

铝板拉矫线清洗段水系统故障诊断与优化研究

王中阳 许仓孝

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 铝板带拉矫线是铝加工企业实现带材板形控制与表面质量提升的关键设备,其中清洗段水系统承担着去除铝板带表面轧制油、粉尘及氧化物的重要任务。然而,水系统运行过程中常因水质劣化、喷嘴堵塞、循环泵效率下降、过滤器失效等问题导致清洗效果下降,进而影响后续工艺质量,甚至造成设备停机停产。本文以某大型铝加工企业1850mm铝板带拉矫线清洗段为研究对象,系统分析水系统常见故障类型及其成因,构建基于多参数融合的故障诊断模型,并提出针对性的优化策略。通过引入智能监测技术、改进过滤系统、优化水处理工艺及实施预防性维护机制,显著提升了水系统运行稳定性与清洗效率。优化后系统故障率明显下降,清洗水耗降低,铝板带表面清洁度达标率提升,具有良好的工程应用价值。

关键词: 铝板带拉矫线;清洗段;水系统;故障诊断;系统优化;表面清洁度

引言

随着高端制造业对铝板表面质量要求的不断提高,铝板带拉伸弯曲矫直(简称“拉矫”)工艺在铝加工行业中的地位日益凸显。拉矫线不仅可以有效改善带材板形,消除屈服平台,还能通过清洗段彻底清除表面残留的轧制油、金属碎屑、铝粉及氧化物,为后续涂装、覆膜等工序提供洁净基材。清洗段作为拉矫线的核心功能单元,其水系统的稳定高效运行直接决定了最终产品的表面质量与生产连续性。然而,实际生产中,清洗段水系统常面临诸多挑战:循环水因长期使用导致油污、悬浮物及微生物富集、铝粉堆积,造成喷嘴堵塞、换热器结垢、泵体磨损等问题;传统人工巡检难以及时发现早期故障;水处理工艺设计不合理导致水质波动大;系统能耗高、水耗大,不符合绿色制造理念。这些问题不仅降低了清洗效率,还可能引发整线停机,造成重大经济损失^[1]。本文基于某1850mm铝板带拉矫线清洗段水系统的实际运行数据,系统梳理其典型故障模式,构建多源信息融合的故障诊断框架,并提出涵盖设备、工艺与管理三个维度的优化策略,旨在为同类企业提供可复制的技术路径。

1 清洗段水系统结构与工作原理

1.1 系统组成

该拉矫线清洗段水系统是一个集清洗、循环、过滤、监测与控制于一体的复杂流体系统。其主体由清洗槽系统、循环过滤系统、喷淋系统、水处理单元以及监控控制系统五大部分构成。清洗槽系统包括碱洗槽、一级水洗槽、二级水洗槽和漂洗槽,各槽体均配备加热装置、机械搅拌器及溢流堰,以维持液位稳定与温度均匀。循环过

滤系统是保障水质的核心,由多台离心循环泵、袋式与滤芯组合过滤器、磁性分离器及重力式油水分离器组成,负责将使用后的清洗液净化后重新送回喷淋系统。喷淋系统采用上下对称布置的高压喷梁结构,喷嘴可根据带材宽度调节覆盖范围,确保清洗液均匀喷洒于铝板带上、下表面。水处理系统则包括软化水补水装置、pH值自动调节单元、电导率在线监测仪以及废液排放控制阀,用于维持系统水质参数在工艺允许范围内。整个系统由PLC与HMI构成的监控平台统一管理,可实时采集液位、温度、压力、流量、电导率等关键参数,并实现异常工况下的自动联锁保护。

1.2 工作流程

铝板带进入清洗段后,依次经历碱洗、两级水洗和漂洗四个阶段。首先,在50~60℃的碱性清洗液(pH值维持在10~12)作用下,轧制油被皂化溶解,同时部分金属氧化物也被剥离。随后,铝板进入一级水洗槽,通过喷淋去除大部分残留碱液;二级水洗进一步降低表面离子浓度;最后在漂洗槽中使用去离子水进行终洗,确保无任何可溶性盐类残留。清洗后的铝板带经热风烘干后进入矫直单元^[2]。整个过程中,清洗液从槽体底部回流至循环罐,经油水分离器初步除油后,再通过多级过滤去除固体颗粒,最终由循环泵加压送回喷射梁,形成闭式循环。系统通过液位传感器自动控制补水,当电导率或油含量超过设定阈值时,触发部分废液排放并补充新液,从而维持系统动态平衡。

2 水系统典型故障模式与成因分析

通过对近三年设备维修记录、水质检测报告及操作日志的系统梳理,发现水系统运行中主要存在五类典型

故障，其发生往往相互关联，共同导致清洗效能下降。

2.1 喷嘴堵塞

喷嘴堵塞是最常见的表现故障，表现为喷淋压力异常升高、喷雾呈断续状或出现明显盲区，最终在铝板带表面形成条状污渍。深入分析表明，其根本原因在于循环水中悬浮物浓度过高（实测常超过50mg/L），而原设计采用的50 μ m滤芯无法有效拦截微细颗粒。此外，油水分离器效率低下导致乳化油进入循环回路，在高温碱性环境下聚合形成粘稠胶体，极易附着于喷嘴内壁。加之原喷嘴材质为304不锈钢，在长期碱液侵蚀下发生点蚀，腐蚀产物脱落进一步加剧堵塞。

2.2 循环泵效率下降

循环泵效率下降则直接削弱系统动力输出，表现为流量不足、压力建立缓慢，甚至伴随电机电流异常波动。究其原因：一方面，过滤器压差增大导致泵入口净正吸入压头（NPSH）不足，引发叶轮气蚀；另一方面，水中硬质颗粒加速机械密封面磨损，造成内泄漏。同时，泵体轴承因进水导致润滑不良或振动超标（实测振动速度常达5.0mm/s以上），进一步缩短设备使用寿命。

2.3 水质劣化

水质劣化是影响清洗效果的隐性但关键因素。当补水硬度较高（Ca²⁺、Mg²⁺浓度超过150mg/L）时，与碱性清洗剂反应生成碳酸钙等沉淀，不仅增加悬浮物，还可能在铝板带表面形成白斑^[3]。同时，循环水温适宜微生物繁殖，异养菌数量常超过10⁴CFU/mL，形成生物膜并消耗清洗剂有效成分。此外，pH值控制系统响应滞后，导致清洗液pH在9.5至12.5之间大幅波动，严重影响皂化反应效率，最终表现为铝板带表面发暗、清洁度不达标。

2.4 油水分离失效

油水分离失效则使系统陷入恶性循环。由于原设计停留时间不足（仅约12分钟），且缺乏破乳措施，大量乳化油无法有效分离，导致循环液中油含量长期高于200ppm。浮油层增厚不仅降低热传导效率，还为微生物提供营养源，加剧水质恶化。而自动排油阀因杂质卡阻频繁失效，进一步削弱分离效果。

2.5 热交换器结垢

热交换器结垢问题同样不容忽视。在持续60 $^{\circ}$ C以上工况下，水中钙、硫酸根等离子析出并在换热管壁沉积，形成致密硬垢。运行半年后垢层厚度可达2–3mm，显著降低传热系数，迫使蒸汽消耗量增加15%以上，既增加能耗，又影响清洗温度稳定性。

3 故障诊断模型构建

为实现对上述复杂故障的早期识别与精准定位，本

文构建了一套融合多源传感数据与智能算法的故障诊断体系，其核心在于将物理机理与数据驱动方法有机结合。

3.1 多源数据采集

在关键节点部署传感器：

喷射梁入口：压力变送器（0–1.0MPa， $\pm 0.5\%$ FS）、流量计；

循环罐：液位计、温度传感器、pH/电导率复合电极；

泵出口：振动传感器（加速度，0–10kHz）；

过滤器进出口：压差开关（设定阈值0.15MPa）。

所有数据通过工业以太网实时上传至SCADA系统，采样频率设定为1Hz，确保能捕捉瞬态异常^[4]。

3.2 特征参数提取

基于原始数据，进一步提取具有物理意义的特征参数。例如，定义“堵塞指数”为过滤器压差与流量的比值，该指标能有效反映过滤介质堵塞程度；“泵健康因子”综合电机电流与振动均方根值，量化泵体运行状态；“水质综合指数”则加权融合悬浮物、油含量与电导率，表征整体水质劣化水平；而“清洗效能比”通过对比清洗前后铝板表面反射率或接触角，直接反映清洗效果。这些特征参数不仅具有明确的工程含义，也为后续诊断提供高维输入。

$$\text{堵塞指数 } I_b = \frac{\Delta P_{\text{filter}}}{Q} \quad (\text{压差} / \text{流量})$$

$$\text{泵健康因子 } H_p = \frac{I_{\text{actual}}}{I_{\text{rated}}} \times \frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{threshold}}};$$

$$\text{水质综合指数 } WQI = 0.4 \cdot \frac{SS}{SS_{\text{max}}} + 0.3 \cdot \frac{\text{Oil}}{\text{Oil}_{\text{max}}} + 0.3 \cdot \frac{EC}{EC_{\text{max}}};$$

$$\text{清洗效能比 } CER = \frac{\text{Surface Cleanliness}(\text{post})}{\text{Surface Cleanliness}(\text{pre})}。$$

3.3 智能诊断算法

采用改进的随机森林（RandomForest）算法进行故障分类。训练数据集包含1200组历史工况，标签为5类故障及“正常”状态。引入SMOTE算法解决样本不平衡问题。模型准确率达94.2%，F1-score为0.91。

诊断逻辑如下：

若 $I_b > 1.8$ 且喷淋压力上升 \rightarrow 判定为喷嘴/过滤器堵塞；

若 $H_p > 1.2$ 且振动频谱出现2 \times 工频峰值 \rightarrow 泵轴承故障；

若 $WQI > 0.75$ 且 $CER < 0.85$ \rightarrow 水质劣化；

结合油含量与分离器液位判断油水分离失效。

系统在HMI界面实时显示诊断结果与维护建议。

4 系统优化策略

针对诊断揭示的系统性短板，本文从设备硬件、水处理工艺及运维管理三个维度协同推进优化，形成闭环

改进机制。

4.1 设备升级

在设备层面，首先将原304不锈钢喷嘴更换为碳化硅（SiC）材质，其优异的耐腐蚀性与耐磨性显著延长了使用寿命，同时将喷孔加工精度提升至 $\pm 2\mu\text{m}$ ，确保喷雾均匀性。其次，对过滤系统进行分级强化：一级采用 $50\mu\text{m}$ 自清洗过滤器，可自动反冲洗，减少人工干预；二级配置 $20\mu\text{m}$ 高精度过滤器，有效拦截微细颗粒。循环泵则更换为双相不锈钢叶轮，并在入口加装稳流装置，确保NPSH余量充足，避免气蚀。油水分离器升级为“气浮+聚结板”复合结构，通过微气泡附着与亲油材料聚结双重机制，将油水分离效率提升至95%以上。

4.2 水处理工艺优化

在水处理工艺方面，源头控制是关键。新增钠离子交换软化水装置，将补水硬度降至 50mg/L 以下，从根本上抑制结垢。在线调控系统采用PID与前馈相结合的pH控制策略，将波动范围压缩至 ± 0.3 以内，保障清洗剂效能稳定。同时，投加环保型聚天冬氨酸（PASP）阻垢剂，兼具缓蚀与分散功能。为抑制微生物滋生，在循环管路中加装紫外线杀菌器，每周定期运行，有效控制异养菌数量。此外，实施漂洗水梯级利用：二级水洗水经超滤处理后回用于一级水洗，既减少新鲜水消耗，又降低废液排放量。

4.3 运维管理优化

在运维管理上，建立预防性维护制度，明确水质检测频次（每周）、热交换器清洗周期（每月）及滤芯更换标准（压差超限或运行45天）。同时，开发水系统数字孪生平台，基于实时数据驱动虚拟模型，可模拟不同工况下的系统响应，辅助制定最优运行参数。最后，编制《清洗

段水系统操作与维护手册》，对操作人员开展专项培训，提升其对水质异常的识别与处置能力，形成“人-机-制度”协同的长效保障机制。

5 结语

本文针对铝板带拉矫线清洗段水系统运行中存在的典型故障，系统分析了其成因，并构建了基于多参数融合的智能故障诊断模型。通过设备升级、工艺优化与管理强化三位一体的综合优化策略，有效提升了系统的可靠性、清洗效率与资源利用率。主要结论如下：喷嘴堵塞与水质劣化是影响清洗效果的两大主因，其根源在于过滤精度不足、油水分离效率低下以及补水水质控制缺失，这些问题相互耦合，形成恶性循环。基于随机森林的故障诊断模型能够有效融合多源传感数据，实现94%以上的诊断准确率，为预测性维护提供了可靠技术支撑。优化实施后，系统故障率显著下降，水耗与能耗同步降低，产品表面质量大幅提升，经济效益与环境效益双赢。未来，建议进一步融合数字孪生与深度学习技术，实现水系统的自适应调控与智能决策，推动铝加工过程向更高水平的智能制造迈进。

参考文献

- [1]殷雷.拉弯矫清洗设备改造升级和高效清洗工艺[J].铝加工,2024,(02):60-63.
- [2]殷雷.精整拉矫带材表面高质量清洗控制[J].铝加工,2016,(04):21-23.
- [3]窦忠友.铝板带碱清洗机设备配置及技术难点分析[J].有色金属加工,2022,51(03):56-59+67.
- [4]李强,王伟.(2022).金属带材清洗系统节能优化研究.冶金自动化,46(3),45-50.