



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 26978.2—2011

## 现场组装立式圆筒平底钢质 液化天然气储罐的设计与建造 第2部分：金属构件

Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical,  
flat-bottomed steel tanks for the storage of liquefied natural gases—  
Part 2: Metallic components

2011-09-29 发布

2012-03-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

## 目 次

前言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	4
4 材料 .....	4
4.1 概述 .....	4
4.2 温度 .....	4
4.2.1 最低设计温度 .....	4
4.2.2 气象资料 .....	4
4.2.3 金属设计温度 .....	4
4.3 主液体容器和次液体容器 .....	5
4.3.1 钢材选择 .....	5
4.3.2 夏比V型缺口冲击试验要求 .....	6
4.3.3 合格证 .....	7
4.4 蒸发气容器/外罐 .....	7
4.4.1 板材及结构部分的材料 .....	7
4.4.2 合格证 .....	7
4.5 其他构件 .....	8
4.5.1 螺栓 .....	8
4.5.2 附件 .....	8
4.5.3 管道构件 .....	8
5 设计 .....	8
5.1 设计原理 .....	8
5.1.1 总则 .....	8
5.1.2 许用应力 .....	9
5.1.3 极限状态理论 .....	10
5.2 主液体容器和次液体容器 .....	10
5.2.1 单容罐、双容罐和全容罐 .....	10
5.2.2 薄膜罐 .....	14
5.3 蒸发气容器(外罐) .....	19
5.3.1 单容罐、双容罐和全容罐 .....	19
5.3.2 薄膜罐 .....	22
5.4 吊顶 .....	22
5.5 管嘴 .....	22
5.5.1 概述 .....	22
5.5.2 管嘴荷载 .....	22
5.5.3 罐壁管嘴 .....	22

5.5.4	罐壁管嘴焊接的详细要求	23
5.5.5	罐顶上的管嘴	23
5.5.6	法兰钻孔	24
5.5.7	管嘴焊后热处理	24
5.6	主和次容器的罐底连接	24
5.7	容器之间的连接	24
5.8	其他细节	24
5.8.1	罐体锚固系统	24
5.8.2	铭牌	25
6	制造	25
6.1	材料的处理	25
6.2	板材准备和允许误差	25
6.2.1	罐壁板	25
6.2.2	环形板	25
6.2.3	管嘴	25
6.2.4	加强板	26
6.3	允许误差	26
6.3.1	基础的周边允许误差	26
6.3.2	基础的其他表面允许误差	26
6.3.3	罐底板允许误差	26
6.3.4	罐壁与罐底的连接	26
6.3.5	圆度	26
6.3.6	板材的局部变形	26
6.3.7	焊缝处的局部变形	27
6.3.8	竖直允许误差	28
6.3.9	板材的不平行度允许误差	28
6.3.10	薄膜系统的允许误差	28
6.4	罐顶	28
6.5	临时附件	28
7	焊接工艺	28
7.1	概述	28
7.2	焊接工艺评定(WPAR)的要求	29
7.3	冲击试验	29
7.4	9%镍钢	29
7.5	焊工与焊接操作工	29
7.5.1	单容罐、双容罐和全容罐	29
7.5.2	薄膜罐	29
7.6	产品试板	30
7.6.1	单容罐、双容罐和全容罐	30
7.6.2	薄膜罐	30
8	焊接	30
8.1	定位焊缝与临时焊缝	30

8.2	气候条件	30
8.3	预热	30
8.4	焊后热处理	31
9	检验	32
9.1	无损检测(NDE)人员的资质	32
9.2	检验程序	32
9.3	检验的类型	32
9.3.1	材料检验	32
9.3.2	焊缝的检验范围	32
9.4	目视检验	35
9.5	着色渗透检验	35
9.6	磁粉检验	35
9.7	真空箱检查	35
9.8	氨渗漏试验	35
9.9	肥皂液检查	36
9.9.1	概述	36
9.9.2	罐壁与罐底之间的双面角焊缝	36
9.9.3	加强板	36
9.9.4	罐顶	36
9.10	射线检查	36
9.11	超声波检验	36
9.12	验收标准	36
9.12.1	射线检查	36
9.12.2	超声波检验	36
9.13	水平焊缝中不可接受的缺陷	37
9.13.1	概述	37
9.13.2	自动焊	37
9.13.3	手工焊	37
9.14	研磨后可接受的局部变薄	37
附录 A (资料性附录) 薄膜上的荷载		38
附录 B (资料性附录) 确定薄膜上的荷载与疲劳曲线		39
附录 NA (资料性附录) 本部分与 EN 14620-2:2006 技术性差异及其原因		40
参考文献		42

## 前 言

GB/T 26978《现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造》分为以下5个部分:

- 第1部分:总则;
- 第2部分:金属构件;
- 第3部分:混凝土构件;
- 第4部分:绝热构件;
- 第5部分:试验、干燥、置换及冷却。

本部分为GB/T 26978—2011的第2部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分修改采用EN 14620-2:2006《现场组装立式圆筒形平底钢质操作温度介于0℃~—165℃的冷冻液化气储罐设计和建造 第2部分:金属构件》(英文版)。

主要差异如下:

保留了与液化天然气有关的内容,删除与液化石油气、乙烯、乙烷和类似的碳氢化合物以及液氧、液氮、液氩储存等相关的内容。

增加了“附录NA(资料性附录)”,其中给出了技术性差异及其原因的一览表,以供参考。

为了便于使用,本部分以法定计量单位为主,非法定计量单位的相应值标在其后的括号内。

本部分的附录A、附录B、附录NA为资料性附录。

本部分由全国石油天然气标准化技术委员会液化天然气分技术委员会(SAC/TC 355/SC 1)归口。

本部分负责起草单位:中海石油气电集团有限责任公司、中国石油天然气管道工程有限公司。

本部分参加起草单位:中国石油天然气股份有限公司唐山LNG项目经理部、中国成达工程公司、中国石化集团中原石油勘探局勘察设计院,中国石油天然气与管道分公司、中国石油天然气管道工程有限公司。

本部分主要起草人:付昱华、殷虹、尹晔昕、张志强、赵旭清、孙青峰、何涛。

# 现场组装立式圆筒平底钢质 液化天然气储罐的设计与建造

## 第2部分：金属构件

### 1 范围

本部分是对液化天然气(LNG)储罐金属构件的材料、设计、建造和安装等的一般要求做出规定。

本部分适用于现场组装的立式、圆筒、平底、钢质、操作温度介于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的液化天然气储罐的设计和建造。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 193—2003 普通螺纹 直径与螺距系列

GB/T 9145—2003 普通螺纹 中等精度、优选系列的极限尺寸

GB/T 26978.1—2011 现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造 第1部分：总则

SY/T 0608—2006 大型焊接低压储罐的设计与建造

EN ISO 5817:2003 焊接 对钢、镍、钛及其合金的熔焊接头(电子束焊除外)缺陷的质量等级 [Welding—Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)—Quality levels for imperfections]

EN ISO 15607:2003 金属材料焊接工艺的技术要求和评定 第1部分：总则 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Part 1: General rules)

EN ISO 15609-1:2004 金属材料焊接工艺的技术要求和评定 焊接工艺 第1部分：电弧焊 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure specification—Part 1: Arc welding)

EN ISO 15614-1:2004 金属材料焊接工艺的技术要求和评定 焊接工艺试验 第1部分：钢的电弧气体保护焊和镍与镍合金的电弧焊 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure test—Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys)

EN 287-1 焊工评定 熔焊 第1部分：钢 (Qualification test of welders—Fusion welding—Part 1: Steels)

EN 462-1 无损检验 射线照片的图像质量 第1部分：像质计(线型)——像质值的测定 (Non-destructive testing—Image quality of radiographs—Part 1, Image quality indicators (wire type)—Determination of image quality value)

EN 462-2 无损检验 射线照片的图像质量 第2部分：像质计(阶梯型/孔型)——像质值的测定 (Non-destructive testing—Image quality of radiographs—Part 2: Image quality indicators (step/hole type)—Determination of image quality value)

EN 473 无损检验 无损检验人员的资质和认证 总则(Non-destructive testing—Qualification and certification of NDT personnel—General principles)

EN 571-1 无损检验 渗透检验 第1部分:总则(Non-destructive testing—Penetrant testing—Part 1;General principles)

EN 584-1 无损检验 工业用射线照相底片 第1部分:工业用射线照相底片系统的分类(Non-destructive testing—Industrial radiographic film—Part 1;Classification of film systems for industrial radiography)

EN 584-2 无损检验 工业用射线照相底片 第2部分:根据参考值控制底片处理(Non-destructive testing—Industrial radiographic film—Part 2;Control of film processing by means of reference values)

EN 875 金属材料焊缝的破坏性试验 冲击试验 试样的位置、缺口方向和检查(Destructive tests on welds in metallic materials—Impact tests—Test specimen location, notch orientation and examination)

EN 970 熔焊焊缝的无损检查 目视检查(Non-destructive examination of fusion welds—Visual examination)

EN 1011-2 焊接 金属材料焊接的推荐标准 第2部分:铁素体钢的电弧焊(Welding—Recommendations for welding of metallic materials—Part 2;Arc welding of ferritic steels)

EN 1092-1:2001 法兰及其连接件 管件、阀门、配件和附件用圆形法兰(用PN标注) 第1部分:钢质法兰(Flanges and their joints—Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, PN designated—Part 1;Steel flanges)

EN 1290 焊缝的无损检验 焊缝的磁粉检验(Non-destructive testing of welds—Magnetic particle testing of welds)

EN 1418 焊接人员 金属材料全机械焊接和自动焊接用熔焊设备和电阻焊设备操作员的批准(Welding personnel—Approval testing of welding operators for fusion welding and resistance weld setters for fully mechanized and automatic welding of metallic materials)

EN 1435:1997 焊缝的无损检验 焊接接头的射线(照相)检查(Non-destructive examination of welds—Radiographic examination of welded joints)

EN 1515-1:1999 法兰及其连接件 螺栓连接 第1部分:螺栓的选择(Flanges and their joints—Bolting—Part 1;Selection of bolting)

EN 1593 无损检验 泄漏检验 发泡技术(Non-destructive testing—Leak testing—Bubble emission techniques)

EN 1712:1997 焊缝的无损检验 焊缝的超声波探伤 验收标准(Non-destructive testing of welds—Ultrasonic testing of welded joints—Acceptance Levels)

EN 1714:1997 焊缝的无损检验 焊接接头的超声波探伤(Non-destructive testing of welds—Ultrasonic testing of welded joints)

EN 1759-1:2004 法兰及其连接件 管道、阀门、配件、附件用圆法兰设定等级 第1部分:钢质法兰,NPS 1/2 到 24(Flanges and their joint—Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, Class designated—Part 1;Steel flanges, NPS 1/2 to 24)

EN 1993-1-1 欧洲标准 3:钢结构设计 1-1 部分:一般规则和建筑物的规则(Eurocode 3 Design of steel structures—Part 1-1;General rules and rules for buildings)

ENV 1993-1-6 欧洲标准 3:钢结构设计 1-6 部分:总则——壳体结构强度和稳定性的补充规则(Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-6; General rules—Supplementary rules for the strength and stability of shell structures)

- ENV 1993-4-2:1999 欧洲标准 3: 钢结构设计 4-2 部分: 筒仓、储罐和管道 储罐 (Eurocode 3: Design of steel structures—Part 4-2: Silos, tanks and pipelines—Tanks)
- EN 1994-1-1 欧洲标准 4: 钢材混凝土混合结构的设计 1-1 部分: 一般规则和建筑物的规则 (Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings)
- EN 10025:2004 非合金结构钢材的热轧产品 (Hot rolled products of non-alloy structural steels)
- EN 10029:1991 厚度等于或大于 3 mm 的热轧钢板 尺寸、形状和质量允许误差 (Hot rolled steel plates 3 mm thick or above—Tolerances on dimensions, shape and mass)
- EN 10045-1 金属材料 夏比冲击试验 第 1 部分: 试验方法 (Metallic materials—Charpy impact test—Part 1: Test method)
- EN 10160:1999 厚度等于或大于 6 mm 平钢板产品的超声波探伤(反射法) (Ultrasonic testing of steel flat product of thickness equal or greater than 6 mm)
- EN 10204:2004 金属制品 检查文件的类型 (Metallic products—Types of inspection documents)
- EN 10216-1 压力无缝钢管 交货技术条件 第 1 部分: 规定室温特性的非合金钢管 (Seamless steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 1: Non-alloy steel tubes with specified room temperature properties)
- EN 10216-2 压力无缝钢管 交货技术条件 第 2 部分: 规定高温特性的非合金与合金钢管 (Seamless steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties)
- EN 10216-3 压力无缝钢管 交货技术条件 第 3 部分: 合金细晶粒钢管 (Seamless steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 3: Alloy fine grain steel tubes)
- EN 10216-4 压力无缝钢管 交货技术条件 第 4 部分: 规定低温特性的非合金与合金 (Seamless steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 4: Non-alloy and alloy steel tubes with specified low temperature properties)
- EN 10217-1 压力焊接钢管 交货技术条件 第 1 部分: 规定室温特性的非合金钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 1: Non-alloy steel tubes with specified room temperature properties)
- EN 10217-2 压力焊接钢管 交货技术条件 第 2 部分: 规定高温特性的非合金与合金电焊钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 2: Electric welded non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties)
- EN 10217-3 压力焊接钢管 交货技术条件 第 3 部分: 合金细晶粒钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 3: Alloy fine grain steel tubes)
- EN 10217-4 压力焊接钢管 交货技术条件 第 4 部分: 规定低温特性的非合金电焊钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 4: Electric welded non-alloy steel tubes with specified low temperature properties)
- EN 10217-5 压力焊接钢管 交货技术条件 第 5 部分: 规定高温特性的非合金与合金埋弧焊钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 5: Submerged arc welded non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties)
- EN 10217-6 压力焊接钢管 交货技术条件 第 6 部分: 规定低温特性的非合金埋弧焊钢管 (Welded steel tubes for pressure purposes—Technical delivery conditions—Part 6: Submerged arc welded non-alloy steel tubes with specified low temperature properties)
- EN 10220 无缝钢管和焊接钢管 尺寸和单位长度质量 (Seamless and welded steel tubes—Di-

mensions and masses per unit length)

EN 12062:1997 焊缝的无损检验 金属材料检查的一般规则(Non-destructive examination of welds—General rules for metallic materials)

EN 14015:2004 现场组装的平底、钢质、立式、圆筒、超出地面高度、操作温度等于和高于环境温度的液体储罐的设计和建造规范(Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flatbottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above)

### 3 术语和定义

GB/T 26978.1—2011 中确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**应变幅 amplitude of strain**

应变范围的一半。

#### 3.2

**递进变形 progressive deformation**

在循环荷载作用下,薄膜的每部分的变形逐渐增加的现象。

#### 3.3

**应变范围 range of strain**

循环应变曲线上最大值与最小值之间的差值。

#### 3.4

**棘轮变形 ratcheting**

渐进性增加的非弹性变形或渐进性增加的应变,棘轮变形可能发生在受到机械应力变化的构件上。

#### 3.5

**失稳 unstable collapse**

在静荷载条件下变形过程的确切变得不明确的现象。

### 4 材料

#### 4.1 概述

在所有环境中钢材可能承受到的温度是重要参数,应加以确定。

#### 4.2 温度

##### 4.2.1 最低设计温度

最低设计温度应作为液体主容器和液体次容器材料选取的金属设计温度。

##### 4.2.2 气象资料

买方应规定气象资料(Lodmat,日、月、年温度记录)。

##### 4.2.3 金属设计温度

当钢质构件使用热绝缘的办法来防止低的液体或蒸发气温度的损害时,则金属设计温度应按照相应荷载条件(包括偶然作用)下最为不利的假设进行计算。

## 4.3 主液体容器和次液体容器

## 4.3.1 钢材选择

## 4.3.1.1 概述

在 4.3.1.2 所给出的主液体容器和次液体容器的材料要求主要是针对在金属设计温度下材料的高水平韧性而提出的。针对每种存储产品,规定了一些特定的材料要求。

## 4.3.1.2 材料要求

## 4.3.1.2.1 钢材分类

板材分类如下:

- I 型钢材:低温碳锰钢;
- II 型钢材:特种低温碳锰钢;
- III 型钢材:低镍钢;
- IV 型钢材:改进的 9% 镍钢;
- V 型钢材:奥氏体不锈钢。

对于每种存储产品,所使用钢材类型应符合表 1。

表 1 存储产品与所使用钢材的类型

产品	单容罐	双容罐或全容罐	薄壁罐	典型的产品存储温度
温度 -10 °C 产品	II 型	I 型		-10 °C
温度 -15 °C 产品	II 型	II 型		-15 °C
温度 -50 °C 产品	III 型	II 型	V 型	-50 °C
温度 -105 °C 产品	IV 型	IV 型	V 型	-105 °C
液化天然气	IV 型	IV 型	V 型	-165 °C

注:材料选择宜考虑工作条件的影响(例如应力腐蚀裂纹)。

## 4.3.1.2.2 一般要求

材料选择应遵循下列一般要求:

## a) I 型钢材:

I 型钢材为细晶粒、低碳钢,应规定其用于低温达到 -35 °C 条件下的承压构件。该类型钢材应满足下列各项要求:

- 1) 应规定该类型钢材满足已颁布的标准(例如,EN 10028-3 标准)的要求,最小屈服强度大于 355 N/mm<sup>2</sup> 的钢材不应使用;
- 2) 该类型钢材应为正火状态或用热轧工艺生产;
- 3) 碳含量应低于 0.20%,碳当量  $C_{eq}$ (%) 应小于或等于 0.43,其中碳当量  $C_{eq}$  的计算见式(1)。

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \dots\dots\dots(1)$$

式中:元素符号均表示该元素的质量分数。

## b) II 型钢材:

II 型钢材为细晶粒、低碳钢,应规定其用于低温达到 -50 °C 条件下的压力用途。该类型钢材

应满足下列各项要求:

- 1) 应规定该类型钢材满足已颁布的标准(例如, EN 10028-3)的要求。最小屈服强度大于  $355 \text{ N/mm}^2$  的钢材不应使用;
- 2) 该类型钢材应为正火状态或用热轧工艺生产;
- 3) 碳含量应低于 0.20%, 碳当量  $C_{eq}$  应小于或等于 0.43, 其中碳当量  $C_{eq}$  的计算见式(2):

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \dots\dots\dots(2)$$

式中:元素符号均表示该元素的质量分数。

c) III型钢材:

III型钢材为细晶粒、低镍合金钢,应规定其用于低温达到  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下的压力用途。该类型钢材应满足下列各项要求:

- 1) 应规定该类型钢材满足已颁布的标准(例如, EN 10028-4)的要求;
- 2) 该类型钢材应经过热处理,获得均匀尺寸的细晶粒,或者使用热轧工艺生产;

d) IV型钢材:

IV型钢材为改进的 9% 镍钢,应规定其用于低温达到  $-165 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下的压力用途。该类型钢材应满足下列各项要求:

- 1) 应规定该类型钢材满足已颁布的标准(例如, EN 10028-4)的要求;
- 2) 该类型钢材应为调质钢。

e) V型钢材:

V型钢材为奥氏体不锈钢,符合标准(例如, EN 10028-7)。

#### 4.3.1.2.3 最大罐壁板厚度

最大罐壁板厚度应为:

- I 型、II 型和 III 型钢材: 40 mm;
- IV 型钢材: 50 mm;
- V 型钢材: 没有厚度上限。

当需要的材料厚度超过上述数值时,则应进行额外的材料调查和试验,以证明材料能够达到上述型号材料和最大厚度所具有的相同的抗脆裂水平。

#### 4.3.1.2.4 板材允许误差

板材的允许误差应满足下列要求:

- 对于通过计算而确定厚度的部分,其板材允许误差应符合 EN 10029:1991, 分类 C;
- 对于考虑最小公称厚度而确定厚度的部分,其板材允许误差应符合 EN 10029:1991, 分类 B。

#### 4.3.2 夏比 V 型缺口冲击试验要求

母材、热影响区以及焊缝金属的夏比 V 型缺口冲击试验数值应符合表 2 中的要求。

规定数值应为三个试样的最小平均值,只允许其中一个数值小于规定数值,但不得小于规定数值的 70%。

对于厚度小于 11 mm 的材料,应选实用的最大尺寸小试样(sub-size)。小试样的最小夏比 V 型缺口冲击试验数值应与全尺寸试样的规定值成正比。

由于焊接原因所导致的不利影响应加以考虑。

注:对于某些材料,母材需要选用较高的夏比 V 型缺口值或较低的试验温度,才能满足热影响区的要求。

储液罐的每一块壁板和供切割环形板的钢板都应进行冲击试验。对于其他构件,应根据材料的炉

号或批次进行冲击试验。

冲击试验应按照 EN 10045-1 标准和 EN 875 标准来实施。

表 2 最小夏比 V 型缺口冲击试验能量

分类	钢材类型	冲击试验能量	试样相对于钢板的方向
I 型	低温碳锰钢	在 -35 ℃, 27 J	横向
II 型	特种低温碳锰钢	在 -50 ℃, 27 J	横向
III 型	低碳钢	在 -80 ℃, 27 J	横向
IV 型	改进的 0% 碳钢	在 -196 ℃, 80 J	横向

注: 如果使用镍基焊缝金属(II 型, III 型和 IV 型钢材), 则焊缝金属和热影响区的冲击韧性能量应为 55 J。

#### 4.3.3 合格证

对于金属设计温度低于 0 ℃ 的材料, 需要按照 EN 10204, 2004, 类型 3.1, 提供一份检验合格证书。

#### 4.4 蒸发气容器/外罐

##### 4.4.1 板材及结构部分的材料

蒸发气容器/外罐的钢材应按照表 3 来进行选取。

注: 钢材的型号可以另外选择, 只要能够证明该材料的相当性能(例如化学成分和机械性能)。

表 3 蒸发气容器/外罐所使用钢材

金属设计温度 $t_{DM}/\text{℃}$	厚度 $e/\text{mm}$	按照 EN 10025, 2004 的材料型号
$t_{DM} \geq 10$	$e \leq 40$	S235JRG2 或 S275JR 或 S355JR
$10 > t_{DM} \geq 0$	$e \leq 13$ $13 < e \leq 40$	S235JRG2 或 S275JR 或 S355JR S235J0 或 S275J0 或 S355J0
$0 > t_{DM} \geq -10$	$e \leq 13$ $13 < e \leq 40$	S235J0 或 S275J0 或 S355J0 S235J2G3 或 S275J2G3 或 S355J2G3
$-10 > t_{DM} \geq -20$	$e \leq 13$ $13 < e \leq 40$	S235J2G3 或 S275J2G3 或 S355J2G3 S235J2G3 或 S275J2G3 或 S355J2G4

注 1: 对于金属设计温度低于 -20 ℃ 或者厚度大于 40 mm, 则板材应在不超过金属设计温度的条件下进行冲击试验, 其纵向冲击功数值最小应为 27 J。

注 2: 对于金属设计温度低于 0 ℃ 的材料, 在金属设计温度下, 垂直壁板接头上焊缝金属和热影响区的冲击试验数值最小应为 27 J。

##### 4.4.2 合格证

对于金属设计温度低于 0 ℃ 的材料, 需要按照 EN 10204, 2004, 类型 3.1, 提供一份检查合格证书。所有其他材料应按照 EN 10204, 2004, 类型 2.2 提供试验报告。

## 4.5 其他构件

### 4.5.1 螺栓

#### 4.5.1.1 螺栓的选取

螺栓应符合 EN 1515-1:1999,表 1 和表 2 中的要求。

在材料选择的过程中,应考虑到用途、设计压力、设计温度和液体工作条件等因素。

在铁素体钢和马氏体钢情况下,螺栓杆材料的拉伸强度应小于  $1\ 000\ \text{N}/\text{mm}^2$ ,延伸率 A5 应大于 14%。

使用温度条件介于  $-10\ ^\circ\text{C}$  到  $-160\ ^\circ\text{C}$  之间的铁素体钢和马氏体钢应在金属设计温度下进行冲击试验,纵向的平均冲击功值应为 40 J。

金属设计温度低于  $-160\ ^\circ\text{C}$  的,冲击试验应在  $-196\ ^\circ\text{C}$  的温度下进行。

注 1: 在使用奥氏体钢材的情况下,将螺栓冷却到零下温度时,它就会松弛。这是由于材料结构由奥氏体永久转变到马氏体而造成的,这个永久转变过程会导致长度增加。随着所施加应力的增加,转变的程度也会随之加大。

注 2: 对于在冷却以后不能重新拉紧的螺栓,宜使用具有稳定结构的钢材制造,例如使用 33Cr20Ni,或使用含氮奥氏体钢材制造。

#### 4.5.1.2 双头螺栓

双头螺栓应在整个长度上加工有螺纹。螺栓端应加工成倒角或圆形。螺栓端头的高度最大应为螺距的一倍。

双头螺栓的长度应包含螺栓端头的长度。螺栓长度按 3 mm 阶梯式递增,直到 80 mm;大于 80 mm 到等于 200 mm 时,按 10 mm 阶梯式递增;在 200 mm 以上时,按 20 mm 递增。

螺纹应符合 GB/T 193—2003 标准,允许误差应符合 GB/T 9145—2003 标准中的 6g 等级。螺纹类型为 ISO M 螺线,或为 M39 以上的,螺距为 4 mm 的细牙螺线。

#### 4.5.1.3 弹簧垫圈

在使用不同材料以及不同热收缩可能发生的场合下,应考虑专用弹簧垫圈。

### 4.5.2 附件

管嘴颈、插入板和加强板以及永久性附属件等都具有与其连板材相同的强度和切口延性。不过,如果满足一个前提条件,即管嘴颈面积不应作为置换(contributing)面积(安装区域)计算的一部分,则管嘴颈能够使用较低强度材料。

### 4.5.3 管道构件

管道构件所使用材料应符合 EN 1092-1:2001、EN 10216-1、EN 10216-2、EN 10216-3、EN 10216-4、EN 10217-1、EN 10217-2、EN 10217-3、EN 10217-4、EN 10217-5、EN 10217-6 等标准。

## 5 设计

### 5.1 设计原理

#### 5.1.1 总则

关于作用(荷载),见 GB/T 26978.1:2011 中 7.3。

钢构件的设计应以许用应力理论或极限状态理论为依据。

注：给出两个选择的原因是，目前极限状态理论应用到钢质储罐设计中的经验是有限的。

因为薄膜的设计使用弹塑性方法，所以许用应力或极限状态准则是不适用的，应以规定材料的应力/应变曲线取代。

## 5.1.2 许用应力

### 5.1.2.1 概述

所有板材和焊缝金属的最大许用拉应力应符合表 4 的要求。

表 4 最大设计许用应力的确定

钢材类型	使用中的许用应力	水压试验期间的许用应力
I、II、III型钢材	$0.43f_u, 0.67f_y, 260 \text{ N/mm}^2$ 三者中的较小者	$0.60f_u, 0.65f_y, 340 \text{ N/mm}^2$ 三者中的较小者
IV型钢材	$0.43f_u, 0.67f_y$ 两者中的较小者	
V型钢材	$0.40f_u, 0.67f_y$ 两者中的较小者	
注 1: $f_u$ 为最小极限抗拉强度, $\text{N/mm}^2$ ; $f_y$ 为最小屈服强度, $\text{N/mm}^2$ 。 注 2: 对于 III 型钢材和 IV 型钢材, $f_y$ 等于 0.2% 残余变形时的应力值。 注 3: 对于 V 型钢材, $f_y$ 等于 1% 残余变形时的应力值。		

进行地震设计时,运行基准地震(OBE)的许用应力应为操作工况下许用应力的 1.33 倍。安全停运地震(SSE)的许用拉应力应为  $1.00f_u$ ,许用压应力应为临界屈曲应力。

### 5.1.2.2 储罐锚固

储罐锚固应能抵抗罐体抬升。储罐锚固的许用拉应力应限制在:

- 正常操作工况下:  $0.50f_u$ ;
- 试验条件下:  $0.85f_u$ ;
- OBE 条件下:  $0.67f_y$ ;
- SSE 条件下:  $1.00f_u$ 。

罐壁上的附件以及嵌入件应设计成能承受未发生腐蚀的锚定螺栓和拉索全部屈服时的荷载。

注:这是为了防止可能发生的罐壁撕裂。锚固螺栓座的设计参见参考文献[14]。

在液化天然气使用条件下,用 IV 型或 V 型钢材制造的锚固件应采用表 1 中所给出温度(或更低)条件下的锚固件材料屈服应力。

### 5.1.2.3 罐顶-罐壁连接处的承压区

许用压缩应力  $S_c$  应限制在  $120 \text{ N/mm}^2$ 。

注:承压区的详细内容见 5.3.1.3.5。

## 5.1.2.4 应力

### 5.1.2.4.1 对接焊缝

当荷载垂直于焊缝并作用在板材平面内时,许用应力应限制在表 4 中所给出数值。

当荷载平行于焊缝时,许用剪切应力应限制在表 4 中所给出数值的 75%。

5.1.2.4.2 角焊缝

当荷载垂直于焊缝时,许用剪切应力应限制在表4中所给出数值的70%。  
当荷载平行于焊缝时,许用剪切应力应限制在表4中所给出数值的50%。

5.1.3 极限状态理论

5.1.3.1 概述

采用极限状态理论进行分析时,应使用下列标准:

EN 1993-1-1, ENV 1993-1-6, ENV 1993-4-2:1999 和 EN 1994-1-1

下列事项应予以考虑:

- 不应采用 ENV 1993-4-2:1999 中条款 11 规定的简化方法;
- 进行罐顶结构静态分析时,应使用 EN 1993-1-1 或 EN 1994-1-1;
- 承受外部压力的罐壁,其设计应考虑 5.2.1.2.3 所提出的各项要求,ENV 1993-1-6 不适用于本情况;
- 5.1.3.2 中的各项要求与 ENV 1993-4-2:1999 的各项要求是不相同的,但应遵守。

5.1.3.2 主液体容器和次液体容器

对于单容罐、双容罐和全容罐,其主液体容器和次液体容器的分项安全系数应按照表5予以调整。  
注:已经对分项荷载系数和材料系数进行了调整,以获得与按许用应力理论得到的相同壁厚。

表5 I、II、III和IV型钢的分项荷载和材料系数

操作工况			试验条件		
$\gamma_i$	$\gamma_w$		$\gamma_i$	$\gamma_w$	
1.36	$\alpha \geq 1.57$	$\alpha < 1.57$	1.06	$\alpha \geq 1.43$	$\alpha < 1.43$
	1.10	$1.72/\alpha$		1.11	$1.57/\alpha$
注1: $\gamma_i$ 为作用的分项系数; 注2: $\gamma_w$ 为材料强度系数; 注3: $\alpha$ 为拉伸强度与屈服强度之比( $f_u/f_t$ )。 式中: $f_u$ 为钢材或焊缝金属的极限抗拉强度,取为二者之间的较小者; $f_t$ 为钢材或焊缝金属的屈服强度,取为二者之间的较小者。					

5.2 主液体容器和次液体容器

5.2.1 单容罐、双容罐和全容罐

5.2.1.1 罐底

5.2.1.1.1 罐底环形板

环形板的最小厚度(不包括腐蚀裕量) $e_s$  应见式(3):

$$e_s = (3.0 + e_t/3), \text{但不小于 } 8 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$e_t$  ——底圆罐壁板的厚度,单位为毫米(mm)。

图1c所示罐底外圆异型板的边缘与壁板内侧之间的最小宽度 $l_s$ ,应为下列a)、b)中的较大值。

a) 满足式(4):

$$l_s > \frac{240}{\sqrt{H}} e_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$e_s$ ——环形板厚度,单位为毫米(mm);

$H$ ——最高设计液位,单位为米(m)。

b) 500 mm。

另外,还应满足下列附加要求:

——环形板之间的径向接缝应对焊;

——壁板与环形边缘板连接应采用下列方式之一:

- 对接焊缝焊接;
- 双面角焊缝焊接,最大焊脚高度为 12 mm,最小为罐壁和边缘板厚度的较小者;
- 厚度大于 12 mm 的环形板用坡口焊加角焊。坡口深度加上角焊缝焊脚高度应等于边缘板厚度;

——环形板径向接缝与任何壁板立缝之间的距离应不小于 300 mm;

——壁板外侧与环形板外缘之间的最小距离应为 50 mm。

注:环形板的宽度和厚度也可由地震作用力确定。

#### 5.2.1.1.2 罐底中幅板

不计腐蚀裕量,罐底板的最小厚度应为 5 mm。

应满足下列要求:

——中幅板的最小直边长度应为 500 mm;

——底板应使用角焊或对焊的方法连接;

——搭接接头的最小搭接宽度应是板厚的 5 倍;

——角焊缝至少应由两道焊道组成;

——罐底中幅板应搭接在边缘板上,最小搭接宽度应为 60 mm;

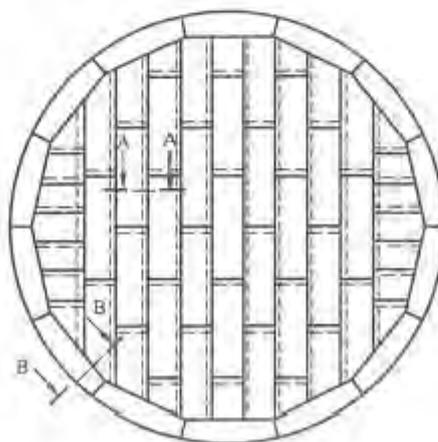
——罐底中幅板的对接焊缝应既可以采用双面焊,也可采用带垫板的单面焊;

——三块板连接中接头之间的最小距离应为 300 mm。

如果在底板上安装加强板,应使用连续角焊。

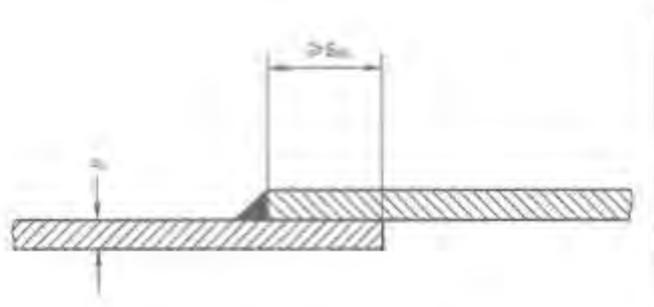
储罐底板和环形板的布置及细节应符合图 1。

单位为毫米

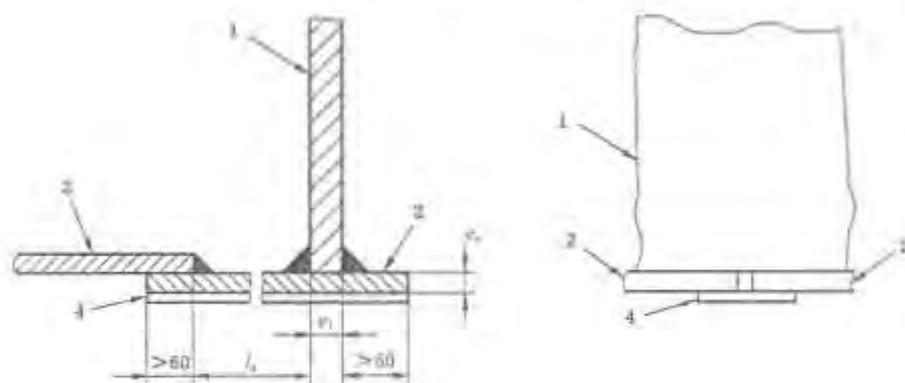


a) 两边设置环形板

图 1 典型的罐底板铺放布置



b) 截面 A-A, 底板的搭接



c) 截面 B-B

图例:

- 1—罐壁;
- 2—环形板;
- 3—(靠近边缘的)异型板;
- 4—垫板。

图 1 (续)

### 5.2.1.2 罐壁

#### 5.2.1.2.1 罐壁最小厚度

罐壁最小厚度应符合表 6 中的规定。

表 6 罐壁最小厚度

罐壁直径/m	最小厚度/mm
$D \leq 10$	5
$10 < D \leq 30$	6
$30 < D \leq 60$	8
$D > 60$	10

注: 对罐壁的最小厚度要求, 是出于建造需要, 且可包含腐蚀裕量; 除非通过计算显示在腐蚀条件下壁板是安全的。

## 5.2.1.2.2 壁板厚度

壁板厚度应为  $e_1, e, e_2$  最小厚度三者中的最大值。

a) 对于操作工况见式(5)：

$$e = \frac{D}{20S} [98W(H - 0.3) + P] + c \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中：

$e$  —— 板材计算厚度，单位为毫米(mm)；

$D$  —— 储罐内径，单位为米(m)；

$S$  —— 许用设计应力，单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>)；

$W$  —— 储存条件下液体的最大密度，单位为千克/升(kg/L)，(1 kg/L=1 000 kg/m<sup>3</sup>)；

$H$  —— 从所考虑的圈壁板的底部与最大设计液位之间的高度，单位为米(m)；

$P$  —— 设计压力，单位为毫巴(mbar)(1 mbar=0.1 kPa)。对于顶部开口内罐，设计压力取值为0；

$c$  —— 腐蚀裕量，单位为毫米(mm)。

b) 对于水压试验条件见式(6)：

$$e_1 = \frac{D}{20S_1} [98W_1(H_1 - 0.3) + P_1] \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中：

$e_1$  —— 板材计算厚度，单位为毫米(mm)；

$D$  —— 储罐内径，单位为米(m)；

$S_1$  —— 在试验条件下的许用应力，单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>)；

$W_1$  —— 试验用水的最大密度，单位为千克每升(kg/L)(1 kg/L=1 000 kg/m<sup>3</sup>)；

$H_1$  —— 从所考虑的圈壁板的底部与试验液位之间的高度，单位为米(m)；

$P_1$  —— 试验压力，单位为毫巴(mbar)(1 mbar=0.1 kPa)。对于顶部开口内罐，取值为0。

对于任何一圈壁板，无论采用何种建造钢材，其壁板的设计厚度都不允许小于其上层壁板的厚度，压缩区域除外。

## 5.2.1.2.3 附加要求

a) 罐壁焊缝

所有竖直焊缝和水平焊缝都应采用全焊透和全熔合的对焊。

b) 板材布置

相邻两圈壁板上的竖直焊缝之间的距离不应小于300 mm。

c) 附件

在安装附件的部位，应使用垫板，附件的位置应距离竖直焊缝300 mm以上，或距离水平焊缝150 mm以上。

垫板和加强板应采用圆角过渡，圆角的最小半径为50 mm。

d) 内罐壁的外荷载

如适用，应考虑下列荷载：

—— 绝热层压力；

—— 内罐真空负压；

—— 内罐与外罐之间的压力。

两轴向的应力合成；

壁板设计应考虑到环向压应力和轴向(纵向)应力的合成。

环向压应力与轴向应力的合成:

与有轴向压应力或拉应力同时作用的情况相比,当没有轴向应力作用时,许用环向压应力(抵抗力)应适当降低。与有环向压应力同时作用的情况相比,当没有环向压应力作用时,许用轴向压应力(抵抗力)应适当降低。

环向拉应力与轴向压应力的合成:

由于同时存在的内部径向压力产生的稳定性效果,当没有环向应力作用时,许用轴向压应力(抵抗力)可提高。

中间加强圈的间距:

罐壁厚度变化时,可以使用罐壁反变形换算法确定不同壁厚中间环形加强圈的间隔距。加强圈之间的等效高度(间距)按式(7)计算:

$$H_e = h \sqrt{\left(\frac{e_{\max}}{e}\right)^2} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$H_e$  ——每圈壁板的厚度为  $e_{\max}$  时的等效稳定高度,单位为米(m);

$e$  ——依次排定的每圈壁板的厚度,单位为毫米(mm);

$e_{\max}$  ——排在最上一圈壁板的厚度,单位为毫米(mm);

$h$  ——每圈壁板的高度,单位为米(m)。

每个中间水平环形加强圈应按与该加强圈相关联的节间荷载设计,要考虑到壁板对加强圈刚度的贡献。

罐壁底角和敞开口罐顶部加强圈的特性,应符合底及顶部加强圈或隔板的设计要求。

加强圈与罐壁的连接应采用双面连续角焊缝。在中间加强圈对接焊缝处和在加强圈跨越壁板立缝处,应设置“鼠孔”(mouse-hole)。

加强圈与水平焊缝之间的最小距离应为 150 mm。

#### e) 外罐壁的外部风力荷载/真空荷载

罐壁应设计成能承受环向和轴向(纵向)压缩应力的组合。见上述 5.2.1.2.3d)。罐壁应能够承受外部风压和内部真空(内部负压)合力产生的径向压力。为抵抗径向压力,在计算中采用的设计风压,应基于按 EN 1991-1-4 确定的地区风压特征。为抵抗因风力倾覆和在罐顶上的抽吸引发的罐壁内轴向应力,在计算中使用的设计风压应基于总风压,该风压是按 EN 1991-1-4:2004 采用适当的形状和表面系数确定的。焊接要求见 5.2.1.2.3d)。

## 5.2.2 薄膜罐

### 5.2.2.1 概述

薄膜罐应使用金属板材制造,最小厚度为 1.2 mm。薄膜应具有双网络波纹,允许在所有荷载条件下自由移动。应使用起皱或深拉拔工艺加工波纹。薄膜应完全由罐体绝热系统支撑。

薄膜应锚固到绝热系统中,或者锚固到混凝土外罐上,以便在整个寿命期间能够保持其位置不变。在罐的顶部,薄膜应布置成使其成为蒸发气和液体密闭的容器(称为“绝热蒸发气空间”)。

所有薄膜构件应设计成在罐寿命期间能承受所有可能的静态和动态荷载。

注:典型荷载数据参见附录 A。

经过平稳的变形和移动后,薄膜和所有构件应能保持其形状。应能证明在周期荷载作用下薄膜不会发生渐进性变形,还应证明能防止波纹处不会发生屈曲或折断,以及避免疲劳失效。

金属膜的设计应采用模型试验和/或数值分析的方法,见图2。无论使用哪种方法,应能证明设计的薄膜在下述情况下的可靠性:

- 在给定荷载作用下薄膜应保持稳定性;
- 在规定的荷载循环次数内,薄膜应具有足够的疲劳强度。

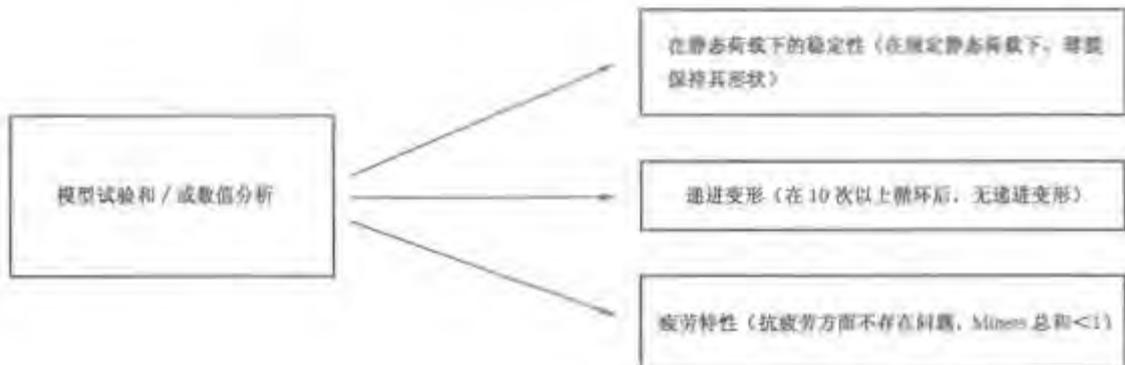


图2 薄膜的设计流程图

在进行数值分析时,应使用非线性弹-塑性或弹-塑性/大位移计算方法。应考虑到下列因素:

- 在由于进入到绝热层或者混凝土中的锚固系统导致的热荷载作用下,薄膜可能的不均匀变化;
- 在静态设计和疲劳设计中,应使用 Tresca 理论或 von-Mises 理论计算等效应力;
- 在适用情况,由热荷载产生的变形应作为边界条件;
- 最大应力或应变的计算应以主轴为依据;
- 应重视所有薄膜单元的建模(即确定单元尺寸);
- 应证明,涉及计算理论的模型显示出与实物很好的相关性。

薄膜设计应考虑地震荷载。有限元模型应包括储罐结构和液体,以及液体与结构之间的相互作用。进入到绝热层或混凝土中的薄膜的锚固系统应能承受包括地震荷载在内的所有规定荷载。

## 5.2.2.2 数值分析

### 5.2.2.2.1 应力/应变曲线

应力/应变曲线的建立应考虑下列各项:

- 应力/应变曲线应为选定材料而建立;
- 出现断面缩小的部分曲线(即颈缩段)应是不允许的;
- 弹性范围和塑性范围的泊松比是不同的。

### 5.2.2.2.2 静态荷载下的稳定性

应证明薄膜能够在所规定的静态荷载作用下,经受平滑变形后仍保持其形状(液压的安全系数为1.25)。应确认波纹部分的变形符合在应力/应变曲线中所给出的限度。应采用主应力和主应变。

### 5.2.2.2.3 失稳和屈曲不稳定

应证明不会出现失稳和屈曲。

注:可采用基于屈曲荷载系数的屈曲分析校核屈曲稳定性。在这种情况下,应可考虑到如下安全系数:1) 根据激光测量或相当等效方法进行建模,安全系数  $SF=2.0$ ;2) 根据理想形状建模, $SF=4.0$ 。热变形可认为是一种稳定状态,其安全系数仅应使用在压力荷载上。

5.2.2.2.4 递进变形(棘轮变形)

应证明在热荷载与液体压力荷载两者共同作用下,经过 10 次循环,薄膜的任何部分都不会发生递进变形。

5.2.2.2.5 疲劳特性

5.2.2.2.5.1 概述

双向应力条件应使用等效应力或应变予以确定,等效应力或应变分别是根据 Tresca 或 von Mises 理论的主应力和主应变进行计算。

注:疲劳曲线通常是根椐单轴向应变循环疲劳试验确定的。

5.2.2.2.5.2 应变范围

应对所有周期荷载(包括各荷载的组合)的等效应变范围予以评估。

由于薄膜被认为是薄板,规定的周期荷载等效应变范围( $\Delta\varepsilon_e$ )应在平面应力的假设条件下进行计算。

有效应力应与主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别对应,有效应变应与主应变  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  分别对应,其中主应力按  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  排序,主应变按  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$  排序。因此,在包含多个荷载的一个周期中,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  和  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  应分别重新排序。另外,因为薄膜是一层薄板,所以,应假设为平面应力状态( $\sigma_i, i \in \{1, 2, 3\}, \sigma_i = 0$ )。还应注意到即使  $\sigma_i = 0$ , 也有  $\varepsilon_i \neq 0 (i \in \{1, 2, 3\})$ 。

因此,根据 Tresca 理论,等效应变幅应按式(8)进行计算:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \text{MAX} \left\{ \left| \frac{\varepsilon_1}{2} \right|, \left| \frac{\varepsilon_2}{2} \right|, \left| \frac{\varepsilon_3}{2} \right|, \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \right| \right\} \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  为主应变。

而根据 von Mises 理论,等效应变幅应按式(9)进行计算:

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = C \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}}{2} \dots\dots\dots (9)$$

其中系数 C 应见式(10)和式(11):

——塑性,

$$\eta = 0.5; \quad C = \frac{\sqrt{2}}{\eta} \dots\dots\dots (10)$$

——弹性,

$$\eta = 0.3; \quad C = 0.544 \dots\dots\dots (11)$$

5.2.2.2.5.3 疲劳曲线(S-N 曲线)

设计疲劳曲线的选择应考虑到薄膜在低温时易发生低循环疲劳,以及局部产生塑性变形的事实。

如果用对薄膜单元本身的疲劳试验得不到疲劳曲线,在疲劳特性的评估中应使用选取材料的疲劳曲线,并将疲劳曲线提交给买方批准。

Miner 法则应作为损伤累积技术予以使用,以便确定抗疲劳强度。

注 1: 疲劳曲线示例参见“LNG 地下储罐指南 7.3”[16]。

注 2: 疲劳曲线通常以如下内容为依据:

- “最佳适配曲线”,是基于疲劳试验结果的统计分析,该分析给出中间值试验曲线;
- “设计曲线”是基于引入修正系数的“最佳适配曲线”,该系数为应力值除以 2 或周期数除以 20 中的最不利的数值。

不能将这些系数看作为安全系数,但应将其看成为不确定性系数,这些不确定性系数既包含数据分散性,又包含了被忽略的影响(即粗糙度、切割方面的问题等)。这些系数没有考虑局部不连续性(即应力集中系数(SCF)),因此,在计算应力强度时应考虑到这种影响是必要的。

注3:在实践中,疲劳失效通常发生在应力集中处。因此应力集中的影响宜针对所有条件,使用合适的应力集中系数予以评价。应力集中系数是根据有限元应力分析的理论 and 实验研究确定的。

#### 5.2.2.2.6 地震荷载下的稳定性

在操作条件下混凝土外罐应能承受运行基准地震(OBE)和安全停运地震(SSE)荷载。

对于 OBE 地震的情况,应证明:

- 薄膜与锚固系统两者都能吸收地震荷载;
- 薄膜承受的压力在允许范围内;
- 绝热系统承受的压力在允许范围内。

对于 SSE 地震的情况,设置有罐底和拐角保护系统的外罐应能够装存液体。

注:薄膜可失效。

#### 5.2.2.3 模型试验

##### 5.2.2.3.1 概述

进行模型试验时,所有系统构件都应参与试验,每一构件都应以全尺寸进行试验。

注:可在环境温度条件下进行模型试验。

试样的数目应能够保证试验结果的可靠性。

测量装置的位置应通过分析、“反射式光弹法”等方法予以确定。

使用在试验材料表面和外型的应变片和粘合剂应证明是可靠的,此外,应能测定主方向上的应力和应变(解释:主方向是指剪应力为零的方向)。

等效应力或应变的计算应总是以主轴为基础。因此,依据 Tresca 理论,等效应变幅应按式(12)计算:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \text{MAX} \left\{ \left| \frac{\varepsilon_1}{2} \right|; \left| \frac{\varepsilon_2}{2} \right|; \left| \frac{\varepsilon_3}{2} \right|; \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \right|; \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \right|; \left| \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{2} \right| \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

而依据 von Mises 理论,等效应变幅应按式(13)计算:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = C \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}}{2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

其中系数 C 应见式(14)和式(15):

——塑性,

$$\eta = 0.5; \quad C = \frac{\sqrt{2}}{3} \quad \dots\dots\dots (14)$$

——弹性,

$$\eta = 0.3; \quad C = 0.544 \quad \dots\dots\dots (15)$$

##### 5.2.2.3.2 静荷载下的稳定性

应证明薄膜不会发生失稳现象。按规定荷载设计的薄膜,安全系数应取 1.25,

##### 5.2.2.3.3 渐进变形(棘轮变形)

应用模拟操作条件的一个荷载周期时,应能够证明膜的每一部分都保持稳定,在 10 个周期以后,没有渐进变形。

5.2.2.3.4 疲劳特性

储罐的所有薄膜构件都应进行疲劳试验,试验项目包括:

- 热荷载引起的周期性伸长;
- 液体静压荷载引起的周期压力变化(为了完全模拟薄膜的工作条件,在周期压力条件下试验的每一构件应至少要预拉到最大拉伸量)。

“最佳适配曲线”应依据疲劳实验结果的统计分析,ISO 建议的“焊接接头和构件疲劳设计推荐”(1996年5月)中,叙述了统计分析。该分析给出了中间值试验曲线。

疲劳试验的实验结果应以应力或应变主值为依据。

“设计曲线”应由“最佳适配曲线”确定,假设置信度  $\gamma=75\%$ , 幸存概率  $p=95\%$ ;

设计点应按式(16)计算:

$$\text{设计点} = m - k\sigma \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:

- $m$  ——全体试验数据的平均值;
- $\sigma$  ——全体试验数据的标准偏差;
- $k$  ——按照表7确定的系数。

注:本方法在附录B中有说明。

Miner 法则应作为损伤累计技术予以使用,以便确定抗疲劳强度。

表7 S-N 曲线的系数  $k$

取样数量 (Sample size)	$k$
3	3.132
4	2.680
5	2.463
6	2.336
7	2.250
8	2.190
9	2.141
10	2.103
11	2.073
12	2.048
13	2.026
14	2.007
15	1.991
16	1.977
17	1.964
18	1.951
19	1.942
20	1.933
21	1.923
22	1.914

表 7 (续)

取样数量 (Sample size)	<i>k</i>
23	1.907
24	1.901
25	1.895

注 1: 假定为正态分布。  
注 2: 置信度 75%, 幸存概率 95%。

### 5.3 蒸发气容器(外罐)

#### 5.3.1 单容罐、双容罐和全容罐

##### 5.3.1.1 罐底

###### 5.3.1.1.1 环形板

环形板应符合 5.2.1.1.1 的要求。

###### 5.3.1.1.2 罐底中幅板

罐底中幅板应符合 5.2.1.1.2 的要求。

##### 5.3.1.2 罐壁

壁板的最小厚度应符合表 6。

在内压条件下,应按式(17)进行壁板厚度计算:

$$e = \frac{PD}{20S} + c \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

*e* ——所计算的壁板厚度,单位为毫米(mm);

*P* ——内部压力,内部气压和绝热系统压力之和,单位为毫巴(mbar)(1 mbar=0.1 kPa);

*D* ——容器直径,单位为米(m);

*S* ——许用设计应力,单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>);

*c* ——腐蚀裕量,单位为毫米(mm)。

带有中间加强圈的外部罐壁设计应考虑与周向压缩力组合的垂直压力。见 5.2.1.2.3d)。

带有加强圈的罐壁应承受所有适用荷载,至少包括:

——竖直压力,包括:

- 1) 静荷载;
- 2) 活荷载(罐顶活荷载、雪荷载);
- 3) 管道荷载;
- 4) 内部负压;
- 5) 风力倾覆[见 5.2.1.2.3e)];
- 6) 地震倾覆;

——环向压力包括:

- 1) 局部风压作用[见 5.2.1.2.3e)];

## 2) 负压。

在许用双向应力计算中,要考虑的由风在罐顶的抽吸和风对罐的倾覆产生的设计荷载数值,应取决于这些作用是有利的,还是不利的。

加强圈接头应使用全焊透对接焊。在加强圈对接焊缝处和加强圈与立缝交叉处,应设置“鼠孔”。加强圈与罐壁之间的连接应采用双面连续角焊缝,但外部罐壁设计成不存装冷冻液体的情况除外,仰焊缝可以是间断的。

加强圈与罐壁水平焊缝之间的最小距离应为 150 mm。

## 5.3.1.3 罐顶

## 5.3.1.3.1 板材的最小厚度

罐顶板材的最小厚度应为 5 mm(不包括腐蚀裕量)。

## 5.3.1.3.2 带支承结构的罐顶

对于顶板,应使用下列一种或多种焊缝:

- 单面搭接焊缝;
- 双面搭接焊缝;
- 使用或不使用垫板的对接焊缝。

罐顶的支承结构应按照 EN 1993-1-1 进行设计,作为另一种选择,应按照许用应力原理理论设计,但其中顶板焊缝要达到下列焊接接头系数:

- 单面搭接焊缝的焊接接头系数为 0.35;
- 双面搭接焊缝的焊接接头系数为 0.65;
- 使用或不使用垫板的对接焊缝的焊接接头系数为 0.70。

顶板搭接焊的最小搭接宽度应为 25 mm。

罐顶板与罐顶支撑件未焊接处,顶框架应在顶表面的平面内予以交叉支撑。

## 5.3.1.3.3 没有支承结构的罐顶

顶板厚度应设计成能够承受内压和阻止由外部荷载引起的屈曲,应使用下列公式:

——对于内压:

$$e_r = PR_i / 20S\eta \text{ (球形顶)}; \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$e_r = PR_i / 10S\eta \text{ (锥形顶)}; \quad \dots\dots\dots(19)$$

——对于屈曲:

$$e_r = 40R_i \sqrt{\frac{10P_e}{E}} \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中:

- $e_r$  ——顶板厚度(不包含腐蚀裕量),单位为毫米(mm);
- $P$  ——内压,其对顶板的作用低于腐蚀后的顶板重量,单位为毫巴(mbar)(1 mbar=0.1 kPa);
- $R_i$  ——罐顶的曲率半径,单位为米(m);
- $S$  ——许用设计应力,单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>);
- $\eta$  ——焊缝的焊接接头系数;
- $P_e$  ——外部荷载,单位为千牛每平方米(kN/m<sup>2</sup>);
- $E$  ——弹性模量,单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>)。

没有支承结构的顶板应使用对接焊或双面搭接焊进行焊接。

5.3.1.3.4 加强的拱形顶

对于经过加强的拱形顶,其结构应按照 EN 1993-1-1 进行设计。

5.3.1.3.5 受压面积

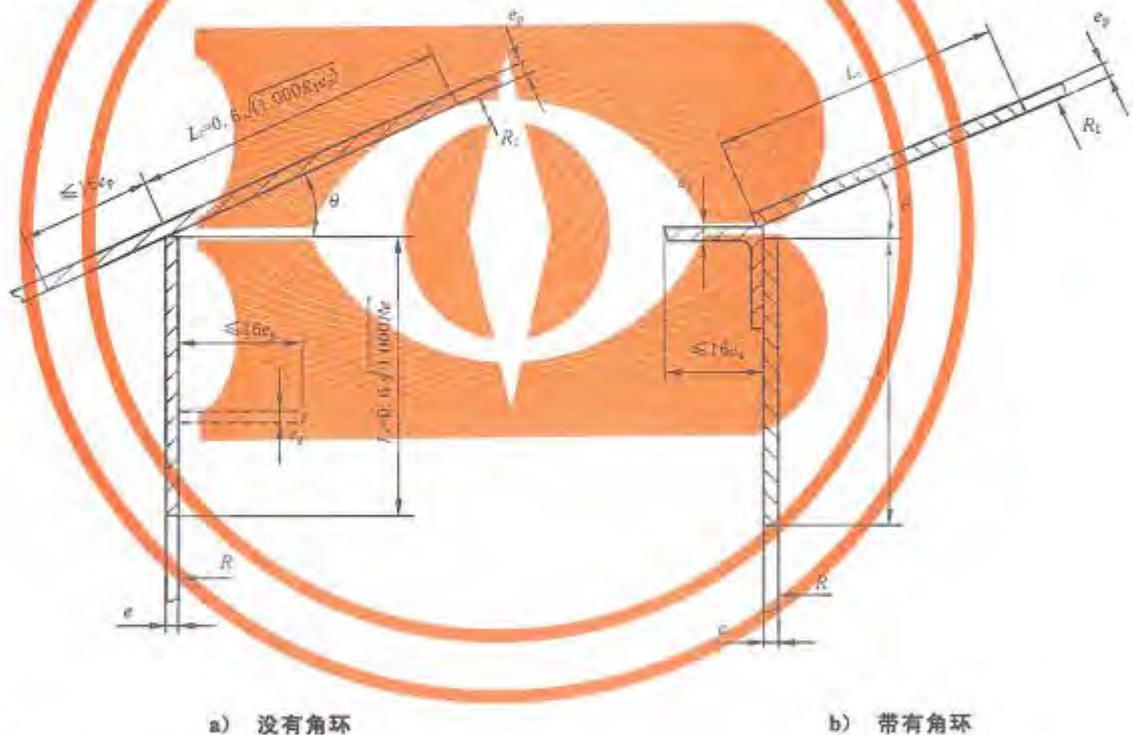
不考虑腐蚀裕量,最小受压面积应按照式(21)确定:

$$A = \frac{50PR^2}{S_c \tan\theta} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- A —— 所需要的受压面积,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);
- P —— 内压,其对顶板的作用低于顶板的重量,单位为毫巴(mbar)(1 mbar=0.1 kPa);
- R —— 罐壁半径,单位为米(m);
- S<sub>c</sub> —— 许用压应力,单位为牛每平方米(N/mm<sup>2</sup>), (见 5.1.2.3);
- θ —— 顶-壁相连接位置上,子午线上顶的坡度角,单位为度(°)。

有效受压面积应由板和/或最大宽度符合图 3 要求的截面积构成:



图例:

- e —— 罐壁厚度,单位为毫米(mm)(不考虑腐蚀裕量);
- ea —— 顶端角环的厚度,单位为毫米(mm);
- es —— 水平桁钢的厚度,单位为毫米(mm);
- ep —— 在抗压环处顶板的厚度,单位为毫米(mm)(不考虑腐蚀裕量);
- Lr —— 有效顶长度,单位为毫米(mm);
- Ls —— 有效罐壁长度,单位为毫米(mm);
- R —— 罐壁半径,单位为米(m);
- R1 —— 罐顶的曲率半径,单位为米(m)(对于锥形顶 R1 = R/sinθ)

图 3 典型的罐壁-罐顶受压面积

在使用顶端角环的部位,其最小尺寸应符合表 8 中的规定。

表 8 顶端角环的最小尺寸

罐壁直径 $D/m$	角环的尺寸 $mm \times mm \times mm$
$D \leq 10$	60×60×6
$10 < D \leq 20$	60×60×8
$20 < D \leq 36$	80×80×10
$36 < D \leq 48$	100×100×12
$D > 48$	150×150×10

单侧面搭接焊接顶板不应计入受压区面积。

注 1: 双面搭接焊顶板可计入受压面积。

受压区应符合一定比例,使得有效受压面水平投影具有不少于储罐水平半径 1.5% 的径向宽度。

受压区域的排列应使受压面质心落在等于转角处相交的两个部件平均厚度 1.5 倍的垂直距离以内,质心位于贯穿转角的水平面以上或以下。

应对受压区由于外部荷载(包括内部负压)导致的拉伸进行校核。

注 2: 宜注意避免在顶支撑部件与受压区连接处受压区内的过度弯曲。

注 3: 对受压区设计,使用胶接,参见文献[16]。

### 5.3.2 薄膜罐

薄膜罐顶上的钢质部件应符合 5.3.1.3。

### 5.4 吊顶

吊顶及其支撑结构应按照最低设计温度条件进行设计。

应按照任何一根悬挂架出现失效仍保证安全进行结构设计。

吊顶通气口(气相管道出口)应使吊顶上下空间之间的压差产生的作用力不超过吊顶的重量,以免吊顶被举升。

### 5.5 管嘴

#### 5.5.1 概述

通往主液体容器和次液体容器的管道连接应符合标准 GB/T 26978.1—2011 中 7.1.6。

#### 5.5.2 管嘴荷载

管嘴应设计成能承受由连接管路和附件所产生的荷载。

#### 5.5.3 罐壁管嘴

##### 5.5.3.1 外径等于和大于 80 mm 的罐壁管嘴

其细部应符合 EN 14015:2004 中 13.1。

##### 5.5.3.2 外径小于 80 mm 的罐壁管嘴

其细部应符合 EN 14015:2004 中 13.2。

##### 5.5.3.3 人孔

如果管嘴用作人孔,则其最小内径应为 600 mm。

#### 5.5.4 罐壁管嘴焊接的详细要求

罐壁管嘴焊接的详细要求应符合 EN 14015:2004 中 13.7。

#### 5.5.5 罐顶上的管嘴

对于设计压力小于或等于 6 kPa(60 mbar), 穿透罐顶上的开孔处应按照 EN 14015:2004 中 13.3 加强和焊接。

对于设计压力大于 6 kPa(60 mbar), 穿透罐顶上的开孔处应按照罐壁开孔的规定加强和焊接, 见 5.5.3。

由于罐顶结构的弯曲或坡度, 致使顶上的开孔呈椭圆形, 需要的加强应以椭圆形开口的长轴方向为基础来进行。

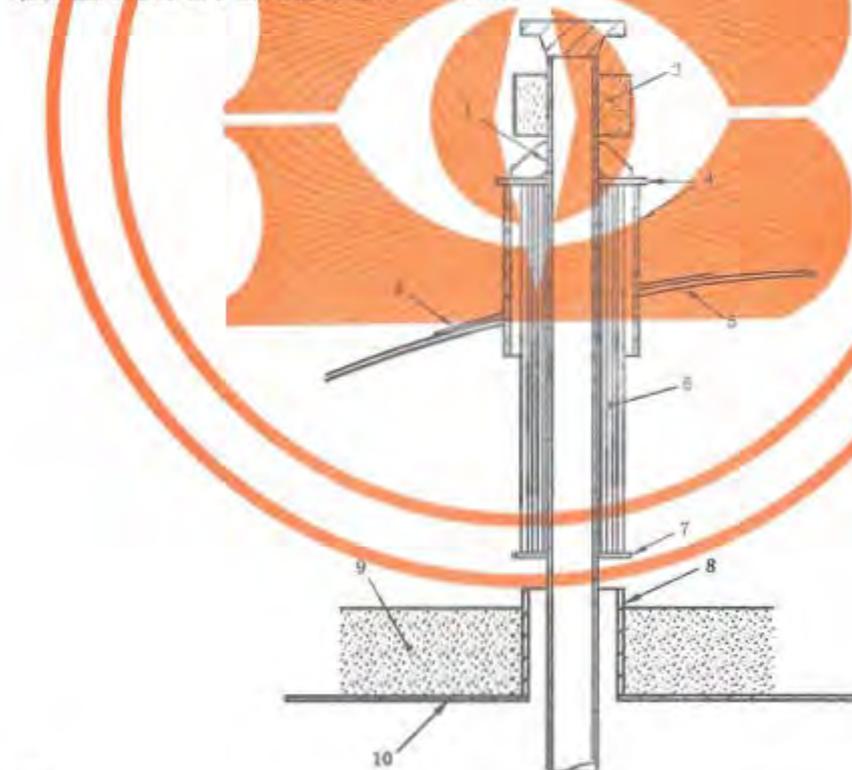
最小管嘴壁厚应根据包括管道荷载在内的适用荷载加以计算。在任何情况下, 管嘴壁厚都不应小于在 EN 10220 中所给出的标准重量管道的厚度。

除买方规定更高级别的部位外, 罐顶上的管嘴和人孔法兰应符合 EN 1759-1:2004 的 class150 等级, 或 EN 1092-1:2001 的 PN25 压力等级。

注 1: 作为选择, 人孔法兰及其盖子可用板材制造, 并按最小压力 3.5 bar(表压)设计。

注 2: 宜认识到, 使用于冷液体或冷蒸发气的罐顶上的管嘴可能需要装配绝热件。见图 4, 其中显示了带有吊顶的罐顶的产品入口管嘴安装有绝热件。

罐顶上人孔的最小公称直径应为 600 mm。



图例:

- 1——管嘴管道(低温);
- 2——管嘴补强板(环境温度);
- 3——外部管道的绝热件;
- 4——绝热件(低温);
- 5——拱形顶(环境温度);

- 6——内部管道的绝热系统;
- 7——绝热系统的支撑环;
- 8——吊顶管套;
- 9——吊顶的绝热系统;
- 10——吊顶。

图 4 典型的带有绝热件的罐顶管嘴

### 5.5.6 法兰钻孔

除壳体和顶上人孔外,作为最低要求,所有配件的法兰都应按照 EN 1759-1:2004 class150 等级进行制造和钻孔。应检查配套法兰的定位,以保证可兼容性。

### 5.5.7 管嘴焊后热处理

管嘴焊后热处理应按照 8.4 进行。

## 5.6 主和次容器的罐底连接

当采用主/次容器的罐底连接时,应考虑下列事项:

- 储罐不均匀沉降;
- 内罐相对于外罐的差异性收缩;
- 管嘴开口应予以加强(双层钢板,加厚环板,或异型板);
- 管嘴周围未支撑区域应降低到最小;
- 管嘴和管道周围的空间应使用合适的绝热材料填充,并应设置足够的局部化基础加热设施。

## 5.7 容器之间的连接

应注意下列事项:

- 由内、外罐之间的相对移动产生的热应力和流体静压力;
- 应考虑内、外罐之间的连接件上的热量传递阻隔;

注:应受吸收连接件(例如,柔性环)可能是必要的,以保证相对运动不会在内罐和/或外罐上引发不可接受的局部应力。

- 在难以进入的内罐壁与外罐壁之间的环形空间,不应安装法兰接头;
- 对于内罐顶上开口与外罐顶上开口之间的连接,应设计成能适应两个顶之间的差异性位移,穿透吊顶的连接件应能够透过吊顶自由移动,从而避免在外顶或吊顶上产生附加荷载。

## 5.8 其他细节

### 5.8.1 罐体锚固系统

关于锚固系统的设计,应考虑到下列事项:

- 内罐和外罐都应分别按所有最不利荷载组合进行设计;
- 应注意穿过外罐底部的内罐锚固系统的设计,以确保液密性和能够适应所有设计条件下温差位移的柔性;
- 锚固点应等距离地沿罐体周围均匀分布,最大间距为 3 m;
- 不对锚固定系统施加任何初始拉力。只有在罐容器的壁内产生抬升力时,锚固系统才应起作用。应采取措施确保在储罐的整个设计寿命期间,锚固定系统螺栓不会松弛或失效;
- 罐壁和基础的锚固附件应根据锚固螺栓和拉索处于全屈服状态予以设计;
- 锚固系统的设计应允许在试运之前由于沉降需进行的调整;
- 锚固系统设计应考虑热位移导致的弯曲;
- 锚固系统不应与罐壁直接连接,而应连接到垫板或托架上。所有锚杆、螺栓或拉索的最小横截面面积应为 500 mm<sup>2</sup>;
- 对于直接暴露在空气中的固定锚的锚固杆、螺栓或拉索的所有表面至少应增加 1 mm 的腐蚀裕量;
- 需要热隔断设施。应限制热量向罐体结构和基础的较冷部件传递,因此不会由于结冰而导致锚固系统或储罐的失效。

## 5.8.2 铭牌

每一罐体上都应安装至少给出下列信息的铭牌：

- 承包商名称；
- 序列号；
- 建造年份；
- 设计规范/标准；
- 储罐、装置编号；
- 产品设计密度和温度；
- 最大设计压力；
- 最高设计液位；
- 存储容量。

## 6 制造

### 6.1 材料的处理

所有用于主液体容器和次液体容器的板材都应分别独立搬运和存放，以使各种材料不会互混。应采取足够的防风雨保护措施。“低温材料”应作适当标记。

不锈钢材料应使用合适的设备存储和搬运，以避免表面受到污染。应防止与锌、镀锌工具的任何接触。

应避免9%镍钢磁化，在场地交货之时，残留磁性应不超过30Gs。

焊接耗材应按照焊接耗材标准规定的条件和/或供应商的推荐进行保护和存储。

在罐体安装完毕以后，按照EN 10204:2004,类型3.1或更高标准订购的具有合格证的材料，其标志仍应保持可见。如标志在制造过程中被涂抹掉，至少应将一个标志移置到罐体完工以后可以看到的位置上。

注：最好的标志方法是使用最小圆角半径为0.25 mm的低应力印模的压印方法。这种方法并不适用于厚度小于6 mm的板材。可以使用喷涂或喷墨标记的方法代替压印方法。

### 6.2 板材准备和允许误差

#### 6.2.1 罐壁板

热切边缘应打磨到露出明亮金属，并且除去氧化层和熔渣。

允许误差应根据钢材制造工艺、车间加工程序和安装方法予以确定。罐壁环形板材的最大宽度应控制在设计数值的上下4 mm以内。

对于薄膜罐，板材应为冷轧制完成的，无可见的缺陷。

#### 6.2.2 环形板

所有边缘板的外边缘以及两个短边都应按照EN 10160:1999中S<sub>2</sub>等级，在预制下料以后进行超声波检查，检查宽度为150 mm，检查是否存在层状缺陷。

#### 6.2.3 管嘴

如果主液体容器或次液体容器的管嘴颈采用板材卷制，则管嘴颈上的纵向焊缝应进行100%的射线照相检验或超声波探伤检验。

如果罐壁管嘴颈采用厚度大于或等于25 mm的碳钢板材制造，则应在罐壁和加强板的焊缝区域进

行超声波检验,检查是否存在层状缺陷。

如果法兰是用板材制造的,应对法兰按照 EN 10160,1999 进行超声波检验,以确保不存在层状缺陷。

平焊法兰应在两侧进行焊接。

所有对焊法兰应采用全熔透对接焊。

#### 6.2.4 加强板

在安装时,应将加强板加工成与所焊接的罐壁具有相同的曲率。

所有管嘴加强板上至少应设置一个检查螺纹塞孔。

### 6.3 允许误差

#### 6.3.1 基础的周边允许误差

如果罐壁下部为混凝土环梁,环梁顶面与以平均高度测定的平面差在任意 10 m 弧长上不应超过  $\pm 3$  mm;整个圆周上,不应超过  $\pm 6$  mm。

如果使用混凝土基础底板,罐壁向内 300 mm 和向外 300 mm 区域应符合混凝土圈梁水平度允许误差要求。

#### 6.3.2 基础的其他表面允许误差

使用长度为 3 m 的靠尺测量,任意位置的偏差都不应超过 15 mm。

#### 6.3.3 罐底板允许误差

通过控制焊接次序,安装临时固定卡等方法应使底板的局部变形最小,在小于 3 m 的距离内,局部变形不应超过 75 mm。

#### 6.3.4 罐壁与罐底的连接

在罐底上安装和焊接第一圈(层)罐壁板以后,在罐壁底部以上 300 mm 高度上,水平测量的内部半径应在表 9 中给出的限度内。测量应在每块罐壁板的中心点进行。

表 9 半径允许误差

直径 $D$ /m	半径允许误差/mm
$D \leq 12$	$\pm 12$
$12 < D \leq 46$	$\pm 19$
$46 < D \leq 76$	$\pm 25$
$D > 76$	$\pm 30$

#### 6.3.5 圆度

在任何高度上,最大直径与最小直径之间的偏差不应超过直径的 1%,或 300 mm,选用两者之间的较小值。

#### 6.3.6 板材的局部变形

应检查壁板上的局部变形,在竖直方向上使用 1 m 长直尺检查,在水平方向上使用 1 m 长的弧形样板检查。水平测量的弧形样板的弧度应与罐的设计半径吻合。

设计与竣工纵断面之间的最大偏差应取表 10 中的数值。

表 10 设计与竣工纵断面之间的最大偏差

板材厚度 $e$ /mm	偏差/mm
$e \leq 12.5$	16
$12.5 < e \leq 25$	13
$e > 25$	10

### 6.3.7 焊缝处的局部变形

焊缝位置的局部角变形(棱角, peaking), 可以是相对于罐中心的向外和向内的棱角(见图 5), 允许误差值对两种情况均应适用。

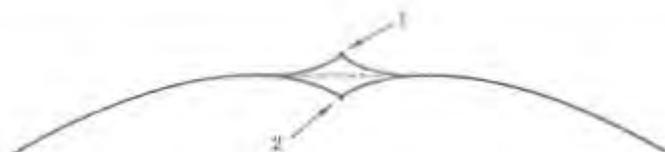
应使用图 6 中的量规测量棱角。应按照表 11 设置量规的棱角最大允许值(对正矢量进行修正)。

只要外侧支腿中的一个没有离开表面, 则棱角应是可接受的。

注: 焊接棱角引起一个死角长度, 不适合使用弧形样板, 因此弧形样板中间一段应按照焊缝宽度开出缺口, 消除其影响。

表 11 焊缝位置上局部变形的允许误差

板材厚度 $e$ /mm	最大允许误差/mm
$e \leq 12.5$	12
$12.5 < e \leq 25$	9
$e > 25$	6



图例:

1——向外棱角;

2——向内棱角。

图 5 向外和向内的棱角

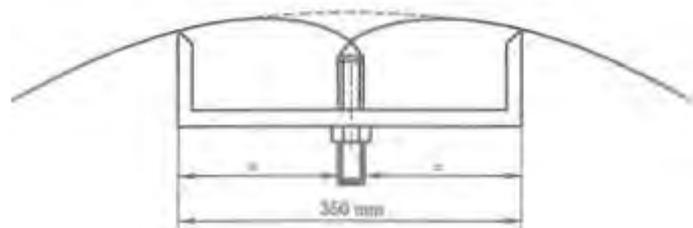


图 6 用于测量棱角的量规

### 6.3.8 竖直允许误差

#### 6.3.8.1 钢质储罐

罐壁顶端相对于罐壁的底部的最大凸起度(out-plumpness)不应超过总高度的  $1/200$ , 或 50 mm, 取其较小值。这个误差同样适用于各层(圈)壁板。

#### 6.3.8.2 衬里

衬里的最大凸起度允许误差不应超过 100 mm。

### 6.3.9 板材的不平行度允许误差

#### 6.3.9.1 立缝

壁板在立缝位置上的直线度允许误差不应超过表 12 中给出的数值。

表 12 立缝位置上的错边(misalignment)误差

板材厚度 $e$ /mm	最大误差/mm
$e \leq 15$	1.5
$15 < e \leq 30$	板材厚度 $e$ 的 10%
$e > 30$	3

#### 6.3.9.2 水平焊缝

图纸上所显示的定位与实际位置之间的偏差不应超过上层板材厚度的 20%, 但最大偏差为 3 mm。

### 6.3.10 薄膜系统的允许误差

整个薄膜系统(包括膜、绝热板、胶和锚等)都应连接到混凝土墙壁或混凝土底座或由它们支撑。因此,承包商应规定混凝土罐体的允许误差,该允许误差适用于各种荷载工况。

## 6.4 罐顶

罐顶的建造方法应保证在整个安装过程中罐顶的稳定状态。

如果采用临时支撑结构,承包商应采取所有必要的预防措施以避免支撑框架发生扭曲和结构整体旋转。

## 6.5 临时附件

各种临时附件应使用与要附着的材料所使用的相同的焊接工艺进行焊接。临时附件应使用热切割、刨削,或打磨的方法除掉。在热切割或刨削焊缝以后,应保留 2 mm 材料,并磨平到光滑表面。在除掉临时附件以后,应进行裂纹探测。

不允许在薄膜上焊接临时附件。

## 7 焊接工艺

### 7.1 概述

包括修补焊和定位焊在内的所有焊接,都应按照 EN ISO 15607、EN ISO 15609-1:2004 和

EN ISO 15614-1的规定制定焊接工艺规程(WPS)和焊接工艺评定(Welding Procedure Approval Record—WPAR)。

对于主液体容器和次液体容器,对于每个新工程项目,不管以前的批准,焊接工艺都应再次经过批准,所使用的钢材应由同一钢厂、用同一炼钢工艺制造。

对于在焊接期间仍然可能保留板材上预先喷涂的保护漆的情况下,批准的焊接工艺应在有喷涂保护漆的板材上进行。

## 7.2 焊接工艺评定(WPAR)的要求

应为下列每种情况制定一套相应的 WPAR。

对于在水平位置用于罐壁环焊缝的每项焊接工艺,应为下述规定的每一种厚度完成一块对接焊缝试板:

- 试板厚度小于或等于罐壁最小厚度;
- 试板厚度大于或等于罐壁最大厚度。

对于在垂直位置用于焊接罐壁立缝的每项焊接工艺,应为下述所规定的每一种厚度完成一块对接焊缝试板:

- 试板厚度小于或等于罐壁最小厚度;
- 试板厚度大于或等于罐壁最大厚度。

作为最低要求,上面指出的试验条件下批准的厚度范围应符合 EN ISO 15614-1 中的各项要求。

## 7.3 冲击试验

为焊接工艺评定(WPAR)进行的焊缝金属和热影响区(HAZ)的冲击试验以及焊接产品试验,应符合下列内容,以及表 2 的要求。

- 每一组试样应由三套试样组成。一套试样取自焊缝金属,一套试样取自热影响区。
- 焊缝金属和热影响区夏比 V 型缺口冲击试件应从垂直于焊缝和衬材金属表面以下最多 2 mm 位置处提取。用于冲击试验的试验板材的轧制方向应与焊缝平行,但用于立缝的试验板材除外,轧制方向可与焊缝垂直。
- V 型缺口应切割成垂直于焊缝表面。
- 在热影响区中,缺口应距熔合线(1~2)mm,并且在焊缝金属中,缺口应位于焊缝中心线。

## 7.4 9%镍钢

EN ISO 15614-1 要求的横向拉伸试件的拉伸数值,对于立缝应不低于设计值,和/或对于水平横缝应不低于 80%设计值。如果裂纹出现在焊缝金属上,则焊缝金属极限拉应力和屈服应力(弹性极限应力)应按下列方法确定:

- 应使用熔敷隔离层的碳钢板材制备两套全焊缝金属试验板材(一套用于 1 G 位置,另一块用于 3 G 位置);
- 从每块试验板材上应制备两件全焊缝金属试样。

## 7.5 焊工与焊接操作工

### 7.5.1 单容罐、双容罐和全容罐

焊工应按照 EN 287-1 获得批准。焊接操作工应按照 EN 1418 获得批准。

### 7.5.2 薄膜罐

焊接试验应在实际组焊的薄膜板上进行。

作为最低要求,应在下列位置和方向上进行批准(评定)试验:

- 对于罐底,为平焊位置;
- 对于罐壁立缝,为向上立焊;
- 对于罐壁的水平焊缝,贴边上向,或下向。

每个试样都应使用低倍照相方法进行检验。

在焊接生产过程中,应对每个焊工或每个焊接操作工进行定期评定。应根据所获得的生产结果确定评定的间隔时间。作为最低要求,应每个月对焊工测试一次,焊接操作工应每个星期测试一次。

## 7.6 产品试板

### 7.6.1 单容罐、双容罐和全容罐

对于主液体容器和次液体容器,作为最低要求,应保证罐壁最厚板和罐壁最薄板的纵焊缝以及每一种相应的焊接工艺至少各制作一块产品焊接试板。

产品试板的焊接和试验应在罐体建造过程中尽可能早的时间进行。

如果底部罐壁与顶端罐壁的厚度差大于或等于 20 mm,则应在立缝位置增加一组生产试件,其大约厚度为最厚一圈壁板和最薄一圈壁板之间的中间厚度,并应考虑到使用的每种焊接方法。

这些试板的最小宽度应为 400 mm(焊缝两侧各 200 mm),试验板材应足够大,以避免加热对其机械特性产生影响。

产品试板所使用的试验材料应是建造储罐所使用钢材的炉次之一。

另外,用于焊接产品试板的焊接耗材应与焊接相应产品焊缝的耗材属于同一生产商和同一型号。

如果罐体安装方法不能使试板安放在一道立向焊缝的末端,则应在现场合适的地方,采用 WPS 中用于焊接有代表性产品焊缝的方法完成试件焊接。

产品试板的检验和试验要求应与“焊接工艺评定”的要求相同。仅需进行焊缝金属和热影响区的夏比 V 型缺口冲击试验。

允许进行重新试验。在重新试验失败的情况下,应采取纠正措施,应通知买方。

### 7.6.2 薄壁罐

作为最低要求,薄壁板的产品试板应由罐壁竖直和水平焊缝以及罐底平直焊缝制备。

## 8 焊接

### 8.1 定位焊缝与临时焊缝

定位焊缝与临时焊缝应由考试合格的焊工完成。

注:如果定位焊缝是牢固的,且随后的焊缝可完全熔透定位焊缝,则定位焊缝不需除去。

### 8.2 气候条件

承包商应采取措施确保焊接免遭潮湿、雨水的作用,还要采取防风措施。

当母材金属温度低于 +5 ℃ 时,接头两侧的材料应进行预热。预热应使整个接头厚度上的温度超过 5 ℃。

### 8.3 预热

如果需要预热,预热应包含待焊接部分的整个厚度,预热宽度为板材厚度的 4 倍,或为 75 mm,选二者之中的较大者,在焊接开始前可从任何方向进行预热。

预热应符合 EN 1011-2 的规定。

8.4 焊后热处理

罐壁管嘴和人孔应焊接到壁板上或焊接到加厚插入板上,焊接组合件在安装到罐体上之前应进行焊后热处理,除非下列例外之一:

- 组合件中设有厚度大于或等于 16 mm 的部分;
- 组合件中设有厚度大于或等于 30 mm 的部分,而且管嘴的公称直径小于 300 mm;
- 安装在设计成仅装存蒸发气的外罐壁上的管嘴或人孔。

应为热处理制订一份热处理方案。

注 1: 这些要求适用于碳锰钢,不适用于 1.5% 和 9% 镍钢、奥氏体不锈钢和非铁材料。

当冷压成型过程中形成的板端纤维应变超过按式(22)计算结果的 3% 时,则应对冷压成型的 9% 镍板进行焊后热处理(或消除应力):

$$s = \frac{50t}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_0}\right) \dots\dots\dots(22)$$

式中:

- s —— 应变, %;
- t —— 板材厚度,单位为毫米(mm);
- R<sub>f</sub> —— 最终半径,单位为毫米(mm);
- R<sub>0</sub> —— 初始半径(对于平板为无限大),单位为毫米(mm);

应连续地、自动地记录足够多点处的温度,以确保在进行热处理的整个组合件都处于规定的温度范围内。

在组合件放到炉中的时刻,炉内温度不应超过 400 ℃。

在 400 ℃ 以上时的加热速度(℃/h)应不超过:

$$\frac{5\ 500}{e} \text{ 但最大速度为 } 220 \text{ } \dots\dots\dots(23)$$

其中:e —— 罐壁板或插入板厚度,单位为毫米(mm)。

在加热期间,在长度为 4 500 mm 的任何间隔内,整个被加热组合件上的温度变化应不超过 150 ℃。在保持温度期间,整个组件温度应保持在 580 ℃ 到 620 ℃ 之间的范围内。对于调质钢材,热处理应向制造商进行咨询。

炉内空气应予以控制,以避免表面过度氧化。火焰不应直接喷射到组合件上。

当组合件获得所规定的均匀温度后,应保持恒温。保温保持时间按照每毫米罐壁厚度 2.5 min(分钟)或插入板最少 1 h(小时)考虑。

注 2: 如有必要,可使用表 13 中给出的温度-保温时间组合。

表 13 温度较低时的保温时间

温度/℃	保温时间/(每毫米厚度分钟数)
500	12.5
540	7.5
570	5.0

组合件应在炉中冷却到 400 ℃,冷却速度不超过:

$$\frac{5\ 500}{e} \text{ 但最大速度为 } 220 \text{ } \dots\dots\dots(24)$$

其中:

$e$ ——罐壁板或插入板厚度,单位为毫米(mm)。

注3:在400℃以下,组件可以在静止空气中冷却。

组装的板材应予以适当加固,以便在PWHT(post-weld heat treatment)过程中保持其形状。

## 9 检验

### 9.1 无损检测(NDE)人员的资质

无损检测人员应具有与其从事工作相应的资质。该资质应通过NDT和认证程序的考核和合格书面确认,认证程序应基于EN 473。

注1:也可使用ASNT SNT-TC-1A、CP 189或ACCP。

注2:也可使用等效的现行中国标准。

### 9.2 检验程序

所有NDE检验应由独立于施工方的部门来进行。

应制定检验和试验程序。作为最低要求,每一程序应指明:

——检查和试验程序的范围;

——操作条件:

- 1) 使用设备的类型;
- 2) 耗材产品的类型和特性;
- 3) 试验参数(持续时间、温度等);
- 4) 辨认结果的条件(照明等)。

### 9.3 检验的类型

#### 9.3.1 材料检验

承包商应确保维护好材料的标记/识别系统。该系统应做到在建造过程中的任何时候,材料能被识别。

#### 9.3.2 焊缝的检验范围

##### 9.3.2.1 单容罐、双容罐和全容罐的主液体容器和次液体容器

检验应按照表14来进行。

表14 主液体容器和次液体容器的焊缝检验

储罐部位	组件类型	目视检验/ %	渗透探伤/ %	磁粉检验/ %	真空箱检查/ %	肥皂液检查/ %	射线或超声波检查/ %
底板	对接焊缝	100 <sup>a</sup>	—	—	100 <sup>a</sup>	—	—
	角焊缝	100 <sup>a</sup>	—	—	100 <sup>a</sup>	—	—
底边缘板	径向对接焊缝	100	—	—	100	—	100
底-壁角焊	角焊缝	100 <sup>b</sup>	—	—	—	100 <sup>b</sup>	—
罐壁	对接焊缝	100 <sup>b</sup>	—	—	—	—	见表15

表 14 (续)

储罐部位	组件类型	目视检验/ %	渗透探伤/ %	磁粉检验/ %	真空箱检查/ %	肥皂液检查/ %	射线或超声波检查/ %
壁或底上管嘴	纵向焊缝	100 <sup>a</sup>	—	—	—	—	100
	焊颈法兰与接管 $d_s \geq 100$ mm	100 <sup>a</sup>	100 或 100 <sup>b</sup>		—	—	10
	焊颈法兰与接管 $d_s < 100$ mm	100 <sup>a,c</sup>	100 或 100		—	—	—
	平焊法兰与接管 角焊缝	100 <sup>a</sup>	100 或 100		—	—	—
壁板装配管嘴 (插入板式和 加强板式)	管嘴与罐壁 或插入式焊缝	100 <sup>a</sup>	100 或 100		—	—	—
	管嘴与加强板	100 <sup>a</sup>	100 或 100		—	—	—
	加强板与罐壁	100 <sup>a</sup>	—	—	—	100	—
	插入板与罐壁	100	—	—	—	—	100
永久托架与垫板	角焊缝	100	100 或 100		—	—	—
加强圈	加强圈主体对 接焊缝	100	—	—	—	—	100
	加强圈与罐壁 角焊缝	100	100 或 100		—	—	—
注： <sup>a</sup> 在水压试验之前与之后进行。 <sup>b</sup> 在两侧。 <sup>c</sup> 如果需要，在焊接热处理之后进行。 <sup>d</sup> 一侧。 <sup>e</sup> 进行 100% 渗透探伤或 100% 磁粉检验。							

表 15 主液体容器和次液体容器罐壁焊缝射线照相/超声波检验范围

检验的类型	焊缝		
	垂直/ <sup>a</sup> %	T 字形/ <sup>a</sup> %	水平/ <sup>a</sup> %
射线或超声波检验	100	100	5
注： <sup>a</sup> 400 mm 底片水平放置。 <sup>b</sup> 不包括 T 字形焊缝。			

## 9.3.2.2 薄膜罐的主液体容器

对于不锈钢膜,应进行下列焊缝检验:

- 百分之百的目视检验;
- 氨渗漏试验;
- 每天要从每种类型焊缝上抽查5%进行着色渗透检验。

## 9.3.2.3 单容罐、双容罐和全容罐的蒸发气容器

检验应按照表16进行。

表16 蒸发气隔层/衬里的检验

储罐部位	组件的类型	目视检验 %	渗透检验 %	磁粉检验 %	真空箱检查 %	肥皂液检查 %	射线或超声检查 %
底板	对接焊缝	100	—	—	100	—	—
	角焊缝	100	—	—	100	—	—
底边缘板	径向对接焊缝	100	—	—	100	—	—
底-壁	角焊缝	100	—	—	100	—	—
罐壁	对接焊缝	100	—	—	100	—	见表17
受压区	竖直和径向 对接焊缝	100	100或100*		—	—	25
	周向对接焊 或角焊缝	100	100或100		—	100	—
顶	角焊缝	100	—	—	—	100	—
	对接焊	100	—	—	—	100	—
壁、底或 顶上的管嘴	纵向管嘴焊缝	100	—	—	—	100	—
	法兰到管嘴体	100	—	—	—	100	—
管嘴对罐壁,或 插入板,以及带 有加强板的管嘴	管嘴与壁或 插入板的焊缝	100	100或100		—	100	—
	管嘴与加强板 连接	100	100或100		—	100	—
	加强板与罐壁	100	—	—	—	100	—
	插入板与罐壁	100	—	—	—	—	100
临时托架	除掉托架以后	100	100或100		—	—	—
永久托架和垫板	角焊焊缝	100	100或100		—	—	—
加强圈(抗风圈)	加强圈主体 对接焊缝	100	100或100		—	—	—
	对罐壁的角焊缝	100	—	—	—	—	—
* 进行100%渗透探伤或100%磁粉检验。							

表 17 蒸发气容器壁板焊缝射线照相/超声波检验范围

检验类型	焊缝		
	竖直/%	T字形*/%	水平/%
射线或超声波检验	5	25	1
* 50%的射线照片应在 400 mm 底片水平放置的情况下拍摄,而另外 50%的射线照片应在竖直放置的情况下拍摄。			

#### 9.4 目视检验

目视检验应按照 EN 970 进行,检查焊道、形状和尺寸,发现焊缝及板材上,在制造和建造过程中安装在罐体上的管嘴及所有附件上的表面缺陷。

目视检验应在任何其他无损检验或试验之前进行。

#### 9.5 着色渗透检验

着色渗透探伤检验应按照 EN 571-1 进行。

在特定检验中使用的所有着色渗透产品应是相容的。

承包商应确保着色渗透产品对将要进行检查的项目无污染风险和无存储风险。

#### 9.6 磁粉检验

磁粉检验应按照 EN 1290 进行。

所使用磁粉检验方法应避免向被检验部分上通入电流。应使用在被检验部分形成封闭磁路的可移动电磁铁。

应为提供给买方或检查人员的文件中规定使用的检查程序和设备以及探测和消除缺陷的方法。

程序应指明需要给出正确解释的表面质量。

9%镍钢不应使用磁粉检验方法。

#### 9.7 真空箱检查

真空箱检查应按照 EN 1593 进行。

板材应清洁,焊缝应除去油污和不存在可能影响检验质量的焊渣或鳞片。

所使用的抽气系统应保证 30 kPa 的最小真空度。

所使用的肥皂水应具有:

- 高润湿力;
- 低粘性;
- 低表面张力;
- 高发泡能力。

#### 9.8 氦泄漏试验

应进行氦泄漏试验。

注:在没有标准可供使用之前,可使用 NF A09-106。

## 9.9 肥皂液检查

### 9.9.1 概述

压力下的肥皂液检查应按照 EN 1593 来进行。

### 9.9.2 罐壁与罐底之间的双面角焊缝

罐壁与罐底之间采用双面角焊缝时,应将压力最小为 500 mbar(表压)的空气通过为检验提供的螺纹孔注入到角焊焊缝之间的空间中,并应在检验期间保持该压力。肥皂水应使用刷子或喷洒的方法涂撒到焊缝上。在试验完毕后,应封闭螺纹孔。

应注意确保两道角焊缝之间的试验压力在罐壁圆周上保持连续。

### 9.9.3 加强板

在用肥皂水对加强板焊缝适度润湿后,应通过螺纹孔注入压力最小为 500 mbar(表压)的空气。压力保持时间应不少于 30 s。在试验完成后,应封闭螺纹孔。

### 9.9.4 罐顶

在钢质顶气压试验后,应使用肥皂水润湿外部角焊缝。在检验期间应保持设计压力。

## 9.10 射线检查

射线检查应按照 EN 1435:1997,试验类别 B,表 1 进行。

应根据检验材料的厚度和面积选取放射源。

使用的底片应符合 EN 584-1 和 EN 584-2。

射线照相底片的长度应为 400 mm。如果在焊缝的任何一侧一条 10 mm 宽的带状母材金属是可见的,其内没有任何底片标记,应允许使用窄底片。

图像质量指示器应符合 EN 462-1 或 EN 462-2。

焊缝的底片应加以标记。标记和位置应和有关焊工和焊接操作工的身份一起显示在图纸上。每张底片应标记有罐体坐标及底片在罐体上的位置。

底片最少应保存 5 年时间,以备整理分析。按照订购单中的规定,底片由承包商/安装商或者买方保管。

## 9.11 超声波检验

作为辅助检验工艺,超声波检验应按照 EN 1714:1997 进行。

在用超声波检验代替射线检查的位置,只有标准化的、产生永久检验记录的、可重复的程序才是可以接受的。SY/T 0608—2006 附录 U 提供了满足此项要求的标准。

## 9.12 验收标准

### 9.12.1 射线检查

焊缝缺陷的验收标准应以 EN 12062:1997 和质量水平 B 为基础的 EN ISO 5817:2003 为依据。

### 9.12.2 超声波检验

在使用超声波检验替代射线照相检验的地方,SY/T 0608—2006 的规定则应适用于本部分,包括 I 型到 V 型材料的验收标准。对于 I 型到 III 型材料,在不能使用上述超声波检验或需要人工超声波检验的

情况下,应使用符合 EN 1714:1997 的人工程序和采用符合 EN 1712:1997 的验收水平。当需要对Ⅳ型和Ⅴ型材料进行人工超声波检验时,应编制专门程序,并审定。

注:对于超声波检验,还没有一部以断裂力学为基础的验收准则的 EN 标准。SY/T 0608—2006 中已经增加了规则和以断裂力学为基础的验收准则,允许超声波检验替代射线照相检验。

### 9.13 水平焊缝中不可接受的缺陷

#### 9.13.1 概述

当发现不可接受的缺陷时,应进行焊缝修理,然后应进行额外的检验。

#### 9.13.2 自动焊

在原区域的每一侧应再进行一次射线照相检验,或 1 m 长超声波检验。

如果追加照片或超声波检查中有一处不合格,则应对当天出现问题的焊机所焊的全部焊缝进行检查。

#### 9.13.3 手工作

在原区域的每一侧应再进行一次射线照相检验,或 1 m 长超声波检验。

如果追加照片或超声波检查中有一处不合格,则应对当天出现问题的焊工所焊的全部焊缝进行检查。

### 9.14 研磨后可接受的局部变薄

如果探测到表面缺陷,应通过研磨的方法彻底将表面缺陷除掉,然后应对表面进行更深入的检查。如果满足下列两个条件,应允许相对于原厚度的局部板材变薄。

- 在  $6e \times 6e$  的面积上( $e$  为板材厚度),板材最终厚度应不小于所订购板材厚度的 95%;
- 任意两个变薄面之间的距离至少应等于最大变薄面的外接圆的直径。

附录 A  
(资料性附录)  
薄膜上的荷载

宜考虑到显示在表 A.1 到 A.3 中的下列各项典型静荷载、周期荷载和偶然荷载。

表 A.1 静荷载

设计压力	设计液体压力加上设计气体压力
热荷载	温度差异所导致的荷载
机械荷载	因外力,例如自重,预应力墙体,混凝土收缩等所导致的荷载(除了温度和压力变化的所有机械荷载)。

表 A.2 周期荷载

液体压力	最大液体高度与最小液体高度之差	根据罐体设计寿命和预计的操作条件确定的周期数
热荷载	在冷却过程中的温度变化因为灌注和排空而导致的温度变化 <sup>a</sup>	根据罐体设计寿命和预计的操作条件确定的周期数
<p>注:业主可以提供罐体操作条件方面的信息。如果业主没有提供该类信息,则应根据下列假定进行设计:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>——每星期装载/卸载一次;</li> <li>——每两年停止使用/启动一次。</li> </ul> <p><sup>a</sup> 应向买方提供描述罐体内气体温度分布的曲线,以获得批准。</p>		

表 A.3 偶然荷载

地震荷载(不考虑疲劳)	OBE
	SSE

附录 B  
(资料性附录)  
确定薄膜上的荷载与疲劳曲线

宜遵循图 B.1 中所给出的流程图。

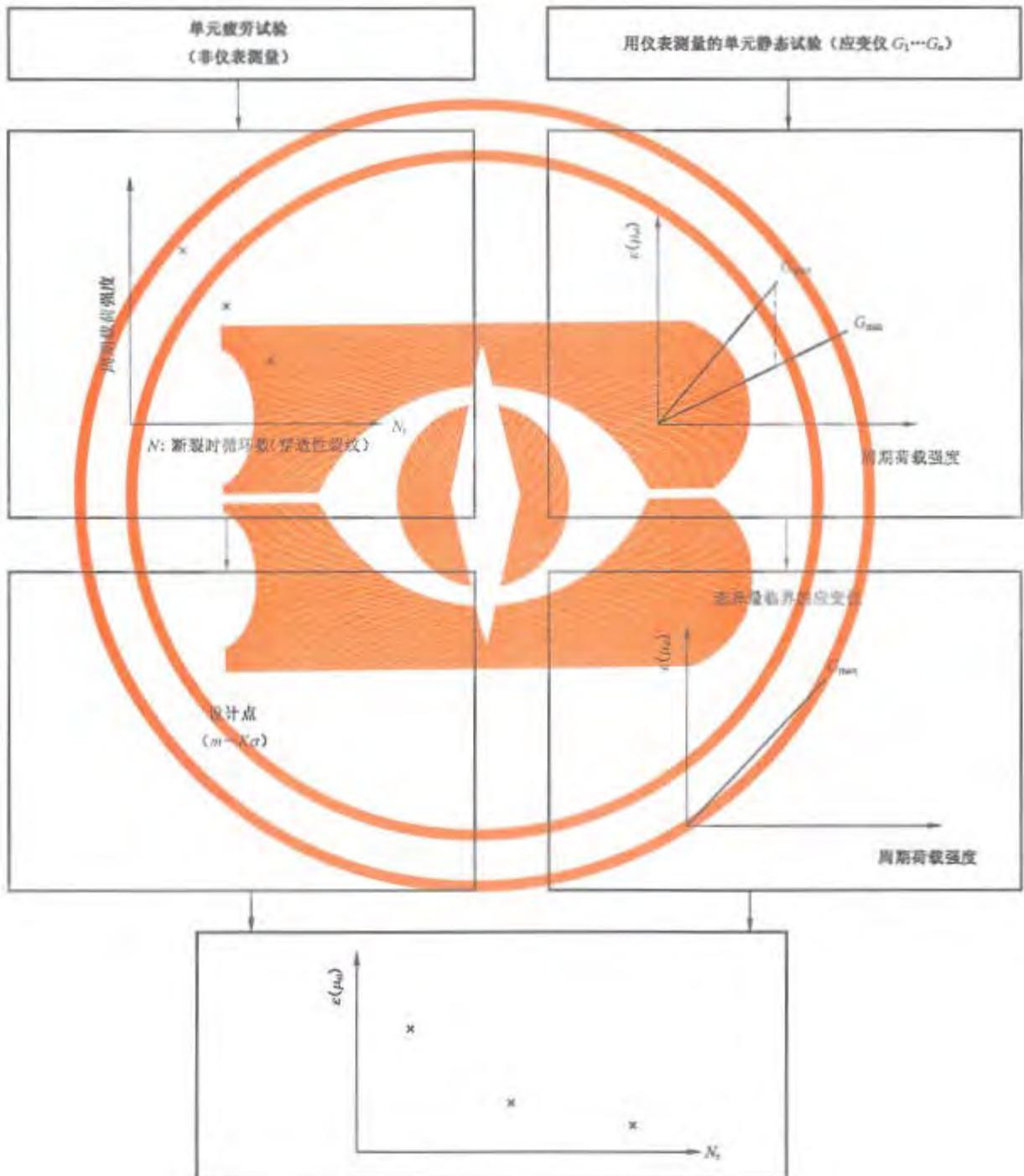


图 B.1 确定薄膜上的荷载与疲劳曲线流程图

## 附录 NA

(资料性附录)

## 本部分与 EN 14620-2:2006 技术性差异及其原因

表 NA.1 给出了本部分与 EN 14620-2:2006 技术性差异及其原因的一览表。

表 NA.1 技术性差异

序号	本部分的 章条编号	技术性差异	原因
1	1	删除“冷冻液化气 (refrigerated liquefied gas)”;改为:“液化天然气(LNG)”。 删除“冷却液化气”;改为:“液化天然气”。	本部分修改采用 EN 14620-2:2006;保留与液化天然气有关的内容,删除与液化石油气、乙烷、乙烷和类似的碳氢化合物以及液氨等相关的内容。删除内容以适应修改采用。
2	2	删除“ISO 261 ISO 一般用途米制螺纹一般方案 ISO general purpose metric screw threads—General plan”,改为:“GB/T 193—2003 普通螺纹 直径与螺距系列”。 删除 ISO 935-2:1998 ISO 一般用途米制螺纹 允许误差 第 2 部分:一般用途外螺纹和内螺纹的尺寸限制 中等质量”,改为“GB/T 9146—2005 普通螺纹 中等精度、优选系列的极限尺寸”。	原标准已经转化成国家标准
3	4.3.1.2.1 表 1	删除“丁烷”;改为“温度-10℃产品”。 删除“氨”;改为“温度-35℃产品”。 删除“丙烷/丙烯”;改为“温度-30℃产品”。 删除“乙烷/乙烯”;改为“温度-105℃产品”。	本部分修改采用 EN 14620-2:2006;保留与液化天然气有关的内容,删除与液化石油气、乙烷、乙烷和类似的碳氢化合物以及液氨等相关的内容。删除内容以适应修改采用。
4	5.1.2.2	删除“在乙烷/乙烯和液化天然气使用条件下”;改为“在液化天然气使用条件下”。	
5	6.3.6	表 10 设计与竣工纵断面之间的最大偏差 删除“ $25 > e$ ”,改为“ $25 < e$ ”。	原文错误
6	9.1	删除“注:也可使用 ASNT SNT-TC-1A、CP189 或 ACCP。”改为 “注 1:也可使用 ASNT SNT-TC-1A、CP189 或 ACCP。 注 2:也可使用等效的现行中国标准。”	考虑中国也有相应规范,故增加“注 2:也可使用等效的现行中国标准。”使用者根据具体情况使用。
7	表 14	“见表 15”改为“见表 15”。	原文错误
8	表 14	增加上标“e”, 增加注 e 进行 100%渗透探伤或 100%磁粉检验。	解释此表内容

表 NA.1 (续)

序号	本部分的 章条编号	技术性差异	原因
9	表 16	“见表 18”改为“见表 17”。	原文错误
10	表 17	增加上标“a”， 增加“注 a 进行 100% 渗透探伤或 100% 磁粉 检验”。	解释此表内容
11	9.11	“API 620:2004”改为“SY/T 0608—2006”。	原标准已经转化成我国行业标准
12	9.12.2		
13	9.12.2 注		

### 参 考 文 献

- [1] EN 444 无损检验 使用 X 射线或  $\gamma$  射线对金属材料进行射线检验的一般原则
- [2] EN 1515-2 法兰及其连接件 螺栓连接 第 2 部分:钢质法兰螺栓材料分类,PN 的命名
- [3] EN 10028-3 压力容器用钢板制品 第 3 部分:标准化可焊接细晶粒钢
- [4] EN 10028-4 压力容器用钢板制品 第 4 部分:具有规定低温特性的镍合金钢
- [5] EN 10088-1 不锈钢 第 1 部分:不锈钢清单
- [6] EN 10088-2 不锈钢 第 2 部分:一般用途薄钢板/钢板和钢带的技术交货条件
- [7] GB/T 26978.3—2011 现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造 第 3 部分:混凝土构件
- [8] GB/T 26978.4—2011 现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造 第 4 部分:绝热构件
- [9] GB/T 26978.5—2011 现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造 第 5 部分:试验,干燥、置换和冷却
- [10] EN ISO 6520-1:1998 焊接及配套工艺 金属材料几何缺陷的分类 第 1 部分:熔焊(ISO 6520-1:1998)
- [11] ASTM B 619 焊接镍及镍钴合金管的标准规格
- [12] ASTM B 622 无缝镍及镍钴合金管的标准规格
- [13] NF A 09-106 氮检漏试验,通过压力变化确定泄露位置
- [14] “钢板工程数据 第 2 卷”板材结构设计的有用信息, AISI 出版物修订版,1992 年,第 7 部分 锚定螺栓座
- [15] LNG 地上储罐指南 日本燃气协会,1981 年
- [16] LNG 地下储罐指南 日本燃气协会,1979 年 3 月
- [17] ASME 规范案例 N 284-1 金属容器壁屈曲设计方法 第 1 卷 第 3 章 Class MC
- [18] ASME 规范案例 N 2286 关于圆筒形、锥形、球形,以及加工帽头确定许用外压力和压缩应力的二选一规则 第 1 卷和第 2 卷 第 8 章