

T/CSCP XXXXX--AAAA

ICS ×××××

×××

CSCP

中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP XXXXX--AAAA

## 沉管隧道钢壳外表面防腐蚀技术规范

Technical Specification for Anti-Corrosion of The Outside Steel Shell  
Surface at Immersed Tube Tunnel

(征求意见稿)

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国腐蚀与防护学会 发布

# 目 次

前 言.....	II
1、范围.....	1
2、规范性引用文件.....	1
3、基本规定.....	2
4、防腐蚀设计.....	2
4.1 一般规定.....	2
4.2 表面处理.....	2
4.3 涂层保护.....	3
4.4 阴极保护.....	4
5、制造安装、检验规定.....	7
5.1 一般规定.....	7
5.2 涂装表面预处理.....	7
5.3 涂装工艺要求.....	7
5.4 牺牲阳极施工要求.....	8
5.5 检验.....	8
5.6 验收.....	10
6 维护管理.....	10
6.1 一般要求.....	10
6.2 全生命周期耐久性监测.....	10
6.3 全生命周期耐久性评估.....	11
6.4 全生命周期耐久性管理.....	11
附录 A 牺牲阳极检验项目、频次和技术要求.....	12
附录 B 牺牲阳极的数量和使用年限核算.....	14
附录 C 牺牲阳极安装后钢壳阴极保护电位检测.....	16
附录 D 牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座接触电阻.....	18
附录 E 沉管钢壳用牺牲阳极长期电化学性能检测.....	19
附录 F 沉管钢壳外壁防腐蚀涂层破损修复工艺.....	22

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020 给出的规则起草。

本标准由青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司提出。

本标准由中国腐蚀与防护学会标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位：青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司

本标准参加起草单位：广东公路建设有限公司、大连理工大学、北京科技大学、集美大学、大连科迈尔防腐科技有限公司、山东福瑞成环境工程有限公司

本标准主要起草人：赵永韬、王康臣、黄一、陈伟乐、宋神友、秦铁男、李晓刚、张贤慧、李威力、汪相辰、吴建华、高瑾、郭仕奎、金文良、杜翠薇。

# 沉管隧道钢壳外表面防腐蚀技术规范

## 1、范围

本标准主要规定了沉管钢壳外表面的涂层和阴极保护要求。

本标准适用于全浸在海水或埋设在海底泥、抛石层下的沉管钢壳等海洋工程钢结构的防腐设计、施工和验收。

## 2、规范性引用文件

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

- ISO 20340 色漆和清漆 海上和有关结构防护涂料体系的性能要求
- IMO/MSC. 215(82) 所有类型船舶专用海水压载舱和散货船双舷侧处所保护涂层性能标准（简称PSPC）
- DNVGL-RP-B401 阴极保护设计
- BS EN 12496 海水和海泥中牺牲阳极保护
- NACE SP 0387 海上设备用铸铝阳极的冶金和检验要求
- NACE SP0176 海上固定式石油生产钢质构筑物全浸区的腐蚀控制
- GB/T 5210 色漆和清漆 拉开法附着力试验
- GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
- GB/T 8923.3 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第3部分：焊缝、边缘和其他区域的表面缺陷的处理等级
- GB/T 9793 金属和其他无机覆盖层 热喷涂锌、铝及其合金
- 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度特性 第2部分：磨料喷射清理后钢材表面粗糙度等级的测定方法 比较样块法
- GB/T 13912 金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法
- GB/T 18570.3 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第3部分：涂覆涂料前钢材表面的灰尘评定（压敏粘带法）
- GB/T 18570.6 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第6部分：可溶性杂质的取样 Bresle法
- GB/T 18570.9 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第9部分：水溶性盐的现场电导率测定法
- GB/T 31972 海上浮式生产储存设备腐蚀防护
- GB/T 33314 腐蚀控制工程生命周期通用要求
- GB/T 7387 船用参比电极技术条件
- GB 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 7788 船舶及海洋工程阳极屏涂料通用技术条件
- GB/T 20624.1 色漆和清漆 快速变形（耐冲击性）试验 第1部分：落锤试验（大面积冲头）

GB/T 1768	色漆和清漆 耐磨性的测定 旋转橡胶砂轮法
GB/T 1771	色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定
GB/T 7790	色漆和清漆 暴露在海水中的涂层耐阴极剥离性能的测定
CB/T 4168	船舶压载舱涂装技术要求
CB/T 4231	船舶涂装技术要求
JTS 153-3	海港工程钢结构防腐技术规范
HGT 4336	玻璃鳞片防腐涂料

### 3、基本规定

沉管钢壳外壁应进行防腐蚀设计。

防腐蚀设计应根据环境条件、材质、结构形式、使用要求、施工条件和维护管理等综合确定。

沉管钢壳的部位划分符合JTS 153-3-2007《海港工程钢结构防腐技术规范》表3.0.3中关于泥下区的规定。

采用涂层或阴极保护时，结构设计应留有适当的腐蚀裕量，不同部位的单面腐蚀裕量按照JTS 153-3-2007《海港工程钢结构防腐技术规范》表3.0.7计算。沉管钢壳的防腐蚀不宜单采用腐蚀裕量法。

埋于沉管外壁的辅助构件或预埋件应与钢壳进行电连接。沉管外壁的临时性辅助构件应予以拆除。

### 4、防腐蚀设计

#### 4.1 一般规定

4.1.1 本标准提出了使用涂层完成腐蚀防护的基本要求，其目的是对沉管钢壳外壁提供10年或更长期限的使用寿命。涂层系统的目标使用寿命取决于从表面处理到涂料涂覆全过程是否严格按给定的程序执行。因此，适当的表面处理要求是确保涂层系统10年或更长期限目标使用寿命的非常重要的条件之一。

4.1.2 涂层系统的选择和应用程序应当考虑到沉管钢壳在制造、安装和服务期间的条件。

4.1.3 防腐蚀措施应根据沉管钢壳的部位、保护年限、施工、维护管理、安全要求和技术经济效益等因素确定，并应符合下列规定。

4.1.3.1 沉管钢壳外壁防腐蚀设计使用年限原则上至少为40年以上，可采用阴极保护和涂层联合保护或单独采用阴极保护。单独采用阴极保护时，应考虑施工期的防腐蚀措施。

4.1.3.2 当牺牲阳极埋设于石子或海泥中时，应选用适当的阳极材料，并应考虑其驱动电压和电流效率的下降。

#### 4.2 表面处理

4.2.1 沉管钢壳在涂装之前应进行表面喷射除锈预处理。表面预处理、结构性处理、二次表面处理以及表面清理按CB/T 4231的规定进行。

4.2.2 喷射清理前，所有油脂，或因探伤拍片留下的润湿剂按SSP SP1“溶剂清理”清除干净。

4.2.3 钢材表面在喷射清理前，应先进行结构处理，按GB/T 8923.3进行。锐边和切割边缘打磨到 $R \geq 2\text{mm}$ ，气孔要进行补焊，咬边要进行打磨，焊缝光滑没有焊渣、飞溅等。结构处理前对焊缝进行预喷砂。

4.2.4 磨料应能产生涂料系统规定的表面粗糙度，表面粗糙度按GB/T 13288-2008执行。粗糙度达到 $Rz35-75$ 微米或GB/T 8923.1中规定的“中等（G）”级别。

4.2.5 钢材表面要求喷射清理到GB/T 8923.1规定的Sa2½级，即钢材表面在目视观察时，表面应无可见的油脂和污物，并且没有氧化皮、铁锈、涂层和异物，任何污染物的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑。

### 4.3 涂层保护

4.3.1 涂层保护将在钢材和环境之间提供一个屏障，从而达到钢材保护要求。涂层系统的目标使用寿命应满足海上浮式结构的操作要求。

4.3.2 涂层的性质对涂层腐蚀防护也很重要。应确保所选择的涂层具有必要的特性，沉管钢壳外壁防腐涂层性能应符合表1的规定要求。

表1 沉管钢壳外壁防腐涂层

序号	项目	性能指标	试验方法
1	附着力, MPa	$\geq 8$	GB/T 5210
2	抗冲击, cm	$\geq 50$	GB/T 20624.1
3	耐磨性 (1000g/1000r), mg	$\leq 40$	GB/T 1768
4	抗氯离子渗透性 (30d), mg/cm <sup>2</sup> ·d	$\leq 5.0 \cdot 10^{-4}$	JTJ 275-2000 附录 C
5	耐阴极剥离性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离 $\leq 8$	ISO 20340
6	耐海水浸泡性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离 $\leq 8$	
7	循环老化试验 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离 $\leq 8$	

4.3.3 为达到10年或更长期限的涂层系统目标使用寿命，需要进行严格的规定。应强调的两个主要因素是：

- (a) 选择的涂料应获得资格认可；
- (b) 严格的表面处理和清理。

#### 4.3.4 涂层资格认可

4.3.4.1 沉管钢壳的环境条件为抛石埋覆下的海底或江底。为确保10年或更长期限的目标使用寿命，应选择具有认可资格的涂料。

4.3.4.2 涂层保护应按不同保护部位进行设计选择，涂层资格认可应考虑产品所在部位的腐蚀环境特点。例如：顶部和侧面沉管壳体外表面的涂层应具有耐抛石冲击性能，以及涂层应与阴极保护相兼容；底部沉管壳体外表面的涂层应具有耐磨性和耐海水浸泡性。

4.3.4.3 涂层系统的性能应确定，为确保涂层的目标使用寿命，应进行下列二者之一的资格认可：

- (a) 涂层实际应用的相关文件；
- (b) 完成合格预证明的试验。

4.3.4.4 涂料应按 ISO 20340:2009 和 PSPC 标准规定进行合格预试验。

#### 4.3.5 涂料

4.3.5.1 涂料应根据使用部位选择适当的材料且经过有关方面评估认可，诸如：

- (b) 腐蚀防护特性；
- (b) 健康、安全和环保要求；
- (c) 与施工条件和设备相关的特性。

4.3.5.2 承制方应将附带合格文件的涂料清单提交给业主认可。

4.3.5.3 所有涂料和溶剂应由制造商提供 MSDS 和 TDS，并在产品包装标签上予以必要的标识，每一产品应有制造年月批号和保质期限。

4.3.6 沉管钢壳涂层系统可采用环氧玻璃鳞片及性能相近涂层系统。

表2 沉管钢壳外壁的涂层系统

区域	涂层类型	平均总 DFT, $\mu\text{m}$	涂层道数
牺牲阳极保护区	环氧玻璃鳞片或其它认可的硬质涂层	~700	2~3
沉管底部、远离牺牲阳极保护区	环氧玻璃鳞片或其它认可的硬质涂层	~1000	3~4

#### 4.4 阴极保护

4.4.1 沉管钢壳外壁阴极保护采用牺牲阳极阴极保护方式。

4.4.2 阴极保护设计应收集如下资料，必要时可进行现场测定：

- (1) 沉管钢壳的材质、外形尺寸、表面状况，与相邻结构物的关系；
- (2) 介质的盐度或化学成分；
- (3) 介质的温度、含氧量、电阻率和pH值；
- (4) 波浪、潮位、海底水流速和水中泥沙含量等；
- (5) 介质的污染情况等。

4.4.3 阴极保护测量用参比电极应具有极化小、稳定性好、不易损坏、使用寿命长和适用海底介质等特性。参比电极主要技术性能可参考现行国家标准《船用参比电极技术条件》(GB/T 7387) 和表3。

表3 常用参比电极技术性能

名称	电极结构	电位*	适用环境
饱和甘汞电极	Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> 饱和 KCl	+0.242 V	淡水、海水
饱和硫酸铜电极	Cu/饱和 CuSO <sub>4</sub>	+0.316 V	淡水、海水、土壤
海水氯化银电极	Ag/AgCl 海水	+0.250 V	海水
锌合金电极	Zn 合金	-0.784 V	淡水、海水、土壤

\*: 电极电位的参考电极为标准氢电极，饱和甘汞电极主要作为现场参比电极校对。

4.4.4 阴极保护电位应符合和表4。考虑到沉管隧道沉管外壳介于含氧环境(沉管运行初期)和可能的缺氧环境(未来海底泥沉积积累效应)，钢壳外壳的保护电位除了满足上述技术规范的规定外，增加极化幅度大于100mV判据。钢壳阴极保护电位测量细则见附录C。

表4 钢结构的保护电位 (Vs. Ag/AgCl/海水\* (3))

环境、材质	保护电位	
	最正电位	最负电位
海水/海淡水	-0.80 (是否考虑厌氧-0.90V)	-1.15 <sup>(1-2)</sup>

\* (1) 关于阴极保护最负电位, ISO 13174-2012、ISO 12473-2017、DNV RP B401等国际标准均规定为-1.10V, 这涵盖了外加电流和镁合金牺牲阳极等可能产生极负电位情况下的指标。在DNV RP B401中5.4.2特别说明“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。”。

\* (2) 考虑到沉管隧道钢壳埋覆在较高电阻率介质中, 保护电位存在欧姆降误差(阴极电位偏负、阳极电位偏正), 所以现场测量值若出现超出上限情况, 应考虑相关措施消除欧姆降、测量电缆等影响因素。

\* (3) 在港池、船坞等地点测量钢壳极化电位, 只是作为阳极活化过程的验证。钢壳实际保护电位的测量要考虑海水介质中氯离子变化对氯化银参比电极标准电位的影响。

4.4.5 阴极保护的阴极保护电流密度可参考表5选值, 适合沉管隧道钢壳外壁的阴极保护电流密度, 应参考表中海泥、海泥/堆石环境介质, 必要时可通过现场试验确定。采用防腐涂层的沉管钢壳保护电流密度应在表4.4.5中的选值基础上乘以涂层破损系数, 涂层破损系数应按照《JTS 153-3-2007海港工程钢结构防腐技术规范》附录B确定。

表5 海港工程钢结构的保护电流密度

环境介质	钢结构表面状态	保护电流面密度 (mA/m <sup>2</sup> )		
		初始值	维持值	末期值
静止海水	裸钢	100~130	55~70	70~90
流动海水	裸钢	150~180	60~80	80~100
海泥	裸钢	25	20	20
海水堆石	裸钢	60~90	40~50	50~75

4.4.6 采用阴极保护的钢壳应确保每一个设计单元或整体具有良好的通电连续性, 连接方式可采用焊接。应确保牺牲阳极与被保护的钢壳之间的连接电阻不大于0.001 Ω。

4.4.7 总保护电流可以下列公式计算:

$$I = \sum I_n + I_f$$

$$\sum I_n = \sum i_n s_n$$

式中:  $I$  — 总保护电流 (A);

$I_n$  — 被保护钢结构各分部分的保护电流 (A);

$I_f$  — 其他附加保护电流 (A);

$i_n$  — 被保护钢结构各分部分的初期保护电流密度 (A/m<sup>2</sup>);

$s_n$  — 被保护钢结构各分部分的保护面积 (m<sup>2</sup>)。

4.4.8 牺牲阳极材料应根据沉管钢壳环境介质条件和经济因素综合确定。牺牲阳极材料采用铝合金牺牲阳极时, 其重量、尺寸、表面质量、铸造质量应满足 NACE SP 0387 《海上设



备用铸铝阳极的冶金和检验要求》，执行细则见附录 A。铝合金阳极化学成分应按照表 6 范围。

表6 阳极的化学成分（重量百分比）

Zn	In	Ti	Si	Sn	Cu	Fe	总杂质
4.0~ 6.0	0.015~ 0.030	0.001~0.03	0.05~0.4	0.001~0.02	最大 0.003	最大 0.07	最大 0.05
4.75~ 5.75	0.016~ 0.020	/	0.08~0.12	/	最大 0.003	最大 0.06	最大 0.05

4.4.9 铝合金阳极的电化学性能应符合表7中的要求。测试过程应有第三方见证。

表7 阳极电化学性能

检测类别	测试介质电阻率	工作电位 (V)	实际电容量 (Ah/kg)	溶解状况
短期性能测试* <sup>(1)</sup>	70~80 欧姆-厘米海淡水	负于-1.05	海淡水中≥2550	腐蚀产物容易脱落，表面溶解均匀
长期性能测试* <sup>(2)</sup>	8~40 毫米抛石/40 欧姆-厘米海淡水	负于-0.95	≥2000	表面溶解均匀

\* (1) 短期性能测试电容量值是作为阳极出厂质量控制依据。海淡水中电容量值不作为设计参数。  
\* (2) 沉管钢壳的阳极埋覆在抛石下无法更换和补充，应进行一年期的长期电化学性能测试，阳极实际电容量值作为牺牲阳极保护的设计依据，测试方法见附录 E

4.4.10 牺牲阳极的几何尺寸和质量应能满足阳极初期发生电流、末期发生电流和使用年限的要求。

4.4.11 牺牲阳极的铁芯结构应能保证在整个使用期与阳极体的电连接，并能承受自重和使用环境所施加的荷载，其埋设方式和接触电阻应符合现行国家标准《铝-锌-钢系合金牺牲阳极》（GB/T 4948）的有关规定。

4.4.12 牺牲阳极的接水电阻、发生电流、牺牲阳极的数量和使用年限核算可按照附录B计算。

4.4.13 牺牲阳极的布置应使被保护钢壳外壁的表面电位均匀化，宜采用均匀布置。当沉管钢壳阳极所处环境介质电阻率不能确定时，宜采用仿真计算方法评估钢壳保护电位分布的均匀性。

4.4.14 牺牲阳极与被保护钢壳距离小于100mm时，应设置屏蔽层。牺牲阳极紧贴钢壳表面安装时，除了按规定装配屏蔽层外，还应对贴近钢壳表面的牺牲阳极底面进行绝缘涂装。

4.4.15 阴极保护监测装置应具有测量、显示钢壳保护电位和牺牲阳极输出电流等基本功能。有条件时，宜采用具有远距离遥测和分析评估功能的监测设备。

4.4.16 监测装置应设有手动检测接线端子和备用参比电极的接线端子。

4.4.17 参比电极电缆应选用耐海水腐蚀和耐老化的屏蔽电缆，其屏蔽层接地。

## 5、制造安装、检验规定

### 5.1 一般规定

5.1.1 防腐蚀工程所用的设备、材料、仪器应经过实际应用或有关试验论证，并具备出厂质量合格证或质量检验报告，必要时应进行质量复检。

5.1.2 防腐蚀工程的施工应满足国家有关法律、法规对环境保护的要求，防腐蚀施工应有妥善的安全防范措施。

### 5.2 涂装表面预处理

5.2.1 表面脱脂净化和喷射清理的等级应符合相关条款的规定。工作环境应满足空气相对湿度低于85%，钢结构表面温度不低于露点以上3℃。

5.2.2 钢材表面喷射处理应达到 GB/T 8923.1—2011 中的 Sa 2½ 级。二次表面处理时，破损的车间底漆喷射清理至 Sa 2½ 级（包括焊缝和烧损区）；完好的车间底漆进行扫砂处理；大接缝及其涂层破损区域机械打磨至 St 3 级。

5.2.3 喷射处理后，钢材表面粗糙度介于 50 μm~85 μm，或达到 GB/T 13288.2—2011 规定的比较样块法的中级。

5.2.4 喷射清理后涂覆涂料前，钢材表面应清洁、干燥，无油、脂。钢材表面颗粒大小为“3”、“4”或“5”的灰尘分布量不应超过 GB/T 18570.3—2005 规定的 2 级。在待涂表面目视可见的更小颗粒的灰尘应去除。

5.2.5 喷射清理后，钢材表面可溶性杂质含量的电导率应不超过 50 mg/m<sup>2</sup>NaCl 盐含量电导率。电导率检测应按 GB/T 18570.9 规定进行，采用 GB/T 18570.6 规定的抽样法。

5.2.6 喷射清理所用的磨料应清洁、干燥。应根据钢结构表面的原始锈蚀程度、设计或涂装规格书所要求的喷射工艺、清洁度和表面粗糙度来选择磨料的种类和粒度。一般对于壁厚大于或等于4mm的钢构件，选用磨料的粒度范围为0.5~1.5mm，对于壁厚小于4mm的钢构件，应选用密度较小的磨料。

5.2.7 压力式喷射（喷砂）所用的磨料一般只用一次，如需要回收利用，应经过筛分和干燥处理。

5.2.8 手动和动力工具除锈仅适用于涂层缺陷的局部修补和无法进行喷射清理的场合。

5.2.9 表面清理后，应用吸尘器或干燥、洁净的压缩空气清除浮尘和碎屑，清理后的表面不得用手触摸。

5.2.10 清理后的钢结构表面应及时涂刷底漆，涂装前如发现表面被污染或返锈，应重新清理至原要求的表面清洁度等级。

5.2.11 压力式喷砂所用的空压机、喷砂罐等压力容器，其生产厂家应持有国家有关部门颁发的压力容器生产许可证。

5.2.12 喷砂工人在进行喷砂作业时，应穿戴防护用具，以保护身体不受飞溅磨料的伤害；在工作间内作业时，呼吸用空气应进行净化处理。

5.2.13 露天作业时应注意防尘和环境保护，并应符合国家有关法律法规的规定。

### 5.3 涂装工艺要求

5.3.1 涂装前应先对钢结构表面进行外观检查，确保钢结构的表面清洁度和表面粗糙度满足设计要求。

5.3.2 涂装方法和涂刷工艺应根据所选用的涂料的物理性能、施工条件和被涂钢结构的形状进行选择，并应符合涂料规格书或产品说明书的规定。

- 5.3.3 表面预处理与涂装之间的间隔时间应尽可能缩短，在一般现场作业环境条件下，应在4小时内涂装完毕；车间作业或湿度较低的晴天，最长不应超过12小时。
- 5.3.4 当被涂刷钢结构表面的温度低于露点以上3℃，或空气相对湿度大于85%时，除非设计另有说明，否则应停止现场施工作业。
- 5.3.5 需在工地拼装焊接的钢结构，其焊缝两侧应先涂刷不影响焊接性能的车间底漆，焊接完毕后应对焊缝热影响区进行二次表面清理，按设计要求重新涂装。
- 5.3.6 涂层系统各层之间的涂装间隔时间应符合产品说明书或规格书的要求，以保证涂层间的结合力。
- 5.3.7 涂装后应对涂膜认真维护，在固化前应避免雨淋、曝晒及践踏，吊装搬运过程中应采取适当措施，尽量减少对涂层的损伤。
- 5.3.8 涂层修补程序
- 5.3.8.1 运输、安装后，涂层破损处应按原工艺修补，承制方应提供涂层破损的修补程序。该程序包含涂层破损修补数量要求和可接受的修补工作标准。该程序及对该程序的改进应经业主认可。
- 5.3.8.2 涂层搭接处应羽化处理。从有涂层的表面向无涂层表面的涂层厚度上逐渐减薄，便于后续涂层与旧涂层牢固附着。执行细则参见附录F。

#### 5.4 牺牲阳极施工要求

- 5.4.1 牺牲阳极储存和搬运过程中应避免受到油漆等污染。
- 5.4.2 牺牲阳极安装前应提前验收铝合金阳极材料，阳极供应商应提交第三方检测报告，阳极材料的化学成分和电化学性能分别满足表6和表7。
- 5.4.3 牺牲阳极的安装位置应符合设计要求，需变更安装位置时，应得到设计的书面确认并在竣工图中标明。
- 5.4.4 牺牲阳极的安装方式可采用焊接方式。应确保牺牲阳极与被保护的钢壳之间的连接电阻不大于0.001 Ω，具体检验方式见附录D。
- 5.4.5 海水电阻率大于30 Ω·cm时，并采用Ag/AgCl/海水参比电极测量时，应采取Cu/饱和CuSO4参比电极修正读数偏差。
- 5.4.6 测量电缆可采用直接与保护钢结构连接或与电连接钢筋连接的方式。

#### 5.5 检验

##### 5.5.1 涂装表面清理的质量检验

###### 5.5.1.1 表面清洁度

表面清洁度检验按现行国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB8923中相应的照片进行目视对照检查。表面清洁度的检查数量见表8。

###### 5.5.1.2 表面粗糙度

表面粗糙度检验按照GB/T 13288.2-2011. 涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理后的钢材表面粗糙度特性 第2部分：磨料喷射清理后钢材表面粗糙度等级的测定方法（比较样块法）的规定，用标准样块目视比较评定粗糙度等级，或用剖面检测仪直接测定表面粗糙度。表面粗糙度的检查数量见表8。

表8 海港工程钢结构清洁度和表面粗糙度抽查数量

钢结构名称	检查数量
小型钢构件	抽查数量不少于构件总数的10%，且每工班不少于5件

大型、整体钢结构	每 50 m <sup>2</sup> 对照检查一次，且每工班检查次数不少于一次
*：①表面粗糙度采用比较样块法时，每一评定点面积不小于 50 mm <sup>2</sup> 。 ②采用剖面检测仪或粗糙度仪直接检测时，取评定长度为 40 mm，在此长度范围内测 5 点，取其算术平均值为该评定点的表面粗糙度值。	

### 5.5.1.3 作业环境

钢结构喷（抛）射表面清理时，环境的温度、湿度和露点应符合设计和涂料产品的技术要求。用温、湿度检测（记录）仪测量施工环境的温度、湿度，并与设计、产品技术要求和施工记录相对照。

作业环境检查每工班至少应检查并记录3次检测和换算结果。

### 5.5.1.4 表面状态

在表面清理完成后，涂装施工开始前，应对钢结构的表面状态逐件进行检查确认。

表面清理后应核查放置时间是否超出设计及标准的规定，外观检查钢结构表面是否有污染或返锈。

## 5.5.2 涂装检验

### 5.5.2.1 涂层的附着力

漆膜厚度大于250 μm时，涂层的附着力检测采用GB/T5210的涂层附着力测定法（拉开法）。涂层附着力检查属于破坏性检查，可用同条件下制作的板状试件进行试验。如在结构上直接进行附着力检测时，应选择非重要部位，测试后立即补涂（具体补涂——前面的条目号）。

检查数量为每200m<sup>2</sup>至少进行一次检测，且总检测数量不得少于3次。

### 5.5.2.2 涂装作业环境

涂装作业环境采用温度计、湿度计检测环境的温度、湿度，工件表面温度、湿度。每工班至少检查三次。

### 5.5.2.3 涂层外观

目视外观检查，涂层表面应均匀，色泽一致，不应有皱皮、流淌、气泡、裂纹等缺陷。涂层外观应逐件检查。

### 5.5.2.4 涂层的干膜厚度

干膜厚度采用精度不低于10%的磁性测厚仪，经标准样块校正后进行测量，每一测点应测取3次读数，每次读数的位置相距25~75mm，取3次读数的算术平均值为此点的测定值。涂层的干膜厚度检测结果允许存在一定程度的偏差，其允许偏差值为：平均值达到设计厚度的测点数应不少于总测点数的85%；检测结果中最小厚度读数不得低于设计厚度的85%。

大型钢结构，每10m<sup>2</sup>不少于3个测点；小型钢构件，每2m<sup>2</sup>布置1个测点。

## 5.5.3 牺牲阳极检验规则

5.5.3.1 牺牲阳极的重量、尺寸、表面质量、电化学性能、接触电阻、内部缺陷检验，检验频次及技术要求见附录A。

5.5.3.2 牺牲阳极的电化学性能检验分为短期和长期性能检验，性能指标见表7。铝合金阳极按本标准生产时，有下列情况之一者，应做长期性能检验：

- a) 生产厂作为新产品设计定型时；
- b) 产品转厂生产时；
- c) 长期电化学性能的第三方检验报告时间超过五年时；
- d) 业主或国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

## 5.5.4 沉管管节的阴极保护电位检测

管节阴极保护电位采用高内阻（内阻大于 $10\text{M}\Omega$ ），最小分辨率 $1\text{mV}$ 的数字万用表和 $\text{Ag}/\text{AgCl}$ 参比电极进行现场检测，当海水电阻率大于 $30\ \Omega\cdot\text{cm}$ 时，应采取 $\text{Cu}/\text{饱和}\text{CuSO}_4$ 参比电极修正读数偏差。检测方法见附录C。

沉管隧道钢壳阴极保护电位检测在回填石埋覆前，每个标段各检测一个管节。

## 5.6 验收

5.6.1 钢结构的表面清理施工是涂装的前期工序，不作为独立工程进行验收，但作为对防腐工程质量有重大影响的隐蔽工程项目，其检查、检测结果应得到质量监督员或监理工程师的签字确认。

5.6.2 防腐涂层施工是钢结构防腐工程中的分项或独立工程，其验收工作应与表面清理合并进行，验收前应按要求确认所有表面清理施工记录和质量证明材料已齐全且符合设计要求。

5.6.3 阴极保护工程是钢结构防腐工程中的独立工程或最后完成的分项工程，其验收工作可以独立进行，也可以与涂装合并进行。

5.6.4 防腐工程竣工验收时，应提交下列资料：

- a) 设计文件及设计变更通知书；
- b) 涂料、牺牲阳极、阴极电缆、测量电缆、监测仪器和测量仪器的产地与材质证明书；
- c) 涂料、牺牲阳极的第三方检测报告；
- d) 施工记录；
- e) 施工检查、检测记录；
- f) 竣工图纸；

## 6 维护管理

### 6.1 一般要求

6.1.1 本节规定适用于全浸在海水或埋设在海底泥、抛石层下的沉管钢壳等海洋工程钢结构的全生命周期耐久性监测、评估及管理，亦适用于长期处于深水、深埋等几乎不可达或不可维修的钢结构。

6.1.2 上述钢结构的全生命周期耐久性监测、评估及管理，除应符合本规范及钢结构设计、施工规范的有关要求外，还应满足国家相关法律法规的规定。

6.1.3 上述钢结构的全生命周期耐久性监测、评估及管理，除应符合本规范相关条款外，还应满足国家标准《腐蚀控制工程生命周期通用要求》（GB/T 33314）的有关规定。

### 6.2 全生命周期耐久性监测

6.2.1 钢壳沉管隧道应在工程设计、施工建设阶段同步设计、安装原位耐久性监测或等效的暴露试验监测系统，并制定长期有效的评估方法。

6.2.2 耐久性监测方法、传感器、监测设备本身的耐久性，不应低于工程要求的设计寿命；当监测传感器、监测设备自身使用寿命无法达到工程设计寿命时，可通过系统更换或延寿保障其满足全生命周期监测的要求。

6.2.3 钢壳沉管隧道耐久性监测系统宜选用工程原位监测；也可采用同材质等比例模型暴露试验。

6.2.4 钢壳沉管隧道耐久性监测应对工程服役期内的环境工况进行监测或定期检测，用于状态评估及故障分析。

6.2.5 钢壳沉管隧道耐久性监测参数包含但不限于钢结构保护电位、牺牲阳极输出电流及阴极电流密度等参数的监测及评估。

### 6.3 全生命周期耐久性评估

6.3.1 应定期对钢壳沉管外壁耐久性监测数据评估，宜每1~2年进行1次数据评估，每5年对监测系统进行1次系统性的评估。

6.3.2 全生命周期耐久性评估报告应至少包含以下几方面内容：

- a) 监测及评估依据的标准；
- b) 所评估被保护结构的信息：结构编号、材质、规格、环境工况、防腐设计、服役年限；
- c) 所评估被保护结构的上一次评估结果及上一次维修情况；
- d) 所评估监测数据的监测方法、监测设备信息、设备状态；
- e) 所评估监测数据的时间段；
- f) 监测数据的合理区间（满足保护要求的最大值和最小值）；
- g) 监测数据的修正；
- h) 异常数据识别、异常保护状态识别、异常数据核实；
- i) 监测数据数值分析；
- j) 监测评估结果、处理建议。

6.3.3 钢壳沉管耐久性评估应以设计文件及设计引用标准中规定的保护电位区间作为主要评估依据。

### 6.4 全生命周期耐久性管理

6.4.1 应在钢壳沉管隧道工程建设初期进行全生命周期耐久性管理顶层设计，建立系统化的运行期管理程序文件，并确保其在被保护结构全生命周期内得到有效执行。

6.4.2 全生命周期耐久性管理程序文件应包含但不限于内容：监测系统技术规格书、设计图纸、操作手册，监测系统运维手册，常见故障处理及检修方法，常用备品备件清单及供应商，监测设备升级改造及延寿技术路线，监测数据评估方法、分析频率及异常数据识别，监测系统故障报警、运行保护状态报警及极端异常事件的处理方法。

## 附录 A 牺牲阳极检验项目、频次和技术要求

表 B1：检验内容及频次

序号	检验项目	检验阶段	检验技术要求	船厂		三检	
				检验频次	地点	检验频次	地点
1	重量	安装前	NACE SP0387 第 3.3 节	阳极数量的 10%	阳极生产厂	抽检船厂检验数量的 5%	阳极生产厂
2	尺寸		NACE SP0387 第 3.4 节	阳极数量的 10%	阳极生产厂	抽检船厂检验数量的 5%	阳极生产厂
3	表面质量		NACE SP0387 第 3.9 \3.10 节	阳极数量的 100%	阳极生产厂	抽检船厂检验数量的 5%	阳极生产厂
4	化学成分		表 7	每批随机抽 3 个样	阳极生产厂	每批随机抽 3 个	阳极生产厂
5	电化学性能		参考 DNVGL RP B401 附录 B 和附录 C，分别进行短期和长期性能测试，规则按照本标准第 5.5.3.2 节	短期性能测试每批随机抽 3 个样；长期性能检测报告有效期五年。	阳极生产厂	短期性能测试每批随机抽 3 个样；长期性能检测报告有效期五年。	阳极生产厂
6	接触电阻（牺牲阳极本体与铁脚之间）		试验方法按照 GB/T 4948-2002 的要求。	每批随机抽 1 个	阳极生产厂	每批随机抽 1 个	阳极生产厂
7	内部缺陷检验（剖切）		NACE SP0387 第 3.11 节	每批随机抽 1 个（见证）	阳极生产厂	1 个（见证）	阳极生产厂
8	接触电阻（安装后）	安装后（在船厂）	$\leq 0.01 \Omega$	每个标段各测量一个管节，管顶及两侧面至少 5 个（见证）	船厂	每个标段各测量一个管节，管顶及两侧面至少 5 个（执行）	船厂
9	保护电位	安装后（船坞/港池）	在船坞/港池，钢壳及牺牲阳极需浸于水中	每个标段各测量一个管节，随机选取 1 组	船坞/港池	每个标段各测量一个管节，随机选取 1 组（见证）	船坞/港池

备注：1、批次说明：每个管节所使用的牺牲阳极（铝阳极）作为一个批次；

2、对以上检验项目有质量异议的，船厂、监理及业主将有权加大复验抽样检查比例。

表 B2：检验技术要求

检验项目	检验依据	检验技术要求	
重量	NACE SP0387 第 3.3 节	单只阳极的重量偏差为±3%；总重量偏差为 0~2%；	
尺寸	NACE SP0387 第 3.4 节	允许偏差：长度±25mm；宽度±5%；厚度±10%；直线度 2%；	
表面质量	NACE SP0387 第 3.9 \3.10 节	1. 缩孔和冷隔 缩孔（含凹坑）：缩孔的深度不超过阳极高度的 10%； 冷隔：冷隔深度不超过 10mm；（阳极冷缩和表面重叠深度不能超过 10mm） 2. 非金属夹渣：不超过阳极表面的 1%。 3. 没有对人员安全有危害的突出物。 4. 裂纹 阳极表面不存在以下类型的裂纹： 纵向裂纹； 宽度大于 5mm 的横向裂纹； 宽度小于 5mm 的横向裂纹，最多不超过 10 条； 细小的裂纹团可以看做 1 条裂纹； 宽度小于 0.5mm 的裂纹，不计数；	
化学成分	GB 4949	表 7	
电化学性能	参考 DNVGL RP B401 附录 B	在电阻率为 70~80 Ω·cm 海淡水中，实际电容量：≥2550A.h/Kg；工作电位负于-1.05V（相对 S.C.E.）---出厂和短期。。。	
接触电阻检验	试验方法按照 GB/T 4948-2002 的要求。	≤0.001 Ω	
内部缺陷检验 (剖切检验)	NACE SP0387 第 3.3 节	1/2 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，单个面的 5%；非金属夹杂不超过总表面的 1%，单个面的 2%；与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。
	NACE SP0387 第 3.3 节	1/3 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，单个面的 5%；非金属夹杂不超过总表面的 1%，单个面的 2%；与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。
	NACE SP0387 第 3.3 节	1/4 截面	气孔不超过总剖切表面的 2%，单个面的 5%；非金属夹杂不超过总表面的 1%，单个面的 2%；与铁芯连接处空隙不超过总铁芯周长的 10%，每个面上周长的 20%。



## 附录 B 牺牲阳极的数量和使用年限核算

### C.0.1 初始阶段

阳极块电阻  $R_a(\text{initial}) = \rho / 2S(\text{initial})$ , [ohm]

阳极块平均换算长度  $S(\text{initial}) = (L(\text{initial}) + B(\text{initial})) / 2$ , [m]

$\rho$  : 电阻率, [ohm·m]

$L(\text{initial})$  : 阳极块长度, [m]

$B(\text{initial})$  : 阳极块宽度, [m]

### C.0.2 最终阶段

阳极块长度  $L(\text{final}) = L(\text{initial}) - 0.10 \times u \times L(\text{initial})$ , m

U: 阳极利用系数0.7~0.95, 平均值取0.82

最终阳极块质量  $m(\text{final}) = m(\text{initial}) \times (1-u)$ , kg

$m(\text{initial})$ : 初始阳极块净质量, [kg]

### C.0.3 阳极块等效半径 (最终)

阳极块体积  $V_c(\text{final}) = (d_c / 2)^2 \times 3.14 \times L(\text{final})$ , m<sup>3</sup>

阳极块体积  $V_a(\text{final}) = m(\text{final}) / g$ , m<sup>3</sup>

阳极块等效半径  $r(\text{final})$

$= \{ (V_a(\text{final}) + V_c(\text{final})) / L(\text{final}) \times 2 / 3.14 \}^{0.5}$ , m

$d_c$  : 阳极块高度, [m]

$L(\text{final})$ : 阳极块长度, [m]

$m(\text{final})$ : 最终阳极块质量, [kg]

$g$  : 铝合金比重  $2.7 \times 10^3$  [kg/m<sup>3</sup>]

### C.0.4 阳极块电阻 (最终)

阳极块电阻  $R_a(\text{final}) = \rho / 2S(\text{final})$ , ohm

$S(\text{final}) = (L(\text{final}) + 2r(\text{final})) / 2$ , m

$\rho$  : 电阻率, [ohm·m]

$L(\text{final})$ : 阳极块长度(final), [m]

$r(\text{final})$ : 阳极块等效半径, [m]

### C.0.5 阳极块的安装数量

阳极块总重量 (最小)

$M_{a\text{Min}} = I_c(\text{Mean}) \times T \times T_y / (u \times e)$ , kg

$I_c(\text{Mean})$ : 运营时防腐蚀电流的所需值, [A]

T : 设计寿命, [年]

$T_y$  : 年换算时间 8,760[h/y]

u : 电流效率 0.82 [-]

e : 海泥中有效电容量 1500[A·hour/kg]

### C.0.6 发生电流的计算值和阳极使用年限核算

初始阳极块发生电流

$I_{a_i} = (E_{0c} - E_{0a}) / R_a(\text{initial})$ , A/pc.

初始阳极块发生总电流

$I_{at} = I_{a_i} \times n_{ac}$ , A

$I_{at} > I_{or} = I_c$ , 即:

初始阳极块发生电流, A > 初期阴极保护电流需求值, A

因此, 满足初始极化条件

$E_{0c}$  : 防腐蚀电位  $-0.8$  [V] (标准海水氯化银电极)

$E_{0a}$  : 闭合电路电位  $-1.00$  [V] (标准海水氯化银电极)

$R_a$  : 阳极块接地电阻, [ohm]

$I_a$  : 阳极块发生电流 [A/pc.]

$n_{ac}$ : 阳极块设置数= $M_{a_{Min}}/M_{a_{unit}}$ , 块

末期阳极块发生总电流  $I_{af} = (E_{0c}-E_{0a})/R_a(\text{final})$  A/pc.

$$I_{at} = I_{af} \times n_{ac}, \text{ A}$$

$I_{at} > \text{or} = I_c$

末期阳极块发生电流, A  $>$  末期阴极保护电流需求值, A

因此, 满足防腐保护终期极化条件

综上所述, 确定上述铝合金阳极块选用符合使用年限要求

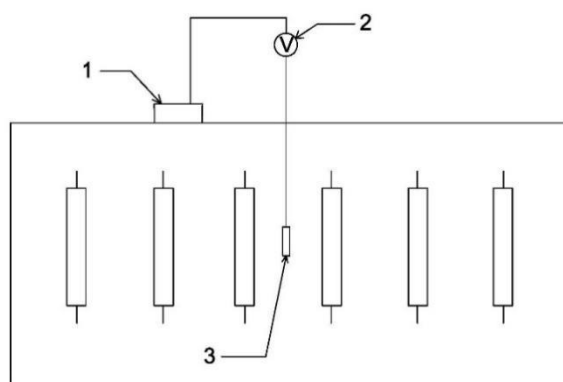
## 附录 C 牺牲阳极安装后钢壳阴极保护电位检测

### A.0.1 测量准备:

牺牲阳极安装后的阴极保护电位试验需在深水坞/港池中实施。管节牺牲阳极安装完成后,在深水坞/港池中进行测量,测量前,钢壳及牺牲阳极需浸于水中 3~5 天或以上,以保证阴极极化。

#### A.0.1.1 测量电路:

阴极保护电位检测线路示意图如图 1 所示:



其中:

- 1: 与钢壳有电连接的结构;
- 2: 数字电压表,阻抗大于  $10M\Omega$ ;
- 3: 银/氯化银参比电极;可用携带式银/氯化银参比电极;

图 C1: 阴极保护电位检测线路图

### A.0.1.2 检测要求

鉴于现场工况钢壳顶面牺牲阳极不具备全浸入水中的条件,检测方法分两步-首先在顶面牺牲阳极不工作的状态下进行电位测试;若是测试结果满足设计要求,则不再进行测试;若是测试结果不满足设计要求则沉管安装施工单位需提供管顶测阳极浸没水中的工况进行再次测试。具体检测要求如下:

**A.0.1.2.1** 检测前确保牺牲阳极累计浸没水中时间超过 3 天;

**A.0.1.2.2** 阴极保护电位试验在沉管两侧随机共选取六个位置,当需管顶阳极浸入水中再测量保护电位时,则沉管两侧及管顶随机共选取九个位置;

**A.0.1.2.3** 初定所检电位范围应在  $-0.8V \sim -1.15V$  (相对于海水氯化银参比电极)。

### A.0.1.3 测量步骤:

**A.0.1.3.1** 从与钢壳有电连接的结构物引出电缆,连接至数字电压表;

**A.0.1.3.2** 银/氯化银参比电极通过电缆连接至数字电压表,选定测量点,将银/氯化银参比电极依次置于测量点处,参比电极在距离钢壳 1 米范围内进行测量,参比电极需尽量靠近钢壳,但不可与钢壳直接接触,也不可于牺牲阳极接触。

**A.0.1.3.3** 数字电压表调至直流电压档,读取不同测量点处的阴极保护电位;

### A.0.1.4 检测时机:

在深水坞/港池进行测量，需保证检测条件可控，进行保护电位检测时，测量区域需浸于水中，保证牺牲阳极、钢壳、水形成回路。

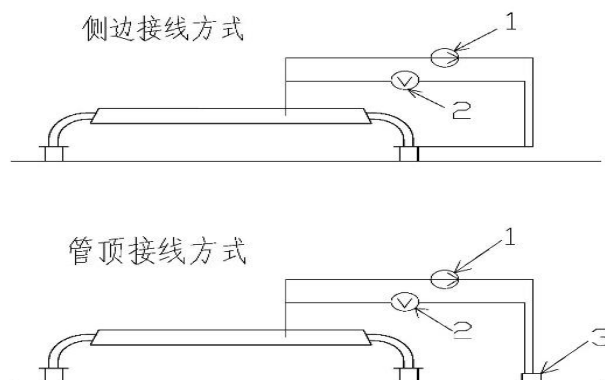
## 附录 D 牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座接触电阻

### D.0.1 测量方法:

通一恒定的直流电,测定牺牲阳极铁脚—牺牲阳极支座的电压降,计算牺牲阳极铁脚与阳极支座之间的接触电阻。

### D.0.2 测量电路:

测定牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻电路如图 1 所示:



其中:

- 1: 直流恒流电源, 可显示电压、电流;
- 2: 数字电压表, 阻抗大于  $10M\Omega$ ;
- 3: 钢壳顶面排气孔等与支座有电连接的钢结构物;

图 D1: 牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻测量线路图

**D.0.3 检测时机:** 单块牺牲阳极安装到位后即可测量。

**D.0.4 检测数量:** 管节管顶及两个侧面至少测量 5 处。

**D.0.5 测量步骤:**

**D.0.5.1** 将直流恒流电源稳定于某一固定电流  $A$  (如,  $4A\sim 10A$ );

**D.0.5.2** 数字电压表调至毫伏档, 读取牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座之间的电压降  $U$ ;

**D.0.6 数据处理:**

牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻  $R=U/I$ 。牺牲阳极安装后的接触电阻不大于  $0.001\Omega$ 。

式中:

$R$ ——牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座的接触电阻;

$U$ ——牺牲阳极铁脚与牺牲阳极支座之间的电压降  $U$ ;

$I$ ——直流恒流电源显示电流读数;

**D.0.7 注意事项:**

各测点接触应良好, 需去掉表面涂层, 避免测点的接触电阻影响测量结果。

## 附录 E 沉管钢壳用牺牲阳极长期电化学性能检测

### E.0.1 检测目的

测定沉管钢壳用铝合金阳极在抛石+海淡水埋覆下长期电化学性能。

### E.0.2 试样的取样和处理

#### E.0.2.1 浇铸试样

试样化学成分按照表 6.

#### E.0.2.2 制备试样

试样尺寸  $\Phi 120 \times 120\text{mm}$  顶部 R60mm 的阳极试样，见图 E1。在试样的上部端面钻 M10 螺纹，用于连接 350mm 长的导电棒。阳极试样用蒸馏水清洗，然后用无水乙醇清除油污。

**E.0.2.3** 试样放入烘箱内在  $105^\circ\text{C}$  下烘烤 30min，取出后放入干燥器内。

**E.0.2.4** 阳极试样冷却至室温后进行称重，称重设备为电子天平，型号：梅特勒 托利多 XP5003S 量程:5100g 最小分度值：2mg。

**E.0.2.5** 采用恒电流法试验，阳极试样暴露的工作面尺寸为  $\Phi 120 \times 120\text{mm}$ ，工作面积为  $678\text{cm}^2$ ，试样上部端面 and 导电杆用环氧腻子封装。

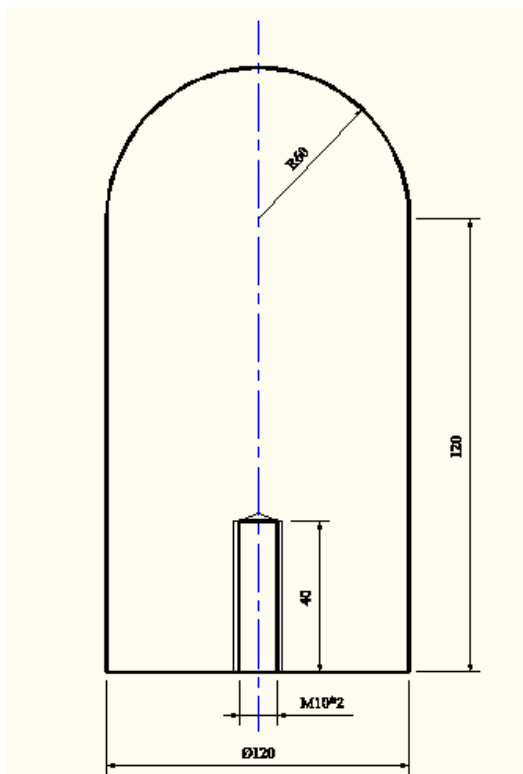


图 E1 阳极试样图

### E.0.3 试验周期和试样数量

试验周期为 12 个月。试样数量宜至少 3 个。

### E.0.4 试验的环境介质

环境介质为的干净海淡水（电阻率为  $40 \Omega \cdot \text{cm}$ ）浸没粒径  $8 \sim 40\text{mm}$  的抛石至少  $5\text{cm}$ ，抛石埋覆阳极试样顶部至少  $10\text{cm}$ 。试验容器规格  $\phi 500 \times 650\text{mm}$ ，抛石中预埋  $\phi 400 \times 290\text{mm}$  不锈钢材质的阴极桶，温度允许在  $+7^\circ\text{C}$  至  $+25^\circ\text{C}$  之间变动。海水的温度须每周至少记录一次。

### E.0.5 试验装置图

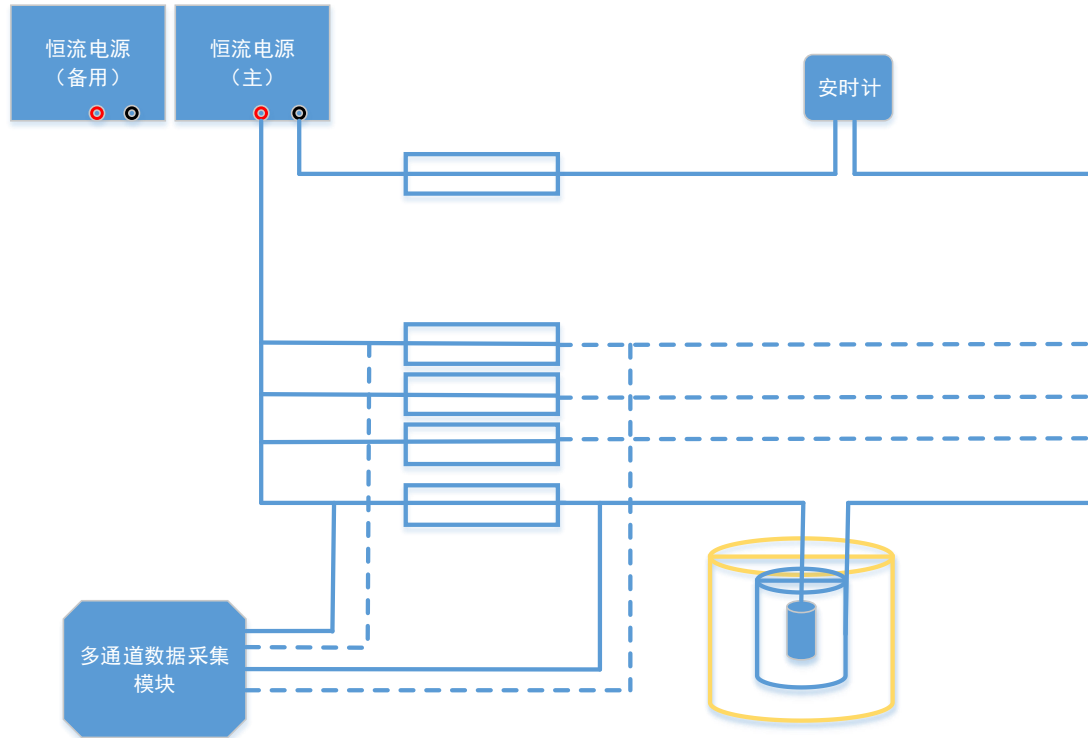


图 E2 电源及采集设备

**E.0.6** 试验容器下端应具备出水口，试验过程中，每月更换海淡水一次，每次更换试验海淡水总量的一半，每次更换海水后记录海水的盐度。

**E.0.7** 试验采用恒电流控制，试验时间 12 个月；其中每隔 30 天取一次试样，进行试样处理，须去除导电棒和密封胶并清洗掉试样上的腐蚀产物。试样须在浸入 68%浓硝酸溶液中清洗  $5 \sim 10$  分钟，随后须用蒸馏水冲洗试样，然后用乙醇洗，干燥后称重精确到  $\pm 2\text{mg}$ 。

**E.0.8** 试样最初暴露的阳极表面面积为  $678\text{cm}^2$ ，恒电流控制的阳极电流密度最大  $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 。积分电流由电量采集器自动记录并最终生成。阳极工作电位每天至少 1 次；。

**E.0.9** 抛石内需预埋参比电极测试管，靠近阳极试样圆周边缘。阳极工作电位测量饱和甘汞参比电极或银/氯化银参比电极。参比电极测试管顶端须位于试样表面  $1\text{cm}$  以内，但是不能扰动在阳极试样上形成的任何腐蚀产物。

**E.0.10** 阳极实际电容量  $C_a$  ( $\text{A} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ) 须按下式计算：

$$C_a = (Q * 1000) / \Delta w$$

式中：Q 是总电量，单位  $\text{A} \cdot \text{h}$ ；

$\Delta w$  是阳极试样重量损失，单位 g。

### E.0.11 试验数据

**E.0.11.1** 试验条件记录：

- (a) 试验温度
- (b) 海淡水电阻率

(c) 混合体系电阻率

**E.0.11.2** 长期监测数据:

(a) 阳极工作电位

(b) 通电电流

**E.0.11.3** 试验结果输出:

(a) 阳极开路电位

(b) 阳极工作电位

(c) 计算阳极电容量

(d) 观察阳极溶解形貌

**E.0.12** 试验完成后, 形成以下文件:

(a) 按月形成过程试验报告;

(b) 试验完成后形成最终试验报告;

(c) 第三方认证试验报告。

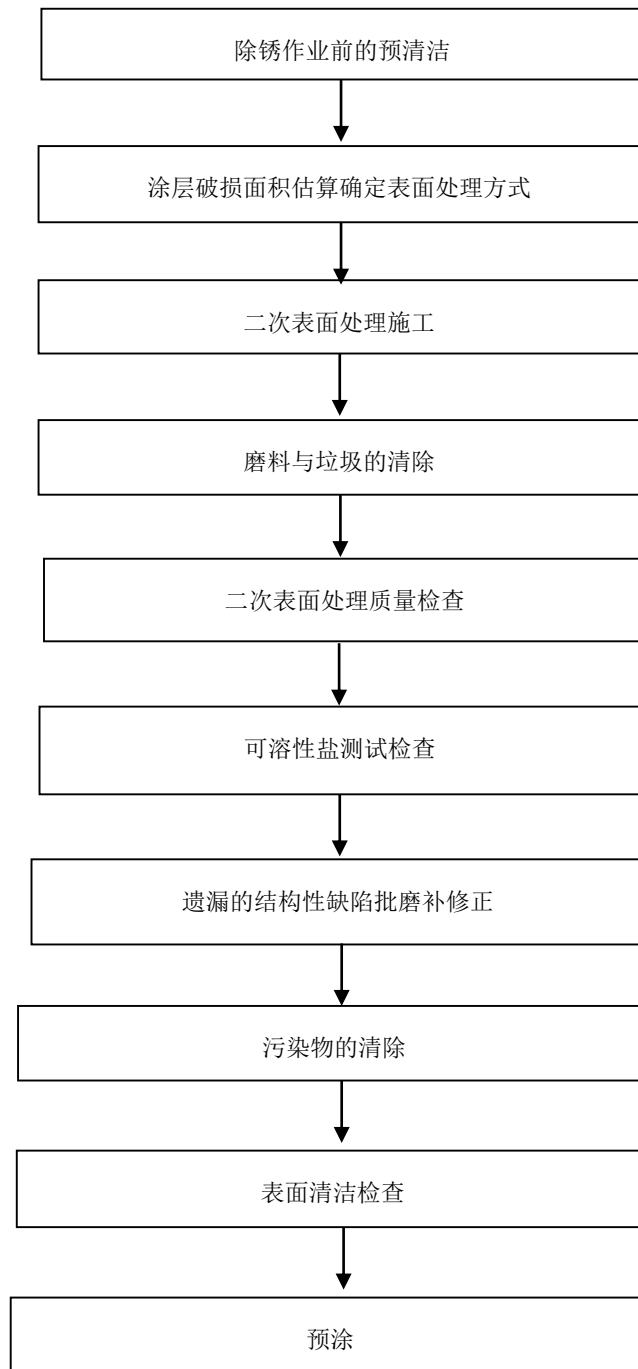


## 附录 F 沉管钢壳外壁防腐蚀涂层破损修复工艺

**F.0.1** 涂装工艺步骤见图F1。

**F.0.2** 运输、安装后，涂层破损处应按原工艺修补。

**F.0.3** 涂层搭界处应羽化处理。从有涂层的表面向无涂层表面的涂层厚度上逐渐减薄，便于后续涂层与旧涂层牢固附着。修补工艺步骤见图F2。



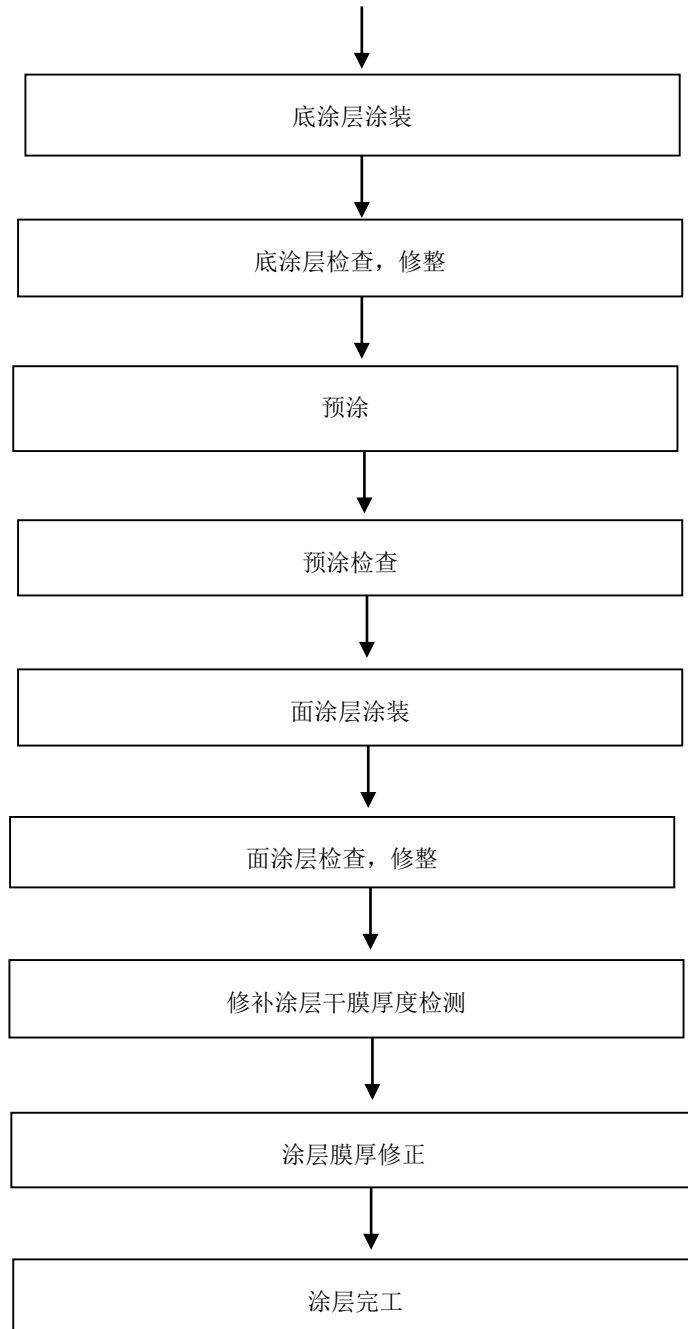
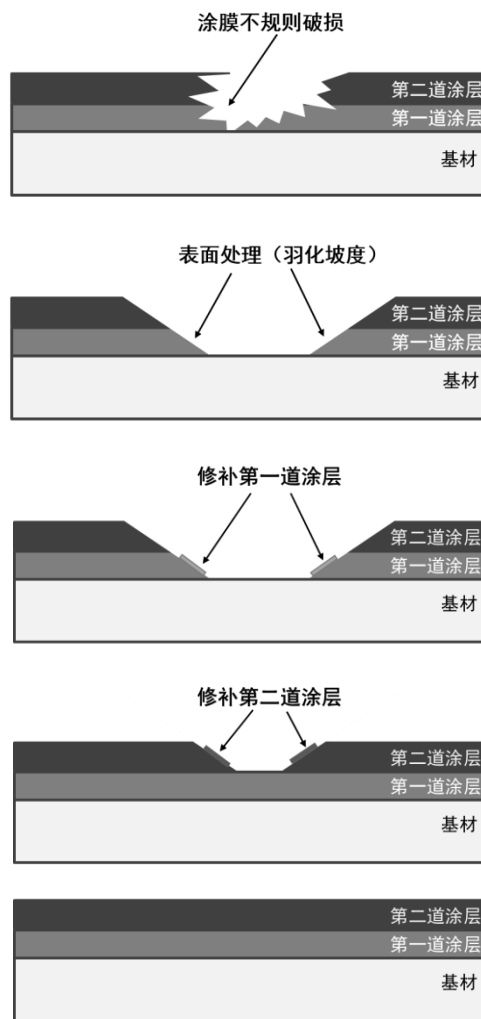


图 F1 涂装工艺步骤

注:

- (1) 修补涂层干膜厚度的检测是仅针对涂层破损处进行检验;
- (2) 由于喷涂受喷枪喷幅的限制, 对于过小的破损区域可采用刷涂或辊涂方式进行修补;
- (3) 涂层名义干膜总厚度, 符合膜厚检测 90/10 规则要求, 即漆膜厚度分布应控制在两个 90%以上, 即要求 90%以上的测点测得的干膜厚度值应达到或超过规定干膜厚度值, 余下的不到 10%的测点测得的干膜厚度值不得低于规定干膜厚度值的 90%, 否则应予补涂或加涂一道。
- (4) 涂层破损处的表面处理和涂层修补涂装, 均应经过持证涂层检查员的检查认可。



图F2 涂层修补示意图