牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

推荐实施细则

DNV-RP-B401

阴极保护设计

2005年1月

本推荐细则2005年1月出版以来已经修订。最近一次修订在2006年4月。
修订情况请见下页‘修订与更正’

Since issued in print (January 2005), this booklet has been amended, latest in April 2006.
See the reference to "Amendments and Corrections" on the next page.

挪威船级社

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

前言

挪威船级社（DNV）是一个自发建立的独立的组织，其宗旨在于保护海上和海岸生命、财产和环境安全。DNV 在全球范围内承担与船舶、海上设备装置以及海岸工业设施相关的分级、认证、和其他检定和咨询服务并开展与这些职能相关的研究工作。

DNV 海上法规由以下三个层次的文件构成：

- 海上服役技术条件。提供 DNV 分级、认证、检定和咨询服务的原理和程序。
- 海上标准。提供海上工业常用的技术规定和验收准则以及 DNV 海上服务的技术基础。
- 推荐实施细则。提供经验证的技术和可靠的工程实施细则以及对更高等级的海上服役技术条件和海上标准的指南。

DNV 海上法规致力于以下领域：

A） 资质、质量和安全方法学
B）材料工艺学
C）结构
D） 系统
E）特殊设施
F） 管路和提升设备
G） 资产运作
H） 海洋工作
I） 风力发电

修订和更正

本文件一直有效直至被新版本取代。次要修订和更正将发布单独的文件，通常每年两次（4 月和 10 月）。

对于修改的完整信息，请按以下途径查找‘Amendments and Corrections’文件：

http://www.dnv.com/technologyservices/, “Offshore Rules & Standards”, “Viewing Area”

网络版 DNV 海上法规将定期更新以便纳入这些修订和更正内容。

可以将意见用 e-mail 送交 *rules@dnv.com*

订单或预约信息请发 e-mail 到 *distribution@dnv.com*

有关 DNV 服务、研究和出版物方面的综合信息请网上见 *http*://www.dnv.com 或直接从 DNV 获取，地址：Veritasveien 1，NO-1322 Høvik, Norway; Tel +47 67 57 99 00, Fax +47 67 57 99 11.

©挪威船级社版权所有。没有DNV事先的书面同意，不得将本出版物的任何部分进行复制或传播，包括影印和录音。

只要由于DNV的任何不当或疏忽给任何人造成损失或伤害，DNV将负责赔偿直接损失。然而赔偿将不超过服务费用的10倍，而且最大赔偿额度将不超过2百万美元。在这个规定中DNV指DNV基金会以及它所有的分支机构、主管、高级职员、雇员、代理商、以及其他任何打着DNV旗号的单位和个人。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

2005 年 1 月版主要修改

○ 第 1 章 导言

- 将范围中的外加电流阴极保护删除。这样做的后果是推荐实施细则（RP）实际上不包括油气生产可移动装置的阴极保护（CP），但是如果选择了牺牲阳极，CP 还是可用的。

- 对 1993 年版 § 1.2.5 中的一般性条款进行了修订。

- § 1 的修订对本细则作为一种合同文件使用给予了详细的指导。在 § 7.1.2、§ 8.1.2 和 § 9.1.3 中分别进一步给出了供承包商参考的核对表、与 CP 设计规定、阳极制造和阳极安装相关的可选要求。

○ 第 2 章 引用文件

- 有几处修改，例如引用 NORSOK M-501.

○ 第 3 章 术语和定义

- 加入了一些在正文章节中定义的 CP 设计术语。

○ 第 5 章 CP 设计中一般需要考虑的问题（供参考）

- 一些参考性 CP 设计参数/计算公式移到了本章中。对正文中 CP 的 HISC（氢至应力开裂）问题进行了修订，特别是关于马氏体和铁素体-奥氏体（双相）不锈钢的，加入了 1993 年以后的经验。

○ 第 6 章 CP 设计参数

- 对 1993 年版 § 6.1.6 进行了修订。主要的一点是修订覆盖层类别，覆盖层类别从 4 类降到了 3 类并使在常用系统中的应用更为广泛。引用文件还是 NORSOK M-501 的系统 3B 和系统 7。对第III类覆盖层破坏时间计算的常数稍微作了减小处理。然而对于需要的阳极容量，对于通常在超过 100 米深度使用的覆盖层元件，通过提高设计电流密度进行了大量的补偿。对于设计电流密度，定义了两个更深的区域。这样做的效果在热带水域最为明显。

○ 第 7 章 CP 计算和设计程序

- 如 § 7.1.4 中所述，只对 § 7.8.6 的导言部分作了重要修订，对使用尺寸差异大的阳极作了告诫。

○ 第 8 章 阳极制造

- 与 1993 版比较本章更加全面。修改包括 ISO 15589-2 的阳极化学成分要求、质量控制和电化学测试验收准则延伸要求等。本章的基础是 NACE RP0387，没有重复该标准中的要求。

○ 第 9 章 阳极安装

- 与 1993 版比较本章有所扩展。然而对质量控制证明文件的许多补充要求都是可选的。

○ 附录 A 图和表

- 见以上对 § 6 和 § 8 章的评述。

○ 附录 B 质量控制之牺牲阳极材料实验室测试

- 只有次要修订，见 § 11.1.4.

○ 附录 C 牺牲阳极材料电化学性能评定之实验室测试

- 只次要修订，见 § 12.1.4.

目 录

前言.....2
修订和更正.....2
1 概述.....6
1.1 引言.....6
1.2 范围.....6
1.3 目的和运用.....7
1.4 文件结构.....7
1.5 与其他 DNV 文件的关系.....7
2 引用文件.....7
2.1 概述.....7
2.2 ASTM 标准.....7
2.3 DNV 标准.....7
2.4 EN 标准.....7
2.5 NORSOK 标准.....8
2.6 ISO 标准.....8
2.7 NACE 标准.....8
3 术语和定义.....8
3.1 术语.....8
3.2 定义.....8
4 缩写词和符号.....9
4.1 缩写词.....9
4.2 符号.....9
5 阴极保护设计一般需要考虑的问题（仅供参考）.....11
5.1 概述.....11
5.2 阴极保护的限制性.....11
5.3 影响阴极保护的环境参数.....11
5.4 保护电位.....12
5.5 阴极保护的有害作用.....12
5.6 牺牲阳极材料.....13
5.7 阳极几何形状和固定装置.....14
5.8 与阴极保护相结合的涂层的使用.....14
5.9 电连续性和电流消耗.....15
6 阴极保护设计参数.....15
6.1 概述.....15
6.2 设计寿命.....15
6.3 设计电流密度.....16
6.4 阴极保护设计的涂层击穿系数.....18
6.5 牺牲阳极材料设计参数.....19
6.6 阳极电阻公式.....20
6.7 海水和沉积物电阻率.....20
6.8 阳极利用系数.....20
6.9 电耗设计参数.....20

7 阴极保护计算和设计程序.....21
7.1 概述.....21
7.2 阴极保护对象的细分.....21
7.3 表面面积计算.....21
7.4 电流需求计算.....22
7.5 电耗计算.....22
7.6 阳极类型的选择.....22
7.7 阳极质量计算.....23
7.8 阳极数量的计算.....23
7.9 阳极电阻的计算.....24
7.10 阳极设计.....25
7.11 阳极的分布.....25
7.12 电连续性规定.....26
7.13 文件.....26
8 阳极制造.....26
8.1 概述.....26
8.2 制造工艺规范.....27
8.3 试生产评定试验.....28
8.4 生产的质量控制.....28
8.5 阳极插件的材料、制造和阳极的铸造.....29
8.6 阳极的检查和试验.....29
8.7 文件和标记.....30
8.8 阳极的搬运、储存和运输.....31
9 阳极的安装.....31
9.1 概述.....31
9.2 安装工艺规范.....31
9.3 安装资质.....32
9.4 阳极的接收和搬运.....32
9.5 阳极安装和电连续性规定.....32
9.6 阳极安装的检查.....32
9.7 文件.....32
10 附录 A—图表数据.....32
10.1 图表数据.....32
11 附录 B—牺牲阳极材料质量控制的实验室试验.....36
11.1 概述.....36
11.2 试样的取样和处理.....36
11.3 设备和实验程序.....36
11.4 验收标准和重新试验.....38
11.5 文件.....38
12 附录 C—牺牲阳极材料电化学性能评定的实验室试验.....39
12.1 概述.....39
12.2 试样的取样和处理.....39
12.3 设备和试验程序.....39
12.4 文件.....40

1 概述

1.1 引言

1.1.1 ‘阴极保护（CP）’可以定义为‘通过将腐蚀电位降低到金属腐蚀速率显著降低的水平所进行的电化学保护（ISO 8044）’或‘通过将金属表面变成电化学电池阴极来降低金属表面腐蚀的一种技术（NACE RP 0176）’等。将腐蚀电位降低到一个更负电位的过程被称为‘阴极极化’。

1.1.2 对于牺牲阳极 CP 系统，电化学电池的阳极是一个电化学活性的合金（通常为铝、锌或镁基合金）。这种阳极还是 CP 系统的电流源并且将被消耗掉，它通常被称为‘sacrificial anode（牺牲阳极）’，在本推荐实施细则中则一贯被称为‘galvanic anode（牺牲阳极）’。对于外加电流阴极保护，使用的是惰性（非消耗）阳极，而电流由一台整流器提供。在本推荐实施细则中，电化学电池的阴极（即接受阴极保护的构件、子系统或元件）被称为‘保护对象’。

1.1.3 对于永久性安装的海上构件，最好使用牺牲阳极。这种设计简单，系统结构牢靠，不需要外加电源。此外，在运行期间的检查和维护仅限于定期外观检查阳极的消耗和腐蚀分解情况。然而，由于存在重力和牺牲阳极的拖曳力，有时选择用外加电流阴极保护代替牺牲阳极保护用于永久安装的漂浮结构。

1.1.4 阴极保护适用于常用于水下应用的所有类型的金属和合金。它可以防止局部形式的腐蚀和均匀腐蚀侵蚀并消除具有不同电化学特性的金属材料组合可能产生的电偶腐蚀。然而，阴极保护可能有一定的有害作用，例如在§5.5 中描述的某些高强度合金的氢致开裂和覆盖层脱落。

1.1.5 阴极保护主要设计用于永久性暴露在海水或海洋沉积物中的金属表面。而且，阴极保护对防止潮差区任何严酷的腐蚀通常充分有效并对被海水间歇浸湿的表面有降低腐蚀的效果。

1.2 范围

1.2.1 本推荐实施细则的编制在于方便利用铝基或锌基牺牲阳极进行阴极保护总体设计和详细设计并对制造和安装这种阳极进行了规定。与此同时，要求和建议都是一般性的，本文所含关于怎样修正的忠告可以写进项目特殊要求。本推荐实施细则还便于管理机关修改要求和指南，或反映业主对于腐蚀控制的总体原则。

1.2.2 在§5、6、7 章中的某些设计建议和方法还适用于使用其他电流源如镁阳极和整流器（即外加电流）的阴极保护系统。

1.2.3 本推荐实施细则主要设计用于永久性安装的与石油和天然气生产相关的海上结构的阴极保护。用于石油和天然气生产的诸如半潜式、支柱式和单体船舶式可移动装置不包括在本文范围内。然而使用者可以自行决定这种结构是否也可以本推荐实施细则相关部分的牺牲阳极保护。

1.2.4 阳极固定装置结构完整性详细设计不包含在本推荐实施细则内。对与牺牲阳极制造和安装相关安全和环境危害问题的考虑也不在本细则范围内。

1.2.5 与 1993 版的 DNV-RP-B401 比较，从 2004 版起删除了有关外加电流阴极保护设计内容，同时使关于阳极制造和安装的章节更加全面。海底管道的阴极保护也排斥在范围之外（见§1.5）。然而，只要元件与结构性碳钢主要表面是电学连接的，本细则适用于安装在井口基

盘总管上的管道系统、提升机底座和其他海底结构。

在本版本中，指导和解释性说明写在§6、7、8 和附录 B、C 相关章节的‘指导性说明'之下。（大多数指导性说明是以 1993 版 DNV-RP-B401 中的问答和对其应用其他实践经验为基础的。此外，老版本中的一些资料性正文也被写入了这种说明中）。

与§6 相关的所有表格和图形都纳入附录 A。文件进行了进一步的修订以便于买方向承包方传达规范信息，文件加入了与阴极保护设计和阳极制造和安装相关的可选要求（见§1.3）。在本 2004 版中对修订的附加注释写在§6、7、8 和附录 B、C 的引言段落中（最后一段）。

1.3 目的和运用

1.3.1 本细则有两个主要目的。它可以用作为业主或承包商进行阴极保护总体设计和详细设计的一个指南和用作为牺牲阳极制造和安装技术要求的指南。它还可以用作为这种工作询价或采购合同技术要求的一个附件。如果买方选择在采购文件中引用本推荐实施细则，除非在具体的合同中进行了修正和背离说明，承包方应认为本细则第 6 至 9 章中的所有要求都是强制性的。在采购文件中引用本细则也就引用了 DNV-RP-B401 适用的活动，即第 6 和第 7 章中的阴极保护设计、第 8 章中的阳极制造和/或第 9 章中的阳极安装。

1.3.2 阴极保护设计、阳极制造和阳极安装典型地由三个不同的团体来进行（它们都被称为‘承包商’）。不同的团体之间签合同（即充当‘买方’）也适用，后者包括‘业主’，例如对阴极保护设计和牺牲阳极材料资质审查。对签约各方的定义和相关术语见第 3 章。

1.3.3 项目具体信息规定和阴极保护详细设计、阳极制造和阳极安装的可选要求分别在§7.1.2、§8.1.2 和§9.1.3 中说明。

1.4 文件结构

1.4.1 与阴极保护总体设计和详细设计相关的指南和要求写在第 5、6、7 章，而牺牲阳极制造与安装分别写在第 8 和第 9 章。阴极保护设计列表数据被编辑到附录 A 中，附录 B 和附录 C 分别为阳极材料生产质量控制和长效电化学性能文件证明的实验室试验推荐程序。

1.5 与其他 DNV 文件的关系

1.5.1 海底管道的阴极保护问题在 DNV-RP-F103 中阐述。

2 引用文件

2.1 概述

以下标准（§2.2-§2.7）被引用到本推荐实施细则中，最新版本适用。

2.2 ASTM 标准

ASTM G8	管道涂层阴极剥离试验方法
ASMT D1141	海洋海水代用品技术要求

2.3 DNV 标准

DNV-RP-F103	海底管道牺牲阳极保护

2.4 EN 标准

EN 10204	金属产品—检查文件的类型

2.5 NORSOK 标准

NORSOK M-501	表面处理和保护性涂层标准

2.6 ISO 标准

ISO 3506	耐腐蚀不锈钢紧固件的力学性能
ISO 8044	金属和合金的腐蚀 基本术语和定义
ISO 8501-1	钢基体涂料和相关产品施工前处理—表面清洁度的目视评价 第 1 部份：无覆盖层钢基体的锈蚀等级和处理等级
ISO 10005	质量管理—质量计划指南
ISO 10474	钢和钢产品—检查文件

2.7 NACE 标准

NACE RP0176	石油生产固定式海上钢结构的腐蚀控制
NACE RP0387	海用铸造牺牲阳极的冶金学和检查要求

3 术语和定义

3.1 术语

业主/Owner	法律上负责接受阴极保护的对象的设计、建造和运行的当事方。
买方/Purchaser	为阴极保护设计、阳极制造和阳极安装签发询价书或合同或指派代表的当事方（业主或主承包商）。
须/Shall	指强制性要求。
应/Should	指最佳做法。
可/May	指许可的做法。

协议的，协议/agreed, agreement 指买方与承包方之间签订的书面协议（例如‘按合同中的规定’）。

报告和通知/report and notify 系承包商书面表达的形式。

认可的，认可/accepted，acceptance 指买方书面表达认可或确认。

证书，持证的/certificate, certified 指由承包商或金属材料供应商按 EN 10204:3.1B、ISO 10474:5.1-B 或等同形式签发的对指定性能进行确认的文件。

采购文件/purchase document(S) 指相关询价/投标或采购/合同规格书。

3.2 定义

为了遵照下面的技术条款，以下文本中的定义适用：

阴极保护/cathodic protection（§1.1.1）；牺牲阳极/galvanic anode（§1.1.2）；保护对象/protection object（§1.1.2）；极化/polarization（§1.1.1）；石灰质垢/层/calcareous scale/layer（§5.5.13）；阴极剥离/cathodic disbondment（§5.5.1）。

括号中指引用的相关章节。

对于适用于质量控制和阴极保护设计参数的条款请参见在缩写词列表（§4.1）和符号

列表（§4.2）中提到的有关章节。

4 缩写词和符号

4.1 缩写词

CP	阴极保护
CR	让步申请书（§8.5.6）
CRA	耐蚀合金
CTOD	裂纹尖端开裂位移
DC	直流电流
DFT	干膜厚度
HAZ	热影响区域
HISC	氢至应力开裂（§5.5.3）
HV	维氏硬度
ITP	检查和试验大纲（§8.4.2）
IPS	安装工艺规范（§9.2）
MIP	制造和检查大纲（§8.4.2）
MPS	制造工艺规范（§8.2）
NDT	非破坏性试验
PQT	生产评定试验（§8.3）
PWHT	焊后热处理（§5.5.7）
ROV	遥控运载工具
RP	推荐实施细则
SCE	标准甘汞电极（）§6.1.5
SMYS	规定最低屈服强度
UNS	统一编号系统
WPS	焊接工艺规范
WPQT	焊接工艺评定试验
YS	屈服强度

4.2 符号

A（㎡）	阳极表面面积（表 10-7）
A_c(㎡)	阴极表面面积（§7.4.1）
a	涂层击穿系数常数（§6.4.2）
b	涂层击穿系数常数（§6.4.2）
C（Ah）	与阳极材料的质量控制试验相关的电流负荷（§11.3.10）

c(m)	阳极横截面周长（表 10-7）
C_a（Ah）	（单体）阳极电流容量（§7.8.2）
$C_{a\,tot}$（Ah）	总阳极电流容量（§7.8.2）
E_a^o（V）	设计闭路阳极电位（§6.5.1）
E_c^o（V）	设计保护电位（§7.8.2）
E'_c（V）	整体保护电位（§6.3.4）
E'_a（V）	（实际）阳极闭路电位（§6.3.4）
$\triangle E^o$（V）	设计驱动电压（§7.8.2）
ε （Ah/kg）	阳极电化学容量（§6.5.1）
f_c	涂层击穿系数（§6.4.1）
f_{ci}	初期涂层击穿系数（§6.4.4）
f_{cm}	平均涂层击穿系数（§6.4.4）
f_{cf}	后期涂层击穿系数（§6.4.4）
I_a（A）	（单体）阳极电流输出（§7.8.2）
I_{ai}（A）	（单体）初期阳极电流输出（§7.8.2）
I_{af}（A）	（单体）后期阳极电流输出（§7.8.2）
$I_{a\,tot}$（A）	总阳极电流输出（§6.3.4）
$I_{a\,tot\,i}$（A）	初期总电流输出（§7.8.4）
$I_{a\,tot\,f}$（A）	后期总电流输出（§7.8.4）
I_c（A）	电流需要量（§7.4.2）
I_{ci}（A）	初期电流需要量（§7.4.2，§6.3.1）
I_{cm}（A）	平均电流需要量（§7.4.2）
I_{cf}（A）	后期电流需要量（§7.4.2）
i_c（A/㎡）	设计电流密度（§6.3.1）
i_{ci}（A/㎡）	初期设计电流密度（§6.3.1）
i_{cm}（A/㎡）	平均设计电流密度（§6.3.5）
i_{cf}（A/㎡）	后期设计电流密度（§6.3.1）
L（m）	阳极长度（表 10-7）
M_a（kg）	总阳极净质量（§7.7.1）
m_a（kg）	（单体）阳极净质量（§7.8.3）
m_{ai}（kg）	初期（单体）阳极净质量（§7.9.3）
m_{af}（kg）	后期（单体）阳极净质量（§7.9.3）
N	阳极数量（§7.8.1）
r（m）	阳极半径（表 10-7）

R_a（ohm） （单体）阳极电阻（§6.6.1）

R_{ai}（ohm） 初期（单体）阳极电阻（§7.9.2）

R_{af}（ohm） 后期（单体）阳极电阻（§7.9.2）

$R_{a\,tot}$（ohm） 总阳极电阻（§6.3.4）

S（m） 阳极长度和宽度的算术平均值（表 10-7）

ρ（ohm.m） 海水/沉积物电阻率（§6.7.1）

t_f(years) 设计寿命（§6.4.4）

u 阳极利用系数（§6.8）

△w（g） 与阳极材料质量控制试验相关的重量损失（§11.3.10）

5 阴极保护设计一般需要考虑的问题（仅供参考）

5.1 概述

5.1.1 本章主要讲与阴极保护总体设计相关的问题，包括阴极保护与金属材料和覆盖层的相容性。本章的内容是参考性质的，想为业主们和它们的承包商在进行阴极保护总体设计和详细设计时提供一个指南。如果本细则被引用到合同文件中，本章所涉及的内容都不能被认为是强制性的。

5.1.2 与本细则的 1993 版比较，本 2004 版对§5.5 由重大修订。

5.2 阴极保护的限制性

5.2.1 对于碳钢和低合金钢，阴极保护被认为是腐蚀控制的一种方法，而不是提供免蚀性（§1.1.1）。可以理解为对于有非常大尺寸公差的元件，例如与海底生产系统相关的密封组件，阴极保护并不是耐蚀合金的替代。

5.3 影响阴极保护的环境参数

5.3.1 影响阴极保护处的重要海水参数有：

- 溶解氧含量
- 海流
- 温度
- 海洋生物
- 盐度

此外，海水 PH 值变化和碳酸盐含量被认为是影响与阴极保护相关的石灰质层形成的因素，裸金属表面需要到达电流来维持阴极保护。在海底沉积物中，主要参数是：温度、细菌类生物、盐度和沉积物粒度。

5.3.2 上述参数相互关联并且随地理位置和海洋深度而变化。要给出上述海水环境与达到并维持阴极保护所需阴极电流之间的精确关系是行不通的。为了使海洋中的阴极保护设计合理化，本细则根据 1）气候区域（与海水表面平均温度相关）和 2）海水深度定义了默认设计电流密度 i_c（A/㎡）。环境海水温度和盐度决定具体的海水电阻率 ρ（ohm.m），它被用于计算阳极电阻 R_a（ohm），R_a（ohm）是阳极电流输出的一个控制因素。

5.4 保护电位

5.4.1 相对于 Ag/AgCl/海水参比电极-0.80V 的电势通常被视作为碳钢和低合金钢的设计保护电位 E_c^o（V）。细则主张厌氧环境包括典型的海底沉积物环境采用-0.90V 的设计保护电位。然而在本细则中，不打算在设计程序中将保护电位作为一个变量。

5.4.2 对于一个正确设计的牺牲阳极阴极保护系统，设计寿命的主要阶段的保护电位应在-0.90 至-1.05（V）之间，在服役寿命的末期电位迅速上升到-0.80（V），最终甚至不是负值，被称为是‘欠保护（under-protection）’。术语‘过保护（over-protection）’只适用于保护电位比-1.15（V）更负的情况，这种电位不适用于铝基或锌基牺牲阳极阴极保护系统。

5.5 阴极保护的有害作用

5.5.1 伴随阴极保护将在被保护对象表面产生氢氧根离子和氢气。这些产物可导致非金属涂层剥离，机理包括在金属/涂层界面的化学溶解和电化学还原过程，可能还有在该界面上的氢压积累。涂层劣化的这个过程被称为‘阴极剥离’。在容纳热介质的元件表面，该过程将被传到金属/涂层界面热流加速。

5.5.2 涂在耐蚀合金机加面或交货状态表面上的涂层特别倾向于阴极剥离。然而通过表面处理达到一个最佳表面粗糙度，当用于耐蚀合金以及碳钢和低合金钢时，某些涂层体系（例如环氧基或聚氨酯基的）显现出了良好的抗牺牲阳极阴极保护阴极剥离性能。对于与牺牲阳极阴极保护的相容性没有充分文件证明的涂层体系，业主应考虑进行评定试验，包括抗阴极剥离的实验室试验。船舶漆的抗阴极剥离试验已经标准化，例如在 ASTM G8 中。

5.5.3 阴极保护将导致在金属表面形成原子氢。在铝基或锌基阳极的阴极保护电位范围内（即-0.80 至-1.10V ，Ag/AgCl/海水参比电极），朝负电位极限氢的生成按指数规律增加。氢原子可相互结合形成氢分子，也可被金属基体吸收，在后一种情况中，氢可与元件的显微组织相互作用产生高应力导致引发和产生氢至裂纹，这里被称为‘氢至应力开裂（HISC）’。

5.5.4 对于所有实际应用，奥氏体不锈钢和镍基合金钢通常被认为在溶解退火状态对 HISC 是免疫的。除 UNS S30200（AISI302）和 UNS S30400（AISI304）不锈钢以外，中等冷作不会诱发这些材料的 HISC 敏感性。相同情况适用于按照适当程序进行的焊接或热成型。按照 ISO 3506-1，A4 材质，80 或更低性能等级（SMYS≤640MPa）制作的 AISI 316 不锈钢螺栓被证明与牺牲阳极阴极保护相容。

5.5.5 对于某些镍基合金（即奥氏体合金，包括例如 UNS N05500 和 N07750），沉淀硬化可诱发对 HISC 的高度敏感。对于沉淀硬化奥氏体不锈钢，磁化率低且硬度最大 300HV 可被认为是合理的安全极限，如果材料的硬度高于 350HV，通常应避免作接受阴极保护的任何元件。在中间硬度范围（即 300 至 350HV），在设计中应采取预防措施来避免局部屈服和/或指定一个合格的涂层体系作为避免通过阴极保护吸收氢的屏障。为此目的的涂层资质应包含在环境效果（包括阴极保护和任何内在加热）中服役的抗剥离证明文件。

5.5.6 根据实践经验，规定最低屈服强度（SMYS）至少达到 500MPa 的铁素体和铁素体-珠光体结构钢已经被证明与海洋阴极保护系统相容。（然而实验室实验已经证明在极端屈服条件下对 HISC 敏感）。建议所有焊接采用经评定的程序，用 350HV 作为绝对上限。采用范围在 300 至 350HV 的一个经评定的最大硬度，设计方法应避免局部屈服并采用一个可靠地涂层体系作为防止阴极保护诱导吸氢的屏障。

5.5.7 对于马氏体碳钢、低合金钢和不锈钢，已经遇到过阴极保护诱导 HISC 事故，包括实际屈服强度和硬度分别为大约 700MPa 和 350HV 的材料。广泛认为未经回火的马氏体特别倾向于 HISC。对形成马氏体敏感的材料焊接随后应进行焊后热处理来减小热影响区硬度和

焊接残余应力。同样的建议对硬度极限和铁素体刚设计适用（§5.5.6）。热处理到 SMYS 达到 720MPa 的马氏体钢螺栓（例如 ASTM A182 材质 B7 和 ASTM A320 材质 L7）有很好的文件证明与阴极保护相容。然而还是出现了由于热处理不充分产生的事故，对于关键性应用，建议分批试验来验证 350HV 的最大硬度规定。

5.5.8 铁素体-奥氏体（双相）不锈钢应被认为对 HISC 具有潜在的敏感性，不依赖于规定最低屈服强度（典型的为 400 至 550MPa）或规定最大硬度。焊接可导致焊缝金属和邻近熔合线的热影响区的 HISC 敏感性增加。这与铁素体含量增加的关系胜于硬度。因此焊接评定应证明焊缝和热影响区内（大约 0.1mm 宽？）的最高铁素体含量能够得到有效控制；典型规定为最大含量 60 至 70%. 锻件比锻造材料更倾向于 HISC，由于锻造过程给 HISC 在铁素体相显微组织中传播提供了良好条件。当用作为海底装置的生产控制管路时，小直径的冷弯管（无涂层和采用机械连接（即无焊接）的）已经有被证明对阴极保护相容的记录。设计预防措施应包括 1）避免局部塑性屈服的措施和 2）采用经评定耐机械剥离和物理/化学作用等的涂层体系。

5.5.9 铜基和铝基合金通常被认为是对 HISC 免疫的，与制造模式无关。对于高强度钛合金，文件有限，应作专门的考虑（例如评定试验，见§5.5.10）。

5.5.10 验证不同金属材料的阴极保护相容性没有公认的试验方法。固定延伸率试验（也被称为‘低应变率试验’）适用于比较相同类型材料的 HISC 敏感性（例如马氏体钢的相对敏感性），但是对于不同类型的材料却不能直截了当的比较。对于更多的定量测试，单轴向加载拉伸试样（采用固定载荷）、四点弯曲试样（采用固定位移）、裂纹尖端开裂位移（CTOD）和其他试验形式已经被应用于阴极保护条件控制。然而这种试验超出了本文件范围。

5.5.11 特殊技术已经被用于将 CP 保护电位控制在一个小的范围内（例如-0.80 至-0.90V），包括二极管和特殊阳极合金的使用，但是实践经验有限。这种技术的一个主要缺点是单体元件需要与相邻的‘标准’CP 系统电绝缘。

5.5.12 对没用通风的封闭元件进行阴极保护可导致氢气堆积到一定浓度甚至与氧气形成爆炸性混合气体。铝基和锌基牺牲阳极的这种风险是中度的，但是在对装有这种阳极的一个注水平台支柱进行外部焊接时至少发生过 1 次于这种现象相关的爆炸。（密闭的注水元件通常不需要阴极保护，见§6.3.7）。

5.5.13 阴极保护应用的一个后果是在裸金属表面形成一层石灰质层（主要由碳酸钙组成）。典型的厚度大约为十分之一毫米，但是也会出现更厚的沉积物。石灰质层降低了维持阴极保护的电流需求，因此是有益的。然而石灰质层可能会妨碍公差小的海底电气和液压管接头的连接。这可以通过涂一层薄的隔离涂层来防止（例如烘烤型环氧树脂）。一种替代办法是将接头与 CP 系统电绝缘并使用抗海水材料制作所有沾水的零件。高合金不锈钢、镍-铬-钼合金、钛和一些铜基合金（例如镍-铝青铜）已经被用于这种目的。

5.5.14 牺牲阳极可干扰水下操作并增加在流动海水中的拖曳力（见§5.7.3）。

5.5.15 CP 消除了铜基合金在海水中的防污特性。

5.6 牺牲阳极材料

5.6.1 用于海上的牺牲阳极通常是铝基的或锌基的。阳极材料的类属型（即铝基或锌基）通常由业主选定并规定在总体 CP 设计报告中和/或详细 CP 设计的设计前提中。

5.6.2 由于有较高的电化学容量 ε （Ah/kg），铝基阳极通常受到欢迎。然而在海底沉积物或有高细菌活性的内部隔室中应用时锌基阳极有时被认为更可靠（即就电化性能为而论），这两种环境都表现出了厌氧状态。

5.6.3 一些制造商提供专利阳极合金。买方可以要求阳极制造商通过运行经验或在自然海水中的长期试验文件证明他们的产品的电化学性能。（附录 C 提供了一个推荐的试验程序）。

5.7 阳极几何形状和固定装置

5.7.1 用于海上构筑物的阳极主要有 3 种类型：

- 细长加芯型（slender stand-off）
- 延伸镶装型（elongated, flush mounted）
- 箍套型（bracelet）

加芯型和镶装型阳极根据长宽比可进一步细分为‘短型’和‘长型’。阳极类型决定所用的阳极电阻公式（§6.6）和阳极利用系数（§6.8）。

5.7.2 典型的细长加芯型阳极为在一根芯管上铸上阳极材料，一般用在相对较大的阳极上，例如平台下部结构和水下平台的阴极保护。这种阳极的利用系数 u 既电流输出 I_a（A）与净阳极质量 M_a（kg）之比高。

加芯阳极可以制成净阳极材料达到数百千克的阳极。在表层水中，海流施加的拖曳力是显著的。

箍套型阳极主要用于管路，但在平台支柱上部区域也发现有些用途，有电流输出/重量比高与拖曳力低相结合的优势。所有镶装型阳极在面对保护对象的表面上都应涂上适合的涂层系统，这是为了避免阳极腐蚀产物堆积导致阳极固定装置变形甚至断裂。

5.7.3 在总体 CP 设计期间应规定好阳极的类型和对阳极固定的特殊要求，将安装期间（例如打桩操作）和运行期间（例如波浪力）施加给阳极的力考虑进去。对于加芯型阳极，在阳极设计时可能需要考虑采取特殊的预防措施和阳极的布置，以避免妨碍水下操作（§7.10.2）。

5.8 与阴极保护相结合的涂层的使用

5.8.1 非金属涂层的使用大大地降低了保护对象对 CP 电流的需求，因此也大大地减小了需要的阳极重量。对于长设计寿命的重量敏感结构，CP 与涂层相结合似乎是最节省成本的腐蚀控制方式。对于某些非常长设计寿命的系统，CP 可能只有与涂层相结合才是切实可行的。

5.8.2 对应用中裸金属表面已知需要 CP 保护或更高要求的地方应考虑使用涂层，这包括深水应用，在那里石灰质沉积物的形成可能缓慢（§6.3.2）。对于由于几何因素 CP 受到部分屏蔽的表面更应该考虑使用涂层。

5.8.3 对于像多井口海底生产装置那样的大型和复杂结构，需要广泛使用涂层来限制总电流需求和保证有适当的电流分布。

在本文件中 CP 设计程序没有考虑海水中远离阳极的电压降。

为了对此进行补偿，用于 CP 设计的设计涂层击穿系数故意作了保守地选择，以保证有充足的后期总电流输出能力。这样做的一个后果是对远离阳极的电解质电压降的任何计算（例如通过有限元或边界元分析）和对这些涂层击穿系数利用可能会得到过高的电解质电压降，显示出按照预计的保护电位阴极保护勉强或甚至不足。

这主要适用于相对的长设计寿命，当计算的涂层破裂时，电流需求和电解质电压降按指数规律地增大。

5.8.4 涂层的应用可能不适用于需要频繁检查疲劳裂纹的水下构件，例如外套结构的关键焊接节点。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

5.8.5 锌基和铝基金属覆盖层与牺牲阳极阴极保护相容，然而与有机涂层相比，它们并不被认为在降低阴极保护电流需求方面有任何优点。富锌底漆被认为不适合与阴极保护一起使用，因为它们即对阴极剥离（§5.5.1）敏感电阻率又低，会导致高 CP 电流需求。

5.8.6 对于用阴极保护时对 HISC 敏感的材料制作的元件，应始终考虑用非金属覆盖层体系作为防止吸氢的屏障（§5.5.6-5.5.7）。

5.9 电连续性和电流消耗

5.9.1 电绝缘规定只在要避免阴极保护而电绝缘或通过特殊方式控制 CP 电位的某些元件或子系统是必要的（见§5.5.11 和§5.5.12）。

5.9.2 在设计期间无疑需要考虑与保护对象电连接的元件的 CP 消耗电流。这可能包括例如被认为在海水中完全耐蚀的合金元件和由于相对于预期的腐蚀速率有高壁厚设计而不需要防腐蚀保护的元件（例如安装在海底的桩和铸件）。

6 阴极保护设计参数

6.1 概述

6.1.1 本章描述用于牺牲阳极阴极保护总体设计和详细设计的设计参数并对这些参数的选择给出指导。除设计寿命（见§6.2）和还可能存在的涂层击穿系数（见§6.4.3）以外，需要用于具体方案的实际设计值通常由承包商选择，选择基于在方案设计基础中确定的环境和其他参数。然而在某些时候某些或所有 CP 设计参数都已经被买方在方案文件中规定好了。

6.1.2 如果在采购文件中将本推荐实施细则列为引用文件，除非另有规定，在本章中引用的默认设计值适用。

6.1.3 在本章中推荐的设计值始终是以保守的方式选择的。因此坚持使用这些值提供的服役寿命会超过 CP 系统的设计寿命。

6.1.4 海上结构的业主可根据他们自己的经验或其他特殊考虑规定小于，或在一定情况下规定大于保守设计数据的值。承包商（即非业主）可进一步建议使用替代设计数据，然而，任何这种数据随后都需要业主认可，最好在 CP 设计工作开始之前。

6.1.5 在本章中与 CP 相关的所有电化学电位都是以 Ag/AgCl/海水参比电极为基准的。该参比电极的电位实际上等于标准甘汞电极（SCE）的电位。

6.1.6 与本细则 1993 版比较，本 2004 版的主要修订是设计电流密度的深度区域数量从 2 个扩展到了 4 个（3 只用于混凝土加固钢），同时‘涂层类别’的数量从 4 个较少到 3 个。实际设计参数的修订又另当别论了（写在本版本的附录 A 中）。

6.2 设计寿命

6.2.1 CP 系统的设计寿命通常由业主规定，需要虑及保护对象的设计寿命。设计寿命还需要考虑保护对象运行之前 CP 系统已经在起作用的时间段。

指导性说明：

海上固定结构的 CP 系统的维护和修理通常很昂贵，有时候还不切实际。因此通常的做法是将阳极寿命设计得至少与保护对象的设计寿命相同。然而在某些情形下，按计划更换新阳极比一开始就安装一个很大的阳极可能更为经济。这种更换方案在最初设计和制造阶段就应计划好。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

6.3 设计电流密度

6.3.1 在本文件中，‘电流密度’i_c指单位面积的阴极保护电流（单位 A/㎡）。‘初期’和‘后期’设计电流密度（分别用i_{ci}和i_{cf}表示）给出了裸金属表面在一个合理短的时间段内为达到阴极保护所预期的阴极电流密度需求。它们被用于计算初期和后期电流需求从而确定阳极的数量和尺寸。通过使用‘涂层击穿系数’（见§6.4）将涂层对电流需求的影响考虑进去。

6.3.2 初期设计电流密度指在开始时期对裸金属表面实现极化需要的阴极电流密度。典型的裸金属表面例如有一些锈蚀和/或轧制氧化皮的结构钢表面。

指导性说明：

初期设计阴极电流密度必定高于后期设计电流密度，因为在初始阶段生成的石灰质垢（见 5.5.13）和海洋性积垢层减小了随后的电流需求（即‘极化阻抗’被降低）。一个充分的初期设计电流密度能够使保护性石灰质垢快速形成并因此有效极化。

6.3.3 后期设计电流密度指金属表面生成了石灰质垢和海洋生物后阴极保护需要的电流密度。它需要考虑这种垢层部分损坏例如定期去除海洋生物表面重新极化需要的电流密度。

指导性说明：

一个适当的后期设计电流密度（和因此具备的 CP 极化能力）将进一步保证保护对象在整个设计寿命保持在-0.95 至-1.05V 的极化电位。在这个电位范围内维持 CP 的电流密度需求最低。

6.3.4 初期和后期电流密度被用于计算达到充足极化能力需要的特定类型阳极的数量（§7.7）。计算采用欧姆定律并假定：

1）阳极电位遵循设计闭路电位（§6.5.3）和

2）保护对象（即阴极）的电位是在碳钢和低合金钢的设计保护电位，即-0.80V。

指导性说明：

从上述关系得出当阴极朝着闭路电路的阳极电位极化时阳极电流和因此而生的阴极电流密度线性减小，降低了原电池的驱动电压。按照§7.8.3，一个 CP 装置的总 CP 电流I_{tot}（A）变成：

$$I_{tot} = \frac{(E'_c - E'_a)}{R_{atot}}$$

式中$R_{a\,tot}$（ohm）是阳极总电阻；E'_c（V）是整体保护电位；E'_a（V）是阳极实际（闭路）电位。

6.3.5 平均（或‘维持’）设计电流密度i_{cm}（A/㎡）是 CP 系统一旦达到它的稳态保护电位后的预期阴极电流密度的一个量值。这个电位典型值比设计保护电位负 0.15 至 0.20V。

指导性说明：

如§6.3.4 的指导性说明中所述，阴极电位降低（即‘阴极极化’）降低了阳极电流，以致平均设计电流密度变成只有初期/后期设计电流密度的大约 50%.由于初期极化达到稳定状态的时间与整个设计寿命相比通常很短，时间加权的阴极电流密度变得非常靠近稳态阴极电流密度。

6.3.6 达到和维持 CP 的阴极电流密度的决定因素随地理位置和运行深度变化。附录 A 的表 10-1 和表 10-2 分别给出了初期/后期和平均设计电流密度的建议。这些电流密度的选择都是

保守的，考虑的都是苛刻的气候条件、波浪和海流，但是没有考虑沙粒或冰对石灰质层的侵蚀作用。它们进一步假定表面的海水是空气饱和的（即氧分压在 0.2bar）。

指导性说明：

表 10-1 和表 10-2 中的数据反映海水温度和深度对由 CP 形成的石灰质垢的特性和溶解氧含量的预期的影响。这种垢层的特性依赖于海水环境温度并且在一定深度依赖于温度以外的其他参数（见 § 5.3.1）。氧被溶解在表层（从空气中溶解和通过光合作用产生），这样使热带地区深水中的氧含量看起来比相同环境温度的或北极圈相同环境温度的表层海水的氧含量低很多。在最上层区域采取较高的设计电流密度是波浪力和海洋生物对石灰质垢降解氧的对流传质作用的结果。在一定的区域，有机材料的分解可减少并最终耗尽海水中所有的氧。表 10-1 和表 10-2 中没有考虑氧含量的这种减少。

6.3.7 对于直接灌水的隔室和不通空气的（with free access to air）的封闭隔室，建议采用表 10-1 和表 10-2 中给出的 30-100 米深度的设计电流密度。封闭和密封的灌水隔室通常不需要 CP。

6.3.8 对于埋在沉积物中的裸钢表面，不管地理位置和海水深度如何，建议采用 0.020A/㎡的（前期/后期/平均）设计电流密度。

指导性说明：

在海底沉积物的最上层，细菌活性可能是决定 CP 电流需求的主要因素。进一步深入沉积物，电流将与氢的演化有关。

6.3.9 对于管道和其他被内部介质加热的元件，当金属/环境界面温度被假定超过 25℃时，表 10-1 和表 10-2 中规定的设计电流密度温度每增加 1℃应增加 0.001A/㎡。对于单壁封闭体这个温度应假定等于内部介质的温度。

指导性说明：

追加的 CP 电流密度是由于热传递引起的氧的对流和扩散传质作用增加的原因。

6.3.10 表 10-1 和表 10-2 中的设计电流密度还适用于含有碳钢和低合金钢元件的 CP 系统的任何不锈钢或有色金属元件的表面。对于按 § 7.8.2 计算阳极电流输出，-0.80V 的保护电位也适用于这些材料。

6.3.11 对于铝元件或那些覆盖铝或锌覆盖层的元件初期/后期以及平均值设计电流密度建议采用 0.010A/㎡。对于内部加热的元件，当金属/环境界面温度被假定超过 25℃时，温度每增加 1℃设计电流密度应增加 0.002A/㎡。

6.3.12 对于与海上结构相关的混凝土加固钢和其他混凝土掩埋钢质元件的阴极保护，建议采用附录 A 表 10-3 中的设计电流密度。对于海水填充的混凝土竖井，应从两侧提供阴极保护。对于通常是空的竖井的外部保护，采用表 10-3 中的电流密度须乘系数 1.5.

指导性说明：

埋在混凝土中的钢的阴极电流密度主要受控于氧的减少。在飞溅区和在内部干燥的隔室内，氧是由孔隙水的毛细管作用和大气表面蒸发驱动传递的，因此，阴极电流密度将取决于暴露条件（即混凝土大气暴露的距离）和环境温度。

6.3.13 当实际的钢筋表面积（单位㎡）与钢筋混凝土体积（单位 m^3）之比 B 超过 5 时，可在表 10-3 中的设计电流密度上施以一个 5/B 的调整系数。

6.4 阴极保护设计的涂层击穿系数

6.4.1 涂层击穿系数 f_c 描述应用电绝缘涂层的阴极电流密度的预期减小。当 f_c=0 时，涂层是100%电绝缘的，因此将阴极电流密度减小至零。f_c=1 意味着覆盖层没有电流减小特性。

指导性说明：

涂层击穿系数不应与目视检查的涂层外观劣化现象相混淆。一个涂层表现出大范围的起泡仍然可能保持好的电绝缘性。相反，看起来涂层完好的表面可能存在显著的电流通道。

6.4.2 涂层击穿系数的涂层特性、运行参数和时间的一个函数。作为简单的工程手段，f_c 可表达为：

$$f_c=a+b.t$$

式中 t（years）是涂层寿命，a 和 b 是依赖于涂层特性和环境的常数。

指导性说明：

上层 30 米以内海洋生物的影响是最高的，在这个区域波浪力对涂层的劣化可进一步的推动。另一个因素是在这个区域对海洋生物的定期清理。

6.4.3 业主最好根据自己对具体涂层体系在特定环境中的实践经验指定计算涂层击穿系数的常数 a 和 b.当业主没有指定任何这种数据时，须采用附录 A 表 10-4 中的默认值。如附录 A 中的涂层击穿系数是依据 § 5.8.3 中考虑事项建立的。

6.4.4 一旦确定下 a 和 b，引入 CP 设计寿命 t_f(yrs)就可分别计算出平均和后期涂层击穿系数 f_{cm} 和 f_{cf}：

$$f_{cm} = a + b \cdot \frac{t_f}{2}$$

$$f_{cf} = a + b \cdot t_f$$

对于一定的有大的无涂层表面的保护对象，初期涂层击穿系数 f_{ci} =a 可用于计算包含有有涂层表面的初期电流需求。

6.4.5 如果按照 § 6.4.4 的计算值超过 1，设计中须使用 f_c =1. 当 CP 系统的设计寿命超过按照（ § 6.4.2）计算的涂层系统的实际计算寿命时，f_{cm} 可计算为：

$$f_{cm} = 1 - \frac{(1-a)^2}{2 \cdot b \cdot t_f}$$

6.4.6 为了说明涂层系统对涂层击穿系数的影响，在表 10-4 中定义了三种‘涂层类别’：

I 类涂层	一层环氧漆涂层，最低 20 μ m 名义干膜厚度（NDFT）
II 类涂层	一层或多层船舶漆涂层（环氧基、聚氨酯基或乙烯基的），总 NDFT≥250 μ m
III类涂层	两层或多层船舶漆涂层（环氧基、聚氨酯基或乙烯基的），总 NDFT≥350 μ m

I 类包括车间底漆型涂层。细则假定用于 II 类和III类涂层供方指定涂料已经通过使用证明文件或相关试验通过了资格评定。细则还进一步假定对于所有三类涂层所有涂装作业是按照涂料制造商的建议进行的并且表面处理包括了按照 ISO 8501 喷射清理达到 Sa2.5 等级或

以上。对于没有经过喷射清理（包括机加工、打磨、刷磨和轧制表面）就涂装的任何涂层，应采用涂层击穿系数 $f_{cm}=f_{cf}=1$，而初期电流需求可以按 I 类涂层的计算。

指导性说明：

缺乏公布的阴极保护方面的涂层性能数据，特别是长使用寿命方面的。因此表 10-4 中的数据应被认为相当 course(粗糙？)但工程判断是保守的。对于以上三类没有包含的任何涂层系统和对总电流需求的主要电位影响，业主应指定或接受适合的常数 a 和 b。

6.4.7 NORSOK M-501 体系 3B 和 7 符合III类涂层要求。

6.4.8 表 10-4 中 30-100m 深度的 a 和 b 值适用于计算淹没隔室和不通空气的（with free access to air）的封闭隔室。

6.4.9 表 10-4 中的常数没有考虑在制造和安装期间对涂层的重大损坏。如果这种损坏是预先考虑的，需要对受影响的表面面积作出估计并作为裸金属表面纳入设计计算。

6.5 牺牲阳极材料设计参数

6.5.1 除非另有规定或被业主认可，表 10-5 中规定的合金化成分限制和铝基和锌基阳极的杂质元素限制适用。相关阳极材料性能的 CP 设计参数是：

- 设计电化学容量 ε （Ah/kg）
- 设计闭路阳极电位 E_a^o（V）

设计电化学容量 ε （Ah/kg）和设计闭路阳极电位 E_a^o（V）被用于计算：

1） 设计阳极电流输出，和

2） 分别采用欧姆定律和法拉第定律计算需要的净阳极质量

6.5.2 除非另有规定或业主认可，须使用在附录 A 表 10-6 中的电化学容量 ε （Ah/kg）设计值。数据是用于环境温度海水（即年平均值 30℃及以下海水）。

指导性说明：

从短期实验室试验获得的牺牲阳极材料的阳极电化学效能数据典型地将接近理论极限在值（例如对于 Al-Zn-In 材料≥2500Ah/kg）。这是由于试验使用了相对较高的阳极电流密度。这种数据不能替代推荐的电化学容量设计值。对大于表 10-6 中默认值的电化学容量的使用应按照附录 C 通过长期试验来证明是正确的，尽管这种试验由于试验时间仍然相对较短且阳极电流密度相对工作状态的真实阳极的电流密度仍然较高将倾向于产生有点不保守的结果。当用阳极制造商的试验数据于设计时，应进一步地保证试验的材料的合金成分和杂质元素和铸造条件代表的是正常生产情况，最好代表的是‘最坏’生产情况（见附录 C 的 § 12.2.2）。

6.5.3 设计须使用附录 A 表 10-6 中的闭路阳极电位设计值 E_a^o（V）。数据适用于所有环境海水温度（即年平均值最大 30℃）。

指导性说明：

如果阳极受到内部介质加热并埋在海底沉积物中，可能需要采用更高的阳极温度，则表 10-6 中的数据不再适用。然而这种条件只与管路的阴极保护有关，它不在本文范围之内。

6.6 阳极电阻公式

6.1.1 除非另有协议，阳极电阻 R_a（ohm）的计算须采用附录 A 表 10-7 中的公式，它适用于阳极实际形状。计算应使用阳极的最初尺寸和使用阳极消耗到它的利用系数时的估计尺寸（§7.8）。

6.7 海水和沉积物电阻率

6.7.1 海水电阻率 ρ（ohm.m）是海水盐度和温度的函数。在开放性海水中，盐度变化不大，因此温度是主要因素。盐度在 30‰至 40‰的电阻率与温度之间的关系见附录 A 表 10-1。

6.7.2 在海滩，特别是在河口和有屏障的海湾，盐度的变化将是显著的。细则建议在这种区域的 CP 系统设计以反映年度平均值和电阻率随深度变化的电阻率测量值为基础。

6.7.3 与海水比较，海洋沉积物的电阻率较高，需要乘以一个系数，范围从非常松软粘土的大约 2 到砂土的大约 5。除非可以获得区域的沉积物数据，计算任何埋入阳极的电阻时须假定使用最大系数。

6.7.4 在温度范围内（年平均表层水温 7 至 12℃），计算海水中和海洋沉积物中阳极电阻建议分别使用 0.30 和 1.3 欧姆.米的合理保守估计的电阻率，且不依赖于深度。使用较低的值要有实际测量的文件证明并将任何温度季节性变化考虑进去。

6.8 阳极利用系数

6.8.1 阳极利用系数 u 是一个具体款式的阳极的阳极材料的函数，它可用于计算一个 CP 系统在整个设计寿命内支持阴极保护所需要的净阳极质量（见 §7.7.1）。当一个阳极被消耗到它的利用系数时，由于失去了阳极材料应有的支持，或由于其他因素使阳极电阻迅速增加（见 §7.9），极化能力（由阳极电流输出决定）变得无法预测。

6.8.2 利用系数依赖于阳极款式，特别是它的尺寸和阳极芯的位置（§7.10.4）。除非另有协议，设计计算须利用附录 A 表 10-8 中的阳极利用系数。

6.9 电耗设计参数

6.9.1 分别在 §6.3 和 §6.4 中阐述过的设计电流密度和涂层击穿系数适用于计算被认为不需要阴极保护的元件的电流消耗，但是元件须是（或可能变成是）与设计的阴极保护系统是电连接的。

6.9.2 对于防沉板-衬板和桩的掩埋表面，须根据外部的（沉积物暴露的）外表面考虑一个电耗（按 §6.3.8 即为 0.020A/㎡）。对于开放桩头，顶部内表面须考虑 5 倍直径的距离并须视作为海水暴露的。填充沉积物的桩内表面不必包括在内。

6.9.3 除非另有规定或业主认可，电耗计算中每个井筒（well casing）须计 5A 的电耗。

指导性说明：

典型的海底井筒是粘合的，与通常不粘合的平台井相比电耗降低了。然而海底井在安装和插入等作业过程中可能会暴露变成有显著的电耗。

6.9.4 对只有水线以上部分系泊点的系统需考虑 30 米锚链的电耗。对带水线以下系泊点的系统，这点以上暴露在海水中的部分还须计算在内。对于使用锚链的锚定装置的阴极保护，也须计算 30 米锚链电耗。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

7 阴极保护计算和设计程序

7.1 概述

7.1.1 对于大型保护对象比如平台下部结构，一个 CP 系统的详细设计通常放在总体设计活动之后。在这种总体设计期间，应考虑到在安装和运行期间施加给阳极的力并选定阳极类型和固定装置，而且通常还应指定需要涂任何涂层系统的具体区域或元件，以便对阴极保护电流需求和需要的阳极材料总净重进行初步地计算。如果没有编制 CP 总体设计报告，那么 CP 详细设计需要的前提条件和基本概念须由买方在对 CP 详细设计询价的其他一些引用文件中规定。

7.1.2 除在‘采购文件’（见§1.3）中对本细则的任何引用之外，买方须提供以下信息和任何选择性要求（用作为对照表）：

信息：

- 总体 CP 设计报告，如果完成（§7.1.1）
- 要安装的 CP 系统的设计寿命（§6.2）
- 从方案设计基础而来的相关信息（§7.1.1），例如计算阳极电阻需要的盐度和温度的深度函数、平台下部结构的海平面位置和泥线位置、影响对阳极作用力的环境和安装参数等
- 计算保护面积需要的结构图纸和涂层系统信息，包括可能临时或永久产生电耗的元件（§7.1.3）
- 对自己有足够 CP 系统的电连接元件/系统（例如管道）的任何界面的标识。

要求（可选项）：

- 对证明文件和第三方验证的要求，包括供货时间计划（§7.13）
- 对要采用的 CP 设计参数的任何具体要求，例如涂层击穿系数（§6.4.3）和井的电耗（§6.9.3）
- 对阳极材料（§6.5）和阳极设计（§7.6）的任何具体要求
- 对将本实施细则运用于 CP 设计的任何进一步变更和偏差。

7.1.3 买方须保证承包方在设计工作中可以获得影响计算 CP 电流需求和阳极位置的图纸和规范的有效版本。须保证将所有必要的信息提供给承包方以便计算总电流需求，例如保护平台下部结构的导体和海底阀门树的生产控制系统等。

7.1.4 本细则 2004 版和 1993 版的 CP 计算程序是相同的，2004 版对 1993 版的修订主要在于澄清。但在§7.8.6 中增加了对尺寸相差大的阳极的使用的提示。

7.2 阴极保护对象的细分

7.2.1 在对大型和/或复杂 CP 系统的设计中，将保护对象分割成保护单元始终是方便的。

7.2.2 单元划分可以基于深度区域或保护对象的物理界面等，比如在一个海底生产系统中划分可恢复性单元。

7.3 表面面积计算

7.3.1 对于每个 CP 单元（§7.2），须分别计算接受 CP 的有和没有涂层系统的表面面积（涂层分类见§6.4.6）和影响电流需求的受其他参数（例如表面温度）影响的表面面积。

本标准内容以原文为准，译文仅供参考　欢迎指导（邮件至 monroe1234@126.com）
牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

7.3.2 在计算有复杂几何形状的对象的表面面积时采取某种简化是切实可行的，然而，须保证任何这种简化得到的结果是保守的。

指导性说明：

对于主要表面面积，精确度达到-5/+10%就足矣。对于较小的元件，根据有无涂层和是否是主要表面，要求的精确度可以降低。

7.3.3 每个单元的表面面积计算须记录在 CP 设计报告中。须写明引用的图纸和版本号。

7.3.4 承包方须确认影响 CP 电流需求的所有项目都纳入了表面面积计算中。这可能包括由不同承包商安装的各种类型的舾装。

指导性说明：

对于海底生产系统，典型的生产控制系统是采用无涂层的不锈钢制造的（管件、接头、电缆槽等），它们有显著的电流需求。ROV 补偿元件也经常用无涂层的不锈钢制造。而且，有些元件，如阀块和液压缸可能还有涂层直接涂在机加工表面，增加了要用于设计的涂层击穿系数（§6.4.6）。

7.4 电流需求计算

7.4.1 为了计算电流需求 I_c（A），在设计寿命期间提供充分的极化能力（§6.3.1-§6.3.4）并维持阴极保护，须按照（§7.2）计算每个 CP 单元的单元表面面积 A_c（㎡），然后乘以相应的电流密度 i_c（A/㎡）和涂层破裂系数（如适用的话）：

$$I_c = A_c \cdot i_c \cdot f_c \qquad (1)$$

然后分别按照（§6.3）和（§6.4）选择 i_c 和 f_c

7.4.2 对于有无涂层金属主要表面的项目，须分别计算初期极化和设计寿命结束阶段极化的 CP 电流需求，I_{ci}（A）和 I_{cf}（A），以及在整个设计寿命维持阴极保护的平均电流需求 I_{cm}（A）。对于涂层表面为主的保护对象的电流需求，设计计算时可以省去对初期电流需求的计算。为了供将来参考，所有计算数据须记录在设计报告中。

7.5 电耗计算

7.5.1 预期（或可能）变得与一个 CP 系统电连接的所有项目在电耗计算时需考虑进去。

指导性说明：

复杂的海上结构经常有一些临时的或永久的元件没有要求阴极保护但会给阴极保护系统造成电流消耗，例如浮式安装的系泊系统或乐意承受某种腐蚀损耗的次要结构元件（比如桩和裙座）。还有，具有抵抗海水腐蚀性能的金属材料仍然会给阴极保护系统造成电流消耗。

7.5.2 电耗计算须使用需要阴极保护的项目的设计电流密度（§6.3）和涂层击穿系数（§6.4）。表面面积和电流需求计算须分别按（§7.3）和（§7.4）。

7.5.3 对于防沉板、裙座、桩、井筒以及钢锚链的电耗计算，见§6.9.2 和§6.9.4.

7.6 阳极类型的选择

7.6.1 对于一定的构件，阳极类型（即加芯型、镶装型或箍套型阳极）可由业主/买方指定，要考虑到海流拖曳等的影响和对海底干预的干扰（§7.1）等因素。

7.6.2 如果业主/买方没有规定阳极类型，承包方须选择阳极类型，要考虑到要安装的净阳极

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

质量和阳极安装位置可利用的空间等因素。阳极类型的选择除考虑在安装和运行期间施加给阳极的力外，主要决定于保护对象的尺寸和几何结构。阳极类型还影响阳极利用系数和阳极单位重量的电流输出。（阳极类型选择通常需要考虑的问题见 § 5.7）。

指导性说明：

长有芯型阳极首选用途为安装在平台下部结构和海底基盘上的相对大型的阳极（约 100KG 或更重）。有相同净阳极质量的镶装型阳极将有较低的阳极电流输出和较低的利用系数。

7.7 阳极质量计算

7.7.1 在整个设计寿命期 t_f(years)维持阴极保护所需要的总净阳极质量 M_a（kg）从保护对象每个单元的 I_{cm}（A）计算而来（包括任何电耗）：

$$M_a = \frac{I_{cm} \cdot t_f \cdot 8760}{u \cdot \varepsilon} \qquad (2)$$

在公式（2）中，8760 指年小时数，u 和 ε （Ah/kg）要分别以 § 6.8 和 § 6.5 基础选择。

7.8 阳极数量的计算

7.8.1 阳极类型选择后（ § 7.6），须确定阳极数量 N、阳极尺寸和阳极净质量 m_a（kg）来满足以下要求：

1）初期/后期电流输出 I_{ci}/I_{cf}（A），和

2）阳极电流容量 C_a（Ah）

它们与保护对象的 CP 电流需求 I_c（A）相关。

指导性说明：

确定阳极的尺寸主要应以市场上能买到的产品为基础，需要与潜在的阳极卖家联络。

7.8.2 满足电流需求 I_c（A）需要的单体阳极电流输出 I_a（A）用欧姆定律计算：

$$I_c = N \cdot I_a = \frac{N(E_c^\circ - E_a^\circ)}{R_a} = \frac{N \cdot \Delta E^\circ}{R_a} \qquad (3)$$

式中 E_a^o（V）是阳极材料的设计闭路电势（ § 6.5），R_a（ohm）是阳极电阻（ § 6.6）. 初期电流输出 I_{ai} 和后期电流输出 I_{af} 的计算分别要用到初期和后期阳极电阻 R_{ai} 和 R_{af}，见 § 7.9. E_c^o（V）是设计保护电位，为-0.80V（ § 5.4）。△E^o（V）是所谓的设计驱动电压。

指导性说明：

由于公式（3）中定义的设计驱动电压使用的是碳钢设计保护电位，定义阳极电流输出能力的初期/后期设计电流密度和因此而生的驱动电压涉及在该电位需要的阳极电流输出，因此，表 10-3 中给出的初期/后期设计电流密度是以-0.80V 的保护电位为基础的。这意味着它们须总是与这个电位一起被用于公式（3）的计算，同样，如果一个更负的保护电位（例如≤-0.90V）被瞄上，（这个电位也要与它们一起用于公式（3）的计算），见 § 6.3.

7.8.3 单体阳极电流容量 C_a（Ah）由以下公式得出：

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

$$C_a = m_a \cdot \varepsilon \cdot u \qquad (4)$$

式中，m_a（kg）是每个阳极的净质量。因此一个 CP 单元 N 个阳极的总电流容量变成了 $N.C_a$（A.h）。

7.8.4 计算的进行须论证满足以下要求：

$$C_{a\,tot} = N \cdot C_a \geq I_{cm} \cdot t_f \cdot 8760 \qquad (5)$$

$$I_{a\,tot\,i} = N \cdot I_{ai} \geq I_{ci} \qquad (6)$$

$$I_{a\,tot\,f} = N \cdot I_{af} \geq I_{cf} \qquad (7)$$

式（5）中 $C_{a\,tot}$ 是总阳极电流容量；式（5、6、7）中的 Icm/ Ici/ Icf 是一个 CP 单元的电流需求，包括任何电耗。8760 是年小时数。式（6）和式（7）中的 I_{ai} 和 I_{af} 是单体阳极的初期和后期电流输出。

指导性说明：

如果阳极有不同尺寸并因此而必须对每种尺寸的阳极分别计算阳极电流容量 C_a（Ah）、用于一个 CP 单元的电流输出 I_a（A）、$N.C_a$ 和 $I_{ai}/N.I_{af}$ 然后额外计算总阳极电流容量 $C_{a\,tot}$（Ah）和总阳极电流输出 $I_{a\,tot\,i}/I_{a\,tot\,f}$

7.8.5 如果以上判别式不能满足最初选择的阳极尺寸和净质量，须选择另外的阳极尺寸并重复计算直到满足判别式。

指导性说明：

最优化式（5）、（6）和（7）中的要求是一个反复的过程，一张简单的计算机电子表格可能有助于这项工作。通常，如果式（5）满足但是式（6）和/或式（7）不满足，就要使用更多数量的较小阳极或相同数量的更长阳极。另一方面，如果式（6、7）中的 $N.I_a$ 比 I_{ci} 和 I_{cf} 大得多，可能需要使用更少和/或更多的小型阳极。

7.8.6 除非决定采用一个高初期电流容量（例如保护对象主要由无涂层金属的情况），要安装的阳极应有一个相似的阳极电流输出（I_a）与净阳极质量（m_a）比率。有高阳极板电流输出/净质量比率的小阳极将比有更大比率的大阳极更快地消耗掉，这将导致越往设计寿命的终点总阳极电流容量越不充分。

指导性说明：

对于具有相同阳极电阻的阳极并由此而具有相同的阳极电流输出，但是若净阳极质量差别很大（即有不同的阳极几何尺寸），净阳极质量最低的阳极将最先消耗掉。类似地，有相同净阳极质量的阳极但阳极电阻有很大区别并由此而阳极电流输出有很大区别，则阳极电阻最低的阳极将最先消耗掉。

7.9 阳极电阻的计算

7.9.1 用于公式（3）中的阳极电阻 R_a（ohm）须以附录 A 表 10-7 中的适用公式为基础，利用实际阳极尺寸和周围环境具体的电阻率计算。周围环境的具体电阻率须按照 § 6.7 选择。

7.9.2 要计算初期阳极电阻 R_{ai}（ohm），将初期阳极尺寸插入表 10-7 中的相关阳极电阻公式。后期阳极电阻 R_{af}（欧姆）的计算以阳极消耗到它的利用系数 u（见 § 6.8）的预期尺寸为基础，解释如下。

7.9.3 在设计寿命 t_f(years)的结束时，当阳极已经消耗到它的利用系数 u 时，剩余的净阳极质

量 m_{af}（kg）由以下公式计算：

$$m_{af} = m_{ai} \cdot (1 - u) \qquad (8)$$

用于计算 R_{af}的后期阳极体积可用剩余净阳极质量 m_{af}（kg）、阳极材料比重和内嵌材料体积计算出来。当不知道阳极芯的详细情况时，要么忽略它们的体积要么作出保守的估计。

7.9.4 对于消耗到它们的利用系数的长和短的细长加芯阳极，须假定长度减少了 10%. 而且假定后期阳极形状是圆柱形的，后期半径计算须基于这个长度减少和如 § 7.9.3 中解释的后期阳极质量/体积。

7.9.5 对于长的镶装阳极，后期形状虚假定为一个半圆柱，而最终（后期）长度和半径须按以上计算。

7.9.6 对于短的镶装阳极、箍套阳极和其他形状的与保护对象镶装的阳极，最终暴露的面积须假定等于朝向保护表面的最初面积。

7.10 阳极设计

7.10.1 承包方须在 CP 设计报告中规定要使用的阳极的暂定尺寸和/或净质量。

7.10.2 对于安装和运行期间可能承受显著的力的阳极，阳极固定装置的设计须在设计报告中说明。对打桩操作期间承受疲劳载荷的结构性元件上安装的大型阳极需要特殊考虑。大型阳极可能需要贴合器和/或角撑板。

7.10.3 对于表 10-7 中加芯型阳极的阳极电阻公式的使用，从阳极到保护对象的距离最小须为 300mm。然而，对于距离下降到 150mm 的情况，通过在阳极电阻乘以 1.3 的系数公式仍然可以使用。

7.10.4 阳极详细设计须保证在按照 § 7.7 计算需要的阳极净质量时符合利用系数假定。因此，须保证当阳极已经消耗到它的设计利用系数时阳极芯仍然能够一如既往地支撑剩余阳极材料。除非另有协议，加芯型阳极的阳极芯须伸出端面。

7.10.5 除加芯型阳极之外，面向保护对象的阳极表面须规定涂最低 100 μ mDFT 的船舶漆涂层。

7.11 阳极的分布

7.11.1 一个 CP 单元计算好的阳极数量 N 的分布需提供均匀的电流分布，构件有不同的表面面积和任何涂层时，要考虑到单个构件的电流需求。在平台下部结构上，阳极分布要考虑特殊的区域例如节点、桩导向和导线束。所有单个阳极的位置须在图纸上标明。

7.11.2 只要切实可行，给埋在沉积物中的表面阴极保护的阳极须直接暴露在海水中。

7.11.3 阳极的摆放相互之间要有足够的空间以避免相互影响降低有用的电流输出。只要切实可行，阳极的摆放须尽量使它的电流输出表面不过于接近结构性构件而降低电流输出。

指导性说明：

除极大型的阳极以外，在大约 0.5 米或更远的距离屏蔽和干扰消应就变得微不足道。如果怀疑阳极之间会有干扰，一种保守办法是可以考虑将两根相邻的阳极合二为一根长阳极或一根宽阳极，这取决于它们相互之间的位置关系。

7.11.4 安置任何阳极都不能焊接到容纳压力的元件上或有高疲劳载荷的区域。对于主要结构元件，阳极固定焊缝与结构性焊缝之间至少须距离 150mm。对于夹套结构，任何阳极不得安置在距节点 600mm 以内的位置。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

7.11.5 阳极的位置须考虑制造、安装和运行方面的限制。对于大型和/或复杂对象，要及早与其他技术部门联络并听取制造和安装承包商的意见。

7.12 电连续性规定

7.12.1 除焊接连接外，冷锻接头、金属封口和没有涂层的螺纹连接（即跨接螺纹）可以假定为完全电连续的。

7.12.2 对于通过焊接以外的其他方式固定到保护对象上的阳极，以及一个 CP 单元的元件没有按以上定义可靠电连接的，电连续性须通过绞股电缆（典型为铜材）来保证。用于电连接的电缆须有最低 16mm² 的横截面积，并通过钎焊、摩擦或爆炸焊接把合，或利用锯齿状垫圈等通过机械连接以便在螺栓头或垫圈处提供可靠的电连接。任何电缆靴与电缆连接都需采用铜焊。电缆连接的使用适用于通过焊接以外方式连接到保护对象的任何阳极，也适用于接受 CP 的元件个体，没有可靠电连接到 CP 单元的定义见 § 7.12.1.

7.12.3 如果 CP 设计包括电连续性电缆的使用，在 CP 设计报告中须规定电连续性验证要求。细则建议连接电阻的产品和电流需求（或一个非焊接阳极的电流输出）（分摊的电压）不超过设计驱动电压的 10%. 在任何情况下电连接电缆的阻抗须不超过 0.1 欧姆。

7.12.4 对于用于混凝土钢筋阴极保护的阳极，需要特殊规定来保证电连续性。

7.13 文件

7.13.1 详细设计文件（CP 详细设计报告）须包含以下项目：

- 设计前提（包括引用的所有有关项目规范、法规和标准）
- 表面面积计算（包括引用的所有相关图纸和版本号）
- 电流需求计算（初期/后期/平均）
- 电耗计算（初期/后期/平均）
- 需要的最低净阳极质量的计算
- 阳极电阻计算（初期和/或后期，只要有关）
- 需要的最低阳极数量的计算（包括系统初期和寿终的阳极电流输出和阳极容量）
- 根据需要的阳极数量进行的净阳极质量计算（如果高于需要的净阳极质量）
- 根据要安装的阳极的数量和类型/尺寸进行的总电流输出计算
- 暂定阳极设计（包括对结构完整性和电连续性的任何特殊规定。对利用系数高于表 10-8 中默认值的任何特殊要求须突出表示）。
- 阳极分布图纸
- 对电连续性的规定，包括实验验证（如果适用）。

7.13.2 总体 CP 设计报告的范围须协商确定。

7.13.3 文件须准备充分和详细，使第三方能够验证并满足为延期使用或更新在将来可能进行的进一步计算。

8 阳极制造

8.1 概述

8.1.1 本章讲牺牲阳极的制造，包括铸造前对阳极芯的处理。本章中的要求符合 NACE

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

RP0387 中的规定并进行了某些修订，修订主要与质量控制相关。

8.1.2 除在‘采购文件’(见§1.3.1)中对本细则的任何引用外，买方还须加入以下信息和任何选择性要求（用作为对照表）：

信息：

- 阳极材料类型（即铝或锌基）和任何化学成分特殊要求（即不同于§6.5.1 规定的要求）和对阳极材料评定的特殊要求（§5.6.3）
- 每种阳极的暂定阳极尺寸和净阳极质量和对阳极固定装置的任何特殊要求（§7.10）

要求（可选项）：

- 对阳极利用率的任何特殊要求（§6.8）
- 对试生产评定试验（PQT）的任何特殊要求，包括通知和文件提供时间计划（§8.3.2-8.3.4）
- 对‘制造工艺规范（MPS）’（§8.2）或‘检查和试验计划（ITP）’（§8.4.2）的任何特殊要求，包括文件提供时间计划
- 对尺寸检查频率（§8.6.2）、无损探伤（§8.6.5）和生产过程中的电化学试验（§8.6.6）的任何特殊要求
- 对承包方的不符合项（8.6.10）和让步申请（§8.5.6）管理的任何具体要求
- 对可追溯性的任何简化要求（§8.5.1、§8.5.10）
- 对阳极材料试样保留的任何要求（§8.6.1）
- 对阳极标记的任何特殊要求（§8.7.1）
- 对阳极搬运储存和运输的任何特殊要求（§8.8.1）
- 对最终文件的任何特殊要求，包括提供时间计划（§8.7.4）
- 对本细则的任何进一步更正和偏差。

8.1.3 除非另有协议，用于质量控制的牺牲阳极材料的电化学试验须按附录 B 进行。附录 C 中文件证明长期性能的试验程序是非强制性的，如果适用，须由买方在采购文件中规定。

8.1.4 与本细则 1993 版相比，对阳极制造相关的质量控制要求不管是强制性的还是选择项目都有所扩展。

8.2 制造工艺规范

8.2.1 除非另有协议，15000kg 或以上净合金的采购合同须提供‘制造工艺规范（MPS）’。然而买方也可以规定对更小的订单提供 MPS。MPS 至少应包括以下内容：

- 阳极芯材料的技术要求
- 材料的接收、搬运和储存
- 阳极材料合金元素的最高和/或最低含量及杂质元素的最高含量
- 阳极详细图纸，包括阳极插件、毛/净重和尺寸/重量公差（见本段以下说明）
- 焊接工艺规范和对阳极芯的任何焊接的评定试验（WPQT）的引用，焊工资质要求
- 铸造前对阳极芯的处理
- 阳极铸造，包括温度的控制和合金元素的添加

- 阳极的检查和测试
- 面对保护对象的表面的涂装（非加芯型阳极）
- 阳极的搬运、储存和运输
- 标记、追溯性和文件

阳极详细设计须保证阳极内部的芯不显著暴露并能在阳极消耗到表 10-8 中规定的利用系数或买方规定的任何更不保守的系数（即更高）时还支撑着剩余的阳极质量。

8.2.2 买方可以规定将试验/检查详细程序和与质量控制有关的其他信息也写入 MPS，例如检查和试验的详细程序、不符合项和让步申请书的处理。买方可进一步规定在开始阳极制造之前将 MPS 提交审查和批准。

8.3 试生产评定试验

8.3.1 试生产评定试验（PQT）的主要目的是验证 MPS 对于达到规定的阳极特性是充分的。最关心的是那些在正常生产期间不能经常验证的破坏性试验方面的要求。 PQT 须使用与正常生产相同的具体材料和设备。

8.3.2 除非另有协议，一个 15000kg 或更多净合金的采购订单需准备一个 PQT。然而买方也可以对更小的订单规定 PQT。

8.3.3 对 PQT 的具体要求，包括每种模具要检查的阳极数量（包括用于破坏性检查的阳极），通知和报告的时间进度，须规定在采购文件中。

8.3.4 在起动评定活动之前须就具体的 PQT 及时向买方提交一份 MPS 和一份‘检查和试验计划（ITP）’（§8.4.2），以及阳极浇铸、检查和/或试验、和报告的详细时间计划。

8.3.5 质量控制不可缺少的仪器（例如温度传感器）的资料和校准证书在 PQT 期间可供买方审查。

8.3.6 评定期间所有检查、试验和校准的结果，对铸造基本操作参数的报告和材料证书须汇编成一个 PQT 报告。除非另有协议，报告须在生产开始之前由买方认可。

8.4 生产的质量控制

8.4.1 正常生产（即对于 15000kg 或更重净合金的采购订单，或更重/更轻的订单，按协议，见§8.2.1）启动之前，承包方需提交以下文件给买方认可：

- 一个项目具体的 MPS，更新以反映完成和验收 PQT 期间使用的工艺参数（§8.3）
- 一个项目具体的‘检查和试验计划（ITP）’，更新以反映完成和验收 PQT 期间使用的工艺参数
- 一本‘日志’表格（见§8.6.11）
- 一份涉及质量控制的人员责任说明书

8.4.2 ITP 需满足 ISO 10005§5.10 的一般要求。须以表格的形式规定与材料接收、阳极芯处理、铸造、检查、试验和阳极标记相关的所有质量控制活动。活动须以连续编号的形式罗列，每项活动分配到唯一的编号并引用适用于具体项目的适用法规、标准和承包方规程或工作说明书。而且，并须在计划中规定检查和试验的频率和/或范围、验收标准以及万一出现不符合项时要采取的措施。ITP 还须为检查代码（例如检查点、见证点和停工待检点）开辟一列，指明承包方、买方和任何第三方的任务。在有关报告表格或文件中加入引用文件和引用到验证中使用的具体设备和工具是很好的习惯做法。

8.4.3 除非另有协议，MPS、ITP、和‘日志’须使用英语书写。

8.4.4 ITP 中引用的规程和工作说明书和有关验收标准，须让与工作相关的每个人都可获取他们母语的文本。

8.4.5 在整个生产过程中买方有权检查与工作相关的任何活动和对承包方的 QA/QC 体系进行审核。买方须确定在 ITP 中见证的任何停工待检点并告知承包方。

8.5 阳极插件的材料、制造和阳极的铸造

8.5.1 阳极插件材料须符合 NACE RP0387 中的所有要求，而且除非另有协议，焊接到保护对象上的插件须可追溯到符合 EN 10204-3.1.B 或 ISO 10474-5.1.B 的证书。

8.5.2 承包方须核实接收用于阳极制造的所有材料符合规定要求。核实可包括实际试验或审查供方证书。审查证书和要由承包方完成的任何验证试验须写在 ITP 中。检查并发现不符合项的任何材料需做标记和隔离。

8.5.3 要用于表面处理和涂装的材料须装在它们的原包装中直到使用，并应有充分的标记，包括：

- 制造商名称和产地
- 材料类型和产品名称
- 批号
- 生产日期（和储存期，如果适用）
- 制造标准（如果适用）
- 储存和搬运说明（包括健康和安全提示）

8.5.4 承包方须保证用于涂装和表面处理的任何材料的储存和搬运，避免被环境或其他因素损坏。买方须容易获取供方的储存和使用建议供审查。

8.5.5 钢插件的所有制造焊接和铸造前的表面处理须符合 NACE RP0387 的要求并应在铸造前跟即经过目视检查。

8.5.6 与阳极芯处理和阳极铸造相关的所有工作须按评定合格的 MPS（如果适用）进行，说明使用的设备和规程。一旦 MPS 被评定合格，任何改变须用‘让步申请书（CR）’让买方正式认可。

8.5.7 监视对质量有关键性影响的过程参数的设备（例如温度传感器）须按 ITP 规定在计划的时间间隔校准。

8.5.8 锌或锌-铝-铟型牺牲阳极不允许热处理。

8.5.9 镶装型阳极的涂装须按照涂装规程并在表面缺陷目视检查完成后进行。

8.5.10 如果适用，除非另有协议，生产的所有阳极须可追踪到阳极芯材料和涂料的证书。

8.6 阳极的检查和试验

8.6.1 化学分析取样须按 NACE RP0387 进行并对每个‘阳极冶炼炉次’（即在所有合金加完并均化后）取样，除铝基阳极外，除非另有协议，超过 500kg 的所有炉次的样品须收集起来。对于阳极化学成分的光谱分析，须采用独立第三方检定的化学成分已知的标样（即所有合金和杂质元素规定含量有独立第三方检定）。买方有权要求将阳极样品材料交独立实验室验证，或将样品送交买方检验。买方可以进一步规定承包方须为任何补充化学分析和/或电化学试验保留样品材料。从一个不满足规定化学成分的试验批而来的所有阳极都须拒收。

8.6.2 阳极重量和尺寸的验证须按 NACE RP0387 规定的频率和验收标准。伸出插件的位置须符合制造图纸中的公差要求并须检查每个具体款式阳极的至少 10%数量。买方可以规定扩大检查阳极尺寸公差的范围。

8.6.3 须对所有阳极进行裂纹和其他表面不规则性检查，验收标准按 NACE RP0387 并作以下变动：

- 对于锌基阳极，有肉眼可见的裂纹不合格

- 能见到裂纹渗透到阳极插件不可接受

- 在完全由阳极插件支撑的区段，裂纹宽度大于 2mm 只有在长度最大不超过 100mm 时才可接受。

8.6.4 须对与阳极相关的任何涂层进行目视检查。洒在不涂装表面的涂层须去除。

8.6.5 除非另有协议，每种尺寸至少要有两根阳极须经受破坏性试验来验证没有内部缺陷且阳极插件的位置适当。须采用 NACE RP0387 中规定的切割程序和验收标准。如果适用，这种试验须作为 PQT 的一部分来进行。如果没有 PQT 需要完成，试验应在生产的第一天进行。业主/买方有权选择做试验的阳极。生产期间阳极的任何分批破坏性试验在采购订单中规定。

8.6.6 至少，对于超过 15000kg 净阳极材料的订货和生产每超过 15000kg，电化学试验须作为 PQT 的一部分来完成或作为第一天生产试验的一部分来完成。业主/买方可规定扩大试验和/或第三方试验。

8.6.7 当电化学试验适用时，为试验取样须对每冶炼炉次进行，参见附录 B-§11.2.1。（炉次定义见§8.6.1）。除非另有协议，试验须按附录 B 中的程序进行并采用以下验收标准：

铝基阳极：

电化学容量：最低 2500Ah/kg，

闭路电位：≤1.05V（在第 4 试验周期结束时）。

锌基阳极：

电化学容量：最低 780Ah/kg，

闭路电位：≤1.00V（在第 4 试验周期结束时）。

如果不满足规定的电化学特性，承包方须立即发出不符合项报告。

8.6.8 在试验期间明显由于取样问题或对试验设备的操作性错误造成的失败可不计较但须采用相同阳极（样品）重新试验。

8.6.9 如果不合格发生在电化学性能以外的其他特性分项试验（例如每 50 根阳极作 1 根的破坏性试验），须对前面和后面的阳极一一试验，直到至少 3 根挨顺序的阳极合格。

8.6.10 如果重复试验还是不满足规定特性（即电化学性能以外的特性），生产须停顿下来，承包方须发出‘不符合项报告’并找出不合格原因。不合格阳极（个体或批）须作标记并隔离。对于电化学试验中的不合格，见附录 B-§11.4.3。

8.6.11 来自阳极检查/试验和试验/监控设备校准的所有数据须被记录在‘日志’中。对于阳极具体数据，引用须指向阳极唯一编号或炉号（§8.7.2）。日志须以日为基础记录并须可供买方在制造期间任何时候审查。

8.7 文件和标记

8.7.1 至少，每根阳极须标上制造商的名称或徽记、阳极材料（例如铝基标‘A’，锌基标‘Z’）、

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

冶炼炉号和序列号。任何更多标记要求须在采购文件中规定。

8.7.2 在 PQT（如果适用）和生产期间的所有检查和试验结果须记录在案并且须可追溯到阳极唯一编号（或阳极批，如果适用）、阳极芯材料和涂料的证书，如果适用。对‘日志’的具体要求见§8.6.11.

8.7.3 合同方须按 EN10204 或 ISO10474 检查证书 3.1B 签发检查文件。

8.7.4 买方可规定对最终文件的要求，附加 NACE RP0387 中的一些要求，例如要提供给买方的文件（包括格式和提交时间计划）、让承包方保留文件至少 2 年以上（NACE RP0387 中的最低要求）。

8.8 阳极的搬运、储存和运输

8.8.1 对 NACE RP0387 的任何附加要求须在采购合同中规定。

9 阳极的安装

9.1 概述

9.1.1 在海上结构上安装牺牲阳极通常采用焊接有时也采用将阳极支撑夹持在结构性钢元件上的办法。在后一种情况下，电连续性典型的提供方式是采用铜缆，通过钎焊与阳极支撑和保护对象连接；或采用某种特殊的机械性连接设计来保证可靠的电连续性。通过焊接、金属密封或螺纹接头，电连续电缆也可安装用于给与一个 CP 单元没有可靠电连接的元件提供电连续性。这种连接的设计要求须按§7.12.

9.1.2 对在有关构件安装和运行期间阳极固定装置的机械完整性和任何特殊要求的考虑须写入 CP 详细设计报告。对于大型阳极，设计可能需要考虑贴合器和/或角撑板的使用。含压元件上不能采用焊接或钎焊。CRA 不建议采用铝热剂焊接。可以考虑采用管脚钎焊或软钎焊之类的替代办法。

9.1.3 除在‘采购文件’(见§1.3.1)中对本细则的任何引用外，买方还须加入以下信息和任何选择性要求（用作为对照表）：

信息：

- CP 详细设计而来的阳极图纸或制造商的图纸
- 从 CP 详细设计而来的标注有单个阳极的位置的图纸。

要求（选项）：

- 对 IPS 编制的任何要求（§9.2）
- 对文件的任何特殊要求（§9.7.2）
- 对本实施细则的任何进一步的更正和与本实施细则的任何偏差。

9.2 安装工艺规范

9.2.1 承包方？可以规定与阳极安装相关的所有工作都须在‘安装工艺规范（IPS）’中说明。如果适用，这个文件至少须包括：

- 对要使用的材料和设备的技术要求，包括证书和材料技术数据表
- 阳极安装的阳极和材料的的接收、搬运和储存
- 对焊接和/或钎焊工艺规范的引用和钎焊/焊接人员资质

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

- 阳极紧固检查和试验
- 材料的证明文件和检查记录

9.3 安装资质

9.3.1 与阳极安装相关的所有焊接须按照一个公认的标准评定。只能使用有资格的焊工和/或钎焊设备操作者。

9.4 阳极的接收和搬运

9.4.1 买方提供的所有阳极承包方须检查确认符合阳极图纸并确认没有明显损坏或其他不良因素。须隔离不合格的阳极及其他材料。

9.4.2 承包方须保证用于阳极安装的阳极和其他材料的储存和搬运避免了环境或其他因素的损坏。

9.5 阳极安装和电连续性规定

9.5.1 阳极安装须按经过结构性核准、显示个体阳极位置的图纸和任何其他与保护对象的制造相关的规范进行。与阳极安装相关的所有焊接须由有资格的焊工按评定合格的焊接工艺规程进行。

9.5.2 与认可图纸明显改变的阳极安装须有买方批准。然而，为了安装方便，安装在结构性元件上的加芯阳极可以横移不大于一个阳极长度的距离和最大 30° 圆周角。

9.5.3 对于在高外加载荷上焊接阳极，焊接接头须至少远离其他焊缝 150mm，并至少远离夹套结构的结构性节点 600mm。

9.5.4 安装的阳极在任何后续的涂装作业期间需提供充分的保护。须去除阳极上的任何溅落涂层。对于有涂层的对象，暴露的阳极芯须按相同的标准涂装。

9.6 阳极安装的检查

9.6.1 阳极安装检查至少须包括焊缝和任何钎焊接头的目视检查。对于结构性元件的焊接，可能需要按有关制造规范作进一步的 NDT 检查。

9.6.2 在阳极安装完成之后，须确认阳极安装符图。

9.6.3 对于铜焊和机械性接头的电连续性，须按照备有文件证明的程序和能够验证 0.1 欧姆电阻的仪器测量。

9.7 文件

9.7.1 阳极的最终位置须记载在竣工图上。
9.7.2 验证电连续性的测量值须备有文件记录。
9.7.3 买方可进一步规定对阳极安装文件的要求。

10 附录 A—图表数据

10.1 图表数据

表 10-1：暴露在海水中的裸金属表面的推荐初期和后期设计电流密度（A/㎡），为海水深度和表层海水温度为基础的‘气候区’的一个函数（参见§6.3）

Table 10-1 Recommended initial and final design current densities (A/m^2) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature (ref. 6.3).

Depth (m)	*'Tropical' (> 20 °C)*		*'Sub-Tropical' (12- 20 °C)*		*'Temperate' (7-11 °C)*		*'Arctic' (< 7 °C)*	
	initial	*final*	*initial*	*final*	*initial*	*final*	*initial*	*final*
0-30	0.150	0.100	0.170	0.110	0.200	0.130	0.250	0.170
>30-100	0.120	0.080	0.140	0.090	0.170	0.110	0.200	0.130
>100-300	0.140	0.090	0.160	0.110	0.190	0.140	0.220	0.170
>300	0.180	0.130	0.200	0.150	0.220	0.170	0.220	0.170

Depth=海水深度；Tropical=热带；Sub-Tropical=亚热带；Temperate=温带；Arctic=寒带

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

表 10-2：暴露在海水中的裸金属表面的推荐平均设计电流密度（A/m²），为海水深度和表层海水温度为基础的‘气候区’的一个函数（参见 § 6.3）

Table 10-2 Recommended mean design current densities (A/m²) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature (ref. 6.3).

Depth (m)	*'Tropical' (> 20 °C)*	*'Sub-Tropical' (12- 20 °C)*	*'Temperate' (7-12 °C)*	*'Arctic' (< 7 °C)*
0-30	0.070	0.080	0.100	0.120
>30-100	0.060	0.070	0.080	0.100
>100-300	0.070	0.080	0.090	0.110
>300	0.090	0.100	0.110	0.110

表 10-3：钢筋保护（即在混凝土结构中）的推荐平均电流密度，为海水深度和表层海水温度为基础的‘气候区’的一个函数（参见 § 6.3.12）。电流密度单位 A/m²中面积指钢筋表面面积而非混凝土表面面积。

Table 10-3 Recommended mean design current densities for protection of reinforcing steel (i.e. in concrete structures) as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature (ref. 6.3.12). The current densities in A/m² refer to the steel reinforcement surface area, not surface area of concrete.

Depth (m)	*'Tropical' (> 20 °C)*	*'Sub-Tropical' (12- 20 °C)*	*'Temperate' (7-12 °C)*	*'Arctic' (< 7 °C)*
0-30	0.0025	0.0015	0.0010	0.0008
>30-100	0.0020	0.0010	0.0008	0.0006
>100	0.0010	0.0008	0.0006	0.0006

表 10-4：计算油漆涂层击穿系数用推荐的常数 a 和 b。（涂层分类按 § 6.4.6 定义）

Table 10-4 Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors. (Coating Categories are defined in 6.4.6).

Depth (m)	*Recommended a and b values for Coating Categories I, II and III (see 6.4.7)*		
	I (a = 0.10)	*II (a = 0.05)*	*III (a = 0.02)*
0-30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008

表 10-5：铝基和锌基阳极材料推荐化学成分限制值（参见 § 6.5）

Table 10-5 Recommended compositional limits for Al-based and Zn-based anode materials (ref. 6.5).

Alloying/Impurity Element	*Zn-base*	*Al-base*
Zn	rem.	2.5-5.75
Al	0.10-0.50	rem.
In	na	0.015-0.040
Cd	≤ 0.07	≤ 0.002
Si	na	≤ 0.12
Fe	≤ 0.005	≤ 0.09
Cu	≤ 0.005	≤ 0.003
Pb	≤ 0.006	na

Rem.=余量；na=不适用

表 10-6：阳极材料在海水室温下的推荐设计电化学容量和设计闭路电位（参见 § 6.5）

Table 10-6 Recommended design electrochemical capacity and design closed circuit potential for anode materials at seawater ambient temperatures (ref. 6.5).

Anode Material Type	*Environment*	*Electrochem-ical Capacity (Ah/kg)*	*Closed Circuit Potential (V)*
Al-based	seawater	2,000	-1.05
	sediments	1,500	-0.95
Zn-based	seawater	780	-1.00
	sediments	700	-0.95

本标准内容以原文为准，译文仅供参考　欢迎指导（邮件至 monroe1234@126.com）

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

表 10-7：推荐用于阴极保护设计计算的阳极电阻公式

阳极类型	电阻公式
长的细长加芯型 [1] L≥4r	$R_a = \frac{\rho}{2\cdot\pi\cdot L}\left(\ln\frac{4\cdot L}{r}-1\right)$
短的细长加芯型 [1] L＜4r	$R_a = \frac{\rho}{2\cdot\pi\cdot L}\left[\ln\left\{\frac{2L}{r}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right)\right\}+\frac{r}{2L}-\sqrt{1+\left(\frac{r}{2L}\right)^2}\right]$
长的镶装型 [2] L≥4×宽度，和 L≥4×厚度	$R_a = \frac{\rho}{2\cdot S}$
短的镶装型，箍套型和其他类型	$R_a = \frac{0.315\cdot\rho}{\sqrt{A}}$

1） 公式对与保护对象最小距离达到 0.30m 的阳极有效。对于阳极-对象距离小于 0.30m 但是大于 0.15m 的，可采用相同的公式乘以 1.3 修正系数。

2） 对于非圆柱形阳极：r=c/2π，其中 c（m）是阳极横截面外围长度

表 10-8：用于阴极保护计算的推荐阳极利用系数

阳极类型	阳极利用系数
长的细长加芯型 L≥4r	0.90
短的细长加芯型 L＜4r	0.85
长的镶装型 [2] L≥4×宽度，和 L≥4×厚度	0.85
短的镶装型，箍套型和其他类型	0.80

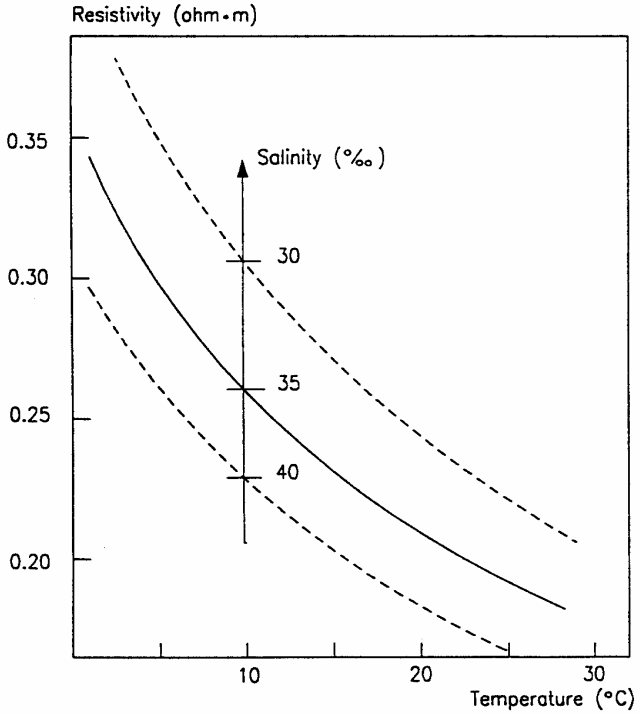


图 10-1:30～40‰盐度的海水电阻率与温度的关系

本标准内容以原文为准，译文仅供参考　欢迎指导（邮件至 monroe1234@126.com）

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

11 附录 B—牺牲阳极材料质量控制的实验室试验

11.1 概述

11.1.1 该实验室试验程序设计用于铝基和锌基阳极材料在牺牲阳极制造期间的质量控制。在本附录中，§3.1 中的业主、买方和承包方（即阳极制造商）定义适用。

指导性说明：

因为电化学数据是从短期试验获得的，按照本程序从试验获得的结果不适用于阴极保护设计。试验中典型采用高阳极电流密度将使实际的野外长期使用性能倾向于不再保守。

11.1.2 试验须按对所有相关步骤有详细描述的程序进行。对于在承包方实验室进行的试验，业主/买方有权见证。

11.1.3 除非偏差报告得到了批准，本程序的所有要求须认为是强制性的，见§8.1.3. 然而业主/买方可选择指定一个替代的试验程序。

11.1.4 与本文件的 1993 版比较，作了一些修订，主要是关于试验材料的采样，而且还为质量控制目的规定的一个详细的试验程序。在 2004 版中，不允许采用 3%NaCl 溶液代替天然的或人造的海水。在§8.6.6 中还进一步规定了验收标准。其他修订只是为了澄清或简化。

11.2 试样的取样和处理

11.2.1 除非另有规定，电化学特性（即电化学效率和闭路阳极电位）的质量控制须按每生产 15000kg 阳极为一个单元。然而为电位测试取样（用单独的小型铸件）须按每冶炼炉次阳极材料的生产为单元。用于试验所有样品须有充分的标记。样品保留见§8.6.1. 业主/买方有权选择用于试验的样品，例如根据对单个炉次化学成分的审查。

指导性说明：

单个炉次有时比 15000kg 小很多，那么有必要选择一个代表所有生产的炉次进行试验。因此炉次选择应选择合金和/或杂质含量分别在低范围和在高范围的炉次。

11.2.2 直径 10mm±1mm 和长度 50mm±5mm 的圆柱形试样须采用样品机械加工制备。在试样的一端须钻一个直径约 2mm 的孔并攻丝用于连接钛导电棒。随后须用自来水冲洗，然后用乙醇洗，然后干燥和称重精确到±0.1mg。

11.2.3 在所有制备、储存和试验所有阶段，试样须有充分的标记。

11.3 设备和实验程序

11.3.1 安装好导电棒之后，试样端部和导电棒暴露在试验溶液中的部分须涂上适当的封闭材料比如氯丁橡胶或硅橡胶。

11.3.2 试验溶液须是天然海水（要有足够的纯度且盐度至少 30‰）或按 ASTM D1141 的人造海水。

指导性说明：

氯化物以外的海水成分，硫酸盐、碳酸氢盐/碳酸盐、钠、钙和镁离子对牺牲阳极电化学性能没有影响，在配制人造海水时可以省去。配制溶液时可用自来水。

11.3.3 每个试样试验须至少用 10 升溶液。在试验期间溶液须持续吹入空气并不能更换。温度须维持在 20±3℃。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

11.3.4 每个试样须悬挂在一个无涂层的圆柱形钢容器（例如用管子段制作的）的中央，容器沾水表面面积须至少 20 倍暴露的阳极试样面积，即大概至少 400cm² 。通常的摆放形式见图 11-1.

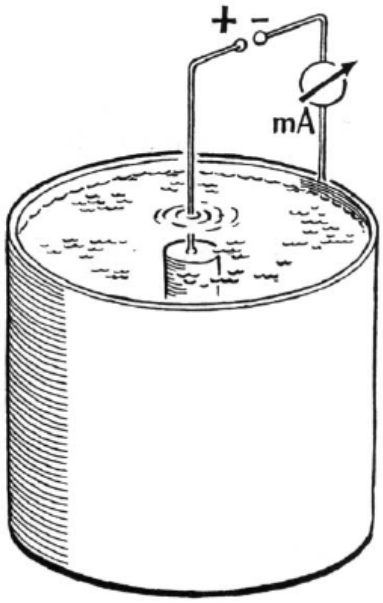


图 11-1：用于牺牲阳极材料质量控制试验的常用布置方式

11.3.5 恒电流控制须用 DC 恒流源的方式干预，并能根据以下 § 11.3.7 控制电流。试样和阴极须分别连在整流器的正和负接线端。多个试验电池可以串联到一个 DC 源。

11.3.6 含有一个或多个试验电池的电路中须插入一个电流积分器，例如一个铜电量计或一个精确度±2%的能够测定总放电量的电子装置。

11.3.7 通过电池的电流须调节到规定的阳极电流密度，以最初暴露的表面面积为基础计算，并按以下方案调节：

第 1 天：　1.5mA/cm²

第 2 天：　0.4 mA/cm²

第 3 天：　4.0 mA/cm²

第 4 天：　1.5 mA/cm²

电流密度控制的精确度须达到 0.1 mA/cm² 并须维持 24 小时±1 小时的周期。总试验时间须在 96 小时±4 小时。

11.3.8 在每个试验周期的末期，须测量每个试样上三个位置的阳极电位。电位测量须使用标准参比电极（银/氯化银电极或甘汞电极）和电桥（例如鲁金毛细管）。电桥顶端须位于试样表面 1mm 以内，但是不能扰动在阳极试样上形成的任何腐蚀产物。参比电极须按不超过 1 周（7 天）的时间间隔校准。用‘Ag/AgCl/海水’以外的参比电极（例如 SCE）记录的电位须转化为这个参比电位。

11.3.9 全部试验周期完成之后，须去除导电棒和密封胶并清洗掉试样上的腐蚀产物。铝基试样须在每升水含 20 克铬酐和 30ml 磷酸的 80℃溶液中清洗 10 分钟，锌基试样须在室温的饱和氯化铵溶液中浸泡 2 小时。随后须用自来水冲洗试样，然后用乙醇洗，干燥后称重精确到±0.1mg。

牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂　江福　+86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

11.3.10 电化学效率 ε （Ah/kg）须按下式计算：

$$\varepsilon = (C*1000)/\triangle w$$

式中 C 是总电量，单位 Ah; △w 是重量损失，单位 g

11.4 验收标准和重新试验

11.4.1 §8.6.7 中的验收标准适用。

11.4.2 试验期间明显由于操作性错误造成的失败可以不计较但须用相同样品上或从相同炉次的一根阳极上切下来的新试样重新试验（参见§8.6.8）。

11.4.3 如果试验结果不能满足规定要求，可从每个试验批（通常代表 15000kg 及以下的阳极材料）的每个炉次的 3 个试样重复试验。一个炉次的任何试样不合格将导致这个炉次的所有阳极被拒收。

11.5 文件

11.5.1 试验报告须包含受试阳极材料的相关数据，包括冶炼炉号、化学成分和铸造日期。须概述试样处理、试验设备和试验程序。

11.5.2 记录的所有电位（即每个试样 3 个数据）须以列表形式出现，如果适用，记录数据要转化成相对 Ag/AgCl/海水参比电极的电位值。除了计算的电化学效率之外，还须记录试样失重和总电量。报告中须提供试样清洗后的照片。

本标准内容以原文为准，译文仅供参考 欢迎指导（邮件至 monroe1234@126.com）
牺牲阳极专业厂家---太仓市建新合金厂 江福 +86-13776177955,电话：0512-89768896 传真：051253259401

12 附录 C—牺牲阳极材料电化学性能评定的实验室试验

12.1 概述

12.1.1 本附录给出了牺牲阳极材料在室温的天然海水中的电化学性能文件证明（即评定）的一个推荐程序。（可对本程序进行修改使之包含在热的或冷的海水中的试验）。

指导性说明：

阳极的性能最好用全尺寸的阳极现场试验结果作文件证明。然而这种试验费事并经常不能切实际。

12.1.2 评定试验最好由独立于阳极制造商的团体进行，或至少有这个团体的见证。

12.1.3 按照本程序的试验是非强制性的，须有买方的规定（见 § 8.1.3）。可协商修订试验参数。

12.1.4 与本文件 1993 版比较，进行了一些修订，主要是关于试验材料的取样。试样的推荐尺寸进一步增加了，因为经验表明在 12 个月的一个试验周期结束之前试样就可能已经被消耗掉。§ 12.2.3 和 § 12.3.5 作了一些进一步的修订。其他修订只是为了澄清或简化。

12.2 试样的取样和处理

12.2.1 用于试验的试样须从用与正常生产相同的原材料、冶炼和铸造工艺制造的全尺寸阳极上切割下来。阳极的净质量须至少为文件证明的阳极的最大阳极净质量的 30%.

指导性说明：

一个阳极材料的性能可受凝固和冷却情况的影响，因此从较小阳极而来的试样或单独铸造的试样，可能不能完全代表大阳极。

12.2.2 要用于文件证明的阳极的化学成分须反映制造商正常生产期间适用的成分极限值（见 § 6.5.2）。这通常需要准备一个特殊的炉次，熔炼成最大规定含量的杂质元素和最小含量的实际合金元素。锌基和铝-锌-铟合金阳极材料铸件不允许热处理。

指导性说明：

为了验证制造商规定的极限值，可能需要对不止一个炉次试验。

12.2.3 要文件证明的每炉至少试验 5 个试样。须准备直径至少 25mm 和长度至少 100mm 的圆柱形试样。在试样的一端须钻一个直径约 2mm 的孔并攻丝用于连接钛导电棒。随后须用自来水冲洗，然后用乙醇洗，然后干燥并称重精确到±0.1mg。

12.2.4 在所有制备、储存和试验的所有阶段，试样须有充分的标记。须保留阳极铸件的阳极材料以备以后的任何补充试验。

12.3 设备和试验程序

12.3.1 安装好导电棒之后，试样端部和导电棒暴露在试验溶液中的部分须涂上适当的封闭材料比如氯丁橡胶或硅橡胶。

12.3.2 试验环境须为盐度≥30‰的干净天然海水。温度允许在+7℃至+20℃之间变动。海水的温度和盐度须每周至少记录一次。

试验须按附录 B 中概述配置，然而，在这里电池中的海水须持续更换（至少 1 升/分钟）。海水须连续通入空气。

指导性说明：

海水温度在上述范围变动不认为会显著影响阳极材料的电化学性能。然而，较低温度有时会认为降低了性能，阳极买方可能要求在这种温度文件证明阳极材料的性能。

12.3.3 试验可以采用恒电流控制，也可自流试验。试验时间须至少 12 个月。

指导性说明：

‘自流’试验暗指在试验期间阳极/阴极组件被允许自发极化。这样驱动电压和由此而生的阳极电流密度在试验期间将发生变化。对于一个‘恒电流’试验，在整个试验期间阳极电位都是受控的。

12.3.4 根据最初暴露的阳极表面面积，恒电流控制的阳极电流密度最大只能 1mA/cm² 。积分电流（即 12 个月的电量）可按附录 B-§11.3.6 测定，但是人工读数前两周至少一天一次，每周 5 次；此后每周一次就可以了。阳极电位的读数（见附录 B-§11.3.8）的最低频率至少和人工电流读数一样。

12.3.5 对于一个自流试验，阳极和阴极须连接一个 10 欧姆±1 欧姆精密电阻（实际电阻要按±0.2 欧姆记录）。内部无涂层阴极表面面积须大致 30 倍暴露的阳极表面面积。外表面须涂装达到大致 1:30 的规定表面面积。电流须通过用高阻抗（≥107 欧姆）电压表测得的精密电阻两端的电压降测量值计算而来。阳极电位、阴极电位和电池电流的测量须在以上规定的最大时间间隔进行。

12.3.6 用于阳极电位读数的参比电极须定期校准（每月至少一次）。试验完成之后，试样须清洗并按附录 B§11.3.9 和 11.3.10 计算电化学效率。

12.4 文件

12.4.1 试验报告需包含与阳极冶炼和铸造相关的数据和试验试样的位置。合金和杂质元素含量须规定名义值和保证值作为参考。

12.4.2 须报告海水的盐度和温度的平均、最大和最小值。

12.4.3 报告中须说明取样、试样处理、标记、试验设备、校准和数据读数情况。须用时间函数图显示阳极电位（相对于 Ag/AgCl/海水）。对于自流式试验，计算阳极电流密度（原始暴露表面面积）和阴极电位也须用图示显示。

12.4.4 除计算的电化学效率（Ah/kg）外，报告须包含阳极重量损失测量数据。须报告平均值和标准偏差。须有阳极试样清洗前后的照片。

【练手习作，欢迎热心人指正，特别是技术性错误和语法翻译错误。

联系邮箱：monroe1234@126.com】