

易燃易爆码头钢管桩牺牲阳极 阴极保护设计及施工

隋吉林¹, 李云飞^{2*}, 杨太年²

(1. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300220; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

摘要: 以某化工码头钢管桩阴极保护更新项目为依托, 针对易燃易爆环境下传统水下焊接安装牺牲阳极存在的动火作业安全隐患问题, 系统优化了牺牲阳极阴极保护系统的设计与施工方案。通过计算保护电流需求、科学选型阳极规格并验算抱箍系统螺栓、钢板等部件的受力状态, 确定抱箍式牺牲阳极系统方案, 并聚焦施工重点问题, 制定了相应的施工工艺与管控措施。安装后钢管桩保护电位稳定在 $-991\sim-1\ 008\text{ mV}$ (相对于海水 Ag/AgCl 参比电极), 满足规范要求。该方案为易燃易爆环境下实施阴极保护提供了安全可行的解决方法, 可供类似工程借鉴和使用。

关键词: 易燃易爆; 钢管桩; 牺牲阳极; 阴极保护; 抱箍安装

中图分类号: U6; U653.5; TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)03-0062-05

doi: 10.7640/zggwjs202603010

Design and construction of sacrificial anode cathodic protection for steel pipe piles in flammable and explosive terminals

SUI Ji-lin¹, LI Yun-fei^{2*}, YANG Tai-nian²

(1. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on a cathodic protection renewal project for steel pipe piles at a chemical terminal, aiming at the safety hazards of hot work in traditional underwater welding installation of sacrificial anodes in flammable and explosive environments, the design and construction scheme of the sacrificial anode cathodic protection system was systematically optimized. The hoop-type sacrificial anode system scheme was determined by calculating the protective current demand, scientifically selecting anode specifications, and checking the stress state of components such as bolts and steel plates of the hoop system. Focusing on key construction problems, corresponding construction processes and control measures were formulated. After installation, the protective potential of steel pipe piles was stabilized at -991 mV to $-1\ 008\text{ mV}$ (relative to the seawater Ag/AgCl reference electrode), which meets the specification requirements. The scheme provides a safe and feasible solution for implementing cathodic protection in flammable and explosive environments, and can be referenced and applied in similar projects.

Key words: flammable and explosive; steel pipe piles; sacrificial anode; cathodic protection; hoop installation

0 引言

钢管桩作为海洋工程领域码头结构的重要支撑构件, 因长期处于高盐度、高湿度的海洋环境中, 面临严重的电化学腐蚀威胁^[1]。阴极保护技术

是海洋钢管桩防腐的成熟有效方法, 其中牺牲阳极阴极保护因原理简单、无需外部电源、维护成本低、保护效果稳定等优势, 应用广泛。然而, 对原油、液体化工品等易燃易爆码头, 安全风险

收稿日期: 2025-09-04 修回日期: 2025-12-19

作者简介: 隋吉林(1982—), 男, 辽宁大连人, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计工作。

* 通讯作者: 李云飞, E-mail: 873917981@qq.com

管控要求极高,须尽量避免动火作业。传统水下焊接安装牺牲阳极的方式易因火花、高温引发燃爆事故,存在重大安全隐患^[2-3]。因此,探索适用于易燃易爆环境下的牺牲阳极阴极保护设计新思路与可靠施工工艺,具有重要的工程实际意义。

本文以某化工码头钢管桩阴极保护更新项目为工程背景,针对上述问题,提出一种抱箍式牺牲阳极系统,重点围绕抱箍安装方式的设计可行性、施工关键技术及质量管控展开论述,以期为类似工程提供技术参考。

1 工程概况

某化工码头始建于2002年,其靠船墩和系缆墩采用钢管桩基础,共计43根(16根 $\phi 700$ mm, 27根 $\phi 800$ mm)。钢管桩原防腐设计采用“重防腐涂层+水下区牺牲阳极”的联合保护方案,牺牲阳极材料为Al-Zn-In-Cd合金,设计保护年限为15 a。

现原阴极保护系统已超过设计使用年限,保护效果无法满足要求,为确保码头结构安全与持续运营,需对牺牲阳极系统进行更新,新系统设计保护年限仍为15 a。本次更新工程需严格遵循码头安全生产规定,确保新阴极保护系统的可靠性、有效性及长期稳定性。

2 牺牲阳极阴极保护系统设计

2.1 保护电流计算

依据现行行业标准JTS 153—2015《水运工程

结构耐久性设计标准》^[4],结合码头钢管桩实际情况,选取合适的保护电流密度及涂层破损率。本工程钢管桩原有涂层整体状况良好,考虑到长期使用可能存在的局部破损与老化,确定水位变动区及水下区涂层破损率分别为:初始值0.3、维持值0.53、末期值0.75。据此计算得到各区域阴极保护面积及不同时期的保护电流需求,见表1。

表1 保护面积和保护电流

Table 1 Protected area and protective current

项目	桩径/mm	钢管桩数量/根	保护面积/m ²	保护电流/A		
				初始值	维持值	末期值
系缆墩	700	16	380.52	11.23	9.64	13.18
靠船墩	800	27	692.70	40.31	26.41	35.10
总计		43	1 073.22	51.54	36.05	48.28

2.2 牺牲阳极规格尺寸及安装方式

本工程选用符合GB/T 4948—2002《铝-锌-铜系合金牺牲阳极》要求的Al-Zn-In-Mg-Ti合金作为牺牲阳极材料^[5]。考虑到靠船墩(水深较深)和系缆墩(水深较浅)的水深差异,选用2种规格阳极以满足电流需求与安装可行性,牺牲阳极配置见表2。钢结构与牺牲阳极的连接方式关系到系统安全性、稳定性及施工难度,针对易燃易爆环境的特殊要求,对常用安装方式进行对比分析,见表3。

表2 牺牲阳极配置表

Table 2 Sacrificial anode configuration table

结构名称	阳极编号	阳极尺寸	铁芯	毛重/(kg·块 ⁻¹)	阳极数量/(块·根 ⁻¹)	阳极总数/块
系缆墩	AI-1型	600 mm×(200+170) mm×180 mm	$\phi 22$ mm 螺纹钢	57.0	2	32
靠船墩	AI-2型	1 000 mm×(200+170) mm×180 mm	$\phi 28$ mm 螺纹钢	97.6	2	54

表3 牺牲阳极不同安装方式的特点

Table 3 Characteristics of different installation methods for sacrificial anode

安装方式	原理	特点
电焊焊接	将牺牲阳极直接焊接在被保护的金属结构表面	1) 能使阳极与被保护金属紧密连接,保证电气导通性良好,从而有效传递保护电流; 2) 相对稳定,阳极不易发生位移,能持续、稳定地为金属结构提供保护; 3) 受水流、水压等环境因素影响,水下焊接施工难度大,施工成本较高; 4) 在某些特殊环境下(如易燃易爆区域),焊接过程中产生的火花和高温可能引发安全事故
螺栓连接	通过在被保护金属结构和牺牲阳极上预先设置对应的螺栓孔,使用螺栓将阳极固定在结构上	1) 安装和拆卸操作相对简便,施工难度较低; 2) 施工成本相对较低; 3) 长期受水流冲刷可能导致螺栓松动,进而影响阳极与被保护金属之间的电连接稳定性,降低保护效果; 4) 需在钢管桩上预先钻孔或焊接螺栓基座,可能破坏防腐涂层或结构
抱箍安装	由牺牲阳极和2个半箍组成,牺牲阳极固定在半箍上,2个半箍用螺栓连接在一起	1) 避免了水下焊接作业,无需动火作业,安全性高; 2) 施工便捷,维护成本低; 3) 不破坏钢管桩的防腐涂层,不影响阳极的表面; 4) 便于阳极的维护和更换; 5) 要确保抱箍与钢管桩之间的连接稳定性

通过对比分析，电焊焊接虽导通性好，但动火作业不符合易燃易爆环境下的作业要求；螺栓连接施工简便，但易松动且破坏涂层；抱箍安装无需动火、不损伤涂层、便于维护，因此成为本工程最优选择。后续将通过力学计算验证其连接稳定性。

2.3 抱箍式牺牲阳极系统制作

抱箍式牺牲阳极系统采用特定阳极组安装形式，抱箍采用镀锌钢板加工，材质为 Q235。每个牺牲阳极组由 2 块阳极和 2 套抱箍组成，每套抱

箍包含 2 个半圆抱箍、8 个 M10 电连接高强度螺栓和 2 套 M16 高强度螺栓。阳极铁芯两端与抱箍进行焊接，要求焊缝饱满，连续平整，无虚焊，焊接牢固可靠。电连接固定螺母由 2 个高强度螺母并排组成，并与抱箍满焊，要求无虚焊，焊接牢固可靠。螺母中心与抱箍开孔中心必须严格对齐，保证螺栓能顺利穿透孔道，确保整个阳极组的连接稳定性和电导通性。抱箍式牺牲阳极系统抱箍示意图见图 1，抱箍式牺牲阳极系统如图 2 所示。

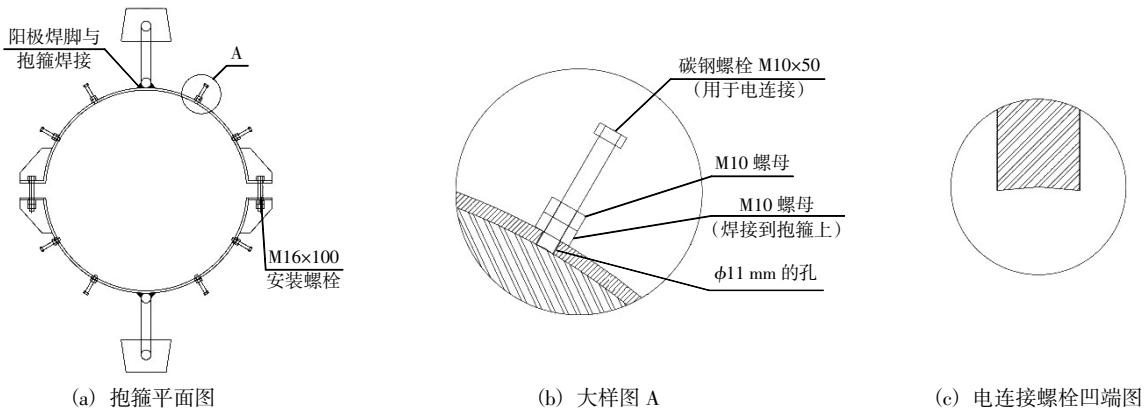


图 1 抱箍式牺牲阳极系统抱箍示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic of the hoop clamp for the sacrificial anode system (mm)

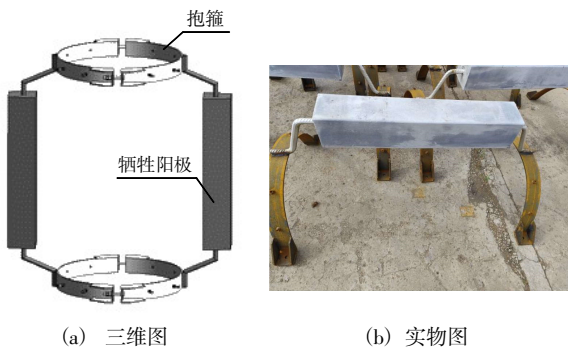


图 2 抱箍式牺牲阳极系统

Fig. 2 Sacrificial anode hoop clamp system

2.4 抱箍式牺牲阳极系统受力验算

为明确抱箍式牺牲阳极系统制作方案的可行性，对其紧固件、钢板等核心部件受力状况进行验算分析；同时计算确定了系统安装时紧固螺栓所需终拧扭矩。

2.4.1 紧固螺栓规格及数量验算

为防止抱箍式牺牲阳极系统滑移，要求系统与钢管桩表面静摩擦力 $f_{静} \geq$ 系统自重 G 。假定 2 个抱箍连接处通过 1 个安装螺栓进行紧固，计算

公式见式(1)：

$$f_{静} = \mu \times 2P_1 \tag{1}$$

式中： μ 为摩擦系数，取 0.3； P_1 为单个安装螺栓承受的拉力，kN。

单个系统自重 G 包括阳极自重与抱箍自重，其计算公式见式(2)：

$$G = (W_{阳极} + W_{抱箍}) \times g \tag{2}$$

式中： $W_{阳极}$ 为单个阳极(AI-2型)质量，kg，取 97.6 kg； $W_{抱箍}$ 为抱箍的质量，取 50 kg； g 为重力加速度，N/kg，取 10 N/kg。

经计算得到 1 个安装螺栓承受的拉力为 $P_1 = 2.46$ kN。

现行国家标准 GB 50017—2017《钢结构设计标准》中^[6]，1 个 8.8 级 M16 高强螺栓承受的拉力设计值 P_2 计算公式为：

$$P_2 = f_t^b \times \frac{\pi}{4} d^2 \tag{3}$$

式中： f_t^b 为螺栓抗拉强度设计值，N/mm²，取为 400 N/mm²； d 为螺栓直径，mm。

经计算, $P_2=80.38$ kN。由于 P_2 远大于 P_1 , 表明本工程采用 1 个 8.8 级 M16 高强螺栓安装连接 2 个抱箍阳极的安装措施能保证抱箍式牺牲阳极系统与钢管桩表面之间不会出现相对滑移, 同时保证了系统的安装位置准确。

2.4.2 抱箍钢板的截面强度验算

本工程的抱箍钢板为 Q235 碳素结构钢, 厚度为 8 mm, 宽为 100 mm。采用高强螺栓连接时, 抱箍钢板的截面强度验算应同时满足式(4)一式(5)。

毛截面屈服:

$$\frac{N}{A} \leq f \quad (4)$$

净截面断裂:

$$\frac{N}{A_n} \leq 0.7 f_u \quad (5)$$

式中: N 为抱箍钢板拉力设计值, 取 $N=P_2$; A 为抱箍钢板的毛截面面积, mm^2 ; f 为抱箍钢板的抗拉强度设计值^[5], N/mm^2 , 取 215 N/mm^2 ; A_n 为抱箍钢板的净截面面积, mm^2 ; f_u 为抱箍钢板的抗拉强度最小值^[5], N/mm^2 , 取 370 N/mm^2 。

经计算, $\frac{N}{A}=100.5 \text{ N/mm}^2$, $\frac{N}{A_n}=119.6 \text{ N/mm}^2$ 。结果表明, 抱箍钢板截面强度满足验算要求, 抱箍钢板钢材牌号和截面满足规范规定。

2.4.3 螺栓施工终拧扭矩计算

依据现行行业标准 JTS 203—2019《水运工程钢结构施工规范》^[7], 大六角头高强螺栓连接副施工终拧扭矩 T_c 按式(6)计算:

$$T_c = K P_c d \quad (6)$$

式中: K 为高强度螺栓连接副的扭矩复验系数平均值, 取 0.150; P_c 为高强度螺栓施工预拉力, kN, 取 90 kN; d 为螺栓直径, mm, 取 16 mm。

经计算, $T_c=216 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。此扭矩值将作为施工控制的依据。

3 施工及效果测试

3.1 施工工艺及管控措施

稳固的安装和有效的电连接是保障牺牲阳极服役寿命和效果的关键因素。因此, 抱箍系统在施工过程中必须解决以下重点问题: 1) 抱箍系统支承牺牲阳极, 稳固安装在钢管桩上; 2) 牺牲阳极通过抱箍系统与钢管桩稳定有效的电连接。针对上述问题, 制定相应的施工工艺及管控措施。

3.1.1 施工前准备

1) 钢管桩表面处理: 钢管桩表面清洁度与平整度直接影响抱箍贴合度, 进而影响连接稳定性。安装前需对钢管桩安装区域表面进行清理, 去除表面海生物、锈蚀等, 确保表面平整、无凸起或凹陷。

2) 抱箍式牺牲阳极系统检验: 牺牲阳极及抱箍组件进场后, 需进行严格质量检验。阳极材料需检查化学成分、尺寸偏差、重量、表面质量及电化学性能, 确保符合《铝-锌-钢系合金牺牲阳极》标准及设计要求; 抱箍组件需检查钢板厚度、螺栓规格、螺栓数量等, 确保组件符合安装要求。

3.1.2 水下安装

1) 安装定位: 抱箍式牺牲阳极系统水下安装时, 应检查和确定阳极组安装位置及标高, 确保符合设计要求。

2) 抱箍紧固安装: 抱箍式牺牲阳极系统紧固螺栓的紧固分初拧和终拧 2 次进行。终拧扭矩值应达到 $216 \text{ N}\cdot\text{m}$, 初拧扭矩值通常不得小于终拧扭矩值的 30%。

3) 电连接螺栓安装: 在抱箍固定后, 通过紧固电连接螺栓实现抱箍系统与钢管桩的电连接, 电连接电阻应不大于 0.01Ω 。使用液压或气动工具分初拧和终拧 2 次紧固, 终拧扭矩值应达到 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。紧固时, 需确保螺栓端部与钢管桩表面良好接触, 但应避免螺栓旋拧过度导致抱箍钢板局部凸起, 影响安装效果。若钢管桩表面有涂层, 应保证螺栓端部顶破涂层, 并与钢管桩表面良好接触。

3.1.3 施工过程中质量检查

通过水下拍照摄像检查抱箍的连接情况与螺栓紧固状态, 以便及时发现因水流冲击导致位移、松脱或其他安装缺陷, 确保抱箍系统的稳定性和可靠性。

3.2 保护效果测试

保护电位是衡量阴极保护状态的关键指标。系统安装完成后 90 d 内^[8], 对钢管桩保护电位进行了全面检测, 检测结果见表 4。所有测点电位值均在 $-991 \sim -1\ 008 \text{ mV}$ (相对于海水 Ag/AgCl 参比电极) 区间内, 达到《水运工程结构耐久性设计标准》规定的阴极保护要求 ($-780 \sim -1\ 050 \text{ mV}$), 且分布均匀, 验证了该抱箍式牺牲阳极系统设计、安装方式和施工的合理性和有效性。

表 4 钢管桩保护电位测试数据
Table 4 Test data of protective potential of steel pipe piles

测点	保护电位				
	1号靠船墩	2号靠船墩	4号靠船墩	1号系缆墩	2号系缆墩
1	-995	-999	-997	-996	-1 003
2	-1 001	-1 001	-996	-1 002	-1 001
3	-1 002	-998	-994	-998	-999
4	-997	-1 003	-1 002	-1 001	-995
5	-992	-991	-997	-1 004	-993
6	-1 001	-997	-996	-1 007	-996
7	-999	-998	-999	-998	-1 000
8	-994	-998	-998	-1 008	-1 001
9	-1 002	-999	-1 002		

3.3 维护要求

1) 电位定期检测：定期检测钢管桩保护电位，当实测电位不满足设计要求时，排查阳极失效、抱箍松动、电导通性下降等问题，及时更换阳极或紧固螺栓。

2) 抱箍系统检查：定期对抱箍和阳极的连接部位进行检查，重点关注螺栓紧固状态、抱箍变形、连接部位腐蚀产物堆积等。若发现松动，及时紧固螺栓；若发现腐蚀，采取相应的防腐处理措施，如涂抹防腐涂料、更换腐蚀部件等，确保连接部位的可靠性和稳定性。

4 结语

1) 针对易燃易爆码头的安全要求，采用抱箍式牺牲阳极系统安装方式，有效规避了传统焊接工艺的安全风险，技术方案安全可行。

2) 设计阶段根据环境特点、结构特征等参数，详细计算了钢管桩保护电流需求量，同时考虑了水深差异对安装可行性的影响，最终确定了牺牲阳极类型、规格和用量。

3) 详细验算了抱箍系统螺栓、钢板等部件的受力状态，结果表明抱箍系统方案满足使用要求。

4) 施工阶段聚焦抱箍系统稳固安装和有效电连接 2 个关键问题，制定了相应的施工工艺及管控措施，有效保障了施工质量。

5) 系统安装后，钢管桩保护电位稳定在-991~-1 008 mV，满足规范要求，验证了抱箍式牺牲阳

极系统的有效性与可靠性，可为同类易燃易爆码头钢管桩阴极保护工程提供技术参考。

参考文献：

[1] 王飞朋,沈剑,雷明月,等.某液体化工码头钢管桩防腐系统维护设计及施工风险点分析[J].中国水运,2024(3):36-38.
WANG Fei-peng, SHEN Jian, LEI Ming-yue, et al. Maintenance design and construction risk analysis of anticorrosion system for steel pipe piles in a liquid chemical terminal[J]. China Water Transport, 2024(3): 36-38.

[2] 刘岩峰.30万吨级原油码头工程钢管桩防腐蚀安全保护措施探析[J].化工管理,2021(29):175-176.
LIU Yan-feng. Discussion on anti-corrosion safety protection measures of steel pipe piles in 300 000-ton crude oil wharf project[J]. Chemical Engineering Management, 2021(29): 175-176.

[3] 马化雄.海港工程构筑物腐蚀控制技术及应用[M].北京:科学出版社,2018.
MA Hua-xiong. Corrosion control technology and application for harbour engineering structures[M]. Beijing: Science Press, 2018.

[4] JTS 153—2015,水运工程结构耐久性设计标准[S].
JTS 153—2015, Standard for durability design of port and waterway engineering structure[S].

[5] GB/T 4948—2002,铝-锌-铜系合金牺牲阳极[S].
GB/T 4948—2002, Sacrificial anode of Al-Zn-In series alloy[S].

[6] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017, Standard for design of steel structures[S].

[7] JTS 203—2019,水运工程钢结构施工规范[S].
JTS 203—2019, Code for construction of steel structures for waterway engineering[S].

[8] JTS/T 209—2020,水运工程结构防腐蚀施工规范[S].
JTS/T 209—2020, Specifications for corrosion protection construction of port and waterway engineering structure[S].