

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

核环境下无氧铜材料性能测试指南

Guide for performance testing of oxygen-free copper materials in nuclear
environments

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 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 试验通用要求 1

5 试样制备方法 2

 5.1 取样要求 2

 5.2 标准试样尺寸 2

 5.3 试样加工与表面预处理 2

 5.4 辐照封装 2

6 辐照模拟加速试验方法 2

 6.1 辐照工艺参数控制 2

 6.2 剂量标定与 dpa 计算方法 3

 6.3 辐照后试样拆解与去污预处理 3

7 辐照前基准性能测试方法 3

 7.1 化学成分与含氧量测试 3

 7.2 拉伸试验 3

 7.3 夏比冲击测试 3

 7.4 导电性能测试 3

 7.5 金相晶粒度测试 3

 7.6 氢脆性能测试 3

 7.7 腐蚀试验 3

8 辐照后性能测试方法 3

 8.1 辐照后力学性能复测 3

 8.2 辐照后导电、热物理性能复测 3

 8.3 辐照后微观组织表征 3

 8.4 辐照后腐蚀、氢脆复测 4

9 试验报告编制要求 4

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。

本文件由中国西部开发促进会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

核环境下无氧铜材料性能测试指南

1 范围

本文件规定了核环境下无氧铜材料性能测试的试验通用要求、试样制备方法、辐照模拟加速试验方法、辐照前基准性能测试方法、辐照后性能测试方法、试验报告编制要求。
本文件适用于核环境下无氧铜材料性能测试。

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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法
- GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 4960.8 核科学技术术语 第8部分：放射性废物管理
- GB/T 5121 铜及铜合金化学分析方法（所有部分）
- GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法
- GB/T 23606 铜氢脆检验方法
- GB/T 35392 无损检测 电导率电磁（涡流）测定方法
- YS/T 335 无氧铜含氧量金相检验方法
- YS/T 482 铜及铜合金分析方法 火花放电原子发射光谱法
- EJ/T 20227.1 含硼铝基中子吸收材料应用性能试验 第1部分：均匀腐蚀试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

离位损伤剂量 displacement per atom
中子、离子轰击晶格，单个铜原子平均被击出晶格点阵的次数。

3.2

氢脆 hydrogen embrittlement
铜制品在高温下暴露于氢气中时，由于氧化亚铜（或氧）与氢的反应致使晶界开裂而引起塑性降低的现象。

3.3

基准试样 reference specimen
与辐照试样同熔炼批次、同加工热处理、同尺寸规格，未进行辐照处理，作为性能对比基准平行试样。

4 试验通用要求

- 4.1 基准试样、辐照配对试样取自同一坯料相邻区域，轧制/锻造取向（锻造工艺）、热处理制度完全一致。
- 4.2 同一种工况平行试样最低数量：力学 ≥ 3 支，腐蚀 ≥ 2 片，微观 ≥ 2 块。
- 4.3 试样加工禁止砂轮高温切割，优先采用低速线切割，避免引入加工硬化、表面氧化损伤。
- 4.4 所有试样唯一激光编号（表述），编号不覆盖测试观测区域。
- 4.5 力学试验机、电阻率仪、激光热导仪、金相显微镜、腐蚀高压釜、中子/ γ 辐照剂量监测设备均经法定计量机构校准，在校准有效期内。
- 4.6 中子通量、dpa 标定片每批次辐照同步标定，剂量测量相对允许误差 $\leq \pm 10\%$ 。
- 4.7 中子堆、 γ 源辐照试验人员持辐射工作人员上岗证，全程佩戴个人剂量计。
- 4.8 辐照后放射性试样分区台账管理，转运、测试、存放全程登记。
- 4.9 放射性废液、固体废样按国家放射性三废管理规定分类处置。
- 4.10 高温、腐蚀、金相制样配套防护用品，防止烫伤、化学灼伤。

5 试样制备方法

5.1 取样要求

- 5.1.1 板材取样平行轧制方向；锻件沿主变形流线；管材同时取轴向、环向两组平行试样。
- 5.1.2 避开铸锭缩孔、表面氧化皮、热处理脱碳、轧制边缘非均质区域。
- 5.1.3 基准试样、辐照试样一一配对，编号一一对应。

5.2 标准试样尺寸

- 5.2.1 室温/高温拉伸试样：按 GB/T 228.1 试样， $d_0=5\text{mm}$ ，标距 $L_0=50\text{mm}$ ；板材采用 12.5mm 宽矩形拉伸试样。
- 5.2.2 夏比冲击试样：GB/T 229V 型缺口 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 。
- 5.2.3 电导率试样： $\phi 5\text{mm} \times 100\text{mm}$ 圆棒或 $10\text{mm} \times 100\text{mm}$ 板材。
- 5.2.4 激光脉冲热导率试样： $\phi 12.7\text{mm}$ ，厚度 1.5mm，双面平行无翘曲。
- 5.2.5 腐蚀全浸/高压釜试样： $50\text{mm} \times 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，所有边角倒角 $R \leq 0.5\text{mm}$ 。
- 5.2.6 金相/TEM 观测试样： $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ 小块。
- 5.2.7 辐照封装载体试样：长度 $\leq 150\text{mm}$ ，匹配堆/离子靶腔内径，预留剂量片安装位置。

5.3 试样加工与表面预处理

- 5.3.1 线切割加工后，依次 800#、1200#、2000#水砂纸打磨去除切削损伤层。
- 5.3.2 清洗流程：丙酮超声清洗 10min $\rightarrow$ 无水乙醇漂洗 2 次 $\rightarrow 60^\circ\text{C}$ 烘干 30min，去除油污、切削液、氧化层。
- 5.3.3 成品退火材料加工后统一执行原厂完整退火制度，消除加工应力。
- 5.3.4 金相观测试样增加电解抛光工序，去除表面加工变形层。

5.4 辐照封装

- 5.4.1 中子辐照封装外壳采用高纯铝或 316L 不锈钢密封包，气密性检漏合格。
- 5.4.2 每个封装单元内置同材质剂量监测片，与试样同步辐照，用于实测 dpa 计算。
- 5.4.3 封装外部激光标注试样编号、材料牌号、目标辐照温度、目标 dpa、辐照气氛，外观尺寸。

6 辐照模拟加速试验方法

6.1 辐照工艺参数控制

- 6.1.1 辐照温度：模拟实际服役温度，常用 100°C 、 300°C 、 450°C ，全程温度波动 $\leq \pm 10^\circ\text{C}$ 。
- 6.1.2 辐照气氛：真空、高纯氦、模拟一回路冷却水环境三选一，与服役工况完全一致。
- 6.1.3 目标离位损伤剂量 dpa：目标离位损伤剂量 dpa：0.1dpa、1dpa、5dpa、10dpa，按装备设计服役年限选定。

6.1.4 中子/离子通量全程连续记录，每 24h 记录一次监测数据。

6.2 剂量标定与 dpa 计算方法

6.2.1 封装内剂量片辐照后采用活化法测定中子积分通量，按 SRIM-Lindhard 模型计算铜监测材料实测平均 dpa。

6.2.2 试验报告中采用实测 dpa，不应仅填写设定目标 dpa。

6.3 辐照后试样拆解与去污预处理

6.3.1 辐照完成冷却至室温后，在热室内远程拆解密封包，检测表面放射性活度。

6.3.2 按 GB/T 4960.5 及核行业相关三废管理规范开展超声去污，去除表面放射性吸附杂质。

6.3.3 需二次机加工的试样仅在屏蔽热室内专用设备完成，加工废液、碎屑分类收集。

6.3.4 加工后再次清洗、烘干，转入对应测试工位。

7 辐照前基准性能测试方法

7.1 化学成分与含氧量测试

化学成分分析按 GB/T 5121 或 YS/T 482 的规定执行，氧含量测定按 YS/T 335 的规定执行。

7.2 拉伸试验

拉伸试验按 GB/T 228.1 的规定执行。

7.3 夏比冲击测试

夏比冲击测试按 GB/T 229 的规定执行。

7.4 导电性能测试

导电性能测试按 GB/T 35392 的规定执行。

7.5 金相晶粒度测试

晶粒度测定按 GB/T 6394 的规定执行，采用截线法测定平均晶粒度。

7.6 氢脆性能测试

氢脆试验测试按 GB/T 23606 的规则执行。

7.7 腐蚀试验

腐蚀试验按 EJ/T 20227.1 的规定执行。

8 辐照后性能测试方法

8.1 辐照后力学性能复测

8.1.1 拉伸测试、夏比冲击测试按 7.2、7.3 操作步骤重复测试。

8.1.2 计算强度上升率、塑性保留率、冲击功衰减幅度、DBTT 偏移温度。

8.2 辐照后导电、热物理性能复测

8.2.1 电导率、热导率测试方法、温度点与辐照前保持一致。

8.2.2 计算辐照后导电、热导率性能保留率。

8.3 辐照后微观组织表征

8.3.1 金相、SEM 观察晶粒、表面腐蚀形貌，统计晶粒尺寸变化。

8.3.2 EBSD 分析晶界取向、辐照诱导偏析。

8.3.3 TEM 观测空位团、位错环、辐照析出相，统计缺陷密度。

8.4 辐照后腐蚀、氢脆复测

8.4.1 腐蚀试验介质、温度、压力、时长与基准试样完全相同。

8.4.2 氢脆试验按 GB/T 23606 重复操作，对比辐照前后裂纹扩展程度。

9 试验报告编制要求

试验报告应包括：

- a) 报告编号、出具日期；
 - b) 试样来源、无氧铜牌号 TU00/TU0/TU1/TU2、熔炼批次、加工热处理状态；
 - c) 试样编号分组（基准组/辐照组）、取样取向、试样尺寸规格；
 - d) 辐照完整工艺：辐照源、辐照温度、气氛、实测 dpa、辐照时长；
 - e) 测试依据标准编号；
 - f) 试验环境、仪器型号、计量校准有效期；
 - g) 辐照前、辐照后原始数据、每组平均值、性能变化率；
 - h) 微观图谱、腐蚀形貌、TEM 缺陷附图（附报告附件）；
 - i) 综合测试结论：该无氧铜在给定辐照工况下的力学、导电、热、腐蚀劣化程度；
 - j) 异常说明、测量不确定度（按需）；
 - k) 试验人、审核人、批准人手签字；
 - l) 免责声明：报告仅对送检试样有效，未经许可不得拆分复制。
-