

团 体 标 准

T/CNS 20—2019

核电厂用金属材料高温高压水中 交变条件下的微动磨损试验方法

**Test method for fretting wear under altering conditions in high temperature
high pressure water of 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..... 5

附录 A（资料性附录） 高温高压水微动磨损测试系统结构 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、中国核动力研究设计院、上海核工程研究设计院有限公司、国家电投集团科学技术研究院。

本标准主要起草人：韩恩厚、王俭秋、明洪亮、张志明、钱浩、孙磊、高李霞、唐力晨、白亚奎、孙晨。

核电厂用金属材料高温高压水中交变条件下的微动磨损试验方法

1 范围

本标准规定了核电厂用金属材料在高温高压水交变机械参数条件下的微动磨损试验方法。
本标准适用于评价核电厂用金属材料在350℃以下水介质中的抗微动磨损性能。

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 压力容器 第4部分：制造、检验和验收

GB/T 12444 金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验

3 术语和定义

GB/T 12444界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 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。

3.2 最大磨损深度 **maximum wear depth**

磨损试验后试样磨痕最深处与初始表面间的高度差。

3.3 切向摩擦力-位移曲线 **tangential friction force - displacement (F_t - D) curve**

磨损试验每一个完整振动周期内，切向摩擦力与位移的关系曲线。

3.4 交变机械参数 **alternate mechanical parameters**

主要指交变法向正压力、交变频率和交变位移幅值。

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（推荐 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢）、镍基合金（推荐 NS3306 合金）或哈氏合金（推荐 NS3304 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。

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 高压釜必须设有安全保护装置，并定期更换安全保护装置，以保证其可靠性。

4.1.4 高压釜釜体、釜盖等高温承压构件应依据 GB 150.4 进行制造、无损检测和验收。

4.1.5 釜内导管、试样连接杆和压力加载杆等构件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。

4.1.6 附录 A 给出了推荐的高温高压循环水系统、高压釜、加载系统和激振系统等结构的示意图。

4.1.7 高压釜应配备相应的冷却水循环系统，以保护数据采集系统及其它不耐高温的试验部件，并保障采集数据的精度。冷却循环水的推荐温度为 20℃，控温精度： $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 加热及控温装置

4.2.1 推荐采用电加热方式。

4.2.2 加热及控温装置应满足试验要求的升、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。尽量保持高压釜内温度均匀，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 加载系统

4.3.1 高温高压水微动磨损测试系统应配备慢应变速率拉伸机加载系统来加载并控制正压力的交变范围和交变频率，而且推荐慢应变速率拉伸机加载系统配备压力平衡系统，以抵消釜内水压对加载系统施加的压力。

4.3.2 慢应变速率拉伸机加载系统在高温高压水环境下需能够在试样与配对材料间施加 0 N~500 N 范围内交变的正压力，推荐正压力控制精度在 $\pm 1\text{N}$ 内。

4.3.3 慢应变速率拉伸机应能够加载三角波、正弦波和梯形波等正压力波形，以适用于不同条件下的微动磨损测试，交变频率范围在 0.01 Hz~1 Hz 范围内。

4.4 激振系统

4.4.1 本标准推荐的高温高压水微动磨损测试系统应配备压电陶瓷式激振器，振动频率可在 1 Hz~200 Hz 内精确交变调节，振幅可交变调节范围推荐为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ ~ $\pm 500\text{ }\mu\text{m}$ 且推荐偏差控制在 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 内。振动频率和振幅的交变次数以实际试验要求而定。

4.4.2 若无法配备压电陶瓷激振器时，优先推荐采用高性能的电液伺服系统或其他等同装置作为激振装置，但是应保证其能满足具体微动磨损测试时的频率、振幅要求及控制精度。

4.4.3 激振装置的频率、振幅控制精度应由权威第三方机构检定并出具报告。

4.5 数据采集系统

4.5.1 本标准推荐的高温高压水微动磨损测试系统应配备高性能力传感器及位移传感器，测量值的误差应控制在指示值 2%范围内。

4.5.2 本标准推荐的高温高压水微动磨损测试系统应配备高性能数据采集系统，包括摩擦力与位移数据的实时采集、处理与存储，需保证每个磨损周次内至少采集 50 组摩擦力、位移数据以获得摩擦力-位移曲线和位移-时间曲线等。

5 试样制备和要求

5.1 试样尺寸

5.1.1 根据具体试验要求确定试样的形状及尺寸。推荐按照核电站运行中试样与摩擦副的实际接触形式确定试样的形状、尺寸及加工方式，以最大限度地反应真实工况条件。

5.1.2 管状试样推荐尺寸：长度 $L=20\pm 0.1\text{ mm}$ ，直径与壁厚均为实测值。

5.1.3 板状试样推荐尺寸：长度 $L=20\pm 0.1\text{ mm}$ ，宽度 $W=10\pm 0.1\text{ mm}$ ，厚度 $T=5\pm 0.1\text{ mm}$ 。

5.1.4 当被测材料无法获得上述推荐尺寸试样时,可按实际情况确定试样的尺寸并加工相应夹具。夹具应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。

5.2 摩擦副尺寸

5.2.1 根据具体试验要求确定试样的形状及尺寸。推荐按照核电站运行中试样与摩擦副间的实际接触形式确定摩擦副的形状及尺寸。

5.2.2 需按照摩擦副的形状及尺寸加工相应的夹具。夹具应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。

5.3 试样加工

5.3.1 试样的加工应采用对材质组织影响小的机加工方法。

5.3.2 试样不应带有磁性,经磨床加工后应退磁。

5.3.3 试样边缘应进行倒角或者磨平,确保无毛刺、卷边等影响试验的加工缺陷。

5.3.4 根据试验要求处理样品表面。推荐磨损试验接触面采用原始表面,加工过程中需采取保护措施以防止原始表面的破坏(擦伤、烧伤等)。

5.3.5 若对表面状态无特殊要求,推荐用水砂纸将试样表面依次磨到 2000 号并进行机械抛光处理,然后用分析纯丙酮或酒精洗净。推荐超声清洗时间不低于 30 min。

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 根据试验要求配制试验溶液,建议采用分析纯试剂。

6.1.3 根据试验要求配置试验溶液,要求控制试验溶液 pH 值,不得与高压釜体发生造成高压釜损坏的化学反应,并在试验报告中注明试验溶液。

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气压,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 内至少彻底更换 1 次。

6.2.3 推荐升温速率为 $50^\circ\text{C}/\text{h}\sim 80^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

6.2.4 相同试验条件下平行试验不少于 3 组。

6.3 试验步骤

6.3.1 试样安装。根据试样形状及尺寸选择相应夹具并将试样安装于高压釜内的横杆上。然后安装摩擦副并调节摩擦副与试样间的距离至 $50\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$,将摩擦副固定锁死。当安装平面或者柱面试样时应保证两接触平面或接触线处于平行状态。

6.3.2 采用慢应变速率拉伸机系统驱动与之连接的纵杆来推动试样上移,上移速度为 $0.5\ \mu\text{m}/\text{s}\sim 1\ \mu\text{m}/\text{s}$,上移过程中实时观察正压力测量值的变化。当正压力测量值发生突变时,试样与摩擦副刚好接触,将该位置作为试样与摩擦副相接触的位置零点。

6.3.3 选择恒载荷模式,采用慢应变速率拉伸机系统自动执行相应程序,将正压力加载至试验过程中的最低值。

- 6.3.4 用酒精擦拭釜内和夹具，关闭高压釜并拧紧。
- 6.3.5 将试验溶液配制好后用循环泵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等。
- 6.3.6 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。
- 6.3.7 温度到达试验温度并稳定一段时间后，使用手动模式操控慢应变速率拉伸机系统使纵杆下移，下移速度为 $0.5\ \mu\text{m/s}\sim 1\ \mu\text{m/s}$ ，使试样与摩擦副脱离。
- 6.3.8 升温过程中釜内各种夹具、支架和构件的热膨胀会影响试样与摩擦副相接触的位置零点，因此需要按照 6.3.2 重新寻找试样与摩擦副相接触的位置零点。
- 6.3.9 设定加载程序（载荷模式，正压力渐变范围及交变频率），慢应变速率拉伸机系统自动执行加载程序。
- 6.3.10 待正压力的变化达到设定值后，根据试验要求设定振动频率及振幅数值的交变范围及交变次数，开始微动磨损试验，并实时进行数据采集。
- 6.3.11 到达预设的试验时间后，关闭激振系统，停止试验。通过降温程序使高压釜温度缓慢下降，推荐降温速度不超过 30°C/h ，以避免在降温过程中发生泄漏，待温度降至室温后，再进行卸压，防止循环回路中的溶液因压力降低发生汽化。
- 6.3.12 打开高压釜并取出试样。
- 6.3.13 鉴于核电材料服役的长期性，推荐总的微动磨损周次不低于 10^7 次。

7 试验结果观察及评定

- 7.1 利用绘图软件处理微动磨损测试源文件数据，并绘出摩擦系数与摩擦力-位移曲线随磨损周次的演变规律曲线等。
- 7.2 利用白光干涉仪或激光共聚焦显微镜测量微动磨损体积与最大磨损深度，并计算相应微动磨损速率。当磨痕表面存在严重材料转移现象时，需将转移材料去除后再进行磨损体积与最大磨损深度的测量。如果转移材料无法去除，需通过磨痕截面对转移材料的厚度进行测量，以获得实际的磨损体积。
- 7.3 利用扫描电子显微镜观察磨痕的表面及截面形貌，判断主要的磨损机制及损伤类型等。

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微动磨损专业背景知识，以提高试验可靠性及结果可信度。

8.2 试验系统校准要求

按照不同传感器和探头的检定要求，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、正压力、振幅等测试用传感器或探头进行检测或计量标定，且均应在标定有效期内使用，保证相关试验参数和结果的可信度。

8.3 其他要求

如采用静态釜系统、其他加载方式或激振方式进行试验，应注明试验装置参数和条件。

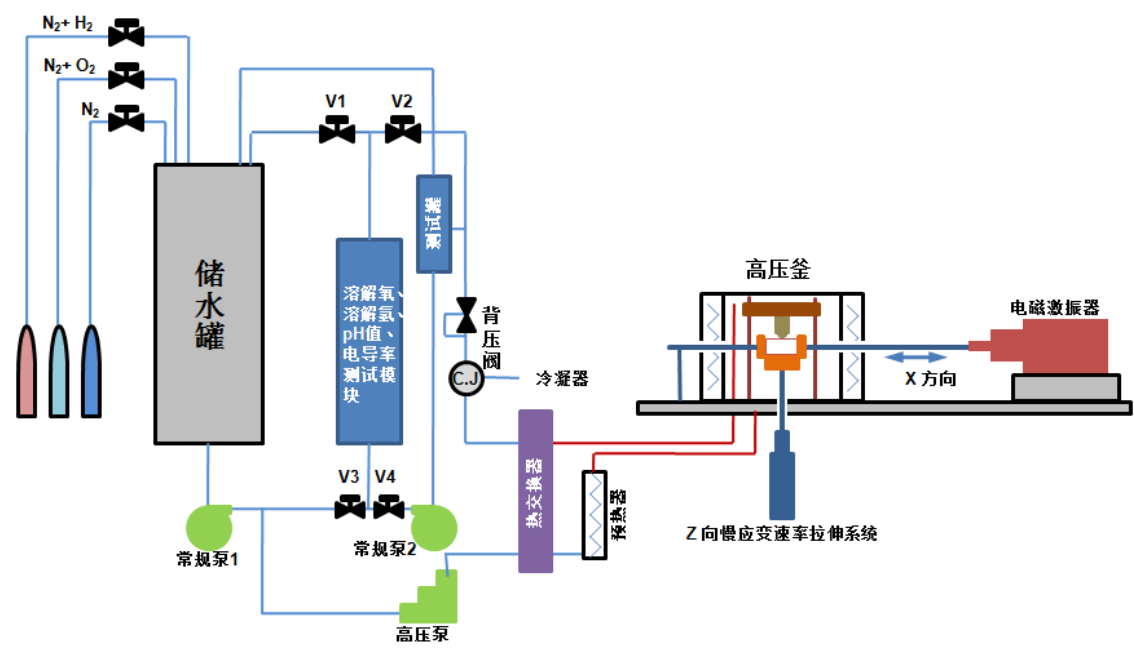
9 试验报告

试验报告应包括但不限于以下内容：

- a) 本标准号；
- b) 材料牌号和标准号、炉批号、化学成分、热处理状态和力学性能等；
- c) 试样与摩擦副的形状、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、正压力交变范围及频率、位移幅值交变范围及次数、振动频率交变范围及次数、釜内压力及高压釜参数等；
- f) 试验结果，包括材料磨损体积、最大磨损深度、磨损速率、摩擦系数及摩擦力-位移曲线随磨损周次演化规律、磨痕表面及截面形貌、化学成分、正压力-时间曲线、位移-时间曲线等；
- g) 试验异常记录（如果有）；
- h) 试验人员、审核人员和日期。

附 录 A
(资料性附录)
高温高压水微动磨损测试系统结构

高温高压水微动磨损测试系统结构见图A. 1。



图A. 1 高温高压水微动磨损测试系统结构