ICS 75.200
E 98

中华人民共和国国家标准

GB/T 35988—2018

石油天然气工业海底管道阴极保护

Cathodic protection of offshore pipeline in petroleum, natural gas industries

(ISO 15589-2:2012, Petroleum, petrochemical and natural gas industries—
Cathodic protection of pipeline transportation systems—
Part 2: Offshore pipelines, NEQ)

2018-02-06 发布　　2018-09-01 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　阴极保护系统要求 …… 3
5　设计参数 …… 4
6　牺牲阳极 …… 9
7　牺牲阳极生产制造 …… 11
8　牺牲阳极质量控制 …… 13
9　牺牲阳极安装 …… 16
10　外加电流阴极保护系统 …… 17
11　文件 …… 18
12　阴极保护系统操作、监测和维修 …… 19
附录 A（规范性附录）　牺牲阳极阴极保护系统设计程序 …… 20
附录 B（规范性附录）　阴极保护衰减 …… 25
附录 C（规范性附录）　牺牲阳极材料的性能测试 …… 28
附录 D（规范性附录）　阴极保护的监测和检查 …… 30
附录 E（规范性附录）　牺牲阳极电化学性能的实验室测试 …… 35
附录 F（资料性附录）　干扰 …… 37
附录 G（资料性附录）　管道的阴极保护设计 …… 39

前　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法参考 ISO 15589-2:2012《石油石化天然气工业海底管道输送系统的阴极保护　第 2 部分:海底管道》编制,与 ISO 15589-2:2012 的一致程度为非等效。

本标准由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本标准起草单位:中海油研究总院。

本标准主要起草人:常炜、余晓毅、田永芹、胡丽华、于淏、贾旭。

学兔兔 www.bzfxw.com

石油天然气工业海底管道阴极保护

1 范围

本标准规定了石油石化天然气工业海底管道的阴极保护系统预调查、设计、材料、设备、制造、安装、调试、运行、检查和维护保养的技术要求及推荐做法。

本标准适用于海水或海床中的碳钢管、不锈钢管、柔性管以及平均水位线以下立管段的设计、改造与修复。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 13912 金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法

GB/T 15169 钢熔化焊焊工技能评定

GB/T 17848 牺牲阳极电化学性能试验方法

GB/T 19866 焊接工艺规程及评定的一般原则

GB/T 21448 埋地钢质管道阴极保护技术规范

GB 50661 钢结构焊接规范

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 21448界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了GB/T 21448中的某些术语和定义。

3.1.1

阳极电位 anode potential

与同一电解质接触的阳极和参比电极间，在外电路测得的电压。

3.1.2

阳极堆 anode sled

直接安装在构筑物上或者通过电缆连接到管道上的牺牲阳极组。

3.1.3

阳极闭路电位 closed-circuit anode potential

阳极与被保护的管道电连接时的电位。

3.1.4

涂层破损率 coating breakdown factor

钢结构涂覆表面与裸钢表面的极化电流密度之比。

学兔兔 www.bzfxw.com

3.1.5

冷隔　cold shut

由于铸流中断导致的炉内金属液体局部凝固，进而导致铸造阳极水平面间断。

3.1.6

驱动电压　driving voltage

阴极保护系统中，管道和牺牲阳极的电位差。

3.1.7

电场梯度　electric field gradient

在导电介质中，由于电流流动引起的单位距离上的电位变化。

3.1.8

电容量　electrochemical capacity

在电化学反应中，消耗单位阳极材料产生的电荷总数。

3.1.9

末期电流密度　final current density

管道运行末期的电流密度估算值。

3.1.10

氢致应力开裂　hydrogen-induced stress cracking

阴极极化产生氢原子，在应力和氢脆联合作用下导致的钢铁表面开裂。

3.1.11

一级标准参比电极　primary calibration reference electrode

用于校准标准参比电极的参比电极。

3.1.12

标准参比电极　master reference electrode

经一级标准参比电极校准后的参比电极。标准参比电极可校验用于现场或实验室测量的参比电极。

3.1.13

平均电流密度　mean current density

管道运行全寿命周期所需的平均电流密度估算值。

3.1.14

保护电位　protection potential

当金属腐蚀速率低至可忽略不计时(<0.01 mm/a)，被保护的管道相对于参比电极的电位。

3.1.15

耐点蚀当量数　pitting resistance equivalent number

用于反映和预测不锈钢耐点蚀能力的数值，与合金中的 Cr、Mo、W 和 N 等化学成分有关。

3.1.16

利用率　utilization factor

当牺牲阳极无法满足最小输出电流要求时，牺牲阳极材料消耗量占总质量的质量分数。

3.2　缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CAT　冷缠带(cold-applied tape)

CE　碳当量(carbon equivalent)

CP　阴极保护(cathodic protection)

学兔兔 www.bzfxw.com

HISC　氢致应力开裂(hydrogen-induced stress cracking)
PREN　耐点蚀当量数(pitting resistance equivalent number)
ROV　水下机器人(remotely operated vehicle)
SCE　饱和甘汞电极(saturated calomel electrode)
SMYS　额定最小屈服强度(specified minimum yield strength)
SRB　硫酸盐还原菌(sulphate reducing bacteria)
3LPE　三层聚乙烯(three-layer polyethylene)
3LPP　三层聚丙烯(three-layer polypropylene)

4　阴极保护系统要求

4.1　通则

4.1.1　在设计阴极保护系统时,为了防止管道在设计年限内发生外腐蚀,应满足以下要求:

a)　根据采用的阴极保护标准,为管道提供足够保护电流,并使该电流有效分布于管道表面;
b)　阴极保护系统设计年限应与受保护管道设计年限相适应,或者系统可定期修复;
c)　为运行期间可预见的电流需求变化预留足够的裕量;
d)　确保阳极所安装的位置受干扰和破坏的可能性最小;
e)　采用适当的监测设备测试和评价系统性能。

4.1.2　阴极保护系统设计应考虑环境条件和毗邻构筑物。采用牺牲阳极系统保护的海底管道宜与采用外加电流系统保护的管道或构筑物保持电绝缘。海底管道应与其他未保护或者欠保护的构筑物保持电绝缘。无法实现电绝缘或者可能存在杂散电流时,宜确保阴极保护系统的电连续性。

4.1.3　应注意相邻管道或构筑物不同阴极保护系统的兼容性,确保没有过多的电流从一个系统流入毗邻系统。

4.1.4　管道阴极保护系统设计应考虑管道施工方法、管道/立管形式、埋设和稳定性方法。

4.1.5　管道全寿命周期内的牺牲阳极阴极保护系统设计,应采用附录 A 中规定的计算方法。

4.1.6　安装长效测试设备宜考虑管道长度、水深、埋设条件和操作维护空间等。

4.1.7　与受阴极保护的陆上管道直接相接的短距离海底管道及其支管的阴极保护设计宜按 GB/T 21448 进行设计。

4.2　阴极保护系统选择

4.2.1　概述

4.2.1.1　阴极保护系统可分为牺牲阳极系统和外加电流系统。牺牲阳极应以单个或成组形式与管道连接。

4.2.1.2　应根据阳极间的驱动电位和电解质电阻率确定牺牲阳极输出电流大小。牺牲阳极可采用手镯形式直接安装到管道上,也可沿管道按一定间隔布置阳极堆。

4.2.1.3　平台间海底管道可在管道两端安装牺牲阳极进行阴极保护。当海底管道与平台电连接时,海底管道牺牲阳极可安装在平台上。

4.2.2　阴极保护系统选择考虑因素

4.2.2.1　阴极保护系统的选择应收集以下基础资料:

a)　所需保护电流量;
b)　海水电阻率;

学兔兔 www.bzfxw.com

c) 外加电流系统电源的有效性和位置；
d) 导致管道对地电位显著波动的杂散电流的存在会限制牺牲阳极的使用；
e) 毗邻构筑物阴极保护系统的干扰电流可能会限制外加电流阴极保护系统的使用；
f) 考虑毗邻构筑物建造和维护所需的空间；
g) 本区域的远景规划和任何可预见的管道系统的扩建；
h) 安装、操作和维护成本；
i) 整个系统的可靠性；
j) 外加电流阴极保护系统对同区域管道或者构筑物的影响。

4.2.2.2 以下情况可优先选择外加电流阴极保护系统：
a) 短距离海底管道，且与之相连的平台已安装外加电流系统或外加电流系统可在陆地上操作；
b) 当海底管道牺牲阳极失效、过度消耗、涂层破损严重或需要延寿等情况时，可采用外加电流作为阴极保护系统修复方案；
c) 海水电阻率较高时。

4.3 绝缘接头

4.3.1 以下位置宜考虑设置绝缘接头：
a) 与登陆管道或与陆地设施的连接处；
b) 与满足不同阴极保护准则管道的连接处；
c) 受阴极保护管道与未保护/欠保护设施连接处；
d) 外加电流型和牺牲阳极型阴极保护管道系统/构筑物之间。

4.3.2 采用绝缘接头时，应确保其设计和安装的长期完整性，绝缘接头位置应便于检测和维护。

5 设计参数

5.1 概述

5.1.1 管道阴极保护系统设计应收集以下基础资料：
a) 管道具体参数，包括材质、长度、壁厚、外径、铺管方式、路由、海底铺设条件、沿管道长度方向的温度分布(包括操作温度和关断温度)、管道/接头的防腐涂层类型和厚度、保温层类型和厚度、机械保护层或者配重层；
b) 环境条件；
c) 埋设状态、海泥电阻率；
d) 系统设计年限；
e) 与新建管道毗邻或跨接的现有管道信息；
f) 现有平台/海底构筑物等的阴极保护系统信息、电气管道绝缘信息；
g) 电源、电绝缘装置、电跨接装置的系统有效性；
h) 法律法规适用性；
i) 建造时间；高温管道，应考虑投产时间；
j) 是否存在接头、J 型管、立管、夹具、Y 型/T 型三通等其他附属件；
k) 同等环境条件下的阴极保护系统运行数据。

5.1.2 若无类似条件下的阴极保护系统运行数据时，应获取影响阴极极化和钙镁沉积的海水特性参数，包括溶解氧、盐度、pH 值、海流、污染情况等。对于无先例的情况，应通过现场考察或者腐蚀测试实验来获取以下参数：
a) 保护电流要求；

学兔兔 www.bzfxw.com

b) 电解质的电阻率，如有必要，可包括其季节性变化；

c) 挖沟管道的埋设深度、裸露管段长度和位置；

d) 海床处的海水温度；

e) 海床处的氧浓度；

f) 海床处的海水流速，如有必要，可包括其季节性变化；

g) 海底地形地貌；

5.1.3 当检测现有系统运行情况时，宜附加考虑以下因素：

a) 电连续性；

b) 电绝缘性；

c) 外涂层完整性；

d) 系统实际运行与设计规格书的差异；

e) 运行维护数据。

5.1.4 牺牲阳极阴极保护系统的设计程序应按附录 A 执行。

5.2 保护电位

5.2.1 电位判据

5.2.1.1 管道实测电位应满足表 1 的要求，以确保管道阴极保护有效性。

5.2.1.2 可采用直接测量管道电位的方法确认阴极保护系统和其他外防腐措施的有效性。采用潜水员或内检测装置(如智能清管球)进行管道壁厚损失物理测量也可显示腐蚀防护程度的不足。

表 1 保护电位判据

材料		最正阴极保护电位/V	最负阴极保护电位[a]/V
碳钢	浸没在海水中	−0.80	−1.10[b]
	埋设在海泥中	−0.90[c]	−1.10[b]
奥氏体不锈钢[d]	PREN≥40[e]	−0.30[f]	−1.10
	PREN<40[e]	−0.50[f]	−1.10
双相不锈钢		−0.50[f]	最负阴极保护电位[g]
马氏体不锈钢[13%Cr]		−0.50[f]	最负阴极保护电位[g]

注：表中电位是相对饱和甘汞电极电极(SCE)的电位，当海水电阻率为 30 Ω·cm 时，SCE 电极电位等效于 Ag/AgCl/〔海水〕电极电位。

[a] 限制阴极电位的同时应确保阴极保护系统不会对管道涂层产生不良影响。

[b] 对于高强钢管道系统(SMYS>550 MPa)，应确定不产生氢脆的最负阴极保护电位。

[c] 海泥中存在活性 SRB 或用于高温管道(温度>60 ℃)工况。

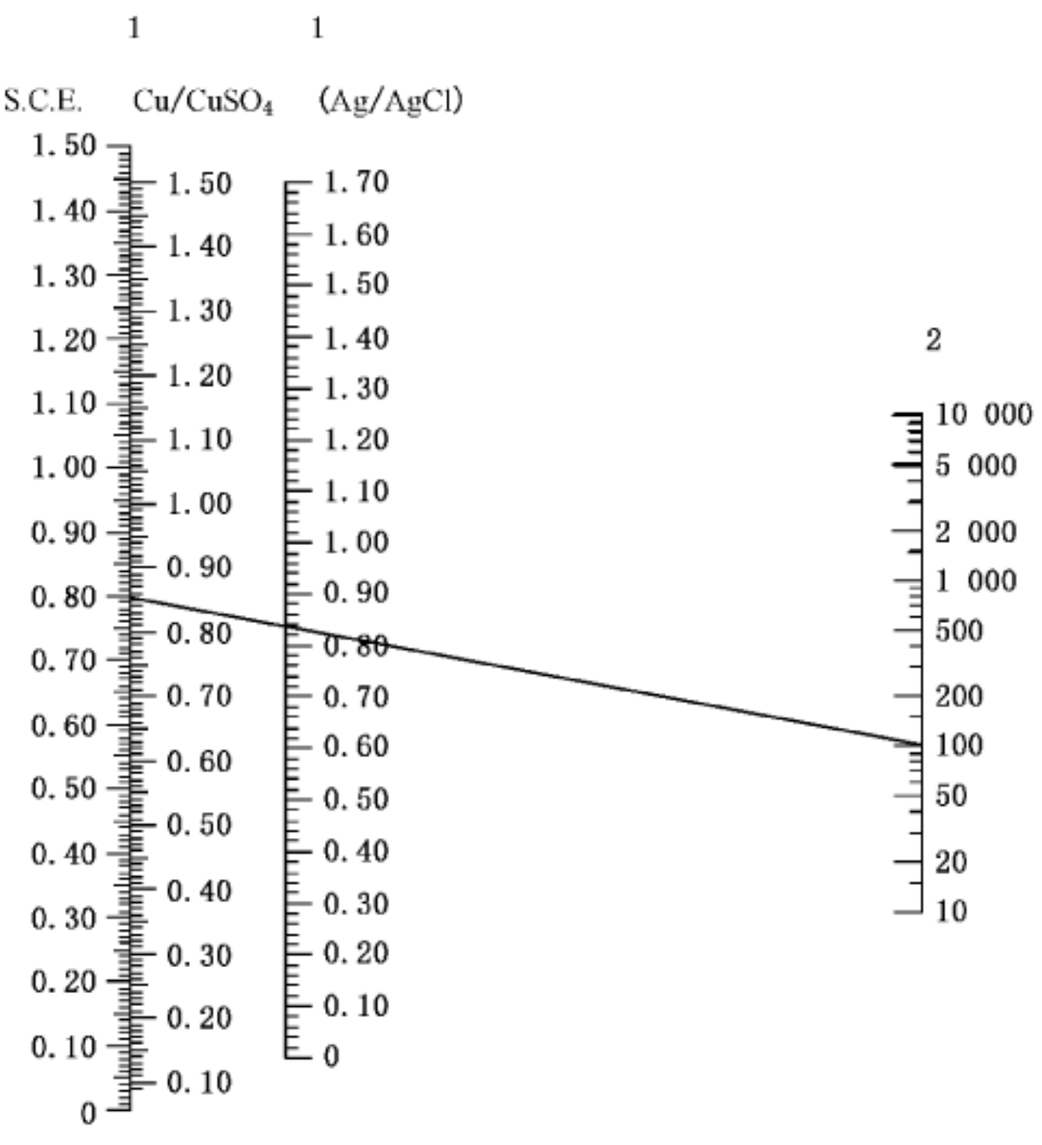
[d] 如果不锈钢材料的金相结构不完全为奥氏体，则该不锈钢易发生氢致开裂(HISC)，宜避免阴极电位过负。

[e] 耐点蚀当量 PREN=%Cr+3.3%[Mo+0.5W]+16%N。

[f] 对于不锈钢，最正阴极电位同时适用于含氧和无氧条件。

[g] 根据强度、特殊金相条件和服役环境中承受的压力等级不同，该类合金易发生氢脆和开裂。如果存在氢脆风险，则宜避免阴极电位低于−0.8 V。同时见 5.2.3。

5.2.1.3 Ag/AgCl〔海水〕参比电极的电位取决于电解质中的氯离子浓度，进而取决于海水电阻率。如果已知氯化物浓度或电阻率明显不同于一般海水（氯化物浓度 3.5%，电阻率 30 Ω·cm），Ag/AgCl〔海水〕参比电极保护电位值应根据图 1 校正。



说明：

1——电位，单位为伏特（V）；

2——电阻率，单位为欧姆·厘米（Ω·cm）。

图 1 不同电阻率水中 Ag/AgCl〔海水〕电极相对于饱和甘汞电极和 $Cu/CuSO_4$ 电极的电位值对比图

5.2.2 马氏体不锈钢/双相不锈钢材料氢致应力开裂评价

马氏体不锈钢/双相不锈钢材料应进行专门的评估以确保 HISC 风险最低，应考虑对应力和应变有贡献的所有载荷，并评估可接受的应力和应变。高强碳钢（SMYS＞550 MPa）、马氏体不锈钢和双相不锈钢均不宜直接采用填角焊、双面焊或者铝热焊。牺牲阳极电缆宜安装在特殊的碳钢内衬管接头或者其他对 HISC 不敏感的耐蚀合金管接头上。

5.2.3 热喷铝

当热喷铝工件的阴极保护电位低于－1.15 V（相对于 $Cu/CuSO_4$ 参比电极）时，由于金属/电极界面碱性的增加，将导致热喷铝涂层腐蚀，除非有前期试验结果或运行经验证明此条件下不发生明显腐蚀，否则极化电位不宜低于－1.15 V（相对于 $Cu/CuSO_4$ 参比电极）。

5.3 设计年限

管道阴极保护系统的设计年限应涵盖从初始安装至管道运行结束的整个周期。同时，在设计阶段宜考虑管道延寿或者其他管道接入的可能性。宜对未来可能发生的事件做好预案，包括涂层破损标准的修订、接入阳极修复设备等。

5.4 裸钢的设计保护电流密度

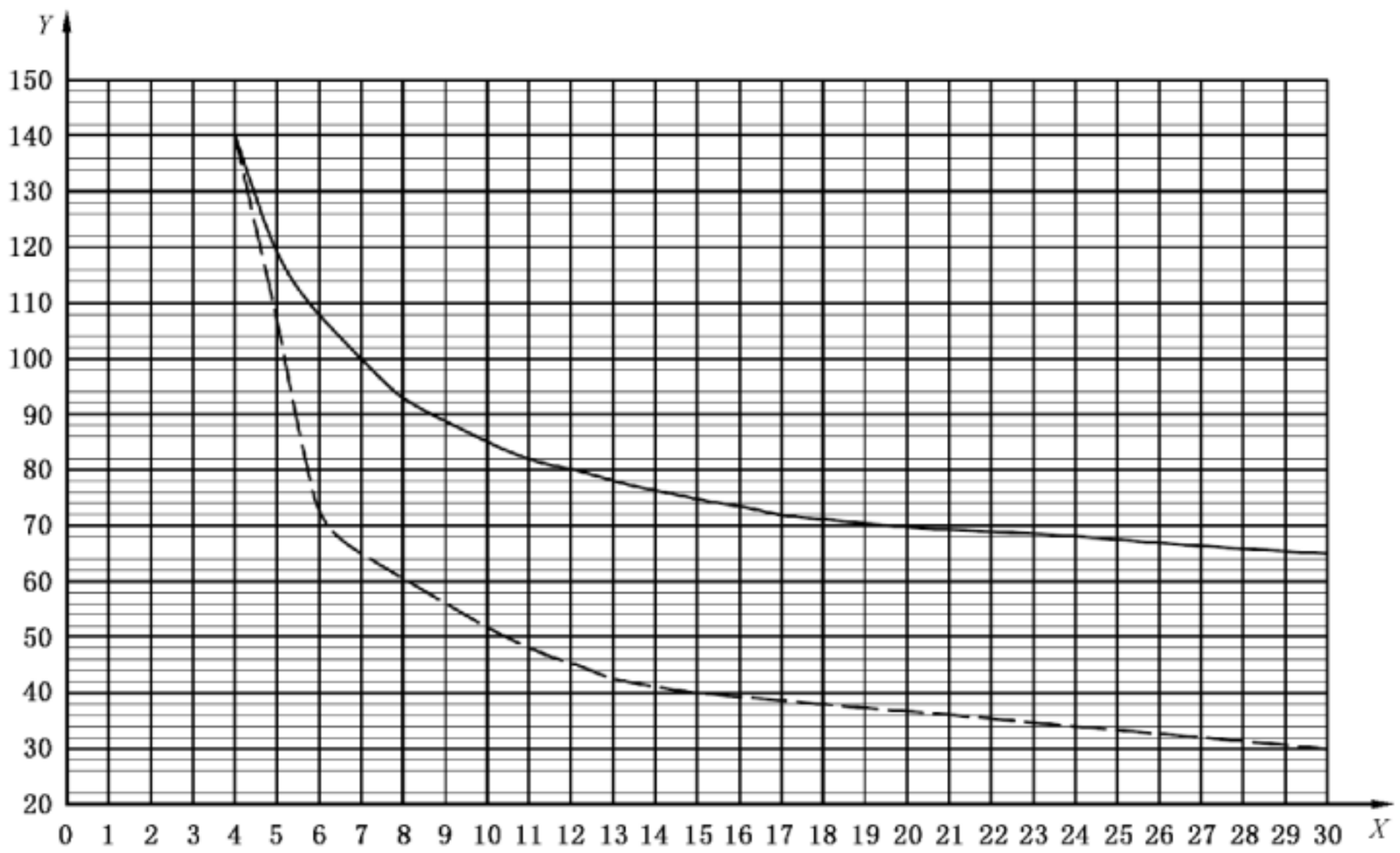
5.4.1 一般规定

5.4.1.1 设计电流密度应取决于海水温度、氧浓度、海水流速、裸钢表面保护性钙质层的沉积效率。

5.4.1.2 理论上可考虑初期电流密度、平均电流密度和末期电流密度三个电流密度值，电流密度应为在合理时间段内管道极化所需的电流密度。对于埋设管道，平均电流密度和末期电流密度可采用相同数值。

5.4.1.3 对于受风暴干扰影响的特定区域，应考虑更高末期电流密度。

5.4.1.4 对于水深小于 500 m 的大部分情况，设计电流密度应取决于海水温度。未埋设管道的电流密度宜根据图 2 确定。



说明：

X ——海水温度，单位为摄氏度(℃)；

Y ——电流密度，单位为毫安每平方米(mA/m^2)。

虚线可用于以下情形：从海面到海底氧浓度无显著变化，可形成保护性钙质层沉积，以及中低海底流速(流速≤1 m/s)。如果没有其他已知数据，宜选用上方实线。

图 2 管道平均电流密度曲线(未埋设，裸钢)

5.4.1.5 温度低于 6 ℃时平均设计电流密度应为 120 mA/m^2。

5.4.1.6 若无沿管道路由的海水温度数据，所需电流密度应基于测量到的最低海底温度，该温度通常为沿管道路由水深最深点的温度。

5.4.1.7 若已知沿管道路由的海水温度数据，宜查阅图 2，根据平均海水温度获得各管段的电流密度数据。若沿管道路由方向的年平均海水温度变化超过 5 ℃，宜分段计算，每段管段年平均海水温度变化不宜超过 5 ℃。上文涉及的设计电流密度适用于碳钢和不锈钢(奥氏体、马氏体和双相不锈钢)的阴极保护系统。

5.4.1.8 电流密度数据可基于现场测量或者相同地理位置点的现有设施数据。

5.4.2 飞溅区

相同温度下，对于飞溅区部位的立管，其电流密度应比飞溅区下方的立管或者管道高 10 mA/m^2。

5.4.3 埋设管道

对于完全埋设的管道(挖沟埋设和自然掩埋)或者有人工岩石堆覆的管道,当不考虑海水温度、氧浓度和水深时,平均和末期设计电流密度宜取 20 mA/m^2。

5.4.4 温度

金属管道外壁温度或者环境温度超过 25 ℃时,在 25 ℃～100 ℃范围内,每增加 1 ℃,设计电流密度应增加 1 mA/m^2。

海水温度升高导致氧溶解度降低,温度的升高也将导致腐蚀速率增加。

5.4.5 电流消耗

海底设施连接到阴极保护管道时,应考虑流失到海底构筑物井口、管汇和套管的电流量。总设计电流密度宜为泥下井套管留有裕量,每口井的设计电流宜为 5 A。

5.5 涂层破损率

5.5.1 涂覆管道所需电流量随着涂层破损而增加,设计时宜为涂层破损考虑足够的阴极保护容量。涂层破损率用于计算涂覆管道平均条件和设计年限末期时的裸露金属表面区域,详见附录 A。

平均和末期涂层破损率计算公式如下:

平均涂层破损率$\overline{f_c}$,见式(1):

$$\overline{f_c} = f_i + (0.5\Delta f \times t_{dl}) \quad \cdots\cdots(1)$$

末期涂层破损率 f_f 见式(2):

$$f_f = f_i + (\Delta f \times t_{dl}) \quad \cdots\cdots(2)$$

式中:

f_i ——管道运行开始时的初期涂层破损率;

Δf ——涂层破损率平均年增长率;

t_{dl} ——设计年限,年。

5.5.2 涂层破损率宜按表 2 和表 3 确定,表中未涉及的情况宜通过充分论证确定。

若考虑涂层极端破坏或者现场节点有意未涂装的情况,应评估受影响表面区域,并将作为裸露金属表面列入设计考虑($f_c=1$)或者增加表 2 和表 3 中涂层破损率数值。对于混凝土覆盖层外部的热绝缘层,热绝缘层的取值宜参照表 2。

表 2 涂层破损率 f_c(无水泥配重层的管道)

工厂涂敷涂层	现场节点涂层	f_i	Δf
熔结环氧	热缩套	0.080	0.003 5
	熔结环氧	0.060	0.003 0
环氧＋粘接剂＋聚乙烯三层涂层体系(3LPE)	热缩套	0.009	0.000 6
	熔结环氧	0.008	0.005
	环氧＋聚乙烯多层涂层	0.007	0.000 5
环氧＋粘接剂＋聚丙烯三层涂层体系(3LPP)	热缩套	0.007	0.000 3
	熔结环氧	0.006	0.000 2
	环氧＋聚丙烯多层涂层	0.005	0.000 2

表 2（续）

工厂涂敷涂层	现场节点涂层	f_i	Δf
环氧＋粘接剂＋聚乙烯/聚丙烯/聚氨酯保温多层涂层体系	环氧＋粘接剂＋聚乙烯/聚丙烯/聚氨酯/热缩套多层可厚涂涂层体系	0.002	0.000 1
可厚涂涂层：弹性材料（氯丁橡胶或三元乙丙橡胶）或纤维增强树脂	弹性材料或纤维增强树脂	0.002	0.000 1
柔性管	不适用	0.002	0.000 1

表 3　涂层破损率 f_c（有水泥配重层的管道）

工厂涂敷涂层	是否有现场节点填充	现场节点涂层	f_i	Δf
沥青或煤焦油瓷漆	否	冷缠带或热缩套，表面用钢丝刷处理至 St3 级[a]	0.045	0.002 5
		冷缠带或热缩套，表面用喷砂处理至 Sa3 级	0.040	0.002 0
	是	冷缠带	0.030	0.001 5
		热缩套	0.020	0.000 8
熔结环氧	否	热缩套	0.045	0.002 5
		熔结环氧	0.035	0.002 0
	是	热缩套	0.040	0.002 0
		熔结环氧	0.030	0.001 5
环氧＋粘接剂＋聚乙烯三层涂层体系	否	热缩套/熔结环氧	0.008	0.005
		环氧＋聚乙烯多层涂层	0.007	0.000 3
	是	热缩套/熔结环氧	0.004	0.000 2
		环氧＋聚乙烯多层涂层	0.004	0.000 2
环氧＋粘接剂＋聚丙烯三层涂层体系	否	热缩套/熔结环氧	0.008	0.000 5
		环氧＋聚乙烯多层涂层	0.007	0.000 3
	是	热缩套/熔结环氧	0.004	0.000 2
		环氧＋聚乙烯多层涂层	0.004	0.000 2

[a] 冷缠带涂覆前需预涂底漆。

6　牺牲阳极

6.1　系统设计

6.1.1　牺牲阳极应沿着管道方向安装以维持管道设计年限内所需的保护电位，其形状和尺寸应适合安装。

6.1.2 海底管道牺牲阳极阴极保护系统由沿管道间隔分布的镯式阳极组成。牺牲阳极应同时提供足够的平均电流和末期电流。

6.1.3 采用阳极堆形式，宜考虑阳极堆与海管连接及其沿海管分布的替代方案。计算阳极数量时应确定间隔，阳极布置间距应确保在单个阳极发生机械损耗或电损耗情况下，仍可提供足够的保护电流。若阳极布置间距超过 300 m，应按附录 B 或者其他数学模型进行衰减计算。

6.1.4 对于距离较短的管道，经过数学计算或者模型论证阴极保护可行的前提下，阳极可安装在管道两端。在管道两端安装阳极的安装方式可用于平台间管道。如果海管与平台不绝缘，导管架上的阳极可同时保护海底管道。如果采用两端安装阳极的方式，应按附录 B 进行衰减计算。

6.1.5 对于海底管道靠近构筑物、平台或海岸部分，宜增设阳极。在阳极计算设计中，距离构筑物 1 000 m 以内的海底管道的设计电流密度宜为其他部分的两倍。

6.1.6 以下情况，可增加阳极数量：

a) 落物和抛锚导致管道涂层破损风险增加；

b) 可能存在电流消耗量变大；

c) 管道电位负于平台电位，海底管道牺牲阳极为毗邻平台提供保护电流的情况。

6.1.7 阳极及其附属构件的设计应避免尖锐的边角。

6.2 阳极材料的选择

6.2.1 阳极材料性能应在类似的现场或模拟试验条件下满足要求。

6.2.2 铝阳极不宜用于盐度＜0.5％的环境。

6.2.3 锌阳极不宜用于超过 50 ℃的环境。

6.2.4 特殊海洋环境下的阳极材料宜根据附录 C 开展长期试验确定。

6.2.5 海底管道牺牲阳极可选用铝合金阳极或锌合金阳极。

6.3 电化学性能

设计阶段牺牲阳极设计的电化学参数宜采用表 4 中的数据。需要采用其他参数，应根据附录 C 的要求在相应的温度下进行试验确定阳极电化学性能与操作温度的相关性。参比电极要求参见附录 D。阴极保护设计中不同阳极电流密度取值参见附录 A。对于不埋设的管道，阳极表面温度宜取管壁外部的温度，而不是内部物流温度。对于埋设的单层管，阳极表面温度应取内部流体温度。

表 4 牺牲阳极设计的电化学参数

阳极	阳极表面温度[a]/℃	浸没在海水中		埋设在海泥中[d]	
		相对于 Ag/AgCl〔海水〕参比电极的电位/mV	电容量 ε/(A·h/kg)	相对于 Ag/AgCl〔海水〕参比电极的电位/mV	电容量 ε/(A·h/kg)
铝	＜30	−1 050	2 000	−1 000	1 500
	60	−1 050	1 500	−1 000	800
	80[b]	−1 050	900	−1 000	400
锌	＜30	−1 030	780	−980	750
	30～50[c]				580

[a] 阳极表面温度介于临界温度之间时，应采用内插值法计算电容量。

[b] 除非经试验论证，否则铝阳极表面温度不宜超过 80 ℃。

[c] 除非经试验论证，否则锌阳极表面温度不宜超过 50 ℃。

[d] 抛石的管道应视为埋设在沉积物中。

6.4 阳极形状和利用率

6.4.1 应按本标准规定确定阳极形状，以确定阳极利用率 μ。除非特殊规定，镯式阳极利用率取值宜为0.8，长条状阳极阳极利用率取值宜不小于0.9。

6.4.2 阳极芯位于阳极内部，阳极芯分布宜保证阳极利用率。

6.4.3 考虑阳极表面积减少和阳极芯暴露风险，厚度小于50 mm的镯式阳极，阳极利用率取值宜小于0.8。

6.5 机械性能和电连接

6.5.1 宜根据管道直径和涂层涂覆厚度确定镯式阳极内径，应考虑外径尺寸公差和涂层厚度。

6.5.2 应重点关注阳极通过托管架离开铺管船时的损坏风险。

6.5.3 对于无配重管道，阳极两侧宜设计有锥形过渡面，以减少阳极卡在托管架滚轮中的风险。

6.5.4 对于有配重管道，阳极外径应与配重层厚度匹配，确保铺管时顺利通过托管架。

6.5.5 对于中小尺寸管道，宜采用锥肩或方肩的半圆柱状镯式阳极。对于大尺寸管道，宜采用分段式阳极。在特定情况下，可在管道上直接焊接阳极。

6.5.6 阳极设计年限内，应保持阳极芯与阳极的电连接完整性。

6.5.7 管道和阳极的电连接宜采用跨接线或者将阳极芯直接焊接到管道上。跨接线的焊接可采用铝热焊、铜焊等多种方式。焊接方式应与管道铺设和管材冶金性能相适应。

6.5.8 半瓦型镯式阳极，阳极芯伸出部分宜沿着半瓦型阳极轴向，且位于半瓦横断面的中间位置。阳极芯伸出部分宜为扁平钢片，钢片应完全焊至阳极芯上且与管道尺寸、材料相适宜。

7 牺牲阳极生产制造

7.1 制造前测试

7.1.1 阳极详细设计图应包括阳极形状、尺寸及公差。大规模制造阳极之前，应进行工厂制造前测试以确保阳极模具、阳极芯、铸造设备和其他组件符合现行标准、图纸、尺寸、公差、检查工序和数据表的要求。

7.1.2 阳极生产过程中宜至少进行一次的阳极铸件破坏性测试，也可采用其他过程质量评定方法测试阳极质量。

7.2 涂装

7.2.1 镯式阳极靠近管道/水泥配重层侧宜喷涂涂层，涂层类型宜为浸水级双组分环氧涂层，厚度应大于100 μm。其他种类的阳极也宜在阳极表面喷涂涂层。

7.2.2 阳极向外暴露的位置不应喷涂涂层。

7.3 阳极芯材料

7.3.1 阳极芯材料应与管道及其附属构件材质相同。阳极芯材料碳当量(CE)应低于管道材料碳当量。碳当量计算值见式(3)。

$$CE = w_C + w_{Mn}/6 + (w_{Cr} + w_{Mo} + w_V)/5 + (w_{Ni} + w_{Cu})/15 \quad \cdots\cdots(3)$$

式中：

w_C、w_{Mn}、w_{Cr}、w_{Mo}、w_V、w_{Ni}、w_{Cu}——钢中该元素含量。

7.3.2 如果只有Mn含量的数值，式(3)可简化为式(4)。

$$CE = w_C + w_{Mn}/6 + 0.04 \quad \cdots\cdots(4)$$

7.3.3 阳极芯材料质量应符合 GB/T 1499.1 的要求。

7.3.4 钢制阳极芯工艺焊接应符合 GB 50661 或其他等效标准相关要求。焊工资质应符合 GB/T 15169 或 GB 50661 的要求。焊接工艺应符合 GB/T 19866、GB 50661 或其他等效标准要求。

7.3.5 在铝阳极浇注前,铁芯材料应根据 GB/T 8923.1 要求喷砂处理至表面清洁度达到并保持 Sa2-1/2 等级。

7.3.6 钢制锌阳极芯材料应根据 GB/T 8923.1 的要求喷砂处理至表面清洁度达到并保持 Sa2-1/2 等级。电镀锌应符合 GB/T 13912 及等效标准要求。锌镀层表面不应有生锈点或其他外观可见的表面污染。

7.4 铝阳极材料

铝阳极材料宜采用 Al-Zn-In 型阳极。铝阳极化学组分应满足表 5 要求。若使用其他化学组成,应经过试验确保阳极电化学性能,并符合要求。

表 5 典型铝阳极材料化学组分

元素[a]	质量分数 w %	
	最小值	最大值
Zn	2.5	5.75
In	0.016	0.040
Fe	—	0.09
Si	—	0.12
Cu	—	0.003
Cd	—	0.002
其他	—	0.02(单元素最大值)
Al	余量	

[a] 对于特定的操作条件(如水深>500 m 或者水温较低),为满足阳极电化学性能需要,可适当缩小各元素质量分数的范围。

7.5 锌阳极材料

典型锌阳极化学组分应满足表 6。若使用其他化学组成,需经过试验确保阳极电化学性能,并符合要求。

表 6 典型锌阳极材料化学组分

元素	质量分数 w %	
	最小值	最大值
Cu	—	0.005
Al	0.10	0.50
Fe	—	0.005

表 6（续）

元素	质量分数 w %	
	最小值	最大值
Cd	0.025	0.07
Pb	—	0.006
Zn	余量	

8 牺牲阳极质量控制

8.1 钢制阳极芯

应对钢制阳极芯所有焊缝进行外观检查。

在铸造即将开始前，应对表面处理状况进行外观检查。

8.2 阳极的化学组成分析

每炉应取两个样品进行化学分析。取样时间应选择浇注开始和结束阶段，应从浇注流中取样。对于 500 kg 以下的合金炉，可每炉取一个样品。取样时间应选择第一炉开始、第二炉结束、第三炉开始等阶段，以此类推。应检测样品化学成分，检测结果应符合标准要求。

8.3 阳极质量

总质量超过 50 kg 的阳极，每块阳极铸件的净重允许误差≤±3%；总质量低于 50 kg 的阳极，每块阳极铸件的净重允许误差≤±5%。

阳极称重比例不应低于 10%。阳极可批量称重以计算出平均阳极质量。

阳极总净重不应低于标称值。

8.4 阳极尺度和平直度

8.4.1 长条状阳极

8.4.1.1 长条状阳极尺度和平直度应满足下列要求：

a) 阳极平均宽度允许误差不应超过标称宽度的±5%；

b) 阳极深度允许误差不应超过标称深度的±10%；

c) 阳极圆柱面直径允许误差不应超过标称直径的±5%；

d) 阳极长度允许误差不应超过标称长度的±3%，且阳极长度不应超过标称长度±25 mm；

e) 阳极沿纵轴方向的平直度偏离量不应超过阳极标称长度的 2%。

8.4.1.2 阳极块的检验数量不应少于阳极总数的 10%。

8.4.2 镯式阳极

8.4.2.1 每个镯式阳极长度允许误差不应超过标称长度的±3%，且阳极长度不应超过标称长度±25 mm。

8.4.2.2 阳极内径尺寸允许误差应满足下列要求：

a) 管径≤300 mm 时，内径允许误差范围宜为 $^{+4}_{0}$ mm；

b) 300 mm＜管径≤610 mm 时，内径允许误差范围为宜 $^{+6}_{0}$ mm；

c) 管径＞610 mm 时，内径允许误差范围宜为 0～+1%；

d) 阳极厚度的允许尺寸误差为宜±3 mm；

e) 阳极块的检验数量不应少于阳极总数的 10%；

f) 不应选用过分弯曲和翘曲的阳极块，阳极铸件沿纵轴方向的偏离量不应超过阳极标称长度的 2%；应至少完全装配一套镯式阳极以核验阳极尺寸，或采用其他等效方法验证。

8.5 阳极芯尺度和位置

应在阳极制造前协商确定阳极芯在阳极内位置的允许误差，并宜列入质量控制计划，以满足阳极利用率的要求。阳极芯伸出阳极部分和关键部位尺寸应测量并满足规定要求。

8.6 阳极表面平整度

8.6.1 长条状阳极

应对长条状阳极进行目视检查，且符合以下要求：

a) 表面缩陷不应超过阳极与阳极芯距离的 10%。表面凹陷测量为从阳极平面到凹陷底部的距离；

b) 表面最大缩减深度不应超过 10 mm。体积缩减量不超过阳极总体积的 0.5%。附属构件和无规则铸件都应确保完全连接到阳极块上。

c) 冷隔深度＜10 mm，冷隔总长度＜阳极宽度的 3 倍。

d) 应去除任何可能危害操作人员人身安全的尖锐表面。

8.6.2 镯式阳极

应对镯式阳极进行目视检查，且满足以下要求：

a) 表面缩陷不应超过阳极顶弯至底凹处距离的 10%，暴露的阳极芯表面不允许有缺陷。

b) 表面最大缩减深度不应超过 10 mm，体积缩减量不超过阳极总体积的 0.5%，附属构件和无规则铸件都应确保完全连接到阳极块上。

c) 冷隔缺陷深度应＜10 mm，冷隔缺陷总长度＜150 mm。

d) 任何可能危害操作人员人身安全的尖锐表面应去除。

8.7 裂纹

8.7.1 一般要求

8.7.1.1 海底阴极保护用阳极，使用前应进行裂纹检测。

8.7.1.2 裂纹检测之前，不应进行打磨抛光等任何修饰裂纹的处理。

8.7.1.3 对于锌阳极，宜借助放大工具辅助进行外观检测裂纹。

8.7.1.4 对于铝阳极，安装、运输和服役过程中不允许出现以下三种情形：

a) 裂纹合并；

b) 导致阳极芯结合力不足处的裂纹；

c) 不完全由阳极芯支撑的阳极块上的裂纹。

8.7.2 铝基长条状阳极

8.7.2.1 裂纹检测宜符合下列要求：

a) 不完全由阳极芯支撑的阳极块体，在无辅助放大观察下，不应有可视裂纹。
b) 由阳极芯支撑的阳极块体部分，可接受的裂纹长度≤100 mm 且宽度≤1 mm。
c) 不允许开裂深入到钢制阳极芯或者贯穿阳极块体。
d) 长度和宽度均小于 0.5 mm 的裂纹可不计。

8.7.2.2 不应有纵向裂纹出现。

8.7.3 铝基镯式阳极

裂纹检测应符合下列要求：

a) 不完全由阳极芯支撑的阳极块体部分，在不借助放大工具条件下，不应有可视裂纹。
b) 不允许开裂深入到钢制阳极芯或者贯穿阳极块体。
c) 不允许裂纹长度＞100 mm 或长度超过阳极直径的 50%，不允许裂纹宽度＞3 mm。
d) 在满足以下三条的前提下，出现以下横向裂纹可接受：
   ——裂纹宽度＜3 mm 时，裂纹长度≤50 mm 且长度不超过阳极直径的 20%。
   ——裂纹宽度＜1 mm 时，裂纹长度范围是 50 mm～200 mm 且长度为阳极直径的 20%～50%。
   ——裂纹长度范围为 50 mm～200 mm 时，且每个阳极半瓦平均不超过两条裂纹，或每块阳极不超过四条裂纹。
e) 纵向裂纹宽度≤1 mm 时，应满足长度＜100 mm 且长度不超过直径的 20%。

8.8 内部缺陷、破坏性测试

8.8.1 应规定不同尺寸类型阳极破坏性测试的阳极数量、截面选取方法、截面数和预制测试内容。

8.8.2 阳极试样不能满足破坏性测试指标要求时，可增加一块阳极试样，新增试样仍无法满足规定指标要求，应废弃该批次的全部阳极或在装配前采取其他措施。

8.8.3 长条状阳极截面分布宜位于标称长度的 25%、33%和 50%处；对于特殊阳极设计可据具体情况规定。不借助放大工具时，切面应满足以下要求：

a) 气孔和孔隙率不应超过切面面积的 2%；特殊切面情况下，气孔和孔隙率不应超过切面面积的 5%。凹坑不应超过 1 cm^2。
b) 非金属夹杂不应超过切面面积的 1%；特殊切面情况下，非金属夹杂不应超过切面面积的 2%。非金属夹杂面积不应超过 1 cm^2。
c) 阳极芯与块体的空隙不应超过管状阳极芯截面周长的 10%。特殊切面情况下，空隙不应超过管状阳极芯截面周长的 20%。

8.8.4 镯式阳极截面分布宜位于标称长度的 25%和 50%处；对于特殊阳极设计，可另行规定。若不借助放大工具，切面应满足以下要求：

a) 气孔和孔隙率不应超过切面面积的 2%；特殊切面情况下，气孔和孔隙率不应超过切面面积的 5%。凹坑不应超过 1 cm^2。
b) 非金属夹杂不应超过切面面积的 1%；特殊切面情况下，非金属夹杂不应超过切面面积的 2%。非金属夹杂面积不应超过 1 cm^2。
c) 阳极芯与块体的空隙不应超过管状阳极芯截面周长的 10%。特殊切面情况下，空隙不应超过管状阳极芯截面周长的 20%。

8.8.5 应在切面上实际测量阳极芯位置。

8.9 电化学性能测试

8.9.1 测试应包括以下内容：

a) 闭路电压；

b) 电容量；

c) 腐蚀形貌(不均匀消耗、晶间腐蚀、钝化等)。

8.9.2 每生产 15 t 阳极应进行一次电化学质量控制测试，应记录电化学测试数据报告。

8.9.3 宜在天然海水或者符合 GB/T 17848 规定的人造海水中进行测试。

8.9.4 宜按附录 E 或者 GB/T 17848 规定的程序执行测试，如果按附录 E 执行，测试结果应满足表 7 的要求。

表 7 电化学性能验收标准

阳极类型	最小电容量/(A·h/kg)	闭路电压(相对于 Ag/AgCl〔海水〕参比电极的电位)/mV
铝	2 500	−1 050
锌	780	−1 030

8.9.5 若测试结果不满足以上规范要求，宜从该批次试样中再选取三个试样进行重新测试；三个试样中任何一个试样不满足规范要求，则宜拒收该热处理批次阳极。

8.9.6 测试阳极表面不应有钝化或者晶间腐蚀迹象。

9 牺牲阳极安装

9.1 牺牲阳极焊接宜符合 GB/T 19866 规定的焊接工艺要求。

9.2 镯式阳极应采用螺栓或焊接方法固定在管道上。

9.3 在水泥配重管道的现场节点处，应避免阳极和水泥钢筋的电连接，任一阳极的间距宜为 25 mm。镯式阳极半瓦间隙、半瓦与水泥配重间隙应填充绝缘的玛蹄脂或其他类似化合物。

9.4 安装阳极时应采取措施减少对管道涂层的伤害。

9.5 阳极与管道连接的铁芯应具有足够的机械强度，铁芯应与管道具有电连续性，设置的连接点应避免对管道造成伤害。连接是宜尽量减少管道涂层的去除量，阳极安装后应采用兼容的涂层材料进行修补。

9.6 阴极保护系统设计中应包含详细的阳极与管道连接工艺。弯头和管道焊缝 200 mm 范围内不应采用焊接法固定阳极。

9.7 采用铝热法焊接阳极时，焊接工艺应确保铜元素渗入管材深度小于 1 mm。

9.8 铝热焊剂不宜超过 15 g。如果阳极连接电缆的截面超过 16 mm^2，应把电缆分为各段截面小于 16 mm^2 的若干部分并分别焊接。

9.9 对于耐蚀合金管，不宜采用铝热法焊接。在进行焊接工艺和性能论证可行的前提下，可采用销钎焊、软钎焊、胶剂黏合、摩擦焊等方法替代。

9.10 阴极保护的组件均与阳极连接的方式宜采用焊接/铜焊方式，表面积超过 1 m^2 的组件不宜只采用螺栓或夹具固定。采用螺旋或夹具固定的附件其电连接电阻率应小于 0.1 Ω。阳极连接处的管道涂层应在安装前清除完毕。

9.11 宜采用铜芯连接电缆，电缆绝缘和铠甲应可以抵抗常规化学/力学环境。电缆芯最小截面应为 4 mm^2，电缆不应有明显的电压降以至于降低整个系统的电容量。

9.12 采用载流铜线焊接，电缆应集束至最小截面 16 mm^2，并且焊接在电缆护管上。每个阳极应有两条电缆连接在管道上；对于半瓦型阳极，两个半瓦应合并为一个阳极。

9.13 阳极芯直接焊接在管道上，宜在管道上预安装加强板。

9.14　对于采用厚绝缘涂层的管道，镯式阳极可与安装了加强板的管道电连接，加强版的外径尺寸与绝缘涂层平齐。

9.15　阳极安装后，焊接处应涂覆兼容性涂层系统。

9.16　外加电流系统维护或者远地式阳极装置水下阳极安装时可采用螺栓固定、夹具固定和焊接等方式。

9.17　阳极系统修复电连接时可采用固定螺钉螺栓连接或者摩擦焊方法。

10　外加电流阴极保护系统

10.1　电源和电流控制

10.1.1　被保护管道与电源阴极应通过单独电缆连接，且应独立于其他与阴极相连的平台和陆地设施。电源阴极连接端应接到控制盒上，控制装置应可调节和测量每条管道的保护电流。

10.1.2　整流变压器输出电流可采用手动或自动控制。手动控制电源可采用电流或电压控制；自动控制应以固定参比电极测定的电位值为依据。报警功能宜包括阳极荷载过电压/过电流以及过保护/欠保护电压显示。

10.1.3　每个阳极输出电流均宜独立控制。

10.2　外加电流阳极材料

阳极材料宜选用钛、铌、钽基的 MMO 或铂阳极、石墨、高硅铸铁、磁铁、贵金属或者钢铁。用于保护海底管道的陆上外加电流阴极保护系统阳极材料选用应符合 GB/T 21448 的规定。

10.3　系统设计

10.3.1　阴极保护系统设计和操作时应采取措施，避免生成的氯气、氢气等有害气体。

10.3.2　外加电流阳极应设于海底管道端部。输出电流保护范围应到达管道中点处。外加电流系统输出电流设计宜大于牺牲阳极，电流分配效率可低于牺牲阳极。

10.3.3　宜按附录 B 计算电流衰减。

10.3.4　可按附录 A 计算管道所需的总电流量，外加电流系统总电流量应为管道所需电流量的 1.25 倍以上。

10.3.5　外加电流系统设计中阳极数量应考虑一定的冗余。

10.3.6　外加电流阳极和电缆设计应考虑安装和操作时可能的外力。应可在水上更换阳极或者采用水下潜水员/ROV 方式更换。

10.3.7　当辅助阳极与支撑结构距离小于 1.5 m 时，支撑结构表面应安装阳极屏。

10.3.8　阳极屏形式可采用玻璃鳞片增强环氧或聚酯等绝缘涂层，也可采用预涂玻璃纤维增强环氧树脂绝缘板，最小厚度 1 mm。屏蔽板可与辅助阳极装配成撬或通过环氧树脂固定。

10.3.9　阳极电缆应配套金属铠甲或设置电缆专用路由，且便于维修更换。

10.3.10　电缆路由不宜穿过危险区。

10.3.11　暴露在海水中的电接触宜采用钛、铌、钽基的铂金或纯金涂层。

10.3.12　外加电流保护管道两端应与邻近的设施/管道保持电绝缘。绝缘接头宜设置在水面以上易于检修的位置。如果邻近管道或者结构对管道产生干扰，宜安装电阻连接装置。

10.3.13　采用外加电流系统，应在阳极周围安装固定式参比电极监测电位校核管道阴极保护情况。对于潜水员和 ROV 检测无法到达的区域应安装式固定参比电极。

10.3.14　阴、阳极电缆不应公用一根护管。

10.3.15　如果测量电缆和测试点无法直接连接到管道上，应在管道两端安装，以评估外加电流阴极保

护系统的性能。

10.3.16 绝缘接头/法兰两侧应分别连接两根电缆，电缆应可采用直接跨接或电阻跨接等方式接入测试盒或接线盒。测试盒宜安装在靠近立管且安全便利的位置，可沿立管向水下垂设测试单元。

10.4 机械和电气

10.4.1 阳极和电缆的电连接应防水且机械性能良好。电缆和连接件间绝缘材料应适用于对氯气、氢气或其他有害化学物质的抗性。

10.4.2 阳极和电缆应采取机械保护。对于拉伸式系统，应考虑防止台风造成损坏、常规检测和维护的要求，每串阳极宜配置绞车或其他提升装置。宜预估在非正常工况下造成的保护不足。

10.4.3 固定式外加电流系统阳极可采用以下安装方法：

a) 可将阳极安装在放置于海床上稳定的混凝土基础上，可降低阳极被泥砂覆盖的可能性。

b) 可将阳极安装在平台上竖直的附属钢套管或导管的底部。套管固定在水面上的平台杆件上，并在水面、水下进行支撑。阳极宜通过套管下放至套管底部或底端装置下，套管对阳极电缆提供保护。此方式进行阳极电缆维修或更换阳极可不需要潜水作业。海生物生长和腐蚀垢层将导致阳极更换困难或者无法进行。阳极套管顶端应安装可拆卸的遮罩密封以防止碎屑进入套管。

c) 扁平结构形式的绝缘支架型阳极可直接安装到立管等平台水下结构或者附属件上。

d) 阳极可安装在平台水下钢结构支撑件上。

10.4.4 外加电流系统电源可采用手动控制型、恒电流型或恒电位仪。

10.4.5 海上设施宜采用具备交直流过载保护功能的手动调节油冷整流器。

10.4.6 应考虑阴极保护系统安装初期无供电阶段对管道和设施的阴极保护。

10.4.7 应评估干扰电流对其他管道、钢结构和混凝土结构的腐蚀，具体参见附录 F。

10.4.8 应考虑管道安装的影响，具体参见附录 G。

11 文件

11.1 设计、制造、安装文件

11.1.1 系统完工文件应包括以下内容：

a) 基于项目规格书、标准和法规的阴极保护系统基础描述；

b) 保护面积和所需的保护电流计算；

c) 阳极最终设计文件计算书中应涵盖阳极质量、尺寸、电阻、数量和性能等；

d) 图纸：包括阳极分布图、阳极详细设计、制造、安装图。

11.1.2 最终文件应包括更新至完工阶段的工程图纸和设备清单，阳极制造和测试均应具备相关资质。

11.1.3 外加电流系统处提交 12.1.1 文件外，还应提交以下文件：

a) 整流器变压器文件、包括电容量、控制和警报设备和电路图；

b) 阳极、参比电极、水下连接器、电缆端子、阳极屏详细设计图纸；

c) 固定阳极、参比电极和阳极屏工艺文件；

d) 外加电流辅助阳极性能文件；

e) 阳极和参比电极位置图；

f) 电缆和电绝缘接头的详细设计图纸；

g) 电缆护管图纸文件；

h) 电位监测系统文件；

11.1.4 应确定阴极保护装配材料清单，列出建造外加电流系统所需的指定材料；

11.1.5 应提供外加电流系统的建造细节和安装工艺。

11.2 调试大纲

对于外加电流系统，调试大纲宜包括以下内容：

a) 测试管道绝缘；
b) 有必要时启动阴极保护设备；
c) 按附录 D 测定恰当的保护水平；
d) 条件允许时测试干扰电流。

11.3 操作维修手册

对于外加电流系统，操作维修手册应涵盖以下内容：

a) 系统和配件说明；
b) 调试报告；
c) 系统/配件完工图纸；
d) 制造方/承包方文件；
e) 系统保护电位标准；
f) 监测方案，包括监测程序、监测日程以及管道上安装的所有监测设备；
g) 外加电流系统安全操作指南；
h) 维修程序。

12 阴极保护系统操作、监测和维修

12.1 一般要求

应参照附录 D 执行阴极保护系统的检测或监测。附录 F 中列出了可能的干扰项。

12.2 监测方案

12.2.1 设计方案中应涵盖监测方案，宜考虑以下内容：

a) 检测项目，包括管道-海水电位、阳极电位、阳极输出电流、阳极尺寸目视检测、管道绝缘测试等；
b) 检测位置；
c) 长效监测设备设施；
d) 监测装置和设备；
e) 采用的监测技术描述，例如潜水员、ROV 监测、拖缆、拖舱物探等。本描述应同时涵盖管道精确定位方法，采集定位数据以满足建造阶段的需要。
f) 检测频率。

12.2.2 监测方案应列入操作维修手册中。

12.3 维修

12.3.1 定期勘察和检测表明阴极保护不满足设计标准的需要时，应采取增加阳极等补偿方法。

12.3.2 阳极电缆可采用机械固定或者摩擦焊等焊接方式安装到管道上，连接电阻宜小于 0.1 Ω。

12.3.3 后期监测项目宜涵盖所有采用机械连接的牺牲阳极的电连接状况同时测量附属点附近的管道和阳极电位。

附　录　A
（规范性附录）
牺牲阳极阴极保护系统设计程序

A.1　引言

附录 A 规定了牺牲阳极的阴极保护系统的详细设计程序。

A.2　管道分段

管道可根据引起电流密度变化的条件，如水深、操作温度或埋设，细分为多个部分。

A.3　表面积计算

A.3.1　对于管道的每部分，由于条件不同导致需求的电流密度不同，应单独计算需要进行阴极保护的表面积。

A.3.2　与管道电连接的部件，如立管、膨胀弯、连接段、阀门和三通，应包含在计算的表面积中。

A.4　保护电流计算

根据管道的尺寸和选择的涂层，平均保护电流 I_{cm} 和末期保护电流 I_{cf} 应分别根据式(A.1)进行计算。

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \qquad \text{……(A.1)}$$

式中：

I_c ——设计管段根据平均和末期的条件计算的保护电流，单位为安培(A)；

i_c ——电流密度，根据平均和末期的条件进行选择，单位为安培每平方米(A/m^2)；

f_c ——涂层破损率，由平均和末期条件决定；

A_c ——具体管段的总表面积，单位为平方米(m^2)。

A.5　阳极类型和尺寸的选择

A.5.1　阳极的类型应由制造、安装和操作条件来决定。

A.5.2　镯式阳极的内径应由管道的公称外径加上最大指定涂层厚度、最大直径公差以及管道的椭圆度来决定。

A.5.3　对于与混凝土配重层齐平安装的镯式阳极，在决定阳极的整体尺寸时应考虑混凝土涂层的厚度。

A.5.4　阳极应有足够的尺寸以满足设计年限末期的电流需求。

A.6　阳极总质量计算

对于每段管道维持设计年限期间阴极保护所需阳极的总净质量应根据式(A.2)进行计算。

$$m = I_{cm} \times t_{dl} \times 8\,760/(\mu \times \varepsilon) \qquad \text{……(A.2)}$$

式中：

m ——设计管段的阳极总净质量，单位为千克(kg)；

I_{cm} ——具体管段需求的平均电流，单位为安培(A)；

t_{dl} ——设计年限，单位为年(a)；

ε ——单位阳极材料的电容量，单位为安培小时每千克(A·h/kg)；

μ ——利用率。

A.7 尺寸和净重的计算

A.7.1 单个阳极的最终尺寸和净质量应采用下面的公式计算，通过一系列的迭代计算进行优化。

A.7.2 阳极总净质量由式(A.3)给出。

$$m = n \times m_a \qquad \text{……(A.3)}$$

式中：

n ——设计管段安装的阳极数量；

m ——设计管段阳极的总净质量，单位为千克(kg)，[由式(A.2)给出]；

m_a ——单个阳极质量，单位为千克(kg)。

A.7.3 阳极数量 n 的最小值应考虑允许的最大阳极间距。对于镯式阳极，阳极间距设定为现场节点数量的固定数。

A.7.4 阳极制造商有可用的标准尺寸的模具，在实际设计中，n 和 m_a 可按照式(A.4)来选择。

$$m > n \times m_a \qquad \text{……(A.4)}$$

A.7.5 寿命末期需要的单个阳极的电流输出 I_f，应根据式(A.5)计算。

$$I_f = I_{cf}/n \qquad \text{……(A.5)}$$

式中：

I_f ——寿命末期需要的单个阳极的电流输出，单位为安培(A)；

I_{cf} ——具体管段寿命末期需求的总保护电流，单位为安培(A)；

n ——具体管段安装的阳极数量。

A.7.6 对于给定大小和质量的阳极，在寿命末期单个阳极的实际输出电流 I_{af} 可根据式(A.6)计算。

$$I_{af} = (E_c - E_a)/R_a \qquad \text{……(A.6)}$$

式中：

I_{af} ——寿命末期单个阳极的实际输出电流，单位为安培(A)；

E_c ——设计阳极闭路电位，单位为伏特(V)；

E_a ——设计保护电位，单位为伏特(V)，即最小的负电位；

R_a ——总环路电阻，被假定为等同于阳极电阻(见 A.8)，单位为欧姆(Ω)；

A.7.7 为了确定设计年限末期阳极-海水间电阻，应通过给定阳极利用率假定阳极消耗到一定程度的近似尺寸。阳极电阻公式 R_a 的计算应采用该近似尺寸(见 A.8)。

A.7.8 $E_c - E_a$ 通常称为设计驱动电压，单位为伏特(V)。

为了提供需要的电流，实际阳极的输出电流应大于或等于需要的电流输出，见式(A.7)：

$$I_{af} \geqslant I_f \qquad \text{……(A.7)}$$

A.7.9 式(A.4)～式(A.7)可宜用于优化阳极的数量、大小和单个阳极的质量。对于满足式(A.4)～式(A.7)标准的阳极，可考虑阳极的制造和安装成本进行优化。

A.8 阳极电阻公式

A.8.1 阳极电阻应按式(A.8)和式(A.9)进行计算：

a) 对于镯式阳极

$$R_a = 0.315 \times \rho / A^{1/2} \quad \cdots\cdots (A.8)$$

b) 对于长条状阳极

$$R_a = \rho / (2 \times \pi \times L) \times (\ln(4L/r) - 1) \quad \cdots\cdots (A.9)$$

式中：

R_a ——阳极电阻，假定等同于环路电阻，单位为欧姆(Ω)；

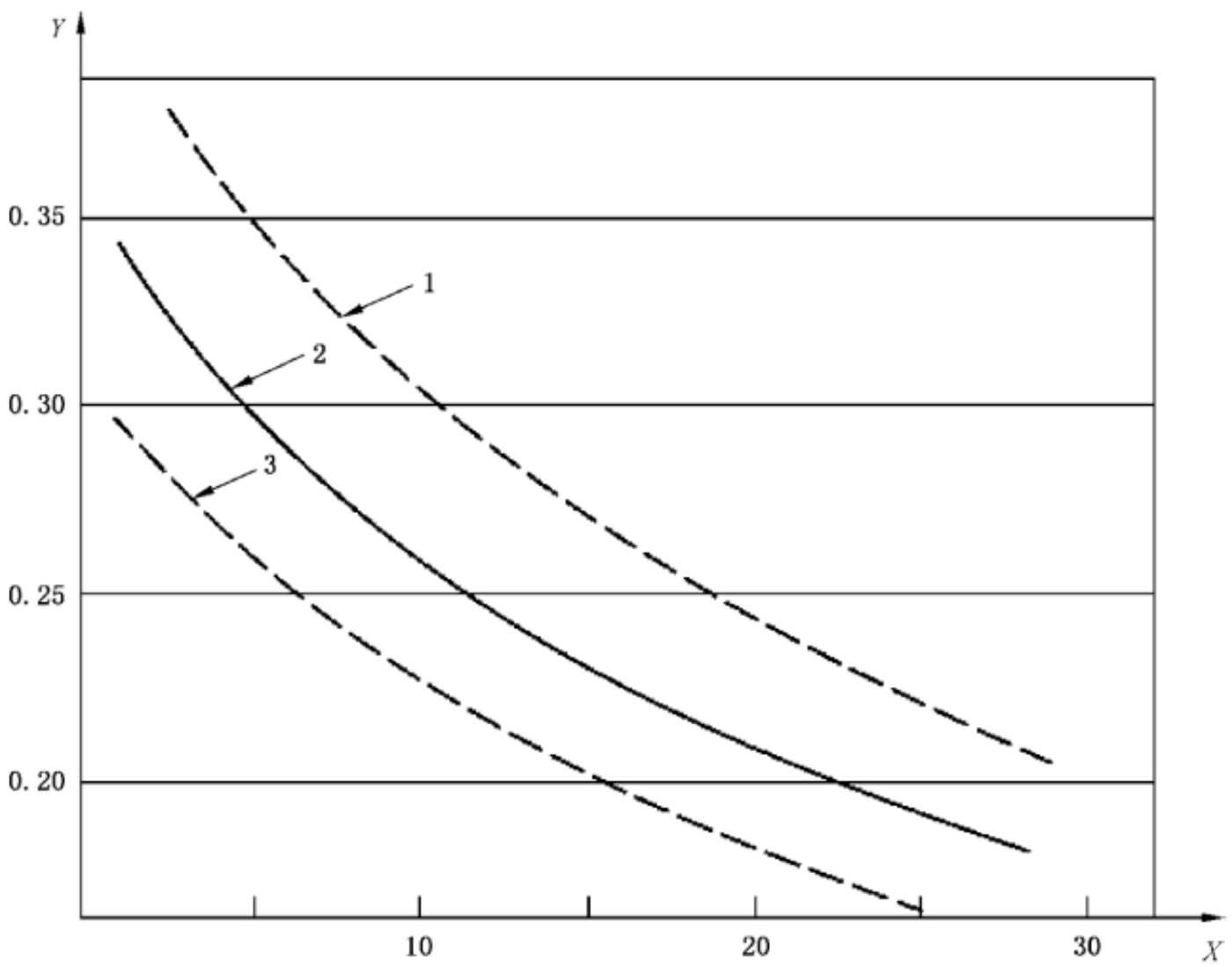
ρ ——环境电阻率，单位为欧姆米(Ω·m)；

L ——阳极长度，单位为米(m)；

r ——阳极半径，单位为米(m)；

A ——阳极暴露面积，单位为平方米(m^2)。

A.8.2 典型海水电阻见图 1 并采用下列方案：



说明：

X ——温度，单位为摄氏度(℃)；

Y ——海水电阻率 ρ，单位为欧姆米(Ω·m)；

1 ——盐度 3.0%；

2 ——盐度 3.5%；

3 ——盐度 4.0%。

图 A.1 海水电阻率随温度的函数

a) 对于暴露于海床环境下的阳极，电阻率宜通过测量或以前的经验进行评估。如果没有可用数据，宜采用 1.5 Ω·m。

b) 对于非圆柱形阳极，式(A.9)中的 r 应通过式(A.10)计算。

$$r = C/(2\pi) \qquad \cdots\cdots(A.10)$$

式中：

r ——阳极的半径，单位为米(m)；

C ——截面周长，单位为米(m)。

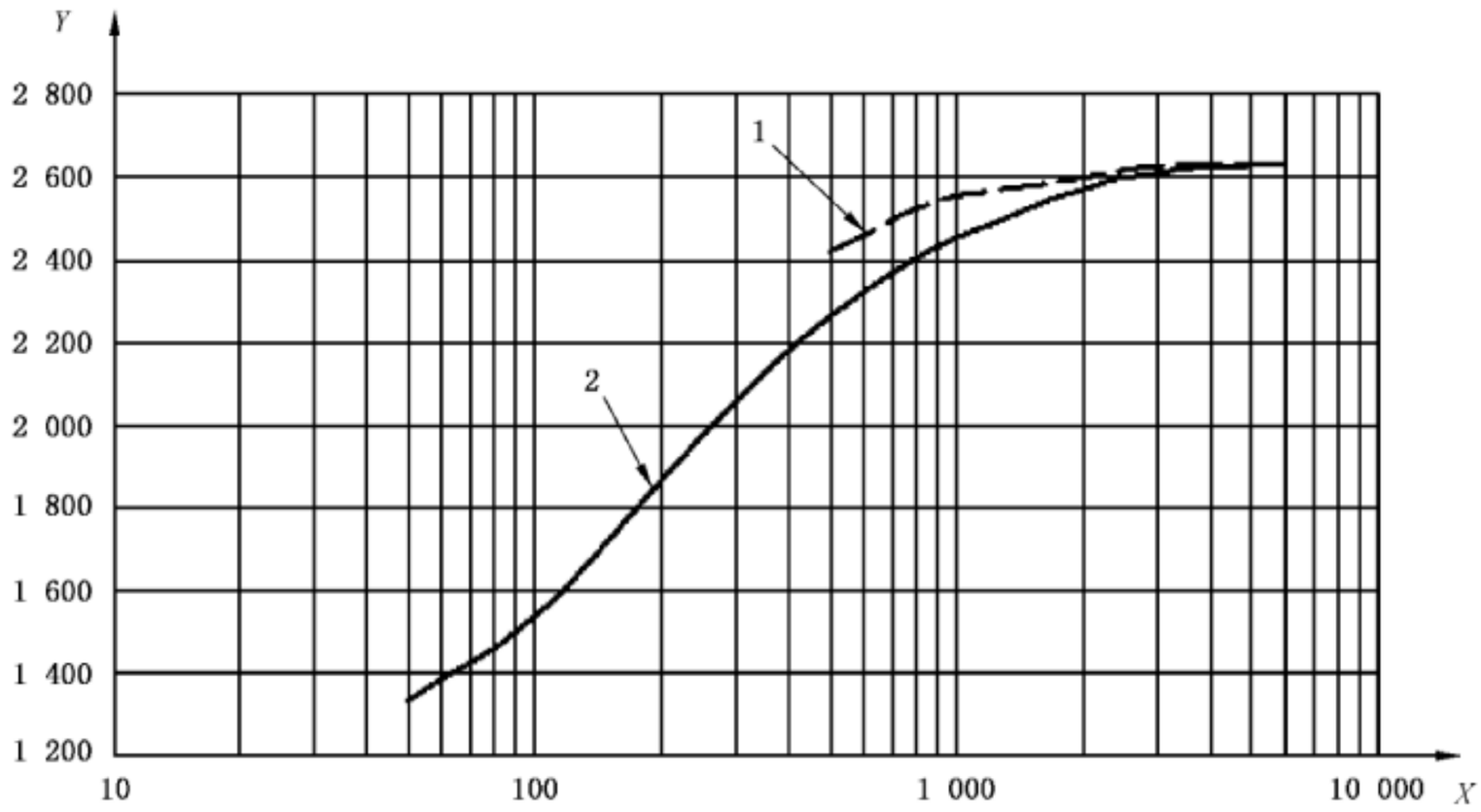
c) 其他阳极电阻公式可通过理论或测试来验证。

A.9 条件变化时的设计修正

A.9.1 在典型的阴极保护设计中用到涂层破损率 f_c 和电容量 ε，适用于假设 f_c 和 ε 在管道寿命期间管道的操作条件不变的情况下。如果假设不成立，则式(A.1)、式(A.2)和式(A.6)中的数值取值将会不连续随着操作条件的变化而变化。变化的操作条件对于阴极保护设计的影响可通过在可预期的极端情况下重新计算来评估。如果这两种情况下的阳极设计差别很小，则宜采用最保守的设计。如果两种设计的阳极数量差别很大，则可考虑如下因素，设计满足相应变化的方案：

a) 在投产前几年安装的高温管道，在投产之前由于温度比较低时所需的阴极保护电流较小。

b) 对于埋设的管道，在管道寿命后期由于水产量增加导致操作温度升高，生产初期比后期高温阶段需求的阴极电流要小很多。阳极的操作温度会随时间变化，因此电容量也随温度升高而变化。图 A.2 给出了两种温度范围下，阳极电容量随阳极电流密度变化的曲线。



说明：

X ——阳极电流密度，单位为毫安每平方米(mA/m^2)；

Y ——阳极电容量，单位为安培小时每千克(A·h/kg)；

1 ——T=2 ℃；

2 ——T=25 ℃～28 ℃。

图 A.2 低电流密度下，铝阳极在海水中的性能

c) 拥有优质外涂层和高阴极保护电流密度需求的管道，深水保温管道可能需要很小的电流，因此一个常规镯式阳极的电流密度设计为低于 1 000 mA/m^2。铝阳极的电容量在阳极电流密度低于 1 000 mA/m^2 时不是一个常数。

d) 阳极电流密度超过 1 000 mA/m^2 时，阳极电容量通常分高、低温度数值制表查询。对于正常操作温度低于 50 ℃以及电流密度超过 1 000 mA/m^2，变化通常可忽略。

A.9.2 考虑阳极电容量 ε 在管道寿命期间变化的情况下，采用式(A.2)选取单一的阳极电容量是不适

用。当电容量变化时，则式(A.2)宜修正为式(A.11)。

$$m=\frac{A_c\times 8\ 760}{u}\int_t i_c\times f_c\times\frac{1}{\varepsilon}\mathrm{d}t \qquad \cdots\cdots(\mathrm{A.11})$$

式中：

i_c，f_c 和 ε 在管道年限期间不是常数而是变化的。

ε——温度、电流密度的函数，关于 ε 的信息可从附录 C 获得。

通常，阳极电容量计算采用电子表格进行数值积分，可计算出每年需要的阳极质量 m，然后计算管道设计年限内的总质量。

附 录 B
（规范性附录）
阴极保护衰减

B.1 介绍

B.1.1 一旦根据附录 A 确定了阳极的数量、尺寸和间距，可利用衰减公式来进行阳极分布适宜性的大概检查。利用这些公式，可得到管道与电解质的电位分布以及流入管道电流与到汇流点（如阳极）距离的函数。

B.1.2 图 B.1 提供了电位和电流与汇流点距离函数的图示，图中使用的符号在 B.2 定义。图中：1 为汇流点

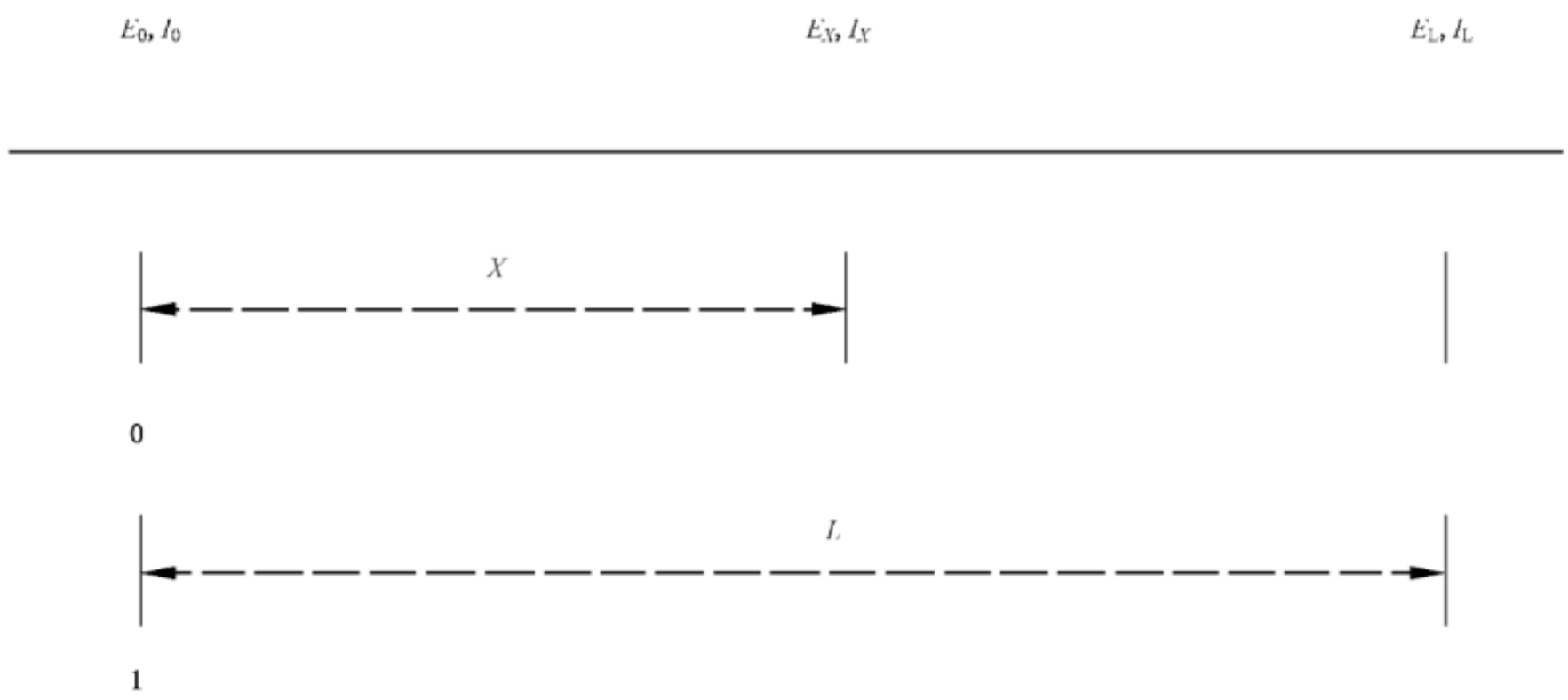


图 B.1 电位和电流与汇流点的距离函数

B.2 方法

B.2.1 对于一条有多个汇流点（阳极），均匀间距为 $2L$ 的管道，距离阳极任意距离 X 处的电位 E_x，电流 I_x 可通过式（B.1）和式（B.2）来计算：

$$E_x = E_0 \times \frac{\cosh\alpha(L-x)}{\cosh\alpha L} \qquad \cdots\cdots(B.1)$$

$$I_x = I_0 \times \frac{\sinh\alpha(L-x)}{\sinh\alpha L} \qquad \cdots\cdots(B.2)$$

式中：

E_0 ——汇流点（阳极）处管道对电解质的电位差，单位为伏特（V）；

E_x ——距离汇流点 x 处管道对电解质的电位差，单位为伏特（V）；

I_0 ——汇流点（阳极）处流入管道的电流，单位为安培（A）；

I_x ——距离汇流点 x 处流入管道的电流，单位为安培（A）；

L ——汇流点间距的一半，单位为米（m）；

α ——管道的衰减常数，等于$\sqrt{\frac{R_L}{R_t}}$，单位为每米（m^{-1}）；

R_L ——管道的线电阻，单位为欧姆每米（Ω/m），并且由式（B.3）给出：

$$R_L = \rho / A_W ; \qquad \text{（B.3）}$$

ρ ——管道材质的电阻率，单位为欧姆米（Ω·m）；

A_W ——管壁的横截面积，单位为平方米（m^2）；

R_t ——泄露或横向电阻，单位为欧姆米（Ω·m），并且由式（B.4）给出：

$$R_t = R_0 / (\pi D_o) \qquad \text{（B.4）}$$

R_0 ——管道对电解质的绝缘电阻，单位为欧姆米（Ω·m）；

D_o ——管道外径，单位为米（m）；

B.2.2 绝缘电阻 R_0 值的选择宜基于实践经验，并考虑以下几点：

a） 涂层类型；

b） 接触条件，如海水还是海床沉积物；

c） 管道的设计年限以及预期的设计年限内涂层电阻的衰减；

d） 管道的安装方法和涂层的损坏程度。

B.2.3 管道的线电阻 R_L 可通过式（B.5）来计算：

$$R_L = 4L \cdot \frac{\rho}{\pi (D_o^2 - D_i^2)} \qquad \text{（B.5）}$$

式中：

D_o ——管道外径，单位为米（m）；

D_i ——管道内径，单位为米（m）；

L ——汇流点间距的一半，单位为米（m）。

B.3 NORSOK 标准程序

B.3.1 本章推荐的程序可用于确定阳极之间的最大距离。

B.3.2 最大压降通过假设涂层破坏的整个区域位于阳极间的中间位置来计算。

B.3.3 在阴极保护设计中，对于沿管道均匀布置的阳极，阳极间的压降（或电位增加）可通过式（B.6）来计算。

$$\Delta E_{Me} + \Delta E_A = \frac{L^2 \times \rho_{Me} \times i \times f_{cf} \times D_o}{4 \times d \times (D_o - d)} + R_{anode} \times i \times \pi \times D_o \times f_{cf} \times L \qquad \text{（B.6）}$$

式中：

ΔE_A ——由于从阳极到阴极输送电流导致的 IR 降，电解电压降，单位为伏特（V）；

ΔE_{Me} ——由于输送电流进入管壁导致的 IR 降，金属电压降，单位为伏特（V）；

R_{anode} ——阳极电阻，等同于电解电阻，单位为欧姆（Ω）；

ρ_{Me} ——管壁材质的电阻率，单位为欧姆米（Ω·m）；

L ——阳极间距离，单位为米（m）；

i ——电流密度，单位为安培每平方米（A/m^2）；

f_{cf} ——末期涂层破损率；

D_o ——管道外径，单位为米（m）；

d ——管道壁厚，单位为米（m）。

B.3.4 阳极沿管道分布，在计算阳极间的最大距离时应考虑单个阳极的损耗。

B.3.5 对于位于管道端部阳极块的阴极保护设计，两个阳极块之间的电压降（电位增加）宜采用

式(B.7)来计算。

$$\Delta E_{Mc}+\Delta E_{\Lambda}=\frac{L^{2}\times\rho_{Mc}\times i\times f_{cf}\times D_{o}}{4\times d\times(D_{o}-d)}+\frac{R_{anodc}\times i\times\pi\times D_{o}\times f_{cf}\times L}{2} \quad \cdots\cdots(B.7)$$

式中：

ΔE_{Me}——由于输送电流进入管壁导致的 IR 降，金属电压降，单位为伏特(V)；

ΔE_{Λ}——由于从阳极到阴极输送电流导致的 IR 降，电解电压降，单位为伏特(V)；

L——阳极间距离，单位为米(m)；

ρ_{Me}——管壁材质的电阻率，单位为欧姆米(Ω·m)；

i——电流密度，单位为安培每平方米(A/m^{2})；

f_{cf}——末期涂层破损率；

D_{o}——管道外径，单位为米(m)；

d——管道壁厚，单位为米(m)；

R_{anode}——阳极电阻，等同于电解电阻，单位为欧姆(Ω)。

B.3.6 应用式(B.7)时，应满足管段和阳极管接头不受管道末端其他装置的影响。如果末端装置从阳极吸收电流，代表阳极压降的式(B.7)的最后部分应考虑该影响并进行修正。当管道受到来自管端构筑物上阳极的保护时，阳极压降应进行特殊评估。当阳极在端部安装与阳极或阳极线轴沿管道安装联合应用时，式(B.6)与式(B.7)应组合使用。

附 录 C
（规范性附录）
牺牲阳极材料的性能测试

C.1 范围

C.1.1 本附录提供了用于确定具体环境下牺牲阳极性能参数的实验室测试程序。

C.1.2 牺牲阳极材料的性能可通过现场经验验证，或者通过阳极监测数据或专用的全尺寸阳极实地试验进行验证。

C.1.3 本程序也可适用于热海水或沉积物等特殊环境。

C.1.4 阳极组分验证、阳极铸造以及任何需要进行阳极材料性能验证时应进行性能测试。

C.2 取样和试样制备

C.2.1 材料试验应从正常生产所制造的阳极或从使用相同的原料和熔融操作所生产的专用铸件中进行采样。

C.2.2 应准备代表至少 5 个炉次材料的两个样品。采样的试验材料的化学组分应代表正常生产，如，合金的组分和元素的纯度应反映制造商对阳极材料化学成分的定值。

C.2.3 应将采样材料加工成圆柱形样品，直径最小 20 mm，长度最小 80 mm。

C.2.4 应在试样样品一端钻一个直径大约 2 mm 的圆孔，应当攻丝，连接到钛支撑杆上。应将支撑杆与试验溶液接触的所有表面涂敷上绝缘涂层。

C.2.5 安装在支撑杆上后，样品端部应涂敷密封化合物如聚氯丁二烯胶或硅橡胶。

C.2.6 在浸泡之前，试样应使用自来水漂洗，然后用乙醇或等效物干燥。干燥后，试样应称重，精确到 0.1 mg。

C.3 检测设备和实验程序

C.3.1 测试环境应为清洁的天然海水，盐分质量分数≥3.0%。测试环境的温度范围为 7 ℃～20 ℃。温度和测试环境的盐度应至少每周记录一次。

C.3.2 试验单元应根据附录 E 设置连续海水置换装置，置换速度至少 1 L/min。海水应不断用空气进行清洗。

C.3.3 测试执行应不受其他限制。

C.3.4 测试的持续时间应至少为 12 个月。

C.3.5 总电流可由电量计或通过记录电路中引入的精密电阻的电压降来确定。总电流的手动记录须每周至少一次。

C.3.6 如采用人工记录，则测试前 2 周至少应有 5 日每天记录一次阳极电位（见附录 E），两周后每周应至少记录一次阳极电位。也可采用连续记录方式。

C.3.7 在阳极和阴极区之间应连接一个 10 Ω 精密电阻，以便限制阳极电流密度。如果需要更多的数据，也可取更高或更低的电路电阻值（例如 2 Ω～20 Ω）。阴极表面积应至少为 30 倍裸露的阳极表面积。

C.3.8 阳极电流密度应通过使用高阻抗（$>10^7$ Ω）电压表测量 10 Ω 电路电阻上的电压降来计算。

C.3.9　电流和阳极电位的测量应定期进行。应同时记录钢的阴极电位。

C.3.10　电容量应根据附录 E 的规定进行计算。

C.4　文件

编制测试报告应包含以下内容：

a)　测试材料的熔融和铸造数据，包括影响阳极性能的合金化和元素纯度；

b)　标称成分和保证成分极限；

c)　样品的制备，测试设备和程序；

d)　环境数据，包括海水温度和盐度；

e)　阳极电位与时间的函数用图形表示；

f)　清洗前后阳极样品的图片；

g)　电容量，单位为安培小时每千克(A·h/kg)。

附　录　D
（规范性附录）
阴极保护的监测和检查

D.1　简介

D.1.1　有许多方法可用于监测近管道线阴极保护系统的有效性。监测水平应与管道的重要性及条件和规定的最低要求相匹配。

D.1.2　安装后的调查宜根据 D.6.1 在管道安装后的 12 个月内进行。

D.1.3　进一步的调查宜基于以下进行考虑：

a）　阴极保护设计和阳极性能符合本规范要求；

b）　前期的调查结果；

c）　阳极过度消耗的报告；

d）　涂层损坏导致涂层破损率大于表 2 和表 3 中所给出的数值；

e）　周边管道和结构的电位干扰。

D.1.4　如果管道将超期服役，则 CP 系统在设计年限的最后 5 年应至少进行一次电位调查。

D.2　上部电位检测

D.2.1　管线立管电位可通过使用简单的便携式参比电极和常规电压表进行测量。电压表负极应连接到水线以上的立管，正极连接到参比电极。为确保准确性，参比电极应放入水中并尽可能接近立管。应记录不同深度的电位，下垂的深度通过参比电极电缆上的标记进行确认。

D.2.2　由于海水的运动对参比电极直观观测的影响导致了测量精度降低。如果用潜水员确保参比电极的良好定位便可恢复测量精度。当用潜水员或遥控潜水器来测量电位，可使用专门的接触探针。如果可能，在读取电位之前，应检测立管与主结构之间的电连接。

D.2.3　如果立管与主结构电连接，立管的电位会受到主结构影响。立管电位并不一定是整个管道电位轮廓的良好指示。

D.2.4　两个平台间运行的短管道的电位可利用衰减公式来建模，最坏情况下的电位值为极限下的电位预测。应沿管线按照一定间隔进行电位测量以验证模型可靠性。管道测量的长度取决于管道的壁厚和直径、外部涂层条件、工作温度、埋设的程度、终点电位、外加电流阳极位置、牺牲阳极条件和间距，以及管道是否与主结构有效绝缘。

D.3　外观检测

D.3.1　必要时宜对未埋设管段进行外观检测，来检查管道、涂层和阴极保护系统的状况。在检查之前，应记录检查过程中收集的数据类型，且数据类型应满足要求。

D.3.2　潜水员的目视外观检测或 ROV 相机可显示 CP 系统的不足之处，如阳极的损坏或丢失、电缆损坏、阳极过度消耗。明显的腐蚀损坏或生锈变色是保护不足的另一个标志。低阳极消耗可表明钝化，靠近阳极处厚的钙质沉积可表明过度保护。

D.3.3　在进行阳极尺寸的任何物理测量之前，宜清洗牺牲阳极的表面。

D.4 电位测量

D.4.1 概述

D.4.1.1 宜按照本规范要求进行电位测量以评估阴极保护系统的性能。

D.4.1.2 电位测量的目的是确定管道与海水界面相对于参比电极的实际电位，以此来评估阴极保护系统的有效性。可接受的电位标准见表1，并且电位可转换成相对其他参比电极。通常难以直接测量的管道与海水的电位，宜考虑进行间接电位测量。

D.4.1.3 牺牲阳极也宜进行电位测量，以获得阳极表面的性能信息。

D.4.1.4 当采用外加电流阴极保护时，应测量电位及施加的保护电流。

D.4.1.5 测量值包括钢/水界面的电压降，也包括参比电极与管道间在海水中的电压降。

D.4.1.6 在大多数情况下，除了外加电流阳极附近，海水中的电压降可取为零。

D.4.1.7 应定期保养并校准测量设备。应检查参比电极污染并参照实验室标准参比电极定期校准。

D.4.1.8 在实际操作中参比电极应尽量靠近管道，特别是在近阳极海水中存在较大压降的阳极电位的测量中。在尤其是以上情况下，当检测电位转化为真实阳极电位时，应用IR降进行补偿。

D.4.1.9 阳极电位宜负于设计的闭路阳极电位。

D.4.1.10 过多正电位记录表明出现过电流载荷或钝化行为。

D.4.1.11 潜水员在外加电流阴极保护管道上工作时应遵守电气安全。

D.4.1.12 应测量钢/海水电位以确定钢结构是否被充分保护。钢结构与电解质都应进行连接。

D.4.1.13 与钢结构的连接是一种简单的金属连接，金属导体与电解质的连接时，应放入到电解质中。该导体引入其自身的电极电位，这不可避免被包含在测量值中。可使用可重放和限定电极电位的导体，即参比电极。不论使用何种类型的参比电极，参比电极宜放在尽量接近金属表面的位置，因为当保护电流经电解质流到钢结构的时候，金属表面与电解质之间的电位差的测量可在很大程度上受到保护电流产生的电位降的影响。这种效应被称为IR降，具有使所测量的电位比在金属/电解质界面的实际电位更负的作用。IR降取决于电解质电阻率并且与埋设的构筑物有很大关系。涂料电阻也会对IR降有影响。

D.4.2 参比电极

D.4.2.1 参比电极如饱和甘汞电极或各种用不同浓度的氯化钾电解质的银/氯化银电极，可作为主参比电极使用。两个电极集成为一个在线交叉校准组件，作为电位的监测装置。

D.4.2.2 饱和甘汞电极或银/氯化银/氯化钾电极不经常用于海水中阴极保护系统的监测和控制，因为它们在现场使用不够稳定。在该场合中更经常使用的参比电极是银/氯化银/海水电极或高纯或阳极-合金-标准锌电极。从实用的角度，虽然电解质未完全限定和具有可重制性，这些电极仍被认为足够精确。Ag/AgCl〔海水〕电极是在海水应用最广泛的电极，尤其是在与便携式监测设备一起使用的场合。

D.4.2.3 使用其他参比电极替代Ag/AgCl〔海水〕参比电极时描述如下，碳钢相对于该电极的保护电位等效于碳钢相对于Ag/AgCl〔海水〕标准电极时的−0.80 V。

a) 饱和铜/硫酸铜参比电极(CSE)。该电极测定的最小电位应为−0.85 V。该电极常用于确定陆上管道的保护水平，而在海水中长期浸泡的情况下不是足够稳定。不建议在海水中使用。

b) 高纯锌电极。“高纯度”或用于制造阳极的锌合金在海水中电位稳定，有时用作参比电极。锌电极精度没有银/氯化银参比电极准确，并且大多是在长期监测中使用。在长效设施上宜有微小阳极电流流经表面，以保持其清洁和有效。对于碳钢的有效的阴极保护，相对锌/海水电极的最小电位为+0.25 V。

c) 饱和甘汞参比电极(SCE)。此电极由氯化钾饱和溶液、汞和氯化亚汞组成。对于低合金钢的

有效阴极保护，最小负电位为－0.78 V。该电极不常用于现场测量，更适合于实验室使用。

d) 饱和银/氯化银(Ag/AgCl〔饱和 KCl 溶液〕)。该电极类似于银/氯化银/海水电极，不同的是银/氯化银浸渍在氯化钾饱和溶液，并且电位不受海水盐度(或电阻率)影响。对于合金钢有效的阴极保护，应用此参比电极最小负电位为－0.76 V。与 SCE 相同，饱和银/氯化银电极也更适合于实验室应用。

D.4.2.4 在现场使用参比电极，应定期用具有有效校准证书的标准参比电极进行检查。标准电极应至少一年一次与一级标准参比电极(一般氢电极，NHE)进行校正。

D.4.2.5 参比电极如饱和甘汞电极或各种用不同浓度的 Ag/AgCl/KCl 溶液参比电极，可使用作为标准参比电极。

D.4.2.6 标准氢电极(SHE)为正式的参比电极。此电极考虑氢气逸度系数和 H^+ 离子的活度系数，但实际上是不可能制造出来的。

D.4.3 直接接触设备

D.4.3.1 接触探针

D.4.3.1.1 电位测量可使用常规电压表在水上测量，电压表的一根电缆连接到参比电极，第二根电缆连接接触探头的金属头和电压表的负端。第二根电缆不宜连接到一根管道立管的水上部分。

D.4.3.1.2 接触探针包括一个坚固的外壳和带有金属头的参比电极，以便于与管道直接接触。这是专为潜水员或辅助 ROV 进行电位测量而设计。它们可用于接近模式，类似于上部监测，也可经由金属电极头局部接触结构。当管道被隔离和顶侧接地连接的电压表不可用时，这就显得很重要了。

D.4.3.1.3 电位测量也可通过自包含接触探针，类似于电极头接触探针，除外参比电极自带集成电压表，并且不需要任何电缆返回到表面。这些探针可由潜水员或 ROV 安装，且仅在尖部触地模式下工作。可通过视频显示水下读数或通过潜水员口头传达给数据记录员。

D.4.3.2 固定/长效系统

D.4.3.2.1 对于那些条件苛刻的管道，如在高温下运行、立管不可接近或在环境敏感区域的管道，可配备长效阴极保护检测设施。对于这些管道，可使用多个设备，比如长效参比电极，与管道电连接的钢试样，电流试样(裸钢或带涂层)以及阳极电流检测分流器。

D.4.3.2.2 监控装置宜通过电缆连接或者声波传输到上部设施数据记录器上。宜考虑声波传输装置的电池寿命、造价和可行性。

D.4.3.2.3 声波传输设备需要电池，且需要人工查询。

D.4.3.2.4 长效监测设施更适合于立管或距离平台或距离海岸线较近的管道。

D.5 阳极电流测量

D.5.1 电流密度和电场梯度的测量可被用来验证未埋设管道上的牺牲阳极是否有效。对于埋地管道，阳极定位会更受限制，同时宜考虑定位跟踪、埋设深度和电流泄漏。如果可以高精度测量电场或电流的大小和方向，就可计算输出的阳极电流。

D.5.2 有几种技术可用于在线测量牺牲阳极电流的输出。这样的数据可用来计算阳极的剩余寿命并用于优化未来的设计。

D.6 调查

D.6.1 综述

D.6.1.1 对于主管线或其他关键管线在安装过程中或安装后应进行水下的目视观测以确定阴极保护

系统是否受到破坏。本次调查可包括确定沿管线长度的管道电位、由现场梯度测量得出的牺牲阳极输出电流和涂层状况的评估。如果牺牲阳极阴极保护系统的基线检测证实防腐系统作用与设计的一致，则最近几年没有必要对本管道进行下一次阴极保护系统调查。

D.6.1.2 现有检查结果宜用于规划未来的检查。应关注前期调查中缺少阴极保护或阴极保护不足的区域以及阳极或涂层损坏的区域。

D.6.1.3 对于已确认或疑似保护水平不足的管道，应增加全管段或局部调查频率，包括以下情形：

a) 在原来设计中的已知缺陷；

b) 管道或阴极保护系统的损坏；

c) 来自第三方的干扰破坏；

d) 管道年限已经接近阴极保护系统的设计年限时，计划超期服役。

D.6.1.4 如无法定期调查，调查可用采样基础替代。

D.6.1.5 埋地管道一般难以调研涂层状况和阴极保护设施的损坏情况，尤其难以对阳极进行目视检查。宜考虑埋设管道的风险评估。

D.6.2 方法

D.6.2.1 可采用不同的调查方法，包括但不限于直接连接管道的电位测量或与管道固定距离的两个或多个参比电极的现场梯度测量。

D.6.2.2 最完整和准确的电位测量的系统是使用潜水员或 ROV 沿管道使用带有尖端触点的阴极保护探针和一个内置参比电极，定点读数。这些通常被称为“触点”读数。挂片的安装宜考虑确保测量的准确性。衰减模型可用来预测连续测量点之间的电位分布。

D.6.2.3 对于具有配重且涂层状况良好的管道，此技术的作用是非常有限的，阳极读数不能反应保护水平。

D.6.2.4 一种采用与管道有已知距离的固定参比电极阵列的调查方法克服了无法与管道直接接触的问题。阵列应安装在 ROV 上，在可测量的距离部分有两个或更多的参比电极。ROV 应沿管道在一个固定的距离移动，并且应测量管周围由于海水中的阴极保护电流形成的电场的梯度。利用计算机软件，这些测量可转换成管道-海水电位并确定沿管道的电位分布。电场梯度测量可用于评估阳极和管道电流密度的水平，并用于定位涂层上的缺陷。

D.6.2.5 由船舶拖行，利用水下传感器或探头调查是一种不太准确的调查方法。本方法通过牵引电线连接到陆上或者立管的管道上实现电连接。船舶应携带探头，沿着管道路由行进。管道相对于安装在探头上的参比电极的电位应连续测量。电位测量的精确度是由相对于该管道的探头的位置来确定，因此该方法优势不明显。

D.6.2.6 如果潜水员或遥控潜水器正在对管道执行其他活动，如连接作业，检查跨越，维修或重新埋设时，宜同时收集阴极保护数据。

D.6.2.7 如果管道的保温系统进水，则阴极保护就可能会失效。宜考虑智能清管等评估管道腐蚀的其他手段，并制定相应调查计划。

D.7 外加电流系统部件的检查

D.7.1 应每年检查外加电流电源六次且间隔不超过 2.5 个月。应测量输出电压和电流，其数值应接近调试后确定的数值。

D.7.2 反向电流开关，二极管和干扰跨接的失效将危及管道保护，应每年开展六次检查且间隔不超过 2.5 个月。

D.7.3 应每年检查一次外加电流系统设施，间隔不超过 15 个月，以尽量减少设备故障。检查项目宜包

括电气短路，接地连接，仪表精度，设备效率和电路电阻检查。

D.7.4 应定期调查并评估电绝缘/电连接装置的有效性。

D.8 安全

D.8.1 当潜水员在由外加电流阴极保护系统保护的管道上工作时，应执行相关法定的安全规定。主要的危险可能来自任何阴极保护系统，外加电流系统的危险一般限于物理障碍、触电和易燃、有毒或压力危险。

D.8.2 当进行与阴极保护系统不直接相关的操作以及进行接近外加电流阳极的潜水检查时应关闭阳极的直流电源。在遵守所有的安全规定和注意事项的前提下，也可在外加电流系统正常工作的时候进行阴极保护的潜水检查。

D.9 文件

D.9.1 检测报告应包含测量程序，位置和结果和来自安装的在线监测系统的数据。

D.9.2 宜保存定期检查和在线监测的历史数据，以利用专业软件分析日渐明显的长期趋势。

D.9.3 在数据被处理和解释的时候应提供一个检测调查报告，并宜包括以下内容：

a) 已实施的操作描述；
b) 所使用的监控设备的技术特性和运行参数；
c) 数据变更记录；
d) 沿管道里程的管道电位曲线图；
e) 测得的场梯度(必要时)；
f) 测量电阻率值(必要时)；
g) 纸质或电子记录；
h) 所记录的数据与以往调查记录的比较。

附 录 E
（规范性附录）
牺牲阳极电化学性能的实验室测试

E.1 范围

本实验室测试程序宜用于牺牲阳极生产期间铝和锌材料的质量控制。实验结果不宜用于阴极保护的设计，因为从短期测试中得到的电化学数据可能不代表长期性能。

E.2 试件的取样和准备

E.2.1 除非另有规定，每 15 t 阳极产品应进行阳极电位和电容量等电化学性能质量控制。

E.2.2 实验样品可从每批阳极产品中切出或单独浇铸。注铸样品有可能最具有代表性。

E.2.3 试样应为圆柱形，直径为(10±1)mm 和长度为(50±5)mm。在整个准备和测试期间都应有标识标志。

E.2.4 应在实验样品上钻一个直径约 2 mm 的圆孔，末端攻螺纹并连接到一个钛支撑杆上，钛支撑杆浸泡于测试溶液中的部分应涂敷绝缘涂层。

E.2.5 在浸泡之前，应将试样用自来水中漂洗，用乙醇或等效物干燥并称重，精确到 0.1 mg。

E.2.6 安装在支承杆上后，试样端部应用合适的化合物包衣如聚氯丁二烯胶或硅橡胶进行密封。

E.3 设备和实验步骤

E.3.1 测试溶液应为天然海水或按照 GB/T 17848 规定的人工海水中。每个测试样品应使用至少 10 L 的测试溶液。应向该试验溶液通入空气连续吹扫，保持测试时间内温度保持在 20 ℃±3 ℃。

E.3.2 每个样品应悬挂在未涂敷涂层的圆柱形钢制容器或管段的中心，润湿表面应至少为 20 倍的阳极试样面积，即最低 400 cm^2。

E.3.3 应通过恒定直流电源进行恒流控制。阳极试样和钢阴极应分别连接到正和负端。多个测试单元可串联连接于一个直流源。含有一个或多个串联排列的测试单元的电路中应安装总输出电流精度到±2%的铜库仑电流积分器或其他电子设备。

E.3.4 基于初始浸泡试样表面积，按照以下方案，应调整通过测试单元的电流以提供阳极的电流密度：

——第 1 天：1.5 mA/cm^2

——第 2 天：0.4 mA/cm^2

——第 3 天：4.0 mA/cm^2

——第 4 天：1.5 mA/cm^2

24 h±1 h 内电流密度精度应控制至±0.1 mA/cm^2，总测试时间为 96 h±4 h。

E.3.5 在每个测试周期结束时，每个样品应在三个位置测量阳极电位。应使用一个带有电解液桥(如毛细管)的标准参比电极。桥的端部应定位在样品表面 1 mm 以内，样品在测量前不应清洗腐蚀产物。

E.3.6 一个完整的测试周期完成后，应清洗样品的腐蚀产物。样品铝应在 80 ℃的三氧化铬(浓度 20 g/L)和浓磷酸(体积浓度 3%)混合溶液中清洗 10 min。样品锌应在环境温度下浸泡在饱和氯化铵溶液中 2 h。试样应采用自来水冲洗，用乙醇或同等物干燥，称重精确到 0.1 mg。阳极电容量用式(E.1)计算：

$$\varepsilon = Q/\Delta m \qquad \cdots\cdots (E.1)$$

式中：

ε ——电容量，单位为安培小时每千克(A·h/kg)；

Q ——总电荷，单位为安培小时(A·h)；

Δm ——减少的样品质量，单位为千克(kg)。

E.4 验收标准和重新测试

在未能满足指定要求的情况下，不满足要求的每炉可选3个样品进行重新测试。这三个样品中任何一个不满足指定的要求则宜拒收该炉所有的阳极或根据生产前约定执行。

E.5 文件

实验报告应包含的以下内容：

a) 实验材料数据，包括熔炼炉号，化学组分和铸造数据；

b) 样品准备，试验设备和程序；

c) 记录的电位，用表格的形式；

d) 阳极质量损失和总电荷；

e) 计算的阳极电容量。

附 录 F
（资料性附录）
干 扰

F.1 概述

F.1.1 本附录为管道交流直流干扰电流的检测和控制指南。

F.1.2 干扰电流对水下管道造成的腐蚀不同于其他原因造成的腐蚀损害是由于造成腐蚀的电流来源不是来自于所影响管道。典型的干扰电流源是直流电力电缆，焊接，直接电加热系统和不相关的外加电流系统。牺牲阳极系统不会对邻近的结构造成干扰电流问题。干扰电流的不利影响发生在管道和电解质(海水或海床)之间的电流传输的地方。

F.2 干扰电流的控制

F.2.1 在怀疑干扰电流存在的地方宜进行测试。测试的类型取决与水的深度和管道的可操作性。可采用以下方法的一种或几种的组合：

a) 管道-电解质间电位的测量用记录或显示仪表，利用场梯度或类似的连续电位测量技术。

b) 测量干扰电流可疑源的输出电流的变化，并且与用上述方法获得的测量数据相关联。

F.2.2 埋地管道的干扰电流腐蚀可能是由与管道非电连接的相邻其他结构引起。来自其他构筑物的电流在海水中通过一个低电阻路径进入管道。在干扰电流从管道流出进入电解质并回到其他结构的地方管道会发生加速腐蚀。

F.3 直流电流干扰

F.3.1 测量

F.3.1.1 在怀疑直流干扰电流存在的地方应进行适当的测试。宜采用以下测试方法中的一种或几种联合进行测量：

a) 管道电位，使用记录或显示仪表；

b) 挂片的电流密度；

c) 流过管道的电流，用记录或显示仪表；

d) 测量干扰电流可疑源的输出电流的变化，并且与用上述方法获得的测量数据相关联。

F.3.1.2 宜进行足够长时间的测试，以评估干扰水平的时间依赖性。时间依赖性是由调查的干涉现象的类型决定的。

F.3.1.3 阴极保护系统通电后宜测量来自其他水下管道或设施的干扰。宜进行如下的干扰测试：

a) 引起干扰的相关阴极保护电流源关断时测量其他管道与目标管道的管道-海水电位；

b) 其他管线和目标管线的阴极保护站通电时测量其他管道或设施的管道-海水电位。

F.3.1.4 外部管道或设施任何部分电位的平均变化不宜导致其他管道的电位超出保护范围。如果干扰导致阴极保护不满足标准要求，应采取补救行动以减少干扰到可接受的水平。

F.3.2 解决直流电流干扰腐蚀问题的一般方法

宜考虑以下方法来解决管道或其他水下结构的干扰问题：

a) 杜绝或限制干扰电流流经管道；
b) 通过管道和干扰电流源负极间的金属导体去除来自管道干扰电流不利影响；
c) 通过在受影响管道增加阴极保护抵消干扰影响；
d) 去除，移动或重新调整干扰电流源。

F.4 交流电流干扰

F.4.1 高压交流电源，例如动力电缆和管道的电阻加热系统，可能会对管道产生交流干扰。干扰程度取决于：

a) 周边交流电源；
b) 交流电压水平；
c) 交流电流水平；
d) 牺牲阳极的数量和位置；
e) 管道涂层的质量；
f) 管道和海水的电阻率。

F.4.2 交流对管道的干扰，尽管在海底管道中比较少见，如果不能有效缓解也会造成安全和腐蚀问题。

附 录 G
（资料性附录）
管道的阴极保护设计

G.1 概述

本附录涵盖了设计管道或立管外部腐蚀控制系统时宜满足的设计和安装细节，包含了不同类型和以不同安装方式安装的管道和立管的推荐做法。

由于暴露环境的不同，管道和立管可作为不同的独立的实体。管道通常是完全浸没在海水中或埋在海底，而立管可能部分埋设、淹没，并暴露在潮汐、飞溅和大气区。

G.2 管道安装方法

G.2.1 总则

水深、管道的长度和管径、地理位置以及经济评价是决定管道安装方法的主要因素。管道安装方式宜列入阴极保护设计考虑范畴。安装方式不宜破坏外部涂层或阴极保护部件。腐蚀控制系统如果在铺管船上安装完成，不宜影响管道的安装速率。

G.2.2 S 型铺设

G.2.2.1 牺牲阳极可在陆上预安装在单根管道上，如果不影响铺管速率，也可在海上完成。当管道移动通过托管架的时候不宜影响到阳极或阳极接线。节点涂层的选择、管道焊接后的涂敷以及涂层破损率宜考虑到节点涂层可达到的质量。

G.2.2.2 最常见的安装方法就是在安装之前在铺管船上通过焊接把管道连接起来。当铺管船向前移动时管道从铺管船后部通过托管架被水平送入，当管道沿海床被逐渐铺设的时候管道在海床和铺管船之间呈 S 形。节点涂层的质量可能对管道整体的初始损坏是一个很大的因素。

G.2.3 J 型铺设

G.2.3.1 J 型铺设方法通常在深水应用。这种方法涉及在铺管船后部部署垂直管的 J 型铺管框架。在该方法中管道承受了高水平的张力。在铺设前，管段（通常为四根）在铺管船甲板成型然后在 J 型铺设框架内竖直立起。因为它是从铺管船垂直下降，特殊 J 型铺设管卡以一定间隔焊接到管道上用于使铺管船能支持管道的自重。

G.2.3.2 管卡通常作为屈曲止屈器和牺牲阳极的安装点。镯式阳极可在陆上预安装或者在海上安装在四倍管节上。节点涂层可在铺管船的甲板上涂敷在四倍管节上，但是宜在 J 型铺设框架的垂直面上完成最后搭接。

G.2.4 卷筒式铺设

G.2.4.1 对于卷筒式铺设，单根管在陆上预焊接成长的管段。节点在陆上涂敷，然后管道在铺管船上卷到一个大卷筒上。

G.2.4.2 宜在卷筒的管道圈间设置隔板以减少由于管与管的接触造成的涂层的损坏。由于在卷曲过程中会产生高应力，镯式阳极不宜在陆上安装。

G.2.4.3　在管道铺设过程中管道被通常通过一个S型构造的托管架被解开。管道通过一系列滚轴使来自卷筒的管道变直。这种铺管方法的最大优势在于管道安装速度。

G.2.4.4　阳极的安装，当管道展开时在铺管船上完成，不宜对管道安装过程有影响。镯式阳极和阳极接头细节宜足够强韧以承受其越过托管架时所产生的力。

G.2.5　底拖铺设

G.2.5.1　底拖铺设安装方法仅适用于几千米长短管道的顺序安装。管道在一个沿海站点预制完成(包括节点涂层和阳极安装)。然后管道沿着海床从站点拖至安装地点。

G.2.5.2　宜使用耐磨的管道和节点涂层，阳极设计宜采取特别的预防措施。阳极附件详细资料宜提供机械稳定性，减少阻力，且使被刮蹭风险最小。

G.2.6　控制深度拖法

G.2.6.1　控制深度拖法减少了底拖安装的大部分顾虑，但是在计算浮力时应考虑阳极的质量及分布。

G.2.6.2　控制深度拖法与底拖法类似，所不同的是管道具有了浮力，通常通过排水、密封和在一定间隔增加临时浮力模块的方法。可变重量(通常为链)以一定间隔悬挂在管道上以抵消浮力并允许管道在两个船舶之间，漂浮在海床上方至控制深度。管道被拖到所需位置并下降到位。

G.3　管道和立管类型

G.3.1　管道

G.3.1.1　常规管道

常规的管道可安装或不安装水泥配重。管道采用埋设，开沟槽或直接铺设在海床上。管道通常通过镯式牺牲阳极、远地式阳极或位于管道端部的外加电流系统进行保护。

G.3.1.2　保温管道

G.3.1.2.1　为防止管道流体温度降到形成水合物或石蜡限制流动的温度点以下，可要求管道保温。管道保温系统有两种主要类型：或者几毫米的厚强韧的保温涂层直接涂敷在管道的外部，或管中管系统，在内管和外管的环形空间填充保温材料。在管中管系统，外管被完全密封以确保保温材料保持干燥。外部涂敷的保温涂层通常为聚丙烯-或聚氨酯系。可接受的低热传输特性可通过利用复合或泡沫材料，或两者混合来达到。

G.3.1.2.2　不同的阴极保护设置可包括：

a)　牺牲阳极直接连接到管道上；

b)　牺牲阳极夹在绝缘层外面通过电缆透过保温层与钢连接；

c)　牺牲阳极远离管道安装；

d)　外加电流系统；

e)　在保温层下热喷涂铝。

G.3.1.2.3　直接连接在管道上的镯式阳极会起到散热器的作用并会降低保温系统的整体效果。应当考虑操作温度变化对阴极保护的影响。

G.3.1.2.4　对于夹在绝缘层外面通过电缆透过保温层与钢连接的牺牲阳极，在安装过程中阳极有被移动的风险。在这种情况下，宜考虑利用阳极到保温层过渡椎体和不成比例的加长连接电缆。这种电连接宜采用四根电缆，两根用于每个带有连接在纵向相反方向引线的半手镯上。宜考虑电缆贯穿保温层所增加的完整性风险。

G.3.1.3 管中管系统

对于管中管系统，保温材料热传导率较低，但阻水性能不如湿式保温系统。在安装前内管宜涂敷保护涂层在全寿命周期内防止水进入内外管环空时保护管道，从而延长管道的寿命。外管的外表面宜与常规管道同样进行防腐保护处理。

G.3.1.4 管道束

G.3.1.4.1 管道束系统由多个小尺寸管道捆绑在一起构成，通常包括电力电缆，并通过拖拉方式安装。宜在管束的管线间提供介电间隔物。这些间隔物在建造或管束安装时不宜对管道涂层保护范围产生不利影响或加以损害。

G.3.1.4.2 可在某一条管道上安装所有的阳极块来保护管道束中的所有管道。在这种情况下，管道间应适当间隔并确保每条管道间充分的电连接。

G.3.1.5 柔性管

G.3.1.5.1 柔性管经常被用来作为海底组件和常规管道间短的搭接用。如果柔性管为完全的金属结构，宜确保柔性管、常规管道系统和海底组件间的电连续性。

G.3.1.5.2 对于由同心的非金属和金属鞘组成且最外层为厚非金属层，接头和节点间为金属的柔性管，阳极宜布置在金属的接头和节点处。

G.3.2 立管

G.3.2.1 标准的固定(静态)立管

G.3.2.1.1 固定立管可通过膨胀弯连接到管道端部，膨胀弯两端通过法兰连接。立管在不同深度被夹在主结构上。立管上可安装牺牲阳极或通过主结构或管道提供阴极保护。

G.3.2.1.2 如立管和管道需要与构筑物电绝缘，则所有的立管卡子需安装氯丁橡胶或类似的材料制成的绝缘内衬。绝缘衬里可安装在管道与卡子的界面或卡子与构筑物的界面。如果卡子与立管和结构均绝缘，则卡子上宜安装专用阳极。

G.3.2.1.3 如果阳极安装了绝缘法兰或绝缘接头，宜从接头两端提供测试引线，末端连接在耐候测试盒中。

G.3.2.2 拉管(J 型管)

G.3.2.2.1 深水固定/浮式平台可采用预安装的 J 型管以方便立管安装。J 型管用于拉升立管到平台并在平台寿命期内对立管起到机械保护作用。完成拉升后以及在后续的操作中，很难证明 J 型管对其中的管道立管部分防腐保护的有效性。

G.3.2.2.2 J 型管安装立管宜对高品质耐磨涂层系统进行保护，以尽量减少拉入期间对涂层的损害。当确定 J 型管中立管的阴极保护需求时宜对寿命期间的涂层损坏留足足够的裕量。其他的腐蚀控制措施，如缓蚀剂，可适用于 J 型管和立管之间的环形空间。

G.3.2.2.3 如果牺牲阳极需要用来保护 J 型管内部下端的立管，阳极宜安装在 6 点钟位置，以便不妨碍立管的拉升操作。

G.3.2.3 钢悬链线立管

G.3.2.3.1 钢悬链线立管可用于连接深水管道和浮式生产装置。立管悬浮在生产平台近水面处并从从平台悬下通过预定的链连到海床上的一个点并在这接触海床。这些立管系统在服役中可承受非常高的

力。支撑细节的某些部件可由高强度的材料,这些材料在高应力条件下对阴极保护是敏感的。宜考虑这种敏感性的程度(见表 1)。任何风险的识别可排除直接连接阳极到立管的链线部分。阳极可安装在立管的静态部分、上部主结构或下方的管道上,以保护链线部分。电位衰减建模可用来确定立管在不同阳极布置下保护传播的方向。

G.3.2.3.2 钢悬链线立管常配有边条来减少涡激振动的影响。边条下的阴极保护可能不会完全有效,宜在这些位置选择合适的保护涂层。

G.3.2.4 柔性立管

柔性立管通常与柔性管结构相同,柔性管相关要求也适用于柔性立管。

G.4 埋设与固定

G.4.1 总则

宜基于输送流体、操作温度以及当地的法规确定管道是否埋设以及在海床上的固定方式。埋设的程度以及用于稳定管道的措施宜考虑在设计以及阴极保护系统的有效性中。

G.4.2 埋设条件

G.4.2.1 裸露

G.4.2.1.1 铺设到海床上的管道可能裸露在海水中,在役期间可能对涂层和阳极的损害较敏感。

G.4.2.1.2 如果在该区域没有海底运动,管道和阳极设计时均宜考虑 100%裸露。如果在管道服役期间有证据显示存在海底运动,使得阳极可能会被沉积物覆盖(同时管道继续裸露或也被掩埋),这宜在阴极保护系统设计中考虑。

G.4.2.1.3 阴极保护设计的最糟情况是管道 100%裸露,阳极 100%掩埋;最好的情况是管道 100%掩埋,阳极 100%裸露。在部分掩埋的情况,实际情况介于这两个极端之间。

G.4.2.2 开放式沟槽

管道被铺设在预先挖好的沟槽中,随时间推移沟槽自然回填的方法称为开放式沟槽法。假设管道不受机械损伤,在阴极保护系统设计时,通常认为此管道设计与完全埋设管道一致,但宜结合当地自然埋设的现场经验进行评估。

G.4.2.3 挖沟并掩埋

G.4.2.3.1 管道挖沟埋设时,通常借助一个拖拽掩埋设备单程掩埋和回填管线。由于拖拽掩埋设备跨坐在管道上并沿管道运动,宜确保阳极无突出点以防止勾住拖拽掩埋设备。可使用全模制锥形阳极或配有钢筋铸件聚氨酯锥体的阳极来平滑交叉截面过渡等措施。

G.4.2.3.2 如果埋设管道可能发生裸露,则设计时宜考虑增加阳极总量。如果裸露风险较大,则设计中该埋设管道宜按裸露管道考虑。

G.4.3 固定方法

G.4.3.1 不稳定的管道

对于无配重的管道,阳极宜安装在腐蚀涂层的顶部。阳极连接的方法应足够强韧以承受管道铺设过程的受力。在铺设过程中,避免阳极打滑的方法包括使用锥形阳极或在阳极的两侧具有锥形端部的配件。

G.4.3.2 配重管道

G.4.3.2.1 在防腐层外面采用钢筋混凝土配重是大管径管道的标准程序。混凝土配重通过部分或全部埋设降低浮力并给管道提供额外的机械保护。

G.4.2.2.2 在牺牲阳极的安装期间，宜确保混凝土中的钢筋不会与管道本身或牺牲阳极电连接以避免屏蔽管道的保护电流。钢筋与管道或阳极相连接的，也可增加阴极保护设计中电流值以满足管道电流需求。如果带配重的管道采用S型或J型安装方法，阳极宜嵌入或与配重层齐平。或可考虑采用锥形阳极或配有钢筋铸件聚氨酯锥体的阳极来平滑交叉截面过渡，从而最大限度的减小铺设期间对阳极的损坏。

G.4.3.3 抛石

抛石是用岩石对裸露管道进行覆盖。如果推荐采用抛石作为稳定管道的方法，可预估到额外的涂层损坏和阳极损失，宜在阴极保护设计中体现这点。预制的柔性混凝土垫有时用来替代抛石稳定管道。许多新的设计在混凝土外面提供非金属的软覆盖物以进一步减少安装期间涂层的损坏风险。垫子可采用可控方式慢慢的放低到管道上。

G.4.3.4 管道锚

各种类型的管道锚可用于高流速区域，如靠近大河口区域，以及在某些北极地区。这些锚对阴极保护设计的影响宜认真评估，特别是如果使用钢桩的。如果预测到锚需要过大的电流量，宜单独为锚设置一个独立于管道系统的阴极保护系统。

G.5 管道跨越和海底连接

G.5.1 交叉

G.5.1.1 管道交叉处的阴极保护系统间会产生干扰。如果两条管道均是由牺牲阳极保护，通常做法是在交叉点两条管道间提供分离。

G.5.1.2 通常0.3 m的间隔是足够的，如果能够证明管线间阴极保护干扰不太明显，更小的间隔也是可接受的。

G.5.1.3 海床或管道随时间运动的风险宜通过在交叉点引入一个物理分隔屏障进行补偿。这个屏障可是一个混泥土垫，橡胶垫或沙袋。

G.5.2 海底连接

G.5.2.1 对于水下两个管道系统的连接，宜确保两个管道的阴极保护系统间不发生显著的干扰。

G.5.2.2 如果两个管道系统直接连接，宜考虑阴极保护系统的所有相关细节，如两个阴极保护系统中的任何一个都不能造成另外一个阴极保护系统电流的过度流失。

G.5.2.3 如果两个管道系统电绝缘，宜定期校验绝缘接头和靠近绝缘接头的阳极。宜考虑同时采用外加电流系统和牺牲阳极系统之间干扰的可能性。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
石油天然气工业海底管道阴极保护
GB/T 35988—2018
*
中 国 标 准 出 版 社 出 版 发 行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
网址:www.spc.org.cn
服务热线:400-168-0010
2018 年 2 月第一版
*
书号:155066·1-59882

版权专有 侵权必究

GB/T 35988-2018