

# 团 体 标 准

T/CNS 18—2020

---

## 核电厂金属材料高温高压水中 电偶腐蚀试验方法

**Galvanic corrosion test method in high temperature high pressure  
water for metallic materials used in nuclear power plants**

2020 - 04 - 28 发布

2020 - 08 - 01 实施

---

中国核学会 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 试验仪器和设备.....	1
5 试样制备和要求.....	2
6 试验条件和步骤.....	3
7 试验结果观察及评定.....	4
8 质量保证.....	4
9 试验报告.....	4
附录 A（资料性附录） 高温高压水循环回路系统及高压釜结构.....	5
附录 B（资料性附录） 电化学工作站推荐参数.....	6

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国核学会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国科学院金属研究所。

本标准主要起草人：韩恩厚、王俭秋、张志明、明洪亮。

# 核电厂金属材料高温高压水中 电偶腐蚀试验方法

## 1 范围

本标准规定了核电厂用金属材料在高温高压水中电偶腐蚀试验方法。  
本标准适用于核电厂用金属材料在350℃以下水介质中的电偶腐蚀测试试验。

## 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。

GB 150.4 压力容器 第4部分:制造、检验和验收

GB/T 10123 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义(GB/T 10123—2001, eqv ISO 8044:1999, IDT)

GB/T 15748 船用金属材料电偶腐蚀试验方法

GB/T 16545 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除(GB/T 16545—2015, ISO 8407:2009, IDT)

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 24196—2009, ISO 17475:2005, IDT)

HB 5374 不同金属电偶电流测定方法

TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程

ASTM G3—2014 腐蚀测试中电化学测量的通用导则(Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing)

ASTM G5—14 动电位阳极极化测量参考测试方法(Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements)

ASTM G59—97(2014) 动电位极化电阻测量标准测试方法(Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements)

ASTM G71—81(1998) 溶液中电偶腐蚀测试与评价的标准规程(Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes)

ASTM G82—98(2014) 利用电偶序预测电偶腐蚀性能的标准规程(Standard Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance)

ASTM G102—89(2015) 利用电化学测试计算腐蚀速率及其相关信息的标准规程(Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements)

ASTM STP978-EB.2308—1988 电偶腐蚀(Galvanic Corrosion)

## 3 术语和定义

GB/T 10123、GB/T 15748、GB/T 24196和HB 5374界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 试验仪器和设备

### 4.1 高压釜及水循环系统

- 4.1.1 高压釜釜体、釜盖应采用奥氏体不锈钢或镍基合金等耐蚀合金制造。釜体一般为整体，特殊情况下也可焊接结构，但应进行无损检测。
- 4.1.2 釜体与釜盖之间及釜上引出的各测试孔均应具有良好的密封性能，在试验过程中不允许有泄漏现象。
- 4.1.3 高压釜应设有安全保护装置，并定期检查安全保护装置的可靠性。
- 4.1.4 高压釜中釜体、釜盖等高温承压构件应按 GB 150.4 进行制造、检验和验收，非依据 GB 150.4 制造的高压釜应满足 TSG 21—2016 的要求。
- 4.1.5 釜内导管及试样支架推荐采用耐高温耐腐蚀材料加工，如采用不锈钢、镍基合金等材料制成。试样固定在试样架上，应保证试样与试样架、试样与釜体、试样与试样之间均处于绝缘状态。
- 4.1.6 高压釜应配备相应的冷却水循环系统，以保护外部参比电极及其他不耐高温的试验部件。
- 4.1.7 附录 A 给出了推荐的高温高压水循环回路系统及高压釜结构的示意图。

### 4.2 加热及控温装置

- 4.2.1 推荐采用电加热方式。
- 4.2.2 加热及控温装置必须满足试验要求的升、降温速率，在试验温度下能长期保温，并且稳定、可靠、操作方便。保持高压釜内试样区温度均匀，并确保高压釜内热电偶位于试样附近，以便实时监测试样试验温度。
- 4.2.3 控温精度： $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

### 4.3 测量装置

- 4.3.1 推荐采用零阻电流表、可结成零阻电路模式的电化学工作站或电偶腐蚀测量仪。
- 4.3.2 电化学工作站应满足高温高压水中开路电位和动电位极化曲线等测试要求。
- 4.3.3 本标准附录 B 中给出了电化学工作站的推荐参数。

### 4.4 电极系统

- 4.4.1 电化学试验一般采用三电极体系，包括工作电极、辅助电极和参比电极。进行电偶电流和电偶电位测量时，工作电极和辅助电极对应测量的偶对。
- 4.4.2 高温高压水中电化学试验所用参比电极推荐采用外置式压力平衡 Ag/AgCl 电极，也可采用 Cu/Cu<sub>2</sub>O/陶瓷或 Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/陶瓷等耐高温固体参比电极。对于外置式压力平衡 Ag/AgCl 参比电极，电解质 KCl 溶液推荐浓度 0.1mol/L（25℃时该浓度的 Ag/AgCl 电极相对标准氢电极的电位为 0.2866V）。
- 4.4.3 应配备电极冷却循环水系统，确保参比电极芯部温度相对恒定，且不超过 50℃。试验前后检测并校正参比电极电位，必要时更换电解液，保证试验期间电极电位稳定。
- 4.4.4 辅助电极推荐选用金属铂片，推荐尺寸 20 mm（长）×20 mm（宽），辅助电极采用铂丝点焊，并用聚四氟乙烯热缩管包覆后引出高压釜。各个电极之间的距离应保持恒定。
- 4.4.5 当采用 0.1mol/L KCl 溶液作电解液的 Ag/AgCl 参比电极时，推荐按照下述公式将测得的电极电位转换为标准氢电极电位见公式（1）：

$$E_{\text{SHE}}=E_{\text{obs}}+0.2866-0.001 \times (T-T_r)+1.745 \times 10^{-7} \times (T-T_r)^2-3.03 \times 10^{-9} \times (T-T_r)^3 \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$T$ ——试验温度的数值，单位为摄氏度（℃）；

$T_r$ ——25℃；

$E_{\text{obs}}$ ——实测工作电极相对于参比电极的电位的数值，单位为伏特（V）；

$E_{\text{SHE}}$ ——相对于标准氢电极的电位的数值，单位为伏特（V）。

## 5 试样制备和要求

### 5.1 试样尺寸

5.1.1 试验电偶阴极和阳极面积比应尽量与使用状态一致。

5.1.2 如进行不同面积比的电偶腐蚀试验，可根据试验要求改变阴极和阳极的试样尺寸，但同一次试验的平行试样的尺寸应相同。

5.1.3 如未要求阴极和阳极的面积比，推荐测试用的阳极和阴极试样尺寸：10 mm（长）×10 mm（宽）×1 mm（厚）。

### 5.2 试样加工

试样的加工应采用对材质影响小的方法。推荐用水砂纸将试样表面依次磨到 2000 号，或根据试验要求处理样品表面，确保最终去除样品表面加工影响层，然后用分析纯级丙酮或酒精洗净。

### 5.3 试样连接

5.3.1 高温电化学试样一般不进行试样封装，因此需严格控制样品尺寸及表面状态。

5.3.2 试样引线推荐采用与试样化学成分相同或近似的金属丝，引线表面包覆聚四氟乙烯热缩管，聚四氟乙烯管热缩后与导线之间不应存在缝隙，试样引线点焊在试样侧面，并确保焊点附近导线裸露面积尽量小，焊点长度不宜超过 3 mm。

5.3.3 点焊后，应注意打磨样品表面由焊接引起的其它损伤部位，该部位表面粗糙度与样品最终粗糙度要求相同。当试验温度超过 300℃时，推荐在导线聚四氟乙烯热缩管外面包套氧化锆陶瓷管，以保证导线绝缘特性。

## 6 试验条件和步骤

### 6.1 溶液配制

6.1.1 采用电导率小于 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。

6.1.2 建议采用分析纯级试剂配置试验溶液。

### 6.2 试验条件

6.2.1 按照试验要求确定试验温度。

6.2.2 对于动态循环高压釜，溶液应充满高压釜腔，外加压力高于试验温度对应的饱和蒸汽压，调节高压泵选择合适的溶液流量，确保高压釜内溶液在 1 h 内至少更换 1 次。

6.2.3 推荐升温速率不高于 100℃/h。

6.2.4 溶液体积与试样表面积的比值宜大于 100 mL/cm<sup>2</sup>。

6.2.5 相同试验条件下，偶对平行试样至少 3 个，同时应有 3 个未偶联的对比试样。

6.2.6 开路电位和动电位极化曲线测试时，达到试验温度后保温时间不宜少于 48 h，亦可根据试验需要对试验保温时间进行调整。

6.2.7 高温高压水中开路电位和动电位极化曲线测试时试验参数的选择，根据具体试验项目和试验要求，按照 GB/T 24196、ASTM G3、ASTM G5、ASTM G59 及 ASTM G102 中的相关规定执行。

6.2.8 进行阳极和阴极间电偶电位和电偶电流测试时，达到试验温度后分别连续监测两电极的开路电位 600 s。之后持续监测两电极电偶电位及电流 72 h，采样频率 1 Hz。监测完成后，再次分别连续监测两电极各自的开路电位 600 s。亦可根据试验需要对试验测试时间进行调整。

### 6.3 试验步骤

6.3.1 试验前精确测量每个试样的尺寸，测量精度取决于试验要求，推荐使用游标卡尺测量，并计算其表面积（取三位有效数字）。

6.3.2 实验前利用分析天平对所有试样进行称重，精确到 0.1 mg。

6.3.3 安装试样，并保持阴极和阳极的测试面对，且保证每次测试时阴极和阳极间距离相同，两试样之间的距离推荐为 20 mm~30 mm。拧紧固定螺栓，确保高压釜密闭，向高压釜内连续充入高纯氮气，时间不低于 600 s，排出釜腔内的空气，然后注入试验溶液排出高纯氮气。

6.3.4 试验前应调节试验溶液水化学参数，根据试验条件调节溶解氧、溶解氢含量，并在试验报告中注明。

6.3.5 确保测温、测压及安全保护装置均处于正常状态后，开始加压并确保压力达到设定值，确认无泄漏后开始加热升温。

6.3.6 系统稳定后根据试验要求规定的时间进行电化学测试。

6.3.7 对比试样在相同试验条件下进行未偶联状态下的腐蚀试验。

6.3.8 试验完成后，首先对高压釜停止加热，等降至室温时方可降压打开高压釜，防止循环回路中的溶液因压力降低发生汽化或造成人身伤害。

6.3.9 打开高压釜取出试样，先用去离子水冲洗，然后用软毛刷等刷去表面腐蚀产物。如腐蚀产物不易去除时，可按照 GB/T 16545 中的化学和电解清洗方法进行去除。待试样干燥后再次对所有试样进行称重，精确到 0.1 mg。之后将试样放入真空干燥箱中妥善保存。

## 7 试验结果观察及评定

利用光学显微镜和扫描电子显微镜对测试后阴极和阳极试样进行观察并描述表面形貌。

利用相关软件处理电化学测试源文件，并根据试验要求绘制或拟合出试验条件下的开路电位、钝化电流密度、电偶电位、电偶电流和电偶电流密度，以及计算平均电偶腐蚀速率和电偶腐蚀系数等试验结果。具体数据处理和结果评定可按照 GB/T 15748、GB/T 24196、HB 5374、ASTM G71、ASTM G82 及 ASTM STP978-EB.2308 的规定执行。

## 8 安全和质量保证

### 8.1 试验人员要求

本标准所规定的试验涉及高温高压特殊工况，试验人员应经过实验室培训，应具备相关高温高压水循环系统基本操作技能及电化学专业背景知识，以保证试验可靠性及结果可信度。

### 8.2 高压釜使用

高压釜的使用和管理应按 TSG 21—2016 中第 7 章的规定执行。

### 8.3 试验系统校准要求

定期对高温高压水循环系统中的压力容器及温度、压力、水化学参数等测试用传感器或探头进行检测或计量标定，定期更换探头和参比电极电解液等耗材，保证相关试验参数和结果的可信度。

#### 8.4 其他要求

如采用静态釜系统进行试验，应注明试验装置参数和试验条件。

### 9 试验报告

试验报告应包括但不限于以下内容：

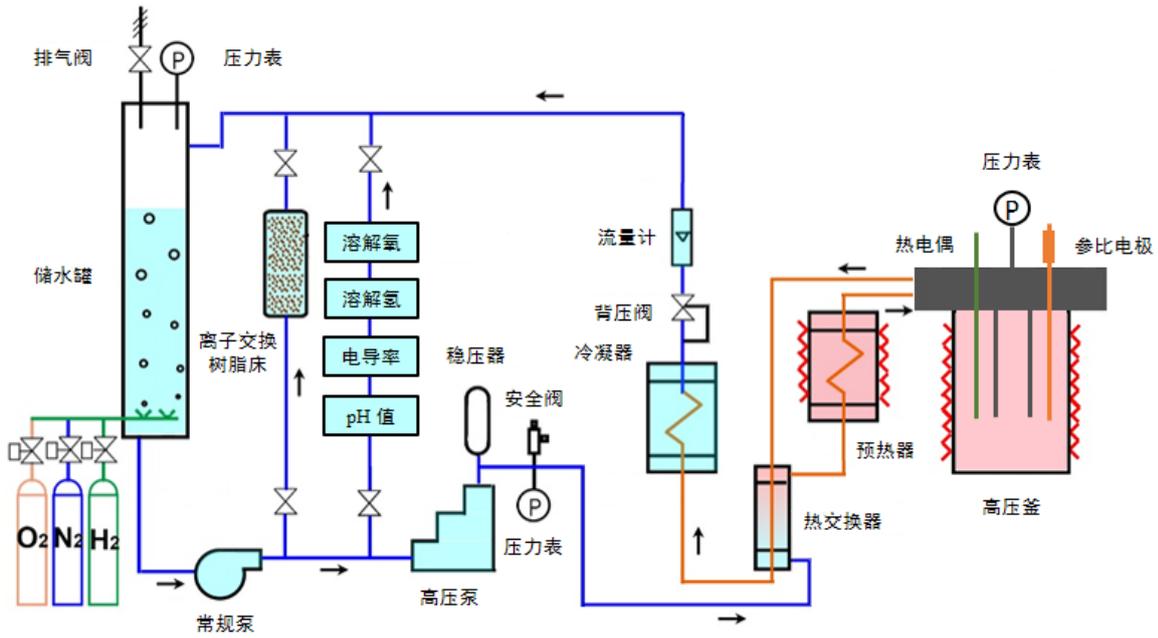
- a) 本标准编号；
- b) 材料牌号和标准号、炉批号、化学成分、加工工艺、热处理状态和力学性能等；
- c) 试样形状尺寸、数量、表面状态、取样位置、取样方向；
- d) 试验设备的型号及相关说明；
- e) 试验参数，如溶液成分、溶解氧/溶解氢浓度、pH 值、电导率、试验温度及保温时间、釜内压力及高压釜参数等；
- f) 试验结果，包括电偶组元的开路电位、极化曲线、钝化电流密度、电偶对电偶电位、电偶电流、电偶腐蚀速率和系数、腐蚀形貌等；
- g) 试验异常记录（如有）；
- h) 试验人员和日期。

附录 A  
(资料性附录)

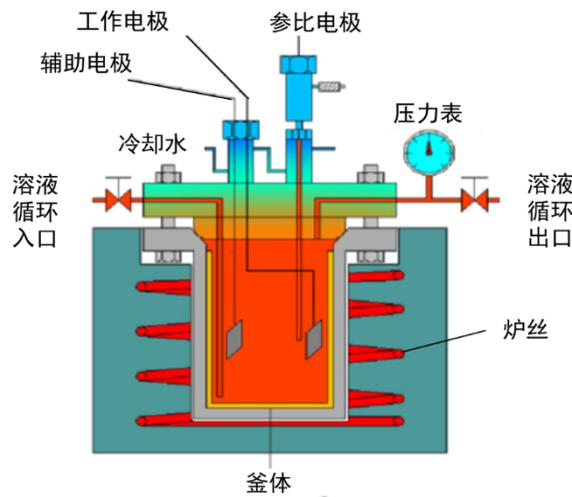
高温高压水循环回路系统及高压釜结构

高温高压水动态循环回路见图A.1。

高温高压水循环动态高压釜见图A.2。



图A.1 高温高压水动态循环回路



图A.2 高温高压水循环动态高压釜示意图

附 录 B  
(资料性附录)  
电化学工作站推荐参数

电化学工作站推荐参数见表B.1。

表B.1 电化学工作站推荐参数

参数	范围
输出槽压	$\pm 22\text{ V}$
恒电位扫描电压范围	$\pm 11\text{ V}$
电压最小分辨率	$1\ \mu\text{V}$
电流量程	$600\text{ fA}\sim 600\text{ mA}$
电流最小分辨率	$20\text{ aA}$
输入阻抗	$100\text{T}\Omega$ , 电容 $<0.2\text{ pF}$
电化学交流阻抗频率范围	$10\text{ mHz}\sim 100\text{ kHz}$
数据采集频率	$0\text{ Hz}\sim 1000\text{ Hz}$