ICS 75.180.10
E 94
备案号：35178—2012

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6878—2012

海底管道牺牲阳极阴极保护

Cathodic protection of submarine pipelines by galvanic anodes

2012－01－04 发布　　2012－03－01 实施

国家能源局　发布

目　次

前言 …… Ⅲ
1　总则 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　范围 …… 1
1.3　目的和用途 …… 2
1.4　文件结构 …… 3
1.5　与 DNV－OS－F101 和其他 DNV 标准的关系 …… 3
2　参考标准 …… 3
2.1　DNV（挪威船级社） …… 3
2.2　EN（欧洲标准） …… 3
2.3　ISO（国际标准化组织） …… 3
2.4　GB（国家标准） …… 3
3　术语和定义 …… 4
4　缩写和符号 …… 5
4.1　缩写 …… 5
4.2　阴极保护设计参数符号 …… 5
5　阴极保护详细设计 …… 6
5.1　概述 …… 6
5.2　阴极保护中期电流的计算 …… 6
5.3　阴极保护后期保护电流的计算 …… 8
5.4　阳极总重量计算 …… 8
5.5　后期阳极输出电流计算 …… 9
5.6　阳极布置 …… 10
5.7　阴极保护详细设计文件 …… 12
6　阳极的制造 …… 12
6.1　概述 …… 12
6.2　制造程序 …… 12
6.3　生产前质量鉴定试验（PQT） …… 12
6.4　生产质量控制 …… 13
6.5　原料和铸造 …… 13
6.6　阳极检测和试验 …… 14
6.7　文件及标记 …… 14
6.8　阳极存放和运输 …… 14
7　阳极安装 …… 15
7.1　阳极安装设计 …… 15

7.2 阳极安装程序 …… 15
7.3 生产前质量鉴定试验（PQT） …… 15
7.4 生产中质量控制 …… 16
7.5 阳极和安装材料的接收和运输 …… 16
7.6 阳极安装 …… 16
7.7 阳极安装检验 …… 16
7.8 文件 …… 16
8 附件1 推荐涂层破损系数 …… 16

前　言

本标准等同采用挪威船级社 DNV - RP - F103：2003 Cathodic protection of submarine pipelines by galvanic anodes。

本标准在使用中如遇到涉及原标准所在国政府或其他主管当局的法令、法规和规定时，一律按中华人民共和国政府或政府主管部门颁布的相应法令、法规和规定执行。

本标准的计量单位均以国家已颁布的法定计量单位为准，即本标准中表达形式为：法定计量单位在前，将英制单位的相应值标在其后括号内。

本标准由海洋石油工程专业标准化技术委员会提出并管理归口。

本标准起草单位：中国海洋石油总公司海洋石油工程股份有限公司。

本标准主要起草人：陆长山、李妍、张国庆、王洪福、齐江涛、张有慧、张国华、余直霞。

本标准主审人：赵冬岩。

海底管道牺牲阳极阴极保护

1 总则

1.1 引言

1.1.1 海底管道一般以外涂层作为主要腐蚀控制系统，如果涂层有缺陷时阴极保护（CP）作为备用系统。涂层缺陷包括喷涂过程中产生的针孔，已涂敷管道在运输和安装过程中涂层的损坏，以及管道在操作过程中受到的机械性损坏或者涂层老化。在确定阴极保护（CP）系统的保护电流时，管道涂层系统的设计是主要因素。

指导性说明：

除腐蚀控制外，管道涂层还有其他的功能，包括机械防护、保温/或者配重。广义的“管道涂层”包括在工厂中对每根管子涂装的“钢管涂层”（或者“工厂涂层”）、“现场接头涂层”（FJC）和“涂层现场修复”（CFR）。除了涂层系统的设计之外，涂装的质量控制也是涂层性能和阴极保护设计的关键。

1.1.2 管道阴极保护可以使用牺牲阳极，或者由整流器输出的外加电流来实现。海底管道牺牲阳极系统的应用最普遍。传统上该系统把手镯式阳极直接安装在管道上。但是，本标准和 ISO 15589－2 允许使用邻近并与管道有电连接的结构上的阳极提供阴极保护，诸如使用平台水下结构、海底基盘和立管上的阳极。

指导性说明：

安装在邻近结构上的阳极表面可以完全裸露在海水中，比阳极表面部分或全部被海底沉积物覆盖具有增加阳极电化学效率和阳极电流输出的优点，而且，可以减少安装期间对管道涂层的破坏。

1.1.3 管道阴极保护设计通常分两步进行：概念设计和详细设计。典型的阴极保护概念设计包括阳极材料的选择、阳极净重和阳极尺寸估算，以及阳极安装形式设计。概念设计还要进一步考虑阴极保护可能带来的有害影响，如管道材料的敏感性造成的氢脆和安装期间产生过大局部应力在运行或操作期间管道可能发生的氢致应力开裂（HISC）。阴极保护概念设计可以参考 DNV－OS－F101 和 ISO 15589－2（见 1.3.1）的相关章节。在阴极保护详细设计阶段（如本文件介绍的），确定最后的阳极净重和尺寸，并确定阳极在管道上的分布。

1.2 范围

1.2.1 本标准的目的是为了进行阴极保护详细设计和规范牺牲阳极的制造和安装，包括如何改进项目特定要求的建议。本标准可以很方便地改进以采纳权威机构的要求和反映管道操作者腐蚀控制的方法。

指导性说明：

推荐使用“设计因子”，而不是采用在阴极保护计算中修改一个或多个设计参数的方法来增加设计的保守性。例如，设计寿命要基于管道估计的最长寿命乘以一个大于 1 的常量。

1.2.2 本标准包括铝基或锌基牺牲阳极的海底管道的阴极保护详细设计（见 1.3.1）以及阳极的制造和安装，不包括与管道相连的水下管汇系统。对于阴极保护概念设计，第 5 章适用于阳极净重量和阳极布置的初步计算。本标准以 ISO 15589－2 部分章节为依据（见 1.3.1）。为了与 DNV－OS－F101 的主要方法统一，主要对质量控制程序、澄清和指导目的作了一些修改。本标准还包括未见于 ISO 标准的关于相邻结构的保护范围、管道阳极之间最小距离的计算公式，推荐了牺牲阳极性能和设

计电流密度参数。

1.2.3 参照 DNV－RP－F102 和 DNV－RP－F106 关于钢管、现场接头和现场修复保护涂层系统及生产质量控制的具体要求，提出了计算阴极保护电流的设计参数，避免了阴极保护设计和质量控制的随意性，从而减少了设计中的过度保守。相对于 ISO 15589－2，本标准中阴极保护的电流为现场接头和钢管的电流之和。

指导性说明：

如果 DNV－RP－F106 和 DNV－RP－F102 涂层设计要求和制造质量控制不一致，本标准中与管道涂层相关的阴极保护设计参数（涂层破损系数）仍然是适用的，但用户应仔细评估这些不一致产生的影响。

1.2.4 本标准不包括阴极保护设计概念设计（见 1.1.3 和 1.2.2）、外加电流阴极保护详细设计、阳极材料质量和质量控制测试及海底管道阴极保护系统的操作。这些内容请参考 DNV－OS－F101 中的要求，更详细的请参见 ISO 15589－1 和 ISO 15589－2。

1.2.5 本标准不包括与阳极制造安装有关的安全和环境灾害内容。

1.3 目的和用途

1.3.1 本标准与 ISO 15589－2 中相关章节的要求、建议和指导方针一致，适用于 DNV－OS－F101 中定义的“海底管道系统”，但阴极保护不包括最低天文潮以上的立管。对于外加电流保护的管道登陆段，参见 ISO 15589－1。

1.3.2 本标准主要有两个目的，可作为管道操作者或承包人进行阴极保护详细设计、阳极制造和安装要求的指导，也可以作为咨询或采购订单的附件。如果业主在采购文件中采用本标准，承包人宜考虑本标准所有强制性的要求（见第 3 章），除非合同中有特别要求。

1.3.3 除了采用本标准的“采购文件”（参看第 3 章的定义）外，还应附上 1.3.4～1.3.6 的资料（作为检查列表），分别用于阴极保护详细设计、阳极制造和阳极安装。

1.3.4 阴极保护详细设计：

——概念设计报告，如果已完成（5.1）；

——管道设计基础数据，包括管道材料和尺寸、安装条件、内部流体温度、海洋环境条件、埋设情况或礁石、管道现场接头涂装设计、设计寿命（5.1）；

——文件和验证资料，包括文件的提交时间表（5.7）。

1.3.5 阳极制造：

——阳极材料类型（如铝基或锌基）和阳极材料的化学成分（6.5.1）；

——阳极结构图（包括阳极芯）及公差（5.7.1）；

——生产前质量鉴定试验（PQT）的特殊需求，包括文件提供、浇注数量和每种类型阳极的破坏性试验数量的计划（6.3）；

——“制造程序规格书”（MPS）（6.2.1）或“检测和试验计划”（ITP）（6.4.2）的特定要求；

——生产期间破坏性测试频率要求，手镯式阳极芯位置检验和/或在模具上的装配测试（6.6.3）；

——任何对承包商管理的特定要求（6.6.7）；

——阳极材料样本（6.6.1）；

——阳极标记要求（6.7）；

——阳极搬运、储存和海上运输的特殊要求（6.8）；

——最终文件的特殊需求，包括供货时间表（6.7）。

1.3.6 阳极安装：

——阳极安装设计要求，包括阳极图纸（阴极保护概念或详细设计图纸，随后由阳极制造图取代）；

——影响阳极安装的设计前提，比如管道尺寸、管道涂装类型、管道安装原则；

——阳极位置与管端和接头之间的距离（7.6.3）；
——阳极安装质量的特别要求（PQT），包括管道安装过程中阳极的完整性检验，相关的填充材料和管道涂层的修复（7.3）；
——质量控制的特殊需求，比如安装程序规格书（7.2.1）和“施工日志”（7.4.2）；
——阳极和阳极安装材料运输和储存的特殊要求（7.5.2）；
——最终文件的特殊要求，包括供货时间表（7.8.3）。

1.4 文件结构

1.4.1 第5章、第6章、第7章分别介绍了阴极保护详细设计、阳极制造和阳极安装的要求和推荐作法。

1.5 与 DNV－OS－F101 和其他 DNV 标准的关系

1.5.1 DNV－OS－F101《海底管道系统》第8章给出了阴极保护系统概念设计和详细设计阶段的一般性指导方针，包括制造和安装方面的要求和建议及涂层的要求；第10章的一些章节给出了操作状态下阴极保护系统的检测文件。
1.5.2 DNV－RP－F106《工厂外涂层腐蚀控制》和 DNV－RP－F102《管道现场接头和外涂层的现场修复》，给出了管道涂装的详细规定。
1.5.3 对于海底管道阴极保护，本标准取代 DNV－RP－B401《阴极保护设计》（1993）。

2 参考标准

2.1 DNV（挪威船级社）

DNV－OS－F101 Submarine pipeline systems
DNV－RP－B401 Cathodic protection design
DNV－RP－F106 Factory applied coatings for external corrosion control
DNV－RP－F102 Pipeline field joint coating and field repair of linepipe external coatings

2.2 EN（欧洲标准）

EN 10204 Metallic products—Types of inspection documents

2.3 ISO（国际标准化组织）

ISO 10474 Steel and steel products—Inspection documents
ISO 10005 Quality management—Guidelines for quality plans
ISO 13847 Petroleum and natural gas industries—Pipeline transportation systems—Welding of pipelines
ISO 15589－1 Petroleum and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline transportation systems—Part 1：Onshore pipelines
ISO 15589－2 Petroleum and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline transportation systems—Part 2：Offshore pipelines

2.4 GB（国家标准）

GB 8923 涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级
GB/T 13288.2 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙特性 第2部分：磨料

3　术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

业主　purchaser

咨询或工程承包方（管道操作者或主要承包者）、制造或安装方或指定代理方。

3.2

承包商　contractor

签订工作承包合约的一方。

3.3

应　shall

强制性要求。

3.4

宜　should

一种合适的行动。

3.5

可　may

一种允许的行动。

3.6

协议　agreed，agreement

采购方和承包商之间的书面协定（如合同中的规定）。

3.7

报告和通报　report and notify

承包商提供书面通报的活动。

3.8

接受　accepted，acceptance

业主提供的书面认可。

3.9

证书　certificate，certified

由承包商和供应商依照 EN 10204 中 3.1.B，ISO 10474 中 5.1－B 或相当标准提供的涂料的证书。

3.10

购买文件　purchase document（s）

咨询供应商或购业主/承包方规格书。

3.11

制造加工　manufacture，manufacturing

阳极的制造、安装，包括 MPS（如 PQT）和 WPS 质量相关的工作。

4 缩写和符号

4.1 缩写

CDS——涂料数据表；
CFR——涂层现场修补；
CP——阴极保护；
CR——特许要求；
CRA——耐蚀合金；
FJC——现场接头涂层；
HISC——氢致应力开裂；
HV——维氏硬度；
IPS——安装程序规格书（见 7.2）；
ITP——检测试验计划（见 6.4.2）；
LAT——最低天文潮；
LE——液态环氧；
MIP——制造检验计划（见 6.4.2）；
MPS——制造程序规格书（见 6.2）；
PE——聚乙烯；
PP——聚丙烯；
PVC——聚氯乙烯；
PQT——生产前质量鉴定试验（见 6.3）；
RP——推荐作法；
SMYS——最小屈服应力；
WPQ——焊接程序资质；
WPS——焊接程序规格书。

4.2 阴极保护设计参数符号

括号内指定段落中设计参数的详细说明。

A_c（m^2）——表面积（5.2.1）；
a——常数（5.2.7）；
b——常数（5.2.7）；
D（m）——钢管外径（5.6.4）；
d（m）——钢管壁厚（5.6.5）；
E_a°（V）——设计阳极闭路电位（5.5.1）；
E_c°（V）——设计保护电位（5.5.1）；
E'_c（V）——平均保护电位（5.6.3）；
ΔE_A（V）——电解质电压降（5.6.9）；
ΔE_{Me}（V）——金属电压降（5.6.3）；
ε（A·h/kg）——阳极电容量（5.4.1）；
f_{cm}——中期涂层破损率（5.2.5）；
f_{cf}——后期涂层破损率（5.3.2）；

f'_{cf}——平均后期涂层破损率（5.6.4）；

I_{af}（A）——阳极后期输出电流（5.5.1）；

I_c（A）——保护电流（5.2.1）；

I_{cm}（A）——中期保护电流（5.2.1）；

I_{cm}（tot）（A）——总的中期保护电流（5.2.9）；

I_{cf}（A）——后期保护电流（5.3.1）；

I_{cf}（tot）（A）——总的后期保护电流（5.3.1）；

i_{cm}（A/m^2）——设计中期电流密度（5.2.3）；

L（m）——一块阳极保护的管道长度（5.6.3）；

L_{tot}（m）——管段长度（5.6.9）；

M（kg）——总的阳极净重量（5.4.1）；

M_a（kg）——单个阳极净重量（5.6.9）；

N——阳极数量（5.5.3）；

R_{Me}（Ω）——金属电阻（5.6.3）

R_{af}（Ω）——后期阳极电阻（5.5.1）；

r——钢管无涂敷段与涂敷段的长度比（5.6.4）；

ρ_{Me}（Ω·m）——钢管材料电阻率（5.6.5）；

t_f（年）——设计寿命（5.2.6）；

μ——阳极利用系数（5.4.2）。

5 阴极保护详细设计

5.1 概述

5.1.1 海底管道阴极保护系统详细设计通常以概念设计开始（见1.1.3），在概念设计过程中确定阴极保护系统的类型和拟使用的牺牲阳极材料种类（使用外加电流阴极保护系统除外），确定阳极的连接方式，考虑管道安装期间阳极的完整性要求和阳极材料与管道的电连接要求。

5.1.2 海底管道概念设计时，要确定管道和管件涂层的类型及现场接头的涂层。以此为根据进行初步的阴极保护电流计算和相应阳极材料总重量的计算，从而得出初步的单个阳极尺寸和阳极分布（见1.1.3）。

5.1.3 除阴极保护概念设计报告之外，项目设计基础资料包括项目详细设计的输入参数。在设计期间，应确保提供有效的设计基础数据。

5.1.4 设计计算按照ISO 15589－2附件A进行，为了明确和方便阴极保护设计参数的选择进行了一些修改。

5.1.5 所有涉及的电化学电位均相对Ag/AgCl/海水参比电极的电位。

5.2 阴极保护中期电流的计算

5.2.1 对于阴极保护详细设计，根据流体和环境参数的变化（流体温度和埋设条件），管道宜分成不同的部分，这些都会影响到阴极保护的“保护电流”。对于“表面积为A_c”管道的“中期保护电流”I_{cm}（A）按下式计算：

$$I_{cm} = A_c \cdot f_{cm} \cdot i_{cm} \quad \cdots\cdots (1)$$

（f_{cm}和i_{cm}定义见后）

5.2.2 本标准中环焊缝现场接头的表面积应分别计算，根据公式（1）计算保护电流并加到管道和管件所需保护电流中。

指导性说明：

因为现场接头的表面积只占管道总表面积的百分之几，因此在计算管道的保护电流时没必要减去现场接头的表面积。

5.2.3 在公式（1）中，i_{cm}是“设计中期电流密度”，即假定暴露在海水或海底沉积层中裸露金属的平均电流密度（见5.2.4），“中期”为设计寿命期间保护电流密度的平均值。

5.2.4 表5－1列出了埋设和不埋设管道（或管段）的推荐设计中期电流密度。这个值是输送介质温度的函数，与深度无关。“埋设”指管段要挖沟并回填。管道（管段）铺设在非常软的、会完全自埋（如通过计算）海床上可以认为是埋设的。预计不能完全自埋的管段，在计算保护电流时应认为是不埋设的。虽然没有挖沟，但由岩石/沙砾覆盖也可认为是“埋设”的。表5.1中的设计电流密度适用于DNV－RP－F106和DNV－RP－F102中定义的带涂层的管道和现场接头。对于没有涂装的管道和管件，对于与表面温度和深度无关的不埋设和埋设管道，推荐使用0.100A/m²和0.050A/m²保护电流密度。假定与整个面积（管段）相比很小的面积（最大2%）都是被保护的。这些设计电流密度适用于CRA及CMn钢管道和普通碳钢管道。

表5－1 设计中期电流密度推荐值（A/m²），为输送介质温度的函数

暴露条件	内部流体温度，℃			
	≤50	>50～80	>80～120	>120
不埋设*	0.050	0.060	0.070	0.100
埋设*	0.020	0.025	0.030	0.040
* 见5.2.4中指导性说明。				

指导性说明：

表5－1中的设计电流密度可用于不同的地理位置和不同深度，但宜作为最小值。对于特殊要求，管道所有者可以选择比表5－1更高的设计值。

指导性说明：

海底管道阴极保护的保护电流与涂层的针孔和裂纹引起的电流泄漏有关，多发生在现场接头处。钢表面不会直接暴露在海水中，金属/电解质界面的温度接近管道内介质温度。阴极电流主要与析氢有关，即使是不埋设的管段溶解氧的还原对阴极反应的贡献也很小。因此，影响氧供应的海水参数（如溶解氧的含量和海水流速）、静水压力和海水温度都不太重要。阴极电流主要取决于小孔和裂缝处的扩散和对流以及电解质电阻率。对于操作温度高于环境温度的管道，介质的温度对扩散/对流过程和电解质电导有很大影响，是考虑保护电流的决定性因素。

5.2.5 f_{cm}是公式（1）中的一个无因次因数（≤1），称为“中期涂层破损系数”，描述了涂层减小阴极保护的电流的性能（见指导性说明5.2.7，5.3.1和5.3.2）。“中期”表示设计寿命的平均值。

5.2.6 中期涂层破损率由下式给出：

$$f_{cm} = a + 0.5bt_f \qquad \cdots\cdots (2)$$

t_f（年）是设计寿命。a和b在下面定义。

指导性说明：

阴极保护详细设计的设计寿命应由业主确定，并保守估算管道的最大预期寿命，包括安装期间和开始生产的时间。

5.2.7 公式中的a和b是常数，附件1中表A.1和表A.2分别给出了DNV－RP－F106和DNV－RP－F102中推荐的现场接头和管道涂层在最大操作温度下的常数。假定这些常数在安装前管道涂层的任何损坏都按照DNV RP－ F102的要求进行修补，且安装系统和现场接头已通过实验或计算确

认。另外，假设管道由配重层保护、埋设在沙砾层缓冲以避免裸露金属在操作中引起的损坏。

指导性说明：

常数 a 确定了假设的最初涂层减小阴极保护的电流的能力，而常数 b 定义了假定的涂层在使用期间性能的老化（涂层破损），尽管这些涂层表面看上去没有变化。表 A.1 和表 A.2 中的常数 a 和 b 是根据实际经验和工程判断值，这反映在推荐数值的精度上。

5.2.8 对于使用普通海洋涂层系统的管件，如使用液体环氧或聚氨酯（干膜厚度大于 150μm），默认值假定表面的清洁度为 A/B Sa 2½，根据 GB 8923 和 GB/T 13288.2 的要求，表面粗糙度中等，a 和 b 的推荐值分别为 0.1 和 0.03。在 DNV－RP－F106 和 DNV－RP－F102 中确定的无涂层的管道保护电流采用 5.2.4 中定义的电流密度计算。使用这些数值是假定无涂层的面积与管道面积相比只占很小的部分（最大 2%，见 5.2.4）。

5.2.9 根据上面定义的电流密度和涂层破损率，涂有常用涂层的管道、现场接头和管件的保护电流根据公式（1）分别计算，然后相加得到总的保护电流 I_{cm}（tot）（A）。

5.3 阴极保护后期保护电流的计算

5.3.1 管段总的后期保护电流 I_{cf}（tot）（A）等于涂敷钢管、现场接头和管件各部分保护电流的和。

$$I_{cf} = A_c \cdot f_{cf} \cdot i_{cm} \qquad \cdots\cdots (3)$$

符号如前面 5.2 所述。

指导性说明：

DNV－RP－B401 中定义的初期和后期电流密度分别考虑了裸钢表面的初始极化需要的保护电流（固定保护电位－0.8V）和裸钢表面由于机械作用去除表面钙质沉积引起的再极化的保护电流。对于按 DNV－RP－F106 和 DNV－RP－F102 涂敷的管道，不考虑极化能力的要求，公式（3）中使用了 I_{cm}，本方法也可用于采用其他涂层系统涂敷的一小段管道（或管段）（最大 2%）的情况（见 5.2.8）。

5.3.2 后期涂层破损系数 f_{cf} 按下式计算：

$$f_{cf} = a + bt_f \qquad \cdots\cdots (4)$$

a 和 b 常数在附件 1 表 A.1 和表 A.2 中。

指导性说明：

阴极保护设计中使用的涂层破损率是计算保护电流的主要参数。其他设计参数，如设计电流密度和与阳极性能相关的参数的影响较小。

5.4 阳极总重量计算

5.4.1 根据计算的总中期保护电流 I_{cm}，相应的阳极总净重可由下式计算：

$$M = \frac{I_{cm} \cdot t_f \times 8760}{\mu \cdot \varepsilon} \qquad \cdots\cdots (5)$$

式中：

μ——阳极利用系数，无因次；

ε——阳极材料电容量，A·h/kg；

8760——每年的小时数。

5.4.2 阳极利用系数 μ 可根据 ISO 15589－2 中 7.4 选择，手镯阳极最高取 0.80，安装在其他海底结构上保护海底管道的条型阳极最高取 0.90。

指导性说明：

阳极利用系数 μ 取决于阳极芯的结构设计，实际值可能比以上给定的值小，在这种情况下宜向阳极制造厂咨询。

5.4.3 根据 ISO 15589－2，阴极保护设计中阳极材料的电容量 ε 要依照该标准附录 A 中 A9 的内容

考虑阳极电流密度的影响。ISO 15589－2 要求对表 4 中数据的使用要按该标准的附录 B 进行长时间的测试。本标准推荐如果 Al－Zn－In 阳极（符合 ISO 15589－2 表 5 的成分要求）在适用的温度范围没有合适的阳极电流密度数据，可以使用 ISO 15589－2 中表 4 的数据乘以设计系数 0.8。例如，当阳极表面温度低于 30℃时，暴露在海水和海泥中的阳极应分别取 2000 A·h/kg 和 1600 A·h/kg。对于锌阳极（成分符合 ISO 15589－2 表 6 的要求），在低电流密度下该标准中表 4 的数据是适用的。ISO 15589－2（表 4）对 Al－Zn－In 和 Zn 阳极的温度限制同样适用，详见 5.4.4。

指导性说明：

实验室测得的阳极电流效率与理论值接近（即对 Al－Zn－In 材料大于 2500 A·h/kg），这是由于在测试中使用了较高的阳极电流密度。这些值不能代替推荐的设计电容量值。如果使用的电流效率高于以上值，则宜根据 ISO 15589－2 附录 B 进行的长期测试校正。

5.4.4 对于不埋设管道所需保护电流的计算（见 5.2.4），当海水中阳极表面温度不超过 30℃时或即使流体的温度稍高于 30℃时，可采用 ISO 15589－2 表 4 所给出的电容量值（如 5.4.3）。对于埋设的阳极，保守的做法是以管道内流体的温度作为阳极表面的温度。阳极表面的温度也可以根据阳极与金属结构之间的隔热物质和环境参数进行传热计算获得。

指导性说明：

使用 Al－Zn－In 或 Zn 合金阳极时，如表面温度分别超过 80℃和 50℃时，要经过长时间的测试以证明其有效性。因此推荐在阳极和管道之间进行隔热或使阳极表面完全暴露于海水中以避免过高的使用温度。因此，较短的埋设管道可以使用其邻近的不埋设结构上的阳极提供阴极保护。

5.5 后期阳极输出电流计算

5.5.1 可先假定阳极尺寸，并按公式（5）计算不同管径（包括涂层）的管道或管段所需的阳极总净重（M）。设计寿命后期单个阳极（假定尺寸）的输出电流 I_{af}（A）应按 ISO 15589－2 附件 A 中 A.7 进行计算，公式如下：

$$I_{af}=\frac{E_c^{\circ}-E_a^{\circ}}{R_{af}} \qquad \cdots\cdots (6)$$

式中：

E_a°——阳极闭路电位（V），见 ISO 15589－2 表 4；

E_c°——管道的设计保护电位（V），见 5.6.11；

R_{af}——后期阳极电阻（Ω）。

公式（6）假设管道金属的电阻远小于阳极电阻（R_{af}）、涂层符合 DNV－RP－F106 和 DNV－RP－F102 的要求，并且距阳极至少可达 300m。

指导性说明：

当管道运行过程中要达到更负的保护电位时，5.6.11 给出的设计保护电位 E_c° 仍然适用。因此，根据 R_{af} 计算 I_{af} 以确保阴极保护系统充分地极化，并且用设计保护电位来确定驱动电位。

5.5.2 公式（6）中的后期阳极电阻 R_{af} 应根据 ISO 15589－2 附录 A 中 A.8 进行计算。对 5.2.4 中所描述的不埋设的管道，环境温度下的海水电阻率可用于 R_{af} 的计算。海水电阻率（年平均值）可根据 ISO 15589－2 附录 A 中图 1 估算。对于埋设的管道阳极，应对土壤电阻率进行实测，并根据每年的温度变化进行修正。另外，也可以使用 1.5Ω·m。

5.5.3 根据 ISO 15589－2 附录 A 中 A.7 部分，由后期单个阳极输出电流 I_{af} 和管道阴极保护的后期保护电流 I_{cf}（tot），可得所需阳极数量 N 为：

$$N=\frac{I_{cf}(\mathrm{tot})}{I_{af}} \qquad \cdots\cdots (7)$$

阳极尺寸的选择要经过调整并反复计算以满足阳极净重 M 和后期阳极总电流输出（$N\cdot I_{af}$）的要求。

5.6 阳极布置

5.6.1 在ISO 15589－2的7.1中，管道阴极保护推荐的阳极最大间距为300m。标准中假定，即使相邻阳极丢失也能够提供足够的阳极电流，这时实际阳极间距变成600m。设计中如果阳极间距大于300m，应考虑管道金属本身电阻率的影响。

5.6.2 根据本标准，短距离管道（根据设计和运行环境，小于10km～30km的管道）可以通过将阳极安装在其他结构上对海底管道进行保护，但要求管道与结构是电连接的，例如水下生产基盘、立管底部和平台水下结构。安装在撬座上的阳极（长条形）也可以通过电缆与管道连接。这种布置的阳极发生电流计算应考虑电连接中的电压降和相近阳极对其电解质电阻的相互作用（例如，5.5.2中的阳极电阻）。

5.6.3 安装在附属结构上（额外阴极保护能力，见5.6.8）的阳极所能保护的管道长度L（m）由该结构的阴极电位E'_c决定。管道的设计保护电位E_c°（V）和金属电压降ΔE_{Me}（V）与管道需要的保护电流I_{cf}和金属电阻率R_{Me}有关，服从欧姆定律。

$$\Delta E_{Me} = E_c^{\circ} - E'_c = R_{Me} \cdot I_{cf} \qquad \cdots\cdots (8)$$

5.6.4 长度为L的管道所需的总阴极保护电流为：

$$I_{cf} = L \cdot D \cdot \pi \cdot f'_{cf} \cdot i_{cm} \qquad \cdots\cdots (9)$$

式中：

D——管道外径，m；

f'_{cf}——后期涂层破损系数，无因次。

f'_{cf}是钢管和现场接头的平均值，公式如下：

$$f'_{cf} = f'_{cf}(\text{管道}) + r \cdot f'_{cf}(\text{FJC}) \qquad \cdots\cdots (10)$$

其中：

r是无涂层管段长度和有涂层管段长度的比值。

指导性说明：

对于约为12m长的管道，当管端无涂层的长度小于0.2m时，按0.2m考虑。

$$r = 0.033 \text{ 且 } f'_{cf} = f'_{cf}(\text{管道}) + 0.033 f'_{cf}(\text{FJC})$$

5.6.5 金属电阻R_{Me}根据以下公式计算：

$$R_{Me} = \frac{L \cdot \rho_{Me}}{\pi \cdot d \cdot (D - d)} \qquad \cdots\cdots (11)$$

式中：

d——管道壁厚，m；

ρ_{Me}——管道的电阻率，Ω·m。

5.6.6 假设阴极电流平均分布在长度L的管道上，将公式（9）和公式（11）代入公式（8）中：

$$\Delta E_{Me} = E_c^{\circ} - E'_c = \frac{L^2 \cdot \rho_{Me} \cdot f'_{cf} \cdot i_{cm} \cdot D}{2d \cdot (D - d)} \qquad \cdots\cdots (12)$$

则L变为：

$$L = \sqrt{\frac{2\Delta E_{Me} \cdot d \cdot (D - d)}{\rho_{Me} \cdot D \cdot f'_{cf} \cdot i_{cm}}} \qquad \cdots\cdots (13)$$

这个公式给出了评估阴极电流在管道上电压降的简单方法。

5.6.7 如果预期的阴极电流不是平均地分布在长度为 L 的管道上，可以保守假设所有的电流都进入管道，那么：

$$L=\sqrt{\frac{\Delta E_{Me}\cdot d\cdot(D-d)}{\rho_{Me}\cdot D\cdot f'_{cf}\cdot i_{cm}}} \qquad \cdots\cdots (14)$$

5.6.8 对于暴露于海水中有涂层的结构物的阴极保护，推荐采用有一定保守性的整体保护电位（E'_c）－0.95V。对于大部分为裸钢的结构（平台水下结构），推荐整体电位为－0.90V。

指导性说明：

用相邻结构上的阳极进行管道阴极保护设计必须保证这个系统有足够的冗余，因此，在接近阴极保护系统寿命时，整体电位会变得比以上假设的电位还小一点。对于新结构，阴极保护系统设计应有一定的保守性（延长使用寿命）。对于现有阴极保护能力达到临界值的结构，可对总体保护电位进行监测并更新阳极（也应注意，即使管道上的牺牲阳极，管道与临界状态阴极保护的结构的电连接也可能受到过早的阳极消耗，最终导致保护不足）。

5.6.9 如果用手镯式阳极进行阴极保护，阳极最大间距不应按 5.6.1 提出的 300m 数值，连续阳极的最大间距可使用公式（17）进行计算。对于长度为 L_{tot} 的管段使用 N 个手镯阳极进行保护，阳极之间的最大距离变为 $2L$。

$$2L=\frac{L_{tot}}{N} \qquad \cdots\cdots (15)$$

L 的计算应考虑电解质的电压降 ΔE_A（V）和金属的电压降 ΔE_{Me}（V），如下面的公式：

$$\Delta E_A+\Delta E_{Me}=E_c^\circ-E_a^\circ \qquad \cdots\cdots (16)$$

将公式（7）、公式（12）、公式（15）、公式（16）代入，则 L 变为：

$$L=\frac{d\cdot(D-d)}{\rho_{Me}\cdot D\cdot f'_{cf}\cdot i_{cm}}\left\{-\frac{2\cdot R_{af}\cdot I_{cf}(tot)}{L_{tot}}+\sqrt{\frac{4R_{af}^2\cdot I_{cf}^2(tot)}{L_{tot}^2}+\frac{2\rho_{Me}\cdot i_{cm}\cdot f'_{cf}\cdot D}{d(D-d)}\times(E_c^\circ-E_a^\circ)}\right\} \qquad \cdots\cdots (17)$$

如果考虑到丢失掉一个阳极，提供足够阳极发生电流的阳极最大间距为 L 而不是 $2L$。

可以证实，单个阳极净重 M_a（kg）和总阳极净重 M 满足以下公式：

$$N\cdot M_a=M \qquad \cdots\cdots (18)$$

5.6.10 用于 L 计算的不同钢材的电阻率推荐值（适用于不同操作温度）：

CMn 钢管	$0.2\times10^{-6}\ \Omega\cdot m$
13Cr 管	$0.8\times10^{-6}\ \Omega\cdot m$
22Cr/25Cr 管	$1.0\times10^{-6}\ \Omega\cdot m$

5.6.11 根据公式（13）、公式（14）、公式（17）用于计算 L 的设计保护电位值：

CMn 钢管道	－0.80V
13Cr 不锈钢管道	－0.60V
双相不锈钢管道	－0.50V

上面提到的电位是相对于银/氯化银/海水参比电极，适用于埋设和不埋设管道。

指导性说明：

普通的铝—锌—铟阳极和锌阳极材料分别可以提供－1.15V 和－1.05V 的保护电位。在管道概念设计时要避免（见 1.1.3）保护电位太负，避免或减少管道材料引起氢脆的可能性。这可以通过使用特殊的铝阳极和安装二极管来

实现，但是这样的电位控制实际经验非常少。

5.7 阴极保护详细设计文件

5.7.1 防腐详细设计报告中应包括下列文件：

——参考的相关标准规范和项目规格书（包括版本号）；

——每段管道所需要的平均和后期保护电流；

——计算每段管道平均保护电流的阳极净重；

——在概念设计中确定采用手镯式阳极或使用相邻结构上的阳极；

——概念设计中或手镯式阳极的间距超过了 ISO 15589－2 提出的 300m 时，计算管道材料电阻率来验证相邻结构阳极提供保护的可行性；

——计算阳极后期发生电流验证能否满足后期需要的保护电流；

——阳极数量、阳极总净重；

——阳极结构图纸和安装图纸允许的误差。

指导性说明：

业主宜请第三方审查防腐设计的详细设计文件。阳极设计可与管道的安装结合并经安装承包人交接并接受。

6 阳极的制造

6.1 概述

6.1.1 本章叙述了牺牲阳极的制造，包括阳极芯的预制。本章的要求及指导方针与 ISO 15589－2 的第 8 章和第 9 章一致，只是对质量控制作出了一些修改，大多数内容也适用于安装在相邻结构上与被保护管道有电连接的其他类型的阳极的制造。本章主要是关于管道手镯式阳极的制造。

6.2 制造程序

6.2.1 所有牺牲阳极制造工作，包括“生产前质量鉴定试验”（PQT，见 6.3），都必须在“制造程序规格书”（MPS）中描述，至少应包括如下内容：

——阳极芯材料规格书；

——材料的接收、处理和储存；

——阳极材料合金元素的最大和（或）最小含量、杂质元素的最大含量；

——详细阳极图纸及公差；

——阳极芯焊接资质测试（WPQ）的焊接程序规格书和焊接人员的资质；

——铸造前阳极芯处理；

——阳极铸造，包括合金元素的添加和温度控制；

——阳极的检测和试验；

——手镯式阳极内表面涂层；

——阳极储运和装船；

——标记、追溯和文件。

阳极的成分、详细的阳极图纸和最后两项内容要满足业主的要求。

6.2.2 业主可以指定试验/检测的详细程序和 MPS 中质量控制的其他要求，例如检测和试验的详细程序、双方不一致时的优先要求。

6.3 生产前质量鉴定试验（PQT）

6.3.1 “生产前质量鉴定试验”（PQT）的主要目的是验证 MPS 能否满足阳极性能。要求特别关注

破坏性试验，因为在正常生产中不能频繁地进行这种试验。PQT 选用的材料和设备应与正常生产一致。

指导性说明：

正常生产前应进行手镯式阳极的 PQT，并由业主代表见证。

6.3.2 购买文件应包括 PQT 的要求，例如每个模具铸造的阳极数量和检测（包括破坏性试验的阳极数）、通告和报告计划。

6.3.3 为 PQT 而出的 MPS 和“检测和测试计划”（ITP，见 6.4.2）、阳极铸造检测和（或）测试的详细进度表和报告应在资质认证前及时提交给业主（在每一份购买文件中）。

6.3.4 应向业主提供质量控制仪表（如温度传感器）的校准证书由业主过目。

6.3.5 所有认证过程中的检测、测试和校正记录、铸件和材料认证的操作参数记录都应编写在 PQT 报告中。除非允许，报告必须在开始制作前由业主认可。

6.4 生产质量控制

6.4.1 正常生产之前，承包商应提交如下文件由业主认可：

——反映完整的工艺参数的 MPS 和已认可的 PQT；

——反映完成的工艺参数和已认可的 PQT 的“检测和测试计划”（ITP）；

——日志（参见 6.6.9）；

——质量控制中人员的职责。

6.4.2 ITP 应符合 ISO 10005 的一般要求，见 5.10。用表格的形式确定材料的验收、阳极芯预制、阳极铸造、检测、测试以及阳极标记等相关的质量控制要求。每项工作应按顺序排列，每项工作应确定唯一的数字编号、标准、承包商程序以及具体工程的唯一号码。而且，检测测试频率和（或）范围、在双方不一致的情况下采用的准则和工作都应在计划中确定。另外，ITP 还应包含一个检测代码栏（如检测、目击证据和待定项），应包括承包商、业主、第三方的意见。最好包括应用报告或文件、检验使用的设备或工具。

指导性说明：

建议 ITP 包括检测和测试，也包含相关的制造步骤，并按照制造过程的连续顺序描述。此文件有时被称为“制造和检测计划”（MIP）。

6.4.3 业主有权检查制造过程中的活动并且能调看承包人的 QA（质量评价系统）/QC（质量控制系统）系统资料。业主应对 ITP 过程中目击的证据及待定内容进行确定并通知承包人。

6.5 原料和铸造

6.5.1 业主应确定牺牲阳极原材料的组分（合金和杂质元素的含量）。

指导性说明：

“典型”的铝—锌—铟和锌基阳极原料的化学成分见 ISO 15589－2 的第 8 章。

6.5.2 承包商应确保所有阳极制造使用的原材料满足要求。验证包括实际测试和材料供应商的资质认证。所有承包商的资质认证的审查和核实测试都要包括于 ITP 中。检查到的与要求不一致的原料都需要标记并隔离。

6.5.3 阳极芯材料、焊接、表面处理和最终检测及手镯式阳极内表面涂层应满足 ISO 15589－2 第 8 章的要求。

6.5.4 表面处理材料和涂料除了使用外，应放在原始的包装之中；应有明确的标记，包括：

——制造商名称和产地；

——原料类型和产品标识；

——批号；

——日期（如需要提供储藏时间）；

——标准（如需要的话）；

——储运说明书（包括健康和安全说明）。

6.5.5 承包商应保证涂料和表面处理的原料在储运过程中免受环境及其他因素的损坏。供应商关于储存和使用的建议得到业主的审查认可。

6.5.6 阳极芯预制和阳极铸造工作应按照已认可的 MPS、描述的设备和程序进行。一旦 MPS 取得了认证，任何的变更都应得到业主的认可。

6.5.7 对于质量控制监测设备（如温度传感器）应按照 ITP（6.4.2）要求的时间间隔进行校准。

6.5.8 所有阳极都应可追溯到阳极芯材料和涂料的认证。

6.6 阳极检测和试验

6.6.1 阳极化学成分应按照 ISO 15589－2 中 9.2 要求的频次进行检验。阳极成分（合金和杂质元素的特定含量）应由独立第三方进行阳极化学成分光谱分析。业主有权要求在独立实验室中对阳极试样进行测试，也可以自己测试。业主还可要求承包商保留试样做额外的化学分析和（或）电化学测试。

6.6.2 可参照 ISO 15589－2 的 9.3～9.9 进行阳极尺寸和重量的检查、阳极表面裂纹/砂眼的目视检查、内部缺陷的破坏性试验和电化学性能测试，包括测试的频率及验收标准。

指导性说明：

应在 MPS/MIP 中定量描述表面缺陷的验收标准。

6.6.3 额外的阳极破坏性试验以及手镯式阳极的适配性测试（如在样管上的测试）在购买单中详述。业主有权选择阳极的批次进行测试。

指导性说明：

阳极芯伸出部分是指阳极表面突出的部分，起紧固阳极的作用。

6.6.4 如果明显是由于取样缺陷或测试设备的操作错误而造成的失败可以忽略，可对同一阳极重新进行测试。

6.6.5 进行切割测试（如每 50 个阳极做一次破坏性试验）时，如果破坏性阳极测试失效，本块阳极及以后的阳极必须每个都作测试直到最少 3 个阳极连续通过测试为止。

6.6.6 如果出现连续的测试失败，应停止生产，由承包商提出“不符合要求报告”及失败的原因。应标记不符合要求的阳极（单一的或批量）并隔离。

6.6.7 在“日志”中应记录所有阳极的检测、测试数据和测试、监测设备的校准数据。对于阳极的特定数据，必须确定阳极号或批次（6.7.2）。日志应以日更新，而且在制造过程中要得到业主的审查认可。

6.7 文件及标记

6.7.1 在业主文件中应明确标记文件的格式要求。承包商的标记应在 MPS 中描述并作为特定工作包括在 ITP 中。

6.7.2 所有认证和生产过程中的检测和测试结果都应记录在文件中并且可追溯到阳极编号（或阳极批次），阳极芯材料和涂层材料也要做如上的要求，特殊的要求见 6.6.7。

6.7.3 承包商应按 EN 10204 中 3.1.B 检测证书或 ISO 10474 中 5.1.B 检测证书要求提供检测文件。

6.7.4 业主可以对最终文件指定特殊的要求，如表格和进度表。

6.8 阳极存放和运输

6.8.1 储存和运输应避免对阳极材料和阳极芯造成损坏，应符合购买文件中的要求。MPS 中应包含具体的程序且得到业主的认可。

6.8.2 购买文件应包括包装的特殊要求或阳极运输的保护方式。

7 阳极安装

7.1 阳极安装设计

7.1.1 本章主要介绍海底管道手镯式阳极的安装要求，如果使用邻近结构上的阳极保护海底管道（或管段），应提供该结构上阳极安装的规格书。其技术要求和指南见 ISO 15589－2 第 10 章，本标准仅对质量控制有关的内容作了一些补充和修改。

指导性说明：

对于安装在已涂敷管道上的手镯式阳极，在概念设计时应提出安装要求，在详细设计阶段完成。阳极铸造前，业主宜考虑让阳极安装分包商进行阳极设计的确认。

7.1.2 避免将阳极通过熔透焊与管道或有内压的耐腐蚀合金（CRA）连接（即使有加强板也不行）。与管道的电连接方式应采用铝热剂焊接法（铝热焊）、铜焊或爆炸焊接，应控制焊接过程和铝热剂的热量导入，避免过多的热量导入管道。如果采用焊接方式进行阳极安装，应保证在焊接热影响区最大的硬度不超过 300HV，对于铁素体—奥氏体双相不锈钢以及铁素体和马氏体不锈钢其焊接热影响区的硬度不应超过 350HV。

7.1.3 手镯式阳极与钢管的固定形式应采用螺栓连接或焊接方式进行（见 6.6.3）。对于螺栓连接，规定的最小屈服强度（SMYS）不超过 720MPa。

指导性说明：

对于卡在已涂敷管道上的手镯阳极，推荐通过计算或实验以及模拟管道铺设过程中的最大剪切应力来保证阳极安装后的稳定性。

7.1.4 电缆及电缆连接材料应按 ISO 15589－2 执行。应采用合理的填充材料确保阳极电缆在管道运输和铺管过程中得到保护。由于阳极安装而破损的管道涂层应得到及时的修补（详见 DNV－RP－F102）。

7.2 阳极安装程序

7.2.1 管道阳极安装的所有工作包括阳极制造工艺评定（PQT）都应在安装程序规格书（IPS）中说明，至少包括以下几个方面：

——所用材料和设备规格书，包括相关证书和材料清单；

——阳极和阳极安装材料的接收、处理和储存；

——阳极安装详细图纸及公差；

——阳极安装的检验和试验；

——设计文件、材料和检查记录报告。

7.3 生产前质量鉴定试验（PQT）

7.3.1 生产前质量鉴定试验（PQT）的主要目的是验证 IPS 能达到规定要求。特别对在正常生产过程中不能经常检测的破坏性切割实验。同时应确保阳极安装不会破坏阳极周围的防腐涂层。

7.3.2 阳极安装过程中所有的焊接包括铜焊程序应遵照 ISO 13847 的规定，以保证焊接硬度和铜的熔透焊接。只有取得铜焊操作和认证的焊接工人才能进行此项工作。

7.3.3 IPS 的 PQT，以及详细的进度表应在安装之前提交给业主。

7.3.4 检测、试验和校正资质审核结果及焊接程序测试、材料清单、证书、铜焊设备操作手册及其他相关项目都应汇编在 PQT 报告中。除非情况特殊，否则该报告应在生产前提交给业主。

7.4 生产中质量控制

7.4.1 在阳极安装前，承包商应向业主提交详细的 IPS，并在完成 PQT 后修正自己的相关安装数据和参数。

7.4.2 对于比较复杂的阳极安装，如管道涂层的修补，应增加以下文件：

——生产的详细检查和测试计划（ITP）；

——日志（见 6.6.7）；

——质量控制人员责任。

7.5 阳极和安装材料的接收和运输

7.5.1 安装前承包人应对所有阳极进行检查，确保没有明显的损坏或其他不利的影响。未经检验的阳极和材料应隔离处置。

7.5.2 承包商应确保阳极及阳极安装材料在储存和运输过程中免遭环境和其他因素的损坏。应提供储存和使用建议供业主参考。

7.5.3 业主可以对阳极和安装材料提出详细的接收和运输要求。

7.6 阳极安装

7.6.1 所有与阳极安装有关的工作应按 IPS 和 WPS 规定进行。当 IPS 和 WPS 确定后，任何改变都应通过业主确认。

7.6.2 业主应具体说明（或确认）阳极与管端或现场接头的距离。对安装在有混凝土配重管道上的阳极，应提供相应的措施避免阳极与混凝土龙骨之间的电连接（在 IPS 中注明）。

7.6.3 阳极安装后管道涂层的修补和填充材料应依照 DNV－RP－F106 中相应章节实施。

7.7 阳极安装检验

7.7.1 阳极安装的检验应包括焊缝外观检查和铜线的电连接检验。铝热焊和铜线电连接的完整性用 1kg 重的硬橡胶头锤击测试。

7.7.2 管道涂层修补的检测请参见 DNV－RP－F106。阳极表面填充溢出物或杂质应清除。

7.8 文件

7.8.1 生产前应提供的文件见 7.2，7.3 和 7.4.1。

7.8.2 最终文件应包括材料证书（包括焊接和/或铜焊耗材）及所有检查和测试报告。

7.8.3 业主可以对完工文件提出特殊要求，如格式和进度等。

8 附件 1 推荐涂层破损系数

表 A.1 推荐使用“a”和“b”计算 DNV－RP－F106 中定义的钢管涂层系统的破损系数

（最高温度是指连续操作的最高指示温度。制造商的建议应采用。以 FBE 为底漆的运行温度高于 90℃的涂层，其性能参数应在前期资质和/或 PQT 中阐述。高于 90℃温度使用的氯丁橡胶涂层也是一样）

管道涂层类型	DNV－RP－F106 CDS	混凝土涂层	最高温度 ℃	$a\times100$	$b\times100$
玻璃纤维增强沥青	系统 5	是	70	0.3	0.01
玻璃纤维增强煤焦油	系统 6	是	80	0.3	0.01

表 A.1（续）

管道涂层类型	DNV－RP－F106 CDS	混凝土涂层	最高温度 ℃	$a\times100$	$b\times100$
单层或双层 FBE	系统 1	是	90	1	0.03
3 层 FBE/PE	系统 2	是	80	0.1	0.003
3 层 FBE/PP	系统 3	否	110	0.1	0.003
多层 FBE/PP	系统 4	否	140	0.03	0.001
氯丁橡胶	系统 7	否	90	0.1	0.01

表 A.2 推荐“a”和“b”计算 DNV－RP－F102 中定义的现场节点涂层系统在有填充物或没有填充物时的涂层破损系数

（最高温度是指连续操作的最高指示温度。制造商的建议应采用。以 FBE 为底漆的运行温度高于 90°C 的涂层，其性能参数应在前期资质和/或 PQT 中阐述。高于 90°C 温度使用的氯丁橡胶涂层也是一样）

现场节点类型（DNV－RP－F102 现场节点涂层系统）	填充类型（DNV－RP－F102 系统）	最高温度 ℃	与 DNV－RP－F106 管道涂层系统兼容的例子	$a\times100$	$b\times100$
无	Ⅱ（PU），Ⅲ（混凝土）或Ⅳ（PP）		涂层系统 1，2，5，6 带混凝土配重，节点涂层系统 4	30	3
1A 缠绕带或热缩套（PVC/PE 背衬）带玛蹄脂粘结层	Ⅰ（玛蹄脂），Ⅱ 或Ⅲ	70	涂层系统 5 和 6 带混凝土配重	10	1
2A 热缩套（背衬＋粘结层的 PE，液体环氧底漆）	Ⅱ或Ⅲ	70	涂层系统 2 带混凝土配重	3	0.3
2B 热缩套（背衬＋PP 粘结层，液体环氧底漆）	无	110	涂层系统 3	3	0.3
3A FBE	Ⅱ或Ⅲ	90	涂层系统 1 带混凝土配重	3	0.3
3B FBE＋PE 热缩套	Ⅱ或Ⅲ	80	涂层系统 2 带混凝土配重	1	0.03
3C FBE＋PP 热缩套	无或Ⅱ	140	涂层系统 3	1	0.03
3D FBE，PP 粘结层和 PP（包覆、挤压或火焰加热）	无或Ⅱ	140	涂层系统 3 或 4	1	0.03
4A 氯丁橡胶	无	90	涂层系统 7	1	0.03

中华人民共和国
石油天然气行业标准
海底管道牺牲阳极阴极保护
SY/T 6878—2012

*

石油工业出版社出版
（北京安定门外安华里二区一号楼）
北京中石油彩色印刷有限责任公司排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

880×1230 毫米 16 开本 1.5 印张 42 千字 印 1—1000
2012 年 11 月北京第 1 版 2012 年 11 月北京第 1 次印刷
书号：155021·6794 定价：18.00 元
版权专有 不得翻印