

煤化工装置大型静设备安装工艺优化与调试质量控制研究

刘爱亨

贵阳安讯智能化工设备有限公司 贵州省 贵阳市 550009

【摘要】：煤化工装置大型静设备安装质量直接影响系统密封可靠性、结构稳定性与长周期运行安全。围绕100万吨/年甲醇装置气化炉安装与调试，研究提出基于BIM的安装精度预控、模块化组装与现场拼接、吊装方案力学仿真优化及三级调试质量控制方法。应用结果表明，优化后安装周期由60 d缩短至45 d，安装精度误差由 ± 5 mm收敛至 ± 2 mm，调试故障率由12%降至3%，项目成本降低15%，高空交叉作业时长由320 h减少至180 h。研究表明，该优化体系能够有效降低返工与调试风险，提升大型静设备安装过程的可控性和工程质量稳定性。

【关键词】：煤化工装置；大型静设备；安装工艺优化；BIM预控；调试质量控制

0 引言

煤化工装置通常具有流程连续、介质复杂、运行参数高等特点，其中气化炉、洗涤塔、变换炉及大型换热器等静设备承担关键工艺功能。此类设备体积大、重量高、接口多，安装过程易受基础偏差、吊装变形、管口应力及交叉作业影响。若安装精度控制不足，将直接增加调试返修和运行安全风险。因此，研究大型静设备安装工艺优化与调试质量控制方法，对提升煤化工工程建设质量和装置稳定运行具有现实意义。

1 煤化工装置大型静设备安装工艺优化与调试质量控制研究概述

煤化工装置中的大型静设备主要涵盖气化炉、洗涤塔、变换炉、分离器以及大型换热器等承压或非旋转类核心单元，其安装质量直接关联装置长周期运行的结构稳定性、密封可靠性以及工艺介质传递效率。鉴于此类设备普遍具有体积大、重量高、接口多、基础荷载集中以及现场交叉作业频繁等特性，传统依靠经验放线、分散吊装以及事后校正的安装方式，容易把制造偏差、基础偏差以及吊装变形累积到设备就位阶段，进而增加调试期间的返修概率。从工程实施角度来看，安装工艺优化不宜仅停留在施工顺序调整层面，而应把三维模型校核、模块化预制、吊装受力分析以及安装过程测量复核纳入统一技术链条。调试质量控制则需要围绕设备找正、管口应力释放、内件完整性检查、严密性试验以及联动条件确认开展全过程管理，使安装结果能够满足煤气化、净化、合成等连续工艺对安全裕度和运行稳定性的要求。

2 大型静设备安装工艺优化策略

2.1 基于BIM的安装精度预控工艺优化

煤化工装置大型静设备的安装偏差会沿基础、筒体、管口以及附属钢结构持续传递，气化炉以及反应器等设备还承受高

温、高压以及多介质耦合作用，若就位阶段未把垂直度、标高以及管口方位控制在设计容许范围内，后续管道组对容易形成附加应力。以100万吨/年甲醇装置气化炉安装为对象，可把BIM当作安装精度预控平台来使用，将设备制造尺寸、基础复测数据、预埋螺栓坐标、吊装路径以及检修空间统一导入三维模型，开展碰撞检查以及安装姿态模拟。模型校核阶段需把基础顶面标高偏差控制目标设为 ± 3 mm，设备中心线偏差控制目标设为5 mm，筒体垂直度按 $H/1000$ 且不大于10 mm进行约束，关键管口方位偏差控制在2 mm以内。现场实施时，技术人员依据BIM模型输出的控制点坐标开展测量放样，并且把全站仪复测值回传模型进行偏差比对，使找平垫铁布置、地脚螺栓调整以及筒体找正能够在就位前完成预判。该流程把传统事后校正转化为安装前预控以及安装中复核，可减少因管口错位、平台干涉以及基础偏差引起的返工次数。

2.2 模块化组装与现场拼接工艺改进

鉴于案例气化炉筒体高度大、内件层级多以及现场高空作业受限等现实条件，模块化组装可把安装工作从露天交叉作业环境转移至可控预制场景。工艺设计中将气化炉划分为炉体上段、炉体下段以及内件模块，工厂阶段完成坡口加工、环缝预组对、内件定位以及接口尺寸复核，同时对喷嘴、衬里支撑件以及内部导流构件开展预调试检查。现场拼接阶段需设置环向定位卡具、临时支撑胎架以及可调式中心定位杆，把上下段筒体同轴度以及环缝间隙纳入同一工装体系进行控制。焊接工艺参数宜结合母材厚度以及焊材特性进行分层设定，手工电弧焊电流可控制在120 A至160 A，电压控制在22 V至26 V，埋弧焊电流可控制在520 A至620 A，电压控制在28 V至34 V，并且配合对称分段退焊来降低焊接残余变形。该流程如图1所示，其核心在于把制造、运输、拼接以及复核节点串联起来，

使现场安装周期由大量散件组装转向少量模块对接。

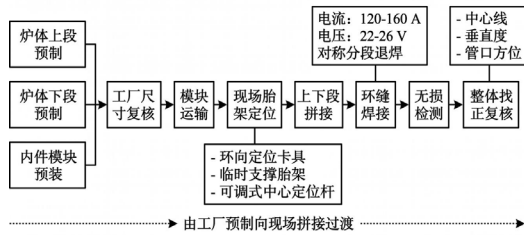


图1 模块化组装与现场拼接工艺流程图

2.3 吊装方案的力学仿真优化

大型气化炉吊装过程受到设备自重、吊索夹角、风荷载以及起重机幅度变化共同影响，仅依靠经验选取吊点容易造成局部应力集中。针对 100 万吨 / 年甲醇装置气化炉，可运用有限元仿真软件建立筒体、吊耳、加强板以及索具等效模型，把设备重量、吊索方向以及起吊姿态作为边界条件输入，分析吊耳根部应力、筒体椭圆化趋势以及重心偏移对翻转风险的影响。吊点受力核算可由吊索与竖直方向夹角引出，吊点合力按下式计算：

$$F = G \times \sin \theta$$

其中， F 表示吊点合力，单位为 kN， G 表示设备重量，单位为 kN， θ 表示吊索与竖直方向夹角，单位为°。

在吊装稳定性评价中，还需把设备重心、吊点投影以及起重机支腿反力纳入力矩平衡分析，稳定性系数按下式计算：

$$K = \frac{M_{\text{稳}}}{M_{\text{倾}}}$$

其中， K 表示吊装稳定性系数， $M_{\text{稳}}$ 表示稳定力矩，单位为 kN·m， $M_{\text{倾}}$ 表示倾覆力矩，单位为 kN·m。

结合仿真计算结果，可对吊点位置进行迭代调整，使吊耳受力避开筒体开孔密集区，并且依据最大计算拉力选配钢丝绳、卸扣以及平衡梁。吊装方案还应限定起吊半径、回转速度以及试吊高度，把力学计算结果转化为现场可执行的作业边界，从而使气化炉吊装过程具备较充分的安全裕度。

3 调试质量控制与应用效果评估

3.1 安装后调试质量控制体系构建

大型气化炉完成就位、找正以及管口组对后，调试质量控制需要把安装实体状态转化为可监测、可判定以及可追溯的过程数据。鉴于 100 万吨 / 年甲醇装置气化炉承压等级高、介质切换频繁以及内件受热状态复杂等工况特性，现场宜建立单机调试、系统联动调试、负荷试车三级调试质量控制体系。单机调试阶段重点围绕设备本体完整性开展确认，检查内容涵盖地脚螺栓紧固状态、垫铁接触质量、筒体垂直度复测、喷嘴以及人孔密封面保护状态，同时对仪表测点、热电偶套管、压力取源管以及安全附件进行回路校验。压力监测宜把设计压力、升压速率以及保压波动作为控制对象，气密试验期间压力波动应保持在工艺文件允许范围内，密封面不得出现连续性泄漏痕迹。温度监测则需要覆盖炉壳、衬里支撑区以及关键管口附近测点，避免局部升温过快造成衬里应力集中。

系统联动调试阶段应把气化炉同洗涤塔、黑水管线、合成气出口管线以及联锁保护系统纳入同一运行边界进行检查，重点观察管口位移、支吊架受力、阀门动作响应以及联锁切断逻辑的匹配情况。负荷试车阶段应结合投料升负荷曲线开展连续跟踪，压力、温度、密封性能以及振动响应需要形成班组记录、专业复核以及项目确认的闭环资料。调试问题的处置不宜停留在现场经验判断层面，而应形成快速识别、风险分级、原因复核、措施执行以及复验销项的流程。对于法兰渗漏、仪表漂移、管口附加应力异常等问题，施工、设计、监理以及生产单位应同步核对安装记录和调试曲线，把处理措施限定在可验证的技术范围内，从而提高调试阶段质量判定的一致性。

3.2 优化方案的应用效果评估

围绕案例气化炉的安装以及调试过程进行对比可以发现，BIM 精度预控、模块化组装以及吊装仿真优化把原本分散的施工控制点转化为连续受控的技术链条，安装周期、精度误差、调试故障率以及项目成本均呈现较为明确的改善趋势。相关对比结果见表 1。

表1 气化炉安装工艺优化前后效果对比表

对比指标	优化前状态	优化后状态	变化情况	工程质量含义
安装周期	60 d	45 d	缩短25%	模块预制以及现场拼接减少高空散装等待时间
安装精度误差	±5 mm	±2 mm	误差收敛60%	管口组对偏差降低，后续管道附加应力减小
调试故障率	12%	3%	降低9个百分点	密封返修、仪表回路异常以及联锁误动作明显减少
项目成本	100%	85%	降低15%	吊装等待、返工焊接以及临时措施费用得到压缩
高空交叉作业时长	320 h	180 h	减少43.75%	作业暴露时间缩短，人员坠落以及物体打击风险降低
管口复核次数	6次	2次	减少66.67%	BIM坐标复核提高了就位前偏差预判能力

从表 1 数据来看，安装周期由 60 d 缩短至 45 d，主要缘由于炉体模块在预制阶段完成了环缝预组对、内件定位以及

接口复核,现场施工由多工序穿插转向少量关键节点衔接。安装精度误差由 $\pm 5\text{ mm}$ 收敛至 $\pm 2\text{ mm}$,说明全站仪复测数据回传BIM模型后,基础标高、中心线以及管口方位的偏差能够在设备最终固定前得到调整。调试故障率由12%降至3%,表明前端安装精度控制对气密性、联锁稳定性以及管道应力释放具有传递性影响。项目成本降低15%,不仅来自工期压缩,也来自返工焊缝、脚手架延期以及大型吊机待机费用的减少。安全风险层面,高空交叉作业时长由320 h降至180 h,吊点受力经过仿真核算后,起吊半径、回转速度以及试吊高度获得明确约束,设备翻转、吊耳超载以及筒体局部变形的风险随之下降,

优化方案对大型静设备安装全过程质量控制具有较强的工程适配性。

4 结语

大型静设备安装质量控制应由单一施工管理转向设计、预制、吊装、测量、调试协同控制。通过BIM精度预控、模块化拼接、吊装仿真和调试闭环管理,可将偏差识别前移,将风险控制嵌入施工全过程。工程应用表明,该方法在缩短工期、降低误差、减少故障和控制成本方面具有明显效果。后续工程中还应强化数字化数据积累,完善安装参数与运行状态之间的关联分析,进一步提升煤化工装置建设与运维的一体化管理水平。

参考文献

- [1]黎成,何康.电站机电设备安装过程中“美丽机电”工艺的探索与实施[J].安装,2024,(S2):74-76.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]张本峰,吴培.大型煤化工装置联动改造应用总结[J].现代化工,2024,44(12):220-223.
- [5]刘昌健.化工电气自动化仪表安装检修技术研究[J].天津化工,2025,39(06):41-43.
- [6]高云波.煤化工装置配体催化剂消耗分析及研究[J].中国煤炭,2024,50(07):148-153.
- [7]赵原林.煤化工气化炉液位计改造与应用[J].石化技术,2025,32(11):50-52.
- [8]于爱霞.LNG-FSRU电力系统改装过程中的关键工艺节点把控[J].船舶物资与市场,2025,33(11):71-73.
- [9]胡方华.迈湾水利枢纽工程大型机组座环及蜗壳安装工艺[J].水电与新能源,2025,39(11):63-65+69.

作者简介:刘爱亨(1975—),男,汉族,本科,研究方向为设备工程。