

大型锥形双体 LNG 储罐制作工艺

郑龙, 阮桂勇

武汉一冶钢结构有限责任公司, 湖北 武汉 430415

DOI:10.61369/ERA.2026070015

摘 要 : C 型双耳储罐的设计使得其能够最大限度地利用船体空间, 提高空间利用率至少 40%, 但是在船首位置的空间, 常规设计使得其未被完全利用。在国内建造的 78900m³LNG 运输船储罐工程中, 船首部位的罐体设计成锥形后, 就能将船首空间得到较好地利用, 但是 C 型双耳锥形罐的制作在国内尚属首次; 本文结合国内 78900m³LNG 运输船储罐建造阐述 C 型双耳锥形储罐的制作。

关 键 词 : 大型 C 型双耳锥形储罐; 低温; 组装; 焊接; 试验

Manufacturing Process of Large Conical Twin-Shell LNG Storage Tank

Zheng Long , Ruan Guiyong

Wuhan Yiye Steel Structure Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430415

Abstract : The design of C-type double-ear storage tanks enables maximum utilization of hull space, increasing space utilization rate by at least 40%. However, the space at the bow is not fully utilized in conventional design. In the construction of 78900m³ LNG carrier tank project built in China, the tank at the bow is designed in conical shape, which can make better use of the bow space. Nevertheless, the fabrication of C-type double-ear conical tanks is the first attempt in China. Combined with the construction of 78900m³ LNG carrier tanks in China, this paper elaborates the manufacturing process of C-type double-ear conical storage tanks.

Keywords : large C-type double-ear conical storage tank; cryogenic; assembly; welding; testing

一、概述

随着 LNG 全球市场需求量的增长、LNG 旧船的大量拆解、低碳化转型 LNG 双燃料船的使用、LNG 区域枢纽建设, LNG 储罐结构也从独立 C 型 LNG 罐逐渐发展为大型 LNG 双耳储罐。本文针对 C 型双耳锥形储罐工程为例, 对施工建造过程中的重难点进行系统性阐述。

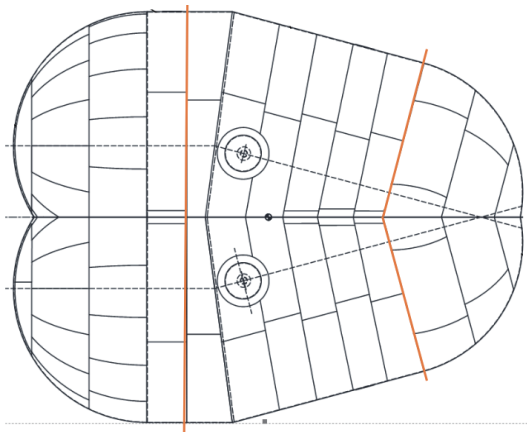
二、C 型双耳罐技术参数

C 型双耳储罐主要技术参数如表 2.1 所示:

表 2.1 主要技术参数

公称容积	17342m ³	内径	Φ21000mm
设计压力	3.85 bar	长 度	39948mm
设计温度	-163℃	主要材料	SA553 TYPE III
操作温度	-160℃	壁 厚	封头 20mm/ 罐体 26、27、33mm

罐体由 7 个筒节和 2 个球形封头组成。考虑到现场门式起重机的起重能力和工作面, 将罐体分为 A 分段 - 封头 + 筒节 1、B 分段 - 筒节 2 ~ 筒节 7、C 分段 - 封头。分段从 A 到 B 到 C 的顺序吊装上船。罐体 A、B、C 分段图及重量表如图 2-1 和表 2.2 所示。



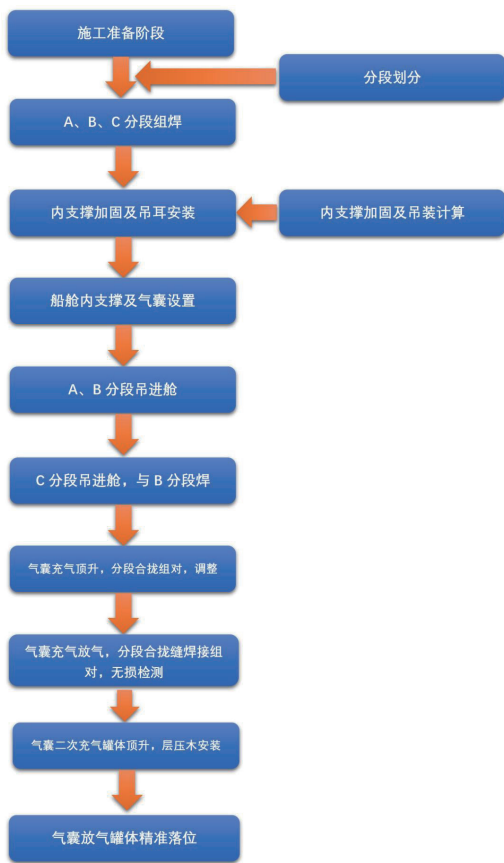
封头 筒节 1 2 3 4 5 6 7 封头
A 段 B 段 C 段

图 2-1 C 型双耳锥形储罐分段图

表 2.2 分段重量

序号	分段名称	数量	重量	吊装状态
1	A	1	400T	整体 (含加强支撑、吊耳)
2	B	1	640T	整体 (含加强支撑、吊耳)
3	C	1	168T	整体 (含加强支撑、吊耳)

三、施工工艺流程



四、单个筒节及封头的拼装

（一）拼装平台搭设要求

拼装平台选用船厂现有水泥船台，水泥船台地坪不平且没有地线，地坪上需制作拼装胎架，胎架制作用 H 型钢 350×250 和底板焊接，高度为 500mm 左右。在胎架底部钻孔用膨胀螺栓固定，间距为 3m 均匀分布，用主体同材质钢板为垫板和限位板。使用激光经纬仪确保胎架模板的顶端保持在同一水平面，误差不得大于 2mm。

（二）单个筒节的拼装

1. 单个 C 型筒节因加厚补强原因，不同筒节每圈筒节板块数 4～6 块不等。以单个 C 型筒节，由 4 块筒节板组成的情况为例。依次把 4 块筒节板吊到拼装胎架固定的位置，并用卡具固定，筒节拼装胎架如图 4-1 所示。

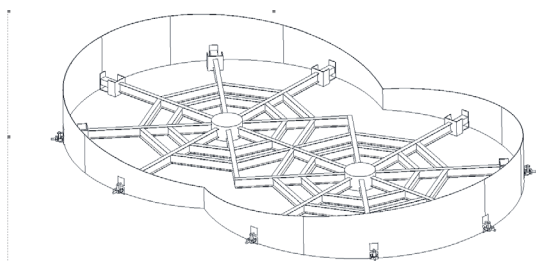


图 4-1 筒节拼装胎架

单个筒节外侧立焊缝焊接完成后，再进行隔舱板安装与焊接。先完成隔舱板一侧的筒节焊接，再进行另一侧焊接工作。焊接顺序如图 4-2 所示。先焊接 1 处的 C 型筒节，再焊接 2 处的 C 型筒节与隔舱板，其次焊接 3 处的 C 型筒节，最后焊接 4 处的 C 型筒节与隔舱板。

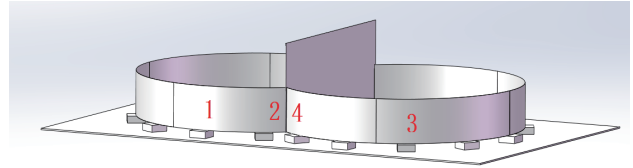


图 4-2 筒节焊接顺序

2. 单个筒节装配好后，需要用钢盘尺检查 C 型筒节上下口周长，周长超差 ≤ 12mm。坡口间隙 $2 \pm 2\text{mm}$ 、错边 ≤ 3mm、棱角度 ≤ 5mm。

3. 拼装相邻筒节时，应以上一个筒节的外周长为依据，以保证筒体之间能够充分吻合，若外围周长差超过 12mm，应及时通知生产车间及拼装班组检查改进问题。

4. 隔舱板落位前，在相邻筒节板上画出安装线，再调整好隔舱板高度。隔舱板落位后，检查垂直度，垂直度 ≤ 5mm；2 个 C 形圈中心到隔舱板距离误差应 ≤ 2mm。隔舱板水平高度误差 ≤ 2mm。

（三）封头的拼装

1. 封头拼装前，先搭设胎架，用 L=250mm 16# 槽钢按封头等分的布置节点，直接在地面上固定槽钢，槽钢上用主体同材质钢板隔断与封头板直接接触，并调整水平度。为了便于拼装以及拼装后的焊接，在胎架上搭设脚手架，拼装脚手架如图 4-3 所示。



图 4-3 拼装脚手架

2. 封头吊装顺序为：先吊赤道带，再吊温带，最后吊装冠顶，封头各带名称如图 4-4 所示。

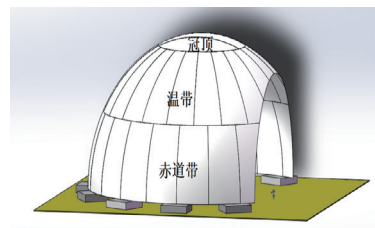


图 4-4 封头各带名称

3. 第一块赤道板放在胎架 270° 方向，且与胎架上所画弧线重

合,如图4-5所示。赤道带吊装完第一块后,在内侧用支撑撑住赤道板,然后依次往两侧开始吊装,第二块吊装上胎架后,用卡具调整第二块与第一块赤道板的间隙、错边,调整好两块板后,再吊第三块板。以此类推,吊装完全部的赤道板。赤道带吊装完成后进行间隙、错边、棱角度的调整,要求间隙 $2\pm 2\text{mm}$,错边 $\leq 3\text{mm}$ 、棱角度 $\leq 5\text{mm}$,赤道带上端位置吊线坠,保证线坠与地样重合。赤道上端环缝的垂直投影应与地样上的圆完全重合。



图4-5 赤道带拼装

4. 封头温带的吊装与赤道带相同。但要注意错缝,赤道带、温带、极带错缝如图4-6所示。赤道带 270° 位置的焊缝正对温带板的中间位置,温带板的中间位置正对极中板中间位置。封头温带板全部吊装完成后,开始吊装封头的冠顶。吊装封头冠顶前,先在温带板上坡口边缘处画出两块极边板的定位线,然后开始依次吊装两块极边板。两块极边板固定好后,最后吊装封头极中板。

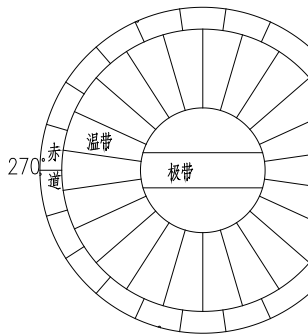


图4-6 赤道带、温带、极带错缝

5. 封头整体拼装完成后,利用卡具调整好坡口间隙、错边、棱角度,同时要测量封头最下端的外周长,确保封头下端的外周长在允许的误差范围内,且与配合的下端筒节的焊后周长一致。要求间隙 $2\pm 2\text{mm}$,错边 $\leq 3\text{mm}$ 、棱角度 $\leq 5\text{mm}$ 。调整好并经过质检员检查确认后开始在焊缝的小坡口进行整体的点固、焊接。焊接完成后在封头以及与之配合的下端筒节上标出 0° 、 180° 、 270° 位置方便后续组对。焊缝的调整如图4-7,错边量的检查如图4-8,棱角度 E 的检查如图4-9所示。

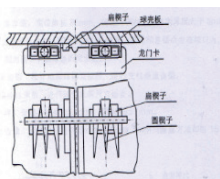


图4-7 调整焊缝

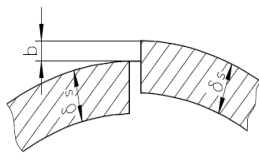


图4-8 壳板错边量检查

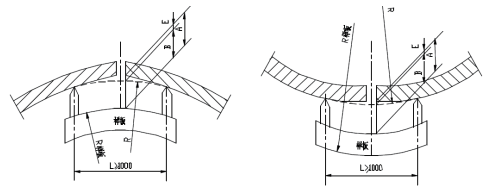


图4-9 棱角度 E 的测量

五、分段的拼装

(一) A 分段的拼装

1.A 分段由1号筒节和两个封头组成。先将1号筒节和隔舱板焊接完成(与单个筒节拼装方式相同)。封头与1号筒节的环缝每间距 $800\text{mm} \sim 1100\text{mm}$ 焊接固定块。封头和筒体均标明三个轴线位置,且在1号筒节三个轴线方向设置导向限位块,方便后续组对和落位,如图5-1所示。

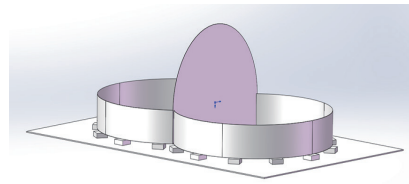


图5-1 A 分段1号筒节

2. 将焊接且涂装完成(与筒节组对焊缝不涂装)的封头,用船台800T 门式起重机将封头吊上1号筒节左侧,如图5-2所示,查看三个轴线方向是否对齐,通过工装进行微调。调整完成环缝坡口间隙、错边、棱角度、整体高度,以及与隔舱板的间隙后,再进行点固、焊接。

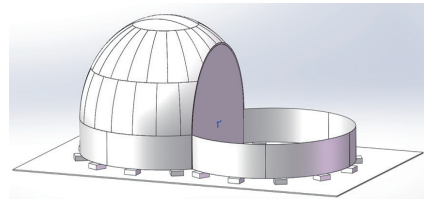


图5-2 1号筒节左侧封头吊装

3.1号筒节右侧的封头,如图5-3所示,吊装方法与左侧方法一致。均要求环缝坡口间隙 $2\pm 2\text{mm}$,错边 $\leq 3\text{mm}$ 、棱角度 $\leq 5\text{mm}$,与隔舱板的间隙 $\leq 2\text{mm}$,整体高度偏差 $\leq 4\text{mm}$ 。

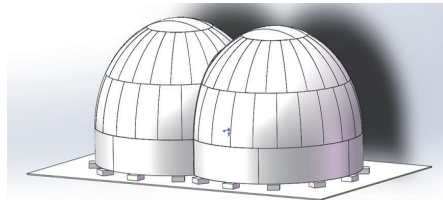


图5-3 1号筒节右侧封头吊装

4. 封头与筒节1的环缝采用埋弧焊,封头与隔舱板的焊缝用焊条电弧焊,左、右侧封头与隔舱板的焊接顺序如图5-4所示。下图1和2位置的隔舱板与封头上温带的焊缝安排两名焊工从中间向两侧同时施焊,3和4位置的焊缝安排两名焊工对称施焊。3和4的起始位置,在上温和赤道焊缝与隔舱板交界处向上 500mm 处。

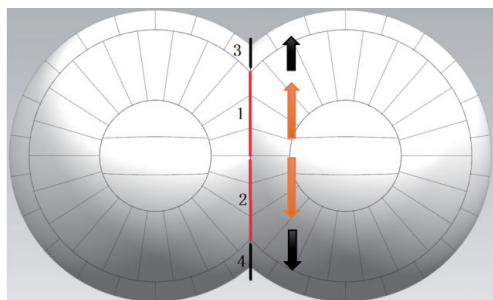


图5-4 焊接顺序

(二) B分段的拼装

1.B分段2号筒节拼装,如图5-5所示。先将2号筒节和隔舱板焊接完成(与单个筒节拼装方式相同)。2号与3号筒节的环缝每间距1200mm~1400mm焊接固定块。2号和3号筒节均标明三个轴线位置,且在2号筒节三个轴线方向设置导向限位块,方便后续组对和落位。

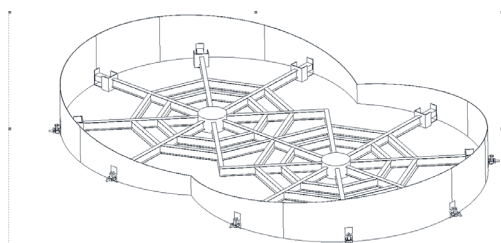


图5-5 2号筒节

2.将焊接完成的3号筒节左侧C形圈,如图5-6所示,用船台800T门式起重机吊上2号筒节左侧,查看三个轴线方向是否对齐,通过工装进行微调。调整完成环缝坡口间隙、错边、棱角度,以及与隔舱板的间隙,同时对整体高度进行调整。调整完成后,再进行点固、焊接。

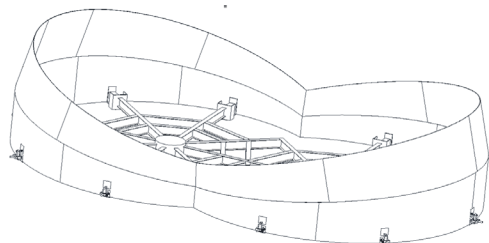


图5-6 3号筒节

3.3号筒节右侧C形圈吊上2号筒节方法与左侧一样。均要求环缝坡口间隙 $2\pm 2\text{mm}$,错边 $\leq 3\text{mm}$ 、棱角度 $\leq 5\text{mm}$,与隔舱板的间隙 $\leq 2\text{mm}$,整体高度偏差 $\leq 4\text{mm}$ 。焊接完成后再安装后续筒节,直至筒节7完成,如图5-7所示。

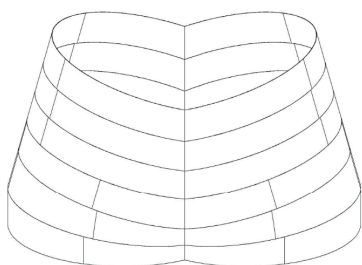


图5-7 B分段

4.B分段焊接时,先焊接环缝,再焊接筒节与隔舱板,单个C型筒节与隔舱板的两条立焊缝,采用两名焊工对称施焊。

(三) A、B、C分段的最终合拢

1.最终合拢在船舱内进行。船舱内两端各有一个支撑鞍座。无法满足吊装需要,因此还需要增加罐体临时托架。罐体托架样式如图5-8所示。在船舱安装中心定位线位置上放置好托架,调整好托架位置和标高。

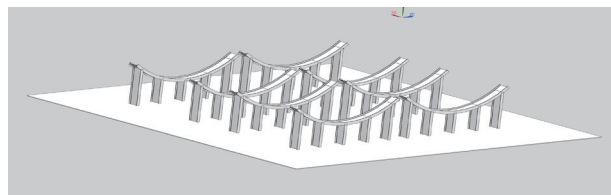


图5-8 罐体托架图

2.所有分段需探伤检验全部合格,内部隔舱板上的筋板全部焊接完成。

3.为防止大合拢吊装时,内部隔舱板紧挨在一起,分段外壳并未达到要求间隙 $2\pm 2\text{mm}$,或组对间隙过大的情况发生。将隔舱板预留300~700mm宽的条状不安装,确保分段外壳合拢完成,再安装此条状隔舱板。

4.吊装采用800T和250T门式起重机,吊装时先要试吊,试吊时用800T门式起重机通过主吊点将罐体吊离地面10cm,确认吊具、吊耳、门式起重机安全可靠后,方可正式吊装。

5.用800T门式起重机通过主吊点,缓慢将罐体吊离地面5m,再用250T门式起重机通过辅助吊点提升罐体。在提升过程中,分段逐渐翻身,直至罐体水平。通过门式起重机顶部的行走小车,将罐体吊至船舱上方。

6.罐体吊至船舱上方后,通过门式起重机微调罐体与船舱间距,再缓慢下降,直至罐体落于支架上,如图5-9所示。

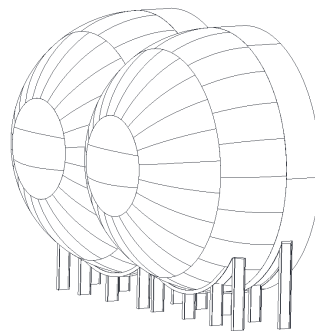


图5-9 A段吊装

7.B分段和C分段吊装到船舱方式与A分段一样,首先在分段十字轴线位置进行标记。合拢时要检查十字轴线是否对齐。罐体总长的控制,通过焊后高度之和,与图纸罐体总长之差,计算出坡口焊前间隙且考虑焊缝收缩,确保焊后罐体整体长度偏差 $\leq 30\text{mm}$ 。要求环缝坡口间隙 $2\pm 2\text{mm}$,错边 $\leq 3\text{mm}$ 、棱角度 $\leq 5\text{mm}$ 、标高偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。罐体标高通过在鞍座底板塞入斜铁进行调整,罐体整体合拢如图5-10所示。

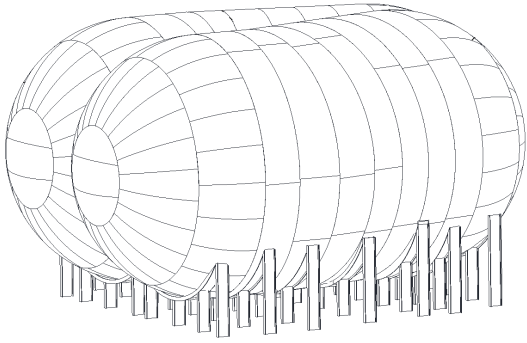


图 5-10 罐体整体合拢

六、焊接工艺

（一）储罐焊接方法

储罐罐体的焊接主要采用焊条电弧焊和埋弧自动焊，封头均采用焊条电弧焊。

（二）焊接参数

根据合格的焊接工艺评定报告编制相应的焊接工艺卡，并由焊接责任工程师审核批准。现场严格控制焊接电流、电压、层间温度、焊接速度、层次、线能量等参数。不同热输入条件下焊条推荐熔敷长度如表 6.1 所示。

表 6.1 不同热输入条件下焊条推荐熔敷长度

焊接位置	焊条直径 /mm	电流 /A	推荐熔敷长度 /mm				
			热输入 10KJ/ cm	热输入 15KJ/ cm	热输入 20KJ/ cm	热输入 25KJ/ cm	热输入 30KJ/ cm
平焊	3.2	125~135	200	150	--	--	--
	4.0	165~175	--	240	180	--	--
横焊	3.2	120~130	230	150	--	--	--
	4.0	155~165	290	190	140	--	--
立焊	3.2	110~120	--	160	130	95	--
	4.0	135~145	--	200	150	120	100
仰焊	3.2	95~115	180	140	--	--	--

※ 加粗字体为推荐热输入。

（三）焊前准备

- （1）被焊接表面应均匀、光滑，不应有起鳞、磨损、铁锈、渣垢、油脂、油漆和影响焊接质量的其它有害物质。坡口表面、坡口两侧 25mm 范围内用打磨机清理干净；
- （2）潮湿天气可加热坡口两侧母材以去除水汽，不得直接用火烘烤焊接坡口；
- （3）定位焊不能有裂纹，若发现有裂纹应及时去除，重新补焊。

（四）焊条电弧焊各位置焊接通用注意事项

- （1）各焊接位置焊接时收弧应尽量减少熔池尺寸，并进行适当打磨操作；

- （2）在接头处用引弧板起弧，焊缝凸出部位进行打磨处理；
- （3）盖面焊接时焊条摆动到坡口两侧时要稍作停留，并熔化坡口边缘 1 ~ 2mm，以防咬边。

（五）焊条电弧焊平焊位置焊接通用注意事项

- （1）焊条后拖角为 $70 \pm 5^\circ$ ；
- （2）直线焊道，尽量少摆动；
- （3）采用打磨彻底去除焊渣；
- （4）不宜采用太大电流，避免因焊渣覆盖不全导致高温氧化。

（六）焊条电弧焊立焊位置焊接通用注意事项

- （1）立向上焊时，熔深较大（重力作用）；焊缝中间凸起两边凹陷，易产生夹渣现象。焊接时在焊缝的两侧要有足够的停顿时间，中间部分均匀、快速移动；
- （2）焊渣彻底打磨，若焊道凸起较高时，应将焊缝打磨至较平，不能只打磨焊缝两边嵌渣位置，打磨太深容易造成未融合夹渣等缺陷；
- （3）焊缝较宽时应采用分道焊接，需注意焊道布置及搭接方式，若第一道焊缝较凸，打磨时需将焊缝磨出斜面以方便下道焊接及避免未融合；
- （4）打底焊和最后一层焊接时，建议采用较小直径焊条以避免咬边和焊道成形不良；
- （5）焊缝接头需打磨圆滑过渡。

（七）焊条电弧焊仰焊位置焊接通用注意事项

- （1）短弧焊接，焊接电弧应控制在 1×2 mm，不摆动或轻微摆动；
- （2）多层多道焊接，所有接头均需打磨干净且在接头外起弧；
- （3）焊缝层间需彻底清理干净。

（八）焊接一般注意事项

- （1）单侧焊接后应进行反面气刨清根，其目的是把第一层焊肉的缺陷去掉。每条焊缝气刨时，确保将底层焊肉刨去，槽底半径保持 5mm 左右。刨槽要平直，光滑，坡口形式应一致。清根后用砂轮机修整刨槽，磨除可能存在的渗碳，粘渣与铜斑等缺陷和修整刨槽深浅不均、宽窄不等的现象，并采用渗透或磁粉检测检查，确认无裂纹、未焊透、未熔合及夹渣等缺陷后方可施焊。如有缺陷，需继续气刨打磨和渗透检测，直至缺陷彻底消除。
- （2）焊缝表面不得有裂纹、咬边、气孔、弧坑和夹渣等缺陷，且不得保留有熔渣与飞溅物。对接焊缝应打磨与母材圆滑过渡，焊缝表面不应有急剧的形状变化，角焊缝应与母材呈圆滑过渡。
- （3）焊接过程中，及时在焊缝两侧及焊缝排版图上注明焊工代号，以便达到焊接过程可追溯性要求。

七、无损检测工艺

- （1）A、B 类缝：RT 或 PAUT，检测比例 100%，Ⅰ级合格；UT，检测比例 100%，Ⅰ级合格；PT，检测比例 100%，Ⅰ

级合格；

(2) Y 型焊缝、C、D 类缝 :UT, 检测比例 100%, I 级合格; PT, 检测比例 100%, I 级合格;

(3) 气液组合压力试验后罐体 Y 型焊缝、A、B、C、D 类: UT, 检测比例 10%, I 级合格; PT, 检测比例 100%, I 级合格;

(4) 因船厂施工环境复杂, 交叉作业面广, 采用 PAUT 检测能有效提高工作效率, 检测图谱如图 7-1 所示。

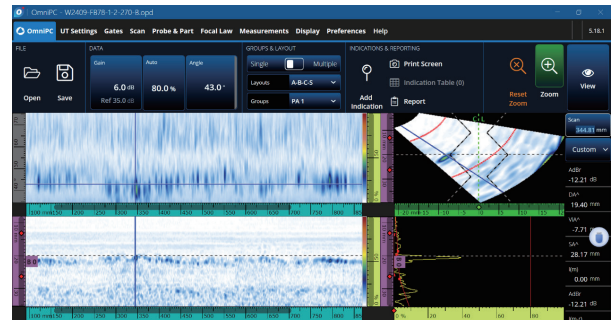


图 7-1 PAUT 检测图谱

八、气液组合压力试验

GB/T 150.4-2024 中 11.4.1 章节明确耐压试验分为液压试验、气压试验以及气液组合压力试验, 本项目采用水上气液组合压力试验。储罐组焊完毕, 经无损检测合格后进行, 气液组合压力试验应符合 CCS 和《国际散装运输液化气体船舶构造与设备规范》IGC 规则的有关要求, 压力试验需采用工业用纯净水。

因货品物料密度 426kg/m^3 , 水密度 1000kg/m^3 , 换算成充水量约为 8800T, 此充水量相当于船体货物满载状态。压力试验时

储罐已经落位在船上, 试验时间是长江枯水期, 且岸线水深仅约 5m, 船体有触底, 硬坐底的风险。最终根据船舶设计院指导意见及专家评审后, 建议充水量为 300T。

试验步骤: 压力升至试验压力的 10% (0.5775bar), 保持 30min, 并对储罐的所有焊缝和连接部位进行检查, 确认无渗漏后, 再继续升压至试验压力的 50% (2.8875bar); 如无异常现象, 其后按规定试验压力的 10% 逐级升压, 直至达到试验压力 5.775bar , 保压 130 分钟, 保压期间压力保持不变, 对所有焊缝进行检查, 无渗漏、无漏气、无可见变形, 对所有插管喷肥皂水, 插管处无气泡产生, 无异常声响为合格。

保压 130 分钟完成后, 降至设计压力 (气密试验压力), 保压足够时间进行检查, 检查期间压力保持不变, 检查完成后缓慢卸压完成气液组合压力试验。

试压合格后, 应及时将排气阀打开, 当压力降至零后, 再打开人孔和深井泵, 用高压水泵向罐外抽水。

九、结论

(1) 大型船载锥形 C 型双耳 LNG 储罐建造工艺经过多个工程项目的不断总结和完善逐步形成了成熟的施工工艺对后续船载 C 型双耳 LNG 储罐的建造具有指导性的意义。

(2) 本项目优化采用 3 段式吊装方案后, 现有 800T+250T 双机台吊即可满足吊装要求, 有效降低工程大型设备投入费用, 节约建造成本。

(3) 本项目采用水上气液组合压力试验, 能降低常规满载水压试验对地基承载力的要求, 有效降低项目对水压试验平台的投入成本。

参考文献

- [1] GB/T150-2024 压力容器 [S].
- [2] 《IGC 规则》[S].
- [3] 中国船级社《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》2022 [S].