



中国腐蚀与防护学会团体标准

T/CSCP 0057-2025

高强度钢海水环境力-电化学 腐蚀控制方法

**Mechanical-electrochemical corrosion control methods for
high-strength steel in seawater**

2025年3月24日发布

2025年4月24日实施

中国腐蚀与防护学会 发布

前 言

本文件参考 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由北京科技大学、中国腐蚀与防护学会提出。

本文件由中国腐蚀与防护学会归口。

本文件起草单位：北京科技大学、中国船舶集团有限公司第七一九研究所、中国船舶集团有限公司第七二五研究所。

本文件主要起草人：刘智勇、崔怀云、胡科峰、李广涛、胡凌越、范林、杜翠薇、李光明、闫永贵、李晓刚。

本文件为首次发布。

高强度钢海水环境力-电化学腐蚀控制方法

1 范围

本文件描述了高强度钢海水环境应力腐蚀力-电化学的检验和电化学控制方法。

本文件适用于高强度钢海水环境高拉应力部位的应力腐蚀和电化学腐蚀兼容的电化学防护设计指导。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本文件。

GB/T 10123 金属和合金的腐蚀 术语

GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验第7部分：慢应变速率拉伸试验

GB/T 21246 埋地钢制管道阴极保护参数测量方法

GB/T 21448 埋地钢制管道阴极保护技术规范

GB/T 24196 金属和合金的腐蚀 电化学试验方法 恒电位和动电位极化测量导则

GB/T 31316 海水阴极保护准则

GB/T 33378 阴极保护技术条件

ISO 12473 海水中阴极保护的基本原理(General principles of cathodic protection in seawater)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

金属腐蚀 metallic corrosion

金属材料与周围环境的作用而引起的性能破坏、退化。

3.2

腐蚀电位 corrosion potential

无外加电流时，金属表面达到稳定腐蚀状态时的电位。

3.3

应力腐蚀开裂 stress corrosion cracking, SCC

金属在应力和特定腐蚀环境联合作用下引起的脆性开裂现象。

3.4

应力腐蚀开裂敏感性 stress corrosion cracking susceptibility

金属在腐蚀介质中发生应力腐蚀开裂的敏感程度。

3.5

阴极保护 cathodic protection

通过施加阴极极化电流、降低金属的电位而使金属腐蚀速率和某些局部腐蚀显著减小的一种电化学保护方法。

3.6

极化 polarization

有外加电流时，电极电位偏离腐蚀电位的现象。

3.7

极化电位 polarization potential

有外加电流时，金属在介质中的电极电位值。

3.8

阴极极化 cathodic polarization

阴极电流流过导体/电解质界面引起的电极电位负移的现象。

3.9

最小保护电位 minimum protection potential

阴极保护条件下，金属达到一定保护所需要的最正的电位值。

3.10

最大保护电位 maximum protection potential

阴极保护条件下，可允许的不引起被保护金属或其涂层体系损害的最负电位。

3.11

动电位极化曲线 potentiodynamic polarization curves

以预定速率控制电极电位获得的极化曲线。

3.12

快扫曲线 potentiodynamic polarization curves with fast potential scan rate

在电位扫描速率大于 $50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，获得的动电位极化曲线。

3.13

慢扫曲线 potentiodynamic polarization curves with slow potential scan rate

在电位扫描速率不大于 $0.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，获得的动电位极化曲线。

3.14

慢应变速率拉伸试验 slow strain rate tensile test, SSRT

以相当低的应变速率，使暴露到特定环境中的试样承受逐渐增加的拉伸应变直至试样断裂以确定应力腐蚀敏感性的试验。

3.15

阳极溶解机制 anodic dissolution mechanism, AD

应力腐蚀过程由裂纹尖端电化学阳极溶解反应驱动时的开裂机制。

3.16

氢脆机制 hydrogen embrittlement mechanism, HE

应力腐蚀过程由阴极析氢反应产生的氢进入金属内部导致裂纹萌生和扩展时的开裂机制。

3.17

混合机制 AD+HE

应力腐蚀过程由阳极溶解和氢脆作用协同控制时的开裂机制。

4 总则

4.1 承受较高应力金属材料暴露于海水中时，不仅会发生常规电化学腐蚀，还可能发生应力作用下的腐蚀失效。

4.2 钢结构在海水中的应力腐蚀有三种机制或模式。在自然腐蚀电位或阴极保护电位不足时，可发生阳极溶解机制的应力腐蚀，通常表现为先形成点蚀，后演变为应力腐蚀；在过负的阴极保护电位下发

生氢脆机制的应力腐蚀；在适中阴极保护范围内可发生混合机制的应力腐蚀。亦即不当的阴极保护电位不能防控应力腐蚀，必须在评价材料应力腐蚀性能与阴极保护电位相关性的基础上合理确定阴极保护电位。

4.3 阴极保护一般能有效防护电化学腐蚀，对阳极溶解机制和混合机制的应力腐蚀萌生过程有一定的防护作用，但可加重氢脆型应力腐蚀（包括混合型和氢脆型应力腐蚀）风险。高拉应力水平钢结构在海水中服役时必须兼顾对电化学腐蚀和应力腐蚀防护的兼容性。

4.4 完好的涂层能够进一步防护应力腐蚀破坏，和合适的阴极保护联合防护能够对应力腐蚀起到更好的防护。

5 阴极保护电位的测量

5.1 参比电极

5.1.1 通常用于监测海水中阴极保护系统的参比电极为Ag/AgCl/海水参比电极。实验室测试常用饱和甘汞电极。这些电极在多数实际应用中具有足够精确度。

5.1.2 附录A中给出了在海水中所应用参比电极的详细数据。

5.2 电极电位测量

5.2.1 无论使用何种类型的参比电极，保护电流通过电解质进入金属结构时产生的电位降均会影响金属电极电位的测量值。保护电流产生的电压降，即IR降，会使金属电极电位的测量值比实际值更负。IR降主要取决于电解质的电阻率。

5.2.2 通常，海水中的IR降较小。为了准确测量阴极保护的水平，在水介质盐度较低或测试点接近外加电流阳极的情况下，可能需要使用“瞬时关闭”方法或在外加电流系统关闭后进行电位测量。

5.2.3 必须在关闭电流源后和金属材料去极化前立即测量金属结构的电极电位。

6 应力水平的评估

6.1 导致海洋工程结构应力腐蚀的应力包括在同一区域同时存在并能正向叠加的所有应力，包括焊接残余应力、加工安装应力、热应力、水压变形附加应力、表面损伤残余应力等。

6.2 对于焊接残余应力，须严格控制焊接工艺，避免大能束少道次焊接，并对焊接残余应力分布及水平采用X射线分析、盲孔法分析等进行评估；对于加工冷变形应力，应在制造过程中控制安装精度和必要的热处理措施加以消除；对于热应力、水压附加应力等可通过有限元分析等方法进行评估。对表面损伤和粗糙表面加工残余应力应尽量避免和及时修复。

6.3 一般各种应力叠加水平高于待评估材料的实际屈服强度的70%以上时，应考虑应力腐蚀发生的可能。

7 应力作用下的阴极保护电位范围

7.1 表1给出了不同材料在海水中的阴极保护电位指导值，包括未考虑结构受力和存在应力条件下的阴极保护电位选择范围。

表1 不同材料在海水中的阴极保护电位（考虑力-电化学腐蚀的影响）

材料		最正阴保电位 V vs. Ag/AgCl/海水	最负阴保电位 V vs. Ag/AgCl/海水	应力腐蚀敏感性等级 ^(注1)
碳钢和低合金钢（屈服强度不大于550 MPa）	有氧环境	-0.80	-1.10	不敏感~中度敏感
		-0.80	-1.00	较高~高度敏感
	厌氧环境或温度>60°C	-0.90	-1.10	不敏感~中度敏感
		-0.90	-1.00	较高~高度敏感
碳素高强钢（屈服强度高于550 MPa）		-0.85	-1.08 ~ -1.10 ^(注2)	不敏感~中度敏感
		-0.85	-0.98 ~ -1.00 ^(注2)	较高~高度敏感
耐蚀高强度钢（屈服强度高于550 MPa）	有氧环境	-0.80	-1.08 ~ -1.10 ^(注3)	不敏感~中度敏感
		-0.80	-0.98 ~ -1.00 ^(注3)	较高~高度敏感
	厌氧环境	-0.90	-1.08 ~ -1.10 ^(注3)	不敏感~中度敏感
		-0.90	-0.98 ~ -1.00 ^(注3)	较高~高度敏感

注 1：此处的应力腐蚀敏感性须在相应阴极保护电位和溶解氧水平条件下评测。
 注 2：一般碳素高强钢易发生氢脆型应力腐蚀（亦称氢脆或氢致开裂），其最负阴保电位随材料成分而变化，需根据测试评估决定。
 注 3：对于高强度钢如其具有较好的耐氢脆型应力腐蚀性能，可适当增大阴极保护电位范围，较低的阴极保护电位还可以避免其缝隙腐蚀。
 注 4：过负的阴极电位会促使金属结构表面析氢，其在增加金属结构氢脆和应力腐蚀风险的同时，也可能会破坏金属结构表面的涂层。因此，最大阴极保护电位的设定应综合考虑应力腐蚀和涂层抗氢脆剥离特性的影响。

7.2 应力腐蚀敏感性确定方法

可通过两种方式确定与应力腐蚀防护兼容的阴极保护范围设定。

7.2.1 慢应变速率拉伸试验

GB/T 15970.7 中规定了慢应变速率拉伸试验的方法。该方法可以在实验室测定适用的应力腐蚀敏感电位范围。本文件中应变速率通常 $\leq 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

7.2.2 非稳态电化学方法

非稳态电化学方法评测应力腐蚀敏感电位范围的方法见附录 B。先现场测试快速扫描极化曲线和慢速扫描极化曲线，再根据以下公式（1）计算对应电位范围下的材料应力腐蚀敏感性。该方法可以现场快速测试工程结构的应力腐蚀敏感性。

$$I_{\text{SCC}} = \begin{cases} k_a \cdot i_f \cdot \left(\left| \frac{i_f}{i_s} \right| - 1 \right) + I_0 & (i_f > i_s > 0 \text{ 或 } E > \text{OCP} - 100 \text{ mV}) \\ k_{\text{he}} \cdot |i_s| + k_{\text{ad}} \cdot i_f \cdot \left(\left| \frac{i_f}{i_s} \right| - 1 \right) + I_{\text{ac}} & (i_f > 0, i_s < 0) \\ k_c \cdot |i_s| + I_c & (i_f < 0, i_s < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

I_{SCC} ——应力腐蚀开裂敏感性, 单位为(%);

i_f ——快扫电流密度, 单位为微安每平方厘米($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$);

i_s ——慢扫电流密度, 单位为微安每平方厘米($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$);

k_a ——与电流密度、介质以及材料有关的常数;

I_0 —— $i_f=i_s$ 时的名义应力腐蚀开裂敏感性, 单位为(%);

k_{he} ——与材料、介质和电流密度有关的常数, 为氢脆机制的作用因数;

k_{ad} ——与材料、介质和电流密度有关的常数, 为阳极溶解机制的作用因数;

I_{ac} ——混合机制作用的相关的余项, 单位为(%);

k_c ——与材料、介质和电流密度有关的常数;

I_c —— i_s 趋近于零时的名义SCC敏感性, 单位为(%);

7.3 绘制金属结构(或材料)应力腐蚀开裂敏感性与电极电位的关系图。根据附录 C 中的应力腐蚀开裂敏感性进行评级。

7.4 结合表 1 中的电位范围和表 C.1 中的应力腐蚀敏感性分级综合确定金属结构(或材料)阴极保护电位的最佳范围。

8 补充性评估报告

对需要进一步评估阴极保护电位范围下应力腐蚀敏感性规律的金属结构(或材料)体系, 应进行补充性评估报告, 主要包括以下内容:

- 1) 本文件编号;
- 2) 试验日期、测试人员;
- 3) 阴极保护电位范围评估;
- 4) 目标材料应力腐蚀参数;
- 5) 应力腐蚀敏感性测试;
- 6) 应力腐蚀开裂敏感性评级和最佳阴极保护电位范围;
- 7) 目标材料海水环境力-电化学腐蚀敏感性评估方法。

附录 A
(资料性)
参比电极

常用参比电极^(注1)的电极电位如表 A.1 所示。

表 A.1 参比电极的电极电位（相对于标准氢电极，25℃）^(注2)

参比电极	电位/V
标准氢电极	0.000
甘汞电极（饱和 KCl 溶液）	+0.242
甘汞电极（1mol/L KCl）	+0.280
Ag/AgCl/饱和 KCl 电极	+0.194
Ag/AgCl/ 1mol/L KCl	+0.222
Ag/AgCl/海水	+0.250
饱和硫酸铜电极	+0.316
Zn/海水	（约）-0.780
<p>注 1：实验室和现场测试所用的参比电极可能不同。此表的目的在于可将某一参比电极测量的电位转换为另一种电极，供有关工程或科研人员参考。</p> <p>注 2：现场测试温度宜接近该温度。</p>	

附录 B (资料性)

通过电化学法评测阴极保护电位范围

B.1 测试材料为海洋用高强度钢，试验溶液为模拟海水溶液。

B.2 电化学测试的样品尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ ，封装后的测试面积为 1 cm^2 。测试之前先用碳化硅砂纸打磨至2000#，用去离子水和酒精冲洗吹干。测试在普林斯顿3F电化学工作站上进行。海洋用高强度钢试样作为研究电极，铂片电极作为辅助电极，饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极。用慢速和快速扫描两种动电位极化测试，慢扫曲线的电位扫描速率为 0.5 mV/s ，快扫曲线的电位扫描速率为 50 mV/s 。电位扫描区间为 $-1250\text{ mV} \sim 200\text{ mV}$ (vs SCE)。

B.3 海洋用高强度钢的快慢扫曲线如图B.1所示，图中将所有电位转换为相对于Ag/AgCl/海水的电位值。

B.4 对得到的电化学快慢扫曲线进行SCC机制区间划分，如图B.1所示。

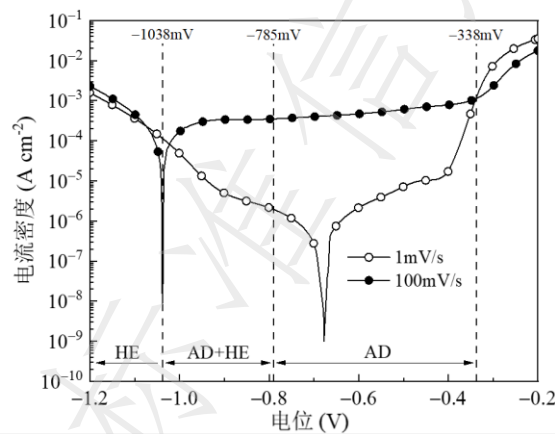


图 B.1 海洋用高强度钢在模拟海水中的快慢扫极化曲线

B.5 选择至少7个电位进行SSRT，以获得应力腐蚀开裂敏感性，其中AD区间至少选择2个电位，HE区间至少选择2个电位，AD+HE区间至少选择3个电位；在本实例中（相对于Ag/AgCl/海水），AD区间选择的电位为： -685 mV (OCP)、 -750 mV ；AD+HE区间选择的电位为： -800 mV 、 -850 mV 、 -950 mV ；HE区间选择的电位为： -1057 mV 、 -1200 mV 。上述电位下，分别通过SSRT，测定应力腐蚀开裂敏感性 I_{SCC} 。

B.6 慢应变拉伸速率试验试样尺寸如图B.2所示。实验前先将拉伸试样用SiC砂纸打磨至2000#，最终打磨痕迹应当与试样受力方向平行。进行拉伸试验时先在目标电位下预拉伸24小时，预拉载荷为 500 N 。外加电位时使用武汉科斯特恒电位仪，SSRT在应力腐蚀试验机上进行。应变速率为 $1 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 。

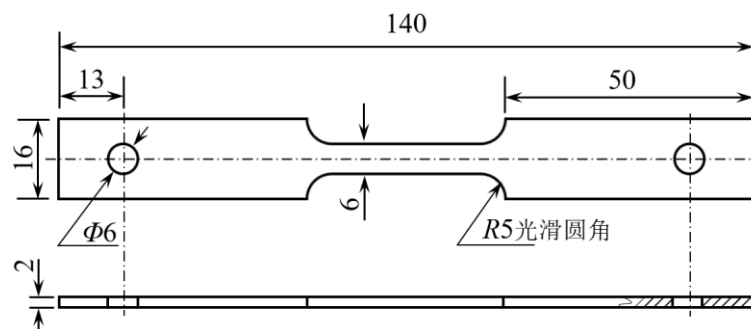


图 B.2 慢应变拉伸速率试验试样尺寸, 单位: mm

B.7 计算得出不同区间SCC敏感性与快慢扫电流的关系, 见式(B.1), 绘制电位与应力腐蚀开裂敏感性的关系图, 见图C.3。

$$I_{SCC} \begin{cases} 4.22 \times 10^{-5} \cdot i_f \cdot \left(\left| \frac{i_f}{i_s} \right| - 1 \right) + 0.15 & -785 \text{ mV} \leq E < -338 \text{ mV} \\ -0.463 \cdot |i_s| - 3.20 \times 10^{-4} \cdot i_f \cdot \left(\left| \frac{i_f}{i_s} \right| - 1 \right) + 34.63 & -1038 \text{ mV} \leq E < -785 \text{ mV} \dots(B.1) \\ 4.92 \times 10^{-3} \cdot |i_s| + 33.39 & E < -1038 \text{ mV} \end{cases}$$

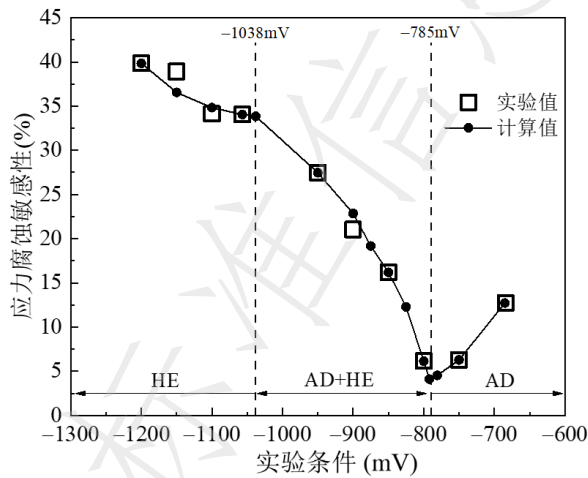


图 B.3 电位与海洋用高强度钢母材在模拟海水中的应力腐蚀开裂敏感性的关系

B.8 适宜阴极保护电位需满足两个条件: (1)海洋用高强度钢的应力腐蚀开裂敏感性评级为“低” (<45%)或“无敏感性” (<25%), (2)符合表 1 中的最负阴保电位要求。得到海洋用高强度钢在海水中的最佳阴极保护电位范围是: -1050mV~-870mV(vs. Ag/AgCl/海水)。

B.9 本数值仅为提供参考示例, 并非推荐值。因应力腐蚀敏感性与材料制备状态有关, 不同制备状态和焊接工艺的海洋用高强度钢的阴极保护电位范围应根据其实际评测值确定。

附录 C
(资料性)

应力腐蚀开裂敏感性评级

海洋用高强度钢在服役环境中的应力腐蚀开裂敏感性分级如表 C.1 所示。

表 C.1 应力腐蚀敏感性分级

I_{sc} 值	$\leq 25\%$	25%~45%	45%~65%	65%~80%	80%~90%	90%~100%
I_{sc} 分级	不敏感	低	中	较高	高	极高