

大型独立 Type-C LNG 液罐

制造与安装检验要点

大连分社建造处 王旭



2021 年 07 月

目录

一、C 型独立液罐及船型概述

二、液罐设计检验依据

三、液罐制作工艺简介

四、液罐制造检验试验要求

五、液罐船上安装检验要求

前言

随着世界能源结构的调整及环保法令的不断收紧，LNG 作为货物运输和船用燃料逐渐增多。中国作为造船大国向造船强国迈进过程中逐渐涉猎 LNG 运输船和 LNG 燃料动力船的建造项目，在此过程中，C 型独立罐式船型存在自身优势，订单最多应用最广泛，首当其冲成为国内船企争相建造的船型，然由于缺乏实际建造经验，往往会遇到诸多实际生产施工问题，蒙受巨大损失。本文结合作者实际经历的几个 LNG 船建造检验项目积累经验，梳理了 C 罐船型建造过程中难度最大的罐体制造和船上安装重点和注意事项，为国内有意向进军 LNG 运输船和 LNG 燃料动力船的造船企业提供了参考，为保证 LNG 运输船和 LNG 燃料动力船建造质量提供了重要指导。

一、C 型独立液罐及船型概述

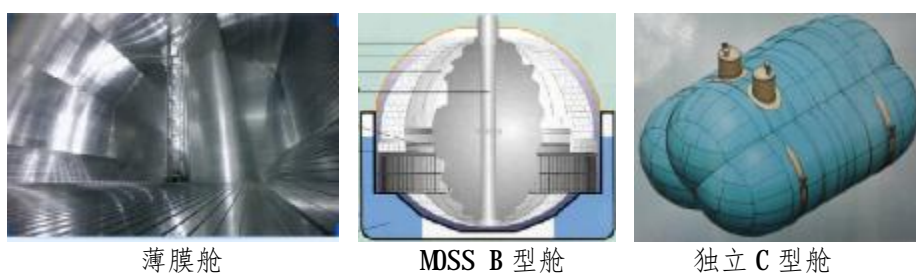


图 1- 三大主流舱型

在目前薄膜型、MSS 型和 C 型三大主流围护系统中，C 型舱具有如下优势而备受青睐：

- 罐体按照压力容器标准设计，安全可靠，无需次屏蔽；C 罐不构成货舱部分，由专业厂家制作，吊装入舱，施工简易；评估后可重复使用，不等同船舶寿命
- 罐体可承受一定高压，可采用自蓄压 15 天（燃料舱）或 21 天（货舱）、气体加压进行应急驳运，无需配备双泵或应急驳运泵，而薄膜型则不可；
- 罐体可承受一定真空负压，而薄膜型必须保证主次屏壁与舱壁之间的贴合，操作不当会导致屏壁坍塌，维修成本大；
- 罐体强度高，抗晃荡载荷性能好，可任意高度装载，基本不受薄膜型液位高度限制；可用于装载量经常变动的情况，如 LNG 动力船/加注船；
- 液罐保护距离不计绝缘厚度，绝缘厚度变化不影响船体主尺度（在保证检查通道宽度前提下），而薄膜式如绝缘层增厚，需增大船体主尺度或缩小货舱主尺度
- 液罐与货舱形状匹配低，舱容利用率低，干舷高，侧向受风面积大，摇晃加剧；单罐容积受限，总装货量小，多用于短程二次转运。为弥补舱容利用率，目前出现了很多变种设计。

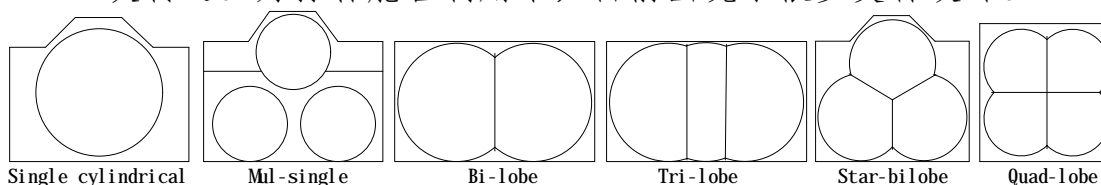


图 2- C 舱变种设计

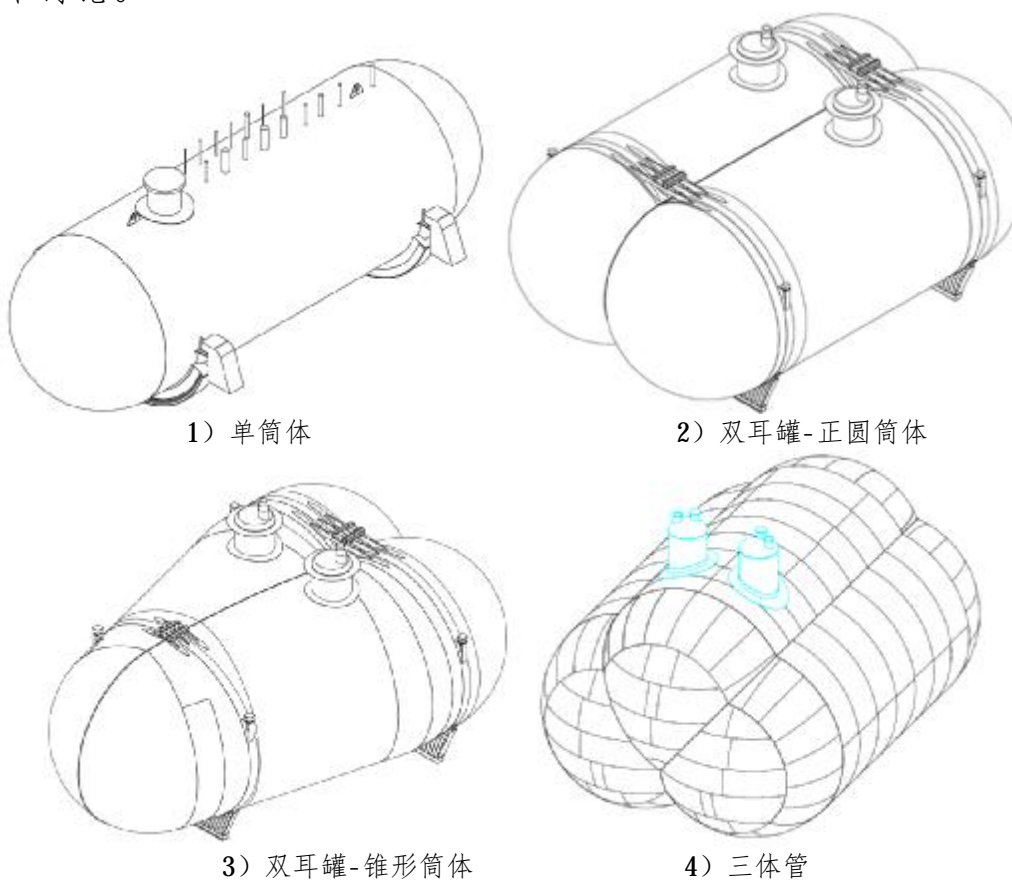


(1) 散货船

(2) VLCC

图 3- C 型燃料舱应用于各种船型

根据舱容，C 舱分为小型、中型和大型；根据形状分为单体罐、双耳罐、三体罐；根据绝缘型式分为双层真空绝缘罐、单壳体外敷绝缘罐。根据安装方式，有卧式和立式。为配合船体型线，筒体一端会出现收缩，形成锥形。由于结构限制，双层真空绝热型无法做到较大容积，一般在 1000 立方以下，多用于小型船舶 LNG 燃料舱或 LNG 罐式集装箱，之前北方冬季“气荒”催生了整船运输 LNG 罐箱的应用尝试，本文不讨论。

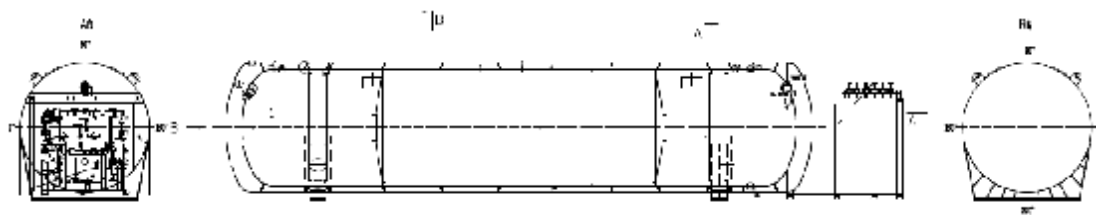


1) 单筒体

2) 双耳罐-正圆筒体

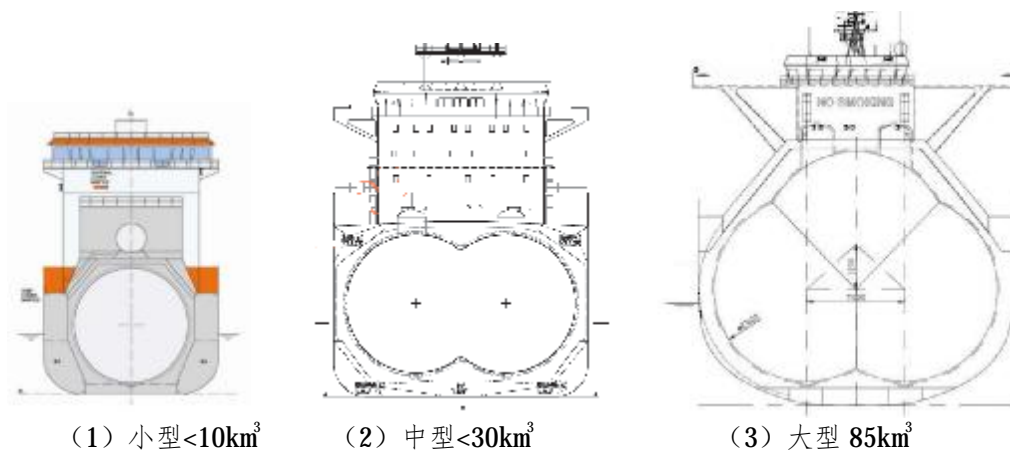
3) 双耳罐-锥形筒体

4) 三体管



5) 双层真空绝缘罐

图 4- C 舱分类



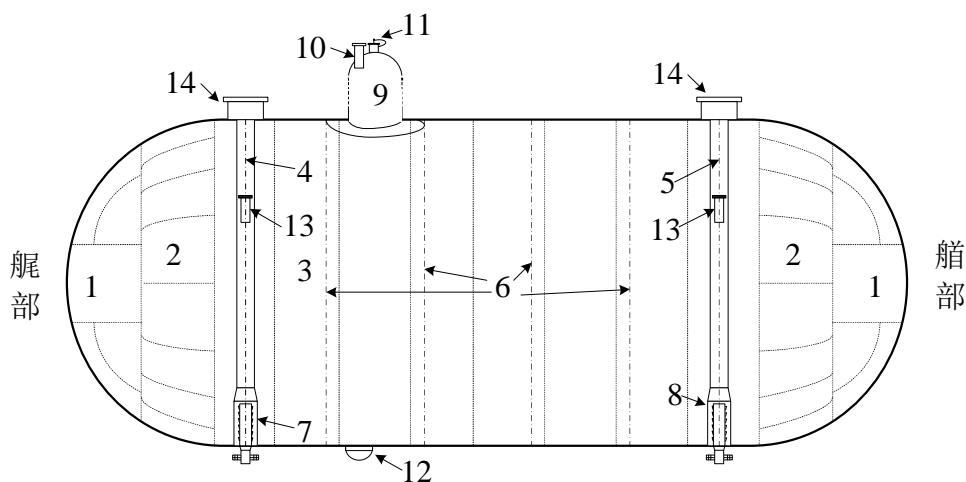
(1) 小型<math>< 10\text{km}^3</math>

(2) 中型<math>< 30\text{km}^3</math>

(3) 大型 85km^3

图 5- C 罐液化气体船型发展

C 罐的典型构造如下:



1-顶圆; 2-瓣片; 3-筒体; 4-固定加强环; 5-滑动加强环; 6-真空环; 7-固定鞍座; 8-滑动鞍座; 9-气室; 10-泵管; 11-人孔; 12-集液阱; 13-止浮装置; 14-顶部横向止摇装置

图 6- 典型 C 罐构造图

双体罐中间设有水密纵隔舱壁, 将左右舷液相货物隔开, 而气相通过管系连通, 纵隔舱上加有垂向 T 型排加强, 承受横向晃荡载荷; 罐体顶部中后处左右舷各设 1 个气室, 气室上设有人孔、泵管, 罐体底部正对泵管下方对应各设有 1 个集液井和导向泵座, 因罐体两侧气相已连通, 在气相上属于一个容器, 故每个气室只设一个安全阀, 满足 IGC 至少两只安全阀的要求; 三体罐由于结构上的限制, 纵隔舱壁则无法

做到水密。罐体内部艏艉与封头相邻的筒节上各设一个加强环，中间段的筒节均匀分布 4 个真空环，真空环防止壳体发生屈曲，加强环也起到此作用，加强环和真空环还起到阻止纵向晃荡载荷的作用；罐内还设有各种管系、扶梯及平台。

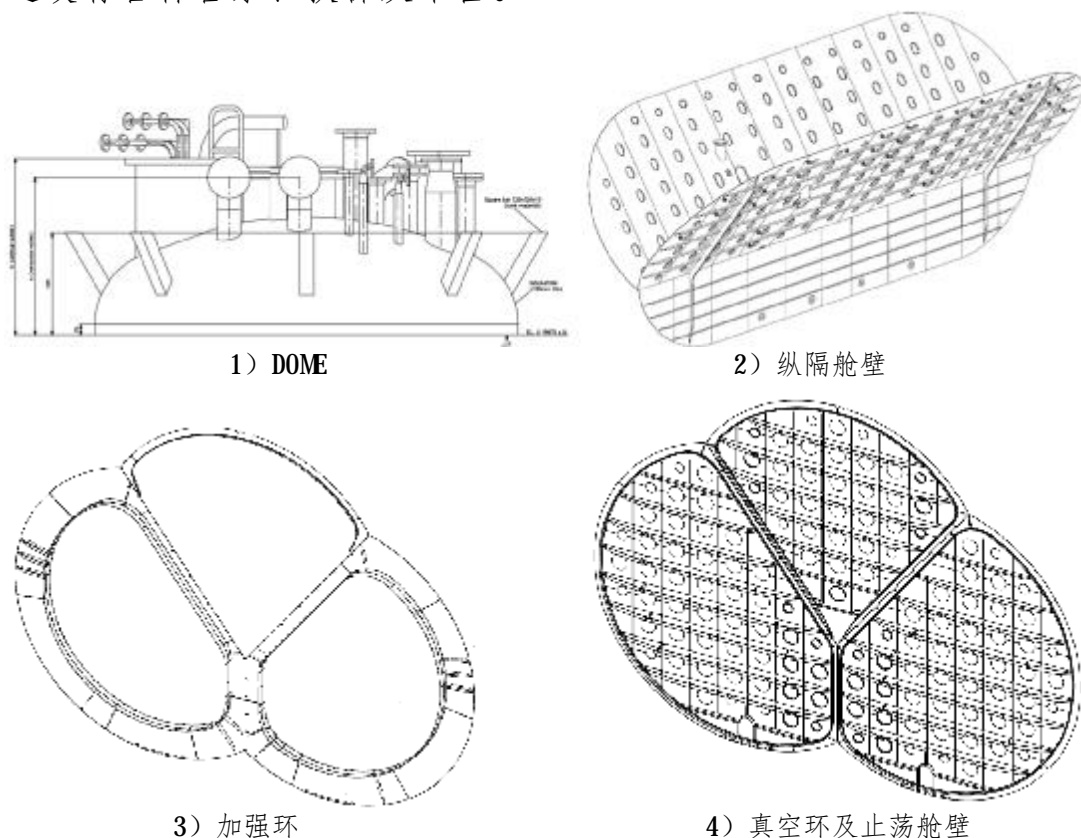


图 7- 主要罐体部件

LNG 管壳体材料一般选用 9Ni (X8Ni9, EN10028-4), 焊条 TNM-9 (ENiCrMo-6, AWS A5. 11/A5. 11M; 管材 316L 不锈钢, 焊丝 TGA-316L。

表 1-28K LNG 运输船罐体主要参数:

| | 1#主罐(双体锥形) | 2#、3#主罐(双体直筒) | 甲板罐(单体直筒) |
|---------------------------|------------|---------------|------------|
| 罐体材料 | 9Ni | 9Ni | 9Ni |
| MARVS (bar) | 3.65 | 3.65 | 10.0 |
| 类型 | IMD C 型独立舱 | IMD C 型独立舱 | IMD C 型独立舱 |
| 内径 (mm) | 15000 | 15000 | 3800 |
| 内壁总长 (mm) | 37000 | 37000 | 12000 |
| 容积 (m ³ , 含气室) | 8353 | 10166 | 121.7 |
| 重量 (吨) | 约 740 | 约 760 | 约 14 |
| 外表面积 (m ²) | 2320 | 2725 | 143 |

根据形状，鞍座分为环形和平底两种型式：

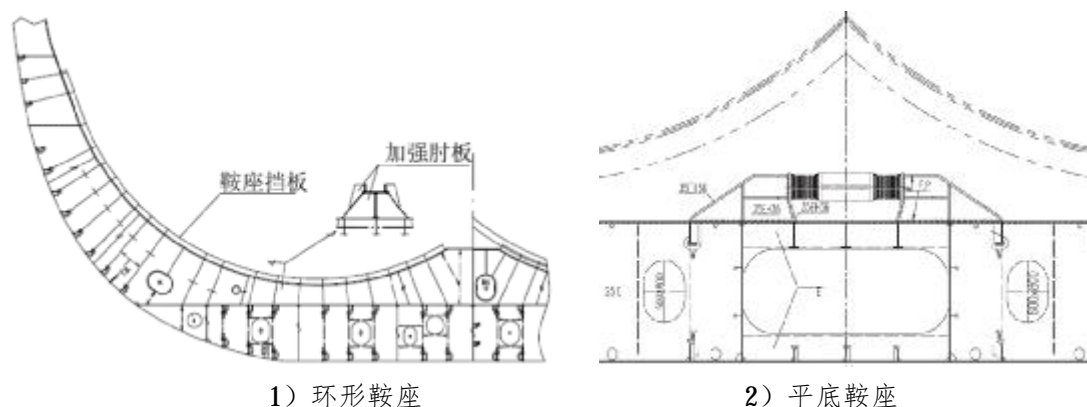
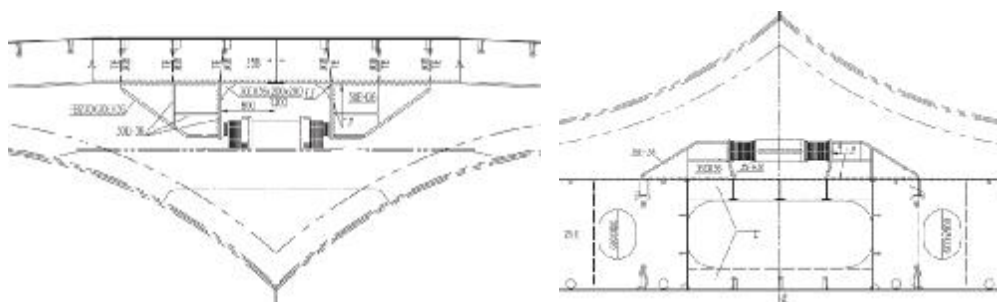


图 8- 两种鞍座型式

两种鞍座各自优缺点如下：

- 环形鞍座无需设横向止摇装置
- 环形鞍座更节省低温钢材
- 平底鞍座加大了罐体制作难度
- 平底鞍座保护罐体不受磨损
- 环形鞍座如具有足够大包角，可不设横向止摇装置；而平底形鞍座需单设止横摇装置（底部和顶部），顶部止摇还将双耳向中间拉紧，需用纵向肋板来增加罐体侧鞍座强度，来传递船舶推力；纵倾艏摇，滑动鞍座处的止摇装置结构强度应大一些；环形鞍座，罐体制作简单，船体制作难度加大，而平底式则相反。

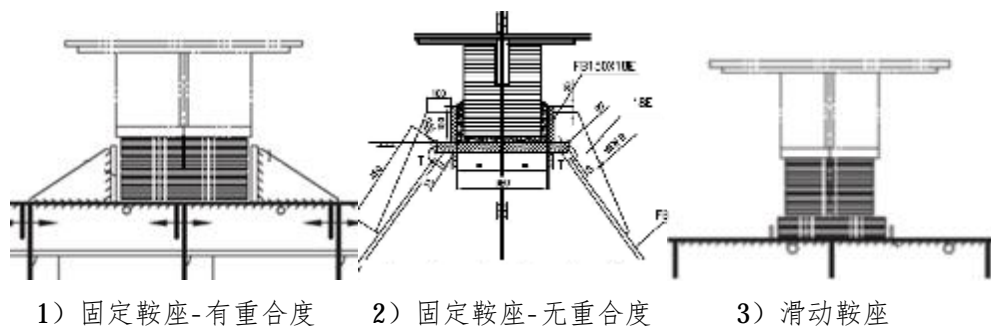




1) 顶部止摇

2) 底部止摇

充装 LNG 前后，温度变化罐体会出现伸缩，为避免形成应力集中，允许罐体伸缩，设置滑动鞍座，而固定鞍座用于传递推力。一般在罐体外侧底部对应加强环处分别设有固定支撑鞍座（艏部）和滑动支撑鞍座（艉部）各 1 个，船舶推力通过固定鞍座传递到罐体，带动液罐运动；滑动鞍座是为罐体因热伸缩及船体变形而提供移动空间，鞍座中间位置设有底部横向止摇装置。根据强度需要，固定鞍座止移扁钢可插入船体鞍座槽边存在重合度，而推力较小时也可无重合度，此时推力由层压木承受剪切应力来传递，需关注层压木强度及木块方向。



1) 固定鞍座-有重合度

2) 固定鞍座-无重合度

3) 滑动鞍座

图 9- 固定、滑动鞍座

罐体外侧中上部两舷对应加强环处各设 1 个止浮装置（共 4 个），防止空载时货舱进水罐体漂浮与船体结构碰撞而破损；甲板罐为防止船舶传浪较大纵摇时罐体脱离颠簸，也会设置止浮装置。

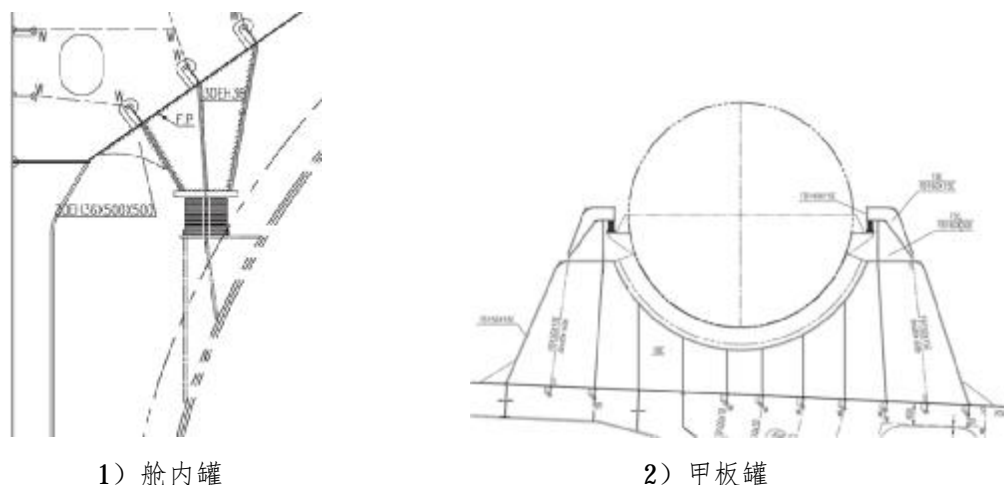


图 10- 止浮装置

气室区域：

DOME 上集成了罐体与外界连接所有接口,是唯一通路,对于舱内安装的 C 罐, LNG 充装前后, 罐体伸缩带动 **DOME** 移位,需在罐体与货舱结构之间设置运行位移的弹性装置。

- 气室是液罐在主甲板之上唯一凸露部分,其开口尺寸应确保考虑到

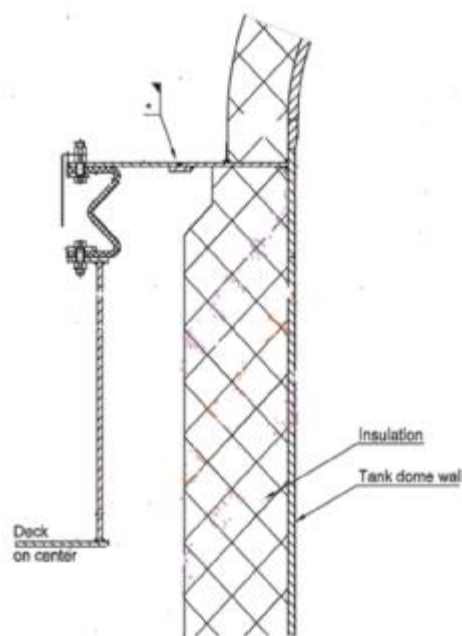


图 11- 气室膜圈

气室绝缘层后剩余足够的检查空隙；为保证货舱留空处所内的气密,并允许装货前后气室在垂直方向上的热伸缩,甲板围板与气室环板通过橡胶膜围圈进行封闭。

- 横梁、纵桁的端部与气室下的圆形加强结构间一般采用深熔焊或全焊透焊接；甲板围板与上甲板焊接,并与甲板下的加强结构对齐。围板上面板按照角度开螺栓孔,与液罐气室环形面板对应,两面板间为竖 **M** 型密封圈,螺栓固定,保证液货舱密封；液罐吊装

到位后，甲板围板先套入液罐，焊接到位后再套入橡胶密封圈，之后安装液罐气室环板的环形面板。为确保密性，应保证甲板围板上面板和气试环板的平整度。

- 气室环板直接与罐体连接，温度较低，因此要求橡胶膜圈应能够耐低温，并具有适当耐火等级；另外其强度应能承受货舱留空处所的正气压（PV 阀起跳压力+0.15bar），并可承受拍浪载荷；为防止在露天甲板风吹日晒，延缓橡胶老化，为其设有防护挡板。营运中应定期检查老化程度，注意是否存在漏气，必要时换新。

罐体绝缘层：

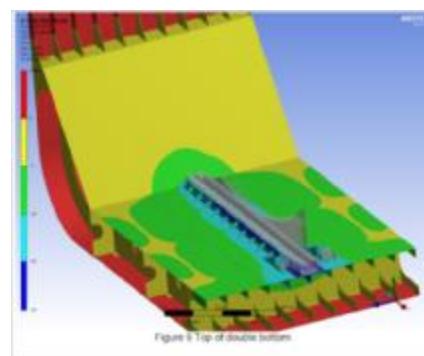
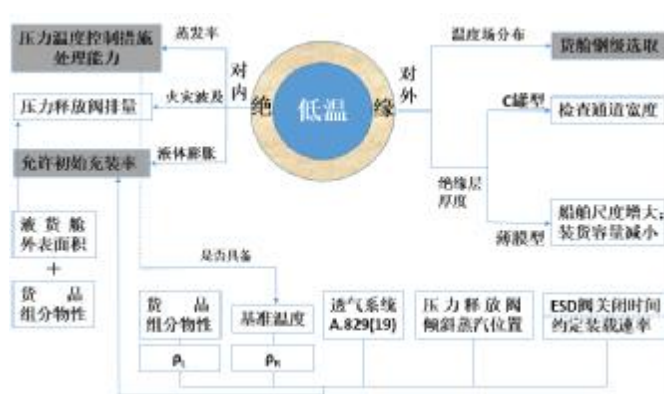


图 12- 绝缘相关各因素相互影响关系图

图 13- 温度场计算

保温是 LNG 罐的核心之一，绝缘性能好坏，对内对外均产生很多影响。

- 对内：决定了热侵入量的多少，决定了蒸发率的大小，进而决定了压力/温度控制措施的处理能力（包括管径大小、BOG 压缩机排量、用气设备的处理能力），还决定了装载率，绝缘越好，航行过程液体膨胀越小，初始装载越多。

- 对外：绝缘性能好坏影响温度场分布，从而决定了所货舱结构钢板所采用的钢级，进而决定了货舱周围舱室和管路是否需要采取附加隔热或加热措施。

二、液罐设计检验依据

1、依据及检验模式

按照 IGC 规则定义，C 型独立液货舱是符合压力容器标准的液货舱，即一种压力容器。

按照我社《钢质海船入级规范》第 1 篇第 3 章 产品检验附录 1 船舶入级产品持证要求一览表 6.11 压力容器(0.7MPa 或 0.25m³ 及以上)的要求，该 C 型独立液货舱的制造厂需获得我社工厂认可，该 C 型独立液货舱需持我社产品证书。

按照我社《钢质海船入级规范》第 3 篇第 6 章 锅炉与压力容器表 6.1.2.1 的定义，该 C 型独立舱属于 CCS I 级压力容器。

由此可见，该压力容器既属于法定产品，又属于入级产品，故其应同时满足相关国际公约、规则、船旗国政府法规、我社规范、相关设计压力容器标准(如德国压力容器规范 AD2000、欧盟压容标准 PD5500)和 TGE 等专利方的技术要求。

表 2- 液罐设计检验依据

| 序号 | 依据 |
|----|--|
| 1 | IGC/IGF 规范规则 |
| 2 | 钢规第三篇第六章、材规第三篇第 7 章 |
| 3 | 《液化气体运输船检验指南》2018 第四章第 2 节 |
| 4 | 压力容器标准： |
| 5 | GB 150：压力容器 |
| 6 | AD2000: Technical Rules for Pressure Vessels |

| | |
|----|--|
| 7 | PD5500: Specification for unfired fusion welded pressure vessels |
| 8 | EN13345: Unfired Pressure Vessels |
| 9 | ISO 16528: Boilers and Pressure Vessels |
| 10 | ASME VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels |
| 11 | CB/T 4241-2013: 船用半冷半压式液化气体储罐 |

2、检验模式

为满足规范对压力容器产品持证的要求，目前多数按照 CCS I 级压力容器进行工厂认可和产品检验。然而液罐既属于压力容器，又属于液货舱，与船体存在很多接口（结构支撑、温度场分布-绝缘、管系连接、液货泵及监测仪器的安装），其与单单一个空气瓶检验的关注点存在很大差异，其已不仅仅是一个受压壳体，从这方面讲，本项目担当建造验船师对由实船接口信息反推到对液罐的技术要求了解更多；如何满足产品持证要求，又能在液罐建造过程中对实船要求进行更好的关注，是对液罐检验模式今后我们需要探讨的问题：

- ① 产品和建造同时派人：既能关注实船要求，又能满足产品发证要求，但人力配备过多；
- ② 仅产品派人：可满足产品持证要求，但对实船要求可能会由于信息获取不足而关注不够；
- ③ 仅建造派人：既能关注壳体焊接，又能兼顾实船要求，但此担当人员的产品检验资质及发证是个问题，除非此人具有产品和建造双资质，一举两得；或认为产品持证仅是入级要求，非法定要求，由本项目建

造验船师负责的检验可直接接受，而不需产品证书，这种操作对于液罐和船舶由同一船厂制作时可行的，但对于液罐和船舶不在同一船厂建造时，可能会涉及到跨地区检验，这需要各分社之间或总部的协调；还存在另外一种情况：即使 CCS 内部协调好了，但若订货方（船东或船厂）要求产品证书，则需指派产品和建造双资质人员，完成产品检验发证流程。

比较理想的解决方式是，若由建造派人，则指派本项目组成员担当液罐检验工作，若其无产品资质，仅补充压力容器产品检验资质即可；若由产品派人，则对其进行液化气船建造检验的相关培训。

3、需要审批的主要图纸和技术文件：

(1) 计及运动加速度、晃荡载荷、 $0-30^\circ$ 最不利横倾角和 5° 纵倾角等工况的罐体结构强度计算书，壳体板厚计算，工况主要包括：

①LC 1-4：分别在 0° 、 10° 、 20° 、 40° 静横倾角下，船舶运动引起的动态加速度与重力相结合工况；

②LC 5：碰撞工况：纵向 $0.5g$ 向前，纵向 $0.25g$ 向后；

③LC 6：晃荡载荷，包括纵向和横向；晃荡载荷与加速度的叠加，最不利情况；

④LC 7：水压试验工况： 0° 横倾角， $0g$ ，水的密度，试验压力；

许用应力应满足 IGC 4.5.1.4 和 4.5.1.6 的衡准。

(2) 主要附件的强度计算书：

①鞍座，包括止移扁钢/承压木的强度，加强环和鞍座的应力，应满足 IACS UI GC8 的要求；②止浮装置，浮力为空舱时浸水至载重线；

③ 横向止摇装置；

④ 纵隔舱壁强度计算；

⑤ 吊耳强度

(3) 结构图 (节点图), 包括壳体、纵隔舱壁、Y 型接头、鞍座、加强环、真空环、气室、集液井、横向止摇装置、止浮装置、内部管系及扶梯、吊耳及内部加强结构；

(4) 开孔加强计算, 包括气室及其上的接管、集液井, 对于气室还需考虑安装其上深井泵电机重量带来的影响; 对于甲板罐, 是壳体上接管的加强;

(5) 加强环处 (固定鞍座与滑动鞍座) 角焊缝强度应力分析, 包括外部复板与壳体 (上部和下部)、鞍座立板与壳体、鞍座加强板与立板、加强环的腹板与壳体、加强环的腹板与面板、纵隔舱壁 T 排的腹板与纵隔舱壁、T 排腹板与面板、顶部横向止摇装置处的角焊缝;

(6) 屈曲强度校核, 外部压力

(7) 计及温度场的绝缘层布置图, 包括绝缘材料及性能、绝缘厚度和层数、补偿温度变化而设的弹性绝缘等。

三、液罐制作工艺简介

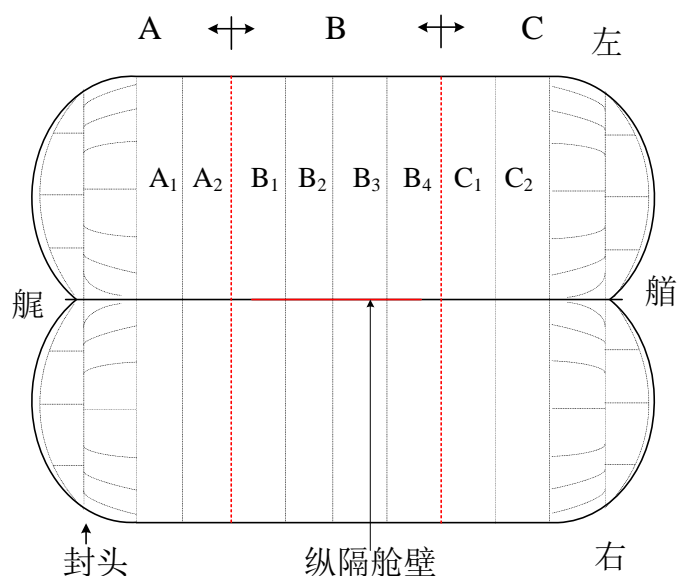
(一) 建造流程

1、分段

罐体整体上按照分段法进行建造，在纵向上从艏部至艉部分为 A、B、C 三个大分段，生产顺序上按照单片、单体、小合拢、中合拢、大合拢，顶圆和瓣片组成封头，两个封头与纵隔舱壁及两节筒节组成整个封头段，B 分段由单筒节及纵隔舱壁组成，最后进行大合拢；焊接工作完毕后进行焊后整体外观检查、承压木安装、水压试验、内部清洁、外部涂装、保温绝缘敷设，至此罐体制作完毕；之后运至船厂吊装至货舱内，浇注树脂，进行船上安装。

在确定焊缝位置时，应确保无焊缝重合，并尽量对称设置。

在确定分段长度时应考虑车间的起重能力、厂房高度和空间大小、施工难易程度，一般保证各分段大致均长，本项目分段如下：



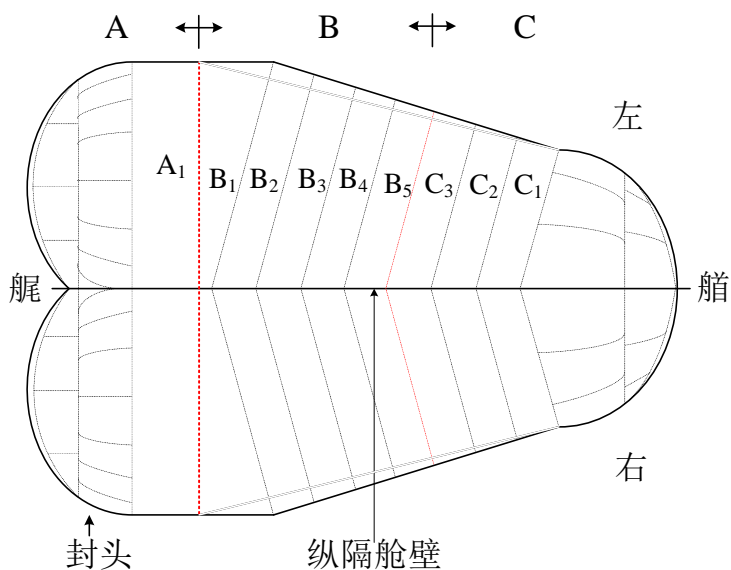
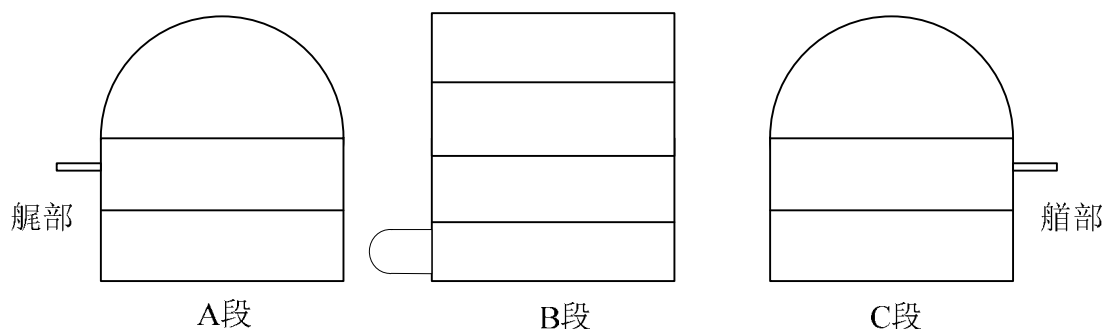


图 14- 罐体分段划分图

对于直筒双体罐，A 和 C 分段封头各带两个筒节，B 分段 4 个筒节，每个分段均包括纵隔舱壁，为避免大合拢时纵隔舱壁对接缝与筒体对接环缝重叠，A、C 分段的纵隔舱壁伸出一段距离以错开，这是对接的一个基本原则。

对于锥形双体罐，A 分段封头带一个直筒节，C 分段带 2 个斜筒节，B 分段包括 1 个直筒节、5 个斜筒节，这样划分分段，尽量保证了 A、B 分段在中合拢时的胎架是水平的，仅 C 分段的中合拢胎架为倾斜型，这样减轻了施工难度，易于保证建造精度。

为便于分段的吊放进行大合拢，各分段在车间场地上按如下顺序对称布置：



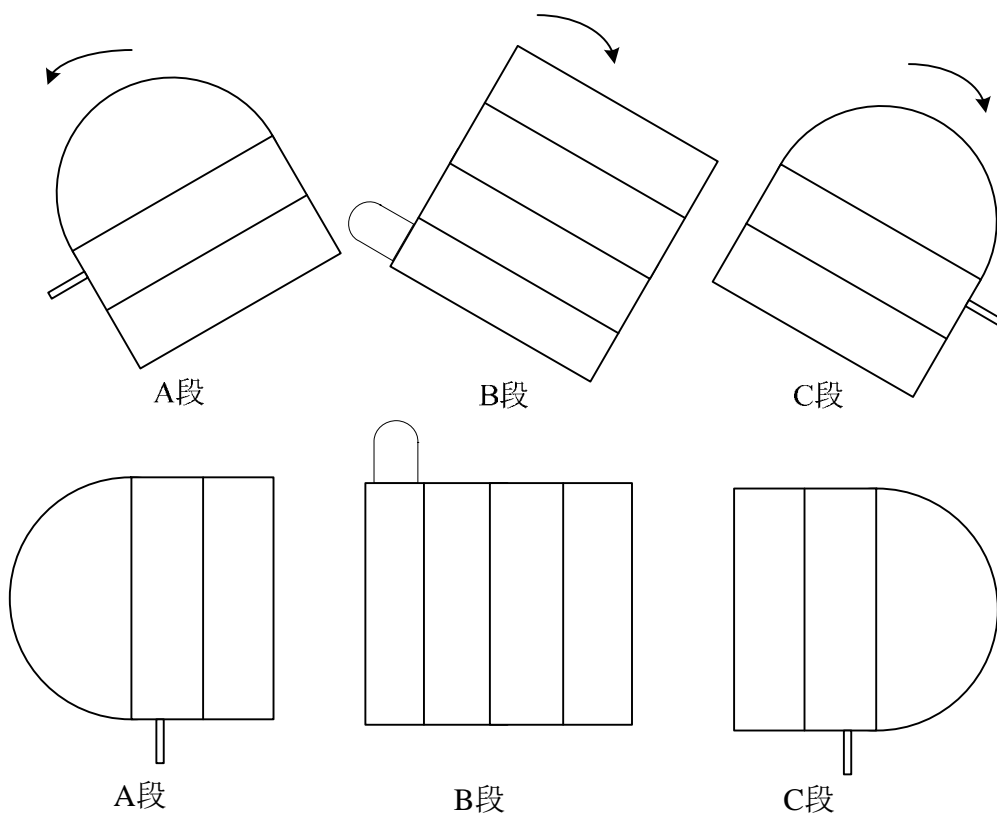
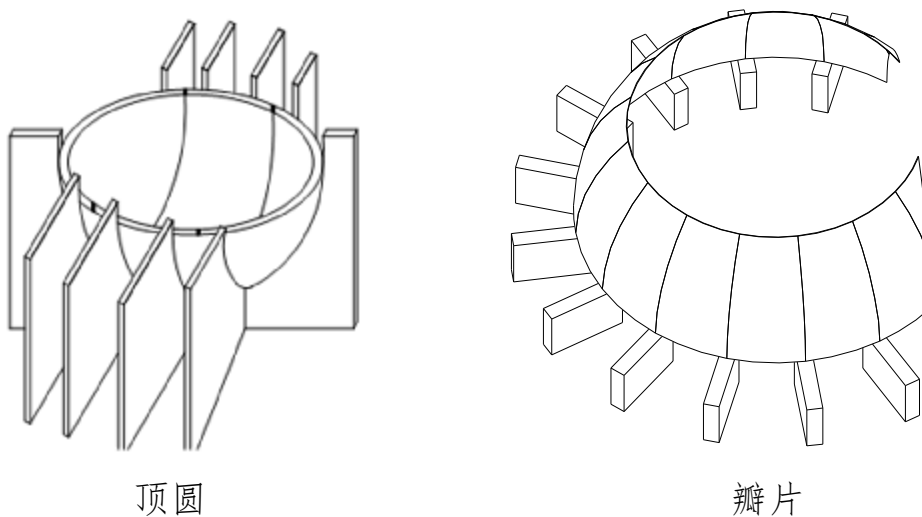
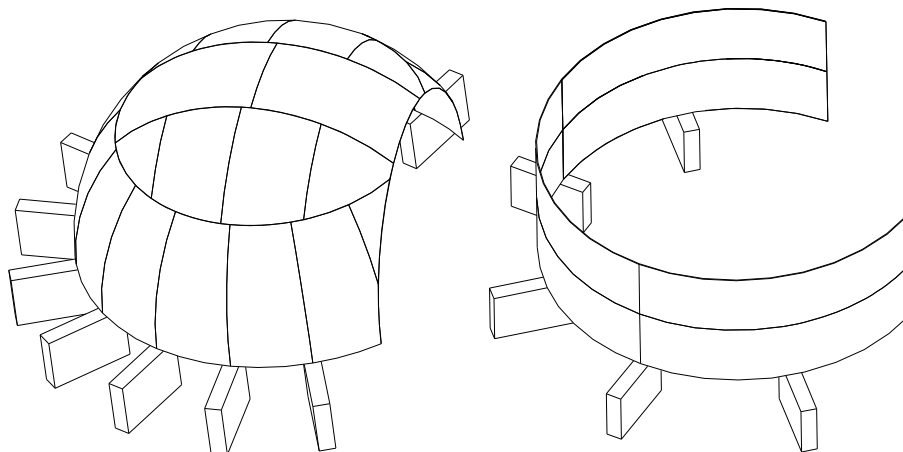


图 15 罐体分段顺序

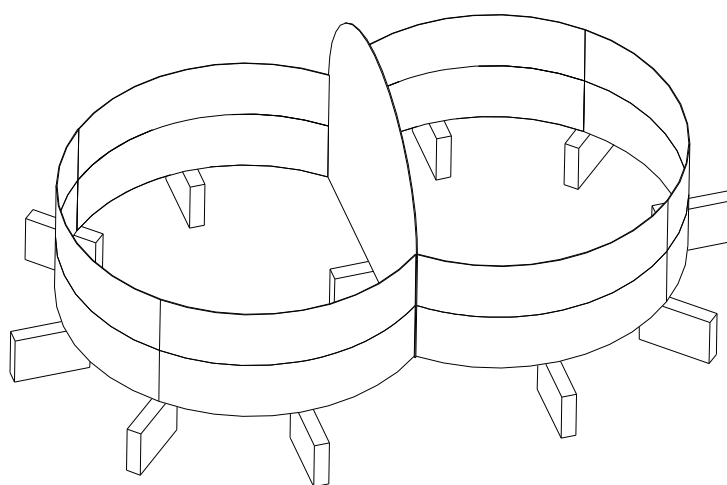
2、封头分段的





封头小合拢

单筒节



筒节小合拢

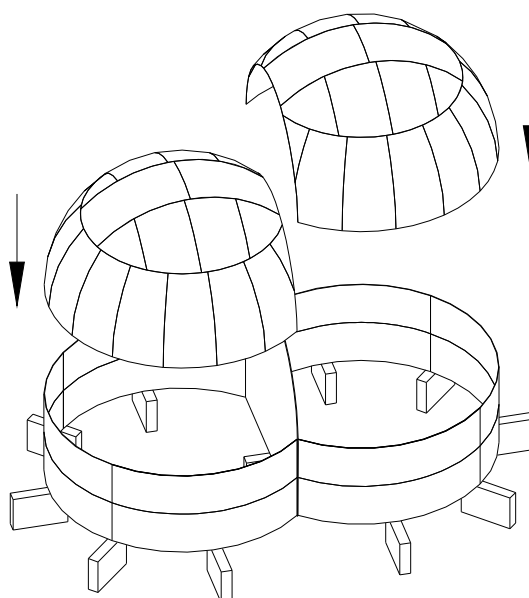


图 16- 封头段中合拢

3、整体建造顺序：

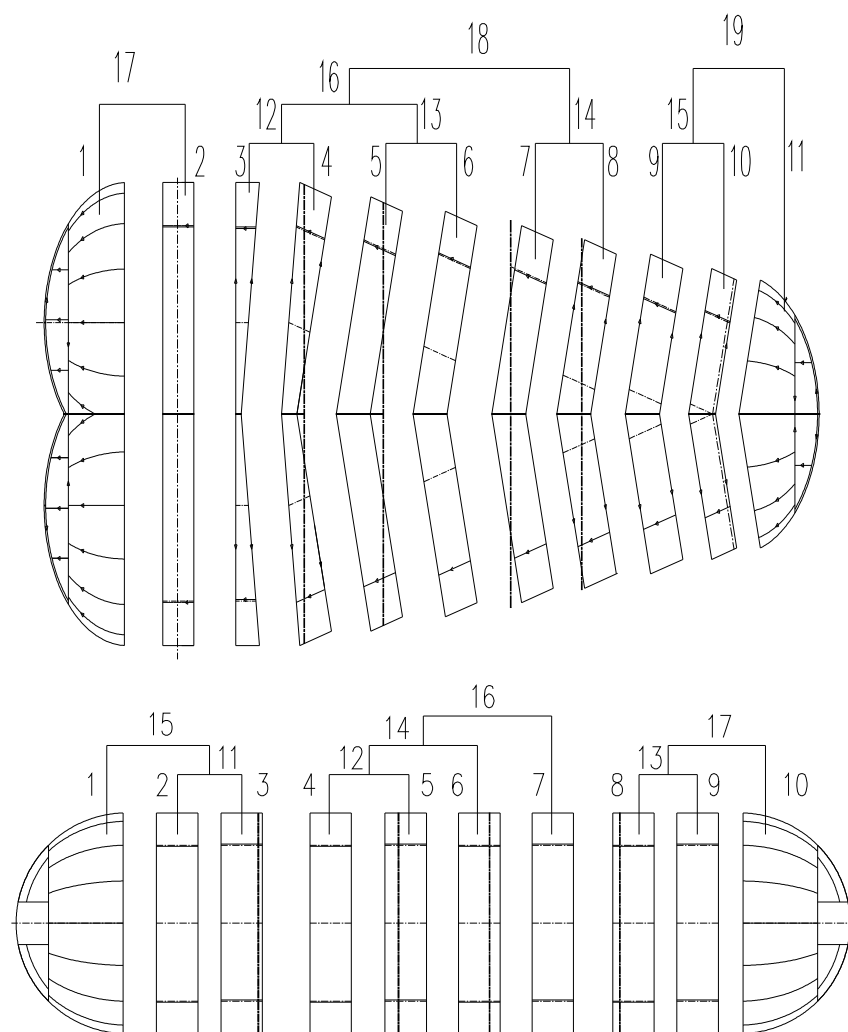


图 17- 罐体建造顺序

(二) 下料和加工成型

罐体结构及管系部分均应经过放样，根据图纸尺寸和工艺要求进行展开，并根据加工制造需要，制作各类样板、样棒或样箱；

钢板调运时严禁使用电磁铁吸盘，须用卡具之类的用具，避免破坏钢板性能；

罐体结构中为控制焊接变形，壳体展开时加放适当的收缩余量，已保证制作完成后罐体直径满足公差要求；

钢板无需喷砂，但需预处理保证表面精度（IS08501-1 Sa2.5 级）；

封头和瓣片展开时直径需加放适当的焊接收缩余量，并在直边段加放一定的余量，以满足与罐体直径的配合及罐体总长度；一般按照正公差来控制尺寸；

封头瓣片采用压模、冷加工成型，成型后球瓣的径向曲率均用弦长不小于 **2500mm** 的不变形样板或样箱检查，任何部位的接触间隙应不大于 **3mm**；

如封头瓣片需先拼后轧，其连接焊缝应按图开坡口，按相应工艺进行装配、焊接和探伤，为避免焊缝余高对成型造成影响，应在成型前将焊缝余高磨平，轧出曲面合格后再盖面；

压制后需进行外观检查，必要时进行表面裂纹探伤；根据材质特性及变形程度，决定是否需要进行成型后的热处理；**9Ni** 钢材质的封头瓣片、气室封头均无需成型后热处理，仅主罐集液井封头，因压制变形过大，需要热处理；

瓣片加工成型后，在立体胎架上用激光经纬仪划线，切除余量，切割坡口，在运输及吊运过程中应放置曲面变形；

壳体轧圆时，要保持壳体板与轧辊垂直，轧后用样板及对角线测量壳体板，轧后要垂直存放和运输以防变形；

管系部分按放样展开尺寸，在相应部位加放必要的加工余量后号料、切割；

壳体部件均需移植钢板炉批号，辅助材料（如吊码、引弧板）可移植材质标示；实际仍采用打钢字头的方式进行追溯标识，存在隐患（板

厚减薄、引发裂纹)，但据罐体制作厂反应，已使用此种方式多年，从未发生过事故；采用麻点打字机可解决此问题，打入点凹入为圆点，圆滑过渡，无应力，但采用此方式相对钢字头大大增加成本，两方面考虑，很多时候还是采用传统的打钢字头方式。

下料后对部件自由边进行打磨，去除飞溅、毛刺等。

人孔法兰采用二次机加工，泵管法兰采用三次机加工；钢板下料后先加工内外圆及坡口，待与各筒节焊接后，再加工法兰面和外圆至图纸要求尺寸，以保证法兰面精度；

人孔及泵管的法兰与其筒节之间的角焊缝若影响螺栓安装，则应适当机加工去除多余焊缝。

（三）焊接

由于 9Ni 钢的特性，在制造过程中，与 9Ni 钢接触的金属，如胎架板、吊码、角码、引弧板等，只要需要与 9Ni 进行焊接（如点焊）的金属板均应为 9Ni 钢，应对工装和废料区分放置。在建造过程中需要搭建大量脚手架，与罐体接触的脚手架一端应设置塑料套，以与 9Ni 壳体隔绝，防止与壳体接触，有电流流过，从而影响 9Ni 性能。

由于 9Ni 的弱磁性，易导致磁偏吹，故在吊运和焊接过程中，尽量减少磁铁的使用，并使用交流焊机。在进行焊接工艺认可时，应测量并记录剩磁量，在实际焊接过程中，必要时进行剩磁测量，其剩磁水平应不高于焊接工艺认可时的水平。

1、焊接工艺

根据典型件的焊接母材、接头形式、焊接材料、焊接方法、焊接

位置等进行焊接工艺认可试验，制造厂首先制定并提交焊接工艺计划书 **pWPS** 供验船师审核，按照批准的 **pWPS** 进行焊接，记录参数，并进行各项理化试验；合格后提交相关资料颁发 **WPQR**，工厂按照 **WPQR** 制定焊接工艺规程 **WPS**（其中应包括整体的焊接顺序及防止焊接变形的措施），提交验船师审核批准后指定现场焊接。

(1) 试验项目：应包括 IGC 规则 **6.3.3** 和 **6.3.4**、CCS《散装液化气体运输船舶构造与设备规范》(2006) 及其修改通报 **6.3.3** 和 **6.3.4**、CCS《材料与焊接规范》(2012) 第 3 篇第 3 章的相关要求。需注意上述三个依据要求的试验项目有所不同（如冲击试验），此时因取较严格者或同时进行，包括横向拉伸(2)、熔敷金属纵向拉伸(1)、横正反弯曲或侧向弯曲或纵向正反弯曲(4)、冲击试验（位置：焊缝中心、熔合线、**FL+1**、**FL+2**、**FL+3**、**FL+5**、**FL+7~10**、母材；根据双面焊还是单面焊及板厚确定试样是仅焊缝表面还是表面加根部同时进行）、断面宏观和微观（各 1）、硬度检测(1)及其它验船师认为有必要的试验。

(2) 焊接型式：一般要求全焊透；

(3) 焊接方法：目前，**9Ni** 钢的焊接方法主要有焊条电弧焊 (**SMAW**)、钨极氩弧焊 (**GTAW**)、熔化极惰性气体保护电弧焊 (**GMAW**) 和埋弧焊 (**SAW**)。**SMAW** 是 **9Ni** 钢现场焊接所使用的一种适合各种焊接位置，非常灵活且可行的焊接方法。虽然 **GTAW** 的焊接效率太低，在工程中选择此焊接方法不太经济，但能得到具有窄坡口的高质量焊接接头，所以只有在特定场合下才选择 **GTAW**。**SAW** 是熔敷速率最高的一种焊接方

法，特别是在环焊缝焊接时，由于使用了环缝焊接机械系统，其优点更加突出，它几乎适于焊接所有横焊缝和水平位置焊缝。生产实践证明，SMAW 和 SAW 是 9Ni 钢储罐现场焊接效率最高，而且最常用的焊接方法。

(4) 焊接材料：因 9Ni 钢热膨胀系数较大，为降低接头的焊接应力，在选择焊接材料时，焊缝金属的热膨胀系数应尽可能地接近 9Ni 钢的热膨胀系数；9Ni 钢在焊接过程中易于出现磁偏吹现象，尽量选用适应交流电源施焊的焊条或焊丝焊剂；从韧塑性和热膨胀两方面考虑，Ni 基和 Fe₂Ni 基合金都是焊接 9Ni 钢最适合的焊材；虽然高镍合金焊材将增加成本，但使用高镍合金焊材是解决性能和结构完整性等首要问题的最适合的选择；故应根据 IGC 6.3.2 和 CCS《材料与焊接规范》(2012) 第 3 篇第 2 章的要求适合等级 (9Ni) 的低氢或超低氢焊接材料。

(5) 焊接工艺：为确保焊接接头具有良好的低温韧性，必须避免接头过热和晶粒长大，为此，焊接工艺可采取例如如下措施：

① 焊前不预热且须严格控制层间温度：因为预热温度和层间温度直接影响焊后冷却速度，冷却速度越慢，越有助于晶粒长大，所以 9Ni 钢焊前一般不预热，层间温度不宜超过 100℃。但对于气候潮湿的场地，需进行低温预热，目的是去除焊道潮气，避免引起内部缺陷。

② 选择合适的线能量：因为焊接热循环的正确与否直接关系到接头组织、晶粒大小和性能；焊接线能量应控制在 45kJ/cm 以下，通常为 7~35kJ/cm。

③ 进行多层多道焊，避免单道焊：实验发现，即使小线能量 (15kJ/cm) 单道热循环的 CGHAZ (粗晶热影响区) 的低温 (-196℃) 冲击功也非常低，经过 800℃ 或 900℃ 二次热循环后，低温冲击功明显提高；三次热循环能进一步改善其低温韧性。所以，焊接 9Ni 钢时应进行多层多道焊。

④ 尽量选用交流极性的电流：由于 9Ni 钢是一种强磁性材料，极易被磁化，采用直流电源时易出现磁偏吹现象，影响焊接工艺的稳定性，直接影响接头质量。

本项目的所有工艺评定全部采用手工焊，为避免磁偏吹，采用交流电，禁止直流焊，尽量避免磁性工具的使用，必要时进行剩磁监测、消磁或布置对应磁块，避免与碳钢的接触。参数如下：

| 焊层 | 焊接方法 | 电流极性 | 规范参数 | | |
|-------|------|------|---------|--------|----------------|
| | | | 电流 (A) | 电压 (V) | 焊接速度 (cm/min.) |
| 打底 | 手工焊 | 交流 | 100-130 | 20-25 | 15 |
| 填充、盖面 | 手工焊 | 交流 | 160-170 | 25-30 | 20-22 |

2、 施焊

焊前检查主要包括坡口型式、角度、间隙、对接焊缝错边量、削斜情况，打磨清除边缘 25mm 区域内的表面上的氧化物、潮湿、油污，定位焊打磨及各个对接筒体纵缝间角度等等，其结果应符合 CCS《规范》及批准图纸的要求。

失圆、局部偏离正确形状、焊接接头的对中以及不同厚度板的削斜等，均应符合 CCS 同意的标准，这些公差都是与屈曲分析有关。

严格按照批准的焊接工艺规程 (WPS) 中的焊接参数进行焊接施工，控制焊接速度和热输入量，焊接过程中应采用使焊接变形降低到最小

的焊接顺序和方式，一般采用对称分段等速焊接，按要求进行预热和控制道间温度，多道焊和接焊时注意道间清洁和彻底清根，被扣后 PT；注意合适的焊接环境，应在具有防雨、雪的遮蔽及避风条件下施焊，当环境温度较低或湿度较大时采取适当的预热去潮措施；焊工持我社颁发的范围适用的焊工证（锅炉压力容器类别、母材等级为 W05（Ni 含量 $\geq 5\%$ 的低温镍钢））。选取《材规》规定的 9Ni 等级的焊条，并持有我社认可证书。

对于双耳型储罐，中间舱壁与两侧圆筒交叉处为焊接应力集中区，虽然焊缝分布在中间舱壁的不同程度，但焊接时最好能够将此交叉区作为一个整体，来考虑其焊接顺序、变形及应力等工艺，见下图；为避免内部裂纹，最好每焊完一层做一次 PT。焊接过程中加强巡检，检查焊接工艺的执行及焊条的烘干和保存情况。

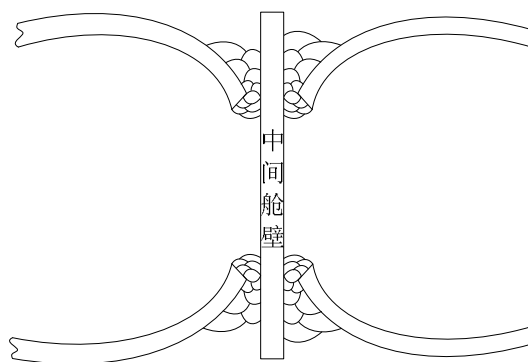


图 18- 中间舱壁交叉焊接应力集中区

另注意受压壳体上的开口和管径周围的补强。

3、热处理

因 9Ni 钢自身性能，并考虑避免热处理带来的渗碳，一般不进行热处理，而是采用水压试验的方法消除机械应力，压力值应高于水压试验压力，确保在常压至 MARVS 压力范围内主膜应力与应变之间成线性关

系。

四、液罐制造检验试验要求

0、液罐制造厂/车间能力评估

(1) 软件方面：

- 质量管理体系必须很健全，液罐的制造需要的就是规范操作；
- 对 9Ni 钢的焊接特性深入掌握，焊接工艺得到我社认可；
- 具有 LNG、LPG 大型液罐的制造经验，具有精度控制措施；
- 焊工具有相关资质；
- 9Ni 钢专门管理

(2) 硬件方面：

- 具有足够的场地厂房（最好是隔离专用）、吊装工具、钢材下料/成型设备、焊接设备、专门胎架、重型水压试验平台、重型移动设备等。
- 封头旋压、筒体辊压成型设备、集液井热处理设备

1、检验节点

(1) 主要检验节点包括：

顶圆装配、瓣片装配、极圈装配、单筒节装配、纵隔舱壁装配、加强环的装配、真空环的装配、加强环/真空环与筒节的装配、封头中合拢（筒节环缝装配、封头装配）、鞍座的装配、鞍座与筒节的装配、中间筒节中合拢（筒节环缝装配、筒节与纵隔舱壁装配）、大合拢、气室（气室与上筒节的装配（气室上部）、下筒体与补强圈的装配（气室下部）、气室下部与罐体的装配、定位照光、气室上下部装配）、集液阱（封头与筒体的装配、筒体与补强圈的装配、定位照光、集液阱

与罐体的装配)、鞍座底板的装配定位、止浮装置的装配定位、横向止摇装置的装配定位、产品焊接试板的取样和力学性能试验、无损探伤、整体焊后检查、主尺度测量、木块粘结、水压试验、绝缘敷设。

(2) 需要提高的文件:

•WPS

•焊工证

•零部件持证清单

•ITP

•零部件证件、复验报告

•罐体制造工艺

•产品焊接试板布置图

•探伤报告、探伤机构/人员资质

•尺寸精度测量报告

•试验程序、报告

•层压木及粘结树脂证书

•绝缘材料认可证书、敷设工艺、试块试验程序报告

2、精度控制

(1) 罐体结构

1) 罐体结构从放样、下料、加工、焊接等各个主要工序均需由质检人员按图纸及工艺要求检验确认,其中一些关键项目需经验船师认可。

2) 罐体制造允许公差按 **CCS** 规范及技术文件要求,一般为:

①封头与筒体接缝处的公差要求:

拼缝处： $h_1 \leq 2\text{mm}$ ；封头处： $h_2 \leq 5\text{mm}$

②对接焊缝错边量检查：

封头拼缝 $b \leq 0.1t$ 且 $b \leq 3 \text{ mm}$ ；筒体纵缝 $b \leq 0.1t$ 且 $b \leq 3 \text{ mm}$ ；筒体环缝 $b \leq 0.1t+1 \text{ mm}$ 且 $b \leq 4 \text{ mm}$ ；

③筒体对接焊缝棱角检查：

①对筒体纵缝凹凸棱角的检查采用弦长 $\geq 500\text{mm}$ 的内或外样板检查 $E \leq 5\text{mm}$ ；

②对筒体环缝凹凸棱角的检查采用长度 $\geq 500\text{mm}$ 的直尺检查 $E \leq 5\text{mm}$ ；

3) 筒体的直线度

沿液罐长度方向，每米内的直线度不超过 1mm ，筒体总长的直线度不超过筒体长度的 0.5% 。

4) 筒体的圆度

液罐装配完成后，沿筒体长度方向，最大不超过 2 米的间距应测一次筒体的圆度。通过所测得的周长尺寸换算出筒体平均外径偏差不应大于理论尺寸的 $\pm 1.0\%$ 。

$$\text{且筒体圆度 } U = \frac{2(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100\% \leq 2.0\%$$

此外，筒体上局部的凸起和凹坑应在公差允许的范围以内，凸起和凹坑与其周围区域应平滑过渡，且凸起和凹坑的深度（即偏离正常曲线的尺寸）应不大于该部位的长度或宽度的 1% 。

5) 气室封头和集液井与筒体之间的连接

在焊后热处理完成后，在气室封头和集液井与筒体连接区域的最大允许变形要求如下：

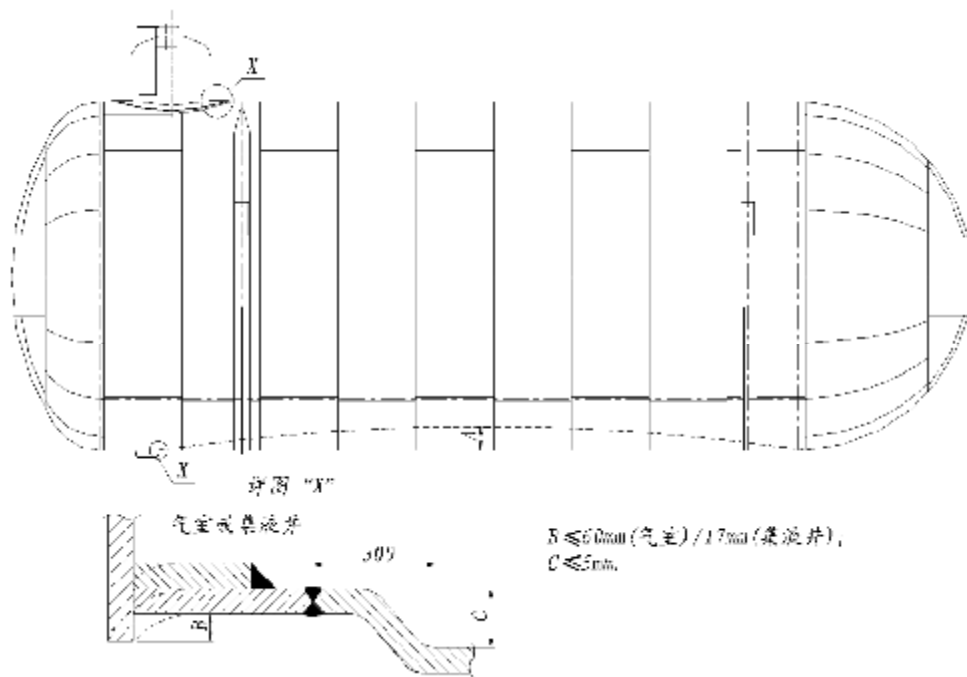


图 19- 罐体变形控制

6) 罐体主尺寸建造公差

① 液罐直径:

1#~3#罐: +15 mm/-0 mm;

② 液罐外壁总长:

1#~3#罐 +40 mm/-0 mm;

③ 气室中心到艙封头外侧距离 ±20 mm;

④ 固定鞍座和活动鞍座间距离 ±10 mm;

⑤ 座架垂直度偏差:

固定鞍座: ±5 mm;

活动鞍座: ±10 mm。

(2) 管系部分

1) 管系部分放样、号料、加工、装配、焊接等主要工序均需按图纸及工艺要求检验确认，关键项目还需验船师的认可。

2) 管系制造公差

① 泵法兰平面度偏差(固定状态): $\pm 0.2\text{mm}$;

② 泵导向座轴线偏差: $\pm 2\text{mm}$;

③ 泵法兰、泵导向座以及集液井的轴线偏差: $\pm 10\text{mm}$ (须通过光学仪器测量)。

(3) 在液压试验完成后, 必须重新检查泵管与泵导向座/集液井的对中, 并作好调整和记录。

3、产品焊接试验

应按 IGC 6.3.6、CCS《液化气规范》6.3.6 和 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 7 章第 2 节的要求制作产品焊接试板并进行相关试验; 应提交产品试板布置图进行批准, 确保每种焊接工艺、焊接位置所选取的试板足够; 至少每 50m 焊制一个试件 (此处长度是指具有相同焊接工艺的焊缝长度, 否则应单独计算长度并制作焊接试板, 不满 50m 的按 50m 计算), 试板材料级别和厚度应与壳体材料相同, 坡口与筒体焊缝相同, 用定位焊与筒体壳板相连接, 是其成为筒体纵缝的延续和模拟, 与筒体纵缝一次性焊成; 如环缝与纵缝所用焊接工艺差别较大, 则应每 30m 环缝焊制 1 个环缝模拟试件; 试样所用的方法、工艺和热处理等均应与筒体和环缝所采用的方法、工艺等相同; 试验项目应包括:

- 内外部缺陷探伤
- 熔敷金属拉伸;
- 正弯、反弯 (厚度超过 20mm, 可改为侧弯);

- ， 接头横向拉伸；
- ， 断面宏观检查；
- ， 冲击试验（焊缝中心、熔合线各 1 组，温度与母材相同，V 型缺口，不合格可用双倍落锤试验进行在冲击温度下进行复验，应不断裂）。Y 叉头处也应按每 50m 取 1 组产品试板。

4、焊后检验

对焊缝进行外观检查，焊缝表面应光滑、成形美观、均匀、致密，无裂纹、结疤、气孔、咬边、夹渣、弧坑、未填满等缺陷；余高应圆滑过渡；测量焊角高度；目测筒体、封头应无裂纹、结疤等降低产品性能的其他缺陷，壳体表面无伤痕，如有应在距表面 3-5mm 内铲除并打磨平整；整体形状检查，是否存在焊接变形；尺寸检查，包括总长、总高、筒体直径、筒体不圆度、鞍座间距、气室定位尺寸等主要尺寸，其结果应符合本社规范及批准图纸的要求。尤其注意圆筒分段各对接处的平面度、圆度和筒体直径，另外还应注意各节纵缝的错开距离。

5、无损探伤

(1) 制造厂应由 CCS II 级以上人员制定探伤工艺和计划书，标明探伤部位、比例、探伤时机及顺序、验收标准和合格等级提交验船师审核，并由持 CCS 相应证书的探伤人员及校准合格的探伤设备进行探伤，出具相关探伤报告（注：探伤报告涵盖内容应满足 IACS REC. 20），由具有资质人员的人员审核合格后签署，并提交验船师审核。表面探伤应至少在热处理后进行；产品焊接试板也应包括在内。注意，因 9Ni

钢磁性较弱，不可使用 **MT**，表面探伤只能使用 **PT**。

(2) 受压壳体应按照 **IGC 6.3.7.2** 和 **CCS《液化气规范》6.3.7.2** 及 **CCS《材料与焊接规范》(2012)** 第 3 篇第 7 章第 5 节第 **7.5.4** 的要求进行：

① 全面无损探伤（焊接有效系数 **0.95**）：

射线检查：对接焊缝 **100%**；

表面裂纹检查：所有焊缝 **10%**；开孔和接管周围的加强环：**100%**。

如经特别许可，可以采用超声波检查替代部分射线检查。此外，可要求对开孔周围的加强环和接管焊缝进行全部超声波检查。

或②部分无损探伤（焊接有效系数 **0.85**，仅允许处理用压力容器）

射线检查：对接焊缝，全部焊接交叉处的接头及在全部焊缝长度上至少均匀地选取 **10%**；

表面裂纹检查：开孔和接管等周围的加强环**100%**；

超声波检查：根据每一具体情况提出要求。

(3) 管系应符合 **IGC 第 5 章**和 **CCS《液化气规范》第 5 章**和 **CCS《材料与焊接规范》(2012)** 第 3 篇第 9 章的相关要求，对于位于罐体内部的端部开口的管系，可适当放宽要求。

| 序号 | 焊缝位置 | 检验方法 | | | |
|----|--------------------------|------|----|-----|------|
| | | RT | UT | PT | VT |
| 1 | 液罐壳体（包括封头）对接焊缝 | 100% | | 10% | 100% |
| 2 | 气室，集液井和人孔对接焊缝 | 100% | | 10% | |
| 3 | 泵管对接焊缝（罐外部分） | 100% | | 10% | |
| 4 | 罐外管系（管子，法兰，弯头，异径管等）的对接焊缝 | 100% | | 10% | |

| | | | | |
|----|----------------------------------|--|------|------|
| 5 | 纵隔舱与壳体的“Y”型全熔透焊缝 | | 100% | 10% |
| 6 | 纵隔舱壁板的对接焊缝 | | 10% | 10% |
| 7 | 气室，集液井与筒体的“T”型焊缝；人孔，泵管与气室的“T”型焊缝 | | 100% | 10% |
| 8 | 甲板罐接管和壳体之间的“T”型焊缝 | | 100% | 100% |
| 9 | 气室接管和气室封头之间的“T”型焊缝 | | 100% | 100% |
| 10 | 加强环腹板对接焊缝 | | 10% | 10% |
| 11 | 加强环面板对接焊缝 | | 10% | 10% |
| 12 | 泵法兰与泵管、人孔法兰与筒节的“T”型焊缝 | | 100% | 100% |
| 13 | 吊码及补强板与壳体的角焊缝 | | | 100% |
| 14 | 补焊返修、临时卡具马脚的焊缝或其它误操作产生焊缝 | | | 100% |
| 15 | 开孔或接管处补强板的角焊缝 | | | 100% |
| 16 | 上述之外的角焊缝 | | | 10% |
| 17 | 所有全熔透焊缝背面清根 | | | 100% |
| 18 | 液压试验之后所有壳体板对接焊缝 | | 10% | |

(4) 无损探伤试验标准及焊缝质量评定标准

1) 执行标准

RT: EN 1435; UT: EN ISO 17640; PT: ASME-2010

2) 评定标准

- RT: IS05817-B 级，另要求不允许存在裂纹、未熔合、未焊透等缺陷。
- UT: IS05817-B 级，另要求不允许存在裂纹、未熔合、未焊透等缺陷。
- PT: ASME-V 第 6 章。

液罐焊缝经以上检验不合格，应及时返修至复探合格，应控制返修次

数，返修时应严格按照返修焊接工艺进行。

6、水压试验

本体及接管组装完毕后，应进行液压试验；制造厂应预先制定水压试验工艺，应至少包括试验介质、加压方式、试验压力、保压时间、升压/降压速率等信息，提交验船师审核。因储罐体积较大，水的密度约为 LNG 密度的两倍，压力容器装满水后水的重量再加上压力容器的重量的总重量很大，故制造厂在试验前应格外谨慎，采用合适的支撑方式和布置，应对底部支撑的强度进行计算和对液压试验的各个细节和布置及是否需要进行应力检测进行整体评估。

为避免生锈，应对试验用水中氯含量进行控制，水压试验前取样测试，提交包括氯含量、PH 值等参数在内的水质检测报告；

试验时在液货舱顶测得的压力应不小于 $1.5P_0$ （IGC 4.2.4.4 定义的设计蒸气压力），必要时对试验倍数（试验温度下材料许用应力/设计温度下材料许用应力）进行修正（取大者）；

试验时所采用的水温至少应比制成的材料的零韧性转变温度高出 30°C ；每 25mm 厚度，压力应保持为 2 小时，但在任何情况下不得少于 2 小时；

其试验条件应尽可能模拟液货舱及其支持构件实际所受的载荷情况，在注水和水压试验过程中，应对试验场地的沉降进行监测，避免地基较大沉陷损坏罐体结构；

按照 IGC 的要求，C 型独立液罐在焊接完成后应进行水压试验，同时进行消除应力，压力应高于水压试验的 $1.5P_0$ ；在压力试验期间的任

何情况下，对任意点计算所得的主膜应力应不超过材料屈服应力的 **90%**，为此，若计算表明主膜应力超过屈服强度的 **75%**，则在原型试验时，应采用应变仪或其他合适的设备加以监测，但对于简单的圆柱型或球型的受压容器，可予以除外；应变仪应在罐体内外两侧同一位置对应成对布置，以计算出主膜应力。

试验时罐体顶部应设排气口，充水时应将罐体内的空气排尽。水压试验过程中，应按一定速率进行升压和降压，水压应达到要求值，至少有一组两个量程相同的、业经检定合格的、量程为 **2** 倍左右试验压力的压力表，如认为有必要，可要求增加压力表组数及其合理布置；在保压期间，压力表读数应无下降，受压容器不应出现渗漏、变形、异响，应注意关注焊缝及连接结构是否存在变化。如有渗漏，修补后重新试验。试验合格后出具水压试验报告。

降低水位，冲入压缩空气，对气室及其接管进行气密试验，气压一般为 **2bar**。

7、容积测量

船东为保证装货量，要求罐体容积控制在正公差，然而若容积过大，会导致罐体重量和装载货物总体超重，这涉及到船体结构及罐体本身结构的强度问题，所以船级社也需关注此事。如超重过大，需要求对罐体结构强度和船体结构强度进行重新校核。在制定总尺度公差时应估算其对罐体容积的影响，保证容积在一定范围内。

8、内部清洁

应对罐体内部进行手工打磨，去除浮锈，防止浮锈混入 **LNG** 液货，一

方面导致液货中掺入杂质，另一方面，浮锈粉末可能会对深井泵叶片和传动轴滑动轴承造成磨损；一般要求表面处理至 ISO 8501-1 ST2 等级即可，即打磨露出微弱金属光泽。打磨完成后，进行彻底清洁，之后充入一定正压的低露点干燥空气(5mbar, 相对湿度<30%@15℃)，封盖密闭。

9、涂装

按照 IGC 的要求，对于壳体钢板在设计时无腐蚀余量的液罐，应按要求进行防腐涂装。一般要求液罐周围的液货舱进行充入惰性气体或干燥空气，再加上绝缘层的隔绝防护，可无腐蚀余量；但对于甲板罐，其周围环境比较潮湿，一般要求敷设余量。

应在涂装前进行打磨至适当等级 (ST3)，所选油漆应适合于绝缘层的泡沫材料，涂装过程中注意控制干膜厚度；所有外部钢结构（包括气室、集液井、人孔、泵管、管支架等）的外表面均需油漆，人孔及泵管的法兰（除法兰面外）也需油漆；所有接管的临时法兰盖（除法兰面外）需表面油漆；罐外不锈钢接管油漆到与法兰相接的焊缝为止（包括焊缝）。

10、绝缘敷设

按照敷设工艺进行绝缘层和外部保护层的安装，注意绝缘材料的绝缘性能及厚度应满足货舱温度场计算的要求，还注意敷设顺序及粘结剂的涂刷方向对绝缘性能的影响。



图 20- 罐体绝缘敷设

五、液罐船上安装检验要求

1、产品厂与船厂之间的数据互通

双方在液罐和船体分段制作过程中，应进行必要的数据互通，确保今后吊装的顺利进行。

液罐与船体的接口位置主要包括：

罐体总尺度（包括绝缘层厚度）、鞍座、止浮装置、止摇装置、气室定位、气室接管等。

（1）船体尺寸在设计时应考虑罐体的总尺度，尤其是敷设绝缘后的尺寸，否则会出现罐体总尺寸过大而吊装不进货舱的情况，为此，在进行罐体绝缘层敷设时，除为保证绝缘性能而避免过大负公差外，还应避免过大正公差；在吊装前，需对绝缘敷设后的总尺寸进行测量，以用于吊装预估；

(2) 在设计和制作鞍座时，应考虑吊装后其鞍座总宽度，仍能为货舱舱底水向舱尾部污水井流动留出足够通道；座间距应与船体基座进行数据匹配，包括公差控制，预防吊装时罐体鞍座无法落坐到船体基座内；



船体基座高度，应与罐体鞍座止移扁钢、承压

木、树脂浇注厚度、绝缘层厚度进行数据匹配，既保证止移扁钢安装重合度，又要避免因基座太高而与绝缘层发生碰撞而损坏。

(3) 止浮装置，罐体与船体之间应有足够的间隙，保证在营运过程中确保具有足够的热伸缩活动空间；

(4) 气室定位，气室从甲板分段开孔穿过，其定位不准，在甲板合盖时可能会发生碰撞；

另外，还会影响接管的连接；

(5) 气室接管，接管在气室上的布置、朝向、高度等，应与船舶管系放样、走向能够对应。

(6) 对于环形滑动鞍座中间部位断档的型式，务必提前核实罐体空档是否大于船体空档，避免无法落座。

图21- 船体鞍座

2、船体鞍座精度控制工艺

用全站仪，事先在罐厂获得承压木型线；船体鞍座腹板底部焊好，打一次精度，根据罐体承压木底部线型，调整鞍座面板高度（扣除面板厚度），使树脂厚度在 20-40mm 最优，切掉腹板顶部余量，上面板后，再打一次精度；面板和槽边焊好后，再打一次精度。

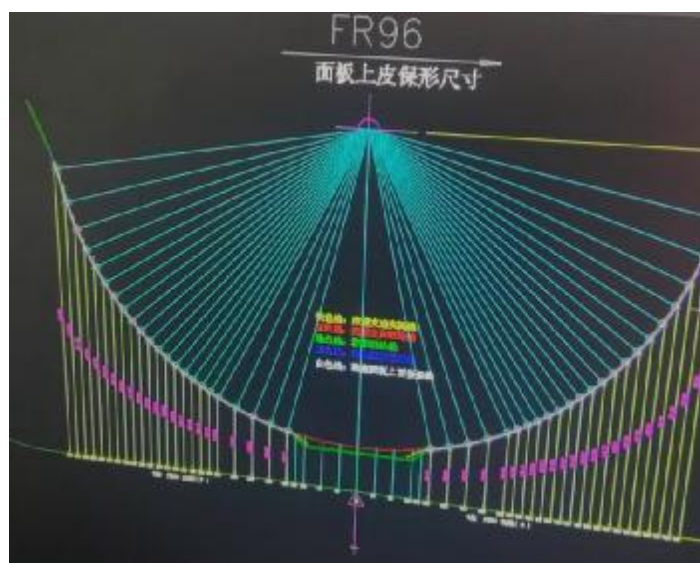




图 22- 罐体与船体鞍座线型匹配

3、 吊装方式

由于都是采用树脂浇注，考虑定位及树脂凝固期间罐体姿态长时保持，不建议船舶在倾斜船台上吊装，最好是在平船坞内进行。

吊装方式可根据生产情况和船厂设施采用汽车吊、龙门吊、浮吊。

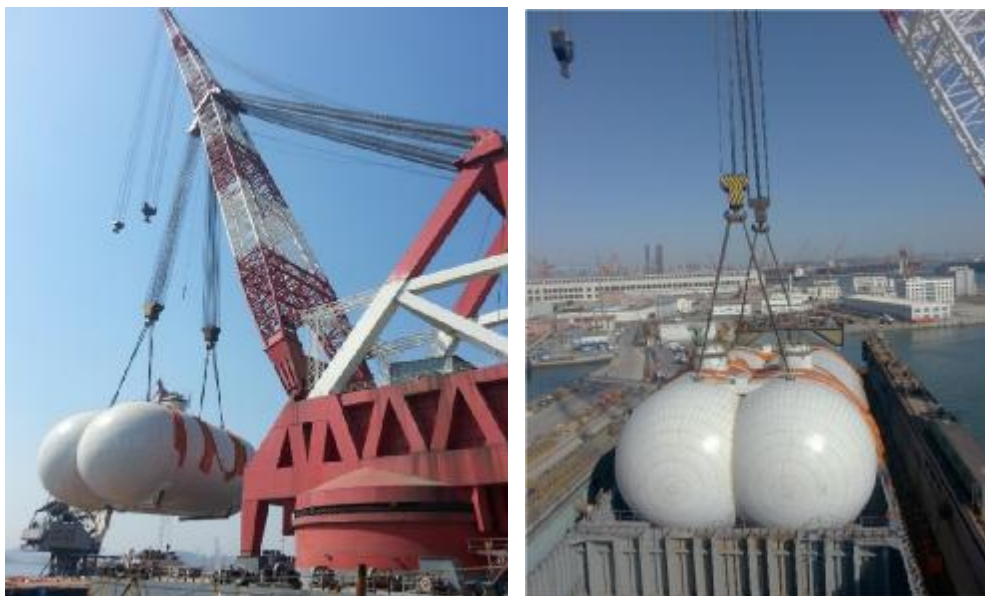


图 23- 液罐吊装

4、 吊装控制点

液罐船上吊装和安装，需额外关注以下几点：

1、液罐的定位：

(1) Z 向，影响船舶整体重心，关键参数为底部重合度和顶部的止浮间隙：应保证此两参数满足计算书的要求，应将此要求在安装工艺中明确体现，并作为船检的报验点；罐体之所以能够跟随船一起运动，其着力点在于固定鞍座，鞍座止移扁钢下沿与船体基座上沿之间的重合，实现了船舶推力的传递，因承压木的抗剪切能力较差，故在液罐吊装时，必须保证设计最小重合度，使钢结构之间相互传递推力，而不是通过木块，否则木块可能被切断，这是液罐船上吊装的关键控制点；为便于现场核查重合度，船厂应事先做好标记或标尺等；对于安装精度，底部重合度，大罐 **50mm**，甲板罐 **5mm**，顶部止浮间隙 **20mm**，这相对于船体结构的精度，其范围都很小，要保证这些精度，建议船厂向液罐制造厂索要罐体各项完工尺寸等数据，并对船厂建造的分段上的基座和止浮实测数据，事先计算一下，掌握情况，如不满足要求，事先提出解决方案。对于底部间隙，由硬树脂块来保证，在硬树脂块放入船体基座前应确认其厚度。

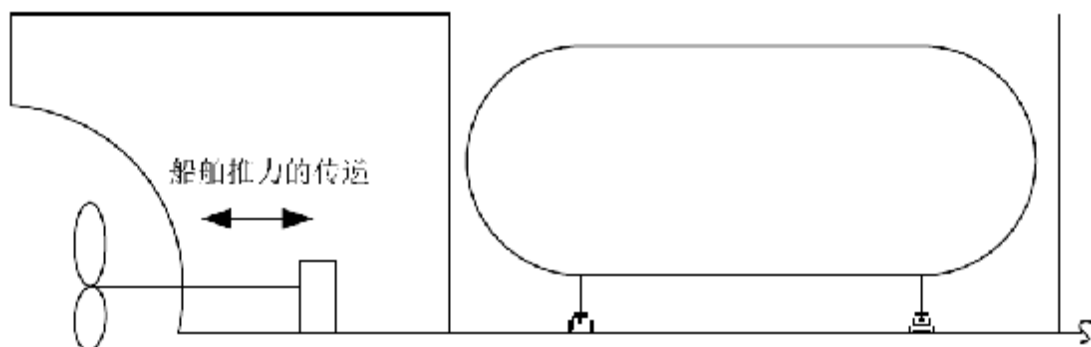
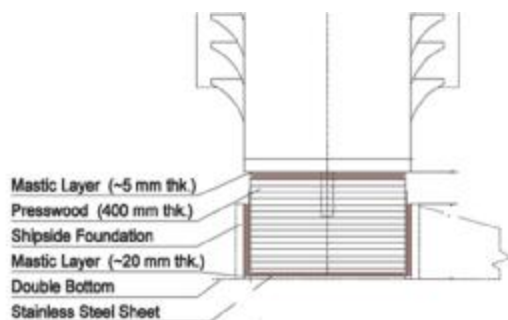


图 24- 罐体推力传递图

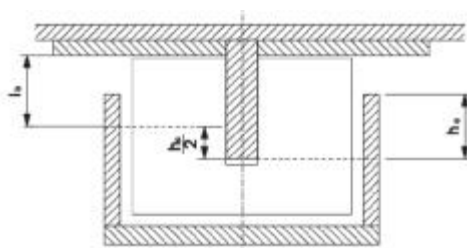
船舶推力传递给液罐的路径：

桨→艉轴→齿轮箱→船体→固定鞍座槽→树脂→承压木→止移扁钢
→固定鞍座→罐体

作用点就在于固定鞍座处，详图如下：



(1) 固定鞍座结构图



(2) 固定鞍座的悬臂梁模型及重合度

图 25- 固定鞍座详图

h_c 为止移扁钢下沿与安装槽上沿之间的重合高度，推力作用点简化为 h_c 中点， l_b 是弯曲力臂，保证重合高度 h_c 和 l_b 是避免鞍座出现高应力和顺利传递推力的关键，因此在液罐安装时必须确保 h_c 的

正公差和避免 **lb** 过大，为此必须尽量降低液罐高度；然而为保证承压木与船体底部之间树脂层的厚度，从热传导的角度，还需保证此处树脂厚度不可太薄；因此，液罐安装应从船体传递和绝热两方面考虑，既不可太高又不可太低，二者是矛盾的，需寻找一个平衡点。

另外，在液罐制造阶段，必须保证止移扁钢的高度，不允许出现负公差，不可为满足其它形

状尺寸而随意打磨面板上面立板下沿坡口；但也不可太高，防止与罐体绝缘碰撞，包括槽边加强肋板，也不可太高太宽。另外在粘结承压木时，面板和承压木之间的树脂

层不能过厚，否则木块整体高度增大，安装到船上后，会减小重合度 **hc**；在安装木块时，

尽量保证前后木块底面的平面度，最好保证滑动木块相对于固定木块在较高的位置，避免因

滑动木块整体高度太高而需太高固定木块高度；

另外，在包罐体绝缘方面，只要满足规定厚度即可（也需正公差），无需太厚，以免在液罐

安装时，因太厚而与鞍座槽上沿发生碰撞，为不破坏绝缘而必须将罐体整体抬高。

船厂分段制造方面，应保证鞍座槽的高度为正公差，避免负公差。

另外，止浮装置与船体结构之间需保持 **20mm** 的间隙，为保持此间隙，如底部树脂厚度增厚，

必须上抬甲板盖，这样外板对接缝间隙可能过大，另外甲板盖上抬会

使总高增大，影响船

体总尺度。

(2) X、Y 向对中：X 方向，需保证罐体鞍座间距在船体基座之内，关系到罐体能否放进船

体基座内，在船体基座和罐体制作过程中，船厂与液罐制造厂进行数据沟通，并各自将尺寸

精度控制在允差之内；另外 X 方向的定位还影响货舱检验通道的宽度；Y 方向，关系到船舶的横倾，罐体中心（即纵隔舱壁）应与船体中心对齐，需事先在罐体和船体上做好标记线，

很多部件包了绝缘，因绝缘层厚度不同，包绝缘后找中心线并不准确，故中心线需从绝缘层

内部结构中返出，此部分工作需由液罐厂家在包绝缘时进行；另外 Y 向定位也会影响货舱的检验通道宽度。



1) 吊装定位



2) 辅助导槽定位装置

图 26- 罐体吊装精度控制

2、热传导方面，即树脂的热传导性能：木块与船体基座之间的填充了耐低温树脂，其起两

方面的作用，一方面为填充支撑，另一方面还起到隔热作用，其热传导系数必须满足温度场

计算书的要求，在选取树脂厂家时，除具备我社颁发的工厂认可证书外，还需厂家提交树脂

热传导系数测试报告，以证明其热传导系数低于设计值，这是进行吊装的前提条件。经过普

通认可的树脂不能保证完全可用在液罐的安装，因为我社《材料与焊接规范》缺少对这种应

用场合热传导性能测试的要求，目前已向上海规范所提出了反馈，意见被接纳。

3、树脂强度计算：包括基座底部和侧面的强度，包括静态载荷和动态载荷下的强度，应提

交树脂强度计算书，结合罐体的有限元计算，验证在不同工况下，及在常温至液货运输过程

中可能存在的最低温整个温度范围内，所选树脂的强度均满足要求。

4、绝缘层的修复：绝缘层敷设在产品检验阶段为船检报验项，绝缘层强度很低，在吊装过程中极易遭到绳索的损坏，船厂需按照原敷设工艺和材料进行修复，施工人员应具备适当资质和技能，因此船厂应在吊装工艺中增加绝缘层修复工艺相关内容。

5、树脂浇注：为确保整个基座全部充满树脂，应初步计算树脂用

量；因船底板存在凸凹点，应先预吊装，在基座内长度方向上定距放置油灰球，由压缩后油灰球的厚度来确定对应位置硬树脂块的厚度；在保证重合度的前提下，还需确保底部树脂的厚度；船厂应提交树脂浇注工艺，对现场温度控制（低于多少温度需现场加热）、防风、湿度、固化时长，浇注及凝固期间禁止大幅度活动（如动机器）、固化剂混比、取样数量等进行详细说明。

6、罐体重量：在船体基座处结构强度计算时，使用的是理论罐体重量，而实际重量会有出入，总重量还包括绝缘层的重量，一般控制在±5%以内，如在吊装时发现罐重出现较大偏重，则需考虑船体基座及罐体本身鞍座的强度是否足够，必要时应要求以实际罐重重新校核船体强度，如发现超差，需做额外加强。

7、罐体容积：容积同样与船体强度是否足够有关，在罐体制作过程中，一般保证容积的正公差，但如容积超差过大，可能会超出船体基座受力范围，故需在罐体制作过程中，进行精度控制，在交货时进行容积测量，一方面是为满足船东正公差容积的技术协议要求，另一方面，对容积超差值对船体基座的影响进行评判。

8、液罐吊装流程：

（1）准备工作：

1) 吊装方案已经审批，若用浮吊，应选取风浪平静天气，浮吊应具备足够起吊能力和安全裕度；

2) 应确保吊装路径内无障碍物：事先测量液罐在包绝缘的情况下的主尺度，总长、总宽、总高、鞍座侧面绝缘层宽度，在电脑上建

模，模拟吊装下放路径过程中可能存在的碰点及障碍物，事先拆除这些碰点，主要是两舷检查通道处的栏杆、货舱内个别管系，必要时拆除部分绝缘，如鞍座侧面的绝缘层等；

3) 在浮船坞上吊装时，应采取合理顺序吊装各罐；根据罐重和所在舱位，适当调节浮船坞的压载吃水，调整浮船坞的倾斜，保证罐体坐实后船体基本是水平的，便于定位，避免树脂凝固前发生偏移；

4) 清理船体基座，打磨露出金属光泽，冬天为满足树脂浇注要求，需对基座进行电加热；

5) 冬季搭建防风棚，对树脂腻子进行加热至厂家规定温度；

6) 底部设足够照明；注意防火，必要时准备消防器材。



图27- 液化气体舱在建造过程中严重失火

(2) 预吊装：

在基座中每隔一定间距，约1.5-2 米，放置油灰球，吊放液罐坐实，之后再吊起一定高度，注意坐实时中心线的对中；测量各点油灰球的高度，掌握基座在整个方向上的凹凸情况（承压木地面基本为平面），据此决定支撑垫块（钢板或硬树脂块）的厚度，一般在

横向均匀放置四个垫块，以油灰球最薄处放置垫块的厚度为基准，选取其它垫块厚度，保证放置垫块后，各处高度基本一致，注意保持前后鞍座及各舱之间的高度基本一致，注意垫起后的高度应保证止移扁钢的重合度，同时应考虑不同地点垫起高度对气室泵管法兰平面的影响，这对今后深井泵的安装及正常运行都有影响。定位以固定鞍座处为准。可将钢板埋入树脂中，保证上下面均有树脂。根据垫起厚度，大致计算所需树脂数量。

再次清洁，包括基座槽、承压木底面和侧面、底部横向支撑槽及其承压木，并将承压木放入槽中；除掉斜拉撑，装好对应位置的绝缘泡沫块。

（3）正式吊装：

- 1) 搅拌、浇注足量树脂腻子；
- 2) 下放液罐，微调进行横向和纵向的对中，横向定位的依据是船体中线与罐体中心，纵向

定位时检查承压木与基座侧面槽边的间距，垂向定位通过测量承压木上部鞍座面板底面的垂向高度来确定；下放过程中检查各处均有树脂溢出，已确保每处均填满了树脂，并在坐实后及时清理。



图28- 罐体吊装树脂浇注溢出

3) 取试样块。

4) 坐实定位后，检查鞍座两侧是否留有足够的空档，为舱底水向艉部流动留出通道。

(4) 吊装后的工作

1) 吊装完毕后，搭建防风棚，冬季需在棚内架设热风机对树脂进行加热，静待其凝固，在此期间避免振动。

2) 填写定位记录表。

3) 拆除滑动鞍座处的把紧钢片，外折 45° ；切除吊耳，恢复前期拆除的部件，包括绝缘

层；连接防静电接地电缆和罐壳外部的温度传感器信号线。

(5) 甲板合盖：

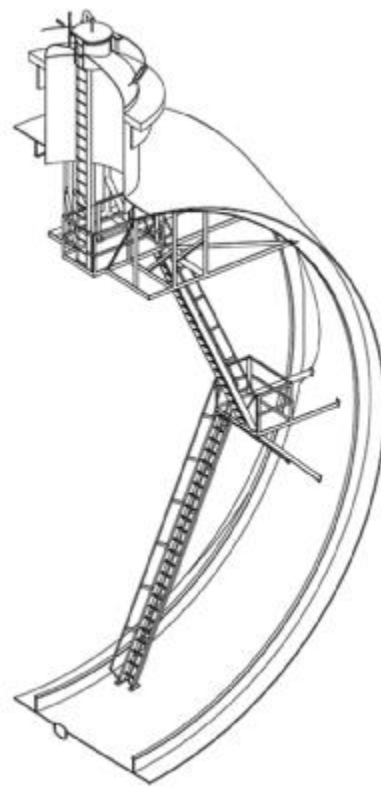
1) 待鞍座处树脂彻底凝固后，方可进行甲板段的合盖；

2) 在定位甲板段时除了与船体结构的对中外，还应关注与顶部横向支撑及止浮装置的对中，横向注意与顶部横向支撑的定位，垂向注

意与止浮装置之间的间隙；

3) 定位后进行顶底部横向支撑木块及止浮处木块安装和浇注：顶部横向止摇木块，在吊装前，与底部横向止摇木块一样，用顶丝临时固定的方法进行顶部横向止摇木块的安装；

止浮木块，在甲板合拢后进行安装；测量液罐止浮下部木块与甲板结构之间的间隙，并且满足上部止浮木块安装后仍有**20mm**的活动间隙，必要时对上部木块进行厚度修正；在下部木块上表面涂抹**5mm**树脂，放入上部木块，用四个定位销孔进行定位。



4) 定位并焊接舱口围板，安装橡胶膜式密封圈，进行气密试验，检验其密性。

5) 树脂测试块取样：注意不同配比、不同浇注批次、不同凝固环境条件，应分别取样，试样应在同样的环境下凝固。一般仅测硬度，如有必要可要求测试压缩强度等其它性能。

(6) 甲板罐的吊装：

相对简单，关注点同样为定位、重合度和树脂厚度，其它与大型液罐类似。

9、后续与液罐有关施工的注意事项：

(1) 在后续深井泵和监测仪器的安装过程中，需打开液罐，人员进

入，在液罐制造厂，已进行了内部清洁和充注干燥空气，进行了封盖；船厂施工开盖后，需立即鼓入低露点干燥空气，保持罐内正压，确保无潮气进入罐内，防止浮锈；施工人员的工作服和鞋帽应保持清洁，尽量避免对罐体的损伤；施工结束后，封盖前，应进行再次彻底的清洁，因深井泵滑动轴承用LNG作为润滑液，如留有金属颗粒或浮锈，可能会造成抱轴；因在运输、吊装过程中可能带来较大变形，故需重新对泵管导座进行照光定位。

(2) 舱容测量：虽然在液罐制造厂已进行了此项工作，但只是为了满足船东的正公差容积要求，另外，液罐在运输及安装到船上后，支撑发生变化，舱容也会变化，应由认可机构再次对舱容进行测量，出具公认的舱容表，与TCS 液位计进行关联。

(3) 货舱留空处所检验通道检查：最终确认通道的布置可以检查到罐体每个地方，检验通道宽度是否满足IACS UI GC6的要求。



图 29- 全球首艘 LNG 双燃料 VLCC 燃料罐吊装现场

(4) 气室密封膜圈的安装及货舱处所密性试验

采取弹性围壁的原因是，考虑罐体热伸缩引起气室处与船体结构上甲板有相对位移，额定位移值为：

垂向： $-50\text{mm}\sim+15\text{mm}$

水平： $\pm 15\text{mm}$

连接处应保持气密和风雨密，货舱留空处所进行气密试验，试验压力（应考虑正常舱室气密试验压力和 PV 阀起跳压力）；气室环和围板与橡胶把紧处，应保证平面度，确保气密。考虑对中，船体结构上的围板，可先不与甲板焊接，待吊罐后，再找正定位后焊接。

采用了 SBR（丁苯橡胶）膜圈，可承受低温（通过气室环与罐体直接

连接)、强度可承受气压(PV 阀起跳压力+0.15bar)、强度可承受拍浪、可达到适当耐火性能(至少为自熄)。

此处作为一个气密水密结构来考虑,不作为舱口盖来考虑。

不可以直接用低温不锈钢波纹结构来代替橡胶,原因是钢质材料导热性能好,从气室传递来的低温必然引起结冰将其包裹,丧失弹性空间。除非通过加强绝缘,解决结冰问题。

橡胶的强度,是有拍浪载荷计算所得,而此计算还未曾有过。

橡胶的持证要求,也可考虑。

橡胶暴露在甲板,风吹日晒,其抗老化性能受到很大考验,再加上气室与甲板之间长期反复的相对移动,很容易导致橡胶圈破损,使货舱丧失密性,因此对橡胶的抗老化性提出较高要求,在船舶营运过程中,应加强对此处完整性的检查,根据橡胶的额定寿命定期换新,在船级社年检时对其密性进行检查,此种检查在船员的日常维护保养中也可进行(因为货舱内正常都有干燥空气)。可设遮蔽罩,遮挡阳光直射,和部分风雨。

在船舶运营过程中,为保证罐体绝缘良好状态,货舱处所内充满正压干燥空气或氮气,为维持货舱处所内正压,需保证货舱处所的密性,在罐体吊装后所有附件全部安装到位后,需对货舱处所进行整体密性试验,试验压力可考虑货舱处所 PV 阀起跳压力、气室膜圈可承受压力等因素。



图 30- 气室密封膜圈的安装

(5) 罐体绝缘性能验证

罐体绝缘层的性能影响两方面, BOR 和温度场分布; 对于 BOR 的大小, 影响货损, 只要燃烧设备的处理配备足够, 安全阀的排量足够, 就像船舶航速一样, 属于使用性能问题, 船东或货主更关心; 而温度场, 涉及结构安全, 仅进行计算是不足够的, 还需要实际进行验证, 应作为首次装卸货的一个项目进行。