

团 体 标 准

T/CNEA XXXXX—XXXX

压水堆承压部件 设计与制造 第 4 部分：钢 制安全壳及贯穿件

Code for PWR pressure boundary components Design and Fabrication Part 1:
Steel Containment Vessel and Penetrations

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国核能行业协会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和符号 2

4 总则 8

 4.1 一般规定 8

 4.2 资格与职责 8

 4.3 本标准管辖边界范围 8

5 材料 14

 5.1 一般规定 14

 5.2 材料的总要求 16

 5.3 铁素体钢材的试件和试样 17

 5.4 材料的断裂韧性要求 20

 5.5 焊接材料 26

 5.6 承压材料的检测和修补 31

6 设计 35

 6.1 设计原则 35

 6.2 公式法设计 37

 6.3 分析法设计 44

 6.4 开孔和开孔补强 53

 6.5 焊接连接设计 58

 6.6 螺栓的应力限制 63

 6.7 特殊要求 64

 6.8 电气和机械贯穿件 65

7 制造和安装 65

 7.1 一般规定 65

 7.2 成形、装配和对中 66

 7.3 焊接及评定 81

 7.4 施焊、检测和焊接返修要求 84

 7.5 热处理 87

 7.6 机械接头和贯穿组件 90

 7.7 膨胀节 92

8 检测 92

8.1 无损检测通用要求 92

8.2 焊缝的检测要求 93

8.3 验收准则 94

8.4 无损检测人员的考核、取证 96

9 试验 96

9.1 一般规定 96

9.2 密封性试验 97

9.3 结构完整性试验 97

10 超压保护 97

10.1 一般规定 97

10.2 外压保护 98

10.3 内压保护 98

11 铭牌 98

11.1 铭牌位置 98

11.2 铭牌内容 98

附录 A（规范性附录） 材料的补充规定 99

附录 B（规范性附录） 材料的许用应力及许用应力强度值 100

附录 C（规范性附录） 外压计算用图表 108

附录 D（规范性附录） 设计疲劳曲线 119

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 4 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：×××、×××、×××。

本文件主要起草人：×××、×××、×××。

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 4 部分：钢制安全壳及贯穿件

1 范围

本标准规定了压水堆承压部件钢制安全壳及贯穿件的材料、设计、制造和安装、检测、试验、超压保护的技术要求。

本标准适用于压水堆承压部件钢制安全壳及贯穿件，其他堆型核电厂同类安全壳可参照执行。

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。

HAF601 民用核安全设备设计制造安装和无损检验监督管理规定

HAF602 民用核安全设备无损检验人员资格管理规定

HAF603 民用核安全设备焊工焊接操作工资格管理规定

GB/T 17569 压水堆核电厂物项分级

GB/T 6803 铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验（ISO 148-1:2006 Part 1,MOD）

GB/T 20066-2006 钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法（ISO 14284:1996，IDT）

GB/T 1954-2008 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法

JB/T 8467 锻钢件超声波探伤方法

NB/T 20005.31-2015 压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第31部分：安全壳用15Mn锻件

NB/T 20005.32-2015 压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第32部分：安全壳用15MnHR钢板

NB/T 20005.33-2015 压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第33部分：安全壳用15Mn钢管

NB/T 20005.38-2017 压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第38 部分：安全壳机械贯穿件用15MnHR焊接钢管

NB/T 20005.39-2017 压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第39部分：安全壳机械贯穿件用15Mn锻件

NB/T 20006.31-2015 压水堆核电厂用合金钢 第31部分：安全壳用10MnNiMoHR钢板

NB/T 20006.32-2015 压水堆核电厂用合金钢 第32部分：安全壳机械贯穿件用15Cr1Mo锻件

NB/T 20007.31-2015 压水堆核电厂用不锈钢 第31部分：安全壳用022Cr19Ni10不锈钢锻件

NB/T 20007.32-2015 压水堆核电厂用不锈钢 第32部分：安全壳用022Cr19Ni10不锈钢无缝钢管

NB/T 20007.35-2015 压水堆核电厂用不锈钢 第35部分：安全壳机械贯穿件用06Cr18Ni11Ti不锈钢板

T/CNEA XXX.5-XXXX 压水堆承压部件 设计与制造 第5部分：支承件

T/CNEA XXX.8-XXXX 压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则

T/CNEA XXX.18-XXXX 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.1-XXXX 压水堆承压部件 焊接 第1部分：焊接通用要求

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

T/CNEA XXX.3-XXXX 压水堆承压部件 焊接 第3部分：产品焊接

T/CNEA XXX.4-XXXX	压水堆承压部件	焊接	第4部分：焊接材料验收
T/CNEA XXX.1-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第1部分：通用要求
T/CNEA XXX.2-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第2部分：超声检测
T/CNEA XXX.3-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第3部分：射线检测
T/CNEA XXX.4-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第4部分：渗透检测
T/CNEA XXX.5-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第5部分：磁粉检测
T/CNEA XXX.6-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第6部分：涡流检测
T/CNEA XXX.7-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第7部分：目视检测
T/CNEA XXX.8-XXXX	压水堆承压部件	无损检测	第8部分：泄漏检测
NB/T 20391-2016	压水堆核电厂钢制安全壳组装、安装及验收技术规程		
NB/T 20018-2010	核电厂安全壳密封性试验		
NB/T 20431-2017	压水堆核电厂钢制安全壳结构整体性试验		

3 术语和符号

3.1 术语

下列术语适用于本文件。

3.1.1

设计压力 design pressure
在设计技术规格书中规定的与设计限制相应的压力值。

3.1.2

试验压力 test pressure
压力试验期间，容器顶部的压力。

3.1.3

计算厚度 required thickness
按本标准相应公式计算得到的厚度。

3.1.4

设计厚度 design thickness
计算厚度与腐蚀裕量之和。

3.1.5

名义厚度 nominal thickness
设计厚度加上材料厚度负偏差后向上圆整至材料标准规格的厚度。

3.1.6

有效厚度 effective thickness
名义厚度减去腐蚀裕量和材料厚度负偏差。

3.1.7

最小成形厚度 minimum required fabrication thickness

受压元件成形后保证设计要求的最小厚度。

3.1.8

设计温度 design temperature

在设计技术规格书中规定的与设计限制相应的容器金属温度值。

3.1.9

金属最低使用温度 lowest service metal temperature

在核动力装置运行期间，设备使用过程中金属可能遇到的最低温度。

3.1.10

热成形 hot deformed

材料在温度高于其下相变温度减56℃的成形。

3.1.11

应力强度 stress intensity

在给定点上最大剪应力的两倍，是组合应力的当量强度。即为在给定点上的代数最大主应力与代数最小主应力之差。

3.1.12

总体结构不连续 gross structural discontinuity

是一种几何或材料的不连续，它影响承压构件沿整个壁厚的应力或应变分布。总体结构不连续性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。

3.1.13

局部结构不连续 local structural discontinuity

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。

3.1.14

薄膜应力 membrane stress

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。

3.1.15

弯曲应力 bending stress

是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。

3.1.16

一次应力 primary stress

是所施加荷载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的,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荷载的重新分配。一次应力的例子有:

- a) 由于内压或其他的分布活荷载在圆柱形壳体或球形壳体中引起的总体薄膜应力;
- b) 由于压力的作用,在平封头中央部分引起的弯曲应力。

3.1.17

局部一次薄膜应力 local primary membrane stress

与荷载传递到结构其他部分时不连续效应如不加以限制所产生的过量变形有关的,由压力或其它机械荷载产生的薄膜应力。

3.1.18

二次应力 secondary stress

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;
- b) 总体结构不连续处的弯曲应力。

3.1.19

峰值应力 peak stress

由包括应力集中效应在内的局部不连续性或局部热应力而附加于一次应力及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。

3.1.20

荷载应力 load stress

不同于热应力,由某种荷载作用引起的应力。

3.1.21

热应力 thermal stress

由温度不均匀分布或热膨胀系数不同而引起的一种自平衡应力。

3.1.22

总应力 total stress

一次应力、二次应力和峰值应力的总和。

3.1.23

安定性 shakedown

没有持续的塑性变形循环。如果结构经受所施加荷载的几次循环作用后，变形趋于稳定，且结构的反应是弹性的，不包括蠕变效应，认为结构是安定的。

3.1.24

自由端位移 free end displacement

固定的附件与它们所连接的管道分离并允许活动时，这两个构件之间发生的相对移动。

3.1.25

使用循环 service cycle

新工况的起始和建立，随后又回复到循环开始时的工况。

3.1.26

应力循环 stress cycle

交变应力差所制约的，从初始值经过一个代数最大值至一个代数最小值随后返回到初始值的一种情况。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

3.2.1 几何参数

R——圆筒形壳体或球形壳体的内半径；半球形封头或碟形封头球面部分的内半径；椭圆形封头的当量球形内半径；mm

R_o——圆筒形壳体或球形壳体的外半径；半球形封头或碟形封头球面部分的外半径；mm

D——圆筒形壳体或球形壳体的内直径；半球形封头或碟形封头球面部分的内直径；椭圆形封头的长轴内部长度；mm

D_o——圆筒形壳体或球形壳体的外直径；半球形封头或碟形封头球面部分的外直径；椭圆形封头的长轴外部长度；mm

t——承压材料的名义厚度；热处理最大厚度；焊缝较薄部分的厚度；棒材的直径或厚度；管状制品的名义壁厚；铸件的承压壁厚；试验焊缝的厚度；圆筒形壳体或球形壳体的计算厚度；凸形封头(半球形封头、椭圆形封头或碟形封头)的计算厚度；mm

t_n——圆筒形壳体或球形壳体的名义厚度；凸形封头(半球形封头、椭圆形封头或碟形封头)的名义厚度；接管名义厚度；mm

h——椭圆形封头内部短轴长度的一半；mm

L——安全壳筒身段的设计长度；接管颈部长度的；mm

r——碟形封头过渡段转角内半径；完工开孔的半径；mm

A_s——加劲肋横截面积；mm²

I——平行于圆筒轴线的加劲肋惯性矩；mm⁴

I_s——平行于圆筒轴线的加劲肋与圆筒有效段组合截面的惯性矩；mm⁴

3.2.2 荷载类型

- D——恒载，包括容器自重、固定设备荷载、液体静压头等；
- E_1 ——由运行基准地震（OBE）引起的荷载；
- E_2 ——由安全停堆地震（SSE）引起的荷载；
- F_L ——冷却剂丧失事故（LOCA）后由水淹产生的荷载；
- L——活载，包括吊车荷载、风荷载、平台荷载等；
- P_a ——由假想管道破裂（包括管道小破口、中等破口）、水池溢水及其产生的动压头引起的压力；
- P_i ——设计内压，不小于 P_a ；
- P_{g1} ——由 100% 锆水反应产生的氢气释放引起的压力；
- P_{g2} ——由氢气爆燃产生的压力；
- P_{g3} ——事故后假定在安全壳内充二氧化碳惰化而产生的压力；
- P_o ——由于安全壳内部或外部压力变动而引起的安全壳的外压；
- P_s ——由安全缓解阀（SRV）动作引起的压力，包括水池溢水及其产生的动压头引起的荷载；
- P_t ——试验压力；
- R_a ——由假想管道破裂（包括管道小破口、中等破口）、水池溢水及其产生的动压头引起的反力；
- R_o ——在启动、正常运行、停堆期间产生的管道反力；
- R_s ——由安全缓解阀（SRV）动作引起的管道反力，包括水池溢水及其产生的动压头引起的荷载；
- T_a ——由假想管道破裂（包括管道小破口、中等破口）、水池溢水及其产生的动压头引起的温度作用；
- T_o ——在启动、正常运行、停堆期间的温度作用；
- T_s ——由安全缓解阀（SRV）动作引起的温度作用，包括水池溢水及其产生的动压头引起的荷载；
- T_t ——试验温度；
- Y_j ——由破管喷射产生的等效静力荷载；
- Y_m ——由破管甩动产生的飞射撞击等效静力荷载；
- Y_r ——由破管反力产生的等效静力荷载；

3.2.3 计算指标

- R_m ——材料标准抗拉强度下限值；MPa
- R_{eL} ——材料标准室温屈服强度；MPa
- R'_{eL} ——材料在设计温度下的屈服强度；MPa
- R'_D ——材料在设计温度下经10万小时断裂的持久强度的平均值；MPa
- R'_n ——材料在设计温度下经10万小时蠕变率为1%的蠕变极限平均值；MPa
- E——所用材料的弹性模量；MPa
- R_u ——所用材料的极限抗拉强度值；MPa
- S——所用材料的许用应力值；MPa
- $S_f = 0.85 \min(2.4S_m, 0.7R_u)$ ；MPa
- S_m ——所用材料的许用应力强度值；MPa
- S_{IF} ——内压设计采用的许用应力值；MPa
- S_{EF} ——圆筒形壳体外压设计时所用钢材的许用应力值；MPa
- S_{mc} ——分析法设计采用的许用应力强度值；MPa
- α ——材料瞬时热膨胀系数；

3.2.4 计算系数及其他

A——所用材料的外压计算应变系数；

B——所用材料的外压计算应力系数；

K——椭圆形封头形状系数， $K = \frac{1}{6}[2 + (\frac{D}{2h})^2]$ ；

M——碟形封头形状系数， $M = \frac{1}{4}\left(3 + \sqrt{\frac{R}{r}}\right)$ ；

K_1 ——取决于椭圆形封头长短轴比例的系数；

4 总则

4.1 一般规定

4.1.1 钢制安全壳的材料、设计、制作、检测、试验和验收要求除应符合本标准的规定外，还应遵守国家颁布的有关法令、法规和规章的规定。

4.1.2 钢制安全壳的设备分级、抗震类别、质保等级等的规定详见 GB/T 17569 的规定。

4.2 资格与职责

4.2.1 资格

4.2.1.1 钢制安全壳的设计、制造、安装单位应具备健全的质量管理体系。设计单位应持有民用核安全设备设计许可证，制造单位应持有民用核安全设备制造许可证，安装单位应持有民用核安全设备安装许可证。

4.2.1.2 钢制安全壳的设计、制造和安装应接受国务院核安全监管部门及其派出机构的监督检查。

4.2.2 职责

4.2.2.1 设计单位的职责

4.2.2.1.1 设计单位应对设计文件的正确性和完整性负责。

4.2.2.1.2 钢制安全壳的设计文件至少应包括应力分析报告、设计图纸和制造安装技术要求。

4.2.2.1.3 设计单位应在钢制安全壳设计使用年限内保存全部设计文件。

4.2.2.2 制造单位的职责

4.2.2.2.1 制造单位应按照设计文件要求进行制造，如需要对原设计进行修改，应取得原设计单位同意修改的书面认可文件，并且对改动部位作出详细记录。

4.2.2.2.2 制造单位应在钢制安全壳制造前制定完善的质量计划。

4.2.2.2.3 制造单位对其制造的每个钢制安全壳产品应在钢制安全壳的设计使用年限内至少保存下列技术文件以备查：

- e) 质量计划；
- f) 制造工艺图或制造工艺卡；
- g) 材料证明文件及材料表；
- h) 钢制安全壳的焊接工艺和热处理工艺记录；
- i) 标准中允许制造厂选择的检验、试验项目的记录；
- j) 钢制安全壳制造过程中及完工后的检查记录、不符合项记录及不符合项处理记录；
- k) 钢制安全壳的原设计图和竣工图。

4.3 本标准管辖边界范围

4.3.1 钢制安全壳本体及与钢制安全壳本体相连的贯穿件或附件应按本标准进行设计和建造。作为钢制安全壳系统一部分或贯穿钢制安全壳或与其连接的管道、泵和阀门，应按 GB/T 17569 的规定将它们定为 1 级部件或 2 级部件，并按相应规范进行设计和建造。典型的钢制安全壳贯穿件如图 1 所示。

4.3.2 设计单位应在设计输入文件中规定钢制安全壳与所连接的管道或其它部件的边界范围。图 2 列出了几种典型的焊接连接件的管辖边界范围。钢制安全壳的管辖边界范围应不限于下述范围：焊接连接件的第一道环焊缝接头(连接焊缝应认为是管道的一部分)；螺栓连接件的第一个法兰面(螺栓应认为是管道的一部分)；螺钉连接件的第一个螺纹接头。

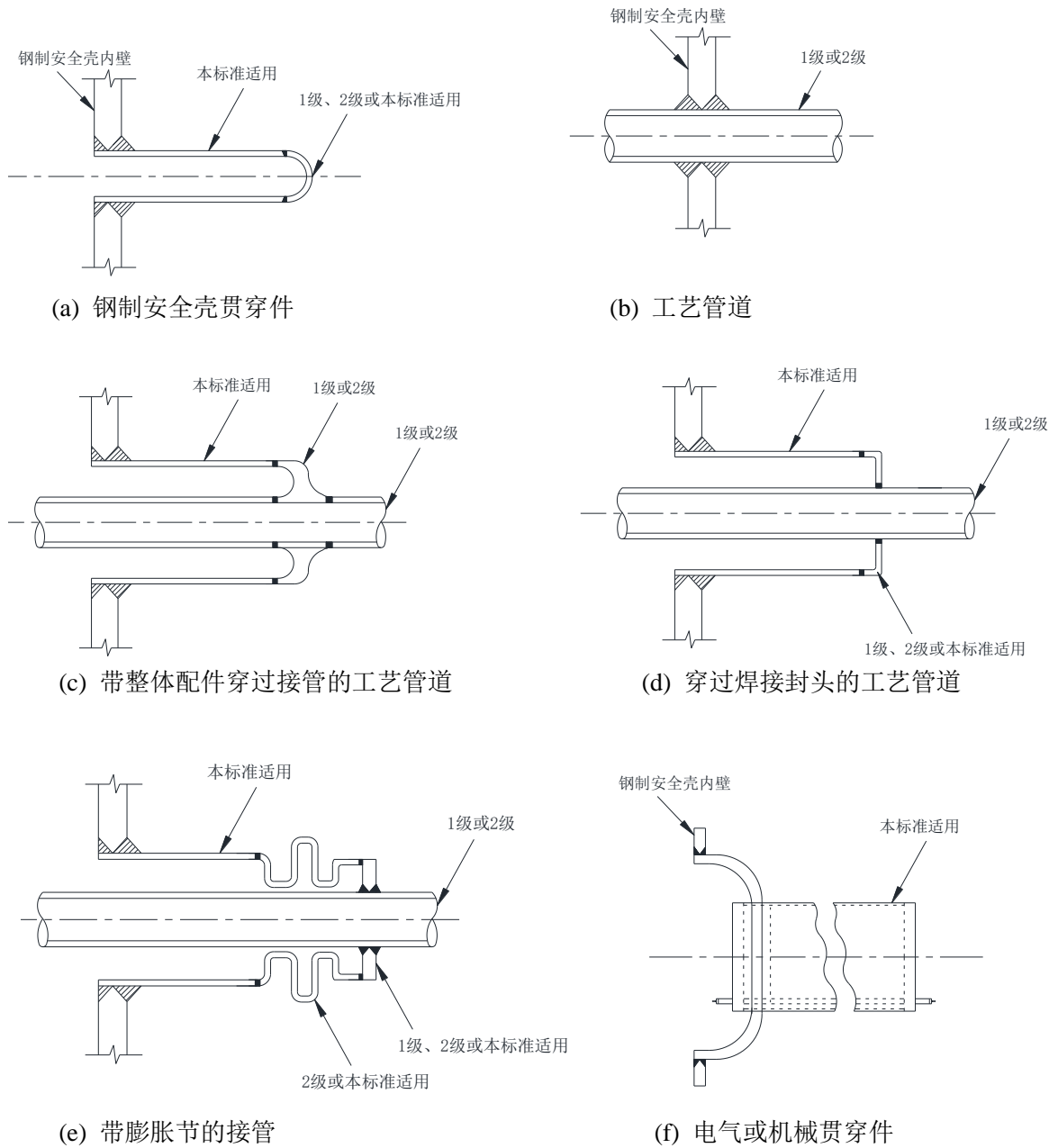


图1 钢制安全壳上的典型贯穿件

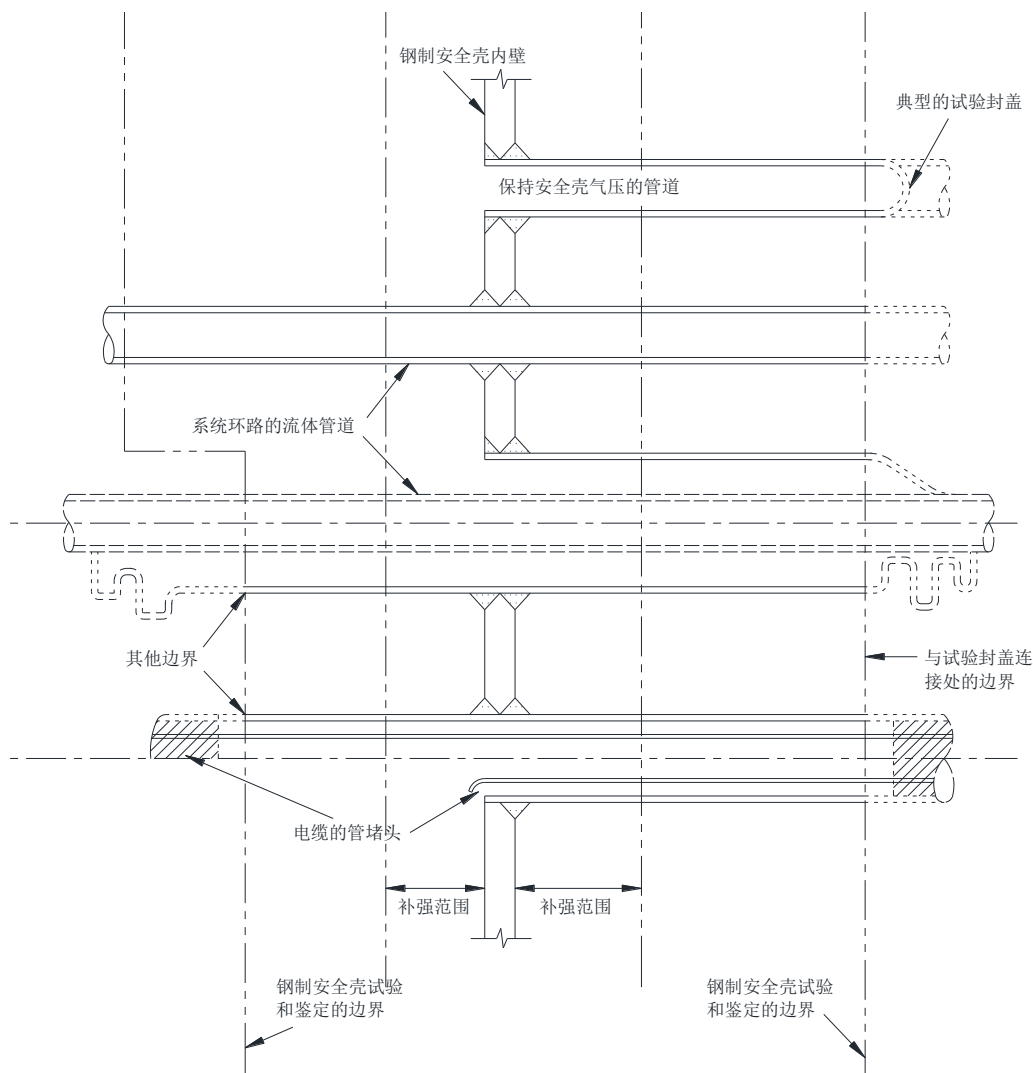


图2 钢制安全壳上典型的焊接连接件的管辖边界范围

4.3.3 钢制安全壳和附件之间的边界

4.3.3.1 附件

4.3.3.1.1 附件是指与安全壳承压部分的内部或外部相接触或相连接的部件。

4.3.3.1.2 附件可具有承压功能或非承压功能：

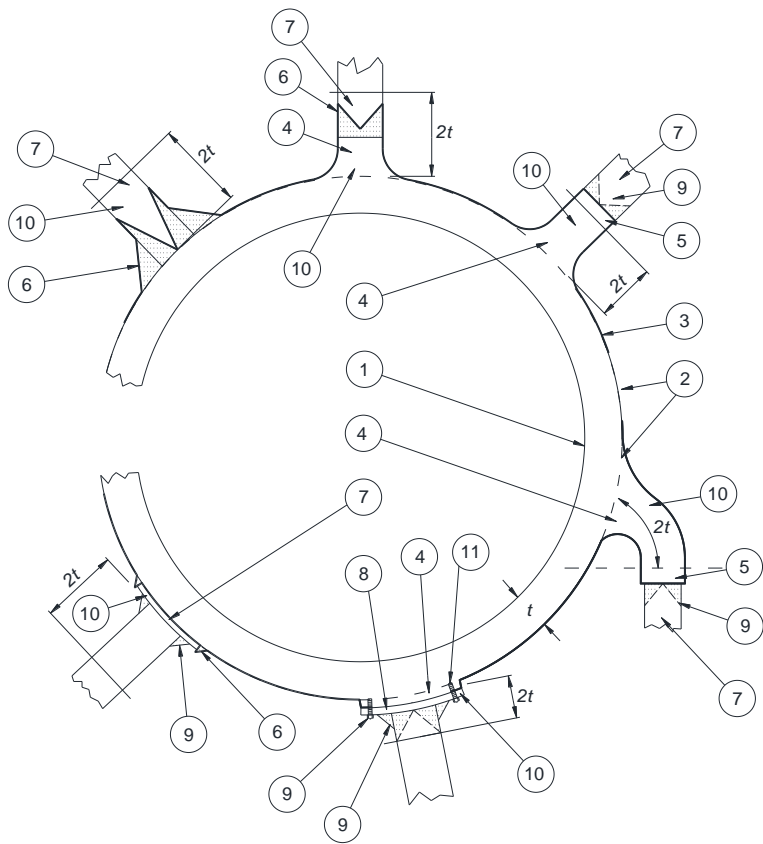
- a) 具有承压功能的附件包括：
 - 1) 压力边界的加劲肋；
 - 2) 钢制安全壳开孔补强件。
- b) 非承压功能的附件包括：
 - 1) 热套管、转动叶片；
 - 2) 钢制安全壳支座、支承件和吊耳、托架、裙座及其他在钢制安全壳支承荷载路径上的部件。

4.3.3.1.3 附件可具有结构性功能或非结构性功能：

- a) 具有结构性功能的附件(结构性附件):
 - 1) 执行承压功能；
 - 2) 钢制安全壳支承荷载路径上的附件。
- b) 具有非结构性功能的附件(非结构性附件):
 - 1) 不执行承压功能；
 - 2) 不是钢制安全壳支承荷载路径上的附件；
 - 3) 临时的或永久性的附件。

4.3.3.2 钢制安全壳和附件之间的界限应不近于下述 a)到 f)规定的承压边界之内，具体边界示意如图 3 至图 5 所示：

- a) 钢制安全壳的铸造或锻造的附件以及钢制安全壳表面的堆焊层均为钢制安全壳的一部分；
- b) 有承压功能的附件、焊缝和紧固件为钢制安全壳的一部分；
- c) 除以下 d)和 e)的规定外，钢制安全壳和不具有承压功能的附件之间的边界应在钢制安全壳的表面；
- d) 非承压结构性附件与钢制安全壳之间的第一道焊缝，如果与钢制安全壳承压部位的距离不大于 $2t$ ，该焊缝为钢制安全壳的一部分，如果距离超过 $2t$ ，则第一道焊缝为附件的一部分，其中 t 为承压材料的名义厚度；
- e) 非结构性附件与钢制安全壳之间的第一道连接焊缝为附件的一部分，在钢制安全壳承压部位不超过 $2t$ 范围以内的第一道焊缝应符合 7.4.3 的规定；
- f) 连接钢制安全壳和非承压附件的紧固件为附件的一部分；

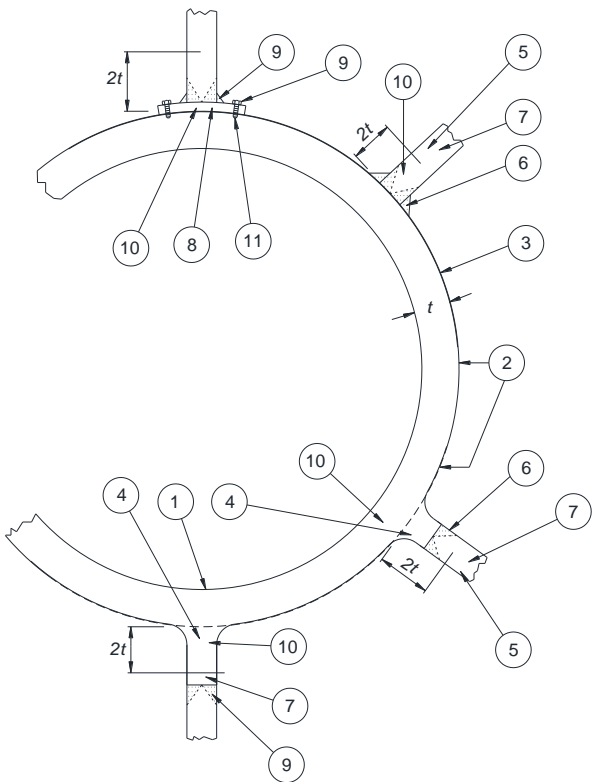


- ① 钢制安全壳应符合本标准的要求；
- ② 钢制安全壳的承压部位；
- ③ 管辖界线（粗线条）；
- ④ 铸造或锻造的附件或堆焊层应符合本标准的要求；
- ⑤ 离钢制安全壳承压部位大于 $2t$ 的焊缝，可用 T/CNEA XXX. 5-20XX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》第 6 章设计的设计规则代替本标准第 6 章的设计规则；
- ⑥ 离钢制安全壳承压部位小于或等于 $2t$ 的第一道连接焊缝应符合本标准的要求；
- ⑦ 离钢制安全壳承压部位 $2t$ 以上或超过第一道连接焊缝，附件应符合 T/CNEA XXX. 5-20XX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》的要求^a；
- ⑧ 支承、夹紧或紧固的附件应符合 T/CNEA XXX. 5-20XX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》的要求^a；
- ⑨ 附件的连接应符合 T/CNEA XXX. 5-20XX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》的要求^a；
- ⑩ 离钢制安全壳承压部位小于等于 $2t$ 处，附件与设备的相互作用应依据符合 6.2.3 要求考虑；
- ⑪ 钻孔应符合本标准的要求。

注：这些草图是表示管辖范围上的概念，而不应认为是推荐图。

^a 如果附件是一种中间元件 T/CNEA XXX. 5-20XX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》，则它的材料、设计和连接不属于本标准管辖范围。

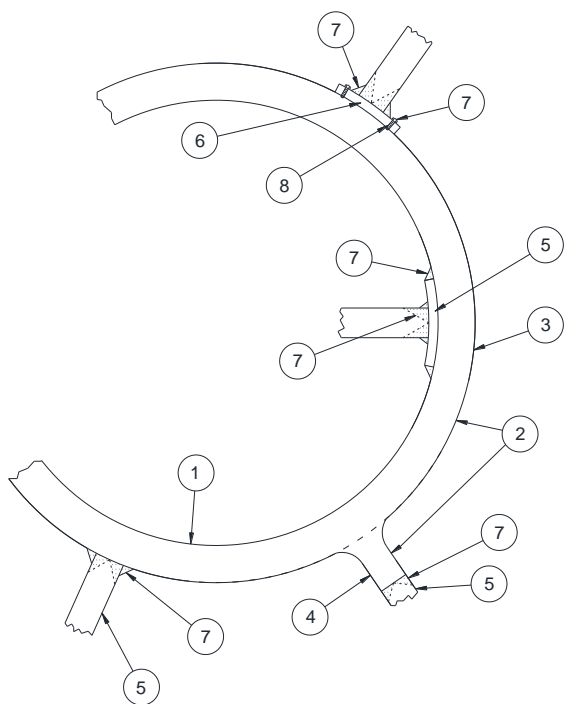
图3 钢制安全壳支撑荷载路径上不执行承压功能的附件



- ① 钢制安全壳应符合本标准的要求；
- ② 钢制安全壳的承压部位；
- ③ 管辖界线（粗线条）；
- ④ 铸造或锻造的附件或堆焊层应符合本标准的要求；
- ⑤ 离钢制安全壳承压部位等于或小于 $2t$ 时，第一道焊接非结构附件的材料应符合 5.2.7 的要求；设计不属于本标准管辖范围；
- ⑥ 离钢制安全壳承压部位小于或等于 $2t$ 的第一道连接焊缝应符合 7.4.3 的要求；
- ⑦ 离钢制安全壳承压部位 $2t$ 以上时，非结构附件不属于本标准管辖范围；
- ⑧ 支承、夹紧或紧固的非结构附件不属于本标准管辖范围；
- ⑨ 非结构附件的连接不属于本标准管辖范围；
- ⑩ 离钢制安全壳承压部位小于等于 $2t$ 处，附件与设备的相互作用应依据符合 6.2.3 要求考虑；
- ⑪ 钻孔应符合本标准的要求。

注：这些草图是表示管辖范围上的概念，而不应认为是推荐图。

图4 不执行承压功能且不在钢制安全壳支撑荷载路径上的附件



- ① 钢制安全壳应符合本标准的要求；
 - ② 钢制安全壳的承压部位；
 - ③ 管辖界线（粗线条）；
 - ④ 铸造或锻造的附件或堆焊层应符合本标准的要求；
 - ⑤ 焊接附件应符合本标准的要求；
 - ⑥ 支承的、夹紧的或紧固的连接件应符合本标准的要求；
 - ⑦ 附件连接应符合本标准的要求；
 - ⑧ 钻孔应符合本标准的要求；
- 注：这些草图是表示管辖范围上的概念，而不应认为是推荐图。

图5 钢制安全壳上执行承压功能的附件

5 材料

5.1 一般规定

- 5.1.1 本标准对钢制安全壳承压部件所用的钢板、钢管、钢锻件和螺栓用钢材作出了规定。与承压部件焊接的非承压部件用钢应是焊接性能良好的钢材。
- 5.1.2 采用本标准未列入的钢材时，应符合附录 A 的有关规定。
- 5.1.3 钢制安全壳承压用钢应附有钢材生产单位的钢材质量证明书原件，钢制安全壳制造单位应按材料技术条件对钢材进行验收。
- 5.1.4 当对钢材有特殊要求时（如特殊冶炼方法、较高的冲击功指标、提高无损检测要求、增加力学性能检验等），设计单位应在相关技术文件中注明。

5.1.5 许用应力强度和许用应力

5.1.5.1 本标准中所用材料的许用应力值 S 和许用应力强度值 S_m 按附录 B 的规定查用。

5.1.5.2 本标准中所用材料（螺栓材料除外）的许用应力 S 按表 1 的规定确定，许用应力强度 S_m 按表 2 的规定确定；钢制螺栓材料的许用应力 S 按表 3 的规定确定，钢制螺栓材料的许用应力强度 S_m 按表 4 的规定确定。

表1 钢材（螺栓材料除外）许用应力 S 取值准则

材料	许用应力/MPa 取下列各值中的最小值
锻件、碳钢、合金钢	$\frac{R_m}{3.5}, \frac{R_{eL}}{1.5}, \frac{R'_{eL}}{1.5}, \frac{R'_D}{1.5}, \frac{R'_{Dmin}}{1.5}, \frac{R'_n}{1.5}$

表2 钢材（螺栓材料除外）许用应力强度 S_m 取值准则

材料	许用应力强度/MPa 取下列各值中的最小值
锻件、碳钢、合金钢	$\frac{R_m}{3}, \frac{R_{eL}}{1.5}, \frac{R'_{eL}}{1.5}$

表3 钢制螺栓材料许用应力 S 取值准则

材料	许用应力/MPa 取下列各值中的最小值
退火螺栓	$\frac{R_m}{4}, \frac{R_{eL}}{1.5}, \frac{R'_{eL}}{1.5}$
通过热处理或应变硬化提高强度的螺栓	$\frac{R_m}{5}, \frac{R_{eL}}{4}, \frac{R'_{eL}}{4}$

表4 钢制螺栓材料许用应力强度 S_m 取值准则

材料	许用应力强度/MPa 取下列各值中的最小值
通过热处理或应变硬化提高强度的螺栓	$\frac{R_{eL}}{3}, \frac{R'_{eL}}{3}$

5.2 材料的总要求

5.2.1 承压材料

5.2.1.1 本标准允许采用的承压材料的技术要求：

- a) 本标准允许采用的承压材料（非螺栓材料）如表 5 所示，螺栓材料如表 6 所示。具有承压功能的附件应采用承压材料。
- b) 本章的要求不适用于与部件承压功能无关物项的材料，也不适用于起导电作用和绝缘作用的材料，以及在电气贯穿件中作密封材料用的特殊合金。
- c) 若钢制安全壳所用铁素体承压钢材的厚度超过 6mm，应在材料未作冲击试验时，对所用钢材进行正火热处理或淬火加回火热处理，并完全镇静化处理。
- d) 在物项制造中所使用的焊接材料和钎接材料，应符合本章相关要求。本章的要求不适用于在焊接接头中作垫环或条状垫板用的材料。
- e) 本章规定不适用于厚度小于等于母材厚度 10%的硬质合金表面堆焊层或耐腐蚀金属覆盖层。

表5 钢制安全壳许用承压材料（非螺栓材料）表

NB/T 20005.31	压水堆核电厂用碳钢和低合金钢	第31部分：安全壳用15Mn锻件
NB/T 20005.32	压水堆核电厂用碳钢和低合金钢	第32部分：安全壳用15MnHR钢板
NB/T 20005.33	压水堆核电厂用碳钢和低合金钢	第33部分：安全壳用15Mn钢管
NB/T 20005.38	压水堆核电厂用碳钢和低合金钢	第 38 部分：安全壳机械贯穿件用 15MnHR 焊接钢管
NB/T 20005.39	压水堆核电厂用碳钢和低合金钢	第39部分：安全壳机械贯穿件用15Mn锻件
NB/T 20006.31	压水堆核电厂用合金钢	第31部分：安全壳用10MnNiMoHR钢板
NB/T 20006.32	压水堆核电厂用合金钢	第32部分：安全壳机械贯穿件用15Cr1Mo锻件
NB/T 20007.31	压水堆核电厂用不锈钢	第31部分：安全壳用022Cr19Ni10不锈钢锻件
NB/T 20007.32	压水堆核电厂用不锈钢	第32部分：安全壳用022Cr19Ni10不锈钢无缝钢管
NB/T 20007.35	压水堆核电厂用不锈钢	第35部分：安全壳机械贯穿件用06Cr18Ni11Ti不锈钢板

表6 钢制安全壳许用承压材料螺栓材料表

T/CNEA XXX.18-XXXX	高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料
--------------------	--------------------------

5.2.1.2 当本章规定的特殊要求同材料技术条件中的要求相矛盾时，应以本章所规定的特殊要求代替材料技术条件中对应的要求。这些特殊要求中如包括材料技术条件中也要求的检测、试验或处理时，则只需进行一次。要求的无损检测应按 5.6 中对每种产品型式所作的规定进行。

5.2.1.3 为确保部件处于最佳的预期使用工况，可对化学成分、热处理工艺规程、制作要求以及补充试验等提出特殊要求。

5.2.1.4 螺母材料的技术要求：

- a) 螺母材料应符合 SA-194 的规定。
- b) 螺母的螺纹应按 ANSI B1.1 的规定加工到 2B 级精度或更高的公差。螺母和垫圈的材料应按下列要求选用：

- 1) 碳钢螺栓或栓钉可配用碳钢螺母和碳钢垫圈。
 - 2) 对于金属运行温度不超过 480℃的合金钢螺栓或栓钉可配用碳钢或合金钢螺母以及硬度与螺母大致相同的碳钢或合金钢垫圈。
 - 3) 对于金属运行温度超过 480℃的合金钢螺栓或栓钉，应配用合金钢螺母，垫圈化学成分和硬度应与螺母材料相同。
- c) 螺母应是机制的，并倒角和去毛刺。

5.2.2 材料验证

钢制安全壳所用的所有材料应经过确认。承压材料应具有经确认的材料试验报告，材料试验报告应包括所有要求的化学分析、试验和检测的实际结果。非承压材料可用产品合格证书来代替经确认的材料试验报告。所有经确认的材料试验报告和产品合格证书的副本，应随材料一起提供。

5.2.3 焊接材料

焊接材料的要求见5.5节的规定。

5.2.4 材料识别

钢制安全壳所用承压材料应是可识别的。在钢制安全壳的制造过程中，应对小件物项的材料加以控制，以确保它们始终是可识别且可接受的材料。在材料修补和钢制安全壳制造过程中，应对焊接材料和钎焊材料加以控制，以确保它们始终是可识别且可接受的材料。

5.2.5 提高冲击性能的热处理

碳钢、低合金钢和高铬合金钢可通过淬火和回火热处理来提高冲击性能。材料在温度不低于595℃的焊后热处理，可认为是回火热处理状态。

5.2.6 材料的热处理规程

当对热处理温度、热处理时间有要求时，热处理应在有温度受到监测和温度已校准的炉内进行，或应采用与材料接触的经检定合格且在有效期内的热电偶，或连接到与材料接触的金属块上的经检定合格且在有效期内的温度计仪表作测量控制以进行热处理。热处理炉的炉装料应符合本标准的规定。

5.2.7 非承压材料

5.2.7.1 钢制安全壳支承荷载路径上的材料以及焊于承压材料上而不执行承压功能的材料应符合所用材料的要求。

5.2.7.2 不执行承压功能的材料以及焊接于距钢制安全壳承压部位小于等于 2t，不在钢制安全壳支承荷载路径上（非结构附件）的材料应满足 7.4.3 的要求，此处 t 为材料的名义厚度。

5.2.7.3 符合本标准要求并具有产品合格证书的轧制型钢，应按照相应轧制型钢标准的规定进行焊接修补。

5.3 铁素体钢材的试件和试样

5.3.1 热处理要求

5.3.1.1 铁素体材料试件的热处理

当铁素体钢材在钢制安全壳制作或安装过程中需进行热处理时,用作拉伸和冲击试样的材料应采用与钢制安全壳用材料相同的方法进行热处理。热处理所采用的加热温度、加热速率和冷却速率应进行记录。对于焊后热处理,试验材料在一种温度或几种温度下的总保温时间至少应为该材料在实际焊后热处理时,在一种或几种温度下总时间的80%,而试验材料、试件或试样在一种温度或几种温度下的总保温时间,可以在一次热处理循环中完成。

5.3.1.2 淬火和回火材料试件的热处理

5.3.1.2.1 当铁素体钢材从奥氏体化温度进行淬火时,试件的冷却速率应与材料主体的冷却速率相近且不得大于材料主体的冷却速率,锻件和铸件可不受此限制。本条同样适用于直接从材料上切取的试件,也适用于代表材料的单独试件。对于按 5.3.1.2.2 或按 5.3.2 制备的试件也是适用的。

5.3.1.2.2 如果试样按 5.3.2 的规定从产品有关表面来切取,则淬火和回火材料或代表该材料的试件的热处理规程需满足下面 a)、b) 和 c) 的规定。

- a) 能使试验材料的冷却速率接近产品主体上离表面 $0.25t$ 深处的冷却速率,以及离产品任何热处理边缘不小于名义厚度 t 的冷却速率,即淬火时,从奥氏体化温度开始冷却的所有温度,在 20 秒以内不超过 14°C 的所有规程都是可以的。
- b) 如果有材料的冷却速率数据,并有控制试样冷却速率的装置,可采用上述 a) 规定的热处理规程,将试样放在该装置中进行热处理。
- c) 当采用 5.3.2 中所规定的任一专用规程时,材料边缘较快的冷却速率可用下列方法来补偿:
 - 1) 取样部位离淬火边缘不得小于材料厚度;
 - 2) 在取样部位边缘用部分焊透的焊缝(该焊缝将完全密封缓冲层表面),焊上一块补偿钢板,其宽度不得小于材料厚度;
 - 3) 在取样部位边缘使用隔热垫板或绝热措施。
 应验证这种补偿方法的冷却速率与上面的 a) 或 b) 的冷却速率相等,并且经确认的材料试验报告中应包括这些验证资料。

5.3.2 淬火和回火材料试件和试样的制备规程

5.3.2.1 通用规程

淬火和回火材料试样的制备规程与产品的型式有关。试件和试样的切取部位应符合下列各条规定。

5.3.2.2 板材

5.3.2.2.1 切取的试件应使试样的纵轴到轧制表面的距离不小于 $0.25t$,且试样长度的中线到板材任何热处理边缘的距离至少为 t ,此处 t 为材料的名义厚度。

5.3.2.2.2 当采用单独试件代表部件的材料时,试件应有足够的尺寸,以保证试件切取部位的冷却速率能代表产品的深度至少为 $0.25t$ 和距离产品任何边缘至少为 t 部位处的材料的冷却速率。除非按 5.3.1.2.2 的规定来模拟大件或产品的适用冷却速率,否则试件的尺寸应不小于 $3t \times 3t \times t$,此处 t 为材料的名义厚度。

5.3.2.3 锻件

5.3.2.3.1 切取的试件应使试样的纵轴到任何表面的距离不小于 $0.25t$ ，且试样长度的中线到任何第二表面的距离至少为 t ，此处 t 为热处理最大厚度。可采用 5.3.1.2.2 c) 所述的热缓冲层来达到上述条件，除非按 5.3.1.2.2 中的其他规定来模拟大锻件的适用冷却速率。

5.3.2.3.2 对于特厚且复杂的锻件，诸如异型接管、厚管板、法兰、接管、以及其他在热处理以前已成形或基本机加工到成品形状的复杂锻件，试件可取自产品的延长部分或产品的加工余量部位。使用期间承受高拉应力区应标识清楚。切取试件应使试样的纵轴离最近热处理表面的距离至少等于所规定的高拉应力表面到最近热处理表面的最大距离，且使试样长度的中线到其他热处理表面至少为此距离的两倍。在任何情况下，试样的纵轴到任何热处理的距离应至少为 19mm ，试样长度的中线到任何热处理表面至少为 38mm 。

5.3.2.3.3 代表同一炉号和同一热处理批号的锻件试件，可在单独锻造的试验锻件上切取，试验锻件的制造应满足下面 a) 到 e) 的条件：

- a) 单独的试验锻件应同它代表的产品锻件材料同炉号，且应经受相同的锻造比和加工过程；
- b) 单独的试验锻件应与产品锻件同装一炉，并经受与产品锻件相同的热处理条件；
- c) 单独的试验锻件应具有同产品锻件相同的名义厚度；
- d) 从简单锻件上切取试件时，应使试样的纵轴位于厚度之半到表面的中间部位，且使试样长度的中线到任何热处理边缘的距离不小于锻件的厚度，但当产品锻件的厚长比不允许时，则应采用产品锻件作为试验锻件，且试样长度的中线应位于试验锻件长度的中线上；
- e) 复杂锻件的试件应按 5.3.2.3.2 的规定切取。

5.3.2.3.4 在锻件上切取试样及对试样进行试验时需进行见证，在试样上打上标识，并做好记录。

5.3.2.4 试件的部位

5.3.2.4.1 棒材试件的切取应使试样的纵轴到外表面或轧制表面的距离不小于 $0.25t$ ，且使试样长度的中线到热处理端的距离至少为 t ，此处 t 为棒材的直径或厚度。

5.3.2.4.2 对于螺栓连接件材料，其试样长度的中线到热处理端的距离应不小于一倍直径。双头螺栓、螺母或螺栓不够长时，试样长度中线应位于双头螺栓、螺母或螺栓的中轴线，用于试件材料的双头螺栓、螺母或螺栓应与所代表的双头螺栓、螺母或螺栓有相同的淬火外形和除长度以外的尺寸，长度应等于或超过所代表的双头螺栓、螺母或螺栓。

5.3.2.5 管状制品和配件

5.3.2.5.1 试件的切取应使试样的纵轴到内表面或外表面的距离不小于 $0.25t$ ，且使试样长度的中线到热处理端的距离至少为 t ，此处 t 为管状制品的名义壁厚。

5.3.2.5.2 代表配件的试件可以单独制造。当采用单独生产的试件时，应满足 5.3.2.3.3 的要求。

5.3.2.6 拉伸试验试样的部位（淬火和回火铁素体钢铸件）

5.3.2.6.1 本标准仅适用于厚度超过 50mm 的淬火和回火的铁素体钢铸件。

5.3.2.6.2 下述条款之一应采用，本条所用 t 指铸件的承压壁厚：

- a) 拉伸试样厚度的纵向中心线至承压壁厚 t 表面的距离应不小于 $0.25t$ 。对于圆柱型铸件试样，其纵向中心线距外表面或内表面的距离不小于 $0.25t$ ，且其标距长度距热处理端表面至少为 t 。

- b) 当试件采用单独铸造时，其尺寸应不小于 $3t \times 3t \times t$ ，并且取自试件的每块试样应满足 5.3.2.6.2 的要求。试件应与其代表的产品铸件是同炉号，且应经受基本上与产品铸件相同的铸造操作（离心铸造可由静态浇注铸造试件来代表）。试件应经受产品铸件相同的热处理条件。试件尺寸 t 应是 5.3.2.6.1 定义相同的最大厚度 t 。在单独铸造的试件要求重新热处理情况下，可采用符合 5.3.2.6.2 的热缓冲层。
- c) 在试样取自铸件情况下，在热处理前，应将一个最小尺寸为 $1t \times 1t \times 3t$ 的钢制热缓冲层，用部分焊透焊缝焊接于铸件表面上，完全密封缓冲表面。试样应从此铸件邻近缓冲层中心 $1/3$ 处切取。它们距缓冲层表面至少应为 13mm ，并且距其他热处理表面 $0.25t$ 。
- d) 在试样取自铸件情况下，在热处理过程中，在邻近切取试样的铸件边缘应采用绝热措施或其他隔热垫板。应验证该试样的冷却速率不大于 5.3.2.6.2 a) 方法切取试样的冷却速率。
- e) 在热处理前已铸造成形或机加工到成品形状的铸件，试样应取自铸件的延长部分或由订单上指定的紧靠热处理表面下部的加工余量部位。试样纵轴离最近的热处理表面至少等于所规定的高拉应力表面到最近的热处理表面的最大距离，且试样长度中线到其他热处理表面至少为此距离的 2 倍。在任何情况下，试样的纵轴到任何热处理表面的距离不得小于 6mm ，并且试样长度的中线到任何其他热处理表面的距离至少为 38mm 。部件制造商应规定在使用中承受高拉应力的成品表面。

5.4 材料的断裂韧性要求

5.4.1 作冲击试验的材料

5.4.1.1 如果满足 5.2.1.1 c) 的要求，承压材料应按 5.4.3 的要求进行冲击试验，但下面 a) 到 h) 所述材料的冲击试验不属本标准要求：

- a) 名义厚度小于等于 16mm 的材料，对于不同形式及材料，名义厚度按下述 1) 到 4) 的规定：
 - 1) 对于容器，为适用的壳体或封头的名义厚度；
 - 2) 对于与容器焊接的接管或零件，为与零件相焊接的容器壳体厚度或零件的最大径向厚度，取两者中的较小值。不包括整体壳体对接焊缝的突出部分；
 - 3) 对于平封头、管板或法兰，为与对接焊接相连的毂部的最大壳体厚度；
 - 4) 对于将工艺管道焊接到安全壳容器上的整体配件，为与对接件中较大的名义壁厚。
- b) 名义尺寸小于等于 25mm 的螺栓连接件，包括双头螺栓、螺母和螺栓；
- c) 名义横截面面积小于等于 650mm^2 的棒材；
- d) 名义管径小于等于 $\text{DN}150$ 的各种厚度的管道、管子和配件等的材料；
- e) 带有名义壁厚小于等于 16mm 的各种管接头的配件材料；
- f) 奥氏体不锈钢；
- g) 非铁基材料；
- h) 表 7 中所列出的材料，这些材料的 T_{NDT} 值¹⁾ 低于按 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》附录 AB 规则所确定的最低使用温度（LST）²⁾。这种例外不能免除用冲击试验来评定焊缝金属（5.5.3）或焊接规程（7.3.3.4）。
- i) 最低使用温度超过 65°C 的部件用材料。

1) T_{NDT} ——温度等于或高于无延性转变温度 NDT（NB/T20004-20XX）， T_{NDT} 温度比至少有两个试样没有断裂的温度低 5.6°C 。

2) 金属的最低使用温度（LST）必须是在核动力装置运行期间设备使用中金属可能遇到的最低温度，必须根据周围的大气条件、所提供的绝热和封闭情况，以及核动力装置运行期间容器内部保持的最低温度，通过恰当的计算来确定金属的最低使用温度。

表7 按 5.4.1.1 h) 要求可不进行冲击试验的材料

材料 ^a	材料状态 ^b	$T_{NDT}^{c,d}$ (°C)
NB/T 20005.32《压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第32部分：安全壳用 15MnHR 钢板》	Q 和 T	-23
NB/T 20005.32《压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第32部分：安全壳用 15MnHR 钢板》	N	-18
<p>^a 当材料的 LST-T_{NDT} 按 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》附录 BB 到满足时，则这些材料可免除冲击试验。</p> <p>^b 表示材料状态的字母意义如下： N——正火； Q 和 T——淬火和回火； HR——热轧。</p> <p>^c T_{NDT} 数值是根据厚截面钢（厚度大于 64mm）数据确定的。在未取得更多数据以前，对于截面厚度小 64mm 的材料，T_{NDT} 数值作为常数。</p> <p>^d T_{NDT}——温度等于或高于无延性转变温度 NDT（NB/T 20004-2014；T_{NDT} 温度比至少有两个试样没有断裂的温度低 5°C。</p>		

5.4.1.2 设计单位应在设计图纸或其他技术文件中规定部件的最低使用温度。

5.4.1.3 马氏体高铬合金钢和沉淀硬化钢，不要求进行落锤试验。5.4.3.1 和 5.4.3.2 的其他要求对这些钢也是适用的。对于名义壁厚大于 64mm 的材料，所需的夏比 V 型缺口冲击试验值应为 1.0mm 横向膨胀量。

5.4.2 冲击试验规程

5.4.2.1 试验类型

5.4.2.1.1 应按 GB/T 6803 的规定进行落锤试验。当按 5.4 进行落锤试验时，试验温度和结果应记载在经确认的材料试验报告中。

5.4.2.1.2 应按 GB/T 229 的规定进行夏比 V 型缺口试验。一次试验应由一组三个横截面 10mm×10mm 的全尺寸试样组成。横向膨胀、吸收能量、试验温度、取样部位和方向均应满足 5.4.3 的要求，并记录在经确认的材料试验报告中。

5.4.2.2 试样

5.4.2.2.1 冲击试样应从材料表面以下一定深度的部位上切取，其深度应不小于相应材料技术条件中对拉伸试样规定的深度。对于螺栓连接件，切取缺口冲击试样时，应使试样的纵轴到表面的距离再加上每边的加工余量应至少等于半径的一半或 25mm 中取较小值。试样的断裂面到热处理端的距离应至少等于一倍直径或厚度。双头螺栓、螺母或螺栓不够长时，试样长度中线应位于双头螺栓、螺母或螺栓的

中线。用于试件材料的螺栓、螺母或螺栓应该受与所代表的双头螺栓、螺母或螺栓相同的淬火工艺和除长度以外的尺寸，长度应等于或超过所代表的双头螺栓、螺母、螺栓。

5.4.2.2.2 试样的方向

- a) 对于淬火和回火材料，冲击试样的取样方向，应符合 5.3.2 的要求，其他材料冲击试样的取样方向，应符合 GB/T 229 的规定。
- b) 落锤试验试样的轴线可取在任何方向。

5.4.3 试验要求和验收标准

5.4.3.1 承压材料的试验方法和试验温度

- a) 对承压材料进行的冲击试验可采用夏比 V 型缺口冲击试验或落锤试验中的任一种，采用夏比 V 型缺口冲击试验时，试验温度应等于或低于金属的最低使用温度。
- b) 当设计要求钢制安全壳的水压试验温度或气压试验温度低于金属的最低使用温度时，承压材料的冲击试验应按照上面 a) 的要求，在低于或等于规定的安全壳最低试验温度下进行。或者，规定金属的最低超压试验温度，按 5.4.2.1.2 的规定，但在比按照 5.4.3.3 规定的金属最低超压试验温度低 17°C 或更多的温度下进行夏比 V 型缺口冲击试验。

5.4.3.2 承压材料在金属的最低使用温度下试验的特殊试验方法和验收标准

5.4.3.2.1 最大厚度为 64mm 的承压材料（螺栓连接件材料除外）除了满足 7.3.3.4 的规定外，应按 5.4.3.1 a) 中规定的任一方法对母材按 7.3.3.4 的规定进行焊接工艺评定试验的母材、热影响区和焊缝金属及按 5.5.3.1 规定进行力学性能试验的焊缝金属进行试验。冲击试验的验收准则如下：

- a) 夏比 V 型缺口冲击试验的横向膨胀：三个试样的平均值和单个试样的试验结果都应符合表 8 的相应要求。
- b) 夏比 V 型缺口冲击试验的吸收能量值：三个试样的平均值和单个试样的试验结果都应符合表 9 的相应要求。
- c) 落锤试验：按 GB/T 6803 的规定进行试验时，应至少有两个试样没有断裂。

表8 承压材料（螺栓连接件除外）夏比 V 型缺口冲击试验的横向膨胀量

名义厚度t, (mm)	横向膨胀量, (mm) ^{a,b}	
	三个试样平均值	三个试样最低值
t≤16 ^c	...	...
16<t≤25	0.5	0.38
25<t≤38	0.64	0.5
38<t≤64	0.89	0.75
t>64 ^d	1.1	1.0
<div>^e 当按 5.5 的要求对焊缝金属进行试验时，冲击横向膨胀量应符合两种被连接母材中任一母材的要求； ^f 当具有两种不同规定横向膨胀的母材焊接在一起时，按 7.3.3 规定进行的焊接工艺规程评定试验的焊缝金属横向膨胀要求应符合任一母材的要求； ^g 不要求进行试验； ^h 适用于 5.4.3.2.2 b)。</div>		

表9 承压材料（螺栓连接件除外）夏比 V 型缺口冲击试验的吸收能量

名义厚度t, (mm)	不同屈服强度(MPa)母材的吸收能量值 ^{a,b} , (J)					
	≤ 380		$380 < \leq 520$		$520 < \leq 725$	
	三个试样平均值	三个试样最小值	三个试样平均值	三个试样最小值	三个试样平均值	三个试样最小值
$t \leq 16^c$	...	...	...	...	...	...
$16 < t \leq 25$	27	20	34	27	41	34
$25 < t \leq 38$	34	27	41	34	47	41
$38 < t \leq 64$	47	41	54	47	61	54
$t > 64^d$	61	54	68	61	75	68
ⁱ 当按 5.5 的要求对焊缝金属进行试验时，冲击横向膨胀量应符合两种被连接母材中任一母材的要求； ^j 当具有两种不同规定横向膨胀的母材焊接在一起时，按 7.3.3 规定进行的焊接工艺规程评定试验的焊缝金属横向膨胀要求应符合任一母材的要求； ^k 不要求进行试验； ^l 适用于 5.4.3.2.2 b)。						

5.4.3.2.2 厚度大于 64mm 的承压材料（螺栓连接件材料除外）

- a) 母材和按 7.3.3.4 规定进行焊接工艺评定试验的焊缝金属，应按 5.4.2.1.1 的规定进行落锤试验。
- b) 除满足 7.3.3.4 的规定外，应按 5.4.3.1 a) 中规定的任一方法对按 7.3.3.4 规定进行焊接工艺评定试验的母材、热影响区和焊缝金属及按 5.5.3.1 规定进行力学性能试验的焊缝金属进行试验。
- c) 验收准则同 5.4.3.2.1 规定的验收准则。

5.4.3.2.3 螺栓连接件材料（包括螺母、双头螺栓和螺栓）应进行夏比 V 型缺口冲击试验。试验可在金属的最低使用温度或在比金属的最低使用温度低至少 17℃ 的温度下进行试验。

- a) 当在金属的最低使用温度进行试验时，应确定横向膨胀量和吸收能量，所有三个试样的试验结果应满足表 10 要求。
- b) 当在比金属的最低使用温度低至少 17℃ 的温度进行试验时，应确定横向膨胀量和吸收能量，所有三个试样的试验结果都应满足表 11 的要求。

表10 螺栓连接件材料按 5.4.3.2.3 a) 试验时对夏比 V 型缺口冲击试验值的要求

名义直径D, mm	横向膨胀量, mm	吸收能量值, J
$D \leq 25$	不要求进行试验	不要求进行试验
$25 < D \leq 100$	0.6	不要求进行试验
$D > 100$	0.6	61

表11 螺栓连接件材料按 5.4.3.2.3 b)试验时对夏比 V 型缺口冲击试验值的要求

名义直径D, mm	横向膨胀量, mm	吸收能量值, J
D≤25	不要求进行试验	不要求进行试验
25<D≤100	0.38	41
D>100	0.5	47

5.4.3.3 承压材料在金属的最低超压试验温度下试验的特殊试验方法和验收标准

5.4.3.3.1 承压材料（螺栓连接件材料除外）应按 5.4.3.1 a）中规定的任一方法对母材按 7.3.3.4 规定进行焊接工艺评定试验的母材、热影响区和焊缝金属及按 5.5.3.1 规定进行力学性能试验的焊缝金属进行试验。试验的验收要求如表 12 所示。

表12 承压材料（螺栓连接件材料除外）进行超压试验时

对夏比 V 型缺口冲击试验吸收能量值要求

名义厚度t, (mm)	不同屈服强度(MPa) 母材的吸收能量值 ^{a,b} , (J)			
	≤415		>415	
	三个试样平均值	三个试样最小值	三个试样平均值	三个试样最小值
t≤16 ^c	...	...	...	...
t>16	20	14	27	20
<p>^a 当按 5.5 的要求对焊缝金属进行试验时，冲击横向膨胀应符合两种被连接母材中任一母材的要求；</p> <p>^b 当具有两种不同规定横向膨胀的母材焊接在一起时，按 7.3.3 规定进行的焊接工艺规程评定试验的焊缝金属横向膨胀要求应符合任一母材的要求；</p> <p>^c 不要求进行试验；</p>				

5.4.3.3.2 螺栓连接件材料（包括螺母、双头螺栓和螺栓），应进行夏比 V 型缺口冲击试验。应确定横向膨胀量和吸收能量值，所有三个试验的试验结果都应满足表 10 的要求。

5.4.4 冲击试验的次数

5.4.4.1 热处理的每块板材应进行一次试验。当板材以未热处理过的状态供货，而用热处理的试样进行评定时，每块轧制状态的板材应进行一次试验。

5.4.4.2 锻件和铸件的试验次数按下列规定：

- a) 当单个锻件或铸件的重量小于 450kg 时，每一热处理批次的每一炉号的制品应进行一次试验；

- b) 当热处理是在连续式热处理炉内进行, 炉内装有适当的温度控制设施和高温记录仪, 可以得到完整的热处理记录时, 一次热处理炉次应考虑为连续操作 8 小时内所处理的全部装载量或处理的总重量不超过 950kg 的制品, 取其中较小值;
- c) 单重为 450kg 到 4500kg 的锻件或铸件, 每件都应进行一次试验;
- d) 作为上述 c) 的替代方法, 如果锻件或铸件的试验件是代表热处理批的最大厚度, 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和铸件。此外, 试验锻件应经受与所代表锻件相同的锻造比和加工过程。
- e) 重量大于 4500kg 的锻件或铸件, 每件都应进行 2 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 型缺口冲击试样的部位, 应在锻件或铸件相隔 180°的部位上切取, 两个部位取的试样的数量应相等。
- f) 作为上述 e) 的替代方法, 对静态浇注的铸件, 可采用单独铸造试件; 夏比 V 型缺口冲击试验和落锤试验各做一次。

5.4.4.3 横截面面积大于 65mm² 的棒材, 每批应进行一次试验。每批指同一炉号同一次装炉热处理的材料, 或在一次连续热处理操作中所生产的重量不超过 2700kg 的棒材。

5.4.4.4 对于无缝的或不加填充金属焊接的制品, 每批应进行一次试验。对于加填充金属焊接的制品, 每批还应从焊缝区切取的试件上增加一次试样的试验。每批应在一次热处理装料, 或在连续热处理炉的同一次连续操作中进行, 热处理炉的温度变化范围控制在 28℃ 以内, 并装有高温记录仪。

5.4.4.5 每一批材料应进行一次试验。每批指同一炉号在同一装炉热处理的材料, 或在一次连续热处理操作中所生产的材料, 每批的重量应不超过下列规定: 直径≤44mm, 1650kg; 44mm<直径≤64mm, 1350kg; 64mm<直径≤125mm, 2700kg; 直径>125mm, 4500kg。

5.4.5 复试

5.4.5.1 材料的复试 (螺栓连接件除外)

- a) 对于 5.4.3 所要求的夏比 V 型缺口冲击试验, 在同一温度下可进行一次复试, 复试须满足下列条件:
 - 1) 试验结果的平均值应满足表 8、表 9 或表 12 中相应规定的三个试样的平均值;
 - 2) 每次试验中, 只能有一个试样小于表 8、表 9 或表 12 中相应规定的三个试样的最低值;
 - 3) 不满足最低值要求的试样, 应比表 8、表 9 或表 12 中相应规定的三个试样中一个的要求低于 6.8J 或 0.13mm。
- b) 每次复试取 2 个补充试样, 补充试样的切取尽可能靠近不合格试样的部位。2 个试样的试验结果都应等于或大于表 8、表 9 或表 12 中相应规定的 3 个试样的平均值, 复试才算合格。

5.4.5.2 螺栓连接件材料的复试

- a) 对于 5.4.3 要求的夏比 V 型缺口冲击试验, 在同一温度下可进行一次复试; 但应满足下述条件:
 - 1) 每次试验中, 只能有一个试样低于合格要求;
 - 2) 不满足合格要求的试样, 是同规定合格要求低于 6.8J 或 0.13mm 值以内。
- b) 每次复试取 2 个补充试样, 补充试样的切取尽可能靠近不合格试样的部位。当 2 个试样的试验结果都满足规定的合格要求时, 复试才算合格。

5.4.6 冲击试验使用的温度仪表和冲击试验机, 应按下面 a) 和 b) 规定的次数进行标定。

- a) 控制试样试验温度的温度仪表，至少应每隔三个月标定一次，并记录标定结果。
- b) 冲击试验机应每年至少标定一次，并记录标定结果。

5.5 焊接材料

5.5.1 通用要求

5.5.1.1 除用于硬质合金堆焊表面的焊接材料外，凡用于部件或材料的建造和修补的所有焊接材料，应符合本节和 5.2.4 中关于材料识别的要求，或团标焊接部分中允许使用其它焊接材料的规定。

5.5.1.2 制造单位应为进行试验的单位提供下列资料：

- a) 焊接工艺过程；
- b) 焊接材料技术规格书和级别；
- c) 如焊接材料技术规格书不适用，应提供其它鉴别方法；
- d) 焊后或热处理状态或两种状态下的最小抗拉强度；
- e) 材料在焊后或热处理状态或两种状态下的落锤试验；
- f) 材料在焊接或热处理状态或两种状态下的夏比 V 型缺口冲击试验，应提供试验温度和横向膨胀或吸收能量值；
- g) 当有焊接试件时，所采用的预热温度和层间温度；
- h) 如果焊缝要进行热处理，应提供焊后热处理时间、热处理温度范围和最大冷却速率；
- i) 每份焊接材料技术规格书或焊接工艺规程（WPS）和 5.5.3.2 要求进行化学分析的元素；
- j) δ 铁素体的最低含量要求。

5.5.2 要求试验的项目

5.5.2.1 对下列各类焊接材料应进行必要的试验：对每批次药皮焊条、管状焊丝或机制焊条；用于氧焰气焊（OFW）、熔化极气体保护焊（GMAW）、钨极气体保护电弧焊（GTAW）、等离子弧焊（PAW）和气体电立焊（EGW）等焊接工艺的每炉次光焊条、焊芯或焊丝；每炉次的熔化性嵌条；每炉次的光焊条和每批次埋弧焊焊剂的各种组合；或每批次机制焊条和每批次机制焊条的补充粉末填充金属干混合料以及每批次埋弧焊焊剂的各种组合；或每炉次的光焊条和每批次电渣焊焊剂的各种组合。如果按第 7 章和本节的要求进行了试验，且试验结果符合本章的要求，则在焊接工艺评定中的焊接材料试验，也就满足对所用的该批次、该炉次或该炉次同该批次组合的焊接材料的试验要求。

5.5.2.2 同一炉次药皮干混合料是指在一台搅拌器内一次混合的全部药皮干配料量；干混合料一次配制量可以一次使用，也可分成几份，再加入液体粘剂后配制成若干份湿混合料。

5.5.2.3 同一批次干混合料是指把一炉次或几炉次干混合料按比例配制在一台搅拌器内混合均匀全部混合料，其均匀程度等于在同一台搅拌器内一次混合同样数量干配料所得到的干混合料的均匀性。

5.5.2.4 湿混合料是指在同一炉次干混合料或同一批次干混合料中加入液体粘合剂，在一台搅拌器内一次混合配制成的混合料。

5.5.2.5 同一批次药皮焊条、管状焊丝或机制焊条是指用同一炉号的金属和同一次干配制量或同一批次干混合量或控制化学成分组合的焊剂或药芯材料混合物生产的全部焊条量。或者在连续生产情况下，可把连续 24 小时生产的同一型号的规格的药皮焊条、管状焊丝或机制焊条作为同一批次，每批次重量不得超过 45000kg，且采用控制化学成分管材、丝材或带材和一次干配料量、一次干混合量或控制化

学成分的焊药混合料制成的焊条。每箱焊接材料应编有识别标记，能查出焊接材料的生产时期、生产班次、生产线、以及制造焊条所用的混合料和棒材、管材或带材的化学分析范围。

- a) 控制化学成分的管材、丝材或带材是指成卷供应用作熔化极的管材、丝材或带材。每卷中最多只有一个接头，并且已进行化学分析以保证材料的化学成分符合焊材制造商所规定焊材型号的化学成分控制范围。应对每卷材料的两端进行化学分析，对没有接头的卷材只要求在每卷材料的一端进行化学分析。
- b) 控制化学成分的焊剂混合料是指已进行化学分析的焊药混合料，保证它的每个化学元素都符合焊条制造标准所规定型号的焊条允许偏差的百分率。对每台搅拌器内混合后的每一批次混合料应进行一次化学分析。

5.5.2.6 同一炉次的光焊条、焊芯、焊丝或熔化性嵌条是指由同一炉次熔炼出的金属制成的材料。

5.5.2.7 对埋弧焊（SAW）、氧焰气焊（OFW）、熔化极气体保护焊（GMAW）、钨极气体保护电弧焊（GTAW）、等离子弧焊（PAW）和气电立焊（EGW）等焊接工艺所使用的碳钢和低合金钢光焊条、焊芯、焊丝或熔化性嵌条，每一炉次是指用同一炉次金属熔炼所生产的材料，也可以指在连续生产期间即不超过 24 小时，不超过 45000kg，用同一型号和规格并控制化学成分的焊丝制成的材料，但要遵守下面 a）、b）和 c）的要求：

- a) 对于轧制焊芯产品的化学成分控制是在拉丝前，每卷材料应限制最多一个接头。化学分析试样应从轧制成每卷焊芯材料的两端切取，每卷焊芯材料只需从一端取样进行化学分析。
- b) 对于碳、锰、硅和其它有意添加的各种元素应予以鉴别，以保证材料符合焊接材料技术规格书或用户的材料技术条件的要求。
- c) 每箱焊丝应编有识别标记，能跟踪焊丝的批次、生产时期、生产班次、生产线、以及制造焊丝所用的焊芯化学分析成分范围。

5.5.2.8 同一批次埋弧焊或电渣焊剂是指由相同的原材料组合按同一种生产工艺流程生产的全部焊剂。

5.5.2.9 同一批补充粉状填充金属的干混合料是指在连续生产的情况下（不超过 24 小时，不超过 9000kg）由控制化学成分的粉状填充金属混合料生产的，每一箱粉状填充金属应编有识别标记，能跟踪混合料的生产时期、生产班次和搅拌器。同一批粉状填充金属的控制化学成分的混合料的定义是指已进行过化学分析的粉状填充金属材料，应保证它的每个化学元素都符合粉状填充金属制造标准规定的该型号粉状填充金属的每一化学元素百分率容许偏差的粉状填充金属材料。同一单独搅拌器在每批次的混合料应作一次化学分析。补充粉状填充金属的化学成分范围应与焊条一致。用于制造试块的焊条和粉状金属的比值，应该包括产品焊接中最大的允许量。

5.5.3 焊缝金属试验

5.5.3.1 力学性能试验

5.5.3.1.1 焊接材料应按本条规定进行拉伸试验和冲击试验，但下面 a）到 d）列举的情况除外：

- a) 使用奥氏体不锈钢焊接材料和非铁基焊接材料；
- b) 熔化性嵌条（封底的填充材料）；
- c) 用于钨极气体保护电弧焊 GTAW 根部熔敷最多为两层的焊接材料；
- d) 当被焊接的母材按 5.4.1.1 的规定可免除冲击试验时，焊接材料也可免除本条所要求的冲击试验。

5.5.3.1.2 焊接试件应按下面 a) 到 f) 的规定制成:

- a) 试件应有足够的尺寸和厚度, 以便能切取到所需的试样。
- b) 所有焊接工艺过程中(电渣焊除外)试验使用焊缝金属的熔敷方式, 应基本能消除母材对试验结果的影响。
- c) 试件焊接时, 应在产品焊接所采用的预热温度和层间温度范围内进行。试件应在焊后状态下进行试验。当产品焊缝要进行焊后热处理时, 试件应在适用的焊后热处理状态下进行试验。焊后热处理的保温时间至少应为产品焊缝金属的最长热处理时间的 80%。试件焊后热处理温度的总时间可用一次加热循环来完成。从焊后热处理温度开始的冷却速率, 应同部件中适用的焊缝金属基本相同。此外, 采用电渣焊工艺过程所用焊缝金属的焊接试件, 应在焊后状态下进行试验, 或按产品规定的保温时间范围内进行的焊后热处理状态下进行试验, 其厚度应取产品中焊缝厚度的 0.5~1.1 倍。要在焊后热处理后进行试验的电渣焊焊缝试件厚度应取产品中焊缝厚度的 0.9~1.1 倍。
- d) 当要求进行拉伸试验和冲击试验时, 不论何种焊接工艺或受试的是何种焊接材料, 试样的部位和制备均应按焊接材料技术规格书的要求进行。当要求进行落锤冲击试验的试样, 应将纵轴垂直于焊缝, 试样的缺口应在焊缝表面上, 或在平行于焊缝表面的平面上。对于冲击试样的制备和试验, 应分别符合 5.4.2.1.1 和 5.4.2.1.2 的相应要求。试样纵轴到表面的距离至少应为 0.25t, 此处 t 为试验焊缝的厚度。
- e) 一个全焊缝金属的拉伸试样应进行试验, 并应满足母材技术规格书所规定的抗拉强度最低要求。当两种规格不同的母材焊接时, 抗拉强度的要求, 应符合其中任一种母材技术规格书所规定的最低抗拉强度要求。
- f) 当产品焊缝的两种母材中任一种要求进行冲击试验时, 该焊缝金属也必须进行冲击试验。焊缝金属必须符合 5.4.3.2.1、5.4.3.2.2 或 5.4.3.2.3 的相应要求。

5.5.3.1.3 当低碳钢和低合金钢药皮焊条要求进行拉伸和冲击试验时, 可按本条的规定进行试验, 以代替 5.5.3.1.1 所规定的通用试验要求; 5.5.3.1 中列出的要求进行焊缝材料试验的各种材料组合, 应使用本标准试验要求作选择。本标准试验选项的限制和试验方法应符合下面 a) 到 f) 的规定。

- a) 按本条要求进行的试验, 应限于碳钢或低合金钢焊接材料技术规格书所包括的各类焊条。
- b) 如适用时, 应按碳钢或低合金钢焊接材料技术规格书所规定的相应试验组件来制备试件, 除此以外相应增加试验组件的尺寸, 以切取按 5.4.3.1 足够数量的冲击试样或落锤试样。
- c) 试件的焊接应符合焊接材料技术规格书对所试验的各类焊条提出的要求。试件应在焊后状态下和在焊后热处理状态下进行试验。焊后热处理温度应符合表 22 的规定。在焊后热处理温度下的保温时间应为 8 小时(则评定焊后热处理温度下的保温时间就限制在 10 小时以内)。当产品焊缝的焊后热处理时间超过 10 小时, 或焊后热处理温度不采用上述规定时, 应采用 5.5.3.1.1 的通用试验要求。
- d) 拉伸试样和冲击试样的部位和制备应符合碳钢或低合金钢焊接材料技术规格书的相应要求。当要求进行落锤冲击试验时, 试样的部位和取向应按 5.5.3.1.1 d) 的规定。
- e) 取一个全焊缝金属的拉伸试样应进行试验, 以及应满足焊接材料技术规格书对有关各类焊条的抗拉强度最低要求。
- f) 冲击试验应满足 5.5.3.1.1 f) 对冲击试验的要求。

5.5.3.2 化学分析试验

5.5.3.2.1 化学分析试验应按本条和表 13 的要求进行, 试验结果应符合 5.5.3.2.2 规定。

- a) 对于钨极气体保护电弧焊（GTAW）和等离子弧焊（PAW）过程所采用的奥氏体不锈钢焊接材料，以及钨极气体保护电弧焊（GTAW），等离子弧焊（PAW）或溶化极气体保护焊（GMAW）过程所采用的其他焊接材料，可对填充金属，也可对焊缝熔敷金属进行化学分析。焊缝熔敷金属应按下面 c) 或 d) 的规定用填充金属焊制。
- b) 对于钨极气体保护电弧焊（GTAW）的等离子弧焊（PAW）以外的其他焊接方法所使用的奥氏体不锈钢焊接材料，以及除钨极气体保护电弧焊（GTAW）、等离子弧焊（PAW）或溶化极气体保护焊以外的其他焊接方法所用的其他焊接材料，应按下列 c) 和 d) 的规定对鉴定合格的材料或材料组合的焊缝熔敷金属进行化学分析。化学分析试样应从按下面 c) 的规定制备而未稀释的焊缝熔敷金属上切取。另一种方法是，对于耐蚀堆焊层可按照下面 d) 的规定来堆敷所用的焊接材料。当焊接工艺评定或焊接材料技术规格书规定化学成分百分比限制时，应说明根据上述的要求的合格试验，所规定的化学成分限制适用于填充金属分析和未稀释焊缝熔敷金属分析，或适用于现场堆焊的熔敷金属分析。
- c) 未稀释焊缝熔敷金属的化学分析试样的制备，应遵照适用的焊接材料技术规格书规定的方法。当焊接材料技术未规定焊缝的熔敷方法时，试样可以从焊接垫板、焊缝坡口或其他试验焊缝上切取。焊接垫板、焊缝坡口或其他试验焊缝，应将是以后采用被确认的焊接材料或焊接材料的组合所使用的焊接过程相同。当用溶化极气体保护焊或气电立焊焊接奥氏体不锈钢材料时，保护气体的成分应符合焊接工艺规程的规定，它将是以后生产中所用的气体成分。电渣焊的试样应从力学性试件的焊缝金属上切取。当焊接材料要求进行化学分析但不要求进行力学性能试验时，则化学分析的试件应按 5.5.3.1.1 c) 的要求制备，但对试件热处理不作要求，以及按 5.5.3.1.1 c) 规定的焊接试件厚度要求不适用的情况除外。
- d) 对于耐蚀堆焊层所用的焊接材料，上面 b) 中还规定了另一种化学分析试样的制备方法，在焊制试验焊缝时，应采用焊接工艺规程中关于溶化焊接材料时的基本参数。试验焊缝的制备和化学成分分析应符合焊接工艺评定的要求。

表13 焊接材料的化学分析取样

	钨极气体保护电弧焊/等离子弧焊(GTAW/PAW)	溶化极气体保护焊(GMAW)	其他各种焊接方法
铬-镍填充金属	填充金属或焊缝熔敷金属	焊缝熔敷金属	焊缝熔敷金属
其他各种填充金属	填充金属或焊缝熔敷金属	填充金属或焊缝熔敷金属	焊缝熔敷金属

5.5.3.2.2 要测定的化学元素、焊缝金属的成分要求、以及化学分析结果的记录应符合下面 a)、b) 和 c) 的规定。

- a) 对铁基合金奥氏体不锈钢焊接材料，应按表 14 中所列各个元素，以及焊接工艺规程中注明的焊接材料规格或焊接工艺规程所规定的任何其他元素。
- b) 焊缝金属或填充金属的化学成分应符合焊接材料规格所规定的元素成分百分数的限制。当焊接工艺规程对焊接材料的成分限制有修改时，或增加其他元素的成份限制时，在焊接工艺规程中的这些成分限制的可接受性应申请批准。
- c) 化学分析的结果应反映在材料试验报告中。对于表 14 中列出的但在焊接材料规格或焊接工艺规程中未规定的各个元素仅作为数据应予以记录。

表14 焊接材料的化学分析

铬-镍不锈钢材料	C, Cr, Mo, Ni, Mn, Si, Cb
----------	---------------------------

5.5.3.3 δ 铁素体含量测定

5.5.3.3.1 对于奥氏体不锈钢焊接材料应进行 δ 铁素体含量测定：衬垫填充金属（熔化性嵌条）、光焊条、焊芯或填充焊丝、或焊缝金属应测定 δ 铁素体含量，对于奥氏体不锈钢焊条中的 16-8-2 型焊缝填充金属，或对于焊缝金属堆焊层使用的奥氏体不锈钢焊缝填充金属，不要求测定其 δ 铁素体含量。

5.5.3.3.2 焊接材料（包括熔化性嵌条材料）的 δ 铁素体含量应采用磁性测量仪进行测量，而焊缝熔敷金属应按下面 b）的规定焊接。或用 5.5.3.2 的化学分析方法，并结合图 6 来确定焊接材料的 δ 铁素体含量。

- a) 磁性测量仪应按 GB/T 1954 的规定进行标定。
- b) 用磁性法测定 δ 铁素体含量的焊缝熔敷金属应按 5.5.3.2.1 c) 的规定进行焊接。
- c) 在焊缝熔敷金属表面上，至少应测取 6 个铁素体含量的读数。但记录的铁素体含量（FN）为这些所得读数的平均值。

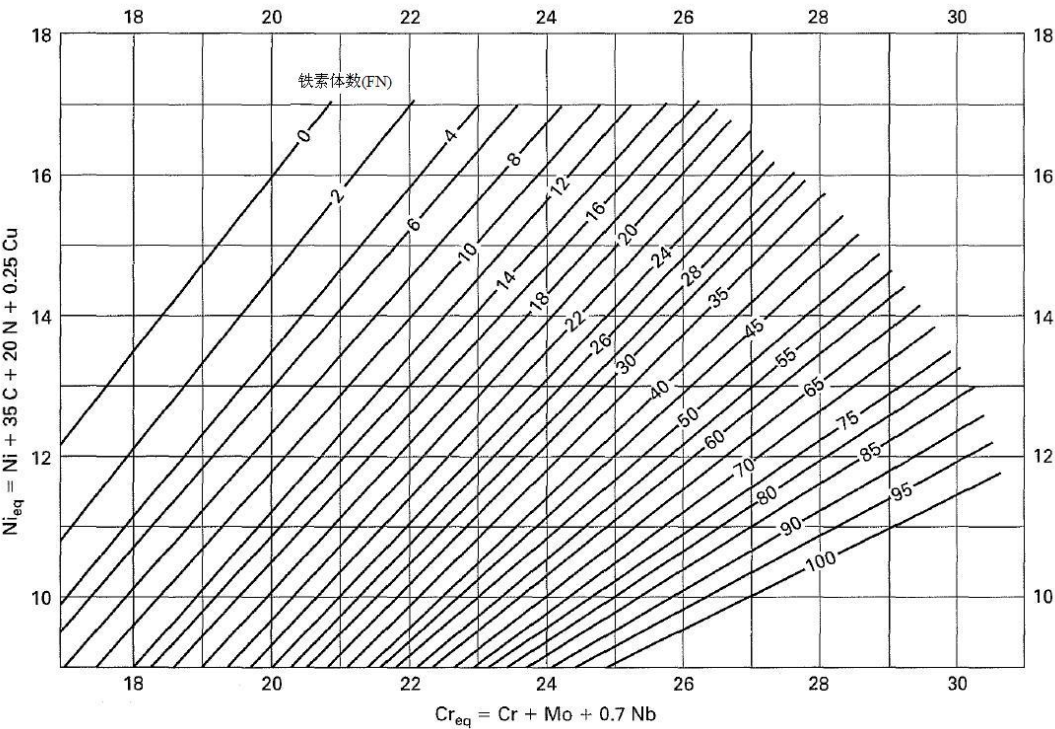


图6 焊缝材料 δ 铁素体含量

5.5.3.3.3 δ 铁素体的最低可接受值应为 5FN（铁素体含量 5 级）。δ 铁素体含量测定结果应记入经确认的材料试验报告中。

5.5.4 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、管状焊丝和药皮焊条的受潮。

5.6 承压材料的检测和修补

5.6.1 板材的检测和修补

5.6.1.1 制造时应按下面 a)、b) 和 c) 规定的时机进行验收检测。

- a) 材料技术条件所要求的检测项目，应按材料技术条件的规定在制造时进行；
- b) 当要求对修补焊缝进行射线照相检测时，可在任何要求的焊后热处理以前进行；
- c) 修补焊缝的磁粉检验或液体渗透检测，应在任何要求的焊后热处理以后进行。

5.6.1.2 表面缺陷应采用打磨或机加工的方法清除，但需满足下面 a) 和 b) 的要求。

- a) 缺陷清除后，表面凹陷应与周围表面平滑过渡。
- b) 缺陷清除后，如果截面厚度减少到第 6 章所要求的最小厚度时，材料应按照 5.6.2.4 的规定进行修补。

5.6.1.3 材料可在清除缺陷后用焊接材料进行修补，但消除缺陷后的修补深度不得超过材料名义厚度的三分之一，且修补应满足下列各款要求：

- a) 应采用适当的机械切削、热切割或刨削等方法清除缺陷，或将缺陷减小到可接受范围以内，并将凹坑按 7.2.2 的规定做好补焊准备；
- b) 焊接工艺、焊工或焊接操作工应按照第 7 章的规定进行评定和考核；
- c) 修补后的表面应与周围表面平滑过渡；
- d) 每条修补焊缝应采用磁粉法（5.6.3.2）或液体渗透法（5.6.3.3）进行检测。此外，当修补凹坑的深度超过 10mm 或截面厚度的 10% 中的较小值时，修补焊缝应按第 8 章的规定及相应的验收标准进行射线检测。透度计应以修补区域的截面厚度为基准；
- e) 产品修补后应按照 7.5.2 的要求进行热处理。
- f) 每个修补缺陷，均应记载在经确认的材料试验报告中。每个修补件的经确认的材料试验报告应包括下列内容：一份表明修补凹坑位置和尺寸的简图、焊接材料鉴别、焊接工艺、热处理以及一份包括射线底片的检测结果报告。

5.6.2 锻件和棒材的检测和修补

5.6.2.1 要求的检测

锻件和棒材应按本标准的要求进行检测，当按本标准的要求进行磁粉检测或液体渗透检测时，检测应符合 5.6.3.2 或 5.6.3.3 的相应要求。

5.6.2.2 磁粉检测

5.6.2.2.1 检测要求

磁粉检测规程应符合 T/CNEA XXX. 5-XXXX《压水堆承压部件 无损检测 第 5 部分：磁粉检测》的方法。

5.6.2.2.2 显示的评定

- a) 凡超过 5.6.3.2.3 验收标准的任何显示，即使认为与缺陷无关仍应作为缺陷，应用相同的或其他的无损检测方法进行复查，以验证是否存在真正的缺陷。复查前可先进行表面修整，凡会掩盖缺陷显示的无关显示均是不可接受的。

- b) 相关显示是指由缺陷产生的显示；线状显示是指长度大于 3 倍宽度的显示；圆形显示是指圆形的或长度小于或等于 3 倍宽度的椭圆形显示。

5.6.2.2.3 验收标准

- a) 主要尺寸大于 1.5mm 的缺陷显示都认为是相关缺陷。
- b) 符合下列的相关显示为不可接受：
 - 1) 长度大于下述规定的线状显示：材料厚度小于 16mm 时，长度大于 1.5mm 的线状显示；材料厚度介于 16mm 到 50mm 以下时，长度大于 3mm 的线状显示；材料厚度等于和大于 50mm 时，长度大于 5mm 的线状显示；
 - 2) 尺寸大于下述规定的圆形显示：材料厚度小于 16mm 时，尺寸大于 3mm 的圆形显示；材料厚度等于和大于 16mm 时，显示尺寸大于 5mm。
 - 3) 边缘之间距离等于或小于 1.5mm 在一条直线上，有 4 个或更多个相关显示。
 - 4) 在需评定相关显示最密集部位，其任意面积为 4000mm²，最大尺寸不大于 150mm 的区域内，有十个或更多个相关显示。

5.6.2.3 液体渗透检测

5.6.2.3.1 检测要求

液体渗透检测规程应符合 T/CNEA XXX. 4-XXXX《压水堆承压部件 无损检测 第4部分：渗透检测》的方法。

5.6.2.3.2 显示的评定

- a) 超过 5.6.3.3.3 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以及大面积渗透剂沉淀，都是不可接受的。
- b) 相关显示是指由缺陷引起的显示；线状显示是指长度大于 3 倍宽度的显示；圆形显示是指圆形的显示或长度小于 3 倍宽度的椭圆形显示。

5.6.2.3.3 验收标准

- a) 主要尺寸大于 1.5mm 的缺陷显示都认为是相关缺陷。
- b) 符合下列的相关显示为不可接受：
 - 1) 长度大于下述规定的线状显示：材料厚度小于 16mm 时，长度大于 1.5mm 的线状显示；材料厚度介于 16mm 到 50mm 以下时，长度大于 3mm 的线状显示；材料厚度等于和大于 50mm 时，长度大于 5mm 的线状显示。
 - 2) 尺寸大于下述规定的圆形显示：材料厚度小于 16mm 时，尺寸大于 3mm 的圆形显示；材料厚度等于或大于 16mm 时，尺寸大于 5mm 的圆形显示。
 - 3) 边界间距离等于或小于 1.5mm。一条直线上有 4 个或更多个的相关显示。
 - 4) 在需评定相关显示最密集部位的任意面积为 4000mm² 其最大尺寸不大于 150mm 的区域内，有十个或更多个相关显示。

5.6.2.4 检测时间

对检测时间的要求应与 5.6.2.2 的规定相同。

5.6.2.5 表面缺陷的清除

表面缺陷应按5.6.2.3的规定进行清除。

5.6.2.6 焊接修补

对焊接修补的要求应与5.6.2.4的规定相同，但允许修补的深度不受限制。

5.6.3 无缝以及焊接（不加填充金属）管状制品和配件的检测与修补

5.6.3.1 要求的检测

- a) 锻轧无缝管状制品和配件应符合 5.6.4.5、5.6.4.6、5.6.4.7 的要求。
- b) 焊接（不加填充金属）管状制品和配件应符合 5.6.4.5、5.6.4.6、5.6.4.7 的要求；并且焊缝应用下列方法之一进行检测：
 - 1) 按 5.6.4.2 进行超声检测；
 - 2) 按 5.6.4.4 进行涡流检测；
 - 3) 按 5.6.4.3 进行射线检测。

5.6.3.2 超声检测

5.6.3.2.1 管道和管子焊缝的检测规程

- a) 外径小于等于 171mm 的管道和管子(环向)：管道和管子上焊缝的检测应在两个圆周方向上进行。管道和管子在圆周方向的超声检测规程应满足本条要求。规程应提供一个灵敏度始终如一地探测缺陷，该缺陷的显示等于或大于 5.6.4.2.3 规定的校准试样的标准缺陷产生的显示。
- b) 外径大于 171mm 的管道和管子：管道和管子上焊缝检测应在两个圆周方向上进行。大于 171mm 外径的管道和管子超声检测规程，圆周方向的斜射法扫查应符合 JB/T 8467 的规定，标准试样应符合 5.6.4.2.3 的规定。
- c) 超过校准试样中的标准缺陷显示范围时，该缺陷显示的产品为不可接受，除非按 5.6.4.6 或 5.6.4.7 对缺陷进行清除或修补。

5.6.3.2.2 配件焊缝的检测规程

- a) 配件焊缝的超声检测规程应按 JB/T 8467 规定方法的要求在两个周向进行斜射法扫查检测。
- b) 如果斜射法扫查检测结果表明，一个或更多个反射体所产生的显示波幅超过由标定切口产生的显示波幅时，这种配件是不可接受的。

5.6.3.2.3 校准试样

- a) 校准试样应与被检产品具有相同的名义直径、厚度、热处理状态和相同的材质或相似的声学性能。进行周向检测时，标准缺陷应是位于校准试样内、外表面的轴向切口或切槽，并且长度应等于或小于 25mm，及宽度在切口为方型或 U 型时不超过 1.5mm，宽度在切口为 V 型时与深度成正比，且深度不大于 0.10mm 或 5% 的名义壁厚中的较大值。
- b) 校准试样应有足够长度以使其能模拟被检产品通过检测装置时的操作。如果校准试样中设置一个以上的标准缺陷时，这些缺陷的设置应保证每个缺陷产生的显示分开而清晰，不至相互干扰或增强。应去除所有突起金属及切口附近的毛刺。

5.6.3.2.4 对检测装置的正常功能应进行校验，并且应使用校准试样对其进行标定。如果在校验时确认检测装置工作出现不正常，则自装置最近有效标定以来所有检测过的产品均应重检。校验和标定至少在以下时间进行：

- a) 材料生产所给定的尺寸和厚度的产品，在每个生产过程的开始时；
- b) 在同一生产过程中每隔 4 小时或更短时间间隔后；
- c) 在同一生产过程的末尾；
- d) 在怀疑操作失常的任何时候。

5.6.3.3 射线检验

- a) 用射线检验代替对材料整个体积的超声检测，该方法应适用于管道、管子或配件材料的整个体积。并将对焊缝所规定的验收标准应适用于材料的整个体积检测。
- b) 射线检测应按 T/CNEA XXX.3-XXXX《压水堆承压部件 无损检测 第 3 部分：射线检测》的规程进行并按 8.1.1 进行修正。
- c) 经射线检测具有下列类型的不连续缺陷的焊缝为不可接受：
 - 1) 任何型式的裂纹或未熔合、未焊透区；
 - 2) 长度大于下述值的任何条状显示：6mm，当 $t \leq 19\text{mm}$ 时；8mm，当 $19\text{mm} < t \leq 32\text{mm}$ 时；19mm，当 $t > 32\text{mm}$ 时。这里 t 是指焊缝较薄部分的厚度。
 - 3) 在长度为 $12t$ 的焊缝上，任何一组总长大于 t 的链状显示均为不可接受，除非在连续显示之间的最小间距超过 $6L$ （这种情况下总长度是不受限制的）。 L 是该组显示中最长显示长度。
 - 4) 超过 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》附录 F 中规定的可接受的圆形显示。

注：当一列四个以上的圆形显示与穿过两个外侧圆形显示的中心所画的平行于焊缝长度的直线相接触时应认为是链形显示。

5.6.3.4 涡流检测

5.6.3.4.1 涡流检测规程所提供的灵敏度应与拟探测缺陷的灵敏度始终相一致，办法是将后者与 5.6.4.2.3 中所规定校准试样内的标准缺陷作比较。有缺陷的产品产生的缺陷显示超过标准缺陷显示时则判为不可接受，除非此缺陷按 5.6.4.6 或 5.6.4.7 的规定清除或修补后方可验收合格。

5.6.3.4.2 标准试样的名义直径、厚度、标称的化学成分以及热处理状态应与被检产品相同。校准试样应包括外表面开有切线方向或周向的切口，此外还应开有直径为 1.5mm 的穿壁孔。这些切口和穿壁孔将用来建立对产品的判废标准。校准切口的深度不得大于 0.10mm 或 5%壁厚中的较大值。切口宽度不大于 1.5mm，长度约为小于或等于 25mm。校准试样的尺寸应按 5.6.4.2.3 的规定。

5.6.3.4.3 检测装置的校验和标定应与 5.6.4.2.4 要求相同。

5.6.3.5 检测时间

- a) 淬火和回火产品应在淬火和回火热处理后按要求进行检测。
- b) 非淬火和回火产品应按下列要求进行检测：
 - 1) 当有要求时，应在最终热处理（焊后热处理除外）之后进行超声波检测或涡流检测；
 - 2) 当有要求时，可在任一要求的焊后热处理之前进行射线检测；

- 3) 在最终热处理之后,应对包括补焊焊缝在内的所有焊缝进行磁粉或液体渗透检验,但对名义厚度等于或小于 50mm 的材料可在焊后热处理之前进行检测。
- 4) 镗孔或车削方法将锻件和轧制棒材制成的管状零件或配件,应在镗孔和(或)车削后进行检测(车制螺纹除外)。配件的检验应在最终成形之后进行。
- 5) 当要求表面检测时,所有外表面和可接近内表面都应检测(螺栓孔和螺纹除外)。

5.6.3.6 表面缺陷清除的规定

表面缺陷应采用打磨或机加工的方法清除,但需满足下列a)到c)的要求:

- a) 缺陷清除后,表面凹陷应与周围表面平滑过渡。
- b) 缺陷清除后,此区域应采用原来发现缺陷的方法再作检测以确保缺陷已被清除或减小到可接受的尺寸。
- c) 缺陷清除后,如果产品的截面厚度小于第 6 章要求的最小厚度,应按 5.6.4.7 进行修补。

5.6.3.7 焊接修补的规定

缺陷的修补应按 5.6.2.4 的规定进行。

5.6.4 填充金属焊接的管状制品和配件的检测和修补

5.6.4.1 检测要求

- a) 加填充金属焊接的管状制品应作为材料处理。
- b) 加填充金属焊接的管件和管件配件应对所有焊缝进行 100%射线检测。验收要求同母材的射线检测验收要求,若母材未规定射线检测,焊缝应按 5.6.5.2 进行检测。
- c) 做过射线检测的管状制品和配件应做好标记以表明进行了射线检测。射线检测的底片以及说明底片位置的射线检测报告,应随同被确认的材料试验报告一起提供。

5.6.4.2 射线检测应按 5.6.4.3 的要求进行。

5.6.4.3 检测时间应符合 5.6.4.5 的要求。

5.6.4.4 不可接受的表面缺陷应按 5.6.4.6 的要求清除。

5.6.4.5 母材中的缺陷应按 5.6.4.7 的要求进行修补。焊接缺陷的补焊应按 7.4.4 的要求进行。

6 设计

6.1 设计原则

6.1.1 钢制安全壳结构基本尺寸应满足公式法设计要求。在各种荷载组合工况下,应对钢制安全壳整体结构进行充分的应力分析确保满足分析法设计限制要求。

6.1.2 钢制安全壳结构局部开孔应满足开孔补强设计要求。在各种荷载组合工况下,应对钢制安全壳局部结构进行充分的应力分析确保满足分析法设计限制要求。

6.1.3 钢制安全壳变形计算应符合本标准规定的任何变形限制,防止发生过大变形而导致与相邻构筑物碰撞、贯穿件破坏或管道处发生泄漏。

6.1.4 钢制安全壳或其部件所经受的每一种荷载应按下列使用限制进行分类。使用限制定义为下述四种情况：

- a) A 级使用限制适用于与钢制安全壳功能所要求的电厂或系统设计基准事故荷载相组合的所有持续荷载；
- b) B 级使用限制适用于承受 A 级使用限制的荷载，并与为电厂继续保持运行的自然现象所引起的外加荷载进行组合；
- c) C 级使用限制适用于承受 A 级和 B 级使用限制的荷载，并与要求电厂安全停堆的自然现象引起的外加荷载进行组合；
- d) D 级使用限制适用于承受其他使用限制的荷载，并与安全壳功能所要求的局部动态性质的荷载进行组合，如由假想管道断裂引起的向外喷射、管道甩动及管道的反作用力等。

6.1.5 钢制安全壳或其部件设计时应考虑下列荷载组合（如适用）：

- a) 试验工况

$$D+L+T_t+P_t \dots\dots\dots(1)$$

- b) 设计工况

$$D+L+P_i+T_a+R_a\dots\dots\dots(2)$$

- c) 运行工况

- 1) A 级使用限制

$$D+L+P_o+T_o+R_o \dots\dots\dots(3)$$

$$D+L+P_s+T_s+R_s\dots\dots\dots(4)$$

$$D+L+P_i+T_a+R_a\dots\dots\dots(5)$$

$$D+L+P_i+T_a+R_a+P_s+T_s+R_s \dots\dots\dots(6)$$

$$D+L+P_o+T_o+R_o+P_{g3}\dots\dots\dots(7)$$

$$D+1.1P_{g3}\dots\dots\dots(8)$$

- 2) B 级使用限制

$$D+L+P_i+T_a+R_a+E_1\dots\dots\dots(9)$$

$$D+L+P_o+T_o+R_o+E_1 \dots\dots\dots(10)$$

$$D+L+P_s+T_s+R_s+E_1\dots\dots\dots(11)$$

$$D+L+P_i+T_a+R_a+P_s+T_s+R_s \dots\dots\dots(12)$$

- 3) C 级使用限制

$$D+L+P_i+T_a+R_a+E_2\dots\dots\dots(13)$$

$$D+L+P_o+T_o+R_o+E_2 \dots\dots\dots (14)$$

$$D+L+P_i+T_a+R_a+P_s+T_s+R_s+E_2 \dots\dots\dots (15)$$

$$D+P_{g1}+P_{g2} \dots\dots\dots (16)$$

$$D+P_{g1}+P_{g3} \dots\dots\dots (17)$$

4) D 级使用限制

$$D+L+P_i+T_a+R_a+Y_r+Y_j+Y_m+E_2 \dots\dots\dots (18)$$

$$D+L+P_i+T_a+R_a+Y_r+Y_j+Y_m+P_s+T_s+R_s+E_2 \dots\dots\dots (19)$$

$$D+L+F_L+E_1 \dots\dots\dots (20)$$

注：符号定义详见3.2节。

6.1.6 本章适用于壳体半径与壁厚比值小于 1000 的结构，分析计算中所有部件基本尺寸均不包括腐蚀裕量在内。

6.2 公式法设计

6.2.1 内压设计

6.2.1.1 基本规定

6.2.1.1.1 本节适用于钢制安全壳承受内压荷载作用下的设计，任何构造和荷载都应满足本节的规定。

6.2.1.1.2 钢制安全壳筒身结构宜设计成圆筒形或球形壳体，封头宜设计成半球形、椭圆形或碟形。

6.2.1.1.3 内压设计采用的许用应力值 S_{IF} 为表 B.1 中选用钢材的许用应力值的 1.1 倍，且不超过表 B.6 中相应温度下材料屈服强度值的 90%。

6.2.1.2 圆筒形壳体

圆筒形壳体所需的最小厚度 t 应取下列 a) 到 c) 中的较大值：

a) 环向应力(纵向接头)

当圆筒形壳体厚度不超过内半径 R 之半，或设计内压 P_i 不超过 $0.385S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t = \frac{P_i R}{S_{IF} - 0.6P_i} \dots\dots\dots (21)$$

b) 纵向应力(环向接头)

当圆筒形壳体厚度不超过内半径 R 之半，或设计内压 P_i 不超过 $1.25S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t = \frac{P_i R}{2S_{IF} + 0.4P_i} \dots\dots\dots (22)$$

c) 厚壁圆筒形壳体

1) 环向应力（纵向接头），当承受内压的圆筒形壳体厚度超过内半径 R 之半，或设计内压 P_i 超过 $0.385S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=R(Z^{1/2}-1) \dots\dots\dots(23)$$

式中 $Z=\frac{(S_{IF}+P_i)}{(S_{IF}-P_i)}$ 。

- 2) 纵向应力（环向接头），当承受内压的圆筒形壳体厚度超过内半径 R 之半，或设计内压 P_i 超过 $1.25S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=R(Z^{1/2}-1) \dots\dots\dots(24)$$

式中 $Z=\left(\frac{P_i}{S_{IF}}+1\right)$ 。

6.2.1.3 球形壳体

- a) 当球形壳体厚度不超过 $0.356R$ ，或设计内压 P_i 不超过 $0.665S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=\frac{P_i R}{2S_{IF}-0.2P_i} \dots\dots\dots(25)$$

- b) 当球形壳体厚度超过 $0.356R$ ，或设计内压 P_i 超过 $0.665S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=R(Y^{1/3}-1) \dots\dots\dots(26)$$

式中 $Y=\frac{2(S_{IF}+P_i)}{2S_{IF}-P_i}$ 。

6.2.1.4 半球形封头

- a) 半球形封头如图 7 所示，当半球形封头厚度不超过 $0.356R$ ，或设计内压 P_i 不超过 $0.665S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=\frac{P_i R}{2S_{IF}-0.2P_i} \dots\dots\dots(27)$$

- b) 当半球形封头厚度超过 $0.356R$ ，或设计内压 P_i 超过 $0.665S_{IF}$ 时，所需厚度 t 按下式计算：

$$t=R(Y^{1/3}-1) \dots\dots\dots(28)$$

式中 $Y=\frac{2(S_{IF}+P_i)}{2S_{IF}-P_i}$ 。

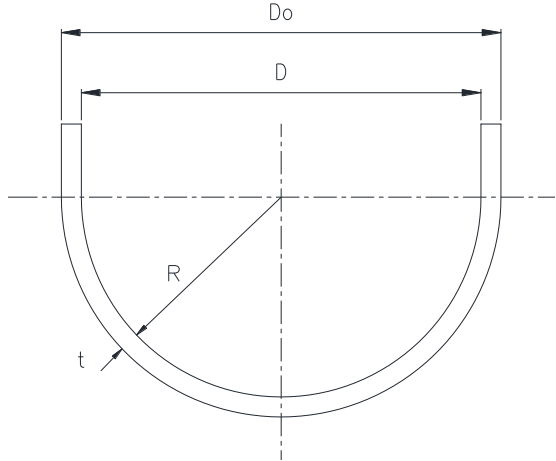


图7 半球形封头

6.2.1.5 椭圆形封头

a) 椭圆形封头如图 8 所示，长短轴比值为 2 的标准椭圆封头所需的厚度 t 应按下式计算：

$$t = \frac{P_i D}{2S_{if} - 0.2P_i} \dots\dots\dots (29)$$

b) 其它比例的椭圆形封头，其所需的厚度 t 应按下式计算：

$$t = \frac{P_i D K}{2S_{if} - 0.2P_i} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

K ——椭圆形封头形状系数， $K = \frac{1}{6} [2 + (\frac{D}{2h})^2]$ 。

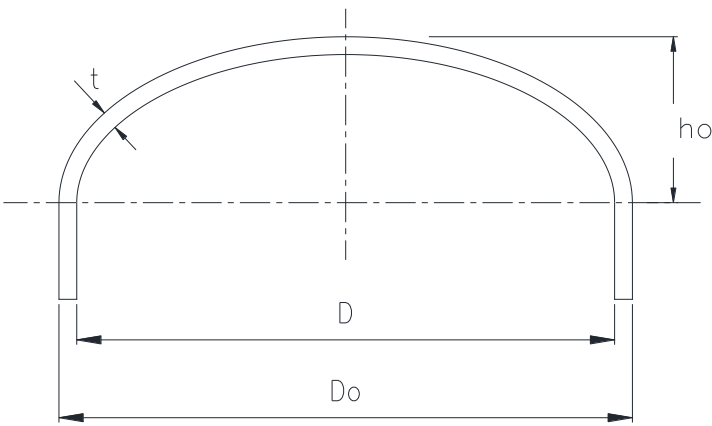


图8 椭圆形封头

6.2.1.6 碟形封头

a) 碟形封头如图 9 所示，转角半径 r 是球内半径 6% 的碟形封头，其所需的厚度 t 应按下式计算：

$$t = \frac{0.885P_i R}{S_{if} - 0.1P_i} \dots\dots\dots(31)$$

b) 其它比例的碟形封头，其所需的厚度 t 应按下式计算：

$$t = \frac{P_i R M}{2S_{if} - 0.2P_i} \dots\dots\dots(32)$$

或按下式用碟形封头的球外半径 R_o 计算所需厚度：

$$t = \frac{P_i R_o M}{2S_{if} + P_i(M - 0.2)} \dots\dots\dots(33)$$

式中：

M ——碟形封头形状系数， $M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R}{r}} \right)$ 。

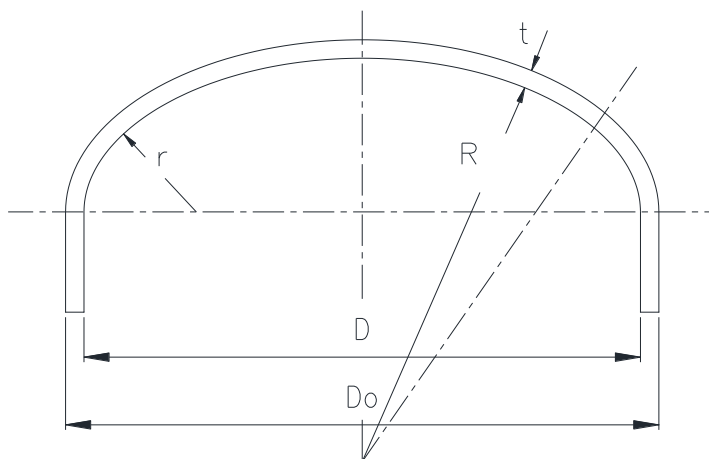


图9 碟形封头

6.2.2 外压设计

6.2.2.1 基本规定

6.2.2.1.1 本节适用于钢制安全壳及其部件承受外压荷载设计，任何构造和荷载都应满足本节的规定。

6.2.2.1.2 钢制安全壳及其部件在外压作用下的设计采用图算方法。

6.2.2.2 $D_o/t \geq 10$ 的圆筒形壳体

6.2.2.2.1 确定外压应变系数 A

- 根据 L/D_o 和 D_o/t 由附录 C 适用的图或表查取外压应变系数 A 值（遇中间值取内插法）；
- 若比值 L/D_o 大于 50，则用 $L/D_o=50$ 查附录 C 适用的图或表；若比值 L/D_o 小于 0.05，则用 $L/D_o=0.05$ 查附录 C 适用的图或表。

注：L 为圆筒体段的设计长度，详见 6.2.2.2.4。

6.2.2.2.2 确定外压应力系数 B

- a) 按所用材料, 确定对应的外压应力系数曲线图(附录 C 图或表), 由 A 值查取 B 值(遇中间值用内插法);
- b) 若 A 值超出设计温度曲线的最大值, 则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为 B 值;
- c) 若 A 值小于设计温度曲线的最小值, 则按下式计算 B 值:

$$B = \frac{AE}{2} \dots\dots\dots (34)$$

6.2.2.2.3 对于 $D_o/t \geq 10$ 的圆筒形壳体, 所能承受的许用外压 P_{al} 按下式进行计算:

$$P_{al} = \frac{4B}{3(D_o/t)} \dots\dots\dots (35)$$

计算得到的许用外压 P_{al} 应不小于设计外压 P_o , 否则须调整设计参数, 直到满足设计要求。

6.2.2.2.4 安全壳筒身段的设计长度 L, 取下列中的最大值:

- a) 如果无加劲肋, 取封头切线之间的距离加上每个封头深度的三分之一;
- b) 任何两个相邻的加劲肋之间的最大中心距;
- c) 自第一个加劲肋的中心到封头切线的距离再加上封头深度的三分之一, 所有测量应平行于钢制安全壳的轴线。

6.2.2.3 $D_o/t < 10$ 的圆筒形壳体

6.2.2.3.1 确定外压应变系数 A

- a) 对 $D_o/t \geq 4$ 的圆筒体, 用与 6.2.2.2.1 相同的步骤得到系数 A 值;
- b) 对 $D_o/t < 4$ 的圆筒体, 按下式计算系数 A 值:

$$A = \frac{1.1}{(D_o/t)^2} \dots\dots\dots (36)$$

系数 $A > 0.1$ 时, 取 $A = 0.1$ 。

6.2.2.3.2 确定外压应力系数 B

用与 6.2.2.2.2 相同的步骤得到系数 B 值。

6.2.2.3.3 对于 $D_o/t < 10$ 的圆筒形壳体, 所能承受的许用外压 P_{al} 应为下列两式中的较小值:

$$P_{al} = \left[\frac{2.167}{(D_o/t)} - 0.0833 \right] B \dots\dots\dots (37)$$

$$P_{al} = \frac{2S_{EF}}{D_o/t} \left[1 - \frac{1}{D_o/t} \right] \dots\dots\dots (38)$$

式中:

S_{EF} ——选用表 B.1 钢材的许用应力值 S 的 2 倍, 且不超过表 B.6 相应温度下材料屈服强度值的 90%。

计算得到的许用外压 P_{al} 应不小于设计外压 P_o ，否则须调整设计参数，直到满足设计要求。

6.2.2.4 球形壳体

6.2.2.4.1 根据半球形封头的外半径 R_o 与所需厚度 t 之比值 (R_o/t) ，按下式计算外压应变系数 A ：

$$A = \frac{0.125}{(R_o/t)} \dots\dots\dots (39)$$

6.2.2.4.2 确定外压应力系数 B

- a) 按所用材料，确定对应的外压应力系数曲线图(附录 C 图或表)，由 A 值查取 B 值（遇中间值用内插法）；
- b) 若 A 值超出设计温度曲线的最大值，则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为 B 值；
- c) 若 A 值小于设计温度曲线的最小值，则按 6.2.2.4.3 b) 计算许用外压值。

6.2.2.4.3 确定许用外压 P_{al}

- a) 若符合 6.2.2.4.2 a) 和 b)，则球形壳体所能承受的许用外压 P_{al} 按下式进行计算：

$$P_{al} = \frac{B}{(R_o/t)} \dots\dots\dots (40)$$

- b) 若符合 6.2.2.4.2 c)，则球形壳体所能承受的许用外压 P_{al} 按下式进行计算：

$$P_{al} = \frac{0.0625E}{(R_o/t)^2} \dots\dots\dots (41)$$

根据上述a)和b)计算得到的许用外压 P_{al} 应不小于设计外压 P_o ，否则须调整设计参数，直到满足设计要求。

6.2.2.5 半球形封头

半球形封头所能承受的许用外压 P_{al} 按6.2.2.4球形壳体给出的计算公式和步骤确定。

6.2.2.6 椭圆形封头

椭圆形封头所能承受的许用外压 P_{al} 按6.2.2.4球形壳体给出的计算公式和步骤确定，但计算步骤中系数 A 应用下式替代：

$$A = \frac{0.125}{(R_o/t)} \dots\dots\dots (42)$$

式中：

R_o ——椭圆形封头的当量球形外半径， $R_o=K_1D_o$ ；

K_1 ——取决于椭圆形封头长短轴比例的系数，由表18给出。

6.2.2.7 碟形封头

碟形封头所能承受的许用外压 P_{al} 按6.2.2.4球形壳体给出的计算公式和步骤确定，其中 R_o 为碟形封头冠形部分外半径。

6.2.2.8 圆筒形壳体的加劲肋

6.2.2.8.1 惯性矩计算

选定加劲肋截面尺寸，计算其横截面积 A_s 、平行于圆筒轴线的惯性矩 I 和加劲肋与圆筒有效段组合截面的惯性矩 I_s 。用作计算组合惯性矩所取的壳体宽度不大于 $1.10\sqrt{D_0 t_n}$ ，且应各有一半分布在加劲肋质心的两侧，若加劲肋一侧的有效壳体段有重叠，则加劲肋在筒体上的有效壳体段应为重叠部分的一半。

6.2.2.8.2 确定外压应力系数 B 值：

$$B = \frac{3}{4} \left(\frac{P_o D_o}{t_n + A_s / L_s} \right) \dots\dots\dots (43)$$

式中：

L_s ——自加劲肋中心线到相邻同一侧支撑间距离的一半，再加上自加劲肋中心线到相邻另一侧支撑间距离的一半，两者的测量均平行于部件轴线，支撑指：

- (1) 符合本条要求的加劲肋；
- (2) 封头上离封头切线三分之一封头深度处的环线；
- (3) 圆筒形壳体夹套部分与夹套相连的环向连接处。

6.2.2.8.3 确定外压应变系数 A 值

- a) 按所用材料，确定对应的外压应力系数曲线图(附录 C 图或表)，由 B 值查取 A 值（遇中间值用内插法）；
- b) 若 B 值超出设计温度曲线的最大值，则取对应温度曲线右端点的横坐标值为 A 值；
- c) 若 B 值小于设计温度曲线的最小值，则按下式计算 A 值：

$$A = \frac{2B}{E} \dots\dots\dots (44)$$

6.2.2.8.4 圆筒形壳体所需的加劲肋惯性矩 I' 和 I'_s 分别按下列两个公式计算，计算所需的加劲肋惯性矩 I' 和 I'_s 应分别不小于 I 和 I_s ，否则须调整设计参数，直到满足设计要求。

$$I' = \frac{D_o^2 L_s (t + \frac{A_s}{L_s}) A}{14} \dots\dots\dots (45)$$

$$I'_s = \frac{D_o^2 L_s (t + \frac{A_s}{L_s}) A}{10.9} \dots\dots\dots (46)$$

6.2.2.9 轴向受压的筒体

6.2.2.9.1 在圆筒形壳体和管状件的设计中，其承受的荷载在壳体截面上产生的纵向压应力应不小于由下列 a) 和 b) 确定的较小值，否则须调整设计参数，直到满足设计要求。

- a) 设计温度下所用材料的许用应力值的 1.1 倍。
- b) 所用材料确定的许用外压应力系数 B 值，其中 B 值可由 6.2.2.9.2 和 6.2.2.9.3 求得。

6.2.2.9.2 根据外半径 R_o 与所需厚度 t 之比值 (R_o/t)，按下式计算外压应变系数 A ：

$$A = \frac{0.125}{(R_o/t)} \dots\dots\dots (47)$$

6.2.2.9.3 确定外压应力系数 B

- a) 按所用材料，确定对应的外压应力系数曲线图，由 A 值查取 B 值（遇中间值用内插法）；
- b) 若 A 值超出设计温度曲线的最大值，则取对应温度曲线右端点的纵坐标值为 B 值；
- c) 若 A 值小于设计温度曲线的最小值，则按下式计算 B 值：

$$B = \frac{AE}{2} \dots\dots\dots (48)$$

6.2.3 附件

- a) 除了下述 c) 和 d) 以外，第 4.3 规定的部件管辖界线内的附件和连接焊缝，应满足部件的应力限制。
- b) 部件设计应包括考虑由局部相互作用和通过附件的荷载传递的影响，以及来自于部件承压区的影响，应考虑热应力、应力集中和部件承压区域的约束。
- c) 离部件承压区域 $2t$ 以外，这里 t 是承压材料的名义厚度，在部件支承荷载路径上的附件部分，T/CNEA XXX.5-20XX《压水堆承压部件 设计与制造 第 5 部分：支承件》的相应设计规则可用来替代本标准第 6 章的设计规则。
- d) 非结构附件应满足 7.4.3.5 的要求。

6.3 分析法设计

6.3.1 基本规定

- 6.3.1.1 本节组合应力采用的失效理论为最大剪应力理论。在某一点的最大剪应力等于该点上三个主应力的代数最大值与代数最小值之差的一半。
 - 6.3.1.2 钢制安全壳或其部件在各种荷载作用下应进行充分的应力分析，计算结果应不超过本节规定的相应限制。
 - 6.3.1.3 分析法设计采用的许用应力强度值 S_{mc} 等于表 B.1 中选用钢材的许用应力值的 1.1 倍，且不超过表 B.6 中相应温度下材料屈服强度值的 90%。
- 6.3.2 钢制安全壳或其部件在不同位置处作用有不同的荷载，产生的应力类别也不同，表 15 给出了钢制安全壳上典型部位的应力类别。

表15 钢制安全壳应力分类典型实例

钢制安全壳	位置	应力来源	应力类型	分类
圆筒形壳体或球形壳体	远离不连续处的壳体	内压	总体薄膜应力	P_m
			沿板厚度的应力梯度	Q
		轴向热梯度	薄膜应力	Q
			弯曲应力	Q
	与封头或法兰的连接处	内压	薄膜应力	P_L
			弯曲应力	Q^a

钢制安全壳	位置	应力来源	应力类型	分类
任何壳体或封头	沿整个钢制安全壳的任何截面	外荷载或力矩，或内压	沿整个截面平均的总体薄膜应力	P_m
		外荷载或力矩	沿整个截面的弯曲应力	P_m
	接管或其它开孔附近	外荷载或力矩，或内压	局部薄膜应力 弯曲应力 峰值应力(圆角或转角)	P_L Q F
	任何位置	壳体与封头间的温差	薄膜应力 弯曲应力	Q Q
多孔的封头或壳体	均匀布置的典型管孔桥	压力	薄膜应力(沿横截面平均) 弯曲应力(沿管孔桥宽度平均，但沿板厚有应力梯度) 峰值应力	P_m P_b F
	孤立的或不规则的管孔桥	压力	薄膜应力 弯曲应力 峰值应力	Q F F
碟形封头	顶部	内压	薄膜应力 弯曲应力	P_m P_b
	反弯点处或与壳体连接处	内压	薄膜应力 弯曲应力	P_L^b Q
接管	按 6.4.3 规定的补强范围内	压力，外荷载和外力矩，包括连接管道自由端位移受约束所产生的外荷载和外力矩	总体薄膜应力 沿接管厚度平均的弯曲应力 (不包括总体结构不连续应力)	P_m P_m
	按 6.4.3 规定的补强范围以外	压力和外部作用在接管上的轴向、切向和扭转荷载，不包括连接管道自由端位移受约束而产生的外荷载和外力矩	总体薄膜应力	P_m
		压力、外荷载和外力矩 不包括连接管道自由端位移受约束所产生的外荷载和外力矩	薄膜应力 弯曲应力	P_L P_b
		压力、所有的外荷载和外力矩	薄膜应力 弯曲应力 峰值应力	P_L Q F
	接管壁	总体结构不连续	局部薄膜应力 弯曲应力 峰值应力	P_L Q F
		不同的膨胀量	薄膜应力	Q

钢制安全壳	位置	应力来源	应力类型	分类
			弯曲应力	Q
			峰值应力	F
任意	任意	径向温度分布 ^c	当量线性应力 ^d	Q
			应力分布的非线性部分	F
任意	任意	任意	应力集中(缺口效应)	F
注：表中Q和F应力分类是指设计工况以外的情况。				
^a 如果要求边缘的弯矩使中部的弯曲应力保持在可接受限制内时，边缘弯曲应力归入 P _b 类，否则归入 Q 类。				
^b 若径厚比较大，还应考虑起皱和过渡变形的影响。				
^c 考虑热应力棘轮效应的可能性。				
^d 当量线性应力定义为线性分布的应力，与实际的应力分布具有相同的弯矩。				

6.3.3 应力强度限值

6.3.3.1 钢制安全壳和其部件的应力评定需满足本节应力强度限值要求和 6.3.6 规定的特殊应力限值。表 16 列出了不同工况下应力强度的限值要求。

6.3.3.2 总体一次薄膜应力强度(P_m)在设计工况和各种使用限制下的许用限值规定如下：

- a) 在设计工况及 A 级和 B 级使用限制下，P_m 应不超过 1.0S_{mc}。
- b) C 级使用限制
 - 1) 整体而连续的部位，P_m 应不超过 1.2S_{mc} 或 1.0R_{eL}^t 中的较大值。
 - 2) 非整体而不连续的部位，如带螺栓的法兰和机械接头，P_m 应不超过 1.0S_{mc}。
- c) D 级使用限制
 - 1) 整体而连续的部位，P_m 应不超过 S_f、1.2S_{mc} 或 1.0S_y 三者中的较大值。其中 S_f=0.85min(2.4S_m, 0.7R_u)。
 - 2) 非整体而不连续的部位及部分焊透焊缝，P_m 应不超过 1.2S_{mc} 或 1.0R_{eL}^t 中的较大值。

6.3.3.3 局部薄膜应力强度(P_L)的许用限值是相同限制下总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍，但当钢制安全壳部件采用非弹性分析时，D 级使用限制不应乘以 1.5 系数。

6.3.3.4 一次薄膜(总体或局部)加一次弯曲应力强度(P_L+P_b)在设计荷载和各种使用限制下的许用限值规定如下：

- a) 在设计工况及 A 级和 B 级使用限制下，(P_L+P_b)应不超过 6.3.3.2 a)中总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍。
- b) C 级使用限制

1) 整体而连续的部位, 当 $P_L \leq 0.67R_{eL}^t$ 时, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 b) 中总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍; 当 $P_L > 0.67R_{eL}^t$ 时, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 b) 中总体一次薄膜应力强度限值的 $(2.5 - 1.5P_L/R_{eL}^t)$ 倍。

2) 非整体而不连续的部位, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 b) 中总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍。

c) D 级使用限制

1) 当采用弹性分析时, 钢制安全壳整体而连续的部位, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 c) 中总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍。

2) 当采用弹性分析时, 钢制安全壳非整体而不连续的部位, 若 $P_L \leq 0.67R_{eL}^t$, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 c) 中总体一次薄膜应力强度限值的 1.5 倍; 若 $P_L > 0.67R_{eL}^t$, $(P_L + P_b)$ 应不超过 6.3.3.2 c) 中总体一次薄膜应力强度限值的 $(2.5 - 1.5P_L/R_{eL}^t)$ 倍。

3) 当采用非弹性分析时, 限值规定为 S_f 。

d) 对于非实心矩形截面, 许用限值是 6.3.3.2 规定限值的 α 倍。系数 α 为产生全截面塑性的荷载值与截面最外层纤维产生初始屈服的荷载值之比。评定截面初始屈服和全截面塑性承载能力时, 荷载值中每个单独荷载与该荷载值中每个其他荷载之比应同特定设计荷载值中单独荷载的对应比值相同; α 值应不超过仅有弯曲应力 ($P_m = 0$) 时的计算值且不超过 1.5; 还应考虑部分受压截面屈曲的倾向。

6.3.3.5 一次加二次应力强度($P_L + P_b + Q$)在设计荷载和各种使用限制下的许用限值规定如下:

a) 在 A 级和 B 级使用限制下, $(P_L + P_b + Q)$ 应不超过 $3.0S_m$ 。

b) 在设计工况及 C 级和 D 级使用限制下, 均不要求对二次应力进行评定。

6.3.3.6 循环运行分析

6.3.3.6.1 若钢制安全壳或其部件经受的使用荷载全部满足 a) 到 f) 的条件, 无需进行循环使用分析, 并可假定由疲劳控制的峰值应力强度也是满足要求的而无需进行评定。

a) 在使用期间, 压力从大气压上升到使用压力又返回到大气压的循环次数 (包括启动和停堆) 不得超过附录 D 中适用的疲劳曲线上对应于 $3S_m$ 的 S_a 值所查到的循环次数。

b) 在使用期间, 压力波动范围不超过 $(1/3) \times \text{设计压力} \times (S_a/S_m)$ 。此处 S_a 是从附录 D 中适用的疲劳设计曲线上根据规定的有意义的压力波动总次数查到的值。如果有意义的压力波动总次数超过适用的设计疲劳曲线所限定的最大循环次数, 可采用曲线上该最大循环次数所对应的 S_a 值。有意义的压力波动是指波动总偏差超过: $\text{设计压力} \times (1/3) \times (S/S_m)$ 。其中 S 按下述规定取值:

1) 如果总的规定的使用循环次数等于或小于 10^6 , 则 S 是从相应的设计疲劳曲线上在 10^6 循环次数时所得到的 S_a 值。

2) 如果总的规定的使用循环次数超过 10^6 , 则 S 是由相应的设计疲劳曲线上取该曲线所限定的最大循环数时所得到的 S_a 值。

c) 在使用期间, 反应堆启动和停堆时, 钢制安全壳壳体上任意相邻两点之间的温差不得超过 $S_a/2E\alpha$ 。其中 S_a 是从适用的疲劳设计曲线上根据规定的启动-停堆循环次数查到的值, α 为材料瞬时热膨胀系数, E 为材料弹性模量。

d) 在使用期间, 钢制安全壳壳体上相似材料任意相邻两点之间的温差不得大于 $S_a/2E\alpha$ 。其中 S_a 是从适用的疲劳设计曲线上根据规定的有意义温差波动的总次数查到的值, 有意义的温度波动

是指温度波动的总幅值超过 $S/E\alpha$ 。 α 为材料瞬时热膨胀系数；E 为材料的弹性模量。S 取值规定如下：

- 1) 如果总的规定的使用循环次数等于或小于 10^6 ，则 S 是从相应的设计疲劳曲线上在 10^6 循环次数时所得到的 S_a 值。
 - 2) 如果总的规定的使用循环次数超过 10^6 ，则 S 是由相应的设计疲劳曲线上取该曲线所限定的最大循环数时所得到的 S_a 值。
- e) 用不同弹性模量或不同热膨胀系数的材料制成的部件，使用期间部件经受的温度波动的总代数范围不得超过 $S_a/2(E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)$ 。其中 S_a 是从适用的疲劳设计曲线上根据规定的有意义的温度波动的总次数查到的值，有意义的温度波动是指温度波动的总幅值超过 $S/2(E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)$ 。 α_1 和 α_2 为结构上两种材料在平均温度时的瞬时热膨胀系数；E 为材料的弹性模量。S 取值规定如下：
- 1) 如果总的规定的使用循环次数等于或小于 10^6 ，则 S 是从相应的设计疲劳曲线上在 10^6 循环次数时所得到的 S_a 值。
 - 2) 如果总的规定的使用循环次数超过 10^6 ，则 S 是由相应的设计疲劳曲线上取该曲线所限定的最大循环数时所得到的 S_a 值。
- f) 不包括压力，但包括管道反力的机械荷载，其整个应力强度变化范围不得超过 S_a 。 S_a 是从适用的疲劳设计曲线上根据规定的有意义的荷载波动的总次数查到的值，如果有意义的荷载波动总次数超过适用的设计疲劳曲线所限定的最大循环次数，则可采用曲线上该最大循环次数所对应的 S_a 值。有意义的荷载波动是指荷载应力总幅值超过 S。S 取值规定如下：
- 1) 如果总的规定的使用循环次数等于或小于 10^6 ，则 S 是从相应的设计疲劳曲线上在 10^6 循环次数时所得到的 S_a 值。
 - 2) 如果总的规定的使用循环次数超过 10^6 ，则 S 是由相应的设计疲劳曲线上取该曲线所限定的最大循环数时所得到的 S_a 值。

6.3.3.6.2 如果钢制安全壳或其部件经受的使用荷载不满足 6.3.3.6.1 所述的条件，应按下述 a)~e) 的规定进行循环荷载作用下的疲劳验算。

- a) 确定各种荷载工况下的应力差和交变应力强度 S_a 。
- b) 对所有的使用荷载，均可采用基于理论或实验的研究或应力分析技术所确定的应力集中系数来估计局部结构不连续的影响。
- c) 附录 D 给出了本规范允许材料的设计疲劳曲线，材料的中间强度级别可采用线性内插法求得，此处所用的强度级别是室温下规定的最小值。
- d) 将交变应力强度 $S_{\text{交变}}$ 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的比值，在适用的设计疲劳曲线上查到相应的循环次数。如果所考虑的循环荷载仅一种且引起了有意义的应力波动，则此值即为许用的循环次数。
- e) 如果有两种或两种以上能产生有意义应力波动的应力循环类型，应按下面 1) 到 6) 的规定来估计它们的累积效应：
 - 1) 在部件的使用寿命内，将每一种应力循环类型（1、2、3……n 等）规定的循环次数分别用 n_1 、 n_2 、 n_3 ……等表示。
 - 2) 对每种应力循环类型，确定其交变应力强度 $S_{\text{交变}}$ ，并记为 $S_{\text{交变}1}$ 、 $S_{\text{交变}2}$ 、 $S_{\text{交变}3}$ …… $S_{\text{交变}n}$ 。
 - 3) 对每一个 $S_{\text{交变}1}$ 、 $S_{\text{交变}2}$ 、 $S_{\text{交变}3}$ …… $S_{\text{交变}n}$ ，如果这种类型的循环单独起作用，可采用相应的设计疲劳曲线来确定允许的最大重复次数，并记为 N_1 、 N_2 、 N_3 …… N_n 。
 - 4) 对每种类型的应力循环，由 $U_1=n_1/N_1$ 、 $U_2=n_2/N_2$ 、 $U_3=n_3/N_3$ …… $U_n=n_n/N_n$ 来计算使用系数 U_1 、 U_2 、 U_3 …… U_n 。

- 5) 由 $U=U_1+U_2+U_3+.....+U_n$ ，计算累积使用系数 U 。
- 6) 累积使用系数 U 不得超过 1.0。
- 6.3.3.7 对经受稳态内压荷载的部分轴对称壳体，所允许的最大循环热应力的限值按下述规定确定。
- a) 温度沿壁厚呈线性变化时：

1) 当 $0 < x < 0.5$ 时， $y' = 1/x$ ；

2) 当 $0.5 < x < 1.0$ 时， $y' = 4(1-x)$ 。
- b) 温度沿壁厚按抛物线恒定地增加或减小时：

1) 当 $0.615 < x < 1.0$ 时， $y' = 5.2(1-x)$ ；

2) 当 $x < 0.615$ 时的近似取值为： $x = 0.3, 0.4, 0.5$ 时， y 相应取值为 4.65, 3.55, 2.70。
- 其中：
- x =压力产生的最大总体薄膜应力与屈服强度的比值；
- y' =按照弹性理论计算的热应力的最大许用范围与屈服强度的比值。

6.3.3.8 钢制安全壳的设计需满足设计规定的相应变形限值要求。

表16 应力强度限值

荷载工况及部位		一次应力			二次应力	峰值应力
		P_m	P_L	$P_m (P_L) + P_b^c$	$P_L + P_b + Q$	$P_L + P_b + Q + F$
试验工况 ^b	气压试验	$0.8 R_{eL}^t$	N/A ^a	$P_m \leq 0.67 R_{eL}^t$ 时： $1.35 R_{eL}^t$ $0.67 R_{eL}^t < P_m \leq 0.9 R_{eL}^t$ 时： $2.15 R_{eL}^t - 1.2 P_m$	$3.0 S_m$ 或 $2.0 R_{eL}^t$	S_a
设计工况		$1.0 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	N/A ^a	N/A ^a
A 级使用限制		$1.0 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$3.0 S_m$	S_a
B 级使用限制		$1.0 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$3.0 S_m$	S_a
C 级使用限制	整体连续	$\max(1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	$\max(1.8 S_{mc}, 1.5 R_{eL}^t)$	$\max(1.8 S_{mc}, 1.5 R_{eL}^t)$	N/A ^a	N/A ^a
	非整体不连续	$1.0 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	$1.5 S_{mc}$	N/A ^a	N/A ^a
D 级使用限制	非整体不连续 ^d	$\max(1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	$\max(1.8 S_{mc}, 1.5 R_{eL}^t)$	$P_L \leq 0.67 R_{eL}^t$ 时： $\max(1.8 S_{mc}, 1.5 R_{eL}^t)$ $P_L > 0.67 R_{eL}^t$ 时： $\max([2.5 - 1.5(P_L / R_{eL}^t)] \cdot 1.2 S_{mc}, [2.5 - 1.5(P_L / R_{eL}^t)] R_{eL}^t)$	N/A ^a	N/A ^a
	整体、连续弹性分析	$\max(S_f, 1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	$1.5 \max(S_f, 1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	$1.5 \max(S_f, 1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	N/A ^a	N/A ^a
	整体、连续非弹性分析	$\max(S_f, 1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	$\max(S_f, 1.2 S_{mc}, 1.0 R_{eL}^t)$	S_f	N/A ^a	N/A ^a

- ^a N/A 为不需要评定。

^b 试验次数超过 10 次时需进行疲劳评定。

^c P_m (P_L)+ P_b 列中的数值适用于实心矩形截面，非实心矩形截面见 6.3.3.4 d) 的规定。

^d D 级使用限制下非整体不连续时的应力强度限值也适用于部分焊透焊缝。

6.3.4 屈曲应力值

6.3.4.1 基本许用压应力应取由下列方法之一确定的临界屈曲应力值的三分之一：

- a) 精确分析法，这种方法考虑了总体和局部屈曲，几何缺陷、非线性，大变形和惯性力(仅指动态荷载)的影响；
- b) 经典(线性)分析法，这种方法反映了理论与实际承载能力之间裕量的差别；
- c) 实物模型试验法，预计结构在所需经受的荷载和约束相同条件下的模型试验。

6.3.4.2 屈曲稳定性应力限值应满足下列要求：

- a) 对于设计工况及 A 级和 B 级使用限制，应不超过 6.3.4.1 中给定的限值；
- b) 对于 C 级使用限制，应不超过 6.3.4.1 中给定限值的 120%；
- c) 对于 D 级使用限制，应不超过 6.3.4.1 中给定限值的 150%。

6.3.5 试验限制

6.3.5.1 如果水压试验压力超过所要求的试验压力的 6%时，应对试验期间所有荷载所引起的应力进行评定。在这种情况下，一次薄膜应力强度 P_m 不得超过试验温度下材料屈服强度 R_{eL}^t 的 90%，且：

- a) 对于实心矩形截面，一次薄膜加一次弯曲应力强度 P_m+P_b 不得超过下述规定的相应限值：
 - 1) 当 $P_m \leq 0.67 R_{eL}^t$ 时

$$P_m+P_b \leq 1.35 R_{eL}^t \dots\dots\dots (49)$$

- 2) 当 $0.67 R_{eL}^t < P_m \leq 0.90 R_{eL}^t$ 时

$$P_m+P_b \leq 2.15 R_{eL}^t - 1.2P_m \dots\dots\dots (50)$$

- b) 对于非实心矩形截面：

$$P_m+P_b \leq 0.9 \alpha R_{eL}^t \dots\dots\dots (51)$$

式中： α 为产生全截面塑性的荷载值与截面最外层纤维产生初始屈服的荷载值之比， α 不得超过仅有弯曲应力时的计算值，且 $\alpha \leq 1.5$ 。

6.3.5.2 如果气压试验压力超过所要求的试验压力的 6%时，应对试验期间所有荷载所引起的应力进行评定。在这种情况下，一次薄膜应力强度 P_m 不得超过试验温度下材料屈服强度 R_{eL}^t 的 80%；且：

- a) 对于实心矩形截面，一次薄膜加一次弯曲应力强度 P_m+P_b 不得超过下述规定的相应限值：
 - 1) 当 $P_m \leq 0.67 R_{eL}^t$ 时

$$P_m+P_b \leq 1.35 R_{eL}^t \dots\dots\dots (52)$$

- 2) 当 $0.67 R_{eL}^t < P_m \leq 0.90 R_{eL}^t$ 时

$$P_m + P_b \leq 2.15 R_{eL}^t - 1.2 P_m \dots\dots\dots (53)$$

b) 对于非实心矩形截面:

$$P_m + P_b \leq 0.8 \alpha R_{eL}^t \dots\dots\dots (54)$$

6.3.5.3 外压不得超过 6.3.4 所确定限值的 125%。

6.3.5.4 水压试验次数、气压试验次数、或其任意组合的试验次数不得超过 10 次，否则应对试验工况下的疲劳进行评定，一次加二次应力强度范围的限值可取 $3S_m$ 或 $2 R_{eL}^t$ 中的较大值。

6.3.6 特殊应力限制

6.3.6.1 当有特殊条件或构造时，应采用下列应力限值。本节规定同样适用于设计工况荷载、A 级使用限制荷载、B 级使用限制荷载、C 级使用限制荷载以及 D 级使用限制荷载。

6.3.6.2 纯剪切

6.3.6.2.1 在纯剪切截面(例如抗剪连接件、剪力环、螺纹)上，由设计工况荷载产生的一次剪应力的平均值不应大于 $0.6S_{mc}$ 。

6.3.6.2.2 由设计工况荷载产生的最大一次剪应力不应大于 $0.8S_{mc}$ 。

6.3.6.3 三个一次主应力的代数和($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)不应超过 $4S_{mc}$ 。

6.3.6.4 支承荷载

6.3.6.4.1 在设计荷载或任何使用荷载或试验荷载所引起的最大荷载作用下，为防止压毁，平均支承应力应小于 R_{eL}^t ，但当到自由端的距离大于支承荷载作用的距离时，支承应力的最大值可为 $1.5R_{eL}^t$ 。

6.3.6.4.2 支承荷载作用在靠近自由端时，应考虑剪切失效的可能性。若只有荷载应力（不包括热应力），平均剪切应力不得超过 $0.6S_{mc}$ 。若考虑荷载应力加二次应力，平均剪切应力不得超过 $0.5R_{eL}^t$ 。

6.3.6.4.3 考虑销钉和类似零件的支承应力时，可采用所处温度下的 R_{eL}^t 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，可采用 $1.5R_{eL}^t$ 值。

6.3.6.5 螺旋帽、螺旋塞、剪力环盖及栓块锁紧盖等非整体连接件，会产生喇叭形或其它渐进性变形而致失效。如果施加的荷载引起了屈服，则这类接头就会产生棘轮效应，从而导致非整体连接件之间产生滑移，由于渐进性畸变可能产生连接件松动的一次加二次应力强度不得超过 R_{eL}^t 。

6.3.6.6 接管过渡

6.3.6.6.1 补强范围之内

- a) 由压力引起的总体薄膜应力以及除不连续应力之外的由外荷载和外力矩(包括由于连接管道的自由端位移受约束而产生的外荷载和外力矩)产生的应力，应采用 P_m 类应力强度限制。
- b) 由不连续效应引起的局部一次薄膜应力加上由压力和外荷载及外力矩(包括由于连续管道的自由端位移受约束而产生的外荷载和外力矩)的组合作用产生的一次弯曲应力，应采用 P_L 类应力强度限制。
- c) 由压力、温度和外荷载以及外力矩(包括由于连接管道的自由端位移受约束而产生的外荷载和外力矩)的组合作用产生的一次加二次应力,应采用 $P_L + P_b + Q$ 类应力强度限制。

6.3.6.6.2 补强范围之外

- a) 由压力引起的总体薄膜应力以及由外部作用在接管上的轴向、剪切和扭转荷载（不包括由于连接管道的自由端位移受约束而引起的荷载）产生的沿接管壁厚的平均应力，应采用 P_m 类应力强度限制。
- b) 由 P_m 类的应力加上由外部作用的弯矩（不包括由于连接管道的自由端位移受约束而产生的弯矩）产生的应力，应采用 P_L+P_b 类应力强度限制。
- c) 由所有压力、温度和外荷载及外力矩（包括由于连接管道的自由端位移受约束而产生的外荷载和外力矩）产生的应力，应采用 P_L+P_b+Q 类应力强度限制。

6.3.6.7 除具有明显的局部结构不连续或局部热应力的区域外，一次加二次应力强度限值 $3S_m$ 的设置已经考虑到经过几次重复应力循环后能确保在弹性作用下结构的安定性。而明显的局部结构不连续或局部热应力只在疲劳评定中才进行考虑。在弹性分析应力评定时应采用下述准则。

- a) 为了与疲劳许用限值以外的应力限值相比较，应按弹性假设进行应力计算。
- b) 为了与疲劳许用限值相比较，在评定应力中，除局部热应力引起的应力外，应按弹性假设进行应力计算。在评定局部热应力时，应采用弹性计算公式，其中泊松比的数值由下式确定：

$$\nu = 0.5 - 0.2 \frac{S_y}{S_a}, \text{ 但不小于 } 0.3 \dots\dots\dots (55)$$

式中：

R_{eL}^t ——循环平均温度下材料的屈服强度，MPa

S_a ——根据6.3.3.6.2节规定确定的在弹性模量按6.3.3.6.2 d)节进行修订之前的交变应力强度。

6.3.7 塑性分析的应用

6.3.7.1 如果结构的某一具体部位满足下述 a)到 c)的规定，则该部位处的局部薄膜应力强度、一次加二次应力强度、壳体中的热应力棘轮效应以及非整体连接的渐进性畸变等无需满足对应节 6.3.3.3、6.3.3.5、6.3.3.7 和 6.3.6.5 中限值的要求。

- a) 与残余应力限制进行比较所用的评定应力应按弹性理论进行计算。
- b) 在结构的某一具体部位按塑性理论计算结构的反应，如果结构保持安定，且安定前的变形不超过规定的限制，则认为该部位是满足要求的，而无需按 6.3.3.3、6.3.3.5、6.3.3.7 和 6.3.6.5 的要求再进行评定。
- c) 为了与疲劳许用限制比较，评定应力时，应将结构安定后数值上最大的总主应变范围乘以循环温度的平均温度下材料弹性模量的 0.5 倍。

6.3.7.2 如果极限分析或试验能够证明在某一具体部位所施加的荷载不超过下限极限荷载的 2/3，则该部位处的局部薄膜应力强度、一次薄膜加一次弯曲应力强度无需满足对应节 6.3.3.3 和 6.3.3.4 中限值的要求。

6.3.7.3 采用简化的弹塑性分析，如果满足下列 a)到 f)的要求，则一次加二次应力强度范围可超过 6.3.3.5 节规定的 $3S_m$ 的限值要求。

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

1) 若 $S_n \leq 3S_m$, $K_e = 1.0$ 。

2) 若 $3S_m < S_n < 3mS_m$, $K_e = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left[\frac{S_n}{3S_m} - 1 \right]$ 。

3) 若 $S_n \geq 3S_m$, $K_e = 1/n$ 。

其中， S_n 为一次加二次应力强度范围，与材料相关的参数 m 和 n 值见表 17。

表17 各类材料的 m 、 n 和 T_{max} 值

材料	m	n	$T_{max}/^{\circ}C$
低合金钢	2.0	0.2	370
马氏体不锈钢	2.0	0.2	370
碳钢	3.0	0.2	370
奥氏体不锈钢	1.7	0.3	425
镍-铬铁合金	1.7	0.3	425
镍-铜合金	1.7	0.3	425

- c) 疲劳评定时除了不需采用 6.3.6.7 的规定外，其他的要求应与 6.3.3.6 的规定相同。
- d) 部件应满足 6.3.3.7 节规定的热棘轮效应要求。
- e) 温度应不超过表 17 所列各类材料的温度值。
- f) 材料最小屈服强度与最小抗拉强度的比值应小于 0.80。

6.3.7.4 如果所施加的荷载是冲击性质的荷载，可采用塑性分析或试验验证的方法来适当放宽 6.3.3.1、6.3.3.2、6.3.3.3 和 6.3.3.4 中规定的 A 级、B 级、C 级和 D 级使用限制下的许用限值。塑性分析或试验应能证明冲击荷载作用下的失效系数小于持续荷载作用下由 A 级使用限制规定的失效系数。

6.4 开孔和开孔补强

6.4.1 开孔的通用要求

6.4.1.1 不经受循环使用工况的钢制安全壳壳体或其部件，满足 6.4 节的要求时，无需对开孔附近区域进行分析以证明其满足 6.3.3.2、6.3.3.3、6.3.3.4 和 6.3.3.5 节的要求。

6.4.1.2 经受循环使用工况的钢制安全壳壳体或其部件，不满足 6.3.3.6.1 节的规定时，需要进行疲劳分析，而 6.4 节中的规定可确保压力荷载作用下开孔附近的应力结果仅满足 6.3.3.2、6.3.3.3 和 6.3.3.4 节的要求，无需进行特殊的应力分析。若在接管附近，由接管外荷载和温度效应，包括总体结构不连续性，但不包括局部结构不连续性，引起的应力强度，经分析表明小于 $1.5S_m$ 时，也可认为是满足 6.3.3.5 节的要求的。若按 6.3.3.6.2 的规定进行评定时，压力荷载产生的峰值应力强度可根据 6.4.6 节给出的方法求得。

6.4.1.3 开孔应是圆形、椭圆形或由圆形或椭圆形筒体与钢制安全壳相交而形成的其它任何形状。

6.4.1.4 圆筒形和球形壳体上适当补强的开孔，其尺寸不受限制。6.4.4 中给出了可作为补强金属的规定。

6.4.1.5 所有引用的尺寸均指最终完工尺寸，不包括附加的腐蚀裕量。

6.4.1.6 开孔可位于焊接接头上。

6.4.2 壳体和成型封头上开孔的补强要求

6.4.2.1 补强面积的数量和分布应满足通过开孔中心和与壳体表面垂直的所有平面对补强面积的要求。直径小于等于 64mm 的开孔无需进行补强。

6.4.2.2 承受内压的钢制安全壳，在任何给定平面上所需的补强面积 A 应按下式计算，且至少一半的补强面积应位于开孔中心线的每一侧：

$$A = F \times d \times t_r \dots\dots\dots (56)$$

式中：
d=圆孔完工直径或考虑平面上椭圆形和长圆形开孔完工弦长的长度；
F=修正系数，用于补偿在相对于钢制安全壳轴线成不同平面上压力引起应力的变化。（除图10可用于圆筒形壳体的整体补强开孔外，对于其他结构形式取F=1.0）；
t_r=按本章规定对壳体或封头在设计压力下求出的计算厚度，但下述情况例外：
a) 当开孔机补强完全处在碟形封头的球形部分内时，t_r是按 6.2.1.6 b)取 M=1.0 求得的计算厚度；
b) 当开孔及补强在椭圆形封头上，且全部位于一个圆内，其中心线与封头中心线重合，以及该圆的直径等于壳体直径的 80%时，t_r是一个外半径为 K₁D_o的无缝球体的计算厚度，其中 K₁由表 18 给出。

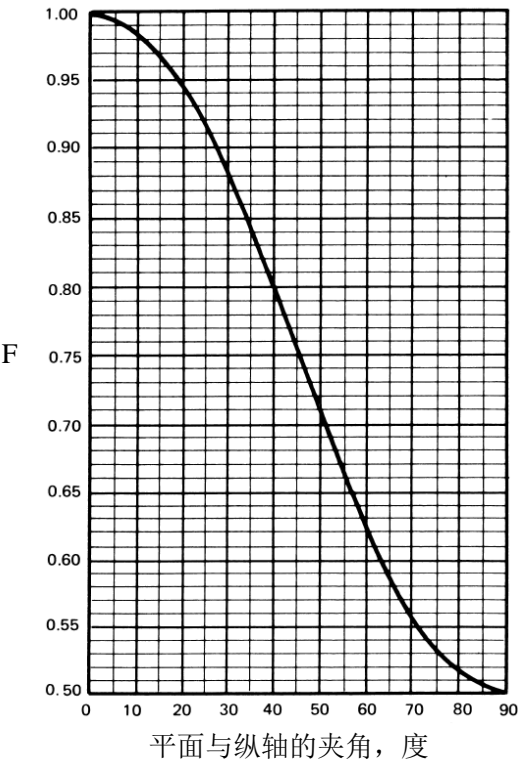


图10 修正系数 F 值

表18 球形壳体半径系数 K₁

D _o /2h _o	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K ₁	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50
注：当量球壳外半径=K ₁ D _o ，D _o /2h _o =长短轴比值，对于中间值，允许用内插法求K ₁ 。											

6.4.2.3 对于承受外压荷载作用的钢制安全壳，开孔所要求的补强不得小于 6.4.2.2 节所要求补强面积的 50%，其中 t_r 是按外压设计规定的计算厚度。

6.4.2.4 对于既承受内压又承受外压作用的钢制安全壳，内压作用的补强面积应满足 6.4.2.2 节的规定，外压作用的补强面积应满足 6.4.2.3 的规定。

6.4.3 补强范围

6.4.3.1 沿钢制安全壳名义厚度中间面测得的补强范围应满足下述规定：

- a) 所需全部补强应位于到开孔轴线每一侧的距离等于下面 1) 和 2) 中的较大值：
 - 1) 完工开孔的直径；
 - 2) 完工开孔的半径，加上壳体壁厚及接管壁厚的总和。
- b) 所需补强的三分之二应位于到开孔轴线每一侧的距离等于下面 1) 和 2) 中的较大值：
 - 1) $r + 0.5\sqrt{Rt_n}$ ，这里 R 是壳体或封头的平均半径， r 是完工开孔的半径；
 - 2) 完工开孔半径加上壳体壁厚与接管壁厚总和的 $2/3$ 。

6.4.3.2 垂直于钢制安全壳壳体的补强范围应与表面外形一致，在离每一表面的距离应等于图 11 所示下面 a)、b) 和 c) 中规定的范围：

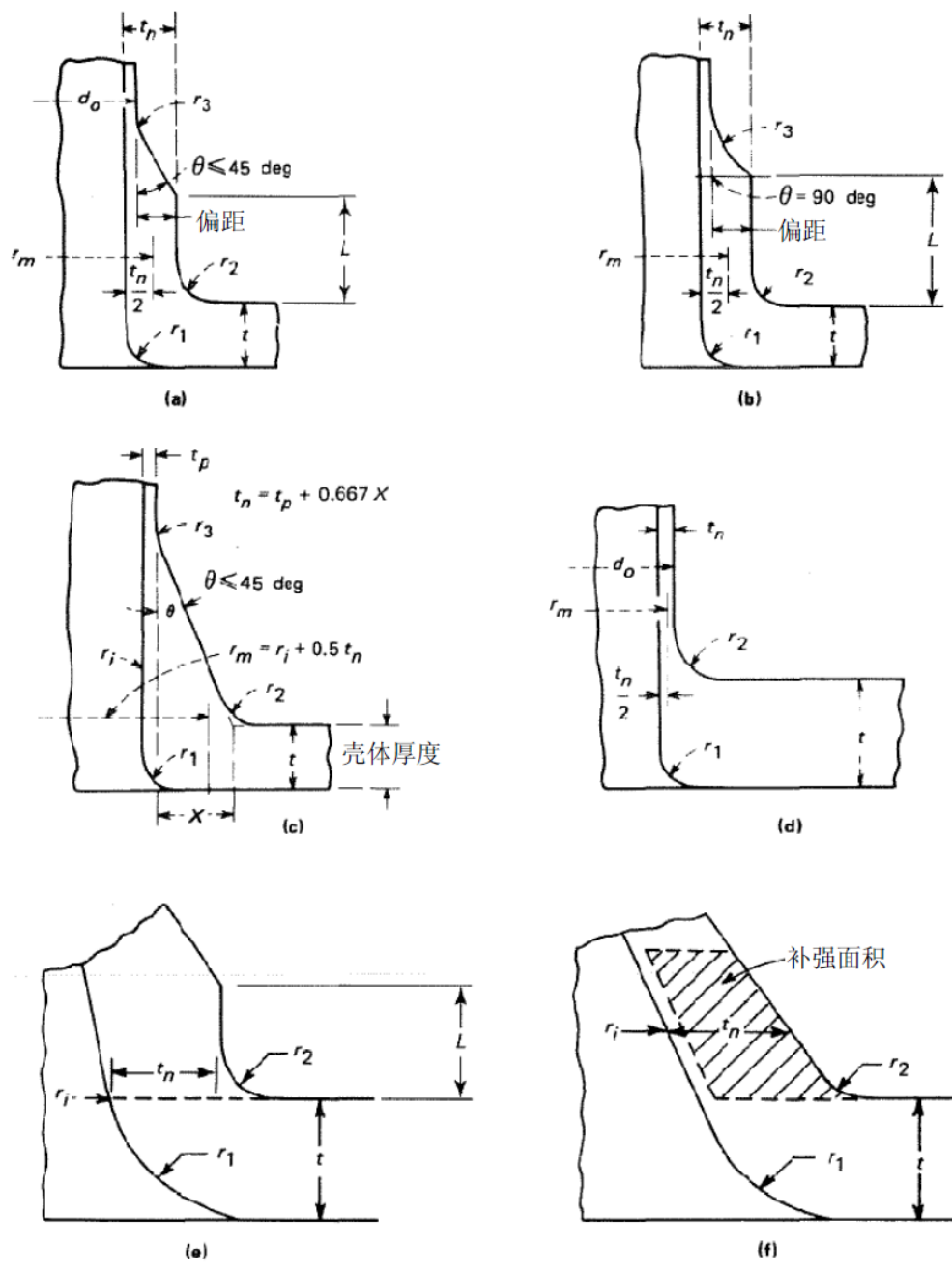
- a) 对于图 11 的简图(a)、(b)、(d)和(e)：
 - 1) 若 $L \geq 2.5t_n$ ，补强限制范围等于 $(0.5\sqrt{r_m t_n} + 0.5r_2)$ 或 $(2.5t_n)$ 中的较大值。
 - 2) 若 $L < 2.5t_n$ ，补强限制范围等于 $(0.5\sqrt{r_m t_n} + 0.5r_2)$ 。

注：对于带有锥形内径的接管，应采用钢制安全壳名义外径处的 r_i 和 t_n 值来计算补强范围(见图11的简图(e))。

- b) 对于图 11 的简图(c)和(f)，补强限制范围等于 $0.5\sqrt{r_m t_n}$ 。

注：对于带有锥形内径的接管，应采用接管补强面积重心处的 r_i 和 t_n 值来计算补强范围(见图11的简图(f))。

- c) 当采用补强板或插入板时，垂直于钢制安全壳壳体测得的补强范围应和表面外形一致，在离每一表面的距离应等于 $(0.5\sqrt{r_m t_n} + t_e)$ 或 $(2.5t_n + t_e)$ 中的较大值，式中 r_m 是接管的平均半径， t_e 等于任何附加补强的厚度或壳体壁厚 1.5 倍中的较小值。



r_i = 内半径; t_n = 接管名义厚度; r_m = 接管平均半径 $= r_i + 0.5 t_n$; L = 接管颈部长度的;
 t_p = 连接管道的名义厚度;
 r_2 = 接管和钢制安全壳之间的过渡半径;
 X = 斜面偏移距离;
 θ = 斜面与垂线之间的夹角, 等于或小于 45° 。

图11 接管尺寸

6.4.4 可用作补强的金属

6.4.4.1 位于补强范围内可作为补强所需面积的金属，应满足下述要求：

- a) 壳体中超过按 6.2.2 节规定的所需厚度以外的金属；
- b) 接管壁中金属，满足接管与壳体成一个整体或它与壳体用全焊透焊缝连接；
- c) 与壳体呈完全连续的焊缝金属；
- d) 上述 b)或 c)中所包括补强金属，其平均热膨胀系数值应在壳体材料热膨胀系数值的 85%至 115%以内；
- e) 与壳体不完全连续的金属，如只在一侧用部分熔透焊缝连接的接管，不得作为补强部分；
- f) 用作补强的金属只能为一个开孔所用；
- g) 在开孔中心线的每一侧应不小于所需补强材料的一半。

6.4.4.2 多孔补强

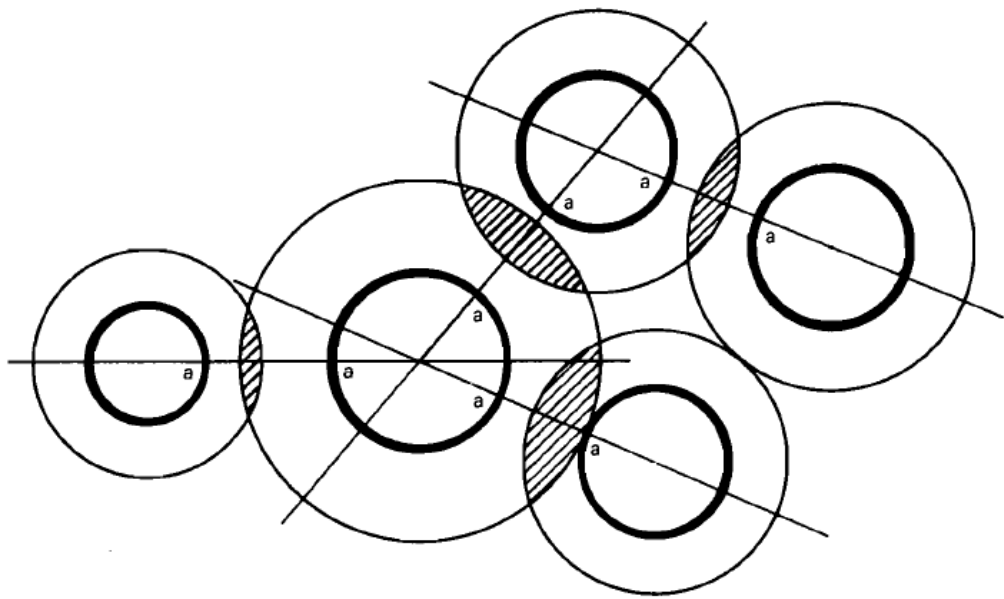
6.4.4.2.1 在两个以上的一组开孔中，当任何两个开孔的间距小于它们平均直径的两倍，使得它们的补强范围产生搭接时，如图 12，应进行联合补强计算，其联合补强面积等于单个开孔所需补强面积之和。任一部分截面不得用于超过一个开孔补强，或在联合补强面积计算中不得超过一次。同时满足下列要求：

- a) 当任何两个开孔的中心距大于其平均直径的 $1\frac{1}{3}$ 倍时，这两个孔之间的补强面积应不小于这两个开孔所需总补强面积的 50%；
- b) 当任何两个开孔的中心距小于其平均直径的 $1\frac{1}{3}$ 倍时，这两个孔之间的任何材料都不起补强作用，且开孔应按下面 6.4.4.2.2 的规定进行补强。

6.4.4.2.2 任何数目的相邻开孔，在任何排列情况下，都可用一个包围所有这些开孔在内的假想开孔来补强。假想开孔的直径应不超过下列规定数值：

- a) 当钢制安全壳直径小于等于 1500mm 时，假想开孔直径可取钢制安全壳直径的一半，但应不超过 500mm；
- b) 当钢制安全壳直径大于 1500mm 时，假想开孔直径可取钢制安全壳直径的三分之一，但应不超过 1000mm；

6.4.4.2.3 当一组开孔采用一块较厚截面的材料对接焊到壳体或封头上进行补强时，则该嵌入材料的边缘应按 6.6.1 的规定加工成锥形过渡。



通过a-a的每块截面积，应计算其补强是否足够。
 注1：阴影部分面积表示有搭接的补强范围；
 注2：粗实线表示开孔，细实线表示补强范围。

图12 多孔补强布置

6.4.5 补强材料的强度

6.4.5.1 用作补强的金属材料宜与钢制安全壳壳体材料相同。补强材料的设计应力值低于壳体材料时，公式法计算所需补强面积应为所给实际面积乘以补强材料设计应力值与壳体材料设计应力值的比值。补强材料的设计应力值高于壳体材料时，不得减少所需的补强面积。在壳体或任何补强垫块外边作为补强用的熔敷焊接金属，其许用应力值应等于被焊接连接中较弱者材料的许用应力值，在壳体内或补强垫块内的壳体与接近或补强垫块与接管连接处的熔敷焊接金属，可以认为分别具有等于壳体或补强垫块的应力值。

6.4.5.2 按 6.4.3 规定的平面的每一侧上，连接壳体与补强件或连接附加补强的任何零件的连接强度应按下述两者中的较小值。

- a) 所考虑的补强元件横截面的抗拉强度；
- b) 按 6.4.2 节确定的补强面积的抗拉强度小于与壳体成为一个整体的补强面积的抗拉强度。

6.4.5.3 连接接头的强度应按 6.4.3 节所定义的补强区平面每侧上的全长来考虑。对于长圆形开孔，也应考虑垂直于开孔两平行侧边且通过开孔半圆端中心的平面一侧上的连接接头的强度。

6.4.6 运行工况下用于疲劳评定开孔处的承压应力

6.4.6.1 开孔周围的峰值应力可通过有限元分析方法或试验应力分析方法或应力指数方法求得。

6.4.6.2 对于开孔处承压能力的疲劳评定，可通过详尽的应力分析确定开孔周围的应力分布和总峰值应力，并按 6.3 节规定进行评定。

6.5 焊接连接设计

6.5.1 焊接接头分类是指焊接接头在钢制安全壳上的位置，并非指接头的型式。所确定的分类用于规定有关承压焊接接头的型式和检测程度的特殊要求，并不适用于每个焊接接头。焊接接头按下述分为 A 类、B 类、C 类和 D 类接头，图 13 列举了各类典型接头的位置。

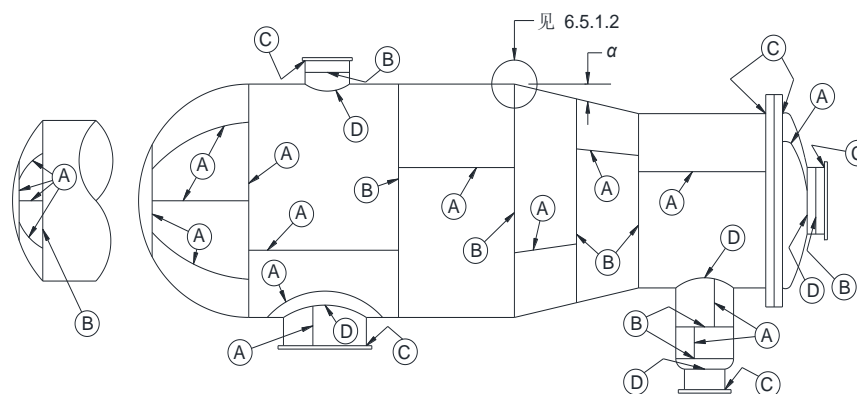


图13 A类、B类、C类、D类焊接接头典型位置示意图

6.5.1.1 A类接头包括主壳体、连通室直径过渡段或接管上的纵向焊接接头；球体、成形封头或平封头上的任何焊接接头；连接半球形封头与主壳体、直径过渡段、接管或连通室相连接的环向焊接接头。

6.5.1.2 B类接头包括主壳体、连通室、接管或直径过渡段(包括过渡段大端或小端的筒体之间的接头)的环向焊接接头；连接成形封头(不包括半球形封头)与主壳体、直径过渡段、接管或连通室相连接的环向焊接接头。

6.5.1.3 C类接头包括连接法兰、翻边搭环、管板或平封头与主壳体、成形封头、直径过渡段、接管或连通室相连接的焊接接头；箱形容器的侧板及与侧板相连接的任何焊接接头。

6.5.1.4 D类接头包括将连通室或接管与主壳体、球体、直径过渡段，封头或箱形容器上的焊接接头；以及将接管与连通室上相连接的焊接接头。直径过渡段小端处的接管焊接接头见 B 类。

注1：连通室为钢制安全壳的附属体，它与钢制安全壳的壳体或封头相贯通，组成一个承压密封结构的整体部分。

注2：箱形容器的侧板为组成承压密闭外壳整体部分的任何平板。

6.5.2 焊接接头许用形式

6.5.2.1 安全壳设计应满足下述各类焊接接头的要求。对接接头是指大致位于同一平面的板材之间或其他元件之间的全焊透接头。偏斜角 α 不超过 30° 的板材之间或其它元件之间的 B 类角接头可认为满足对接接头要求。图 14 表示了各类接头的典型对接焊缝。

6.5.2.2 A类接头，应满足 7.2.14 条 a) 的制造要求，且应按照 8.2.1 的规定进行检测。

6.5.2.3 B类接头，应满足 7.2.14 条 b) 的制造要求，且应按照 8.2.2 的规定进行检测。对于电气贯穿件中的 B 类对接焊缝，其表面检测可由射线检测代替，但其焊接接头的许用应力应乘以 0.8 的系数。

6.5.2.4 C类接头，应满足 7.2.14 条 c) 的制造要求，且应按照 8.2.3 的规定进行检测。此外，尚应满足图 21 和图 22 中的最小尺寸要求。

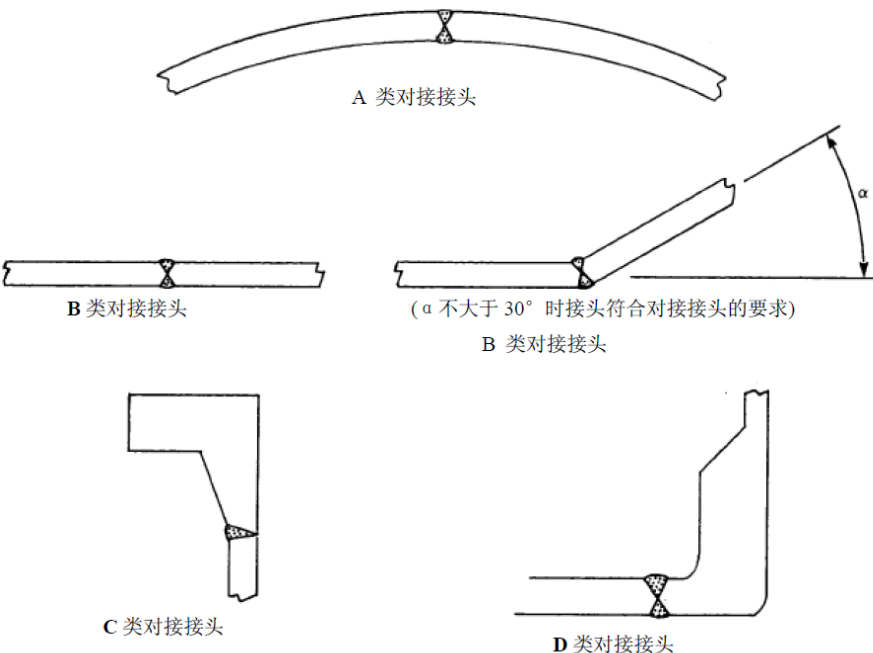


图14 典型的对接接头

6.5.2.5 D类接头，应满足 6.5.6 的要求和下列各项要求之一：

- a) 当接管采用对接焊缝连接，接管应满足 7.2.14 条 d)1) 的制造要求，且应能按照 8.2.4 条 a) 的规定进行检测。此外，尚应满足图 23 中的最小尺寸和几何形状的要求。
- b) 当接管在转角部位采用全焊透焊缝连接，接管应满足 7.2.14 条 d)2) 的制造要求，且应能按照 8.2.4 条 b) 的要求进行检测。以单独补强板形式进行补强的插入式接管应在补强板的外缘和在接管周边用焊接进行连接。补强板外缘的焊接应是角焊缝，其最小角焊缝实际厚度尺寸为 $0.5t_{min}$ 。此外，应满足图 24 中的最小尺寸要求。
- c) 当开孔和接管部位采用熔敷焊接金属：
 - 1) 接管应满足 7.2.14 条 d)3) 的要求；
 - 2) 当熔敷焊缝金属用作补强时，母材、焊缝金属和接管的热膨胀系数之差应不大于它们中最小热膨胀系数的 15%；
 - 3) 应满足图 25 所示要求；
 - 4) 每个接管颈伸出被插入部分内表面的距离小于 $\sqrt{dt_n}$ 时，其端头应倒圆，且圆角半径为接管颈部厚度 t_n 的一半或 19mm 中的较小值。
- d) 当接管采用部分熔透焊缝连接：
 - 1) 从两边焊接的接管，其部分熔透焊缝应满足 7.2.14 条 d)4) 的要求，且满足图 26 所示要求。对无补强件的插入式接管，可以采用两条部分焊透焊缝(可以是角焊缝、单面 V 型坡口焊缝以及单面 J 型焊缝的任一种所需的组合)。以单独补强件形式进行补强的插入式接管不允许采用部分焊透焊接；

- 2) 从一边焊接的接管,其部分焊透焊缝仅适用于没有管道反作用力的附件。这些部分焊透焊缝应满足 7.2.14 条 d)4)的制造要求,且应能按照 8.2.4 条 b)的要求进行检测。此外,应满足图 27 所示要求;
 - 3) 凡接管颈伸出被插入部分内表面部分的距离小于 $\sqrt{dt_n}$ 时,其端头应倒圆,且圆角半径为插入部分厚度 t_n 的一半或 19mm 中的较小值;
 - 4) 与接管连接的部分焊透接头的焊接坡口设计应作特殊考虑,应达到最小焊接深度 $1.25t_n$,并便于进行焊接检测。图 27 和图 28 中的简图所示的焊缝可位于壳体的内壁或壳体的外壁。焊缝坡口可以如图中所示的 J 型坡口或单边 V 形坡口。
- e) 带内螺纹配件的连接:
- 1) 除下面 2)和 3)中的规定以外,尚应满足 7.2.14 条 d)5)的规定。应满足图 29 所示要求;
 - 2) 图 29 中简图(a-2)、(b-2)、(C-2)和(d)所示的不超过 DN50 的配件可用焊缝连接,这些焊缝只需符合 6.5.6 要求;
 - 3) 当内螺纹的配件和螺栓连接垫块不超过 DN80,可仅从外侧熔敷的角焊缝将其连接到壁厚不大于 10mm 的容器上,其焊缝应符合图 30 所示要求;当开孔超过 DN125,则应对其进行补强,且接管或其它连接件需采用图 29 中的合适详图。
- f) 对于管接头的连接,插入厚壁容器或封头内、仅从一面焊接的管子,在容器壁上均应有焊接坡口,其坡口在开孔纵轴方向上的深度应不大于 t_n ,在坡口底部应设有一个 1.5mm 深的凹槽,使接管在其中对中。连接焊缝尺寸 t_w 应不小于 t_n ,也不小于 6mm。 t_c 的最小尺寸应是 6mm,如图 31 所示。

6.5.3 除在 6.5.2.5 中另有规定外,连接边缘的尺寸和形状应使其完全熔合和焊透。

6.5.4 角焊缝

6.5.4.1 C 类焊缝的角接头或 T 型接头可用角焊缝制成,但此类连接件应不依赖焊缝作用而能独立支承。满足 6.7.2 要求的端盖可用角焊缝连接。

6.5.4.2 角焊缝的许用荷载应等于以最小焊脚尺寸为依据的焊缝面积、被焊材料的许用拉伸应力值与接头系数 0.55 三者的乘积。

6.5.4.3 除在其它条款中允许的特殊细则外,承受弯曲应力的焊接接头,在需要减少应力集中的地方,均应附加角焊缝。应不采用仅用角焊缝的角接头,除非构成角接头的板材不依赖这些焊缝而得到恰当的支承。

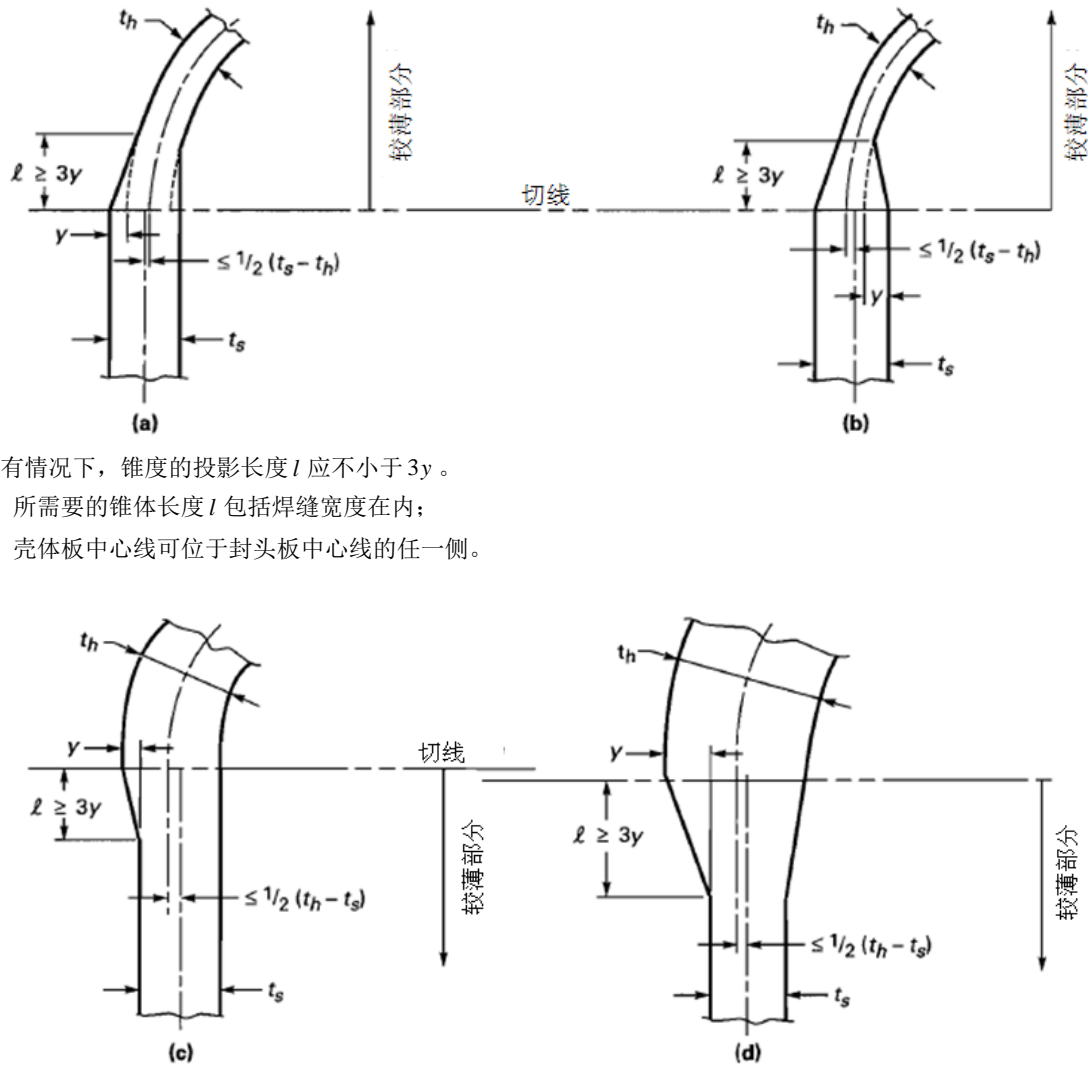
6.5.5 封头连接

6.5.5.1 凹面或凸面承压的椭圆形和其它型式的成形封头,应具有不小于图 15 所示的折边长度。装配在壳体里面或外面的封头在焊接前应为紧配合。

6.5.5.2 当成形封头和壳体的厚度差超过较薄截面厚度的四分之一或 3mm 中的较小值时,在其接头处应有一个如图 15 所示的锥形过渡段,其长度应不小于相接部分的相邻表面之间偏距的 3 倍。当厚度

大于壳体的任何成形封头需要一个便于对接焊连接的锥体时，其折边长度应足以使所需的锥体长度不超出切线。

6.5.5.3 当壳体、封头或其他承压部件与锻造或轧制板材焊接，构成如图 21 和图 22 所示的角接接头时，应满足图 21 和图 22 角接接头构造要求。



在所有情况下，锥度的投影长度 l 应不小于 $3y$ 。

注1：所需要的锥体长度 l 包括焊缝宽度在内；

注2：壳体板中心线可位于封头板中心线的任一侧。

当 t_h 大于 $1.25t_s$ 时，在任何情况下， l 不得小于 $3y$ ；折边的最小长度为 $3t_h$ ，但不超过 38mm ，除有必要提供所需的锥体长度外；

当 t_h 小于等于 $1.25t_s$ 时，折边应有足够的长度，以适应锥体长度要求；

注1：所需要的锥体长度 l 包括焊缝宽度在内；

注2：壳体板中心线可位于封头中心线的任一侧。

图15 封头与壳体的连接

6.5.6 接管连接

- 6.5.6.1 在通过开孔中心且平行于壳体纵轴的直线的每一侧应保证有足够的焊接。坡口焊缝的强度应视承受剪切或拉伸的面积而定。角焊缝的强度应视承受剪切的面积(按最小焊脚尺寸计算)而定，计算角焊缝的长度时，应采用其内径。当采用全焊透焊缝时，不要求进行计算。
- 6.5.6.2 坡口焊缝和角焊缝的许用应力值以及接管中的许用剪应力值，以钢制安全壳材料应力值的百分比计，应符合表 19 要求。

表19 接管焊缝强度

焊缝应力类型	焊缝许用应力值 (以母材应力值计)
接管壁的剪应力	70%
坡口焊缝的拉应力	74%
坡口焊缝的剪应力	60%
角焊缝的剪应力	49%

6.6 螺栓的应力限制

6.6.1 设计工况

- 6.6.1.1 承受设计压力所需要的螺栓数量和横截面积应按照 T/CNEA XXX. 8-XXXX 《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》附录 G 计算。螺栓连接材料的许用设计应力取附录表 B. 3 规定值的 1. 1 倍。
- 6.6.1.2 当用焊接密封代替垫片密封时，垫片系数 m 和最小的设计压紧应力 y 可取为零。
- 6.6.1.3 当垫片只用于役前试验时，如果满足上述 $m=y=0$ 的要求，则此设计是可接受的。

6.6.2 组合荷载

螺栓中的实际使用应力，如由预紧荷载、压力和不同的热膨胀组合引起的应力，可大于6.6.1.1给出的许用应力值。

6.6.3 平均应力

不计应力集中，沿螺栓横截面平均的使用应力的最大值，不应超过附录表B.3规定应力值的2.2倍。

6.6.4 最大应力

除了6.6.5的限制外，不计应力集中，在螺栓横截面的周边上直接由拉伸加弯曲所引起的最大使用应力值不应超过附录表B.3规定应力值的3.3倍。当不用加热器、拉伸机或其他方法拧紧螺栓以减小残余扭矩时，应将应力强度限制在此值以内。

6.6.5 螺栓的疲劳分析

如果装有螺栓的部件符合6.3.3.6.1的全部条件，则不要求进行疲劳分析。否则，螺栓对循环使用的适用性应按下列a)到e)的规定。

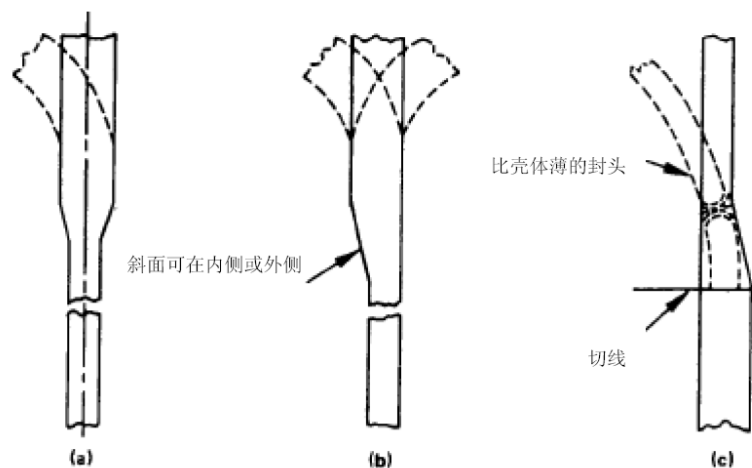
- a) 抗拉强度小于 700MPa 的螺栓，以及用规定的最小抗拉强度小于 700MPa 的材料制成的螺栓，应按 6.3.3.6.2 对循环使用进行评定，并应采用 T/CNEA XXX.8-XXXX《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》图 C.4 中适用的设计疲劳曲线和合适的疲劳强度减弱系数（6.6.5(c)）。
- b) 高强度合金钢螺栓如满足下面 1)、2)和 3)的要求，则高强度合金钢螺栓和双头螺栓可按 6.3.3.6.2 的方法，使用图 C.4 中的设计疲劳曲线来评定循环使用。
 - 1) 在螺栓横截面的周边上，如果采用图 C.4 给出的两条设计疲劳曲线中的较高值，则由直接拉伸和弯曲不计应力集中的影响所引起的最大使用应力值（6.6.4）应不超过 $2.7S_m$ 。直接拉伸时的限值为 $2S_m$ 不变。
 - 2) 螺纹呈 V 型，螺纹根部最小半径应不小于 0.08mm。
 - 3) 螺栓柱端部的圆角半径，应使圆角半径与螺栓柱直径之比不小于 0.060。
- c) 疲劳强度减弱系数除非能用分析或试验证明采用较低的数值是合适的，否则在螺纹的疲劳评定中所用的疲劳强度减弱系数应不小于 4.0。但是对高强度合金钢螺栓应用 6.6.5(b)时，所用的数值不应小于 4。
- d) 将 $S_{\text{交变}}$ 乘以设计疲劳曲线给出的弹性模量与分析所用的弹性模量的比值，在适用的设计疲劳曲线上查到相应的循环次数。如果所考虑的循环荷载仅一种且引起了有意义的应力波动，则此值即为许用的循环次数。
- e) 如按 6.3.3.6.2 (e) 确定的累积使用系数 U 不超过 1.0，则螺栓对使用的荷载和热应力的循环使用是可以接受的。

6.6.6 设计应力值

螺栓的设计应力强度值 S_{mc} 和许用应力值 S 为附录表 B.3 规定应力值的 1.1 倍，对于中间温度下的数值可用内插法求得。T/CNEA XXX.8-XXXX《压水堆承压部件 设计与制造 第 8 部分：辅助规则》附录 E 提供了确定应力强度值的依据。

6.7 特殊要求

6.7.1 在各段之间的接头处，当其厚度差大于较薄截面厚度的四分之一或 3mm 其中的较小值时，应设置一锥形过渡段，其长度应不小于相连接两截面的相邻表面之间偏距的 3 倍，如图 16 所示。焊缝可部分或全部位于锥形段内或其邻近区。



注：斜面长度包括焊缝宽度在内。

图16 不等厚截面间的 A 类和 B 类接头

6.7.2 名义管径小于等于 DN50 的贯穿孔上的密封件，可采用盲板法兰、焊接塞或管帽等类似密封配件。

6.8 电气和机械贯穿件

6.8.1 电气和机械贯穿件承压部分的设计与钢制安全壳的设计相同，可依据 6.2 节的计算。

7 制造和安装

7.1 一般规定

7.1.1 钢制安全壳的制造和安装除应符合本章规定外，还应符合设备制造技术要求和图纸的规定。钢制安全壳组装和安装可参考 NB/T 20391 技术规程。

7.1.2 用于承压部件的材料应带有识别标记，识别标记在部件组装或安装完毕后应仍能识别。如果原来的识别标记被切除或材料被分成几块，应将识别标记移植到切割后的各块板材或部件上。做识别标记时不得对原材料造成有害的污染或明显的不连续性。

7.1.3 丢失识别标记的材料，若没有试验或其他证明材料能证明其原有标识，该材料应作为不符合项材料。经认定的材料可再次在材料上进行标识。

7.1.4 焊接材料应满足 5.5 的要求。

7.1.5 在交货中原已验收的材料，在制作或安装过程中得知或发现缺陷有超过 5.6 的规定，该材料是不能接受的。如果按 5.6 中相对应的产品形式的要求对其进行了修补，则该材料仍然可以使用。下列情况可不按 5.6 执行：

- a) 补焊深度不作限制；
- b) 焊缝坡口补焊后的检验时间应符合 8.1.6 的规定；
- c) 对于厚度等于或小于 6mm 的密封薄膜材料补焊，不需要进行射线检查。

7.2 成形、装配和对中

7.2.1 可通过机加工、切削、打磨等机械方法或通过氧气切割或电弧切割方法将平板、封头边缘及其他零件加工到所需的形状和尺寸。氧气切割后，需要进行焊接的边缘应平顺并打磨至光滑，且无疏松的鳞屑和残渣。

7.2.2 当采用热切割来加工焊接接头或坡口，为去除焊接附件或材料的缺陷，或为其他任何目的，应考虑对材料进行预热。

7.2.3 可采用冷成形、热成形或弯曲形式将承压材料（包括焊接材料）加工成需要尺寸的形状，成形后材料的冲击韧性值不得小于规定的最小值。

7.2.4 钢制安全壳体材料经冷成形后，其最外边缘纤维的最终伸长大于 5% 时，应对成形后的材料进行成形后热处理。

7.2.5 当设计技术规格书要求作冲击试验时，应进行工艺评定试验，试验材料应与部件中所用的材料具有同样的规格、等级或类别、热处理制度，并且具有相似的冲击性能。这些试样应经受与部件材料相同的成形或弯曲过程以及热处理制度，且应进行相应的试验以确定变形后仍满足 5.4 冲击性能要求。

7.2.6 对于下列 a) 到 f) 所列的材料。不需要进行工艺规程评定试验：

- a) 在切取冲击试样前已由金属材料制造单位完成热成形的材料，例如锻件；
- b) 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；
- c) 按 5.4 不要求冲击试验的材料；
- d) 最终应变小于 0.5% 的材料；
- e) 最终应变小于预先评定的工艺规程中的应变的材料；
- f) 在成形后，每炉和每批按 5.4 要求进行冲击试验的材料。

7.2.7 工艺评定试验应按下面 a) 到 f) 规定的方法进行。

- a) 应在变形以前及变形和热处理以后，各用三个不同炉号的材料进行试验，以确定成形和随后的热处理操作的影响。
- b) 试样应按第 5 章的要求切取，并应取自变形材料的拉伸侧。
- c) 应变率应按下列公式确定：
对于筒体：

$$\% \text{ 应变} = \frac{50t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \dots\dots\dots (57)$$

对于球形或碟形表面：

$$\% \text{ 应变} = \frac{75t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \dots\dots\dots (58)$$

对于管道：

$$\% \text{ 应变} = \frac{100r}{R} \dots\dots\dots (59)$$

式中：

- t = 名义厚度
- R_f = 到壳体中心线的最终半径

R_0 = 初始半径（对于平板状零件，此值等于无穷大）

R = 到管道中心线的名义弯曲半径

r = 管道的名义半径

- d) 工艺评定应使用与材料制造中采用的相似的弯曲过程，或在试样直接拉伸，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氏 V 形缺口试样，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整个转变区域内分布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（5.4）。此外，如 5.4 有要求，还应进行落锤试验。
- f) 用三炉材料的每一炉在变形前后的冲击试验数据结果，确定任一项：
 - 1) 无延性转变温度（NDT 温度）随下列变化而发生最大的变化：
 - (1) 在所考虑的温度下，横向膨胀量和吸收能量的最大变化，或
 - (2) 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（5.4）时，最大温度变化或最大横向膨胀量变化。

7.2.8 作为部件上使用的合格成形材料，在成形前应具有足够的冲击性能，以补偿由所用的评定成形过程引起的冲击性能的最大损失。

7.2.9 当发生下面 a)、b) 和 c) 中的任何一种变化时，要求进行新的工艺评定试验。

- a) 在某一温度下的实际焊后热处理保温时间大于按 5.3.1.1 节已评定过的时间。如果材料没有进行焊后热处理，则应在不进行焊后热处理的条件下进行工艺评定试验。
- b) 材料的最大应变计算值超过以前已评定应变值 0.5% 以上。
- c) 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。

7.2.10 制造单位应根据制造工艺确定加工余量，以确保受压元件成形后的实际厚度不小于设计图纸中标注的最小成形厚度。

7.2.11 在任一横截面上，最大和最小内径之差应不超过所考虑横截面上名义内径的 1%，如图 17 所示。若在某一横截面处有开孔，则该横截面处最大和最小内径之差应不超过所考虑横截面上名义内径的 1% 加开孔内径的 2%。

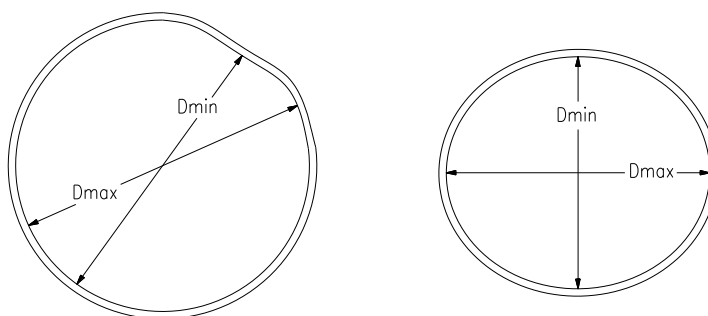


图17 横截面直径最大偏差示意图

7.2.12 若钢制安全壳承受外压，则其偏离理论形状的最大偏差应满足下列要求：

- a) 沿径向测量的筒体内壁或外壁与其理论形状的最大正、负偏差，应不大于图 18 所示的最大允许偏差值 e ，图中的最大允许偏差值 e 不小于 $0.3t$ 。可采用扇形样板测量偏差，样板圆弧半径

应等于测量部位的设计内半径或设计外半径，样板弦长等于图 19 所示弧长的 2 倍，图中的弧长不大于 $0.3D_o$ 。测量时应避开焊缝和有凸起的部位；

- b) 对于等厚度的截面，任一横截面的 t 值等于名义板厚减去腐蚀裕量；对于有几种不同板厚的截面， t 为最薄板的名义厚度减去腐蚀裕量。

7.2.13 图 18 和图 19 中的 L 值按下述规定进行确定：

- a) 对于圆筒体 L 值为下述值中的最大值：
- 1) 如果圆筒体内部无加劲肋，则 L 值取封头切线之间的距离与每个封头深度的 $1/3$ 之和；
 - 2) 相邻加劲肋的中心到中心之间距离的最大值；
 - 3) 第一道加劲肋的中心到封头切线之间的距离与封头深度的 $1/3$ 之和。
- b) 对于球壳， L 值为球壳外径 D_o 的一半。

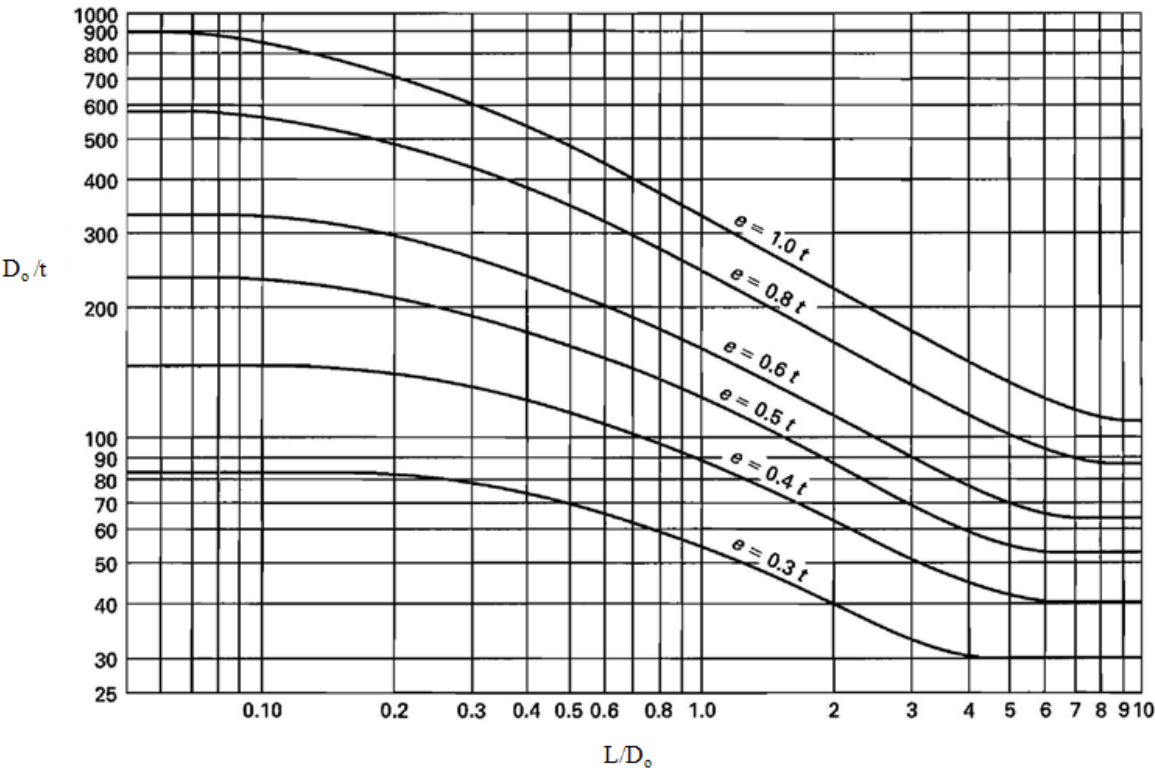


图18 最大允许偏差值

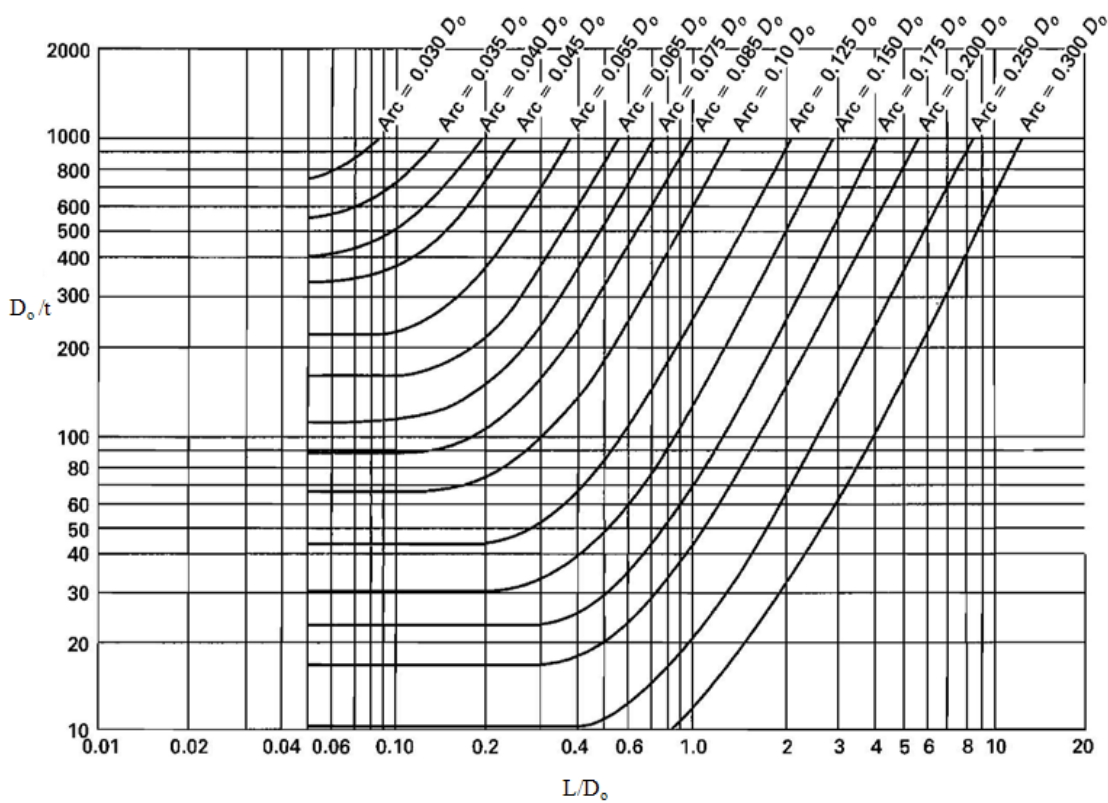


图19 确定正负偏差的最大弧长

7.2.14 成形封头的公差应满足下述要求：

- a) 成形封头的折边段或端部的圆筒体段，其最大最小直径之差应取下面两式中的较小值，其中直径 D 为名义内径，mm。

$$\frac{D + 1270}{200} \dots\dots\dots (60)$$

$$\frac{D + 305}{100} \dots\dots\dots (61)$$

- b) 碟形或椭圆形封头的内表面偏离规定形状的偏差，向外不大于 $1.25\%D$ ，向内不大于 $0.625\%D$ ，其中 D 为钢制安全壳的名义内径。偏差应沿垂直于规定形状的方向测量，并且无突变。过渡区转角半径应不小于规定值。对于 2：1 的椭圆形封头，其过渡区转角半径可取为钢制安全壳直径的 17%；
- c) 半球形封头和成形封头的球形部分应满足 7.2.7 所给的球壳局部公差的要求；
- d) 测量偏差时应避开焊缝，在母材表面上进行测量。
- e) 封头各种不相交的拼接焊缝中心线间距离应不小于封头钢材板厚的 3 倍，且不小于 200mm。凸形封头由成形的瓣片和顶圆板拼接制成时，瓣片间的焊缝方向宜是径向和环向的，如图 20 所示。

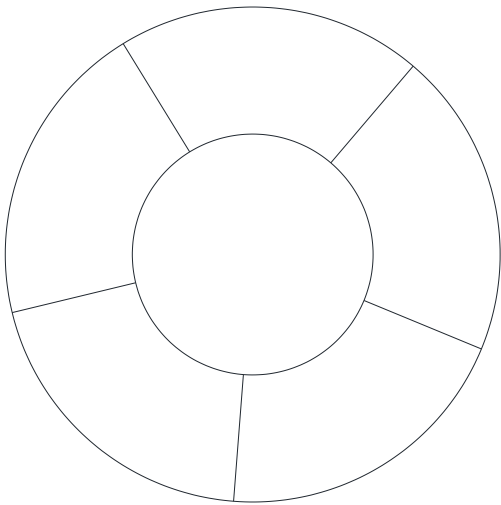


图20 分瓣成形凸形封头的焊缝布置

7.2.15 采用焊接连接的部件，在施焊时可在指定位置处借用芯棒、千斤顶、夹具、定位焊或临时性附件辅助进行装配、对中和定位。

7.2.16 用于保持对中的定位焊，在其对中功能完成后应完全清除，或采用磨削或其他合适的方法，对定位焊的起弧端和收弧端进行修整，以使它们与最终焊缝能很好地结合成一体。定位焊应由合格的焊工，采用评定合格的焊接工艺来焊接。若要将定位焊作为完工焊缝的一部分，应对定位焊进行目视检查，检查合格的可保留，有缺陷的定位焊应清除。

7.2.17 焊接接头的最大错边量应不大于表 20 所列的相应值，其中 t 为接头处较薄截面的名义厚度。球形容器上的接头、封头上的接头、圆筒形壳体与封头之间的接头应满足表 20 中纵向接头的要求。

表20 焊接接头的最大允许错边量

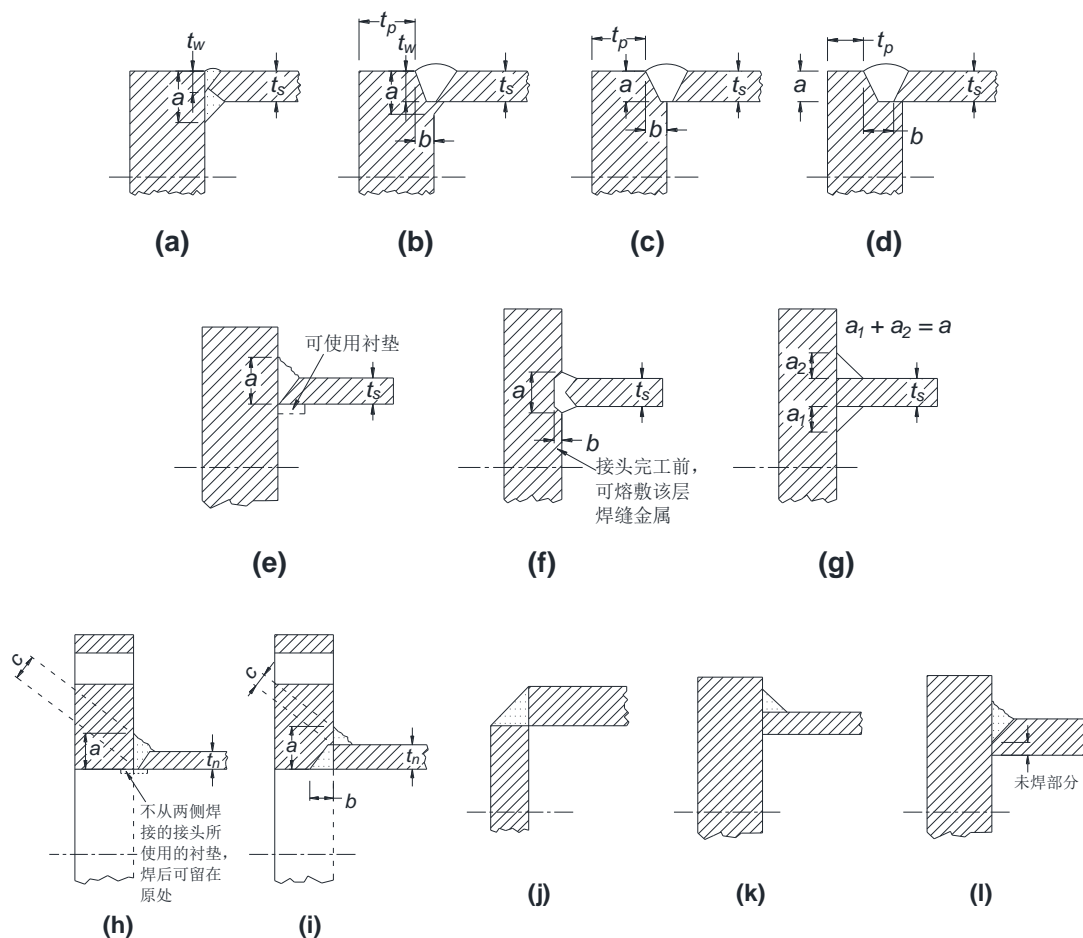
截面厚度，mm	接头类别	
	A 类焊接接头，mm	B 类焊接接头，mm
≤13	0.25t	0.25t
>13～19	3	0.25t
>19～38	3	5
>38～50	3	0.125t
>50	0.0625t 和 10mm 的较小值	0.125t 和 19mm 的较小值

7.2.18 满足表 20 要求的所有错边应修整成平滑过渡，其斜度至少应为 3:1。如有必要，可在焊缝边缘的外侧堆焊附加的焊缝金属。如果错边量超出表 20 的要求，需根据分析法的规定进行复核算，若复核结果满足要求，则该错边量也是可以接受的，其处理需满足本条要求。

7.2.19 焊接接头应满足下列要求：

- a) A 类焊接接头：应为全焊透对接接头；从单面施焊的带衬垫（焊后拆除衬垫）或不带衬垫的焊接接头，当焊缝根部满足 7.4.2.4 条要求时，该焊缝可作为全焊透焊缝；

- b) **B 类焊接接头**：除 DN50 或尺寸更小的管道的焊缝可采用插套焊缝外，其余所有 B 类焊接接头应为全焊透对接接头；采用可熔垫片或气垫的焊接接头，或采用焊后要拆除的环形金属垫片的焊接接头，均可作为全焊透焊接接头。当采用衬垫时，应沿整个横截面都设置衬垫；
- c) **C 类焊接接头**：除 DN50 或尺寸更小的管道的插套焊接法兰以及平焊法兰外，C 类焊接接头应如图 21 和图 22 所示，为全焊透焊接接头；
- d) **D 类焊接接头**：D 类焊接接头和类似的焊接接头应采用下列 1)到 7)所示方式之一进行焊接连接：
- 1) 接管应采用如图 23 所示的对接焊缝形式进行连接。焊接时，若使用衬垫条，焊后可留在原处；
 - 2) 接管在转角部位与钢制安全壳的对接焊缝应采用如图 24 所示形式进行连接。若无法用目视检测方法或其他允许的检测方法对对接焊缝进行检测，则在对接焊缝施焊时，应从单面施焊并且应在背面采用条状衬垫或具有条状衬垫功能的附件加以辅助。若使用衬垫条，焊后可留在原处；
 - 3) 接管应采用全焊透焊缝连接到钢制安全壳上，焊前在容器壁上或接管壁上熔敷堆焊层，如图 25 所示。若使用衬垫条，焊后可留在原处。在接管的连接中，应采用角焊缝，角焊缝仅作为相连接两零件之间的平滑过渡或为接管提供密封。当采用角焊缝时，角焊缝表面应打磨光滑，使相连两零件的交接处平滑过渡；
 - 4) 接管采用部分熔透焊缝时，应对部分熔透焊缝进行设计。部分熔透焊缝连接方式如图 26、图 27、图 28 所示；
 - 5) 带内螺纹的配件应采用全焊透坡口焊缝连接，对小于等于 DN50 的内螺纹配件，应采用双面角焊缝或部分熔透焊缝连接，双面角焊缝应在容器壁两侧设置，或采用带坡口的贴角角焊缝连接，如图 29 所示。直径不超过 DN80 的带内螺纹的配件与壁厚不超过 10mm 壳体的连接，可采用角焊缝，角焊缝仅允许从外部熔敷，如图 30 所示；
 - 6) 满足相关设计要求的嵌入厚壁部件或零件凹槽中的接管或管子与厚壁可采用角焊缝连接，角焊缝可只从单面施焊，如图 31 所示；
 - 7) 与容器壁外侧相连的接管的补强板上应至少设置一个最大直径为 6mm 的监测孔，用于监测对焊缝进行的密封性试验，试验介质可为压缩空气或肥皂水。在钢制安全壳服役时，补强板上的监测孔可以是敞开也可以是堵上的。如果孔是堵住的，堵孔用的材料不要求能承受补强板和钢制安全壳之间的压力。



对于简图(a), $a+b$ 不小于 $2t_s$ ($b=0$), t_w 不小于 t_s , t_s = 壳体的实际厚度;

对于简图(b), $a+b$ 不小于 $2t_s$, t_w 不小于 t_s , t_p 不小于 t_s , t_s = 壳体的实际厚度;

对于简图(c)、(d), $a+b$ 不小于 $2t_s$, a 不小于 t_s , t_p 不小于 t_s , t_s = 壳体的实际厚度;

对于简图(e), $a+b$ 不小于 $2t_s$ ($b=0$), t_s = 壳体的实际厚度;

对于简图(f), $a+b$ 不小于 $2t_s$, t_s = 壳体的实际厚度;

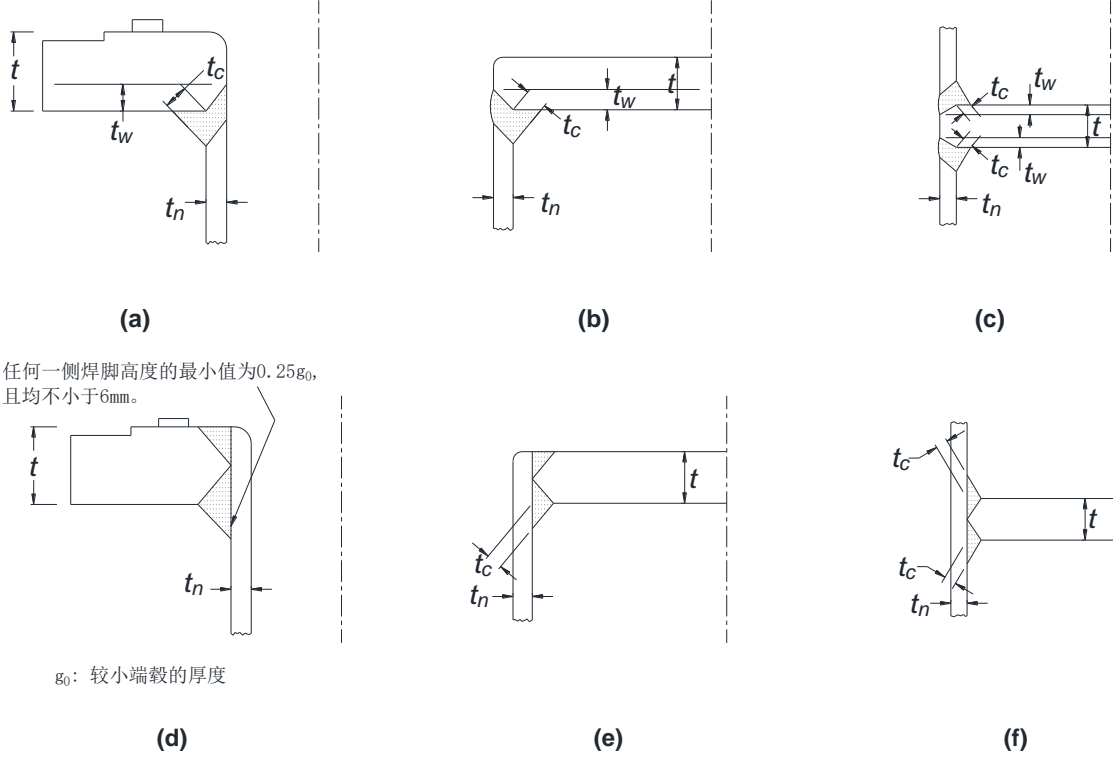
对于简图(g), $a+b$ 不小于 $2t_s$, a_1 不小于 $0.5a_2$, 但不大于 $2a_2$, t_s = 壳体的实际厚度;

对于简图(h), a 不小于 $3t_n$ ($b=0$), c 不小于 t_n 或 t_d 中的较小值 (t_d = 当设计按整体法兰计算时, 为法兰小端颈部的厚度 g_0 的两倍, 或当设计按活套法兰计算时, 为内压所要求的筒体或接管壁厚的两倍, 但不能小于 6mm);

对于简图(i), $a+b$ 不小于 $3t_n$, c 不小于 t_n 或 t_d 中的较小值 (t_d = 当设计按整体法兰计算时, 为法兰小端颈部的厚度 g_0 的两倍, 或当设计按活套法兰计算时, 为内压所要求的筒体或接管壁厚的两倍, 但不能小于 6mm);

对于简图(j)、(k)和(l), 接头尺寸小于壳体、封头或其它承压部件厚度, 或出现偏心连接, 都是不允许的。

图21 承压部件的附件与板材之间的角接头



对于从面上量得的带有焊接坡口斜角不大于45°的锻制管板、锻制平封头及锻制法兰：

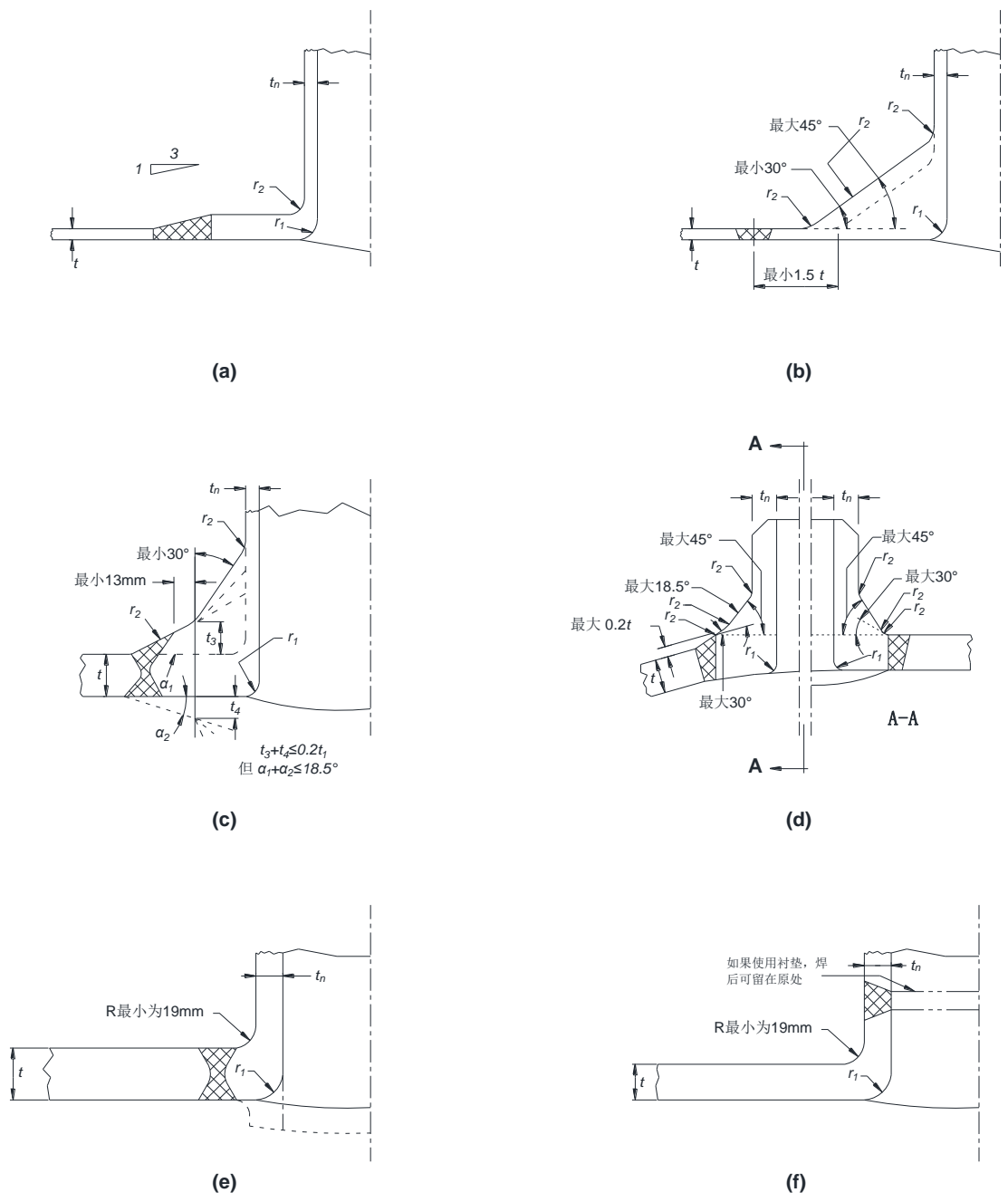
$t_c = 0.7t_n$ 或6mm中的较小值；
 $t_w = 0.5t_n$ 或0.25t中的较小值。

对于所有其它材料的构件，以及对于从上面量得的带有焊接坡口斜角大于45°的锻制管板、锻制平封头及锻制法兰：

$t_c = 0.7t_n$ 或6mm中的较小值；
 $t_w = t_n$ 或0.5t中的较小值。

注：图中t和t_n为名义厚度。

图22 C类全焊透焊接接头详图

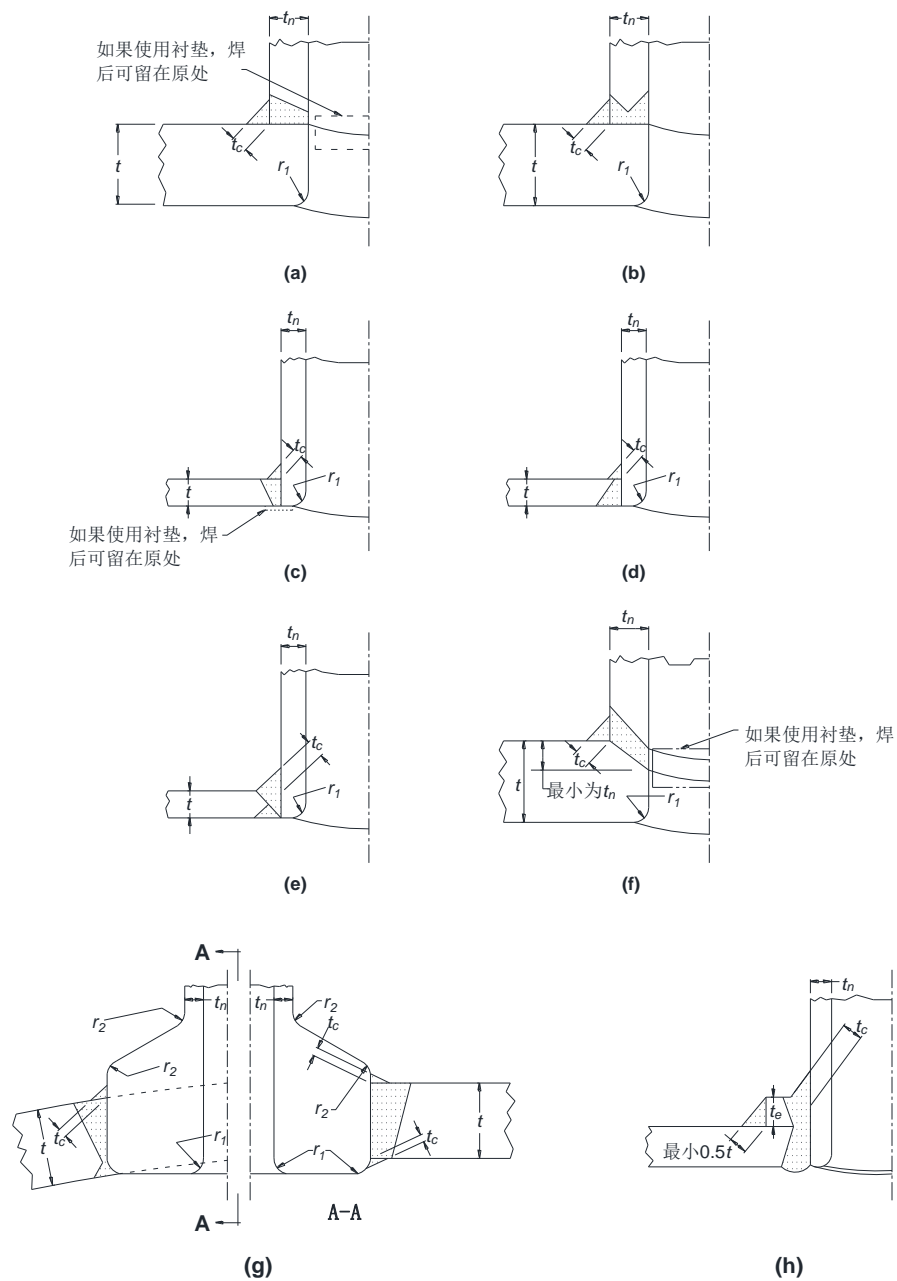


$r_1 = 0.25t$ 或 19mm 中的较小值;

$r_2 =$ 至少 6mm 。

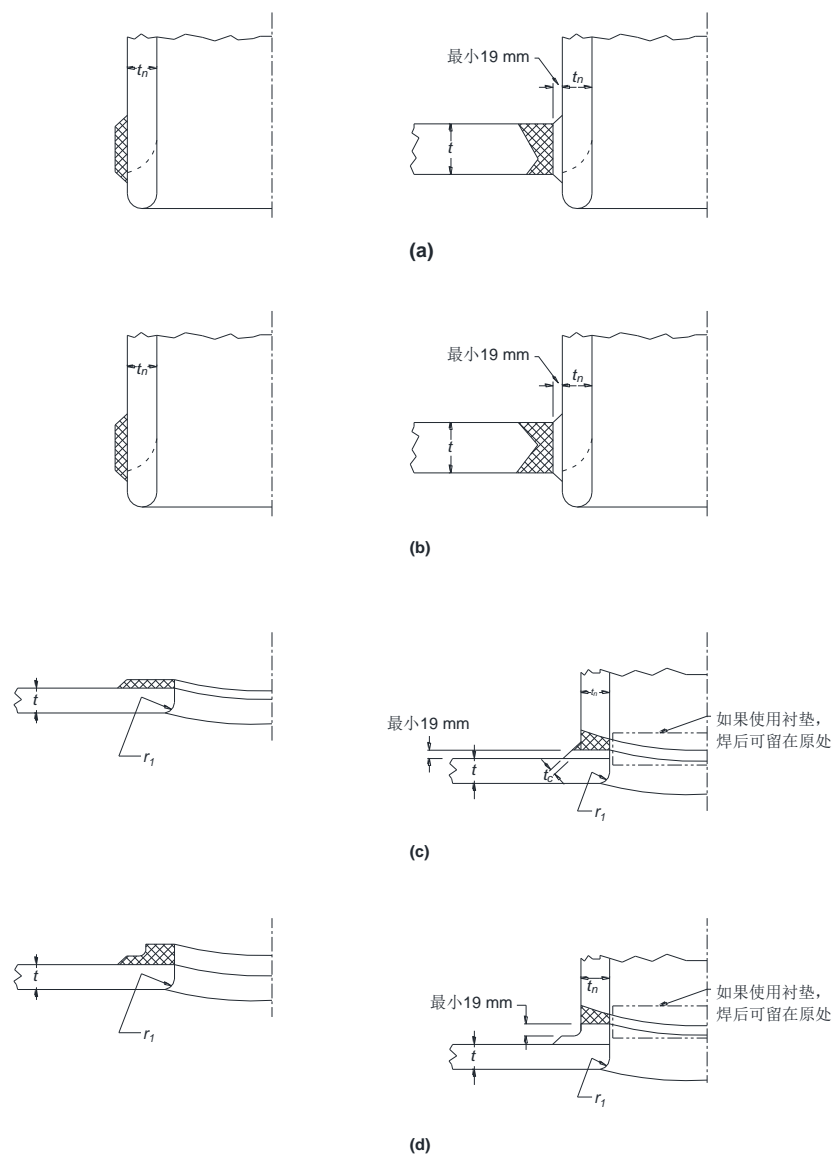
注: t = 被插入部分的名义厚度, t_n = 插入部分的名义厚度。

图23 全焊透对接焊缝的接管连接



$t_c = 0.7t_n$ 或6mm的较小值；
 $r_1 = 0.25t$ 或19mm中的较小值；
 $r_2 =$ 至少6mm；
 $t_{min} = 19\text{mm}$ 或被连接件的较薄厚度中的较小值。
注：t=被插入部分的名义厚度， t_n =插入部分的名义厚度， t_c =补强件的厚度。

图24 全焊透角焊缝的接管连接

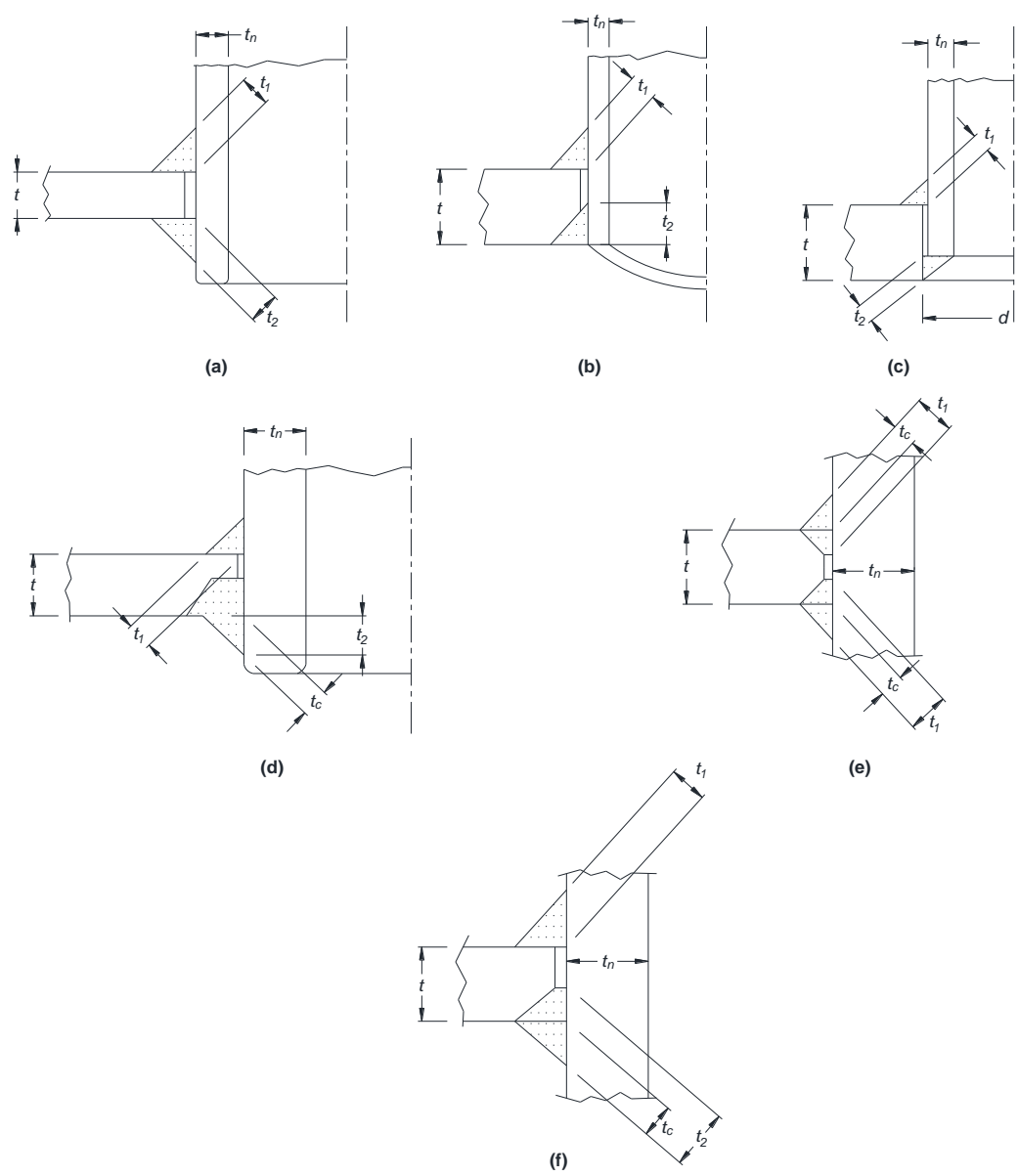


$t_c = 0.7t_n$ 或6mm的较小值;

$r_1 = 0.25t$ 或19mm中的较小值。

注: t =被插入部分的名义厚度, t_n =插入部分的名义厚度。

图25 开孔和接管的熔敷金属层



$t_{\min}=19\text{mm}$ 或被连接件的较薄厚度中的较小值；

$t_c=0.7t_n$ 或 6mm 中的较小值；

$c=0.5t_{\min}$ ；

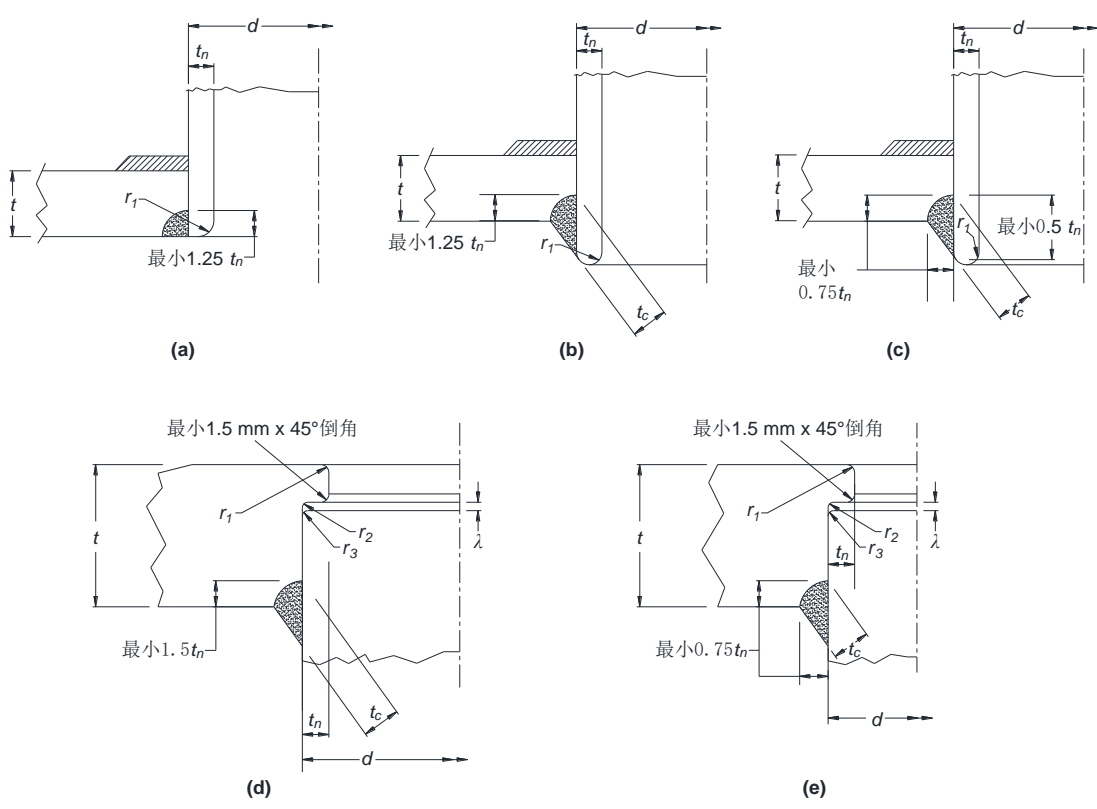
$t_w=0.7t_n$ ；

$t_1+t_2=1.25t_{\min}$ ；

t_1 或 t_2 是不小于 6mm 或 $0.7t_{\min}$ 中的较小值。

注： t ＝被插入部分的名义厚度， t_n ＝插入部分的名义厚度。

图26 采用部分焊透焊缝焊接管的允许形式



$t_c = 0.7t_n$ 或6mm中的较小值；

$r_1 = 0.25t_n$ 或19mm中的较小值； r_2 = 最小为1.5mm； r_3 = 最小为 r_2 或相当的倒角； $r_4 = 0.5t_n$ 或19mm中的较小值；

λ = 最小为1.5mm，最大为 t_n ；

d = 接管外径；

c = 接管与钢制安全壳相贯处的直径间隙规定如下：

- 当 $d \leq 25\text{mm}$ 时， $c = 0.25\text{mm}$ ；
- 当 $1 < d \leq 100\text{mm}$ 时， $c = 0.50\text{mm}$ ；
- 当 $d > 100\text{mm}$ 时， c 最大值为0.75mm；

假如焊缝坡口区 and 焊缝相反端的开孔端附近区域均满足上述最大间隙的限制，且开孔端附近区域有足够大的空间(不需连续)为防止接管偏斜可设置一个限位挡块时，则在开孔的整个长度上不必满足上述最大的间隙限制。

注： t = 被插入部分的名义厚度， t_n = 插入部分的名义厚度。

图27 部分焊透焊缝的连接

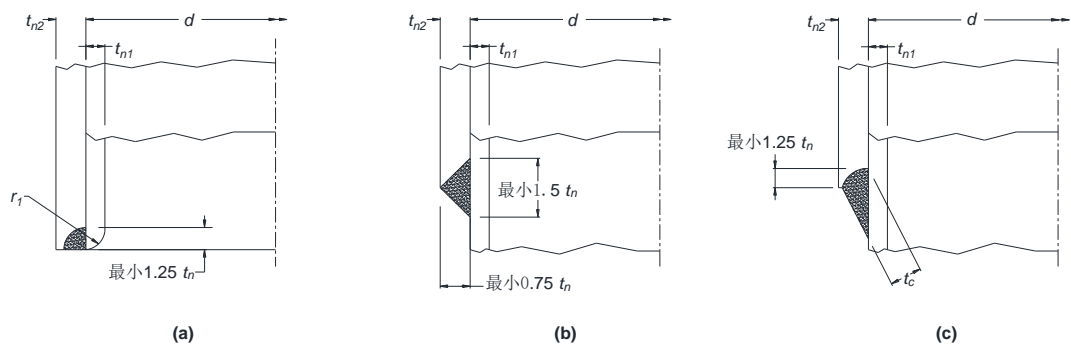
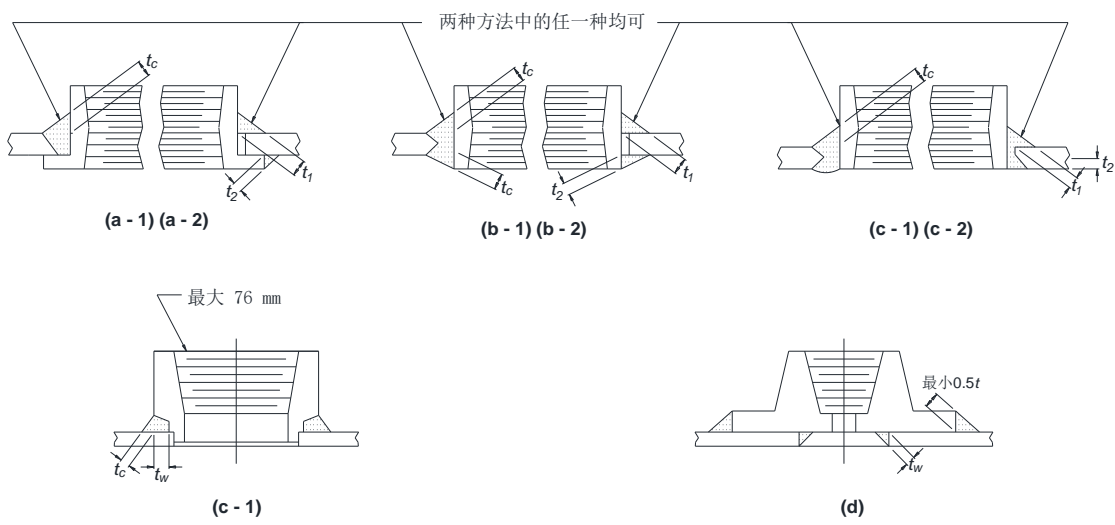


图28 同轴圆筒的部分焊透焊缝连接



$t_{\min} = 19\text{mm}$ 或被连接件的厚度中的较小值；

$t_c = \text{最小为} 6\text{mm}$ ；

简图(a)和(b)中， $t_1 + t_2 = 0.25 t_{\min}$ ；

简图(c)中， $t_1 + t_2 = \text{不小于} 6\text{mm}$ 或 $0.7 t_{\min}$ 中的较小值；

简图(d)中， $c = 0.5 t_{\min}$ ， $t_w = 0.7 t_{\min}$ 。

图29 内螺纹配件连接方式

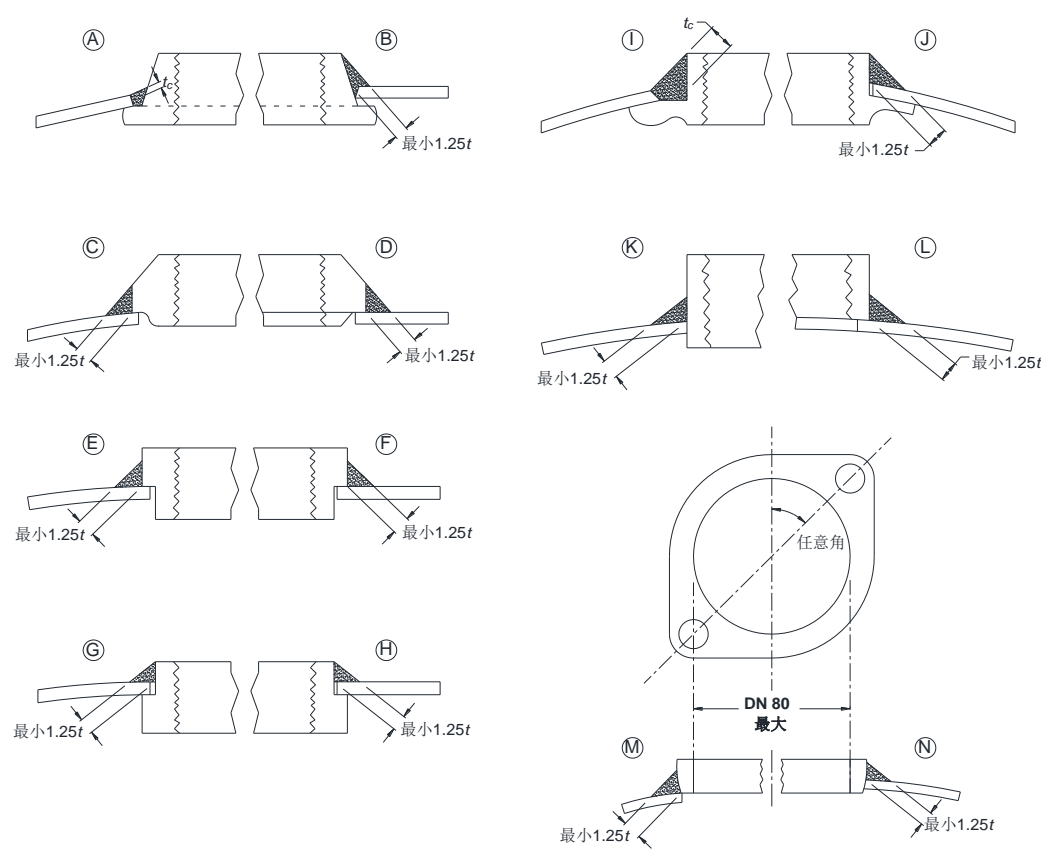
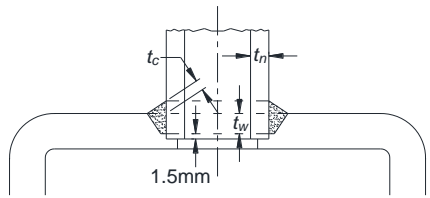
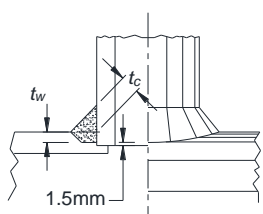
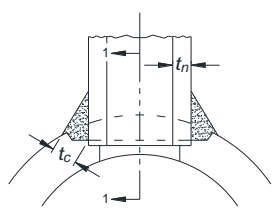


图30 小型配件连接方式



(a)



1 - 1

t_w = 应不小于 t_n 或 6mm 中的较大值；

t_c = 最小为 6mm。

图31 管子连接件

7.3 焊接及评定

7.3.1 焊接工艺

7.3.1.1 钢制安全壳施焊前，应进行焊接工艺评定或者具有经过评定合格的焊接工艺支持。

7.3.1.2 螺柱焊只能用于非结构性和临时性附件的焊接。当在平直位置进行焊接时，对于圆形的栓钉，其最大直径不得超过 25mm，对于其他形状的栓钉，其最大横截面面积应不超过直径为 25mm 的圆形栓钉的横截面积。当在其他位置焊接时，栓钉的最大直径不得超过 19mm。焊后热处理应符合 7.5 的规定，但是无论母材厚度多少，保温时间都无需超过半个小时。

注：此处栓钉最大直径均指栓钉名义直径，不考虑直径偏差。

7.3.2 焊接评定、记录和识别标记

7.3.2.1 要求的评定：

- a) 凡在承压零件上焊接永久性或临时性附件、以及在此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、焊工与焊接操作工，应满足本章的评定要求。焊工与焊接操作工应按照 HAF603 的规定取得相应的资质。
- b) 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。对于抗拉强度大于等于 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，反之则可能不会产生裂纹。

7.3.2.2 制造商应保存一份评定合格的焊接工艺以及焊工及焊接操作工的记录。记录应表明试验的日期和结果，以及每个焊工的识别标记。业主和监管部门应能查阅这些记录。

7.3.2.2.1 由焊工或焊接操作工焊接的接头应做识别标记，标记可采用下述两种方法中的任一种：

- a) 每个焊工或焊接操作工，应在他所焊接的所有永久性焊接接头或一系列接头上或其附近，打上制造商规定的识别标记。识别标记的间距应不超过 1m，并应采用连续或不连续的钝头印模做成。
- b) 制造商应保存每个零件上永久性焊接接头的记录，以及焊接每一个接头所雇用的焊工和焊接操作工的记录。

7.3.2.2.2 当在产品上焊接多条永久的结构性附件焊缝、非结构性附件焊缝、角焊缝、插套焊缝、特殊设计的密封焊缝、焊缝金属堆焊、硬质表面和管子与管板相接的焊缝时，如能符合下述规定，制造商无需对各个接头的焊工或焊接操作工进行识别标记：

- a) 制造商保存了一份能识别焊工或焊接操作工在每个物项上焊接这类焊缝的记录，并且监管者能验证焊工或焊接操作工都是已评定合格的。
- b) 每一类焊接接头中各条焊缝的形式和结构都相同，且均采用相同的焊接工艺规程进行焊接。

7.3.2.2.3 定位焊不要求有焊工或焊接操作工的识别标记。

7.3.2.3 拟采用的焊接工艺规程被评定合格之前不得进行焊接操作。

7.3.2.4 由某一制造商进行的焊接工艺评定以及焊工和焊接操作工的技能评定试验，不能证明此焊接工艺对其他制造商也是合格的，亦不能证明该焊工或焊接操作工能够对其他制造商进行合格的焊接。

7.3.3 焊接工艺评定试验的通用要求

7.3.3.1 所有的焊接工艺评定试验应符合 T/CNEA XXX.2-XXXX《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》的要求以及本章的补充要求。

7.3.3.2 工艺评定焊缝的焊后热处理，应同 7.5 和 T/CNEA XXX.2-XXXX《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》的相应要求相一致。焊后热处理保温时间，至少应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 试块和试样的制备

- a) 从试验焊缝上切取试件，以及由该件制成的试样尺寸，除切取冲击试块和由该块制成的冲击试样的尺寸应按照下面 b) 的要求外，都应符合 T/CNEA XXX.2-XXXX《压水堆承压部件 焊接 第2部分：焊接工艺评定》的要求。
- b) 在多种工艺的焊缝中，应尽可能把每种工艺的熔敷金属包含在冲击试样内。当不可能把每种工艺的熔敷金属包括在本章要求的 $0.25t$ 部位切取的全尺寸冲击试样内时，则应从该试验焊缝中切取附加的全尺寸冲击试样，其部位应能确保每种工艺的熔敷金属，至少有一部分被包含在全尺寸冲击试样内。另一种方法是，每种工艺的熔敷金属制成附加的试验焊缝，使每种工艺都能进行全尺寸试样的试验。

7.3.3.3.1 代表焊缝熔敷金属的试件，其冲击试样和试验方法应与 5.4.2.1 的要求相一致。每个冲击试样的取样部位应使试样的纵轴与试验组件的焊缝表面的距离至少为 $0.25t$ ，当试验组件的厚度允许时，则该距离不小于 10mm。此外，当焊后热处理温度超过 7.5.2 规定的最高温度，且试验组件被快速冷却时，则试样的纵轴离试验组件的边缘至少为 t 。试样应垂直于焊缝的纵轴，且试样的缺口应位于焊缝中。夏比 V 型缺口冲击试样的缺口长度方向应垂直于焊缝表面。当要求切取落锤试样时，试样受拉表面的取向应平行于试验组件的表面。

7.3.3.3.2 代表热影响区的试件当按 7.3.3.4.2 的要求进行热影响区的冲击试验时，试样应按下面 a) 到 c) 的要求从焊接工艺评定试验组件上切取。

- a) 如果评定试验材料是板材或锻件，焊缝轴线方向应平行或垂直轧制或锻造的主方向。
- b) 热影响区的冲击试样和试验方法应与 5.4.2.1.2 的要求相一致。这些试样的切取部位应尽可能靠近表面与厚度中心之间的中间部位上。热影响区冲击试样的试件应在垂直于焊缝轴线的方向上切取。试件应进行侵蚀，以确定热影响区的位置。夏比 V 型缺口试样的缺口应大致垂直于材料的表面，使最后的断口中包括尽可能多的热影响区。当材料厚度允许时，试样的轴线可以是倾斜的，使缺口的根部平行熔合线。对于用电渣焊工艺或气电立焊工艺焊成的焊缝，如果焊后不进行细化晶粒的热处理，则冲击试样的缺口应位于粗晶粒区内。
- c) 为了比较热影响区和母材的冲击性能值 7.3.3.4.2 b)，应从未受影响的母材中切取夏比 V 型缺口试样，试样离母材表面的距离应与热量影响区试样大致相同。未受热影响的母材试样的轴线应平行于热影响区试样的轴线，缺口的轴线应垂直于母材表面。

7.3.3.4 当材料需按 5.4 要求进行冲击试验时，应按下列要求进行焊缝金属和热影响区的冲击试验。焊接工艺评定的冲击试样应按 5.4.3 和 7.3.3.3 的相应要求进行制备和试验。允许按 5.4.5 的规定进行复验。

7.3.3.4.1 焊缝金属的冲击试验：

- a) 当在母材表面或穿过母材进行焊接，且母材又要求按 5.4.1 的规定进行冲击试验时，对于产品焊接接头厚度超过 16mm 的焊接工艺评定试验，都应进行焊缝金属的冲击试验。此外，当母材要求按 5.4.1 的规定进行冲击试验时，不论补焊深度如何，亦应进行焊缝金属的冲击试验。
- b) 在焊接工艺评定试验中，对焊缝金属的冲击试验要求和验收标准应与 5.4.3 对母材的焊接或返修的规定相同。在焊接具有不同断裂韧性要求的两种材料时，一般可以将任何一种材料的冲击要求和验收标准用于焊缝金属。

7.3.3.4.2 热影响区的冲击试验：

- a) 当焊接接头的焊缝厚度超过 16mm，且母材又要求按 5.4.1 的规定进行冲击试验时，要求进行焊接工艺评定试验组件的热影响区夏比 V 型缺口冲击试验。仅下列要求除外：
 - 1) 对于用钢及钢合金材料焊成的焊缝评定，如果焊后已进行热处理、且采用电渣焊、气电立焊或热剂焊以外的任何焊接方法焊成时，可不进行上述试验。
 - 2) 对于在任何母材上的熔敷金属堆焊层或耐磨堆焊层的焊接工艺评定，可不进行上述试验。
 - 3) 对于用钨极气体保护电弧焊（GTAW）打底焊时热影响区部分，根部熔敷金属最多两层或 5mm（取两者中的较小值）时，可不进行上述试验。
- b) 应根据下述规定进行夏比 V 型缺口试验：
 - 1) 对于热影响区和未受热影响的母材都要取出代表性的夏比 V 型缺口试验的试样进行试验。未受热影响的母材试样应该在小于或等于最低使用温度的温度下进行试验。
 - 2) 未受热影响母材的夏比 V 型缺口试验应满足表 8 或表 9（如适用）以及表 12 的要求，同样地，或者应在较高温度进行补充试验直到满足以上任一要求。
 - 3) 热影响区试样应该在 7.3.3.4.2 b) 2) 中确定的温度下进行试验。热影响区试样可适用的平均韧性值应该大于或等于未受热影响的母材可适用的平均韧性值，或者应按 7.3.3.4.2 b) 4)～6) 中的要求所给出的调整。另一种替代方法，应在比 5.4.3.1 要求低 17°C 的温度下进行产品材料的冲击试验。作为一个附加的方法，可焊接另一块试件并进行试验。
 - 4) 在三个试样可适用的韧性都不小于 7.3.3.4.2 b) 2) 中规定要求的温度下，应在热影响区或未受热影响的母材（或两者上），进行附加的夏比 V 型缺口试验。应将满足上述要求的每次试验可适用的韧性值绘制成韧性值—温度曲线。在热影响区与未受热影响母材上可适用的平均韧性值是相同并且不小于 7.3.3.4.2 b) 2) 规定的地方，应采用温度 T_{HAZ} 和 T_{UBM} 的差值来确定修正温度 T_{ADJ} ： $T_{ADJ}=T_{HAZ}-T_{UBM}$ ，如果 $T_{ADJ}\leq 0$ ，那么 $T_{ADJ}=0$ 。
 - 5) 作为 7.3.3.4.2 b) 4) 的替代方法，如果热影响区试样可适用的平均韧性值不小于表 8 或表 9，如适用，以及表 12 中的规定值，同样地，热影响区试样可适用的平均韧性值低于未受热影响母材可适用的韧性值的 10N·m 或 0.13mm 以内时， T_{ADJ} 可取 8°C。
 - 6) 作为 7.3.3.4.2 b) 4) 的第二种替代方法，如果热影响区试样可适用的平均韧性值不小于表 8 或表 9，如适用，以及表 12 中的规定值，同样地，应计算热影响区和未受热影响母材试样可适用的平均韧性值的差值，并且采用 7.3.3.4.2 c) 3) 中的描述。
- c) 至少应该采取下列任一种方法来补偿由于焊接工艺而导致的热影响区韧性降低：
 - 1) 对于由工艺评定报告(PQR)支持的产品焊接工艺规程(WPS)中所要进行焊接的所有材料，应通过修正温度 T_{ADJ} 来提高设计技术规格书规定的最低使用温度。
 - 2) 可由 T_{ADJ} 或 17°C 来降低产品材料所规定的试验温度。
 - 3) 如果焊接工艺规程(WPS)中夏比 V 型冲击值不低于 5.4 要求的最小规定韧性值加上 7.3.3.4.2 b) 6) 中确定的平均韧性值差值，则产品所焊接的母材可按该 WPS 进行焊接。

- d) 夏比 V 型缺口试验结果应记入焊接工艺评定报告中, 任何补偿的修正温度 T_{Adj} 或者增加的韧性要求都应记录在焊接工艺评定报告(PQR)和焊接工艺规程(WPS)中。在焊接工艺评定报告(PQR)中可采用多种补偿方法。

7.3.3.5 母材补强用的堆焊金属应按 7.3.3.1 到 7.3.3.4 的要求进行评定。

7.4 施焊、检测和焊接返修要求

7.4.1 焊前应采取的预防措施

7.4.1.1 制造商应对用于设备制作和安装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、储存和保管。应采用预防措施, 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相当光洁的表面。要焊接的表面应没有氧化皮、铁锈、油脂及其他有害的物质。焊接时应保护工件不受有害的污染, 以及雨、雪、风的影响。不允许在潮湿的表面上进行焊接。

7.4.2 焊接接头的制作

7.4.2.1 衬环应与 7.2.14 的要求相一致。当使用垫环时, 其材料应与母材相容。当按 7.2.14 的规定采用永久性衬环时, 则衬环应是连续, 且任何拼接接头应采用全焊透焊缝焊成。定位销应不熔入焊缝内。

7.4.2.2 为使变形减到最小, 可进行有控制的锤击。除非焊缝按 7.5 的要求进行焊后热处理, 否则对于第一层焊缝金属的根部, 以及最后一层焊缝都不能采用锤击。

7.4.2.3 各种焊接要求

- a) 在焊接全焊透双面焊接头的第二面以前, 应采用适当的方法, 例如风铲、打磨或热刨等方法加工焊缝根部。当用其他的焊接方法能够获得完全熔合和焊透, 且该方法经焊接工艺评定证明是良好时, 在焊接第二面以前可不清理焊根。
- b) 如果由于任何原因需要暂停焊接, 在重新开始焊接时要特别小心, 以获得所要求的焊透和熔合。对于埋弧焊, 宜在弧坑处凿出一个凹槽。
- c) 当采用单面焊接头时, 应特别注意使被连接的两个部件对中, 并且离开一定距离, 使接头的底部在接头全长度上完全焊透和熔合。

7.4.2.4 允许使用焊后状态的表面, 但焊接表面应完全没有粗糙的波纹、沟槽、焊瘤以及突起的凸块和凹坑, 以满足下面 a)到 e)的要求。

- a) 完工的焊缝表面状态应适于对焊缝用射线照相和其他所需的无损检测方法进行正确的分析。在分析射线照片时, 如对焊缝的表面状态有怀疑, 应将照片与实际的焊缝表面进行对比以确定其可接受性。
- b) 焊缝余高的允许值按照 7.4.2.6 的规定。
- c) 咬边应不超过 0.8mm, 且应不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, 单面焊环形对接焊缝的根部则凹陷是允许的。
- e) 若焊缝表面需要进行打磨以满足上述准则时, 应避免把焊缝或母材减薄到低于所要求的厚度。

7.4.2.5 当不同直径的部件被焊在一起时, 两个表面之间应按照 6.6.1 的规定逐步过渡, 过渡段的长度可包括焊缝。

7.4.2.6 容器上所有的对接焊接头的余高表面可以与母材齐平，也可以有均匀的凸起。焊缝每一面的加强高度应不超过表 21 中的数值。

表21 焊缝余高

名义厚度，mm	最大余高，mm
$t \leq 25$	2.5
$25 < t \leq 50$	3
$50 < t \leq 75$	4
$75 < t \leq 100$	5.5
$100 < t \leq 125$	6
$t > 125$	8

7.4.2.7 角焊缝的形状可以是凸形至凹形。如果尺寸不足的焊缝段总长度不超过焊缝全长的 10%，则任何单面连续焊的角焊缝尺寸可小于规定的角焊缝尺寸，但其差值不得大于 1.6mm。单个尺寸不足的焊缝段长度应不超过 50mm。在进行插套焊缝焊接时，焊接前须预留约 1.5mm 的间隙，焊接后无需检验该间隙。

7.4.3 附件的焊接

7.4.3.1 焊接到钢制安全壳上的非承压附件的材料应满足 5.2.7 的要求，承压附件的材料应满足 5.2.1 的要求。

7.4.3.2 指导焊接评定的 7.3.2.1 适用于承压材料上的结构性附件的焊接。

7.4.3.3 结构性附件应与壳体的曲率或相连接表面的曲率基本一致，可采用全焊透的连续或间断焊缝、连续或间断的角焊缝、或部分焊透的连续或间断焊缝来连接。

7.4.3.4 在堆焊层表面上的内部结构支承件，除焊缝的堆焊层外，应焊在母材上，应不焊在堆焊层上。

7.4.3.5 非结构性附件和临时性附件的焊接和拆除：

- a) 非结构性附件与钢制安全壳之间的焊接，可以采用连续的或间断的角焊缝或部分焊透焊缝进行焊接，但应满足下列 1)到 4)的要求：
 - 1) 焊接工艺和焊工已按 7.3.2.1 的要求评定合格；
 - 2) 材料已鉴别并与相连接的材料相容；
 - 3) 焊接材料已鉴别并与被焊材料相容；
 - 4) 当 7.5.2 有要求时，焊缝应进行焊后热处理。
- b) 临时性附件的拆除，应按下列要求完成：
 - 1) 临时性附件应按照 7.2.1 规定的工艺完全拆除；
 - 2) 作为上述 a) 4)的替代，焊后热处理可延迟到附件拆除以后再进行。

7.4.3.6 加劲肋与壳体的连接

- a) 当采用加劲肋时，加劲肋可安装在容器的内侧或外侧，并采用焊接方式壳体相连。
- b) 加劲肋可用连续焊或间断焊与壳体相连。间断焊缝允许的排列和布置如图 32 所示。加劲肋的相对两侧的焊缝，可以交错排列，也可以并列排列。加劲肋每侧间断焊缝的总长度应满足下述要求：

- 1) 对于安装在容器外侧的加劲肋，间断焊缝的总长度应不小于容器外侧周长的一半；
- 2) 对于安装在容器内侧的加劲肋，间断焊缝的总长度应不小于容器周长的三分之一。
- c) 加劲肋的所有焊接应与本标准的要求一致。在规定腐蚀裕量的部位，加劲肋与壳体应采用连续的角焊缝、密封焊缝或全焊透焊缝连接。

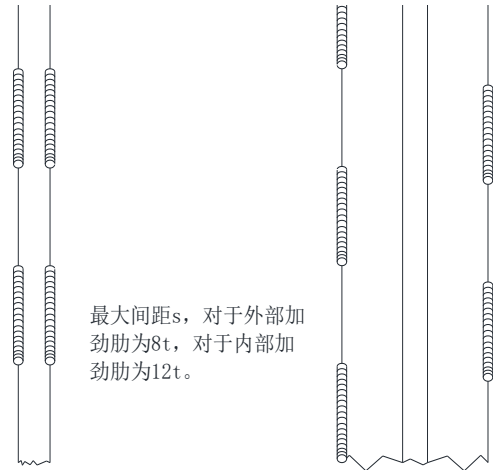


图32 允许的间断焊缝排列和布置图

7.4.4 焊缝金属缺陷的修补

7.4.4.1 按第 8 章的检测要求探测到的焊缝金属缺陷，必要时应予以去除和修补。

7.4.4.2 如能满足下面 a)到 c)的要求，焊缝金属的表面缺陷可用打磨或机加工方法去除，而不必用焊接方法修补：

- a) 剩余的截面厚度不低于第 6 章的要求；
- b) 缺陷去除后，凹陷与周围表面平滑过渡；
- c) 平滑过渡后，该部位需按 8.1 的要求用磁粉法或液体渗透法进行检测，检测结果需满足 8.3 的验收标准，以保证缺陷被完全被去除，或已降低到允许限值内的瑕疵。用目视方法或体积方法检测位于内表面的缺陷，当此内表面因不可达而不能进行表面检测时，需再对此内表面用原来探测缺陷的检测方法进行复检。

7.4.4.3 当采用焊接修补时，焊缝金属中挖出的凹坑应满足下列各项要求：

7.4.4.3.1 缺陷可采用机械方法或热刨方法去除。准备修补的区域应按照 8.1 采用液体渗透法或磁粉法进行检测，检测结果应满足 8.3.3 或 8.3.4 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可达而无法除去检验物质时，不要求进行这种检测。

7.4.4.3.2 焊缝修补应采用符合 7.1.4 和 7.3 要求的已评定价的焊接材料、焊工和焊接工艺来进行。

7.4.4.3.3 修补后的表面应与周围表面平滑过渡。

7.4.4.3.4 修补焊缝应按原始焊缝的要求重新进行检测。但是当原来用液体渗透法或磁粉法进行检测、且检查出不可接受的缺陷显示时，以及当补焊凹坑尺寸不超过下列尺寸时，修补焊缝只需用液体渗透法或磁粉法来重新检测：

- a) 当 $t < 19\text{mm}$ 时，补焊凹坑尺寸不超过 $1/3t$ ；

- b) 当 $19\text{mm} < t < 64\text{mm}$ 时, 补焊的凹坑尺寸不超过 6mm;
- c) 当 $t > 64\text{mm}$ 时, 补焊的凹坑尺寸取 10mm 或 $0.1t$ 两者中的较小值。此处 t 等于焊缝厚度。

7.4.4.3.5 修补区应按照 7.5.2 进行热处理。

7.4.4.4 用于接头处修复堆焊层所用的嵌条厚度, 应等于钢板背面所规定的堆焊层最小名义厚度, 如有需要, 用抗腐蚀焊缝金属在坡口上熔敷, 以使嵌条与邻近堆焊层的表面齐平。

7.5 热处理

7.5.1 焊接预热要求

7.5.1.1 应按焊接工艺评定要求来规定最低限度的预热要求。制定预热措施和预热的温度时, 需考虑如化学成份、被焊零件的约束程度、高温、物理性能以及材料厚度等的影响。

7.5.1.2 当焊接或热切割采用预热时, 可以采用任何方法。但预热方法应不损害母材或任何已经焊好的焊缝金属, 且应不把对焊缝有害的物质带进焊接区域。

7.5.1.3 对于已淬火和回火的材料, 应考虑限制层间温度, 以免对机械性能产生有害的影响。

7.5.2 焊后热处理

7.5.2.1 如能保持所要求的加热和冷却速率、金属温度、金属温度的均匀性以及温度的控制, 可采用任何合适的加热和冷却方法进行焊后热理(PWHT)。

7.5.2.2 焊后热处理的时间和温度要求

7.5.2.2.1 焊后热处理的通用要求规定如下:

- a) 除 7.5.2.2.7 中另有规定外, 包括修补焊缝在内的所有焊缝都应进行焊后热处理。在焊后热处理过程中, 除 7.5.2.2.4 c) 另有规定外, 金属的温度和最短保温时间应满足表 22 的要求。除 7.5.2.4.3 的规定外, 焊后热处理应在有温度测量和温度标定的炉内进行。或用热电偶测温来进行, 热电偶应与被热处理的材料接触, 或把热电偶连接到与被处理的材料相接触的金属块上。
- b) 除表 24 中免作强制性焊后热处理的情况外, 所有焊接结构, 都应焊入壳体板或板件的某一部分, 并在焊接到壳体上以前对这些焊接组件进行焊后热处理。

7.5.2.2.2 所有的焊后热处理都应对时间-温度进行记录, 并且时间-温度记录上应有相应焊缝、零件或容器的识别标记。

表22 焊缝焊后热处理保温要求

保温的温度范围(°C)	不同名义焊缝厚度 t(mm)的最短保温时间		
	t≤13	13<t≤50	t>50
595~675	30 min	2 min/mm	2hr+0.5 min/mm (每增加 1mm 增加 0.5 min)

注: 所有温度均指金属温度

7.5.2.2.3 表 24 中的名义厚度指焊缝、用于结构性附件焊接件的承压材料或被连接的较薄承压材料中最薄的厚度。当成形公差、减薄量或轧制公差的数值不超过 3mm 时, 名义厚度不计这部分材料。角焊

缝的名义厚度是指角焊缝的焊喉高度；部分焊透焊缝和材料修补焊缝的名义厚度是指焊接坡口的高度或焊透的深度。

7.5.2.2.4 保温时间规定如下：

- a) 表 22 中规定的保温时间应基于焊缝的名义厚度。保温时间不必连续。它可以是几个焊后热处理周期的累计时间。
- b) 如果经过这类热处理的试样是按 5.3、5.5 和 7.3 的规定进行试验时，可采用超过表 22 要求的最短保温时间。
- c) 当不能按表 22 规定的温度范围进行热处理时，按 5.3 的规定经确认的母材可按表 23 的规定在较低的最低温度和增加了最短保温时间条件下进行焊后热处理，而不必重新确认。

表23 许用的焊缝焊后热处理保温要求

最低保温温度(°C)	最短保温时间
565	4 min/mm 厚度
540	4 min/mm 厚度

7.5.2.2.5 当厚度等于或小于 38mm 的连接材料用形成奥氏体相或非空气淬硬的镍-铬-铁沉淀物的焊条材料焊接时，不要求进行焊后热处理。

7.5.2.2.6 当非承压材料与承压材料相焊时，应控制承压材料焊后热处理的温度范围。

7.5.2.2.7 对于下列材料和焊缝不要求按本节规定进行焊后热处理：

- a) 非铁基金属材料；
- b) 表 24 中免除强制性焊后热处理的焊缝；
- c) 经受的温度高于表 22 所规定的焊后热处理温度范围的焊缝，但焊接工艺规程评定合格，而且母材和熔敷的焊缝填充材料是在更高温度条件下热处理的；
- d) 伸出件及这些伸出件与接管、开孔框架、以及类似结构的连接焊缝，如满足 7.5.2 的所有其他要求，且焊缝位置离容器表面的距离至少等于 $0.5\sqrt{rt}$ ，此处 r 是接管或开孔的平均半径，t 是接管或开孔的名义厚度；
- e) 非承压零件与预先进行过焊后热处理的承压零件相焊接时，且连接焊缝满足表 24 的要求。

7.5.2.3 在 425°C 以上，加热速率和冷却速率应不超过 220°C/hr 除以热处理材料的最大英尺厚度的倍数，但不超过 220°C/hr 亦不必低于 56°C/hr。在加热和冷却过程中，在任何 5m 长的焊缝长度间隔内，温度的变化应不大于 139°C。

表24 免除强制性的焊缝焊后热处理的规定

焊缝类型 ^a	名义厚度, mm	实测的最大含碳量, % ^b	最低预热温度, °C
所连板厚小于等于38mm的所有焊缝, 不包括内径大于50mm的接管或贯穿件与钢制安全壳壳体的连接焊缝	≤32	≤ 0.30	...
	> 32~38	≤ 0.30	95
	≤19	> 0.30	...
	> 19~38	> 0.30	95
内径大于50mm的接管或贯穿件与钢制安全壳壳体的连接焊缝, 满足下述所有条件: (1) 壳体壁厚不超过38mm; (2) 接管或贯穿件尺寸不超过DN300; (3) 非圆形孔洞最大与最小直径之比不超过1.15, 并且焊缝距钢制安全壳壳体上其它不经焊后热处理焊缝的距离不小于 \sqrt{Rt}	≤32	≤ 0.30	...
	> 32~38	≤ 0.30	95
	≤19	> 0.30	...
	> 19~38	> 0.30	95
所连板厚大于38mm的所有焊缝, 不包括接管或贯穿件与钢制安全壳壳体的连接焊缝	≤19	...	95
所有焊缝, 包括厚度大于38mm小于等于44.5mm板材上的修补焊缝, 但不包括接管或贯穿件与钢制安全壳壳体的连接焊缝 ^c	≤44.5	0.24	95
与名义内径不大于50mm的接管或贯穿件相连接的所有焊缝	≤19	...	95
按7.5.2.2.1 b)的要求进行焊后热处理的组件, 在焊缝修补时, 其任一条焊缝的累计修补长度不超过原焊缝长度的25%	≤44.5	...	95
^a 焊缝类型一栏中的材料厚度, 是指焊接接头所连接接母材的厚度。 ^b 指所连接的承压材料的含碳量。 ^c 下列情况下, 这一免除规定限于 NB/T 20005.32《压水堆核电厂用碳钢和低合金钢 第32部分: 安全壳用 15MnHR 钢板》和 NB/T 20006.31《压水堆核电厂用合金钢 第31部分: 安全壳用 10MnNiMoHR 钢板》材料: a) 不允许免除 5.4.1.1 h) 规定的冲击试验; b) 5.4.3.1 a) 的夏比 V 型缺口冲击试验的准则为下述之一:			

1) 试验温度低于最低使用金属温度 5.6℃，C _v 能量值如表 9 所示。
2) 试验温度为最低金属温度，C _v 能量值为表 9 中之值加上 7J。
c) 5.4.3.1 a) 允许的落锤试验，最低时用金属温度与无延性转变温度之差等于或大于 5.6℃+A，A 值按 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》附录 BB 确定。

7.5.2.4 焊后热处理可按下述任一适合的方法进行。

7.5.2.4.1 炉内加热，一次加热：应当控制炉内的气氛以避免过分氧化，并禁止火焰直接冲刷到容器或物项表面。

7.5.2.4.2 炉内加热，多次加热：容器或物项加热部位的重叠长度至少为 2m。当采用这种工艺时，容器或物项在炉外的部分应予保温，使不致引起有害的温度梯度。容器或物项从炉内伸出部位的横截面应与接管或其他的结构不连续部分交叉。

7.5.2.4.3 局部加热：当容器或物项不能实现整体热处理时，焊缝可以进行局部焊后热处理。当进行局部焊后热处理时，应沿容器或物项的整个圆周加热一个环形带，加热温度应在本节规定的温度范围内。在焊缝宽度最大的一面，焊缝每边的受热加热带的最小宽度应等于焊缝厚度或 50mm 两者中较小值。容器或物项的温度从受控加热带的边缘向外应逐渐地减小，以避免有害的温度梯度。这种工艺亦可用于补焊后的热处理。

7.5.2.4.4 可用任何适当的方法从内部加热，并应采用适当的温度指示和温度记录装置来控制并保持容器或物项内的温度均匀分布。内部加热前，容器或物项应全部用保温材料包起来。

7.5.3 在 7.5.2 中所规定的的焊后热处理的温度、保温时间、以及加热速率和冷却速率等要求，并不是中间焊后热处理的强制性要求。

7.5.4 接头厚度超过 38mm 的铁素体材料的电渣焊焊缝应进行细化晶粒的热处理。

7.6 机械接头和贯穿组件

7.6.1 螺栓和螺纹

7.6.1.1 所有螺栓或双头螺栓的螺纹都应按设计要求啮合。

7.6.1.2 在螺纹接头所采用的润滑剂或化合物都应适合于使用条件，且应不与系统中的工作介质或任何材料起不利的反应。

7.6.1.3 应从密封焊表面上清除所有的螺纹润滑剂或化合物。

7.6.1.4 双头螺栓应沿整个长度车制螺纹，或应将无螺纹部分机加工到螺纹根部直径。

7.6.2 在螺栓连接垫片式法兰接头中，法兰的接触面应均匀地压在垫片上，且垫片的压缩应符合所用垫片型式的设计原则。所有法兰接头的装配应使螺栓应力相对地均匀。

7.6.3 电气和机械贯穿组件

- a) 除起导电和绝缘功能的那部分外，电气和机械贯穿组件都应符合本标准的要求。
- b) 等于和小于 DN50 的管子或管道，可按 7.6.4 的规则与贯穿组件相连接。
- c) 贯穿组件的密封焊缝如能满足下面 1)到5)的要求，可采用多道单面搭接角焊缝焊成，如图 33 所示。

- 1) 贯穿件的封头之一应满足 6.5.2.4 的要求;
- 2) 贯穿件的外径应不超过 450mm;
- 3) 贯穿件的设计压力应不超过 700kPa, 且设计温度应不超过 205℃;
- 4) 角焊缝应按 8.3.4 的规定用液体渗透法进行检测;
- 5) 角焊缝和封头应满足 6.7.2 的要求。

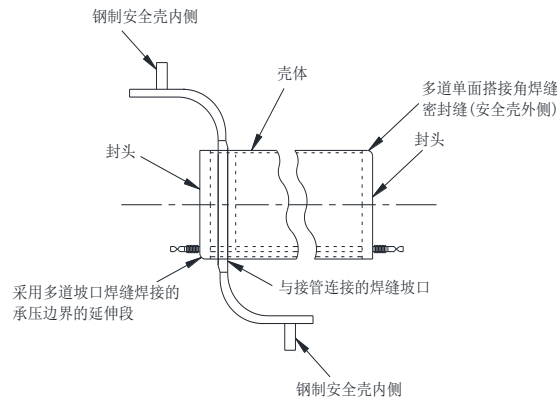


图33 贯穿件

7.6.4 电气和机械贯穿件的专门评定要求

7.6.4.1 本条仅适用于按 7.6.3 规定的名义管径等于和小于 DN50 的管道和管子与电气和机械贯穿组件的连接。焊接工艺应按照新的工艺规程进行评定, 且当下面列出的任意一项工艺规程有变更时, 焊接工艺应全部重新评定。如果焊接工艺规程为表明这些变更而作了修改, 则工艺规程内的变更(除下面给出的以外)不必重新评定。

7.6.4.2 所有焊接工艺规程的基本变量如下所述:

- a) 从一种焊接工艺改为另一种焊接工艺或几种焊接工艺的组合;
- b) 管道或管子材料的焊接分类有变更; 不属于任何焊接分类的每种管道或管子材料要求分别进行评定;
- c) 贯穿组件母材可以是锻造型或堆焊型的均质材料或是堆焊层材料; 如果在管道或管子与堆焊层之间进行焊接, 则应把堆焊层看作母材; 当管道或管子与不属于任何焊接分类的母材或堆焊材料焊接时, 要求分别进行评定;
- d) 堆焊熔敷金属的成分发生了变更;
- e) 当管道和管子的规定壁厚等于或小于 2.54mm, 规定壁厚或规定直径增加或减小 10%;
- f) 当管道或管子的规定壁厚大于 2.54mm, 只要求作一次评定试验;
- g) 当规定的孔桥带的宽度小于 10mm 或三倍规定管道或管子壁厚两者中的较大值时, 管孔间孔桥的规定宽度减少 10%或更多;
- h) 除已评定的焊接部位外, 增加了其他的焊接部位;
- i) 规定的预热温度范围的变更;
- j) 规定的焊后热处理温度的变更;
- k) 从多道焊改为单道焊或相反。

7.6.4.3 手工电弧焊(SMAW)的基本变量包括: 电焊条直径和焊接评定用焊条与焊丝的分组号。

7.6.4.4 钨极气体保护电弧焊(GTAW)和熔化极气体保护焊(GMAW)的基本变量如下面 a)到 f)所述:

- a) 贯穿组件在孔边缘处的外表结构的变更，包括填加或不加预置金属填充物；
- b) 预置金属填充物尺寸或形状的变更；
- c) 从一种保护气体改为另一种保护气体，或改为几种保护气体的混合气体；
- d) 当采用混合保护气体时，次要气体的流量变化为 $\pm 25\%$ 或 $0.14\text{m}^3/\text{hr}$ 两者中的较大值；
- e) 对于钨极气体保护焊工艺，填加或不加填充金属；
- f) 填充金属名义直径的变更。

7.6.4.5 工艺评定应在试验组件上进行，该试验组件在管孔布置及在 7.6.4.1 中所列的基本变素方面模拟生产条件。此外开孔处的试验组件的厚度应与产品贯穿组件开孔处的厚度相同，其孔的厚度不超过 50mm 者除外。要求焊接接头的数目最少为 10 个。

7.6.4.6 试验组件应按 8.1 的要求用液体渗透法进行检测，且检测结果应满足 8.3.4 的验收标准。沿纵向剖开试验组件通过每根管道或管子。在剖开以前，该试验组件的厚度可减薄到 13mm。每根管道或管子剖开后四个面应抛光，并用适当的浸蚀剂浸蚀，然后目视检测裂纹。角焊缝厚度（即最小泄漏通道）应不小于规定管道或管子厚度的三分之二，且用 10 倍放大镜目视检测该焊缝时应无裂纹。

7.6.4.7 对焊工和焊接操作工技能评定试验的要求应与工艺规程评定试验的要求相同，但试验组件中要求的管子数量最少应为 6 根。任一个焊工或焊接操作工如能通过工艺评定试验，即可评定为合格。

7.7 膨胀节

7.7.1 波纹管型膨胀节应满足下述各款的要求：

- a) 所有焊接接头应与 7.4 的要求相一致；
- b) 波纹管的纵向密封焊缝应是全焊透对接型式的焊缝；
- c) 膨胀节的波纹管元件应采用完全穿透波纹管管壁厚度的全焊透环向对接型式的焊缝与焊接端头或法兰相连接，如图 34 所示；
- d) 除连接焊缝外，波纹管元件不允许有环向焊缝；
- e) 波纹管元件母材不允许进行补焊。

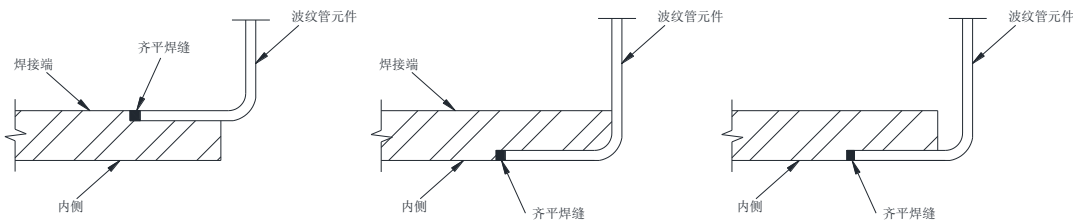


图34 许用的波纹管连接焊缝形式

8 检测

8.1 无损检测通用要求

8.1.1 钢制安全壳的焊接接头，经形状尺寸及外观检查合格后，再进行本规范规定的无损检测。

8.1.2 对焊接接头进行的射线、超声、磁粉、液体渗透、目视和泄漏检测，应符合团标压水堆承压部件无损检测对应章节的规定。

8.1.3 按本章要求进行的所有无损检测，都应制定详细的无损检测规程。

8.1.4 若在检测部件上应用了检测材料，应在检测完成后根据所使用的检测材料或检测规程的规定对检测部件进行彻底清洗。

8.1.5 焊缝的检测时间应满足下列各条的要求：

- a) 所有焊缝的射线检测可在焊后热处理之前进行；
- b) 所有焊缝的磁粉或液体渗透检测应在焊后热处理之后进行；
- c) 贯穿钢制安全壳壳体的所有异种金属焊接接头，如奥氏体材料或高镍合金材料与铁素体材料的焊接接头，或用奥氏体材料或高镍合金填充金属连接铁素体材料，其无损检测应在最终焊后热处理以后进行；
- d) 铁素体材料电渣焊焊缝的超声检测，如有细化晶粒热处理工序时，应在这一工序之后进行，否则应在最终焊后热处理以后进行。

8.1.6 A类、B类、C类、D类全焊透焊接接头和壁厚不小于50mm的材料的焊接接头，其焊缝坡口表面应采用磁粉或液体渗透进行检测。检测的验收标准应符合下述规定：

- a) 仅主要尺寸大于1.5mm的显示才被认定为缺陷；
- b) 长度不超过25mm的层状缺陷不必进行修补，是可以接受的。长度超过25mm的各种层状缺陷，应采用超声检测方法确定超出的长度。长度超过25mm的缺陷应采用焊接方法进行修补，修补焊缝深度应为缺陷深度和10mm两者中的较小值；
- c) 本条所述3种类型的非层状缺陷是不可接受的：长度大于5mm的线性显示、尺寸大于5mm的圆形显示、单条线上有4条及以上的缺陷显示且显示之间的间距小于1.5mm；
- d) 对A类、B类、C类、D类焊接接头和类似焊接接头的坡口表面进行的焊接修补应在其变为不可达之前采用磁粉或液体渗透进行无损检测，无损检测可在焊后热处理之前或之后进行。

8.2 焊缝的检测要求

8.2.1 A类焊接接头：

A类焊接接头应全部进行射线检测。

8.2.2 B类焊接接头：

- a) 对接焊缝：应进行射线检测；当无法按本规范规定对对接接头进行射线检测时，可用超声波检测加液体渗透检测或超声波检测加磁粉检测代替射线检测对完工焊缝进行检测，缺少适用的射线照相设备不应成为这种替代的理由。
- b) 插套焊缝：应进行磁粉或液体渗透检测。

8.2.3 C类焊接接头：

- a) 对接焊缝：应进行射线检测。
- b) 非对接焊缝：应采用超声、磁粉或液体渗透检测中的任一种方法进行检测。

8.2.4 D类焊接接头:

- a) 对接焊缝: 应进行射线检测。
- b) 非对接焊缝: 应采用超声波、磁粉或液体渗透检测中的任一种方法进行检测; 与钢制安全壳外壁连接的补强板上的焊缝, 应进行溶液薄膜试验, 试验时补强板所承受的压力至少为 100kPa。

8.2.5 附件上的焊接接头:

- a) 对接焊缝: 承压零件上所有非 A 类、B 类、C 类和 D 类中的对接焊缝, 如门、开洞、永久性附件及类似结构的连接焊缝, 应进行射线检测; 与承压部件相连的非承压结构件上的对接焊缝, 应对至少 $16t$ 长度的对接焊缝进行 100% 的射线检测, 其中 t 为非承压结构件的厚度;
- b) 非对接焊缝: 承压部件上采用非对接焊缝时, 应采用超声波、液体渗透或磁粉检测方法对非对接焊缝进行检测。与承压部件相连的非承压结构件上的非对接焊缝, 应对至少 $16t$ 长度的焊缝采用超声波、液体渗透或磁粉检测方法进行检测, 其中 t 为非承压结构件的厚度。

8.2.6 特殊焊缝, 焊接金属堆焊层应采用液体渗透法进行检测。

8.2.7 电渣焊焊缝, 用电渣焊工艺焊接铁素体材料的所有全焊透焊缝, 都应进行超声波检测。

8.3 验收准则

8.3.1 射线检测验收准则

8.3.1.1 射线检测的下述显示是不可接受的:

- a) 任何具有裂纹、未熔合或未焊透的显示;
- b) 长度大于下列值的其他条形显示:
 - 1) 6mm, 板厚小于等于 19mm;
 - 2) $\frac{1}{3}t$, 板厚介于 19mm 至 57mm, 其中 t 为较薄焊件的厚度;
 - 3) 19mm, 板厚大于 57mm。
- c) 射线检测显示焊根内部黑度无突变的焊缝是可接受的, 焊根任一侧的条形显示达到上述第 b) 条的规定时, 该焊缝是不可接受的;
- d) 在长度为 $12t$ 的任意选定条形显示评定区内, 相邻显示间距不超过 $6L$ 的任一组条形显示的累计长度大于 t , 若间距大于 $6L$, 则显示的累计长度不受限。 L 为该组条形显示中最长显示本身的长度。
- e) 超过 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》附录 F 规定的可接受的圆形显示。

8.3.2 超声检测验收准则: 对于反射波幅大于基准波幅 20% 的所有缺陷, 应扩大探测范围, 直至操作员能确定所有缺陷的形状、性质和位置, 并满足下列规定:

- a) 任何具有裂纹、未完全熔合或未焊透的缺陷;

b) 缺陷波幅超过基准波幅且长度超过下列规定的缺陷均不可接受:

- 1) 6mm, 板厚小于等于 19mm;
- 2) $\frac{1}{3}t$, 板厚介于 19mm 至 57mm, 其中 t 为较薄焊件的厚度;
- 3) 19mm, 板厚大于 57mm。

8.3.3 磁粉检测验收准则

8.3.3.1 显示的评定

8.3.3.1.1 表面上的机械不连续通过检测介质的滞留来显示。但并非所有的显示都是缺陷, 因为某些冶金上的不连续和磁导率的变化都可能产生类似的显示, 而这类显示与缺陷是无关的。

8.3.3.1.2 任何被认为是无关的显示, 应采用相同的或其他的无损检测方法复测, 以验证实际上是否有缺陷存在。复测前可先进行表面修整。在一个显示被证实为无关显示后, 不需要再对同类型的无关显示进行复测。如果无关显示遮盖了缺陷, 则这样的无关显示是不可接受的。

8.3.3.1.3 相关显示是由缺陷引起的显示。线状显示是指长度大于 3 倍宽度的显示。圆形显示是指圆形或长度不超过 3 倍宽度的椭圆形显示。

8.3.3.2 验收准则

8.3.3.2.1 只有产生主要尺寸大于 1.5mm 的显示的缺陷才是相关缺陷。

8.3.3.2.2 引起下列显示的缺陷均是不可接受的:

- a) 任何裂纹或线状显示;
- b) 尺寸大于 5mm 的圆形显示;
- c) 在一条直线上有至少 4 个且边缘距离不超过 1.5mm 的圆形显示;
- d) 在显示评定的最不利区域, 主要尺寸不超过 150mm 的任一面积为 4000mm² 的范围内有至少 10 个圆形显示。

8.3.4 液体渗透检测验收准则

8.3.4.1 显示的评定

8.3.4.1.1 表面上的机械不连续通过渗透剂的渗出来显示。但由于机械加工的痕迹或表面条件等可能引起的局部表面不连续性, 也会产生类似的显示, 这类显示是无关显示。

8.3.4.1.2 任何被认为是无关的显示, 应采用相同的或其他的无损检测方法复测, 以验证实际上是否有缺陷存在。复测前可先进行表面修整。可能会遮盖缺陷的无关显示及液体渗透的扩散区域是不可接受的。

8.3.4.1.3 相关显示是由缺陷引起的显示。线状显示是指长度大于 3 倍宽度的显示。圆形显示是指圆形或长度不超过 3 倍宽度的椭圆形显示。

8.3.4.2 验收准则

8.3.4.2.1 只有产生主要尺寸大于 1.5mm 的显示的缺陷才是相关缺陷。

8.3.4.2.2 引起下列显示的缺陷，均是不可接受的：

- a) 任何裂纹或线状显示；
- b) 尺寸大于 5mm 的圆形显示；
- c) 在一条直线上有至少 4 个且边缘距离不超过 1.5mm 的圆形显示；
- d) 在显示评定的最不利区域，主要尺寸不超过 150mm 的任一面积为 4000mm² 的范围内有至少 10 个圆形显示。

8.4 无损检测人员的考核、取证

8.4.1 无损检测人员的考核、取证应符合《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定》。

9 试验

9.1 一般规定

9.1.1 应对钢制安全壳和附件进行压力试验。螺栓、双头螺栓、螺母、垫圈和密封垫片可免作压力试验。

9.1.2 应在试验前制定详细试验程序，满足本章和技术规格书的要求。

9.1.3 为了试验时进行检测，除规定允许以外，所有接头（包括焊接接头）应不加保温层，而暴露在外。

9.1.4 在试验期间的附加压力荷载作用下，可对膨胀接头安装临时的约束件。

9.1.5 在试验期间不承受压力试验的设备应与钢制安全壳断开，或用盲板法兰或类似的方法隔离。如关闭阀门适用于预定的试验压力，则可使用该阀门。

9.1.6 试验期间装入盲板使其与其他设备隔离的法兰接头，不需再作试验。

9.1.7 如果压力试验需要保持一段时间，而系统中的试验介质会受热膨胀，则应采取预防措施以避免超压。

9.1.8 加压前应检验试验装置，应确保其密封性以及所有低压充水管路和应不经受试验的其他部件都已断开或隔离。

9.1.9 可在气压试验之前进行压力不超过试验压力 10% 的气压试验，以查找泄露部位。

9.1.10 当采用有压力的气体作为试验介质时，需采取保护人员安全的专门预防措施。

9.1.11 用作气压试验的试验介质应是不可燃气体。

9.1.12 气压试验应在发生脆性断裂的可能性为最小的温度下进行。

9.2 密封性试验

9.2.1 钢制安全壳密封性试验的实施及要求应符合《核电厂安全壳密封性试验》NB/T 20018-2010 的规定。

9.3 结构完整性试验

9.3.1 核电厂运行前及需要对钢制安全壳的结构完整性进行试验验证时，安全壳结构应进行规定压力下的压力试验，以验证其结构的完整性。

9.3.2 试验压力应不小于设计压力的 1.1 倍，且不大于设计压力的 1.15 倍。

9.3.3 加压规程：安全壳内的压力应逐渐增加到不大于试验压力的一半，然后按每级为试验压力的约 1/10 逐级升压到所要求的试验压力。

9.3.4 试验压力的保持时间：在 9.3.2 规定的试验压力下，至少应保持总时间为 10 分钟。

9.3.5 加压后的检漏：满足 9.3.4 规定的保压时间后，应将气压试验的试验压力降到设计压力，并对所有接头、连接处和高应力区（如开孔周围区域和厚度过渡段）进行检漏。

9.3.6 结构完整性试验的实施及要求应符合 NB/T 20431-2017 的规定。

10 超压保护

10.1 一般规定

10.1.1 核电厂在运行过程中，若钢制安全壳有可能出现超压时，应按本章规定配备超压泄放装置。

10.1.2 非永久性的压力泄放装置，在钢制安全壳投入使用前应从其上拆除。

10.1.3 超压泄放装置应设计成可通过试验或检测来确定由于其在流体环境中服役造成的超压保护功能的受损情况。

10.1.4 泄放装置在施工和安装时，应能保证其在使用或试验工况下可对泄放装置的正确操作和与泄放装置有关的压力传感元件的可靠性进行验证。

10.1.5 部件与部件上的压力泄放阀之间连接管道的最小内径应大于等于压力泄放阀进气口处的名义尺寸。在连接管道上开孔时，应保证部件与部件上的压力泄放阀之间的流体能直接并畅通无阻地流动。由被保护部件与泄放阀之间沿程管路损失所引起的压降，应与泄放阀工作特性相适应。

10.1.6 弹簧加载式压力泄放阀通常应安装在与其阀杆的铅垂线相一致的竖直位置上。当空间或管道布置不允许按这种方式安装时，如果满足下列条件，则弹簧加载式压力泄放阀可安装在非垂直位置上：

- a) 核级阀门生产者提供书面证明材料证明这种安装位置可满足阀门设计要求；
- b) 该阀门已按相同的非垂直安装位置作过压力试验。

10.1.7 压力泄放装置上泄放管道的截面应不小于泄放连接管道的截面。泄放管道的尺寸和长度，应使可能存在或产生的任何背压不致把压力泄放装置的泄放量减小到低于保护部件所需的量。

10.1.8 在压力泄放装置的入口管路或泄放管路中应不设置隔离阀或其他装置,这样压力泄放装置的保护功能不会降低到低于本章规定的要求,除非这种隔离阀在制造和安装中带有控制和连锁装置,致使泄放量要求在所有运行工况下都能得到满足。应提供一种方法对控制和连锁装置的操作状态进行确认。

10.1.9 钢制安全壳上不得采用非重闭式压力泄放装置。

10.2 外压保护

10.2.1 若钢制安全壳内的压力有可能小于大气压力,且不能承受此负压条件时,应装设防负压的泄放装置。

10.2.2 当需要在钢制安全壳上设置防负压的真空释放装置或系统时,该真空释放装置或系统应带有控制泄放的通风系统或冷凝系统。

10.2.3 真空释放装置的额定总释放量应考虑流体流经管道和其他部件时对释放量的限制要求。

10.2.4 每套真空释放装置的额定释放量应不小于为防止压差超过设计外压所需的释放量。

10.2.5 当需要在钢制安全壳上设置防负压的真空释放装置或系统时,应至少设置两套独立的装置。每套真空释放装置的释放量应不低于为保护部件所需的释放量。

10.2.6 真空释放装置的整定压力应使真空释放装置动作后安全壳的最大负压不超过规定的设计外压的某个压力值。

10.3 内压保护

10.3.1 若钢制安全壳上装有直接排放至周围环境的压力泄放装置,会导致钢制安全壳的基本功能丧失,一般不在钢制安全壳上设置内压保护的壓力泄放閥。

10.3.2 当需要在钢制安全壳上设置内压保护的壓力泄放裝置時,壓力泄放閥的整定壓力應不小於試驗工況的試驗壓力。

11 铭牌

11.1 铭牌位置

铭牌应固定于明显的位置。

11.2 铭牌内容

铭牌应包括如下内容:

- a) 制造单位名称和制造单位许可证号码;
- b) 制造单位对该钢制安全壳产品的编号;
- c) 设计压力(设计内外压);
- d) 试验压力;
- e) 设计温度;
- f) 钢制安全壳重量;
- g) 竣工日期

附 录 A
(规范性附录)
材料的补充规定

本附录作为第5章的补充，适用于下列情况：

- a) 已列入第 5 章但尚未列入材料标准（国家标准或行业标准）的钢材；
- b) 选用未列入第 5 章的钢材；
- c) 代用第 5 章的钢材。

钢材除应符合第5章的有关规定外，还应符合以下规定：

- a) 选用国外钢材时，应是国外相应压力容器最新标准所允许使用的钢材，其使用范围应不超出该标准的规定；
- b) 代用图纸规定的钢材时，应取得原设计单位的书面认可；
- c) 钢材的许用应力应按第 5 章规定确定。

附 录 B
(规范性附录)
材料的许用应力及许用应力强度值

表B.1 材料的许用应力

钢号	材料标准	厚度 (mm)	外压 图	常温强度指标(MPa)		在下列温度(°C)下的许用应力/MPa																	
				R _m	R _{eL}	-30~40	65	100	125	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
10MnNiMo	NB/T 20006.31		图C.1	585	415	168	168	168	168	168	168	168	167	165	163	...	...	...	...	...	...	...	...
15Mn	NB/T 20005.32		图C.1	485	260	138	138	138	138	138	138	138	136	132	128	123	101	83.8	67.1	51.0	33.6	21.3	12.9
022Cr19Ni10	NB/T 20007.31	>125	图C.3	450	170	115	115	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	86.6	72.5	60.2	49.5
		≤125	图C.3	485	170	115	115	115	115	115	110	103	97.7	95.7	94.1	92.6	91.3	90.0	88.7	86.6	72.5	60.2	49.5
022Cr19Ni10	NB/T 20007.32		图C.3	485	170	115	105	97.0	92.3	88.1	81.2	76.0	72.3	70.9	69.7	68.6	67.6	66.7	65.7	64.6	63.4	60.2	49.5
06Cr18Ni11Ti	NB/T 20007.35		图C.4	515	205	138	138	138	135	132	129	129	127	125	123	121	119	117	115	114	113	111	87.4
15Mn	NB/T 20007.31		图C.1	485	250	138	138	138	138	138	138	136	129	125	122	117	101	83.9	67.0	51.1	33.6	21.3	12.9
15Mn	NB/T 20005.33		图C.1	415	240	118	118	118	118	118	118	118	118	118	117	105	88.9	75.3	62.7	45.5	31.6	21.9	12.7
15CrMnMo	NB/T 20006.32		图C.1	485	275	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	136	133	130	105	73.3	52.1	36.4
15Mn	NB/T 20005.39		图C.1	485	260	138	138	138	138	138	138	138	138	136	132	128	123						

表B.2 材料的许用应力强度

钢号	材料标准	厚度 (mm)	外压 图	常温强度指标 (MPa)		在下列温度(℃)下的许用应力强度/MPa															
				R _m	R _{eL}	-30~40	65	100	125	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500
10MnNiMo	NB/T 20006.31		图C.1	585	415	195	195	195	195	195	195	195	195	193	190						
15Mn	NB/T 20005.32		图C.1	485	260	161	161	160	157	154	149	143	136	132	129	124					
022Cr19Ni10	NB/T 20007.31	>125	图C.3	450	170	115	115	115	115	115	110	103	97.7	95.8	94.1	92.9	91.6	89.7	88.4		
		≤125	图C.3	485	170	115	115	115	115	115	110	103	97.7	95.8	94.1	92.9	91.6	89.7	88.4		
022Cr19Ni10	NB/T 20007.32		图C.3	485	170	115	115	115	115	115	110	103	97.7	95.8	94.1	92.9	91.6	89.7	88.4		
06Cr18Ni11Ti	NB/T 20007.35		图C.4	515	205	138	138	138	138	138	138	134	128	125	123	120	119	117	115		
15Mn	NB/T 20007.31		图C.1	485	250	161	156	151	148	146	142	136	129	125	122	118					
15Mn	NB/T 20005.33		图C.1	415	240	138	138	138	138	138	137	132	126	122	118	115					
15CrMnMo	NB/T 20006.32		图C.1	485	275	161	161	161	161	161	156	151	146	143	141	138					
15Mn	NB/T 20005.39		图C.1	485	260	161	160	160	157	154	149	143	136	132	129	124					

表B. 3 螺栓材料的许用应力

螺栓材料	螺栓材料的许用应力
T/CNEA XXX.18-XXXX 高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料	螺栓材料的许用应力从T/CNEA XXX.8-XXXX 《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》表A.5中查用。

表B. 4 螺栓材料的许用应力强度

螺栓材料	螺栓材料的许用应力强度
T/CNEA XXX.18-XXXX 高温或高压及其他特殊用途用合金钢和不锈钢螺栓材料	螺栓材料的许用应力强度从T/CNEA XXX.8-XXXX 《压水堆承压部件 设计与制造 第8部分：辅助规则》表A.6中查用。

表B. 5 材料的抗拉强度

钢号	材料标准	厚度 (mm)	外压 图	常温强度指标 (MPa)		在下列温度(°C)下的抗拉强度/MPa														
				R _m	R _{eL}	-30~40	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525
10MnNiMo	NB/T 20006.31		图C.1	585	415	586	586	586	586	586	583	578	569	556	539	516	493			
15Mn	NB/T 20005.32		图C.1	485	260	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
022Cr19Ni10	NB/T 20007.31	>125	图C.3	450	170	448	419	392	377	369	366	364	362	361	358	355	350	345	338	330
		≤125	图C.3	485	170	483	452	421	406	398	393	392	391	389	386	382	377	372	364	355
022Cr19Ni10	NB/T 20007.32		图C.3	485	170	483	452	421	406	398	393	392	391	389	386	382	377	372	364	355
06Cr18Ni11Ti	NB/T 20007.35		图C.4	515	205	517	487	461	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	452	447
15Mn	NB/T 20007.31		图C.1	485	250	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296
15Mn	NB/T 20005.33		图C.1	415	240	414	414	414	414	414	414	414	414	414	408	382	352	319	285	253
15CrMnMo	NB/T 20006.32		图C.1	485	205	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	472	454	433	407
15Mn	NB/T 20005.39		图C.1	485	260	483	483	483	483	483	483	483	483	483	476	446	411	372	332	296

表B.6 材料的屈服强度

钢号	材料标准	厚度 (mm)	外压 图	常温强度指标 (MPa)		在下列温度(°C)下的屈服强度/MPa																	
				R _m	R _{eL}	-30~40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
10MnNiMo	NB/T 20006.31		图C.1	585	415	414	393	378	368	360	353	345	339	333	328	323	317	312	306	300	293	286	
15Mn	NB/T 20005.32		图C.1	485	260	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210	204	199	193	187	181	176	171	167
022Cr19Ni10	NB/T 20007.31	>125	图C.3	450	170	172	157	146	138	132	126	121	117	114	111	108	106	104	103	101	100	98.9	97.1
		≤125	图C.3	485	170	172	157	146	138	132	126	121	117	114	111	108	106	104	103	101	100	98.9	97.1
022Cr19Ni10	NB/T 20007.32		图C.3	485	170	172	157	146	138	132	126	121	117	114	111	108	106	104	103	101	100	98.9	97.1
06Cr18Ni11Ti	NB/T 20007.35		图C.4	515	205	207	194	184	177	171	165	160	154	150	146	142	139	136	133	132	130	128	127
15Mn	NB/T 20007.31		图C.1	485	250	248	233	227	223	219	216	213	209	204	199	194	188	183	177	171	166	162	158
15Mn	NB/T 20005.33		图C.1	415	240	241	227	220	217	214	210	207	203	198	194	188	183	177	172	167	162	158	154
15CrMnMo	NB/T 20006.32		图C.1	415	205	207	197	190	185	181	178	175	172	169	166	164	161	158	155	153	149	145	142
15Mn	NB/T 20005.39		图C.1	485	260	262	246	239	235	232	228	225	221	216	210	204	199	193	187	181	176	171	167

表B.7 材料的弹性模量

材料	在下列温度(°C)下的弹性模量/×10 ³ MPa																	
	-200	-125	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	
碳钢，碳含量≤0.30%	216	212	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162	151	137				
碳钢，碳含量>0.30%	215	211	207	201	197	194	191	188	183	178	170	161	149	136	121			
延性铸铁			169	161	155	151	147	142	138	134								

表B.8 铁基材料的热膨胀系数

温度 ℃	碳钢和低合金钢（1组） ^a			其它低合金钢（2组） ^b			奥氏体不锈钢（3组） ^c		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
20	11.5	11.5	0	12.6	12.6	0	15.3	15.3	0
50	12.0	11.8	0.4	13.0	12.8	0.4	16.0	15.6	0.5
75	12.3	11.9	0.7	13.3	13.0	0.7	16.5	15.9	0.9
100	12.7	12.1	1.0	13.5	13.1	1.0	17.0	16.2	1.3
125	12.9	12.3	1.3	13.8	13.2	1.4	17.4	16.4	1.7
150	13.2	12.4	1.6	14.0	13.4	1.7	17.8	16.6	2.2
175	13.5	12.6	2.0	14.2	13.5	2.1	18.1	16.8	2.6
200	13.8	12.7	2.3	14.4	13.6	2.4	18.4	17.0	3.1
225	14.0	12.9	2.6	14.6	13.7	2.8	18.6	17.2	3.5
250	14.3	13.0	3.0	14.8	13.8	3.02	18.8	17.4	4.0
275	14.6	13.2	3.4	15.0	13.9	3.6	18.9	17.5	4.5
300	14.9	13.3	3.7	15.1	14.0	3.9	19.1	17.7	4.9
325	15.1	13.4	4.1	15.3	14.1	4.3	19.2	17.8	5.4
350	15.4	13.6	4.5	15.4	14.2	4.7	19.3	17.9	5.9
375	15.7	13.7	4.9	15.5	14.3	5.1	19.4	18.0	6.4
400	15.9	13.8	5.3	15.7	14.4	5.5	19.5	18.1	6.9
425	16.1	14.0	5.7	15.8	14.5	5.9	19.6	18.2	7.4
450	16.4	14.1	6.1	15.9	14.6	6.3	19.8	18.3	7.9
475	16.5	14.2	6.5	16.0	14.6	6.7	20.0	18.4	8.3
500	16.7	14.4	6.9	16.1	14.7	7.1	20.2	18.4	8.9

525	16.8	14.5	7.3	16.2	14.8	7.5	20.4	18.5	9.4
550	16.9	14.6	7.7	16.2	14.8	7.9	20.6	18.6	9.9
575	17.0	14.7	8.2	16.3	14.9	8.3	20.9	18.7	10.4
600	17.0	14.8	8.6	16.4	15.0	8.7	21.1	18.8	10.9
625	17.1	14.9	9.0	16.4	15.0	9.1	21.4	18.9	11.4
650	17.1	15.0	9.4	16.4	15.1	9.5	21.6	19.0	12.0
675	17.1	15.1	9.9	16.4	15.1	9.9	21.7	19.1	12.5
700	17.1	15.1	10.3	16.4	15.2	10.3	21.7	19.2	13.1
725	17.1	15.2	10.7	16.3	15.2	10.7	21.5	19.3	13.6
750	17.2	15.3	11.1	16.3	15.3	11.1	21.2	19.4	14.1
775	17.4	15.3	11.6	16.2	15.3	11.1	20.6	19.4	14.7
800	17.7	15.4	12.0	16.0	15.3	11.5	19.7	19.4	15.2
825	18.1	15.5	12.5	15.8	15.3	11.9	18.4	19.4	15.6

注：系数A是瞬时热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ （mm/mm/℃）。系数B是从20℃到所指温度的平均热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ （mm/mm/℃）。
系数C是从20℃到所指温度的线性热膨胀系数（mm/m）。

- ^a 1 组合金（按公称成分）：
 碳钢
 34Ni-1/2Mo-Cr-V
- ^b 2 组合金（按公称成分）：
 Mn-1/2Mo-1/2Ni
- ^c 3 组合金（按公称成分）：
 16Cr-12Ni-2Mo-N
 18Cr8Ni

附 录 C
(规范性附录)
外压计算用图表

C.1 外压计算用图

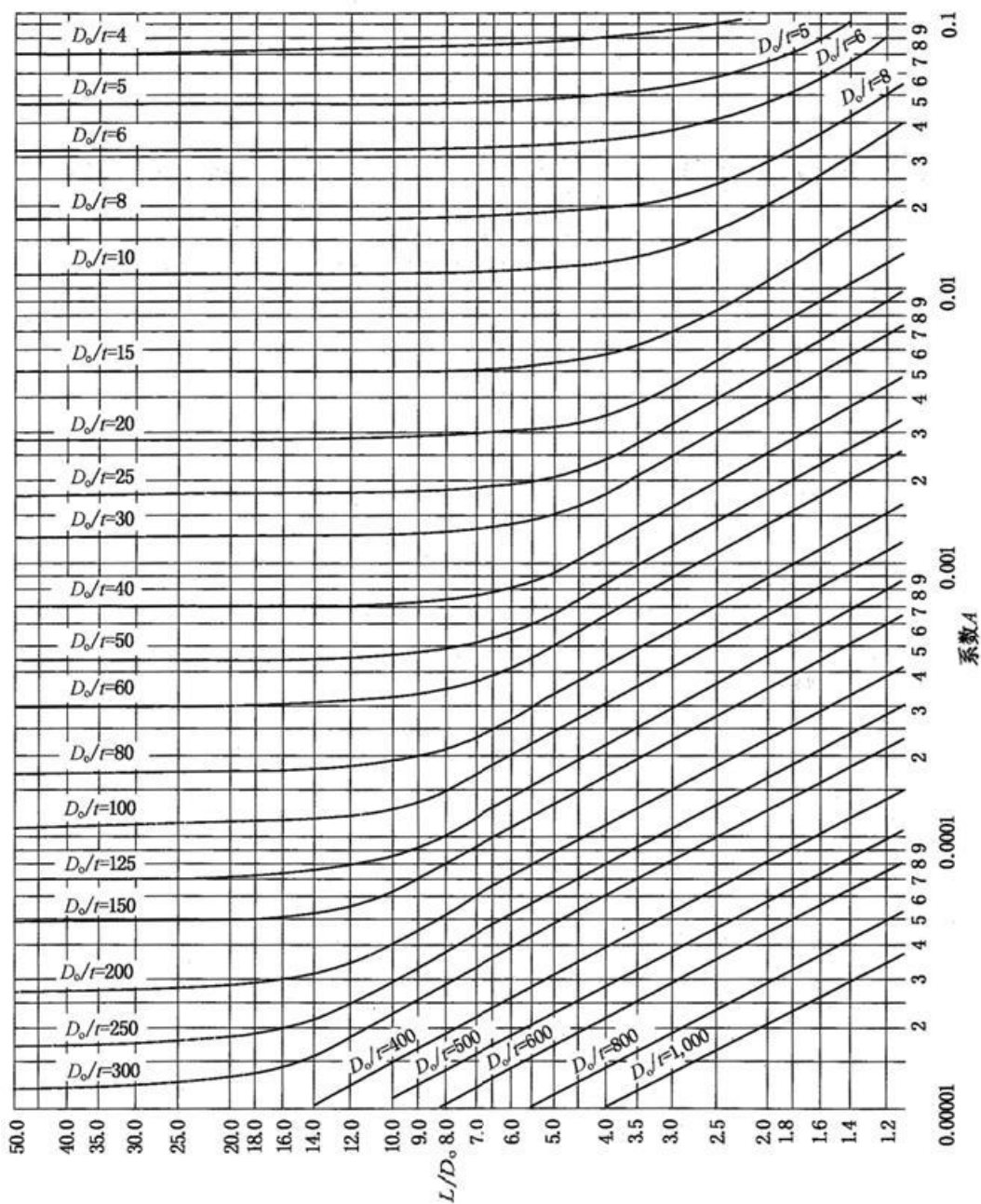
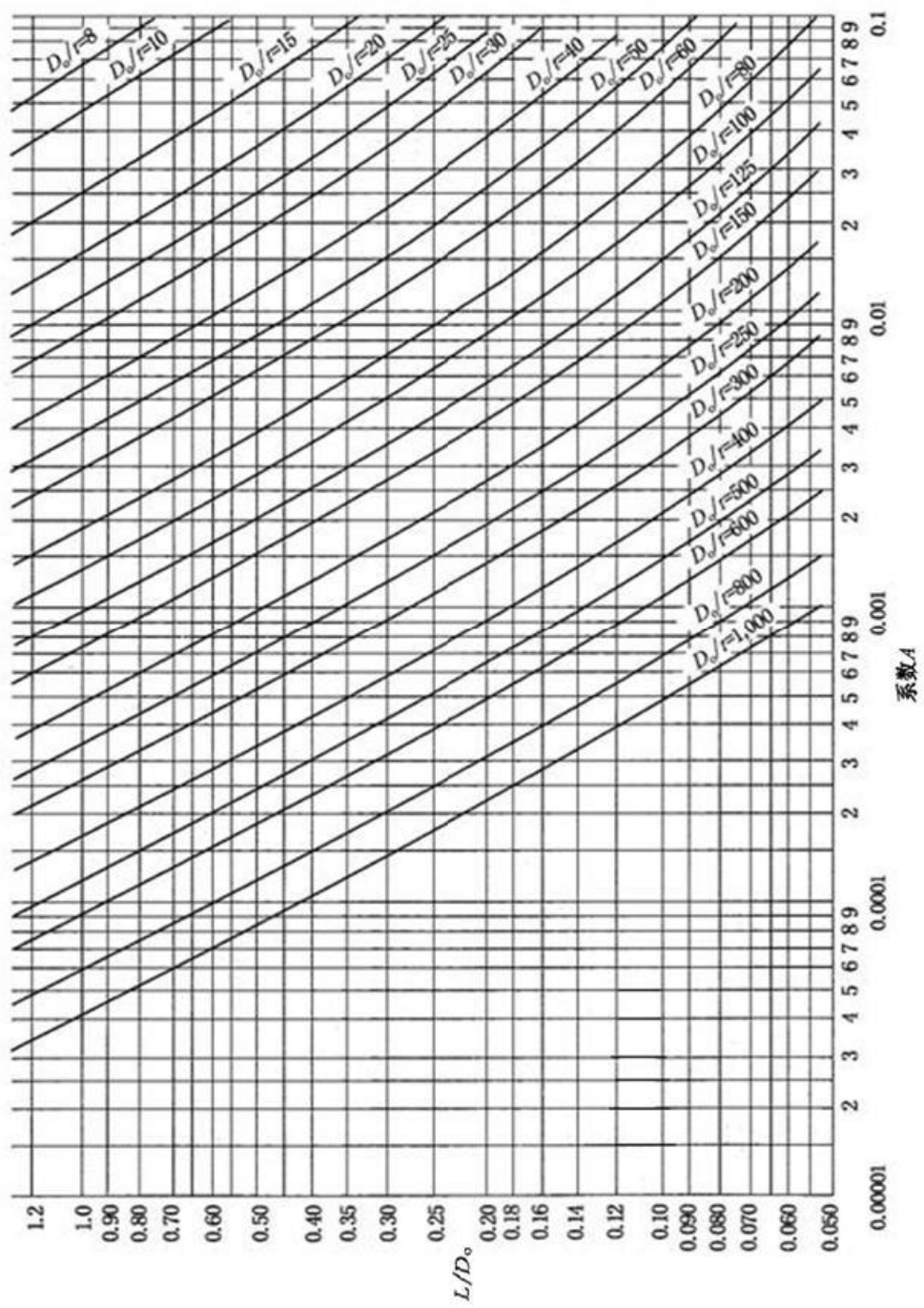
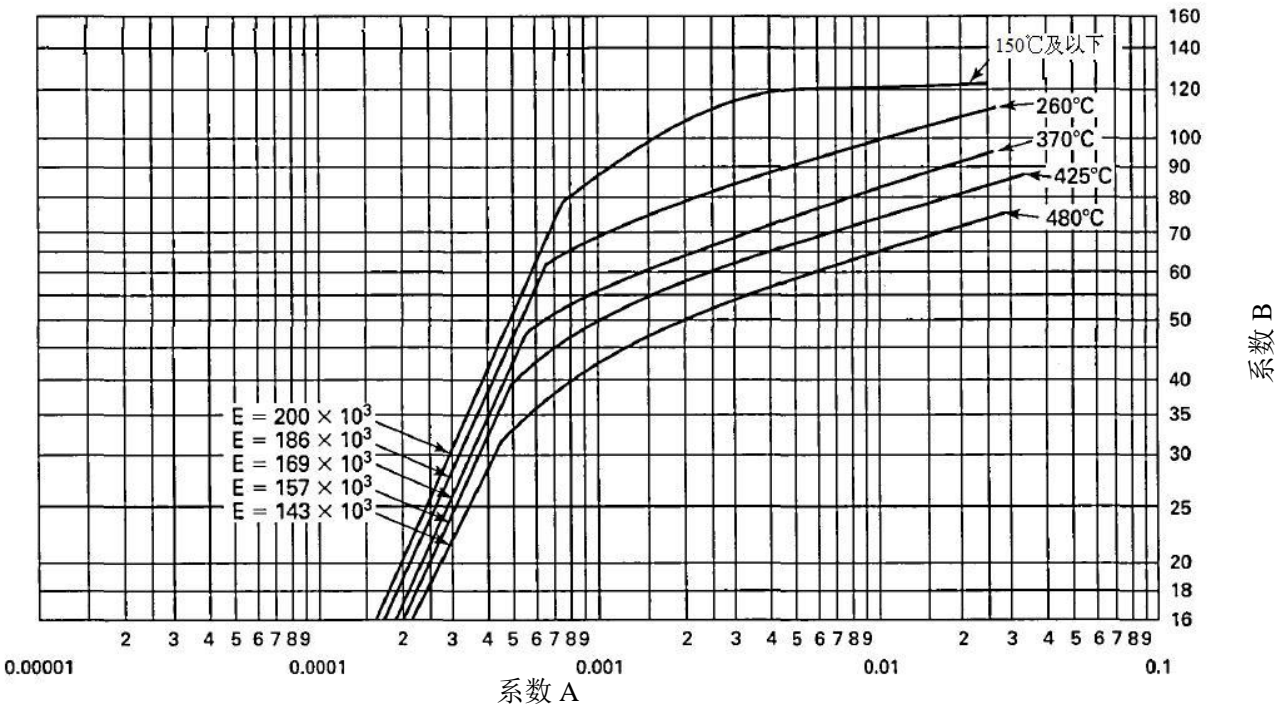


图 C.1 外压荷载作用下部件的几何尺寸线算图(用于所有材料)



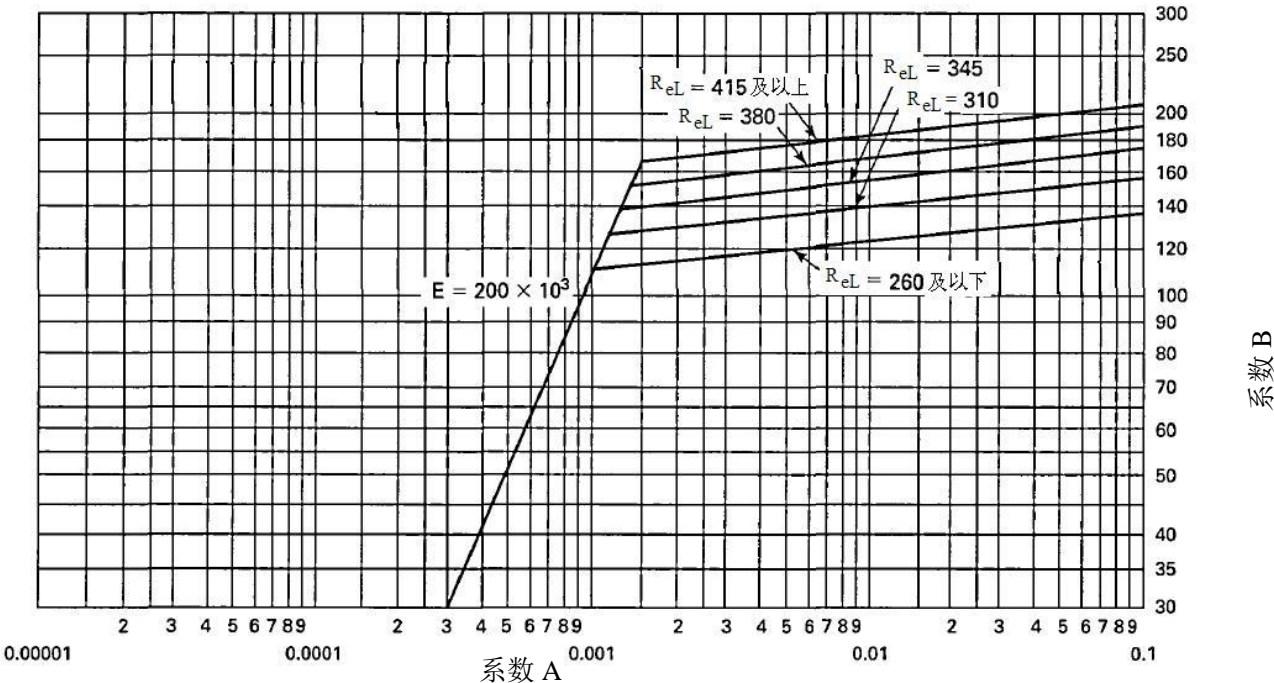
注：图中数据详见表C.1。

图C.1 外压荷载作用下部件的几何尺寸线算图(用于所有材料，续)



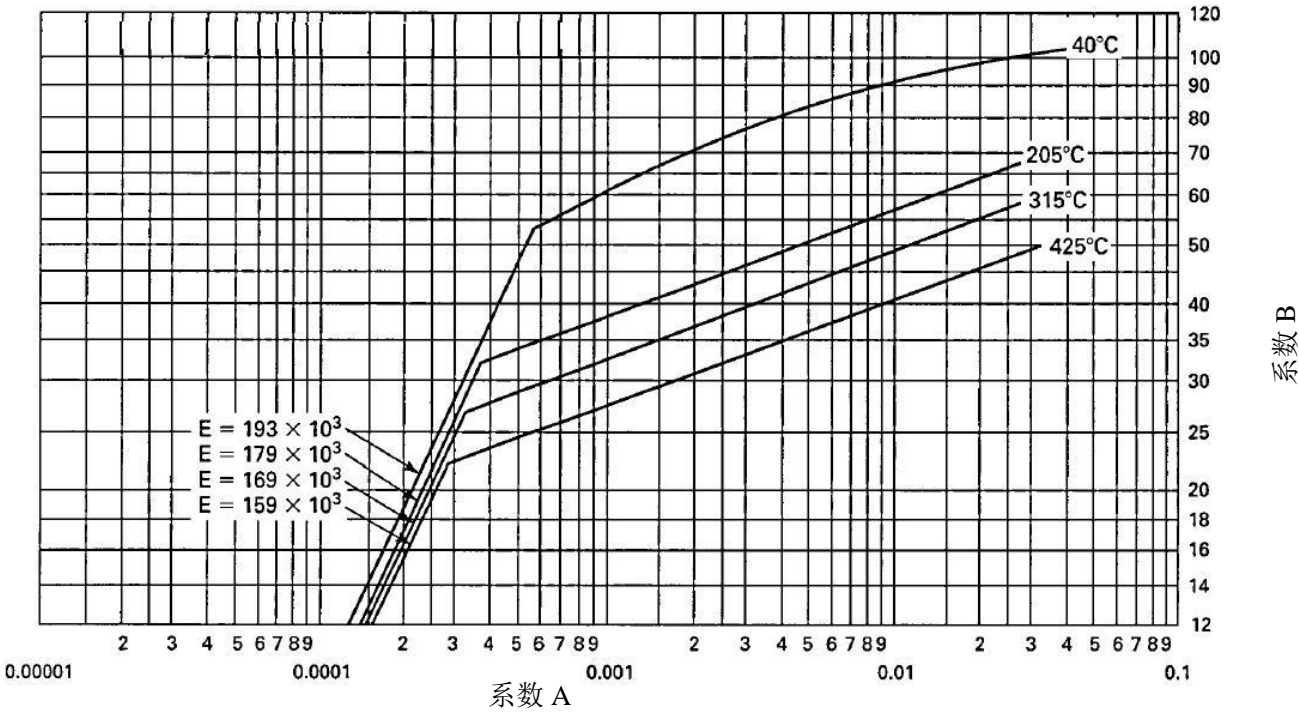
注：图中数据详见表C.2。

图C.2 最小屈服强度为 205MPa 的碳钢或低合金钢部件在外压作用下计算用图



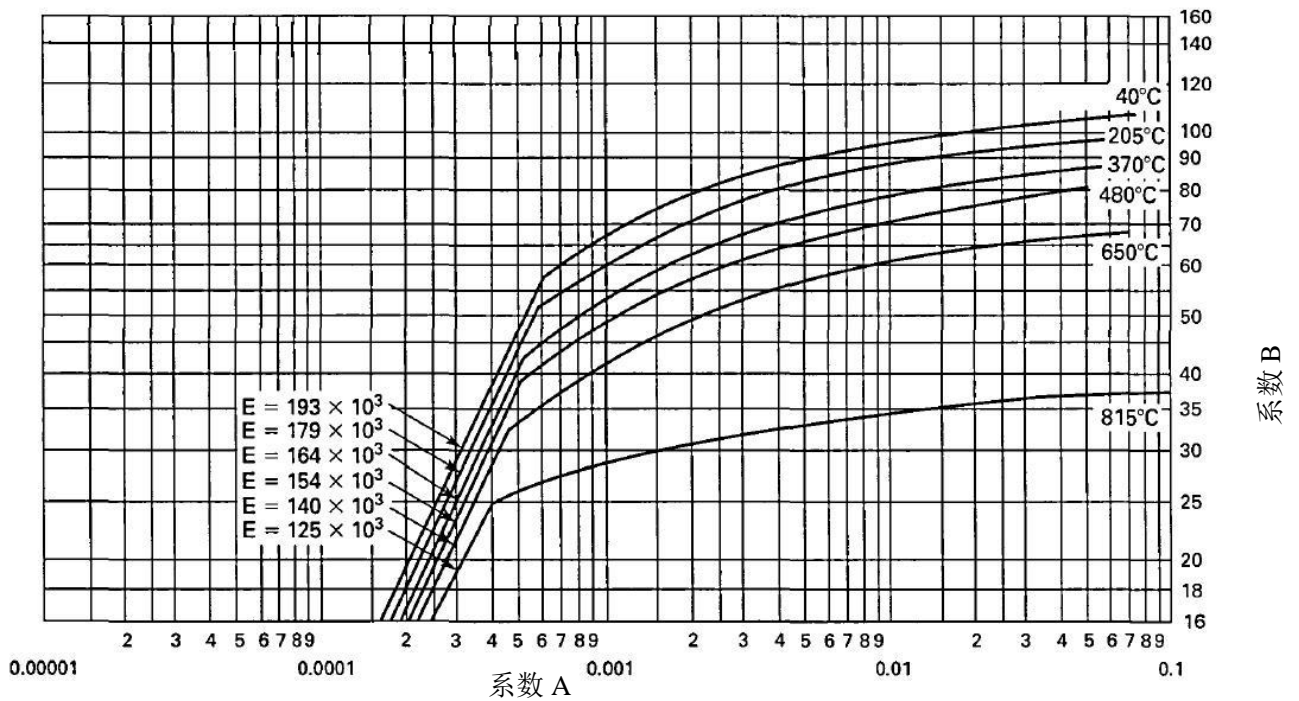
注：图中数据详见表C.3。

图C.3 最小屈服强度为 260MPa 的碳钢或低合金钢部件在外压作用下不超过 150°C计算用图



注：图中数据详见表C.4。

图C.4 奥氏体不锈钢部件在外压作用下计算用图 1



注：图中数据详见表C.5。

图C.5 奥氏体不锈钢部件在外压作用下计算用图 2

C.2 外压计算用图对应的数据表

表C.1 图 C.1 中的曲线数据表

D _o /t	L/D _o	A值	D _o /t	L/D _o	A值	D _o /t	L/D _o	A值
4	2.2	9.59E-02	8	1	6.6	15	5	5.34
	2.6	8.84		1.6	3.72		6	5.16
	3	8.39		2	2.85		10	4.97
	4	7.83		2.4	2.42		40	4.90
	5	7.59		3	2.12		50	4.90
	7	7.39		4	1.92	20	0.24	9.82E-02
	10	7.29		5	1.84		0.4	4.77
	30	7.20		7	1.79		0.6	2.86
	50	7.20		10	1.76		0.8	2.03
5	1.4	9.29E-02	10	20	1.74		1	1.56
	1.6	8.02		50	1.74		1.2	1.27
	2	6.58		0.56	9.64E-02		2	7.13E-03
	2.4	5.86		0.7	7.2		3	4.46
	3	5.32		1	4.63		3.4	3.88
	4	4.94		1.2	3.71		4	3.42
	5	4.78		2	2.01		5	3.08
	7	4.65		2.4	1.61		7	2.87
	10	4.59		3	1.39		10	2.80
	30	4.54		4	1.24		40	2.75
	50	4.53		5	1.18		50	2.75
6	1.2	8.37E-02	15	7	1.14	25	0.2	8.77E-02
	1.6	5.84		10	1.12		0.3	4.84
	2	4.69		16	1.11		0.5	2.50
	2.4	4.11		50	1.11		0.8	1.43
	3	3.69		0.34	9.68E-02		1	1.11
	4	3.41		0.4	7.70		1.2	9.02E-03
	5	3.29		0.6	4.53		2	5.08
	7	3.20		1	2.44		3	3.23
	10	3.16		1.2	1.97		3.4	2.78
	30	3.12		2	1.09		4	2.35
	50	3.12		2.4	8.90E-03		4.4	2.19
8	0.74	9.68E-02		3	6.91		5	2.04
	0.8	8.75		4	5.73		6	1.91

表 C.1 图 C.1 中的曲线数据表（续 1）

25	7	1.86	40	50	6.88		0.07	6.08
	10	1.80	50	0.088	9.30E-02		0.09	3.91
	30	1.76		0.1	7.82		0.1	3.28
	50	1.76		0.2	2.63		0.14	1.96
30	0.16	9.04E-02		0.3	1.54	80	0.2	1.20
	2	6.35		0.4	1.08		0.24	9.50E-03
	0.3	3.57		0.6	6.77E-03		0.4	5.16
	0.4	2.46		0.8	4.90		0.6	3.28
	0.6	1.50		1	3.84		0.8	2.39
	0.8	1.08		2	1.71		1	1.88
	1	8.38E-03		4	8.42E-04		2	8.95E-04
	1.2	6.83		5	6.52		4	4.24
	2	3.88		6	5.48		6.6	2.41
	3	2.46		7	5.02		8	2.05
	4	1.77		8	4.78		10	1.86
	4.4	1.61		10	4.58		14	1.76
	5	1.47		12	4.49		30	1.72
	6	1.36		16	4.44		50	1.72
	7	1.30		40	4.40	100	0.05	7.41E-02
	10	1.25		50	4.40		0.07	3.98
	30	1.22	60	0.074	9.54E-02		0.1	2.20
	50	1.22		0.1	5.56		0.14	1.33
40	0.12	8.64E-02		0.14	3.23		0.2	8.31E-03
	0.2	3.85		0.2	1.93		0.4	3.64
	0.3	2.22		0.4	8.12E-03		0.5	2.83
	0.4	1.55		0.6	5.10		0.8	1.70
	0.6	9.58E-03		0.8	3.71		1	1.34
	0.8	6.91		1	2.91		2	6.41E-04
	1	5.39		2	1.38		4	3.05
	1.2	4.41		3	8.86E-04		6	1.95
	2	2.52		4	6.45		8	1.42
	4	1.17		6	4.09		10	1.24
	5	9.12E-04		7	3.64		14	1.14
	6	8.04		8	3.41		25	1.10
	7	7.56		10	3.22		50	1.10
	8	7.31		14	3.10	125	0.05	4.80E-02
	10	7.08		40	3.06		0.06	3.44
	16	6.92		50	3.06		0.08	2.10
	40	6.88	80	0.054	9.90E-02		0.1	1.48

表 C.1 图 C.1 中的曲线数据表（续 2）

125	0.14	9.17E-03	200	0.1	6.59	300	0.05	9.23E-03
	0.2	5.78		0.14	4.21		0.06	6.90
	0.4	2.57		0.2	2.72		0.08	4.52
	0.6	1.65		0.3	1.71		0.1	3.34
	0.8	1.21		0.5	9.76E-04		0.12	2.64
	1	9.55E-04		0.8	5.92		0.2	1.43
	2	4.59		1	4.69		0.4	6.66E-04
	4	2.20		2	2.27		0.6	4.33
	6	1.41		4	1.10		0.8	3.21
	9	9.04E-05		6	7.11E-05		1	2.54
	10	8.37		8	5.20		2	1.24
	12	7.70		10	4.03		4	6.02E-05
	14	7.40		12	3.38		6	3.93
	20	7.13		14	3.09		8	2.87
	40	7.04		16	2.95		10	2.25
	50	7.04		20	2.83		14	1.56
150	0.05	3.38E-02	250	40	2.75	400	16	1.42
	0.06	2.44		50	2.75		20	1.30
	0.08	1.51		0.05	1.29E-02		40	1.23
	0.1	1.08		0.06	9.55E-03		50	1.22
	0.12	8.33E-03		0.08	6.17		0.05	5.49E-03
	0.16	5.69		0.1	4.52		0.06	4.17
	0.2	4.31		0.14	2.93		0.08	2.78
	0.4	1.94		0.2	1.91		0.1	2.08
	0.6	1.25		0.4	8.81E-04		0.12	1.66
	1	7.26E-05		0.6	5.72		0.16	1.18
	2	3.49		0.8	4.22		0.2	9.14E-04
	4	1.68		1	3.35		0.4	4.29
	6	1.08		2	1.63		0.6	2.80
	8	7.87E-05		4	7.89E-05		0.8	2.07
	10	6.19		6	5.13		1	1.65
	12	5.53		8	3.77		2	8.08E-05
	16	5.10		10	2.93		4	3.93
	20	4.98		12	2.38		6	2.57
	40	4.89		14	2.10		8	1.89
	50	4.89		16	1.96		10	1.48
200	0.05	1.96E-02	500	20	1.84		14	1.02
	0.06	1.43		40	1.76		16	8.82E-06
	0.08	9.09E-03		50	1.76		0.05	3.70E-03

表 C.1 图 C.1 中的曲线数据表（续 3）

500	0.06	2.84	600	0.12	8.68E-04	800	0.6	9.80E-05
	0.08	1.92		0.16	6.24		0.8	7.28
	0.1	1.45		0.2	4.86		1	5.80
	0.12	1.16		0.4	2.31		2	2.86
	0.16	8.30E-04		0.6	1.51		4	1.40
	0.2	6.45		0.8	1.12		5	1.12
	0.4	3.05		1	8.94E-05		5.6	9.92E-06
	0.6	1.99		2	4.39	1000	0.05	1.13E-03
	0.8	1.48		4	2.16		0.06	8.91E-04
	1	1.18		6	1.41		0.07	7.33
	2	5.79E-05		8	1.04		0.09	5.41
	4	2.82		8.4	9.88E-06		0.12	3.88
	6	1.85	800	0.05	1.65E-03		0.16	2.82
	8	1.37		0.06	1.29		0.2	2.21
	10	1.07		0.08	8.92E-04		0.4	1.06
	12	8.80E-06		0.1	6.82		0.7	5.96E-05
600	0.05	2.70E-03		0.12	5.51		1	4.14
	0.06	2.08		0.16	3.98		2	2.04
	0.08	1.42		0.2	3.12		4	1.01
	0.1	1.08		0.4	1.49		4.2	9.57E-06

表C.2 图 C.2 中曲线关键点数据

温度, °C	A	B, MPa	温度, °C	A	B, MPa
150	1.76×10^{-5}	1.72	370	2.13×10^{-5}	1.72
	7.83×10^{-4}	7.79×10^1		5.64×10^{-4}	4.69×10^1
	8.00×10^{-4}	7.86×10^1		1.00×10^{-3}	5.52×10^1
	9.00×10^{-4}	8.14×10^1		3.00×10^{-3}	6.96×10^1
	1.00×10^{-3}	8.48×10^1		1.00×10^{-2}	8.34×10^1
	2.00×10^{-3}	1.03×10^2		2.64×10^{-2}	9.51×10^1
	3.00×10^{-3}	1.12×10^2		1.00×10^{-1}	9.51×10^1
	4.00×10^{-3}	1.16×10^2	425	2.23×10^{-5}	1.72
	5.00×10^{-3}	1.19×10^2		5.05×10^{-4}	3.94×10^1
	2.50×10^{-2}	1.21×10^2		1.00×10^{-3}	4.90×10^1
	1.00×10^{-1}	1.21×10^2		1.50×10^{-3}	5.48×10^1
260	1.94×10^{-5}	1.72		2.00×10^{-3}	5.79×10^1
	6.75×10^{-4}	6.21×10^1		3.00×10^{-3}	6.14×10^1
	9.00×10^{-4}	6.65×10^1		3.19×10^{-2}	8.55×10^1
	1.00×10^{-3}	6.89×10^1		1.00×10^{-1}	8.55×10^1
	2.50×10^{-3}	8.27×10^1	480	2.37×10^{-5}	1.72
	3.00×10^{-3}	8.55×10^1		4.28×10^{-4}	3.10×10^1
	8.00×10^{-3}	9.79×10^1		1.00×10^{-3}	4.14×10^1
	1.00×10^{-2}	1.01×10^2		1.50×10^{-3}	4.69×10^1
	1.50×10^{-2}	1.07×10^2		2.00×10^{-3}	5.07×10^1
	2.00×10^{-2}	1.11×10^2		3.00×10^{-3}	5.45×10^1
	2.80×10^{-2}	1.17×10^2		8.00×10^{-3}	6.34×10^1
	1.00×10^{-1}	1.17×10^2		3.00×10^{-2}	7.65×10^1
				1.00×10^{-1}	7.65×10^1

表C.3 图 C.3 中曲线关键点数据

屈服强度, MPa	A	B, MPa	温度, °C	A	B, MPa
415	4.00×10^{-5}	4.00	310	4.00×10^{-5}	4.00
	1.00×10^{-3}	1.00×10^2		1.00×10^{-3}	1.00×10^2
	1.66×10^{-3}	1.65×10^2		1.24×10^{-3}	1.38×10^2
	1.00×10^{-1}	2.07×10^2		1.00×10^{-1}	1.72×10^2
380	4.00×10^{-5}	4.00	425	4.00×10^{-5}	4.00
	1.00×10^{-3}	1.00×10^2		1.00×10^{-3}	1.00×10^2
	1.52×10^{-3}	1.52×10^2		1.10×10^{-3}	1.24×10^2
	1.00×10^{-1}	1.86×10^2		1.00×10^{-1}	1.55×10^2
345	4.00×10^{-5}	4.00	345	1.38×10^{-3}	1.10×10^2
	1.00×10^{-3}	1.00×10^2		1.00×10^{-1}	1.38×10^2

表C.4 图 C.4 中曲线关键点数据

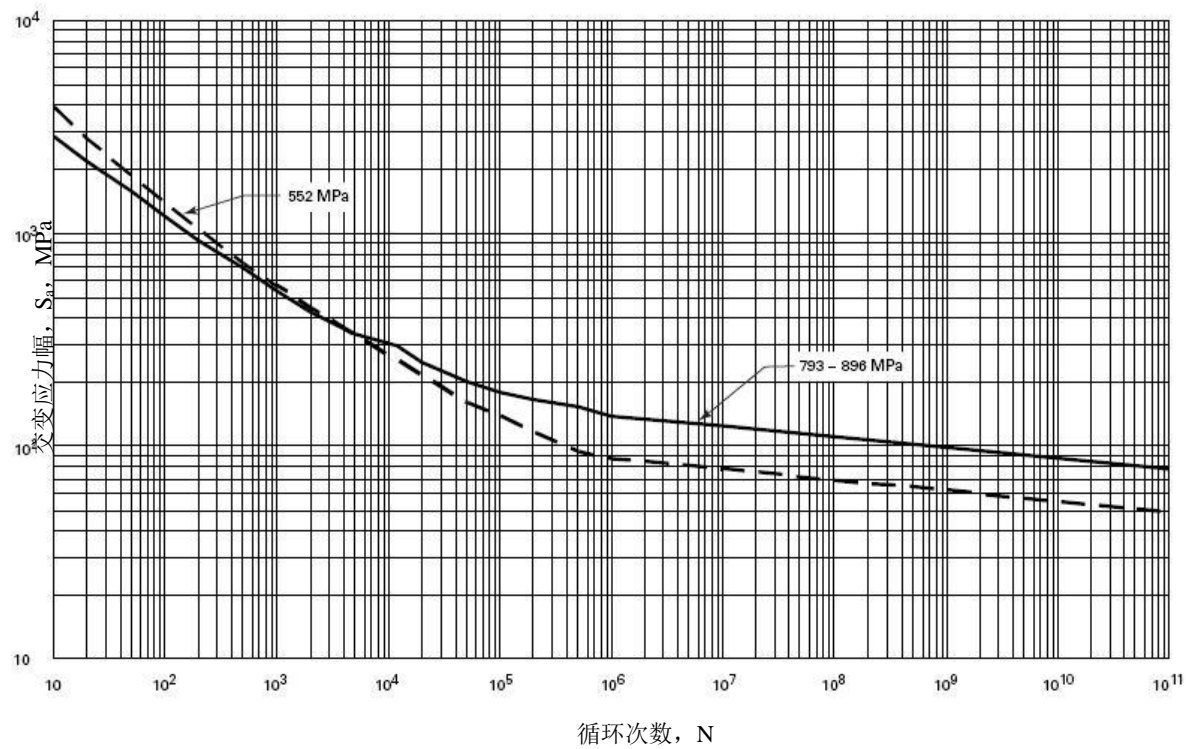
屈服强度, MPa	A	B, MPa	温度, °C	A	B, MPa
40	1.39×10^{-5}	1.38	315	1.65×10^{-5}	1.38
	5.35×10^{-4}	5.21×10^1		3.19×10^{-4}	2.68×10^1
	2.00×10^{-3}	6.96×10^1		1.00×10^{-3}	3.28×10^1
	6.00×10^{-3}	8.55×10^1		1.00×10^{-2}	4.90×10^1
	4.00×10^{-2}	1.03×10^2		2.81×10^{-2}	5.83×10^1
	1.00×10^{-1}	1.03×10^2		1.00×10^{-1}	5.83×10^1
205	1.58×10^{-5}	1.38	425	1.74×10^{-5}	1.38
	3.61×10^{-4}	3.19×10^1		2.75×10^{-4}	2.19×10^1
	1.00×10^{-3}	3.79×10^1		1.50×10^{-3}	2.94×10^1
	1.00×10^{-2}	5.62×10^1		1.00×10^{-2}	4.07×10^1
	2.83×10^{-2}	6.72×10^1		3.00×10^{-2}	4.96×10^1
	1.00×10^{-1}	6.72×10^1		1.00×10^{-1}	4.96×10^1

表C.5 图 C.5 中曲线关键点数据

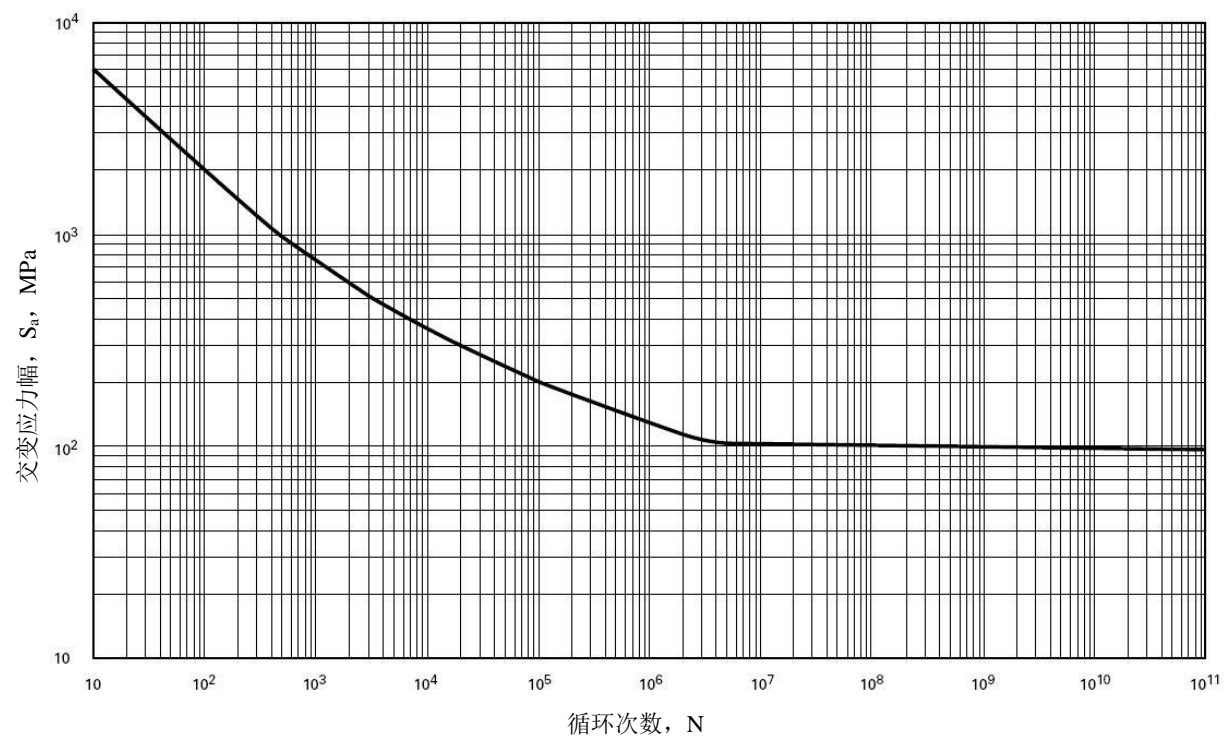
温度, °C	A	B, MPa	温度, °C	A	B, MPa
40	1.84×10^{-5}	1.72	370	1.00×10^{-2}	7.86×10^1
	6.05×10^{-4}	5.79×10^1		5.00×10^{-2}	8.76×10^1
	1.50×10^{-3}	7.65×10^1		5.92×10^{-2}	8.89×10^1
	2.00×10^{-3}	8.07×10^1		1.00×10^{-1}	8.89×10^1
	2.50×10^{-3}	8.41×10^1	480	2.28×10^{-5}	1.72
	3.00×10^{-3}	8.69×10^1		5.10×10^{-4}	3.90×10^1
	4.00×10^{-3}	8.96×10^1		6.00×10^{-4}	4.21×10^1
	5.00×10^{-3}	9.17×10^1		1.00×10^{-3}	4.96×10^1
	7.00×10^{-3}	9.38×10^1		3.00×10^{-3}	6.24×10^1
	1.00×10^{-2}	9.65×10^1		4.00×10^{-3}	6.48×10^1
	2.00×10^{-2}	1.01×10^2		1.00×10^{-2}	7.10×10^1
	7.26×10^{-2}	1.08×10^2		5.22×10^{-2}	8.07×10^1
	1.00×10^{-1}	1.08×10^2		1.00×10^{-1}	8.07×10^1
205	1.99×10^{-5}	1.72	650	2.47×10^{-5}	1.72
	5.85×10^{-4}	5.17×10^1		4.60×10^{-4}	3.21×10^1
	1.00×10^{-3}	6.00×10^1		1.00×10^{-3}	4.14×10^1
	1.50×10^{-3}	6.69×10^1		2.00×10^{-3}	4.96×10^1
	2.00×10^{-3}	7.17×10^1		3.00×10^{-3}	5.38×10^1
	3.00×10^{-3}	7.72×10^1		4.00×10^{-3}	5.65×10^1
	4.00×10^{-3}	8.07×10^1		5.00×10^{-3}	5.79×10^1
	5.00×10^{-3}	8.27×10^1		1.00×10^{-2}	6.17×10^1
	6.00×10^{-3}	8.41×10^1		7.00×10^{-2}	6.89×10^1
	1.00×10^{-2}	8.76×10^1		1.00×10^{-1}	6.89×10^1
	5.74×10^{-2}	9.86×10^1	815	1.00×10^{-4}	6.2
	1.00×10^{-1}	9.86×10^1		1.60×10^{-4}	1.00×10^1
370	2.18×10^{-5}	1.72		3.95×10^{-4}	2.46×10^1
	5.33×10^{-4}	4.31×10^1		1.45×10^{-3}	2.93×10^1
	7.00×10^{-4}	4.83×10^1		2.54×10^{-3}	3.10×10^1
	1.00×10^{-3}	5.38×10^1		5.62×10^{-3}	3.32×10^1
	3.00×10^{-3}	6.89×10^1		3.50×10^{-2}	3.76×10^1
	4.00×10^{-3}	7.24×10^1		1.00×10^{-1}	3.76×10^1

附录 D
(规范性附录)
设计疲劳曲线

D.1 材料的设计疲劳曲线图



图D.1 温度不超过 370℃的碳钢、低合金钢和高抗拉强度钢的设计疲劳曲线



图D.2 温度不超过 425℃的奥氏体不锈钢、镍铬铁合金、镍铁铬合金镍铜合金的设计疲劳曲线

D. 2 材料的设计疲劳曲线数据表

表 D.1 中关键点数据

循环次数	交变应力幅 S_a 值, MPa	
	极限抗拉强度: 793~896	极限抗拉强度: ≤ 552
1E1	2896	3999
2E1	2206	2827
5E1	1586	1896
1E2	1207	1413
2E2	931	1069
5E2	689	724
1E3	538	572
2E3	427	441
5E3	338	331
1E4	303	262
1.2E4	296	
2E4	248	214
5E4	200	159
1E5	179	138
2E5	165	114
5E5	152	93
1E6	138	86
1E7	123	77
1E8	110	68
1E9	98	61
1E10	87	54
1E11	77	48

表 D.2 中关键点数据

循环次数	交变应力幅 S_a 值, MPa
1E1	6000
2E1	4300
5E1	2748
1E2	1978
2E2	1440
5E2	974
1E3	745
2E3	590
5E3	450
1E4	368
2E4	300
5E4	235
1E5	196
2E5	168
5E5	142
1E6	126
2E6	113
5E6	102
1E7	99
1E8	97.1
1E9	95.8
1E10	94.4
1E11	93.7