

石油化工压力管道安装工艺研究

张思阳 (中国石油天然气股份有限公司东北销售广州分公司, 广东 广州 510000)

摘要: 石油化工压力管道作为高温、高压及腐蚀性介质输送的关键设施, 其安装质量直接关乎生产安全与经济效益。当前, 随着石化装置大型化与工艺复杂化趋势加剧, 管道安装面临材料性能适配性、焊接缺陷控制、环境应力消除等技术挑战。针对工程实践中存在的工艺标准执行偏差与成本控制难题, 本文聚焦安装工艺的系统性探究, 以期推动管道工程的全生命周期管理。

关键词: 石油化工; 压力管道; 安装工艺; 经济性分析

中图分类号: TE973

文献标识码: B

文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0103-03

Research on installation technology of pressure pipeline in petrochemical industry

Zhang Siyang (China National Petroleum Corporation Northeast Sales Guangzhou Branch, Guangzhou Guangdong 510000, China)

Abstract: Petrochemical pressure pipelines, serving as critical facilities for transporting high-temperature, high-pressure, and corrosive media, have installation quality that directly impacts production safety and economic efficiency. Currently, with the trend toward larger-scale petrochemical plants and more complex processes, pipeline installation faces technical challenges such as material compatibility, welding defect control, and environmental stress relief. Addressing deviations in process standard implementation and cost-control difficulties in engineering practice, this paper focuses on a systematic exploration of installation techniques to promote the lifecycle management of pipeline projects.

Keywords: petrochemical; pressure pipeline; installation technique; economic analysis

石油化工压力管道作为复杂工业系统的“生命线”, 承载着能源与化工原料的高效、安全传输使命。近年来, 石化产业技术迭代加速, 管道设计参数与服役环境日益严苛, 对安装工艺的精细化水平提出更高要求。从材料预处理、装配精度到环境适应性优化, 每一环节在保障工艺可靠性的前提下, 统筹施工效率与成本效益, 对推动石化工程领域标准化建设具有现实意义。

1 石油化工压力管道简述

石油化工压力管道是石化生产体系中输送高温、高压及腐蚀性介质的特种承压设备, 其功能涵盖原料传输、反应过程控制及成品输出等核心环节。此类管道通常由管体、连接件、阀门及支撑结构组成, 需根据介质特性、操作温度及压力等级选择适配材料, 如碳钢、合金钢或耐蚀金属。由于石化装置运行环境复杂, 管道安装需严格遵循工艺标准, 确保结构强度、密封性与抗疲劳性能。在安装过程中, 工艺技术的科学性与规范性直接决定管道的服役寿命与系统安全性, 尤其在应力分布调节、焊缝质量控制及防腐措施实施等方面存在显著技术壁垒^[1]。

2 石油化工压力管道安装工艺分析

2.1 材料预处理与适配性检验

石油化工压力管道安装前, 材料预处理是确保工程质量的先决条件。材料进场后需依据设计文件与规范要求系统性验收, 重点核查管材、管件及阀门

的材质证明文件、规格尺寸及表面缺陷。对于碳钢、合金钢等常用材料, 需采用喷砂或化学清洗工艺彻底去除表面氧化层、油污及杂质, 并同步进行干燥处理, 避免后续焊接或涂覆过程中因污染物残留引发气孔、夹渣等缺陷。针对大口径或厚壁管道, 需通过机械或火焰切割完成下料, 并对切口进行坡口加工, 确保坡口角度、钝边尺寸与焊接工艺评定要求一致。预处理阶段还需对特殊材料 (低温钢、耐蚀合金) 进行预热或消应力处理, 消除冷加工或运输过程中产生的残余应力, 防止安装后因应力集中导致开裂风险^[2]。

适配性检验贯穿材料选择与应用的全过程, 应结合管道服役环境与工艺参数综合判定。首先, 根据介质腐蚀特性、操作温度及压力等级, 依据 ASTM、GB/T 等标准对管材的化学成分、力学性能及耐蚀性进行复验, 例如对不锈钢管道进行晶间腐蚀试验, 验证其在酸性介质中的稳定性。其次, 阶段需通过光谱分析仪对焊材与母材的匹配性进行快速检测, 避免因成分偏差导致焊缝力学性能下降。对于存在异种钢焊接的管段, 需提前开展焊接工艺评定试验, 明确预热温度、层间温度及焊后热处理参数, 确保接头强度与耐蚀性满足设计要求。此外, 管道支撑件的适配性检验需结合应力分析结果。例如, 在高温管道中优先选用滑动支座或弹簧吊架, 通过有限元模拟验证支撑结构在热位移工况下的承载能力, 防止因约束不当引发局部变形或疲劳失效。

2.2 支撑系统设计与应力预控

随着石化装置规模扩大与工艺参数提升,管道支撑系统设计成为控制结构安全性与服役寿命的核心环节。支撑系统的规划需基于管道走向、热膨胀量及载荷分布进行力学建模,优先采用固定支座、滑动支座与导向结构。例如,在高温管线中,固定支座通常设置在补偿器或弯头附近,用于吸收轴向推力;滑动支座则根据管段热位移量计算安装间距,并采用聚四氟乙烯滑板降低摩擦系数。对于振动敏感区域(压缩机出口管道),需设计弹簧减振支架,通过刚度计算与动态仿真确定弹簧预压缩量,抑制机械振动传递。此外,支撑件的选材需与管道介质特性匹配,如在含硫环境中选用镀锌钢或耐蚀合金,避免因腐蚀导致支撑失效。

在冷态安装阶段,需依据设计文件对特定管段施加冷紧量,通过预拉伸或预压缩抵消热膨胀产生的应力。例如,高温蒸汽管道安装时,需在常温下对两固定支座间的管段进行冷拉,冷紧量根据管线膨胀系数与温差精确计算,并采用液压千斤顶分级加载至目标值。对于多分支复杂管网,需优化焊接顺序与约束释放时机,避免残余应力叠加。例如,在主管与支管连接处完成主管的固定支座焊接,再采用分段跳焊工艺连接支管,减少焊接变形对支撑结构的影响。安装完成后,需通过锤击试验或应力贴片检测支撑部位的局部应力集中,必要时采用局部热处理或机械矫正消除异常应力。最后,动态工况下的应力验证需结合压力试验与热态调整,确保应力分布与设计预期一致。

2.3 焊接工艺优化与缺陷闭环管理

在石油化工压力管道安装中,焊接工艺的合理设计与精准执行直接决定管道的密封性与结构强度。针对不同管材与工况,需依据 NB/T47014 标准对焊接方法、参数及操作规范进行分级细化。以厚壁铬钼钢管道为例,采用窄间隙热丝 TIG 焊工艺,通过多道次堆焊控制层间温度在 150℃~250℃,并采用氩气双气保护(正面 98%Ar+2%CO₂,背面纯 Ar)避免根部氧化。对于大口径固定焊口,配置轨道式自动焊机,集成激光视觉传感系统实时追踪坡口位置,结合焊接电流波形调制技术(脉冲频率 20Hz、基值电流 80A),确保熔深均匀且热输入量稳定。焊接前需对焊材进行 350℃×2h 烘干处理,并使用便携式光谱仪抽检焊丝成分,确保与母材的相容性。此外,针对低温管道(LNG 用 9%Ni 钢),需在焊后 24h 内完成 -196℃ 深冷冲击试验,验证焊缝低温韧性是否达标。

焊接过程中,采用红外热像仪在线监测焊缝及热影响区温度场分布,结合焊接参数动态调整,避免未

熔合、气孔等缺陷。焊后通过多维度无损检测技术组合(射线检测+超声相控阵)对焊缝进行全覆盖扫查:射线检测优先采用 γ 源 Ir-192 对壁厚 $\leq 50\text{mm}$ 的焊缝成像,识别夹杂、未焊透等体积型缺陷;超声相控阵则通过多角度线性扫查定位裂纹、未熔合等面状缺陷,并量化缺陷高度与长度。对于超标缺陷,采用机械打磨或等离子弧气刨清除至缺陷根部,经 PT 检测确认无残留后,按原工艺规范进行补焊,补焊区域需扩大检测范围至原焊缝两侧各 50mm。修复完成后,需重新进行热处理(消应力退火)与硬度测试,确保修复区与母材性能一致。针对高风险管道(含 H₂S 介质),还需在压力试验后增加氨渗漏检测,通过覆贴酚酞试纸验证焊缝气密性,形成“检测-修复-验证”的闭环管控机制。

2.4 无损检测及压力试验验证

在石油化工压力管道安装中,无损检测是验证焊缝与管体完整性的核心手段。针对不同工况与材料特性,需采用多技术协同检测策略。射线检测(RT)作为体积型缺陷的权威方法,优先选用 Ir-192 或 Se-75 射线源,依据 GB/T3323 标准对环焊缝进行双壁双影透照。壁厚 $\leq 30\text{mm}$ 的管道采用倾斜投影法,确保根部未焊透与夹渣的清晰成像;壁厚 $> 50\text{mm}$ 的合金钢焊缝则使用电子直线加速器(1-6MeV)提高穿透力,结合计算机成像(CR)实时分析缺陷尺寸。超声相控阵(PAUT)通过多晶片阵列发射聚焦声束,对焊缝全深度进行扇形扫查,精准识别未熔合与疲劳裂纹的走向及高度。磁粉检测(MT)作为表面缺陷的补充手段,采用荧光磁悬液与紫外线灯增强灵敏度,重点检测不锈钢管道的角焊缝与异形连接处。检测结果依据 JB/T4730 分级判定,生成数字化报告并标注缺陷坐标,为修复与验收提供依据。

压力试验是验证管道系统强度与密封性的最终环节。液压试验前需编制专项方案,试验压力按 ASME B31.3 设定为设计压力的 1.5 倍。注水时逐级升压(每级 $\leq 0.5\text{MPa}$),保压 10 分钟检查法兰、阀门及支撑结构的泄漏与形变。对于不锈钢或低温管道,采用气压试验替代,试验压力为设计压力的 1.1 倍,介质选用干燥无油氮气,升压至 0.6 倍试验值时,用电子嗅探仪或发泡剂排查焊缝与螺纹连接的微泄漏。试验中需在弯头、三通等区域粘贴电阻应变片,实时监测弹性变形量是否超限。试验后需彻底排净介质并干燥,避免残留水引发腐蚀。对含毒性或易燃介质的管道,补充气密性试验,保压 24h 记录压降,同步采用红外热像仪定位泄漏点,确保投用前系统绝对密封(见表 1)。

表 1 无损检测及压力试验关键技术

项目	方法	典型应用场景	技术参数 / 步骤
无损检测	射线检测	体积型缺陷	Ir-192/Se-75 源，双壁双影透照
	超声相控阵	面状缺陷	多晶片阵列扇形扫查
	磁粉检测	表面裂纹检测	荧光磁悬液 + 紫外线灯显像
压力试验	液压试验	常规工艺管道	1.5 倍设计压力，分级升压
	气压试验	不锈钢 / 低温管道	1.1 倍设计压力，氮气介质
	气密性试验	毒性 / 易燃介质管道	1.0 倍设计压力，保压 24h

2.5 防腐施工与动态工况适配

随着石化装置运行环境复杂化与介质腐蚀性增强，管道防腐施工成为保障长周期安全运行的关键措施。防腐施工前需依据介质成分、温度及流速对管材表面进行喷砂除锈处理，达到 Sa2.5 级清洁度，并采用粗糙度仪检测表面轮廓（ $R_z \geq 50 \mu m$ ），确保涂层附着。

对于输送酸性介质的碳钢管道，采用三层聚乙烯（3PE）复合结构防腐：底层为环氧粉末，中间层为共聚物胶粘剂，外层为高密度聚乙烯，施工时通过静电喷涂与热熔缠绕工艺实现无缝包覆。在高温油气管道中，选用耐温型聚氨酯泡沫保温层与铝箔反射层复合结构，采用分段发泡模具控制发泡密度（ $\geq 60 kg/m^3$ ），并在弯头与法兰处加装可拆卸保温套，便于检修。涂覆完成后，需通过电火花检测仪扫描涂层针孔，并取样进行阴极剥离试验，验证防腐层抗渗透性能。

动态工况适配需综合考虑管道振动、热位移及压力波动对结构完整性的影响。设计阶段采用有限元分析（模拟管道在启停、变载等瞬态工况下的应力分布，优化支撑布局与柔性连接设计。例如，在往复压缩机出口管道中，增设金属软管或膨胀节吸收脉冲振动，软管长度根据振幅与频率计算，并采用多层不锈钢丝网增强抗压强度。对于高温管线的热膨胀控制，采用预变形安装技术，在冷态安装时，依据管系应力分析结果对特定管段施加反向位移（水平管道预偏置 20mm），补偿热态膨胀量。施工完成后，通过模态分析仪测试管道固有频率，避免与设备振动频率共振，必要时加装阻尼器或约束型减震支架。

3 石油化工压力管道安装的经济性分析

随着石化装置大型化与工艺复杂化，压力管道安

装的经济性需从全生命周期成本视角统筹技术投入与长期效益。经济性分析的核心在于平衡材料选型、施工效率与运维成本三者关系。

在材料选择阶段，需基于管道设计参数与介质特性精准匹配材料等级，避免过度冗余或性能不足。例如，对于中低压常温工况的碳钢管道，优先采用 Q235B 替代高等级合金钢，同时优化管壁厚度计算模型，在满足强度要求的前提下减少材料耗量。针对高温含硫介质管道，选用内衬 316L 不锈钢的复合管替代整体合金钢管，降低材料采购成本且缩短预制周期。施工过程中，通过模块化预制技术将管段、阀门及支撑结构在车间提前组装，减少现场焊接与吊装作业量，降低人工与机械台班成本。此外，采用 BIM 技术对管道走向与支撑系统进行三维碰撞检测，避免因设计冲突导致的返工与材料浪费，提升施工一次合格率^[3]。

另外，经济性分析需统筹全生命周期成本，涵盖设计、施工、运维三大阶段的协同优化。设计阶段引入管道应力仿真与疲劳寿命预测模型，优化支撑布局与柔性结构设计，降低因振动或热应力引发的后期维护成本。施工阶段通过焊接工艺标准化与自动化设备应用，减少返修率与检测成本，例如采用自动焊机完成 80% 以上固定焊口，结合相控阵超声检测替代部分射线检测，在保障质量的同时降低检测费用。运维阶段推行预防性维护策略，在管道关键节点部署在线腐蚀监测系统，实时采集数据并预测剩余寿命，避免非计划停机损失。对于长输管道，采用智能清管器定期清除管内沉积物，维持输送效率并延长化学清洗周期，降低化学药剂与人工清理成本。

4 结语

石油化工压力管道安装工艺研究是保障石化装置安全高效运行的重要基础。未来，相关研究人员需进一步结合新材料、智能监测技术深化研究，构建更完善的安装与运维体系，支撑石化产业可持续发展。

参考文献：

[1] 王敏, 宋建伟, 张汉勇. 石油化工压力管道安装工艺及质量控制重点分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(10): 272-274.

[2] 王苏珊. 石油化工压力管道安装工艺及质量控制重点 [J]. 天津化工, 2024, 38(05): 120-122.

[3] 张城建. 探究石油化工压力管道安装工艺及质量控制 [J]. 山东工业技术, 2017, (13): 80.

作者简介：

张思阳（1990—），男，汉族，本科，助理工程师，设备管理，研究方向：工程及检维修。