



港口工程钢管桩阴极保护全寿命期方案

任志杰

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要:以海南洋浦30万吨级原油码头及配套储运设施工程为例,从设计、施工、后期维护和全寿命期成本方面研究钢管桩的牺牲阳极和外加电流两种阴极保护全寿命期方案。

关键词:设计; 施工; 后期维护; 全寿命期成本; 牺牲阳极; 外加电流

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0077-05

Cathodic protection of steel piles throughout life cycle in port engineering

REN Zhi-jie

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

Abstract: Taking the 0.3 million DWT crude oil terminal and associated storage and transportation facilities project in Yangpu harbor of Hainan province as an example, this paper studies two throughout-life-cycle cathodic protection methods including sacrificial anode protection and impressed current protection from design, construction, latter maintenance and the whole life cycle cost.

Key words: design; construction; latter maintenance; whole life cycle cost; sacrificial anode; impressed current

港口工程中的钢管桩属海洋环境下固定式钢结构。钢管桩存在海洋大气区、海水飞溅区、海水潮差区、海水全浸区和海泥埋没区5个腐蚀区域,严重威胁码头的安全运行和长期使用。众多工程证实,对港口工程中的钢管桩采取及时有效的防腐保护是十分必要的。钢管桩在海洋环境中的腐蚀主要是电化学腐蚀,阴极保护可以有效防止金属在海洋腐蚀环境中的电化学腐蚀。本文主要研究钢管桩的阴极保护全寿命期方案。

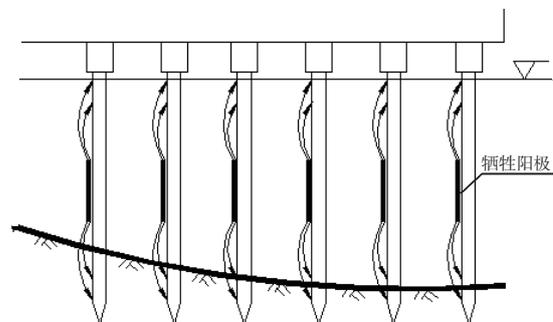
1 阴极保护

1.1 类型

阴极保护有2个基本类型。1)“牺牲阳极”。该工艺基于钢结构(阴极)和牺牲阳极之间存在的自然电位差,牺牲阳极发出保护电流并

溶解于电解质中,钢结构(钢管桩)得到保护。

2)外加电流。即将惰性阳极与直流电源的正极相连,将受保护的钢结构(钢管桩)与直流电源的负极相连,保护电流由电源提供,这时辅助阳极可选用耐腐蚀的材料(如钛金属)。保护原理如图1所示。



a) 牺牲阳极

收稿日期: 2012-03-19

作者简介: 任志杰(1979—),男,工程师,主要从事港口与航道工程设计、施工条件及项目经济评价。

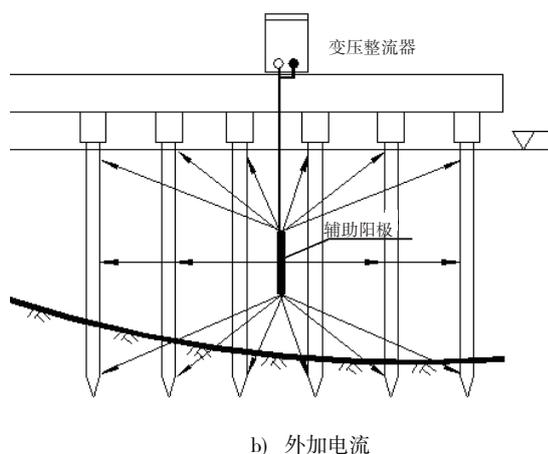


图1 阴极保护原理

1.2 设计步骤

阴极保护的设计步骤为：根据被保护的钢管桩材质、表面状态、涂层质量与厚度、工作海域特点、有效保护年限和外界条件影响等有关因素，分段确定电流保护密度及保护面积，计算求得保护电流，从而选取牺牲阳极材料、规格、重量，或根据保护电流来确定外加电流。

2 工程简介

海南洋浦30万吨级原油码头及配套储运设施工程位于海南岛的西北部儋州辖属海岸线上，该工程码头和引桥墩均采用高桩墩式结构，整个工程共采用 $\phi 1\ 500\text{ mm}$ 钢管桩698根， $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 钢管桩18根。钢管桩处于天然海水环境中，海水电阻率 $20\ \Omega \cdot \text{cm}$ ，钢管桩全长采用环氧重防腐涂层保护。钢管桩设计保护年限为50 a。

该工程对钢管桩阴极保护进行了牺牲阳极和外加电流2种方案的全寿命设计研究。

3 牺牲阳极阴极保护方案

3.1 技术指标

该工程钢管桩阴极保护年限为50 a，考虑初期投资、施工难度和为将来可能出现的更先进技术留出余地等因素，可以考虑分期投资建设方式对码头进行分期保护，最终满足50 a全寿命保护（分2期保护：30 a+20 a）。

根据确定的保护技术路线，钢管桩防腐保护设计技术指标为：

1) 钢管桩牺牲阳极保护设计寿命合计大于

50 a；

2) 牺牲阳极安装完成后7 d内，钢管桩电位全部达到 -900 mV 以上（相对于铜/饱和硫酸铜参比电极，下同）；

3) 有效保护期间内，钢管桩电位自始至终控制在标准规定的保护电位范围（ $-0.85\sim-1.10\text{ V}$ ）；

4) 在有效保护期内，钢管桩的腐蚀得到有效抑制，表面基本无锈蚀，不产生蚀坑等集中腐蚀现象，壁厚无明显减薄，码头基本维持现状而安全运行。

3.2 设计计算

3.2.1 面积^[1-2]

钢管桩不同的工作环境和不同的表面状态所需的保护电流密度差异很大，因此对各部位的保护面积要进行详细计算。根据工程资料和相关规范标准，对钢管桩潮差涂层区、海水涂层区和海泥埋设区的保护面积分别进行计算，结果见表1。

表1 钢管桩各部位的保护面积

钢管桩总数量/根	潮差涂层区面积/ m^2	海水涂层区面积/ m^2	海泥埋设区面积/ m^2
698 ($\phi 1\ 500\text{ mm}$)	9 922	60 045	50 355
18 ($\phi 1\ 200\text{ mm}$)			

3.2.2 电流密度选取和所需保护电流^[1-2]

根据工程所处的地理位置、介质电阻率、海水流速、波高、码头结构形式和钢管桩材质、表面状态、涂层种类以及涂层使用寿命等实际情况，参照相关标准和类似工程的保护效果，并结合各腐蚀区保护面积和选取的保护电流密度，经计算，钢管桩所需的总保护电流见表2。

3.2.3 牺牲阳极材料的选择^[3-5]

我国海洋钢结构防腐广泛使用普通Al-Zn-In系铝合金牺牲阳极，其中有：Al-Zn-In-Cd阳极、Al-Zn-In-Sn阳极、Al-Zn-In-Si阳极、Al-Zn-In-Sn-Mg阳极。Al-Zn-In系铝合金牺牲阳极的电化学性能见表3。

近年来，随着科学技术的发展和不断的深入研究，研制生产的高效三元铝合金牺牲阳极被广泛应用，并获得了良好的防腐效果。高效三元铝合金牺牲阳极的电化学性能见表3。

表2 钢管桩保护面积及保护电流

时间	位置	面积/m ²	初期			末期		
			保护电流密度/(mA·m ⁻²)	破损率/%	保护电流/A	保护电流密度/mA	涂层破损率/%	保护电流/A
前30 a	潮差涂层区	9 922	120	2	23.81	80	53	420.70
	海水涂层区	60 045	120	2	144.11	80	47	2 257.70
	海泥埋没区	50 355	25	2	25.18	20	47	473.34
	总计				193.10			3 151.74
后20 a	潮差涂层区	9 922	120	53	631.05	80	87	690.59
	海水涂层区	60 045	120	47	3 386.55	80	77	3 698.79
	海泥埋没区	50 355	25	47	591.67	20	77	775.47
	总计				4 609.28			5 164.85

表3 牺牲阳极电化学性能

阳极名称	工作电位/V	实际电容量/(A·h·kg ⁻¹)	电流效率%	消耗率/(kg·A ⁻¹ ·a ⁻¹)	溶解状况
Al-Zn-In系合金牺牲阳极	-1.12~-1.05	≥2 400	≥85	3.65	腐蚀产物容易脱落，表面溶解均匀
高效三元铝合金牺牲阳极	-1.12~-1.09	≥2 550	≥90	3.44	

根据该工程钢管桩阴极保护期长的特点，考虑工程量大、保护寿命长，同时为了减少阳极用量和水下焊接安装工程量，节约工程造价，设计方案选用高效三元铝合金牺牲阳极作为该工程的防腐牺牲阳极材料。

3.2.4 牺牲阳极规格尺寸的确定^[1-2, 6-7]

根据该工程钢管桩所需保护电流和牺牲阳极设计使用寿命，依据相关规范标准，综合考虑码头结构条件和防腐保护要求，确定设计使用防腐牺牲阳极规格（表4）。

表4 牺牲阳极规格

方案	保护年限/a	牺牲阳极规格	牺牲阳极单块质量/(kg·块 ⁻¹)	牺牲阳极用量/块
分2期	30	SRG-V	199.1	1 224
保护	20	SRG-IV	127.2	1 748

3.2.5 牺牲阳极用量计算^[1-2, 6-7]

为了满足钢管桩所需保护电流，使牺牲阳极发生电流和保护电位分布均匀，防腐效果一致，牺牲阳极便于布置安装，钢管桩阴极保护所需阳极用量见表4。

3.3 牺牲阳极结构、布置和安装

3.3.1 牺牲阳极结构

牺牲阳极由阳极体、镀锌钢板导电钢芯和槽钢焊接焊脚3部分组成，结构见图2。

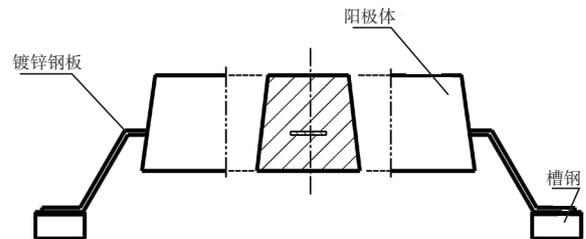


图2 牺牲阳极结构

3.3.2 钢管桩电性连接

考虑码头结构特点，钢管桩潮差区、海水涂层区和海泥埋没区的长度不同，保护面积、保护电流和所需阳极数量不同，为了排除钢管桩之间因电位分布不均匀而造成的不良影响，达到电位分布均匀，整体得到一致的良好保护效果，在钢管桩打桩完工后，及时将码头各区域内的所有钢管桩分别用钢筋电焊连接，各自形成一个保护整体。

3.3.3 牺牲阳极布置

由于牺牲阳极工作电位低，保护范围有限，因此牺牲阳极需根据码头钢管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。

3.3.4 牺牲阳极安装^[6, 8]

根据钢管桩码头建造特点，钢管桩打桩前不能焊接任何较大构件，以免妨碍打桩施工，牺牲阳极只能在打桩完成后采用水下安装施工。

牺牲阳极水下安装施工的方法主要有以下几种：螺栓固定法、捆扎法和水下电焊法。

由于螺栓固定法和捆扎固定法有其局限性,结合该工程钢管桩材质为高强度钢,要求防腐保护寿命长的特点,为了确保阳极焊接安装质量,牺牲阳极的水下安装工艺设计采用专用特殊成分水下焊条湿法焊。

3.4 牺牲阳极系统后期维护

由于牺牲阳极阴极保护系统无法自调控发生电流及及时自行监控钢管桩受保护情况,根据 JTS 153-3—2007《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》规范要求,每5 a须对整个牺牲阳极保护系统全面检查一次,并对阴极保护情况作一次评价,包括逐个阳极尺寸测量,另外一般要进行相应的维护。

4 外加电流阴极保护方案

4.1 外加电流阴极保护技术指标

根据确定的保护技术路线,钢管桩防腐保护

设计技术指标为:

- 1) 钢管桩外加电流保护设计寿命合计大于50 a;
- 2) 有效保护期间内,钢管桩电位自始至终控制在标准规定的保护电位范围(-0.85~-1.10 V,相对于铜/饱和硫酸铜参比电极);
- 3) 在有效保护期内,钢管桩的腐蚀得到有效抑制,表面基本无锈蚀,不产生蚀坑等集中腐蚀现象,壁厚无明显减薄,码头基本维持现状而安全运行。

4.2 外加电流保护设计计算

4.2.1 钢管桩保护面积计算

钢管桩各部分保护面积见表1。

4.2.2 阴极保护电流密度选取和所需保护电流计算^[1-2,9]

根据相关规范标准,并结合各腐蚀区保护面积和选取的保护电流密度,经计算钢管桩所需的总保护电流见表5。

表5 钢管桩保护面积及保护电流

位置	面积/m ²	初期			末期		
		保护电流密度/(mA·m ⁻²)	破损率/%	保护电流/A	保护电流密度/mA	涂层破损率/%	保护电流/A
潮差涂层区	9 922	120	2	23.81	80	87	690.59
海水涂层区	60 045	120	2	144.11	80	77	3698.79
海泥埋没区	50 355	25	2	25.18	20	77	775.47
总计				193.10			5164.85

4.2.3 外加电流材料的选择^[1]

1) 变压整流器及监控系统。

外加电流阴极保护系统的监控设备安装在变压整流器内部。

监控设备采用保护性外壳,其绝缘密封等级为IP65。

监控设备具有监测、采集钢结构自然腐蚀电位、保护电位、电源设备的输出电流和输出电压的功能,并能监测设备状态,具备报警功能。

2) 辅助阳极。

辅助阳极材料采用MMO钛管阳极,采用一体式阳极头设计,在阳极和尾缆连接处使用环氧浇注密封,阳极使用寿命50 a。

3) 参比电极。

选用铜/饱和硫酸铜参比电极测量钢桩相对于电解质的电位。

4) 接线箱。

接线盒采用玻璃钢制造,其防护等级为IP65。

5) 电缆。

所有电缆应均采用耐海水腐蚀和耐老化的电缆。

4.3 外加电流阴极保护系统施工^[1]

外加电流阴极保护系统施工包括:钢管桩电性连接,阳极(参比电极)安装,负极连接施工,电缆铺设,变压整流器安装调试,系统试运行等工序。

4.4 外加电流后期运行及维护

4.4.1 电费

结合以往工程经验以及钢管桩全部有涂层保护的实际情况,每台变压整流器实际耗电量约为0.4 kW/h,共16台变压整流器,1 a供耗电能

56 064 kW。

4.4.2 专业人员维护管理及检测

维护管理和定期检测由专门防腐公司负责进行。由专业人员提供维护管理,能24 h监控阴极保护系统的保护情况,并每5 a对外加电流保护系统和被保护的钢管桩逐一进行全面检测和评估。

5 阴极保护系统全寿命期成本分析^[10]

阴极保护系统全寿命成本分析是依据资金的时间价值理论,按照设定的折现率,计算阴极保护全寿命期内的工程投资和后期运行及维护费用的现值和,从经济性角度判断阴极保护方案的优劣。

阴极保护全寿命期成本(ΣPV),按设定的折现率(i_c)计算的全寿命期内现金流量的现值之和,应按下列公式计算:

$$\Sigma PV = \sum_{t=1}^n (CO)_t (1 + i_c)^{-t} \quad (1)$$

式中: $(CO)_t$ 为第 t 期现金流出量; i_c 为设定的折现率; n 为全寿命期。

该工程中,折现率取社会折现率8%,全寿命期取50 a。

5.1 牺牲阳极系统全寿命期成本分析

5.1.1 初期工程投资

该工程采用分2期保护,前30 a初期工程投资725.6万元,后20 a初期投资1 059.2万元。

5.1.2 后期运行及维护费用

按该工程的规模,每次检查及维修费用约为10万元,每5 a检查及维修1次。

5.1.3 全寿命期成本

根据全寿命期成本计算公式计算:该工程牺牲阳极全寿命成本为1 632.07万元。

5.2 外加电流系统全寿命成本分析

5.2.1 初期工程投资

该工程初期投资1 640.9万元。

5.2.2 后期运行及维护费用

1) 电费。

该工程1a供耗电能约56 064 kW,按目前工业

用电每度电1.0元计算,每年电费5.61万元。

2) 每年专业人员维护管理及检测费用。

维护管理和定期检测可以由专门防腐公司负责进行,每年费用约为3万元。

3) 全寿命期成本。

根据全寿命期成本计算公式计算:该工程牺牲阳极全寿命成本为1 616.71万元。

6 结语

1) 牺牲阳极和外加电流两种保护方法从理论上均是可行的。

2) 从工程施工难易方面考虑,牺牲阳极法施工工艺简单,但需要水下作业,作业时间长;外加电流法安装数量少,但施工质量控制过程比较复杂,需加强现场各个环节的质量验证和检验管理力度。

3) 从维护管理方面考虑,牺牲阳极和外加电流都需要后期的检测和维护。

4) 从全寿命期成本方面考虑,牺牲阳极与外加电流的全寿命期成本基本相当。

参考文献:

- [1] JTS153-3—2007 海港工程钢结构防腐蚀技术规范[S].
- [2] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [3] GB/T 4948—2002 铝-锌-铜系合金牺牲阳极[S].
- [4] Q/SR 4510—2007 三元铝合金牺牲阳极[S].
- [5] GB 4949—2007 铝-锌-铜系合金牺牲阳极化学分析方法[S].
- [6] GJB 156A—2008 港工设施牺牲阳极保护设计和安装[S].
- [7] DNV RP B401, 2005 Cathodic Protection Design[S].
- [8] SRE TS 208 水下湿法焊条焊接工艺评定报告[S].
- [9] BS EN 13174 港口设施的阴极保护[S].
- [10] 国家发展改革委和建设部. 建设项目经济评价方法与参数[S].

(本文编辑 郭雪珍)