

# 双壁燃气供应管在 LNG 船中的制作焊接工艺与密性试验创新

李晓杰

招商局重工(江苏)有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i4.15478

**[摘要]** 针对LNG船双壁燃气供应管(GSP)在 $-163^{\circ}\text{C}$ 工况下的制造难题,本文聚焦焊接工艺与密性试验创新。针对焊接低温韧性劣化、薄壁变形及狭窄空间施焊问题,采用窄间隙热丝TIG焊与激光-电弧复合焊接技术,优化焊丝成分与热输入,使焊缝低温冲击功达125-150J,一次合格率提升至99.2%。创新构建氦气质谱分析仪与DR协同的多模态密性检测体系,通过三阶试验流程实现 $10^{-8}\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ 级微泄漏检测,泄漏率较标准提升50倍。研究为LNG船关键管路安全建造提供技术支撑。

**[关键词]** LNG运输船; 双壁燃气供应管; 低温不锈钢焊接; 密性试验

中图分类号: TF764+.1 文献标识码: A

## Innovation in the Manufacturing, Welding Process, and Tightness Testing of Double Wall Gas Supply Pipes in LNG Ships

Xiaojie Li

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd.

**[Abstract]** In response to the manufacturing difficulties of double wall gas supply pipes (GSP) for LNG ships under  $-163^{\circ}\text{C}$  conditions, this article focuses on innovative welding processes and tightness tests. In response to the problems of low temperature toughness degradation, thin-walled deformation, and narrow space welding in welding, narrow gap hot wire TIG welding and laser arc composite welding technology are adopted to optimize the composition of the welding wire and heat input, resulting in a low temperature impact energy of 125-150J for the weld seam and an increase in the first pass qualification rate to 99.2%. Innovatively constructing a multimodal leak detection system that combines helium mass spectrometer and DR, achieving  $10^{-8}\text{mbar}\cdot\text{L/s}$  level micro leak detection through a third-order experimental process, with a leak rate 50 times higher than the standard. Provide technical support for the safe construction of key pipelines in LNG ships.

**[Key words]** LNG transport ships; Double wall gas supply pipe; Low temperature stainless steel welding; Tightness test

### 引言

随着全球能源结构转型加速,液化天然气(LNG)运输船向大型化、高安全标准升级,燃料输送系统的可靠性成为船舶建造核心课题。双壁燃气供应管(GSP)作为低温LNG输送的关键部件,需在 $-163^{\circ}\text{C}$ 极端工况下实现零泄漏运行,其制造工艺面临多重挑战<sup>[1]</sup>。当前奥氏体不锈钢焊接存在低温韧性劣化、薄壁管焊接变形难控及狭窄空间施焊可达性差等问题,传统密性试验方法亦难以满足IGCCode要求的 $10^{-6}\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ 级微泄漏检测需求。本文针对上述痛点,聚焦焊接工艺优化与密性检测创新,旨在为LNG船关键管路系统安全建造提供技术解决方案。

### 1 双壁GSP在LNG船中的技术挑战与创新需求

#### 1.1 LNG船燃料系统结构与双壁GSP功能定位

LNG船燃料系统由储罐、增压单元、气化装置及输送管路构成闭环回路,双壁燃气供应管(GSP)是连接燃料舱与主机的核心通道。其需在 $-163^{\circ}\text{C}$ 超低温下持续输送LNG,保障结构稳定与介质连续输送,避免材料低温脆性或焊缝失效泄漏。双壁结构采用“内管输送+外管防护”设计:内管直接接触LNG需优异低温性能;外管与内管形成密闭间隙,通过隔热材料减冷损并监测内管泄漏,构成双重安全屏障<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 制造工艺痛点分析

双壁GSP制造面临多重瓶颈。奥氏体不锈钢焊接时,高温热循环易致焊缝晶粒粗化及 $\sigma$ 相析出,显著降低 $-163^{\circ}\text{C}$ 冲击韧性,存在脆断风险。 $\delta\leq 8\text{mm}$ 薄壁管经多层多道焊接后,热输入累积易引发径向收缩与椭圆度超差,影响双壁间隙均匀性。此外,双

壁管环缝位于狭窄空间(间隙 $\leq 15\text{mm}$ ),全位置焊接时焊枪调整受限、视野模糊,易产生未熔合、气孔等隐蔽缺陷,增加质量控制难度<sup>[3]</sup>。

### 1.3 密性试验标准局限性与创新方向

现有密性试验存在局限:传统气压试验对 $\leq 10^{-6}\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ 微泄漏灵敏度不足;水压试验易残留水分, $-163^\circ\text{C}$ 下可能冻裂管路且无法量化泄漏率。而IGCCode明确要求双壁GSP泄漏率 $\leq 10^{-6}\text{mbar}\cdot\text{L/s}$ ,传统方法难以满足。因此需构建高灵敏度、低温适应性的新型密性检测体系,实现微泄漏精准识别与量化评估。

## 2 双壁GSP焊接工艺创新与关键参数优化

### 2.1 低温韧性保障焊接技术

针对双壁GSP内管在 $-163^\circ\text{C}$ 超低温工况下的韧性需求,创新采用窄间隙热丝TIG焊与脉冲协同控制技术,如图1所示,从热循环调控与材料匹配双维度提升焊缝低温性能。窄间隙设计通过减小坡口宽度( $\leq 8\text{mm}$ )降低填充量,配合热丝预热( $80\text{--}120^\circ\text{C}$ )减少母材热输入,实现单道热输入精准控制在 $\leq 1.2\text{kJ/mm}$ ,避免传统焊接因过热导致的焊缝晶粒粗化问题。同步引入脉冲电流(频率 $50\text{--}100\text{Hz}$ )协同控制,利用脉冲峰值与基值电流交替作用细化熔池结晶组织,抑制 $\sigma$ 相、碳化物等脆性相析出。



图1 窄间隙热丝TIG焊

为强化低温力学性能,对ER 316L焊丝进行Mo/Cu微合金化优化:将Mo含量提升至 $2.5\%\text{--}3.0\%$ 以增强晶界稳定性,添加 $0.3\%\text{--}0.5\%$ Cu元素促进奥氏体晶粒细化。通过层间温度 $\leq 150^\circ\text{C}$ 的实时监测与反馈控制,进一步避免热累积导致的组织劣化,为低温工况下的结构安全提供核心保障。

### 2.2 低变形与狭窄空间适应性焊接技术

针对双壁GSP薄壁管( $\delta \leq 8\text{mm}$ )焊接变形与狭窄空间施焊难题,创新采用激光-电弧复合焊头与自适应工装协同技术方案,如图2所示。复合焊头采用 $1064\text{nm}$ 光纤激光器与脉冲MIG焊枪同轴布置,侧方配置送丝喷嘴输送焊丝,焊枪同步喷出氩气作为保护气体;激光以 $300\text{--}500\text{W}$ 功率聚焦于母材形成高能密度熔池,电弧热输入较传统TIG焊减少 $30\%$ ,借助激光快速熔凝与电弧稳定冶金复合特性,显著抑制径向收缩变形,将椭圆度控制在 $\leq 0.5\text{mm/m}$ 。同步开发柔性自适应夹持工装,通过气动顶针实时补偿焊接热变形,确保双壁间隙均匀性偏差 $\leq 1\text{mm}$ 。

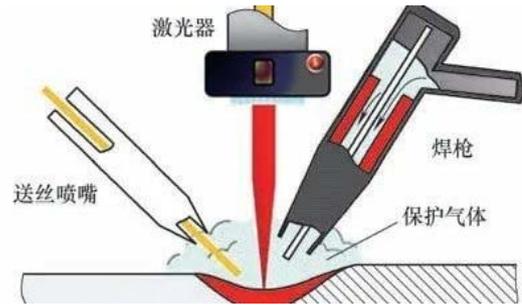


图2 激光-电弧复合焊

针对内外管形成的狭窄环缝空间(间隙 $\leq 15\text{mm}$ ),采用小型化摆动焊枪(枪头直径 $\leq 12\text{mm}$ )配合可调式焊接支架,通过提前预设焊接路径并标记定位基准,结合强光照明与专用观察镜辅助跟踪焊缝位置(定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ),解决人工操作视野受限问题。焊工手持轻量化焊枪,凭借专用工装稳定枪身姿态,引入脉冲电弧协同手动摆动(摆幅 $3\text{--}5\text{mm}$ ,频率 $2\text{--}3\text{Hz}$ ),通过手腕微调确保电弧对中根部与侧壁,精准控制熔池形态以保障熔透性,有效减少未熔合、咬边等缺陷,实现狭窄空间全位置人工焊接的精准可控。

### 2.3 焊接质量验证

采用多维度检测方法验证双壁GSP焊接质量,通过微观组织调控与力学性能测试构建质量保障体系。微观组织分析采用电子背散射衍射(EBSD)技术,对焊缝区及热影响区(HAZ)进行晶体取向成像,重点表征奥氏体与铁素体相比比例及晶粒尺寸分布。优化工艺下焊缝奥氏体相比比例稳定控制在 $92\%\text{--}95\%$ ,铁素体含量 $3\%\text{--}5\%$ ,有效避免 $\sigma$ 相析出(检测阈值 $\leq 0.1\%$ ),晶粒平均尺寸细化至 $8\text{--}12\mu\text{m}$ ,较传统焊接工艺减小 $40\%$ 以上,显著提升组织均匀性。

低温力学性能测试严格按照GB/T229-2020标准执行,在 $-165^\circ\text{C}$ 工况下进行夏比V型缺口冲击试验。测试样本取自焊缝中心及热影响区,每组不少于3个平行试样。关键数据对比如表1所示。

表1 焊接质量验证关键数据对比

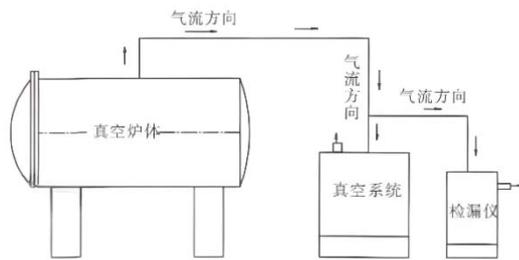
检测项目	传统TIG焊	优化窄间隙热丝TIG焊	标准要求
平均晶粒尺寸	$20\text{--}25\mu\text{m}$	$8\text{--}12\mu\text{m}$	$\leq 15\mu\text{m}$
$-165^\circ\text{C}$ 冲击吸收功(焊缝)	$85\text{--}95\text{J}$	$125\text{--}150\text{J}$	$\geq 100\text{J}$
$-165^\circ\text{C}$ 冲击吸收功(热影响区)	$90\text{--}100\text{J}$	$110\text{--}130\text{J}$	$\geq 100\text{J}$

试验结果显示,优化工艺下焊缝冲击吸收功达 $125\text{--}150\text{J}$ ,热影响区冲击功达 $110\text{--}130\text{J}$ ,均超 $100\text{J}$ 的设计要求,低温脆性风险得到有效控制。

### 3 基于多模态检测的密性试验体系创新

#### 3.1 组合式泄漏检测方法设计

针对双壁GSP微泄漏检测难题,创新构建氦气质谱分析仪与数字射线成像(DR)协同的多模态检测体系,如图3所示。氦气质谱分析仪基于负压法原理,采用氦气作为示踪介质,通用连接方式成本低且可确定漏点位置与泄漏量。真空系统抽真空至检漏仪起测点后,开启含小型分子泵和机械泵的检漏仪协同抽气,检测人员从上部向接口及焊缝吹氦气,漏点处氦气进入检漏仪即触发报警。双层夹套可单独抽真空实现内外壁一次性检测,检测灵敏度达 $10^{-7}$  mbar·L/s级,满足IGCCode对微泄漏的量化要求。



(a) 氦气质谱分析仪原理



(b) 数字射线成像(DR)技术

图3 多模态检测体系

同步集成DR数字射线成像系统,采用160kV高能射线源与平板探测器组合,通过0.1mm像素精度的实时成像技术,直观识别焊缝内部气孔( $\geq 0.2$ mm)、未熔合(深度 $\geq 0.5$ mm)等隐蔽缺陷。两种技术形成“量化泄漏率+缺陷定位溯源”的协同机制,氦质谱实现泄漏量级精准判定,DR提供缺陷形态学证据,共同构建双壁GSP密封可靠性的全维度验证体系。

#### 3.2 试验流程创新

构建“分段预控-整体验证-数字存档”的三阶密性试验流程,实现双壁GSP全生命周期密封质量可控。

阶段1实施单壁管分段氦检,在内管、外管各自焊接完成后,采用局部真空罩法对环缝区域充入0.2MPa氦气,通过便携式质谱仪(灵敏度 $10^{-8}$  mbar·L/s)扫描检测,提前筛查未熔合、气孔等初始缺陷,剔除不合格段避免后续无效组装,单段检测耗时较

传统方法缩短40%。

阶段2开展整体双壁抽真空负压氦检,待双壁结构组装完成后,对内外管间隙抽真空至 $\leq 5$ Pa负压状态,向内管充入5%氦气-氮气混合气(压力0.1MPa),利用氦质谱仪对间隙区域进行全域扫描,精准捕捉微泄漏信号,实现双壁协同密封性能验证。

阶段3通过DR数字成像完成焊缝全数字化存档,采用自动扫描架对所有环缝进行100%射线检测,生成0.1mm精度的数字图像并关联焊缝编号,建立包含泄漏率数据、缺陷位置的三维质量档案,为后续运维提供可追溯的数字化依据。

#### 3.3 工程应用验证

在某174,000m<sup>3</sup> LNG船双壁GSP系统建造中,全面应用本文的焊接工艺与密性检测体系进行工程验证。实船测试覆盖全船32段双壁管路(总长186m),通过三阶密性试验流程与优化焊接工艺的协同应用,取得显著技术成效。

关键性能指标显示,系统泄漏率检测结果稳定控制在 $\leq 5 \times 10^{-8}$  mbar·L/s,较IGCCode要求的 $10^{-6}$  mbar·L/s标准提升50倍,充分验证氦质谱-DR组合检测体系的超高灵敏度。焊接质量方面,得益于窄间隙热丝TIG焊与激光-电弧复合焊技术的应用,全船焊缝一次合格率从传统工艺的92.5%提升至99.2%,大幅降低返工成本。低温工况模拟测试表明,-163℃下管路无泄漏现象,结构稳定性满足实船运营要求,验证了工艺创新的工程实用价值。

### 4 结束语

本文针对LNG船双壁燃气供应管制造难题,通过焊接工艺与密性试验双维度创新形成技术解决方案。焊接端采用窄间隙热丝TIG焊与激光-电弧复合焊技术,优化热输入与材料成分,有效提升焊缝低温韧性与抗变形能力,焊缝一次合格率显著提高。密性检测端构建氦质谱-DR多模态体系及三阶试验流程,实现 $10^{-8}$  mbar·L/s级微泄漏精准量化。实船验证表明,相关技术满足-163℃极端工况需求,泄漏控制精度远超标准。研究为LNG船关键管路安全建造提供了可推广的工艺范式,对提升船舶低温流体输送系统可靠性具有重要工程价值。

#### [参考文献]

- [1]刘雁轩.双燃料机LNG高压供气系统安全性研究[D].江苏科技大学,2020.
- [2]宋吉卫.15.8万吨LNG双燃料原油船设计研究[J].中国造船,2023,64(04):120-126.
- [3]秦俊,孟宁,杨帆.LNG燃气双壁管抽风机选型及计算验证[J].船舶,2021,32(02):87-92.

#### 作者简介:

李骁杰(1991--),男,汉族,江苏南通人,本科,工程师,研究方向:船舶与海工平台轮机,管系建造。