

团 体 标 准
T/CWDPA

T/CWDPA XXX—XXXX

LNG 深冷绝热系统技术要求

Technical requirements for LNG cryogenic insulation system

(征求意见稿)

2026 – XX – XX 发布

2026 – XX – XX 实施

中国西部开发促进会 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 分类 2

5 技术要求 3

 5.1 材料要求 3

 5.2 设计性能要求 5

 5.3 施工与安装要求 7

 5.4 系统性能要求 9

6 试验方法 10

 6.1 材料试验方法 10

 6.2 系统绝热性能试验 10

 6.3 施工质量检测方法 11

7 检验规则 12

 7.1 检验分类 12

 7.2 出厂检验 12

 7.3 型式检验 12

 7.4 判定规则 13

 7.5 现场验收检验 13

参考文献 14

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

LNG 深冷绝热系统技术要求

1 范围

本文件规定了LNG深冷绝热系统的分类、技术要求、试验方法及检验规则。

本文件适用于陆上或海上的液化天然气（LNG）工业设施及其它应用到LNG深冷绝热系统的相关设施中，工作温度低于-100℃的深冷绝热系统的设计、施工、验收和维护。其他类似深冷工况的绝热系统可参照执行。

本文件不适用于薄膜型储罐罐体绝热系统。

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 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 1037 塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法
- GB/T 1038 塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法 压差法
- GB/T 1040 塑料 拉伸性能的测定
- GB/T 1463 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法
- GB/T 3512 硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验
- GB/T 5486 无机硬质绝热制品试验方法
- GB/T 6343 泡沫塑料及橡胶 表观密度的测定
- GB/T 7124 胶粘剂 拉伸剪切强度的测定（刚性材料对刚性材料）
- GB/T 7762 硫化橡胶或热塑性橡胶 耐臭氧龟裂 静态拉伸试验
- GB/T 8174 设备及管道绝热效果的测试与评价
- GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
- GB/T 10297 非金属固体材料导热系数的测定 热线法
- GB/T 10799 硬质泡沫塑料 开孔和闭孔体积百分率的测定
- GB/T 11344 无损检测 超声测厚
- GB/T 13912 金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法
- GB/T 14522 机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料 人工气候老化试验方法 荧光紫外灯
- GB/T 16422.2 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分：氙弧灯
- GB/T 17357 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法和表面温度法
- GB/T 17363 绝热材料导热系数测定 防护热板法
- GB/T 17643 土工合成材料 聚乙烯土工膜
- GB/T 18443.5 低温绝热压力容器试验方法 第5部分：静态蒸发率测量
- GB/T 19687 建筑设备及工业装置用绝热产品 长期吸湿性测定 加速老化试验
- GB/T 23457 预铺防水卷材
- GB/T 2423.55 环境试验 第2部分：试验方法 试验Eh：锤击试验
- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划
- GB 50009 建筑结构荷载规范
- GB 50011 建筑抗震设计规范

T/CWDPA XXX—XXXX

GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范

GB 51156 液化天然气接收站工程设计规范

JC/T 647 泡沫玻璃绝热制品

ASTM A463 Specification for Steel sheet, Aluminium-Coated, by the Hot-Dip Process (热浸镀铝钢板规范)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

LNG 深冷绝热系统 LNG cryogenic insulation system

由绝热层、密封层、防潮层及支撑结构等组成，用于液化天然气（LNG）深冷工况（工作温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的低温设备和管道外表面的绝热系统。

3.2

绝热层 insulating layer

在LNG深冷绝热系统中起主要隔热作用，由泡沫玻璃砖、聚氨酯泡沫或珍珠岩粉末等绝热材料构成的层状结构。

3.3

密封层 sealing layer

在绝热层外侧设置的用于防止低温介质泄漏的层状结构。

3.4

防潮层 vapour barrier

防止环境水分渗入绝热系统的层状结构。

3.5

热流密度 heat flux density

单位时间内通过单位面积的热量，单位为瓦每平方米（ W/m^2 ），用于表征绝热系统的绝热性能。

3.6

冷损失率 cold loss rate

LNG储罐在静态条件下，以蒸发气估算的日蒸发量与储罐总容量（或总质量）的比值，用于表征罐体的整体绝热效果。

3.7

冷桥 cold bridge

绝热系统中由导热系数较高的构件（如金属支承件、螺栓等）形成的热流通路。

3.8

低温收缩 cryogenic shrinkage

材料在低温环境下因热胀冷缩效应引起的线性尺寸减小，需通过补偿措施避免结构破坏。

3.9

二次密封 secondary sealing

在主密封层外侧设置的自备用密封结构。

3.10

现场验收检验 on-site acceptance inspection

在LNG深冷绝热系统施工现场进行的检验，包括施工过程检验和竣工检验。

4 分类

4.1 按绝热材料类型分类如下：

- 泡沫玻璃型：以泡沫玻璃为主要绝热材料；
- 聚氨酯泡沫型：以硬质聚氨酯泡沫（PUR 或 PIR）为绝热材料；
- 珍珠岩粉末型：以膨胀珍珠岩颗粒为填充式绝热材料。

4.2 按系统结构形式分类如下：

- 整体预制型：绝热层、密封层、防潮层及支撑件在工厂内预制成标准模块，现场组装；
- 现场浇注型：在施工现场通过喷涂或浇注方式将绝热原料发泡成型。

4.3 按绝热功能分类如下：

- 保冷绝热：应用于低温工艺系统；
- 人身防护绝热：防止人员冻伤；
- 防噪音绝热：减少噪音。

5 技术要求

5.1 材料要求

5.1.1 绝热材料

5.1.1.1 导热系数

5.1.1.1.1 在深冷工况下，材料的导热系数应按照 GB/T 10297 或 GB/T 17363 规定的方法进行测定，测试平均温度应为 $-165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.1.1.2 密度 $\leq 140\text{ kg/m}^3$ 的泡沫玻璃型在 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的导热系数不应大于 $0.045\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

5.1.1.1.3 聚氨酯泡沫型在 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的导热系数不应大于 $0.025\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

5.1.1.1.4 珍珠岩粉末型在 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、充装密度不低于 120 kg/m^3 条件下的导热系数不应大于 $0.030\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

5.1.1.2 密度和孔隙率

5.1.1.2.1 表观密度的测定应按以下规定执行：

- 泡沫玻璃型绝热材料：按 JC/T 647 的规定进行；
- 聚氨酯泡沫型绝热材料：按 GB/T 6343 的规定进行；
- 珍珠岩粉末型绝热材料：按 GB/T 5486 的规定进行。

5.1.1.2.2 各类绝热材料的表观密度应符合以下要求：

- 泡沫玻璃型： $120\text{ kg/m}^3 \sim 210\text{ kg/m}^3$ ；
- 聚氨酯泡沫型：芯部密度不应低于 50 kg/m^3 ；
- 珍珠岩粉末型：充装密度不应低于 120 kg/m^3 。

5.1.1.2.3 闭孔率的测定应按以下规定执行：

- 泡沫玻璃型绝热材料：按 JC/T 647 的规定进行，闭孔率不应低于95%；
- 聚氨酯泡沫型绝热材料：按 GB/T 10799 的规定进行，闭孔率不应低于90%。

5.1.1.2.4 同一批次产品的表观密度偏差应不超过 $\pm 5\%$ ，或应符合相应产品标准的规定。

5.1.1.3 低温适应性

在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下，泡沫玻璃型线性热收缩率不应大于0.15%，聚氨酯泡沫型线性热收缩率不应大于1.5%。材料经受10次常温至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷热循环后，不应出现开裂、粉化、层间剥离等缺陷。

5.1.2 密封材料

5.1.2.1 低温密封性能

密封材料在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下应符合以下要求：

- 不应发生脆裂或失去弹性，断裂伸长率不应低于常温值的50%；
- 低温密封胶的拉伸剪切强度（铝-铝粘接）不应低于 1.5 MPa ，应按 GB/T 7124 规定的方法进行测定；
- 密封膜的气体渗透系数不应大于 $1.0 \times 10^{-3}\text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ ，应按 GB/T 1038 规定的方法进行测定；
- 密封膜的低温柔韧性应满足绕直径 20 mm 芯轴弯曲不出现裂纹的要求；
- 与绝热材料及基体金属的粘接强度，经低温处理后剥离强度下降幅度不应超过30%。

5.1.2.2 耐老化性能

- 5.1.2.2.1 密封材料的热空气老化试验应按 GB/T 3512 的规定进行，试验后的拉伸强度保持率不应低于 80%，断裂伸长率保持率不应低于 70%。
- 5.1.2.2.2 密封材料的耐紫外线老化性能应按 GB/T 16422.2 或 GB/T 14522 的规定进行，试验后表面不应出现裂纹。
- 5.1.2.2.3 密封材料的耐臭氧老化性能应按 GB/T 7762 的规定进行，试验后表面不应出现裂纹。
- 5.1.2.2.4 各项老化试验后，密封材料的低温密封性能仍应满足 5.1.2.1 的要求。

5.1.3 防潮层材料

5.1.3.1 水蒸气渗透率

- 防潮层材料的水蒸气渗透性能应符合以下要求：
- 水蒸气渗透率应按 GB/T 1037（适用于薄膜材料）或 GB/T 17146（适用于建筑材料）规定的方法进行测定；
 - 具体限值应根据设计要求和材料类型确定，或应符合现行国家标准 GB 50264 及相关产品标准的规定；
 - 搭接宽度不应小于 50 mm，搭接部位经水密性试验不应出现渗漏。

5.1.3.2 机械强度

- 防潮层材料的机械性能应符合以下要求：
- 包捆型防潮层材料的拉伸强度不应低于 10.0 MPa，断裂伸长率不应低于 10%，应按 GB/T 1040 规定的方法进行测定；
 - 涂抹型防潮层材料在 20 ℃时的粘结强度不应小于 0.15 MPa；
 - 防潮层材料的抗穿刺性能应符合设计要求，试验方法按 GB/T 17643 或 GB/T 23457 的规定执行；
 - 在-40 ℃条件下的拉伸强度不应低于常温值的 80%；
 - 外表面应具有耐磨损性能，或应设置保护层。

5.1.4 保护层材料

5.1.4.1 金属保护层材料

金属保护层材料应采用镀铝钢板。镀铝钢板应为每面镀层厚度40 μm的双面镀铝钢板，或相当于至少230 g/m² 双面镀层厚度的纯铝镀层钢板。材料应符合ASTM A 463/A 463M的规定。

5.1.4.2 金属保护层厚度

金属保护层厚度详见表1。

表 1 金属保护层厚度

绝热外径	镀铝钢板厚度（mm）
140 mm~300 mm	0.56
>300 mm	0.8
可拆卸的保冷盒（阀门、法兰等）	1.0

5.1.4.3 定型金属保护层

- 5.1.4.3.1 直径大于 1000 mm 的立式设备/容器的金属保护层，应采用沟纹深度 19.0 mm、斜长 76 mm 的波纹板，或其他经批准的波纹板型。
- 5.1.4.3.2 直径小于或等于 1000 mm 的立式设备/容器及所有卧式设备，其金属保护层应采用平板。
- 5.1.4.3.3 立式设备/容器上部和下部的椭圆封头（不包括裙座内的底部封头）及卧式设备/容器端部椭圆封头的金属保护层，应采用去皮板。

5.1.5 紧固材料

- 5.1.5.1 紧固材料应符合 CINI 2.25.1 的规定，并满足下列修正要求。

- 合成胶带：应采用 19 mm 宽的压力敏感型合成胶带，用于保护所有两半管壳连接处绝热层的内层。
- 不锈钢钢带：用于保护绝热层和金属保护层的不锈钢带是 AISI 316L 型热轧材料；钢带封紧处（不锈钢卡扣）采用 0.8 mm 厚 316L 不锈钢。
- 螺纹紧固件：在可采用螺纹紧固件的位置，应使用自攻型不锈钢螺钉，规格为平端 No. 8，4.2 mm×12 mm 长。

5.1.5.2 不锈钢钢带规格按下列规定选用。

- 应采用 13 mm 宽×0.8 mm 厚不锈钢带的场合包括。
 - 用于斜块状PIR 绝热层外层。
 - 设备的绝热层外径不大于500mm的所有内层和外层。
 - 立式容器的顶、底封头和卧式容器的封头绝热层的所有内层。
 - 管道和设备的绝热外径不大于500mm 的所有金属保护层。
- 在 PIR 绝热外层和以下地方应使用 19 mm 宽×0.8 mm 厚不锈钢/密封。
 - 设备的绝热层外径大于500 mm的所有内层和外层。
 - 立式容器的顶、底封头和卧式容器的封头绝热层的所有外层。
 - 管道和设备的绝热外径大于500 mm的所有金属保护层。

5.2 设计性能要求

5.2.1 绝热层厚度设计

5.2.1.1 基于热流密度的计算方法

设计热流密度不宜大于25 W/m²，设计厚度应在计算厚度基础上增加不少于15%的裕量。最小绝热层厚度按公式（1）计算：

$$\delta = \lambda \left(\frac{T_a - T_c}{q} - R_o \right) \quad (1)$$

式中：

δ ——绝热层最小计算厚度，单位为米（m）；

λ ——绝热材料在设计平均温度下的导热系数，单位为瓦每米每开尔文（W/（m·K））；

T_a ——环境温度设计值（取夏季室外通风设计温度），单位为开尔文（K）或摄氏度（℃）；

T_c ——冷表面设计温度，单位为开尔文（K）或摄氏度（℃）；

q ——设计热流密度限值，单位为瓦每平方米（W/m²）；

R_o ——除绝热层外其他部分（密封层、防潮层、保护层等）的热阻之和，单位为平方米开尔文每瓦（m²·K/W）。

5.2.1.2 基于表面温度的校核方法

绝热系统最外层表面温度不应低于设计工况下环境空气露点温度加1℃。

5.2.2 热收缩补偿设计

5.2.2.1 收缩量计算

冷收缩量按公式（2）计算：

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中：

ΔL ——计算方向上的冷收缩量，单位为毫米（mm）；

α ——材料在该温度区间的平均线膨胀系数，单位为每摄氏度（℃⁻¹）；

L ——该方向上的特征尺寸，单位为毫米（mm）；

ΔT ——安装温度与最低运行温度的差值，单位为摄氏度（℃）。

5.2.2.2 补偿措施

5.2.2.3 补偿措施

5.2.2.3.1 整体预制型绝热系统：预制块之间应设置柔性膨胀缝，缝宽不应小于收缩差计算值的 1.5 倍，缝内应填充弹性低温密封材料。膨胀缝间距水平方向不宜大于 3 m，垂直方向不宜大于 4 m。

5.2.2.3.2 金属管道外绝热系统：应在管道固定支架处及弯头等应力集中区域设置波纹管补偿器，材质宜选用奥氏体不锈钢（如 06Cr19Ni10），设计补偿量不应小于计算位移量的 1.5 倍。

5.2.2.3.3 绝热层与基体之间应设置滑动接头或采用分层错缝铺贴方式，使绝热层能够相对于基体产生滑动，滑动面应平整并涂敷低摩擦系数材料。

5.2.2.3.4 所有补偿措施不应在绝热系统中形成连续的冷桥。

5.2.3 密封设计

5.2.3.1 二次密封结构

5.2.3.1.1 应采用主密封与二次密封相结合的双重密封设计。主密封层应紧邻绝热层外侧设置，材料应符合 5.1.2 的要求。二次密封层应设置在主密封层外侧，材料应与主密封具有不同的失效模式。

5.2.3.1.2 二次密封层应能将泄漏气体导向安全区域并设置检测口，检测口的数量和位置应能有效监测密封夹层内的密封状态，并应符合设计要求。

5.2.3.1.3 检测口处应能监测密封夹层内的压力变化，压力异常升高时应发出报警信号。报警阈值的设定应符合设计要求。

5.2.3.1.4 单一密封层失效时，二次密封结构应保证绝热系统整体气密性满足 5.4.2 的要求。

5.2.3.2 防潮密封结构

5.2.3.2.1 防潮层与密封层之间应形成连续防潮密封。防潮层搭接、穿孔及终端处均应进行密封处理。

5.2.3.2.2 搭接应采用双面胶粘密封并辅以机械压紧，搭接宽度不应小于 50 mm。

5.2.3.2.3 支撑件、测温元件等穿透防潮层处应设置密封套筒及密封胶填充，密封长度不应小于 30 mm。

5.2.3.2.4 防潮层与密封层交界处，防潮层应延伸至密封层下方不少于 100 mm 并搭接密封。

5.2.3.2.5 防潮密封结构应能承受设计规定的内外压差，不应出现渗漏。

5.2.3.2.6 系统最低部位应设置冷凝水导排口，导排口应设水封或止回装置，防止湿气倒灌。

5.2.4 支承与固定设计

5.2.4.1 低温冷桥控制

5.2.4.1.1 穿透绝热层的金属件应选用低热导率材料。奥氏体不锈钢的热导率不应大于 $16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，碳钢的热导率不应大于 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。宜采用玻璃钢等非金属材料制作支承构件，玻璃钢的热导率不应大于 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

5.2.4.1.2 支承件与冷侧基体的接触面积应尽可能小，宜采用点接触或线接触形式。金属支承件应在冷侧设置断热隔垫，隔垫材料的热导率不应大于 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，厚度不应小于 10 mm。

5.2.4.1.3 由冷桥引起的局部热流增量不应超过平均热流密度的 20%，应经传热分析确定冷桥影响范围并采取补偿措施。

5.2.4.2 固定件材质选择

5.2.4.2.1 金属固定件应选用低温韧性良好的材料（如奥氏体不锈钢、9%镍钢），在 -196°C 时的 V 型缺口冲击吸收能量不应低于 27 J，应按 GB/T 229 规定的方法进行测定。

5.2.4.2.2 非金属固定件在 -196°C 时的力学性能应符合设计要求。

5.2.4.2.3 金属固定件应进行热浸镀锌或采用不锈钢材质。热浸镀锌层厚度应符合 GB/T 13912 的规定。

5.2.4.2.4 固定件与绝热材料直接接触时，不应发生有害的化学反应。不锈钢紧固件在泡沫玻璃环境中不应产生应力腐蚀，必要时应在接触面增设隔离膜。

5.2.4.2.5 固定件的布置间距应能保证绝热层在运输、安装及运行过程中不发生移位或脱落，并应符合设计要求。

5.2.5 应力分析与安全系数

5.2.5.1 热应力分析

5.2.5.1.1 应建立包含绝热层、密封层、防潮层及基体的有限元分析模型，施加温度载荷计算各层材料中的热应力分布，分析应考虑材料性能随温度的变化。

5.2.5.1.2 热应力分析应在最不利温度工况（含紧急泄放等瞬态工况）下进行校核，层间剪切应力和拉伸应力不应超过材料在该温度下的许用应力。

5.2.5.2 机械应力分析

5.2.5.2.1 绝热系统应能承受自重、风荷载、地震作用及可能的冲击载荷。风荷载应按 GB 50009 的规定计算，基本风压取值不应低于当地 50 年一遇值。地震作用应按 GB 50011 的规定计算。

5.2.5.2.2 外保护层及支承结构在最不利荷载组合下的挠度应符合设计要求。固定件的承载力应通过计算和试验进行验证，单个固定点的极限承载力不应小于设计荷载。

5.2.5.2.3 应考虑冷态运行时由于收缩产生的附加应力，并将其纳入机械应力组合中进行校核。

5.2.5.3 最小安全系数要求

5.2.5.3.1 金属支承及固定件基于材料屈服强度的安全系数不应小于 1.5。

5.2.5.3.2 非金属结构件基于极限强度的安全系数不应小于 2.7。

5.2.5.3.3 绝热材料的强度安全系数应符合 GB 51156 的规定。

5.2.5.3.4 密封材料及防潮层的安全系数应符合设计要求。

5.2.5.3.5 所有安全系数校核均应基于材料在-196℃时的实测力学性能数据。

5.3 施工与安装要求

5.3.1 施工准备

5.3.1.1 环境条件控制

5.3.1.1.1 施工环境温度不应低于 5℃。

5.3.1.1.2 室外施工应搭设防雨、防风围挡，抗风能力应符合施工方案要求。

5.3.1.1.3 施工前应对基体表面进行处理。金属基体表面应进行除锈，除锈等级不应低于 GB/T 8923.1 规定的 St2 级或 Sa2 级。

5.3.1.1.4 基体表面应清洁、干燥、无油污，表面粗糙度应满足密封材料粘接的要求。

5.3.1.1.5 施工区域应配备温湿度监测记录装置，并按施工方案规定的频率记录环境参数。

5.3.1.2 材料复验

5.3.1.2.1 绝热材料、密封材料及防潮层材料供应商应提供可溯源至生产批次的合格证及第三方型式检验报告。合格证应标明材料名称、规格、生产日期、批号及执行标准。型式检验报告应由具备相应资质的检测机构出具，其检测项目应涵盖本文件 5.1 的各项要求。

5.3.1.2.2 材料进场后应核对实物与合格证的一致性，核验内容包括材料名称、规格型号、生产批号、数量及外观质量。核验应在监理见证下进行，核验记录应归档保存。

5.3.1.2.3 核验不合格的材料不得用于工程。当对材料质量有异议时，应进行见证取样复验，复验应在监理见证下进行，由具备相应资质的检测机构出具报告。

5.3.2 绝热层安装

5.3.2.1 预制块安装要求

5.3.2.1.1 预制块应采用分层错缝铺贴，相邻层接缝错开间距不宜小于 100 mm。

5.3.2.1.2 预制块与基体之间的粘接应采用低温性能合格的胶粘剂，涂胶覆盖率不应低于 90%。

5.3.2.1.3 拼缝宽度不应大于 5 mm，应采用与预制块材质相容的密封胶或低温胶泥嵌填密实。

5.3.2.1.4 每层预制块安装后应进行平整度检查，2 m 靠尺与层表面的间隙不应超过 5 mm。

5.3.2.1.5 预制块切割面应平整，切割后预制块的最小边长不应小于 150 mm

5.3.2.2 现场浇注要求

5.3.2.2.1 施工环境温度宜为 10℃~40℃，相对湿度不宜大于 80%。不满足要求时应采取防护措施。

- 5.3.2.2.2 混合料配比应符合产品说明书的要求。
- 5.3.2.2.3 浇注应连续均匀，单次浇注厚度不宜大于设计规定值。多层浇注时，层间应进行界面处理。
- 5.3.2.2.4 浇注体不应出现空洞、裂纹或明显的密度不均。泡沫体整体密度偏差不应超过设计值的 $\pm 10\%$ 。
- 5.3.2.2.5 浇注后应按产品要求进行养护，养护期间环境温度波动不应超过 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，不应有振动干扰。
- 5.3.2.2.6 珍珠岩粉末型绝热层的现场充装应在干燥条件下进行，应分层振实，每层虚铺厚度不宜大于150 mm，振实至设计密度后方可进行下一层充装。充装完毕后顶部应预留沉降补偿高度。

5.3.2.3 接缝处理

- 5.3.2.3.1 所有预制块接缝、预制块与固定件周围的间隙、不同绝热材料交界面处的接缝均应进行密封填充处理。
- 5.3.2.3.2 接缝宽度大于3 mm时应先嵌填低温密封胶泥，再于表面粘贴密封带并压实。密封带宽度不应小于50 mm。
- 5.3.2.3.3 连续浇注结构的施工缝，应在再次浇注前涂刷界面剂。
- 5.3.2.3.4 接缝处理后应进行外观检查，所有接缝应密实、平整、无收缩裂缝。

5.3.3 密封层施工

5.3.3.1 密封胶施工要求

- 5.3.3.1.1 粘接面应清洁、干燥、无浮尘。
- 5.3.3.1.2 双组分密封胶应按产品说明书规定的比例计量并搅拌均匀，混合后应在适用期内使用完毕。
- 5.3.3.1.3 密封胶的涂覆厚度及接头部位的加强处理应符合设计要求。
- 5.3.3.1.4 密封胶涂覆后至表干期间应防止灰尘和水汽接触，表干时间应符合产品说明书的规定。
- 5.3.3.1.5 密封胶施工完成后应进行外观检查，缺陷应补涂修复。

5.3.3.2 密封膜铺设要求

- 5.3.3.2.1 密封膜铺设应在密封胶表干后进行。
- 5.3.3.2.2 密封膜的搭接应顺水搭接，搭接宽度不应小于100 mm。
- 5.3.3.2.3 搭接部位应采用与密封膜材质兼容的胶粘剂或热合方式进行密封连接，连接强度不应低于母材强度的80%。
- 5.3.3.2.4 密封膜在转角、穿出构件等异形部位应进行加强处理，宜采用预成型密封套或现场热塑成型方法。
- 5.3.3.2.5 铺设过程中出现的破损应及时修补，修补片尺寸应超出破损边缘不小于50 mm，修补片边缘应圆角处理。
- 5.3.3.2.6 密封膜铺设后应紧贴下层表面，不应有明显的褶皱或架空。

5.3.4 防潮层施工

5.3.4.1 防潮层搭接要求

- 5.3.4.1.1 防潮层应采用连续搭接铺贴方式，搭接方向应从低处向高处进行。
- 5.3.4.1.2 搭接宽度不应小于50 mm。
- 5.3.4.1.3 搭接缝应采用专用密封胶或压敏胶带进行密封，不得仅依靠机械压紧实现搭接。
- 5.3.4.1.4 系统终端、开口边缘及与设备连接处，防潮层应翻边并用压条和密封胶固定，翻边宽度应符合设计要求。
- 5.3.4.1.5 施工过程中的临时开口应及时密封封堵。

5.3.4.2 防潮层固定要求

- 5.3.4.2.1 防潮层应采用机械固定与粘接固定相结合的方式。
- 5.3.4.2.2 机械固定件穿透防潮层处应采用密封垫片或密封胶密封。
- 5.3.4.2.3 粘接固定应使用与防潮层材料匹配的胶粘剂。
- 5.3.4.2.4 固定完成后防潮层应平整服帖，不应出现局部凸起或剥离。

5.3.4.2.5 施工完成后应进行外观检查，确认连续性和完整性。

5.3.5 质量检验与验收

5.3.5.1 LNG 深冷绝热系统施工过程中应进行分项、分部工程质量检验与验收。

5.3.5.2 隐蔽工程在隐蔽前应进行专项检验，检验合格后方可进行下道工序施工。

5.3.5.3 质量检验与控制应形成书面记录，记录内容应包括检验项目、时间、环境条件、检验结果、操作人员及检验人员签名等信息。

5.3.5.4 分项工程验收应在该分项所有检验项目合格后进行，分部工程验收应在所属分项工程均验收合格后进行。

5.3.5.5 验收不合格的工程项目应返工处理，直至满足本文件及设计要求。

5.4 系统性能要求

5.4.1 绝热性能要求

5.4.1.1 整体热流密度限值

5.4.1.1.1 在环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、介质温度 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下，整体热流密度应符合以下要求：

——储罐罐壁绝热系统：不应大于 25 W/m^2 ；

——储罐罐顶绝热系统：不应大于 18 W/m^2 ；

——管道绝热系统：不宜大于 20 W/m^2 。

5.4.1.1.2 整体热流密度的测定应按本文件 6.2.1 规定的方法进行，测试应在系统首次冷却稳定运行不少于 72 h 后进行。

5.4.1.1.3 测点布置应能反映系统整体热流密度分布，取所有有效测点的平均值。

5.4.1.2 冷损失率限值

5.4.1.2.1 公称容积大于 50000 m^3 的 LNG 储罐，日蒸发率不应大于 0.05% /天。

5.4.1.2.2 公称容积不超过 50000 m^3 的 LNG 储罐，日蒸发率不应大于 0.08% /天。

5.4.1.2.3 管径 DN150 及以上的主要工艺管道，单位长度等效冷损失不应超过 30 W/m 。

5.4.1.2.4 冷损失率的测定应按本文件 6.2.2 规定的方法进行。设计文件中应明确计算依据和验收标准。

5.4.2 密封性能要求

5.4.2.1 气密性试验指标

5.4.2.1.1 密封层和二次密封结构施工完成后应进行气密性试验。

5.4.2.1.2 试验介质宜采用氦气或干燥氮气。

5.4.2.1.3 试验压力及允许泄漏率应符合设计要求。

5.4.2.1.4 气密性试验应在密封层施工完毕且连接附件均已密封的条件下进行，试验步骤应按 6.2.3.1 的规定执行。

5.4.2.2 保冷密封性试验指标

绝热系统在冷态运行条件下应进行保冷密封性试验，验证密封层在低温下的完整性。试验指标应符合设计要求。

5.4.3 结构完整性要求

5.4.3.1 耐低温收缩循环能力

5.4.3.1.1 绝热系统应能承受从常温至 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度循环而不发生结构性损坏，循环次数应符合设计要求。

5.4.3.1.2 低温收缩循环试验应按 6.2.4 规定的方法进行。

5.4.3.1.3 循环试验后应进行外观检查和密封性复测。密封层不应出现影响密封性能的裂缝，绝热层不应出现贯通裂缝或大面积剥离，绝热材料不应出现碎化或显著粉化，固定件不应出现松动或断裂。

5.4.3.1.4 循环试验后系统整体热流密度增量应符合设计要求，密封性能仍应满足 5.4.2 的要求。

5.4.3.2 抗外界冲击能力

5.4.3.2.1 外保护层应能抵抗施工、巡检及环境因素引起的外界冲击，不应导致密封和绝热功能丧失。

5.4.3.2.2 外保护层应能承受 10 J 能量的冲击而不产生穿透性损伤，试验方法应按 GB/T 2423.55 的规定执行。

5.4.3.2.3 外保护层的耐磨性能应符合设计要求。

5.4.3.2.4 结构件和紧固件应能抵抗正常使用中因风振引起的疲劳载荷

5.4.4 耐久性要求

5.4.4.1.1 绝热系统的设计使用年限不应小于 50 年，或应与储罐主体结构的设计使用年限一致。

5.4.4.1.2 在设计使用年限内，整体热流密度增量及密封、防潮性能的退化应符合设计要求。

5.4.4.1.3 耐久性验证应按 GB/T 19687 的规定进行加速老化试验，或采用其他经认可的等效方法。

5.4.4.1.4 宜在代表性设施上设置监测段，定期采集绝热性能数据，验证耐久性设计。

6 试验方法

6.1 材料试验方法

6.1.1 导热系数试验

按GB/T 17363或GB/T 10297规定的方法进行。

6.1.2 密度和孔隙率试验

密度按GB/T 1463测定。孔隙率通过真密度和表观密度计算。

6.1.3 低温力学性能试验

试样在-196 ℃下浸泡不少于30 min后测试。

6.1.4 密封材料试验

6.1.4.1 低温密封性测试

将密封材料制成标准密封接头或涂敷于模拟法兰面，在液氮温度下以氦气加压至0.1 MPa，采用氦质谱检漏仪检测泄漏率。泄漏率不应大于 1×10^{-6} Pa·m³/s。压力衰减法也可作为替代，记录15 min内的压力降。

6.1.4.2 老化性能测试

密封材料应进行热空气加速老化试验，试验温度宜为100 ℃，老化时间不少于168 h。老化后试样应重复低温密封性测试，其泄漏率变化不应超过初始值的20%。此外，可进行紫外辐射老化（按GB/T 2406.2规定）和耐介质浸泡试验。

6.1.5 防潮层水蒸气渗透率试验

按GB/T 1037规定的杯式法测定。

6.2 系统绝热性能试验

6.2.1 冷态热流密度测试

6.2.1.1 测试装置与传感器布置

6.2.1.1.1 应在 LNG 储罐或模拟试验容器的外表面代表性区域布置热流计和表面温度传感器。

6.2.1.1.2 热流计的性能要求应符合 GB/T 17357 的规定。

6.2.1.1.3 传感器应均匀布置，并避开接管、人孔等不规则区域。

6.2.1.1.4 数据采集应符合 GB/T 17357 或 GB/T 8174 的规定。

6.2.1.2 测试步骤与数据处理

系统应充注液氮并稳定冷态运行，直至达到稳态工况。连续记录各点热流密度，测点布置和记录时间应符合GB/T 17357的规定，平均热流密度按公式（3）计算，整体热流密度应取各区域面积加权平均值：

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (1)$$

式中：

$\bar{q}$ ——平均热流密度，单位为瓦每平方米（W/m²）；

q_i ——第*i*个测点的热流密度，单位为瓦每平方米（W/m²）；

n ——有效测点数量。

6.2.2 冷损失率测试

6.2.2.1 温差法

当系统充注液氮达到稳态后，可测量储罐内介质温度和环境温度，结合总传热系数和传热面积计算热流量。冷损失率可通过等效蒸发量换算。本方法适用于不便直接测量蒸发量的场合。

6.2.2.2 蒸发法

蒸发法测试方法如下：

——系统充满液氮后，关闭所有进出口阀门，测量自然蒸发的气体量；

——在液位稳定期间连续记录不少于 24 h 的蒸发量；

——日冷损失率按公式（4）计算；

$$\eta = \frac{m_{\text{evap}}}{M_{\text{total}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

η ——日冷损失率；

m_{evap} ——24 h内蒸发量，单位为千克（kg）；

M_{total} ——系统初始充注液氮总质量，单位为千克（kg）；

——测试期间环境温度应记录，宜修正到标准工况。

6.2.3 密封性能试验

6.2.3.1 气密性试验（氦气检漏）

密封层施工完成后，应对封闭空间进行气密性试验。试验介质宜采用氦气或干燥氮气。采用氦气检漏时，试验压力及允许泄漏率应符合设计要求。

6.2.3.2 保冷密封性试验（液氮蒸发）

系统充注液氮并达到稳态后，应进行保冷密封性试验。试验方法可按GB/T 18443.5的规定执行。也可采用真空箱法对密封层进行局部检测。

注：GB/T 18443.5适用于液氢、液氧、液氮、液氩、液氦、液化天然气等低温绝热压力容器静态蒸发率试验。

6.2.4 低温收缩循环试验

应采用缩比模型或实际系统局部构件进行低温收缩循环试验。试验应按以下步骤进行：

——将试件从室温以不超过 5 °C/min 的速率冷却至-196 °C，保温 1 h 后升温至室温，此为一个循环；

——循环次数应符合设计要求；

——每次循环后应检查绝热层表面、接缝及密封层是否有裂缝、脱粘或变形，并测量尺寸变化。

6.3 施工质量检测方法

6.3.1 绝热层厚度检测

6.3.1.1 超声波测厚法

采用超声波测厚仪进行检测，应按GB/T 11344的规定执行。测点布置及数量应符合设计要求，每个测点应取多次读数的平均值。

6.3.1.2 激光测距法

可采用三维激光扫描仪或激光测距仪进行非接触式测量，通过点云数据计算厚度偏差，适用于大型储罐整体轮廓检测。

6.3.2 接缝与冷缝检测

绝热层安装完成后，可采用红外热成像仪对表面进行扫描检测。检测应在系统冷态运行条件下进行，局部温度异常区域应标记为可疑缺陷位置并记录。

6.3.3 防潮层连续性检测

防潮层施工完成后，应采用电火花检漏仪进行针孔检测。检测电压应根据防潮层厚度确定。无火花放电为合格，对接缝和修补部位应重点检测。

6.3.4 密封层完整性检测

密封层施工完成后应进行完整性检测。可采用抽真空法，将密封夹层抽真空至设计规定的绝对压力，关闭阀门后监测压力回升情况。压力回升率应符合设计要求。大型系统可分区进行检测。

7 检验规则

7.1 检验分类

产品检验分为出厂检验及型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 每台产品出厂均应由生产厂的质量监督检验部门进行检验，检验合格并附合格证后方可出厂。

7.2.2 出厂检验应以同一原料、相同生产条件下连续生产的同一规格产品为一批。

7.2.3 出厂检验项目应包括：

- 外观质量（目视检查）；
- 尺寸偏差（按设计图纸及GB/T 2828.1的规定）；
- 表观密度（按5.1.1.2规定的试验方法）。

7.2.4 材料性能抽检的样本量不应少于3件；外观及尺寸偏差的抽样方案应按GB/T 2828.1的规定，采用一般检验水平II、AQL值为4.0。

7.3 型式检验

7.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

- 新产品定型鉴定或老产品转厂生产时；
- 正式生产后，如材料、设计、工艺有较大改变，可能影响产品性能时；
- 正常生产时，每三年进行一次；
- 产品停产一年以上恢复生产时；
- 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时；
- 国家质量监督机构提出进行型式检验要求时。

7.3.2 型式检验项目应包括本文件第5章和第6章规定的全部项目，其中：

- 材料性能检验项目应按6.1的规定执行，包括：导热系数、密度和孔隙率、低温力学性能、密封材料低温密封性及老化性能、防潮层水蒸气渗透率等全部材料试验项目；
- 系统绝热性能检验项目应按6.2的规定执行，包括：冷态热流密度测试、冷损失率测试、密封性能试验及低温收缩循环试验；

——施工质量检验项目应按 6.3 的规定执行，包括：绝热层厚度检测、接缝与冷缝检测、防潮层连续性检测及密封层完整性检测。

7.4 判定规则

7.4.1 产品检验结果中，所有检验项目均符合要求时，判定该批产品合格。

7.4.2 产品检验结果中，若有不合格项，应加倍抽样复验；复验仍不合格时，判该批产品不合格。

7.4.3 型式检验项目全部符合要求时，判定型式检验合格。若有一项不符合，应在查明原因并采取整改措施后，重新抽样进行全部项目检验，或仅对不合格项目加倍抽样复验。复验仍不合格，则判定型式检验不合格。

7.5 现场验收检验

7.5.1 施工过程检验

7.5.1.1 隐蔽工程检验

对每道工序完成后难以再行检查的部位，应在隐蔽前进行检验，检验项目包括绝热层厚度、接缝处理、防潮层搭接等，并形成隐蔽工程记录。

7.5.1.2 分项工程检验

各分项工程完成后，应按5.3的要求进行施工质量检验，检验项目包括绝热层表面质量、密封层连续性和防潮层施工质量等。

7.5.2 竣工检验

7.5.2.1 系统冷态试验

系统竣工后应进行冷态试验，模拟工作温度条件，测试整体热流密度和密封性能，试验方法按6.2执行。

7.5.2.2 整体性能评估

根据冷态试验结果，对系统的绝热性能、密封性能及结构完整性进行综合评估，并出具检测报告。

参考文献

- [1]GB/T 8175—2008 设备及管道绝热设计导则
- [2]GB/T4272—2008 设备及管道绝热技术通则
- [3]GB 50126—2008 工业设备及管道绝热工程施工规范
- [4]GB 50185—2010 工业设备及管道绝热工程质量检验评定标准
- [5]GB 8624—2012 建筑材料及制品燃烧性能分级
- [6]GB/T16617-96 设备及管道保冷效果的测试与评价
- [7]ASTM A167 Specification for Stainless and Heat - Resisting Chromium-Nickel Steel Sheet and Strip (不锈钢和耐热铬镍钢板和钢带规范)
- [8]ASTM C165 Test Method for Measuring Compressive Properties of Thermal Insulations (测量绝热材料压缩性的试验方法)
- [9]ASTM C177 Standard Test Method for Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus (用护热板法测定稳态热通量和传导性的试验方法)
- [10]ASTM C303 Test Method for Density of Preformed Block-Type Thermal Insulation (预制块型绝热材料密度的试验方法)
- [11]ASTM C518 Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (用热流计法测定稳态热通量和热传递特性的试验方法)
- [12]ASTM C591 Specification for Un-faced Preformed Rigid Cellular Polyisocyanurate Thermal Insulation (非表面加工用预制刚性泡沫聚氨基甲酸酯绝热材料规范)
- [13]ASTM C623 Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Glass-Ceramics by Resonance (用共振对玻璃和玻璃陶瓷材料的杨氏模量、剪切模量及泊松比的试验方法)
- [14]ASTM D1621 Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics (硬质泡沫塑料的压缩特性的试验方法)
- [15]ASTM D1622 Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics (硬质泡沫塑料的表观密度的测试方法)
- [16]ASTM D1623 Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics (硬质泡沫塑料张力和张力粘合性能的试验方法)
- [17]ASTM D2856 Test Method for Open-Cell Content of Rigid Cellular Plastics by the Air Pycnometer (用空气比重计测量硬质泡沫塑料的开孔气穴含量的方法)
- [18]ASTM D3014 Test Method for Flame Height, Time of Burning, and Loss of Mass of Rigid Thermoset Cellular Plastics in a Vertical Position (硬质热固泡沫塑料在垂直状态时的火焰高度, 燃烧时间和重量损失的测试方法)
- [19]ASTM E84 Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials (建筑材料表面燃烧特性的测试方法)
- [20]ASTM E96 Test Method for Water Vapor Transmission of Materials (材料的水蒸气散布的测试方法)
- [21]CINI Manual General Requirements for the Thermal Insulation of "Cold" Pipeline and Equipmen ("冷" 管道和设备绝热要求通则)
- [22]EN 14308 Thermal insulation products for building equipment and industrial installations - Factory made rigid polyurethane foam (PUR) and polyisocyanurate foam (PIR) products - Specification (工业装置和建筑设备用热绝缘产品——工厂制硬质聚氨酯泡沫和聚异氰脲酸酯泡沫产品——规范)

[23]ISO 15665 Acoustic Insulation for Pipes, Valves and Flanges (声学. 管、阀和法兰隔声)
