

热轧机生产过程中乳化液润滑能力的评估

武国锋 刘晓龙

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 热轧机生产过程中乳化液润滑能力对轧制质量至关重要。其润滑以混合润滑为主, 涵盖流体与边界润滑, 热分离性、边界润滑及冷却清洗功能协同作用。评估需综合多方面, 包括热分离性能的析油速率、油膜强度、乳粒尺寸分布、边界润滑剂消耗率及退火污染性等指标。通过合理设计配方、控制工艺参数、注重水质与设备维护, 可有效提升乳化液润滑能力, 保障铝热轧机生产出合格的板带材。

关键词: 热轧机生产过程中; 乳化液润滑能力; 评估

引言: 在热轧机生产过程中, 乳化液润滑起着举足轻重的作用, 它不仅能降低轧辊与板带间的摩擦, 减少磨损和能耗, 还能改善板带表面质量, 提升生产效率。然而, 热轧机生产环境复杂, 高温、高压、高速等工况对乳化液润滑能力提出了严苛要求。准确评估乳化液润滑能力, 有助于优化乳化液配方与工艺参数, 解决轧制中的润滑问题。因此, 深入开展热轧机乳化液润滑能力评估研究具有重要的现实意义。

1 热轧乳化液润滑机制分析

1.1 润滑类型与摩擦状态

(1) 混合润滑主导: 热轧机生产过程中, 乳化液并非单一润滑类型, 而是以混合润滑为核心。其中, 流体润滑通过乳化液中的油相形成油膜, 承担部分轧制载荷, 减少直接金属接触; 同时, 边界润滑发挥关键作用, 乳化液中的脂肪酸成分通过极性基团吸附在铝及轧辊金属表面, 形成致密吸附膜, 填补微观表面凹陷, 二者协同实现高效润滑。(2) 热轧机生产时, 轧制速度、载荷及温度等参数共同作用, 使润滑状态稳定处于曲线 II 区 (混合润滑区), 此区间内摩擦系数随轧制速度提升先降后稳, 既避免了 I 区 (边界润滑) 的高摩擦磨损, 又克服了 III 区 (流体润滑) 油膜过厚导致的轧制打滑问题。

1.2 热分离性机制

(1) 乳化液受热破乳: 热轧机时轧辊与板带接触区温度可达 300-500°C, 高温使乳化液稳定性下降, 发生热破乳现象。油相从水相中析出, 快速吸附于高温金属表面, 形成连续且具有一定承载能力的润滑膜, 为轧制过程提供基础润滑保障。(2) 乳粒在乳液中的沉降速度与乳粒直径平方成正比。乳粒尺寸越大, 热破乳时油相析出

速度越快, 在金属表面形成润滑膜的效率越高; 同时, 较大乳粒形成的油膜厚度更易满足轧制载荷需求, 润滑能力更强, 因此乳液制备中需合理控制乳粒粒径分布^[1]。

1.3 边界润滑作用

(1) 脂肪酸极性吸附: 乳化液中的脂肪酸分子具有极性羧基 (-COOH), 可与铝金属表面的羟基 (-OH) 发生化学吸附, 形成有序排列的分子层。该分子层紧密附着于金属表面, 能有效隔绝轧辊与板带的直接接触, 降低摩擦系数, 减少表面划伤。(2) 金属皂生成: 在高温轧制环境下, 脂肪酸的羧基与铝表面的铝离子发生化学反应, 生成铝皂化合物。铝皂具有良好的润滑性和耐磨性, 可进一步增强润滑膜的强度, 提高其抗剪切能力, 确保在高载荷轧制条件下仍能保持稳定润滑效果。

1.4 冷却与清洗功能

(1) 水分蒸发吸热: 乳化液中占比约 93% 的水相具有高比热容, 轧制过程中水分与高温轧辊、板带接触, 快速蒸发并吸收大量热量, 有效控制轧辊温度在 80-120°C 的合理范围, 避免轧辊因过热产生热变形, 保障轧制精度; 同时防止板带因温度过高出现氧化或性能劣化。

(2) 铝粉冲洗: 轧制过程中铝板带表面会产生微小铝粉, 若堆积在轧辊表面易造成轧辊粘铝, 影响板带表面质量。乳化液的流动特性可将铝粉及时冲洗带走, 保持轧辊表面清洁, 维持润滑膜的连续性和稳定性, 减少轧制缺陷。

2 影响乳化液润滑能力的关键因素

2.1 乳化液配方设计

(1) 基础油选择需平衡成本与性能, 矿物油凭借原料易得、加工工艺成熟的优势, 成本显著低于合成油, 适用于对高温环境要求不高的常规轧制场景; 而合成油 (如聚 α -烯烃) 具备优异的高温稳定性, 在轧制温度较高的硬合金加工中, 能有效避免基础油氧化分解, 维持润

作者简介: 武国锋, 1983年5月, 男, 汉族, 河南巩义人, 本科学历, 助理工程师

滑性能稳定。(2)乳化剂类型直接影响乳液稳定性,阴离子型乳化剂(如十二烷基苯磺酸钠)在高温环境下易发生热分离,便于后续乳液回收处理,但低温稳定性较差;非离子型乳化剂(如脂肪醇聚氧乙烯醚)受温度影响小,能在较宽温度范围内保持乳液均一性,降低分层风险。

(3)添加剂复配是提升润滑性能的核心,极压剂(如硫化异丁烯)可在金属表面形成高强度化学吸附膜,抵御轧制过程中的高压载荷;油性剂(如硬脂酸)则能通过物理吸附减少金属表面摩擦系数,二者协同作用可同时满足极压抗磨与减摩需求,大幅降低轧件表面划伤率。

2.2 工艺参数控制

(1)喷射压力与流量:喷射压力需 $\geq 5\text{bar}$,高压可使乳液突破轧制区空气屏障,增强对轧辊与板带接触间隙的渗透性,确保油相充分附着;流量需匹配轧辊宽度,通常控制在 $0.5\text{--}1.5\text{L}/\text{min}\cdot\text{mm}$,避免流量不足导致润滑不均,或流量过大造成乳液浪费。(2)温度管理:乳液需预先加热至 $50\text{--}60^\circ\text{C}$,降低黏度以提升流动性,便于快速渗透至轧制接触区;同时通过冷却系统精准控制轧辊表面温度,软铝合金(如1系)控制在 $80\text{--}90^\circ\text{C}$,硬铝合金(如5系)控制在 $90\text{--}100^\circ\text{C}$,既防止温度过低导致乳化液破乳不充分,又避免温度过高引发油相碳化^[2]。

2.3 水质影响

(1)硬度控制:配制乳液需使用去离子水,电导率 $\leq 50\mu\text{S}/\text{cm}$,若水中钙、镁离子含量过高,会与乳化剂发生反应生成不溶性皂化物,导致乳化剂失效、乳液分层,大幅降低润滑能力,因此需定期检测水质硬度并更换水源。(2)微生物抑制:乳液液长期循环易滋生细菌、霉菌,微生物代谢产物会破坏乳液稳定性,还可能腐蚀设备表面,需添加苯甲酸钠、卡松等防腐剂,浓度控制在 $0.1\%\text{--}0.3\%$,同时定期排放 $10\%\text{--}15\%$ 的旧乳液并补充新液,延长乳液使用寿命。

2.4 设备维护

(1)过滤系统精度:乳液循环系统需配备 $5\text{--}10\mu\text{m}$ 精度的自清洗过滤器和真空过滤机,有效拦截过滤轧制过程中产生的铝粉、金属碎屑等杂质,若杂质堆积在轧辊表面,会划伤润滑膜并造成轧辊粘铝,因此需每班过滤机走纸,确保过滤效率。(2)撇油装置效率:乳液使用过程中会产生表面浮油(如基础油氧化产物),浮油过多会降低乳液有效浓度,需通过撇油装置定期清除,维持乳液浓度在 $6\%\text{--}8\%$ 的最佳范围,同时每班2次检测乳液浓度,通过补加基础油或水调整至标准值。

3 乳液润滑能力的评估指标体系

3.1 热分离性能

(1)评估方法:热分离性能直接决定乳液在高温轧制区的润滑膜形成效率,核心评估手段为高温辊面油析出量测定。模拟热轧机轧辊实际温度区间($70\text{--}100^\circ\text{C}$),将乳液置于恒温辊面测试装置中,通过称重法收集单位时间内析出的油相质量,计算析油速率单位: $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$ 。通常要求在 80°C (软合金轧制典型温度)下析油速率 $\geq 0.8\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$, 95°C (硬合金轧制典型温度)下析油速率 $\geq 1.2\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$,确保油相能快速覆盖金属表面形成有效润滑膜^[3]。(2)指标优化:析油速率需与具体轧制温度匹配,关键在于调整乳化体系配方。当轧制温度较低(如 $70\text{--}80^\circ\text{C}$)时,可提高阴离子型乳化剂(如油酸钠)占比(至乳化剂总量的 $60\%\text{--}70\%$),利用其低温下易破乳的特性提升析油效率;当轧制温度较高(如 $90\text{--}100^\circ\text{C}$)时,需降低阴离子型乳化剂占比(至 $40\%\text{--}50\%$),搭配非离子型乳化剂(如聚氧乙烯壬基酚醚),避免油相过度析出导致乳液分层,同时通过添加 $0.5\%\text{--}1\%$ 的助乳化剂(如乙二醇单丁醚),进一步优化油相析出的均匀性。

3.2 油膜强度

(1)测试手段:油膜强度是衡量乳液抗载荷能力的核心指标,采用四球摩擦试验机进行测定,重点关注 pb 值(最大无卡咬负荷)和烧结负荷(pd 值)。测试时将乳液作为润滑剂注入四球接触区域,以 $500\text{r}/\text{min}$ 的转速逐步增加载荷,记录 pb 值(载荷增加过程中摩擦系数突然上升前的最大载荷)和烧结负荷(四球表面出现永久性咬合时的载荷)。工业标准要求铝热轧乳液 pb 值 $\geq 630\text{N}$,烧结负荷 $\geq 2500\text{N}$,确保在高轧制载荷(如 $300\text{--}500\text{MPa}$)下油膜不破裂,避免轧辊与板带直接接触金属接触。(2)影响因素:油膜强度主要受基础油黏度与极压剂添加量影响。基础油需选用 $150\text{--}300\text{SUS}$ (40°C 运动黏度)的矿物油,低黏度基础油($< 150\text{SUS}$)虽流动性好,但油膜承载能力弱,易在高载荷下破裂;高黏度基础油(300SUS)虽油膜强度高,但流动性差,影响乳液渗透性。极压剂(如硫化异丁烯)添加量需控制在 $1.5\%\text{--}3\%$,添加量过低($< 1.5\%$)时,极压效果不足, pb 值与烧结负荷偏低;添加量过高(3%)时,易导致金属表面过度腐蚀,且会增加乳液退火污染风险,需通过正交试验确定基础油黏度与极压剂添加量的最优组合。

3.3 乳粒尺寸分布

(1)粒径范围:乳粒尺寸直接影响乳液稳定性与润滑性, $3\text{--}10\mu\text{m}$ 为最优区间。乳粒粒径 $< 3\mu\text{m}$ 时,乳液稳定性极强,但热破乳时油相析出速度慢,难以快速形成润滑膜;乳粒粒径 $> 10\mu\text{m}$ 时,虽油相析出效率高,但

乳液易分层, 储存与循环过程中易出现乳粒沉降, 导致润滑不均。实际应用中需确保粒径在3-10 μm 范围内的乳粒占比 $\geq 80\%$, 其中5-8 μm 乳粒占比 $\geq 50\%$, 既能保证乳液在循环系统中稳定分散, 又能满足热分离性能要求。(2)检测技术: 采用激光粒度分析仪(如马尔文Mastersizer3000)进行实时监测, 该设备通过激光衍射原理, 可在0.01-3000 μm 范围内精准测量乳粒粒径分布。检测时需从乳化液循环系统的油箱不同采样点、采集样品, 每次采样量 $\geq 800\text{mL}$, 排除气泡干扰后进行测试, 每4小时检测1次, 若发现3-10 μm 乳粒占比低于75%, 需及时调整乳化液加强循环过滤, 确保乳粒尺寸维持在最优区间^[4]。

3.4 边界润滑剂消耗率

(1)游离脂肪酸含量: 边界润滑剂(主要为脂肪酸)在轧制过程中会因吸附、反应、降解而消耗, 需通过红外光谱法跟踪其消耗速率。利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 检测乳液中游离脂肪酸特征峰(羧基C=O伸缩振动, 波数1700-1720 cm^{-1})的吸光度, 结合标准曲线计算游离脂肪酸含量(单位: mg/g)。新配制乳液游离脂肪酸含量通常为5~8 mg/g , 轧制过程中若含量降至2~3 mg/g 以下, 边界润滑效果会显著下降, 需触发补充机制。(2)补充策略: 采用动态添加方式维持游离脂肪酸含量, 根据红外光谱检测结果, 当游离脂肪酸消耗速率 $\geq 0.5\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 时, 通过自动添加系统向乳液循环罐中注入油性剂(如硬脂酸丁酯), 添加量按“每降低1 mg/g 游离脂肪酸, 补充0.8~1 mg/g 油性剂”计算。同时, 为避免油性剂过度积累导致乳液黏度过高, 需搭配在线黏度监测(控制乳液黏度在20-30 $\text{mPa}\cdot\text{s}$), 当黏度超过30 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时, 适当减少油性剂添加量, 并补充少量去离子水调整。

3.5 退火污染性

(1)评估标准: 退火污染性关乎铝板带后续加工质量, 核心评估指标为退火后板面油斑等级, 参照ASTME112(金属平均晶粒度测定标准)中附带的油斑评级方法, 将退火后的铝板带表面划分为5个等级: 1级

(无可见油斑, 板面光亮)、2级(零星油斑, 面积占比 $< 5\%$)、3级(少量油斑, 面积占比5%~15%)、4级(较多油斑, 面积占比15%~30%)、5级(大量油斑, 面积占比 $> 30\%$)。热轧乳化液需确保退火后板面油斑等级 ≤ 2 级, 其中1级占比 $\geq 80\%$, 避免油斑影响后续涂装、复合等工序。(2)低污染配方: 降低退火污染性的关键在于优化基础油与添加剂选择。基础油优先选用饱和烃类(如石蜡基矿物油), 其退火时易完全挥发, 且无残留; 避免使用含不饱和和双键的化合物(如油酸、亚麻酸), 此类物质在退火高温(300-400 $^{\circ}\text{C}$)下易发生聚合反应, 形成难以去除的碳化物油斑。添加剂方面, 选用低挥发性油性剂(如硬脂酸异辛酯)替代高挥发性油性剂(如硬脂酸), 同时控制极压剂中硫含量 $\leq 0.5\%$, 减少退火时硫化物残留, 通过气相色谱-质谱联用(GC-MS)检测乳液退火挥发物成分, 确保有害残留物质(如苯类化合物)含量 $< 10\text{mg/kg}$ 。

结束语

综上所述, 热轧机生产过程中乳化液润滑能力的评估是一项系统且关键的工作。通过剖析润滑机制、明确影响润滑能力的关键因素, 并构建起涵盖热分离性能、油膜强度等多方面的评估指标体系, 我们得以更科学、精准地衡量乳液润滑效果。未来, 需持续深入研究, 不断优化评估方法与标准, 以进一步提升铝热轧乳液润滑能力, 推动铝加工行业朝着更高质量、更高效益的方向稳步迈进。

参考文献

- [1]黎政东.浅谈铝板带轧制润滑[J].建筑设计及理论,2020,(12):92-93.
- [2]姜宁,李金凤.工艺润滑对轧制产品铝粉产生量的研究[J].《铝加工》技术工程,2021,(07):77-78.
- [3]赵洪,周玉鹏.润滑条件对热轧润滑剂润滑性能的影响研究[J].文化科学,2020,(06):65-66.
- [4]陈志忠,鲁倩.热轧工艺润滑剂的研究进展及发展趋势[J].油气加工工程,2021,(10):104-105.