

钢铁冶金设备维修过程中绿色润滑技术的选型与应用效果分析

吴佛琼

本溪钢铁（集团）设备工程有限公司，辽宁 本溪 117000

DOI:10.61369/ERA.2025110030

摘要：本文聚焦钢铁冶金设备维修过程中绿色润滑技术的选型与应用效果分析，针对钢铁冶金设备高温、高负荷、多污染的复杂工况，从工况适配、部位特性、维修目标三维度拆解润滑需求，确立技术有效性、环境友好性、经济合理性与安全兼容性的选型原则，并构建目标层—准则层—指标层三级综合评价模型，通过层次分析法（AHP）与熵权法融合确定权重，结合指标量化评分实现技术量化选型。指出技术推广面临认知、技术、成本、政策四大挑战，并从认知引导、技术突破、成本分摊、政策支持四方面提出对策，为钢铁行业绿色润滑技术应用与可持续发展提供参考。

关键词：钢铁冶金设备；设备维修；绿色润滑技术；技术选型

Analysis of Selection and Application Effects of Green Lubrication Technologies in the Maintenance Process of Iron and Steel Metallurgical Equipment

Wu Fuqiong

Benxi Iron and Steel (Group) Equipment Engineering Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117000

Abstract : This paper focuses on the selection and application effects of green lubrication technologies in the maintenance process of iron and steel metallurgical equipment. Addressing the complex working conditions of high temperature, high load, and multiple pollutants in iron and steel metallurgical equipment, it dissects lubrication requirements from three dimensions: working condition adaptability, component characteristics, and maintenance objectives. It establishes selection principles based on technical effectiveness, environmental friendliness, economic rationality, and safety compatibility. Furthermore, it constructs a three-tier comprehensive evaluation model comprising an objective layer, a criterion layer, and an indicator layer. By integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the entropy weight method to determine weights, and combining indicator quantification and scoring, it achieves quantitative technology selection. The paper points out four major challenges in technology promotion: awareness, technology, cost, and policy, and proposes countermeasures from four aspects: awareness guidance, technological breakthroughs, cost-sharing, and policy support, providing references for the application and sustainable development of green lubrication technologies in the iron and steel industry.

Keywords : iron and steel metallurgical equipment; equipment maintenance; green lubrication technologies; technology selection

引言

随着环保政策趋严、企业降本增效需求升级，绿色润滑技术凭借其高热安定性、高生物降解率、长使用寿命等优势，逐渐成为解决传统润滑痛点的核心方向。因此，构建科学的绿色润滑技术选型体系，量化分析其应用效果，成为推动钢铁冶金设备维修绿色化、提升企业核心竞争力的关键课题。本文基于钢铁冶金设备的典型工况与维修需求，首先建立三级选型评价模型，明确选型逻辑；从技术、经济、环境与社会维度，结合实际案例量化分析绿色润滑技术的应用价值；针对推广挑战提出针对性对策，旨在为钢铁企业绿色润滑技术选型与应用提供理论支撑与实践参考，助力钢铁行业实现可持续发展。

一、钢铁冶金设备绿色润滑技术选型模型与方法

(一) 设备维修润滑需求分析

由于润滑油脂在高温环境下容易被氧化、蒸发而失效，其使用温度很难超越 $-80 \sim 350^{\circ}\text{C}$ ，并且杂质的存在、冲击强度高等因素都会大大降低油脂的润滑性能。在这种工况下，若仍采用普通润滑油脂就很难实现设备的良好润滑，冶金设备可能经常处于干摩擦状态，造成设备的巨大磨损，严重影响生产的正常进行^[1]。钢铁冶金设备涵盖高炉、转炉、连铸机、轧机等数十类核心设备，不同设备的结构特性、运行工况差异显著，其润滑需求需从“工况适配、部位特性、维修目标”三维度精准拆解，为技术选型奠定基础^[2]。设备普遍面临高温、高负荷、多污染环境，如高炉、转炉温度可达 $300\text{--}500$ ，需高闪点、高热安定性润滑剂；连铸机结晶器近 1000，需石墨基固体润滑；轧机轴承等重载部位要求极压抗磨性。不同部位润滑特性各异，如滚动轴承需中低黏度润滑脂，滑动轴承需高黏度油并增强吸附，齿轮传动需抗泡沫、黏附性好。维修目标上，追求延长部件寿命、降低润滑成本与减少停机，需采用长寿命润滑剂、高效润滑系统及高可靠设计，确保设备在极端工况下稳定运行。

(二) 绿色润滑技术选型原则

绿色润滑技术选型需平衡技术有效性、环境友好性、经济合理性与安全兼容性四大原则，避免单一维度决策。技术适配是前提，需根据工况、部位及系统兼容性精准匹配^[3]。环境友好性需从润滑剂全生命周期考量，覆盖生产、使用、废弃三个阶段。经济合理性需通过全生命周期成本分析，综合评估绿色润滑技术的短期投入与长期收益。安全兼容性旨在确保绿色润滑技术不对设备和人员造成安全风险，重点关注材料兼容、操作安全与火灾防控。

(三) 构建绿色润滑技术选型综合评价模型

为实现绿色润滑技术的量化选型，构建目标层—准则层—指标层三级综合评价模型，通过多维度指标加权评分筛选最优方案^[4]。目标层为绿色润滑技术选型综合评价，准则层包括技术性能、环境影响、经济成本和安全性能四大维度，每个准则层下细分具体指标层，共 20 项核心评价指标，每项指标均明确数据来源与说明。权重确定采用层次分析法 (AHP) 结合熵权法，邀请 10 位专家使用 1-9 标度法对指标重要性两两比较构建判断矩阵，并进行一致性检验 ($\text{CR} < 0.1$)，主观权重 (AHP) 占 60%，客观权重 (熵权法) 占 40%，融合得最终权重。指标量化与评分环节中，定量指标采用极值法标准化处理，正向指标得分随值增大而提高，负向指标则相反；定性指标采用 5 级评分法 (1-5 分)，映射为 0-100 分^[5]。综合评价与优选采用加权求和法计算各方案综合得分，公式为综合得分等于各项指标权重与对应标准化得分乘积的累加结果，得分最高的方案即为最优绿色润滑技术选型方案。

二、绿色润滑技术应用效果分析

(一) 技术效果分析

绿色润滑技术通过优化润滑剂性能与润滑系统设计，显著改

善了钢铁冶金设备的运行稳定性，降低了设备磨损率与故障频次，核心技术效果体现在设备摩擦控制、润滑系统效率及恶劣工况适应性三个方面^[6]。在设备摩擦磨损控制上，绿色润滑技术通过采用高极压抗磨性能的润滑剂与精准供油方式，大幅减少了设备关键部件的磨损。润滑系统效率提升是绿色润滑技术的另一核心优势，改造为油气润滑系统后，通过压缩空气将润滑剂雾化成 $5\text{--}10 \mu\text{m}$ 的微小油滴，均匀输送至每个润滑点，润滑剂利用率提升至 90% 以上，且系统配备在线压力、流量监测模块，可实时预警管路堵塞、油位不足等异常，维护方式从“定期拆解”转为“按需检修”，月均维护时间缩短至 2 小时，系统维护效率提升 75%^[7]。此外，针对原料场皮带运输机的润滑改造，采用自动补脂型滚动轴承单元与低黏度合成润滑剂，轴承润滑脂填充量从传统的 80% 轴承内部空间降至 30%-40%，避免了因油脂过多导致的轴承温升过高问题，轴承运行温度从 65°C 降至 45°C ，进一步延长了润滑脂更换周期。在恶劣工况适应性方面，绿色润滑技术展现出显著优势。钢铁冶金设备面临的高温、多粉尘工况对润滑系统的稳定性提出极高要求，传统矿物油在 200°C 以上环境中易发生氧化碳化，形成油泥堵塞管路，而可生物降解合成酯润滑剂的闪点可达 280°C 以上，在轧机工作辊轴承工况下，仍能保持稳定的黏度与油膜强度，氧化安定性指标仅为传统矿物油的 $1/3$ ^[8]。针对转炉烟道支撑轴承的高温润滑难题，采用聚四氟乙烯基固体润滑剂，可在 $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$ 环境下长期保持润滑性能，解决了传统润滑剂频繁失效的问题。同时油气润滑系统的密封结构优化，有效阻挡了铁鳞、粉尘侵入润滑部位，轧机牌坊轴承润滑系统的污染率从改造前的 30% 降至 5% 以下，因杂质导致的轴承卡死故障从每月 1-2 次降至每季度不足 1 次。

(二) 经济效益分析

从全生命周期成本视角来看，绿色润滑技术虽初期投入高于传统润滑技术，但通过减少润滑剂消耗、降低设备维修成本及减少停机损失，可在短期内实现成本回收，长期经济效益显著。以该钢铁企业 2050mm 热连轧机与连铸机改造为例，连铸机采用可生物降解合成酯润滑剂及油气润滑系统后，单条生产线初期额外投入约 35 万元，两条合计 70 万元；长期运行中，润滑剂月均消耗从 500kg 降至 150kg，年节约成本 1.92 万元，热连轧机工作辊轴承与结晶器铜板更换频率显著降低，年节约维修成本 45.3 万元，同时设备停机时间从年均 48 小时缩短至 12 小时，年减少停机损失 2160 万元^[9]。综合计算，年总节约成本约 2207.22 万元，扣除初期投入 70 万元后，投资回报周期仅约 11 天，远低于行业平均水平。此外，随着绿色润滑剂规模化采购，单价可进一步降低，人工成本也间接减少，经济效益持续提升。

(三) 环境与社会效益分析

绿色润滑技术在减少环境污染、降低能源消耗的同时，显著改善了车间工作环境，提升了企业绿色形象，契合钢铁行业“双碳”目标与绿色转型需求^[10]。在环境效益方面，绿色润滑系统将润滑剂泄漏量控制在 $50\text{kg}/\text{年}$ 以下，可生物降解润滑剂 28 天降解率达 95% 以上，避免了传统矿物油泄漏带来的土壤修复成本，年节约约 2 万元；同时通过降低设备摩擦阻力，热连轧机主电机运

行电流从150A降至130A，年节电1.2万度，减少二氧化碳排放3.67吨，润滑剂生产能耗也较传统矿物油低30%，进一步推动碳减排。此外，废油年产生量从800kg降至200kg，处理成本大幅降低，有效减少危险废物对环境的影响。在社会效益方面，绿色润滑技术使车间 VOCs 浓度降至50mg/m³以下，操作人员呼吸道不适投诉率从20%降至5%，噪音也降至60分贝，显著改善了工作环境；企业因此获评“环保示范企业”，获得政府环保补贴10万元，并因“绿色生产”标签赢得下游客户优先采购，市场占有率达到3%。该技术还推动企业与高校合作研发，形成2项实用新型专利，经验被纳入行业指南，促进技术普及，同时通过专项培训培养了一批专业人才，增强了企业的可持续发展能力。

三、绿色润滑技术推广的挑战与对策

（一）推广应用面临的主要挑战

从认知层面看，多数钢铁企业仍存在“重生产、轻环保”“重短期成本、轻长期收益”的思维定式，管理层常将绿色润滑技术视为环保附加项而非降本增效手段，忽视其延长设备寿命、减少停机等长期收益；基层人员则因不熟悉操作规范而存在畏难情绪，执行阻力大。此外，行业缺乏权威案例库与评估标准，企业难以直观判断技术价值，决策顾虑多。技术层面，钢铁设备工况复杂多样，现有绿色润滑剂在极端高温、高负荷等条件下性能不足，如国产耐高温润滑剂使用寿命仅为进口产品的70%；老旧设备改造中润滑系统兼容性差，需额外结构调整，增加复杂度与成本。同时行业缺乏统一的选型、检测与维护规范，导致技术质量参差不齐，企业选型困难。成本层面，绿色润滑技术初期投入高，润滑剂价格是传统矿物油的1.5–3倍，系统改造费用动辄数十万至百万元，中小企业难以承受；且其成本节约需长期显现，与企业短期财务考核冲突。此外，环境效益未转化为直接经济回报，缺乏成本分摊机制，进一步削弱企业推广动力。政策层面，支持体系尚不健全，专项补贴覆盖有限、申请复杂；税收优惠缺失，无法体现政策导向；监管力度不足，传统润滑剂违规使用处罚成本低，导致“守法成本高、违法成本低”现象普遍，企业缺

乏外部压力推动技术转型。

（二）推动绿色润滑技术应用的对策与建议

为推动绿色润滑技术在钢铁行业的广泛应用，需从认知引导、技术突破、成本分摊与政策支持四方面协同发力，构建多方参与的综合推进体系。政府部门应将绿色润滑技术纳入钢铁行业绿色转型重点目录，发布应用指南，强调其“降本增效环保”双重价值；行业组织需搭建技术交流平台，组织龙头企业分享改造经验，建立行业案例库与数据库，举办技术交流与现场观摩活动；企业则应加强管理层与基层人员培训，将推广成效纳入绩效考核，消除畏难情绪，提升执行积极性。在技术层面，需支持企业与高校、科研机构联合攻关高温、高负荷等极端工况绿色润滑剂，提升国产化水平，同时开发适用于老旧设备的模块化润滑系统，并制定绿色润滑剂选型、检测及生物降解率测定等系列标准，规范市场秩序。成本结构优化方面，应扩大专项补贴覆盖范围，推出绿色润滑专项贷款，并将减排纳入碳交易体系，探索环保效益补偿机制。政策体系上，应将绿色润滑技术应用纳入企业绿色评级，强化润滑剂使用与废油处理监管，建立多部门协作机制，避免政策碎片化，同时鼓励润滑剂企业与钢铁企业开展定制化研发与服务，降低技术应用风险与成本。通过多维度、多主体的协同推进，逐步破除推广障碍，助力钢铁行业实现绿色可持续发展。

四、结语

本文围绕钢铁冶金设备维修场景下绿色润滑技术的选型与应用效果展开系统性研究，旨在为行业突破传统润滑技术瓶颈、推动绿色转型提供理论与实践支撑。研究表明，针对钢铁冶金设备高温、高负荷、多污染的复杂工况，构建“目标层—准则层—指标层”三级综合评价模型，通过层次分析法与熵权法融合确定指标权重，结合定量与定性指标的标准化评分，能够实现绿色润滑技术的科学选型，有效解决“技术错配”问题，为不同类型设备的润滑方案优化提供精准指导。

参考文献

- [1] 丁光玉.冶金设备用宽温铁基固体自润滑复合材料的研究与制备[D].甘肃：兰州理工大学, 2008. DOI: 10.7666/d.y1292697.
- [2] 王文军.项目导向型全生命周期液压润滑设备管理研究——以济钢为例[D].天津：南开大学, 2007. DOI: 10.7666/d.j015486.
- [3] 孙志强, 王毓民, 王向中.绿色环保润滑剂研究技术的进展[J].润滑与密封, 2005(6):200–203. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2005.06.063.
- [4] 贾继欣, 邓娟.浅析绿色工艺润滑技术发展方向[J].中国化工贸易, 2018, 10(2):74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5167.2018.02.069.
- [5] 创新产业技术驱动绿色润滑[J].石油商技, 2012, 30(1):6–11.
- [6] 陆航, 花镜, 胡盟, 等.甘油基绿色润滑剂的性能与应用研究进展[J].摩擦学学报(中英文), 2024, 44(11):1614–1638. DOI: 10.16078/j.tribology.2023217.
- [7] 孙志强.硫、磷复合极压抗磨添加剂在绿色润滑剂基础油中的摩擦学性能研究[D].陕西：长安大学, 2006. DOI: 10.7666/d.y978517.
- [8] 石琛, 毛大恒.纳米二硫化钨在绿色润滑油中的应用与机理研究[J].应用基础与工程科学学报, 2009, 17(3):429–437. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.03.0013.
- [9] 张海洋.冶金设备的常见故障及维修管理措施研究[J].冶金与材料, 2024, 44(12):178–180. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5183.2024.12.061.
- [10] 马亮.冶金机械设备维修管理分析[J].冶金与材料, 2023, 43(4):76–78. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5183.2023.04.028.