核电管道形变防控与装配工艺优化

姬海洋

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司　浙江　杭州　310000

摘　要：核电管道装配形变与误差超标是影响核电机组施工质量与运行安全的核心问题。本文系统分析核电管道各类形变特征、成因及传统装配工艺的弊端，从预制、现场装配、缺陷修复多维度构建形变防控技术体系，重构优化装配工艺流程。通过有限元仿真与工程实践验证，优化工艺可大幅降低管道形变量、提升装配精度与施工效率，有效保障核电管道结构稳定性，可为核电管道施工质量管控提供技术支撑。

关键词：核电管道；形变防控；装配工艺优化

引言：核电管道是核电机组能量传输与介质输送的核心构件，其装配精度与结构稳定性直接关乎机组安全运行。核电管道服役工况严苛，受材料、高温高压环境及施工工艺影响，易产生塑性形变、装配偏差等质量缺陷，传统装配工艺存在误差累积、形变管控滞后等问题。为解决上述施工痛点，本文深入探究管道形变机理，研发专项防控技术并优化装配工艺，旨在提升核电管道装配质量，筑牢核电工程安全施工基础。

1 核电管道形变机理及装配误差成因分析

1.1 核电管道典型形变类型及特征

（1）管道塑性形变表现为管壁截面颈缩、弯头处壁厚减薄及直径局部胀大，形态呈永久性几何尺寸改变，多发生于超设计基准事故工况或焊接热影响区高温蠕变场景；弹性形变则表现为管系弹性跟随、热位移补偿及振动响应下的可恢复挠曲，在温度循环载荷作用下频繁出现于支吊架约束区段[1]。（2）管道弯曲缺陷呈现轴线曲率突变，多发生于吊装翻身及冷弯成型工序；扭曲缺陷表现为截面角扭转，常见于法兰连接错边及焊口组对误差；偏移缺陷即管段轴线整体平移或端部位移偏差，典型场景为弹簧支吊架冷态定位失准及预埋套管错位。（3）高温持久载荷下管道蠕变呈现应变率三阶段演化：初期减速蠕变由位错强化主导，中期稳态蠕变速率恒定，末期加速蠕变伴随晶界蠕变空洞贯通，最终导致管道截面颈缩开裂，该演化规律在主管道热段尤为显著。

1.2 管道形变核心影响因素分析

（1）材料因素：奥氏体不锈钢基材的晶粒度、δ 铁素体含量及析出相分布直接影响高温屈服强度；固溶处理温度偏差及冷却速率不均引发残余应力场畸变，导致后续机加工及焊接过程形变失稳。（2）环境因素：高温环境加剧材料蠕变与应力松弛，高压介质引起管道内壁环向应力升高，中子辐照导致材料韧脆转变温度上移及辐照膨胀，三者耦合作用下管道产生附加非均匀形变。（3）施工因素：吊装过程支点布置不当引起弹性挠曲变形，焊接热循环导致焊缝区收缩应变及角变形，预装工序强制对口产生的装配应力在管道运行后逐步释放并引发二次形变。

1.3 传统装配工艺误差成因及弊端

（1）人工划线定位依赖操作经验，卷尺测量与水准仪校核的累积读数误差可达毫米级，组对间隙与错边量超差直接引发焊后收缩不均，产生附加弯曲应力。（2）装配流程中焊接、切割、矫正工序交叉无序，先焊后割或先冷校后热处理等工序倒置使应力路径紊乱，各工序形变叠加缺乏抵消设计，最终表现为管系整体偏移的超差累积。（3）形变检测滞后于装配进度，焊后尺寸检验发现误差时管道已形成闭合刚度体系，矫正难度大幅增加，且检测频次不足使过程失控状态无法及时纠偏，质量闭环管理存在盲区。

2 核电管道形变防控关键技术研究

2.1 管道预制阶段形变预防控技术

（1）管道下料、切割精准控制技术与形变预判方法：采用数控带锯床配合激光划线定位，下料长度偏差控制在 ±0.5mm 以内；切割工序推荐使用精细等离子或水刀切割工艺，切斜度不大于管壁厚度的 3%。基于有限元数值模拟提前预判切割释放应力引起的端部回弹量，将补偿值反向计入下料余量，实现切割形变的超前修正。（2）预制工装夹具优化设计，约束预制过程形变：针对弯头、三通等异形件开发专用组合夹具，采用 V 型块 + 液压压紧机构实现管件六点定位，定位支撑点

布置依据管件刚度分布进行力学优化；在法兰焊接工装中增设防变形刚性环，通过约束焊件自由度抑制角变形与波浪变形，确保预制过程形变量控制在设计许用范围以内[2]。（3）预制后应力释放工艺，消除残余应力形变隐患：焊后立即实施高温消应力热处理，加热温度与保温时间依据材料蠕变特性曲线确定；对于无法热处理的薄壁管段，采用高频振动时效工艺替代，通过共振激励使残余应力发生塑性松弛；处理后使用盲孔法或 X 射线法抽检残余应力水平，确保消除率不低于 60%。

2.2 现场装配过程动态形变防控策略

（1）高精度定位安装技术，减少装配初始偏差：引入激光跟踪仪与全站仪组合测量系统，建立管道安装三维坐标控制网，实现管段端部中心坐标定位精度 ±0.3mm；法兰密封面对中采用光学对中仪辅助，平行度与同轴度偏差控制在标准允许值的 50% 以内，从源头消除初始偏差对后续形变放大的驱动效应。（2）分层、分步装配形变管控流程，控制累积误差：将整体管系划分为若干装配单元，明确各单元内焊接—检测—矫正—下一单元的顺序衔接节点；每个装配层级完成后进行中间尺寸验收，合格后方可进入下一层级，避免误差逐级传递与叠加；同时预留各环节形变吸收余量，实现形变的有序释放与自主抵消[3]。（3）实时形变监测技术应用，实现装配过程动态调控：在管系关键节点布置光纤光栅应变传感器与激光位移计，采集焊接热循环及冷却过程中管件三向位移变化数据；监测数据实时上传至装配管控平台，与预设阈值进行比对，超差即触发预警并反馈至操作端，指导焊接参数或装配顺序的实时调整，形成“监测—判断—调控”的动态闭环。

2.3 形变缺陷修复与补偿技术

（1）轻微形变的冷矫正、热矫正修复工艺：对于偏差量小于材料许用变形值 30% 的弯曲或扭曲，采用机械冷矫正法，以三点反弯或扭转工装施加反向载荷，保载一定时间后卸载回弹，重复直至尺寸合格；对于残余应力集中导致的硬态变形，采用局部加热热矫正，加热温度控制在材料相变点以下，利用热胀冷缩效应实现形变回复，矫正后需重新进行应力检测评估。（2）装配尺寸偏差的精准补偿方案设计：针对已形成闭合尺寸链的超差管段，按实测偏差数据设计补偿环或调整段，补偿件长度经过三维坐标反算确定并留有余量；法兰连接偏差可采用偏心变径法兰或调整垫片组合实现补偿，坡口间隙偏差则通过堆焊过渡层再二次加工予以修正，所有补偿件需经过预装配验证后方可正式安装[4]。（3）修复后管道稳定性检测与质量验证方法：修复完成后，首先采用相控阵超声或 DR 数字射线对修复区进行体积检测，确认无裂纹、未熔合等缺陷；随后进行水压或气压试验验证整体密封性，保压期间监测残余变形量；最后对修复管段进行模态分析或振动特性测试，确认其刚度与阻尼特性恢复至修复前水平，确保修复后管道长期运行的安全性。

3 核电管道装配工艺优化及效果验证

3.1 装配工艺整体优化方案设计

（1）基于形变防控的装配工序重构与流程简化：打破传统“下料 → 组对 → 焊接 → 检测”单一串联模式，重构为“车间预制 → 分区并行组对 → 阶段验收 → 最终合拢”的柔性装配体系。将弯头、三通等异形管件提前在预制车间完成坡口加工与消应力处理，减少现场焊接量；在组对与主焊接之间增设应力预释放静置环节，使初始残余应力提前松弛，避免其与后续焊接应力叠加；剔除传统工艺中重复的临时点固与割除操作，工序衔接节点由 12 个压缩至 8 个，流程精简率达 33%，显著降低人为操作引入的附加形变风险[5]。（2）装配工装、设备的适配性优化升级：开发适用于 DN200~DN800 管径的系列化可调式定位工装，采用 V 型块结合螺旋微调机构，实现管段空间六自由度精细调整，精度达 0.1mm；焊接设备更新为全数字化脉冲焊机，内置多材质焊接参数数据库，自动匹配最优热输入，配合弧长实时跟踪系统，确保焊缝热输入波动控制在 ±2.5% 以内，从热源稳定性层面有效降低焊接形变的离散性。（3）标准化、精细化装配作业规范制定：编制《核岛管道装配形变防控作业规程》，细化每道工序的操作要领、允许偏差、检测手段及超标处置预案；重点对定位焊布置、对称焊顺序、层间温度区间、工装解除时机等关键参数实行量化管控；配套装配工序信息记录卡，实现每道焊口从组对到焊后检测全流程数据的可追溯。

3.2 优化工艺仿真模拟分析

（1）基于有限元的管道装配形变仿真模型构建：采用 ANSYSWorkbench 建立典型管系三维热-力耦合仿真模型，涵盖直管段、弯头及法兰连接。温度场模拟选用双椭球热源，考虑材料热物性随温度的非线性变化；应力场采用 Chaboche 随动硬化本构及蠕变方程，准确描述焊接热循环中的塑性累积与应力松弛；约束边界按工装实际定位刚度等效为弹性支撑。（2）传统工艺与优化工艺的形变数据对比仿真：在相同边界条件下分别代入传统与优化工艺参数进行计算。仿真结果显示：优化工艺下焊缝径向最大收缩由传统工艺的 3.2mm 降至 1.8mm，降幅 44%；法兰端面角偏量由 1.4° 降至 0.7°，降幅 50%；管段全长累积偏移量由

5.8mm 降至 3.4mm，整体形变控制效果提升约 40%，验证了优化方案的形变抑制优势。（3）优化工艺参数迭代与最优参数确定：以焊接电流、焊接速度、层间温度及约束释放时机为设计变量，以焊后残余形变最小化为目标，采用 Box-Behnken 设计法安排仿真方案，构建形变响应二阶模型，运用遗传算法求解最优参数组合，并据此建立“最优窗口—允许范围—禁止边界”三级管控体系，为现场操作提供清晰指导。

3.3 工程应用与效果验证

（1）优化装配工艺的现场工程应用方案：选取某在建核电机组主蒸汽管道系统为验证对象，涵盖焊口 82 道，管径 DN500，壁厚 32mm。施工前组织全体作业人员进行工艺交底与仿真可视化培训；现场配置激光跟踪仪（精度 ±0.05mm/m）、光纤应变传感器及红外热像仪，构建多参量实时监测网络，严格按照优化方案施工并完整记录全过程数据。（2）装配精度、形变控制效果实测数据统计分析：应用优化工艺后，组对错边量均值由传统工艺的 1.3mm 降至 0.4mm，降幅 69%；法兰密封面平行度偏差由 1.0mm/m 降至 0.2mm/m，降幅 80%；焊接收缩量标准差由 0.55mm 缩小至 0.25mm，离散度降低 55%；82 道焊口形变一次合格率达 98.8%，较传统工艺的 82.9% 提升 15.9 个百分点，经 t 检验 $P < 0.01$，差异高度显著。（3）工艺优化后施工效率、安全稳定性综合评估：单道焊口平均装配周期由 4.8 小时缩短至 3.2 小时，降幅 33%；返修停工次数由平均每 10 道口 3.5 次降至 0.5 次，降幅 86%；综合施工效率提升约 30%。管系水压试验（1.5 倍设计压力）保压期间残余变形增量小于 0.04mm；振动模态测试前三阶固有频率偏移率均在 ±1.8% 以内，结构完整性优良，长期运行安全裕度充足。

3.4 工艺优化现存问题与改进展望

（1）优化工艺在复杂工况下的应用局限性：当前方案主要适用于常规直管段及标准弯头装配，对于狭窄空间内大口径厚壁管（DN ≥ 700、壁厚≥ 50mm）的手工焊作业，工装布置受限导致分级约束策略执行困难；异种钢焊接及在役维修工况下的参数适配性尚需专项验证。（2）智能化、自动化装配工艺升级改进方向：后续可引入结构光视觉引导的机器人自动组对与自适应焊接系统，实现坡口间隙与错边量的自动识别及焊枪位姿实时调整；同步构建基于数字孪生的装配智能管控平台，实现形变趋势的前瞻预测与工艺参数的在线自优化，推动装配过程向智能化决策迈进。（3）长效形变防控与装配质量管控体系完善思路：建立覆盖设计预控、预制消应、装配监测、运行反馈的全寿命形变数据管理体系，构建形变模式识别知识库；将优化成果固化为企业级标准工艺规程，配套执行审核与动态修订机制，形成“标准—执行—评估—改进”螺旋上升的质量管理闭环。

结束语

本文完成了核电管道形变机理分析、防控技术研发与装配工艺优化全套研究，经仿真与工程应用证实，优化方案可显著抑制管道形变、提升装配合格率与施工效率。同时梳理了当前工艺在复杂工况下的应用局限，明确了智能化装配、全寿命质量管控的改进方向。后续将持续迭代工艺参数、完善管控体系，推动核电管道装配施工向精细化、智能化、标准化升级，助力核电工程高质量建设。

参考文献

[1] 冯哲, 王帅, 李响. 秦山核电厂特殊管道支吊架改造与形变控制技术 [J]. 核动力工程,2022,43(S1):112-117.

[2] 王健, 刘军, 赵辰. 核电薄壁管道焊接装配变形控制及工艺优化 [J]. 焊接学报,2023,44(09):289-295.

[3] 李洋, 张恒.VVER-1000 核电机组主管道焊接施工工艺优化与变形防控 [J]. 电焊机,2025,55(10):78-83.

[4] 陈默, 周凯. 核电管道精密装配偏差控制与形变预补偿技术研究 [J]. 压力容器,2024,41(06):166-172.

[5] 林文斌. 核电高温管道装配应力释放与形变防控优化策略 [J]. 管道技术与设备,2024,22(03):245-249.