

# 团 体 标 准

T/CNS 75—2022

---

## 高温高压水环境 燃料包壳污垢沉积试验方法

Crud deposit test method for fuel cladding  
in high temperature pressurizde water environment

2022 -12 - 16 发布

2023 - 04 - 01 实施

---

中国核学会 发 布



目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 总体要求 ..... 1

5 试验仪器和设备 ..... 1

6 试样制备 ..... 2

7 试验条件和步骤 ..... 2

8 试验结果表征 ..... 2

9 试验报告 ..... 3

附录 A（资料性） 釜盖与试样密封及高温高压水循环回路系统..... 4

附录 B（资料性） 实验室获得典型污垢的表面形貌..... 5



## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：广东腐蚀科学与技术创新研究院、中国科学院金属研究所、中广核研究院有限公司、生态环境部核与辐射安全中心。

本文件主要起草人：张兹瑜、薛超超、廖家鹏、蒙舒祺、吴欣强、韩恩厚、胡友森、金德升、孙海涛、郭彦辉。



# 高温高压水环境燃料包壳污垢沉积试验方法

## 1 范围

本文件描述了高温高压水环境燃料包壳污垢沉积的总体要求、试验仪器和设备、试样制备、试验条件和步骤、试验结果分析及试验报告等内容。

本文件适用于高温高压水环境燃料包壳污垢沉积试验。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 压力容器 第4部分：制造、检验和验收

GB/T 4960.2 核科学技术术语 裂变反应堆

GB/T 10123 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义

## 3 术语和定义

GB/T 4960.2、GB/T 10123界定的术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**污垢 crud**

高温高压水环境中燃料包壳表面沉积的腐蚀产物。

## 4 总体要求

4.1 试验人员应具备高温高压循环水系统及污垢沉积试验的基本操作技能。

4.2 定期对试验系统中的测试设备进行检测或计量检定，保证相关实验参数和结果的可信度。

## 5 试验仪器和设备

### 5.1 高压釜

5.1.1 釜体、釜盖应采用不锈钢、镍基合金或哈氏合金等耐蚀合金制造，具体材料应与试验溶液相容。釜体宜为整体，特殊情况下也可准许施焊但应进行探伤。

5.1.2 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，在试验过程中不准许有泄漏现象。

5.1.3 应设有安全保护装置，并定期检查安全保护装置的可靠性。

5.1.4 釜体、釜盖等高温承压构件应按照 GB/T 150.4 的规定进行制造、无损检测和验收，未按照 GB/T 150.4 制造的釜体及釜盖，应按此文件要求进行评估，经验收合格后方可使用。

5.1.5 燃料包壳试样宜采用 O 型圈实现与釜盖之间的密封，O 型圈密封连接处宜配有水冷装置；燃料包壳试样也可通过焊接方式直接与高压釜釜盖连接。

5.1.6 宜采用附录 A 中的釜盖与试样密封及高温高压水循环回路系统。

5.2 加热及控温装置

- 5.2.1 高压釜宜采用电加热方式，加热装置及控温仪器应具有满足试验要求的升温速度，在试验温度下能长期保温，控温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- 5.2.2 燃料包壳试样内部采用加热棒加热模拟实际服役情况，加热棒在试验温度下能长期保温，控温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

6 试样制备

- 6.1 燃料包壳试样浸入高温高压水中的一端应封闭，宜采用同种合金作为焊接材料实现密封。
- 6.2 试样浸入溶液中的长度宜大于 10 cm。
- 6.3 燃料包壳试样保持表面保持出厂状态，试样用分析纯级丙酮或酒精清洗干净，放置于干燥皿中保存。

7 试验条件和步骤

7.1 试验溶液

- 7.1.1 采用电导率小于  $2\ \mu\text{S}/\text{cm}$  的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。
- 7.1.2 根据试验要求配置试验溶液，宜采用分析纯级试剂。溶液中通过添加镍、铁离子等腐蚀产物模拟燃料包壳服役的水化学环境。污垢的主要成分铁和镍的氧化物，主要元素及存在形式见表 1。

表1 污垢中的主要元素及存在形式

| 元素 | 存在形式                                                  |
|----|-------------------------------------------------------|
| Fe | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 等 |
| Ni | $\text{NiO}$ 、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 等            |

7.2 试验条件

- 7.2.1 按照试验要求确定高压釜内溶液温度。
- 7.2.2 按照试验要求调节高压泵选择合适的溶液流量，宜确保高压釜内溶液在 1 h 内至少更换 1 次。
- 7.2.3 高压釜升温速率宜为  $50^{\circ}\text{C}/\text{h} \sim 80^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，加热棒升温速率宜小于  $150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。
- 7.2.4 按照试验要求确定加热棒温度，宜选取燃料包壳的实际服役温度。
- 7.2.5 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。

7.3 试验步骤

- 7.3.1 将试样安装到高压釜上，试样安装期间，应佩带干净的工作手套。
- 7.3.2 将加热棒插入到燃料包壳试样内部并与温控装置连接。
- 7.3.3 按照试验要求调整溶液中的溶解氧浓度等参数。
- 7.3.4 检查测温、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。
- 7.3.5 高压釜内温度达到设定值并稳定 1 h 后，开启加热棒加热，加热棒温度达到设定值稳定 1 h 后，开始试验。
- 7.3.6 试验结束后，停止加热，待温度降至室温后，将试样取出自然风干，放入干燥皿中妥善保存。

8 试验结果表征

- 8.1 利用配备能谱仪的扫描电子显微镜对污垢进行表面形貌和成分进行表征与分析，利用 X 射线衍射仪对污垢的结构进行分析。
- 8.2 利用配备能谱仪的扫描电子显微镜对污垢进行截面形貌及成分进行表征与分析，获得污垢的平均厚度及沿厚度方向的成分变化。为保护试样表面氧化膜，减少磨抛截面时对氧化膜的破坏，用环氧树脂

密封，用水砂纸将试样截面低转速（转速宜为 100 r/min~150 r/min）逐级磨至 5 000 号。污垢平均厚度测量位置宜大于 3 个，测量位置应均匀分布。

8.3 实验室获得典型污垢的表面及截面形貌参见附录 B。

## 9 试验报告

应包括但不限于以下内容：

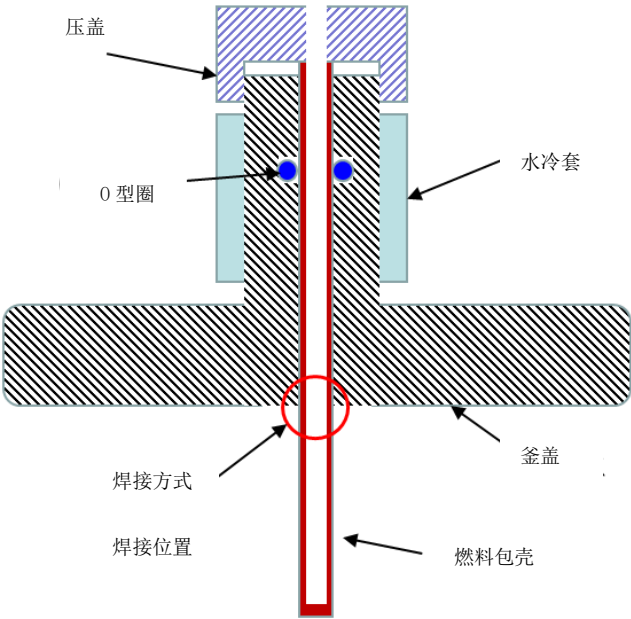
- a) 试验名称及本文件编号；
- b) 试样信息包括材料牌号及表面状态等；
- c) 试验设备；
- d) 试验参数，如试验温度、压力、试验溶液及试验时间等；
- e) 试验结果包括污垢形貌（包括表面和截面）、污垢厚度、化学组成及结构等；
- f) 试验异常记录（如有）；
- g) 试验人员和日期。

附 录 A

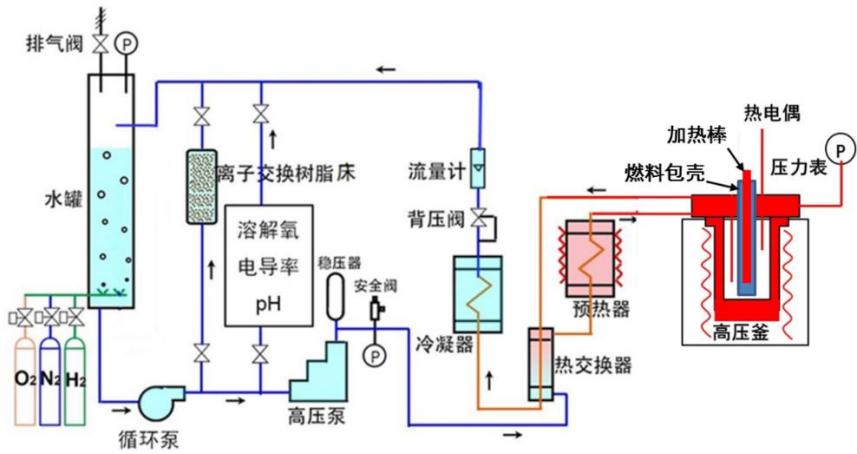
(资料性)

釜盖与试样密封及高温高压水循环回路系统

釜盖与试样密封示意图见图A. 1，高温高压水循环回路系统示意图见图A. 2。



图A. 1 釜盖与试样密封示意图



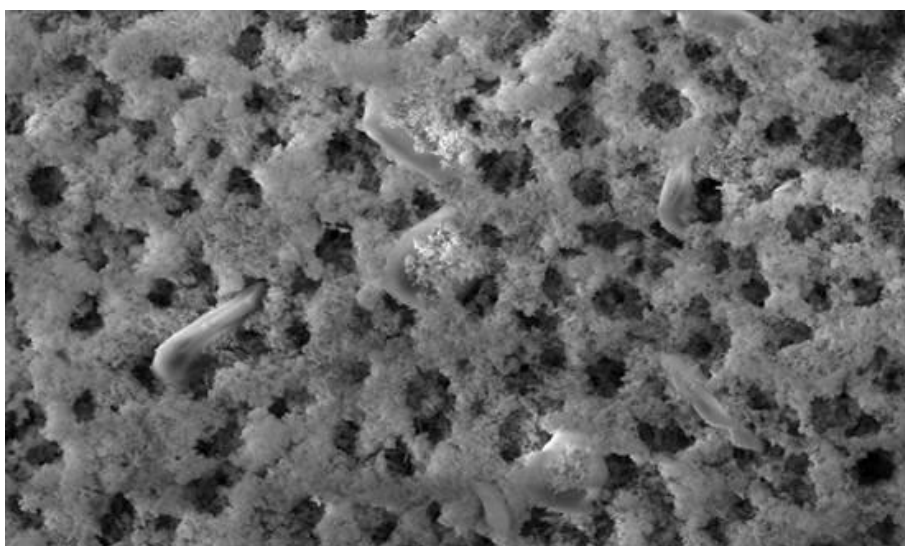
图A. 2 高温高压水循环回路系统示意图

## 附 录 B

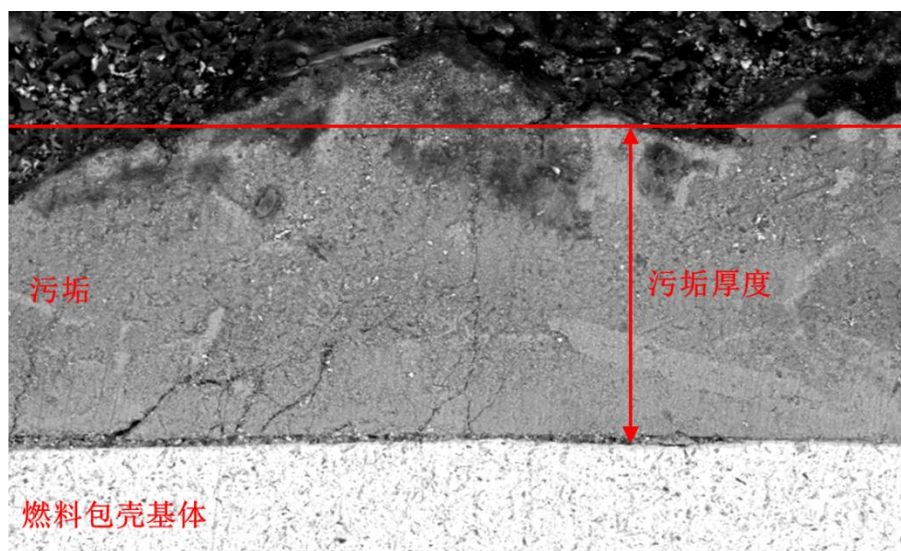
(资料性)

### 实验室获得典型污垢的表面及截面形貌

实验室获得典型污垢的表面形貌图见图B. 1，实验室获得典型污垢的截面形貌图见图B. 2。



图B. 1 实验室获得典型污垢的表面形貌



图B. 2 实验室获得典型污垢的截面形貌