

钢铁冶金余热利用的节能潜力及实践路径

何涛

武钢集团昆明钢铁股份有限公司 云南昆明 650300

摘要: 在“双碳”目标与钢铁行业能效提升需求双重驱动下,钢铁冶金余热作为可回收的二次能源,其利用水平直接影响行业碳减排与成本控制。本文基于钢铁生产全流程(烧结、炼铁、炼钢、轧钢)的余热资源特性,量化分析各工序余热占比与节能潜力,提出“技术集成+系统优化+管理创新”的三维实践路径。通过理论分析与典型工艺优化验证:高温余热发电效率可提升至42%,中低温余热回收成本降低25%,全流程余热利用率有望从当前40%提升至65%以上,为钢铁行业绿色转型提供系统性技术框架。

关键词: 钢铁冶金;余热利用;节能潜力;实践路径;碳减排

引言

钢铁工业作为能源密集型产业,吨钢综合能耗约1.5吨标准煤,占全国工业总能耗的15%。其生产过程中产生的余热资源占总能耗的30%–50%,主要以高温烟气、熔融渣液、炉窑尾气等形式存在^[1]。当前行业余热利用存在三大矛盾:一是余热资源量大与利用率低的矛盾——全国钢铁余热平均利用率约38%,远低于发达国家60%的水平;二是余热品质差异与高效回收的矛盾——高炉渣显热达1500℃,但传统水淬工艺仅回收5%的热量;三是技术应用与系统匹配的矛盾——单一余热发电项目投资回收期超8年,制约规模化推广。

一、钢铁冶金余热资源的节能潜力分析

(一) 余热资源的热力学特性与分布规律

钢铁生产全流程余热资源按工序可分为四大类,其热力学特性与回收难点如下:

1. 烧结工序余热

主要为烧结矿冷却产生的高温烟气,温度区间300–400℃,流量达200000m³/h,占工序能耗的25%–30%。烟气中含粉尘浓度5–10g/m³,且粉尘粒径分布不均(1–100μm),导致换热器易堵塞、磨损。从热力学角度看,该部分烟气的焓值(Exergy)占比约18%,主要损失于粉尘颗粒的无序运动与烟气散热,若采用“旋风除

尘+布袋过滤”预处理,可使粉尘浓度降至50mg/m³以下,为后续余热回收创造条件^[2]。

2. 炼铁工序余热

包含高炉煤气、高炉渣显热与热风炉烟气。其中高炉煤气热值1000kcal/m³,流量300000m³/h,其化学潜热占炼铁工序余热总量的35%,是当前利用最广泛的余热资源,但煤气中含H₂S(浓度500–2000ppm),需脱硫处理以避免设备腐蚀;高炉渣显热温度1500℃,每吨渣含热量约2.8GJ,其物理显热占比达60%,但传统水淬工艺将高温渣骤冷至常温,导致95%的显热以汽化潜热形式散失,热力学不可逆损失显著。

3. 炼钢工序余热

转炉煤气热值2100kcal/m³,吨钢回收量100–120m³,其化学潜热品位高(焓值占比30%),但烟气中含CO(体积分数60%–80%),需精准控制氧含量以防爆炸;钢渣显热温度1600℃,每吨渣含热量约3.2GJ,其物理显热中可回收的高温辐射热占比约40%,但钢渣粘度高(10–100Pa·s),传统水淬后形成的渣棉导热系数低(0.04W/m·K),反而阻碍热量传递。

(二) 余热资源的节能潜力量化分析

以年产1000万吨钢的联合企业为研究对象,基于热力学第一、第二定律进行潜力评估:

1. 理论回收极限

吨钢余热资源总量约5.2GJ(含物理热与化学热),其中可回收能量超2GJ(占比38.5%)。从焓分析视角,高温余热(>500℃)的焓值占比达65%,适合通过动力循环发电;中温余热(200–500℃)的焓值占比25%,适

作者简介: 何涛(1991.05–),男,云南省宣威市人,汉族,热能助理工程师,硕士研究生,研究方向为冶金热能。

合热交换或工艺预热；低温余热（ $< 200^{\circ}\text{C}$ ）的焓值占比10%，适合生活用能或低品位工艺需求。若全部利用，可替代标准煤68kg/吨钢，对应碳排放减少170kg/吨钢，相当于每万吨钢种植8.5公顷森林的碳汇效果^[3]。

2. 现实利用差距

当前行业吨钢余热回收量约0.8GJ（利用率40%），与理论值相差1.2GJ/吨钢，主要损失于三方面：①高炉渣水淬冷却——液态渣的显热（2.8GJ/吨渣）转化为水蒸气的汽化潜热，仅5%以热水形式回收；②转炉煤气放散——部分企业因煤气柜容量不足或净化系统故障，放散率超30%，对应吨钢损失热量0.3GJ；③轧钢加热炉烟气直接排放—— 400°C 以上烟气未回收，导致吨钢损失热量0.2GJ。从能量品质看，这些损失的余热中，高温部分占比达70%，造成的焓损失是低温余热的3-5倍。

（三）余热利用的边际效益与热力学约束

从节能与经济性双维度建立边际效益模型，需考虑卡诺循环效率限制与焓损失：

1. 高温余热（ $> 500^{\circ}\text{C}$ ）

优先用于发电，理论卡诺效率随温度升高而提升（如 800°C 时效率达58%），但实际发电效率受工质特性限制——传统蒸汽循环效率约30%，联合循环（燃气轮机+蒸汽轮机）可提升至42%。以高炉煤气发电为例，吨钢发电收益约25元（电价0.5元/kWh），但需投入脱硫脱硝系统（投资占比15%）以满足环保要求^[4]。

2. 中温余热（ $200-500^{\circ}\text{C}$ ）

适合生产蒸汽或预热助燃空气，热交换效率约60%-80%。以烧结环冷机烟气为例，生产1吨蒸汽（1.0MPa）可获利20元（蒸汽价格200元/吨），但需考虑烟气粉尘导致的换热器维护成本（年维护费用占投资的8%）。从焓损失角度，中温余热用于加热工艺空气（温升 $50-100^{\circ}\text{C}$ ）的焓效率达40%-50%，优于直接产蒸汽（焓效率30%-40%）。

3. 低温余热（ $< 200^{\circ}\text{C}$ ）

可用于供暖或预热物料，但其焓值低（ $< 10\%$ ），回收成本较高（占投资的30%）。以轧钢加热炉低温烟气为例，采用热泵回收用于厂区供暖，COP（性能系数）约1.8，吨钢收益5-8元，但需克服低温热源的传热温差限制（ $\Delta T \geq 10^{\circ}\text{C}$ ），导致换热器面积增加30%。

二、钢铁冶金余热利用的实践路径

（一）技术集成路径：基于热力学的全工序梯级利用

1. 高温余热高效发电技术优化

高炉煤气联合循环发电（CCPP）：采用“燃气轮机-

余热锅炉-蒸汽轮机”三联供系统，利用高炉煤气与转炉煤气混合（热值提升至 1500kcal/m^3 ），在燃气轮机中实现高温膨胀做功（初温 1100°C ），排气进入余热锅炉产生蒸汽驱动蒸汽轮机。该系统发电效率从传统锅炉的30%提升至42%，关键在于：①燃气轮机透平叶片采用陶瓷涂层（耐温 1200°C ）；②余热锅炉采用螺旋管式换热面（换热系数提升25%）；③蒸汽轮机采用补汽凝汽式结构（背压0.004MPa），吨钢发电量从120kWh提升至180kWh，焓效率达38%。

干熄焦（CDQ）技术升级：新型余热锅炉采用“膜式水冷壁+分级过热”结构，换热效率从75%提升至88%，关键改进包括：①辐射段采用内螺纹管（传热系数提升30%）；②对流段设置旋转吹灰器（积灰热阻降低50%）；③蒸汽过热段分为低温段（ 350°C ）与高温段（ 450°C ），吨焦发电量从125kWh提升至150kWh。同时，干熄焦产生的低温烟气（ $150-200^{\circ}\text{C}$ ）通过板式换热器预热助燃空气（温升 60°C ），使焦炉加热燃料消耗降低8%，综合节能率达15%。

2. 中温余热综合利用技术创新

烧结环冷机余热双压发电：将环冷机烟气按温度分为高温段（ $350-400^{\circ}\text{C}$ ）与中温段（ $200-300^{\circ}\text{C}$ ），分别产生高压蒸汽（10MPa， 480°C ）与低压蒸汽（1.6MPa， 300°C ）。高压蒸汽进入背压式汽轮机发电（做功焓降 700kJ/kg ），低压蒸汽用于预热烧结混合料（温升 30°C ）。该技术发电效率提升8%，关键在于：①高温段采用翅片管换热器（传热面积增加20%）；②中温段设置蒸汽蓄热器（容量50吨）平衡负荷波动；③汽轮机采用补汽调节（补汽量占主汽量的15%），吨烧结矿发电量从35kWh提升至42kWh，焓效率达32%。

转炉煤气余热锅炉优化：采用“膜式水冷壁+分级换热”结构，将烟气温度从 1400°C 降至 200°C ，蒸汽产量从50吨/小时提升至65吨/小时。技术要点：①水冷壁采用内插扭带（对流换热系数提升40%）；②设置三级过热器（低温段、中温段、高温段），蒸汽过热度从 150°C 提升至 200°C ；③配套蒸汽蓄热器（容积 200m^3 ），适应转炉周期性产烟（每炉周期40分钟），使蒸汽参数波动 $\leq \pm 5\%$ ，满足汽轮机稳定运行要求。

（二）系统优化路径：基于焓分析的多能互补调控

1. 余热-储能-电网协同系统构建

能量流优化：余热发电优先满足厂内用电（占比60%），多余电量（40%）存入200MWh储能电站（锂电

池能量密度 150Wh/kg)；

时间尺度匹配：电网峰段（8：00-22：00）释放储能电力（放电深度80%），利用峰谷价差（0.7元/kWh）提升收益；

焓损失控制：储能系统充放电效率 $\geq 90\%$ ，余热发电至储能的能量传递效率 $\geq 95\%$ ，系统综合收益较单一发电模式提升30%，对应焓效率提升5个百分点。

2. 全流程余热资源智能匹配

开发“余热资源地图”管理平台，基于物联网与大数据技术实现：

动态供需匹配：实时监控各工序余热产生量（如高炉煤气流量波动 $\pm 10\%$ ）与用户需求（如轧钢加热炉热量缺口），采用模型预测控制（MPC）算法调节换热器负荷，响应时间 ≤ 10 秒；

能量流网络优化：通过遗传算法优化余热输送路径，考虑管网热损失（从15%降至8%）与焓损失（降低10%），确定最优管径与保温厚度；

三、现存挑战与热力学优化对策

（一）核心挑战的热力学本质

技术瓶颈：高温余热发电效率（35%-42%）接近卡诺循环极限，本质是工质热力学性质限制——水蒸汽朗肯循环的最高焓效率约45%；低温余热（ $< 200^\circ\text{C}$ ）回收成本高，因传热温差小（ $\Delta T \leq 20^\circ\text{C}$ ）导致换热器面积指数级增加，焓损失占比超50%^[5]。

系统匹配：余热产生与需求存在时空不匹配，如高炉连续产热（24小时）vs 轧钢间歇用热（每日16小时），导致30%的余热无法有效利用，本质是能量流时间维度的焓损失，即余热储存过程的不可逆性（储存焓效率 $< 70\%$ ）。

（二）基于热力学的优化对策

技术创新：开发超临界CO₂发电技术（工质临界温度31℃，临界压力7.38MPa），在800℃热源下效率突破50%，因CO₂在超临界状态下密度高（ $> 400\text{kg}/\text{m}^3$ ），可减小设备体积30%；研发吸附式余热制冷技术（采用硅胶-水吸附对），COP提升至2.5，利用低温余热（120-150℃）驱动，焓效率达30%。

系统集成：建设区域性能源站，整合钢铁、化工等行业余热资源，通过高温热网（介质为导热油，温

度300-400℃）实现跨企业梯级利用，热网输送焓效率 $\geq 85\%$ ，如将钢铁厂高炉渣余热（1500℃）先用于化工裂解（需热800℃），再回收余热用于供暖（需热50℃）。

政策完善：将余热利用量纳入钢铁行业碳交易核算体系（1kWh余热发电抵扣0.8kgCO₂），按当前碳价（70元/吨）计算，可提升收益0.056元/kWh；提高上网电价至0.45元/kWh，使余热发电项目投资回收期缩短至5年以内，匹配工业项目基准收益率（15%）。

结论

钢铁冶金余热利用是实现“双碳”目标的核心路径，其节能潜力可通过“技术集成-系统优化-管理创新”三维路径释放。从热力学视角，全工序余热梯级利用可使吨钢综合能耗下降12%、碳排放减少8.5%，同时提升系统焓效率5-8个百分点。实践表明，高温余热发电效率提升至42%、中低温余热回收成本降低25%后，余热利用率有望从当前40%提升至65%以上，为钢铁行业创造显著的经济效益与环境效益。

未来需重点突破高温发电的热力学循环限制与低温回收的焓损失瓶颈，通过多能互补系统与智能调控技术提升余热利用的时空匹配度，辅以基于热力学成本的政策激励与商业模式创新，推动钢铁行业向“零碳冶金”转型。随着氢能炼钢与碳捕集技术的发展，余热利用将与新能源深度融合，形成“余热-氢能-碳循环”的新型能源体系，其热力学焓效率有望突破60%，为全球工业节能提供基于热力学原理的中国方案。

参考文献

- [1] 陈子旋. 钢铁冶金过程环保和节能技术应用研究[J]. 环境与生活, 2025, (06): 73-75.
- [2] 史志伟, 白凤荣. 钢铁冶金流程及节能技术研究[J]. 山西冶金, 2024, 47 (03): 107-108.
- [3] 牛永辉. 钢铁冶金系统节能技术探讨[J]. 中国金属通报, 2023, (11): 4-6.
- [4] 李孟想. 冶金企业低品位余热回收技术的创新与优化[J]. 能源与节能, 2024, (05): 84-87.
- [5] 刘琳. 冶金余热环形热电转换装置开发[D]. 东北大学, 2022.