ICS  27.120.10

CCS F65

**T/CNS**

中国核学会团体标准

T/CNS XXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂高温固体氧化物电解制氢电堆系统性能要求与测试规范

Performance requirements and test specification for high-temperature solid oxide electrolysis hydrogen production stack systems in HTGR nuclear power plants

|  |
| --- |
| （征求意见稿） |
| 本稿完成日期：2025年7月 |

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX – XX 实施

中国核学会   发布

目  次

[目次 I](#_Toc201322499)

[前言 II](#_Toc201322500)

[1 适用范围 1](#_Toc201322501)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc201322502)

[3 术语和定义 1](#_Toc201322503)

[4 技术要求 3](#_Toc201322504)

[5 测试规范 7](#_Toc201322505)

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：清华大学核能与新能源技术研究院

本文件主要起草人：于波，张文强，李富

高温气冷堆核动力厂高温固体氧化物电解制氢电堆系统性能要求与测试规范

适用范围

本文件规定了高温气冷堆核动力厂高温固体氧化物电解制氢电堆系统的术语和定义、技术要求与测试规范。

本文件适用于高温气冷堆核动力厂高温固体氧化物电解制氢电堆系统的设计和测试。

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。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。

下列文件为本标准不可或缺的引用依据：

GB/T 34582-2017 固体氧化物燃料电池单电池和电池堆性能试验方法

术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。



高温气冷堆核动力厂高温固体氧化物电解制氢系统 HTGR nuclear power plant integrated HT-SOEC hydrogen production system

高温气冷堆通过热交换和供电系统向HT-SOEC电堆供应热能/电能的集成制氢系统。

核氢接口 nuclear-hydrogen interface

放射性隔离边界与介质交换的安全关键设备集成区。

热-电耦合系统 thermo-electric coupling system

热-电耦合系统指的是一个设计和控制系统，它负责将高温气冷堆产生的热能和电能以高效、协调的方式整合并输送到高温电解槽中，以满足其最佳运行需求。

高温固体氧化物电解池 high temperature solid oxide electrolysis cell（HT-HT-SOEC）

一种在高温下，将电能与热能转化为化学能的电化学装置。其核心功能是通过电解反应（如水蒸气电解）高效制取氢气（H₂）或合成气（H₂+CO）。

电解质 electrolyte

典型材料如氧化钇稳定氧化锆（YSZ, Yttria-Stabilized Zirconia），高温下传导氧离子的陶瓷材料，是HT-SOEC的核心组件。

阴极 cathode

典型组成如镍-氧化锆金属陶瓷（Ni-YSZ），电解反应中水蒸气被还原生成氢气的电极。

阳极 anode

典型组成如钙钛矿材料LSCF（Lanthanum Strontium Cobalt Ferrite），氧离子被氧化生成氧气的电极。

连接体 interconnect

典型组成如铬酸镧（LaCrO₃）或铁素体不锈钢，连接相邻单电池并分隔燃料与氧化剂的组件。

电堆 stack

多个单电池通过连接体（Interconnect）串联组成的电解装置，是用于规模化制氢的最基本单元。

电流密度 current density

单位电极面积通过的电流强度（A/cm²），衡量电解效率的关键参数。

热力学效率 thermodynamic efficiency

实际制氢能量与理论最小能量的比值。

电解效率 electrolytic efficiency

实际生成氢气所含化学能与输入电能的比值，以百分比表示。

开路电压 open circuit voltage（OCV）

在高温固体氧化物电解池处于开路状态（无电流通过）时，其正极与负极之间的电势差。

热中性电压 thermoneutral voltage

指电解过程中，输入的电能恰好满足水分解反应的总能量需求（包括焓变和熵变），使得系统处于热平衡状态的电压。

衰减率 degradation rate

电堆电解性能（如电压或效率）随时间下降的速度，通常以%/kh（每千小时百分比）衡量。

蒸汽转化率 steam conversion rate

通入HT-SOEC的蒸汽中，实际被电解生成氢气的那部分蒸汽所占的百分比。

热循环 thermal cycling

HT-SOEC电堆在运行过程中经历反复的温度变化过程，通常涉及系统启动（从室温升至高温）和停机（从高温冷却至室温）阶段。

技术要求

* 1. 设计边界

**4.1.1 总则**

高温固体氧化物电解（HT-SOEC）制氢电堆系统（以下简称"制氢系统"）的边界范围涵盖从高温气冷堆核动力厂（HTR-PM）的核氢接口开始，至氢气产品输出接口结束的完整制氢过程链，包括能量转换、电解反应、气体处理及系统控制等核心环节。

**4.1.2 物理边界**

4.1.2.1 核氢接口：高温气冷堆提供的高温蒸汽或氦气输入管道的法兰（或等效连接点）。

4.1.2.2 电解单元：HT-SOEC电堆及模块本体（含电解池片、密封结构、双极板等）。

4.1.2.3 气体处理单元：

1. 阴极侧（氢气侧）：氢气分离器、纯化装置、冷却器
2. 阳极侧（氧气侧）：氧气分离与排放装置

4.1.2.4 辅助系统：

1. 热管理系统（热交换器、保温层）
2. 电气系统（直流电源接口、电压/电流监控）
3. 控制系统（本地PLC/DCS控制柜）

4.1.2.5 输出接口：

1. 氢气出口管道法兰（含压力、温度、流量监测点）
2. 氧气排放管道接口
3. 循环水返回接口

**4.1.3 非包含范围**

4.1.3.1 核岛高温蒸汽供应系统（以核氢接口法兰为界）

4.1.3.2 热-电耦合系统

4.1.3.3 氦气循环回路及核级热交换设备

4.1.3.4 厂外氢气储存与运输设施

* 1. 结构与组成

**4.2.1 系统结构**

4.2.1.1 电化学反应单元

1. HT-SOEC电堆模块组（含单元电堆、电堆模块及附件）；
2. 电堆热区结构（支撑电堆和提供稳定性高温环境）；

4.2.1.2 介质输配单元

1. 高温蒸汽输入管路（温度≥700°C）；
2. 氢气/氧气混合气输出收集系统；

4.2.1.3 电气集成单元

1. 直流电源汇流排（耐受电压≥1.5 kV，电流密度≥0.5 A/cm²）；
2. 电堆分段控制继电器组（支持单模块隔离维护）；

4.2.1.4 热管理单元

1. 嵌入式换热流道（与反应堆氦气回路/高温蒸汽回路热耦合设计）；
2. 电堆启停阶段温度梯度控制装置。
   1. 基本要求

**4.3.1 电堆核心部件**

4.3.1.1 电解质: 必须具有高离子电导率、低电子电导率、在高温和还原/氧化气氛下的优异化学稳定性与致密性；

4.3.1.2 耐高温电极:

1. 阴极（氢电极）: 需承受强还原气氛，具备高催化活性将水蒸气还原为氢气；
2. 阳极（氧电极）: 需在强氧化气氛和高氧分压下稳定工作，具备高催化活性析出氧气；

4.3.1.3 金属连接体:

1. 导电性：连接单电池保证电流导通；
2. 抗氧化/腐蚀：在高温氧化气氛（阳极侧）和还原气氛（阴极侧）中长期稳定；
3. 热膨胀系数匹配：与陶瓷部件CTE接近，减少热应力；

4.3.1.4 高效密封:

1. 气密性：严格隔绝氢氧气体互串；
2. 热稳定性：在700°C以上长期保持密封性；
3. 化学兼容性：抵抗电池气氛腐蚀；
4. 热匹配性：CTE与连接体、电池组件匹配。常用玻璃/玻璃陶瓷或金属密封。

**4.3.2 系统热管理与热集成**

4.3.2.1 高温维持: 需保温与加热系统，减少热量损失；

4.3.2.2 高效热回收: 利用电堆高温尾气（氢气和氧气出口）预热进入电堆的水蒸气和空气/氧气。热回收效率直接影响系统总效率；

4.3.2.3 热应力控制: 优化结构设计和升温/降温速率，降低热冲击开裂风险；

4.3.2.4 热平衡设计: 电解过程系统热平衡（一般在热中性电压下运行），需精确控制输入电能与热能以维持稳定温度。

**4.3.3 反应气供应与管理**

4.3.2.1 高纯水蒸气供应: 水需高度净化去除污染物和有害离子（硫等）；

4.3.2.2 蒸汽/气体流量控制: 需精确控制气体成分（蒸汽/载气混合比例）、流量及分布；

4.3.2.3 露点温度控制: 严格控制水蒸气供给温度和露点，防止冷凝；

4.3.2.3 阳极气体管理: 供应干燥空气或氧气并收集排出的氧气。

**4.3.4 电力与电子控制**

4.3.4.1 稳定直流电源: 提供电解所需高压直流电；

4.3.4.2 先进控制策略: 管理电压、电流、温度、气体流量等运行参数，确保安全、高效、稳定运行；

4.3.4.4 系统集成: 需包含整流器、逆变器、应急管理系统等。

**4.3.5 制氢系统安全**

4.3.5.1 严格防气体互串: 密封失效可能导致爆炸，需多重保护设计和高灵敏气体泄漏检测；

4.3.5.2 高温防护: 隔离电堆防止接触烫伤，使用阻燃隔热材料；

4.3.5.3 紧急处置系统: 快速切断电源、吹扫系统、紧急泄压等安全程序。

4.3.5.4 氢气安全: 遵循氢气生产、处理、储存全流程安全标准。

**4.3.6 效率目标**

4.3.6.1 高电-氢转化效率: 充分利用高温提升动力学性能降低能耗（电解效率90%以上）；

4.3.6.2 高系统总效率: 需优化热管理（回收率＞60%）降低辅助能耗。

**4.3.7 耐用性与寿命**

4.3.7.1 长期稳定性: 目标使用寿命＞4万小时；

4.3.7.2 衰减率控制: 需缓解高温老化现象，控制性能衰减速度（< 0.5% 千小时衰减率）；

4.3.7.3 抗热循环能力: 具备可接受次数的开关机或温度波动耐受度。

**4.3.8 兼容性与成本**

4.3.8.1 核氢耦合: 适应不同的热电负荷；

4.3.8.2 规模化与成本: 需优化降低材料（尤其贵金属电极、连接体涂层）和制造成本；

4.3.8.3 维护友好: 设计需考虑可维护性减少停机时间。

* 1. 接口与附件

**4.4.1 热工接口**

4.4.1.1 热输入：氦气回路热交换器出口温度 750±25°C（需提供温度波动补偿方案）；

4.4.1.2 冷却输出：余热回收系统最低利用率≥85%；

**4.4.2 电气接口**

4.4.2.1 直流电源纹波系数≤3%；

4.4.2.2 电堆绝缘电阻（1000VDC测试）≥100 MΩ；

**4.4.3 安全隔离接口**

4.4.3.1 设置双阀组隔离系统（正常运行时冗余关闭，放射性物质渗透率≤10⁻⁶ g/s）。

* 1. 模块化设计要求

**4.5.1** 单电堆模块额定功率≥5 kW，模块组额定功率≥500kW，系统通过并联实现产能扩展；

**4.5.2** 模块组间设置物理分隔屏障（防止氢气交叉引燃）；

**4.5.3** 支持在线更换设计（单个单元模块拆卸不影响整体运行）。

* 1. 核能耦合安全适应性要求

**4.6.1 辐射防护设计**

4.6.1.1 电堆模块组外壁厚需满足γ射线屏蔽要求（剂量率≤2.5 μSv/h @ 1m）；

4.6.1.2 含氢管路布置在放射性控制区外，穿墙段采用多重密封套管；

**4.6.2 事故工况兼容性**

4.6.2.1 失冷事故（LOCA）下电堆自动泄压系统响应时间≤5 s；

4.6.2.2 地震载荷（SSE 0.3g）下结构变形量≤许用应变的50%．

测试规范

* 1. 基本检查

**5.1.1 标识检查**

检查HT-SOEC电堆模块的说明书或设计文件，标签内容是否完整清晰；

**5.1.2 外观检查**

采用目测法检查SEOC电堆模块外观结构是否完好，有无无变形、裂缝等；

**5.1.3 接口气密性检查**

应对接口的密封性进行检测，检查所有气/电接口有无泄漏；

**5.1.4 绝缘电阻检查**

HT-SOEC电堆模块设置电气接口应符合说明书要求，满足安装运行与检修维护的需要，电气绝缘性能应符合要求，采用兆欧表测试，绝缘电阻≥100 MΩ（500 V DC）；

**5.1.5 接地电阻检查**

HT-SOEC电堆模块在测试前应进行接地检查，模块系统的接地电阻应小于 4 Ω。

* 1. 性能测试

**5.2.1 基本要求**

以下所述的HT-SOEC电堆模块的性能测试应在制氢系统集成之前完成。

**5.2.2 气密性测试**

HT-SOEC电堆模块在进入制氢系统区域之前，需要进行气密性测试，测试方法应按照GB/T 34582-2017的要求执行。

**5.2.3 电流-电压特性测试**

5.2.2.1 测试目的

测定电堆在不同电流密度下的工作电压特性，绘制I-V曲线，评估电堆的欧姆极化、活化极化和浓差极化特性。

5.2.2.2 测试设备

1. 可编程直流电源（精度±0.5% FS）；
2. 高精度电压/电流数据采集仪（采样频率≥1 Hz）；
3. 温度/压力监测传感器 ；
4. 恒温蒸汽供给系统（波动≤±2℃）。

5.2.2.3 测试步骤

1. 维持电堆温度稳定在设定值（如750℃），蒸汽流量恒定（例：1.2 NL/min·cell）；
2. 以阶梯方式递增电流密度（步长≤100 mA/cm²，每步稳定时间≥5 min）；
3. 同步记录各电流点对应的电堆电压、单电池电压分布、温度及压力。

5.2.2.4 评价指标

1. 绘制电流密度-电压曲线（I-V曲线）及功率密度曲线；
2. 计算平均单电池电压偏差（标准偏差≤5%）；
3. 极化损失分析：拟合曲线得到欧姆电阻（RΩ）及塔菲尔斜率。

**5.2.4 蒸汽利用率测试**

5.2.3.1 测试目的

验证电解过程中蒸汽向氢气的转化效率，优化蒸汽供给策略。

5.2.3.2 关键参数

蒸汽利用率（ηH2O）= 实际产氢量 / 理论产氢量（法拉第效率基准）×100%

5.2.3.3 测试步骤

1. 设定恒定电流密度（如0.5 A/cm²），稳定运行30 min；
2. 测量入口蒸汽流量及出口氢气流量；
3. 使用露点仪分析出口气体水含量，计算未反应蒸汽量。

5.2.3.4 性能要求：

额定工况下ηH2O ≥85%

**5.2.5 额定电解功率测试**

5.2.4.1 测试目的

验证电堆在标称电解功率下的持续运行能力及稳定性。

5.2.4.2 测试条件

1. 环境温度：25±5℃，相对湿度≤60% ；
2. 运行参数：热中性电压下、额定温度、额定蒸汽流量、额定电流密度（例：1.0 A/cm²）。

5.2.4.3 测试流程

1. 升温至额定工况后加载额定电流，持续运行≥24 h。
2. 每30 min记录电堆总电压、电流、产氢量、温度分布。
3. 监测电压衰减率（每小时电压上升值）。

5.2.4.4 性能要求

1. 电压波动范围：≤±5% 标称值；
2. 产氢量偏差：≥95% 理论值（基于法拉第定律）；
3. 衰减率：≤0.5%/1 000h

**5.2.6 热循环性能测试**

5.2.5.1 测试目的：评估HT-SOEC制氢模块在反复升/降温过程中的结构稳定性与性能衰减特性。

5.2.5.2 测试方法：

1. 温度范围：室温（25℃）↔ 目标运行温度（650-800℃）；
2. 升温/降温速率：≤5℃/min（典型值）；
3. 保温时间：高温端≥30 min，低温端≥10 min；
4. 循环次数：≥50次（或至性能衰减≥10%）；
5. 记录每次循环结束后的额定电流密度（如0.5A/cm²）下的工作电压；
6. 监测电堆内阻（EIS）、气体泄漏率及外观形貌变化。

5.2.5.3 判定标准：

1. 电压衰减率＜5%/100次循环；
2. 无密封失效、电池片开裂或连接体氧化等结构性损伤。

**5.2.7 热动态响应测试**

5.2.6.1 温度阶跃： 700°C → 800°C（升/降温速率 50°C/min）；

5.2.6.2 要求：输出电压波动 ≤±7%，温度均匀性 ΔT≤30°C 。

* 1. 核氢耦合安全测试

**5.3.1 放射性隔离验证**

5.3.1.1 双阀组泄漏率测试：阀间注入 He/N₂混合气（代替放射性示踪剂） ，质谱仪检测制氢侧泄漏率 ≤1×10⁻⁶ mbar·L/s·m ；

5.3.1.2 事故压力测试：模拟LOCA边界条件（压力 2.0 MPa → 0.5 MPa 骤降），电堆结构无塑性变形，密封件泄漏率仍满足要求。

**5.3.2 抗震测试**

按IEC60068-3-3标准（非核岛级）：频率范围 5–35 Hz，加速度 0.15g（制氢厂房设计值）， 测试后氢气泄漏率 ≤标准值120% 。

* 1. 核氢耦合接口专项测试

**5.4.1 热工接口兼容性**

5.4.1.1 输入热功率阶跃（±20%额定值），电堆蒸汽流量调节响应时间 ≤60 s ；

5.4.1.2 热交换器出口温度超限（＞800°C）时，电堆自动降功率速率 ≥10%/s 。

**5.4.2 电气接口抗扰度**

5.4.2.1 模拟反应堆电网波动：电压暂降 ±15%，频率偏移 ±2 Hz ；

5.4.2.2 电堆直流电源输出纹波 ≤5%，无保护性关机 。

* 1. 核衍生要求

**5.5.1 材料预认证：**

电堆接触氦气的部件需提供抗辐照脆化证书（中子注量率 ≤10¹³ n/cm²·s）；

**5.5.2 接口文件：**

测试报告需声明所用参数与反应堆设计值的偏差范围（如温度允差 ±25°C）。

* 1. 豁免条款

以下测试无需在核设施内进行：电堆性能/稳定性测试；抗震试验（按独立厂房等级）。

参考文献

［1］GB/T 24499-2009 氢气、氢能与氢能系统术语

［2］GB/T 19774-2005 水电解制氢系统技术要求