

Technical and Economic Barriers and Breakthrough Paths for Low-Carbon Transformation of High-Energy Consumption Industries

Muwen Xu

Guangxi Nanning Desing Engineering Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

Global climate governance has reached a "critical point". The carbon emissions from the industrial sector account for over 70%, among which the high-energy-consuming industries such as steel, cement, and chemical industries contribute over 60% of the industrial carbon emissions. As the world's largest manufacturing country, China's carbon emissions from high-energy-consuming industries reached 5.1 billion tons in 2020, accounting for 48% of the national total emissions. Under the constraints of the "dual carbon" goals, high-energy-consuming industries face dual challenges of high technology substitution costs, high risks of traditional assets being stranded, and insufficient green financial support. Existing studies mostly focus on a single technological path or policy tool, lacking systematic coupling analysis of the technical feasibility and economic rationality. This paper first elaborates on the relevant overview of the low-carbon transformation of high-energy-consuming industries, then specifically analyzes the technical and economic obstacles of low-carbon transformation in high-energy-consuming industries, and subsequently conducts detailed case analyses of typical industries from multiple aspects. Finally, it proposes specific breakthrough paths and suggestions, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

High-energy-consuming industries; Low-carbon transformation; Technical and economic obstacles; Breakthrough paths

高耗能行业低碳转型的技术经济障碍与突破路径

徐木文

广西南宁德星工程咨询有限公司, 中国·广西南宁 530000

摘要

全球气候治理进入"临界点", 工业领域碳排放占比超70%, 其中钢铁、水泥、化工等高耗能行业贡献了工业碳排放的60%以上。中国作为全球最大制造业国家, 2020年高耗能行业碳排放达51亿吨, 占全国总排放量的48%。在"双碳"目标约束下, 高耗能行业面临技术替代成本高、传统资产搁浅风险大、绿色金融支持不足等双重挑战。现有研究多聚焦单一技术路径或政策工具, 缺乏对技术可行性与经济合理性的系统性耦合分析。本文先是详细阐述了高耗能行业低碳转型的相关概述, 随后具体分析了高耗能行业低碳转型的技术经济障碍, 紧接着从多方面分别进行了详细的典型行业案例分析, 最后提出了具体的突破路径与建议, 以期为相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

高耗能行业; 低碳转型; 技术经济障碍; 突破路径

1 引言

全球气候治理已进入"1.5°C温控目标"倒计时阶段, 工业领域碳排放占比超70%成为减排主战场。中国作为全球最大制造业国家, 高耗能行业(钢铁、水泥、化工等)贡献了全国48%的碳排放, 其低碳转型面临"技术锁定"与"经济可行性"的双重困境: 一方面, 氢基冶金、电化学合成等颠覆性技术尚处示范阶段, 技术成熟度不足导致推广受阻; 另一方面, 初始投资成本高昂(如水泥行业碳捕集项目

单位投资超2000元/吨产能)与碳市场价格偏低形成矛盾, 企业转型动力不足。现有研究多聚焦单一技术路径或政策工具, 缺乏对技术替代成本、资产搁浅风险、政策协同效应等关键变量的系统性分析。本文以技术经济学为理论基石, 通过多行业案例对比, 揭示低碳转型的核心障碍, 并提出技术-经济-政策协同突破路径。

2 高耗能行业低碳转型的相关概述

2.1 高耗能行业低碳转型的驱动因素

高耗能行业的低碳转型, 是外部政策压力与内部经济动机共同作用的结果。从外部压力层面, 碳定价机制如碳税、碳交易市场等, 通过提高碳排放成本产生倒逼效应, 像欧

【作者简介】: 徐木文(1991—), 男, 中国江西抚州人, 本科, 高级工程师, 从事生态环境保护研究。

盟碳边境调节机制 (CBAM) 实施后, 出口型高耗能企业面临额外碳成本, 这直接推动其加快低碳技术升级步伐^[1]。同时, 严格的环保法规, 如超低排放标准、能效标杆制度等, 限制了高碳排放工艺的使用, 迫使企业走上清洁生产之路。从内部动力角度, 能源成本上升与技术创新的双向驱动至关重要。化石能源价格波动压缩传统工艺利润空间, 促使企业寻求可再生能源替代; 技术突破如氢能冶金、电化学合成等降低了低碳技术实施门槛, 形成正向循环, 中国钢铁行业余热回收技术提升能源利用率, 大幅降低单位产量碳排放强度便是例证。

2.2 技术经济障碍的理论基础

高耗能行业低碳转型面临的核心障碍, 是技术、市场与制度相互作用的结果。技术锁定效应表明, 现有技术体系, 像高炉炼铁、水泥熟料煅烧等, 因沉淀成本、技能依赖和基础设施锁定, 产生“惯性阻力”, 阻碍新技术替代^[2]。以钢铁行业转型氢能冶金为例, 需废弃现有高炉设备, 资产搁浅风险高达数百亿, 使企业决策趋于保守。创新补偿效应虽指出严格环境政策能激发企业创新, 以技术升级抵消合规成本、提升竞争力, 但这依赖有效的市场机制。若碳价格过低、绿色金融支持不足, 企业创新动力就会不足, 引发市场失灵。而且, 转型成本与收益存在时空错配, 低碳技术前期投资大、回收周期长, 碳减排收益却具长期性和不确定性, 造成企业短期财务压力与长期社会收益失衡。

2.3 分析框架构建

本研究构建“技术-经济-政策”三维分析框架(见图1), 系统解构高耗能行业低碳转型的障碍与路径。技术可行性维度聚焦实施条件: 以技术成熟度、替代方案和协同效应为核心指标, 评估低碳技术的落地潜力; 经济合理性维度关注成本收益结构, 通过投资回报率、政策补贴依赖度和碳价格敏感性量化转型经济性; 政策协同性维度则强调制度设计对技术-经济互动的调节作用, 如碳市场与绿色金融联动可缓解转型成本与收益的时空错配。三维框架交叉分析可精准定位技术不成熟、碳价过低或补贴不足等核心障碍, 为制定差异化突破路径提供理论支撑。



图1 高耗能行业低碳转型“技术-经济-政策”分析框架图

3 高耗能行业低碳转型的技术经济障碍分析

3.1 技术障碍

高耗能行业低碳转型面临多重技术障碍。关键低碳技

术存在瓶颈, 氢基炼钢因氢气制取成本高、大规模稳定供应难, 且炼钢中反应控制技术不成熟, 影响生产效率与产品质量; CCUS 技术则面临捕集成本高、封存安全性存疑、长期监测难度大等问题, 制约其大规模商业化应用。技术适配性也不足, 现有工艺多基于传统化石能源, 与新能源兼容性差, 改用新能源需大规模改造设备, 还可能影响生产稳定性与产品质量, 新能源的间歇性和波动性也需配套储能设施, 增加适配难度与成本。此外, 技术扩散存在壁垒, 专利垄断使发达国家企业设置高额专利使用费, 限制技术获取应用, 技术标准不统一也阻碍技术产品国际流通, 增加企业市场开拓与技术推广难度。

3.2 经济障碍

高耗能行业低碳转型面临诸多经济障碍。其一, 初始投资高昂且回报不确定。低碳转型要求企业投入大量资金用于技术改造、设备更新及新能源设施建设, 像建设一套 CCUS 装置就需数亿元, 对企业是沉重负担。同时, 低碳技术应用前景不明, 长期回报存疑, 企业担忧投资难收回, 对转型态度谨慎^[3]。其二, 碳市场价格偏低使技术经济性不足。当前全球碳价普遍较低, 无法体现碳排放真实成本, 企业采用低碳技术经济激励不够, 购买碳排放配额成本相对更低, 如部分地区碳价每吨几十元, 而氢基炼钢成本每吨数百元, 企业缺乏采用动力。其三, 传统资产搁浅且成本分摊机制缺失。行业传统资产面临搁浅风险, 且缺乏有效成本分摊机制, 企业需独自承担损失, 加重经济负担, 阻碍转型。

3.3 制度与市场障碍

高耗能行业低碳转型遭遇制度与市场多重障碍。政策层面, 不同部门和地区政策碎片化, 缺乏统一规划协调, 如能源与工业部门政策目标和方法冲突, 让企业执行时无所适从, 且激励措施缺乏协同性, 政策合力不足、效果大打折扣。绿色金融方面, 虽对转型作用重大, 但融资渠道单一, 银行贷款门槛高, 企业难获足够资金支持; 同时, 缺乏专门针对低碳项目的风险评估体系, 银行难以准确评估风险收益, 限制了绿色金融发展。国际层面, 一些发达国家设置严格技术出口管制, 阻碍关键低碳技术向发展中国家转移; 贸易保护主义抬头, 部分国家通过提高关税、设置技术壁垒等限制高耗能产品进口, 破坏国际市场公平竞争, 给行业低碳转型带来外部压力。

4 典型行业案例分析

4.1 钢铁行业: 氢能冶金与电弧炉短流程技术

钢铁行业低碳转型中, 氢能冶金与电弧炉短流程技术是关键路径。传统高炉以焦炭为还原剂, 吨钢碳排放达 1.8-2.5 吨; 氢基直接还原工艺以氢气为还原剂, 氢气占比超 55%, 可减少 90% 碳排放, 但目前仍处于试验阶段, 全氢还原需解决氢气制备成本高、储运不便等瓶颈。高炉富氢冶炼通过喷吹焦炉煤气或天然气裂解制氢, 利用现有设备实现部分替代, 技术成熟度更高, 但减排幅度有限(约 20%-

30%)。成本结构上,氢基直接还原能源成本占比超70%,主要源于氢气制备与储运,当前仍需政策补贴覆盖初期风险;高炉富氢冶炼依赖焦炉煤气或天然气,能源成本占比约50%-60%,政策补贴需求较低。此外,电弧炉短流程以废钢为原料,吨钢碳排放仅0.25-0.3吨,但废钢成本占比达60%-70%,政策补贴可加速其替代长流程的进程。

4.2 水泥行业:替代燃料与低碳熟料技术

水泥行业低碳转型中,替代燃料与低碳熟料技术是重要方向。生物质燃料如秸秆、稻壳具有碳中性和可再生性,每用1吨可减少2.25吨CO₂排放并降低成本,但热值波动大、回收难、燃烧稳定性差,应用比例不足10%。废旧轮胎衍生燃料(TDF)热值是煤炭的1.2-1.5倍,含硫量低,可减少SO₂排放,但需预处理去除金属丝等杂质,增加成本,且燃烧可能产生二噁英,需配套尾气处理设备。此外,碳捕集技术(CCUS)虽能捕获烟气中90%以上CO₂,但成本高昂,如中国首条示范线捕集成本达300-500元/吨,使熟料成本增加15%-20%,需碳价升至180元/吨以上才能实现经济平衡,目前全球碳价普遍较低,企业投资动力不足,且CCUS需配套压缩、运输、封存等环节,进一步推高成本,仅在碳价较高的欧盟有少量应用。

4.3 化工行业:绿氢制备与电合成工艺

化工行业低碳转型中,绿氢制备与电合成工艺是关键路径。绿氢制备以电解水为核心,成本70%以上来自电力消耗,当绿电价格降至0.2元/kWh时,制氢成本可低于灰氢,绿氨等产品将具备市场竞争力,但当前绿电价格普遍高于0.3元/kWh,导致绿氢化工产品成本较传统产品高30%-50%,需政策工具弥补差距。同时,化工行业通过循环经济模式可显著提升资源效率,如煤化工耦合绿氢工艺可降低CO₂排放量50%以上,资源利用率提升20%-30%,电合成工艺则实现碳资源循环利用,每吨产品减少CO₂排放1.5-2吨。不过,循环经济模式需配套建设碳捕集、氢能储运等基础设施,初期投资成本较高,需通过税收优惠、绿色信贷等政策激励降低企业转型门槛。

5 突破路径与建议

5.1 技术创新路径

推动低碳技术突破,构建“产学研用”协同创新体系是关键。以氢能冶金领域为例,可联合高校、科研院所与钢铁企业共建氢能冶金联合实验室,聚焦全氢还原工艺中氢气制备成本高、储运效率低等难题集中攻关,并通过企业试点验证技术可行性,加速成果落地转化^[4]。同时,需推动数字化与低碳技术深度融合,利用AI算法搭建能源管理系统,实时监测高炉、电炉等设备能耗数据,动态调整生产参数以降低碳排放。例如,通过机器学习模型预测电力价格波动,精准指导电解水制氢的启停时机,可进一步压缩绿氢制备成本,为低碳技术规模化应用提供经济性支撑。

5.2 经济激励路径

激发企业减排动力,完善碳定价机制是核心抓手。一方

面,需循序渐进提高碳税税率、扩大碳市场覆盖范围,将水泥、化工等高排放行业纳入交易体系,以价格信号形成倒逼机制,推动企业主动采用低碳技术。另一方面,要设计多元化转型金融工具:通过发行绿色债券为氢能冶金、碳捕集等项目提供低成本资金支持,开发碳期货合约帮助企业锁定长期成本、规避价格波动风险,设立风险补偿基金分担技术创新失败带来的损失。以绿氢化工为例,当碳价升至200元/吨以上时,绿氨生产成本可与灰氨持平,此时碳金融工具的配套支持将显著降低企业技术替代门槛,加速低碳转型进程。

5.3 制度保障路径

规范市场行为、推动低碳转型,建立行业低碳标准体系是重要基石。一方面,需制定钢铁、水泥等行业的能效标杆值,明确单位产品能耗上限,对超标企业实施惩罚性电价,倒逼其优化生产流程;同时推行碳足迹认证制度,强制企业披露产品全生命周期碳排放数据,通过信息透明化引导消费者优先选择低碳产品。另一方面,强化国际合作是突破技术壁垒与贸易限制的关键:通过引进欧盟碳捕集、氢能冶金等先进技术缩短研发周期,联合开展跨国项目分摊创新成本;针对欧盟碳边境调节机制(CBAM),应推动建立国际互认的碳核算标准,避免我国高碳产品因核算差异被额外征税,维护出口竞争力。

6 结语

本文系统剖析了高耗能行业低碳转型的技术经济障碍,揭示技术瓶颈、成本高昂、制度碎片化及市场失灵是核心制约因素。通过钢铁、水泥、化工等行业的案例对比发现,氢能冶金、替代燃料、绿氢制备等关键技术虽具减排潜力,但受制于技术成熟度不足、初始投资回报周期长及碳价偏低等经济性矛盾,企业转型动力受限。未来突破路径需聚焦技术-经济-政策协同:通过“产学研用”创新体系加速技术迭代,完善碳定价与绿色金融工具提升经济激励,建立国际互认标准体系强化制度保障。随着全球碳市场扩容及绿电成本下降,低碳技术经济性将逐步改善,但需警惕传统资产搁浅风险与国际贸易壁垒。后续研究可进一步量化政策协同效应,探索跨行业低碳技术耦合路径,为高耗能行业绿色转型提供更具实操性的理论支撑。

参考文献

- [1] 白雪.高耗能行业“含绿量”提升尚待多维支撑[N].中国经济导报,2025-11-29(003).
- [2] 黄振宇.华电国际发行低碳转型债券的动因及绩效研究[D].江西财经大学,2025.
- [3] 李龙翔.绿色金融对经济低碳转型的影响研究[D].河南财经政法大学,2025.
- [4] 张居营,高雨桐,安风楼.高耗能行业低碳转型风险传染效应——基于股价波动率溢出的视角[J].内蒙古科技与经济,2025,(08): 97-104.