

石油化工装置区混凝土基础二次灌浆施工质量控制研究

王振

中国石油工程建设有限公司华北分公司 河北任丘 062552

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21574

[摘要] 炼化大型动设备混凝土基础二次灌浆易产生空鼓、开裂、底座偏移等质量问题。以42t级离心式压缩机为工程实例，结合现场空间狭小、工序交叉、工况复杂的施工条件，开展施工质量管控研究。文章围绕施工前置质控、核心灌浆工艺、全过程动态监测，优化基面处理、设备找正、模块化支模、分区灌注、恒温养护等关键工序，构建多维传感预警与BIM联动监测体系。工程对比试验表明，优化工艺可提升设备找正精度与灌浆密实度，降低返修率与施工成本，解决受限空间内大型设备灌浆施工质量难题，可为石化同类设备基础灌浆施工提供技术参考。

[关键词] 二次灌浆；动设备基础；施工工艺；质量管控；动态监测

引言

炼化大型离心式压缩机是装置核心动设备，基础二次灌浆施工质量影响设备运行稳定性与使用寿命。设备长期承受轴向与径向交变荷载，传统灌浆工艺易产生灌浆层空鼓、开裂、底座偏移缺陷。石化装置设备集中、作业空间狭小、工期紧张，提升了灌浆施工的质控难度。结合传统施工精度、密实度不达标的各类问题，依托炼化工程梳理前置管控要点，优化灌浆施工工艺，建立全程动态缺陷防控体系。现场试验验证工艺应用优势，可形成适配石化受限场景的灌浆质控技术方案。

一、装置基础工况与施工前置工序质量管控

（一）大型动设备混凝土基础结构承载特性

研究以炼化装置42t级离心式压缩机为工程案例，分析大型动设备混凝土基础二次灌浆施工质量控制要点^[1]。设备基础为C50整体现浇钢筋混凝土结构，底板厚度不低于800mm，主体设置双层 $\Phi 25$ 主筋，锚固区域布置双向加密钢筋，钢筋间距控制在150mm内，依靠12组M36锚栓固定设备底座。机组额定转速7350r/min，运行产生82kN轴向、66kN径向峰值载荷，交变荷载易造成灌浆层空鼓、开裂缺陷。基础一阶固有频率超38Hz、阻尼比不小于0.05，有效规避共振现象，设备安装形位偏差控制在0.05mm以内。高强混凝土与加密配筋可分散交变应力，弱化灌浆结构隐患，为二次灌浆施工及质量管控提供稳定的结构条件。

（二）装置现场多维度施工约束条件

压缩机灌浆施工位于石化装置设备密集区域，周边管廊、

钢结构、电气桥架交叉分布，施工受限条件突出。设备周边作业净空间不足1.8m，竖向净空2.4m，运输通道宽度4.2m，大型机具无法进场，施工采用轻量化模块化作业模式。施工周期与土建工序交叉重叠，有效作业时长仅7d，夜间温湿度波动明显，不具备夜间灌浆施工条件。现场地基承载力不足，禁止重载设备通行，基础钢筋密度620根/ m^2 ，结构内部易形成灌浆死角与积气区域，削弱灌浆密实度。场地粉尘浓度3.2mg/ m^3 、噪声超85dB，干扰测量仪器精度与设备找正状态，对二次灌浆整体精度控制与环境适配性提出较高要求。

（三）基础基面界面粘结处理工艺控制

基面界面处理是二次灌浆前置核心工序，直接影响灌浆层与基体粘结效果，可规避结构脱空、分层、开裂问题^[2]。工程采用高压水喷砂清理基面杂质，外露密实骨料并保持饱和面干状态，涂刷水泥基界面剂。处理后界面粘结强度可达1.6MPa，隐蔽区域人工补涂用料。打磨设备底座并校验平面度，严控平整度偏差，弱化应力集中，优化界面粘结条件，保障灌浆结构协同受力。

（四）设备找正与底座锚固防偏移措施

高精度设备找正与底座锚固防护，是二次灌浆施工的核心前置工序，能够规避灌浆后基准偏移、设备振动异常及密封失效等隐患。工程依托厂区永久控制点搭建三维测量体系，搭配精密仪器与对称找正工艺调控底座水平状态，严控垫片承压偏差。系统实时采集施工数据、监测微位移，完成底座刚性锁定后预留应力缓冲及静置周期，消除残余应力，维持设备找正精度的长期稳定。

二、混凝土基础二次灌浆核心施工工艺控制

（一）模块化灌浆模板及排气密封系统构造

工程采用 6mm 厚钢制模块化模板适配狭小施工空间，利用 M12 膨胀螺栓固定，布设间距 250mm，结构刚度可靠且拆装便捷。模板内侧粘贴发泡橡胶止浆带，密封系数超 0.92，杜绝灌浆渗漏^[3]。腔体布设多组排气管与导气槽，依靠高差形成排气通路，消除灌浆空腔空鼓隐患。预制模块可缩短支模工期，模板挠度严格受控，可抵抗浆体侧向压力，防止变形跑模，保障灌浆腔体成型质量。

（二）专用灌浆材料选型、拌合参数管控

动设备基础二次灌浆选用高流动性无收缩水泥基灌浆料，严控材料核心性能，初始流动度、24h 抗压强度与线膨胀率均满足施工标准，微膨胀特性可补偿浆体水化收缩，保障腔体充盈效果。现场采用高速强制搅拌设备制备浆料，稳

定搅拌转速与拌合时长，保证浆料质地均匀，规避结块、离析问题。浆体入模温度保持恒定，结合现场环境调整施工举措，稳定浆体凝结状态。浆料于初凝时段一次性灌注，不重复加水搅拌，各批次留存试块并记录施工数据，构建可追溯的材料质量管控体系。

（三）分区对称灌注流速、压力时序调控

为规避灌浆单侧压力引发底座偏移，工程采用分区对称灌注工艺，依照既定灌注时序划分独立腔体分区同步施工，平衡浆体侧向压力。施工把控浆面抬升速度，依托浆体自重完成腔体充盈，监测灌浆入口压力并限定峰值区间，规避高压扰动造成底座位移偏差。各分区排气口排出均质无气泡浆体后及时封闭，灌注结束辅以稳压补浆，弥补浆体初期沉降收缩。工艺结合实时压力数据调整泵送参数，实现施工指标闭环管控，提升灌浆充盈均匀度与整体施工稳定性（见图 1）。

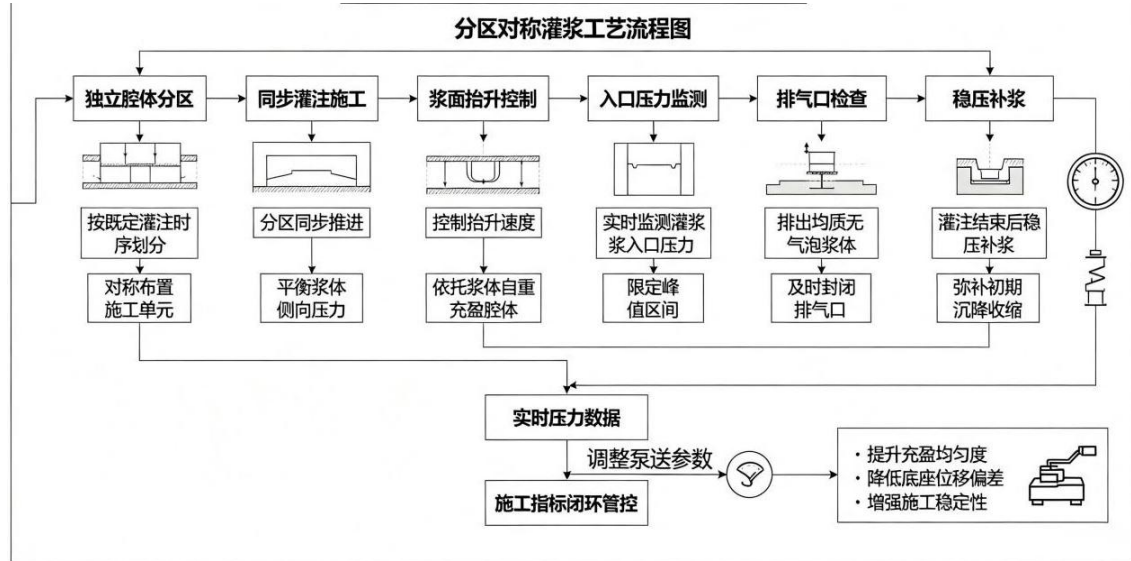


图 1 分区对称灌浆工艺流程图

（四）灌浆固化阶段温湿度养护闭环管理

灌浆封堵作业完成后即可启动分区恒温恒湿养护体系，整体湿养护周期设置为 7d，养护环境温度维持 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度保持 95% 以上。现场搭设封闭式养护棚配套温控喷淋设备，依托预埋元件监测灌浆层水化温度，结合强度龄期公式判定设备验收节点。常态化巡检调控养护环境，将结构内外温差控制在 8°C 以内，规避温差应力产生的细微裂缝，全程归档养护数据，保障灌浆体强度稳步提升。

三、灌浆全过程动态监测与质量缺陷防控体系

（一）多维传感实时监测系统搭建方案

工程搭建覆盖设备找正、浆料灌注、结构固化全周期的多维传感监测平台，搭载多类精密设备采集施工状态数据，覆盖设备姿态、模板位移、灌浆压力、机体振动及浆体水化温度指标^[4]。传感设备依托通讯协议上传实时数据至管控终端，搭载快速预警功能，可及时捕捉施工偏差与潜在质量隐患。系统数据库留存各类施工信息实现数据溯源，监测数据对接 BIM 模型形成动态信息体系，完成灌浆全过程高精度数字化感知，为二次灌浆精细化质量管控提供完善数据支撑。

（二）灌注阶段空鼓、底座上浮风险预警

灌浆灌注施工阶段针对空鼓、底座上浮、模板偏移等频发

的施工质量隐患，搭建适配现场工况的多维度传感预警防控体系。浆体声波透射率作为判定灌浆空鼓问题的核心标准，监测数值低于 92%时即刻触发预警，工作人员核对灌浆容积差异，及时排查腔体积气、注浆通道堵塞等各类施工问题。激光位移传感器不间断监测模板及设备底座位移变化，设置±1.0mm 的位移偏差控制标准，监测数据超限时立即暂停灌注作业，同步监测模板底部切应力并控制在 0.4MPa 以内，有效规避模板变形移位问题。倾角与高频振动传感器联动监测底座运行状态，主轴倾斜角、轴承座振动幅值超出预设限定标准时，及时复核核查设备找正精度与灌浆密实度，这套预警体系可实现施工缺陷前置防控，有效规避各类不可逆的施工质量问题。

（三）固化期水化温差与基础沉降监测

灌浆固化养护阶段可依托预埋热电偶，持续采集灌浆层内部、表层及基础母体温度数据，实时计算水化温差数值，将整体温差稳定控制在 8℃以内，削弱温差应力带来的结构裂缝隐患。现场以 0.5m 网格间距布设沉降监测点位，搭配高

精度水准仪与变形监测设备，定期记录基础沉降差值与形变发展趋势。设备试运行阶段利用三轴加速度传感器捕捉振动信号，结合频谱分析与刚度衰减规律研判基础结构状态，刚度降幅突破 5%即可判定结构存在内部损伤。基础沉降差、设备倾斜角度超出限定数值的区域，均列为复检补灌重点区域。各类监测数据统一留存归档，长期跟踪灌浆结构整体稳定性，为成品质量评定与设备后期运维提供可靠数据支撑。

（四）灌浆密实度检测与成品质量验收管控

养护完成后，采用声波透射扫描与体积核算相结合的方式检测灌浆密实度，工艺实测密实度达 96.8%，同步核查设备找正、基础沉降及表面裂缝等验收指标。为验证优化工艺效果，选取两台同规格压缩机开展对比试验，A 机组采用传统施工工艺，B 机组采用模块化施工与动态监测优化工艺，统一施工周期 12d。试验结果表明，优化工艺在找正精度、灌浆密实度、返修率、施工效率及材料利用率等方面优势显著，具体指标对比如下表所示：

表 1 灌浆密实度检测

评估指标	传统工艺机组	优化管控工艺机组	指标变化幅度
设备找正误差标准差/mm	±0.118	±0.038	降低 67.8%
灌浆层实测密实度/%	89.7	96.8	提升 7.9%
灌浆局部返修率/%	11.3	3.1	降低 72.6%
灌浆前找正调整次数/次	5	2	减少 60%
完整施工总工时/(人·h)	428	334	减少 21.96%
灌浆材料总消耗量/kg	1280	1186	节约 7.34%

成品验收阶段需同步核验全过程监测数据、拌合记录、养护台账及传感报警资料，结合 BIM 施工信息图谱复核全工序管控轨迹。需确保灌浆密实度、设备安装精度、运行振动稳定性等指标全部达标，方可完成基础验收。该模式形成施工、检测、验收一体化闭环质控体系，有效保障大型动设备二次灌浆基础的长期运行结构可靠性。

结语

本文依托大型炼化压缩机基础工程，构建了涵盖前置管控、工艺优化、动态监测的一体化二次灌浆质控体系。通过模块化施工、分区灌注、恒温养护及多维传感预警技术，有效解决狭小空间施工、结构缺陷、灌浆密实度不足等行业难题。实测证明，优化工艺可提升设备找正精度与灌浆成型质量，降低返修率与材料损耗。该体系适配石化复杂施工场景，

实用性与可靠性突出，可为同类动设备灌浆施工优化及运维管理提供工程参考。

【参考文献】

[1]张峰. 钢结构防火涂料在石油化工装置中的应用[J]. 天津化工, 2025, 39(4):160-163.

[2]汉建德. 石油化工装置仪表电缆优化设计探讨[J]. 石油化工自动化, 2025, 61(1):34-39.

[3]李赫, 徐蒙. 石油化工装置设计中的能源优化与节能减排研究[J]. 石化技术, 2024, 31(7):57-59.

[4]王立超. 石油化工装置电气照明设计的流程与应用[J]. 化工管理, 2021, (28):149-150. [5]徐辉, 逯志斌. 钢柱脚与混凝土基础连接节点二次灌浆层的处理措施[J]. 住宅与房地产, 2021, (16):115-116.