ICS 27.120.20

CCS F 65

中国核学会   发布

中国核学会团体标准

T/CNS XXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂反应堆压力容器与堆芯壳辐照监督设备设计与制造要求

Technical code for design and manufacture requirement of irradiation surveillance equipment of reactor pressure vessel and core barrel for high-temperature gas-cooled reactor nuclear power plants

|  |
| --- |
| 报批稿 |
| （本稿完成日期：） |

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX – XX 实施

T/CNS

目  次

[前  言 II](#_Toc1171380132)

[1 范围 3](#_Toc1403286475)

[2 规范性引用文件 3](#_Toc1370373971)

[3 术语和定义 3](#_Toc113216522)

[4 反应堆压力容器与堆芯壳的辐照监督设计 4](#_Toc159574012)

[5 反应堆压力容器和堆芯壳辐照监督设备的供货要求 11](#_Toc1900828228)

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。

本文件主要起草人员：张征明、孙立斌、张易阳、傅激扬。

高温气冷堆核动力厂反应堆压力容器与堆芯壳辐照监督设备设计与制造要求

1. 范围

高温气冷堆的设计与传统的压水堆相比较，除了反应堆压力容器需进行辐照监督外，位于反应堆压力容器内侧的堆芯壳也需要进行辐照监督。反应堆压力容器和堆芯壳所受到的辐照剂量、监督管放置位置、监督管的放入和取出方式等因素，也与压水堆有很大的不同。

本文件适用于高温气冷堆核电厂反应堆压力容器与堆芯壳辐照监督设备的设计与制造，规定了辐照监督设备供货商所需的设计输入条件、设计要求、设备供货的最低要求。

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。

ASTM E 185-82, Standard Practice for Conducting Surveillance Tests for Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels

NB∕T20220-2013 轻水冷却反应堆压力容器辐照监督

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。



辐照监督 irradiation surveillance

对铁素体材料在辐照环境下的机械性能进行监测与评估。

监督管 surveillance capsule

置于反应堆压力容器内规定位置并在规定时间取出的密封管（对于高温气冷堆可以是非密封管），其中放置铁素体材料力学性能检测试样、中子剂量计和温度监测计，并充有适当压力的惰性气体。

中子剂量 neutron dose

中子辐射在单位质量的物质中所沉积的能量。

超前因子 lead factor

监督管内试样的中子注量(E>1.0 MeV)峰值与反应堆压力容器内表面中子注量(E>1.0 MeV)峰值之比。

1. 反应堆压力容器与堆芯壳的辐照监督设计
   1. 反应堆压力容器的辐照监督设计

反应堆压力容器的主体由反应堆压力容器顶盖和反应堆压力容器筒体两大件组成，如图1所示。在反应堆压力容器的顶盖上，布置有8个辐照监督管嘴，但其中2个管嘴用于堆芯支承结构温度测量，实际用于材料辐照监督的管嘴为6个。每个管嘴对应1个辐照监督通道，辐照监督管嘴的结构如图2所示。

反应堆压力容器受辐照剂量最大的部位是上筒体段（堆芯环带区），材质为SA508-3-1钢锻件。该段材料的化学成分及力学性能要求应取自反应堆压力容器制造阶段的技术条件。

反应堆压力容器的制造厂将为每台容器制备一块专门的辐照监督试板，该段材料的具体信息应取自反应堆压力容器制造阶段的设备规格书。

在反应堆压力容器筒体下部的加厚段内壁，布置有15个堆芯壳支承座，堆芯壳即坐落在其上。



图 1 反应堆压力容器结构示意图



图 2 辐照监督管嘴结构示意图

* 1. 堆芯壳的辐照监督设计

高温气冷堆反应堆本体结构如图3所示，堆芯壳是一个分节直圆筒结构，堆芯壳筒身材料的化学成分及力学性能要求应取自堆芯壳制造阶段的技术条件。



图 3 堆本体结构示意图

金属材料辐照管用于为反应堆压力容器筒身、堆芯壳筒身材料进行辐照监督，金属材料辐照管上端喇叭口引导材料辐照样品罐从反应堆压力容器顶盖放入到堆芯支承结构活性区位置。有两根材料辐照管还用于放置热电偶组件。材料辐照管的具体布置应取自堆芯壳的设计图册。

堆芯壳制造厂为每个堆芯壳制备一块专门的辐照监督材料，，该段材料的具体信息应取自堆芯壳制造阶段的设备规格书。

* 1. 辐照监督通道的设计

在反应堆压力容器顶盖上共有6个辐照监督管嘴用于放置辐照监督管，管嘴下部有对应的辐照监督通道，通道中的管子均按国家标准选取和制造。

每个通道内的监督管需分为多段，各个监督管之间需采用柔性连接，形成一个监督管串。在反应堆压力容器安装完毕后，将监督管串从辐照监督管嘴处插入反应堆，最终采取吊挂的方式固定在反应堆压力容器顶盖上辐照监督管嘴的端盖内侧。若要取出监督管，需在反应堆压力容器的在役检查期间，待一回路系统降温降压后，打开辐照监督管嘴的端盖，将监督管串从反应堆中抽出。

为使监督管顺利通过辐照监督通道的管嘴、辐照监督通道，需对一个监督管的外形尺寸进行限制，两个监督管之间的连接结构应具备足够的柔性，以适应反应堆压力容器顶盖上辐照监督管嘴、辐照监督通道在制造、安装和运行期间的偏差和变形。

* 1. 反应堆压力容器和堆芯壳的辐照剂量分布和温度分布

辐照剂量分布

反应堆压力容器内壁、堆芯壳内壁和材料辐照管内部的中子辐照（E>1.0MeV）剂量数据及峰值位置见表1，其分布见图4。

表 1 反应堆压力容器内壁和堆芯壳内壁的辐照剂量

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 单位 | 压力容器内壁 | 堆芯壳内壁 |
| 寿期末最大中子剂量 | n/cm2 | 4.42E17 | 8.30 E17 |
| 峰值位置 | cm | 1038.5 | 1023.5 |

注：峰值位置为轴向位置，坐标0点见图3。

按照《轻水冷却反应堆压力容器辐照监督》（NB/T 20220-2013）超前因子定义，可知反应堆压力容器辐照监督材料的超前因子约为1.8，堆芯壳辐照监督材料的超前因子约为1。

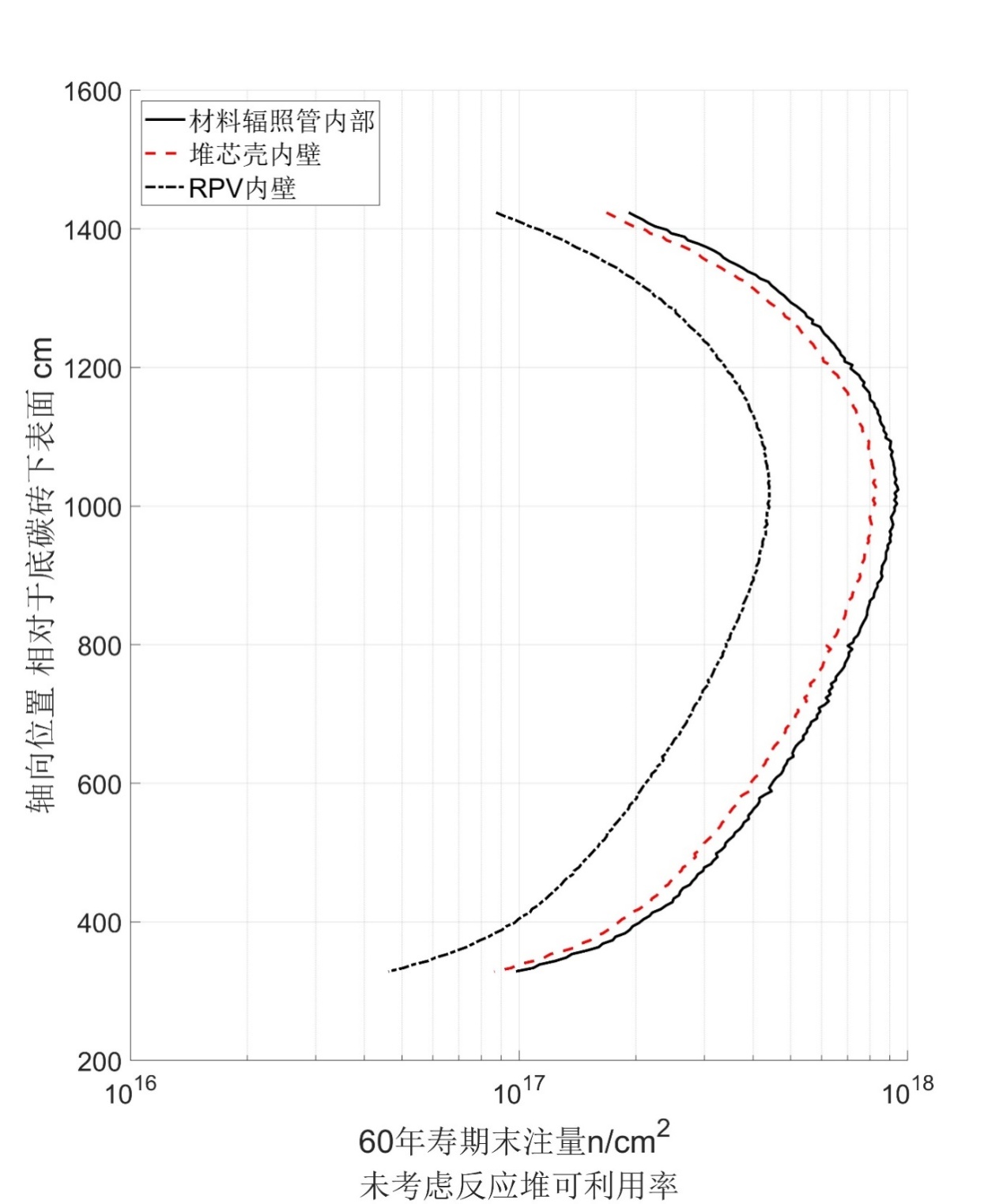


图 4 材料辐照管内部、反应堆压力容器内壁及堆芯壳内壁沿轴向的辐照剂量分布

温度沿轴向分布

正常运行工况下反应堆压力容器内壁和堆芯壳内壁沿轴向的温度分布见图5，材料辐照管内部、堆芯壳内壁、碳砖外表面沿轴向的温度分布见图6。堆芯壳内壁三个参考点处的辐照剂量和温度数量见表2。

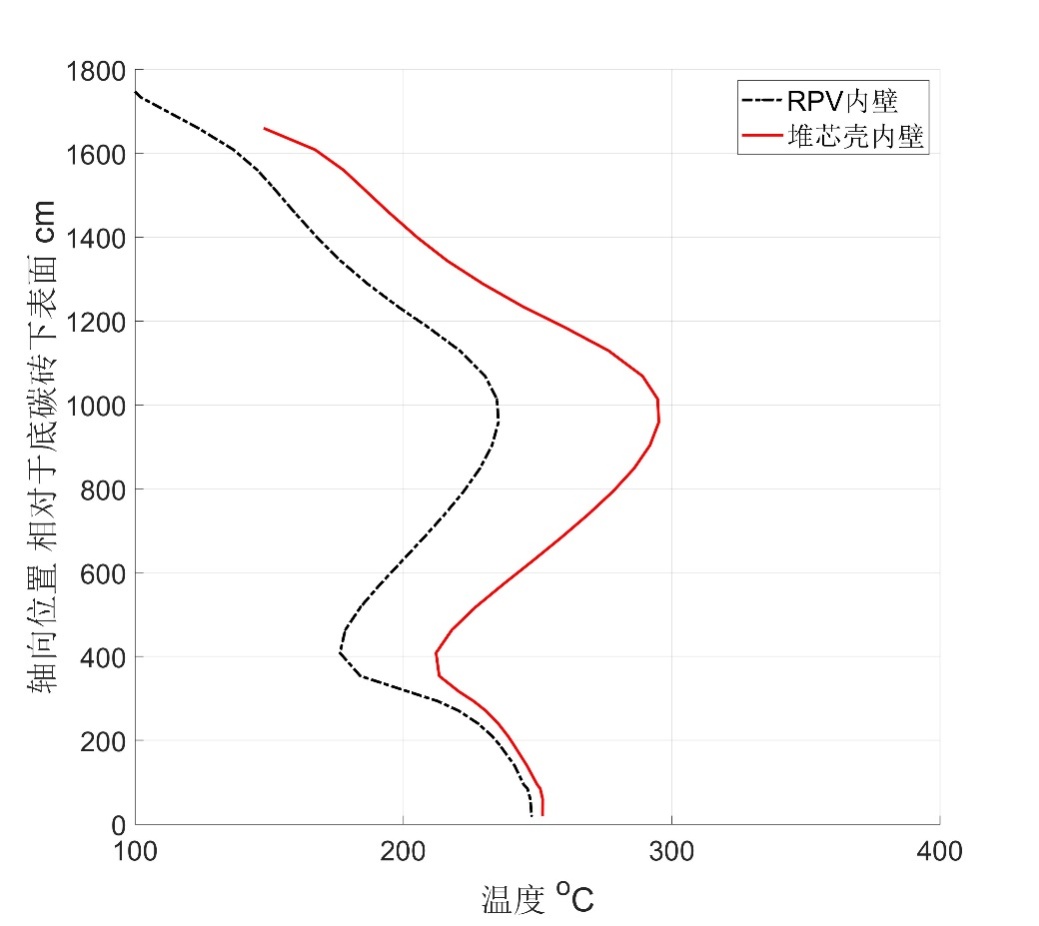


图 5 正常运行工况下反应堆压力容器内壁和堆芯壳内壁沿轴向的温度分布

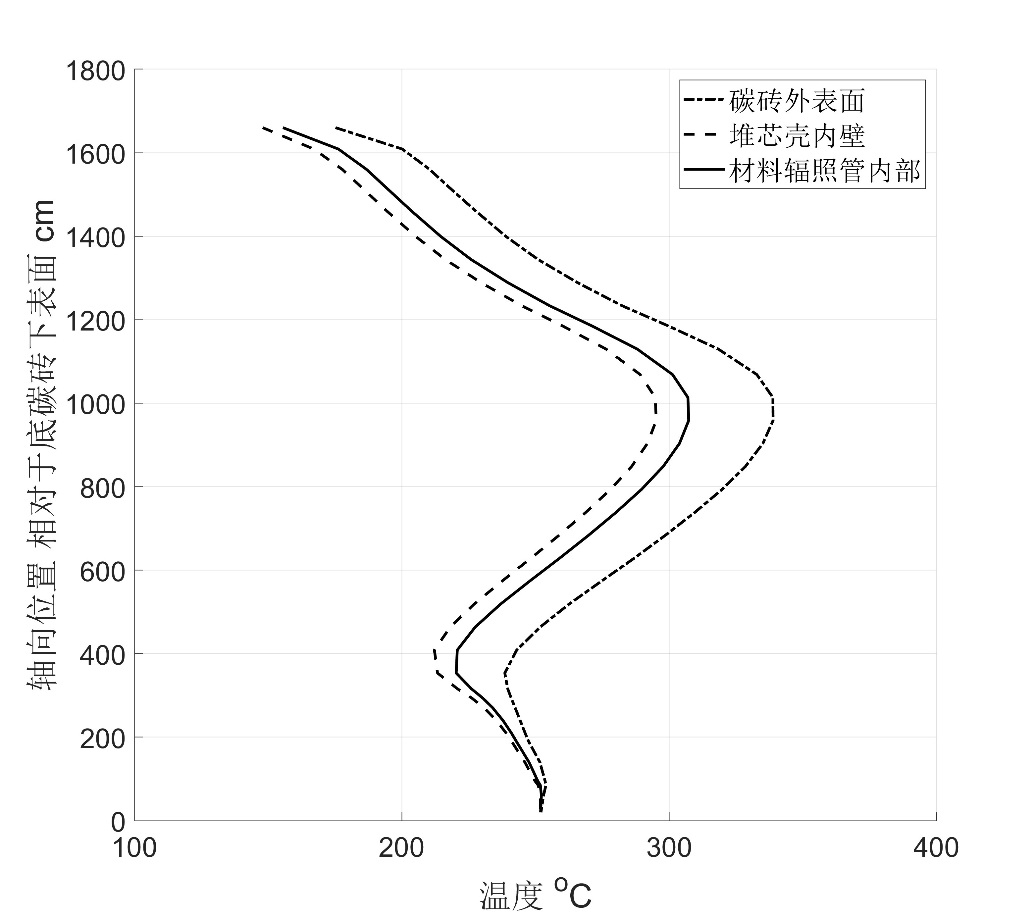


图 6 正常运行工况下材料辐照管内部、堆芯壳内壁、碳砖外表面沿轴向的温度分布

表 2 堆芯壳内壁的快中子剂量和温度数值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 轴向位置cm | 位置描述 | 寿期末剂量 n/cm2 (E>1.0 MeV)  （考虑反应堆可利用率0.9） | 正常运行工况下堆芯壳内表面温度 ℃ |
| 1023.5 | 堆芯壳内壁最大快中子剂量 | 8.30 E17 | 294 |
| 1423.5 | 辐照监督管中可能的胶囊上端 | 1.68 E17 | 201 |
| 243 | 辐照监督管下端 | 8.64 E16 | 235 |

注：轴向位置的坐标0点见图3。

1. 反应堆压力容器和堆芯壳辐照监督设备的供货要求
   1. 辐照监督设备的总体设计参数
2. 安全等级 非安全级
3. 质保等级 NC+
4. 抗震类别 非抗震类
5. 工作压力 7.0MPa（绝对压力）
6. 设计压力 8.0MPa（表压）
7. 工作介质 氦气
8. 反应堆寿命 60年
   1. 标准适用性论证

目前只有针对压水堆核电站的辐照监督技术标准，主要包括以下两个：

1. ASTM E 185-82, Standard Practice for Conducting Surveillance Tests for Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels（考虑到反应堆压力容器和堆芯壳的设计寿命均为60年，因此需参考ASTM E 185-02版）
2. NB∕T20220-2013 轻水冷却反应堆压力容器辐照监督

高温气冷堆辐照监督的实施需参照以上标准，在与上述标准不矛盾的前提下，必要时可以参考其它相关规范。

* 1. 辐照监督设备的设计和制造要求

考虑到全寿期的监督需求，每条通道均应放置反应堆压力容器辐照监督试样，视情况选择若干通道放置堆芯壳辐照监督试样。

需在反应堆压力容器和堆芯壳的辐照监督设计的基础上，开展以下几方面的工作：

监督管(Surveillance Capsule)的设计和制造

监督管置于辐照监督通道内，其中放置材料的力学性能监测试样、中子剂量计和温度监测计。由于辐照监督通道的内径及路径已经确定，因此监督管的外径和长度都受到限制。在一个通道内，可以放置一串链接起来的监督管。由于高温气冷堆一回路介质为惰性气体，因此监督管可不必密封，也不必承压。

监督管的设计中，应考虑监督管抽取时对试样进行保护，因此供货商仍应考虑是否需要对监督管进行密封。若需进行密封，供货商应明确密封时监督管内封装气体的类型和封装内压数值，并论证（有限元分析或/和试验验证）辐照监督管在密封内压和环境外压分别和共同作用下，不会发生结构破坏。

辐照监督通道应考虑进行通过试验，供货商应提前制造监督管串的模拟件，提供给辐照监督通道的制造厂，由制造厂进行通过试验，以确保监督管能够顺利通过监督通道。

监督试样的设计和制造

监督试样的类型为夏比（V型缺口）冲击试样、拉伸试样和作为补充试验的断裂韧性试样。需根据辐照监督通道及监督管的具体情况确定试样的取样、数量、形状、尺寸、制备及试验等方面的具体要求。

中子剂量计(Neutron Dosimeter)和温度监测计(Temperature Monitor)的设计和制造

应根据监督管的具体结构状况设计并制造中子剂量计和温度监测计。

参比监测试样(Correlation Monitor)的设计和制造

应根据监督管的具体结构状况设计并制造参比监测试样。

### 5.4 辐照监督相关文件的编制要求

应根据高温气冷堆的具体情况编制辐照监督大纲、辐照监督计划等相关文件，并协助委托方与核安全审评当局进行对话，直至辐照监督的实施方案得到审评当局的认可。

### 5.5 实施辐照监督的技术准备要求。

应对辐照监督实施过程中所涉及到的技术问题进行考察，如监督管的制造、试样的制备、中子剂量计和温度监测计的制备、参比监测试样的制备、（带剂量的）监督管的运输和保管、试验设备的功能等。如果需要，应根据高温气冷堆辐照监督的具体情况进行相应的准备或调整。