

ICS 47.020

CCS L 05

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

深海装备关键材料服役可靠性评价 方法

Evaluation methods for service reliability of key materials for deep-sea

equipment

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 2

5 评价指标 2

6 试验方法 2

 6.1 试样与试验准备 2

 6.2 腐蚀性能 3

 6.3 环境耦合力学性能 4

 6.4 耐海洋老化性能 4

 6.5 界面及外观失效 5

7 取值规则 5

 7.1 数据处理 5

 7.2 单项指标等级判定 5

 7.3 材料综合等级判定 6

8 评价结果 6

 8.1 级别划分 6

 8.2 评价报告 6

前言

本文件按照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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

深海装备关键材料服役可靠性评价方法

1 范围

本文件规定了深海装备关键材料服役可靠性评价的总体要求、评价指标、试验方法、取值规则、评价结果。

本文件适用于深海装备（包括但不限于深潜器、深海空间站、海底管线、水下生产系统、海底观测网等）所用金属及合金、高分子基复合材料在深海环境条件下服役可靠性的评价。

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（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
- GB/T 228.3 金属材料 拉伸试验 第3部分：低温试验方法
- GB/T 1450.1 纤维增强塑料层间剪切强度试验方法
- GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法
- GB/T 7759.1 硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩永久变形的测定 第1部分：在常温及高温条件下
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 10834 船舶漆耐盐水性的测定 盐水和热盐水浸泡法
- GB/T 15970.4 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第4部分：单轴加载拉伸试样的制备和应用
- GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第7部分：慢应变速率试验
- GB/T 16491 电子式万能试验机
- GB/T 16545 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

深海装备 deep-sea equipment

在深度超过 1000m 的海洋环境中服役的各类装备的总称，包括但不限于深潜器、深海空间站、海底管线、水下生产系统、海底观测网等。

3.2

关键材料 key materials

用于深海装备承压、连接、密封、传力构件，直接承受高静水压、低温、海水腐蚀、海洋微生物、交变载荷耦合作用的金属、合金以及高分子基复合材料。

3.3

服役可靠性 service reliability

材料在规定的深海服役环境条件和规定的时间内，抵御腐蚀、氢损伤、疲劳、老化等损伤作用，不发生失效，持续保持规定使用性能、满足深海服役使用要求的能力。

4 总体要求

应满足以下要求：

- a) 开展深海装备关键材料服役可靠性评价工作，应优先采用多因素耦合模拟试验；单一环境因素试验仅可作为辅助验证手段；
- b) 试验前应记录试样原始状态，全部试验原始数据应具备可复现性，原始记录应予以留存；
- c) 应依据装备实际服役深度选取对应的模拟环境等级，深海模拟环境分级参数见表 1，开展评价工作时，应在评价报告中明确标注所选用的环境等级，不得跨等级套用试验数据；

表 1 深海模拟环境分级参数

等级	对应深度/m	静水压/MPa	温度/℃	盐度/‰	pH	溶解氧/(mg/L)
S- 1	1000	10.0	5.0±1.0	34.5±0.3	7.6±0.2	2.7±0.3
S- 2	3000	30.0	2.5±0.5	34.6±0.2	7.5±0.2	3.0±0.3
S- 3	6000	60.0	1.5±0.5	34.7±0.2	7.4±0.2	3.2±0.3
注：人造海水的配制应符合 GB/T 10834 的规定。						

- d) 若开展实海投样验证，应记录实际投放深度、海水温度、盐度、溶解氧、pH 值及投放周期；
- e) 试验全过程应遵守高压容器、腐蚀化学品相关实验室安全管理规定。

5 评价指标

深海装备关键材料服役可靠性评价指标见表 2。

表 2 深海装备关键材料服役可靠性评价指标

材料类别	性能类别	评价指标
金属及合金材料	腐蚀性能	均匀腐蚀速率
		最大点蚀深度
		点蚀密度
		最大缝隙腐蚀深度
	环境耦合力学性能	抗拉强度保持率
		断后伸长率保持率
		断面收缩率损失率
		应力腐蚀开裂行为
高分子基复合材料	耐海洋老化性能	腐蚀疲劳性能
		拉伸强度保持率
		压缩永久变形
		体积溶胀率
	界面及外观失效	层间剪切强度保持率
		溶胀与外观损伤

6 试验方法

6.1 试样与试验准备

6.1.1 试样制备

应满足以下要求：

a) 试样取材应与工程构件保持同一生产批次，热处理、表面处理工艺与构件完全一致，禁止采用状态不一致替代材料，消除材料本身带来的试验误差；

b) 机加工过程控制切削参数，规避过热、冷加工硬化对试样性能造成干扰，加工结束去除全部边缘毛刺；

c) 根据测试项目类别确定试样数量，力学测试每组不少于 3 件；腐蚀、氢损伤、腐蚀疲劳测试每组不少于 5 件；空白参比试样不少于 3 件。参比试样和暴露试样取自同一块坯料，加工流程完全相同，参比试样不进行深海环境暴露；

d) 试样编号标记设置在非加载、非观测区域，不得在测试工作面刻划深痕迹；

e) 金属试样测试工作面打磨粒度不低于 800#，去除油污及氧化层，干燥后完成称量、外形尺寸记录，留存试样原始表面形貌照片；

f) 高分子基复合材料试样依据对应产品标准完成状态调节，释放加工残余应力。

6.1.2 试验设备

主要仪器设备要求如下：

a) 深海高压环境模拟釜：压力控制精度 ± 0.2 MPa，温度控制精度 ± 0.5 °C，具备介质循环与取样接口，用于实现高静水压-海水耦合环境；

b) 万能材料试验机，符合 GB/T 16491，力值示值误差 $\leq \pm 1\%$ ，用于金属拉伸、复合材料拉伸性能测试；

c) 轴向疲劳试验机：动态力示值误差 $\leq \pm 1\%$ ，开展腐蚀疲劳加载；

d) 慢应变速率拉伸试验机：应变速率 $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，用于氢致损伤、应力腐蚀相关测试；

e) 理化检测仪器：金相显微镜、扫描电子显微镜（SEM）、pH 计、溶解氧测试仪、电子分析天平（分度值 0.1 mg），用于局部腐蚀形貌观测与质量检测；

f) 配套工装：压缩永久变形工装、体积测量工装，完成高分子材料压缩永久变形、体积溶胀率相关测试。

6.2 腐蚀性能

6.2.1 高静水压-海水耦合暴露试验

应按以下方法进行：

a) 高压釜内部清理干净，除去油污、残留腐蚀产物；注入人造海水，通入氮气调节溶解氧至设定区间；升压速率不大于 1.0 MPa/min；

b) 待温度、压力、pH 稳定并保温保压 2 h 后放入试样，试样相互间距、试样与釜壁间距 ≥ 20 mm；

c) 试验周期可选取 30 d、90 d、180 d；每 7 d 记录环境参数，每 30 d 更换全部试验介质；

d) 试验结束降压，降压速率 ≤ 0.5 MPa/min，取出试样后分组处理：一组保留原始腐蚀形貌；一组按照 GB/T 16545 清除腐蚀产物用于失重测试；其余试样转入后续力学测试。

6.2.2 均匀腐蚀速率

采用重量损失法进行测试，均匀腐蚀速率按公式（1）计算：

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (W_0 - W_1)}{S \times \rho \times t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

v ——均匀腐蚀速率，单位为毫米每年（mm/a）；

W_0 ——试验前试样质量，单位为克（g）；

W_1 ——去除腐蚀产物后试样质量，单位为克（g）；

S ——试样暴露表面积，单位为平方厘米（cm²）；

ρ ——材料密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

t ——试验时间，单位为小时（h）。

6.2.3 最大点蚀深度

对暴露后试样观测面开展显微检测，采用金相切片或三维显微扫描测量蚀坑，获取最大点蚀深度。

6.2.4 点蚀密度

在试样有效观测区域内统计点蚀坑总数量，换算得到单位面积点蚀坑数量，即为点蚀密度。

6.2.5 最大缝隙腐蚀深度

采用缝隙专用试样同步开展耦合暴露试验，试验结束拆开缝隙装配结构，对缝隙内部腐蚀区域进行显微测量，得到最大缝隙腐蚀深度。

6.3 环境耦合力学性能

6.3.1 抗拉强度保持率、断后伸长率保持率

分别对空白参比试样与深海耦合暴露后试样开展拉伸试验，按 GB/T 228.1 执行，测定抗拉强度、断后伸长率。抗拉强度保持率、断后伸长率保持率按公式（2）、公式（3）计算：

$$R_{mR} = \frac{R_{m1}}{R_{m2}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A_R = \frac{A_1}{A_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

R_{mR} ——抗拉强度保持率，%；

R_{m1} ——暴露后试样抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；

R_{m2} ——原始试样抗拉强度，单位为兆帕（MPa）；

A_R ——断后伸长率保持率，%；

A_1 ——暴露后试样断后伸长率，%；

A_0 ——原始试样断后伸长率，%；

注：当装备实际服役包含低温工况时，宜补充低温拉伸试验，试验温度取 2℃，参照 GB/T 228.3 执行。

6.3.2 断面收缩率损失率

采用慢应变速率拉伸试验，试验按照 GB/T 15970.7 执行，应变速率选用 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，设置两组试样，一组在常压空气环境开展测试，一组在深海模拟耦合环境开展测试；断面收缩率损失率，按公式（4）计算：

$$I_{HE} = \frac{Z_{air} - Z_{sea}}{Z_{air}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

I_{HE} ——断面收缩率损失率，%；

Z_{air} ——空气环境下试样断面收缩率，%；

Z_{sea} ——深海模拟海水耦合环境下试样断面收缩率，%。

6.3.3 应力腐蚀开裂行为

按照 GB/T 15970.4 开展恒载荷应力腐蚀试验：

a) 加载应力取屈服强度 70%，试验介质采用人造海水，可同步施加静水压；

b) 连续监测试样状态，最长试验周期 90 d；

c) 90 d 未断裂时，开展断口与金相检验，判断是否存在微裂纹，综合判定应力腐蚀开裂行为。

6.3.4 腐蚀疲劳性能

参照 GB/T 3075 开展轴向力控制腐蚀疲劳试验：

a) 试验介质为人造海水，应力比 0.1，频率 0.5 Hz～2 Hz，最大试验应力取屈服强度 40%～60%；

b) 记录断裂循环周次，循环达到 10^7 次未断裂，则终止试验，判定达到条件疲劳极限。

6.4 耐海洋老化性能

6.4.1 深海耦合老化预处理

高分子基复合材料试样放入高压釜完成高静水压-海水耦合暴露，试验周期与金属试样保持一致，设置同批次空白参比试样。试验结束取出试样，在标准环境条件下完成状态调节后开展各项性能测试。

6.4.2 拉伸强度保持率

老化试样与参比试样分别开展拉伸测试，按照 GB/T 1447 执行，读取两组试样拉伸强度，拉伸强度保持率按公式（5）计算：

$$R_{tr} = \frac{R_{tl}}{R_{to}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

R_{tr} ——拉伸强度保持率，%；

R_{tl} ——老化后试样拉伸强度，单位为兆帕（MPa）；

R_{to} ——未老化参比试样拉伸强度，单位为兆帕（MPa）。

6.4.3 压缩永久变形

参照 GB/T 7759.1 开展压缩永久变形测试。试样经深海耦合老化后，采用专用压缩工装施加规定压缩率，恒温保压规定时间；卸载后将试样置于标准环境充分回弹，测量试样残余厚度，计算压缩永久变形。

6.4.4 体积溶胀率

分别测定试样老化前、老化后的体积，体积溶胀率按公式（6）计算：

$$Q_v = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

Q_v ——体积溶胀率，%；

V_1 ——老化后试样体积，单位为立方毫米（mm³）；

V_0 ——老化前试样体积，单位为立方毫米（mm³）。

6.4.5 层间剪切强度保持率

按照 GB/T 1450.1 开展层间剪切试验，分别测试参比试样与老化后试样层间剪切强度，层间剪切强度保持率按公式（7）计算：

$$R_{ILSS} = \frac{\tau_l}{\tau_o} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

R_{ILSS} ——层间剪切强度保持率，%；

τ_l ——老化后试样层间剪切强度，单位为兆帕（MPa）；

τ_o ——未老化参比试样层间剪切强度，单位为兆帕（MPa）。

6.5 界面及外观失效

试样完成深海耦合老化之后，采用目视观察结合光学显微镜观测方式，全面检查试样外表面、层间界面区域，记录试样出现的基体溶胀、表面鼓泡、基体开裂、层间剥离、表面缺损等现象，完成溶胀与外观损伤现象记录与描述。

7 取值规则

7.1 数据处理

7.1.1 同一组试样测试结果，应采用格拉布斯法剔除异常值；有效测试结果取算术平均值，并给出标准差。

7.1.2 数值修约应符合 GB/T 8170 的规定；均匀腐蚀速率保留 3 位小数；各类性能保持率保留 1 位小数。

7.1.3 应明确记录失效模式，失效模式包括：均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂、氢脆断裂、疲劳开裂、高分子材料溶胀分层等。

7.2 单项指标等级判定

将 7.1 处理完成的实测、判定结果，对照表 3 分级阈值，逐个确定每个评价指标的等级：一级（高可靠）、二级（中可靠）、三级（有限可靠）。

表 3 深海装备关键材料服役可靠性分级判定阈值

序号	性能类别	评价指标	一级（高可靠）	二级（中可靠）	三级（有限可靠）
1	腐蚀性能	均匀腐蚀速率/（mm/a）	≤0.010	0.010~0.050	>0.050
		最大点蚀深度/mm	≤0.05	0.05~0.20	>0.20
		点蚀密度/（个/cm ² ）	≤5	5~20	>20
		最大缝隙腐蚀深度/mm	≤0.05	0.05~0.20	>0.20
2	环境耦合力学性能	抗拉强度保持率/%	≥95.0	85.0~94.9	<85.0
		断后伸长率保持率/%	≥90.0	75.0~89.9	<75.0
		断面收缩率损失率 IHE/%	≤15	15~30	>30
		应力腐蚀开裂行为（恒载荷90d）	无裂纹	存在微裂纹，无扩展	发生断裂
		腐蚀疲劳性能（10 ⁷ 周次）	不断裂	未断裂，存在表面微裂纹	提前发生断裂
3	耐海洋老化性能	拉伸强度保持率/%	≥90.0	75.0~89.9	<75.0
		压缩永久变形/%	≤10	10~25	>25
		体积溶胀率/%	≤3	3~8	>8
		层间剪切强度保持率/%	≥85.0	65.0~84.9	<65.0
4	界面及外观失效	溶胀与外观损伤	无起泡、分层、开裂	轻微起泡，无分层开裂	出现分层、开裂

7.3 材料综合等级判定

- 7.3.1 同一材料类别下，全部评价指标均达到一级（高可靠），材料综合等级判定为一级（高可靠）。
- 7.3.2 只要任意一项评价指标达到三级（有限可靠），材料综合等级直接判定为三级（有限可靠）。
- 7.3.3 其余全部情况，材料综合等级判定为二级（中可靠）。

8 评价结果

8.1 级别划分

- 依据 7.3 得到的综合等级划分服役可靠性等级：
- a）一级（高可靠）：全部评价项目达到一级，材料可用于深海装备长期服役关键工况；
- b）二级（中可靠）：存在二级指标、无任何三级指标，仅允许限定工况、限定服役周期条件下使用；
- c）三级（有限可靠）：存在任意一项三级指标，该材料不允许用于深海装备关键构件。

8.2 评价报告

- 应至少包含以下内容：
- a）报告编号、版本、编制及生效日期；
- b）委托方信息、评价实施单位信息；
- c）样品信息，包括材料名称、牌号、批次、规格、生产单位、取样部位、样品编号、材料类别（金属及合金材料/高分子基复合材料）；
- d）本标准编号及名称、引用的相关试验方法标准；
- e）试验设备名称及编号、试验环境条件、试样数量、平行试样数量、试验周期；
- f）原始试验数据、数据处理过程（异常数据剔除说明、计算过程、计算结果）；
- g）各单项评价指标结果及单项分级判定（一级（高可靠）/二级（中可靠）/三级（有限可靠））；
- h）材料综合服役可靠性等级判定；

i) 评价结果、材料适用范围。
