

团 体 标 准

T/CNS 45—2020

高温气冷堆核动力厂 陶瓷堆芯支承结构设计准则

Design criteria for the ceramic core support structures of high temperature
gas-cooled reactor power plant

2020-12-31 发布

2021-04-01 实施

中 国 核 学 会 发 布

中国核学会
团体标准
高温气冷堆核动力厂
陶瓷堆芯支承结构设计准则

T/CNS 45—2020

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 0.75 字数 22 千字
2021年8月第一版 2021年8月第一次印刷

*

书号: 155066·5-3467 定价 16.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107

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：史力、孙立斌。

高温气冷堆核动力厂 陶瓷堆芯支承结构设计准则

1 范围

本文件规定了球床模块式高温气冷堆(简称高温气冷堆)核动力厂石墨堆芯支承结构及碳堆芯支承结构在设计时的安全分级和质量等级、功能要求、材料、设计、结构设计、制造与安装、与其他结构的接口等。

本文件适用于高温气冷堆陶瓷堆芯支承结构的设计。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

堆芯支承结构 core support structure

用于高温气冷堆中支承球床堆芯燃料,并维持其形状尺寸的石墨、碳和金属部件。

注:石墨和碳部件又统称为陶瓷堆芯支承结构,金属部件统称为金属堆芯支承结构。

3.2

各向同性度 isotropy

垂直晶格方向热膨胀系数与平行晶格方向热膨胀系数的比值。

3.3

中子辐照 neutron irradiation

反应堆中高能中子辐照到结构或者燃料材料上,与材料发生级联碰撞,使材料发生大量离位损伤或者肿胀。对于核级石墨,需要考虑的中子能量范围为 $E > 0.1 \text{ MeV}$ 。

3.4

辐照变形 irradiation deformation

在高温中子辐照条件下石墨体产生的变形,这种变形和温度变化及注量增加有关。一般地说,石墨在高温快中子辐照时先缩小,到达某个注量后开始胀大。

3.5

辐照蠕变 irradiation creep

石墨在高温中子辐照条件下产生的蠕变称为辐照蠕变,它和温度变化及注量增加有关。辐照蠕变分3个阶段:a)一次蠕变即瞬变;b)二次蠕变,蠕变变形线性增长;c)三次蠕变即蠕变变形快速增长到破坏。

3.6

热气室 hot gas chamber

在底反射层内形成的空腔结构,其作用是把从堆芯来的热氦气收集在一起并进行混合,以减少氦气

流的温度差,然后通过热气导管流出反应堆。

4 安全分级和质量等级

4.1 安全等级

参照 HAF 102 中的相关要求,规定石墨堆芯支承结构及碳堆芯支承结构为安全相关级。

4.2 质量保证等级

4.2.1 规定承载并对保持堆芯形状起重要作用的石墨堆芯支承结构为质量保证 1 级(QA1)。

4.2.2 规定非主要承载但承受快中子辐照载荷的石墨堆芯支承结构为质量保证 2 级(QA2)。

4.2.3 规定起热绝缘和中子屏蔽作用的碳堆芯支承结构为质量保证 3 级(QA3)。

4.3 抗震类别

规定石墨堆芯支承结构及碳堆芯支承结构为抗震 I 类部件。

5 功能要求

陶瓷堆芯支承结构的设计应至少满足以下功能:

- a) 组成对堆芯的中子反射层结构;
- b) 形成堆芯球床与燃料球的球流通道和燃料球的进、出口管道,以保证燃料球循环的正常运行;
- c) 构成氦气冷却剂气体的流道,在堆芯出口和出口位置形成冷热气室对氦气进行混合;
- d) 为控制棒和吸收球停堆系统提供导向孔道,即使在事故情况和地震情况下,也能保证使控制棒插入和使吸收球流入其靠近堆芯部位的孔道内而使反应堆停堆;
- e) 构成中子屏蔽层,降低在其外侧工作的金属结构上的中子积分通量;
- f) 构成热绝缘层、保护其外侧的金属结构免受高温的作用;
- g) 形成对整个石墨堆芯结构的支承结构,把各种载荷最后传递给金属支承结构;
- h) 用键和销的连结方法,形成堆芯支承结构的整体结构,保证堆芯支承结构的整体性;
- i) 在事故工况下侧向石墨和碳结构可作为余热排出的路径。

6 材料

为评价石墨和碳构件的结构完整性,应获得材料在各种条件下的物理特性,在设计中应考虑的材料性能数据的一般要求如下:

- a) 材料生产厂家应按照本章和技术规格书中的要求提供所需的材料试验数据,包括材料主要力学性能、取样规则、辐照特性等。
- b) 石墨和碳材料需要考虑以下物理特性,并满足材料技术规格书中的限值和测试方法规定。
 - 1) 石墨材料未经辐照的特性数据,包括:
 - 材料牌号、化学成分、热中子吸收截面和灰分等材料基本参数;
 - 各向同性度、泊松比、断裂韧性和比热等与温度无关的物理量;
 - 密度、弹性模量(动态和静态)、拉伸强度、弯曲强度、压缩强度、热膨胀系数和热导率等参数在材料的两个方向上随温度的变化,温度间隔不应大于 200 °C,最高温度不应低于反应堆运行过程中石墨构件上的最高温度。
 - 2) 用作反射层石墨材料辐照后的特性数据,至少应包括材料两个方向上以下物理性能随快

中子(能量 $E > 0.1 \text{ MeV}$)注量和温度的变化,中子注量应至少包络反应堆中石墨材料在不同温度下的最大值,温度间隔满足技术规格书中的规定:

- 辐照变形;
 - 蠕变系数;
 - 热膨胀系数;
 - 热导率;
 - 弹性模量;
 - 强度。
- c) 除了以上材料性能之外,辐照后断裂韧性和微观结构的变化也可以为石墨构件的结构完整性评价提供额外的参考依据,以提高失效概率分析的可靠性,包括:
- 1) 石墨材料 Weibell 强度分布的两个特性参数;
 - 2) 疲劳循环强度的数据;
 - 3) 石墨材料氧化数据,包括不同氧化条件下材料强度、弹性模量和导热率的数据;
 - 4) 碳材料未经辐照的特性数据,包括:
 - 材料牌号、化学成分和灰分等材料基本参数;
 - 各向异性因子、泊松比、断裂韧性和比热等与温度无关的物理量;
 - 密度、弹性模量(动态和静态)、拉伸强度、弯曲强度、压缩强度、热膨胀系数和热导率等参数在材料的两个方向上随温度的变化,温度间隔不应大于 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度不应低于反应堆运行过程中石墨和碳构件上的最高温度;
 - 对于作为屏蔽热中子的碳砖应给出碳化硼的含量。
- d) 设计单位应制定专门的验收标准文件或者采用已有的成熟验收标准对所接收的石墨和碳材料进行验收;
- e) 包装、运输和存储应按照技术规格书的要求执行;
- f) 在设计中应考虑在役检查和辐照监督的可能性。

7 设计

7.1 载荷

7.1.1 设计载荷

设计载荷要求如下:

- a) 正常运行条件下堆芯与冷却剂通道氮气压差的包络值;
- b) 设计温度:正常运行条件下石墨或者碳构件温度的包络值;
- c) 设计中子注量:寿期内石墨构件上的中子辐照注量的包络值;
- d) 设计机械载荷:重力、金属支承结构重量和燃料球床等相邻部件的作用力。

7.1.2 使用载荷

设计规格书中应给定反应堆整个寿期内需要考虑的各种载荷,并给出这些载荷的评价准则。一般而言,石墨和碳构件上需要考虑的载荷至少应包括:

- a) 重力(石墨或碳部件的自重、金属支承结构重量和燃料球床的作用力);
- b) 正常运行条件下的机械载荷,例如由于插入堆芯控制棒所产生的作用力;
- c) 热物理特性和力学特性随温度变化和快中子注量变化所产生的载荷;
- d) 预应力载荷;

- e) 地震载荷；
- f) 各类运行环境下瞬态工况导致的冷却剂气流压差、温度变化所导致的载荷，例如反应堆功率调节、负荷阶跃变化、甩负荷、丧失场外电源、紧急停堆、破口、断管等设计基准瞬态；
- g) 其他超设计基准载荷，例如飞行物撞击、气体混合物爆炸和热气导管双端断裂等；
- h) 试验载荷。

7.2 工况和载荷分级

7.2.1 工况分类

在设计规格书中应根据反应堆的运行状况，对 7.2 中的各类载荷进行分类：

a) A 类工况

反应堆的正常运行状态，即系统启动、设计功率范围内运行以及系统停闭(B 类、C 类、D 类瞬态和试验类除外)过程中出现的任何瞬态事件，如：

- 1) 起动反应堆；
- 2) 关闭反应堆；
- 3) 额定功率运行；
- 4) 按计划调节的功率运行；
- 5) 按电网需要而进行的调节运行。

b) B 类工况

反应堆的异常运行状态，即预计会经常发生的偏离正常瞬态的事件，系统设计应有能力承受这些事件而不出现运行损伤，例如由个别操作人员的错误或控制失误而导致的瞬态、由某个系统部件的故障而导致的瞬态、由于甩负荷或失去电力而导致的瞬态等。该工况下部分陶瓷构件上作用有较小的载荷，但不会对反应堆的继续运行产生安全问题。

c) C 类工况

偏离正常运行且需要停堆进行纠正或对系统中受损部件进行修复的事件，该类载荷发生概率较低。在这种条件下，反应堆要停堆，以对系统和构件的继续运行进行评价和检查事故的原因。

d) D 类工况

概率极低的假想事件及其组合，其后果是核能系统完整性和可运行性的损坏程度达到要考虑公众的健康和安全的程度。在这种条件下没有对系统和构件经过充分检查和评价，这些系统和构件是不能再投入运行的。

e) 超设计基准工况

超过电厂及其安全系统设计包络、事故后果比设计基准事故更为严重的事故工况。

7.2.2 对应力限值的载荷分级

采用概率法进行分析和评价时，可按照 7.2.1 中的规定对反应堆不同工况下的各类载荷进行分级，并在技术规格书中详细规定具体载荷的分级：

a) A 级载荷

1) 凡在下列载荷状态下石墨堆芯支承结构所承受的名义载荷称为 A 级载荷：

- 正常运行；
- 异常运行；
- 试验状态；
- 在整个反应堆寿期内预计发生次数 $N > 1$ 的事故状态。

2) 在规定的 A 级载荷条件下,应保证反应堆石墨部件的功能在整个反应堆寿期内运行的安全性。

b) B 级载荷

1) 凡在下列载荷状态下石墨堆芯支承结构所承受的名义载荷都称 B 级载荷:

- 在整个反应堆寿期内预计发生次数 $N < 1$ 的事故状态;
- 假想事故状态或过程。

2) 在规定的 B 级载荷条件下,应保证结构的完整性,即使反应堆安全停堆和安全地排出余热。

3) 在出现一个 B 级载荷之后,反应堆不能再继续运行。除非通过计算或适当的检查,甚至更换某些有关的部件保证在事故之后反应堆仍将保持它的安全性,才可继续运行反应堆。

c) 超设计基准载荷

发生概率极低、后果极为严重的假象事故一般不在设计中考考虑,对反应堆设备的影响可能组合极其不同,难以采用确定的准则进行评价,因此推荐针对各个事故进行专项分析,论证陶瓷堆内构件完整性或者出现损伤后对反应堆安全和事故后果的影响。

7.3 分析方法

7.3.1 石墨构件分析的力学模型

7.3.1.1 对于石墨和碳部件在反应堆启动、停堆、稳定和过渡工况运行的应力分析可采用弹性和热弹性模型计算方法。

7.3.1.2 当材料上的中子注量大于 $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (EDN, 约 0.25 dpa) 时,应考虑中子辐照在石墨构件上引起的应力,对于石墨部件由于快中子辐照所引起的变形和应力分析可采用粘弹性模型进行计算,辐照分析中材料相关的参数应根据辐照试验数据拟合得到,一般采用有限元等数值分析方法进行引进应力分析。

7.3.1.3 对连结部件、键或销应计算其剪切变形和应力。

7.3.2 等效应力计算

石墨和碳构件的评价采用修正的最大变形能理论求出的等效应力,修正的等效应力用主应力用公式(1)表示。

$$\sigma_v^2 = \bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2 - 2\nu(\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2 \cdot \bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_3 \cdot \bar{\sigma}_1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

ν ——泊松比;

$\bar{\sigma}_i$ ——修正主应力, $i=1,2,3$ 。用公式(2)计算。

$$\bar{\sigma}_i = \begin{cases} \sigma_i, \sigma_i \geq 0 \\ \sigma_i \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \sigma_i < 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

σ_i ——修正主应力, $i=1,2,3$;

σ_t 和 σ_c ——分别为石墨的抗拉强度和抗压强度。

7.3.3 失效概率计算

7.3.3.1 石墨材料失效概率的计算可采用双参数的 Weibull 强度分布函数。

7.3.3.2 石墨构件失效概率的计算用公式(3)计算。

$$P(\sigma_v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_v}{R'_c} \right)^m \right] \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$P(\sigma_v)$ ——石墨构件的失效概率；

σ_v ——等效应力；

R'_c ——Weibull 分布函数的特征强度，根据材料性能试验数据拟合确定；

m ——Weibull 分布函数的形状参数，根据材料性能试验数据拟合确定。

7.3.3.3 石墨构件失效概率的计算可以采用分析解或数值解，更多的是采用有限元方法进行计算。

7.3.3.4 计算失效概率时应考虑辐照、温度和腐蚀等对石墨材料性能的影响。

7.3.4 疲劳分析

7.3.4.1 为了进行石墨材料的疲劳分析，应提供该石墨材料的循环疲劳 Goodman 图，并据此进行抗疲劳安全评价。

7.3.4.2 当应力循环次数不超过 10^5 ，并且计算出的拉伸应力不超过石墨拉伸强度平均值的 1/4，压缩应力不超过石墨压缩强度平均值的 1/4 时，可以不进行疲劳分析。

7.4 失效概率限值和变形限值

7.4.1 采用以概率法为基准的安全评价原则。

7.4.2 对石墨和碳构件的质量保证分级和载荷限值分级规定失效概率的限值列于表 1。

表 1 石墨堆芯支承结构失效概率的规定限值

质保等级	A 级载荷	B 级载荷
I	0.000 1	0.001
II	0.000 1~0.01 ^a	0.05
III	0.01	0.05
^a 0.000 1 是对运行初期，0.01 是对运行末期(考虑中子辐照载荷)。		

7.4.3 应根据表 1 中的失效概率限值设计陶瓷堆芯支承结构，保证构件在反应堆设计寿期内失效概率满足要求。

7.4.4 当材料性能，特别是辐照性能数据和初始设计时相比有变更，或者需要考虑反应堆延寿的情况下，应根据表 1 中的失效概率来预估石墨和碳部件的使用寿命，当失效概率不能满足要求，应对构件可能出现的损伤或者破裂进行专项分析，评估对反应堆运行的影响。

7.4.5 变形限值：石墨结构内的变形(包括由机械载荷、热载荷、辐照载荷及其他有关载荷引起的变形值之和)应小于变形限值，以保证不妨碍控制棒和吸收球运动功能的执行，设计方应给出变形限值。

8 结构设计、制造与安装

8.1 由石墨和碳组成的堆芯支承结构在结构设计时要注意下面一些问题，即应满足下面的一些要求：

- 石墨结构的设计应保证控制棒孔道的对中要求；
- 在石墨部件上作用的机械载荷应以压应力为主，尽量避免受拉应力作用；
- 不应妨碍相邻块之间位移差的补偿；
- 材料的结构变形不影响结构的稳定性；

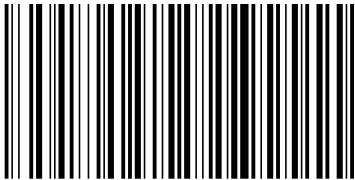
- e) 在石墨和碳结构内部位移和缝隙的积累要限制在允许值的范围内,避免在局部形成过大的缝隙;
 - f) 在单个部件失效时不影响整体结构的连结,不损害反应堆运行的安全性;
 - g) 在决定石墨部件的公差时要保证在接触处不产生过大的挤压应力;
 - h) 在石墨砖上所开槽孔的内角都应进行倒圆,以防局部产生过大的应力集中而导致破坏。凡和燃料球,石墨球相接触的石墨砖的棱边及开孔的边缘也必须进行倒圆以避免造成棱边处过快的磨损和产生更多的石墨粉尘;
 - i) 石墨是各向异性材料,因此石墨部件的设计、加工和安装都要考虑其方向性,因为石墨部件的辐照变形和热变形都要受其各向异性的影响;
 - j) 在石墨堆芯支承结构的设计过程中,要尽量减少各部结构间的漏流。特别是在侧反射层的设计中要保证绝大部分的氦气通过燃料球床,保证堆芯的有效冷却;
 - k) 石墨部件的设计要考虑因水或水蒸气浸入而造成的腐蚀;
 - l) 石墨堆芯支承结构各部件的设计应考虑其制造、安装的方便,要充分考虑经济性的要求;
 - m) 石墨堆芯支承结构各部件的设计应考虑在反应堆寿期末拆卸的可能性;
 - n) 石墨堆芯支承结构的结构设计应考虑在制造、安装和运行过程中检查的可能性。
- 8.2 设计方应提供结构设计的图纸和技术条件,设备规格书、各种技术规格书和制造安装要求,为陶瓷堆芯支承结构制造和安装提供依据。

9 与其他结构的接口

- 9.1 反射层的内表面的形状应保证燃料球流动的通畅,不致卡球、滞流和使球床密实化。反射层内表面应有足够的强度。石墨卸球管内表面应保证光滑,有足够大的直径,避免卡球和搭桥。
- 9.2 反射层内控制棒孔道和吸收球孔道应保证和相关金属导向管结构能很好的对中配合。
- 9.3 保证石墨堆芯支承结构的热气室出口和热气导管的对中和阻流,以保证热气和冷气不会产生大规模交混。保证石墨反射层内的冷气孔道和下部金属支承板上的接口的正确对中,不会产生漏流。
- 9.4 石墨堆芯支承结构和金属堆芯壳之间,石墨结构和上部金属结构之间的间隙大小要适当,既能做到有效的限位又能避免产生过大的挤压应力。
- 9.5 石墨堆芯支承结构和金属支承板之间的热膨胀差应该通过适当的结构设计得到补偿。

参 考 文 献

[1] HAF 102 核动力厂设计安全规定



T/CNS 45-2020



码上扫一扫 正版服务到

版权专有 侵权必究

*

书号:155066 • 5-3467

定价: 16.00 元