NACE RP0176-2003
Item No. 21118

海上钢质固定石油生产构筑物腐蚀控制的推荐做法

本NACE标准代表各成员的统一意见，这些成员审查了本文件及其适用范围和条款。接受本标准并不排除任何人（不管是否采用本标准）会在生产、销售、采购或使用产品、工艺或程序时不符合本标准。在本标准中绝不包含任何可被理解为（隐含的或其他的）授予任何权力进行与为专利特许权所涵盖的任何方法、器械或产品有关的制造、销售或使用；或被理解为确认或保护任何人免除因侵犯专利特许权而应承担的责任。本标准仅是最低要求，但不能解释为限制使用更好的方法或材料。本标准也不能用于与本主题有关的所有情况。不可预见的环境可能在特定情况下使本标准失效。NACE不承担其它方对本标准的解释或使用所导致的责任，只承担NACE按照管理程序和政策所颁发的正式解释的责任，它排除了单个志愿者的解释。

NACE标准的用户负责在使用前检查相应的健康、安全、环保和法规文件，并确定它们对本标准的适用性。本标准可能没有列出在本标准范围内所涉及的与材料和设备的使用及操作相关的所有潜在的健康和安全问题或对环境的危害。NACE标准的用户也有责任建立相应的健康、安全和环保规则，必要时咨询相应的政府法规部门，以便在使用本标准前满足现有适用的法律和法规要求。

警示： NACE标准会被定期审查，不经通知随时修改或撤销标准。NACE要求在本标准初次发布后五年内，进行重新确认、修改或撤销。用户应注意获取最新版本。NACE标准的购买者可与NACE会员服务部联系取得所有标准和其它NACE出版物的最新信息，联系地址：NACE International Membership Services Department, 1440 South Creek Drive, Houston, Texas 77084-4906 (telephone +1 281/228-6200).

2004-06-21修订
1996-03修订
1983-05修订
1967-04批准
NACE
1440 South Creek Drive
Houston, Texas 77084-4906
(telephone: +1 281/228-6200)
ISBN 1-57590-170-6
©2003, NACE

前　言

海上构筑物意味着巨大的投资。遍布世界各海域中的构筑物，设计应能够承受飓风、极地风暴、潮流、地震以及浮冰的冲击。而且，目前构筑物建造的海域水深越来越深，因此构筑物设计得越来越大，越来越复杂，投资也越来越高。为了经济地开发油气，给工作与生活提供安全保障，避免对环境的潜在危害，有必要对构筑物进行腐蚀控制。为此目的，本标准所指海上构筑物为采用重力、桩、和/或锚链固定在海床上的固定结构（平台或海底设施）。

本NACE标准主要供从事海上钢质固定石油生产构筑物腐蚀控制人员使用，涵概了用于海上钢质固定石油生产构筑物腐蚀控制所需的材料、习惯作法和方法。其目的是通过提供可靠的资料来便于更有效地保护构筑物。海上构筑物的腐蚀可分为三个主要区域：全浸区、飞溅区和大气区。全浸区还包括位于泥线下的部分。本标准不包括构筑物上所用的油井、配管和有关设备的内腐蚀控制方法，但包括了这些设施暴露于构筑物大气区的外腐蚀控制方法。

本标准最初由“北海腐蚀问题”任务组T-1-2在1976年发布，并于1983年进行了修改。1994年由任务组T-1-5修改，2003年由任务组TG 170修改。TG 170任务组由“石油和天然气生产——阴极保护”专题技术组STG 30管理，并得到“大气区的保护性防腐层和衬里”专题技术组STG 02和“阴极/阳极保护”专题技术组STG 05的支持。本标准在STG 30的主管下由NACE发布。

在NACE标准中，术语项“应(shall)”、“必须(must)”、“宜(should)”、“可(may)”按《NACE出版物格式手册》第4版第7.4.1.9款对这些词项的定义使用。“应”、“必须”用来表示强制性的要求，“宜”用来指那些认为是比较好的、值得推荐的但不是绝对强制性的要求，“可”用来指那些可选择的要求。

目　次

1．总则

2．定义

3．腐蚀控制的结构设计

4. 阴极保护准则

5. 阴极保护系统的设计

6. 阴极保护系统的安装

7. 干扰电流的控制

8. 绝缘屏蔽层

9. 阴极保护系统的运行和维护

10.飞溅区腐蚀控制措施

11.飞溅区腐蚀控制的维护措施

12. 表面处理

13. 防腐层

14. 防腐层检验

15. 腐蚀控制记录

参考文献

参考书目

附录 A. 海上石油生产典型设计参数

附录 B. 用于海上构筑物阴极保护的各种工业用牺牲阳极的电容量与消耗率

附录 C. 用于海上构筑物阴极保护的各种工业用辅助阳极在海水中的消耗率

附录 D. 使用初期、维持和后期电流密度计算牺牲阳极输出电流的典型方法

表 A1. 阴极保护设计准则

表 B1. 海水中牺牲阳极材料的电容量和消耗率

表 C1. 辅助阳极材料的消耗率

图 A1. 电流密度/温度曲线

第一章　总则

1.1　本标准为海上钢质固定石油生产构筑物及有关的油气处理设备外部的腐蚀控制所需的最低要求提供了指南。固定构筑物包括平台、张力腿平台（TLPs）和海底基盘。本标准不包括用于石油生产的临时系泊船舶。

1.2　本标准中对构筑物的腐蚀控制分为三个区域:全浸区、飞溅区和大气区,各区分别论述。

1.3　由于环境条件的复杂性，本标准没有提供针对每个特殊情况的指南。在许多情况下，同一问题可能会有几种不同的解决方法，在适当的情况下，包含其他有效的方法。

1.4　本标准不包括附属于构筑物或建于构筑物上的油井、配管和有关设备的内腐蚀控制指南。

1.5　本标准包括了飞溅区以上附属管道的外腐蚀控制。当管道与构筑物的拥有者不同时，构筑物的拥有者对管道的责任通常终止于某一指定点，或位于构筑物上的阀门处。

1.6　本标准不包括海底管道及其立管。

1.7　本标准中提出的目标可以通过不同的方法来达到,不过选择方式仅在有资格的腐蚀控制专家认可并已达到本标准中指出的目标时方可采用。

第二章　定义

说明：阴极保护和防腐层技术的附加定义可见 NACE RP0169[1]、《NACE 腐蚀工程师手册》[2] 和 NACE2002 有关腐蚀的术语表 [3]。

粗糙度：钢表面经高速喷砂处理后产生的不规则凹凸。

阳极： 电化学电池中发生氧化反应的电极。电子从阳极的外部环路流出。阳极往往发生腐蚀，并且金属离子由此进入溶液中。

大气区：飞溅区以上暴露于阳光、风、水雾及雨水中的构筑物部分。

钙质膜或沉积物：沉积在表面上的含碳酸钙和其它盐的膜。是表面被阴极极化时，受到阴极保护的表面附近的 pH 值升高的结果。

阴极： 电化学电池中以还原反应为主要反应的电极。电子流向外部回路的阴极。

阴极剥离：由于阴极反应产物引起的防腐层与被涂覆表面之间的粘结力的破坏。

阴极保护：通过使金属表面成为电化学电池的阴极来减少金属表面腐蚀的技术。

粉化： 有机防腐层表面疏松、粉末（颜料）脱落的过程，通常由风化引起。控制粉化可以

保证漆膜表面的净化，从而为重新施加防腐层保持良好的表面。

氯化橡胶： 由氯化橡胶形成的起粘合作用的特殊防腐层。

腐蚀：由于与周围环境的作用而引起的材料（通常是金属）的破坏。

防腐蚀专家:由于其所受教育和(或)经验有资格来评价和解决与材料腐蚀有关问题的人。本标准中所指的腐蚀专家是具有资格控制海洋环境腐蚀的人。

交联：使防腐层分子结构中连接两链并改变防腐层最终状态的化学反应结果。

电流：（1）流动的电荷（2）单位时间内流经电路某点的电荷数量，指测得的某方向上正电荷的净流动量(金属导体中与电子的流向相反)。

电流密度：流过电极表面单位面积的电流。

去极化：去除电化学电池中阻碍电流流动的因素。

绝缘屏蔽层：指在阴极保护系统中置于阳极与邻近阴极之间的非导电材料，如防腐层、绝缘片或管子，通常置在阴极上，用来改善阴极保护系统电流分布。

加强板：为额外提高强度，在阳极与构筑物连接处附加的一块钢板或增加钢材壁厚。

电绝缘： 与其他金属构筑物或环境呈电隔绝的状态。

电解质： 含有在电场中可以迁移的离子的化学物质。

环氧：由脂肪族或芳香族多羟基化合物（如双酚）和环氧氯丙烷反应而形成的一类树脂，其性能取决于参与反应的环氧乙烷和官能团。

接合：特别类似于接头。本词的愿意是指木船船体板之间的接头。

无关构筑物： 与阴极保护系统无关的任何金属构筑物。

牺牲阳极：在电解质中，两种金属连接时，一种对另一种更惰性的金属提供牺牲保护的金属。这类阴极保护中该种金属是提供电子的来源。

漏点： 防腐层的不连续处，导致未被保护的表面暴露于环境中。

强制电流：使用电极系统以外的电源设备提供的电流(如阴极保护的直流电)。

干扰电流 (杂散电流)： 非预期回路上通过的电流。本标准中干扰电流是指电流自构筑物流向电解质，（1）它可能不在指定回路上；（2）或在指定回路上，但未与电流源完全连通。

无机富锌涂料： 指在无机载体中含有锌粉颜料的涂料（干膜中锌的重量百分含量通常不小于 75%）。

“ J” 型管：设计和安装在构筑物上以支撑或引导一根或多根管道立管或电缆的弯管。

轧制鳞片：在金属热轧或热处理过程中形成的氧化皮。

泥线： 特定区域的海底面。

系缆板环：外形类似于眼睛的吊点或连接点，用于吊钩、固定或吊索。

管道：在构筑物与构筑物之间或构筑物与岸上处理设施之间输送产出的油、水和气的管子。

平台：一种海上结构物，该结构物中可容纳油和(或)气井以及有关的生产设施、配管和（或）生活模块。

极化：由于电流通过电极/电解质界面引起电位偏离开路电位的变化。

聚合反应： 许多小的化学单位聚结成大化学单位的过程，由此产生的集合体称为聚合物。

底漆： 施加于未涂覆表面的第一层防腐层材料。该防腐层与被涂覆表面有特别好的结合力以保护被涂覆表面，并能为随后防腐层提供适宜的表面。

参比电极： 在相似的测量条件下可以认为开路电位恒定不变的电极，可以用作测量其他电极的相对电位。

树脂：一般类属于广义的塑料或聚合物材料，并且用作涂料粘结剂时具有稳定性。“ 树脂”这一术语通常用其他词修饰以表示其种类，例如，醇酸树脂、乙烯基树脂、酯类树脂、或环氧树脂。

立管：（1）自海底向上延伸至构筑物的管道部分。（2）蒸汽发电机循环水和上升蒸汽对流管束中的垂直管段。

银/氯化银电极：本标准指用海水作为电解质的参比电极。例如 Ag/AgCl/海水电极。

飞溅区： 由于潮汐、风和波浪的影响所致，构筑物干湿交替的部分，不包括仅在大风暴时浸湿的表面。

构筑物： 由重力、桩、和/或系泊缆固定在海床上的固定结构（平台或海底设施）。

构筑物/电解质电位：用与电解质接触的参比电极测量的埋设或全浸的金属构筑物与电解质之间的电位差。

全浸区：飞溅区以下的区域，包括泥线以下的构筑物部分。

海底基盘：置于海床上，为油和/或气井、相关生产设备、和/或海底管道提供基础的结构物。

稀释剂：一种用于降低涂料粘度的易挥发性溶剂。

热塑材料： 具有反复加热软化、冷却硬化性能的材料。

热固材料： 在加热、压力、催化和紫外线作用下，经过化学反应而成为比较难熔状态的材料。

粘结层： 具有特定功能的中间防腐层，通常指有机防腐层。它作为底漆与面漆的过渡防腐层，以克服底漆与面漆之间的不相容性或实用上的困难。

氨基甲酸乙酯：一种化学固化涂料，其中所含乙烯溶液、乙烯基丙烯酸溶液或丙烯酸溶液，与异氰酸盐反应而形成一种坚韧、耐久、光滑的防腐层。

阀门外延杆：指阀门伸长操作柄，它可使构筑物上部的操作人员开启或关闭靠近构筑物底

部的压载阀。

丙烯酸乙烯树脂：用溶解的丙烯酸树脂改性的乙烯树脂。

乙烯基涂料： 指溶解在溶剂中的乙烯树脂。乙烯基溶液防腐层可以风干或烘干。

电压：电动势或电极电位差，单位以“ 伏”或“ 毫伏”来表示。

电压降： 按照欧姆定律所得载流电阻两端的电压。

清洗底漆： 一种稀的缓蚀底漆，通常含有铬酸盐类颜料与聚乙烯丁酸酯粘合剂。

防磨蚀板： 一种设置在构筑物飞溅区部位的牺牲性部件，以防止冰和(或)高速含泥沙水对构筑物可能造成的腐蚀和(或)磨蚀。

第三章 腐蚀控制的结构设计

3.1 引言

3.1.1 本章推荐了简化海上构筑物大气区、飞溅区和全浸区钢结构的腐蚀控制设计作法。为使海上构筑物能承受动态荷载和静态荷载所必须考虑的结构设计参数属土木工程师和结构工程师的职责范畴，故未包含在本标准中。

3.2 飞溅区

3.2.1 海上构筑物飞溅区是指由于受潮汐、风和波浪的影响，构筑物干湿交替的区域，但不包括只在大风暴时才被打湿的表面。在墨西哥湾，典型的飞溅区大约为 2m (6 ft)；在阿拉斯加的库克湾达到 9m (30 ft)；在北海，冬季的风暴可使飞溅区达到 10m (33 ft)。

3.2.2 在构筑物结构设计中宜最大程度地减少钢在飞溅区的表面积，在飞溅区宜避免采用“ T”型、“ K”型或“ Y”型交叉的节点。

3.2.3 飞溅区控制腐蚀的方法见第 10 章。

3.2.4 采用焊接套管或厚壁杆件来增加额外的壁厚，以补偿构筑物在使用寿命期间飞溅区的腐蚀。

确定所需增加的壁厚时，可考虑下列因素：

- 构筑物的寿命；
- 使用寿命最短或不需要维护的防腐层（例如，热喷铝）；
- 如果防腐层出现破损，维护的原则（防腐层破损后多长时间内修补）；
- 构筑物所在海域碳钢的腐蚀速率。

3.2.5 在构筑物安装后需要拆除的穿越飞溅区的管道等部件，宜选择用卡子与构筑物构件连接而不要焊接。

3.3　大气区

3.3.1　大气区是指海上构筑物飞溅区以上的部分，该区域暴露于阳光、风、雾和雨中。

3.3.2　控制大气区腐蚀常用保护防腐层系统(见第 12 章)。采取下述措施可减少需要涂覆的钢表面积，并易于施工。

3.3.2.1　用管形构件代替其他形状的构件。

3.3.2.2　金属构件组合在一起时采用密封焊接和绕焊。

3.3.2.3　避免跳焊。

3.3.2.4　避免紧配合面和搭接面。

3.3.2.5　设置系缆环板为搭置脚手架和防腐层维修提供方便。

3.3.3　有色金属和非金属材料可减小大气腐蚀问题。例如，生活模块和救生艇可使用铝和复合材料，如玻璃强化聚酯(GRP)。耐腐蚀材料可以做成扶手、电缆护管、梯子和甲板。在使用不同金属材料时，必须注意防止活泼金属的电偶腐蚀。复合材料如玻璃强化聚酯在要求耐腐蚀和/或减轻重量的地方可用来代替金属材料。使用这些材料宜考虑安全因素。

3.3.4　钻井液对保护防腐层和有色金属（如铝和锌）有破坏作用，因此，为减小钻井液对防腐层的破坏和污染，采用实心板、防溅墙及良好的排放系统。

3.4　全浸区—— 外部

3.4.1　全浸区是指从飞溅区向下包括泥线以下的区域。全浸区的外部腐蚀控制宜用阴极保护或阴极保护加防腐层来实现。推荐采用如下设计，以简化实施有效的阴极保护。

3.4.1.1　宜尽可能使用圆管构件。槽钢或工字钢的死角很难保护，并且背对背的槽钢或角钢形成的缝隙不可能得到有效的保护，因此，不宜采用这类结构形式。

3.4.1.2　当疲劳和腐蚀疲劳是结构设计中的重要因素时，可消除焊接应力，以降低热影响区(HAZ)疲劳和腐蚀疲劳出现的可能性。这一点对在冷水环境中极化进程较慢的构筑物，或构筑物上受到屏蔽的部分特别重要。见 API[1] RP 2A-WSD 和 RP 2A-LRFD[5]。

3.4.1.3　焊缝宜连续，不宜使用跳焊或点焊。如果使用搭接焊，则两边均宜焊接，并避免使用螺栓和铆钉。

3.4.1.4　只要可行，压载控制阀外延杆宜设计成在构筑物就位以后，可将其移除的形式。如果留在那里，它们可能会屏蔽邻近受阴极电流保护的金属构件。松动的外延杆会磨损构筑物。

3.4.1.5　钢管，如灌浆管、钻屑管、排放管、供水套管和海底管道立管，如果群集在构筑物桩腿周围，会造成屏蔽和干扰阴极保护电流的流通。如果经济上可行，宜去掉构筑物操

[1]美国石油学会 (API), 1220 L St. NW, Washington, DC20005.

作不需要的钢管，未能去除的钢管宜放置在不会造成屏蔽的地方。钢管间的最小净间距宜是较小钢管直径的 1.5 倍。也可使用钢管防腐层来减少屏蔽。

3.4.1.6　构筑物投入使用后，有时需要补充或替换强制电流系统的阳极，设计人员宜考虑提供备用的“ J” 型护管，便于增设阳极时牵引电缆，和(或)提供其他类型的管架、导管和管卡，便于阳极的补充或替换。

3.4.1.7　构筑物泥线以下部分宜采用构筑物的阴极保护系统进行保护。从导管架腿中打入的桩通常和导管架采用焊接连接，因此钢桩也受到阴极保护。典型的裙桩是打入水下钢管中并就地用水泥固定。裙桩可通过导向靴、对中器或其他可行的方法与导管架电连接。泥线以下的腐蚀速率低，但是，长使用寿命下构筑物的泥线处腐蚀是很大的。所有泥线处构件，对构筑物的完整性很重要，宜确保与阴极保护系统的电连接。

3.4.1.8　若需要把隔水导管与油井套管作为整体来考虑,必须将隔水导管与构筑物电连接。

3.4.1.9　所有被保护钢结构必须与阳极电连接(优先采用焊接)，并且在结构的整个寿命期间内宜保持连接。

3.5　全浸区 ——内部

3.5.1　对于构件或经密封后不与大气或海水接触的密封舱的内表面，其腐蚀可忽略。如有可能，设计中宜考虑密封舱。

3.5.2　在构筑物下水和扶正操作期间，某些金属构件会充水，并且在其寿命期间一直保持充水状态。为防止内部腐蚀，充水后宜关闭充水阀以避免充水舱接触大气中的氧。如果舱中的海水循环不能避免，宜采取减缓内腐蚀的措施，宜使用阴极保护或使用阴极保护加防腐层。有气相存在的罐或密封舱宜采用内防腐层，阴极保护对产生凝析水之处不能保护。此类密封舱内不宜采用强制电流系统，因为阳极会产生有毒的、有腐蚀性的氯气。

3.5.2.1　管道系统、阀门、潜没泵和其它特殊设备必须得到保护，特别是采用不同金属材料时，发生电偶腐蚀的风险很高。例如，耐蚀合金管道穿越钢结构舱壁时，保护是重要的。

3.5.3　在存在有机营养物质的充水舱内，细菌的生长可产生有机酸、二氧化碳和/或硫化氢（H_2S），这些物质能够产生腐蚀。细菌腐蚀可使用内部阴极保护、防腐层和/或杀菌剂加以控制。（注意：H_2S 即使在低浓度时也是有毒的）

3.5.4　海底管道有时安装在牵引导向管段或“ J” 型管段里。为限制海水和大气中的氧与管道接触，在管道定位后，宜将牵引导向管段环形空间的水上端口用合适的非吸浸性填料加以密封。

3.5.5　为长期服役，浮式生产装置采用系泊系统，此类系泊缆需采取特殊的防腐措施

3.5.5.1　锚链：锚链采用增加腐蚀裕量的方法进行保护。腐蚀裕量增大了锚链（棒）的直

径，在计算腐蚀裕量时，必须以所处位置腐蚀速率的 2 倍来考虑。飞溅区取更大的腐蚀裕量。根据不同的锚链操作方法，锚链的磨蚀可能是严重的。很多永久性浮式生产系统要求最大限度减少锚链的操作。做为飞溅区全部采取腐蚀裕量的替代方法，可在寿命期间将飞溅区部分的锚链调换，这样，在达到设计寿命一半时，全浸区部分的锚链换到了飞溅区。根据经验，构筑物阴极保护的有效范围大约是 30 米至 60 米 (100 英尺至 200 英尺)，该距离取决于锚链与构筑物的电连接、锚链的粗细及其拉伸程度。阴极保护的设计不宜包含在系泊锚链的设计中，但是，未受保护的钢导缆器钢结构必须施加额外的阴极保护。

3.5.5.2　钢索：钢索通常用镀锌钢丝制成，外部防腐采用挤出成型的聚氨酯、聚乙烯或类似材料。另外，挤入油脂防水渗入并使钢丝间的移动变得容易。因为钢丝强度很高，氢的影响宜作为绳索阴极保护的一部分来考虑。

包覆在钢索接头外的夹克层的完好对绳帽和防止水渗入钢索是重要的。

3.5.5.3　对系泊链和锚，必须考虑暴露于海底沉积物部分的细菌腐蚀，如果可能，采取阴极保护、防腐层或增加腐蚀裕量的保护措施。

第四章　阴极保护准则

4.1　引言

4.1.1　本章列出了阴极保护准则和相应的检测方法。单独或联合使用本标准可判断构筑物是否被保护。

4.2　概述

4.2.1　应用阴极保护的目的是控制与电解质溶液接触的金属表面的腐蚀。

4.2.2　第 4.3 节的准则是依据实验室或现场经验确定的，如果用其他方法证明腐蚀得到控制，则构筑物的保护方法不必局限于本准则。

4.2.3　可选择特定的准则来达到 4.2.1 中所提出的目标，这种准则的选择，部分是根据以往在类似构筑物和环境条件下应用该准则的成功经验。

4.2.4　目前还没有一个令人满意的单独的准则可以评价任何条件下应用阴极保护的效果。对某个构筑物的评价可能需要综合使用几个准则。

4.3　准则

4.3.1　电位测量

4.3.1.1　构筑物表面与接触海水的银– 氯化银(20Ω·cm 海水)参比电极(Ag/AgCl/[SW])之间测出的负(阴极)电位差至少为-0.80V。通常构筑物表面的阴极电位是在施加保护电流时测

得的 ,规定的-0.80V 包含了电流通过钢/水界面的电压降 ,但未包含在水中的电压降(见 4.5.1 和 4.6.1)。

4.3.1.2　施加保护电流时 , 负(阴极)电位最小偏移量为 300mV , 此值可替代 4.3.1.1 条中的准则。与海水接触的构筑物表面电位偏移量可由参比电极测出，此值包括电流通过钢/水界面的电压降，但不包含水中的电压降(见 4.5.1.1 和 4.6.1)。

4.3.1.3　控制腐蚀的电位是温度和环境条件的函数。对于与大气接触的水，当处于有代表性的环境温度条件时，4.3.1.1 和 4.3.1.2 中列出的准则已被证明是令人满意的。对于其他环境条件，控制腐蚀的电位可以使用 Nernst 方程来估算。

4.3.2　外观检查

4.3.2.1　为保证构筑物的使用寿命，对整个构筑物的各种外观检查方法(潜水员观察或触摸、物理测量、拍照或录像)所获结果均宜指明腐蚀没有超出构筑物使用寿命所允许的限度。

4.3.3　试片

4.3.3.1　腐蚀类型和腐蚀速率必须在保证构筑物使用寿命的范围内。

4.4　可供选择的参比电极

4.4.1　下面列出的其他类型的标准参比电极可替代 Ag/AgCl/[SW] 参比电极，它们的电位等同于对 Ag/AgCl/[SW]参比电极的-0.80V 电位。

4.4.1.1　饱和铜– 硫酸铜（CSE）参比电极：-0.85V 电位(或用于保护时可更负)。说明：本参比电极不适合于长期浸泡的环境。

4.4.1.2　高纯锌参比电极 : 电位为+0.25V(或用于保护时低于+0.25V) ,对应于 ASTM[2] B 418[7] 类型 II，成分为:

铝：　不大于 0.005%

镉：　不大于 0.003%

铁：　不大于 0.0014%

锌：　余量

4.4.1.3　饱和甘汞电极(SCE[饱和 KCl])：-0.78V(或用于保护时可更负)。

4.4.1.4　军用[3]锌参比电极：电位为+0.25V(或用于保护时低于+0.25V)，对应于 MIL-A-18001[8]，成份为：

铝：　0.10%～0.50%

---

[2] 美国材料试验学会(ASTM) ，100 Barr Harbor Drive, West Conshochocken, PA 19428。

[3] 美国军用规范，来自政府出版物， Washington, DC 20402。

镉： 0.025%～0.15%

铁： 不大于 0.005%

铅： 不大于 0.005%

铜： 不大于 0.005%

硅： 不大于 0.125%

4.4.1.5 Ag/AgCl(饱和 KCl)：-0.76V(或用于保护时可更负)。

4.5 测量和评价阴极保护的方法

4.5.1 评价阴极保护程度最常用的方法是使用适当的参比电极测出构筑物的电位。

4.5.1.1 在测量构筑物电位时，宜将浸入水中的参比电极尽可能靠近被测量的构筑物，以减少测量电位中的电压降因素。在评价构筑物保护程度时，宜重点考虑靠近构筑物但远离阳极块，以及最大的屏蔽区内参比电极测得的数据。

4.5.1.2 测量电位最常用的方法之一是在构筑物的某一设定位置上将参比电极自由悬挂在水中。将参比电极从构筑物上放入水中一系列规定的深度测取数据，并在构筑物其他适当位置重复该过程。由于海流会导致参比电极的漂移，因此可能不确切知道参比电极的具体位置。这种方法对确定阴极保护系统的总体情况是有效的，但当构筑物恰处于被保护的临界状态时，该方法可能会确定不出存在问题的区域。

4.5.1.3 参比电极可由潜水员或摇控运载器(RCV)携带。用这两种方法可准确地知道参比电极位置，并可满足各种精度的电位测量要求。在评价由强制电流保护的构筑物时，必须考虑潜水员的人身安全。为此，在测量期间可减少输出电流或者至少可以关断系统的一部分。如果关掉系统电源，在评价电位（值）大小时，宜考虑对保护程度的相应降低的影响。

4.5.1.4 参比电极可通过导向绳下放，以便更好地控制其位置。定向导向绳可以永久性地安装在构筑物上，也可以临时安装，借助于重物将其锚固在构筑物底部。如果是临时安装，则导向绳（如果是金属材料）宜与构筑物电绝缘。这种导向式参比电极与自由悬挂式参比电极相比，由于导向绳贴近构筑物构件，因此能够提供更加准确的测量电位。

4.5.1.5 在构筑物上可安装一定数量的永久性参比电极。虽然可准确知道这些参比电极的位置，但从这些参比电极上得到的信息只是限于其邻近构筑物表面的电位。

尽管任何电位的测量仅限于局部，但它可以为不同时期的电位比较提供再现依据。宜该用其他电极对永久性参比电极的精确度进行定期校核。将锌和银/氯化银组合成双电极，安装在一个永久装置上，有利于发现/减少故障的发生。

4.5.1.6 除参比电极外，一些构筑物上安装了电流密度和代表性阳极输出电流的永久监测装置。对新构筑物设计和尚无确切防腐设计准则的新环境，这些装置有特殊重要的作用。

这些装置一般采用校准过的分流器测量输出电流和电流密度，一般采用导线将信号传送到上部组块。

4.5.2　除了电位测量外，测量电流密度也可获得有价值的信息。使用特殊设计的参比电极系统，通过测定结构周围海水中的电位梯度可测量电流密度。尽管这些测量不能确定当前结构的保护程度，但可以用来确定电流分布及预测阳极的剩余寿命。

4.5.3　有时要使用外观检测来获取其他方法不能得到的详细信息。

4.5.3.1　可用潜水员进行外观检查，在浑浊或光线比较暗的地方可凭借触摸检查。

4.5.3.2　配备适当的仪器，外观检查可进行物理测量，如裂纹长度和深度、壁厚或点蚀深度，以及阳极尺寸和状况。

4.5.3.3　利用水下摄影可获取构筑物状况的永久性记录。

4.5.3.4　在水下作业期间，如果必须做出决定，可使用水下电视为构筑物上提供监视。录像带对水下情况可提供永久性记录。

4.5.4　在构筑物上安装与构筑物构件相似材质的钢试片，以便后来取样确定腐蚀控制测量的有效性。试片对怀疑阴极保护电流比较难以达到的区域可能特别有用。

4.6　注意事项

4.6.1　在评价构筑物电位数据时，除了考虑钢/海水界面电压（IR）降，还宜考虑其他电压(IR)降。

4.6.1.1　由于诸如河流淡水的流入或海水温度的差异而引起海水电阻率的变化将会影响测量的电位。

4.6.1.2　对于强制电流系统，在水的电阻率很高和(或)电流密度很大的情况下，电压降可能会很大。在关断整流器的瞬间电位测量会对消除水中电压降提供有用的信息。

4.6.1.3　对按传统方式设计的牺牲阳极保护系统，断电读数是做不到的。但是，如果参比电极靠近构筑物结构，则在正常海水中的电压降不大。

4.6.2　风暴潮或强潮汐可产生高速水流，会对构筑物产生去极化。高水位也会增加未被保护的钢结构面积，从而需要增加达到保护电位所需的电流。对完全极化的构件，以及有完好钙质沉积层或防腐层的钢结构，去极化的影响不大。

4.6.3　在外观检查期间，海生物会掩盖钢结构表面的真实状态，因此对于检查的表面必须清除这些海生物。所有电位测量应在清除海生物前进行。清除海生物会使钢结构去极化，导致错误的测量结果。

4.6.4　试片通常很小，所以将试片数据外推至被保护的构筑物的其它区域或整个构筑物时，必须谨慎考虑。

4.6.5　Ag/AgCl(海水)的电位有可能在某种程度上受到电阻率的影响,例如浸泡电极的海水中氯化物含量。如果已知电阻率明显不同于一般海水的电阻率(20Ω·cm)，那么电极读数宜根据图 1 校正；例如，如果构筑物处于电阻率为 100Ω·cm 的微咸水中，最小保护电位对 Ag/AgCl 电极为-0.83V，对 SCE 为-0.85V。

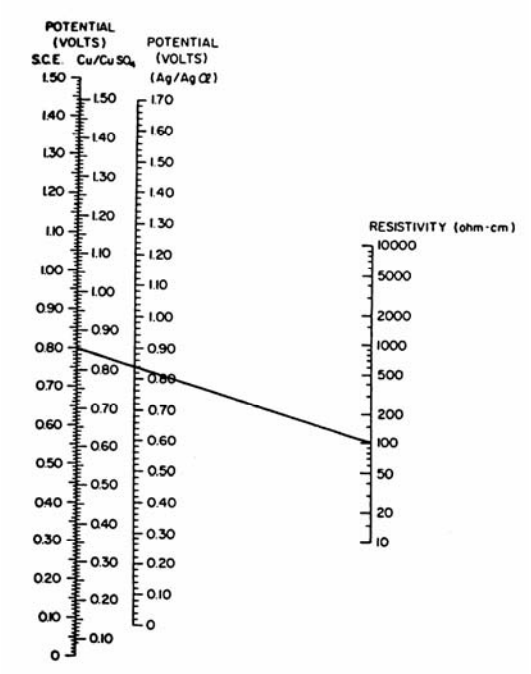


图 1. 不同电阻率水中的 Ag/AgCl 电极电位值相对饱和甘汞电极或 Cu/CuSO4 电极(4),9 电位值对比图

4.6.6　水深逐渐超过 300m(1000ft)及有时深度稍小些时，海水特性(溶解氧、温度、盐度、pH、海流和附着生物)与表层和浅水域海水特性会发生很大变化,这会影响阴极极化和钙质沉积层的形成。针对阴极保护效果和海水特性的季节性波动做现场具体调查，有助于设计有效的深水阴极保护系统。

4.7　阴极保护可以影响构筑物的腐蚀疲劳特性。

4.7.1　处于典型电位值的阴极保护趋向于将钢恢复到空气中的疲劳值。

4.7.2　过保护电位下的阴极保护可能会加速某些钢疲劳裂纹的扩展速度。利用疲劳裂纹生长数据可以确定过保护电位的影响程度。

4.7.3　钙质层可以填塞疲劳裂纹，降低裂纹的生长速度。

4.7.4　在高应力部位必须进行腐蚀控制，以防止可能促成疲劳裂纹的点蚀的产生。

---

[4]来图自华盛顿军舰研究实验室的 M.H Peterson 和佛罗里达州 Key West 区 NRL 海洋腐蚀实验室的 R.E.Groover

第五章　阴极保护系统的设计

5.1　引言

5.1.1　本章推荐了为海上构筑物阴极保护系统提供有效的腐蚀控制设计程序。

5.1.2　在设计海洋阴极保护系统过程中必须了解环境因素，同时还宜考虑以下几个方面：

5.1.2.1　为确保阴极保护系统安装与使用上安全可靠，必须选择和确定材料、设备和安装方法。

5.1.2.2　材料规格和安装作业可采用下列机构出版的适用法规、条例和标准：

(a) 构筑物操作者

(b) NACE

(c) API

(d) 政府机构

(e) 美国电气标准发证代表[5]

(f) 或其他国际标准组织

5.1.2.3　对阴极保护系统从安装、安全、维修和操作的最佳经济性方面，进行选择与设计。

5.1.2.4　为确保阴极保护系统使用寿命期间的可靠性，对材料和安装作法进行选择并提出技术要求。

5.1.2.5　选择一个可以减少过大的保护电流密度，降低过高的地(海)电位梯度的系统，以防对防腐层或附近埋设或水中设置的外部结构的损坏。

5.1.2.6　开始对计划采用的阴极保护系统对临近设施（或自将来延伸设施）可能的影响进行合作研究。

5.2　阴极保护系统设计的要点

5.2.1　遵循选用的阴极保护准则，确定出设施设计寿命期间保护构筑物所需的足够电流与良好的电流分布。

5.2.2　尽量减小所用阴极保护系统对相关管道和邻近金属结构的影响。

5.2.3　使阳极系统的设计寿命与被保护构筑物的设计寿命或计划相匹配，如有必要，要为阳极系统提供适当的更新方法和配件。

5.2.4　考虑到将来构筑物对电流要求的变化，以及阳极的老化、增加构筑物附件和环境的

[5]美国电气标准，National Electrical Code 70 (Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association)

变化而影响阳极电流输出量，需提供满足这些变化的富裕量。

5.2.5　将阴极保护系统的所有组件放置在受干扰或被破坏可能性最小的地方。

5.3　海上构筑物阴极保护系统设计所需或有用的资料

5.3.1 构筑物建造说明书及实施方法

(a) 施工图；

(b) 陆上施工场地，海上施工操作以及大概的施工日期；

(c) 立管（包括电缆）的数量、尺寸和位置；

(d) 防腐层；

(e) 电力供应；

(f) 腐蚀控制测量点(测试站、电连接点位置等)；

(g) 安全要求；

(h) 系统安装和(或)替换中可能用到的结构设备安装的方便性和可能性；

(i) 构筑物预期寿命（设计寿命）；

(j) 水位；

(k) 打桩作业完成后移走导桩管，或在阴极保护设计中包括这部分；

(l) 绝缘法兰或绝缘支座的位置。

5.3.2　海上现场条件

(a) 水深、含氧量、流速、水扰动性、水温、海水电阻率、潮汐的影响以及淤泥、砂和固体悬浮物 (参见附录 A)；

(b) 将来监测和维修的可能性，包括费用因素；

(c) 邻近设施，包括管道；

(d) 现有的和拟用的阴极保护系统；

(e) 与外部管道和结构的绝缘。

5.3.3　现场调查资料、腐蚀测试数据和操作经验

(a) 符合所使用的规范和标准的保护电流密度要求(见 5.6)；

(b) 水的电阻率(考虑水的特性可能会有分层)；

(c) 建造说明书的变更；

(d) 电绝缘和(或)电连续性；

(e) 干扰电流(见第 7 章)；

(f) 在相同的一般环境条件下，以往和现有的阴极保护系统的运行记录；

(g) 立管最大操作温度；

(h) 其他维修和操作数据。

5.3.4 如果以往经验和测试数据可用来评估电流需求量和系统性能，在阴极保护实际应用之前，可不必进行全面的现场调查工作。

5.4 阴极保护系统类型

5.4.1 牺牲阳极系统

5.4.1.1 牺牲阳极可以是镁、锌、铝等活泼金属的合金，这些合金采用不同形状和大小以最佳的电流分布形式为特定的海上构筑物提供保护电流。阳极块与构筑物的连接方法宜根据阳极块的类型及应用范围来确定,但在阳极块整个使用寿命期间必须保持低的接触电阻。

5.4.1.2 海水中牺牲阳极的性能主要取决于合金的成份，特别是锌和铝合金(参见附录 B)。

5.4.1.3 镁阳极是非常活泼的，同时可提供很大的电流输出。因此，在阴极保护系统中使用的阳极个数少，根据镁阳极自身特性，通常不用于长寿命的设计中。

5.4.1.4 对于有防腐层的结构，牺牲阳极材料即使在很低的阳极电流密度下工作多年之后仍能够发出电流。

5.4.2 强制电流系统

5.4.2.1 强制电流系统阳极材料包括铅-银合金，各种基体上的铂阳极，混合金属氧化物，铅-铂，石墨电极，硅-铁合金。这些阳极宜单个或成组地通过绝缘的导管连接至整流器或发电机等直流电源的正极接线柱，被保护的构筑物与直流电源的负极接线柱连接。

5.4.3 联合使用牺牲阳极和强制电流系统

5.4.3.1 联合阴极保护系统用于构筑物施工期间和(或)强制电流系统尚未运行期间为构筑物提供保护。

5.4.3.2 如果系统的牺牲阳极部分小于常规的长期保护系统，需仔细设计以确保充分的电流及其合理的分布。

5.5 影响选择阴极保护系统类型的因素

5.5.1 电力供给

5.5.2 系统整体的可靠性

5.5.2.1 牺牲阳极系统具有长期保护的可靠性。

5.5.2.2 强制电流系统具有长期保护的功能，但对设计、安装以及维修缺陷的承受能力比牺牲阳极系统差，只有在充分考虑机械强度、电连接、电缆保护(尤其在波浪区和飞溅区)、阳极类型的选择以及电源完整性的前提下，这种系统才能有好的使用效果。同时宜配备足够的监测系统。

5.5.2.3 留出安装余量，采用适当的设计安全系数，以及在设计阶段详尽规定整个使用期

间的维护措施，能够提高强制电流保护系统的可靠性。

5.5.3　保护电流总需求量

5.5.4　给定所需电流后，牺牲阳极保护的可行性和阳极材料选择按以下事项来确定(见附录)：

(a) 电解质的电阻率；

(b) 阳极对构筑物的电位(当构筑物处于保护状态时)；

(c) 在安装、下水和运行过程中免受机械破坏；

(d) 阳极材料预计的使用寿命；

(e) 构筑物重量及其限制。

5.5.5　海底强制电流系统安装阳极的可用空间宜由与邻近其它构筑物和管道的距离确定，并考虑到将来的建造物和维修。

5.5.6　宜充分考虑阴极保护系统在整个使用期内的经济性，包括投资、维修、检测、折旧、税收和腐蚀损耗，合理地评价不同方案的效果。

5.5.6.1　牺牲阳极保护系统初始投资较大，但几乎没有维修费用。

5.5.6.2　强制电流阳极系统一般初始投资费用较低，但在整个使用寿命期间内需用电力，并且维修费用较高。

5.6　决定阴极保护系统总电流的因素

5.6.1　整个全浸区面积

5.6.1.1　浸入水中的面积。

5.6.1.2　泥线以下的面积。

5.6.1.3　采油构筑物上实际或预计安装的隔水导管数。

5.6.1.4　无绝缘和无保护的外部构筑物。

5.6.2　水下构件预计所要求的最小设计(或维持)保护电流密度

5.6.2.1　开阔海区结构在典型水域中的阴极保护电流密度范围为 55 mA/m^2～430 mA/m^2 (5 mA/ft^2～40mA/ft^2)，11 个典型的海上生产区域的数值参见附录 A。根据 Hartt and Lemieux[10] 海上现场和室内挂片实验结果，设计平均保护电流密度（i_m）也可按公式（1）：

$$i_m = \frac{10^{(a+c\sigma)} \times T_d}{b+1} \qquad (1)$$

式中：

σ ： 标准差

Td ： 设计寿命

c ：与σ 有关的安全系数，a 和 b 是常数

a、b和σ 的数值由表1确定。

c 值在对系统合理冗余度进行正确判断后确定。对冷水水域，列于附录 A 中的设计 i_m 对应于 c 等于 1，对温水水域，即使 c 值取 2（包含 97.5%的数据），附录 A 中的电流密度（i_m）还是大于公式（1）的 i_m 值。

表 1　为公式（1）推荐的设计参数

	温/浅水参数	冷/深水参数
σ	0.233	0.229
a	3.130	2.820
b	-0.410	-0.226

5.6.2.2　泥线以下区域典型的保护电流密度为 10 mA/m^2 ~ 30mA/m^2 (1 mA/ft^2 ~ 3mA/ft^2)。

5.6.2.3　为补偿泥线以下油井套管对电流负荷的需要，总电流需求量设计中，宜有一定的富裕量。其典型值为每口井 1.5A ~ 5A。对张力腿平台（TLP）和海底采油基盘，从总深度（TD）到海底的油井套管可能会涂装或浇注水泥，从而大大减少需要电流的裸钢面积。在这种情况下，宜考虑表面积的减少，可合理降低每口井的电流裕量。

5.6.2.4　为补偿泥线以下桩对电流负荷的需要，总电流需求量设计中，宜有一定的富裕量。其典型值为每根桩 1.5A ~ 5A。对水下基盘而言，这部分电流需求可能决定设计结果。

5.6.3　构筑物水下部分即使有防腐层也应考虑相应的电流裕量

5.6.3.1　在过去，常用的保护防腐层(不是阳极屏蔽层)很少用在构筑物飞溅区以下的部分。但是，对安装在较深水域，需较高电流密度的复杂结构以及屏蔽区，例如大的隔水套管群，和/或延长其设计寿命的构筑物，由于所需电流和阳极重量增大的限制，可能决定施加防腐层。

5.6.3.2　带有防腐层的构筑物随着防腐层的退化，电流的需求将增加。因此当防腐层退化时要提供足够的阴极保护能力以维持对构筑物的保护。与防腐层退化直观检查预示情况相比，所需电流的增加可能或多或少要快些。

5.6.3.3　由于阴极保护电流的作用而在构筑物构件上沉积的钙质膜将降低维持保护电位所需的电流密度，还将改善电流的分布（见 5.6.4）。当防腐层出现缺陷时，由于该处初期电流密度会相当高，有机防腐层也有助于在缺陷处形成致密的钙质沉积膜。但是，钙质沉积膜的溶解度通常随着温度的降低而增加。较冷的水不易形成保护性钙质膜，或要求较高的初期电流密度以达到极化。

5.6.4　电流分布效率

5.6.4.1　使用较大数量、单个输出能力较低的阳极块可提高电流分布效率。在结构表面涂敷防腐层，也可改善电流分布。

5.6.4.2　由数量较多，分布密，单个输出能力低(典型值为每块阳极输出 3A～6A)的阳极块组成的牺牲阳极系统，可实现最高效率的电流分布。当构筑物构件与阳极块最小间距为 300mm (12in)时，设计通常可获得均匀的电流分布。

5.6.4.3　强制电流阳极系统，使用较少数量的阳极，产生的电流输出要比牺牲阳极系统大，通常降低了电流分布效率。这类阳极单个输出电流能力为 30A 至 200A 以上，这种较高的电流输出通常会对最近的构件表面产生过保护。为了补偿保护电流分布效率不足，宜使用效率系数(取值通常为 67%～80%)。因此，阴极保护电流宜是计算总电流值的 1.25 倍～1.5 倍。总电流取决于表面积与选择的设计电流密度。

5.6.4.4　无论是牺牲阳极系统还是强制电流保护系统，阳极均宜按照构筑物构件所需的电流密度进行水平布置和(或)垂直布置。计算机模型可用于验证合理的电流分布。

5.7　决定阳极电流输出、使用寿命和效率的因素

5.7.1　在特定的环境下，当从阳极表面流出给定的电流密度时，各种不同的阳极材料有不同的消耗率。因此，对于给定的电流输出，阳极寿命取决于阳极材料和阳极块重量。宜利用已确定的阳极特性数据计算可能的消耗率(参见附录 B 和 C)。

5.7.2　牺牲阳极和阳极系统的设计宜提供足够大的阳极裸露面积，以便在阳极系统寿命期间能产生保护所需的电流。附录 D 和 E 列出了阳极电流输出能力的两种计算方法。根据阳极自身的特性数据，阳极系统必须有足够重量的阳极材料，以满足保护寿命期间保护电流的需求。

5.7.3　正确地设计牺牲阳极系统必须考虑构筑物对阳极的电位、相应的阳极电流输出，如果可能的话，还必须考虑连接阳极的导线的电阻。对于典型的铝– – 锌– – 汞或–1.50V 的锌阳极(Ag/AgCl [SW]参比电极)，虽然构筑物初期电位较正，初始净驱动电压很高，在阳极与被极化的构筑物之间的净驱动电压仅为 0.25V(1.05–0.80)。

牺牲阳极寿命(L)可由公式（2）确定：

$$L=\frac{W\cdot u}{E\cdot I} \quad \text{----------} \quad (2)$$

式中：　L ：阳极寿命，a；

W：阳极净质量，kg 或 lb；

u ：利用系数, 取决于剩余阳极材料不能输出所需电流时所消耗的阳极材料重量；

E ：阳极消耗率，kg/（A·a）或 lb/（A·a）；

I ：在寿命期间阳极平均电流输出值，A。

阳极的形状会影响阳极的利用系数，因此，适当选择阳极的长度、直径和钢芯直径可使阳极利用系数范围从 0.75 至接近 1。对于支腿阳极，利用系数通常是 0.90~0.95；手镯阳极的利用系数可取 0.75~0.90。

5.8 特殊的机械和电力问题

5.8.1 阴极保护系统的性能取决于系统的各种构件承受实际应力的能力，因此，系统的类型、及其各种构件和实际安装宜具有持久性和可靠性。

5.8.2 牺牲阳极系统虽相对简单，但也必须考虑以下情况：

5.8.2.1 阳极宜置于结构上以确保节点焊缝尽早极化。节点焊缝是构筑物结构强度的关键。节点焊缝的极化非常重要，它要防止在热影响区（HZA）的不能接受的焊接缺陷的扩大，例如，咬边。以及在节点焊缝上出现的点蚀。这两种类型的腐蚀均能引起附加的应力集中，导致焊口产生疲劳开裂。节点还是金属表面积大和形状复杂的区域，要求较大的电流密度来保护和克服屏蔽的影响。不能使用焊缝相对钢为阳极的焊接材料，作为预焊接质量鉴定(WPQT)的一部分，应对此进行试验。

5.8.2.2 阳极钢芯在结构上必须适合于承受阳极重量和其它作用力，包括构筑物就位、打桩作业、风暴和飓风的影响。尤其是在阳极寿命后期，阳极对钢芯不再有附加强度时，能够抵抗波浪力是重要的。

5.8.2.3 阳极芯的设计宜使其与阳极体在整个使用寿命期间保持电连接的完整性。大直径的钢芯可保证阳极在使用寿命后期满足电流输出的要求。

5.8.2.4 为了安装尺寸较大的牺牲阳极，构筑物构件可能需要加强。如果这样，则宜将阳极通过角板、加强板或其他经批准的方法安装在构件上。

5.8.2.5 由于某些铝阳极埋在淤泥中对其效率有不利影响，只有经过在典型的泥中对阳极进行测试后，或经验表明埋在泥线下的阳极材料没有钝化，才宜将阳极安装在泥线处或泥线以下的构筑物构件上。如果将阳极安装在泥线处或泥线以下，宜考虑到阳极被泥覆盖降低了发出电流和效率。

5.8.2.6 只要可行，较大尺寸牺牲阳极块的安装宜尽量使连接处的应力最小。

5.8.2.7 对于海上使用的较大型的阳极，由于阳极材料和钢芯膨胀系数不同，在阳极浇铸冷却时会产生裂纹。如果裂纹不会导致阳极材料的脱落，这些裂纹害处不大。如果阳极的弯曲变形不影响阳极的安装，也是可以接受的。更多的技术要求见 NACE 标准 RP0387。

5.8.2.8 当牺牲阳极紧贴钢表面安装时，阳极的背面或钢表面宜涂敷防腐层或安装绝缘屏

蔽层，以免阳极背面材料过早消耗掉，以及因阳极腐蚀产物造成的压力有可能使阳极脱落。

5.8.3　强制电流系统由于阳极用量较少，每个阳极发出的保护电流量都很大，因此对机械损坏更加关注。失去一块阳极会严重地影响系统的性能。

5.8.3.1　阳极体与阳极导线之间的电连接必须具有防水性与良好的机械性能。

5.8.3.2　电缆和连接处的绝缘材料宜能抗氯、烃类或其他有害化学物质的侵蚀。

5.8.3.3　对于阳极及其连接导线，必须注意给予适当的机械保护。对于悬挂系统，单个阳极或阳极组可以配备绞车或其他回收工具，作为在强风暴时的保护措施，也可用于日常检查与维修。宜考虑到这期间构筑物是失去保护的。

5.8.3.4　对于固定型强制电流阳极允许采用以下安装方法，但不限于这些：

(a) 阳极可以安装在垂直的钢保护套管或导管下端。套管宜连接到水上的构筑物构件上，并靠水下的多个构件支撑。阳极宜通过套管(由它保护阳极导线)放下，并允许其延伸到固定在每个套管底部的装置以下。这种方法使阳极能用阳极电缆取回或更换，而无需潜水员协助。海生物生长或腐蚀锈层会造成阳极回收困难；

(b) 安装在绝缘支架上的扁平阳极可直接与构筑物构件或辅助结构构件相连，例如安装在垂直管上，它可以在阳极更换时拆卸下来。对后一种连接方式进行合理的设计，可在没有潜水员帮助的情况下回收阳极；

(c) 可采用钢支撑结构形式将阳极安装在全浸区构筑物构件上,这种类型的阳极更换时需要潜水员的帮助；

(d) 在某些特殊场合，阳极可安装在海底，例如在阿拉斯加的库克湾。为其稳定，阳极通常要安装在专门设计的混凝土橇上，这也减少了它们被泥浆或淤泥覆盖的可能性。据报道混凝土中的加强钢筋受到干扰电流腐蚀。

5.8.3.5　强制电流阳极的安装宜尽量远离任何构筑物构件[最小距离一般为 1.5m (5ft)，但与电流大小成比例(见 8.5.2)]。如果 1.5m(5ft)的间距不能达到，通常宜使用绝缘屏蔽层来减少因局部过保护所致保护电流浪费。阳极支架设计中宜避免这种浪费，并将阳极与构筑物之间短路的可能性减至最小。注：用作阴极屏蔽层的涂料并未得到证实能够长期表现其令人满意的性能。最好的方法是在阳极和阴极之间提供一个合适的空间，确保较好的阳极电流分布。

5.8.3.6　宜使用简单、耐用、容易维修的强制电流设备。除了天气因素外，由于某一海区的条件很少变化，因此最好选用可手动调节的，具有交流（AC）和直流（DC）过保护功能的油冷式整流器。在某些特定条件下，既有“ 恒定电流” 也有“ 自动电位控制” 功能的整流器可能是合乎要求的，但宜对这些设备的报价和维修加以比较。

5.8.3.7　从构筑物就位到永久性电源供电这段时间可能会拖延几个月到一年，甚至更长。此期间宜做出计划，使用临时电源对强制电流系统尽早供电，或使用短期的牺牲阳极系统。否则，构筑物构件和强制电流系统的水下装置会发生严重的腐蚀。

5.9　设计图纸和技术规格书

5.9.1　宜准备有关的设计图纸，标明阴极保护系统总布置和装置的重要部件的位置、腐蚀测试和监测站、接线盒、绝缘体的位置以及相邻埋地或全浸区的金属构件。

5.9.2　宜为每项强制电流阴极保护安装准备布置图纸，在该图中标明阴极保护系统的详细情况和在被保护构筑物上的位置。

5.9.3　牺牲阳极的位置宜表示在图纸上，或者用表格的形式表示，并附上对阳极类型、重量、形状和位置的适当注释。

5.9.4　宜为所有的材料和安装方法准备规格书，用于阴极保护系统的安装、检验和操作。

5.9.5　在施工阶段和施工完成后宜绘制适当的竣工图纸，这些图纸中宜包括任何与原始设计不同的地方。

5.9.6　宜保留完整的记录。阴极保护系统的详细情况是故障检修和将来设计(见第 15 章)所必须的。

5.10　相关设施的设计

5.10.1　如果海上阴极保护系统设计中使用绝缘法兰或接头，则绝缘装置需置于垂直管中以减少盐、金属残渣或其他导电物质堆积引起的内部短路，这种绝缘装置不宜安装在水面以下(见 6.7.1)。

5.10.2　在设计和放置绝缘装置时，宜认识并考虑到绝缘设备电火花的潜在危险。

第六章　阴极保护系统的安装

6.1　引言

6.1.1　根据第 5 章的设计思路，本章推荐了阴极保护系统安装程序。

6.2　建造技术规格书

6.2.1　所有阴极保护系统的施工都宜按照图纸和技术规格书进行。建造技术规格书宜以第 3、4 和 5 章的推荐作法为依据。

6.3　施工监督

6.3.1　所有阴极保护系统的施工都宜在质量监督人员的监督下进行，确保安装工作严格按照相应图纸和技术规格书进行。如有例外，宜经过负责监督的腐蚀专家的认可。

6.3.2　所有与建造技术规格书不同之处宜在完工图上标明。

6.4　牺牲阳极

6.4.1　检验和搬运

6.4.1.1　指南见 NACE RP0387。

6.4.1.2　宜对阳极进行检验，确保其尺寸和重量符合设计规格书要求，并且确保在搬运过程中的任何损坏不会影响阳极的使用。

6.4.1.3　如果阳极采用焊接方式与构筑物连接，宜检验钢芯是否符合技术规格书的要求。如果阳极芯有焊接的节点或连接件，宜对其进行检验，确保符合结构焊接技术规格书的要求。

6.4.1.4　当牺牲阳极吊缆作为导线时，宜对吊缆的强度、电压降、与阳极好的电连接性进行检验。在吊缆与导线分开使用时，注意确保阳极导线及连接点不受拉力损坏。

6.4.1.5　如果阳极支撑构件或吊缆需施加防腐层，宜进行目视检查，损坏的地方宜加以修补。

6.4.2　阳极安装

6.4.2.1　阳极宜按照建造技术规格书的要求安装。

6.4.2.2　当阳极直接焊在构筑物上时，宜检查焊接是否符合构筑物施工焊接技术规格书的要求。

6.4.2.3　当安装支腿管芯阳极并且阳极重量超过 230kg (500Lb)时宜考虑采用加强板和(或)角撑板。

6.4.2.4　在进行阳极安装时，可将加强板和(或)角撑板安装在阳极支撑件上。如果将加强板和(或)角撑板与阳极预制在一起，这些加强板在运输和吊装过程中易受到严重损坏。

6.4.2.5　悬挂式牺牲阳极的安装宜在构筑物海上就位后再进行，对安装好的阳极，宜对吊缆进行测试，检查它与构筑物的导电性是否良好。

6.5　强制电流系统

6.5.1　检验和搬运

6.5.1.1　宜检查整流器或其他电源以确保内部机械连接安全可靠，在船运和搬运过程中没有被损坏。直流电源的铭牌和额定功率宜符合建造规格书。

6.5.1.2　宜按照规格书的要求检验强制电流的阳极，包括阳极材料，大小和导线的长度，确保阳极帽(如果设置)的可靠性。宜对导线仔细检查，看其是否存在绝缘缺陷，对损坏的导线和(或)阳极帽必须加以彻底修理，或者必须舍弃该阳极。

6.5.1.3　在最后安装前，小心搬运所有强制电流元件。

6.5.2　安装规定

6.5.2.1　宜将整流器或其它电源安装在操作通道之外，并远离温度极高的地方和容易被泥浆、灰尘、浪花等污染的地方。在安装两个或多个整流器的地方，宜留有足够的空间保证空气循环冷却。

6.5.2.2　连接整流器的导线应遵从有关规则和操作者的技术规格书，宜在向整流器提供交流电的线路中安装一个外部断路开关。整流器外壳应正确接地，并与负极连接以防疏忽将电极接反。

6.5.2.3　在热力发电机上，宜安装一个逆流装置以防在发电机熄火时阳极和金属构件之间产生电偶效应。

6.5.2.4　强制电流阳极宜按照建造技术规格书进行安装。在安装过程中，宜特别注意避免损坏阳极和导线。仔细监督这方面的工作对确保阴极保护系统长期运行是最为重要的。

6.5.2.5　连接阳极和构筑物与整流器导线，必须保证其机械性能和导电性能。在通电以前，检查整流器的负极（－）是否与被保护的构筑物连接，整流器的正极（＋）是否与阳极连接，系统不存在短路情况。

6.5.2.6　整流器正极接线柱与阳极连接的导线宜具有良好的机械性能和导电性能，这种连接必须是密封的以防湿气侵入，同时要与周围环境电绝缘。水下连接所要求的密封应能承受可能遭受的水压和周围环境的影响。

6.5.2.7　在安装需分开悬挂的阳极时，防止连接阳极的导线或连接点在张力作用下损坏。

6.5.2.8　为了保证系统的连续运转，宜对操作人员在系统功能和要求方面进行培训。

6.6　腐蚀控制测试站、接线和接头

6.6.1　安装规定

6.6.1.1　接在与构筑物相连的管道上的测试线必须具有良好的机械性能和导电性能，并且易于接近。

6.6.1.2　在管道与测试线连接时，宜对管道和测试线的连接点进行清洁、干燥、去除杂物。连接点整体涂覆防腐层，以防大气腐蚀。

6.6.1.3　与其它管道导电连接或穿越绝缘接头宜按 6.6.1.1 的要求安装。所有连接点易于接近以便测试。电缆宜采用焊接法连接。注意保证结构所有部分之间的电连接或者分别配备阳极。

6.7　其他注意事项

6.7.1　绝缘装置

6.7.1.1　在海底管道和构筑物连接处安装绝缘法兰见 5.10.1 的内容。如果安装在水面上的

绝缘法兰不容易接近，那么延伸的测试线宜遵循 6.6.6.1 安装，以满足检测和连接的要求。

第七章　干扰电流的控制

7.1　引言

7.1.1　本章叙述干扰电流，有时也称作杂散电流，可能产生的有害影响，并提出控制干扰电流的推荐作法。

7.1.2　除了某些类型的焊接操作，一般情况下干扰电流对海上构筑物产生腐蚀的可能性很小。

7.2　影响

7.2.1　干扰电流腐蚀发生在电流从被干扰的结构流出，进入电解质的干扰电流同时又回到干扰源。

7.2.2　破坏程度直接与下列因素有关：

(a) 干扰电流的电流量和电流密度；

(b) 受影响的构件的面积， 从此处干扰电流流出并流入电解质；

(c) 干扰影响发生的周期。

7.3　短期干扰

7.3.1　对构筑物产生严重影响的最常见短期干扰电流产生于焊接期间，当焊机安装在驳船或船上，干扰电流会由于焊机的负极在船上接地，而焊机的正极接焊极而产生。一些操作者曾报导过焊接干扰电流对构筑物的水下构件产生严重的穿孔损坏。宜采用下列措施来防止施工期间由停靠在一侧的驳船上进行焊接操作中产生的干扰电流：

(a) 所有的焊机宜与驳船电绝缘；

(b) 每台焊机接地电缆宜与构筑物结构连接。

而从腐蚀的观点看，另一种的也是更好的方法是将焊机放置在构筑物上。

7.3.2　当负极焊接线与构筑物连接后，显然电流要经过负极焊接线或与构筑物相连的电缆流回，但与此同时，如果没有采取 7.3.1 节的预防措施，部分电流会由并联的水路从构筑物回到（驳船）船体。可通过降低负极电缆的电阻、增加负极电缆的数量和(或)直径，以及通过缩短它们的长度来减少由水路流回的电流。负极导线与构筑物的连接点宜尽可能靠近船舶。

7.4　长期干扰

7.4.1　如果构筑物上的所有部件正确连接，通常不会存在对构筑物产生明显腐蚀的长期干

扰电源。

7.4.1.1　由于构筑物水下部分的裸露面积远远大于管道暴露的面积， 因此，管道保护电流对构筑物的干扰影响可以忽略。

7.4.1.2　干扰电流源与被保护构筑物的实际安装位置通常不存在严重干扰的趋势。

7.4.2　在某些情况，如果被保护构筑物与外部海底管道电绝缘，构筑物上的阴极保护系统对构筑物外部海底管道会产生干扰影响。这类干扰比较容易控制，可采取下列措施：可在管道和构筑物之间安装排流的装置，也可以在绝缘管道上安装阴极保护系统，或者改进现有管道的阴极保护系统。如果可能，这些预防措施宜与其它公司或作业者合作实施。

第八章　绝缘屏蔽层

8.1　引言

8.1.1　本章为构筑物阴极保护系统绝缘屏蔽层的选择和使用提出了推荐作法，包括屏蔽层的结构和材料。

8.2　概述

8.2.1　绝缘屏蔽层和用作绝缘屏蔽层的防腐层，其作用是防止在阳极附近产生过高的电流密度和电流损失，使保护电流分布更加均匀。

8.3　绝缘屏蔽层的应用

8.3.1　绝缘屏蔽层的应用取决于阴极保护系统的设计(见第 5 章)。因为强制电流系统通常采用较高的电位梯度，所以一般绝缘屏蔽层是与强制电流系统结合使用。屏蔽层也可以与高电位的牺牲阳极联合使用，如镁阳极。

8.3.2　屏蔽层，包括采用防腐层作为屏蔽材料，有如下特殊用途：

(a) 覆盖与阳极相邻的阴极表面；

(b) 在强制电流阳极与钢电缆导管之间提供一个绝缘层；

(c) 为嵌入安装的牺牲阳极提供一个衬垫；

(d) 使构筑物构件较密集处保护电流的需求降到最小；

(e) 限制阳极电流的输出，即减少流向紧靠阳极构件的阳极电流损失。

8.3.3　水下通用防腐层可以作为屏蔽层的一种，既可减少电流需求，又延长阴极保护系统的使用寿命。

8.4　屏蔽层类型

8.4.1　在构筑物阴极保护系统中已用过几种不同类型的绝缘屏蔽层。其中包括现场防腐

层、预制的塑料或合成橡胶板、塑料管套和已涂敷的强制电流阳极的托脚或支撑件。

8.5　设计考虑

8.5.1　在阳极和阴极上由电化学反应产生的腐蚀性产物和气体会侵蚀绝缘屏蔽材料，屏蔽层下所产生的气体使屏蔽层剥落。所选择的材料宜适合预期的使用情况。

8.5.2　为了保证屏蔽层的功能，在设计绝缘屏蔽层 (在阳极半径周围或阳极到阴极裸露表面的最近距离) 时，必须综合考虑阳极输出电流、海水电阻率、结构的几何形状以及其他阳极的相对位置。

8.5.3　必须考虑来自环境影响因素的机械破坏，如波浪力、水流、漂浮的岩屑、浮冰和海生物。在设计上还应包含一定的裕量，以补偿构筑物就位前搬运期间可能造成的损坏。

8.5.4　在设计阴极保护系统中，宜考虑屏蔽材料的预计使用寿命和通常的老化问题(见5.8.3.4)。

第九章　阴极保护系统的运行和维护

9.1　引言

9.1.1　本章为阴极保护系统启动和维持、有效及可靠的运行提出推荐作法。

9.2　电位测量

9.2.1　为了确定根据现行准则的保护已经建立，以及阴极保护的每一部分均正常运行，电位测量和检测是必需的。影响保护的因素是随时间变化的，阴极保护系统也需做相应的调整以维持保护作用。定期的测量和检测是确定阴极保护系统工作性能发生变化所必需的。

9.2.2　在确定阴极保护合理性时，对电位测量点的位置、数量和类型的选择宜谨慎(见第4章)。

9.2.3　操作经验表明，有可能需要进行比本标准所推荐的次数更多的测量和检查，比如在强风暴之后。

9.3　当每一个阴极保护系统启动后，宜进行测量以确定是否符合实用的准则和运行是否有效。这种测量必须包括对构筑物有足够详细的电位测量以确实证明阴极保护已奏效(见第4章)。

9.4　宜进行定期检测以确保阴极保护的连续性。这种电气测量宜包含构筑物以前的电位检测点。检测周期宜根据下列因素决定：

9.4.1　如果没有以前的测量数据，或未对数据进行分析，则宜每年进行一次检测。

9.4.2　对于牺牲阳极阴极保护系统，有两个关键的使用期。系统使用初期，要证明整个构

筑物已极化（见 9.3 节）；系统设计寿命的后期，这期间阳极的性能更加难以预测。介于这两个期间的时间段内，构筑物的电位及阳极消耗速率按人们准确定义的趋势变化。考虑到这些因素，可采取阴极保护的风险检测方法，检测周期可为 5 年，除非由于下列因素的存在，要求有更高的检测频率：

- 目视检查发现有构筑物阴极保护图纸上不存在的钢结构，包括与构筑物电连接的碎片、新隔水套管、新沉箱、新立管等。宜立即进行阴极保护检测，测量构筑物电位，修改构筑物阴极保护图纸，评估对阳极寿命的影响，评估是否需要进行补救（例如：除去碎片、增加阳极等。）。
- 在阳极初始设计寿命的后两年内，宜对阴极保护进行年检。如果要求构筑物延长寿命超过阳极剩余设计寿命，宜对阳极实际剩余寿命重新进行评估（根据电位测量和阳极剩余质量测量结果），并对系统进行改造评估。如果阳极初始设计寿命是保守的，阳极实际剩余寿命可能超过两年，阳极实际剩余寿命可用于将来阴极保护检测的规划（同样基于 5 年/2 年原则）。
- 阳极位置的调整需要更频繁的检测（例如：美国矿产管理作业[6]——年度）

9.4.3　对于强制电流阴极保护系统（ICCP），系统运行初期很关键，整个构筑物要获得极化（见 9.3 节）。之后，ICCP 系统的运行取决于正确的操作和维护（见 9.5 节）。考虑到这些因素，可采取阴极保护的风险检测方法，检测周期宜为 5 年，除非由于下列因素的存在，要求有更高的检测频率：

- 目视检查发现有构筑物阴极保护图纸上不存在的钢结构，包括与构筑物电连接的碎片、新隔水套管、新沉箱、新立管等。宜立即进行阴极保护检测，测量构筑物电位，修改构筑物阴极保护图纸，评估对 ICCP 寿命的影响，评估是否需要进行补救（例如：除去碎片、增加阳极等。）。
- ICCP 的操作和维护显示系统功能有问题，说明阳极或电缆受到破坏。
- 阳极位置的调整需要更频繁的检测（例如：美国矿产管理作业——年度）

9.5　宜对强制电流阴极保护装置进行检查和测试，以确保它们的正常运行和维护。

9.5.1　所有强制电流的电源检查间隔不宜超过两个月。能够证明其性能正常的依据可以是电流输出和功率消耗正常、或被保护的构筑物构件对海水的电位合理。

9.5.2　作为防范性维护程序的一部分，所有强制电流保护设施宜进行年检，尽量减少其在使用中的失灵。检查可能包括短路检查、接地及电缆接头的可靠性、仪表的精确度、整流

[6] 矿产局，2402　E Street NW, Washington, DC 20241.

器的性能、全部回路电阻。

9.6　用于获取电子数据的测定设备宜处于良好的操作条件并对其精确性进行年检。参比电极宜进行更频繁的校验，因为杂质的污染、不良的电连接及电线绝缘层的破坏可能会影响构筑物电位测量精度。

9.7　可以借助潜水员或遥控机器人结合其他水下检查来确保阴极保护系统是有效的。

9.8　当定期的测量和检查发现保护作用不足或将要变得不足时，宜立即采用补救措施。这些措施包括：

9.8.1　修理、更换或调整阴极保护系统的元件。

9.8.2　在需要增加保护的地方增补阴极保护装置。

9.8.3　修理有缺陷的绝缘装置或连接接头。

第十章　飞溅区腐蚀控制措施

10.1.1　本章列出了减小飞溅区钢质构件损坏的腐蚀控制措施。由于工作条件不同，有些作法可能不适用于世界上所有区域。

10.1.2　处于飞溅区和水下区的附属海底管道和立管的腐蚀，不属于本标准范围。

10.1.3　在飞溅区通常需要增加钢构件的壁厚。

10.2　位置

10.2.1　除非能保证构筑物的安装深度，否则，为了提供安全余地，宜考虑在超出正常飞溅区的区域增加保护。

10.3　防磨蚀钢板和腐蚀裕量

10.3.1　防磨蚀板宜能补偿构筑物寿命期间内预计的腐蚀和磨耗。防磨蚀板的厚度通常为13mm～19mm (0.50 in. ～0.75in.)。

10.3.2　由于飞溅区的防腐层或包覆层易被破坏，因此需要使用防磨蚀板。

10.3.3　防磨蚀板除了增加腐蚀裕量外，还增加了构件的刚度和强度，从而提高了抗冲击能力。

10.3.4　为增加腐蚀防护效果，防磨蚀板通常需要涂敷或包覆。

10.3.5　通过增加钢结构厚度获得腐蚀裕量可以代替防磨蚀板，腐蚀裕量的确定宜依据预期寿命和预测的腐蚀速率进行计算，通常不小于 6mm（0.25 英寸）。飞溅区腐蚀速率一般取 0.2mm/a 至 0.4mm/a（0.007in/a 至 0.015 in /a）。

10.4　飞溅区钢腐蚀控制措施的选择

10.4.1　包覆 UNS N04400（相当于镍– – 铜合金 400）或 UNS C70600 (相当于铜– – 镍

合金 90/10）层。

10.4.1.1　UNS[7] N04400 包覆层，典型壁厚为 1mm～5mm（40mils～200 mils）（用 AWG[8]表测量值为 18～4）。或 UNS C70600 包覆层，典型壁厚为 4mm～5mm（160mils～200 mils）通过捆箍或焊接附在飞溅区的柱形构件上。由于环形空间要求密封，因此最好是焊接。

10.4.1.2　宜保护这种金属包覆层免遭冲击损伤，覆合合金钢板有助于防止损伤。

10.4.2 硫化氯丁橡胶

10.4.2.1 硫化氯丁橡胶典型的使用厚度是 6mm～13mm (0.25in.～0.5in)。

10.4.2.2　由于这种涂料不能在制造现场涂覆，所以在通常情况下，仅限于在管状构件的直线段使用。

10.4.2.3　在管状构件的两端宜至少留有 50mm (2.0 in)未涂覆的管段，以防在焊接过程中对氯丁橡胶的损伤。

10.4.3　厚膜有机防腐层

10.4.3.1　此种防腐层中常包含有石英玻璃磷片或玻璃丝。

10.4.3.2　此种防腐层用在喷砂处理的清洁表面，典型厚度为 1mm～5mm (40mils～200mils)。

10.4.3.3　由于此种防腐层可以在组装后在预制现场涂敷，对节点的保护可以与直管一样。

10.4.3.4　为了使检测可行，可在有防腐层的构件上涂覆防污损防腐层，防污损防腐层的有效寿命应达到 10 年左右。

10.4.4　250mm～500μm (10mils～20mils)高性能构筑物防腐层系统

10.4.4.1　虽然高性能防腐层系统普遍应用于大气区，而且效果相当不错，但它们不适合作为长寿命构筑物的主要控制措施。

10.4.5 热缩套 （说明：热缩套用于北海的性能欠佳）

10.4.5.1　当热缩套被加热升到一定温度时会收缩，且其内表面预涂一层密封胶，已经被用来保护飞溅区的直管段。假如此收缩套遭到轻微的损伤，密封胶粘剂的粘弹性与收缩套的持续径向收缩力，使密封胶流到损伤部位且有效地将损伤处密封好。要求表面除锈及较大粗糙度。

---

[7] 《统一编号系统的金属和合金》（最新版），ASTM 国际和自动化工程师协会（SAE）的联合出版物，400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096。

[8] 美国线规(AWG)：用于有色金属片、棒和线的美国标准，对直径和厚度有特殊的编号。也被称作 Browm and Sharp Gauge.

10.4.6 热喷涂铝

10.4.6.1 热喷涂铝（火焰或电弧）已经用在飞溅区，喷涂厚度为 200μm (8 mils)，且用硅氧烷密封剂封闭。好的表面处理和清洁度是必需的。该防腐层至少宜涂二道。密封剂可封闭防腐层的孔隙且提高保护寿命和性能。美国军用标准 MIL-STD-2138 提出了使用和质量控制要求。

10.4.6.2 防腐层的附着力宜超过 7000 kPa(1000 psi)。实验室附着实验可按 ASTM C 633 进行，现场附着力检测可采用商用仪器。

10.4.6.3 热喷涂铝也已经用于全浸区和海洋大气中的设施。对全浸区，在阴极保护电位难以达到的部位如管夹内侧和几何屏蔽区，可选择热喷涂铝系统。

10.4.7 矿脂/蜡基胶带系统

10 .4.7.1 可以使用矿脂/蜡基防腐层系统加上适当的外套作为机械保护层。

10.4.7.2 应该适当考虑防腐层在使用期间可能遭受的机械应力，为了保证足够的机械保护，应选择具有保护性的外套系统。

第十一章 飞溅区腐蚀控制的维护措施

11.1 本章列出了检验程序和必须的维护手段，以确保处在飞溅区的钢结构得到连续保护。

11.2 检测

11.2.1 每年宜对飞溅区区段进行外观检测，以确定腐蚀控制是否仍有效。如失效，可对被保护构件的损伤程度进行评估并采取补救措施。

11.2.2 当防磨蚀板和保护防腐层其中任一发生破损或机械损坏时，宜定期进行壁厚测量，确定其损耗量不超过腐蚀裕量。

11.3 修补方法

11.3.1 铜镍合金 UNS N04400 包覆层

11.3.1.1 修整 UNS N04400 包覆层有破损的地方，并将 UNS N04400 铜镍合金板焊接或捆绑在破损处来修补。

11.3.1.2 在水面处可使用另一种修补程序，包括修整平铜镍合金后，使用喷砂方法清理损坏的地方，以及手工涂上一层较厚的含有空气固化促进剂的硫化橡胶或飞溅区屏障物。后者是一种聚酰胺环氧涂料，该涂料具有排水性并可在水中固化。如果暴露在波浪作用的地方，可能需要采用金属网或粗麻布固定直至完全固化。

11.3.2 硫化氯丁橡胶

11.3.2.1　修补程序见 11.3.1.2 的内容。

11.3.3　厚膜有机防腐层

11.3.3.1　经过喷砂处理后的破损处表面可用喷涂或手工涂覆进行修补，也可采用 11.3.1.2 的方法进行处理。

11.3.4　热缩套

11.3.4.1　钢表面宜清理干净，除去尖锐的突出物。

11.3.5　具有水活性树脂的玻璃纤维缠绕带

11.3.5.1　宜将钢表面清理干净，除去海生物和所有的尖锐突出物。

11.3.5.2　此系统第一层使用密封缠绕带将钢表面与海水有效地隔绝，外层使用玻璃纤维缠绕带作为机械保护层。

11.3.6　玛蹄脂橡胶缠绕带

11.3.6.1　钢表面可清理干净，除去海生物和所有的尖锐突出物。

第十二章 表面处理

12.1　引言

12.1.1　本章为海上固定式构筑物大气区钢构件涂装前推荐适用的表面处理程序。

12.2　概述

12.2.1　大气区钢结构表面处理目的是为设计的防腐层系统的施工提供必需的清洁度和规定的粗糙度。

12.2.2　在钢板、梁及圆形构件安装前，自动喷砂清理机是经济合理的表面处理工具。

12.2.3　已组装完毕的结构物在涂面漆前，宜检查底漆是否有损坏或存在不合要求的部位。在涂覆防腐层系统前，涂面漆前损坏部位和所有焊接区域均需现场喷砂并涂敷相同的底漆。

12.2.4　所有外露的毛刺、鳞皮、焊剂和轧制氧化皮在表面处理前或处理期间应全部去除。

12.2.5　如果表面处理在室外进行，宜在白天完成，此期间钢表面温度要高于露点，且在处理过的表面出现任何锈蚀前，尽早涂覆合适的底漆。如果怀疑处理过的表面存在可溶性盐，在涂覆防腐层前宜进行可溶性盐实验。

12.2.6　进行表面处理或涂敷底漆时，钢结构表面温度应不低于露点以上 3℃（5°F）。有雾或潮湿的情况下，不宜进行钢表面常规涂敷作业。

12.2.7　如果适当采用保护措施，湿式喷砂可有效地对表面进行处理，并减少干式喷砂产生的粉尘问题。如果应用此种处理方式，涂料系统必须与喷砂用水中加入的缓蚀剂相容。

涂覆防腐层前，处理过的表面必须干燥且无污染物。

12.2.8　采用溶剂和洗涤剂清洗油污应按照 SSPC[9] SP1 的要求进行操作。

12.2.9　不宜采用手工方法进行表面清理，只有其他方法不能使用的小面积上，才使用手工方法。不应采用使钢表面磨光的方法，如用钢丝刷清理。

12.3　NACE 表面处理标准

12.3.1　表面处理的等级或程度由所选防腐层的要求确定。结合 NACE 和 SSPC 标准，表面喷砂清理的四种等级概述如下：

12.3.1.1　NACE 1 级/SSPC SP5 为出白级金属表面喷砂清理，不使用放大镜进行目视检查，表面已无可见油、脂、灰尘、污垢、轧制氧化皮、锈、防腐层、氧化物、腐蚀产物和其他异物。

12.3.1.2　NACE 2 级/SSPC SP10 为近白级金属表面喷砂清理，不使用放大镜进行目视检查，表面已无可见油、脂、灰尘、污垢、轧制氧化皮、锈、防腐层、氧化物、腐蚀产物和其他异物。单位表面（通常为 58cm^2 [9.0 in^2]）上的偶见色斑应小于 5%，这些色斑包括浅色阴影、浅色条纹、或由灰尘、轧制氧化皮或原防腐层产生的轻微变色。

12.3.1.3　NACE 3 级/SSPC SP6 为工业级金属表面喷砂清理，，不使用放大镜进行目视检查，表面已无可见油、脂、灰尘、污垢、轧制氧化皮、锈、防腐层、氧化物、腐蚀产物和其他异物。单位表面（通常为 58cm^2 [9.0 in^2]）上的偶见色斑应小于 33%，这些色斑包括浅色阴影、浅色条纹、或由灰尘、轧制氧化皮或原防腐层产生的轻微变色。

12.3.1.4　NACE4 级/SSPC SP7 为清扫级表面喷砂清理，不使用放大镜进行目视检查，表面已无可见油、脂、灰尘、污垢、松动的轧制氧化皮、松动的锈层和松动的防腐层。附着牢固的轧制氧化皮、锈、和防腐层，可允许留在金属表面。用钝的油灰刀不能去除掉的轧制氧化皮、锈、和防腐层，认为附着是牢固的。

12.3.1.5　各种表面处理标准的对应关系见表 2。

表 2　表面处理标准

标准	出白级	近白级	工业级	清扫级
NACE	1	2	3	4
SSPC	SP5	SP10	SP6	SP7
ISO[(A)] 8501-1[19]	Sa 3	Sa 2-1/2		Sa 1

(A)　国际标准组织（ISO），1 rue de Varembe, Case Postale 56, CH-1121 Geneve 20, Switzerland.

[9] 保护性防腐层学会(SSPC): 40 24th St., 6th Floor, Pittsburgh, PA 15222-4656.

12.4　离心叶轮式清理– – – – 该方法适用于制造场，可由自动叶轮式清理机对新焊件用金属磨料处理。其费用大大低于空气喷砂清理。

12.4.1　离心式喷砂清理宜参照《涂装示范，SSPC 涂装手册》。

12.4.2　需特别注意的问题

12.4.2.1　磨料– – – – 为了产生期望的粗糙度，使用选择的设备，宜采用合适筛目和硬度的钢砂进行作业。对表面处理要求严格的，不推荐使用钢丸。

12.4.2.2　宜对表面形貌进行检测并用经同意的合格方式记录，以保证部件表面处理的清洁度和粗糙度满足待涂防腐层的要求。

12.5　空气喷砂清理– – – – 该方法用于装配现场清理或海上构筑物维修作业时，不适宜使用自动清理设备处理的部件。所用磨料见 12.5.2 所述。

12.5.1　空气供应– – – –　对空气供应的最初检查宜包括如下几个方面：

12.5.1.1　空气供应能力应足够以保证在喷嘴处空气压力至少为 690 kPa (100psi)。

12.5.1.2　压缩机应装配有适当的安全操作装置。

12.5.1.3　在空气管路上必须使用油/水过滤器。每次作业至少应按照 ASTM D4285[21] 进行一次测试。

12.5.2　磨料– – – –　用于喷砂清理的磨料应限于合同规定的范围内，并且有合适的粒径，以保证使用可用的喷砂设备进行处理，能够获得规定的粗糙度。磨料必须是清洁的和标准统一的等级，见《涂装示范，SSPC 涂装手册》。

12.6　用于表面处理的安全设备宜包括但不限于如下内容；

(a) 矿山局(10)或相应权威机构认可的空气喷射防护罩，固定牢靠并且视线好；

(b) 经活性炭过滤并可调节压力的呼吸用压缩气源；

(c) 操作者控制的事故自动刹车摇控阀；

(d) 操作者防护服、手套等；

(e) 操作者安全带；

(f) 合适的脚手架；

(g) 合适的照明。

12.6.1　为有效地完成表面处理和安全操作设备，操作者必须经过严格的训练。

---

[10] 矿山局，2402 E. Street NW, Washington, DC 20241

第十三章 防腐层

13.1 引言

13.1.1 本章概述了关于构筑物防腐层的一般原则，并列举了海上操作者常用防腐层的一般成份。

13.2 概述

13.2.1 常规的涂料、表面处理工艺和涂敷方法不宜用于海上恶劣的腐蚀环境。由于海上维修费用很高，所以宜规定只能使用高性能保护涂料。高性能保护涂料的正确使用和性能要求表面经严格清理(见第 12 章)，熟练的涂敷和检验技术(见第 14 章)。上述要求只能通过实施详细和完整的建造规格书来实现。

13.2.2 高性能涂料的正确使用要求操作人员遵守和坚持所有适用的安全规则和条例。

13.3 防腐层系列

13.3.1 海洋防腐层系列一般包括底漆、中间防腐层和表面防腐层。很多常用涂料均是有效的，但很多业主和涂料顾问认为，只有少数几种适应于海上应用。

13.3.2 大多数防腐层系统以高防蚀性的底漆为基础，底漆要求具有优越的润湿和附着性能，防止锈层钻蚀并使表面钝化。常用的底漆包括：

13.3.2.1 洗涤底漆– – – – 此为转化底漆。是以聚乙烯醇缩丁醛树酯为溶剂，加入铬酸锌或铬酸锶为颜料而成的一种溶液。在使用前需加入含有酒精和磷酸溶液的第二组份。涂覆后防腐层厚度很薄，干膜厚度不超过 13μm (0.50 mils)。该底漆有磷化作用，在与钢基底接触后，会在其表面产生一层钝化膜。为获得其最有效的保护性能和避免铁锈穿透，在洗涤底漆涂敷后，必须迅速涂覆上层防腐层。

13.3.2.2 富锌底漆——此为含高比例锌粉作填料的有机或无机涂料，当防腐层中有破裂或不连续时，锌粒以其牺牲阳极作用保护基材。由于锌可与酸或强碱发生反应，当富锌底漆用于构筑物时会暴露于碱性的钻井泥浆和酸性的完井液中，因此在富锌底漆涂敷后，必须在其上面再施加一层抗化学物质侵蚀的防腐层。在施工前期富锌底漆是非常好的底漆，因为该底漆具有抗擦伤和撞击性，并且即使建造周期很长，它也可为钢基底提供良好保护。但是，必须注意的是在涂覆上层防腐层前锌底漆表面保证是清洁的，为了去除污染物，可采用淡水冲洗或动力清理。

13.3.2.3 有机防锈底漆——此材料为溶剂型、化学固化或热塑型涂料，由溶剂挥发成膜。化学固化涂料一般需要增加第二组份来固化。该底漆特点是含有防锈颜料，颜料必须符合规章标准和条件限制的要求，且对环境是安全的。当这些颜料与湿气接触时，会产生一个

碱性离子的环境，从而减缓基底金属的腐蚀。通常，由于该底漆含有活性颜料，而且只能作为保护性防腐层系列的一部分，因此要有效地保护基底金属，底漆防腐层上面必须是施加上层防腐层。底漆必须遵循所有有关毒性、安全和环境标准的现行法规。

13.3.3　表面防腐层——用于海上构筑物的底漆上面均宜施加中间防腐层和(或)表面防腐层。中间防腐层和表面防腐层的功能是为底漆提供一个保护层，减缓和限制水气、氧和化学活性离子的渗入。表面防腐层还增加保护层的抗冲击性和抗溶性，以及表面的美观。表面涂料的一般特性包括如下：

13.3.3.1　化学固化防腐层—— 这类防腐层通常为环氧树脂、环氧酚醛树脂、聚酯或某些聚氨酯材料，它的固化是靠添加第二类通常称为“ 催化剂” 或转化剂的材料来实现。此类防腐层材料具有很好的抗化学物质侵蚀性，每层厚度常超过 100μm (4 mils)。由于这种材料暴露于环境中会不断地固化，因此随着时间的推移，它们会变得越来越硬、越来越脆、越来越具抗溶性，因此，如果在这类防腐层上再加防腐层，为获得好的机械附着性，这类防腐层的表面需经过吹刮清理。除聚氨酯材料外，这类防腐层暴露于紫外线下会逐渐粉化。这类防腐层材料在固化期间对温度和湿度很敏感，因此要保证有效地交联，需充分控制温度和湿度，以获得抗化学物质侵蚀的防腐层。

13.3.3.2　溶剂沉淀型或热塑型涂料—— 这类涂料包含乙烯丙烯酸树脂、乙烯树脂或氯化橡胶。这类防腐层材料不同于环氧树脂、聚酯和其他化学固化涂料，在该材料自液相变为固相的过程中不伴随任何化学过程，它的固化是靠溶剂的挥发来完成的。这种干燥形式意味着涂料在相对湿度高至 90％以及温度低至 0℃ (32 °F)时仍能进行涂敷。该防腐层一般能极好地抑制环境条件的影响。在这类可溶性防腐层上面再施加防腐层很简单，新旧防腐层之间通过溶剂即可粘接。这类防腐层的主要缺点是耐温性差 [在 60℃～70℃ (140°F～170 °F)之间] 、抗溶性差，以及固体含量低。由于低固体含量，因此要获得要求的防腐层厚度需增加防腐层层数。近代技术表明，厚膜和高固体含量可减少以前要求的防腐层层数。然而，耐化学性可能被削弱了。此外，受有关易挥发有机物质(VOC)管理条例的限制，有些地方可能禁止使用这种涂料。

13.3.4　热喷涂铝

13.3.4.1　热喷涂铝 (火焰或电弧) 每层可达 200μm (8mils) , 采用硅氧烷树脂密封剂封闭，已作为特殊用途用于大气区，例如火炬臂上。严格的表面处理和清洁度是必要的。最常用的原料是 99%的或钝度更高的铝或 Al-5Mg , 在施工时喷两道或更多道。封闭层可以延长寿命和改善外观。美国军用技术规格书 MIL – STD-2138 提供了施工和质量控制指南。

13.3.4.2　防腐层附着力宜超过 7000kPa (1000psi)。(见 10.4.6.2 节)。

13.4　涂料选择原则

13.4.1　为涂料选择而设计的加速试验包括：

(a) 盐雾试验（4000h）：执行 ASTM B 177[22]。

(b) 老化试验（2000h）：执行 ASTM G 152[23]、ASTM G 153[24]、ASTM G 154[25]、或 ASTM G 155[26]。

(c) 潮湿箱试验（4000h）：执行 ASTM D 2247[27]。

一些操作者在一个老化试验的转动装置上联合进行上述三种试验，如 1000h 的盐雾试验，和 1000 h 的老化试验后，再进行 1000h 的盐雾试验，最后又进行了 1000h 的老化试验。

13.4.2　下面列出可在实验室测定其他涂料特性的试验方法，这些有助于防腐层材料的选择。

ASTM D 522[28]

ASTM C 633[13]

ASTM D 968[29]

ASTM D 3359[30]

ASTM D 3363[31]

ASTM D 4214[32]

等同的非 ASTM 的试验标准同样可以采用。

13.4.3　防腐层系统的最终选择依赖于许多对环境、施工和性能的考虑，包括如下：

13.4.3.1　建造期间已涂底漆的钢材贮存时间，及能否承受在吊装和装配期间的磨损，将损失降至最小。

13.4.3.2　能用常规和现有设备涂敷和维修的防腐层系统。

13.4.3.3　处于北纬地区的钢结构的低温和寒冷天气的限制。

13.4.3.4　对于海上构筑物的甲板部位，由于暴露于大气中，而且受钻井作业的磨耗以及会溅上钻井泥浆、地层液体、柴油、润滑油和完井物质，常采用那些抗冲击性好、抗溶性佳和抗腐蚀性化学物质侵蚀的化学固化防腐层。

13.4.3.5　海洋防腐层暴露于强紫外线下，抗粉化性好而且不易褪色。

13.4.3.6　通常优先使用容易修补和维修的防腐层系统。

13.4.3.7　无机富锌防腐层不易与其他无机富锌底漆(IOZ)相容，当其破损或使用中露出时，通常用有机富锌涂料或化学固化、防蚀底漆修补。

13.5　材料的储存、运输和混合

13.5.1　所有用于海上结构的防腐层材料，无论是用于第一次涂敷的基底表面，还是用于维修，均宜来自原始的、未开封的厂家涂料罐，罐上宜贴有明显的标签，注明罐内的涂料种类。防腐层材料的储存宜避免恶劣气候环境，储存温度最好在 10℃～32℃ (59°F~90 °F)之间。

13.5.1.1　稀料、稀释剂或清洗剂的选用宜根据涂料厂商的推荐。如果单独采购这些材料，则其成份宜经涂料厂商认可。

13.5.1.2　使用的底漆、中间防腐层和表面防腐层材料宜由单一厂商提供，以保持由单一厂家承担责任。

13.5.1.3　所有的涂料在使用前宜经彻底搅拌，如发现有颜料沉淀，宜使用电动搅拌，使其重新弥散，形成一种均匀的混合液。对于双组份材料，已加催化剂的混合料也要用电动搅拌器搅拌。像富锌底漆类的重颜料防腐层材料，在使用过程中宜始终进行搅拌，以防沉淀。

13.5.1.4　用 250μm～600μm (30 目 ～60 目)的筛网过滤混合好的涂料，以除去所有的杂质或未弥散的颜料颗粒。

13.5.1.5 当混合涂料中含有催化剂或转化剂时，如果转化剂超过厂家推荐的含量，则会对涂料的涂敷、固化和使用性能产生负效应。

13.5.1.6 在任何时间均宜保持溶剂密封，以防止潮湿空气的侵入，因为潮湿空气会发生冷凝。

13.5.1.7 宜执行生产厂家推荐的涂料的罐藏寿命。

13.6　涂覆设备

13.6.1　大多数防腐层材料均用喷涂法涂覆。常规的喷涂压力罐应装配有双重调节器和空气驱动搅拌器。所有的喷涂设备均必须按涂料厂商的推荐装置液体喷嘴、指针和喷气嘴。到压力罐的空气供应线上必须装配一个有效的油水分离器。对于无空气喷涂，宜选用压缩比至少为 30：1 的液压泵。宜选用符合涂料厂商推荐的雾化嘴，它能根据需涂覆的构筑物的构件提供雾化度和最佳的扇面宽度。

13.6.2　混合防腐层材料宜使用清洁的桶和过滤器。

13.6.3　宜具有最小为 0.85m^3/min（30cfm）、喷嘴压力为 690kPa（100psig）的空气源供应能力。

13.7　通用的典型防腐层系统

13.7.1　表 3 中简要列出了海上构筑物和有关设备大气区常用的防腐层系统。这里并没有推荐这些防腐层系统的意思，也不是对所列防腐层排序，或指出某种防腐层系统优于另一种防腐层系统。防腐层系统的选择宜基于 13.4 节中的选择原则和(或)现场经验和维护程序。

13.7.2　维修防腐层必须与原有的防腐层系统相匹配。

13.7.3　防腐层再涂或修补的频率和范围取决于多种因素，包括如下方面：

(a) 构筑物上腐蚀损坏的范围和位置；

(b) 影响构筑物构件的应力和荷载；

(c) 生产配管和容器溢出和泄漏的威胁；

(d) 再涂工作的费用，包括安装费；

(e) 因涂覆防腐层造成的停工经济损失；

(f) 人员安全；

(g) 外观因素。

13.8　构筑物上生产设备和配管的防腐层

13.8.1　对大多数工作温度为常温的设备，表 3 所列出的防腐层系统基本上均可使用。

表 3　用于大气的典型防腐层系统(A)

防腐层系统	厚　度	
	μm	mils
无机锌自固化底漆	75	3
环氧中间防腐层	50	2
无机锌自固化底漆	75	
乙烯基厚膜中间防腐层	100～150	4～6
乙烯基表面防腐层（2 层）	50	2
环氧中间防腐层	100～150	4～6
乙烯基丙烯或聚氨脂防腐层	50	2
共聚物结合层	50	2
乙烯基表面厚膜防腐层	150～250	6～10
厚膜聚氨酯防腐层	150～250	6～10

(A)　表中所列的防腐层层数和厚度可随操作者和制造厂商的不同而改变。

13.8.2　加热器、压缩机或其他设备的某些表面的温度可能会很高。如果这些表面需防腐层，可以采用特定的耐高温防腐层。也可考虑其他涂覆工艺，如喷镀、瓷釉或使用陶瓷防腐层。

13.8.3　对形状复杂的设备必须注意不要涂得过厚，如管汇和采油树(见 13.9.5)。

13.9　海洋防腐层涂覆过程中的特殊问题

13.9.1　需全盘计划海上防腐层施工。海上防腐层施工在后勤、可接近性、计划、住房和

贮存方面比陆上要求的条件苛刻，而且费用也高得多。

13.9.2　业主、供应商和承包商代表宜对需涂覆的构筑物进行考察，考虑下列结构内容：

(a) 精确的表面积；

(b) 钢的条件；

(c) 需保护的生产设备；

(d) 需安装脚手架的形式和数量及安全设备；

(e) 甲板空间和住房；

(f) 工人、设备、材料及补给的运输可行性；

(g) 构筑物上需移动的设备；

(h) 特殊防腐层系统的适合程度取决于结构的暴露和搬运情况。

13.9.3　在计划和协调构筑物作业时，涂覆工作宜给予特殊考虑。涂覆工作必须通知业主，以防止盐水和油或泥浆中的化学物质的溢出对已清理过的金属表面或已涂底漆的表面的损坏。修井、钻井或建筑可能会严重地影响或延误涂覆工作。

13.9.4　业主和检验员必须熟悉表面处理的要求和会出现的问题，熟悉防腐层材料的使用。

13.9.5　对形状复杂的构件或配管拥挤的区域，薄防腐层难以获得，因此，必须避免选用某些像无机锌底漆类的防腐层材料，除非在涂覆时特别仔细，因为这类防腐层对漆膜过厚很敏感，如果防腐层厚度超过 100μm (4mils)，会发生龟裂和剥离。

13.10　镀锌

13.10.1　对于复杂钢构件，用通常的方法施加防腐层费用会很高，而且也困难，而热浸镀锌会是一种有效的方法。像护栅、扶栏、梯子、仪表盒、设备橇座及其他类似形状的构件可用镀层保护。

13.10.2　像其他含锌防腐层一样，镀锌层在酸性和碱性环境中也会受到损坏，不宜接触水泥、钻井泥浆或井中酸性介质。

13.10.3　在飞溅区和全浸区，镀锌层作为阳极受到腐蚀，会很快穿透或失效。在这些区域宜使用其他类型的材料或在镀锌层的上面再覆盖一层防腐层。

13.10.4　镀锌金属可以用合适的底漆或面漆来覆盖，以改善其抗化学物质和盐水的侵蚀性。

13.10.5　所有镀锌工作应遵循 ASTM A 123[33] 和 ASTM A 153[34]。

第十四章 防腐层检验

14.1　引言

14.1.1　本章提供了检验程序以证实符合防腐层规格书的要求。

14.1.2　为获得可接受的结果，采用检验员建议的检验工具是必要的。不过，根据大量经验作出的判断是最好的检验工具。

14.1.3　施工前宜召开协商会，明确业主、检验员、承包商和涂料供应商之间的责任和关系。

14.2　工作方针

14.2.1　检验员宜全面了解工作环节中的特殊部分，事先提醒承包商注意，减少后期的麻烦。还宜做到对项目规格书的接受和理解的认可。

14.2.2　检验员宜熟悉施工中使用的防腐层材料。

14.2.2.1　规格书宜根据双方商定的标准写明表面清理要求和粗糙度。

14.2.2.2　在施工现场宜检验所有的防腐层材料是否满足规格书的要求。施工前，宜提供给检验员关于产品技术和安全性资料，这些资料应由涂料厂商准备。检验员宜报告与规格书不符之处。

14.2.3　检验员在施工现场宜对所有的设备作初始检验，确保满足工作要求，并提供文件。

14.2.3.1　宜格外注意喷砂清理设备，检验员宜验证和监督有关喷砂清理设备的规格书的实施，以确保压缩机型号与喷嘴数量匹配，软管、垫片和喷嘴尺寸合适，使用条件良好。宜检查喷砂清理用空气的质量，检查其清洁性和干燥性(见 12.5.1.3)。宜出具证明文件。

14.2.3.2　检验员宜常规性地检查涂覆设备是否处于良好的工作状态以及是否满足涂料厂商施工说明书。宜出具证明文件。

14.2.3.3　宜检查索具和安装脚手架所用的设备是否安全和是否适合防腐层施工且符合业主和现行规章的要求。

14.2.3.4　在所有涂覆前检验员均宜检验所有已清理的表面，以保证满足规格书的要求。

14.3　涂装

14.3.1　如果钢构件表面温度低于露点 3℃ (5 °F)以下，检验员宜决定停止涂装作业。

14.3.2　检验员宜检查涂覆设备，以保证所用压力适应于给定的涂料。

14.3.3　检验员宜检查每一个操作者是否使用合适的技术，并报告不安全的作法。

14.3.4　检验员宜保证遵循材料使用程序规格书。

14.3.4.1　宜检查每一层防腐层的干膜厚度，保证漆膜厚度满足规格书的要求。

14.3.4.2　宜检查固化或干燥时间是否遵循规格书。

14.3.5　可对绝缘层最终防腐层表面进行漏点检查。

14.3.6　下一道防腐层施工前，检验员宜确定所有防腐层表面是否通过验收，不符合规格

书要求的宜返工。

14.3.7　检验员宜保证所有需涂覆的表面上没有油、油脂、盐沉积和潮湿。

14.4　检验设备

14.4.1　要配备喷嘴口径测量规，以测量用于喷砂喷嘴的磨损程度。

14.4.2　要配备喷嘴压力测量表，以测量喷嘴的使用压力。

14.4.3　可用表面外观对比器确定表面外观或粗糙度。也可根据 NACE RP0287 的要求测量粗糙度。

14.4.4　推荐采用一套 NACE 外观检查标准，以对比表面处理结果(见第 12.3 节)。

14.4.5　宜采用湿度计或悬吊式干湿球湿度计来测量湿度和温度。

14.4.6　宜采用湿膜厚度计。

14.4.7　宜采用无损磁性干膜厚度计测量干膜厚度(DFT)。

14.4.8　可用湿海棉式检漏仪来检测不导电防腐层中的漏点。高压测漏仪可用于检测厚膜防腐层(DFT>1 mm [40mils])。

14.4.9　可使用小刀或拔拉试验仪检查防腐层间附着性和硬度，并确定多层防腐层系统中的每一道防腐层是否已涂覆。这是一种破坏性试验，可作为最终检测方法。

14.4.10　可采用可变宽度的十字刀片进行 14.4.9 节描述的附着检验。

14.4.11　也可使用其他检验设备，包括反射镜、溶剂、采样瓶、胶布、温度计和表面粗糙度测量器。

14.5　工作评定和记录

14.5.1　检验员宜每天记录所有的工作内容。

14.5.1.1　记录内容宜包括工作人员和使用的设备数量以及工作时间和气候条件。

14.5.1.2　记录每天所使用的全部材料，包括磨料、涂料、溶剂以及其他材料。

14.5.1.3　检验员宜对防腐层规格书的遵循程序作恰当的记录。

14.5.1.4　宜保存好防腐层修补的类型和位置的记录。

14.5.2　检验员宜记录作业进度

14.5.2.1　检验员宜以平方米记录每天每个工作人员的作业进度。

14.5.2.2　检验员宜记录每天全体工作人员的全部作业进度和总面积(m^2)。

14.5.3　用于 14.5.1 节至 14.5.2.2 节中的数据对工作进行评定，确定工作人员的效率和单位面积的费用。

14.5.4 宜保存完整的工作记录，它将作为评定使用该防腐层系统每年每平方米所需费用的基础。

第十五章 腐蚀控制记录

15.1 引言

15.1.1 本章描述一个腐蚀控制记录系统，该系统是为阴极保护和防腐层系统的设计、建造、运行、维护和有效性提供书面记录资料。

15.1.2 本章中详细列举了各种可能的记录内容，每一个操作者宜根据自己构筑物的腐蚀控制需要决定记录内容。

15.1.3 关于阳极的位置、电缆、整流器的资料可按常规作法，记录在被保护构筑物的图纸上。大多数的电位测量值和维护检查结果可以表格的形式记录保存，并且周期性地不断记入最新数据。

15.1.4 完工图宜反映实际建造情况与设计规格书之间的任何差别，尤其是安装深度的误差，因为这可能改变飞溅区的覆盖区间。水深偏差可能发生在水深预测中（初期勘测）或构筑物沉降（可能贯穿于整个寿命期间）。

15.2 阴极保护系统

15.2.1 牺牲阳极系统——宜作如下记录：

15.2.1.1 所选用的设计准则 :设计寿命、计算的阳极输出能力和消耗率以及电流密度需求。

15.2.1.2 阳极的数量、尺寸、成份（如果知道的话）、价格以及制造厂和供应商。

15.2.1.3 每个阳极的位置、与构筑物的连接方式和安装日期。如果阳极在构筑物建造期间安装，宜记录构筑物的实际就位日期。

15.2.1.4 阳极数量和位置。无论建造期间或就位以后进行过的检查, 对检查出现的所有差别均要说明。

15.2.2 强制电流系统——宜做如下记录：

15.2.2.1 所用的设计准则(见 15.2.1.1 节)。

15.2.2.2 阳极的数量、尺寸、成份（如果知道的话）、价格以及制造厂和供应商。

15.2.2.3 每个阳极的位置，连接方式和安装日期。

15.2.2.4 直流电源的特性。

15.2.2.5 所使用的绝缘屏蔽层的成份和位置。

15.2.2.6 如 9.3 节和 9.5 节所述，每一整流器的输出电流和电压，并注意整流器的任何调节。

15.2.3 联合系统

15.2.3.1　联合系统是指牺牲阳极系统和强制电流系统共同使用的一种保护系统。

15.2.3.2　联合系统的记录内容必须包括每一个保护系统的完整资料。

15.2.4　构筑物电位测量

15.2.4.1　每次测量构筑物电位时，均宜记录所使用的参比电极的种类和测量技术(用潜水员的、固定的、用导向装置的、常设的或自由悬挂的)。

15.2.4.2　记录初期构筑物电位，并按 9.4 节规定定期测量记录构筑物电位。

15.2.5　操作和检测——宜做如下记录：

15.2.5.1　阳极系统水下检测结果，注意所有的差异，如丢失阳极。

15.2.5.2　每次水下检查发现的腐蚀破坏的位置、大小和类型，以及构筑物基体上或其周围出现的废弃金属的位置和对它们简要描述。

15.2.5.3　所有更换的阳极块的尺寸、成份、位置、数量、与构筑物的连接方式、价格、供应厂商和安装日期。

15.2.5.4　整流器的每一次维修。

15.2.5.5　强制电流系统任何时候的停用时间。

15.2.5.6　构筑物所有的扩建部分以及新增的外输管道和构筑物之间的管道。任何水深的偏差（见 15.1.4 节）。

15.3　防腐层和包覆层系统

15.3.1　本节涉及的是用于大气区和全浸区的防腐层，以及用于飞溅区的特殊防腐层和金属的或非金属的包覆层。

15.3.2　当指定在飞溅区使用防磨蚀板时，宜记录设计计算中假定的腐蚀速率。

15.3.3　初始安装——宜做如下记录：

15.3.3.1　表面处理、使用的底漆、中间防腐层和表面防腐层，包括表面处理质量、每一道防腐层的干膜厚度和防腐层层数。

15.3.3.2　涂料制造厂商、施工者、施工日期。

15.3.3.3　检验程序，以及所有检验点的膜厚和漏涂检验结果。

15.3.3.4　表面处理、防腐层材料和防腐层施工的费用。

15.3.4　检测

15.3.4.1　定期检测防腐层和包覆层。

15.3.4.2　记录每一次检测所发现的损坏位置、类型和数量。

15.3.5　维修——宜做如下记录：

15.3.5.1　每一次修整和再涂的日期，以及维修的原因，例如装配后、钻井后、常规维护等。

15.3.5.2　总重涂面积、表面处理和使用的防腐层系统，以及检验程序。

15.3.5.3　防腐层承包商的名字、选用的人力、材料和使用的设备，以及整个工作的全部费用。

参考文献

1. NACE Standard RP0169 (latest revision), “Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems” (Houston, TX: NACE).
2. R. Baboian, ed., NACE Corrosion Engineer’s Reference Book, 3rd ed. (Houston, TX: NACE, 2002).
3. NACE International 2002 Glossary of Corrosion-Related Terms (Houston, TX: NACE, 2002).
4. API RP 2A-WSD (latest revision), “Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design” (Washington, DC: API).
5. API RP 2A-LRFD (latest revision), “Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Load and Resistance Factor Design” (Washington, DC: API).
6. M.G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed. (New York, NY: McGraw Hill, 1986).
7. ASTM B 418 (latest revision), “Standard Specification for Cast and Wrought Galvanic Zinc Anodes” (West Conshohocken, PA: ASTM).
8. MIL-A-18001 (latest revision), “Anodes, Sacrificial Zinc Alloy” (Washington, DC: Government Printing Office).
9. “Tests Indicate the Ag/AgCl Elec Is Ideal Reference Cell in Sea Water,” Materials Protection and Performance 11, 5 (May 1972): pp. 19-22.
10. W.H. Hartt, E. Lemieux, “A Principal Determinant in Cathodic Protection Design of Offshore Structures—The Mean Current Density,” Corrosion 56, 10 (2000): pp. 988-997.
11. NACE Standard RP0387 (latest revision), “Metallurgical and Inspection Requirements for Cast Sacrificial Anodes for Offshore Applications” (Houston, TX: NACE).
12. MIL-STD-2138 (latest revision), “Metal Sprayed Coatings for Corrosion Protection Aboard Naval Ships,” November 23, 1981.
13. ASTM C 633 (latest revision), “Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings” (West Conshohocken, PA: ASTM).
14. SSPC-SP 1 (latest revision), “Solvent Cleaning” (Pittsburgh, PA: SSPC).
15. NACE No. 1/SSPC-SP 5, “White Metal Blast Cleaning” (Houston, TX: NACE, and Pittsburgh, PA: SSPC).
16. NACE No. 2/SSPC-SP 10, “Near-White Metal Blast Cleaning” (Houston, TX: NACE, and Pittsburgh, PA: SSPC).
17. NACE No. 3/SSPC-SP 6, “Commercial Blast Cleaning” (Houston, TX: NACE, and Pittsburgh, PA: SSPC).
18. NACE No. 4/SSPC-SP 7, “Brush-Off Blast Cleaning” (Houston, TX: NACE, and Pittsburgh, PA: SSPC).
19. ISO 8501-1 (latest revision), “Preparation of steel substrates before application of paints and related products—Visual assessment of surface cleanliness—Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings” (Geneva, Switzerland: ISO).
20. Good Painting Practice, SSPC Painting Manual, Vol. 1, 4th ed. (Pittsburgh, PA: SSPC).

21. ASTM D 4285 (latest revision), “Standard Test Method for Indicating Oil or Water in Compressed Air” (West Conshohocken, PA: ASTM).
22. ASTM B 117 (latest revision), “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus” (West Conshohocken, PA: ASTM).
23. ASTM G 152 (latest revision), “Standard Practice for Operating Open Flame Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials” (West Conshohocken, PA: ASTM).
24. ASTM G 153 (latest revision), “Standard Practice for Operating Enclosed Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials” (West Conshohocken, PA: ASTM).
25. ASTM G 154 (latest revision), “Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials” (West Conshohocken, PA: ASTM).
26. ASTM G 155 (latest revision), “Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials” (West Conshohocken, PA: ASTM).
27. ASTM D 2247 (latest revision), “Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100% Relative Humidity” (West Conshohocken, PA: ASTM).
28. ASTM D 522 (latest revision), “Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings” (West Conshohocken, PA: ASTM).
29. ASTM D 968 (latest revision), “Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Organic Coatings by Falling Abrasive” (West Conshohocken, PA: ASTM).
30. ASTM D 3359 (latest revision), “Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test” (West Conshohocken, PA: ASTM).
31. ASTM D 3363 (latest revision), “Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test” (West Conshohocken, PA: ASTM).
32. ASTM D 4214 (latest revision), “Standard Test Methods for Evaluating the Degree of Chalking of Exterior Paint Films” (West Conshohocken, PA: ASTM).
33. ASTM A 123 (latest revision), “Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products” (West Conshohocken, PA: ASTM).
34. ASTM A 153 (latest revision), “Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware” (West Conshohocken, PA: ASTM).
35. NACE Standard RP0287 (latest revision), “Field Measurement of Surface Profile of Abrasive Blast Cleaned Steel Surfaces Using a Replica Tape” (Houston, TX: NACE).
36. I. Rippon, “Platform Cathodic Protection Design in the South China Sea,” CORROSION/97, paper no. 475 (Houston, TX: NACE, 1997).
37. R.W. Revie, ed., Uhlig’s Corrosion Handbook (Indianapolis, IN: John Wiley & Sons Inc.[(11)]1985).
38. Navy Ships Technical Manual, Chapter 9920, Welding and Allied Processes, NAVSHIPS[(12)] 0901-920-0003, August 1971. (No longer in print.) (11) John Wiley & Sons Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030. (12) Naval Sea Systems Command, 1333 Isaac Hull Avenue S.E., Washington Navy Yard, DC 20376.
39. H.B. Dwight, “Calculations of Resistance to Ground,” Electrical Engineering 55, 12 (1936): pp. 1319-1328.

[11] John Wiley & Sons Inc., 111River Street, Hoboken, NJ 07030

[12] Naval Sea Systems Command, 1333 Isaac Hull Avenue S.E., Washington Navy Yard, DC 20376.

40. J.E. McCoy, “Corrosion Control by Cathodic Protection,” in Transactions of the Institute of Marine Engineering[13],volume 82 (London, UK: IMarEST, 1970), pp. 82-86.
41. NACE Publication 7L198 (latest revision), “Design of Galvanic Anode Cathodic Protection Systems for Offshore Structures” (Houston, TX: NACE).

参考书目

1. Anthony D.R. “Unique Methods for Applying and Monitoring Platform Cathodic Protection in Cook Inlet, Alaska.” Materials Performance 13, 8 (1974): pp. 9-16.
2. Baboian, R. “Platinum Consumption in Cathodic Protection Anodes.” MP 16, 3 (1977): pp. 20-22.
3. Benedict, R.L., ed. Anode Resistance Fundamentals and Applications—Classic Papers and Reviews. Houston, TX: NACE, 1986.
4. Bone, L. “Method for Accelerated Testing of Atmospheric Coatings for Offshore Structures.” CORROSION/89, paper no. 217. Houston, TX: NACE, 1989.
5. Burgbacher, J.A. “Cathodic Protection of Offshore Structures.” Materials Protection 7, 4 (1968).
6. Chen, S., and W.H. Hartt. “Path Dependence of the Potential-Current Density State for Cathodically Polarized Steel in Sea Water.” CORROSION/96, paper no. 553. Houston, TX: NACE, 1996.
7. Cochran, J.C. “Modified Dwight, McCoy, Modified Peterson and Sunde Anode to Electrolyte Resistance Equations and Their Correlation.” CORRINTEC/USA, 1981.
8. Coke, J.R. “Protective Coatings for Offshore Equipment and Structures.” MP 29, 5 (1990): pp. 35-38. Collected Papers on Cathodic Protection Current Distribution. Houston, TX: NACE, 1989.
9. Conlin, T. “Fundamentals of Offshore Coating Operations.” JPCL 7, 9 (1990): pp. 36-47.
10. Crennell, J.T., and W.C.G. Wheeler. “Zinc Anodes in Seawater.” Journal of Applied Chemistry 6, 10 (1956): p. 415.
11. Davis, J.G., G.L. Doremus, and F.W. Graham. “The Influence of Environment on Corrosion and Cathodic Protection.” Journal of Petroleum Technology 3 (1972): pp. 323-328. Designing Impressed Current Cathodic Protection Systems With Durco Anodes, 2nd ed. Dayton, Ohio: The Duriron Company, Inc., 1970.
12. Doremus, G.L., and J.G. Davis. “Marine Anodes—The Old and New.” Materials Protection 6, 1 (1967): pp. 30-39.
13. Eliassen, S., and G. Valland. “Design Rules for Offshore Cathodic Protection Systems.” Trans Institute of Marine Engineers, NSC Conference, 91 (1979).
14. Evans, S. “Deepwater Platform Protection Using Coatings Combined with Cathodic Protection.” CORROSION/90, paper no. 372. Houston, TX: NACE, 1990.
15. Evans, S. “Use of Initial Current Density in Cathodic Protection Design.” CORROSION/87, paper no. 58. Houston, TX: NACE, 1987.
16. Geld, I., M.A. Acampora, W.L. Miller. “Dielectric Shields for Cathodic Protection Applications.” Materials Protection 8, 8 (1969): pp. 23-24.

[13] 海洋工程学会(The Institute of Marine Engineering)，Science and Technology, 80 Coleman Street, London EC2R

17. Grosz, O.L. “Evaluation of Corrosion Damage Due to Improper Grounding of Welding Unit on Offshore Platforms (Stray Currents).” CORROSION/76, paper no. 179. Houston, TX: NACE, 1976.
18. Hanson, H.R., and D.C. Hurst. “Corrosion Control-Offshore Platforms.” Journal of Metals 4 (1970): pp. 46-50.
19. Hartt, W.H., and S. Chen. “Critical Considerations and Questions Pertaining to Cathodic Protection System Retrofits.” CORROSION/95, paper no. 316. Houston, TX: NACE, 1995.
20. Hudgins Jr., C.M., B.M. Casad, R.L. Schroeder, and C.C. Patton. “The Effect of Cathodic Protection on the Corrosion Fatigue Behavior of Carbon Steel in Synthetic Seawater.” Journal of Petroleum Technology 3 (1971): p. 283.
21. Lennox, T.J., Jr., R.E. Groover, and M.H. Peterson. “Electrochemical Characteristics of Six Aluminum Galvanic Anodes in the Sea.” Materials Protection and Performance 10, 9 (1971): pp. 39-44.
22. Lye, R.E. “Cathodic Protection and Coating—Design and Performance of a Corrosion Protection System for a North Sea Jacket.” CORROSION/89, paper no. 282. Houston, TX: NACE, 1989.
23. McCrory, E.D. “Maintenance of Protective Coating Systems on Offshore Platforms.” JPCL 3, 4 (1986): pp. 26-31. Morgan, J.H. Cathodic Protection. Houston, TX: NACE, 1987.
24. Peabody, A.W. “Sound Applications for Zinc Anodes.” St. Louis, MO: American Zinc Institute, 1954.
25. “Platinized Titanium Anodes for Cathodic Protection.” Technical Bulletin. East Newark, NJ: Engelhard Industries, Inc., 1966.
26. Rau, J.F., T.W. Michie, and S.N. Smith. “Cathodic Protection of Guyed Tower in 1,000 ft of Water.” CORROSION/87, paper no. 76. Houston, TX: NACE, 1987.
27. Reding, J.T., and T.D. Boyce. “Cathodic Protection Performance of Offshore Anodes at a Simulated Depth of 650 Feet.” MP 13, 9 (1974): pp. 37-40.
28. Rosbrook, R., W.H. Thomason, and J.D. Byrd. “Flame Sprayed Aluminum Coatings on Subsea Components.” MP 28, 9 (1989): pp. 34-38.
29. Schrieber, C.F., and J.T. Reding. “Field Testing a New Aluminum Anode.” Materials Protection 6, 5 (1967): pp. 33-36.
30. Smith, S.N., C.F. Schrieber, and R.L. Riley Jr. “Supplemental Studies of the Galvalum III Anode—Exposure Time and Low Temperature.” CORROSION/77, paper no. 35. Houston, TX: NACE, 1977.
31. Smith, S.N, J.T Reding, and R.L. Riley Jr. “Development of a Broad Application Saline Water Aluminum Anode—Galvalum III.” MP 17, 3 (1978): pp 32-36.
32. Stauffer, D.B. “Structural Design for Offshore Engineering.” Australian Corrosion Engineering (June 1959): p. 3.
33. Sverdrup, H.V., M.W. Johnson, and R.H. Fleming. The Oceans. New York, NY: Prentice-Hall, 1952.
34. Szoklik, A. “Maintaining Protective Coatings on Offshore Platforms.” JPCL 5, 5 (1983): pp. 32-40.
35. Szoklik, A. “Splash Zone Protection: A Review of 20 Years in the Bass Strait.” JPCL

5BJ, England.

6, 12 (1989): pp. 46-55.
36. Thomason, W.H. “Offshore Corrosion Protection with Thermal-Sprayed Aluminum.” Proceedings of the 17th Annual Offshore Technology Conference, paper no. 4971 (1985).
37. Thomason, W.H., S.E. Pape, and S. Evans. “The Use of Coatings to Supplement Cathodic Protection of Offshore Structures.” MP 26, 11 (1987): pp. 22-27.
38. Townley, D.W. “Unified Design Equation for Offshore Cathodic Protection.” CORROSION/97, paper no. 473. Houston, TX: NACE, 1997.
39. Uhlig, H.H. Corrosion Handbook. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc., 1948.
40. Vennett, R.M., and R.R. Matthews. “Stratification of Water Properties Along the Louisiana Coast and Its Influence on Cathodic Protection Systems.” MP 14, 7 (1975): pp. 31-39.
41. Wang, W., and W.H. Hartt. “Experimental Protocol and Data Representation for Sacrificial Anode Cathodic Protection of Steel in Seawater.” CORROSION/93, paper no. 520. Houston, TX: NACE, 1993.

附录 A
海上石油生产典型设计参数

选定石油产区的构筑物

在开阔海域能达到构筑物全浸区阴极保护完全极化所需的最小设计电流密度的主要控制因素是构筑物全浸区表面的各种腐蚀性物质（去极化的）的活性，主要是氧。水的温度越低，水的电阻率和水中氧的溶解度越大。在海水中的自然横向流动过程中，海水的紊流也将大大增加氧到达构件表面的传递速度。库克湾的水域条件代表了一种极端的环境状况，除了急速流动的水中悬浮冰渣造成的冲刷(机械去极化)外，上面提到的大多数负面因素均存在。

钙质沉积物的形成降低了氧到达钢表面的能力从而影响到对电流的需求。由于金属表面极化，pH 值向碱性偏移，使钙质沉积物从海水中析出。由于水温的降低和较低的电流密度有损于钙质沉积物的性能，因此，若阴极保护前期电流密度相对较高，则可降低长期维持保护所需电流。

实验室试验和现场试验表明，钢在浸没时，电位快速极化至–0.9V～–1.0V (Ag/AgCl [SW])比极化较慢所产生的钙质沉积物更具有保护性。为获得这样的结果需要较大电流密度，但电流需求量随着保护性钙质沉积物的而形成快速(成 10 倍)降低。结构刚下水时，牺牲阳极和未极化的钢结构之间的电位差可达 0.45V，牺牲阳极系统能在阴极上产生很大的电流密度。阴极极化后，阴阳极电位差降低到 0.25V 或更小，电流密度也同时降低。

极化过程通常形成钢结构电位与电流密度之间的线性关系，其斜率等于阴极保护系统电流回路的总电阻，或设计斜率。对任何给定海域，采用相似设计斜率值的牺牲阳极设计导致相似的电流密度。设计斜率与维持电流密度之间的关系可在现场经验的基础上或通过参照该海域经验来建立。

电流密度极大地取决于水温。对深水构筑物，不同温度区域宜采用不同的设计值。为了优化设计，宜根据温度变化不超过 5°C（9°F）将构筑物划分为不同的区域，宜采用每个间隔的水深平均温度来分析需要的电流密度值。可采用同样的方法分析电阻率。

表 A1 为 11 个主要海上石油生产区内阴极保护系统设计提供了一般性指导。对于特定的设计，在最终确定设计参数之前，表中数据可作为研究工作的起点。表 A1 提供了相同生产区相应的设计数据。

图 A1 为温度随电流密度的变化曲线。

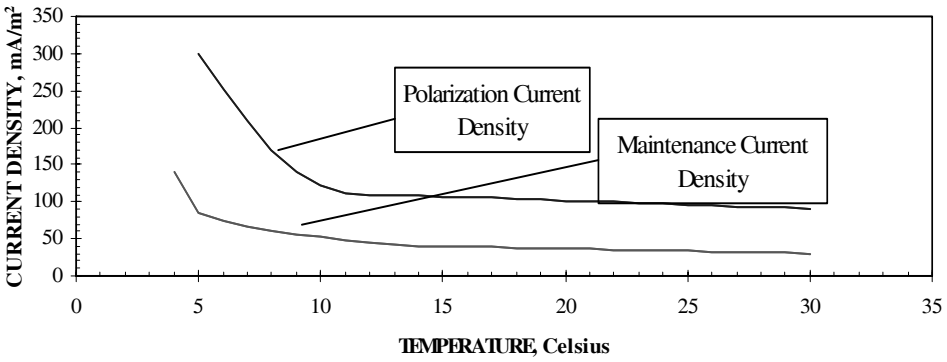


图 A1　电流密度/温度曲线

表 A1　阴极保护设计准则

生产区域	海水电阻率(B) (Ω·cm)	水温 (℃)	环境因素(A)		典型设计电流密度(C) mA/m² (mA/ft²)			典型设计斜率 (Ω·cm²) (Ω·ft²)
			紊流 (波浪作用)	横向水流	初期(E)	平均(F)	末期(G)	
墨西哥湾	20	22	中	中	110 (10)	55 (5)	75 (7)	4.1 (44)
美国西海岸	24	15	中	中	150 (14)	90 (8)	100 (9)	3.0 (32)
库克湾	50	2	低	高	430 (40)	380 (35)	380 (35)	1.0 (11)
北海北部(D)	26~33	0~12	高	中	180 (17)	90 (8)	120 (11)	2.5 (27)
北海南部(D)	26~33	0~12	高	中	150 (17)	90 (8)	100 (9)	3.0 (32)
阿拉伯湾	15	30	中	低	130 (12)	65 (6)	90 (8)	3.5 (37)
澳大利亚	23~30	12~18	高	中	130 (12)	90 (8)	90 (8)	3.5 (37)
巴西	20	15~20	中	高	180 (17)	65 (6)	90 (8)	2.5 (27)
西非	20~30	5~21	低	低	130 (12)	65 (6)	90 (8)	3.5 (37)
印尼	19	24	中	中	110 (10)	55 (5)	75 (7)	4.1 (44)
南中国海	18	30	低	低	110 (9)	35 (3)	35 (3)	

电阻率(Ω·cm)

温度(°C [°F])

氯度(ppt)	0 (32)	5 (41)	10 (50)	15 (59)	20 (68)	25 (77)
19	35.1	30.4	26.7	23.7	21.3	19.2
20	33.5	29.0	25.5	22.7	20.3	18.3

(A) 典型值和等级是根据平均状况，并远离江河入海口。

(B) 海水电阻率是氯度和温度的函数,在 H.H.UhLig 所著的《腐蚀手册》中给出了氯度分别为 19‰和 20‰的海水电阻率。

(C) 在普通海水中，一旦在设计电流密度下使构筑物极化完成并在构件表面产生一层钙质膜，即使实际电流密度比设计电流密度小，也能使构筑物维持保护电位。注意：风暴会造成构筑物去极化。

(D) 北海的条件，从北到南、从冬季到夏季以及风暴期间，会有很大变化。

(E) 初期电流密度是根据欧姆定律和电阻公式，及由阳极原始尺寸根据 Dwight's 或 Crennell's(Mccoy's)电阻公式计算的。在附录 D 给出了一个计算实例，阴极保护电位假定为–0.8V(Ag/AgCl[SW])。

(F) 平均电流密度用来计算在整个设计寿命期间维持电流所需的阳极总重量。计算实例见附录 D 和附录 E。

(G) 末期电流密度的计算除了使用消耗后的阳极尺寸外，与初期电流密度计算方法相似，计算实例见附录 D。

附录 B

用于海上构筑物阴极保护的

各种工业用牺牲阳极的电容量与消耗率

给定牺牲阳极材料的电容量通常以安培·小时/千克（磅）表示。本图中，将每年的小时数(8760)除以电容量便得出用千克（磅）/安培·年表示的消耗率。对于设计工程师来讲，阳极消耗率更为实用。

用于海洋阴极保护系统的各种牺牲阳极材料，其电容量在常规实际使用电流密度，即大约 2.2A/m^2 ~ 7.5A/m^2（200 mA/ft^2 ~ 700 mA/ft^2）下，宜通过实验室和现场试验预先确定。表 B1 中列出了某些常用牺牲阳极材料当电流密度在 2.2 A/m^2 ~ 7.5A/m^2(200 mA/ft^2 ~ 700 mA/ft^2)之间时的电容量。不同材料电容量的差别是由于厂商制造阳极材料的成份不同和(或)经过不同热处理所致。表 B1 中还列出了按上面所述计算出对应的阳极消耗率。因此，在牺牲阳极阴极保护系统设计中，阳极电容量取值小于短期实验是谨慎的做法。

冷却时某些微量合金元素和/或杂质的偏析都会改变阳极材料性能。由于铸造后冷却缓慢，因此大阳极块的内部电位差异现象比较明显。

任何成份的阳极材料必须能为所设计的电流输出提供足够的驱动电压。使用一个合适的参比电极，可以通过测量阳极的闭路电位来检查阳极驱动电压。

表 B1　海水中牺牲阳极材料的电容量和消耗率

牺牲阳极材料	电容量(A) A·h/kg (A·h/lb)	消耗率 kg/A·a (lb/A·a)	阳极在海水(B)中 闭路电位 -V (Ag/AgCl[SW])

铝-锌-铟	2290~2600 (1040~1180)	3.8~3.4 (8.4~7.4)	1.05~1.10
铝-锌-汞	2760~2840 (1250~1290)	3.2~3.1 (7.0~6.8)	1.0~1.05
铝-锌-锡	930~2600 (420~1180)	9.5~3.4 (20.8~7.4)	1.0~1.05
锌合金 （MIL-A-18001）	770~820 (350-370)	11.2~10.7 (24.8~23.7)	1.0~1.05
镁合金（H-1 合金）	1100 (500)	8.0 (17.5)	1.4~1.6

(A) 上面的数据范围取自华盛顿特区[38]海洋研究室在美国佛罗里达州的 Key West 区域所作的现场试验，以及制造厂商长时间的现场试验。这些数据只能由 NACE 国际负责油气生产——阴极保护的 STG 30 小组进行。

(B) 由于温度和盐度不同，测得电位可能会有所改变。

附录 C

用于海上构筑物阴极保护的各种工业用

强制电流阳极在海水中的消耗率

针对不同的特定应用条件，设计者会对阳极电流密度有不同的需求，强制电流阳极不同于牺牲阳极，它可以提供较宽范围的电流密度。由于阳极电流负载对消耗率有影响，因此对于所列各种阳极材料的消耗率必须包含相应的近似电流密度才有意义。

表 C1 列出了用于海上构筑物阴极保护系统的各种强制电流阳极材料的消耗率。如果用钛作为铂类阳极的基体材料，则阳极/电解质间的电压必须限制在大约 8V 以内。对于以铌作为基体材料的阳极，实验室试验证明电压在高达 100V 时其效果仍然令人满意，不过现场经验表明，电压 50V 将更加可靠，是使用的极限。

表 C1　强制电流阳极材料的消耗率

强制电流 阳极材料	用于盐水中的典型阳极电流 密度 A/m^2 (A/ft^2)	正常消耗率 g/A·a (lb/A·a)

Pb–6% Sb–1%Ag	160～220 (15～20)	14~90 (0.03~0.2 (A))
Pb–6% Sb–2%Ag	160～220 (15～20)	14~27 (0.03~0.06 (B))
Pt（以 Ti、Nb 或 Ta 为基体或混合金属氧化物）	540～3200 (50～300)	3.6×10^{-3}~7.3×10^{-3} (8×10^{-6}~16×10^{-6} (B))
石墨	10～40 (1～4)	230~450 (0.5~1.0)
Fe–14.5% Si–4.5%Cr	10～40 (1～4)	230~450 (0.5~1.0)

(A) 经验表明，在水深低于 30m（100ft）时，Pb–Ag 阳极的消耗率很高。

(B) 当电流密度非常高和/或在低盐度水中时该数值会增大。

附录 D

使用初期、维持和后期电流密度计算牺牲阳极输出电流的典型方法

以往的阴极保护设计中普遍采用本方法，所以，专业人员对其熟悉。其缺点在于该方法是基于一种计算方法，而不是以基本原理为基础，与斜率参数法相比（见附录 E），可能出现不必要的过保守设计。可以通过使用不同大小的阳极使过保守设计最小化，阳极大小的选择基于阳极安装费用最低的原则[36]。根据 Dwight 修正公式[39]，圆柱形阳极与所处电解质间的电阻等于电解质电阻率乘以某些阳极形状因数，见公式（D1）：

$$R=\rho\ \frac{k}{L}\left(\ln\frac{4L}{r}-1\right) \qquad (D1)$$

式中：

R：阳极与电解质间的电阻，Ω；

ρ：电解质电阻率，Ω·cm(见表 A1)；

k：如果 L 或 r 单位用 cm 时 K 为 0.500/π 或 0.159，如果单位用 in 时 K 为 0.0627；

L：阳极长度，cm；

r：阳极半径，cm。(如果截面不是圆形，r=C/2π，式中 C 为阳极截面周长)。

因此，对于 25×25 cm (10×10 in.)的阳极截面，C=100cm(40in.)，则 r =15.9cm(6.37

in.)。

应用欧姆定律来确定阳极输出电流：I = E / R

以用于墨西哥湾的阳极计算为例，保护所需阳极数量必须满足三种不同的计算要求。要有足够的阳极满足构筑物初期极化(初期电流密度见表 A1 ）;在构筑物设计寿命期间(平均电流的需要）能够产生适当的电流量；以及在设计寿命后期（后期电流的需要）产生维持保护所需足够的电流。作为实例，给出下面数据：

构筑物表面积 = 9300 m^2 (100,000ft^2)

设计寿命= 20a

ρ = 20 Ω·cm（取自表 A1）

根据这些数据,我们可选择具有下列性能的阳极：

材料：Al-Zn-Hg 合金；

E = 0.25V，保护电位为-0.80V（Ag/AgCl[SW]）时，铝或锌阳极与被保护构筑物之间的驱动电压；

L = 244cm（96 in），阳极长度；

r = 13.7cm（5.4 in），截面为 22×22cm（8.5×8.5 in），阳极芯为 10cm（4in）的阳极初期半径；

Wt = 330 kg（725 lb），每块阳极重量；

CC = 2750 A-hr/kg（1250A-hr/lb），从表 B1 得到的铝-锌-汞合金阳极电容量，或来自阳极供应商的技术规格书；

r_{corr} = 5.7cm（2.25 in），为 11 cm（4 in）80 级钢管外径的一半。

由此，每块阳极初期发出电流为式 D2：

$$I = = \frac{0.25V}{20\times\frac{0.159}{244}[\ln(\frac{4\times244}{13.7})-1]} = \frac{0.25V}{0.0424ohm} = 5.86\ A \quad (D2)$$

暴露面积为 9300m^2（100,000ft^2）的被保护构筑物所需阳极数量为式 D3：

$$N = \frac{前期电流密度(10mA/ft^2)\times表面积(9300m^2)}{每块阳极发出电流(5.86)\times1000mA/A}$$

$$= 175\ 块 \quad (D3)$$

初期保护电流密度为 110 mA/ m^2，来自表 A1。

为了满足构筑物对第二种电流密度的要求，确定在 20a 设计寿命内被保护构筑物所需阳极数量，见式 D4：

$$N = \frac{\text{平均电流密度}(55\text{mA}/\text{m}^2)\times\text{表面积}(9300\text{m}^2)\times\text{寿命}(20\text{a})\times 8760(\text{hr}/\text{a})}{(2750\text{A}-\text{hr}/\text{kg}\times 330\text{kg}/\text{阳极}\times 1000\text{mA}/\text{A})}$$

= 99 块 （D4）

平均保护电流密度为 55 mA/ m^2，来自表 A1。

最后，计算满足后期电流所需阳极数量，除了使用消耗后的阳极尺寸外，采用与初期电流需求类似的方法（见式 D5）：

$$r_{expended} = r_{initial} - (r_{initial} - r_{core})\times 0.9$$

$$= 13.7 - [(13.7 - 5.7)\times 0.9]$$

$$= 6.5\ \text{cm} \quad （D5）$$

式中：0.9 是细长阳极的利用率。假设阳极长度不变。

每块阳极后期发出电流见式 D6：

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0.25V}{20\frac{0.159}{244}\ln\frac{4\times 244cm}{6.5cm}1} = \frac{0.25V}{0.0523cm} = 4.78A \quad （D6）$$

则保护暴露面积为 9300m^2 的构筑物后期所需阳极数量为式 D7：

$$N = \frac{\text{后期电流密度}(75mA/m^2)\times\text{表面积}(9300m^2)}{\text{每块阳极发出电流}(4.78)\times 1000mA/A}$$

= 146(块) （D7）

后期保护电流密度为 75 mA/ m^2，来自表 A1。

初期电流计算结果需要 175 块阳极，按平均电流密度计算需要 99 块阳极，按后期电流计算结果需要 146 块阳极。对于该实例，比较合适的块数为 175 块。但是，这个值与平均电流所要求的 99 块的差别很大。若按另一种形状的阳极计算，三种计算所需数量之间相差较小，则常安装这种比较经济的阳极。

当 4L/r ≥ 16 时，Dwight 公式是有效的；当 4L/r<16 时或阳极截面形状不能作为圆形考虑时，阳极输出电流的计算最好采用其他公式，如 Crennell（McCoy）公式（见公式[D9]）或 Dwight 的其他修正公式。理论上，对于深水全浸圆柱形阳极，下面的公式可能会更加准确：

$$R=\rho\ \frac{k}{L}(\ln\frac{2L}{r}-1) \quad (D8)$$

但在实际阴极保护系统中，第一个公式应用比较广泛。

说明：

a) 在实际设计中，为了保证在阳极寿命期间构件得到充分保护，宜选择阳极长度值 L 和阳极截面半径值 r 表征阳极即将耗尽时的状况。对细长阳极，长度的变化可以忽略。

b) 以-0.8V(Ag/AgCl[SW])为构筑物最小保护电位，如果实际的构筑物保护电位负于此

值，则 E 值会小于 0.25V，这样会减少阳极输出电流，从而增大阳极寿命。

c) 阳极净重必须按照选用阳极材料的实际消耗率设计，能在系统寿命期间内足以提供计算的电流量（见附录 B 和表 B1）。

d) Crennell(McCoy)公式为式 D9：

$$R = \frac{0.135 \cdot \rho}{A} \qquad (D9)$$

式中： R: 电阻，Ω；

ρ: 水的电阻率，Ω·cm；

A: 阳极暴露的面积，cm^2。

附录 E

使用设计斜率和维持电流密度计算牺牲阳极输出电流的典型方法

这是另一种初期、平均和后期电流密度（附件 D）的计算方法，首次基于原理的先进的方法，可避免过保护设计，这是其相对先前方法的本质区别。对暴露在海水中的无防腐层构筑物，采用设计斜率的阴极保护设计步骤如下：

1. 确定构筑物的设计寿命，T。

2. 根据所使用的阳极和所处的环境，选择阳极的消耗率，k（说明：其他地方阳极的消耗率使用不同的表示符号）。

3. 确定海水电阻率，ρ。对于跨越电阻率变化区的大型构筑物，构筑物的不同区域分别进行设计。

4. 根据以前的经验或现场实验数据，选取设计斜率 S，及维持电流密度 i_m，i_m 取决于设计斜率。同样，构筑物的不同区域可能分别进行设计。

5. 确定式 E1 右边的数值。此数值描述阳极尺寸和形状的备选方案，可能用于设计，表示为式子左边的形式。

$$R_a w = i_m T k S \qquad (E1)$$

式中：

R_a = 单个阳极对海水的电阻（例如式 D1），Ω。

w = 单个阳极重量，kg.。

i_m = 维持电流密度，mA/m^2。

T = 设计寿命，a.。

k = 阳极消耗率，kg/A-a。

S = 设计斜率，Ω-m²（其他地方对所有这些术语或很多术语进行了定义）。

6. 再确定合适的阳极：

(a) 选择一个备选阳极，根据其尺寸计算电阻 R_a 和重量 w。

(b) 针对此阳极，检验式 E1 左右两边是否相等。

(c) 如果不相等，有两种选择。首先可以调整阳极尺寸，重复步骤 6a 和 6b，对阳极进行优化以满足设计要求。（尽管无限数量的阳极可以满足式 E1，但是，对于制造和安装，存在一个较小的子集。）另一种选择，采用选择的阳极，调整式 E1，如式 E2 所示，确定阳极的实际设计寿命。

$$T = \frac{R_a w}{i_m k s} \qquad (E2)$$

7. 一旦确定阳极尺寸，可以用 E3 计算每块阳极保护的面积，A1：

$$A_1 = \frac{S}{R_a} \qquad (E3)$$

式中：

A1 = 每块阳极保护的面积，m²。

8. 确定构筑物的总保护面积或区域 A_{total}，除以每块阳极的保护面积计算阳极的需求量，如式 E4。

$$N = \frac{A_{total}}{A_1} \qquad (E4)$$

式中：

N = 阳极总数。

9. 确定根据后期条件（阳极消耗 90%）时的设计斜率是否可以接受，支架阳极采用 R_a 值。支架阳极的 R_a 值可以采用式 D5 和式 D6 计算支架阳极发出电流的同样步骤。阳极的长期电位可能不同于极化期间，因此，极化图中的设计曲线会上移或下移。

如果在相似条件下进行构筑物的大量设计，步骤 1 至 7 和步骤 9，可能只需重复一次，从而可以确定一块标准阳极在每个构筑物上保护一定的保护面积 A1。

如果构筑物结构形式复杂，设计要求使用不同大小和形状的阳极，每种阳极宜单独满足步骤 6 之前的等式，每种阳极的保护面积也不相同。

翻译人：常炜（中海石油研究中心）

审核人：崔玉军、李忠涛