

深水环境下水下管汇吊装与对接安装工艺研究

张璇蕾¹ 张庆秀²

1. 海洋石油工程股份有限公司 天津 300456

2. 天津博迈科海洋工程有限公司 天津 300456

摘要: 在海洋石油开发领域,深水环境下水下管汇吊装与对接安装工艺至关重要。本文聚焦深水环境特性,分析水文、压力、气象及地形等因素对安装的影响。详细阐述吊装与对接安装工艺设计,涵盖设备选型、路径规划、姿态控制等多方面。同时探讨关键技术,如姿态精准调控、偏差修正、设备防护及协同作业技术。为深水水下管汇安装提供全面、系统的工艺指导,保障安装作业的高效性与安全性。

关键词: 深水环境;水下管汇;吊装工艺;对接安装;关键技术

引言: 随着海洋石油开发向深水领域不断拓展,水下管汇作为油气集输的关键设施,其吊装与对接安装工艺面临诸多挑战。深水环境复杂多变,水文条件、压力环境、海洋气象以及水下地形等因素,均对管汇的安装作业产生显著影响。传统安装工艺在深水环境下难以满足高精度、高安全性的要求。因此,深入研究深水环境下水下管汇吊装与对接安装工艺,优化各环节技术方案,对于保障海洋石油开发项目的顺利推进具有重要意义。

1 深水环境对管汇吊装与对接安装的核心影响因素

1.1 深水水文环境影响

深水水文环境是影响管汇吊装与对接安装的关键因素之一。水流速度与方向随水深增加呈现显著变化,近海面水流受风力驱动形成表面流,而深水层水流则受密度差异与地球自转效应影响形成地转流^[1]。这种分层流动特性导致管汇在下放过程中承受不同方向的水动力载荷,若未充分考虑流速剖面分布,可能引发管汇偏移或局部应力集中。此外,内波与潮汐作用在深水区域表现更为突出,内波通过改变水体密度结构产生垂直位移,潮汐引起的水位周期性升降直接影响管汇对接基准面稳定性,二者共同作用可能造成安装作业窗口期缩短,增加操作风险。

1.2 深水压力环境影响

深水压力环境对管汇安装工艺提出严苛挑战。随着水深增加,静水压力呈线性增长趋势,每增加100米水深,压力约增加1MPa。这种高压环境要求管汇结构材料具备高强度与抗疲劳特性,同时需优化密封设计以防止连接部位泄漏。在对接安装阶段,高压环境导致金属材料产生蠕变效应,可能影响连接器预紧力维持,需通过特殊螺栓设计或液压补偿装置确保长期密封性能。此外,压力变化速率对管汇内部设备影响显著,快速下放过程中内外压差突变可能引发电子元件失效,需采用压力平衡

阀或分段下放策略控制压差变化。

1.3 深水海洋气象影响

深水海洋气象条件对安装作业效率与安全性具有决定性影响。台风与热带气旋在深水区域形成强风场,引发表面波浪与涌浪叠加,导致安装船只横摇纵摇幅度增大,严重影响吊装系统动态稳定性。低能见度天气如雾、霾等会降低光学定位系统精度,迫使作业依赖声学定位技术,而声学信号在深水传播中易受温度梯度与盐度跃层影响产生折射误差。极端气象条件下,作业窗口期可能完全关闭,需建立气象预警系统与应急中止机制,确保人员与设备安全。

1.4 水下复杂地形影响

深水海底地形复杂性直接制约管汇安装路径规划与对接精度。大陆坡、海沟、海山等地质构造导致海底高程突变,管汇需通过调整吊装角度或采用柔性连接适应地形起伏。沉积物类型与厚度分布影响管汇基础稳定性,软黏土层需进行地基处理防止沉降,而硬质基岩则需采用预钻孔锚固技术。此外,海底热液活动与冷泉渗漏区域释放的高温流体可能腐蚀管汇材料,需通过地质勘查避开此类危险区,或在管汇表面涂覆耐高温防腐涂层增强防护能力。

2 深水水下管汇吊装工艺设计

2.1 吊装设备选型与适配设计

深水水下管汇吊装作业对设备性能要求极高,需综合考虑作业水深、管汇重量、海洋环境条件等因素。吊装设备选型应基于精确的载荷计算,确保所选设备额定载荷大于实际载荷并留有足够安全系数。主吊机应具备动态定位功能,以适应复杂海况下的精准作业需求^[2]。辅助设备如张紧器、滑轮组等需与主吊机性能匹配,形成高效协同作业系统。设备适配设计需重点关注接口标准

化问题,确保各组件间连接可靠且便于快速拆装,同时应考虑设备防腐性能,采用符合海洋环境标准的防护涂层和密封设计。

2.2 吊装吊点布置与受力优化

吊点布置直接影响管汇结构安全性和吊装稳定性。应根据管汇几何特征和重心位置,采用有限元分析方法确定最优吊点数量及分布方案。对于非对称结构管汇,需通过加装平衡配重装置实现受力均衡。吊点结构设计应满足局部强度要求,采用高强度合金材料并设置加强筋板。受力优化需考虑动态载荷影响,通过时域仿真分析评估不同工况下各吊点受力变化,据此调整吊索角度和长度,确保吊装过程各吊点受力均匀且在材料许用应力范围内。

2.3 吊装绳索与吊具设计

吊装绳索选型需综合考量破断拉力、弹性模量、疲劳寿命等参数,推荐采用高强度聚酯纤维绳或钢丝绳,具体选择依据作业水深和管汇重量确定。绳索长度设计应预留足够调节余量,以适应不同安装深度需求。吊具设计应遵循模块化原则,开发专用连接接头实现与管汇快速可靠连接。关键连接部位应设置双重保险装置,防止意外脱扣。所有金属部件需进行无损检测,确保无裂纹等缺陷,并采用热处理工艺提高材料韧性。

2.4 吊装路径规划与控制工艺

路径规划需建立三维数字模型,综合考虑海底地形、障碍物分布、水流方向等因素。采用动态优化算法生成最优吊装轨迹,确保管汇在升降过程中与周围设施保持安全距离。控制工艺应集成深度反馈系统和姿态监测装置,实时调整吊装速度和方向。对于深水作业,需开发专用控制算法补偿缆绳弹性变形影响,确保管汇精准就位。

2.5 深水吊装过程姿态控制工艺

姿态控制是深水吊装核心技术。应建立六自由度运动模型,通过布置在管汇关键部位的惯性测量单元实时采集姿态数据。控制算法需融合PID控制和模糊控制优势,实现快速响应和精确调节。对于大型管汇,可采用多点协同控制技术,通过调整各吊点张力分配实现姿态修正。特殊工况下可启动应急控制模式,通过释放部分吊索张力防止结构过载。整个控制过程应具备自诊断功能,能及时识别并处理传感器故障等异常情况。

3 深水水下管汇对接安装工艺设计

3.1 对接基准定位工艺

深水环境下管汇对接基准定位需融合多源传感器数据实现高精度空间定位。声学定位系统通过超短基线(USBL)或长基线(LBL)阵列确定管汇与海底基座的

相对位置,定位精度可达厘米级^[3]。光学定位系统利用高清摄像头与激光测距仪,在能见度允许条件下提供毫米级局部定位数据。惯性导航系统通过加速度计与陀螺仪实时监测管汇运动姿态,补偿声学信号传播延迟带来的误差。基准定位工艺需建立多系统数据融合模型,采用卡尔曼滤波算法优化定位结果,确保对接基准面在三维空间中的精准重合。

3.2 管汇对接导向结构设计工艺

导向结构设计需兼顾强度与灵活性,采用锥形导向套与球形接头组合形式。锥形导向套内壁镀硬质合金层,降低摩擦系数并提升耐磨性能,其锥角设计需通过流体力学仿真优化,减少海流冲击导致的偏移。球形接头具备多自由度调节能力,通过球窝结构实现轴向、径向及角向误差补偿,补偿范围可达 $\pm 5^\circ$ 。导向工艺实施时,ROV携带导向套完成初步套合,随后启动液压驱动装置实现自动对中,导向过程需控制推进速度低于0.2m/s,避免冲击载荷损伤密封面。

3.3 水下对接密封工艺

密封设计是确保管汇长期可靠运行的关键。主密封结构宜采用金属密封与橡胶密封相结合的复合密封形式,金属密封环表面进行精密研磨处理,确保接触面粗糙度达到要求。橡胶密封件应选用氢化丁腈橡胶等耐高压材料,并优化唇口结构设计以提高密封性能。密封安装工艺需严格控制压缩量,采用专用工装保证密封件均匀受压。安装完成后应进行压力测试,验证密封性能是否满足设计要求。

3.4 对接过程精准控制工艺

精准控制依托分布式控制系统实现,通过在管汇对接端面布置位移传感器与压力传感器,实时采集对接间隙与接触力数据。控制算法采用模糊PID复合控制策略,根据传感器反馈动态调整推进速度与方向,当接触力超过设定阈值时自动切换至微动模式。推进装置选用液压伺服缸,其行程分辨率可达0.01mm,配合力反馈装置实现接触力的闭环控制。对接速度控制需遵循分级递减原则,初始对接速度设为0.5m/min,临近密封面时降至0.05m/min。

3.5 水下对接辅助作业工艺

辅助作业工艺涵盖多项关键技术:ROV携带液压扭矩扳手完成螺栓紧固,扭矩值通过无线传输系统实时监控;激光清洗装置去除对接面海洋生物附着物,清洗精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$;水下电火花检测仪用于密封面缺陷检测,检测灵敏度可识别0.05mm级裂纹。辅助作业需严格遵循时序控制逻辑,螺栓紧固作业需在密封面清洁后2小时内

完成,避免二次污染。所有辅助工具均需通过高压舱测试,验证其在深水环境下的功能可靠性。

4 深水水下管汇吊装与对接安装关键技术

4.1 深水吊装姿态精准调控技术

深水吊装过程中,管汇姿态的精准调控是确保安装质量与安全的核心环节。由于深水环境存在复杂的水动力作用,管汇在吊装下放阶段易受海流、波浪及船体运动影响,产生横向偏移或纵向摆动^[4]。为解决这一问题,需采用多传感器融合的姿态监测系统,通过集成惯性测量单元、声学定位装置及压力传感器,实时获取管汇的三维位置、倾斜角度及运动加速度数据。基于动态补偿算法,结合环境参数预测模型,可对吊装索具的张力进行主动调整,抑制管汇摆动幅度。此外,通过优化吊装路径规划,利用升沉补偿装置抵消船体升沉运动,可进一步提升姿态控制精度,确保管汇在接近海底时保持预设方位,为后续对接作业创造条件。

4.2 水下对接偏差修正技术

水下对接作业中,管汇与海底基础设施的相对位置偏差是影响连接成功率的关键因素。受深水环境能见度低、定位精度受限及海底地形复杂等影响,初始对接偏差往往难以完全避免。为此,需开发基于多模态感知的偏差修正系统,通过激光扫描、声学成像及ROV视觉监测,构建管汇与对接目标的实时三维模型。结合特征点匹配算法,可快速识别偏差方向与幅度,并生成修正指令。对于机械连接方式,可通过ROV操作液压驱动装置,调整管汇的平移或旋转姿态;对于焊接连接,则需采用激光跟踪技术,引导焊枪自动跟踪对接缝隙,确保焊接质量。通过迭代修正与闭环控制,可逐步缩小偏差范围,最终实现高精度对接。

4.3 深水环境下设备防护技术

深水环境对吊装与对接设备的耐久性提出严苛要求。高压、低温、腐蚀及生物附着等因素可能导致设备性能退化或失效。针对这一问题,需从材料选择与结构设计两方面强化设备防护能力。材料方面,优先采用高强度合金钢、钛合金及复合材料,提升结构抗压与抗腐蚀性

能;表面处理则应用热喷涂铝涂层、环氧树脂涂层或阴极保护技术,延缓腐蚀进程。结构设计方面,通过优化设备外形减少海流阻力,降低振动风险;采用模块化设计便于快速更换受损部件;集成自清洁装置抑制生物附着,保障设备长期稳定运行。

4.4 吊装与对接协同作业技术

吊装与对接是深水管汇安装的两个紧密衔接的阶段,需通过协同作业提升整体效率。通过建立统一的作业控制平台,整合吊装系统的动态定位、张力控制与对接系统的偏差修正、连接执行功能,可实现作业流程的无缝衔接。控制平台基于实时数据交互,动态调整吊装速度与对接修正参数,避免因阶段切换导致的作业中断。此外,通过预演仿真技术优化作业时序,可减少水下操作时间,降低环境不确定性对安装质量的影响,最终实现吊装与对接的高效协同。

结束语

深水环境下水下管汇吊装与对接安装工艺研究,综合考量了深水环境的多方面影响因素,从吊装与对接安装工艺设计到关键技术突破,形成了一套较为完整的工艺体系。通过精准的姿态调控、偏差修正、有效的设备防护以及协同作业技术的应用,有效提升了安装作业的精度与安全性,降低了环境因素对安装质量的影响。该工艺体系的应用,为深水海洋石油开发中水下管汇的安装提供了可靠的技术支撑,有助于推动海洋石油工业向更深水域发展。

参考文献

- [1]袁尚晨,彭甲志,李新超.大型平台导管架滑移下水法安装的应用研究[J].石油和化工设备,2022,25(4):9-11.
- [2]米寰鹏.浮沉法安装海上大型HDPE管道的施工工法探讨[J].现代工程科技,2025,4(19):33-36.
- [3]李晓明,祝皎琳,黄福祥,等.深水导管架下水过程中多向载荷运动响应与作业优化[J].地基处理,2025,7(6):531-539.
- [4]李勇,曾治国,周超等.给排水钢管管道穿越江河水下安装施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(27):112-114.