

石油化工领域往复式压缩机组安装技术的应用与优化

杨万里¹ 郭梁柱² 杨光富¹ 杨兵¹ 杜勇¹

1 蜀南气矿长宁页岩气运维项目部, 四川省泸州市, 646000;

2 中石油西南油气田, 四川省泸州市, 646000;

摘要: 往复式压缩机组是石油化工装置的核心动设备, 其安装质量直接影响装置的长周期、安全、稳定运行。本文在梳理行业标准与工程实践的基础上, 系统阐述了机组安装全过程的关键技术环节, 包括基础验收与二次灌浆、轴系对中、管道无应力连接、密封件装配、隔振与降噪、智能监测等。针对传统方法存在的效率低、误差大、数据碎片化等痛点, 提出基于数字化测量、模块化预制、在线监测与预测性维护的优化路径。通过技术集成与管理协同, 为同类项目提供可复制、可推广的参考范式。

关键词: 往复式压缩机; 石油化工; 安装技术; 对中精度; 无应力配管; 预测性维护

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 12. 054

引言

石油化工装置高温高压、易燃易爆的特点, 决定了往复式压缩机组必须具备极高的可靠性。实际生产中, 机组非计划停机往往与安装阶段的缺陷密切相关, 如对中不良、管道附加应力、基础沉降不均等问题, 均可能引发后续运行故障。随着装置大型化、一体化趋势加剧, 机组结构愈发复杂, 传统“经验+手工”的安装模式已难以满足严苛的质量要求。因此急需从理论、技术、管理等多维度对安装全过程进行系统梳理与优化。

1 机组安装全流程关键技术

1.1 基础验收与二次灌浆

基础承台在往复式压缩机运行期间同时承受静载与周期性脉冲动载, 其整体性、阻尼特性和几何精度直接影响机组振动水平和运行寿命。验收阶段, 除依据 GB 50231 对尺寸、预埋件、螺栓露出长度等常规项目进行检查外, 可引入三维激光扫描技术, 将现场实测点云与土建 BIM 模型进行色谱叠加, 快速识别局部凸起、凹陷或螺栓群偏移, 提前采用研磨、补焊或植筋方式修正, 避免后期垫片堆叠或重新钻孔。二次灌浆前, 应在基础表面刻划“梅花槽”或设置剪力键, 以增加底板与浆体间的水平抗剪能力; 同时布置排气铜管, 形成引导通道, 防止气泡聚集。灌浆料宜选用无收缩、微膨胀、早强型配方, 拌和水质、环境温度及搅拌时间均需按厂家要求严格控制。单侧压浆时保持静压头稳定, 使浆体自外向内流动, 充分填充底板下空隙; 过程中可借助无线振捣传感器对振幅与频率进行网格化监测, 发现异常及时补振, 减少空鼓风险。终凝后采用敲击扫描或超声波透射

法进行区域复查, 确保承台具备高刚度、低衰减的支承性能。

1.2 轴系高精度对中

曲柄连杆机构的往复运动伴随多阶谐波激励, 对中误差会转化为轴瓦偏载、十字头滑道磨损或活塞杆沉降。激光对中仪取代传统“表架+塞尺”后, 可在曲轴旋转若干特征角度自动采集位移数据, 内置算法根据最小二乘圆心拟合生成补偿矢量图, 直观显示“高低”与“左右”调整量。对于多机组串联布置, 宜采用“基准传递”策略: 以电机轴为基准, 逐级向压缩机主轴、增塑器轴传递, 避免误差累积。调整过程中, 先完成粗调再精调, 每轮紧固后需重新复测, 确保垫片组压缩量与螺栓伸长量处于稳定区间。为消除温差影响, 对中作业应避免阳光直射及夜间辐射降温时段, 并在机器本体设置临时遮阳棚。通过提高对中精度, 可有效降低附加弯矩和振动激励, 为后续管道无应力连接及长期平稳运行奠定基础。

1.3 管道无应力连接

进出口法兰附加应力是诱发缸体变形、气阀卡阻或活塞杆偏磨的常见原因。可采取“冷态预紧+热态补偿”策略: 先在冷态下按设计值预紧螺栓, 再利用有限元软件模拟运行温度下的热胀量, 计算所需补偿位移; 现场使用液压拉伸器同步紧固, 配合激光跟踪仪实时监测法兰相对位移, 确保连接后管道对机组的推力与力矩处于较低水平。对于高温高压管道, 宜在靠近缸体处设置 π 型或 Ω 型弯, 以吸收热胀; 同时采用自控式法兰或 Grayloc 接头, 减少现场焊接动火。螺栓紧固顺序应对称交叉, 分三至四轮完成, 每轮记录伸长量并绘制曲线,

发现异常立即暂停检查。安装完毕后,用塞尺复查法兰间隙一致性,并在管道试压前后分别进行对中复测,比较冷态与热态数据差异,必要时微调支撑或弹簧吊架,使机组始终处于“零应力”边界条件,延长气阀及填料寿命。

1.4 密封件装配技术

活塞杆填料环的径向切口间隙是控制泄漏的核心变量。传统“红丹研配”依赖手感,间隙离散大且一致性差。优化方案引入低温冷冻装配与激光测隙一体化工艺:先将填料环置于低温箱内均匀收缩,再快速套装至杆部,避免敲击造成的切口磕碰;随后利用激光位移传感器在线测量切口间隙,通过伺服压力机微调压缩量,使各环切口呈错开布置,形成迷宫密封效应。装配过程中应保持工作台面清洁,防止硬质颗粒混入;切口处可涂少量高温防粘剂,方便后期检修拆卸。对于串联密封室,建议按“高压侧硬质合金、低压侧碳纤维”组合配置,既保证耐磨性又兼顾柔性补偿。通过提升密封一致性,可显著降低气体泄漏风险,满足节能与环保双重需求。

1.5 隔振与降噪

大型机组的往复惯性力较易激发厂房结构共振,影响操作环境与设备寿命。可采用“质量-弹簧-阻尼”模型优化隔振器布局:在机体四角布置变刚度空气弹簧,将系统固有频率调离常见激励频段;同时在曲轴箱底部增设颗粒阻尼器,内部填充高密度金属颗粒与粘性流体,利用碰撞与摩擦耗散宽频振动能量。隔振器安装前,应对基础顶面进行水平度复测,按“对角线-中心线”法布置垫铁组,确保各支承点载荷均匀。调试用充气压力表应定期校准,避免刚度漂移。对于毗邻控制室或厂界的机组,可在隔振基础上加装轻质复合吸声屏障,并对进排气管道包裹多层纤维套,减少空气声辐射。通过综合匹配隔振参数与阻尼特性,可有效降低振动传递和噪声水平,满足相关环保标准要求。

1.6 智能监测与预测性维护

安装阶段预埋无线温振传感器,构建设备级数字孪生体,可实时采集轴瓦温度、十字头加速度、气阀腔压力等多源参数,并与仿真模型持续比对。利用长短期记忆网络(LSTM)对时间序列进行趋势预测,当残差超过设定阈值时自动触发维护工单,实现预测性维护。传感器布置应遵循“关键截面-主传递路径-易损点”原则:

径向轴承区设置双轴加速度计,监测冲击脉冲;气阀腔安装高频压力探头,捕捉启闭特征;机身中部布置温度-湿度复合探头,评估热平衡状态。数据传输可采用低功耗蓝牙或 LoRa 方案,避免复杂布线。维护平台应支持阈值自学习,通过历史数据不断修正告警门限,减少误报。该方式可在故障萌芽阶段发出提示,减少非计划停机,延长机组使用寿命,并为后续检修提供量化依据。

2 技术优化路径

2.1 数字化测量与虚拟预装

“设计-制造-安装”一体化数字链的核心在于把传统串行流程转变为并行协同。设计阶段即建立包含土建、设备、配管的三维主模型,并在关键接口预留“电子handshake”标签,方便后续数据继承。工厂制造环节利用高精度蓝光扫描或摄影测量获取缸体、曲轴箱、电机等实物点云,通过“模型-实物”配准算法自动生成色差云图,提前发现加工圆角、法兰面平行度、螺栓孔位等细微偏差;对于超差部位,可在厂内机床或便携式加工单元上一次性返修,避免现场二次动火。虚拟预装模块基于游戏级物理引擎开发,可对螺栓紧固、轴系旋转、管道柔性进行动态演示,直观展示零部件是否发生静态碰撞或动态干涉。安装阶段,现场人员佩戴 AR 眼镜,眼镜视野中叠加“透明机壳”模型,关键尺寸、螺栓序号、力矩值以悬浮图标形式呈现;当作业者视角偏离最佳观察角度时,系统实时提醒调整站位,确保每一步操作与数字工艺包保持一致。通过连续的数据闭环,把“问题发现-修正-验证”前移到出厂前完成,显著降低现场返工概率。

2.2 模块化预制与快速安装

模块化预制的关键是“分段合理、接口标准化、运输安全”。设计团队根据公路运输极限尺寸和吊装载荷,把润滑油站、冷却器、缓冲罐、仪表撬划分为若干标准单元,每个单元底座采用整体钢梁框架,并设置防变形拉筋;框架底部预留标准高度叉装口和旋转吊耳,满足工地两种搬运方式。内部管道采用“自治焊接+局部热处理”工艺,在预制厂完成 90% 以上的焊口,焊缝编号、射线底片、硬度报告随撬发运,现场仅需进行最终接口组对。自封式法兰或 Grayloc 接头替代传统焊接,不仅消除了高温动火,还通过金属唇形密封环实现微量角度补偿,吸收热胀差。接口区域配置凹凸止口和定位销,保证冷态一次性插入深度,缩短高空对中时间。模

块化运输前,对撬内管路进行氮气充压保护,防止海洋运输或高湿环境产生锈蚀;到达工地后,利用移动式滑梯轨道把模块平移至基础,就位于预埋滑板之上,通过侧向顶丝完成横向微调,实现“零焊接、零火焰”快速安装。

2.3 标准化作业包与技能认证

标准化作业包的核心是“步骤量化、风险显性、知识云端”。每一道安装工序被拆分为可执行的最小动作单元,并赋予唯一编码,例如“轴对中-粗调-垫片增减-螺栓预紧-复测-记录”,对应标准耗时、工具清单、力矩值、检验要点均在后台数据库中关联。作业包以二维码形式贴在设备壳体或作业票上,现场人员扫码即可调出短视频、三维动画或专家语音讲解,实现“边干边学”。风险栏采用颜色-符号双编码:红色闪电图标表示高处坠落,黄色爆炸图标提示易燃气体,蓝色齿轮图标提醒机械夹手,降低因语言或经验差异造成的理解偏差。技能认证体系分为“理论-仿真-实操”三级递进:理论模块涵盖标准规范、安全法规、材料特性;仿真模块借助VR手柄让学员在虚拟环境中完成螺栓紧固、激光对中、法兰热紧等任务,系统实时记录操作轨迹、用力曲线和耗时分布,自动生成能力雷达图;实操模块则在厂内实训撬上进行,考评员依据作业包逐项打分,只有三项成绩均达到合格线方可取得上岗徽章。认证结果与人力资源系统对接,形成可追溯的电子档案,确保技术传承和质量一致性。

3 技术实施要点小结

在炼化一体化项目氢气循环机组安装全过程中,项目团队将数字化测量、模块化预制、无应力配管与智能监测技术贯穿始终,构建起“工厂预控-现场精调-在线维护”的闭环管理模式。前期通过虚拟预装与点云比对,提前识别设备接口、管口方位及基础预埋偏差,在厂内完成修正与加工,避免现场返工。现场作业阶段,采用激光对中仪进行轴系精调,配合液压拉伸器同步紧固法兰螺栓,确保冷态与热态条件下管道应力均处于低水平。模块化预制单元整体撬装运输至现场后,通过快速自封式法兰与主管廊完成无火连接,显著减少高空作业与焊接量。与此同时,无线温振传感器在设备安装阶段即被同步植入关键部位,实时采集轴瓦温度、十字头加速度、气阀腔压力等运行参数,并与数字孪生模型持续比对,实现安装与运维数据的无缝衔接。该模式不仅

提升了施工效率与装配精度,也为后续机组长期稳定运行奠定了坚实基础,形成了一套可复制、可推广的大型机组安装管理范式。

4 结论与展望

往复式压缩机组安装技术正从“经验驱动”迈向“数据驱动”。通过数字化测量、模块化预制、智能监测与预测性维护的深度融合,可系统性解决对中精度低、管道应力大、密封可靠性差等瓶颈问题。未来,随着边缘计算、5G+工业互联网技术的普及,安装过程将实现毫米级定位、毫秒级响应、微应变级感知,进一步压缩建设周期、降低全生命周期成本,为石油化工装置大型化、智能化提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 秦元昌. 石油化工中往复式压缩机组安装技术[J]. 安装, 2025(10): 25-27.
- [2] 祝伍. 往复式压缩机高精度安装施工关键技术[R]. 河北省: 新地能源工程技术有限公司, 2017-12-01.
- [3] 刘军, 黄显富. 大型往复式压缩机的安装技术要点[J]. 中氮肥, 2015(01): 29-31. DOI: 10.16612/j.cnki.issn1004-9932.2015.01.018.
- [4] 梁锋. 往复式压缩机密封件安装技术浅析[J]. 通用机械, 2013(S1): 70-71.
- [5] 张培友. 单轴承电机驱动往复式压缩机安装的技术关键[J]. 化工设备与管道, 2008, 45(06): 42-43.

作者简介: 杨万里(1977.02—), 男, 汉族, 四川自贡人, 2007年四川广播大学法律专业学分制学习毕业, 增压专业高级技师, 主要研究方向为压缩机运维。

郭梁柱(1973.09—), 男, 汉族, 四川泸州人, 96年技校生, 中石油特级技师, 主要研究方向石油、页岩气、压缩机、电力。

杨光富(1970.12—), 男, 汉族, 四川合江人, 1991年四川内江油气田建设技工学校毕业, 电工技师, 主要研究方向为电力系统运行维护。

杨兵(1977.04—), 男, 汉族, 四川泸州人, 2002年重庆石油高等专科学校石油开采专业中专生, 采气专业高级技师, 主要研究方向为天然气开采。

杜勇(1990.10—), 男, 汉族, 四川遂宁人, 2013年西南石油大学学校毕业, 主要研究方向为地面建设和油气储运。