铝热轧乳液润滑性能表征评估及现场工艺调控研究

焦晓奇　孙国卫　韩甲臣
河南中孚高精铝材有限公司　河南　郑州　451200

摘　要：为解决铝热轧过程中乳液润滑不稳定、板面质量缺陷及轧制能耗偏高问题，本文构建完善的乳液润滑性能表征体系，探究乳液组分、工艺参数及环境老化等多因素的润滑作用规律与失效机制。通过正交试验与响应面法明确关键影响因子权重，建立工艺参数优化模型，制定差异化现场调控方案。工业试验表明，优化方案可有效提升板面质量、降低轧制能耗与设备磨损，为铝热轧润滑工艺智能化、标准化管控提供技术支撑。

关键词：铝热轧；乳液润滑性能；表征评估；现场工艺调控

引言：铝热轧乳液的润滑性能直接决定轧制界面状态、板材成型质量与生产能耗，是铝加工生产的核心工艺要素。当前工业生产中，乳液润滑受多因素耦合影响，存在性能衰减快、工况适配性差、调控依赖人工经验等问题，易引发粘铝、板面粗糙、轧制力波动等故障，制约产品精度与生产效率提升。为此本文系统开展乳液润滑性能表征、影响机制及工艺调控研究，旨在破解现场生产痛点，优化轧制工艺体系。

1 铝热轧乳液润滑性能表征体系构建与试验研究

1.1 铝热轧乳液润滑核心作用机理

（1）乳液成膜机制与界面润滑原理：铝热轧过程中，乳液通过“油-水”两相协同作用在轧辊与铝板界面形成润滑膜。其成膜机制包括：水相蒸发冷却促使油相富集析出，在接触弧区形成边界润滑膜，有效降低界面剪切应力，减少轧制力。（2）摩擦界面热量传递与冷却辅助机理：乳液流经变形区时，水相汽化及液相流动带走大量塑性变形热与摩擦热，维持轧辊与铝板温度场稳定。该冷却效应可抑制铝板温升软化，同时降低轧辊热膨胀，保障板形精度。（3）乳液抗磨、抗粘铝的作用机制：乳液中的极性添加剂在摩擦副表面吸附形成物理/化学保护膜，避免金属直接接触，减少粘着磨损与表面擦伤。该保护膜还能阻碍铝屑粘附于轧辊表面，延长轧制周期。

1.2 润滑性能表征指标与测试方法确立

（1）基础物性指标：采用旋转黏度计测定乳液动力黏度，酸度计监测pH值，折光仪或烘干称重法测定有效浓度，静置分层试验评估乳液稳定性，以上指标共同保障乳液批次一致性。（2）摩擦学性能指标：通过四球摩擦试验或销盘试验获得摩擦系数与磨斑直径；利用表面轮廓仪测量磨损体积；采用光干涉或电涡流法表征轧制界面润滑膜厚度，定量评价乳液减摩与抗磨能力。（3）工艺适配指标：以轧制力降幅与扭矩变化评定减摩效果；借助粗糙度仪与光学显微镜检测轧后板面光洁度；采用重量法或溶剂萃取法测定板面残油率，综合评判乳液工艺适应性[1]。

1.3 试验设备与试样制备

（1）摩擦磨损试验设备、热轧模拟试验平台介绍：采用SRV摩擦磨损试验机模拟高温高载界面润滑行为；选用二辊/四辊可逆热轧试验机复现实际轧制工艺，配备测力、测温及扭矩传感系统，实现多参数同步采集。（2）铝基材试样制备标准与预处理工艺：将工业纯铝及铝合金板材线切割至指定尺寸，依次经打磨、抛光、清洗及干燥处理，控制表面粗糙度Ra ≤ 0.4μm，确保试样表面状态一致。（3）试验用乳液配方及基础参数设定：选用典型热轧乳化油与去离子水按比例配制，浓度设定为3%~8%，温度控制在50~70℃，pH值调节至7.5~8.5，搅拌速度恒定以保证乳化均匀性。

1.4 乳液润滑性能基础表征试验分析

（1）不同工况下乳液摩擦学性能变化规律：随轧制温度升高与载荷增大，摩擦系数呈先降后升趋势，成膜能力减弱。高速轧制有利于流体动压润滑形成，但过高速剪切易导致乳液破乳失效。（2）乳液物性参数与润滑性能的相关性分析：黏度升高有助于提高成膜厚度与承载能力，但流动性下降影响冷却效果；浓度增加可改善极压抗磨性，但残油率上升；pH值偏移会改变添加剂活性，降低润滑持久性。（3）轧制界面润滑失效特征与诱因分析：润滑失效主要表现为界面摩擦系数突增、板面出现粘铝痕迹及振动加剧。诱因集中于乳液浓度偏低、温度过高致油相析出过快、或轧制速度突降破坏动压润滑状态。

2 铝热轧乳液润滑性能影响因素及作用规律研究

2.1 乳液自身组分参数对润滑性能的影响

（1）基础油含量、乳化剂配比的影响规律：基础油含量升高可增强油膜连续性与承载能力，降低摩擦系数，但过量会导致乳液黏度过大、冷却性能下降。乳化剂配比决定油水界面张力与乳化稳定性，亲水亲油平衡值（HLB）适宜时乳液分散均匀，润滑膜成膜质量最佳；配比失衡则易产生油水分层，削弱润滑效果[2]。（2）极压添加剂、防锈助剂对润滑抗磨性的调控作用：极压添加剂（如含硫、磷、氯活性组分）在高温高压下与铝表面反应生成化学保护膜，显著提升抗粘铝能力与极限承载负荷，但过量添加会加剧腐蚀倾向。防锈助剂通过吸附于金属表面形成疏水层，抑制氧化与锈蚀，与极压剂协同可兼顾抗磨与防护双重功能。（3）乳液颗粒粒径、分散稳定性对界面润滑的影响：粒径越小，液滴比表面积越大，在接触区沉积成膜速率越快，且均匀性更好；但粒径过细会增加体系表面能，易发生团聚。分散稳定性良好的乳液能持续供给有效油相，维持接触弧内润滑膜厚度稳定，避免因破乳或析油导致润滑间断。

2.2 现场工艺参数对乳液润滑效果的影响

（1）轧制速度、轧制压下量对润滑界面状态的影响：轧制速度升高促进流体动压效应增强，油膜厚度增加，但过高速度使乳液在变形区停留时间过短，成膜不充分，易出现边界润滑失效。压下量增大会加剧界面接触应力与温升，要求润滑膜具有更高抗压强度，否则易发生膜破裂与金属直接接触。（2）轧制温度、乳液喷射流量与压力的耦合影响：温度升高降低乳液黏度，改善流动性但削弱成膜能力，需配合适当喷射流量补充润滑油相；喷射压力增大可改善乳液渗透与铺展均匀性，但压力过高会引起飞溅与浪费。三者需协同匹配，温度高时适当增大流量、提高压力，以平衡冷却与润滑需求。（3）多道次轧制工况下乳液润滑性能衰减规律：随道次增加，乳液中的有效油相和添加剂不断消耗，同时磨损碎屑与热降解产物积累，导致润滑性能呈指数衰减。中间道次润滑效果下降最显著，需适时补加新液或调整浓度，否则后续道次摩擦系数增大，轧制力明显上升。

2.3 环境与老化因素对润滑性能的劣化机制

（1）使用时长对乳液变质、润滑性能衰减的影响：长时间使用中，乳液受机械剪切和热氧化作用，油相裂解生成有机酸和过氧化物，pH值下降，乳化稳定性破坏，导致润滑膜吸附力减弱，摩擦系数逐步增大，有效寿命通常限于连续运行数小时至数十小时。（2）现场杂质混入、水质变化对乳液稳定性的破坏机制：铝屑、粉尘等固体杂质混入后吸附于油水界面，破坏乳化膜结构，加速破乳分层；水质硬度升高，钙镁离子与乳化剂生成不溶性皂，降低乳化能力，同时改变pH缓冲体系，使极压添加剂水解失效，润滑性能急剧恶化[3]。（3）温度交变工况下乳液润滑性能波动规律：轧制间歇期温度骤降时，乳液黏度回升，流动性变差，再次启动时供液滞后，初始阶段润滑不足；而连续轧制高温积累使水分过度蒸发，浓度升高，黏度不稳定，导致摩擦系数呈周期性波动，需借助温控系统维持乳液温度恒定以降低波动幅度。

2.4 多因素耦合作用下润滑性能权重分析

（1）正交试验方案设计与数据采集：选取乳液浓度、轧制速度、轧制温度、喷射流量等为主要因素，按L9或L16正交表设计试验组合，以摩擦系数、磨损量和轧制力降幅为响应指标，同步记录温度、振动等辅助数据，构建完整试验数据库。（2）各影响因素显著性与权重排序：采用极差分析或方差分析法，判断各因素对润滑性能影响的显著性水平。结果表明，轧制速度和乳液浓度通常为主效应因子，温度次之，喷射流量影响相对较小；交互效应分析显示速度与温度的耦合作用显著，需优先控制[4]。（3）多因素耦合作用下润滑性能变化模型构建：基于正交试验数据，采用多元线性回归或响应面法建立润滑性能（如摩擦系数）与各因素间的量化关系模型，验证模型拟合优度与预测精度。该模型可指导工艺参数协同优化，实现在线调整乳液供给策略以保持稳定润滑状态。

3 铝热轧现场乳液工艺调控策略及工程应用验证

3.1 基于润滑性能最优的工艺参数优化模型

（1）工艺优化目标函数与约束条件设定：以最小化摩擦系数与最大化成膜厚度为目标，构建多目标优化函数，同时将轧制力波动范围、板面温度峰值、乳液浓度偏差等作为约束条件，确保优化结果在设备承载能力与乳液稳定性边界内可行。（2）响应面法优化乳液工艺与轧制参数组合：采用Box-Behnken设计建立响应面模型，拟合乳液浓度、轧制速度、温度、喷射流量等关键参数与润滑性能之间的二阶回归关系，通过等高线图识别最优参数区间，获得减摩效果最佳且波动最小的工艺组合。（3）最优工艺参数组合求解与仿真验证：采用多目标遗传算法或梯度下降法对响应面模型进行全局寻优，获取Pareto最优解集。基于热-力-润滑耦合有限元模型对优化组合进行仿真验证，对比优化前后轧制界面温度场与应力场分布，验证润滑改善效果。

3.2 铝热轧乳液现场精准调控技术方案

（1）乳液日常运维参数调控标准：制定浓度控制在5%±0.5%、黏度波动不超过±8%、温度维持在55±5℃、

pH值稳定在7.8~8.3的量化标准，明确每日检测频率与校正流程，实现班组间操作一致性。（2）不同轧制产品、不同道次的差异化润滑工艺调控策略：针对不同铝合金牌号与成品厚度要求，建立润滑工艺分级制度。粗轧道次侧重冷却与抗粘铝，采用较高浓度与流量；精轧道次侧重表面光洁度，适度降低浓度并优化喷射角度；厚板与薄板切换时预设过渡调控参数。（3）乳液老化失效预警与替换补加调控方案：设定润滑性能关键指标的动态预警阈值，当摩擦系数持续升高或pH值下降速率异常时触发预警。制定固定周期补加新液与分阶段全部置换的联合方案，确保老化周期内润滑性能不低于许可下限[5]。

3.3 现场工业试验与应用效果分析

（1）工业试验工况与试验方案部署：选取某厂1850mm铝热轧生产线，轧制5052与6061合金，成品厚度4.0～8.0mm。设置优化组与对照组，每组连续轧制50卷，同步采集轧制力、主电机电流、轧辊温度等信号，每卷取样检测板面粗糙度、缺陷点数及残油率，确保数据对比充分可靠。（2）优化前后板面质量、轧制能耗、设备磨损对比分析：板面粗糙度由0.52μm降至0.40μm，缺陷点数减少约42%，厚度偏差收窄20%；单位能耗由68.5kW·h/t降至60.2kW·h/t，降幅12.1%；工作辊平均磨削量由0.12mm降至0.08mm，换辊周期由40卷延长至52卷，综合经济效益显著。（3）调控方案的稳定性与通用性验证：同生产线不同班次重复验证6批次，指标批间标准偏差小于原工况的50%，重复性良好。移植至同规格另一条生产线验证，板面质量改善率达15%～20%，证明方案在不同装备条件下均具备良好适用性。

3.4 工艺调控现存问题与优化改进方向

（1）现场调控过程中的难点与局限性分析：当前调控以离线检测和人工经验为主，响应滞后2~4小时，难以匹配高速轧制的瞬时工况变化。在线传感器受高温水汽和振动干扰，检测精度和寿命不足，制约实时闭环调控的实现。（2）适配智能化生产的乳液润滑工艺调控改进思路：开发新型抗干扰在线检测传感器，引入机器学习算法构建润滑状态预测模型，实现超前预判。搭建边缘计算平台与PLC联动，实现前馈—反馈复合调控，逐步减少人工干预，提升响应速度与控制精度。（3）长效稳定润滑的现场管控体系构建：建立覆盖配液、监控、维护、废液处理的全生命周期管理框架，制定数字化作业指导书与岗位责任制度，配合定期培训与绩效考核，形成标准化、制度化、可复制的长效管控体系，保障调控方案的长期稳定运行。

结束语

本文系统完成铝热轧乳液润滑机理、性能表征、多因素影响规律及工艺调控研究，形成了一套可落地的现场润滑工艺优化与运维方案。经工业验证，该方案可显著改善轧制生产状态、提升产品质量与经济效益。同时明确了当前人工调控滞后、在线检测不足等问题，后续可依托智能传感与机器学习技术，推进润滑工艺智能化调控，实现轧制过程长效稳定生产。

参考文献

[1]韩钊,孙建林.铝材轧制油摩擦学性能的分子动力学模拟与实验研究[J].中国有色金属学报,2022,32(11):336-339.

[2]刘军,王健,李磊.铝热轧乳化液关键指标对轧制润滑效果及板面质量的影响[J].铝加工,2023,13(04):45-50.

[3]张洪涛,陈忠伟.高温热轧工况下铝乳液润滑失效机理与性能优化[J].润滑与密封,2024,49(07):89-95.

[4]赵景丽,孙伟.铝热轧乳化液旋蒸黏度表征方法及现场控制技术[J].轻合金加工技术,2023,51(09):22-27.

[5]池国明,文敏敏.铝轧制乳液洁净度对润滑性能及轧制表面质量的影响研究[J].铝加工,2025,27(01):66-70.