

3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备的安全运维与技术优化研究

齐永刚 郑建红 李 涛 王建文 张 杰 谢家超

中油宝世顺（秦皇岛）钢管有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘 要：3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制对管道防腐至关重要，控制设备的安全运维与技术优化可提升管道寿命。本文系统分析设备组成与原理，从 HSE 作业管理体系、各阶段安全保障、应急处置规范三方面阐述安全运维管理，提出标准化操作等优化方案。结合中油宝世顺实测数据，验证安全运维与技术优化效果，为同类设备安全运行与性能提升提供参考。

关键词：3PE 钢管；焊缝涂层；厚度控制设备；视觉跟踪；实测数据

引言：3PE 防腐钢管用于长输管道工程，防腐层质量关乎管道寿命与安全。焊缝区域形状不规则、表面复杂，涂层厚度控制难，不足或分布不均会降低抗腐蚀能力。焊缝处涂层厚度控制设备是保障涂层均匀性的核心，其稳定性与补偿精度影响产品质量。本文结合中油宝世顺场景，研究设备安全运维与技术优化，以提升稳定性与精度，为质量控制提供支撑。

1 3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备概况与工作原理

1.1 设备组成

3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备主要由机械系统、电气控制系统、检测与补偿系统三部分组成，配套视觉焊缝跟踪软件实现精准控制。机械系统包含牵引辊、轴承、传动机构及高度调节机构，负责钢管输送与姿态调整，牵引辊转速可无级调节，适配 $\varphi 323.9 \sim \Phi 1626\text{mm}$ 不同规格钢管。电气控制系统由 PLC 系统、伺服电机、编码器、控制柜及触摸面板组成，是设备运行的核心控制单元，伺服电机响应时间不超过 0.1s，编码器定位精度达 0.01mm。检测与补偿系统涵盖焊缝检测模组、补偿控制单元、补偿主机及测速传感器，测速传感器误差不超过 $\pm 0.02\text{m/s}$ ，为涂层厚度补偿提供精准数据支撑。配套的视觉焊缝跟踪系统通过视觉传感器实时采集焊缝数据，输出角速度、线速度、焊缝尺寸等关键参数，焊缝识别响应时间不超过 0.2s，识别准确率达 99.5% 以上，确保补偿精度符合工艺要求。

1.2 工作原理

设备依托现有挤出机涂敷缠绕工装，通过焊缝检测模组实时识别钢管焊缝的位置、宽度及厚度信息，实测显示焊缝，厚度检测范围为 0.3-5mm，检测误差 $\leq$

$\pm 0.2\text{mm}$ 。PLC 根据预设的补偿逻辑，结合视觉跟踪系统输出的参数（角速度 0.1-10rad/s、线速度 0.1-5m/s），控制伺服电机调节牵引辊转速，同时通过高度调节机构适应不同规格钢管的形位变化，最终实现焊缝两侧 $\leq 150\text{mm}$ 范围内涂层厚度的自动补偿，实测补偿精度稳定在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内，确保涂层均匀性。视觉焊缝跟踪系统通过传感器捕捉钢管旋转过程中的焊缝特征，经数据优化与拟合后，精准定位焊缝位置，同步输出补偿触发信号，实测显示，有效避免涂层漏补、过补问题^[1]。

2 3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备全流程安全运维管理

2.1 HSE 作业管理体系构建

结合设备作业场景的风险特点，建立完善的 HSE（健康、安全、环境）作业管理体系，明确作业目标、组织机构与职责分工，实现全流程安全管控。

2.1.1 作业目标

安全目标设定为零人身伤害、零设备损坏、零火灾爆炸、零触电事故，特种作业持证率 100%，急停按钮响应率 100%；健康目标确保作业人员职业健康防护覆盖率 100%，高温、粉尘作业环境符合 GBZ2.1-2019 要求，实测作业区域温度控制在 25-35℃，粉尘浓度 $\leq 8\text{mg/m}^3$ 。

2.1.2 组织机构与职责

设立 HSE 管理组织机构，由项目经理担任总负责人，统筹作业全流程；配备专职安全监督员 1 名，负责现场安全检查、隐患排查与作业票审批，每日排查隐患不少于 3 次，隐患整改率 100%；项目总工作为技术负责人，提供技术支持并组织安全技术交底；作业人员包括机械安装工 2 名、持证电工 2 名、持证焊工 1 名及运维人

员 2 名, 严格执行操作规程, 做好个人防护。

2.2 各阶段安全保障措施

2.2.1 安装阶段安全措施

安装过程中重点管控吊装作业、焊接作业与电气安装安全。吊装前检查吊机额定载荷(不小于部件重量 1.2 倍), 吊钩、绳索无破损, 起吊区域设置警戒带并专人监护, 监护距离 $\geq 5\text{m}$; 焊接前办理动火作业票, 清理作业点 5 米内聚乙烯粉尘, 配备 2 具干粉灭火器与 1 块防火毯, 实测焊接作业区域环境温度 28°C , 无易燃物堆积; 电气安装时线缆独立穿管或走桥架, 接线前切断主电源并悬挂“禁止合闸”警示标识, 检测模组与高温钢管预留 $\geq 300\text{mm}$ 隔热空间, 实测隔热效果良好, 模组表面温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 运行阶段安全措施

开机前需完成安全检查与设备检查, 确认急停按钮复位、防护设施完好、电气接地可靠, 机械部件无卡滞、润滑充足; 运行过程中, 人员与运动部件保持 ≥ 0.8 米安全距离, 禁止触碰高温部件与检测区域, 24 小时连续运行时执行双人巡检制, 每 4 小时记录一次设备状态, 实测设备连续运行 72 小时无故障, 运行稳定性良好; 切换操作模式时需确保设备无负荷, 手动调节时需停机关闭气动部件, 实测手动调节响应顺畅, 无卡滞现象^[2]。

2.2.3 维护检修阶段安全措施

检修前制定详细方案, 确认设备停机、生产线停工, 准备好专用工具与防护用品; 拆卸重型部件时采用起重设备平稳吊装; 焊接维修时远离电气元件, 配备防火设施, 实测焊接作业区域粉尘浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$, 符合安全作业要求; 清洁与校准检测传感器时需断电, 使用干燥压缩空气(压力 $0.3\text{--}0.5\text{MPa}$)清理镜头, 严禁用水或有机溶剂擦拭, 实测校准后检测精度提升至 $\pm 0.03\text{mm}$ 。

2.3 应急处置规范

明确紧急停机场景, 包括设备卡滞、电气冒烟、检测模组报警无法排除及人员面临伤害风险等, 急停后需切断主电源, 排查故障后方可重启。针对烫伤、触电、火灾等常见事故, 制定专项处置流程: 烫伤后立即用冷水冲洗 15-20 分钟, 实测冲洗后皮肤温度可快速降至 37°C 以下; 触电时优先切断电源, 实施心肺复苏, 配备急救箱 1 个, 确保急救物资齐全; 火灾时使用干粉灭火器灭火(严禁用水), 快速控制火情。建立故障上报流程, 操作人员记录故障现象与报警代码, 实测故障平均处置时间 ≤ 2 小时, 不影响生产进度。

3 3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备操作与技术优化

3.1 标准化操作流程

为确保设备运行稳定性与涂层补偿精度, 规范作业人员操作行为, 结合设备工作原理与生产实际, 制定完善的标准化操作流程, 涵盖开机准备、开机与运行操作、停机操作三个核心环节, 明确各环节的操作步骤、注意事项及操作标准, 确保作业人员规范操作。

3.1.1 开机准备

开机前, 作业人员需完成安全检查、设备检查与参数准备三项核心工作。安全检查重点确认作业区域无障碍物、通风良好, 实测作业区域通风量 $\geq 10\text{m}^3/\text{h}$, 粉尘浓度符合安全标准, 安全防护设施完好; 设备检查重点确认机械部件无卡滞、润滑充足, 电气接地可靠, 检测模组、伺服电机、编码器等核心部件正常, 无异常报警; 参数准备环节, 从生产部门获取钢管规格(实测主要为 $\varphi 325\text{mm}$ 、 $\varphi 530\text{mm}$ 、 $\varphi 1220\text{mm}$ 三种规格)与涂层补偿工艺配方, 在触摸面板上设定相关参数, 确认上下游设备处于待机状态, 参数设定符合生产工艺要求, 方可进入开机操作环节^[3]。

3.1.2 开机与运行操作

开启设备总闸, 等待 HMI 触摸面板启动, 确认系统与各部件连接正常、无异常报警后, 根据生产需求选择手动或自动操作模式。正式生产前, 通过点动模式对托辊进行涂油润滑, 确保托辊运行顺畅无卡滞; 切换至自动模式后, 设备进入联机待机状态, 当钢管进入检测区域后, 系统自动启动焊缝检测与涂层补偿功能。运行过程中, 作业人员每 60 分钟巡检一次, 记录涂层厚度、牵引辊转速、补偿量等关键参数, 实测涂层厚度平均值为 2.8mm , 补偿量在 $0.2\text{--}0.5\text{mm}$ 范围内调节, 符合生产工艺要求。若出现参数异常或设备报警, 立即停止设备运行, 排查故障并处理完毕后, 方可恢复运行。

3.1.3 停机操作

停机操作分为正常停机与紧急停机两种情况, 其中正常停机具严格遵循以下流程: 先关闭气动阀门, 降下托辊, 停止焊缝检测与涂层补偿动作, 然后清理设备表面的粉尘与油污, 实测清理后设备表面粉尘残留量 $\leq 0.1\text{g}/\text{m}^2$, 确保设备清洁; 关闭设备各控制模块, 切断设备总电源, 整理作业区域, 做好设备运行记录。紧急停机后, 需先排查故障原因, 处理完毕后复位急停按钮, 重新执行开机准备与开机操作流程, 确保设备无异常后, 再启动设备恢复生产, 严禁未排查故障直接重启设备。

3.2 视觉焊缝跟踪系统优化

视觉焊缝跟踪系统作为设备的核心检测单元，其运行稳定性直接影响补偿精度，通过软件操作优化提升识别与补偿效果。软件启动后自动连接传感器，通过“数据”板块设定焊缝识别参数（宽度范围 2-15mm、高度范围 0.3-5mm），结合“跟踪”板块输出的焊缝尺寸数据，优化识别精度；通过“图形”板块调整补偿范围，利用“更窄”“更宽”“更早”“更晚”按钮手动校准，实测校准后补偿范围误差 $\leq 0.1\text{mm}$ ，确保焊缝两侧涂层厚度均匀。系统运行过程中，通过“图表”与“状态”板块监控补偿触发时间与焊缝实时位置，实测补偿触发时间 $\leq 0.3\text{s}$ ，焊缝位置识别准确率 99.5%；若出现传感器数据异常，可通过关机重启排查，实测重启后系统恢复正常率 100%。

3.3 日常维护与校准优化

建立分级维护体系，提升设备运行稳定性：每日清洁设备粉尘、擦拭传感器镜头，实测清洁后镜头识别准确率提升 3%；每周对轴承加注高温润滑脂（型号：锂基润滑脂），加注量为 5-8g/个，确保轴承无异常磨损；每月用标准量块校准检测精度，要求精度 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ ，实测校准后精度达到 $\pm 0.03\text{mm}$ ，优于标准要求；每季度检查电气线缆接头与接地线路，确保电气系统正常运行。通过定期维护与校准，降低设备运行故障率，大幅提升设备使用寿命与运行效率。

4 3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备应用效果与结论

4.1 应用效果

该 3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备在中油宝世顺的实际应用中，通过实施本文所述的安全运维管理措施与技术优化方案，取得了良好的应用效果，各项实测指标均符合行业标准与工程需求，具体如下：（1）安全效果：特种作业合规率达到 100%，未发生人身伤害、火灾、触电等安全事故，作业区域粉尘浓度稳定在 $5-8\text{mg/m}^3$ ，符合健康与环境管理要求；设备急停响应率 100%，故障处置及时率 100%，有效规避了各类安全隐患；（2）精度效果：设备涂层补偿精度稳定在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内，焊缝处涂层厚度平均值为 2.8mm，符合

SY/T 0315-2013 标准要求，3PE 钢管焊缝处涂层质量合格率从优化前的 96.5% 提升至 99.2%，大幅提升产品质量稳定性；（3）运行效果：设备连续运行稳定性提升，有效提升了生产效率，降低了运维成本^[4]。

4.2 结论

3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备的安全运维与技术优化，是保障设备稳定运行、提升产品质量的关键。构建完善的 HSE 作业管理体系，规范设备全流程操作并强化各环节安全管控，可有效降低安全风险，保障作业人员健康与设备安全；优化视觉焊缝跟踪系统、定期开展设备维护校准，能提升涂层补偿精度与设备运行稳定性，降低运行故障率及维护成本。本文结合中油宝世顺实际应用场景，补充设备运行实测数据，提出的安全运维与技术优化方案实践可行性强，可为同类设备应用与升级提供参考。

结束语

3PE 钢管焊缝处涂层厚度控制设备是保障管道防腐质量的核心装备，其安全运维与技术优化对提升管道服役寿命具有重要意义。本文系统分析设备组成结构与工作原理，构建涵盖 HSE 管理体系、各阶段安全保障、应急处置规范的全流程安全运维管理框架，提出标准化操作流程、视觉焊缝跟踪系统优化、分级维护校准的技术优化方案。未来应进一步融合智能传感与数据分析技术，构建设备运行状态实时监测与故障预警系统，推动涂层厚度控制设备向智能化、精准化方向发展，为长输管道工程提供更加可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 闫林森, 焦振峰, 胡建飞, 等. 直焊缝钢管 3LPE 防腐涂层厚度分析及控制 [J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(10): 85-88.
- [2] 冯红兵, 赵浩飞, 戎志冕, 等. 不锈钢钢管焊缝附近部位开裂原因 [J]. 理化检验 (物理分册), 2023, 59(8): 32-36.
- [3] 张曙华, 赖兴涛, 屈献永, 等. 高频焊接钢管焊缝质量控制关键因素分析 [J]. 焊管, 2025, 48(3): 55-60.
- [4] 宋苗苗. 常宁市农村饮水涂塑钢管焊缝防腐涂层质量提升对策研究 [J]. 湖南水利水电, 2025(1): 31-33, 63.