



中华人民共和国国家标准

GB/T 21448—2008

埋地钢质管道阴极保护技术规范

Specification of cathodic protection for underground steel pipeline

(ISO 15589-1:2003, Petroleum and natural gas industries—
Cathodic protection of pipeline transportation systems—
Part 1: On-land pipelines, NEQ)

2008-02-13 发布

2008-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
4 技术规定	3
5 强制电流系统	5
6 牺牲阳极系统	7
7 测试及监控装置的设置	11
8 附加措施	12
9 管理与维护	13
附录 A (规范性附录) 阴极保护计算公式	18
附录 B (资料性附录) 条文说明	23
参考文献	31

前 言

本标准在吸收了 ISO 15589-1:2003《管道输送系统的阴极保护 第1部分:陆上管道》主要内容基础上,结合我国管道阴极保护实践编制而成,本标准与 ISO 15589-1:2003 的一致性程度为非等效,主要差异如下:

- 将 SY/T 0019—1997《埋地钢质管道牺牲阳极阴极保护设计规范》和 SY/T 0036—2000《埋地钢质管道强制电流阴极保护设计规范》两项石油行业标准中的相关内容纳入了本标准;
- 按照汉语习惯对一些编排格式进行了修改;
- 将一些适用于国际标准的表述改为适用于我国标准的表述。

本标准发布之日起,SY/T 0019—1997 和 SY/T 0036—2000 两项石油行业标准同时废止。

本标准的附录 A 为规范性附录,附录 B 为资料性附录。

本标准由中国石油天然气集团公司提出。

本标准由石油工程建设专业标准化委员会归口。

本标准由中国石油天然气管道工程有限公司负责起草。

本标准主要起草人:胡士信、张本草、石薇、熊信勇、龚亮、高红、董旭、陈枫、靳刚、葛艾天、何悟忠、梁峰。

本标准为首次发布。

埋地钢质管道阴极保护技术规范

1 范围

本标准规定了埋地钢质管道(以下简称管道)阴极保护设计、施工、测试与管理的最低技术要求。本标准适用于埋地钢质油、气、水管道的内壁阴极保护,其他埋地钢质管道可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

- GB/T 3620.1 钛及钛合金牌号和化学成分
- GB/T 10123 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义
- GB/T 21246 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法
- GB 50058 爆炸和火灾危险电力装置设计规范
- GB 50217 电力工程电缆设计规范
- SY/T 0086 阴极保护管道的电绝缘标准
- SY/T 0095 埋地镁牺牲阳极试样实验室评价的试验方法
- SY/T 0096 强制电流深阳极地床技术规范

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 10123 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

阳极填料 anode backfill

填塞在阳极四周的低电阻率材料,用于保持湿度、减小阳极与电解质之间的电阻,以及防止阳极极化。

3.1.2

跨接 bond

采用金属导体(多为铜质导体)连接同一构筑物或不同构筑物上的两点,用于保证两点之间电连续性的一种作法。

3.1.3

直流去耦装置 d. c. decoupling device

一种保护装置,当超过预先设定的极限电压时可导通电流。

例如:极化电池、火花间隙、二极管保护器。

3.1.4

汇流点 drain point

阴极电缆与被保护构筑物的连接点,保护电流通过此点流回电源。

3.1.5

地床 groundbed

埋地的牺牲阳极或强制电流辅助阳极系统。

3.1.6

辅助阳极 impressed-current anode

由外部电源提供强制保护电流用于构筑物阴极保护的电极。

3.1.7

(电位)缺陷定位测量技术 intensive measurement technique

同时测量管地电位与垂直方向土壤电位梯度的技术。

注：通过精确测量技术可以辨别防腐层缺陷并测得缺陷处的无 IR 降电位。

3.1.8

IR 降 IR drop

根据欧姆定律,由于电流的流动在参比电极与金属管道之间电解质上产生的电压。

3.1.9

极化电位 polarized potential

无 IR 降电位

不含保护电流或其他电流 IR 降所实测的构筑物对电解质电位。

3.1.10

绝缘接头 isolating joint

安装在两管段之间用于隔绝电连续的电绝缘组件。

例如：整体型绝缘接头、绝缘法兰、绝缘管接头。

3.1.11

测试桩 test post

测试装置

布设在埋地管道上,用于监测与测试管道阴极保护参数的附属设施。

3.1.12

通电电位 on potential

阴极保护系统持续运行时测量的构筑物对电解质电位。

3.1.13

断电电位 off potential

瞬时断电电位

断电瞬间测得的构筑物对电解质电位。

注：通常情况下,应在切断阴极保护电源后和极化电位尚未衰减前立刻测得的电位。

3.1.14

远方大地 remote earth

任何两点之间没有因电流流动引起的可测量的电压的区域。

注：该区域一般存在于接地电极、接地系统、辅助阳极地床或受保护的构筑物的影响区以外。

3.1.15

杂散电流 stray current

在非指定回路中流动的电流。

3.2 缩略语

3.2.1

CCVT 密闭循环蒸气发电机组

3.2.2

CIPS 密间隔电位测量

3.2.3

CSE 铜/饱和硫酸铜参比电极

3.2.4

DCVG 直流电位梯度测量

3.2.5

SCC 应力腐蚀开裂

3.2.6

SCE 饱和 KCl 甘汞电极

3.2.7

SRB 硫酸盐还原菌

3.2.8

TEG 热电发生器

4 技术规定

4.1 一般规定

4.1.1 新建管道应采用防腐层加阴极保护的联合防护措施或其他业已证明有效的腐蚀控制技术；已建带有防腐层的管道应限期补加阴极保护措施。

4.1.2 阴极保护工程应与主体工程同时勘察、设计、施工和投运，当阴极保护系统在管道埋地六个月内不能投入运行时，应采取临时性阴极保护措施；在强腐蚀性土壤环境中，管道在埋入地下时就应施加临时阴极保护措施，直至正常阴极保护投产；对于受到直流杂散电流干扰影响的管道，阴极保护（含排流保护）应在三个月之内投入运行。

4.1.3 管道阴极保护可分别采用牺牲阳极法、强制电流法或两种方法的结合，设计时应视工程规模、土壤环境、管道防腐层质量等因素，经济合理地选用。

4.1.4 对于高温、防腐层剥离、隔热保温层、屏蔽、细菌侵蚀及电解质的异常污染等特殊条件下，阴极保护可能无效或部分无效，在设计时应给予考虑。

4.1.5 本标准应在有资格的腐蚀工程师，或具有实践经验的腐蚀专家指导下使用。

4.2 管道条件

4.2.1 电绝缘

4.2.1.1 一般原则

阴极保护管道应与公共或场区接地系统电绝缘，经测试确认所提供的管道保护电流足以抵消其接地系统造成的电流损失时除外。

当管道处在交流高压输电系统感应影响范围内时，管道上可能产生超过绝缘接头绝缘能力的高压危险电涌冲击，电绝缘装置应当采用接地电池、极化电池或避雷器保护。

阴极保护管道应与非保护构筑物电绝缘。

电绝缘的设计、材料、尺寸和结构应当符合 SY/T 0086 的要求。电绝缘的主要形式有：

- 绝缘接头（或绝缘法兰）；
- 绝缘短管；
- 绝缘管接头；
- 套管内绝缘支撑；
- 管桥上的绝缘支架；
- 其他。

4.2.1.2 电绝缘装置安装位置

可在管道的下列位置处设置绝缘接头，但不局限于此：

- 支线管道连接处；
- 不同防腐层的管段间；
- 不同电解质的管段间(如河流穿越处)；
- 交、直流干扰影响的管段上；
- 实施阴极保护的管道与未保护的设施之间。

4.2.1.3 电绝缘装置的安装

安装前,在干燥的空气中,用1 000 V绝缘摇表对电绝缘装置进行检测,绝缘两侧电阻值应大于10 M Ω 。

当采用绝缘法兰时,应对法兰采取适当防护措施,以保绝缘性能不受外来物的影响。

对于输送导电介质的管道,应在绝缘接头阴极(负电位)侧的内表面涂敷内涂层,涂刷长度应根据输送介质的电阻率计算足以避免干扰电流腐蚀为准。所有密封、涂料、绝缘材料应能适应所输送的介质。

4.2.2 电连续性

对于钢质管道的非焊接管道接头,应在管道接头处安装永久性跨接。

4.2.3 接地

与阴极保护管道相连接的接地装置主要有机电装置上的安全接地、减轻感应影响的排流接地、用于监控和信号传输的工作接地,应采用锌接地极。

在交流干扰影响区域,测试人员可触及到的管道位置应埋设均压接地装置,可使用螺旋形带状锌阳极。

所有接地装置均不得对管道阴极保护造成不利的影

4.3 阴极保护准则

4.3.1 一般情况

4.3.1.1 管道阴极保护电位(即管/地界面极化电位,下同)应为-850 mV(CSE)或更负。

4.3.1.2 阴极保护状态下管道的极限保护电位不能比-1200 mV(CSE)更负。

4.3.1.3 对高强度钢(最小屈服强度大于550 MPa)和耐蚀合金钢,如马氏体不锈钢,双相不锈钢等,极限保护电位则要根据实际析氢电位来判定。其保护电位应比-850 mV(CSE)稍正,但在-650 mV至-750 mV的电位范围内,管道处于高pH值SCC的敏感区,应予以注意。

4.3.1.4 在厌氧菌或SRB及其他有害菌土壤环境中,管道阴极保护电位应为-950 mV(CSE)或更负。

4.3.1.5 在土壤电阻率100 $\Omega \cdot m$ 至1 000 $\Omega \cdot m$ 环境中的管道,阴极保护电位宜负于-750 mV(CSE);在土壤电阻率 ρ 大于1 000 $\Omega \cdot m$ 的环境中的管道,阴极保护电位宜负于-650 mV(CSE)。

4.3.2 特殊考虑

当4.3.1准则难以达到时,可采用阴极极化或去极化电位差大于100 mV的判据。

注:在高温条件下、SRB的土壤中存在杂散电流干扰及异种金属材料耦合的管道中不能采用100 mV极化准则。

4.4 设计资料及现场勘察

4.4.1 设计所需资料

管道阴极保护系统设计时,需要下列技术资料:

- 管道参数,如长度、直径、壁厚、材料的类型与等级、防腐层种类及等级、运行温度曲线、设计压力;
- 输送介质;
- 阴极保护系统设计寿命;
- 管道走向的带状图纸,图中标明已有的阴极保护系统、已有的外部构筑物及管道的电缆等;
- 阴极保护设备的环境条件;
- 地形地貌和土壤性能,包括土壤电阻率、pH值及引起腐蚀的细菌;

- 气候条件、冻土层等；
- 高压输电线路或埋地高压电缆的位置、走向及额定电压；
- 阀室和调压站的位置；
- 穿越河流、铁路、公路的位置和结构；
- 套管的结构和位置；
- 管沟回填材料种类；
- 绝缘接头的类型与位置；
- 邻近交、直流电气化牵引系统的特性参数、变电站位置和其他干扰电流源的特性；
- 接地系统的类型与位置；
- 电源的可利用性；
- 临近可用于远距离监测的遥测系统的类型与位置。

4.4.2 现场勘察

现场勘察所测项目不得少于下列内容：

- 阳极地床区域不同深度的土壤电阻率；
- 可能的细菌活动的腐蚀条件；
- 交、直流干扰源特定参数及与管道的关系；
- 4.4.1中收集到的资料不能满足设计要求的项目。

5 强制电流系统

5.1 电源

5.1.1 基本要求

强制电流阴极保护对交流电源的基本要求：

- 长期不间断供电；
- 应优先使用市电或使用各类站场稳定可靠的交流电源；
- 当电源不可靠时，应装有备用电源或不间断供电专用设备。

5.1.2 无电地区的电源

对于无交流市电的地区，可根据气象资料和所输介质选用：太阳能电池、风力发电机、TEG、CCVT等直流电源。

5.1.3 电源设备

强制电流阴极保护电源设备的基本要求：

- 可靠性高；
- 维护保养简便；
- 寿命长；
- 对环境适应性强；
- 输出电流、电压可调；
- 具有抗过载、防雷、抗干扰、故障保护等功能。

5.1.4 电源设备的选择

强制电流阴极保护电源设备，一般情况下应选用整流器或恒电位仪。当管地电位或回路电阻有经常性较大变化或电网电压变化较大时，应使用恒电位仪。

在选择电源设备时，包括下列内容：

- 与交流电源连接的匹配性；
- 整流器或恒电位仪的类型；
- 相关参数的显示；

- 冷却方式(空冷或油冷);
- 输出控制的方式;
- 设备保护与安全要求;
- 标识和铭牌。

5.1.5 电源设备的安全要求

在防爆区域使用的电源设备应符合 GB 50058 的要求。

5.1.6 功率选择

电源设备输出功率的选择应根据附录 A 进行。

5.2 辅助阳极地床

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 辅助阳极地床(以下简称地床)的设计和选址应满足以下条件:

- 在最大的预期保护电流需要量时,地床的接地电阻上的电压降应小于额定输出电压的 70%;
- 避免对邻近埋地构筑物造成干扰影响。

5.2.1.2 阳极地床有深井型和浅埋型,在选择时应考虑:

- 岩土地质特征和土壤电阻率随深度的变化;
- 地下水位;
- 不同季节土壤条件极端变化;
- 地形地貌特征;
- 屏蔽作用;
- 第三方破坏的可能性。

5.2.2 深井阳极地床

存在下面一种或多种情况时,应考虑采用深井阳极地床:

- 深层土壤电阻率比地表的低;
- 存在邻近管道或其他埋地构筑物的屏蔽;
- 浅埋型地床应用受到空间限制;
- 对其他设施或系统可能产生干扰。

深井阳极地床的设计、安装、运行与维护等技术要求应符合 SY/T 0096 的规定。在计算地床电阻时,应采用位于阳极段长度中点深度的土壤电阻率值,并应考虑不同层次土壤电阻率差异的影响。

5.2.3 浅埋阳极地床

5.2.3.1 与 5.2.2 条件相反时应采用浅埋型地床。

5.2.3.2 浅埋阳极地床有水平式和立式两种方式,应置于冻土层以下,埋深不宜小于 1 m。

5.2.4 辅助阳极

5.2.4.1 常用的辅助阳极有:高硅铸铁阳极、石墨阳极、钢铁阳极、柔性阳极、金属氧化物阳极等,其主要性能要求见 5.2.5。

5.2.4.2 选用阳极材料和质量应按阴极保护系统设计寿命期内最大预期保护电流的 125% 计算。

5.2.4.3 阳极地床通常使用冶金焦炭、石油焦炭、石墨填充料,使用时应符合下列要求:

- 石墨阳极、高硅铸铁阳极应加填充料;
- 在沼泽地、流沙层可不加填充料,钢铁阳极可不加填充料;
- 预包装焦炭粉的柔性阳极可直接埋设,不必采用填充料;
- 填充料的含碳量宜大于 85%,最大粒径应不大于 15 mm。

5.2.4.4 辅助阳极接地电阻、寿命和阳极数量计算见附录 A。

5.2.5 常用辅助阳极主要性能

5.2.5.1 高硅铸铁阳极的化学成分应符合表 1 的规定。阳极的允许电流密度为 $5 \text{ A/m}^2 \sim 80 \text{ A/m}^2$,

消耗率应小于 $0.5 \text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{a})$ 。阳极引出线与阳极的接触电阻应小于 0.01Ω ，拉脱力数值应大于阳极自身质量的 1.5 倍，接头密封可靠。阳极引线长度不应小于 1.5 m，阳极表面应无明显缺陷。

表 1 高硅铸铁阳极的化学成分

序号	类型	主要化学成分的质量分数/%					杂质质量分数/%	
		Si	Mn	C	Cr	Fe	P	S
1	普通	14.25~15.25	0.5~1.5	0.80~1.05		余量	≤ 0.25	≤ 0.1
2	加铬	14.25~15.25	0.5~1.5	0.8~1.4	4~5	余量	≤ 0.25	≤ 0.1

5.2.5.2 石墨阳极的石墨化程度不应小于 81%，灰分应不大于 0.5%，阳极宜经亚麻油或石蜡浸渍处理，阳极的性能应符合表 2 的规定。阳极引出电缆与阳极的接触电阻应小于 0.01Ω ，拉脱力数值应大于阳极自身质量的 1.5 倍，接头密封可靠。阳极电缆长度不应小于 1.5 m，阳极表面应无明显缺陷。

表 2 石墨阳极的主要性能

密度/ (g/cm^3)	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	气孔率/ %	消耗率/ [$\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{a})$]	允许电流密度/ (A/m^2)
1.7~2.2	9.5~11.0	25~30	< 0.6	5~10

5.2.5.3 柔性阳极是由导电聚合物包覆在铜芯上构成，其性能应符合表 3 的规定，阳极铜芯截面积为 16 mm^2 ，阳极外径为 13 mm。

表 3 柔性阳极主要性能

最大输出线电流密度/(mA/m)		最低施工温度/ $^{\circ}\text{C}$	最小弯曲半径/ mm
无填充料	有填充料		
52	82	-18	150

5.2.5.4 钢铁阳极是指角钢、扁钢、槽钢、钢管制作的阳极或其他用作阳极的废弃钢铁构筑物，阳极的消耗率为 $8 \text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{a}) \sim 10 \text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{a})$ 。

5.2.5.5 混合金属氧化物阳极基体材料采用工业纯钛，其化学成分应不低于 GB/T 3620.1 中对 TA2 的要求，在土壤环境中(带有填料)金属氧化物阳极的工作电流密度为 $100 \text{ A}/\text{m}^2$ ，阳极与电缆接头的接触电阻应小于 0.01Ω 。

6 牺牲阳极系统

6.1 总则

牺牲阳极系统适用于敷设在电阻率较低的土壤里、水中、沼泽或湿地环境中的小口径管道或距离较短并带有优质防腐层的大口径管道。

选用牺牲阳极时，考虑的因素如下：

- 无合适的可利用电源；
- 电器设备不便实施维护保养的地方；
- 临时性保护；
- 强制电流系统保护的补充；
- 永久冻土层内管道周围土壤融化带；
- 保温管道的保温层下。

牺牲阳极的应用条件是：

- 土壤电阻率或阳极填料电阻率足够低；
- 所选阳极类型和规格应能连续提供最大电流需要量；
- 阳极材料的总质量能够满足阳极提供所需电流的设计寿命。

牺牲阳极上应标记材料类型(如商标)、阳极质量(不包括阳极填料)、炉号。

6.2 锌合金牺牲阳极

6.2.1 棒状锌阳极

锌合金牺牲阳极成分见表4,锌合金牺牲阳极的电化学性能见表5。

表4 锌合金牺牲阳极化学成分

元 素	锌合金主要化学成分的质量分数/%	高纯锌主要化学成分的质量分数/%
Al	0.1~0.5	≤0.005
Cd	0.025~0.07	≤0.003
Fe	≤0.005	≤0.001 4
Pb	≤0.006	≤0.003
Cu	≤0.005	≤0.002
其他杂质	总含量≤0.1	—
Zn	余量	余量

表5 棒状锌合金牺牲阳极的电化学性能

性 能	锌合金、高纯锌	备 注
密度/(g/cm ³)	7.14	
开路电位/V	-1.03	相对 SCE
理论电容量/(A·h/kg)	820	
电流效率/%	95	在海水中, 3 mA/cm ² 条件下
发生电容量/(A·h/kg)	780	
消耗率/[kg/(A·a)]	11.88	
电流效率/%	≥65	在土壤中, 0.03 mA/cm ² 条件下
发生电容量/(A·h/kg)	530	
消耗率/[kg/(A·a)]	≤17.25	

如果在相似土壤环境中的阳极性能能够被证明可靠且有证据支持时,其他成分的锌合金牺牲阳极也可以使用。

6.2.2 带状锌阳极

带状锌合金牺牲阳极的电化学性能见表6。带状锌合金牺牲阳极的规格及尺寸见表7,截面图例见图1。

表6 带状锌合金牺牲阳极的电化学性能

型号	开路电位/V		理论电容量/ (A·h/kg)	实际电容量/ (A·h/kg)	电流效率/ %
	相对 CSE	相对 SCE			
锌合金	≤-1.05	≤-0.98	820	780	≥95
高纯锌	≤-1.10	≤-1.03	820	≥740	≥90

注:实验介质为人造海水。

表7 带状锌合金牺牲阳极的规格及尺寸

阳极规格	ZR-1	ZR-2	ZR-3	ZR-4
截面尺寸 D ₁ ×D ₂ /mm	25.40×31.75	15.88×22.22	12.70×14.28	8.73×10.32
阳极带线质量/(kg/m)	3.57	1.785	0.893	0.372
钢芯直径 φ/mm	4.70	3.43	3.30	2.92
标准卷长/m	30.5	61	152	305
标准卷内径/mm	900	600	300	300
钢芯的中心度偏差/mm	-2~+2			

注:阳极规格中 Z 代表锌,R 代表带状,后面数字为系列号。

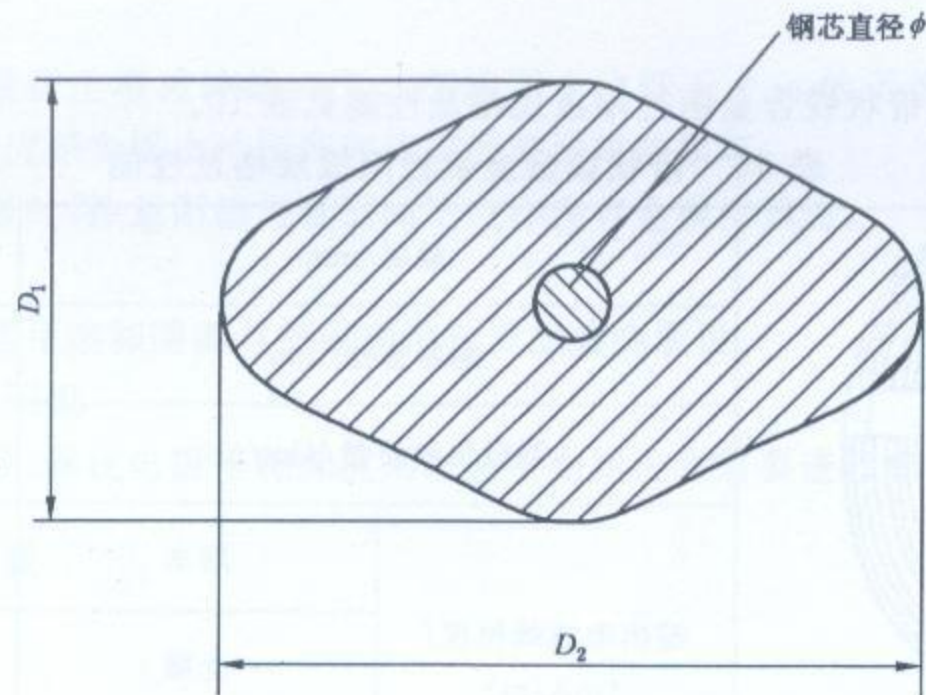


图 1 带状锌阳极的截面示意图

6.3 镁合金牺牲阳极

6.3.1 棒状镁阳极

镁合金牺牲阳极的性能测试应当按照 SY/T 0095 进行,镁合金牺牲阳极化学成分见表 8,镁合金牺牲阳极的电化学性能见表 9。

表 8 镁合金牺牲阳极的化学成分

元 素	标准型主要化学成分的质量分数/%	镁锰型主要化学成分的质量分数/%
Al	5.3~6.7	≤0.010
Zn	2.5~3.5	—
Mn	0.15~0.60	0.50~1.30
Fe	≤0.005	≤0.03
Ni	≤0.003	≤0.001
Cu	≤0.020	≤0.020
Si	≤0.10	—
Mg	余量	余量

表 9 镁合金牺牲阳极的电化学性能

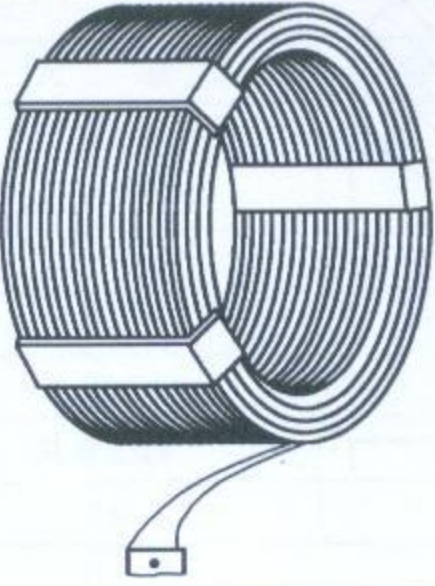
性 能	标准型	镁锰型	备 注
密度/(g/cm ³)	1.77	1.74	
开路电位/V	-1.48	-1.56	相对 SCE
理论电容量/(A·h/kg)	2 210	2 200	
电流效率/%	55	50	在海水中, 3 mA/cm ² 条件下
发生电容量/(A·h/kg)	1 220	1 100	
消耗率/[kg/(A·a)]	7.2	8.0	
电流效率/%	≥50	40	在土壤中, 0.03 mA/cm ² 条件下
发生电容量/(A·h/kg)	1 110	880	
消耗率/[kg/(A·a)]	≤7.92	10.0	

如果在相似土壤环境中的阳极性能能够被证明可靠且有证据支持时,其他成分的镁合金牺牲阳极也可以使用。

6.3.2 带状镁阳极

镁锰合金挤压制造的带状镁合金牺牲阳极规格及性能见表 10。

表 10 带状镁合金牺牲阳极规格及性能

	截面/mm		9.5×19
	钢芯直径/mm		3.2
	阳极带线质量/(kg/m)		0.37
	输出电流线密度/ (mA/m)	海水	2 400
土壤		10	
淡水		3	

注：土壤条件为电阻率 $50 \Omega \cdot \text{m}$ ；淡水条件为 $150 \Omega \cdot \text{m}$ 。

6.4 牺牲阳极的选用

按照表 11 选取牺牲阳极的种类。

表 11 牺牲阳极种类的应用选择

阳极种类	土壤电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$
镁合金牺牲阳极	15~150
锌合金牺牲阳极	<15

对于锌合金牺牲阳极，当土壤电阻率大于 $15 \Omega \cdot \text{m}$ 时，应现场试验确认其有效性。

对于镁合金牺牲阳极，当土壤电阻率大于 $150 \Omega \cdot \text{m}$ 时，应现场试验确认其有效性。

对于高电阻率土壤环境及专门用途，可选择带状牺牲阳极。

6.5 牺牲阳极填包料

牺牲阳极的填包料是由石膏粉、膨润土和工业硫酸钠组成的混合物，常规的牺牲阳极填料配方见表 12。

表 12 牺牲阳极填包料配方

阳极类型	质量分数/%			适用土壤电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)
	石膏粉	膨润土	工业硫酸钠	
镁合金牺牲阳极	50	50	—	≤ 20
	75	20	5	> 20
锌合金牺牲阳极	50	45	5	≤ 20
	75	20	5	> 20

注：所选用石膏粉的分子式为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

6.6 牺牲阳极与管道的连接

牺牲阳极电缆可通过测试装置与管道实现电连接，也可直接焊接在管道上。

6.7 牺牲阳极布置

6.7.1 棒状阳极

棒状牺牲阳极可采取单支或多支成组两种方式，同组阳极宜选用同一炉号或开路电位相近的阳极。

棒状牺牲阳极埋设方式按轴向和径向分为立式和水平式两种。一般情况下牺牲阳极距管道外壁 $3 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$ ，最小不宜小于 0.5 m ，埋设深度以阳极顶部距地面不小于 1 m 为宜。成组布置时，阳极间距

以 2 m~3 m 为宜。

棒状牺牲阳极应埋设在土壤冰冻线以下。在地下水位低于 3 m 的干燥地带,阳极应适当加深埋设;埋设在河床中的阳极应避免洪水冲刷和河床挖泥清淤时的损坏。

在布设棒状牺牲阳极时,注意阳极与管道间不应存在有金属构筑物。

6.7.2 带状阳极

带状牺牲阳极应根据用途和需要与管道同沟敷设或缠绕敷设。

6.7.3 特殊用途的牺牲阳极

牺牲阳极作为接地极、参比电极等特殊应用时应根据用途和需要进行布置。

7 测试及监控装置的设置

7.1 测试装置

7.1.1 一般原则

阴极保护测试装置应与阴极保护系统同步安装。测试装置应沿管道线路走向进行设置,相邻测试装置间隔宜 1 km~3 km。在城镇市区或工业区,相邻的间隔不应大于 1 km,杂散电流干扰影响区域内可适当加密。

7.1.2 特殊要求

在下列位置处,也应安装测试装置:

- 管道与交、直流电气化铁路交叉或平行段;
- 绝缘接头处;
- 接地系统连接处;
- 金属套管处;
- 与其他管道或设施连接处;
- 辅助试片及接地装置连接处;
- 与外部管道交叉处;
- 管道与主要道路或堤坝交叉处;
- 穿越铁路或河流处;
- 与外部金属构筑物相邻处。

对不同沟敷设的多条平行管道,每条管道应单独设置测试装置,测试装置应安装在管道上方。

每个测试装置中至少有两根电缆与管道连接,电缆应采用颜色或其他标记法进行区分,并作到全线统一。

7.2 监控装置

7.2.1 与外部管道交叉

在与其他管道交叉时应设置监控装置,并考虑在装置中进行跨接。即从每条管道上分别引出两根电缆连接到同一监控装置中,在装置内,电缆可直接连接或通过电阻跨接。

7.2.2 金属套管处

为检测金属套管与输送管之间的电绝缘状况,应在套管和输送管两侧分别安装两根测试电缆,并将电缆连接到监控装置中的对应接线端子上。

7.2.3 绝缘接头处

管道绝缘接头两侧应分别引出两根电缆。所有电缆应直接连接或通过电阻跨接至监控装置中不同的接线端子上。在监控装置处,根据需要安装的极化电池、接地电池或避雷器等防电涌装置,通过监控装置中的接线端子进行跨接。

7.2.4 排流点处

杂散电流干扰影响区域,直接排流、极性排流或强制排流的排流点,应在输送管、干扰体或接地体上连接所需数目的电缆,并将电缆引至监控装置,通过监控装置中的接线端子与排流装置进行连接。

7.2.5 汇流点处

直流电源的负极与管道连接的汇流点处应设置监控装置,并在阴极回路中设置电流监控装置。当有多个阴极连接时,应当配备分流器和阻断二极管。

汇流点处的测试装置应当单独从管道上引出测试电缆,用以测量汇流点处的管/地电位。

7.3 其他监测装置

当管道穿过无人地区或很难接近的地方,应当采用远距离监测、遥感技术或其他数据传输系统,同时配合使用长效参比电极、极化测试探头或试片。

7.4 消除 IR 降的测试装置

如果杂散电流干扰影响或牺牲阳极难以拆除时,应采用极化探头(试片)断电测量技术进行电位测量。

8 附加措施

8.1 临时保护

临时性阴极保护可采用牺牲阳极方式,在保护系统调试期间及调试后,应能很容易进行连接和断开。为了测试临时性阴极保护效果,测试装置应当与管道同时安装。

8.2 套管

不宜使用金属套管。如果使用金属套管,套管内的输送管防腐层应保证完好。

钢套管应采用非金属绝缘支撑垫与输送管道实现电绝缘,钢套管不应带有防腐层。

套管两端应绝缘密封并安装排气管。也可在套管与管道之间充填具有长效防腐作用的物料。

8.3 防雷保护

在雷电频发地区,绝缘接头和阴极保护设备,应当安装防雷保护装置。通常绝缘接头两侧和直流电源输出端可安装电涌保护器。

8.4 电涌保护器

为防止供电系统故障或雷击造成的管道上的电涌冲击,应采用火花间隙类的放电器,其要求如下:

- 保护器电极的击穿电压应低于绝缘接头两端的击穿电压;
- 保护器应具有释放出预期的故障电流或雷击电流而不会损坏的能力;
- 保护器应当完全封包起来以防在大气中出现火花。

8.5 阴极保护电缆与电缆连接

8.5.1 电缆的选用

应采用铜芯电缆,测试电缆的截面不宜小于 4 mm^2 。多股连接导线,每股导线的截面不宜小于 2.5 mm^2 。

用于强制电流阴极保护的铜芯电缆截面不宜小于 16 mm^2 ,用于牺牲阳极的铜芯电缆的截面不宜小于 4 mm^2 。

8.5.2 电缆敷设

阴极保护埋地电缆在地下应尽量减少接头,敷设应符合 GB 50217 的规定。

8.5.3 电缆与管道的焊接

焊接位置不应在弯头上或管道焊缝两侧 200 mm 范围里。

可采用铝热焊方法,焊接用的铝热焊剂用量不应超过 15 g ,当焊接电缆的截面大于 16 mm^2 时,可将电缆芯分成若干股,每股小于 16 mm^2 ,分开进行焊接。

在运行中的管道上实施铝热焊时,应预订安全防范措施,并考虑:

- 焊接前要对管壁完整性进行检查;
- 管中流体对热量传输与散失的影响;
- 焊接热量对输送介质的影响(如对某些化学品)。

在耐蚀合金管道上不应实施铝热焊接。

当有详细的焊接程序且性能可靠,并有适当的文件支持,也可使用其他,如铜针焊接、软焊、导电粘接剂粘接、熔焊等方法。

9 管理与维护

9.1 阴极保护运行前的基本要求

9.1.1 管道原始资料

管道管理部门应收集、管理、保存由设计、施工单位提供的和其他来源获得的文件、图纸资料和原始资料,主要包括但不限于以下内容:

- 管道走向带状图;
- 阴极保护系统及单体图;
- 全线防腐层结构、分布、补伤等资料;
- 管道附属设施,如固定墩,穿、跨越,阀室,套管等分布、结构、防腐保护状态;
- 管道自然电位分布曲线图,对于交、直流电干扰管段,干扰长度、起止点,最大、最小干扰电位分布曲线,最大、最小干扰电位-时间分布曲线;
- 沿线土壤电阻率或土壤腐蚀性分布;
- 设计、施工更改、设备合格证、说明书等其他相关资料;
- 管道腐蚀穿孔分布、测试及分析记录等。

9.1.2 测量仪器与设备

管道管理部门应配备必需的设备和仪表、工具。至少包括:管道防腐层检测仪、接地电阻测试仪、万用表、Cu/CuSO₄ 参比电极(便携式)、数字型电位差计。所有测量仪器和设备的要求应符合 GB/T 21246 的要求。

当土壤里含有大量氯化物时,测量电位不宜使用 CSE。

本标准不排除使用其他可替代的参比电极,通常可替代参比电极有以下三种。对于碳钢,相对于 CSE 的保护电位(在 25 ℃)为 -850 mV 时相对替代参比电极的电位是:

- a) 饱和 KCl SCE 为 -780 mV;
- b) 饱和 Ag/AgCl 参比电极,在 25 Ω·cm 的海水中使用,其保护电位为 -800 mV;
- c) 采用 75%石膏、20%膨润土、5%硫酸钠填包料的锌参比电极,其保护电位为 +250 mV。

9.1.3 操作人员

阴极保护岗位的操作人员,上岗前应进行专门的技术培训。

9.2 运行调试

调试涉及到所有阴极保护设备、零件和系统的测试,以达到管道保护符合设计要求。

9.2.1 系统检测

阴极保护系统通电前,应对设备及装置进行检测。

9.2.1.1 电源设备和汇流端子:

- 对地绝缘电阻(在 30 ℃下,500 V 兆欧表最小 10 MΩ);
- 安全接地电阻;
- 螺丝和螺母的松紧;
- 设备及附件是否安装牢固;
- 整流设备(二极管)的技术参数;
- 能否满足额定电流输出;
- 电源设备输出接线是否正确。

9.2.1.2 油冷式电源设备还要检查:

- 油位;
- 油的绝缘性能。

9.2.1.3 绝缘接头、接地设备和金属套管的电绝缘的有效性。

9.2.1.4 阳极地床的接地电阻。

9.2.1.5 测试及监控装置:

- 电缆与接线端子的标记;
- 电缆连接和安全设备的完整性(绝缘与接地、防雷击保护、电气区域分类);
- 电缆接头端的松紧程度;
- 接线是否正确。

9.2.2 系统调试

阴极保护系统调试包括通电前的检测和通电后的测试。

阴极保护系统通电前,应在所有测试装置处进行自然腐蚀电位的测量。

阴极保护系统通电后,要逐步调节保护电流,直到汇流点的电位达到极限电位。电源设备应保持在此电位值,直到管道被充分极化达到 4.3.1 中的准则,应记录电源设备输出电压和电流。

当通电后管道电位发生正向偏移,应立即检查极性并采取措施。

当对周围构筑物有干扰影响时,应在临近构筑物上进行同步测量。

当存在交、直流干扰影响时,应对干扰对阴极保护系统有效性的影响进行测量。测量应在阴极保护系统运行及断电状态下进行。在这两种情况下,应至少记录 24 h 的连续管地电位数据。在通电状态下,还应记录通电电流。可按 4.3 的条文说明中给出的指标评价阴极保护有效性。

9.3 检查与测试

9.3.1 一般原则

应定期进行阴极保护系统的检查与测试,以确认阴极保护系统是否运行正常,运行期间的管/地电位是否符合保护准则。

应对检查与测试所得的数据和所有情况进行分析,进而完成以下工作:

- 评价腐蚀管理是否适当;
- 指出可能存在的异常以及改进措施;
- 说明对管道状况进行更详细评价的必要性。

9.3.2 投产后调试

在阴极保护系统运行一年内,宜进行下列调查:

- 防腐层检漏;
- 电流衰减测量;
- CIPS;
- DCVG;
- 管/地电位缺陷定位测量;
- 全线防腐层绝缘电阻率测试。

进一步的专项调查的类型和周期取决于很多因素,如防腐层老化变质、温度升高的影响、施工活动、干扰影响等。

如果管道安装了阴极保护远程监测系统,并能随时检测出设备故障,可采用比上述推荐检测周期更长的时间间隔进行功能性检查。

远程监测系统提供的结果应定期与手工测试数据进行核对,确保远程监测系统正常有效地工作。

注:将 CIPS 与垂直测量出的电位梯度结合起来就是所谓的管/地电位精确测量技术,用于防腐度层缺陷定位和缺陷处无 IR 降的电位测量。

9.3.3 检测周期

应按照表 13 所列项目进行常规检测,如管地电位、电源设备输出电压和电流等。

表 13 常规功能性检测项目及周期

项 目	检 测 内 容	周 期
牺牲阳极系统	阳极运行和状态、阳极保护电位、输出电流、开路电位	至少每年一次
强制电流系统	电源设备的运行和状况、仪器输出电压、电流(每日记录一次)、阳极地床电阻(视需要进行检测)	根据运行条件(如雷电、杂散电流、附近的施工活动等),每一个月至三个月一次
汇流点	汇流点电位和电流	至少每月一次
与外部管道的连接	电流流动	至少每年一次
跨接装置及接地系统	电连续性	至少每年一次
安全与防护装置	设定值与功能性	至少每年一次
极化电位	瞬间断电电位	每年一次 ^a

^a 对于稳定的系统,可在所有测试装置处,每三年测量一次瞬间断电电位。

如果没有杂散电流、雷电、波动的土壤条件等影响,那么根据专项调查的结果和系统的稳定性可以适当减小测量的周期。

9.3.4 专项调查

可针对某一目的或内容进行专项调查,调查项目如下,但不局限于此:

- 防腐层破损;
- 阴极保护不充分;
- SCC;
- 细菌腐蚀;
- 土壤腐蚀性;
- 其他。

调查应由专门培训的人员使用专用设备和仪器进行。

9.3.5 监测大纲

监测大纲应至少包括以下内容:

- 测试说明;
- 测试位置;
- 所需要的仪器设备;
- 测量技术;
- 测量频次。

9.4 系统维护

9.4.1 电源设备

电源设施或设备,应经常进行检查,维护保养,保证完好,正常运行。

9.4.2 测试装置

测试及监控装置应定期检查维护,保证完整、好用。

9.4.3 阳极地床

阳极地床的接地电阻应定期检测,应对其变化,相应调整电源设备的输出电压,保证保护电流的正常输出。对于因阳极地床接地电阻经常变化等原因,致使需经常调整保护电流输出的情况,电源设备宜改用恒电位仪。

对失效的阳极地床,应及时维修或更换。

9.4.4 地上绝缘装置

地面上安装的绝缘装置,应定期进行检测、清扫,防止灰尘、水分等外来物造成绝缘不良或短路失效。

9.4.5 仪器设备

阴极保护检测使用的仪器、仪表及设备,如参比电极等,应进行常规校验。

9.4.6 保护电位检测

当发现管道阴极保护不充分时,应立即展开调查,查明原因,排除故障。常见故障原因的相应对策如下:

- 修理或更换系统中的装置或部件;
- 修补已查明的防腐层缺陷;
- 调整或更换跨接;
- 消除绝缘不良或短路点;
- 修理失效的绝缘装置;
- 增设阴极保护设施(强制电流或牺牲阳极)。

9.5 技术档案

9.5.1 竣工资料

管道阴极保护系统在竣工验收时,应符合下列要求:

- 竣工验收的工程符合设计要求;
- 规定提供的技术文件齐全、完整;
- 外观检查,工程质量符合规范规定。

竣工的阴极保护系统,在交接验收时,至少应提交下列技术文件:

- 竣工图;
- 变更设计的证明文件;
- 制造厂家提供的说明书、试验记录、产品合格证、安装图纸等技术文件;
- 安装技术记录;
- 调试试验记录;
- 所有阴极保护参数测试记录;
- 隐蔽工程记录。

9.5.2 移交时注意事项

设计文件中配置的仪器、仪表在竣工验收时同时移交给业主,工程竣工后,各施工单位应提供9.5.1中规定的技术资料作为交工依据,汇总建立技术档案交上级主管部门、生产管理部门及施工单位自存。

9.5.3 检查与测试资料

本章所提及的所有检查与测试活动的结果都应有记录,有评价,应妥善保管这些资料。以作为将来验证阴极保护系统有效性的基础。

9.5.4 运行与管理资料

管道阴极保护运行时应编制运行与维护手册,操作人员应按手册的运行与维护程序工作。手册中应包括:

- 系统与系统组成的说明;
- 调试报告;
- 竣工图纸;
- 供货商提供的文件;
- 监测设备一览表;

- 系统的电位准则；
- 监测大纲；
- 监测进度表与对监测设备的要求；
- 所有安装在管道上的监测设备的监测程序；
- 阴极保护系统安全操作指南。

9.5.5 维修保养记录

对于阴极保护系统设备的维修,应记录以下内容和项目:

- 整流器和其他直流电源的修理；
- 阳极、阳极连接以及电缆的修理或更换；
- 防腐层、绝缘装置、测试导线和其他测试设备的维护、修理和更换；
- 汇流点、套管和远程监测设备的维护。

附录 A
(规范性附录)
阴极保护计算公式

A.1 强制电流的计算

A.1.1 管道保护长度的计算见式(A.1)、式(A.2):

$$2L_p = \sqrt{\frac{8 \times \Delta V}{\pi \times D_p \times J_s \times R_s}} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$R_s = \frac{\rho_1}{\pi(1000D_p - \delta)\delta} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- L_p ——单侧保护管道长度,单位为米(m);
- ΔV ——极限保护电位与保护电位之差,单位为伏(V);
- D_p ——管道外径,单位为米(m);
- J_s ——保护电流密度,单位为安每平方米(A/m²);
- R_s ——管道线电阻,单位为欧每米(Ω/m);
- ρ_1 ——钢管电阻率,单位为欧平方毫米每米(Ω·mm²/m);
- δ ——管道壁厚,单位为毫米(mm)。

A.1.2 保护电流的计算见式(A.3):

$$2I_0 = 2\pi \times D_p \times J_s \times L_p \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- I_0 ——单侧管道保护电流,单位为安(A);
- D_p ——管道外径,单位为米(m);
- J_s ——保护电流密度,单位为安每平方米(A/m²);
- L_p ——单侧保护管道长度,单位为米(m)。

A.1.3 辅助阳极接地电阻的计算:

1) 单支立式辅助阳极接地电阻的计算见式(A.4):

$$R_{v1} = \frac{\rho}{2\pi L_a} \ln\left(\frac{2L_a}{D_a} \sqrt{\frac{4t+3L_a}{4t+L_a}}\right) \quad (t \gg D_a)(D_a \ll L_a) \dots\dots\dots (A.4)$$

2) 单支水平式辅助阳极接地电阻的计算见式(A.5):

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi L_a} \ln\left(\frac{L_a^2}{tD_a}\right) \quad (t \ll L_a)(D_a \ll L_a) \dots\dots\dots (A.5)$$

3) 深井式辅助阳极接地电阻的计算见式(A.6):

$$R_{v2} = \frac{\rho}{2\pi L_a} \ln\left(\frac{2L_a}{D_a}\right) \quad (t \gg L_a) \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

- R_{v1} ——单支立式辅助阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- R_{v2} ——深埋式辅助阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- R_h ——单支水平式辅助阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- ρ ——土壤电阻率,单位为欧米(Ω·m);
- L_a ——辅助阳极长度(含填料),单位为米(m);
- D_a ——辅助阳极直径(含填料),单位为米(m);

t ——辅助阳极埋深(填料顶部距地表面),单位为米(m)。

4) 辅助阳极组接地电阻的计算见式(A.7)、式(A.8):

$$R_z = F \frac{R_a}{n} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

$$F \approx 1 + \frac{\rho}{nsR_a} \ln(0.66n) \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

R_z ——辅助阳极组接地电阻,单位为欧(Ω);

F ——辅助阳极电阻修正系数,可查图 A.1;

R_a ——单支辅助阳极接地电阻,单位为欧(Ω);

n ——阳极支数;

ρ ——土壤电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);

s ——辅助阳极间距,单位为米(m)。

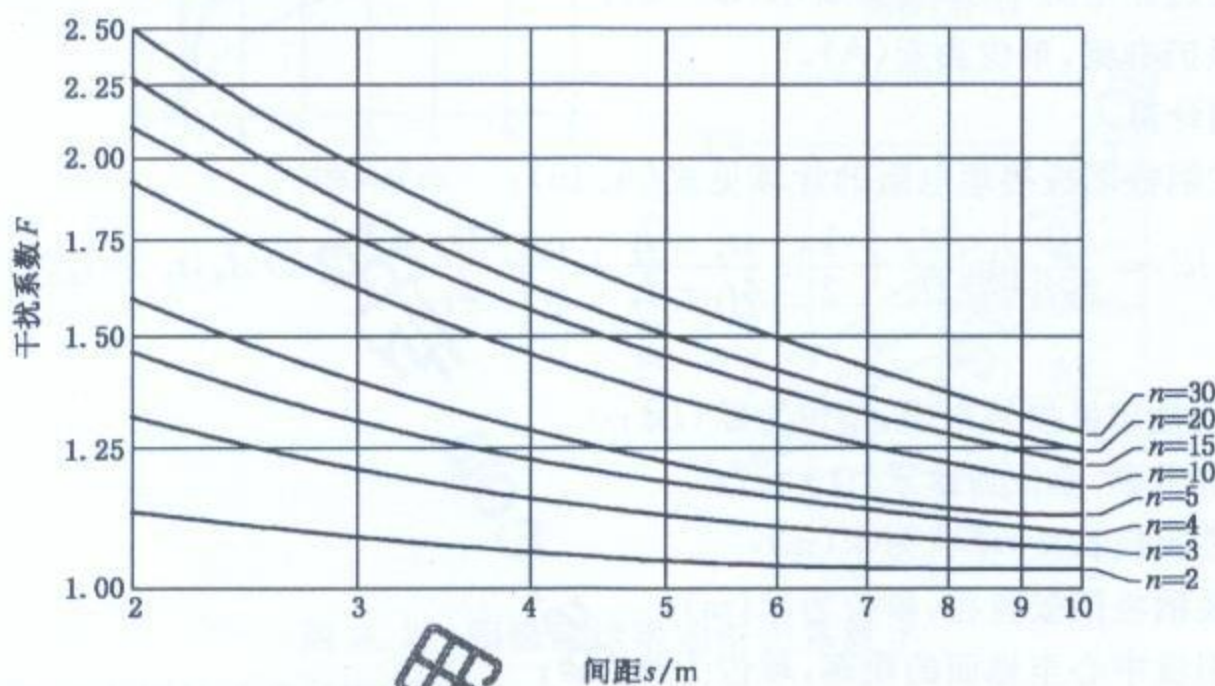


图 A.1 由 n 支阳极组成的阳极地床的干扰系数 F

5) 辅助阳极质量的计算见式(A.9):

$$W_a = \frac{T_a \times \omega_a \times I}{K} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

W_a ——辅助阳极总质量,单位为千克(kg);

T_a ——辅助阳极设计寿命,单位为年(a);

ω_a ——辅助阳极的消耗率,单位为千克每安年[$kg/(A \cdot a)$];

I ——保护电流,单位为安(A);

K ——辅助阳极利用系数,取 0.7~0.85。

注:当已知辅助阳极阳极质量,也可用式(A.9)计算辅助阳极设计寿命。

A.1.4 电源设备功率的计算见式(A.10)~式(A.14):

$$P = \frac{IV}{\eta} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

$$V = I(R_z + R_l + R_c) + V_r \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

$$R_c = \frac{\sqrt{R_l \times r_t}}{2\text{th}(\alpha L)} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_t}{R_l}} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

$$I = 2I_0 \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

- P ——电源功率,单位为瓦(W);
- I ——保护电流,单位为安(A);
- V ——电源设备的输出电压,单位为伏(V);
- η ——电源设备效率,一般取 0.7;
- R_x ——辅助阳极组接地电阻,单位为欧(Ω);
- R_l ——导线电阻,单位为欧(Ω);
- R_c ——阴极过渡电阻,单位为欧(Ω);
- V_r ——辅助阳极地床的反电动势,单位为伏(V),当采用焦炭填充时,取 $V_r = 2V$;
- α ——管道衰减因数,单位为每米(m^{-1});
- L ——被保护管道长度,单位为米(m);
- r_1 ——管道线电阻,单位为欧每米(Ω/m);
- R_1 ——防腐层过渡电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);
- I_0 ——单侧保护电流,单位为安(A)。

A.2 牺牲阳极的计算

A.2.1 单支立式牺牲阳极接地电阻的计算见式(A.15):

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l_g} \left(\ln \frac{2l_g}{D_g} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_g + l_g}{4t_g - l_g} + \frac{\rho_g}{\rho} \ln \frac{D_g}{d_g} \right) \quad (l_g \gg d_g, t_g \gg l_g/4) \quad \dots (A.15)$$

式中:

- R_v ——立式牺牲阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- ρ ——土壤电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);
- l_g ——裸牺牲阳极长度,单位为米(m);
- D_g ——预包装牺牲阳极直径,单位为米(m);
- t_g ——牺牲阳极中心至地面的距离,单位为米(m);
- ρ_g ——填包料电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);
- d_g ——裸牺牲阳极等效直径,单位为米(m), $[d_g = \frac{C}{\pi}, C$ 为周长(m)]。

A.2.2 单支水平式牺牲阳极接地电阻的计算见式(A.16):

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi l_g} \left\{ \ln \frac{2l_g}{D_g} \left[1 + \frac{l_g/4t_g}{\ln^2(l_g/D_g)} \right] + \frac{\rho_g}{\rho} \ln \frac{D_g}{d_g} \right\} \quad (l_g \gg d_g, t_g \gg l_g/4) \quad \dots (A.16)$$

式中:

- R_h ——水平式牺牲阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- ρ ——土壤电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);
- l_g ——裸牺牲阳极长度,单位为米(m);
- D_g ——预包装牺牲阳极直径,单位为米(m);
- t_g ——牺牲阳极中心至地面的距离,单位为米(m);
- ρ_g ——填包料电阻率,单位为欧米($\Omega \cdot m$);
- d_g ——裸牺牲阳极等效直径,单位为米(m), $[d_g = \frac{C}{\pi}, C$ 为周长(m)]。

A.2.3 多支牺牲阳极接地电阻的计算见式(A.17):

$$R_g = f \frac{R_0}{n} \quad \dots (A.17)$$

式中:

- R_g ——多支组合牺牲阳极接地电阻,单位为欧(Ω);

f ——牺牲阳极电阻修正系数,可查图 A. 2;
 R_0 ——单支牺牲阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
 n ——阳极支数。

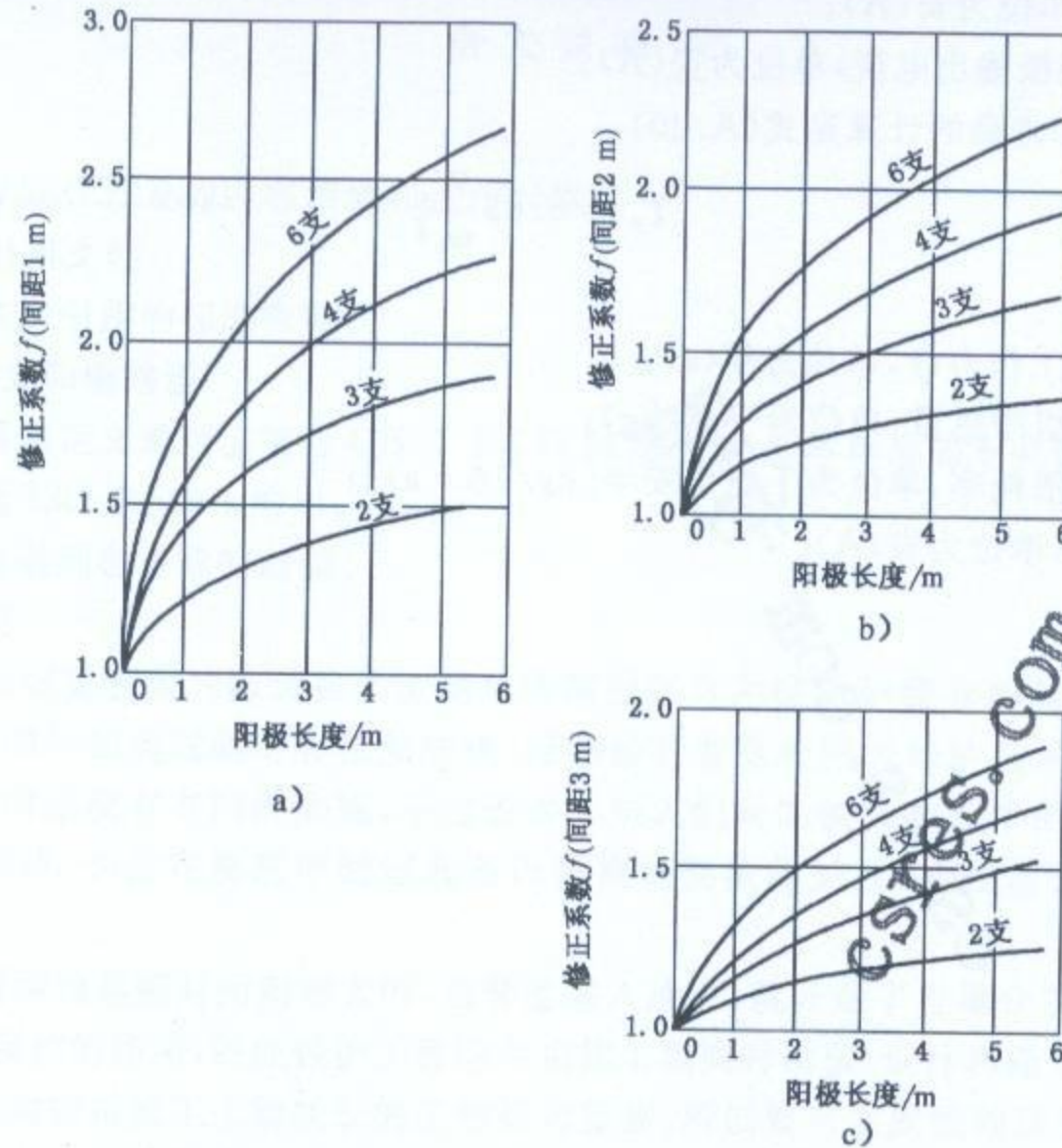


图 A. 2 阳极接地电阻修正系数 f

A. 2. 4 牺牲阳极输出电流的计算见式(A. 18):

$$I_g = \frac{e_c - e_a}{R} = \frac{(E_c - \Delta E_c) - (E_a + \Delta E_a)}{R_g + R_c + R_l} = \frac{\Delta E}{R} \dots\dots\dots (A. 18)$$

式中:

- I_g ——牺牲阳极输出电流,单位为安(A);
- e_c ——阴极极化电位,单位为伏(V);
- e_a ——阳极极化电位,单位为伏(V);
- R ——回路总电阻,单位为欧(Ω);
- E_c ——阴极开路电位,单位为伏(V);
- ΔE_c ——阴极极化电位,单位为伏(V);
- E_a ——阳极开路电压,单位为伏(V);
- ΔE_a ——阳极极化电位,单位为伏(V);
- R_g ——多支组合牺牲阳极接地电阻,单位为欧(Ω);
- R_c ——阴极过渡电阻,单位为欧(Ω);
- R_l ——导线电阻,单位为欧(Ω);
- ΔE ——牺牲阳极有效电位差,单位为伏(V)。

A. 2. 5 所需牺牲阳极支数的计算见式(A. 19):

$$n = \frac{B \times I}{I_{g_0}} \dots\dots\dots (A. 19)$$

式中:

n ——阳极支数;

B ——备用系数,取 2~3;

I ——保护电流,单位为安(A);

I_{g_0} ——单支牺牲阳极输出电流,单位为安(A)。

A.2.6 牺牲阳极工作寿命的计算见式(A.20):

$$T_g = 0.85 \frac{W_g}{\omega_g I} \dots\dots\dots (A.20)$$

式中:

T_g ——牺牲阳极工作寿命,单位为年(a);

W_g ——牺牲阳极组净质量,单位为千克(kg);

ω_g ——牺牲阳极消耗率,单位为千克每安年[kg/(A·a)];

I ——保护电流,单位为安(A)。

附 录 B
(资料性附录)
条文说明

B.1 (1) 范围

本章给出了本标准所涉及的内容领域和适用对象。

B.2 (2) 规范性引用文件

本章引出本标准所引用的标准资料。

B.3 (3) 术语、定义和缩略语

本标准中的术语和定义原则上符合 GB/T 10123 的要求,由于本标准的专业性,对于上述标准中不含的术语和定义参照 ISO 15589-1 给出。

标准中所用缩略语列在本章的后面。

B.4 (4) 技术规定

B.5 (4.1.1) 埋地钢质管道的防蚀技术主要是防腐层结合阴极保护联合措施,国内外的经验表明这是行之有效的,在国外如美国制定有相关法规,强制推行管道的阴极保护技术,并对旧管道限期补加阴极保护,目前国内还没有专门的法规,不过近些年来人们对阴极保护技术的认可已相当高,只是有些部门推动还有困难,为此在规范中制定此条以便推动阴极保护技术,在这方面力争和国外先进技术接轨。

B.6 (4.1.2) 管道腐蚀是随时间而增大的,当管道埋入地下,就开始了土壤介质的腐蚀,影响管道的寿命,为了确保阴极保护的作用,阴极保护工程应与主体工程同时勘察、设计和施工,并应在管道埋地六个月内投入运行。这对管道施工工期较长的工程更为重要,所以要对强腐蚀地区管道还应施加临时阴极保护措施。对于受到直流杂散电流干扰影响的管道,阴极保护(含排流保护)应在3个月之内投入运行。只有这样才能确保管道的设计寿命。

B.7 (4.1.3) 阴极保护可采用牺牲阳极法和强制电流法,方法的选用应做到技术可行、经济合理。本条给出了阴极保护方法选用时的考虑因素。

B.8 (4.1.4) 本条根据 ISO 15589-1 提醒人们注意阴极保护的局限性,在设计时就应考虑这些因素,以防止造成阴极保护无效的后果。

B.9 (4.1.5) 本条是与国际标准接轨的作法,我们很高兴的看到,国内近些年来一直在实行注册工程师制度,其中腐蚀工程师也将提到日程上来了。编写本条文是为了将来更好的执行本标准,坚决杜绝无资质人员从事防腐蚀工程的设计和施工。

B.10 (4.2.1) 电绝缘

管道电绝缘是阴极保护的必要条件,它限定了阴极保护电流的流动,确保电流用于阴极保护,实践证明有的管道没有电绝缘,造成电流无序流动,流入了非保护部件上,使保护范围大大减小,甚至造成干扰。国外有的文献称没有电绝缘就没有阴极保护,可见电绝缘的重要。

B.11 (4.2.2) 电连续性

电连续性是管道阴极保护的另—重要条件,是为了保证阴极保护电流能均匀的流到所要保护的各个部分,对于常规的长输管道是采用焊接连接的,所以电连续性是没有问题的,对于机械连接的管道,因接头电阻过大不利于阴极保护电流的流动,所以应进行电跨接。

B.12 (4.2.3) 接地

当阴极保护的管道或其部件需要安全接地时,这时的接地将会导致阴极保护电流的流失。为此应对接地材料的方法加以限定。本条给出的是常规的方法,在实践中可能还有更合适的方法。这里我们要强调指出,接地材料由钢和铜改为锌,是国内外的公认作法,希望本标准的制订能使更多的技术人

员来推广应用这一高新技术。

对于交流干扰的防护,通常采用带状锌阳极平行于管道,用于接地排流,有时采用螺旋形锌带埋入地下作均压垫,这些都是可行的技术。

B.13 (4.3.1.1) 本条给出的是阴极保护最低保护电位准则,和国内外的所有标准一样采用了一850 mV 极化电位,这里的表述是非常准确的,也就是说这个电位是极化电位,数值中不应含有 IR 降误差。

B.14 (4.3.1.2) 本条给出了一个-1 200 mV 的极限临界电位,也就是我们常说的最大保护电位,这种提法是 NACE 标准中所没有的,对于高强度钢很有必要,在实践中也应严格遵守。在美国 MP 杂志 2003/7 的报道中指出,NACE 成立一个 TG285 任务组,来负责 NCAE RP 0169 的修订,其中一项内容是增加对高强度钢的保护电位的上限的准则。

在电解质(土壤)中金属材料的腐蚀率是由材料的电位 E 确定的。通常,腐蚀率随电位的负向偏移而下降。当腐蚀率小于 0.01 mm/a 变成可以忽略的程度时,将不会造成腐蚀破坏,这就是保护电位 E_p 。阴极保护的准则见式(B.1):

$$E \leq E_p \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

因为在过负的电位下由于析氢会造成某些材料的腐蚀破坏或防腐层的剥离,故保护电位范围应采用极限负电位 E_1 加以限制,在这种情况下,阴极保护准则见式(B.2):

$$E_1 \leq E \leq E_p \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

金属的保护电位取决于腐蚀环境(电解质)和所用金属的种类。

阴极保护电位准则适用于在腐蚀环境中金属/电解质界面没有 IR 降的电位(无 IR 降电位/极化电位)。

B.15 (4.3.1.3) 本条是对特殊材料保护准则的规定,在某些条件下,在一650 mV 至-750 mV 的电位范围,高 pH 值土壤环境里,管道会引起高 pH 值的应力腐蚀开裂(SCC),所以使用比-850 mV 更正的保护电位时,应当考虑这一问题。有关高 pH 值 SCC,在加拿大国家能源局 1996 年 12 月发表的《加拿大油气管道中的应力腐蚀致裂》调查报告中给出的高 pH 值 SCC 的条件是-600 mV 至-750 mV 范围,ISO 15589-1 有所修正。

B.16 (4.3.1.4) 本条是一个常用准则,对于在厌氧土壤里运行的管道,或者怀疑有大量硫酸盐还原菌(SRB)以及其他对管道钢材存在有害影响的细菌时,应当采用相对于铜/饱和硫酸铜参比电极比-950 mV 更负的电位来控制外腐蚀。

B.17 (4.3.1.5) 随着管道建设的发展,所经环境越来越复杂,对于在土壤电阻率非常高的土壤里运行的管道,由于自然电位偏正,所以就没有必要采用-850 mV 准则了,可以考虑采用相对于铜/饱和硫酸铜参比电极比-850 mV 正的电位,这对沙漠地区特别重要。

B.18 (4.3.2) 特殊考虑

本条给出了 100 mV 极化电位准则的限定条件,ISO 15589-1 给出这一准则时是作为一项上述准则的替代,是没有办法时才使用的准则。

本标准对杂散电流干扰下阴极保护的 effect 的好坏没有给出,为了使标准应用范围的延伸,在这里我们引用澳大利亚标准 AS 2832.1:2004 中的相关内容:

受电气化铁路电流和地电流影响的埋地构筑物的保护要求:

a) 牵引电流影响

在要求构筑物根据本准则评价牵引电流的影响时,应记录足够长时间的电位以确保包含最大程度的杂散电流影响。这个时间段包括早晚用电高峰,一般为 20 h。如果用数据记录仪监测电位,采样频率应每分钟至少 4 次。

受牵引电流影响构筑物的阴极保护电位准则根据构筑物极化时间的不同而异:

1) 短时间极化的构筑物

防腐层性能良好的构筑物或已证实对杂散电流的响应为快速极化和去极化的构筑物,应

遵循以下准则:

- 电位正于保护准则的时间不应超过测试时间的 5%;
- 电位正于保护准则 +50 mV(对钢铁构筑物电位为 -800 mV)的时间不应超过测试时间的 2%;
- 电位应正于保护准则 +100 mV(对钢铁构筑物电位为 -750 mV)的时间不应超过测试时间的 1%;
- 电位正于保护准则 +850 mV(对钢铁构筑物电位为 0 mV)的时间不应超过测试时间的 0.2%。

2) 长时间极化的构筑物

对于防腐层性能较差的构筑物或对杂散电流的响应为缓慢极化和去极化的构筑物,其电位正于保护准则的时间不应超过测试时间的 10%。

b) 地电流影响

要求对构筑物进行地电流影响测量时,应记录通常为 20 h 的电位。如果采用数据记录仪监测电位,其采样频率应不低于 1 个/min。

受地电流影响的构筑物的电位正于保护准则的时间不应超过测试时间的 10%。确定电位的变化幅度时,应对记录期间电离层扰动的程度进行评价。

B.19 (4.4.1) 设计所需资料

在本条对于管道阴极保护的设计所需资料加以要求,和其他标准一样这些都是基本要求,没有这些资料就不具备设计条件。

B.20 (4.4.2) 现场勘察

本条给出了现场勘察的要求,通常阴极保护专业设计人员设计前是不上现场的,如果有些参数找不到而影响设计时,专业人员就应到现场,本条所列是现场必测的项目,国内也是这么做的。

B.21 (5.1.1) 基本要求

根据我国的国情,交流电源还是最经济的,因此凡是有交流电网的地区,都应以交流电源为阴极保护的方案。不过,有些交流电源可靠性较差,如当前的农用供电线路经常停电,这种电源作为阴极保护用电显然不合适,应采取适当的备用电源。

B.22 (5.1.2) 无电地区的电源

对于无市电地区,可作阴极保护电源的种类多种多样,其经济性是主要考虑因素,技术上都是可行的,可靠性取决于产品的质量。太阳能电池和风力发电机还要考虑气候条件。随着科学技术的进步,对于各种电源的认识应不断的修正。在实际应用时,要对技术上可靠性和经济上合理性比较选用。

B.23 (5.1.3) 电源设备

直流电源是强制电流阴极保护系统的核心,它的可靠性也就是保护的可靠性,本条是直流电源的基本要求。本条列出了在确定电源设备之前应考虑的一些因素。包括:是否有交流电流可用,阴极保护系统所用设备的类型、功率、标识、输出控制、安全等,以及一般测试需要仪表等。

B.24 (5.1.4) 电源设备的选择

恒电位仪是自动控制的整流器,自 20 世纪 70 年代以来国内发展很快,几乎占领了埋地管道、电缆阴极保护的整个领域。在国外,恒电位仪主要用于排流、船舶、码头,所需保护电流变化幅度大、变化较频繁的地方。

B.25 (5.1.5) 电源设备的安全要求

在与工艺站场或阀室合建的阴极保护站,由于场地的限制,阴极保护电流设备如果安装在防爆区内,应根据 GB 50058 的要求改制电源设备。

B.26 (5.1.6) 功率选择

本条提供了选择阴极保护设备输出功率的计算公式。

B.27 (5.2.1.1) 本条是地床设计和选址的一般要求。

第1款是对地床的远地电阻做出的规定,其远地电阻值应与所选择的阴极保护设备(整流器或恒电位仪)的输出功率相匹配。即根据 $V = I_{\max}(R)$ (需要的最大保护电流) $\times R$ (地床的远地电阻),计算出的 V 值应不超过阴极保护设备的额定电压值的 70%。

第2款主要考虑的是辅助阳极的埋设位置应对周围未实施阴极保护的地下金属构筑物的干扰最小。

B.28 (5.2.1.2) 本条提出了在选择地床的安装位置和类型应考虑的因素。

B.29 (5.2.2) 深井阳极地床

由于深井阳极地床造价高,不易施工、维修,所以本条列出了一些特殊情况,在这些情况下应采用深井型地床。深井阳极地床的设计、安装、测试在 SY/T 0096 中均有规定。

B.30 (5.2.3) 浅埋阳极地床

(5.2.3.1) 本条指出了选用浅埋式地床的一些条件。

(5.2.3.2) 本条是对阳极埋设方式及选用的一般要求。

由于土壤冻结后,阳极接地电阻会有较大增加,所以要求浅埋阳极在冻土层以下,以获得稳定的接地电阻。

B.31 (5.2.4) 辅助阳极

(5.2.4.1) 本条列出了几种常用的辅助阳极,在审查会纪要中要求本标准列出金属氧化物阳极,理由是目前国内已有应用。但到目前为止国内还没有一部土壤环境中金属氧化物阳极的标准,对其成分和性能无法界定和检验,加上在储罐罐底使用中暴露出的氧气去极化问题、击穿电压问题等,我们认为目前使用条件还不成熟。

关于阳极选用,通常应遵守下列原则:

- a) 在一般土壤中可采用高硅铸铁阳极、石墨阳极、钢铁阳极。
- b) 在盐渍土、海滨土和含硫酸根离子较高的环境中,宜采用含铬高硅铸铁阳极。这里给出了优选含铬高硅铸铁阳极的环境。土壤中氯离子或硫酸根离子含量大时,阳极是在 pH 值低并含有强氧化剂和腐蚀性气体的环境中使用。又由于土壤中离子扩散慢,气体排放迟缓,可使阳极破坏加剧。NACE 加拿大 1982 年 2 月西部地区会议报告“强制电流系统用阳极的比较”中指出,土壤中含有 1.9×10^4 mg/L 氯离子或 2×10^4 mg/L 硫酸根离子时,含铬高硅铸铁比高硅铸铁要好。所以,本条所述环境中推荐采用含铬高硅铸铁阳极。
- c) 在高电阻率的地方宜使用钢铁阳极或柔性阳极。
- d) 防腐层质量较差的管道、高电阻率环境里及位于复杂管网或多地下金属构筑物区域内的管道可采用柔性阳极,但不宜在含油污水和盐水中使用柔性阳极。这里给出了柔性阳极的应用条件。柔性阳极通常是沿管道平行敷设,且距被保护管道较近,它可避免对附近地下金属构筑物产生干扰;对防腐层破损严重,甚至无防腐层的管道也可确保阴极保护电流均匀分布。在罐底使用其技术经济比较效果更佳。目前柔性阳极已在新疆的管道、大庆的旧管道和国家储备库的库区管道、上海的 10 万 m^3 和仪征的 15 万 m^3 大型储罐上使用。
- e) 关于金属氧化物阳极用于深井地床里可能还可行,若用在罐底是有问题的,在国标《钢制石油储罐防腐蚀工程技术规范》制定过程中,标准编写组于 2005 年 6 月 13 日至 16 日针对已建镇海和茂名两个罐区的 10 万 m^3 罐底网状阳极和上海白沙湾柔性阳极的保护参数进行了检测,以验证在用金属氧化物网状阳极和柔性阳极的保护效果。结果表明:
 - 1) 采用金属氧化物网状阳极,断电电位(镇海为 647 mV~690 mV,茂名为 350 mV~691 mV)与通电电位(镇海为 1 100 mV~1 130 mV,茂名为 1 270 mV~1 496 mV)相差很大,断电后去极化速度快,可能与其阳极反应产物为氧气,加速了阴极去极化过程有关。单从茂名的断电电位 350 mV~691 mV 看,网状阳极的电流分布可能存在不均匀性。

- 2) 柔性阳极的断电电位(0.90 V~1.0 V)与通电电位(0.90 V~1.09 V)相差极小,断电电位的去极化速度慢,1 h后的断电电位几乎不变,保护参数十分理想。
- 3) 从测试数据看,金属氧化物网状阳极很难达到-0.85 V(CSE)的极化准则,甚至 100 mV 准则有时也难全面达到,在这次测量的四座网状阳极的罐中只有镇海 3# 罐满足了-0.85 V(CSE)的极化准则,但由于参比电极和自然电位不详,又不能下肯定的结论。

根据国外文献介绍,金属氧化物阳极主要用于双层罐底或带有防渗膜的罐底,由于阳极产物氧气去极化的作用,很难达到-0.85 V(CSE)准则,不得不改用-100 mV 极化差准则。国外测试参数和本次差不多。

根据此次检测结果和数据分析,及初步调查和反馈到的信息看,采用金属氧化物网状阳极阴极保护技术存在一些问题。

(5.2.4.2) 本条规定了选用阳极材料、尺寸和质量时,是以阳极额定输出电流值的 125% 来计算。

(5.2.4.3) 本条规定了阳极地床使用环境填充料的一般要求。

阳极填充料首先应是导体,以保证阳极与土壤之间有良好的导电性,其次是成本低、来源广、耐蚀性好。焦炭粒、石油焦炭具备其两项条件,是常用的填充料。

阳极填充料具有增大阳极尺寸,减小接地电阻,将阳极表面的阳极反应转移到填充料上,减少阳极本身的消耗,延长使用寿命的作用;还可以消除气阻,使阳极正常工作。为了减少接地电阻,使阳极表面腐蚀均匀,高硅铸铁阳极、石墨阳极、柔性阳极均应加填充料,有时钢铁阳极也要采用膨润土加石灰类的填充料,只是在一些特殊环境中可不加填充料。

为了保证填充层的密实性、与阳极表面接触良好及填充料的使用效果,对焦炭的最大粒径、焦耐烦的含碳量、填充料厚度均作了相应的要求。

(5.2.4.4) 本条给出了辅助阳极的接地电阻、寿命、阳极数量的计算公式的出处。

B.32 (5.2.5) 常用辅助阳极主要性能

(5.2.5.1) 本条规定了高硅铸铁阳极的化学成分、性能及其规格。

高硅铸铁阳极的化学成分对阳极的性能起关键作用,特别是硅的含量直接影响阳极的耐腐蚀性和机械性能,硅含量增加,耐蚀性提高,但脆性也增加。这次按 BS 1591 修改了硅的含量。

依照美国 ASTM A518/518M,高硅铸铁阳极中锰含量不大于 1.5%,由此确定锰含量 1.5% 为上限;结合 SY/T 0036—2000,确定锰含量 0.5% 为下限。

高硅铸铁阳极的允许电流密度定为(5~80)A/m²。这是因为这种阳极耐蚀性强,电流密度太小,经济效果差,电流密度过大又会使消耗率急剧增加。本标准中提出的数值参考了国内外有关的资料,见表 B.1。

表 B.1 辅助阳极电流密度与消耗率的关系

电流密度/(A/m ²)	消耗率/[kg(A·a)]	资料来源
50~300	0.5	水工钢闸门防腐蚀
5	0.15~0.5	华北油田设计院译文资料,1981年
5~80	0.1~1.0	中川防蚀工业株式会社
50	0.1~0.3	日本防锈技术手册
80	0.18	江汉石油管理局勘察设计研究院
50~300	0.5	上海防蚀中心讲座资料
50~300	0.2~0.5	金属电化学和缓蚀剂技术

阳极与引出导线接头的质量要求是保证该阳极获得充分使用的关键。其数值是根据工程实际提出来的,工程中一组阳极的支数一般都在 10 支左右,又是并联连接,所以 10 个接头并联后的总电阻小于

0.001 Ω ,这对阳极系统电阻来讲影响是很小的。

(5.2.5.2) 本条规定了石墨阳极的技术要求、性能和规格。该材料一般要求经亚麻油或石蜡浸渍。浸渍后的阳极表面电化学活性降低,孔隙中发生反应的可能性减少,从而使阳极的使用寿命延长约 50%。

(5.2.5.3) 本条规定了柔性阳极的主要性能和规格。

(5.2.5.4) 本条给出了几种常用字的钢铁阳极材料和钢铁阳极消耗率。

钢铁阳极简单易行,曾获得广泛应用,但由于消耗率高,使用时间短,近年来已渐少用,只在高电阻率地区或小电流、短时间应用的情况下还有一定的使用价值。

(5.2.5.5) 本条由 725 所为本标准提供的金属氧化物阳极的技术要求中摘取。

B.33 (6.1) 总则

见参考文献。

B.34 (6.2) 锌合金牺牲阳极

(6.2.1) 棒状锌阳极

典型化学成分、电化学性能见参考文献。关于锌阳极的应用限制,在国标 GB/T 4950 中是 15 $\Omega \cdot m$, ISO 15589-1 提出了 30 $\Omega \cdot m$ 的应用限制,根据国内实践对于大于 15 $\Omega \cdot m$ 的条件来说,还要看是否潮湿,潮湿情况下有时锌阳极还可使用。

B.35 (6.2.2) 带状锌阳极

见参考文献。引用文件的公司是一家合资企业,主要生产带状锌阳极出口国外。

B.36 (6.3) 镁合金牺牲阳极

见参考文献。

B.37 (6.4) 牺牲阳极的选用

镁合金牺牲阳极适用土壤电阻率中 150 $\Omega \cdot m$ 的上限见 ISO 15589-1。锌合金牺牲阳极适用土壤电阻率中 15 $\Omega \cdot m$ 的上限见 GB/T 4950 和 SY/T 0019。

B.38 (6.5) 牺牲阳极填包料

参照 SY/T 0019 中的内容。提供了由石膏粉、工业硫酸钠和膨润土组成的填料。

B.39 (6.6) 牺牲阳极与管道的连接

见参考文献。

B.40 (6.7) 牺牲阳极布置

见参考文献。带状阳极和特殊用途的阳极属新增内容。

B.41 (7.1~7.3) 见参考文献。

B.42 (7.4) 阴极保护电位是阴极保护系统最重要的参数,因此在测试系统中应安装参比电极,并考虑 IR 降的影响。

B.43 (8.1) 临时保护

本条规定了施工工期较长(一般长于 6 个月),管道埋地后永久性阴极保护系统不能及时投产的情况下,需要增加一个临时保护系统,以防止在此期间管道因腐蚀减少其使用寿命。

B.44 (8.2) 套管

由于保护性套管对套管保护段的输送管道的阴极保护电流有屏蔽作用,建议不采用套管保护。但是,在特殊情况下,不可避免需要使用保护性套管时,设计时应尽可能地考虑其屏蔽作用,采用屏蔽作用最小的套管。

通常,裸钢套管能够导通阴极保护电流到管道上,假如钢套管有外防腐层,阴极保护电流就无法导通到套管内的那部分管道。用钢接地棒使套管接地能够改善套管内的输送管的阴极保护。对于非金属套管(和有绝缘防腐层的钢套管),应当沿输送管底部安装牺牲阳极,并安装长效参比电极,对套管内的输送管单独实施阴极保护。牺牲阳极引出的电缆应当经由测试装置连接到管道上。参比电极引出电缆应引入到测试装置里单独的接线端子上。对于混凝土套管,如果混凝土套管具有足够的导电性并加强

施在最有效的状态下运行。

B.55 (9.5.1) 竣工资料

阴极保护系统的设计由初步设计、施工图设计及安装程序第一整套程序构成,所有程序步骤都应有相应的文件构成,设计文件不应局限于本条中所列,但至少应包括其内容。

B.56 (9.5.2) 移交时注意事项

作为阴极保护系统试运后形成的系统文件,最终收录成册。

B.57 (9.5.3~9.5.4) 检测和运行维护应该达到有规程、体系及相应的程序,收集并管理工程竣工文件。

B.58 (9.5.5) 维修保养记录

阴保系统长期运行中,登记所维修的记录,以备将来查用。

参 考 文 献

- [1] GB/T 4950 锌-铝-镉合金牺牲阳极.
 - [2] SY/T 0019 埋地钢质管道牺牲阳极阴极保护设计规范.
 - [3] SY/T 0036 埋地钢质管道强制电流阴极保护设计规范.
 - [4] ISO 15589-1, First edition 2003《管道输送系统的阴极保护 第1部分:陆上管道》(Cathodic protection of pipeline transportation systems—Part 1: On land pipelines).
 - [5] ASTM B 418: 2001 铸造和锻造镀锌阳极技术要求 (Standard specification for cast and wrought galvanic zinc anodes).
 - [6] 唐明华. 油气管道阴极保护[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
-