

团 体 标 准

T/CNEA XXXX—XXXX

压水堆承压部件 设备设计制造 第 5 部分： 堆内构件

Code for PWR pressure boundary components Equipments design and fabrication
Part 5: Reactor Internals

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

（本稿完成日期：）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国核能行业协会 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 通用要求 3

6 设计 8

7 制造 19

8 试验 31

附录 A（资料性附录） 典型堆内构件主要零部件 33

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020 的规定起草。

T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设计与制造》与 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 材料》、T/CNEA ××××《压水堆承压部件 焊接》、T/CNEA ××××《压水堆承压部件 无损检测》和 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设备设计制造》共同构成支撑《压水堆承压部件》。本文件是 T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设计与制造》的第 5 部分。

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。

本文件由中国核能行业协会提出并归口，技术支持单位为上海核工程研究设计院有限公司、核工业标准化研究所、苏州热工研究院有限公司。

本标准起草单位：上海核工程研究设计院有限公司、核工业标准化研究所、中国机械工业联合会、中机生产力促进中心、东方电气（广州）重型机器有限公司、上海第一机床厂有限公司和东方电气（武汉）核设备有限公司。

本标准起草人：林绍萱 丁宗华 栾佳明 朱焜 姚俊俊 杨义忠 杨铁成 潘俊 李亭 龚宏伟 舒安华。

本文件为首次发布。

引 言

T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设备设计与制造》旨在规范我国压水堆核电厂主要设备的设计与制造，拟由五个部分构成。

- 第 1 部分：反应堆压力容器。目的在于规定压水堆核电厂反应堆压力容器设计、制造、检验和试验的基本要求。
- 第 2 部分：蒸汽发生器。目的在于规定压水堆核电厂立式自然循环蒸汽发生器材料、设计、制造、检验、试验、验收、包装和运输的基本要求。
- 第 3 部分：稳压器。目的在于规定压水堆核电厂稳压器材料、设计、制造、检验和试验的基本要求。
- 第 4 部分：控制棒驱动机构。目的在于规定压水堆核电厂反应堆控制棒驱动机构的设计、制造和试验等方面的基本要求。
- 第 5 部分：堆内构件。目的在于规定压水堆核电厂反应堆堆内构件的材料、设计、制造和试验等方面的基本要求。

标准名称压水堆承压部件 设备设计制造 第5部分：堆内构件

1 范围

T/CNEA XXXXX的本部分规定了压水堆核电厂反应堆堆内构件（以下简称“堆内构件”）的材料、设计、制造和试验等方面的基本要求。

T/CNEA XXXXX的本部分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 4334 金属和合金的腐蚀不锈钢晶间腐蚀试验方法

GB/T 17569 压水堆核电厂物项分级

NB/T 20004 核电厂核岛机械设备材料理化检验方法

NB/T 20009.14 压水堆核电厂用焊接材料 第14部分：1、2、3级设备用硬质合金堆焊焊接材料

NB/T 20233 压水堆核电厂核蒸汽供应系统设备的清洁和清洁度要求

NB/T 20408 核电厂物项包装、运输、装卸、接收、贮存和维护要求

NB/T 20001 压水堆核电厂核岛机械设备制造规范

T/CNEA XXX.1—20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求

T/CNEA XXX.6—20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构

T/CNEA XXX.1—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第1部分：通用要求

T/CNEA XXX.2—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测

T/CNEA XXX.3—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测

T/CNEA XXX.4—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测

T/CNEA XXX.7—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第7部分：目视检测

T/CNEA XXX.2—20XX 压水堆承压部件 材料 第2部分：高温承压件用合金钢锻件

T/CNEA XXX.15—20XX 压水堆承压部件 材料 第15部分：高温用锻制或轧制合金钢和不锈钢公称管道法兰、锻制管配件、阀门和零件

T/CNEA XXX.16—20XX 压水堆承压部件 材料 第16部分：锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材和型材

T/CNEA XXX.18—20XX 压水堆承压部件 材料 第18部分：高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料

T/CNEA XXX.32—20XX 压水堆承压部件 材料 第32部分：热交换器用奥氏体不锈钢无缝钢管

T/CNEA XXX. 24—20XX 压水堆承压部件 材料 第24部分：压力容器和一般用途用耐热铬及铬镍不锈钢板、薄板和钢带

T/CNEA XXX. 37—20XX 压水堆承压部件 材料 第37部分：镍-铬-铁合金板、薄板和带材

T/CNEA XXX. 5—20XX 压水堆承压部件 焊接 第5部分：不锈钢手工电弧焊焊条

T/CNEA XXX. 6—20XX 压水堆承压部件 焊接 第6部分：不锈钢焊丝

T/CNEA XXX. 8—20XX 压水堆承压部件 焊接 第8部分：不锈钢焊丝和焊剂

T/CNEA XXX. 9—20XX 压水堆承压部件 焊接 第9部分：镍基合金手工电弧焊焊条

T/CNEA XXX. 11—20XX 压水堆承压部件 焊接 第11部分：镍基合金焊丝

T/CNEA XXX. 1—20XX 压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求

T/CNEA XXX. 2—20XX 压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定

T/CNEA XXX. 3—20XX 压水堆承压部件 焊接 第3部分：产品焊接

T/CNEA XXX. 4—20XX 压水堆承压部件 焊接 第4部分：焊接材料验收

3 术语和定义

3.1 术语与定义

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和内部结构件。

3.1.2 堆芯支承结构 **core support structures**

堆芯支承结构是指在反应堆压力容器内为直接支承或约束堆芯（燃料组件和相关组件）而设计的结构或结构零件。

3.1.3 内部结构 **internal structures**

- a) 内部结构是指反应堆压力容器内除了堆芯支承结构、辐照监督管、燃料组件及其相关组件和仪表以外的所有结构。
- b) 仅当证书持有者给出要求，本标准才适用于上述(a)中定义的内部结构。
- c) 证书持有者应确认建造的所有内部结构对堆芯支承结构完整性无不利的影响

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。

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;
 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 通用要求

4.1 通则

4.1.1 堆内构件的设计、制造、检验和验收除应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》、《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》以及本标准所有部份的规定外，还应遵守国家颁布的有关法律、法规和安全技术规范。

4.1.2 堆内构件的设计单位、制造单位应按有关核安全法规及安全导则，以及《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》建立适用的质量保证体系。

4.2 职责

4.2.1 设计单位的职责

设计单位应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》的相关规定。

4.2.2 制造单位的职责

制造单位应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》的相关规定。

4.3 设备范围与管辖边界

4.3.1 设备范围

反应堆堆内构件的设备范围可包括：上部支承板组件、支承柱组件、上部导向筒组件、下部导向筒组件、堆芯上板组件、堆内测量结构、吊篮筒体组件、堆芯围筒组件、导流板、二次支承组件、十字定位键、顶盖冷却管、法兰端塞组件、径向支承键、堆芯支承下板等零部件。

4.3.2 管辖边界

规定堆内构件的管辖边界，包括堆芯支承结构件和反应堆压力容器之间的边界、堆芯支承结构件和内部结构件之间的边界和堆芯支承结构件和临时附件之间的边界，见《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》的4.2节。

4.4 功能与分级

4.4.1 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。

4.4.2 分级

堆内构件的安全等级、抗震类别、质量保证等级和规范等级应遵守《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》及GB/T 17569的要求。

5 材料

5.1 通则

堆内构件用材料应符合本章、《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》以及相关材料共性专篇的规定。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。

5.1.1 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。

5.1.2 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。

5.1.3 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。

5.1.4 堆内构件材料应具有良好的耐辐照性能。

5.1.5 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。

5.1.6 堆内构件制造厂应按设计单位的技术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。

5.1.7 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。

5.1.8 应控制与冷却剂接触的设备材料的钴含量限值，与反应堆冷却剂接触的材料钴含量应不超过0.05%（质量含量）。

5.1.9 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) 06Cr19Ni10 和 07Cr19Ni10 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 07Cr19Ni10 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 06Cr19Ni10、07Cr17Ni9Mn8Si4N 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 038Cr13Ni4MnMoSi 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，其余零部件材料应满足相关国家标准、行业标准或材料技术条件的要求。设计单位应明确堆内构件部件采用的材料标准。当没有明确对应的材料标准时，应提供专用的材料技术规格书。

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	适用的标准
吊篮筒体、堆芯上板	06Cr19Ni10 和 07Cr19Ni10	压水堆承压部件 材料 第 24 部分： 压力容器和一般用途用耐热铬及铬镍不锈钢板、薄板和钢带
十字定位键、出口接管、人孔板	06Cr19Ni10 和 07Cr19Ni10	压水堆承压部件 材料 第 15 部分： 高温用锻制或轧制合金钢和不锈钢 公称管道法兰、锻制管配件、阀门和零件
上部支承板、上部支承板法兰、吊篮筒体法兰、堆芯支承下板	07Cr19Ni10	压水堆承压部件 材料 第 2 部分：高温承压件用合金钢锻件
螺钉、螺母、销	06Cr19Ni10、07Cr17Ni9Mn8Si4N、冷作 06Cr17Ni12Mo2 不 锈 钢 棒 和 冷 作 06Cr17Ni12Mo2 螺栓材料	压水堆承压部件 材料 第 16 部分： 锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材和型材 压水堆承压部件 材料 第 18 部分： 高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料
堆内测量格架组件	06Cr19Ni10 、 07Cr17Ni9Mn8Si4N 和 022Cr19Ni10	压水堆承压部件 材料 第 24 部分： 压力容器和一般用途用耐热铬及铬镍不锈钢板、薄板和钢带 压水堆承压部件 材料 第 18 部分： 高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料 压水堆承压部件 材料 第 16 部分： 锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材和型材

		压水堆承压部件 材料 第 32 部分： 热交换器用奥氏体不锈钢无缝钢管
防松装置	022Cr19Ni10 和 06Cr19Ni10	压水堆承压部件 材料 第 16 部分： 锅炉和其他压力容器用不锈钢棒材 和型材
导流围板	NS3105 合金	压水堆承压部件 材料 第 37 部分： 镍-铬-铁合金板、薄板和带材
压紧弹性环	038Cr13Ni4MnMoSi	压水堆承压部件 材料 第 15 部分： 高温用锻制或轧制合金钢和不锈钢 公称管道法兰、锻制管配件、阀门和 零件

5.2.2 不锈钢板材

不锈钢板材应满足相应材料标准和以下要求：

- 06Cr19Ni10 不锈钢板材碳含量控制在 0.065%以内；07Cr19Ni10 不锈钢板材碳含量控制在 0.04%~0.08%，目标值在 0.04%~0.065%之间；
- 06Cr19Ni10 和 07Cr19Ni10 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；
- 022Cr19Ni10 奥氏体不锈钢板材晶间腐蚀试验，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；
- 06Cr19Ni10 和 022Cr19Ni10 不锈钢板材应采用细晶粒制造工艺，对 07Cr19Ni10 不锈钢板材应采用粗晶粒制造工艺。

5.2.3 不锈钢锻件

不锈钢锻件应满足相应材料标准和以下要求：

- 06Cr19Ni10 不锈钢锻件碳含量控制在 0.065%以内，07Cr19Ni10 不锈钢锻件碳含量控制在 0.04%~0.08%，目标值在 0.04%~0.065%之间；
- 06Cr19Ni10 和 07Cr19Ni10 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；
- 022Cr19Ni10 奥氏体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；
- 06Cr19Ni10 和 022Cr19Ni10 不锈钢锻件应采用细晶粒制造工艺，对 07Cr19Ni10 不锈钢锻件应采用粗晶粒制造工艺。

5.2.4 压紧弹性环

压紧弹性环材料应满足相应材料标准和以下要求：

- a) 压紧弹性环宜采用 038Cr13Ni4MnMoSi；
- 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

NS3105合金板材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) GH4145 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的规定。

6 设计

6.1 通则

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 堆内构件与反应堆压力容器的接口要求

- a) 规定堆内构件与反应堆压力容器的接口要求。主要包括平均压应力、径向间隙和周向间隙等要求。
- b) 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；
- c) 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；
- d) 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间隔内插入堆芯；
- 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) 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；
- e) 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 安装、调试、换料与在役检查要求

规定堆内构件安装、调试、换料与在役检查要求。主要包括操作最简化、在役检查可达性和换料期间检查要求等。

- 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。

6.4 热工水力设计要求

- 6.4.1 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。
- 6.4.2 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容积沸腾。
- 6.4.3 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。
- 6.4.4 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变化不会引起导致控制棒过大振动的横向流体流动。
- 6.4.5 尽可能减少冷却剂无效漏流。
- 6.4.6 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。

6.5 结构设计要求

- 6.5.1 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。
- 6.5.2 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。
- 6.5.3 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。

- 6.5.4 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。
- 6.5.5 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。
- 6.5.6 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。
- 6.5.7 应使用焊接或机械方法锁紧定位销。
- 6.5.8 辐照监督管支架要求：
- 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；
 - 应能从反应堆压力容器内远程移出辐照监督管；
 - 辐照监督管应能顺畅地通过已组装的辐照监督管支架；
 - 外型尺寸应减小对下降环腔区域流场的不利影响。
- 6.5.9 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，尽量使螺栓头、螺杆或螺纹部分都不脱出；
 - g) 紧固件的设计应考虑在材料上进行焊接操作所产生的影响；
 - 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。
- 6.5.10 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) 冲击载荷不能影响反应堆压力容器底封头的结构完整性。

6.6 允许变形

- 6.6.1 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。
- 6.6.2 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。
- 6.6.3 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。

6.6.4 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。

6.6.5 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。

6.6.6 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。

6.6.7 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。

6.6.8 对于正常运行和事故工况，堆内构件部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。

6.7 分析法设计

6.7.1 载荷

6.7.1.1 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。

6.7.1.2 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：必须对作用于需评定部件上的机械载荷进行分析，以满足应力限制，设计温度和相应环境条件下设计工况限制，载荷包括：
 - 自重；
 - 浮力；
 - 机械设计流量（以下简称 MDF）下的水力载荷；
 - 机械弹簧力（包括压紧弹性环、燃料组件和相关组件的弹簧力）。

6.7.1.3 A 级使用载荷

除了设计载荷的要求，必须对部件在正常工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下A级使用限制，正常工况载荷包括：

- a) 反应堆冷却剂系统正常运行工况下的设计瞬态；
- b) 非能动安全系统设计瞬态（若有）；

- c) 机械设计流量下的水力载荷；
- d) 机械设计流量下的流致振动载荷；
- e) 机械设计流量下的泵致振动载荷；
- f) 由于温差或异种材料热膨胀引起的热载荷；
- g) 位移载荷；
- h) 支承载荷；
- i) 长期辐照发热率。

6.7.1.4 B 级使用载荷

除了上述A级使用载荷，必须对部件在异常工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下B级使用限制，不同于或者大于正常工况下的异常工况载荷包括：

- a) 反应堆冷却剂系统异常工况下的设计瞬态；
- b) 非能动安全系统设计瞬态（若有）；
- c) 低水平地震（LLSE）载荷；
- d) 主泵超速流量下的水力载荷；
- e) 短期辐照发热率。

6.7.1.5 C 级使用载荷

C级使用载荷主要为小失水事故下的相关水力载荷，包括：

- a) 机械设计流量下的水力载荷；
- b) 自重
- c) 浮力
- d) 机械设计流量下的流致振动载荷；
- e) 机械设计流量下的泵致振动载荷；
- f) 机械弹簧力（包括压紧弹性环、燃料组件和相关组件的弹簧力）
- g) 小 LOCA 相关的水力载荷。

6.7.1.6 D 级使用载荷

D级使用载荷主要为SSE和满足破前漏（LBB）规则的LOCA载荷。后者又分为声速力（水锤力），水力和惯性力。其中，水力和惯性力必须直接相加，然后与声速力以平方和的平方根法（SRSS）组合。SSE和LOCA载荷应采用SRSS组合。

此外，SSE和LOCA的载荷组合还需用于证明下导向筒的横向载荷小于限值。

D级使用载荷包括：

- a) 机械设计流量下的水力载荷；
- b) 自重

- c) 浮力
- d) 机械设计流量下的流致振动载荷；
- e) 机械设计流量下的泵致振动载荷；
- f) 机械弹簧力（包括压紧弹性环、燃料组件和相关组件的弹簧力）
- g) SRSS (SSE+LOCA)。

6.7.1.7 试验载荷

试验载荷应在设计规范书中规定，包含电厂预运行工况的冷态试验和热态功能试验。

堆内构件设计应考虑与电厂预运行工况相关的机械、热工和水力等载荷；

热态功能试验是预运行试验的一部分。根据要求应在热态功能试验期间进行堆内构件高周疲劳可靠性验证。通常情况下试验期的流量比机械设计流量大，所以不为正常工况所包络，因此在低周疲劳中，需加入此部分的疲劳因子。

6.7.1.8 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，以确保设计满足适用要求，包括疲劳要求。

6.7.1.9 吊装载荷

必须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）进行分析，以确保设计满足适用要求。只需要考虑吊装操作中可能出现的载荷。

6.7.2 载荷组合

反应堆堆内构件各种载荷的组合在正常、异常、危急和事故工况条件下分别进行。表2列出了使用载荷与使用限制关系，表3列出了堆芯支承结构件的载荷组合，表4、表5列出了紧固件的载荷组合。

表2 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 ^{a, e}	使用限制
设计	水力（MDF）+（自重+浮力） ^d + 机械弹簧力	设计
正常	水力（MDF）+（自重+浮力） ^d + 振动（MDF）+ 热梯度（正常瞬态+异种材料）+ 位移 ^c + 机械弹簧力	A 级
异常	水力（MDF）+（自重+浮力） ^d + 振动（MDF）+ 热梯度（异常瞬态+异种材料）+ 位移 ^c + 低水平地震 ^b （LLSE）+ 机械弹簧力	B 级
危急	水力（MDF）+（自重+浮力） ^d + 机械弹簧力+振动（MDF）+小 LOCA	C 级
事故	水力（MDF）+（自重+浮力） ^d + 机械弹簧力+振动（MDF）+SRSS（LOCA & SSE）	D 级
^a 对于堆内构件而言，因为压力平衡，所以压差可以忽略。		

- ^b LLSE 载荷仅用于疲劳评定。

^c 预紧力可视为位移引起的载荷的一部分。

^d 自重+浮力对于部件的应力而言，一般都可以忽略不计。

^e 支承应力是根据支承载荷单独计算。

表3 堆芯支承结构件的载荷组合

P _m , P _a +P _b 和 P _m +P _b +Q 应力强度					
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	√	√	√	√	√
水力载荷 ^a	√	√	√	√	√
流致振动及泵致振动载荷 ^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	√	√	√	√	√
机械弹簧力	√	√	√		
瞬态热载荷		√	√		
低水平地震事件（LLSE） ^b			√		
LOCA 载荷 ^{c, d}				√	√
安全停堆地震（SSE） ^d					√
运输和吊装		√			
<div><p>^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。</p><p>^b 低水平地震事件（LLSE）载荷只用于疲劳评估。</p><p>^c 总的 LOCA 载荷包括适用的 LOCA 条件下的压差、水力、声学 and 惯性载荷。</p><p>^d SSE 及 LOCA 惯性载荷皆来源于系统动态分析。</p><p>^e LOCA 惯性载荷来源于系统分析响应谱。</p></div>					

6.7.3 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4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5所示。

表4 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/试验	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		$U < 1.0$
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 $0.7 S_u$)
	$P_m (P_L) + P_b$ 应力强度		较小值 ($3.6 S_m$ 或 $1.05 S_u$)
	平均一次剪切应力		$0.42 S_u$
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)	$0.6 S_m$
		支承应力 (销钉)	S_y
	纯剪切	平均一次剪应力	$0.6 S_m$
		最大一次剪切应力	$0.8 S_m$

表5 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 级/B 级 ^a	$P_m + Q_m$ 应力强度 ^d (螺杆或是螺纹)	较小值 ($0.9 S_y$, $2/3 S_u$)
	平均螺纹剪切应力 ^d	$0.6 S_y$
	螺头下平均支承应力 ^d	$2.7 S_y$
	P_m 应力强度 (螺杆或是螺纹)	S_m
	预紧力评定	$S_{pre} > S_{tot} - S_{pre}$ (或 $F_{pre} > F_{applied}$)
	一次螺纹剪切应力	$0.6 S_m$
	$P_m + P_b + Q_m + Q_b$ 应力强度 (螺杆或是螺纹) ^d	$1.33 \times$ 较小值 ($0.9 S_y$ 或 $2/3 S_u$)
	$P_m + Q_m$ 安装应力强度 (螺杆或是螺纹) ^b	$1.2 \times$ 较小值 ($0.9 S_y$ 或 $2/3 S_u$)

	$P_m + P_b + Q_m + Q_b$ 安装应力强度（螺杆或是螺纹） ^b	$1.2 \times 1.33 \times \text{较小值} (0.9S_y \text{ 或 } 2/3S_u)$
	$P_m + P_b + Q_m + Q_b$ 应力强度	$0.9S_y$
	$P_m + P_b + Q + F$ 疲劳累积因子	$U < 1.0$
C 级	P_m 应力强度 ^c	$1.5S_m$
	$P_m + P_b$ 应力强度 ^c	$2.25S_m$
D 级	P_m 应力强度	较小值 ($2.4S_m$ 或 $0.7S_u$)
	P_m (或 P_L) + P_b 应力强度	$1.5 \times \text{较小值} (2.4S_m \text{ 或 } 0.7S_u)$
	平均一次剪切应力	$0.42S_u$
	P_m 应力强度 ^c	$2.0S_m$
	$P_m + P_b$ 应力强度 ^c	$3.0S_m$
^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。		

6.7.4 分析方法

针对构件在设计、正常、异常、危急、事故、试验工况下的各个载荷进行应力分析。所得到的应力分为一次应力和二次应力。

一次应力是需要满足平衡规律的载荷所产生的，原则上是使用理论公式计算，一般水力、振动、地震、失水等载荷产生的剪应力都是一次应力。一次应力的目的是防止结构性的破坏，所以必须满足规范的限值。

注意：

- a) 低水平地震（LLSE）载荷虽然产生一次应力，但无需并入一次应力的规范计算；
- b) 在危急和事故工况下，仅考虑一次应力。

二次应力是自限的载荷，譬如热梯度、预紧力、弹簧力、或者位移，所产生的应力以及不需满足平衡规律的力矩所造成的弯曲应力。一般二次应力需要用有限元计算，分析者必须根据应力集中点，决定那些是最可能产生疲劳断裂的截面，计算截面上的薄膜和弯曲应力。

6.7.4.1 热分析方法

堆内构件热分析的步骤是：

- a) 根据堆内构件的各个设计瞬态的温差以及温差速率进行包络，并分为上、下两类；

- b) 建立热分析有限元模型；
- c) 输入包络瞬态的温度时程以及相应的辐照发热率，进行温度场的时程分析；
- d) 将热分析有限元模型，转换为结构分析有限元模型；
- e) 利用热瞬态温度曲线的拐点为参考，输入拐点后的数个时间点的温度场，计算各时间点的应力分布，并找出最大应力强度值、位置及其时间；
- f) 取得与最大应力点的峰值应力强度和相应截面上的薄膜和弯曲应力。

以上得到的热薄膜和弯曲应力，作为二次应力，与一次薄膜加弯曲各应力分量代数和相组合得到一次加二次应力强度范围。计算二次应力的目的是为了疲劳评估，所以一次加二次应力范围限值允许超出的。

6.7.4.2 疲劳分析方法

需要在正常、异常和试验工况下，考虑疲劳评估，其又分为低周和高周疲劳评估。危急和事故工况下，不考虑疲劳评估。

6.7.4.2.1 低周疲劳

- a) 首先将各个瞬态配对，以形成最大应力范围的组合为第一优先，在薄膜加弯曲应力分量的基础上，得到相应的应力强度范围，与一次加二次应力限值（3Sm）比较；
- b) 如果满足 3Sm 限值，可以用峰值应力，或者以一次加二次薄膜加弯曲应力然后乘以应力集中因子，（加上调整弹性模量）以求得该循环组合的交变应力强度值；
- c) 根据该交变应力强度值从设计疲劳曲线上查得对应的许用循环次数 N_i ，再与该组合的设计循环次数 n_i 对比，得到 n_i/N_i ，即为该组合的疲劳使用因子。如此再求得次大的应力范围组合和疲劳使用因子，以此类推，直到所有的循环都已包括；
- d) 如果不满足 3Sm 限值，可以在满足相关条件下，使用应变惩罚因子（ K_e ），进行简化弹塑性分析，其余的程序相同；
- e) 注意低水平地震（LLSE）因为是循环载荷，所以需要在低周疲劳中考虑。此外，流致振动和泵致振动，包括热态功能试验，也需与各个热瞬态，一并计入低周疲劳评估；
- f) 各个疲劳使用因子的总和即为累积疲劳因子。其累积疲劳因子必须小于 1.0；
- g) 螺栓类的疲劳评估相似，但不允许应力强度超过容许值，且不能使用弹塑性分析。

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i}$$

6.7.4.2.2 高周疲劳

高周疲劳是计算在正常工况（机械设计流量）下，由于流致振动和泵致振动所引起的交变应力。其交变应力强度必须小于规范要求。

6.7.4.2.3 其他要求

- a) 圆柱型结构，例如导向筒，支承柱，二次支承柱 和燃料周边的堆芯围筒的自然频率需要避开主泵及其叶片正常运转的 1R、2R 频率 10%以上。如果不能避开，则需评估其振幅，不能危及结构和燃料；
- b) 细管状结构，例如堆芯测量管，需评估其受漩涡脱落锁定的可能。

6.7.4.3 地震和 LOCA 分析方法

因为压力容器和堆内构件的部件间，存在诸多间隙，所以在地震和失水事故中，会产生部件间的非线性碰撞，所以一般都采取时程法分析，以确定反应堆堆内构件的动态响应。

应首先建立压力容器和堆内构件的系统模型，此模型包括燃料，一体化堆顶、相连的管道以及压力容器支撑。其次要确定其在空气中以及在水中的频率及振型与试验结果相符。然后加入代表各个间隙的碰撞单元。

在地震分析中，一般在压力容器支撑处，输入加速度时程。在失水事故分析中，则输入作用在压力容器和堆内构件主要部件上的载荷时程。

以上分析所得结果，都视为系统力，或者称为惯性力。

7 制造

7.1 机械加工

7.1.1 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。

7.1.2 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，并如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。

7.1.3 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。

7.1.4 图纸未注明倒角的锐边，均需倒圆或倒棱。

7.1.5 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。

7.1.6 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。

7.1.7 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 20233 的有关规定执行。

7.1.8 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。

7.1.9 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。

7.1.10 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。

7.1.11 螺栓必须整体由棒材制成，头部不允许镦锻。螺栓头内六角凹孔采用机加工的方法。

7.1.12 不允许采用镀层超过 0.05mm 的表面镀铬处理来达到零件的尺寸精度要求，以防镀层可能在清洗过程中耗蚀或脱落。禁止使用除镀铬之外的镉、铜、镍、银等其他镀层。

7.1.13 除非设计图纸有特殊要求，零部件机加工表面的粗糙度 Ra 应为 $3.2\ \mu\text{m}$ 或更好，非机加工表面的粗糙度 Ra 应为 $6.3\ \mu\text{m}$ 或更好。

7.1.14 不拆卸紧固件宜采用机加工工艺，经常拆卸的紧固件宜采用滚压工艺。两种工艺均可使用，具体要求由设计院在规格书中规定。

7.2 成形工艺

7.2.1 可用任何方法将堆内构件（包括焊缝）进行热成形、冷成形或弯曲，但应保证材料的冲击性能不低于最小规定值以下，或通过后续热处理能够有效恢复冲击性能。热成形被定义为材料成形温度高于材料的下相变温度以下 56°C 时的成形。需要时，该工艺应按《压水堆承压部件 设计与制造 第 6 部分：堆芯支承结构》所提出的关于冲击性能的要求作评定。

7.2.2 应按照《压水堆承压部件 设计与制造 第 6 部分：堆芯支承结构》的有关要求进行成形工艺的评定试验。

7.3 焊接

7.3.1 总则

所有焊缝的焊接均应在焊接工艺评定合格后，由专门接受过焊接技术培训且取得了合格证书、技能熟练且有经验的焊接人员实施。

7.3.2 焊接工艺评定

7.3.2.1 总则

堆内构件焊接工艺评定应满足《压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求》、《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》和《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》的要求。

7.3.2.2 敏化的控制

对于非L级和非稳定化不锈钢材料，当需要焊接时，其焊接工艺评定的最大焊接热输入和母材最大碳含量应能覆盖相应的产品，具体要求如下：

- a) 工艺评定焊件应由两块 13mm 厚的 06Cr19Ni10 材料拼接而成。最小焊缝长度为 150mm。304 型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 06Cr19Ni10 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《压水堆承压部件 焊接 第 2 部分：焊接工艺评定》要求的补充信息。热输入的计算公式为：

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

焊接速度单位为 mm/min，热输入单位为 J/mm。

- c) 不锈钢焊缝应根据 NB/T 20004 方法二的要求进行晶间腐蚀试验。表面加硬堆焊应根 GB/T 4334 的“A”法要求进行晶间腐蚀试验。
- 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。

7.3.3 焊接人员技能评定

- a) 焊接人员应按满足《压水堆承压部件 焊接 第 1 部分：焊接通用要求》。
- b) 当焊接人员与焊接接头之间的距离被物理条件限制在从任何方向上都小于 30cm 时（这种情况会影响电焊操作或焊道连续性，或要求采用间接的熔池观察方式（比如采用镜子反射）），应在模拟实际的物理可达性和目视可达性的条件下对焊接人员和焊接操作工进行技能评定。评定应模拟焊接人员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。
- c) 对于防松销焊缝，要求进行专门焊接人员评定，评定应包括在产品焊接位置上试焊几条典型的防松销焊缝，这些焊缝应按照《压水堆承压部件 设计与制造 第 6 部分：堆芯支承结构》的要求进行目视检测和宏观检验。每个焊缝应取横截面，打磨抛光并进行侵蚀。对焊缝金属和热影响区采用 5~10 倍放大镜进行目视检测，应显示完全熔合，没有裂纹。如焊工在 6G 位置通过了其他项目的评定，则防松销焊缝的焊工评定可以是任何位置。06Cr19Ni10 不锈钢防松销焊工评定合格后，则可焊接所有锁紧装置。

7.3.4 特殊要求

7.3.4.1 焊接材料

焊接材料应满足《压水堆承压部件 焊接 第 4 部分：焊接材料验收》、《压水堆承压部件 焊接 第 6 部分：不锈钢焊丝》、《压水堆承压部件 焊接 第 5 部分：不锈钢手工电弧焊焊条》、《压水堆承压部件 焊接 第 8 部分：不锈钢焊丝和焊剂》、《压水堆承压部件 焊接 第 11 部分：镍基合金焊丝》、《压水堆承压部件 焊接 第 9 部分：镍基合金手工电弧焊焊条》、NB/T 20009.14 及本标准的要求。

7.3.4.1.1 化学成分

用于堆内构件的焊接材料，其焊丝和熔敷金属（埋弧焊焊丝焊剂、手工电弧焊焊条）中Co含量应不大于0.05%。

对于不锈钢焊材，还应提供V，Ti，N，Cb+Ta的实测数据。

对于镍基合金焊材，还应提供N，W，V的实测数据。

7.3.4.1.2 高温拉伸试验

全焊缝金属高温拉伸试验应分别在焊态和焊后热处理态（如需）下进行，性能应满足相应母材及设备规格书的要求。

7.3.4.1.3 冲击韧性试验

全焊缝金属冲击试验应分别在焊态和焊后热处理态（如需）下进行，性能应满足相应母材及设备规格书的要求。

7.3.4.1.4 铁素体含量

对于不锈钢焊接材料，按照《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》要求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5FN~15FN（目标12FN）。

7.3.4.1.5 晶间腐蚀试验

晶间腐蚀试验应按NB/T 20004-2014中第18.3节方法二的规定进行，分别在焊态和焊后热处理状态（如需）下进行。试样经 $675\pm 5^{\circ}\text{C}\times 1$ 小时的敏化处理。试验结果应无晶间腐蚀倾向。

7.3.4.1.6 见证

焊接材料在制造的过程中，采购方应进行质量的监督和见证，采购方的代表可在制造厂进行见证，见证点应由供需双方作为订货合同的一部分在合同中作出规定。

7.3.4.1.7 焊接材料的验收

为了保证在生产中采用的焊接材料具有稳定的质量，凡进厂入库的焊接材料必须按炉（批）号并依据订货技术条件进行验收，复验合格后方可使用。如焊接材料是专门定货的，可由订货方派出有资格的检验人员进行现场监造，并有完整的试验报告及质量合格证书，则可免作验收试验。

7.3.4.1.8 焊接材料的管理

制造厂必须具备完整的焊接材料的识别、贮存、使用的管理体系，焊接材料的使用，应严格按照其识别、贮存和管理等的规定执行。

制造厂必须根据使用条件、所使用的贮存方法和分配方法规定出库材料的最大数量，以使焊接材料性能免受损失。

焊条应按说明书规定烘干，放入保温筒中，随用随取，且在保温筒中的存放时间不得超过8小时。焊条的回烘次数不得超过一次。

焊丝使用前，必须清除表面的油脂，氧化膜和杂质，并用白绸布沾丙酮擦洗干净。

一般情况下不推荐焊剂循环使用，特别是含有金属元素铬的烧结型焊剂。

7.3.4.2 产品焊缝制造

7.3.4.2.1 总则

堆内构件产品焊缝的焊接应满足《压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求》和《压水堆承压部件 焊接 第3部分：产品焊接》的要求。

所有材料必须符合材料技术条件、设备规格书和图纸的规定，并具有符合质保程序要求的完整的出厂质量合格证书，并且验收合格。

产品焊缝施焊前应进行焊接工艺评定，评定合格后，提出焊接工艺评定报告。以合格的焊接工艺评定为依据，结合设计图纸、制造要求、本技术条件及实践经验，制定焊接工艺规程。

7.3.4.2.2 焊接准备工作

a) 焊件的坡口加工必须采用机械方法，坡口形式按有关图纸规定。

待焊表面应按《压水堆承压部件 无损检测 第7部分：目视检测》的规定进行目视检测，待焊表面不应有裂纹和类似裂纹、锈蚀和其它影响质量的气孔、夹渣等缺陷。

b) 在待焊表面（坡口），按《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》的规定进行100%液体渗透检测，检测结果应满足《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》的要求。

c) 待焊表面的清洁度要求为：无水、无油脂、无油污、无氧化物、无铁锈、无赃物、无毛刺和其它可能影响焊接质量的杂质。对于待堆焊的母材，还不允许有任何尖角形的几何形状。

d) 调整和检验焊接参数用的测量仪器仪表应进行校验，前后两次校验的间隔应按相应法规、标准要求。

7.3.4.2.3 产品焊缝的制造范围

a) 每个焊接接头都应有焊工的识别标记，详见《压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求》5.1.3的规定。

b) 焊接时，其环境温度应不低于-10℃，相对湿度不大于90%，焊件的温度至少保持在10℃。不允许在潮湿的表面上进行焊接。焊接场所应防止空气对流，且应保持整洁。

c) 焊接过程中，不允许在非焊接表面上引弧、熄弧，并且还应对非焊接表面采取适当的保护措施，以免损伤。

d) 为确保根部焊缝质量，所有焊缝应采用钨极氩弧焊打底。埋弧焊和手工电弧焊不能用于根部焊道，除非接头采用双面焊，并进行根部焊缝背面清根以及采用液体渗透检查证明根部无缺陷。

- e) 单面焊双面成型对接接头焊接时，在焊缝厚度达到 5mm 之前必须采用背面充氩气的保护措施以保证焊缝背面成型和提高接头性能。
- f) 可以使用衬垫，但必须确保能完全去除。所有衬垫材料应满足母材的化学成分要求。在去除衬垫材料后，焊缝根部应进行目视和液体渗透检测。在进行射线或超声波检测前应去除衬垫。
- g) 对每一焊道，都应仔细清理焊缝表面熔渣及飞溅物。对影响下一焊道焊接质量的缺陷应予清除，并经检验合格后方能继续施焊。应采用不锈钢丝刷或其他机械方法来进行清洁，不锈钢刷必须是新的或仅在不锈钢或镍基材料上使用过的。
- h) 气体保护焊焊丝每次焊接前都应将焊丝头剪掉 10mm 左右，以防端部有污物带入焊缝。
- i) 焊缝的表面状态必须满足无损检测的相应要求。
- j) 所有对接焊接接头焊缝的表面可以和母材齐平，或有一个均匀的焊缝余高，焊缝余高不得大于 2.5mm。
- k) 角焊缝的形状与尺寸应符合图纸等要求。
- l) 角焊缝和部分焊透焊缝的装配间隙应不超过 $1/2T$ 或 3mm 两者中的较小者，其中 T 为较薄焊接连接件的厚度。当允许有根部间隙时，在满足角焊缝尺寸限制条件下，具体的角焊缝尺寸应根据间隙的增大而增大。
- m) 点焊焊点，必须占据两个零件中间匀称位置，焊点布置必须匀称。为避免母材表面烧伤，引弧应尽量采用高频引弧。定位焊应在待焊的表面进行，并尽可能被后续焊缝覆盖。定位焊缝应进行目视检查，有缺陷的定位焊缝应进行去除，并重新焊接。

7.3.4.3 与焊缝相关热处理

与堆内构件焊接有关的热处理包括预热、道间温度、后热、焊后热处理等，尺寸稳定化处理不作为影响焊接工艺评定有效性的因素。对于堆内构件的尺寸稳定化处理温度推荐为 $400\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

7.3.4.4 焊接温度控制

焊接应尽量采用低的热输入。对于不锈钢焊接，道间温度应不大于 180°C ；对于点固焊、防松锁紧焊、断续焊，建议最大道间温度为 100°C 。

7.3.4.5 产品焊缝的无损检测

根据设备规格书和图纸的要求对焊缝进行检验。

7.3.4.6 缺陷的去除和焊补

- a) 焊缝中发现不允许的缺陷应采用机械的方法清除。
- b) 需要补焊区域应进行液体渗透检查，应满足 7.7.2.2 的规定。
- c) 焊接修补应采用评定合格的焊接工艺，焊材应满足 7.3.4.1 的规定，焊工应满足 7.3.3 的规定。
- d) 焊接修补以后对焊缝最终表面的要求应与产品原要求相同，并经受与原产品相同的无损检验。

- e) 同一部位的补焊的次数以两次为限。
- f) 焊后热处理以后不允许焊补。

7.3.4.7 焊接见证件的制造

7.3.4.7.1 焊接见证件设置的目的

焊接见证件的设置，为证明产品焊缝的质量及其均匀性，以及保证与焊接工艺评定试验中所确定的相一致的实施条件。

7.3.4.7.2 焊接见证件的设置数量

焊接见证件的设置应由设计方确定。

7.3.4.7.3 焊接见证件制备

- a) 见证件焊接接头的尺寸应与产品焊缝接头尺寸相同，长度应满足全部试样的规定要求。见证件应有试样保留件，保留件应存放起来。直到焊接见证件记录报告得到验收或工程结束为止。
- b) 见证件应取自吊篮筒体母材同一炉（批）号材料。
- c) 见证件的焊接材料应取自与产品焊缝所用同一批号的焊接材料。
- d) 见证件的焊前准备应与正式产品焊缝焊口准备相同。

7.3.4.7.4 焊接见证件焊接

在质检部门监督下，由参加产品焊接的焊工或焊接操作工，采用与产品焊缝相同的位置、焊接参数、焊接工艺和相同类型的焊接设备来焊接见证件，见证件的焊后热处理应随产品焊缝同炉热处理，当有特殊困难不能随炉焊后热处理的情况下，产品焊接见证件热处理的总的保温时间应等同于相应产品相应焊缝经历的中间热处理和最终焊后热处理全部时间的总和，并应得到设计方的认可。焊接见证件的记录内容应和焊接工艺评定中记录的内容相同。

7.3.4.7.5 焊接见证件的无损检测

焊接见证件接头应经受与产品焊缝相同的无损检验，并采用相同的验收标准。

7.3.4.7.6 焊接见证件的破坏性试验

焊接见证件应尽快完成试验，在任何情况下都应该在焊接和焊后热处理完成后2个月内完成。焊接见证件的破坏性检验应符合焊接工艺评定的相关试验要求。

7.3.4.8 表面加硬堆焊

- a) 表面加硬堆焊时，焊丝应采用钨极气体保护焊。焊条应采用手工电弧焊。如需采用其他焊接方法，应在实施前获得认可。

- b) 表面加硬堆焊层表面机加工完成后, 厚度 t 应满足图纸的要求, 可采用单层或多层表面加硬堆焊。
- c) 最佳堆焊的位置为水平位置。
- d) 表面加硬堆焊的工艺文件中应明确地规定产品堆焊的预热温度。待堆焊表面应均匀地预热, 预热温度的选择与所采用的堆焊方法和堆焊金属成分、母材化学成分、待堆焊金属的尺寸有关。在整个堆焊过程中, 温度不得降低到预热温度以下; 当堆焊中断时, 重新开始堆焊之前应继续保持预热温度。堆焊的预热和道间温度应不超过 400°C 。
- e) 表面加硬堆焊焊接工艺规程中必须明确标出焊道的分布和未经加工的堆焊层数。
- f) 应制定一个表面加硬堆焊后工件的合适冷却方式的工艺。
- g) 表面加硬堆焊后可根据工艺需要进行后热、焊后热处理或稳定化处理。

7.4 热处理

7.4.1 焊后热处理

焊后热处理应符合《压水堆承压部件 焊接 第3部分: 产品焊接》的要求。

7.4.2 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。应满足以下要求:

- a) 炉氛为受控气氛(惰性气体、真空或氢气);
- b) 处理之前需彻底清洗, 确保热处理件表面不存在可降低产品耐腐蚀性的任何残余物质(卤化物或碳化物及氧化铁屑);
- c) 在恒定的加热速率下, 零件应均匀加热, 保温温度在 $1050^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 保温 10 min;
- d) 零件排列应该避免零件在热处理过程中变形;
- e) 在受控气氛中尽可能快地冷却至 120°C ;
- f) 光亮退火处理之后, 热处理件外观应光亮且无氧化痕迹。

7.5 镀铬

堆内构件的镀铬工艺应满足《压水堆核电厂核岛机械设备制造规范》的要求。

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。

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 无损检测

7.7.1 总的要求

堆内构件材料和制造过程中的无损检验应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》、本标准第2章引用的相关无损检验规范以及本标准的要求。无损检测规程应按要求提交采购方或设计方认可。

7.7.2 制造过程中的无损检测

7.7.2.1 表面目视检验

规定焊缝表面目视检验的要求。主要包括放大镜的倍率、验收准则和检验标准等。

用大于5倍的放大镜对焊缝进行检验，焊缝的目视检测按《压水堆承压部件 无损检测 第7部分：目视检测》的规定进行，同时满足以下要求：

- a) 焊缝表面应平整、光洁、外形几何尺寸符合图纸要求。对接焊缝的两侧应平缓过渡，点焊焊缝呈中间凸起的圆弧形。
- b) 焊缝表面不得有裂纹、气孔、咬边、焊瘤、未熔合、夹钨等焊接缺陷。
- c) 点焊焊缝表面及其周围出现氧化色时，应用机械的方法清除干净。

- d) 堆焊层经机加工后, 为了提高抗腐蚀性能, 要求表面处在良好的研磨状态, 表面光洁度应符合图纸要求。

7.7.2.2 液体渗透检验

- a) 焊缝的液体渗透检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第4部分: 渗透检测》执行, 并按《压水堆承压部件 无损检测 第4部分: 渗透检测》的要求进行验收。
- b) 表面加硬堆焊层的液体渗透检测应按《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分: 堆芯支承结构》的要求进行验收。

7.7.2.3 射线检验

焊缝的射线检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第3部分: 射线检测》的要求。

7.7.2.4 超声检验

焊缝的超声检测应符合《压水堆承压部件 无损检测 第2部分: 超声检测》的要求。

7.8 标记

7.8.1 堆内构件的标记应满足《压水堆核电厂核岛机械设备制造规范》的要求。

7.8.2 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。

7.8.3 原材料落料的余料应标记。

7.8.4 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。

7.8.5 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。

7.8.6 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。

7.8.7 不应在焊缝或热影响区进行蚀刻。

7.8.8 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。

7.9 清洁、包装、运输与贮存

7.9.1 清洁

规定堆内构件的清洁要求。主要包括清洁度的控制、清洁方法等。

7.9.1.1 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。

7.9.1.2 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 20233有关规定执行。

7.9.1.3 清洁方法

7.9.1.3.1 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 20233的有关规定。磨削时避免工件局部过热。

7.9.1.3.2 化学清洗

7.9.1.3.2.1 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。

7.9.1.3.2.2 脱脂去油

脱脂去油应按NB/T 20233的有关规定执行。

7.9.1.3.2.3 酸洗

酸洗应按NB/T 20233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。

7.9.1.3.2.4 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《压水堆核电厂核岛机械设备制造规范》的有关规定执行。

7.9.1.3.2.5 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 20233的有关规定。

7.9.1.3.3 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。

7.9.1.4 清洁度的检查

堆内构件零部件清洁度检查应按其NB/T 20233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。

7.9.2 包装

7.9.2.1 堆内构件的包装应满足 NB/T 20408。

7.9.2.2 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。

7.9.2.3 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。

7.9.2.4 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。

7.9.2.5 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。

7.9.2.6 产品包装前,应进行最终清洗,应满足《压水堆核电厂设备清洁和清洁度要求、防污染要求》和相关技术条件的规定。

7.9.2.7 与产品接触的包装材料应满足《压水堆核电厂设备清洁和清洁度要求、防污染要求》和相关技术条件的规定。

7.9.2.8 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。

7.9.3 运输

7.9.3.1 堆内构件的运输应满足 NB/T 20408。

7.9.3.2 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。

7.9.4 贮存

7.9.4.1 堆内构件的贮存应满足 NB/T 20408。

7.9.4.2 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。

7.9.4.3 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。

7.9.4.4 堆内构件贮存期间，严格禁止无关人员进入。

7.9.4.5 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。

8 试验

8.1 总则

试验根据其目的不同可分为设计验证试验和出厂试验，设计验证试验是检验和表征新型设计的反应堆堆内构件设计满足设计性能参数及核安全要求的必要手段，主要为堆内构件水力模拟试验、堆内构件流致振动模拟试验和实堆流致振动试验，出厂试验是检验堆内构件制造质量和验证堆内构件结构功能的重要环节，主要为导向筒摩擦力试验、通规试验等。

8.2 设计验证试验

8.2.1 堆内构件水力模拟试验

堆内构件水力模拟试验的主要目的是采用经过简化的缩比或1:1压力容器和堆内构件模型研究反应堆堆内流体的流动特性，来验证堆芯进口流量分布的均匀性和计算流体动力学模型分析结果的正确性和可靠性。

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) 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。

8.2.2 堆内构件流致振动模拟试验

堆内构件流致振动模拟试验的主要目的是采用经过简化的缩比或1:1压力容器和堆内构件模型研究堆内构件在电厂预期瞬态和稳态工况下的流致振动行为,来验证堆内构件流致振动模型分析结果的正确性和可靠性,从而验证堆内构件设计的合理性。

试验主要包括以下内容:

- a) 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。

8.2.3 实堆堆内构件流致振动试验

堆内构件振动综合评价大纲包括振动和应力分析大纲、振动和应力测量大纲和检查大纲,应根据堆内构件的分类完成相应的大纲,以验证堆内构件能够承受在寿期内的反应堆正常运行时的稳态和瞬态流致振动载荷,验证反应堆堆内构件的结构完整性及其安全裕量。

试验前应制订试验大纲,试验大纲是实堆热态功能调试大纲中的一个子项。试验大纲中的测量工况应在调试大纲的计划工况中。

实堆流致振动试验应至少包括以下工况:

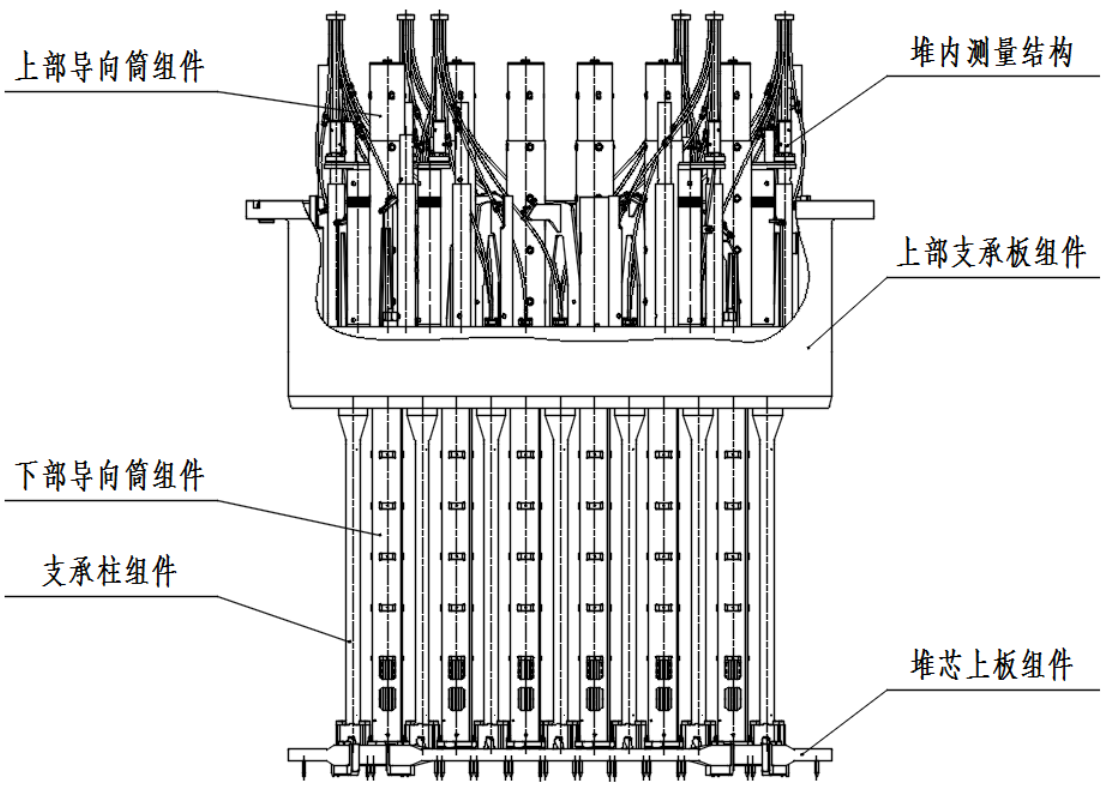
- a)主泵启动、惰转等预期瞬态工况;
- b)设计的额定流量下稳定运行时稳态工况下的结构振动和应力响应;

c)对于原型堆,在正常运行状态下所有试验计划的持续时间,应保证在堆内构件最终检查前各关键部件将经历至少106次的振动循环(即按某一重要部件的最低频率计算得到的循环数)。对于非原型堆,堆内构件试验的持续时间应不少于堆内构件设计分类(即有效原型、条件原型或限定有效原型)的试验持续时间。

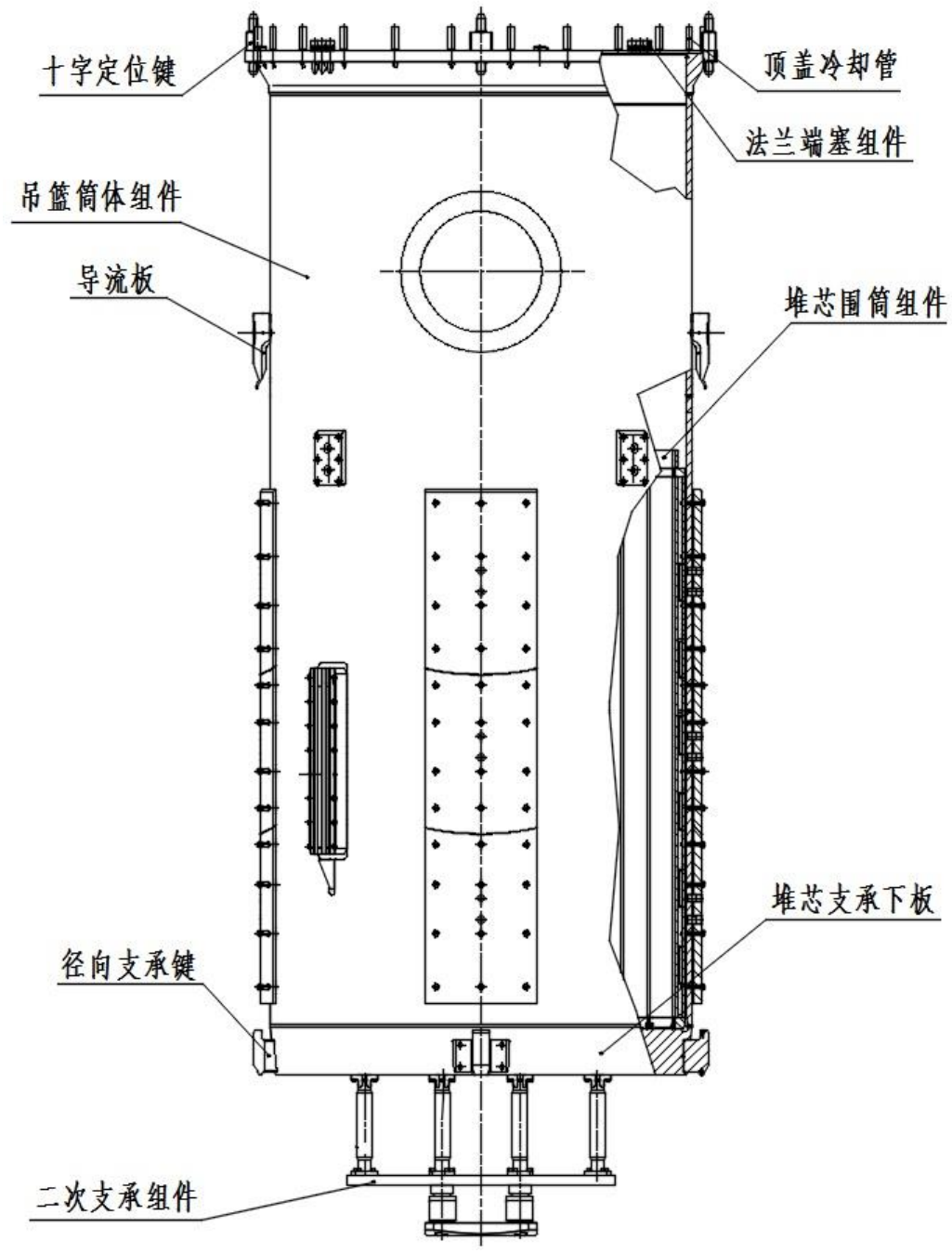
8.3 出厂试验

堆内构件出厂试验主要包括导向筒摩擦力试验、对中试验、通规试验、载荷试验等。

附 录 A
(资料性附录)
典型堆内构件主要零部件



图A. 1 上部堆内构件



图A. 2 下部堆内构件