ICS 点击此处添加ICS号

CCS点击此处添加中国标准文献分类号

**T/CNS**

中国核学会团体标准

T/CNSXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂

控制棒驱动机构电气绝缘系统热评定规程

Thermal evaluation and classification procedures for insulation system of control rod drive mechanism of high temperature gascooled reactor nuclear power plant

|  |
| --- |
| （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

[前言 II](#_Toc20221)

[1 范围 1](#_Toc23107)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc12082)

[3 术语和定义 1](#_Toc25552)

[4 样品描述 2](#_Toc18695)

[4.1 试品制作要求 2](#_Toc11108)

[4.2 实际运行条件及要求 3](#_Toc21568)

[5 试验要求 3](#_Toc26819)

[5.1 概述 3](#_Toc16676)

[5.2 加速模型的选择 3](#_Toc27825)

[5.3 试验温度水平和分周期时间 3](#_Toc10411)

[5.4 试验样本的选取和分组 4](#_Toc25289)

[5.5 诊断试验 4](#_Toc11390)

[5.6 故障判据和试验停止时间 4](#_Toc24736)

[6 试验程序 4](#_Toc25639)

[6.1 氦气氛围相容性测试 4](#_Toc16060)

[6.2 质量保证试验 5](#_Toc28846)

[6.3 热失重分析试验 5](#_Toc566)

[6.4 初始诊断试验 5](#_Toc21043)

[6.5 辐照试验 5](#_Toc9329)

[6.6 摸底试验 5](#_Toc14150)

[6.7 热老化分周期试验 5](#_Toc12688)

[6.8 诊断分周期 6](#_Toc31752)

[6.9 数据处理 6](#_Toc15246)

[7 试验报告 6](#_Toc32609)

[参考文献 7](#_Toc20262)

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，中核能源科技有限公司，上海电器设备检测所有限公司。

本文件主要起草人：

高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构电气绝缘系统热评定规程

1. 范围

本文件规定了球床式高温气冷堆（以下简称：高温气冷堆）核动力厂控制棒驱动机构电气绝缘系统（EIS）热评定的技术要求。

本文件适用于高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构电气绝缘系统（EIS）热评定。

1. 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 11021-2014 电气绝缘 耐热性分级

GBT 20111.1-2015 电气绝缘系统 热评定规程 第1部分：通用要求 低压

GB/T 17948.1-2018 旋转电机 绝缘结构功能性评定 散绕绕组试验规程 热评定与分级

GB/T 20112-2015 电气绝缘系统的评定与鉴别

GB/T 11026.3-2017 电气绝缘材料 耐热性第3部分:计算耐热特征参数的规程

GB/T 755-2019 旋转电机 定额和性能

GB/T 36044-2018 核电厂安全重要电气设备鉴定规程

JB/T 1544-2015 电气绝缘浸渍漆和漆布快速热老化试验方法一热重点斜法

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。



控制棒驱动机构 control rod drive mechanism

在控制系统指令下，通过电机驱动控制棒实现对反应堆反应性控制的机电装置，实现反应堆的启动、功率调节、功率保持、正常停堆和事故停堆。

注：包括机械部件（含承压壳、主减速器、环链机构、磁阻尼器、碟簧减震器等）和电气部件（含电气贯穿件、电机、限位装置、棒位指示器等）。



电气绝缘系统 electrical insulation system;EIS

用于电气设备的与导电部分结合在一起的含有一种或多种电气绝缘材料(EIM)的绝缘组合。

[来源：GB/T 20112-2015]

注：控制棒驱动结构电气绝缘系统主要包括电机绕组、棒位指示器线圈。

电机绕组

控制棒驱动机构电机是控制棒驱动机构的动力源，电机绕组采用I型散绕绕组结构。

注：电机绕组绝缘系统包括：电磁线圈、槽绝缘、浸漆。

棒位指示器线圈

控制棒驱动机构棒位指示器采用旋转变压器将控制棒的直线运动转换为旋转角度实现棒位测量。

注：棒位指示器采用无刷绕线式旋转变压器将控制棒的直线运动转换为角度进行测量，旋转变压器线圈绝缘系统包括：电磁线、槽绝缘、浸漆、定转子骨架等。



耐热等级 thermal class

EIS相对应的最高连续使用温度(摄氏温度)的数值。

[来源：GB/T 11021-2014]



基准 EIS reference EIS

以已知运行经验的记录或已公认对比功能性评定为基础进行评定并确定了的EIS。

[来源：GB/T 11021-2014]



待评 EIS candidate EIS

正在评定中的为确定其耐热能力的EIS。

[来源：GB/T 11021-2014]

1. 样品描述
   1. 试品制作要求
      1. 试品可以是实际产品、产品组件或模型。
      2. 使用实际产品或产品组件作为试品应考虑电机的经济性或/和尺寸大小，可适当减小槽部长度，但需要考虑线圈的实际间隙和爬电距离。
      3. 试验模型应包含所有用于被模拟绕组的基本组件且应极其相似，应使用与预期最大额定电压、设备标准或实际情况相适应的绝缘厚度、爬电距离和放电保护（必要时），按照产品设计图纸的要求1：1比例或等比例缩小制作模型线圈，保证物料、工艺等与实际生产一致。
      4. 试样数量应符合5.5要求，应采用相同的工艺进行制备以保证良好的一致性和均匀性。
      5. 基准 EIS 和待评 EIS应采用相同的试品。

注：试品制作时应考虑在机械振动试验时的安装便捷性，例如方便用压板固定。

* 1. 实际运行条件及要求

高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构实际运行条件及要求如下：

1. 工作环境为氦气环境。
2. 辐照剂量要求：8.4×10^5 Gy。
3. 对于工作中存在温升的绝缘系统，如电机绕组，耐热等级不低于200℃。
4. 对于工作中无明显发热温升的绝缘系统，如棒位指示器线圈，耐热等级不低于180℃。
5. 试验要求
   1. 概述

应采用与待评绝缘结构相同的规程对GB/T 17948.7-2016中4.3所述的基准绝缘结构进行测试。

每个热老化试验通常由一系列的周期组成,每个周期包含热老化分周期及随后的诊断分周期。

* 1. 加速模型的选择

加速老化试验对一定数量的样品在明显高于正常工作温度的几个温度水平下进行试验。在高温应力下，样品通常可以在一周到一年的时间内失效。试验目标是根据寿命数据得到寿命中值和温度关系式，并通过外推估计在工作温度下的寿命中值。

高温老化试验通常使用阿伦纽斯（Arrhenius）模型，绝缘寿命温度与温度的关系式如下:

（1）

式中：

*L*—寿命特征；

*A*—常数；

*E*—激活能，与材料有关，单位为eV；

*K*—玻尔兹曼常数，为8.617×10^(-5)eV/k。

*T*—绝对温度，单位为K。

* 1. 试验温度水平和分周期时间
     1. 热老化试验建议至少在3个温度水平进行。
     2. 加速寿命试验中最低温度应力的外推值一般不得高于预计的耐热等级的25K，最高试验应力温度设置需保证失效原理不变，相邻2个老化温度的间隔为20K或以上，当用多于四个老化温度点进行试验时，可采用少于20K的温差间隔。
     3. 选择的最低老化温度应至少得到5000h的平均寿命,最高温度应至少得到100h的平均寿命。
     4. 也可通过JB/T 1544-2015的热失重曲线计算活化能和摸底试验相结合的方式提高试验温度点的估算精度。
     5. 应参考GB/T 17948.1-2018的表2确定不同温度应力水平及的分周期时间，建议正确选择每个老化温度的分周期长度以产生约10个周期的平均寿命。根据试样破坏速度适当修改曝露周期，如至第5个周期还有一半以上试样未破坏则可把曝露周期时间加倍，如在第3周期内已有1/3试样破坏，则应把曝露周期时间减半。
     6. 若待评绝缘结构预期的耐热等级与基准绝缘结构的已知耐热等级不同,则应以适当方式选择不同的老化温度与老化分周期时间。
  2. 试验样本的选取和分组

当试品为产品整机时，在每一老化温度的一组试品数量应至少有5个；当试品为产品组件或模型时，在每一老化温度的一组试品数量应至少有10个，另外还应准备1组试品，经辐照后与所选择的最高老化温度点的一组试品同时进行老化试验。

* 1. 诊断试验

诊断试验分为振动试验和耐电压试验，试验要求如下：

1. 机械应力试验要求：试验在振动台上进行，振幅为峰—峰0.3 mm，频率50 Hz。该量值对应大约1.5 g的加速度（15 m/s2），持续1 h；

b. 耐电压试验应按照表2的参数进行。

表1 试验电压

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 运行额定电压  V | 建议的工频试验电压（r.m.s）  V | | |
| 对地 | 线圈间 | 导体间a |
| ≤400 | 400 | 400 | 110 |
| 401~690 | 690 | 690 | 110 |
| ＞690 | 2*U*N | 2*U*N | 110 |
| 1. 允许电压范围；然而，使用的电压值应保持一致。 | | | |

* 1. 故障判据和试验停止时间
     1. 故障判据是：匝间、对地、相间工频耐电压试验，以样品在耐电压试验时是否击穿作为判定样品失效的依据。
     2. 试验过程中，试验样品由于非老化因子引起的失效均不计入失效数内。
     3. 实际试验过程中可能会遇到低应力水平下试验时间过长的情况，所以最高应力水平的寿命试验做到全部失效，对其他应力水平下的样本可做截尾寿命试验。一般要求每组试验的截尾数占该组投试样本数的50%以上，即10个样品中至少失效6个。

1. 试验程序
   1. 氦气氛围相容性测试
      1. 鉴于氦气高渗透性，要求绝缘系统中不存在密闭空腔，在真空及9.0MPa氦气氛围下不损坏。
      2. 鉴于低压氦气的击穿电压显著降低，要求绕组线圈需针对真空及低压氦气下做防止局部放电的设计。
      3. 鉴于评定试验主要在空气氛围中开展，要求按6.3节所述开展氦气和真空环境下的热失重对比实验，验证空气环境试验的保守性。
   2. 质量保证试验

在制备试样前，应对拟用于制备试样的每种绝缘材料单独进行测试以确定其一致性。

观察外观无影响性能的损伤后可参考GB/T 755-2019中9.2的耐电压试验要求对样品进行筛选，并剔除有缺陷样品。

* 1. 热失重分析试验

在氦气无氧条件下，温度是导致电气绝缘系统中有机材料的主要老化因素。按照标准JB/T 1544-2015的要求在取样线圈上取粉末样品以3℃/min的升温速率分别在空气下和氦气下进行试验，分析绝缘的活化能，以及验证空气环境试验的保守性。

* 1. 初始诊断试验

初始诊断试验按下列顺序进行：机械应力试验——电气性能诊断试验。

1. 机械应力试验根据5.4要求进行。

b. 电气性能诊断试验：按照表1的参数进行试验，试样不发生击穿或闪络即合格。若试样任一部位连续两个周期击穿则为失效。

* 1. 辐照试验

样品利用辐照装置进行核辐照老化，要求按寿命期内累积辐照剂量8.4×10^5Gy进行耐辐照评定。辐照完成后按照表1进行电气性能检测，通过后与最高老化温度点的一组试品同时进行热老化试验，用以比较未经辐照和辐照后的试品热老化寿命的差异。

* 1. 摸底试验

试样在选定的老化温度下进行热老化试验之前，宜先对少量试样(1~2件)进行极端老化以明确诊断试验确定试验寿命的终点是有效的。老化温度应选择在48h内能终止寿命。一般老化温度至少比预期等级温度高100K。老化后的试样应执行预定的诊断规程,以确信在特定实验室以特定试品执行该规程时能够发现热降解。对于已知热分解温度的材料，极端老化温度建议比绝缘的热分解温度低15℃以上。

极端老化的结果应不作为热老化的数据。

* 1. 热老化分周期试验
     1. 热老化温度和分周期长度

应遵循5.2要求选择热老化温度和分周期长度。

* + 1. 加热方式

根据GB/T 17948.1-2016中5.3和GB/T 20111.1-2015的6.3.4要求使用老化烘箱，将试品置于一个精确控制和监测的且具有强制通风循环烘箱中进行热老化。整个烘箱的温度应满足:老化温度在180 ℃及以下时,温度偏差在士2 K以内;老化温度在180 ℃~300 ℃之间时,温度偏差在士3 K以内。若老化温度超过300 ℃,应另外商定要求的温度精度。

* + 1. 老化规程

在热老化周期开始时试品应直接放入预加热的老化烘箱,在老化周期结束时试品应从烘箱中取出直接置于室温。为了降低各试品之间在实际老化温度时有差异所造成的影响,在连续的热老化周期时试品应随机置放在老化烘箱中。

* 1. 诊断分周期

按照6.4规定的方法进行。

* 1. 数据处理

参考GB/T 11026.3-2017和GB/T 20111.1-2015的第7章中规定的方法进行热评定。

1. 试验报告

试验报告宜包括：

——引用的标准；

——被试EIS（基准EIS和待评EIS）的描述；

——每种EIS的老化温度和老化分周期时间；

——每种EIS采用的诊断试验，包括施加的测试或应力水平；

——试品的描述；

——每种EIS在每一老化温度下的试样数量；

——每个试样的失效时间和失效模式（对地、相间、匝间）；

——热老化曲线图；

——辐照样品与未辐照样品高温点失效时间数据；

——基准EIS的耐热等级（若有）；

——待评EIS的耐热等级。

参 考 文 献

[1] HAF 003 核电厂质量保证安全规定

[2] HAD 003/03 核电厂物项和服务采购中的质量保证

[3] HAD 003/08 核电厂物项制造中的质量保证

[4] GB/T 36044-2018 核电厂安全重要电气设备鉴定规程

[5] GB/T 12727 核电厂安全级电气设备鉴定

[6] T/CNS 25-2020 高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构设计准则