

ICS 27.120.20
F69
备案号: 57407—2017

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20407—2017

压水堆核电厂堆内构件设计制造规范

**Specification for design and fabrication of reactor vessel internals in pressurized
water reactor nuclear power plants**

2017-02-10 发布

2017-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 前 言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和符号 | 1 |
| 4 总则 | 2 |
| 5 材料 | 4 |
| 6 设计与分析 | 10 |
| 7 制造 | 19 |
| 8 清洁、包装和贮存 | 28 |
| 附录 A（资料性附录） 材料设计应力强度值 | 31 |
| 附录 B（资料性附录） 反应堆结构水力模拟试验 | 34 |
| 附录 C（资料性附录） 堆内构件流致振动模拟试验 | 36 |

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由能源行业核电标准化技术委员会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：上海核工程研究设计院、中广核工程有限公司、中国核动力研究设计院、上海第一机床厂有限公司。

本标准主要起草人：林绍萱、张明、梁叶佳、龚宏伟、宁冬、丁宗华、李燕、冉小兵、任大峰、左波。

压水堆核电厂堆内构件设计制造规范

1 范围

本标准规定了压水堆核电厂反应堆堆内构件（以下简称“堆内构件”）材料、设计、制造和试验等方面的基本要求。

本标准适用于压水堆核电厂反应堆堆内构件的设计和制造。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。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。

GB/T 223（适用部分） 钢铁及合金化学分析方法

GB/T 4334—2008 金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法（ISO 3651-1:1998 & ISO 3651-2:1998, MOD）

GB/T 17569 压水堆核电厂物项分级

GB/T 19418—2003 钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南（ISO 5817:1992, IDT）

NB/T 20001 压水堆核电厂核岛机械设备制造规范

NB/T 20002（所有部分） 压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范

NB/T 20003.2 核电厂核岛机械设备无损检测 第2部分：超声检测

NB/T 20003.3 核电厂核岛机械设备无损检测 第3部分：射线检测

NB/T 20003.4 核电厂核岛机械设备无损检测 第4部分：渗透检测

NB/T 20003.7 核电厂核岛机械设备无损检测 第7部分：目视检测

NB/T 20004 核电厂核岛机械设备材料理化检验方法

3 术语和符号

3.1 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

堆内构件 reactor vessel internals

反应堆压力容器内除燃料组件及其相关组件、堆芯测量仪表和辐照监督管以外的所有堆芯支承结构件（CS）和内部结构件（IS）。

3.1.2

堆芯支承结构件 core support structures

反应堆压力容器内为构成堆芯的燃料组件提供支承或定位约束的结构件。

3.1.3

内部结构件 internal structures

反应堆压力容器内除了堆芯支承结构件、燃料组件及其相关组件、堆芯测量仪表和辐照监督管以外的所有结构件。在堆芯支承结构件失效后，才起支承或约束作用的视为内部结构件。

3.1.4

临时附件 temporary attachments

临时附件是指与堆芯支承结构件相接触或相连接的，在运行前拆除的元件。

注：如对中用的吊装栓紧件和拉杆等物项属于临时附件。

3.2 符号

E ——材料的弹性模量，MPa；

F ——峰值应力，MPa；

f ——疲劳系数；

n ——焊接质量系数；

P ——一次应力，MPa；

P_b ——一次弯曲应力，MPa；

P_m ——总体一次薄膜应力，MPa；

Q ——二次应力，MPa；

Q_b ——二次弯曲应力，MPa；

Q_m ——二次薄膜应力，MPa；

R_m ——抗拉强度，MPa

$R_{p0.2}$ ——规定塑性延伸强度，MPa

S_m ——设计应力强度，MPa；

S_u ——抗拉强度，MPa；

S_y ——屈服强度，MPa；

U ——疲劳累积因子；

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——三个方向上的主应力，MPa。

4 总则

4.1 设备管辖边界

4.1.1 堆芯支承结构件和反应堆压力容器之间的边界

堆芯支承结构件和反应堆压力容器之间的边界应是堆芯支承结构件表面。堆芯支承结构件与反应堆压力容器的第一道连接焊缝距反应堆压力容器承压区域小于等于 $2t$ （ t 是承压材料的名义厚度）时，应认为该焊缝是反应堆压力容器的一部分。在设计规范书没有特殊规定的情况下，对于超出堆芯支承结构件与反应堆压力容器连接的第一道之后的焊缝，或超出距离反应堆压力容器承压区域 $2t$ 后的焊缝，应认为是堆芯支承结构件的一部分。用于连接堆芯支承结构件和反应堆压力容器的机械紧固件属于堆内构件的设计范围。图1详细定义了边界的界定。

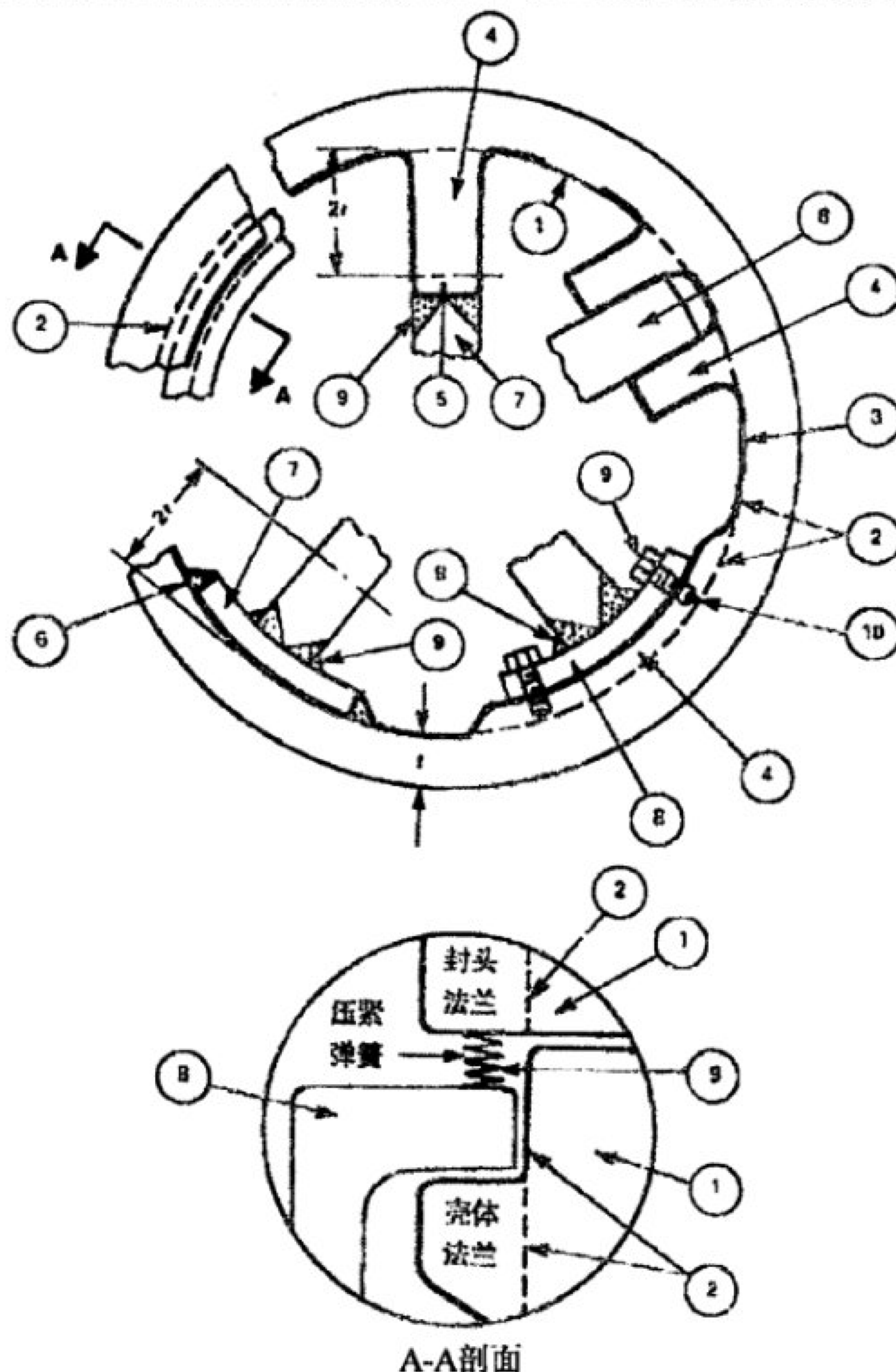
4.1.2 堆芯支承结构件和内部结构件之间的边界

堆芯支承结构件和内部结构件之间的边界应满足以下规定：

- a) 内部结构件可支承、焊接或紧固于堆芯支承结构件上；
- b) 堆芯支承结构件和内部结构件之间管辖的边界应是堆芯支承结构件的表面；
- c) 对于铸件，其中的一个或多个部位可归类为堆芯支承结构件，而余下部位则归类为内部结构件。
铸件部位的分类应在设计规范书或图纸上加以规定。

4.1.3 堆芯支承结构件和临时附件之间的边界

堆芯支承结构件和临时附件之间管辖的边界应位于堆芯支承结构件的表面。



说明：

- 1——属于反应堆压力容器的设计范围。
- 2——反应堆压力容器的承压部位。
- 3——管辖界线(粗线条)。
- 4——铸接或锻接附件或堆焊层属于反应堆压力容器的设计范围。
- 5——离反应堆压力容器承压部位 $2t$ 以上,可用2级部件的相关设计规范来替代反应堆压力容器的相关设计规范。
- 6——离反应堆压力容器承压部位 $2t$ 或 $2t$ 以内,则第一道连接焊缝应属于反应堆压力容器的设计范围。
- 7——离反应堆压力容器承压部位 $2t$ 以上或超过第一道连接焊缝,则附着物属于堆内构件的设计范围。
- 8——附着物的连接属于堆内构件的设计范围。
- 9——离设备承压区域 $2t$ 或 $2t$ 以内,则附着物的相互作用应满足反应堆压力容器相关设计规范中相关条款的要求。
- 10——管辖边界内的钻孔应属于反应堆压力容器的设计范围。

图1 堆内构件的管辖边界

4.2 设备功能

堆内构件的主要功能包括：

- a) 为燃料组件及其相关组件提供支承、导向和定位；
- b) 为控制棒组件提供保护和可靠的导向；
- c) 引导冷却剂流过堆芯，并合理分配流量；
- d) 将控制棒动态载荷、燃料组件载荷和其它载荷传递给反应堆压力容器；
- e) 为反应堆压力容器内的堆芯测量系统提供支承和导向；
- f) 在假想的失水事故下，引导冷却剂进入堆芯；
- g) 为反应堆压力容器提供辐照屏蔽，减轻其受到的堆芯辐照损伤；
- h) 为反应堆压力容器辐照监督管提供定位和支承；
- i) 在发生假想吊篮结构件断裂时，提供二次支承和缓冲，并保证控制棒的插入。

4.3 设备分级

堆内构件的安全等级、抗震类别、质量保证等级等应按GB/T 17569或合适规范进行分级。

5 材料

5.1 基本要求

5.1.1 堆内构件用材料应符合本章规定。当对材料有特殊要求时（如特殊冶炼方式、增加的力学性能试验、提高的无损检测要求等），设计单位应在相应设计文件中注明。

5.1.2 设计选材应综合考虑材料之间物理、化学和力学性能的相容性和匹配性。堆内构件主体材料应具有优良的焊接性和冷热加工性能。

5.1.3 应选用已经过运行验证的材料。已验证的材料是指那些与在役压水堆核电厂中至少使用数年的材料具有同样的名义成分、加工制造工艺和处于同样运行条件（如应力水平、水化学环境或温度）的材料。

5.1.4 生产反应堆堆内构件材料的厂家应通过供方评定，取得采购方认可。

5.1.5 与冷却剂接触的奥氏体不锈钢材料应保证在运行条件下的抗晶间腐蚀性能。

5.1.6 堆内构件材料应具有良好的耐辐照性能。

5.1.7 堆内构件制造厂应根据设计单位的技术文件要求，在考虑加工余量后向材料制造厂和坯件制造厂订购材料，同时应考虑相应的取样要求。

5.1.8 堆内构件制造厂应按设计单位的设计文件对订购材料进行源地见证或入厂复验，并提供见证报告或复验报告。确认合格的材料才可用于设备制造。

5.1.9 在制造、运输和储存期间，可能与堆内构件接触的非金属材料应满足设计要求中对于元素浓度的限值规定。如不能满足要求，则应对不锈钢或镍基合金表面进行清洗以满足设计要求。

5.1.10 应控制与冷却剂接触的设备材料的钴含量限值。

5.1.11 堆内构件材料应进行超声检测；由设计人员所规定的机加工表面还应进行液体渗透检测。

5.2 结构材料

5.2.1 总则

5.2.1.1 在整个设计寿期内，堆内构件材料应能经受一回路水化学环境的侵蚀和腐蚀。所使用材料的适用范围概括如下：

- a) 05Cr19Ni10、06Cr17Ni12Mo2、022Cr19Ni10N、 026Cr19Ni10N 和 06Cr18Ni11Ti 不锈钢适用于大部分部件；
 - b) 高温下需要高强度性能的部件宜选用 06Cr19Ni10 不锈钢；
 - c) 022Cr19Ni10 和 022Cr17Ni12Mo2 不锈钢仅适用于低强度部件，例如紧固件和定位销的防松装置；
 - d) 堆内测量导向结构组件宜选用 05Cr17Ni9Mn8Si4N、 06Cr19Ni10、 026Cr19Ni10N、 06Cr17Ni12Mo2、 06Cr15Ni25Ti2MoAlVB 和 022Cr19Ni10；
 - e) NS3105 合金适用于与反应堆压力容器连接的部件，例如径向支承键左右镶块；
 - f) 弹簧材料宜选用 GH4145 合金或 GH4169 合金；
 - g) 压紧弹性环材料宜选用 04Cr13Ni5Mo、 1Cr13Mo、 12Cr13NiMo 马氏体不锈钢锻件；不允许使用焊接或焊接修补；
 - h) 堆内构件主要结构的适用材料见表 1。
- 5.2.1.2 不适用于堆内构件的材料如下：
- a) 不允许使用 NS3102 合金；
 - b) 禁止使用除铬以外的镉、铜、镍、银等其它镀层；
 - c) 禁止使用易受炉内敏化或焊接敏化而引起应力腐蚀开裂或缝隙腐蚀开裂的材料。

表1 堆内构件主要结构的适用材料

| 零件名称 | 适用材料 |
|-----------------------------|--|
| 吊篮筒体、堆芯上板 | 05Cr19Ni10、06Cr19Ni10、026Cr19Ni10N 和 06Cr18Ni11Ti 板材 |
| 十字定位键、出口接管、人孔板 | 05Cr19Ni10、06Cr19Ni10、026Cr19Ni10N 和 06Cr18Ni11Ti 小锻件 |
| 上部支承板、上部支承板法兰、吊篮筒体法兰、堆芯支承下板 | 06Cr19Ni10、07Cr19Ni10、022Cr19Ni10N 和 06Cr18Ni11Ti 大锻件 |
| 螺钉、螺母、销 | 冷作 06Cr17Ni12Mo2 不锈钢棒、冷作 06Cr17Ni12Mo2 螺栓材料、高强度 GH4169 合金棒、GH4145 合金棒材、022Cr17Ni12Mo2N |
| 堆内测量导向结构组件 | 05Cr17Ni9Mn8Si4N、026Cr19Ni10N、06Cr15Ni25Ti2MoAlVB、06Cr17Ni12Mo2、022Cr19Ni10、05Cr19Ni10 |
| 防松装置 | 022Cr19Ni10、022Cr17Ni12Mo2 棒材 |
| 导流围板 | NS3105 合金 |
| 压紧弹性环 | 04Cr13Ni5Mo、1Cr13Mo、12Cr13NiMo |
| 弹簧 | GH4169、GH4145 丝材 |

5.2.2 不锈钢板材

不锈钢板材设计应力强度值按附录A中表A. 1的规定，且应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 05Cr19Ni10 不锈钢板材碳含量控制在 0.065%以内，06Cr19Ni10 不锈钢板材碳含量控制在 0.04%~0.08%；
- b) 05Cr19Ni10 和 06Cr19Ni10 不锈钢板材应进行晶间腐蚀试验；在设备制造过程中，若经受敏化区间温度加热，试样应经敏化处理；并按适用的试验方法检验，应无晶间腐蚀倾向；
- c) 026Cr19Ni10N 及 06Cr18Ni11Ti 板材的晶间腐蚀试验，必须进行敏化处理，并按适用的试验方法检验，应无晶间腐蚀倾向；
- d) 对 05Cr19Ni10、026Cr19Ni10N 及 06Cr18Ni11Ti 不锈钢板材应采用细晶粒制造工艺，对 06Cr19Ni10 不锈钢板材应采用粗晶粒制造工艺。

5.2.3 不锈钢锻件

不锈钢锻件设计应力强度值按表A.2和表A.3的规定，且应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 05Cr19Ni10 不锈钢锻件碳含量控制在 0.065%以内，06Cr19Ni10 不锈钢锻件碳含量控制在 0.04%~0.08%；
- b) 05Cr19Ni10 和 06Cr19Ni10 不锈钢锻件在设备制造过程中，若经受敏化区间温度加热，试样应经敏化处理；并按适用的试验方法检验，并应无因晶间腐蚀而产生的裂纹；
- c) 022Cr19Ni10N、026Cr19Ni10N 及 06Cr18Ni11Ti 不锈钢锻件的晶间腐蚀试验，必须进行敏化处理，并按适用的试验方法检验，应无因晶间腐蚀而产生的裂纹；
- d) 对 022Cr19Ni10N、05Cr19Ni10、026Cr19Ni10N 及 06Cr18Ni11Ti 不锈钢锻件应采用细晶粒制造工艺，对 06Cr19Ni10 不锈钢锻件应采用粗晶粒制造工艺。

5.2.4 压紧弹性环

压紧弹性环材料的力学性能按表A.4的规定，且应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 压紧弹性环可采用 04Cr13Ni5Mo、1Cr13Mo、12Cr13NiMo；
- b) 压紧弹性环应在温度小于等于规定温度（最低使用温度）下进行冲击试验。

5.2.5 镍基合金板材

镍基合金板材设计应力强度值按附录A中表A.5的规定，且应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 钴含量限制为 0.05%，碳含量限制为 0.03%；
- b) 板材以固溶处理+特殊热处理状态交货。固溶处理后，板材应在 705℃~730℃下进行保温 8h~12h（通常为 10h）的特殊热处理。

5.2.6 镍基合金丝材

镍基合金丝材应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 合金丝材在冷拔达到订货尺寸前应进行固溶处理。冷加工状态的丝材绕制成弹簧后应进行时效处理；
- b) 750 合金丝（直径为 0.64 mm~12.70 mm）固溶处理后冷拔的变形量应控制在 15%左右。

5.3 紧固件材料

5.3.1 总则

紧固件和定位销材料可使用不锈钢螺栓材料（例如冷作06Cr17Ni12Mo2/022Cr17Ni12Mo2不锈钢棒、冷作06Cr17Ni12Mo2螺栓材料、GH4169合金材料和高强GH4145合金材料）。

紧固件材料不允许使用GH2132合金。

5.3.2 冷作硬化不锈钢棒材和螺栓材料

冷作硬化不锈钢棒材和螺栓材料设计应力强度值按附录A中表A.6的规定，且应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 应对碳含量进行控制，使具备抗晶间腐蚀性能；
- b) 冷作硬化不锈钢棒材和螺栓材料可采用热轧或热锻成形，并应在成形并固溶处理后进行冷变形，使其达到所要求的力学性能。

5.3.3 高强度镍基合金棒材

高强度镍基合金棒材应满足相应材料标准，设计应力强度值按附录A中表A.7的规定。

5.4 焊接材料

5.4.1 不锈钢焊丝 ER308L 和不锈钢焊条 E308L

5.4.1.1 化学成分分析

化学成分分析试验方法应按照GB/T 223（适用部分）或其它适用的钢铁化学分析国家标准，结果应满足表2的要求。

表2 焊丝化学成分及焊条焊缝熔敷金属化学成分

| 单位为百分比 | | | | | | | |
|--------|--------|-----------|----------|------------------|---------|---------------------|--------|
| 元素 | C | Cr | Ni | Mo | Mn | Si | P |
| ER308L | ≤0.03 | 19.5~22.0 | 9.0~11.0 | ≤0.50 | 1.0~2.5 | 0.30~0.65 | ≤0.025 |
| E308L | ≤0.03 | 18.0~21.0 | 9.0~11.0 | ≤0.50 | 0.5~2.5 | ≤0.90 | ≤0.025 |
| 元素 | S | Cu | Co | V, Ti, N, Nb, Ta | | Co+(除有规定值以外的)其它元素总量 | |
| ER308L | ≤0.010 | ≤0.50 | ≤0.05 | 提供实测数据 | | ≤0.50 | |
| E308L | ≤0.010 | ≤0.50 | ≤0.05 | 提供实测数据 | | ≤0.50 | |

5.4.1.2 全焊缝金属拉伸试验

试验在室温下进行，焊态和焊后热处理状态试样（若产品焊缝需要进行焊后热处理）数量各1个。按NB/T 20004进行室温全焊缝金属拉伸试验，试样直径Φ12.5 mm。室温拉伸试验结果应满足表3的要求。当母材有高温拉伸试验要求时，焊缝金属亦要求进行高温拉伸试验并应满足表3的要求或母材规定的最低要求。

表3 全焊缝金属拉伸性能

| 试验温度 ℃ | 抗拉强度 R_m MPa | 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa | 断后伸长率 A % | 断面收缩率 Z % |
|-----------|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 室温 | ≥520 | ≥205 | ≥35 | 提供实测数据 |
| 350 | ≥395 | ≥125 | 提供实测数据 | 提供实测数据 |

5.4.1.3 铁素体含量测定

使用化学分析法和磁性法测定焊态焊缝金属的δ铁素体含量，结果应满足5 FN~15 FN（目标12 FN）。

5.4.1.4 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀试验应按GB/T 4334—2008 “E”法，分别在焊态和焊后热处理状态（若产品焊缝需要进行焊后热处理）下进行。试样经675±5℃×1 h的敏化处理。试样弯曲后按GB/T 4334—2008中8.4评定。

5.4.2 表面加硬堆焊钴-镍合金焊材

5.4.2.1 总则

焊丝应选用Stellite6合金焊丝；粉末填充金属应满足5.4.2.2的要求。

5.4.2.2 粉末填充金属的要求

- 5.4.2.2.1 按本要求采购的钴基加硬堆焊粉末用于自动过渡弧焊。除了等离子过渡弧焊外的其它应用应获得设计方认可。粉末应采用气体喷雾工艺制造。
- 5.4.2.2.2 应采用自动等离子过渡电弧工艺在 304 不锈钢试件上堆焊 2 层，试件的尺寸至少应为 19 mm（厚）×76 mm×152 mm。应记录焊接参数并作为正式报告的一部分。
- 5.4.2.2.3 在堆焊层冷却及目视检验后，堆焊层的表面应磨平并随机选取 5 个点测量硬度。所有读数应大于等于 38 HRC。
- 5.4.2.2.4 硬度测试后，应将试件横向切开，对横截面进行抛光和侵蚀。在 10 倍放大倍率下对横截面进行宏观检验，肉眼检查母材和热影响区，应无未焊透或其它线性缺陷。试样数量至少 3 件。
- 5.4.2.2.5 熔敷金属化学成分应满足表 4 的要求。

表4 焊缝熔敷金属化学成分

单位为百分比

| 材料 | C | Cr | Ni | W | Mo | Fe | Si | Mn | Co |
|------------------|---------|-------|------|-----|------|-------|---------|------|----|
| Stellite156或同类材料 | 1.4~1.8 | 26~32 | ≤3.0 | 3~6 | ≤1.0 | ≤0.75 | 0.4~2.0 | ≤1.0 | 余量 |

- 5.4.2.2.6 粉末的包装应为可重复密封以及防潮的金属容器，金属容器应能经受 176 ℃的高温。标签应标有粉末的产品名称、炉/批号和采购合同号。运输过程中应避免容器损坏，容器不应出现凹痕。
- 5.4.2.2.7 至少进行 4 个粒度的筛分试验（包括-325 和+80）。对于等离子过渡电弧工艺，粒度应满足-80/+325 的要求（供应商制造时应力争-80/+270），小于-325 和大于+80 的总量不允许超过 5%。此外，大于+80 的百分含量不允许超过 1%。
- 5.4.2.2.8 质量证明文件包括：
- a) 在交货的同时应提交材料质量证明文件，至少应包括下列内容：硬度、化学成分分析、实际使用的焊接参数、粉末的炉/批号、粉末流速、粉末表观密度、金属粉末的名称或类型；
 - b) 订货合同规定的其它文件。

5.4.3 镍基合金焊丝 ERNiCrFe-7/7A 和镍基合金焊条 ENiCrFe-7

5.4.3.1 化学成分分析

焊丝的化学成分分析试验方法应按GB/T 223（适用部分）或其它适用的钢铁化学分析国家标准，结果应满足表5、6的要求。

表5 焊丝化学成分要求

单位为百分比

| 类别 | C | Cr | Mo | Fe | Mn | Si | P | S | B | N,W,V |
|-------------|-------|-----------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| ERNiCrFe-7 | ≤0.04 | 28.0~31.5 | ≤0.50 | 7.0~11.0 | ≤1.00 | ≤0.50 | ≤0.02 | ≤0.010 | — | 提供实测数据 |
| ERNiCrFe-7A | ≤0.04 | 28.0~31.5 | ≤0.50 | 7.0~11.0 | ≤1.00 | ≤0.50 | ≤0.02 | ≤0.010 | ≤0.005 | 提供实测数据 |

表5 （续）

单位为百分比

| 类别 | Cb(Nb)+Ta | Ti | Co | Cu | Al | Ni | Al+Ti | Zr | 其它元素 ^a | — |
|----------------------------------|-----------|------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------------------|---|
| ERNiCrFe-7 | ≤0.10 | ≤1.0 | ≤0.05 | ≤0.30 | ≤1.10 | 余量 | ≤1.50 | — | ≤0.50 | — |
| ERNiCrFe-7A | 0.5~1.0 | ≤1.0 | ≤0.05 | ≤0.30 | ≤1.10 | 余量 | ≤1.50 | ≤0.02 | ≤0.50 | — |
| ^a 包含 Co,B,Zr,N 的化学成分。 | | | | | | | | | | |

表6 焊条未稀释焊缝熔敷金属化学成分要求

| 元素 | C | Mn | Fe | P | S | Si | Cu | Ni |
|---------------------------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-------|-------------------|---------|
| 范围 % | ≤0.05 | ≤5.0 | 7.0~12.0 | ≤0.03 | ≤0.010 | ≤0.75 | ≤0.50 | 余量 |
| 元素 | Co | Al | Ti | Cr | Cb(Nb)+Ta | Mo | 其它元素 ^a | N, W, V |
| 范围 % | ≤0.05 | ≤0.50 | ≤0.50 | 28.0~31.5 | 1.0~2.5 | ≤0.50 | ≤0.50 | 提供实测数据 |
| ^a 包含 Co 的化学成分。 | | | | | | | | |

5.4.3.2 全焊缝金属拉伸试验

试验分别在焊态和焊后热处理状态（如要求）下进行。每一试验状态下，室温和高温各1个试样。按NB/T 20004进行室温和高温全焊缝金属拉伸试验，试样直径Φ12.5 mm。试验结果应满足表7或相应设备母材的要求。

表7 全焊缝金属拉伸性能

| 试验温度 ℃ | 抗拉强度 R_m MPa | 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa | 断后伸长率 A % | 断面收缩率 Z % |
|-----------|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 室温 | ≥585 | ≥310 | ≥30 | 提供实测数据 |
| 350 | ≥505 | ≥190 | 提供实测数据 | 提供实测数据 |

5.4.3.3 熔敷金属冲击韧性试验

试验分别在焊态和焊后热处理态（如要求）下进行，每个状态下各三个试样。按NB/T 20004的要求在室温进行夏比V型缺口冲击试验。三个试样试验结果均应满足KV₂≥60J。

5.4.3.4 晶间腐蚀试验

试验分别在焊态和焊后热处理态（如要求）下进行，每个状态下两个试样。试验方法按GB/T 4334—2008 “E”法执行，晶间腐蚀试样须经675 ℃±5 ℃×1 h的敏化处理，试样弯曲后按GB/T 4334—2008中8.4评定。

5.4.3.5 弯曲试验

试验分别在焊态和焊后热处理态（如要求）下进行。弯曲试验方法按NB/T 20004，4个侧弯或面弯、背弯和侧弯各2个。 $D=4T$ （ D ：弯轴直径； T ：试样厚度），弯曲角度 $\alpha=180^\circ$ 。在弯曲试样拉伸面上的焊缝金属中仅允许3个长度介于0.4 mm和1.5 mm的开裂缺陷，对于长度小于0.4 mm及位于试样棱角上的裂纹不予考虑。

5.4.4 埋弧焊用不锈钢焊丝焊剂，焊丝类别号 ER308L

5.4.4.1 化学成分分析

化学成分分析试验方法应按照GB/T 223（适用部分）或其它适用的钢铁化学分析国家标准，结果应满足表8的要求。

表8 埋弧焊用不锈钢焊丝 ER308L 和熔敷金属化学成分

| | | | | | | |
|--------|--------|-----------|----------|-------|-----------------|------------------------|
| 单位为百分比 | | | | | | |
| 元素 | C | Cr | Ni | Mo | Mn | Si |
| 焊丝 | ≤0.03 | 19.5~22.0 | 9.0~11.0 | ≤0.50 | 1.0~2.5 | 0.30~0.65 |
| 熔敷金属 | ≤0.04 | 18.0~21.0 | 9.0~11.0 | ≤0.50 | 0.5~2.5 | ≤0.90 |
| 元素 | P | S | Cu | Co | V, Ti, N, Cb+Ta | Co+ (除有规定以外的)其它元素总量 |
| 焊丝 | ≤0.025 | ≤0.010 | ≤0.50 | ≤0.05 | 提供实测数据 | ≤0.50 |
| 熔敷金属 | ≤0.025 | ≤0.010 | ≤0.50 | ≤0.05 | 提供实测数据 | ≤0.50 |

5.4.4.2 全焊缝金属拉伸试验

试验分别在焊态和焊后热处理状态下进行。每一试验状态下，室温和350℃各1个试样；按NB/T 20004进行室温和高温全焊缝金属拉伸试验，试样直径Φ12.5 mm，M310=10；试验结果应满足表9的要求；拉伸试验还应满足对母材规定的最低要求。

表9 全焊缝金属拉伸性能

| | | | | | |
|--------|-----------|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| AWS | 试验温度 ℃ | 抗拉强度 R_m MPa | 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa | 断后伸长率 A % | 断面收缩率 Z % |
| ER308L | 室温 | ≥520 | ≥205 | ≥35 | 提供数据 |
| | 350 | ≥395 | ≥125 | 提供数据 | 提供数据 |

5.4.4.3 弯曲试验

弯曲试验方法按NB/T 20004，在焊后热处理态下进行。4个侧弯试样， $D=4T$ （ D ：弯轴直径； T ：试样厚度）， $\alpha=180^\circ$ 。试样垂直焊接方向。弯曲后的试样，沿任何方向测量，都不允许有超过1.5 mm的开口缺陷，熔合线处也不允许有超过3.0 mm的开口缺陷。

5.4.4.4 铁素体含量测定

使用化学分析法和磁性法测定焊态焊缝金属的 δ 铁素体含量，结果应满足5 FN~15 FN（目标12 FN）。

5.4.4.5 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀试验应按GB/T 4334—2008 “E”法，分别在焊态和焊后热处理状态下进行。试样经675℃±5℃×1 h的敏化处理。试样弯曲后按GB/T 4334—2008中8.4评定。

6 设计与分析

6.1 总则

堆内构件的设计、分析与验证应满足设备分级对应的要求和安全审查的要求。

6.2 接口要求

6.2.1 堆内构件应满足的与燃料组件的接口要求：

- a) 燃料组件定位销的设计应能满足燃料组件互换性的要求；
- b) 堆芯容纳结构与燃料组件最大包络尺寸之间应留有足够的间隙，以便于燃料组件的装卸；
- c) 堆芯容纳结构与燃料组件之间的平均间隙应使得两者之间的流量足够低；
- d) 对于假想的吊篮断裂引起的堆芯跌落，燃料组件不应脱离上方的燃料组件定位销；
- e) 设计时还应考虑燃料组件寿期始末在冷态和热态时的高度。

6.2.2 堆内构件应满足的与反应堆压力容器的接口要求：

- a) 应限制反应堆压力容器凸缘和堆内构件之间在正常工况下的平均压应力值，以防止接触面由于反应堆压力容器和堆内构件的径向膨胀而产生磨损；
- b) 堆内构件与反应堆压力容器存在径向配合的位置，应留有适当的径向间隙，以保证两者不会发生接触；
- c) 设计时还应考虑的接口有：径向支承键与反应堆压力容器组成的径向支承系统的接口、二次支承底板与反应堆压力容器底封头的轴向间隙和反应堆压力容器的贯穿件接口等。

6.2.3 堆内构件应满足的与控制棒驱动线的接口要求：

- a) 控制棒导向筒应为驱动杆部件和控制棒组件提供导向，确保控制棒组件在设计工况下要求的时间内插入堆芯；
- b) 控制棒导向筒的导向板应能够承受一定的向上和向下的冲击载荷，特别是由于控制棒卡棒所产生的力，同时不会对导向板产生功能性损伤。导向板及其焊缝的应力应小于材料的疲劳极限；
- c) 控制棒导向筒的设计应便于驱动杆部件从上部堆内构件移出；
- d) 驱动杆应能搁置在控制棒导向筒中与上部堆内构件一同吊装；
- e) 控制棒导向筒（特别是磨损表面）应减小与控制棒之间的摩擦和磨损，以满足控制棒设计寿命的要求；
- f) 应能对导向板的磨损进行检查，控制棒导向筒应能进行更换。

6.2.4 堆内构件应满足的换料与在役检查要求：

- a) 堆内构件结构设计应能实现反应堆开盖和换料操作最简化；
- b) 应能在不使用特殊工具的情况下，使上部堆内构件与燃料组件和相关组件配合就位；
- c) 堆芯支承下板的设计应有利于燃料组件在没有横向支承的情况下直立；
- d) 燃料组件定位销和堆内构件的定位特征应确保在上部堆内构件的安装过程中，驱动杆挠性接头与对应的控制棒连接柄接合；
- e) 应明确紧固件、焊缝以及其它在设计寿命内可能发生性能劣化的部位在役检查可达性要求；
- f) 在反应堆换料期间，需要移出反应堆压力容器的堆内构件部件应能在存放位置对其进行检查。永久安装在反应堆压力容器内或在移除反应堆主要部件后才能移出的堆内构件部件，应能在原位对其进行检查。在没有移出下部堆内构件的情况下，应能对反应堆压力容器下腔室内相关零部件进行远程检测；
- g) 在上部和/或下部堆内构件已经移出的情况下，应能对所有磨损面进行远程检查。

6.2.5 堆内构件还应满足的其它接口：

- a) 堆内测量导向结构组件与堆芯测量的接口；
- b) 辐照监督管支架与辐照监督管的接口。

6.3 热工水力设计

- 6.3.1 堆内构件的设计和布置应保证冷却剂的流量和分配满足堆芯冷却要求。
- 6.3.2 堆内构件的设计应确保在正常运行和异常工况下，在主冷却剂流道中不会发生由于金属材料受辐照发热引起的水沸腾。
- 6.3.3 应为堆芯容纳结构和反应堆压力容器顶盖提供必要的冷却。
- 6.3.4 堆内构件的设计应确保控制棒导向筒及其周边位置的流体阻力变化不会引起导致控制棒过大振动的横向流体流动。
- 6.3.5 尽可能减少冷却剂无效漏流。
- 6.3.6 堆内构件宜提供从上封头向上腔室排水的流道，以使得发生失水事故时，上封头的水可用于冷却堆芯。

6.4 结构设计

- 6.4.1 在正常、异常、危急、事故和试验工况下，堆芯上板与上部支承板之间的相对轴向变形应保证堆芯上板不会与下部导向筒发生接触，定位销应在堆芯上板定位孔内。
- 6.4.2 堆芯支承下板和堆芯容纳结构的设计应便于堆芯装料或换料。
- 6.4.3 所有相对运动表面应有足够的抗磨损能力以满足设计寿命要求。
- 6.4.4 应考虑吊篮筒体法兰、压紧弹性环和上部支承法兰之间接触面的摩擦作用。
- 6.4.5 补偿反应堆压力容器和堆内相关设备部件的制造和安装公差以及热胀差。
- 6.4.6 压紧弹性环应能产生足够压紧力保证反应堆竖直稳定性，并应考虑压紧弹性环的松弛。
- 6.4.7 应使用焊接或机械方法锁紧定位销。
- 6.4.8 辐照监督管支架要求：
 - a) 应能在所有使用载荷以及适用的试验工况下支承辐照监督管；
 - b) 应能从反应堆压力容器内远程移出辐照监督管；
 - c) 辐照监督管应能顺畅地通过已组装的辐照监督管支架；
 - d) 外型尺寸应减小对下降环腔区域流场的不利影响。
- 6.4.9 紧固件预载荷的规定和紧固件制造技术都应采用成熟技术并满足以下要求：
 - a) 应减小发生堆内构件螺栓松动以及紧固件失效的可能性；
 - b) 应便于检查和维护；
 - c) 尽量避免死水，尽可能地降低缝隙腐蚀效应；
 - d) 只能使用已验证的，并且不会引起紧固件材料腐蚀的螺纹润滑剂；
 - e) 紧固件的锁紧形式应采用经工程验证或试验验证的锁紧结构；
 - f) 所有堆内构件紧固件都应设计成正向锁紧，并且当紧固件失效时，无论是螺栓头、螺杆或螺纹部分都不应脱出；
 - g) 连接件和紧固件的设计应考虑在接头材料上进行焊接操作所产生的热量的影响；
 - h) 应尽量避免使用高强度紧固件材料；
 - i) 在评估预紧载荷是否满足要求时，应考虑应力松弛的影响；
 - j) 应能对紧固件进行在役检查，以便发现严重的劣化或失效。不移出反应堆主要部件无法达到的紧固件应能在原位对其进行检查，这些紧固件中不包括可从堆内构件移出的紧固件。
- 6.4.10 对于假想的吊篮筒体周向断裂，应满足以下准则：

- a) 所有控制棒应能实现紧急停堆；
- b) 燃料组件应滞留在堆芯容纳结构内；
- c) 不会发生流道堵塞；
- d) 燃料组件不应脱离上方的燃料组件定位销。
- e) 冲击载荷不能影响压力容器底封头的结构完整性。

6.5 允许变形

- 6.5.1 堆内构件因冲击和振动引起的载荷和变形，由分析和/或试验来决定。这些动态载荷和变形引起的循环应力与堆内构件重量、水力及温度梯度所引起应力相组合，来确定堆内构件的总应力。
- 6.5.2 设计的堆内构件应能经受住各种运行工况引起的应力循环次数。
- 6.5.3 对于正常运行工况，可以忽略堆芯支承下板垂直向下的变形。
- 6.5.4 对于正常运行和事故工况，堆内构件不应超过最大允许变形，最大允许变形应在规范书中予以明确。
- 6.5.5 在假设的 LOCA 事故下，吊篮上筒体沿径向向内的位移应确保不能导致与外围控制棒导向筒或支承柱接触，以保证发生 LOCA 事故时控制棒组件可以顺利落棒。
- 6.5.6 在假想事故瞬态时，吊篮上筒体向外的永久位移应保证吊篮筒体与压力容器壁之间的下降段环腔面积，不能影响安注功能的实现。
- 6.5.7 堆芯上板相对于上部支承板的垂直运动的允许变形量由堆芯上板与控制棒导向筒支承销销肩的间隙确定。如果变形量大于这个值，则在正常运行或事故工况下可能会导致控制棒导向筒屈曲和功能失效。
- 6.5.8 控制棒导向筒允许的横向变形应使得控制棒组件落棒时间在允许的限值范围内。

6.6 分析法设计

6.6.1 载荷

6.6.1.1 总则

在下列载荷条件下，堆内构件应能满足设计规定的功能要求。

6.6.1.2 设计载荷

设计载荷应满足以下规定：

- a) 设计压差：规定的内部或外部设计压差不得小于在规定正常运行工况下的堆芯支承结构件内外部的最大压差。设计压差应包括压差波动裕量；
- b) 设计温度：在考虑设计压差和设计机械载荷的计算时应使用设计温度；
- c) 设计机械载荷：应对作用于需评定部件上的机械和压差设计载荷进行分析，以满足设计温度和相应环境条件下设计工况限制，载荷包括：
 - 1) 自重；
 - 2) 浮力；
 - 3) 压差；
 - 4) 水力载荷；
 - 5) 燃料组件和相关组件弹簧力、自重、浮力、流体提升力和阻力；
 - 6) 机械弹簧力（包括压紧弹性环的弹簧力）。

6.6.1.3 A级使用载荷

除了设计载荷的要求外，还应对作用于需评定部件的下列载荷进行分析，以满足相应环境条件下A级使用限制，载荷包括：

- a) 正常运行工况下的设计瞬态；
- b) 振动载荷；
- c) 由于温差或异种材料热膨胀引起的热载荷；
- d) 位移载荷；
- e) 支承载荷；
- f) 辐照发热产生的热载荷。

6.6.1.4 B级使用载荷

除了上述A级使用载荷外，应对作用于需评定部件的载荷进行分析，以满足相应环境条件下B级使用限制，载荷包括：

- a) 异常工况下的设计瞬态；
- b) 低水平地震事件（LLSE）。

6.6.1.5 C级使用载荷

应对作用于需评定部件的载荷进行分析，以满足相应环境条件下C级使用限制，载荷包括：

- a) 相关机械载荷；
- b) 紧急工况下的设计瞬态。

6.6.1.6 D级使用载荷

应对作用于需评定部件的载荷进行分析，以满足相应环境条件下D级使用限制，载荷包括：

- a) 相关机械载荷；
- b) 事故工况下的设计瞬态；
- c) SSE和最严重的LOCA。SSE和LOCA载荷组合可采用平方和的平方根法（SRSS）进行。

6.6.1.7 试验载荷

试验载荷分为冷态下试验载荷和热态功能试验载荷。

- a) 对于冷态试验载荷：应对作用于需评定部件的载荷进行分析，以满足相应环境条件下A级使用限制；如果其它使用载荷可以包络试验载荷，则不必对所有堆内构件部件进行试验工况分析；
- b) 对于热态功能试验载荷：应考虑与电厂预运行工况相关的机械、热工和水力等载荷；应在热态功能试验期间进行堆内构件疲劳可靠性验证，试验时间应保证堆内构件所有关键部件至少经受 10^6 次振动循环。

6.6.1.8 运输载荷

应对堆内构件运输过程中的载荷对堆内构件结构完整性的影响进行评估。

6.6.1.9 吊装载荷

应对作用于需评定部件的吊装载荷（包括在准备、换料和在役检查期间）进行评估。

6.6.2 载荷组合

反应堆堆内构件各种载荷的组合在正常、异常、紧急和事故工况条件下分别进行。表10列出了使用载荷与使用限制关系，表11列出了堆芯支承结构件的载荷组合的详细表示。

表10 堆内构件载荷组合与使用限制

| 电厂工况 | 使用载荷与载荷组合 | 使用限制 |
|--|--|------|
| 设计 | 自重+浮力+压差+水力载荷+机械弹簧力 | 设计 |
| 正常 | 自重+浮力+压差 ^a +水力载荷 ^a + 振动载荷 ^a + 机械弹簧力+正常工况下瞬态载荷+热载荷（由温差引起和异种材料热膨胀引起）+ 位移载荷+支承载荷 | A级 |
| 异常 | 自重+浮力+压差 ^a +水力载荷 ^a + 振动载荷 ^a + 机械弹簧力+异常工况下瞬态载荷+位移载荷+支承载荷+低水平地震载荷 ^b (LLSE) | B级 |
| 紧急 | 自重+浮力+压差 ^a +水力载荷 ^a +振动载荷 ^a +机械弹簧力+ 紧急工况下瞬态载荷 | C级 |
| 事故 | 自重+浮力+压差 ^a +水力载荷 ^a +振动载荷 ^a +机械弹簧力+ 事故工况下瞬态载荷+ (SSE + LOCA)载荷 ^c | D级 |
| <div><div>^a 考虑流量变化对这些载荷的影响。</div><div>^b 当 LLSE≤1/3SSE 载荷时，可只做疲劳评定。</div><div>^c SSE 与 LOCA 载荷组合采用平方和的平方根法(SRSS)进行。</div></div> | | |

表11 堆芯支承结构件的载荷组合

| 载荷 | 设计使用载荷 | A 级使用载荷 和试验载荷 | B 级使用载荷 | C 级使用载荷 | D 级使用载荷 |
|---|----------------|------------------|---------|---------|---------|
| 自重 | √ | √ | √ | √ | √ |
| 浮力 ^a | √ | √ | √ | √ | √ |
| 压差 ^a | √ ^b | √ | √ | √ | √ |
| 水力载荷 ^a | √ | √ | √ | √ | √ |
| 振动载荷 ^a | √ | √ | √ | √ | √ |
| 燃料组件（和相关组件）弹簧力、自重、浮力、流体提升力和阻力 ^a | √ | √ | √ | √ | √ |
| 稳态热载荷 | | √ | √ | | |
| 瞬态热载荷 | | √ | √ | | |
| 低水平地震事件 ^c | | | √ | | |
| SSE 载荷 | | | | | √ |
| LOCA 载荷 ^d | | | | √ | √ |
| SRSS（总的 LOCA 载荷 ^d +SSE 载荷） | | | | | √ |
| 运输和吊装 | | √ ^e | | | |
| <div><div>^a 根据不同的情况考虑适用的设计、运行和试验工况，包括流量和温度随时间变化的影响。</div><div>^b 设计压差应大于堆芯支承结构件（或内部结构件）内外表面的最大压差。</div><div>^c 低水平地震事件载荷只用于疲劳评估。</div><div>^d 总的 LOCA 载荷包括适用的 LOCA 条件下的声波力、水力、和惯性力。</div><div>^e 运输和吊装载荷虽然不是 A 级使用载荷或试验载荷，但按照 A 级使用限制对其进行论证。</div></div> | | | | | |

6.6.3 评定准则

反应堆堆内构件非螺纹结构紧固件在各级使用限制下的应力限制如表12所示,反应堆堆内构件螺纹结构紧固件在各级使用限制下的应力限制如表13所示。对于焊接结构,需要确认焊接连接种类和相关检测方式等以保证相应的焊接质量系数和疲劳系数的正确选择,分析评定中采用的质量系数 n 和疲劳系数 f 如表14所示。

表12 非螺纹结构紧固件使用限制与应力强度限制

| 使用限制 | 应力分类 | | 应力限制 |
|------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|
| 设计 | P_m 应力强度 | | S_m |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | | $1.5 S_m$ |
| A 级/B 级 | P_m 应力强度 | | S_m |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | | $1.5 S_m$ |
| | $P_m + P_b + Q$ 应力强度(范围) | | $3.0 S_m$ |
| | $P_m + P_b + Q + F$ 疲劳累积因子 | | $U < 1.0$ |
| B 级 ^a | P_m 应力强度 | | $1.1 S_m$ |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | | $1.65 S_m$ |
| C 级 | P_m 应力强度 | | $1.5 S_m$ |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | | $2.25 S_m$ |
| D 级 | P_m 应力强度 | | 较小值($2.4 S_m$ 或 $0.7 S_u$) |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | | 较小值($3.6 S_m$ 或 $1.05 S_u$) |
| | 平均一次剪切应力 | | $0.42 S_u$ |
| | 压缩 | | $2/3$ 屈曲载荷 |
| 特殊应力限制 | 支承载荷 | 支承应力(抵抗撞击) | S_y |
| | | 平均剪应力(自由端支承) | $0.6 S_m$ |
| | 纯剪切 | 平均一次剪应力 | $0.6 S_m$ |
| | | 最大一次剪切应力 | $0.8 S_m$ |
| | — | 三向应力 | $4.0 S_m$ |

^a 当 B 级压差超过设计压差时,一次应力限制应取 A 级中规定值的 1.1 倍。

表13 螺纹结构紧固件使用限制与应力强度限制

| 使用限制 | 应力分类 | 应力限制 |
|--|--|---|
| 设计/A/B级 ^a | $P_m + Q_m$ 应力强度 ^d (螺杆或螺纹) | $\min\{0.9 S_y, 2/3 S_u\}$ |
| | 平均螺纹剪切应力 ^d | $0.6 S_y$ |
| | 平均支承应力 ^d | $2.7 S_y$ |
| | P_m 应力强度(螺杆或螺纹) | S_m |
| | 一次螺纹剪切应力 | $0.6 S_m$ |
| | $P_m + P_b + Q_m + Q_b$ 应力强度 (螺杆或螺纹) ^d | $1.33 \times \min\{0.9 S_y, 2/3 S_u\}$ |
| | $P_m + Q_m$ 安装应力强度 (螺杆或螺纹) ^b | $1.2 \times \min\{0.9 S_y, 2/3 S_u\}$ |
| | $P_m + P_b + Q_m + Q_b$ 安装应力强度 (螺杆或螺纹) ^b | $1.596 \times \min\{0.9 S_y, 2/3 S_u\}$ |
| | $P_m + P_b + Q + F$ 疲劳累积因子 | $U < 1.0$ |
| C级 | P_m 应力强度 ^c | $1.5 S_m$ |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 ^c | $2.25 S_m$ |
| D级 | P_m 应力强度 | $\min\{2.4 S_m, 0.7 S_u\}$ |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 | $1.5 \times \min\{2.4 S_m, 0.7 S_u\}$ |
| | 平均一次剪切应力 | $0.42 S_u$ |
| | P_m 应力强度 ^c | $2.0 S_m$ |
| | $P_m + P_b$ 应力强度 ^c | $3.0 S_m$ |
| ^a 仅限于弹性分析。 ^b 安装工况计算, 应根据室温下的材料性能。 ^c 仅针对高强度紧固件(最小 $S_u \geq 690\text{MPa}$)。 ^d 包括预紧载荷产生的应力。 | | |

表14 焊接形式的质量系数和疲劳系数

| 焊接种类 | 焊接形式 | RT/UT ^a 和 PT/MT 检测 | | 逐层 PT/MT 检测 | | 根部和最终 PT/MT 检测 | | 表面 PT/MT 检测 | | 表面目视检测 | |
|--|-------|-------------------------------|----|-------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----------------|--------|----------------|
| | | n | f | n | f | n | f | n | f | n | f |
| I.全焊透 | ABCDE | 1.0 | 1 | 0.9 | 1 | 0.75 | 1 | 0.65 | 1 | 0.5 | 1 |
| II.全焊透 | ABCDE | 1.0 | 2 | 0.9 | 2 | 0.75 | 2 | 0.65 | 2 | 0.5 | 2 |
| III.全焊透 | CDE | 1.0 | 1 | 0.9 | 1 ^b | 0.75 | 1 ^b | 0.65 | 1 ^b | 0.5 | 1 ^b |
| IV.双面坡口 (RT 不适用) | ABC | 0.5 | 4 | 0.45 | 4 | 0.4 | 4 | 0.35 | 4 | 0.25 | 4 |
| | DE | 0.9 | 4 | 0.8 | 4 | 0.7 | 4 | 0.6 | 4 | 0.4 | 4 |
| V.双面角焊 (RT 不适用) | BC | 0.5 | 4 | 0.45 | 4 | 0.4 | 4 | 0.35 | 4 | 0.25 | 4 |
| | DE | 0.9 | 4 | 0.8 | 4 | 0.7 | 4 | 0.6 | 4 | 0.4 | 4 |
| VI.单面坡口 (RT 不适用) | DE | 0.6 | 4 | 0.55 | 4 | 0.45 | 4 | 0.4 | 4 | 0.35 | 4 |
| VII.单面角焊 (RT 不适用) | DE | 0.6 | 4 | 0.55 | 4 | 0.45 | 4 | 0.4 | 4 | 0.35 | 4 |
| VIII.间断角焊 或塞焊 | E | NA | NA | 0.45 | 4 | 0.4 | 4 | 0.35 | 4 | 0.3 | 4 |
| ^a 对电渣对接焊缝必须进行射线检测(RT)。对铁素体材料的电渣焊缝还必须在热处理前或后在整个长度上做超声检测(UT)。 | | | | | | | | | | | |
| ^b 当焊缝两面都进行检测时, 允许使用疲劳强度减弱系数等于 1.0。否则, 该系数必须取 2.0。 | | | | | | | | | | | |

6.6.4 设计验证

6.6.4.1 总则

设计验证是检验和表征反应堆堆内构件设计,特别是新型设计满足设计性能参数及核安全要求的必要手段,设计验证试验主要包括反应堆结构水力模拟试验,堆内构件流致振动模拟试验,实堆试验等。

6.6.4.2 反应堆结构水力模拟试验

反应堆结构水力模拟试验旨在验证堆芯进口流量分配的均匀程度,验证进入堆芯的流量分配变化满足反应堆热工设计的要求,验证结构设计和分析计算的合理性和可靠性。

反应堆结构水力模拟试验试验方法可参照附件B。

6.6.4.3 堆内构件流致振动模拟试验

堆内构件流致振动模拟试验旨在验证堆内构件能够承受在堆内设计流量下的流致振动载荷,证实不会出现大幅度振动或导致结构损坏的振动,确保反应堆堆内构件的结构完整性,为堆内构件流致振动评价提供依据,为设计定型和可能的修改提供参考依据,为安全分析提供必需的试验数据支持。

堆内构件流致振动模拟试验试验方法可参照附录C。

6.6.4.4 实堆试验

堆内构件的类型按照布置、设计、运行工况和运行经验等可划分为“原型”和“非原型”等不同类型。首堆堆内构件应完成振动和应力分析大纲、振动和应力测量大纲和检查大纲，以证明反应堆堆内构件满足设计要求。

堆内构件实堆试验应按照RG1.20的要求进行。

7 制造

7.1 机械加工

7.1.1 加工文件

零件加工前，设备制造商应根据上游技术文件编制相应的加工规程、产品质量记录卡和工艺文件，按先后次序，列出零件的制造过程和检验要求。

在零部件制造过程中，设备制造商应严格按照加工规程及工艺执行，并据实填写产品质量记录卡。产品质量记录卡上的每一项检验记录均应有检验人员的签名和检验时间。

7.1.2 机械加工过程

7.1.2.1 落料

金属材料可用机械方法切割和热切割的方法落料成形。采用热切割落料后，应将热影响区完全去除。允许用剪床来切割厚度小于25 mm的板材，但应通过机械加工方法去除加工硬化区。

7.1.2.2 标记

标记的一般要求有：

- a) 堆内构件零件从原材料落料开始到最终加工装配完成的整个制造过程应有唯一的识别标记，并能正确无误地查阅到原材料、零件与组件对应标识的记录。标记方法应按 NB/T 20001 的有关规定执行；
- b) 原材料落料的余料应标记；
- c) 在零件制造过程中，如果标记因加工被破坏或被清除，应在该道工序完成后，在可追溯的情况下，立即恢复原标记；
- d) 对制造过程中的报废件应立即标上清晰的永久标记，应与产品隔离放置；
- e) 零件的标记不应污染零件、不应产生尖锐表面以及不应改变材料成份；
- f) 不应在焊缝或热影响区进行蚀刻；
- g) 使用的蚀刻剂应进行化学分析并记录总卤素、总硫和总铅含量。

7.1.2.3 机加工

机械加工的一般要求有：

- a) 图纸未注明公差尺寸应根据上游技术条件的规定加工；
- b) 图纸未注明倒角的锐边，均需倒圆或倒棱；
- c) 不锈钢材料热切割后，应通过打磨或机加工方法去除热切割面的氧化层；
- d) 焊后不能机加工的焊缝表面，应加以抛磨，去除氧化皮、焊渣、焊瘤和飞溅物等；
- e) 对于奥氏体不锈钢和镍基合金的零件，在加工过程中的吊装、转运和贮存期间，不应与铁素体钢接触；
- f) 在加工过程中，应避免材料受到污染，以防止产生腐蚀，防污染按 NB/T 20001 的有关规定执行；

- g) 最终加工后, 表面不应有毛刺、锐边、裂纹、划痕、撕裂、压痕和碰伤等缺陷。工件在搬运、加工和检查过程中, 应注意保护已加工表面, 谨防工件表面碰伤、划伤或压伤;
- h) 紧固件或其他零部件产品应按照技术文件的要求进行液体渗透检验;
- i) 零件的完工尺寸、形状和位置偏差、粗糙度应符合设计图纸及技术条件中的要求。在零件加工完成后, 应对设计图纸及技术条件中注明的尺寸、形状及位置偏差进行测量, 并将检测结果汇编到产品完工报告中, 在产品交货时提交给设备采购方。

7.2 焊接

7.2.1 总则

堆内构件的全部焊接及其检验应遵守NB/T 20002 (所有部分) 的要求。

7.2.2 焊接工艺评定

7.2.2.1 总则

焊接工艺评定应满足NB/T 20002.3的要求。

7.2.2.2 过度敏化的控制

不锈钢材料的焊接要求供应方能证明每种焊接工艺使用的最大焊接热输入和最大碳含量都满足下列要求:

- a) 工艺评定焊件应由两块 13 mm 厚的 06Cr19Ni10 系列或 022Cr19Ni10 系列材料拼接而成。最小焊缝长度为 152 mm。06Cr19Ni10 系列或 022Cr19Ni10 系列材料的碳含量将决定产品中待焊接的不锈钢材料的最大含碳量。例如, 如果碳含量为 0.068% 的 304 试件的评定通过, 则允许所有碳含量比该值低的不锈钢材料进行产品焊接, 如果碳含量超过该值, 则要求重新评定;
- b) 在工艺评定报告(PQR)上要求记录焊接电流、焊接电压和焊接速度, 以及热输入。热输入的计算公式为:

$$\text{热输入} = \frac{\text{电流} \times \text{电压} \times 60}{\text{焊接速度}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

焊接速度单位为mm/min, 热输入单位为J/mm。

- c) 完工的焊缝应根据 GB/T 4334—2008 “E”法的要求进行试验。试样应该取自焊缝的中心, 并且焊缝每一侧应至少包含 13 mm 的母材;
- d) 应对在生产中使用的每种焊接方法 (SMAW, GTAW, SAW 等) 进行上述试验。

7.2.3 焊工技能评定

焊工评定应按HAF603的要求执行。

当自然条件限制焊工采用常规方法进行焊接时, 技能评定应模拟焊工最难接近的产品焊缝。如果产品焊缝更难接近, 则需要重新评定。

7.2.4 特殊要求

7.2.4.1 焊材

焊接材料的存放和使用应满足对应焊材厂商对焊材存放与使用规定。对于埋弧焊, 焊剂不允许重复使用。

7.2.4.2 产品焊缝制造

7.2.4.2.1 总则

产品焊接应按照NB/T 20002.6的规定执行。产品焊缝要求按照一级部件焊缝执行。

7.2.4.2.2 焊接边缘和表面的处理和检验

待焊坡口和表面的加工及检验应按照NB/T 20002.6规定执行。

焊件厚度小于25 mm的所有焊接坡口表面应用大于5倍的放大镜进行目视检验，坡口表面不得有裂纹、夹渣等缺陷和其它大于1.5 mm的线性显示。

焊件厚度不小于25 mm的所有焊接坡口表面应用液体渗透法进行检验，其缺陷显示应符合NB/T 20003.4的规定。

7.2.4.2.3 产品焊缝的制造范围

堆内构件产品焊缝的制造范围如下：

- a) 点焊；
- b) 永久性和临时附件焊缝；
- c) 焊缝实施；
- d) 焊缝的最终加工。

对于堆内构件产品焊缝的制造，不应在产品、工件表面上引弧。焊工应在坡口中起弧，不应在坡口的邻近表面起弧。焊缝不准许锤击。对于需要道间打磨的情况，打磨应彻底，打磨后不准许存在影响焊接质量的物质和缺陷。焊缝最终加工后应满足设计图纸规定的外形尺寸，表面应光洁平整，粗糙度不大于Ra6.3 μm。焊缝余高超高要求按照GB/T 19418—2003 B级考核。

7.2.4.3 道间与焊缝相关热处理

热处理要求按NB/T 20002.6和NB/T 20002.1或适用的规定执行。

7.2.4.4 焊接温度控制

对于采用焊接连接的装配部件，其焊接道间温度小于等于177℃；不锈钢部件进行表面加硬层堆焊时，道间温度小于等于425℃。

7.2.4.5 产品焊缝的无损检验

无损检验人员应具备HAF602要求的资格并持有资格证书。

反应堆堆内构件的焊缝按1级焊缝要求进行无损检验，各类检验应按以下规定执行：

- a) 焊缝表面目视检验：所有焊缝表面及点焊外形用大于5倍放大镜进行焊缝的目视检查，全部焊缝和热影响区表面不得有裂纹、未焊透和烧穿等缺陷，不允许有焊瘤、气孔及未熔合等缺陷存在。目视检验按NB/T 20003.7的规定执行。
- b) 焊缝表面液体渗透检验：除间断焊缝（例如防松焊）外所有对接环焊缝和对接纵焊缝表面及角焊缝外表面和可达的内表面应进行液体渗透检验，焊缝每侧15 mm相邻母材也应进行检测。吊篮筒体环焊焊缝和纵焊缝还应分层进行液体渗透检验，每层厚度取焊缝厚度的1/3与13 mm中较小值；钴基合金堆焊层要求液体渗透检验；检验结果应符合NB/T 20003.4中的验收标准。
- c) 吊篮筒体对接环焊缝、纵焊缝要求100%射线检验。当设计要求时，全焊透对接焊缝应进行射线检查。其灵敏度、检验方法、验收标准应按照NB/T 20003.3的规定进行。

7.2.4.6 缺陷的去除和焊补

焊缝缺陷应采用机械方法清除。缺陷清除后，应对补焊区域进行液体渗透检查。

所有补焊应采用评定合格的焊接工艺，并经受与原产品相同的无损检验。

同一部位只允许补焊两次；第二次修补前，制造商应提供第二次补焊的原因分析报告，否则不得继续进行任何补焊。

补焊应在最终热处理前进行，除非征得采购方和设计方同意后，方可在最终热处理后进行补焊。

补焊所用的焊接材料和焊工应满足相关要求。

7.2.4.7 焊接见证件的制造

7.2.4.7.1 见证件设置的目的

为了验证堆内构件的焊接质量满足设计要求，并保证产品焊接采用的焊接工艺与焊接工艺评定工艺一致，制造商应在焊接生产过程中制备产品焊接见证件。

7.2.4.7.2 见证件的设置数量

对于每套堆内构件，至少应设置1个吊篮筒体纵焊缝或环焊缝见证件（条件允许的情况应设置在纵焊缝上）。

7.2.4.7.3 焊接见证件制备

见证件母材及焊接材料，应与对应产品焊缝用母材和焊接材料一致。母材应取自为制造该设备的同批供货材料或取自制造该设备同一炉号的材料（前者优先）。并标明轧制方向，并应符合焊接工艺评定的条件。焊接材料应与产品焊缝所用焊材批号相同。

见证件尺寸应能满足试验取样及可能的复验制备要求。

7.2.4.7.4 见证件焊接

见证件的焊接应满足以下规定：

- a) 见证件焊接工艺（包括焊接方法、焊接位置、焊接坡口、焊接电流、焊接电压、焊接速度、预热及道间温度等）应与对应的产品焊缝完全一致；只要可能，见证件焊接应在产品纵焊缝的延长部分进行；
- b) 见证件应由对应产品焊缝的焊工或操作工施焊；
- c) 见证件施焊所用焊接设备类型应与产品焊缝所用设备相同（型号和性能参数应相同）。

7.2.4.7.5 见证件的无损检验

见证件应经历同对应产品焊缝相同的无损检验。

7.2.4.7.6 见证件的破坏性试验

见证件的破坏性试验试样应取自无损检验显示合格的区域，须执行的破坏性试验见下表15：

表15 破坏性试验

| 序号 | 破坏性检验项目 | | 试验数量 |
|--|---------|------|------------------|
| 1 | 纵向拉伸 | 室温 | 1 |
| | | 350℃ | 1 |
| 2 | 横向拉伸 | 室温 | 1(全厚度) |
| 3 | 弯曲 | 横向面弯 | 2 |
| | | 横向背弯 | 2 |
| | | 侧弯 | 2 |
| 4 | KV 冲击 | 焊缝 | 2 组 ^a |
| | | 热影响区 | 2 组 ^a |
| | | 母材 | 1 组 |
| 5 | 金相检验 | | 1(全厚度) |
| 6 | 晶间腐蚀 | | 1 组 |
| 7 | 化学成分分析 | | 1 |
| 8 | 铁素体含量检测 | | 1 |
| ^a 如坡口形式为双面坡口（例如双U形坡口），在条件允许的情况下应针对焊缝与热影响区分别作3组冲击试验。 | | | |

7.2.4.8 耐磨堆焊

对于堆内构件中耐磨堆焊，应按NB/T 20002.7进行堆焊焊接工艺的评定及产品焊缝的制造。

7.2.4.9 报告

报告应包括：

- a) 焊接材料验收报告；
- b) 焊接工艺评定报告；
- c) 焊接工艺规程；
- d) 产品焊缝报告；
- e) 焊缝无损检验报告；
- f) 焊缝热处理报告；
- g) 产品焊缝见证件检验报告；
- h) 焊补报告和不符合报告（如有）；
- i) 焊工或操作工姓名；
- j) 车间名称或代码。

7.3 热处理

7.3.1 热处理规程

7.3.1.1 总则

部件或产品在制造期间，或材料在验收之后的部分制造工序中进行的热处理应满足本节的要求。

7.3.1.2 人员和工厂的要求

7.3.1.2.1 人员要求

对执行热处理的人员，应通过书面的热处理规程熟悉热处理条件。

7.3.1.2.2 热处理设备

热处理设备应满足的要求：

- a) 只要能满足规定的温度和气氛条件，可以采用任何加热方法；
- b) 热处理炉（或其它设备）应符合所要进行的热处理（尺寸、有效容积、能力、加热速度、控温系统等）的要求；
- c) 控温系统应能使有效容积中任何两点间的温差在规定最大温差之内；
- d) 温度测量和记录系统应工作良好，并应进行季度检查，热电偶每年至少要标定一次，必要时直接更换；
- e) 在规定气氛类型的整个热处理期间，应能对气氛进行检测；
- f) 加热和控温系统检查间隔应不大于6个月。

7.3.1.3 热处理的检测和记录

热处理的检测和记录按以下规定进行：

- a) 要连续并自动地记录与热处理相关的主要参数（时间和温度）以及连续进料炉的进料通过速度，不要求对炉外冷却、成形操作和焊接前后的热处理进行连续监测；
- b) 热处理炉的结构和加载特性应为在热处理件各点“获得的温度”与制造商规定的保持温度之间的最大允许偏差为 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ （采购技术要求中有不同的允许温差除外）；
- c) 各记录卡及测量线路要编号，以便能够确认相关的批量热处理件、部件或焊缝的区域。记录卡要附有标明热电偶位置的简图，以便各测量线路与其位置对应；
- d) 所有时间、温度和生产量的记录都应保留待用。热处理报告将引用这些记录，并要给出热循环特性，以便能与制造厂热处理工艺中预定的热循环相比较。

7.3.2 与焊接相关的热处理

与焊接相关的热处理除满足7.3.1外，还应满足7.2.4.3。

7.3.3 制造过程中热处理

7.3.3.1 尺寸稳定化热处理

当要求零件在机械加工后应具有尺寸稳定性时，可在加工过程中或精加工后对其进行尺寸稳定化热处理，该热处理不影响材料的性能。热处理前应将零件彻底除油，并应仔细去除降低设备耐腐蚀性的物质（卤化物或碳化物及氧化铁屑）。热处理炉的炉子气氛应为弱氧化性。任何情况下的入炉温度都应不超过 120°C ，并应按照部件的复杂程度来确定，以避免产生变形。任何情况下的保温温度都应不超过 425°C ，保持在 $400^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ 范围内。保温至少4h，零件应炉冷至 120°C 以下，才可出炉空冷至室温。任何情况下的加热和冷却过程中相距不超过4.5m的两点之间的温度差应不超过 55°C ，应记录热处理温度曲线。在热处理过程中，需要在加热炉中设置测温热电偶，除考虑不同的空间位置设置炉温测点外，还应在零件的最薄和最厚处以及见证件上分别设置热电偶测温。热电偶应经过标定且合格。

7.3.3.2 光亮退火热处理

对紧固件锁紧帽、锁紧杯应该进行光亮退火，以达到释放残余应力和软化材质的目的。热处理前应将零件彻底除油，并应仔细去除降低设备耐腐蚀性的物质（如卤化物或碳化物及氧化铁屑）。热处理炉应提供保护气氛（如氢气、惰性气体或真空状态），在恒定的加热速率下，零件应均匀加热，保温温度

在1050℃~1100℃范围内，保温10 min，零件排列应该避免零件在热处理过程中变形，在保护气氛中尽可能快速冷却到120℃，处理后零件表面应是没有氧化痕迹的光亮表面。

7.4 成形加工

7.4.1 概述

7.4.1.1 成形工艺一般要求

成形工艺包括为获得一个给定形状的部件而对其施加的热—机械操作过程。成形工艺应满足下列要求：

- a) 应按 NB/T 20001 附录 A 中要求进行成形工艺评定，通过成形工艺评定试验来验证成形加工后制品性能符合成形前材料验收技术规范中的性能要求；
- b) 成形工艺不应使部件材料的性能降至低于要求的最小值。因此，必要时应在成形之后进行热处理，恢复材料性能，使之符合要求；
- c) 焊接板件不论采用何种成形工艺，焊接工艺评定都应考虑与成形相关的热处理。

7.4.1.2 成形操作所需文件

7.4.1.2.1 成形操作应按确认的文件规定进行，这些文件至少应包括：

- a) 所使用的成形工艺规程、成形操作文件；
- b) 成形过程中及成形后要求进行的检验；
- c) 相关成形工艺评定报告（如有时）。

7.4.1.2.2 成形工艺规程应包括如下内容：

当要求进行成形工艺评定时，应列出成形工艺评定报告编号。同时应按照NB/T 20001附录A中的规定，列出各重要变素限定的有效范围。

7.4.1.3 变形率的确定方法

部件成形，应按NB/T 20001的有关规定计算成形的变形率。

7.4.2 产品成形操作

7.4.2.1 筒节的成形

用板材制造筒节时，应采用滚卷或压制成形，其成形操作应满足下列规定：

- a) 板材件进行滚卷成形时，应将前缘部分用卷曲或压制法预弯。在最终弯曲之前应将两端平的未成形边缘除去，以避免在纵缝焊接区域产生非弧形的平板区；
- b) 在成形操作过程中，尤其是在钢板与卷辊或模具之间使用垫板时，应采取预防措施以避免工件产生伤痕；在热弯过程中，应清除钢板表面脱落的氧化皮以防止在工件表面上产生压痕；
- c) 用压力机进行压制或弯曲时，在每一压程上压力机压模都应覆盖钢板整个宽度。

7.4.2.2 弯管

弯管的成形操作应满足下列规定：

- a) 根据管子直径和厚度选择弯管工艺，应使管子的圆度和厚度减薄量都保持在设计许可的范围内；
- b) 弯管工具应适合于管子的特性（直径、厚度和力学性能等），制造商在选择弯管工具时应考虑管子弯管公差；
- c) 在可能情况下，焊接管的焊缝应置于变形最小的区域内。

7.5 镀铬

7.5.1 规程

在镀铬操作之前，设备供应商应制定镀铬规程，该规程应明确规定：

- a) 基体材料牌号；
- b) 待镀表面粗糙度；
- c) 电镀液的成分和电镀参数（包括电流密度和温度）；
- d) 待电镀工件的支承件结构（包括工件与导体之间的连接方式）和制造支承件的材料，支承件材料应不是污染源，应不溶解于电镀液；
- e) 搅拌装置；
- f) 阳极材料；
- g) 非电镀表面的保护；
- h) 工件在支承件上的布置，注意要便于排放气泡；
- i) 镀层的检验和验收准则。

7.5.2 工艺评定

7.5.2.1 在镀铬操作之前，负责镀铬的供方应按 7.5.1 的规定的规程和下述规定评定其工艺：

- a) 当可能时使用一个实际工件；
- b) 当不可能使用实际工件时，可使用有代表性的试样。

7.5.2.2 符合 7.5.5 的规定的镀层质量要求时，则评定为合格。

7.5.3 工件准备

在电镀之前，应进行尺寸及粗糙度检验、目视检验和液体渗透检验，并使用蒸汽脱脂法或用有机溶剂去除所有油脂。

7.5.4 镀铬工艺

7.5.4.1 铬酸电镀槽

7.5.4.1.1 在镀铬操作过程中电流不得中断，如果由于某种原因电流中断，则应去除已镀镀层并重新进行镀铬。

7.5.4.1.2 所使用的电镀液应含有：

- a) 150 g/L~400 g/L 的三氧化铬 (CrO_3)；
- b) 足够的硫酸根离子使 $\text{CrO}_3 / \text{SO}_4$ 的重量比尽可能优化，硫酸根离子以硫酸的形式添加；
- c) 镀液温度应在 40 °C~60 °C 之间，电流密度不得超过可使基底产生过度氢化作用的值。

7.5.4.1.3 镀铬后，应将工件浸入水槽中漂洗或用喷淋水冲洗。

7.5.4.2 脱氢处理

在镀铬和冲洗后，工件应立即放入炉内热处理，在 230 °C~260 °C 之间至少保温 3 h，以便去除吸留的氢。

7.5.5 检验

7.5.5.1 目视检验

镀层的最终表面应无裸点、起泡、划痕、凹痕、针孔以及烧焦区或乳白区。应使用10倍放大镜对可疑区进行目视检测。

最终表面的粗糙度应符合相关图纸或设备规格书中的要求。

7.5.5.2 厚度检验

应使用下列方法之一检验厚度：

- a) 用千分卡尺测量电镀前、后工件的尺寸差（如不能直接测量时用试样）；
- b) 当工件的材质和几何形状允许时，使用磁力法检测工件（或试样），但在每次检测之前应按要求标定测量仪器；
- c) 或用显微检验方法检测试样，显微截面应从试样最难电镀表面进行选取，并且试样的材料应与镀铬工件的材料相同。

7.5.5.3 附着力检验

附着力检验应按以下规定执行：

- a) 将代表一批工件的一个试样放在铁砧上；
- b) 将直径为10 mm的钢球放在试样的镀铬表面上；
- c) 用另一重约500 g的铁锤猛击这个钢球一次，使工件表面得到1个名义深度为0.2 mm的凹痕（相当于直径为3 mm的圆形凹坑）；
- d) 镀层在凹痕表面上无起皮为合格。

7.5.6 有缺陷镀层的修补

如按7.5.5的规定检验结果不满足其中任一准则要求，则该批工件应完全去掉镀层，退镀应不影响基体性能，然后重新镀铬。新的镀层应按7.5.5的规定检验。

7.5.7 产品和见证件的电镀

只有在电镀评定通过后，才能进行产品和见证件的电镀，产品和见证件的电镀工艺应与评定件的电镀工艺一致。见证件的检验应与评定件的检验相同。

7.6 装配

7.6.1 装配文件

7.6.1.1 零部件装配前，设备制造商应根据上游技术文件编制相应的装配规程、产品质量记录卡和工艺文件，按先后次序，列出零部件装配过程和检验要求。

7.6.1.2 设备制造商应制定合理的装配程序，选定装配基准，使其尽可能地与设计基准一致，以确保装配质量。

7.6.1.3 在零部件装配过程中，设备制造商应严格按照装配规程及工艺执行，并据实填写产品质量记录卡。产品质量记录卡上的每一项检验记录均应有检验人员的签名和检验时间。

7.6.2 装配的一般要求

根据堆内构件产品装配顺序，设计制造专用的工装夹具、量具、吊具，规划吊装运输方案，安排工作场地，谨防在搬运、加工和检查过程中，碰伤、划伤或压伤工件表面，防止工件变形。吊装、运输工装，都应在起吊堆内构件产品前进行载荷实验。

7.6.3 紧固件

7.6.3.1 试装时,临时装配用的紧固件应有显著标记,以免同产品紧固件相混淆。临时紧固件与产品紧固件的几何尺寸和形位公差应相同,并具有相当的机械强度。

7.6.3.2 在制造装配过程中,内、外螺纹应加以保护,谨防异物污染及碰伤。

7.6.3.3 装配前,应检验紧固件(包括临时紧固件)的螺纹部分是否损坏及存在异物,螺纹部分应涂抹专用润滑剂,润滑剂应满足NB/T 20001和相关技术条件的规定。

7.6.3.4 当全部螺纹紧固件拧紧到规定力矩时,依次确认每个螺纹紧固件的力矩,以便消除由于螺纹之间相互影响所产生的未拧紧或拧紧力矩不足。

7.7 检验

7.7.1 检验的一般要求

7.7.1.1 检验人员应具有相应检测资格证书并在有效期之内。

7.7.1.2 检查用量具及仪器应有合格证书,且应定期标定并在有效期内。

7.7.1.3 检查的方法及检验标准应符合设计图纸及技术条件中的要求,并将检测结果汇编到产品完工报告中,产品完工报告在产品交货时一并提交。

7.7.1.4 所有无损检验都应由持有与其从事的检测方法相应的有效资格证书的检测人员执行,其资格应符合HAF602的规定。验收标准应符合相应的无损检验技术条件的规定。

7.7.2 堆内构件试验检查

堆内构件在设备制造厂应进行试验检查有:

- a) 上部堆内构件与下部堆内构件对中试验检查;
- b) 控制棒导向筒摩擦力试验检查;
- c) 堆芯测量导管通规试验检查;
- d) 辐照监督管支架通规试验检查;
- e) 吊装块与起吊杆的载荷试验检查;
- f) 上下堆芯板燃料销的位置度检查。

8 清洁、包装和贮存

8.1 清洁

8.1.1 适用时间

在能够验证清洁验收准则或在零部件装配前,零件应完成清洁工序。自该阶段起,本条的所有要求均适用。由此获得的清洁度应永久保持。如果清洁度略有降低,可以通过后阶段的正常清洗恢复。

8.1.2 工作区

工作区是指设备或零件(例如内表面或外表面)所紧邻的周围环境。堆内构件制造阶段,清洁和装配应在Ⅱ级工作区进行。Ⅱ级工作区按NB/T 20001有关规定执行。

8.1.3 清洁方法

8.1.3.1 机械清理

对工件进行打磨或喷射清理时,所使用的工具应满足NB/T 20001的有关规定。磨削时避免工件局部过热。

8.1.3.2 化学清洗

8.1.3.2.1 化学清洗一般要求

化学清洗是指脱脂去油、去除氧化皮、酸洗、钝化等操作。零件经化学清洗后均应用符合规定的水进行清洗。通过测定洗涤后水的pH值，检查是否完全去除化学清洗产物。

8.1.3.2.2 脱脂去油

脱脂去油应按NB/T 20001的有关规定执行。

8.1.3.2.3 酸洗

酸洗应按NB/T 20001的有关规定执行。下列零件不得进行酸洗：

- a) 淬硬钢，氮化的奥氏体不锈钢，或淬火回火的马氏体钢制造的零件；
- b) 堆焊钴铬钨硬质合金的零件；
- c) 非耐腐蚀材料制成的零件；
- d) 不满足晶间腐蚀试验要求的奥氏体不锈钢零件；
- e) 带孔洞或有不可接近部分的零件。

8.1.3.2.4 钝化

钝化前所有表面应进行去油处理，化学处理可用于零件去污和钝化表面。钝化应按NB/T 20001的有关规定执行。

8.1.3.2.5 洗涤

堆内构件零件要用A或B级水进行洗涤，当洗涤后水的pH值已稳定，并在允许的范围内时，洗涤即告完成。A级或B级水的水质应满足NB/T 20001的有关规定。

8.1.3.3 干燥

清洁和洗涤后，根据零件结构，可用下列干燥方法进行干燥：

- a) 用清洁的拭布揩干；
- b) 自然挥发；
- c) 热空气吹干。空气应干燥、无油，温度为60℃～80℃，可用氮气、二氧化碳、氩气、氦气中任何一种气体代替空气。

8.1.4 清洁度的检查

堆内构件零部件清洁度检查应按其NB/T 20001的有关规定执行。检查后应编制清洁检验报告，报告应详细记载所进行的清洁工艺及其检验结果。

8.2 包装

8.2.1 产品在包装前，设备制造商应根据技术条件要求，编制包装程序及说明，设计包装装置图纸。

8.2.2 包装装置应具有足够的刚度和强度，以适应堆内构件吊装、运输、翻转以及在其过程中可能出现的各种意外情况。包装装置应能够准确地定位产品，可靠地固定产品，以保证零件结构的完整性。

8.2.3 对于在装卸及运输过程中容易造成碰伤的产品，应考虑使用专用包装、起吊装置或采取相应措施，保证零件完好无损。

8.2.4 包装装置应满足陆运、海运相关的吊装及贮存要求，包装装置具有一定的防雨、防潮、防尘、防腐蚀的功能。

8.2.5 产品包装前，应进行最终清洗，应满足 NB/T 20001 和相关技术条件的规定。

8.2.6 与产品接触的包装材料应满足 NB/T 20001 和相关技术条件的规定。

8.2.7 对于大型包装装置，应安放加速度监测仪。加速度监测仪应能同时监测到三个方向的加速度。

8.2.8 产品包装应有醒目标识，并标明起吊重量、起吊位置、体积尺寸、合同号、产品编号、制造厂商等内容。

8.3 贮存

8.3.1 堆内构件应直立存放（即工作位置），对于下部堆内部件（即使在包装装置内）也不允许长期卧放。运到现场后应立即竖立，防止倾翻。

8.3.2 堆内构件应单独存放，不许其它物品搁置在它的上面。堆内构件应存放在宽阔、干净、防水、通风和安全的室内或等效的环境中。旋转的地面应坚实、平整。堆内构件临时露天存放时，物件应用雨蓬架空保护，并防止积水潮湿、保证干燥透风。

8.3.3 堆内构件贮存期间，严格禁止无关人员进入。

8.3.4 贮存期间应定期进行外观目视检查。物件的任何损伤及异常现象均应记录，必要时应立即报告。

附录 A
(资料性附录)
材料设计应力强度值

当表A. 1~A. 7所列参数与所引用标准的参数有差异时以所引用标准的参数为准。

表A. 1 不锈钢板材设计应力强度

| 钢号 | 状态 | 室温强度 min. | | 应力强度 S_m - 温度 MPa - °C | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|--------------|-------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 05Cr19Ni10 (NB/T20007.XX—201X) | 固溶 | 515 | 205 | 138 | 138 | 138 | 128 | 120 | 114 | 112 |
| 06Cr19Ni10 (NB/T20007.XX—201X) | 固溶 | 515 | 205 | 138 | 138 | 138 | 128 | 120 | 114 | 112 |
| 06Cr18Ni11Ti (ASME-BPVC 相当于 321) | 固溶或+稳定化 | 515 | 205 | 138 | 138 | 138 | 138 | 132 | 125 | 123 |
| 026Cr19Ni10N (NB/T20007.6—2012) | 固溶 | 520 | 207 | 138 | 138 | 138 | 134 | 126 | 119 | 114 |

表A. 2 不锈钢锻件设计应力强度 (重量小于等于 4540 kg)

| 钢号 | 状态 | 室温强度 | | 厚度 mm | 应力强度 S_m - 温度 MPa - °C | | | | | | |
|--|---------|--------------|-------------------|----------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 05Cr19Ni10 (NB/T20007.XX—201X) | 固溶 | 515 | 205 | ≤125 | 138 | 138 | 138 | 128 | 121 | 114 | 112 |
| | | 485 | | >125 | | | | | | | |
| 06Cr19Ni10 (NB/T20007.XX—201X) | 固溶 | 515 | 205 | ≤125 | 138 | 138 | 138 | 128 | 121 | 114 | 112 |
| | | 485 | | >125 | | | | | | | |
| 06Cr18Ni11Ti (ASME-BPVC 相当于 321) | 固溶或+稳定化 | 515 | 205 | ≤125 | 138 | 138 | 138 | 138 | 133 | 126 | 123 |
| | | 485 | | >125 | | | | | | | |
| 026Cr19Ni10N (NB20007.1—2010) (< 10 吨) | 固溶 | 520 | 207 | ≤150 | 138 | 138 | 138 | 130 | 122 | 115 | 111 |
| | | 485 | | >150 | | | | | | | |

表A.3 不锈钢锻件设计应力强度（重量大于 4540 kg）

| 钢号 | 状态 | 室温强度 | | 应力强度 S_m - 温度 MPa - °C | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|--------------|---------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ (MPa) | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 05Cr19Ni10 (NB/T 20007.40—2015) | 固溶 | 485 | 205 | 138 | 138 | 138 | 128 | 121 | 114 | 112 |
| 06Cr19Ni10 (NB/T 20007.40—2015) | 固溶 | 485 | 205 | 138 | 138 | 138 | 128 | 121 | 114 | 112 |
| 06Cr18Ni11Ti (ASME-BPVC 相当于 321) | 固溶或+稳定化 | 485 | 205 | 138 | 138 | 138 | 138 | 133 | 125 | 123 |
| 022Cr19Ni10N (NB/T 20007.3—2012) | 固溶 | 485 | 205 | 138 | 138 | 130 | 120 | 112 | 107 | 104 |

表A.4 压紧弹性环力学性能要求

| 钢号 | 室温强度 | | 设计强度 350°C | | 冲击性能 |
|------------------------------------|--------------|-------------------|---------------|-------------------|---|
| | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | 侧膨胀量/吸收能量 (试验温度小于等于金属使用温度) |
| 04Cr13Ni5Mo (NB/T20007.45—2017) | 790 | 620 | 640 | 530 | 侧膨胀量大于等于 1.00 mm |
| 1Cr13Mo | 760~930 | 620 | — | 515 | 室温平均 KV≥48 J, 单个 KV≥40 J (3 个试样中只允许一个试样的结果低于 48 J, 而不低于 40 J) |
| 12Cr13NiMo (NB/T 20007.17—2012) | 760~900 | 620 | — | 515 | 室温平均 KV≥48 J, 单个 KV≥40 J (3 个试样中只允许一个试样的结果低于 48 J, 而不低于 40 J) |

表A.5 镍基合金板材设计应力强度值

| 钢号 | 供货状态 | 室温强度 | | 应力强度 S_m - 温度 MPa - °C | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| NS3105 合金 (NB/T 20008.XX—201X) | 固溶+特殊 热处理 | 585 | 240~345 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |

表A.6 冷作硬化不锈钢棒材和紧固件材料设计应力强度值

| 钢号 | | 供货状态 | 室温强度 | | 应力强度 S_m - 温度 MPa · °C | | | | | | |
|---|---|---------|--------------|-------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 冷作 06Cr17Ni12Mo2 不锈钢棒 (NB/T 20007.XX—201X) | $\Phi \leq 50 \text{ mm}$ | 固溶+冷作硬化 | 585 | 450~620 | 195 | 195 | 185 | 179 | 177 | 177 | 177 |
| | $\Phi > 50 \text{ mm}$ | | 585 | 415~620 | 195 | 195 | 185 | 179 | 177 | 177 | 177 |
| 冷作 06Cr17Ni12Mo2 螺栓材料 (NB/T 20007.XX—201X) | $\Phi \leq 40 \text{ mm}$ | 固溶+冷作硬化 | 620 | 450~620 | 218 | 218 | 206 | 200 | 198 | 198 | 198 |
| | | | 690~965 | 552~620 | 230 | 230 | 217 | 210 | 208 | 208 | 208 |
| 冷作 06Cr17Ni12Mo2/ 022Cr17Ni12Mo2 (NB/T 20007.15—2012) | $\Phi \leq 30 \text{ mm}$ | 固溶+冷作硬化 | 655 | 450~620 | 218 | 216 | 206 | 200 | 198 | 198 | 198 |
| | $30 \text{ mm} < \Phi \leq 50 \text{ mm}$ | 固溶+冷作硬化 | 590 | 450~620 | 195 | 195 | 185 | 178 | 177 | 177 | 177 |

表A.7 高强度镍基合金棒材设计应力强度值

| 钢号 | 供货状态 | 室温强度指标 | | 在下列温度 (°C) 下的设计应力强度值 S_m (MPa) | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m MPa | $R_{p0.2}$ MPa | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| GH4145 (NB/T 20008.24—2015) | 固溶处理、稳定化处理 和时效处理或固溶处理和时效处理 | 965~1170 | 790 | 264 | 257 | 254 | 251 | 248 | 247 | 246 |
| GH4169 | 固溶处理、稳定化处理 和时效处理或固溶处理和时效处理 | 1275 | 1034 | 345 | 330 | 323 | 318 | 315 | 312 | 310 |
| GH4145 (NB/T 20008.10—2012) | 固溶处理+时效硬化 | 1070 | 655 | — | — | — | — | — | — | — |

附 录 B
(资料性附录)
反应堆结构水力模拟试验

B.1 试验目的

反应堆结构水力模拟试验是验证反应堆结构的设计与分析的一个重要环节,旨在验证堆芯进口流量分配的均匀程度,验证进入堆芯的流量分配变化满足反应堆热工设计的要求,验证结构设计和分析计算的合理性和可靠性。

B.2 试验内容

试验主要包括以下内容:

- a) 以反应堆压力容器及堆内构件为主要研究对象,根据试验台架容量,研究缩比模型的相似准则和相似关系,推导和建立缩比模型的比例;
- b) 比例模型试验件设计,特别是燃料组件试验件的设计,要求每个燃料组件的阻力系数与实堆一致,流动特性能够反映真实的情况;
- c) 堆芯入口流量分配试验;
- d) 反应堆各部分压降和流速测量试验;
- e) 试验数据处理和不确定度分析;
- f) 试验前预分析和试验结果分析。

B.3 流量分配试验

B.3.1 回路系统

水力模拟试验的回路应模拟反应堆回路的实际情况,在环路数、布置形式和流量等满足试验要求;试验回路进入到压力容器入口的流速应该是均匀的,流量应该是可控的。
试验的流量应达到各主要部位的自模区,雷诺数范围要足够大。

B.3.2 测量系统

试验的测量系统可根据测量参数的不同,对流量、压差、电导率、温度等参数进行同步采集。

试验可以测量试验件模拟的燃料组件入口流量,模型各分段压差,模型进出口管及下腔环腔的流速,及模拟回路的流量。

所选择的测量仪表应具有高灵敏度、性能稳定、抗干扰强、防水性好。

数据采集和分析处理系统应满足试验测试要求,具备数据集中显示、数据回放、数据分析、数据记录和处理功能。

B.3.3 试验工况

在不同流量工况下,测量燃料组件进口流量,获得堆芯入口流量分配的均匀程度。

在回路中流量非均匀的工况下,测量燃料组件进口流量,获得堆芯入口流量分配的均匀程性。

在偏回路运行工况下，测量燃料组件进口流量，获得堆芯入口流量分配的均匀程性。
在不同的流量分配结构下，测量燃料组件进口流量，获得堆芯入口流量分配的均匀程性。
对于压降测量，各流道流量应达到自模，试验时调节流量从小流量到回路最大流量。
对于流速测量，在指定流量工况下进行。

B.3.4 试验结果分析和评价

为了获得可靠和可用的测量数据，试验中使用的各种仪表与传感器应进行不确定度分析，所选的仪表应达到试验精度要求，同时整个测量系统也应满足精度要求。

试验人员应具有相应的资质，所使用的试验设备、仪器仪表应在标定的有效期内。

对获得的试验数据进行分析，并与试验前预分析结果比较，获得对试验结果数据的确定。

附 录 C
(资料性附录)
堆内构件流致振动模拟试验

C.1 试验目的

堆内构件流致振动模拟试验是验证反应堆堆内构件结构设计与分析的一个重要环节,旨在验证堆内构件能够承受在堆内设计流量下的流致振动载荷,通过试验了解堆内构件的流致振动特性,证实不会出现大幅度振动或导致结构损坏的振动,确保反应堆堆内构件的结构完整性,为堆内构件流致振动评价提供依据,为设计定型和可能的修改提供参考依据,为安全分析提供必需的试验数据支持。

C.2 试验内容

试验主要包括以下内容:

- a) 比例模型试验件设计;
- b) 模型试验件的动态特性试验;
- c) 堆内构件流致振动模拟试验;
- d) 试验数据处理和不确定度分析;
- e) 试验前预分析和试验结果分析;
- f) 堆内构件模型试验件的耐久性试验。

C.3 流致振动试验

C.3.1 回路系统

流致振动试验的回路应模拟反应堆回路的实际情况,在环路数、布置形式和流量等满足试验要求。试验回路的流量应是可控的,试验回路与模拟体应防止水流引起的附加振动。

C.3.2 测量系统

试验的测量系统包括用来获得流体载荷激励和结构振动反应的加速度传感器、位移传感器、脉动压力传感器和应变片等,也包括数据采集和分析处理系统。

应根据流致振动的测量参数及需要测试的试验件选择合适的传感器,传感器应具有高灵敏度、性能稳定、抗干扰强、防水性好。

数据采集和分析处理系统应满足试验测试要求,信号分析仪应具备多通道(如大于64道)同步采集信号的功能。并具备多种分析软件功能,如对随机信号的时程分析、频率分析、幅值分析、模态分析等数字信号分析功能。

C.3.3 试验工况

在不同机械设计流量下,测量稳态工况以及瞬态工况(泵启动和泵惰转)下,模拟试验件各部分的加速度、位移、应变响应和重要部件上的脉动压力激励。

在100%机械设计流量下进行模拟试验件的疲劳考核试验,验证吊篮的疲劳性能和连接件的功能。试验结束后检查吊篮、压紧弹簧、径向支承键等有无磨损情况及连接螺栓有无松动等情况。

C.3.4 试验结果分析和评价

为了获得可靠和可用的测量数据,试验中使用的各种仪表与传感器应进行不确定度分析,所选的仪表应达到试验精度要求,同时整个测量系统也应满足精度要求。

试验人员应具有相应的资质,所使用的试验设备、仪器仪表应在标定的有效期内。

对获得的试验数据进行分析,并与试验前预分析结果比较,获得对试验结果数据的确定。

中 华 人 民 共 和 国
核 行 业 标 准
压水堆核电厂堆内构件设计制造规范
NB/T 20407—2017

*

核工业标准化研究所出版发行
北京海淀区骚子营 1 号院
邮政编码: 100091
电 话: 010-62863505
原子能出版社印刷
版权专有 不得翻印

*

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷
印数 1—50 定价 52.00 元