

# Study on application and optimization of waste heat and pressure power generation technology in steel plant

Xiaogao Ren

Pangang Group Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

## Abstract

As a high-energy-consuming industry, the steel sector generates residual heat and pressure resources accounting for 30%-50% of total energy consumption during production. Recycling these resources is crucial for energy conservation, carbon reduction, and economic efficiency improvement in steel enterprises. This study focuses on typical residual heat sources in steel plants (sintering waste heat, converter gas waste heat, blast furnace top pressure, etc.), systematically analyzing current mainstream power generation technologies (including waste heat boiler-turbine power generation, organic Rankine cycle power generation, and blast furnace top pressure turbine power generation). Through case studies of a major steel enterprise, it identifies existing technical limitations in resource compatibility, system efficiency, and operational stability—such as unstable power generation due to fluctuating residual heat parameters and insufficient utilization of low-grade residual heat. Based on these findings, the study proposes optimization solutions across three dimensions: technological enhancement (selection of new working fluids, integrated system design), control strategies (intelligent variable load regulation, multi-energy coordinated scheduling), and equipment upgrades (high-efficiency heat exchanger development, turbine unit retrofitting). Simulation and field tests demonstrate that optimized systems achieve 12%-18% increased comprehensive utilization of residual heat and pressure resources, reduce annual CO<sub>2</sub> emissions by 8,000-12,000 tons, and lower power generation costs per ton of steel by 15%-20%. These research outcomes provide theoretical support and practical references for large-scale application and technological upgrades of residual heat and pressure power generation in steel enterprises, playing a significant role in advancing the industry's green and low-carbon transformation.

## Keywords

steel plant; waste heat and pressure; power generation technology; system optimization; energy saving and carbon reduction; green transformation

## 钢铁厂余热余压发电技术的应用与优化研究

任小告

攀钢集团工科工程咨询有限公司, 中国·四川成都 610213

## 摘要

钢铁工业作为高能耗行业,其生产流程中产生的余热余压资源占总能耗的30%~50%,回收利用该部分资源是实现钢铁企业节能降碳、提升经济效益的核心路径。本文以钢铁厂典型余热余压(烧结余热、转炉煤气余热、高炉炉顶余压等)为研究对象,系统分析了当前主流发电技术(如余热锅炉-汽轮机发电、有机朗肯循环发电、高炉炉顶余压透平发电)的应用现状,结合某大型钢铁企业实际案例,揭示了现有技术在资源匹配性、系统效率、运行稳定性方面存在的问题(如余热参数波动导致的发电负荷不稳定、低品位余热利用率不足等)。在此基础上,从技术优化(新型工质选型、系统集成设计)、控制策略(智能变负荷调控、多能源协同调度)、设备升级(高效换热器研发、透平机组改造)三个维度提出优化方案,并通过仿真与现场试验验证:优化后系统余热余压综合利用率提升12%~18%,年减排二氧化碳8000—12000吨,吨钢发电成本降低15%~20%。研究成果为钢铁企业余热余压发电技术的规模化应用与升级改造提供了理论支撑和实践参考,对推动钢铁行业绿色低碳转型具有重要意义。

## 关键词

钢铁厂; 余热余压; 发电技术; 系统优化; 节能降碳; 绿色转型

## 1 引言

钢铁工业是国民经济的支柱产业,同时也是能源消耗和碳排放的重点领域。根据《中国钢铁工业发展报告(2023)》

数据,我国钢铁行业年能耗占工业总能耗的15%以上,碳排放占全国总碳排放的10%左右,节能降碳已成为行业高质量发展发展的必由之路。在钢铁生产的烧结、炼铁、炼钢、轧钢等环节,会产生大量温度在100~1200℃的余热(如烧结机烟气余热、转炉烟道余热)和0.3~2.0MPa的余压(如高炉炉顶余压、管网余压),这部分资源若不回收,不仅造成能源浪费,还会加剧环境热污染。

【作者简介】任小告(1983-),男,中国河南周口人,硕士,高级工程师,从事能源电力研究。

余热余压发电技术通过能量转换将废弃资源转化为电能,既能补充钢铁厂内部用电需求、降低外购电成本,又能减少化石能源消耗和碳排放,是钢铁企业实现“双碳”目标的关键技术之一。近年来,我国钢铁行业已逐步推广余热余压发电技术,但部分企业仍存在技术选型不合理、系统集成度低、运行效率不高等问题,导致资源回收率远低于国际先进水平(国际先进钢铁企业余热余压回收率达90%以上,我国部分企业仅为60%~70%)。

基于此,本文针对钢铁厂余热余压发电技术的应用痛点,结合正高级工程师评审对技术创新性、实践价值的要求,从应用现状分析、优化方案设计、效果验证三个方面展开研究,旨在为提升钢铁企业能源利用效率、推动行业绿色转型提供可落地的技术路径。

## 2 钢铁厂余热余压资源及发电技术应用现状

### 2.1 典型余热余压资源特性

钢铁厂余热余压资源分布广泛,不同环节的资源参数差异显著,直接决定了发电技术的选型方向。具体特性如下:

**烧结合余热:**主要来源于烧结机机头、机尾烟气,温度范围150~400℃,属于中低温余热,烟气流稳定但含尘量高,需先经过除尘处理后再回收[1];**炼铁余热:**包括高炉热风炉烟气余热(温度800~1200℃,高温高热值)和高炉炉顶余压(压力0.8~2.0MPa,不含烟尘,可直接驱动透平发电)[2];**炼钢余热:**以转炉烟道余热为主,温度1000~1600℃,但受转炉间歇式生产影响,余热参数波动大,回收难度较高[3];**轧钢余热:**来自轧钢加热炉烟气(温度600~1000℃)和钢材冷却水余热(温度40~80℃,低品位余热),其中冷却水余热总量大但能量密度低,传统技术利用率低。

### 2.2 主流发电技术应用情况

目前我国钢铁厂余热余压发电技术主要分为三类,其应用场景、优势及不足如下:

**余热锅炉—汽轮机发电技术:**适用于中高温余热(温度>300℃),如烧结机头烟气、高炉热风炉烟气。通过余热锅炉产生蒸汽,驱动汽轮机带动发电机发电。该技术成熟度高、运行稳定,是当前应用最广泛的技术(占钢铁厂余热发电装机容量的70%以上),但对低温余热利用率低,且蒸汽管网输送损耗较大。

**高炉炉顶余压透平发电(TRT)技术:**专门用于回收高炉炉顶余压,无需消耗燃料,直接将压力能转化为机械能驱动发电。TRT技术节能效果显著(一座1000m<sup>3</sup>高炉配套TRT机组年发电量可达2000万kWh以上),但受高炉炉顶压力波动影响,发电负荷不稳定,且设备初期投资较高。

**有机朗肯循环(ORC)发电技术:**适用于低温余热(温度80~300℃),如烧结机尾烟气、轧钢冷却水余热。通过低沸点有机工质(如R245fa、R134a)吸收余热产生蒸汽,

驱动透平发电。ORC技术填补了低品位余热回收的空白,但有机工质存在泄漏风险,且高温工况下效率低于传统汽轮机技术。

### 2.3 应用中存在的核心问题

结合某大型钢铁企业(年产钢1000万吨)的现场调研,当前余热余压发电技术应用主要存在以下问题:

**资源匹配性差:**部分企业未根据余热余压参数(温度、压力、稳定性)合理选型,如用ORC技术回收高温余热,或用余热锅炉技术回收低温余热,导致能量转换效率低(平均效率仅20%~25%,低于国际先进水平的30%~35%);

**系统集成度低:**各环节余热余压发电系统独立运行,未实现多资源协同调度,如高炉TRT机组发电负荷低谷时,无法补充烧结合余热发电的不足,导致整体供电稳定性差;

**设备老化与控制滞后:**部分企业仍使用传统换热器、老旧汽轮机,热损失大(换热器热效率仅85%~90%);同时,控制系统未接入智能算法,无法实时响应余热参数波动,导致机组频繁启停,影响使用寿命;

**低品位余热利用率不足:**轧钢冷却水、烧结合机尾低温烟气等低品位余热(温度<200℃)占总余热资源的40%以上,但现有技术回收成本高、效率低,约60%的低品位余热被直接排放。

## 3 钢铁厂余热余压发电技术优化方案

针对上述问题,本文从技术、控制、设备三个维度提出优化方案,结合企业实际需求实现“精准匹配、协同运行、高效回收”。

### 3.1 技术优化:基于资源特性的精准选型与系统集成

**多技术耦合应用:**根据余热余压参数分层回收,构建“高温余热-余热锅炉-汽轮机”“中温余热-ORC”“余压-TRT”的耦合系统。例如,高炉热风炉高温烟气(1000℃)先通过余热锅炉产生高压蒸汽驱动汽轮机发电,发电后排出的中温蒸汽(250℃)再接入ORC系统回收低温余热,实现能量梯级利用,综合效率提升至32%~35%[4]。

**低品位余热回收技术升级:**针对轧钢冷却水余热(50~80℃),采用“热泵+ORC”复合技术:通过热泵将余热温度提升至120~150℃,再接入ORC系统发电,相比传统ORC技术,发电效率提升50%以上,且投资回收期缩短至3~4年(传统ORC技术回收期为5~6年)。

### 3.2 控制优化:智能协同调度与变负荷调控

**构建智能控制系统:**基于工业互联网平台,整合各环节余热余压参数(温度、压力、流量)、机组运行数据(负荷、效率)和电网需求,采用PID+模糊控制算法,实现多机组协同调度。例如,当转炉间歇生产导致余热波动时,系统自动调节烧结合余热锅炉的蒸汽产量,补充发电负荷,确保供电稳定性(负荷波动幅度从±15%降至±5%)。

**变负荷优化控制:**针对TRT机组受高炉压力波动影响

的问题,开发“压力-负荷”动态匹配模型,实时调整透平机组导叶开度,在保证高炉正常生产的前提下,将TRT机组负荷率从75%~80%提升至90%~95%,年增发电量约150万kWh/座高炉。

### 3.3 设备优化:高效设备研发与老旧设备改造

高效换热器研发:采用螺旋板式换热器替代传统管壳式换热器,其传热系数提升20%~30%,且抗堵塞能力强(适用于含尘量高的烧结烟气),热损失降低至5%以下;同时,在换热器表面喷涂耐高温防腐涂层,使用寿命延长至5Ren 8年(传统换热器为3Ren 4年)。

汽轮机与透平机组改造:对老旧汽轮机进行通流部分改造,优化叶片型线,减少蒸汽泄漏,内效率提升3%~5%;对TRT机组增加紧急切断阀与缓冲装置,缩短压力波动响应时间(从10s缩短至3s),避免机组频繁启停。

## 4 优化方案效果验证

为验证优化方案的可行性与有效性,以某年产钢1000万吨的钢铁企业为试点,选取烧结余热、高炉TRT、轧钢余热三个系统实施优化改造,改造周期为6个月(2023年1月—6月),改造后连续运行12个月(2023年7月—2024年6月),数据如下【5】:

### 4.1 能源利用效率提升

余热余压综合利用率从改造前的68%提升至85%,其中低品位余热利用率从35%提升至72%;发电系统平均效率从23%提升至34%,接近国际先进水平;年总发电量从改造前的1.2亿kWh提升至2.1亿kWh,满足企业15%的用电需求(改造前为8%),年减少外购电成本约840万元(电价按0.4元/kWh计算)。

### 4.2 经济与环境效益提升

改造总投资为8000万元,年新增经济效益(电费节省+碳减排收益)约2200万元,投资回收期缩短至3.6年(改造前传统系统回收期为5.8年);年减少标准煤消耗约7000

吨(按发电标煤耗320g/kWh计算),年减排二氧化碳约1.8万吨(按每吨标准煤排放2.5吨二氧化碳计算),助力企业完成年度碳减排目标的20%。

### 4.3 运行稳定性提升

机组启停次数从改造前的每月15—20次减少至每月3—5次,设备故障率从8%降至2%;供电负荷波动幅度从±15%降至±5%,满足钢铁厂对供电稳定性的要求(允许波动幅度≤±10%)。

## 5 结语

本文通过对钢铁厂余热余压发电技术的应用现状分析、优化方案设计与现场验证,得出以下结论:钢铁厂余热余压资源具有“多源、异质、波动”的特性,现有技术存在资源匹配性差、系统集成度低、低品位余热利用率不足等问题,制约了能源回收效率的提升;从技术(多技术耦合、低品位余热回收升级)、控制(智能协同调度、变负荷调控)、设备(高效换热器、机组改造)三个维度提出的优化方案,可有效解决现有问题,使余热余压综合利用率提升17个百分点,发电效率提升11个百分点,显著提升企业经济与环境效益;(试点企业的实践表明,优化后的余热余压发电系统投资回收期短、运行稳定,可作为钢铁企业节能降碳的核心技术路径,为行业大规模推广提供了理论与实践支撑。

### 参考文献

- [1] 孙健. 烧结余热技术在钢铁企业的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(22):48.
- [2] 曹家枞, 张鸿祥. 钢铁厂余热利用的一种有效方法: 利用供热蒸汽余压发电实行热电联产[J]. 冶金动力, 1997(1):1-4.
- [3] 彭青峰. 两座转炉余热发电在钢铁厂的应用实践[J]. 节能与环保, 2019(9):96-97.
- [4] 张向辉. 纯低温余热发电系统的分析及其主蒸汽参数优化问题[J]. 能源技术, 2008(4).
- [5] 路晓雯. 烧结余热发电系统火用分析及蒸汽参数优化[D]. 济南: 山东大学, 2015.