

ICS 75.200

CCS E 98

T/CCGA

中国工业气体工业协会团体标准

T/CCGA 40012—2022

LNG 薄膜罐设计、施工和验收技术规范

Code for design, construction and acceptance of LNG membrane tanks

2022 - 09 - 28 发布

2022 - 10 - 28 实施

中国工业气体工业协会 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 2

4 基本规定 4

5 材料 5

6 金属构件设计 6

7 绝热结构设计 11

8 混凝土结构设计 12

9 金属构件建造、检验和验收 13

10 绝热结构施工、检验和验收 16

11 混凝土部分施工、检验和验收 20

12 试验 22

13 干燥、置换和冷却 24

附录 A（规范性） 薄膜罐设计条件 25

附录 B（规范性） 低温钢筋的试验 26

附录 C（规范性） 工艺及安全 27

附录 D（规范性） 电气 28

附录 E（规范性） 仪表及自动自控 29

附录 F（规范性） 胶泥相关参数计算 30

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专利的责任。

本文件由中国工业气体协会负责管理，由中国石油工程建设有限公司华北分公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国石油工程建设有限公司华北分公司（地址：河北省任丘市建设路中路3号，邮编：062550）

本文件起草单位：中国石油工程建设有限公司华北分公司、德和科技集团股份有限公司、浙江振申绝热科技股份有限公司、江苏雅克科技股份有限公司、宁波凯荣新能源有限公司、山西太钢不锈钢股份有限公司、法吉泰工程技术（上海）有限公司（GTT中国）、海威斯特保温工程有限公司、沪东中华造船（集团）有限公司、华港燃气集团有限公司。

本规范主要起草人员：徐敬、李付勇、刘煜、徐鸿、张朝阳、刘发安、滕彧、张欢、刘清华、张建国、马树辉、刘永轩、李超、韩禹、王旭升、于曼、向佐新、宋桂锋、陈伟、秦超、管金国、黄海江、杜保军、孙钢、金建兴、章晨飞、马建青、曹恒、王榕、廉宝刚、张威、袁刚、李阳、陈晓贤、安南·伊撒奥尼、孙波、李磊、刘海洋、徐建伟、刘继海。

LNG 薄膜罐设计、施工和验收技术规范

1 范围

本文件规定了陆上LNG薄膜罐设计、施工、检验和验收。

本文件适用于储存液化天然气（LNG）且设计压力不大于50kPa的地上薄膜罐设计、施工和验收。

本文件不适用于地下薄膜罐。地下薄膜罐绝热结构和薄膜内罐施工可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

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

- GB/T 150（所有部分） 压力容器
- GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 13350 绝热用玻璃棉及其制品
- GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- GB/T 20801.1 《压力管道规范 工业管道 第1部分：总则》
- GB/T 20801.2 《压力管道规范 工业管道 第2部分：材料》
- GB/T 20801.3 《压力管道规范 工业管道 第3部分：设计和计算》
- GB/T 20801.4 《压力管道规范 工业管道 第4部分：制作与安装》
- GB/T 20801.5 《压力管道规范 工业管道 第5部分：检验与试验》
- GB/T 20801.6 《压力管道规范 工业管道 第6部分：安全防护》
- GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带
- GB/T 26978 现场组装立式圆筒平底钢制液化天然气储罐的设计与建造
- GB/T 39936 深冷保冷用泡沫塑料
- GB/T 40029 液化天然气储罐用预应力钢绞线
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB/T 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
- GB 50052 供配电系统设计规范
- GB 50057 建筑物防雷设计规范
- GB 50126 工业设备及管道绝热工程施工规范
- GB 50160 石油化工企业设计防火标准
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
- GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范
- GB/T 50448 水泥基灌浆材料应用技术规范
- GB 50496 大体积混凝土施工标准
- GB 50650 石油化工装置防雷设计规范
- GB 51081 低温环境混凝土应用技术规范
- GB 51156 液化天然气接收站工程设计规范
- TSG Z6001 特种设备作业人员考核规则
- TSG Z8001 特种设备无损检测人员考核规则
- JGJ 7 空间网格结构技术规程
- JGJ/T 74 建筑工程大模板技术标准

- JGJ/T 10.4 建筑工程冬季施工规程
 JGJ 162 建筑施工模板安全技术规范
 NB/T 47013.5 《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》
 NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
 SH 3010 石油化工设备和管道绝热工程设计规范
 SH 3012 石油化工金属管道布置设计规范
 SH/T 3022 石油化工设备和管道涂料防腐蚀设计规范
 SH 3034 石油化工给水排水管道设计规范
 SH/T 3097 石油化工静电接地设计规范
 SH/T 3528 石油化工钢制储罐地基与基础施工及验收规范
 SH/T 3537 立式圆筒形低温储罐施工技术规范
 SH/T 3564 全容式低温储罐混凝土外罐施工及验收规范
 SY/T 0608 大型焊接低压储罐的设计与建造
 YB/T 4641 液化天然气储罐用低温钢筋
 API 620-2021 大型焊接低压储罐的设计与建造 (Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks)
 ASTM-A240 用于压力容器和一般用途的铬和铬镍不锈钢钢板、薄钢板和带钢的标准规范 (Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications)
 ISO 29469(2008) 建筑用隔热产品、压缩性能的测定 (Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour)
 EN 10028-7 压力容器用钢的扁平产品第七部分:不锈钢 (Flat products made of steels for pressure purposes - Part 7: Stainless steels)
 JIS G4305 冷轧不锈钢板材、薄板和带材 (Cold-rolled stainless steel plate, sheet and strip)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

液化天然气 liquefied natural gas; LNG

主要由甲烷组成,还可能含有少量的乙烷、丙烷、丁烷、氮或通常存在于天然气中的其他组分的一种液态状况下的无色低温液体。

[来源:GB 51156-2015, 2.0.1, 有修改]

3.2

薄膜罐 membrane tank

金属主屏蔽膜、绝热层及预应力混凝土外罐共同形成的复合结构。金属主屏蔽膜为非自支撑式结构,用于储存液化天然气,其液相荷载和其他施加在金属薄膜上的荷载通过可承受荷载的绝热层全部传递到预应力混凝土外罐上,其气相压力由储罐的顶部承受。

[来源:GB 51156-2015, 2.0.15, 有修改]

3.3

异常荷载 abnormal load

造成安全和环境后果的不可控或非预期情况下的荷载。

3.4

偶然荷载 accidental load

泄漏、火灾、爆炸、冲击等事故情况下产生的荷载。

3.5

防潮层 moisture barrier

涂覆在预应力混凝土外罐内壁上的非金属涂层,其作用是避免大气环境中的湿气进入绝热层(空间)引起结冰。

3.6

次屏蔽膜 secondary barrier

安装在罐底和罐壁5米以下的两层绝热材料之间的薄膜,该薄膜具有气密性和液密性,当主屏蔽膜泄漏时,可盛装泄漏的低温液体和气体。

3.7

主屏蔽膜 primary membrane

由具有波形结构的不锈钢薄膜制成,固定在绝热层上并由其提供支撑,形成主屏蔽膜,用于储存液化天然气,可吸收释放由于温差产生的应力。

3.8

主绝热空间 primary insulation space

由主屏蔽膜、预应力混凝土外罐、次屏蔽膜围合而成的封闭绝热层空间。正常运行期间,主绝热空间始终处于氮气微正压状态,定期取样检测甲烷含量,用于判断主屏蔽膜是否发生泄漏。

3.9

次绝热空间 secondary insulation space

由次屏蔽膜、预应力混凝土外罐围合而成的封闭绝热层空间。正常运行期间,次绝热空间始终处于氮气微正压状态,定期取样检测甲烷含量,用于判断次屏蔽膜是否发生泄漏。

3.10

绝热空间控制监测系统 insulation space control and monitoring system

利用预设的氮气管道,在主绝热空间及次绝热空间内注入氮气,使其保持在设计规定的压力范围内,并通过在线仪表监测压力和检测气体组分。

3.11

日蒸发率 daily boil-off rate

薄膜罐因环境漏热产生的日蒸发量与总容积的百分比,以纯甲烷质量计。

[来源:GB 51156-2015, 2.0.11]

3.12

操作基准地震 operating basis earthquake (OBE)

结构在震时和震后能够承受且无损坏能正常运行的最高级别地震。

3.13

安全停运地震 safe shutdown earthquake (SSE)

结构震时和震后有永久性损坏但不丧失其完整性和包容性的能够承受的最高级别地震。

3.14

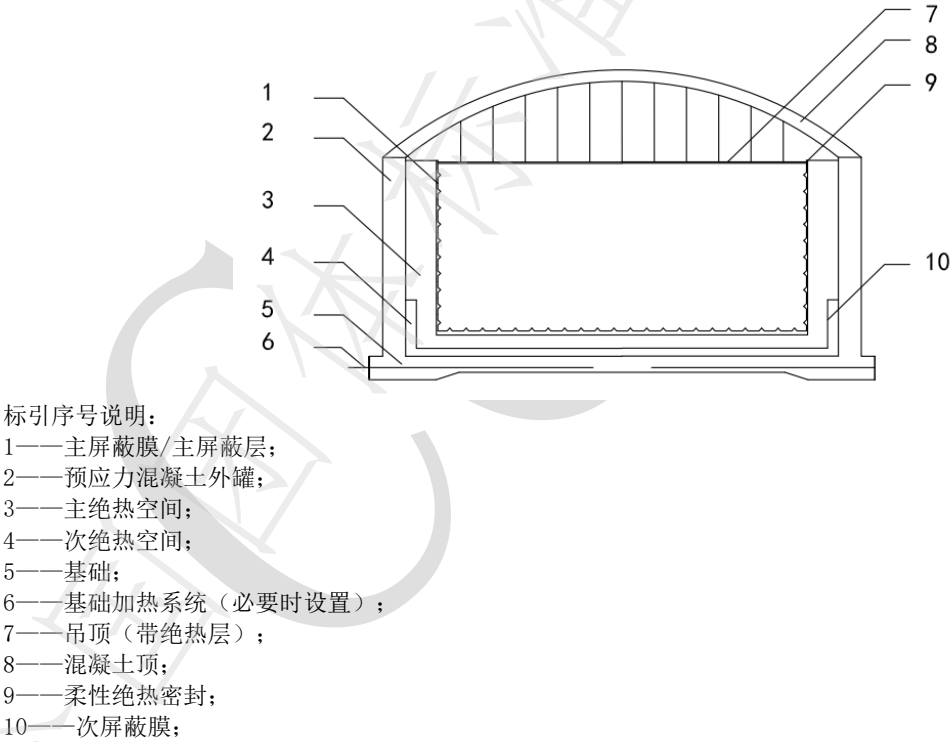
安全停运震后余震 aftershock level earthquake (ALE)

安全停运地震发生后出现的余震,其地震加速度为安全停运地震的50%。

4 基本规定

4.1 薄膜罐

- 4.1.1 LNG薄膜罐除应包括储罐本体及与其连接为整体的零部件外，还应包含下列内容：
- 4.1.1.1 储罐与外部管线的连接应包括下列内容：
- a) 焊接连接的第一道环向接头坡口端面；
 - b) 螺纹连接的第一个螺纹接头端面；
 - c) 法兰连接的第一个法兰密封面；
 - d) 专用连接件或管件连接的第一个密封面。
- 4.1.1.2 接管、人孔等的平盖及其紧固件。
- 4.1.1.3 储罐的罐底、罐壁、罐顶和接管的保冷。
- 4.1.1.4 储罐内部结构件。
- 4.1.1.5 储罐的锚固结构。
- 4.1.2 LNG薄膜罐的设计和建造，除应符合本文件外，还应符合国家现行相关标准规范的规定。
- 4.1.3 薄膜罐应由主液体容器、绝热层和混凝土外罐组成，可参照图1。
- 4.1.4 作用在薄膜上的荷载均通过承载绝热层传递到混凝土外罐。
- 4.1.5 蒸发气应储存在储罐上部空间，在储罐顶部可采用与罐壁和罐底相同的结构，也可由气密拱顶和吊顶上的绝热材料构成。混凝土罐和绝热系统设计应根据在薄膜泄漏时所盛装的液体确定。



- 标引序号说明：
- 1——主屏蔽膜/主屏蔽层；
 - 2——预应力混凝土外罐；
 - 3——主绝热空间；
 - 4——次绝热空间；
 - 5——基础；
 - 6——基础加热系统（必要时设置）；
 - 7——吊顶（带绝热层）；
 - 8——混凝土顶；
 - 9——柔性绝热密封；
 - 10——一次屏蔽膜；

图1 薄膜罐示意图

4.2 一般规定

- 4.2.1 LNG薄膜罐设计应符合下列要求：
- 4.2.1.1 正常操作条件下应能储存液化气体和蒸气。
- 4.2.1.2 应在设计规定的速率下进料和出料。
- 4.2.1.3 气化率应符合设计要求，气化应处于可控状态，超压情况下可排放至火炬系统。

- 4.2.1.4 应能维持设计指定的压力操作范围。
- 4.2.1.5 除异常情况下开启破真空阀外，应能阻止空气和湿气进入。
- 4.2.1.6 绝热设计应避免外表面冷凝或霜冻。
- 4.2.1.7 应能限制在泄漏工况和SSE等异常工况下引起的破坏，且不应导致储液损失。
- 4.2.2 LNG薄膜罐应设置满足预冷、运行和停车操作要求的液位、压力、温度和密度等检测仪表。
- 4.2.3 次屏蔽膜可选用金属材料或复合材料，当采用金属材料时，其设计、施工、检验和验收应符合主屏蔽膜的相关规定。当采用复合材料时，应符合本文件中次屏蔽膜的有关规定。

5 材料

5.1 一般规定

- 5.1.1 LNG薄膜罐金属材料，应具有钢材制造单位的质量证明书。
- 5.1.2 LNG薄膜罐材料，应根据储罐使用条件、材料性能及经济合理性选择。
- 5.1.3 处于低温环境下的混凝土构件用材料应具备抗低温性能。
- 5.1.4 LNG薄膜罐受压部位用钢应选择氧气转炉或电炉冶炼的镇静钢。设计金属温度低于-20℃时，低温钢板、低温钢锻件和低温钢管还应采用炉外精炼工艺。
- 5.1.5 对钢材有特殊要求时，应在设计文件中规定。

5.2 金属材料

- 5.2.1 金属薄膜材料宜采用表1中推荐的材料，薄膜厚度不得小于1.0mm，其他金属材料应符合GB/T 26978中材料的规定。

表1 金属薄膜材料

组件	材料
薄膜	GB/T 24511 S304L
	ASTM A240 Type 304 ASTM A240 Type 304L
	EN 10028-7 X5CrNi18-10(1.4301)
	EN 10028-7 X2CrNi18-9(1.4307)
	EN 10028-7 X2CrNi19-11(1.4306) JIS G4305 SUS304
	JIS G4305 SUS304L

5.3 混凝土构件材料

- 5.3.1 混凝土
 - 5.3.1.1 预应力混凝土罐壁混凝土强度等级不宜低于C50，罐底板、罐顶混凝土强度等级不宜低于C40。
 - 5.3.1.2 低温混凝土配合比应通过试验确定，低温混凝土材料、配合比、施工及验收应符合GB 51081的规定。
 - 5.3.1.3 在腐蚀性环境下，混凝土还应符合GB/T 50046的有关规定。
- 5.3.2 钢材
 - 5.3.2.1 普通钢筋应符合GB 50010规定。
 - 5.3.2.2 储罐内侧低温环境下钢筋应具备耐低温性能，技术要求应符合YB/T 4641的规定。
 - 5.3.2.3 预应力钢绞线宜采用低松弛型，且应具有延性，技术要求应符合GB/T 40029的规定。
 - 5.3.2.4 预应力钢绞线锚具、夹具和连接器应符合设计要求的强度、延伸率和抗疲劳性能，规格应符合GB/T 14370的规定。
 - 5.3.2.5 应对预应力钢绞线、锚具进行低温匹配性试验，试验温度应不高于设计温度。
- 5.3.3 灌浆料宜采用符合GB/T 50448要求的成品水泥基灌浆料。150mm立方体试块28d龄期的抗压强度不应小于50MPa。

5.4 绝热材料

- 5.4.1 吊顶用玻璃棉毡
- 5.4.1.1 玻璃棉制品纤维平均直径不得大于 $7.0\mu\text{m}$ ，粒径大于 0.25mm 的渣球含量不得大于 0.2% ，有机物含量不得大于 4.0% ，质量吸湿率不应大于 3.0% ，憎水率不应小于 98% 。
- 5.4.1.2 玻璃棉毡应具有一定的承载能力和回弹性，宜按ISO 29469检测。
- 5.4.1.3 玻璃棉毡性能除应符合本节要求外，还应符合GB/T 13350和GB 50264的规定。
- 5.4.2 硬质聚氨酯泡沫
- 5.4.2.1 硬质聚氨酯泡沫制品宜由聚氨酯液体和玻璃纤维组成。
- 5.4.2.2 硬质聚氨酯泡沫制品压缩强度不应小于 0.2MPa ，闭孔率不应小于 92% ，体积吸水率不应大于 3.0% ，透湿系数不应大于 $5.8\times 10^{-11}\text{g}/(\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m})$ 。
- 5.4.2.3 硬质聚氨酯泡沫制品性能除应符合5.4要求外，还应符合GB/T 39936的规定。
- 5.4.2.4 绝热板之间缝隙宜采用压实的玻璃棉毡填充。玻璃棉毡性能应按5.4.1执行。
- 5.4.3 次屏蔽膜用粘结剂
- 5.4.3.1 粘结剂应具备粘结力强，固化时间短等性能。粘结剂不得对金属有腐蚀作用，不得对绝热材料有溶解作用。
- 5.4.3.2 粘结剂应进行测试，粘结剂与密封性控制剂-氨氮混合物（摩尔比25%/75%）等其他试剂接触时应保持良好粘合性能。粘结剂测试应符合表2的规定。

表2 液氮环境下粘结剂测试内容及要求

序号	项目		技术指标
1	浸泡温度		$-190^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$
2	浸泡周期		15天/28天/天
3	浸泡前试样的条件		完全固化
4	浸泡后的机械测试	平均阻力	$\geq 6.4\text{MPa}$
		个体阻力	$\geq 8\text{MPa}$

6 金属构件设计

- 6.1 一般规定
- 6.1.1 金属构件设计温度应按最不利工况确定。
- 6.1.2 LNG薄膜罐应按不同载荷组合设计。载荷组合应按API 620确定。
- 6.1.3 金属或焊缝金属最大许用拉应力应符合表3的规定。

表3 金属或焊缝金属的最大许用拉应力

钢材类别	操作工况下的许用拉应力
Q245R、Q345R、Q370R、16MnDR、15MnNiDR、09MnNiDR	$0.43R_m$, $0.67R_{e1}$, 260MPa, 三者中的最小值
9Ni490、9Ni590A、9Ni590B	$0.43R_m$, $0.67R_{e1}$, 两者之中的较小值
S30408、S304L	$0.40R_m$, $0.67R_{e1}$, 两者之中的较小值
注： 1 R_m 为材料标准抗拉强度的下限值（MPa）， R_{e1} 为材料标准下屈服强度（MPa）。 2 对于9%Ni钢， R_{e1} 可为材料标准规定的0.2%非比例延伸强度（MPa）。 3 对于奥氏体不锈钢， R_{e1} 可为材料标准规定的1.0%非比例延伸强度（MPa）。	

6.1.4 抗震验算许用应力可按下列规定选取：

- a) OBE工况下，可取操作工况下许用应力的1.33倍。
- b) SSE工况下，许用应力可取 $1.00R_{e1}$ ，许用压应力可取屈服应力。

6.1.5 锚固螺栓许用应力应符合下列规定：

- a) 正常操作工况下应为 $0.50R_{e1}$ 。
- b) 试验工况下应为 $0.85R_{e1}$ 。
- c) OBE工况下应为 $0.67R_{e1}$ 。
- d) SSE工况下应为 $1.00R_{e1}$ 。

6.1.6 锚固板许用应力应符合下列规定：

- a) 正常操作工况下应为表3规定值。
- b) 试验工况下应为 $0.6R_m$ 、 $0.85R_{e1}$ 、340MPa三者中的较小者。
- c) OBE工况下应为操作工况下许用应力的1.33倍。
- d) SSE工况下应为 $1.00R_{e1}$ 。

6.1.7 罐顶与罐壁连接处承压区域许用压缩应力不应大于120MPa。

6.1.8 当采用对接接头，载荷作用在钢板平面内且与焊缝垂直时，许用应力应按表3的规定选取；当载荷和焊缝平行时，许用剪应力应取表3规定值的75%。

6.1.9 当采用角接头，载荷作用在钢板平面内且与焊缝垂直时，许用应力应取表3规定值的70%；当载荷和焊缝平行时，许用剪应力应取表3规定值的50%。

6.1.10 除薄膜板外的钢构件设计应以理论许用应力或理论极限状态为依据。

6.1.11 薄膜板的设计应以规定材料的应力 / 应变理论曲线为依据。

6.2 薄膜结构设计

6.2.1 LNG薄膜罐的薄膜板应使用金属板材制造，不含腐蚀裕量的最小厚度为1.0mm。

6.2.2 LNG薄膜罐的薄膜板宜设计有波纹、褶皱或花纹，允许在荷载条件下自由移动。宜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。

6.2.3 薄膜板应锚固到绝热系统中，或锚固到混凝土外罐上。

6.2.4 薄膜板应在罐顶部或罐壁顶部闭合，薄膜应布置成蒸发气和液体密闭的容器（称为“绝热蒸发气空间”）。

6.2.5 薄膜构件设计应计及储罐设计使用年限期间可能承受的静态和动态荷载。LNG薄膜罐载荷数据应符合表4的规定。

表4 LNG薄膜罐载荷数据表

静载荷	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)	
动载荷	地震荷载 (不考虑疲劳)	OBE	
偶然载荷	地震荷载 (不考虑疲劳)	SSE	
周期载荷	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	根据罐体设计寿命和预计的操作条件确定的周期数
	注：储罐建设方可以提供罐体操作条件方面的信息。如果储罐建设方没有提供该类信息，则应根据下列假定进行设计： ——每星期装载 / 卸载一次； ——每两年停止使用 / 启动一次。 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。		

- 6.2.6 经过平稳的变形和移动后，薄膜和构件应保持其基本形状，应保证在周期荷载作用下薄膜不发生渐进性变形，还应保证波纹处不发生屈曲或折断。
- 6.2.7 金属薄膜设计应采用模型试验和 / 或数值分析方法，可参照图2。薄膜在下列情况应具有可靠性：
- 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。

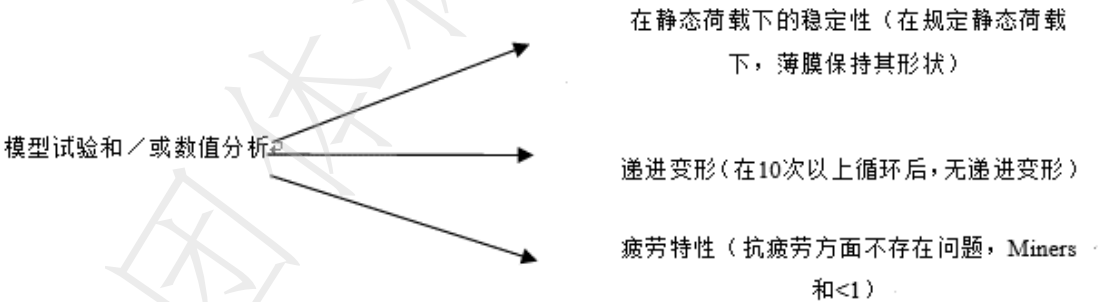


图2 薄膜的设计流程图

- 6.2.8 在数值分析时，应使用非线性弹-塑性或弹-塑性 / 大位移计算方法，并应计及下列因素的影响：
- a) 进入到绝热层或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；
 - b) 在静态设计和疲劳设计中，等效应力应使用Tresca理论或von-Mises理论计算；
 - c) 在适用情况，由热荷载产生的变形应作为边界条件；
 - d) 最大应力或应变的计算应以主轴为依据；
 - e) 应对薄膜元件整体建模（即确定单元尺寸）；
 - f) 应证明，涉及计算理论的模型与实物很好的相关性；
 - g) 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。
 - h) 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规定荷载。
- 6.2.9 金属薄膜数值分析/模型试验方法应按GB/T 26978执行。

6.3 承压环结构设计

- 6.3.1 承压环结构设计应保证罐顶和罐壁连接的密封性。
- 6.3.2 承压环结构设计应计及储罐顶升载荷。
- 6.3.3 承压环设计宜按SY/T 0608或GB 50017执行。

6.4 罐顶设计

- 6.4.1 不包括腐蚀裕量罐顶板材最小厚度应为5mm。
- 6.4.2 当采用带支承结构的罐顶时，顶板焊接接头应按下列要求选取：
 - 单面搭接焊缝的焊接接头系数应为0.35；
 - 双面搭接焊缝的焊接接头系数应为0.65；
 - 带垫板或不带垫板的对接焊缝的焊接接头系数应为0.70；
 - 当采用搭接结构时，最小搭接宽度应为25mm。
- 6.4.3 自支撑结构的罐顶板，应采用对接或双面搭接焊，顶板厚度应能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：

$$e_r = P_r R_l / 20 S \eta \quad (\text{球形顶})$$

式中：

e_r — 顶板厚度（不包含腐蚀裕量），mm；

P_r — 内部压力减去顶板重量，kPa；

R_l — 罐顶的曲率半径，m；

S — 许用设计应力，MPa (N/mm²)；

η — 焊缝的焊接接头系数。

- 6.4.4 罐顶支撑结构宜选择肋环型或肋环斜杆型，可按JGJ 7执行。
- 6.4.5 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。

6.5 吊顶设计

- 6.5.1 吊顶及其支撑结构应按最低设计温度条件设计。
- 6.5.2 吊顶通气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。
- 6.5.3 吊顶周边宜设置转臂。
- 6.5.4 吊顶转臂设计应分析地震工况下吊顶晃动时不接触罐壁薄膜。
- 6.5.5 吊顶周边与罐壁之间应采用搭接连接，吊顶结构可参照图3。

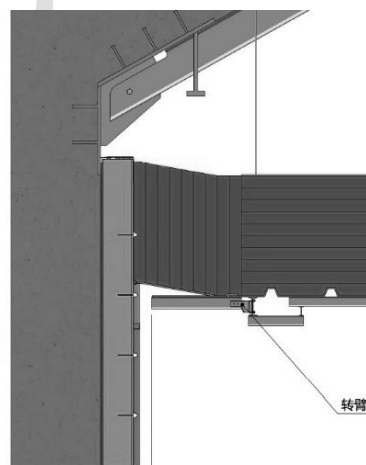
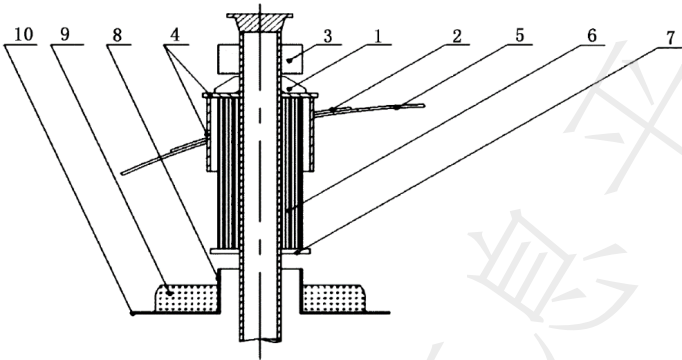


图3 吊顶结构示意图

6.6 接管设计

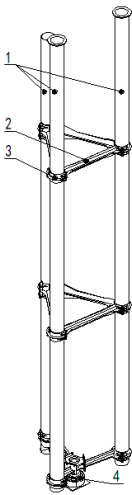
6.6.1 冷介质接管穿过罐顶时应设置套管，套管外壁应设置栓钉。



- 标引序号说明：
- 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 典型的带有套管的罐顶管口

6.6.2 伸入罐内的接管，应采取可靠支撑措施，必要时可采用几个接管联合组成钢结构形式，可参照图5。当采用泵塔结构时，应对泵塔结构的稳定性和强度校核，应力评定可参照罐内其他金属构件执行。



- 标引序号说明：
- 1——接管管口；
 - 2——支撑件；
 - 3——管道抱箍；
 - 4——泵塔基座。

图5 泵塔结构

- 6.6.3 罐顶开口应进行补强计算，开孔补强计算方法应按GB/T 150执行，必要时应设置补强圈或顶板局部加厚。
- 6.6.4 接管应能承受来自连接管道和附件的载荷。
- 6.6.5 人孔接管最小内径宜为600mm。
- 6.6.6 接管焊接应符合GB/T 26978的规定。

7 绝热结构设计

7.1 概述

储罐绝热系统设计应满足结构和热工要求，还应满足安装、开车及停车（置换、气体排除）的要求。

7.2 热工设计

热工设计应符合下列要求：

- a) LNG薄膜罐设计允许的最大LNG蒸发率；
- b) 外罐组件的最低设计温度；
- c) 应避免储罐外表面水蒸气的结冰/冷凝；
- d) 应防止土壤冻结；
- e) 储罐LNG蒸发率应符合最大允许日蒸发量要求，并应计及外部的气候条件；
- f) 热工设计应符合上述全部要求，将总允许热渗入量分散到储罐各个部分形成绝热系统；
- g) 储罐热工设计中，除应计及绝热系统热阻外，也应计及储罐其他部件的热阻，如建造构件（混凝土）或储罐内部的蒸发气空间，宜计算各构件在罐中位置和温度范围内的热阻。

7.3 绝热结构设计

7.3.1 绝热系统结构设计应基于许用应力理论设计。

7.3.2 储罐底部绝热结构、储罐罐壁绝热结构和热角保护系统应能承受压力载荷。

7.3.3 易蠕变材料（聚氨酯泡沫塑料（PUF）、聚氯乙烯（PVC）等）受压时，其允许压缩荷载应为允许荷载（PLD）除以安全系数，允许荷载（PLD）和安全系数应按下列要求取值：

- a) 允许荷载（PLD）应取标准抗压强度与允许承载系数（PLDF）的乘积。
- b) 标准抗压强度为短期承压试验结果的平均值，但当较低规定极限值（即平均值减两倍标准方差）低于标准抗压强度的67%时，应取较低规定极限值的1.5倍。
- c) 允许承载系数（PLDF）应通过重复蠕变试验确定。
- d) 安全系数应按下列要求取值：
 - 1) 正常操作工况为1.25；
 - 2) OBE工况，聚氨酯泡沫塑料（PUF）和聚氯乙烯（PVC）可取0.5；
 - 3) SSE工况，聚氨酯泡沫塑料（PUF）和聚氯乙烯（PVC）可取0.33。

7.3.4 对于其他载荷，应根据具体情况确定许用应力理论方法的安全系数。

7.4 储罐各组件的绝热结构设计

7.4.1 各部分绝热结构厚度应按最大允许冷损失量和最低冷凝或结霜要求确定。

7.4.2 罐底绝热结构设计应根据基础底板平整度、各保冷层平整度、防止基础冻胀程度以及材料承载能力确定，必要时可设置置换设施及热角保护系统等。

7.4.3 罐壁内绝热结构设计应符合下列规定：

- a) 罐壁内绝热结构厚度应通过计算确定；
- b) 固定于外罐内表面的绝热结构应能承受自身静荷载及热应力的作用，固定方法可根据绝热材料、绝热系统的气密性和液密性及环形空间内保冷系统的耐化学性等因素确定；
- c) 固定于罐壁内表面绝热结构应能承受自身静荷载及热应力作用，固定方法可根据绝热材料及绝热系统的水蒸气密封性等因素确定；

- d) 在正常操作或泄漏工况下，绝热材料不应应对储存介质产生吸收/不利作用，考虑兼容性，并应能适应储罐介质可能对绝热材料的吹扫。
- 7.4.4 罐壁外和罐顶外冷介质工艺管道绝热结构设计应符合下列规定：
- 应设置天气防护罩和隔气层；
 - 绝热结构应能承受因储罐及锚固件尺寸变化产生的热-机械应力作用，固定方法可根据绝热材料和隔气层情况确定；
 - 防火设施设计应根据储罐附件设施及管道布置等确定；
 - 绝热系统在设计使用年限内，应能适应当地气候和大气环境；
 - 应针对绝热结构施工期间可能出现的气候条件提出防护措施；
 - 工艺管道绝热结构应采用能防火的结构，且应采用耐燃材料。
- 7.4.5 吊顶绝热结构设计应符合下列规定：
- 应设置人行通道等临时通道；
 - 整个罐的冷损失量应计入吊顶绝热料的导热性、对流和吊杆的冷桥等产生的冷损失；
 - 吊顶绝热层初始安装厚度应能补偿使用中产生的沉降；
 - 吊顶绝热层设计应避免储罐穹顶空间内可能形成产品冷凝的不利影响。

8 混凝土结构设计

8.1 一般规定

- 8.1.1 薄膜罐侧向液体荷载及其它荷载应通过承载绝热层作用在混凝土罐壁上，储罐荷载可根据GB 51156确定。
- 8.1.2 储罐的永久荷载、可变荷载、地震作用和偶然荷载应符合GB 51156的规定。
- 8.1.3 水平与竖向地震作用应同时进行组合，其地震作用分项系数应符合GB 51156的规定。
- 8.1.4 混凝土保护层应根据环境类别、土壤条件以及包括防火设计在内的异常设计条件等因素确定，并符合GB 50010的规定。
- 8.1.5 预应力钢绞线应符合下列规定：
- 应设置扶壁和灌浆的预应力系统，在确定预应力系统位置时应考虑火灾在内的异常情况；
 - 应采取钢筋防腐保护措施。
- 8.1.6 设计应明确施工缝的设置及定位。在有液密性要求的区域，施工前应对施工缝的液密性进行试验，并应经验证符合要求后再施工。
- 8.1.7 罐壁应设置临时施工门洞，其洞顶标高应在热角保护以下不小于500mm。

8.2 液密性

- 8.2.1 热角保护以上的混凝土储罐液密性应符合下列要求：
- 泄漏工况下，罐壁混凝土受压区高度不应小于截面厚度的10%且不小于100mm；
 - 受压区残余压应力不应小于1.0MPa；
 - 正常操作工况下，有防潮层的混凝土储罐混凝土最大裂缝宽度限值应符合GB 50010的规定。
- 8.2.2 防潮层的延伸率应满足基层混凝土的裂缝宽度的1.2倍要求。

8.3 钢筋混凝土储罐

- 8.3.1 罐壁应设置水平预应力钢绞线，采用预应力混凝土结构。
- 8.3.2 竖向预应力钢绞线应根据储罐设计压力、储罐直径、罐顶厚度等计算确定。
- 8.3.3 混凝土罐壁外宜对称设置扶壁柱，水平预应力钢绞线应在扶壁柱处交错张拉锚固。
- 8.3.4 预应力施加采用后张法设计时，应计入相关预应力损失。

- 8.3.5 正常操作工况下, 预应力混凝土外罐底板和罐顶计算裂缝宽度不应超过0.30mm, 罐壁计算裂缝宽度不应超过0.20mm。
- 8.3.6 正常使用工况下混凝土最大压应力不应超过:
- 预应力和长期荷载共同作用下: $0.45 f_{\text{cuk}}$ (混凝土立方体抗压强度);
 - 预应力和全部荷载共同作用下: $0.60 f_{\text{cuk}}$;
- 8.3.7 储罐基础底板可采用钢筋混凝土或预应力混凝土结构。
- 8.3.8 储罐基础底板应根据需要设置施工缝, 并采取措施保证基础底板整体性。
- 8.3.9 罐壁与基础的连接分为滑动连接、铰连接及固定连接。对大中型储罐, 宜采用固定连接。
- 8.3.10 罐顶内侧宜设钢内衬, 内衬应采用抗剪钉与混凝土可靠锚固。
- 8.3.11 在罐顶混凝土达到设计强度前, 可用空气压力平衡新浇筑混凝土的重量。
- 8.3.12 罐顶与罐壁的连接宜为刚接。
- 8.3.13 储罐基础宜优先采用天然地基, 当天然地基不符合设计要求时, 可采用桩基础。
- 8.3.15 天然地基的基础形式宜采用筏板基础, 在筏板高应力区, 宜增加筏板厚度。
- 8.3.16 在筏板设计中, 应计及在正常操作工况或异常工况下可能发生的局部不均匀沉降、干燥收缩、徐变、热应变等因素的影响, 并采取相应的预防措施。
- 8.3.17 桩基础设计应符合下列要求:
- 成桩方法及单桩承载力应通过现场试桩确定;
 - 应根据群桩效应、下拉力和其他可能降低桩承载力的效应, 对桩承载力折减;
 - 应考虑地震作用和作用于罐顶的气压对桩的上拔力影响;
 - 应考虑水平荷载对桩的影响;
 - 桩与罐基础底板之间的连接宜采用刚接;
 - 采用高架式基础底板时, 隔振措施应根据地震作用确定。;
 - 采用高架式基础底板时, 架空高度应根据温度计算确定。

9 金属构件建造、检验和验收

9.1 一般规定

- 9.1.1 LNG薄膜罐金属部件的建造应符合设计文件和本文件的规定, 附属钢结构施工应符合GB 50205的规定。
- 9.1.2 设计文件和材料的变更, 应取得原设计单位书面认可。

9.2 材料管理

9.2.1 材料验收

- 9.2.1.1 LNG薄膜罐用钢材、附件、焊材应有质量证明文件, 其特性参数应符合产品标准的要求, 并满足设计文件的要求。
- 9.2.1.2 低温钢材、低温焊接材料和低温附件的质量证明文件应标明钢号、规格、化学成分、力学性能、低温冲击韧性值、供货状态及材料的制造标准。
- LNG薄膜罐用钢板, 应逐张进行外观质量检查, 并符合下列规定:
- 钢板表面不得有裂纹、气泡、折叠、夹杂、结疤和压入的氧化铁, 钢板不得有分层;
 - 低温钢板表面不得存在机械划伤;
 - 钢板表面的制造厂标志应清晰并与质量证明文件相对应。
- 9.2.1.3 钢板表面局部减薄量与钢板实际负偏差之和, 不应大于设计允许的钢板负偏差值。
- 9.2.1.4 低温钢材、低温焊接材料应按有关规定对化学成分、力学性能进行复验。
- 9.2.1.5 低温薄膜板检验和验收应按技术规格书规定执行。

9.2.2 储存和运输

- 9.2.2.1 LNG薄膜罐用钢材在加工、储存和运输过程中, 应采取防止混淆的措施。
- 9.2.2.2 不锈钢材料在加工、储存和运输时, 应防止表面被污染。

9.2.2.3 LNG薄膜罐用薄膜板在加工、储存和运输时，应采取防止波纹或压型变形的保护措施。

9.2.2.4 焊材保管和储存，应符合相应焊材标准或焊材供应商声明的要求。

9.2.3 标识及移植

9.2.3.1 低温钢板应标识。LNG薄膜罐安装完成后，标识应清晰可见。制造过程中标识被加工掉时，应至少将一处标识移植到完工后易于观察的部位。

9.3 预制

9.3.1 薄膜板钢材应为冷轧制完成的，无可见的缺陷。

9.3.2 薄膜板上波纹或压型应在工厂内预制成型，应采用冷弯或冷压成型工艺。

9.3.3 承压环用钢材应按照设计图样进行切割并打磨到露出明亮金属，并且除去氧化层和熔渣。

9.3.4 在安装时，应将加强板加工成与所焊接的罐壁具有相同的形状。

9.3.5 罐壁承压环和罐顶承压环的纵焊缝之间的距离不应小于150mm。

9.3.6 热角保护预埋板的对接焊缝与主屏蔽层、次屏蔽膜锚固板对接焊缝之间的距离不应小于150mm。

9.3.7 承压环、顶板等预制件直线度、弧度等几何尺寸应采用样板检查，样板制作应符合下列规定：

- a) 支线样板的长度不应小于1000mm；
- b) 测量焊接接头角变形的样板，期限长不应小于1000mm；
- c) 弧形样板，其弦长不应小于2000mm。

9.3.8 低温钢板不得采用硬印标记，非剪切线不得用尖锐工具划线、不得打样冲眼。

9.3.9 钢板坡口宜采用机械加工，坡口表面不得有夹杂、分层、裂纹及熔渣等缺陷。

9.3.10 9%Ni钢坡口采用等离子火焰加工时，应打磨除表面氧化层，并按NB/T 47013.5进行渗透检测，I级合格。

9.3.11 采用对接接头厚度大于10mm的钢板和采用搭接接头厚度大于16mm的钢板，应优先采用激光切割，不宜采用剪切加工。

9.3.12 当设计文件没有规定时，坡口形式和尺寸应按GB/T 985.1选取。

9.3.13 当采用钢板卷制接管时，应对接管对接焊缝进行100%射线检测或超声检查。

9.3.14 罐顶接管由厚度大于或等于25mm的碳钢钢板制作时，应对接管与罐顶和补强圈焊接区域进行100%超声检测，不得有分层。

9.3.15 平焊法兰应进行双面焊接。带颈对焊法兰应采用全焊透对接接头形式。

9.3.16 补强板应进行滚弧加工，且每个补强板上应至少开设一个M10信号孔。

9.3.17 现场所有螺栓孔应采用机械钻孔，不得采用火焰切割。

9.3.18 预制完成的构件应及时标注构件编号。

9.3.19 预制构件的存放、运输应采取防变形措施。

9.4 现场安装

9.4.1 薄膜板、紧固件安装前，应确认构件编号与设计图纸上构件编号一致，并按设计文件注明安装方式。

9.4.2 薄膜板安装前，应按照设计图纸在绝缘板上表面划出薄膜板边界线，并在绝缘板锚固条上标记薄膜板的交角，以保证薄膜板连续性。

9.4.3 薄膜板上不允许焊接任何临时附件。

9.4.4 薄膜板安装前应去除正反面的保护膜，薄膜板上不允许焊接任何临时附件。

9.4.5 薄膜板和连接件表面必须清洁，无灰尘，无胶水、油污等痕迹。

9.4.6 罐底薄膜板安装顺序宜由中心向四周辐射；罐壁薄膜板安装顺序宜由上至下，下侧搭接上侧。薄膜板搭接宽度宜为30mm，偏差不大于±5mm；搭接间隙宜不大于0.3mm。

9.4.7 抗压圈及罐顶板安装应符合SY/T 0608的规定。

9.4.8 罐顶衬板的最大凸起度允许误差不应超过100mm。

9.4.9 薄膜板、绝热板、承重胶泥、锚固件等薄膜系统应连接到混凝土墙壁或混凝土底座支撑。

9.4.10 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。采用临时支撑结构时,承包商应采取避免支撑框架发生扭曲和结构整体旋转的预防措施。

9.4.11 临时附件焊接应使用与附着材料相同的焊接工艺。临时附件去除应使用热切割、刨削,或打磨方法。热切割或刨削焊缝后,应保留2mm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。

9.5 焊接

9.5.1 焊接人员应按TSG Z6001的要求考试合格并取得相应资质后方可入场。

9.5.2 薄膜板焊接人员及自动焊机操作人员宜进行现场技能考核,以确认其技能水平。

9.5.3 所有组焊构件焊接前应进行焊接试验。

9.5.4 薄膜板的焊接试验宜在试件上进行。

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。

9.5.5 作为最低要求,薄膜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。

9.5.6 除薄膜板外的其它金属构件的焊接工艺评定应符合NB/T 47014的规定。薄膜板的焊接,应在正式施工前按照设计文件要求开展焊接工艺评定,并依据评定合格的焊接工艺指导书编制焊接工艺卡,焊工应按照焊接工艺卡施焊。

9.5.7 施工单位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℃。

9.5.8 如需预热,应在焊接开始前进行,预热宽度为板材厚度的4倍,且不小于75mm。预热时间应确保母材厚度方向上温度均匀。

9.5.9 焊后热处理应符合下列要求:

9.5.9.1 碳锰钢储罐罐壁接管和人孔与罐壁或预埋件焊后,应在储罐安装前对改组焊件进行焊后热处理并制定热处理方案。符合下列任一条件时可不进行焊后热处理:

a) 厚度小于等于16mm的组焊件;

b) 厚度小于30mm且接管名义直径小于300mm的组焊件;

c) 任意工况下均不会与低温液体接触的接管或人孔。

9.5.9.2 当9%Ni钢板冷成型的最大纤维应变大于3%时,应进行热处理。冷成型最大限位应变可按下式计算:

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

式中:

R_0 ——初始半径(对于平板为无限大), mm;

R_f ——最终半径, mm;

s ——最大纤维应变, %;

t ——板材厚度, mm。

9.5.10 薄膜板修补及返修

9.5.10.1 发现不可接受的缺陷应进行补焊修补或返修。

9.5.10.2 不可接受的缺陷包括裂纹、未熔合、未焊透、烧穿、外观凹陷、电弧灼伤、夹钨等。

9.5.10.3 应通过抛光、机加工或磨削去除焊接金属或缺陷。

9.5.10.4 修补或返修完成后,应进行目视检查、真空试漏和渗透试验。

9.6 检验

9.6.1 无损检测人员应按TSG Z8001进行考核,并取得相应资格证书。

- 9.6.2 所有无损检测应由独立于施工方的部门来进行，应制定检验和试验程序。
- 9.6.3 施工方应确保维护好材料的标记或识别系统。该系统应做到在建造过程中的任何时候，材料能被识别。
- 9.6.4 对于薄膜内罐，应对薄膜板焊缝进行100%目视检验，要求表面无裂纹、气孔、咬边、未焊透等缺陷；每种焊接类型应进行渗透检验，每日抽检不少于当日焊接完成焊缝数量的5%。焊接完成后进行整体渗漏试验，宜采用氨作为检漏介质。
- 9.6.5 目视检验应在其他无损检验或试验之前进行，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。
- 9.6.6 薄膜内罐安装期间应进行密性试验，密性试验的内容包括：
- a) 真空箱试验：用真空箱目测检查次屏蔽和主薄膜的密封性。 -20kPa 压力下观察，15s无渗漏为合格。
 - b) 次层整体试验：对次层建立真空压差，做衰减度参考曲线评定密封性，次层空间内压力降低至 -53kPa ，检测真空衰减率，在 -45 至 -30kPa 之间计算（测试在14h后停止）。
 - c) 次层声音试验：对次层建立真空，专人进入罐内听声音评定密封性。次层空间内压力降低至 -50kPa ，检测罐内是否发出声音，记录压力变化情况。
 - d) 焊缝接头机械应力试验：对主薄膜内往复正负压，压力维持在 $+2\text{kPa}$ ：30min，测试焊缝质量。
 - e) 主层显像气体密性试验（氨气）：在主绝缘层充氨气混合气体，罐内涂显像试剂，氨气与试剂接触会发生化学反应（颜色变化），密性资质人员进罐内检查颜色来评定密封性。
 - f) 主层参考曲线整体试验：对主层建立真空压差，做衰减度参考曲线评定密封性，主层空间内压力降低至 -53kPa ，检测真空衰减率，在 -45 至 -30kPa 之间计算（测试在14h后停止）。
 - g) 脚手架拆除时日常监测检查：目的是监测曲线变化，以防拆架等作业伤害薄膜，造成泄漏风险。
- 9.6.7 密性试验的详细要求按照设计单位提出的详细技术文件要求执行。
- 9.6.8 储罐接管及承压环的检验和验收应符合SY/T 0608规定。

10 绝热结构施工、检验和验收

10.1 一般规定

- 10.1.1 绝热结构施工应符合设计文件、本文件和GB 50126的有关规定。
- 10.1.2 绝热结构施工前应编制绝热结构施工方案。应采取保证绝热材料不受损害及污染的保护措施。
- 10.1.3 绝热材料及其制品，应具有产品质量检验报告和出厂合格证，规格、性能等技术指标应符合产品技术标准及设计文件的规定。
- 10.1.4 绝热材料在运输和存放过程中，应保证物理性能、化学性能和其他性质不发生改变。
- 10.1.5 对有防腐及隔气处理的储罐，表面防腐及隔气保护应在绝热系统施工前完成。
- 10.1.6 绝热系统施工及修补需在相应温湿度条件下进行，应避免损害防腐及隔气层。

10.2 绝热材料的性能、试验

- 10.2.1 绝热材料及其制品的性能评估应包括下列内容：
- 10.2.1.1 绝热性能应包括导热系数和因辐射、对流、冷桥导致的冷损失量。
 - 10.2.1.2 力学性能应包括短期和长期压缩性能、抗拉和抗剪性能、绝热结构的粘接强度等。
 - 10.2.1.3 耐温性能应包括所能承受最高、最低工作温度以及可能的温度变化、膨胀系数以及设计温度下的抗压强度、拉伸模量等对收缩、膨胀以及可能出现的破裂的影响。
- 10.2.2 防潮性能应包括下列内容：
- a) 绝热材料的闭孔率、水蒸气渗透性、吸水性等特性；
 - b) 水和水蒸气渗透产生的热阻降低、水或冻结过程（冻结/解冻循环）可能对绝热材料产生的结构性破坏的影响。
- 10.2.3 储存产品对绝热材料的影响包括以下内容：
- a) 绝热材料的闭孔率；

- b) 产品蒸汽的吸收率以及对绝热材料其他性能的影响;
 - c) 对液态产品的吸收性和液态产品对其的渗透性;
 - d) 长期吸收液体对绝热材料其他性能的影响;
 - e) 解吸效应: 时间/百分比。
- 10.2.4 绝热材料兼容性以及化学性能应分析绝热系统、环境及绝热系统直接接触的储罐材料和/或涂层之间的兼容性和可能发生的化学反应。
- 10.2.5 施工过程中或外部发生火灾时, 还应评估绝热材料下列特性:
- a) 燃烧性能主要包括绝热材料的可燃性、阻燃性和有毒气体产生的可能性等;
 - b) 最高温度极限评估主要包括熔化温度、分解温度以及燃点温度。

10.3 绝热系统安装

10.3.1 一般规定

10.3.1.1 在罐壁次屏蔽膜盖板以下和罐底板安装绝热层应采用刚性次屏蔽膜的绝热系统, 由胶合板、绝热块和刚性次屏蔽膜组成。位于次屏蔽膜以上绝热层应采用无刚性次屏蔽膜的绝热板, 由两块胶合板之间夹一层绝热块组成。

10.3.1.2 绝热系统宜采用角区绝热板、平面绝热板、三面体绝热板、二面体绝热板、异形连接绝热板、中心区绝热板等, 设置在罐体部位如下:

- a) 角区绝热板宜用于沿罐壁两墙面交线处;
- b) 平面绝热板宜用于罐壁和承台平面;
- c) 三面体绝热板宜用于罐壁两墙面交界线与承台直角连接处;
- d) 二面体绝热板宜用于罐壁与承台直角连接的定型绝热板处;
- e) 异形连接绝热板宜用于承台面扇区之间补偿圆形平面尺寸处;
- f) 中心区绝热板宜用于承台中心处。

10.3.1.3 绝热板安装施工前应对区域内的划线、楔块调平、螺柱安装、基层清理等进行检查验收。

10.3.1.4 绝热板安装应保持储罐内温度、湿度、干燥度及清洁度满足相应要求, 宜制定针对性的方案。

10.3.2 承重胶泥安装

10.3.2.1 施工前应进行现场型式试验, 型式试验的内容包括: 硬度、胶泥配合比、成型宽度、固化时间、粘结强度等性能指标。

10.3.2.2 在罐壁绝热平板以及罐底绝热板安装施工过程中, 宜采用胶泥条的涂抹方式。在特殊情况下, 如三面体板、罐底中央板或非标准板, 宜采用胶泥饼的涂抹方式。

10.3.2.3 在涂抹过程中, 胶泥条涂抹的形状、尺寸可根据罐壁的平整度做适当调整, 以满足绝热板平整度要求。

10.3.2.4 施工控制时间, 应确保产品表干固化时间之前完成绝热板安装固定。

10.3.2.5 施工环境温度宜为20℃~30℃, 相对湿度不大于70%。

10.3.2.6 绝热板采用胶泥涂布的厚度应不大于25mm, 当超过25mm以后, 需采取措施, 经设计审核批准后实施。

10.3.2.7 绝热板的运输应胶泥面朝上, 平面移动, 翻转或竖向移动时要避免胶泥流挂、刮蹭、磕碰。

10.3.3 绝热板安装

10.3.3.1 在安装绝热板之前, 应对检查防潮层的完整性和绝热板螺柱及其相关基准楔块进行检查, 对于垂直墙面平整度有局部超标的区域, 应对每条胶泥涂布位置进行板后间隙值的测量。

10.3.3.2 在绝热板安装前, 应检查绝热板底部清洁度、胶泥条以及罐壁上位置标记线。

10.3.3.3 罐壁/承台面的清洁度, 宜采用白布擦拭无污染物为合格标准。

10.3.3.4 罐壁绝热板宜采用自上而下的顺序安装, 绝热板可分为多个区块同步进行, 罐底绝热平板应从罐底中心板以辐射顺序开始安装。

10.3.3.5 安装有刚性次屏蔽膜的绝热板时, 为避免污染, 操作人员必须使用干净的手套, 并保持次屏蔽表面清洁无灰尘、胶泥或其他任何污染物。同时应注意刚性次屏蔽膜不被其他材料损坏及污染。

10.3.3.6 三面体、二面体、中心区绝热板安装应先用特制定型模板定位后, 进行涂胶安装。

- 10.3.3.7 胶泥条尺寸、形状应根据基准楔块以及绝热平板平整度要求做适当调整，基准楔块最小厚度应不低于4mm。
- 10.3.3.8 绝热角板安装时，应保证与相邻绝热平板水平公差为 $\pm 1\text{mm}$ ，相邻面夹角小于 $6\text{mm}/1\text{m}$ 。
- 10.3.3.9 绝热角板与三面体板相邻面夹角应小于 $1\text{mm}/1\text{m}$ ，径向和周向允许公差为 $\pm 1\text{mm}$ 。
- 10.3.3.10 异型绝热板安装完毕后，应及时清理绝热板和防潮层上的承重胶泥。
- 10.3.4 绝热板填缝
- 10.3.4.1 绝热板填缝宜采用聚氨酯泡沫或玻璃棉，用于保证各绝缘板之间持续的绝热性能。
- 10.3.4.2 绝热板填缝根据位置分为平面板间填缝和调整板间填缝，平面板间填缝为平面板之间标准设计宽度的缝隙填充，调整板间填缝主要用于折角板与平面板间可调间隙的填充。
- 10.3.4.3 绝热板平面板填缝料，施工宜采用真空压缩填塞。
- 10.3.4.4 调整板间填缝采用聚氨酯泡沫板填充，应根据实际缝宽裁剪尺寸，并预留好玻璃纤维棉填缝条宽度。
- 10.3.4.5 填缝高度与绝热板的平面高差超过4mm应重新安装。
- 10.3.5 绝热板修复
- 10.3.5.1 对于超出安装公差的绝热板，应在胶泥固化前卸下，并及时去除粘结胶泥，重新安装。
- 10.3.5.2 绝热板本身损坏，应视情况进行修复或更换。
- 10.3.6 顶部桥垫
- 10.3.6.1 顶部桥垫在不同绝热板连接处提供找平、绝缘以及结构功能。
- 10.3.6.2 安装顶桥垫前，应对安装公差进行检查。
- 10.3.6.3 安装顶桥垫前，应对柔性次屏蔽膜进行真空吸尘和除尘。顶桥板尺寸应预留树脂胶的厚度，厚度宜为 $1\text{mm}\sim\text{mm}$ 。
- 10.3.6.4 绝热板与柔性次屏蔽膜间间隙较小时，应适当削减顶部桥垫底部，保证顶部桥垫底部与绝热板表面间隙不超过 1mm 。
- 10.3.6.5 安装顶桥板宜使用柔性楔块进行找平。
- 10.3.6.6 罐底绝热板之间与罐底中心板连接处，应根据连接区域形状设置异型顶部桥垫。
- 10.3.6.7 位于绝热角板间的顶部桥垫应在现场根据实际尺寸切割完成。
- 10.3.6.8 泵塔基座处的顶部桥垫在铺设时，应与主屏蔽层之间敷设玻璃棉填充。
- 10.3.7 填充件
- 10.3.7.1 泡沫柱填充件
- 泡沫柱填充件插入后不得凸出绝热板平面，平整度公差应为 $+0/-2\text{mm}$ ；
 - 泡沫柱填充件安装时，应使用木槌或者塑料锤轻轻敲入螺栓孔；
 - 泡沫柱突出部分，应打磨整齐，不得损坏绝热板以及次屏蔽膜；
 - 如泡沫柱表面与绝热板表面超过 2mm ，可用承重胶泥填充整齐，并及时清理。
- 10.3.7.2 填充接头
- 填充接头形状、尺寸应根据绝热板接缝实际尺寸确定并预制；
 - 填充接头宽度宜等于实际接缝宽度；
 - 填充接头应采用低温胶水粘合于罐壁或绝热板上；
 - 填充接头宜采用泡沫填充、玻璃棉以及泡沫+玻璃棉组合组成。次膜端上方间隙只能使用玻璃棉填充；
 - 如填料材质选用PU泡沫填料，填料接头与绝热板边缘最大允许间隙应为 4mm ；
 - 如填料材质选用玻璃棉，填料接头最大允许宽度为 30mm ，接头与绝热板间的水平允许公差为 $0\sim 5\text{mm}$ ；
 - 间隙宽度在 $4\sim 10\text{mm}$ 范围之内时，应用玻璃棉填充；
 - 三面体板与角板接缝处填料应选用胶合板、聚氨酯泡沫、胶合板、刚性三层板。填充完毕后，剩余间隙宽度在 30mm 以下时，应用玻璃棉填充。
- 10.3.7.3 填充玻璃棉
- 泵塔支架周围填充玻璃棉时，应采用承重胶泥粘合牢固，并在制动块周围额外敷设承重胶泥；
 - 玻璃棉必须完全填满面板之间的间隙；
 - 绝热板平接头安装时应保证接头处于轻微挤压状态；

- d) 玻璃棉平接头须手动安装，插入绝热板30mm接缝以及次膜端下部锚固件和绝热板之间；
 - e) 接缝处玻璃棉高度应等于绝热层总厚度。
- 10.3.8 次屏蔽膜
- 10.3.8.1 次屏蔽粘接工作应在绝热板安装和接缝填充工作完毕后进行。
- 10.3.8.2 复合材料次屏蔽膜施工作业前，应通过粘连工艺检验，确认施工工艺。
- 10.3.8.3 柔性次屏蔽膜粘接工作应在绝热板安装和填缝检查合格后进行。
- 10.3.8.4 所有热角保护以下部位的绝热板的保冷层之间都粘连刚性的次屏蔽膜。
- 10.3.8.5 次屏蔽通过在绝热板之间搭接粘连柔性次屏蔽来保持次屏蔽的连续性。
- 10.3.8.6 柔性次屏蔽膜安装前应注意如下事项：
- a) 安装环境温度应控制在20~30℃之间，相对湿度应在70%以下；
 - b) 柔性次屏蔽膜施工应采取措施防止出现任何损坏；
 - c) 柔性次屏蔽膜施工可采用自动粘连或手工粘连；手工粘连应用于有角度的柔性次屏蔽膜或异形次屏蔽膜；
 - d) 柔性次屏蔽膜的安装，应采取防护措施确保粘连区域的清洁，避免污染；
 - e) 在切割、调节和处理过程中，应保持清洁，施工人员必须佩戴手套，不得直接接触次屏蔽膜；
 - f) 所有带柔性次屏蔽膜的区域应用硬质乙烯基薄膜覆盖加以保护，并采取适当的防护措施，保护装置应光滑、无锐边且易于操作。
- 10.3.8.7 每天工作前进行设备测试，检查供胶系统配比、硬度、胶水外观等是否符合胶水厂家技术文件要求。
- 10.3.8.8 记录胶水加料时间、胶水批号及有效期，记录每天测试结果。
- 10.3.8.9 根据粘连面积计算所需要的胶水量，自动粘连宜为1000~1200g/m²，手动粘连宜为800~900g/m²，根据几何形状进行调整，记录在胶水托盘上，并记录打胶时间。
- 10.3.8.10 在绝热板上标记柔性次屏蔽膜粘合边界，标记宽度应大于柔性次屏蔽膜实际宽度5~8mm，在柔性次屏蔽膜粘合带旁边布置一条宽20~35mm的胶带。
- 10.3.8.11 柔性次屏蔽膜末端应与绝热板边缘平行，并间隔0~15mm。
- 10.3.8.12 柔性次屏蔽膜之间重叠宽度为250mm，与绝热板搭接宽度为110±5mm，并保证完全覆盖绝热板螺栓孔。两个柔性次屏蔽膜之间搭接宽度为75±5mm；角区次屏蔽膜搭接宽度为145±5mm；交点和搭接区域最小距离为200mm。
- 10.3.8.13 在柔性次屏蔽膜搭接位置，使用打磨机及砂纸打磨溢胶表面。溢胶位置如果有气泡，将气泡磨开，使其完全暴露出。
- 10.3.8.14 使用刮刀沾取胶水逐步涂抹在粘连表面，宜保持涂抹方向一致，不应将粘上玻璃棉的胶水带入到粘连表面。
- 10.3.8.15 PU45胶水涂胶过程时间控制在45min以内，PU15胶水涂胶过程时间控制在15min以内，并做好粘合时间记录。
- 10.3.8.16 手动粘连完成后，应采用热压板覆盖热压，保证粘连质量，热压板使用压力、温度、粘连时间应满足粘连工艺要求。
- 10.3.8.17 柔性次屏蔽膜检验应通过圆棒点压表面进行检查，是否存在气泡，泡沫塞和填缝位置不能点压，气泡的范围及要求见表5的规定
- 10.3.8.18 柔性次屏蔽膜粘连质量检查应满足表5的规定。

表5 柔性次屏蔽膜粘连质量控制标准

检验项目	检验标准	检验方法
外观检验	粘连边界区胶水100%溢胶，无杂质； 要求无折痕； 溢胶高度 $\leq 0.8\text{mm}$ 。	目视检查
气泡	每侧任意150mm长度范围内的气泡带面积应小于5%； 不允许出现直径大于8mm或等效面积大于50mm ² 的单个气泡； 气泡带最大允许长度为粘连宽度的50%； 在泡沫塞区域不允许出现气泡带。	目视检查
溢胶	溢胶长度要求与粘连长度一致，高度与柔性次屏蔽膜一致。	钢尺
密性	无泄漏。	真空试验、声音试验

10.3.9 破损与修复

10.3.9.1 如发现局部承重胶泥混合度不合格，应将该绝热板上的胶泥条和胶泥饼全部拆除，并替换以合格的胶泥条和胶泥饼。

10.3.9.2 如绝热板发生损坏，应及时更换损坏绝热板，并在安装完成后重新校验平整度。

10.3.9.3 如发现绝热板间隙、水平度超过公差的情况，应尽快拆除，避免损坏防潮层和相邻绝热板。与此同时，应将绝热板和防潮层上的低温胶清理干净。

10.2.9.4 连接件、填充件安装过程中不得使用损坏零件，如发现零件损坏，应立即更换。

10.3.9.5 柔性次屏蔽膜粘连的修复：

对溢胶缺陷部位，宜切除缺陷部位5mm宽度的柔性次屏蔽膜，按照以下方式进行修补：

a) 缺陷两侧80mm 范围处贴胶带保护；

b) 用60目~120目砂纸打磨胶带框内的胶水；

c) 重新粘连柔性次屏蔽，应覆盖原柔性次屏蔽的搭接尺寸不少于20mm。

10.3.10 绝热结构施工完成后，应按技术文件检验和验收。

11 混凝土部分施工、检验和验收

11.1 混凝土外罐施工、检测、试验单位应具备相应资质。

11.2 施工测量应符合GB 50026和SH/T 3564规定。

11.3 材料、半成品、成品进场时，应检查其规格、型号、外观和质量证明文件，有进场复验要求的材料应按有关标准的规定进行复验，合格后方可使用。

11.4 混凝土材料选择、配合比的调整确定应符合GB 51081的有关规定。

11.5 低温钢筋应按批进行检查和验收，其性能、连接、试验应符合YB/T 4641的有关规定。

11.6 预应力钢绞线应具有耐低温性能，其性能及检验应符合设计文件要求和GB/T 40029规定。

11.7 灌浆料宜采用符合GB/T 50448规定的成品水泥基灌浆料。

11.8 应使用定位垫块保证钢筋位置及混凝土保护层厚度满足设计要求。

11.9 模板应具有足够的强度和刚度，接缝应密封严实，符合JGJ/T 74和JGJ 162规定。

11.10 罐底板施工宜采用分段、分块作业方法施工，各浇筑段之间应对称施工。

11.11 大体积混凝土材料选择、配合比和施工过程中内外温差控制等均应符合GB 50496的有关规定。

11.12 防潮层施工前，混凝土表面应符合下列标准：

——混凝土表面致密平整，无肉眼可见的空洞和凹陷，无水泥浮浆和其它污染物；

——混凝土基层含水率低于4%；

——混凝土基层抗拉强度高于2.0MPa；

——表面无尖锐突起，阴角、阳角需要做成圆弧处理，圆弧半径不小于30mm。

11.13 防潮层施工时罐内环境中应符合下列条件：

——气温：15℃~30℃；

- 湿度：低于70%；
 - 露点：基层表面温度高于露点温度3℃；
 - 基层温度：高于10℃。
- 11.14 混凝土罐壁的第一个施工缝应高于罐底板不小于200mm。
- 11.15 罐壁预应力钢绞线施工应符合下列要求：
- 预应力钢绞线应设置在混凝土罐壁的中央或偏外位置；
 - 预应力张拉顺序应根据设计确定，可采用先竖向后环向及整体对称方式；
 - 罐壁水平预应力钢绞线宜由下而上张拉，每层钢束宜同时由两端对称张拉；
 - 竖向预应力钢绞线应采用竖向间隔沿壁柱对称张拉方法，且宜采用一端张拉。
- 11.16 罐顶混凝土施工可连续浇筑，也可分段浇筑。罐顶可根据其厚度分层浇筑，但施工方法应确保施工完成后的罐顶平整。
- 11.17 预埋件应符合下列要求：
- 预埋件应按设计要求准确埋设；
 - 后埋设的预埋件施工应满足混凝土结构后锚固技术的要求；
 - 处于低温工作区的永久性埋件材料（埋件及结构胶），应满足耐低温的性能要求；
 - 施工用的预埋件应经设计同意后再埋设。
- 11.18 应通过调整混凝土配合比、水泥型号、增设抗裂网片等措施预防混凝土开裂。
- 11.19 混凝土结构尺寸的允许偏差应满足表6的规定。

表6 薄膜罐混凝土结构尺寸偏差表

序号	检验项目		允许偏差	检验方法	抽验频率
	内容	检验部位			
1	罐壁内墙面垂直度	距承台1m任一点到底部	±6mm	全站仪	每自然面全高每 1.5m~2m 测 1 个点
		从1m以上任一点到底部	±25mm	全站仪	
2	罐壁内墙面半径	储罐中心至内墙面任一边中点长度偏差	±30mm	全站仪	每自然面全高每 1.5m~2m 测 1 个点
3	罐壁内墙面直径	任意标高处内墙面任一边中点至对面中点的长度偏差	±40mm	全站仪	每自然面全高每 1.5m~2m 测 1 个点
4	罐承台内切圆半径	储罐中心至承台任一边中点长度偏差	±25mm	全站仪	每自然面全高每 1.5m~2m 测 1 个点
5	平整度偏差	承台任意两点标高差	25mm	水准仪	承台面建立不大于3m×3m的方格网进行标高测量
6		承台任意3m范围内平整度偏差	5mm	3m直尺	承台面建立不大于3m×3m的方格网，任意测量每方格网内最大平整度偏差值
7		罐壁内墙面平整度偏差	5mm	3m直尺	墙面建立不大于3m×3m的方格网，任意测量每方格网内最大平整度偏差值
8	罐壁内墙面宽度	罐壁内墙面交线间宽度偏差	±10mm	卷尺	每墙面全高上中下不少于3点
9	预埋件位置	预埋件定位偏差	±13mm	全站仪	复核埋件中心或中线位置
10		预埋件平面高差（承台/罐壁）	-2mm~0	水平尺、塞尺	复核埋件与混凝土接缝位置，每面/块不少于3点
11		预埋件平面高差（罐壁顶部）	±10mm	水平尺、塞尺	复核埋件与混凝土接缝位置，每面/块不少于3点

表6 薄膜罐混凝土结构尺寸偏差表（续）

12	罐壁内墙面交线偏差	交线全高水平偏差	±20mm	全站仪	每交线全高不少于3点
13		交线全高倾斜值	≤0.05° 或 1/1000	吊线	每交线全高不少于3点
14	定位尺寸偏差	承台	±30mm	全站仪	测量中心点
15		罐壁	±10mm	全站仪	测量墙面中心角度 (0°、90°、180°、270°)
16	截面尺寸	罐壁、底板、穹顶、柱截面尺寸	±6mm	尺量	每浇筑段监测
17	罐壁钢筋	钢筋间距	±20 mm	尺量	每浇筑段监测
18		保护层	±5mm	测厚仪	随机检测不少于10处
19	预应力套管	径向半径	±5mm	全站仪	每浇筑段监测
20		水平标高	±20mm	全站仪	每浇筑段监测

12 试验

12.1 水压试验

12.1.1 LNG薄膜罐应进行水压试验以证明基础能够承受罐内介质产生的附加载荷。

12.1.2 应对预应力混凝土外罐进行水压试验，水压试验液位高度为1.25倍的最高设计液位乘以介质和试验水的相对密度。

12.1.3 LNG薄膜罐水压试验应在防潮层施工之后，在绝热结构施工之前进行。

12.1.4 试验宜采用洁净水，且不应应对金属部件产生损害。水质不能满足要求时，应采用添加合适的抑制剂等其他试验方法。

12.1.5 水压试验后应清洗干净。

12.1.6 水压试验前，应清除全部焊渣和建造过程中使用的全部材料、部件或临时安装件，并应清扫储罐；

12.1.7 水压试验过程中应使用永久性或临时性压力泄放系统，压力泄放系统应具有一定的泄放能力；

12.1.8 水压试验充液速度应根据水源和设备能力以及基础土壤条件确定；

12.1.9 水压试验前应在储罐外表面安装沉降观测点，观测点的设置应符合下列要求：

- 当外罐直径小于或等于10m时，应安装4个观测点；
- 当外罐直径大于10m时，应安装8个观测点；
- 观测点应在储罐喷漆后依然可用或可见。

12.1.10 在水压试验过程中应观测罐体沉降，并应符合下列规定：

- 对充水和排放过程中的储罐沉降进行监控，应至少在储罐充水水位达到1/2、3/4高度和全高度时对储罐进行沉降观测；
- 当预计储罐罐底的不均匀沉降量大于30mm时，应采取监测储罐中心沉降的措施；
- 试验过程中，应将沉降观测数据与预先的计算值进行比较。沉降观测数据与预先的计算值出现差异时，应通知监理工程师、设计单位和储罐建设方。

12.1.11 试验过程控制和检查，应符合下列规定：

- 应充水至试验液位并保持24h；
- 设置有锚固件的储罐，充水到设计液位的70%时，应对锚固件进行调整。

12.1.12 放水时不应应对周围环境造成不良影响。

12.2 气压试验

- 12.2.1 正压试验的气压压力应为储罐设计压力的1.25倍。正压试验应在水压试验结束后、排水前进行，并保持罐内水液位在水压试验液位。
- 12.2.2 气压试验压力应能自动排放。可利用正压的压力调节排放阀，也可设置一套临时压力排放系统。当压力超过试验压力时，压力调节排放阀和临时排放系统均应立即自动排放。
- 12.2.3 气压试验时，应在试验压力下稳压60min，再将压力降低至设计压力，并应对所有焊缝进行肥皂液检漏试验，应以无渗漏为合格。焊接接头曾做过真空试漏时，可用目测检查代替肥皂液检漏检查。
- 12.2.4 气压试验合格后，应将压力泄放阀的设定压力定为设计压力。压力泄放阀的设定压力应通过泵送空气至气相空间的方法予以验证。
- 12.2.5 渗漏处的修补应在试验结束后进行，且修补处应经真空试漏检查合格。
- 12.2.6 负压试验的试验压力应等于储罐设计负压。达到设计负压后，经检查无异常情况可视为试验合格。
- 12.2.7 负压试验宜在储罐内有静水压力的状态下进行。
- 12.2.8 负压试验时负压应能自动泄放；可安装并调节负压泄放阀，也可设置一套临时压力泄放系统。当负压超过试验负压时，负压泄放阀和临时压力泄放系统均应立即自动泄放。
- 12.2.9 负压试验前应封闭负压泄放阀之外的所有开孔。
- 12.2.10 负压试验合格后，应将负压泄放阀的设定压力定位设计负压压力。真空压力泄放阀的设定压力应通过降低水位或使用空气抽取器的方法予以验证。

12.3 气体示踪试验

- 12.3.1 LNG薄膜罐应进行气体示踪试验。
- 12.3.2 气体示踪试验应在储罐内部薄膜板焊接工作全部完成之后进行。
- 12.3.3 气体示踪试验应在主屏蔽层空间及次屏蔽层空间分别进行。
- 12.3.4 储罐内标记部分参考泄漏点，泄漏点方位布置可根据现场条件进行调整。
- 12.3.5 在试验开始前，应准备好试验用设备及示踪气体和示踪剂，并于主、次屏蔽空间设置安全泄放装置。
- 12.3.6 试验前应对储罐进行彻底清洁。
- 12.3.7 试验前应将储罐主屏蔽层空间及次屏蔽层空间抽真空，并保证主、次屏蔽层空间应保持连通状态且两者压差不得超过3kPa。
- 12.3.8 示踪气体试验应符合下列要求：
- 试验开始应在主屏蔽层内通入示踪气体，在次屏蔽层内通入氮气，保持主、次屏蔽层压力同步上升至2kPa；
 - 在主屏蔽空间内循环进行三次升压、降压过程，压力变化为2kPa，从0到2kPa，并在压力极值处保压20min，同时次屏蔽空间保持2kPa压力值不变；
 - 上述操作过程应持续24h，发生泄漏产生时应及时制动，并用胶带将泄漏点密封。
- 12.3.9 示踪气体检查试验完成后，对所有泄漏点进行修补，并应符合下列要求：
- 开始修补工作前，应将主屏蔽层内示踪气体抽空并用氮气进行吹扫、排空示踪气体；
 - 在标准气压下其主屏蔽层内充满氮气状态对泄漏点进行修补；
 - 如果每1000m²泄漏数量小于等于4个，密封性试验可按三个步骤进行：目视检查、真空箱试验及着色渗透试验。
 - 如果每1000m²泄漏数量大于4个，需要按照12.3.8要求进行附加示踪气体检查试验。
- 12.3.10 泄漏检查试验完成后，对储罐进行清洗工作，并应符合下列要求：
- 对主屏蔽膜进行冲洗、排水，直至排出水内化合物含量小于 1000×10^{-6} ；
 - 利用洁净装置及蒸馏水对屏蔽层进行彻底清洁。
- 12.3.11 侧门封闭及脚手架拆除需对屏蔽层进行密封性检查，应按照三个步骤进行：目视检查、真空箱试验及着色渗透试验。

13 干燥、置换和冷却

13.1 干燥

13.1.1 薄膜罐内罐应干燥至露点不高于 -20°C 。

13.2 置换

13.2.1 在低温介质注入薄膜内罐前，应使用惰性气体对薄膜罐进行置换，置换气体宜采用氮气。

13.2.2 氧浓度符合下列规定时，才允许停止置换：

- 薄膜内罐小于9%（摩尔比）；
- 主、次绝热空间小于3%（摩尔比）。

13.2.3 内罐和拱顶空间、主绝热空间和次绝热空间等关键部位应设置取样检测点，以判断是否完成置换工作。

13.2.4 薄膜罐置换宜按照先内罐后主、次绝热空间的顺序，主、次绝热空间压力不应高于内罐压力。

13.2.5 在薄膜罐的绝热空间置换的过程中，内罐压力不应低于10kPa；主绝热空间和次绝热空间应相互连通，两者压差不应大于1kPa。

13.3 冷却

13.3.1 薄膜罐的冷却宜使用液氮或者液化天然气进行。

13.3.2 薄膜罐顶部应采用带有喷淋装置的环形管路，环形管路应根据操作压力和进料流量确定。

13.3.3 在储罐的罐壁和罐底宜安装监控用测温元件。测温元件宜合理布置，保证关键点的温差测量。

13.3.4 薄膜罐应采用下述冷却速度：

- 薄膜的正常冷却速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，最大冷却速率不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；
- 罐壁或罐底上任意两个相邻热电偶之间的最大温差不超过 50°C 。

13.3.5 在薄膜罐冷却的过程中，主绝热空间和次绝热空间的压力应维持在0.8~1.5kPa范围内。

13.3.6 可能产生蒸发气的空间应安装足够能力的闪蒸气排放装置引至火炬或放空。

附 录 A
(规范性)
薄膜罐设计条件

A.1 买方确定的资料

买方应确定以下设计资料：

- 工作范围（包括预试运行、干燥、置换及冷却）；
- 设计及设定压力；
- 灌注/排放速率；
- 罐内泵设计数据；
- 意外情况（例如：溢出、泄漏、火灾及爆炸）；
- 设计使用年限；
- 储罐位置布置图；
- 储罐容积（净容积或总容积）；
- 环境资料（包括周围环境、最低/最高气温、热辐射）；
- 工艺流程图(PFD)、工艺流程与仪表图(P&ID)；
- 薄膜的金属设计温度；
- 储存液体的相关性质，包括相应的密度、温度及易燃性；
- 防止翻滚的措施（安装密度表，采用连续的产品循环）；
- 允许的蒸发率及环境条件；
- 内部正、负设计压力；
- 最高正常操作液位；
- 压力及真空释放设计数据（流量）；
- 特定作用如：地震、风、爆炸、冲击、火灾、连接管路/罐嘴荷载；
- 管道及使用仪器仪表要求。

注：买方还可提供现场具体土工及地震资料及其它的资料。

A.2 买方与承包商协商的资料

买方与承包商应就以下条款协商一致：

- 承包商为风险评估提供的协助；
- 适用的国家或地方法律及法规的确认；
- 不同泄漏情况的后果；
- 绝热监控系统最大允许置换流量（薄膜罐）；
- 试运行程序；
- 预计的储罐沉降及今后要进行的检查。

附录 B
(规范性)
低温钢筋的试验

B.1 取样

- B.1.1 进行试验的钢筋应从同牌号、同炉、同轧制工艺或同热处理制度、每种规格订货产品的钢筋中抽取，并应从所有拟采用的强度等级中抽取。
- B.1.2 供货商提供的试验记录不得作为最终依据。
- B.1.3 所有试验样品应从同一支钢筋的相邻位置截取。

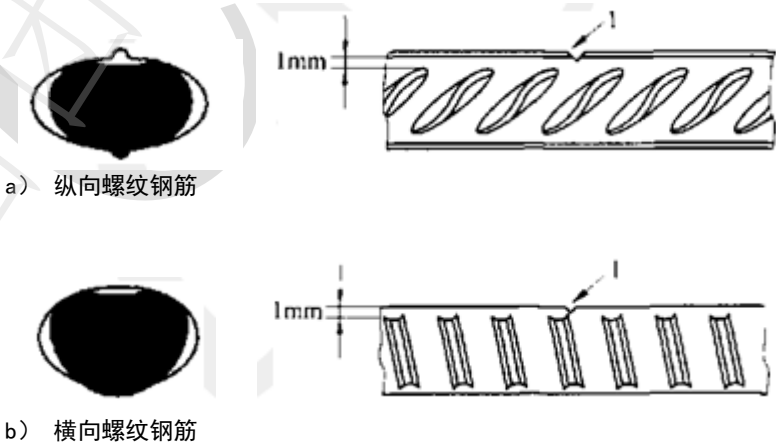
B.2 试验

- B.2.1 拉伸试验应在最低设计温度下进行，最低设计温度应为钢筋在异常荷载状态下可能遭遇的最低温度。
- B.2.2 试验期间，应保证拉伸试验在设计温度条件下进行。试样温度应尽可能均匀，确保试样的任何两点之间的温度差以及试样温度与设定温度的偏差均不应超过5℃。
- B.2.3 拉伸试验应在有缺口钢筋试样和无缺口钢筋试样上分别进行，且应符合下列要求：
 - B.2.3.1 缺口敏感系数值（NSR）大于或等于1时，可判定产品的韧性合格。缺口敏感系数值（NSR）可按下列公式确定：

或

$$NSR = \frac{\text{有缺口钢筋的抗拉强度}}{\text{无缺口钢筋的 } 0.2\% \text{ 的弹性极限应力}}$$
$$NSR = \frac{\text{有缺口钢筋抗拉强度}}{\text{无缺口钢筋的较低屈服强度}}$$

- B.2.3.2 钢筋试件上的缺口应位于试验台两端机械夹具的中部，缺口应为V形缺口，其内夹角应为45°，且底部半径应为0.25mm。缺口位置应符合下列要求：
 - 对于纵肋螺纹钢，其缺口位置应在纵肋上，贯穿纵肋并切入底层钢条1mm；
 - 对于横肋螺纹钢，其缺口应位于齿冠上（见图B.1）。



图B.1 钢筋上的缺口1-V形缺口

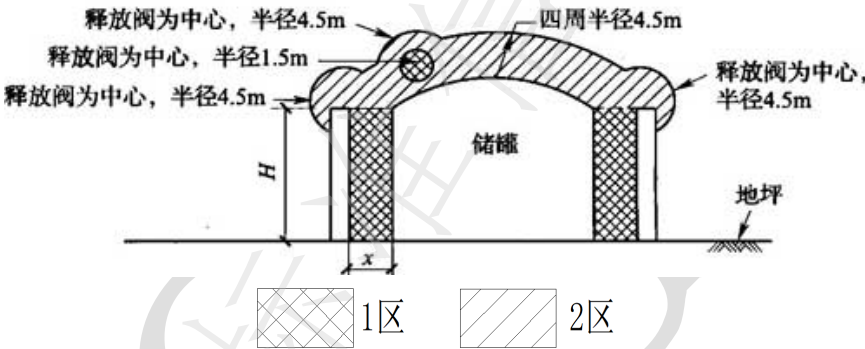
- 无缺口钢筋试样的塑性延伸率不应小于3%。
- 试验所得的屈服强度不应小于设计最小屈服强度的1.15倍。

附 录 C
(规范性)
工艺及安全

- C.1 薄膜罐液位的设置应符合下列规定：
- 基于液化天然气储罐的最大充装体积流量，从最高操作液位上升至高高液位的时间不宜小于10min，达到高高液位时应联锁关闭入口阀门。
 - 薄膜罐低液位应根据罐内泵特性确定。
- C.2 薄膜罐宜设置压力控制阀，超压排放气排放至火炬系统。
- C.3 薄膜罐应设置安全阀及备用安全阀。
- C.4 薄膜罐应设置补气阀和真空安全阀。补气阀的补气介质宜为天然气或氮气，真空安全阀应设置备用。
- C.5 薄膜罐的穹顶、主膜和次屏蔽层空间应设置测定气相氧含量及露点的取样口。
- C.6 薄膜罐的绝热空间应设置氮气保护系统，使绝热层的压力维持在一定范围。
- C.7 薄膜罐的绝热空间应设置超压保护措施，防止主膜泄漏引起的绝热空间超压。
- C.8 设备布置应满足工艺流程、安全生产和环境保护的要求，并应兼顾操作、维护、检修、施工和消防的需要。
- C.9 管道布置应符合SH 3012和SH 3034的有关规定。
- C.10 管道材料选择应符合GB/T 20801.1~GB/T 20801.6的有关规定。
- C.11 管道绝热材料应满足GB 50264及SH 3010中对于低温绝热材料、绝热结构和绝热计算的相关要求。
- C.12 管道防腐蚀涂料应能耐受持续低温，并应满足SH/T 3022的有关要求。

附 录 D
(规范性)
电气

- D.1 LNG薄膜罐用电负荷应满足GB 50052的规定，宜按二级负荷供电。也可结合LNG薄膜罐功能定位，工艺流程以及中断供电所造成的损失和影响程度调整。以下重要负荷应设置应急电源。
- a) 为LNG薄膜罐罐内泵提供电源；
 - b) 维持所有安全状态负荷；
 - c) 启动并运行消防负荷；
 - d) 若LNG薄膜罐安装了电加热系统，应维持其供电；
 - e) 必要时供应用于安全的仪表风和氮气。
- D.2 LNG薄膜罐上的消防负荷配电应符合现行国家标准GB 50160中的规定。
- D.3 LNG薄膜罐爆炸危险区域划分见图D.1。



图D.1 LNG薄膜罐爆炸危险区域划分平面图

- D.4 LNG薄膜罐爆炸性环境的电力装置设计，应符合GB 50058的有关规定。
- D.5 LNG薄膜罐内敷设的电缆或导线选型时应考虑环境温度、腐蚀等因素，且电气线路的敷设应采用一定的防护措施。
- D.6 LNG薄膜罐防雷设计按GB 50650和GB 50057中第二类防雷的有关规定进行设计。
- D.7 LNG薄膜罐的工艺设备，管道，建、构筑物防雷、防静电设计应符合现行国家标准GB 50650、GB 50057和SH/T 3097的有关规定。储罐内各金属内壁、构件、工艺设备、管道等，应有可靠的导静电连接，并有静电引出措施。内壁有涂漆时，漆的导电性能应高于被储液体，其体积电阻率应在 $10^8 \Omega \cdot m$ 以下。

附 录 E
(规范性)
仪表及自动自控

E.1 薄膜罐仪表自控系统设计总则

薄膜罐应设置满足储罐在预冷、运行和紧急停车阶段的压力、温度、液位检测仪表。储罐仪表应能保证储罐在最佳工艺状态下运行，并具备紧急停车功能，事故状态下能使储罐处于安全状态。

E.2 液位检测仪表

液位仪表的设置规定按GB 51156相关要求执行。

E.3 压力检测仪表

- E.3.1 用于薄膜罐安全联锁保护的的压力检测仪表宜采用三选二的冗余配置。
- E.3.2 薄膜罐的取压点应位于储罐顶部高于储罐最高允许液位的气相空间。
- E.3.3 薄膜罐应设置主屏蔽层空间与内罐气相空间、主屏蔽层空间与次屏蔽层空间的差压检测仪表，同时应对绝热层进行压力检测。

E.4 温度检测仪表

E.4.1 薄膜罐应设置用于气相空间监测、泄漏监测、预冷监测、绝热空间监测的温度检测仪表，宜采用双支型铂热电阻。至少包含以下监测点：

表E.1 温度监测点分布表

用途	位置	具体定位
气相空间监测	气相空间内	穹顶空间 吊顶板下表面 穹顶衬板下表面 吊顶保温层
泄漏监测	薄膜内罐底部	次屏蔽膜下表面
预冷	薄膜罐壁垂直方向 罐底部	薄膜板下表面
绝热空间监测	罐壁垂直方向 罐底部	混凝土外罐底

E.4.2 薄膜罐应设置用于检测不同液相高度的多点温度计，相邻两个传感器间的垂直距离不应超过2m。

E.5 可燃气体泄漏监测

- E.5.1 罐区应设置用于连续监测可燃气体浓度的检测报警装置。
- E.5.2 薄膜罐应设置用于分析绝热空间可燃气体浓度的在线检测系统，当绝热空间中碳氢化合物浓度大于或等于25% LEL(爆炸下限)时触发警报。

E.6 主要联锁设置

- 薄膜罐应至少设置以下安全联锁：
- 当薄膜罐液位低于低限时，应联锁停运外输泵并关断出液阀；当液位超出高限时，联锁切断液化天然气进料。
 - 当薄膜罐压力低于低限时，应连锁开启补气阀；当储罐压力超出高限时，连锁开启超压放空阀。

附录 F
(规范性)
胶泥相关参数计算

F.1 胶泥条平均宽度计算，见图F.1。

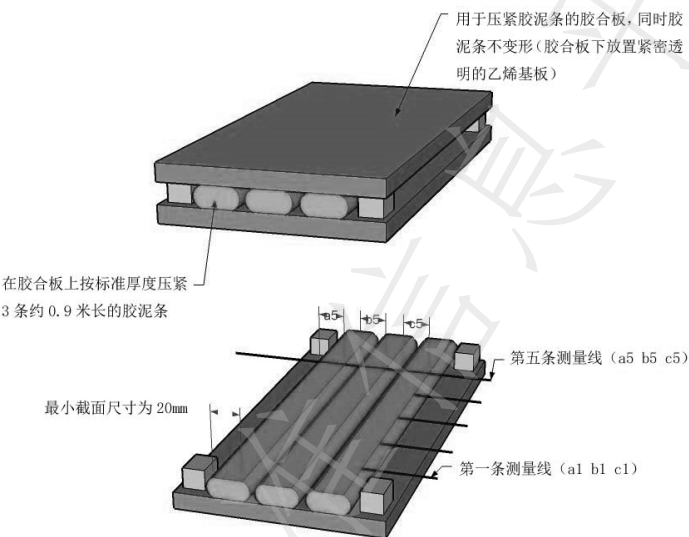


图 F.1 胶泥条平均宽度计算示意图

F.2 胶泥条条宽度应满足下列条件：

胶泥条挤压后的最小宽度 $\geq 20\text{mm}$ ；

胶泥条平均最小宽度 $\geq 25\text{mm}$ ；

$$(a1 + a2 + a3 + a4 + a5) / 5 \geq 25\text{mm};$$

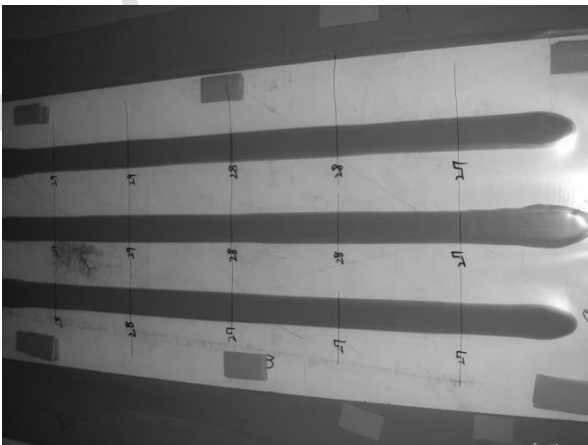
$$(a1 + a2 + a3 + a4 + a5) / 5 \geq 25\text{mm} ;$$

$$(b1 + b2 + b3 + b4 + b5) / 5 \geq 25\text{mm};$$

$$(b1 + b2 + b3 + b4 + b5) / 5 \geq 25\text{mm} ;$$

$$(c1 + c2 + c3 + c4 + c5) / 5 \geq 25\text{mm};$$

$$(c1 + c2 + c3 + c4 + c5) / 5 \geq 25\text{mm}。$$



图F.2 胶泥条挤压测试示意图

F.3 测定胶泥饼尺寸



图F.3 胶泥饼尺寸测定示意图

F.4 尺寸要求

$$d(1) = (dx+dy) / 2$$
$$d(1), d(2), d(3) \cdots \cdots d(15) \geq 60\text{mm}$$



图F.4 胶泥饼挤压测试示意图



中国工业气体工业协会
CHINA INDUSTRIAL GASES INDUSTRY ASSOCIATION
北京市朝阳区惠新南里6号天建大厦202室
电话：010-87378841
010-67315044
传真：010-67315244
邮编：100029
邮箱：cgia@263.net
网址：www.cigia.org.cn



中国气体协会官网