

# 团 体 标 准

T/CNEA XXXXX—

## 压水堆承压部件 设备设计制造 第 2 部分： 蒸汽发生器

Code for PWR pressure boundary components—Equipments design and fabrication  
—Part 2: Steam Generator

（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 总则..... 3

5 材料..... 4

6 设计..... 5

7 制造..... 25

附 录 A（资料性附录） 蒸汽发生器主要零部件..... 38

附 录 B（资料性附录） 690 合金的导热系数 ..... 40

附 录 C（资料性附录） 蒸汽发生器主要母材 ..... 41

附 录 D（资料性附录） 蒸汽发生器主要焊材 ..... 42

附 录 E（资料性附录） 载荷组合..... 43

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020的规定起草。

T/CNEA XXXX《压水堆承压部件 设计与制造》与T/CNEA XXXXX《压水堆承压部件 材料》、T/CNEA XXXXX《压水堆承压部件 焊接》、T/CNEA XXXXX《压水堆承压部件 无损检测》和T/CNEA XXXXX《压水堆承压部件 设备设计与制造》共同构成支撑《压水堆承压部件》。本文件是T/CNEA XXXXX《压水堆承压部件 设备设计与制造》的第2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。。

本文件起草单位：上海核工程研究设计院有限公司、上海电气核电设备有限公司、哈电集团（秦皇岛）重型装备有限公司、东方电气（广州）重型机器有限公司。

本文件起草人：

本文件为首次发布。

# 引 言

T/CNEA XXXX《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材料、设计、制造、检验和试验等方面的基本能要求。
- 第2部分：蒸汽发生器。目的在于规定压水堆核电厂蒸汽发生器材料、设计、制造、检验和试验等方面的基本能要求。
- 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、检验和试验的基本能要求。
- 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材料、设计、制造和试验等方面的基本能要求。
- 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材料、设计、制造和试验等方面的基本能要求。



# 压水堆承压部件 设备设计制造 第2部分:蒸汽发生器

## 1 范围

本标准规定了压水堆核电厂立式自然循环蒸汽发生器的建造要求，包括材料、设计、制造、检验、试验、包装和运输等要求。

本标准适用于压水堆核电厂立式自然循环蒸汽发生器。

## 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 191 包装储运图示标志
- GB/T 196 普通螺纹 基本尺寸
- GB/T 197 普通螺纹 公差
- GB/T 1184 形状和位置公差 未注公差值
- GB/T 1804 一般公差 未注公差的线形和角度尺寸的公差
- GB/T 4844 纯氮、高纯氮和超纯氮
- GB/T 8979 纯氮、高纯氮和超纯氮
- GB/T 17569 压水堆核电厂物项分级
- GB/T 19804 焊接结构的一般尺寸公差和形位公差
- NB/T 20004-2014 核电厂核岛机械设备材料理化检验方法
- NB/T 20233 压水堆核电厂核蒸汽核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
- T/CNEA XXX.1 压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求
- T/CNEA XXX.2 压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件
- T/CNEA XXX.8 压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则
- T/CNEA XXX.2 压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测
- T/CNEA XXX.3 压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测
- T/CNEA XXX.4 压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测
- T/CNEA XXX.5 压水堆承压部件 无损检测 第5部分：磁粉检测
- T/CNEA XXX.6 压水堆承压部件 无损检测 第6部分：涡流检测
- T/CNEA XXX.8 压水堆承压部件 无损检测 第8部分：泄漏检测
- T/CNEA XXX.4 压水堆承压部件 材料 第4部分：压力容器用经真空处理的淬火加回火碳钢和合金钢锻件
- T/CNEA XXX.15 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.27 压水堆承压部件 材料 第27部分：高温高压螺栓用碳钢和合金钢螺母
- T/CNEA XXX.16 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 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.38 压水堆承压部件 材料 第 38 部分：镍合金锻件
- T/CNEA XXX.22 压水堆承压部件 材料 第 22 部分：高温用无缝铁素体合金钢管
- T/CNEA XXX.35 压水堆承压部件 材料 第 35 部分：冷凝器及热交换器用镍基合金无缝管
- T/CNEA XXX.24 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 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.2 压水堆承压部件 焊接

### 3 术语和定义

#### 3.1

**一次侧 primary side**

蒸汽发生器内与一回路流体接触的界面一侧。

#### 3.2

**二次侧 secondary side**

蒸汽发生器内与二回路流体接触的界面一侧。

#### 3.3

**设计压力 design pressure**

设定的蒸汽发生器一、二次侧顶部的最高压力；与相应的设计温度一起作为设计载荷条件，其值不低于工作压力。

#### 3.4

**设计温度 design temperature**

蒸汽发生器在正常工作情况下，设定的元件金属温度（沿元件金属横截面的温度平均值）；设计温度与设计压力一起作为设计载荷条件。

#### 3.5

**试验压力 test pressure**

进行耐压试验或泄漏试验时，蒸汽发生器一、二次侧顶部的压力。

#### 3.6

**试验温度 test temperature**

进行耐压试验或泄漏试验时，蒸汽发生器一、二次侧的金属温度。

#### 3.7

**循环倍率 circulation ratio**

蒸汽发生器二次侧上升段内介质与出口蒸汽质量流量之比。

#### 3.8



**蒸汽湿度 moisture carry over**

蒸汽发生器蒸汽液相介质与混合介质的质量之比。

### 3.9

**计算厚度 required thickness**

按本标准相应公式计算得到的厚度。需要时，还应计入其他载荷所需厚度。对于外压元件，系指满足稳定性要求的最小厚度。

### 3.10

**厚度附加量 additional thickness**

厚度附加量为腐蚀裕量、材料厚度负偏差以及制造负偏差三者之和。

$$C=C_1+C_2+C_3$$

式中：

$C$  ——厚度附加量，mm；

$C_1$  ——腐蚀裕量，mm；

$C_2$  ——材料厚度负偏差，mm；

$C_3$  ——制造负偏差，mm。

### 3.11

**名义厚度 nominal thickness**

计算厚度加上厚度附加量后向上圆整至材料标准规格的厚度。

### 3.12

**特殊热处理 thermal treatment**

690合金的特殊热处理。指705-738℃，保温时间至少5小时（通常为10小时）的热处理。

### 3.13

**参考无塑性转变温度 reference nil-ductility transition temperature ( $RT_{NDT}$ )**

表征1级设备承压材料韧性指标的参数；确定方法见T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》。

### 3.14

**LOCA loss of coolant accident**

一次侧冷却剂丧失事故。

## 4 总则

### 4.1 通则

4.1.1 蒸汽发生器的设计、制造、检验、试验和验收应符合 T/CNEA XXX.1《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》、T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》以及本标准的要求，还应遵守国家颁布的有关法律、法规和导则。

4.1.2 蒸汽发生器的设计、制造单位应按 T/CNEA XXX.1《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》以及有关法规、导则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 T/CNEA XXX.1《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 T/CNEA XXX.1《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

本标准管辖范围是蒸汽发生器外部承压零部件及内件。范围如下：

### a) 蒸汽发生器与外部管道/支撑连接：

- 1) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面，如蒸汽发生器接管含安全端，则为安全端与管道连接的焊接坡口端面；
- 2) 法兰连接的第一个法兰密封面；
- 3) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面；
- 4) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。

### b) 人孔、手孔和检查孔等的平盖及其紧固件；

### c) 非承压元件与蒸汽发生器外表面的焊接接头。

压水堆核电站典型的蒸汽发生器和主要零部件见附录 A。

## 4.4 功能与分级

### 4.4.1 功能

4.4.1.1 蒸汽发生器是压水堆核电站的关键设备之一。其主要功能是将一次侧反应堆冷却剂从堆芯带走的热量传递到二次侧产生饱和蒸汽推动汽轮机做功发电。

4.4.1.2 蒸汽发生器作为反应堆冷却剂系统压力边界的重要组成部分，防止裂变产物释放到环境中。

### 4.4.2 分级

蒸汽发生器的安全等级、抗震类别、质量保证等级和规范等级应遵守T/CNEA XXX.1《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

5.1.1 蒸汽发生器用材料应满足国家标准、行业标准或 T/CNEA XXX《压水堆承压部件 材料》相关标准的要求，承压零部件还应满足 T/CNEA XXX.1《压水堆承压部件 设计与制造 第1部分：通用要求》的要求，同时还应符合本标准的规定。

5.1.2 蒸汽发生器一、二次侧压力边界的材料，包括传热管、壳体、安全端以及焊接材料等应由具有核电站相同材料业绩和相应资质的材料制造单位制造。如材料制造单位没有相应材料的制造和核电站蒸汽发生器应用业绩，应预制一定数量的试验件，进行系统性的试验研究，证明能长期安全地用于核电站蒸汽发生器，并由蒸汽发生器制造单位做相关工艺试验证明可用于蒸汽发生器制造。用于蒸汽发生器制造的材料应按评审合格的相同工艺进行制造、试验和检验。

- 5.1.3 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）。每台蒸汽发生器的传热管材料的钴含量应不超过 0.014%（质量含量）。
- 5.1.4 所有奥氏体不锈钢应是固溶处理和非敏化状态。所有的镍基合金母材应在固溶处理和特殊热处理（TT 处理）状态下供货。
- 5.1.5 用水淬以外的任何方法从固溶温度冷却到 427℃ 以下的非稳定化的奥氏体不锈钢，应满足 NB/T 20004-2014 中第 18 章的要求。试样应从代表每个热处理批号和每个熔炼炉号的材料中取出。应提供合格证和质量证明文件（或 CMTR），报告中应证明提供的材料是固溶处理和非敏化状态。如果是非稳定化的，则应证明提供的材料已经过水淬或满足 NB/T 20004-2014 中第 18 章的相关要求。固溶处理应在材料专篇技术条件要求的温度下进行，但是不得超过 1149℃。除了焊接或热切割直接加热外，所有加热到 427℃ 或更高温度的奥氏体不锈钢，都应进行固溶处理。加热到 427~1149℃、保温时间小于 1h 的稳定化奥氏体不锈钢和碳含量不大于 0.03% 的奥氏体不锈钢不受此限。铁素体含量不低于 5FN 的铸件及焊缝金属也不受此限。焊接过程的热输入应避免焊接区域敏化。
- 5.1.6 硫、铅、铜、汞、铝、铋、砷和其他低熔点元素、其合金和化合物禁止在蒸汽发生器的制造、试验、运输或安装过程中使用。二硫化钼（MoS<sub>2</sub>）润滑剂、聚四氟乙烯或其他氟化聚合物，以及四氧化三铅和矿物油不能用在任何蒸汽发生器部件上。
- 5.1.7 如果不能找到不含 5.1.6 规定的污染元素的合适的替代材料，允许用这些替代材料在室温下处理和加工金属，但在任何高温操作前，制造厂应将所有表面、缝隙和盲孔等处杂质清除干净。

## 5.2 母材

- 5.2.1 蒸汽发生器传热管应采用抗腐蚀性能优异的材料，宜采用 NS3105 材料。
- 5.2.2 蒸汽发生器壳体应采用韧性较好的低合金钢锻件。蒸汽发生器壳体材料的参考无延性转变温度（RT<sub>NDT</sub>）应不低于 -12℃，具体应满足设计文件的要求。
- 5.2.3 人孔、手孔和检修孔的螺栓和螺母（简称螺栓连接件）应采用韧性较好的棒材。螺栓连接件不应采用屈服强度（或规定塑性延伸强度  $R_{p0.2}$ ）超过 965MPa 且抗拉强度超过 1035MPa 的材料。
- 5.2.4 一次侧管嘴安全端宜采用与管道材料相同牌号的不锈钢材料。
- 5.2.5 水室隔板宜采用 NS3105 材料。
- 5.2.6 传热管支承板和流量分配板（如有）应采用抗腐蚀性能较好的材料，宜采用 06Cr13Al 材料。
- 5.2.7 抗振条宜采用 06Cr13Al 材料。
- 5.2.8 给水环应采用抗磨蚀性能较好的材料，宜采用 SA-335 Gr.P11 材料。
- 5.2.9 蒸汽限流器（文丘里管）应采用抗磨蚀性能较好的材料，宜采用 NS3105 材料。
- 5.2.10 蒸汽发生器主要的母材及标准见附录 C。
- 5.2.11 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。设计单位应明确蒸汽发生器零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。

## 5.3 焊接材料

- 5.3.1 焊接材料应保证焊缝金属的拉伸性能和韧性满足母材标准规定的下限值。
- 5.3.2 蒸汽发生器主要的焊接材料见附录 D。

## 5.4 存档材料

为以后可能的试验，制造单位应按照设计文件的要求在规定的位置截取规定数量的存档材料，应对存档材料作详细的标记和记录

## 6 设计

## 6.1 通则

6.1.1 蒸汽发生器出口蒸汽湿度应满足汽轮机的要求。在任何稳态功率水平（包括 100% 功率），且水位在正常运行条件的范围内时，蒸汽发生器出口蒸汽湿度宜不超过 0.25%。

6.1.2 蒸汽发生器二次侧应有足够的循环倍率和良好的流动状态。正常满功率（100% 功率）时循环倍率应不小于 3，宜为 3~4 之间。

6.1.3 蒸汽发生器热工水力设计的堵管裕量应不小于 10%。

6.1.4 蒸汽发生器设计应考虑在役检查和维修要求。

## 6.2 热工水力设计

### 6.2.1 稳态热工水力计算

#### 6.2.1.1 传热系数

总传热系数计算包含以下四部分：

- 用管内对流传热公式计算一次侧传热系数；
- 用大容积沸腾传热公式计算二次侧传热系数；
- 用管壁平均温度下金属的导热系数计算管壁热阻；
- 根据试验数据或其他核电厂的经验数据确定污垢热阻。

以传热管外表面积为基准的总传热系数  $K$  按式(1)计算。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} + r_i \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{a_o} + r_w + r_o} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$K$  ——总传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$a_i$  ——管内对流传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$d_o$  ——传热管外径，mm；

$d_i$  ——传热管内径，mm；

$r_i$  ——管内污垢热阻， $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ；

$a_o$  ——管外传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$r_w$  ——管壁热阻，可按式(2)计算， $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 。

$$r_w = \frac{d_o}{2\lambda_w} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\lambda_w$  ——传热管导热系数，690 合金的导热系数参见附录 B， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

$r_o$  ——管外污垢热阻， $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 。

#### 6.2.1.2 传热温差

传热管的传热温差  $\Delta t$  应按对数平均温差。按式(3)计算：

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / (\ln \Delta t_1 - \ln \Delta t_2) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\Delta t_m$  ——传热管的对数平均温差， $^\circ C$ ；

$\Delta t_1$  ——蒸汽发生器大温差端的流体温差， $^\circ C$ ；

$\Delta t_2$  ——蒸汽发生器小温差端的流体温差， $^\circ C$ 。

### 6.2.1.3 换热面积

蒸汽发生器最小换热面积可按式(4)计算：

$$A=Q/(K\cdot\Delta t_m) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$A$  ——蒸汽发生器所需的最小换热面积， $m^2$ ；

$Q$  ——蒸汽发生器的额定热负荷， $W$ ；

$K$  ——总传热系数， $W/(m^2\cdot^\circ C)$ ；

$\Delta t_m$  ——传热管的对数平均温差， $^\circ C$ 。

### 6.2.1.4 一次侧流动阻力

一次侧流动阻力计算的范围应由一次侧冷却剂进口接管开始到一次侧冷却剂出口接管为止，包括下列部分：

- a) 由入口接管至入口水室，突然扩大；
- b) 入口水室内拐弯；
- c) 由入口水室进入传热管，突然收缩；
- d) 传热管内摩擦阻力和  $180^\circ$  拐弯；
- e) 由传热管进入出口水室，突然扩大；
- f) 出口水室内拐弯；
- g) 由出口水室至出口接管，突然收缩。

### 6.2.1.5 稳态稳定性分析

应进行蒸汽发生器的稳态稳定性分析，以避免蒸汽发生器在正常运行区间自然循环上升段（从管束入口到汽水分离器出口）的流量-压降曲线存在负斜率区间。

### 6.2.2 瞬态热工水力计算

瞬态热工水力计算应至少包括以下内容：

- a) 计算蒸汽发生器的瞬态水力稳定性；
- b) 计算蒸汽发生器对外来扰动的响应特性，为控制系统提供数据；
- c) 计算水位波动幅值。

### 6.2.3 管束三位热工水力分析

管束三维热工水力分析应包括以下内容：

- a) 计算管束区域整体流场和温度场，为传热管流致振动和微振磨损评价提供输入；
- b) 计算管束底部局部流场和温度场，为排污结构、流量分配板（如有）和阻挡块的设计提供输入；
- c) 计算管束顶部局部流场和温度场，为传热恶化评价提供输入；
- d) 计算管束顶部区域流场和温度场，为汽水分离器的设计提供输入。

### 6.2.4 排污设计

排污设计应符合下列规定：

- a) 蒸汽发生器二次侧管板表面应有合适的流场分布，以减小管板表面的低流速泥渣沉积区；
- b) 二次侧靠近管板处应设置排污结构；
- c) 二次侧下部筒体上靠近管板处应设置手孔，以便进行管束检查和泥渣冲洗；
- d) 必要时，可在套筒顶部设置泥渣收集器。

排污设计的主要内容有：

- a) 确定总排污量及其分布；

- b) 确定排污管/排污孔的直径和位置。

### 6.2.5 水位设计

水位设计应符合下列规定：

- a) 蒸汽发生器应有合适的水装量；
- b) 水位设计应满足蒸汽发生器循环倍率的要求；
- c) 水位最高限值不得高于汽水分离器蒸汽出口端面。

水位设计的主要内容包括：

- a) 确定正常水位、高水位、高高水位、低水位、低低水位的位置；
- b) 根据监控和测量水位的需要，设置水位测量接口。

## 6.3 结构设计

### 6.3.1 总体布置

总体布置应至少包括以下内容：

- a) 传热管布置；
- b) 汽水分离装置的布置；
- c) 确定壳体的内径、壁厚；
- d) 套筒、传热管支承板、流量分配板（如有）、抗振条的布置；
- e) 给水环的布置；
- f) 满足系统要求的蒸汽发生器接管尺寸和布置。

### 6.3.2 传热管

#### 6.3.2.1 传热管厚度

传热管直管段的计算厚度按T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求计算。传热管弯管段的计算厚度按式(5)确定。

$$t = \frac{Pd_o}{2\left(\frac{S_m}{I} + 0.4P\right)} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$P$  ——设计压力，MPa；

$S_m$  ——设计温度下材料的设计应力强度（见 T/CNEA XXX.8《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》，下同），MPa

$I$  ——系数，在弯管段内侧处， $I=(4R-d_o)/(4R-2d_o)$ ；在弯管段外侧处， $I=(4R+d_o)/(4R+2d_o)$ ；  
在弯管段中心线处， $I=1.0$ ；

$d_o$  ——传热管外径，mm；

$R$  ——传热管弯曲半径，mm

#### 6.3.2.2 传热管外压校核

传热管外压校核按T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》进行。

#### 6.3.2.3 传热管弯管要求

传热管弯管之前的最小厚度可按式(6)计算。

$$t_0 = t_1 \left( 1 + \frac{d_o}{4R} \right) \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$t_0$  ——传热管弯管之前所需的最小厚度，mm；

$t_1$  ——传热管直管段的计算厚度，mm；

$d_o$  ——传热管外径，mm；

$R$  ——传热管弯曲半径，传热管弯曲半径应不小于  $2d_o$ ，mm。

在任何情况下，传热管弯管段厚度的减薄量不应大于弯管前名义厚度的17%，传热管弯管段的椭圆度不应大于3%。

### 6.3.3 管板

#### 6.3.3.1 管板的总体要求

管板的设计应符合下列规定：

- a) 管板一次侧和二次侧应设置直段壳体。直段的高度应满足焊缝热处理和无损检测的需要；
- b) 管板一次侧表面应堆焊镍基合金和(或)不锈钢；
- c) 管板一次侧堆焊层上应焊接水室隔板短节；
- d) 管板结构设计应考虑疏水和排污的要求。

管孔的排列方式应为三角形排列或正方形排列。

#### 6.3.3.2 管孔节距

管孔节距最小应为传热管外径的1.25倍。

#### 6.3.3.3 管板厚度

管板所需的最小厚度应通过应力分析的方法确定。当管板与水室封头、二次侧筒体采用焊接连接时，可按式(7)初定管板厚度：

$$t = \frac{FD}{3} \sqrt{\frac{P}{\eta S_m}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$t$  ——计算厚度，mm；

$P$  ——最大设计压差，MPa；

$D$  ——管板直段壳体内径，mm；

$S_m$  ——设计温度下材料的设计应力强度，MPa；

$\eta$  ——对于管孔正方形排列：

$$\eta = 1 - \frac{0.785}{(p'/d_o)^2}$$

对于管孔三角形排列：

$$\eta = 1 - \frac{0.907}{(p'/d_o)^2}$$

$p'$  ——管孔节距，mm；

$d_o$  ——传热管外径，mm；

$F$  ——系数，与管板两侧壳体的壁厚 $T$ 和内径 $D$ 的比值有关，取较小值；

当 $T/D \leq 0.02$ 时,  $F=1.25$ ;

当 $T/D \geq 0.05$ 时,  $F=1.00$ ;

当 $0.02 < T/D < 0.05$ 时,  $F$ 按式(8)计算。

$$F = \frac{17 - 100T/D}{12} \dots\dots\dots (8)$$

### 6.3.4 传热管-管板连接

6.3.4.1 蒸汽发生器管板与传热管的连接方式宜采用强度胀加密封焊的形式。管板与传热管的胀接工艺应使传热管的残余应力尽量低,管板二次侧表面的缝隙深度尽量小。

6.3.4.2 传热管管端宜与管板堆焊层表面平齐。

### 6.3.5 水室封头

#### 6.3.5.1 水室封头的总体要求

水室封头的设计应符合下列规定:

- a) 应选用球形封头或类似的结构;
- b) 应采用封头、支承座、人孔座、接管一体化封头锻造形式;
- c) 必要时,一次侧接管应设置不锈钢安全端;
- d) 内壁应堆焊超低碳不锈钢耐腐蚀层;
- e) 内壁堆焊层表面宜电解抛光。

#### 6.3.5.2 水室封头的厚度

球形水室封头的计算厚度按T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》的要求计算。

### 6.3.6 下筒体

#### 6.3.6.1 下筒体的总体要求

下筒体的设计应符合下列规定:

- a) 下筒体应采用锻件,下筒体下端宜采用加厚段;
- b) 下筒体应设置手孔和检查孔;
- c) 下筒体下部内壁应焊接支撑块,用于支撑管束套筒。

#### 6.3.6.2 下筒体的厚度

下筒体的计算厚度按T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》的要求计算。

### 6.3.7 上筒体

#### 6.3.7.1 上筒体的总体要求

上筒体的设计应符合下列规定:

- a) 上筒体应采用锻件;
- b) 上筒体上应设置人孔,设置位置应便于蒸汽发生器的维修检查和设备安装的起吊;
- c) 上筒体上应设置给水接管,给水接管内设置热保护套管,减小上筒体热应力;
- d) 为便于给水环、汽水分离装置等内件的支撑,在上筒体内壁的相应位置应堆焊镍基合金或焊接支撑块。

#### 6.3.7.2 上筒体的厚度



上筒体的计算厚度按T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求计算。

### 6.3.8 锥形筒体

#### 6.3.8.1 锥形筒体的总体要求

锥形筒体的设计应符合下列规定：

- a) 锥形筒体应采用锻件；
- b) 锥形筒体应采用有折边的结构形式，大端和小端各设置一段直段；
- c) 锥形筒体上可设置检查孔。

#### 6.3.8.2 锥形筒体的厚度

##### 6.3.8.2.1 计算厚度

锥形筒体的计算厚度采用式(9)确定。a)和b)分别给出锥形筒体大端和小端与筒体的连接要求。

$$t = \frac{PR_{ic}}{S_m - 0.5P} \frac{1}{\cos \alpha} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$R_{ic}$  ——计算点处的内半径，mm；

$\alpha$  ——半锥顶角，°。

##### 6.3.8.2.2 锥形筒体大端与筒体连接

本条适用于受内压、锥形筒体和筒体具有同一回转轴、 $\alpha \leq 30^\circ$ 的锥形筒体大端与圆筒连接的结构。

查图1，若  $P/S_m$  值与  $\alpha$  值的交点位于图1中曲线的上方，连接处筒体和锥形筒体无需加强，厚度分别按6.3.7.2节和公式(9)计算。

若  $P/S_m$  值与  $\alpha$  值的交点位于图1中曲线的下方，在连接处筒体和锥形筒体须设置加强段。圆筒加强段的长度范围应不小于  $2\sqrt{R_L t_r}$ ，锥形筒体的长度范围应不小于  $2\sqrt{R_L t_r / \cos \alpha}$ 。加强段的厚度  $t_r$  应按式(10)计算，但不得小于式(9)计算的厚度。

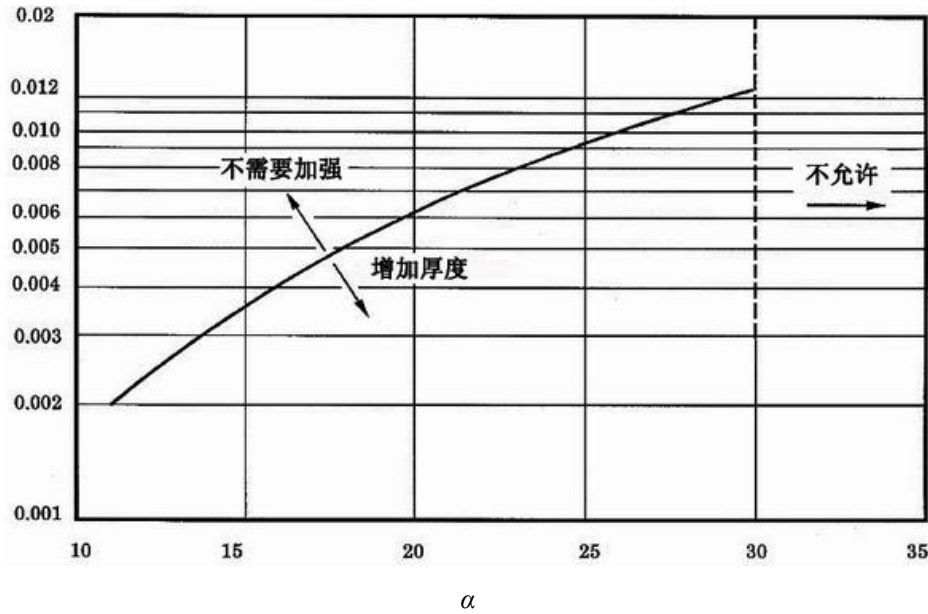
$$t_r = \frac{Q_L PR_L}{S_m - 0.5P} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$Q_L$  ——锥壳大端加强系数，根据  $P/S_m$  值与半锥顶角  $\alpha$  值查图2确定；

$R_L$  ——锥形筒体大端与筒体连接处，锥形筒体大端的内半径，mm。

$P/S_m$



图中：  
 $P$  ——设计压力；  
 $\alpha$  ——半锥顶角。  
 $S_m$  ——设计应力强度；

图1 确定锥形筒体大端与筒体连接处的加强图

系数  $Q_L$

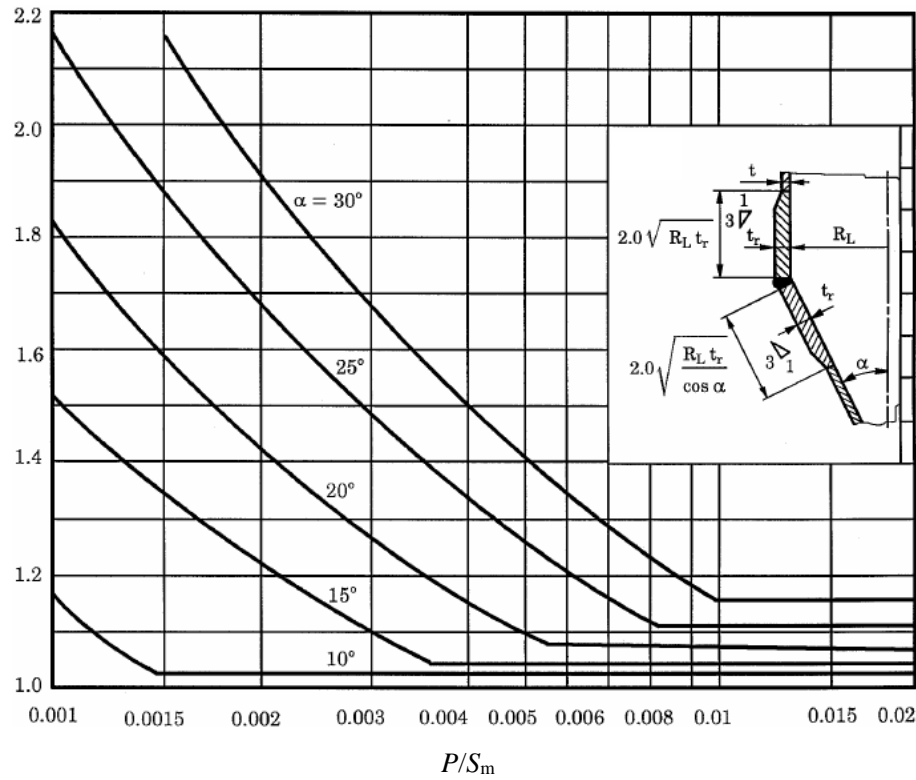


图2 锥形筒体大端与筒体连接处的  $Q$  值图

6.3.8.2.3 锥形筒体小端与筒体连接

本条适用于受内压、锥形筒体和筒体具有同一回转轴、 $\alpha \leq 30^\circ$ 的锥形筒体小端与圆筒连接的结构。

锥形筒体小端与筒体连接处应设置加强段。圆筒加强段的长度范围应不小于  $\sqrt{2R_s t_r}$ ，锥形筒体的长度范围应不小于  $\sqrt{2R_s t_r / \cos \alpha}$ 。加强段的厚度  $t_r$  应按式(11)计算，但不得小于距离连接点  $\sqrt{2R_s t_r / \cos \alpha}$  处按式(9)计算的锥形筒体厚度。

$$t_r = \frac{Q_s P R_s}{S_m - 0.5P} \dots\dots\dots (11)$$

式中：  
 $Q_s$  ——锥壳小端加强系数，根据  $P/S_m$  值与半锥顶角  $\alpha$  值查图 3 确定；  
 $R_s$  ——锥形筒体小端与筒体连接处，锥形筒体小端的内半径，mm。

系数  $Q_s$

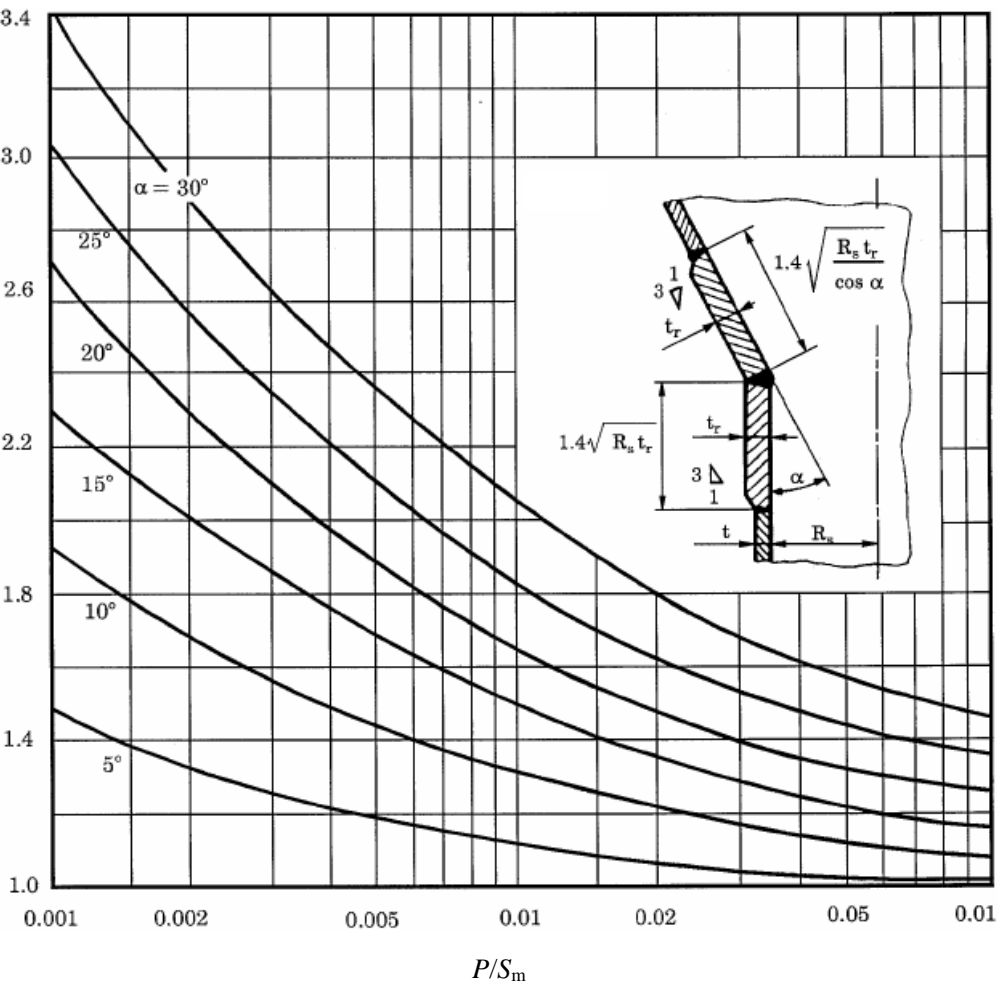


图3 锥形筒体小端与筒体连接处的  $Q$  值

### 6.3.9 上封头

#### 6.3.9.1 上封头的总体要求

上封头的设计应符合下列规定：

- a) 上封头应采用锻件；
- b) 上封头宜采用标准椭圆形封头或与标准椭圆形封头近似的碟形封头；
- c) 在上封头内表面应整体锻造出一个环形凸台，用于与干燥器支撑吊筒焊接连接；
- d) 上封头下端应带有一段直段；
- e) 上封头上端应带有出口蒸汽接管。

#### 6.3.9.2 上封头的厚度

标准椭圆形封头的计算厚度采用式(12)计算。

$$t = \frac{PD}{2S_m - P} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- $t$  ——计算厚度，mm；  
 $D$  ——上封头内径，mm；  
 $S_m$  ——设计温度下材料的设计应力强度，MPa；  
 $P$  ——设计压力，MPa。

碟形封头的计算厚度如下确定。

当  $t/R \geq 0.002$  且  $P/S_m \leq 0.08$  时，按图 4 确定。可以取内插法求取落在曲线范围内的  $r/D$  值，不允许采用曲线范围外的外推值。

### 6.3.10 开孔密封装置

#### 6.3.10.1 开孔密封装置的总体要求

开孔密封装置的设计应符合下列规定：

- a) 蒸汽发生器一次侧人孔、二次侧人孔、手孔和检查孔的垫片应采用石墨不锈钢缠绕垫片或膨胀石墨垫片；
- b) 一次侧人孔应设置密封垫板，便于将介质和盖板隔离以及密封垫片的更换；
- c) 紧固螺栓结构型式应优先采用螺栓拉伸机预紧和拆卸型式。

#### 6.3.10.2 开孔密封装置的计算

##### 6.3.10.2.1 紧固件

所需的最小螺栓面积应按 T/CNEA XXX.8 《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》的规定进行计算。

##### 6.3.10.2.2 盖板

人孔、手孔和检修孔盖的计算厚度按式(13)确定。

$$t = \max(t_1, t_2) \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- $t$  ——计算厚度，mm；  
 $t_1$  ——操作工况下的计算厚度，按式(14)计算，mm；  
 $t_2$  ——预紧工况下的计算厚度，按式(15)计算，mm。

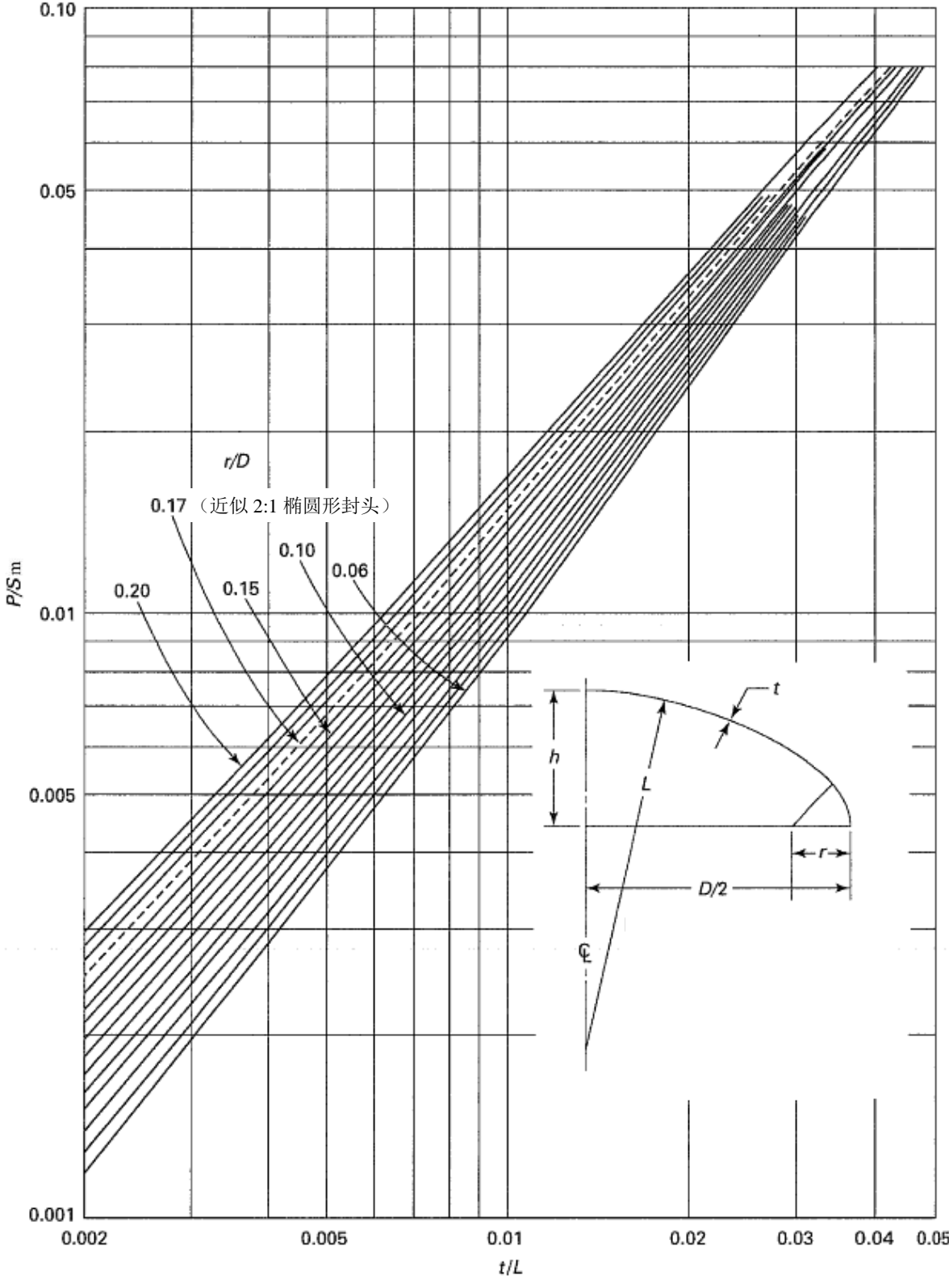


图4 碟形封头设计曲线

$$t_1 = d \sqrt{\frac{CP}{S_1} + \frac{1.9W_1h_g}{S_1d^3}} \dots\dots\dots (14)$$

$$t_2 = d \sqrt{\frac{1.9W_2h_g}{S_2d^3}} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$d$ ——垫片载荷作用位置处的直径，mm；

$C$ ——系数，对于典型的人孔、手孔和检修孔螺栓密封结构， $C=0.3$ ；

$P$ ——设计压力，MPa；

$S_1$ ——设计温度下盖板材料的设计应力强度值，MPa；

$S_2$ ——室温下检修孔盖材料的设计应力强度值，MPa；

$W_1$ ——操作工况下需要的最小螺栓载荷，N；

$W_2$ ——预紧工况下需要的最小螺栓载荷，N；

$h_g$ ——螺栓中心线至垫片载荷作用位置处的径向距离，mm。

### 6.3.11 壳体开孔和开孔补强

壳体开孔和开孔补强应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的规定。

### 6.3.12 水室隔板

水室隔板的设计应符合下列规定：

- a) 水室隔板应设置水室隔板短节结构；
- b) 水室隔板与水室封头的焊缝应采用全焊透结构；
- c) 必要时，水室隔板底部可开设疏水孔。

### 6.3.13 传热管支承板和流量分配板

传热管支承板和流量分配板（如有）的设计应符合下列规定：

- a) 传热管支承板和流量分配板的形式应采用圆盘形；
- b) 传热管支承板管孔形式应采用三叶或四叶梅花孔。三叶或四叶梅花孔与传热管接触为平面接触；
- c) 传热管支承板宜在传热管直段上等距布置。传热管支承板最大无支撑间距通常不超过1300mm，最终应根据传热管流致振动和微振磨损的结果来确定。传热管支承板的间距还应满足检修空间要求；
- d) 流量分配板设置（如有）应使给水以较高流速掠过管板上表面，减少泥渣沉积。

### 6.3.14 给水环

给水环设计应符合下列规定：

- a) 根据给水分配的要求，可采用整环或半环结构；
- b) 给水环支撑应考虑给水环热膨胀，采用滑动支承；
- c) 应防止或尽可能减轻水锤和热冲击。

### 6.3.15 汽水分离装置

### 6.3.15.1 布置要求

汽水分离装置的布置要求如下：

- a) 汽水分离装置包括汽水分离器和干燥器两部分。
- b) 汽水分离器的布置应考虑：汽水混合物流量和含汽率、汽水分离器的性能及尺寸规格、蒸汽发生器各水位线位置等。
- c) 干燥器可采用星形布置或平行布置。干燥器疏水汇集管应位于正常水位线以下。
- d) 汽水分离器蒸汽出口与干燥器入口之间的重力分离空间的高度不应小于 0.6m。

### 6.3.15.2 汽水分离器

#### 6.3.15.2.1 汽水分离器结构

汽水分离器的结构如下：

- a) 汽水分离器是由多只旋叶式分离筒组成；
- b) 旋叶式分离筒主要由分离筒、螺旋叶片、疏水结构等组成。

#### 6.3.15.2.2 汽水分离器设计要求

汽水分离器的设计要求如下：

- a) 具有较高的汽水分离效率；
- b) 具有较小的阻力；
- c) 布置应合理，保证蒸汽负荷均匀；
- d) 有良好的疏水通道，防止蒸汽回流；
- e) 布置紧凑。

#### 6.3.15.2.3 汽水分离器设计的主要内容

汽水分离器设计的主要内容是：

- a) 螺旋叶片：确定螺旋叶片升角，叶片出口至分离筒端口高度，相邻叶片重叠角，叶片数量；
- b) 分离筒：确定分离筒直径，蒸汽出口管口径比（出口管内径与分离筒内径之比），疏水口高度；
- c) 疏水结构：确定疏水口高度，设置节流结构和切向疏水结构；
- d) 分离器组布置；
- e) 汽水分离器支承；
- f) 性能曲线：汽水分离器应采用试验的方法确定其性能曲线。

### 6.3.15.3 干燥器

#### 6.3.15.3.1 干燥器结构

干燥器的结构如下：

- a) 干燥器结构
- b) 干燥器采用带钩的波纹板结构；
- c) 干燥器主要由波纹板组、干燥器支承等部件构成。

#### 6.3.15.3.2 干燥器设计要求

干燥器的设计要求如下：

- a) 具有较高的汽水分离效率；
- b) 干燥器阻力小；
- c) 蒸汽负荷均匀，防止局部蒸汽湿度过大；
- d) 有良好的疏水结构；
- e) 结构紧凑。

#### 6.3.15.3.3 干燥器设计的主要内容

干燥器设计的主要内容是：

- a) 波形板组主要由波形板、集水槽、均汽板、疏水管等组成；

- b) 均汽板可采用均汽孔板或均汽网板;
- c) 集水槽应设置挡汽板和疏水孔;
- d) 波形板可采用单钩波形板和双钩波形板;
- e) 波形板参数选择应包括: 临界入口蒸汽速度、波数、高度、波形板间距、相邻波形板重叠量;
- f) 干燥器应设置人孔通道, 便于干燥器波形板的更换和维修检查;
- g) 干燥器疏水结构设计与分析;
- h) 干燥器支撑结构设计;
- i) 干燥器应采用试验的方法确定其性能曲线。

### 6.3.16 蒸汽限流器

#### 6.3.16.1 蒸汽限流器设计要求

蒸汽限流器设计应符合下列规定:

- a) 蒸汽限流器应采用文丘里管形式, 宜设置若干个文丘里管;
- b) 在主蒸汽管道破裂工况时, 限制蒸汽流量满足要求;
- c) 在正常运行时, 蒸汽限流器具有较小的阻力;
- d) 文丘里管扩压段圆锥角宜采用  $7^\circ$  左右。

#### 6.3.16.2 蒸汽限流器设计的主要内容

蒸汽限流器设计包括以下主要内容:

- a) 确定文丘里管收缩段结构, 喉部直径, 扩压段圆锥角, 扩压段长度等;
- b) 确定文丘里管的数量;
- c) 确定蒸汽限流器的阻力系数。

### 6.4 分析法设计

#### 6.4.1 载荷

##### 6.4.1.1 总则

设计瞬态是在核电厂寿期内预期将会发生的或者可能发生的包络工况, 设计瞬态基于电厂设计准则和工程判断和经验, 以确保在整个核电厂设计寿期内设备和部件的结构完整性。蒸汽发生器应力分析时需考虑预期在使用寿期内发生的各种运行工况下的设计瞬态, 这些运行工况包括正常工况、异常工况、危急工况和事故工况。

设计机械载荷是除设计压力、设计温度、设计瞬态载荷以外, 蒸汽发生器可能承受的另一类重要载荷, 也是重要的分析输入。设计机械载荷一般由于设备安装或正常运行过程中, 设备部件间的接触行为产生。此类机械载荷可能是恒定不变的, 也可能是变化的, 如设计机械载荷是变化的, 那么应在疲劳分析中加以考虑。

##### 6.4.1.2 设计载荷

设计载荷应满足以下规定:

- a) 设计压力: 通常是核电厂设计总参数之一, 需要包络正常工况下的所有压力;
- b) 设计温度: 规定的设计温度应不低于在所考虑的零件整个厚度上预期的最高平均金属温度, 在考虑设计压力 and 设计机械载荷的计算时应使用设计温度;
- c) 设计工况机械载荷: 应对作用于需评定部件上的机械载荷进行分析, 以满足设计温度和相应环境条件下设计工况限制, 机械载荷包括:
  - 1) 自重;
  - 2) 支承载荷;
  - 3) 压力、热胀等载荷引起的接管反力;



- 4) 流致振动载荷；
- 5) 其它运行过程中产生的机械载荷。

#### 6.4.1.3 A级使用载荷

应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。A级使用载荷应考虑正常工况下部件经受的应力、温度、机械载荷及正常工况各设计瞬态的循环累积效应。

因为正常工况为设计工况所包络，所以不必单独对正常工况进行一次应力评定。

#### 6.4.1.4 B级使用载荷

应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。B级使用载荷应考虑异常工况下部件经受的应力、温度、机械载荷及异常工况各设计瞬态的循环累积效应。B级使用载荷还应考虑运行安全地震震动（或称运行基准地震）。

若危急工况下的设计瞬态超过25次，应将超过25次的其它危急工况设计瞬态对部件的循环累积效应纳入B级使用中考虑。

#### 6.4.1.5 C级使用载荷

应对部件在危急工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下C级使用限制。C级使用载荷应考虑危急工况下部件经受的应力、温度和机械载荷。

#### 6.4.1.6 D级使用载荷

应对部件在事故工况下的应力进行分析，以满足相应环境条件下D级使用限制，D级使用载荷应考虑事故工况下部件经受的应力、温度、机械载荷，还应考虑极限安全地震震动（或称安全停堆地震）、设计基准管道破裂载荷、卸压/安全阀动作引起的载荷对蒸汽发生器的影响。

#### 6.4.1.7 试验载荷

试验载荷包括水压试验和泄漏试验。水压试验载荷应考虑试验温度、试验压力、试验预紧载荷和自重。泄漏试验的载荷能被水压试验包络。

#### 6.4.1.8 运输载荷

应对蒸汽发生器运输过程中的载荷对结构完整性的影响进行评估，以确保设计满足适用要求，其中包括对疲劳的要求。

#### 6.4.1.9 吊装载荷

对吊耳的吊装载荷（包括在役前、换料和在役检查期间）进行分析，以确保设计满足适用要求。吊装载荷应在吊装操作中可能出现的载荷。

### 6.4.2 载荷组合

载荷组合就是将设计载荷，按其发生频率、造成后果等因素进行分类并重组，同时与电厂的各级工况和规范中的运行级别建立联系，以确定评定限制。

蒸汽发生器设计时应考虑设计寿期内各级工况下所承受的载荷组合，以确保其结构完整性。载荷组合通常由蒸汽发生器设计规范书中给出，附录E给出了供参考的载荷组合及相关载荷术语描述。

### 6.4.3 评定准则

蒸汽发生器在各使用限制下，应在应力、疲劳、断裂等方面满足适用规范及设计规范书的要求。蒸汽发生器各部件中，规范等级为1级的承压部件在各使用限制下的应力限制见表1，其他承压部件在各使用限制下的应力限制见表2，人孔螺栓在各使用限制下的应力限制见表3，蒸汽发生器支承内件在各使用限制下的应力限制见表4和表5。

表1 规范等级为 1 级的承压部件在各使用限制下的应力限制

使用限制	应力分类	应力限制
设计	$P_m$	$S_m$
	$P_L$	$1.5S_m^{(2)}$
	$P_m(P_L)+P_b$	$\alpha \cdot S_m$
A 级/ B 级	$(P_L+P_b+Q)_r^{(1)}$	$3S_m$
	热棘轮比率	1
	累积使用因子	$U \leq 1$
B 级	$P_m$	$1.1S_m$
	$P_L$	$1.1\alpha S_m$
	$P_m(P_L)+P_b$	$1.1\alpha S_m$
C 级	$P_m$	所有载荷: $\text{Max}[1.2S_m, 1.0S_y]$
		铁素体钢-仅受压: $\text{Max}[1.1S_m, 0.9S_y]$
	$P_L$	$\text{Max}[1.8S_m, 1.5S_y]$
	$P_m(P_L)+P_b$	$\text{Max}[1.8S_m, 1.5S_y]$
D 级	$P_m$	$S_m'^{(3)}$
	$P_L$	$1.5 S_m'^{(3)}$
	$P_m(P_L)+P_b$	$1.5 S_m'^{(3)}$
试验	$P_m$	$0.9S_y$
	$P_m+P_b$	$1.35S_y$ (当 $P_m \leq 0.67 S_y$ )
	$P_m+P_b$	$2.15S_y-1.2P_m$ (当 $0.67S_y < P_m \leq 0.9S_y$ )
三向应力	$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$	$4S_m^{(4)}$
平均支承应力	支承应力	$S_y$
平均一次纯剪应力	纯剪应力	$0.6S_m$
断裂	$K_I$	$K_{IR}$ (或 $K_{IC}$ ) <sup>(5)</sup>
注 1: 下标 r 表示应力强度范围; 注 2: $\alpha$ 为产生全塑性截面的载荷设定值与产生截面表层起始屈服的载荷设定值的比值; 任何情况下, $\alpha$ 不超过 1.5; 注 3: 对铁素体钢, $S_m'=0.7S_u$ ; 对奥氏体钢、高镍合金及铜镍合金, $S_m'=\min(2.4S_m, 0.7S_u)$ ; 注 4: D 级使用除外, C 级使用限制取 $4.8S_m$ ; 注 5: 根据适用规范的要求使用 $K_{IR}$ 或 $K_{IC}$ ; 注 6: $P_m$ 为总体一次薄膜应力强度; $P_L$ 为局部一次薄膜应力强度; $P_b$ 为一次弯曲应力强度; $Q$ 为二次应力强度; $(P_L+P_b+Q)_r$ 为一次加二次应力强度范围; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 为三个方向主应力。		

表2 规范等级非 1 级的承压部件在各使用限制下的应力限制

使用限制	应力类别	应力限制
设计、A 级	$\sigma_m$	1.0S
	$\sigma_L$	1.5S
	$\sigma_m + \sigma_b$	1.5S
B 级	$\sigma_m$	1.1S
	$\sigma_L$	1.65S
	$\sigma_m + \sigma_b$	1.65S
C 级	$\sigma_m$	1.5S
	$\sigma_L$	1.8S
	$\sigma_m + \sigma_b$	1.8S
D 级	$\sigma_m$	2.0S
	$\sigma_L$	2.4S
	$\sigma_m + \sigma_b$	2.4S
注： $\sigma_m$ 为总体一次薄膜应力； $\sigma_L$ 为局部一次薄膜应力； $\sigma_b$ 为一次弯曲应力；S 为材料许用应力。		

表3 人孔螺栓在各使用限制下的应力限制

使用限制	应力分类	应力限制
设计 <sup>(1)</sup>	N/A	N/A
A、B 级	平均应力	2.0S <sub>m</sub>
	最大应力	2.7S <sub>m</sub> <sup>(3,4)</sup>
	疲劳累积因子	1
C 级 <sup>(2)</sup>	平均应力	2.0S <sub>m</sub>
	最大应力	2.7S <sub>m</sub>
D 级	平均拉伸应力	Min(0.7S <sub>u</sub> ,S <sub>y</sub> )
	最大拉伸应力	S <sub>u</sub>
	平均剪切应力	Min(0.42S <sub>u</sub> ,0.6S <sub>y</sub> )
	组合应力 <sup>(5)</sup> $\frac{f_t^2}{F_{tb}^2} + \frac{f_v^2}{F_{vb}^2}$	1
<p>注 1：在主螺栓强度校核时考虑承受设计压力所需要的螺栓数量和横截面面积；</p> <p>注 2：C 级应力限制和 A、B 级应力限制相同；</p> <p>注 3：当螺栓通过减少残余扭矩的方式预紧时；</p> <p>注 4：当采用两条设计疲劳曲线中的较高值，则由拉伸和弯曲引起的最大使用应力不得超过 2.7S<sub>m</sub>；</p> <p>注 5：F<sub>tb</sub>=min[1.2S<sub>y</sub>,0.7S<sub>u</sub>]，F<sub>vb</sub>=min[1.23S<sub>y</sub>,0.7S<sub>u</sub>]。</p>		

表4 板壳型支承件的应力限制

使用限制	应力类别	应力限制
设计、A 级	$\sigma_1$	1.0S
	$\sigma_1 + \sigma_2$	1.5S
B 级	$\sigma_1$	1.33S
	$\sigma_1 + \sigma_2$	2.0S
C 级	$\sigma_1$	1.5S
	$\sigma_1 + \sigma_2$	2.25S
D 级	$\sigma_1$	$\min[\max(1.2S_y, 1.5S), 0.7S_u]$
	$\sigma_1 + \sigma_2$	$1.5\min[\max(1.2S_y, 1.5S), 0.7S_u]$
注： $\sigma_1$ 为薄膜应力， $\sigma_2$ 为弯曲应力。		

表5 线型支承件的应力限制

使用限制	应力类别	应力限制
设计、A 级	$f_t$	$F_t=0.60S_y$
	$f_v$	$F_v=0.40S_y$
	$f_b$	$F_b=0.66S_y$
	/	$f_t/F_t+f_b/F_b \leq 1.0$
B 级	$f_t$	$F_t=0.80S_y$
	$f_v$	$F_v=0.53S_y$
	$f_b$	$F_b=0.88S_y$
	/	$f_t/F_t+f_b/F_b \leq 1.0$
C 级	$f_t$	$F_t=0.90S_y$
	$f_v$	$F_v=0.60S_y$
	$f_b$	$F_b=0.99S_y$
	/	$f_t/F_t+f_b/F_b \leq 1.0$
D 级	$f_t$	$F_t=\min(1.2S_y, 0.7S_u)$
	$f_v$	$F_v=\min(0.72S_y, 0.42S_u)$
	$f_b$	$F_b=1.32S_y$
	/	$f_t/F_t+f_b/F_b \leq 1.0$
注： $f_t$ 为拉应力， $f_v$ 为剪应力， $f_b$ 为弯曲应力， $F_t$ 为拉应力限制， $F_v$ 为剪应力限制， $F_b$ 为弯曲应力限制。		

#### 6.4.4 分析方法

##### 6.4.4.1 概述

蒸汽发生器各部件应根据规范等级进行应力分析。一次应力是需要满足平衡规律的载荷所产生的，原则上使用理论公式计算。二次应力是自限的载荷，如热梯度、预紧力或者位移产生的应力，以及不需满足平衡方程的力矩所造成的弯曲应力，二次应力通常需要有限元计算得到。分析者可根据应力分布，决定哪些是最可能产生失效的截面，计算截面上的薄膜和弯曲等应力，并按规范要求进行评定。

##### 6.4.4.2 热分析方法

采用热分析模型进行热瞬态分析,选取热瞬态曲线的拐点作为关键时间点,整理得到瞬态输入文件。使用有限元通用程序读入瞬态输入文件,计算不同瞬态每个关键时间点的温度分布情况,并保存为温度分布结果文件,再通过有限元程序读取温度分布结果文件计算热应力。热瞬态分析模型中不必施加压力、外部机械载荷。分析所得不同瞬态下的热应力分布结果放入后续的疲劳分析中作为一次加二次应力强度范围、热应力棘轮和无延性断裂评定之用。

#### 6.4.4.3 应力分析方法

6.4.4.3.1 应力分析可采用与热分析相同的几何模型,但计算时采用的单元类型不同。

##### 6.4.4.3.2 一次应力

计算蒸汽发生器在压力、接管载荷等静态载荷作用下的一次应力强度时,根据部件的结构特点,采用理论计算、有限元静态分析或两者相结合的方法。分析过程中应按各工况下的最大载荷组合方式对模型施加内压和外部接管载荷边界条件,并将计算得到的应力沿评定截面作线性化处理,得到一次应力强度。

##### 6.4.4.3.3 二次应力

二次应力由热梯度、不同材料间热膨胀差别以及材料不连续处的结构相互作用所产生。这些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。

对正常和异常工况,采用结构分析模型进行压力瞬态分析。选取压力瞬态曲线的拐点作为关键时间点,整理得到瞬态输入文件。使用有限元通用程序读取瞬态输入文件每个关键时间点的压力值,配合瞬态对应使用限制的外部机械载荷作为加载条件,计算不同瞬态每个关键时间点的结构应力。分析所得不同瞬态下的结构应力分布结果可用于一次加二次应力强度范围、热应力棘轮、疲劳和无延性断裂等分析中。

对正常和异常工况(A/B级)下的一次+二次应力强度范围 $(P+Q)_{\text{range}}$ 进行评定,控制一次+二次应力强度范围在 $3S_m$ 的设计准则之内。一次+二次应力强度范围若大于 $3S_m$ 的限值,可以将热弯曲应力去除,若此时的一次+二次应力强度范围仍然超出 $3S_m$ 的限值,则需要进行塑性分析。

当交变应力超过材料屈服强度 $S_y$ 时,需对由弹性为基础分析所得到的局部热应力进行修正。采用修正的泊松比 $\nu=0.5-0.2(S_y/S_a)$ ,且不小于0.3,用于疲劳分析结果的修正。

热棘轮效应是指承受恒定内压载荷的壳体当其内部流体发生冷热交替时,当结构的热应力值达到一定程度时结构将失去安定性,会发生棘轮长大效应。所有的A/B级工况下的载荷需要考虑热棘轮效应。下述公式是最大循环热应力范围( $Q_{mx}$ )的计算方程,然后再进一步计算热应力棘轮比率:

$$X = P_m / S_y \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$P_m$  ——由压力产生的最大总体薄膜应力强度;

$S_y$  ——材料的屈服强度。

计算时 $S_y$ 的值保守取为设计温度下的性能参数。如果循环次数很大,且 $S_y$ 大于持久极限( $S_e$ ),则应采用持久极限( $S_e$ )。

$$Y' = Q_{mx} / S_y \dots\dots\dots (17)$$

$$Q_{mx} = Y' \times S_y \dots\dots\dots (18)$$

式中:

$Q_{mx}$  ——热载荷的最大许用膜应力+弯曲应力范围;

$S_y$  ——设计温度下的屈服极限。

$Y'$ 可以通过下述公式确定, $Q_{mx}$ 的值可以通过上述公式确定。

情况1: 温度沿壁厚线性变化

当 $0 < X < 0.5$ 时,  $Y' = 1/X$

当 $0.5 \leq X < 1.0$ 时,  $Y' = 4 \times (1-X)$

情况2：温度沿壁厚按抛物线变化

当 $X < 0.615$  时，

$X = 0.3$ ,  $Y' = 4.65$

$X = 0.4$ ,  $Y' = 3.55$

$X = 0.5$ ,  $Y' = 2.70$

当 $0.615 \leq X < 1.0$ 时,  $Y' = 5.2 \times (1-X)$

#### 6.4.4.4 疲劳分析方法

疲劳分析在瞬态应力分析的基础上进行,求得设计瞬态工况下蒸汽发生器各部件的应力分布情况后,进行疲劳分析与评定。分析方法应采用设计疲劳曲线法,根据瞬态应力分析计算所得的正常、异常及试验工况下结构各评定截面的应力值来求得各应力循环类型交变应力强度值,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 $N_i$ ,再将其与该类应力循环实际发生次数 $n_i$ 对比,得到 $n_i/N_i$ ,称为使用因子。当有 $K$ 种应力循环类型时,则累积使用因子 $U$ 为:

$$U = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots (19)$$

若 $U \leq 1$ ,则认为该部位不会发生疲劳失效。

对规定为C级使用限制的所对应的危急使用工况,当 $S_a$ 值大于适用的疲劳设计曲线 $10^6$ 次的对应值时,假想出现的总次数不得超过25次。若该工况的瞬态超过25次,则超过部分的应力循环次数应在异常工况的设计瞬态中加以考虑。

由于疲劳曲线的弹性模量( $E_c$ )和实际材料的弹性模量( $E_m$ )不同,应对疲劳曲线乘以修正因子进行调整。为保守起见,常采用设备的设计温度作为包络温度。修正因子取设计温度下实际材料弹性模量( $E_m$ )和设计疲劳曲线弹性模量( $E_c$ )的比值。

可采用具备疲劳分析功能的有限元程序的疲劳模块进行疲劳累积使用因子计算和评定。自动评定每个瞬态工况下各应力循环对应的总应力变化范围。如果薄膜加弯曲应力强度变化范围超过 $3S_m$ 的限值,应对其进行弹塑性修正( $K_e$ )。这与简化弹塑性分析的要求一致,除弹塑性修正外其他五条要求也应满足,其中一条是必须满足热棘轮效应的要求,另一条是一次加二次薄膜加弯曲应力强度变化范围(不包含热弯曲应力)仍应小于 $3S_m$ 的限值。进行简化弹塑性分析后,当交变应力超过材料屈服强度时泊松比修正不作要求。

#### 6.4.4.5 断裂分析方法

断裂分析和评定在瞬态应力分析工作基础上进行,分析方法参照 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》。

#### 6.4.4.6 其他动态载荷的分析

##### 6.4.4.6.1 总体要求

除上述分析内容外,还应考虑地震载荷、失水事故(LOCA)载荷、流致振动载荷等动态载荷对蒸汽发生器结构反应的影响,将相应载荷引起的蒸汽发生器相关部件的应力按载荷组合要求纳入各使用限制下的应力分析与评定中。通常计算这些动态载荷引起的部件应力时其模型及分析方法较为复杂,宜与应力分析与评定报告分开而形成单独的计算文件。

6.4.4.6.2~6.4.4.6.4给出了地震载荷、失水事故载荷、流致振动载荷等典型动态载荷作出分析方法简述。若所设计的蒸汽发生器基于其结构特点还会经受其他动态载荷,应对这些动态载荷分别予以分析评估。

##### 6.4.4.6.2 地震载荷下蒸汽发生器结构反应分析

蒸汽发生器受到的地震载荷输入以楼面设计加速度地震反应谱的形式提供,因此抗震分析一般采用反应谱分析方法计算蒸汽发生器各部件的结构反应。反应谱分析之前需对蒸汽发生器抗震分析模型进行模态分析,得到结构固有频率和振型,在此基础上可按反应谱分析方法求出各阶模态下的结构动态反应,进而通过平方和平方根法(SRSS法)、完全二次方组合法(CQC法)等方法对各阶模态下的结构动态反应进行组合。当相邻的模态频率差等于或小于较低频率的10%时,宜用完全二次方组合法进行结构模态反应的组合。

在模态反应的总和中应包含截止频率以下并包括截止频率的模态。如果模态的等效质量总和大于设备总质量的90%时,认为所取模态已足够反映出总的设备质量;否则说明设备地震反应的一部分是由于设备的刚性高频模态(大于截止频率)的静态地震反应所引起的,应按残余质量计算刚性模态的反应分量,再与反应谱分析获得的结构反应用SRSS法进行组合。

#### 6.4.4.6.3 失水事故下蒸汽发生器结构反应分析

主管道突然破裂后产生的失水事故对蒸汽发生器的影响主要有两方面:一是管道突然破裂在固体中引起压力波经主管道传递到蒸汽发生器一次侧进、出口管嘴,在水室封头支承位置处产生动态载荷反力,从而引起蒸汽发生器整体晃动;二是断口处流体突然失压,在流体中产生稀疏波,稀疏波由一次侧传递到传热管上部弯管段后,弯管段热侧与冷侧间的压差使得其在弯管区发生平面内运动,从而引起传热管弯曲应力并对支承板(主要是最上面的两块支承板)产生结构反力。对这两部分影响的载荷分析内容可分别称为LOCA晃动分析和LOCA稀疏波分析。

通常采用全瞬态动力学分析方法进行蒸汽发生器LOCA晃动分析,将晃动载荷对应的位移载荷时程施加在一次侧进、出口管嘴对应的节点上,获得蒸汽发生器各部件的结构反应。

其它主给水管破裂等事故引起的蒸汽发生器晃动分析方法与之类似,只需将相应载荷时程施加到对应蒸汽发生器的受载位置。

蒸汽发生器LOCA稀疏波分析的研究对象为传热管,LOCA稀疏波载荷作用在传热管所在平面内,其影响的主要区域为传热管弯管段。分析时选取典型传热管(覆盖最大、最小、中间的弯管半径及固有频率与稀疏波载荷主频相近的传热管),以LOCA稀疏波载荷时程作为设计输入,采用瞬态动力学分析方法计算传热管结构反应。

#### 6.4.4.6.4 传热管流致振动分析

蒸汽发生器传热管在运行过程中会经受流致振动载荷的作用,应对流致振动的影响开展分析评估。蒸汽发生器传热管流致振动主要为二次侧横向流激发引起的振动,分析时应考虑以下三个主要激振机理:湍流诱发振动、漩涡脱落和流体弹性激励(或称流体弹性失稳)。

传热管流致振动分析时应结合管束结构特点及二次侧流场分布信息,筛选易受流致振动影响的传热管开展分析。通常选择无支撑跨距较大、管外流速较大的一系列传热管建立传热管有限元分析模型,结合管束结构的支承特点设置边界条件,对传热管进行模态分析,进而根据振动理论并结合工程或试验的经验参数,计算传热管在各种激励机理下的结构反应,评价传热管是否会发生流体弹性失稳。

流致振动分析计算结果还用于传热管的磨损评价,传热管的磨损量是时间的函数,可按Archard磨损理论进行计算。通过试验和工程经验计算传热管寿期内的磨损体积和磨损深度,得到由于磨损引起的传热管的减薄量,并用于传热管的应力分析和评定。

## 7 制造

### 7.1 通则

蒸汽发生器制造应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分:1级部件》以及设计文件的要求。

## 7.2 机加工

7.2.1 蒸汽发生器零部件机加工应按设计图样的要求进行。设计图样中的尺寸为最终尺寸，加工裕量由制造单位确定。

7.2.2 设计文件如无规定，机加工表面和非机加工表面的线性尺寸、角度尺寸的极限偏差，分别按 GB/T 1804 中的 m 级和 c 级的规定；未注形位公差按 GB/T 1184 的规定，机加工件为 H 级，非机加工件为 L 级；尺寸超出 GB/T 1804 和 GB/T 1184 的，线性尺寸、角度尺寸的极限偏差和未注形位公差分别按 GB/T 19804 中 A 级和 E 级的规定。

7.2.3 除非设计文件另有规定，人孔螺栓、人孔螺母等紧固件的螺纹基本尺寸和公差应分别按 GB/T 196 和 GB/T 197 的规定。

7.2.4 所有零部件应去除毛刺，倒钝锐角。

### 7.2.5 深孔钻加工

产品深孔钻加工前，应在相同厚度、相同材质和相同热处理状态的试板上进行预钻试验，合格后才可加工产品。产品钻孔使用与预钻试验相同的工艺参数。

### 7.2.6 传热管支承板加工

7.2.6.1 产品加工前，应在相同材料试板上进行加工试验，合格后才可加工产品。加工过程中，应设置合理的自检频率。

7.2.6.2 传热管支承板应先钻孔，再拉孔。拉孔后应去毛刺、倒圆，保证孔内无铁屑、毛刺、锐角等。

7.2.6.3 传热管支承板加工后，应采用浸泡法或其他方法去油处理。

## 7.3 成形、装配与对中

### 7.3.1 热切割

#### 7.3.1.1 氧气切割

氧气切割应满足以下要求：

- 气割区域一般应预热；
- 应仔细清理工件的氧化表面，并用机加工或磨削的方式去除所有氧化物痕迹；
- 应仔细检查氧气切割表面，确保无裂纹等缺陷；
- 对采用氧气切割制备的焊接坡口，应采用机械加工或磨削的方法去除热影响区，并进行目视检验和磁粉检验。

#### 7.3.1.2 等离子切割

使用等离子电弧切割法切割工件时，应去除切割面上的金属切割残留物、沟痕等所有残留的杂质，并采用机加工或磨削的方法去除金属表面至少 1mm 的材料。对于奥氏体不锈钢，可采用去除毛刺后进行化学酸洗代替机加工或磨削。

### 7.3.2 成形

成形工艺包括为获得一个给定形状的部件而对其施加的全部热—机械操作过程（热循环、变形以及成形后的热处理）。成形工艺应满足下列要求：

- 应按要求进行成形工艺评定，通过成形工艺评定试验来验证成形加工后制品性能符合成形前材料验收技术规范中的性能要求；
- 成形工艺不应使部件材料的性能降至低于要求的最小值；因此，必要时应在成形之后进行热处理，恢复材料性能，使之符合要求。



### 7.3.3 装配与对中

#### 7.3.3.1 装配与对中方法

采用焊接连接的零件，在施焊时，可用芯棒、千斤顶、夹具、定位焊或临时附件在应有位置上进行装配、对中和定位。

#### 7.3.3.2 定位焊

用来保持对中的定位焊应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。

#### 7.3.3.3 主环焊缝对中要求

压力边界环焊缝对中的错边量应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》和设计文件的要求。

### 7.3.4 管束装配

#### 7.3.4.1 清洁度控制

管束装配应在 NB/T 20233 规定的 I 级工作区内进行。

#### 7.3.4.2 传热管支承板装配

##### 7.3.4.2.1 初建基准

- 在管板一次侧至少选择 3 个孔位用准直望远镜进行对准；
- 将传热管支承板安装在最远端，粗调准直仪位置，并记录间隙值；
- 分别调整准直望远镜的角度。

##### 7.3.4.2.2 试装传热管支承板

利用首块传热管支承板在每个支承板安装位置进行试装，并记录支承板与套筒的间隙值。

##### 7.3.4.2.3 通量棒检测

将首块支承板安装到位，然后进行通量棒检测。

- 在管板随机选取孔进行通量棒检测；
- 调整首块支承板位置，直至满足要求；
- 记录准直望远镜在首块支承板的读数值。

##### 7.3.4.2.4 精建基准

- 根据对准度测量数据及基准板与内套筒的间隙值，调整准直望远镜的角度；
- 将支承板基准板重新安装在最远端支承板位置，并调整基准板
- 在地面建立固定点，以备后续重新校准。

#### 7.3.4.3 穿管

##### 7.3.4.3.1 穿管要求

- 从垂直蒸汽发生器管束底部开始，逐列水平安装管子；
- 在先前已安装的两列管子间水平插入抗振条，如此交替进行；
- 管子不应翻查或翻身。如果管子不满足穿管要求，应使用备用管子。

##### 7.3.4.3.2 管子修整要求

- 在管子修整或进行其他活动时，管子 U 形弯头应无位移；
- 管端伸出管板一次侧表面的最大距离，去除长度超出部分。

##### 7.3.4.3.3 管子损伤及检查

- 在管子穿入蒸汽发生器前，所有的管子应由经培训的人员肉眼目视检查和用带棉手套的手触觉检查损伤迹象；

- b) 任何超过由管子制造厂提供的、采购方认可的目视检查标准块的划痕,应抛磨至符合接受标准。距管端  $t+125\text{mm}$  ( $t$  为管板芯部厚度, mm) 范围内的直段不允许局部返工;
- c) 微小的局部污点可按要求抛磨去除;
- d) 管子划痕和其他轻微表面痕迹,管子识别号,损伤的类型和范围,返工的位置和修复结果应记录;
- e) 管子表面损伤的去除应使用抛磨盘或其他相当的工具手工抛磨。管壁厚度的减薄不应超过设计要求。

#### 7.3.4.4 抗振条安装及检测

##### 7.3.4.4.1 抗振条安装

- a) 抗振条插入之前,保证抗振条的序列号在管巷正确的一侧。将属于这一层最深的一组抗振条利用工具插入到正确的深度;
- b) 核实抗振条插入的深度和偏移在设计要求的范围内;
- c) 核实抗振条的弦长在规定的公差内。

##### 7.3.4.4.2 抗振条焊接

- a) 旋转下部壳体组件  $90^\circ$ ,使管弄平面处于水平。垂直基准线和中心管列最外层管子中心线的最大偏差为  $6.3\text{mm}$ ;
- b) 焊接变形会使保持环变直。监控该过程并用保持环弯曲工具调整每个保持环;
- c) 在焊接之前核实最外排夹紧的管子和两个相邻抗振条之间累积的间隙满足设计要求;
- d) 抗振条焊接后,最外侧抗振条内侧间的累积长度应满足设计要求;
- e) 抗振条焊接后,内层管列和外围管列的最大允许间隙应满足设计要求。

#### 7.3.4.5 传热管-管板胀接

##### 7.3.4.5.1 定位胀

定位胀工艺参数根据传热管-管板焊接工艺评定确定,定位胀后需要进行目视检测、尺寸检测。

##### 7.3.4.5.2 液压胀工艺评定

在产品液压胀前,应制定液压胀工艺评定方案并提交设计单位审批,审批后按液压胀工艺评定方案进行工艺评定。

液压胀工艺评定中,传热管的实际拉脱力应不小于式(20)计算得到的值。

$$f = P \pi d_i^2 / 2 \dots \dots \dots (20)$$

式中:

- $f$  —— 拉脱力, N;
- $P$  —— 蒸汽发生器一次侧到二次侧设计压差, MPa;
- $d_i$  —— 传热管内径, mm。

##### 7.3.4.5.3 液压胀要求

- a) 采用与胀接工艺评定相同的、经校验的胀管设备;
- b) 液压胀工艺采用的材料和液压胀芯棒润滑剂不应损害管子或管板堆焊层并且不能造成划痕或管子表面咬合;
- c) 胀接操作工应经过评定合格后方可从事胀接操作;
- d) 液压胀需要在清洁室内执行;
- e) 胀管前传热管应满足清洁度要求;
- f) 液压胀用水至少满足 NB/T 20233 中 B 级水质要求;
- g) 胀管始于管板一次侧表面一定距离,且应与定位胀接端至少重叠  $3\text{mm}$ ;胀管止于距管板二次侧表面一定距离,不允许有过胀现象和漏胀现象;
- h) 胀管后应用 A 级水 (NB/T 20233) 对管内进行清洗,用无毛头的白布擦拭,保证管内的清洁度;

- i) 胀管后应进行清洁度检查、目视检测、尺寸检测和涡流检测。

### 7.3.5 上部内件装配

上部内件装配时应控制外来物，进出的物品应进行登记和记录。

## 7.4 焊接

### 7.4.1 通用要求

蒸汽发生器承压壳体的焊接应按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求进行。应针对不同的部位或结构，根据设计要求，结合自身的工艺装备条件选用合适的焊接方法。母材温度低于 10℃时不应进行焊接。当选择手工焊条电弧焊（SMAW）和埋弧焊（SAW）方法用于碳钢或低合金钢的焊接时，只能使用低氢型焊接材料。

### 7.4.2 焊接人员资质

焊接人员(包括焊工和焊接操作工)应按国家相关法规的要求取得资格证书后方可实施产品的焊接。

### 7.4.3 焊接工艺评定

7.4.3.1 对于承压焊缝（包括承压边界部件以及与承压部件相连附件的焊缝），焊接工艺评定按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》以及 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》的要求执行。

7.4.3.2 对于非承压焊缝，焊接工艺评定应按设计文件的规定执行。

7.4.3.3 焊接工艺评定应以可靠的焊接性试验为依据，并在产品焊接之前完成。

7.4.3.4 本标准适用于对接焊缝、角焊缝、堆焊以及管子-管板焊缝，适用的焊接方法为手工电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、电渣焊以及这些焊接方法的组合。

7.4.3.5 制造厂应根据相关设计图纸及本标准的要求，编写焊接工艺评定说明书，作为焊接工艺评定试验中焊接人员施焊指导文件。它应至少包括：评定试件焊接工艺数据卡、评定的有效范围、实施的试验和相应的验收准则、试样切取位置示意图、焊道分布图和所采用的焊接方法等内容。焊接工艺评定报告时试件焊接是所用焊接数据和焊接变素的记录，对每种焊接方法，应记录用于试件焊接时的全部重要变素和附加重要变素，焊接工艺评定应详细记录焊接工艺评定说明书中规定的和具体实施的参数。在进行焊接工艺评定时，选择焊接变素的范围尽可能宽，从而使生产中的变素是评定时的中间值，而不是极限值。

### 7.4.4 焊缝返修

#### 7.4.4.1 通用要求

从技术准备的充分性、工艺操作人员的技能水平、产品生产的过程控制等方面来确保产品质量，尽可能避免焊缝返修。在母材和压力边界焊缝上所有的返修，应提供详细的返修方案，并取得设计单位书面批准后，才能执行。焊缝返修应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》和设计文件的要求，必要时进行模拟件的制作以验证返修方案和工艺的正确性和合理性。

返修应采用经焊接工艺评定合格的焊接工艺和经过验收合格的焊材。返修由持有资格证书（见 7.4.2）、技能熟练且有经验的焊接人员进行。返修一般采用手工焊条电弧焊（SMAW）和钨极惰性气体保护焊（GTAW），也可采用原产品焊缝使用的焊接工艺。

返修的其余要求如下：

- a) 对堆焊和隔离层焊缝，补焊若涉及到对低合金钢等基材补焊，焊接前腐蚀出补焊区不锈钢或镍基合金与基材之间的分界线（熔合线），分界线应清晰可辨或采用适当的方式进行标记。如果目视检查可明显区分焊缝和基材的分界线，则可不采用腐蚀的方法；
- b) 返修的凹槽及其边缘区域应圆滑，便于焊接操作，且表面应清洁和干燥；
- c) 当补焊有预热要求时，补焊区的预热温度应不低于补焊工艺评定允许的最低预热温度；
- d) 每一次补焊，均做出详细的焊缝补焊记录。补焊记录包括补焊前凹槽详细的位置和形状尺寸、焊接预热/层间温度、后热处理时间和温度（如有）、焊接参数、焊道图、焊接设备、焊工等信息。

#### 7.4.4.2 返修实施

返修按以下要求实施：

- a) 去除缺陷；
- b) 补焊前应按要求对凹槽进行检验；
- c) 在缺陷清理凹槽表面检验合格之后才能实施补焊。焊缝的补焊严格按照补焊工艺规程的要求进行；
- d) 补焊后，除去粘附在焊缝表面及其边缘上的所有熔化飞溅物、焊渣、氧化皮和油脂等妨碍无损检验的物质。同时采取有效措施，保护邻近的焊缝表面不受损伤。补焊焊缝的表面与四周表面平滑过渡。对于奥氏体不锈钢和镍基合金的补焊焊缝，通过打磨或其它机械方法清除焊缝表面的残留焊渣，操作工具应符合有关清洁度的要求；
- e) 补焊后是否热处理按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》及设计文件中的相关规定执行；
- f) 补焊后的无损检验按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》及设计文件中的相关规定执行；
- g) 焊接制造过程中，若补焊后进行焊后热处理不可能或不现实，可在满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》相关要求并得到设计单位批准后进行免作焊后热处理的补焊（包括母材、堆焊层、焊缝等）。

#### 7.4.5 预热和后热处理

##### 7.4.5.1 加热方法

可使用热处理炉、电红外加热装置、燃气喷嘴等方式进行加热。使用燃气加热时应注意：

- a) 只有零部件形状适用燃气喷嘴加热时才能使用。手工气炬一般不允许使用；
- b) 火焰内焰不能直接接触工件，只有外焰才能接触工件；
- c) 加热时应注意加热温度要均匀（例如加热火焰不动，但工件转动），防止有害的温度梯度的出现。

##### 7.4.5.2 加热温度

T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》对焊接预热温度给出了规定。后热温度应高于或等于预热温度，且至少保持 60min。

##### 7.4.5.3 温度测量

可应用以下工具检查和测量温度，以实现温度的控制：

- a) 热电偶
- b) 接触式测温仪
- c) 非接触式红外测温仪

应采用标定过的时间—温度记录仪器记录部件的温度。热电偶的布置应根据热源性质、热源位置和加热部件确定。控制热电偶应布置在预计最高温度点处。监测热电偶的位置应确保控制局部加热操作的

所有规定的参数都可获得。此外，监测热电偶的位置应能测量金属最高温度和最低温度。监测热电偶应布置在焊缝中心线或均温带边缘。热电偶之间的间距不应超过 4.5 米。为了保证整个壁厚达到需要的温度，部件内外表面都应布置热电偶。

## 7.5 热处理

### 7.5.1 总体要求

蒸汽发生器产品和零部件的焊后热处理应按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》的规定执行。制造单位应针对不同的部位或结构，根据设计要求，结合自身的工艺装备条件选用合适的热处理工艺。

### 7.5.2 焊后热处理温度和保温时间

焊后热处理的温度和保温时间应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》的规定。对于升温 and 降温过程中要求控制升温或降温速率的温度区间，每一根热电偶都应达到规定的升温或降温速率要求。

### 7.5.3 加热速率和冷却速率

为了防止变形和热应力，加热速度和冷却速度应足够缓慢。加热速率和冷却速率应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》的规定。设备装炉的起始升温受控温度应取设计结构，特别取决于热应力引起的变形危险。起始升温受控温度不得超过 350℃ 或根据部件所要求的更低装炉温度。

### 7.5.4 焊后热处理的检测和记录

用热电偶测量温度，采用压紧块压紧或点焊的方式固定热电偶。热电偶应加以防护，使之不受炉温的辐射及炉内气氛的影响。在工件的最厚部位和最薄部位应至少放置 1 个热电偶。要连续并自动的记录与热处理相关的主要参数（时间和温度）。

### 7.5.5 炉内焊后热处理

炉内加热时，工件应放置足够高度，一般不低于 300mm，防止离炉底太近，工件应放置在有效加热区内。火焰不能直接接触工件。气体炉内环境气氛应每 6 个月检查一次。当设计文件对炉膛气氛中的硫含量有专门规定时，应对所用的热处理炉进行标定并满足要求。炉内加热时，工件应放置在足够多的支撑物上，当筒体工件水平放置时，支撑物应为圆弧状，使其与筒体表面有足够的接触面，并视工件刚性，在筒体内侧可放置支撑，以使焊后热处理变形降低到最少程度。

### 7.5.6 局部焊后热处理

一次侧和二次侧关闭环缝应采用局部焊后热处理。加热控制区应是整圈，加热宽度应不小于 4 倍焊缝金属厚度。必要时，应采用特殊的工艺措施，控制蒸汽发生器部件及内部各区域温度，减小传热管支承板的弯曲变形，防止传热管支承板孔边缘压到传热管产生凹痕。

### 7.5.7 传热管-管板焊接

传热管-管板焊接应在 NB/T 20233 规定的 I 级工作区内进行，并控制传热管-管板焊接接头的清洁度。焊接采用全位置、填丝或不填丝惰性气体保护自动氩弧焊。焊接完成后应进行氦检漏和渗透检测。

## 7.6 见证件

### 7.6.1 见证件设置原则

为了验证产品焊缝质量的一致性,并保证与由焊接工艺评定所确定的操作工艺相一致,制造商应按设计文件的要求在焊接生产过程中制备一些产品焊接见证件(以下简称见证件)。见证件应能代表其所对应的实际产品焊缝。

焊接见证件的设置按照设计要求执行,同时考虑以下因素:

- a) 每个焊接工艺评定
- b) 每个车间
- c) 每台产品

见证件的尺寸应满足焊接工艺评定试件的要求,并具有足够的长度,以便满足评定需要的全部试验、重复试验以及模拟补焊的要求。

### 7.6.2 见证件的材料

母材或相关材料(如隔离层、堆焊层等)应按下列规定选取:

- a) 优先取自为制造该设备所提供的材料(如延长段);
- b) 取自为制造该设备所用的某一炉号材料。

不能满足上述要求的情况下,为了保证母材具有代表性,制造单位应制定具体措施。如果可能,应标出母材的轧制方向,并应符合焊接工艺评定的条件,但对筒体纵缝焊接见证件,母材轧制方向应沿宽度方向。

焊接填充材料应取自产品焊缝所用的同批号材料。

### 7.6.3 见证件的数量

蒸汽发生器传热管与管板的焊缝应按下列要求设置见证件。其余见证件应满足设计文件的规定。

- a) 每个焊接操作工在产品焊接开始前应焊接一个见证件;
- b) 每 100 条自动焊缝,至少应焊接一个见证件,该见证件应由焊过这 100 条焊缝的某一焊接操作工焊接。

对于焊接设备调整的每次变动,这种变动是由车间控制部门确定,并在相应的技术文件中作了规定,在使用该设备焊接之前应焊接一个见证件。然后,每 100 条焊缝焊一个见证件。见证件应包括管板上用不同工艺堆焊的区域(如果可能)。对于其中每一个区域,至少应焊接 10 条焊缝。焊接见证件时,应采用在制造过程中所采用的所有的传热管与管板焊接工艺(包括补焊)。

### 7.6.4 见证件的焊接

7.6.4.1 见证件的焊接应在车间检查部门的监督下,由焊过相应产品焊缝的焊工或焊接操作工,使用与焊接产品同样的焊接规程和相同类型的设备来完成。并采取和焊接工艺评定试验相同的记录方式进行记录。

7.6.4.2 见证件应与其代表的零部件具有相同的焊后热处理(包括温度、保温时间),并尽可能与所代表的产品进行同炉焊后热处理。

### 7.6.5 见证件的检验

7.6.5.1 见证件应进行和产品焊缝相同要求的无损检验。

7.6.5.2 见证件应尽快完成检验,在任何情况下都应在焊接和热处理后两个月之内完成无损检验。

7.6.5.3 当见证件的焊接产生一个不合格时的结果时,将对焊接工艺评定产生怀疑,除非制造单位能证明程序中没有错误。

### 7.6.6 见证件的试验

7.6.6.1 见证件试件应从按照无损检验验收准则判断为合格的部位切取。

7.6.6.2 在见证件试件上要进行的一系列试验及验收指标应与焊接工艺评定试件的要求相同。

### 7.6.7 见证件的报告

见证件的报告应由制造单位编写，并应包括下列内容：

- a) 见证件的实施条件（要求的和实际记录的），特别是焊接顺序、焊工姓名，以及所采用的焊接填充材料的批号等；
- b) 所进行的无损检验和检验结果；
- c) 所进行的破坏性检验以及所要求的值和实际所测得的结果。

## 7.7 污染防治

蒸汽发生器制造阶段污染防治应满足 NB/T 20233 的要求。

## 7.8 无损检验

7.8.1 蒸汽发生器无损检验应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。

7.8.2 无损检验人员应按国家相关法规要求取得资格证书。

7.8.3 取得不同方法和等级资格证书的人员只能从事与该方法和等级相适应的无损检验工作，并承担相应的责任。

### 7.8.4 体积检验

7.8.4.1 蒸汽发生器压力边界的全焊透对接焊接接头应采用体积检验进行无损检验。

体积检验应采用射线检验和超声检验。射线检测应按 T/CNEA XXX.3《压水堆承压部件 无损检测 第3部分：射线检测》进行，超声检测应按 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 无损检测 第2部分：超声检测》进行。验收指标应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。

#### 7.8.4.2 射线检验

应对以下部位进行射线检验：

- a) 管板与水室封头焊接接头、管板与筒体焊接接头、上封头与筒体焊接接头、筒体与锥形筒体焊接接头、筒体间焊接接头；
- b) 二次侧给水接管与筒体焊接接头、二次侧人孔座与筒体焊接接头、一次侧进/出口接管预堆边与安全端焊接接头、上封头蒸汽接管与安全端焊接接头（如有）。

#### 7.8.4.3 超声检验

- a) 应对筒体焊接接头、接管与筒体焊接接头、垫块和支撑块与筒体焊接接头等部位进行超声检验；
- b) 应对以下部位的堆焊层进行超声检验：

- 1) 蒸汽发生器水室封头人孔密封面、水室封头、一次侧进/出口接管和人孔座、手孔座、检修孔座、管板一次侧以及上封头内壁蒸汽限流器孔位置的堆焊层应进行 100% 超声检验；检验区域应包括堆焊层、堆焊层与母材的结合面以及堆焊层以下至少 4mm 的母材区域。
- 2) 水室隔板与水室封头，水室隔板短节与管板以及水室隔板与水室隔板短节焊接后，应对水室隔板和在水室隔板短节下的堆焊层进行未结合超声检验
- 3) 应使用双晶直探头和纵波双晶斜探头对堆焊层进行超声检验。

### 7.8.5 表面检验

#### 7.8.5.1 总体要求

除非不可达，蒸汽发生器所有焊接接头应进行表面检验。铁磁性材料的表面检验应优先采用磁粉检验，非铁磁性材料的表面检验应采用渗透检验。磁粉检测应按 T/CNEA XXX.5《压水堆承压部件 无损检测 第5部分：磁粉检测》进行，渗透检测应按 T/CNEA XXX.4《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》进行。验收指标应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。

#### 7.8.5.2 磁粉检验

磁粉检验应符合下列规定：

- 一般使用磁轭法。触头法只应在特殊场合下使用，如返修时缺陷去除后的凹坑以及焊缝根部打磨处等。触头法应在焊后最终热处理之前使用，对于触头法产生的磁疤，在去除后应进行渗透检验或者磁轭法检验；
- 对螺栓应使用整体周向和整体纵向磁化方法，并且在加工完成后进行；
- 磁粉检测时不应过热和烧伤工件表面。

#### 7.8.5.3 渗透检验

应对以下部位进行渗透检验：

- 管板、水室封头、一次侧进/出口接管、人孔座、手孔座、检修孔座以及上封头内壁蒸汽限流器孔位置的堆焊层；
- 水室隔板短节与管板焊接接头、水室隔板与水室封头焊接接头；
- 排污接管、疏水接管与管板焊接接头；
- 非铁磁性待堆焊面、焊接坡口；
- 传热管与管板焊接接头；
- 一次侧进/出口接管与安全端隔离层焊接接头；
- 其它非铁磁性材料部件以及受到几何形状限制不能进行磁粉检验的铁磁性材料部件。

### 7.8.6 泄漏试验

#### 7.8.6.1 传热管与管板焊接后、液压胀前应进行氦检漏。

7.8.6.2 氦检漏试验应满足 T/CNEA XXX.8《压水堆承压部件 无损检测 第8部分：泄漏检测》的要求，最大泄漏率应不超过  $3 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

7.8.6.3 检漏气体可采用纯氦气或氦气和氮气的混合气体。在混合气体中，氦气的体积浓度在氦检漏试验压力、温度下，不应低于 15%，宜为 30%。所用氦气的品质应符合 GB/T 4844 的要求，氦气纯度应不低于 99.999%。所用氮气的品质应符合 GB/T 8979 的要求，氮气纯度应不低于 99.999%。

### 7.8.7 涡流检测

管束胀管后应对胀管区轮廓进行 100% 涡流检验。涡流检测应满足 T/CNEA XXX.6《压水堆承压部件 无损检测 第6部分：涡流检测》的要求。

## 7.9 水压试验

### 7.9.1 总体要求

蒸汽发生器水压试验应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第2部分：1级部件》的要求。水压试验应在制造单位进行。

### 7.9.2 试验介质



7.9.2.1 水压试验及最终清洗用水应满足 NB/T 20233 中 A 级水的规定。

7.9.2.2 二次侧水压试验用水及最终清洗用水应加联氨（175~500ppm）和氨，使水中含氧量小于 100ppb，pH 值保持在 9.0 以上。

7.9.2.3 水质检测应在试验充水前 24h 内进行。

### 7.9.3 压力表

7.9.3.1 压力表应为直读式，压力表的精确度等级不宜低于 0.4 级（即基本误差 $\pm 0.4\%$ ）。

7.9.3.2 水压试验用压力表应设置于垂直位置。

### 7.9.4 试验压力

7.9.4.1 蒸汽发生器水压试验的最低试验压力应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》的要求。

7.9.4.2 一次侧水压试验时，二次侧应排空（无水），且保持常压；二次侧水压试验时，一次侧应排空（无水），且保持常压。

### 7.9.5 试验温度

7.9.5.1 蒸汽发生器水压试验的试验温度应满足 T/CNEA XXX.2《压水堆承压部件 设计与制造 第 2 部分：1 级部件》的要求。

7.9.5.2 水压试验时应保证蒸汽发生器容器壁温不低于承压部件材料和焊缝之间最高的  $RT_{NDT}$  加 33℃。

### 7.9.6 升压、降压速率

水压试验升压或降压时，升压或降压速率不应大于 0.4MPa/min。

### 7.9.7 超压保护

蒸汽发生器水压试验时应设置超压保护装置，以免水压试验时蒸汽发生器任何部位的压力（包括静压头）超过最低试验压力（见 7.9.4.1）的 6%。

### 7.9.8 检查

#### 7.9.8.1 外观检查

在试验前、试验中和压力降至零以后，都应进行外观检查。检查重点部位包括：焊缝、接管和人孔周围，尤其是管板一次侧表面（二次侧水压试验）。

#### 7.9.8.2 压力检查

在整个水压试验过程中，对水压试验压力应进行实时检查并记录。

#### 7.9.8.3 温度检查

对温度进行定时监测时，至少包括试验开始、试验结束和至少一次在试验进行到一半时的测量结果。测量的温度、时间间隔和测量位置均应记录。

### 7.9.9 疏水及干燥

水压试验合格后，应将水排尽并立即使用过滤处理的无油、无尘、清洁、加热、干燥的氮气对蒸汽发生器一次侧和二次侧内部进行干燥。

### 7.10 标识与标记

标识与标记应满足蒸汽发生器设计文件的要求。

### 7.11 铭牌

蒸汽发生器铭牌应固定于明显的位置。铭牌应至少包含以下内容：

- a) 设备名称；
- b) 制造单位名称；
- c) 制造许可证编号；
- d) 产品标准；
- e) 主体材料；
- f) 设计压力（一次侧和二次侧）；
- g) 设计温度（一次侧和二次侧）；
- h) 水压试验压力（一次侧和二次侧）；
- i) 传热面积；
- j) 设备编号；
- k) 制造日期。

### 7.12 清洁、包装、运输与贮存

#### 7.12.1 清洁

蒸汽发生器最终清洁和清洁度应满足 NB/T 20233 的要求。

#### 7.12.2 包装

7.12.2.1 蒸汽发生器包装应满足 NB/T 20408 的要求。

7.12.2.2 蒸汽发生器的所有接管应用管盖或管塞密封，抽真空后充入干燥、无油的氮气。充氮后，压力应不小于 20kPa（表压），宜为 35~70kPa。蒸汽发生器内环境应满足：露点 $\leq$ -29℃，含氧量 $\leq$ 1.0%。

7.12.2.3 蒸汽发生器应连接供氮系统，氮气压力不足时可充压。蒸汽发生器或供氮系统应配备压力表监测蒸汽发生器内部的氮气压力。

7.12.2.4 蒸汽发生器所有螺纹孔应进行清理和保护。

7.12.2.5 蒸汽发生器外表面应用可去除的涂层/覆盖层保护，以防止湿气和大气污染物腐蚀。涂层/覆盖层应为耗材，且应控制污染物含量。涂层/覆盖层应不溶于水，但能用无卤素的溶液或机械方法容易去除。

7.12.2.6 蒸汽发生器包装标识按 GB/T 191 的规定，至少应包含以下内容：

- a) 设备质量、重心及起吊点；
- b) 防雨、防潮等标识；
- c) 禁焊标识；
- d) 防撞标识；
- e) 充氮标识。

#### 7.12.3 运输

7.12.3.1 蒸汽发生器运输应满足 NB/T 20408 的要求。

7.12.3.2 蒸汽发生器一般为整体运输。

7.12.3.3 蒸汽发生器运输过程中直到现场，应定期进行外观、包装完整性及充氮压力检查并记录。

7.12.3.4 氮气压力应维持在正压状态，如发现氮气压力小于设计要求的最低压力值，应充氮使氮气压力满足要求。

7.12.3.5 运输期间蒸汽发生器应卧置于鞍式支座上。

7.12.3.6 蒸汽发生器的适当位置应安装连续式加速度记录仪,记录蒸汽发生器完工后在装卸和运输过程中以及现场吊装时三个方向的加速度数值。允许的加速度限值应满足设备规格书的要求。

#### 7.12.4 贮存

7.12.4.1 蒸汽发生器贮存应满足 NB/T 20408 的要求。

7.12.4.2 蒸汽发生器应贮存在清洁、干燥、安全的贮存环境中,并且可定期检查。贮存环境不应低于 NB/T 20233 规定的 III 级工作区的要求。如蒸汽发生器临时贮存在户外,则应提供遮蔽物,且蒸汽发生器四周应安装围栏,以抵挡外部环境条件侵害。

7.12.4.3 蒸汽发生器在贮存期内,应进行定期检查。若发现异常应及时采取必要措施,恢复规定的贮存状态,并作书面报告。定期检查项目如下:

- a) 氮气压力检查;
- b) 标识应齐全;
- c) 封口应完好;
- d) 涂层/覆盖层应完好;
- e) 不应有机械损伤;
- f) 不应有污染、腐蚀;
- g) 包装箱不应打开或密封包装不应有损伤。

附录 A  
(资料性附录)  
蒸汽发生器主要零部件

压水堆核电站典型的蒸汽发生器和主要零部件参见图5和表6。

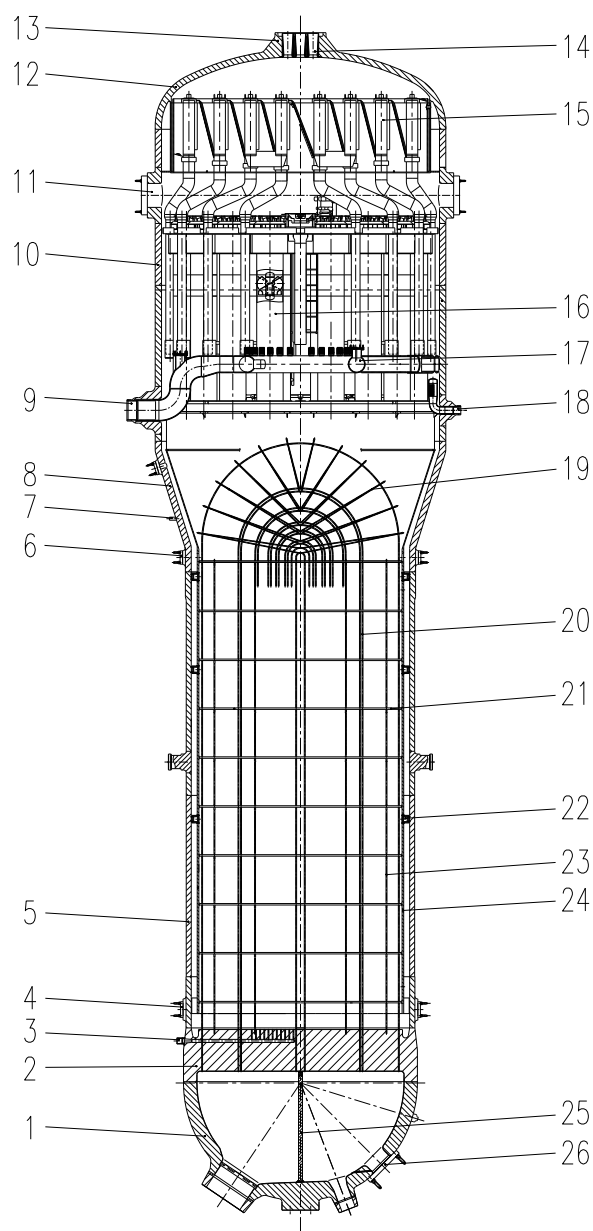


图5 典型蒸汽发生器的示意图

表6 蒸汽发生器典型的零部件

序号	名称	序号	名称
1	水室封头	14	蒸汽限流器
2	管板	15	次级分离器（干燥器）
3	排污/疏水接管	16	初级分离器
4	手孔	17	给水环
5	下筒体	18	备用给水接管
6	检修孔	19	抗振条
7	水位计接管	20	传热管支承板
8	锥体	21	传热管
9	主给水接管	22	套筒支撑
10	上筒体	23	拉杆
11	二次侧人孔	24	套筒
12	上封头	25	水室隔板
13	蒸汽出口接管	26	一次侧人孔

附 录 B  
(资料性附录)  
690 合金的导热系数

690合金（传热管）的导热系数见表7。中间温度的值可用内插法确定。

表7 690 合金的导热系数

在下列温度（℃）下的导热系数，W/(m·K)							
20	50	75	100	125	150	175	200
11.8	12.3	12.8	13.3	13.8	14.2	14.7	15.1
在下列温度（℃）下的导热系数，W/(m·K)							
225	250	275	300	325	350	375	400
15.6	16.1	16.5	17.0	17.5	17.9	18.4	18.9

附 录 C  
(资料性附录)  
蒸汽发生器主要母材

蒸汽发生器主要的母材及标准见表8。

表8 蒸汽发生器主要母材及标准

零部件名称	材料牌号	材料标准
传热管	NS3105	T/CNEA XXX.35
水室封头、管板、下筒体、锥体、上筒体、上封头等	13MnNiMo	T/CNEA XXX.4
一次侧管嘴安全端	S31653 (F316LN)	T/CNEA XXX.15
人孔、手孔和检修孔螺栓	42CrMoA (SA-193 Gr.B7)	T/CNEA XXX.18
人孔、手孔和检修孔螺母	40CrMnMo (SA-194 Gr.7)	T/CNEA XXX.27
水室隔板	NS3105	T/CNEA XXX.37
传热管支承板	06Cr13Al	T/CNEA XXX.24
抗振条	06Cr13Al	T/CNEA XXX.16
给水环	14CrMo (SA-335 Gr.P11)	T/CNEA XXX.22
蒸汽限流器	NS3105	T/CNEA XXX.38

附 录 D  
(资料性附录)  
蒸汽发生器主要焊材

蒸汽发生器主要的焊接材料及标准见表9。

表9 蒸汽发生器主要的焊接材料及标准

焊缝部位	焊接材料牌号	焊接材料标准
低合金钢环焊缝或堆焊成形结构 (承压)	E9018M	T/CNEA XXX.16
	ER90S-D2	T/CNEA XXX.15
	E6215-G、E6216-G、E6218-G、E6218-N3M1	T/CNEA XXX.17
水室封头内壁或其他部位不锈钢堆焊	E309L、E308L	T/CNEA XXX.5
	ER309L、ER308L	T/CNEA XXX.6
	EQ309L、EQ308L 及焊剂	T/CNEA XXX.7
管板一次侧或其他部位镍基合金堆焊	ENiCrFe-7	T/CNEA XXX.9
	EQNiCrFe-7 或 EQNiCrFe-7A 及焊剂	T/CNEA XXX.10
	ERNiCrFe-7 或 ERNiCrFe-7A	T/CNEA XXX.11
低合金钢堆焊层 (如有)	E8018-B2	T/CNEA XXX.16
	ER80S-B2	T/CNEA XXX.15
碳钢焊缝或堆焊成形结构 (不承压)	E7018	T/CNEA XXX.12
	ER70S-6	T/CNEA XXX.13



附 录 E  
(资料性附录)  
载荷组合

蒸汽发生器分析法设计时需考虑的载荷组合见表10，载荷术语描述见表11。

表10 蒸汽发生器载荷组合

工况	载荷组合 <sup>(9)</sup>	限值
设计	$P+DW+DML+XL$	设计
正常	$PMAX^{(1)}+DW+XL^{(3)}$ $PMAX+DW+DN+XL^{(5)}$	A
异常	$PMAX+DW+DU+XL^{(5)}$	B
危急	$PMAX+DW+DE+XL^{(5)}$ $PMAX+DW+DY+HYDSP+XL^{(6)}$	C
事故	$PMAX+DW+DF+XL^{(5)}$ $PMAX+DW+SRSS^{(2)}((SSE+SSES)+DBPB^{(4)})+XL^{(3)}$ $PMAX+DW+RVOS+SRSS(SSE+SSES)^{(4)}+XL^{(8)}$ $PMAX+DW+DYS+DBPBS+SRSS((SSE+SES)^{(4)}+DY+HYDSP)+XL^{(6)(7)}$	D
试验	$P+DW+DML$	试验
注 1：不同运行工况下，载荷组合中 PMAX 的值可能不同。地震载荷下 PMAX 的值等于正常 100% 功率下的值； 注 2：SRSS 等于平方和的平方根； 注 3：在载荷组合中，PMAX 和 XL 之间存在的时间和因果关系需在计算载荷组合时考虑； 注 4：对于固定管道系统的部件，如设备管嘴，组合 SSE 和 SSES 两个载荷绝对值。对于其它部件如直管、三通、阀门等，用 SRSS 法组合 SSE 和 SSES 两个载荷； 注 5：在载荷组合中，PMAX、DN、DU、DE、DF 和 XL 之间存在的时间和因果关系需在计算载荷组合时考虑； 注 6：在载荷组合中，PMAX、DY、HYDSP 和 XL 之间存在的时间和因果关系需在计算载荷组合时考虑； 注 7：在载荷组合中，PMAX、DY、和 XL 之间存在的时间和因果关系需在计算载荷组合时考虑； 注 8：在载荷组合中，PMAX、RVOS 和 XL 之间存在的时间和因果关系需在计算载荷组合时考虑。		

表11 载荷术语

载荷	描述
P	内部设计压力
PMAX	压力峰值
DW	自重
DML	设计机械载荷（除自重）。包括A级载荷和B级卸压/安全阀开启系统稳态载荷
XL	外部机械载荷（相应管道对管嘴的相互作用）
SSE	极限安全地震震动（惯性部分）
FV	阀门快速关闭
RVC	卸压/安全阀-封闭系统（瞬态）
RVOS	卸压/安全阀-开放系统（稳态）
RVOT	卸压/安全阀-开放系统（瞬态）
DY	不同工况下的动态载荷（瞬态）
DN	A工况下适用的动态载荷（瞬态）
DU	B工况下适用的动态载荷（瞬态）
DE	C工况下适用的动态载荷（瞬态）
DF	D工况下适用的动态载荷（瞬态）
DYS	各种使用工况相关的动态载荷（稳态）
SSES	SSE地震锚固点位移
ES	小于SSE的地震锚固点位移
DBPB	设计基准管道破裂，包括LOCA和非LOCA（瞬态）
HYDSP	由于自动卸压系统鼓泡器下泄造成的厂房结构运动
DBPBS	设计基准管道破裂，包括LOCA和非LOCA（稳态）