



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 4732.6—2024

## 压力容器分析设计 第6部分：制造、检验和验收



Pressure vessels design by analysis—  
Part 6: Fabrication, inspection and testing and acceptance

2024-07-24 发布

2024-07-24 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布



## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 总体要求 .....	3
5 材料复验、分割与标志移植 .....	5
6 冷、热加工成形与组装 .....	6
7 焊接 .....	13
8 热处理 .....	16
9 试件与试样 .....	21
10 无损检测 .....	23
11 耐压试验和泄漏试验 .....	25
12 热气循环试验 .....	28
13 压力容器出厂要求 .....	29
附录 A (规范性) 锻焊压力容器的制造、检验和验收附加要求 .....	31
附录 B (规范性) 套合压力容器的制造、检验和验收附加要求 .....	33
附录 C (规范性) 多层包扎压力容器的制造、检验和验收附加要求 .....	35
附录 D (规范性) 钢带错绕压力容器的制造、检验和验收附加要求 .....	42



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 4732《压力容器分析设计》的第 6 部分。GB/T 4732 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：通用要求；
- 第 2 部分：材料；
- 第 3 部分：公式法；
- 第 4 部分：应力分类方法；
- 第 5 部分：弹塑性分析方法；
- 第 6 部分：制造、检验和验收。

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。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本文件起草单位：合肥通用机械研究院有限公司、中国机械工业集团有限公司、中国特种设备检测研究院、二重(德阳)重型装备有限公司、中国石化工程建设有限公司、中石化南京化工机械有限公司、浙江大学、中国寰球工程有限公司北京分公司、一重集团大连工程技术有限公司、大连金州重型机器集团有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院。

本文件主要起草人：崔军、陈学东、杨国义、王迎君、陈志伟、冯清晓、姚佐权、韩冰、陈志平、岳国印、赵景玉、刘静、缪春生、房务农、黄勇力、谢国山。



## 引 言

GB/T 4732《压力容器分析设计》给出了压力容器按分析设计方法进行建造的要求,GB/T 150 基于规则设计理念提出了压力容器建造的要求。压力容器设计制造单位可依据设计具体条件选择两种建造标准之一实现压力容器的建造。

GB/T 4732 由 6 个部分构成。

- 第 1 部分:通用要求。目的在于给出按分析设计建造的压力容器的通用要求,包括相关管理要求、通用的术语和定义以及 GB/T 4732 其他部分共用的基础要求等。
- 第 2 部分:材料。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中的钢制材料相关要求及材料性能数据等。
- 第 3 部分:公式法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器的典型受压元件及结构设计要求。具体给出了常用容器部件按公式法设计的厚度计算公式。GB/T 4732.3 可作为 GB/T 4732.4、GB/T 4732.5 的设计基础,也可依据 GB/T 4732.3 自行完成简化的、完整的分析设计。
- 第 4 部分:应力分类方法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中采用应力分类法进行设计的相关规定。
- 第 5 部分:弹塑性分析方法。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中采用弹塑性分析方法进行设计的相关规定。
- 第 6 部分:制造、检验和验收。目的在于给出按分析设计建造的压力容器中所涵盖结构形式容器的制造、检验和验收要求。

GB/T 4732 包括了基于分析设计方法的压力容器建造过程(即指材料、设计、制造、检验、试验和验收工作)中需要遵循的技术要求、特殊禁用规定。由于 GB/T 4732 没有必要,也不可能囊括适用范围内压力容器建造中的所有技术细节。因此,在满足安全技术规范所规定的基本安全要求的前提下,不限制 GB/T 4732 中没有特别提及的技术内容。GB/T 4732 不能作为具体压力容器建造的技术手册,也不能替代培训、工程经验和工程评价。工程评价是指由知识渊博、娴于规范应用的技术人员所作出针对具体产品的技术评价。工程评价需要符合 GB/T 4732 的相关技术要求。

GB/T 4732 不限制实际工程建造中采用其他先进的技术方法,但工程技术人员采用先进的技术方法时需要作出可靠的判断,确保其满足 GB/T 4732 的规定。

GB/T 4732 既不要求也不限制设计人员使用计算机程序实现压力容器的分析设计,但采用计算机程序进行分析设计时,除需要满足 GB/T 4732 的要求外,还要确认:

- 所采用程序中技术假定的合理性;
- 所采用程序对设计内容的适用性;
- 所采用程序输入参数及输出结果用于工程设计的正确性。

进行应力分析设计计算时可以选择或不选择以 GB/T 4732.3 作为设计基础,进而采用 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 进行具体设计计算以确定满足设计计算要求中防止结构失效所要求的元件厚度或局部结构尺寸。当独立采用 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 作为设计基础时,无需相互满足。



# 压力容器分析设计

## 第6部分：制造、检验和验收

### 1 范围

本文件规定了采用分析设计的钢制压力容器的制造、检验和验收要求。

本文件适用于钢制压力容器以及选用镍及镍合金为覆层、衬里或堆焊层的复合板压力容器、衬里压力容器、带堆焊层压力容器中非合金钢、低合金钢或高合金钢制基层的制造、检验和验收。

本文件适用的压力容器结构形式为单层焊接(含管制筒体)压力容器、锻焊压力容器、套合压力容器、多层包扎(包括多层筒节包扎、多层整体包扎)压力容器和钢带错绕压力容器。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 150.1 压力容器 第1部分:通用要求
- GB/T 150.2 压力容器 第2部分:材料
- GB/T 150.3 压力容器 第3部分:设计
- GB/T 150.4 压力容器 第4部分:制造、检验和验收
- GB/T 151 热交换器
- GB/T 196 普通螺纹 基本尺寸
- GB/T 197 普通螺纹 公差
- GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法
- GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法
- GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 232 金属材料 弯曲试验方法
- GB/T 1804 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差
- GB/T 1954 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法
- GB/T 2039 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法
- GB/T 3965 熔敷金属中扩散氢测定方法
- GB/T 4732.1 压力容器分析设计 第1部分:通用要求
- GB/T 4732.2 压力容器分析设计 第2部分:材料
- GB/T 4732.3 压力容器分析设计 第3部分:公式法
- GB/T 6396 复合钢板力学及工艺性能试验方法
- GB/T 8923.1 涂敷涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分:未涂敷过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
- GB/T 12337 钢制球形储罐
- GB/T 16749 压力容器波形膨胀节
- GB/T 21433 不锈钢压力容器晶间腐蚀敏感性检验

- GB/T 25198 压力容器封头
- GB/T 30583 承压设备焊后热处理规程
- GB/T 39255 焊接与切割用保护气体
- HG/T 20592~20635 钢制管法兰、垫片、紧固件
- JB/T 3223 焊接材料质量管理规程
- JB/T 4756 镍及镍合金制压力容器
- NB/T 10558 压力容器涂敷与运输包装
- NB/T 11025 补强圈
- NB/T 47002.1 压力容器用复合板 第1部分:不锈钢-钢复合板
- NB/T 47002.2 压力容器用复合板 第2部分:镍-钢复合板
- NB/T 47013(所有部分) 承压设备无损检测
- NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
- NB/T 47015 压力容器焊接规程
- NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验
- NB/T 47018(所有部分) 承压设备用焊接材料订货技术条件
- NB/T 47020 压力容器法兰分类与技术条件
- NB/T 47021 甲型平焊法兰
- NB/T 47022 乙型平焊法兰
- NB/T 47023 长颈对焊法兰
- NB/T 47024 非金属软垫片
- NB/T 47025 缠绕垫片
- NB/T 47026 金属包垫片
- NB/T 47027 压力容器法兰用紧固件
- NB/T 47041 塔式容器
- NB/T 47042 卧式容器

### 3 术语和定义

GB/T 150.1、GB/T 150.2、GB/T 150.3、GB/T 150.4、GB/T 4732.1、GB/T 30583 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **模拟最大程度焊后热处理 maximum postweld heat treatment; Max.PWHT**

为模拟制造和使用过程中可能发生的最多的热过程循环,而对试件(或试样)进行的特定热处理。

注1:对于具有与材料出厂时相同的奥氏体化和回火热处理状态的试件(或试样),该模拟热处理累计制造过程中所有高于490℃的热处理,包括中间消除应力热处理、所有焊后热处理、一次制造单位返修后进行的焊后热处理以及至少一次留给用户进行的焊后热处理。

注2:对Cr-Mo、Cr-Mo-V钢,不高于最终焊后热处理温度的热处理,可使用Larson-Miller公式计算等效保温时间,结果得到设计单位的书面认可。

#### 3.2

##### **模拟最小程度焊后热处理 minimum postweld heat treatment; Min.PWHT**

为模拟制造过程中发生的最少的热过程循环,而对试件(或试样)进行的特定热处理。

注1:对于具有与材料出厂时相同的奥氏体化和回火热处理状态的试件(或试样),该模拟热处理累计制造过程中所有高于490℃的热处理,包括中间消除应力热处理(不与PWHT合并时)和一次焊后热处理。

注2:对Cr-Mo、Cr-Mo-V钢,不高于最终焊后热处理温度的热处理,可使用Larson-Miller公式计算等效保温时

间,结果得到设计单位的书面认可。

### 3.3

#### 中间消除应力热处理 intermediate stress relief;ISR

进行最终焊后热处理前,为消除焊接残余应力等目的而将焊件均匀加热到一定温度,并保持一定时间,然后均匀冷却的过程。

### 3.4

#### 绕带筒体 flat steel ribbon wound cylindrical shell

由内筒和错绕钢带层组成的筒体。

## 4 总体要求

### 4.1 压力容器的制造、检验和验收要求

4.1.1 不同结构形式压力容器的制造、检验和验收应在单层焊接(含管制筒体)压力容器制造、检验和验收要求的基础上附加要求:

- a) 锻焊压力容器的制造、检验和验收附加要求按附录 A;
- b) 套合压力容器的制造、检验和验收附加要求按附录 B;
- c) 多层包扎压力容器的制造、检验和验收附加要求按附录 C;
- d) 钢带错绕压力容器的制造、检验和验收附加要求按附录 D。

4.1.2 对于铬镍奥氏体型不锈钢制低温压力容器(设计温度低于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),由参与建造的各方协商规定附加的制造、检验和验收要求,设计单位在设计文件中予以规定。

### 4.2 压力容器的制造、检验和验收依据

压力容器的制造、检验和验收除应符合本文件和设计文件的要求外,还应符合下列要求:

- a) 热交换器、球形储罐、塔式容器、卧式容器的制造、检验和验收还应分别符合 GB/T 151、GB/T 12337、NB/T 47041 和 NB/T 47042 的规定。
- b) 镍及镍合金复合板覆层、衬里和堆焊层的制造、检验和验收还应符合 JB/T 4756 的规定。

### 4.3 原材料及零、部件(含自制、外协加工和外购的零、部件)

#### 4.3.1 原材料

4.3.1.1 板材、管材、锻件、棒材、复合板按以下要求。

- a) 板材、管材、锻件、棒材应符合 GB/T 4732.2、JB/T 4756 中对材料的相关规定,材料供应商应提供材料制造单位材料出厂热处理工艺参数。
- b) 复合板应分别符合 NB/T 47002.1、NB/T 47002.2 的规定。当换热管受轴向压应力时,若选用复合板制造管板,应对复合板的粘结强度提出要求,并按 GB/T 6396 进行粘结试验测定粘结强度。
- c) 本文件适用范围内的压力容器,若受压元件全部采用镍及镍合金材料制造,则其许用应力应按 JB/T 4756 的相关规定选取。

4.3.1.2 焊接材料除应符合 NB/T 47018(所有部分)的规定外,还应满足 GB/T 4732.2 的要求。

#### 4.3.2 零、部件(含自制、外协加工和外购的零、部件)

4.3.2.1 封头除应符合 GB/T 25198 的规定外,还应满足下列要求。

- a) 成形封头不应采用硬印标志。

- b) 冷成形的铬镍奥氏体型不锈钢制封头应采用铁素体仪、按 GB/T 1954 在相互垂直的两条母线上进行铁素体含量检测。其中,椭圆形封头、碟形封头检测点至少包括顶点、小半径转角部位四个点、直边靠近端口部位四个点;锥形封头检测点至少包括大、小端靠近端口部位各四个点和中部四个点;半球形封头检测点至少包括顶点、靠近端口部位共四点、顶点与端口间中间部位共四点。测得的铁素体显示含量不大于 15%,且压力容器制造单位对成形封头逐只进行复验。对先拼板后成形的封头,检测部位应包括焊缝。
- c) 当材料的供货热处理状态与使用的热处理状态一致时,若封头成形改变了材料的供货热处理状态,则封头制造单位应进行恢复性能热处理。
- d) 分瓣成形后组装的封头,若组装不由封头制造单位完成,则封头制造单位进行封头的预组装,预组装封头的检验项目和检验结果应符合相应标准的规定或订货技术文件的要求。
- e) 采用来料加工方式制造的封头,来料的性能、成形后封头的性能要求由封头采供双方商定,来料的性能由封头采购方保证,成形后封头的性能由封头供货方保证。

4.3.2.2 压力容器法兰及其组件应分别符合 NB/T 47020~NB/T 47027 的规定和设计文件的要求。

4.3.2.3 压力容器管法兰及其组件应分别符合 HG/T 20592~20635 的规定和设计文件的要求,并应选用专用级紧固件。

4.3.2.4 压力容器膨胀节应符合 GB/T 16749 的规定和设计文件的要求。其中,冷成形的铬镍奥氏体型不锈钢制膨胀节应采用铁素体仪、按 GB/T 1954 在相互间隔 90°的膨胀节四条母线上进行铁素体含量检测。检测点至少包括波峰、波谷及波峰与波谷间中间部位,测得的铁素体显示含量不应大于 15%,且压力容器制造单位应对成形膨胀节逐只进行复验。对先拼板后成形的膨胀节,检测部位应包括焊缝。

4.3.2.5 补强圈应符合 NB/T 11025 的规定和设计文件的要求。

4.3.2.6 外购成品零、部件的供货单位应向压力容器制造单位提供完整、真实的产品质量证明文件。当压力容器制造单位要求时,供货单位应提供成品零、部件的钢材厚度。

#### 4.4 制造环境

镍及镍合金复合板压力容器、衬里压力容器、堆焊压力容器(或堆焊受压元件)的制造环境应洁净,并符合 JB/T 4756 的相关规定。

#### 4.5 压力容器制造过程中的风险预防和控制

4.5.1 制造单位应根据风险评估报告提出的主要失效模式、压力容器制造检验要求和建议,完成下列工作:

- a) 合理地确定制造、检验工艺和质量计划;
- b) 风险评估报告中给出的预防失效措施应在产品质量证明文件中予以体现。

4.5.2 对于设计单位没有出具风险评估报告的压力容器,制造单位应根据压力容器的制造、检验工艺评估风险,并进行有效控制。技术措施应至少包括:

- a) 评估压力容器制造工艺过程对材料的影响,合理确定材料订货技术条件中对材料相关性能的要求;
- b) 评估压力容器后续制造、检验工艺过程对外购成品零、部件的要求,合理制订外购成品零、部件订货技术条件。

#### 4.6 设计变更和材料代用

制造单位对设计文件的变更以及对受压元件的材料代用,应事先取得原设计单位的书面批准,并在竣工图上做详细记录。

#### 4.7 新技术和新工艺的使用

采用未列入本文件的压力容器制造、检验新技术、新工艺和新方法时,应按规定进行技术评审。

#### 4.8 信息化管理

压力容器制造单位应按照特种设备信息化管理的规定,及时将压力容器制造、检验相关数据录入特种设备信息化管理系统。

### 5 材料复验、分割与标志移植

#### 5.1 材料复验

##### 5.1.1 原材料复验

5.1.1.1 下列材料应进行复验:

- a) 设计压力大于 35 MPa 的压力容器主要受压元件材料;
- b) 外购的Ⅲ类压力容器用Ⅳ级锻件;
- c) 不能确定质量证明书真实性或者对性能和化学成分有怀疑的主要受压元件材料;
- d) 用于制造主要受压元件的境外牌号材料;
- e) 设计文件要求进行复验的材料。

5.1.1.2 材料复验时,应按炉号复验化学成分,按热处理批号复验力学性能。

5.1.1.3 材料复验结果应符合相应材料标准的规定或设计文件的要求。

##### 5.1.2 焊接材料复验

5.1.2.1 不能确定质量证明书真实性或者对性能和化学成分有怀疑的焊接材料,应按批进行熔敷金属的化学成分和力学性能复验,复验结果应符合相应焊材标准的规定或设计文件的要求。

5.1.2.2 焊接受压元件的药芯焊丝应按批进行熔敷金属化学成分、力学性能复验,其熔敷金属化学成分应符合相应标准的规定,冲击吸收能量应符合 NB/T 47018.2 相对应的焊条(具有相同的最小抗拉强度代号及化学成分分类代号)规定。

5.1.2.3 制造单位应采用 GB/T 3965 中的水银法或热导法对下列焊接材料的熔敷金属扩散氢含量按批进行复验,其扩散氢含量不应大于 5 mL/100 g:

- a) 焊接受压元件使用的药芯焊丝;
- b) 焊接 Cr-Mo 钢和 Cr-Mo-V 钢制压力容器、低温压力容器、非合金钢和低合金钢制现场组装压力容器、按疲劳分析设计的非合金钢和低合金钢制压力容器的受压元件所使用的实心焊丝、焊条以及每一种焊丝和焊剂组合;
- c) 焊接采用标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 的低合金钢制造的、厚度大于 36 mm 的受压元件所使用的焊接材料。
- d) 经熔敷金属扩散氢含量复验合格的有缝药芯焊丝,若其真空包装发生损坏,则施焊前应再次对真空包装损坏的药芯焊丝进行熔敷金属扩散氢含量复验。

5.1.2.4 标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 低合金钢制受压元件、设计温度低于  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的钢制受压元件用焊接材料,应按批进行熔敷金属化学成分复验,熔敷金属中的  $P\leq 0.020\%$ 、 $S\leq 0.010\%$ 。

#### 5.2 材料分割

5.2.1 材料分割可采用冷切割或热切割方法,分割时不应对材料性能产生有害的影响。当采用热切割

方法分割材料时,应清除表面熔渣和影响制造质量的表面层。

5.2.2 采用机械切割方法分割复合板时,应使复合板的覆层面对切割具;采用火焰切割方法分割复合板时,应使复合板的基层面对切割具。

### 5.3 材料标志移植

5.3.1 受压元件的材料应有可追溯的标志。在制造过程中,如原标志被裁掉或材料分成若干块时,制造单位应规定标志的表达方式,并在材料分割前完成标志的移植。

5.3.2 堆焊层表面、衬里表面、复合板覆层表面和有耐腐蚀要求不锈钢接触介质的表面不应采用硬印标记。

5.3.3 低温压力容器和按疲劳分析设计压力容器的受压元件表面不应采用硬印标记。

5.3.4 厚度不大于 6 mm 的受压元件、预制或预成形的受压元件表面不应采用硬印标记。

## 6 冷、热加工成形与组装

### 6.1 成形

6.1.1 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样标注的最小成形厚度。

6.1.2 受压元件的成形工艺应能保证压力容器制造完成后,成形件的性能仍满足设计文件的要求。其中,镍及镍合金复合板、衬里的成形应符合 JB/T 4756 的规定。

6.1.3 与成形工序衔接的相关制造单位(或部门)宜协商制订成形件投料材料的技术要求和成形件的技术要求,并加以控制。

6.1.4 采用经过正火、正火加回火或调质处理的钢材制造的受压元件,宜采用冷成形或温成形;采用温成形时,应避开钢材的回火脆性温度区。

6.1.5 成形件的加热、恢复性能热处理所使用的加热炉参照 8.3.8 的规定;当成形件进行恢复性能热处理时,制造单位(或部门)应提供热处理工艺规范和热处理时间-温度记录曲线。

### 6.2 表面修磨

6.2.1 制造中不应造成材料表面的机械损伤。对于尖锐伤痕以及不锈钢制压力容器耐腐蚀表面的局部伤痕、刻槽等缺陷应予修磨,修磨斜度最大为 1 : 3。修磨的深度不应大于该部位钢材厚度( $\delta_s$ )的 5%,且修磨后的剩余厚度不应小于设计图样标注的最小成形厚度,否则应予焊补。

6.2.2 对于复合板的覆层、堆焊层及衬里,修磨深度不应大于覆层(或堆焊层、衬里)厚度的 30%,且不大于 1 mm,否则应予焊补;当覆层、堆焊层计入强度时,修磨后覆层或堆焊层的剩余厚度不应小于其计入强度的厚度,否则应予焊补。

6.2.3 修磨不同类别金属的工具应各自专用。

### 6.3 坡口

6.3.1 坡口表面不应有裂纹、分层、夹杂等缺陷;对于复合板坡口,不应存在基、覆层剥离。

6.3.2 标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 的低合金钢及 Cr-Mo 钢、Cr-Mo-V 钢经热切割的坡口表面,加工完成后应按 NB/T 47013.4 或 NB/T 47013.5 进行表面检测,Ⅰ级合格。

6.3.3 施焊前,应清除坡口及内、外两侧母材表面至少 20 mm 范围内(对镍及镍合金覆层、衬里等为 25 mm,以离坡口边缘的距离计)的氧化皮、油污、熔渣及其他有害杂质。

## 6.4 封头

6.4.1 封头上各种不相交的拼接焊缝中心线之间的距离至少为封头钢材厚度( $\delta_s$ )的3倍,且不小于100 mm。

6.4.2 先分瓣成形后组装的封头,除顶圆板自身的拼接焊缝外,瓣片与瓣片之间、瓣片与顶圆板之间的焊缝方向应是径向的或环向的,见图1。顶圆板若拼接,其拼接焊缝的间距应符合6.4.1的规定。

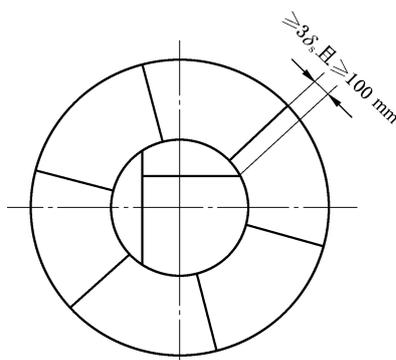


图1 分瓣成形封头的焊缝布置示意图

6.4.3 先拼板后成形的封头,其拼接焊缝的内表面以及影响成形质量的拼接焊缝的外表面,在成形前应打磨至与母材齐平。

6.4.4 封头内表面的形状偏差可采用带间隙的全尺寸内样板检查或使用测量仪器检查,对大直径封头,推荐使用测量仪器检查。当采用图2所示的全尺寸内样板检查椭圆形、碟形、半球形、球冠形封头内表面的形状偏差时,样板的缩进尺寸为 $3\% D_i \sim 5\% D_i$  ( $D_i$ 为封头公称内径),其最大形状偏差外凸不应大于 $1.25\% D_i$ ,内凹不应大于 $0.625\% D_i$ ,且不应有形状突变。检查时应使样板垂直于待测表面。对图1所示的先分瓣成形后组装的封头,允许样板避开焊缝进行测量。当使用测量仪器检查椭圆形、碟形、半球形、球冠形封头内表面的形状偏差时,测得的形状应与封头内表面基准曲线对比,其最大形状偏差外凸不应大于 $1.25\% D_i$ ,内凹不应大于 $0.625\% D_i$ ,且不应有形状突变。

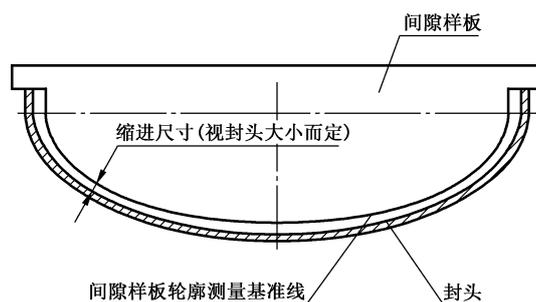


图2 封头的形状偏差检查示意图

6.4.5 折边锥形封头,其过渡区转角半径不应小于设计图样的规定值。

6.4.6 封头直边部分不应存在纵向皱褶。

6.4.7 先拼板后热成形的封头,当有工艺评定支持且封头焊接试件经检验合格时,其拼缝可不作焊缝置换。

6.5 圆筒与壳体

6.5.1 图3中A类、B类焊接接头对口错边量( $b$ )可采用样板、专用检测器具或仪器测量,并应符合表1的规定。半球形封头与圆筒连接的环向接头以及嵌入式接管与圆筒或封头对接连接的A类接头,按B类焊接接头的对口错边量要求。图4中复合板的对口错边量( $b$ )不大于钢板覆层厚度的50%,且不大于2 mm。

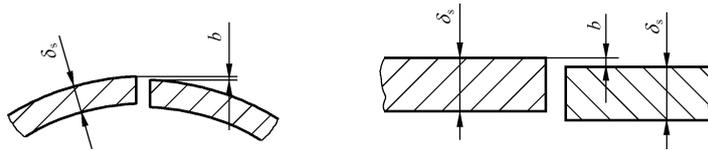


图3 A类、B类焊接接头对口错边量示意图

表1 A类、B类焊接接头对口错边量

单位为毫米

对口处钢材厚度( $\delta_s$ )	按焊接接头类别划分对口错边量( $b$ )	
	A类焊接接头	B类焊接接头
$\leq 12$	$\leq \delta_s/5$	$\leq \delta_s/4$
$> 12 \sim 20$	$\leq 2.4$	$\leq \delta_s/4$
$> 20 \sim 40$	$\leq 2.4$	$\leq 5.0$
$> 40 \sim 50$	$\leq 3.0$	$\leq \delta_s/8$
$> 50$	$\leq \delta_s/16$ , 且不大于 8.0	$\leq \delta_s/8$ , 且不大于 15.0

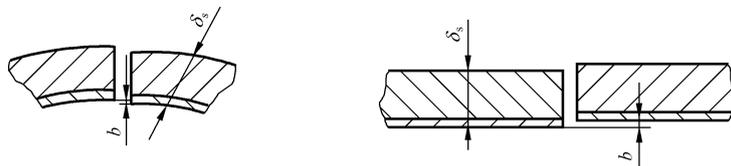


图4 复合板A类、B类焊接接头对口错边量示意图

6.5.2 在焊接接头环向、轴向形成的棱角( $E$ ),可采用样板或量具测量。当采用图5、图6所示样板测量时,宜分别用弦长等于  $D_i/6$ ,且不小于 300 mm 的内样板(或外样板)和直尺检查,其棱角( $E$ )值不应大于  $(\delta_s/10+2)$  mm,且不大于 5 mm。

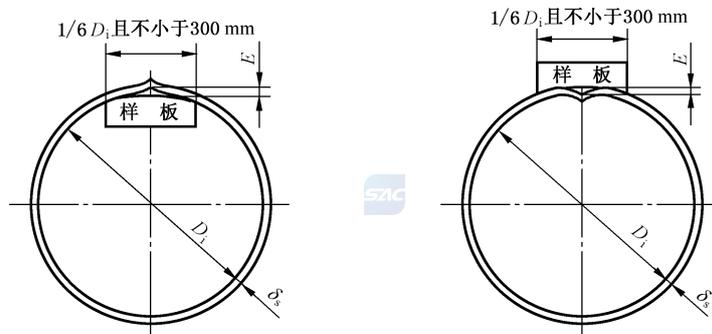


图5 焊接接头处的环向棱角示意图

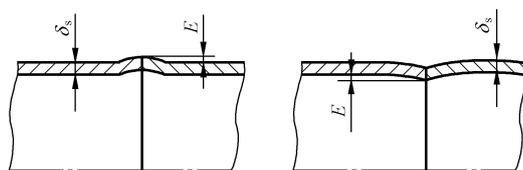
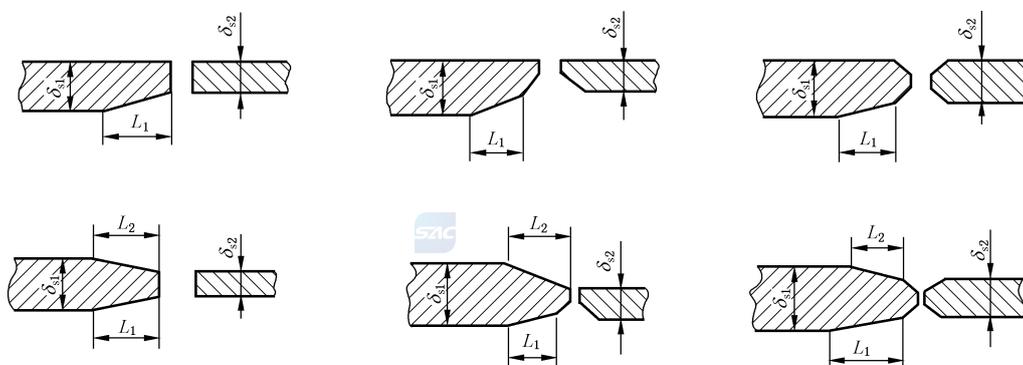


图 6 焊接接头处的轴向棱角示意图

6.5.3 B类焊接接头以及圆筒与球形封头相连的A类焊接接头,当两侧钢材厚度不等时,若两板厚度差大于 $25\% \delta_{s2}$ ,或超过3 mm时,均应按图7的要求单面或双面削薄厚板边缘,或按同样要求采用堆焊方法将薄板边缘焊成斜面。但对封头直边段进行单面或双面削薄时,削薄区域仅限于直边段,不应超出封头切线。

当两板厚度差小于上列数值时,则对口错边量 $b$ 按6.5.1的要求,且对口错边量 $b$ 以较薄板厚度为基准确定。在测量对口错边量 $b$ 时,不应计入两板厚度的差值。



单面削薄结构: $L_1 \geq 3(\delta_{s1} - \delta_{s2})$ ; 双面削薄结构: $L_1, L_2$ 长度可保证所在侧厚度以不大于1:3的坡度过渡。

图 7 不等厚度的B类焊接接头以及圆筒与球形封头相连的A类焊接接头连接型式示意图

6.5.4 壳体直线度可采用钢丝绳或仪器测量。除设计文件另有规定外,壳体总长度上的直线度偏差不应大于壳体长度( $L$ )的1‰,当直立容器壳体总长度超过30 000 mm时,其壳体直线度偏差不应大于 $(0.5L/1\ 000) + 15$  mm。

注:壳体直线度检查是通过中心线的水平和垂直面,即沿圆周 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四个部位进行测量。测量位置与筒体纵向接头焊缝中心线的距离至少100 mm。当壳体厚度不同时,直线度中不包括厚度差。

6.5.5 壳体组装的附加要求如下:

- 相邻筒节A类接头间外圆弧长,应大于钢材厚度( $\delta_s$ )的3倍,且不小于100 mm;
- 封头A类拼接接头、封头上嵌入式接管A类接头、与封头相邻筒节的A类接头相互间的外圆弧长,均应大于钢材厚度( $\delta_s$ )的3倍,且不小于100 mm;
- 组装筒体中,单个筒节的长度不应小于300 mm;
- 不宜采用十字焊缝。

注:外圆弧长是指接头焊缝中心线之间、沿壳体外表面测得的距离。

6.5.6 法兰面应垂直于接管或壳体的主轴中心线。接管和法兰的组件与壳体组装应保证法兰面的水平或垂直(有特殊要求的,如斜接管应按设计文件规定),其偏差均不应超过法兰外径的1%(法兰外径小于100 mm时,按100 mm计算),且不大于3 mm。法兰螺栓孔应与壳体主轴或铅垂线跨中布置,见图8。有特殊要求时,应在设计图样上注明。

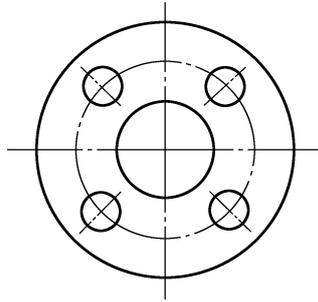


图 8 法兰螺栓孔的跨中布置示意图

6.5.7 直立容器的底座圈、底板上地脚螺栓孔应均布,中心圆直径允差、相邻两孔弦长允差和任意两孔弦长允差均不大于 $\pm 3$  mm。

6.5.8 压力容器内、外附件及接管、人孔与壳体间的焊接宜避开壳体上的 A 类、B 类焊接接头。

6.5.9 若设计文件未另行规定,安放式接管、插入端与壳体内壁齐平的插入式接管以及与圆筒或封头对接连接的嵌入式接管,其内表面转角半径( $r$ )不小于圆筒或封头名义厚度的  $1/4$ ,且不大于 20 mm,如图 9a)~图 9c)所示;内伸的插入式接管,其内表面转角半径( $r$ )不小于接管名义厚度的  $1/4$ ,且不大于 10 mm,如图 9d)所示。

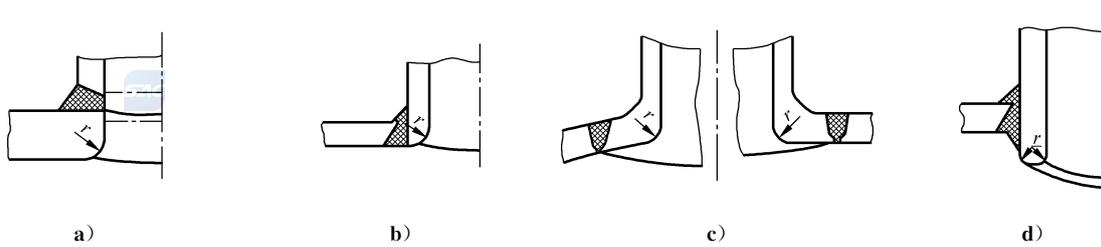


图 9 接管内表面转角半径示意图

6.5.10 压力容器上凡被补强圈、支座、垫板等覆盖的焊缝,均应打磨至与母材齐平。

6.5.11 压力容器组焊完成后,应采用专用检测器具或仪器检查壳体的直径,要求如下:

- a) 壳体同一断面上最大内径( $D_{max}$ )与最小内径( $D_{min}$ )之差,不应大于该断面内径( $D_i$ )的 1%,且不大于 25 mm 见图 10;
- b) 当被检断面与开孔中心的距离小于开孔直径时,该断面最大内径与最小内径之差,不应大于该断面内径( $D_i$ )的 1%与开孔直径的 2%之和,且不大于 25 mm。

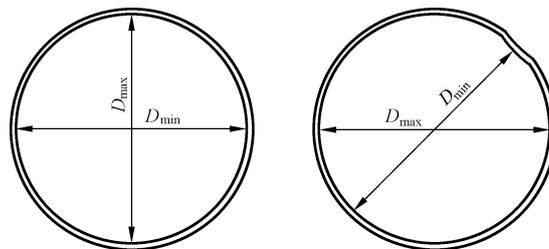


图 10 壳体同一断面上最大内径与最小内径之差

6.5.12 外压容器组焊完成后,还应按如下要求检查壳体与设计要求的圆周间的偏差。

- a) 采用内弓形、外弓形样板(依测量部位而定)测量。样板圆弧半径等于壳体内半径或外半径,其

弦长等于 GB/T 4732.3 规定的圆筒上加强圈允许的间断弧长的 2 倍。测量点应避开焊接接头或其他凸起部位。

b) 用样板沿壳体径向测量的最大正负偏差( $e$ )不应大于由图 11 中查得的最大允许偏差值。

注 1: 当外径与有效厚度比值( $D_o/\delta_e$ )和计算长度与有效厚度比值( $L/D_o$ )的交点位于图 11 中任意两条曲线之间时,其最大正负偏差( $e$ )由内插法确定;当外径与有效厚度比值( $D_o/\delta_e$ )和计算长度与有效厚度比值( $L/D_o$ )的交点位于图 11 中  $e=1.0\delta_e$  曲线的上方或  $e=0.2\delta_e$  曲线的下方时,其最大正负偏差( $e$ )分别不大于  $\delta_e$  及  $0.2\delta_e$  值。

注 2: 圆筒的计算长度( $L$ )与外径( $D_o$ )、锥壳当量长度( $L_{ec}$ )与大端外径( $D_L$ )取值与 GB/T 4732.3 相同;球壳计算长度( $L$ )取 0.5 倍球壳外径( $D_o$ )。

注 3: 确定锥壳最大正负偏差( $e$ )时,锥壳外径取测量点所在截面外径( $D_{ox}$ ),计算长度( $L$ )取换算长度( $L_{ec} \cdot D_L/D_{ox}$ )。其中,锥壳当量长度( $L_{ec}$ )计算与 GB/T 4732.3 相同。

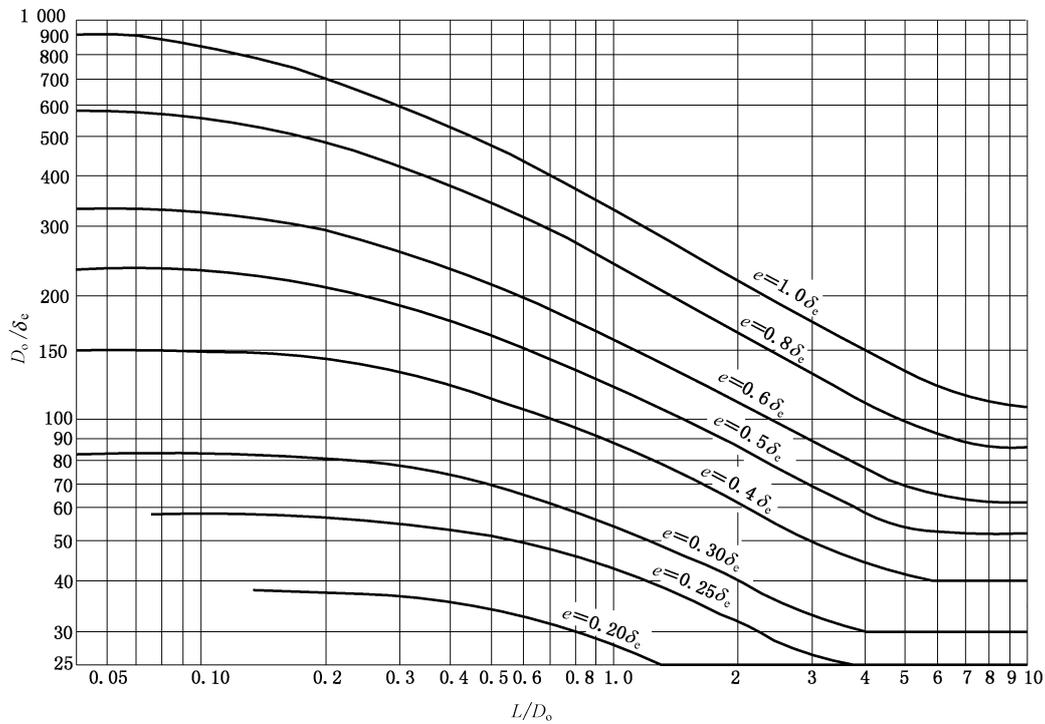


图 11 外压壳体圆度最大允许偏差

6.5.13 承受均匀轴向压缩和由弯矩引起的轴向压缩的压力容器组焊完成后,其圆筒、锥壳除应符合 6.5.11 的要求外,还应采用样板、专用检测器具或仪器沿其母线方向测量壳体的内凹,在测量长度( $L_x$ )的范围,内凹不应大于测量点所在壳体截面内半径的 2%。测量长度( $L_x$ )按公式(1)~公式(3)确定。

圆筒测量长度( $L_x$ ):

$$L_x = \min\{4\sqrt{R_m\delta}, L\} \dots\dots\dots (1)$$

锥壳测量长度( $L_x$ ):

$$L_x = \min\left\{4\sqrt{\frac{R_m\delta}{\cos\alpha}}, \frac{L_c}{\cos\alpha}\right\} \dots\dots\dots (2)$$

跨壳体环焊缝测量长度( $L_x$ ):

$$L_x = 25\delta \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$L_x$ ——检查壳体内凹的测量长度范围，单位为毫米(mm)；

$R_m$ ——测量点所在壳体截面的平均半径，单位为毫米(mm)；

$\delta$ ——圆筒或锥壳的厚度，单位为毫米(mm)；

$L$ ——支撑线间无加强圆筒的长度，单位为毫米(mm)；

$L_c$ ——对无加强的锥壳，为锥壳的轴向长度；对有加强的锥壳，为锥壳与圆筒连接处至锥壳上第一个加强圈的轴向长度，单位为毫米(mm)；

$\alpha$ ——锥壳半顶角度数，单位为度(°)。

6.5.14 同时承受外压、均匀轴向压缩和由弯矩引起的轴向压缩的压力容器组焊完成后，应按 6.5.11、6.5.12、6.5.13 的要求逐一进行检查。

## 6.6 平盖和筒体端部

平盖和筒体端部的加工按以下规定：

a) 螺柱孔或螺栓孔的中心圆直径以及相邻两孔弦长允差为 $\pm 0.6$  mm，任意两孔弦长允差按表 2 规定；

表 2 法兰螺柱孔或螺栓孔任意两孔弦长允差

单位为毫米

设计内径 $D_i$	<600	600~1 200	>1 200
允差	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$	$\pm 2.0$

b) 螺孔中心线与端面的垂直度允差不应大于螺孔中心圆直径的 0.25%；

c) 螺纹基本尺寸与公差应分别按 GB/T 196、GB/T 197 的规定；

d) 螺纹精度应为中等精度，或按相应标准选取。

## 6.7 螺栓、螺柱和螺母

6.7.1 公称直径小于 M36 的螺栓、螺柱和螺母，按相应标准制造。

6.7.2 公称直径大于或等于 M36 的螺柱和螺母除应符合 6.6 c)、6.6 d) 和相应标准规定外，还应满足如下要求：

a) 有热处理要求的螺柱，其试样与试验按 GB/T 4732.2 的有关规定；

b) 螺母毛坯热处理后进行硬度检查，并符合设计文件的要求。

## 6.8 组装及其他要求

6.8.1 当换热管与管板仅采用强度焊接连接时，管孔非焊接侧应按胀焊并用连接的要求进行倒角。

6.8.2 机械加工表面和非机械加工表面的线性尺寸的极限偏差，应分别按 GB/T 1804 中 m 级和 c 级的规定。

6.8.3 压力容器受压元件组装过程中不应强力进行对中、找平等操作。

6.8.4 组装后，应对容器的主要几何尺寸、形位公差、管口方位进行检查，并应符合设计图样要求。

6.8.5 压力容器制造过程中的目视检测应符合 NB/T 47013.7 的规定。

## 7 焊接

### 7.1 施焊环境及焊前准备

#### 7.1.1 施焊环境

7.1.1.1 施焊钢制焊件,若出现下列任一情况,且无有效防护措施时,不应施焊:

- a) 焊条电弧焊时风速大于 10 m/s;
- b) 实心焊丝、药芯焊丝气体保护焊时风速大于 2 m/s;
- c) 焊件表面有结露或有缝药芯焊丝气体保护焊相对湿度大于 80%,其他焊接方法相对湿度大于 90%;
- d) 雨、雪环境;
- e) 焊件温度低于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

当焊件温度为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,应在始焊处 100 mm 范围内预热到  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

7.1.1.2 镍及镍合金制焊件的施焊环境应符合 JB/T 4756 的相关规定。

#### 7.1.2 焊材准备

7.1.2.1 焊接用气体应符合 GB/T 39255 的规定。

7.1.2.2 焊接材料的贮存等质量管理应符合 JB/T 3223 的规定,有缝药芯焊丝应真空包装保存。

7.1.2.3 若设计温度高于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,焊接 Fe-5A、Fe-5C 组材料使用的焊材,其熔敷金属应进行回火脆化评定,试验方法及合格指标由设计文件规定。

7.1.2.4 若设计温度高于  $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,焊接 Fe-5C 组材料的 A 类焊接接头使用的焊材,应按批对每一种焊丝和焊剂组合进行焊缝金属和焊接接头的高温持久试验,高温持久试验按 GB/T 2039 进行。要求如下:

- a) 制备试件所用的材料应与压力容器用材料同钢号、同热处理状态,焊材为同批号;
- b) 焊接试件应进行模拟最大程度焊后热处理;
- c) 高温持久试验取两件试样:一件试样平行于焊缝轴线(全焊缝金属试样),另一件试样垂直于焊缝轴线(焊接接头试样);
- d) 在标定长度(检测长度)范围内,试样的直径应大于或等于 13 mm,且不大于 20 mm,试样中心线应位于  $t/2$  处( $t$  为焊接试件厚度);
- e) 焊接接头试样的标定长度(检测长度)应包括焊缝及其邻近熔合线每侧至少 20 mm 宽范围内的母材;
- f) 应力断裂试验合格指标为:在  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  下,施加 210 MPa 应力,试样发生断裂的时间不应少于 900 h。

7.1.2.5 当设计文件要求时,Fe-5C 组材料埋弧焊(SAW)所使用的焊材应按批对每一种焊丝和焊剂组合进行熔敷金属再热裂纹敏感性评定并应合格。

7.1.2.6 药芯焊丝可用于 Fe-8-1 组铬镍奥氏体型不锈钢母材之间和 Fe-1-1 组母材之间的焊接,但不应选用药芯焊丝焊接其中的低温压力容器、按疲劳分析设计压力容器、盛装毒性为极度和高度危害介质的压力容器、现场组装压力容器在现场施焊的受压元件焊接接头以及厚度大于 60 mm 的 Fe-1-1 组母材制受压元件焊接接头。

#### 7.1.3 焊件清理

钢焊件的清理应符合 6.3 的规定;镍及镍合金焊件的清理应符合 JB/T 4756 的相关规定,清理工具

也应各自专用。

## 7.2 焊接方法

应选用 NB/T 47014 允许使用的焊接方法焊接受压元件。

## 7.3 焊接工艺

7.3.1 受压元件之间应采用全截面焊透的焊接接头；受压元件与非受压元件之间宜采用全截面焊透的焊接接头。

7.3.2 压力容器及其受压元件的焊接工艺评定应符合 NB/T 47014 的规定，并满足如下补充要求。

- a) 压力容器施焊前，受压元件焊缝、与受压元件相焊的焊缝、熔入永久焊缝内的定位焊缝、受压元件母材表面堆焊与补焊，以及上述焊缝的返修焊缝应按 NB/T 47014 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。
- b) 用于焊接结构受压元件的境外材料（含焊接材料），压力容器制造单位在首次使用前，应按 NB/T 47014 进行焊接工艺评定。
- c) 设计温度低于 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且不低于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铬镍奥氏体型不锈钢制压力容器，母材（包括焊材）应为含碳量小于或等于 $0.08\%$ 的铬镍奥氏体不锈钢，应根据设计温度选择合适的焊接方法；在相应的焊接工艺评定中，应进行焊缝金属的低温夏比（V形缺口）冲击试验，在不高于设计温度下的冲击吸收能量不应小于 $31\text{ J}$ ，且任一试样的侧膨胀值 $LE$ 不应小于 $0.38\text{ mm}$ （设计温度在 $-192\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，冲击试验温度取 $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。
- d) 低温压力容器的焊接工艺评定，包括焊缝和热影响区的低温夏比（V形缺口）冲击试验。冲击试验的取样方法，按 NB/T 47014 的要求确定。冲击试验温度不应高于设计文件要求的试验温度。当焊缝两侧母材具有不同冲击试验要求时，低温冲击功按两侧母材抗拉强度的较低值符合 GB/T 4732.2 的规定或设计文件的要求。接头的拉伸和弯曲性能按两侧母材中的较低要求。
- e) Fe-5A、Fe-5C 组材料制压力容器，若设计温度高于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，焊接工艺评定时应附加进行高温拉伸试验和回火脆性评定试验，试验要求由设计文件规定。其中，高温拉伸试验按 GB/T 228.2 进行，试验温度为设计温度。
- f) Fe-5A、Fe-5C 组材料的焊接工艺评定试件应进行模拟最大程度焊后热处理和模拟最小程度焊后热处理。

7.3.3 压力容器及其受压元件的焊前预热应符合 NB/T 47015 的规定，并满足如下补充要求。

- a) 对 Fe-5A、Fe-5C 组材料，焊前预热应保证焊接接头坡口及两侧各 1 倍壁厚（且不小于 $100\text{ mm}$ ）范围内的母材温度始终不低于预热温度，且不高于允许的最高层间温度，并保持至焊接完毕；若焊接中断，仍应维持预热范围内的母材温度不低于预热温度，并保持至焊接重新开始，否则应进行中间消除应力热处理。
- b) 当焊件厚度增大或拘束度增大时，应适当提高预热温度。
- c) Fe-5C 组材料制压力容器及其受压元件的焊前预热不宜低于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- d) 在 Cr-Mo 钢、Cr-Mo-V 钢母材上堆焊第一层奥氏体不锈钢、镍及镍合金时，焊前预热温度不应低于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，道间温度不应超过 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；在其他钢材的母材上堆焊第一层奥氏体不锈钢、镍及镍合金时，焊前预热温度宜不低于 NB/T 47015 规定的预热温度减 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且不应低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7.3.4 压力容器及其受压元件的中间消除应力热处理和后热处理，按设计文件要求进行。其中，后热处理应在施焊完毕立即进行；若施焊完毕随即进行中间消除应力热处理或焊后热处理，可免做后热处理。

7.3.5 低温压力容器的焊接应控制焊接热输入，多层多道施焊。

7.3.6 采用有缝药芯焊丝焊接受压元件时,施焊后方可打开药芯焊丝的真空包装,真空包装打开 8 h 后未使用完的药芯焊丝应进行除湿处理后方可继续使用;完成施焊后剩余的药芯焊丝,应进行除湿处理后置于真空环境中保存,方可继续使用。

7.3.7 对于带堆焊层压力容器,若单层堆焊不能满足要求,则堆焊层应包括过渡层和盖面层;对于复合板压力容器,覆层焊缝应包括过渡层和盖面层。

7.3.8 镍及镍合金的焊接应符合 NB/T 47015、JB/T 4756 的相关规定。

7.3.9 受压元件应在其焊接接头附近的指定部位打上焊工代号钢印,或者在含焊缝布置图的焊接记录中记录焊工代号。其中,钢印的使用范围应符合 5.3.2、5.3.3、5.3.4 的规定。

7.3.10 焊接工艺评定技术档案应保存至该工艺评定失效为止,焊接工艺评定试样保存期不应少于 5 年。

7.4 焊缝表面的形状尺寸及外观要求

7.4.1 按疲劳分析设计的压力容器,A类、B类焊接接头表面应修磨至与相邻母材表面平齐;非疲劳分析设计的压力容器,A类、B类焊接接头的焊缝余高  $e_1$ 、 $e_2$ ,按表 3 和图 12 的规定。

表 3 A类、B类焊接接头的焊缝余高合格指标

单位为毫米

标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 的低合金钢、Cr-Mo 钢和 Cr-Mo-V 钢				其他钢材			
单面坡口		双面坡口		单面坡口		双面坡口	
$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$	$e_1$	$e_2$
0~10% $\delta_s$ 且 $\leq 3$	0~1.5	0~10% $\delta_1$ 且 $\leq 3$	0~10% $\delta_2$ 且 $\leq 3$	0~15% $\delta_s$ 且 $\leq 4$	0~1.5	0~15% $\delta_1$ 且 $\leq 4$	0~15% $\delta_2$ 且 $\leq 4$
注:表中,按百分数乘以厚度所得的计算值小于 1.5 mm 时,按 1.5 mm 计。							

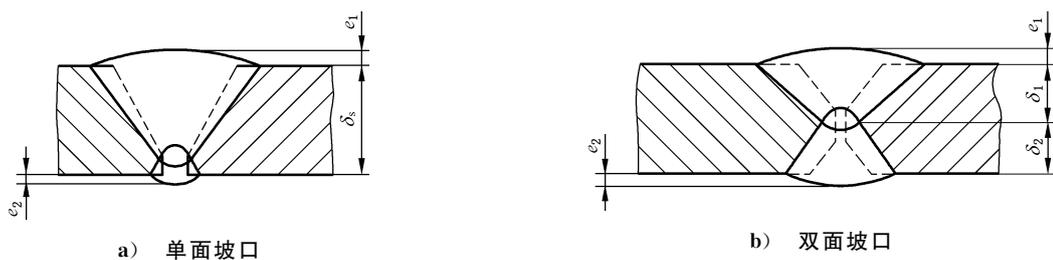


图 12 A类、B类焊接接头的焊缝余高

7.4.2 C类、D类、E类焊接接头的焊脚尺寸,在设计文件无规定时,应取焊件中较薄者之厚度。当补强圈的厚度不小于 8 mm 时,补强圈的焊脚尺寸应等于补强圈厚度的 70%,且不应小于 8 mm。

7.4.3 焊接接头表面应按相关标准进行外观检查,不应有表面裂纹、咬边、未焊透、未熔合、表面气孔、弧坑、未填满、夹渣和飞溅物;焊缝与母材应圆滑过渡;角焊缝的外形应凹形圆滑过渡。

7.4.4 不应在压力容器的非焊接部位引弧。因电弧擦伤而产生的弧坑、焊疤以及因切割卡具、拉筋板等临时性附件后遗留的焊疤应修磨平滑。

7.4.5 焊接接头表面的修磨应符合 6.2.1、6.2.2 的有关规定。

## 7.5 焊接返修

7.5.1 当焊缝需要返修时,应先对缺陷去除部位进行表面检测,确认缺陷已完全去除。

7.5.2 返修的焊接工艺应符合 7.3 的有关规定。

7.5.3 焊缝同一部位的返修次数不宜超过 2 次。如超过 2 次,返修前须经制造单位技术负责人批准,返修次数、部位和返修情况应记入压力容器的质量证明文件。

7.5.4 补焊表面应按 NB/T 47013.4 或 NB/T 47013.5 进行表面检测, I 级合格。对钢焊件,当补焊深度超过 10 mm 或母材厚度的 1/2 时,还应增加射线检测或超声检测,检测技术等级、合格指标不应低于设计文件中对选用的无损检测方法的规定。

7.5.5 下列压力容器如在焊后热处理后进行任何焊接返修,应对返修部位重新进行热处理:

- a) 盛装毒性为极度或高度危害介质的压力容器;
- b) Cr-Mo 钢、Cr-Mo-V 钢制压力容器;
- c) 低温压力容器;
- d) 设计文件注明有应力腐蚀的压力容器;
- e) 按疲劳分析设计的压力容器;
- f) 设计文件要求重新进行焊后热处理的压力容器。

7.5.6 除 7.5.5 外,热处理后的焊接返修应征得用户同意。要求焊后热处理的压力容器,如在热处理后进行返修,应符合 NB/T 47015 的相应规定。

7.5.7 有特殊耐腐蚀要求的压力容器或受压元件,返修部位仍应达到相应的耐腐蚀性能要求。

## 8 热处理

### 8.1 热处理类型及方式

#### 8.1.1 热处理类型

压力容器及其受压元件的热处理类型分为恢复性能热处理、改善材料力学性能热处理、焊后热处理和其他热处理。

#### 8.1.2 热处理方式

8.1.2.1 压力容器及其受压元件的热处理可采用炉内整体热处理、分段炉内热处理和局部热处理三种方式。当条件许可时,宜优先选用炉内整体热处理,且应避免进行现场热处理。

8.1.2.2 当压力容器及其受压元件无法炉内整体热处理时,可分段热处理。分段热处理时,其重复加热长度不应小于 1 500 mm,且非加热部分的焊件应采取隔热措施,热处理工件的温度梯度应能保证其热处理后的性能仍满足设计文件规定或符合使用要求。

8.1.2.3 局部热处理宜选择在焊件刚性相近的焊缝上进行,加热带、均温带和隔热带范围应符合 GB/T 30583 的规定,热处理工件在不同方向上的温度梯度不应影响压力容器性能和消除焊接残余应力效果产生有害影响,且不会产生有害变形和非预期的热处理残余应力。当用户要求时,设计单位或制造单位应对热处理工件的温度场和变形进行模拟计算,给出具体的控制措施。

### 8.2 恢复性能热处理

#### 8.2.1 成形受压元件的恢复性能热处理

8.2.1.1 非合金钢、低合金钢制冷成形件,当符合下列 a)~d) 中任意条件之一,且变形率超过 5% 时,应于成形后进行恢复性能热处理:

- a) 盛装毒性为极度或高度危害介质的压力容器；
- b) 设计文件注明有应力腐蚀的压力容器；
- c) 对非合金钢、低合金钢，成形前厚度大于 16 mm 时；
- d) 对非合金钢、低合金钢，成形后减薄量大于 10% 时。

8.2.1.2 冷成形件变形率按公式(4)~公式(6)计算。

- a) 单向拉弯[如筒体成形,见图 13a)]:

$$\text{变形率}(\%) = 50\delta[1 - (R_f/R_o)]/R_f \dots\dots\dots(4)$$

- b) 双向拉弯[如封头成形,见图 13b)]:

$$\text{变形率}(\%) = 75\delta[1 - (R_f/R_o)]/R_f \dots\dots\dots(5)$$

- c) 弯管(见图 14):

$$\text{变形率}(\%) = 100r/R \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- $\delta$  —— 板材厚度,单位为毫米(mm);
- $R_f$  —— 成形后中面半径,单位为毫米(mm);
- $R_o$  —— 成形前中面半径(对于平板为 $\infty$ ),单位为毫米(mm);
- $r$  —— 管子的外半径,单位为毫米(mm);
- $R$  —— 管子中心线处的弯曲半径,单位为毫米(mm)。

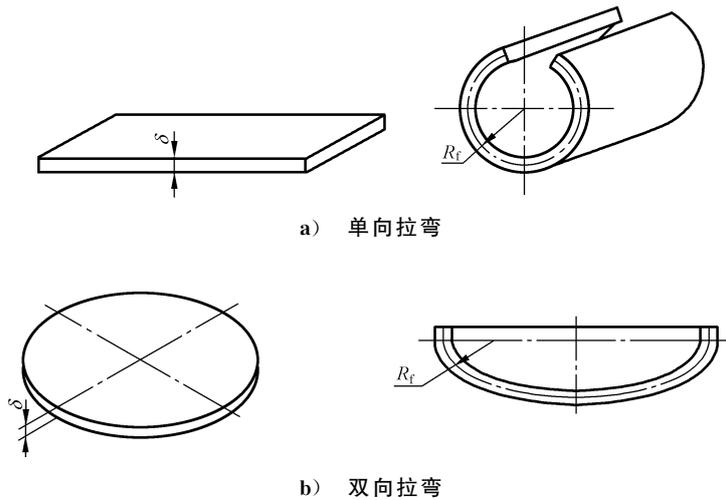


图 13 单向拉弯和双向拉弯成形示意图

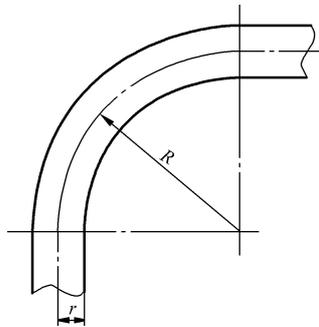


图 14 弯管成形示意图

8.2.1.3 分步冷成形时,若不进行恢复性能热处理,则成形件的变形率为各分步成形的变形率之和;若在成形过程中进行恢复性能热处理,则成形件的变形率为进行恢复性能热处理后的各分步成形的变形率之和。若投料钢板经过开平操作,进行变形率计算时应计入开平操作产生的变形率。

8.2.1.4 铬镍奥氏体型不锈钢钢板制冷成形件,若成形后按 GB/T 1954 测得的铁素体显示含量大于 15%,应于成形后进行恢复性能热处理。其中,封头、膨胀节上的铁素体检测部位应分别按 4.3.2.1 b)、4.3.2.4 确定。

8.2.1.5 设计温度高于 675 °C 的铬镍奥氏体型不锈钢钢板制冷成形件,应在成形后进行恢复性能热处理。

8.2.1.6 若需消除温成形的变形对材料性能的影响,推荐按 8.2.1.1、8.2.1.4 或按设计文件要求对成形件进行恢复性能热处理。

8.2.1.7 若热成形或温成形改变了材料供货热处理状态,应重新进行热处理,恢复材料供货热处理状态。

8.2.1.8 复合板制造的成形件,应按基层材料确定成形后是否进行恢复性能热处理及其热处理参数。其中,计算变形率、确定热处理保温时间时,应取复合板总厚度;确定恢复性能热处理参数时,应同时保证覆层经热处理后的性能满足使用要求或设计文件的规定。

8.2.1.9 当对成形温度、恢复材料性能热处理等有特殊要求时,应遵循相关标准、规范或设计文件的规定。

## 8.2.2 其他恢复性能热处理

当材料的供货热处理状态与使用的热处理状态一致时,若制造过程中除成形外的其他工艺过程改变了材料供货热处理状态,应进行恢复性能热处理。

## 8.2.3 恢复性能热处理工艺

确定恢复性能热处理工艺时宜考虑材料出厂热处理工艺;非合金钢、低合金钢的热处理操作推荐按 8.3.10 进行。

## 8.3 焊后热处理(PWHT)

8.3.1 压力容器及其受压元件应按焊缝厚度(即焊后热处理厚度  $\delta_{PWHT}$ )、材料和设计要求确定是否进行焊后热处理。

8.3.2 焊缝厚度应按下列规定确定。

- a) 对于等厚度全焊透焊缝连接的对接接头,焊缝厚度为钢材厚度。
- b) 对于对接焊缝连接的焊接接头,焊缝厚度为对接焊缝厚度。
- c) 对于角焊缝连接的焊接接头,焊缝厚度为角焊缝厚度。
- d) 对于组合焊缝连接的焊接接头,焊缝厚度为对接焊缝与角焊缝厚度中较大者。
- e) 对于螺柱焊缝,焊缝厚度为螺柱的公称直径。
- f) 当不同厚度受压元件焊接时。
  - 1) 不等厚对接接头,焊缝厚度取较薄元件的钢材厚度。
  - 2) 壳体与管板、平封头、盖板、凸缘、压力容器法兰[不包括图 15 a)所示的法兰全厚度截面焊透的焊接接头]及其他类似元件的 B 类焊接接头,焊缝厚度取壳体厚度。
  - 3) 接管与壳体焊接时:对安放式接管,焊缝厚度取安放式接管厚度、筒体焊缝厚度或封头焊缝厚度(视接管位置取其中之一)、补强圈厚度和补强圈连接角焊缝厚度中较大者;对非安放式接管,焊缝厚度取接管焊缝厚度、筒体焊缝厚度或封头焊缝厚度(视接管位置取其中之一)、补强圈厚度和补强圈连接角焊缝厚度中较大者。

- 4) 接管与法兰焊接时,焊缝厚度取焊接接头处接管颈厚度;但对于图 15 a)所示结构,焊缝厚度取法兰厚度。
- 5) 对于图 15 b)所示的封头置于筒体内的连接结构,焊缝厚度取圆筒厚度、封头厚度和角焊缝厚度中的较大者。
- 6) 非受压元件与受压元件焊接时,焊缝厚度取连接焊缝厚度。
- 7) 换热管与管板之间的焊接接头,焊缝厚度取换热管厚度。
- g) 焊接返修时,焊缝厚度取填充焊缝金属厚度。

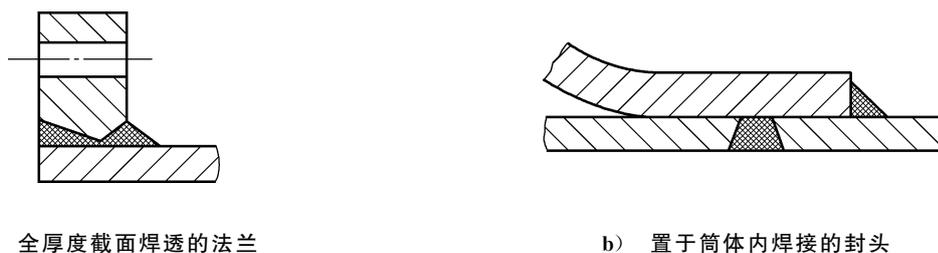


图 15 确定焊缝厚度的结构示意图

8.3.3 压力容器及其受压元件符合下列条件之一者,应进行焊后热处理,焊后热处理应包括受压元件间、受压元件与非受压元件间的连接焊缝。

- a) 焊缝厚度符合表 4 规定时;
- b) 设计文件注明有应力腐蚀的压力容器;
- c) 用于盛装毒性为极度或高度危害介质的非合金钢、低合金钢的压力容器(含以非合金钢、低合金钢为基层的复合板压力容器);
- d) 当相关标准或设计文件另有规定时。

表 4 进行焊后热处理的焊缝厚度

材料组别	材料牌号	进行焊后热处理的焊缝厚度
Fe-1-1	Q245R、10、20	若焊前不预热: $\delta_{PWHT} > 32 \text{ mm}$ ; 若焊前预热至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上: $\delta_{PWHT} > 38 \text{ mm}$
Fe-1-2	Q345R、GB/SA-516 Gr70、GB/SA-537 Cl1、Q345D、Q345E、16Mn	若焊前不预热: $\delta_{PWHT} > 32 \text{ mm}$ ; 若焊前预热至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上: $\delta_{PWHT} > 38 \text{ mm}$
Fe-1-2	16MnDR、16MnD	$\delta_{PWHT} > 25 \text{ mm}$
Fe-1-2	09MnNiDR、09MnNiD	对于设计温度不低于 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温压力容器: $\delta_{PWHT} > 20 \text{ mm}$ ; 对于设计温度低于 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温压力容器:任意厚度
Fe-1-3	Q370R、Q420R	若焊前不预热: $\delta_{PWHT} > 32 \text{ mm}$ ; 若焊前预热至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上: $\delta_{PWHT} > 38 \text{ mm}$
Fe-1-3	15MnNiNbDR	对于设计温度不低于 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温压力容器: $\delta_{PWHT} > 20 \text{ mm}$ ; 对于设计温度低于 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温压力容器:任意厚度

表 4 进行焊后热处理的焊缝厚度 (续)

材料组别	材料牌号	进行焊后热处理的焊缝厚度
Fe-1-4	Q490R、Q490DRL1、Q490DRL2、12MnNiVR、08MnNiMoVD、10Ni3MoVD	若焊前不预热： $\delta_{PWHT} > 32$ mm； 若焊前预热至 100 °C 以上： $\delta_{PWHT} > 38$ mm
Fe-3-1	12CrMo	任意厚度
Fe-3-2	20MnMo	任意厚度
Fe-3-2	20MnMoD	对于设计温度不低于 -30 °C 的低温压力容器： $\delta_{PWHT} > 20$ mm； 对于设计温度低于 -30 °C 的低温压力容器：任意厚度
Fe-3-3	13MnNiMoR、18MnMoNbR、20MnNiMo、20MnMoNb、15NiCuMoNb	任意厚度
Fe-4-1	15CrMoR、GB/SA-387 Gr12 Cl2、14Cr1MoR、09CrCuSb、15CrMo、14Cr1Mo	任意厚度
Fe-4-2	12Cr1MoVR、12Cr1MoV	任意厚度
Fe-5A	12Cr2Mo1R、12Cr2Mo、08Cr2AlMo、12Cr2Mo1	任意厚度
Fe-5B-1	12Cr5Mo、12Cr5Mo1	任意厚度
Fe-5B-2	10Cr9Mo1VNbN、10Cr9MoW2VNbBN	任意厚度
Fe-5C	12Cr2Mo1VR、12Cr2Mo1V、12Cr3Mo1V	任意厚度
Fe-7-1	S11306、S11348	$\delta_{PWHT} > 10$ mm
Fe-7-2	S11972	$\delta_{PWHT} > 10$ mm
Fe-9B	08Ni3DR、08Ni3D	任意厚度

8.3.4 对于异种钢材之间的焊接接头,按本文件要求严者确定是否进行焊后热处理。

8.3.5 对于复合板之间的焊接接头,按基层焊缝厚度确定是否进行焊后热处理。

8.3.6 当需要对铬镍奥氏体型不锈钢、奥氏体-铁素体型不锈钢进行焊后热处理时,设计文件应明确规定。

8.3.7 焊后热处理工艺要求如下。

- a) 焊后热处理保温温度、保温时间应按 GB/T 30583 的规定执行。当采用降低保温温度、延长保温时间的热处理工艺时,保温温度最大降温幅度不应大于 55 °C。
- b) 复合板压力容器及其受压元件的焊后热处理的保温温度按基层材料确定,但不应对覆层性能产生有害影响;焊后热处理的保温时间,应按复合板的总厚度确定。
- c) 焊后热处理工艺不应导致产生再热裂纹。
- d) 衬里压力容器及其受压元件的焊后热处理应在组焊衬里件前进行。
- e) 压力容器制造单位应按设计文件和标准的要求在热处理前编制热处理工艺文件。

8.3.8 热处理炉符合下列规定。

- a) 热处理炉应符合 GB/T 30583 的规定,炉内气氛应呈中性或弱氧化性。当采用燃气炉对镍及镍合金复合板压力容器、衬里压力容器、堆焊压力容器或受压元件进行热处理时,燃气中的硫含量应低于 0.57 g/m<sup>3</sup>;当采用燃油炉加热时,燃油中的硫含量应低于 0.5%。

- b) 热处理炉应配有自动记录温度曲线的测温仪表,并能自动绘制热处理的时间与工件壁温关系曲线。

### 8.3.9 测温点的布置符合下列规定。

- a) 压力容器及其受压元件上测温点的布置应符合 GB/T 30583 的规定,且接管与壳体焊接接头部位、刚性构件与壳体相焊的焊接接头转角部位应布置测温点,相邻测温点沿壳体轮廓线测量的间距不应超过 4 600 mm。
- b) 当热源在压力容器及其受压元件的外部时,测温点宜更多地布置在压力容器及其受压元件的内部;当热源在压力容器及其受压元件的内部时,测温点宜更多地布置在压力容器及其受压元件的外部。

### 8.3.10 热处理操作符合下列规定。

- a) 加热前,应去除工件上所有的油、油污、油漆、标记、润滑剂等杂物和有害介质。
- b) 热处理工件应放置在有效加热区内,加热的火焰不宜与工件直接接触,并应控制工件表面的过度氧化、脱碳、增碳和腐蚀。对镍及镍合金复合板工件,当对应产品标准对覆层材料热处理的表面保护有要求时,应采取措施对覆层加以保护。
- c) 非合金钢、低合金钢的焊后热处理操作符合如下规定:
- 1) 焊件进炉时炉内温度不应高于 400 °C;
  - 2) 焊件升温至 400 °C 后,加热区升温速度按  $5\,500/\delta_{\text{PWHT}}$  °C/h 计算确定,且最快不应超过 220 °C/h,最慢不应低于 15 °C/h;
  - 3) 升温时,加热区内任意 4 600 mm 长度内的温差不应大于 140 °C;
  - 4) 保温时,加热区内最高与最低温度之差不应超过 80 °C;
  - 5) 炉温高于 400 °C 时,加热区降温速度按  $7\,000/\delta_{\text{PWHT}}$  °C/h 计算确定,且最快不应超过 280 °C/h,最慢不应低于 15 °C/h;
  - 6) 焊件出炉时,炉温不应高于 400 °C,出炉后应在空气中继续冷却。

8.3.11 S11306、S11348 铁素体型不锈钢的焊后热处理操作按 8.3.10 的规定。其中,对于 8.3.10c) 中 5) 和 6),当温度高于 650 °C 时,降温速度不应大于 55 °C/h,当温度低于 650 °C 时,应快速降温。

## 8.4 改善材料力学性能热处理

压力容器或受压元件的制造单位进行的改善性能热处理应有工艺试验支持并据此制订热处理工艺。

## 8.5 其他热处理

8.5.1 钢制压力容器及其受压元件的其他热处理,按设计文件要求进行。

8.5.2 镍及镍合金衬里元件的热处理应符合 JB/T 4756 的相关规定或设计文件的要求。

## 8.6 热处理前、后的表面处理

有耐腐蚀要求的不锈钢及复合板制压力容器的表面,应在热处理前清除不锈钢及覆层表面污物及有害介质。该类材料制零部件进行热处理后,还应进行表面处理。

## 9 试件与试样

### 9.1 产品焊接试件

#### 9.1.1 制备产品焊接试件条件

9.1.1.1 有筒节纵向焊缝的每台压力容器应至少制备一块产品焊接试件。是否增加制备封头焊接试件

按设计文件要求确定。

9.1.1.2 除设计文件要求制作鉴证环试件外, B类焊接接头、半球形封头与圆筒相连的 A类焊接接头免做产品焊接试件。

### 9.1.2 制备产品焊接试件与试样的要求

9.1.2.1 产品焊接试件应在筒节纵向焊缝延长部位与筒节纵缝同时施焊;封头焊接试件应在封头拼缝延长部位与封头拼缝同时施焊。其中,钢制球形储罐的产品焊接试件制备应符合 GB/T 12337 的规定。

9.1.2.2 试件应取自合格的原材料,且与压力容器用材具有相同标准、相同牌号、相同厚度和相同热处理状态。

9.1.2.3 试件应由该压力容器的焊工焊接(多焊工焊接的压力容器,制备试件的焊工由制造单位的检验部门指定),并应采用与压力容器相同的条件、过程与焊接工艺(包括施焊及其之后的热处理条件)施焊。有热处理要求的压力容器,试件一般应随压力容器进行热处理;封头焊接试件还应经历与封头成形过程中相同的加热、冷却过程。否则应采取措施保证试件与所带代表的压力容器、封头经历相同的热过程。

9.1.2.4 当一台压力容器不同筒节的 A类焊接接头(不含半球形封头与圆筒间的焊接接头)由数种焊接工艺施焊时,每种焊接工艺均应制备一块试件。

9.1.2.5 当筒节厚度不同时,同一焊接工艺条件下,应在厚度最大的筒节上制备试件。

9.1.2.6 试件的尺寸和试样的截取按 NB/T 47016 的规定。

### 9.1.3 试样检验与评定

9.1.3.1 试样的检验与评定按 NB/T 47016、GB/T 4732.2 和设计文件要求进行。

9.1.3.2 当需要进行耐腐蚀性能检验时,应按相关标准和设计文件规定制备试样进行试验,并满足要求。其中,不锈钢的晶间腐蚀敏感性检验应按 GB/T 21433 的规定进行;镍及镍合金覆层、堆焊层的耐腐蚀性能检验按对应的产品标准规定或设计文件要求。

9.1.3.3 对于低温压力容器,除另有规定外,冲击试验应包括焊缝金属和热影响区,并按 NB/T 47016、GB/T 4732.2 和设计文件规定的试验温度和合格指标进行检验和评定。

9.1.3.4 除另有规定,铬镍奥氏体型不锈钢的焊缝金属冲击吸收能量不应小于 31 J,且任一试样的侧膨胀值  $LE$  不应小于 0.38 mm。

9.1.3.5 奥氏体-铁素体型不锈钢焊接接头的铁素体或奥氏体数应在 40 FN~60 FN。

9.1.3.6 当试样评定结果不能满足要求时,可按 NB/T 47016 的要求取样进行复验。如复验结果仍达不到要求时,则该试件所代表的产品应判为不合格。

9.1.3.7 模拟焊后热处理的产品焊接试件、封头焊接试件应按设计文件要求的检验项目和合格指标进行检验并合格。

## 9.2 母材热处理试件

### 9.2.1 制备母材热处理试件条件

凡符合以下条件之一者,应制备母材热处理试件:

- a) 当要求材料的使用热处理状态与供货热处理状态一致时,在制造过程中若改变了供货的热处理状态,需要重新进行热处理的;
- b) 在制造过程中,需要采用热处理改善材料力学性能的;
- c) 冷成形或温成形的受压元件,成形后需要通过热处理恢复材料性能的;
- d) 设计文件要求制备母材热处理试件的。

## 9.2.2 制备热处理试件与试样的要求

9.2.2.1 热处理试件应与热处理工件同炉进行热处理；当无法同炉时，应模拟与热处理工件相同的热处理状态。

9.2.2.2 母材热处理试样的尺寸参照对应的材料标准确定，在试件上切取拉伸试样 1 个、冷弯试样 2 个、冲击试样 3 个；带焊接接头的热处理试样的尺寸参照 NB/T 47016 确定，在试件上切取拉伸试样 1 个、冷弯试样 2 个、焊缝金属和热影响区冲击试样各 3 个。

## 9.2.3 试样检验与评定

试样的拉伸、冷弯和冲击试验应分别按 GB/T 228.1、GB/T 232 和 GB/T 229 的规定进行，并按 GB/T 4732.2 和设计文件要求进行评定。当试样评定结果不满足要求时，允许重新取样进行复验。如复验结果仍达不到要求，则该试件所代表的母材或焊接接头应判为不合格。

## 9.3 B 类焊接接头鉴证环

9.3.1 鉴证环的制备应符合 9.1.2.2、9.1.2.3 的规定。

9.3.2 鉴证环试样的种类、尺寸、数量、截取及试验方法与结果评定应按设计文件要求进行。

## 9.4 其他试件与试样

9.4.1 要求做耐腐蚀性能检验的压力容器或者受压元件，应按设计文件规定制备耐腐蚀性能试验试件并进行检验与评定。

9.4.2 根据设计文件要求，螺柱经热处理后需做力学性能试验者，应按批制备热处理试样并进行检验与评定，并符合下列要求。

- a) 每批系指同时投料的具有相同钢号、相同炉罐号、相同断面尺寸、相同制造工艺的同类螺柱。
- b) 供做力学性能试验所切取的一根定长螺柱试验毛坯，应与零件毛坯同炉进行热处理。在钢号、断面尺寸和热处理工艺相同情况下，连续做数炉热处理时，允许仅对其中一炉做力学性能抽检，但各炉毛坯均应进行硬度检验。硬度检验结果应符合相应标准的规定或设计文件的要求。
- c) 直径不小于 M48 的螺柱应在毛坯 1/2 半径处取样，沿轴向切取拉伸试样 1 个，冲击试样 3 个。拉伸、冲击试验分别按 GB/T 228.1、GB/T 229 的规定进行。各项指标不应低于规定值的下限。

## 9.5 试件的合并制备

当压力容器同时要求制备产品焊接试件和热处理试件时，在保证两种试件各自代表性不发生改变的情况下可合并制备。

## 9.6 产品焊接试件的检验与评定时机

产品焊接试件的检验与评定应在耐压试验前进行；热处理试件的检验与评定应在热处理完成后即进行。若设计文件提出要求，可在制造工序间增加检验与评定。

## 10 无损检测

### 10.1 无损检测方法的选择

10.1.1 应采用 NB/T 47013(所有部分)规定的方法对焊接接头进行无损检测。

10.1.2 压力容器的对接接头应采用射线检测或超声检测。其中,射线检测包括射线胶片照相检测(RT)、射线数字成像检测(DR)、射线计算机辅助成像检测(CR);超声检测包括相控阵超声检测(PAUT)、衍射时差法超声检测(TOFD)、脉冲反射法超声成像检测(UT)和不可记录的脉冲反射法超声检测(UT)。

10.1.3 当采用不可记录的脉冲反射法超声检测时,还应采用射线胶片照相检测、射线数字成像检测、射线计算机辅助成像检测或者相控阵超声检测、衍射时差法超声检测作为附加局部检测。局部检测长度不应少于各条焊接接头长度的20%,且不应小于250 mm。

10.1.4 压力容器焊接接头的表面检测应选用磁粉检测、渗透检测等NB/T 47013(所有部分)规定的表面检测方法。其中,铁磁性材料制压力容器焊接接头表面优先采用磁粉检测。

## 10.2 无损检测的实施时机

10.2.1 压力容器的焊接接头和需要进行缺陷检查的部位,应在形状尺寸检查、外观目视检查合格后,再进行无损检测。

10.2.2 成形受压元件应在成形后进行无损检测。

10.2.3 有延迟裂纹倾向的材料(如:12Cr2Mo1R)应在焊接完成的至少24 h以后再进行无损检测,有再热裂纹倾向的材料(如:Q490DRL1)应在热处理后、水压试验前对所有焊接接头增加一次表面无损检测。

10.2.4 标准抗拉强度下限值大于540 MPa的低合金钢制压力容器,在耐压试验后,还应对焊接接头进行表面无损检测。

10.2.5 若设计时计入覆层(或堆焊层)强度,则不锈钢及镍及镍合金复合板压力容器、带堆焊层压力容器中的A类和B类焊接接头,其射线或超声检测应在基、覆层(或堆焊层)焊接均完成后进行;若设计时未计入覆层(或堆焊层)强度,则不锈钢及镍及镍合金复合板压力容器、带堆焊层压力容器中的A类和B类焊接接头,其射线或超声检测可在基层和过渡层焊接完成后进行。

10.2.6 镍及镍合金复合板压力容器、衬里压力容器在热气循环试验后,还应对覆层、衬里的焊接接头进行表面无损检测。

10.2.7 被压力容器内、外构件覆盖的焊接接头,应在内、外构件组装前进行无损检测。

## 10.3 射线和超声检测

射线和超声检测按下列要求进行:

- a) 压力容器及其受压元件的A类和B类焊接接头,应进行全部(100%)射线或超声检测;
- b) 接管与壳体相焊的D类焊接接头应进行100%超声检测。

## 10.4 表面检测

凡符合下列条件之一,应按设计文件规定的方法,对其表面进行磁粉或渗透检测:

- a) 压力容器及其受压元件上的A类、B类、C类、D类、E类焊接接头;
- b) 压力容器及其受压元件上的缺陷修磨或补焊处的表面,卡具和拉筋等拆除处的割痕表面;
- c) 堆焊表面;
- d) 复合板的覆层、衬里的焊接接头;
- e) 按疲劳分析设计压力容器上的受压元件之间的连接螺柱、不锈钢制螺柱及尺寸大于或等于M36的螺柱。

## 10.5 重复检测和组合检测

10.5.1 经射线或超声检测的焊接接头,如有不赞许的缺陷,应在缺陷清除干净后进行补焊,并对该部

分采用原检测方法重新检查,直至合格。

10.5.2 磁粉与渗透检测发现的不准许缺陷,应在进行修磨及必要的补焊后,对该部位采用原检测方法重新检测,直至合格。

10.5.3 标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 的低合金钢制压力容器所有 A 类和 B 类焊接接头,若其焊接接头厚度大于 20 mm,还应采用 10.1.2 中所列的与原无损检测方法不同的检测方法进行组合检测,该检测应包括所有的焊缝交叉部位;上述组合检测的部位、比例,按设计文件要求确定。

10.5.4 当对接接头采用  $\gamma$  射线全景曝光射线检测时,还应另外采用 X 射线检测、相控阵超声检测或者衍射时差法超声检测进行 50% 的附加局部检测。如发现超标缺陷,则应进行 100% 的 X 射线检测、相控阵超声检测或者衍射时差法超声检测。

10.5.5 当设计文件有规定时,应按其规定进行组合检测。

## 10.6 无损检测要求

10.6.1 无损检测的通用要求应按 NB/T 47013.1 的规定进行。

10.6.2 射线检测应按 NB/T 47013.2、NB/T 47013.11、NB/T 47013.14 的规定进行,其合格指标见表 5。

10.6.3 超声检测应按 NB/T 47013.3、NB/T 47013.10、NB/T 47013.15 的规定进行,其合格指标见表 5。

表 5 射线检测、超声检测合格指标

检测方法		技术等级	合格级别
射线检测		AB	不低于 II
超声检测	脉冲反射法	B	不低于 I
	衍射时差法	B	不低于 II
	相控阵超声检测	B	不低于 I

10.6.4 表面检测应按 NB/T 47013.4、NB/T 47013.5 进行,质量分级为 I 级。

10.6.5 组合检测的技术等级和质量分级按照各无损检测方法对应的要求确定,并且均应合格。

## 10.7 无损检测档案

压力容器无损检测档案应完整,保存时间不应少于压力容器设计使用年限。

## 11 耐压试验和泄漏试验

### 11.1 试验依据

制造完工的压力容器应按设计文件规定进行耐压试验和泄漏试验。

### 11.2 试验用压力表

耐压试验和泄漏试验时,如采用压力表测量试验压力,则应使用两个量程相同的并经检定合格的压力表。压力表的量程应为 1.5 倍~3 倍的试验压力,宜为试验压力的 2 倍。压力表的精度不应低于 1.6 级,表盘直径不应小于 100 mm。

### 11.3 试验前的检查

压力容器的开孔补强圈应在耐压试验前以 0.4 MPa~0.5 MPa 的压缩空气检查焊接接头质量。对

复合板制压力容器、衬里压力容器,可在耐压试验前对覆层、衬里及其焊接接头进行泄漏检查,检查方法、合格指标按设计文件要求。

## 11.4 耐压试验

### 11.4.1 通用要求

11.4.1.1 耐压试验分为液压试验、气压试验以及气液组合压力试验,应按设计文件规定的方法进行耐压试验。

11.4.1.2 耐压试验的试验压力及必要时强度校核按 GB/T 4732.1 的规定。

11.4.1.3 耐压试验前,压力容器各连接部位的紧固件应装配齐全,并紧固妥当;为进行耐压试验而装配的临时受压元件,应按该压力容器同类受压元件的要求进行设计、制造、检验和验收,以保证其安全性。

11.4.1.4 试验用压力表应安装在被试验压力容器的顶部。

11.4.1.5 耐压试验保压期间不应采用连续加压以维持试验压力不变,试验过程中不应带压拧紧紧固件或对受压元件施加外力。

11.4.1.6 耐压试验后所进行的返修,如返修深度大于壁厚一半的压力容器,应重新进行耐压试验。

11.4.1.7 2个(或2个以上)压力室组成的多腔压力容器的耐压试验,应符合 GB/T 4732.1 的规定和设计文件的要求。

11.4.1.8 带夹套压力容器应先进行内筒耐压试验,合格后再焊夹套,然后再进行夹套内的耐压试验。

### 11.4.2 液压试验

11.4.2.1 试验液体一般采用水,试验合格后应立即将水排尽并用压缩空气将内部吹干;无法完全排尽、吹干时,对存在奥氏体不锈钢、镍及镍合金制元件接触水的压力容器,应控制水的氯离子含量不超过 25 mg/L。

11.4.2.2 需要时,也可采用不会导致危险的其他试验液体,但试验时液体的温度应低于其闪点或沸点,并有可靠的安全措施。

11.4.2.3 试验温度要求如下。

- a) 进行 Q345R、Q370R、Q490R 制压力容器液压试验时,压力容器器壁金属温度和液体温度均不应低于 5 °C;进行其他非合金钢和低合金钢制压力容器液压试验时,压力容器器壁金属温度和液体温度均不应低于 15 °C;低温压力容器液压试验的压力容器器壁金属温度和液体温度均不应低于壳体材料和焊接接头的冲击试验温度(取其高者)加 20 °C。如果由于板厚等因素造成材料无塑性转变温度升高,则应相应提高压力容器器壁金属温度和液体温度。
- b) 当有试验数据支持时,可在较低的温度下进行试验,但试验时应保证压力容器器壁金属温度和液体温度比压力容器器壁金属无塑性转变温度至少高 30 °C。

11.4.2.4 试验程序和步骤规定如下:

- a) 试验压力容器内的气体应排净并充满液体,试验过程中,应保持压力容器观察表面的干燥;
- b) 当试验压力容器器壁金属温度与液体温度接近时,方可缓慢升压至设计压力,确认无泄漏后继续升压至规定的试验压力,保压时间一般不少于 30 min;然后降至设计压力,保压足够时间进行检查,检查期间压力应保持不变。

11.4.2.5 液压试验的合格标准为:试验过程中,压力容器无渗漏,无可见的变形和异常声响。

### 11.4.3 气压试验和气液组合压力试验

11.4.3.1 试验所用气体应为干燥洁净的空气、氮气或其他惰性气体;试验液体与液压试验的规定相同。

11.4.3.2 气压试验和气液组合压力试验应有安全措施,试验单位的安全管理部门应派人进行现场监督。

11.4.3.3 试验压力及必要时强度校核按 GB/T 4732.1 的规定。

11.4.3.4 试验温度应符合下列规定。

- a) 进行 Q345R、Q370R、Q490R 制压力容器试验时,压力容器器壁金属温度和介质温度均不应低于 5 ℃;进行其他非合金钢和低合金钢制压力容器试验时,压力容器器壁金属温度和介质温度均不应低于 15 ℃;进行低温压力容器试验时,压力容器器壁金属温度和介质温度均不应低于壳体材料和焊接接头的冲击试验温度(取其高者)加 20 ℃。如果由于板厚等因素造成材料无塑性转变温度升高,则应相应提高压力容器器壁金属温度和介质温度。
- b) 当有试验数据支持时,可在较低的温度下进行试验,但试验时应保证压力容器器壁金属温度和介质温度比压力容器器壁金属无塑性转变温度至少高 30 ℃。

11.4.3.5 试验时应先缓慢升压至规定试验压力的 10%,保压足够时间,并且对所有焊接接头和连接部位进行初次检查;确认无泄漏后,再继续升压至规定试验压力的 50%;如无异常现象,其后按规定试验压力的 10%逐级升压,直到试验压力,保压 10 min;然后降至设计压力,保压足够时间进行检查,检查期间压力应保持不变。

11.4.3.6 对于气压试验,压力容器无异常声响,经肥皂液或其他检漏液检查无漏气,无可见的变形;对于气液组合压力试验,应保持压力容器外壁干燥,经检查无液体泄漏后,再以检漏液检查无漏气,且无异常声响,无可见的变形。

## 11.5 泄漏试验

### 11.5.1 试验方法

泄漏试验包括气密性试验、氨检漏试验、卤素检漏试验和氦检漏试验,应按设计文件规定的方法和要求进行。

### 11.5.2 试验时机

作为最终检验项目的泄漏试验,应在压力容器经耐压试验合格后或热气循环试验后进行;作为中间过程检验项目的泄漏试验,应在被检件局部结构制造完成后、流转到下道工序前进行,具体由设计文件规定。但不应以中间过程的泄漏试验替代最终检验的泄漏试验。

### 11.5.3 气密性试验

11.5.3.1 气密性试验所用气体应符合 11.4.3.1 的规定。

11.5.3.2 气密性试验压力为压力容器的设计压力。

11.5.3.3 试验时压力应缓慢上升,达到规定压力后保持足够长的时间,对所有焊接接头和连接部位进行泄漏检查。小型压力容器亦可浸入水中检查。

11.5.3.4 试验过程中,无泄漏合格;如有泄漏,应在修补后重新进行试验。

11.5.3.5 气密性试验的其他要求应符合 NB/T 47013.8 的规定。

### 11.5.4 氨检漏试验

11.5.4.1 氨检漏试验可选用充入 1%(体积分数)氨气法、充入 10%~30%(体积分数)氨气法或充入 100%氨气法。

11.5.4.2 氨检漏试验的试验方法及合格判定按 NB/T 47013.8 的规定。

11.5.4.3 氨介质环境下具有应力腐蚀倾向的压力容器不宜采用氨检漏试验。

11.5.4.4 进行氨检漏试验时,应采取必要的防护措施,避免爆炸危险及对人体和环境的伤害。

#### 11.5.5 卤素检漏试验

11.5.5.1 卤素检漏试验的试验方法及合格判定按 NB/T 47013.8 的规定。

11.5.5.2 当卤素检漏介质对压力容器材质产生腐蚀或压力容器中不允许有微量卤素检漏介质存在时,不应采用卤素检漏试验。

#### 11.5.6 氦检漏试验

11.5.6.1 氦检漏试验可选用吸枪法、示踪探头法或护罩法。

11.5.6.2 吸枪法、示踪探头法或护罩法的试验方法及合格判定应分别符合 NB/T 47013.8 的规定。

#### 11.5.7 泄漏率指标

盛装一般介质的压力容器,泄漏率宜小于  $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;盛装毒性为极度或高度危害介质的极高价值介质的压力容器,泄漏率宜小于  $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \sim 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

## 12 热气循环试验

### 12.1 通用要求

12.1.1 当设计文件要求时,复合板制压力容器、衬里压力容器应进行热气循环试验。

12.1.2 热气循环试验应在耐压试验合格后、最终泄漏试验前进行。

### 12.2 热气循环试验的操作

12.2.1 热气循环试验一般采用干燥洁净的空气、氮气或其他惰性气体作为试验介质。

12.2.2 热气循环试验可取设计温度与设计压力组合或操作压力与操作温度组合作为试验参数;升压、升温 and 降压、降温顺序及速率宜按压力容器操作要求确定。其中,升温、降温速率宜不低于压力容器操作要求。对多腔压力容器,应按试验时覆层或衬里的应力与操作时的应力相当的原则确定试验参数。

12.2.3 热气循环试验宜按如下步骤进行(如图 16):

- a) 先将试验压力容器按规定的升温速率,升温至试验温度,保温规定的时间;
- b) 再按规定的升压速率,向试验压力容器充入试验介质,升压至试验压力;
- c) 在试验压力、试验温度下保持规定的时间;
- d) 先按规定的降压速率,泄放试验介质至常压(或微正压);
- e) 再按规定的降温速率,将试验压力容器降温至室温。降温过程中,压力容器内不应形成负压对结构造成损伤。

12.2.4 当设计文件有规定时,可重复 12.2.3 试验步骤进行多次循环。

12.2.5 热气循环试验完成后,应按设计文件要求对复合板的覆层、衬里表面及其焊接接头进行表面检测和/或泄漏试验。对发现的缺陷和泄漏部位应进行必要的补焊,并对该部位采用原检测方法进行表面检测和/或泄漏试验,直至合格。

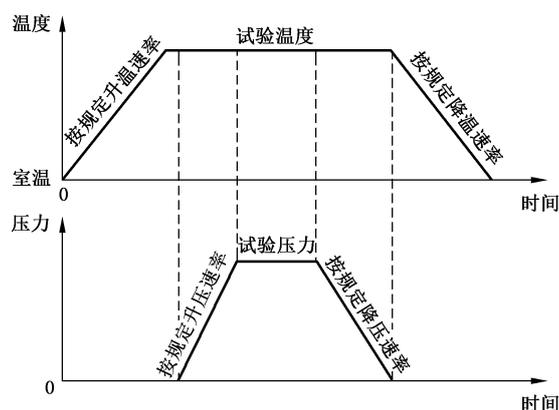


图 16 热气循环试验过程中压力、温度控制示意图

### 13 压力容器出厂要求

#### 13.1 出厂资料

13.1.1 制造单位应向压力容器采购方提供出厂资料；对压力容器使用有特殊要求时，还应提供使用说明书。

13.1.2 压力容器出厂资料至少应包括以下内容：

- a) 压力容器竣工图样；
- b) 压力容器产品合格证(含产品数据表)；
- c) 产品质量证明文件(含主要受压元件材质证明书、材料清单、外购的封头和锻件等的质量证明文件、质量计划或检验计划、外观及几何尺寸检查报告、焊接记录、无损检测报告、热处理报告及自动记录曲线、耐压试验报告及泄漏试验报告、与风险预防和控制相关的制造文件、现场组焊压力容器的组焊和质量检验技术资料等；对真空绝热压力容器，还包括封口真空度、真空夹层泄漏率、静态蒸发率等检测结果)；
- d) 产品铭牌的拓印件或者复印件；
- e) 特种设备制造监督检验证书(对需监督检验的压力容器)；
- f) 压力容器设计文件。

所有文件的电子文档应采用光盘或其他电子介质存储，随纸质出厂资料一并提供。

13.1.3 压力容器出厂资料的保存期限不应少于压力容器设计使用年限。

#### 13.2 产品铭牌

13.2.1 压力容器铭牌应牢固固定于明显的位置，压力容器的铭牌不应直接铆固在壳体上。

13.2.2 铭牌应至少包括如下内容：

- a) 产品名称；
- b) 制造单位名称；
- c) 制造单位许可证编号/许可级别；
- d) 产品标准；
- e) 主体材料；
- f) 介质名称/组分；
- g) 设计温度；

- h) 设计压力；
- i) 耐压试验压力；
- j) 产品编号或产品批号；
- k) 设备代码；
- l) 制造日期；
- m) 压力容器类别/级别；
- n) 压力容器自重；
- o) 容积；
- p) 换热面积(对于热交换器)。

### 13.3 压力容器的涂敷与运输包装

压力容器的涂敷与运输包装除符合 NB/T 10558 的规定外,附加要求如下。

#### a) 表面除锈

- 1) 压力容器的非合金钢、低合金钢外表面应在出厂前进行表面除锈;当设计文件要求时,非合金钢、低合金钢制压力容器及其连接件的内表面也应在出厂前进行表面除锈。
- 2) 表面除锈可选用喷砂、喷丸、手工或动力工具打磨等方法进行。
- 3) 除锈后的钢材表面至少应达到 GB/T 8923.1 规定的 St2 级或 Sa2 级的要求。

#### b) 酸洗钝化处理

- 1) 当设计文件要求时,可对非合金钢、低合金钢、高合金钢制压力容器以及复合板的覆层、衬里、堆焊层表面进行酸洗钝化处理。
- 2) 酸洗钝化处理可选用酸洗液、钝化液浸泡或刷涂酸洗钝化膏的方法进行。
- 3) 酸洗钝化处理后,应立即用清水将处理后的表面冲洗干净。酸洗钝化处理效果按设计文件要求进行检验和验收。
- 4) 经酸洗钝化处理后的压力容器及其受压元件表面,不应再进行任何有可能损伤钝化膜的操作,否则应重新进行酸洗钝化处理。

#### c) 喷丸处理

若设计文件要求时,可对压力容器及其受压元件表面进行喷丸处理,设计单位宜在设计文件中对喷丸处理所采用的丸粒材料、粒径、喷丸动力作出规定。

#### d) 抛光处理

若设计文件要求时,应按其要求对压力容器及其受压元件表面进行抛光处理。

#### e) 分片或分段出厂压力容器

- 1) 制造单位应在出厂前进行分片或分段出厂压力容器的预组装,经检验合格后,应对预组装确定的对应位置进行标识。
- 2) 现场组焊的对接焊接接头的坡口由制造单位加工、检验和清理,并在坡口及内、外两侧母材表面至少 50 mm 范围内涂敷可焊性防锈涂料加以保护。
- 3) 制造单位应采取措施防止分片或分段出厂压力容器在运输过程中的变形,保证组装后的压力容器能够达到设计文件要求的几何尺寸和形位公差。

## 附 录 A

(规范性)

## 锻焊压力容器的制造、检验和验收附加要求

## A.1 概述

本附录规定了锻焊压力容器的制造、检验和验收的附加要求。

## A.2 材料

A.2.1 锻焊压力容器壳体应采用Ⅳ级锻件,其他受压元件应采用不低于Ⅲ级锻件。

A.2.2 锻焊压力容器用锻件的杂质元素含量应控制。其中,低合金钢锻件的  $P \leq 0.020\%$ 、 $S \leq 0.010\%$ 。

A.2.3 Ⅳ级锻件主截面部分的锻造比不应小于 3.5,且锻件各向锻造比接近,并宜锻至接近成品零件的形状和尺寸。

A.2.4 出厂热处理状态为淬火+回火的锻件,应保证锻件全截面淬透。

A.2.5 设计压力大于 35 MPa 的压力容器主要受压元件锻件,应附加断裂韧性要求,其取样方法、合格指标等按设计文件要求。

## A.3 材料复验

A.3.1 外购的Ⅳ级锻件应按相应的标准对化学成分和力学性能进行复验。

A.3.2 设计压力大于 35 MPa 的压力容器外购的主要受压元件锻件,应按设计文件要求进行复验。

A.3.3 材料复验试样应从锻件的延长段或开孔位置截取,截取的试样应经历与所代表锻件相同的热过程。

## A.4 成形与组装

## A.4.1 成形

A.4.1.1 封头若采用热冲压成形,则成形道次不宜超过 2 次。

A.4.1.2 成形后的封头宜采用机加工方法对封头端面的内、外表面圆周进行加工,使之圆滑过渡,并保证制造公差。

## A.4.2 组装

A.4.2.1 待焊部件的相互组装、对准可采用拉杆、千斤顶、连接板、定位焊或其他工具、措施,并在焊接时保持其位置。

A.4.2.2 压力容器 A 类、B 类焊接接头对口错边量( $b$ )不应大于对口处钢材厚度( $\delta_s$ )的  $1/8$ ,且不大于 5 mm。

A.4.2.3 筒节加工后应检查壳体的直径,同一断面上最大内径与最小内径之差,不应大于该断面内径( $D_i$ )的  $1\%$ 。

## A.5 焊接

## A.5.1 焊接材料

A.5.1.1 每炉或每批焊条、每批焊丝以及每一种焊丝和焊剂组合的熔敷金属均应进行化学成分复验和

脱渣、焊缝成形等工艺性试验。若设计文件要求,还应进行力学性能复验(包括常温拉伸、高温拉伸、冲击和冷弯),试样的热处理状态和复验结果应符合相应的标准或设计文件的规定。

**A.5.1.2** Fe-5A类及Fe-5C类钢所选用的焊接材料应保证用相应方法焊成的接头的拉伸、弯曲、冲击等性能满足母材力学性能的要求。对埋弧焊,熔敷金属中主要合金元素应来自焊丝;对手工焊条电弧焊,熔敷金属中主要合金元素宜来自焊芯。

**A.5.1.3** 与壳体相焊的附件宜选用与壳体同类材料,且宜采用同类型焊接材料进行焊接。

**A.5.2 焊接工艺**

**A.5.2.1** 若设计温度高于 350 °C,焊接工艺评定时应进行高温拉伸试验和回火脆性评定试验,试验要求由设计文件规定。其中,高温拉伸试验按 GB/T 228.2 进行,试验温度为设计温度。

**A.5.2.2** Fe-4-2组、Fe-5A类及Fe-5C类材料的焊接工艺评定试件应进行模拟最大程度焊后热处理和模拟最小程度焊后热处理。

**A.5.2.3** 中间消除应力热处理和后热处理要求如下。

- a) 压力容器及其受压元件的后热处理应在施焊完毕立即进行;若施焊完毕随即进行中间消除应力热处理或焊后热处理,可免做后热处理。其中,Fe-5A类、Fe-5C类材料的封头拼接焊接接头、接管与壳体连接的焊接接头仅应进行中间消除应力热处理。
- b) 中间消除应力热处理和后热处理的工艺参数见表 A.1。

**表 A.1 常见材料中间消除应力热处理、后热处理工艺推荐参数**

材料	中间消除应力热处理		后热处理	
	温度	时间	温度	时间
Fe-1-2	580 °C~620 °C	2 h~4 h	250 °C~350 °C	2 h~4 h
Fe-3-2、Fe-3-3	580 °C~620 °C	2 h~4 h	250 °C~350 °C	2 h~4 h
Fe-4-1、Fe-4-2、Fe-5A	600 °C~640 °C	2 h~4 h	300 °C~350 °C	2 h~4 h
Fe-5C(12Cr2Mo1V)	650 °C~680 °C	4 h~6 h	350 °C~400 °C	4 h~6 h

**A.6 热处理**

**A.6.1** 进行焊后热处理和中间消除应力热处理时,应采取措施防止工件产生再热裂纹。

**A.6.2** 含奥氏体不锈钢、镍及镍合金堆焊层的压力容器及其受压元件,其焊后热处理的时机和规范的选择应能保证堆焊层的性能符合设计文件的要求。

**A.7 试件与试样**

**A.7.1** 若压力容器只有 B 类焊接接头,或 B 类焊接接头采用与 A 类焊接接头不同的焊接工艺施焊,且制造单位无成功的制造案例时,应在施焊前对该焊接工艺制备 B 类焊接接头鉴证环。

**A.7.2** 制备 B 类焊接接头鉴证环的锻件级别应与压力容器相同。

**A.7.3** 采用锻造板坯成形的封头,优先在成形封头的端部或开孔处截取试件。

**A.8 无损检测**

**A.8.1** 压力容器的 A 类、B 类焊接接头应进行 100%射线或超声检测并符合表 5 的规定。

**A.8.2** 压力容器的 A 类、B 类、C 类、D 类、E 类焊接接头应在最终焊后热处理前、后按 NB/T 47013.4 或 NB/T 47013.5 进行 100%表面检测, I 级合格。

## 附录 B

(规范性)

## 套合压力容器的制造、检验和验收附加要求

## B.1 概述

本附录规定了套合压力容器的制造、检验和验收的附加要求。

## B.2 套合工艺选择

**B.2.1** 套合工艺可采用高于室温的热套合、低于室温的冷套合以及冷热组合套合。其中,筒体制造不应采用冷套合和冷热组合套合工艺,且冷套合、冷热组合套合工艺中只准许冷却奥氏体型不锈钢、镍及镍合金制套合件。

**B.2.2** 设计压力不大于 35 MPa 的压力容器,可采用套合面未经机加工的圆筒热套合,套合后应进行释放套合应力的热处理;设计压力大于 35 MPa 的压力容器,应采用套合面经机加工的圆筒热套合。

## B.3 制造

## B.3.1 单层圆筒及套合件的制造

**B.3.1.1** 套合面不进行机加工的单层圆筒及套合件的制造满足下列要求。

- a) 单层圆筒成形后沿其轴向分上、中、下 3 个断面测量内径。同一断面最大内径与最小内径之差不应大于该圆筒内径的 0.5%。
- b) 单层圆筒的直线度用不小于圆筒长度的直尺检查。将直尺沿轴向靠在筒壁上,直尺与筒壁之间的间隙不大于 1.0 mm。
- c) 单层圆筒的 A 类焊接接头表面均应进行机加工或修磨,不准许保留余高、错边、咬边,并使接头区的圆度和圆筒轮廓一致。用弦长等于该单层圆筒内径 1/3 且不小于 300 mm 的内样板或外样板进行检查,形成的棱角( $E$ )应符合表 B.1 的规定。

表 B.1 套合面不进行机加工的单层圆筒棱角允差

棱角( $E$ ) mm	$\geq 1.5$	$< 1.5 \sim 1.25$	$< 1.25 \sim 1.0$	$< 1.0 \sim 0.75$	$< 0.75 \sim 0.5$	$< 0.5 \sim 0.2$	$< 0.2$
A	0	3	4	5	6	7	不计

注:  $A = \frac{\text{棱角 } E \text{ 的弧长}}{\text{套合面圆周长}} \times 100$ 。

**B.3.1.2** 套合面进行机加工的单层圆筒及套合件,其尺寸、外观及形状和位置偏差应按设计文件规定。

**B.3.1.3** 套合面的过盈量应按设计文件规定,确定过盈量时应同时考虑操作状态下套合件间热膨胀差异的影响,防止内层套合件的失稳。

## B.3.2 套合操作



**B.3.2.1** 套合操作前应对各套合件进行喷砂或喷丸处理,清除铁锈、油污及影响套合面贴合的杂物。

**B.3.2.2** 套合温度的选择,应以不影响材料的性能为准,并在设计文件中标明。套合应靠套合件的自重自由套入,不应强力压入。

**B.3.2.3** 采用热套合工艺的加热推荐按 8.3.10 中的相关要求；采用冷套合工艺的冷却介质宜选用液态二氧化碳或液氮。

**B.3.2.4** 套合过程中，应将各套合件的 A 类接头互相错开，错开角度不小于 30°。

### **B.3.3 套合的其他要求**

**B.3.3.1** 除接触介质的内层外，每个套合件上应按设计文件要求加工检漏孔。

**B.3.3.2** 套合圆筒两端坡口加工后，用塞尺检查套合面间隙，间隙径向尺寸在 0.2 mm 以上的任何一块间隙面积不应大于套合面面积的 0.4%；径向尺寸大于 1.5 mm 的间隙应进行焊补。

注：间隙径向尺寸即指间隙处塞入的最大塞尺厚度；间隙面积即指间隙沿圆周轴向的深度与间隙弧长的乘积。

**B.3.3.3** 套合面不进行机加工的套合后的筒节及套合后的受压元件应作消除应力热处理，这一工序允许和焊后消除应力热处理合并进行。

**B.3.3.4** 套合压力容器壳体各单层圆筒应制作产品焊接试件。

### **B.3.4 无损检测**

**B.3.4.1** 压力容器的 A 类、B 类焊接接头应进行 100% 射线或超声检测并符合表 5 的规定。

**B.3.4.2** 压力容器的 A 类、B 类、C 类、D 类、E 类焊接接头应按 NB/T 47013.4 或 NB/T 47013.5 进行 100% 表面检测，I 级合格。

**B.3.4.3** 套合前，套合件上的焊接接头应进行全部(100%)射线或超声检测。

**B.3.4.4** 每套合一层后，套合件上所有可检测的受压元件焊接接头均应进行 100% 表面检测。

**B.3.4.5** 耐压试验后，所有可检测的受压元件上的焊接接头均应进行 100% 表面检测。

## 附录 C

(规范性)

### 多层包扎压力容器的制造、检验和验收附加要求

#### C.1 概述

本附录规定了多层包扎压力容器(含多层筒节包扎压力容器和多层整体包扎压力容器)的材料、制造、检验和验收的附加要求。

#### C.2 材料

##### C.2.1 内筒材料

对用于制造内筒的钢板规定如下：

- a) 宜选用非合金钢、标准抗拉强度下限值不大于 540 MPa 的低合金钢钢板及以这些材料为基层的复合板；
- b) 多层筒节包扎压力容器的内筒厚度宜不大于所用材料需进行焊后热处理的厚度；
- c) Q245R、Q345R 和 GB/SA-516 Gr.70 钢板应在正火状态下使用，其他钢板按标准规定的交货状态使用；
- d) 钢板逐张按 NB/T 47013.3 规定的方法进行超声检测，合格级别不低于Ⅰ级；
- e) 钢板应按热处理批进行拉伸试验、冲击试验，试样取自钢板厚度  $t/2$  处，试验方法、合格指标应符合材料标准或设计文件的要求；
- f) 复合板的级别应为 NB/T 47002.1、NB/T 47002.2 规定的 1 级。

##### C.2.2 层板

对用于制造层板的钢板规定如下：

- a) 宜选用非合金钢、标准抗拉强度下限值不大于 540 MPa 的低合金钢钢板，不宜使用开平板；
- b) 厚度不应大于所用材料需进行焊后热处理的厚度。

##### C.2.3 封头

对用于制造封头的钢板规定如下：

- a) 可选用非合金钢、低合金钢钢板及以这些材料为基层的复合板；
- b) Q245R、Q345R 和 GB/SA-516 Gr.70 钢板应在正火状态下使用，其他钢板按标准规定的交货状态使用；
- c) 钢板逐张按 NB/T 47013.3 规定的方法进行超声检测，合格级别不低于Ⅰ级；
- d) 复合板的级别为 NB/T 47002.1、NB/T 47002.2 规定的 1 级。

##### C.2.4 锻件

主要受压元件使用的锻件应为Ⅳ级锻件，其他受压元件使用的锻件不应低于Ⅲ级。

#### C.3 多层整体包扎压力容器的端部结构

多层整体包扎压力容器的筒体端部、封头或平盖的端面应加工成阶梯形(见图 C.1)，与内筒连接的

台阶最小宽度( $L$ )通过计算确定,一般不小于 20 mm;与层板连接的台阶宽度( $b$ )根据坡口间隙、焊接热影响区宽度确定。

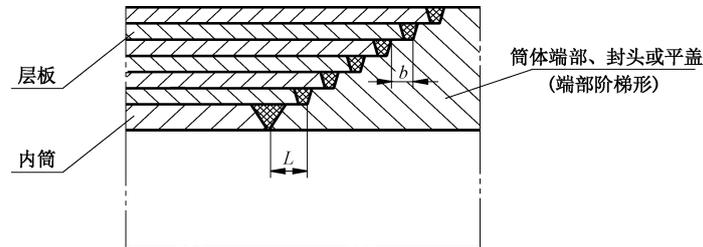


图 C.1 端面阶梯示意图

## C.4 成形

### C.4.1 内筒筒节

C.4.1.1 成形允差应符合表 C.1 的规定。

表 C.1 内筒筒节成形允差

成形允差		
A 类焊接接头的对口错边量 $b$ (见图 3)	A 类焊接接头处形成的棱角 $E$ (见图 5)	同一断面上最大直径与最小直径之差 (见图 10)
$\leq 1.0 \text{ mm}$	$\leq 1.5 \text{ mm}$	$\leq 0.4\% D_i$ , 且 $\leq 5 \text{ mm}$

C.4.1.2 外圆周长的允差应小于或等于 3‰,且不大于 3 mm。

C.4.1.3 筒节最短长度不应小于 500 mm。

C.4.1.4 焊缝表面不应有咬边。

C.4.1.5 A 类焊接接头外表面应进行加工或修磨,使之与母材表面圆滑过渡。

### C.4.2 封头

封头的形状和尺寸除符合 GB/T 150.4、GB/T 25198 的规定外,端口最大内径与最小内径之差不应大于封头内径  $D_i$  的 0.4‰,且不大于 5 mm。

## C.5 组装与焊接

### C.5.1 多层整体包扎压力容器的内壳

C.5.1.1 多层整体包扎压力容器的内壳由内筒体、筒体端部、封头或平盖等组焊制成,内筒体由内筒筒节组焊制成。

C.5.1.2 内筒体筒节之间的 B 类焊接接头对口错边量( $b$ )不应大于 1.5 mm(见图 3);内筒体与筒体端部、封头或平盖之间的 B 类焊接接头对口错边量( $b$ )不应大于 1.0 mm(见图 C.2)。

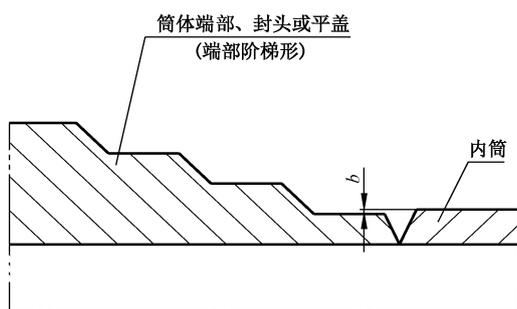


图 C.2 内筒与壳体端部、封头或平盖的对口错边量示意图

C.5.1.3 内壳的环向焊接接头在轴向形成的棱角( $E$ )不应大于 1.5 mm(见图 6)。

C.5.1.4 内筒任意 3 000 mm 长筒体直线度偏差应小于或等于 3 mm,内筒筒体总的直线度允差不应大于内筒长度的 0.1%,且不大于 6 mm。

C.5.1.5 内筒长度不大于 10 000 mm 时,长度允差为 $\pm 15$  mm;内筒长度大于 10 000 mm 时,长度允差为 $\pm 20$  mm。

C.5.1.6 所有内壳焊缝表面不应有咬边。

C.5.1.7 内壳的 A 类、B 类焊接接头外表面应进行加工或修磨,使之与母材表面圆滑过渡。

## C.5.2 多层筒节包扎压力容器的壳体

C.5.2.1 多层筒节包扎压力容器的壳体由多层筒体、筒体端部、封头或平盖等组焊制成,多层筒体由多层包扎筒节组焊制成。

C.5.2.2 多层包扎筒节两端坡口加工后,应对坡口端面进行封焊;壳体环向的 A 类或 B 类焊接接头对口错边量( $b$ )不应大于 3 mm(见图 C.3)。

C.5.2.3 筒体长度不大于 10 000 mm 时,长度允差为 $\pm 15$  mm;筒体长度大于 10 000 mm 时,长度允差为 $\pm 20$  mm。

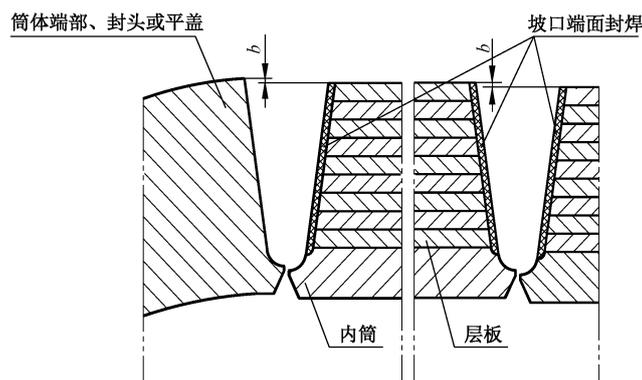


图 C.3 壳体的深环向 A 类或 B 类焊接接头的对口错边量示意图

## C.5.3 层板包扎

C.5.3.1 多层包扎压力容器一般采用钢丝绳捆扎拉紧装置和钳式夹紧装置进行层板的包扎。当采用钳式夹紧装置进行层板包扎时,设计计算应校核层板上开设的包扎工艺排孔对筒体强度的削弱。

C.5.3.2 层板包扎应在内筒筒节或内壳所有检验项目合格后进行。包扎前,应清除内筒、已包扎和待包扎表面的铁锈、油污和其他影响贴合的杂物。

C.5.3.3 多层筒节包扎压力容器的层板,在筒节长度方向(层板宽度方向)上不允许拼接;多层整体包扎压力容器层板的最小宽度不应小于 500 mm。

C.5.3.4 多层筒节包扎压力容器每层层板( $n$  为层板序号)的纵向焊接接头在圆周上均匀分布,逐层相错角按图样规定(见图 C.4);多层整体包扎压力容器每层层板的纵向焊接接头应均匀错开,相邻层板的纵向焊接接头错开夹角  $\alpha$ ,不应小于图样给出的错开角度(见图 C.5)。多层筒节包扎和多层整体包扎压力容器任意两层层板之间及内筒与相邻层板之间的纵向焊接接头中心之间的外圆弧长不应小于 100 mm。

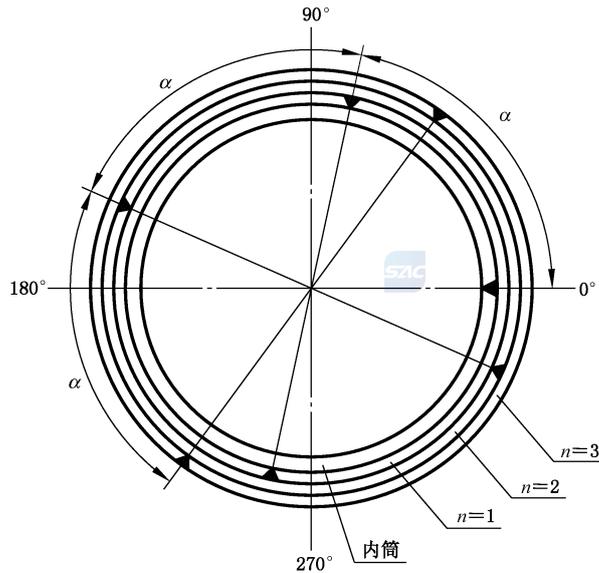


图 C.4 内筒及每层层板纵向焊接接头逐层相错示意图

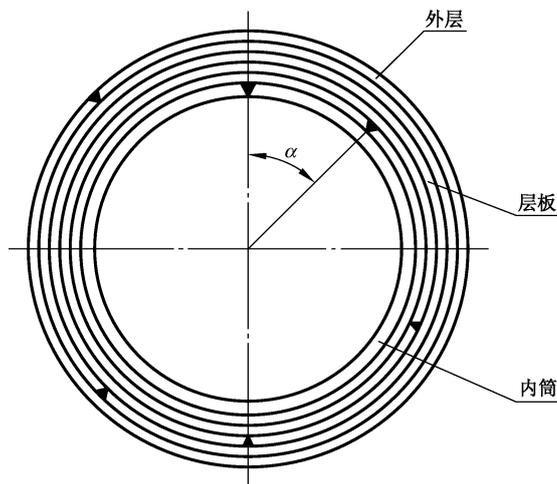


图 C.5 内筒及每层层板纵向焊接接头均匀相错示意图

C.5.3.5 多层整体包扎压力容器内筒的环向焊接接头及各层层板的环向焊接接头应相互错开,且内筒和层板与相邻层的环向焊接接头中心之间的最小距离( $L_{\min}$ )不应小于 100 mm(见图 C.6)。

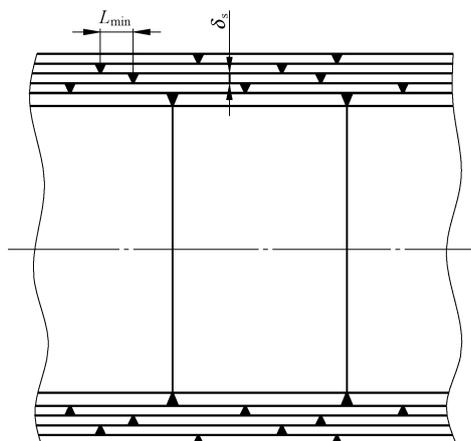


图 C.6 各层板及内筒所有环向焊接接头位置错开示意图

C.5.3.6 多层整体包扎压力容器的各层层板与筒体端部、封头或平盖之间的焊接接头对口错边量( $b$ )均不应大于 0.8 mm(见图 C.7)。

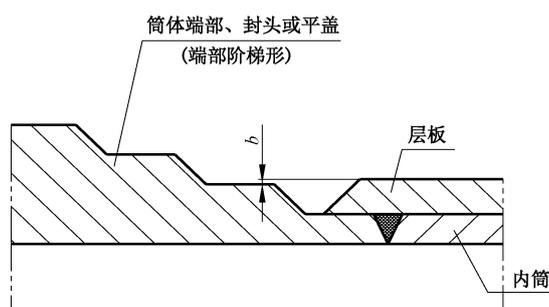


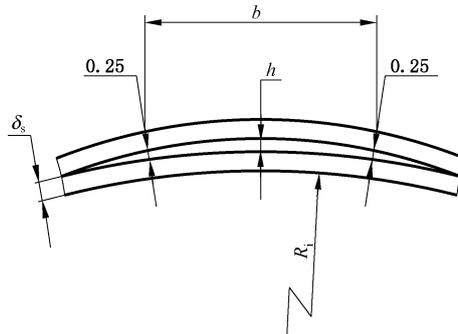
图 C.7 层板与筒体端部、封头或平盖 C 类焊接接头对口错边量示意图

C.5.3.7 包扎下一层层板前,应将前一层焊缝修磨平滑,与母材表面圆滑过渡。

C.5.3.8 层板之间的焊接接头以及多层整体包扎压力容器层板与筒体端部、封头或平盖之间的焊接接头修磨后应进行外观目视检查,不应存在裂纹、未熔合、咬边和密集气孔。

C.5.3.9 层板包扎后应进行松动面积检查。对内筒内径( $D_i$ )不大于 1 000 mm 的压力容器,每一松动部位,沿环向长度不应超过  $30\%D_i$ ,沿轴向长度不应超过 600 mm;对内筒内径( $D_i$ )大于 1 000 mm 的压力容器,每一松动部位,沿环向长度不应超过 300 mm,沿轴向长度不应超过 600 mm。

C.5.3.10 层板拉紧或夹紧后应进行端面径向间隙检查。层板端面的任意处的径向间隙( $h$ )不应大于 1.5 mm,且层板端面径向间隙( $h$ )大于或等于 0.25 mm 的弧长之和所导致的间隙面积( $A_s$ )不应大于  $25\delta_s$ (见图 C.8);每层层板端面间隙超过 0.25 mm 的长度总和不应超过压力容器的内直径  $D_i$ 。



标引符号说明：

$h$ ——径向间隙,单位为毫米(mm)；

$b$ ——径向间隙大于或等于 0.25 mm 的弧长之和,单位为毫米(mm)；

$R_i$ ——径向间隙处压力容器半径,单位为毫米(mm)；

$\delta_s$ ——层板投料厚度,单位为毫米(mm)。

间隙面积计算： $A_s \approx 2bh / 3$ ,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>)。

图 C.8 层板端面径向间隙

C.5.3.11 多层筒节包扎压力容器筒节的每张层板、多层整体包扎压力容器筒体的每层层板筒节均应按设计文件要求加工检漏孔。

## C.6 热处理

C.6.1 多层筒节包扎压力容器的非合金钢和低合金钢制内筒筒节,其 A 类焊接接头应在层板包扎前进行焊后热处理;当内筒筒节厚度超过需进行焊后热处理的厚度时,设计文件中应明确提出避免内筒环向焊接接头焊后热处理的技术措施以及避免层板与内筒直接相焊的技术措施。

C.6.2 多层整体包扎压力容器的非合金钢和低合金钢制内筒筒节,当厚度不超过需进行焊后热处理的厚度时,其 A 类焊接接头应在内筒组焊前进行焊后热处理;当内筒筒节厚度超过需进行焊后热处理的厚度时,应对内壳进行焊后热处理,设计文件中应明确提出避免层板与内筒直接相焊的技术措施。

C.6.3 多层整体包扎压力容器内筒与筒体端部、封头或平盖之间的 B 类焊接接头,焊后热处理按 GB/T 150.4 的规定;设计文件中应明确提出避免层板与筒体端部、封头或平盖之间的焊接接头焊后热处理的技术措施。

C.6.4 需要单独进行焊后热处理的多层包扎压力容器的筒体端部、封头或平盖等,热处理应在与多层包扎筒体或内筒组焊前进行。

C.6.5 多层包扎筒体上接管的 A 类、D 类焊接接头,应按设计文件规定的技术措施避免焊后热处理。

C.6.6 多层筒节包扎压力容器壳体的深环向焊接接头,焊接后可不作焊后热处理,但设计文件应明确提出不进行焊后热处理的技术措施。

## C.7 试件与试样

C.7.1 多层筒节包扎压力容器的内筒和层板均应制备产品焊接试件,层板的焊接试件在某一层纵向接头(C 类)的延长部位焊制,在试件的焊缝根部应垫上与层板同材料、同厚度的垫板。

C.7.2 多层整体包扎压力容器的内筒应制备产品焊接试件。

## C.8 无损检测

### C.8.1 射线检测或衍射时差法超声检测(TOFD)、相控阵超声检测(PAUT)

下列焊接接头应进行全部(100%)射线检测或衍射时差法超声检测(TOFD)、相控阵超声检测

(PAUT):

- a) 多层筒节包扎压力容器内筒筒节的 A 类焊接接头;
- b) 多层整体包扎压力容器内壳的 A 类和 B 类焊接接头;
- c) 多层筒节包扎压力容器的深环向 A 类和 B 类焊接接头;
- d) 层板的拼接接头。

射线检测按 NB/T 47013.2, 检测技术等级不低于 AB 级, 合格级别为 II 级; 衍射时差法超声检测 (TOFD) 按 NB/T 47013.10, 检测技术等级为 B 级, 合格级别为 II 级; 相控阵超声检测 (PAUT) 按 NB/T 47013.15, 检测技术等级为 B 级, 合格级别为 I 级。

### C.8.2 超声检测



下列焊接接头应进行全部(100%)超声检测:

- a) 多层整体包扎压力容器各层层板与筒体端部、封头或平盖连接的焊接接头;
- b) 多层整体包扎压力容器最外层层板的纵向、环向焊接接头; 多层筒节包扎压力容器最外层层板的纵向焊接接头。

超声检测按 NB/T 47013.3, 检测技术等级为 B 级, 合格级别为 I 级。

### C.8.3 表面检测

下列焊接接头应对其表面进行 100% 磁粉或渗透检测:

- a) 材料标准抗拉强度下限值大于 540 MPa 的多层包扎压力容器层板 C 类焊接接头;
- b) D 类焊接接头;
- c) 封焊或堆焊表面;
- d) 复合板的覆层焊接接头;
- e) 缺陷修磨或补焊处;
- f) 卡具、临时附件等拆除处;
- g) 最外层层板的 C 类焊接接头。

磁粉检测按 NB/T 47013.4, 合格级别为 I 级; 渗透检测 NB/T 47013.5, 合格级别为 I 级。铁磁性材料的表面检测应优先采用磁粉检测。

## 附 录 D

(规范性)

## 钢带错绕压力容器的制造、检验和验收附加要求

## D.1 概述

本附录规定了内直径不小于 500 mm 的钢带错绕压力容器的制造、检验和验收的附加要求。

## D.2 内壳制造与钢带缠绕

D.2.1 钢带错绕压力容器内筒筒节和内壳的制造、热处理、试件制备与试样检验以及无损检测应符合附录 C 中对多层整体包扎压力容器内筒筒节和内壳的相关规定。

D.2.2 钢带错绕压力容器的内壳制造完成后,应按设计文件要求进行内壳泄漏试验并合格。泄漏试验的压力不应大于公式(D.1)的计算值。

$$p_{Ti} = S_{mi} \frac{\delta_i}{R_i} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- $p_{Ti}$ ——内筒耐压试验压力,单位为兆帕(MPa);
- $S_{mi}$ ——试验温度下内筒材料的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- $\delta_i$ ——内筒名义壁厚,单位为毫米(mm);
- $R_i$ ——压力容器圆筒内半径,单位为毫米(mm)。

## D.2.3 钢带缠绕要求如下。

- a) 钢带缠绕应在内壳所有检验项目合格后进行。缠绕钢带前,应将内筒、钢带外表面的铁锈、油污及影响贴合的杂物清除干净。
- b) 各层钢带应按设计文件规定的缠绕倾角和预拉应力进行缠绕,并记录测力装置读数。缠绕钢带过程中,应实测并记录各层钢带的实际厚度,并确保各层钢带的实际厚度总和大于钢带层设计厚度。否则,应增加钢带层数。
- c) 同层钢带中,相邻钢带间距应均匀分布且小于 3 mm,不应因间距不均匀而切割钢带侧边。
- d) 每层钢带缠绕后应进行松动面积检查,每根钢带上的松动面积不应超过该钢带总面积的 15%。
- e) 每层钢带的始、末两端应与前一层贴合,并通过焊接钢带端部长度不小于 2 倍钢带宽度的带间间距使之得到加强与箍紧。每层钢带端部焊缝均应修磨平整,并用不小于 5 倍的放大镜对焊缝进行外观检查,不应有咬边、密集气孔、夹渣、裂纹等缺陷。按疲劳分析设计压力容器、设计压力大于 35 MPa 压力容器还应对钢带的所有焊接接头进行 100% 表面检测
- f) 钢带可作 45°切边对接拼接,拼接钢带长度不应小于 500 mm,每根钢带拼接至多 1 处,每一缠绕钢带层的钢带拼接不应多于 3 处。钢带拼接接头应采用全熔透结构,并按 NB/T 47014 进行焊接工艺评定,拼接接头应进行 100% 表面检测,并修磨与钢带平齐。

## D.3 耐压试验和泄漏试验

D.3.1 钢带错绕压力容器耐压试验时,还应测量以下三个部位的圆筒周长:距最外层钢带左端焊缝 800 mm 处、距最外层钢带右端焊缝 800 mm 处、筒体中部。试验过程中取两组测量值,第一组取自耐压试验前、零压力状态下 3 个部位的测量值;第二组取自耐压试验中,达到规定试验压力并至少保压

5 min 后 3 个部位的测量值。计算 3 个部位周长实测伸长量的平均值( $e_m$ ), 并与按公式(D.2)计算所得的相同尺寸单层圆筒周向伸长量理论计算值( $e_{th}$ )进行比较,  $e_m$  和  $e_{th}$  之比为 0.6~1.0 为合格。

$$e_{th} = \frac{10.68R_o P_T R_i^2}{E_m (R_o^2 - R_i^2)} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$e_{th}$  —— 耐压试验压力下, 与绕带筒体尺寸相同的单层圆筒周向伸长量理论计算值, 单位为毫米 (mm);

$R_o$  —— 压力容器圆筒外半径, 单位为毫米 (mm);

$P_T$  —— 压力容器耐压试验压力, 单位为兆帕 (MPa);

$R_i$  —— 压力容器圆筒内半径, 单位为毫米 (mm);

$E_m$  —— 试验温度下材料的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa)。

**D.3.2** 钢带错绕压力容器的最终泄漏试验按设计文件要求进行。

#### **D.4 保护**

钢带错绕压力容器在耐压试验和泄漏试验合格后, 应按设计文件要求加焊外保护壳。



