

指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD17-2016



中国船级社

# 薄膜型液化天然气运输船建造检验指南 (2016)

生效日期：2016年11月1日

# 目录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 概述.....                  | 1  |
| 第 1 节 总则.....                  | 1  |
| 1.1.1 适用性说明.....               | 1  |
| 1.1.2 一般要求.....                | 1  |
| 第 2 章 船体结构.....                | 3  |
| 第 1 节 船体材料.....                | 3  |
| 2.1.1 钢板材料.....                | 3  |
| 2.1.2 焊接.....                  | 3  |
| 第 2 节 建造精度.....                | 3  |
| 2.2.1 关键节点.....                | 3  |
| 2.2.2 关键节点控制的前期准备.....         | 6  |
| 2.2.3 关键节点的装配检验.....           | 7  |
| 2.2.4 关键节点的完工检验.....           | 7  |
| 2.2.5 船舶建造精度控制完工文件.....        | 8  |
| 第 3 节 平整度（货舱内表面）.....          | 8  |
| 2.3.1 基本要求.....                | 8  |
| 2.3.2 货舱分段内表面平整度.....          | 8  |
| 2.3.3 货舱分段总组和坞内搭载内表面平整度.....   | 8  |
| 2.3.4 最终平整度.....               | 8  |
| 第 4 节 特殊区域.....                | 8  |
| 2.4.1 泵塔基座区域.....              | 8  |
| 2.4.2 液穹区域.....                | 9  |
| 2.4.3 气穹区域.....                | 9  |
| 2.4.4 舷侧开口区域.....              | 9  |
| 2.4.5 其他特殊结构.....              | 10 |
| 第 3 章 薄膜型 LNG 运输船典型货物围护系统..... | 11 |
| 第 1 节 NO96 货物围护系统.....         | 11 |
| 3.1.1 NO 96 货物围护系统综述.....      | 11 |
| 3.1.2 NO 96 系统零部件制造检验.....     | 12 |
| 3.1.3 NO96 货物围护系统安装检验.....     | 13 |
| 第 2 节 MARK III 货物围护系统.....     | 16 |
| 3.2.1 MARK III 货物围护系统综述.....   | 16 |
| 3.2.2 Mark III 系统零部件制造检验.....  | 19 |
| 3.2.3 Mark III 系统安装检验.....     | 21 |
| 第 3 节 CS-1 货物围护系统.....         | 24 |
| 3.3.1 CS-1 货物围护系统综述.....       | 24 |
| 第 4 节 MARK V 货物围护系统.....       | 25 |
| 3.4.1 MARK V 货物围护系统综述.....     | 25 |
| 第 4 章 薄膜型 LNG 运输船货物操作系统.....   | 26 |
| 第 1 节 LNG 运输船货物操作系统综述.....     | 26 |
| 4.1.1 货物操作系统组成.....            | 26 |
| 4.1.2 货物操作系统作用.....            | 26 |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 2 节 LNG 运输船货物操作系统设备检验 .....        | 27 |
| 4.2.1 液货设备检验 .....                   | 27 |
| 4.2.2 辅助设备检验 .....                   | 28 |
| 4.2.3 蒸发气体处理设备 .....                 | 29 |
| 第 3 节 薄膜型 LNG 运输船货物操作系统管系与泵塔检验 ..... | 30 |
| 4.3.1 货物管系 .....                     | 30 |
| 4.3.2 泵塔 .....                       | 31 |
| 第 4 节 薄膜型 LNG 运输船货物操作系统辅助系统检验 .....  | 33 |
| 4.4.1 主、次层绝缘层空间的增压和惰化系统 .....        | 33 |
| 4.4.2 主、次层绝缘层空间的保护 .....             | 33 |
| 4.4.3 隔离空舱加热系统 .....                 | 33 |
| 4.4.4 货舱保护 .....                     | 34 |
| 4.4.5 货物区域通风 .....                   | 34 |
| 4.4.6 应急关断系统 .....                   | 34 |
| 4.4.7 货物自动化控制平台 .....                | 35 |
| 4.4.8 货舱测量系统 .....                   | 35 |
| 4.4.9 气体检测系统 .....                   | 35 |
| 4.4.10 消防系统 .....                    | 36 |
| 4.4.11 甲板冷却系统 .....                  | 36 |
| 4.4.12 电缆敷设 .....                    | 36 |
| 4.4.13 防爆电气设备 .....                  | 37 |
| 第 5 章 气体试航和第一次装货与卸货操作 .....          | 40 |
| 第 1 节 气体试航 .....                     | 40 |
| 5.1.1 总则 .....                       | 40 |
| 5.1.2 气体试航前冷态试验 .....                | 40 |
| 5.1.3 货物操作系统试验 .....                 | 54 |
| 5.1.4 气体试航期间的气体管理系统试验 .....          | 70 |
| 第 2 节 第一次装货和卸货操作 .....               | 71 |
| 5.2.1 第一次装货和卸货操作 .....               | 71 |
| 5.2.2 装载限制验证 .....                   | 71 |
| 5.2.3 冷点验证 .....                     | 71 |
| 附录 1 某 LNG 运输船的船体关键节点图表 .....        | 73 |

# 第 1 章 概述

## 第 1 节 总则

### 1.1.1 适用性说明

- 1.1.1.1 本指南适用于船长150 m及以上、具有双舷侧、双层底、双层甲板和双层横舱壁，且机舱位于尾部、最大蒸气压力小于0.07MPa、采用薄膜型整体液货舱载运散装液化天然气的无限航区船舶。其他采用薄膜型整体液货舱的装置可参考执行。
- 1.1.1.2 本指南涉及的货物围护系统类型暂时仅针对现有的薄膜型货物围护系统，如典型的NO96货物围护系统、Mark III货物围护系统等。其他由本指南涉及的货物围护系统衍生出的货物围护系统类型和新货物围护系统类型暂不考虑。
- 1.1.1.3 本指南针对薄膜型 LNG 运输船相对其他种类船舶独有的特征，为薄膜型 LNG 运输船在建造阶段的检验和修理提供建造质量标准方面的指导，为验船师在 LNG 运输船建造阶段检验提供技术支持。指南中的图片、示意图和表格是一种对当前采用标准设计的薄膜型 LNG 运输船建造检验的可接受的惯例做法，供参考使用。
- 1.1.1.4 本指南对船舶共同特征部分的检验应遵循 CCS《钢制海船入级规范》、《材料与焊接规范》、《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》和造船技术规格书中约定的其它标准。
- 1.1.1.5 本指南的内容是基于 CCS 参与建造薄膜型 LNG 运输船的实际经验，同时参考了相关的安装及操作手册和船厂建造经验编制而成。阐述了薄膜型 LNG 运输船的船体结构、货物围护系统、货物操作系统的安装和试验，以及气体试航和第一次装货和卸货操作要点。

### 1.1.2 一般要求

- 1.1.2.1 依据规范和专利公司标准进行检验。在开工会议上，各参与方根据船厂的实际能力和相关技术规格书的要求制定旨在确保质量和施工进度的检验、试验计划。
- 1.1.2.2 与绝缘、薄膜和货舱安装相关的自动/手动焊接作业应由具有资质的操作者/焊工完成，操作者/焊工应严格遵守已批准的焊接工艺规程要求（WPS），使用经 CCS 认可的焊接耗材，并且经过船厂严格有效的培训。
- 1.1.2.3 无损检测操作员使用设备对焊缝进行无损检测，评估焊缝质量，操作员需获得由 CCS 依据其材料与焊接规范或相关国内或国际行业协会或组织依据适当的规范签发的资质证书。无损检测工艺应由资深 II 级及以上资质的操作员评定。
- 1.1.2.4 用于船舶结构、货物围护系统和货物操作系统的主要材料，包括船体钢板、殷瓦

合金、胶合板、隔热材料、低温不锈钢、焊接耗材等，都需要满足 CCS 材料与焊接规范的要求，其余材料持证要求详见 CCS 现行《钢制海船入级规范》、《殷瓦合金检验指南》、《胶合板检验指南》和《LNG 船货物围护系统绝热材料检验指南》。

1.1.2.5 货物操作系统中的设备应取得 CCS 产品证书，满足 CCS 产品检验指南的要求，具体持证产品清单参照 CCS 现行《钢制海船入级规范》的要求。

1.1.2.6 殷瓦合金零部件生产线和绝缘箱生产线的生产流程和成品检验需经 CCS 认可，确认生产出的产品满足技术规格书中约定的标准。

1.1.2.7 验船师通过巡检和报检两种方法在船厂履行自己的工作职责。

## 第 2 章 船体结构

### 第 1 节 船体材料

#### 2.1.1 钢板材料

2.1.1.1 除非另有规定，船体所用的钢板材料应满足本社《材料与焊接规范》第 1 篇《金属材料》的相关要求。

2.1.1.2 涉及《国际散装运输液化气体船舶构造与设备规则》第四章《货物围护》的船体钢板材料还应满足该规则第六章《构造材料与质量控制》的相关要求。

2.1.1.3 对于需满足某些特殊要求的船舶，（如 USCG CFR 46 part 154），船体所用钢板材料还应满足特殊要求中的相关规定。

#### 2.1.2 焊接

2.1.2.1 除非另有规定，船体所使用的焊接材料和焊接工艺应符合本社《材料与焊接规范》第 3 篇《焊接》的相关要求。

2.1.2.2 涉及《国际散装运输液化气体船舶构造与设备规则》第四章《货物围护》的焊接材料和焊接工艺还应满足该规则第六章《构造材料与质量控制》的相关要求。

2.1.2.3 对于需满足某些特殊要求的船舶，（如 USCG CFR 46 part 154），船体建造中所用焊接材料和焊接工艺还应满足特殊要求中的相关规定。

### 第 2 节 建造精度

#### 2.2.1 关键节点

2.2.1.1 薄膜型液化天然气运输船货舱船体维修成本极高，因此在设计初期，就需根据船舶的寿命对船舶的疲劳节点进行设计，如对板材和构架的对中质量、装配间隙焊后成型等提出要求，这些节点在建造过程中，需要受到严格的监控，以保证船体的寿命。这些需要控制的节点称为 CM（Construction Monitoring）节点，一般在图纸中会予以标明其焊接节点形式、构架对中要求、装配要求和焊后成型要求等信息，（LNG 运输船典型的结构控制节点参见附录 3），如图 2.2.1-2.2.4 是某 LNG 运输船内底板、斜板和边纵桁相交节点的相关信息。

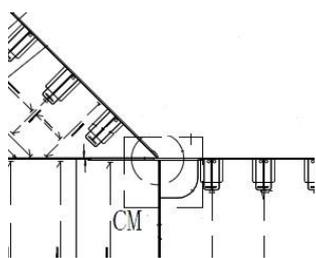


图 2.2.1 节点位置

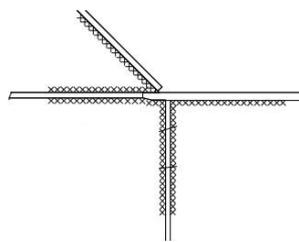


图 2.2.2 节点区域焊接形式

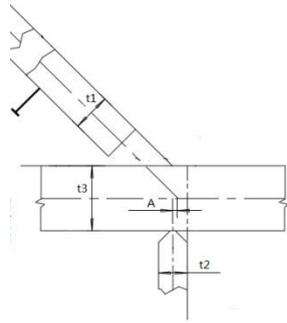


图 2.2.3 节点对中形式

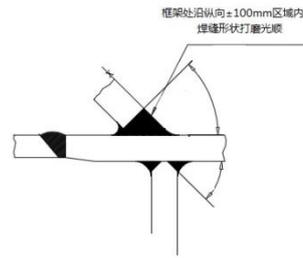


图 2.2.4 节点装配和打磨要求

2.2.1.2 板材和构架对中的形式通常有两种，图 2.2.5 和图 2.2.6 两种对中形式，一般要求三板（ $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ）中心线相交于一点，即最佳对中时，偏差值  $a=0$ 。考虑到板材厚度，几何布置等影响，部分节点的三板中心线可能不交于一点，而是存在一个初始偏差值  $a_{design}$ ，（如图 2.2.3 中的  $a_{design}=A$ ）， $a_{design}$  一般在结构和疲劳设计中已予以考虑。

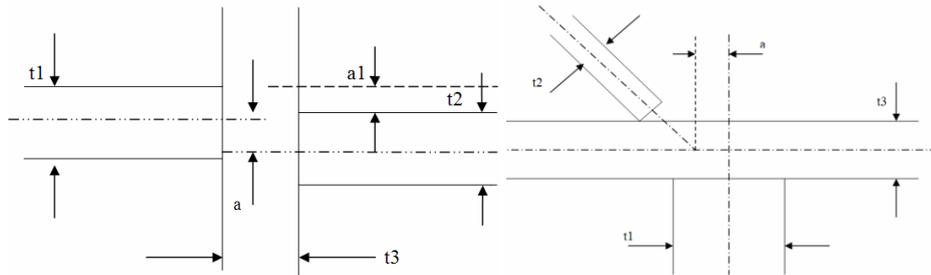


图 2.2.5 垂直对中形式

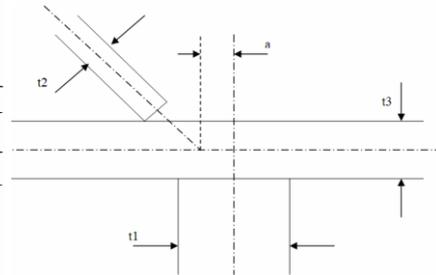


图 2.2.6 斜对中形式

2.2.1.3 装配中的对中测量就是用各种方法（施工中勘划背面构架线、参考线、检验线、使用形状样板等）测得实际的偏差值  $a$ ，并保证装配是  $a$  处于可接受的范围。如图 2.2.7 安装构架的参考线应在  $a_{max}$  和  $a_{min}$  之间。偏差值  $a$  的取值范围由结构计算和疲劳计算确定（如一般要求  $a \leq \min(t_1, t_2, t_3)/3$  且  $a \leq 5\text{mm}$ ）。

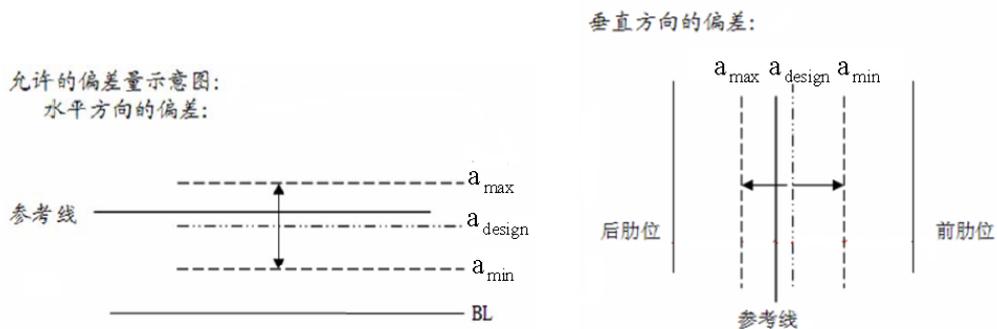


图 2.2.7 允许偏差示意图

2.2.1.4 一般情况下，板材和构架的装配对中无法直接测量，需要通过勘划参考线或者使用特殊样板进行测量，一般有以下三种测量情况：

(1) 参考线测量法：如图 2.2.8 所示，在铺板划线时，在 t3 构架面勘划距离 t2 理论线一定距离的参考线（图中为 100+t2），并反拨到 t3 的另一面。在 t1 构架对齐时，测量线的范围应该在以参考线为基准的计算范围内 $[100-1/2(t_1-t_2) \pm a]$ 。

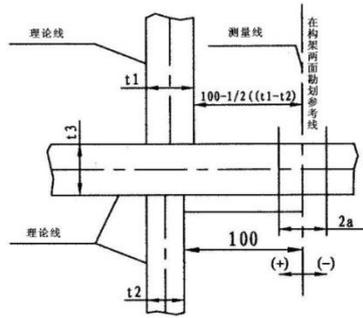


图 2.2.8 参考线测量法

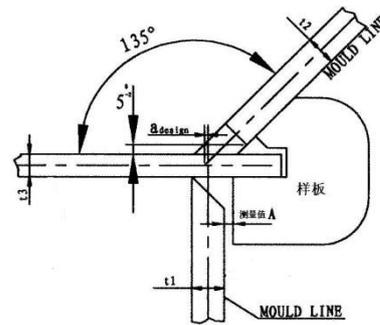


图 2.2.9 检验线测量法

(2) 样板测量法：如图 2.2.9 所示，根据三个构架的几何关系，制成样板，根据几何关系，计算出测量值 A 的范围。

(3) 参考线和样板结合测量法：如图 2.2.10 所示，在铺板划线时，在 t3 构架面勘划距离 t2 理论线一定距离的参考线（图中为 100mm），并反拨到 t3 的另一面。根据节点的几何关系制作特殊样板进行测量，在样板上勘划测量线，测量时测量线应该在以参考线为基准的一定范围内。

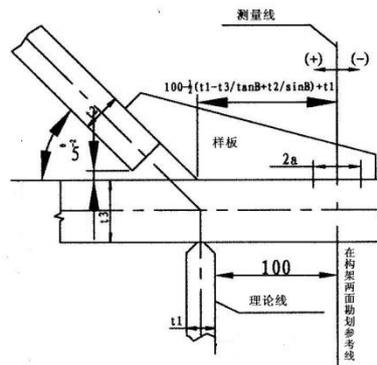


图 2.2.10 参考线和样板结合测量法

2.2.1.5 某船的关键节点装配测量：在分段制作过程中根据实际构架位置勘划参考线，并且在参考线端部和中间做上标记（如打“样冲”），如图 2.2.11 所示。在关键节点合拢装配时，根据标记复原检验线，如图 2.2.12 所示。使用经过认可的形状样板对关键节点的角度和对中度进行检验，并检验装配间隙。对装配数据进行记录，如图 2.2.13 所示。



图 2.2.11 样冲标记



图 2.2.12 勘划检验线



图 2.2.13 样板测量

## 2.2.2 关键节点控制的前期准备

2.2.2.1 审核船厂提交《船舶建造精度控制手册》内容应包括：

- (1) 根据图纸要求控制的关键节点位置，节点图，控制的一般要求（如对中度、装配间隙等）。
- (2) 关键节点控制和检验一般流程和方法。
- (3) 每个关键节点控制方法和各个区域精度控制的详细信息：

每个节点的控制和测量方法，参见本章 2.1 相关内容。各节点的检验测点信息，如该测量点节点图、构架尺寸、测量线位置、测量点位置、形状样板的几何参数和编号、设计偏差值  $a_{design}$ 、允许偏差值  $a_{max}$  和  $a_{min}$  以及装配间隙要求等。如图 2.2.14-2.2.16。

| 位置 <sup>o</sup>     | 参考线 <sup>o</sup> | 构架板厚(mm) <sup>o</sup> |                 |                 | a(mm) <sup>o</sup>        |                        |                        |                  | 样板号 <sup>o</sup>  | 分段号 <sup>o</sup> | 总段号 <sup>o</sup> |
|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                     |                  | t1 <sup>o</sup>       | t2 <sup>o</sup> | t3 <sup>o</sup> | $a_{design}$ <sup>o</sup> | $a_{max}$ <sup>o</sup> | $a_{min}$ <sup>o</sup> | 测量值 <sup>o</sup> |                   |                  |                  |
| Fr.XXX <sup>o</sup> | XXX <sup>o</sup> | X <sup>o</sup>        | X <sup>o</sup>  | X <sup>o</sup>  | X.XX <sup>o</sup>         | X.XX <sup>o</sup>      | X.XX <sup>o</sup>      | X.X <sup>o</sup> | XXXX <sup>o</sup> | XXX <sup>o</sup> | XXX <sup>o</sup> |
| ...                 | ...              | ...                   | ...             | ...             | ...                       | ...                    | ...                    | ...              | ...               | ...              | ...              |
| ...                 | ...              | ...                   | ...             | ...             | ...                       | ...                    | ...                    | ...              | ...               | ...              | ...              |

图 2.2.14 节点信息表

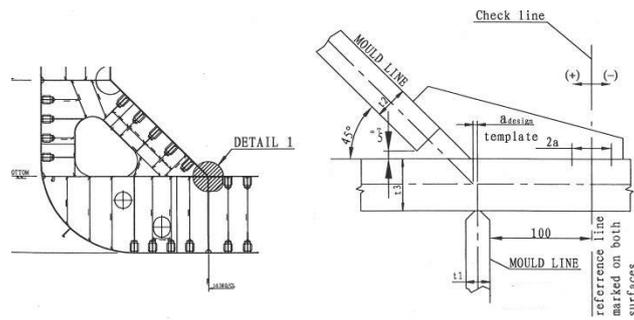


图 2.2.15 节点位置和测量示意图

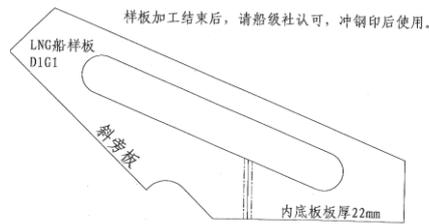


图 2.2.16 节点样板

2.2.2.2 对建造过程中需要使用的各个形状节点样板应能明显区分（如编号），对节点样板的几何参数进行确认，经 CCS 验证并打上钢印，以备在建造过程中使用。

### 2.2.3 关键节点的装配检验

2.2.3.1 在关键节点提交前，施工方应先对节点的装配情况进行检验，并对装配间隙和对中度进行测量，填写测量数据表。测量数据表为根据《船舶建造精度控制手册》细化的表格，内容一般包括如该测量点节点图、构架尺寸、测量线位置、设计偏差值  $a_{design}$ 、允许偏差值  $a_{max}$  和  $a_{min}$  以及装配间隙要求，测量时间和测量人员等，如图 2.2.17 所示。

XXX 分段 X 号节点

| 位置 <sup>o</sup>   | 参考线 <sup>o</sup> | 构件板厚 (mm) <sup>o</sup> |                 |                 | 设计 a 值 (mm) <sup>o</sup>         |                               |                               | 测量 A 值 (mm) <sup>o</sup>      |                               | 实测值 a (mm) <sup>o</sup> | 实测值 b (mm) <sup>o</sup> | 样板编号 <sup>o</sup> |
|-------------------|------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
|                   |                  | t1 <sup>o</sup>        | t2 <sup>o</sup> | t3 <sup>o</sup> | a <sub>design</sub> <sup>o</sup> | a <sub>max</sub> <sup>o</sup> | a <sub>min</sub> <sup>o</sup> | A <sub>max</sub> <sup>o</sup> | A <sub>min</sub> <sup>o</sup> |                         |                         |                   |
| Frxx <sup>o</sup> | xxx <sup>o</sup> | xx <sup>o</sup>        | xx <sup>o</sup> | xx <sup>o</sup> | x.xx <sup>o</sup>                | x.xx <sup>o</sup>             | x.xx <sup>o</sup>             | x.xx <sup>o</sup>             | x.xx <sup>o</sup>             | x.x <sup>o</sup>        | x.x <sup>o</sup>        | xxxx <sup>o</sup> |
| ...               | ...              | ...                    | ...             | ...             | ...                              | ...                           | ...                           | ...                           | ...                           | ...                     | ...                     | ...               |
| ...               | ...              | ...                    | ...             | ...             | ...                              | ...                           | ...                           | ...                           | ...                           | ...                     | ...                     | ...               |
| ...               | ...              | ...                    | ...             | ...             | ...                              | ...                           | ...                           | ...                           | ...                           | ...                     | ...                     | ...               |

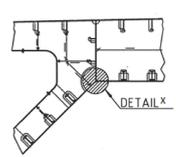
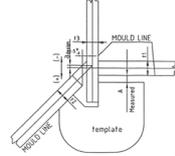



图 2.2.17 施工测量数据表

2.2.3.2 对关键节点装配间隙、焊接坡口进行检验。检验构架线和参考检验线的位置和精度。按照《船舶建造精度控制手册》要求复核测量数据，复核后签字确认。

### 2.2.4 关键节点的完工检验

2.2.4.1 在关键节点焊接完工后对节点焊缝进行目检，并根据《船舶建造精度控制手册》复核其对中度，对于有打磨光滑要求的区域进行外观检验。

2.2.4.2 按要求进行无损检测，审核无损检测报告。

## 2.2.5 船舶建造精度控制完工文件

2.2.5.1 在全船关键节点全部完工后，船厂应汇集所有节点的测量数据表，按《船舶建造精度控制手册》要求编写《船舶建造精度控制完工文件》，提交验船师审核。

## 第 3 节 平整度（货舱内表面）

### 2.3.1 基本要求

2.3.1.1 本章的所涉及的检验需按照薄膜型 LNG 运输船货物围护系统相关要求进行，详见本指南第 3 章第 1 节 3.1.3.2。

### 2.3.2 货舱分段内表面平整度

2.3.2.1 在分段完工检验后，需要对涉及货舱分段货舱内表面平面进行平整度检查，以减少在货舱整体完工后的平整度矫正工作。

### 2.3.3 货舱分段总组和坞内搭载内表面平整度

2.3.3.1 在平台总组和船坞搭载后，如涉及货舱内表面合拢，需对货舱面合拢焊缝区域进行平整度检查，以减少在货舱整体完工后的平整度矫正工作。

### 2.3.4 最终平整度

2.3.4.1 由于分段的吊装、运输、舾装件的安装等一系列施工会在一定程度上改变货舱平整度，因此 2.3.2 和 2.3.3 的平整度检查并不能代表最终的检查结果，待整个货舱船体完工后，货物围护系统搭载前，需对平整度进行最终的检查和测量。

## 第 4 节 特殊区域

### 2.4.1 泵塔基座区域

2.4.1.1 泵塔基座位于货舱后部的泵塔下方，与泵塔相连的货舱内底区域因考虑到低温影响通常使用不锈钢材料，其余结构则采用耐低温的碳钢。

2.4.1.2 泵塔基座区域结构通常与该区域双层底分段整体制作，在分段检验时应特别注意不锈钢区域的焊接情况（如焊接工艺的执行情况和焊接环境等）。因不锈钢平整度较难矫正，内底不锈钢焊接时应特别注意不锈钢板的变形控制。

2.4.1.3 基座区域反面构架是按照泵塔基座尺寸设计，一般有相对较密的横向和纵向加强，因此在施工过程中需要特别注意各构件的位置和相对距离。并在内底上构架位置做“样冲”标记，以方便泵塔基座安装。

2.4.1.4 基座区域结构完工后，按批准的无损探伤图要求进行无损探伤检查。

## 2.4.2 液穹区域

2.4.2.1 液穹区域位于穹顶甲板上，在泵塔顶部，是安装液穹的区域，同时也需承受整个泵塔的重量。其货舱面由不锈钢组成，其余结构的材料为耐低温的碳钢。大部分液货管，测量管均从此穿入货舱。出入货舱的人孔也位于此处。

2.4.2.2 液穹分段和周界穹顶分段的合拢口留焊区需要尽可能的小，以防止在后续液穹分段在合拢过程中因电焊而破坏货物维护系统。为了减小留焊区，液穹分段的制作一般与周界的穹顶分段同时进行，并同胎架施工，从而保证货舱面平整度和各个构架的对中度要求（相当于预装配）。为保证货舱开口的平整度，开口区域可增加加强筋以防止开口变形。

2.4.2.3 在液穹分段和周界穹顶分段合拢时，需按照相关要求对分段进行装配检验。应尽可能减少装配区域（特别是在周界围护系统已经施工完毕的情况下）的动火施工量。在液穹分段合拢施工完毕后，需对合拢区与的焊接和完整性进行检验，并按要求进行无损检测。对液穹分段的货舱面合拢缝和穹顶甲板合拢缝进行真空密性试验。

## 2.4.3 气穹区域

2.4.3.1 气穹的位于液穹前部，大约货舱中心的穹顶甲板上，其船体构件主要为一个气穹筒体（不锈钢）和周围的加强支撑组成。气穹区域的货舱内表面，气穹筒体，以及部分与之相连的肋板和纵桁均使用不锈钢板，其余周界区域材料为耐低温碳钢。

2.4.3.2 气穹区域分段制作中，应注意不锈钢的焊接情况（如焊接工艺的执行情况和焊接环境等），并需关注该区域的平整度。在气穹区域完工后，按批准的无损探伤图要求进行无损检测。

## 2.4.4 舷侧开口区域

2.4.4.1 舷侧开口是在货物围护系统搭载时，专门开设大型工艺孔，一般设置在舷侧纵舱壁上。

2.4.4.2 舷侧开口区域结构和舷侧分段同时制作，在舷侧分段搭载完毕后，再沿相应切割线切割，以达到开口的目的，该区域和周界一般有以下的要求：舷侧开口的切割线应布置合理，并注意内部构架的中断位置。货舱内壳和内壳开口应能保证平整度的要求，一般可在内壳开口周围加设加强筋以防止变形。

2.4.4.3 舷侧开口关闭：

(1) 对工艺孔分段和货舱合拢区域进行装配检验，应尽可能减少装配区域（特别

是在周界围护系统已经施工完毕的情况下)的动火施工量。

(2) 对工艺孔分段和货舱的合拢区域焊接和完整性进行检查,并按要求进行无损检测。

(3) 对舷侧开口区域的货舱壁和外板进行密性试验(气密试验或者真空试验)。

(4) 按认可的图纸进行最终开孔(如周界临时水密构件上的人孔、减轻孔、流水孔等)。

## 2.4.5 其他特殊结构

### 2.4.5.1 锚固扁钢的反面加强结构

锚固扁钢承受了液货舱的横向方向和纵向方向的力并将之传递到主船体上(横舱壁的横向环围,具体见第3章3.1.3.6),其反面有一圈特别的加强,如图2.4.5.1所示。

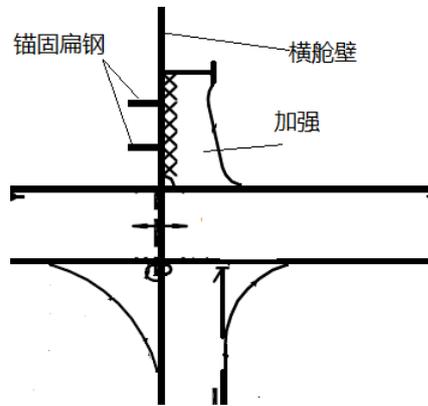


图 2.4.5.1 锚固扁钢反面加强

这些加强通常在分段制作时安装,在检验中应关注其材质、位置以及焊接形式等要求。

### 2.4.5.2 氮气排气孔附近的结构

在横舱壁上部的中间位置,设置有氮气排气管穿入(具体见第3章3.1.2.8),氮气排气管穿入的区域设有氮气管保护箱的气密结构,在分段建造时完成,检验时应特别注意箱体的材质(通常为耐低温碳钢),周界气密焊缝的质量。

## 第 3 章 薄膜型 LNG 运输船典型货物围护系统

### 第 1 节 NO96 货物围护系统

#### 3.1.1 NO 96 货物围护系统综述

3.1.1.1 NO96 货物围护系统是薄膜型货物围护系统中的一种（如图 3.1.1 所示），整个围护系统由液货舱的 A-K 十个面构成（如图 3.1.2 所示）。每个面由主次两层屏蔽层构成，每个屏蔽层都由殷瓦合金薄膜及填充有珍珠岩或刚性绝缘的绝缘箱组成（如图 3.1.3 所示）。液货舱两个面交界处由殷瓦管或复合梁连接，三个面的交界处由三面体连接。每个液货舱的屏蔽层使用了殷瓦板、不锈钢板条、绝缘箱、三面体、殷瓦管、刚性和柔性绝缘材料、连接螺栓、温度感应器等零件组成。

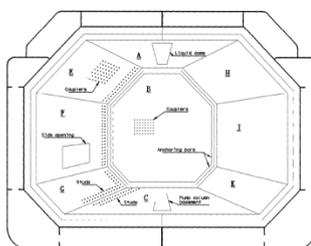


图 3.1.1 NO96 货物围护系统图

3.1.2 液货舱形状图图

3.1.3 主次屏蔽结构图

3.1.1.2 每个从事液货舱焊接的焊工都需要按照相关专利技术文件的要求进行焊工资质考试，并得到 CCS 认可。液货舱各种材料的焊接工艺应按照相关专利技术文件的要求和技术规格书中的标准进行认可。殷瓦焊工焊接工作开始前应经测试并检查合格。

3.1.1.3 NO96 货物围护系统薄膜舱的制作，主要分为以下几个大的步骤：

- (1) 船体内表面划线定位；
- (2) 连接件基座的焊接固定；
- (3) 楔块安装
- (4) 锚固扁钢安装、三面体及殷瓦管安装
- (5) 次层绝缘箱的安装；
- (6) 次层薄膜的安装与焊接；
- (7) 气密试验与状态监控；
- (8) 主层绝缘箱的安装。
- (9) 主层薄膜的安装与焊接；
- (10) 气密试验与状态监控；

- (11) 泵塔安装与试验;
- (12) 气穹安装;
- (13) 液穹安装;
- (14) 局部气密试验;
- (15) 气体航行试验;
- (16) 封舱检查。

### **3.1.2 NO 96 系统零部件制造检验**

- 3.1.2.1 绝缘箱制造检验：制造绝缘箱的胶合板应满足 CCS《胶合板检验指南》要求。绝缘箱的检验采取巡检和抽检的方式，检验中需要关注绝缘箱的外观、尺寸、平整度、门钉位置等。
- 3.1.2.2 殷瓦管制造检验：殷瓦管安装在货舱内部两个面的交界处。殷瓦管检验中需要关注殷瓦管的外观、自动焊缝和手工焊缝、殷瓦管焊后的尺寸、殷瓦管端部的着色探伤等。
- 3.1.2.3 三面体制造检验：三面体安装在液货舱内部三个面交界处，在殷瓦车间预制完毕检查合格后方可上船安装。在对三面体进行检验时需要注意三面体整体尺寸、三面体内部尺寸、三面体的焊缝外观及着色探伤。
- 3.1.2.4 液穹托架制造检验：检验液穹的托架时需要关注液穹托架的制作材质、整体尺寸、焊缝外观及着色探伤等。
- 3.1.2.5 支柱制造检验：支柱安装在最前部液货舱，通常采用不锈钢材质制作而成。检验支柱需要关注支柱的制作材质、焊缝外观、零件和支柱整体的尺寸、管子的同心度和垂直度、着色探伤等。
- 3.1.2.6 泵塔基座制造检验：泵塔基座是泵塔在液货舱内的导向结构，安装在液货舱内底板上。对泵塔基座的检验应关注泵塔基座的制作材料、泵塔基座内部尺寸、泵塔基座的整体尺寸、泵塔基座内部的绝缘材料、泵塔基座焊缝的外观及着色探伤等。
- 3.1.2.7 十字连接件制造检验：十字连接件安装在两个殷瓦管连接处或殷瓦管和三面体之间，起到连接作用。十字连接件在殷瓦车间预制后经检验合格才可以进行安装。十字连接件制作检验过程中应对其外观、长度、连接件的角度及着色探伤等进行关注。
- 3.1.2.8 氮气排气管制造检验：氮气排气管是用不锈钢材质制作而成的，安装在液货舱内横隔舱顶部靠近液穹区域。氮气排气管的主要作用是往主屏蔽层内输送氮气。氮

气排气管的检验需要关注氮气排气管的制作材质、氮气排气管的装配长度和角度、着色探伤等。

### 3.1.3 NO96 货物围护系统安装检验

- 3.1.3.1 货舱清洁：清除遗留的焊渣、钢材的边角料、焊条、灰尘等垃圾，清洁完毕后应对液货舱进行通风，保证液货舱干燥清洁。
- 3.1.3.2 货舱平整度测量：按专利公司技术标准或技术规格书的要求进行液货舱内表面的平整度测量，确保平整度满足绝缘箱和殷瓦薄膜安装的要求。
- 3.1.3.3 货舱划线：划线是指把液货舱内表面用特定的宽度和长度划分成若干个网格，网格的四个顶点就是以后连接基座焊接的地方，按照批准的划线工艺文件执行。
- 3.1.3.4 连接基座安装：连接基座焊接在液货舱内表面。对焊接的位置进行打磨和清洁，在正式焊接前要先对基座进行 2-3 处的定位焊并且要确保基座和货舱内表面没有间隙。焊接结束后要对焊缝进行 100%外观检查并进行 1%的着色探伤及 3%的随机拉力试验。
- 3.1.3.5 楔块安装：楔块被安装在连接基座上，一般用特氟龙材料制成。楔块的作用是用来调整箱子和船体间间隙，每个连接基座上的楔块厚度由计算得来。用三米尺检验楔块安装质量。
- 3.1.3.6 锚固扁钢安装：每个液货舱的前后端部都存在横向环区域，为了使液货舱横向方向和纵向方向的力能传递到船体上在该区域装设有锚固扁钢。锚固扁钢是不锈钢在焊接的时候要使用不锈钢焊条。在安装锚固扁钢之前要对船体内壳板上进行划线和打磨，安装的时候要用专用的工具对锚固扁钢进行定位，定位后进行双面间断焊。
- 3.1.3.7 殷瓦管安装：殷瓦管安装在货舱的横向环区域，连接绝缘层的殷瓦薄膜及锚固扁钢。对殷瓦管之间的间隙、端部层差、与锚固扁钢的搭接长度进行检验、焊后对焊缝进行外观检查应无缺陷、修补处应做 100%PT。
- 3.1.3.8 三面体安装：三面体安装在液货舱内三个面的交界处，三面体和殷瓦管一样都是焊接在锚固扁钢上连接锚固扁钢和殷瓦薄膜的，三面体还起着连接货舱横向环角落处殷瓦管的作用。检查三面体与锚固扁钢的搭接长度、三面体内绝缘箱和三面体的贴合度、检查 SW 和 PW 焊缝外观应无缺陷、用模板检查三面体的装配间隙。
- 3.1.3.9 环氧树脂的涂布：次层绝缘箱安装前要在绝缘箱底部敷设上相应类型的树脂条，在环氧树脂条涂布在绝缘箱之前，须对环氧树脂条的固化进行必要的现场测试，

具体如下：

- (1) 树脂和固化剂的比例；
- (2) 检测树脂条的外观；
- (3) 树脂条在绝缘箱上的位置；
- (4) 树脂条进行取样放入微波炉加热后测硬度；
- (5) 树脂条打完后 24 小时后再次测定硬度；
- (6) 打完绝缘箱的树脂条运至舱内最远处观察其是否发生形。

3.1.3.11 树脂条的应用：按照批准的工艺文件对树脂条的外观尺寸进行检验。

3.1.3.11 次层绝缘箱安装：次层绝缘箱安装在船体内表面上，次层绝缘箱与次层殷瓦薄膜组成次屏蔽空间。检查绝缘箱底部树脂与货舱内表面的间隙、两个绝缘箱的层差、两个绝缘箱之间的间隙、两个绝缘箱列板槽口之间的错位情况；绝缘箱安装完毕后检查固定件上的弹簧垫片是否安装正确，用扭力扳手抽查紧固件是否锁紧。

3.1.3.12 次层薄膜安装：在次层殷瓦列板安装之前要对次层绝缘箱的表面及相关区域内做好清洁工作以确保没有任何杂物落入次层殷瓦薄膜内部。检查殷瓦列板折边的高度、殷瓦列板折边后折边内缘的半径、每 7 米列板的直线度误差、折边后殷瓦列板的表面质量、相邻两块折边殷瓦列板的折边安装高度差。检查端部列板的厚度平直部分长度、重叠部分长度、相邻端部列板之间层差情况、端部列板的剪切中心处离端部长度。端部列板焊接处应进行 100%着色探伤。

3.1.3.13 凸缘螺柱安装：凸缘螺柱是安装在次层殷瓦薄膜上用来连接次层屏蔽和主层屏蔽的构件。在铺设次层薄膜之前应将特殊的螺帽安放在连接螺杆顶部待次层薄膜安装完毕后用工具在次层薄膜打孔后安装凸缘螺柱，然后进行自动焊接。检查凸缘螺柱的安装位置、螺柱偏离中心距离、凸缘螺柱的边缘与殷瓦薄膜孔的边缘搭接长度，焊接后应对凸缘螺柱的周围焊缝进行外观检验并进行 20%PT。

3.1.3.14 主层绝缘箱安装：主层绝缘箱安装在次层殷瓦薄膜上，由凸缘螺柱支撑。用模板检查绝缘箱之间的层差、边界箱之间的层差、两个箱子之间的间距；检查锁紧装置的电焊是否存在漏焊、裂纹等缺陷，如果存在缺陷要进行修补；检查弹簧垫片的安装情况，主要注意垫片的安装方向。

3.1.3.15 主层薄膜安装：薄膜的检验要求详见 3.1.3.12。

3.1.3.16 特殊区域绝缘箱和薄膜的安装：NO96 薄膜型液货舱的特殊区域有液穹区域、气穹区域以及货舱的舷侧开口区域。这些区域的绝缘箱尺寸和厚度不同于平面区

域，所以特殊区域的绝缘箱和薄膜安装的检验标准也和平面区域有所不同。

**3.1.3.16.1 液穹区域：**液穹是液货舱最后关闭的一个区域，泵塔要穿过液穹区域的绝缘箱安装。液穹区域的绝缘箱在车间经过箱子制作、填充发泡剂、安装殷瓦面板等工艺流程最后吊装安装上船。检查液穹绝缘箱殷瓦面板与箱子边界的距离、两条殷瓦面板之间的间隔距离、殷瓦面板端部和搭接板的距离、殷瓦面板焊接结束后应当进行目视检查及着色探伤。检查液穹绝缘箱箱子和周边区域的对中情况。

**3.1.3.16.2 气穹区域：**气穹的位置在每个液货舱顶部的几何中心。气穹周围的绝缘箱是非标准箱，需在车间进行预制，然后进行安装。气穹内部安装有两层波纹管分别和主次层的殷瓦薄膜焊接用来确保主次绝缘层的完整性。检查气穹周围绝缘箱之间的层差、气穹绝缘箱与平面箱之间的层差。检查波纹管内部是否安装玻璃棉和搭接板的长度，焊接后目视检查无缺陷。

**3.1.3.16.3 舷侧开口区域：**舷侧开口是前期为了液货舱安装方便开的临时工艺孔，在液货舱内部安装基本结束时就需要将这个临时工艺孔封闭掉。舷侧开口封闭后还需要和前面一样安装次层和主层屏蔽。舷侧开口处的绝缘箱安装标准以及殷瓦薄膜焊接检验标准参见前述次层屏蔽和主层屏蔽的安装检验要求。

**3.1.3.17 薄膜试验：**次层殷瓦薄膜安装全部完毕后需要对整个液货舱进行强度及密性试验。次层薄膜试验结束后，在安装主层屏蔽时，对次层屏蔽空间进行持续的状态监控。次层屏蔽的试验和主层屏蔽的试验按照批准的试验程序进行。

**3.1.3.17.1 强度性能试验：**绝缘层强度试验（S/T）是对密闭的货舱绝缘层空间抽真空让其承受一定的负压（-800mbar）来检验绝缘层是否能够承受极限装载工况下液态天然气及其蒸汽的压力。

**3.1.3.17.2 承载性能试验：**绝缘层的承载试验（B/T）是通过抽真空的方式使得货舱绝缘层承受负压（-200mbar）来检验绝缘层的殷瓦薄膜在正常装载工况下是否能和绝缘箱很好的贴合以及殷瓦膜和绝缘箱之间是否存在异物。

**3.1.3.17.3 焊缝性能试验：**薄膜焊缝强度试验（M/T）是将试验区域通过加压再释放检验殷瓦列板之间焊缝的机械性能。

**3.1.3.17.4 氦气试验：**氦气试验（H/T）是对密闭绝缘层空间充入一定浓度的氦气，用氦气探测仪来检测绝缘层的殷瓦薄膜是否存在泄漏点。氦气试验的主要目的是检测和发现任何泄漏量大于  $9.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ ，（此时氦气浓度为 20%），并且校

对泄漏量为  $4.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$ , (此时氦气浓度为 100%, +1ba)。如果泄漏数 >5, 同样的泄漏量检测方法检查修补点; 如果泄漏数 <5, 着色检查修补点, 并且用真空箱检查泄漏点; 若真空箱不可操作, 则应用氦气试验方法进行密性检查

3.1.3.17.5 真空试验: 真空试验 (S/P & I/P VBT) 是在氦气试验之后对殷瓦薄膜修补点进行局部的密性试验。

3.1.3.17.6 整体试验: 在上述所有试验结束后还需对液货舱的两层屏蔽层进行整体试验 (G/T), 屏蔽层降低压力至 -800Mbar, 监视并记录 24 小时内的压力变化, 最后取压力最稳定的 10 个小时绘制出一份表格。

3.1.3.18 泵塔吊装: 液穹区域的绝缘箱预装完毕后就可以进行泵塔的吊装, 吊装过程要充分协调, 防止撞伤船体结构和殷瓦。

3.1.3.19 液穹安装及液穹分段安装焊接: 泵塔吊装结束后, 将预装没有问题的液穹大绝缘箱吊装就位, 液穹殷瓦面与平面殷瓦进行焊接密封, 液穹上部船体小分段吊装就位并焊接, 泵塔伸出穹顶甲板的管路与船体焊接。

3.1.3.20 气穹波纹管安装: 每个气穹区域需要安装两个波纹管, 在液货舱里面两个波纹管端部采取手工焊的形式连接, 焊接结束后进行外观检验并做 PT, 在波纹管的末端需要安装抱箍。

3.1.3.21 气穹安装: 气穹安装就位后对气穹本体和甲板之间的焊缝进行外观检查并做 PT 检查。

3.1.3.22 最终检验是在液货舱所有的安装都结束后脚手架拆除时对货舱内薄膜状况进行逐层检查, 检查薄膜是否有损伤, 且防止随身物体高空坠落砸伤薄膜。

## 第 2 节 MARK III 货物围护系统

### 3.2.1 MARK III 货物围护系统综述

3.2.1.1 MARK III 是另一种薄膜型货物围护系统, 主屏壁为 1.2mm 厚带有纵横方向槽形的不锈钢板 (304L), 如图 3.2.1 所示; 次屏壁为二层玻璃纤维布及一层铝箔的三合一片材 (Triplex), 其中柔性带材称为 FSB, 硬质箔称为 RSB, 隔热板块为上下层压板夹增强聚氨酯泡沫 (R-PUF), 密度在  $120-130 \text{Kg/m}^3$ , 其中 10% 的重量为玻璃纤维, 如图 3.2.2 所示; MARK III 货物围护系统典型结构图如 3.2.3 所示; MARK III 货物围护系统分两种型式: MARK III 和 MARK III Flex, 如图 3.2.4 所示, MARK III Flex 的蒸发率比 MARK III 要小。MARK III 货物围护系统的设计概念是高

度标准化，减少零部件的多样性；车间高度预制化，拿来即用；货舱安装自动化、减少人工操作。

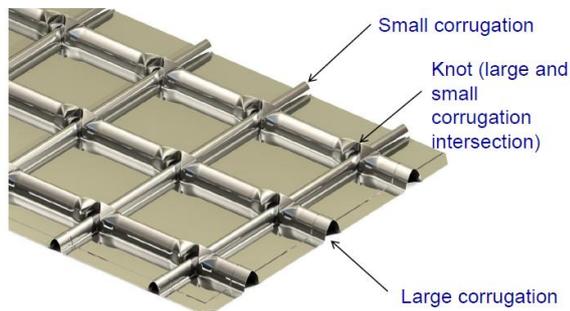


图 3.2.1 主屏蔽示意图

Small corrugation 横向槽型结构；Large corrugation 纵向槽型结构  
Knot (large and small corrugation intersection) 交叉节点

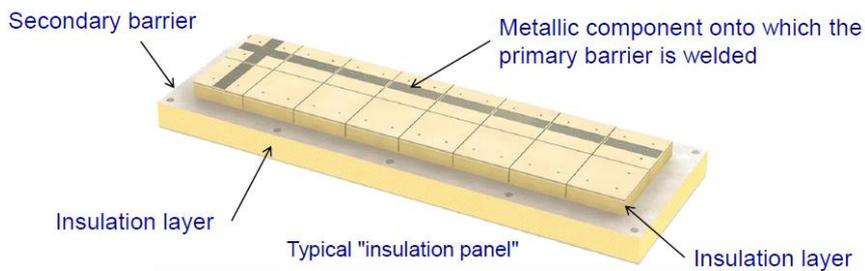


图 3.2.2 次屏蔽和隔热板块

Secondary barrier 次屏蔽；Insulation layer 绝缘层  
Metallic component onto which the primary barrier is welded 锚固条

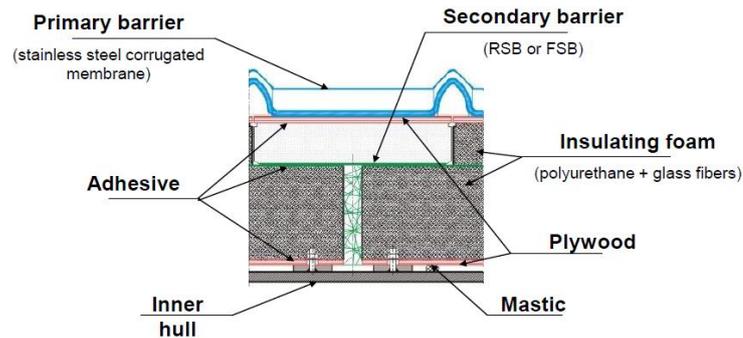


图 3.2.3 典型结构图

Primary barrier 主屏蔽；Secondary barrier 次屏蔽；Adhesive 胶合剂；  
Plywood 胶合板；Insulating foam 绝缘泡沫；Mastic 树脂条

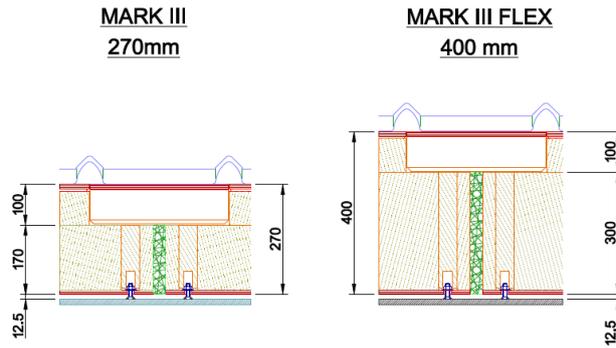


图 3.2.4 MARK III 货物围护系统两种型式

3.2.1.2 该系统的主要优点是主屏壁的不锈钢厚度较厚，304L 不锈钢的焊接要求较为容易，同时，不锈钢板价格相对 36%镍钢（殷瓦钢）便宜。缺点是不锈钢热膨胀系数很大，主屏壁需要采用纵横双向槽形结构，加工较为复杂自动化焊接效率较低。

3.2.1.3 焊工及焊接质量控制：不锈钢薄膜焊接一般有两种方式，一种是钨极气体保护电弧焊（TIG），是常用的焊接方式，另一种是等离子焊，这种焊接方式因焊接速度快而提高生产率，在将来可替代 TIG 焊。

3.2.1.3.1 薄膜焊接分手工焊和自动焊，应根据专利公司技术标准和船厂设计技术规格书的要求进行焊接工艺评定，焊接工艺评定应经船级社认可。手工焊焊工和自动焊操作工应经培训、考试方能授予焊工或操作工资质，培训考试应有记录，随时可查。货舱中的薄膜焊接区域共分四个，每个区域需要焊工掌握的焊接位置也不尽相同。薄膜之间、薄膜与锚固片之间和薄膜与角落不锈钢板之间的焊接位置要求有平焊、水平向上焊、水平向下焊、立向上焊、立向下焊和仰焊；四片薄膜与锚固片十字相交处的焊接位置要求有平焊、立焊和仰焊。手工焊焊工和自动焊操作工的认可流程见图 3.2.5 和图 3.2.6 所示。

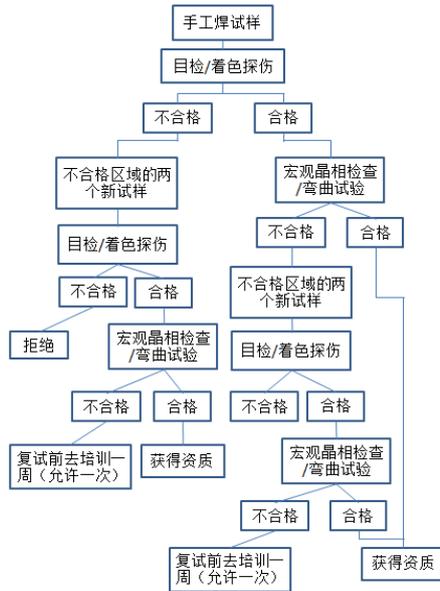


图 3.2.5 手工焊焊工认可流程

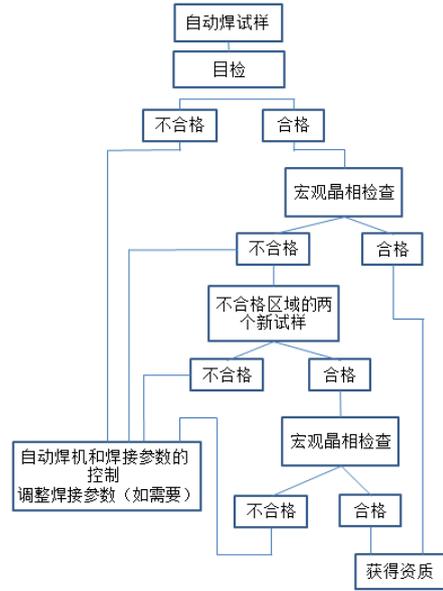


图 3.2.6 自动焊操作工认可流程

3.2.1.3.2 货舱中不同位置的焊接方法不同，薄膜搭接处先采用点焊，然后再连续焊，点焊有一定的顺序，薄膜与锚固片连接处采用断续焊，断续焊按照批准的工艺文件进行，不能焊接到锚固片的铆接钉上，在安装划线时应确保距铆接钉有足够的距离。

3.2.1.4 无损检测和破坏性试验：薄膜的焊缝应进行无损检测，一般采用目检和着色渗透探伤（ASTM E 165），验收标准根据批准的文件执行。在进行焊接工艺评定的试样、焊工考试的试样和每天焊接工作开始前焊接的试样需做破坏性试验，包括宏观金相试验和弯曲试验，取样位置、试样大小、试验方法根据经 CCS 和专利公司认可的工艺文件执行。

### 3.2.2 Mark III 系统零部件制造检验

3.2.2.1 胶合板用于制造绝缘板块，在建造过程中需要验船师检验，若胶合板经过 CCS 型式认可，则建造期间可进行抽检，胶合板的制造、加工和安装应满足 CCS《胶合板检验指南》、船舶技术规格书和专利公司相关标准的要求。

3.2.2.2 硬质聚氨酯泡沫生产加工应按照制造商的质量标准进行验收，满足船舶技术规格书中的密度和强度等相关要求，验船师应进行抽检。

3.2.2.3 承压树脂用作承重，生产加工应按照制造商的质量标准进行验收，满足船舶技术规格书中的硬度和成型等相关要求，船厂做好生产记录，验船师应进行抽检。

3.2.2.4 用作薄膜的材质为不锈钢材，长度和宽度应满足船舶技术规格书和专利公司相关标准的要求，不锈钢应取得 CCS 产品证书。

- 3.2.2.5 用作锚固条和角落区的材质为不锈钢，长度、宽度和厚度应满足船舶技术规格书和专利公司相关标准的要求，不锈钢应取得 CCS 产品证书。
- 3.2.2.6 胶合剂应获得 CCS 型式认可，按制造商的质量标准进行验收，满足船舶技术规格书中的粘合性能要求，胶合剂质量的高低直接影响次屏蔽的密性。
- 3.2.2.7 三合一片材 (Triplex) 为二层玻璃纤维布中间夹一层铝箔，三合一片材分为两种，柔性带材称为 FSB，硬质箔称为 RSB。三合一片材在建造过程中需要验船师检验，若三合一片材经过 CCS 型式认可，则建造期间可进行抽检。三合一片材应满足 CCS 《船用复合材料检验指南》、船舶技术规格书和专利公司相关标准的要求。
- 3.2.2.8 平面绝缘板块：货舱大部分区域为平面区域，平面区域安装的主要构件就是平面绝缘板块。平面绝缘板块由胶合板、RSB、R-PUF 胶合而成，用于焊接主层薄膜的不锈钢锚固条铆接在顶层胶合板上。
- 3.2.2.8.1 平面绝缘板块预制分为次层绝缘胶合、主层绝缘胶合、组装、压紧、切割、锚固条铆接。
- 3.2.2.8.2 平面绝缘板块在工厂或车间制造过程，CCS 验船师应进行检验，除非该产品已经获得 CCS 型式认可。平面绝缘板块制造过程中制造厂应进行生产记录、CCS 不定期抽检。检验平面绝缘板块的表面质量、机加工质量、尺寸、厚度、平面度、变形情况等。
- 3.2.2.9 薄膜在工厂或车间制造过程，CCS 验船师应进行检验，除非该产品已经获得 CCS 型式认可。薄膜制造过程中制造厂应进行生产记录、CCS 不定期抽检。检查薄膜褶皱面板的外观、表面质量、尺寸、褶皱波峰间距、褶皱剖面等。
- 3.2.2.10 角度块（两面角，angle）在工厂或车间制造过程，CCS 验船师应进行检验，除非该产品已经获得 CCS 型式认可。角度块制造过程中制造厂应进行生产记录、CCS 不定期抽检。检查角度块的外观、加工质量、孔、附件、尺寸、厚度、平整度和方正度等。
- 3.2.2.11 角落块（三面交角，Corner）在工厂或车间制造过程，CCS 验船师应进行检验，除非该产品已经获得 CCS 型式认可。角落块制造过程中制造厂应进行生产记录、CCS 不定期抽检。检查角度块的外观、加工质量、尺寸、加强筋、弯曲度和方正度等。

### 3.2.3 Mark III 系统安装检验

3.2.3.1 货舱清洁：清除遗留的焊渣、钢材的边角料、焊条、灰尘等垃圾，清洁完毕后应对液货舱进行通风，保证液货舱干燥清洁。

3.2.3.2 货舱平整度测量：按专利公司技术标准或技术规格书的要求进行液货舱内表面的平整度测量，确保平整度满足绝缘箱和殷瓦薄膜安装的要求。

3.2.3.3 货舱划线和定位扁钢：划线是指把液货舱内表面用特定的宽度和长度划分成若干个网格，每个交叉点附近焊接四个螺栓。按照批准的划线工艺进行划线。每个液货舱的前后端部都存在横向环(TC)区域，为了使液货舱横向方向和纵向方向的力能传递到船体上在该区域装设有定位扁钢。安装的时候要用专用的工具对定位扁钢进行定位，定位后进行双面间断焊。检查定位扁钢的直线度偏差情况。

3.2.3.4 楔块安装：楔块的作用是用来调整绝缘板块和船体间间隙。先用激光扫查各点与参考点的偏差，然后计算出该点需要的楔块厚度，使用三米尺检验楔块安装。平面区域和角落区域的水平楔块的水平度和安装应使用模板进行检查，同时还应安装过程中检查船厂的相关工艺和操作方式，确保所有的平面块和角落块区域都被检查到，保证工艺要求的平整度。检查楔块的高度差。

3.2.3.5 螺栓焊接：验船师应随机抽查螺栓焊接质量，在巡检过程中检查螺栓相关试验。检查焊缝外观；进行 10%的随机拉力试验，无可视缺陷；检查角落块位置偏差和垂直度偏差。

3.2.3.6 树脂条和环氧树脂胶应用：验船师应见证树脂条工艺评定试验和胶合工艺评定试验，通常在每个舱安装树脂或进行胶合作业时，船厂应申请树脂机性能确认测试，验船师应见证该试验。验船师应在巡检中随机检验树脂条和环氧树脂胶的应用情况。

3.2.3.6.1 在安装次层绝缘板块之前要在板块底部敷设上树脂条来调整绝缘板块和货舱内表面的间隙，树脂条是将树脂和固化剂按照一定的比例混合制作出来的，具有合适的硬度。不同负荷区域的树脂条布置间距和大小有差别，试验结果要符合专利公司的技术要求和胶黏剂制造商的技术标准。

树脂条工艺评定试验要点：

- (1) 场所的温度和湿度要控制；
- (2) 树脂和固化剂的比例；
- (3) 检测树脂条的外观；

- (4) 树脂条在模拟绝缘箱上的位置；
- (5) 树脂条剖开外观检查；
- (6) 树脂条进行取样放入微波炉加热后测硬度；
- (7) 树脂条打完后 24 小时后再次测定硬度。

3.2.3.6.2 RSB 和 FSB 使用环氧树脂胶进行黏合，确保次层屏蔽的密性。在此之前，需要进行胶合工艺评定试验，试验结果要符合专利公司的技术要求和胶黏剂制造商的技术标准，检验要点如下：

- (1) 场所的温度和湿度要控制；
- (2) 两种环氧胶剂和硬化剂的比例；
- (3) 检测胶黏剂的外观，无虎皮条纹；
- (4) 进行取样放入微波炉加热熟化试验后的硬度；
- (5) RSB 和 FSB 黏合后的剥离性能。

3.2.3.7 平面板块和角块安装：验船师应在巡检中随机检验平面板块、角块的安装。角块分角度块和角落块两种，角度块是两个面相交处使用的预制块，分直角块和钝角块，直角块与定位扁钢相连，以传递载荷。角落块是三个面相交处使用的预制块，每个货舱有 16 个角落块。检查角块的安装定偏差、平整度偏差、间隙、角块之间的坡度、角块与平面板块之间的坡度、角块与楔块的接触情况。检查相邻平面板块次层屏蔽之间的安装水平度偏差、相邻平面板块主层屏蔽之间的安装水平度偏差、平面板块之间的坡度、平面板块与楔块的接触情况、圆柱形泡沫塞的安装、板块之间缝隙的填充物与 RSB 面的距离和间隙、填充物顶部与次层屏蔽之间的安装水平度偏差。平面板块安装结束时要进行 100%的目检，确保无不可接受的缺陷。

3.2.3.8 次层绝缘胶合和顶部桥接垫块安装：柔性及硬质三合一片材的胶合和顶部桥接垫块的安装是 Mark III 系统最关键的节点。胶合的缺陷在最终检验前可能很难发现，因此，次层屏蔽胶合的监控应特别精确。船厂的质量控制、操作人员的资格考试、安装工艺以及清洁工作都应使验船师满意。特别是下述方面应满足：

- (1) 三合一片材（柔性和硬质）应检查无缺陷；
- (2) 胶合表面无杂物；
- (3) 工人处理三合一片材时须戴手套；
- (4) 三合一片材不允许暴露灰尘中，不准置于脏的表面。每卷在使用前必须储

存在密封塑料袋中；

- (5) 检查三合一片材和环氧树脂胶的相容性；
- (6) 在胶合前用来清洁三合一片材的清洁剂应被环氧树脂胶制造商认可；
- (7) 柔性三合一片材的敷设应符合规格书中的公差，特别是不同层之间的重叠，通常，三合一片材超过两层的重叠是不允许的；
- (8) 安装用空气袋模板应确保各位置压力均衡、能够按照专利公司规格书的要求在特定位置保持足够长的时间，且加热温度可控。

3.2.3.8.1 相邻的两块绝缘板块之间用玻璃棉、软质或硬质绝缘块填充后，为保证次层屏蔽的完整性，需要在硬质三合一片材上粘贴柔性三合一片材，以保证次屏蔽完整，FSB 与 RSB 之间的胶合粘贴并不是涂上胶水抹平就完成了的，而是用可充气空气袋压紧模板进行充气压紧并加热一定的时间进行固化。充气压力、加热温度和时间根据不同的环境会有相应的变化，详情参见相关专利的技术文件。

3.2.3.8.2 FSB 与 RSB 的胶合粘贴工作完成后还需做两项试验，一项是真空试验，在-200mbar 的压力保持 45 秒，无气泡产生。另一项是剥离试验，试验方法按照工艺文件要求执行，在怀疑的区域，剥离 FSB，如胶黏剂都留在 RSB 上，则合格。

3.2.3.8.3 在次层屏蔽施工的同时，与主屏蔽相关的施工也可同步进行，FSB 粘贴后，主层绝缘板块之间的留空处要进行桥接垫块的粘贴施工。桥接垫块下涂上环氧树脂胶，胶层厚度要符合专利公司工艺文件要求。将桥接垫块安装在相应的位置上，使用工装件将桥接垫块固定住，根据工艺文件要求保持一定的固化时间。检查主层绝缘块之间的间隙和平整度。

3.2.3.9 薄膜安装：薄膜一般采用 304L 不锈钢在车间预制而成，薄膜安装过程中，验船师通过巡检来控制安装质量。点焊、断续焊和自动焊将用在薄膜安装过程中，薄膜的永久性焊接检验应受控于验船师。

3.2.3.9.1 薄膜安装之前要进行尺寸检查，满足设计图纸要求。

3.2.3.9.2 根据主层绝缘上的锚固条位置，先进行划线，确定薄膜安装的边界位置。如薄膜尺寸不满足划线后的尺寸，则需要对薄膜进行裁剪加工。薄膜安装到位后用点焊固定在锚固条上。非边界区域的薄膜与锚固条的焊接采用断续焊。薄膜搭接处采用连续焊，分为手工焊和自动焊两种。检查焊缝坡口间隙、焊缝厚度，焊缝宽度，无凹形缺陷。

- 3.2.3.9.3 对焊接有问题的地方，验船师应要求船厂进行修补，修补工艺应被认可。
- 3.2.3.10 薄膜密性试验:密性试验采用氦气进行试验，试验程序需被批准，验船师在巡检中检验船厂的工艺执行情况和操作情况。验船师应见证薄膜氦气密性试验。在修补完漏点、关闭参考点和注入点后的局部真空试验应在验船师的见证下进行。
- 3.2.3.11 整体试验：验船师应见证主层和次层屏蔽整体试验。4 个小时将主次绝缘层空间从大气压降到-800mbar±5%，具体试验程序参考专利公司技术文件。
- 3.2.3.12 泵塔吊装的要求参考本章第 1 节 3.1.3.18 的要求。
- 3.2.3.13 液穹安装的要求参考本章第 1 节 3.1.3.19 的要求。
- 3.2.3.14 气穹安装的要求参考本章第 1 节 3.1.3.21 的要求。
- 3.2.3.15 舷侧口关闭的要求参考本章第 1 节 3.1.3.16.3 的要求，绝缘板块安装和薄膜焊接参考本节 3.2.3.7、3.2.3.8、3.2.3.9 和 3.2.3.10 的相关要求，若专利公司有特殊要求，应按照其特殊要求进行检验。
- 3.2.3.16 最终检验：在脚手架拆除之前，要一层一层的检查薄膜是否有损坏，检查一层就拆除一层脚手架，确保在拆除过程中，没有坠物损伤薄膜。

### 第 3 节 CS-1 货物围护系统

#### 3.3.1 CS-1 货物围护系统综述

CS-1 薄膜型货物围护系统是 GTT 公司结合 NO96 和 MARK III 两种系统的优点新开发的薄膜型货物围护系统。其主屏壁采用的是 NO96 的结构，而次屏壁则是 MARK III 的结构，角部则非常类似 NO96 的形式。CS-1 货物围护系统结构形式如图 3.3.1 所示。该系统未经大力推广，仅实际应用到极少数船上。

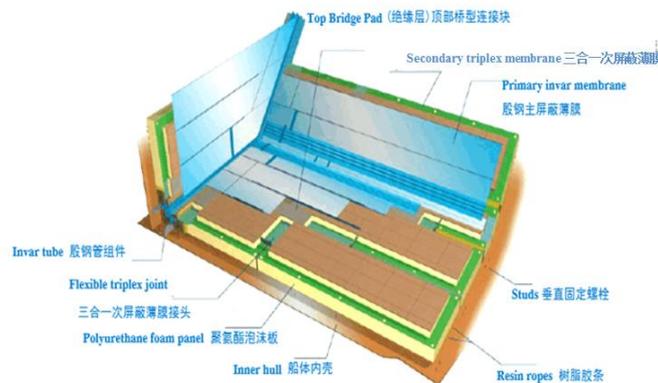


图 3.3.1 CS-1 货物围护系统结构示意图

## 第 4 节 MARK V 货物围护系统

### 3.4.1 MARK V 货物围护系统综述

MARK V 货物围护系统是新一代货物围护系统，主要由 MARK III 演变而来，重要结构变化是主薄膜由不锈钢替换成殷瓦钢，殷瓦钢在低温下的变形量低于不锈钢且稳定性高于不锈钢，焊缝处出现缺陷的几率小，货物围护系统泄漏几率降低。但该系统正在研发推广阶段，尚未应用到实船上，具体如何检验需等到应用到实船上才能编写。

## 第 4 章 薄膜型 LNG 运输船货物操作系统

### 第 1 节 LNG 运输船货物操作系统综述

#### 4.1.1 货物操作系统组成

4.1.1.1 装卸货系统布置在顶甲板、货物压缩机室和货舱内部。主要由以下部件组成：浸没式液货泵（每舱两台）、扫舱/喷淋泵（每舱一台）、辅助（应急）液货泵、货物压缩机室的压缩机、真空泵、气化和加热器、安全阀、管路和阀件等。

#### 4.1.2 货物操作系统作用

4.1.2.1 货物操作系统的作用：

- （1）货物装卸、驳运；
- （2）货舱的干燥、惰化和扫残；
- （3）在没有基站的情况下，完成对任一货舱进行上述两个操作等。

4.1.2.2 由于 LNG 的液态温度达到 $-163^{\circ}\text{C}$ ，所以与 LNG 相接触的货物管路一般采用奥氏体不锈钢制作。

4.1.2.3 液货通过船中的两根横跨管进行装卸，并通过位于顶甲板上的、连接各个货舱液穹的液相总管（沿船长方向布置）进行前、后驳运。船中的横跨管在每舷分别连接 2 个装/卸接头，使得在船舶的每舷有 4 个装/卸接头。

4.1.2.4 货舱气穹通过沿顶甲板前后布置的气相总管保持着相互间的连接。气相总管通过回气压缩机与设在船中的横跨管（每舷有 1 个接头）相连接，以便在装卸货时控制货舱压力，如图 4.1.1 和 4.1.2 所示。

4.1.2.5 装货时，通过气相总管和横跨管，以及回气货物压缩机将从货舱置换出的气体回收至基站。卸货时，气相总管和横跨管或蒸发器共同使用，向货舱补给气体以补充液货外流导致的货舱压力降低。这样，装卸货过程中，货舱压力可以控制在一个合理的范围内。

4.1.2.6 扫舱/喷淋管与液相横跨管相连，用于各货舱的扫残或冷却，也可以在卸货时，当回流蒸气不足的情况下用于喷淋（补充气体）。各液货舱的喷淋装置安装在货舱气穹内部，用于将液体分散到各个喷嘴，以起到帮助蒸发从而加快冷却速度的目的。

4.1.2.7 气相总管将各个气穹顶部相连，以便蒸发气体的排放，多余蒸气一般通过 1 号透气桅（应离上层建筑最远）向大气排放。气相总管还通过燃气压缩机和燃气加热器（或升温加热器），将蒸发气（Boil Off Gas，简称 BOG）送入机舱燃烧。

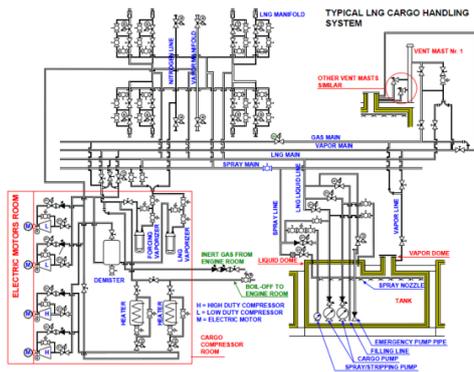


图 4.1.1 典型货物操作系统图



图 4.1.2 货物操作系统实船布置图

## 第 2 节 LNG 运输船货物操作系统设备检验

### 4.2.1 液货设备检验

4.2.1.1 主液货泵用于将液货舱内的液货卸载到岸站或液货舱之间的液货驳运。泵的绝缘值应符合设计要求，低温电缆相位连接要正确，泵和主启动箱之间的电缆绝缘要满足要求，排放管路的止回阀安装符合设计图纸要求，泵的安装满足工艺文件要求。

4.2.1.2 喷淋扫舱泵用于货舱冷却、扫舱、以及将液货送入强制气化器。泵的绝缘值应符合设计要求，低温电缆相位连接要正确，泵和主启动箱之间的电缆绝缘要满足要求，排放管路的止回阀安装符合设计图纸要求，泵的安装满足工艺文件要求。

4.2.1.3 应急液货泵是在主液货泵和喷淋泵等不能使用时，将应急液货泵按程序放入应急排出管内，使用应急液货泵卸载货物。泵的绝缘值应符合设计要求，低温电缆相位连接要正确，泵和主启动箱之间的电缆绝缘要满足要求，泵的临时安装调试满足专利公司工艺文件要求，现场张贴应急液货泵的安装操作须知，平时储存时要注意防护。

4.2.1.4 货物压缩机分回气压缩机、燃气压缩机和 BOG 压缩机，这些压缩机的结构原理相同，区别在于使用过程的介质温度、进出口压力和用途不同。马达驱动轴与压缩机轴的对中度符合工艺文件要求。所有报警点功能试验合格。氮气轴封状态良好，阻止可燃气体挥发出来。自动防喘振系统防止压缩机流量低于最小设计值。详细功能试验参考经批准的试验大纲。

4.2.1.5 升温加热器用于加热 LNG 气体，用于货舱升温操作。燃气加热器将蒸发的 LNG 气体进行加热，然后送入机舱作为燃料使用。蒸汽管的隔热包扎质量需保证；低温部件的绝缘包扎质量需要保证，满足设计要求；管路及设备的密性试验，确保可

燃气体或蒸汽不外泄。

4.2.1.6 LNG 主气化器基站提供的 LNG 经过扫舱/喷淋总管进入 LNG 气化器, LNG 气化器出来的天然气通过气相总管由气穹进入货舱顶部, 驱除货舱内的惰性气体, 降低货舱二氧化碳的含量。强制气化器当蒸发气体 (BOG) 量不够时, 扫舱/喷淋泵将 LNG 驳至强制气化器, 再进入燃气加热器后, 作为燃料使用。蒸汽管的隔热包扎质量需保证; 低温部件的绝缘包扎质量需要保证, 满足设计要求; 管路及设备的密性试验, 确保可燃气体或蒸汽不外泄。

#### 4.2.2 辅助设备检验

##### 4.2.2.1 氮气发生器

4.2.2.1.1 氮气发生器所产生氮气的用途主要有:

- (1) 惰化液货舱绝缘空间;
- (2) 充填液货舱绝热保温层并维持主次绝缘空间适当的正压。由于氮气是干燥低露点的, 可防止绝热材料结露, 保证保温绝热材料的性能, 保护货舱免受腐蚀;
- (3) 惰化货物系统, 防止天然气与空气形成爆炸性混合气体;
- (4) 作为货物压缩机的轴封气体;
- (5) 吹洗锅炉燃气系统和货物管路系统 (包括透气桅);
- (6) 货物装卸臂连接后和拆卸前吹洗货物总管末端。

4.2.2.1.2 氮气发生器的检验要点:

- (1) 氮气发生器系统包括一个供气处理系统和任意数目的薄膜或吸附件, 这些薄膜或吸附件所必须达到的额定容量应至少为以体积表示的船的最大排气量的 125%;
- (2) 空压机和氮气发生器可以安装在机舱或一个独立的舱室中。在防火方面, 该独立舱室可视为“其他机器处所”之一;
- (3) 如设有独立的舱室, 该舱室应位于货油区域外, 并且应装有一套独立的能每小时换气 6 次的机械通风系统。此外, 还应装有一套低氧报警装置;
- (4) 该舱室应无直接通向起居处所、服务处所和控制站的通道;
- (5) 氮气发生器应能生成高纯度的氮气, 其中 O<sub>2</sub> 含量不超过 5% 的体积;
- (6) 该系统还应装有自动装置以便在起动和非正常操作时能将有害气体排放到大气中;
- (7) 该系统应配有 2 个空压机。系统的总容量要求建议由该两空压机平均负担,

且在任何时候其中一个空压机的容量不应小于总容量的 1/3；

(8) 应装有供气处理系统，以便能够除去压缩空气中的水分、颗粒和油滴，并保证达到所要求的温度；

(9) 如合适时，可在设有空压机和发生器的专用舱室或独立舱室中，或者货物区域内装设氮气存储装置或缓冲柜。如氮气存储装置或缓冲柜安装在闭式处所，该处所的通道只能通往开敞甲板，且该通道的门只能向外开启。应设有永久通风和报警装置；

(10) 由氮气发生器产生的高浓度氧以及由氮气储存器保护装置排出的高浓度氮气产品，应能排放到开敞甲板的安全位置；

(11) 为便于维护保养，应在发生器与储存装置之间设有分隔措施；

(12) 在惰性气体供给总管处应至少装有两个止回装置，其中之一应是双截止透气装置。另一个是能够直接关闭的止回装置；

(13) 应在下述位置设有可连续显示空气温度和压力的仪器设备：  
空压机的排气口；氮气发生器的进气口。

(14) 当惰性气体产生时，应在氮气发生器的惰性气体排气口设有可连续显示和永久记录氧气含量的仪器设备。应安装在货油控制站和机器控制站或机器处所；

(15) 应设有视觉和听觉报警信号以指示：  
空压机的低供气压力；高空气温度；油水分离器自动泄水管的高冷凝水水位；电加热器故障（如有时）；氧气含量；供给仪器设备的电源故障，上述报警条件下，系统应能自动关闭。

(16) 报警器应安装在机器处所和货物控制站，但是在每一种情况下，这些位置都应是值班船员能即刻收到报警信号的处所。

**4.2.2.2 LNG 船使用的惰性气体发生装置使用自带的燃烧器制造惰性气体。**与其他船上安装的惰性气体发生器不同的是，LNG 船还配有空气干燥装置，制造的干燥空气在常压下的露点为-45℃，惰性气体和干燥空气通过同一根总管接入货物压缩机室。

两个装置本身与其他船舶没有重大区别。检验要点见钢制海船入级规范相关要求。

### **4.2.3 蒸发气体处理设备**

#### **4.2.3.1 总则**

甲烷(液化天然气)是其蒸气或蒸发气体一般有三种处理方式：直接在 GCU 中燃烧掉；经过再液化装置被液化后送回货舱；直接用作燃料。

4.2.3.2 直接燃烧装置（GCU）能够燃烧来不及处理或处理后残余的甲烷蒸发气，详见 5.1.4.3 条款。

#### 4.2.3.3 再液化装置

再液化设备主要在产品阶段检验，安装上船的调试按照批准的调试大纲进行，详见 5.1.4.2 条款。

4.2.3.4 蒸发气用作燃料时，A 类机器处所的布置要求详见现行 IGC Code 第 16 章 16.2 的要求，气体燃料供应的要求详见现行 IGC Code 第 16 章 16.3 的要求，气体补给装置和相关储存容器的要求详见现行 IGC Code 第 16 章 16.4 的要求。

### 第 3 节 薄膜型 LNG 运输船货物操作系统管系与泵塔检验

#### 4.3.1 货物管系

4.3.1.1 管系应力分析管线一般都是薄壁管（壁厚比直径），设计温度低于零下 110℃的所有蒸汽管线和液货管线都应提交一份完整的应力分析给审图中心进行认可。

4.3.1.2 LNG 低温管系的温度变化范围很大，从常温到-163℃，营运中易发生问题，因此低温管采用奥氏体不锈钢制作，制作过程采用过程控制方法。一般分为以下 12 步：

- （1） 焊接工艺的認可；
- （2） 进货控制；
- （3） 内场焊接前组对定位；
- （4） 焊接后焊缝表面检查和 PT；
- （5） 100%RT；
- （6） 液压试验；
- （7） 清洁检查；
- （8） 合拢焊缝的定位/焊缝表面/RT；
- （9） 支架的定位；
- （10） 系统完成后的完整性；
- （11） 系统密性及清洁；
- （12） 绝热。

4.3.1.3 管线的无损检测一般采用 RT（JISZ-3104）和 PT（JISZ-2343），角焊缝处采用 UT（JISZ-3060），无损检测工艺需提交認可，验船师需对探伤片进行评判。

4.3.1.4 所有液货管线上均应设置释放阀，释放阀能够防止液货管线超压，该阀需取得 CCS 产品证书。阀门大小应根据船舶设计规格书选取。

4.3.1.5 为防止液体货物泄漏破坏船体结构，在船舶易发生液体货物泄漏的地方设置承滴盘，该承滴盘的布置和大小应能够承载可预见的泄漏量，该承滴盘的材料应能承

受液货温度,一般使用 316L 不锈钢,若使用其他替代材料,应提供该材料在-163℃ 以下不失效的证明资料。

4.3.1.6 货舱内外的所有管线都应该进行液压试验,若试压介质是水,则管线试压的排水和吹干工艺文件需提交认可,对于不锈钢管尽量使用低氯离子水。一般若使用高压氮气对低温管进行试压,则必须做好一切安全防护措施。

4.3.1.7 低温管线除阀门处外,都需进行绝缘包扎,防止外界温度传递到低温管线内,同时也可防止人员不慎接触低温管线造成冻伤。绝缘材料一般采用聚氨酯泡沫,判断绝缘包扎是否合格的标准是在低温管液氮打冷试验或者气体试航时,低温管线绝缘层表面不出现结冰出霜现象。

4.3.1.8 低温管大量采用滑动式支架。这样变形时,有利于管路在其长度方向上变形、移动。同时,在任何工况下,支架需在管子上的抱箍的区域,支架应按照批准的工艺文件进行安装检验。

#### 4.3.2 泵塔

4.3.2.1 泵塔的检验可以作为产品检验,也可以作为建造检验中的节点检验。同时,泵塔作为一个相对独立且十分重要的设备,制造方一般在生产前,应提供 CTI 计划(结构制作、试验及检验计划)供专利公司代表及验船师审核并批准。泵塔是一个三角桅,由不锈钢管系构成(304L),悬挂在液体室。在舱底由泵塔基座前后和左右方向固定,高度方向可自由滑动,使之能热胀冷缩。三角桅包括主卸货管路和应急泵井,形状是三角格架结构,用于支承液舱进出梯子、其他管系和仪器设备。

4.3.2.2 泵塔的内场建造检验根据专门的技术标准和经批准的工艺文件的要求进行。泵塔内场建造流程如下:

- (1) 管子检查与校正
- (2) 开坡口并对接
- (3) 主泵支管安装
- (4) 平立面支撑管安装
- (5) 底板制作
- (6) 导向系统上部装焊检查
- (7) 底板整体酸洗钝化
- (8) 底板吊装
- (9) 8 片散装零件

- (10) 底板焊接及减小焊接变形措施
- (11) 吊环安装
- (12) 附件总装
- (13) 吊装注入管和扫舱管
- (14) Hs 值切割及上贯穿件安装
- (15) 液位管和应急泵管通过试验
- (16) 水压试验
- (17) 氦气试验
- (18) 完工检验
- (19) 泵塔整体酸洗钝化

4.3.2.3 泵塔吊装及安装检验按照批准的程序文件的要求进行。

4.3.2.4 泵塔建造过程须送审的图纸清单如下：

- (1) 液舱穹顶穿舱件详图；
- (2) 泵塔布置总图；
- (3) 泵塔管结构图；
- (4) 泵塔底部结构图；
- (5) 泵塔扶梯、平台详图；
- (6) 泵塔电缆导架详图；
- (7) 泵塔其他设施详图；
- (8) 泵塔导向装置图；
- (9) 泵塔货泵支座；
- (10) 泵塔货泵的搬移流程图。

4.3.2.5 泵塔安装及焊接检验要点

- (1) 泵塔管系材料为 304L，管件的对接一般采用带填充金属的 TIG 焊或者 MIG 焊，焊接过程中的层间温度应进行检查和控制；背面保护气体（比如氩气）浓度应始终保持在 99% 以上，并在整个焊接过程中进行浓度监控。
- (2) 管件的装配精度要求较高。一般采用激光进行直线校准，检查管壁对接错位量；
- (3) 所有直径 > 70mm 的管子的对接焊缝需要 100% 的射线探伤进行检查，其余焊缝 100% PT 检查；

- (4) 管件对接焊缝的变形量应进行严格的检查和控制，以及焊缝余高的磨平工作（比如一般应在安装殷钢裙板之前完成磨平工作）；
- (5) 所有紧固件的拧紧及螺母的点焊的检查，一般应要求船厂提供此项工作的记录；
- (6) 泵塔整体尺寸检查，尤其是泵塔直线度的检查；
- (7) 平整度检查，尤其是泵塔底板及其上的泵塔支撑架的平面度检查；
- (8) 泵塔上四根管路应进行通球试验，保证内部无卡阻现象。
- (9) 泵塔完工前（即在安装殷钢裙板之前），须对三根主桅管进行水压试验。试验时应采用清水，压力一般为 1.5 倍的设计压力,并至少保持压力一小时后，进行检查；
- (10) 殷钢裙板的安装和焊接结束后，应进行 100%PT 检查；
- (11) 泵塔底座的安装焊接时，一般应进行焊前的装配检查，以及焊后的 100%PT 检查；
- (12) 泵塔基座导向机构的制作。导向设施的表面粗糙度的需满足相应的要求，一般制造方应提供表面粗糙度检查记录供验船师审核。（达到 Ra3.2）。

## 第 4 节薄膜型 LNG 运输船货物操作系统辅助系统检验

### 4.4.1 主、次层绝缘层空间的增压和惰化系统

4.4.1.1 在 LNG 船正常营运期间，其主、次层绝缘层空间需进行充入氮气进行增压和惰化，氮气经氮气发生器制造后进入缓冲储存罐，之后经分配阀组进入氮气增压总管，此时主、次层绝缘层空间的空气你经真空泵抽出后，氮气进入相应的主、次层绝缘层空间，保证主层绝缘层压力高于次层绝缘层压力，多余氮气经过压力调节阀后，主层绝缘层空间的氮气通过透气桅排出，次层绝缘层空间的氮气经释放阀释放到甲板上。

### 4.4.2 主、次层绝缘层空间的保护

4.4.2.1 主、次层绝缘层空间均设有压力释放阀，当主层绝缘层空间压力高于表压 35mbar，次层绝缘层空间压力高于表压 30mbar 时，压力释放阀开启泄压。如需要，手动旁通球阀可用于本地放气。

### 4.4.3 隔离空舱加热系统

4.4.3.1 相对于货舱内的低温液化天然气来说，外界的空气、海水相对温度较高，可以源

源不断地向船体结构传递热量，以保持船体钢板不至于温度过低。而货舱间的横隔内则始终处于较低的工作温度之中。在 IGC 规则和 USCG 规则中，通过计算得出的货舱之间的横隔舱内的温度一般为-65℃，这已经远远超过了 E 级钢的安全工作条件（-30℃）。根据 IGC 规则 4.8.4，船舶安装了加热系统（Heating system），以维持这些空间的工作温度，十分经济安全地解决了这个问题。加热系统是利用乙二醇和水的混合液，通过布置在横隔舱内的加热盘管进行加温。在 LNG 船舶整个生命周期内，这个加热系统需始终处于正常地工作状态，对船舶的安全至关重要。

4.4.3.2 隔离空舱加热系统检验要求：泵的功能试验达到钢规要求；管路全部采用焊接连接，强度试验合格系统报警点试验状态良好；管路温度探测系统工作良好，能准确反应各点的实际温度状态，维持系统处于正常工作温度范围内。

#### 4.4.4 货舱保护

4.4.4.1 货舱在相应的温度下装载应不超过货舱容积的 98%，但主管机关在考虑到货舱形状、压力释放阀布置、液位及温度测量精确度、装载温度及蒸发气温度等情况，可能会允许更高的装载极限。这就要求压力释放阀始终保持在处于蒸气状态时的位置，压力释放阀是基于这种条件进行设计和选型的。

4.4.4.2 压力释放阀应进行原型试验，验船师要全程参与检验，每个压力释放阀都应进行试验已确保能在设定的压力下开启，对于起跳压力在 0-1.5bar 之间时误差不超过±10%，在 1.5-3.0bar 之间时误差不超过±6%，在 3.0bar 及以上时误差不超过±3%。压力释放阀的设置和铅封应以主管机关认可的方式进行，此项工作的记录，包括阀门的设定压力要保存在船上。压力释放阀在液货舱上的位置应使得在最大许可充装极限下当船舶处于横倾 15° 和纵倾 0.015L(L 为规范船长)的情况下，压力释放阀处仍保持蒸气状态。

#### 4.4.5 货物区域通风

4.4.5.1 正常装卸货物作业时需要有人进出的处所，每小时至少需要换气 30 次。气体安全处所，如压缩机电动马达间，应保持正压，气体危险处室，如货物压缩机间，应保持负压。在营运中通常不进入的处所，如在装卸货操作时需要进入时，每小时至少换气 8 次。关于货物区域通风的详细要求按照现行 IGC CODE 执行。

#### 4.4.6 应急关断系统

4.4.6.1 船舶在遇到紧急情况或者触发 ESD 逻辑信号时，应急关断系统将会开启对船舶和

相关的管路系统进行保护。

4.4.6.2 弹簧承压式单作用执行器作为应急关断系统的执行器时，加压开启，失压关闭，是一种失效-安全型执行器。如果配置了双作用执行器，则每个阀门都应设置一个蓄能器，在没有补偿的情况下，可以执行应急关断系统发出的关闭信号。如果 ESD 阀门位于同一个区域，则一个蓄能器可为多个阀门服务。

4.4.6.3 验船师应验证每个 ESD 阀门的 30 秒关闭时间，该时间是从手动或自动开启激活 ESD 系统至阀门最终关闭的时间，包括 ESD 系统的信号响应时间和阀门关闭时间。阀门的关闭过程中应避免管系压力波动，平稳的切断管内货物。

#### 4.4.7 货物自动化控制平台

4.4.7.1 LNG 船采用集成自动化系统，英文简称 IAS。采用集成自动化系统的目的是使各控制系统尽量采用相同的硬件和软件平台，增加系统的稳定性，减少系统备件，简化系统维护，并使船员易于学习和使用。在对各种系统进行试验期间对 IAS 进行功能验证。

#### 4.4.8 货舱测量系统

4.4.8.1 LNG 船液舱监测系统的英文名称为 Custody Transfer System，简称 CTS。该系统用于对货舱的液货进行高精度的液位、温度和压力测量和记录。检查低温电缆的铺设和连接质量；传感器的实验室校核和现场模拟试验；产品使用的型号和性能符合设计文件要求，持有船检证书；功能试验按照系泊试验大纲进行。

#### 4.4.9 气体检测系统

4.4.9.1 应提供永久性气体探测系统检测危险区和危险区比邻区域，下述区域应安装气体探测装置和声光报警：

- (1) 货物压缩机室；
- (2) 货物处理设备马达间；
- (3) 除定义为气体安全处所的货物控制室；
- (4) 其它容易聚集货物蒸气的围蔽处所；
- (5) 通风罩和蒸发气道；
- (6) 气锁。

4.4.9.2 路经安全处所的取样管应尽可能短，穿舱件应是认可的型式且耐火完整性应等效于舱壁，手动截止阀应安装在气体安全处所一侧。当气体探测装置箱体内气体浓度达到 30%爆炸下限时，气体分析装置应自动切断。具体要求详见现行 IGC code

第 13.6 节。

#### 4.4.10 消防系统

4.4.10.1 可能会安装在 LNG 运输船上的消防系统：水消防，CO<sub>2</sub> 系统、便携式或半便携式灭火器、固定局部水基灭火系统、厨房灭火系统、固定式干粉灭火系统、高压或低压泡沫灭火系统和水雾系统。

4.4.10.2 LNG 运输船上的消防系统按照 IGC Code、SOLAS 公约相关章节和 FSS 规则的原则进行配置和检验。

#### 4.4.11 甲板冷却系统

4.4.11.1 甲板冷却系统的环境气温高的情况下开启，降低甲板、液货管系、气穹、货物机械室和货物压缩机室外板、生活区前部和救生艇存放处的温度，尤其是减少对货物系统的热传递梯度，降低液货蒸发量，同时还具有灭火的功能。甲板冷却系统主要由管路、喷嘴和截止阀组成，验船师应验证该系统的有效性，进行喷淋试验并检验其喷淋覆盖范围。

#### 4.4.12 电缆敷设

4.4.12.1 LNG 船上的低温电缆用于液货舱内和液货舱绝缘层区域。

4.4.12.2 为了监测液货舱的 LNG 是否有泄漏、绝热性能是否正常、每个液货舱的绝缘层区域都均匀分布了温度传感器。由于低温传感器安装在主绝缘层和次绝缘层中，所以电缆必须从绝缘箱的间隙中穿行，每个内平面都需提供一份专门的传感器和电缆布置图。检查低温电缆的敷设质量及穿舱件安装质量。

4.4.12.3 高压电缆敷设要求

- (1) 高压电缆不应路径居住处所，若无法避免则应采取相应的保护措施；
- (2) 高压电缆必须于低压电缆分隔开，特别是他们不应敷设在同一电缆束、或同一电缆糙、同一管道中、或者同一箱（盒）中；
- (3) 高压电缆外表选用红色，电缆导架涂红色油漆以区别于常规电压电缆。
- (4) 高压电缆耐压试验

根据规范以及 IEC-60502 要求，采用 Alternative-1 试验型式，对高压电缆每相电缆对电缆外壳进行耐压试验，测试电压采用直流 36 kV 的 70% 及 25.2 kV。

4.4.12.4 本安电缆的分隔

- (1) 本安电缆和非本安电缆不可以绑扎在一起，且间距应大于 50 mm；

- (2) 本安电缆和非本安电缆不应使用同一个电缆管；
- (3) Exia, Exib 的电路不应使用同一电缆的不同芯线；
- (4) 本安电路不应与非本安电路使用同一电缆的不同芯线；
- (5) 本安与非本安的接线端子排应大于 50 mm 的距离，且分别标识清楚；
- (6) 无屏蔽的本安与非本安芯线不应位于同一线槽/线束内。

#### 4.4.12.5 本安电路接地

- (1) 电缆的编织/铠装应在两端接地，除了要求单端接地的传感器；
- (2) 若对线有单独的内屏蔽层，则此屏蔽应在隔离栅处接地，在危险区域作绝缘处理；
- (3) 若设备提供了单独的保护接地，仪表接地和本安接地，则应相对应单独连接；
- (4) 电缆的接地应按照设备商提供的安装手册施工；
- (5) 本安电路的接地布置应和其它接地系统分开，并单独与船体连接。

### 4.4.13 防爆电气设备

#### 4.4.13.1 防爆区域的检验流程

- (1) 应按照工艺流程和厂家要求对防爆设备进行正确的安装；
- (2) 应按设计部门提供的防爆设备清册对各设备进行专项检查；
- (3) 专项检查时要包括对各防爆设备的安装，位置、数量、序列号、防爆等级以及证书等逐一核对；
- (4) 防爆证书正本应在船上保留，以备港口当局检查。

#### 4.4.13.2 防爆区域主要设备的验收要求

##### 4.4.13.2.1 防爆区域的设备电缆敷设验收

- (1) 连接防爆设备的本安电缆应与信号电缆区分开，尽量避免在同一导架上敷设；无法避免的，间距应大于 50 mm；
- (2) 电缆在贯穿件处应有密性处理；
- (3) 电缆中不应有转接头或接线盒，除非系统有特殊要求或规定允许（例如照明，广播系统等）；
- (4) 电缆的敷设应注重完整性，检查电缆表面是否有破损，应避免接触油漆，电缆应有效保护；
- (5) 防爆区域电缆的弯曲余量应符合规范要求；

(6) 电缆进设备控制箱填料函处应垂直，不应倾斜；

(7) 电缆或电缆管穿越分隔危险与非危险区域或所处的气密舱壁和甲板时，其布置不应破坏舱壁或甲板的气密完整性。

#### 4.4.13.2.2 防爆区域照明系统的验收

(1) 核对防爆区域照明灯具的防爆证书；

(2) 防爆区域照明设施的开关及保护装置应置于非危险区域，若开关拥有危险区域安全类型证书，则可以安装；

(3) 检查照明系统涉及的电缆按防爆区域的设备电缆进行检验；

(4) 检查灯具填料函的密性及灯具固定螺丝的紧固，按设计部门提供的防爆设备清册确定各灯具型号、数量、安装位置；

(5) 照明灯具应保持清洁，检查安装过程中（包括灯罩、灯壳、接线盒）是否损坏；

(6) 检查灯具的外壳接地线是否安装正确、紧固。

#### 4.4.13.2.3 防爆区域传感器的安装检查

(1) 按照防爆设备清册核对防爆区域传感器的防爆证书、型号、数量；

(2) 检查传感器的电缆，按防爆区域的设备电缆进行检验；

(3) 防爆区域传感器在货舱装有 LNG 气体时所涉及的调试与报验中使用的设备如压力矫正器、过程测试仪等，应是防爆的并有 Ex 标记；

(4) 安装在隔离空舱内的传感器应避免碰触管子支架，检查传感器的进线口紧固情况，不应松动。

#### 4.4.13.2.4 防爆区域隔离栅控制箱的验收

(1) 控制箱的安装应布局合理，固定牢固。其垂直偏差不应大于 1.5%；

(2) 检查控制箱的接地线是否安装正确；

(3) 控制箱内隔离栅应保持清洁，接线完整；

(4) 按照防爆设备清册核对隔离栅的证书、数量和型号；

(5) 检查控制箱内电缆，按防爆区域的设备电缆进行检验；

(6) 检查控制箱贯穿件的密性完整。

#### 4.4.13.2.5 防爆区域各阀和液货泵过渡箱的检验

(1) 按照防爆设备清册核对各阀和过渡箱的防爆证书、型号、数量；

(2) 检查各阀和过渡箱的安装是否固定好；

- (3) 电缆进过渡箱内部接线后，应检查接头的上紧力矩（测力力矩的数值按接头螺丝的标准决定）；
- (4) 完成测力后应对过渡箱内清洁并浇注密性，同时检查密性是否填满；
- (5) 检查过渡箱填料函的紧固，电缆安装的固定，以及热缩套管对填料函的塑封。

## 第 5 章 气体试航和第一次装货与卸货操作

### 第 1 节 气体试航

#### 5.1.1 总则

5.1.1.1 LNG 船除了进行常规试航，在正式营运之前还需进行气体试航，目的是验证所有涉及到货物操作设备和气体管理系统（包括仪表，监测控制和报警系统）的功能和完整的效用，从而保证 LNG 船的所有系统和设备在 LNG 船营运和装卸过程中可靠良好的运行。一般来说，气体试航需进行下列操作试验：

- (1) 绝缘层空间的氮气注入
- (2) 液货舱和管系的惰化
- (3) 与岸站通讯及装载臂连接
- (4) 气体置换
- (5) 液货舱和管系冷却
- (6) 装载 LNG
- (7) 液货泵、扫舱泵及应急液货泵的运行
- (8) 卸载 LNG
- (9) 液货舱升温
- (10) 液货舱的惰化及通风

5.1.1.2 LNG 船气体试航一般分为下列三个步骤：

(1) 冷态试验：在船厂码头进行，主要包括绝缘层空间氮气注入、液货舱和管系干燥、惰化、液货管路冷却。

(2) 货物操作系统运行试验：当 LNG 船到达气站时进行，主要包括与岸站通讯及装载臂连接、气体置换、液货舱和管系冷却、装载 LNG、液货泵和扫舱泵及应急液货泵的运行、卸载 LNG、液货舱升温、液货舱的惰化、液货舱通风。

(3) 气体管理系统的运行试验：主要包括 BOG 的操作验证试验，如主锅炉燃烧试验，双燃料发电机运行试验，再液化效用试验，GCU 效用验证，其他试验等。

#### 5.1.2 气体试航前冷态试验

##### 5.1.2.1 绝缘层内注入氮气

5.1.2.1.1 向绝缘层内注入氮气的目的是清除绝缘层内的空气，降低绝缘层空间的含氧量（使之小于 3%）。每个舱的初级和次级绝缘层空间是由船上一个或两个氮气发

生装置通过吸入空气通过薄膜过滤而产生的氮气来调节绝缘层空间的压力。氮气发生装置产生氮气（含氧量为 3%），目的是保证舱内压力不会随着温度的变化而变化，初级与次级绝缘层空间是由两根独立的氮气总管分别注入氮气。每根管路上有两只控制阀门分别控制注入压力和排出压力，管路压力过高时，氮气排至透气桅。每个绝缘层空间均设有安全阀，其中次级绝缘层空间安全阀直接排至大气，初级绝缘层空间安全阀排至透气桅。每个初级绝缘层的安全阀也能够直接旁通排至大气。

5.1.2.1.2 在注入氮气之前，首先要将绝缘层空间内的空气排出，利用两台真空泵对所有液货舱的主、次绝缘层抽真空进行减压，将排出的废气通过透气桅释放至空气中(如图 5.1.1 所示)。主、次绝缘层抽真空可以同时进行，最终液货舱的初级与次级绝缘层须达到规定的真空状态。

5.1.2.1.3 气体试航时，第一次对绝缘层空间注入氮气时，绝缘层空间与液货舱压力关系：  
液货舱>初级绝缘层>次级绝缘层。（注：压力不可升高太快，压力值通过货控室内的操作屏显示，并附有报警点）。当绝缘层空间达到注入氮气的要求之后，通过 LNG 汽化器把岸上的液态氮化成气态，并调整 LNG 汽化器的流量，使氮气通过管系注入到绝缘层空间（如图 5.1.2 所示）。

5.1.2.1.4 检验时需测量货舱，主次绝缘层的压力以及绝缘层空间内氧气的浓度。

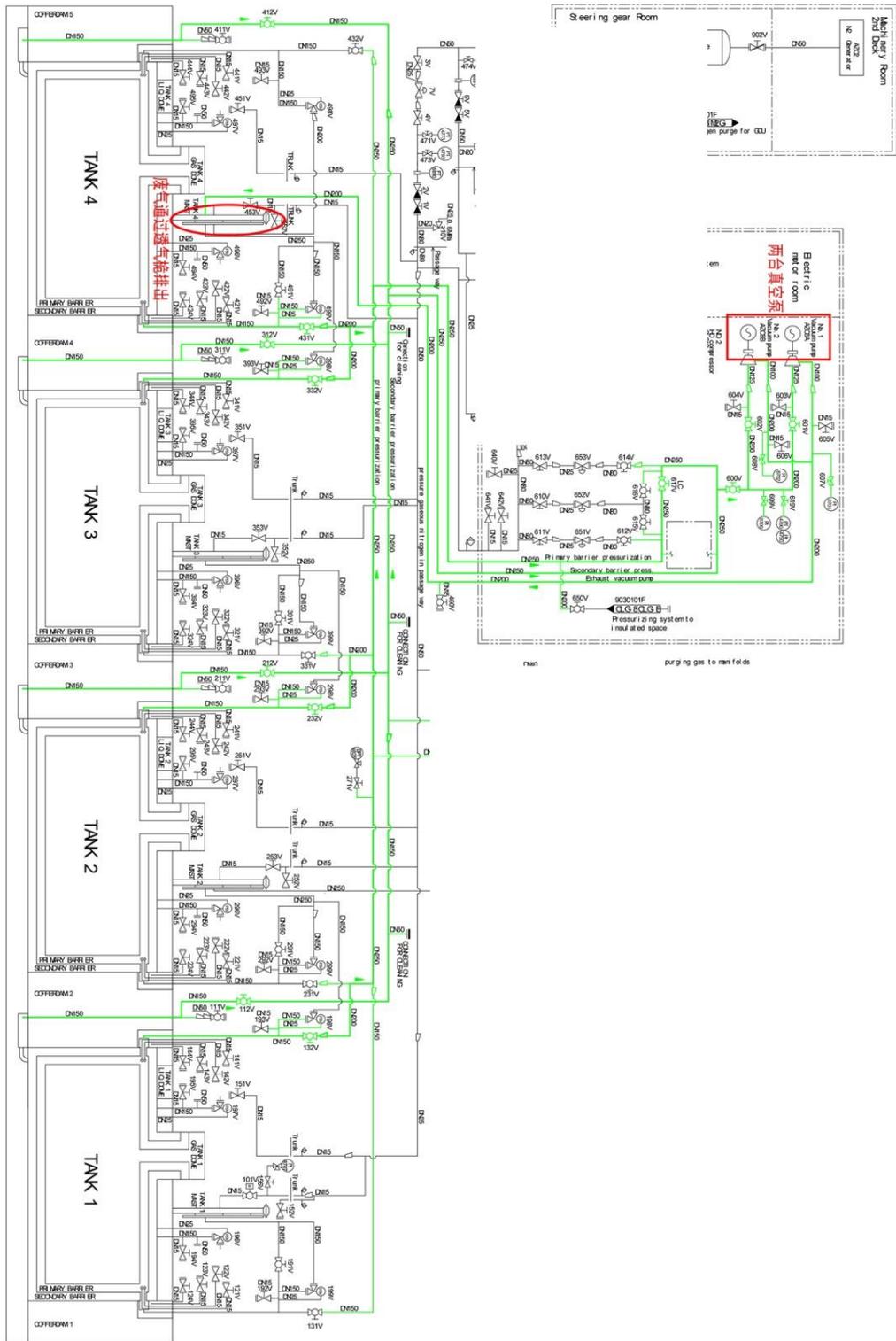


图 5.1.1 主、次绝缘层抽真空试验



### 5.1.2.2 货舱和管系干燥处理

5.1.2.2.1 液货舱和管系进行干燥目的是将湿空气排出，降低货舱露点，保证货舱在冷却时下不会结冰。液货舱要由惰气发生器产生的干空气来干燥，使露点降低到 $-20^{\circ}\text{C}$ 或更低。

5.1.2.2.2 惰气发生器产生的干空气由液货管送到各舱，置换出的气体通过挥发气管通过 1 号透气桅排出。由于干空气密度会随温度的变化而变化，根据货舱内空气和干空气的相对密度：

(1) 在冬季，干空气比环境空气轻，干空气从挥发气主管和气穹注入以获得好的活塞效应，环境空气从底部注入管排出（如图 5.1.3）；

(2) 在夏季，干空气比环境空气重，干空气从底部注入，环境空气从挥发气主管排出（如图 5.1.4）。

5.1.2.2.3 货舱干燥目标：货舱露点  $\leq -20^{\circ}\text{C}$ ，单货舱干燥完成，关闭透气阀使舱内压力上升到 120 kPa，然后关闭注入阀并停止惰性气体发生器。

5.1.2.2.4 在检验时，首先要确认挥发气总管、液货管、扫舱管的干空气吹洗试验，保证管系内的清洁；在干燥过程时，每小时需测量：

- (1) 大气压力和温度
- (2) 货舱的露点
- (3) 货舱温度和压力
- (4) 主次绝缘层内的压力

5.1.2.2.5 对惰性气体发生器干空气模式下的功能进行验证。

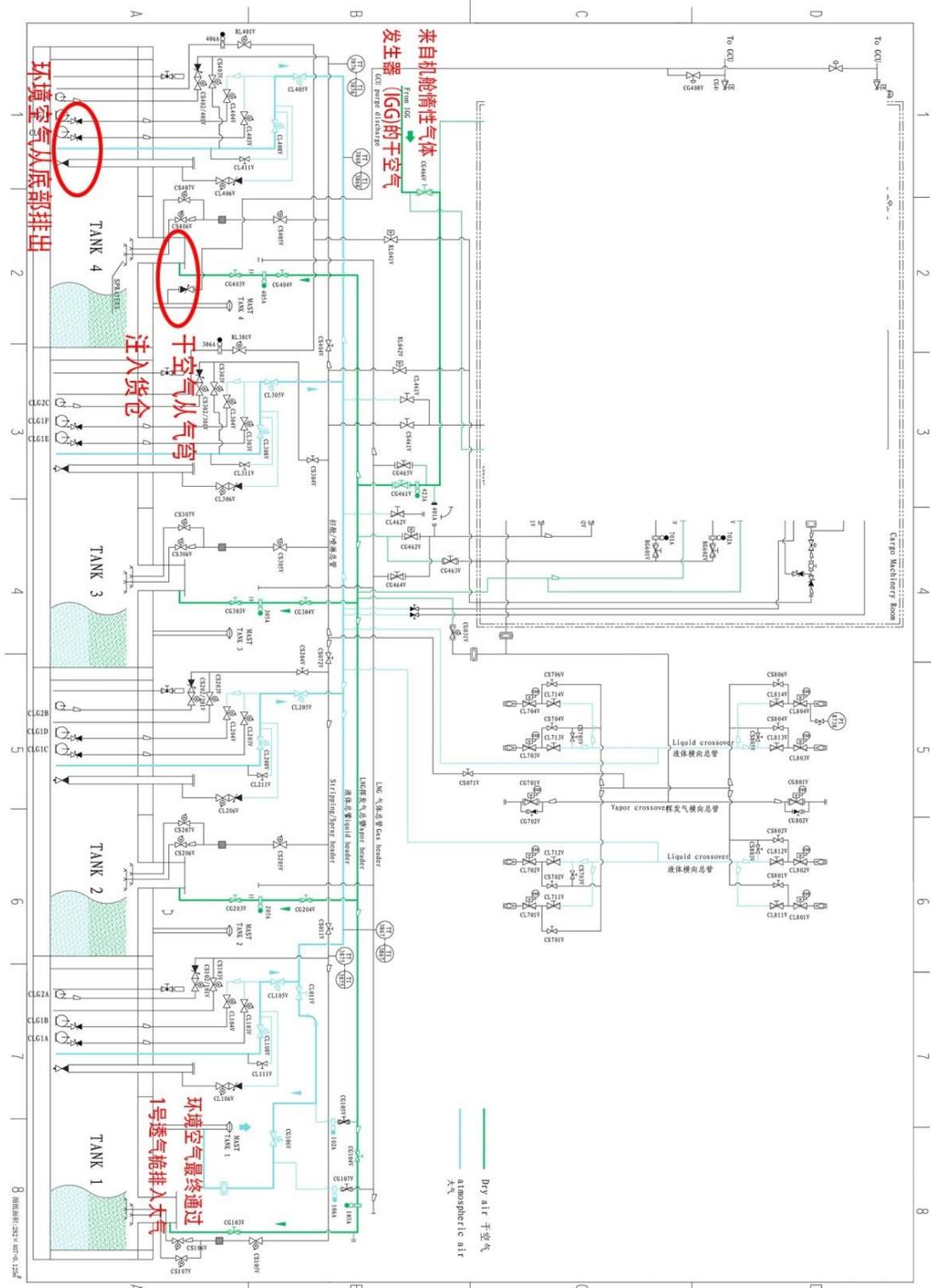


图5.1.3冬季液货舱及管系干燥图示

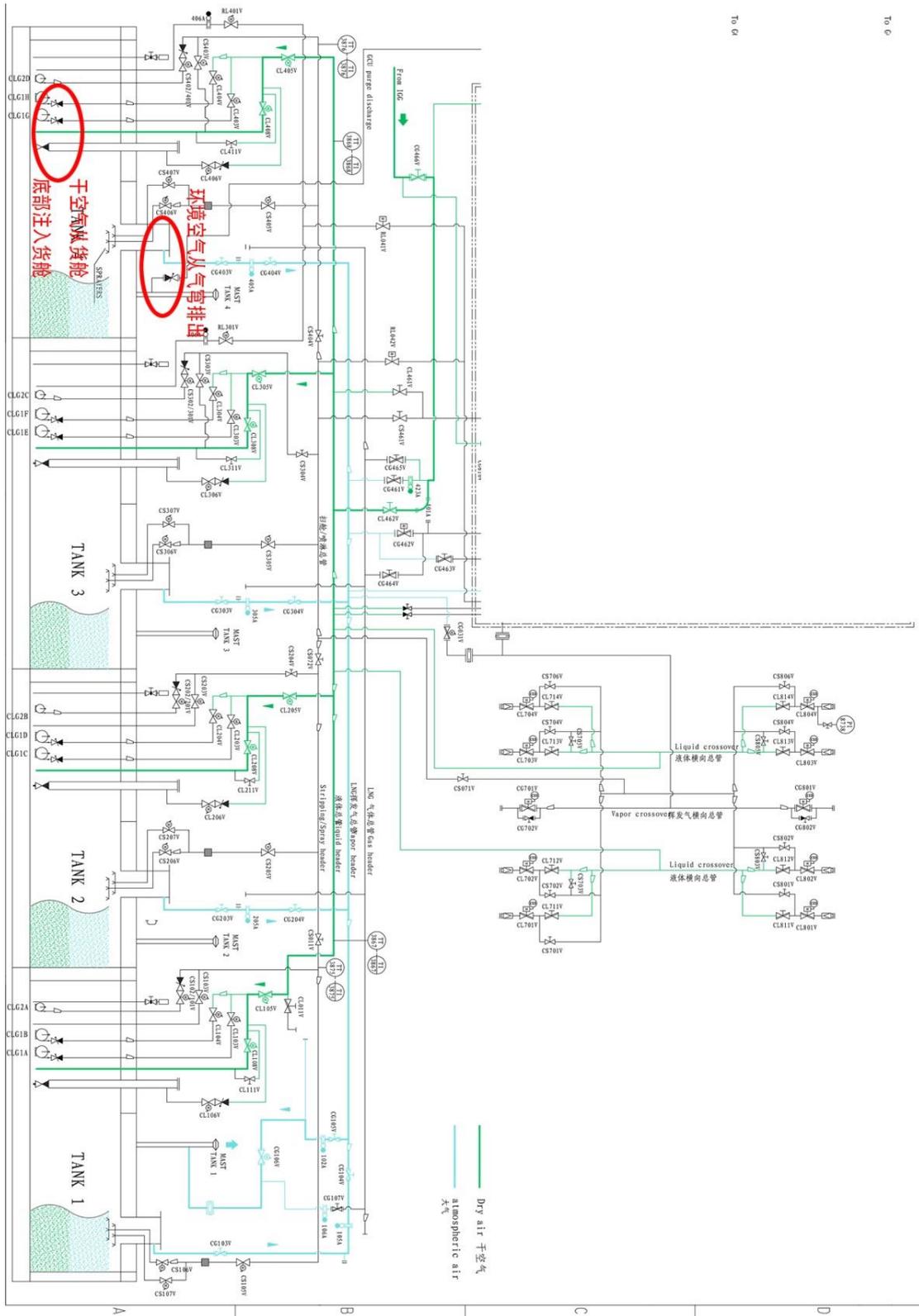


图 5.1.4 夏季液货舱及管系干燥图示

### 5.1.2.3 液货舱及管系惰化

5.1.2.3.1 液货舱及管系惰化的目的是将液货舱内的含氧量降低至小于 2%，露点进一步降低至-40℃。液货舱惰化一般是由惰性气体发生器产生的惰性气体（由 85%的 N<sub>2</sub> 和 14%的 CO<sub>2</sub> 构成）进行空气的置换（如图 5.1.5）。需要岸上的液氮对液货舱及管系进行惰化（如图 5.1.6），此时在操作之前，液货管、扫舱管、LNG 汽化器均需要进行冷却。

5.1.2.3.2 根据货舱内惰性气体和干空气的相对密度，采用惰性气体进行惰化时，惰性气体从货舱底部注入，空气由气穹排出；采用氮气进行惰化时，氮气从货舱气穹注入，空气由底部排出，最终空气经由 1 号透气桅排出。检验时需注意每小时进行一次测量，主要有：

- (1) 大气压力和空气温度
- (2) 货舱的露点，氧气含量和温度、压力
- (3) 主次绝缘层的温度和压力
- (4) 货舱和绝缘层的压差
- (5) 1 号透气桅的流量
- (6) 管系的压力和温度

5.1.2.3.3 注意货舱露点及氧气含量的测量的最终确认点，当使用惰性气体时，在货舱的顶部；当使用氮气时，在货舱的底部。



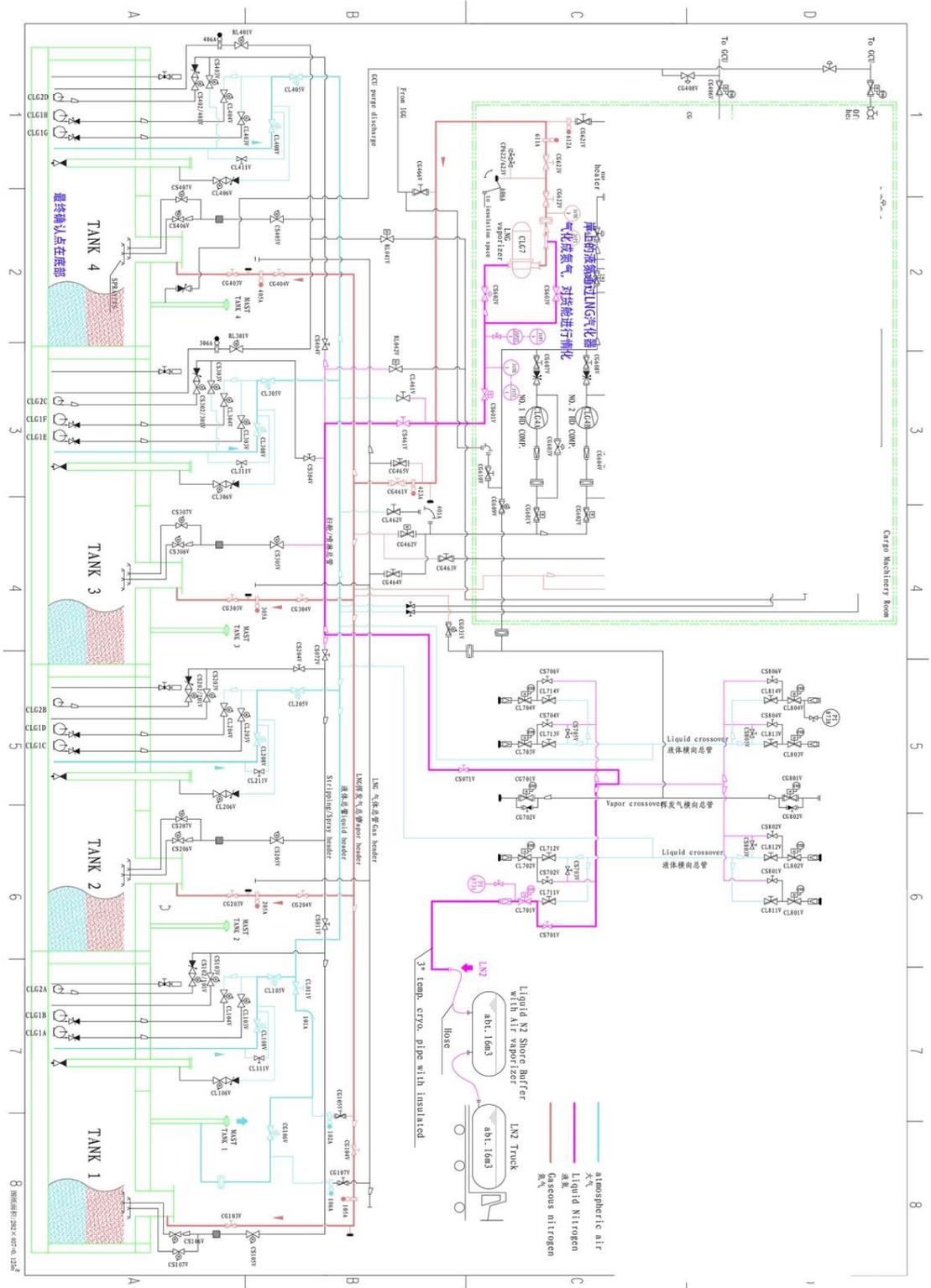


图 5.1.6 采用液氮进行惰化

#### 5.1.2.4 液货管路冷却

5.1.2.4.1 管系冷却主要是对扫舱总管、液货总管、挥发气总管进行冷却。

5.1.2.4.2 扫舱总管:是指用作液货舱扫舱、冷却、液货主泵排出管注入及向蒸发器提供 LNG 的纵向管路,通过集管区域的阀门与液货主管连接(如图 5.1.7)。

5.1.2.4.3 液货总管是指用作液货舱注入和排出的纵向管路。液货总管与岸站管路连接的跨越管称为集管,通过集管区域的阀门与扫舱主管连接(如图 5.1.8)。

5.1.2.4.4 挥发气总管是指用作液货舱自然挥发的收集纵向管路,与挥发气返岸压缩机连接(如图 5.1.9)。

5.1.2.4.5 对管系进行低温冷却试验主要目的是验证:

- (1) 管路在低温情况下的性能;
- (2) 管路绝缘在低温情况下的性能;
- (3) 根据计算管路在低温情况下的位移;
- (4) 管夹的抗力。

5.1.2.4.6 管系冷却是通过码头上的液氮通过临时接头与集管连接进行,冷却之前应利用氮气对管系进行吹洗,吹洗完成之后应对所有管系包括临时管系进行 0.5bar 的密性试验,然后进行冷却,冷却的最终结果是管系的温度降至-100℃以下。在检验时需进行巡检,时刻关注管系及其附件的工作状态,主要有:

- (1) 膨胀弯头和膨胀接头处于好的工作状态;
- (2) 管夹处于好的工作状态、没有永久变形;
- (3) 阀件的密封性,法兰的密封性;
- (4) 测量管系的移动及变形数据;
- (5) 测量管系温度、压力。

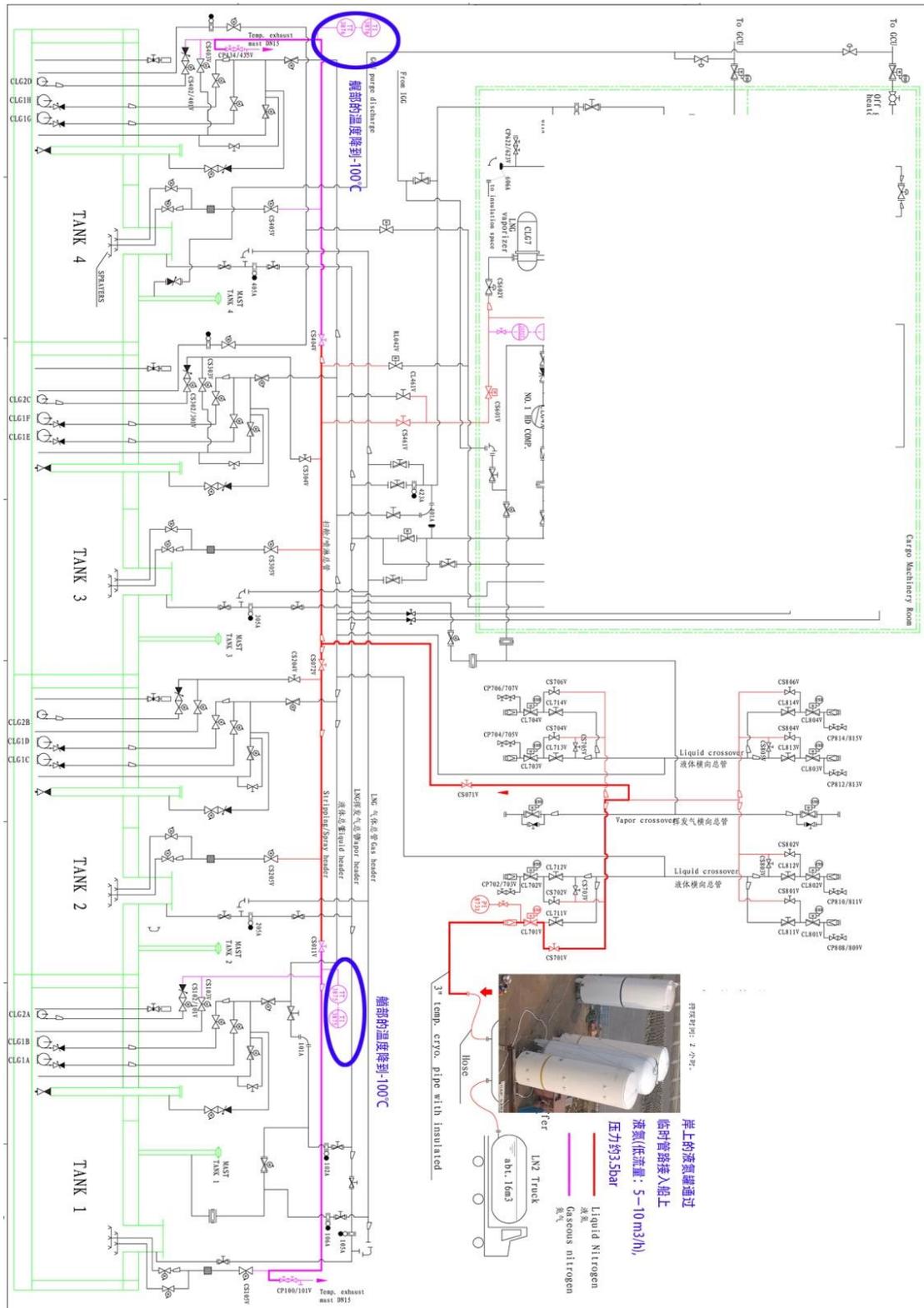


图5.1.7 扫舱管系冷却图示

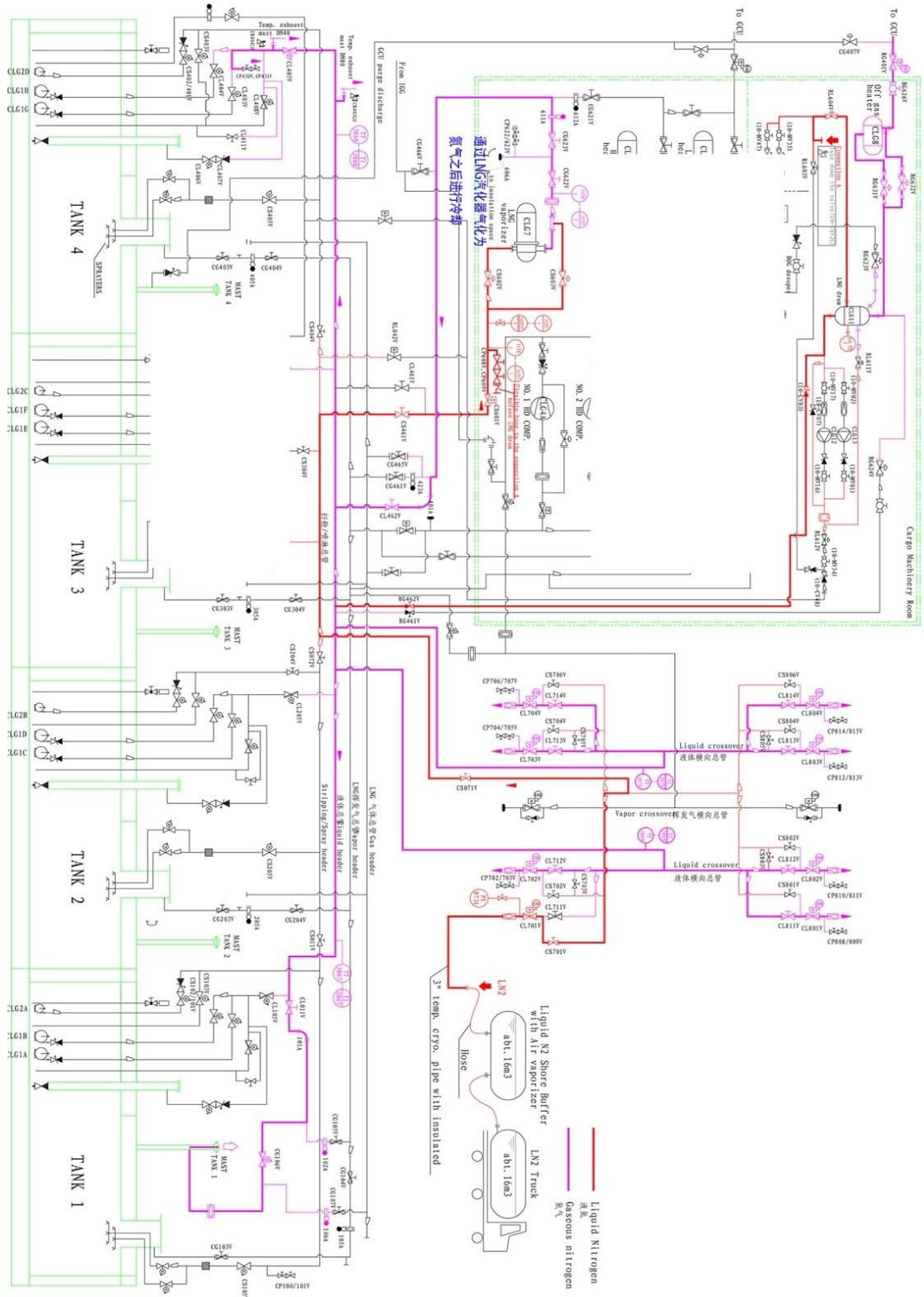


图5.1.8 液货总管的冷却图示



### 5.1.3 货物操作系统试验

#### 5.1.3.1 连接岸站和 ESD 试验

5.1.3.1.1 在 LNG 船到达气站之前，应对船岸通讯设备（SSL 系统）、甲板喷淋系统、机舱通风系统、ECR 空气闸功能、ESD 功能进行验证，确保其正常运行。

5.1.3.1.2 船岸通讯系统：通过模拟信号对电气、光纤连接功能验证，船岸电话功能正常，气动 ESD 上的管系通畅，功能良好。

5.1.3.1.3 甲板喷淋系统：连接到甲板喷淋的临时管系（位于消防控制站），启动甲板喷淋泵，确认穹顶甲板上各喷淋区域的水雾效果。

5.1.3.1.4 机舱通风系统：在到达气站之前需将上建区域端壁及舷侧的门窗关严，通过送风机使空气进行内循环并形成一定的正压，以免泄露的 LNG 气体进入舱室房间。

5.1.3.1.5 空气闸功能：验证空气闸的声光报警系统、通风系统功能是否正常。

5.1.3.1.6 ESD 功能：通过模拟信号进行 ESD，验证各阀及泵的动作是否良好。

5.1.3.1.7 根据气站要求，达到气站之前还应切断船上阴极保护系统。

5.1.3.1.8 到达岸站之后，完成船岸通讯系统的船岸连接，检查电气、光纤的通讯正常、船岸的声力电话联系正常、船上公共电话与岸站联系正常。

5.1.3.1.9 气体装载臂的连接：对气体装载臂进行连接之后，由岸站提供氮气对气体管路和装载臂进行吹洗，氮气从岸站装载臂注入，在气体管泄放阀排出。目标使管内含氧量小于 2%，露点低于-25℃。然后进行接头密性试验。

5.1.3.1.10 ESD 系统的测试应按如下过程进行：

- (1) 将 ESD 系统进行船岸连接（通过船岸通讯系统）
- (2) 涉及 ESD 系统的所有阀打开
- (3) 确认 ESD 系统的电源供应和气动管系内压力供应正常
- (4) 货控室将 ESD 按钮复位
- (5) 由货控室和岸站对 ESD 系统进行操作
- (6) 测量 ESD 系统阀的关闭时间（30S 内完全关闭）
- (7) 将 ESD 按钮复位

#### 5.1.3.2 气体置换

5.1.3.2.1 气体置换主要目的是利用岸站上的液化天然气接入船上 LNG 汽化器，产生的气化天然气（温度在-70℃~20℃之间）将液货舱内的惰性气体排出。因此，在靠岸站前应确保液货舱、液体和气体管路及集管，以及加热器、汽化器、压缩机、

至 GCU 燃气管均惰化结束（惰化目标：露点低于-40℃，含氧量低于2%）。

5.1.3.2.2 气体置换前考虑到安全的需要，集管区域内的水幕喷淋应开启，消防软管放置在甲板上和货物机械室内，甲板上的干粉灭火系统随时开启状态，手提式灭火器敷设在甲板上，以便随时取用。

5.1.3.2.3 在检验气体置换过程中，需对下列状态和参数进行确认及测量：

- (1) 测试液货泵、扫舱/喷淋泵和应急泵的绝缘电阻；
- (2) 集管冷却足够之后进行冷态的 ESD 测试（检查结霜情况）；
- (3) 从每舱的采样点（顶部，中部，底部）逐一检查液货舱的气体含量；
- (4) 大气压力和温度；
- (5) 货舱、主、次绝缘层内的压力和温度；
- (6) LNG 汽化器出口压力温度及流量以及排岸的压力温度及流量；
- (7) 液货舱内 CO<sub>2</sub> 含量小于 1%时，CH<sub>4</sub> 含量大于 99%时，气体置换结束。

5.1.3.3 货舱冷却

5.1.3.3.1 气体置换结束之后，应对货舱进行冷却而不是直接装载 LNG 的作用是降低热力对泵塔及货舱边界产生冲击作用，并减少在装载初期产生的挥发气。货舱冷却的目标是使货舱内的温度一般需达到-130℃以下。货舱冷却工作进行之前，应对下列设备进行检查：

- (1) 一台乙二醇加热系统处于工作状态，另一台处于备用状态；
- (2) 氮气发生器处于自动模式状态，并检查氮气缓冲罐的压力；
- (3) 主、次绝缘层内的压力，确保液货舱压力>初级>次级绝缘层；
- (4) 确认可燃气体探测系统正常运行；
- (5) 回气压缩机正常运行。

5.1.3.3.2 货舱冷却过程主要是由岸站提供的 LNG 通过扫舱管经由位于气穹内的喷淋头喷洒在货舱内对货舱进行冷却，产生的挥发气经由回气压缩机通过挥发气总管排到岸站（如图 5.1.10）。

5.1.3.3.3 货舱冷却过程中应对如下状态和参数进行确认和测量：

- (1) 测试液货泵、扫舱/喷淋泵和应急泵的绝缘电阻；
- (2) 大气压力和温度；
- (3) 货舱、主、次绝缘层内的压力；
- (4) 隔离空舱内温度；

5.1.3.3.4 逐一检查液货舱的温度，液货舱内温度梯度曲线（图 5.1.11），舱内的平均温度须按照此曲线，误差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

| Cooling-Down Time | Cargo Tanks Mean Temperature |
|-------------------|------------------------------|
| 0 hour            | 40 °C                        |
| 1 hour            | 0 °C                         |
| 2 hours           | -36 °C                       |
| 3 hours           | -62 °C                       |
| 4 hours           | -78 °C                       |
| 5 hours           | -92 °C                       |
| 6 hours           | -102 °C                      |
| 7 hours           | -112 °C                      |
| 8 hours           | -120 °C                      |
| 9 hours           | -126 °C                      |
| 10 hours          | -130 °C                      |

图 5.1.11 相关技术文件上的温度梯度曲线

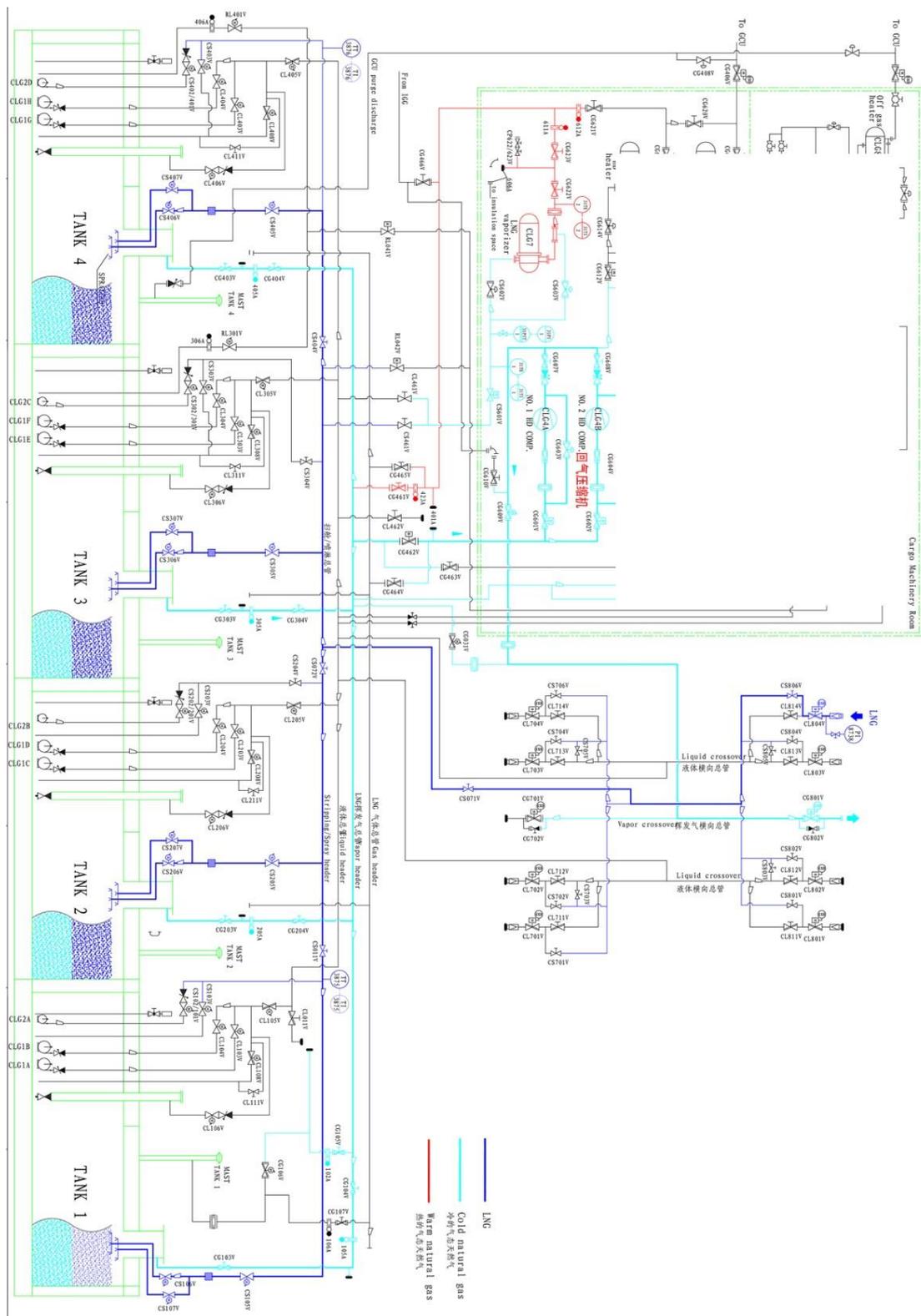


图 5.1.10 货舱冷却图

#### 5.1.3.4 液货装载

5.1.3.4.1 一旦冷却完成就可以进行货物转载，首次装载一般单舱装载少量的 LNG，在装载的过程中要密切注意货舱内的压力，一般通过流量阀控制，舱内压力保持在 10KPa 左右，但如果压力较大，需启动一台回气压缩机控制舱内压力在 14KPa 以内，同时应根据舱内液位记录扫舱泵、液货泵的浸没时间（如图 5.1.12）。

5.1.3.4.2 在检验时还应对下列状态及参数进行确认和记录：

- （1）大气压力和温度；
- （2）货舱、主、次绝缘层内的压力；
- （3）隔离空舱内温度；
- （4）货舱压力、温度、液位；
- （5）到岸站挥发气的流量；
- （6）对液货管系进行巡检，检查是否存在结冰现象，附件是否有泄露以及管系支撑处的位移是否在正常范围内；
- （7）检查 CTS 上的流量表的指示。

5.1.3.4.3 装载结束后，对液货泵和扫舱泵进行绝缘测量，关闭进口阀件，由岸站提供的氮气对装载臂和管系进行吹洗，使管系内排放到的大气的  $CH_4 < 5\%$ ，然后对装载臂进行拆卸并安装船侧连接管的盲板法兰，将 ESD 系统岸船连接切断，岸船通讯系统关闭，随后船舶离岸。



#### 5.1.3.5 航行期间货舱气体置换（可选）

5.1.3.5.1 如果其它货舱在岸站没有进行气体置换，那么在海上也进行气体置换，置换过程与在岸站类似，有一点不同的是货舱内混合的惰性气体和 LNG 挥发气需由 1 号透气桅排出，所以需密切注意一号透气桅内 LNG 挥发气的浓度。

#### 5.1.3.6 航行期间液货泵运行及货舱冷却

5.1.3.6.1 航行期间需对货舱内的扫舱泵、液货泵和应急液货泵的效用进行验证，目的是确保其在随后的货舱冷却和驳运过程中正常运行。验证试验通常是在一个货舱内进行 LNG 的自循环驳运（如图 5.1.13），试验前先确认如下状态：

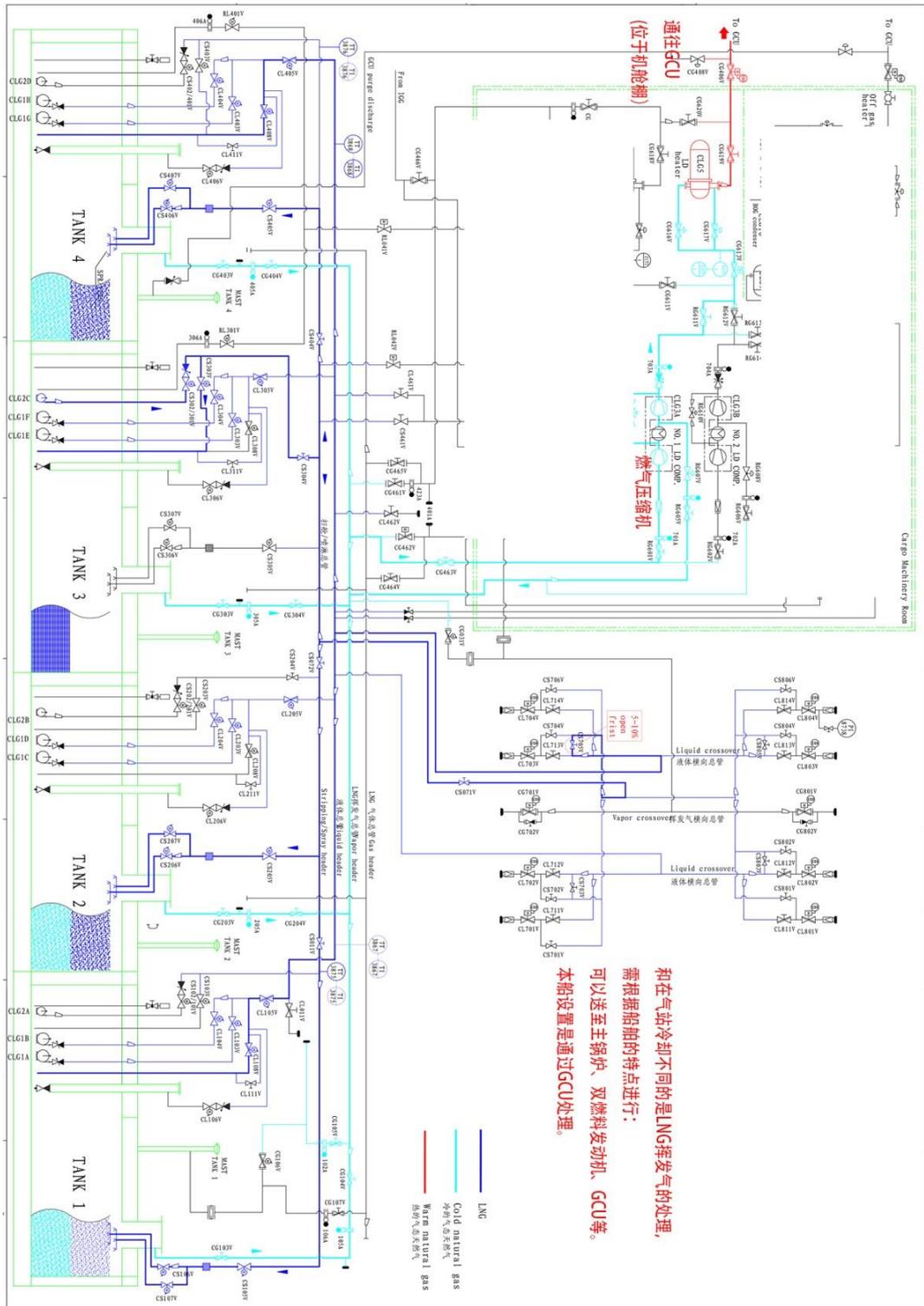
- （1）发电机正常工作；
- （2）整船电网剩余负荷满足运行液货泵的容量；
- （3）液货泵的绝缘测量；
- （4）液货泵在启动前需浸没 1 小时，应急液货泵浸没 2 小时；
- （5）货舱的排出阀和注入阀工作正常；
- （6）液货舱内 LNG 的液位。

5.1.3.6.2 上述状态确认后，进行扫舱泵、液货泵和应急液货泵的运行试验，试验过程中需记录下列参数：

- （1）货舱的温度及压力；
- （2）泵浦的遥控操作和就地操作；
- （3）泵浦的马达启动和运行电流；
- （4）泵浦的转向，如发生逆转，需在货物配电板上改变电缆的相序；
- （5）泵浦的运行时间；
- （6）应急液货泵运行时还应注意应急货泵管上部需要有防泄露的方式，如环绕法兰等。

5.1.3.6.3 货舱冷却的过程和在岸站类似，主要是由扫舱泵向其他需要冷却的货舱通过喷淋管进行冷却，不同的是 LNG 挥发气的处理，需根据船舶的特点处理，可以送至主锅炉、或双燃料发动机、或 GCU 直接燃烧（如图 5.1.14）。





和在其他站冷却不同的是LNG挥发气的处理，  
 需要根据船舶的特点进行：  
 可以送至主锅炉、双燃料发动机、GCU等。  
 本船设置是通过GCU处理。

图 5.1.14 航行时货舱的冷却

### 5.1.3.7 货物驳运操作

5.1.3.7.1 当其他货舱冷却过程结束之后，就可以进行各个货舱之间液货的驳运操作，主要目的是验证每个货舱内的液货泵及扫舱泵的运行状况，液货驳运过程应确保每个货舱进行轮换。

### 5.1.3.8 卸货

5.1.3.8.1 船舶再次抵达岸站进行液货卸载（如图 5.1.15），卸载货物前应确保下列过程操作完成：

- （1）尽可能将液货驳运到一个舱；
- （2）液货管路应进行再次冷却；
- （3）冷态的 ESD 效用，检查阀件的结霜情况；
- （4）岸船通讯及装载臂连接。

5.1.3.8.2 货物卸载时，货舱内部压力会因为抽吸效应而降低，所以要从气穹补充汽化 LNG 以平衡压力，汽化 LNG 一般由岸站提供，如岸站不提供，需使用 LNG 汽化器产生。在检验时应应对下列状态及参数进行确认和记录：

- （1）主次绝缘层的压力及温度；
- （2）隔离空舱的温度及压力；
- （3）乙二醇系统的运行状态；
- （4）LNG 汽化器备用状态；
- （5）船舶的吃水及横纵倾状态；
- （6）液货泵及扫舱泵出口压力，运行电流；
- （7）液货舱的液位。

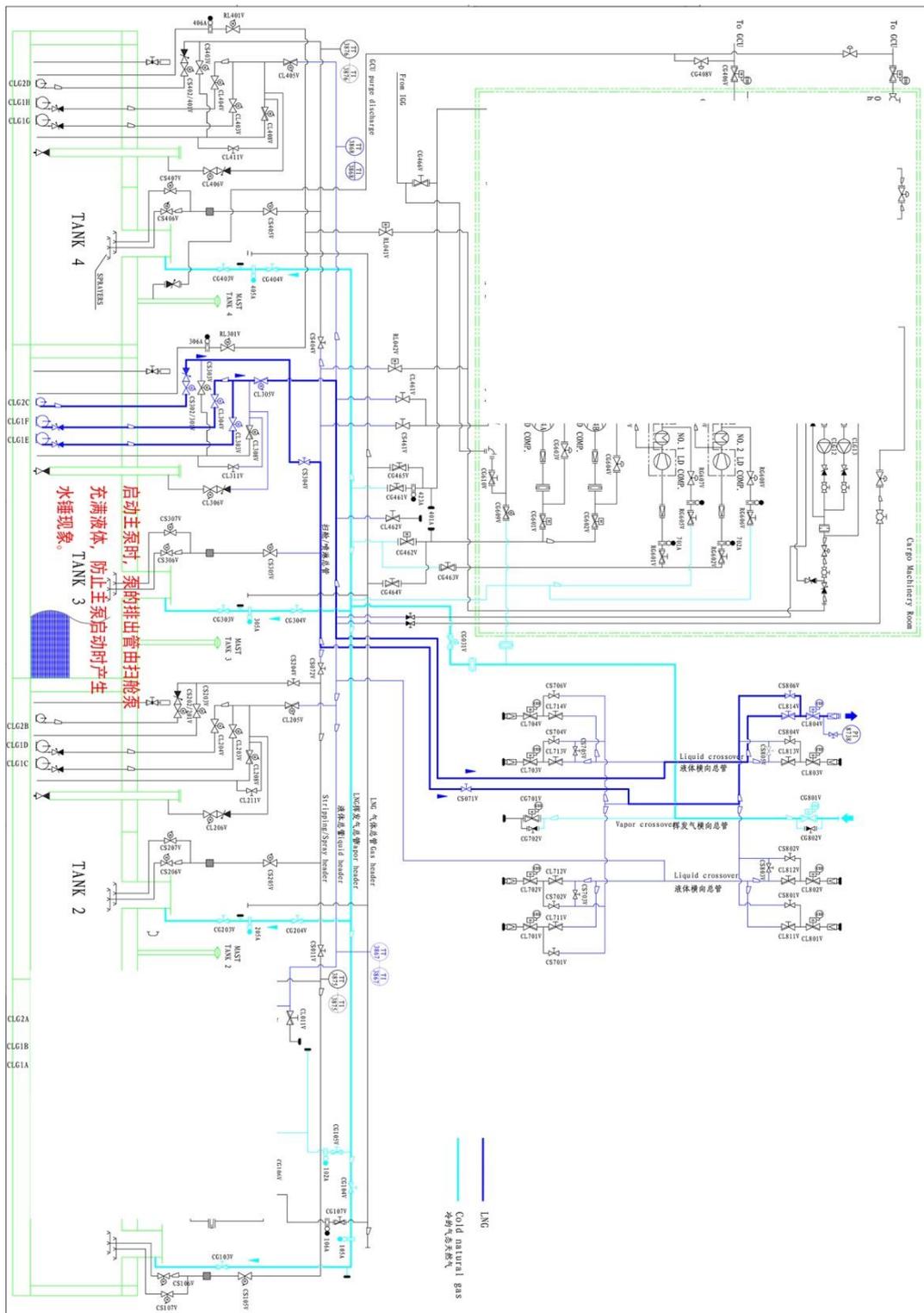


图 5.1.15 液货卸载

### 5.1.3.9 升温

5.1.3.9.1 在货舱惰化和空气化之前，货舱要升到室温，目的是防止惰气内的 CO<sub>2</sub> 变成干冰，并防止惰气和空气中的水凝结。货舱升温原理是通过回气压缩机和回气加热器对气体进行循环加热，货舱内冷的天然气通过气穹抽出，经回气加热器加热后由注入管从货舱底部注入，完成一个循环（如图 5.1.16）。

5.1.3.9.2 货舱升温分成两步，首先是将货舱内残余的 LNG 挥发成气体，然后才是货舱正式开始加热。热的天然气的注入会使残余的液体挥发，并且舱内的温度和压力升高，多余的 LNG 挥发气通过 1 号透气桅排放到大气或 GCU 燃烧，通常都是经 GCU 燃烧，透气桅只在应急时使用。如使用透气桅进行排气，特别注意上层建筑的可燃气体探测和船舶艏部及通道内的可燃气体探测。

5.1.3.9.3 在检验时应应对下列状态和参数进行确认和记录：

- (1) 货舱压力及温度；
- (2) 主、次绝缘层空间的压力及温度；
- (3) 隔离空舱内的温度；
- (4) 回气压缩机的出口温度及流量；
- (5) 回气加热器的出口温度及压力；
- (6) LNG 挥发气到透气桅或 GCU 的流量。

5.1.3.9.4 货舱升温过程一般持续 48 小左右，控制回气加热器的出口温度不要超过 80℃，通过根据 GTT 提供的次绝缘层的温升曲线（如图 5.1.17），检测次绝缘层的温度  $\geq -10^{\circ}\text{C}$ （如用热的惰气惰化）或  $+5^{\circ}\text{C}$ （如用常温的惰气惰化，大舱温度约 25℃），此时货舱自循环升温过程结束。

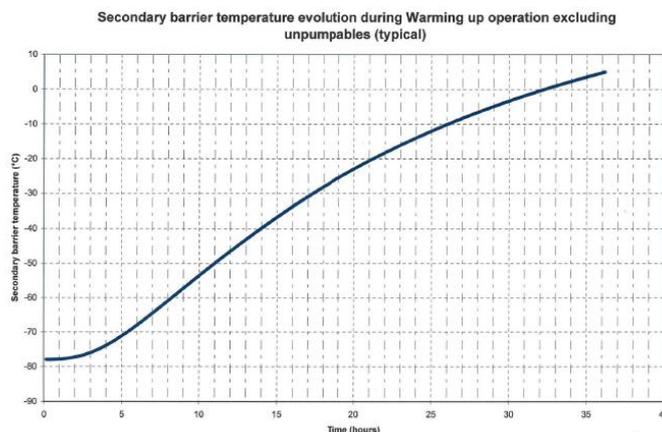


图5.1.17 相关技术文件中的货舱温升曲线

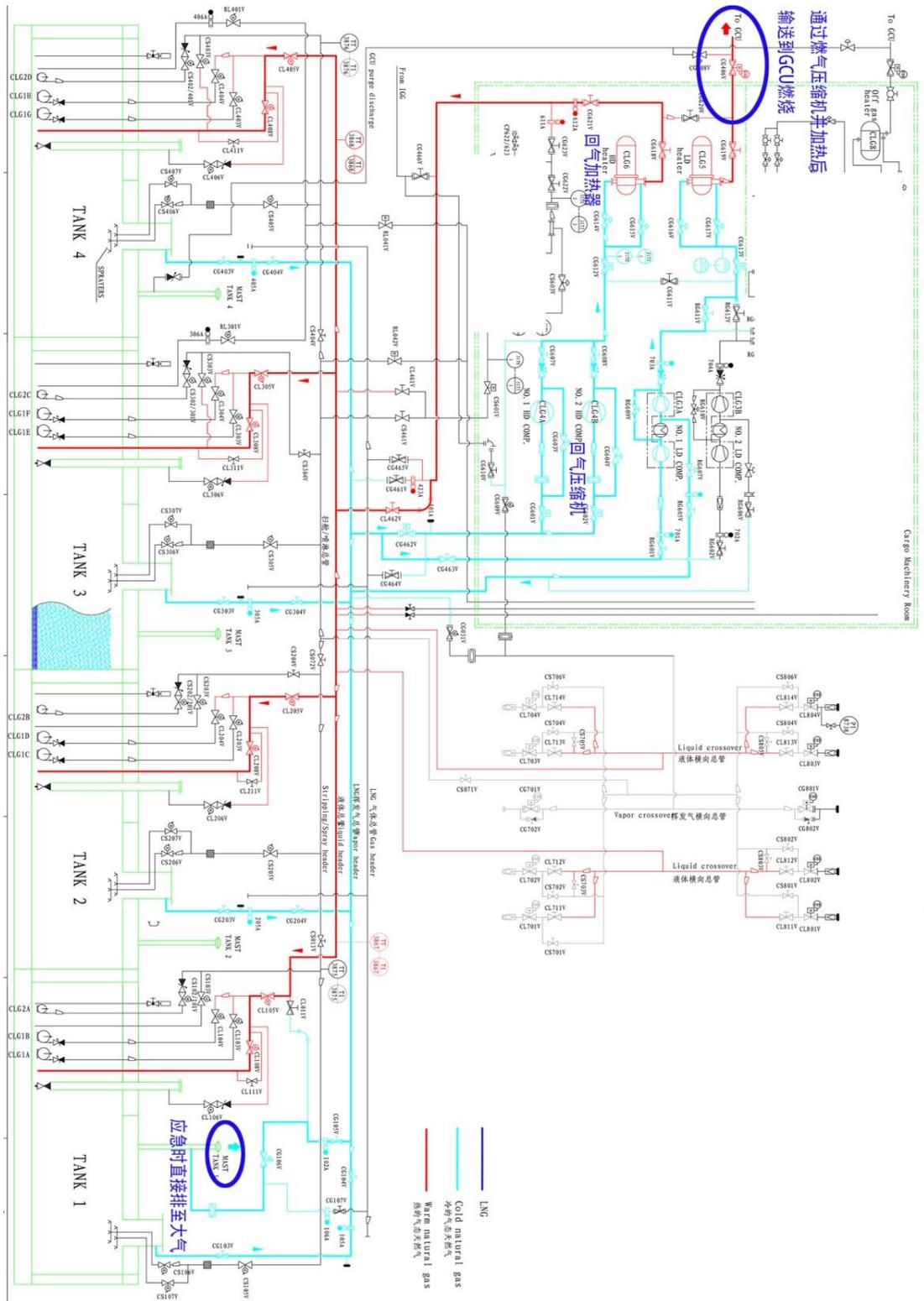


图 5.1.16 液货舱升温

### 5.1.3.10 惰化和通风

5.1.3.10.1 当次绝缘层温度达到指定温度之后，就可以进行货舱惰化，惰化的目的是防止天然气和空气形成混合爆炸气体。惰性气体由 IGG 产生，密度较天然气重，由注入管注入至舱底，天然气由气穹排出至 GCU 或者 1 号透气桅，由于会产生大量的天然气，所以通过 1 号透气桅排至大气时，需注意 1 号透气桅附近的天然气浓度。货舱惰化的目标是使每个舱内的 CH 含量低于 2%。惰化操作也一并包括所有管系及辅助设备的惰化（图 5.1.18）。

5.1.3.10.2 检验时应应对下列状态及参数进行巡检和记录：

- (1) 货舱的温度和压力；
- (2) 主、次绝缘层的温度和压力；
- (3) 主、次氮气总管内压力；
- (4) 惰性气体发生器出口含氧量，温度，压力及流量；
- (5) 货舱内 CH 含量；
- (6) 通往 GCU 的流量或透气桅的流量；
- (7) GCU 的运行状态；
- (8) 危险气体探测结果：主绝缘层，透气桅，隔离空舱，液穹空间，次绝缘层，货物机械室。

5.1.3.10.3 液货舱惰化之后，就可以进行通风（图 5.1.19），原理和货舱惰化类似，IGG 产生的干空气对货舱内的惰性气体进行置换，干空气密度比惰性气体低，由气穹注入货舱，惰性气体有注入管通过 1 号透气桅排至大气，货舱通风过程要一直持续到货舱内含氧量达到 20%，次绝缘层温度达到+5℃，同时 CO 含量<50ppm，CO<sub>2</sub> 含量<0.5%，CH 含量<0.2%。

5.1.3.10.4 检验时应应对下列状态及参数进行巡检和记录：

- (1) 货舱的温度和压力；
- (2) 主、次绝缘层的温度和压力；
- (3) 惰性气体发生器出口含氧量，温度，压力及流量；
- (4) 货舱 O<sub>2</sub>， CH， CO & CO<sub>2</sub> 的含量。

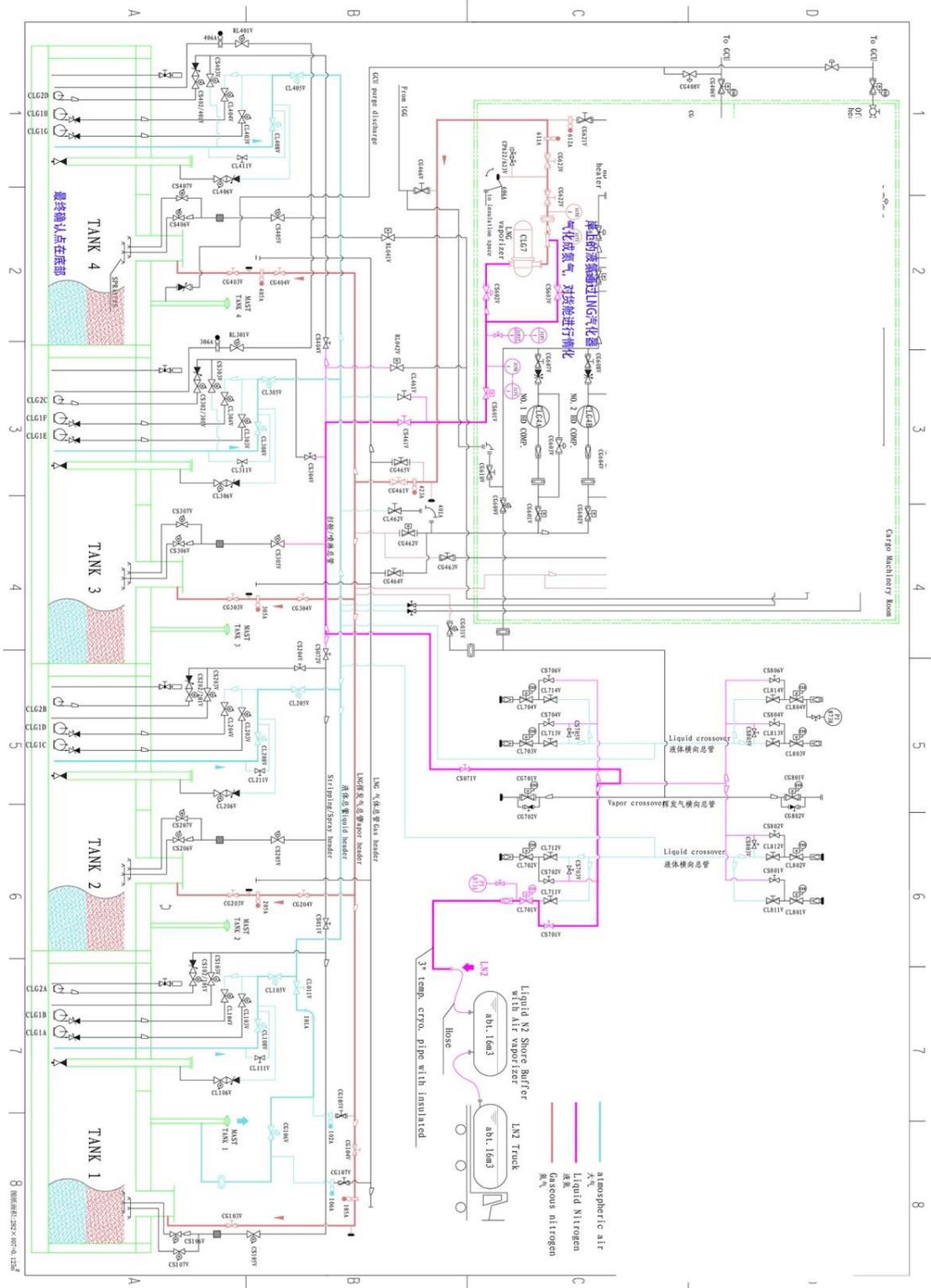


图 5.1.18 货舱惰化

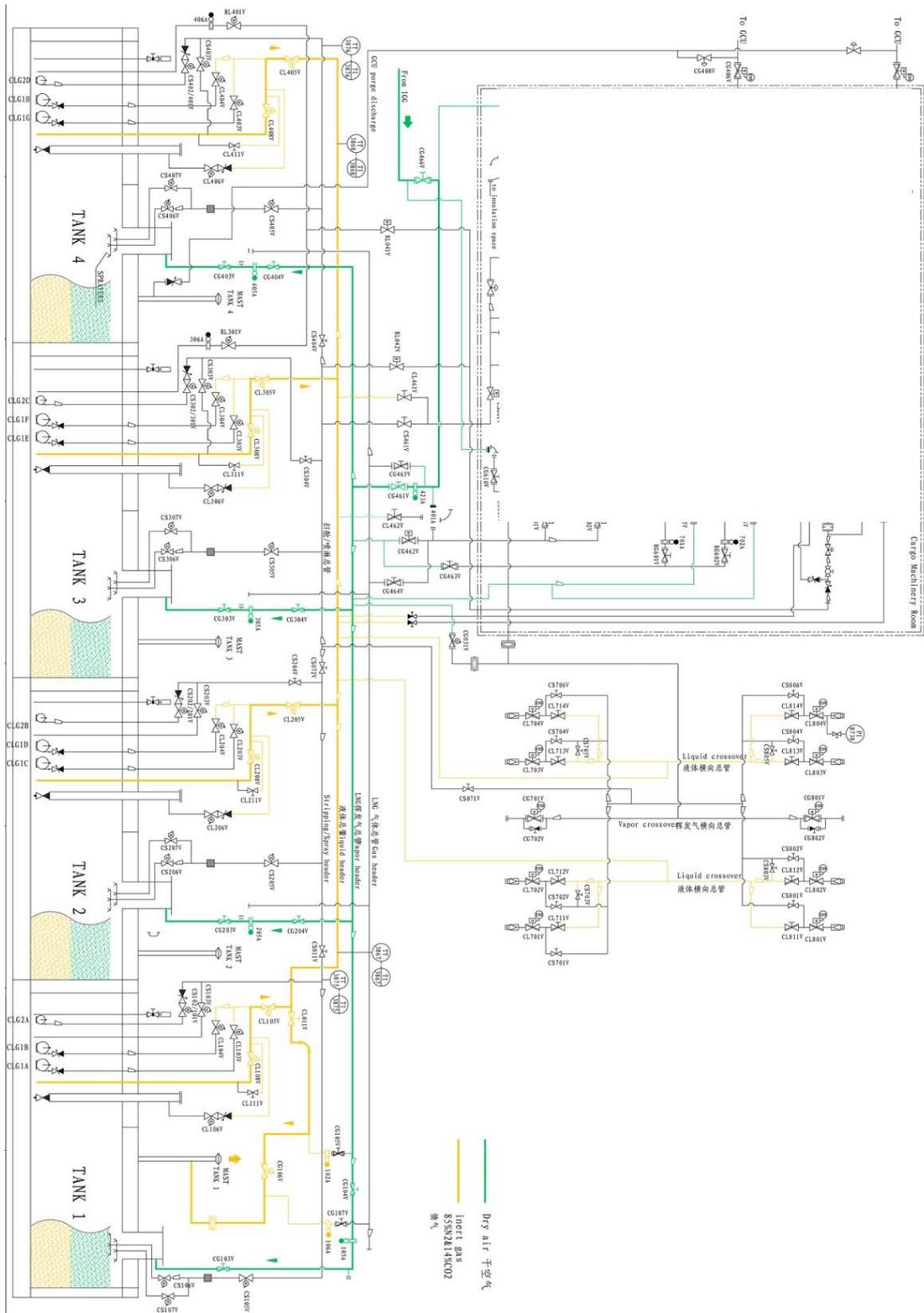


图 5.1.19 货舱通风

## 5.1.4 气体试航期间的气体管理系统试验

5.1.4.1 气体管理系统是针对 LNG 蒸发气 (Boil Off Gas, 简称 BOG) 进行处理利用的系统, 目前 LNG 船舶主要采用二类方式对 BOG 进行处理利用, 第一类是用 BOG 做燃料, 如主锅炉 (蒸汽透平涡轮增压发动机)、双燃料发电机 (电力推进)、以及即将应用的双燃料低速发动机等; 第二类是将 BOG 进行再液化后注入货舱的再液化系统。另外, 如果 BOG 蒸发量比较大的情况下, 由直接燃烧的系统 (Gas Combustion Unit, 简称 GCU) 或者通过透气桅排入大气。本节重点介绍再液化系统和 GCU。

### 5.1.4.2 再液化系统运行试验

5.1.4.2.1 再液化属于低温过程, 在理论上是利用等熵膨胀制冷的循环, 一般采用逆布雷顿循环制冷机原理, 布雷顿循环是由等熵压缩、等压冷却、等熵膨胀和等压吸热四个过程组成, 如图 5.1.23 所示, 是其单级循环的系统图和 T-S 图: 在室温下工质被压缩, 并经冷却达到 3 点, 然后高压气体在逆流换热器中被返流的冷气体冷却到 4 点, 再流入膨胀机, 绝热膨胀并输出外功, 工质温度降低, 制得冷量, 该过程理论上为等熵膨胀(4-5'), 实际上为 4-5 过程, 在 5-6 过程中向外界输出冷量。随后进入逆流换热器用来冷却正流高压热气体(6-1)回收冷量, 最后在接近室温下进入压缩机, 至此完成一个冷却介质的封闭循环。

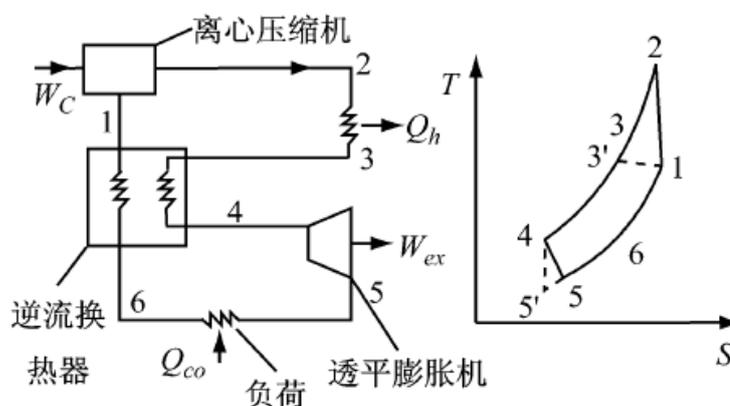


图 5.1.23 单级逆布雷顿循环系统图和 T-S 图

5.1.4.2.2 由于天然气的露点为 $-163^{\circ}\text{C}$ , 所以一般采用氮气作为冷却介质, LNG 船再液化装置的原理可简单归结为: 氮气在压缩机中被压缩, 然后在膨胀过程得到低温, 通过热交换器来液化 BOG, 氮气的循环量的变化与再液化装置的热负荷相对应。再液化系统的安装和试验根据批准的工艺文件进行检验。

### 5.1.4.3 GCU 运行试验

5.1.4.3.1 GCU 系统主要用在 BOG 挥发量较大无法被利用的情况, 其工作原理类似于厨房

的天然气灶，主要是将天然气点火燃烧，与之不同的是，GCU 中天然气的压力及含量并不均匀，所以设置有专门的点火油泵及油柜针对不同压力及含量的 BOG 气体进行燃烧，保证燃烧连续。

5.1.4.3.2 检验时，应注意对 GCU 的安保系统进行检验，各阀件及设备功能运行正常，在各个负荷下进行 GCU 的负荷试验，100%负荷应根据实际情况进行耐久试验。由于 GCU 房间存在天然气泄露的潜在隐患，属于危险区域，房间内各电气设备均为防爆型，并应设置可燃气体探测探头，房间内应有抽风使之形成负压，避免可燃气体向机舱扩散，所以要注意抽风机的出口附近电气设备（如有时）的防爆类型。

## 第 2 节 第一次装货和卸货操作

### 5.2.1 第一次装货和卸货操作

5.2.1.1 LNG 运输船在首次运营中，应对装货和卸货的操作进行验证，以确保船舶能正常运营，当船舶达到装货港口后，应对下列设备系统进行确认：

- (1) 甲板部分的货物管系，确认在途中没有因为天气原因损坏；
- (2) 货控系统正常运行，测试遥控阀应急关闭系统的功能；
- (3) 气体探测系统，记录货舱屏蔽层空间的读数；
- (4) 甲板干粉灭火器处于待用状态；
- (5) 绝缘层压力确认；
- (6) 涉及货物操作的各系统运行正常；
- (7) 船岸连接和通讯。

### 5.2.2 装载限制验证

5.2.2.1 根据 IGC 规则第 15 章要求，应对液货舱的充装极限进行验证；所以在首次运营的过程中，对一个货舱装货完成时，需要从一个货舱连续驳运液货到另一个货舱，测试高液位报警和装载阀关闭功能。通过比对不同液位计来检测液位计的精度（如果每个货舱装有多种类型的液位计），比较高液位报警的设计触发点和实际触发点，测试时应该将液位计的相对位置、船舶吃水差或倾斜因素考虑在内，测试的结果与审批图纸核对，确认其满足规则要求。

### 5.2.3 冷点验证

5.2.3.1 LNG 运输船在首次载货航行时，应对船体冷点进行检查，验证船体表面结构的温

度状况，找到船体平均温度的最低点。使用相关的仪器仪表对绝缘层和内部船体的温度进行监控；主要对边舱、双层底舱和隔离舱的周围结构进行检查确认在液货舱冷态情况是否有冷点；如有必要，可以对货舱绝缘层常温面或者顶边舱和隔舱隔热区域进行实地检查，确认是否存在低温点。

5.2.3.2 在船舶装卸货过程中也应持续密切的监测船体表面温度，如果可行，在装货完成72小时后对内壳和隔舱的温度进行定期检查。

附录 1 某 LNG 运输船的船体关键节点图表

|  |   |
|--|---|
|  | <p>Detail 1:内底板、货舱下斜板和内底边纵桁交点。</p> <p>Detail 2: 下斜板、货舱内纵壁和平台板交点。</p> <p>Detail 3: 内纵壁、货舱上斜板和平台板交点。</p> <p>Detail 4: 舱顶板、货舱上斜板和纵桁交点</p> <p>Detail 5: 穹顶外斜板、主甲板和下方支撑纵骨点。</p> <p>A1: 各个横隔舱与双层底肋板对中节点</p> |
|  | <p>A2: 货舱隔离空舱内各个纵桁构架与双层底纵桁, 以及纵桁构架与穹顶空舱内纵桁对中节点</p>  |
|  | <p>A3: 底边舱各个框架, 水密舱壁和实肋板与下部双层底肋板的对中节点</p>   |
|  | <p>A4: 底边舱各个框架, 水密舱壁和实肋板与双舷侧区域内各相应肋板的对中节点</p>   |
|  | <p>A5: 货舱隔离空舱内各个平台板和双舷侧区域内相应平台的对中节点</p>   |