

团 体 标 准

T/CNS 44—2020

高温气冷堆核动力厂一回路压力容器 设计准则

Design criteria for the primary circuit pressure vessels of high temperature
gas-cooled reactor nuclear power plant

2020-12-31 发布

2021-04-01 实施

中 国 核 学 会 发 布

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：张征明、何树延。

高温气冷堆核动力厂一回路压力容器 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)核动力厂一回路压力容器设计时应遵循的总体准则、载荷准则、结构材料准则、结构设计准则、分析法设计准则等。

本文件适用于高温气冷堆核动力厂反应堆压力容器、热气导管壳体、蒸汽发生器壳体的设计。

2 规范性引用文件

T/CNS 23 高温气冷堆核动力厂工况分类

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

一回路压力容器 primary circuit pressure vessels

包容高温气冷堆核电厂反应堆冷却剂的承压容器,它们构成反应堆冷却剂压力边界的主体。

3.2

载荷组合 load combination

在反应堆的运行状态下,一回路压力容器受到对应的周围介质的载荷作用,如压力、力、力矩、温度、腐蚀、浸蚀、辐照等。这些载荷作用所处的状态和状态的变化称为载荷组合。

3.3

运行工况 operation condition

根据核能动力装置的载荷工况及保证不同的安全裕度而划分的不同的运行状态。

3.4

事故工况 accident condition

核能动力装置处于安全设计上假想的偏离运行工况的状态。

3.5

试验工况 experimental condition

进行的耐压试验,在一回路压力容器和(或)一回路上施加超过最高使用压力的加压工况。

4 总体准则

4.1 规范与标准

4.1.1 目的是保证高温气冷堆核电厂一回路压力容器的正确设计及安全可靠。应将本文件贯彻于载荷、材料、结构、分析、试验、检验、安装、调试等各方面的技术要求中,并采用分析、实验或已被承认的设计对比方法来证明本文件已被全部执行。

4.1.2 为了保证一回路压力容器有充分的安全可靠性,可以提出或采用其他准则,但一回路压力容器的设计至少应满足本文件。

4.1.3 当采用公认的规范和标准进行设计、制造、安装和试验时,应对规范和标准进行分析和评价,确定其是否适用和充分,必要时应进行修改或补充,以保证一回路压力容器的质量满足其安全功能的要求。

4.2 质量与记录

4.2.1 设计单位应根据相关核安全法规编制和执行质量保证大纲,并建立质保体系,以确保一回路压力容器达到预期的质量。

4.2.2 设计单位应根据相关核安全法规及质保大纲的要求确定设计人员的设计资质,并根据设计人员的资质开展设计活动。

4.2.3 设计单位的设计活动的相关记录和文件汇编应满足相关核安全法规及质保大纲的要求,并由设计单位在一回路压力容器的整个寿期内保存和管理。

4.3 设计与性能

4.3.1 一回路压力容器的安全等级属于安全 1 级、质量保证要求为 QA1 级、规范等级为 1 级、抗震要求为抗震 I 类。

4.3.2 一回路压力容器的工况遵循 T/CNS 23 的规定,应保证各类工况下的结构强度和功能要求,并具有足够的安全裕度。

4.3.3 一回路压力容器应处于非脆性状态且快速扩展断裂的概率最小。

4.3.4 如果实际温度可能超过一般设计规范规定的限值,则应按照适用的规范和标准中有关高温使用的 1 级部件进行设计。

4.3.5 在确定材料性能、辐照对材料性能的影响、稳态及瞬态应力、缺陷大小以及腐蚀等方面时,应考虑不确定性,留有裕度。

4.3.6 在设计文件中,应包含设计、分析、材料、制造、检验、试验、安装、调试等方面的具体信息和详细规定,以保证一回路压力容器达到设计所预期的性能。

4.4 检查与检测

4.4.1 一回路压力容器应设计成能允许定期检查和试验,以评价其结构和密封的完整性。

4.4.2 应根据辐照注量确定是否应为反应堆压力容器应制定一份材料辐照监督大纲并设置相应的材料辐照监督装置,以监测其材料性能因受到辐照而产生的变化。

4.4.3 应设置监测手段来监测一回路压力容器的泄漏状况。对于主法兰,应提供合适的构件或接头,对法兰的泄漏情况进行检测。

4.4.4 应设置温度测点来监测一回路压力容器的温度分布状况。

4.5 制造

4.5.1 应根据 4.3 和 4.4 的要求,确定一回路压力容器的主要制造工艺。

4.5.2 一回路压力容器的主要制造工艺包括:锻件/钢板的制造;焊接;密封面的不锈钢堆焊;冷、热成形和焊接后的热处理;无损检测;机加工;水压试验;包装和运输等,在设计文件中应对这些制造工艺进行描述和规定。

5 载荷准则

5.1 载荷

5.1.1 一回路压力容器的设计、分析和计算,应考虑运行工况、事故工况、试验工况下的机械载荷、热载

荷、腐蚀、浸蚀及辐照等作用,并予以确定和进行评价。

5.1.2 机械载荷和热载荷因素至少应包括下列:

- a) 由反应堆冷却剂产生的载荷因素,如压力、压差、温度及其变化、流动、振动等;
- b) 由一回路压力容器自身及内部结构物产生的载荷因素,如设备自重、预紧力等;
- c) 由邻近设备或部件产生的载荷因素,如设备或管道热膨胀所产生的作用、主氦风机振动所产生的作用;
- d) 由周围环境及设备支承结构产生的载荷因素,如地震引起的一回路压力容器相对于支承点的位移和振动;
- e) 由 γ 等辐射产生的热效应,如反应堆容器壁因吸收 γ 辐射而产生的内热源;
- f) 在反应堆容器堆芯附近区域,因中子辐照而产生的材料辐射脆化,应予以特殊考虑。

5.1.3 一回路压力容器的设计中,至少应考虑以下机械载荷和热载荷:

- a) 持续载荷 1——载荷 Z1:
 - 1) 内压;
 - 2) 一回路压力容器及内部构件的自重;
 - 3) 温度;
 - 4) 连接法兰的主螺栓力;
 - 5) 由于接管反作用力而作用在管嘴的外部机械载荷;
 - 6) 内部构件(如控制棒)运行时所产生的载荷。
- b) 持续载荷 2(热气导管壳体)——载荷 Z2:
 - 1) 摩擦力载荷;
 - 2) 安装载荷。
- c) 正常和预计运行瞬态工况——载荷 Z3;
- d) 地震载荷:
 - 1) 运行安全地震动 SL-1——载荷 Z4;
 - 2) 极限安全地震动 SL-2——载荷 Z5。
- e) 设计基准管道破裂载荷(小破口)——载荷 Z6;
- f) 设计基准事故载荷——载荷 Z7;
- g) 主蒸汽管道和主给水管道破管载荷——载荷 Z8;
- h) 气压或水压试验载荷——载荷 Z9。

5.2 载荷组合

5.2.1 载荷组合中的载荷因素来自运行工况、事故工况、试验工况下的各种事件瞬态及规定的地震大小。对每一种工况应予评定的特定瞬态或事件应在设计任务书中规定。通常应予以考虑的载荷组合只是核电厂各种瞬态和地震事件中最不利的那些事件瞬态,因为只有这些载荷组合才能导致限制或控制一回路压力容器的完整性。这些载荷组合应根据下述 3 个方面来确定:

- a) 最新建造许可证申请中规定的资料;
- b) 产生载荷的正常运行、预计运行事件及次序;
- c) 假想事故。

5.2.2 载荷组合通常按下列步骤进行:

- a) 考虑一回路各种运行工况及其载荷因素,根据典型事件计算和确定作用在一回路压力容器上的机械载荷和热载荷,进而确定应进行分析和评定的每种工况中的载荷组合;
- b) 若某一载荷因素或载荷不是确定的唯一值,则应确定载荷因素或载荷随时间的变化及变化频率,以及这种循环载荷作用的次数;

c) 根据 5.2a) 的规定进行载荷组合,可按照表 1 进行。

表 1 载荷组合

工 况		载荷组合	评价准则
设计工况		Z1+Z2	A
运行工况	工况 I	Z1+Z2	A
	工况 II	Z1+Z2+Z3+Z4	B
	工况 III	Z1+Z2+Z5+Z6	C
	工况 IV	Z1+Z2+Z5+Z7+Z8	D
试验工况		Z9	—

6 结构材料准则

6.1 用于一回路压力容器主体的材料通常应为锰-镍-钼系列的细晶粒低合金钢,部分管嘴结构可选用奥氏体不锈钢、镍基合金及其制品。如果局部温度可能超过一般设计规范规定的温度限值,则应选用能够耐受高温的合金材料。

6.2 应按预定的用途、运行状态承受的应力、应变、温度、化学腐蚀及中子辐照损伤等使用条件,以及制造工艺要求选择结构材料。

6.3 对选用的结构材料,应根据使用条件及工艺要求对材料特性进行评价。若进行焊接,则应对材料的焊接性能进行评价和验证。

6.4 采用在原评价中没有考虑的新工艺时,应对这些新工艺与原评价中包含的工艺等效性予以证实。

6.5 应根据结构材料确定适用的焊接材料和焊接消耗品,并应制定焊接工艺评定要求和焊接见证件制备要求。

6.6 结构材料和焊接材料应满足规定的冲击韧性和断裂韧性要求,保证材料在规定的使用寿期内的各类工况及水压试验和气压试验状态下不处于脆性状态,并使破裂概率降至最小。

6.7 应根据反应堆压力容器的防脆性断裂要求及辐照注量确定反应堆容器堆芯段筒体的参考温度(RTNDT)要求。

6.8 对反应堆压力容器材料应编制和执行辐照监督计划,监督反应堆容器母材及焊缝的有关性能在使用期间的变化,并采用相关的安全措施。压力容器材料辐照监督的原则和要求为:

- 当压力容器在设计寿命末期的最大中子辐照注量小于 1.017 n/cm^2 ($E > 1.0 \text{ MeV}$,需计入所有可能的测量误差)时,可以不编制材料辐照监督计划,但该容器的材料应是经过保守的分析论证的,并且这种论证方法是基于相似容器的实验数据基础之上的。
- 当不能满足 6.8 a) 时,需制定辐照监督计划,对堆芯环带材料进行监督。辐照监督试样的材料、制备、数量、在堆内的放置、测试以及报告等具体要求,可参照相应的规范执行。
- 对铁素体低合金钢材料的中子辐照脆化敏感性,当没有足够的中子辐照脆化效应的辐照数据时,应采用监管当局认可的标准进行预测和限制。

7 结构设计准则

7.1 总则

一回路压力容器除应满足功能要求外,其结构应满足:

- a) 规定的应力及变形；
- b) 材料、制造和试验合理；
- c) 在役检查、维护方便。

7.2 壳体连接结构

- 7.2.1 对构件的连接,应尽可能设计成在纵向截面上有相同厚度和曲率的同轴旋转壳体的连接。
- 7.2.2 对不等厚构件的连接,应使两构件的旋转轴线重合,或中面无突变或弯折过渡。
- 7.2.3 对不等厚构件的连接,应采用适当的斜度或圆角半径过渡,以使两构件变形尽量协调。

7.3 焊接连接结构

- 7.3.1 尽可能采用大型构件以减少焊缝。
- 7.3.2 压力边界承压焊缝应为全焊透焊缝。
- 7.3.3 焊缝应尽量避免避开高应力区和中子强辐照区,并有足够的距离。
- 7.3.4 在确定焊缝位置与各构件空间位置相互关系时,应保证施焊方便、无损检测的可达性及可检验性。
- 7.3.5 在确定焊缝位置时,应考虑在役检查的可达性和可实施性,尽量减少不可达焊缝的数量。

7.4 接管结构

- 7.4.1 接管的布置、数量及尺寸应满足反应堆物理、热工、结构与工艺性的要求。
- 7.4.2 接管的结构形式应符合采用的法规或设计规格书的规定,它的几何尺寸(横截面形状、过渡半径)应使应力的分布与大小合理。
- 7.4.3 接管轴线应垂直或尽可能垂直壳体壁厚中面,偏差应尽可能小。
- 7.4.4 接管的布置不应位于有其他局部峰值应力的过渡区内。
- 7.4.5 接管与壳体之间的连接应采用全焊透焊缝连接,并满足规定的无损检测要求。

7.5 法兰-螺栓连接结构

- 7.5.1 在法兰结构设计时,应使上下法兰的刚度匹配,尽可能减小密封元件(如密封环)处的轴向分离量及径向相对位移,以保证密封性要求。
- 7.5.2 在确定螺栓布置、数量和大小时,应使密封力分布均匀、装拆及重复检验方便。
- 7.5.3 在设计螺栓大小时,应将其作为承压法兰的传力连接件,将螺栓设计成弹性螺栓。
- 7.5.4 在密封件设计时,应考虑密封件材料与法兰密封面及一回路冷却剂的化学相容性、密封性能的稳定性,应考虑密封件的装拆方便。
- 7.5.5 密封面应根据密封性能、装拆及检验要求进行结构设计。
- 7.5.6 应考虑对泄漏的探测要求。

7.6 支承结构

- 7.6.1 可以采用接管、容器法兰及焊接到容器上的单支承结构(如耳式支座),亦可以采用旋转对称支承结构(如支承圆筒)作为支承结构。
- 7.6.2 支承结构与容器的焊接应采用全焊透焊缝。
- 7.6.3 支承结构应容纳一回路压力容器在压力、温度等载荷作用下所产生的膨胀和移动,同时应有效地限制一回路压力容器在地震载荷作用下的晃动。
- 7.6.4 应设置必要的可现场调整的结构件,以便于容器现场安装时的调整和定位。

7.7 导向定位结构

7.7.1 顶盖等大部件安装时应有导向及就位后的精确定位结构,保证部件装拆时不损伤其他构件、装配及调整方便,以满足规定的一回路压力容器的装配精度要求。

7.7.2 在一回路压力容器的内侧,应设置合理的支承及定位结构,便于内部构件的支承、装配和调整,以满足规定的内部构件的装配精度要求,并允许运行时内部构件与容器之间产生相对的轴向和径向位移。

7.8 其他

7.8.1 构件及其连接过渡处的几何形状应尽可能避免形成腐蚀产物沉积的死区。

7.8.2 法兰密封面应有足够的粗糙度和平面度,以保证密封功能;其他内外表面应有合适的粗糙度,以方便涂敷保护层及清洗去污。

7.8.3 焊缝的外表面及其附近区域应有合适的粗糙度和平整度,以满足在役检查的要求。

7.8.4 应设置必要的辅助结构,以便于温度测点、保温层、在役检查装置、安装平台等设施的固定和布置。

8 分析法设计准则

8.1 一回路压力容器结构设计应采用分析法设计。通常采用最大剪切应力强度理论及其对应的限值条件,在设计工况及各种工况下,各类应力应在规定的限值内。

8.2 应根据适用的规范和标准确定设计工况及各类工况下的使用限制条件,同时还应考虑特殊应力限值,如纯剪切应力等。

8.3 一回路压力容器材料的设计应力强度值为下列各值中的最小值:

a) 对铁素体钢:

- 1) 室温下规定的最小抗拉强度的 $1/3$;
- 2) 设计温度下抗拉强度的 $1/3$;
- 3) 室温下规定的最小屈服强度的 $2/3$;
- 4) 设计温度下屈服强度的 $2/3$ 。

b) 对奥氏体、镍-铬-铁、镍-铁-铬合金材料:

- 1) 室温下规定的最小抗拉强度的 $1/3$;
- 2) 设计温度下抗拉强度的 $1/3$;
- 3) 室温下规定的最小屈服强度的 $2/3$;
- 4) 设计温度下屈服强度的 90% ,但不超过室温下规定的最小屈服强度的 $2/3$ 。

c) 对螺栓件材料:

- 1) 室温下规定的最小屈服强度的 $1/3$;
- 2) 设计温度下屈服强度的 $1/3$ 。

8.4 应根据实际使用载荷和循环次数对一回路压力容器进行疲劳分析,其累积疲劳损伤系数应不大于 1.0。

8.5 应考虑热应力棘轮效应,应根据适用规范中的方法对热应力棘轮效应进行评估。

8.6 应采用弹性断裂力学原理评定或防止脆性断裂,应根据适用规范中的方法进行脆性断裂分析。

8.7 对于装料前所进行的系统和设备的水压试验或气压试验,试验温度应不低于材料的参考无延性转变温度 $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$;对于装料后所进行的系统和设备的压力试验,试验温度应根据计算得到的应力强度因子加以确定。

8.8 对于热气导管壳体,应考虑其具有压力容器和压力管道的双重特性。设计时,除满足本文件之外,还应满足更保守的要求,即疲劳损伤系数小于 0.1,设计应力强度值为安全 1 级部件对应值的 0.8 倍。除了在容器分析中所通常考虑的载荷(如内压、温度梯度)外,还应充分考虑热气导管壳体作为连接管道所承受的各种载荷,如安装载荷、地震载荷、设备热位移所产生的载荷等。应对热气导管壳体的在役检查进行充分考虑,其在役检查的频度和范围应不低于对应的压力容器。可采用破前漏(LBB)方法对热气导管壳体进行分析,以进一步验证其防脆性断裂的性能。

8.9 应对一回路压力容器的变形进行分析,尤其应对法兰在压力、温度载荷作用下的变形进行详细分析,以保证容器有良好的密封性能。

9 技术文件

设计单位应提供下列技术文件:

- a) 技术图纸及说明书;
 - b) 设备及备件清单;
 - c) 有关一回路压力容器设计的各项技术文件,包括材料、焊接、热处理、机加工、检验与试验、清洁、包装、运输、安装、调试等方面的技术要求;
 - d) 质量保证文件。
-

中国核学会
团体标准
高温气冷堆核动力厂一回路压力容器
设计准则

T/CNS 44—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

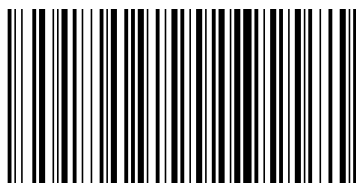
*

开本 880×1230 1/16 印张 0.75 字数 20 千字
2021 年 8 月第一版 2021 年 8 月第一次印刷

*

书号: 155066·5-3464 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



T/CNS 44-2020



码上扫一扫 正版服务到