

第八届钢铁、焦化行业绿色低碳
高质量发展技术研讨会

论文集

2025 年 9 月 河北·石家庄

目 录

基于热力学品位的钢铁冶金余热梯级利用技术与多目标协同优化研究	1
CASCADE UTILIZATION OF WASTE HEAT IN IRON AND STEEL METALLURGY: THERMODYNAMIC HIERARCHY-BASED TECHNOLOGIES AND MULTI-OBJECTIVE SYNERGISTIC OPTIMIZATION	1
焦化企业焦炉烟气环保治理实施超低限值排放的路径和方案	7
焦化行业焦炉烟气高温尘硝硫 NMHC 氨逃逸超低排放解决方案	11
金属滤袋高温除尘应用过程中脉冲喷吹清灰设计及应用实践	14
炼钢转炉烟道喷煤降碳操作的热化学技术分析	18
Application Analysis of Thermochemical Energy Storage Technology for Carbon Reduction in Steelmaking Converters	18
烧结过程铁矿石原位催化氧化甲苯研究	18
in situ Catalytic Oxidation of Toluene by Iron Ore during Sintering Process	19
应用于钢铁企业的储能技术的绿色资产证券化	25
Green Asset Securitization of Major Energy Storage Projects in Steel Plants	26
综述大型高炉余压 TRT 发电湿改干节能技术经济分析与投融资路径优化	34

基于热力学品位的钢铁冶金余热梯级利用技术与多目标协同优化研究

王雪原¹, 陈琛^{*2}, 史光²

(1. 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067399; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176)

摘要: 钢铁工业能耗占全球工业总能耗 26%, 其余热高效回收是降低碳排放的核心路径。本文系统解析钢铁全流程余热热源品位特性 (高温>500°C、中温 150–500°C、低温<150°C), 提出“品位-技术-场景”匹配原则: 高品位热源 (转炉煤气、熔渣) 采用 CDQ、HRSG 技术发电 (蒸汽参数达 440°C/120 bar); 中品位热源 (烧结废气) 适用 ORC 循环; 低品位热源 (冷却水) 依托工业热泵提温。研究揭示当前瓶颈包括: (1) 数据驱动滞后, 需融合拉格朗日动态追踪与 e-CPS 实现智能调度; (2) 物料-能量流协同薄弱, 火用分析表明品位错配造成烟损; (3) 系统柔性不足, 制约可再生能源整合。案例证实, 余热梯级利用可降吨钢能耗 26.08% (4.87 GJ/吨钢), 减排 CO₂ 50 kg/吨钢。未来需深化多能流协同模型与经济性优化, 推动钢铁工业零碳转型。

关键词: 钢铁冶金; 信息物理系统; 余热回收; 梯级利用; 热源品味; 品位匹配; 蒸汽产物; 火用分析; 协同优化; 源网荷储;

中图分类号: TF083; X321

Cascade Utilization of Waste Heat in Iron and Steel Metallurgy: Thermodynamic Hierarchy-Based Technologies and Multi-Objective Synergistic Optimization

CHEN Chen, LI Jiawang, SHI Guang

(Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: The iron and steel industry accounts for 26% of global industrial energy consumption, and efficient waste heat recovery is crucial for decarbonization. This study systematically analyzes the thermodynamic hierarchy of waste heat sources (high-grade: >500° C, medium-grade: 150 – 500° C, low-grade: <150° C) across production processes and establishes a "hierarchy-technology-application" matching framework. Key findings include: (1) High-grade heat sources (e.g., LDG, molten slag) are optimally recovered via CDQ and HRSG for power generation (steam: 440° C/120 bar); (2) Medium-grade sources (sintering exhaust) suit ORC cycles (efficiency: 25%); (3) Low-grade sources (cooling water) require industrial heat pumps for temperature upgrading. Critical bottlenecks are identified: (i) Data-decision gaps necessitate Lagrangian tracking and e-CPS for dynamic optimization; (ii) Material-energy flow decoupling leads to exergy loss due to grade mismatch; (iii) Insufficient flexibility hinders renewable energy integration. Case studies validate that cascade utilization reduces energy consumption by 26.08% (4.87 GJ/t-steel) and CO₂ emissions by 50 kg/t-steel. Future work must prioritize multi-energy synergy modeling and economic enhancement for zero-carbon transition.

Key words: Iron and steel metallurgy; Cyber-Physical System; Waste heat recovery; Cascade utilization; Heat Source Grade; Hierarchy matching; Steam products; Exergy analysis; Synergistic optimization; Source - Grid - Load - Storage;

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208100) 低碳冶金关键技术和装备联合研发

引言

钢铁工业作为全球第二大能源消耗产业, 其生产过程对化石燃料高度依赖, 并伴随着大量的环境污染排放。2024 年我国粗钢产量为 10.05 亿吨, 占全球 53.39%^[1], 平均能源强度为 20 GJ/吨粗

钢，二氧化碳排放强度为 1.9 吨/吨粗钢^[2]。在当前全球气候变化日益严峻和能源价格持续上涨的背景下，降低能源强度、提升能源效率已成为钢铁行业实现可持续发展的核心驱动力。余热回收，作为一项关键的节能减排技术，在钢铁工业中展现出巨大的潜力。研究表明，对于年产 1000 万吨粗钢的钢厂而言，其余热回收潜力可达 4.87 GJ/吨钢，相当于总能耗的 26.08%^[3,4]。

尽管钢铁行业在过去几十年中为提高能源效率付出了巨大努力，但传统的、孤立的节能措施所能带来的增量效益正日益减少。这使得进一步的节能空间变得狭窄，促使行业必须寻求更为系统化、协同化的解决方案。现代钢厂已普遍配备企业资源规划（Enterprise Resource Planning, ERP）系统、制造执行系统（Manufacturing Execution System, MES）和计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System, CIMS）^[5]，为物料流和能量流的快速信息传输、数据采集与监控提供了基础硬件支持。然而，这些先进基础设施的潜力尚未完全释放，物料流与能量流之间的高效、优化和智能调度以及协同互动仍未充分实现。这表明，仅仅拥有先进的传感器和数据采集系统，以及基础的控制系统的是不够的；真正的挑战在于钢铁行业正面临着在保持高产品质量、提高生产力、降低运营成本、减少能耗和缓解环境排放等多重目标之间寻求平衡的严峻挑战^[6]。

当前热能利用的问题框架

尽管钢铁行业在余热回收方面取得了显著进展，但在充分发挥其潜力和实现可持续发展目标方面，仍面临诸多挑战。这些挑战也指明了未来重要的研究和发展方向。

数据驱动与智能优化的问题与解决方案

目前，钢铁行业余热回收的优化工作大多停留在静态规划层面，动态优化仍处于早期阶段。这主要受限于数据的缺失或不完整，以及大多数能量流模型未能充分考虑物料流或设备状态的动态影响。钢铁生产过程是一个典型的动态、非平衡、非线性、不可逆且复杂的系统。要实现真正的动态优化，需要通过充足的监测仪器和必要数据，显著改进物料流和能量流的动态模型。这些问题主要体现在算法和数据流系统的建立：

首先，预热回收面临从数据到决策的鸿沟。这体现在“数据可用性与可操作洞察”之间的鸿沟。仅仅通过传感器、CIMS 收集更多数据是不够的；钢铁行业需要强大的数据分析能力、人工智能驱动的预测模型（例如，回声状态网络 ESN^[7]、遗传算法优化支持向量机 GA-SVM 用于能量流预测^[8]），以及能够处理动态波动并整合不同数据流（物料流、能量流、设备状态、市场价格）的实时优化算法，以实现真正的“智能”能源管理。

其次，传统的欧拉方法虽然广泛用于分析特定设施的物料和能量流生产或消耗，但其局限性在于不适用于研究特定能量载体从产生到最终使用的全生命周期流动行为^[9]。例如，高炉煤气在加热炉中的消耗受加热炉工况影响，但也受高炉产气量和其它用户消耗的影响，这难以用欧拉方法描述。相比之下，拉格朗日方法通过追踪流体性质随时间的变化来确定物料和能量流的特性，提供了更深入的描述方式^[10]。未来研究应更多关注利用拉格朗日方法来理解物料和能量流的运动行为，从而实现更精细的动态管理。

第三，智能钢铁制造与智能能源系统的整合问题。随着物联网（Internet of Things, IoT）、大数据分析、云计算和人工智能（Artificial Intelligence, AI）等新技术的快速发展，智能制造正成为现代工业的重要趋势，钢铁行业也正迈向“工业 4.0”时代，其核心是信息物理系统（Cyber Physical Systems, CPS）^[11]。智能钢铁制造包括智能能源系统，即能源系统的信息物理系统（energy-Cyber Physical Systems, e-CPS）。e-CPS 需要可靠的能量流数据和信息，在传感器无法全面部署的地方，状态估计是一种可行的解决方案。此外，随着能源系统的柔性化，钢厂需要与外部能源生产者/消费者进行交易或为大型能源网络提供辅助服务，区块链技术有望为此类交易平台提供可复制、安全、可验证且可信赖的解决方案。

物料-能量协同优化问题和解决方案

如同数据驱动面临的问题，目前，能量流网络常被视为孤立系统，能量流预测也往往忽略物料流的影响，尽管物料流对能量流有直接且决定性的影响。物料流与能量流之间的协同作用对于进一步降低能耗和提高能效至关重要。调整产品结构被认为对提高能效具有重要作用。当前使用的能源效率对能效评价存在局限性。传统上，单位能耗（也称为比能源消耗, Specific Energy Consumption, SEC）常用于评估钢铁生产过程的能效^[12]。然而，SEC 不足以全面评估能效，因为它仅关注能量的

“量”而非“质”。烟（Exergy）概念基于热力学第二定律，在评估能量的有用性方面发挥着更重要的作用^[13,14]。虽然火用分析已应用于钢厂的特定能量转换过程，但尚未用于整个钢铁生产基地来优化物料和能量流网络。未来的研究应引入“烟”概念，以识别具有大量火用损失的具体工艺或工厂，并开发结合数据驱动方法与能量-物料协同机制的混合模型。基于协同思维进行优化，解决能量流瞬时产生和消耗的定量不平衡、供需之间品位不匹配（例如，高品位能量用于低品位需求）和非协同操作等问题，将是未来的重要方向。从更广阔的视角看，为了减少环境污染和提高可持续性，物料、能量、水、排放和现金流之间的协同作用将在推动钢铁工业发展中发挥重要作用。

钢铁生产过程与能源系统的缺乏柔性关联

钢铁生产过程是动态、非平衡、非线性、不可逆且复杂的系统，其节能潜力存在于当前的能量不平衡、不匹配和非协同状态。因此，生产过程（物料流）和能源系统（能量流）都需要具备柔性，以应对不确定性和变化^[15]。但是恰恰物料流与能量流在实际过程中体现为“刚性十足”导致钢厂与外部能源生产者/消费者发生能源交换及基于能源交换的能源交易存在困难。

首先，生产过程柔性不足。现有文献对产品组合柔性、路径柔性、产量柔性等生产柔性有大量研究，但在钢铁生产过程的运输柔性方面研究较少。生产过程柔性对于解决热轧调度、炼钢-连铸调度和钢包调度等物料流调度问题至关重要。

其次，能源系统柔性不足。能源系统需要柔性来匹配动态波动的能源供需。钢厂的能源系统需要柔性来调整能量流的产生和消耗，以响应物料流的变化和环境限制。钢厂还可以利用其能源系统柔性为外部电力或供热网络提供辅助服务，创造更多收益。然而，目前关于钢厂还原剂柔性和电力柔性的研究较少，未来需要进一步深入研究。随着间歇性可再生能源在钢厂中的引入，能源流的可预测性降低，对能源系统柔性的需求增加。因此，在可再生能源和核能驱动的炼钢背景下，钢铁工业正负柔性供应的资质和提升是一个重要的研究领域。

余热回收的经济性与环境效益评估

余热回收的经济性和环境效益评估是推动其广泛应用的关键。虽然余热回收的节能潜力巨大，但其初期资本投入和运行维护成本需要仔细权衡。

经济性：评估余热回收项目的经济可行性需要考虑投资成本、运行维护成本、回收能量的价值（替代燃料或电力成本）、以及通过减少排放获得的碳交易收益^[16]。例如，CDQ 技术虽然初期投资较大，但其产生的电力和减少的粉尘排放可带来可观的经济回报。而低品位余热回收技术，如工业热泵，虽然节能潜力显著，但其高资本支出和对电力的依赖可能影响其经济性。

环境效益：余热回收直接减少了化石燃料的消耗，从而降低了 CO₂、SO_x、NO_x 等温室气体和粉尘颗粒物的污染物排放^[17,18]。例如，BOF 煤气回收可使 CO₂ 排放量减少约 50 kg/吨钢^[19]。全面的环境效益评估应包括全生命周期分析，考虑从能源产生到最终利用的整个过程。

钢铁冶金行业余热热源分析

在进行完问题框架上的分析，钢铁工业的生产预热分析还需要具体问题具体对待。首先钢铁冶金行业的生产过程是一个典型的高温、高能耗过程，在各个环节都会产生大量的余热。对这些余热热源进行系统的识别和特性分析，是实现高效余热回收的基础。余热通常根据其温度高低分为高品位（>500℃）、中品位（150-500℃）和低品位（<150℃）热源^[20]。

高品位余热具有较高的温度和能量密度，通常适合直接用于发电或驱动高温工艺。在钢铁工业中普遍存在于焦化、烧结、炼钢及轧钢加热炉的烟气、熔渣温度>500℃，是典型的高品位热源。

中品位余热的温度范围适中，通常需要特定的技术进行回收利用，例如高炉生产的煤气通畅 150-280℃ 之间的烟气属于中品味热源。

低品位余热温度较低，回收利用难度较大，但其总量巨大，具有重要的回收潜力。往往各种废水和烟气换热后尾气属于低品位热源，例如轧钢冷却水、水冷夹套水、换热后烟气及煤气的温度低于 150℃，属于低品位热源。

表 1 详细列出了钢铁行业中主要的余热热源及其典型参数，并根据其能量品位进行了分类。

表1 钢铁冶金副产物煤气成分和热值对比表

热源名称	工艺来源	典型温度范围 (°C)	典型压力范围 (kPa / kg/cm ² g)	主要成分/特性	热品 位等 级
------	------	-------------	--	---------	---------------

热源名称	工艺来源	典型温度范围 (°C)	典型压力范围 (kPa / kg/cm²g)	主要成分/特性	热品等级
热焦炭	炼焦	~1000	大气压	固体显热	高
焦炉煤气 (COG)	炼焦	649~982	大气压	H ₂ S, 焦油, HCN, CO, H ₂ , CH ₄ 等; 高热值, 含污染物	高
高炉煤气 (BFG)	炼铁	150~280	200~250 (2~2.5 kg/cm²g)	CO, CO ₂ , N ₂ , H ₂ ; 低热值, 含粉尘, 高压	中
熔渣	炼铁 / 炼钢	1450~1700 (高炉); 1500~1700 (转炉)	大气压	熔融固体的显热; 低导热性, 易结晶, 间歇性	高
转炉煤气 (LDG)	炼钢	~1200, 水冷后~350	大气压	CO (70~80%), CO ₂ , N ₂ , H ₂ ; 高热值, 含粉尘, 间歇性	高
电炉烟气 (EAF Off-gas)	炼钢	最高 2100, 水冷后~600	大气压	粉尘 (氧化铁); 高温, 间歇性	高
加热炉烟气	轧钢	550~700	大气压	烟气显热	高
热钢坯/板坯	轧钢	高温 (铸造后)	大气压	固体显热	高
烧结机冷却废气	烧结	250~450 (高温部分)	大气压	气体显热	中
中温烟气	各类炉窑	200~500	大气压	烟气显热	中
冷却水	轧钢、设备冷却	80~200	常压	液体显热	低
低温烟气	各类炉窑	<150	大气压	烟气显热	低

余热回收技术与热源品味匹配

有效的余热回收需要将热源的“品位”（温度、压力、成分）与回收技术的能力精确匹配。本节将详细介绍各种技术及其最佳应用场景。

换热器的核心换热原理基于三种基本传热方式，除大量应用于气体热源余热回收的辐射换热（依靠电磁波传递热量）和对流换热（依靠流体流动传递热量）外，还包括导热换热（热传导）。导热换热依靠物质分子、原子或自由电子的热运动传递热量，无需介质流动，是固体内部传热的主要方式。换热系统往往是两种或者三种换热器的组合完成余热回收的。表 2 清晰展示了钢铁行业不同品位余热热源对应的最佳回收技术，并简述了其原理和主要效益。

表2：余热回收技术与热源品味匹配矩阵

热源名称	热品位	热能回收技术	原理/机制 (简述)	典型蒸汽产物参数 (温度/压力/质量)	主要效益/考虑因素
热焦炭	高	干熄焦 (CDQ)	热传导, 辐射换热, 对流换热	饱和蒸汽, 95~105 kWh/吨焦炭发电潜力 ^[21]	节能, 减少粉尘, 提高焦炭质量, 清洁能源
焦炉煤气 (COG)	较高	高温烟气余热锅炉 (HRSG)	对流换热	过热蒸汽, 可达 440° C/50~120 bar (g)	能量回收, 需高效脱硫酸焦油, 防止腐蚀
高炉煤气 (BFG)	高 / 中	余压回收透平 (TRT)	利用 BFG 压力驱动透平发电; 需净化	电力 (30 kWh/吨粗钢) ^[22]	节能, 无需额外燃料, 干法除尘可提高发电量
熔渣	高	熔渣显热回收 (物理/化学)	热传导, 对流换热	蒸汽/热空气 (冷却水温升~30° C)	潜力巨大, 但技术尚不成熟, 需克服低导热性、结晶、间歇性挑战
转炉煤气 (LDG)	高	高温烟气余热锅炉 (HRSG)	辐射换热, 对流换热	饱和 / 过热蒸汽, 192~230° C/13~28 bar ^[23]	能量回收, 但气体间歇性、脏, 需鲁棒系统和净化
电炉烟气 (EAF Off-gas)	高	高温烟气余热锅炉 (HRSG) / 相变材料 (PCM) 耦合	辐射换热, 对流换热	饱和/过热蒸汽, 可达 230° C/28 bar; PCM 可产恒定过热蒸汽 ^[24]	能量回收, PCM 可提高波动热源的蒸汽质量和稳定性
加热炉烟气	高	高温烟气余热锅炉 (HRSG)	对流换热	饱和/过热蒸汽	节能, 提高燃料效率
热钢坯/板坯	高	板坯冷却锅炉/直接利用	热传导, 对流换热	蒸汽	节能, 提高工艺连续性
烧结机冷却废气	中	余热锅炉 / ORC	对流换热	饱和蒸汽/电力 ^[25]	节能, 可用于内部工艺加热或发电

热源名称	热品位	热能回收技术	原理/机制（简述）	典型蒸汽产物参数（温度/压力/质量）	主要效益/考虑因素
中温烟气	中	有机朗肯循环（ORC）/ 先进换热器	对流换热	电力（ORC，循环效率可达 25%）/ 热空气/热水 ^[26]	节能，适用于中低温热源，无需水处理
冷却水	低	工业热泵 / 吸收式制冷/供热	对流换热，热传导	提升后的热水/蒸汽；制冷/供热	节能，减少化石燃料消耗，但资本成本高，需大量电力
低温烟气	低	工业热泵 / 吸收式制冷/供热	对流换热	提升后的热水/蒸汽；制冷/供热	节能，挑战在于经济性，但潜力巨大

余热回收产物蒸汽的温压流特性及应用场景

蒸汽是工业过程中一种重要的通用能量载体，其特定的温度、压力、流量特性以及质量决定了其最佳的最终用途。余热回收系统通常会产生不同参数的蒸汽。

回收的蒸汽，凭借其特定的温度、压力和流量特性，可用于各种内部和外部应用。优化这些用户场景可最大限度地发挥回收能源的价值，实现经济和环境效益的最大化。

余热回收蒸汽产物典型温压流参数与用户场景

表 3 详细列出了不同余热回收技术产生的蒸汽产品的典型温度、压力和流量参数，并推荐了相应的内部和外部用户场景。

表3 余热回收蒸汽产物典型温压流参数与推荐用户场景						
蒸汽来源	典型蒸汽温度（°C）	典型蒸汽压力（bar）	典型蒸汽流量（吨/小时）	蒸汽质量	推荐的内部用户场景	推荐的外部用户场景
干熄焦（CDQ）	中高压饱和/过热蒸汽（具体取决于设计）	10~50	0.45 吨/吨焦炭 ^[27]	饱和/过热蒸汽	内部发电（汽轮机）	区域供热，工业园区供热
转炉/电炉 HRSG	192-230（或更高）	13~28（或更高） ^[28]	波动性，取决于炉次	饱和/过热蒸汽	内部发电（汽轮机），真空脱气，工艺加热	区域供热，电网辅助服务
加热炉 HRSG	550-700（烟气入口）；产出蒸汽参数取决于设计	50-120（HRSG）	取决于炉型和负荷	过热蒸汽	内部发电（汽轮机），高压工艺加热	区域供热，工业园区供热
烧结冷却余热锅炉	250-450（废气入口）；产出蒸汽参数取决于设计	中低压饱和蒸汽	取决于烧结机规模	饱和蒸汽	烧结工艺自用热，中低压工艺加热	区域供热
熔渣显热回收	冷却水温升 30° C，可产生中低压蒸汽或过热蒸汽	中低压	取决于回收技术和熔渣量	饱和蒸汽/热空气	预热燃烧空气，低压工艺加热	钢渣高效余热回收 ^[29]
工业热泵	提升至 120（或更高）	中低压	取决于热泵容量	提升后的热水/蒸汽	干燥，低温工艺加热，建筑供暖	区域供热（低温）

结论

钢铁冶金工业作为高载能、高排放的典型流程工业，其能源结构优化对我国实现“双碳”目标具有战略意义。本研究通过剖析焦化、炼铁、炼钢及轧钢全流程余热热源（温度梯度覆盖<150°C至>2100°C），提出基于热力学第二定律的品位分级框架（高/中/低品位），并建立“品位-技术-场景”协同匹配模型。实证表明：

技术匹配性：高品位热源（如电炉烟气、熔渣）宜采用干熄焦（CDQ）、高温余热锅炉（HRSG）实现高效蒸汽发电（CDQ 发电量 95-105 kWh/吨焦）；中品位热源（烧结废气）适配有机朗肯循环（ORC）及相变材料（PCM）耦合系统（ORC 效率达 25%）；低品位热源（冷却水）需依托工业热泵实现能量品位提升。

系统瓶颈：当前余热回收受限于三方面：数据-决策脱节：动态优化需融合拉格朗日物料流追踪与 e-CPS 信息物理系统，弥合实时调度鸿沟；协同不足：火用（Exergy）分析揭示物料-能量流耦合缺失导致品位错配（如高品位能量用于低需求场景），需构建多目标协同模型；柔性缺失：能源系统需增强还原剂柔性与电力柔性，以响应可再生能源并网波动。

效益量化：梯级利用可使吨钢能耗降低 26.08%（余热潜力 4.87 GJ/吨钢）^[30]，CO₂减排达 50 kg/吨钢（如转炉煤气回收）。未来研究应聚焦多能流智能调控、低品位余热经济性突破及跨行业能量集成，赋能钢铁工业零碳转型。

参考文献

- [1] 张攀路, 都沁军, 张凯旋, 等. 中国钢铁行业碳排放: 达峰情景与中和路径[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6336-6343.
- [2] 孙烨. 钢铁行业 CO₂ 排放计算模型分析和预测[D]. 冶金自动化研究设计院, 2023. DOI:10.27448/d.cnki.gzyzy.2023.000002.
- [3] Waste heat recovery systems - Global Energy Monitor, accessed July 12, 2025, https://www.gem.wiki/Waste_heat_recovery_systems
- [4] 陈少卿. 浅析炼钢余热蒸汽利用方案[J]. 大科技·科技天地, 2010(1).
- [5] 孙巍伟. 智能制造概论[M]. 化学工业出版社: 202308: 352.
- [6] 张涛, 李志伟. 钢铁企业 MES 系统的集成应用[J]. 冶金经济与管理, 2021, (03): 14-17.
- [7] Gao W, Zhang K, Zheng F, et al. Prediction of Steam Consumption in the Tobacco Industry's Primary Processing Workshop[J]. International Journal of Heat and Technology, 2024, 42(5):
- [8] 陈琛, 倪书权, 郝景章, 等. 冶金企业人工智能的发展与应用综述[C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集—14. 冶金自动化与智能化. 五矿集团中冶京诚工程技术有限公司, 2023: 120-126. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.056558.
- [9] 孙巍伟. 智能制造概论[M]. 化学工业出版社: 202308: 352.
- [10] Kűchler C, Landeta I A, Molůček J, et al. Lagrangian particle tracking at large Reynolds numbers. [J]. The Review of scientific instruments, 2024, 95(10):
- [11] 四川省金属学会. 钢铁制造流程信息物理融合系统的构建与应用 [EB/OL]. (2024-06-26)[2025-08-18]. <http://www.scsjsh.com/go-a4984.htm>.
- [12] 陈海红, 李鹏程, 王中航. GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》国家标准解读[J]. 标准科学, 2021, (12): 107-111.
- [13] EXERGY[M]. Elsevier Ltd: 2007-01-01:
- [14] From Pinch Methodology to Pinch - Exergy Integration of Flexible Systems[M]. Elsevier Ltd: 2017-01-01:
- [15] 陈琛, 李加旺, 史光. 综述深度学习技术在冶金安全生产节能领域的应用[C]//中国金属学会, 中国金属学会青年工作委员会. 第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二). 中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司, 2024: 367-372. DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.023557.
- [16] rgul M, Selimli S. An applied study on energy analysis of a coke oven [J]. Science and Technology for Energy Transition, 2024, 79 (1): 1 - 10. DOI: 10.2516/stet/2023042.
- [17] 陈琛. 通过转炉灰粒径分析指导和评价目前主流一次除尘工艺[C]//中国金属学会. 2022 年钢铁工业绿色低碳发展论坛暨全国冶金能源环保生产技术研究论文集. 中冶京诚工程技术有限公司环保与暖通工程技术所, 2022: 174-177. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.089491.
- [18] Ivan K, Richard G. Modelling the Influence of Climate on the Performance of the Organic Rankine Cycle for Industrial Waste Heat Recovery[J]. Energies, 2016, 9(5): 335. DOI:10.3390/en9050335.
- [19] 宋佳媛. 全氧炼铁钢铁生产流程能耗、碳排放及经济性综合分析[D]. 北京科技大学, 2024. DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2024.000107.
- [20] 陈琛, 倪书权, 徐继法, 等. 转炉烟气余热、化学能回收及超低排放技术综述与展望[C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集—12. 冶金环保与资源利用. 中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司, 2023: 87-93. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.055129.
- [21] 陈时选, 杜梅芳, 赵梦然, 等. 干熄焦余热回收与转化系统的效率分析[J]. 钢铁, 2019, 54(06): 114-120. DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180407.
- [22] 苏迎彬. 2023 年我国钢铁行业节能减排分析[J]. 中国钢铁业, 2024, (02): 38-40.
- [23] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262). 氧气转炉余热锅炉技术条件: GB/T 28057-2011[S]. 中国标准出版社, 2011.

- [24] 陈程,许佳孟,毛凌波.相变储热技术在冶金余热回收中的应用[J].世界有色金属,2021,(16):14-15.
- [25] 汪磐石,张永忠.宝钢烧结余热梯级利用及展望[J].冶金能源,2019,38(01):46-51.
- [26] 沈氏科技. “双碳” 进行时! 沈氏科技 PFHE 高度适配有机朗肯循环,助力余热回收发电更高质高效 [EB/OL]. (2024-07-10)[2025-08-18]. <https://www.hzssjn.com/case-detail/1811.htm>.
- [27] 任栓良.干熄焦余热锅炉热平衡及回收蒸汽量计算[J].内蒙古科技与经济,2013,(14):117-118.
- [28] 何立波.炼钢电炉余热发电技术的研究与应用[J].节能,2013,32(02):55-57+3.
- [29] 我的钢铁网.中冶京诚总承包的钢渣全流程干法处理及高效余热回收项目全线投产 [EB/OL]. (2025-08-07)[2025-08-18].<https://news.mysteel.com/a/25080709/68747DF27F250F16.html>
- [30] Sheng Y ,Xue-Feng S ,Jia-Hao L , et al.A novel cascade latent heat thermal energy storage system consisting of erythritol and paraffin wax for deep recovery of medium-temperature industrial waste heat[J].Energy,2023,265

焦化企业焦炉烟气环保治理实施超低限值排放的路径和方案

王丰海¹、高德坤¹、李臣华¹、夏鹏亮²、赵亚亭²

(1-山东盛宝传热科技有限公司 山东 潍坊 262100)

(2-河北旭阳能源有限公司 河北 保定 073000)

摘 要: 焦化企业属于双高行业,节能减排的政策方针下,双高行业首当其冲受到全社会关注。国家在热电行业实施的超低标准排放政策推广至非电行业后,钢铁行业、焦化行业接力实施超低排放限值的要求。焦化行业产能加之过剩,在环保和市场双重夹击下,焦化企业在夹缝中艰难生存。焦炉烟气的环保治理是焦化企业大气污染有组织排放环保治理的重头戏,烟气量大、污染物质复杂且含量高、超低排放限值低等特点给焦炉烟气的环保治理带来了技术性挑战。本文从焦炉烟气超低排放限值实施的路径谈起,对比不同的环保治理方案,以期焦化企业焦炉烟气的环保治理提供治理思路和节能减排的主旨理念。

关键词: 焦化企业 焦炉烟气 超低排放 环保治理 节能减排 路径方案

1、引言

焦炉作为焦化行业的主要窑炉生产设备,其回炉煤气在焦炉燃烧室内提供焦炭生产所需的热量后,产生的焦炉烟气是焦化企业大气环境污染的主要组成部分,焦炉烟气的超低排放治理是焦化企业环保治理的重中之重。

焦炉在生产过程中视回炉煤气的种类和成分不同,加之焦炉炉型的不同,所产生的烟气量差别也较大,烟气中污染物质的成分和含量也有所不同。部分焦化企业实施化产工序 VOCs 有机废气治理,为彻底治理化产有机废气,往往将化产收集的有机废气通过水洗、碱洗、酸洗降低其浓度后送往焦炉进行焚烧处理,掺入燃烧室的有机废气除了影响焦炉的加热制度外,还对焦炉烟气的污染物质成分有着很大的影响。

焦炉烟气环保治理从最初的采用净化后焦炉煤气开始,到废气循环降低烟气中的氮氧化物,直至后来的湿法脱硫+SCR 脱硝+布袋除尘、半干法脱硫+SCR 脱硫+布袋除尘,焦炉烟气治理随着排放指标的调整经历了多种工艺路线。超低排放限值实施后,钙基移动床干法脱硫+SCR 尘硝硫一体化协同处理工艺在焦炉烟气提标改造中占据了越来越大的市场份额。

2、焦炉烟气治理历程

《炼焦化学工业大气污染物排放标准》GB16171-2012 的实施,拉开了焦化企业烟气治理的序幕,

在这之前的焦炉烟气经由地下烟道通过焦炉烟囱直接排放。焦炉烟囱存在的意义就是导出焦炉燃烧产生的烟气，提供焦炉燃烧室底部所需负压；增加烟气环保治理设施后，系统运行阻力增大，为了克服环保治理设施带来的阻力，需要增设烟气引风机。目前焦炉烟气的环保治理政策是环保治理设施必须全年 365 天不间断全开，迫使部分焦化企业烟气环保治理设施开一备一，有的地方政府也明确要求，环保治理设施需要有备用系统，从这一角度分析，100-120 米的焦炉烟囱就没有了具体存在的意义，一开一备的两台烟气引风机完全能够满足焦化连续性生产的需求。

焦化企业焦炉烟气的治理 2018 年是一个分水岭，在 2018 年之前，焦炉烟气脱硫以湿法为主，除尘是清一色布袋除尘，脱硝是在烟气补燃后采用 SCR 脱硝，废气循环固然能够降低部分烟气中的氮氧化物，但是降低效率微乎其微。采用脱硫除尘前 SCR 脱硝的焦化企业，脱硝催化剂堵塞、积碳、中毒失活是常态。

2018 年之后，半干法脱硫虽然没在焦炉烟气脱硫中成气候，但是 SDS 钠基小苏打脱硫一度替代湿法脱硫成为主流，高温布袋除尘既担负了烟气除尘的功能，又要承担烟气脱硫喷射的小苏打及脱硫副产物的脱除；脱硫、除尘后的净烟气经过余热锅炉回收热量后通过焦炉烟气进行排放。原来实施湿法脱硫时，焦炉烟囱的热备还需要增加 GGH 换热器，实施干法脱硫后，焦炉烟气可以直接通过焦炉烟囱进行达标排放，省去了烟囱热备带来的不必要的投资及繁琐的操作。

SDS 钠基干法脱硫设备投资低，脱硫效率高并且能够回收焦炉烟气中的余热，替代湿法脱硫、半干法脱硫后在焦化企业大面积实施。但是小苏打采购成本高造成的环保运行费用高，加之脱硫副产物无论以硫酸钠为主，还是以亚硫酸钠为主均为水溶性盐，市场无法消纳且企业堆放处理成本居高不下，部分地区以危废的标准进行监控和管理，加之后来高比表面积、高活性钙基粉剂脱硫剂的研发和应用，DSD 钠基脱硫工艺逐步被 CDS 钙基脱硫所取代。

CDS 钙基粉剂脱硫取代 SDS 钠基脱硫后，脱硫副产物以及未反应的脱硫剂、烟气中的粉尘颗粒的去除还是依靠高温布袋除尘，这个阶段烟气的 SCR 脱硝还是设置在烟气治理的前端，脱硝催化剂中毒失活、微孔堵塞以及积碳等问题并没有得到解决，SCR 脱硝前设置的活性炭/焦炭过滤器因阻力大，运行效果差没有能够得到大面积的应用。除尘设置在余热回收之前，因而照顾中低温脱硝所需的起活温度下，除尘布袋的长周期使用是一个很大的挑战，少则几个月，多则一年半布袋就需要更换一次，投资成本高，职工劳动强度大且长周期使用的布袋对于粉尘超低标准排放也是一个考虑点。基于此，陶瓷纤维管尘硝硫一体化装置在国内二、三十家焦化企业得到了应用，陶瓷纤维管耐高温，脱硝催化剂附着量大并且能够满足粉尘超低排放限值的需求，因而初始受到焦化企业的青睐。投资高，陶瓷纤维管本身材质决定了其长度加工受限导致占地面积较大，对于改造型焦化企业来说布置是一个很大的难题，因而其推广市场占有率并不是很高。

CDS 钙基脱硫其效率、速率均不如 SDS 钠基脱硫高，脱硫剂需要与烟气有较长的接触反应时间，因而采用最初采用 CDS 钙基粉剂脱硫的焦化企业，要么采用 CFB 流化床工艺增加烟气与脱硫剂的接触反应时间，要么在较长的烟道内喷入钙基脱硫粉剂，后者脱硫效率、脱硫剂的利用率均不高，甚至连二氧化硫的超低排放限值都很难达到，因而推广采用的焦化企业不多。采用 CFB 流化床的脱硫工艺，由于焦炉烟气的不稳定性及周期加热换向变化导致流化床层很难建立，循环风机的高耗电量增加了企业的环保运行成本，因而 CFB 钙基粉剂脱硫在焦化企业推广应用的也不是很多。

移动床钙基干法脱硝+SCR 脱硝一体化协同治理工艺是在柱状或四叶草状高活性粒状钙基脱硫剂成功开发应用的基础上发展兴盛起来的。由于其干法脱硫过程中完成焦炉烟气的除尘，净烟气在一体化装置内协同完成脱硝工作，省去了除尘设备并且占地面积小，投资运行成本低，全自动化的监控操作现场几乎不需要专人维护操作，因而在焦炉烟气升级提标改造中受到越来越多的焦化企业认可。

3、焦炉烟气治理现状

焦化企业烟气所实施的湿法脱硫以石灰石石膏法为主，氨法脱硫由于能够与焦炉煤气硫酸脱氨实现硫铵共同干燥处理而少部分焦化企业采用。但是由于焦炉烟气中二氧化硫含量并不高，加之氨法脱硫形成的硫酸铵会影响化产硫铵工段的硫酸铵质量，所以焦化氨法脱硫采用的企业不多且采用的企业运行的效果也不是很好，后来逐渐被干法脱硫所取代。

焦化企业继钢铁行业实施超低标准排放限值后，除了少部分焦化企业仍然采用湿法脱硫外，绝大多数企业已经改为 SDS 钠基干法或 CDS 钙基干法脱硫了。目前，焦化企业主要流行采用的烟气

治理工艺包括如下几种：

SCR 脱硝+余热锅炉+CFB 钙基脱硫+布袋除尘器
 SCR 脱硝+余热锅炉+SDS 钠基脱硫+布袋除尘器
 SCR 脱硝+余热锅炉+CDS 钙基脱硫+布袋除尘器
 CFB 钙基脱硫+陶瓷纤维管一体化装置+余热锅炉
 钙基固定床脱硫+SCR 脱硝+余热锅炉
 钙基移动床脱硫+SCR 脱硝+余热锅炉

2024 年 12 月 26 日，《炼焦化学工业大气污染物排放标准》GB16171.1-2024 部分代替 GB16171-2012 分布后，于 2025 年 4 月 1 日起开始实施，至此，焦化企业新的排放标准再一轮覆盖所有的焦化企业。2025 年 4 月 27 日，山东省生态环境厅、发改委、工信厅、财政厅、自然资源厅、交通运输厅、应急管理厅、国税总局山东省税务局联合发布《山东省焦化行业超低排放改造提升方案》要求“推动焦化企业（包括独立焦化企业和钢焦联合企业的焦化工序）超低排放提升改造。到 2025 年年底，力争全省 60% 的焦化产能完成改造；到 2028 年年底，重点区域焦化企业基本完成改造，其他区域力争 80% 焦化产能完成改造”，并且指出“通过建设备用设施或多仓室改造等措施有效减少治理设施检修时污染物排放”。

全新的排放指标，明确的改造时间，为目前焦炉烟气治理提出了新的考验。焦化企业烟气治理场地本来就局促，“建设备用设施”无疑是雪上加霜，因而占地面积小，无需专门设置除尘设备的“钙基移动床干法脱硫+SCR 脱硝+原有余热锅炉”的全新一体化协同治理工艺将在新一轮烟气治理“备用设施”超低排放中占据重要的地位。

4、超低排放治理工艺

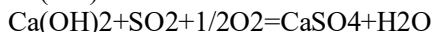
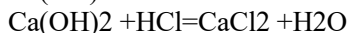
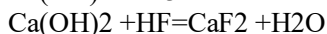
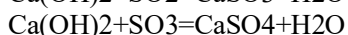
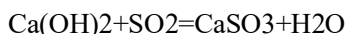
焦炉烟气“钙基移动床干法脱硫+SCR 脱硝+余热锅炉”一体化协同治理工艺占地面积小，一座 2×65 孔 6.25 米捣固焦炉烟气脱硫脱硝除尘一体化协同治理装置占地仅仅 11.40 米×18 米，因而适合焦炉烟气升级提标改造“备用设施”的建设。

钙基移动床干法脱硫是采取移动床技术，脱硫剂在反应器中缓慢移动或循环流动（如重力下落或机械输送），烟气与吸附剂逆流或错流接触。在工程上的实现是采取间歇式移动床，将碱(石灰或氢氧化钙等)与催化剂的成型颗粒装于脱硫反应器中，烟气通过烟道进入脱硫塔内，当烟气穿过脱硫剂与之充分接触后，其中的二氧化硫被氧化成为三氧化硫，进一步反应固化成为硫酸钙(石膏)固体，以实现烟气净化的目的。脱硫吸附剂可边运行边补充或排出，实现烟气不间断净化，脱硫剂在线补充更换的运行模式。

钙基移动床干法脱硫除尘脱硝一体化系统整体是由脱硫剂净化料仓(脱硫塔)、布风系统、加料系统、卸料系统、喷氨系统、脱硝系统以及电气仪表系统等组成。脱硫塔在结构上采用单元化设计，通过灵活的单元开启和关闭可适应烟气负荷变化，且系统布置灵活。整个脱硫一体化工艺极其简单，烟气直接进入脱硫除尘脱硝一体化装置，在穿过干法脱硫剂、脱硝催化剂时烟气中的二氧化硫、汞、铅、铜、砷等重金属以及 HF、HCl、NO_x、粉尘等污染物被去除，净化后的烟气经净烟道汇集进入余热锅炉回收烟气中热量后通过烟囱达标排放。

脱硫原理：钙基干法脱硫剂表面具有微孔结构，能够吸附烟气中的 SO₂、HF、HCl 等酸性有害物质，从而促成脱硫剂的碱性物质与烟气中的酸性有害物质充分接触并发生反应。

钙基干法脱硫技术是通过颗粒状钙基脱硫剂把烟气中的二氧化硫吸附并反应生成硫酸钙：



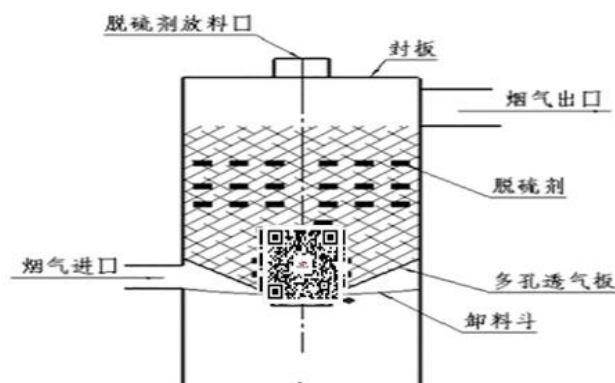
除尘原理：脱硫塔剂层为移动床层，塔内装填高比表面积的钙基粒状脱硫剂，其具有一定的除尘作用，其原理为颗粒层除尘原理。颗粒层过滤器过滤部分由许多直径在几毫米之间的颗粒组成，这些颗粒由挡板放置于气流流经的位置，含尘气体通过过滤层时被捕集颗粒所捕捉从而使气体得到净化。颗粒层过滤过程属于深层过滤，即过滤过程深入床层内部，粉尘颗粒在床层内部不同部位被捕集。颗粒层捕集含尘气体中的粉尘，使气体得以净化，主要依靠接触凝聚作用、筛分作用和惯性碰撞作用，也有一定的重力沉降作用。

SCR 脱硝原理：脱硫除尘后的烟气进入 SCR 脱硝装置，烟气中的氮氧化物与喷入的氨水/尿素水解液在催化剂的作用下转化为氮气与水，从而完成烟气中氮氧化物的脱除。脱硫除尘后的净烟气脱硝，不会堵塞脱硝催化剂微孔，催化剂中毒失活的几率也大大降低，提高了催化剂的脱硝效率，延长了催化剂的使用寿命，因而能够极大降低烟气治理的环保运行成本。

移动床钙基干法脱硫除尘脱硝一体化协同烟气治理工艺在设计时需要关注如下要点：

1、气固流动与接触效率的优化：在移动床结构设计中，采用垂直或倾斜床层设计，确保钙基吸收剂（如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 CaO 颗粒）在重力或机械驱动下均匀流动，避免局部堆积或短路。床层厚度与流速匹配：根据烟气流量和 SO_2 浓度，优化床层厚度（通常 0.5-2m）与颗粒流速，延长气固接触时间（一般 3-10 秒）。

在气体分布均匀性设计上，烟气入口设置导流板或多孔分布器，确保烟气均匀通过床层，避免偏流导致脱硫效率下降。



2、钙基吸收剂特性控制：钙基脱硫剂粒径与活性要匹配：吸收剂粒径范围通常为 0.5-3mm，过细易被烟气夹带，过粗降低反应表面积。

脱硫剂需要做改性处理：对 CaO 进行水合处理生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，或添加助剂（如 Na_2CO_3 、有机酸）提高反应活性。

脱硫剂的循环与补充机制：设计吸收剂循环系统（如斗式提升机或气力输送），回收未反应的吸收剂重新利用，降低消耗量。

实时监测吸收剂活性，动态调整补充量（通常钙硫比控制在 1.5-2.5）。

3、脱硫副产物处理与资源化：钙基干法脱硫其副产物可用于建材（如水泥缓凝剂、路基材料）或填埋处理，因而在设计时需密封储运系统防止二次污染。

5、结语

焦化生产作为产能严重过剩的双高行业，环保排放指标严苛是必然的。新建湿法熄焦装置全新未用便被推倒，干熄焦装置还需开一备一，环保治理装置建设备用设施也写进了排放标准中。没有最低只有更低的排放限值需要每一个焦化工作者和为焦化服务的技术人员共同努力。

山东盛宝致力于节能、环保、减排装备的工艺技术研发与工业应用开发，焦化烟气钙基移动床干法脱硫、除尘、脱硝一体化协同治理工艺适合目前焦化行业超低排放改造提标备用设施的建设，已在国内最大的单体焦化旭阳集团开发应用多套，使用效果极佳，值得在国内焦化企业焦炉烟气治理提标升级改造中大力推广应用。

作者简介：李臣华（1972-），男，汉族，山东潍坊人，大学学历，高级工程师，现就职于山东盛宝传热科技有限公司，研究方向为烟气环保治理技术与工艺，联系电话：15253666578。

焦化行业焦炉烟气高温尘硝硫 NMHC 氨逃逸超低排放解决方案

王丰海、韩正凯、杨振强、王永强、李臣华

(山东盛宝传热科技有限公司 山东 潍坊 262100)

摘要：国内钢铁市场持续低糜致使焦炭售价回涨迟缓，未等焦炭涨价落地，炼焦原料煤却先行售价高涨；甚至 2023 年下半年还出现了焦炭售价下跌，而炼焦原料煤售价却上涨的倒挂现象，因而导致焦化行业亏损严重，所以焦炉烟气超低排放的实施一直推进不畅。焦炉烟气增加了非甲烷总烃（NMHC）、氨逃逸排放限值的新一轮超低排放标准必将引发焦化行业焦炉烟气高温超尘、硝、硫、非甲烷总烃以及氨逃逸控制超低排放工艺的研发和实施，是下一步焦化企业烟气环保治理实施的难点和重点。

关键词：高温烟气 超低排放 非甲烷总烃 氨逃逸 金属滤袋 陶瓷纤维

1、引言：

2021 年 4 月 13 日，山西省生态环境厅、山西省工业和信息化厅联合印发的《山西省焦化行业超低排放改造实施方案》将焦炉烟气中 NMHC 的排放提上议事日程。2021 年 9 月 3 日生态环境部的“关于征求国家标准《炼焦化学工业大气污染物排放标准》（征求意见稿）意见的通知”将焦炉烟气中 NMHC 的排放限值上升至国家标准。但是由于“目前行业尚无针对性末端治理设施”，并且国内“目前其他类型蓄热室工业炉窑尚未设定烟囱 NMHC 排放限值”，加之国内焦化企业，尤其是焦化生产大省山西省人大代表的提案、山东省焦化行业协会的提议，加之去年下半年焦炭连续十轮降价导致的焦化行业亏损严重，导致该征求意见稿一直没能转正实施。

综合上述，国家生态环境部在 2023 年 6 月 15 日下发的《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》（征求意见稿）将焦化行业超低排放重又提上议程：“推动焦化企业（含半焦生产）超低排放改造。到 2025 年底前，重点区域焦化企业力争 80%左右产能完成改造；到 2028 年底前，重点区域焦化企业基本完成改造，全国力争 80%左右产能完成改造。”

焦化行业此次超低排放标准，“在基准含氧量 8%的条件下，焦炉烟囱废气颗粒物、SO₂、NO_x、NMHC、氨排放浓度小时均值分别不高于 10、30、150、100、8mg/m³”，并且“达到超低排放的焦化企业每月至少 95%以上时段小时均值排放浓度满足上述要求”。同时还要求焦化企业“主要排放口安装自动监控设施，焦炉烟囱（含热备烟囱）增加 NMHC 和氨排放自动监测”。

焦炉烟囱废气非甲烷总烃以及氨排放限值的实施，将焦化行业焦炉烟气治理提升到高温烟气治理的行列，焦炉烟气高温超低排放治理是下一步焦化企业面临的重点和难点。

2、焦炉烟气治理现状：

从燃用净化后的焦炉煤气，到焦炉废气循环减低烟气中氮氧化物，再到后来的湿法脱硫、半干法脱硫、干法脱硫以及布袋除尘和 SCR 脱硝，焦炉烟气治理从无到有，从有到优，走过了十几年的治理历程。

焦炉烟气增加 NMHC 以及氨逃逸的控制指标之前，一直就是颗粒物、SO₂ 以及氮氧化物的控制，指标递进调整，治理工艺也是随着进行变化。对于烟气中的颗粒物，除了市场占主导地位的布袋除尘之外，固定床/移动床脱硫过程中进行除尘以及陶瓷纤维管除尘也在焦化行业占有一定的份额。

焦炉烟气中的二氧化硫，从一开始的湿法脱硫，无论是氨法脱硫、镁法脱硫，还是石灰石-石膏法脱硫，都在焦化企业有所应用。半干法脱硫经历一段时间后，逐渐被干法脱硫所代替，尤其是 SDS 钠基干法脱硫，现在在焦化行业烟气治理中占有绝大多数份额。由于 SDS 钠基干法脱硫剂采购成本高，加之脱硫灰有列入危废的嫌疑，因而 SDS 钠基干法脱硫逐渐被 CFB 钙基干法脱硫替代的趋势。虽然目前钙基干法脱硫也有直喷的方式，但是脱硫效率低，脱硫剂利用率低影响了其大面积推广。

焦炉烟气中氮氧化物的去除，从一开始的焦炉烟气废气循环，降低燃烧室温度到 SCR 脱硝后，SCR 脱硝一直是市场的主流，无论是蜂窝状脱硝催化剂还是附着在陶瓷纤维管壁的脱硝催化剂，其原理都是 SCR 脱硝。

上述治理工艺，无论是除尘、脱硫还是脱硝，由于对烟气温度没有特别的要求，一直都是在焦炉烟温下进行治理。原来采用先脱硝后脱硫工艺时，由于 ABS 的形成影响了脱硝效率，因而部分焦化企业在脱硝前增设烟气补燃装置，每隔一段时间将焦炉烟温升高，对脱硝催化剂进行再生，目的为的是延长催化剂的使用寿命，提高脱硝效率。但是这样一来，增加了环保治理投资不说，还浪费了能源，增加了环保治理运行成本。

新一轮焦炉烟气超低排放限值增加了非甲烷总烃以及氨逃逸的限值，结合目前对于 NMHC 在焦炉烟气中的含量以及 NMHC 治理的措施和手段，必须将焦炉烟气进行升温后才能有效去除焦炉烟气中的非甲烷总烃，达到目前规定的 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放限值的要求。虽然烟气中的 NMHC 从 2021 年 9 月 3 日生态环境部《炼焦化学工业大气污染物排放标准》（征求意见稿）的 $80\text{mg}/\text{m}^3$ 提高到了 2023 年 6 月 15 日《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》的 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 的限值，但是就目前国内焦炉烟气普遍 $200\text{--}300\text{mg}/\text{m}^3$ 的实际含量，都需要有 50-70% 的去除率才行。

焦炉烟气控制氨逃逸分为从源头控制和末端治理两种工艺。末端治理采用的脱氨催化剂也需要在较高的运行温度下才能有较好的脱除效率。因而，从焦炉烟气控制非甲烷总烃以及氨逃逸限值后，焦炉烟气治理才正式走向高温超低排放治理的行列。

3、焦炉烟气高温超低排放治理工艺：

焦炉煤气既然需要高温脱除非甲烷总烃以及控制氨逃逸，如果在现有治理工艺基础上增设脱除非甲烷总烃模块以及控制氨逃逸模块的话，需要在脱硫、脱硝、除尘后的净烟气上增加烟气补燃装置，将烟气温度提高至脱除非甲烷总烃、氨逃逸控制所需的 $380^{\circ}\text{C}\text{--}420^{\circ}\text{C}$ 。这样实施的前提是焦炉烟气采用干法脱硫，净烟气温度不至于太低的情况下采用此办法。如果焦化企业烟气脱硫仍然采用湿法脱硫，则烟气增温需要消耗的燃气能源会很大，造成能源浪费。

烟气补燃升温进行脱除非甲烷总烃、控制氨逃逸后需要增加余热回收装置将烟气中的热量进行回收。如果条件允许，脱除非甲烷总烃、控制氨逃逸的净烟气可以与脱硫、脱硝、除尘后的烟气进行 GGH 换热，这样烟气补燃升温的能源消耗将会大大降低，后续余热回收装置的适配量可以降低。

焦炉烟气环保治理如果采用新上系统，则建议如下两种高温超低治理工艺：一是“烟气补燃升温+CFB 钙基干法脱硫+金属滤袋除尘+SCR 高温脱硝+脱除非甲烷总烃模块+氨逃逸控制模块+余热回收装置”的治理工艺；二是“烟气补燃升温+CFB 钙基干法脱硫+陶瓷纤维管除尘脱硝一体化装置+脱除非甲烷总烃模块+氨逃逸控制模块+余热回收装置”的治理工艺。

上述两种治理工艺，脱除非甲烷总烃模块以及氨逃逸控制模块可以与 SCR 高温脱硝或者陶瓷纤维管除尘脱硝一体化装置联合实施，整合为协同一体化治理装置，这样一来既减少了环保治理设施一次性投资，又节省了环保治理占地面积，还减少了烟气治理过程中温降，确保能够余热回收量最大化。

上述两种治理工艺，焦炉烟气都需要在前端一次性补燃升温至 $380^{\circ}\text{C}\text{--}420^{\circ}\text{C}$ ，这样后续烟气脱硝，无论是采用 SCR 高温脱硝，还是陶瓷纤维管除尘脱硝一体化，脱硝催化剂均可采用高温脱硝催化剂，这样一来，脱硝效率会大大提高，脱硝催化剂的采购成本也会大大降低，脱硝用的氨气消耗也会大大降低。

4、金属滤袋治理工艺：

金属滤袋采用 304、316L、310S、904 等奥氏体不锈钢、镍基高温合金或者是哈氏合金等不锈钢材质制作而成。采用不锈钢金属拉丝，制成纤维毡，进而制成的金属滤袋称之为金属纤维滤袋；采用不锈钢金属粉末经过多次浸浆、梯级烧结制膜制成的金属滤袋称之为金属烧结滤袋。由于部分不锈钢，尤其是镍含量高的一些不锈钢，在金属拉丝时难以成型，无法制成金属纤维毡，因而制约了金属纤维滤袋的材质选择；反而金属烧结滤袋由于采用不锈钢粉末烧结而成，能够随心所欲的控制不锈钢各种金属元素的含量，所以使用范围更广、成本更低、使用效果更好一些。

金属滤袋耐高温、过滤精度高，能够适用焦炉烟气高温环保治理的温度需求，且能够在高温环

境下保证烟气尘含量超低、超净排放，满足后续烟气脱硝、脱除非甲烷总烃、控制氨逃逸的要求。金属滤袋能够长周期使用，减少了焦化企业更好滤袋的投资费用，减轻了职工的劳动强度，且能够保证焦炉烟气尘含量达到现有的环保排放限值需求，因而，是下一步焦炉烟气高温超低排放治理的首选。

焦炉烟气高温超低排放治理采用金属滤袋治理的工艺如下：

焦炉烟气→补燃升温装置→CFB 钙基干法脱硫→金属滤袋除尘→SCR 高温脱硝→脱除非甲烷总烃模块→氨逃逸控制模块→余热回收装置→烟气风机→烟囱

5、陶瓷纤维管治理工艺：

陶瓷纤维管是以陶瓷纤维为主材，配合无机粘合材料生产的用于高温烟气除尘的筒状过滤材料。陶瓷纤维是一种集传统绝热材料、耐火材料优良性能于一体的纤维状轻质耐火材料，具有材质轻、热稳定性好、耐高温、比热容小、耐机械振动等优良特性，是继碳纤维、玻璃纤维和玄武岩纤维之后应用较为广泛的无机耐高温烟气过滤材料，其主要成分是碳化硅、氧化铝或多铝硅酸盐。

陶瓷纤维管 90% 以上的高孔隙率，其开放式多孔内部结构除了保证低阻力下良好的过滤效果外，可以在其内部负载环境友好的功能催化剂，是功能催化剂最理想的载体，不同功能的催化剂可以在烟气除尘的同时脱除烟气中不同的污染物质，譬如：氮氧化物、二噁英、戴奥辛等有害物质。陶瓷纤维管耐高温的特性可以保证在较高温度下操作的能力与高微粒去除效率的结合，提供功能型催化剂工作理想的反应温床。

负载脱硝钒钛系催化剂的陶瓷纤维管可实现烟气干法脱硫、除尘、脱硝协同一体化。由于采用的是纯干法烟气净化工艺，相比湿法脱硫来说无烟尾、无需脱白，无脱硫废水产生，因而无二次环境污染。

陶瓷纤维管在烟气除尘时粉尘先沉积在陶瓷纤维管的表面，先附着在陶瓷纤维管表面的粒子变为后续粒子的收尘体，形成链状的凝聚尘，凝聚尘不断堆积、坍塌，最后在陶瓷纤维管表面形成稳定的粉饼，粉饼继续充当过滤层不断捕集烟气中的粒子，很少或几乎没有粒子透过陶瓷纤维管滤料层。由于粉饼的存在，阻止了焦炉烟气中的煤焦油组分穿透陶瓷纤维管，对脱硝催化剂进行中毒性侵害，使得脱硝催化剂能够长期高效发挥催化作用，因而，陶瓷纤维管的脱硝效果才能够保证五年内不会下降。

陶瓷纤维管是目前唯一有可能集过滤、催化等功能为一体的一种多功能过滤材料，因其耐高温，可以嫁接脱除非甲烷总烃、氨逃逸控制模块，在焦化企业烟气高温超净排放治理方面即将替代原来的布袋除尘+SCR 脱硝工艺成为焦化烟气尘硝硫氨非甲烷总烃协同一体化处理工艺的新主角。因此加大对现有陶瓷纤维管的升级改进，嫁接脱除烟气非甲烷总烃的模块与氨逃逸控制模块，使陶瓷纤维管一体化协同处理工艺更加完善，更加适合当今乃至今后一段时间内焦化企业环保治理的新需求是今后环保工作者与焦化企业共同努力的方向之一。

焦炉烟气高温超低排放治理采用陶瓷纤维管尘硝一体化治理的工艺如下：

焦炉烟气→烟气补燃升温→CFB 钙基干法脱硫→陶瓷纤维管除尘脱硝一体化装置→脱除非甲烷总烃模块→氨逃逸控制模块→余热回收装置→烟气风机→烟囱

6、结语：

2024 年 6 月 19 日山东省生态环境厅发布的《山东省焦化行业超低排放改造巩固提升方案》（征求意见稿）将国家生态环境部在 2023 年 6 月 15 日下发的《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》（征求意见稿）进一步具象化，方案要求：“在基准含氧量 8% 的条件下，焦炉烟囱废气中颗粒物、SO₂NO_x、非甲烷总烃、氨排放浓度小时均值分别不高于 10mg/m³、30mg/m³、100mg/m³、60mg/m³、8mg/m³。达到超低排放的焦化企业每月至少 95% 以上时段排放浓度小时均值满足上述要求”。焦炉烟气脱除非甲烷总烃、控制氨逃逸的步伐越来越近，因而焦炉烟气高温环保治理已经迫在眉睫。

焦炉烟气“烟气补燃升温+CFB 钙基干法脱硫+金属滤袋除尘+SCR 高温脱硝+脱除非甲烷总烃模块+氨逃逸控制模块+余热回收装置”的金属滤袋治理工艺与“烟气补燃升温+CFB 钙基干法脱硫+陶瓷纤维管除尘脱硝一体化+脱除非甲烷总烃模块+氨逃逸控制模块+余热回收装置”的陶瓷纤维管治理工艺均能满足未来一段时间内焦炉烟气高温环保治理的需求。

寻求最佳的脱除非甲烷总烃的催化剂以及控制氨逃逸的催化剂，降低焦化企业焦炉烟气的环保治理成本，配合适合的最佳治理工艺，相信焦化企业的环保未来前途必定光明，焦炉烟气治理必定走出一条全新的高温治理之路，来服务于焦化企业，服务于全社会。

作者简介：李臣华（1972—），男，汉族，山东潍坊人，大学学历，高级工程师，现就职于山东盛宝传热科技有限公司，研究方向为环保技术与工艺，联系电话：17664149113。

参考文献：

- [1]20210902 生态环境部关于《炼焦化学工业大气污染物排放标准》（征求意见稿）编制说明；
- [2]20230615 生态环境部关于《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》（征求意见稿）；
- [3]梁振东，邓辉，张杰，朱珍军.陶瓷纤维在高温烟气过滤中的应用[J].山东纺织科技，2017年第6期：44-45。

金属滤袋高温除尘应用过程中脉冲喷吹清灰设计及应用实践

王丰海、韩正凯、韩巍、刘宗保、李臣华

（山东盛宝传热科技有限公司 山东 潍坊 262100）

摘 要：烟气环保治理超低排放限值的实施以及高温金属滤袋、陶瓷纤维滤管的开发和应用，促使高温烟气除尘在烟气粉尘治理，尤其是高温超细粉治理领域占有越来越多的市场份额。金属滤袋高温除尘在运行过程中，需要在金属滤袋表面形成一定厚度的尘垢过滤层，一方面增加粉尘的过滤精度，另一方面用于保护金属滤袋免受腐蚀介质的侵蚀，避免烟气中的粘性介质粘糊滤袋；在用于除尘、脱硝领域的负载催化剂的陶瓷纤维管使用工况下，适当的尘垢层还起到保护脱硝催化剂免受重金属等杂质中毒失活的作用。因而，对高温除尘在设计脉冲清灰时相关参数的设置值得推敲和商榷。

关键词：高温烟气 超低排放 脉冲清灰 在线清灰 离线清灰

1、引言

我国窑炉烟气的超低排放治理首先从热电行业燃煤锅炉开始，过渡到钢铁行业的热风炉、加热炉、焦化炉等窑炉，又慢慢渗透至建材行业的玻璃窑炉、水泥窑炉等各行各业。人民对美好生活向往与追求的目标会越来越高，国家对于环保治理的要求就会越来越严苛。“3060 双碳目标”下，热电行业燃煤锅炉环保压力将会越来越大；钢铁行业、建材行业产能过剩的局面不缓解，超低排放的环保治理之路就会越走越远。

窑炉烟气治理从除尘开始，增加脱硫后，治理工艺还算顺畅，无论是先除尘、后脱硫，还是先脱硫、后除尘，在湿法脱硫的加持下，均在低温下进行，除尘脱硫的先后无可厚非。后来烟气脱硝提上议事日程后，具备条件的窑炉 SNCR 脱硝占领过一段时间的市场，中高温 SCR 脱硝需要的烟气温在 250℃ 以上，这个温度段的烟气除尘采用布袋除尘就稍显尴尬。所以烟气环保治理领域一开始就出现了烟气先降温除尘、脱硫，再升温 SCR 脱硝的治理工艺；或者是烟气先 SCR 脱硝，再降温进行脱硫、除尘的工艺。前一种治理工艺烟气在降温、升温的过程中增加了一次性设备投资，还在运行过程中消耗大量能源；后一种治理工艺未除尘、脱硫的烟气会造成 SCR 脱硝催化剂堵塞、硫杂质中毒失活的现象发生，均制约着烟气治理合理工艺的选择。直至高温烟气除尘、干法脱硫工艺的成功开发和应用，才解决了上述治理难题，为烟气超低排放治理提供了可能和针对性的治理方案。

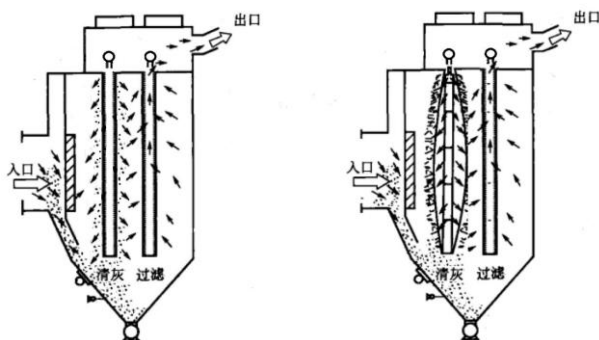
2、高温烟气除尘

金属滤袋除尘在烟气治理领域上的成功开发与应用，既解决了烟气超低排放治理工艺选择的难题，又迎合了国家关于节能减排的政策要求，所以一经推上市场，即受到工业企业的青睐。

金属滤袋从加工工艺上区分，可分为金属粉末烧结滤袋和金属纤维毡滤袋两种；从加工材质上，可以是普通的奥氏体不锈钢，譬如 304、316L、310S 等等，也可以是高镍含量的哈氏不锈钢、904 等等。无论是那种形式的金属滤袋，无论是那种材质的金属滤袋，在烟气治理方面都能耐高温、高通量、低阻值且具有高效过滤精度，因而能够满足烟气高温除尘、超低排放的环保治理要求。

为确保金属滤袋的高效过滤精度，满足除尘的需要，金属滤袋在使用过程中，需要在滤料过滤层表面形成一层尘垢层。新安装投运的金属滤袋设备，在开车投产前，需要进行预喷涂，目的也在于此。金属滤袋表面的尘垢层，一来可以增加金属滤袋的过滤精度，起到过滤层的作用，防止超细粉尘进入到金属滤袋的纳米级微孔过滤通道中，引起运行阻力增大；二来还能保护金属滤袋，免受烟气中的腐蚀介质直接接触金属滤料，避免高温烟气直接包裹金属滤袋，降低滤袋使用寿命。

金属滤袋是复合刚性过滤材料，在脉冲反吹时不会像除尘布袋具有弹性一样有一个膨胀变形将尘饼完全剥离的过程，加之除尘滤带表面所需的尘垢层，因而其脉冲反吹清灰时反吹的压力、气包的大小、喷嘴的大小以及喷嘴距除尘滤袋口的高度与除尘布袋存在较大的偏差，需要在设计和应用实践中加以关注。金属滤袋、除尘布袋在线脉冲反吹清灰示意如下图。除尘布袋在脉冲反吹清灰时尘饼完全剥离，膨胀变形的滤袋反复反吹后滤料间的微孔变大，因而会导致超细粉尘穿透布袋，造成净烟气中粉尘不能长久保持超低排放限值需求，这也是为金属滤袋除尘提供更为广阔市场的因素之一。



金属滤袋（左）与除尘布袋（右）在线脉冲清灰示意图

3、金属滤袋脉冲清灰

金属滤袋脉冲清灰分在线与离线两种方式，两种清灰方式在实际应用中并没有绝对的好坏之分，而是各有利弊、各有千秋。选择哪一种清灰方式，实际上是一个平衡技术需求与投资成本的决策过程。

在线清灰是在除尘的同时完成清灰，每次只是降低一行除尘滤袋的阻力，除尘器内部的其他滤袋仍然会继续进行过滤工作，这样对刚喷吹后的滤袋所承受的过滤负荷的变化相对来说比较温和。除尘器内部是一个大空间静态气室，气流分布均匀，滤料所承受的过滤荷载变化不大，因而可以有效延长金属滤袋的使用寿命。在线清灰结构简单，控制方便简单，造价成本较低。但是由于清灰与过滤同时进行，就会出现部分超细灰尘刚被反吹出金属滤袋表面还未落入灰斗又被二次吸附在金属滤袋表面，另外烟气风机的吸力会抵消掉部分脉冲阀的吹力，影响清灰效果，清灰不彻底。

离线清灰是将过滤箱体分成多个箱室，这些箱室采用并联的方式，每个箱室通过提升阀进行烟气控制，需要清灰的箱室通过提升阀切断烟气，开启脉冲阀进行停风清灰。这样一个箱室清灰时，其他箱室保持正常运行状态，逐步实现在除尘器整体工作不停的情况下，各个箱室轮流完成清灰工作。因为是在停止过滤时进行喷吹清灰，所以灰尘容易被分离且不易产生二次吸附，清灰效果好，清灰彻底。但是离线清灰由于将除尘器进行分仓处理，所以清灰时烟气波动大，并且清灰后的仓室滤袋阻力低，仓室内的滤料将承受很高的过滤荷载，导致滤料的荷载变化循环太高，因而会缩短滤料使用寿命。

清灰采用何种方式，主要取决于烟气性质和工艺要求。对于小型除尘器及非连续性生产企业建

议采用在线清灰的方式，对于连续性生产企业以及大型除尘器，建议采用分仓室离线清灰的方式。

目前市场上倾向于在线清灰的方式，因为在线清灰阻力低，因而运行能耗低；滤袋数量少，所以减少一次性投资成本；并且从清灰效果来说，只要烟气采用侧进气方式，粉尘沉降方向与烟气流动方向垂直或一致，与离线清灰并没有明显差别。离线清灰由于设置了提升阀，增加了设备投资的同时增加了故障点，并且增加了运行阻力。研究表明，当提升阀的风速在 10m/s 时，提升阀本身加烟气的转向等阻力将达到 100Pa 以上。另外离线清灰整体阻力波动比较大，分仓室越少，波动越大，影响系统的工艺操作，并且由于离线清灰的仓室不参加过滤，所以除尘器的全部过滤面积不能得到充分的利用。

4、设计与应用

4.1 按照烟气通量核算脉冲反吹耗气量：

江西某碳酸锂企业回转窑烟气采用金属滤袋进行烟气治理，金属滤袋规格为 $\varnothing 160 \times 4200\text{mm}$ ，共 990 条滤袋，11 条滤袋同用一个脉冲阀，滤袋过滤风速按照 0.8m/min 进行设计。则一个脉冲阀对应滤袋处理烟气流量为：

$$Q_{\text{设计}} = 3.14 \times 0.16 \times 4.20 \times 11 \times 0.80 \times 60 = 1114 \text{m}^3/\text{h} = 0.31 \text{m}^3/\text{s}。$$

脉冲阀一般脉冲宽度建议在 100-200 千秒(ms)，设计选定 150ms，则 150ms 的烟气通量为：

$$Q_{150\text{ms}} = Q_{\text{设计}} \times 0.15 = 0.31 \times 0.15 = 0.0465 \text{m}^3/150\text{ms}。$$

根据设计经验系数，脉冲阀喷量应为滤袋处理风量 2-3 倍，才可满足清灰强度的要求。则脉冲阀喷气量为：

$$Q_{\text{喷量}} = Q_{150\text{ms}} \times 2.5 = 0.0465 \times 2.5 = 0.11625 \text{m}^3/150\text{ms}。$$

单个脉冲阀引射气流量是其喷吹耗气量的 3 倍，要达到清灰强度要求的喷气量 0.11625m³/150ms 的要求，仅需单个脉冲阀喷吹耗气量为：

$$Q_{\text{耗气}} = Q_{\text{喷量}}/4 = 0.11625/4 = 0.029 \text{m}^3/150\text{ms} = 0.1938 \text{m}^3/\text{s}。$$

4.2 按照除尘面积核算脉冲反吹耗气量：

上述规格的金属滤袋，每个脉冲阀对应的滤袋除尘面积为：

$$S_{\text{除尘}} = 3.14 \times 0.16 \times 4.20 \times 11 = 23.21 \text{m}^2。$$

依据烟气中粉尘含量以及粉尘性质，一般每平米滤袋所需的耗气量通常业内定在 10-15L/m²，设计按照 12L/m²取值，则每个脉冲阀对应的喷量为：

$$Q_{\text{喷量}} = 23.21 \times 12 = 278.52 \text{L} = 0.27852 \text{m}^3/150\text{ms}。$$

每个脉冲阀耗气量为：

$$Q_{\text{耗气}} = Q_{\text{喷量}}/4 = 0.27852/4 = 0.069 \text{m}^3/150\text{ms} = 0.46 \text{m}^3/\text{s}。$$

4.3 脉冲阀的选取：

上述脉冲阀的耗气量计算，两种计算方法差值 2.4 倍，设计过程中一般按照大值进行取值设计；另外对于脉冲阀的选择，有的脉冲阀厂家提供了关于喷吹气量、工作压力与喷吹脉宽的曲线图。在查看这类曲线图时，要注意厂家提供的喷吹气量是标准状态下的气量，而不是工作压力下的气量，需要将标准状态下的气量转换成工作状态下的气量。

譬如：曲线图中查找到在 0.5Mpa 的工作压力下，脉冲阀的喷吹气量为 500L，那么实际上，该脉冲阀所消耗的工作状态下的压缩气量为：

$$500 \times 0.1/0.5 = 100 \text{L}。$$

工作状态下与标准状态下压缩空气量差别很大，因而设计选型时一定多加注意。

4.4 金属滤袋脉冲反吹压力的结论：

金属滤袋主要选用不锈钢材料，适用于高温烟气除尘，从滤料的材质、密度以及弹性模量等参数均区别于传统的纤维滤料。传统纤维滤料耐受的烟气温度一般在 250℃ 以下，由于其在脉冲反吹清灰时滤料有一个膨胀变形从而抖落滤料表面粉尘的过程，因而滤料纤维间距会随反吹清灰次数增多而增大，所以不能长久保持超低排放限值的需求，加之烟尘的摩擦、滤袋的碰撞、高温的侵扰，

一般传统滤料使用周期为 1 年-1.5 年，频繁的更换滤袋，增加投资的同时，增加了职工的劳动强度，并且产生废滤袋危废，企业处理还要增加危废处理费用。因而，随着烟气超低、超净排放的实施，金属滤袋高温烟气治理越来越得到更为广泛的应用。

金属滤袋无论是金属纤维滤袋还是金属粉末滤袋，都采用独特的梯度复合工艺，迎尘面为超细纳米级控制过滤层，支撑体为大孔隙率的金属丝网层，从而确保烟尘过滤精度的同时增加了滤袋的强度，延长了其使用寿命。梯度复合结构使得过滤时烟气中的粉尘在迎风面的初层纤维中穿透，近滤料表面层清灰效果明显，但是中后段清灰效果欠佳，因而导致金属滤袋较传统的纤维滤袋反吹清灰后残余阻力偏高。

滤袋侧壁峰值压力、压力上升速率以及最大反向加速度等指标是评价传统纤维滤料清灰性能的重要指标，现在的除尘器大部分均采用脉冲喷吹清灰方式，金属滤袋除尘器借鉴传统除尘器清灰方式，也采用脉冲喷吹清灰方式。脉冲喷吹清灰对于传统除尘器来说，一是靠滤袋的膨胀变形，使得粉尘由于惯性从滤袋上脱落；二是靠清灰气流直接吹扫使得滤袋表面粉尘层脱落。而金属滤袋的弹性系数远远大于传统的纤维布袋，其结构不同于传统的柔性材料，因而在脉冲喷吹清灰时，滤袋侧壁峰值压力、压力上升速率以及最大反向加速度等指标与传统滤袋均不同。

按照韩笑等在《高温袋式除尘器金属滤袋脉冲喷吹清灰性能分析》的结论，金属滤袋壁面峰值压力值与压力上升速率呈现上部>底部>中部的趋势；最大反向加速度呈现上部>中部>底部的趋势，均在滤袋袋口 0.5m 处达到最大值。在相同喷吹参数下，金属滤袋与传统纤维滤袋壁面峰值压力变化趋势相同，但壁面峰值压力和最大反向加速度整体低于传统纤维滤袋；通过数值模拟正交实验得出喷吹压力和喷吹孔径均为影响金属滤袋与传统纤维滤袋喷吹效果的显著影响因素；最佳喷吹距离为 200mm，最佳喷吹时间为 100ms。

李明等在《脉冲喷吹金属长滤袋的清灰性能》的结论：当喷吹压力为 0.4MPa 时，金属长滤袋在喷吹孔径 10、12、16、20mm 时最佳喷吹距离分别为 200、200、200 和 160mm；在满足滤袋清灰有效性和均匀性条件下，喷吹压力为 0.4MPa、喷吹孔径为 16mm 和最优喷吹距离 200mm 为金属长滤袋的最优清灰参数；在最优参数条件下，金属长滤袋沿长度方向的侧壁压力峰值呈现出上部>下部>中部的变化趋势。滤袋透气性较好，造成中部测点压力峰值较低，但均大于 300Pa，满足有效清灰条件。

在研究过程中，常以侧壁压力峰值为评价指标：Humphries 等研究发现，要去除滤袋 60% 的粉尘，侧壁压力峰值应大于 300Pa；秦文茜通过实验发现，金属滤袋侧壁压力达到 300Pa 时，才能有效清灰，与 Humphries 等研究的数据一致；王沁淘等研究发现，当侧壁压力峰值大于 5282Pa 时会造成滤袋破损，因此，滤袋侧壁压力值一般应选定在 300~5282Pa 之间。

5、结语

金属滤袋除尘伴随节能减排、超低排放的国家政策下，越来越在烟气治理领域发挥着不可替代的作用。金属滤袋独特的梯形复合结构，与传统的纤维滤袋有着截然的差异，使得其在应用过程中需要针对不同的烟气工况和治理工艺确定不同的脉冲反吹清灰数据。

借鉴传统纤维滤袋的应用数据，结合金属滤袋的特性，只有当金属滤袋侧壁压力达到 300Pa 时，才能有效清灰，并且侧壁压力峰值大于 5282Pa 会造成滤袋破损；金属滤袋的脉冲反吹压力 0.4MPa、喷吹孔径 16mm 和最优喷吹距离 200mm 为金属长滤袋的最优清灰参数。只有设计参数满足了金属滤袋的结构特点和适用工况，才能确保滤袋清灰效果、延长滤袋使用寿命和提高除尘器系统运行稳定性。

作者简介：李臣华（1972-），男，汉族，山东潍坊人，高级工程师，现就职于山东盛宝传热科技有限公司，联系电话：17664149113。

参考文献：

- 1、韩笑、党小庆、王赫、赵志宏、张小庆、王磊《高温袋式除尘器金属滤袋脉冲喷吹清灰性能分析》环境工程学报 2023-09-28；
- 2、李朋、薛峰、康彦、马小辉、颜翠平、陈海焱、侯力强、钱云楼《脉冲喷吹金属长滤袋的清灰性能》中国粉体技术 2021 年 27 卷第 6 期。

炼钢转炉烟道喷煤降碳操作的热化学技术分析

陈琛, 李加旺, 史光

(中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176)

摘要: 本文分析了基于煤气热化学储能技术 (TCES) 的碳资源化、烟道喷煤操作应用在炼钢热回收领域的应用。转炉煤气作为炼钢过程中的副产物是重要的二次能源, 其高效利用对节能环保、安全生产和降低炼钢成本具有重大意义。本文概述了转炉煤气的高温热能回收技术和化学能回收技术, 指出了传统能量回收技术的困境, 并引入了热化学储能技术作为解决方案。探讨了 TCES 系统的工作原理、储能体系选择和 C/CO₂/CO 热化学反应过程在转炉煤气中温热能储能的分析, 最后对 TCES 技术在钢铁行业的应用前景和商业前景进行了展望。

关键词: 热化学储能技术, 燃气, 全温域余热回收技术, 高效降温技术, 专精特新

Application Analysis of Thermochemical Energy Storage Technology for Carbon Reduction in Steelmaking Converters

CHEN Chen, LI Jiawang, SHI Guang

(Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: This paper analyzes the application of Thermo-Chemical Energy Storage Technology (TCES) in the field of ultimate energy efficiency of steelmaking flue gas and converter gas. Converter gas, as a byproduct in the steelmaking process, is an important secondary energy source, and its efficient utilization is of great significance for energy conservation and environmental protection, safe production, and reducing the cost of steelmaking. The paper outlines the high-temperature thermal energy recovery technology and chemical energy recovery technology for converter gas, points out the dilemma of traditional energy recovery technologies, and introduces thermochemical energy storage technology as a solution. It discusses the working principles of the TCES system, the selection of energy storage systems, and the analysis of the C/CO₂/CO thermochemical reaction process in the medium-temperature thermal energy storage of converter gas. Finally, it provides a prospect of the application and commercial prospects of TCES technology in the steel industry.

Key words: Thermo-Chemical Energy Storage Technology, Gas, Full-Temperature Range Waste Heat Recovery Technology, High-Efficiency Cooling Technology, Specialization, Refinement, Peculiarity, and Innovation

烧结过程铁矿石原位催化氧化甲苯研究

崔还丹, 薛文博, 雷新睿, 周文龙, 张芷源, 路世翔, 李珏秀 

(中原工学院智慧能源与环境学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 铁矿石烧结过程高度依赖化石燃料, 因负压燃烧特性该过程产生大量未完全燃烧的挥发性有机化合物 (VOCs) 排放, 其组分复杂, 既有烷烃、烯烃、苯系物等, 也会产生含氯 VOCs、二噁英等高毒性化合物, 对大气环境和人体健康构成严重威胁。然而, 现有研究多聚焦于末端治理技术, 却忽视了烧结过程中含铁物料本身可能具备的 VOCs 催化氧化潜力。本研究以甲苯作为烧结烟气典型 VOCs 模型化合

物,采集钢铁企业 3 种不同铁矿石,系统考察其催化氧化甲苯的性能。结果表明,不同铁矿石的甲苯氧化活性存在显著差异,对甲苯的催化氧化活性顺序为 YD>BG>JS, YD 矿以 FeOOH 为主要晶相,具有更多氧空位、Fe²⁺/Fe³⁺氧化还原循环电子对以及表面活性氧,具备更高效的甲苯催化氧化性能。

关键词: 烧结烟气; 催化氧化; 铁矿石; 甲苯

in situ Catalytic Oxidation of Toluene by Iron Ore during Sintering Process

CUI Huandan, XUE Wenbo, LEI Xinrui, ZHOU Wenlong, ZHANG Zhiyuan,

LU Shixiang, LI Juexiu✉

(School of Smart Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Iron ore sintering process, featuring of high dependence on fossil fuels, produced substantial quantity of volatile organic compounds (VOCs) emission owing to the unique negative pressure combustion character. The VOCs composition of sinter flue gas is complex, including alkanes, alkenes, aromatic hydrocarbons, chlorinated VOCs, dioxins and other highly toxic compounds. These substances pose serious threats to the atmospheric environment and human health. However, most studies focused on the end-of-pipe sinter flue gas treatment technology, while neglecting the potential catalytic oxidation capacity of the iron-bearing materials during sintering process. This study employs toluene as typical VOCs of sintering flue gas, and three distinct types of iron ores sampling from steel plants were taken as catalysts to evaluate toluene oxidation performance. Results showed toluene oxidation activity of different iron ores varies significantly, following the order of YD>BG>JS. YD ore exhibited more effective catalytic toluene oxidation performance owing to the dominant FeOOH phase, thus generating more oxygen vacancies, Fe²⁺/Fe³⁺ redox pairs and surface active oxygen species.

Key words: sintering flue gas; catalytic oxidation; iron ore; toluene

钢铁行业是我国经济的支柱产业之一,同时也是大气污染物的重要排放源头。铁矿石烧结过程是长流程炼钢的重要工序,该过程通过铁精粉、助剂和固体燃料的高温负压燃烧生产烧结矿用于高炉,其烟气排放量达 4000~6000 Nm³/h^[1-3]。由于对焦、煤粉的高度依赖,在低氧、高温的烧结氛围中,烧结过程近似于上层烧结料对下层底料的干馏,烧结原料中固体燃料热解和不完全燃烧,以及含油残留物的挥发导致大量低凝点有机成分呈气态挥发进入烧结废气,产生挥发性有机物(VOCs)排放^[4,5]。基于全流程活动水平数据建立的钢铁行业排放清单显示钢铁全行业 VOCs 年排放量为 25.4 万吨,烧结过程 VOCs 的排放量约占钢铁生产全流程的 69.6%^[6];大型或密集钢铁企业分布地区(如京津冀地区)钢铁行业的 VOCs 排放占比更高^[7]。现行烧结烟气超低排放标准《(环大气[2019]35 号)》仍未对 VOCs 的排放限值进行约束。

烧结矿主要成分为铁氧化物,具有多种晶型和不同价态的元素铁,因此高温烧结过程中烧结床层产生 VOCs 的同时必然在铁矿石表界面不同活性位点发生原位的 VOCs 催化氧化过程。然而,由于烧结过程的复杂性和在线监测烧结机源头 VOCs 排放的局限性,烧结过程的 VOCs 催化转化贡献未知。

基于上述科学问题,本研究以甲苯作为烧结烟气典型 VOCs 模型化合物,采集实际烧结铁矿石,系统研究其在不同温度对甲苯的催化氧化活性,通过材料表征(XRD、XPS、H₂-TPR、O₂-TPD、TG-DSC),揭示了铁矿石理化特性与甲苯催化氧化性能之间的关系,为烧结烟气过程控制和末端减排提供理论依据。

1 实验部分

1.1 实验原料

从国内钢厂采集 3 种典型铁矿石(YD、JS 和 BG),为保证接近实际烧结矿生产过程的催化氧

化作用，铁矿石样品仅经过 40 目筛分，不进行其他预处理。

1.2 催化剂表征

通过多种材料表征方法对铁矿石的理化特性进行测定，采用 X 射线荧光光谱（XRF，Panalytical Axios）测定铁矿石中的主要元素种类和含量，采用 X 射线衍射仪（XRD，Rigaku RINT 2500 TTRAX-III）对铁矿石的主要物相组成进行分析，通过 X 射线光电子能谱仪（XPS，Thermo Fisher ESCALAB 250xi）分析铁矿石的表面元素价态，通过 H₂-TPR 和 O₂-TPD 分析铁矿石的氧化还原性能和活性氧物种。

1.3 铁矿石催化氧化甲苯评价

以甲苯为模型化合物，采用固定床反应器研究铁矿石的 VOCs 催化氧化活性。每次评价前，将 100 mg 过筛的铁矿石样品置于内径 10 mm 的石英管中心，进、出口通过石英棉支撑。甲苯气体通过冰水浴鼓泡系统提供的吹扫气流以 1000 ppm 的固定浓度和 100 mL·min⁻¹ 的恒定流速供给，通过气相色谱仪（GC1120，配备甲烷转化炉）测定进出口甲苯浓度和二氧化碳产率。

甲苯催化氧化效率通过公式(1)计算得到：

$$\eta_{\text{甲苯}} = \frac{C_{\text{甲苯,in}} - C_{\text{甲苯,out}}}{C_{\text{甲苯,in}}} \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

式中 $\eta_{\text{甲苯}}$ 为甲苯转化率； $C_{\text{甲苯,in}}$ 为进口甲苯浓度； $C_{\text{甲苯,out}}$ 为出口甲苯浓度。

甲苯经氧化生成的 CO₂ 转化率由公式(2)计算得到：

$$\eta_{\text{CO}_2} = \frac{[CO_2]_{\text{out}} - [CO_2]_{\text{in}}}{7 \cdot C_{\text{甲苯,in}}} \times 100\% \quad \text{式(2)}$$

式中 η_{CO_2} 为 CO₂ 转化率； $[CO_2]_{\text{in}}$ 为进口 CO₂ 浓度； $[CO_2]_{\text{out}}$ 为出口 CO₂ 浓度； $C_{\text{甲苯,in}}$ 为进口浓度；7 为甲苯碳原子数。

2 结果与讨论

2.1 铁矿石理化性质

2.1.1 元素分析

表 1 不同铁矿石的 XRF 测试结果.
Table1 XRF analysis of different iron ores.

Samples	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Co
YD	93.182	0.050	0.159	2.418	3.589	0.055	0.023	0.047	-	0.100	0.143	0.046	0.189
BG	93.684	0.055	0.156	1.921	3.067	0.063	0.051	0.042	0.050	0.591	0.107	0.165	-
JS	93.968	0.082	0.387	0.230	4.859	0.033	0.039	0.033	0.026	0.272	0.023	0.047	-

铁矿石在催化氧化反应中的性能差异，本质上源于活性位点、表面物理化学性质以及晶体结构等因素的协同调控^[8]。表 1 的 XRF 结果表明，3 种铁矿石均含有丰富的金属元素，其中铁元素占比最大，铁元素含量顺序为：JS（93.968%）>BG（93.684%）>YD（93.182%）。此外，铁矿石中钴、锰、钛、铝等元素的组成也存在差异，铝元素含量差异较大（YD（2.418%）>BG（1.921%）>JS（0.230%）），可能对其 VOCs 催化氧化活性有一定影响。

2.1.2 晶体结构及键合表征

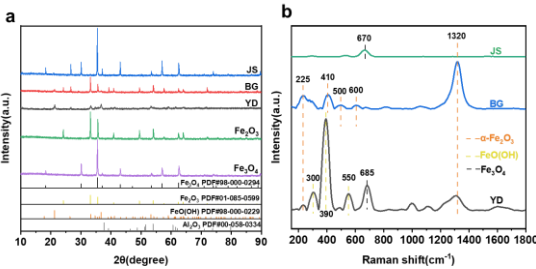


图 1 铁矿石 XRD 谱图(a)和 Raman 光谱图(b).
Fig.1 XRD patterns (a) and Raman spectra (b) of different iron ores.

通过 X 射线衍射分析揭示了铁矿石的主要物相组成。由图 1 可以看出,不同矿石样品展现出特定的晶体结构差异,JS 矿在 35.4°、43.1°、56.9°位置出现的特征衍射峰,与立方晶系磁铁矿(Fe_3O_4 , PDF#98-000-0294)^[9]的标准衍射谱中(311)、(400)、(511)晶面对应;BG 矿 24.1°、33.1°、35.6°的特征衍射峰分别对应于六方晶系赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, PDF#01-085-0599)^[10]的(012)、(104)和(110)晶面;而 YD 矿在 21.4°、33.2°的特征峰则与正交晶系针铁矿(FeOOH , PDF#98-000-0229)的(110)和(130)晶面对应。XRD 结果表明,YD 矿的主要物相为针铁矿,BG 矿主要物相为赤铁矿,而 JS 矿则主要由磁铁矿构成。此外,还检测到矿石中含有 SiO_2 、 Al_2O_3 等成分,与 XRF 结果一致。

天然铁矿石通常含有 Fe-O 和 Fe-S 键,采用拉曼光谱进一步对铁矿石的化学键合进行表征,结果如图 1 (b) 所示。YD 矿在 300、390、550 和 685 cm^{-1} 处的特征峰分别对应于 FeOOH (针铁矿)与 Fe_3O_4 (磁铁矿)相的不同振动模式。其中,拉曼位移为 685 cm^{-1} 处的峰与 Fe_3O_4 的 A_{1g} 对称伸缩振动有关,390 cm^{-1} 处的峰对应 FeOOH 结构中 Fe-O-H 的弯曲振动。BG 矿在拉曼位移为 225、410 和 1320 cm^{-1} 处的峰分别对应于 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (赤铁矿)相的不同振动模式。其中,1320 cm^{-1} 处的峰为赤铁矿两个 LO_4 声子的倍频振动^[11]。JS 矿在拉曼位移为 670 cm^{-1} 的峰对应 Fe_3O_4 的 A_{1g} 振动模式。拉曼测试结果表明,BG 矿以赤铁矿为主,YD 矿呈 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeOOH}$ 混相结构,而 JS 矿则以 Fe_3O_4 相为主,进一步补充了 XRD 的测试结果。

2.1.3 表面元素价态

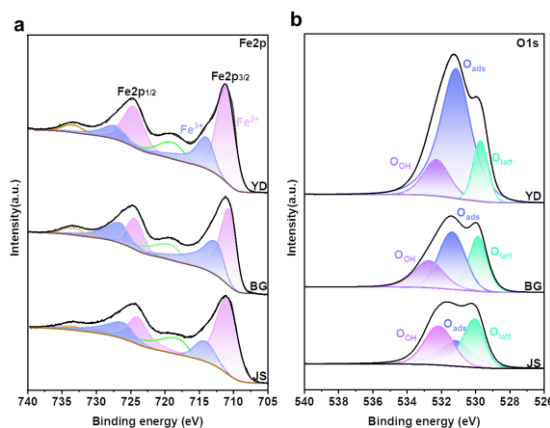

图 2 不同铁矿石的 XPS 谱图: Fe2p(a)和 O1s(b).
Fig.2 Fe2p (a) and O1s (b) XPS spectra of YD, BG and JS ore.

表 2 不同铁矿石的表面元素组成.
Table2 Surface elemental composition of different iron ores.

Sample	Peak area			$\text{O}_{\text{ads}}/(\text{O}_{\text{ads}}+\text{O}_{\text{latt}})$ (%)	$\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ (%)
	$\text{O}_{\text{latt}}^{\text{a}}$	$\text{O}_{\text{ads}}^{\text{b}}$	$\text{O}_{\text{ads-OH}}^{\text{c}}$		
YD	156510.3	474628.4	148228.6	75.2	71.7
BG	160605.9	233819.9	217038.5	59.3	57.5
JS	160543.9	114019.2	139268.6	41.5	66.1

(峰面积数据来源于 XPS 分析结果。a: 晶格氧; b: 表面吸附氧; c: 羟基水形成的含氧吸附基团。)

为测定不同铁矿石样品的表面元素价态,对 3 种铁矿石进行 X 射线光电子能谱(XPS)分析。从图 2 (a) 可以看出, $\text{Fe}2\text{p}_{3/2}$ 和 $\text{Fe}2\text{p}_{1/2}$ XPS 光谱曲线可分为 712.5eV 和 724.4eV,分别对应于 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ^[12, 13]。高的 Fe^{2+} 比例可为催化氧化反应提供更多活性位点,从而加速 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的氧化还原循环^[14]。3 种矿石 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ 比例分别为 71.7% (YD)、57.5% (BG) 和 66.1% (JS), YD 矿具有更好的还原能力。

由图 2 (b) 可知,3 种矿石表面均具有晶格氧(O_{latt})、表面吸附氧(O_{ads})以及羟基水形成的含氧吸附基团($\text{O}_{\text{ads-OH}}$)^[15, 16]。根据表 2 的积分结果计算表明,3 种铁矿石的 $\text{O}_{\text{ads}}/(\text{O}_{\text{ads}}+\text{O}_{\text{latt}})$ 比例为: YD (75.2%) > BG (59.3%) > JS (41.5%), YD 矿表面吸附氧(O_{ads})含量较高,表明其表面氧空位浓度较高,有利于表面活性氧的形成^[17]。结合 XRD、Raman 和 XPS 结果可知, YD 矿中大量

存在的 FeOOH ，其结构易于形成空位缺陷，且共存的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 氧化还原进一步提升了晶格氧活性，从而具有较强的活化分子氧能力^[18]。

2.1.4 氧化还原性能

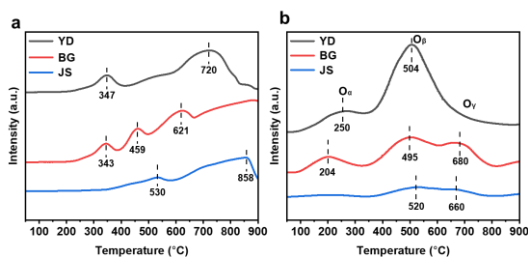


图3 铁矿石的 H_2 -TPR(a)和 O_2 -TPD(b)曲线.

Fig.3 H_2 -TPR (a) and O_2 -TPD (b) profiles of the iron ores.

表3 H_2 摄取量($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)与 O_2 脱附量($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$).

Table3 H_2 uptake determined from H_2 -TPR analysis ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$) and O_2 desorption amount derived from O_2 -TPD analysis ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$).

Samples	Total H_2 consumption	H_2 -uptake 300-400°C	H_2 -uptake 400-700°C	H_2 -uptake $T > 750^\circ\text{C}$	O_2 -desorbed $T < 330^\circ\text{C}$	Total O_2 desorbed
YD	11.1	1.5	9.6	-	0.177	1.2
BG	13.3	-	1.5	11.8	0.125	0.9
JS	10.0	-	1.8	7.2	0.015	0.2

催化剂的还原能力是催化氧化性能的重要参数。如图3(a)所示，不同铁矿石的 H_2 -TPR 曲线均可分为低温(300~400°C)、中温(400~700°C)和高温段(>750°C)。YD 矿 347°C 的还原峰对应于浅层 Fe^{3+} 到 Fe^{2+} 的还原，720°C 还原峰对应次表层的 Fe^{3+} 到 Fe^{2+} 的还原。由于本研究中 VOCs 的催化氧化评价温度在 150°C~550°C 之间，故选取 400~700°C 区间的耗氢量为主要评价指标。表3为各温区的氢气消耗情况，其中在 400~700°C 温度区间的耗氢量为 YD (9.6mmol g^{-1}) > JS (1.8mmol g^{-1}) > BG (1.5mmol g^{-1})，表明 YD 具有更多的表面活性氧物种和更好的低温催化氧化能力，随着还原峰面积的逐渐增大，氢气消耗量也随之增加，主要来自还原过程中氢气的累积。

O_2 -TPD 反应了不同铁矿石的储放氧能力及表面氧物种的分布情况。如图3(b)所示， α 、 β 和 γ 峰分别对应表面吸附氧、表面晶格氧和体相晶格氧的脱附过程。对于 YD 矿，表面吸附氧的峰位于 250°C 处，而表面晶格氧的特征峰则位于 504°C 处。BG 矿表面吸附氧的峰位于 204°C 处，表面晶格氧的特征峰位于 495°C 处。结果表明，BG 矿的表面吸附氧和晶格氧脱附温度均低于 YD 矿石，这说明 BG 矿石中的表面氧物种更容易发生脱附。从表3可以看出，YD 矿在低温下的表面吸附氧脱附量 (0.177mmol g^{-1}) 明显高于其他矿，这表明其表面氧空位数量更多。

2.1.5 TG-DSC 分析

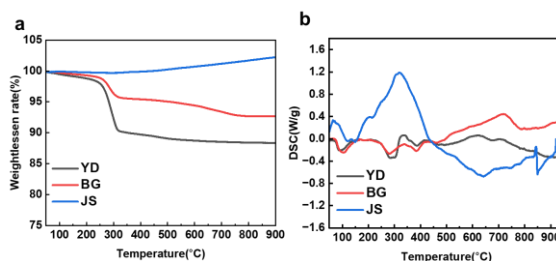


图4 不同铁矿石的 TG-DSC 曲线.

Fig.4 TG-DSC curves of different iron ores.

天然铁矿石含有结合水和碳酸盐等成分，通过热重分析进一步研究铁矿石在不同温度下的失重行为，结果见图4。可以看出，YD 矿在 50°C~250°C 温度区间出现 3.1% 的重量损失，这主要源于结合水脱附和碳酸盐分解。在 250°C~320°C 温度区间出现 6.7% 的重量损失，可能源于 YD 矿表面氧物种的释放及部分晶格氧的析出。这与 DSC 曲线该温度区间出现的吸热峰相对应，表明在 YD 矿在升

温过程中较低温度会出现结构转变。在 320~550℃ 之间,重量损失约为 1.2%,主要源于氧化亚铁氧化为氧化铁的反应失重。相比之下, BG 矿整体质量变化较小,但在 200~600℃ 仍有缓慢失重,可能含有少量物理吸附水或其他杂质挥发。此外, BG 矿石的热行为较为平缓,仅在 600~800℃ 出现弱放热峰。JS 整体几乎没有质量下降,说明其热稳定性最强,但在 250~350℃ 出现吸热峰,在 350~450℃ 出现明显放热峰,说明在高温区间可能存在 Fe_3O_4 向 Fe_2O_3 的氧化反应。YD 矿在低温条件下具有一定的催化氧化能力,可能与其晶格氧参与甲苯氧化反应有关。

2.2 催化性能分析

2.2.1 甲苯催化氧化活性

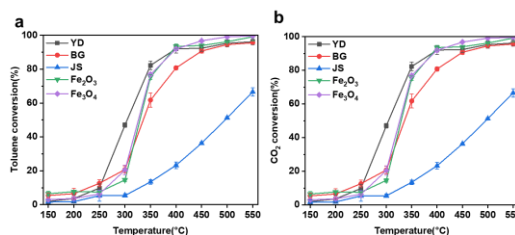


图 5 不同铁矿石对甲苯的催化氧化效果 (a) 和 CO_2 转化率 (b)。

Fig.5 Catalytic oxidation of toluene by different iron ores(a); corresponding CO_2 conversion (b).

根据前期研究结果,实际烧结过程中 150℃~550℃ 温度区间是 VOCs 的主要生成区间^[19, 20],因此在此温度区间对 3 种矿石的甲苯催化氧化活性进行评价,同时以分析纯级 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 进行对比评价。如图 5 (a) 所示,3 种铁矿石对甲苯的转化率均随着反应温度的升高而提高,其中 YD 矿 T_{50} 和 T_{90} 分别为 304℃ 和 385℃,BG 矿的 T_{50} 和 T_{90} 为 336℃ 和 448℃,JS 矿的 T_{50} 为 496℃, Fe_2O_3 的 T_{50} 和 T_{90} 为 328℃ 和 389℃, Fe_3O_4 的 T_{50} 和 T_{90} 为 325℃ 和 393℃。由此可见, YD 矿石展现出最佳的甲苯催化氧化效率,总体活性顺序为 $\text{YD} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{BG} > \text{JS}$ 。

CO_2 产率 (图 5 (b)) 与甲苯转化率曲线趋势基本保持一致。随着反应温度升高,甲苯转化率逐步上升, CO_2 产率也随之增加。YD 矿 CO_2 产率在 550℃ 可以达到 98%,而此时 BG 矿和 JS 矿 CO_2 产率分别可以达到 92% 和 66%, Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 分别为 96% 和 95%。此外, YD 矿化甲苯成 CO_2 的 T_{50} (339℃) 和 T_{90} (534℃) 比图 5 (a) 中催化氧化甲苯时的 T_{50} (304℃) 和 T_{90} (385℃) 高了 35℃ 和 149℃,表明铁矿石表面存在未被完全矿化的副产物^[21]。

2.2.2 空速的影响

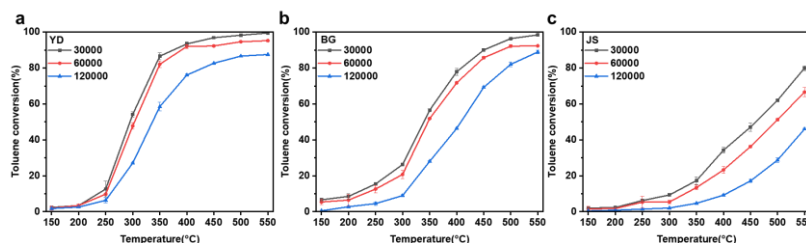


图 6 空速对铁矿石催化氧化甲苯性能的影响。

Fig.6 Effect of space velocity on toluene oxidation by iron ore.

空速是评价催化剂催化氧化性能的重要指标,对于实际烟气尤其是大风量、高空速行业烟气的 VOCs 治理应用至关重要。从图 6 可以看出,不同空速条件下 YD 矿对甲苯的催化氧化活性均优于 JS 和 BG 矿石。当 WHSV 由 30,000 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 升至 60,000 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, YD 的催化氧化能力有所下降,其最大转化率从 95.1% 降至 85.7%。当 WHSV 达到 120,000 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,转化率降至 83.2%。该结果说明空速对铁矿石的催化氧化能力有较大影响,空速增加导致了单位质量催化剂表面接触的甲苯分子数变多,同时停留时间减少,导致甲苯氧化效率降低。

2.2.3 稳定性测试

在 350℃、空速为 60,000 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、甲苯浓度为 1000 ppm 的条件下,对不同铁矿石进行了

120min 的连续催化氧化的稳定性评价。如图 7 所示, 3 种铁矿石在 350℃ 连续运行 2h 后的转化率均无明显波动, YD、BG 和 JS 三者的转化率分别稳定在约 81.9%、62.3%与 18.1%, 表明在连续烧结过程中铁矿石对 VOCs 的催化氧化作用能够在一定温度范围持续发挥作用。

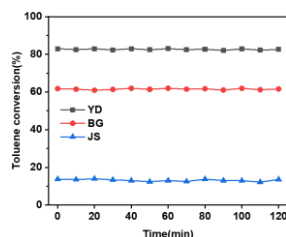


图 7 不同铁矿石的催化稳定性评价.

Fig.7 Stability test of different iron ores.

3 结论

以甲苯为模型 VOCs 对实际铁矿石的催化氧化性能进行了系统研究, 结果表明, 不同铁矿石的 VOCs 催化氧化性能差异较大, 其催化活性依次为 YD>BG>JS, YD 矿在 385℃ 时对甲苯的氧化矿化效率达到 90%。结合表征结果, YD 矿以正交晶系 FeOOH 为主要晶相, 并伴有 Fe₃O₄ 混相结构, 可提供丰富的 Fe²⁺/Fe³⁺ 氧化还原循环位点; BG 矿主要由赤铁矿 α-Fe₂O₃ 构成, JS 矿则以 Fe₃O₄ 为主。YD 矿表面具有较高的吸附氧含量, 其 O_β/(O_α+O_β) 比例达 75.2%。在 350℃、空速 60,000 mL·g⁻¹·h⁻¹、甲苯浓度 1000ppm 的条件下连续反应 2h 后, YD 和 BG 的甲苯转化率分别为 81.9%和 62.3%。在连续烧结过程中, 铁矿石对 VOCs 的催化氧化作用能够在一定温度范围持续发挥作用。

参考文献

- [1] QUE Z-G, SHI J-M, AI X-B. Combustion mechanism of benzene in iron ore sintering process: experimental and simulation [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(1): 195-203.
- [2] WANG Y, DING L, SHI Q, et al. Volatile organic compounds (VOC) emissions control in iron ore sintering process: Recent progress and future development [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 448: 137601.
- [3] ZHANG JIAN-LIANG Y J-Y, LIU ZHENG-JIAN, XU RUN-SHENG. Current situation and trend of air pollutant emission in China's steel industry [J]. Iron and Steel, 2021, 56(12): 1-9.
- [4] 罗云飞, 李俊杰, 余正伟, 魏进超, 龙红明. 焦煤比对烧结烟气中挥发性有机物排放特性的影响. [J]. 中国环境科学 2021, 41(09): 4077-4084.
- [5] 李俊杰, 王毅璠, 罗云飞, 余正伟, 李杰民. 烧结燃料对烟气中挥发性有机物释放的影响. [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(06): 2062-2070.
- [6] WU X, ZHAO L, ZHANG Y, et al. Primary Air Pollutant Emissions and Future Prediction of Iron and Steel Industry in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(4): 1422-32.
- [7] 段文娇, 程水源, 贾佳, 王晓琦. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM2.5 影响. [J]. 环境科学 2018, 39(04): 1445-1454.
- [8] OKOYE-CHINE C G, MUBENESHA S. The Use of Iron Ore as a Catalyst in Fischer–Tropsch Synthesis—A Review [J/OL] 2022, 12(10):10.3390/cryst12101349.
- [9] ZHU D, HUANG Y, LI R, et al. Constructing Active Cu²⁺-O-Fe³⁺ Sites at the CuO–Fe₃O₄ Interface to Promote Activation of Surface Lattice Oxygen [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(45): 17598-609.
- [10] ZHANG R, HE H, TANG Y, et al. A Review on Fe₂O₃-Based Catalysts for Toluene Oxidation: Catalysts Design and Optimization with the Formation of Abundant Oxygen Vacancies [J].

ChemCatChem, 2024, 16(18): e202400396.

- [11] IVANOV B A J L T P. Mesoscopic antiferromagnets: statics, dynamics, and quantum tunneling (Review) [J]. 2005, 31(8): 635-67.
- [12] ZHAO L, YANG Y, LIU J. Insight into the reaction mechanism of NH₃-SCR and chlorobenzene oxidation over Mn-based spinel catalysts [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 492: 138113.
- [13] ZHANG H, LI J, SHU S, et al. Preparation of VOC low-temperature oxidation catalysts with copper and iron binary metal oxides via hydrotalcite-like precursors [J]. RSC advances, 2022, 12(54): 35083-93.
- [14] HE Z, LUO J, ZHU G, et al. Enhanced activation of peroxymonosulfate with cobalt-doped manganese-iron oxides for contaminant degradation: Regulation of oxygen vacancy defects [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 678: 186-200.
- [15] MINIAJLUK N, TRAWCZYŃSKI J, ZAWADZKI M. Properties and catalytic performance for propane combustion of LaMnO₃ prepared under microwave-assisted glycothermal conditions: Effect of solvent diols [J]. Applied Catalysis A: General, 2017, 531: 119-28.
- [16] ARENDT E, MAIONE A, KLISINSKA A, et al. Structuration of LaMnO₃ perovskite catalysts on ceramic and metallic monoliths: Physico-chemical characterisation and catalytic activity in methane combustion [J]. Applied Catalysis A: General, 2008, 339(1): 1-14.
- [17] LUO L, HUANG R, HU W, et al. Metal–Organic Framework-Derived Hollow CoMn₂O₄ Nanocube Catalysts for Deep Toluene Oxidation [J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(6): 8232-42.
- [18] SI Z, PEI M, LIU Y, et al. Boosting the photocatalytic activity of β-FeOOH catalyst for toluene oxidation by constructing internal electric field at 0D/1D homojunction interfaces [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 654: 300-7.
- [19] LI J, HE X, PEI B, et al. The ignored emission of volatile organic compounds from iron ore sinter process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 77: 282-90.
- [20] CAI C, LI J, HE Y, et al. Target the neglected VOCs emission from iron and steel industry in China for air quality improvement [J]. Frontiers of environmental science & engineering, 2023, 17(8): 95.
- [21] CHEN J, XIXU, WENJIANXU, ZHENCHEN, JIAZIJIA, HONGPENGCHEN, JING J
CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. Hydrolysis driving redox reaction to synthesize Mn-Fe binary oxides as highly active catalysts for the removal of toluene [J]. 2017, 330.

应用于钢铁企业的储能技术的绿色资产证券化

王雪原¹, 陈琛^{*2}, 李加旺², 史光²

(1. 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067399; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176)

摘要: 钢铁行业作为高能耗、高排放的工业部门, 其能源转型与“双碳”目标实现息息相关。本文聚焦于钢铁厂煤气柜、蓄热器、储能电池等能源调节储能资产, 探讨其作为生息资产进行资产证券化改造的可行性与路径。通过分析其多元化收益来源(包括内部节能、外部能源销售、辅助服务及碳信用), 结合中国绿色金融政策框架与已执行案例, 本文构建了基于收益法的资产证券化定价模型。研究表明, “储能”项目通过绿色资产证券化, 不仅能有效盘活存量资产、降低融资成本, 更能促进钢铁企业向能源服务商转型, 为行业绿色低碳发展提供创新融资范式。

关键词: 蓄能; 蓄热; 资产证券化; 绿色金融; 能源期货; REITs; 能源管理; 储能技术; 煤气柜; 蓄热

器；储能电池；碳信用；电力辅助服务；虚拟电厂；气候债券；绿色债券

中图分类号：F407.3；F832.5；X757；X321

Green Asset Securitization of Major Energy Storage Projects in Steel Plants

WANG Xueyuan¹, CHEN Chen^{*2}, LI Jiawang², SHI Guang²

Chengde Jianlong Special Steel Co., Ltd, Chengde 067300, China; 2. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: The steel industry is closely related to the realization of the "dual-carbon" goals due to its high energy consumption and emissions. This paper focuses on the "major energy storage" assets in steel plants, such as gas holders, heat accumulators, and energy storage batteries, and explores the feasibility and paths of their asset securitization as income-generating assets. By analyzing their diversified revenue sources (including internal energy savings, external energy sales, auxiliary services, and carbon credits), and combining with China's green financial policy framework and implemented cases, a pricing model for asset securitization based on the income approach is constructed. The research shows that through green asset securitization, the "major energy storage" projects can not only effectively revitalize existing assets and reduce financing costs, but also promote the transformation of steel enterprises into energy service providers, providing an innovative financing paradigm for the green and low-carbon development of the industry.

Key words: Energy storage; Heat storage; Asset backed securitization; Green finance; Energy futures; REITs; Energy Management; Gas holder; Heat accumulator; Energy storage battery revenue; Carbon credit; Power auxiliary services; Virtual power plant; Climate bonds; Green bonds

基金项目：

国家重点研发计划

项目编号 2022YFE0208100

项目名称：低碳冶金关键技术和装备联合研发

引言

传统 Coke-BF-BOF 长流程冶炼生产过程对化石燃料高度依赖，并伴随大量温室气体排放，是全球第二大能源消耗产业。2024 年全球及中国粗钢产量分别达 18.846 亿吨和 10.05 亿吨，平均能源强度为 20 GJ/吨粗钢，CO₂ 排放强度为 1.9 吨/吨粗钢^[30]。在中国，钢铁行业能源消耗占全国总量的 14%，碳排放占 15.9%，在此背景下，提升内部能源利用效率、推动能源结构转型成为钢铁行业的战略要务。

钢铁厂内部的煤气柜（化学能蓄能）、蓄热器（热能蓄能）和储能电池（电能蓄能）等“储能”项目设施，是维持能源供需平衡、保障生产稳定及平衡外部能源供应价格“削峰填谷”的基础能源储备设施^[30]。近年来，随着能源定价改革推进，这些设施不仅能平滑内部能源波动，更能在新型电力市场中发挥柔性调节作用，参与外部能源交易，从而从传统的成本中心转变为价值创造的生息资产。然而，这些资产的重资产属性和初期投资巨大，限制了其进一步发展和效益释放。资产证券化（Asset-Backed Securitization, ABS）作为一种创新融资工具，为盘活存量资产、拓宽融资渠道提供了可能。

本文旨在深入探讨钢铁厂“储能”项目进行绿色资产证券化改造的可行性与具体路径。首先，分析“储能”资产的技术与运营特点及其多元化收益来源。其次，结合中国绿色金融政策与已执行案例，探讨资产证券化的定价机制。

钢铁厂“储能”能源设施的价值重估及资产厘清

钢铁厂的煤气柜、蓄热器和储能电池，作为能源调节设施，其价值已超越传统的内部平衡功能，正向外部市场化收益拓展。

煤气柜（化学能蓄能）

钢铁生产过程中产生大量副产煤气，包括焦炉煤气(COG)、高炉煤气(BFG)和转炉煤气(LDG)。这些煤气是钢铁厂重要的内部能源，约占总能源收入的 30%-40%^[30,30]。煤气柜用于储存这些副产煤气，平滑生产与消耗之间的波动。

焦炉煤气中氢气含量可达 50%-60%，使其成为潜在的工业副产氢来源，中国焦炉煤气制氢的潜在产量估计约为每年 912 万吨^[30]。通过先进的净化技术，如高效脱硫（H2S 去除效率可超 99.9%），焦炉煤气可用于化工原料或高纯度氢气生产，从而提升其经济价值^[30]。高炉煤气在储存前需要降压，利用余压回收透平（TRT）技术可将高炉煤气压力能转化为电能，每吨粗钢可发电约 30 kWh^[30]。

表1 钢铁冶金主要煤气回收技术及应用

项 目	技术说明/应用目 的	价 格 (元 / Nm ³)	价格说明
内 部 燃 料 替 代	减少外购燃料成本 ^[错误:未定义符号。]	0.8-1.2	基于替代天然气（约 2.96 元/Nm ³ ）或煤炭（约 862 元/吨）的成本折算，考虑煤气热值差异。
过 剩 煤 气 销 售	将多余煤气出售给外部工业用户或发电厂 ^[3]	0.6-0.9	低于内部自用价值，考虑传输成本及市场供需，高炉煤气（BFG）因热值低可能接近下限，转炉煤气（LDG）略高
高 附 加 值 产 品	净化后焦炉煤气可制氢或作为化工原料销售 ^[5]	2.5-3.5	经净化提纯后（如提氢纯度 99.99%），作为化工原料价值提升。中国生产侧氢价约 25-35 元/kg，折算为每立方米氢气价格（1Nm ³ H2 约 0.09kg），则为 2.25-3.15 元/Nm ³ 。

蓄热器（热蓄能）

钢铁生产过程产生大量余热，按温度可分为高温（>500℃）、中温（200-500℃）^{[30][30]}和低温（<200℃）。余热回收潜力巨大，每吨粗钢可达 4.87 GJ，相当于总能耗的 26.08%^[30]。欧美钢铁企业普遍借鉴化工行业的能源管理技术建立起调度优化系统以提高能效利用率^[30]。

主要余热回收技术如表 2 所示

表2 钢铁冶金主要余热回收技术及应用

技术类型	技术说明	性能 / 效果	示例公司 / 项目 名称	价 格 (元 / 吨)	价格说明
干 熄 焦 (CDQ)	冷却 1000℃ 热焦炭产生蒸汽	每 吨 焦 炭 可 发 电 95-105 kWh	日 本 NipponSteel ^[30]	180 -220	蒸汽可自用或发电，单价结合发电收益折算（按 0.8 元/kWh 电价，每吨焦炭发电收益 76-84 元，每吨蒸汽价值约 168-187 元），高于普通工业蒸汽。
余 热 锅 炉 (HRSG)	回收加热炉、转炉、电炉等高温烟气（最高可达 2100℃），产生高参数蒸汽	蒸 汽 参 数 可 达 440℃/120 bar，用于发电或供热 ^[30]	德 国 Georgsmarienhütte ^[30]	200 -250	高参数蒸汽（高压高温）用途广（发电、工艺用汽），价格较高。中国工业蒸汽价格约 200-220 元/吨。
有 机 朗 肯 循 环 (ORC)	将 中 低 温 余 热 (90-400℃) 转化为电能	效率可达 25% ^[30]	德国 Feralpi ^[30]	150 -180	ORC 主要产电，效率优势提升蒸汽利用价值，单价参考低压蒸汽市场。
卡 琳 娜 循 环 (KC)	(90-250℃) 废热回收	在 低 于 250℃ 中 低 温 比 ORC 效率更高 ^[30]	日 本 Kashima 钢 铁 厂 ^[30]	160 -190	效率优势提升蒸汽利用价值，单价略高于 ORC。
工业热泵	将低温余热 (<200℃) “升级”至更高温度	COP 可超 400% ^[30]		120 -150	能耗低，“升级”成本较低，单价低于原生蒸汽。
蓄热器(含蒸汽蓄热器和相变材料储热)	平滑余热的间歇性供应，确保稳定、可调度的热源或蒸汽输出	- 内部蒸汽 / 电力供应：减少外购能源，提高能源自给率 ^[30] - 外部供热 / 供电：向区域供热网络或电网出售热能 / 电能 ^{[30][30]} - 电网辅助服务：通过热电联产（CHP）机组或蒸汽轮机参与电网调峰、调频 ^[30]		160 -190	蒸汽稳定性提升其市场价值，单价接近中参数蒸汽平均水平。

储能电池（电蓄能）

储能电池在钢铁厂主要用于电力负荷管理和参与电力市场。

表3 钢铁冶金主要储能电池技术及应用

技术类型	技术说明/应用目的
削峰填谷	在电价低谷时充电，高峰时放电，降低用电成本 ^[错误!未定义书签。]
提高供电可靠性	保障工厂内部供电稳定 ^[30]
参与电力市场	电力现货市场：作为独立主体参与日前、日内、实时市场交易，通过双向报价（充电和放电价格）优化收益 ^[30] 辅助服务市场：提供调峰、调频、备用等服务，获取额外收益 ^[错误!未定义书签。] 需求响应：响应电网需求信号，获得补贴 ^[错误!未定义书签。] 虚拟电厂（VPP）：聚合储能、柔性负荷等资源，作为统一实体参与电力市场交易 ^[错误!未定义书签。]

储能电池的价值在于其高度的灵活性和市场参与能力，能够将电力波动转化为可观的经济收益。综上所述“储能”项目在运营过程中均可以产生可观的现金流，因此可作为资产进行汇集，这是未来进行资产证券化改造的基础。

“储能”项目的资产证券化改造、定价与实践

将“储能”项目作为生息资产进行资产证券化改造，核心在于将其未来可预测的现金流转化为可交易的证券。

资产证券化改造路径

“储能”资产证券化（ABS）的核心是将具有未来现金流的资产汇集，以特殊目的载体（SPV）为渠道，经由 SPV 发行标准化证券实现募集资金，简化的主体运作流程可参考图 1。

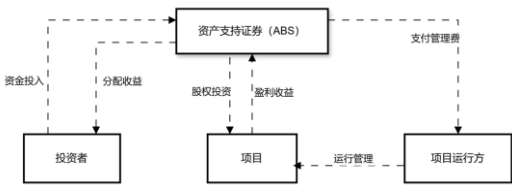


图 1 ABS 项目运行投资流程图

公募 C-REITs

自 2021 年 5 月 17 日中国首批 5 只基础设施公募 REITs 项目获沪深两市交易所审核通过以来，中国公募基金 REITs(也叫做 C-REITs^[30])主要针对商业地产、产业园区项目延伸至基础设施资产，包括高速公路、水电气热等市政设施，至 2025 年已执行的 C-REITs 如表 4 所示已延伸至光伏、清洁能源等能源项目及云计算等科技项目。钢铁厂的“储能”设施的运营与回报非常类似，特别是其作为能源基础设施的属性，非常符合 REITs 的底层资产要求。因此利用 REITs 能够盘活存量资产，提高流动性，并降低融资成本。

表4 2025年上海证券交易所REITs项目状态统计表^[30]

编号	公募REITs名称	申报类型	管理人	受理日期
1	中金唯品会奥特莱斯封闭式基础设施证券投资基金	首次 发售	中金基金	2025-0 5-09
2	中航京能光伏封闭式基础设施证券投资基金	扩募 发售	中航基金	2024-0 4-01
3	华夏中核清洁能源封闭式基础设施证券投资基金	首次 发售	华夏基金	2025-0 6-10
4	创金合信电子城产业园封闭式基础设施证券投资基金	首次 发售	创金合信基金	2025-0 5-20

5	中金厦门安居保障性租赁住房封闭式基础设施证券投资基金	扩募 发售	中金基金	2025-0 5-09
6	华夏凯德商业资产封闭式基础设施证券投资基金	首次 发售	华夏基金	2025-0 4-18
7	国泰君安东久新经济产业园封闭式基础设施证券投资基金	扩募 发售	国泰君安资管 公司	2025-0 3-31

绿色 ABS

除了 C-REITs 的框架外，在具体执行中，也可以收益于中国政府大力支持绿色资产证券化等绿色金融通道。钢铁厂“储能”项目如果能够通过节能减排、提高能源效率、促进新能源消纳等绿色属性而被认定为绿色资产，从而吸引绿色资本，则可以享受更低的融资成本和更广泛的投资者基础。

ABS 定价机制

ABS 的定价核心是基于底层资产的自由现金流折现（Discounted Cash Flow，DCF）模型^[30]。对于“储能”项目，其现金流来源多元且复杂，需要精细化测算。

收益流的量化与预测

“储能”项目的收益流统计如表 5 所示，这些收益流的预测需要基于历史数据、市场趋势、政策变化以及钢铁厂的生产计划和能源管理能力。例如，电力销售收益需考虑分时电价、现货市场价格波动和辅助服务市场规则。

表5 “储能”项目的收益统计表

分 类	收益类型	具体类型
内 部 销 售 外 部 销 售	节能收益	通过优化能源调度和利用，减少外购能源（电力、天然气、煤炭）的成本节约。例如，储能电池的峰谷价差套利，以及余热回收替代燃料的成本节约 ^[30]
	副产煤气销 售	将过剩的焦炉煤气、高炉煤气出售给外部工业用户或发电厂 ^[错误!未定义书签。]
	电力销售	通过余热发电（如 CDQ、HRSG、ORC）和储能电池放电，向电网出售电力 ^[30,30]
市 场 服 务	电力市场辅 助服务收益	储能电池和虚拟电厂参与调峰、调频、备用等辅助服务市场获得的补偿 ^[错误!未定义书签。]
碳 交 易	碳信用/抵消 收益	通过节能减排产生的碳配额或核证自愿减排量（CCER）可在碳市场交易变现；中国全国碳排放交易体系已覆盖钢铁行业 ^[30]
补 贴	政府补贴与 激励	绿色项目可能获得的各类政府补贴、税收优惠等 ^[30]

结合能源期货与售电的定价优化

将煤气柜内的煤气和蓄电池内的电能作为能量期货与售电相结合，能够进一步优化 ABS 的定价，详见表 6。

表6 基于能源期货与售电结合的定价优化策略

收益模式类 型	具体内容说明
电力期货与 现货市场联动	构建多层次电力市场（含省间和省 / 区域现货市场，如日前、日内、实时市场） ^[30] ；储能电池可独立参与中长期和现货市场，低价电充电、高价电放电实现峰谷套利 ^[30] ；独立储能向电网送电，充电电量免征输配电价和政府性基金及附加 ^[30] ；电力期货研发上市为钢铁厂对冲电价波动风险、稳定电力销售收入、提升 ABS 现金流可预测性 ^[30] 。
煤气期货潜 力	2022 年 9 月 22 日，上海环境能源交易所、上海期货交易所和长三角氢能研究院联合发布中国氢价指数体系首批“长三角氢价格指数”可以未来作为指导副产煤气期货市场的建立的依据 ^[30] ；焦炉煤气含较高氢气，未来副产煤气标准化并期货交易有潜力。
虚 拟 电 厂 （VPP）模式	钢铁厂“储能”资产可聚合为虚拟电厂，作为可控实体参与电力市场，提供电能量和辅助服务 ^[错误!未定义书签。] ；收益模式涵盖参与调峰 / 调频辅助服务市场、需求侧响应市场，以及绿色证书交易、绿色电力交易和碳排放交易 ^[30] 。

由表 6 可知在 ABS 定价中，通过能源期货对冲价格风险，可以降低现金流预测的不确定性，从而降低折现率，提高 ABS 的估值。同时，通过参与电力现货和辅助服务市场，以及未来可能的煤

气期货市场，能够增加收益的灵活性和多样性，进一步增强 ABS 的吸引力。综上，通过多元市场参与最大化资产收益，为 ABS 提供更丰富现金流来源

“储能”项目资产证券化与绿色融资的实践结合

中国已建立全面的绿色金融政策框架，涵盖绿色贷款、绿色债券、绿色股权和绿色保险产品等多种金融工具。这些政策为钢铁厂“储能”项目的绿色资产证券化提供了坚实的基础和激励。钢铁厂“储能”项目借绿色认证、碳交易及市场实例，撬动绿色资本并增厚收益，支撑资产证券化落地。

表7 绿色资产认定与碳市场对“储能”项目资产证券化的支撑

核心类别	核心逻辑	对应实践案例
绿色标签与 资本吸引	绿色项目认定 回收副产煤气 / 余热、促进新 能源消纳的“储能”项目符合标准	1. 可再生能源发电 ABS：中节能嘉实 2 号绿色资产支持专项计划 ^[30] （以绿电收入为基础，获 AAA 评级） 2. 商业地产证券化：CMBS/CMBN/ 类 REITs ^[30] （绿色 ABS 核心基础资产，替代补贴款） 3. 能源保供项目：2021 年 国家能源集团 - 工银瑞投 - 能源保供 1 期资产支持专项计划 ^[30] （能源保供类绿色项目）
	吸引绿色资本 绿色 ABS 获 ESG 投资青 睐，降低融资成本、提升企业 ESG 评级	上述案例均通过绿色标签吸引 ESG 资本 ^[30,30] ，如“中节能嘉实 2 号”因绿色属性获 AAA 评级及低融资成本） 错误!未定义书签。
碳市场整合 与收益增厚	碳资产证券化 减排量转化为碳配额 / CCER 交易，提前锁定收益、提高资本周 转率	多能互补能源站项目（合同收入 + 碳减排量证券化 ^[30] ，实现“滚动融资”，直接交易碳资产）
	收益增厚 碳汇收益可增强 ABS 现金流 稳定性	贵安云谷多能互补分布式能源中心每年节省标煤 2270 吨/年，减少 CO2 排放 6243 吨/年，每年可获得碳汇收益约 18.7 万元，展示了减排量就是经济收益的环保价值 ^[30] 。

表 7 中这些案例表明，中国绿色金融市场对能源基础设施和具有环境效益的项目具有强烈的支持意愿和成熟的运作经验。因此，钢铁厂“储能”项目作为典型的工业能源基础设施，且具有显著的绿色属性，完全具备进行绿色资产证券化的条件。

结论与展望

钢铁厂“储能”项目的绿色资产证券化，是推动钢铁行业绿色低碳转型、实现“双碳”目标的重要创新路径。通过将煤气柜、蓄热器、储能电池等能源调节资产从成本中心转变为价值创造的生息资产，钢铁企业能够有效盘活存量资产，降低融资成本，并增强其在能源市场中的竞争力。

本文分析了“储能”项目多元化的收益来源，包括内部节能、外部能源销售（煤气、电力）、电力市场辅助服务以及碳信用等。同时，通过参与电力现货市场和未来可能的能源期货市场，钢铁企业能够对冲价格风险，优化收益，进一步提升 ABS 的吸引力。中国健全的绿色金融政策框架和丰富的绿色融资实践案例，为“储能”项目的绿色资产证券化提供了有利的政策环境和市场经验。

展望未来，为进一步推动钢铁厂“储能”项目的绿色资产证券化，建议：

完善数据基础设施：钢铁企业应投资先进的能源流监测和数据采集系统，确保实时、高质量的数据可用于精确的收益预测和 M&V。

深化市场参与机制：鼓励钢铁企业积极参与电力现货市场、辅助服务市场和虚拟电厂建设，探索更多元化的收益模式。

推动能源期货发展：监管机构可进一步研究和推动工业副产煤气（特别是高纯度氢气）的人工智能生产调配^[30,30]以及产品的标准化和期货交易，为钢铁企业提供更完善的风险管理工具。

创新绿色金融产品：金融机构可与钢铁企业合作，开发更多符合“储能”项目特点的绿色金融产品，如基于 EMC 合同收益权的绿色 ABS，或将碳资产、碳信用与能源资产深度融合的创新证券化产品，例如气候债券^[30]，绿色债券^[30]，绿色 REITs^[30]。

项目类别扩展：经过政府可出台更具体的工业能源资产证券化指导方针，明确绿色认定标准和激励措施^[30,30]，降低交易成本，提高市场透明度，未来可以被应用在更广阔的高耗能高投资长周期的项目，例如固废处理项目^[30,30]、服务于储能项目的公辅项目^[30,30]和其他源网荷储环节^[30,30]，以及数据中心项目^[30,30]。

通过上述举措,钢铁厂“储能”项目有望成为钢铁企业获得绿色金融支持的支点,是实现实体经济低碳化转型的重要载体,为中国乃至全球钢铁行业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 世界钢铁协会.世界钢铁统计年鉴[OL].2024.
2025-03-10.<https://worldsteel.org/steeltopics/statistics/steel-statistical-yearbook/>.
- [2] 陈琛,倪书权,徐继法,等.转炉烟气余热、化学能回收及超低排放技术综述与展望[C]//中国金属学会.第十四届中国钢铁年会论文集—12.冶金环保与资源利用.中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,;2023:87-93.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.055129.
- [3] 冶金自动化研究设计院,北京科技大学.钢铁企业煤气动态仿真系统:200710178960.7[P].2010-08-25.
- [4] 陈琛.通过转炉灰粒径分析指导和评价目前主流一次除尘工艺[C]//中国金属学会.2022 年钢铁工业绿色低碳发展论坛暨全国冶金能源环保生产技术研讨会论文集.中冶京诚工程技术有限公司环保与暖通工程技术所,;2022:174-177.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.089491.
- [5] “十二五”, 唱好钢铁循环经济产业链的“重头戏”-物产中大国际贸易集团, accessed July 13, 2025, <https://www.zmi.cn/news/detail/339.html>
- [6] 2022 年中国工业副产氢行业概览, https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202211021579823201_1.pdf
- [7] 陈琛,贺龙龙,杨海新,等.大型高炉余压发电湿改干技术增益炼铁绿色低碳转型的研究[C]//中国金属学会,中国金属学会青年工作委员会.第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一).中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司;邯郸钢铁集团有限责任公司;邯郸钢铁集团设备制造安装有限公司,;2024:132-137.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.025157.
- [8] 张志祥,转炉烟气(800-200℃)余热回收技术的开发与应用.北京市,中冶京诚工程技术有限公司,2023-11-21.
- [9] 转炉烟气宽温域(800℃到 200℃)干式余热回收技术的开发与应用[J].中国冶金,2025,35(05):164.
- [10] [30] 闫天一.钢铁企业蒸汽系统(火用)优化及余热回收利用的研究[D].东北大学,2022.DOI:10.27007/d.cnki.gdbeu.2022.001951.
- [11] 陈琛,倪书权,郝景章,等.冶金企业人工智能的发展与应用综述[C]//中国金属学会.第十四届中国钢铁年会论文集—14.冶金自动化与智能化.五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,;2023:120-126.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.056558.
- [12] Wen K, Zhou C, Wang X. The analysis of waste heat recovery in steel enterprises' data centers based on the Co-ah cycle. PLoS One. 2025;20(5):e0323455. Published 2025 May 29. doi:10.1371/journal.pone.0323455
- [13] Maolin, Dong; Tao, Zhou. Total Waste Heat Recovery Device for Off-gas from EAF, p. 764-770. In: 48th Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy Seminar, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-5300, DOI 10.5151/1982-9345-30860
- [14] Schliephake H , Born C , Granderath R ,et al.Heat recovery for the EAF of Georgsmarienhütte, Germany[J].Iron and Steel Technology, 2011, 8(5):330-335.
- [15] Chen C L, Li P Y, Le S N T. Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery in a Refinery[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(12): 3262-3275. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b03381.
- [16] CARSTEN BORN,RALF GRANDERATH.电炉余热回收——第四孔烟气至 200℃[C]//中国金属学会特钢分会特钢冶炼学术委员会全国特钢年会.中国金属学会, 2014.
- [17] Kumar, N. P., Wanve, S., Maheshwari, A., & Kumer, M. (2018). Kalina Cycle (waste heat recovery applications)-A Review. Int. Jor. Of Advanced in Man., Tech. and Eng. Sci., 8, 1369-1376.
- [18] 王雪原,陈琛,李加旺,等.焦化生产余热回收领域的新技术 [C]// 中国金属学会. 2025 年全国冶金焦化流程节能减排创新技术研讨会论文集.承德监控特殊钢有限公司, 中冶京诚工程技术有限公司

限公司, 南京: [中国金属学会], 2025:37-43

[19] Dadi D, Introna V, Benedetti M. Decarbonization of Heat through Low-Temperature Waste Heat Recovery: Proposal of a Tool for the Preliminary Evaluation of Technologies in the Industrial Sector. Sustainability. 2022; 14(19):12626. <https://doi.org/10.3390/su141912626>

[20] Spirax Sarco, Steam Accumulators, 2025,

https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/steam-accumulators?sc_lang=en-GB

[21] Sun W, Wang Q, Zhou Y, et al. Material and Energy Flows of the Iron and Steel Industry: Status Quo, Challenges and Perspectives[J]. Applied Energy, 2020, 268:114946. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.114946.

[22] Wen K, Zhou C, Wang X. The analysis of waste heat recovery in steel enterprises' data centers based on the Co-ah cycle. PLoS One. 2025;20(5):e0323455. Published 2025 May 29. doi:10.1371/journal.pone.0323455

[23] Yan J, Zhao Y, Hao Q, Ji Y, Zhang M, Ma H, Meng N. Energy Scheduling Strategy for the Gas - Steam - Power System in Steel Enterprises Under the Influence of Time-Of-Use Tariff. Energies. 2025; 18(3):721. <https://doi.org/10.3390/en18030721>

[24] 林博. 储能技术在电力系统中的应用价值和运营模式[J]. 储能科学与技术, 2021.

[25] 国家能源局. 电力现货市场基本规则, 2022, http://www.nea.gov.cn/1310679693_16693653939121n.pdf

[26] 蔡建春, 刘俏, 张峥, 等. 中国 REITs 市场建设 [M]. 中信出版集团股份有限公司, 2020:12.

[27] 基础设施 REITs 介绍, 上海证券交易所, 2025,

http://www.sse.com.cn/reits/home/c/c_20210129_5313206.shtml

[28] 郭雪萌, 马佳欣. REITs 交易结构、估值与绩效: 文献综述[J]. 财会通讯, 2023, (06):24-29+89. DOI:10.16144/j.cnki.issn1002-8072.2023.06.002.

[29] 樊三彩. 三问新型储能[N]. 中国冶金

报, 2024-05-08(002). DOI:10.28153/n.cnki.ncyjb.2024.000997.

[30] Dal Magro F, Savino S, Meneghetti A, et al. Coupling waste heat extraction by phase change materials with superheated steam generation in the steel industry[J]. Energy, 2017, 137(oct.15):1107-1118. DOI:10.1016/j.energy.2017.04.051.

[31] 陈昌铭, 章天晗, 沈子康, 等. 新型电力系统的发用电侧共享储能商业模式研究综述[J/OL]. 电力系统自动化, 1-23[2025-07-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250224.2001.004.html>.

[32] 韩启. 碳配额交易让降碳“有价可依” [N]. 天津日报, 2025-07-10(007). DOI:10.28789/n.cnki.ntjrb.2025.006783.

[33] 刘尚希. 优化绿色低碳转型财税政策为实现“双碳”目标提供重要支撑[J]. 新能源科技, 2021, (12):35-36.

[34] 电力现货市场基本规则 - 国家发展改革委办公厅, 国家能源局, 2022, https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202206/t20220607_1326854.html

[35] 张伟. 碳达峰背景下 G 储能公司发展战略研究[D]. 东南大学, 2022. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2022.004456.

[36] 关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知(发改办运行(2022)475号), 2022, https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202206/t20220607_1326854.html

[37] 关于政协十四届全国委员会第二次会议第 02820 号(工交邮电类 404 号)提案答复的函, 2024, https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jianyitianfuwen/qgzxwytawgk/202412/t20241227_1395221.html

[38] 黄宇翔, 黄蔚亮, 牛振勇, 等. 虚拟电厂市场机制与盈利模式及欧洲运行实例分析[J]. 电力系统自动化, 2025(9). 国石油和化学工业联合会, 山东隆众信息技术有限公司. 中国化工产业链图解[M]. 化学工业出版社: 202403. 213.

[39] 陈丹, 赵敏. 发展虚拟电厂技术 促进新能源优化配置与消纳[J]. 中国电力企业管理, 2021(4).

[40] 中国节能成功发行 10 亿元绿色资产证券化产品, accessed July 13, 2025,

<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c8965394/content.html>

- [41] 陈浩.三峡新能源集团绿色资产证券化动因及效应分析[D].江西财经大学,2024.DOI:10.27175/d.cnki.gjxcu.2024.001224.
- [42] 祝嫣然.能源保供多措并举成效初显央企加速布局清洁能源[N].第一财经日报,2021-12-03(A02).DOI:10.28207/n.cnki.ndycj.2021.005423.
- [43] 李玉红.企业 ESG 表现对财务绩效的影响研究[J].商业经济,2025,(08):172-174+184.DOI:10.19905/j.cnki.syjj1982.2025.08.039.
- [44] 杨红雄,张浩博,门峰,等.ESG 表现对企业新质生产力发展的影响研究[J/OL].天津理工大学学报,1-11[2025-07-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20250723.1424.034.html>.
- [45] 冀洋,闫明喆.碳信托为碳市场发展注入新动能[J].中国金融,2025,(07):38-39.
- [46] 绿色金融改革创新案例汇编:案例九绿色资产证券化解决环保企业融资难题,2021-03-27,<http://www.greenfinance.org.cn/displaynews.php?id=3224>
- [47] CHEN C. Application and analysis of deep learning in dynamic modeling for Oxygen Safety Control in BOF Metallurgy[J].Journal of Iron and Steel Research,2023,51(11):91-96.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20230151
- [48] 陈琛,李加旺,史光.综述深度学习技术在冶金安全生产节能领域的应用[C]//中国金属学会,中国金属学会青年工作委员会.第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二).中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,2024:367-372.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.023557.
- [49] 钱立华,方琦,鲁政委.中国绿色债券市场:概况、机遇与对策[J].金融纵横,2020,(07):28-33.
- [50] 郭净,李静.挪威气候金融的研究与实践:来自国际气候与环境研究中心——奥斯陆的经验启示[J].金融理论探索,2020,(02):43-53.DOI:10.16620/j.cnki.jrjy.2020.02.005.
- [51] 王力,宋林书.从绿色公募 REITs 看优质绿色信贷项目识别[J].银行家,2025,(04):104-109.
- [52] 秦阳.W 固废公司供应链融资方案设计研究[D].湘潭大学,2024.
- [53] 吴凤佼.固废处理行业 PPP/BOT 项目的最优资本结构选择研究[D].上海交通大学,2018.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2018.004893.
- [54] 陈琛,倪书权,李加旺,等.冶金固废提锌技术的发展现状与展望[J].绿色矿冶,2024,40(05):15-24.DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.003.
- [55] 赵誉媛.碳中和背景下固废处理企业融资策略研究——以中国天楹为例[J].投资与创业,2022,33(08):20-22.
- [56] 李蕾,姚亚楠.资本扎堆具身智能“杭州六小龙”融资不断[N].每日经济新闻,2025-07-11(004).DOI:10.28571/n.cnki.nmrjj.2025.001928.
- [57] 陈琛.电除尘凝聚预处理技术对提钒转炉烟气除尘超低排放的影响[J].中国有色冶金,2022,51(06):91-96.DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.06.013.
- [58] 陈琛,李加旺,潘宏涛等.转炉煤气蓄热技术应用于炼钢绿色转型的技术分析[C]//中国金属学会.2024 年全国炼钢—连铸生产技术会论文集.中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,2024:343-347.
- [59] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):28-51.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211016.
- [60] 樊贵先,程志,彭超,等.大型钢铁企业生产系统存储双活的构建与实践[C]//中国金属学会.第十四届中国钢铁年会论文集—14.冶金自动化与智能化.武汉钢铁有限公司;宝信软件(武汉)有限公司,2023:33-38.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.056546.
- [61] 龚鑫.钢铁制造大数据中心建设方案研究与应用[J].冶金管理,2021,(21):88-89.

综述大型高炉余压 TRT 发电湿改干节能技术 经济分析与投融资路径优化

王雪原¹, 陈琛^{*2}, 赵雷³, 庞显鹤³, 郑恒², 郝政浩², 倪书权², 张齐璐², 张永强², 李冉², 席金杨², 康潍羽², 张红磊², 李加旺², 史光²

(1. 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067399; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176; 3. 邯郸钢铁集团有限责任公司, 河北 邯郸 056015)

摘要: 本文以工业节能技术经济评价为核心, 对比分析了改造建设大型高炉余压 TRT 湿改干节能发电项目采用对外售电与对内售电两种模式的投资回收期差异, 并结合净现值 (NPV)、内部收益率 (IRR) 和投资回收期 (IPP) 探讨了高炉煤气 TRT 余压发电的建设投资回报。研究表明, 对外售电模式的投资回收期显著长于对内售电模式, 但两种模式均具有正的 NPV 和高于行业基准收益率的 IRR, 显示出良好的经济可行性。进一步分析了资产证券化 (ABS) 融资路径, 指出通过将未来稳定的现金流证券化, 可以显著缩短资金占用周期, 优化资金使用效率。结合绿色金融政策框架, 提出了基于电费收益权的 ABS 融资方案, 为钢铁企业绿色低碳转型提供了创新的金融支持路径。

关键词: 节能技术; 经济分析; 工业经济; 绿色资产证券化; 绿色金融; 售电模式对比; 碳汇; ESG; 项目评价; 低碳转型融资; 投融资路径

中图分类号: F832.5; F830.59; F407.3; X757; X321

Technical and Economic Analysis of Wet-to-Dry Conversion for TRT Power Generation in Large Blast Furnaces and Optimization of Financing Paths

Abstract: This paper focuses on the economic evaluation of industrial energy saving technology, comparing the investment payback periods of two modes for the construction and transformation of large blast furnace residual pressure TRT (Top Gas Recovery Turbine) wet-to-dry every saving and power generation projects: selling electricity to external markets and selling electricity internally within the company. It also explores the investment returns of blast furnace gas TRT power generation using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Investment Payback Period (IPP). The results show that the payback period for the external sales mode is significantly longer than that of the internal sales mode. However, both modes have positive NPV and IRR values higher than the industry benchmark, indicating good economic feasibility. The paper further analyzes the Asset-Backed Securitization (ABS) financing path, pointing out that securitizing future stable cash flows can significantly shorten the capital occupation cycle and optimize capital utilization efficiency. Combining the framework of green financial policies, the paper proposes an ABS financing plan based on electricity revenue rights, providing an innovative financial support path for the green and low-carbon transformation of steel enterprises.

Key words: Energy saving tech; Economic analysis; Industrial economy; Green Asset-backed securitization; Green finance; Power sales mode comparison; CCER; ESG; Project evaluation; Low-carbon transition financing; Financing path optimization

引言

钢铁工业能耗占全国总量 14%, 碳排放占比 15.9%, 面临严峻的环保与能源转型压力。高炉炼铁作为能耗最大的工序 (占总能耗 70%以上), 其副产品高炉煤气如同作为转炉负能炼钢为基础的转炉煤气的重要贡献^[30], 其除尘净化与能量回收对实现绿色低碳炼铁至关重要。高炉煤气余压透平发电 (TRT) 技术可将煤气压力势能转化为电能^[30] (吨铁约 30kWh), 是核心节能技术。传统湿式

TRT 能耗高且产生废水，而干式 TRT（与干式布袋除尘 BFS 集成应用）具有更高除尘效率、能源回收率和环保性（无废水），适应水资源匮乏与高环保标准地区。

然而湿改干能提升发电量，增强系统安全性，但涉及新增干法布袋除尘器、喷碱设施，改造 TRT 主机、控制系统等，初期投资巨大。湿改干项目虽具显著经济与环境效益，其重资产属性制约了推广。因此，亟需创新经济分析方法与融资模式覆盖建设投资，引入市场投资者。传统融资难以满足需求，探索新型融资工具、盘活资产、拓宽融资渠道成为关键。因此本论文将着重论述建立湿改干项目经济模型，分析发电电价覆盖总投资（含非发电设施）的条件，评估项目 NPV/IRR/IPP；并基于经济分析和投资方案设计基于电费收益权的融资方案，提出引入市场资本推动项目实施的可行性路径。

大型高炉余压发电湿改干项目技术和经济分析

湿改干技术特点和环境增益分析

干式 TRT 对比湿式 TRT 系统的环境效益

在钢铁工业中，TRT 设备是重要的压力势能回收设备^[30]。现代钢铁企业炼铁后副产物高炉煤气均优先通过 TRT 回收压力势能。干式 TRT 系统几乎不耗水尤其适合水资源短缺的地区，且由于没有了除尘用的循环水，经过 TRT 的煤气不夹带机械水^[30]，后序的煤气排水问题大大改善。如表 1 所示干式 TRT 在环保方面具有优势^[30]。

表1 干湿式TRT系统环境效益对比表

对比项	干式 TRT	湿式 TRT
煤气处理效果	≤5mg/Nm3(滤袋过滤法 ^[30])	≤10mg/Nm3（环缝洗涤法 ^[30,30] ）
水耗	较低，因为无需消耗水资源。	较高，需要大量水资源和废水处理，增加了能耗。
废水处理	无需废水处理，减少了环境和经济负担。	需要处理大量废水，增加了处理成本和环境风险。
综合环保效果	显著优势，无废水产生，降低环保处理成本，节约水资源 ^[30] 。	存在废水处理问题，可能增加环保成本，对环境造成压力。

综合评估,干式 TRT 对比湿式在适合于水资源匮乏和对环保要求高的地区，高炉煤气余压 TRT 湿改干项目可以在解决环境问题的前提下提高发电量^[30]，是一种对于高炉炼铁降低能耗，提高环保效益有益的项目^[30]。

干式 TRT 对比湿式 TRT 系统的发电增益分析

根据根据《钢铁企业节能设计规范》^[30,30]以及《煤气余压发电装置技术规范》^[30,30]，TRT 的主机轴功率估算公式：

$$W = G * \Delta H$$

$$G = \frac{Q}{3600} \times \frac{P_1}{P_1 - P_w} \times \gamma_N$$

$$\Delta H = C_p \times T_1 \times \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right\} / f_d$$

根据准确计算 TRT 的装机功率需要获取高炉煤气的能力和运行参数。以某大型高炉(炉容大于 3000m³) 为例，关键输入参数包括煤气量（55 万 Nm³/h）、炉顶温度（155℃）、压力（0.235MPa）TRT 的主机轴功率主要取决于高炉煤气的流量、压力、温度以及为透平机做功该煤气的热力学状态

参数 K 代入上述公式得到表格 2:

表2 干湿式TRT设备发电性能对比表				
项目	符号	单位	干式 TRT	湿式 TRT
当地大气压	P0	MPa	0.101325	0.101325
炉顶表压	P1	MPa	0.235	0.235
煤气入口表压	P1	MPa	0.225	0.205
煤气出口表压	P2	MPa	0.015	0.015
煤气入口温度	T1	℃	150	55
总煤气流量	Q	Nm³/h	550000	550000
煤气入口绝压	P1	MPa	0.326	0.306
煤气出口绝压	P2	MPa	0.116	0.116
绝热系数	K	1.365	1.365	1.365
冷凝水汽化修正	fd		1.000	1.130
工况焓降	ΔH	kJ/kg	106	88
质量流量	G	kg/s	212	213
透平发电机功率	Nw	MW	18.4	15.3

从表 2 计算得到该项目属于大型 TRT^[30,30]，其干式 TRT 的发电功率 18.4MW 是湿式 TRT 计算发电功率 15.3MW 的 120%，根据河北省发改委近年数据，工业用电（大工业类）平均电价约为 0.65-0.75 元 /kWh（含基本电费及分时电价加权平均），考虑检修停机时间一年 TRT 发电时间为 8000h，则可以计算分别得到年发电总量和年发电电价及发电价差如表 3 所示。

表3 钢铁冶金主要煤气回收技术及应用

项目	单位	干式 TRT	湿式 TRT
发电功率	MW	18.4	15.3
年运行时间	h	8000	8000
年总发电量	GWh	122.4	24.8
售电价格	元	0.65~0.75	0.65~0.75
总发电电价	万元	9568~11040	7956~9180

由表 3 可以计算 TRT 湿改干后计算发电量售电价差 1612~1860 万元。这部分电价差就是改造项目的未来现金流收益项目

TRT 系统湿改干建设投资分析估算

TRT 设施改造投资策略

TRT 系统湿改干系统能够直接产生收益的是 TRT 主机及发电机，因此改造的方案是将有限的资源优先倾向于 TRT 主体设施性能的提高。其次，TRT 湿改干系统还需要包括干式精除尘系统（BFS 系统^[30]）和其他辅助设施，这部分虽然不直接产生直接收益，但是可以辅助 TRT 完成发电任务，因

此也是必不可缺的，但是由于不直接产生收益，因此仅需满足 TRT 合理工作需求即可。

TRT 设施改造投资计算

常用的工业经济计算指标是净现值(Net Present Value, NPV)、内部收益率(Internal Rate of Return, IRR)^[30]和投资回收期(Investment Payback Period, IPP)^[30]，这两个分别代表了在整个寿命期内为投资者带来的净收益的现值（考虑资金时间价值）的绝对收益指标，以及反映项目自身的“内在获利能力”，不受外部基准收益率影响，直接体现项目的收益效率的相对收益指标。在工业项目评价中，通常需结合两者判断：若 $NPV > 0$ 且 $IRR >$ 行业基准收益率，项目才具备经济可行性^[30]。如表 3 所示为 3200m³ 高炉煤气湿改干的 NPV, IRR 和 IPP 的估算。

表4 TRT湿改干投资回报计算表

物理量	净现值(Net Present Value, NPV)	内部收益率(Internal Rate of Return, IRR)	投资回收期 (Investment Payback Period, IPP)
计算公式	$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t}$ NCF_t为第 t 年净现金流量（忽略所得税，即税前收益），i 为基准收益率，n 为项目寿命	$NPV=0 = \sum_{t=0}^n \frac{NCF_t}{(1+IRR)^t}$ 即为 $NPV=0$ 的折现率 IRR	$IPP = \frac{I}{NCF_t}$ I,为一次性投资额
对外售电模式	1. 年税前净收益 = 干湿电价差年均值 = (1612+1860)/2=1736 万元 2. 年税后净现金流量 (NCF) = 税前收益 × (1 - 所得税率) = 1736 × (1 - 25%) = 1302 万元 3. 初始现金流出 (t=0) = -9000 万元 4. 项目寿命 n=15 年，基准收益率 i=10% 5. 年金现值系数 (P/A, 10%, 15) = 7.6061 6. NPV = -9000 + 1302 × 7.6061 ≈ 903 万元	1. 试算 i=11%: NPV = -9000 + 1302 × 7.1909 ≈ -9000 + 9363 = 363 万元 2. 试算 i=12%: NPV = -9000 + 1302 × 6.8109 ≈ -9000 + 8868 = -132 万元 3. 插值法: $IRR = 11\% + 363 / (363 + 132363) \times 1\% \approx 11.73\%$	IPP = 9000 / 1302 ≈ 6.91
厂内售电模式	1. 年净现金流量 (NCF) = 干湿电价差年均值 = 1736 万元（忽略所得税，直接取税前收益） 2. 初始现金流出 (t=0) = -9000 万元（总投资） 3. 项目寿命 n=15 年，基准收益率 i=10%（行业平均值） 4. 年金现值系数 (P/A, 10%, 15) = 7.6061（查表） 5. NPV = -9000 + 1736 × 7.6061 ≈ 4204 万元	1. 试算 i=17%: 年金现值系数 (P/A, 17%, 15) = 5.3241; NPV = -9000 + 1736 × 5.3241 ≈ -9000 + 9242.64 = 242.64 万元 (>0) 2. 试算 i=18%: 年金现值系数 (P/A, 18%, 15) = 5.0916; NPV = -9000 + 1736 × 5.0916 ≈ -9000 + 8839.0 = -161 万元 (<0) 3. 插值法（取 i=17% 和 i=18%）：$IRR = 17\% + 242.64 / (242.64 + 161) \times (18\% - 17\%) \approx 17\% + 0.601\% = 17.60\%$	IPP = 9000 / 1736 ≈ 5.18

根据表 4，该湿改干项目的经过估算 $NPV > 0$ ， $IRR >$ 行业基准收益率(工程行业基准收益率为 8~10%)^[30]，因此具备投资价值。然而考虑 $IPP > 5$ 年，会长期给企业现金流压力，仍需通过融资路径优化^[30]来提高企业现金利用率降低企业现金流压力。

湿改干项目融资方案优化设计

即便经过估算 TRT 的投资回报巨大，但是考虑较长的投资回报期（ $IPP=[5.18, 6.91]$ ）较长，对于企业运转的现金流并不友好。因此，从考虑企业资金使用效率角度，应该分析采用何种融资方案以降低投资资金占用时间是非常必要的。而基于资产支持证券（Asset Backed Securitization, ABS）的融资^[30, 30]（简称 ABS 融资）并非依赖投资回收期的长短，通过将“投资回收期内及后续的稳定现金流”证券化，实现资金提前回笼正好满足了企业的降低资金占用时间的需求。对于对外售电（长回收期），ABS 融资可以解决资金占用问题；对于对内售电（短回收期），ABS 融资提升资金周转效率。结合 NPV 的正向验证和 IRR 的收益保障，ABS 融资成为衔接项目投资回报与资本市场的高效工具^[30, 30]。

从投资回报年限看 ABS 融资的意义

缩短实际资金占用周期

对外售电模式下，虽 IRR=11.73%（高于基准收益率 10%）、NPV=903 万元（可行），但 6.91 年的回收期意味着资金需占用近 7 年。通过 ABS 将未来 6.91 年的售电收益权打包发行，可提前回收 9000 万元初始投资，实际资金占用周期从 6.91 年缩短至融资发行周期（通常 3-6 个月），避免资金长期沉淀。

对内售电模式下，5.18 年回收期虽相较 6.91 年短，但 ABS 仍可将“未来 5 年 + 的现金流”提前变现，结合 NPV=4204 万元（高正值），提前回收的资金可再投入其他 IRR>10% 的项目，实现资金复利增值。

匹配项目寿命与资金需求

TRT 项目寿命 n=15 年，远长于投资回收期（5.18-6.91 年）。ABS 可将回收期后的剩余现金流（如对外售电第 7-15 年、对内售电第 6-15 年）提前折现，按基准收益率 i=10% 计算，这部分现金流的现值已包含在 NPV 中（对外 903 万元、对内 4204 万元）。通过 ABS 融资提前兑现这部分价值，可避免“远期现金流折现损失”^[30]，优化 NPV 实现效率，提升资金时间价值利用效率。

以 IRR 为支撑增强融资吸引力

对外售电 IRR=11.73%、对内售电 IRR=17.60%，均高于工业项目基准收益率（8%-10%），证明项目具备稳定收益能力。ABS 以该 IRR 对应的现金流为底层资产，易获得投资者认可，可降低发行利率^[30]（通常较传统贷款低 1-2 个百分点）实现降低融资成本，进一步优化项目整体收益。

平衡投资回收期与风险

投资回收期仅反映“成本回收节点”^[30]，未覆盖回收期内的市场风险（如电价波动）。ABS 通过“资产隔离”^[30]将回收期内的风险分散给投资者，企业可锁定回收金额（如按 NPV 计算的现值），即使实际回收期因波动延长，分散周期波动影响，也不影响已收回的初始投资，增强财务安全性。

绿色资产支持证券融资路径与结构设计

绿色融资^[30]是国际上一种先进的并设立为提高环保项目和碳中和项目一种高效融资手段^[30]。绿色资产支持证券（ABS）是中国政府大力支持的绿色金融工具^[30,30]。TRT 湿改干项目通过节能减排、提高能源效率等绿色属性，可被认定为绿色资产，从而吸引绿色资本，享受更低的融资成本和更广泛的投资者基础。绿色 ABS 的发行流程与普通 ABS 类似，但要求募集资金明确用于绿色资产和/或项目。

绿色 ABS 的定价核心是基于底层资产未来现金流的折现。对于湿改干项目，其收益流来源多元且复杂，需要精细化测算。主要收益来源包括：

表5 绿色ABS收益分类分析对比表

收益类型	具体说明
内部节能收益	TRT 发电可以减少外购能源（电力、天然气、煤炭）的成本节约 ^[30] ； 基于 TRT 的 BPRT 技术可以优化能源调度，降低能源管理费用。
外部能源销售收入	TRT 发电并网后向电网出售电力
电力市场辅助服务收益	TRT 发电的灵活性可参与调峰、调频等辅助服务市场获得的补偿 ^[30]

碳信用 / 抵消收益

通过节能减排产生的碳配额或核证自愿减排量 (CCER) 可在碳市场交易变现^[30]

吸引 ESG 资本

项目被认定为绿色资产可以帮助企业提高 ESG 评级从而降低企业整体融资成本^[30,30]

结论与展望

本研究深入探讨了大型高炉余压发电湿改干项目的经济可行性与创新融资路径。研究表明,湿改干技术在提高 TRT 发电量 (~20%)、降低能耗、减少废水排放和提升环保效益方面具有显著优势。通过将干式布袋除尘系统和喷碱塔系统等非发电设施的投资视为 TRT 发电项目实现其经济效益的必要耗能成本,并将其纳入总投资考量,可以构建全面的项目经济模型。此模型能够评估在真实发电电价(包括峰谷价差套利和辅助服务收益)下覆盖项目建设投资的条件,并计算出具有吸引力的内部收益率(IRR),从而证明项目的经济可行性。在融资方面,将 TRT 湿改干项目未来的电费收益权进行证券化,是盘活重资产、引入市场投资者的有效途径。通过发行绿色资产支持证券(ABS)项目能够利用其显著的绿色属性吸引专注于 ESG 投资的绿色资本,享受更低的融资成本。

随着绿色金融政策的不断完善和市场对 ESG 投资的日益关注以及人工智能技术在钢铁企业工业流程中的大规模应用^[30,30,30,30],湿改干项目有望成为钢铁行业绿色转型的重要范例,未来应进一步优化技术,拓展融资渠道,推动未来应用在钢铁企业大规模高耗电的固废处理领域^[30,30,30,30]以及数据中心运维中,助力行业实现“双碳”目标。

参考文献

- [1]陈琛,倪书权,徐继法,等.转炉烟气余热、化学能回收及超低排放技术综述与展望[C]//第十四届中国钢铁年会论文集—12.冶金环保与资源利用.冶金工业出版社,2023:7. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.055129.
- [2]Albayrak F İ, Ergün A, Yıldız G. Performance, exergy, and environmental analysis of blast furnace top pressure turbine in an iron-steel factory [J]. Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN), 2023, 11(4): 189 – 202.
- [3]党建明,贾国栋,李楠.高炉 TRT 机组长周期稳定运行实践[J].冶金动力,2025,(03):29-31.DOI:10.13589/j.cnki.yjdl.2025.03.005.
- [4]李俊星.TRt 湿式改干式的运行实践[J].冶金动力,2021,(04):36-38.DOI:10.13589/j.cnki.yjdl.2021.04.012.
- [5]钱卫强,苏威,马作仿,等.国产干式 TRT 在 5000 m³ 高炉上的应用[J].冶金动力,2018,(07):36-38.DOI:10.13589/j.cnki.yjdl.2018.07.013.
- [6]陈琛.通过转炉灰粒径分析指导和评价目前主流一次除尘工艺[C]//中国金属学会.2022 年钢铁工业绿色低碳发展论坛暨全国冶金能源环保生产技术研发研讨会论文集.中冶京诚工程技术有限公司环保与暖通工程技术所,;2022:174-177.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.089491.
- [7]刘永民,李金亮.合同能源管理实施高炉煤气湿法净化系统改造的前景分析[J].河南冶金,2015,23(03):53-56.
- [8]赵英群.洗涤塔净化系统的改进[J].冶金动力,2013,(10):18-20.DOI:10.13589/j.cnki.yjdl.2013.10.006.
- [9]陈琛,李永军,李加旺,等.高炉荒煤气净化与料罐均压煤气净化湿改干耦合系统研究[C]//中国金属学会,中国金属学会青年工作委员会.第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二).中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,;2024:239-246.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.023527.
- [10]王明磊,高炉煤气湿法改干法除尘及干式 TRT 技术研究及应用.山东省,济钢集团国际工程技术有限公司,2012-11-28.
- [11]「蒋钧,攀钢高炉煤气全干式除尘及 TRT 系统工艺及装备集成应用研究.四川省,攀钢集团冶金

工程技术有限公司,2011-05-19.

[12] 《钢铁企业节能设计规范》编制过程和主要内容[C]//中国金属学会,河北省冶金学会.2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会文集.中冶京诚工程技术有限公司"规范"编写小组,2011:584-588.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢铁企业节能设计规范:GB 50632-2010[S].中国计划出版社,2010.

[14] 本刊通讯员.《煤气余压发电装置技术规范》国家标准发布[J].煤气与热力,2010,30(08):30.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.煤气余压发电装置技术规范:GB 50584-2010[S].中国计划出版社,2010.

[16] 秦军强,郝鹏,亓海燕,等.15MW 干式 TRT 发电机组运行问题简析[C]//中国金属学会.2006 中国金属学会青年学术年会论文集.山东莱钢热电厂,2006:609-611.

[17] 曹勇杰,陶有志,韩渝京.国内首座 5500m³ 高炉全干式 TRT 工艺技术及生产实践[C]//中国金属学会,中国金属学会炼铁分会.2010 年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会文集(下).北京首钢国际工程技术有限公司,2009:409-411+414.

[18] 陈琛,贺龙龙,杨海新,等.大型高炉余压发电湿改干技术增益炼铁绿色低碳转型的研究[C]//中国金属学会,中国金属学会青年工作委员会.第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一).中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司;邯郸钢铁集团有限责任公司;邯郸钢铁集团设备制造安装有限公司,2024:132-137.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.025157.

[19] Ardyn Sari Sinaga, Maya Macia Sari, Anggi Andini Hutahut, et al. Comparison of capital budgeting methods: NPV, IRR, PAYBACK PERIOD [J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2023, 19(2): 1078 – 1081.

[20] Liu M. Research on investment project evaluation: Comparative analysis based on NPV and IRR [J]. Highlights in Business, Economics and Management, 2024, 24: 1133 – 1138.

[21] 叶秋,陈海斌.电力企业财务管理中的资金管理创新举措探究[J].财经界,2025,(07):93-95.DOI:10.19887/j.cnki.cn11-4098/f.2025.07.034.

[22] 赵彦名,钟鑫亮,张俪璇,等.新建洞室储气库压缩空气储能系统平准化成本分析[J/OL].水力发电,1-6[2025-07-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20250619.1410.004.html>.

[23] 陈晓晗,刘喜华.绿色信贷如何影响重污染企业碳减排?——基于环境信息披露与债务融资规模的中介效应[J].合肥工业大学学报(社会科学版),2025,39(04):111-124.

[24] 王佳佳.首钢绿能“公募+ABS”融资模式研究[D].中南财经政法大学,2023.DOI:10.27660/d.cnki.gzczu.2023.000835.

[25] 牛灵芝.民营高速公路收费权 ABS 融资研究——华金证券-惠莞高速资产支持专项计划项目为例[J].交通财会,2023,(02):49-54.

[26] 陈霞,朱新兰,王兮泽.企业融资策略与商业思维[M].人民邮电出版社:202309.226.

[27] 穆瑶.房地产企业供应链金融 ABS 融资模式及效应研究[D].青岛理工大学,2023.DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2023.000374.

[28] 杨松.绿色金融推动能源革命低碳发展的作用机理、现实挑战与对策建议[J].改革与战略,2025,41(02):139-142.DOI:10.16331/j.cnki.issn1002-736X.2025.02.021.

[29] 周凯,刘玉娟,吕雯一.无增信类应收账款 ABS 产品分析与投资建议——以建筑类央企为视角[J].债券,2025,(06):86-90.

[30] 金耀杰,常广隆,徐江,等.计及成本回收与灵活性调节的双差异化容量补偿方法[J/OL].南方电网技术,1-8[2025-07-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241209.1442.006.html>.

[31] 王鹏.关于资产证券化的运行机理与经济效应的研究[J].金融客,2025,(04):34-36.

- [32] 李嘉伟,杜泓宇.“双碳”政策下绿色融资对企业战略转型的促进作用[J].国际商务财会,2025,(12):51-53+65.
- [33] Wang X, Gao C. Does green finance policy help to improve carbon reduction welfare performance? Evidence from China [J]. Energy Economics, 2024, 132: 107452.
- [34] 郑国英,章晓洪.完善气候债券市场化发行机制[J].中国金融,2025,(02):76-77.
- [35] 刘慧心,崔莹.气候债券产品创新的国内外经验借鉴[J].团结,2022,(02):42-44+47.
- [36] 陈光,蔡九菊,于庆波,等.钢铁企业物流对能耗影响的分析[J].东北大学学报,2002,(05):459-462.
- [37] 陈昌铭,章天晗,沈子康,等.新型电力系统的发用电侧共享储能商业模式研究综述[J/OL].电力系统自动化,1-23[2025-07-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250224.2001.004.html>.
- [38] 韩启.碳配额交易让降碳“有价可依”[N].天津日报,2025-07-10(007).DOI:10.28789/n.cnki.ntjrb.2025.006783.
- [39] 李玉红.企业 ESG 表现对财务绩效的影响研究[J].商业经济,2025,(08):172-174+184.DOI:10.19905/j.cnki.syjj1982.2025.08.039.
- [40] 杨红雄,张浩博,门峰,等.ESG 表现对企业新质生产力发展的影响研究[J/OL].天津理工大学学报,1-11[2025-07-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20250723.1424.034.html>.
- [41] 陈琛,倪书权,郝景章,等.冶金企业人工智能的发展与应用综述[C]//中国金属学会.第十四届中国钢铁年会论文集—14.冶金自动化与智能化.五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,2023:120-126.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.056558.
- [42] 李蕾,姚亚楠.资本扎堆具身智能“杭州六小龙”融资不断[N].每日经济新闻,2025-07-11(004).DOI:10.28571/n.cnki.nmrjj.2025.001928.
- [43] 国家发改委:推动首批数据中心基础设施 REITs 发行[J].中国设备工程,2025,(13):1.
- [44] 徐玮蔓.企业人工智能水平对绿色投资的影响[D].商务部国际贸易经济合作研究院,2025.
- [45] 陈琛,李加旺,史光.综述深度学习技术在冶金安全生产节能领域的应用[C]//中国金属学会,中国金属学会青年工作委员会.第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二).中国五矿集团中冶京诚工程技术有限公司,2024:367-372.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.023557.
- [46] 秦阳.W 固废公司供应链融资方案设计研究[D].湘潭大学,2024.
- [47] 赵誉媛.碳中和背景下固废处理企业融资策略研究——以中国天楹为例[J].投资与创业,2022,33(08):20-22.
- [48] 吴凤佼.固废处理行业 PPP/BOT 项目的最优资本结构选择研究[D].上海交通大学,2018.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2018.004893.
- [49] 陈琛,倪书权,李加旺,等.冶金固废提锌技术的发展现状与展望[J].绿色矿冶,2024,40(05):15-24.DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.003.