

海洋平台工艺管线安装技术及施工难点分析

迟海明 魏玉战 陈绍军 刘福领 何庆瑞 (海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要: 为解决海洋平台工艺管线在海况与高荷载条件下安装偏差、焊接控制和补偿失效等难题, 本文以固定式与浮式平台为对象, 对工艺管线系统特性、预制组对工艺、支吊架布置、热胀冷缩补偿及高温高压含硫介质管线施工风险开展分析, 提出安装顺序优化方法、焊接变形与残余应力控制措施以及防腐绝热协同设计思路, 以期为海洋油气工艺管线安装设计、现场施工与质量管理提供参考。

关键词: 海洋平台工艺管线; 安装技术; 施工难点; 应对策略

中图分类号: TE95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0121-03

Installation Technology and Construction Difficulties Analysis of Offshore Platform Process Pipeline

Chi Haiming, Wei Yuzhan, Chen Shaojun, Liu Fuling, He Qingrui (Ocean Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to solve the problems of installation deviation, welding control, and compensation failure of process pipelines on offshore platforms under sea conditions and high load conditions, this paper takes fixed and floating platforms as objects, analyzes the characteristics of process pipeline systems, prefabricated assembly processes, support and hanger arrangements, thermal expansion and contraction compensation, and construction risks of high temperature and high pressure sulfur-containing medium pipelines. It proposes installation sequence optimization methods, welding deformation and residual stress control measures, and anti-corrosion and insulation collaborative design ideas, in order to provide reference for the installation design, on-site construction, and quality management of offshore oil and gas process pipelines.

Keywords: offshore platform; process pipeline; intelligent construction management; key technology

海洋平台工艺管线处于高湿、高盐雾及动力环境, 安装过程受平台结构变形、海上吊装条件及多专业交叉作业制约。大口径厚壁高压管线、含硫高温管线与高致密度区域布置, 使预制精度、焊接、支吊架体系和热胀冷缩补偿控制更突出。围绕上述关键环节开展技术分析, 有助于提升海洋平台工艺管线安装质量与可靠性, 具有重要工程意义。

1 海洋平台工艺管线系统特性分析

1.1 海洋平台类型及工艺管线功能分区

固定式平台与浮式平台在结构刚度、运动幅值及甲板空间方面差异, 对工艺管线支撑间距、导向约束形式与伸缩补偿布置产生影响。工艺管线依据平台功能划分为井口采集、处理、公用、计量外输和火炬排放功能区, 各分区压力、材质、温度及腐蚀裕度等级设置不同。高压采出流与高温注入管线沿独立管廊布置, 以满足工艺与防火要求; 公用和低压排放管线集中布置于综合管廊, 通过支架系列化与空间分层方式形成功能明确、检修受控的管线路局。

1.2 荷载特性与受力工况分析

海洋平台工艺管线承受自重、内压、温度梯度、支架约束以及平台六自由度运动产生的惯性作用, 受力状态呈现多向循环特征。设计计算将内压与自重纳

入持续荷载组合, 将波浪与风加速度效应及启停工况纳入偶然荷载, 将温差导致的位移划入位移荷载, 通过应力分类控制一次应力、二次应力和峰值应力^[1]。导向支架刚度、固定点布置及弯头构件几何形状对应力路径与重分布影响显著, 疲劳敏感截面需结合循环次数、应力幅值和腐蚀裕度校核安全系数。

2 工艺管线安装关键工艺与技术要点

2.1 管段预制与组对工艺

管段预制阶段按照设计等轴测图和三维坐标数据展开, 下料前需完成材质、规格、热号核对, 关键管线按批次进行 PMI 检测, 碳当量不超过 0.43%。采用数控坡口机加工坡口, 坡口角度控制在 $30^\circ \pm 2^\circ$, 钝边 1.6 ~ 2.0mm, 保证焊接接头熔合深度与成形质量。管段长度尺寸偏差一般控制在 $\pm 2\text{mm}$, 同轴度偏差不大于 1.5 mm, 椭圆度按公称直径 1% 控制, 高压管段支座位置偏差控制在 3mm 以内。组对工序依据基准线及控制点进行, 利用全站仪或激光跟踪仪核对三维坐标, 组对间隙控制在 2 ~ 3mm, 错边量不超过壁厚 10% 且不大于 1mm, 通过临时夹具、胎具与可调支架形成稳定装配体系, 为后续焊接变形控制与安装精度提供基础。预制过程中对不锈钢及双相钢管段实施分区存放与防污管理, 车间温度控制在 5 ~ 40℃、相对

湿度不高于 85%，关键对口位置设 10 ~ 15mm 预留量以吸收现场结构偏差。

2.2 焊接工艺及焊接质量控制

焊接工艺依据 PQR 试验结果编制，针对 X65、X70 管线钢及 316L 不锈钢分别确定焊接方法组合，一般采用 GTAW 打底、GMAW 过渡、SMAW 或 SAW 填充盖面。焊接线能量控制在 10 ~ 18 kJ/cm，碳当量高于 0.42% 管材预热温度不低于 120℃，道间温度保持在 100 ~ 200℃ 范围，以限制硬化组织与冷裂纹风险^[2]。高压、高温介质管线焊缝内部缺陷按 100%RT 或 UT 检验，合格级别按 ISO 11666 或 NB/T 47013 执行，表面缺陷配合 MT、PT 抽检比例不低于 10%。焊缝余高控制在 1 ~ 3mm，错边量不超过壁厚 8%，硬度上限一般取 248HV 或 275 HV，现场根据介质含硫分级调整。焊接过程通过焊工连续编号、层道记录、热输入曲线与预热温度实测表形成可追溯质量控制链。

2.3 支吊架布置与安装技术

工艺管线支吊架按受力机理划分为固定支架、导向支架、滑动支架、弹簧支吊架及阻尼器类型，布置时需与结构梁格、防火分区形成协调体系。管道跨距依据公称直径、设计压力和充液状态校核，一般在 4 ~ 8m 范围内取值，高温管段跨距按挠度限值 L/200 复核。固定点沿热位移方向布设间距通常不大于 25m，导向间距按不超过 12m 取值，确保热膨胀传递路径清晰。安装阶段通过激光测距仪与水平仪校核支架标高与垂直度，立柱垂直偏差不超高度的 1/1000，锚栓预紧力按 0.6Re 选取，焊接支架角焊缝尺寸不小于 6mm，并依据平台变形分析结果设置柔性节点与减振支撑。

2.4 热胀冷缩补偿装置安装与调试

热胀冷缩补偿系统由波纹膨胀节、球形补偿器、

Ω 形自然补偿弯管及冷紧段组成，安装前依据设计温度差 ΔT 与线膨胀系数 α 计算轴向位移量，例如碳钢管在 $\Delta T=120^\circ\text{C}$ 、直线段 30m 条件下伸长约 43mm。波纹膨胀节安装方向按照流向与标牌箭头统一，导向支架与固定支架距膨胀节端面的距离依照规范控制在 4D 与 14D 范围内。冷紧段通过千斤顶或螺杆机构施加预位移，多取设计位移量的 50% ~ 70%，采用百分表监控实际行程偏差不超 2mm^[3]。调试阶段在常温与升温工况测量关键节点应变与支座反力，核对膨胀节波纹圈应力不超许用应力的 0.8 倍。工艺管线支吊架布置与安装主要控制参数见表 1。

2.5 阀门、法兰与附属件安装技术

阀门与法兰安装按介质压力、温度等级及防火分区控制。阀门进出口方向与工艺流程指向一致，阀杆竖直或倾角不大于 30°，手轮中心距操作平台高度取 1.0 ~ 1.6m。法兰密封面粗糙度需严格控制，金属环垫密封面控制在 Ra3.2 μm 以内。两侧法兰对中偏差不大于 1.5mm，密封面不平度控制在外径的 0.3% 以内。螺栓采用对称分步预紧方式，初紧、复紧和终紧分三次实施，预紧力按设计应力的 0.6 ~ 0.8 倍控制。过滤器、止回阀、排气阀等附属件布置在便于检修与排污的区域，取压口中心与主管内底距按不少于 1.5D 控制，并按系统图逐点核对标识与方向。

2.6 绝热与防腐施工技术

绝热与防腐施工依据工艺温度梯度、海洋大气腐蚀等级和防火分级统筹设计。保温结构采用系统，外壁温度高于 60℃ 的热介质管线选用岩棉或硅酸铝纤维，导热系数不大于 0.045W/(m·K)，厚度依据热损失计算取 40 ~ 120mm。冷媒管道保冷层保证外表面温度高于环境露点 5℃，选用闭孔率大于 90% 的聚氨酯或酚醛泡沫，接缝采用双道胶粘与箍紧固。外壁防

表 1 工艺管线支吊架布置与安装主要控制参数

项目	参数 / 范围	说明简注
管道跨距	4 ~ 8m	按公称直径、压力及充液工况选取
高温管段挠度限值	L/200	以弹性挠度控制为主
固定支架间距	≤ 25m	保证热位移传递与约束可靠
导向支架间距	≤ 12m	控制侧向位移与弯矩水平
立柱垂直偏差	≤ H/1000	H 为立柱高度
支架标高偏差	± 3mm	与设计基准线对比
锚栓预紧力	约 0.6Re	Re 为锚栓屈服强度
角焊缝腿长	≥ 6mm	满足承载与疲劳要求
减振支撑设置间距	10 ~ 20m	依据振动频率与管径调整
固定点邻近导向支架间距	3D ~ 5D	D 为管道外径

腐采用锌粉环氧底漆、环氧云铁中间漆及聚氨酯面漆,总干膜厚度控制在 250 ~ 320 μm ,飞溅区提高膜厚。钢材表面处理等级按 Sa2.5 执行,粗糙度控制在 40 ~ 75 μm ,辅以针孔检测、附着力试验和干膜测厚进行质量验收。

3 关键施工难点及技术应对策略

3.1 大口径厚壁高压管线安装难点与控制要点

大口径厚壁高压管线在海上平台安装阶段呈现自重大、刚度高、吊装难度偏大特征,单根管段重量常在 3 ~ 8 t 范围。吊装转运过程中,由于薄弱截面屈曲与局部压溃风险增大,需要在弯头、三通及焊口邻近位置布设加劲环或内撑,控制施工工况下应力低于屈服强度的 0.6 倍^[4]。对口环节要求口径偏差、中心距偏差与同轴度在空间三向协调控制,椭圆度宜控制在公称直径的 0.75% 以内,错边量优先控制在壁厚的 5% 以下。现场组装阶段采用双机抬吊或滑轮组配合滚轮支架方式,以减小悬臂段弯矩,关键截面增设临时导向托架。对焊收缩影响通过预留负偏差、刚性定位夹具以及分段对称焊程序综合调节,并结合有限元分析结果复核焊后应力分布。

3.2 高温、高压、含硫介质管线安装风险及防护措施

高温、高压、含硫介质管线在投运条件下承受 14 ~ 25 MPa 压力与 150 ~ 250 $^{\circ}\text{C}$ 温度组合, H_2S 分压超过 0.003 MPa 时易产生硫化物应力腐蚀开裂与氢致开裂风险。安装阶段需严格执行 NACE MR0175/ISO 15156 等标准,对母材及焊缝硬度实施分区管理,碳钢区域硬度控制目标宜不高于 248HV,必要场合采用局部回火或整体后热处理。焊前预热温度宜不低于 150 $^{\circ}\text{C}$,道间温度控制在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下,通过恒温记录与热电偶监测构建完整温度曲线。口径转换、三通节点及盲板区域属于应力集中部位,设计阶段配置过渡段与加强板,安装阶段控制装配间隙并合理限制单道焊线能量,避免形成硬脆组织。系统试压与吹扫环节选用惰性气体或淡水介质,控制升压梯度与保压时间,降低早期腐蚀损伤累积风险。

3.3 高致密度区域管线布置与施工冲突解决策略

高致密度区域管线布置以火区边界、检修通道及逃生路线为约束条件,单位面积管线数量高、交叉频繁,若缺乏前期协调易产生安装冲突与运行隐患。布置阶段依据压力等级、介质危害程度与管径大小实行分层分带原则,高压及可燃介质管道布置于管廊上层或外侧,低压、公用管道安排在内层,通过立体分区减小交叉节点数量。三维模型中采用间距控制参数,平行管道净距不小于 75mm,法兰对接区维持 150mm 以上操作空间,主要通道净宽不低于 800mm。施工阶

段根据系统优先级制定“主干先行、支线跟进”的顺序,利用临时支托、可调吊杆和预留孔洞组织穿插作业,并在现场通过全站仪或激光扫描复核关键节点位置,减弱因结构偏差引起的二次拆改工作量,高密度区域支吊架立柱间距一般控制在 3.0 ~ 3.5m,管托层级高度按 150 ~ 250mm 递增,以满足热位移与排凝坡度要求。

3.4 焊接变形控制与残余应力管理

焊接变形与残余应力管理针对海洋平台高约束、多道次焊缝特点进行。厚壁管对接处径向收缩、角变形与轴向弯曲耦合作用,若未进行预控制,焊后中心偏移可达 3 ~ 5 mm,局部附加载荷显著增加。施工阶段依据构件刚度与开口位置制定分段焊接顺序,采用对称、跳焊、分层退焊等工艺组合,单道焊线能量控制在适宜区间,通过预设反变形角度与定位胎架限制自由收缩^[5]。关键节点配备温度监测点和应变计,记录加热与冷却曲线,依据测量数据评估残余应力峰值是否逼近屈服强度的 0.7 倍。对高温高压系统焊缝实施分区消除应力热处理,保温温度一般控制在 600 ~ 650 $^{\circ}\text{C}$,保温时间按壁厚每 25 mm 不低于 1h 取值。部分难以热处理区域引入振动时效或局部机械加工方式,分散峰值拉应力,降低服役期裂纹萌生概率。

4 结语

总而言之,海洋平台工艺管线安装受结构约束、海洋环境荷载与材料性能耦合影响。作业期间需完成大口径厚壁高压管线精确就位、焊接变形控制、支吊架刚度匹配及热胀冷缩补偿等关键工序,并兼顾疲劳寿命、腐蚀防护和检维修通道,对施工组织与质量控制提出高要求。未来,数字化建造、智能检测与高性能材料将持续提升工艺管线安装可靠性与安全水平。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 常文鹏. 海洋石油平台工艺管线安装技术及质量控制 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(09): 34-36.
- [3] 朱绍锋. 海洋平台金属管线安装质量控制要点 [J]. 化工管理, 2023, (13): 108-110+118.
- [4] 毕祥元, 刘果, 任康, 等. 海洋平台工艺管线球阀在线维修技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(14): 171-173.
- [5] 王举田. 工艺管线冬季试压方法与良好施工实践 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(09): 76-79.

作者简介:

迟海明, 男, 黑龙江人, 大专, 研究方向: 海洋石油、工艺管道、智能化。