

ICS 23.020.30

CCS J 74

C I E S C

团 体 标 准

T/CIESC XXX—XXXX

覆土式钢制卧式容器

Mounded horizontal cylindrical steel vessels

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国化工学会 发布

目次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 通用要求.....	2
5 材料	4
6 结构	4
7 计算	12
8 制造、检验、试验及验收.....	33
9 防腐和阴极保护基本要求.....	36
10 砂床及覆土基本要求.....	37
附录 A（规范性）整体分析设计覆土容器基本要求	39

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。

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这些专利的责任。

本文件由中国化工学会提出并归口。

本文件起草单位：中国寰球工程有限公司北京分公司、广东寰球广业工程有限公司、中国石油天然气第六建设有限公司、鞍山钢制压力容器有限公司。

本文件主要起草人：蒋小文、陶钧、张海涛、李清娟、唐辉永、吕远锋、冯健、张志义、李晓波、刘凤侠、周地、丘波、余东航、张金伟、朱笔华、秦芳珍、甘生江、高殿生、蔡国萍。

本文件为首次发布。

覆土式钢制卧式容器

警示：本文件并未指出所有可能的安全问题。使用者有责任采取适当的安全和健康措施，并保证符合国家有关法规规定的条件。

1 范围

1.1 本文件规定了覆土式钢制卧式容器的通用要求、材料、结构、计算、制造、检验、试验和验收、防腐和阴极保护的要求。

1.2 适用本文件规定的覆土式钢制卧式容器应同时满足以下条件：

- a) 储存介质正常操作温度大于0℃，小于50℃，正常工况设计温度范围： $-20^{\circ}\text{C} \leq t \leq 65^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 设计压力：不大于4.0MPa；
- c) 卧式容器置于地下最高水位之上的砂床上且容器全部被覆土覆盖；
- d) 容器公称直径 $\leq 8\text{m}$ ，容积 $\leq 3500\text{m}^3$ ，容器长径比 ≤ 8 。

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。

TSG 21	固定式压力容器安全技术监察规程
GB/T 150（所有部分）	压力容器
GB/T 1804	一般公差 线性尺寸的未注公差
GB/T 4732（所有部分）	压力容器分析设计
GB 18306	中国地震动参数区划图
GB/T 26929	压力容器术语
GB/T 50761	石油化工钢制设备抗震设计标准
NB/T 10558	压力容器涂敷与运输包装
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 47016	承压设备产品焊接试件的力学性能检验
NB/T 47041	塔式容器
NB/T 47042	卧式容器
NB/T 47065.1	容器支座 第1部分：鞍式支座
HG/T 20584	钢制化工容器制造技术规范
HG/T 20592~20635	钢制管法兰、垫片、紧固件

3 术语和定义

GB/T 26929、TSG 21、GB/T 150、GB/T 4732和NB/T 47042界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

覆土式钢制卧式容器 mounded horizontal cylindrical steel vessels

在环境温度下,用于储存化工介质且外表面被合适的砂土覆盖,仅有相关的接管及设备安全附件等伸出覆土之外,且被合适砂床支撑的钢制卧式圆筒形容器,在本文件中简称“容器”。

3.2

穹顶(气室) nozzle dome

卧式容器顶部设置的大接管并采用凸形封头封闭,将多个接管设置于此凸形封头之上,以达到减少卧式容器筒体上开孔数量目的,此大接管及凸形封头称为穹顶。

3.3

砂床层 sand bed

位于覆土式钢制卧式容器底部且在整个容器长度范围内直接支撑容器的砂床。砂床铺设在平整地面之上,要求砂床结构受力稳定,减少不均匀沉降,便于施工和质量控制。一个砂床可以承载单台容器或多台容器组成的容器组。

3.4

覆土层 mounded layer

覆盖在覆土式钢制卧式容器周围除砂床层以外的砂层及土层。

3.5

容器长径比 slenderness ratio of vessel

容器凸形封头切线间距离与公称直径的比值。

3.6

坡度 slope

表征覆土的倾斜程度,用覆土垂直高度与水平距离的比值来表示。

4 通用要求

4.1 通则

4.1.1 容器除应符合本文件规定外,还应遵守国家有关法律、法规和安全技术规范。

4.1.2 TSG 21 适用范围内的压力容器设计和制造应接受特种设备安全监察机构的监察。TSG 21 适用范围内的压力容器设计、制造和安装单位应持有相应特种设备生产许可证。

4.2 职责

4.2.1 用户或设计委托方的职责

容器的用户或设计委托方应当以正式书面形式向设计单位提出设计条件,其中至少包含以下内容:

- a) 容器设计所依据的主要标准和规范;
- b) 操作参数(包括工作压力、工作温度范围、液位高度、接管载荷等);
- c) 容器使用地及其自然条件(包括环境温度、抗震设防烈度、雪载荷、建设地标高和最高地下水位等);
- d) 介质组分与特性;
- e) 预期使用年限;
- f) 几何参数和管口方位;
- g) 包含砂床和覆土参数信息的土壤工程报告;
- h) 容器支撑地基形式(砂床地基或桩地基);
- i) 腐蚀防护要求;
- j) 设计需要的其他必要条件。

4.2.2 设计单位的职责

- a) 设计单位应对设计文件的正确性和完整性负责;
- b) 容器的设计文件至少应包括强度计算书、设计图样、安全泄放量计算书、制造技术条件和

风险评估报告（相关法规或设计委托方要求时），必要时还应当包括安装与使用维修说明等；

- c) TSG 21 适用范围内压力容器的设计总图应盖有特种设备设计许可印章；
- d) 适用范围内的压力容器，设计单位应在容器设计使用年限内保存全部容器设计文件。

4.2.3 制造单位的职责

- a) 制造单位应按照设计文件的要求进行制造，如需要对原设计进行修改，应当取得原设计单位同意修改的书面文件，并对改动部位作出详细记载；
- b) 制造单位在容器制造前应制定完善的质量计划，其内容至少应包括容器或元件的制造工艺控制点、检验项目和合格指标；
- c) 制造单位的检查部门在容器制造过程中和完工后，应按本文件、设计文件规定和质量计划的规定对容器进行各项检验和试验，出具相应报告，并对报告的正确性和完整性负责；
- d) 制造单位在检验合格后，出具产品质量合格证；
- e) 适用范围内的压力容器，每台压力容器产品应在容器设计使用年限内保存下列文件备查：
 - 1) 质量计划；
 - 2) 制造工艺图或制造工艺卡；
 - 3) 产品质量证明文件；
 - 4) 容器的焊接工艺和热处理工艺文件；
 - 5) 标准中允许制造厂选择的检验、试验项目记录；
 - 6) 容器制造过程中及完工后的检查、检验、试验记录；
 - 7) 容器的原设计图和竣工图。

4.2.4 安装单位的职责

- a) 安装单位应按照设计文件的要求进行安装，如需要对原设计进行修改，应当取得原设计单位同意修改的书面文件，并对改动部位作出详细记载；
- b) 安装单位在容器安装前应制定完善的质量计划。

4.3 设计一般规定

4.3.1 容器设计单位（设计人员）应严格依据用户或设计委托方所提供的容器设计条件进行设计，应考虑容器在使用中可能出现的所有失效模式，提出防止失效的措施。

4.3.2 容器受压元件的强度、刚度和稳定性计算可选择规则设计方法或分析设计方法。

- a) 当采用规则设计时，除满足本文件规定，还应满足GB/T150.3的规定；
- b) 容器总体按 GB/T 150.3进行设计、局部结构采用应力分析方法设计时，局部结构的设计、制造、检验和验收应满足GB/T 4732的相应规定；
- c) 容器总体采用分析设计方法设计时，容器整体的设计、制造、检验和验收应满足GB/T 4732的相应规定。

4.3.3 载荷

设计时应考虑以下载荷：

- a) 内压、外压或最大压差；
- b) 液柱静压力，当液柱静压力小于设计压力的5%时，可忽略不计；
- c) 容器的自重（包括内件等），以及正常工作条件下或耐压试验状态下内装介质的重力载荷；
- d) 附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的重力载荷；
- e) 地震载荷、雪载荷；
- f) 覆土荷载；
- g) 基础支撑不均匀引起的荷载；
- h) 温度和内部压力变化引起的荷载；

需要时，还应考虑以下载荷的影响：

- i) 连接管道和其他部件的作用力；
- j) 冲击载荷，包括压力急剧波动引起的冲击载荷、流体冲击引起的反力等；
- k) 活载荷及爆炸冲击载荷等；
- l) 运输或吊装时的作用力。

4.3.4 设计参数

4.3.4.1 设计压力、设计温度、厚度附加量 C （包括钢材厚度负偏差 C_1 和腐蚀裕量 C_2 ）、材料许用应力和焊接接头系数的确定应符合GB/T 150.3或GB/T 4732的规定。

4.3.4.2 设计温度应考虑紧急泄放工况引起的低温。

4.3.4.3 内加强圈的腐蚀裕量如图1所示

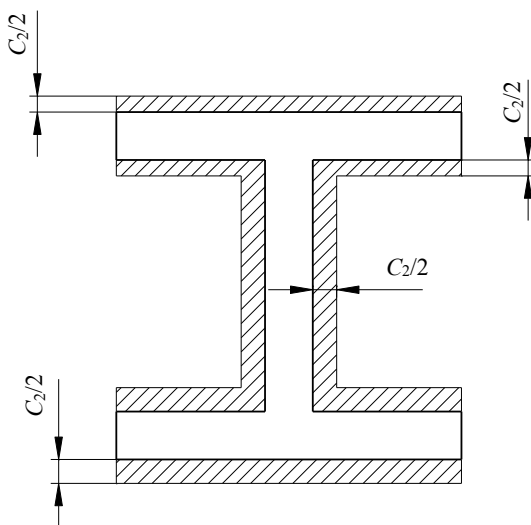


图1 内加强圈的腐蚀裕量示意图

4.3.5 试验

容器应进行耐压试验和泄漏试验，试验要求应符合 GB/T 150 或 GB/T 4732 的规定。

5 材料

5.1 选择容器受压元件用钢材应依据容器的使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性、操作特点、砂床与覆土的腐蚀性等），钢材的化学成分、微观组织、性能（力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能），容器的制造工艺以及经济合理性来确定。

5.2 容器的受压元件用材料的选用原则、标准、热处理状态、检验、测试及许用应力等均应根据所采用的设计方法符合GB/T 150.2或GB/T 4732.2的相应规定。符合TSG 21适用范围的容器所用材料还应满足TSG 21相关条文的规定。

5.3 容器壳体用钢板应逐张进行超声检测，须符合NB/T 47013.3的规定，质量等级不低于相应设计标准的要求，且不得低于Ⅱ级。

5.4 材料选用时应充分考虑非正常操作可能造成的局部低温工况。

5.5 受压元件用钢材应是焊接性良好的钢材，与受压元件相焊接的非受压元件用钢材也应是焊接性良好的钢材，非受压元件用钢材优先选用与壳体相同的材料。

6 结构

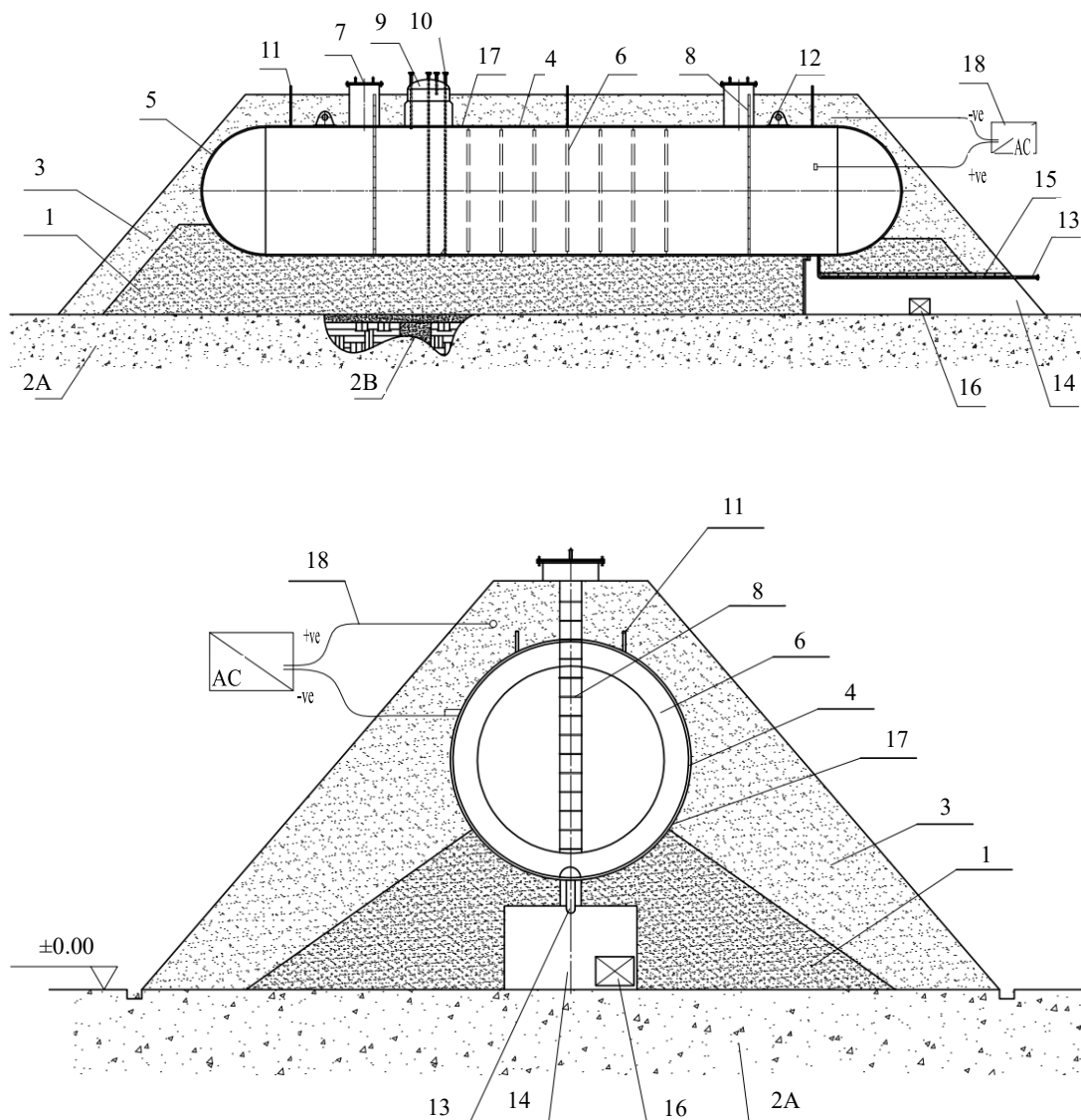
6.1 一般要求

6.1.1 本文件适用范围内的容器是指主体由筒体与封头组成的壳体结构，带有工艺和控制检测仪表管口、人孔、砂床基础、覆土层、检查与检修结构、防腐结构、阴极保护结构，并配备安全、消防等附件与设施。

6.1.2 容器进行结构设计时，应综合考虑所有相关因素、失效模式和足够的安全裕量，以保证容器具有足够的强度、刚度、稳定性和耐腐蚀性，受压元件与非受压元件的焊接接头符合本文件或相应标准的规定，确保容器在设计使用年限内的安全。

6.2 主要结构

容器的主要结构如图2所示。



标引序号说明：

1—砂床基础； 2A—平整地面； 2B—桩基基础； 3—覆土层； 4—筒体； 5—封头； 6—容器内加强圈； 7—人孔； 8—容器内梯子； 9—气室； 10—工艺管接口； 11—沉降监测板； 12—吊耳； 13—容器底部接管； 14—容器底部通道； 15—管道吊架； 16—气体浓度检测装置； 17—防腐涂层； 18—阴极保护系统

图2 容器的主要结构示意图

6.3 支撑基础形式

容器可采用包括砂床基础、桩基基础、钢制或混凝土制鞍座基础等在内的支撑基础形式。

6.3.1 砂床基础

6.3.1.1 砂床基础形式是在地面层上建造砂床以支撑容器全长的支撑基础形式，如图3所示。

6.3.1.2 只要现场地质条件允许，宜采用砂床基础，砂床层下面地面应平整，砂床厚度不得小于1m。

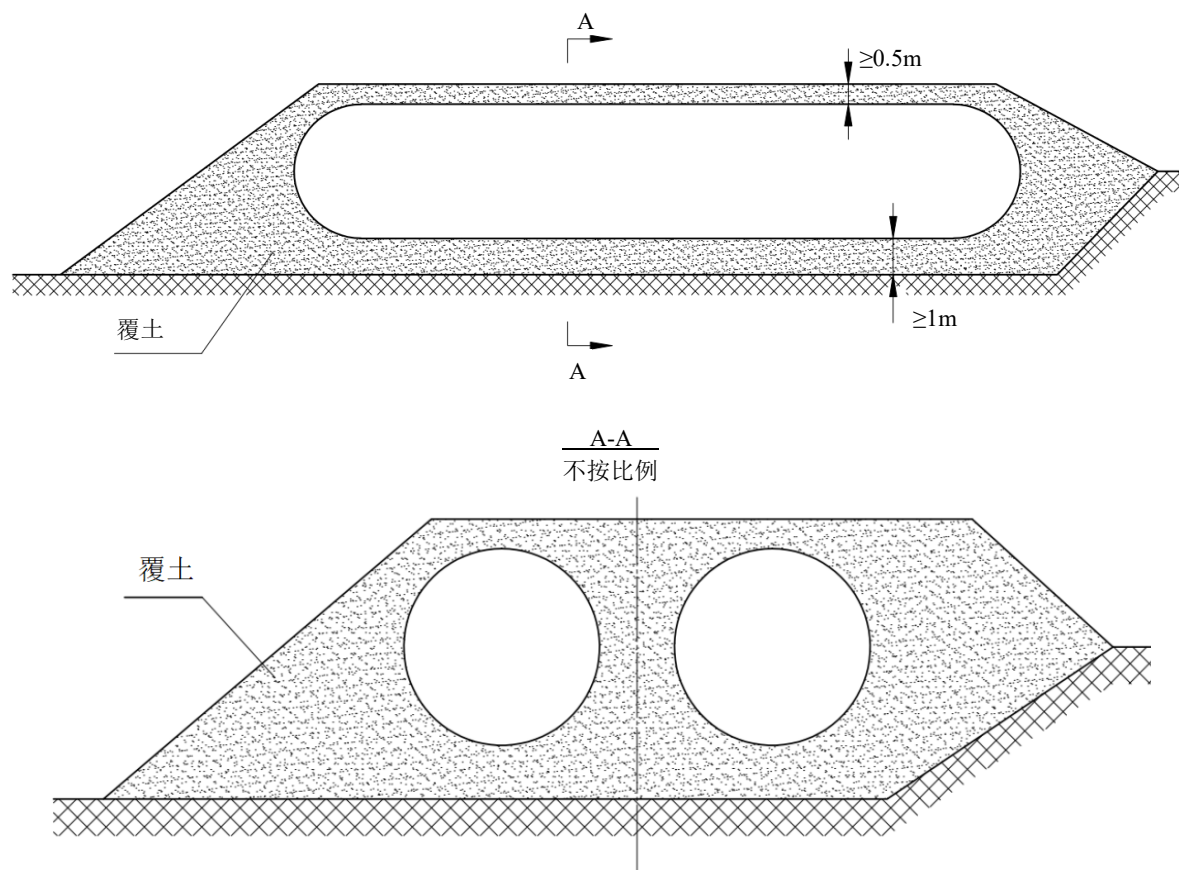


图3 砂床基础形式

6.3.2 桩基基础

6.3.2.1 当地质条件导致砂床层和地面层无法满足承载要求或均匀沉降要求时可以采用桩基基础。

6.3.2.2 桩基基础形式是在桩基支撑的混凝土底板上建造砂床以支撑容器全长的支撑基础形式，如图4所示。混凝土底板上的砂床厚度不得小于1m。

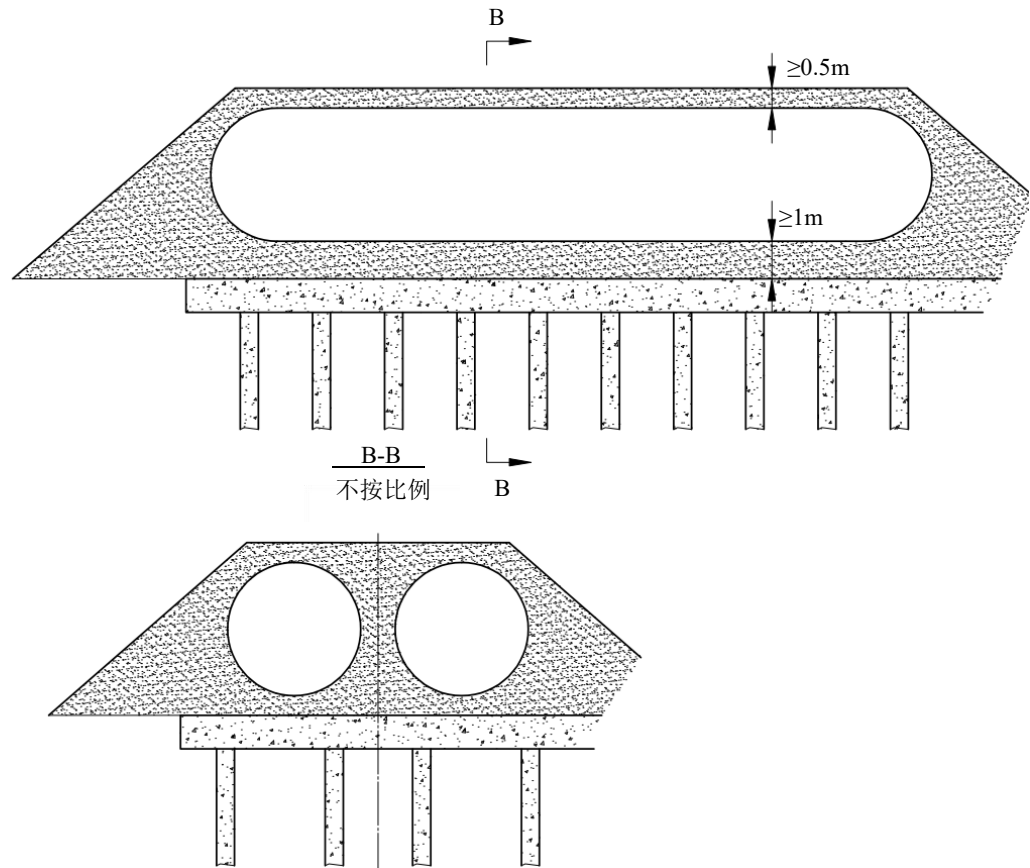


图4 桩基基础形式

6.3.3 鞍座基础

6.3.3.1 鞍座基础形式是在由桩基支撑的鞍座上安放容器本体的支撑基础形式，如图5所示。容器底部应以砂层填充并充分墩实。

鞍座可以由钢或混凝土制成。容器本体不宜与鞍座焊接固定。容器可设置锚带限位，锚带两端应固定在鞍座基础上，且不应限制容器沿其中轴线伸缩，如图6所示。

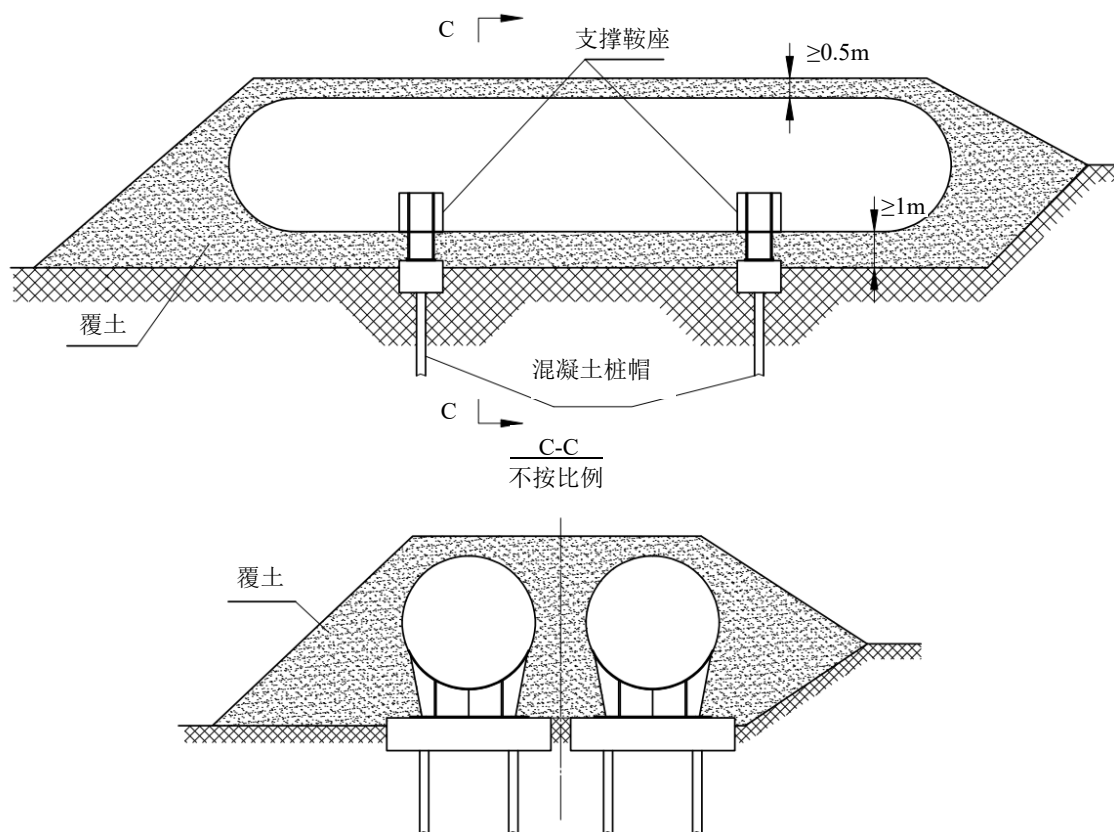


图5 鞍座基础形式

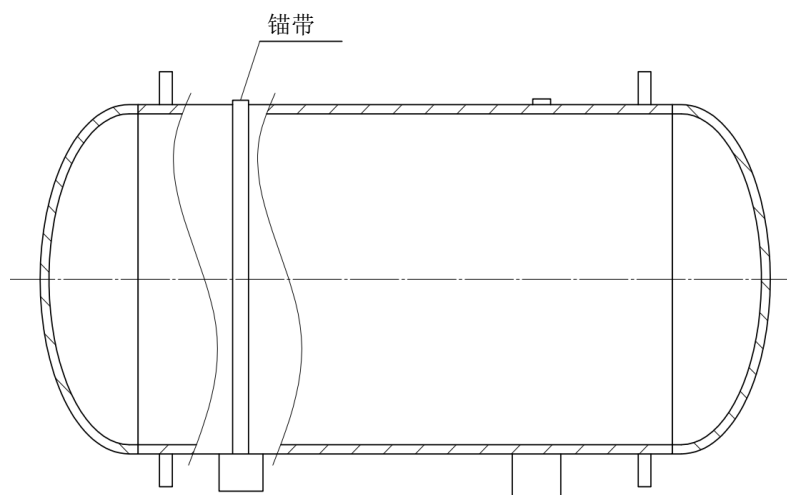


图6 鞍座基础用锚带

6.4 砂床及覆土

砂床底部应高于最高地下水位至少0.6m。容器顶部覆土厚度不得小于0.5m，其余结构要求见第10章。

6.5 筒体与封头

筒体与封头结构要求应符合6.5.1和6.5.2的规定。

6.5.1 筒体

- a) 筒体外径与内径之比不应超过1.3。
- b) 板厚与容器直径之比应不小于1/400。

6.5.2 封头

a) 容器封头一般采用半球形封头、椭圆封头或碟形封头，封头直边长度宜符合表1的要求。当容器公称直径大于等于3.5m时，宜采用半球形封头。

表1 封头直边长度

容器外径 (D_o)	直边长度
$3500\text{mm} < D_o \leq 4500\text{mm}$	30 mm
$4500\text{mm} < D_o \leq 6000\text{mm}$	40 mm
$6000\text{mm} < D_o \leq 8000\text{mm}$	50 mm

b) 半球形封头板厚度不应小于12 mm；封头板厚与容器直径之比不得小于0.002，也不得超过0.16。

c) 椭圆形封头一般采用长短轴比值为2的标准型椭圆形封头。

6.6 接管、人孔及保护套筒

6.6.1 接管及法兰

6.6.1.1 容器的接管应具备足够的强度、刚度和稳定性，可承受与之连接的管道及其他部件的作用力。

6.6.1.2 容器的接管应尽量少，并应集中布置于容器筒体顶部，排净口位于容器底部，并通过底部检查通道。

6.6.1.3 只要工艺与自控条件允许，较小的几个管口可集中布置在人孔盖或较大直径接管的法兰盖上，也可集中布置于容器筒体顶部的穹顶上。

6.6.1.4 容器进液管道宜延伸到介质液面以下，并在接管顶部设平衡孔。

6.6.1.5 为消除气穴的风险并简化结构，顶部接管法兰接口应高于覆土顶部。

6.6.1.6 管口宜采用整体补强结构。

6.6.1.7 容器的接管与壳体之间的焊接接头应采用全焊透结构。

6.6.1.8 容器法兰连接管口应按照HG/T 20592~20635系列标准的要求，选用符合设计条件的法兰、垫片与紧固件。

6.6.2 人孔

容器宜设置两个及以上的人孔或检查孔。对于有紧急逃生要求的容器，其中一个人孔的直径不宜小于DN900，人孔内应设置爬梯与扶手。

6.6.3 保护套筒

6.6.3.1 应在容器的接管、气室和人孔周围设置保护套筒。

6.6.3.2 保护套筒宜由非金属材料制成，且应有防雨结构能避免雨水渗漏至覆土和接管的间隙。保护套筒宜设计为可拆卸结构，如图7 a)、图7 b)。

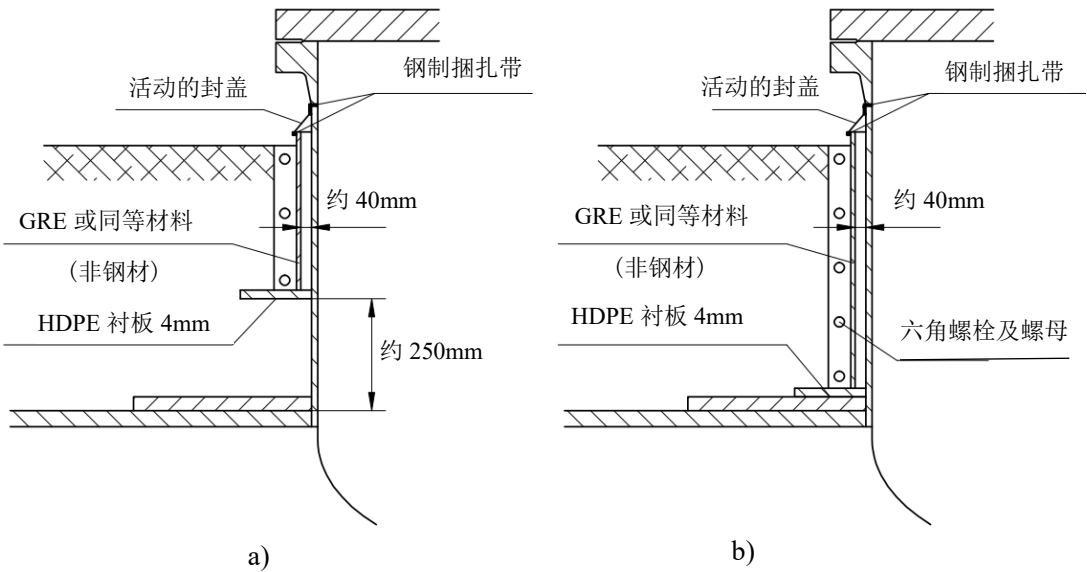


图 7 保护套筒参考图

6.7 加强圈

容器可设置加强圈， $DN \geq 3500\text{mm}$ 的容器宜采用加强圈，加强圈的设置应满足以下要求：

- a) 加强圈宜布置于筒体内部, 且应为连续结构, 不得断开;
- b) 加强圈横截面应是以腹板纵向中轴为对称轴的对称结构, 可为“T”型结构或“I”形结构, 优先选用“T”型结构, 加强圈的推荐结构形式见图8;
- c) 加强圈应使用与壳体相同的材料, 各部分厚度不宜超过所在壳体的厚度;
- d) 加强圈之间的距离与容器直径的比率宜为1:2至1:1;
- e) 允许采用大、小加强圈的组合方案;
- f) 离凸形封头最近的加强圈距离封头与筒体焊缝线的距离等于覆土式容器直径的1/2为宜;
- g) 容器内如存在气相介质, 加强圈最高点处应设置半径不小于50mm的通气孔; 如存在液相介质, 最低点处应设置半径不小于50mm通液孔。

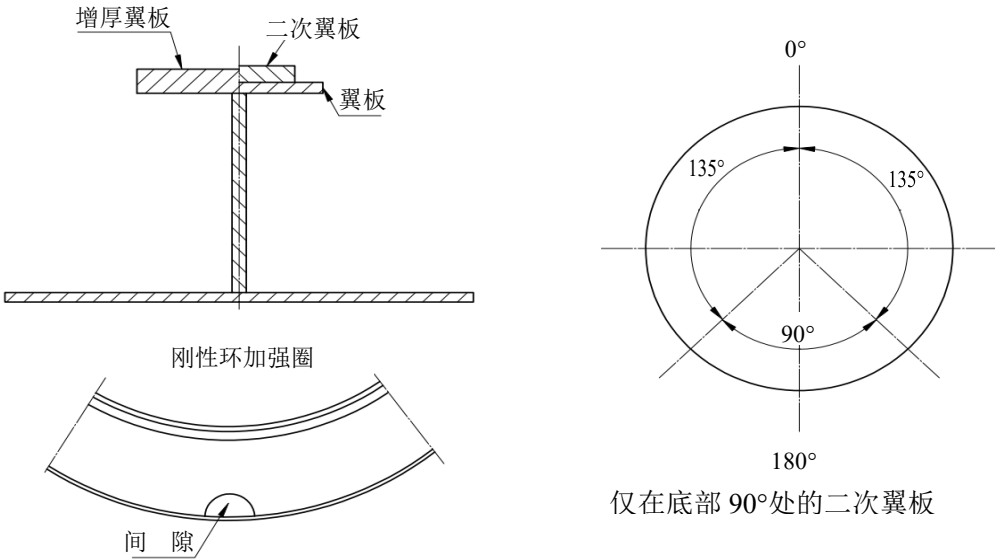


图 8 加强圈结构示意图

6.8 沉降监测板

容器顶部应沿容器轴向设置沉降监测点用于监测容器沉降。这些监测点的间距不大于容器公称直径的两倍。每台容器至少安装三个沉降监测点，两个靠近容器末端和中间的一个。沉降监测点可使用专门的沉降监测板，也可在焊接管口或气室上标识监测点。

在容器基础及砂床施工期间，应在容器附近的固定位置设置一个沉降观测原点，定期对容器基础进行沉降监测，发现异常时及时处理。

6.9 接地板

容器静电接地板数量至少为2个，相邻两个接地板之间的间距不应大于18m。接地板数量、规格和位置还应满足电气专业的要求。

当容器内介质为易爆、易燃介质或图样规定时，容器金属部分与非埋地工艺金属管道宜做电气连接。

6.10 吊耳和承重支点

吊耳和承重支点不应直接焊接到容器上，而应焊接到圆形垫板上，垫板应与所在容器壳体具有相同的材料。

6.11 防腐涂层与阴极保护

防腐涂层与阴极保护应符合本规范第9章的规定。

6.12 安全附件及附属设施

6.12.1 在预期容器的正常操作和非正常操作过程中有可能出现超压时，应设置超压泄放装置。直接装在容器上的超压泄放装置应符合TSG 21和GB/T 150.1附录B的要求。

6.12.2 容器还应设置液位控制（报警）、压力控制（报警）以及温度测量系统。

6.12.3 直连在容器上的仪表等附件，应符合其产品标准的规定。压力表、液位计和温度计等仪表还应符合TSG 21的规定。

6.13 容器底部检查通道

一般情况下，容器底部不宜设置用于检修、检验和日常维护的检查通道。如果设置容器底部出口，其检查通道设计应能承受容器的重量载荷，尽量减小对砂床的破坏，且需要满足以下要求：

- a) 需要采取足够的安全预防措施来确保容器在长期使用中的完好与安全性。这些预防措施涉及从检查通道到容器之间的过渡、检查通道的尺寸、底部出口管支架的可调节性以及底部出口附近区域的容器底部防腐。
- b) 检查通道的尺寸应为检查和维护活动提供足够充裕且安全的空间。
- c) 检查通道应配备气体泄漏监测设备。
- d) 应考虑长期沉降问题。
- e) 检查通道应采取措施防止外部积水倒灌。如采用混凝土建造，应整体原地浇注。如需使用预浇混凝土，混凝土模块间的接缝需要密封以防止进水。
- f) 通道门应选用可闭锁（闭锁结构应使用不发火的导电材料）的非密闭门（如格栅门），禁止使用密闭门。门的钢制部件应镀锌。

容器底部检修通道的通道室和接管井设计为钢筋混凝土整体现浇成型，并在内壁设计防水层。通道室内的管道采用高度可调节的固定方式，接管井上端与容器底部应采用柔性连接，如图9所示。

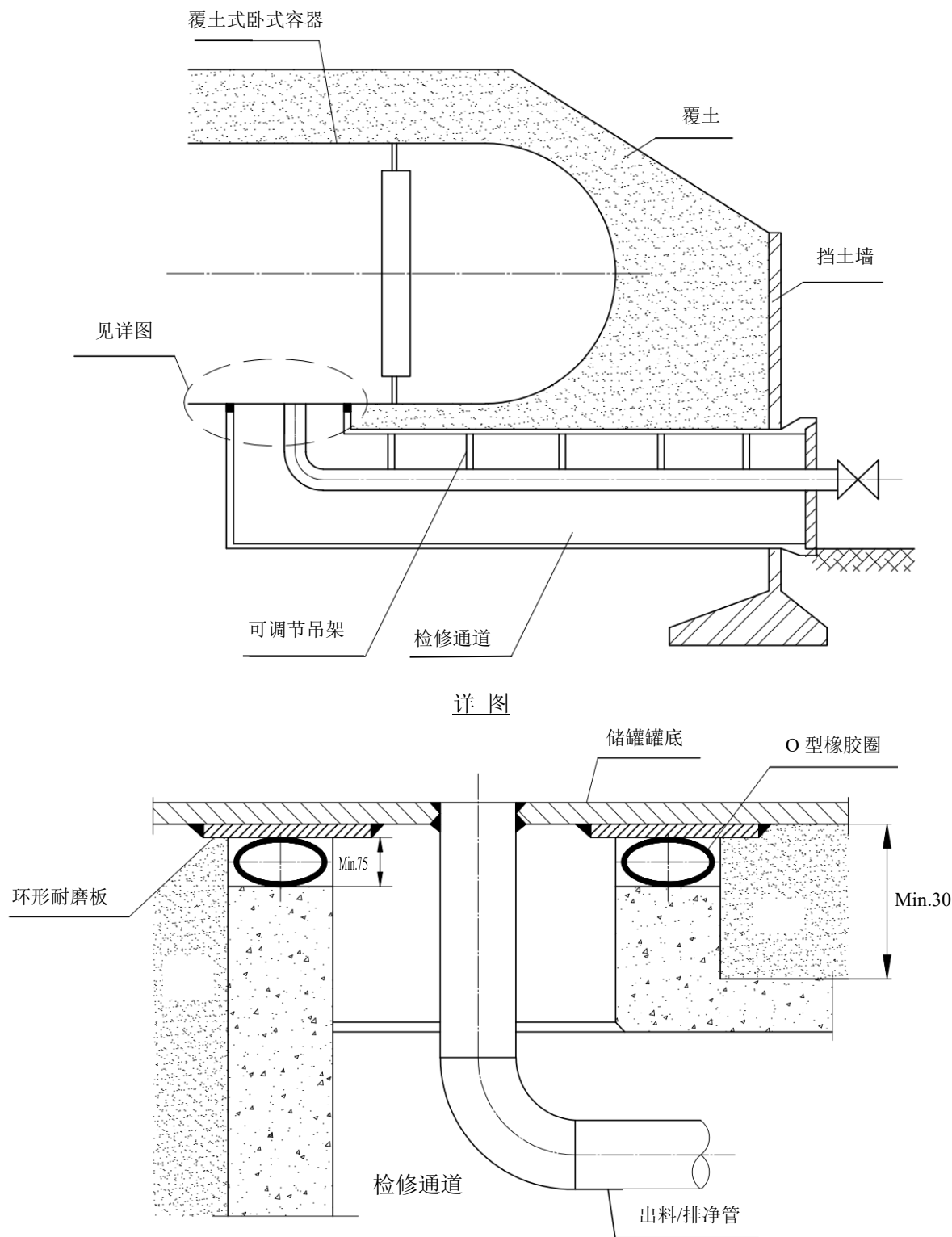


图 9 容器底部检查通道

7 计算

7.1 基本要求

7.1.1 筒体和封头的厚度应在考虑制造公差及腐蚀裕量的前提下，根据其承受的正压和负压按 GB/T

150 确定。其中，筒体应考虑 7.4.10 确定的砂床支撑压力和内部负压的组合。封头应考虑载荷 2、载荷 3、载荷 4 和载荷 5 的组合。

7.1.2 无加强圈筒体的封头建议采用有限元方法对封头进行应力分析。

7.1.3 本文件计算仅适用于连续砂床基础和桩基基础支撑的容器，钢制或混凝土制鞍座基础支撑的容器的计算应另行考虑。

7.2 符号

以下符号适用于本文件：

A_{fc} ——加强圈翼板截面积， mm^2 ；

A_{gross} ——有效宽度范围内壳体有效截面积与加强圈有效截面积之和， mm^2 ，应考虑扣除所校核的工况条件下的厚度附加量；

A_{net} ——加强圈有效截面积， mm^2 ；

A_w ——加强圈腹板截面积， mm^2 ；

C ——容器筒体厚度附加量， mm ；

C_a ——覆土压力系数；

C_1 ——钢板厚度负偏差， mm ；

C_2 ——腐蚀裕量， mm ；

D_i ——筒体内径， mm ；

D_o ——筒体外径， mm ；

d ——加强圈腹板高度， mm ；

E_r^t ——容器加强圈材料在设计温度下的弹性模量， MPa ；

E_s^t ——容器筒体材料在设计温度下的弹性模量， MPa ；

F_{dome} ——覆土在凸形封头上产生的轴向压力， N ；

F_w ——加强圈与壳体连接焊缝单位长度剪力， N/mm ；

F_{soil} ——容器筒体承受的总的土壤轴向摩擦力， N ；

F'_{soil} ——单位长度容器筒体承受的土壤轴向摩擦力， N/mm ；

H ——容器中心线到覆土顶面的距离， mm ；

h ——覆土顶面距离计算位置处的深度， mm ；

h_w ——加强圈与容器焊接尺寸，见图 15， mm ；

I_r ——加强圈的横截面的截面惯性矩， mm^4 ；

I_s ——容器的横截面的截面惯性矩， mm^4 ；

I_y ——以 y - y 为平面转动中性轴的加强圈与筒体有效段组合截面惯性矩， mm^4 ；

K ——在加强圈处用于计算力和弯矩的系数；

K_s ——砂床基床系数，指单位面积砂床表面下沉单位距离所需的力， kN/m^3 ；

K_6 ——在加强圈处用于计算挠度的系数；

K_7 ——在加强圈处用于计算挠度的系数；

k_y ——相互作用系数，按式 (80) 计算；

L ——两相邻加强圈间的最大距离， mm ；

L_{tot} ——容器的等效长度，对于采用球形封头的容器，容器等效长度为封头切线间距离加上 1 倍封头曲面高度，否则该长度为封头切线间的距离， mm ；

M_s ——容器筒体上承受的最大弯矩， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；

M_0 ——加强圈在 ψ 等于 0° 处的弯矩， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；

M_{100} ——加强圈在 ψ 等于 100° 处的弯矩， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；

M_{180} ——加强圈在 ψ 等于 180° 处的弯矩， $\text{N}\cdot\text{mm}$ ；

m_L ——容器正常操作工况下介质的质量， kg ；

- m_w ——容器水压试验工况下介质的质量, kg;
 m_1 ——容器本体的质量, 包括筒体、封头、加强圈、人孔、接管法兰以及其他金属构件的质量, kg;
 N_3 ——容器内压在加强圈上产生的法向力, N;
 N_4 ——容器负压在加强圈上产生的法向力, N;
 N_0 ——加强圈在 ψ 等于 0° 处的法向力, N;
 N_{100} ——加强圈在 ψ 等于 100° 处的法向力, N;
 N_{180} ——加强圈在 ψ 等于 180° 处的法向力, N;
 P ——单个加强圈承担的砂床基础的支撑载荷, N;
 P' ——采用基础梁法计算的容器筒体承受的单位长度最大支撑载荷, N/mm;
 P'_{\max} ——容器单位长度最大的基础反力, N/mm;
 P'_{\min} ——容器单位长度最小的基础反力, N/mm;
 p ——砂床作用在容器筒体上的压力, MPa;
 p_T ——水压试验压力, MPa;
 p_{heq} ——由于覆土压力或筒体轴向膨胀对封头产生的压缩载荷而引起的封头等效外压, MPa;
 p_c ——计算压力; MPa;
 p_o ——砂床作用在容器筒体上的最大压力; MPa;
 p_s ——覆土对容器两端的凸形封头产生的压力, MPa;
 p_1 ——容器本体重量产生的压力, MPa;
 p_2 ——水压试验工况下, 液体重量产生的压力, MPa;
 p_3 ——容器内压, MPa;
 p_4 ——容器负压, MPa, 除非采购方另有规定, 一般取 0.05MPa;
 p_5 ——容器本体重量产生的压力, MPa;
 p_{10} ——容器本体重量产生的压力, MPa;
 Q' ——容器自重、介质重量以及覆土载荷共同引起的砂床基础单位长度平均基础反力, N/mm;
 Q_s ——容器筒体上承受的最大剪切载荷, N;
 Q_1 ——单个加强圈承受的容器重量载荷, N;
 Q_2 ——正常操作工况下, 单个加强圈承受的介质重量载荷, N;
 Q_{2w} ——水压试验工况下, 单个加强圈承受的容器重量载荷, N;
 Q_5 ——单个加强圈承受的覆土载荷, N;
 Q_6 ——单个加强圈承受的剪切载荷, N;
 Q_6' ——容器筒体承受的最大单位剪切载荷, N/mm;
 Q_9 ——蒸汽云爆炸导致单个加强圈承受的外压载荷, N;
 Q_{12} ——容器单个加强圈承受的活载荷, N;
 Q_{13} ——容器单个加强圈承受的雪载荷, N;
 q ——覆土的重量在筒体上产生的径向压力, MPa;
 q_ψ ——覆土的重量在角度 ψ 处对容器筒体的压力, MPa;
 q_0 ——覆土的重量在角度 0 处对容器筒体的最大径向压力, MPa;
 R ——容器筒体中径半径, mm;
 R_r ——加强圈的最大外半径, mm;
 r ——加强圈翼板内半径, mm;
 S_o ——基本雪压, kN/m²;
 S_{140} ——加强圈在 ψ 等于 140° 处的剪力, N;
 S_{160} ——加强圈在 ψ 等于 160° 处的剪力, N;
 W_{ply} ——组合截面的塑性截面系数, mm³;

- W_{ely} ——组合截面对其中性轴的弹性截面系数, mm^3 ;
 X_f ——翼板平面失稳时考虑的削弱系数, 按式(89)计算;
 X_{fib} ——相互影响失稳时考虑的削弱系数, 按式(87)计算;
 X_w ——腹板平面失稳时考虑的削弱系数, 按式(88)计算;
 X_y ——平面内失稳时考虑的削弱系数;
 y_{max} ——横截面上离弹性中性轴最远的点到中性轴的距离, mm ;
 y_{rmax} ——加强圈顶部最大挠度, mm ;
 y_{smax} ——筒体中部的最大挠度, mm ;
 w ——能够与加强圈一起来承受加强圈所承受载荷的筒体的有效宽度, mm ;
 α_h ——设防地震下水平地震影响系数最大值;
 $\sigma_{\theta s}$ ——筒体的周向应力, MPa ;
 σ_{xs1} ——内压或外压引起的筒体轴向应力, MPa ;
 σ_{xs2} ——砂床不均匀支撑引起的筒体上最大弯矩处的轴向应力, MPa ;
 σ_{xs3} ——筒体中部因土壤摩擦力引起的最大轴向应力, MPa ;
 σ_{xs4} ——覆土压力在凸形封头上产生轴向的外部载荷引起的筒体轴向应力, MPa ;
 σ_{xst} ——筒体最大组合拉应力, MPa ;
 σ_{xsc} ——筒体最大组合压应力, MPa ;
 σ_{sM} ——由于内压作用在加强圈处的筒体上产生的二次弯曲应力, MPa ;
 σ_r ——加强圈法向力引起的应力, MPa ;
 σ_{rw} ——加强圈与壳体连接焊缝的径向应力, MPa ;
 $[\sigma]^t$ ——设计温度下容器筒体材料的许用应力, MPa ;
 $[\sigma]_r^t$ ——设计温度下加强圈材料的许用应力, MPa ;
 α ——缺陷系数, 按表 4 选取;
 μ ——覆土层和容器筒体之间的摩擦系数, 无量纲;
 μ_y ——系数, 按式(81)计算;
 ε ——系数, 按式(84)计算;
 γ_s ——覆土的密度, kg/m^3 ;
 γ_{M1} ——加强圈局部安全系数, 当在试验工况下进行校核时, $\gamma_{M1}=1.5$; 当在其它工况下进行校核时, $\gamma_{M1}=1.1$;
 δ_e ——容器筒体有效厚度, mm ;
 ψ ——容器顶部与计算位置处周向之间的夹角;
 τ_s ——筒体的剪应力, MPa ;
 τ_r ——加强圈的剪应力, MPa ;
 τ_{rw} ——加强圈与壳体连接焊缝的剪应力, MPa ;
 ϕ ——系数, 按式(76)计算;
 λ ——长细比, 按式(77)计算;
 λ ——长细比, 按式(79)计算;
 λ_1 ——临界长细比, 按式(78)计算。

7.3 设计工况

设计时应考虑覆土前液(气)压试验、正常操作、紧急泄压(负压操作工况)、停工检修期空罐和投用后检修时液(气)压试验等情况。如有特殊情况, 设计者另行考虑。设计工况载荷组合表见表 2。

- a) 开车前液压试验时应考虑: 容器(含附件)自重、试验介质质量、水压试验压力(必要时考虑液柱静压力), 基础支撑及不均支撑引起的载荷等, 试验工况不允许覆土。

- b) 操作时应考虑：容器（含附件）自重、正常操作最大充装介质质量、设计内压力、负压（紧急泄放时）、覆土载荷、基础支撑及基础不均匀支撑的载荷、温度及内压变化引发容器长度变化因土壤作用产生的轴向载荷、封头上的土壤压力、地震载荷（如需要）、覆土层上部的检修活载荷和雪载荷、外部气体云爆炸产生的载荷（如需要）等。
- c) 停车定期检验或者维修需要，重新进行液压试验（有覆土层）时应考虑：容器（含附件）自重、液压介质重量、水压试验压力（必要时考虑液柱静压力）、基础支撑及不均匀支撑的载荷、覆土层载荷温度及内压变化引发容器长度变化因土壤作用产生的轴向载荷、覆土层上部的检修活载荷和雪载荷等。

表 2 载荷组合表

设计工况	容器自重 m/kg	操作介质 重量 m/kg	试验介质 重量 m/kg	设计内压 p_3/MPa	设计负压 p_4/MPa	覆土载荷 m_6/kg	基础不均 匀支撑引 起的载荷	容器伸缩 引起的轴 向载荷	地震载荷	外部爆炸 引起的载 荷	基础支撑 载荷	试验压力 p_t/MPa	覆土上部 的检修活 载荷 p_{12}/kPa	雪载荷 p_{13} (N/m^2)
	载荷 1 Q_1/N	载荷 2 Q_2/N		载荷 3 N_3/N	载荷 4 N_4/N	载荷 5 Q_5/N	载荷 6 Q_6/N	载荷 7 F_{soil}/N	载荷 8 Q_8/N	载荷 9 Q_9/N	载荷 10 P/N	载荷 11 N_{11}/N	载荷 12 Q_{12}/N	载荷 13 Q_{13}/N
覆土前的液 (气) 压试验	√		√				√				√	√		
正常操作	√	√		√		√	√	√	√	√	√		√	√
紧急泄压 (负压操作工 况)	√	√			√	√	√	√			√		√	√
停车检修期空 罐	√					√	√	√			√		√	√
投用后检修液 压试验/气压 试验	√		√			√	√	√			√	√	√	√

注：地震载荷和外部爆炸引起的载荷不同时考虑。

7.4 载荷计算

7.4.1 壳体及附件重量载荷（载荷1）

容器质量 m_1 包括筒体、封头、加强圈、人孔、接管法兰以及其他金属构件的质量。

单个加强圈承受的容器重量载荷 Q_1 按式（1）计算：

$$Q_1 = 9.8m_1L / L_{tot} \dots\dots\dots(1)$$

7.4.2 介质重量载荷（载荷2）

正常操作工况以及水压试验工况下介质质量分别为 m_L 和 m_w 。

正常操作工况下，单个加强圈承受的操作介质重量 Q_2 ，按式（2）计算：

$$Q_2 = 9.8m_L L / L_{tot} \dots\dots\dots(2)$$

试验工况下，单个加强圈承受的最大容积的试验介质重量 Q_{2w} ，按式（3）计算：

$$Q_{2w} = 9.8m_w L / L_{tot} \dots\dots\dots(3)$$

7.4.3 内压载荷（载荷3）

加强圈处的部分筒体能与加强圈一起来承担加强圈所承受的载荷，能够承受载荷的筒体有效宽度 w 按式（4）计算：

$$w = 1.1\sqrt{D_o\delta_e} \dots\dots\dots(4)$$

施加在有效宽度 w 上的内压会导致法向拉伸力 N_3 ， N_3 由加强圈和有效宽度筒体的组合截面承担， N_3 按式（5）计算：

$$N_3 = p_3 w R \dots\dots\dots(5)$$

水压试验工况时，式（5）中的内压用水压试验压力来代替。

7.4.4 容器内部的负压载荷（载荷4）

在容器承受负压的情况下，负压将在加强圈和筒体有效宽度的组合截面上产生压缩法向力 N_4 ，按式（6）计算：

$$N_4 = p_4 w R \dots\dots\dots(6)$$

7.4.5 覆土载荷（载荷5）

7.4.5.1 覆土作用在筒体上引起的压力

两个加强圈之间长度为 L 覆土的重量假设由筒体的顶部支撑，如图 10 所示，该载荷分配在单个加强圈上，按式（7）计算：

$$Q_5 = 9.8 \times 10^{-9} \gamma_s \left(D_o H + \frac{H^2}{3} - \pi D_o^2 / 8 \right) L \dots\dots\dots(7)$$

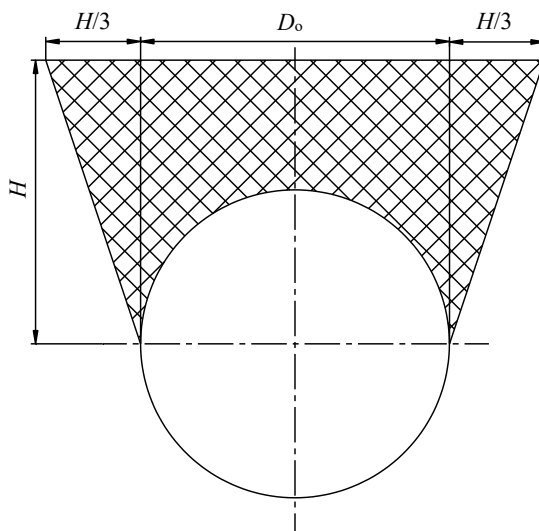


图 10 容器承受覆土载荷示意图

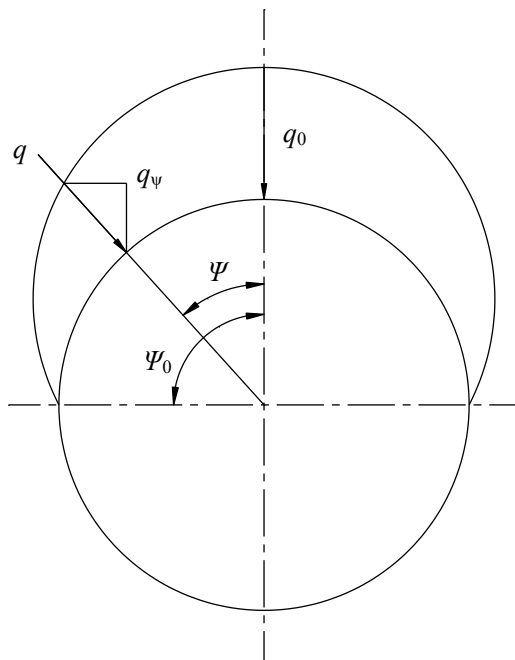


图 11 容器承受的覆土压力分布图

假设覆土的重量在筒体上产生一径向的压力 q ，如图 11 所示，则在 ψ 角度处的压力按式（8）计算：

$$q_{\psi} = q_0 \cos \psi \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中 q_0 为当 ψ 等于 0 时的最大压力，按式（9）计算：

$$q_0 = \frac{Q_5}{0.5\pi D_0 L} \quad \dots\dots\dots (9)$$

当设计工况考虑爆炸载荷时， Q_5 应以 $(Q_5 + Q_9)$ 代替。

7.4.5.2 覆土作用在凸形封头上引起的压力

覆土对容器两端的凸形封头产生压力 p_s 随着计算位置处距离覆土顶面深度的增大而线性增大，按式（10）计算。

$$p_s = 9.8 \times 10^{-9} C_a \gamma_s h \cdots \cdots \cdots (10)$$

其中，覆土压力系数 C_a 值取决于覆土的坡度以及凸形封头的移动量。对于坡度为 2:3 的覆土， C_a 按表 3 取值。

表 3 覆土压力系数 C_a 的取值

凸形封头覆土形式	C_a 取值	说明
凸形封头覆土，且覆土自然坡度 2:3	0.3	容器不收缩也不膨胀时，取中性土壤压力系数
	0.2	当容器收缩，且凸形封头的移动量大于等于 20mm 时
	0.3~0.2 之间差值	当容器收缩，且凸形封头的移动量大于 0mm，小于 20mm 时
	1.7	当容器膨胀，且凸形封头的移动量超过 20mm 时
	0.3~1.7	当容器膨胀，且凸形封头的移动量大于 0mm，小于等于 20mm 时
凸形封头覆土无坡度，如容器完全埋在地坪以下或采用挡墙结构	0.33	当容器轴向收缩
	0.5	当容器不收缩也不膨胀时
	3	当容器轴向膨胀

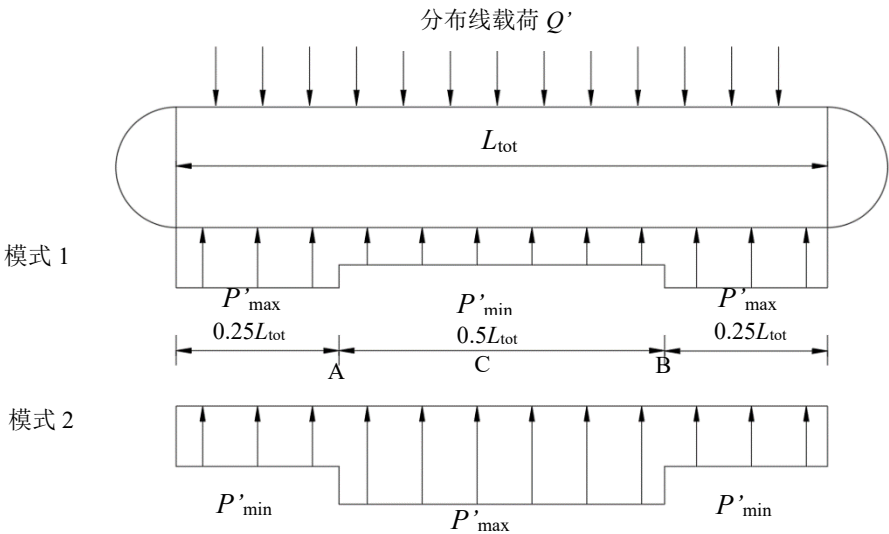
凸形封头厚度的确定应考虑最大的覆土压力系数。
覆土在凸形封头上产生轴向压力 F_{dome} ，按式（11）计算。计算筒体轴向应力时应考虑此载荷。

$$F_{dome} = 9.8 \pi C_a \gamma_s H R^2 \times 10^{-9} \cdots \cdots \cdots (11)$$

7.4.6 基础不均匀支撑引起的剪力和弯矩载荷（载荷6）

当容器采用砂床基础支撑时，因筒体轴向底部砂床特性变化，如基础不均匀或容器及基础的建造偏差，砂床基床系数 K_s 会沿容器轴向不均匀分布，从而造成砂床支撑载荷不均匀分布，导致容器产生轴向弯曲变形，故而在筒体上形成较大的基础支撑反力、轴向弯矩与剪切力。工程设计时可采用如图 12 所示两种假定基床系数分布模型计算容器不均匀基础支撑载荷。

其中，模式 1 为“两侧硬、中间软”的底部基床系数分布时，容器的底部基础反力分布；模式 2 为“两侧软、中间硬”的底部基床系数分布时，容器的底部基础反力分布。



计算不均匀支撑引起的载荷应以载荷 1 (Q_1)，载荷 2 (Q_2) 以及载荷 5 (Q_5) 为基础，当需要考虑地震载荷时， Q_1 、 Q_2 以及 Q_5 按 7.4.8 处理；当需要考虑爆炸载荷时，应在 Q_1 、 Q_2 、 Q_5 的基础上再考虑爆炸载荷 Q_9 。

容器自重、介质重量以及覆土载荷共同引起的砂床基础单位长度平均基础反力按式 (12) 计算：

$$Q' = (Q_1 + Q_2 + Q_5) / L \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

容器筒体单位长度最大的基础反力按式 (13) 计算：

$$P'_{\max} = 0.67Q' \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

容器筒体单位长度最小的基础反力按式 (14) 计算：

$$P'_{\min} = 0.67Q' \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

容器筒体承受的最大单位剪切载荷 Q'_6 按式 (15) 计算：

$$Q'_6 = 0.33Q' \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

单个加强圈承担的剪切载荷按式 (16) 计算：

$$Q_6 = 0.33Q'L \quad \cdots \cdots \cdots (16)$$

容器筒体上承受的最大剪切载荷（在 A 和 B 处）按 (17) 计算：

$$Q_s = 0.0825Q'L_{\text{tot}} \quad \cdots \cdots \cdots (17)$$

容器筒体上承受的最大弯矩（在 C 处）按 (18) 计算：

$$M_s = \pm 0.0206Q'L_{\text{tot}}^2 \quad \cdots \cdots \cdots (18)$$

对于规则设计的容器，还应基于砂床性质，采用土壤调查报告中的沙床基床系数 K_s 进行容器的弹性基础梁有限元分析，加强圈承担的剪切载荷，容器筒体上的剪切载荷及弯矩取以上两者分析的大值。

对于整体应力分析设计的容器，由于基础不均匀支撑引起的加强圈承担的剪切载荷，容器筒体上的剪切载荷及弯矩取弹性基础梁有限元分析的结果。

7.4.7 容器长度变化引起的轴向载荷（载荷7）

当容器由于温度或压力的变化而膨胀或收缩时，容器周围的覆土在容器筒体轴线方向上会产生摩擦力。覆土层和筒体之间的摩擦系数取 1.0（对应于周围土壤的内摩擦角为 45° ，当土壤调查报告中土壤内摩擦角为其他角度时，摩擦系数应相应调整）。

正常操作工况下，单位长度的土壤轴向摩擦力及总摩擦力按式 (19) 及 (20) 计算：

$$F'_{\text{soil}} = \mu(Q_1 + Q_2 + 2Q_5) / L \quad \cdots \cdots \cdots (19)$$

$$F_{\text{soil}} = 0.5F'_{\text{soil}}L_{\text{tot}} \quad \cdots \cdots \cdots (20)$$

当设计工况考虑爆炸载荷时，以上计算摩擦力中的 Q_5 应以 ($Q_5 + Q_9$) 代替。

当筒体沿轴向膨胀时，轴向摩擦力为压缩载荷，数值为负；当容器沿轴向方向收缩时，轴向摩擦力为拉伸载荷，数值为正。

7.4.8 地震荷载（载荷8）

通常情况下或采购方没有特别要求时，容器可不考虑地震载荷。

当采购方有要求时,容器应按 GB/T 50761 进行抗震设计。设计地震动参数或抗震设防烈度应按现行国家标准 GB 18306 的有关规定确定,对完成地震安全性评价的工程场地,应按批准的设计地震动参数或抗震设防烈度进行抗震设防。

地震作用的载荷应考虑为载荷 Q_1 、 Q_2 、 Q_5 与设防地震下水平地震影响系数最大值 α_h 的乘积,并与载荷 Q_1 、 Q_2 、 Q_5 进行叠加后进行覆土罐的设计,即 $(1+0.495\alpha_h)Q_1$ 代替 Q_1 ; $(1+0.495\alpha_h)Q_2$ 代替 Q_2 ; $(1+0.495\alpha_h)Q_5$ 代替 Q_5 。

7.4.9 蒸汽云爆炸导致的外压载荷 (载荷9)

通常情况下或采购方没有特别要求时,覆土式卧式容器可不考虑蒸汽云爆炸载荷。

除非另有规定,蒸汽云爆炸的压力按 0.0225MPa 考虑,每个加强圈承受的载荷 Q_9 按式(21)计算:

$$Q_9 = 0.0225(D_o + 2/3H)L \cdots \cdots (21)$$

Q_9 可以看作是覆土重量的增量,并且应该在计算中按和 Q_5 的方式一样处理。

7.4.10 基础的支撑压力载荷 (载荷10)

对于规则设计的容器,砂床基础的支撑载荷 P 取以下两种方法计算所得载荷的大值: 1) 采用本文件 7.4.6 规定的支撑载荷分布的方法; 2) 弹性基础梁法。

a) 当采用本文件的方法时, P 按式 (22) 计算:

$$P = 1.33(Q_1 + Q_2 + Q_5) \cdots \cdots (22)$$

上式中,当设计工况考虑地震载荷时, Q_1 、 Q_2 与 Q_5 应按 7.4.8 节的要求进行修正; 当设计工况考虑爆炸载荷时, Q_5 应以 $(Q_5 + Q_9)$ 代替。

b) 当采用基于弹性基础梁法的有限元分析法时, P 按式 (23) 计算:

$$P = P'L \cdots \cdots (23)$$

对于整体应力分析设计的容器,砂床基础的支撑载荷 P 应按式(23)计算。

假设支撑砂床在一定支撑角度内对筒体施加径向压力。支撑筒体的角度依据基础而定,一般砂床基础支撑角为 120° (见图 13)。

按保守考虑,假设压力满足余弦分布:

$$p = p_o \cos[1.5(180^\circ - \psi)](120^\circ \leq \psi \leq 240^\circ) \cdots \cdots (24)$$

最大的压力在 $\psi=180^\circ$ 处:

$$p_o = P / (0.6D_oL) \cdots \cdots (25)$$

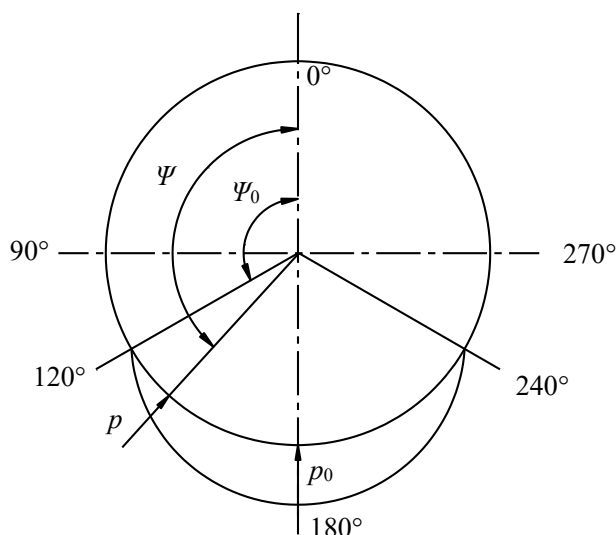


图 13 砂床作用在筒体上的载荷分布

在施工阶段或水压试验阶段，采用更窄的基础支撑会更有优势，例如支撑角为 90° ($\Psi_0=135^\circ$)，甚至 60° 支撑角（最小允许角度， $\Psi_0=150^\circ$ ）。支撑角为 90° 时，基础的最大压力按式（26）计算，支撑角为 60° 时，基础的最大压力按式（27）计算。

$$p_o = P / (0.4715 D_o L) \dots\dots\dots (26)$$

$$p_o = P / (0.325 D_o L) \dots\dots\dots (27)$$

7.4.11 液压试验压力（载荷11）

容器的液压试验压力应按相应的压力容器设计标准 GB/T 150 或 GB/T 4732 确定。

7.4.12 检修活载荷（载荷12）

检修时，覆土上部的均布活载荷取值不应小于 1.0 kPa。单个加强圈承受的活载荷 Q_{12} 按式（28）计算：

$$Q_{12} = 0.001 (D_o + 2H / 3) L \dots\dots\dots (28)$$

当设计工况需要考虑检修活载时， Q_{12} 应叠加到 Q_5 上。

7.4.13 雪载荷（载荷13）

单个加强圈承受的载荷 Q_{13} 按式(29)计算

$$Q_{13} = 0.001 S_o (D_o + 2H / 3) L \dots\dots\dots (29)$$

当设计工况需要考虑雪载荷时， Q_{13} 应叠加到 Q_5 上。

7.5 筒体和封头应力计算及评定

7.5.1 通常情况下或采购方没有特别要求时，容器筒体、封头及加强圈的应力计算及评定按本章执行，当容器采用整体应力分析设计时，分析设计的计算除满足GB/T 4732要求外，还应满足本文件附录A的要求。

7.5.2 无加强圈筒体的封头进行局部有限元分析时，应力分析和评定按GB/T 150.1-2024附录E执行。

7.5.3 各种工况下载荷1至载荷13对容器主要承压件筒体、封头、加强圈产生的载荷、应力分析及评定按本节规定。

7.5.4 筒体应力计算及评定

7.5.4.1 筒体周向应力

内压载荷和外压载荷引起筒体的周向薄膜应力应按式（30）计算，并依据 GB/T 150 的要求进行

评定。

$$\sigma_{0s} = \frac{p_c (D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \dots\dots\dots(30)$$

式中，当为正压操作工况或水压试验工况时， p_c 取 p_3 或 p_T ；当为负压操作工况（紧急泄压况）时， p_c 取载荷10引起的负压 p_0 与负压 p_4 进行叠加。

筒体的周向失稳以负压 p_0 与负压 p_4 作为外压载荷，按GB/T 150.3-2024进行临界压力校核。

7.5.4.2 筒体轴向应力

筒体的厚度应以内压以及由组合外压引起的周向失稳确定的厚度的大值为准。

（1）压力引起的轴向力

内压或外压引起的筒体轴向应力按（31）计算：

$$\sigma_{xs1} = \frac{p_c (D_i + \delta_e)}{4\delta_e} \dots\dots\dots(31)$$

式中，当为正压工操作工况或水压试验工况时， p_c 取 p_3 或 p_T ；当为负压操作工况（紧急泄压工况）时， p_c 取 p_4 。

（2）载荷6引起筒体最大弯矩处的轴向应力

砂床不均匀支撑引起的筒体上最大弯矩处的轴向应力按式（32）计算。

$$\sigma_{xs2} = \frac{0.0206Q'L_{tot}^2}{\pi D_i^2 \delta_e} \dots\dots\dots(32)$$

（3）土壤摩擦力引起的筒体轴向应力

筒体中部因土壤摩擦力引起的最大轴向应力按式（33）计算：

$$\sigma_{xs3} = \pm \frac{F'_{soil} L_{tot}}{2\pi (D_i + \delta_e) \delta_e} \dots\dots\dots(33)$$

当筒体沿轴向膨胀时，轴向摩擦力为压缩载荷，数值为负；当容器沿轴向收缩时，轴向摩擦力为拉伸载荷，数值为正。

（4）覆土压力在凸形封头上产生轴向的外部载荷引起的筒体轴向应力按式（34）计算：

$$\sigma_{xs4} = 9.8 \times 10^{-9} \frac{C_a \gamma_s H (D_i + \delta_e)}{4\delta_e} \dots\dots\dots(34)$$

正压工况，最大组合拉应力及压应力按式（35）和（36）计算：

$$\sigma_{xst} = \sigma_{xs1} + \sigma_{xs2} \dots\dots\dots(35)$$

$$\sigma_{xsc} = \sigma_{xs2} + \sigma_{xs3} + \sigma_{xs4} \dots\dots\dots(36)$$

负压工况，最大组合拉应力及压应力按式（37）和（38）计算：

$$\sigma_{xst} = \sigma_{xs2} + \sigma_{xs3} \dots\dots\dots(37)$$

$$\sigma_{xsc} = \sigma_{xs1} + \sigma_{xs2} + \sigma_{xs4} \dots\dots\dots(38)$$

以上组合应力可按NB/T 47041进行评定，当设计工况考虑地震载荷时，许用应力乘以载荷系数1.2。

7.5.4.3 筒体剪切应力

本节规定了由于加强圈以及不均匀支撑引起筒体上的剪应力的计算方法。

1) 无加强圈筒体的剪应力按式 (39) 计算:

$$\tau_s = \frac{0.0825 Q' L_{\text{tot}}}{\pi D_i \delta_e} \dots\dots\dots (39)$$

2) 带加强圈筒体的剪应力按 (40) ~ (42) 计算。

非初始水压试验工况的筒体剪应力计算按式 (40) 计算:

$$\tau_s = \frac{0.62P + 0.28Q_s}{0.5(D_i + \delta_e)\delta_e} \dots\dots\dots (40)$$

初始水压试验 (沙床支撑角度为 90° 时) 筒体剪应力计算按式 (41) 计算:

$$\tau_s = \frac{1.06P + 0.225Q_s}{0.5(D_i + \delta_e)\delta_e} \dots\dots\dots (41)$$

初始水压试验 (沙床支撑角度为 60° 时) 筒体剪应力计算按 (42) 计算:

$$\tau_s = \frac{2.31P + 0.16Q_s}{0.5(D_i + \delta_e)\delta_e} \dots\dots\dots (42)$$

筒体剪应力的评定按式 (43) 计算:

$$\tau_s, 0.6[\sigma]^t \dots\dots\dots (43)$$

7.5.4.4 筒体的二次应力

由于内压作用在加强圈处的筒体上产生的二次弯曲应力可按下式 (44) 计算:

$$\sigma_{\text{SM}} = \frac{1.82 p_c (D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \dots\dots\dots (44)$$

二次弯曲应力应与其他应力组合后评定, 当量应力的许用值应为 $3[\sigma]^t$ 。

7.5.5 封头应力计算及评定

7.5.5.1 封头采用分析设计方法设计时, 应依据本文件的载荷按 GB/T 4732.4 和 GB/T 4732.5 进行分析及评定, 否则按以下 7.5.5.2 及 7.5.5.3 节进行计算及评定。

7.5.5.2 正压时封头应力计算及评定

a) 正压工况下封头以压力 p_3 或 p_T 按 GB/T 150.3 进行应力计算及评定, 确定内压下封头的厚度。

b) 正压工况下, 由于覆土压力或筒体轴向膨胀对封头产生的压缩载荷而引起的封头等效外压按式 (45) 计算, 封头应以此外压按 GB/T 150.3 进行封头的周向失稳评定, 确定外压下封头的厚度。

$$p_{\text{heq}} = 9.8 \times 10^{-9} C_a \gamma_s (H + 0.5D_i) \dots\dots\dots (45)$$

7.5.5.3 负压时封头应力计算及评定

负压工况下, 封头应以封头等效外压 p_{heq} 以及设计外压的组合按 GB/T 150.3 进行封头的周向失稳评定, 确定外压下封头的厚度。

7.5.5.4 规则设计时, 封头的厚度应取 7.5.5.2 以及 7.5.5.3 确定的封头厚度大值, 且应乘以应力修正系数。球形封头应力修正系数为 1.2, 椭圆形和碟形封头应力修正系数为 1.1。修正后封头的最终厚度应不低于与之相连筒体厚度的 $2/3$ 。

7.6 加强圈计算及评定

7.6.1 加强圈尺寸

加强圈的初始尺寸可以按以下要求确定：

- a) 加强圈腹板和翼板的厚度可取与壳体相同的厚度；
- b) 腹板高度以不小于 $0.22R$ 为宜，腹板高度与腹板厚度之比最大不宜超过 20；
- c) 翼板宽度以不小于 $0.2R$ 为宜，翼板宽度与翼板厚度之比最大不宜超过 12；
- d) 整个加强圈在圆周方向宜采用相同规格尺寸的腹板和翼板。

7.6.2 计算说明

在容器建造期间以及初始水压试验期间，容器支撑在更小的角度是有利的，例如支撑角为 90° 或 60° （最小允许值）。容器正常操作工况下，基础支撑容器的角度按 120° 考虑。各种情况下加强圈上的弯矩和力的计算按本节规定。

7.6.3 120° 支撑角时，加强圈上的内力计算

7.6.3.1 加强圈上弯矩计算

弯矩为正使得加强圈的曲率半径增大，从而导致加强圈内侧拉伸弯曲应力。弯矩为负时，使得加强圈曲率半径减小，从而导致加强圈内侧压缩弯曲应力。加强圈的受力图如图 14 所示。加强圈在 ψ 等于 0° 、 100° 和 180° 处的弯矩分别按式 (46) ~ (48) 计算。

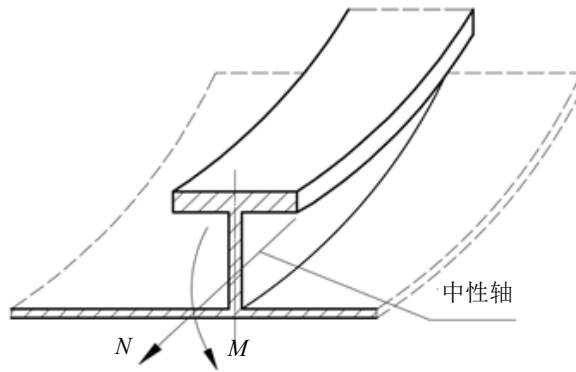


图 14 加强圈受力图

$$M_0 = 0.063R(Q_1 + Q_2 + Q_6) + 0.117R(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (46)$$

$$M_{100} = -0.077R(Q_1 + Q_2 + Q_6) - 0.121R(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (47)$$

$$M_{180} = 0.091R(Q_1 + Q_2 + Q_6) + 0.135R(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (48)$$

7.6.3.2 加强圈上的法向力计算

加强圈上的法向应力主要是由于弯矩引起，应计算最大弯矩产生处的法向力，加强圈在 ψ 等于 0° 、 100° 和 180° 处的法向力按式 (49) ~ (51) 计算。

$$N_0 = 0.205(Q_1 + Q_2 + Q_6) + 0.373(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (49)$$

$$N_{100} = -0.309(Q_1 + Q_2 + Q_6) - 0.499(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (50)$$

$$N_{180} = 0.429(Q_1 + Q_2 + Q_6) + 0.582(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (51)$$

负的法向力产生压缩应力，正的法向力产生拉伸应力。

内压 p_3 （或外压 p_4 ）也会在加强圈上产生法向力，此力在加强圈的周向方向上是定值，按 7.4.3 以及 7.4.4 节的要求计算。 N_3 为拉伸力， N_4 为压缩力， N_3 、 N_4 应与外载荷计算的法向力进行组合。

7.6.3.3 加强圈上剪力计算

加强圈上的剪力在弯矩最大处时基本等于 0，但在 $\psi=140^\circ$ 时，剪力最大，剪力按式 (52) 计算，此时弯矩基本为 0。

$$S_{140} = 0.197(Q_1 + Q_2 + Q_6) + 0.113(Q_5 + Q_9) \cdots \cdots (52)$$

7.6.4 90° 支撑角时，加强圈上的内力计算

覆土前的压力试验时，当沙床支撑角度为 90° 时，加强圈上的内力按 7.6.4.1~7.6.4.3 计算。

7.6.4.1 加强圈上弯矩计算

加强圈在 ψ 等于 0°、100° 和 180° 处的弯矩分别按式 (53) ~ (55) 计算：

$$M_0 = 0.07R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (53)$$

$$M_{100} = -0.088R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (54)$$

$$M_{180} = 0.124R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (55)$$

7.6.4.2 加强圈上法向力计算

加强圈在 ψ 等于 0°、100° 和 180° 处的法向力分别按式 (56) ~ (58) 计算：

$$N_0 = 0.219(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (56)$$

$$N_{100} = -0.312(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (57)$$

$$N_{180} = 0.692(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (58)$$

7.6.4.3 加强圈上剪力计算

加强圈在 ψ 等于 140° 处的剪力按式 (59) 计算：

$$S_{140} = 0.25(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (59)$$

7.6.5 60° 支撑角时，加强圈上的内力计算

7.6.5.1 加强圈上弯矩计算

加强圈在 ψ 等于 0°、100° 和 180° 处的弯矩分别按式 (60) ~ (62) 计算：

$$M_0 = 0.075R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (60)$$

$$M_{100} = -0.095R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (61)$$

$$M_{180} = 0.16R(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (62)$$

7.6.5.2 加强圈上法向力计算

加强圈在 ψ 等于 0°、100° 和 180° 处的法向力分别按式 (63) ~ (65) 计算：

$$N_0 = 0.229(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (63)$$

$$N_{100} = -0.314(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (64)$$

$$N_{180} = 1.209(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (65)$$

7.6.5.3 加强圈上剪力计算

加强圈在 ψ 等于 160° 处的剪力按式 (66) 计算:

$$S_{160} = 0.32(Q_1 + Q_2 + Q_6) \cdots \cdots (66)$$

7.6.6 加强圈上应力计算及评定

7.6.6.1 加强圈剪力计算及评定

加强圈上的剪力计算及评定按式 (67) 计算:

$$\tau_r = \frac{S_{140}}{A_w} \leq 0.5[\sigma]_r^t \cdots \cdots (67)$$

计算加强圈在 ψ 等于 160° 处的剪力时, 用 S_{160} 代替 S_{140} 。

7.6.6.2 加强圈法向力引起应力计算及评定

正压情况下, 加强圈的法向力引起的拉应力以及内压在加强圈上引起的拉应力的组合计算及评定按式 (68):

$$\sigma_r = \frac{N_{180}}{A_{\text{net}}} + \frac{N_3}{A_{\text{gross}}} \frac{A_{\text{net}}}{A_{\text{gross}}} \leq [\sigma]_r^t \cdots \cdots (68)$$

负压情况下, 加强圈的法向力引起的拉应力、压应力以及外压在加强圈上引起的压应力的组合计算及评定按式 (69):

$$\sigma_r = \begin{cases} \frac{N_{100}}{A_{\text{net}}} - \frac{N_4}{A_{\text{gross}}} \frac{A_{\text{net}}}{A_{\text{gross}}} \\ \frac{N_{180}}{A_{\text{net}}} + \frac{N_4}{A_{\text{gross}}} \frac{A_{\text{net}}}{A_{\text{gross}}} \end{cases} \leq [\sigma]_r^t \cdots \cdots (69)$$

7.6.6.3 加强圈与壳体连接焊缝应力计算及评定

加强圈与壳体连接焊缝的径向应力计算和评定按 (70):

$$\sigma_{rw} = \frac{p_c w}{1.4hw} \frac{A_{\text{net}}}{A_{\text{gross}}} \leq 0.6[\sigma]_r^t \cdots \cdots (70)$$

式中, 当为正压工操作工况或水压试验工况时, p_c 取 p_3 或 p_T ; 当为负压操作工况 (紧急泄压工况) 时, p_c 取 p_3 。

加强圈与壳体连接焊缝单位长度剪力按 (71) 计算:

$$F_w = \begin{cases} \frac{S_{140}}{A_w} t_w + \frac{2 \times 0.62 P}{R} \frac{A_{net}}{A_{gross}} \\ \frac{S_{140}}{A_w} t_w + \frac{2 \times 1.06 P}{R} \frac{A_{net}}{A_{gross}} & (\text{初始水压试验砂床支撑角为 } 90^\circ) \dots\dots\dots (71) \\ \frac{S_{160}}{A_w} t_w + \frac{2 \times 2.31 P}{R} \frac{A_{net}}{A_{gross}} & (\text{初始水压试验砂床支撑角为 } 60^\circ) \end{cases}$$

加强圈与壳体连接焊缝的剪应力计算和评定按 (72)，其中 hw 和 w 见图 15。

$$\tau_{rw} = \frac{F_w}{0.7hw} \leq 0.6[\sigma]_r^t \dots\dots\dots (72)$$

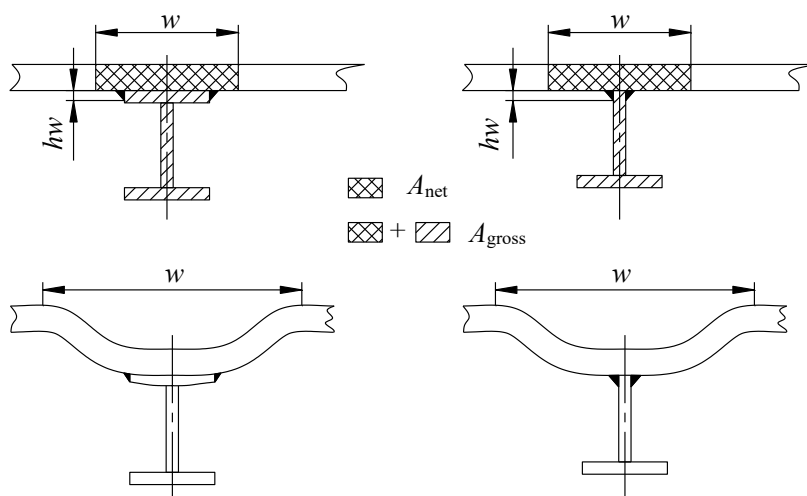


图 15 内加强圈与筒体的焊缝及径向变形

7.6.7 加强圈的稳定性评定

7.6.7.1 加强圈的失稳模式

容器的加强圈可能发生的失稳模式有局部失稳、平面失稳、腹板剪切失稳和翼板诱导失稳。以上失稳模式之间相互作用的可能性也应评估，因为可能会出现各种模式之间互相干涉。

7.6.7.2 平面失稳

加强圈的平面轴心受压稳定性校核按式 (73)：

$$N_{100} / \frac{X_y A_{gross} [\sigma]_r^t}{\gamma_{M1}} \leq 1 \dots\dots\dots (73)$$

加强圈的平面压弯稳定性校核按式 (74)：

$$\frac{N_{100}}{X_y A_{gross} \frac{[\sigma]_r^t}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y M_{100}}{W_{ply} \frac{[\sigma]_r^t}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \dots\dots\dots (74)$$

式中：

X_y ——平面内失稳时考虑的削弱系数，按式 (75) 计算：

$$X_y = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5}} (X_y, 1) \dots\dots\dots (75)$$

ϕ ——系数，按式（76）计算：

$$\phi = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] \dots\dots\dots (76)$$

$\bar{\lambda}$ ——长细比，按式（77）计算：

$$\bar{\lambda} = \lambda / \lambda_1 \dots\dots\dots (77)$$

λ_1 ——临界长细比，按式（78）计算：

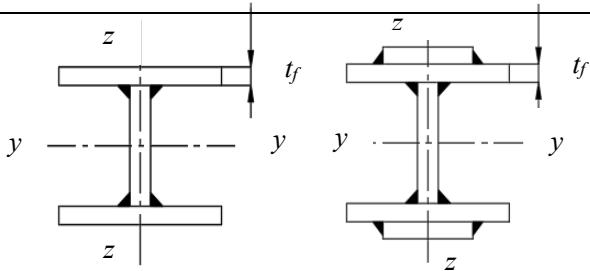
$$\lambda_1 = \pi \left(\frac{E_r^t}{[\sigma]_r^t} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (78)$$

λ ——以 y-y 为组合截面中性轴的杆件长细比，按式（79）计算：

$$\lambda = \frac{0.25 \pi D_1}{\sqrt{\frac{I_y}{A_{gross}}}} \dots\dots\dots (79)$$

I_y ——以 y-y 为平面转动中性轴的加强圈与筒体有效段组合截面惯性矩（mm⁴）；
如校核的工况下须考虑厚度附加量的影响，则应减除相应的厚度附加量后再对该参数进行计算；
 α ——缺陷系数，按表 4 选取；

表 4 缺陷系数 α 选用表

截面形式	适用范围	屈曲时的 主轴	缺陷系数 α
	$t_f \leq 40$	y-y	0.34
		z-z	0.49
	$t_f > 40$	y-y	0.49
		z-z	0.76

A_{gross} ——含壳体有效宽度的加强圈有效截面积，mm²，应根据所校核的工况条件减除相应的厚度附加量后再进行计算；

γ_{M1} ——加强圈局部安全系数，当在试验工况下进行校核时， $\gamma_{M1}=1.5$ ；当在其它工况下进行校核时， $\gamma_{M1}=1.1$ ；

k_y ——相互作用系数，按式（80）计算：

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{100}}{X_y A_{gross} [\sigma]_r^t} \quad (k_y, 1.5) \dots\dots\dots (80)$$

μ_y ——系数，按式（81）计算：

$$\mu_y = -1.8\bar{\lambda} + \left[\frac{W_{\text{ply}} - W_{\text{ely}}}{W_{\text{ely}}} \right] (\mu_y, 0.9) \dots\dots\dots(81)$$

W_{ply} ——组合截面的塑性截面系数， mm^3 ，分别求两侧面积对中心轴的面积矩，面积矩之和即为塑性截面系数，塑性心性轴为组合截面面积平分线；

W_{ely} ——组合截面对其中性轴的弹性截面系数， mm^3 ，按式（82）计算：

$$W_{\text{ely}} = I_y / y_{\text{max}} \dots\dots\dots(82)$$

y_{max} ——横截面上离弹性中性轴最远的点到中性轴的距离， mm 。

7.6.7.3 腹板剪切失稳

为了避免失稳导致的剪切失效，应控制腹板高度与厚度的比 d/t_w ，其应满足式（83）的要求。加强圈腹板尺寸符号示意图见图 16。

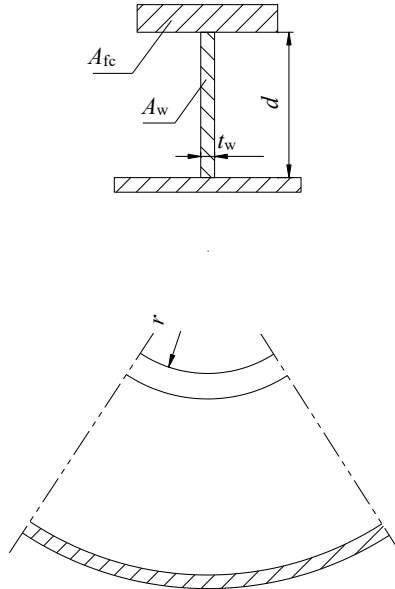


图 16 加强圈腹板尺寸符号示意图

$$\frac{d}{t_w}, 69\varepsilon \dots\dots\dots(83)$$

其中：

ε ——系数， ε 按式(84)计算：

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{[\sigma]_r}} \dots\dots\dots(84)$$

d ——加强圈腹板高度（ mm ）

t_w ——加强圈腹板的有效厚度（ mm ），该参数应根据所校核的工况条件减除相应的厚度附加量后再进行计算。

7.6.7.4 翼板诱导失稳

当腹板较薄且高时，由于弯曲和轴向载荷，腹板不能提供翼板平面内失稳足够的抵抗力，从而导

致翼板发生失稳，如图 17 所示。

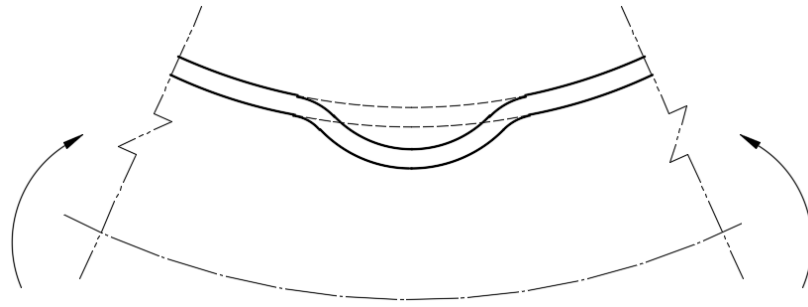


图 17 加强圈翼板失稳示意图

为了避免此种失效，腹板高度与厚度的比值上限应满足式（85）的要求：

$$\frac{d}{t_w} = \frac{0.3 \frac{E_r^t}{[\sigma]_r^t} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{\left(1 + \frac{dE_r^t}{3r[\sigma]_r^t}\right)}} \dots\dots\dots(85)$$

其中：

A_w ——加强圈腹板的截面面积， mm^2 ，如校核的工况下要考虑厚度附加量的影响，则应减除相应的厚度附加量后再确定该参数；

A_{fc} ——加强圈压缩侧翼板的截面面积 mm^2 ，该参数应根据所校核的工况条件减除相应的厚度附加量后再进行计算；

r ——加强圈翼板内半径， mm 。

7.6.7.5 失稳模式之间的相互影响

当在相同的载荷水平下，当两个或两个以上的失稳模式发生时，失稳之间会发生相互影响。在容器上的加强圈，平面失稳和翼板诱导失稳之间可能发生相互作用。为避免失稳模式之间的相互影响，应按式（86）对加强圈进行校核。

$$\frac{N_{100}}{X_y A_{\text{gross}} \frac{[\sigma]_r^t}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{100}}{X_{\text{fib}} W_{\text{ply}} \frac{[\sigma]_r^t}{\gamma_{M1}}} \geq 1 \dots\dots\dots(86)$$

式中：

X_{fib} ——相互影响失稳时考虑的削弱系数，按式（87）计算：

$$X_{\text{fib}} = \min(X_{\text{fib1}}, X_{\text{fib2}}) \dots\dots\dots(87)$$

其中： $X_{\text{fib1}} = (t_w r / A_{fc}) X_w$ ， $X_{\text{fib2}} = X_f$

X_w ——腹板平面失稳时考虑的削弱系数，按式（88）计算：

$$X_w = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5}} (X_w, 1) \dots\dots\dots(88)$$

X_f ——翼板平面失稳时考虑的削弱系数按式(89)计算:

$$X_f = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5}} (X_{f,1}) \dots\dots\dots(89)$$

7.7 挠度计算

7.7.1 筒体中部的最大挠度

筒体中部的最大挠度按式(90)计算:

$$y_{s\max} = \left(\frac{2.125}{384} \right) \frac{0.33Q'L_{\text{tot}}^4}{E_s^t I_s} \dots\dots\dots(90)$$

7.7.2 加强圈的挠度

容器覆土工况下,加强圈顶部相对底部的挠度按式(91)计算(仅适用于沙床支撑角为 120°)。

$$y_{r\max} = \frac{R_r^2}{E_r^t I_r} \int_0^\pi [(Q_1 + Q_2 + Q_6)R_r K_7 + (Q_5 + Q_9)R_r K_6] \sin\psi d\psi \dots\dots\dots(91)$$

式中, R_r 为加强圈的最大外半径,单位为 mm; 系数 K_6 和 K_7 分别按式(92)和式(93)计算:

$$K_6(\psi) = -0.000792 - 0.006086\cos(\psi) - 0.106405\sin(\psi) + 0.126189\cos(2\psi) + 0.050080\sin(2\psi) \dots\dots(92)$$

$$K_7(\psi) = -0.000458 - 0.003350\cos(\psi) - 0.058646\sin(\psi) + 0.069535\cos(2\psi) + 0.027586\sin(2\psi) \dots\dots(93)$$

由于各种载荷组合导致的弯矩计算的复杂性,挠度宜采用数值方法计算。

7.8 开孔及补强设计

内压和外压下容器的开孔补强计算按 GB/T 150.3 的要求,超出该章计算范围或者设计方认为必要时,可采用有限元方法进行局部应力分析。

8 制造、检验、试验及验收

8.1 一般要求

容器的制造、检验与验收除应符合本文件和设计文件的要求外,还应符合 TSG 21、GB/T 150.4 的要求,采用分析设计的容器相关制造、检验与验收还应满足 GB/T 4732 的要求。

制造单位应当根据容器风险评估报告合理确定制造和检验工艺。

8.2 成形、组装及公差要求

8.2.1 容器制造公差应满足以下规定:

(1) 筒体 A、B 类焊接接头及封头拼接接头的对口错边量 b 不大于较薄板厚度的 10%,且不大于 3mm。

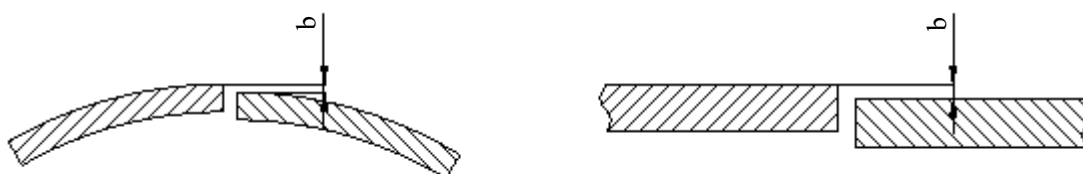


图18 筒体A、B类焊接接头及封头拼接接头的对口错边量示意图

(2) 筒体圆度,应符合 GB/T 150.4 中 6.5.10 及 6.5.11 的要求,且任意同一断面的最大内径与最

小内径之差不大于 0.5 倍的筒体名义厚度。

8.2.2 除图样中另有规定外，容器及其相连接的非受压元件的尺寸极限偏差、形状和位置公差应满足 GB/T 150.4 的要求。

8.2.3 容器外形尺寸极限偏差、形状和位置公差检验项目如表 5 所示，其合格标准按 HG/T 20584 的规定。

表 5 容器外形尺寸极限偏差及形状位置公差检验项目

序号	检验项目
1	两封头切线间的距离
2	a) 开口接管中心线到切线、圆筒中心线的距离，接管间距 b) 开口接管法兰面与筒体外表面或与筒体中心线之间距离
3	a) 人孔、手孔中心线到切线距离 b) 人孔、手孔的法兰面与筒体外表面距离或与筒体中心线之间距离
4	a) 法兰面水平度或垂直度公差

8.3 焊接

8.3.1 在基础上进行水压试验的容器，其筒体底部 120° 范围内应避免存在纵向焊缝。

8.3.2 加强圈的材质应与壳体材质相同，其布置应避开环焊缝、开口和其他固定件。

8.3.3 加强圈腹板对接焊缝、翼缘板对接焊缝、腹板与翼缘板连接焊缝以及“T”型加强圈与筒体连接焊缝应采用全焊透结构。

8.3.4 施焊前，所有的焊接接头应按照 NB/T 47014 进行焊接工艺评定或具有结果评定合格的焊接工艺支持。

8.3.5 焊工应具备相应的资格证书。

8.3.6 容器壳体所用钢板，坡口加工后，应在坡口及周边 50mm 宽度范围内进行 100%UT 检测，按 NB/T 47013.3 标准执行，质量等级不低于本文件 5.3 节规定。

8.3.7 所有接管与筒体的角焊缝应采用合适的焊接方法保证焊透，否则应采用双面焊，双面焊须清除焊根。

8.3.8 焊缝返修前应编制焊接返修工艺文件，焊接返修工艺应提出具体的预热、后热、焊后热处理及无损检测要求。

8.4 无损检测

8.4.1 容器的壳体、接管以及加强圈（包括腹板和翼板）上的所有对接焊接接头应进行 100%射线检测或衍射时差法超声检测（TOFD），如采用 TOFD 方法，应针对近表面可能存在的检测盲区采取补充检测措施；无法进行射线检测的焊缝，允许选用有记录的脉冲反射法超声成像检测代替；需要消除应力热处理的容器，射线检测应在热处理前完成。

8.4.2 加强圈腹板对接焊缝、翼缘板对接焊缝、腹板与翼缘板连接焊缝以及“T”型加强圈与筒体连接焊缝应 100%磁粉检测（无法磁粉检测的，允许采用渗透检测），磁粉检测按 NB/T47013.4 标准执行，质量等级不低于 I 级。

8.4.3 接管及人孔与壳体连接的焊接接头应 100%射线或超声检测，检测标准及合格级别按 GB/T150.4-2024 表 5。

8.4.4 所有 A、B、D 及 E 类焊接接头，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均应 100%磁粉检测（无法磁粉检测的设备，允许采用渗透检测）。有热处理要求的设备，上述焊缝还应在热处理后再次进行磁粉检测。磁粉检测按 NB/T 47013.4 标准执行，质量等级不低于 I 级。

8.4.5 容器内侧宜采用荧光磁粉检测。

8.4.6 在基础上进行水压试验的容器，如果其底部环向焊接接头因砂床覆盖无法观测，则覆盖部分焊

接头在水压试验后应从内侧进行 100%MT 检测，无法磁粉检测的设备，允许采用渗透检测。磁粉检测按 NB/T 47013.4 标准执行，质量等级不低于 I 级。

8.5 热处理

8.5.1 焊前预热应符合 GB/T 150.4-2024 中 7.3.2 条规定，确定预热温度及时间时应充分考虑容器上每种焊接接头（包括临时附件在内的所有附件以及接管与容器的焊接接头）厚度、拘束度以及施焊环境的影响。

8.5.2 容器应按照 GB/T 150.4 或 GB/T 4732.6 标准的规定进行热处理。整体热处理的容器，焊接应在热处理前完成，热处理后不允许再施焊。

8.5.3 有焊后热处理要求的焊缝，其返修宜在焊后热处理前进行，如在焊后热处理之后返修，应严格执行 GB/T 150.4 的规定。

8.5.4 需焊后热处理的容器，制造单位应按设计文件和标准的要求，在热处理前编制焊后热处理工艺规程，焊后热处理工艺应经评定合格。

8.5.5 宜采用整体加热焊后热处理，如采用分段整体热处理，其合拢焊缝允许采用局部焊后热处理，局部焊后热处理的合拢缝与筒体加强圈距离宜>1500mm。

8.5.6 应力腐蚀环境下的容器，在焊后热处理后，应检测每道 A、B、D 类焊接接头表面硬度，焊接接头表面硬度以母材-热影响区-焊缝金属-热影响区-母材为一组，每道焊接接头至少检测一组，硬度值应符合设计文件的规定值。其他容器如相关标准规定或者设计者认为必要时，应在图纸中明确硬度检测要求。

8.6 试件与试样

8.6.1 容器应逐台制备产品焊接试件。产品焊接试件应在筒节纵向焊缝延长部位与筒节纵缝采用相同的焊接工艺同时施焊，试件应取自合格的原材料，且与容器用材料具有相同标准、相同牌号（等级）、相同厚度和相同热处理状态。

8.6.2 试件应按 NB/T 47016 取样及试验，并按 GB/T 150.2 和设计文件的要求进行评定，硬度检测要求应与筒体焊缝相同。

8.7 耐压试验及泄漏试验

8.7.1 容器应进行耐压试验和泄漏试验，泄漏试验宜采用气密性试验，试验前制造单位应编制试验方案。

8.7.2 试验压力、温度应满足 GB/T 150.4 要求。试验过程中，容器体无渗漏，无可见的变形和异常声响为合格。

8.7.3 在制造厂已完成整体液压试验的容器，无需在现场再次试验。

8.7.4 现场组焊的容器，如在砂床基础上进行液压试验，应设置沉降观测点，对容器基础进行沉降观测，至少记录液体充装率为 25%、50%、75%、100%时以及充满 48h 后的沉降值。

8.7.5 耐压试验完毕后，应将液体排尽，用压缩干燥空气将容器内部吹干。

8.7.6 水压试验时，焊接过程中设置的焊沟需要临时回填，位于临时回填的焊沟部位的焊接接头的涂层应在水压试验后进行。

8.8 出厂要求

8.8.1 容器出厂或者竣工时，制造厂应向使用单位至少提供以下技术文件和资料，并且同时提供存储技术文件和资料的光盘或者其他电子存储介质：

- a) TSG 21-2016 中 4.1.5 及 GB/T 150.4-2024 中 13.1 规定的文件和资料。
- b) 焊补和返修记录。
- c) 容器防腐层施工检报告。
- d) 阴极保护系统的操作和维护手册（如有）。

8.8.2 容器铭牌应固定于明显的位置，铭牌的内容应满足 TSG 21-2016 中 4.1.6 及 GB/T 150.4-2024 中 13.2 或设计文件要求。

8.9 包装和运输

- 8.9.1 容器的涂敷与运输包装除应符合 NB/T 10558 的规定外，还应符合设计文件要求。
- 8.9.2 所有容器、箱、包等，均应和运输工具妥善固定。
- 8.9.3 经焊后热处理的容器，应在容器上显著位置标示“已热处理，严禁焊接”。
- 8.9.4 海上运输的容器，内部应充 0.05MPa 的氮气保护，同时封闭所有开口。

9 防腐和阴极保护基本要求

9.1 应根据介质特性确定是否需要内部防腐涂层。外部防腐和阴极保护系统应满足容器设计使用年限的需要，防腐涂层应与阴极保护系统相兼容。

9.2 外部防腐涂层施工前应制定相应涂装施工技术规程。

9.3 在底漆和涂层施工期间，容器表面应无污染物和水分，喷砂清理和涂层施工应在钢材表面温度高于露点温度 3℃或以上或环境相对湿度低于 80% 时进行。

9.4 外部防腐涂层

9.4.1 容器外部防腐涂层可选择多层玻璃纤维增强沥青涂层、环氧树脂基涂层或聚氨酯基涂层等，其应满足以下要求：

- a) 与容器的材料相匹配；
- b) 耐受砂床和覆土中污染物中的腐蚀环境，涂层可隔绝容器金属和腐蚀环境，形成有效物理屏障；
- c) 各道涂层间具有良好的配套性和相容性；
- d) 能够抵抗在所有操作条件下（例如冷冲击）容器和周围覆土间的法向力和摩擦力；
- e) 涂层具备足够附着力，能够承受在各工况下容器和周围土壤之间正常压力、摩擦力和冷热冲击，具备施工适应性；
- f) 与选用的阴极保护系统相匹配。

9.4.2 玻璃纤维增强沥青涂层

玻璃纤维增强沥青涂层应由两层或两层以上的组成，涂于适用的底漆之上，总厚度不应小于 6 mm。所用沥青的等级应适合安装地的气候条件，不得用于暴露于大气环境条件下的零部件。

9.4.3 环氧树脂或聚氨酯涂层

环氧树脂或聚氨酯涂层应为无溶剂、最小厚度为 800μm，涂层的附着力不应小于 6N/m²。

9.4.4 选用其它防腐涂层时当应经过充分论证，并符合 9.4.1 条要求。

9.5 阴极保护

9.5.1 应根据以下因素评估容器阴极保护系统的必要性和可行性：

- a) 设计使用年限；
- b) 覆土和砂层的电阻率、成分、PH 值和细菌活性等；
- c) 周边其它设施的干扰情况；
- d) 周边其它设施的杂散电流情况；
- e) 对周边其它设施的影响；
- f) 经济合理性。

9.5.2 阴极保护系统的设计、施工和调试应由专业且经验丰富的阴极保护工程承包商负责。

9.5.3 承包商应基于阴极保护系统的要求对容器的设计和电气隔离系统等提出相应的设计条件。

9.5.4 阴极保护系统应满足储罐设计使用年限的需要，不应因过度保护而对容器、防腐涂层和其它结构造成有害影响，设计时应考虑以下因素：

- a) 容器的数量、尺寸和位置；
- b) 设计使用年限；

- c) 连接管道;
- d) 相邻埋地金属;
- e) 设备布置;
- f) 砂床和覆土条件;
- g) 防腐涂层;
- h) 接地系统;
- i) 电气隔离系统;
- j) 可能的干扰源;
- k) 危险区域分类;
- l) 周边其它设施条件;
- m) 对点位控制、监测设施的其他要求。

9.5.5 阴极保护系统应可靠、可监测和易维护。

9.5.6 阴极保护系统施工前应制定相应施工技术规程。

9.5.7 阴极保护系统的监测设施应确保能够有效测量容器不同位置的阴极保护水平;

9.5.8 阴极保护系统的操作和维护手册

阴极保护系统承包商应编写阴极保护系统的操作和维护手册, 内容至少包括:

- a) 系统和系统组件、控制装置和连接说明;
- b) 竣工图;
- c) 设备制造商文件;
- d) 系统保护电位要求;
- e) 监测时间表;
- f) 电气隔离完整性测试程序和手册;
- g) 系统的再调整方法;
- h) 监测程序及操作手册。

9.5.9 应定期检查阴极保护系统的完好情况。

10 砂床及覆土基本要求

10.1 一般要求

10.1.1 容器的基础及覆土应采取避免砂土塌陷、流失、砂床冲刷、冻胀、储罐漂浮等措施, 床和覆土材料应具备适宜的安息角和沉降量。

10.1.2 容器的基础应确保在容器设计使用年限内其轴向斜度最小为1:200, 最大为1:50。

10.2 砂床

10.2.1 砂床应高于最高地下水位至少600mm, 砂床厚度不应小于1m, 应沿容器全长连续支承容器。

10.2.2 容器下支承角120°范围内的砂床材料应分层敷设, 每层最大厚度为0.3米, 每层应压实至最大干密度不小于95%。

10.3 砂

砂床和覆土均采用砂。砂的选择应考虑容器外表面防腐和阴极保护的要求, 不得使用海砂或任何其他有腐蚀性的材料, 宜符合以下要求:

- a) 干净;
- b) 小于 0.063 mm 的颗粒含量不应超过 10% (按重量计);
- c) 有机质含量不应超过 3% (按重量计);
- d) 硫酸盐含量不应大于 0.02% (按重量计);
- e) 氯化物含量不应大于 0.02% (按重量计);
- f) 粒径不应大于 2 mm;

g) 粒度分布不均匀系数 (D_{60}/D_{10}) 应在4至10之间。

10.4 基础沉降及检测

10.4.1 储罐全长应连续支承在砂床基础上，应控制基础的最大沉降，不均匀沉降不得影响储罐的均匀支承。

10.4.2 总沉降量应符合容器连接管道和底部排放通道的要求。

10.4.3 应在砂床施工安装、充水预压、耐压试验、开车和操作使用阶段进行沉降监测。对于现场制造的容器，在其基础上进行水压试验时，应在试验期间进行沉降监测，分别在充水 0、25、50、75 和 100% 时，以及在容器完成充水 48 小时后进行沉降监测，沉降率应随时间的推移而降低，直至稳定。

10.5 覆土

10.5.1 覆土坡度不得超过填充材料的自然坡度，且最大坡度应为1:1.5。

10.5.2 容器顶部覆土厚度应不小于500mm。

10.5.3 覆土表面应用柔性沥青层、预制石板、带孔混凝土地砖或植被等覆盖，但不应使用连续的不透水覆盖物。覆土底部应设置合理的排水设施，避免雨水积聚在覆土内部。

附录 A
(规范性)
整体分析设计覆土容器基本要求

A. 1 总则

A. 1.1 本附录在 GB/T 4732. 1~4732. 6 的基础上提出了以分析设计为基础的覆土容器的设计、制造、组焊、检验与验收的特殊要求
A. 1.2 本附录未作规定者，还应符合本文件各有关章节及 GB/T 4732. 1~4732. 6 的要求。

A. 2 通用要求

A. 2.1 失效模式

根据设计条件，整体分析设计覆土容器至少应考虑失效模式包括：塑性垮塌、局部过度应变、屈曲、疲劳、棘轮。
设计人员在设计时还需考虑覆土容器在全寿命周期内可能出现的其他失效模式，提出防止失效的措施。

A. 2.2 设计方法

容器的分析设计可以根据失效模式，选择采用如表 A.1 所列的设计方法，以判定是否失效，并按 GB/T 4732 的相关规定制定评定方法。

表 A.1 设计方法

失效模式	设计方法			
	公式法	应力分类方法 (弹性应力分析)	极限分析	弹塑性分析
塑性垮塌失效	√	√	√	√
局部过度应变失效	√ ^a	√		√
屈曲失效	√			√
疲劳失效		√		√
棘轮失效	(安定)	√		√
^a 按 GB/T 4732. 3 中公式法设计的受压元件，无需进行局部过度应变评定。				

当采用上述设计方法进行分析设计计算时，应选择以 GB/T 4732. 3~GB/T 4732. 5 作为设计基础，进而采用 GB/T 4732. 3、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. 3、GB/T 4732. 4 或 GB/T 4732. 5 作为设计基础时，无需相互满足。同一容器不同部位的受压元件，可采用不同的设计方法进行分析 and 评定。当采用上述不同的设计方法进行分析设计计算时，只需满足其中一种评定方法即可。

A. 2.3 耐压试验应力校核

采用整体分析设计的覆土容器，制成后应经耐压试验，并应满足 GB/T 4732. 1 中 5. 7 的要求。覆土容器的耐压试验的类型、要求、试验温度和试验压力值应满足 GB/T 4732 的相关规定。
当耐压试验时，覆土容器任意点上的压力(包括液注静压力)超过 GB/T 4732. 1 中 5. 7. 2 规定的试验压力时，应校核各受压元件在试验条件下的应力水平。

耐压试验工况下进行应力校核时，应计及以下载荷：

- a) 选定的耐压试验压力；
- b) 由试验液体引起的液注静压力（必要时）；
- c) 试验工况下容器的自重（含附件），以及内装试验介质的重力载荷；
- d) 基础支撑载荷（包括基础不均匀支撑引起的载荷）；
- e) 覆土层载荷、容器伸缩引起的轴向载荷等（仅停车检验或者维修时，需要重新进行液压试验、有覆土层的情况下考虑）；
- f) 一般情况下，可不考虑雪、风与地震载荷。

A.3 符号

以下符号适用于本文件：

D_o ——筒体外径，mm；

K ——载荷组合系数；

k ——载荷工况序号；

L_1, L_{o1} ——设计工况和正常操作工况下，容器本体重力载荷；

L_2, L_{o2} ——设计工况和正常操作工况下，容器内操作介质重力载荷；

L_{T2} ——耐压试验工况下，容器内试验介质重力载荷；

L_3 ——容器设计内压，MPa；

L_{o3} ——容器工作内压，MPa；

L_4 ——容器设计负压，MPa；

L_{o4} ——容器工作负压，MPa；

L_5, L_{o5} ——设计工况和正常操作工况下，覆土载荷；

L_6, L_{o6} ——设计工况和正常操作工况下，基础不均匀支撑引起的载荷；

L_7, L_{o7} ——设计工况和正常操作工况下，容器伸缩引起的轴向载荷（由于温度或压力的变化）；

L_8, L_{o8} ——设计工况和正常操作工况下，地震载荷；

L_9, L_{o9} ——设计工况和正常操作工况下，蒸汽云爆炸导致的对容器的外压载荷；

L_{10}, L_{o10} ——设计工况和正常操作工况下，基础支撑载荷；

L_{11} ——耐压试验压力，MPa；

L_{12}, L_{o12} ——设计工况和正常操作工况下，覆土上部的检修活载荷；

L_{13}, L_{o13} ——设计工况和正常操作工况下，雪载荷；

$P_{m,k}$ ——每个部件在中面处的等效薄膜应力，MPa；

$S_{c,k}$ —— k 载荷工况需用压应力，MPa；

S_y ——材料在设计温度下的屈服强度，MPa；

S_I ——一次总体薄膜当量应力，MPa；

S_{II} ——一次局部薄膜当量应力，MPa；

S_{III} ——一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲当量应力，MPa；

α ——载荷调整系数；

β_b ——屈曲载荷调整系数；

β_{cr} ——承载能力减弱系数；

$\beta_{bcomponent,k}$ ——每个部件在 k 载荷工况下的屈曲载荷调整系数；

$\lambda_{component,k}$ ——每个部件在 k 载荷工况下的屈曲特征值；

δe ——圆筒或者锥壳有效厚度，mm；

σ_1 ——第一主应力，MPa；

σ_2 ——第二主应力，MPa；

σ_3 ——第三主应力，MPa；

$\sigma_{component,crit,k}$ ——等效薄膜应力 $P_{m,k}$ 与承载能力减弱系数 β_{cr} 的乘积，MPa。

A. 4 设计载荷

设计载荷应按本文件第 4.3 节的规定。

如采用有限元分析，容器筒体上覆土压力应按 7.4.5.1 节公式（8）计算；容器封头上的覆土载荷应按 7.4.5.2 节公式（10）计算。对于采用连续砂床基础和桩基基础的支撑形式，容器基础的支撑载荷应按 7.4.10 节公式（10）计算，应考虑基础支撑载荷沿筒体轴线方向分布的不均匀因素。基础支撑也可采用等效弹性支撑方式施加；采用钢制或混凝土制鞍座基础的支撑形式，容器基础的支撑载荷应充分考虑基础支撑载荷沿筒体轴线方向分布的不均匀因素，并进行强度及稳定性分析与评定。

A. 5 设计工况

A. 5.1 应力分类方法

采用应力分类方法进行设计时，应力分析时应至少包括 GB/T 4732.3-2024 中表 1、表 2 与本文件中 7.3、7.4 所列出的载荷与载荷组合。当有多个载荷同时作用时，应按可产生最不利结果的方式进行载荷组合，如其中一个或多个载荷不起作用时可能引起更危险的情况。

进行塑性垮塌评定和棘轮评定时，还应至少包括按表 A.2 中的设计条件和工作条件分别计算的载荷组合；局部过度应变评定，应按表 A.2 中规定的载荷组合进行。

耐压试验时，如容器上任何点的压力（包括液柱静压头）大于规定试验压力的 1.06 倍，当量应力（ S_I 和 S_{III} ）应在表 A.2 中耐压条件的载荷组合下按 GB/T 4732.1-2024 中 5.7.3.2 进行校核。

表 A.2 应力分类方法载荷组合工况和当量应力

载荷组合工况			当量应力
设计条件：			S_I, S_{II}, S_{III}
1	正常操作	$L_1+L_2+L_3+L_6+L_7+L_{10}$ $L_1+L_2+L_3+L_6+L_7+L_{10}+L_{12}+L_{13}$	
2	正常操作+地震	$L_1+L_2+L_3+L_6+L_7+L_8+L_9+L_{10}$	
3	正常操作+0.75（地震+雪载荷+活载荷+冲击载荷）	$L_1+L_2+L_3+L_6+L_7+0.75L_8+0.75L_9+L_{10}+0.75L_{12}+0.75L_{13}$	
4	紧急泄压（负压操作工况）	$L_1+L_2+L_4+L_6+L_7+L_{10}+L_{12}$	

表 A.2 应力分类方法载荷组合工况和当量应力(续表)

载荷组合工况			当量应力
设计条件:			S_I, S_{II}, S_{III}
5	停车检修期空罐	$L_1+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{12}+L_{13}$	
工作条件:			S_{IV}
1	正常操作	$L_{01}+L_{02}+L_{03}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+L_{010}$ $L_{01}+L_{02}+L_{03}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+L_{010}+L_{012}+L_{013}$	
2	正常操作+地震	$L_{01}+L_{02}+L_{03}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+L_{08}+L_{09}+L_{010}$	
3	正常操作+0.75（地震+雪载荷+活载荷+冲击载荷）	$L_{01}+L_{02}+L_{03}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+0.75L_{08}+0.75L_{09}+L_{010}+0.75L_{012}+0.75L_{013}$	
4	紧急泄压（负压操作工况）	$L_{01}+L_{02}+L_{04}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+L_{010}+L_{012}$	
5	停车检修期空罐	$L_{01}+L_{05}+L_{06}+L_{07}+L_{010}+L_{012}+L_{013}$	
耐压试验条件			S_I, S_{III}
1	覆土前的液（气）压试验	$L_1+L_{T2}+L_6+L_{10}+L_{11}$	
2	投用后检修液（气）压试验	$L_1+L_{T2}+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{11}+L_{12}+L_{13}$	
局部过度应变评定			
1	正常操作	$L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10}$	$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$
2	紧急泄压（负压操作工况）	$L_1+L_2+L_4+L_5+L_6+L_7+L_{10}$	
注：			
1. 本设计评定，应符合 GB/T 4732.4 的相关规定。其中，对塑性垮塌失效评定，当载荷组合中包含地震载荷 L_8 的全值时，载荷组合系数 K 取 1.2，否则 K 取 1.0；			
2. 对于包括 L_6 (L_{06}) 的载荷组合，应考虑基础支撑载荷沿筒体轴线方向分布的不均匀性。			

A.5.2 弹塑性分析方法

采用弹塑性分析法设计时,容器的塑性垮塌、局部过度应变、屈曲、疲劳和棘轮等 5 种失效模式的分析与评定,除应考虑 GB/T4732.5 中表 1 规定的载荷组合工况外,还应至少计算表 A.3 中的载荷

组合。

基于弹塑性分析的塑性垮塌评定，可以采用极限分析或弹塑性分析。若对随变形而出现刚度下降的元件（例如面内弯曲的弯管）不得采用极限分析，应采用 GB/T4732.5 中 5.3 的弹塑性分析进行评定。

表 A.3 弹塑性分析法载荷组合工况

条件和组合序号			载荷组合工况	
设计条件	正常操作		1	$\alpha [L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10}]$ $\alpha [0.88(L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10})+1.13L_{12}+0.36L_{13}]$ $\alpha [0.88(L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10})+0.71L_{12}+1.13L_{13}]$
	正常操作+地震 +雪载荷+活载荷+ 冲击载荷		2	$\alpha [0.88(L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10})+0.71L_8+0.71L_9+0.71L_{12}+0.14L_{13}]$
	紧急泄压（负压操作工况）		3	$\alpha [L_1+L_2+L_4+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{12}]$
	停车检修期空罐		4	$\alpha [L_1+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{12}+L_{13}]$
耐压试验条件	覆土前	液压	1	$\alpha [0.71(L_1+L_{12}+L_6+L_{10}+L_{11})]$
		气压	2	$\alpha [0.84(L_1+L_{12}+L_6+L_{10}+L_{11})]$
	投用后 检修	液压	3	$\alpha [0.71(L_1+L_{12}+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{11})+L_{12}+L_{13}]$
		气压	4	$\alpha [0.84(L_1+L_{12}+L_5+L_6+L_7+L_{10}+L_{11})+L_{12}+L_{13}]$
局部过度应变评定			1	$1.7[L_1+L_2+L_3+L_5+L_6+L_7+L_{10}]$
			2	$1.7[L_1+L_2+L_4+L_5+L_6+L_7+L_{10}]$
注：极限分析载荷系数法 $\alpha=1.5$ ，弹塑性分析载荷系数法 $\alpha=2.4$ ；				

A.6 屈曲分析

A.6.1 当采用有限元方法进行屈曲分析时，可以采用单个部件、多个部件或整体建立三维模型结构进行分析。对于整体模型，应至少包括容器筒体、两端的封头、加强圈与加劲肋、以及影响屈曲分析的结构附件（如：鞍座等），并且应根据所采用的屈曲分析方法，充分考虑影响屈曲分析的因素，包括但不限于：有限元单元与网格、几何初始缺陷、约束方式（如：容器支撑形式、弹性基础、非线性接触等）、材料特性、以及载荷特性等。

A.6.2 屈曲分析法载荷组合工况

采用屈曲分析法设计时，容器的屈曲分析与评定，除应考虑 GB/T 4732.5-2024 中表 1 规定的载荷组合工况外，还应至少计算表 A.4 中的载荷组合。

表 A.4 方法 A 和方法 B 屈曲分析载荷组合工况

条件和组合序号			载荷组合工况
设计 条件	正常操作	1	$\beta_b [L_1 + L_2 + L_3 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10}]$ $\beta_b [0.88 (L_1 + L_2 + L_3 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10}) + 1.13 L_{12} + 0.36 L_{13}]$ $\beta_b [0.88 (L_1 + L_2 + L_3 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10}) + 0.71 L_{12} + 1.13 L_{13}]$
	正常操作+地震 +雪载荷+活载 荷	2	$\beta_b [0.88 (L_1 + L_2 + L_3 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10}) + 0.71 L_8 + 0.71 L_9 + 0.71 L_{12} + 0.14 L_{13}]$
	紧急泄压(负压 操作工况)	3	$\beta_b [L_1 + L_2 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10} + L_{12}]$
	停车检修期空 罐	4	$\beta_b [L_1 + L_5 + L_6 + L_7 + L_{10} + L_{12} + L_{13}]$

A.6.3 分析方法

A.6.3.1 屈曲分析可按 GB/T 4732.5 的 3 种方法进行分析,也可按以下 2 种方法进行分析。

A.6.3.2 屈曲分析—方法 A

A.6.3.2.1 本方法适用于独立评定的单个部件(例如,封头、圆筒或圆锥等),也可用于评定作为组件的两个或多个部件。如果在评定的任何步骤中未满足要求,则应使用方法 B 进行评定。

A.6.3.2.2 评定步骤

容器采用方法 A 进行屈曲分析与评定,应按如下步骤进行:

步骤 1:按表 A.4 给定的每种载荷工况组合 $k=1, 2, \dots, n$, 使用载荷调整系数 $\beta_{b\text{component},k}=1.0$ 进行特征值屈曲分析。应对组件中的每个部件单独提取特征值 $\lambda_{\text{component},k}$ 。

步骤 2:针对表 A.4 的每种载荷组合,将适用载荷乘以相应的特征值($\beta_{b\text{component},k}=\lambda_{\text{component},k}$),进行单独的弹性应力分析。如果需要评定同一个组件中的多个部件,则每个部件的载荷应乘以该部件对应的主导特征值($\beta_{b\text{component},k}=\lambda_{\text{component},k}$)。

步骤 3:在临界屈曲位置(根据特征模态形状确定),提取每个部件在中面处的等效薄膜应力 $P_{m,k}$ 。

a) 如果临界屈曲位置在圆筒或圆锥中,则轴向应力分量的承载能力减弱系数按式(A.1)和式(A.2)取值:

$$D_o/\delta_e \geq 1247 \text{ 时, } \beta_{cr} = 0.207 \dots \dots \dots (A.1)$$

$$D_o/\delta_e < 1247 \text{ 时, } \beta_{cr} = 338/(389 + D_o/\delta_e) \dots \dots \dots (A.2)$$

环向应力分量的承载能力减弱系数 β_{cr} 取值为 0.8。

b) 如果临界屈曲位置在球壳或半球形、球冠形、碟形、椭圆形封头中,则环向和经向应力分量的承载能力减弱系数 β_{cr} 取值为 0.124。

c) 如果临界屈曲位置未包含在(a)或(b)中,则应使用方法 B。

步骤 4:步骤 3 中计算得到的等效薄膜应力 $P_{m,k}$ 与承载能力减弱系数 β_{cr} 的乘积为 $\sigma_{\text{component, crit},k}$ 。将每个部件的 $\sigma_{\text{component, crit},k}$ 与 $0.55S_y$ 进行比较。

a) 其中 k 对应于特定的载荷组合 $k=1, 2, \dots, n$;

b) 如果 $\sigma_{\text{component, crit},k} > 0.55S_y$, 则可使用 $S_{c,k}=0.55S_y/2$ 或方法 B。

步骤 5:对于表 4 中 $\beta_b=1.0$ 的每种载荷组合,在临界屈曲位置,将计算得到的屈曲等效薄膜应力 $P_{m,k}$ 与相应的许用值进行比较。

$$P_{m,k}, S_{c,k} \dots\dots\dots (A.3)$$

步骤 6:任何不满足式(A.3)的部件应进行调整,直至满足该式和设计准则。或者,可使用方法 B 来满足设计准则。

A. 6. 3. 3 屈曲分析—方法 B

若方法 A 的任一要求无法满足,则应使用本方法。本方法的适用性无限制。采用方法 B 进行屈曲分析与评定,应按如下步骤:

步骤 1:针对表 A.4 ($k=1, 2, \dots, n$) 中的每种荷载组合,使用承载能力减弱系数 $\beta_b=1.0$ 进行线性特征值屈曲分析。

步骤 2:通过将步骤 1 中分析得到的第一阶特征模态形状,将此模态放大或缩小后,作为步骤 3 分析初始形状缺陷。

初始形状缺陷的尺寸可通过以下方式确定:

- (a) GB/T 4732 中设计允许最大公差;
- (b) GB/T 4732. 6 中规定的制造公差;
- (c) 容器制造过程中的形状缺陷实测值。

步骤 3:针对表 A.4 ($k=1, 2, \dots, n$) 中的每种荷载组合,使用承载能力减弱系数 $\beta_b=1.67$ 且考虑步骤 2 中的形状缺陷,进行弹塑性分析。

该分析中应采用弹塑性材料模型,且应满足 Von Mises 屈服准则及相关联的流动法则,同时应考虑几何非线性效应。可按 GB/T 4732. 5-2024 附录 D 提供的真实应力-应变曲线模型,使用此材料模型时,应计入直至真实极限应力的应变硬化行为,超过该极限后则为理想塑性行为(即应力-应变曲线斜率为零)。

若数值计算能得到收敛解,则该部件在此荷载工况下的外荷载作用下是稳定的。否则,应修改部件结构(如:厚度)或降低外荷载,并重复分析与评定。

A. 7 分析设计报告内容要求

分析设计报告至少应包括以下内容:

- a) 概述,包括采用的规范、分析设计报告中分析和评定的失效模式等;
- b) 分析条件,包括容器图纸、结构尺寸、材料及性能数据、各类载荷、砂床和覆土参数等;
- c) 载荷分析,应说明需要计入的载荷及载荷组合,是否疲劳分析;
- d) 结构分析,应列出需要评定的部件,确定可能的失效模式,如是否有疲劳失效,采用的设计方法,如应力分类法、弹塑性分析法等;
- e) 有限元模型说明,包括模型范围、采用的软件、单元选择、单元数量、材料性能设置等;
- f) 边界条件说明,包括边界条件简化说明,力边界条件与位移边界条件施加方式及数值等;
- g) 计算结果的分析与评定。对于采用非线性分析得到结果,应提供非线性计算过程的收敛曲线及相关说明;
- h) 评定结论。

A. 8 制造、检验和验收

容器整体的制造、检验和验收除了应符合本文件规定外,还应符合 GB/T 4732 的相应规定。

本标准版权归中国化工学会所有。除了用于国家法律或事先得到
中国化工学会文字上的许可外，不许以任何形式复制该标准。

中国化工学会地址：北京市朝阳区安定路 33 号化信大厦 B 座 7 层

邮政编码：100029 电话：010-64455951 传真：010-64411194

网址：www.ciesc.cn