

Welding performance and application practice of duplex stainless steel material in FPSO construction process

Jianrong Zhang

COSCO SHIPPING Heavy Industry (Dalian) Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116113, China

Abstract

With the development and utilization of offshore oil and gas resources, the construction quality and service life of FPSO are directly related to the economy and safety of oil and gas exploitation. Due to its high acidity and high corrosive working environment, duplex stainless steel materials with good corrosion resistance, high strength and weldability are widely used in the construction of FPSO. However, the welding process of duplex stainless steel is complex, and its welding performance and engineering application face many challenges. Therefore, it is of great significance to carry out research on the welding characteristics and application practice of duplex stainless steel for FPSO construction to improve the construction quality and operation efficiency of FPSO, reduce safety risks and reduce maintenance costs.

Keywords

FPSO construction; Duplex stainless steel material; welding property; application practice

FPSO 建造过程中双相不锈钢材料焊接性能及应用实践

张建荣

大连中远海运重工有限公司，中国·辽宁 大连 116113

摘要

随着海洋油气资源的开发利用，FPSO 的建造质量与服役寿命直接关系到油气开采的经济性与安全性。由于其高酸性、高腐蚀性的工作环境中，具有良好耐腐蚀、高强度和可焊接性的双相不锈钢材料被广泛应用到建造 FPSO 中。但双相不锈钢焊接过程复杂，其焊接性能及工程应用面临诸多挑战。因此，开展 FPSO 建造用双相不锈钢焊接特性及其应用实践研究，对提高 FPSO 建造质量和运行效率，降低安全风险、降低维修费用具有重要意义。

关键词

FPSO 建造；双相不锈钢材料；焊接性能；应用实践

1 引言

双相不锈钢从 20 世纪 40 年代在美国诞生以来，已经发展到第三代。在 FPSO 建造使用较多的双相不锈钢无缝管材料为符合美标 ASTM A790 标准，UNS 编号为 S31803 材质，其化学成分：

这种高合金含量材料在抗腐蚀方面，特别是介质环境比较恶劣（如海水，离子含量较高）的条件下，双相不锈钢的耐点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀及腐蚀疲劳性能明显优于普通的奥氏体不锈钢。双相不锈钢是奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的结合，实现了抗腐蚀性和高焊接性能的目标^[1]。

表 1 ASTM A790 理论化学成分（质量分数, Max%）

型号	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
S31803	0.03	2.0	0.03	0.02	1.0	4.5-6.5	21-23	2.5-3.5	0.08-0.20

表 2 ASTM A790 力学性能

型号	抗拉强度 R _m /Mpa (Min)	屈服强度 R _{p0.2} /Mpa (Min)	伸长量 A/%(Min)	硬度 HWB	硬度 HRC
S31803	620	450	25	290	30

【作者简介】张建荣（1982-），男，中国陕西宝鸡人，本科，工程师，从事船舶与海洋工程材料与焊接技术、质量管理研究。

2 FPSO 建造过程中双相不锈钢材料焊接性能分析

2.1 双相不锈钢焊接热影响区 (HAZ) 组织演变

焊接过程的快速升温和冷却使得 HAZ 经历了复杂的热循环，并引起组织结构的改变。铁素体相与奥氏体相之间的平衡被打破，铁素体相因晶粒长大而粗化，而过快的冷却速率会导致马氏体相变。这种微观结构的改变会对接头的强韧性等力学性能产生重要影响，因此，通常在焊接后要求对焊缝及两侧热影响区进行铁素体含量检测，以确保铁素体含量满足标准要求的 35%-70%^[2]。焊接热循环可能导致局部 Cr 元素贫化，特别是在熔合线附近，降低了其抗晶间腐蚀能力，影响其服役寿命。另外，焊接热应力也会在热影响区产生微裂纹，这不仅会降低接头韧性，也会成为腐蚀起始点，进一步加速腐蚀速率。焊接热循环引起的微观结构非均匀性，有可能加剧疲劳裂纹的萌生与扩展。FPSO 在服役过程中需要承受复杂载荷作用，其微观结构演化可能导致疲劳性能退化，进而影响结构安全^[3]。

2.2 焊接裂纹敏感性及预防措施

双相不锈钢由奥氏体与铁素体构成，在焊接过程中，快速冷却不使奥氏体向马氏体转变，这类马氏体相脆性大，在焊接应力下极易产生裂纹。此外，在焊接热循环过程中，铁素体相还可能发生晶粒粗化，导致材料韧性下降，开裂风险增大。焊接速度太快或太慢，焊接电流太大或太小，保护气选择不合理，会引起焊接热影响区 (HAZ) 及焊缝金属组织不均匀，增加裂纹易感性。因此，选择热输入相对较低的氩弧焊 (GTAW)，以及在焊接过程选择合理的焊接参数是控制裂纹产生的一个重要措施。为降低裂纹敏感性，选用低碳、低硫、低磷双相不锈钢焊接材料，选用 ER 2209 直径 2.4mm 的焊丝。在焊接技术上，要严格控制焊接线能量，选择合适的焊接速度、焊接电流、保护气体保护等，避免出现氧化、氢脆现象^[4]。

2.3 焊接接头耐腐蚀性能变化

焊接过程中，焊缝及热影响区 (HAZ) 组织结构与母材有很大差异。焊接接头中存在奥氏体与铁素体比不平衡或贫铬层等微结构改变，导致接头耐腐蚀性能下降，特别是在海洋环境下，焊接热循环使焊缝内部产生残余应力，这些应力可能在材料表面产生微裂纹或缺陷，并可能成为腐蚀起始点。FPSO 在服役过程中，长期在复杂海洋环境与载荷共同作用下，会产生残余应力，加速腐蚀速率，降低材料服役寿命。因此，如何有效地控制焊接残余应力是提高焊缝抗腐蚀能力的一个重要措施。FPSO 建造过程中，需要对焊缝进行打磨、酸洗或钝化等表面处理，以消除氧化皮、杂质，使其具有良好的耐蚀性^[5]。

2.4 焊接变形与残余应力控制

双相不锈钢焊接时，由于热输入引起的局部膨胀与冷却收缩，极易产生变形。这不仅影响了管子尺寸精度，而且

可能引起局部应力集中，从而影响整个系统的水密性和稳定性。因此，针对大口径、薄壁的管对接接头，合理控制焊接顺序，采取对称焊接或分段式焊接等技术措施，可以有效地降低焊接变形，保证管段的几何精度和系统完整性。双相不锈钢焊接接头的残余应力对其力学性能及耐久性能具有重要影响。焊接过程中，热输入、热循环导致焊缝及热影响区产生残余应力，诱发疲劳裂纹萌生与扩展，降低接头疲劳寿命。因此，通常在焊接过程中采用降低焊接电流、电压、焊接速度、选用小直径的焊丝有效的降低焊接热输入以及管路内部冲保护气体（通常采用 98%Ar+2%N 混合气体）的方式有效降低焊接温度，防止焊缝和热影响区发生氧化现象。应力腐蚀 (SCC) 是双相不锈钢常见的失效模式之一。通过控制焊接线能量、预热及后续热处理等技术参数，可有效降低焊缝残余应力，提高接头抗疲劳及应力腐蚀性能。从材料特性、焊接技术等方面对焊接变形和残余应力进行控制。由于双相不锈钢具有较高的热膨胀系数，所以在焊接时要特别注意热输入量的控制。同时，通过合理的工艺设计，如增设支撑、加强筋或加强工艺板、合理布置定位焊点等，可有效地分散焊接应力，减小变形^[6]。

3 FPSO 建造中双相不锈钢材料应用实践

3.1 替代碳钢实现轻量化与免涂装设计

双相不锈钢具有高强耐腐蚀特性，屈服强度比碳钢高一倍，可大幅降低材料消耗，同时满足管路系统耐腐蚀和高强度要求。如采用双相不锈钢代替碳钢，对 FPSO 的管系进行优化设计，实现重量的大幅降低。双相不锈钢具有良好的抗腐蚀性，使其不需要再进行涂层保护就能适应海洋环境。FPSO 采用免涂装设计，可大大缩短建造周期，降低涂层缺陷带来的腐蚀风险，延长管路系统寿命。FPSO 由于省去了涂装工序，在施工过程中减少了涂装前和涂装后的表面处理、涂料固化等工序，减少了施工的复杂度和工期。同时，由于双相不锈钢具有较好的焊接性能，因此对其进行优化可以进一步提高焊接效率和保证焊接质量。

3.2 焊接技术标准化与质量控制

通过制定焊接技术、严格按照焊接技术进行焊接工艺评定试验，对焊接电流、电压、速度、保护气流量等关键技术参数进行了详细的规定，保证了焊接过程的稳定与一致性。例如，根据双相不锈钢材料的特点，采用氩弧焊 (GTAW)、焊接过程采用保护气体、较小的电流、电压和焊接速度等小线能量焊接技术，不仅可以避免焊缝金属及热影响区产生过热粗化，而且可以保证接头的性能。在此基础上，引入自动焊接机器人等先进焊接装备，提高焊接技术参数的精度与重复性，降低人为因素对焊接质量的影响。对焊接过程进行严格的质量监控，从焊接前准备到焊接后的检测。焊接前对母材及焊接材料进行严格的化学成分及力学性能检测，以保证材料满足选择满足设计要求。然后，利用超声、射线等无损

检测手段，对焊缝进行无损检测，保证焊缝内部无裂纹、未熔合等缺陷。FPSO 的建造实践表明，采用双丝焊、多丝焊等先进的焊接技术可以显著提高焊接效率，降低焊接变形。同时，采用管段预制方法，把复杂的焊接任务分解成若干标准化的模块，使得焊接作业更标准化、更高效。另外，通过对焊工开展定期培训与评估，保证他们熟练掌握标准化的焊接技术及质量控制要求，使焊接队伍的整体素质与施工能力得到进一步提高。

3.3 焊接缺陷修复与寿命评估

采用相控阵超声（PAUT）、数字射线（DR）和常规射线（ γ 射线）等先进无损检测技术，可实现对内部焊缝缺陷（如裂纹、未熔合等）的准确定位及尺寸定位。通常，双相不锈钢焊缝要求在焊后 72 小时进行无损检测，其目的是为了使焊缝内部应力充分释放，提高无损检测的准确性。焊缝缺陷的修复，首先要对缺陷的类型、尺寸、位置（深度、距离焊缝中心距离等）、数量等进行详细记录，其次制定缺陷修复工艺。通常，缺陷修复要选择持有船级社焊工证书且经验丰富焊工进行焊接，焊接前对缺陷焊缝局部预热、预热温度要比焊接工艺要求的层间温度提高 50° 左右，采用机械加工方式清除缺陷，并采用着色（PT）探伤确认缺陷已被彻底清除后再开始焊接修补。焊接应严格控制焊接线能量及冷却速度，以防止产生新缺陷或引起母材热损伤，必要时每一层焊接后进行着色（PT）检测，确保焊缝每一层焊接质量合格。规范的修补既能恢复焊缝的完整性又能保证焊缝性能达到原设计要求，但是，同一焊缝最多允许焊接修复 2 次。针对 FPSO 全寿命周期的焊接接头开展实际检测与性能评价，通过详细记录建造及运行期间焊接缺陷修复情况，包括缺陷种类、修复方式及修复后的检验结果，用数据来支持制定合理的维修方案。

3.4 新材料与新技术的工程化应用

随着技术不断进步，新型双相不锈钢通过成分设计进一步降低碳含量，增加 Cr、Mo 等合金元素含量，显著提高材料抗腐蚀性能及抗应力腐蚀性能。该材料可保证 FPSO 长

时间稳定运行，降低因腐蚀引起的维修费用及停工期。同时，高强度双相不锈钢在满足结构强度要求的同时，可减小材料厚度，实现 FPSO 的轻量化设计，降低建造成本，降低运行能耗。利用高能量密度的先进激光焊接技术，在降低热输入的同时，可有效控制焊接变形及热影响区尺寸。激光焊接具有精度高、自动化程度高等特点，可有效降低人为因素对焊接质量的影响。在线热处理等先进热处理技术可有效消除焊缝残余应力，改善接头微观结构，改善接头抗疲劳、抗腐蚀等性能。同时，采用等离子喷涂等先进表面处理技术，进一步提高焊接接头的耐磨、耐腐蚀性能。

4 结语

随着海洋油气勘探向深海、复杂环境发展，FPSO 作为核心装备，其建造材料性能的提高至关重要。双相不锈钢具有良好的耐腐蚀、高强度等特点，是实现 FPSO 轻量化、长寿命设计的关键。随着材料与焊接技术的不断进步，双相不锈钢在海工装备中的应用将会越来越广泛，从而推动 FPSO 建造技术的进步，为我国海洋油气资源的高效开采提供更加可靠的保证。

参考文献

- [1] ASTM A790. Standards Of Specification For Seamless And Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe 2023
- [2] NACE MR0175/ISO 15156-3. Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H₂S-containing Environments in oil and gas production.
- [3] 孙德一.双相不锈钢化学品船建造快速搭载工艺研究及应用[J].广东造船,2018,37(02):58-60+41.
- [4] 丁振.化学品船双相不锈钢的建造工艺研究[J].中国水运,2018,(05):42-45.
- [5] 何江华.38000吨旗舰型双相不锈钢化学品船设计与建造技术研究.上海市,沪东中华造船,2017-07-27.
- [6] 马延德,王言英.FPSO与常规油船设计建造的比较分析[J].哈尔滨工程大学学报,2008,(10):1030-1035.