

海洋石油钻井管道结构焊接相关问题研究分析

韩兴忠（中海油能源发展装备技术有限公司，天津 300450）

摘要：在海洋石油钻井工程中，管道作为输送石油、天然气等资源的关键基础设施，其结构的安全性和可靠性至关重要，而焊接技术作为管道结构连接的重要手段，直接影响到管道的整体性能。海洋环境具有高腐蚀性、复杂的温度和压力条件，这对焊接质量提出了严苛的要求。本文通过对海洋石油钻井管道结构焊接的挑战进行研究，了解常用焊接工艺中的要点，在此基础上提出海洋石油钻井管道结构焊接实践措施，以此来提高海洋石油钻井管道结构焊接的安全及质量。

关键词：海洋石油钻井管道；管道结构；焊接工艺

0 引言

随着海洋油田开发的深入，管道结构的复杂性和环境条件的恶劣性不断增加，对焊接技术的要求也随之提高。海洋环境中的高湿度、盐雾腐蚀以及海流冲击等因素，使得焊接接头的强度和抗腐蚀性能面临严峻挑战。因此，对海洋石油钻井管道结构焊接相关问题的研究具有重要的现实意义，不仅直接影响到管道系统的使用寿命和可靠性，还关系到整个海上油气开采作业的安全和经济效益。

1 海洋石油钻井管道结构焊接的挑战

1.1 施工环境的复杂性

海洋石油钻井管道焊接面临的最大挑战之一是海洋环境的复杂性对焊接质量的影响，海水的高腐蚀性是首要考虑因素，盐分和湿度的存在可能导致焊接材料和焊缝的快速腐蚀，降低管道的整体强度和耐久性。并且深海环境中的高压和低温条件进一步增加了焊接的难度，焊接过程中由于温度剧烈变化，容易产生裂纹或焊缝脆化，影响焊接质量^[1]。

1.2 材料的特殊要求

对于海洋石油钻井管道焊接中的材料，需要满足极端海洋环境下的高强度和耐腐蚀性要求。管道材料必须具有优异的耐腐蚀性能，以此来抵御长期暴露在海水中的腐蚀作用，特别是在含盐量高、温度波动大的深海环境中。并且所选择的材料还需要具备足够的强度和韧性，能够承受高压、高应力的工况，确保管道在深海钻井过程中不发生断裂或泄漏。目前合金钢和特殊不锈钢材料通常被用来制造海洋石油钻井管道，但这些材料的焊接难度较大，容易产生如裂纹、气孔等焊接缺陷。在此情况下对于石油钻井管道结构焊接必须充分考虑材料的特殊性质，选择合适的焊接参数和预热、后热处理方法，使焊接质量满足严苛的

海洋环境要求。

2 海洋石油钻井管道结构主要的焊接工艺

2.1 手工电弧焊

手工电弧焊（SMAW）在海洋石油钻井管道结构中是较为常用的工艺，由于手工电弧焊焊接方法操作简便、设备相对轻便，特别适合复杂的结构和受限空间，常用于海上平台和钻井管道的焊接。在这种环境下，焊工可以根据实际操作需求灵活调整焊接电流和电压，适应不同的材料和焊接位置。SMAW 使用焊条作为电极，焊条熔化形成熔池和焊缝，同时焊条外部的药皮分解产生的气体和熔渣能够有效隔离熔池与空气接触，防止氧化和氮化，保证焊缝的机械性能。SMAW 的主要优势在于其操作的灵活性和适应性，能够在各种焊接位置和条件下进行稳定的焊接，这种工艺不需要复杂的设备，因此非常适合海上平台和钻井作业中需要应对多变环境的情况。并且 SMAW 对材料的适应性强，能够焊接各种碳钢、不锈钢和合金钢，特别是在处理较厚材料或需要多道焊接时，SMAW 可以通过调节焊接电流和焊条直径来优化焊缝成形和熔深，确保焊接接头的强度和耐久性^[2]。

2.2 埋弧焊

在海洋石油钻井管道结构焊接中，埋弧焊（SAW）是自动化程度较高的焊接工艺，能够以较高的焊接速度在大直径管道上形成连续且均匀的焊缝，SAW 采用熔化极和焊剂覆盖的方式，使电弧在焊剂层下燃烧，避免了电弧暴露在空气中，在焊接过程中电弧被焊剂覆盖，焊缝金属与空气隔绝，这极大地减少了焊缝的氧化和氮化现象，从而提高了焊接金属的纯净度和抗腐蚀性能。SAW 可以通过预设焊接电流、电压和焊接速度等参数，精确控制焊缝的热输入，这对于厚壁管道的焊接尤为重要，有助于防止焊接过程中产生过热

和变形问题。在管道结构焊接中 SAW 的焊接热输入集中且稳定，焊缝成形良好，能够实现深熔透，确保焊缝的机械强度。同时，埋弧焊具备较高的焊接效率，适合长时间的连续焊接，特别是在大直径和厚壁管道的长缝焊接中，SAW 的热输入稳定，可有效控制焊接变形，确保焊接质量的一致性，这些工艺特点使得 SAW 在要求高强度和高质量焊接的大型海洋管道项目中具有显著的优势。

2.3 气体保护焊

在海洋石油钻井管道结构中，气体保护焊主要应用于精度要求较高的焊接，特别是在需要高质量根部焊接时。其中 GMAW（熔化极气体保护焊）和 FCAW

（熔化极药芯焊丝气体保护焊）通过惰性或半惰性气体的保护，有效防止焊接过程中空气中的氧气、氮气等杂质进入熔池，减少了焊缝的氧化和气孔缺陷。气体保护焊的焊接效率较高，适用于长距离管道的自动或半自动焊接。在实际操作中，GMAW/FCAW 可通过调整焊接参数，如焊接电流、电压和焊接速度，精确控制焊缝的成形和熔深，确保焊缝的机械性能满足设计要求。同时，这种焊接方法在面对海上强风时，利用气体流量和焊丝速度的调节，能够有效抵抗外部环境对焊接过程的干扰，保持焊缝质量的稳定性。因此，GMAW/FCAW 成为海洋工程中广泛应用的焊接技术，能够满足高效率和高质量焊接环境下的应用要求^[3]。

3 海洋石油钻井管道结构焊接工艺的应用

3.1 工程概况

在某海域进行的一项重大海洋石油钻井工程中，施工团队的主要任务是对平台上关键输油管道进行焊接连接，确保其在高压、高腐蚀环境下的长期稳定运行。工程要求极高的焊接质量，焊缝需达到完全无缺陷状态，以防止管道泄漏。由于深海作业的特殊性，为了保证焊接稳定性以及满足对不同材质管道的焊接工艺要求，需要精细的焊接顺序设计和多种焊接工艺的综合应用，在焊接工艺的选择上主要有手工电弧焊及埋弧焊，确保在不同环境条件下达到最佳的焊接质量和强度。

3.2 焊接准备

在海洋石油钻井管道结构焊接中，需要根据工程需求来进行焊接准备，合理选择焊接材料，并进行材料处理。其中坡口加工在海洋石油钻井管道焊接中直接影响到焊缝的质量和结构的整体强度，坡口设计必须考虑管道的厚度和所使用的焊接方法，确保在焊接

时有足够的熔合面积，从而形成均匀而坚固的焊缝。常见的坡口形状包括 V 形和 U 形，选择合适的坡口角度和根部间隙有助于控制焊接熔池的流动性，防止焊缝出现未熔合、夹渣等缺陷，并减少焊接应力和变形，确保焊接后的管道能够承受海洋环境中的复杂应力条件。而清洁与预处理在焊接准备中同样至关重要，决定了焊接过程的顺利进行和焊缝的最终质量，坡口及其周边区域的清洁工作主要是为了去除油污、锈迹、水分等杂质。根据实际情况，进行适当的预热处理能够有效减少焊接应力，特别是在低温或高强度材料焊接时，预热可以避免热影响区的脆裂，改善焊缝金属的韧性和抗裂性^[4]。

该项目选用的管道材料为 X70 高强度钢，X70 钢材具有较高的屈服强度，同时具备良好的焊接性能和韧性，为配合 X70 钢材的特性，选用了与之匹配的 E7018 低氢焊条和 SAW 用焊丝，保证焊接过程中焊缝的强度和韧性。低氢焊条具有很低的氢含量，这有助于防止氢致裂纹的形成，而高强度焊丝则能提供与母材相匹配的高强度焊缝金属。该项目中使用的管道管径为 42 英寸，壁厚为 1.5 英寸，为了确保焊缝的充分熔合和结构强度，坡口设计采用了双 V 形坡口。V 形坡口的顶角设定为 60°，根部间隙控制在 3mm 左右，在焊接时确保焊材能够充分填充坡口，同时在焊接过程中获得稳定的熔池流动性。坡口的加工采用机械加工方法，使用自动化的坡口机进行精确切割，坡口的加工速度设定为每分钟 15—20mm，保证切割面光滑平整，没有毛刺或不规则的切口，避免焊接时产生未熔合或夹杂物的缺陷。由于海洋环境中盐分和湿度较高，焊接前的清洁工作尤为重要。在本项目中，焊接区域的清洁采用了喷砂处理，使用粒径为 0.5—1mm 的钢丸进行表面清理，去除金属表面的氧化皮、锈迹和油污。喷砂压力设定在 6—8bar 之间，清理速度为 50—60mm/min，确保清洁的同时不损伤坡口表面。清洁后，立即进行了焊接区域的预热处理，由于 X70 钢材的强度较高，焊接过程中容易产生冷裂纹，因此预热温度设定在 150—180℃ 之间，并保持至少 30min，预热使用了电加热带，均匀缠绕在管道的坡口周围，通过温度控制系统精确调节和监测温度，在整个预热过程中，使用红外温度计进行实时监控，确保预热温度在规定范围内。

3.3 焊接工艺

在海洋石油钻井管道的焊接过程中，焊接工艺参

数的精确控制是确保焊接质量的关键，其中焊接电流和电压的设定直接影响焊缝的成形质量和力学性能，过高的焊接电流可能导致焊缝金属过烧、熔池过大，从而引发焊接缺陷如气孔和裂纹，而过低的电流则可能导致焊缝熔合不良或未焊透。

在这一过程中，根据所选材料、焊材和具体的环境条件来设定焊接电流、电压、焊接速度等参数，合理的参数设定可以确保焊接过程中热输入的精确控制，避免母材过热导致的金相组织变化，进而防止焊缝出现如晶粒粗大、脆化等问题。并通过优化参数，提高焊接的效率和质量，减少焊接缺陷的产生，确保管道能够在严苛的海洋环境中长期稳定运行^[5]。

同时，焊接顺序的合理安排是确保海洋石油钻井管道焊接成功的要点，合理的焊接顺序可以有效减少焊接应力和变形，在现场作业中，根据具体的环境条件调整焊接顺序，还可以避免环境对焊接过程的干扰，提高焊接的整体质量和稳定性。

该项目中，在采用埋弧焊进行工厂预制焊接时，基于X70钢的特性以及焊材的要求，焊接电流被设定在750A左右，电压为32V，以此来提供足够的热输入以确保焊缝的充分熔合，同时避免母材过热导致的晶粒长大或组织变化。在现场安装过程中，特别是根部焊接时，则采用手工电弧焊(SMAW)，由于现场环境条件的复杂性，焊接电流控制在140A左右，电压为24V。

为了避免热输入过高导致母材脆化，焊接速度保持在适当范围内，为了进一步提高焊接质量，焊接前对每一根焊条进行了烘干处理，温度设定在300℃，时间为1h，确保焊条内部的水分完全被驱除。在该项目中采用了多层焊接技术，尤其是在焊接厚壁管道时，为了防止层间温度过高导致焊缝金属性能下降，每一层焊接完成后，层间温度被严格控制在150—200℃之间。

在焊接过程中，焊工使用红外温度计进行实时检测，并根据需要调整焊接节奏，确保层间温度始终处于最佳范围内。在本项目中，为了减小焊接残余应力，焊接采用了对称焊接的方式，即从管道两侧同时开始焊接，逐渐向中间汇合，这种方式可以均匀分布热量，减少由于不均匀加热导致的结构变形。并且在焊接较为复杂的接头或多分支管道时，采用了跳焊技术，其中在焊接支管与主干管道的连接部位时，先焊接几处小段，然后转移到另一处进行焊接，再回到原先的部

位继续焊接，这样做不仅可以避免局部过热，还能有效分散焊接应力，降低焊缝开裂的风险。

3.4 防腐处理

海洋石油钻井管道结构的防腐措施在确保管道长期稳定运行方面至关重要，焊接完成后，防腐涂层处理是首要步骤，通过在管道表面涂覆一层耐腐蚀的材料，防止海水、盐分以及其他化学物质对金属表面的侵蚀，这种涂层不仅可以延长管道的使用寿命，还能有效防止焊接点处的腐蚀风险。而阴极保护技术也是常用的防腐手段，尤其适用于深海环境，通过施加外部电流或安装牺牲阳极，阴极保护可以在管道表面形成电化学保护层，进一步阻止腐蚀反应的发生。合理运用防腐措施，可以大大提高管道的耐久性和安全性，确保海洋石油钻井系统的持续可靠运行。

在该项目中管道焊接完成后立即进行了喷砂处理，去除焊接过程中产生的氧化皮和飞溅物，随后进行了三层环氧树脂涂层的涂覆，用来增加管道的耐腐蚀性能。除了涂层处理，该项目还采用了电化学防护技术。管道的外部安装了牺牲阳极，这些阳极由锌合金制成，能够在海洋环境中提供有效的阴极保护，防止管道表面的腐蚀。

4 总结

海洋环境恶劣，对管道结构的焊接质量提出了极高的要求，焊接缺陷可能导致严重的安全隐患和经济损失。在此情况下，深入研究焊接工艺、焊接顺序，以及防腐措施等技术，不仅能够提升焊接接头的可靠性和耐久性，还能有效降低维护和修复成本。在实际中还需不断优化焊接流程，确保管道结构在极端海洋环境中的长期稳定性和安全性，进一步推动海洋石油钻井技术的发展和应用，提高焊接质量，降低管道失效风险，推动海洋油气资源的高效开发与利用。

参考文献：

- [1] 韩兴忠. 石油化工管道焊接工艺及其焊接质量浅析 [J]. 当代化工研究, 2023, (06):157-159.
- [2] 李金泰. 石油化工管道焊接质量的控制措施 [J]. 化工管理, 2023, (03):133-136.
- [3] 段瑞峰. 石油管道焊接接头的腐蚀与防护 [J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(05):114-116.
- [4] 陈有禄. 探索石油化工管道焊接工艺与质量控制 [J]. 冶金管理, 2021, (05):3-4.
- [5] 宋亚卓. 石油化工管道焊接工艺分析及其质量控制策略探析 [J]. 云南化工, 2020, 47(06):167-168.