

大口径化工管道现场安装难点及无应力解决对策

张巨业

陕西化建工程有限责任公司 陕西兴平 713100

DOI:10.32629/ems.v8i6.20541

[摘要] 针对化工工程中大口径管道现场安装易产生残余应力、变形超标、对口精度不足等技术问题，对大口径化工管道现场施工的核心技术难点进行了分析。从管道自重变形、精准对口装配、支架受力平衡、焊接应力控制及设备接口对接五个施工维度进行了论述，结合化工现场复杂工况特性，梳理出各类应力缺陷产生的技术诱因。依托一线施工实操经验，提出了预制堆放防控、无应力对口装配、支架精细化安装、焊接消应力处理及设备接口精准对接等专项施工方法。结合实际化工工程项目进行了工艺落地应用，开展了传统施工与无应力施工的质量对比研究。结果表明，整套无应力施工工艺可有效消除管道安装残余应力，控制管道变形偏差，达到了提升管道安装精度、降低后期泄漏及形变失效风险的效果，解决了大口径化工管道现场安装应力集中、装配精度差的核心技术问题，可为同类化工管道施工提供技术参考。

[关键词] 大口径化工管道；现场安装；无应力施工；变形控制；对口装配

一、研究目的

大口径化工管道是化工装置物料输送、介质换热的核心基础设施，普遍应用于高温、高压、强腐蚀的严苛工况环境，管径大、管壁厚重、管线跨度长的结构特点，让其现场安装施工难度远高于普通管道。现场安装过程中，受自重荷载、人工装配误差、焊接热变形、支架受力不均及设备基准偏差等多重因素影响，管道极易产生残余应力与塑性变形，不仅会造成管道对口错位、密封不严、焊缝缺陷等施工质量问题，长期运行后还会引发管道开裂、介质泄漏、设备接口受力损伤等安全隐患，直接影响化工装置稳定运行。为彻底解决大口径化工管道安装应力超标、变形失控、装配精度不足的技术难题，规避强制装配、野蛮施工带来的质量隐患，保障管道系统安装精度与运行稳定性，本次研究聚焦现场施工全流程技术要点，针对性攻克各类安装难点，总结适配化工复杂工况的无应力施工技术，为大口径化工管道标准化、高质量施工提供实操技术支撑。

二、大口径化工管道现场安装核心难点分析

（一）管道自重与变形控制难点

大口径化工管道多为碳钢、不锈钢厚壁管材，单根管道自重极大，部分大直径高压管道单米重量可达数百千克。管道从预制场地转运至施工现场、临时堆放、吊装就位的全过程中，若支撑点位设置不合理、堆放层数超标、吊装吊点选择不当，极易出现不均匀弯曲变形。化工现场施工场地有限，管道临时堆放多为多层堆叠，底层管道长期承受上层荷载挤压，容易产生不可逆的塑性形变。同时，长跨度架空管道未

完成固定前，仅依靠临时支撑受力，自重荷载会让管道中段产生自然下垂，导致管道轴线偏移，后续对口装配时出现错边、间隙不均问题，强行校正后会留存大量残余应力，为后期运行埋下隐患。这类微小形变在低压管道中可忽略，但大口径厚壁管道刚度敏感度高，微量变形即可造成系统性对口偏差。

（二）高精度对口装配施工难点

大口径管道端口截面尺寸大，端口椭圆度、端面垂直度偏差对装配精度影响极大。管道切割、坡口加工过程中，人工操作或设备精度偏差，容易造成端口不平整、坡口角度不均、管口椭圆度超标等问题。现场装配时，受场地空间限制、管道位移难度大、相邻管线遮挡等影响，管道同心度、法兰平行度难以精准把控。实际施工中，常出现螺栓孔错位、法兰间隙不均匀、管口错边超标等情况，部分施工人员为加快进度，会采用撬棍撬动、千斤顶强制顶推等方式强行对口，直接导致管道内部产生弯曲应力与剪切应力，是管道后期变形、密封失效的主要诱因。

（三）支架安装与受力平衡难点

管道支架是承载管道荷载、均衡管道受力的核心构件，大口径管道荷载分布不均对支架安装精度要求极高。化工管道系统支架数量多、类型杂，包含固定支架、滑动支架、导向支架等，不同支架的安装标高、间距、限位角度均有严格技术要求。现场施工中，容易出现支架预埋位置偏差、标高误差超标、支架接触面不贴合管道外壁等问题，导致管道荷载集中于局部支架，部分支架悬空不受力、部分支架过载承压。管道受力失衡后，会产生局部应力集中，长期运行过程

中, 应力持续累积, 会引发管道变形、支架焊缝开裂, 甚至造成管道整体位移。

(四) 现场工况与焊接应力控制难点

大口径管道焊接坡口深、焊缝填充量大, 焊接过程中会产生剧烈的热胀冷缩效应, 是残余应力产生的核心环节。化工施工现场多为露天或装置密集区域, 环境温度、风力、湿度波动较大, 无法像预制车间一样保持恒温恒湿施工条件。现场焊接时, 局部高温加热与快速冷却的温差效应, 会让焊缝区域与管道母材产生不均匀形变, 形成焊接残余应力。同时, 大口径管道环形焊缝焊接作业量大, 多层多道焊的焊接顺序不当、层间温度控制不规范、焊接电流电压不稳定等问题, 会进一步加剧应力堆积, 导致管道焊接后出现弯曲、扭曲变形, 焊缝内部产生微裂纹缺陷。多道焊接累积的温差形变, 是大口径管道焊接扭曲、端口偏移的核心诱因。

(五) 设备接口对接无应力控制难点

大口径化工管道多与反应器、换热器、储罐、泵体等核心工艺设备对接, 设备接口精度直接决定管道对接质量。设备出厂、吊装就位后, 受基础沉降、设备找平找正偏差、设备自身形变影响, 接口法兰常存在标高偏差、角度偏移问题。管道与设备对接时, 若以设备偏差接口为基准强行适配管道, 会让管道整体处于受力状态, 产生持续性装配应力。此外, 设备接口属于精密受力部位, 应力集中会直接损伤设备密封面与接口母材, 极易造成运行阶段介质渗漏, 严重时会导致设备接口开裂, 引发安全生产事故。管道与设备刚性对接的特殊性, 使其成为整个管系应力最集中的薄弱节点。

三、大口径化工管道无应力施工解决对策

(一) 管道预制与堆放变形防控对策

从源头管控管道形变问题, 预制阶段严格把控管道切割、坡口加工精度, 采用机械切割设备替代人工火焰切割, 保证管道端面垂直度、坡口角度、管口椭圆度符合施工规范, 从根部减少装配偏差。管道预制完成后, 分类分区进行堆放管控, 禁止多层堆叠堆放, 根据管道管径、重量设置专用承重垫木, 垫木间距均匀布置, 贴合管道受力支点, 避免管道局部悬空受压。吊装作业时, 选用两点对称吊装方式, 精准确定吊点位置, 搭配柔性吊装带替代钢丝绳, 防止管道外壁挤压变形, 吊装过程平稳缓慢, 杜绝拖拽、磕碰管道, 最大程度规避自重与外力引发的塑性变形。

(二) 无应力精准对口装配施工工艺

摒弃传统强制对口施工方式, 推行无应力精准对口工艺。

对口作业前, 先清理管道端口杂物、氧化皮, 复测管口尺寸、椭圆度, 对超标端口进行修磨校正。采用水平仪、百分表、专用对口器辅助装配, 实时检测管道同心度、法兰平行度, 保证法兰间隙均匀、所有螺栓孔可自由穿入, 无任何卡涩阻力。针对管道微小偏差, 通过微调临时支撑高度、小幅挪动管道位置的方式逐步校准, 严禁撬动、顶推强制对口。对口完成后, 先进行临时固定, 静置观察无形变、无应力残留后, 再开展后续焊接作业, 彻底消除装配应力。

(三) 管道支架精细化安装与受力优化

实施支架精细化安装施工, 施工前精准复测施工现场基准标高、轴线, 严格按照图纸定位支架安装点位, 严控支架预埋、焊接精度, 保证支架安装标高、间距、角度偏差控制在规范允许范围内。支架安装完成后, 逐一检查支架与管道外壁的贴合度, 杜绝悬空、虚接问题。根据管道荷载分布特性, 优化支架受力体系, 固定支架精准限位、滑动支架保证自由伸缩、导向支架严控偏移范围, 让管道自重、介质荷载均匀分散至各个支架, 实现整体受力平衡。对大跨度管道增设辅助支撑点位, 避免管道中段下垂形变, 从结构上规避应力集中问题。

(四) 焊接应力控制与消应力处理技术

结合现场工况优化焊接工艺, 严控焊接全过程温度与参数。施工前根据管道材质、壁厚编制专项焊接工艺卡, 确定合理的焊接电流、层间温度、焊接速度, 采用对称分段、多层多道的焊接顺序, 避免局部集中受热。露天施工时, 搭设防风、保温防护棚, 规避环境温差、风力对焊接质量的影响。每层焊缝焊接完成后, 及时清理焊渣, 检测层间温度, 待温度降至规范区间后再进行下一道焊接。全部焊接作业完成后, 对管道焊缝区域采用履带式加热设备进行低温消应力热处理, 通过均匀升温、恒温保温、缓慢降温的方式, 释放焊接残余应力, 同时对焊缝外观及内部进行无损检测, 确保无应力缺陷与焊接瑕疵。

(五) 设备接口无应力对接控制措施

设备就位后优先完成找平找正与沉降观测, 待设备基础稳定、位置固定后, 再开展管道对接施工, 杜绝设备形变、位移引发的对接偏差。管道与设备接口对接前, 以设备接口基准为核心, 精准复测接口标高、角度、法兰平整度, 根据实测数据微调管道尺寸, 适配设备接口状态, 禁止强行适配偏差接口。对接过程中, 采用对称分步紧固螺栓的方式, 均匀释放装配应力, 保证接口密封面均匀受力。对接完成后,

静置 24 小时复测管道形变与接口受力状态，确认无应力集中、无位移偏差后，方可完成最终固定，保障设备接口长期稳定运行。

四、工程实例应用与效果分析

本次研究的无应力施工成套技术，成功应用于万华化学（福建）有限公司年产 108 万吨苯胺项目二期 3#硝酸装置，压缩机工艺管道直径为 DN600-DN2000 大口径厚壁不锈钢管道，涵盖高温蒸汽输送、腐蚀性介质输送管线，管线最大架空跨度 12.8m，施工场地紧凑、周边设备密集，属于典型的复杂化工施工工况，极易出现管道变形、应力集中、对口精度超标的问题，施工难度与以往常规管道工程差异极大。该项目 2#硝酸采用传统施工工艺，施工过程中暴露出多项典型质量问题，管道无应力调整困难，后续全线推行本文所述无应力施工工艺，通过前后施工质量对比，直观验证工艺应用效果。

2#硝酸施工时，沿用传统吊装、强制对口、常规焊接的施工方式，未做精细化形变防控与应力处理。施工完成后检测发现，大跨度架空管道普遍存在中段下垂形变，最大竖向偏差达 4.2mm，管口错边偏差超标点位占比 28.6%，法兰对口间隙不均、螺栓孔轻微卡涩问题频发。焊接完成后经无损检测，焊缝残余应力集中点位较多，局部区域应力值超出规范允许范围，部分滑动支架存在悬空、受力不均现象，管道整体受力体系紊乱，若直接投入使用，大概率会出现后期形变、密封泄漏等隐患，后续不得不对样板段管道进行返工校正。

针对暴露的问题，项目后续施工全面落地无应力施工技术体系。管道预制阶段全部采用机械设备加工端口，严控管口椭圆度与端面垂直度，预制完成后采用单点独立垫木支撑堆放，杜绝多层挤压变形。吊装就位选用对称吊点搭配柔性吊装带，通过微调临时支撑高度完成管道精准对位，全程摒弃撬棍、千斤顶强制校正的操作。支架施工前逐一复测基准点位，精准把控安装标高与贴合度，优化大跨度管线辅助支撑布局，让管道荷载均匀分散。焊接作业搭设防风保温棚，严格执行对称分段焊接工艺，每层焊道严控层间温度，焊接完成后统一开展低温消应力热处理，彻底释放焊缝残余应力。设备接口对接全程以设备实测基准为准，微调管道适配接口偏差，采用对称分步紧固方式完成法兰对接，规避强制装配应力。

全线施工完成后的检测数据显示，应用无应力施工工艺后，管道竖向形变最大偏差仅 1.1mm，远低于规范允许的 3mm

偏差标准，管口错边、法兰间隙不均问题基本消除，对口精度合格率提升至 100%。焊缝无损检测结果显示，残余应力完全处于规范可控区间，无应力集中、微裂纹等缺陷，焊接一次合格率较传统施工提升 12.3%。同时，管道支架全部贴合受力，无悬空、过载工况，设备接口密封面受力均匀，无装配残余应力留存。装置运行以来，该批次大口径管道未出现形变、渗漏、接口松动等问题，压缩机运行状态稳定，相较于同类型传统施工管道，后期维护频次与故障发生率大幅降低，充分验证了这套无应力施工工艺的实用性与可靠性。

五、结论

大口径化工管道现场安装的核心技术问题集中于自重形变、装配偏差、支架受力失衡、焊接应力堆积及设备接口强制对接五个方面，各类问题相互叠加，是引发管道质量缺陷与运行隐患的关键诱因。通过落实源头形变防控、无应力精准对口、支架精细化受力优化、焊接全过程应力管控及设备接口柔性对接的成套施工技术，可系统性解决大口径化工管道安装的应力与形变问题。工程实践证明，该套无应力施工工艺适配化工复杂现场工况，能够有效控制管道安装残余应力，提升管道装配精度与焊接质量，杜绝强制装配带来的隐性隐患。整套技术操作贴合现场施工实际，无需复杂设备与理论改造，可直接应用于各类大口径化工管道安装工程，对提升化工管道施工质量、保障化工装置安全稳定运行具备重要的工程应用价值。

[参考文献]

- [1] 米孜拉夫·麦麦提, 杨帆, 张伟, 等. 裂解气压缩机管道无应力安装[J]. 乙烯工业, 2022, 34(2): 65-68, 70.
- [2] Shengyuan Niu¹, Xueda Li^{CA2}, Congyue Liu, et al. Study on low temperature and narrow heating bands of post weld heat treatment for girth welds stress reduction of long-distance pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, Vol. 212: 105347.
- [3] 胡家郡, 付雪峰, 熊峰. PTFE 滑板在化工项目管道系统支吊架中的应用[J]. 中氮肥, 2023, (6): 54-57.
- [4] 杜敬华. 应力分析支持下的化工管道柔性设计研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(10): 129-132.
- [5] 高开科. GB/T20801—2020《压力管道规范-工业管道》阀门逸散要求解读[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4): 70-77.