

# 海底管道不锈钢复合管焊接工艺分析

姚小彬 葛超 崔同新 贾江涛 徐利军

(海洋石油工程(青岛)有限公司 山东青岛 266520)

**[摘要]** 本文从异种材料冶金相容性与界面控制难题、苛刻服役环境下的焊接接头抗腐蚀性保障难题、海工焊接操作受限与变形控制挑战、焊接接头质量控制与无损检测的特殊要求4个方面着手,首先分析了海底管道不锈钢复合管焊接难点。在此基础上,本文探讨了海底管道不锈钢复合管焊接工艺,主要是焊接材料与热输入精细化控制技术、保障焊接接头耐蚀性的特殊工艺措施、高精度及高稳定性焊接方法、焊接质量保障体系。希望通过本文的分析,能够为相关从业人员提供一定的参考。

**[关键词]** 海底管道; 不锈钢复合管; 焊接难点; 焊接工艺

## 引言

海底管道是保障海洋油气资源高效、安全集输的“生命线”。随着勘探开发向深水、超深水及含腐蚀性介质(如H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>)区域扩展,管道材质与结构完整性面临前所未有的挑战。不锈钢复合管(如X65/316L)凭借其基层碳钢的强度优势与复层不锈钢优异的耐蚀性能,成为解决这一难题的关键路径,在海底管道铺设与维修工程中应用日益广泛。然而,复合管材固有的异质特性,叠加严苛的深海服役环境(高压、低温、腐蚀、动态载荷),使得其焊接成为整个管道工程中的技术瓶颈与高风险环节。因此,需明确焊接难点,总结具有针对性的焊接工艺。

## 1 海底管道不锈钢复合管焊接难点分析

### 1.1 异种材料冶金相容性与界面控制难题

不锈钢复合管是在耐腐蚀性能优良的不锈钢复

层和具有较高综合力学性能的碳钢或低合金钢基层之间连接而成的复合钢板。基材和复层因为化学性能和物理性能的巨大差异而给焊接带来了基本难题。1)不锈钢复层和钢材的线膨胀系数相差极大,焊接过程中由于温度变化剧烈及温度分布极不均匀导致的界面区域的热应力过大,极易造成复层的剥离脱落。2)由于焊接过程所经历的高温将使高含量碳元素由高碳的碳钢基材向低碳含量的复层迁移,其碳迁移扩散在熔合线中形成铬的碳化物析出带,使部分区域贫铬及此处的韧性和耐蚀能力急剧恶化。而且碳迁移会改变熔合区域化学成分和组织的变化,也增加了在熔合区域出现淬硬的马氏体组织的倾向。由于马氏体组织硬度高,塑性差,为裂纹的起源提供了条件。3)由于熔池中两种金属成分的混合作用可能出现焊接稀释作用,使复层不锈钢熔入大量基层金属成分,造成对原不锈钢耐蚀性能的破坏或复层元素污染增碳变脆。主要冶金因素对比如表1所示。

表1 不锈钢复合管基层与复层关键物理冶金特性对比

特性	基层(典型碳钢)	复层(典型不锈钢)
热膨胀系数 ( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ )	~13	~18(奥氏体型)
导热系数 ( $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ )	~50	~15
熔点 ( $^{\circ}\text{C}$ )	~1500	~1400
碳当量	相对较高	相对较低

**作者简介:** 姚小彬 河北省唐山市人,海洋石油工程(青岛)有限公司,高级技师。

### 1.2 苛刻服役环境下的焊接接头抗腐蚀性保障难题

管道接头在服役工况所处的海洋环境条件非常恶劣，对耐蚀性提出了很严格的要求。海水含有一定量的溶解氧和氯离子，其本身具有一定的腐蚀性；异种金属对接存在电位差，在可导电的电解质溶液中极易发生电偶腐蚀电池，焊缝作为电化学反应极为活跃的区域；由于焊缝复合堆焊层部位可能存在的成分不均匀，复合焊缝的过渡层和复层可能存在的贫铬区均增加接头应力腐蚀开裂和点蚀的敏感性；焊缝热循环（尤其是奥氏体不锈钢焊缝）的某些温度区间内缓慢冷却形成的铬碳化物析出（通常奥氏体不锈钢复层堆焊工艺与热处理工艺会发生冷裂，细裂纹在敏化环境

下形成淬硬脆裂）引起热影响区奥氏体不锈钢焊接接头的热时效和敏化，以及碳的迁移形成的贫铬区使焊接接头的晶间腐蚀敏感性增强；深海环境的高压低温也可能影响腐蚀的物理化学作用；为防止管道的腐蚀经常使用阴极保护手段（外加电流保护法或牺牲阳极法阴极保护系统），保护电流控制过高会引发焊缝和复层的析氢反应，使氢原子析出进入基体引起氢脆性开裂，过低的保护电流无法对腐蚀起到有效的防护作用；焊缝或复层的表面气孔/裂纹在活性离子环境下为电化学腐蚀的“集电极”或腐蚀的开始点，容易引发腐蚀开裂。腐蚀过程复杂，主要的腐蚀类型如表2所示。

表 2 海底管道不锈钢复合管焊接接头需防范的主要腐蚀类型

腐蚀类型	主要特征与诱因
电偶腐蚀	异种金属电位差驱动在接头区域加速腐蚀
点蚀与缝隙腐蚀	氯离子引发，接头缺陷、几何不连续处优先腐蚀
晶间腐蚀	焊接热影响区敏化后晶界碳化铬析出导致贫铬区腐蚀
应力腐蚀开裂	腐蚀介质、焊接残余拉应力及特定材料组织结构联合作用
氢致开裂 / 氢脆	阴极保护过负电位析氢或环境中氢渗入金属导致脆性开裂

### 1.3 海工焊接操作受限与变形控制挑战

海上管道铺管焊接受制约因素和变形控制更难于陆地焊接：焊缝焊接在铺管船甲板上，受海上风浪流等海况的影响，铺管船处于不停地摇摆、晃动的动态状态下，造成焊枪相对于管口位置的动态位移量大。动态位移对焊接姿态稳定的影响，使得熔池和电弧不稳定，造成焊接过程中的焊接质量不稳定性。管道铺设的过程中受到较大的张力作用，管道受到的动态负载作用和焊

接热应力共同作用，容易造成管口组对应力过大的影响，从而使组对精度破坏，圆度发生变化以及焊接过程中错边，容易产生焊接未熔合等缺陷；海底管道一般管径大壁厚厚（壁厚20mm以上），焊缝采用多层多道焊接时，累计的热输入引起过大的收缩变形如周向和轴向收缩变形，过大剩余应力对结构安全和疲劳寿命的影响显著；管道环缝焊接包括了焊位仰焊等困难的位置，焊接位姿变换增加工艺控制的难度和工艺的复杂程度。主要干扰与控制挑战见表3。

表3 海底管道海上焊接操作与变形控制的主要挑战因素

挑战类别	具体表现与影响
环境干扰	船舶运动导致焊枪位姿不稳，电弧偏移，熔池扰动
铺管张力与载荷影响	动态负载改变管口组对间隙与错边，增大装配偏差与应力
厚壁多层焊变形累积	热输入循环引起显著周向收缩与角变形，累积残余应力
困难位置焊接	环缝仰焊位置操作困难，熔池控制不易，易产生缺陷
水下焊接局限	水深压力、能见度低、环境温度限制焊接方法与质量可靠性

### 1.4 焊接接头质量控制与无损检测的特殊要求

安全保护的重中之重是确保检测出不锈钢复合管焊缝内的各种缺陷和潜在损伤。不锈钢复合板对接焊接接头内缺陷及潜在损伤的检测尤为

困难。首先，最主要是复层与基层的复合材料分层以及熔合区域未熔合缺陷等。缺陷平行于探伤面、处于不同的异质材料接合区，常规单一的超探方法容易漏检或误判。其次，由焊接热影响区

组织的敏化和碳的迁移等，造成材料微观劣变引起的材质缺陷（贫铬区），微裂纹用传统无损检测方法很难或不能及时发现。这些缺陷在海水中一旦扩展都将是致命的。管道较厚而焊缝无损检测需要达到良好的透声性以及近表面的可检性，

微小缺陷在海洋环境下工作将是非常危险的，对无损检测技术要求极为严格。海上铺设的空间有限、工期紧，迫切需要实现自动化，高效、快速的在役管道无损检测技术。常规无损检测方法存在的缺陷及应重点解决的问题见表4。

表4 不锈钢复合管焊接接头无损检测难点与应对方向

检测难点类型	表现与应对考量
界面缺陷难以可靠识别	界面未熔合和剥离，需采用低频特殊角度探头或超声波相控阵技术
微观材质劣化难以探测	碳迁移贫铬区、晶间腐蚀敏感区，需结合金相或专用电化学分析
厚壁焊缝内部缺陷	深层次缺陷位置判断精度要求高，需TOFD技术深度补偿技术
微小缺陷危害性巨大	微小气孔、微裂纹必须高灵敏度检测技术保障
海洋环境自动检测限制	需要高抗干扰能力，高稳定性自动化检测设备适应船载环境

## 2 海底管道不锈钢复合管焊接工艺关键与技术

### 2.1 焊接材料与热输入精细化控制技术

消除异种焊接材料金属的冶金相容性的方法是合理选择焊接材料并控制热输入细化。其中焊接材料是至关重要的关键参数。常用高镍基合金焊材（如ERNiCrMo-3等类型），它具有良好的冶金相容性，能减少碳自基层向熔敷金属的扩散并降低熔合区脆性马氏体的含量，并能减小熔合区的界面剥离倾向；其线膨胀系数介于碳钢与奥氏体不锈钢之间，能有效降低热焊接及冷却过程中

产生的焊接应力；其良好的塑韧性也能吸收部分焊接应力，从而增强接头的抗裂性。热输入的控制是关键的另一因素。热输入太大会导致焊接热影响区扩大并加剧碳的转移、晶粒长大和产生变形；热输入太小会造成焊接熔合不良甚至冷裂纹开裂，必须对焊接电流、电弧电压及焊接速度等焊接工艺参数组合进行优化选择，寻求熔透充分和成形良好的热输入最小的条件。焊接材料和热参数的选择直接决定了其冶金匹配性效果，表5简要列出了重点控制因素。

表5 焊接材料与热输入精细化控制关键要素

控制要素	目标与作用
高镍基合金焊材	抑制碳迁移，减少脆性相，缓解热应力，提高界面结合力与抗裂性
低热输入参数组合	最小化热影响区，控制碳扩散，减少变形与残余应力，保持组织细化
严格层间温度控制	防止晶粒粗化，避免热影响区性能下降，控制焊接变形累积
高纯度惰性气体保护	防止焊缝氧化、氮化，保证熔敷金属成分与耐蚀性，减少气孔缺陷
充分内保护	确保根部及复层焊缝背面成形良好，无氧化，维持复层耐蚀性

### 2.2 保障焊接接头耐蚀性的特殊工艺措施

深海环境下的焊接接头焊接工艺均需有相对应的耐腐蚀保证措施，首先在于接头设计，在焊接过程中尽可能降低基层碳钢对复层不锈钢焊缝的合金污染，一般通过隔离焊道（Buttering或WeldOverlay）的形式实现。先使用与复层组元相等或者过渡相组元的耐蚀合金（如309L或镍基合金），在基层的坡口表面堆焊一层或多层，形成一个冶金隔离层，并且后续的复层在隔离层上进行焊接，从而最大程度减轻复层焊缝被基层稀释的程度。其次体现在焊接顺序上，一般奥氏体不锈钢复层焊接顺序如下：先完成基层碳钢焊缝，

再在基层与复层焊接线之间堆焊一层隔离层，最后堆焊复层不锈钢，这样可以在一定程度上控制对复层焊缝的热影响程度，从而避免过度敏化的情况发生。对于奥氏体不锈钢复层焊缝的热敏化问题，需要控制焊接热输入以及层间温度，同时要确保冷却速度足够快，使焊接接头的热影响区快速冷却通过析出碳化铬的敏感温度区域（一般该温度区域为450~850℃），从而降低晶间腐蚀的倾向。此外，为了在焊缝及热影响区增加耐蚀性，完成焊接后需要对焊缝及热影响区进行彻底处理，去除焊渣、飞溅、氧化色等，必要时采用酸洗钝化的方法，即通过酸将表面的贫铬层以及

铁污染进行溶解,从而使其形成化学性质稳定、致密的钝化层,恢复以及提高耐点蚀能力与均匀腐蚀能力。

### 2.3 高精度及高稳定性焊接方法

基于海上施工环境的焊接要求,将对焊接精度和稳定性提出更高的要求,高精度、高稳定的焊接工艺方法必定会得到必然的应用。GMAW和埋弧焊(SAW)等具有参数受控程度高、易于与铺管船自动化控制系统集成的技术特征,作为海底不锈钢复合管的首选焊接方法,利用精密送丝技术和稳定电弧使焊缝熔敷金属的组织成分和熔合比均匀一致。针对铺管船动态摇摆造成焊枪偏离的问题,必定需要采用先进的传感和实时补偿技术,才能保证焊枪始终保持良好的电弧指向性,在熔池跟踪过程中,通过实时传感器持续跟踪焊枪相对焊缝坡口的偏移量,将电弧精确定位于焊缝设定轨迹上。对于厚壁管焊接形成的形变风险,主要通过多层多道焊接的智能焊道控制及严格控制每层每道焊接时层间温度来实现,必要工装夹具约束措施可减少角变形积累。

### 2.4 焊接质量保障体系

焊接质量管理体系的建立是海底不锈钢复合管焊接成功的重要保障。焊接质量管理体系建立于焊接工艺评定(WPS/PQR)阶段,在PQR阶段对选定的工艺参数以及材料组台进行焊接并验证是否能够生产出达到预定力学及防腐性能的接头,认可合格的焊工以及施焊人员按照工艺合格的焊接工艺进行焊接,以工艺的保持性来说是以合格

的焊工和施焊人员的基础;通过对整个焊接过程的全检测保证焊接过程的每个细节;通过数据记录系统记录焊接电流、电压、速度、热输入以及焊缝层间温度,通过视频记录整个焊接位置与熔池状态以确保操作过程可追溯并且不偏离工艺要求。

### 3 结语

本文综合考虑海底深水不锈钢复合管的焊接异种材料的冶金匹配性、苛刻腐蚀条件、海工操作受限以及质量控制上的挑战,有针对性地提出高匹配性焊接材料的选用、耐蚀性焊接工艺的应用、自动化焊接技术以及综合质量保证措施等关键技术的解决方案。攻克上述的焊接技术问题,是确保深海能源开发安全、高效的集输的重要基础。面向未来,智能化焊接技术和材料技术的有机结合将带来更多海底管道的可靠性保障。

#### ◆参考文献

- [1]陈亮.海底管道不锈钢复合管焊缝的全自动超声检测工艺认证[J].无损检测,2021,43(01):53-55.
- [2]王维,余建星.海底不同材料的双金属复合管力学性能分析[J].港工技术,2020,57(05):34-39.
- [3]刘飞.基于近场动力学的海底不锈钢管道的缝隙腐蚀研究[D].武汉理工大学,2019.
- [4]汤炳然,郭智慧,骆承树,等.不锈钢复合管膨胀弯安装技术[J].化工管理,2019,(04):160-161.
- [5]芦红威,王喆.海底输气复合管道焊接工艺[J].船海工程,2015,44(05):75-79.

收稿日期:2025-07-13 修回日期:2026-01-31

(上接140页)

#### ◆参考文献

- [1]蔡向阳.浅析石油化工工艺管线安装技术与质量控制[J].石化技术,2025,32(04):113-115.
- [2]温家铭,张国伟,孙强,等.海洋平台镍基复合管线安装焊接的典型做法[J].石油和化工设备,2025,28(02):134-138.
- [3]何炳秀.海洋石油平台栈桥管线布置及安装方案[J].石油和化工设备,2025,28(05):168-171.
- [4]王金鹤.论石油化工工艺管线安装技术及质控对策[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(24):172-174.

收稿日期:2025-07-14 修回日期:2026-01-31