

# 团 体 标 准

T/CNEA XXXX—XXXX

## 压水堆承压部件 设计与制造 第 6 部分：堆 芯支承结构

Code for PWR pressure boundary components Design and Fabrication Part 6: Core  
Support Structures

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

文稿版次选择

（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 ..... 1

4 范围和管辖边界 ..... 2

5 材料 ..... 4

6 设计 ..... 15

7 制造 ..... 52

8 检测 ..... 61

## 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 6 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、中国机械工业联合会、中机生产力促进中心、核工业标准化研究所、中广核工程有限公司和中国核动力研究设计院

本标准起草人：林绍萱 丁宗华 栾佳明 杨义忠 姚俊俊 薛国宏 杨铁成 潘俊 张宏伟 肖威 李燕  
本文件为首次发布。

## 引 言

T/CNEA ××××《压水堆承压部件 设计与制造》旨在规范我国压水堆核电厂核承压部件的设计与制造，拟由八个部分构成。

- 第 1 部分：通用要求。目的在于规定用于压水堆核电厂物项的材料、设计、制造、安装、检测、试验、检验与超压保护等的通用要求。
- 第 2 部分：1 级部件。目的在于规定压水堆核电厂 1 级部件的设计、制造、安装、检测、试验、验收和超压保护要求。
- 第 3 部分：2、3 级部件。目的在于规定压水堆核电厂 2、3 级部件的设计、制造、检验、试验和验收要求。
- 第 4 部分：钢制安全壳及贯穿件。目的在于规定压水堆承压部件钢制安全壳及贯穿件的材料、设计、制作、检测、试验和验收要求。
- 第 5 部分：支承件。目的在于规定压水堆核电厂支承件的材料、设计、制造、检验、试验和验收要求。
- 第 6 部分：堆芯支承结构。目的在于规定支承结构的材料、设计、制造、检测等方面的要求。
- 第 7 部分：混凝土安全壳。目的在于规定预应力混凝土和钢筋混凝土安全壳的材料、设计、制作、建造、检测、试验、标志、印记、编制报告以及安全壳结构整体性试验和密封性试验的要求。
- 第 8 部分：辅助规则。目的在于规定压水堆承压部件设计与制造的辅助规则，是压水堆承压部件设计与制造团体标准其它部分的必要补充，用于对其他各部分适用部件设计与制造标准的使用提供进一步支持。



# 压水堆承压部件 设计与制造 第 6 部分：堆芯支承结构

## 1 范围

本标准规定了压水堆核电站堆芯支承结构的材料、设计、制造、检测等方面的要求。  
本标准适用于压水堆核电站堆芯支承结构。堆内构件的内部构件可参照使用。

## 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。

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. 8—20XX 压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则  
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. 5—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第 5 部分：磁粉检测  
T/CNEA XXX. 6—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第 6 部分：涡流检测  
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. 8—20XX 压水堆承压部件 无损检测 第 8 部分：泄漏检测  
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  
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 20004 核电厂核岛机械设备材料理化检验方法  
GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

## 3 术语和定义

### 3.1 压力 pressure

指垂直作用于流体或固体界面单位面积上的力。

除注明者外，本文件提及的压力均指表压力。

### 3.2 设计压差 design pressure difference

设定的容器的最高内外压力差。

### 3.3 计算厚度 calculated thickness

按各章公式计算得到的厚度。

### 3.4 设计厚度 design thickness

计算厚度与腐蚀裕量之和。

### 3.5 名义厚度 nominal thickness

设计厚度加上钢材厚度负偏差后向上圆整至钢材标准规格的厚度。

即为标注在图纸上的厚度。

### 3.6 热成形 hot forming

材料在再结晶温度以上的成形。

## 4 范围和管辖边界

### 4.1 结构定义和本标准的适用范围

#### 4.1.1 堆芯支承结构

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。仅在发生假想失效后支承或约束堆芯的堆芯支承结构视为内部结构。

#### 4.1.2 内部结构

- 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，本标准才使用于上述(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。

#### 4.1.3 临时附件

临时附件是指与堆芯支承结构相接触或相连接的，在运行前拆除的元件。临时附件包括如对中用的吊装件和拉杆等物项。

### 4.2 管辖的边界范围

#### 4.2.1 堆芯支承结构和反应堆压力容器之间的边界

堆芯支承结构和反应堆压力容器之间的边界应位于堆芯支承结构的表面。堆芯支承结构与反应堆压力容器的第一道连接焊缝应认为是反应堆压力容器的一部分，除非焊缝距反应堆压力容器承压区域



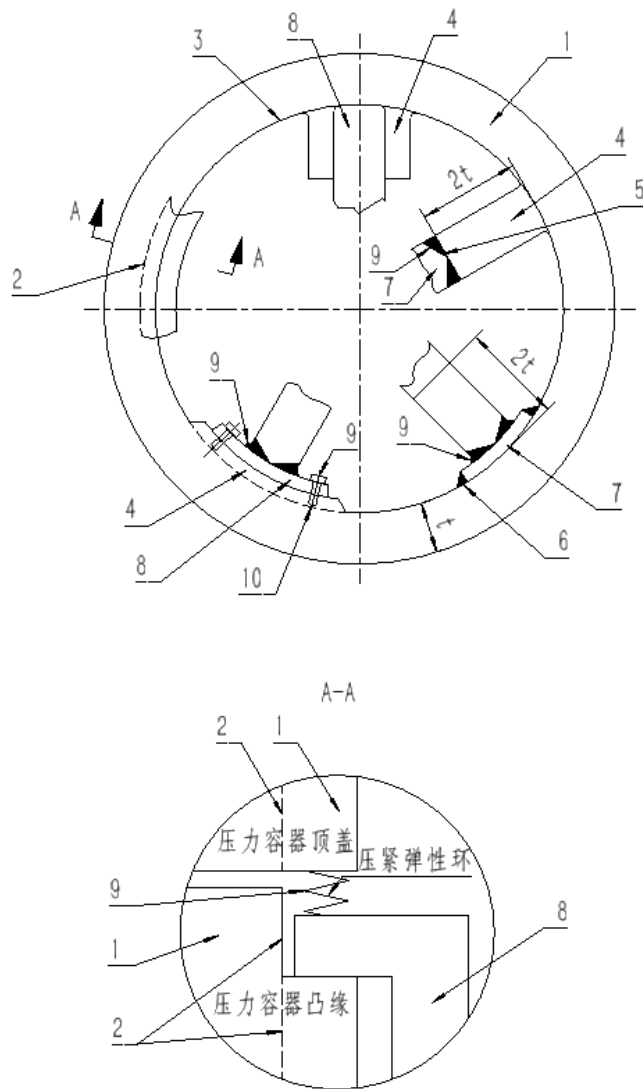
大于 $2t$ （ $t$ 是承压材料的名义厚度），除非技术规范书另有规定。对于超出与反应堆压力容器连接的第一道焊缝，或超出反应堆压力容器承压区域距离 $2t$ ，则第一道焊缝应认为是堆芯支承结构的一部分。用于连接堆芯支承结构和反应堆压力容器的紧固件应满足本标准的要求。

4.2.2 堆芯支承结构和内部结构之间的边界

- a) 内部结构可支承或可焊接或紧固于堆芯支承结构上。
- b) 堆芯支承结构和内部结构之间管辖的边界位于堆芯支承结构的表面。内部结构与堆芯支承结构的连接方式应属于本标准的管辖范围之内。

4.2.3 堆芯支承结构和临时附件之间的边界

堆芯支承结构和临时附件之间管辖的边界应位于堆芯支承结构的表面。



- ① 反应堆压力容器应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。
- ② 反应堆压力容器的承压部位。
- ③ 管辖界线。

- ④ 锻件附件或堆焊层应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。
- ⑤ 离反应堆压力容器承压区域  $2t$  以上，《压水堆承压部件 设计与制造 第3部分：2、3级部件》的设计规则可用来替代《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》第6章设计规则。
- ⑥ 离反应堆压力容器承压区域  $2t$  或  $2t$  以内，第一道连接焊缝应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。
- 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，则附件应符合本标准的要求。
- ⑧ 附件连接应符合本标准的要求。
- ⑨ 离设备承压区域  $2t$  或  $2t$  以内，附件的相互作用应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》第6.1.3.5节的要求。
- ⑩ 管辖边界内的钻孔应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。

注1：这些草图表示管辖范围上的概念，而不应认为是推荐图。

注2：如果附件是内部结构，如适用相应的材料、设计和连接可不属本标准管辖范围，除非当证书持有者规定它们应遵循《压水堆承压部件 设计与制造 第6部分：堆芯支承结构》。

图1 堆芯支承结构和反应堆压力容器之间的管辖界线

## 5 材料

### 5.1 材料的通用要求

#### 5.1.1 厚度定义

本章所用术语厚度，为使用明确起见，名义厚度的定义如下：

- a) 板材一厚度是指横向的短边尺寸。
- b) 锻件一厚度的定义如下：
  - 1) 空心锻件一名义厚度是指内外表面间测得的厚度（即径向厚度）；
  - 2) 圆饼锻件（轴向长度小于外径）一名义厚度是指轴向长度；
  - 3) 扁平环形锻件（轴向长度小于径向厚度）—当轴向长度 $\leq 50\text{mm}$ 时，轴向长度即为名义厚度；当轴向长度 $> 50\text{mm}$ 时，径向厚度即为名义厚度；
  - 4) 矩形实心锻件—矩形的最小尺寸即为名义厚度。
- c) 铸件一厚度定义为铸件承载部分的最大名义厚度。

#### 5.1.2 堆芯支承结构材料

##### 5.1.2.1 许用的材料标准

- a) 堆芯支承结构及其焊接的材料以及螺纹结构紧固件的材料，都应符合核设施建造统一规范（辅助规则）附录A中表A.3和A.4所列的材料标准要求和本章对所采用材料制品的所有特殊要求。但下列材料除外：焊接材料（见5.3节）；硬质合金表面堆焊材料；厚度等于或小于母材厚度10%的堆焊层材料（6.1.2.2节）或被7.4.3节排除的材料。
- b) 只有证书持有者明确规定时，本章的要求才可适用于4.1.2节中所指的内部结构。但是，应保证用于内部结构的材料对堆芯支承结构完整性无不利的影响。

- c) 在物项制造中所适用的焊接材料,应满足《压水堆承压部件 焊接第 1 部分至第 17 部分》的要求,同时还应满足本章适用的要求。本章的要求不适用于在焊接接头中用作垫环或垫板的材料。

### 5.1.2.2 与许用材料标准相矛盾的特殊要求

当本章规定的特殊要求同(《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》6.1.3.1.5 节)有矛盾时,应以本章所规定的特殊要求为准。当特殊要求包括材料标准中也要求的检测、试验或处理时,则检测、试验或处理只需进行一次。要求的无损检测应按 5.4 节中对每种产品形式所作的规定来进行。材料标准或本章所规定的任何检测、修补、试验或处理工作,可以由金属材料制造单位或证书持有者按 7.1.2.1.1 节规定进行。如果材料未用于承压功能,则材料标准所要求的任何水压或气压试验可不必进行。

### 5.1.2.3 尺寸范围

如果材料符合标准的其它要求,且在本标准没有给定尺寸限制,则可使用超出《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分:辅助规则》附录 A 材料标准尺寸或厚度限制的材料。当这些材料标准规定的化学成分、力学性能或两者同时随尺寸或厚度变化时,则超出标准尺寸范围的任何材料其化学成分和力学性能应符合最接近的规定范围(《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》6.1.3.1.5)。

### 5.1.3 材料的确认

在堆芯支承结构的制造或安装中所使用的所有材料,应确认符合《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》5.9.6.2 和《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》5.9.6.1 的要求。对堆芯支承材料,除《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》5.9.6.2 规定以外,都应具有经确认的材料试验报告。对所有其他材料,可用材料合格证书来代替经确认的材料试验报告。堆芯支承结构所用材料的所有经确认的材料试验报告和合格证书的副本,应随材料一起提供。

### 5.1.4 焊接材料

用于焊接材料的要求见 5.3 节。

### 5.1.5 材料的识别

堆芯支承结构材料的识别应满足《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》5.9.5.6 的要求。在堆芯支承结构的制造过程中,应对小件物项的材料加以控制,以便始终可识别出是可接受的材料。在材料修补和堆芯支承结构的制造及安装过程中,应对焊接材料加以控制,以可识别它们直到用完为止都是可接受的材料(7.1.2.2 节)。

### 5.1.6 材料在使用期间的劣化

设计方应选择适合(《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分:通用要求》5.2.3)中所叙述条件的材料,并应特别注意使用工况对材料性能的影响。

### 5.1.7 提高冲击性能的热处理

高铬合金钢可通过淬火和回火热处理来提高冲击性能。当设备的焊后热处理温度不低于 595℃时,可认为是回火热处理状态。

### 5.1.8 材料的热处理规程

当材料标准和本标准的规则对热处理温度或热处理时间有要求时,热处理应在温度受到监测和温度

已校准的炉内进行,或应使用与材料直接接触或连接到与材料接触的金属块上的热电偶或使用经校准的高温计仪表作测量控制来进行热处理。热处理应在炉内装料的条件下进行以使热处理符合材料标准和本标准的规则。

#### 5.1.9 临时附件材料

只要满足 7.4.3 节的要求,用做临时附件的材料不必符合本章并可焊于堆芯支承结构上。

#### 5.1.10 不锈钢的晶间腐蚀敏感性

用于零部件制造的奥氏体或奥氏体-铁素体不锈钢,应进行固溶处理,并按照 NB/T 20004 中 18 章的规定对材料进行晶间腐蚀试验以验证材料处于非敏化状态。在热处理和加工过程中,应尽量避免材料的敏化并且不应使材料抗晶间腐蚀能力产生不利影响,经受 425℃至 815℃范围敏化温度的材料应经固溶处理,或重新试验以验证该材料对晶间腐蚀不敏感。

### 5.2 材料的断裂韧性要求

#### 5.2.1 作冲击试验的材料

##### 5.2.1.1 要求进行冲击试验的材料

- a) 当堆芯支承结构设计技术规格书要求进行冲击试验时,则应根据 5.2 节的要求进行冲击试验,但下列材料不需要按本标准的要求进行冲击试验:
  - 1) 奥氏体不锈钢,包括沉淀硬化奥氏体不锈钢;
  - 2) 非铁基材料。
- b) 对于《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分:辅助规则》附录 A 中表 A.3 和 A.4 所列的马氏体高铬合金钢和沉淀硬化钢,不要求做落锤试验。名义壁厚大于 64mm,所要求的  $C_v$  横向膨胀量应为 $\geq 1.00\text{mm}$ 。

#### 5.2.2 冲击试验规程

##### 5.2.2.1 夏比 V 型缺口冲击试验

当要求做夏比 V 型缺口冲击试验 ( $C_v$ ) 时,应按 NB/T 20004 规定进行。试验应由一组三个全尺寸的  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  的试样组成。适用的横向膨胀量、吸收能量和试验温度,以及试样取样方向和取样部位应记入经确认的材料试验报告中。

##### 5.2.2.2 试样

###### 5.2.2.2.1 试样的部位

对于淬火加回火材料的冲击试样应按材料标准中对拉伸试样所规定的部位切取。试验次数应按 5.2.3 节的规定。

###### 5.2.2.2.2 冲击试样的取样方向

$C_v$  冲击试样的取样方向应按如下规定:

- 1) 锻件试样,其取向应与材料的主加工方向垂直。既不要求也不限制从厚度方向切取试样。

2)  $C_v$  试样缺口的底线应垂直于材料的热处理表面。

### 5.2.3 冲击试验要求的次数

- a) 当单个锻件的重量小于 450kg 时，每一热处理批次的每一炉次的制品应进行一次试验。
- b) 当热处理是在具有适当温度控制和装有高温记录仪的连续式热处理炉中进行，可得到完整的热处理记录时，一次热处理装炉量应考虑为连续操作不超过 8h 的全部装载量或总重量不超过 900kg 的制品，取两者中较小者。
- c) 单重为 450kg 到 4500kg 的锻件，每件都应进行一次试验。
- d) 或者（对应于上述 c）），若试验件是代表该热处理批中的最大厚度，则单独试验锻件或试验铸件可用于代表同一炉号和同一热处理批次的不同尺寸的锻件。此外，试验锻件应经受与所代表锻件相同的锻造和加工过程。
- e) 重量大于 4500kg 的锻件，每件应进行两次夏比 V 型缺口冲击试验和一次落锤试验。选择落锤试样或夏比 V 型缺口冲击试样部位时，应在锻件相隔 180° 的部位上切取，两个部位的取样数量相等。

### 5.2.4 复试

- a)  $C_v$  冲击试验，若符合下列条件，则可在同一温度下进行一次复试：
  - 1) 试验结果的平均值满足最低要求；
  - 2) 每次试验，只有一个试样低于最低要求；
  - 3) 不满足最低要求的试样，不得比规定要求低 13.6J 和 0.13mm 值以外。
- b) 一次复试取两个补充试样，补充试样的切取部位应尽量靠近不合格试样的部位。

两个试样均应满足最低要求才算复试合格。

## 5.3 焊接材料

### 5.3.1 通用要求

(a) 用于设备或材料的建造和修补的焊接材料，除了硬质合金堆焊的焊接材料以外，应符合《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6部分：不锈钢焊丝》、《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9部分：镍基合金手工电弧焊焊条》、《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4部分：焊接材料验收》及NB/T 20009.14的要求。此外，焊接材料还应符合本节所规定的要求，以及符合5.1.5中关于材料识别的各项规则。

(b) 制造商提供下列资料，诸如：

- (1) 焊接工艺；
- (2) 《压水堆承压部件 焊接》标准及型号；
- (3) 《压水堆承压部件 焊接》以外的标准及型号；
- (4) 焊后状态或热处理后的或两种状态下的最低抗拉强；
- (5) 焊后状态或热处理后的或两种状态下的晶间腐蚀试验；

(6) 焊后状态或热处理后的或两种状态下材料的 $C_v$ 试验(如有), 应提供试验温度和横向膨胀量或吸收能量值;

(7) 当有试件焊接时, 采用的预热温度和道间温度;

(8) 当产品焊缝要进行热处理时, 应提供焊后热处理时间、热处理温度范围和最大冷却速率;

(9) 应按T/CNEA XXXXX或焊接工艺规程要求进行化学分析的元素;

(10)  $\delta$ -铁素体的最低含量。

### 5.3.2 要求的试验

焊接材料试验项目和验收指标满足《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6部分: 不锈钢焊丝》、《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9部分: 镍基合金手工电弧焊焊条》、《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4部分: 焊接材料验收》及NB/T 20009.14的规定。

### 5.3.3 焊缝金属试验

焊接材料试验项目和验收指标满足《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6部分: 不锈钢焊丝》、《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9部分: 镍基合金手工电弧焊焊条》、《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4部分: 焊接材料验收》及NB/T 20009.14的规定。

### 5.3.4 焊接材料的贮存和保管

焊条、焊剂和其他焊接材料应妥善贮存和保管。应采取措施, 尽量减少焊剂及管状焊丝、机制焊条和药皮焊条的受潮。

## 5.4 堆芯支承结构材料的检测

### 5.4.1 堆芯支承结构材料的检测

堆芯支承结构材料, 应按本节规则要求, 采用适合于此材料和产品形式的无损检测方法进行检测。

### 5.4.2 板材的检测

#### 5.4.2.1 要求的检测

所有厚度大于19mm的堆芯支承结构用的板材应按5.4.2.2.1节用直射法超声波进行检测。

#### 5.4.2.2 检测规程

##### 5.4.2.2.1 直射法检测

直射法检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第2部分: 超声检测》中第12章的相关要求进行。但检测范围和验收标准应按下列要求。

- a) 检测范围 对板材的主要表面应进行100%探测, 探头沿平行路线移动, 重叠部分应不小于10%。
- d) 验收标准:
  - 1) 在板材的任一区域中, 存在一个或几个不连续缺陷, 使在同一平面上产生连续显示的同时, 出现连续的底面反射波完全消失, 且消失的区域不能被直径为75mm或板厚的1/2(取两者中的较大值)的圆所包围, 则此板材为不可接受;

- 2) 另外, 对小于 1) 中规定的两个或两个以上的缺陷, 若缺陷间的最小距离等于较大缺陷的最大直径, 或者缺陷的分布面积大于上述 1) 中所述的圆面积, 这些缺陷也为不可接受。

#### 5.4.2.2.2 斜射法检测

斜射法的检测要求应按《压水堆承压部件 无损检测 第2部分: 超声检测》中第12章的相关要求进行, 并以本款规则为补充要求。所用的标定缺口, 检测范围和验收标准如下要求。

- a) 标定 斜射法检测应用缺口进行标定。
- b) 检测范围 对板材的主要表面进行 100%探测, 探头沿平行路线移动, 重叠部分不小于 10%。
- c) 验收标准 凡材料的一个或几个缺陷显示, 其波幅高度超过大于标定缺口显示时, 则此材料为不可接受。

#### 5.4.2.3 检测时机

验收检测应按下列要求在制造期间进行:

- a) 超声检测应在轧制到规定尺寸并热处理后进行(不包括焊后热处理)。
- b) 修补焊缝的射线检测, 可在任何要求的焊后热处理前进行。
- c) 奥氏体材料和非铁基材料的所有修补焊缝可在焊后热处理之前进行渗透检测。

#### 5.4.2.4 表面缺陷的清除

表面缺陷应采用打磨或机加工方法消除, 但要满足下列要求。

- a) 缺陷清除后, 表面凹痕应与周围表面平滑过渡。
- b) 缺陷清除后, 表面区域应按 5.4.3.3 节进行磁粉检测或按 5.4.3.4 节进行渗透检测, 确保缺陷已被清除, 或减小到可接受的尺寸。
- c) 为消除氧化皮或其他影响外观的机加工痕迹, 或者为便于进行超声检测而打磨的表面区域, 不必用进行磁粉检测或渗透检测。
- d) 缺陷清除后, 产品的截面厚度不允许小于第 6 节要求的最小厚度。

#### 5.4.3 锻件和棒材的检测

##### 5.4.3.1 要求的检测

- a) 除 5.4.4.1 节规定以外的锻件和棒材都应按 5.4.3.2 节用超声波进行检测。但对于锻件或锻件的某些晶粒粗大或外形复杂用超声波法不能得到有意义的结果时, 应按《压水堆承压部件 无损检测 第 3 部分: 射线检测》的射线法作检测, 并按的验收标准评定。此外, 由证书持有者所选定的表面应按 5.4.3.4 节进行渗透检测或按 5.4.3.3 节进行磁粉检测。
- b) 锻造的法兰和配件, 诸如弯头、三通和连接件应按 5.4.4 节的要求进行检测。
- c) 螺纹结构紧固的棒材应按 5.4.5 节进行检测。

##### 5.4.3.2 超声检测

###### 5.4.3.2.1 检测规程

所有毛坯锻件或成品锻件和棒材应按《压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测》标准进行检测。接触法，液浸法或水柱偶合法都是许可的，下列技术按适用情况采用。

- a) 所有锻件和棒材应使用超声波直射法进行检测。
- b) 此外，环形锻件和其他空心锻件还应在两个圆周方向用斜射法进行检测，除非壁厚或几何形状无法使用斜射法检测。
- c) 假如验收标准与 5.4.3.2.2 节所列的验收标准相当的话，也可以采用距离波幅修正的超声波方法来检测锻件。

#### 5.4.3.2.2 验收标准

- a) 直射法通用规则 当直射法检测的结果表明锻件内有一个或更多个缺陷反射波产生的显示伴随底面反射波的完全消失，而底面反射波的消失不是归因于几何形状所致，则锻件为不可接受。当底面反射波下降到荧光屏标定满高度的 5% 以下时，则可认为底面反射波完全消失。
- b) 斜射法规则 当用斜射法检测结果表明一个或几个缺陷的波幅产生的显示超过标定缺口反射波的波幅高度时，则锻件应为不可接受。

#### 5.4.3.3 磁粉检测

##### 5.4.3.3.1 检测规程

磁粉检测规程应符合《压水堆承压部件 无损检测 第5部分：磁粉检测》的规定。

##### 5.4.3.3.2 显示的评定

- a) 表面的机械不连续是通过检验介质积聚来显示的。但是，并非所有磁粉显示都一定是缺陷，因为某些金相上的不连续和磁导率的变化都可能产生无关的相似显示。
- b) 凡超过 5.4.3.3.3 节验收标准的任何显示，即使认为与缺陷无关仍应作为缺陷，应用相同的方法或用其他无损检测方法进行复查，以验证是否存在真正的缺陷。复查前可进行表面修整。凡会掩盖缺陷显示的无关显示是不可接受的。
- c) 由缺陷所产生的显示为相关显示。长度大于三倍宽度的显示称为线状显示。圆形或长度小于三倍宽度的椭圆形的显示称为圆形显示。

##### 5.4.3.3.3 验收标准

- a) 凡主要尺寸大于 1.5mm 的缺陷显示，均应认为是相关显示。
- b) 产生下列相关显示的缺陷为不可接受的：
  - 1) 对于厚度小于 16mm 的材料，长度大于 1.5mm 的线状显示；对于厚度为 16mm 至 50mm 以下的材料，长度大于 3mm 的线状显示；对于厚度等于和大于 50mm 的材料，长度为 5mm 的线状显示；
  - 2) 对于厚度小于 16mm 的材料，尺寸大于 1.5mm 的圆形显示；对于厚度等于和大于 16mm 的材料，尺寸大于 5mm 的圆形显示；
  - 3) 一直线上有 4 个或更多个显示，且边缘间距等于或小于 1.5mm；



- 4) 凡在需评定的相关显示最密集部位，其任意面积为  $4,000\text{mm}^2$ ，其最大尺寸不大于  $150\text{mm}$  的区域内，有十个或更多个相关显示。

#### 5.4.3.4 渗透检测

##### 5.4.3.4.1 检测规程

渗透检测的规程应符合《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》的规定。

##### 5.4.3.4.2 显示的评定

- a) 表面的机械不连续是通过渗透剂的渗出显示出来。但是，如机加工痕迹或其他表面状态可能引起的局部表面缺陷，可以产生无关的相似显示。
- b) 凡超过 5.4.3.4.3 节验收标准的任何显示，即使认为与缺陷无关仍应作为缺陷进行复查以验证是否存在真正的缺陷。复查前，可先进行表面修整。凡会掩盖缺陷显示的无关显示和大面积渗透剂着色区，均为不可接受。
- c) 缺陷引起的显示称为相关显示。长度大于宽度三倍的显示称为线状显示。圆形的或长度小于或等于三倍宽度的椭圆形显示称为圆形显示。

##### 5.4.3.4.3 验收标准

- a) 凡主要尺寸大于  $1.5\text{mm}$  的缺陷显示，均应认为是相关显示。
- b) 产生下列相关显示的缺陷为不可接受的：
  - 1) 对于厚度小于  $16\text{mm}$  的材料，长度大于  $1.5\text{mm}$  的线状显示；对于厚度为  $16\text{mm}$  至  $50\text{mm}$  以下的材料，长度大于  $3\text{mm}$  的线状显示；对于厚度等于和大于  $50\text{mm}$  的材料，长度为  $5\text{mm}$  的线状显示。
  - 2) 对于厚度小于  $16\text{mm}$  的材料，尺寸大于  $3\text{mm}$  的圆形显示；对于厚度等于和大于  $16\text{mm}$  的材料，尺寸大于  $5\text{mm}$  的圆形显示。
  - 3) 一直线上有 4 个或更多个显示，且边缘间距等于或小于  $1.5\text{mm}$ 。
  - 4) 凡在需评定的相关显示最密集部位，其任意面积为  $4,000\text{mm}^2$ ，其最大尺寸不大于  $150\text{mm}$  的区域内，有十个或更多个相关显示。

##### 5.4.3.5 检测时机

锻件的超声检测可在锻造后的任何时间进行。验收检测应在锻件的最终热处理后进行（不包括焊后热处理）。

##### 5.4.3.6 表面缺陷的清除

表面缺陷应按照 5.4.2.4 节进行清除。

#### 5.4.4 无缝和焊接的管状制品及配件的检测

##### 5.4.4.1 要求的检测

- a) 所进行的检测应对被检测的产品形式是可操作的，并能取得有意义的真实数据。对于一些材料状态和产品外形而言，某些检测方法是无效的。例如：
  - 1) 用超声波法检测形状不规则的产品，诸如焊接法兰和配件，是不可操作的或无意义的；
  - 2) 对于晶粒粗大的奥氏体不锈钢或晶粒粗大的镍铬合金材料，要求用专用技术的超声检测。
- b) 用厚度大于 19mm 的板材制成的焊接管状制品和配件（包括法兰和配件），应按 5.4.4.2 或 5.4.4.3 用超声波或射线照相法进行检测。
- c) 焊接的管状制品和配件（包括法兰和配件）中的所有焊缝，应按 5.4.4.2 或 5.4.4.3 用超声波或射线照相法进行检测。此外，所有焊缝应按 5.4.4.4 节或 5.4.4.5 节对所有可达表面进行磁粉检测或渗透检测。
- d) 厚度大于 10mm 的锻制的无缝管状制品和配件（包括用锻件和棒材机加工成的法兰及配件），应按 5.4.4.2 或 5.4.4.3 进行超声检测或射线检测。

#### 5.4.4.2 超声检测

##### 5.4.4.2.1 检测规程

超声检测规程提供的灵敏度，应能探测出大于或等于按 5.4.4.2.2 节规定的参考试样中标准缺陷的显示的缺陷。当产品缺陷所产生的显示大于校准试样中标准缺陷所产生的显示时，则此产品为不可接受的，除非对缺陷按 5.4.4.7 节的要求进行了清除。

##### 5.4.4.2.2 校准试样

- a) 校准试样应与被检测产品具有相同的名义直径和厚度，以及相同的标称化学成分和热处理状态。标准缺陷应在参考试样内外表面上的轴向缺口或切槽，其长度应约等于或小于 25mm，宽度不大于 1.5mm，深度不超过 0.10mm 或名义壁厚的 5% 中的较大值。校准试样也可以是被检测的产品。
- b) 校准试样应有足够的长度以模拟被检测产品在检测设备中的操作。当校准试样上设置一个以上标准缺陷时，这些缺陷所处的位置应使每个缺陷所引起的显示分开，且清晰可辨，不致相互干扰或增强。

##### 5.4.4.2.3 装置的校验和标定

检测装置的正常功能应予以校验，应用校准试样至少在下列时间进行标定：

- a) 对一种给定材料，某种给定尺寸和厚度的产品的每个生产过程开始时。
- b) 生产过程中每隔或小于 4h 以后。
- c) 生产过程结束时。
- d) 怀疑有故障的任何时候。

如果在任何检验过程中确定试验装置功能失常，则从上一次有效标定后受试过的全部产品都应重新检测。

#### 5.4.4.3 射线检测

射线照相检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测》方法进行检测，按 8.1.1.1 加以修正，并按 8.3.1 要求验收。

#### 5.4.4.4 磁粉检测

磁粉检测应按 5.4.3.3 节的要求进行检测。

#### 5.4.4.5 渗透检测

渗透检测应按 5.4.3.4 节的要求进行检测。

#### 5.4.4.6 检测时间

包括修补焊缝在内的验收检测的时间应按 5.4.2.3 节的规定。

#### 5.4.4.7 表面缺陷的清除

表面缺陷应用打磨或机加工的方法予以去除，但需满足下列要求：

- a) 缺陷清除后，表面凹痕应与周围表面平滑过渡。
- b) 缺陷清除后，该区域应采用原来发现此缺陷的方法进行检测，以确保此缺陷已被清除或减小到可接受的尺寸。
- c) 清除缺陷后，产品的截面厚度不允许小于第 6 节要求的最小厚度。

#### 5.4.4.8 焊接修补

母材缺陷的焊接修补应按 5.4.2.5 节进行，焊缝缺陷的焊接修补应按 5.4.2.6 节进行。

### 5.4.5 螺纹结构紧固件的检测

#### 5.4.5.1 要求的检测

螺纹结构紧固件应按 5.4.5.2 节进行目视检测，名义尺寸等于和大于 10mm 的外螺纹结构固件和大于 25mm 的螺母，应进行磁粉检测或渗透检测。此外，名义尺寸大于 13mm 而不超过 100mm 时，应按 5.4.5.4 节所要求的超声波法进行检测。名义尺寸大于 100mm 时，应按 5.4.5.4 节和 5.4.5.5 节所要求的超声波法进行检测。

#### 5.4.5.2 目视检测

名义尺寸小于 10mm 的外螺纹结构紧固件及等于和小于 25mm 的螺母，应在电镀或其他表面保护处理以前，对最终机加工零件的螺纹、螺杆和头部区域应进行目视检测。对有害的不连续缺陷，诸如折叠，裂缝或裂纹之类均为不可接受的。

#### 5.4.5.3 磁粉检测或渗透检测

名义尺寸等于和大于 10mm 的外螺纹结构紧固件和大于 25mm 的螺母，应进行磁粉检测（5.4.3.3 节）或渗透检测（5.4.3.4 节）。这类检测应在攻丝后，及在电镀或其他表面保护处理前的成品螺纹结构紧固件上进行。在螺纹表面上不允许存在相关显示。相关显示包括大于 1.5mm 的任何线性或圆形显示。由特殊制造方法而导致相关显示，例如滚轧螺纹的齿顶或切削螺纹的齿根，但这种显示可通过预先的工艺评定或破坏性金相检验来证明它们是与缺陷无关的和可接受的。在所有其他可达表面，不允许有大于 5mm 的线状显示或圆形显示，但允许长度小于一个直径或 25mm 的轴向线状显示。

#### 5.4.5.4 尺寸大于 13mm 的超声检测

名义螺栓尺寸大于 13mm 的所有螺纹结构紧固件应在攻丝前，对整个圆柱表面按下面各项要求进行超声检测。

##### 5.4.5.4.1 超声波方法

应采用径向扫描直射法进行检测。

##### 5.4.5.4.2 检测规程

除了如产品材料晶格结构一类的可变因素需用 2.5 兆赫频率以保证波束充分穿透以外，应用 2.25 兆赫的名义频率进行检测，且探头的面积大大于  $650\text{mm}^2$ 。

##### 5.4.5.4.3 装置的标定

应通过调整仪器来确定标定灵敏度，使第一次底面反射波为荧光屏高度的 75%~90%。

##### 5.4.5.4.4 验收标准

任何缺陷产生的显示，超过第一次底面反射波波高的 20%，或使得第一次底面反射波低于标定波幅的 50%，则为不可接受的。

#### 5.4.5.5 尺寸超过 100mm 的超声检测

所有名义尺寸超过 100mm 的螺纹结构紧固件，除了按 5.4.5.4 节的要求外，还应在攻丝前或以后按下列各款要求在整个表面上进行超声检测。

##### 5.4.5.5.1 超声波方法

应采用纵向扫描直射法进行检验。

##### 5.4.5.5.2 试验规程

除了如产品材料晶格结构一类的可变因素需要 1 兆赫频率，以保证波束充分穿透以外，应用 2.25 兆赫的名义频率进行检测，且使用的圆形探头直径不小于 13mm 也不大于 29mm。

##### 5.4.5.5.3 装置的标定

应采用与产品零件具有相同标称成分和相同名义直径的试棒来标定。试棒长度至少为产品长度的 1/2。应在试棒的一端钻一个直径为 10mm，深为 75mm 的平底孔，再把孔堵满，用扫描方法从试棒两端测出距离-幅度曲线。

##### 5.4.5.5.4 验收标准

任何缺陷经距离-幅度曲线进行修正所产生的显示超过了校准试样中标定孔所产生显示的 50%，则为不可接受。

##### 5.4.5.6 表面缺陷的清除

表面缺陷可以用打磨或机加工方法来清除，但影响部位的最终尺寸满足设计要求，且该区域应根据 5.4.5.3 重新进行磁粉检测或渗透检测。

#### 5.5 材料制造商的质量体系大纲

### 5.5.1 质量体系大纲的编制与保管

- a) 除了下面 b) 项的规定以外, 金属材料制造单位应编制一份满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分: 通用要求》5.9 要求的质量体系大纲。
- b) 应按 5.1.3 节的规定来满足《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分: 通用要求》5.9.6.2 的要求。对于下面 c) 中所规定的小尺寸产品和本标准允许按的以合格证书供应的材料, 金属材料制造单位不需采用《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分: 通用要求》5.9 的其他要求。对于这些产品取得证书持有者的质量保证大纲《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分: 通用要求》应包括保证措施使供应的材料符合材料标准要求和本标准中相应的特殊要求。
- c) 本款所指的小尺寸产品的定义见下面的规定:
  - 1) 等于和小于 DN 50 的管道、管子(热交换器传热管除外)、管道配件和法兰;
  - 2) 等于和小于名义直径 25mm 的螺栓紧固件材料, 包括双头螺栓、螺母和螺栓;
 名义截面积小于和等于 $650\text{mm}^2$ 。

## 6 设计

### 6.1 设计总则

#### 6.1.1 载荷准则

##### 6.1.1.1 载荷条件

在设计堆芯支承结构时应考虑下列(a)到(k)项中的载荷, 但不限于这些载荷:

- a) 冷却剂流动形成的压差;
- b) 自重;
- c) 由其他结构, 如堆芯、流量分配件、围板、热屏蔽和安全设备等形成的叠加载荷;
- d) 地震载荷或者由于反应堆容器移动形成的其他载荷;
- e) 对支承、约束或两者的反作用力;
- f) 因温度效应, 热梯度和不同的膨胀、或两者同时影响所形成的载荷;
- g) 由反应堆冷却剂, 或其容纳的或其周围的其他流体的流动或者冲击所形成的载荷;
- h) 瞬时压差载荷: 诸如主冷却剂管道断裂所引起的载荷;
- i) 振动载荷;
- j) 机械动作所引起的载荷: 诸如控制棒缓冲之类机械动作形成的载荷;
- k) 在换料或在役检查的准备工作中, 以及换料或在役检查期间所承受的操作载荷。

##### 6.1.1.2 设计载荷

设计载荷是指下列各款中所定义的，运用于堆芯支承结构设计的压差、温度和各种载荷。

#### 6.1.1.2.1 设计压差

- a) 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堆芯支承结构内外侧之间的最大压差。在计算中应采用设计压差以满足 6.2.2.1 节、6.2.2.6.1 节、6.2.2.6.2 节、6.2.2.7.1 节、6.2.2.7.2 节和 6.2.3.1 节的应力强度限制的要求。在计算中还应使用在适当时刻的实际使用压差以表示满足 6.2.2.2 节、6.2.2.7.3 节和 6.2.3.2 节的应力强度限制的要求。在使用期间，当预计到结构的部位会出现不同的压差时，这些不同部位的设计压差可根据预计压差来确定。
- b) 设计压差应包括压差波动裕量。

#### 6.1.1.2.2 设计温度

设计温度应按《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要求》4.1.4.2.1 节（b）来确定。在涉及设计压差又有设计机械载荷的计算时应使用设计温度。在要求使用实际使用压差的所有计算中，应使用所考虑部位的实际金属温度。

- a) 除另有说明外，本标准涉及的所有温度是用摄氏度（℃）为单位来表示金属温度。
- b) 当堆芯支承结构由盘管、感应圈、夹套或产生的内热源来加热时，在确定设计温度时应同时考虑这些加热的影响。

#### 6.1.1.2.3 设计机械载荷

在评价 6.2.2.1.1 节和 6.2.2.1.2 节的要求时，在连同设计压差和设计温度的同时，还必须考虑机械载荷的规定组合和数值，这些都应在设计技术规格书《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要求》5.2.3 节）中加以规定，这种载荷按《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要求》4.1.4.2.1 节（c）规定称它们为设计机械载荷。在计算中应采用适当时刻的实际机械载荷以证明满足 6.2.2.2.2 节和 6.2.2.2.4 节的应力强度限制要求。同时还应适用下列（a）、（b）和（c）的要求：

- a) 应考虑由内部或外部工况所引起的冲击力；
- b) 在设计堆芯支承结构时，应考虑地震的影响。对用于分析中的载荷、位移和循环次数，应是设计技术规范书的一部分。地震效应引起的应力应与压差或其他使用载荷引起的应力同时考虑；
- c) 堆芯支承结构的布置和支撑应使振动尽量减少。

#### 6.1.1.2.4 设计应力强度

材料的设计应力强度值列于《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 中。材料的金属温度和设计温度不应超出在所列的应力强度值的温度时使用。表中的值对中间温度可用插入法求值。

#### 6.1.1.3 使用载荷

应根据核《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要求》4.1.4.2 节对结构可能承受的各种载荷进行分级，在设计技术规范书中应对使用限制[《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要

求》4.1.4.2.4 节 (b) ]进行足够详细的规定,以便按照这些规则为设计、建造和检查提供一个完整的依据。

## 6.1.2 特殊考虑

### 6.1.2.1 腐蚀

材料因腐蚀、侵蚀、机械磨损或其他环境影响而减薄,设计时应采取克服这些影响的措施,或适当地增加或加大根据设计公式求得的母材厚度来满足对结构所规定的寿命。如预计到各个区域有不同的腐蚀速率,则对结构所有区域的材料增厚或这些措施也不必相同。

应当注意,在建立《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录C设计疲劳曲线所依据的试验中,尚未包括呈现在腐蚀环境中可能加速疲劳失效的试验影响。

### 6.1.2.2 堆焊层

本条各规则适用于带堆焊层结构的设计分析,这些结构由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录A的材料所制成的。

#### 6.1.2.2.1 一次应力

在满足 6.2.2.1.1 节和 6.2.2.1.3 节时,堆焊层不应承担结构强度。

#### 6.1.2.2.2 设计尺寸

在设计部件时,应采用下列(a)到(b)项中给出的尺寸。

- a) 承受内压差的结构,内径应取自堆焊层的名义内表面;
- b) 承受外压差的结构,外径应取自母材的外表面。

#### 6.1.2.2.3 二次应力和峰值应力

在满足 6.2.2.2.2 节和 6.2.2.2.4 (b) 时,热分析与应力分析都应该考虑堆焊层的存在。两种材料的应力都应限制在 6.2.2.2.2 节和 6.2.2.2.4 (b) 的规定值中。但是,当堆焊层为整体熔合型且其名义厚度等于或小于结构总厚度的 10% 时,堆焊层的存在可以忽略不计。

#### 6.1.2.2.4 支承应力

在满足 6.2.2.6.1 节时,应包括堆焊层的存在。

### 6.1.2.3 异种金属的焊接

在满足本节的要求时,对涉及热膨胀系数不同的异种金属的设计和制造应加以注意,为了避免在使用中带来困难。

### 6.1.2.4 环境影响

材料性能可能因环境影响而发生变化。特别当快中子( $>1\text{MeV}$ )辐照超过一定水平时,可以引起脆性断裂转变温度的显著提高,以及在高于脆性转变温度范围抗断裂性能(上平台能量)降低。

### 6.1.3 通用设计规则

#### 6.1.3.1 范围

下列各条给出了适用于堆芯支承结构的通用设计规则。

#### 6.1.3.2 开孔补强

只要在“设计技术规范书”中有规定,适用于1级容器和管道的补强规则就可用于堆芯支承结构设计。

#### 6.1.3.3 外部压差

##### 6.1.3.3.1 概述

本条给出了用于确定球形壳体、带有或不带有加强环的圆柱形壳体以及由管道、管子和配件所组成的管状制品在受外压差时的应力规则。《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B给出了确定壳体、半球形封头以及管状制品应力的图表。

##### 6.1.3.3.2 公式中的符号说明

本条所用符号的定义如下:

$A$ 由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B图G确定的系数,并用于《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B相应的材料图表。对于 $D_0/T$ 值小于10的圆筒参见6.1.3.3.3(b)。该系数也可以从《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B中按适用于加强环所用材料,相应的系数 $B$ 和所考虑壳体的设计金属温度下的相应图表来确定。

$A_s$ =加强环的横截面积。

$B$ =按壳体或加强环所用材料,在设计金属温度下,由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B相应图表内确定的系数,MPa。

$D_0$ =考虑的圆柱形壳体或管子的外径。

$E$ =设计温度下材料的弹性模量( $E$ 值见《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录A表TM)。可用《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分:辅助规则》规范性附录B中相应图表的材料/温度曲线上带有此值的曲线。

$I$ =加强环一壳体组合截面绕平行于壳体轴线的中性轴的有效惯性矩,  $\text{mm}^4$ 。用作计算组合惯性矩所取的有效的壳体宽度不应大于 $1.10\sqrt{D_0 T_n}$ ,并应按分布在环的形心各侧的一半选取,部分壳板超过一个加强环的面积不应考虑这种贡献。

$I_s$ =加强环一壳体组合截面绕平行于壳体轴线的中性轴所需惯性矩。

$L$ =管板之间的管子总长或筒体段的设计长度,按下列值中的最大值选取:

- (1) 如果不带加强环,封头切线之间的距离再加每个封头深度的 $1/3$ ;



(2) 任意两相邻加强环之间最大中心距离；

(3) 从第一个加强环的中心到封头切线的距离加上封头深度的 $\frac{1}{3}$ ，所有测量应与筒体轴线平行，mm。

$L_s$ =从加强环中心线到相邻一侧的支承线间的距离一半，再加上从加强环的中心线到相邻另一侧的支承线之间距离的 $\frac{1}{2}$ ，两者的测量都要与部件的轴线平行。支承线指：

- (1) 符合本条要求的加强环；
- (2) 距封头切点线有 $\frac{1}{3}$ 封头深度处的封头上的环向线；或
- (3) 圆柱形壳体带夹套部分的夹套环向连接处。

$P$ =设计外压（按需要可取表压或绝对压力）。

$P_2$ =许用外压（按需要可取表压或绝对压力）。

$R$ =球形壳体的内半径。

$S$ =《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A表2A、2B和表4中所列的设计金属温度下应力强度的1.5倍，或由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A表Y-1得到的设计金属温度下屈服强度的0.9倍，取两者中的较小值。

$T$ =圆柱形壳体、管子或球形壳体的所需最小厚度。

$T_n$ =圆柱形壳体或管子的使用名义厚度，不包括腐蚀裕度。

### 6.1.3.3.3 圆柱形壳体或管状制品

a) 承受外压的圆柱形壳体或管状制品，若 $D_0/T$ 值等于或大于10，其最小厚度应按下列步骤1到8所给出的规程来确定。

步骤1：假定一个 $T$ 值，确定比值 $L/D_0$ 和 $D_0/T$ 。

步骤2：在《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录B图G中记下步骤1算出的比值 $L/D_0$ ，当比值 $L/D_0$ 大于50时，则在图表中记入 $L/D_0=50$ 的值。当比值 $L/D_0$ 小于0.05时，则在图表中记入 $L/D_0=0.05$ 的值。

步骤3：水平移动到与步骤1算出的 $D_0/T$ 值的那根曲线相交， $D_0/T$ 的中间值用内插法得到。从这个交点垂直向下移动，求得系数 $A$ 的值。

步骤4：按所考虑的材料/温度，在《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录B内适用的材料图表中，应用步骤3求得的 $A$ 值垂直移动到与设计温度的材料/温度曲线相交，对于中间温度可在曲线之间用内插。假如 $A$ 值落在材料/温度曲线末端的右边时，假设与材料/温度曲线上端的水平投影相交。当 $A$ 值落在材料/温度曲线左边时，见步骤7。

步骤5：从步骤4得到的交点向右水平移动，求得 $B$ 值。

步骤 6: 以此  $B$  值, 用下式求出最大允许外压  $P_a$  值:

$$P_a = \frac{4B}{3D_0/T}$$

步骤 7: 当  $A$  值落在所用材料/温度曲线左边时,  $P_a$  值可用下式求得:

$$P_a = \frac{2AE}{3D_0/T}$$

步骤 8: 比较  $P_a$  值和  $P$  值, 若  $P_a$  值小于  $P$  值, 则再选一个更大的  $T$  值, 并重复上述设计规程, 直到得出等于或大于  $P$  的  $P_a$  值。

b) 若  $D_0/T$  值小于 10, 承受外压的圆柱形壳体或管状件的最小壁厚, 应按下列步骤 1 到 4 所给出的规程来确定。

步骤 1: 应用述 (a) 给出的同样步骤求出  $B$  值, 当  $D_0/T$  值小于 4 时, 系数  $A$  可用下式算出:

$$A = \frac{1.1}{(D_0/T)^2}$$

当  $A$  值大于 0.10 时, 则采用值 0.10。

步骤 2: 用步骤 1 求得的  $B$  值, 按下式求出  $P_{a1}$ :

$$P_{a1} = \left( \frac{2.167}{D_0/T} - 0.0833 \right) B$$

步骤 3: 用下式计算  $P_{a2}$  值:

$$P_{a2} = \frac{2S}{D_0/T} \left( 1 - \frac{1}{D_0/T} \right)$$

步骤 4: 取步骤 2 算出的  $P_{a1}$  值或步骤 3 算出的  $P_{a2}$  值中的较小值作为最大允许外压  $P_a$  值。比较  $P_a$  值和  $P$  值, 若  $P_a$  值小于  $P$  值, 则再选一个更大的  $T$  值, 并重复上述设计规程, 直到得出等于或大于  $P$  的  $P_a$  值。

另外, 设计者可采用分析法确定上述过程中的  $A$  值和  $B$  值, 具体方法如下:

对  $A$  值的选取如下:

当  $L/D_0 \geq 0.1$  和  $D_0/T > 10$  时,

$$A = \max \left| \frac{\frac{1.3(T/D_0)^{3/2}}{(L/D_0) - 0.45(T/D_0)^{1/2}} - 0.23(T/D_0)^2}{1.1(T/D_0)^2} \right|$$

对  $B$  值的选取如下:

对于奥氏体钢:

若  $A \leq A_1 = 0.60 \frac{S_y}{E}$ ,  $B = \frac{1}{2} AE$ ;

若  $A_1 = 0.60 \frac{S_y}{E} \leq A \leq A_2 = 1.8 \frac{S_y}{E}$ ,  $B = 0.3 S_y \left( \frac{A}{A_1} \right)^{0.37}$ ;

若  $A_2 = 1.8 \frac{S_y}{E} \leq A_3 \leq 0.02 - 2 \frac{S_y}{E}$ ,  $B = 0.45 S_y \left( \frac{A}{A_2} \right)^a$ , 其中  $a = \frac{\log(1.11)}{\log(A_3 / A_2)}$ ;

若  $A \geq A_3 = 0.02 - 2 \frac{S_y}{E}$ ,  $B = \frac{1}{2} S_y$ 。

#### 6.1.3.3.4 球形壳体

承受外压的无缝或对接拼焊结构的球形壳体所需的最小厚度,应按下列步骤 1 到 6 所给出的规程来确定。

步骤 1: 假定一个  $T$  值,用下式算出系数  $A$  值:

$$A = \frac{0.125}{R/T}$$

步骤 2: 按所考虑的材料,在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分:辅助规则》规范性附录 B 内适用的材料图表中,应用步骤 1 求得的  $A$  值,垂直移动到与设计温度的材料/温度曲线相交,对中间温度可在曲线之间内插。假如  $A$  值落在材料/温度曲线末端的右边时,假设其与材料/温度曲线上端的水平投影相交,当  $A$  值落在材料/温度曲线左边时,见步骤 5。

步骤 3: 从步骤 2 得到的交点向右水平移动,求得系数  $B$  值。

步骤 4: 从步骤 3 得出的  $B$  值,用下式求出最大允许外压  $P_a$  值:

$$P_a = \frac{B}{R/T}$$

步骤 5: 当  $A$  值落在设计温度下相应的材料/温度曲线左边时,  $P_a$  值可用下式计算:

$$P_a = \frac{0.0625E}{(R/T)^2}$$

步骤 6: 将步骤 4 或步骤 5 得出的  $P_a$  值与  $P$  值相比较,若  $P_a$  值小于  $P$  值,则再选一个更大的  $T$  值,并重复上述设计规程,直到得出等于或大于  $P$  的  $P_a$  值。

#### 6.1.3.3.5 圆柱形壳体的加强环

a) 加强环和壳体组合截面所需的惯性矩由下式给出:

$$I_s = \frac{D_0^2 L_s (T + A_s / L_s) A}{10.9}$$

加强环的惯性矩  $I$  应按下列步骤 1 到 6 所给出的规程来确定。

步骤 1: 假定壳体已设计好,  $D_0$ 、 $L_s$  及  $T_n$  均为已知, 则选取一组用于加强环并确定其截面积  $A$  和 6.1.3.3.2 节中所定义的  $I$  值。然后按下式计算  $B$  值:

$$B = \frac{3}{4} \left( \frac{PD_0}{T_n + A_s / L_s} \right)$$

步骤 2: 按所考虑的材料, 在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 B 内适用的材料图表的右边, 应用步骤 1 得出的  $B$  值, 如果壳体和加强环所使用的材料不同, 用材料图表按下面步骤 4 或 5 中得到的较大  $A$  值。

步骤 3: 向左水平移动到与金属设计温度的材料/温度曲线相交, 当  $B$  值落到材料/温度曲线左端下面时, 见步骤 5。

步骤 4: 垂直移动到图表的底部, 读出  $A$  值。

步骤 5: 当  $B$  值落到设计温度的材料/温度曲线左端下面时,  $A$  值可用下式计算:

$$A = 2B/E$$

步骤 6: 若所需的  $I_s$  大于步骤 1 中选取的加强环与壳体组合截面计算所得的惯性矩  $I$  时, 则应另外选取一个具有更大惯性矩的新截面和确定新的  $I_s$ 。若所需的  $I_s$  小于步骤 1 所选取截面计算出的  $I$  时, 则该截面将是令人满意的。

b) 加强环可用连续焊连接在部件的内侧或外侧。

#### 6.1.3.3.6 轴向受压的圆柱体

在圆柱形壳体和管状制品设计中, 当其承受的载荷在壳体或壁上产生纵向压应力时, 所要采用的最大许用压应力应取下列 (a) 或 (b) 给出的较小值。

- a) 《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 A 表 2A 和 2B 给出的设计温度下适用材料的  $S_m$  值。
- b) 由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 B 中适用的图表确定系数  $B$  值, 对图表中的符号采用如下定义:
  - b)  $R$ =圆柱形壳体或管状制品的内半径
  - c)  $T$ =壳体或管状制品需要的最小厚度, 不包括腐蚀裕量
  - d)  $B$  值应由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 B 中适用的图表按下列步骤 1 到 5 来确定。
  - e) 步骤 1: 用选定的  $T$  和  $R$  值, 按下式算出系数  $A$  值:

$$A = \frac{0.125}{R/T}$$

f)

- g) 步骤 2: 按所考虑的材料, 在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 B 内适用的材料图表中, 应用步骤 1 求得的 A 值, 垂直移动到与设计温度的材料/温度曲线相交。对中间温度可在曲线之间内插。假如 A 值落在材料/温度曲线末端的右边时, 就假设与材料/温度曲线上端的水平投影相交。当 A 值落在材料/温度曲线左边时, 见步骤 4。
- h) 步骤 3: 从步骤 2 得到的交点向右水平移动, 求得系数 B 值, 这就是步骤 1 中 T 值和 R 值的最大许用压应力。
- i) 步骤 4: 当 A 值落在相应的材料/温度曲线左边时, B 值可用下式算出:
- j) 
$$B = AE/2$$
- k) 步骤 5: 将步骤 3 或步骤 4 得出的 B 值与圆柱形壳体或管状件选用的 T 值和 R 值算出的纵向压应力相比较。若 B 值小于算出的压应力, 则应重选一个更大的 T 值, 并重复上述设计规程, 直至得出的 B 值大于圆柱形壳体或管状件按所受载荷算出的压应力。

## 6.2 分析法设计

### 6.2.1 设计准则

#### 6.2.1.1 合格性要求

分析法设计的合格性要求如下 (a) 到 (d) 所列。

- a) 设计应使应力强度不超过《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 A, 表 2A、2B 和表 4 中所列的设计应力强度值  $S_m$  的限制。
- b) 设计细节应遵循 6.1 节和 6.3.3 节中给出的规则。
- c) 对于存在压应力的结构, 除了上述 (a) 和 (b) 项的要求外, 还应考虑临界屈曲应力, 见 6.1.3.3 节。(对于受外压差的特殊情况见 6.1.3.3 节。涉及动态压差部位, 允许的外压差应满足 6.1.3.3 节的要求, 或者将其限制在正常使用工况下动态失稳压差的 25%)。
- d) 应提供防止无延性断裂的方法。在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 U 中给出了防止无延性断裂的可接受的规程。

#### 6.2.1.2 确定应力的依据

本分卷的规则对组合应力所采用的失效理论是最大剪应力理论。在一点上的最大剪应力等于该点上三个主应力中代数最大应力与代数最小应力之差的  $1/2$ 。

#### 6.2.1.3 有关应力分析的术语

本分卷中应力分析所用的有关术语定义如下。

##### 6.2.1.3.1 应力强度

应力强度是组合应力的当量强度，应力强度定义为最大剪应力的两倍。换句话说，应力强度是在给定点上的代数最大主应力与代数最小主应力之差。拉应力为正值，压应力为负值。

#### 6.2.1.3.2 总体结构不连续

总体结构不连续是一种几何或材料的不连续，它影响壳型构件沿整个壁厚的应力或应变分布。总体结构不连续型应力是实际应力分布的一部分，当沿壁厚积分时，该部分得到纯弯曲和纯薄膜力的合力。总体结构不连续的例子有：封头与壳体的连接、法兰与壳体的连接、接管以及不等直径或不等厚度的壳体间的连接。

#### 6.2.1.3.3 局部结构不连续

局部结构不连续是一种几何或材料的不连续，它影响沿部分壁厚的应力或应变分布。这种与局部不连续有关的应力分布只引起非常局部的变形或应变，对壳型不连续变形没有显著的影响。例如：小的圆角半径、小的附件及部分焊透的焊缝。

#### 6.2.1.3.4 法向应力

法向应力是垂直于参考平面的应力分量，也称为正应力。通常法向应力沿部件的厚度方向的分布是不均匀的，因此可以认为此应力由两部分分量所组成，一部分是均匀分布且等于所考虑厚度上应力的平均值，另一部分是偏离平均值且随厚度方向变化的应力值。

#### 6.2.1.3.5 剪应力

剪应力是与参考平面相切的应力分量。

#### 6.2.1.3.6 薄膜应力

薄膜应力是均匀分布的法向应力分量，其值等于沿所考虑截面厚度方向应力的平均值。

#### 6.2.1.3.7 弯曲应力

弯曲应力是 6.2.1.3.4 节中所述法向应力的变化分量。沿厚度方向的变化可以是线性的，也可以不是线性的。

#### 6.2.1.3.8 一次应力

一次应力是所施加载荷产生的任何法向应力或剪应力，它是为了满足外力或内力以及力矩的平衡规律所必需的。一次应力的基本特性是非自限，当一次应力大大超过屈服强度时，它会引起失效或至少会引起总体变形。热应力不按一次应力分类。一次薄膜应力分为总体的和局部的两类，总体一次薄膜应力在结构中是这样分布的一种应力：由于发生屈服时不会引起载荷的重新分配。一次应力的例子有：

- a) 由于内压或其他分布活载荷在圆柱形壳体或球形壳体中引起的总体薄膜应力；
- b) 由于压差的作用，在平封头中央部分引起的弯曲应力。

#### 6.2.1.3.9 二次应力

二次应力是由于相邻材料的约束或者由于结构本身的约束而引起的法向应力或剪应力。二次应力的基本特性是自限的，局部屈服和微小变形能满足成为引起应力的条件，这种应力的一次作用不会产生预计的失效。二次应力的例子有：

- a) 总体热应力[6.2.1.3.12(a)]；
- b) 总体结构不连续处的弯曲应力。

#### 6.2.1.3.10 峰值应力

峰值应力是由于包括应力集中效应(如果有的话)在内的局部不连续或局部热应力[6.2.1.3.12 b)]而附加于一次应力与二次应力之和上的应力增量。峰值应力的基本特性是不引起任何显著的变形，只是在作为可能生成疲劳裂纹或脆性断裂的根源时才是有害的。如果它不引起明显的变形，虽不是高度集中局部范围的应力也可归属于本类。峰值应力的例子有：

- a) 碳钢部件上奥氏体钢堆焊层内的热应力；
- b) 引起疲劳但不引起变形的某些热应力；
- c) 局部结构不连续处的应力；
- d) 热冲击产生的表面应力。

#### 6.2.1.3.11 载荷应力

载荷应力是由于使用的载荷，如压差或重力效应引起的应力，以区别于热应力。

#### 6.2.1.3.12 热应力

热应力是由温度不均匀分布或热膨胀系数不同而引起的自平衡应力。固体中出现热应力是由于温度改变时物体体积受阻不能呈现其通常应有的尺寸和形状所致。为了确定许用应力，依照发生变形所取部位的体积或面积，认为有如下(a)和(b)所述两种类型的热应力：

- a) 总体热应力，它与产生总体热应力的结构变形有关。如果这类热应力(不计应力集中)，超过材料屈服强度两倍，则弹性分析可能无效，而连续热循环则可能产生畸变增量。因此这类应力归属于6.2.1.7中表1的二次应力。总体热应力的例子有：
  - 1) 圆柱形壳体上由轴向温度分布产生的应力；
  - 2) 接管及与其相连的壳体之间由温差产生的应力；
  - 3) 圆柱形壳体上由径向温度分布产生的当量线性应力。
- b) 局部热应力，它与不同膨胀几乎完全被限制有关，因而不产生显著的变形。这种热应力仅从疲劳观点来看才应考虑，因此归属于6.2.1.7节中表1中的局部应力。在评定局部热应力时应采用6.2.2.6.5 b)节的规程。局部热应力的例子有：
  - 1) 容器壁内局部加热处的应力；
  - 2) 圆柱形壳体上由于径向温度分布引起的实际应力与当量线性应力之差；
  - 3) 膨胀系数不同于母材的堆焊层材料中的热应力。

#### 6.2.1.3.13 总应力

总应力是一次应力、二次应力和峰值应力的总和。识别单独作用的每一种应力，对确定适当的应力限制是重要的。

#### 6.2.1.3.14 运行循环

运行循环定义为新工况的起始和建立，最后又回复到循环开始时的工况。可能出现运行工况的类型在 6.1.1.3 节中有进一步的规定。

#### 6.2.1.3.15 应力循环

应力循环是交变应力差[见 6.2.2.2.4 e)]所制约的，从初始值经过一个代数最大值至一个代数最小值随后再回到初始值的一种工况。一个单独的运行循环可引起一个或多个应力循环。动态效应也应认为是应力循环。

#### 6.2.1.3.16 疲劳强度减弱系数

疲劳强度减弱系数是考虑局部结构不连续效应（应力集中）对疲劳强度影响的应力增强系数。在缺乏实验数据时，可采用理论应力集中系数。

#### 6.2.1.3.17 安定性

安定性是指不存在连续的塑性变形循环。如果结构经几次适用的加载循环之后，其变形趋于稳定，后续结构的反应是弹性的，则该结构就认为是安定的。蠕变效应除外。

#### 6.2.1.3.18 自由端位移

自由端位移是指附件与其相连接的结构或设备（如果两个构件是分开的）之间产生的相对运动。这种运动的例子是：由于管系、设备，以及设备支承件所出现相对热膨胀所引起的运动，或者而不是由于管系的原因作用在设备上的转动。

#### 6.2.1.3.19 膨胀应力

膨胀应力是对堆芯支承结构起作用的管道自由端位移受到约束所引起的应力。

#### 6.2.1.3.20 极限分析—垮塌载荷

极限分析方法是用来计算由假定为理想塑性材料（无应变硬化）组成的超静定结构所能承受的最大载荷或载荷组合。也就是说在某一个或一组的载荷下，理想塑性结构的变形将无限增大，但是仍然保持稳定的状态，直到结构由于薄膜屈服、塑性铰或临界屈曲而失效。这个导致失效的载荷称之为垮塌载荷。

#### 6.2.1.3.21 垮塌载荷--下限定理

在一个给定的载荷下，如果结构能够处处满足平衡，且都未超过材料的屈服强度，则此载荷等于或小于垮塌载荷的下限。这就是极限分析的下限定理，用于计算垮塌载荷的下限。

#### 6.2.1.3.22 应力比法

具有应变硬化的材料可利用应力比组合的塑性分析方法用来计算其最大载荷（《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》附录 O A-9000）。因为在确定载荷时均要考虑实际形状系数（横截面



函数) 和不同应力场的类型和大小, 所以应力比组合是有效的。

#### 6.2.1.4 应力分析

对所有主要的结构部件, 应有足够详细的应力分析, 以表明当部件承受 6.1.1 节所列的各种载荷时, 6.2.2 节和 6.2.3 节所列的每一种应力限制都得到了满足。为了有助于这些应力的计算, 把某些经常遇到的问题的求解公式和方法列入《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》附录 O 中。

#### 6.2.1.5 应力强度的推导

设计合格性(见 6.2.1 节)要求之一是计算所得的应力强度不应超过规定的各种许用限制。许用限制随推导应力强度的应力分类不同(一次应力、二次应力等)而不同。本条叙述了计算应力强度的规程, 该应力强度要服从规定的限制。按规程的计算步骤规定如下面(a)至(e)所规定:

- a) 在所考虑部件的一点上, 选取一个直角坐标系, 如切向、轴向和径向, 并分别以脚注 t、l 和 r 表示之。在这些方向的应力分量则用  $\sigma_t$ 、 $\sigma_l$  和  $\sigma_r$  表示正应力, 用  $\tau_{lt}$ 、 $\tau_{lr}$  和  $\tau_{rt}$  表示剪应力。
- b) 计算该部件所承受每种载荷类型的应力分量, 并将每组应力值归入如下的一类或一组。
  - 1) 总体一次薄膜应力,  $P_m$  (见 6.2.1.3.8);
  - 2) 一次弯曲应力,  $P_b$  (见 6.2.1.3.7 和 6.2.1.3.8);
  - 3) 膨胀应力,  $P_e$  (见 6.2.1.3.19);
  - 4) 二次应力,  $Q$  (见 6.2.1.3.9);
  - 5) 峰值应力,  $F$  (见 6.2.1.3.10)。
- c) 对每一类应力, 计算出由不同类型载荷引起  $\sigma_t$  的代数和。对其余五种应力分量也进行同样的计算。这些应力分类的某些组合也应考虑。
- d) 把 t、l、r 方向应力分量转换为主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ 。在许多承压部件的计算中可适当选择 t、l、r 的方向使剪应力为零, 并使三个方向的主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  等于  $\sigma_t$ 、 $\sigma_l$  和  $\sigma_r$ 。
- e) 用下列关系式计算应力差  $S_{12}$ 、 $S_{23}$  和  $S_{31}$ :

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

- 1) 应力强度  $S$  为  $S_{12}$ 、 $S_{23}$  和  $S_{31}$  中绝对值最大者。

#### 6.2.1.6 应力差和交变应力强度的推导

如部件规定的运行不满足 6.2.2.2.4 d) 节中的工况, 则部件承受规定的循环使用次数而不发生疲劳失效的能力, 应按照 6.2.2.2.4 e) 节的规定来确定。这种确定应根据结构上一点的各种应力来进行, 同时许用应力循环应对每一点在规定的使用下都是足够的。仅须考虑设计技术规格书规定的循环使用载荷引起的应力差。

在所研究的点上, 应采用下列(a)到(e)的步骤。

- a) 研究整个应力循环中六个应力分量  $\sigma_t$ 、 $\sigma_l$ 、 $\sigma_r$ 、 $\tau_{lt}$ 、 $\tau_{lr}$  和  $\tau_{rt}$  对应于时间的各个数值，同时考虑到总体及局部的结构不连续，以及在循环过程中变化的热效应。
- b) 选择一个时间点，那时的情况是循环的极值状态之一（代数最大值或代数最小值），并将此时的应力分量标以脚注  $i$ 。在大多数情况下，在循环中至少可选择到一个时间，该时已知是极值情况时。在有些情况下，可能要试选不同的时间点，以找到一个交变应力强度最大值的时间。
- c) 在循环过程中的每个时间点上，把六个应力分量  $\sigma_{ti}$ 、 $\sigma_{li}$ 、 $\dots$  中的每一个分量从相应的应力分量  $\sigma_t$ 、 $\sigma_l$   $\dots$  中减去，把所得的应力分量分别称为  $\sigma'_t$ 、 $\sigma'_l$   $\dots$ 。
- d) 在循环过程中的每个时间点上，由六个应力分量  $\sigma'_t$ 、 $\sigma'_l$   $\dots$  推算出主应力  $\sigma'_1$ 、 $\sigma'_2$  和  $\sigma'_3$ 。注意，在循环过程中主应力的方向可能已改变，当主应力转动时，其标记仍保持不变。
- e) 确定整个循环中对应于时间的应力差  $S'_{12} = \sigma'_1 - \sigma'_2$ 、 $S'_{23} = \sigma'_2 - \sigma'_3$ 、 $S'_{31} = \sigma'_3 - \sigma'_1$ ，并找出任何时间的任一应力差的最大绝对值。交变应力强度  $S_{\text{交变}}$  等于此值的  $1/2$ 。

6.2.1.7 应力分类

表 1 对确定应力归类提供帮助。

表 1 一些典型情况的应力强度分类

| 堆芯支承<br>结构   | 位 置            | 应力来源            | 应力类型                               | 分类    | 不连续性 |    |
|--------------|----------------|-----------------|------------------------------------|-------|------|----|
|              |                |                 |                                    |       | 总体   | 局部 |
| 圆柱形或<br>球形壳体 | 远离不连续处<br>的壳板  | 压差              | 总体薄膜应力                             | $P_m$ | 否    | 否  |
|              |                |                 | 沿板厚的应力梯度                           | $Q$   | 是    | 否  |
|              |                | 轴向热梯度           | 薄膜应力                               | $Q$   | 是    | 否  |
|              |                |                 | 弯曲应力                               | $Q$   | 是    | 否  |
|              | 与封头或法兰<br>的连接处 | 压差              | 薄膜应力                               | $Q$   | 是    | 否  |
|              |                |                 | 弯曲应力                               | $Q$   | 是    | 否  |
| 任何壳体或<br>封头  | 沿整个壳体的<br>任何截面 | 外部载荷或力<br>矩，或压差 | 沿整个截面的平均总体薄膜<br>应力，<br>垂直于横截面的应力分量 | $P_m$ | 否    | 否  |
|              |                | 外部载荷或力<br>矩     | 沿整个截面的弯曲应力<br>垂直于横截面的应力分量          | $P_m$ | 否    | 否  |

|           |             |             |  |                       |             |             |
|-----------|-------------|-------------|--|-----------------------|-------------|-------------|
|           | 接管或其他开孔附近   | 外部载荷或力矩，或压差 | 薄膜应力<br>弯曲应力<br>峰值应力（圆角或转角）                        | $Q$<br>$Q$<br>$F$     | 是<br>是<br>是 | 否<br>否<br>是 |
|           | 任何位置        | 壳体与封头间的温差   | 薄膜应力<br>弯曲应力                                       | $Q$<br>$Q$            | 是<br>是      | 否<br>否      |
| 碟形封头或锥形封头 | 顶部          | 压差          | 总体薄膜应力<br>弯曲应力                                     | $P_m$<br>$P_b$        | 否<br>否      | 否<br>否      |
|           | 转角或与壳体连接处   | 压差          | 薄膜应力<br>弯曲应力                                       | $Q^{(1)}$<br>$Q$      | 是<br>是      | 否<br>否      |
| 堆芯支承结构    | 位 置         | 应力来源        | 应力类型   | 分类                    | 不连续性        |             |
|           |             |             |  |                       | 总体          | 局部          |
| 平封头       | 中心区域        | 压差          | 总体薄膜应力<br>弯曲应力                                     | $P_m$<br>$P_b$        | 否<br>否      | 否<br>否      |
|           | 与壳体连接处      | 压差          | 薄膜应力<br>弯曲应力                                       | $Q$<br>$Q$            | 是<br>是      | 否<br>否      |
| 多孔封头或壳体   | 均匀分布的典型管孔桥  | 压差或外部载荷     | 总体薄膜应力（沿横截面平均）<br>弯曲应力（沿管孔桥宽度平均，但沿板厚有应力梯度）<br>峰值应力 | $P_m$<br>$P_b$<br>$F$ | 否<br>否<br>否 | 否<br>否<br>是 |
|           | 孤立的或不规则的管孔桥 | 压差          | 薄膜应力<br>弯曲应力<br>峰值应力                               | $Q$<br>$F$<br>$F$     | 是<br>是<br>是 | 否<br>是<br>是 |
| 接 管       | 垂直于接管轴线的横截面 | 压差或外部载荷或力矩  | 沿整个截面平均的总体薄膜应力<br>垂直于截面的应力分量                       | $P_m$                 | 否           | 否           |
|           |             | 外部载荷或力矩     | 沿接管截面的弯曲应力   | $P_m$                 | 否           | 否           |

|     |     |                            |            |           |   |   |
|-----|-----|----------------------------|------------|-----------|---|---|
|     | 接管壁 | 压差                         | 总体薄膜应力     | $P_m$     | 否 | 否 |
|     |     |                            | 薄膜应力       | $Q$       | 是 | 否 |
|     |     |                            | 弯曲应力       | $Q$       | 是 | 否 |
|     |     |                            | 峰值应力       | $F$       | 是 | 是 |
|     |     | 不同的膨胀量                     | 薄膜应力       | $Q$       | 是 | 否 |
|     |     |                            | 弯曲应力       | $Q$       | 是 | 否 |
|     |     |                            | 峰值应力       | $F$       | 是 | 是 |
| 堆焊层 | 任意  | 不同的膨胀量                     | 薄膜应力       | $F$       | 是 | 是 |
|     |     |                            | 弯曲应力       | $F$       | 是 | 是 |
| 任 意 | 任意  | 沿板厚度的径向温度梯度 <sup>(2)</sup> | 当量线形应力部分   | $Q^{(3)}$ | 是 | 否 |
|     |     |                            | 非线性应力部分    | $F$       | 是 | 是 |
| 任 意 | 任意  | 任意                         | 应力集中（缺口效应） | $F$       | 是 | 是 |

注1：在直径一厚度比值较大的壳体中，应考虑到皱折和过分变形的可能性。

注2：考虑到热应力棘轮效应的可能性。

注3：当量线性应力的定义是和实际应力分布具有相同纯弯曲的线性应力分布。

## 6.2.2 除螺纹结构紧固件以外的应力限制

### 6.2.2.1 设计载荷

在设计技术规格书中所指明设计载荷（6.1.1.2节）必须满足的应力强度限制，就是本条的三种限制和6.2.2.6节的特殊应力限制。如果采用塑性分析技术或试验方法，对6.2.2.7节规定中提出的一些应力限制可适当放宽。6.2.2.8节中给出了设计应力强度 $S_m$ ，图2归纳了这些应力限制。

#### 6.2.2.1.1 总体一次薄膜应力强度（由图2中的 $P_m$ 导出）

此应力强度是由设计内压差与其他规定的设计机械载荷所引起的总体一次应力（见6.2.1.3.8节）沿其截面厚度的平均值推导而得，但不包括所有二次应力和峰值应力。在确定应力强度值前先对应力分量取平均值。此应力强度的许用值是设计温度下的 $S_m$ 。

#### 6.2.2.1.2 一次薄膜加一次弯曲应力强度（由图2中的 $P_m+P_b$ 导出）

此应力强度是由设计压差及其他规定的设计机械载荷所引起的总体一次薄膜加一次弯曲应力沿截面厚度上的最大值而得，但不包括所有二次应力和峰值应力。此应力强度的许用值为 $1.5S_m$ 。

### 6.2.2.1.3 外压差

应用 6.1.3.3 节的规定。

### 6.2.2.2 A 级使用限制

在设计技术规格书中所指定对于使用工况的 A 级使用限制 [《压水堆承压部件 设计与制造 第 1 部分：通用要求》第 2.1.4.2.2 (a) 节]，必须满足本条的四种应力限制与 6.2.2.6 节的特殊应力限制。如果采用塑性分析方法，6.2.2.7 节的规定对这些应力限制可适当放宽。6.2.2.8 节中给出了设计应力强度值  $S_m$ 。图 2 归纳了这些应力限制。

#### 6.2.2.2.1 一次薄膜加一次弯曲应力强度

在正常使用期间必须计算由一次载荷所引起的应力，这些应力必须满足 6.2.2.1 节中的限制。

#### 6.2.2.2.2 一次加二次应力强度

该应力强度是由规定的使用压差与其他规定的机械载荷以及结合正常使用载荷有关的总体热效应等所引起的，它是沿截面厚度任意一点上的总体或局部一次薄膜应力加上一次弯曲应力加二次应力的最大值求得。应包括整体结构不连续的影响，但不包括局部结构不连续（应力集中）的影响。除了在电厂设计寿期可能超出  $3S_m$  限制的一些循环工况外，该应力强度最大范围的许用值是  $3S_m$  [图 2 中注 (1)]。对此例外，代替满足  $3S_m$  的限制可按照 6.2.2.7.3 节进行弹塑性疲劳分析，证明由这些低循环事件加上所有其他循环事件组合，按照 6.2.2.2.4 节计算的累积疲劳使用系数不超过 1.0。

#### 6.2.2.2.3 膨胀应力强度

该应力强度是不计局部结构不连续性，其自由端位移受到约束及锚固点移动的影响时，所引起的载荷沿截面厚度的任意点所形成的最大应力值，当与所有其他一次和二次应力强度组合时，该应力强度的最大范围的许用值为  $3S_m$ 。

#### 6.2.2.2.4 对循环运行的分析

- a) 对循环工况的适用性 一个结构对于规定的使用载荷的适用性，包括载荷和热工况的循环作用，应由这里所叙述的方法加以确定。对高强度螺纹结构紧固件应按 6.2.3.2.3 b) 节中的方法来确定其适用性，对热应力棘轮效应的可能性应按照 6.2.2.2.5 节进行研究。如果结构规定的使用载荷符合下面 (d) 中所有条件，则不需要进行循环使用工况分析，并且可以认为下面 (b) 项中讨论的峰值应力限制，由于符合本分卷的材料、设计、制作、检测和试验的相应要求，已经得到满足。如果使用载荷不满足下列 (d) 的所有条件，则应按下面 (e) 的要求作疲劳分析，或按《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 D-1500 进行疲劳试验。

- b) 峰值应力强度 该应力强度是由所有一次应力、二次应力和峰值应力沿截面厚度任意点上的最大值推导而得，而这些应力是由规定的使用压差和其他机械载荷，以及与正常使用工况有关的总体和局部热效应所引起的，还包括总体和局部结构不连续的影响。
- c) 工况和规程 6.2.2.2.4 节所述的工况和规程是以峰值应力同应变循环的疲劳数据进行比较为基础的。《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录C图I-9.0的设计疲劳强度曲线表示了应变循环的疲劳数据。这些曲线给出了交变应力强度分量的许用幅值 $S_a$ （交变应力强度范围的1/2）与循环次数的关系。该应力强度幅值是按照弹性特性的假设计算的，因此它具有应力的量纲，但当超出弹性范围时它不代表真实应力。疲劳曲线是从单向应变循环数据得到的，其中将应变强制乘上弹性模量并留有设计裕量，因此计算出来的应力强度幅值可同许用应力强度幅值直接进行比较。与使用应变控制的试验不同，《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录C图I-9.2.2的曲线B和C是基于载荷控制的疲劳数据。在必要的地方对曲线进行了修正，以包括平均应力的最大影响，这就是应力波动的平均值不等于零的情况。因此该规程必须在所有时间内，包括瞬态应力对上述（b）的要求得以满足；同时交变应力强度计算值正比于实际应变幅值。为了评定幅值变化的交变应力的影响，下面（e）（4）项中假设了线性损伤关系。
- d) 不需要进行循环使用分析的部件 只要结构或部分结构规定的使用载荷符合下列（1）到（4）项的全部条件时，就不要求进行循环使用分析，而且对一个结构而言，由于符合了本分卷的材料、设计、制作、检测和试验的相应要求，可以假定上面（b）项中所讨论的峰值应力限值也已得到满足。
- 1) 温差—启动和停止 在正常使用期间，结构上任意两个相邻两点之间的温差 $[\text{℃}]$ 不超过 $S_a / (2E\alpha)$ 。其中， $S_a$ 是由规定的启动和停止循环次数从适用的设计疲劳曲线上查得， $\alpha$ 是两点温度平均值下材料的瞬时热膨胀系数，由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A中表TE给出其数值。 $E$ 是两点温度平均值下的弹性模量，从《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A中表TM查得。
  - 2) 温差—正常使用 在正常使用期间任意相邻两点之间的温差 $[\text{℃}]$ 变化不得大于 $S_a / (2E\alpha)$ ，其中， $S_a$ 是按规定的有意义温差波动总次数从《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录C图I-9.0中相应的设计疲劳曲线上查得的值，如果温差波动的总代数范围超过 $S / (2E\alpha)$ ，则认为是有意义的，这里 $S$ 由下列方法来确定：
    - (1) 如果总的规定循环次数等于或小于 $10^6$ ，则 $S$ 为从适用的设计疲劳曲线上取 $10^6$ 循环次数所得到的 $S_a$ 值。
    - (2) 如果总的规定循环次数超过 $10^6$ ，则 $S$ 为从适用的设计疲劳曲线上取该曲线所规定的最大循环次数所得到的 $S_a$ 值。
  - 3) 温差—异种材料 用不同弹性模量和不同热膨胀系数，或者两者都是不同的材料制成的结构，在正常使用期间经受温度波动总的代数范围 $[\text{℃}]$ 不应超过 $S_a / 2 (E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)$ 。其中 $S_a$ 是按规定的有意义温度波动总次数从适用的设计疲劳曲线上查得的值， $E_1$ 和 $E_2$ 、以及 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 是为结构上两种材料平均温度值时的弹性模量及瞬时热膨胀系数（《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A表TM和TE）。若温度波动的总偏差超过量 $S/2 (E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)$ 则应认为是有意义的，这里 $S$ 是由下列方法来确定：

- (1) 如果总的规定循环次数等于或小于  $10^6$ ，则  $S$  为从适用的设计疲劳曲线上取  $10^6$  循环次数所得到的  $S_a$  值。
  - (2) 如果总的规定循环次数超过  $10^6$ ，则  $S$  为从适用的设计疲劳曲线上取该曲线所规定的最大循环次数所得到的  $S_a$  值。如果所用的两种材料具有不同适用的设计疲劳曲线，在使用本条规则时应取  $S_a$  的较小值。
- 4) 机械载荷 规定机械载荷的全部范围，包括管道反作用力和压差，所产生的载荷应力范围不超过  $S_a$  值，这里的  $S_a$  是按规定有意义载荷波动总次数从《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.0 适用的设计疲劳曲线查得的值。如果总的规定有意义载荷波动次数超过  $10^6$ ，则可用  $N=10^6$  次的  $S_a$  值。如果载荷应力的总偏差超过  $S_a$  值，则这种载荷波动可认为是有意义的，这里  $S$  是由下列方法来确定。
- (1) 如果总的规定循环次数等于或小于  $10^6$ ，则  $S$  为从适用的设计疲劳曲线上取  $10^6$  循环次数所得到的  $S_a$  值。
  - (2) 如果总的规定循环次数超过  $10^6$ ，则  $S$  为适用的设计疲劳曲线上取该曲线所规定的最大循环次数所得到的  $S_a$  值。
- e) 循环载荷的分析步骤 结构承受规定的使用循环而不产生疲劳失效的能力应按本规定来确定。即应根据一个点的应力来确定，并使允许的应力循环次数在每一点上对规定的使用载荷均是足够的。仅需考虑设计技术规格书中规定的由于使用循环产生的应力。所谓符合这些要求，仅仅是从可能发生疲劳失效的观点来说该结构是适用的，而要完全满足规定的使用载荷还取决于是否满足 6.2.2.2 节中通用的应力限制及 6.2.2.6 节中任何适用的特殊应力限制。
- 1) 应力差 对正常使用的各种工况，应按照 6.2.1.6 节来确定应力差和交变应力强度  $S_a$ 。
  - 2) 局部结构不连续性 除了这里指明的或按《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 D-1600 的步骤来采用试验方法确定的疲劳强度减弱系数外，对于所有的情况，都应采用理论应力集中系数来估计局部结构不连续的影响。除了裂纹状缺陷和 3.6.8 节中给出规定具体数值的特定管系几何形状以外的情况，不必使用大于 5 的疲劳强度减弱系数。
  - 3) 设计疲劳曲线 《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.0 涵盖了本分卷所容许的材料适用的设计疲劳曲线。当给定的材料存在不止一条曲线时，应注意每一条曲线适用于不同强度等级的材料。对中间强度等级的材料可采用线性内插法。这里所采用的强度等级是按室温下的最低值来确定。《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.0 的设计疲劳曲线限于循环次数为  $10 \sim 10^6$  的范围，不包括奥氏体钢、镍-铬合金及镍-铜合金，对于这些材料的设计疲劳曲线在图 I-9.2.2 中，其循环次数扩展到  $10^{11}$ 。《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.2.2 给出了后一种曲线使用的准则，并在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.2.3 中以流程图图示说明。
  - 4) 弹性模量的影响 将  $S_{\text{交变}}$  (6.2.1.6.1 或 6.2.1.6.2) 乘以设计疲劳曲线给出的弹性模量与分析中采用的弹性模量之比，在图 I-9.0 中适用的设计疲劳曲线纵坐标上找出此值，并在横坐标上找到相应的循环次数。如果考虑使用循环仅由一种有意义的波动应力所引起的，则此值即为许用循环次数。

- 5) 累积损伤 如果有两种或两种以上产生有意义应力波动的应力循环类型, 则应用下列 1 至 6 规定的步骤来评估它们的累积效应。

步骤 1: 将部件使用寿期内的每一个应力循环, 进行组合, 用  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$  表示。

在  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$  是指循环组合的次数。

步骤 2: 对于每种应力循环组合, 采用上述 6.2.1.6.1 或 6.2.1.6.2 的规程确定交变应力强度  $S_{\text{交变}}$ , 称这些量为  $S_{\text{交变}1}, S_{\text{交变}2}, S_{\text{交变}3}, \dots, S_{\text{交变}n}$ 。

例如, 如果有一种应力循环所产生的应力差从 0 到 +600MPa, 总共 1,000 次。而另一种应力循环产生的应力差从 0 到 -500MPa, 总共 10,000 次。所以考虑的两种循环组合为:

(a) 循环组合 1:  $n_1=1,000$

$$S_{\text{交变}1}=1/2 \times (600 - (-500)) \times \text{弹性模量修正} \times K_e$$

(b) 循环组合 2:  $n_2=9,000$

$$S_{\text{交变}2}=1/2 \times (0 - (-500)) \times \text{弹性模量修正} \times K_e$$

注: 为说明起见, 简单假设了 1 个应力分量。实际上, 必须在 6 个应力分量的基础上分别取得范围, 然后计算分量范围的应力强度。

步骤 3: 对于每一个  $S_{\text{交变}1}, S_{\text{交变}2}, S_{\text{交变}3}, \dots, S_{\text{交变}n}$  值, 在适用的设计疲劳曲线上求取允许的次數, 称其为  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ 。

步骤 4: 对每种组合, 计算其使用因子  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ ; 即  $U_1 = n_1 / N_1, U_2 = n_2 / N_2, U_3 = n_3 / N_3, \dots, U_n = n_n / N_n$ 。

步骤 5: 从  $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ , 来计算疲劳累积使用因子。

疲劳累积使用因子不应超过 1.0。

#### 6.2.2.2.5 热应力棘轮效应

在机械力(譬如压力)和温度载荷的交互作用下, 结构有可能出现持续的变形, 而每次循环所增加的变形量几乎相等。这种现象的例子在本节和 6.2.2.6.3 中讨论。

- a) 为了防止直径的周期性增大, 在经受稳态内压差载荷的部分轴对称壳体中, 所允许的最大循环热应力的限值如下:

m) 令  $x$  = 由压差产生的最大总体薄膜应力除以屈服强度限  $S_y$ <sup>1)</sup>。

n)  $y'$  = 按照弹性原理计算的热应力的最大许用范围除以屈服强度限  $S_y$ 。

o) 情况 1: 温度沿壁厚线性变化:

p) 当  $0 < x < 0.5$  时,  $y' = 1/x$ ;

q) 当  $0.5 < x < 1.0$  时,  $y' = 4(1-x)$ ;

---

1) 当  $1.5S_m$  大于  $S_y$  时, 允许采用  $1.5S_m$



- r) 情况 2: 温度沿壁厚按抛物线增加或减少:
- s) 当  $0.615 < x < 1.0$  时,  $y' = 5.2(1-x)$ ;
- t) 当  $x < 0.615$  时的近似值如下:
- u) 对  $x=0.3$ 、 $0.4$  及  $0.5$ ,  $y'$  分别为: 4.65、3.55 及 2.70。
- b) 上述关系式中用屈服强度  $S_y$  代替比例极限, 以便在每一次循环中允许有一个小量的增加, 直至应变硬化使比例极限上升到  $S_y$  为止。如果材料的屈服强度高于材料的持久限<sup>2)</sup>, 并有大的循环次数, 由于可能发生应变软化, 所以应采用持久强度限。

#### 6.2.2.2.6 变形限制

应满足设计技术规格书所规定的任何变形限制。

#### 6.2.2.3 B 级使用限制

对于在本卷的温度限制内使用的部件, 采用下列 (a) 和 (b) 的要求。

- a) A 级使用限制的值 (6.2.2.2) 同样适用于 B 级使用限制。此外, 如果指定为 B 级使用限制的压差超过设计压力差, 则图 2 的应力限制应采用图 2 所给定许用应力强度值的 110% 的载荷。
- b) 应满足设计技术规格书的要求。

---

2) 持久限应取《核岛机械设备设计建造统一规范〈辅助规则〉》规范性附录 C 图 I-9.0 中适用的疲劳曲线中  $10^7$  次循环时  $S_a$  值的两倍, 除非采用《核岛机械设备设计建造统一规范〈辅助规则〉》规范性附录 C 图 I-9.2.1 和图 I-9.2.2 的曲线, 此时持久限采用曲线 A 中  $10^{11}$  次循环时  $S_a$  值的两倍。

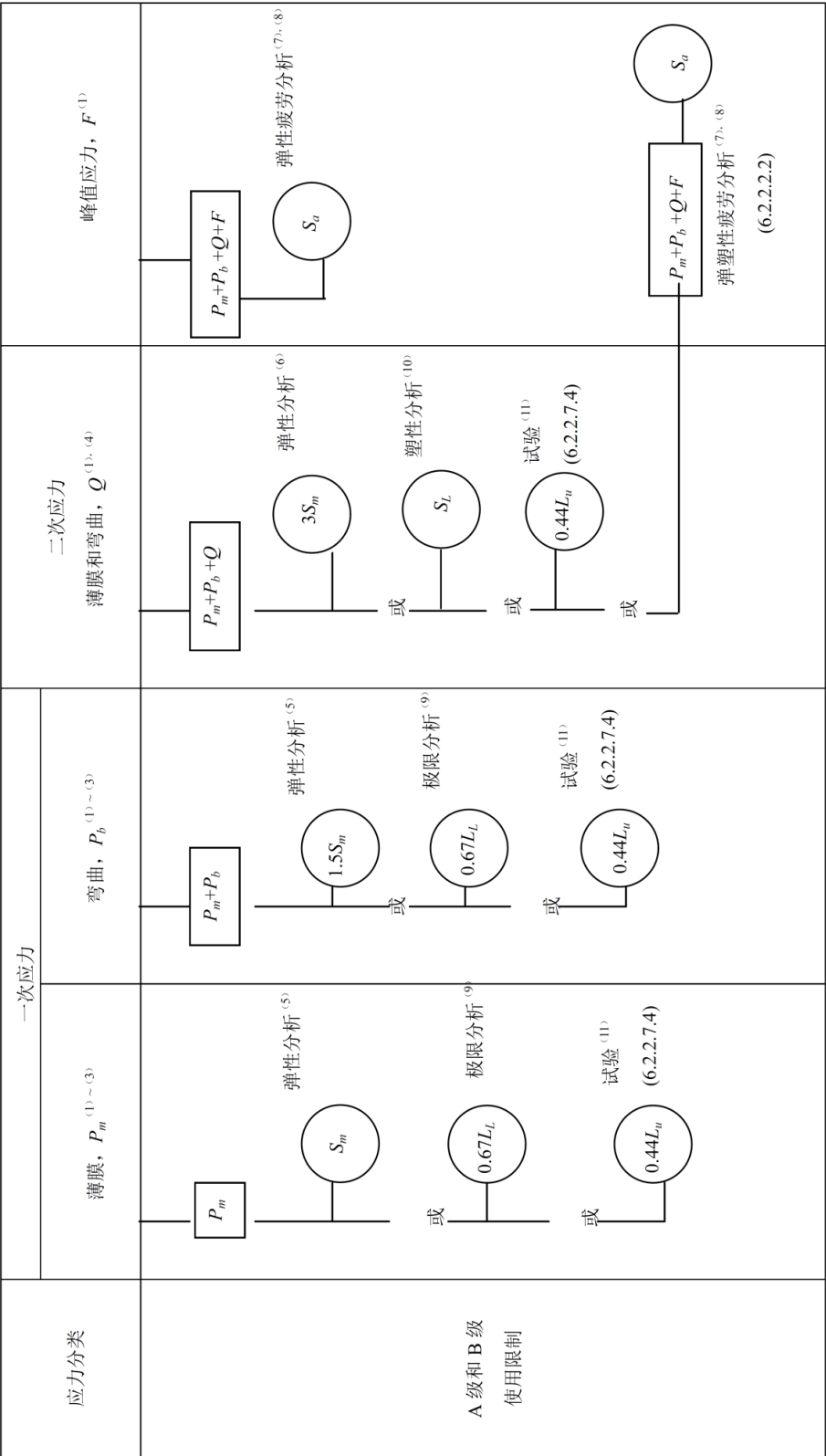


图2 A 级和 B 级使用限制的应力分类与应力强度限制

注1：符号 $P_m$ 、 $P_b$ 、 $Q$ 和 $F$ 并不代表单个量，而是代表六个应力分量 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、 $\tau_{12}$ 、 $\tau_{13}$ 、 $\tau_{23}$ ，的六个量的组合。

注2：对于有压应力出现的结构，应修正应力限值，以便考虑临界屈曲应力[6.2.1.1(c)]。

注3：当施加瞬态载荷时，应考虑动态载荷放大的使用。

注4： $Q$ 类应力是总应力中由温度梯度和结构不连续性所造成的那部分，并不包括可能在同一点上存在的一次应力。应该注意的是，详细的应力分析常常直接给出一级和二级应力的组合，有时该计算值表示的是 $P_m+P_b+Q$ 的总和，而不是单独的 $Q$ 值。同样如果属于 $F$ 的应力是由应力集中引起的，则 $F$ 值是在名义应力之外的由缺口产生的附加应力。例如，一块板有名义应力强度为 $P_m=S$ ， $P_b=0$ ， $Q=0$ ，并有一个应力集中系数为 $K$ 的缺口，那么 $F=P_m(K-1)$ ，且峰值应力强度等于 $P_m+P_m(K-1)=KP_m$ 。

注5：应力分量组合，三向应力表示三个主应力的代数和（ $\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$ ）。在存在均匀拉伸载荷时，三向应力限制在 $4S_m$ 内。

注6：本限值用于确定应力强度的范围。当二次应力是由进行应力分析的点上温度偏差产生时， $S_m$ 应该取第II卷，D篇，第1分篇列表2A、2B和表4中该瞬态金属的最高和最低温度 $S_m$ 的平均值。当部分或全部二次应力是由机械载荷引起时， $S_m$ 应该取该瞬态金属最高温度的 $S_m$ 值。

注7： $S_m$ 是由疲劳曲线图I-9.0得到，整个波动范围的许用应力强度为 $2S_m$ 。

注8：当使用图I-9.0的疲劳曲线时，在弹性基础上计算出的 $S_{all}$ 值不应超过10次循环所对应的 $S_m$ 值。

注9： $L_L$ =屈服点的下限极限载荷等于 $1.5S_m$ （此处， $S_m$ 是第II卷，D篇，第1分篇表2A、2B和表4中所包含温度的许用应力强度）。下限极限载荷被定义为由理想塑性（无应变硬化）材料所分析得到的载荷，即当施加的载荷不增加而变形不断增加。不论应用多轴屈服与单轴屈服情况相联系的最大剪应力理论或变形应变能理论，下限载荷是在材料各处都能满足平衡条件的载荷，以及各处都不超过材料所规定的屈服强度。

注10： $S_L$ 表示在6.2.1.3.17中所定义的作用在结构上的安定载荷，当作用在结构上规定的位置时，应在塑性基础上计算出安定载荷。

注11： $L_u$ 定义见6.2.2.7.4。

## 6.2.2.4 C级使用限制

设计技术规格书中指定的C级使用限制的使用载荷必须满足C级使用限制，在6.2.2.4.1节中的5种分析方法中任何一种的使用限制均为允许的。这些应力强度限制包括在图3中。在满足载荷、应力和变形限制的同时应考虑动态不稳定性。6.2.2.4.2节到6.2.2.4.6节的要求也应满足。

### 6.2.2.4.1 应力强度限制

#### a) 弹性分析法

- 1) 总体一次薄膜应力强度（6.2.1.3.6节，6.2.1.3.8节和6.2.2.1.1节）应不超过许用应力强度 $S_m$ 的1.5倍， $S_m$ 值由《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录A、表2A和2B中给出。

- 2) 一次薄膜加一次弯曲应力强度 (6.2.1.3.7 节、6.2.1.3.8 节和 6.2.2.1.3 节) 应不超过许用应力强度  $S_m$  的 2.25 倍,  $S_m$  值由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 A, 表 2A 和 2B 中给出。
- b) 极限载荷分析法 代替上述 (a) 的弹性分析, 极限载荷分析可按下列方法进行。
- 1) 下限极限载荷 LL 用材料的屈服强度限来确定, 该屈服强度等于该温度下许用应力强度  $S_m$  的 1.5 倍。 $S_m$  值由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 A、表 2A 和 2B 给出。下限极限载荷 (6.2.1.3.21 节) 是由理想塑性 (无应变硬化) 材料的分析 (6.2.1.3.20 节) 而得到的一种载荷。理想塑性材料是当施加载荷不再增加时而变形还在继续增加。不论应用多轴屈服与单轴屈服情况相关联的最大剪应力理论或变形应变能理论, 下限载荷是在材料内处处都能满足平衡条件的载荷, 以及各处都不会超过材料所规定的屈服强度。
  - 2) 对于所指定为 C 级限制的使用载荷, 其总体一次薄膜应力强度不应超过下限极限载荷 LL。
  - 3) 对于所指定为 C 级限制的使用载荷, 其总体一次薄膜加一次弯曲应力强度不应超过下限极限载荷 LL。
- c) 塑性分析法 代替上述 (a) 项的弹性分析, 可按下列 (1) 和 (2) 项的说明进行塑性分析。
- 4) 对于指定为 C 级限制的使用载荷, 其总体一次薄膜应力强度不应超过该温度下许用应力强度值  $S_m$  的 1.5 倍。 $S_m$  值由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》规范性附录 A、表 2A 和 2B 中给出。
  - 5) 对于指定为 C 级限制的使用载荷, 其总体一次薄膜加一次弯曲应力强度不应超过下列两者中的较大值: 该温度下极限抗拉强度值的 1/2 或该温度下许用应力强度值  $S_m$  的 2.25 倍。 $S_m$  值可从第 II 卷、D 篇、第 1 分篇、表 2A 和 2B 中给出。
- d) 应力比分析法 代替上述 (a) 项的弹性分析法, 可以进行应力比分析 (6.2.1.3.23 节)。在这种情况下, 应满足下列 (1) 和 (2) 项的限制。
- 6) 使用载荷产生的一次薄膜应力强度不应导致应力强度超过  $SE$ , 这里  $SE \leq 2.0S_m$ 。
  - 7) 对其他的应力场, 应力强度限制应符合《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规

$$P_B \leq S_E \left[ 1 - \left( \frac{P_m}{S_E} \right)^2 \right]$$

则》附录 O A-9000 的规定。例如, 对弯曲应力:

对矩形截面,

$$n=2 \text{ 或 } P_B \leq \sqrt{K^2 S_E (S_E - P_m)}$$

其中  $K$  是  $n=1$  的截面系数, 由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分: 辅助规则》附录 O A-9000 的方法确定。

- e) 原型或模型试验法 对指定为 C 级限制的使用载荷, 如果从原型或模型试验能证明规定的载荷 (等效动态或静态) 不超过  $Le$  的 60%, 则可以不满足上述 (a) 项的限制。 $Le$  是极限载荷或最大载荷或试验中所用的组合载荷。当采用这方法时, 应考虑实际零件与试验用零件或部件之间可能存在的尺寸影响和尺寸公差, 同时还要考虑实际零件与试验用零件之间可能存在的极限抗拉强度或其他控制材料性能的差异, 在指定为 C 级限制使用载荷下, 以确保从试验中得到的载荷是保守代表实际结构的承载能力。

#### 6.2.2.4.2 外压

允许的等效静态外压应取 3.1.3.3 节规则中容许值的 150%。在包含动态压力时，允许的外压应满足上述要求或限制动态不稳定压力的<sup>1</sup>/<sub>2</sub>。

#### 6.2.2.4.3 特殊应力限制

特殊应力限制的允许值应取 6.2.2.6 节和 6.2.2.7.1 节所给定值的 150%。

#### 6.2.2.4.4 二次应力和峰值应力

不必满足 6.2.2.2.2 节、6.2.2.2.4 (b) 节、6.2.2.2.5 节和 6.2.2.6.3 节的要求。

#### 6.2.2.4.5 疲劳要求

当应用 6.2.2.2.4 (a) 节的规程确定是否需要进行疲劳分析时，不必考虑指定为 C 级限制的使用载荷。

#### 6.2.2.4.6 变形限制

应考虑设计技术规格书规定的任何变形限制[图3，注 (9)]。

| 应力分类              | 一次应力  |  | 二次应力<br>薄膜和弯曲, $Q$ | 峰值应力,<br>$F$ |
|-------------------|---|--|--------------------|--------------|
|                   | 薄膜, $P_m^{(1) \sim (3)}$  | 弯曲, $P_b^{(1) \sim (3)}$   |                    |              |
| C级 <sup>(4)</sup> | <div><div><math>P_m</math></div><div>弹性分析<sup>(5)</sup><br/><math>1.5S_m</math></div><div>或</div><div>极限分析<sup>(6)</sup><br/><math>L_t</math></div><div>或</div><div>塑性分析<sup>(7)</sup><br/><math>1.5S_m</math></div><div>或</div><div>试验<sup>(8)</sup><br/><math>0.6L_t</math></div><div>或</div><div>应力比分析<sup>(10)</sup><br/><math>S_F</math></div></div> | <div><div><math>P_m+P_b</math></div><div>弹性分析<sup>(5)</sup><br/><math>2.25S_m</math></div><div>或</div><div>极限分析<sup>(6)</sup><br/><math>L_t</math></div><div>或</div><div>塑性分析<sup>(7)</sup><br/><math>2.25S_m</math></div><div>或</div><div><math>0.5S_u</math></div><div>或</div><div>试验<sup>(8)</sup><br/><math>0.6L_t</math></div><div>或</div><div>应力比分析<sup>(10)</sup><br/><math>KS_F</math></div></div> | 不要求评定              | 不要求评定        |

图3 C级使用限制的应力分类与应力强度限制

注1：符号 $P_m$ 、 $P_b$ 、 $Q$ 和 $F$ 并不代表单个量，而是代表六个应力分量  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ 、 $\tau_{12}$ 、 $\tau_{13}$ 、 $\tau_{23}$ ，的六个量的组合。

注2：对于有压缩应力出现的结构，应修正应力限值，以便考虑临界屈曲应力[6.2.2.4.2]。

注3：当施加瞬态载荷时，应考虑给出动态载荷放大的使用，以及弹性模量可能的变化。

注4：如在结构中变形是有关系的，其变形应限制在设计技术规格书为C级使用限制给定值的2 / 3。

注5：对应力分量组合，三向应力表示三个主应力的代数和（ $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ）。在存在均匀拉伸载荷时，三向应力限制在 $6S_u$ 内。

注6： $L_L$  = 以屈服点的下限极限载荷等于 $1.5S_u$ （此处， $S_u$ 是第II卷，D篇，第1分篇表2A、2B中所包含温度的许用应力强度）。下限极限载荷被定义为是由理想塑性（无应变硬化）材料的分析而得到的载荷，即当施加的载荷不增加时而变形还在不断增加。不论应用多轴屈服与单轴屈服情况相关联的最大剪应力理论或变形应变能理论，下限载荷是在材料内处处都能满足平衡条件的一种载荷，以及各处都不会超过材料所规定的屈服强度。

注7：弹塑性计算名义一次应力。对于该温度下加载的实际单调应力—应变曲线，或同可能采用的实际单调应力—应变曲线相比处处都会有应变相同应力更低的任何近似的实际应力—应变曲线，则可采用材料的应变硬化。对于多轴效应，应使用剪应力理论或变形应变能理论的流动规则。

注8： $S_o$  = 在该温度下的抗拉强度限，应考虑在强度限中的多轴效应。

注9： $L_o$ 是在6.2.2.4.1（e）中的定义。

注10：应力比法是塑性分析的一种方法，它运用应力比组合（应力的组合认为是实际应力与许用塑性或弹性应力的比值，6.2.2.4.1（d））计算应变硬化材料所能承受的最大载荷。

#### 6.2.2.5 D级使用限制

根据核设施部件建造总规则 2.1.4.2.4 节（d），使用附录 F 中的规则来评定 D 级限制的使用载荷。此外，当 6.2.2.6 节的特殊应力限制应用于 D 级限制时，则计算应力不应超过 6.2.2.6 节中给出相应的 A 级与 B 级使用限制应力限值的两倍。

#### 6.2.2.6 特殊应力限制

对特殊使用载荷或结构规定了下列与基本应力限制不同的特殊应力限制。它与基本应力限制相比，有些比基本应力限制更严格，有些则比基本应力限制要宽些。作为 C 级限制和 D 级限制所支配的这些特殊应力限制的应用规则分别包含在 6.2.2.4.3 节和 6.2.2.5 节中。当这些要求和基本应力限制相矛盾时，应把 6.2.2.6 节的规则优先用于这种特殊情况。6.2.2.6 节对螺纹结构紧固件并不适用（6.2.3）。

##### 6.2.2.6.1 支承载荷

- a) 在由设计载荷或指定为 A 级限制的使用载荷所引起的最大载荷作用下，为防止压毁的平均支承应力应限制在该温度下的  $S_y$  值。但是，当距自由端的距离大于支承载荷作用的距离时，支承应力允许为达到该温度下  $S_y$  的 1.5 倍。对于堆焊层表面，当计算支承应力时，如取实际接触面积或支承实际接触表面的母材面积两者取较小值作为支承面积，则可采用母材的屈服强度限。
- b) 当支承载荷作用在靠近自由端时，例如突出的凸缘，则应考虑剪切失效的可能性。当只有载荷应力情况下，平均剪应力应限制在  $0.6S_m$  内。当载荷应力加上二次应力时，其平均剪应力不应超过下列（1）或（2）的限值：

- 1) 对应用《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 2A 和 2B 中注(2)的材料\*, 可取 38℃下的 0.5Sy 和所处温度的 0.675Sy 两者中的较小值。
- 2) 对所有其他的材料, 不应超过所处温度下的 0.5Sy。
- c) 对于堆焊层表面, 如其结构或厚度使剪切失效完全在堆焊材料内发生, 则堆焊层的许用剪应力应按等同的锻造材料性能来确定。如结构的剪切失效通过部分母材、部分堆焊材料, 则评定该失效类型的组合抗力时, 应采用每种材料的许用剪应力。
- d) 考虑销钉或类似构件中的支承应力时, 采用该温度下的 Sy 值, 但如果不计入距板边一个销钉直径范围内的支承面积时, 可用 1.5Sy 值。

#### 6.2.2.6.2 纯剪切

- a) 由设计载荷或指定为 A 级限制的使用载荷所引起的沿截面的纯剪切(例如键、剪切环)的平均一次剪应力应限制为 0.6Sm。
- b) 由设计载荷或指定为 A 级限制的使用载荷所引起受扭转的实心圆截面周边上的最大一次剪应力(不包括应力集中)应限制为 0.8Sm。一次加二次和峰值剪应力应换算成应力强度(等于纯剪应力的两倍), 且不超过 6.2.2.2.2 节和 6.2.2.2.4 b) 节的基本应力限制。

#### 6.2.2.6.3 非整体连接件的渐进性畸变

螺帽、螺塞、剪切环盖和栓块锁锁紧盖都是非整体连接件的例子。它们要承受喇叭形或其他类型的渐进性畸变失效。如果施加载荷的任何组合引起了屈服, 这类接头就会承受棘轮效应, 因为在每次完整的使用循环后, 相互配合的零件可能会松动, 而且不管有否手动操作, 它们之间以新的关系开始下一次循环。每次循环都可能发生附加的畸变, 以致像螺纹那样的紧固件最终可能松动。对于可能导致非整体连接零件之间发生滑移, 而且因渐进性畸变有可能最后发生连接松开, 因此其一次加二次应力强度(6.2.2.2.2 节)应限制在  $S_y$  值内(《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A、表 Y-1)。

#### 6.2.2.6.4 接管管道过渡

无论接管是否补强, 由压差、外载和外力矩在接管中引起的应力可采用  $P_m$  类处在限值内或按 6.1.3.2 节给定的接管长度上补强。补强范围以外,  $P_m$  类应力应适用于由压差和外部机械载荷组合作用所引起的沿截面(不是厚度)平均的总体一次薄膜应力强度;  $P_m+P_b$  类应力应适用于由设计压差和外部机械载荷所引起的一次薄膜加一次弯曲应力强度;  $P_m+P_b+Q$  类应力应适用于所有载荷, 包括外载或连接管道自由端位移受到约束所产生的力矩等所引起的一次加二次应力强度。在补强范围之外, 按 6.2.2.7.3 节规定的一次加二次应力强度范围可以超过  $3S_m$  的限值。但按 6.2.2.7.3 (a) 节评定时相连管道热膨胀载荷和力矩所引起的应力可以不予考虑。而由相连管道加热膨胀单独引起的薄膜加弯曲应力强度范围应  $\leq 3S_m$ 。在补强范围以外接管壁厚不应小于管壁厚度或值  $t_p (S_{mp} / S_{mn})$  中的较大者。其中  $t_p$  是相连接管道的名义厚度,  $S_{mp}$  是管道材料的许用应力强度,  $S_{mn}$  是接管材料的许用应力强度。

#### 6.2.2.6.5 应力超过屈服强度限时弹性分析的应用



设计准则中容许的某些许用应力在弹性基础上所计算的最大应力可以超出材料的屈服强度。但具有明显的局部结构不连续或者局部热应力的区域除外，关于一次加二次应力强度限制  $3S_m$ （6.2.2.2.2节）已经考虑到经过几次重复应力循环后确保弹性作用的安定性，而明显的局部结构不连续或局部热应力只在疲劳评定特性中才加以考虑。因此应采用下列（a）和（b）的规程：

- a) 为了不同于与疲劳许用限制的应力限制相比较，在评定应力时应按弹性为基础进行计算。
- b) 为了与疲劳许用限制相比较，在评定应力中，除局部热应力引起的应力（见 6.2.1.3.12 b）节）以外，所有的应力均应按弹性为基础进行评定。在评定局部热应力时应采用弹性计算公式，但泊松比应采用由下式确定的数值：

$$\nu = 0.5 - 0.2 (S_y / S_a), \quad \text{但不小于 } 0.3。$$

式中： $S_a$  = 对于考虑工况所规定的循环次数，从适用的设计疲劳曲线（图 I-9.0）上得到的值；

$S_y$  = 循环平均温度下材料的屈服强度。

#### 6.2.2.7 塑性分析的应用

下列各款提供了应用塑性分析的导则，以及如果采用塑性分析，如何放宽允许的基本应力限制。

##### 6.2.2.7.1 塑性分析

如在特定部位上，采用下列（a）到（c）项的规程，则对一次加二次应力强度（6.2.2.2.2节），壳体内热棘轮效应（6.2.2.2.5节）和非整体连接的渐进性畸变（6.2.2.6.3节）的有关部位上的限制可以不必满足。

- a) 为了与其余的应力限制相比较，在评定应力时，应力在弹性基础上进行计算。
- b) 在具体部位上，代替满足 6.2.2.2.2节、6.2.2.2.5节和 6.2.2.6.3节的特殊要求，应按塑性为基础计算结构的作用，如果出现安定（不持续变形）和在出现安定前的变形不超过规定的限制时，则可认为设计是可接受的。然而，如果下述的条件满足时，安定性要求可以不必被满足。
  - 1) 如果在具体部位上，为了与所有其他的设计、使用、试验及与 6.2.2节规定的特殊应力限制相比较，所作的应力评定以弹性计算为基础，则对一次加二次应力强度（6.2.2.2.2节）、在壳体中的热应力棘轮效应（6.2.2.2.5节）和非整体连接的渐进性畸变（6.2.2.6.3节）的要求可以不必满足。
  - 2) 采用塑性分析由循环运行造成任何点的最大累积应变不超过 5.0%。
  - 3) 最大变形不超过规定的限制。
  - 4) 为了和疲劳许用应力相比较，在评定应力时应将最大总的主应变范围的数值乘以循环平均温度下的材料弹性模量（《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录 A、表 TM）的 1/2。
  - 5) 应使用最小规定屈服强度限与规定的最小强度极限之比小于 0.80 的材料。
- c) 为了和疲劳许用应力相比较，在评定应力时，应将安定后所出现的最大总的主应变范围的数值乘以循环平均温度下材料的弹性模量（《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录 A 表 TM）的 1/2。

6.2.2.7.2 极限分析

如用极限分析或试验能表明规定载荷不超过下限极限载荷的  $2/3$ ，则该特定部位上可以不满足对一次薄膜应力强度（6.2.2.1.1 节）和一次薄膜加一次弯曲应力强度（6.2.2.1.2 节）的限制要求。但对《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 2A 和 2B 所对应表中注（2）的材料除外\*，对后面的这些材料，其规定载荷应不超过《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 Y-2 中适用的永久应变限制系数与下限极限载荷的乘积。

6.2.2.7.3 简化弹--塑性分析

如果符合下列（a）到（f）的要求，则一次加二次应力强度（6.2.2.2.2 节）可以超过  $3S_m$  限制。

- a) 不包括热弯曲应力，其一次加二次薄膜加弯曲应力强度范围应  $\leq 3S_m$ 。
- b) 在设计疲劳曲线上所列的  $S_a$  值乘以系数  $K_e$ ，这里：

$$K_e = 1.0$$

当  $S_n \leq 3S_m$

$$K_e = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{3S_m} - 1 \right)$$

当  $3S_m < S_n < 3mS_m$

$$K_e = 1/n$$

当  $S_n \geq 3mS_m$

各类允许材料的材料参数  $m$  和  $n$  值如下所示，其中， $S_n$ = 一次加二次应力强度范围。

|         | $m$ | $n$ | T 最大℃ |
|---------|-----|-----|-------|
| 马氏体不锈钢  | 2.0 | 0.2 | 370   |
| 奥氏体不锈钢  | 1.7 | 0.3 | 425   |
| 镍—铬—铁合金 | 1.7 | 0.3 | 425   |

- c) 除了不必采用 6.2.2.6.6 节的规程外，其余的疲劳评定与 6.2.2.2.4 节的要求相同。
- d) 结构满足 6.2.2.2.5 节的热棘轮效应的要求。
- e) 对各类材料其温度不能超过上表所列的值。
- f) 材料规定的最小屈服强度与规定的最小抗拉强度之比应小于 0.80。

6.2.2.7.4 A 级和 B 级使用限制的试验

对于 A 级和 B 级使用限制，如利用原型或模型试验能证明规定载荷（等效动态或静态）不超过  $L_u$  的 44%，该结构就不必满足一次薄膜加一次弯曲应力强度的限制。这里  $L_u$  是极限载荷或试验中所用的最大

载荷或组合载荷。在应用本方法时，应考虑在实际零件和试验用零件或部件之间可能存在的尺寸影响和尺寸公差。同时还应考虑实际零件和试验零件之间可能存在的极限强度以及其他材料特性方面的差异，以保证从试验中所得到的载荷足以代表在假定使用载荷下实际结构的承载能力。

### 6.2.2.8 设计应力值

对于堆芯支承结构材料的设计应力强度值  $S_m$  由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 2A 和 2B 中给出。中间温度值可用内插法求得。这些数据是各种应力强度限制的依据。屈服强度值由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 Y-1 中给出。热膨胀系数值由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 TE 中给出。弹性模量在《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 TM 中给出。附录 III 给出了确定应力强度值的依据。在图 I-9.0 中给出了与 6.2.2.2.4 节一起使用的设计疲劳曲线。

## 6.2.3 螺纹结构紧固件的应力限制

### 6.2.3.1 设计工况

- 本条的规则适用于承压边界内的堆芯支承结构的机械连接件。用于组装堆芯支承结构的部件称为螺纹结构紧固件。螺纹结构紧固件的设计应力强度值  $S_m$  和屈服应力强度值  $S_y$  分别由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 A 表 Y-1 给出。
- 6.2.2.6 节特殊应力限制不适用于螺纹结构紧固件。对于连接承压边界的连接零件可见 6.2.3 节。
- 仅有施加在螺纹结构紧固件上的设计机械载荷产生的平均应力，不得超过设计温度下确定的  $S_m$  值。

### 6.2.3.2 A 级使用限制

螺纹结构紧固件的数目和横截面面积应在设计技术规格书中指定为 A 级限制的使用载荷下满足本条的应力强度限制。这些应力强度限制包括在图 4 中。应考虑设计技术规格书中所描述的任何变形限制。在规定的使用载荷下，由紧固件螺纹传递的轴向总裁荷不应达到或趋于零。

#### 6.2.3.2.1 平均应力

规定工况下的弹性分析\*应表明：包括予加载荷所引起的应力在内的平均一次加二次薄膜应力，应满足下列（a）到（f）项的要求。

- 横截以紧固件螺杆面积或螺纹抗拉应力面积上的平均薄膜应力强度最大值，不得大于  $0.9S_y$  或  $2/3S_u$  中的较小值，这里  $S_y$  和  $S_u$  按使用温度来确定。
- 对纯剪切加载，横截螺纹上的平均剪应力不应大于  $0.6S_y$ ， $S_y$  按使用温度来确定。
- 紧固件头部下的支承面应力平均值应不大于  $2.7S_y$ 。 $S_y$  按使用温度来确定。

- d) 仅由施加于紧固件的设计机械载荷所引起的一次薄膜应力强度  $P_m$  应不大于  $S_m$ 。 $S_m$  按使用温度来确定。注意这里不能用连接系数。
- e) 如有紧密连接要求,则预加载荷的应力应大于除预加载荷外的其他载荷引起的一次加二次薄膜应力。
- f) 对纯剪切力加载,仅由施加于紧固件的设计机械载荷,由横截螺纹上的一次剪切应力不得大于  $0.6S_m$ ,  $S_m$  按使用温度确定。

#### 6.2.3.2.2 最大应力

- a) 对不包括应力集中效应所有一次载荷加二次载荷组合所引起的最大一次薄膜和弯曲加上二次薄膜和弯曲应力强度,应不大于 6.2.3.2.1 a) 节限值的 1.33 倍。
- b) 对于紧固件装配期间的扭矩,薄膜应力强度的最大值应不大于装配温度下的 6.2.3.2.1 a) 节限值的 1.2 倍。以及薄膜加弯曲应力强度的最大值应不大于装配温度下 6.2.3.2.2 a) 节限值的 1.2 倍。

#### 6.2.3.2.3 螺纹结构紧固件的疲劳分析

除了螺纹结构紧固件满足 6.2.2.2.4 d) 节中的条件而不需作疲劳分析外,否则应按下列 (a) 至 (e) 程序来确定螺纹结构紧固件对循环使用的适用性。

- a) 抗拉强度低于 700MPa 的螺纹结构紧固件。对由规定最小抗拉强度低于 700MPa 的材料制成的螺纹结构紧固件,应按 6.2.2.2.4 e) 节的方法对循环使用进行评定。使用图 I-9.0 适用的设计疲劳曲线和合理的疲劳强度减弱系数[6.2.3.2.3 c) ]。
- b) 高强度螺纹结构紧固件。高强度螺纹结构紧固件使用图 I-9.0 适用的设计疲劳曲线,可按 6.2.2.2.4 e) 节的方法,对循环使用进行评定:
  - 1) 包括预加载荷在内,在紧固件的截面周边上(直接拉伸和弯曲的合成,但不计应力集中)引起的一次加二次应力的最大值应不超过  $0.9S_y$ 。 $S_y$  按使用温度来确定。
  - 2) 螺纹的最小螺纹根部圆半径应不小于 0.08mm。
  - 3) 螺杆端部的圆角半径与螺杆直径之比不得小于 0.060。
- c) 疲劳强度减弱系数(6.2.1.3.16 节)。除非用分析或试验能证明较低的数值是合适的,否则,在螺纹结构紧固件的疲劳评定中所使用的疲劳强度减弱系数不应小于 4.0。由此,对高强度的螺纹结构紧固件应用上面 (b) 中的规则时,所用的值不应小于 4.0。
- d) 弹性模量的影响。应将  $S$  交变(6.2.1.6.1 节或 6.2.1.6.2 节)乘以设计疲劳曲线查得的弹性模量与分析中使用的弹性模量之比,在适用的设计疲劳曲线上的纵坐标轴上找到此值,在横坐标轴上找到相应的循环次数。如所考虑的使用循环仅由一种有意义的波动应力所引起的,则此值即为许用的循环次数。
- e) 累积损伤。如按 6.2.2.2.4 节 (e) (5) 所求得的累积使用系数  $U$  不超过 1.0,则紧固件将能承受所规定的循环使用的载荷和热应力。

### 6.2.3.3 B 级使用限制

采用 A 级使用限制（6.2.3.2 节）。

### 6.2.3.4 C 级使用限制

在设计技术规格书指定的 C 级限制的使用载荷，螺纹结构紧固件的数目和截面积应满足 6.2.2.4 节的要求。对于高强度结构紧固件（ $S_u > 700\text{MPa}$ ），6.2.3.2 节中的限制对于这些使用载荷也是适用的。应考虑在设计技术规格书中规定的任何变形限制。

### 6.2.3.5 D 级使用限制

在设计技术规格书指定为 D 级限制[核设施部件建造总规则-2142.2 d) 节]的使用载荷，螺纹结构紧固件的数目和截面积应满足 6.2.2.5 节的要求。应考虑在设计技术规格书所规定的任何变形限制。

| 应力分类                                 | 包括预加载荷引起的应力在内的平均一次加二次薄膜应力 <sup>(1)、(2)</sup>   | 一次薄膜和弯曲加二次薄膜和弯曲应力 <sup>(2)、(3)</sup>   | 峰值应力  |
|--------------------------------------|--|--|---|
| A 级和 B 级<br>使用限制 <sup>(9)、(10)</sup> | <div><div><math>P_m + Q_m</math></div><div>或</div><div><math>0.9S_y</math></div><div>或</div><div><math>2/3S_u</math></div><div>或</div><div><math>0.67L_L</math></div><div>或</div><div><math>0.44L_u</math></div><div>或</div><div><math>0.6S_y</math></div><div>或</div><div><math>2.7S_y</math></div><div>或</div><div><math>S_m</math></div></div> <div>螺杆或螺纹部分<sup>(4)</sup></div> <div><sup>(5)</sup></div> <div>极限分析<sup>(7)</sup></div> <div>试验<sup>(8)</sup></div> | <div><div><math>P_m + Q_m + P_b + Q_b</math></div><div>或</div><div><math>1.2S_y</math></div><div>或</div><div><math>8/9S_u</math></div><div>或</div><div><math>0.67L_L</math></div><div>或</div><div><math>0.44L_u</math></div><div>或</div><div>试验<sup>(8)</sup></div></div> <div>螺杆或螺纹部分<sup>(4)</sup></div> <div><sup>(5)</sup></div> <div>极限分析<sup>(7)</sup></div> <div>试验<sup>(8)</sup></div> | <div><div><math>P_m + Q_m + P_b + Q_b + F</math></div><div>或</div><div><math>S_a</math></div></div> <div><sup>(6)</sup></div> |
|                                      | <p>注：</p> <p>(1) 如果要求紧密连接，则预加载荷引起的应力必须超过除预加载荷外的其他载荷引起的一次加二次薄膜应力。</p> <p>(2) <math>Q_m</math> 是二次薄膜应力。</p> <p>(3) <math>Q_b</math> 是二次弯曲应力。</p> <p>(4) 对于安装扭矩，最大薄膜应力强度不应超过安装温度下该值的 1.2 倍。</p> <p>(5) 图 4 的注 (5)。</p> <p>(6) 图 3 的注 (9)。</p> <p>(7) 图 3 的注 (10)。</p> <p>(8) <math>L_u</math> 定义在 6.2.2.7.4 中。</p> <p>(9) 对 C 级使用限制，满足 6.2.3.4。</p> <p>(10) 对 D 级使用限制，满足 6.2.3.5。</p>   |  |   |

图4 螺纹结构紧固件设计的应力强度限制

## 6.3 堆芯支承结构设计

### 6.3.1 通用要求

#### 6.3.1.1 合格要求

堆芯支承结构设计的合格要求在如下（a）到（c）给出：

- a) 设计应满足 6.1 和 6.2 的要求。
- b) 满足 6.3 的要求。当 6.2 和 6.3 相矛盾时，应按 6.3 的要求来控制。
- c) 本节要求可适用于证书持有者具体规定的内部结构（4.1.2），但是证书持有者应确认内部结构所采用的设计将不会对堆芯支承结构的完整性产生不利的影响。

### 6.3.2 设计考虑事项

#### 6.3.2.1 设计和使用载荷

采用 6.1.1 的规定。

#### 6.3.2.2 特殊考虑事项

采用 6.1.2 的规定。

#### 6.3.2.3 通用设计规则

采用 6.1.3 的规定，但和本节的规则有矛盾者除外。对于有矛盾的情况，按本节来指导堆芯支承结构的设计。

### 6.3.3 焊接结构的设计

#### 6.3.3.1 焊接接头的分类

- a) 这里所用术语分类是定义焊接接头的位置。本条规定的分类可通用于本分卷其他地方，以确定关于许用焊接接头形式以鉴别对于位置的特殊限制。凡焊接接头的设计功能既不是约束堆芯又不是支承堆芯者，均不属于本条的任何分类。
- b) 在 6.3.3.2 中定义了各种不同位置上可采用的焊接接头形式。

##### 6.3.3.1.1 A 类接头

A 类焊接接头是圆柱形构件上的纵向焊缝。A 类焊接接头可以是 I 型、II 型或在下列限制中的 IV 型。

当 A 类焊接接头采用 IV 型时，其质量系数应取检测用表 2 所允许的 I 型或 II 型质量系数的 1/2。

#### 6.3.3.1.2 B 类接头

B 类接头是圆柱形焊件上的环向焊缝。B 类接头可以是 I 型、II 型或在下列限制中的 IV 型或 V 型接头。当 B 类接头采用 IV 型或 V 型接头时，其质量系数应取检测用表 2 所允许的 I 型或 II 型质量系数的 1/2。

#### 6.3.3.1.3 C 类接头

C 类接头主要是用于法兰与圆筒的连接焊缝。C 类接头可以是 I 型、II 型、III 型，或在下列限制中的 IV 型或 V 型接头。当 C 类接头采用 IV 型或 V 型接头时，其质量系数应取检测用表 2 所允许的 I 型或 II 型质量系数的 1/2。

#### 6.3.3.1.4 D 类接头

D 类接头主要用在接管与其他构件的连接。D 类接头可以是 I、II、III、IV、V、VI 或 VII 型接头。

#### 6.3.3.1.5 E 类接头

E 类接头主要用在梁的腹板端头连接。E 类接头可以是 I、II、III、IV、V、VI、VII 或 VIII 型接头。

### 6.3.3.2 焊接接头的许用形式

根据 6.3.5.1 所给的限制条件，只要在分析中采用所提供的质量系数  $n$  和疲劳系数  $f$  满足了检测用表 2 中的要求，则堆芯支承结构可采用下列各款中所述的任何形式的接头。在设计评定中的质量系数，它是通过将质量系数乘以一次应力的许用限值来使用的。换言之，焊接质量系数  $n$  是针对静力分析，而不用于疲劳分析。进行疲劳分析时，应使用表 2 中疲劳系数  $f$  和《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 C 图 I-9.0 中适用的设计疲劳曲线。

#### 6.3.3.2.1 I 型接头

在板之间或在近似位于一个平面内或偏斜角不大于  $30^\circ$  的其他构件之间的全焊透焊缝，当采用双面对接焊、或熔化性嵌条、气体保护、或焊后拆除金属衬垫等焊接方法，而这些接头的背面都满足 7.4.2.4 的要求时，则都属于本款范围。

#### 6.3.3.2.2 II 型接头

在板之间或在其他构件之间的全焊透焊缝，当采用符合于 6.3.3.2.1 要求或坡口边缘以相对的凸缘构成整体垫板或焊后不拆除的金属垫板等方法焊成的接头，都属于本款范围，按 6.2.2.2.4（当采用时，垫板应是连续的，任何连接头都应是全焊透焊缝。）的方法分析应对循环运行工况的适用性情况可除外。



#### 6.3.3.2.3 III 型接头

在板之间或其他偏斜角可达  $90^\circ$  的构件之间的全焊透焊缝,当采用符合 6.3.3.2.2 要求或是角接焊缝焊接接头,都属于本款范围。采用堆焊金属补强的焊接附件以及倾斜的连接接头也都属于本款范围。

#### 6.3.3.2.4 IV 型接头

当按照焊缝厚度乘以焊缝长度之积来确定连接的面积时,双面坡口设计的部分焊透焊缝(每个坡口的最小深度等于最薄构件厚度的  $1/8$ )属于本款范围。

#### 6.3.3.2.5 V 型接头

当按焊缝理论厚度乘以焊缝长度的积来确定连接的面积时,双面角焊缝属于本款范围。有一侧为单面角焊缝另一侧为单面坡口焊缝组成的接头也属于本款范围。

#### 6.3.3.2.6 VI 型接头

当用焊缝厚度乘以焊缝长度的积来确定连接面积时,单面坡口的部分焊透焊缝,属于本款范围。

#### 6.3.3.2.7 VII 型接头

当用角焊缝的理论厚度乘以焊缝长度的积来确定连接面积时,单面角焊缝属于本款范围。

#### 6.3.3.2.8 VIII 型接头

当用理论焊缝厚度乘以焊缝长度之总和的乘积来确定间断角焊缝的连接面积,以及用塞焊数目乘最小横截面积的乘积来确定塞焊的连接面积时,间断角焊和塞焊都属于本款范围。

#### 6.3.3.2.9 接头形式的限制

使用中采用的接头形式应是接头种类(6.3.3.2)中允许的一种。当某些形式的接头采用 A、B 和 C 类接头时(表 2),必须采用降低的质量系数。

表 2 许用焊接接头和设计系数

| 焊接接头<br>形式           | 允许的接头<br>类别 | 质 量 系 数 和 疲 劳 系 数 <sup>1</sup>                  |                              |                                 |                             |                            |
|----------------------|-------------|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                      |             | RT 或 UT <sup>2</sup> 和<br>PT 或 MT 检测<br>5.2.2.0 | 发展的 PT 或<br>MT 检测<br>5.2.3.1 | 根部和最终的<br>PT 或 MT 检测<br>5.2.3.2 | 表面 PT 或<br>MT 检测<br>5.2.3.3 | 表面目视<br>检测<br>5.2.6.0      |
| I、全焊透                | A.B.C.D.E   | n = 1.0 f = 1                                   | n = 0.9 f = 1                | n = 0.75 f = 1                  | n = 0.65 f=1                | n = 0.5 f = 1              |
| II、全焊透               | A.B.C.D.E   | n = 1.0 f = 2                                   | n = 0.9 f = 2                | n = 0.75 f = 2                  | n = 0.65 f=2                | n = 0.5 f = 2              |
| III、全焊透              | C.D.E       | n = 1.0 f = 1                                   | n = 0.9 f = 1 <sup>3</sup>   | n = 0.75 f = 1 <sup>3</sup>     | n = 0.65 f=1 <sup>3</sup>   | n = 0.5 f = 1 <sup>3</sup> |
| IV、双面坡口<br>(RT 不适用)  | A.B.C       | n = 0.5 f = 4                                   | n = 0.45 f = 4               | n = 0.4 f = 4                   | n = 0.35 f=4                | n = 0.25 f = 4             |
|                      | D.E         | n = 0.9 f = 4                                   | n = 0.8 f = 4                | n = 0.7 f = 4                   | n = 0.6 f=4                 | n = 0.4 f = 4              |
| V、双面角焊<br>(RT 不适用)   | B.C         | n = 0.5 f = 4                                   | n = 0.45 f = 4               | n = 0.4 f = 4                   | n = 0.35 f=4                | n = 0.25 f = 4             |
|                      | D.E         | n = 0.9 f = 4                                   | n = 0.8 f = 4                | n = 0.7 f = 4                   | n = 0.6 f=4                 | n = 0.4 f = 4              |
| VI、单面坡口<br>(RT 不适用)  | D.E         | n = 0.6 f = 4                                   | n= 0.55 f = 4                | n = 0.45 f = 4                  | n = 0.4 f=4                 | n = 0.35 f = 4             |
| VII、单面角焊<br>(RT 不适用) | D.E         | n = 0.6 f = 4                                   | n=0.55 f = 4                 | n = 0.45 f = 4                  | n = 0.4 f=4                 | n = 0.35 f = 4             |
| VIII、间断角焊或<br>塞焊     | E           | 不适用   | n = 0.45 f = 4               | n = 0.4 f = 4                   | n = 0.35 f=4                | n = 0.3 f = 4              |

注1：定义见6. 3. 5. 2。

注2：对电渣对接缝应进行射线检测。对铁素体材料中的电渣焊缝也应在整个长度上作超声检测，如进行晶粒细化热处理或焊后热处理的话，则检测应在这些处理之后进行。

注3：当焊缝两面都进行检测时，允许采用的最小疲劳强度减弱系数为1. 0。否则，在循环运行工况的分析中，该系数必须取2. 0。

7 制造

7.1 总的要求

7.1.1 引言

- a) 堆芯支承结构（4.1.1节）应按本章要求进行制造和安装，应采用符合第5节要求的材料进行制造。
- b) 只有明确地要求证书持有者执行本规定时，本章的规则才适用于内部结构（4.1.2节）。而证书持有者应保证所制作的每一件内部结构不会对堆芯支承结构的完整性带来有害的影响。

## 7.1.2 由证书持有者提供的材料和制作的确认

### 7.1.2.1 确认的内容

每项物项的证书持有者应通过使用相应的规范标志，并确认所使用的材料满足第5章节的要求和制作或安装满足本章的要求。

#### 7.1.2.1.1 加工、试验和检测的确认

如果证书持有者按本分卷其他章的要求进行加工、试验、修补或检测，则证书持有者应当确认已经满足相应章节的要求。应当备有所有要求进行加工的报告以及所有要求的试验、修补和检测结果的报告，供检验人员所用。

#### 7.1.2.1.2 拉伸或冲击试验的复验

在物项的制作或安装过程中如果材料经受的热处理，未能被试件热处理范围所覆盖（第5章节），并用这种热处理可能使拉伸或冲击性能降低到要求值以下，则应由证书持有者重新进行拉伸和冲击试验。复验试样取自按照第5章节的要求进行切取和热处理过的试件。

#### 7.1.2.2 材料的识别标记

堆芯支承结构的材料应带有明显的识别标记，这种识别标记直到堆芯支承结构的制作或安装完毕仍能辨别。如原来的识别标记被切除或材料被分割，应把原来的识别标记准确地移植到被切割后零件上或采用规定编码标志，以保证在以后的制作或安装过程中都能识别每一块材料，但5.1.5节另有规定者可例外。应严格地识别和控制具有合格证书的材料、焊接材料和钎焊材料，以便在堆芯支承结构中能追踪到这种材料，否则，应采用一种控制规程，以保证使用规定的材料。

#### 7.1.2.3 检测

没有引用其他特殊检测规范条款而只是用来验证第7节要求一致性的目视检测，可以由操作或监理该工作的人员进行。除另有规定外，不要求按8.4节和8.1节来考核人员和评定规程以进行目视检测。

#### 7.1.2.4 焊接材料的试验

所有焊接材料均应满足5.3节的要求。

### 7.1.3 材料的修补

#### 7.1.3.1 缺陷的去除和修补

如果在原先在交付时已验收的材料中，在制作或安装过程中又得知或发现超过5.4节限制的缺陷，则该材料是不合格的。如果按照5.4节对相应产品形式的要求进行了修补，该材料仍可使用，但是：

- a) 补焊深度不作限制；
- b) 焊缝坡口补焊后的检测时间应符合8.1.3节的规定；

#### 7.1.3.2 母材补焊的证明文件

制造商在进行深度超过10mm或超过截面厚度10%（取较小值）的补焊后，应编写一份报告，报告应包括以下内容：一张表示补焊凹坑位置和尺寸的图表、焊接材料识别标记、焊接工艺规程、热处理制度以及补焊的检测结果。另外，所有修补焊缝的面积超过零件20%的累计面积或9,700mm<sup>2</sup>（取较小值）时，应编制有一份与修补焊缝超过最小深度时相同的证明文件。

## 7.2 成形、装配和对中

### 7.2.1 切割、成形和弯曲

#### 7.2.1.1 切割

可用机械方法诸如车削、剪切、刨削、磨削和热切割方法把材料加工到所需的形状和尺寸。

##### 7.2.1.1.1 热切割前的预热

当用热切割加工焊缝接头或坡口，去除焊接附件或材料缺陷或用于任何其他目的时，应考虑采用《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》规范性附录R所建议的预热工艺对材料进行预热。

##### 7.2.1.1.2 P-No.8 材料热切割后的材料修整

当要用热切割的方法去除金属时，应采用机械方法去除附着材料以达到设计技术规格书中的要求。材料的P-No.详见《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》表1。

#### 7.2.1.2 成形和弯曲工艺

只要能获得所要求的尺寸（见7.2.1.4），并且材料规定的冲击性能不低于最小规定值以下，或者伴随着成形操作后的热处理能够有效地恢复冲击性能，则可用任何方法将堆芯支承结构材料（包括焊缝金属）进行热成形，冷成形或弯曲。热成形被定义为材料成形温度高于材料的下转变温度以下56℃时的成形。需要时，这工艺应按7.2.1.3节所提出的关于冲击性能的要求作评定。

#### 7.2.1.3 冲击性能要求的成形工艺评定

应进行工艺评定试验，试验材料应与部件中使用的材料具有同样的规格、等级（或类别）和热处理制度，并且具有相近的冲击性能。这些试样应经受与部件材料相同的成形或弯曲工艺以及热处理制度。应进行相应的试验，以确定变形后仍满足5.2节的冲击性能要求。

##### 7.2.1.3.1 免除试验的条件

对于下列（a）至（f）所列的材料，不要求进行工艺评定试验：

- 在切取冲击试样前已由材料机构完成热成形的材料，例如锻件；
- 按 5.2.1.1 节要求，由试件来代表的热成形材料，该试件已经受的热处理能代表零件要经受的热成形工艺和热处理制度；
- 按照 5.2 节不要求冲击试验的材料；
- 最终应变小于 0.5%的材料；
- 最终应变小于预先评定的工艺规程中的材料；
- 在成形后，每炉和每批按 5.2 节的要求进行冲击试验的材料。

##### 7.2.1.3.2 工艺评定试验

工艺评定试验应按下列（a）至（f）规定的方法进行。

- a) 应当在变形以前以及变形和热处理以后，各用三个不同炉号的材料进行试验，以确定成形和随后热处理操作的影响。
- b) 试件应按照第 5 节的要求切取，并应取自变形材料的受拉侧。
- c) 应变百分率应按下列公式确定：

对于筒体：

$$\% \text{应变} = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

对于球形或碟形表面：

$$\% \text{应变} = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

对于管道：

$$\% \text{应变} = \frac{100r}{R}$$

式中：

$R$  = 到管道中心线的名义弯曲半径

$R_f$  = 到壳体中心线的最终半径

$R_o$  = 初始半径（对于平板状零件，此值等于无穷大）

$r$  = 管道的名义半径

$t$  = 名义厚度

- d) 工艺评定使用与材料制作中采用的相似的弯曲过程，或在试样上直接拉伸，来模拟表面最大应变率。
- e) 应对三炉材料的每一炉切取足够的夏比 V 型缺口试样，以确定表示出上、下平台的转变曲线。对每一炉材料，三个冲击试样的试验应在转变区域内的至少五种不同温度分布下进行。上、下平台各用一个试样测定。按照产品形式，可能需要绘制横向膨胀量和吸收能量值的转变曲线（5.2 节）。
- f) 用三炉的每一炉材料在变形前后的冲击试验数据结果，确定：
  - 1) 无延性转变温度（NDT）随下列变化发生的最大变化：
    - ◆ 在所考虑的温度下，横向膨胀量和吸收能量的最大变化；或
    - ◆ 在所考虑的横向膨胀量和吸收能量水平下，温度的最大变化；或
  - 2) 当横向膨胀量是验收准则（5.2 节）时，最大温度变化或最大横向膨胀量变化。

### 7.2.1.3.3 成形材料的验收标准

为了验收，部件中采用的成形材料在成形之前的冲击性能，应足以补偿由于采用评定过的成形工艺所引起的冲击性能的最大损失。

#### 7.2.1.3.4 重新评定

当发生下面（a）、（b）中的任何一种变化时，要求进行新的工艺评定试验。

- a) 材料的最大计算应变值超过以前已评定应变值 0.5%以上。
- b) 在成形或弯曲过程中，所用的预热温度高于 120℃而后不进行焊后热处理。

#### 7.2.1.4 加工后材料的最小厚度

如任何一种加工工艺，使厚度减薄到低于第6节规则所要求的最小值，则材料可以按7.1.3节的要求进行修补。

### 7.2.2 焊接前的装配和对中

#### 7.2.2.1 焊接前的装配和对中方法

在焊接操作过程中，用焊接连接的零件可以用拉杆、千斤顶、夹具、定位焊或临时性附件，进行装配、对中和定位。

##### 7.2.2.1.1 定位焊

用来保持对中的定位焊，在完成后应完全清除，或采用磨削或其他合适的方法适当地修整其终端和始端，使它们与最终焊缝能很好地熔合。定位焊应由评定合格的焊工采用评定合格的焊接工艺进行焊接。当定位焊将成为完工焊缝的一部分时，则应按8.2.4节的要求进行目视检测，并应清除有缺陷的定位焊缝。

##### 7.2.2.2 截面对中的最大错边量

截面的对中应使焊完的焊接接头的最大错边量不大于 $t/2$ ， $t$ 是在焊接连接件较薄截面的名义厚度。或者，在设计技术规格书中规定更小的对中公差。

##### 7.2.2.2.1 错边的修整

在上面规定的允许公差范围内的任何错边应修整成平滑过渡，在完工的焊缝宽度范围内的斜度至少为3:1，必要时，在焊缝边缘的外侧堆焊附加焊缝金属。此外，如果满足6.2节的要求，则可以允许大于7.2.2.2节所规定的错边值。

##### 7.2.2.3 全焊透接头焊缝

如果满足本分卷中规定的检测验收准则，则认为已经达到了全焊透。如果确定已经达到了全焊透，则不要求进行其他的检测。

### 7.3 焊接评定

#### 7.3.1 通用要求

##### 7.3.1.1 允许采用的焊接工艺类型

可采用《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》第7.2节允许的焊接工艺焊接堆芯支承结构材料或连接附件。所采用的任何方法都应按照7.3.2的要求作出记录。不允许采用螺栓焊。

##### 7.3.2 焊接评定、记录和识别标记

### 7.3.2.1 要求的评定

- a) 制造厂应制定焊接工艺和进行《压水堆承压部件 焊接 第 3 部分：焊接工艺评定》所要求的试验。
- b) 凡在承压零件上焊接永久性或临时性附件，以及在这类焊接中焊接永久性或临时性的定位焊缝所采用的工艺规程，亦应满足评定要求。
- c) 当制作对接焊缝的工艺试板时，应考虑工件角度约束、横向约束和端部约束对焊件的影响。对于抗拉强度等于或高于 550MPa 的材料和焊缝金属，以及不论抗拉强度高和低的厚截面材料，都应特别注意上述各项约束。焊接时增加约束可能会产生裂纹，反之可能不会产生裂纹。

### 7.3.2.2 记录的保存和确认

制造厂应保存一份经评定的焊接工艺以及焊接人员的记录。记录应表明试验的日期和结果，以及指定每个焊接人员的识别标记。这些记录应由制造厂通过签字的方式或者符合质保程序的其它方法进行审查、验证和授权。采购方应能得到这些记录。

#### 7.3.2.2.1 焊接人员的识别标记

焊接人员的识别标记应符合《压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求》第5.1.3节的规定。

### 7.3.2.3 评定前的焊接

所采用的焊接工艺规程被评定合格前不可用于产品的焊接，应只雇用取得资质的焊接人员。

### 7.3.2.4 评定的转移

由制造厂进行的焊接工艺评定，以及焊接人员的技能评定试验，除《压水堆承压部件 焊接 第 3 部分：焊接工艺评定》规定的以外，不能证明这些焊接工艺对任何其他制造厂也是合格的，亦不能证明该焊接人员能够为任何其他制造厂进行合格的焊接。

## 7.3.3 焊接工艺评定试验的通用要求

### 7.3.3.1 与《压水堆承压部件 焊接 第 3 部分：焊接工艺评定》要求的一致性

所有的焊接工艺评定试验应符合《压水堆承压部件 焊接 第 3 部分：焊接工艺评定》的要求和本章的补充要求或修订要求。

### 7.3.3.2 评定焊缝热处理

工艺评定焊缝的焊后热处理应符合 7.5 的要求。焊后热处理的保温时间应至少等于部件焊缝材料所采用的最长时间的 80%。焊后热处理的总时间可以在一个热循环内完成。

### 7.3.3.3 试件和试样的制备

焊接工艺评定试件和试样的制备应符合《压水堆承压部件 焊接 第3部分：焊接工艺评定》的要求。

### 7.3.3.4 堆焊的评定要求

母材补强用的堆焊熔敷金属应按 7.3.3 的要求进行评定。

## 7.4 指导焊缝的施焊、检测和返修的规则

### 7.4.1 焊前应采取的预防措施

#### 7.4.1.1 焊接材料的识别、贮存和保管

制造厂应对堆芯支承结构的制作和安装所用的焊条和其他材料的控制负责。焊条、焊剂和其他材料应保持适当的识别、贮存和保管，应符合《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》第4章的规定。应采取预防措施尽量减少焊条和焊剂的吸潮量。

#### 7.4.1.2 焊接表面的清洁度和保护

母材焊前准备所用的方法应能使焊接坡口具有适当光滑的表面。要焊接的表面应没有氧化皮，铁锈、油、油脂和其他有害物质。焊接时应保护工件不受有害的污染，以及雨、雪和风的影响，不允许在潮湿的表面上进行焊接。

### 7.4.2 制作焊接接头的规则

#### 7.4.2.1 垫板

垫板的适用应符合《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》第7.4.1节的规定。

#### 7.4.2.2 锤击

为使变形减到最小，可以进行有控制的锤击。除非焊缝进行焊后热处理，否则对于第一层焊缝和焊缝金属的根部，以及最后一层焊缝都不得采用锤击。

#### 7.4.2.3 双面焊接头

在焊接全焊透双面焊接头的第二面以前，应采用机械方法加工焊缝根部。但是，当采用的焊接方法能够获得完全熔合和焊透，且该方法由焊接工艺评定证明是良好时，则在焊接第二面以前可不清理焊根。

#### 7.4.2.4 焊缝的表面

可接受的焊态表面，应没有粗糙的波纹、沟槽、焊瘤以及突起的凸块和凹坑，并且满足下面（a）到（e）项的要求。

- a) 焊完的焊缝表面状态应适合于进行射线照相和任何其他所需要的焊缝无损检测。在射线照相分析时，如果对表面状态有怀疑，应把照片与实际焊缝表面进行对照，以解释和确定其可接受性。
- b) 焊缝余高按 7.4.2.6 节的规定。
- c) 咬边不应超过 0.8mm，且不应侵入所要求的截面厚度以内。
- d) 当焊缝的最终厚度满足第 6 章的要求时，允许单面环形对接焊缝根部存在凹陷。
- e) 如果焊缝表面需要打磨来满足上述准则时，则应注意避免把焊缝或母材减薄到低于所要求的厚度。

#### 7.4.2.5 不同直径工件的焊接

当不同直径的工件焊接在一起时，在两个表面之间应平滑过渡。其过渡长度可以包括焊缝。过渡的斜度应保证长度与偏差之比不小于3:1，除非按6.2节的分析允许存在较大的斜度。

#### 7.4.2.6 焊缝的余高

在堆芯支承结构中所有对接接头的余高表面可以和母材齐平，或有一个均匀的凸起。焊缝每一面的



余高高度不应超过下表所规定的数值。

| 名义厚度, mm           | 最大余高,mm |
|--------------------|---------|
| $t \leq 25$        | 2.5     |
| $25 < t \leq 50$   | 3.0     |
| $50 < t \leq 75$   | 4.0     |
| $75 < t \leq 100$  | 5.5     |
| $100 < t \leq 125$ | 6.0     |
| $t > 125$          | 8.0     |

7.4.2.7 角焊缝的形状和尺寸

角焊缝可以是凸形或是凹形。只要焊缝总的尺寸不足部分不超过焊缝全长的 10%，则任何单面连续焊的角焊缝尺寸可以小于规定的角焊缝尺寸，但不小于 1.5mm。个别焊缝的尺寸不足部分在长度上应不超过 50mm。在托架上的筋和凸缘的焊缝，在长度等于两倍凸缘宽度的两端不允许没有焊缝，在插套式焊缝焊接时，焊前应预留 1.5mm 的间隙，焊接后该间隙不需存在也不必检测。对于没有内肩的插套式接头，在管端之间应留有间隙。

7.4.2.8 堆焊层零件的焊接

用于堆焊层的焊接接头形式和焊接工艺应能防止形成脆性焊缝组织，所有这些堆焊层都应采用液体渗透法按 8.1.1 节的要求进行检测并满足 8.3.3 节的验收标准。焊接到具有堆焊层的产品的零件应直接焊到母材上，而不能焊到堆焊层上，焊缝的堆焊覆层除外。

7.4.3 临时附件的焊接和拆除

- a) 只要满足下列 1) 到 5) 的要求，临时性附件可以采用未确认的材料，并可以采用连续或断续的角焊缝或部分焊透焊缝，焊在堆芯支承结构上或它们的部件上：
  - 1) 焊接工艺和焊接人员已按 7.3.2.1 的要求评定合格；
  - 2) 附件材料经鉴别并适用于焊接；
  - 3) 附件材料与被焊材料相容；
  - 4) 焊接材料已鉴别且与被焊材料相容；
  - 5) 当 7.5.2 有要求时，焊缝应进行焊后热处理。
- b) 临时性附件拆除应按下列要求进行：
  - 1) 在临时性附件周围的邻近区域用适当的方法进行标记，以使在附件拆除后，直到按照下列 (3) 要求完成检测后，该区域一直能被识别。
  - 2) 临时性附件应按照 7.2.1.1 的工艺完成拆除。
  - 3) 在临时性附件已经拆除后，标记区域应按 8.1.1 的要求用液体渗透检测的方法进行检测，并满足 8.3.3 的验收标准。如果将要拆除的材料大于 3mm，采用任何机械加工方法拆除则不需要进行这种检测；
  - 4) 上述 (a) (5) 的焊后热处理可以延迟到附件拆除以后再进行。

7.4.4 焊缝金属缺陷的修补

7.4.4.1 通用要求

按照第 8 章要求进行检测发现焊缝金属中有缺陷时，必要时应去除和修补。

#### 7.4.4.2 表面缺陷的去除

焊缝金属表面缺陷如果符合《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》第7.6.2节（a）到（c）项要求时，可以用打磨或机械加工的方法去除，而不需要用焊接进行修补。

#### 7.4.4.3 焊缝修补的要求

当采用补焊时，焊缝金属中所挖的凹坑应满足下列各项要求。

##### 7.4.4.3.1 缺陷的去除

缺陷可以采用机械方法或热刨方法去除。准备修补的区域应按8.1.1用液体渗透法进行检测，检测结果应满足8.3.3的验收标准。当去除缺陷要求除去焊缝的全部厚度时，以及当焊接接头的背面不易于除去检测物质时，则不要求进行上述检测。

##### 7.4.4.3.2 焊接材料、工艺和焊接人员的要求

焊缝修补应采用按7.1.2.5和7.3的要求评定合格的焊接材料、焊接人员和焊接工艺来进行。

##### 7.4.4.3.3 修补区的过渡

修补后的表面与周围表面应平滑过渡。

##### 7.4.4.3.4 修补焊缝的检测

应按原焊缝的检测要求，对修补焊缝重新进行检测。但是，不合格的缺陷原来就是用液体渗透法探出时，以及当修补的凹陷深度不超过下列值时仍须使用液体渗透法重新检测：

- a) 对于  $t \leq 13\text{mm}$ ，为  $1/3t$ ；
- b) 对于  $13\text{mm} < t \leq 64\text{mm}$ ，为  $6\text{mm}$ ；
- c) 对于  $t > 64\text{mm}$ ，取  $10\text{mm}$  或  $10\%t$  两者中的较小值。

这里， $t$  为焊缝厚度。

#### 7.5 热处理

##### 7.5.1 焊接预热要求

焊接预热和道间温度应符合《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》的要求。

##### 7.5.2 焊后热处理

焊后热处理应符合《压水堆承压部件 焊接 第4部分：产品焊接》的要求。

##### 7.5.3 最终焊后热处理以外的焊缝热处理

最终焊后热处理以外的热处理保温温度、保温时间、加热速率和冷却速率不必满足本章要求。

##### 7.5.4 弯曲或成形后的热处理

###### 7.5.4.1 奥氏体和非铁基金属材料

奥氏体和非铁基金属材料，在弯曲或成形后既不要求也不禁止热处理。

#### 7.6 机械连接件

### 7.6.1 螺纹结构紧固件

#### 7.6.1.1 螺纹的啮合

所有螺纹结构紧固件应按设计图纸或按设计技术规格书的要求进行啮合。

#### 7.6.1.2 螺纹的润滑剂

用于螺纹连接的任何润滑剂或涂料，应与其使用条件相适应，同时不应同系统中工作介质或任一结构材料起不良的化学反应。

#### 7.6.1.3 螺纹润滑剂的清除

应从将要进行密封焊接的表面上清除所有螺纹润滑剂或化合物。

### 7.6.2 临时紧固件及其拆除

用于连接临时附件与堆芯支撑结构件的所有临时性紧固件应该在运行前拆除。

## 8 检测

### 8.1 检测的通用要求

#### 8.1.1 规程、考核和评定

##### 8.1.1.1 通用要求

无损检测除按本章要求进行修改以外，应按《压水堆承压部件 无损检测》的检测方法进行。射线检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测》规定进行射线检验，对于胶片射线照相不允许用荧光屏除外，几何不清晰度不允许超过《压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测》第7.4.2节的范围，并应采用表10的图像质量指示计(IQI)。电子和数字射线照相图像的保存与胶片射线照相法要求相同。超声检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测》；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》进行；目视检测应按《压水堆承压部件 无损检测 第7部分：目视检测》进行。按本章要求或参考本章要求的无损检测应由已按本章要求考核合格的人员执行。检测的结果应按本章的验收标准评定。

表 3 厚度、图像质量指示计编号、基本孔和线径

| 单壁材料的厚度范围<br>(mm) | 图像质量指示计—孔型或线型 <sup>(注1)</sup> |            |     |                   |     |            |     |                   |
|-------------------|-------------------------------|------------|-----|-------------------|-----|------------|-----|-------------------|
|                   | 射线源侧                          |            |     |                   | 胶片侧 |            |     |                   |
|                   | 编号                            | 孔径<br>(mm) | 基本孔 | 要求的线径 IQI<br>(mm) | 编号  | 孔径<br>(mm) | 基本孔 | 要求的线径 IQI<br>(mm) |
| ≤6                | 5                             | 1.02       | 4T  | 0.15              | 5   | 1.02       | 4T  | 0.15              |
| >6~10             | 7                             | 1.02       | 4T  | 0.15              | 7   | 1.02       | 4T  | 0.15              |
| >10~13            | 10                            | 1.02       | 4T  | 0.25              | 10  | 1.02       | 4T  | 0.25              |
| >13~16            | 12                            | 1.27       | 4T  | 0.33              | 12  | 1.27       | 4T  | 0.33              |
| >16~19            | 15                            | 1.52       | 4T  | 0.41              | 12  | 1.27       | 4T  | 0.33              |
| >19~25            | 20                            | 1.02       | 2T  | 0.41              | 17  | 0.89       | 2T  | 0.33              |
| >25~32            | 25                            | 1.27       | 2T  | 0.51              | 17  | 0.89       | 2T  | 0.33              |
| >32~38            | 30                            | 1.52       | 2T  | 0.64              | 20  | 1.02       | 2T  | 0.41              |
| >38~50            | 35                            | 1.78       | 2T  | 0.81              | 25  | 1.27       | 2T  | 0.57              |
| >50~64            | 40                            | 2.03       | 2T  | 1.02              | 30  | 1.52       | 2T  | 0.64              |
| >64~75            | 45                            | 2.29       | 2T  | 1.02              | 35  | 1.78       | 2T  | 0.81              |
| >75~100           | 50                            | 2.54       | 2T  | 1.27              | 40  | 2.03       | 2T  | 1.02              |
| >100~150          | 60                            | 3.05       | 2T  | 1.60              | 45  | 2.29       | 2T  | 1.02              |
| >150~200          | 80                            | 4.06       | 2T  | 2.54              | 50  | 2.54       | 2T  | 1.27              |
| >200~250          | 100                           | 5.08       | 2T  | 3.20              | 60  | 3.05       | 2T  | 1.60              |
| >250~300          | 120                           | 6.10       | 2T  | 4.06              | 80  | 4.06       | 2T  | 2.54              |
| >300~400          | 160                           | 8.13       | 2T  | 6.35              | 100 | 5.08       | 2T  | 3.20              |
| >400~500          | 200                           | 10.16      | 2T  | 8.13              | 120 | 6.10       | 2T  | 4.06              |

注：注1：孔（板）型透图像质量指示计可用于平板和不使透度计孔的影像变形的几何形状的工作。

#### 8.1.1.2 无损检测规程

凡按本章要求进行的所有无损检测，都应按经过专业责任工程师认可的经实践验证证明的详细书面规程实施。所用的规程应符合《压水堆承压部件 无损检测》相应各章对特定检测方法的规定。射线照相胶片和射线透视图像的数字化处理应满足《压水堆承压部件 无损检测》第2章强制性附录III“射线照相法和射线透视法的数字成像、显示和储存”的要求。当专业责任工程师需要时，应能取得书面规程，

以及证明规程效能和检测人员考核的记录。所有相关的无损检测人员至少应持有一份检测规程的副本，以便工作时参考及使用。

### 8.1.1.3 检测后的清洁

所有在检测工件上使用检测材料的无损检测，在检测以后应根据所使用的检测材料或检测规程的说明将检测工件进行彻底清洁。

### 8.1.2 焊缝检测的时间

制作和安装期间按8.2节要求进行焊缝验收检测时间应按下列各款规定：

- a) 对堆芯支承结构部件上的焊缝，如按7.5.2节的要求进行热处理，当需要进行射线检测或超声检测时，应在中间或最终焊后热处理之后进行；
- b) 除P-No. 1材料的焊缝可在焊后热处理之前或之后进行检测外，最终焊缝表面的液体渗透或目视检测均应在所要求的焊后热处理之后进行。对于被焊缝金属堆焊层覆盖的焊缝表面检测应在焊缝金属堆焊之前进行。对于焊后热处理之后不可达的焊缝表面，应在导致不可达的操作之前进行检测；
- c) 所有异种金属焊接接头，最终焊缝表面的检测，应在最终焊后热处理之后进行。

### 8.1.3 焊缝坡口制备表面的检测

所有材料厚度等于或大于25mm的全焊透焊缝坡口制备表面都应采用液体渗透法进行检测。显示应按下列(a)、(b)和(c)的验收标准进行评定：

- a) 只有主要尺寸大于1.5mm的显示才应认为与缺陷有关。
- b) 长度不超过13mm的层状不连续显示是可以接受而不必进行修补。长度超过13mm的各种层状显示，其范围应用超声检测来确定。长度超过13mm的各种显示应用焊接方法进行修补。除了超声检测发现为满足产品形状的超声检测要求而需要附加补焊深度者外，补焊深度应为10mm或缺陷显示深度两者中的较小值。
- c) 下面相关的显示是不可接受的：
  - 1) 对于厚度为25mm~50mm的材料，任何长度大于3mm的线状显示。对于厚度 $\geq 50\text{mm}$ 的材料，任何长度大于5mm的线状显示；
  - 2) 尺寸大于5mm的圆形显示；
  - 3) 在一条直线上有4个或4个以上的显示，其显示长度大于1.5mm，且缺陷边缘间距等于或小于1.5mm；
  - 4) 在与受评定的显示有关的最不利部位上，任取一个面积为 $4,000\text{mm}^2$ 内的主要尺寸不超过150mm，在这个面积内有10个或更多个长度大于1.5mm的显示。
- d) 对I类、II类及III类焊缝的用焊缝边缘制备来完成修补，应在其表面成为不可达之前，用磁粉或液体渗透法进行检测，检测可在焊后热处理以前或以后进行。

## 8.2 焊缝要求的检测

### 8.2.1 允许的检测方法

堆芯支承结构焊缝检测应符合本节要求，由证书持有者规定的检测类型进行检测以满足表6的要求。证书持有者可以把表6检测的等级提高到比原先规定更高的水平。

### 8.2.2 射线、超声或液体渗透的要求

当证书持有者要求（表6）时，应对焊缝作射线检测，并对外部和可达的内部焊缝表面以及焊缝每侧至少13mm内的母材，用液体渗透法检测。除了有晶粒粗大和复杂外形的一些材料和焊缝用超声检测得不到满意的结果外，超声检测可以代替射线检测。

### 8.2.3 液体渗透的要求

#### 8.2.3.1 逐层作液体渗透的要求

当证书持有者要求（表6）时，应对焊缝逐层进行液体渗透检测。每层厚度取焊缝接头厚度的1/3或13mm，两者中较小值，对焊缝外表面和可达的内表面及焊缝每侧13mm内相邻的母材进行检测。对于厚度小于或等于10mm的焊缝，允许对焊缝根部，每焊完一层，再对焊缝外表面和可达的内表面以及焊缝每侧至少13mm相邻内的母材进行检测，来代替上述检测。

#### 8.2.3.2 焊缝根部和最后焊道的液体渗透检测的要求

当证书持有者要求（表6）时，在焊根和最后的焊道完成之后，应对焊缝外表面和可达的内表面，以及在焊缝每侧至少13mm内相邻的母材，用液体渗透进行检测。

#### 8.2.3.3 表面液体渗透检测的要求

当证书持有者要求（表6）时，应对焊缝外表面和可达的内表面，以及焊缝每侧至少13mm内相邻的母材，用液体渗透进行检测。

### 8.2.4 表面目视检测的要求

#### 8.2.4.1 其它无损检测以外的目视检测

所有焊缝应进行目视检测，并按8.3.4.1节的准则验收。该目视检测应在要求的检测以外而附加的检测。

#### 8.2.4.2 焊缝表面完整性的目视检测

当证书持有者要求（表6）时，对焊缝的最终表面应进行目视检测，并按8.3.4.1节的准则进行验收。

### 8.2.5 加硬堆焊表面

加硬堆焊表面应按5.4.3.4节的要求用液体渗透法进行检测，其验收标准可适用于等于和大于50mm厚度使用的材料。

## 8.3 验收标准

### 8.3.1 射线检测验收标准

#### 8.3.1.1 显示的评定

由焊缝射线照相发现的具有缺陷特性的下列情况均为不可接受的显示：

- a) 任何具有裂纹、未完全熔合或未焊透区域特性的显示。
- b) 任何长度大于下列值的任何其他条形显示：
  - 1) 对于厚度  $t$  小于和等于 19mm 时，长度为 6mm 的显示；
  - 2) 对于厚度  $t$  大于 19mm 到小于等于 57mm 时，长度为  $t/3$  的显示；
  - 3) 对于厚度  $t$  大于 57mm 时长度为 19mm 的显示。

这里  $t$  为焊缝较薄部分的厚度。

- c) 内部根部焊道的状态在射线照相所示的黑度无突变时是可接受的；但如果这种根部焊道状态的任一侧上射线照相的条状显示达到上述(b)的规定，则为不可接受。
- d) 在  $12t$  长度内任一组的链形显示且累计长度大于  $t$  的任一组显示，不得验收。但最小距离超过  $6L$  的相邻显示可除外，此时累计长度不限， $L$  为最大显示长度。
- e) 任一组链形显示，其累积长度超过单个显示所允许的长度，且相邻显示之间的最小距离小于  $3L$ ， $L$  为最大的显示长度。
- f) 超过《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 F 规定可接受的圆形显示。四个或更多圆形显示应构成由《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》规范性附录 F 中所包括的焊缝链状圆形显示。

### 8.3.2 超声检测验收标准

产生反射波幅度等于和大于基准波幅度50%的所有缺陷均为不可接受，但下面(a)中指出的长度除外。

- a) 显示波幅超过基准波幅度，且长度超过下列规定值的缺陷，均为不可接受：
  - 1) 对于厚度  $t$  小于和等于 19mm 时，长度为 6mm 的显示；
  - 2) 对于厚度  $t$  大于 19mm 到小于等于 57mm 时，长度为  $t/3$  的显示；
  - 3) 对于厚度  $t$  大于 57mm 时，长度为 19mm 的显示。

这里  $t$  为被检验焊缝的厚度，如果焊缝是由两个不同厚度的焊件焊接而成，则  $t$  为较薄焊件的厚度。

- b) 如果显示具有裂纹、未完全熔合或未焊透的特征，则不论长度如何均为不可接受。

### 8.3.3 液体渗透检测验收标准

#### 8.3.3.1 显示的评定

- a) 表面上的机械不连续性通过渗透剂的渗出来显露。但诸如机械加工的痕迹或表面状态等局部的表面不连续，会产生类似的无关显示。
- b) 任何被认为是无关的显示应进行复测，以验证实际上是否有缺陷存在。复测前可先进行表面修整。无关显示且存在会掩盖缺陷的大面积渗透剂沉淀的属于不可接受。
- c) 相关显示是由缺陷引起的显示。线性显示是长度大于 3 倍宽度的显示。圆形显示是圆形或长度等于或小于 3 倍宽度的椭圆形显示。

#### 8.3.3.2 验收标准

- a) 只有产生主要尺寸大于 1.5mm 的显示的缺陷才被认为是相关缺陷。
- b) 出现下列显示的缺陷均不得验收。
  - 1) 任何裂纹或线状显示；
  - 2) 尺寸大于 5mm 的圆形显示；
  - 3) 在一条直线上有 4 个或 4 个以上，且边缘相距小于或等于 1.5mm 的圆形显示；
  - 4) 在与受评定的显示有关的最不利部位上，任取一个表面积为  $4,000\text{mm}^2$  且其主要尺寸不超过 150mm，在这个面积内有 10 个或 10 个以上的圆形显示。

### 8.3.4 目视检测验收标准

#### 8.3.4.1 通常验收标准

按8.2.4.1节的要求进行目视检测时应满足下列(a)和(b)的验收标准:

- a) 焊缝余高、未焊透、咬边和重叠应不超过本标准所允许的范围;
- b) 被检测的表面不得有凸凹不平的陡谷。

#### 8.3.4.2 焊缝表面完整性的目视检测验收标准

- a) 按8.2.4.2节的要求进行目视检测时,焊缝表面应满足8.3.4.1节中给出的验收准则。
- b) 下列缺陷不可接受的:
  - 1) 任何具有裂纹或未焊透特征的缺陷;
  - 2) 圆形缺陷,其最大尺寸大于3mm时;
  - 3) 在一条直线上有4个或更多个大于0.8mm,其边缘间距小于或等于1.5mm的圆形缺陷;
  - 4) 在与受评定的缺陷有关的最不利部位上,任取一个面积为4,000mm<sup>2</sup>且其主要尺寸不超过150mm的表面,在这个表面内有10个或10个以上的大于0.8mm的圆形缺陷。

### 8.4 无损检测人员的考核和取证

#### 8.4.1 通用要求

执行规范要求的无损检测的机构,应使用具备8.4.2节规定的有相应检测能力和知识的无损检测人员。当证书持有者或质量体系的证书持有者分包这些服务时,应按8.4.2节的要求对无损检测人员的资格进行验证。应由考核合格的无损检测人员进行本标准要求的所有无损检测和结果评定。

#### 8.4.2 人员的考核、取证和认证

从事堆内构件无损检测活动的人员应参加考核并取得资格证书后,方可从事相应方法和级别的无损检测活动。

无损检测技术资格的范围包括超声、射线、渗透、磁粉、涡流、目视和泄漏七种检测方法。

无损检测人员技术资格等级分为III(高)级、II(中)级和I(初)级。取得不同无损检测方法各资格等级的人员,应从事与该方法和该资格等级相应的无损检测工作,并承担相应的技术责任。