu	
铝-锌-镉-镉(A11)	2.5~4.5	0.018~0.050	0.005~0.020	-	-	-	-	≤0.10	≤0.15	≤0.01	余量
铝-锌-镉-锡(A12)	2.2~5.2	0.020~0.045	-	0.018~0.035	-	-	-	≤0.10	≤0.15	≤0.01	余量
铝-锌-镉-硅(A13)	5.5~7.0	0.025~0.035	-	-	-	0.10~0.15	-	≤0.10	≤0.15	≤0.01	余量
铝-锌-镉-锡-镁(A14)	2.5~4.0	0.020~0.050	-	0.025~0.075	0.50~1.00	-	-	≤0.10	≤0.15	≤0.01	余量
铝-锌-镉-镁-钛(A21)	4.0~7.0	0.020~0.050	-	-	0.50~1.50	-	0.01~0.08	≤0.10	≤0.15	≤0.01	余量

注: A 代表铝-锌-镉系合金牺牲阳极; 11、12、13、14、21 代表铝-锌-镉系主体中掺入其他合金形成的不同种类的牺牲阳极。

2.3 电化学性能

常用阳极材料电化学性能见表 2。铝锌合金的开路电位可达-1.15~-1.05 V, 可为被保护金属

提供充足的驱动电压。其电流效率高达 85%~95%, 远高于镁合金(约 50%), 可输出更大保护电流并延长使用寿命。

表 2 电化学性能

Tab. 2 Electrochemical performance

阳极材料	开路电位/V	工作电位/V	实际容量/(Ah·kg ⁻¹)	电流效率/%	消耗率/[kg·(A·a) ⁻¹]	溶解状况
1 型	-1.18~-1.10	-1.12~-1.05	≥2 400	≥85	≤3.65	产物容易脱落,表面溶解均匀
2 型	-1.18~-1.10	-1.12~-1.05	≥2 600	≥90	≤3.37	

注：1. 参比电极为饱和甘汞电极。
2. 介质为人造海水或天然海水或电阻率小的河流等。
3. 阳极材料 A11、A12、A13、A14 为 1 型，A21 为 2 型。

2.4 常用型号及规格

海洋工程与港口工程长期处于盐雾浓度高，氯离子渗透性强，导致钢材电化学腐蚀速率显著提升，铁脚及铁芯作为导体，将阳极本体与被保护金属结构连通形成电流回路，确保阳极优先腐

蚀释放的电子有效传递至被保护结构，实现阴极保护。铝锌合金阳极虽综合性能突出，但需根据环境电阻率、温度及介质成分(如 pH、硫含量)精准选型，样式及对应的尺寸见图 1、2，常用型号及规格见表 3、4。

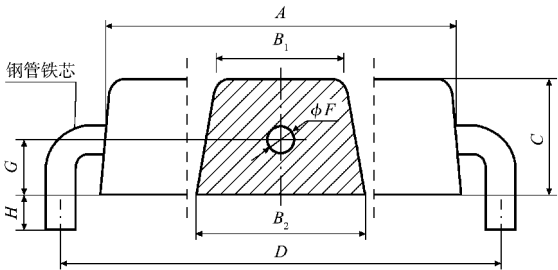


图 1 海洋工程设施牺牲阳极图
Fig. 1 Sacrificial anode diagram of marine engineering facilities

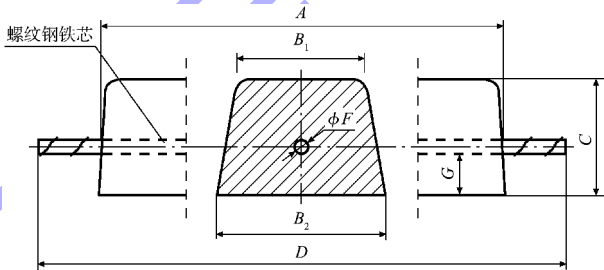


图 2 港口工程设施牺牲阳极图
Fig. 2 Sacrificial anode diagram of port engineering facilities

表 3 海洋工程设施牺牲阳极型号及规格

Tab. 3 Types and specifications of sacrificial anodes for marine engineering facilities

型号	规格 [A×(B ₁ +B ₂)×C] / (mm×mm×mm)	铁脚尺寸/mm				净质量/ kg	毛质量/ kg
		D	F	H	G		
A□I-1	2 300×(220+240)×230	2 500	60	300	110	294.0	310.0
A□I-2	1 600×(200+210)×220	1 800	60	300	90	181.0	190.0
A□I-3	1 500×(170+200)×180	1 700	50	300	80	122.0	130.0
A□I-4	900×(150+170)×160	1 100	40	300	70	55.0	58.0

注：1. □代表材料种类号，可选 11、12、13、14、21。
2. I 为用途代号，代表港口和海洋工程设施阴极保护用牺牲阳极。
3. 5~12 代表规格序号。

表 4 港口工程设施牺牲阳极型号及规格

Tab. 4 Types and specifications of sacrificial anodes for port engineering facilities

型号	规格 [A×(B ₁ +B ₂)×C] / (mm×mm×mm)	螺纹钢铁脚尺寸/mm			扁钢铁脚尺寸/mm				净质量/ kg	毛质量/ kg
		D	F	G	D	E	F	G		
A□I-5	1 500×(148+178)×170	1 800	25	65	1 800	50	8	65	114.0	120.0
A□I-6	850×(180+220)×180	1 100	25	70	1 100	60	8	70	80.0	85.0
A□I-7	800×(200+280)×150	1 050	25	55	1 050	60	8	55	76.0	80.0
A□I-8	700×(160+220)×180	950	22	70	950	60	8	70	68.5	72.5
A□I-9	1 250×(115+135)×130	1 500	18	45	1 500	40	8	45	52.0	56.0
A□I-10	1 000×(115+135)×130	1 250	18	45	1 250	40	8	45	42.6	46.0
A□I-11	750×(115+135)×130	1 000	16	45	1 000	40	8	45	33.0	35.0
A□I-12	500×(115+135)×130	700	16	45	700	40	8	45	22.0	23.0

注：5~12 代表规格序号。

2.5 设计思路

- 1) 初步选择牺牲阳极的种类及型号。
- 2) 明确该型号的电化学性能等性质。
- 3) 根据地形、测图、水深等条件计算水下区及泥下区钢桩所需的保护电流。
- 4) 根据型号计算牺牲阳极所需的质量。
- 5) 计算单根钢桩需要的阳极体个数。
- 6) 计算初期及末期的发生电流, 判断牺牲阳极是否发挥作用。

2.6 工程设计实例

工程所在区域为长江入海口, 海水与长江水交汇处, 根据防腐要求: 钢桩防腐蚀区域划分为浪溅区、水位变动区、水下区及泥下区。其中浪溅区与水位变动区采用重涂层防腐, 设计年限 20 a, 破损后重新刷防腐涂层, 设计保护年限 10 a, 钢桩预留腐蚀厚度, 设计年限 20 a, 水下区采用牺牲阳极的阴极保护与轻防腐涂层联合防腐措施, 阴

极保护设计年限 30 a, 轻涂层防腐设计年限 10 a, 钢桩预留的腐蚀厚度, 设计年限 10 a; 泥下区采用牺牲阳极的阴极保护, 设计年限 30 a, 钢桩预留的腐蚀厚度, 设计年限为 20 a。

由上可知牺牲阳极阴极保护设计年限为 30 a, 以直径 800 mm 钢桩为例, 选用电容量大、电流效率高的 Al-Zn-In-Mg-Ti (A21), 根据不同区域的桩长得出相应的面积, 再乘以电流密度得出不同时期的保护电流, 然后根据所选阳极体型号计算发生电流, 两者相比, 数据见表 5、6。

表 5 桩基基本数据

Tab. 5 Basic data of pile foundation

桩径/mm	桩长/m	水中桩长/m	泥中桩长/m
800	54.5	13	33.5
	56.5	13	35.5
	57.5	20	29.5
	58.5	20	30.5
	59.5	13	38.5

表 6 计算数据

Tab. 6 Calculation data

初期阴极 保护电流/A	平均阴极 保护电流/A	末期阴极 保护电流/A	阳极总 质量/kg	阳极规格/ (mm×mm×mm)	单块阳极净 质量/kg	单块阳极毛 质量/kg	数量/ 块	初期阴极 发生电流/A	末期阴极 发生电流/A
2.21	1.84	1.98	207.09	1 500×(170+200)×180					
2.34	1.94	2.08	218.38	1 500×(170+200)×180					
2.01	1.73	1.94	194.19	1 500×(170+200)×180	133.66	141.5	2	3.2	2.15
2.08	1.78	1.99	199.84	1 500×(170+200)×180					
2.52	2.01	2.13	235.32	1 500×(170+200)×180					

注: 发生电流应大于保护电流。

3 牺牲阳极施工与安装

根据各种钢桩所需保护电流和计算所需牺牲阳极块数进行均匀安装布置, 每根钢桩安装 2 块牺牲阳极。阳极体顶部距离设计低水位的距离必须大于 1.2 m, 距离泥面必须大于 1.0 m, 2 块阳极互成 180°±30°角布置, 牺牲阳极与被保护钢结

构之间的距离必须大于 100 mm。

牺牲阳极安装质量的好坏, 直接影响到阳极的发生电流量、溶解性能、使用寿命和防腐效果。牺牲阳极安装必须牢固可靠, 30 a 不脱落, 安装位置见图 3, 阳极块尺寸及选型见表 7。

表 7 阳极块尺寸及选型

Tab. 7 Anode block dimension and selection

钢管桩直径/mm	阳极体规格/(mm×mm×mm)	A/mm	B ₁ /mm	B ₂ /mm	C/mm	F/mm	L/mm	单块净质量/kg	单块毛质量/kg
800	1 500×(170+200)×180	1 500	170	200	180	60	A+770	133.66	141.50

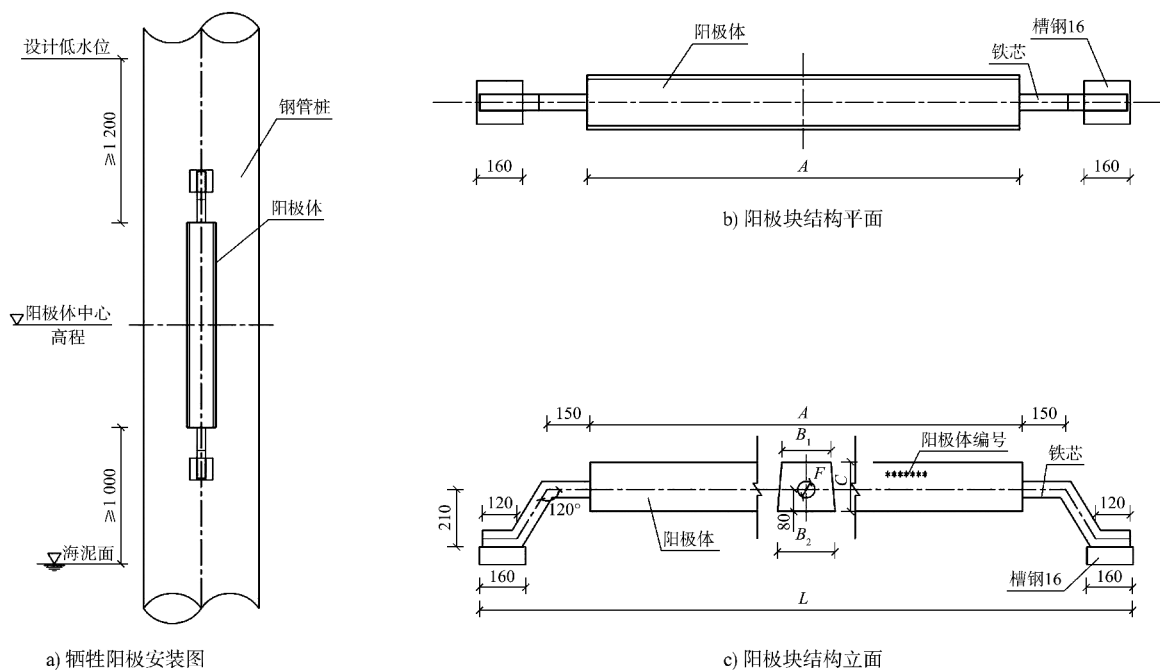


图 3 牺牲阳极安装图 (单位: mm)
Fig. 3 Sacrificial anode installation diagram (unit: mm)

3.1 牺牲阳极安装工艺

根据钢桩码头建造特点,钢桩打桩前不能焊接任何较大构件,以免妨碍打桩施工,牺牲阳极只能在完成打桩后采用水下安装施工^[3-5]。水下电焊法,是采用水下焊接设备和水下焊条,通过电焊的方法把牺牲阳极固定在钢桩上,该工程宜采用局部排水干法焊接,将水下焊接部位采用特制密封罩罩住,用高纯度 CO_2 保护气体将密封罩内的水吹出,通过密封罩内的焊头与自动输送焊丝系统在水下干燥条件下进行焊接;也可采用水下湿法焊接,并满足焊接质量要求^[6]。

3.2 牺牲阳极焊接技术要求

根据阳极结构,每只牺牲阳极有 2 只焊脚,4 条焊缝,要求每条焊缝长度大于 80 mm,焊缝高度 8~10 mm,焊缝连接、平整、无虚焊、焊接牢固,确保 30 a 不脱落,并与钢桩有良好的电性连接。

3.3 牺牲阳极焊脚焊缝计算

依据 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》^[7]和 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[8-9]有关规定,所设计的牺牲阳极焊脚焊缝能承受的

应力强度为 F_w 。牺牲阳极在水流侧压力(流速 v 、波浪冲击力)、自重力共同作用下,焊脚焊缝的应力强度计算满足要求,即设计的焊缝长度和高度满足使用要求。

4 运营维护

钢桩建成运营后,在对码头检修期间应对钢桩牺牲阳极的阴极保护装置进行检修及保护电位测量等措施,通过检测阳极的表面形貌、计算阳极使用寿命、测量保护电位和检查钢桩腐蚀状况,对牺牲阳极保护效果进行评价和分析^[10-11]。

4.1 检测周期

初期检测:在牺牲阳极安装后,通常会在初期进行较为频繁的检测,以确保系统能够正常工作并达到预期的保护效果。一般在安装后的 13 个月内进行首次检测。

定期检测:半年至一年检测一次,这是较为常见的检测频率。通过定期检测可以及时发现阳极的消耗情况、保护电位是否在合理范围内以及钢桩的腐蚀状况等。

特殊情况下的检测:如果码头所处的环境较

为恶劣, 如海水腐蚀性强、水流速度快等, 或者在检测过程中发现阳极消耗过快、保护电位异常等情况, 应适当增加检测频次。

4.2 检测内容

外观检查: 检查牺牲阳极的外观, 确保没有明显的损坏、腐蚀或松动, 包括防腐涂层附着情况、阳极焊接质量、溶解性能、消耗情况及钢桩各部位的保护效果等。

电位测量: 使用万用表和参比电极 (如铜/饱和硫酸铜参比电极) 测量钢桩的保护电位, 钢桩牺牲阳极保护效果的好坏可以通过电位测量数值进行直观有效的评定, 相关标准规范规定钢的保护电位为 $-1.10 \sim -0.85$ V (相对于铜/饱和硫酸铜参比电极) 或 $0 \sim 0.25$ V (相对于锌参比电极), 当钢桩保护电位达到上述规定后, 其保护度可达 90% 以上。

电流测量: 通过直测法测量牺牲阳极的输出电流, 确保电流输出正常。

接地电阻测量: 定期测量牺牲阳极的接地电阻, 确保其电阻值在合理范围内。

4.3 阳极更换

如果在使用期间出现以下情况之一时, 应及时更换: 1) 阳极剩余量不足以保护下次检修间隔期所需用量; 2) 阳极铁芯明显外露, 短期内将会造成阳极体脱落。在安装或更换阳极时, 须确保阳极表面清洁, 无油脂、污物和铁锈。

4.4 系统检查与修复

电缆检查: 定期检查连接牺牲阳极和钢桩的电缆。

防腐层检查: 检查钢桩的防腐层是否完好。

故障排查: 如果发现保护电位异常或电流输出不足, 应及时排查原因。

4.5 记录与评估

记录数据: 详细记录每次检测的数据, 包括电位、电流、接地电阻等, 以便进行趋势分析。

效果评估: 根据检测数据评估牺牲阳极系统的保护效果, 及时调整阳极的数量或分布, 确保系统的有效运行。

5 结语

1) 钢桩作为港口工程的重要结构, 其腐蚀保护一直是行业领域的重要课题, 通过对码头钢桩腐蚀特性的深入分析, 并集合牺牲阳极阴极保护技术的理论基础, 系统地展开研究, 结果表明, 罗泾改造一期工程牺牲阳极阴极保护法能够降低钢桩腐蚀速率约 90%, 预期延长钢管桩寿命约 30 a, 可为港口的安全运行提供有力保障。

2) 在设计过程中, 综合分析钢桩的结构特点、海洋 (河流) 环境因素以及经济成本等多方面因素, 合理选择阳极材料, 并优化阳极的数量和布置方式, 降低维护成本, 提高其使用效率。通过计算保护电流密度, 确保了阴极保护系统的有效性和经济性。

3) 在实际应用中, 通过对保护效果的长期监测与评估, 验证了设计的合理性和系统的可靠性。监测结果表明, 保护系统能够维持钢桩的电位稳定在 $-1.05 \sim -0.85$ V, 有效抑制了钢桩的腐蚀。

4) 如何在更复杂的环境下实现高效、可靠性高的阴极保护, 也是值得深入探讨的方向之一。总之, 牺牲阳极阴极保护技术在码头钢桩防腐领域具有广阔的应用前景。研究为该技术的推广应用提供了理论依据和实践经验, 可为后续的深入研究奠定基础。

参考文献:

- [1] 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Standard for durability design of port and waterway engineering structure: JTS 153-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [2] 铝合金牺牲阳极: GB/T 4948—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
Sacrificial anode of aluminum alloy: GB/T 4948-2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.
- [3] 樊海辉, 刘海民, 宋振远, 等. 牺牲阳极法的阴极保护系统优化设计及施工[J]. 水运工程, 2019(S1): 5-8, 114.
FAN H H, LIU H M, SONG Z Y, et al. Optimization design and construction of sacrificial anode method cathodic protection system[J]. Port & waterway engineering, 2019(S1): 5-8, 114.

(下转第 150 页)