

团 体 标 准

T/CNS 5—2018

核电厂金属材料高温高压水中 应力腐蚀裂纹扩展试验方法

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

2018 - 03 - 15 发布

2018 - 05 - 30 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) 高温高压循环水应力腐蚀试验系统	5
附录 B (资料性附录) 直流电位降 (DCPD) 数据采集系统	6
附录 C (资料性附录) 紧凑拉伸试样尺寸	7

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、核工业标准化研究所、上海交通大学、中国核动力研究设计院、中国原子能科学研究院。

本标准主要起草人：韩恩厚、王俭秋、张志明、朱若林、张利涛、张宏伟、杜东海、王家贞、姜峨、彭德全。

本标准于2018年首次发布。

核电厂金属材料高温高压水中应力腐蚀裂纹扩展试验方法

1 范围

本标准规定了核电厂用金属材料高温高压水中应力腐蚀裂纹扩展试验的方法和相关技术要求。本标准适用于评价核电厂用金属材料在高温高压水中的抗应力腐蚀性能。

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—2011 压办容器 第4部分 制造、检验和验收
 GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法
 GB/T 15970.1—1995 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第1部分: 试验方法总则
 GB/T 15970.6—2007 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第6部分: 恒载荷或恒位移下预裂纹试样的制备和应用
 GB/T 15970.7—2000 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 20120.2—2006 金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第2部分: 预裂纹试样裂纹扩展试验
 YB/T 5344—2006 铁-铬-镍合金在高温水中应力腐蚀试验方法
 ASTM E399:06 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials

3 术语和定义

GB/T 6398—2000、GB/T 15970.6—2007、GB/T 20120.2—2006和YB/T 5344—2006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

4.1.1 高压釜釜体、釜盖应采用不锈钢或镍基合金等耐蚀合金制造。釜体一般为整体,特殊情况下可为焊接结构,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,在试验过程中不应有泄漏现象。

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 釜体、釜盖等高温承压构件应按照 GB150.4—2011 的规定进行无损检测,经检测合格后方可使用。

4.1.5 试样架宜采用耐高温耐腐蚀材料加工制作,如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

4.1.6 推荐采用的高温高压循环水循环系统和高压釜的结构示意图参见附录 A。

4.1.7 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它不耐高温试验装置。

4.2 加载系统

4.2.1 高压釜需配备慢应变速率拉伸加载系统,而且慢应变速率拉伸加载系统推荐配备压力平衡系统,抵消釜内水压对拉伸杆施加的压力。慢应变速率拉伸加载系统在高温高压水环境下能够精确实现应力控制或者应变控制,能够加载三角波、梯形波和恒载荷等波形。

4.2.2 推荐的加载系统示意图参见附录 A。

4.3 加热及控温装置

4.3.1 宜采用电加热方式加热。

4.3.2 加热装置及控温仪器应具有满足试验要求的升温速率,在试验温度下能长期保温,并且稳定、可靠、操作方便。尽量保持高压釜内温度均匀,并确保高压釜内热电偶在试样附近,以便实时检测试样试验温度。

4.3.3 控温精度: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 裂纹扩展长度在线监测系统

在裂纹扩展过程中,可采用直流电位降(DCPD)、交流电位降(ACPD)等方法原位实时测量裂纹扩展速率,宜采用DCPD方法。推荐的DCPD数据采集系统示意图参见附录B。

5 试样制备和要求

5.1 试样要求

5.1.1 参照 GB/T 6398—2000 的相关规定,宜采用紧凑拉伸试样进行试验,试样的尺寸示意图参见附录 C。若受限于试验材料,可采用按比例缩小的紧凑拉伸试样。

5.1.2 紧凑拉伸试样的应力强度因子 K_1 按以下公式计算:

$$K_1 = \frac{YP}{B\sqrt{W}} \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left(0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- a ——裂纹长度,单位毫米(mm);
- K ——应力强度因子,单位兆帕斯卡·米^{1/2}(MPa·m^{1/2});
- Y ——应力强度因子系数,无量纲;
- P ——载荷,单位牛顿(N);
- B ——试样有效厚度,单位毫米(mm);
- W ——试样宽度,单位毫米(mm)。

注1: 对于切凹槽的试样, $B = \sqrt{B_0 B_1}$, 其中 B_0 为试样初始厚度, B_1 为试样切完凹槽后的裂纹所在位置的厚度。

注2: 公式(2)在 $a/W \geq 0.2$ 范围内使用,其准确度为 $\pm 0.5\%$ 。

5.2 试样加工

5.2.1 根据材料的形状和尺寸以及试验的目的，从特定的位置按照一定的方向切取试样。在进行机加工时，应减少试样过热及产生塑性变形。宜采用对材质影响小的线切割加工等方法。

5.2.2 用水砂纸对试样表面进行打磨，然后用分析纯级丙酮或酒精在超声清洗机内洗净。

5.3 空气中预制疲劳裂纹

5.3.1 参照 GB/T 6398—2000 的规定，用预制疲劳裂纹的试验机对试样加载时，应使切口附近的应力分布对称，并且施加力的准确度在±2.5%以内。

5.3.2 采用正弦波或三角波加载预制疲劳裂纹，频率为 1 Hz~20 Hz，应力比 R 值为 0.1~0.5，最大应力强度因子 K_{\max} 值低于应力腐蚀试验初期 K 的 75%，直至裂纹至少在两侧侧面越过切口 2.5% W 或 1.25 mm（选取两者中的较大值）为止。

5.3.3 最终的裂纹长度 a ，应满足平面应变条件，按公式（3）计算：

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{\max}}{R_{p0.2}} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

K_{\max} ——最大应力强度因子，单位兆帕斯卡·米^{1/2}（MPa·m^{1/2}）；

$R_{p0.2}$ ——0.2%规定非比例延伸强度，单位兆帕斯卡（MPa）。

5.3.4 为了确保应力强度分析的有效性，应该检查试样两个侧面上疲劳裂纹，以保证疲劳裂纹面偏离切口平面 10°以下，长度差值不超过 5% W 。

5.3.5 预制完疲劳裂纹后，宜对试样两侧沿着裂纹扩展方向各切 5% B 的凹槽。

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 μS/cm 的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。

6.1.2 根据试验要求配制试验溶液，宜采用分析纯级试剂。

6.2 试验条件

6.2.1 对于动态循环高压釜，溶液应充满高压釜腔，压力应高于该溶液饱和蒸气压。

6.2.2 调节高压泵选择合适的溶液流量，应确保高压釜内溶液在 1 h 内至少更换 1 次。

6.2.3 升温速率宜控制在 70 °C/h~100 °C/h。

6.2.4 溶液体积与试样表面积的比值宜大于 100 mL/cm²。

6.3 试验步骤

6.3.1 将试样安装在夹具上，试样与夹具之间采用绝缘垫片和套管隔离。

6.3.2 高压釜拧紧后，将试验溶液配制好后注入储水罐及高压釜中，并按具体试验要求调节压力、流量、溶解氧和溶解氢浓度。

6.3.3 确认测温、测压及安全保护装置均处于正常状态后，开始加压并达到压力设定值，确认无泄漏后开始加热升温。

6.3.4 到达试验稳定温度后，开始进行加载并在线监测试样电位变化。

6.3.5 先对试样在高温高压水中加载三角波进行预裂纹， K_{\max} 不高于应力腐蚀试验采用的 K 值， R 值宜为 0.3~0.7，有利于过渡到应力腐蚀裂纹扩展。然后，施加恒载荷或梯形波进行裂纹扩展试验。应力腐蚀试验过程中 K 值宜满足 GB/T 15970.6—2007 规定的平面应变条件。

6.3.6 在试验过程中出现卸载的情况下如需继续进行试验，宜重新升温，先加载三角波对裂纹进行活化后，再按照试验条件施加恒载荷或梯形波进行试验。

6.3.7 试验结束后，将试样取出，在空气中疲劳拉断。

7 试验结果观察及评定

用光学显微镜和扫描电子显微镜观察裂纹断口形貌，建议在试样厚度方向选取不少于30个测量点测量裂纹长度，计算平均裂纹长度，用于校对原位监测系统的测量值。对于不规则的裂纹扩展，如指状应力腐蚀裂纹前沿，建议加密选取测量点。绘制裂纹长度-时间曲线，通过对某一阶段的裂纹长度和时间的线性拟合得到该阶段的裂纹扩展速率值。

用光学显微镜和扫描电子显微镜观察裂纹扩展路径，若裂纹偏离与拉力垂直的扩展平面，裂纹长度可通过测量裂纹扩展路径得到。另外通过有限元模拟可以得出裂尖实际的应力强度因子，从而可估算出实际的应力强度因子条件下相应的裂纹扩展速率。

8 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，以提高试验可操作性及结果可信度。

8.2 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载荷、位移、温度、压力和化学参数等测试用传感器或探头进行检测或计量标定，并在有效期内使用，定期更换探头电解液等耗材，保证相关试验参数和结果的可信度。

8.3 其它要求

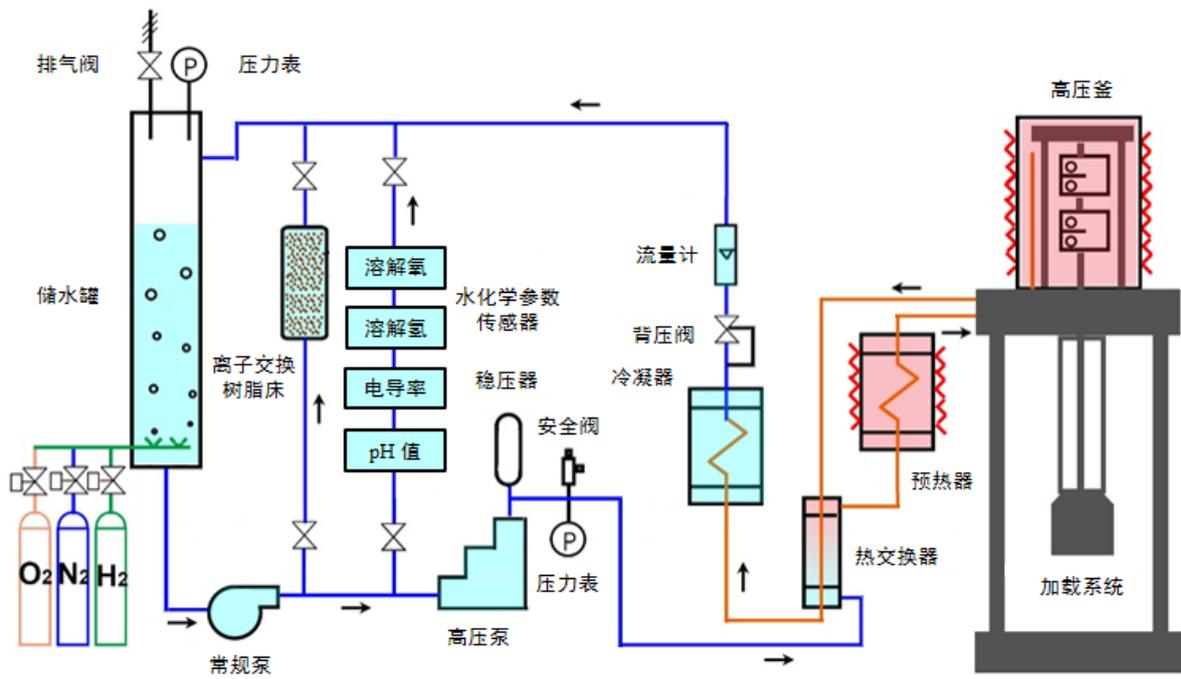
当采用静态釜进行试验时，应注明装置参数及条件。

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) 材料名称、热处理工艺和热处理状态；
- c) 试样形状、尺寸、加工方式、取样方向、取样位置、变形量；
- d) 试验参数，如：溶液成分、电导率、pH 值、压力、溶解氧（或氢）浓度、温度、试样加载形式（单试样或多试样）、加载波形、应力强度因子等；
- e) 试验结果，包括测试时间、校正后的裂纹扩展长度和裂纹扩展速率、断口形貌；
- f) 试验异常记录；
- g) 试验人员和日期。

附录 A
 (资料性附录)
 高温高压循环水应力腐蚀试验系统

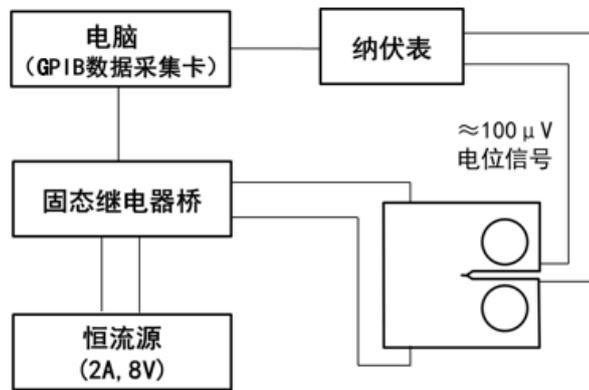


图A.1 高温高压循环水应力腐蚀试验系统示意图

附录 B
(资料性附录)
直流电位降 (DCPD) 数据采集系统

B.1 直流电位降 (DCPD) 数据采集系统

直流电位降 (DCPD) 数据采集系统见图B.1。



图B.1 DCPD 数据采集系统示意图

数据采集系统包括配备通用接口总线 (GPIB) 数据采集卡的电脑主机、显示器、恒流源、纳伏表、数据采集开关、固态继电器等设备。

采用不锈钢丝、镍丝或铂丝作为测试线。测试线需包覆一层聚四氟乙烯热缩管,从而达到绝缘效果。

通过测试线采集试样裂纹两侧电压值的变化,进而换算成裂纹长度值,推荐裂纹长度的测量分辨率优于5 μm。

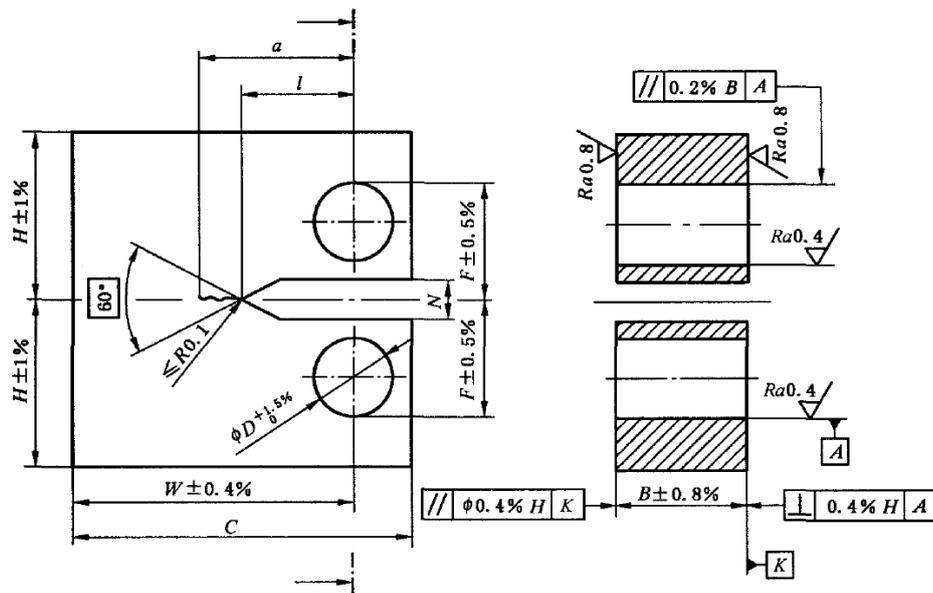
在试验过程中可按试验要求调整试验条件,如溶解氧浓度、温度、加载参数等。推荐每次改变试验条件时只改变其中一个条件。

原位监测高温高压水中紧凑拉伸试样的裂纹长度值,从而得到裂纹扩展速率。

附录 C
(资料性附录)
紧凑拉伸试样尺寸

C.1 紧凑拉伸试样尺寸

紧凑拉伸试样尺寸见图C.1。



说明:

净宽度 = W

总宽度 $C=1.25W$ 最小

厚度 $B=0.5W$

半高 $H=0.6W$

孔直径 $D=0.25W$

孔外边缘之间距离的一半 $F=1.6D$

切口宽度 $N=0.065W$ 最大

有效切口长度 $l=0.25W\sim 0.40W$

有效裂纹长度 $a=0.45W\sim 0.55W$

图C.1 紧凑拉伸试样尺寸示意图