



中华人民共和国国家标准

GB/T 26978—2021

代替 GB/T 26978.1—2011, GB/T 26978.2—2011, GB/T 26978.3—2011,
GB/T 26978.4—2011, GB/T 26978.5—2011

现场组装立式圆筒平底钢质低温 液化气储罐的设计与建造

Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical,
flat-bottomed steel tanks for the storage of cryogenic liquefied gas

2021-12-31 发布

2022-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	V
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义、符号和缩略语	3
3.1 术语和定义	3
3.2 符号	6
3.3 缩略语	9
4 基本规定与总则	9
4.1 储罐类型	9
4.2 总体设计依据	13
4.3 保护系统	16
4.4 作用	17
4.5 检查与维护	19
4.6 质量管理、环境管理和职业健康安全管理	19
5 金属构件	19
5.1 一般要求	19
5.2 材料	19
5.3 设计	23
5.4 制造	37
5.5 焊接工艺	50
5.6 焊接	52
5.7 检验	53
5.8 气压升顶	58
6 混凝土构件	59
6.1 材料	59
6.2 荷载组合	60
6.3 设计要求	60
6.4 施工要求	61
6.5 衬里	61
7 绝热构件	62
7.1 概述	62
7.2 绝热材料的设计、性能、测试和选择	62

7.3	绝热保护-隔气层	65
7.4	绝热系统设计	66
7.5	绝热系统的安装	70
8	试验、干燥、置换和冷却	71
8.1	水压试验和气压试验	71
8.2	干燥、置换和冷却	74
8.3	停运	75
附录 A (资料性)	中间加强圈设计示例	76
附录 B (资料性)	薄膜上的荷载	78
附录 C (资料性)	绝热材料	79
附录 D (资料性)	绝热材料检测方法	82
附录 E (资料性)	主要绝热材料验收	85
E.1	罐底承压泡沫玻璃砖	85
E.2	膨胀珍珠岩	87
E.3	玻璃棉	89
E.4	弹性毡	90
E.5	沥青毡	90
附录 F (资料性)	主储罐底部绝热——极限状态理论	91
附录 G (资料性)	储罐绝热系统施工安装	92
G.1	罐底绝热安装	92
G.2	环形空间绝热安装	92
G.3	吊顶绝热安装	93
G.4	罐顶空间低温管线绝热安装	93
参考文献	94
图 1	单容罐图	10
图 2	双容罐图	11
图 3	全容罐图	12
图 4	薄膜罐图	13
图 5	典型的罐底板布置	25
图 6	薄膜的设计流程图	28
图 7	典型的罐壁-罐顶受压面积	34
图 8	典型的带有绝热构件的罐顶接管	36
图 9	穹顶片几何尺寸测量部位	39
图 10	罐底边缘板几何尺寸测量部位	40
图 11	罐壁几何尺寸测量部位	41
图 12	向外和向内的棱角	43

图 13	用于测量棱角的量规	43
图 14	吊顶示意	45
图 15	三层板搭接示意图	46
表 1	产品存储温度下储罐钢材的类型	20
表 2	钢材牌号和存储温度下限	20
表 3	最小夏比 V 型缺口冲击试验能量	22
表 4	蒸发气容器所使用钢材	22
表 5	设计许用拉应力	23
表 6	低温低合金钢、低镍钢、9%镍钢的分项荷载和材料系数	24
表 7	罐壁最小厚度	26
表 8	S-N 曲线的系数 k (假定为正态分布)	31
表 9	顶端角环的最小尺寸	34
表 10	植焊钉力学性能	36
表 11	穹顶片几何尺寸允许偏差	39
表 12	罐底边缘板几何尺寸允许偏差	40
表 13	壁板几何尺寸允许偏差	41
表 14	半径允许误差	42
表 15	设计与竣工纵断面之间的最大偏差	42
表 16	焊接接头位置上局部变形的允许误差	43
表 17	立缝位置上的最大错边量	44
表 18	壁板组装错边量	48
表 19	底圈壁板内表面任意点半径允许偏差	49
表 20	壁板焊接接头角变形	49
表 21	壁板凹凸变形	49
表 22	温度较低时的保温时间	53
表 23	主容器和次容器的焊接接头检验	54
表 24	罐壁焊接接头射线/超声检测	55
表 25	蒸发气隔层/衬里的检验	55
表 26	蒸发气容器壁板焊接接头射线照相/超声波检验范围	56
表 27	偶然作用的分项荷载系数	60
表 28	裂缝要求	61
表 29	水压试验要求	72
表 A.1	壁板尺寸表	76
表 B.1	静荷载	78
表 B.2	周期荷载	78
表 B.3	偶然荷载	78

表 C.1	单容罐和双容罐	79
表 C.2	全容罐	80
表 C.3	薄膜罐	80
表 D.1	热阻性能检测	82
表 D.2	力学性能检测	82
表 D.3	耐高温性能检测	83
表 D.4	水和水蒸气的渗透率检测/水和水蒸气的影响检测	83
表 D.5	浸设在低温液化气环境中材料性能检测	83
表 D.6	化学特性检测	84
表 D.7	阻燃性/对火反应检测	84
表 E.1	泡沫玻璃砖主要性能要求	85
表 E.2	泡沫玻璃砖随温度变化的导热系数性能要求	85
表 E.3	泡沫玻璃砖尺寸、外观检验样本大小和合格判定	86
表 E.4	泡沫玻璃砖出厂检验抗压强度和导热系数样本大小和合格判定要求	87
表 E.5	珍珠岩矿石性能检验	88
表 E.6	珍珠岩矿石粒度筛分	88
表 E.7	膨胀珍珠岩粉末性能检验	88
表 E.8	膨胀珍珠岩粉末粒度筛分	89



前 言

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

本文件代替 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》、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》、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》、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》和 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、置换及冷却》，本文件将 GB/T 26978—2011(所有部分)合并整合修订为一个文件。除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 更改了储罐类型的定义(见 4.1,2011 年版的第 1 部分第 4 章)；
- b) 删除了储罐风险评估章节(见 2011 年版的第 1 部分第 4 章)；
- c) 删除了工程建设单位或买方的责任要求(见 2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- d) 更改了极限状态和许用应力理论的规定，并更改了极限状态理论两种状态的定义描述(见 4.2.3,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- e) 增加了地震设计需提供地震安评报告、场地地震动参数和地震影响系数特征参数，更改了垂直分量反应谱的坐标值不应小于相应水平分量反应谱坐标值的 65%(见 4.2.4,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- f) 更改了密闭性的规定(见 4.2.5,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- g) 增加了基础与隔震系统的规定和技术要求(见 4.2.9)；
- h) 更改了混凝土储罐热防护系统的高度要求(见 4.2.11,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- i) 增加了薄膜罐的其他要求(见 4.2.13)；
- j) 更改了永久作用、可变作用的参考规范和要求(见 4.4.2、4.4.3,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- k) 更改了偶然作用的规定(见 4.4.4,2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- l) 删除了“根据 ENV 1998-4:1998 的规定，非弹性特性系数 q 不应大于 1，除非按 EN 1998-1:2004 及 DD ENV 1998-4:1998 调整是合理的。”(见 2011 年版的第 1 部分第 7 章)；
- m) 删除了“质量保证与质量控制”(见 2011 年版的第 1 部分第 5 章)；
- n) 更改了“健康、安全和环境计划”(见 4.6,2011 年版的第 1 部分第 6 章)；
- o) 更改了钢材分类、新钢材分类的夏比 V 型缺口冲击、最大设计许用应力等要求(见 5.2,2011 年版的第 2 部分第 4 章)；
- p) 更改了螺栓、管道构件材料选取等要求，引用国内标准(见 5.2,2011 年版的第 2 部分第 4 章)；
- q) 更改了罐底边缘板的最小宽度要求，更改了罐底中幅板的最小直边长度要求，增加了吊顶设计荷载要求，增加了吊顶两侧允许压差要求，更改了管嘴设计要求，更改了罐体锚固系统表面腐蚀余量要求，增加了穹顶、吊顶、衬板、热角保护、内罐底板、内罐壁板、附件的组装偏差和预制要求(见 5.3,2011 年版的第 2 部分第 5 章、第 6 章)；
- r) 更改了焊工、焊接操作工及探伤人员的资质认证、焊接工艺评定、无损检测的引用标准，更改了罐壁板环焊缝接头 RT 检测比例(见 5.5,2011 年版的第 2 部分第 7 章)；
- s) 增加了气压升顶的相关要求(见 5.8)；

- t) 删除了附录 B 确定薄膜上的荷载与疲劳曲线(见 2011 年版的第 2 部分附录 B);
- u) 更改了混凝土材料设计、施工及验收标准(见 6.1.1,2011 年版的第 3 部分 6.2);
- v) 更改了预应力系统、低温钢筋的参考规范(见 6.1.2,2011 年版的第 3 部分 6.3);
- w) 更改了荷载设计值、荷载影响和几何参数参考规范(见 6.2,2011 年版的第 3 部分 7.2);
- x) 删除了液密性部分(见 2011 年版的第 3 部分 7.3);
- y) 删除了附录 A 材料、附录 B 预应力混凝土储罐(见 2011 年版的第 3 部分附录 A、附录 B);
- z) 新增了预应力系统设计的要求(见 6.3.1);
- aa) 增加了预应力混凝土外罐的抗震设防分类要求、罐壁设计要求、罐壁最小受压区高度的最低要求(见 6.3.2);
- bb) 增加了桩和桩帽应在适用性极限状态下进行裂缝宽度校核及裂缝控制要求(见 6.3.3);
- cc) 更改了混凝土保护层厚度参考规范(见 6.3.6,2011 年版的第 3 部分 8.7);
- dd) 更改了最小配筋面积要求(见 6.3.7,2011 年版的第 3 部分 8.8);
- ee) 增加了罐壁结构强度设计要求(见 6.5.2);
- ff) 删除了施工缝部分(见 2011 年版的第 3 部分 8.5);
- gg) 删除了钢筋混凝土围堰部分(见 2011 年版的第 3 部分 8.9);
- hh) 删除了模板与系杆部分(见 2011 年版的第 3 部分 9.3);
- ii) 删除了混凝土定位垫块的要求(见 2011 年版的第 3 部分 9.4);
- jj) 删除了混凝土养护的要求(见 2011 年版的第 3 部分 9.5);
- kk) 删除了误差部分(见 2011 年版的第 3 部分 9.6);
- ll) 删除了涂层相关内容(见 2011 年版的第 3 部分第 10 章);
- mm) 增加了主要绝热材料验收要求(见 7.2.5 和附录 E);
- nn) 删除了隔气层外罐形成的防护结构对 GB/T 26978.3—2011 第 9 章的引用(见 2011 年版的第 4 部分第 5 章);
- oo) 增加了全容罐绝热系统各构件设计的要点(见 7.4);
- pp) 增加了绝热系统安装的一般要求、罐底绝热安装要求、环隙空间绝热安装要求、吊顶绝热安装要求和罐顶空间低温管线绝热安装要求(见 7.5 和附录 G);
- qq) 更改了绝热材料的检测方法,统一为国内标准(见附录 D,2011 年版的第 4 部分附录 B);
- rr) 增加了丁烷、乙烯、乙烷等低温液烃储罐的水压试验要求(见 8.1.1.2,2011 年版的第 5 部分 4.1.2);
- ss) 更改了储罐试验水质的要求(见 8.1.1.4,2011 年版的第 5 部分 4.1.4);
- tt) 增加了水压试验前,对管道和内罐支撑的检查(见 8.1.1.5);
- uu) 更改了圆周检查中沉降观测点要求,补充 1/4 试验液位高度时的沉降观测(见 8.1.1.6.1,2011 年版的第 5 部分 4.1.6.1);
- vv) 更改了充水中时间的要求(见 8.1.1.7,2011 年版的第 5 部分 4.1.7);
- ww) 增加了负压试压中试验合格后打开进气阀要求(见 8.1.1.2);
- xx) 增加了干燥方案满足 SY/T 4114 的规定(见 8.2.2);
- yy) 更改了置换中氧浓度要求(见 8.2.3,2011 年版的第 5 部分 5.3);
- zz) 更改了冷却中相关要求(见 8.2.4,2011 年版的第 5 部分 5.4)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本文件起草单位:中海石油气电集团有限责任公司、中国寰球工程有限公司北京分公司、中国石化

工程建设有限公司、中国石油天然气管道工程有限公司、中石化中原石油工程设计有限公司、北京市燃气集团有限责任公司。

本文件主要起草人：张超、扬帆、张博超、段品佳、许佳伟、刘博、肖立、武铜柱、彭延建、杜亮坡、刘洋、刘海霞、苏展、高贤、陈团海、张平、郭琦、孟庆鹏、黄欢、武学勇、毕晓星、陈峰、王若冰、李晓琳、王成硕、王文焘、计宁宁、李金光、赵铭睿、陈瑞金、夏梦莹、银永明、钟曦、李斌、范嘉堃、李阳、郝思佳、张建强、邱灶杨、赵建伟、明红芳、陈锐莹、姜夏雪、杨文刚、邢楠、衣鹏、陈晖、宋坤、张奕、冯伟。

本文件于2011年首次发布为GB/T 26978.1—2011、GB/T 26978.2—2011、GB/T 26978.3—2011、GB/T 26978.4—2011和GB/T 26978.5—2011，本次为第一次修订。



引 言

为了规范国内低温液化气储罐的设计与建造,促进国内低温液化气储罐行业的发展和标准化,需建立一种基础性的国家标准。

低温液化储罐用于储存两相状态下(即液体和蒸发气)标准沸点低于环境温度的产品。通过冷却产品,使其温度等于或略低于标准沸点,并使储罐处于微正压,以保持液相和气相间的平衡。

低温液化气储罐的建设过程包括设计、施工、试验、试运行、操作(含故障)和停止使用。本文件根据以上情况,制定低温液化气储罐的设计建造原则。

低温液化气储罐包括主体结构和辅助设施。辅助设施不会影响储罐的整体结构设计,因此本文件只对储罐主体结构的设计进行了规定。

低温液化气储罐所使用的材料目前已基本实现国产化,因此本文件中涉及的材料均为国家标准及ISO标准牌号。如储罐材料设计时参考其他国外标准,可采用相关标准中引用的牌号等同替代国家标准牌号。



现场组装立式圆筒平底钢质低温 液化气储罐的设计与建造

1 范围

本文件规定了现场组装的地上立式圆筒平底钢质主容器储罐(含金属构件、混凝土构件、绝热构件等)设计、建造和安装的一般要求,描述了储罐的试验、干燥、置换和冷却的程序和方法。

本文件适用于存储温度范围介于 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温液化气体,包括液化天然气(LNG)和低温液化石油气(LPG)等低温冷冻烃,其组分主要为甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、乙烯、丙烯等。

本文件适用于最大设计压力不大于 50 kPa 的储罐。

本文件不适用于主容器为混凝土的储罐。

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 150.2—2011 压力容器 第2部分:材料
- GB/T 150.3 压力容器 第3部分:设计
- GB/T 193 普通螺纹 直径与螺距系列
- GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 709—2019 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
- 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 1220 不锈钢棒
- GB/T 2518 连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带
- GB 3097 海水水质标准
- GB/T 3531 低温压力容器用钢板
- GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 6478 冷镦和冷挤压用钢
- GB/T 9145—2003 普通螺纹 中等精度、优选系列的极限尺寸
- GB/T 12459 钢制对焊管件 类型与参数
- GB/T 13401 钢制对焊管件 技术规范
- GB/T 13480 建筑用绝热制品 压缩性能的测定
- GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- GB/T 19001 质量管理体系 要求
- GB/T 23248 海水循环冷却水处理设计规范
- GB/T 24001 环境管理体系 要求及使用指南
- GB/T 24510 低温压力容器用镍合金钢板
- GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带

- GB/T 32983 建筑用绝热制品 压缩蠕变性能的测定
- GB/T 45001 职业健康安全管理体系 要求及使用指南
- GB 50009 建筑结构荷载规范
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50011 建筑抗震设计规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50021 岩土工程勘察规范
- GB/T 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
- GB 50057 建筑物防雷设计规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB/T 50448 水泥基灌浆材料应用技术规范
- GB 51006 石油化工建(构)筑物结构荷载规范
- GB 51081 低温环境混凝土应用技术规范
- GB 51156—2015 液化天然气接收站工程设计规范
- GB/T 51408 建筑隔震设计标准
- HG/T 20592 钢制管法兰(PN 系列)
- HG/T 20606 钢制管法兰用非金属平垫片(PN 系列)
- HG/T 20607 钢制管法兰用聚四氟乙烯包覆垫片(PN 系列)
- HG/T 20609 钢制管法兰用金属包覆垫片(PN 系列)
- HG/T 20610 钢制管法兰用缠绕式垫片(PN 系列)
- HG/T 20611 钢制管法兰用具有覆盖层的齿形组合垫(PN 系列)
- HG/T 20612 钢制管法兰用金属环形垫(PN 系列)
- HG/T 20613 钢制管法兰用紧固件(PN 系列)
- HG/T 20614 钢制管法兰、垫片、紧固件选配规定(PN 系列)
- HG/T 20615 钢制管法兰(Class 系列)
- HG/T 20623 大直径钢制管法兰(Class 系列)
- HG/T 20627 钢制管法兰用非金属平垫片(Class 系列)
- HG/T 20628 钢制管法兰用聚四氟乙烯包覆垫片(Class 系列)
- HG/T 20630 钢制管法兰用金属包覆垫片(Class 系列)
- HG/T 20631 钢制管法兰用缠绕式垫片(Class 系列)
- HG/T 20632 钢制管法兰用具有覆盖层的齿形组合垫(Class 系列)
- HG/T 20633 钢制管法兰用金属环形垫(Class 系列)
- HG/T 20634 钢制管法兰用紧固件(Class 系列)
- HG/T 20635 钢制管法兰、垫片、紧固件选配规定(Class 系列)
- JGJ/T 225 大直径扩底灌注桩技术规程
- JGJ 369 预应力混凝土结构设计规范
- NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第 2 部分:射线检测
- NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测
- NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第 4 部分:磁粉检测
- NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测
- NB/T 47013.7 承压设备无损检测 第 7 部分:目视检测

NB/T 47013.8 承压设备无损检测 第8部分:泄漏检测
 NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
 NB/T 47015 压力容器焊接规程
 SY/T 4114 天然气管道、液化天然气站(厂)干燥施工技术规范
 YB/T 4641 液化天然气储罐用低温钢筋
 CECS 226 栓钉焊接技术规程(附条文说明)
 TSG Z6002 特种设备焊接操作人员考核细则
 TSG Z8001 特种设备无损检测人员考核规则

3 术语、定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

蒸发气 **boil-off gas; BOG**

由于外界的热量引入以及在容器进出料过程中压力变化时的闪蒸等原因,引起低温液化气气化产生的气体。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.4,有修改]

3.1.2

日蒸发率 **daily boil-off rate**

储罐因漏热产生的日蒸发量与储罐总容积的百分比。

[来源:GB 51156—2015,2.0.11,有修改]

3.1.3

储罐总容积 **tank gross capacity**

储罐正常操作条件下允许储存的最大容积。

注:按照内罐的设计液位计算出来的容积。

3.1.4

储罐净容积 **tank net capacity**

有效工作容积

储罐正常操作条件下允许的最高操作液位和最低操作液位之间容积。

3.1.5

拦蓄区 **impounding basin**

现场用防护堤或利用地形条件圈定的用于防止低温液化气或易燃制冷剂事故溢出的区域。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.22,有修改]

3.1.6

基础 **foundations**

所有用于支撑储罐及其内部储存物的结构单元。

注:由底板、环墙或桩组成。

3.1.7

基础底板 **base slab**

支撑储罐的连续式混凝土基座。

注：包括地面式或架空式。

3.1.8

主容器 primary container

用来盛装低温液体,并直接与低温液体接触的容器。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.24]

3.1.9

次容器 secondary container

一般位于主容器之外,泄漏时盛装低温液体,正常运行工况下不与低温液体接触的容器。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.25]

3.1.10

内罐 inner tank

金属自支撑式圆筒形主容器。

3.1.11

外罐 outer tank

由钢材或混凝土构成的自支撑式圆筒形次容器。

3.1.12

环形空间 annular space

自支撑式储罐的内壁与外壁或外墙之间的空间。

3.1.13

绝热空间 insulation space

储罐环形空间以及储罐底部和顶部容纳绝热材料的空间。

3.1.14

隔气层 vapour barrier

防止罐外气体进入绝热材料或罐内的隔离层。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.33]

3.1.15

衬里 liner

为了阻止产品蒸发气和水蒸气渗透,紧贴在混凝土外罐内侧安装的金属板。

3.1.16

环梁 ringbeam

储罐运行状态下处于低温环境,置于内罐壁板下面的环形支承。

3.1.17

罐顶 roof

用于抑制蒸发气压力,使罐内物质不与大气接触的罐壁或墙体顶部结构。

3.1.18

罐壁 shell

金属立式圆筒。

3.1.19

墙体 wall

混凝土立式圆筒。

3.1.20

吊顶 suspended deck

用于承载储罐顶部绝热层,避免珍珠岩掉入内罐,与钢穹顶通过吊杆连接的结构。

3.1.21

热角保护 thermal corner protection; TCP

在内罐少量泄漏的情况下,为了保护罐底和混凝土底层的外壁,且罐体不失效,在内外罐之间设置的由二次底、壁以及保温材料组成的结构。

3.1.22

自支撑式 self supporting

在适用的情况下,容器形式可承载所储存液体的静态压力和蒸发气压力荷载。

3.1.23

蒸发气容器 vapour container

在正常操作条件下单容罐、双容罐、全容罐或薄膜罐储存蒸发气的部分。

3.1.24

设计压力 design pressure

为储罐设定的储罐容器的最高压力。

[来源:GB/T 150.1—2011,3.1.3,有修改]

3.1.25

操作压力 operating pressure

在正常工作情况下,容器可能达到的最大压力。

3.1.26

试验压力 test pressure

进行耐压试验或泄漏试验时,容器的压力。

[来源:GB/T 150.1—2011,3.1.5,有修改]

3.1.27

最高设计液位 maximum design liquid level

确定静态下罐壁厚度的参数之一,为储罐运行期间的最高液位。

3.1.28

最高正常操作液位 maximum normal operating level

第一个高液位报警的设定值,为储罐正常运行期间的最高液位。

3.1.29

设计温度 design temperature

储罐在正常工作情况下,设定元件的温度(沿元件截面的温度平均值)。

[来源:GB/T 150.1—2011,3.1.7,有修改]

3.1.30

操作基准地震 operating base earthquake; OBE

不会造成系统损坏、不影响系统重新启动并继续安全运行的最大地震。

注:该级别的地震作用不会损害储罐系统运行的完整性,能够保证公共安全。

3.1.31

安全停运地震 safe shutdown earthquake; SSE

不会造成系统基本功能失效和破坏的最大地震。

注：该级别的地震作用可能会造成装置和储罐的局部永久性损坏，但不会破坏系统的完整性。

3.1.32

翻滚 roll-over

容器(通常为储罐)中不同深度的低温液化气因温度和(或)密度的差异而产生传热、传质,致使分层的液体发生快速的混合并伴随大量的蒸发气从低温液化气容器中急剧释放的现象。

[来源:GB/T 8423.3—2018,5.2.7,有修改]

3.1.33

作用 action

施加在结构上的集中力或分布力和引起结构外加变形或约束变形的原因。前者为直接作用,也称为荷载;后者为间接作用。

[来源:GB 50068—2018,2.1.36]

3.1.34

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。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

A : 所需要的受压面积,单位为平方毫米(mm^2);

a : 每条纵向焊接接头焊接收缩量,单位为毫米(mm);

C : 等效应变幅系数;

c : 腐蚀裕量,单位为毫米(mm);

D_i : 储罐内罐直径,单位为米(m);

D_o : 储罐外罐内径,单位为米(m);

D_p : 设计点;

E : 弹性模量,单位为兆帕(MPa);

e : 板材厚度,单位为毫米(mm);

e_a : 环形板厚度,单位为毫米(mm);

$e_{a,\min}$: 环形板的最小厚度(不包括腐蚀裕量),单位为毫米(mm);

e_{ar} : 顶端角环的厚度,单位为毫米(mm);

e_b : 中幅板厚度,单位为毫米(mm);

e_c : 板材计算厚度,单位为毫米(mm);

e_g : 水平桁钢的厚度,单位为毫米(mm);

e_o : 罐壁厚度(不考虑腐蚀裕量),单位为毫米(mm);

e_{os} : 内压工况下的壁板计算厚度,单位为毫米(mm);

e_p : 在抗压环处顶板的厚度(不考虑腐蚀裕量),单位为毫米(mm);

e_r : 顶板厚度(不包含腐蚀裕量),单位为毫米(mm);

e_s : 内罐壁板厚度,单位为毫米(mm);

$e_{s,c}$: 操作工况下壁板计算厚度,单位为毫米(mm);

e_{si} : 依次排定的每圈壁板的厚度,单位为毫米(mm);

e_{st} : 排在最上一圈壁板的厚度,单位为毫米(mm);

$e_{s,t}$: 水压试验工况下的壁板计算厚度,单位为毫米(mm);

- $e_{s,1}$:底圈罐壁板厚度,单位为毫米(mm);
- F :作用力,单位为牛(N);
- f_{PLDF} :承载绝热易蠕变材料许用荷载系数;
- H :最高设计液位,单位为米(m);
- H_e :每圈壁板的厚度为 e_{s1} 时的等效稳定高度,单位为米(m);
- H_h :计算的壁板底部与最大设计液位之间的高度,单位为米(m);
- H_p :加强支撑在最小厚度罐壁上的最大允许间距,单位为米(m);
- H_t :计算的壁板底部与试验液位之间的高度,单位为米(m);
- h_s :每圈壁板的高度,单位为米(m);
- K :计算加强圈系数;
- k :S-N 曲线系数;
- L :抗压强度单次允许最小值;
- L_r :有效顶长度,单位为毫米(mm);
- L_s :有效罐壁长度,单位为毫米(mm);
- l_a :罐底外圈不规则板的边缘与壁板内侧之间的最小宽度,单位为毫米(mm);
- m :疲劳试验全体试验数据的平均值;
- n_j :首圈壁板纵向焊接接头数;
- n_s :抽检批次样本数量;
- P :设计压力(顶部开口内罐,设计压力取值为0),单位为千帕(kPa);
- P_e :外部荷载,单位为千帕(kPa);
- P_i :内部压力,内部气压和绝热系统压力之和,单位为千帕(kPa);
- P_{LD} :承载绝热易蠕变材料许用荷载,单位为兆帕(MPa);
- P_r :内部压力减去顶板重量,单位为千帕(kPa);
- P_t :水压试验压力(顶部开口内罐,设计压力取值为0),单位为千帕(kPa);
- Q :验收抽样检验的质量统计量;
- Q_e :抽检批次的抗压强度质量统计量;
- Q_k :抽检批次的导热系数质量统计量;
- R :绝热材料的特征强度值,单位为兆帕(MPa);
- R_b :首圈壁板内组装圆半径,单位为毫米(mm);
- R_{el} :钢材或焊缝金属的屈服强度,取二者之间的较小者,单位为兆帕(MPa);
- R_f :9%镍钢板最终半径,单位为毫米(mm);
- R_i :储罐内罐半径,单位为毫米(mm);
- R_1 :外罐半径,单位为米(m);
- R_m :钢材或焊缝金属标准抗拉强度的下限值,单位为兆帕(MPa);
- R_r :罐顶的曲率半径(锥形顶 $R_r = R/\sin\theta$),单位为米(m);
- R_0 :9%镍钢板初始半径(平板为无限大),单位为毫米(mm);
- S :标准偏差;
- SF:安全系数;
- s :抽检批次的标准差;
- U :导热系数单次允许最大值;
- V_a :设计内部负压,单位为千帕(kPa);

V_w :设计风速,单位为米每秒(m/s);

\bar{X} :平均值;

\bar{X}_e :抽检批次的抗压强度平均值;

\bar{X}_t :抽检批次的导热系数平均值;

α :拉伸强度与屈服强度之比 R_m/R_{el} ;

α_n :隔震前构件 n 的水平地震影响系数,根据场地的地震影响系数曲线,采用振型分解反应谱法计算;

α_{n1} :隔震后构件 n 的水平地震影响系数;

β_n :构件 n 水平方向减震系数,为隔震后构件 n 最大加速度与隔震前构件 n 最大加速度比值,隔震前后构件的加速度应该采用时程分析法按照 OBE 地震加速度输入进行计算,隔震支座参数应该以试验所得滞回曲线作为依据;

γ_c :圆筒效应的安全系数;

γ_F :材料分项系数;

γ_i :安装的安全系数;

γ_L :应用于荷载的安全系数;

γ_M :材料强度系数;

γ_m :绝热材料的安全系数;

γ_t :测试绝热产品的参考方法与其安装方法之间可能存在差异的系数;

ϵ :应变;

ϵ_{ef} :极端纤维应变, %;

ϵ_1 :第一主应变;

ϵ_2 :第二主应变;

ϵ_3 :第三主应变;

η :焊缝的焊接接头系数;

θ :顶-壁相连接位置上,子午线上顶的坡度角,单位为度($^\circ$);

ρ :操作工况下储存介质的最大密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_t :水压试验工况下试验介质的最大密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

σ :许用应力,单位为兆帕(MPa);

σ_1 :第一主应力,单位为兆帕(MPa);

σ_2 :第二主应力,单位为兆帕(MPa);

σ_3 :第三主应力,单位为兆帕(MPa);

σ_c :许用压应力,单位为兆帕(MPa);

σ_i :承载绝热易蠕变材料试验施加的压应力,单位为兆帕(MPa);

σ_m :承载绝热材料在小于 10% 变形出现屈服或破坏时的最大抗压强度,单位为兆帕(MPa);

σ_n :承载绝热材料公称抗压强度,单位为兆帕(MPa);

σ_s :许用拉应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{st} :水压试验工况下的设计许用拉应力,单位为兆帕(MPa);

σ_{10} :承载绝热易蠕变材料在 10% 变形未出现屈服或破坏时的压应力,单位为兆帕(MPa);

φ :基础坡度角,单位为度($^\circ$);

ψ :隔震支座调整系数,一般橡胶支座,取 0.80;支座剪切性能偏差为 S-A 类,取 0.85;

$\Delta\epsilon$:等效应变幅;

$\sum x$:抽检批次所有样本抗压强度或导热系数的平方总和;

$\sum x^2$:抽检批次所有样本抗压强度或导热系数的总和。

3.3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ALE——安全停运地震余震(Aftershock Level Earthquake)

AQL——接收质量限(Acceptance Quality Limit)

BL ——块状(Block Type)

BOG——蒸发气(Boil-off Gas)

FIP——现场发泡(Foamed in Place)

GR ——增强玻璃纤维(Glass Fibre Reinforced)

HAZ——热影响区(Heat Affected Zone)

HD ——高密度(High Density)

LNG——液化天然气(Liquefied Natural Gas)

LPG——液化石油气(Liquefied Petroleum Gas)

LQ ——极限质量(Limiting Quality)

MD ——中密度(Medium Density)

ND ——常规密度(Normal Density)

NDE——无损检测(Non-destructive Examination)

OBE——操作基准地震(Operating Base Earthquake)

PIR——聚异氰酸酯泡沫(Poly Isocyanurate Foam)

PQR——焊接工艺评定报告(Procedure Qualification Records)

PUF——聚氨酯泡沫(Polyurethane Foam)

PVC——聚氯乙烯泡沫(Polyvinyl Chloride Foam)

RLG——低温液化气(Refrigerated Liquefied Gas)

SLS——正常使用极限状态(serviceability limit states)

SPR——喷射类型(Spray Type)

SSE——安全停运地震(Safe Shutdown Earthquake)

TCP——热角保护(Thermal Corner Protection)

ULS——承载能力极限状态(Ultimate Limit States)

WPS——焊接工艺规程(Welding Procedure Specification)



4 基本规定与总则

4.1 储罐类型

4.1.1 单容罐

只有一个储存低温液体的自支撑式钢质储罐,该储罐可由带绝热层的单壁或双壁结构组成,具有液密性和气密性。

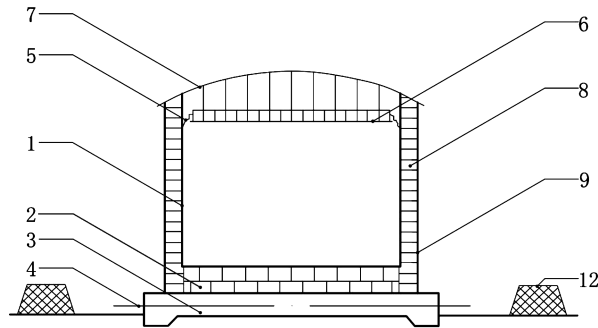
产品蒸发气应储存在:

- a) 容器的钢质拱顶内;
- b) 当主容器是一个敞开的杯状体时,储存在包围主容器的气密金属外罐内,金属外罐仅设计用于

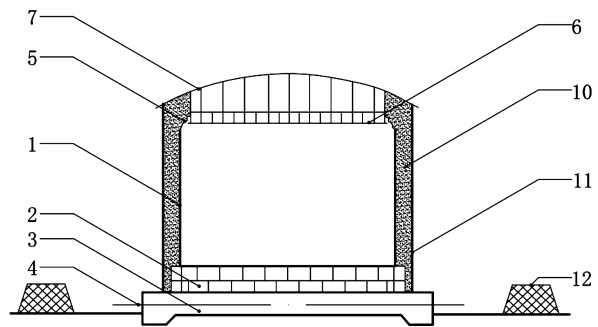
储存产品蒸发气及支撑和保护绝热层。

每个单容罐的周围应筑有围堰,以容纳可能泄漏的产品。

根据蒸发气储存和绝热的方式不同,有多种形式的单容罐。单容罐示例见图 1。



a) 单容罐典型结构形式一



b) 单容罐典型结构形式二

标引序号说明:

- 1——主容器(钢质);
- 2——底部绝热层;
- 3——基础;
- 4——基础加热系统;
- 5——柔性绝热密封;
- 6——吊顶(绝热);

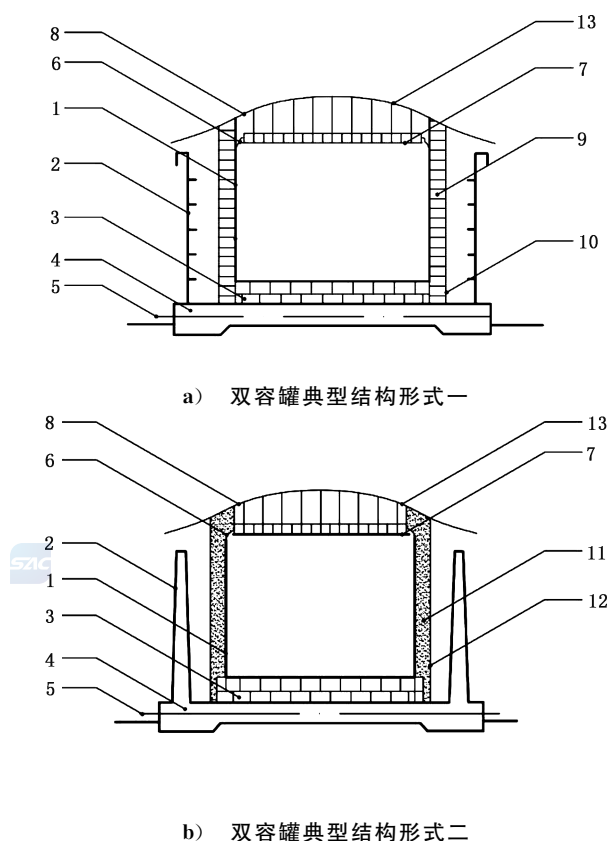
- 7 —— 顶(钢质);
- 8 —— 罐壁外部绝热层;
- 9 —— 外部水汽隔层;
- 10——松散充填的绝热层;
- 11——外钢壳(不能装存液体);
- 12——围堰。

图 1 单容罐图

4.1.2 双容罐

具有液密性的次容器和建立在次容器之中的单容罐共同组成的储罐,次容器与主容器水平距离不大于 6 m 且顶部向大气开口。

次容器顶部为敞开式,无法防止产品蒸发气的逸出。主容器与次容器之间的环形空间可用一个“防雨罩”遮盖,以防止雨水、雪、尘土等进入。双容罐示例见图 2。



标引序号说明：

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1——主容器(钢质)； | 8——顶(钢质)； |
| 2——次容器(钢质或混凝土)； | 9——外部绝热层； |
| 3——底部绝热层； | 10——外部水汽隔层； |
| 4——基础； | 11——松散充填绝热层； |
| 5——基础加热系统； | 12——外壳(不能装存液体)； |
| 6——柔性绝热密封； | 13——防雨罩。 |
| 7——吊顶(绝热)； | |

图 2 双容罐图

4.1.3 全容罐

具有液密性、气密性的次容器和建立在次容器之中的主容器共同组成的储罐，次容器为独立的自支撑带拱顶的闭式结构。

主容器应为以下两种形式之一：

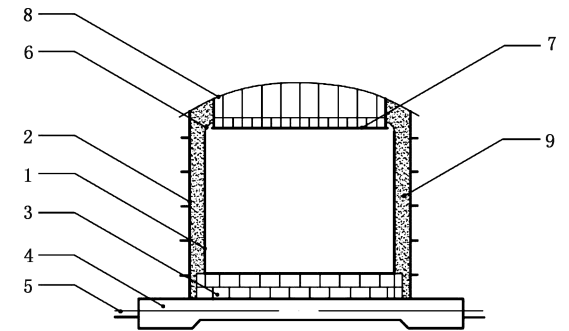
- 在顶部开口，不储存产品蒸发气；
- 配备拱顶，可储存产品蒸发气。

次容器应是一个具有拱顶的自支撑式钢质或混凝土储罐，其设计应同时满足以下要求：

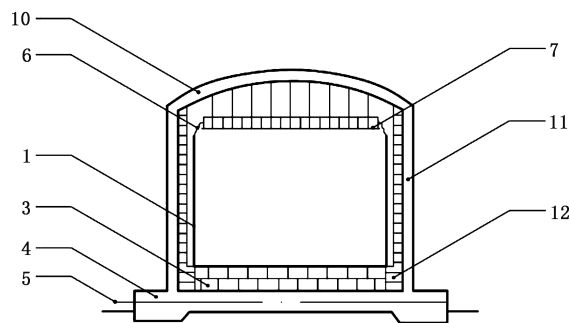
- 在储罐正常操作条件下：作为储罐的主要蒸发气容器(此情况适用于顶部开口的主容器)，并支撑主容器的绝热层；
- 在主容器泄漏的情况下：装存全部的液体产品，并保持结构上的气密性。可以进行排气，但应通过卸压系统对其进行控制。

主容器和次容器之间的环形空间径向宽度不应大于 2.0 m。

在次容器外部设置有绝热层的全容罐也应符合上述要求。全容罐示例见图 3。



a) 全容罐典型结构形式一



b) 全容罐典型结构形式二

标引序号说明：

- | | |
|-------------|---------------------|
| 1——主容器(钢质)； | 7 ——吊顶(绝热)； |
| 2——次容器(钢质)； | 8 ——罐顶(钢质)； |
| 3——底部绝热层； | 9 ——松散充填绝热层； |
| 4——基础； | 10——混凝土顶； |
| 5——基础加热系统； | 11——预应力混凝土外罐(次容器)； |
| 6——柔性绝热密封； | 12——预应力混凝土外罐内侧的绝热层。 |

图 3 全容罐图



4.1.4 薄膜罐

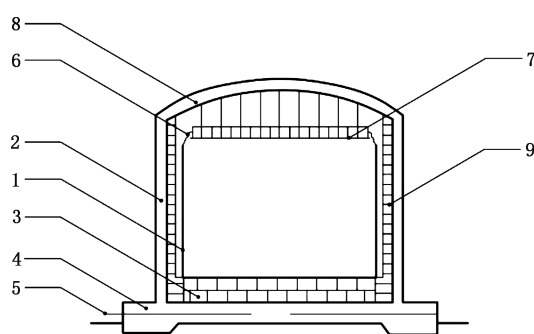
有一个薄的钢质主容器(即薄膜)、绝热层和预应力混凝土罐体共同组成的能储存低温液体的复合结构。

金属薄膜内罐为非自支撑式结构,用于储存低温液化气,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混凝土外罐上,其气相压力由储罐的顶部承受。

作用在薄膜上的全部静液压荷载及其他荷载均应通过承载绝热层转移至混凝土罐上。

蒸发气应储存在储罐顶部,该储罐顶部既可以是复合结构,也可以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应按照在薄膜泄漏时能够装存液体的形式进行设计。薄膜罐示例见图 4。



标引序号说明：

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1——主容器(薄膜)； | 6——柔性绝热密封； |
| 2——次容器(混凝土)； | 7——吊顶(绝热)； |
| 3——底部绝热层； | 8——混凝土顶； |
| 4——基础； | 9——预应力混凝土外罐内侧的绝热层。 |
| 5——基础加热系统； | |

图 4 薄膜罐图

4.2 总体设计依据

4.2.1 一般规定

储罐设计技术说明文件应确定以下内容：

- a) 工作范围,包括试验、干燥、置换和冷却等；
- b) 标准及规范；
- c) 环境资料,包括周围环境、最低/最高气温等；
- d) 设计压力、操作压力；
- e) 进液/排放速率；
- f) 事故工况,包括泄漏、火灾及爆炸等；
- g) 储罐类型,设计使用年限；
- h) 储罐位置布置图；
- i) 储罐容积(储罐净容积或储罐总容积)；
- j) 工艺流程图(PFD)、工艺流程与仪表图(P&ID)；
- k) 主容器的金属设计温度；
- l) 储存液体的相关性质,包括密度、温度和易燃性等；
- m) 防止翻滚的措施,包括安装密度表,采用连续的产品循环等；
- n) 允许的日蒸发率和环境条件；
- o) 储罐最高设计液位、最高正常操作液位；
- p) 压力和真空释放设计数据(流量)；
- q) 特定作用:地震、风、爆炸、火灾、连接管路/接管荷载等；
- r) 管道和使用仪器仪表要求；
- s) 现场土工和地震资料,地质勘察报告、地震安全性评价报告等；
- t) 绝热监控系统最大允许置换流量(薄膜罐)；
- u) 试运行程序；

- v) 储罐沉降和检维修要求。

4.2.2 性能要求

储罐设计应满足下列要求：

- a) 储罐设计使用年限为 50a；
- b) 在正常操作条件下,储存液体和蒸发气；
- c) 按规定的流量进液和出液；
- d) 控制蒸发,在异常情况下蒸发气可以排放到火炬或大气排放口；
- e) 防止空气和湿气进入,但真空泄放阀工作的情况除外；
- f) 蒸发符合要求,并且控制储罐外表面的水凝结/结霜最低程度,并应预防基础冻胀。

4.2.3 许用应力和极限状态理论

钢质储罐和绝热系统设计,可使用许用应力理论,也可使用极限状态理论。

混凝土结构设计应采用极限状态理论。

极限状态设计应包括：

- a) 正常使用极限状态(SLS):结构或结构构件达到正常使用的某项规定限制或耐久性能的某种规定状态；
- b) 承载力极限状态(ULS):结构或结构构件达到最大承载力、出现疲劳破坏、发生不适于继续承载的变形或因结构局部破坏而引发的连续倒塌。

4.2.4 抗震设计

应按照以下规定进行地震作用下的结构设计：

- 主容器应按照其被填充至最高正常操作液位时,能承受 OBE 和 SSE 作用进行设计；
- 若使用次容器,应按照其内未装存液体时能承受 OBE 和 SSE 作用进行设计,次容器还应按照在 ALE 作用下能够满足装存全部液体(最大正常操作液位)的要求进行设计；
- 薄膜罐的薄膜应按照能承受 OBE 作用进行设计。在 SSE 作用下,薄膜可能发生故障,但混凝土罐、包括 TCP,应能装存液体。

应按照以下规定确定 OBE 和 SSE 地震反应谱以及水平分量反应谱与垂直分量反应谱,并符合 GB 50011 的相关规定：

- a) OBE 地震反应谱：

应是 50 a 期内超越概率 10%(重现期 475 a)的 5%阻尼反应谱表示的运动。

在相关结构、结构系统或构件等的阻尼值不等于 5%时,OBE 反应谱应根据 GB 50011 中建筑结构地震影响系数曲线的调整系数作相应调整。

应使用 GB 51156—2015 中 7.1.6 的阻尼值。用于垂直脉冲作用影响的阻尼值应与水平脉冲作用影响的阻尼值相同。

- b) SSE 地震反应谱：

应是 50 a 期内超越概率为 2%(重现期 2475 a)的 5%阻尼反应谱表示的运动。

若无法确定 5%阻尼的 SSE 反应谱,该谱可采用不大于 5%阻尼的 OBE 反应谱的两倍进行取值。

在相关结构、结构系统或构件等的阻尼值不等于 5%时,SSE 反应谱应根据 GB 50011 中建筑结构地震影响系数曲线的调整系数做相应调整。阻尼值应采用如下方法确定：

- 1) 应使用 GB 51156—2015 中 7.1.6 的阻尼值,用于垂直脉冲作用影响的阻尼值应与水平脉冲作用影响的阻尼值相同;
- 2) 土壤-结构相互作用:传递(晃动)模式下阻尼系数基本与储罐材料和土壤-结构相互作用无关,且不应大于 0.5%。

4.2.5 密闭性

应在外罐内壁安装金属衬里或涂刷聚合物涂层。采用聚合物隔气层时应验证其液密性和气密性。

预应力混凝土结构的液密性应由混凝土结构中的最小受压区厚度及残余应力来确定。混凝土部分的裂缝宽度计算应符合 GB 50010 的规定。

4.2.6 主容器和次容器接口

主容器和次容器接口宜设置在储罐的顶部。薄膜罐入口和出口应设置在储罐顶部。

主容器和次容器接口设置在底部的情况下,应满足下列要求:

- a) 应安装远程操作关断阀;
- b) 无远程操作关断阀时,底部连接件应设计为主容器的一部分。第一个阀门应为远程操作型,并焊接到底部连接件上,不应使用法兰连接件。

4.2.7 其他连接件

尽量减少与主容器和次容器连接的其他连接件(导向器、支撑等)。

4.2.8 冷却系统

储罐应设置冷却系统,采用喷嘴或其他装置。该系统的设计应能保持规定的冷却速率。

4.2.9 基础和隔震系统

4.2.9.1 基础

基础设计应满足储罐及其连接件沉降的要求,通常使用下列类型:

- a) 浅基础;
- b) 桩基础。

储罐基础设计开始前应进行岩土工程勘察,确定场地地基土的土层物理性质,判别土层液化情况。

岩土工程勘察应符合 GB 50021 的规定,结构的抗震性应符合 GB 50011 和 GB 51156—2015 的规定。

储罐的不均匀沉降量应满足 GB 51156—2015 的相关规定。储罐建设和服役期间应开展沉降监测。储罐基础上应安装沉降测量标记,宜设置测斜管,并在墙体和穹顶施工过程中、水压试验过程(之前、期间和之后)进行沉降测量,以后每隔 3 个月测量一次,直到沉降稳定为止。

储罐基础下部未设置空气流通空间时,应设置加热系统。

4.2.9.2 隔震系统

4.2.9.2.1 一般规定

储罐隔震系统设计满足以下规定:

- a) 采用隔震方案的低温储罐,其所在场地的场地类型宜为 I、II、III 类型;
- b) 隔震设计应根据预期的水平方向减震要求和位移控制要求确定结构隔震层方案;

c) 隔震支座应按照 GB/T 51408 进行承载力和连接强度校核。

4.2.9.2.2 隔震作用计算

低温储罐地震作用隔震应采用振型分解反应谱法与时程分析法结合计算,隔震后储罐各个构件的水平地震影响系数按公式(1)计算:

$$\alpha_{ni} = \frac{\beta_n \alpha_n}{\psi} \dots\dots\dots(1)$$

4.2.10 基础加热系统

基础加热系统的设计应使基础在任何位置的温度不低于 0℃。当一条加热带或回路发生故障时,加热管路的布置和备用的加热系统仍能满足上述要求。

热输出量至少应由两个温控器控制。其中一个温控器应设置在可能出现低温的区域。各温控器在操作盘上应有数据显示,同时发出低温报警。

4.2.11 混凝土罐热角保护

4.2.11.1 全容罐

混凝土次容器,在刚性基础墙连接的部位,可安装 TCP,以防止主容器泄漏时基础墙连接或基础底板内出现不可控的裂纹。TCP 覆盖整个储罐底部和墙体较低部分。TCP 可由钢板(双层底板)和绝热材料(双容罐和全容罐)或液体隔离层和绝热材料(薄膜罐)构成。

TCP 垂直部分的高度取决于温度分布、刚性拐角的变形能力和次容器施工洞口高度。

4.2.11.2 薄膜罐

TCP 应采用与产品温度相适应的金属或非金属材料,在机械荷载和温度荷载作用下能够保持储罐结构的完整性和液密性。

应提供薄膜的第三方机构独立见证和验证的试验结果,证明 TCP 的所有部件在泄漏条件下的液密性。

薄膜罐 TCP 无损检测验收合格后应与全容罐金属 TCP 有同等液密性能。

4.2.12 围堰与拦蓄区

单容罐应设置围堰。围堰内容积应能够容纳储罐内全部储存产品。

拦蓄区和围堰应设计成永久液密性。所使用的材料应能够阻止产品泄漏。应考虑在无产品液体溢出时排出聚集在拦蓄区和围堰内雨水和消防水的措施。

4.2.13 雷电

防雷设计应符合 GB 50057 的规定。

4.3 保护系统

4.3.1 监测保护

4.3.1.1 监测系统

储罐内液位、压力、温度监测和补气系统设计,应符合 GB 51156—2015 的相关规定。



4.3.1.2 防止翻滚系统

可采取以下防止翻滚措施：

- a) 使用密度测量系统监测罐内液体密度分布,当超过一定的设定值时,该系统具有报警功能。密度测量系统与液位计系统应相互独立运行；
- b) 在储罐底部和顶部之间,设置间断或连续的液体循环系统。

4.3.1.3 气体探测和火灾报警

应设置可燃气体和有毒气体检测报警系统和火灾自动报警系统。

4.3.1.4 泄漏检测系统

应设置泄漏检测系统,并根据储罐型式确定组成方案：

- a) 温降；
- b) 气体探测；
- c) 压差测量。

4.3.1.5 绝热空间监测系统

薄膜罐绝热空间与薄膜隔离,应安装绝热空间监测系统。该系统应满足以下要求：

- a) 通过分析置换气体组分,探测产品蒸发气；
- b) 通过向绝热气相空间充入惰性气体,以保证正常运行期间蒸发气浓度保持在可燃下限的30%以下；
- c) 控制绝热空间与薄膜之间的压差,防止薄膜破损,该系统应设计成“失效保护”。

4.3.2 安全阀和防火设计

4.3.2.1 安全阀设计

储罐压力安全阀和真空安全阀设计,应符合 GB 51156—2015 的规定。

4.3.2.2 防火设计

防火设计应考虑潜在的火灾：

- a) 局部火灾；
- b) 安全阀火灾；
- c) 邻近装置(包括其他储罐)的火灾。

4.4 作用

4.4.1 通则

应包括永久作用、可变作用和偶然作用。

4.4.2 永久作用

永久作用包括混凝土、钢材和绝热构件、管路、配件、辅助设备、固定设备的自重和预应力局部效应。预应力局部效应确定方法见 GB 50010。



4.4.3 可变作用

可变作用类别和取值要求如下。

a) 介质荷载

产品静液压荷载。

b) 运行基准地震(OBE)

储罐设计应能承受 OBE 地面运动。

c) 外加荷载

储罐应考虑以下外加荷载：

1) 罐顶均布荷载 1.2 kN/m^2 (投影面积), 此荷载不宜与雪荷载和内部负压荷载组合；

2) 平台和通道上的均布荷载 2.4 kN/m^2 ；

3) 作用在平台或通道上任何位置一块 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 面积上的集中荷载 5 kN ；

4) 在建造与维护期间, 吊顶上的最小均布荷载推荐为 0.5 kN/m^2 。

d) 风荷载

储罐设计基本风压, 宜根据 GB 50009 中 100a 重现期的风压取值。

e) 雪荷载

储罐设计雪荷载, 宜根据 GB 50009 中 100a 重现期取值。

f) 绝热系统压力

主容器和次容器的设计均应考虑绝热系统施加的压力(膨胀珍珠岩粉末)。

g) 内部设计压力

设计范围宜为 $-1.0 \text{ kPa} \sim 29 \text{ kPa}$, 并结合工艺设计参数确定。

h) 沉降荷载

储罐及其基础设计应考虑到在设计使用年限内预计可能发生的基础最大总沉降和不均匀沉降。

i) 管道连接荷载

应根据管道材质和位移要求确定。

j) 施工荷载

应符合 GB 50009 的规定。

k) 水压和气压试验

应符合第 8 章的规定。

l) 热效应

应考虑在施工、试验、冷却、正常或非正常操作和预冷时所有可能的热效应。

4.4.4 偶然作用

4.4.4.1 主容器泄漏

有次容器的储罐, 次容器应按照可以装存主容器最大液体量的条件进行设计。应假定次容器被逐渐充满。除大量产品泄漏外, 还应对导致“冷点”的少量产品的泄漏后果进行评估。

4.4.4.2 管路连接件泄漏

应考虑管道法兰、阀门可能的泄漏, 及其对罐顶或罐壁产生的影响, 可假定衬垫损坏。

设计时应考虑可能泄漏的区域与储存的液体接触, 或通过收集/排放产品对该区域进行保护。

4.4.4.3 安全停运地震(SSE)

储罐设计应能承受 SSE 地面运动。

4.4.4.4 安全停运地震余震(ALE)

ALE 为安全停运地震发生后的余震。该级别的地震再发生作用时仍不会破坏系统的完整性。根据 GB 51156—2015 中 7.1.4 的规定, ALE 的反应谱加速度值应为 SSE 反应谱加速度值的 50%。在 SSE 作用之后, 主容器可能发生泄漏事故, 但次容器或周围的拦蓄系统应保持完好, 余震时应能容纳储罐内的液体产品。

4.4.4.5 外部火灾和爆炸

应根据外部火灾和爆炸危险性分析确定载荷。

4.4.5 作用组合

上述所列的永久作用和可变作用应按照 GB 50009 和 GB 51006 的规定进行组合。任何单一荷载状况下, 永久作用和可变作用的组合只应与一个偶然作用进行组合。

4.5 检查与维护

应明确需要注意的关键事项, 编写相应的储罐检查与维护程序。

4.6 质量管理、环境管理和职业健康安全

应建立储罐设计、材料采办、施工和试验一体化的质量管理体系。

储罐设计、施工和试运行应制定整体目标一致的健康、安全和环境计划。该计划应包括责任、符合国家或地方的法律与法规的活动, 还应规定设计和施工期间对人员、安全和环境保护的安全操作规程。

质量管理、环境管理和职业健康安全应符合 GB/T 19001、GB/T 24001 和 GB/T 45001 的规定。

5 金属构件

5.1 一般要求

低温液化气储罐金属构件应根据储罐类型、存储介质、操作条件等因素进行设计。

5.2 材料

5.2.1 温度

在确定金属构件的设计温度时应考虑以下因素。

a) 储罐设计温度

主容器和次容器在正常工作情况下, 设定的元件的金属温度(沿元件横截面的温度平均值)。

b) 气象资料

包括日、月、年温度记录等资料。

c) 最低设计金属温度

储罐在运行工作中, 预期的各种可能条件下各元件金属温度的最低值。设计金属温度应按照

相应荷载条件(包括偶然作用)下最为不利的假设进行计算。

5.2.2 主容器和次容器

5.2.2.1 钢材选择

5.2.2.1.1 钢材分类

板材分类如下：

- a) 低温低合金钢板；
- b) 低镍钢；
- c) 9%镍钢；
- d) 奥氏体不锈钢。

每种存储产品使用钢材类型见表 1，薄膜罐宜采用奥氏体不锈钢材料。钢材牌号和存储温度下限见表 2。

表 1 产品存储温度下储罐钢材的类型

单位为摄氏度

单容罐	双容罐或全容罐	薄膜罐	产品存储温度
低温低合金钢板	低温低合金钢板	—	-10~-40
低温低合金钢板	低温低合金钢板	奥氏体不锈钢	-50
低镍钢	低镍钢	奥氏体不锈钢	-70
9%镍钢或奥氏体不锈钢	9%镍钢或奥氏体不锈钢	奥氏体不锈钢	-100
9%镍钢或奥氏体不锈钢	9%镍钢或奥氏体不锈钢	奥氏体不锈钢	-165

表 2 钢材牌号和存储温度下限

单位为摄氏度

材料类型	材料牌号	产品存储温度下限
低合金钢板	Q345R 等	-20
低温低合金钢板	16MnDR 等	-40
低温低合金钢板	15MnNiNbDR 等	-50
低温低合金钢板	09MnNiDR 等	-70
低镍钢	08Ni3DR 等	-100
9%镍钢或奥氏体不锈钢	06Ni9DR、S30408 等	-165

5.2.2.1.2 一般要求

材料选择应遵循下列一般要求。

- a) 低温用低合金钢板，应满足下列要求：
 - 1) 应符合 GB/T 3531 的规定，不应使用最小屈服强度大于 370 MPa 的钢材；

- 2) 应为正火或正火+回火状态。
- b) 低镍钢,其使用温度不应低于 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时应满足下列要求:
 - 1) 应符合 GB/T 3531 的规定;
 - 2) 应经过热处理,获得均匀尺寸的细晶粒。
- c) 9%镍钢,其使用温度不应低于 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时应满足下列要求:
 - 1) 应符合 GB/T 3531、GB/T 24510 的规定;
 - 2) 应为调质钢。
- d) 奥氏体不锈钢,应符合 GB/T 24511 的规定。

5.2.2.1.3 最大罐壁板厚度

最大允许罐壁板厚度应为:

- a) 低温低合金钢板:40 mm;
- b) 低镍钢:40 mm;
- c) 9%镍钢板:50 mm;
- d) 奥氏体不锈钢板:80 mm。

当材料厚度超过上述数值时,应进行额外的材料调查和试验,以证明材料能够达到和上述规定最大厚度下相同的抗脆性断裂水平。

5.2.2.1.4 板材允许误差

板材的允许误差应满足下列要求:

- a) 通过计算确定厚度的部分,其板材允许误差应符合 GB/T 709—2019 中 C 类偏差的规定;
- b) 考虑最小公称厚度确定厚度的部分,其板材允许误差应符合 GB/T 709—2019 中 B 类偏差的规定。

5.2.2.2 夏比 V 型缺口冲击试验

热影响区和焊接接头金属的夏比 V 型缺口冲击试验数值见表 3。

母材的夏比 V 型缺口冲击试验数值按照母材的材料规范的要求执行。

如果使用镍基焊接接头金属(低温低合金钢、低镍钢、9%镍钢等),则焊接接头金属和热影响区的最小冲击功应为 56 J。

规定数值应选取 3 个试样的最小平均值,只允许其中一个数值小于规定数值,但不应小于规定数值的 70%。

厚度小于 12 mm 的材料,应尽可能选择允许的最大尺寸试样。试样的最小夏比 V 型缺口冲击试验数值应与标准试样的规定值成正比。

应考虑焊接导致的不利影响。

储罐的每一块壁板和用于切割环形板的钢板都应进行冲击试验。其他构件应根据材料的炉号或批次进行冲击试验。

冲击试验应符合 GB/T 229 的规定。



表 3 最小夏比 V 型缺口冲击试验能量

钢材类型	冲击试验能量	试样相对于钢板的方位
低温低合金钢	在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 27 J	横向
	在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 27 J	横向
低镍钢	在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 27 J	横向
9%镍钢	在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, 80 J	横向
奥氏体不锈钢	—	—

5.2.3 蒸发气容器

蒸发气容器的钢材宜根据表 4 选取,也可选择其他化学成分和机械性能相当的钢材型号。

表 4 蒸发气容器所使用钢材

金属设计温度 $^{\circ}\text{C}$	厚度 e mm	按材料型号
≥ -20	$13 < e \leq 40$	Q355、Q345R、16MnDR 等
金属设计温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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。 金属设计温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的材料,在金属设计温度下,竖直壁板接头上焊接接头金属和热影响区的冲击试验数值最小应为 27 J。		

5.2.4 其他构件

5.2.4.1 螺柱

5.2.4.1.1 螺柱选取

螺柱应符合 GB/T 150.2—2011 的规定。

碳素钢和低合金钢钢棒的标准、螺柱的使用状态和许用应力符合 GB/T 150.2—2011 中表 12 的规定。

高合金钢钢棒的标准、螺柱的使用状态和许用应力符合 GB/T 150.2—2011 中表 16 的规定。

高合金钢钢棒各钢号螺柱用毛坯应进行拉伸试验,试验要求和结果应符合 GB/T 1220 的规定。

5.2.4.1.2 双头螺柱

螺纹应符合 GB/T 193 的规定,允许误差应符合 GB/T 9145—2003 中 6g 等级规定。螺纹类型为 ISO M 螺线或 M39 以上,细牙螺纹,螺距为 4 mm。

5.2.4.1.3 弹簧垫圈

使用不同材料和(或)可能发生不同的热收缩时,应考虑使用弹簧垫圈。

5.2.4.2 附件

与接管、嵌入式补强板、加强圈或永久性附件等相连的板材应使用具有相同强度和韧性的材料。

如果接管面积不作为补强面积计算的一部分,则接管允许使用较低强度材料。

5.2.4.3 管道构件

法兰应符合 HG/T 20592、HG/T 20606、HG/T 20607、HG/T 20609、HG/T 20610、HG/T 20611、HG/T 20612、HG/T 20613、HG/T 20614、HG/T 20615、HG/T 20623、HG/T 20627、HG/T 20628、HG/T 20630、HG/T 20631、HG/T 20632、HG/T 20633、HG/T 20634、HG/T 20635 的规定。

储罐用管件应符合 GB/T 13401 和 GB/T 12459 的规定。

5.3 设计

5.3.1 一般规定

5.3.1.1 设计理论

钢构件的设计应采用许用应力理论或极限状态理论。

薄膜设计宜使用规定材料的应力-应变曲线。

5.3.1.2 许用应力

5.3.1.2.1 概述

所有板材和焊接接头金属的最大许用拉应力见表 5。

表 5 设计许用拉应力

钢材类型	使用中的许用拉应力	水压试验期间的许用拉应力
低温低合金钢、低镍钢	$0.43 R_m$ 、 $0.67 R_{el}$ 、260 MPa 三者中的较小者	0.60 R_m 、0.85 R_{el} 、340 MPa 三者中的较小者
9%镍钢	$0.43 R_m$ 、 $0.67 R_{el}$ 两者中的较小者	
奥氏体不锈钢	$0.40 R_m$ 、 $0.67 R_{el}$ 两者中的较小者	
低镍钢和 9%镍钢, R_{el} 可为材料标准规定的 0.2%非比例延伸强度,单位为兆帕(MPa)。 奥氏体不锈钢, R_{el} 可为材料标准规定的 1.0%非比例延伸强度,单位为兆帕(MPa)。		

抗震验算时,OBE 工况下许用应力应取操作工况下许用应力的 1.33 倍。SSE 工况下许用应力应取材料标准下屈服强度的 1.00 倍。

5.3.1.2.2 储罐锚固件

储罐锚固件的许用拉应力应符合下列规定:

- 正常操作工况下应为材料标准下屈服强度的 0.50 倍;
- 试验工况下应为材料标准下屈服强度的 0.85 倍;
- OBE 工况下应为材料标准下屈服强度的 0.67 倍;
- SSE 工况下应为材料标准下屈服强度的 1.00 倍。

5.3.1.2.3 罐顶-罐壁连接处的承压区

许用压缩应力 σ_c 应限制在 120 MPa。

承压区的设计应满足 5.3.3.1.3.5 的要求。

5.3.1.2.4 应力

5.3.1.2.4.1 对接焊接接头

当荷载垂直于焊接接头并作用在板材平面内时,许用应力应限制在表 6 中所给出数值。
当荷载平行于焊接接头时,许用剪切应力应限制在表 6 中所给出数值的 75%。

5.3.1.2.4.2 角焊缝

当荷载垂直于焊接接头时,许用剪切应力应限制在表 6 中所给出数值的 70%。
当荷载平行于焊接接头时,许用剪切应力应限制在表 6 所给出数值的 50%。

5.3.1.3 极限状态理论

5.3.1.3.1 一般要求

应按照 GB 50017 的要求进行极限状态理论分析。

5.3.1.3.2 主容器和次容器

单容罐、双容罐和全容罐,其主容器和次容器的分项安全系数应按照表 6 进行调整。

表 6 低温低合金钢、低镍钢、9%镍钢的分项荷载和材料系数

操作工况			试验条件		
γ_F	γ_M		γ_F	γ_M	
1.36	$\alpha \geq 1.57$	$\alpha < 1.57$	1.06	$\alpha \geq 1.42$	$\alpha < 1.42$
	1.10	$1.72/\alpha$		1.11	$1.57/\alpha$

5.3.2 主容器和次容器

5.3.2.1 单容罐、双容罐和全容罐

5.3.2.1.1 罐底

5.3.2.1.1.1 罐底边缘板

环形板的最小厚度(不包括腐蚀裕量) e_a 应按公式(2)计算,且不应小于 8 mm:

$$e_a = (3.0 + e_{s,1})/3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

图 5 c)所示罐底外圈不规则板的边缘与壁板内侧之间的最小宽度 l_a ,应为公式(3)计算结果和 600 mm中的较大值。

$$l_a > \frac{240}{\sqrt{H}} e_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

另外,还应满足下列附加要求:

- a) 环形板之间的径向接缝应是对焊;
- b) 壁板与环形边缘板连接应采用下列方式之一:
 - 1) 对接焊接接头;
 - 2) 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;

- 3) 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不应小于边缘板厚度;
- c) 环形板径向接缝与任何壁板立缝之间的距离不应小于 300 mm;
- d) 壁板外侧与环形板外缘之间的距离不应小于 50 mm;
- e) 边缘板的宽度和厚度应满足地震设防的要求。

5.3.2.1.1.2 罐底中幅板

罐底板的厚度不应小于 5 mm(不包括腐蚀裕量)。

罐底板应满足下列要求:

- a) 中幅板的最小直边长度不应小于 700 mm;
- b) 底板中幅板应采用搭接或对接焊接接头;
- c) 搭接接头的最小宽度应是中幅板厚度的 5 倍;
- d) 搭接接头应至少由两道焊道组成;
- e) 罐底中幅板应搭接在边缘板上,最小搭接宽度应为 60 mm;
- f) 罐底中幅板的对接接头应采用双面焊或带垫板的单面焊;
- g) 罐底板任意相邻的三块板焊接接头之间距离,以及三块板焊接接头与边缘板对接接头之间的距离不应小于 300 mm。

当罐底板设置补强板或垫板时,应采用连续角焊缝。

储罐底板中幅板和边缘板的布置应符合图 5 的要求。

单位为毫米

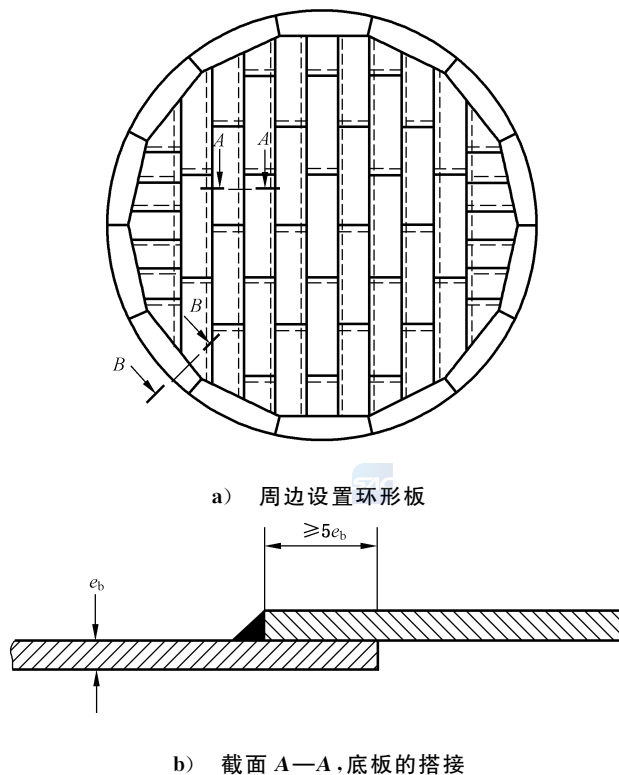
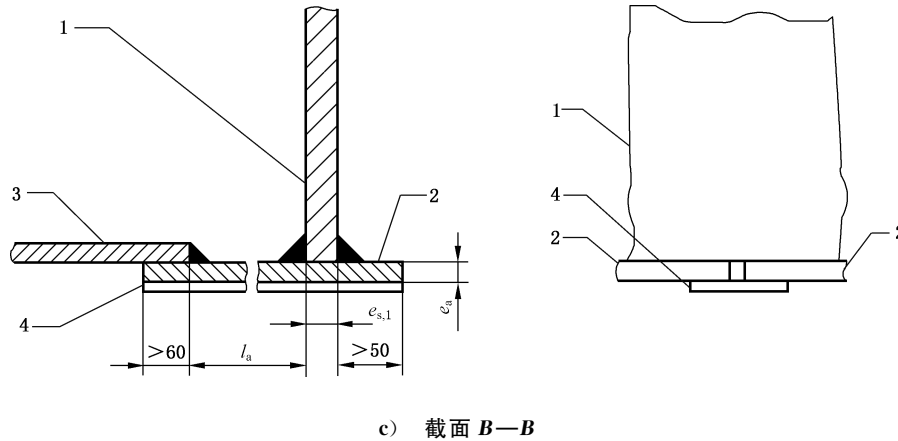


图 5 典型的罐底板布置



标引序号说明：

- 1——罐壁；
- 2——环形板；
- 3——(靠近边缘的)不规则板；
- 4——垫板。

图 5 典型的罐底板布置 (续)

5.3.2.1.2 罐壁

5.3.2.1.2.1 罐壁最小厚度

罐壁最小厚度应符合表 7 的规定。

表 7 罐壁最小厚度

储罐内罐直径 D_i m	最小厚度 mm
$D_i \leq 10$	5
$10 < D_i \leq 30$	6
$30 < D_i \leq 60$	8
$D_i > 60$	10

罐壁的最小厚度要求,应包含腐蚀裕量。

5.3.2.1.2.2 壁板厚度

壁板厚度应为 $e_{s,c}$ 、 $e_{s,t}$ 和罐壁最小厚度三者中的最大值。

a) 操作工况,应按公式(4)计算:

$$e_{s,c} = \frac{D_i}{20 \sigma_s} [0.098 \rho (H - 0.3) + 10P] + c \quad \dots\dots\dots (4)$$

b) 水压试验工况,应按公式(5)计算:

$$e_{s,t} = \frac{D_i}{20 \sigma_{st}} [0.098 \rho_t (H_t - 0.3) + 10P_t] \quad \dots\dots\dots (5)$$

c) 除承压区外,任何一圈壁板的设计厚度都不应小于其上层壁板的厚度。

5.3.2.1.2.3 其他

其他应满足的要求如下。

- a) 罐壁焊接接头：
所有立缝和环缝都应采用全焊透的对焊。
- b) 板材布置：
相邻两圈壁板上的立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，附件的位置应距离立缝 300 mm 以上，或距离环缝 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：
 - 1) 绝热层压力；
 - 2) 内罐真空负压；
 - 3) 内罐与外罐之间的压力。

壁板设计应考虑到环向压应力和轴向(纵向)应力的组合。

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(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(抗力)应适当降低。

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(抗力)可提高。

加强圈等效间距按照公式(6)计算：

$$H_c = h_s \sqrt{\left(\frac{e_{st}}{e_{si}}\right)^5} \dots\dots\dots (6)$$

中间加强圈设计示例，见附录 A。

罐壁底角和敞开口罐顶部加强圈的特性，应符合底和顶端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。

加强圈与水平焊接接头之间的距离不应小于 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[5.3.2.1.2.3d)]。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 GB 50009 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 GB 50009 采用适当的形状和表面系数确定的。

5.3.2.2 薄膜罐

5.3.2.2.1 通则

薄膜罐应使用金属板材制造，厚度不应小于 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伸缩。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,薄膜应为蒸发气和液体密闭的容器。

所有薄膜构件设计时应考虑所有可能的静态和动态荷载。典型荷载详见附录 B。

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,避免疲劳失效。

金属膜的设计应采用模型试验或应力分析的方法,见图 6,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;
- 薄膜的疲劳强度应满足规定的荷载循环次数。

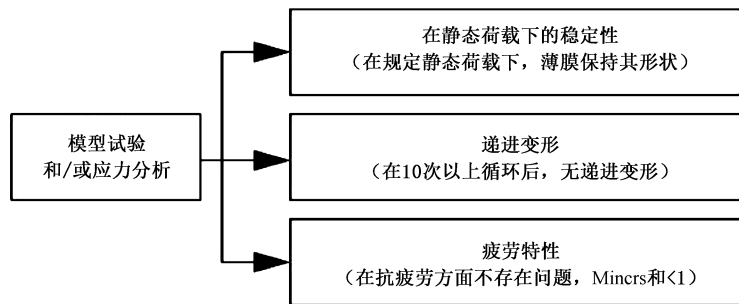


图 6 薄膜的设计流程图

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:

- a) 在进入绝热层或者混凝土中的锚固系统导致的热荷载作用下,薄膜可能不均匀变化;
- b) 应使用 Tresca 理论或 Mises 理论计算静态设计和疲劳设计的等效应力;
- 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) 应对所有薄膜单元进行建模;
- f) 计算理论的模型应与实物具有相关性。

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荷载。

5.3.2.2.2 应力分析

5.3.2.2.2.1 应力-应变曲线

应力-应变曲线的建立应考虑下列各项:

- a) 应力-应变曲线应为选定材料而建立;
- b) 曲线不应出现颈缩现象;
- c) 弹性范围和塑性范围的泊松比不同。

5.3.2.2.2.2 失稳和屈曲不稳定

薄膜不应出现失稳和屈曲。

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,可考虑到如下安全系数:

- a) 根据激光测量或相当等效方法进行建模;安全系数 SF=2.0;
- b) 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。

5.3.2.2.2.3 递进变形

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。

5.3.2.2.2.4 疲劳特性

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 Mises 理论的主应力和主应变进行计算。

疲劳曲线可根据单轴向应变循环疲劳试验确定。

a) 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。

薄膜的周期荷载等效应变范围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 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别对应,有效应变应与主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别对应,其中主应力按 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 排序,主应变按 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$ 排序。因此,在包含多个荷载的一个周期中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_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($\exists i \in \{1, 2, 3\}, \sigma_i = 0$)。还应注意即使 $\sigma_i = 0$,也有 $\epsilon_i \neq 0 (i \in \{1, 2, 3\})$ 。

因此,根据 Tresca 理论,等效应变幅应按公式(7)计算:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \text{MAX} \left\{ \left| \frac{\epsilon_1}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_2}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_3}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{2} \right| \right\} \dots\dots\dots (7)$$

而根据 Mises 理论,等效应变幅应按公式(8)计算:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = C \frac{\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}}{2} \dots\dots\dots (8)$$

其中系数 C 应按公式(9)和公式(10)取值:

塑性:

$$C = 1.061 \dots\dots\dots (9)$$

弹性:

$$C = 0.551 \dots\dots\dots (10)$$

b) 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。

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。

应将该系数看成不确定性系数,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)。该系数没有考虑局部不连续性(即应力集中系数),因此,应考虑其在计算应力强度时的影响。

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。

5.3.2.2.2.5 地震荷载下的稳定性

在操作条件下混凝土外罐应能承受 OBE 和 SSE 荷载。

OBE 地震工况下应证明：

- a) 薄膜与锚固系统两者都能承受地震荷载；
- b) 薄膜承受的压力在允许范围内；
- c) 绝热系统承受的压力在允许范围内。

SSE 地震工况，设置 TCP 的外罐应能够装存液体。

5.3.2.2.3 模型试验

5.3.2.2.3.1 通则

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。

可在环境温度条件下进行模型试验。

试样的数目应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”等方法确定。

使用在试验材料表面和外型的应变片和粘合剂应可靠，此外，应能测定主应力方向上的应力和应变。

等效应力或应变的计算应以主轴为基础。因此，依据 Tresca 理论，等效应变幅应按公式(11)计算：

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \text{MAX} \left\{ \left| \frac{\epsilon_1}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_2}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_3}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{2} \right|; \left| \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{2} \right| \right\} \dots\dots\dots(11)$$

而根据 Mises 理论，等效应变幅应按公式(12)计算：

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = C \frac{\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}}{2} \dots\dots\dots(12)$$

系数 C 应根据公式(13)和公式(14)取值：

塑性：

$$C = 1.061 \dots\dots\dots(13)$$

弹性：

$$C = 0.551 \dots\dots\dots(14)$$

5.3.2.2.3.2 静荷载下的稳定性

静荷载作用下，薄膜不应发生失稳。按规定荷载设计的薄膜，安全系数应取 1.25。

5.3.2.2.3.3 渐进变形

应用模拟操作条件的一个荷载周期内，薄膜的每一部分都应保持稳定，在 10 个荷载周期后，薄膜未出现渐进变形。

5.3.2.2.3.4 疲劳特性

储罐的所有薄膜构件应进行疲劳试验，试验项目包括：

- a) 热荷载引起的周期性伸长；
- b) 液体静压荷载引起的周期压力变化，在周期压力条件下试验的每一构件应至少预拉到最大拉

伸量。

“最佳适配曲线”应依据疲劳实验结果的统计分析。

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,假设置信度为 75%,可靠概率为 95%:

设计点应按公式(15)计算,式中 k 按照表 8 取值:

$$D_p = m - kS \quad \dots\dots\dots(15)$$

Miner 法则应作为确定抗疲劳强度的损伤累积技术。

表 8 S-N 曲线的系数 k (假定为正态分布)

取样数量	k
3	3.152
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	1.916
23	1.907
24	1.901
25	1.895

注: 置信度 75%,可靠概率 95%。

5.3.3 钢质外容器

5.3.3.1 单容罐、双容罐和全容罐

5.3.3.1.1 罐底

5.3.3.1.1.1 环形板

环形板应符合 5.3.2.1.1.1 的要求。

5.3.3.1.1.2 罐底中幅板

罐底中幅板应符合 5.3.2.1.1.2 的要求。

5.3.3.1.2 罐壁

壁板的最小厚度应符合表 7 的规定。

在内压条件下,壁板厚度应按公式(16)计算:

$$e_{os} = \frac{P_i D_o}{2\sigma} + c \dots\dots\dots (16)$$

带有中间加强圈的外罐壁设计应考虑与环向压缩力组合的垂直压力,见 5.3.2.1.2.3 d)。

带有加强圈的罐壁应承受所有适用荷载,包括但不限于:

- a) 竖直压力:
 - 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 5.3.2.1.2.3 e)];
 - 6) 地震倾覆;
- b) 环向压力:
 - 1) 局部风压作用[见 5.3.2.1.2.3 e)];
 - 2) 负压。

在许用双向应力计算中,应考虑由风在罐顶的抽吸和风对罐的倾覆产生的设计荷载数值。

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

加强圈与罐壁水平焊接接头之间的距离不应小于 150 mm。

5.3.3.1.3 罐顶

5.3.3.1.3.1 板材的最小厚度

罐顶板材的厚度不应小于 5 mm(不包括腐蚀裕量)。

5.3.3.1.3.2 带支承结构的罐顶

顶板,应使用下列一种或多种焊缝:

- 单面搭接焊接接头;

- 双面搭接焊接接头；
- 带垫板或不带垫板的对接焊接接头。

罐顶的支承结构应按照 GB 50017 进行设计。按许用应力理论设计时,顶板焊接接头系数应为:

- 单面搭接焊接接头 0.35;
- 双面搭接焊接接头 0.65;
- 带垫板或不带垫板的对接焊接接头 0.70。

顶板搭接焊的搭接宽度不应小于 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。

5.3.3.1.3.3 自支承结构的罐顶

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。应按公式(17)~公式(19)计算:

a) 内压计算:

1) 球形顶

$$e_r = \frac{P_r R_r}{20\sigma\eta} \dots\dots\dots(17)$$

2) 锥形顶

$$e_r = \frac{P_r R_r}{10\sigma\eta} \dots\dots\dots(18)$$

b) 屈曲计算:

$$e_r = 40 R_r \sqrt{\frac{10P_c}{E}} \dots\dots\dots(19)$$

自支承结构的顶板应使用对接焊或双面搭接焊。

5.3.3.1.3.4 加强的拱形顶

经过加强的拱形顶,其结构应按照 GB 50017 进行设计。

5.3.3.1.3.5 受压面积

不考虑腐蚀裕量,最小受压面积应按照公式(20)确定:

$$A = \frac{50 P_r R_1^2}{\sigma_c \tan\theta} \dots\dots\dots(20)$$

有效受压面积应由板或最大宽度符合图 7 要求的截面积构成。

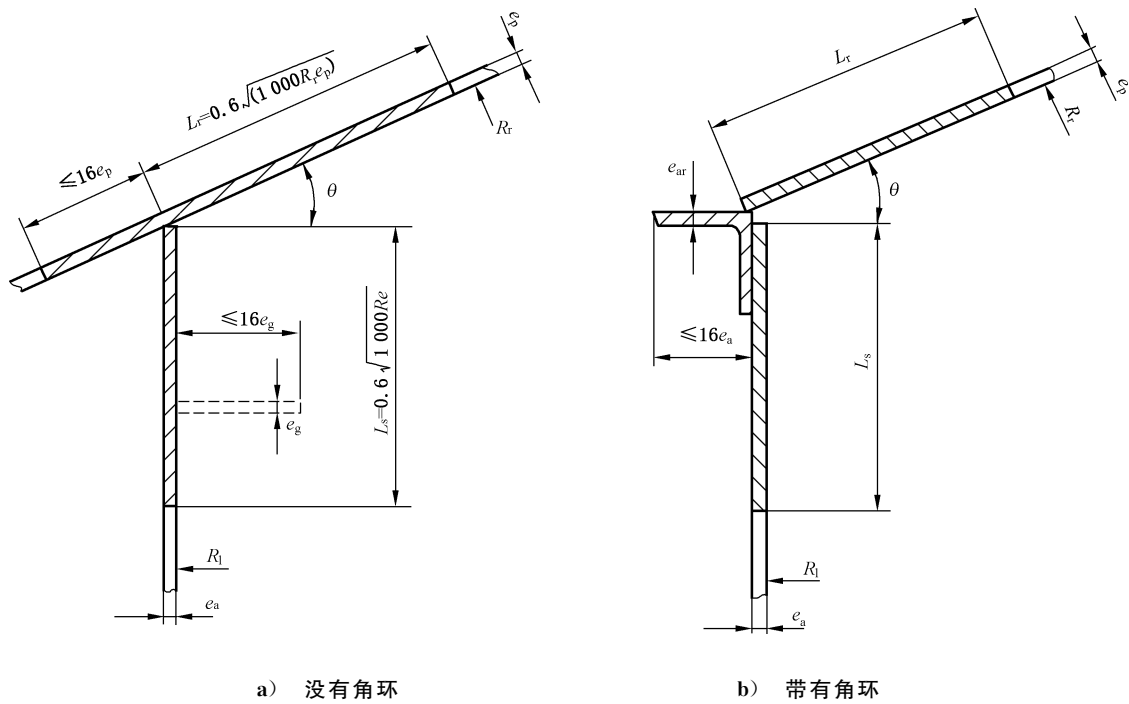


图 7 典型的罐壁-罐顶受压面积

在使用顶端角环的部位,其最小尺寸应符合表 9 的规定。

表 9 顶端角环的最小尺寸

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

单侧面搭接焊接顶板不应计入受压区面积。双面搭接焊接顶板可计入受压面积。
 受压区应符合一定比例,有效受压面水平投影应有不少于储罐水平半径 1.5% 的径向宽度。
 受压区域的布置应使受压区质心的垂直范围处于两个构件交点的 ± 1.5 倍构件平均厚度内。
 应校核外部荷载(包括内部负压)导致的受压区拉伸。
 宜避免承压区内罐顶支撑部件与承压区连接处的过度变形。

5.3.3.2 薄膜罐



薄膜罐顶上的钢质部件应符合 5.3.3.1.3 的规定。

5.3.4 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。

吊顶设计荷载应至少包括吊顶自重、保冷材料重量、吊顶活荷载、吊顶上下气体压力差、吊顶上珍珠岩自重等。

吊顶的隔热设计应使得外罐顶的温度不会冷却到低于它的设计温度,蒸发气得到控制,并且防止结冰导致出现过度的罐顶荷载。隔热和支撑结构的设计应防止隔热材料进入所储存的产品当中,但应允许气体从吊顶下方到上方的流通。反之亦然,以使吊顶两侧的压差不会超过 0.24 kPa。

5.3.5 接管

5.3.5.1 通则

通往主容器和次容器的管道连接应符合 4.2.6 的规定。

5.3.5.2 接管荷载

接管的设计应能承受由连接管路和附件所产生的荷载。

5.3.5.3 罐壁接管

5.3.5.3.1 罐壁接管

罐壁接管开孔和焊接详细要求应符合 GB/T 150.3 的规定。

5.3.5.3.2 人孔

人孔内径不应小于 600 mm。

5.3.5.4 罐顶上的接管

罐顶上的接管开孔和焊接详细要求应符合 GB/T 150.3 的规定。

罐顶上接管的加强应以椭圆形开口的长轴方向为基础来确定。

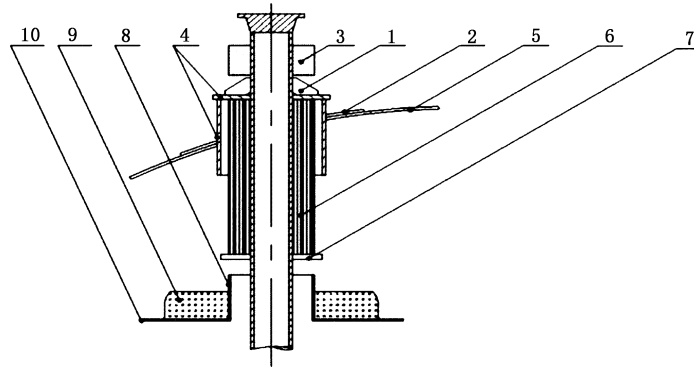
最小接管壁厚计算应考虑包括管道荷载在内的适用荷载。

罐顶上的接管压力等级不应低于 HG/T 20592 中的 PN25 或 HG/T 20615 中的 CL150 压力等级要求。

人孔法兰及其盖子可用板材制造,并按最小压力 0.35 MPa 设计。

用于低温液体或低温气体的罐顶上的接管宜装配绝热构件(见图 8)。





标引序号说明：

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1——接管管道(低温)； | 6——内部管道的绝热系统； |
| 2——接管补强板(环境温度)； | 7——绝热系统的支撑环； |
| 3——外部管道的绝热件； | 8——吊顶管套； |
| 4——绝热件(低温)； | 9——吊顶的绝热系统； |
| 5——拱形顶(环境温度)； | 10——吊顶。 |

图 8 典型的带有绝热构件的罐顶接管

5.3.5.5 接管焊后热处理

接管焊后热处理应符合 5.6.4 的规定。

5.3.6 植焊钉

碳钢植焊钉的材料应符合 GB/T 6478 的规定。

植焊钉力学性能见表 10。

表 10 植焊钉力学性能



植焊钉材料	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率 %
碳钢植焊钉	≥350	≥450	≥15
不锈钢植焊钉	≥350	≥540	≥25

5.3.7 主容器和次容器的罐底连接

当采用主/次容器的罐底连接时,应考虑以下内容:

- 储罐不均匀沉降;
- 内罐相对于外罐的差异性收缩;
- 接管开口补强;
- 接管周围未支撑区域应降低到最小;
- 接管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。

5.3.8 容器之间的连接

容器之间的连接应考虑以下内容:

- a) 由内、外罐之间的相对移动产生的热应力和流体静压力；
 - b) 应考虑内、外罐之间连接件上的热量传递阻隔；
 - c) 内罐壁与外罐壁之间的环形空间不应安装法兰接头；
 - d) 内罐顶开口与外罐顶开口之间的连接应考虑内罐、外罐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。

5.3.9 其他

5.3.9.1 罐体锚固系统

关于锚固系统的设计,应考虑以下内容:

- a) 内罐和外罐都应分别按最不利荷载组合进行设计；
- b) 穿过外罐底部的内罐锚固系统设计时应满足液密性和所有工况下温差变形的要求；
- c) 锚固点应等距离地沿罐体周围均匀分布,最大间距为 3 m；
- d) 不对锚固系统施加任何初始拉力,锚固系统应在罐壁内产生抬升力时起作用；
- e) 应采取措施确保在储罐的整个设计使用年限内锚固系统螺栓不会松弛或失效；
- f) 罐壁和基础的锚固附件应基于锚固螺栓和拉索处于全屈服状态进行设计；
- g) 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；
- h) 锚固系统设计应考虑热位移导致的弯曲；
- i) 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、螺栓或拉索的横截面积不应小于 500 mm²；
- j) 直接暴露在空气中的固定锚的锚固杆、螺栓或拉索,腐蚀裕量不应小于 1.5 mm；
- k) 需要绝热设施,应限制热量向罐体结构和基础的较冷部件传递。

5.3.9.2 铭牌

储罐铭牌宜包含以下信息:

- a) 设计、施工单位名称；
- b) 建造年份；
- c) 设计标准；
- d) 储罐、装置编号；
- e) 产品设计密度和温度；
- f) 最大设计压力；
- g) 最高设计液位；
- h) 储罐净容积。

5.4 制造

5.4.1 材料的处理

所有用于主容器和次容器的板材都应分别独立搬运和存放,以避免各种材料互混。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,残留磁性不应超过 50 Gs。

注: 1 T=10 000 Gs。

焊接耗材应按照焊接耗材标准规定的条件或供应商的推荐进行保护和存储。

厚度大于 6 mm 的板材,宜使用最小圆角半径为 0.25 mm 的低应力印模的压印方法;厚度小于 6 mm 的板材可使用喷涂或喷墨标记的方法代替压印方法。

5.4.2 板材准备

5.4.2.1 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误差应控制在设计数值的 ± 4 mm 以内。

薄膜罐的板材应为冷轧板,无可见缺陷。

5.4.2.2 环形板

所有边缘板的外边缘以及两个短边都应符合 NB/T 47013.3 中 I 级等级的规定,在预制下料以后进行超声波检查,检查宽度为 150 mm。

5.4.2.3 接管

如果主容器或次容器的接管采用板材卷制,则接管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。

如果罐壁接管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检测,检查是否存在层状缺陷。

如果法兰是用板材制造的,法兰超声检测符合 NB/T 47013.3 的规定,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。

5.4.2.4 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。

所有接管加强板上应至少设置一个检查螺纹孔。

5.4.3 预制

5.4.3.1 一般要求

壁板、穹顶等预制件直线度、弧度等几何尺寸应采用样板进行检查,样板制作应符合下列规定:

- a) 直线样板的长度不应小于 1 000 mm;
- b) 测量焊接接头角变形的样板,其弦长不应小于 1 000 mm;
- c) 弧形样板,其弦长不宜小于 2 000 mm。

低温钢板不应采用硬印标记,非剪切线不应用尖锐工具划线、不应打样冲眼。

钢板坡口宜采用机械加工,坡口表面不应有夹杂、分层、裂纹和熔渣等缺陷。

9% 镍钢坡口采用等离子或火焰加工时,应打磨去除表面氧化层,并符合 NB/T 47013.5 的规定进行渗透检测, I 级合格。

采用对接接头厚度大于 10 mm 的钢板和采用搭接接头厚度大于 16 mm 的钢板,板边不宜采用剪切加工。

当没有规定时,坡口形式和尺寸应符合 GB/T 985.1 的规定。

5.4.3.2 预埋件预制

预埋件应按材料规格进行排板下料。

预埋件植焊钉焊接完成后,应逐一进行外观检查,合格标准应符合 CECS 226 的规定,并按 1% 的比例进行弯曲试验抽查,且每批数量不少于 10 个。弯曲试验角度不小于 30° ,以焊缝和热影响区无肉眼可见的裂纹为合格。

5.4.3.3 穹顶预制

穹顶梁采用钢板现场拼焊时,翼缘板与腹板、翼缘板与翼缘板的拼接缝的间距应大于 200 mm。

穹顶梁弯曲成型后应采用不小于 2 000 mm 的弧形样板进行检查,其间隙不大于 2 mm。

穹顶梁弯曲成型后,弯曲矢高偏差不应超过构件长度的 $1/1\,000$,且不大于 5 mm;穹顶梁接长拼接完成后弯曲矢高偏差不应超过构件长度的 $1/1\,000$,且不大于 10 mm。

穹顶宜采用分片预制法预制,预制在胎架上进行,组装后拱梁长度偏差不应超过 20 mm,环向梁的间距偏差不应超过 3 mm。

组装完成的穹顶片各部位几何尺寸允许偏差见表 11,测量部位见图 9。

表 11 穹顶片几何尺寸允许偏差

单位为毫米

测量部分	尺寸允许偏差
宽度 AC、BD	3
长度 AB、CD、EF	20
对角线之差 $ AD-BC $	6

注：AB、AC、AD、BC、BD、CD、EF 为图 9 中的线段长度。

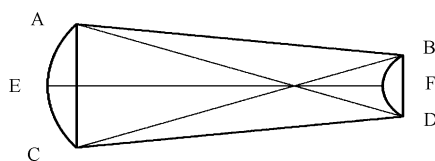


图 9 穹顶片几何尺寸测量部位

穹顶衬板分片预制时应满足下列要求：

- 衬板应按材料规格排板下料；
- 衬板拼接焊缝的间距不应小于 200 mm；
- 当采用搭接接头时,搭接宽度不应小于板厚的 5 倍,且不小于 30 mm。

抗压环/抗压圈应分段预制,每段组对焊接应在胎具上进行。

5.4.3.4 吊顶预制

铝板的切割下料在平整的支架上进行,应采用机械下料开孔。

铝板材料预制时应满足下列要求：

- 铝板切割下料尺寸,按照图纸和排板图尺寸进行；

- b) 切割铝板和坡口加工采用专业的铝型材切割机和锯片；
- c) 铝吊顶加强环等弧形构件卷制时，在滚板机钢辊和构件之间采取有效的隔离；
- d) 摆放板材配件时其下面应垫实，防止变形和污染；
- e) 下料采用铅笔或细记号笔划线，不应采用划针或锐器刻划；
- f) 组对卡具与铝板接触面，应采用铝制或不锈钢材料进行隔离。

5.4.3.5 9%镍钢预制

5.4.3.5.1 罐底板

罐底板预制应绘制排板图，并符合下列规定：

- a) 规则中幅板的宽度不应小于 1 000 mm，长度不应小于 2 000 mm；
- b) 与边缘板连接的不规则中幅板直边尺寸不应小于 700 mm；
- c) 边缘板沿罐底半径方向的最小尺寸不应小于 700 mm；
- d) 底板任意相邻焊缝之间的距离不应小于 300 mm。

罐底边缘板几何尺寸允许偏差见表 12，其测量部位见图 10。

表 12 罐底边缘板几何尺寸允许偏差

单位为毫米

测量部分	尺寸允许偏差
宽度 AB、CD	2
长度 AC、BD、EF	2
对角线之差 AD-BC	3
注：AB、AC、AD、BC、BD、CD、EF 为图 10 中的线段长度。	

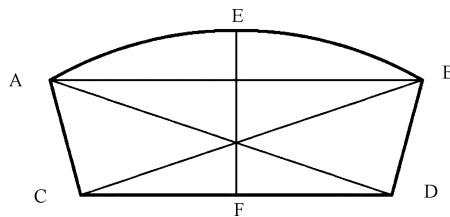


图 10 罐底边缘板几何尺寸测量部位

罐底板搭接宽度在无特殊要求时，应符合下列规定：

- a) 中幅板间的搭接宽度不应小于 5 倍的钢板厚度，且不应小于 30 mm；
- b) 中幅板与边缘板的搭接宽度不应小于 60 mm。

厚度大于或等于 12 mm 的罐底边缘板，应在边缘板两侧(图 10 中的 AC, BD)100 mm 范围内符合 NB/T 47013.3 的规定进行超声检测，I 级合格。

5.4.3.5.2 罐壁板

壁板排板应符合下列规定：

- a) 壁板宽度不宜小于 1 000 mm，长度不宜小于 2 000 mm；

b) 各圈壁板的纵向焊接接头宜向同一方向逐圈错开,其间距宜为板长的 $1/3$,且不应小于 300 mm;

c) 底圈壁板纵向焊接接头与罐底边缘板的对接焊接接头之间的距离不应小于 300 mm。

壁板预制几何尺寸允许偏差见表 13,其测量部位见图 11。

壁板卷制时,其长度方向应垂直于辊的轴线。卷制后直立于台上,水平方向应用内弧样板检查,其间隙不应大于 4 mm;垂直方向用直线样板检查,其间隙不应大于 2 mm。

TCP 壁板的排板符合 5.4.3.5.2 中壁板排板的相关要求。

表 13 壁板几何尺寸允许偏差

单位为毫米

测量部分		允许偏差值	
		$AB(CD) < 10\ 000$	$AB(CD) \geq 10\ 000$
宽度 AC、BD、EF		1	1.5
长度 AB、CD		1.5	2
对角线之差 $ AD - BC $		2	3
直线度	AC、BD	1	1
	AB、CD	2	2

注: AB、AC、AD、BC、BD、CD、EF 为图 11 中的线段长度。

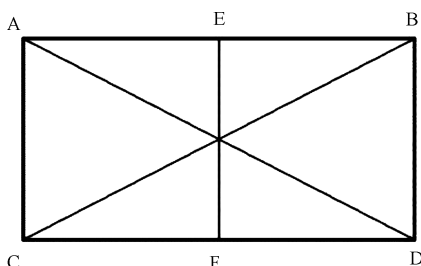


图 11 罐壁几何尺寸测量部位

5.4.3.6 附件预制

加强圈宜采用钢板组焊成型。

弧形构件成形后,应用弧形样板检查,其间隙不应大于 2 mm;放在平台上检查,翘曲变形量不应超过构件长度的 $1/1\ 000$,且不大于 6 mm。

钢管采用钢板卷制时,纵向焊缝应符合 NB/T 47013.2 的规定进行射线检测,Ⅱ级合格,或符合 NB/T 47013.3 的规定进行超声检测,Ⅰ级合格。

泵井管宜采用成品钢管制作。

环向焊缝应按 NB/T 47013.2 进行 100%射线检测,Ⅱ级合格;当泵井管采用钢板拼接焊时,拼接泵井管纵向焊接接头、环向焊接接头均应符合 NB/T 47013.2 的规定进行 100%射线检测,Ⅱ级合格。

补强板、垫板应进行成形加工,曲率应与开孔部位壳体曲率一致,且整块钢板制作的补强板上应至少开设一个信号孔,拼接的补强板,每一拼接段上应开设一个信号孔。

直径小于或等于 50 mm 的开孔应采用机械钻孔,不应采用火焰切割。

5.4.4 制造

5.4.4.1 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 ±3 mm;整个圆周上,不应超过 ±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。

5.4.4.2 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。

5.4.4.3 罐底板允许误差

内罐底板焊后局部最大凹凸变形不应大于变形长度的 2%,且不大于 50 mm。

二次底板焊后局部最大凹凸变形不应大于变形长度的 1.5%,且不大于 40 mm。

5.4.4.4 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,以底板中心为圆心,水平测量每块罐壁板的内部半径,允许误差见表 14。测量应在每块罐壁板的中心点进行。

表 14 半径允许误差

直径 D_i m	半径允许误差 mm
$D_i \leq 12$	±12
$12 < D_i \leq 46$	±19
$46 < D_i \leq 76$	±25
$D_i > 76$	±30

5.4.4.5 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%,且不应超过 300 mm。

5.4.4.6 板材的局部变形

应检查罐壁板上的局部变形,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储罐的设计半径吻合。

设计与竣工纵断面之间的最大偏差见表 15。

表 15 设计与竣工纵断面之间的最大偏差

单位为毫米

板材厚度 e	最大偏差
$e \leq 12.5$	16

表 15 设计与竣工纵断面之间的最大偏差 (续)

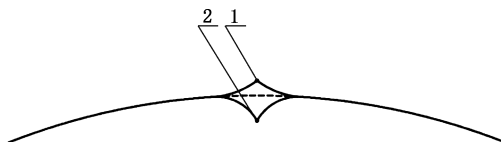
单位为毫米

板材厚度 e	最大偏差
$12.5 < e \leq 25$	13
$25 < e$	10

5.4.4.7 焊接接头处的局部变形

焊接接头位置的局部角变形(棱角, peaking), 可以是相对于罐中心的向外和向内的棱角(见图 12), 允许误差值对两种情况均应适用。

应使用图 13 中的量规测量棱角。应按照表 16 设置量规的棱角最大允许值(对正矢量进行修正)。焊接棱角位置不适合使用弧形样板, 可考虑弧形样板中间一段按照焊接接头宽度开出缺口, 消除其影响。



标引序号说明:

1——向外棱角;

2——向内棱角。

图 12 向外和向内的棱角

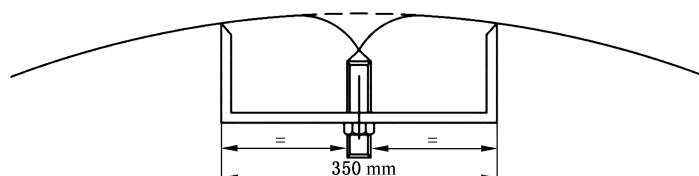


图 13 用于测量棱角的量规

表 16 焊接接头位置上局部变形的允许误差

单位为毫米

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

5.4.4.8 竖直允许误差

5.4.4.8.1 钢质储罐

每圈罐壁板垂直度允许偏差不应大于该圈壁板高度的 $4/1\,000$, 整体垂直度不应大于 50 mm。

5.4.4.8.2 衬里

衬里的最大凸起度允许误差不应超过 100 mm。

5.4.4.9 板材对接焊接接头的错边量控制

5.4.4.9.1 立缝

罐壁在立缝位置上的最大错边量不应超过表 17 中给出的数值。

表 17 立缝位置上的最大错边量

单位为毫米

板材厚度 e	最大允许误差
$e \leq 15$	1.5
$15 < e \leq 30$	板材厚度 e 的 10%
$30 < e$	3

5.4.4.9.2 环缝

环缝的最大错边量不应超过上层板材厚度的 20%，且不应大于 3 mm。

5.4.4.10 薄膜系统偏差

整个薄膜系统(包括膜、绝热板、胶、锚等)都应连接到混凝土墙壁或混凝土底座或由它们支撑。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。

5.4.4.11 穹顶组装偏差

5.4.4.11.1 穹顶组装程序

穹顶采用分片组装时,单片预制完成后,吊装至罐内,利用穹顶组装胎具进行调节、固定后,再进行穹顶片之间的环向梁和穹顶衬板组装焊接。宜参考以下程序进行:

- a) 安装穹顶组装胎架的中心支柱、中间支柱、边缘支柱等;
- b) 穹顶组装工装的高度应根据吊顶组装平面和吊顶设计高度确定;
- c) 边缘立柱应安装在径向梁的正下方,与混凝土预埋件焊接固定,任意两个立柱的顶面标高偏差
不大于 10 mm;
- d) 中间支柱在穹顶吊装就位前宜采用螺栓与穹顶片梁下方的吊耳连接在一起,与穹顶片整体
吊装;
- e) 穹顶片宜采用对称方式进行安装;
- f) 环向梁安装检查合格后,再进行剩余穹顶衬板的铺设焊接。

5.4.4.11.2 穹顶片分片组装

穹顶片分片组装应符合下列要求:

- a) 中心环安装中心点允许偏差 5 mm,水平度允许偏差 3 mm;
- b) 穹顶衬板上表面与径向梁搭接焊接接头宜采用分段退焊或跳焊方式,焊脚高度不小于衬板厚

度,焊接不小于 2 层;

- c) 植焊钉位置距穹顶衬板焊接接头不应小于 100 mm。

5.4.4.11.3 穹顶散件组装

穹顶采用散件组装时应满足下列要求:

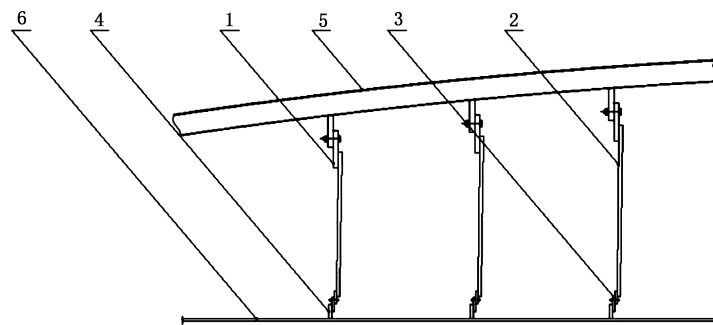
- 径向梁、环向梁和穹顶衬板预制尺寸,应符合 5.4.3.3 的规定;
- 采用先组装径向梁,再组装环向梁、穹顶衬板的顺序;
- 穹顶组装胎具除符合 5.4.4.11 的规定外,中间立柱应安装在径向梁的正下方,通过中间立柱调节穹顶的挠度,调节完成后进行焊接固定;
- 散件组装应符合穹顶分片组装的规定。

5.4.4.12 吊顶组装偏差

5.4.4.12.1 吊顶组装程序

吊顶组装应在穹顶组焊完成后气顶升前进行。

吊顶组装宜采用先组装吊顶板,再组装加强圈,最后进行吊杆连接的顺序,吊顶示意图 14。



标引序号说明:

- | | |
|----------|-----------|
| 1——顶部吊耳; | 4——加强圈; |
| 2——吊杆; | 5——穹顶径向梁; |
| 3——底部吊耳; | 6——吊顶。 |

图 14 吊顶示意

5.4.4.12.2 吊顶板组装

吊顶板组装应符合下列规定:

- 用于组装吊顶板的基础表面应无积水、杂物等,并有防雨、排水措施,防止对铝板造成损伤和污染;
- 吊顶板搭接宽度允许偏差 5 mm;
- 搭接接头三层重叠的部位宜将上层底板切角,切角尺寸宜为搭接宽度的 2 倍,其宽度应为搭接宽度的 2/3(见图 15),在上层底板铺设前,应先焊接上层底板覆盖部分的角焊接接头;
- 搭接接头组对间隙不应大于 1 mm;
- 焊接后,吊顶局部凹凸变形不应大于变形长度的 2%,且不应大于 70 mm。

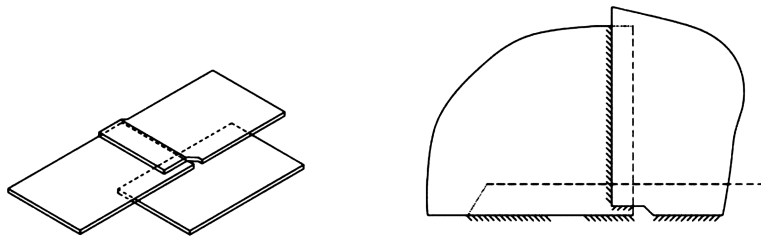


图 15 三层板搭接示意图

5.4.4.12.3 吊顶加强圈组装

吊顶加强圈组装应符合下列规定：

- 应在吊顶板上画出加强圈位置；
- 加强圈与吊顶板搭接缝相交时，应将此位置吊顶板的搭接缝焊接完成后，再进行加强圈组装焊接。

吊杆组装应符合下列规定：

- 吊杆宜在加强圈组焊前进行顶部安装，在吊顶板和加强圈组焊完成后进行底部的组焊；
- 吊杆应安装在穹顶径向梁的正下方；
- 吊杆固定螺柱与螺母之间宜进行点焊。

5.4.4.13 衬板组装偏差

5.4.4.13.1 罐底衬板组装

罐底衬板组装应符合下列规定：

- a) 安装过程中不应损坏混凝土基础，如有损坏应及时修复；
- b) 边缘板采用对接接头时，错边量不应大于 1 mm，底板与垫板的缝隙不应大于 1 mm；
- c) 边缘板对接焊接接头焊后角变形，用长 1 000 mm 直线样板检查，其间隙不应大于 3 mm；
- d) 罐底衬板搭接宽度允许偏差 5 mm；
- e) 中幅板应搭接在边缘板上，且搭接宽度不应小于 60 mm；
- f) 搭接接头三层重叠的部位应符合 5.4.4.12 的规定；
- g) 搭接接头组对间隙不应大于 1 mm；
- h) 罐底衬板任意相邻焊接接头之间的距离不应小于 300 mm；
- i) 罐底衬板焊后，局部最大凹凸变形不应大于变形长度的 1.5%，且不应大于 30 mm。

5.4.4.13.2 墙体衬板组装

墙体衬板组装应符合下列规定：

- a) 墙体衬板宜在地面拼接成条形，整体吊装就位，拼接应满足下列要求：
 - 1) 搭接宽度允许偏差 5 mm；
 - 2) 搭接接头三层重叠的部位符合 5.4.4.12 的规定；
 - 3) 壁板拼接直线度不应大于全长的 1/1 000，且不大于 15 mm；
- b) 墙体衬板与预埋件搭接宽度允许偏差 5 mm；
- c) 搭接接头组对间隙不应大于 1 mm；
- d) 墙体衬板焊后局部最大凹凸变形不应大于变形长度的 2%，且不大于 70 mm。

5.4.4.14 热角保护组装偏差

5.4.4.14.1 TCP 组装

TCP 壁板组装应符合下列规定：

- a) 应画出安装方位线和标高线；
- b) 壁板应在热角保护顶板和隔热层施工完毕后进行；
- c) 壁板安装前应将焊接接头两侧 25 mm 范围内和垫板表面的铁锈、油污等清理干净；
- d) 壁板任意相邻焊接接头之间的距离，不应小于 300 mm；
- e) 垫板之间的对接接头组对间隙偏差为 1 mm，壁板与垫板组对间隙不应大于 1 mm；
- f) 拆除工装卡具时，不应损伤母材；钢板表面的焊疤点应打磨至平滑；
- g) 壁板焊接完毕后，其局部凹凸变形不应大于变形长度的 3%，且不应大于 50 mm。

5.4.4.14.2 二次底板组装

二次底板应符合下列规定：

- a) 在二次找平层施工完毕后，进行二次底板边缘板的组焊；外圆周罐底绝热层和二次找平层宽度应满足边缘板铺设要求；
- b) 当边缘板为带垫板对接接头时，应在基础上预留沟槽；
- c) 二次底板根据现场施工条件可分区域进行组焊；
- d) 二次底板组装质量应符合下列规定：
 - 1) 搭接接头三层重叠的部分符合 5.4.4.12 的规定；
 - 2) 底板搭接宽度允许偏差为 5 mm，搭接接头组对间隙不应大于 1 mm；
 - 3) 中幅板与边缘板之间采用搭接接头时，中幅板应搭接在边缘板的上面；
 - 4) 中幅板与边缘板搭接量不应小于 60 mm；
 - 5) 对接接头组焊的边缘板，对接接头组对间隙偏差为 1.5 mm；边缘板与垫板组对间隙不应大于 1 mm；
 - 6) 底板任意相邻焊接接头之间的距离不应小于 300 mm；
 - 7) 边缘板对接焊接接头焊接完成后，用 1 000 mm 长的直线样板进行检查，其角变形不应大于 2 mm；
 - 8) 焊后局部最大凹凸变形不应大于变形长度的 1.5%，且不应大于 40 mm。

5.4.4.15 内罐底板组装偏差

5.4.4.15.1 一般要求

内罐底板安装前，应对混凝土找平层进行复验和交接。

底板铺设宜根据现场施工条件分区进行施工。

5.4.4.15.2 底板边缘板组装

内罐底板边缘板组装应符合下列规定：

- a) 边缘板组对间隙偏差为 1 mm，错边量不应大于 1 mm；
- b) 采用 1 000 mm 长的直线样板检查边缘板对接焊接接头角变形，其间隙不应大于 1.5 mm；
- c) 当边缘板为带垫板对接接头时，应在基础上预留沟槽。

5.4.4.15.3 底板中幅板组装

内罐底板中幅板组装应符合下列规定：

- a) 搭接接头三层重叠的部分符合 5.4.4.12 的规定；
- b) 中幅板任意相邻焊接接头之间的距离不应小于 300 mm；
- c) 搭接宽度允许偏差为 5 mm, 搭接接头组对间隙不应大于 1 mm；
- d) 中幅板与边缘板搭接量不应小于 60 mm；
- e) 底板焊接完毕后, 局部凹凸变形不应大于变形长度的 2%, 且不应大于 50 mm。

5.4.4.16 罐壁组装偏差

壁板组装前, 应对预制的壁板尺寸进行检查, 合格后方可组装。

底圈壁板组装内圆半径按公式(21)计算。

$$R_b = \frac{R_i + \frac{n_j a}{2\pi}}{\cos\varphi} \dots\dots\dots(21)$$

底圈壁板与边缘板之间的 T 型接头应符合下列规定：

- 当采用全焊透焊接接头结构时, 底圈壁板与边缘板之间宜放置间隙调整板, T 形接头组对间隙不宜小于 2 mm；
- 当采用非全焊透焊接接头时, 气密试验槽应连续贯通。

壁板组装应符合下列规定：

- a) 首圈壁板组装应符合下列规定：
 - 1) 相邻两壁板上口水平度偏差不应大于 2 mm, 在整个圆周上任意两点水平度偏差不应大于 6 mm；
 - 2) 壁板垂直度的允许偏差不应大于板高的 2.5/1 000, 且不应大于 6 mm；
- b) 其他各圈壁板垂直度允许偏差不应大于该圈壁板高度的 4/1 000, 整体垂直度不应大于 50 mm；
- c) 壁板组装错边量允许偏差见表 18；

表 18 壁板组装错边量

单位为毫米

部位	板厚 e	错边量	
立缝	$e \leq 10$	≤ 1	
	$e > 10$	$\leq 0.1e$, 且不大于 1.5	
		机动焊或自动焊时, ≤ 1	
环缝	$e \leq 8$	≤ 1.5	
	$e > 8$	焊条电弧焊	$\leq 0.2e$, 且 ≤ 2
		机动焊或自动焊时	≤ 1.5

- d) 底圈壁板内半径, 在距罐底 1 000 mm 处测量, 任意点半径允许偏差见表 19；

表 19 底圈壁板内表面任意点半径允许偏差

储罐直径 D_i m	半径允许偏差 mm
$D_i \leq 12$	12
$12 < D_i \leq 45$	19
$45 < D_i \leq 76$	25
$\geq D_i > 76$	30

- e) 焊接后,立缝的角变形,用长 1 000 mm 的弧形样板检查,环缝角变形用长 1 000 mm 直线样板检查,角变形允许值见表 20;

表 20 壁板焊接接头角变形

单位为毫米

板厚 e	角变形允许值
$e \leq 12$	12
$12 < e \leq 25$	9
$e > 25$	6

- f) 焊接后,壁板局部凹凸变形用 1 000 mm 长的弧形样板检查,见表 21;

表 21 壁板凹凸变形

单位为毫米

板厚 e	角变形允许值
$e \leq 12$	16
$12.5 < e \leq 25$	13
$e > 25$	10

- g) 内罐组装焊接后,任意高度处最大直径与最小直径的差值不应大于 300 mm。
与 9%镍钢相焊的工卡具拆除时宜采用磨除的方式,不应采用锤击方法去除。
9%镍钢焊疤打磨去除后,应进行渗透检测。

5.4.4.17 附件组装偏差

5.4.4.17.1 罐壁加强圈

罐壁加强圈组装应符合下列规定:

- 罐壁加强圈对接缝与罐壁板立缝之间的距离不应小于 200 mm;
- 加强圈与罐壁立缝交叉位置,应在加强圈上开半圆形缺口。

5.4.4.17.2 内罐接管

内罐接管组装应符合下列规定:

- a) 内罐接管组装焊接,应在储罐水压试验之前完成;
- b) 壁厚相同的管道组对时,应使内壁平齐,其错边量不超过壁厚的 10%,且不大于 1 mm;
- c) 补强圈焊后应从信号孔通入 100 kPa~200 kPa 的压缩空气进行气密试验,无泄漏为合格;
- d) 接管外伸长度允许偏差为 10 mm,法兰螺栓孔应跨中安装,接管对接焊接接头应进行检测;
- e) 法兰密封面不应有划痕;
- f) 法兰密封面与接管轴线的倾斜不应大于法兰外径的 1%,且不大于 3 mm,泵井管底部法兰水平偏差角不应大于 0.5°。

5.4.4.17.3 罐内梯子、平台垫板

罐内梯子、平台垫板的安装位置距壁板环缝不应小于 75 mm,距壁板立缝不应小于 150 mm。

5.4.4.17.4 罐内低温泵

罐内低温泵安装应符合下列规定:

- a) 泵井管应在正式泵安装前,使用泵井规进行测试,合格后进行正式泵的安装;
- b) 泵井管内侧应清洁无污物;
- c) 底阀安装时测量泵井管底部法兰与底阀错边量,应满足制造厂技术文件要求;
- d) 无特殊要求时,法兰螺栓扭矩应符合产品安装技术要求。

5.4.5 罐顶

罐顶的建造方法应确保在整个安装过程中罐顶处于稳定状态。

若采用临时支撑结构,应采取预防措施避免支撑框架发生扭曲和结构整体旋转。

5.4.6 临时附件

各种临时附件应与要附着的材料所使用的焊接工艺相同。临时附件应使用热切割、刨削,或打磨的方法除掉。在热切割或刨削焊接接头以后,应保留 2 mm 材料,并磨平到光滑表面。在除掉临时附件以后,应进行渗透检测,应符合 5.7.5 的规定。

薄膜上不应焊接临时附件。

5.5 焊接工艺

5.5.1 通则

包括修补焊和定位焊在内的所有焊接,应符合 NB/T 47014 的规定进行焊接工艺评定,在此基础上形成焊接工艺规程(WPS)和焊接工艺评定报告(PQR)。

若钢板带保护漆焊接,批准的焊接工艺应在有保护漆的板材上进行。

焊接工艺规程(WPS)和焊接工艺评定报告(PQR)均应获得批准,不同钢板厂家、不同生产工艺,即使牌号相同,也应重新进行焊接工艺评定。

5.5.2 焊接工艺评定

应为下列每种情况制定一套相应的焊接工艺评定:

- a) 罐壁环缝的每种焊接工艺,应为下述规定的每一种厚度完成一块对接焊接接头试板:
 - 1) 试板厚度 \leq 罐壁最小厚度;
 - 2) 试板厚度 \geq 罐壁最大厚度;

- b) 罐壁立缝的每种焊接工艺,应为下述所规定的每一种厚度完成一块对接焊接接头试板:
 - 1) 试板厚度 \leq 罐壁最小厚度;
 - 2) 试板厚度 \geq 罐壁最大厚度;
- c) 覆盖的厚度范围应符合 NB/T 47014 的规定。

5.5.3 冲击试验

为焊接工艺规程(WPS)进行的焊接接头金属和热影响区(HAZ)的冲击试验以及产品焊接试件的试验,应符合下列内容,以及表3的要求:

- a) 每一组试样应由三个试件组成,一组试样取自焊接接头金属,一组试样取自热影响区;
- b) 焊接接头金属和热影响区夏比 V 型缺口冲击试件应从垂直于焊接接头和母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接接头平行,但用于立缝的试验板材轧制方向可与焊接接头垂直;
- c) V 型缺口应垂直于焊接接头表面;
- d) 热影响区中的缺口应距熔合线 1 mm~2 mm,焊接接头金属的缺口应位于焊接接头中心线。

5.5.4 9%镍钢

横向拉伸试件的拉伸数值,对于罐壁立缝不应低于设计值,对于罐壁环缝不应低于设计值的 80%。拉伸试样如果断裂在焊接接头金属上,则焊接接头金属的极限强度和屈服强度应按下列方法确定:

- a) 应使用熔敷隔离层的碳钢板材堆焊制备两件全焊接接头金属试板(一件采用 1G 位置,另一件采用 3G 位置焊接);
- b) 从每块试验板材上应制备两件全焊接接头金属试样。

5.5.5 焊工与焊接操作工

5.5.5.1 单容罐、双容罐和全容罐

焊工应通过规定考试并取得相应资质,符合 TSG Z6002 的规定。

5.5.5.2 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评定试验:

- a) 罐底:平焊位置;
- b) 罐壁立缝:向上立焊;
- c) 罐壁环缝: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。

5.5.6 产品试件

5.5.6.1 单容罐、双容罐和全容罐

主容器和次容器,应保证罐壁最厚板和罐壁最薄板的立缝以及每一种相应的焊接工艺至少各制作一块产品试件。

产品试件的焊接和试验应在罐体建造过程中尽早进行。

如果罐壁底部与罐壁顶端的厚度差不小于 20 mm,则应在立缝位置增加一组生产试件,其厚度可参考罐壁最厚板和罐壁最薄板的平均值近似选取,并应按照使用的每种焊接方法分别制备。

这些试件的宽度不应小于 400 mm(焊接接头两侧各 200 mm),试件应足够大,以避免加热对其机械特性产生影响。

产品试件所使用的钢板材料应是建造储罐所使用钢材的炉次之一,用于焊接产品试件的焊接材料应与焊接相应产品焊接接头的焊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件安放在一道立缝的末端,则应在现场合适的地方,采用焊接工艺规程(WPS)中用于焊接有代表性产品焊接接头的方法完成试件焊接。

产品试件的检验和试验要求应与焊接工艺规程(WPS)的要求相同。仅需进行焊接接头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。

5.5.6.2 薄膜罐

作薄膜板应制备罐壁垂直和水平焊接接头以及罐底平直焊接接头产品试件。

5.6 焊接

5.6.1 定位焊接接头与临时焊接接头

定位焊接接头与临时焊接接头应由考试合格的焊工完成。

如定位焊接接头在随后的焊道中被完全熔透,可不必去除。

5.6.2 气候条件

施工单位应采取措施确保焊接免遭潮湿、雨水的作用,还应采取防风措施。

当母材金属温度低于 5 °C 时,接头两侧的材料应进行预热。

5.6.3 预热

若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 75 mm 之中的较大者,在焊接开始前可从任何方向进行预热。预热应使整个接头厚度上的温度超过 5 °C。

预热应符合 NB/T 47015 的规定。

5.6.4 焊后热处理

除下列情况外,罐壁接管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:

- a) 组合件中没有厚度 ≥16 mm 的部分;
- b) 组合件中没有厚度 ≥30 mm 的部分,而且接管的公称直径小于 300 mm;
- c) 安装在设计成仅装存蒸发气的外罐壁上的接管或人孔。

应为热处理制定一份热处理方案。

以上焊后热处理仅适用于低温低合金钢。

当冷压成型过程中形成的极端纤维应变超过按公式(22)计算结果的 3% 时,则应对冷压成型的 9% 镍板进行热处理(或消除应力):

$$\epsilon_{ef} = \frac{50e}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_0} \right) \dots\dots\dots (22)$$

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 °C。

在 400 °C 以上时的加热速度(°C/h)不应超过 $5\,500/e$ (e 为罐壁板或插入板厚度,mm),但最大加热速度不应大于 220 °C/h;

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不应超过 150 °C。在保持温度期间,整个组件温度应保持在 580 °C~620 °C。淬火和调质钢材的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。

当组合件获得规定的均匀温度后,应保持恒温。保温保持时间为每毫米罐壁厚度 2.5 min 或插入板最少 1 h。

如有必要,可使用表 22 中给出的温度-保温时间组合。

表 22 温度较低时的保温时间

温度 °C	每毫米厚度保温时间 min
500	12.5
540	7.5
570	5.0

组合件应在炉中冷却到 400 °C,冷却速度不超过 $5\,500/e$ (e 为罐壁板或插入板厚度,mm),但最大冷却速度不应大于 220 °C/h。

在 400 °C 以下时,组件可以在静止空气中冷却。

组装的板材应予以适当加固,以便在焊后热处理过程中保持其形状。

5.7 检验

5.7.1 无损检测(NDE)人员的资质

无损检测人员应通过考试合格并取得相应资质,符合 TSG Z8001 的规定。

5.7.2 检验程序

所有 NDE 检验应由独立于施工方的第三方检测机构来执行。

应制定检验和试验程序。作为最低要求,每一程序应指明:

- a) 检查和试验程序的范围;
- b) 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)。

5.7.3 检验类型

5.7.3.1 材料检验

应维护好材料的标记/识别系统。该系统应保证材料在建造过程中的任意时间能被识别。

5.7.3.2 焊接接头检验

5.7.3.2.1 单容罐、双容罐和全容罐的主容器和次容器

检验方法和检验比例应按照表 23 来进行。

表 23 主容器和次容器的焊接接头检验

储罐部位	组件类型	目视检测 %	渗透检测 %	磁粉检测 %	真空箱检查 %	肥皂液检查 %	射线或 超声检测 %
底板	对接焊接接头	100 ^a	—	—	100 ^a	—	—
	角焊接接头	100 ^a	—	—	100 ^a	—	—
底边缘板	径向对接焊接接头	100	—	—	100	—	100
底-壁角焊	角焊接接头	100 ^b	—	—	100 或 100 ^b		—
罐壁	对接焊接接头	100 ^b	—	—	—	—	见表 24
壁或底上接管	纵向焊接接头	100 ^c	—	—	—	—	100
	焊颈法兰与接管 直径≥100 mm	100 ^c	100		—	—	10
	焊颈法兰与接管 直径<100 mm	100 ^{c,d}	100		—	—	—
	平焊法兰与接管 角焊接接头	100 ^c	100		—	—	—
壁板装配接管 (插入板式和 加强板式)	管嘴与罐壁或 插入式焊接接头	100 ^c	100		—	—	—
	管嘴与加强板	100 ^c	100		—	—	—
	加强板与罐壁	100 ^c	—	—	—	100	—
	插入板与罐壁	100	—	—	—	—	100
永久托架 与垫板	角焊接接头	100	100		—	—	—
加强圈	加强圈主体 对接焊接接头	100	—	—	—	—	100
	加强圈与罐壁 角焊接接头	100	100		—	—	—

^a 在水压试验之前与之后进行。
^b 在两侧。
^c 如果需要,在焊接热处理之后进行。
^d 一侧。

表 24 罐壁焊接接头射线/超声检测

检验类型	焊接接头		
	纵向焊接接头 %	T 字形 ^a %	环向焊接接头 ^b %
射线或超声检测	100	100	100
^a 400 mm 底片水平放置。 ^b 不包括 T 字形焊接接头。			

5.7.3.2.2 薄膜罐的主容器

不锈钢膜应进行下列焊接接头检验：

- a) 100% 目视检测；
- b) 氨或氨泄漏检测；
- c) 每天要从当天完成的每种类型焊接中抽查至少 5% 进行渗透检测。

5.7.3.2.3 单容罐、双容罐和全容罐的蒸发气容器

检验方法和检验比例应按照表 25 进行。

表 25 蒸发气隔层/衬里的检验

储罐部位	组件类型	目视检测 %	渗透检测 %	磁粉检测 %	真空箱检查 %	肥皂液检查 %	射线或 超声检测 %
底板	对接焊接接头	100	—	—	100	—	—
	角焊接接头	100	—	—	100	—	—
底边缘板	径向对接焊接接头	100	—	—	100	—	—
底-壁	角焊接接头	100	—	—	100	—	—
罐壁	对接焊接接头	100	—	—	100	—	见表 26
受压区	竖直和径向 对接焊接接头	100	100		—	—	25
	周向对接焊 或角焊接接头	100	100		—	100	—
顶	角焊接接头	100	—	—	—	100	—
	对接焊接接头	100	—	—	—	100	—
壁、底或 顶上的接管	纵向管嘴焊 接头	100	—	—	—	100	—
	法兰到管嘴体	100	—	—	—	100	—

表 25 蒸发气隔层/衬里的检验 (续)

储罐部位	组件类型	目视检测 %	渗透检测 %	磁粉检测 %	真空箱检查 %	肥皂液检查 %	射线或 超声检测 %
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 板的焊接接头	100	100		—	100	—
	管嘴与加强板 连接	100	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		—	—	—
永久托架 和垫板	角焊接接头	100	100		—	—	—
加强圈 (抗风圈)	加强圈主体 对接焊接接头	100	100		—	—	—
	对罐壁的 角焊接接头	100	—	—	—	—	—

表 26 蒸发气容器壁板焊接接头射线照相/超声波检验范围

检验类型	焊接接头		
	纵向焊接接头 %	T 字形 %	环向焊接接头 %
射线或超声检测	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%的射线照片应竖直放置的情况下拍摄。

5.7.4 目视检测

目视检测应符合 NB/T 47013.7 的规定,检查焊道、形状和尺寸,包括焊接接头、板材、在制造和建造过程中安装在罐体上的接管和所有附件上的表面缺陷。

目视检测应在其他无损检验或试验之前进行。

5.7.5 渗透检测



渗透检测应符合 NB/T 47013.5 的规定。

在特定检验中使用的所有渗透检测产品应是相容的。

应确保渗透检测产品对将要进行检查的项目无污染风险和无存储风险。

5.7.6 磁粉检测

磁粉检测应符合 NB/T 47013.4 的规定。

所使用磁粉检测方法不对被检验部分通入电流。应使用在被检验部分形成封闭磁路的可移动电磁铁。

宜规定使用的检查程序、设备以及探测和消除缺陷的方法。

程序应指明表面质量的要求。

9%镍钢不应使用磁粉检测方法。

5.7.7 真空箱检测

真空箱检查应符合 NB/T 47013.8 的规定。

板材应清洁,焊接接头应除去油污和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:

- a) 高润湿力;
- b) 低黏性;
- c) 低表面张力;
- d) 高发泡能力。

5.7.8 氨或氦渗漏试验

应进行氨或氦渗漏试验,宜符合 NB/T 47013.8 的规定。

5.7.9 肥皂液检查

5.7.9.1 概述

压力下的肥皂液检查宜符合 NB/T 47013.8 的规定。

5.7.9.2 罐壁与罐底之间的双面角焊接接头

罐壁与罐底之间采用双面角焊接接头时,应将压力不小于 50 kPa 的空气通过螺纹孔注入到角焊接接头之间的空间中,并应在检验期间保持该压力。肥皂液应使用刷子或喷洒的方法涂撒到焊接接头上。在试验完毕后,应封闭螺纹孔。

两道角焊接接头之间的试验压力应在罐壁圆周上保持连续。

5.7.9.3 补强圈

在用肥皂液对补强圈焊接接头适度润湿后,应通过螺纹孔注入压力不小于 50 kPa 的空气。压力保持时间不应少于 30 s。在试验完成后,应封闭螺纹孔。

5.7.9.4 罐顶

在钢质顶气压试验后,应使用肥皂液润湿外部角焊接接头。在检验期间应保持设计压力。

5.7.10 射线检测

射线检测应符合 NB/T 47013.2 的规定,技术等级不低于 AB 级。

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 NB/T 47013.2 的规定。

射线照相底片的长度宜为 400 mm。

图像质量指示器应符合 NB/T 47013.2 的规定。

焊接接头的底片应加以标记。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和底片在罐体上的位置。

9%镍钢对接焊接接头应使用双底片技术进行射线检测。

底片的存档应满足建设单位当地档案部门的相关管理要求。

5.7.11 超声检测

超声检测应符合 NB/T 47013.3 的规定,技术等级不低于 B 级,其中主容器和次容器技术等级为 C 级。

在用超声检测代替射线检测的位置,应采用标准化、永久记录且可重复的程序,可参考 SY/T 0608—2014 附录 U 的规定。

5.7.12 验收

5.7.12.1 射线检测

焊接接头缺陷的验收标准不应低于 NB/T 47013.2 的 II 级规定。

5.7.12.2 超声检测

在使用超声检测替代射线检测的地方,焊接接头缺陷的验收标准不应低于 NB/T 47013.3 的 I 级规定。

对 9%镍钢和奥氏体不锈钢进行超声检测时,应编制专门程序。

5.7.13 焊接接头不合格缺陷

当发现不合格缺陷时,应进行焊接接头修补,并应扩大无损检测的范围。

在原区域的每一侧应再进行一次射线检测,或 1 m 长的超声波检测。

若追加射线或超声波检测中有一处不合格,则应对当天出现问题的焊工所焊的全部焊接接头进行检测。

5.7.14 研磨后可接受的局部变薄

若探测到表面缺陷,应通过研磨的方法彻底将表面缺陷去除,然后应对表面进行进一步检测,确认缺陷完全清除。

相对原厚度的局部板材变薄,应满足下列要求:

- a) 在边长为 6 倍板厚的正方形范围内,研磨后的最终壁厚不应小于所订购板材厚度的 95%;
- b) 任意两个打磨区域边缘之间的距离不应小于最大打磨区域的外接圆的直径。

5.8 气压升顶

5.8.1 一般要求

气压升顶前应配置安全防护设施。

施工前确认下列工序完成并检查合格:

- a) 穹顶组装焊接;
- b) 铝吊顶组装焊接;
- c) 抗压圈/抗压环组装焊接;
- d) 施工单轨和保冷单轨组装焊接;
- e) 径向梁与临时支撑不应连接;
- f) 预应力混凝土外罐壁几何尺寸允许偏差符合 GB 50204 的规定。

5.8.2 气压升顶系统

气压升顶系统应包含风机系统、平衡系统、密封系统和监测系统。

风机系统应满足钢穹顶平稳上升所需的风量和压力,且具有风量调节功能,并应设置备用风机。

为防止顶升过程中钢穹顶发生偏移和失稳,宜设置钢穹顶稳定平衡系统,平衡系统应包括导向绳索、导向滑轮、固定索架以及配重物。

a) 导向绳索宜采用整根钢丝绳制作,中间不应有接头以及破损。

b) 升顶前所有导向绳索均应张拉完毕,每根导向绳索的张拉力宜保持一致。

监测系统包含压力监测和平衡系统,压力监测应分别在最高点和最低点各设置一组气压计,平衡检测应在罐顶四个对称角度位置采用测距工具测量钢穹顶到抗压圈之间的距离。

5.8.3 过程控制

施工前,应检查施工准备工作符合升顶要求。

钢穹顶上升过程中应保持平衡状态,水平偏差宜控制在 200 mm 之内。

钢穹顶上升速度不宜大于 450 mm/min。

钢穹顶即将到达预定高度时,应调整钢穹顶与抗压圈之间的水平偏差不应大于 50 mm,两者定位焊接的过程中应保持足够的平衡压力。

抗压环与钢穹顶采用工装固定后,进行对称焊接。焊接完成后,焊接接头需进行真空检测。

6 混凝土构件

6.1 材料

6.1.1 混凝土

混凝土材料设计、施工和验收标准应符合 GB 50010、GB 51081 和 GB 50204 的规定。

6.1.2 预应力钢材与钢筋

6.1.2.1 预应力系统

预应力系统应符合 GB 50010 的规定。

预应力钢绞线应为符合 GB/T 5224 规定的低松弛型,应按照 GB/T 14370 的规定进行低温配型试验。

预应力锚固系统的锚板、锚垫板和夹片应符合 GB/T 14370 的规定。

预应力导管和导管套管宜采用镀锌金属波纹管,其材质应符合 JGJ/T 225 和 GB/T 2518 的规定。

预应力灌浆料应符合 GB/T 50448 的规定。

6.1.2.2 钢筋

6.1.2.2.1 普通钢筋

储罐罐体结构的钢筋应符合 GB 50010 的规定。

6.1.2.2.2 低温钢筋

低温钢筋应符合 GB 51156—2015 和 YB/T 4641 的规定。

低温钢筋的螺纹机械连接套筒机械等级应为 I 级,应进行低温拉伸试验。

低温钢筋布置在混凝土外罐内侧受低温作用的部位。

6.2 荷载组合

6.2.1 通则

设计荷载组合应符合 4.4 的要求。应使用分项系数法和极限状态理论,确保混凝土构件的可靠性。荷载设计值、荷载影响和几何参数等应符合 GB 50010 的规定。

6.2.2 各种荷载的分项系数和荷载组合

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—2015 的规定。

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—2015 的规定。

除了满足 4.4 的要求之外,偶然作用下的分项荷载系数见表 27。

表 27 偶然作用的分项荷载系数

荷载组合	荷载系数					风荷载	偶然荷载
	永久荷载		可变荷载				
	不利	有利	不利	有利			
正常荷载加上一个偶然荷载	1.05	1.0	1.05	1.0	0.3	1.0	

6.3 设计要求

6.3.1 预应力

预应力系统的设计应符合 GB 50010 和 JGJ 369 的规定。

预应力混凝土罐壁,应对其施加水平预应力和竖向预应力,也可采用斜向预应力的形式。

预应力张拉最大应力宜为预应力钢绞线屈服强度的 75%,不应超过预应力钢绞线屈服强度的 80%。

6.3.2 罐壁设计

预应力混凝土外罐的抗震设防分类应为乙类。

预应力混凝土外罐的混凝土应采用低温环境混凝土,并应符合 GB 51081 的规定。

钢筋的保护层厚度应符合 GB 50010 和 GB/T 50046 的规定。

低温钢筋布置原则应符合 GB 51156—2015 中 7.3.4 的规定。

罐壁最小受压区高度,取 100 mm 和 10%罐壁宽度的较大值,残余压应力不小于 1 MPa。

6.3.3 裂缝控制

桩和桩帽应在适用性极限状态下进行裂缝宽度校核,裂缝宽度应小于 0.2 mm。

各阶段各部位裂缝计算要求应符合表 28 的规定。

表 28 裂缝要求

单位为毫米

工况情况	承台裂缝	墙体裂缝	穹顶裂缝
施工、试验阶段	<0.3	<0.2	<0.3
运行阶段	<0.3	<0.2	<0.3

6.3.4 钢质罐顶衬里

衬里应牢固地锚固到混凝土罐顶,其表面应设置剪力螺栓。

6.3.5 钢绞线束位置

竖向预应力钢绞线束宜布置在混凝土墙体中央位置,水平预应力钢绞线束布置在竖向预应力钢绞线束外侧。

在储罐的整个设计使用年限中,应有效地防止钢筋腐蚀。

在外部火灾条件下,预应力系统应保持外罐承载力不失效。

6.3.6 混凝土保护层

保护层厚度应符合 GB 50010 和 GB/T 50046 的规定。

6.3.7 最小配筋面积要求

最小配筋面积应符合 GB 50010 的规定。

6.4 施工要求

混凝土施工前应开展专门的混凝土配合比设计。

在施工计划中,应充分考虑新、旧施工界面之间的温度差异和环境温度等因素对混凝土结构的影响。

6.5 衬里

6.5.1 通则

应在混凝土内表面安装钢制衬里,以确保混凝土外罐的液密性。

6.5.2 衬里

钢制衬里材料的最低设计温度不应高于最低环境温度,且钢板最小厚度不应小于 3 mm。

衬里设计时应充分考虑金属材料在低温状态下产生的收缩变形以及混凝土的徐变造成的长期形变。

预埋件锚固系统的设计应考虑剪力和拉力的组合。

6.5.3 热角保护

应充分考虑内罐介质液压、蒸发气压力以及混凝土和钢板徐变与收缩的影响。

TCP 顶部的高度应比罐底临时施工开口高 500 mm 以上。

7 绝热构件

7.1 概述

低温液化气储罐中绝热构件的主要作用包括：

- a) 保持日蒸发率低于特定的限度；
- b) 保护储罐的非低温部件/材料(主要是储罐外部),使其处于所要求的环境温度下；
- c) 限制储罐底部的基础/土壤冷却,避免因冻胀而损坏；
- d) 防止和尽可能减少储罐外部表面的水蒸气冷凝和结冰。

7.2 绝热材料的设计、性能、测试和选择

7.2.1 一般要求

应基于以下内容选择适当的绝热系统和绝热材料：

- a) 设计要求分析(见 7.2.2)；
- b) 材料性能特性评估(见 7.2.3)；
- c) 常见绝热材料,见附录 C。

7.2.2 设计要求分析

7.2.2.1 一般要求

绝热系统无论作为一个整体还是各个单独的构件,都应考虑以下设计要求。

7.2.2.2 热阻性能

应考虑绝热系统在正常工况和事故工况下的热阻性能。

- a) 正常工况,应考虑导致绝热系统漏热的所有因素,包括但不限于:
 - 1) 产品温度；
 - 2) 外部温度和其他气候条件,包括太阳辐射、风、湿度等；
 - 3) 导热系数,绝热材料老化可引起性能下降,应考虑安全裕度；
 - 4) 热对流；
 - 5) 热辐射；
 - 6) 因冷桥产生的漏热。
- b) 事故工况,应考虑:
 - 1) 要求的热阻性能、各绝热构件的技术规定和设计事故工况的持续时间；
 - 2) 在这些条件下绝热层的热阻性能。

7.2.2.3 结构

绝热系统的设计应符合以下结构要求：

- a) 各方向上静态和动态的荷载；
- b) 液密性(如要求)。

7.2.2.4 其他

除上述热阻性能和结构要求外,储罐的绝热设计应满足所有特定设计要求,根据具体情况逐项

明确。

7.2.3 材料性能评估

7.2.3.1 一般要求

在分析设计要求的基础上,应确定绝热材料在操作温度范围内的性能要求。至少应考虑以下规定的内容。

7.2.3.2 绝热材料的热阻性能

应考虑下列因素:

- a) 导热系数:
 - 1) 在要求的温度范围;
 - 2) 在储罐的外部和内部环境中;
 - 3) 考虑整个储罐设计使用年限内的老化效应;
- b) 可能因辐射产生的漏热;
- c) 可能因对流产生的漏热;
- d) 因冷桥产生的漏热。

有关热阻性能的检测,见附录 D。

7.2.3.3 绝热材料的力学性能

应考虑下列因素:

- a) 绝热材料在短期和长期荷载作用下的压缩性能;
- b) 绝热材料在可能受到横向力作用下的拉伸和剪切性能,也宜考虑热固耦合对拉伸性能的影响;
- c) 通过粘结安装的绝热系统的粘结强度。

有关力学性能的测定,见附录 D。

7.2.3.4 绝热材料的耐温性能

绝热材料应能够承受最高和最低操作温度和可能遇到的温度变化。为确定材料的收缩、膨胀和可能出现的开裂,应考虑下列因素:

- a) 热膨胀、收缩系数;
- b) 设计温度范围内的抗拉强度、弹性模量。

有关耐温性能的测试,见附录 D。

7.2.3.5 绝热材料的耐水和水蒸气性能

在评估水和水蒸气可能对绝热材料产生的负面影响时应考虑以下性能:

- 闭孔率;
- 水蒸气的渗透率;
- 吸水率。

应对水和水蒸气渗透产生的影响进行评估:

- 热阻性能的降低;
- 水或者冻结过程可能对绝热层产生的结构性损坏。

有关水和水蒸气的渗透性检测,见附录 D。

7.2.3.6 储存产品的影响

应评估以下特性：

- a) 闭孔率；
- b) 产品蒸发气的吸收和对绝热材料其他性能的影响；
- c) 对液体产品的吸收能力和渗透能力；
- d) 长期吸收液体对材料其他性能方面的影响；
- e) 解吸情况：时间/百分比。

产品存在时材料性能的检测，见附录 D。

7.2.3.7 化学性质

7.2.3.7.1 化学反应兼容性评估

应根据以下可能会发生的化学反应之间的兼容性进行评估：

- a) 绝热系统，包括：
 - 1) 绝热材料；
 - 2) 辅助材料，包括涂料、粘结剂、玛蹄脂、密封剂、涂层等；
 - 3) 保护层，包括包覆层和捆扎件等；
- b) 所处环境：
 - 1) 外部绝热：环境条件、水、水蒸气、空气和水中的污染物；
 - 2) 内部绝热：产品蒸发气和液体，惰性气体/置换气体；
- c) 与绝热系统接触的储罐材料和涂层。

7.2.3.7.2 化学特性评估

应对以下典型的化学特性进行评估：

- a) 外部绝热：
 - 1) 应在可以模拟现场环境的条件下评估绝热系统自身或其部分的抗腐蚀性能；
 - 2) 绝热材料的防腐或腐蚀特性；
- b) 内部绝热：
 - 1) 绝热系统对储罐中产品蒸发气/液体的耐化学性；
 - 2) 绝热层对储罐中储存的产品呈惰性。

有关化学特性评估的方法，见附录 D。

7.2.3.8 耐火性能

应考虑下列方面：

- 施工过程中火灾风险；
- 外部起火时的反应。

因此，应考虑下列性能：

- a) 耐火性能：
 - 1) 可燃性；
 - 2) 防火特性；
 - 3) 有毒气体产生；

- b) 材料的最高温度限制: 熔化温度, 分解温度, 燃点温度;
 - c) 绝热层的防火性。
- 防火性和对火的反应的评估方法, 见附录 D。

7.2.4 绝热材料和绝热系统测试

7.2.4.1 一般要求

绝热材料的性能特征, 应通过以下方面证明:

- a) 实验室测试;
- b) 绝热系统的实物模型测试;
- c) 对完成安装的储罐绝热系统进行测试, 可提供有限元计算作为补充资料。

7.2.4.2 测试方法

有关绝热材料/绝热系统的工作性能试验方法, 见附录 D。产品的其他测试, 包括密度测量、尺寸规格等, 可由绝热材料供应商提供。

7.2.5 主要绝热材料验收

低温液化气储罐主要绝热材料的验收宜满足 SY/T 7349 的要求。泡沫玻璃砖、膨胀珍珠岩粉末、玻璃棉、弹性毡和沥青毡等绝热材料的具体验收要求, 见附录 E。

7.3 绝热保护-隔气层

7.3.1 一般要求

由于绝热系统并非储罐的一个自支撑构件, 绝热系统由绝热材料、绝热保护层和固定系统组成, 应固定、安放、装填于构件之间或由其他构件(混凝土和钢结构)支撑。

应保护绝热材料以避免各种可能的退化和损坏, 包括:

- a) 机械损坏;
- b) 雨、雪等造成的浸入;
- c) 其他气候因素引起的浸蚀, 包括风、冰雹、紫外线等;
- d) 水蒸气渗透形成浸水和结冰;
- e) 火灾损害。

7.3.2 外罐形成的防护结构

外罐给绝热材料提供了保护和支撑时, 应确保外罐的密闭性。

应采取必要措施确保水蒸气和产品蒸发气不能透过混凝土层。

水蒸气和产品蒸发气的密闭性应通过选用金属衬里或聚合物隔气层实现。

7.3.3 外部绝热材料的保护层

绝热材料安装于储罐外部时, 应为绝热材料提供适当的绝热保护层。绝热保护层应保护绝热材料的质量、效率和寿命免受所有不利因素的影响。

应考虑下列因素:

- 天气因素: 水蒸气、雨、雪、冰雹、风、暴风雨、日光辐射、紫外线;
- 其他大气因素: 污染、腐蚀;

——人为或鸟类等引起的机械损坏；

——火灾损害。

对于大多数的绝热系统，绝热材料外应安装有效的隔气层，以消除水蒸气的渗透或使其渗透最小化。这种隔气层可以单独设计，也可作为防护层的一部分。

在工程所在地的平均水蒸气分压下，隔气层 24 h 的最大渗透率应不超过 0.5 g/m^2 。

外罐绝热的防护层和隔气层应为以下三种类型之一：

- a) 金属；
- b) 非金属；
- c) 金属和非金属的组合。

若某种绝热系统本身可充分证明能够保持水蒸气不渗透，则不需要隔气层。

7.4 绝热系统设计

7.4.1 一般要求

绝热系统设计除了需要确保蒸发气的日蒸发率满足储罐设计要求外，同时设计时需确保储罐非低温部件和材料处于所要求的环境温度下，防止储罐底部的基础因冻胀而损坏，减少储罐外表面出现水蒸气冷凝和结冰。

7.4.2 承载绝热材料

7.4.2.1 一般要求

以下储罐绝热构件应考虑承受压缩荷载：

- a) 所有类型储罐的罐底绝热系统；
- b) 薄膜罐的罐底和墙体；
- c) 罐底和墙体间的 TCP。

7.4.2.2 脆性材料许用应力

脆性材料公称抗压强度 σ_n 和计算压缩应力之间的最小强度安全系数应为：

正常操作：3.00

水压试验：2.25

OBE：2.00

SSE：1.50

脆性材料公称抗压强度 σ_n 应由以下条件决定：

- a) 抗压强度应按照 GB/T 13480 测量，测量结果为最大抗压强度，用符号 σ_m 表示；
- b) 足够数量的测试结果的统计平均值，称作这种材料的公称抗压强度，用符号 σ_n 表示。

除公称抗压强度，同时应规定抗压强度下限值（平均值减去两倍的标准差）。若此值低于 σ_n 的 67%，那么， σ_n 值应调整为规定的下限值的 1.5 倍。若证明材料不受蠕变影响，则不要求对其做蠕变试验。

7.4.2.3 易蠕变材料许用应力

应根据以下两个准则确定材料的许用荷载 P_{LD} 。

- a) 短期压缩试验：

- 1) 短期压缩试验中的公称抗压强度 σ_n ；
抗压强度应按照 GB/T 13480 测定，结果表示为最大抗压强度 σ_m 或 10% 变形时的压应力 σ_{10} ；
易蠕变材料的公称抗压强度 σ_n 应按这类试验得到的足够数据统计的平均值计算；
- 2) 除了公称抗压强度，同时应提供规定的抗压强度下限值（平均值减去两倍的标准差）。若此值低于 σ_n 的 67%，那么， σ_n 值应调整为规定的下限值的 1.5 倍。

b) 压缩蠕变试验：

压缩蠕变应按照 GB/T 32983 进行测量。

蠕变试验使用的压应力 σ_i 应在上述公称抗压强度 σ_n 的有效范围内选择，然后用该值乘以假定的许用荷载系数 f_{PLDF} 。承重的聚氨酯泡沫 PUF 材料，许用荷载系数 f_{PLDF} 可采用 0.30。

对每一特定的材料，许用荷载系数 f_{PLDF} 应通过反复蠕变试验，使用试凑法测定，应根据材料的物理结构和（或）现有数据假设许用荷载系数 f_{PLDF} 。

为了验证此假设值的准确性，蠕变试验时的压应力应等于 $\sigma_n \times f_{PLDF}$ 。

蠕变试验应确认，在试验数据变化趋势外推到储罐设计使用年限的压应力下，绝热材料的蠕变不应大于材料的蠕变比例极限和材料厚度的 5% 二者中的较小值。

若蠕变测试得到确定的结果，则该材料的许用荷载系数 f_{PLDF} 应予以使用。

若初始蠕变测试表明蠕变高于设定的限度，则该材料应在较低压应力下重新测试，直到确定该材料的正确许用荷载系数 f_{PLDF} 。许用荷载 P_{LD} 按照公式(23)计算：

$$P_{LD} = \sigma_n \times f_{PLDF} \quad \dots\dots\dots(23)$$

许用荷载 P_{LD} 和计算压缩应力之间的最小安全系数应为：

- 正常操作： 1.25；
- 水压试验： 1.00(持续时间 ≤ 1 个月)；
- OBE： 由材料供应商提供(PUF 和 PVC 材料，可使用 0.50)；
- SSE： 由材料供应商提供(PUF 和 PVC 材料，可使用 0.33)。

7.4.2.4 承载绝热材料极限状态

基于极限状态的承载绝热设计，见附录 F。

7.4.2.5 其他荷载

当储罐绝热层受到垂直和水平组合力时，将产生剪应力，地震作用时罐底将承受剪应力。

绝热层也应考虑热量、变形等其他荷载。

应针对每种特殊情况确定产生的应力。

许用应力理论和极限状态理论两者的安全系数都应根据具体情况确定。

7.4.3 承压环梁

7.4.3.1 结构设计

环梁部分宜由钢筋混凝土或珍珠岩混凝土砌块与高强度泡沫玻璃砖组成，或由珍珠岩混凝土砌块单独构成，结构设计应考虑：

- a) 横向力(储罐收缩、地震)；
- b) 罐壁可能发生的位移(进液/排放、地震)；
- c) 环梁的防水和隔气层。

7.4.3.2 热工设计

在可能的情况下,环梁的热工设计应结合基础底板加热系统一起考虑。设计时应最大限度地减小/避免支承环梁下出现“冷点”。由筏板基础支撑的基础底板,基础以下的温度不应低于 0℃。

7.4.3.3 穿过环梁的竖直锚固系统

应考虑以下各项:

- a) 减少冷桥效应;
- b) 防止水/水蒸气侵入;
- c) 锚固系统应具有一定柔性。

7.4.4 罐底绝热

7.4.4.1 结构设计

结构设计应考虑以下几点:

- a) 基础底板的平整度;
- b) 各绝热层的平整度;
- c) 沥青毡材料用来提高承载以及荷载传递能力,需考虑一定的设计厚度;
- d) 防水层和隔气层;
- e) 如要求,应考虑置换装置;
- f) 如要求,应设置 TCP。

全容罐罐底绝热层一般由找平层、泡沫玻璃绝热层以及沥青毡中间层组成,找平层可采用混凝土或干砂。泡沫玻璃绝热层间、最下找平层与泡沫玻璃绝热层间的沥青毡应采用对接结构,对接缝要平整。最上找平层与泡沫玻璃绝热层、现场浇筑的环梁与泡沫玻璃绝热层间的沥青毡应采用搭接并密封。

7.4.4.2 热工设计

底部绝热层的厚度应根据规定的最大总漏热量和尽可能少的冷凝/结冰的要求来确定,还应结合墙体和罐顶的绝热联合设计。

应避免罐底的冻胀。

7.4.5 罐壁绝热(外部)

7.4.5.1 结构设计

结构设计应考虑以下几点:

- a) 储罐和锚固系统的尺寸变化在绝热层上产生的热应力;
- b) 应考虑在下列荷载下罐壁周围固定绝热材料的方法和强度:
 - 1) 自身荷载;
 - 2) 风荷载;
 - 3) 太阳辐射、雨、雪、冰产生的影响;
- c) 隔气层的组合与保护。

全容罐环形空间绝热系统宜采用弹性毡加膨胀珍珠岩粉末结构。弹性毡应悬挂在内罐壁顶部,并宜采用保冷钉进行固定。最外层弹性毡宜设置带加强铝箔的覆面层。

7.4.5.2 热工设计

绝热层的厚度应根据规定的最大总漏热量和尽可能少的冷凝/结冰的要求来确定,还应结合罐底和罐顶的绝热统一设计。

应根据当地环境,包括邻近设施、管道等,规定罐壁外绝热层的耐火性能。

热工设计需考虑施工存放对材料、系统的影响,包括:

- a) 选择合适的绝热系统以承受指定地点的外部气候环境和大气条件,从而达到规定的绝热设计寿命;
- b) 在选择绝热材料和绝热系统的过程中应考虑绝热层工作期间预计的天气条件。

7.4.6 罐壁/墙体绝热(内部)

7.4.6.1 热工设计

罐壁绝热层的厚度应根据规定的最大总漏热量和尽可能少的冷凝/结冰的要求来确定,还应结合罐底和罐顶的绝热统一设计。在某些情况下,绝热厚度应由工程经验来决定(疏松的填充绝热材料)。

全容罐内罐壁以上的环形空间应设置柔性珍珠岩挡墙。内罐高度以上的膨胀珍珠岩超填量不宜小于环形空间容积的5%。罐顶珍珠岩填充口间距宜为2 m~4 m,可设置运营期再填充阀门等设施。

7.4.6.2 固定于外罐内表面的绝热材料

应考虑下列各项:

- a) 在确定外罐壁内表面安装绝热材料的方法和罐壁强度时:
 - 1) 绝热材料自身荷载;
 - 2) 热应力;
- b) 外罐壁的收缩/膨胀;
- c) 绝热系统的气密性和液密性;
- d) 环形空间内绝热层的耐化学性。

7.4.6.3 固定于内罐壁外表面的绝热材料

应考虑下列各项:

- a) 应考虑在内罐壁安装绝热构件的方法和罐壁强度:
 - 1) 绝热材料自身荷载;
 - 2) 热应力;
- b) 内罐壁的收缩/膨胀;
- c) 绝热系统的水蒸气气密性。

7.4.6.4 环形空间内疏松填充的绝热材料

应考虑下列各项:

- a) 因内罐和可能的的外罐尺寸变化而施加在绝热材料上的热应力;
- b) 内罐上的外部压力:此压力由于内罐的循环荷载或由于可能发生的停运(膨胀)而增加,可通过弹性毡降低此压力,应通过试验或计算的方式来验证内罐的假设压力可靠;
- c) 珍珠岩沉降是无法避免的,在安装过程中通过振动的方法可以降低珍珠岩发生沉降的幅度,同时在储罐设计中,应考虑设置珍珠岩补充口,利用珍珠岩补充口进行补填珍珠岩。

7.4.6.5 其他设计注意事项

应考虑下列各项：

- a) 在正常操作或泄漏的情况下绝热层对产品的吸收/解吸；
- b) 可能需要置换绝热材料。

7.4.7 罐顶绝热(外部)

应考虑下列各项：

- a) 罐顶绝热层的厚度应根据规定的最大总漏热量和尽可能少的冷凝/结冰的要求来确定；
- b) 应包括保护层和隔气层；
- c) 适合承受选定地点的外界气候环境和大气条件；
- d) 罐体的尺寸变化产生并作用于绝热层上的热应力；
- e) 适合设置检修通道和维护工作；
- f) 防火性能要求。

7.4.8 吊顶上的罐顶绝热

吊顶绝热系统宜选用玻璃棉毡铺叠,也可采用膨胀珍珠岩粉末充填。吊顶绝热系统应保证绝热层沉降后的厚度不小于设计厚度。

罐顶和吊顶板间的低温管线可采用玻璃棉毡绝热。有内部支撑的低温管线,支撑隔断部分可采用硬质绝热材料。低温管线绝热层外宜用金属铝箔或玻璃纤维布包覆。

应考虑下列各项：

- a) 根据规定最大总漏热量和尽可能少的冷凝/结冰的要求,确定罐顶绝热层厚度；
- b) 应专门布置临时通道,包括人行横道等；
- c) 热工设计不仅要考虑所选择绝热材料的导热系数,而且还要考虑到通过对流、冷桥等可能产生的漏热；
- d) 绝热层可能会发生沉降(收缩)。

7.4.9 不同类型储罐的设计

不同类型的储罐,因设计要求不同,绝热系统的设计也不应相同。

作为储罐和绝热设计的一部分,对特定选择的储罐类型的所有设计要求具体情况具体分析。

7.5 绝热系统的安装



7.5.1 一般要求

储罐绝热系统的安装应符合以下要求：

- a) 储罐绝热施工单位应具有相应的资质和能力,绝热施工前应编制详细的绝热施工工艺方案,在指定储罐施工方法和绝热系统安装时,应采取保护绝热材料不受损害的措施；
- b) 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,其规格、性能等技术指标应符合相关技术标准和设计文件的规定；
- c) 绝热材料在运输和存放过程中,应采取防止发生物理性能变化、化学性能变化或其他质量降低的措施；
- d) 对有防腐处理的储罐,其表面的防腐保护应在绝热系统施工开始前完成；

- e) 绝热系统施工和修补应避免损害防腐层；
- f) 绝热施工完成后,应按相关技术文件进行检验和验收；
- g) 绝热材料在安装前应储存在干燥通风的库房内,防止受潮；
- h) 绝热材料在安装前应清扫安装基面,保持清洁、干燥；
- i) 不应安装有缺陷的绝热材料。

7.5.2 储罐绝热系统施工

低温液化气储罐的施工安装和验收宜满足 SY/T 7349 的要求,储罐绝热系统的具体施工安装要求见附录 G。

7.5.3 损坏防护

应保护绝热材料不受以下因素损坏：

- 机械损坏；
- 潮气、水和其他气候因素；
- 火灾。

储罐施工方法和绝热系统安装方法应充分考虑上述风险,并且在以下工作中采取适当的措施：

- 储罐设计；
- 绝热系统详细设计；
- 储罐施工顺序；
- 绝热材料安装后的防护性措施。

7.5.4 检验和测试

应结合设计要求和绝热设计依据的性能特征制定详细的检验和测试计划。

相关材料性质的性能检测方法,见附录 D。

与材料性质无关的性能,应按照制造商规定的方法进行符合性检测。

8 试验、干燥、置换和冷却

8.1 水压试验和气压试验

8.1.1 水压试验

8.1.1.1 一般规定

储罐应进行水压试验,应通过水压试验证明。

- a) 设计和建造完工的储罐能够装存介质(无泄漏)；
薄膜罐焊接工作完成之后,应进行氨或氦检漏试验。应在薄膜罐上开设基准孔,保证检查顺利进行。封闭所有泄漏点以后,再进行试验。储罐内侧的涂剂应采用真空清理的方法清除。
- b) 基础能够承受储罐内介质产生的荷载。

8.1.1.2 各种类型储罐的试验要求

不同类型的储罐应按照表 29 进行水压试验。

薄膜罐内罐无法进行水压试验,为了保证基础能够支撑储罐和液体,并保证储罐完整性,在内罐安

装前宜对外罐进行水压试验。

应准备一份技术要求,包括所有要进行的试验工作。试验结果应以文件形式记录下来。

表 29 水压试验要求

介质	单容罐	双容罐	全容罐	薄膜罐
丁烷、丙烷和丙烯	储罐 全高度水压试验	内罐 全高度水压试验	内罐 全高度水压试验	—
		钢外罐 不试验	钢外罐 不试验	—
		外罐 (预应力混凝土) 不试验	外罐 (预应力混凝土) 不试验	外罐 (预应力混凝土) 部分高度水压试验
乙烷、乙烯和 LNG	储罐 部分高度水压试验	内罐 部分高度水压试验	内罐 部分高度水压试验	—
		钢外罐 不试验	钢外罐 不试验	—
		外罐 (预应力混凝土) 不试验	外罐 (预应力混凝土) 不试验	外罐 (预应力混凝土) 部分高度水压试验

8.1.1.3 附加要求

应符合下列附加要求:

- a) 部分高度水压试验中,内罐试验液位不应小于 1.25 倍的最高设计液位乘以液体的设计密度;
- b) 罐壁和罐底上的所有附件焊接就位后,方可进行水压试验,水压试验之后不应再焊接;
- c) 采用膨胀珍珠岩做绝热材料的储罐,应在膨胀珍珠岩填充之前进行水压试验;
- d) 应保证水质不会对钢部件或混凝土产生损害。

8.1.1.4 水质

充水试验应采用工业洁净水,水温应高于 5 °C;当采用海水时,应采取防腐蚀措施。

应证明试验用水的适用性。应考虑可能出现的腐蚀。

宜对阴极保护的需求进行研究,防止电化学腐蚀和减少一般性腐蚀。阴极保护促使阴极反应,若同时存在 H₂S,在缺氧(在沉淀物下面)条件下将产生氢气,从而增加氢致裂纹产生的危险。

设计阴极保护系统时,应考虑避免出现氢脆。

若水质不能满足要求,应考虑其他采用添加适当缓蚀剂的试验方法。

若采用海水,注水前宜对海水的 pH 值、硬度、碱度、氯离子含量、氢硫化物含量、微生物等的情况进行取样检测。海水应符合 GB 3097 或 GB/T 23248 的规定。

采用海水作为试验介质时,宜设置阴极保护或其他措施。不锈钢储罐不应用海水作为试验介质。

应考虑并研究排放水对环境的影响。

8.1.1.5 实施条件

储罐内罐进行水压试验,应检查管道与内罐之间的支撑。

试验开始之前,应清理储罐。应去除焊缝上全部飞溅和焊渣,同时应除掉建造过程中遗留的材料、部件或临时安装的设施。

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足够的泄放能力,保证储罐试验正压和负压不大于设计中规定的压力。应使用水柱压力计测量压力。可以使用腐蚀缓凝剂。

8.1.1.6 充水过程检查

8.1.1.6.1 圆周检查

充水前,应在储罐外表面安装沉降观测点,沉降观测点应符合 GB 51156—2015 的规定。

双容罐和全容罐的内罐应制作标记,以便在观测外罐时,也能同时监测内罐的沉降。

应保证储罐的标记在储罐喷漆后依然可见或可用。

应在充水和排水过程中对储罐沉降进行监测。至少应在储罐注水前,储罐液位达到 1/4、1/2、3/4 试验液位高度时和达到试验液位高度时对储罐进行沉降和倾斜监测。

内罐充水液位达到试验最高液位至少保持 24 h 后方可记录沉降量。

充水过程中应保持内罐与大气相通。

充水高度不应超过设计文件的规定。

8.1.1.6.2 罐底面平整度检查

应采取措施以便监测储罐中心的沉降。可以使用测斜仪检测储罐沉降。

8.1.1.7 充水

应依据供水能力和设备条件以及底部土壤条件,确定充水速度。

储罐内的试验用水充满至最高液位后应至少保持 48 h,沉降观测时间宜为前 12 h 每 4 h 观测一次,12 h 后每 8 h 观测一次。在试验过程中,应对内罐所有焊接接头的严密性和罐体各部位的变形进行检查,充水到最高液位并保持 48 h 以后,内罐应无渗漏、罐体无异常变形。

位于敞口储罐试验液位以上的全部焊接接头,应采用真空箱试验检验其严密性。

若安装有锚固件,应在水位达到某个固定高度(至少达到试验液位 70%)对锚固件进行调整。

储罐沉降应符合 GB 51156—2015 的规定。

8.1.1.8 排水

排水过程中宜打开人孔,使罐内不会产生负压。

排水过程中宜进行罐内壁的清洗、清洁工作。在内罐里宜尽快使罐底干燥,无剩水现象,并进行内罐底的清洗、清洁工作。

宜用空气压缩机将其罐体内部剩水吹干,做到无积水遗留。

8.1.2 气压试验

8.1.2.1 正压试验

气压试验的试验压力不应小于 1.25 倍的储罐设计压力。气压试验之前内罐的试验用水可全部或部分排放。

应考虑下列试验要求。

- a) 应将安全阀开启压力调节至试验压力,或设置一套临时压力泄放系统,防止压力超过试验压力。当达到试验压力以后,应至少维持 30 min。之后将压力降低至设计压力。

- b) 试验条件下,应对所有焊缝进行肥皂液检漏试验。若焊接接头已做过真空检漏试验,可用外观检查代替肥皂检漏试验。
- c) 试验过程中,不应开展任何修补工作。修补工作应在试验后进行,并进行单独的真空箱检漏试验。
- d) 应降低压力并将安全阀开启压力调节至设计压力。安全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。

8.1.2.2 负压试验

负压试验的试验压力应等于储罐设计负压。一旦试验压力达到设计负压,立刻结束试验。负压试验宜在储罐内仍有水的状态下进行,防止罐底和 TCP 出现抬升现象。

应考虑下列试验要求:

- a) 应安装真空安全阀并将其开启压力调节至试验压力,或设置一套破真空系统,防止负压超过试验负压;
- b) 应封闭除真空安全阀之外的所有开孔,通过降低水位或使用空气抽气器达到试验所需负压;
- c) 应降低负压并将真空安全阀开启压力调节至设定压力,真空安全阀的设定压力应通过抽水或使用空气抽气器的方法予以校验;
- d) 试验合格后,应立即打开进气阀,使罐内部与大气相通,衬板应无异常变形。
实验过程中,应使吊顶通气孔保持开启状态。

8.1.2.3 排空检查

储罐处于常压状态下,完成排空、干燥、清理工序后(去除全部的残漏物和污泥,并清扫干净),应考虑下列试验要求:

- a) 若安装有锚固件,应再次检查锚固座的压紧程度;
- b) 向空罐内通入空气达到设计压力,若安装有锚固件,应对基础进行检查,是否出现抬升;
- c) 应检查罐底是否出现异常现象,并再次对所有底部焊缝进行真空箱试验;
- d) 若设置罐底接头,应对所有焊缝进行 100%外观检查、100%渗透试验或磁粉检测;
- e) 安装在混凝土外罐内表面上的金属衬里,应做外观检查。

8.2 干燥、置换和冷却

8.2.1 程序

应编制储罐干燥、置换和冷却的程序。置换和冷却应连续进行并应在程序中考虑当任意一个阶段出现中断时的应急方案。

8.2.2 干燥

储罐干燥后,罐内介质露点不应高于 20 °C,填充膨胀珍珠岩的环形空间的露点不应高于-10 °C,罐底绝热空间不做要求。

储罐干燥方案,应符合 SY/T 4114 的规定。

8.2.3 置换

应在低温液化气注入储罐之前,使用惰性气体对储罐进行置换。可采用氮气。

低温液化气储罐置换后,含氧量不大于 4%,罐底绝热空间含氧量不做要求。

应在关键部位(内罐罐底和罐顶,空顶空间和环形空间的底部)设置取样点。

全容罐,置换顺序宜为从内罐向环形空间进行,防止在内罐上受到向内的压力。

在冷却前,宜采用蒸发气置换氮气,防止可能出现的过冷现象。

低温液化气注入储罐时,将会产生大量的蒸发气。所有可能产生蒸发气的空间应安装足够能力的蒸发气排放装置(引至火炬或放空)。

8.2.4 冷却

应对主容器的冷却予以控制,防止冷却过程中出现较大的温差。应监控内罐或薄膜钢材的温度,使之保持在允许范围之内。

宜采用低温液化气进行冷却。

宜仔细考虑冷却工艺和设备的设计,防止钢板中出现较大的温差,从而产生较高的应力。

宜在储罐顶部设计一套带有喷淋装置的环形管路。宜根据操作压力和进料管线流量确定的冷却速度设计环形管路。

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

内罐的冷却速度应符合以下要求:

- 内罐的冷却速度为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,最大冷却速度不超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$;
- 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 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

薄膜罐的冷却速度应符合以下要求:

- 薄膜的冷却速度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,最大冷却速度不超过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$;
- 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 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

8.3 停运

应采取必要的措施保证储罐可以安全停运。应针对可能出现的停运工况制定操作规程。储罐停运时,应制定停运程序。

停运程序应与试运行程序相同,工序与试运行的正常工序相反。

当储罐泄漏或出现其他异常情况时,应采取措施确保储罐安全停运。

附录 A

(资料性)

中间加强圈设计示例

假如一个带固定罐顶的容器的直径为 48 m, 高度为 35 m, 有 14 圈高度为 2.5 m 的壁板, 壁板尺寸见表 A.1, 设计风速为 55 m/s。该容器需要设置多少圈加强圈, 如何确定这些加强圈的位置和尺寸?

表 A.1 壁板尺寸表

圈序	壁板高度 m	壁板厚度 mm	H_e m
1	2.5	9.0	2.5
2	2.5	9.0	2.5
3	2.5	9.0	2.5
4	2.5	9.5	2.184
5	2.5	9.5	2.184
6	2.5	9.5	2.184
7	2.5	10.0	1.921
8	2.5	10.0	1.921
9	2.5	10.5	1.700
10	2.5	11.0	1.514
11	2.5	11.0	1.514
12	2.5	11.5	1.355
13	2.5	11.5	1.355
14	2.5	11.5	1.355
			总计 $\sum H_e = 26.687$

计算可得 $V_w = 55, V_a = 6$, 因此 $K = 6.663$ 。

由此 $H_p = 6.663 \left(\frac{9^5}{48^3} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.869$ 。

鉴于 $5H_p < \sum H_e < 6H_p$, 因此需要 5 圈加强圈。

这些钢圈分别位于 $\frac{\sum H_e}{6}$ 、 $\frac{\sum H_e}{3}$ 、 $\frac{\sum H_e}{2}$ 、 $\frac{2\sum H_e}{3}$ 、 $\frac{\sum H_e}{6}$ 和 $\frac{5\sum H_e}{6}$ 即分别位于距等效罐壁顶端 4.448 m、8.896 m、13.344 m、17.791 m 和 22.239 m 的位置。

第一圈加强圈。第一圈加强圈位于壁厚最小的板上, 因此不需要做调整。剩余 4 圈加强圈位于壁厚不是最小的板上, 因此需要确定它们相对于实际罐壁顶端的位置。

第二圈加强圈。8.896 - 2.5 - 2.5 - 2.5 = 1.396 m, 因此该圈加强圈位于第四圈壁板上, 从罐壁顶端开始 $1.396 \left(\frac{9.5}{9.0} \right)^{\frac{5}{2}} + (3 \times 2.5) = 9.098$ m 的位置。

第三圈加强圈。13.344-2.5-2.5-2.5-2.184-2.184=1.476 m,因此该加强圈位于第六圈壁板上,从罐壁顶端开始 $1.476 \left(\frac{9.5}{9.0}\right)^{\frac{5}{2}} + (5 \times 2.5) = 14.190$ m 的位置。

第四圈加强圈。17.791-(3×2.5)-(3×2.184)-1.921=1.818 m,因此该圈加强圈位于第八圈壁板上,从罐壁顶端开始 $1.818 \left(\frac{10.0}{9.0}\right)^{\frac{5}{2}} + (7 \times 2.5) = 19.866$ m 的位置。

由于此加强圈与水平焊接接头的理想距离应在 150 mm 以内,因此它的位置需要进行移动。很明显,在本示例中该钢圈应移到距离壁板顶端 19.850 m 的位置。

因此,在等效罐壁上,该加强圈位于第八圈罐壁往下 $\frac{19.850 - (7 \times 2.5)}{\left(\frac{10.0}{9.0}\right)^{\frac{5}{2}}} = 1.806$ m 的位置。

因此,该加强圈在等效罐壁上的位置 = 17.791 - (1.818 - 1.806) = 17.779 m。

因此,剩余没有得到加强的等效罐壁 = 26.687 - 17.779 = 8.908 m。

由于 $\frac{8.908}{2} = 4.454 < H_p < 8.908$,因此,需要在 17.779 + 8.908/2 = 22.233 m 的位置再增设一圈加强圈。

第五圈加强圈。22.233-(3×2.5)-(3×2.184)-(2×1.921)-1.7-1.514=1.125 m,因此该圈加强圈位于第 11 圈壁板上,从罐壁顶端开始 $1.125 \left(\frac{11}{9}\right)^{\frac{5}{2}} + (10 \times 2.5) = 26.858$ m 的位置。

因此,这五圈加强圈应分别设在距离罐壁顶端 4.418 m、9.098 m、14.190 m、19.850 m 和 26.850 m 的位置,并采用 150 mm×90 mm×10 mm 的角钢圈。

注:第四圈加强圈也可以安装在距离罐壁顶端 20.150 m 的位置,此时罐壁在上述设计条件也可以保持稳定状态。

附 录 B
(资料性)
薄膜上的荷载

表 B.1~表 B.3 中列出的各项典型静荷载、周期荷载和偶然荷载。

表 B.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 B.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 ^a	根据罐体设计寿命和预计操作条件确定的周期数
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: ——每星期装载/卸载一次; ——每两年停止使用/启动一次。		
^a 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。		

表 B.3 偶然荷载

地震荷载(不考虑疲劳)	OBE SSE
-------------	------------



附 录 C
(资料性)
绝热材料

表 C.1~表 C.3 中列出了不同情况下使用的绝热材料。

表 C.1 单容罐和双容罐

材料	支承环	罐底 绝热层	罐顶		罐壁	
			外部	内部 (包括吊顶)	单层 钢罐外部	双层 钢壁罐
硬木	√	—	—	—	—	—
珍珠岩混凝土块/梁	√	—	—	—	—	—
轻质混凝土块/梁	√	—	—	—	—	—
钢筋混凝土	√ ^a	—	—	—	—	—
泡沫玻璃	√ ^b	√	√	—	√	√
膨胀珍珠岩	—	—	—	√	—	√
矿物棉毡	—	—	—	√	—	√ ^c
PVC	MD	—	√	—	—	—
	HD	√ ^b	√	—	—	—
PUF/PIR	ND BL-SPR-FIP	—	—	√	—	√
	MD BL-SPR	—	—	√	—	√
	HD BL-SPR	√ ^b	√	—	—	—
	GR BL	√ ^b	√	—	—	—
酚醛泡沫塑料	—	—	—	—	√	—
膨胀聚苯乙烯	—	—	—	—	√ ^d	—
挤压聚 苯乙烯	ND	—	—	—	—	√ ^d
	HD	—	√	—	—	—
注：“√”表示可以选用。						
^a 作为荷载分配板,置于底层绝热材料的上方。 ^b 可能需要使用荷载分配板。 ^c 在珍珠岩绝热层和内罐罐壁之间,矿物棉毡可以作为弹性毯使用。 ^d 仅适用于双容罐(有限的耐温性)。						

表 C.2 全容罐

材料	环梁	罐底 (正常 操作)	罐顶绝热		罐壁/墙体绝热 (正常操作)		热角保护	
			在吊 顶上	内罐 拱顶上	内部 空间内	壁的 内侧	无 9% 镍钢板	有 9% 镍钢板
硬木	√	—	—	—	—	—	—	—
珍珠岩混凝土块/梁	√	—	—	—	—	—	—	—
轻质混凝土块/梁	√	—	—	—	—	—	—	—
钢筋混凝土	√ ^a	—	—	—	—	—	—	—
泡沫玻璃	√ ^b	√	—	—	—	—	—	√
膨胀珍珠岩	—	—	√	√	√	—	—	—
矿物棉毡	—	—	√	√	√ ^c	—	—	—
PVC	MD	—	√	—	—	—	—	√
	HD	√ ^b	√	—	—	—	—	√
PUF/PIR	ND BL-SPR-FIP	—	—	—	—	—	—	—
	MD BL-SPR	—	—	—	—	—	√ ^d	√ ^d
	HD BL-SPR	√ ^b	√	—	—	—	√ ^d	√ ^d
	GR BL	√ ^b	√	—	—	—	—	√ ^d

注：“√”表示可以选用。

^a 作为荷载分配板,置于底层绝热材料的上方。

^b 在荷载分配板下面使用。

^c 在珍珠岩绝热层和内罐壁之间,矿物棉毡可以作为弹性毯使用。

^d 只适用于喷射、无接缝、气密性、液密性系统的特定等级。

表 C.3 薄膜罐



材料	罐底绝热	墙体绝热	罐顶绝热		热角保护
			吊顶	拱顶内部	
硬木	—	—	—	—	—
泡沫玻璃	—	—	—	—	—
膨胀珍珠岩	—	—	√	—	—
矿物棉毡	—	—	√	—	—

表 C.3 薄膜罐 (续)

材料		罐底绝热	墙体绝热	罐顶绝热		热角保护
				吊顶	拱顶内部	
PVC	MD	√	√	—	—	√
	HD	√	√	—	—	√
PUF/PIR	ND BL	—	√ ^a	—	√	—
	MD BL	—	√	—	—	√
	HD BL	√	√	—	—	√
	GR BL	√	√	—	—	√
注：“√”表示可以选用。						
^a 仅适用于墙体顶部。						



附 录 D
(资料性)
绝热材料检测方法

表 D.1~表 D.7 给出了绝热材料性能检验。

表 D.1 热阻性能检测

性能	检测条件	检测方法
导热系数	常温下的测量 a) 新材料; b) 在规定条件下老化后; c) 在储罐操作条件下老化后,例如: 1) 产品蒸发气; 2) 液体产品	GB/T 10294 或 GB/T 10295
	常温下的测量 ^a a) 新材料; b) 在规定条件下老化后; c) 在储罐操作条件下老化后,例如: 1) 产品蒸发气; 2) 液体产品	GB/T 10294 或 GB/T 10295
空气渗透性	适用于有渗透性的绝热材料 (仅作为对流指示)	选择合适的检测方法 ^b
^a 温度范围:从常温至绝热材料的设计温度。 ^b 试验方法应经过选择。		

表 D.2 力学性能检测

性能	 检测条件 (根据实际情况而定)	检测方法
抗压强度	在常温下	GB/T 13480
	在应用温度下	GB/T 13480 ^a 或 GB/T 8813 ^{b,c} 或 GB/T 5486
压缩蠕变	在常温下(根据储罐设计的荷载和持续时间)	GB/T 32983
拉伸性能 a) 抗拉强度 b) 拉伸率 c) 抗拉模量	在常温下	GB/T 30804 和 GB/T 33157 ^d
	在应用温度下	GB/T 30804 和 GB/T 33157 ^d
粘结强度	在常温下	GB/T 30804 或 GB/T 5210
	在应用温度下(根据在储罐内的位置)	GB/T 30804 ^a 或 GB/T 5210

表 D.2 力学性能检测 (续)

性能	检测条件 (根据实际情况而定)	检测方法
剪切强度	在常温下	GB/T 32382
	在应用温度下	GB/T 32382 ^a
<p>注 1: 力学性能检测可能在储罐中的所有受力方向上进行。</p> <p>注 2: 对各向异性材料,可能要求各个方向上的检测数据。</p>		
<p>^a 规定为 23 °C。然而,在必要更改的条件下,可以在其他温度下进行此试验。</p> <p>^b 泡沫塑料的试验方法。</p> <p>^c 可在所有要求的温度下试验。</p> <p>^d GB/T 30804 检测垂直面,GB/T 33157 检测平行面。</p>		

表 D.3 耐温性能检测

性能	检测条件	检测方法
热膨胀/收缩系数	在应用温度下	GB/T 34183 或 GB/T 20673
抗拉强度/抗拉模量	在应用温度下	见表 D.2
绝热系统对温度梯度变化的反应	半工业低温检测	根据实际情况确定方法

表 D.4 水和水蒸气的渗透率检测/水和水蒸气的影响检测

性能	检测条件	检测方法
含水量	只适用于加水生产的材料产品(珍珠岩混凝土等)	与材料供应商商定
吸水性	短期——局部浸没	GB/T 30805
	长期——全部浸没	GB/T 30807
	总的吸水性	GB/T 1034
水蒸气透过性		GB/T 17146
闭孔率		GB/T 10799 ^a
尺寸稳定性		GB/T 30806
抗冻融性能		GB/T 33011
热阻性的降低	在接触水/水蒸气后,测量热阻	GB/T 10294
^a 仅用于泡沫塑料。		

表 D.5 浸设在低温液化气环境中材料性能检测

性能	检测条件	检测方法
	吸收和解吸特性	

表 D.5 浸设在低温液化气环境中材料性能检测 (续)

性能	检测条件	检测方法
闭孔率	浸没前 浸没后	a
产品液体的吸收和解吸特性	在规定的温度、压力和持续时间条件下的液体中浸没	a
浸没蒸发气/液体后的影响		a
闭孔率的变化	在规定的条件下浸没前/后	a
抗压强度的变化	在规定的条件下浸没前/后	a
导热系数的变化	在规定的条件下浸没前/后	a
a 每种低温液化气环境的具体检测方法与材料供应商协商后确定。		

表 D.6 化学特性检测

特性	检测方法
绝热材料对各种物料的耐化学性	
a) 水	GB/T 30807
b) 水+污染物	a
c) 低温液化气——蒸发气	a
低温液化气——液体	a
d) 置换气体	a
绝热构件的抗腐蚀性	a
在绝热层中浸出的物质	JC/T 618
a 与材料供应商协商确定。	

表 D.7 阻燃性/对火反应检测

特性	检测方法
绝热材料对火的反应	GB 8624 GB/T 8332
温度限制	
——熔化温度	a
——分解温度	
——燃点	
阻火性	a
a 与材料供应商协商确定。	

附录 E

(资料性)

主要绝热材料验收

E.1 罐底承压泡沫玻璃砖

E.1.1 性能要求

泡沫玻璃砖主要作为低温液化气全容罐的罐底和热角保护区域的绝热材料,是具有封闭气孔结构的无机绝热制品,其材料应为纯玻璃,无粘结剂,体积吸水率不应大于 0.5%,透湿系数不应大于 0.007 ng/(Pa·s·m),燃烧性能应满足 GB 8624 中不燃材料 A 级的要求。

泡沫玻璃砖验收的关键指标包括尺寸、外观、密度、抗压强度和导热系数。

泡沫玻璃砖的长度、宽度和厚度允许偏差分别为 2.0 mm、2.0 mm 和 1.0 mm,垂直度允许偏差为 3.0 mm。

泡沫玻璃砖不能有影响其工作性能的外观缺陷,通常这种缺陷难以定量描述,但是可采用以下准则进行外观质量的评估:如果泡沫玻璃砖表面出现的盘纹、不平整面或过烧区域的面积不超过 96.5 cm²,或深度不超过 1.6 mm,则视为外观质量合格。

由于不同规模的低温液化气储罐对罐底承压泡沫玻璃砖的性能要求不同,常见规格见表 E.1。

表 E.1 泡沫玻璃砖主要性能要求

规格	密度 kg/m ³		抗压强度 MPa		导热系数 (平均温度 10 °C) W/(m·K)		抗折强度 MPa
	平均值	允许偏差	平均值	单个最小值	平均值	单个最高值	单个最小值
800 型	120	±8%	≥0.80	0.55	≤0.043	0.044	0.310
1000 型	130	±8%	≥1.00	0.69	≤0.044	0.046	0.351
1200 型	140	±8%	≥1.20	0.83	≤0.046	0.048	0.386
1600 型	160	±10%	≥1.60	1.10	≤0.048	0.050	0.476
2400 型	210	±15%	≥2.40	1.65	≤0.056	0.058	0.627

不同规格泡沫玻璃砖随温度变化的导热系数应符合表 E.2 的要求。

表 E.2 泡沫玻璃砖随温度变化的导热系数性能要求

温度 °C	800 型 W/(m·K)	1000 型 W/(m·K)	1200 型 W/(m·K)	1600 型 W/(m·K)	2400 型 W/(m·K)
204	≤0.084	≤0.084	≤0.086	≤0.088	≤0.095
149	≤0.072	≤0.074	≤0.074	≤0.075	≤0.084
93	≤0.059	≤0.061	≤0.062	≤0.065	≤0.072
38	≤0.049	≤0.050	≤0.052	≤0.055	≤0.062

表 E.2 泡沫玻璃砖随温度变化的导热系数性能要求 (续)

温度 ℃	800 型 W/(m·K)	1000 型 W/(m·K)	1200 型 W/(m·K)	1600 型 W/(m·K)	2400 型 W/(m·K)
-24	≤0.046	≤0.048	≤0.050	≤0.052	≤0.060
-10	≤0.044	≤0.046	≤0.048	≤0.050	≤0.058
-18	≤0.040	≤0.042	≤0.043	≤0.046	≤0.053
-46	≤0.036	≤0.037	≤0.040	≤0.042	≤0.050
-73	≤0.033	≤0.035	≤0.036	≤0.039	≤0.046
-101	≤0.029	≤0.032	≤0.033	≤0.036	≤0.043
-129	≤0.026	≤0.029	≤0.030	≤0.033	≤0.040
-157	≤0.025	≤0.026	≤0.027	≤0.030	≤0.037

E.1.2 尺寸和外观检验

尺寸、外观宜进行计数验收抽样检验,符合 GB/T 2828.2—2008“模式 A”方法一次抽样方案的要求,采用特殊检验水平 S-4,极限质量(LQ)31.5%。

指定 LQ 值,并不意味着生产方/供方有权提供任何已知的不合格品。

泡沫玻璃砖尺寸、外观抽样数量和规模根据表 E.3 确定,验收抽样检验的不合格数量不宜超过表 E.3 规定的接收数。

表 E.3 泡沫玻璃砖尺寸、外观检验样本大小和合格判定

验收批次数量	抽样数量	接收数
	S-4 31.5%LQ	
16~25	6	0
26~50	6	0
51~90	8	0
91~150	13	1
151~280	13	1
281~500	20	3
501~1 200	32	5
1 201~3 200	50	10
3 201~10 000	80	18
10 001~35 000	80	18
35 001~150 000	80	18
150 001~500 000	80	18
500 001 及以上	80	18

E.1.3 抗压强度和导热系数检验

抗压强度宜进行计量验收抽样检验,参考 GB/T 6378.1—2008“s”方法正常检验一次抽样方案的要求,采用特殊检验水平 S-4,接收质量限(AQL)1.0%。导热系数宜进行计量验收抽样检验,参考标准 GB/T 6378.1—2008“s”方法正常检验一次抽样方案的要求,采用特殊检验水平 S-3,接收质量限(AQL)10%。指定 AQL 值,并不意味着生产方/供方有权提供任何已知的不合格品。

泡沫玻璃砖抗压强度和导热系数的具体抽样数量根据供货验收批次数量的规模,根据表 E.4 确定,验收抽样检验的质量统计量 Q 宜不低于表 E.4 规定的接收常数。导热系数质量统计量 Q_t 和抗压强度质量统计量 Q_e 按公式(E.1)和公式(E.2)计算:

$$Q_t = \frac{U - \bar{X}_t}{S} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

$$Q_e = \frac{\bar{X}_e - L}{S} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

抽检批次的标准差按公式(E.3)计算:

$$s = \left[\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n_s - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

表 E.4 泡沫玻璃砖出厂检验抗压强度和导热系数样本大小和合格判定要求

验收批次数量	抗压强度		导热系数	
	S-4,1.0%AQL		S-3,10%AQL	
	抽样数量	接收常数	抽样数量	接收常数
51~90	9	1.615	4	0.580
91~150	9	1.615	4	0.580
151~280	9	1.615	6	0.587
281~500	9	1.615	6	0.587
501~1 200	13	1.712	9	0.597
1 201~3 200	18	1.770	9	0.597
3 201~10 000	18	1.770	13	0.614
10 001~35 000	25	1.829	13	0.614
35 001~150 000	35	1.862	18	0.718
150 001~500 000	35	1.862	18	0.718
500 001及以上	50	1.885	25	0.809

E.2 膨胀珍珠岩

E.2.1 珍珠岩矿石

珍珠岩矿石经加热膨胀后形成的珍珠岩粉末填充在环形空间作为低温液化气全容罐罐壁绝热材料。

表 E.5 珍珠岩矿石性能检验

试验	详情	抽样率
珍珠岩矿石粒度	粒度筛分满足表 E.6 的要求,每次取样 100 g~200 g。筛分方法按照 JC/T 1020 执行。如果超出公差范围,记录结果并去除不符合要求的材料	生产开始后每 50 t 抽取一次
湿度分析	矿石的结晶水含量 2%~4%(质量分数),表面水含量小于 0.5%(质量分数),每次取样 50 g。湿度分析按照 JC/T 1020 执行	最初以及以后每 50 t 抽取一次
化学分析	每份取样 50 g,用光谱分析测定其化学成分。分析应确定矿石的一致性,以及不含对储罐材料有害的成分	最初以及以后每 200 t 抽取一次

表 E.6 珍珠岩矿石粒度筛分

筛分粒度		通过率 %	
目数	mm	最小值	最大值
30	0.600	97	100
40	0.425	75	85
50	0.300	40	55
100	0.150	0	10
>100	<0.150	0	0

E.2.2 膨胀珍珠岩粉末

膨胀珍珠岩粉末由珍珠岩原矿在施工现场膨胀制作而成,安息角不大于 30°。膨胀珍珠岩粉末填充前宜进行试验验证绝热性能能够满足低温下使用要求,试验方法和取样数量见表 E.7,粒度筛分见表 E.8。

表 E.7 膨胀珍珠岩粉末性能检验

试验	详情	间隔
导热率	参考 GB/T 10294 或 GB/T 10295 执行。在平均温度为 0 °C 时,压实珍珠岩的导热率不应大于 0.044 W/(m·K)。如果超出公差范围,记录结果并采取相应措施	生产开始时以及生产半程一次
粒度	粒度筛分满足表 E.8 的要求。筛分方法按照 JC/T 1020 执行。如果超出公差范围,记录结果并采取相应措施	最初以及以后每 8 h 一次
松散密度	松散密度应为 35 kg/m ³ ~ 55 kg/m ³ 。试验按 JC/T 1020 进行。松散密度作为振实密度的预示,任何松散密度的重大变化应矫正,除非进一步试验确定振实密度和导热率未受影响。如果松散密度有重大变化,记录结果并采取相应措施	最初以及以后每隔 1 h 一次

表 E.7 膨胀珍珠岩粉末性能检验 (续)

试验	详情	间隔
振实密度	振实密度应为 $56 \text{ kg/m}^3 \sim 65 \text{ kg/m}^3$ 。试验按 JC/T 1020 进行。如果 500 次震动能够压实,则不需要再震动更多次。如果超出公差范围,记录结果并采取相应措施	最初以及以后每 1 h 一次
安装密度核对	核对方法通过计算比较珍珠岩重量和安装体积进行。 安装体积是通过测量当前填充高度计算已安装体积,该体积应考虑填充珍珠岩对弹性毡的压缩(记录振实的膨胀珍珠岩安装平面可以通过在环形空隙四周用一端带有小球的长卷尺来简单检验)。 膨胀珍珠岩的安装重量可以通过记录填充储罐的珍珠岩累计重量来获得,但应考虑膨胀、倒运和弹性毡压缩引起的损耗。 如果超出公差范围,记录结果并采取相应措施。 振实密度应为 $56 \text{ kg/m}^3 \sim 65 \text{ kg/m}^3$ 。如果已安装珍珠岩的振实密度超出这一数值,停止填充并在继续填充前确定问题原因	每 24 h 一次,以及每完成 1 层珍珠岩填充后一次
含水率	质量含水率不应超过 0.5%。如果超出公差范围,记录结果并采取相应措施	最初以及以后每天两次

表 E.8 膨胀珍珠岩粉末粒度筛分

筛分粒度		通过率 %	
目数	mm	最小值	最大值
16	1.18	90	100
30	0.60	45	70
50	0.30	15	50
100	0.15	0	10

E.3 玻璃棉

玻璃棉主要用于铝吊顶绝热,由玻璃纤维和适当的粘结剂制成。整个玻璃棉的密度、粘结剂的分布和处理应保持均匀。玻璃棉表面应基本平整,不应有妨碍使用的伤痕、污迹、破损;最顶层玻璃棉为含铝箔外覆层的玻璃棉,该规格玻璃棉的外覆层与基材的粘贴应平整、牢固。

玻璃棉长度偏差 $^{+10}$ mm,宽度偏差 $^{+5}$ mm,厚度偏差 $^{+15}$ mm,玻璃棉展开时的厚度应大于或等于规定的厚度。

玻璃棉的密度为 $10 \text{ kg/m}^3 \sim 16 \text{ kg/m}^3$,导热系数在 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不大于 $0.038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,在 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不大于 $0.029 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,玻璃纤维平均直径不大于 $5.0 \text{ } \mu\text{m}$,渣球含量不大于 0.3%,体积吸湿率小于 0.2%,燃烧性能达到 GB 8624 规定的等级且不低于 A 级。

玻璃棉性能符合本文件的要求,还宜参考 GB/T 13350 的验收要求,检验方法宜参考 GB/T 5480

的规定。

E.4 弹性毡

弹性毡主要用于低温液化气全容罐内罐罐壁和环隙空间之间绝热,用于吸收膨胀珍珠岩对内罐罐壁的荷载,比普通绝热玻璃棉具有更好的拉伸和回弹性能。弹性毡的基材由玻璃纤维物和粘合物组成,含水率不大于0.5%(质量分数)。

弹性毡沿整个厚度方向应平整,密度、纤维和粘结剂的分布应均匀,无降低拉伸或断裂强度的局部缺陷。最外层的弹性毡要求包含铝箔外覆层,该规格弹性毡的外覆层与基材的粘贴应平整、牢固。

弹性毡长度应连续无接缝,宽度偏差 $^{+5}_0$ mm,厚度偏差 $^{+15}_0$ mm,不准许有负偏差。

弹性毡的公称密度为 16 kg/m^3 ,允许偏差为 $^{+2}_1\text{ kg/m}^3$ 。

弹性毡的导热系数在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 不大于 $0.040\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

弹性毡应具有有一定抗拉性能满足在施工现场挂装时不发生断裂,抗拉强度应满足设计要求。

弹性毡应具有有一定回弹性能以吸收环形空间膨胀珍珠岩的荷载,反映回弹性能的荷载-变形弹性曲线由买卖双方协商确定;或者参照SY/T 7349弹性毡回弹系数的测定方法和要求执行,其测定的平均回弹系数宜大于或等于0.44。

E.5 沥青毡

黄麻毡胎基或聚酯毡胎基的沥青毡能够提高罐底绝热系统荷载传递能力并起防潮作用,沥青毡上表面带有细砂用来防止卷裹过程粘在一起。沥青毡的厚度不小于 3 mm ,不含细砂的沥青毡单位面积质量不宜小于 3.8 kg/m^2 ,宽度最小值 900 mm ,宽度允许偏差 $^{+10}_0\text{ mm}$ 。罐底绝热系统用沥青毡宜提供与同绝热系统采用的具体规格泡沫玻璃砖的综合抗压强度匹配试验,一般采用3层沥青毡叠夹2层泡沫玻璃砖进行常温和低温抗压强度对照试验,试验结果不低于表E.1泡沫玻璃砖的抗压强度要求,确保沥青毡的使用不会降低罐底绝热系统承载以及荷载传递能力。

附录 F

(资料性)

主储罐底部绝热——极限状态理论

储罐底部绝热按公式(F.1)计算：

$$\gamma_L S \leq \frac{R}{\gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t \cdot \gamma_i} \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

应用于荷载的安全系数 γ_L 见 EN 1991-1-1。

绝热材料的特征强度 R 应为低于 1.65 倍标准偏差的平均强度。

脆性材料的测试应符合 GB/T 13480 的规定。

易蠕变材料测试应符合 GB/T 13480 的规定，且蠕变测试应符合 GB/T 32983 的规定。

为确定材料安全系数 γ_m ，证实特性统计分布和高斯模型相符合。

安全系数 γ_m 按公式(F.2)计算：

$$\gamma_m = \frac{1 - 1.65 \left[\frac{\sqrt{S^2}}{\bar{X}} \right]}{1 - 3.36 \left[\frac{\sqrt{S^2}}{\bar{X}} \right]} \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

绝热产品抗压强度的安全系数不应小于 1.25。

注 1：此公式基于 10^{-6} 总失效风险平均分布于作用力和阻力之间的假设。

安装安全系数 γ_i 至少应为 1.6。

注 2：如施工者可证明至少 10 年以上使用相同的绝热系统、使用相同产地的相同产品，则 γ_i 可以减至 1.5。

安全系数 γ_i 应以典型正确的安装为基础，且使用符合相关标准的产品。

圆筒效应系数 γ_c ，一层绝热应为 1，三层绝热应为 1.05，八层绝热应为 1.09。

系数 γ_t 应由设计者遵循重要的试验统计结果确定。如果安装法与参照的试验法相同，则 γ_t 为 1。

注 3：系数 γ_i 考虑了可以用一种不同于参考试验法的方法将绝热制品安装在储罐基础上的可能性。

注 4：发现的一个案例是，泡沫玻璃与一种夹层材料一起使用，综合性能不同于 GB/T 13480 规定的泡沫玻璃制品测试结果。

无论 γ_L 、 γ_m 、 γ_c 、 γ_t 和 γ_i 取值多少， $\gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_t \cdot \gamma_i$ 的乘积不应低于 2.5。



附 录 G

(资料性)

储罐绝热系统施工安装

G.1 罐底绝热安装

环梁上表面水平度宜满足环向每 10 m 内偏差不大于 ± 3 mm,环向总偏差不大于 ± 6 mm 的要求。珍珠岩混凝土砌块之间的安装间隙不宜大于 6 mm,空隙间宜采用压缩玻璃棉毡填实。

罐底找平层上表面应平整、光滑,平整度测量应采用 2 m 样板,波峰与波谷的最大差值不宜大于 5 mm。

泡沫玻璃绝热层的安装宜满足以下规定:

- a) 同层的罐底泡沫玻璃绝热层宜满足任意方向每 10 m 内两点的水平偏差不大于 ± 3 mm,且任何方向上的最大高差不大于 ± 6 mm 的要求,不应出现尖角;
- b) 相邻两层泡沫玻璃宜跨中错缝排列,不能跨中排列时错缝间距不应小于 100 mm;
- c) 泡沫玻璃砖间的缝隙不应大于 2 mm;
- d) 不应安装有缺陷和破裂的泡沫玻璃。

当罐底最下层找平层采用混凝土找平时,找平层上表面宜涂敷一层防潮冷底油。

弹性体改性沥青毡上表面隔离材料宜为聚乙烯膜。

G.2 环形空间绝热安装

G.2.1 弹性毡



弹性毡对接接缝应紧密,接缝宽度不宜大于 2 mm。

弹性毡宜采用整体钩挂安装。

G.2.2 膨胀珍珠岩

膨胀珍珠岩的填充安装宜满足如下要求:

- a) 膨胀珍珠岩填充采用现场膨胀、全密闭气流输送填充;
- b) 膨胀珍珠岩填充过程中,填充高度应均匀,每次填充环形空间任意两点珍珠岩堆积顶面最大允许高差不宜大于 3 m;
- c) 填充期间应对环隙内的珍珠岩进行分层振实,层间所有空间应填满;
- d) 填充完成后罐顶珍珠岩挡墙之内的空间应均匀填满;
- e) 预应力混凝土外罐全容储罐的首次真实高度应大于热角保护高度,之后填充时的每层振实高度不宜大于 4 m。

G.2.3 热角保护系统

- a) 热角保护应采用泡沫玻璃砖铺砌,采用低温粘结剂将泡沫玻璃砖粘结在外罐内衬板上,泡沫玻璃砖间接缝不宜大于 2 mm,低温粘结剂应能承受低温特性;
- b) 预应力混凝土外罐全容储罐热角保护的泡沫玻璃安装后应进行修磨,使热角保护的绝热层表面平整统一,表面不应有凸起;
- c) 泡沫玻璃与热角保护盖板之间的空隙应采用压缩玻璃棉毡填实。

G.3 吊顶绝热安装

吊顶绝热层安装前吊顶板应清洁、干燥。

绝热层铺设应平整,同层玻璃棉毡采用对接方法铺设且应同层错缝、层间压缝、缝与缝间距不宜小于 100 mm。

绝热层穿过吊顶杆或者其他结构的部位,应进行裁剪,裁剪后的棉毡与所穿过的构件应贴合紧密。

吊顶绝热系统膨胀珍珠岩填充前,吊顶板上的所有开孔应进行保护,防止膨胀珍珠岩进入内罐。

G.4 罐顶空间低温管线绝热安装

罐顶空间低温管线拱顶套管内宜采用玻璃棉毡填实或工厂预制 PIR。

罐顶空间低温管线绝热层采用不锈钢丝捆扎固定,捆扎间距不宜超过 300 mm。

同层包裹的上下相邻两段玻璃棉毡对接应紧密,相邻两层玻璃棉毡接缝应错开,错开距离不宜小于 100 mm。

穿过吊顶的低温管线绝热时,管道和吊顶套管之间的缝隙应用玻璃布隔离。

低温管线绝热宜保证接管热损不大于 40 W/m^2 。

参 考 文 献

- [1] GB/T 150.1—2011 压力容器 第1部分:通用要求
- [2] GB/T 1034 塑料 吸水性的测定
- [3] GB/T 2828.2—2008 计数抽样检验程序 第2部分:按极限质量(LQ)检索的孤立批检验
抽样方案
- [4] GB/T 5210 色漆和清漆 拉开法附着力试验
- [5] GB/T 5480 矿物棉及其制品试验方法
- [6] GB/T 5486 无机硬质绝热制品试验方法
- [7] GB/T 6378.1—2008 计量抽样检验程序 第1部分:按接收质量限(AQL)检索的对单一质
量特性和单个 AQL 的逐批检验的一次抽样方案
- [8] GB/T 8332 泡沫塑料燃烧性能试验方法 水平燃烧法
- [9] GB/T 8423.3—2018 石油天然气工业术语 第3部分:油气地面工程
- [10] GB 8624 建筑材料及制品燃烧性能分级
- [11] GB/T 8813 硬质泡沫塑料 压缩性能的测定
- [12] GB/T 10294 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法
- [13] GB/T 10295 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法
- [14] GB/T 10799 硬质泡沫塑料 开孔和闭孔体积百分率的测定
- [15] GB/T 13350 绝热用玻璃棉及其制品
- [16] GB/T 17146 建筑材料及其制品水蒸气透过性能试验方法
- [17] GB/T 20673 硬质泡沫塑料 低于环境温度的线膨胀系数的测定
- [18] GB/T 30804 建筑用绝热制品 垂直于表面抗拉强度的测定
- [19] GB/T 30805 建筑用绝热制品 部分浸入法测定短期吸水量
- [20] GB/T 30806 建筑用绝热制品 在指定温度湿度条件下尺寸稳定性的测试方法
- [21] GB/T 30807 建筑用绝热制品 浸泡法测定长期吸水性
- [22] GB/T 32382 建筑用绝热制品 剪切性能的测定
- [23] GB/T 33011 建筑用绝热制品 抗冻融性能的测定
- [24] GB/T 33157 建筑用绝热制品 与面平行拉伸强度的测定
- [25] GB/T 34183 建筑设备及工业装置用绝热制品 热膨胀系数的测定
- [26] GB 50068 建筑结构可靠性设计统一标准
- [27] JC/T 618 绝热材料中可溶出氯化物、氟化物、硅酸盐和钠离子的化学分析方法
- [28] JC/T 1020 低温装置绝热用膨胀珍珠岩
- [29] SY/T 0608 大型焊接低压储罐的设计与建造
- [30] SY/T 7349 低温储罐绝热防腐技术规范
- [31] EN 1991-1-1 Actions on structures—Part 1-1: General actions—Densities, selfweight,
imposed loads for buildings