

团 体 标 准

T/CNS 21—2020

核电厂金属材料高温高压 水中微动疲劳试验方法

**Fretting fatigue 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 数据处理.....3

8 质量保证.....4

9 试验报告.....4

附 录 A （资料性附录） 高温高压循环水微动疲劳试验系统.....5

附 录 B （资料性附录） 微动疲劳试样及夹具.....6

附 录 C （资料性附录） 高温高压循环水微动疲劳 S-N 曲线.....8

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、国家电投集团科学技术研究院。

本标准主要起草人：韩恩厚、谭季波、吴欣强、白亚奎、孙晨。

核电厂金属材料高温高压水中微动疲劳试验方法

1 范围

本标准规定了核电厂高温高压水条件下金属材料试样微动疲劳试验的方法和相关技术要求。
本标准适用于具有一定标距长度的矩形横截面试样在360℃以下水介质中微动疲劳试验。

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 15248 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

GB/T 20120.1 金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第1部分:循环失效试验(GB/T 20120.1—2006,ISO 11782-1:1998,ZDT)

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法(GB/T 3075—2008,ISO 1099:2006,MOD)

T/CNS 4 核电厂金属材料高温高压水中腐蚀疲劳试验方法

3 术语和定义

GB/T 15248、GB/T 20120.1、GB/T 3075、T/CNS 4界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

法向正压力 normal load

由试样A与疲劳试样组成的摩擦副之间的正压力。

3.2

微动 fretting

两个接触表面发生的极小幅度的相对运动,一般其位移幅度为微米量级。

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,特殊情况下也允许施焊,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需具有良好的密封性能,在试验过程中不准许有泄漏现象。

4.1.3 可以模拟典型轻水堆核电站服役循环水环境,可在360℃、20 MPa以下环境中长期稳定运行。

4.1.4 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。

4.1.5 高压釜中釜体、釜盖等高温承压部件应按GB 150.4进行制造、检验和验收。

4.1.6 试样架推荐采用耐高温耐腐蚀材料制造,如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

4.1.7 图A.1给出了推荐的高温高压循环水系统和高压釜结构示意图。

4.1.8 推荐高压釜应配备有相应的外部冷却水循环系统，以保护位移传感器、力传感器、密封圈及其他不耐高温试验部件。

4.2 加载系统

4.2.1 高压釜需配备疲劳机加载系统，推荐试验装置配备压力平衡系统，平衡釜内水压对拉伸杆施加的压力。

4.2.2 在高温高压水环境下能够实现力控制、应变控制或者位移控制加载模式。

4.2.3 能够加载三角波、正弦波和梯形波等波形。

4.2.4 图 A.1 给出了推荐的加载系统示意图。

4.3 加热及控温装置

4.3.1 推荐采用电加热方式。

4.3.2 加热装置及控温仪器必须具有满足试验要求的升温速度，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，实时监测试样处试验温度。

4.3.3 控温精度： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 应变监测系统

在疲劳试验过程中，可采用线性可变差动变压位移传感器或应变引伸计等方法原位实时监测试样在高温高压水中的应变，测量精度一般应优于 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 或者 $\pm 5\%$ 。

4.5 法向正压力施加装置

在疲劳试验过程中，试样A与片状疲劳试样之间的法向正压力施加如图B.1所示，试样A与片状疲劳试样侧面（窄面）面-面接触，法向正压力的施加推荐使用拉伸弹簧或压缩弹簧或带有载荷传感器的载荷施加装置。使用弹簧加载时，应在试验温度条件下校准弹簧的弹性系数。法向正压力控制精度一般应优于 $\pm 5\text{ N}$ 或 $\pm 5\%$ 。

5 试样制备和要求

5.1 试样的材料要求

试样A和疲劳试样为核电厂用金属材料，包括碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、镍基合金、铝合金等，取样应具有代表性。

5.2 试样的形状尺寸

通常试样A端面可为正方形、矩形、圆形或其他规则形状。疲劳试样可采取如图B.2所示的平行部分与夹持端具有切向过渡圆弧的矩形横截面试样。疲劳试样形状尺寸、同轴度等要求按GB/T 15248执行。

5.3 夹持要求

推荐夹持方式如图B.3所示，由疲劳试样、夹块、欧姆夹、底座、样品台、螺栓组成。利用欧姆夹与夹块夹持疲劳试样，夹块、底座通过台阶方式配合安装，通过螺栓与样品台连接，在疲劳过程中能够稳定对疲劳试样施加载荷。其他能够保证试样对中性、对试样提供稳定夹持力的夹持方式亦可采用。

5.4 试样加工

试样A和疲劳试样的取样部位和取向应按有关标准或双方协议。所采用的机加工在试样表面产生的残余应力和加工硬化应尽可能小，推荐按GB/T 15248执行。

5.5 表面粗糙度

推荐采用水磨砂纸对试样A和疲劳试样进行机械抛光，试样A端面（与疲劳试样接触面）和疲劳试样标距段表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ ，亦可根据需求决定。

5.6 试样保存

试样A和疲劳试样需妥善保管，尤其是易氧化的低合金钢、碳钢等材料，需在干燥皿中密封保存，防止试样氧化、受杂质污染。

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 根据试验要求，采用分析纯级试剂配制试验溶液。

6.2 试验条件

6.2.1 试验温度可根据需求确定，一般在 360°C 以下。

6.2.2 对于动态循环高压釜，溶液应充满高压釜腔，压力高于试验温度对应的饱和蒸汽压。

6.2.3 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。

6.2.4 推荐升温速度控制在 $70^\circ\text{C}/\text{h} \sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

6.3 试验步骤

6.3.1 将试样 A 和疲劳试样安装在夹具上，安装后疲劳试样同轴度良好，确保疲劳试验数据有效。

6.3.2 在疲劳试样上安装原位应变监测系统。

6.3.3 在摩擦副上安装法向正压力施加装置，并设定试验需施加的法向正压力。

6.3.4 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。

6.3.5 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。

6.3.6 当温度、压力稳定到试验目标值后，设置疲劳机试验位移、应变速率、加载波形等参数，开始进行疲劳试验。

6.3.7 当峰值拉应力到达稳定值后，设置试验终止条件，如峰值拉应力下降至最大峰值拉应力的 75% 时停止。

6.3.8 试验结束后，将试样取出，妥善保管。

7 数据处理

7.1 试验结果有效性判定

疲劳裂纹萌生于疲劳试样标距段内，且疲劳试样无明显弯扭变形，则试验结果有效。

7.2 数据处理方法和要求

7.2.1 记录试样标距段表面磨损和疲劳裂纹宏观形貌。

7.2.2 记录试样 A 表面磨损宏观形貌。

7.2.3 选择典型的疲劳试样，分析微动疲劳磨损形貌及疲劳断口形貌，疲劳断口分析宜在液氮中冷却后敲断。利用扫描电镜、金相显微镜记录微动疲劳磨损形貌、疲劳裂纹源、裂纹扩展区等的形貌特征。

7.2.4 需要时，将获得的微动疲劳数据汇总，绘制相应的应变-疲劳寿命 ($S-N$) 曲线。一般获得 $S-N$ 曲线需要 4 个以上不同应变幅条件下的疲劳寿命，且每个实验至少重复 3 次。典型的高温高压循环水微动疲劳 $S-N$ 曲线如图 C.1 所示。

8 质量保证

8.1 试验人员要求

高温高压水微动疲劳试验人员应经过培训且满足以下要求：

- a) 能熟练操作疲劳机，设置预定的应变幅、应变速率、应变比和加载波形；
- b) 能熟练操作高压釜的升降，高压釜硬密封拧紧程序；
- c) 能熟练操作高温高压循环水系统，如溶解氧、电导率等水化学参数设置、高压釜内压力调节、高压釜内温度调节等的控制；
- d) 能熟练安装、卸装试样 A 和疲劳试样。

8.2 试验系统校准要求

按照相关规定定期对疲劳机力传感器、位移传感器、高精度线性可变差动变压位移传感器、高压釜热电偶、预热器热电偶、溶解氧探头、压力传感器、pH 探头、弹簧等进行计量标定，并在有效期内使用。

9 试验报告

本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、化学成分、热处理状态和力学性能；
- c) 试样 A 和疲劳试样形状尺寸、表面状态、取样位置、取样方向；
- d) 试验设备型号及相关说明；
- e) 试验参数，如应变幅值、应变速率、法向正压力、应变比、加载波形、温度、压力、试验介质（包括溶解氧浓度）；
- f) 试验结果，包括微动疲劳数据、微动磨损形貌、疲劳裂纹形貌、断口形貌等；
- g) 试验异常记录；
- h) 试验人员和日期。

附录 A
(资料性附录)
高温高压循环水微动疲劳试验系统

典型的高温高压循环水微动疲劳试验系统见图A. 1。

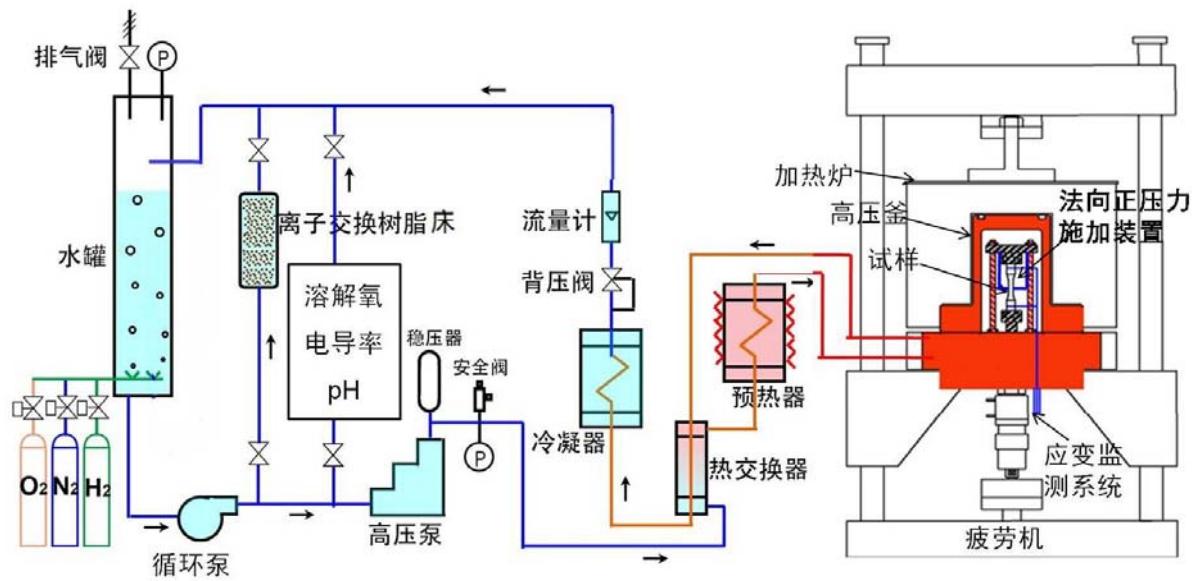


图 A. 1 典型的高温高压循环水微动疲劳试验系统

附 录 B
(资料性附录)
微动疲劳试样及夹具

典型的法向正压力施加装置见图 B.1。
矩形横截面试样见图B.2。
矩形横截面试样夹持方式见图 B.3。

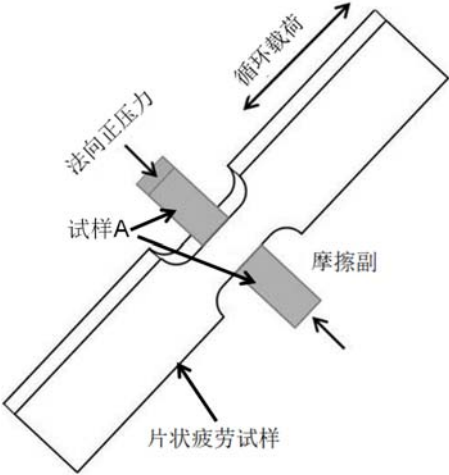


图 B. 1 典型的法向正压力施加装置

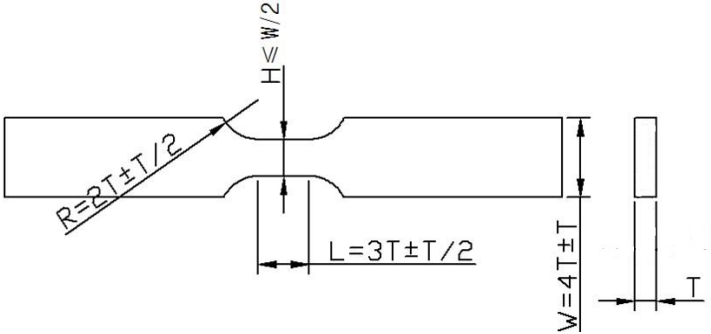
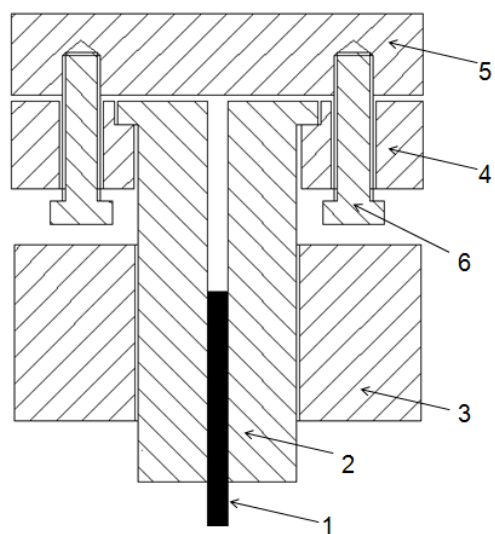


图 B. 2 矩形横截面试样



说明:

1——疲劳试样;

2——夹块;

3——欧姆夹;

4——底座;

5——样品台;

6——螺栓。

图 B. 3 矩形横截面试样夹持方式

附录 C
(资料性附录)
高温高压循环水微动疲劳 $S-N$ 曲线

典型的高温高压循环水微动疲劳 $S-N$ 曲线见图 C.1。

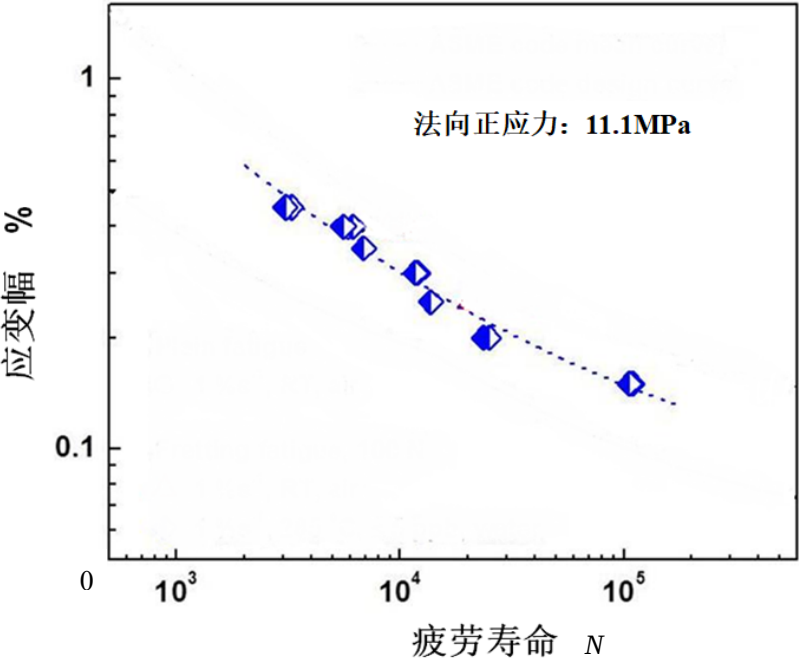


图 C.1 典型的高温高压循环水微动疲劳 $S-N$ 曲线