

团 体 标 准

T/CNS 15—2019

核电厂金属材料高温高压水中 切向微动磨损试验方法

**Test method for tangential fretting wear in high temperature pressurized water
of metallic materials used in nuclear power plant**

2019 – 05 – 27 发布

2019 – 09 – 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。

本标准以相关的金属及合金磨损测试国家标准为参考,并根据核电厂用金属材料在高温高压水中微动磨损测试的特殊要求而补充提出了相应要求。

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,苏州热工研究院有限公司。

本标准主要起草人:韩恩厚、王俭秋、明洪亮、柳星辰、张志明,钱浩,孙磊,高李霞,唐力晨,梅金娜,韩姚磊。

本标准于2019年首次发布。

核电厂金属材料高温高压水中切向微动磨损试验方法

1 范围

本标准规定了核电厂用金属材料高温高压在水中切向微动磨损的试验方法。
本标准适用于评价核电厂用金属材料在360℃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，仅所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/T 150.4—2011 压力容器 第4部分：制造、检验和验收

GB/T 12444—2006 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—2006界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 微动 **fretting**

摩擦学中，两个固态接触表面间由于振动而发生的小幅度的相对运动，一般为切向运动。

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 (*Ft-D*) curve**

磨损试验每一个完整磨损循环内，切向摩擦力与位移的关系曲线。

4 试验仪器和设备

4.1 高压釜

4.1.1 高压釜釜体、釜盖应采用奥氏体不锈钢和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。

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 高压釜必须设有安全保护装置，并定期检查安全保护装置以保证其可靠性。

4.1.4 釜体、釜盖等高温承压构件应依据 GB/T 150.4—2011 进行无损检测，非依据 GB/T 150.4—2011 制造的高压釜及釜盖，应按此标准要求进行评估，经验收合格后方可使用。

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，如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

4.1.6 本标准的附录 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。冷却循环水箱出口水温控制精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，水温宜低于 20°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 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用于加载并控制正压力的大小，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摩擦副间施加 $0\text{ N} \sim 500\text{ N}$ 的正压力，推荐控制精度为 $\pm 1\text{ N}$ 或 2%。

4.3.3 慢应变速率拉伸机建议能够加载三角波、梯形波和恒载荷等波形，以适用于某些特殊条件下的微动磨损测试。

4.3.4 若测试系统无法配备压力平衡式慢应变速率拉伸机加载系统，可采用其它加载方式，但是需精确测定出其（含夹具）在高温高压水中的实际加载力，推荐控制精度为 $\pm 1\text{ N}$ 或 2%。

4.4 激振系统

4.4.1 振动频率可在 $1\text{ Hz} \sim 200\text{ Hz}$ 内精确调节，振幅可调节范围推荐为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m} \sim \pm 500\text{ }\mu\text{m}$ 且测量精度为 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ，推荐高温高压水微动磨损测试系统配备压电陶瓷式激振器。

4.4.2 若无法配备电磁式激振装置时，优先推荐采用高性能的电液伺服系统或其它等同装置作为激振装置，但是必须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。

4.5 数据采集系统

4.5.1 高温高压水微动磨损测试系统配备的力传感器测量精度为 $\pm 1\text{ N}$ 或 2%，配备的位移传感器测量精度为 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 。

4.5.2 高温高压水微动磨损测试系统应配备数据采集系统，包括摩擦力与位移数据的实时采集、处理与存储，每个磨损循环内应至少采集 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 概述

在微动磨损试验中，试样 A 与试样 B 共同组成一个摩擦副。

5.2 试样 A 尺寸

5.2.1 根据具体试验要求确定试样 A 的形状及尺寸。推荐按照核电站运行中摩擦副的实际接触形式确定试样 A 的形状、尺寸及加工方式。亦可按实际情况确定试样 A 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，如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

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

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

5.3 试样 B 尺寸

5.3.1 推荐按照核电站运行中摩擦副的实际接触形式确定试样 B 的形状及尺寸。

5.3.2 需按照试样 B 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，如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

5.4 试样加工

5.4.1 试样的加工应采用对材质影响小的机加工方法。

5.4.2 试样加工过程中应避免磁化，若有磁化须进行退磁处理。

5.4.3 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。

5.4.4 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）。

5.4.5 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，然后用分析纯级丙酮或酒精超声洗净，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 $1\text{ }\mu\text{S/cm}$ 的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。

6.1.2 建议采用分析纯试剂配制试验溶液。

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，外加压力高于该溶液饱和蒸气压，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 内至少更换 1 次。

6.2.3 推荐升温速率不高于 100°C/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 A 形状及尺寸选择相应夹具并将试样 A 安装于高压釜内的横杆上。然后安装试样 B 并调节试样 B 与试样 A 间的距离至 $50\text{ }\mu\text{m}\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ ，将试样 B 夹具固定锁死。当安装平面或者柱面试样时应尽量使两接触平面处于平行状态。

6.3.2 采用慢应变速率拉伸机系统驱动与之连接的纵杆以推动试样 A 上移，上移速率宜为 $0.5\text{ }\mu\text{m/s}\sim 1\text{ }\mu\text{m/s}$ ，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 A 与试样 B 刚好接触，将该位置作为试样 A 与试样 B 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要求值，关闭高压釜并拧紧。
- 6.3.4 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等。
- 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 温度到达试验温度并稳定后，使用手动模式操控慢应变速率拉伸机系统使纵杆下移，下移速率宜为 $0.5\ \mu\text{m/s}\sim 1\ \mu\text{m/s}$ ，使试样 A 与试样 B 脱离。
- 6.3.7 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 A 与试样 B 相接触的位置零点，因此需要按照 6.3.2 步骤重新寻找试样 A 与试样 B 相接触的位置零点。
- 6.3.8 设定加载程序（恒载荷模式，正压力目标值及加载速率，推荐加载速率为 $10\ \text{N/min}$ ），慢应变速率拉伸机系统自动执行加载程序。当采用其它加载模式时（正弦波、三角波或者梯形波等），按照试验要求设定加载模式参数并自动执行加载程序。
- 6.3.9 待正压力达到目标值后，根据试验要求设定振动频率及振幅数值，开始微动磨损试验，并进行实时数据采集。
- 6.3.10 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，降温速率不宜超过 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。
- 6.3.11 打开高压釜并取出试样。
- 6.3.12 当采用其它加载方式时，应采用最优的试验步骤以降低试验误差。
- 6.3.13 鉴于核电材料服役的长期性，总的微动磨损周次不宜低于 10^7 次。

7 试验结果评定

- 7.1 利用绘图软件处理微动磨损测试源文件数据，并绘出摩擦系数随磨损周次的曲线与特定磨损周次下的摩擦力-位移曲线。
- 7.2 利用白光干涉仪或激光共聚焦显微镜等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计算，以获得实际的磨损体积。
- 7.3 观察磨痕形貌，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 其它要求

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

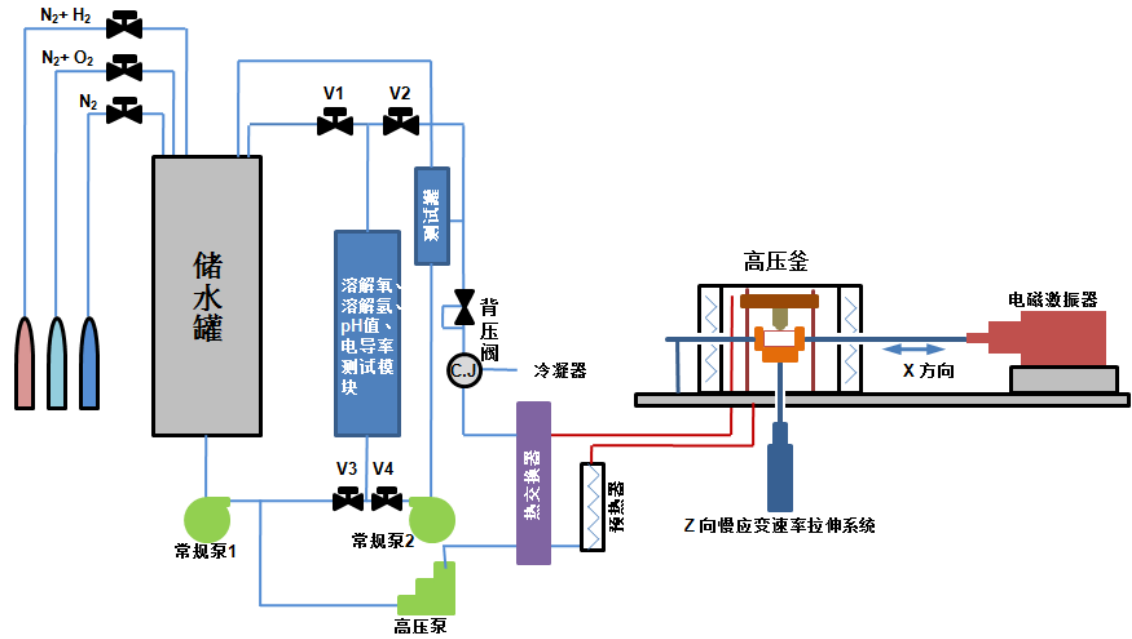
9 试验报告

试验报告应包括但不限于以下内容：

- a) 本标准号；
- b) 材料名称、种类、成分及加工工艺、热处理状态；
- c) 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、位移幅值、振动频率、釜内压力等；
- e) 试验结果，包括材料磨损体积、最大磨损深度、磨损速率、摩擦系数随磨损周次的曲线与特定磨损周次下的摩擦力-位移曲线、磨痕形貌、化学成分、正压力-时间曲线、位移-时间曲线等；
- f) 试验异常记录（如有）；
- g) 试验人员和日期。

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