

Digital Modeling and Intelligent Operation and Maintenance System Construction and Application Practice of Steel Machinery Equipment

Fuqiang Jia

Lianyungang Huale Alloy Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222042, China

Abstract

Under the “dual carbon” strategic goal, the steel industry, as the largest consumer of energy and carbon emissions in the industrial sector, the energy-saving transformation of its high-energy-consuming mechanical equipment is the core leverage for achieving the green and low-carbon transformation of the industry. With the in-depth implementation of the “Steel Industry Carbon Peak Implementation Plan”, the industry’s requirements for energy efficiency improvement continue to tighten. By 2030, the proportion of benchmark-level production capacity in the steel industry needs to reach over 40%, and the comprehensive energy consumption per ton of steel should decrease by more than 3.5% compared to 2020. Under this background, conducting systematic energy-saving renovations for high-energy-consuming mechanical equipment is not only an inevitable requirement for steel enterprises to implement environmental protection policies and reduce production costs, but also a core path to promote the industry’s realization of green, low-carbon and high-quality development.

Keywords

steel industry; high-energy-consuming mechanical equipment; energy-saving renovation; energy efficiency improvement; waste heat and residual energy recovery

钢铁行业高耗能机械装备的节能改造技术路径及能效提升效果分析

贾福强

连云港华乐合金集团有限公司, 中国·江苏·连云港 222042

摘要

在“双碳”战略目标下, 钢铁行业作为工业领域能耗与碳排放第一大户, 其高耗能机械装备的节能改造是实现行业绿色低碳转型的核心抓手。随着《钢铁行业碳达峰实施方案》的深入推进, 行业对能效提升的要求持续收紧, 到2030年钢铁行业标杆水平产能占比需达到40%以上, 吨钢综合能耗较2020年下降3.5%以上。在此背景下, 针对高耗能机械装备开展系统性节能改造, 既是钢铁企业落实环保政策、降低生产成本的必然要求, 也是推动行业实现绿色低碳高质量发展的核心路径。

关键词

钢铁行业; 高耗能机械装备; 节能改造; 能效提升; 余热余能回收

1 钢铁行业高耗能机械装备节能改造核心技术路径

钢铁行业高耗能装备节能改造需摒弃“单点改造、零散优化”的传统模式, 构建从单体装备高效化、工序系统匹配化到全流程管控智能化的全链条技术体系, 核心可分为五大技术路径, 覆盖钢铁生产全流程各类高耗能装备。

1.1 驱动系统

电机驱动系统是钢铁行业电耗的核心来源, 全流程

90%以上的机械装备均依赖电机驱动, 其节能改造是行业节电的基础环节, 核心技术路径分为三个层级。

1.1.1 超高效电机替换改造

针对老旧Y系列、YX3系列电机, 采用YE4、YE5系列一级能效超高效异步电机, 或稀土永磁同步电机进行替换。其中YE5系列电机效率较传统Y系列电机提升3-5个百分点, 可降低电机自身损耗40%以上; 稀土永磁同步电机在低速大转矩工况下(如轧机辊道、高炉上料系统)效率较异步电机提升5-8个百分点, 尤其适合频繁启停、变负载运行的装备场景。某钢企对120台总功率2.8万kW的老旧电机进行超高效替换后, 年节电1260万kWh, 节电率达11.2%。

【作者简介】贾福强(1983-), 男, 中国内蒙古包头人, 硕士, 工程师, 从事节能提效与环境治理研究。

1.1.2 变频调速系统改造

针对烧结主抽风机、高炉除尘风机、循环水泵、空压机等变负载运行的流体机械，摒弃传统的挡板、阀门节流调节方式，采用高压变频调速技术实现负载的动态匹配。变频调速可根据生产工况实时调节电机转速，避免节流造成的无效能耗，综合节电率可达20%-40%，是当前行业应用最广泛的成熟节能技术。针对大功率、高电压的核心装备，可采用三电平高压变频技术，进一步提升调速精度与运行稳定性，降低谐波损耗。

1.1.3 传动系统损耗优化

针对轧机、风机等装备的传动环节，采用永磁耦合器替换传统液力耦合器，可消除滑差损失，传动效率提升3-5个百分点，同时具备软启动、过载保护功能；对齿轮箱进行精密化改造，采用高精度齿轮、优化润滑系统，降低机械传动损耗，可减少传动环节能耗8%-12%^[1]。

1.2 流体机械

风机、水泵、压缩机等流体机械是钢铁行业电耗占比最高的装备类别，占行业总电耗的40%以上，其节能改造不能局限于单体设备，需实现“设备本体-管网系统-运行工况”的全系统优化。

1.2.1 三元流气动性能优化改造

针对烧结主抽风机、高炉鼓风机、转炉除尘风机等大功率离心风机，采用三元流理论对叶轮、蜗壳、进风口进行重新设计与改造，替换传统二元流叶轮。三元流叶轮可完美适配气体在流道内的三维流动规律，减少涡流、冲击损失，风机整机效率可提升10-15个百分点，节电率达15%-20%，且改造仅需更换叶轮核心部件，无需改动设备基础与电机，可在设备定修期间完成，不影响正常生产。

1.2.2 管网系统阻力优化

针对流体机械管网系统存在的局部阻力过大、管道泄漏、积灰堵塞等问题，通过优化管网布局，减少不必要的弯头、变径、阀门等局部阻力部件，清理管道积灰、修复泄漏点，降低管网阻力损失。通过管网优化，可使流体机械系统效率提升5-10个百分点，同时降低设备运行负载，进一步减少能耗。

1.2.3 多机并联系统负载匹配优化

针对循环水系统、空压站等多台设备并联运行的场景，建立系统负载动态分配模型，根据生产工况实时优化运行台数与单台设备负载率，避免设备低负载、空载运行，可实现系统节电10%-20%^[2]。

1.3 热工装备

焦炉、烧结机、高炉热风炉、轧钢加热炉等热工装备是钢铁行业燃料消耗的核心载体，其节能改造的核心是提升燃烧效率、减少散热损失、优化工艺匹配，最大程度降低燃料消耗。

1.3.1 高效燃烧技术升级

针对轧钢加热炉、热风炉等装备，推广蓄热式燃烧技术，采用蜂窝陶瓷蓄热体替换传统烧嘴，可将烟气余热极限回收，助燃空气预热温度可达1000℃以上，炉膛热效率提

升30%以上，吨钢能耗降低30%-40%，同时可实现低氮燃烧，兼顾节能与环保要求。针对焦炉、高炉热风炉，采用贫氧燃烧、扩散式燃烧技术，优化空燃比控制，实现燃料的完全燃烧，减少不完全燃烧热损失，可降低低燃耗5%-8%。

1.3.2 炉体保温与密封优化

采用新型耐火保温材料对炉体进行改造，用纳米绝热材料、陶瓷纤维模块替换传统耐火砖、浇注料，可使炉体导热系数降低50%以上，炉体外壁温度降低30-50℃，散热损失减少40%-60%。针对焦炉、烧结机等装备，开展炉体密封改造，修复炉体裂缝、优化密封结构，减少冷空气吸入与烟气泄漏，可降低热损失10%以上。

1.3.3 工艺匹配优化

大力推广钢坯热装热送工艺，提升轧钢加热炉入炉坯温度，钢坯入炉温度每提升100℃，加热炉吨钢燃耗可降低8%-10%，当前行业先进水平热装热送率可达90%以上；对推钢式加热炉进行步进式改造，消除钢坯黑印，提升加热均匀性，降低燃耗10%-15%；优化烧结机布料工艺、焦炉结焦时间控制，实现热工制度的精细化管理，进一步降低工序能耗。

1.4 余能利用

钢铁生产全流程蕴含大量余热、余压、余煤气资源，其回收利用是不增加原料消耗、直接实现节能降碳的核心路径，也是当前行业节能潜力最大的领域。

1.4.1 高炉余能回收技术

推广干式高炉煤气余压透平发电（TRT）技术，利用高炉炉顶煤气的压力能与热能驱动透平机发电，无需消耗煤气，可回收高炉鼓风机30%-40%的电耗，较湿式TRT发电效率提升30%左右，吨铁发电量可达40-60kWh。同时，采用高炉热风炉烟气余热回收技术，预热助燃空气与煤气，可降低高炉燃料消耗5%-8%。

1.4.2 烧结与焦化余热回收技术

针对烧结机环冷机烟气余热，采用双压余热锅炉回收烟气热量，产生蒸汽用于发电或生产供热，可回收烧结工序15%-20%的能耗，吨烧结矿发电量可达15-20kWh；焦化行业全面推广干熄焦（CDQ）技术，回收红焦的显热用于发电，吨焦可发电量达100-120kWh，节能率达15%以上，同时可提升焦炭质量，减少湿法熄焦的水污染问题。

1.4.3 炼钢与轧钢余能回收技术

转炉工序推广“煤气+蒸汽”双回收技术，通过汽化冷却系统回收转炉烟气余热产生蒸汽，吨钢可回收蒸汽60-80kg；通过煤气净化回收系统回收转炉煤气，吨钢可回收煤气80-100m³，可直接用于轧钢加热炉燃料或发电。轧钢加热炉采用烟气余热回收装置，将排烟温度从800℃以上降至150℃以下，余热回收率可达80%以上，预热后的助燃空气可大幅降低加热炉燃耗。

1.5 智能管控

智能化管控是实现高耗能装备从“单点节能”到“系统节能”的核心支撑，通过工业互联网、数字孪生、大数据

技术,实现装备能效的实时监测、动态优化与智能管控,挖掘全流程系统性节能潜力。

1.5.1 建立装备能效实时监测系统

在电机、风机、加热炉、余能回收装置等核心装备上安装能耗、温度、压力、流量、振动等传感器,实现设备运行参数与能耗数据的实时采集,建立单台装备、单工序、全流程的能效台账,精准识别能耗异常点与节能潜力点,解决“能耗底数不清、节能潜力不明”的问题。

1.5.2 基于数字孪生的运行参数动态优化

建立核心高耗能装备的数字孪生模型,模拟不同生产工况下设备的能效表现,通过大数据算法优化设备运行参数,实现高炉鼓风机防喘振优化、加热炉燃烧动态调节、风机水泵负载实时匹配,使设备始终处于最优能效区间运行,可实现系统能效再提升5%-10%。

1.5.3 搭建全流程能源管理系统(EMS)

整合焦化、烧结、炼铁、炼钢、轧钢全工序的能源生产、消耗、回收数据,实现电、煤气、蒸汽、氧气等能源介质的集中调度与优化分配,精准匹配能源生产与消耗,将高炉、

转炉煤气放散率从10%以上降至3%以下,大幅减少能源无效放散,实现全流程能源利用效率最大化^[3]。

2 节能改造的能效提升效果量化分析与工程验证

为精准评估不同节能改造技术路径的能效提升效果,本文结合国内多家钢铁企业的工程实践案例,从单体装备、全流程系统两个维度进行量化分析,并对不同技术的经济性进行对比验证。

2.1 单体装备改造的能效与经济效益

单体装备改造是钢铁企业节能改造的基础,各类核心装备改造后的能效提升效果与经济效益如下表所示,所有数据均来自国内钢企已投运的改造项目实测数据:

从实测数据可以看出,变频调速、三元流风机改造等节电类技术投资回收期最短,普遍在3年以内,改造难度低、见效快,是中小钢企优先选择的改造路径;蓄热式燃烧、TRT、干熄焦等热工与余能回收类技术,节能规模大、综合效益显著,虽投资回收期略长,但长期经济效益突出,是大型钢企全流程改造的核心选择。

表1 单体装备改造能效与经济效益

装备类型	核心改造技术	能效提升效果	典型项目经济效益	投资回收期
老旧电机	YE5超高效电机替换	电机效率提升3-5个百分点,节电率8%-12%	2.8万kW电机群改造,年节电1260万kWh,年收益756万元	3-5年
风机水泵	变频调速+三元流改造	系统节电率20%-40%,风机效率提升10-15个百分点	265m ² 烧结主抽风机改造,年节电485万kWh,年收益291万元	1-3年
轧钢加热炉	蓄热式燃烧+保温改造	吨钢能耗降低30%-40%,热效率提升30个百分点	棒材线加热炉改造,年节约标煤1.2万吨,年收益1200万元	2-4年
高炉系统	干式TRT改造	吨铁发电量提升40%以上,回收鼓风机30%-40%电耗	2000m ³ 高炉改造,年发电量4200万kWh,年收益2520万元	3-5年
焦炉系统	干熄焦改造	吨焦节能16%,年发电量1.6亿kWh	140万吨/年焦炉改造,年节约标煤5.6万吨,年收益5600万元	4-5年

2.2 全流程系统改造的综合降本减碳效果

相较于单点改造,全流程系统性节能改造可实现各工序节能技术的协同优化,避免“节能不省能”的系统内耗,能效提升效果更为显著。国内某大型国有钢铁企业4000万吨/年产能全流程节能改造项目,覆盖了超高效电机替换、风机水泵系统优化、加热炉蓄热式改造、干熄焦、干式TRT、智能化能源管控系统等全链条技术,改造完成后,企业吨钢综合能耗从578kgce降至521kgce,降幅达9.86%,年节约标煤85.2万吨,减少二氧化碳排放221.5万吨,年直接经济效益达5.2亿元,整体投资回收期3.8年^[4]。

2.3 能效提升的协同效益分析

高耗能装备节能改造除直接的能耗降低外,还具备显著的协同效益。一是环保效益提升,燃料消耗降低直接减少二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物排放,蓄热式燃烧、低氮燃烧等技术可同步实现污染物超低排放,减少企业环保治理成本;二是设备运行稳定性提升,高效电机、变频调速、预测性维护等技术可降低设备故障率,减少非计划停机损失,延长设备使用寿命;三是生产效率提升,加热炉、烧结机等装备的工艺优化,可提升产品质量稳定性,降低废品率,

实现“节能、提质、增效”的多重目标。

3 结论

钢铁行业高耗能机械装备的节能改造,是行业实现碳达峰碳中和目标的核心抓手,也是企业降本增效、提升核心竞争力的必然选择。随着双碳战略的持续深入,钢铁行业高耗能装备节能改造将向更深层次、更广范围发展。钢铁企业应结合自身产能规模、装备现状,选择适配的节能改造技术路径,从单点改造向全流程系统性优化升级,全面提升装备能效水平,推动行业实现绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1] 袁波. 冶金工业高耗能环节节能降碳关键技术分析[J]. 冶金与材料, 2026, 46(01): 70-72.
- [2] 武文起. 基于电碳数据的高耗能工业企业低碳运行方案研究[J]. 科技风, 2024, (34): 141-143.
- [3] 刘文杰, 吴庆华, 于鑫, 等. 推进高耗能行业新质生产力培育的路径研究[J]. 中国工程咨询, 2024, (09): 88-94.
- [4] 张晓迪, 王风华. 钢铁企业绿色供应链绩效评价研究——以宝钢股份为例[J]. 商业会计, 2024, (13): 87-91+86.