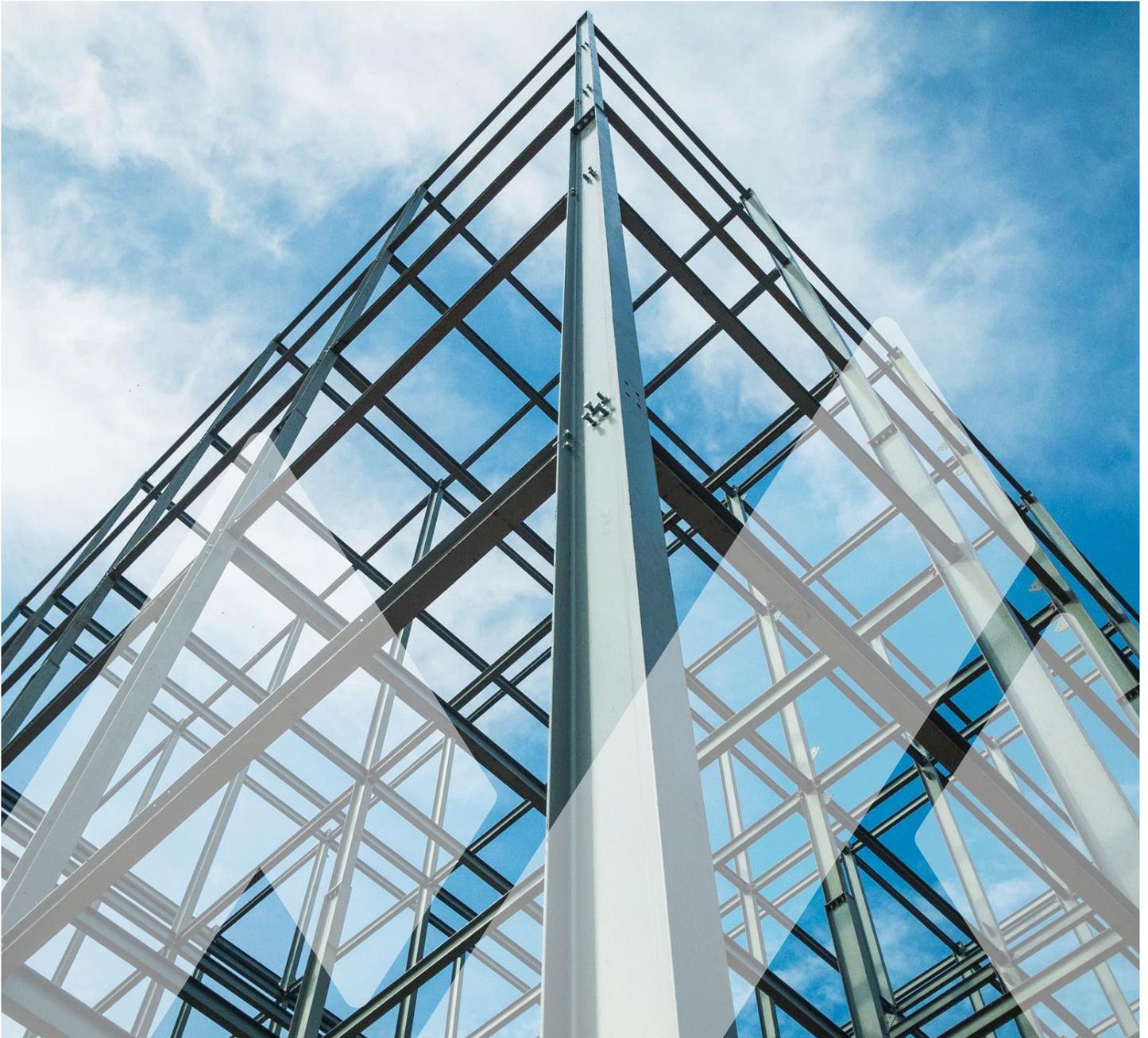




加速首批突破性近零碳钢铁 投资与部署——中国篇





关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所(Rocky Mountain Institute, RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库，与政府部门、企业、科研机构及创业者协作，推动全球能源变革，以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所着重借助经济可行的市场化手段，加速能效提升，推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市及华盛顿特区和尼日利亚设有办事处。

作者与鸣谢

作者

李抒苒
李 婷
薛雨军
闫 榕

联系方式

李抒苒, sli@rmi.org

引用建议

李抒苒, 薛雨军, 闫榕等, 加速首批突破性近零碳钢铁投资与部署——中国篇, 2024, <https://rmi.org.cn/insights/unlocking-the-first-wave-of-breakthrough-steel-investments-in-china/>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BYSA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。

鸣谢

感谢落基山研究所的Chathu Gamage、Lachlan Wright、Rachel Wilmoth、Kaitlyn Ramirez 和刘希元在报告撰写过程中给予的宝贵建议。

本报告作者特别感谢鞍钢集团钢铁研究院环境与资源研究所的马光宇、宝山钢铁股份有限公司的王明月和孟想等专家为报告撰写提供的洞见与建议。

特别感谢Angela Wright Bennett Foundation对本报告的支持。

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构的观点。

目录

前言	5
第一章 碳中和目标下中国钢铁行业的转型方向与关键问题	6
1.1. 中国钢铁行业的转型方向	6
1.2. 低碳冶金项目现状	7
1.3. 关键问题: 实现首批近零碳钢铁的突破	9
第二章 近零碳钢铁生产技术路线的经济性和转型成本	10
2.1. 各类钢铁生产技术路线的碳强度和经济性	10
2.2. 从技术路线到转型路径: 项目投资与部署的实际考量	14
2.3. 转型成本: 以近零碳为目标的项目投入测算	15
第三章 高转型成本挑战下的综合解决方案	17
3.1. 多方合力的综合解决方案: 政策、需求侧与金融的角色	17
3.2. 我国先行实践与趋势	18
3.3. 与各转型路径匹配的综合解决方案: 量化的情景分析	20
第四章 行动建议	24
参考文献	26

前言

钢铁行业是能源密集型的高排放行业，2020年，全球钢铁行业直接碳排放量达到26亿吨，占全球碳排放总量的约7%；¹我国钢铁行业排放量为18.1亿吨，占全国碳排放总量的约16%。^{2,3}同时，钢铁行业属于重要的原材料行业，是经济社会稳步发展的支柱产业之一。钢铁行业的低碳、零碳转型既对实现气候目标至关重要，也将为自身及相关产业的高质量发展带来机遇。

从我国国内情况看，在行业层面，中国钢铁工业协会于2022年8月发布了《钢铁行业碳中和愿景及技术路线图》，并已经更新到第二版。⁴该路线图规划了从当前到“碳达峰”、“碳中和”各个阶段的关键技术，从技术角度为行业转型的指出了方向。在企业层面，国有和民营企业均积极制定碳目标和减排路线图，成为行业转型的重要力量。项目层面，中国宝武钢铁集团有限公司（宝武）、河钢集团有限公司（河钢）等企业已规划、投产了氢冶金等低碳、近零碳项目，已经具备能够生产出符合标准产品的能力。

技术的持续进步和普及为生产近零碳钢铁¹提供了可能性，但成本较高依然是阻碍项目落地以及规模化的主要挑战。目前，已有氢冶金等项目的投资大多依靠企业自有资金，这些企业率先投产和运营低碳、近零碳项目，起到了先行示范的作用，但随着项目的推进，经济性挑战将被放大，成本竞争力将不断接受市场的验证。当项目的中长期经济表现存在不确定性时，更多企业可能对资本密集型的近零碳项目保持观望态度，项目的可持续性以及规模化将受到影响，其能为行业转型带来的积极贡献也可能不如预期。

另一方面，钢铁行业向低碳、近零碳的转型具有紧迫性。据测算，要将升温幅度控制在1.5摄氏度以内，到2030年，全球近零碳钢铁产能需达到约1.9亿吨，但是当前，包括规划产能在内的总产能仅为约6000万吨。⁵从时间节点看，我国相当一部分的高炉、转炉即将投用满20年的第一轮使用周期，如果近零碳钢铁项目的部署速度不够快，则相关资金会被投入到高炉、转炉的设备大修，延长其使用期，意味着将锁定长达十年以上的更多碳排放。如在设备维修投资完成之后再部署近零碳项目，一方面会加剧资金短缺，另一方面有可能导致重资产的高炉、转炉设备的提前退役，造成资源浪费。

因此，要加速近零碳钢铁项目的部署，有必要从应对经济性挑战的角度积极寻求解决方案。在实践中，项目层面的经济性评估具有重要参考意义。各种低碳、近零碳生产技术路线的发展是动态的，例如，近零碳是项目的远期目标，但短中期可考虑合理应用过渡性技术，这意味着同一项目在不同阶段采用的技术方案与路径可能有所变化。此外，技术本身的可行性也是一个逐步提升的过程，成本经济性呈现渐进的改善。因此，经济性评估不应拘泥于单一技术路线的静态假设，而应充分考虑技术迭代下的动态转型路径。鉴此，本研究将不同的钢铁生产技术路线在时间维度上进行组合，形成从较高碳技术路线到较低碳路线、最后到近零碳路线的技术组合，将其作为“转型路径”。在各种钢铁生产技术路线下吨钢成本的基础上，评估整体转型路径的成本。

本报告基于项目级的经济性评估模型，对重点技术路线和代表转型路径的经济性指标进行了量化分析。通过评估项目的净现值、回报周期等，为最终投资决策的确定提供参考。同时，研究也深入分析了政策、需求侧、金融等多相关方对钢铁行业转型的支持方式，量化各类支持对解决经济性挑战的贡献，以帮助形成综合解决方案，提升项目的盈利潜能和可持续运营能力。这些支持方式包括但不限于提供绿氢相关补贴和引入碳价等政策手段，以及买家支付绿色溢价、达成远期采购协议、金融机构提供优惠利率等市场手段等。报告并提出了六项行动建议，以期动员更多相关方，共同构建有利条件，形成有助于加速近零碳钢铁项目部署的生态系统。

¹ 近零碳钢铁指符合中国钢铁工业协会《低碳排放钢评价方法》的A级碳效等级的钢铁。对于近零碳钢铁项目，在项目生产的中后期，绿电得到全面应用，间接排放大幅下降至近零，吨钢排放低于A级碳效阈值。

第一章 碳中和目标下中国钢铁行业的转型方向与关键问题

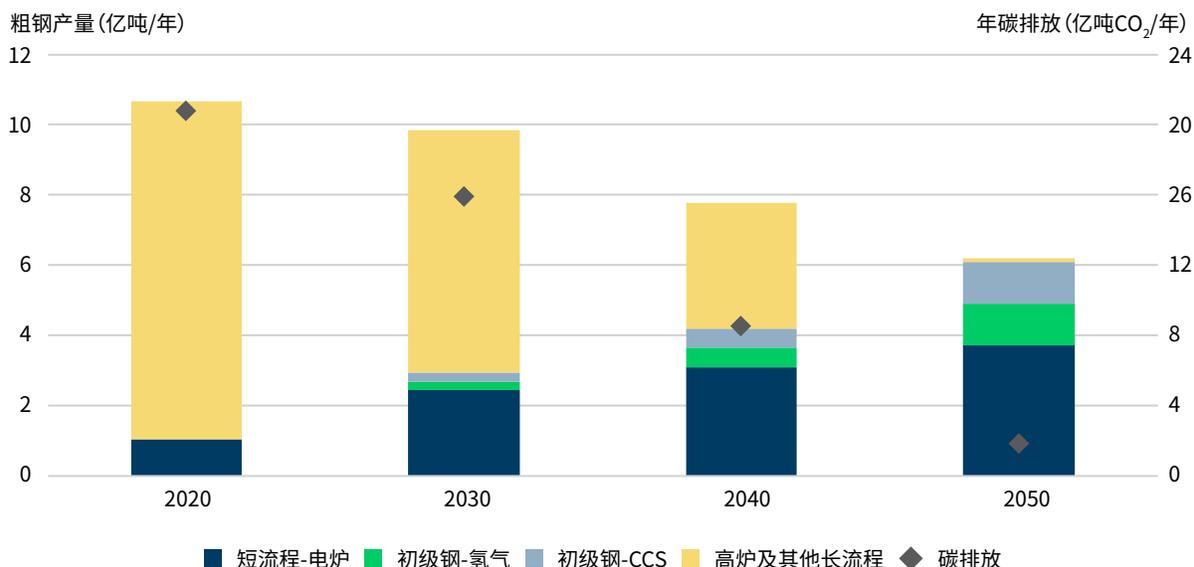
1.1 中国钢铁行业的转型方向

中国是最大的钢铁生产国和消费国，粗钢产量占全球一半以上，钢铁行业的直接碳排放占全国总排放量的 14%，此外另有相当比例的电力消费产生的碳排放来自钢铁行业用电。因此，中国钢铁行业的转型对全球气候目标以及中国双碳目标的实现都举足轻重。⁶ 相较于其他国家，中国的钢铁生产更依赖煤炭的使用，且短流程占比偏低。由于中国“富煤、缺油、少气”的能源结构特点，煤炭在中国钢铁行业的能源使用占比中达到 76%，而在欧洲和美国，该比例仅为 44% 和 24%。⁷ 欧洲和美国钢铁生产中的能源使用虽也以化石能源为主，但天然气占据相当大的比重。此外，中国钢铁生产中的短流程占比不足 10%，低于国际水平，这是由于中国的工业化、城镇化进程启动较晚，所使用的钢材尚未进入大规模报废阶段，废钢积蓄量暂时不足、价格偏高；⁸ 加上电力价格的影响，短流程炼钢经济性有限。

煤炭占比偏高、短流程占比偏低的特点一方面为中国钢铁行业转型带来成本上的突出挑战，另一方面也意味着巨大的减排潜力。例如，随着工业和城市基础设施建设逐步进入更新换代阶段，机械设备和建筑的报废会带来废钢资源量的大量提高，如果辅以回收体系的完善，短流程将有大幅发展潜力。从时间节点看，我国相当一部分的高炉、转炉即将投用满 20 年的第一轮使用周期，如果近零碳钢铁项目的部署速度不够快，则相关资金会被投入到高炉、转炉的设备大修，延长其使用期，意味着将锁定长达十年以上的更多碳排放。⁹ 因此，在关注和规划钢铁行业的转型路径以及近零碳生产投资时，需要结合中国钢铁行业的自身特点，采取合适的节奏，在抓住投资周期带来的机遇、积极果断地推动产能更新换代的同时，也兼顾减碳和钢铁企业的经济效益，尽可能避免资产搁浅的风险。

目前，我国钢铁行业实现碳减排的技术路线已基本明晰，关键技术和手段包括规模化利用废钢和清洁氢冶金等初级钢的低碳生产，且关键政策支持和领先企业行动正在全面推进中。到 2050 年，随着废钢回收率的提高，再生钢产量占比将有望从目前的 10% 增长到 60%，而随着清洁氢、碳捕集与封存 (CCS) 等减排技术成本的不断下降，近零碳初级钢的生产有望达到近 2.4 亿吨。¹⁰

图表 1 中国钢铁生产流程展望



1.2 低碳冶金项目现状

在“1+N”政策体系的指引下,《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》等政策有力推动了钢铁行业的降碳进程,同时循环经济、碳市场、氢能发展、低碳采购和绿色金融等跨行业的支持性政策也在不断塑造和加强钢铁行业转型降碳的有利条件。在政策的全面推动和支持下,多个钢铁企业发布碳达峰、碳中和行动目标和计划(图表2),已有碳达峰、碳中和计划的钢铁企业产量占到全国总量的约38%;在项目层面,氢冶金等低碳、近零碳钢铁项目也不断涌现(图表3),目前已公开的在计划或运行中的总产能已达900万吨以上。

图表2 中国钢铁企业碳达峰、碳中和计划

公司	粗钢产量*	碳达峰	碳中和	基准年	其他时间线			
					2025	2030	2030-2050	2050-2060
 BAOWU	130.8	2023	2050	2020	形成减碳30%工艺技术能力		2035年碳强度及排放总量降低30%	
 鞍钢集团 ANSTEEL	55.9	2025	2050	碳达峰			2035年碳排放总量较峰值降低30%,吨钢碳排放强度降低30%以上	
 HBIS 河钢	41.3	2022	2050	碳达峰	较碳排放峰值降低10%	较碳排放峰值降低30%		
 建龙集团 JIANLONG GROUP	37	2025	2060	2020&碳达峰			2033年碳排放总量较峰值下降20%,碳排放强度较2020年下降25%	
 首钢集团 SHOUYANG GROUP	33.6	2025	2050-2060	2020&碳达峰	部分产品具备减碳60%的能力	低碳产品专线具备吨钢二氧化碳排放强度与2020年相比降低30%的能力	2035年二氧化碳排放总量较峰值降低30%	
 山钢集团 SD STEEL	19.5	2030	2050	2020	碳排放强度较2020年下降5%	碳排放强度较2020年降低20%;具备碳排放强度降低30%的资源条件和技术能力		
 包钢股份 BAO GANG UNITED STEEL	15.2	2023	2050	碳达峰		具备减碳30%的工艺技术能力	2042年碳排放量较峰值降低50%	
 敬业集团 JINGYE GROUP	14.5	2028	2050-2060	碳达峰			2035年碳排放总量较峰值有较大下降,2040年碳排放总量进一步大幅下降	
 中信泰富特钢	14.2	2030	2060	碳达峰			2035年碳排放强度较达峰年下降20%	2060年碳排放量较峰值降低80%,使用抵消实现碳中和
 中钢公司	12.6	n/a	2050	2018	较基准年减碳7%	较基准年减碳25%		
 酒钢集团	9	2030	2060	碳达峰		整体消纳新能源用电量占比达到33.2%	2040年全网达到50%的“绿电”;碳排放总量较达峰期降低30%	2050年碳排放总量较达峰期降低66%;全网达70%~95%的绿电

* 百万吨每年, 2023

数据来源: 公司官网, 公司年报, Worldsteel

图表 3 中国氢冶金项目概览

	公司	省	市	氢冶金类型	项目	运营时间	绿氢规划
1	BAOWU	广东	湛江	氢直接还原铁	100万吨/年氢基竖炉直接还原示范工程	2023	一期副产氢、焦炉煤气、天然气 二期绿氢
2	HBIS 河钢	河北	张家口	氢直接还原铁	120万吨规模的氢冶金示范工程	2022	一期焦炉煤气 二期绿氢
3	鞍钢集团 ANSTEEL	辽宁	鲅鱼圈	氢直接还原铁	万吨级流化床氢气炼铁工程示范	建设中	绿氢
4	BAOWU	新疆	乌鲁木齐	高炉喷吹氢气	2500立方米富氢碳循环氧气高炉	2023	灰氢, 煤气自循环工艺
5	晋南钢铁集团 SHANSHAN STEEL GROUP	山西	临汾	高炉喷吹氢气	1860立方米高炉喷吹氢气	2021	副产氢
6	中晋冶金科技有限公司 CSMI	山西	晋中	氢直接还原铁	30万吨氢基竖炉直接还原铁	2022	100%焦炉煤气
7	建龙集团 JIANGONG GROUP	内蒙古	乌海	氢基熔融还原	30万吨氢基熔融还原	2021	副产氢
8	兴国之业	河北	秦皇岛	高炉喷吹氢气	40m³富氢试验高炉	试验	与隆基氢能共建可再生电源电解水制氢
9	酒钢集团	甘肃	嘉峪关	氢直接还原铁	回转窑中试线	试验	灰氢
10	邢台钢铁有限责任公司 XINSHIJI STEEL	河北	邢台	氢基熔融还原	3座55万吨熔融还原炉	建设中	暂无
11	CISRI 中国钢研	山东	临沂	氢直接还原铁	5万吨/年中国自主研发纯氢冶金竖炉	2024	灰氢/副产氢
12	新华冶金 XINHUA STEEL	河北	唐山	高炉喷吹氢气	2座2300立方米高炉喷吹氢气	2023	副产氢

中国氢冶金项目地图

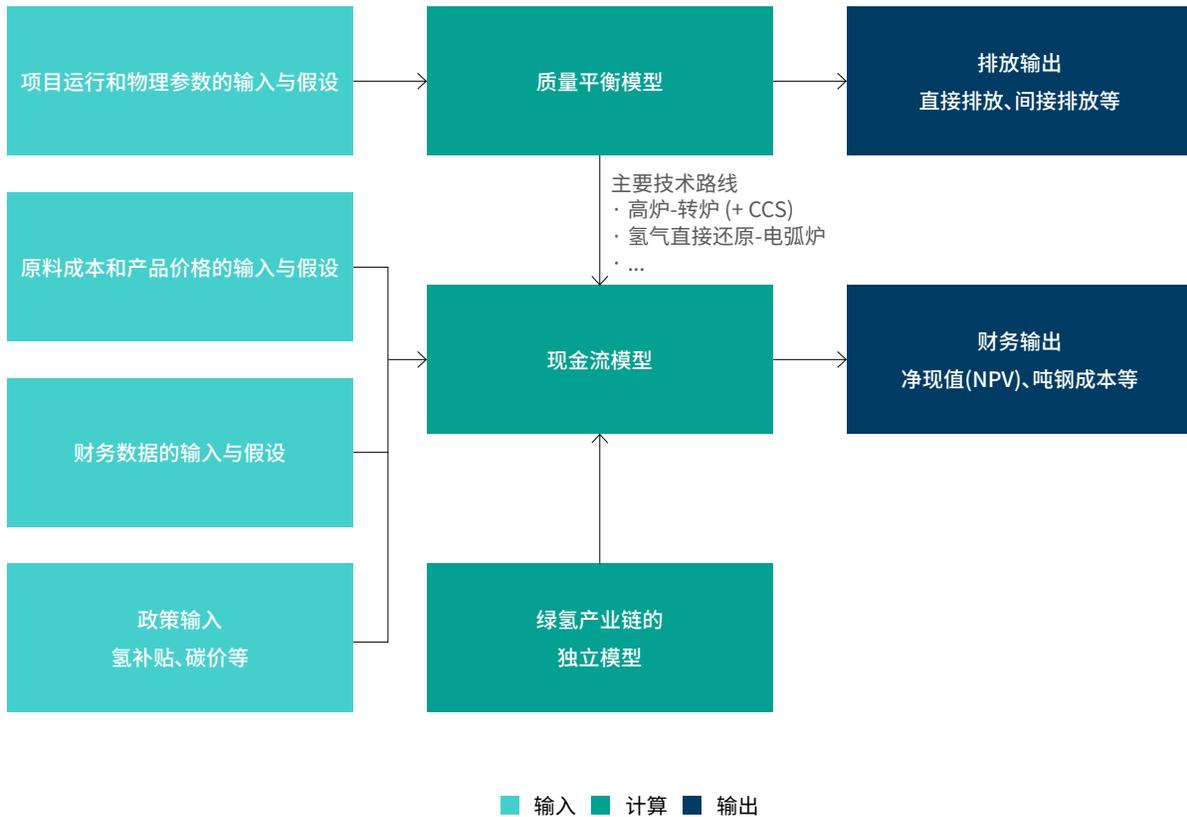


1.3 关键问题：实现首批近零碳钢铁的突破

低碳、近零碳钢铁项目普遍面临成本较高的挑战。本研究将不同的钢铁生产技术路线在时间维度上进行组合，形成从较高碳技术路线到较低碳路线、最后到近零碳路线的技术组合，将其作为“转型路径”。在各种钢铁生产技术路线下吨钢成本的基础上，评估整体转型路径的成本。具体而言，本研究为采用不同转型路径搭建项目级经济性模型，评估项目净现值、回报周期等指标。分析并量化政策、需求侧、金融等各方支持对项目财务表现的影响，形成多方合力的综合解决方案，为钢铁行业、企业提供参考；同时动员多个相关方，共同构建有利条件，推动形成有助于钢铁行业低碳发展的生态系统。

本研究搭建的项目级经济性模型的总体结构如图表 4 所示。该模型的核心是现金流模型，它的核心结果是项目净现值 (NPV) 和吨钢成本等财务输出，需要的直接输入和假设则包括原料成本和产品价格，财务数据，以及氢能补贴、碳价等政策相关数据；质量平衡模型也为现金流模型提供与技术路线相关的关键输入，它需要项目运行和物理参数作为输入，同时也输出排放强度和不同范围的排放量等；相对独立的绿氢产业链模型则为现金流模型提供随时间、地点和技术进步等条件变化的氢气价格输入。

图表 4 项目级经济性模型的总体结构



注：本研究中，NPV 为项目整个周期内产生现金净流量以资金成本为贴现率折现之后与原始投资额现值的差额，从长期视角体现项目投资获得收益的能力。

第二章 近零碳钢铁生产技术路线的经济性和转型成本

2.1 各类钢铁生产技术路线的碳强度和经济性

本研究选取钢铁生产的八条典型技术路线，并按基础大类分为长流程、短流程和直接还原，如图表 5。其中，长流程大类指以高炉-转炉（BF-BOF）为基础的技术路线；短流程大类指以全废钢为原料的路线，不包含以直接还原铁为原料的短流程；直接还原大类指在低于铁素原料熔化温度的情况下，固态还原得到海绵铁，并进入电炉等装置炼钢。上述技术路线大类是为了便于研究的精简分类方法，实际中各技术路线间会有交叠，如长流程中的铁水会进入短流程的电炉中。同时，各技术路线也按照其在近零碳转型的进程中的阶段归类为基础技术、过渡技术和终极技术。基础技术是现阶段的主流路线，效率高，但排放较大，需要逐步实现改造或转型；过渡技术是现阶段具有一定降碳效果且可行性较强的技术路线，但因为资源、成本、减排潜力等局限而无法满足远期碳中和目标；终极技术是适应远期碳中和目标的路线，可随技术逐步成熟而扩大部署。

图表 5 钢铁生产技术路线的分类和特点

大类	技术路线	还原剂	主要设备	特点
长流程	BF-BOF 高炉-转炉	焦炭	高炉、转炉	传统路线，效率高，排放大
	BF-BOF COG-INJ 高炉喷吹焦炉煤气	焦炭、焦炉煤气	高炉、转炉	高炉中配置喷吹焦炉煤气装置，替代喷吹煤和少量焦炭
	BF-BOF CCS 高炉-转炉配备碳捕集	焦炭	高炉、转炉、碳捕集	配置CCS，可以捕集高炉和发电等过程的碳排放
短流程	Scrap-based EAF 全废钢电炉	无	电弧炉	以废钢为铁素原料，排放低，受到废钢资源量影响
直接还原	COG DRI-EAF 焦炉煤气直接还原-电炉	焦炉煤气	竖炉、电弧炉	纯绿氢DRI的过渡路径，利用长流程中的富氢副产焦炉煤气
	COG/H ₂ DRI-EAF 焦炉煤气混氢直接还原-电炉	焦炉煤气、绿氢	竖炉、电弧炉	纯绿氢DRI的过渡路径，在焦炉煤气中混入绿氢
	H ₂ DRI-EAF 氢直接还原-电炉	绿氢	竖炉、电弧炉	纯绿氢DRI
	H ₂ DRI-ESF-BOF 氢直接还原-电熔分炉	绿氢	竖炉、电熔分炉、转炉	可利用品位中等的球团矿，竖炉后配置电熔分炉熔化DRI，转炉炼钢

基础技术

过渡技术

终极技术

钢铁行业低碳转型是个循序渐进的过程，应充分考虑行业现状和技术发展，有序、适时地从基础技术向过渡技术发展，并逐渐达到终极技术。例如，基于我国钢铁行业现状，利用焦炉煤气直接还原可以作为可行的过渡技术，并在绿氢成本较低时逐渐转为绿氢直接还原。本节将深入对比分析各技术路线的特点、碳排放和经济性（如图表 6 和图表 7），以作为转型路径分析的基础。

长流程大类

• 高炉 - 转炉 (BF-BOF)

BF-BOF 是我国钢铁生产最为主流的技术路线，主要还原剂是冶金煤经干馏过程形成的焦炭。该路线冶金效率高，但吨钢碳排放较高，达到 2.2 tCO₂e/t。这一技术路线的碳排放主要来自高炉环节的焦炭和喷吹煤的使用，同时上游煤炭开采环节的甲烷排放也不可忽视。

• 高炉喷吹焦炉煤气 (BF-BOF COG-INJ)

通过在高炉中喷吹焦炉煤气，以替代部分喷吹煤和焦炭，可在一定程度上降低碳排放。焦炉煤气中的氢气含量在 60% 左右，甲烷含量 20% 左右，甲烷可进一步重整生成氢气。该技术路线可有效避免年轻的高炉设备提前退役，并可实现焦炉副产气的循环利用。然而，焦炉煤气的喷吹量有最大值，并不能完全替代焦炭和喷吹煤，降碳幅度多为 20% 左右。且长期来看，随着钢铁行业低碳转型的推进，焦炉煤气资源将持续缩减。因此，该路线可作为近期较理想过渡技术，但在中远期，还将逐步转为其他近零碳的终极技术路线。

• 高炉 - 转炉配备碳捕集 (BF-BOF CCS)

高炉 - 转炉路线产生的碳排放可利用胺溶液等进行捕集。在钢铁生产中，碳排放集中于高炉环节，占到总排放的 72%，因此该环节也是设置碳捕集装置的重点环节，同时炼铁余热也可有效提高捕集溶液的解析效率。¹¹ 高炉环节，碳捕集率可达 90%，而在其他环节，碳捕集作用有限。相应地，该路线的吨钢排放可低至 1.3 tCO₂e/t。然而，高炉环节产生的二氧化碳浓度较低，捕集成本较高，且下游的碳运输、封存环节高度依赖基础设施，为 CCS 技术在钢铁行业的应用带来较大不确定性。基于充分利用已有高炉 - 转炉资产的考虑，CCS 的利用可作为过渡技术。

短流程大类

• 全废钢电炉 (Scrap-based EAF)

指仅利用废钢作为铁素原料，以电为主要能源来源的炼钢工艺。由于原料是废钢，该技术路线并不需要炼铁环节，只需要电炉炼钢环节ⁱⁱ。随着中国的城镇化和工业化进入下一阶段，可利用的废钢资源增多，废钢价格也可趋于稳定，促进全废钢电炉路线的发展。目前，我国电炉钢生产占比约 10%，该比例有望在 2050 年达到 60%¹²，全废钢电炉是钢铁生产重要的终极技术之一，吨钢排放可低至 0.4 tCO₂e/t。在绿电的广泛应用下，吨钢排放进一步下降至 0.2 tCO₂e/t 以下。

直接还原大类

• 焦炉煤气直接还原 - 电炉 (COG DRI-EAF)

该技术路线利用焦炉煤气作为还原剂，炼铁设备以竖炉为主。炼铁环节的产品是固态的直接还原铁（也称为海绵铁），进一步进入炼钢环节的电炉设备。在中东、美国，天然气资源丰富且价格低廉，广泛应用于钢铁生产，以天然气为还原剂的竖炉产能规模较大，形成了直接还原铁技术的经验积累。对于中国而言，这一技术路线可以充分发挥焦炉煤气资源优势，提高直接还原铁和竖炉设备的技术水平和规模化能力。焦炉煤气虽然是副产气，但由于焦化流程消耗的化石能源，排放较高。该技术路线的吨钢排放大约为 1.2 tCO₂e/t，较长流程降低 45%；可作为过渡技术，在实现部分碳减排的同时，为逐步扩大绿氢应用打下坚实的基础。

ⁱⁱ 本研究暂不考虑混掺铁水冶炼的电炉钢。

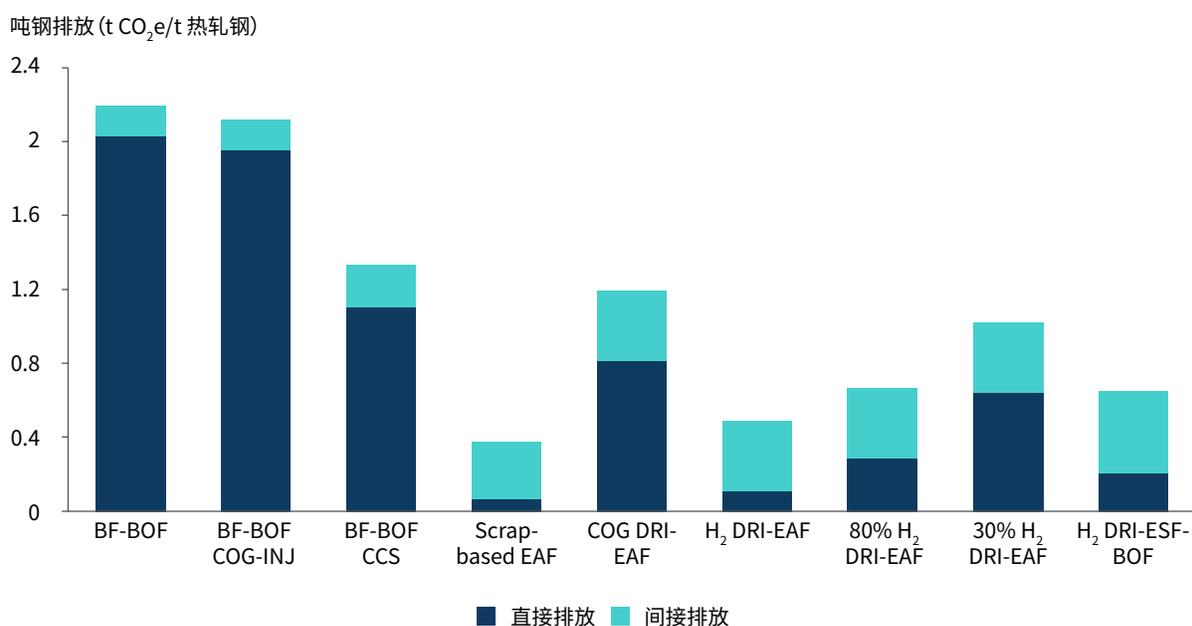
• **全绿氢直接还原 - 电炉 (H₂ DRI-EAF)**

该路线利用 100% 绿氢作为还原剂，直接还原球团矿炼铁，并进一步在电炉炼钢。直接还原过程的温度低于高炉炼铁，以固态 / 气态的方式反应，反应效率比长流程低。但是，该路线反应生成物是水而非二氧化碳，大幅降低炼铁环节的碳排放。未来，随着绿电和电解槽成本的下降，绿氢成本也将有很大的优化空间。在该技术路线下，吨钢碳排放可低至 0.5 tCO₂e/t，较长流程降低近 80%。通过逐步增加绿氢在焦炉煤气中的掺混比例，可实现从 COG DRI-EAF 到 H₂ DRI-EAF 的过渡。

• **氢直接还原 - 电熔分炉 (H₂ DRI-ESF-BOF)**

该技术路线是在 H₂ DRI 后加装一个电熔分炉 (ESF)，将直接还原铁熔化成铁水，并注入到转炉 (BOF) 中。直接还原铁对铁素原料的品位要求较高，通常为 66% 以上的高品位球团¹³，也称为 DR 级球团。直接还原铁本身并不需要高品位的铁矿石，但是中低品位铁矿石中的杂质无法在炼铁过程中去除，竖炉、电炉和转炉都缺少有效的造渣能力，钢铁产品的杂质含量过高。而电熔分炉的加装，可以增强全流程的造渣能力，降低钢铁产品的杂质含量，提高中品味铁矿石的适用性。中国的高品位铁矿石资源较为缺乏，很大程度依赖进口，而该技术路线可以缓解国内优质铁矿石紧缺的压力。ESF 的引入也可更好的利用炼钢环节的转炉设备，避免转炉资产的提前退役。由于 ESF 中直接还原铁的熔化需要消耗能源，而炼钢环节又需要保持较高温度，该技术路线的能耗水平比 H₂ DRI-EAF 高，吨钢排放达到 0.6 tCO₂e/t。

图表 6 各钢铁生产技术路线的碳排放ⁱⁱⁱ



注：假设冶金工艺中的电力来自电网，绿氢电解水的电力来自可再生能源。

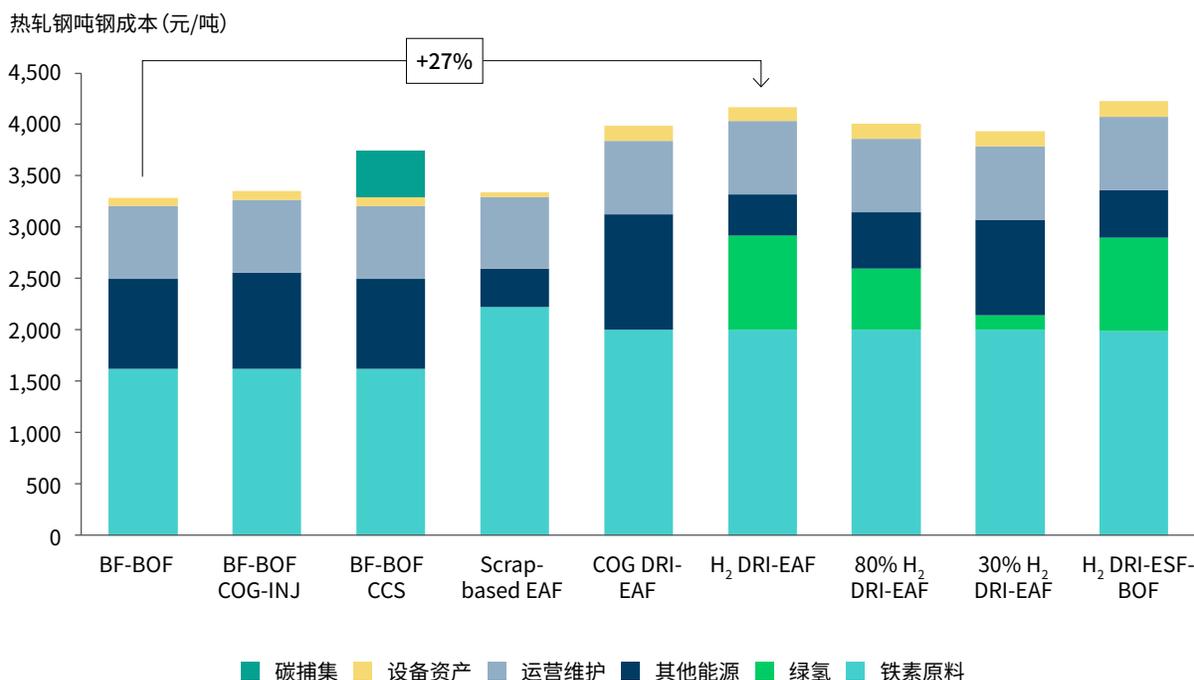
碳排放方面，近零碳钢铁指符合中国钢铁工业协会《低碳排放钢评价方法》的 A 级碳效等级的钢铁，对于近零碳钢铁项目，在项目生产的中后期，绿电得到全面应用，间接排放大幅下降至近零，吨钢排放低于 A 级碳效阈值。¹⁴ 废钢 100% 的热轧钢产品的 A 级碳效阈值是 0.05t CO₂/t，废钢 20% 的热轧钢产品的 A 级碳效阈值是 0.33t CO₂/t。在间接排放近零的情况下，Scrap-based EAF、H₂ DRI-EAF 和 H₂ DRI-ESF-BOF 符合近零碳钢铁标准。

ⁱⁱⁱ 指从“摇篮”到“大门”的直接排放和间接排放，包含上游煤炭和铁矿石在开采过程中产生的甲烷等温室气体，产品边界取到热轧带钢。

经济性方面，本研究模型计算的各项技术路线的吨钢成本如图表 7。BF-BOF 的成本约 3200 元 / 吨，主要来自煤炭和铁矿石等原料的采购费用。因为焦炉煤气的应用，BF-BOF COG-INJ 的成本略有上升。对于 BF-BOF CCS，由于碳运输和封存对基础设施依赖度高，额外成本不确定性较大，有成本上浮的风险。Scrap-based EAF 的成本约在 3300 元 / 吨，略高于长流程，但受废钢价格和电力价格的影响较大，部分短流程钢厂仅在谷电时间生产才能有盈利空间。COG DRI-EAF 的成本约为 3900 元 / 吨，比长流程高 20%，成本主要来自高品位铁素原料和焦炉煤气，且竖炉设备的资本投资也较大。焦炉煤气成本对 COG DRI-EAF 路线的经济性影响偏大，焦炉煤气若来自钢铁企业的内部部门，其售价可低于市场价，COG DRI-EAF 的经济性也可进一步提高。

对于基于绿氢的直接还原铁技术路线，未来经济性会随着绿氢成本的下降而改善。绿氢可掺混在焦炉煤气中进行还原反应，从全项目周期的角度，30% 绿氢掺混的 30% H₂ DRI-EAF 技术路线经济性优于 COG DRI-EAF，即适度的绿氢掺混对项目的财务表现有利好作用。当绿氢掺混比例升高时，为了维持工业生产的连续稳定性，可能需要额外的绿氢储存装置。本研究假设储氢需求的绿氢掺混阈值为 80%，即 80% H₂ DRI-EAF、H₂ DRI-EAF 和 H₂ DRI-ESF-BOF 均需要额外的储氢成本。相应地，H₂ DRI-EAF 的吨钢成本约为 4100 元，比 BF-BOF 高 27%，主要来自高品位铁矿石和绿氢。H₂ DRI-ESF-BOF 技术路线的吨钢成本略高于 H₂ DRI-EAF，其中 ESF 设备的成本具有不确定性，ESF 用电量的增加，可导致吨钢成本进一步上浮。

图表 7 各钢铁生产技术路线的经济性对比

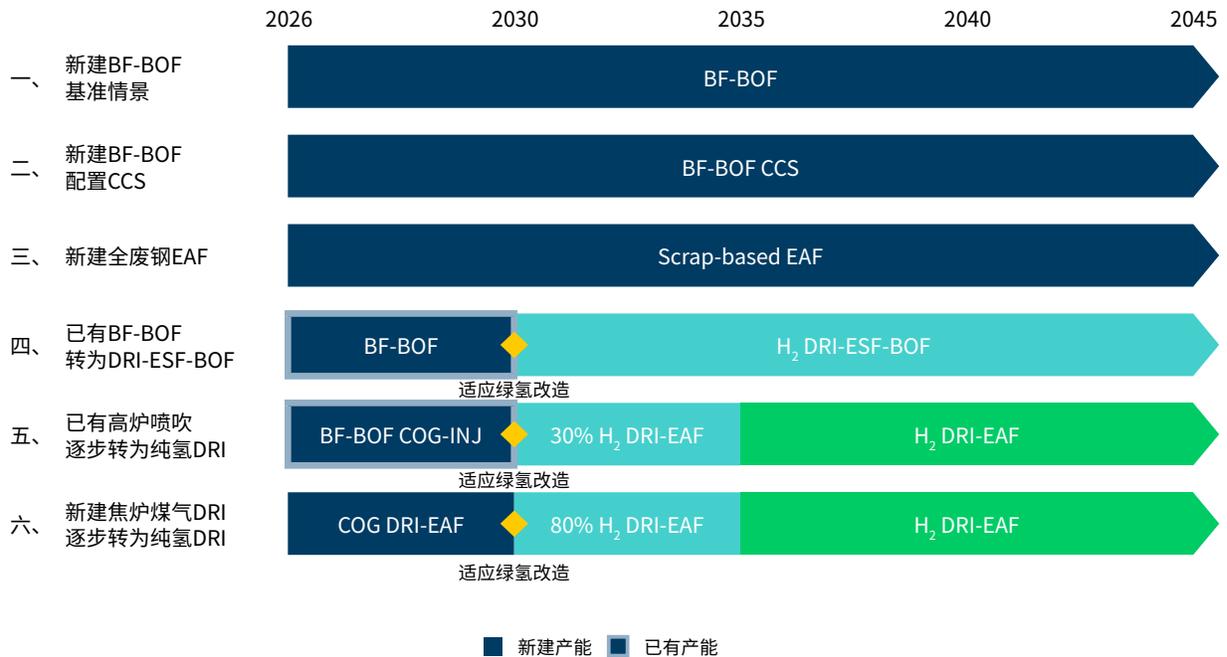


模型部分假设：产能为 100 万吨热轧钢 / 年，利用率 90%；除了 Scrap-based EAF 采用 100% 废钢外，其他技术路线均有 20% 的废钢掺混；2026 年绿氢生产成本为 16 元 / kg，2030 年和 2035 年分别下降至 12 元 / kg 和 10 元 / kg。天然气、煤炭等大宗原料成本参考市场历史价格。

2.2 从技术路线到转型路径：项目投资与部署的实际考量

本章的上一部分详述了钢铁生产的主要技术路线及其经济性情况，这些技术可区分为基础技术、过渡技术和终极技术。值得注意的是，钢铁项目从现状出发，逐步应用新技术，最终转型成为近零碳钢铁项目的过程并不是一蹴而就的。除了技术路线的成熟度与成本等因素以外，还需要全面考量项目的生产设施寿命和状况、人才储备、项目所在地的资源禀赋等与项目直接相关的因素，以减轻企业在转型过程中的负担。本研究力求尽可能贴近钢铁生产实现近零碳转型的现实过程，设定了六种从不同类型的现状出发，随时间变化而渐进使用不同技术路线的转型过程。在本研究中，这样的随时间变化的技术路线组合被称为转型路径。

图表 8 本研究涵盖的典型转型路径



注：“适应绿氢改造”指直接还原铁中还原气从低氢气含量到高氢气含量的设备改造，主要包含压缩机、加热设备等的费用。因为氢气含量越高，还原气体的流量和温度的要求就越大。

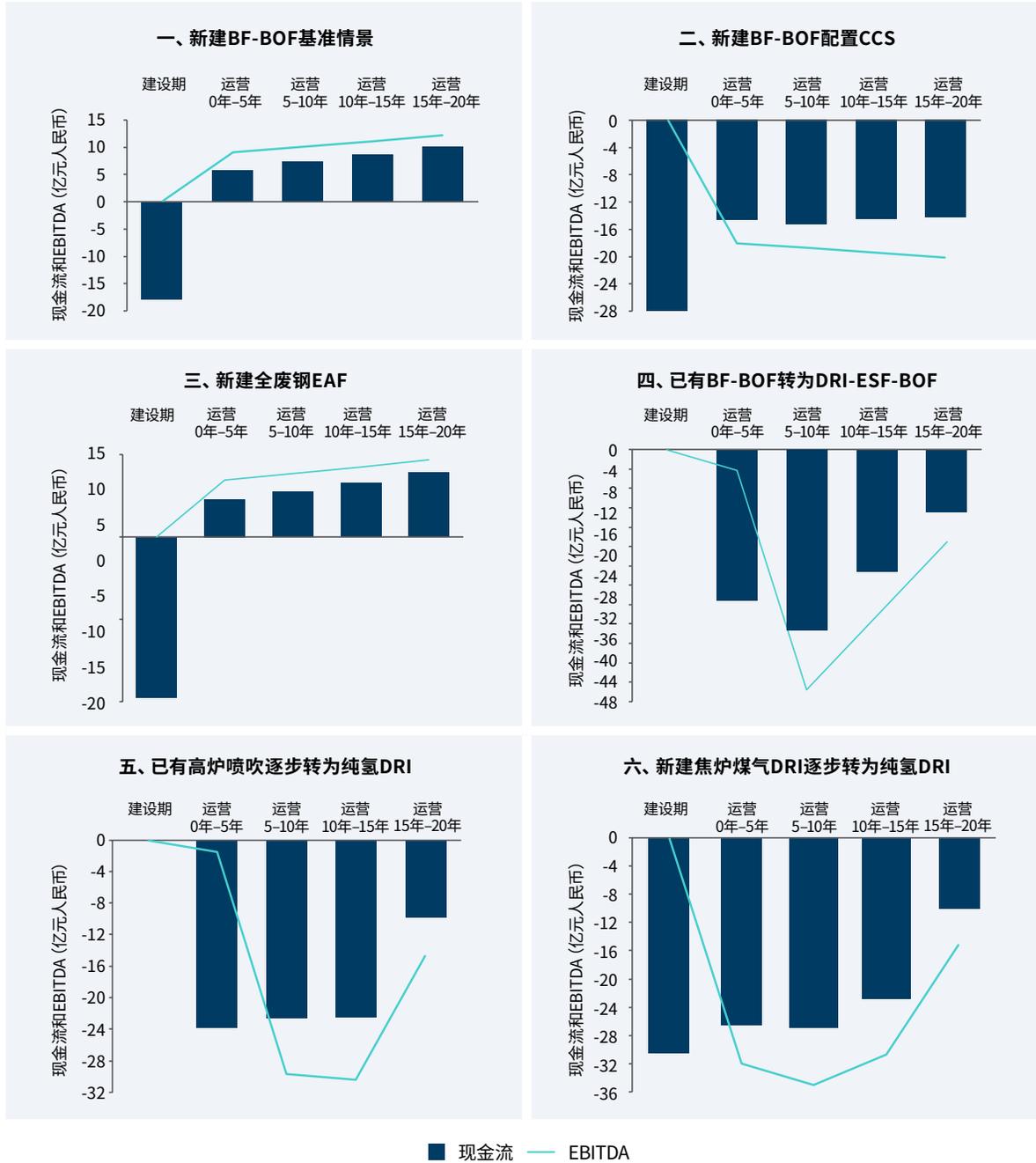
图表 8 展示了本研究涵盖的六种典型转型路径，均假设项目于 2026 年开始运行，考虑此后的 20 年为周期。其中路径一为基准情景，即于 2026 年开始运行 BF-BOF 产能，无添加 CCS 设备，一直运行到 2045 年。路径二在路径一的基础上添加了 CCS 设备，CCS 设备从 2026 年建成起便开始运行。路径三则全程采用全废钢 EAF 的技术路线，无技术路线转变。路径四、五、六均为与氢冶金相关的转型路径，其中路径四是已有 BF-BOF 产能转型为 DRI-ESF-BOF，改造于 2030 年进行；路径五和六均为在 2035 年实现全氢 DRI-EAF 技术路线的转型，区别在于路径五在已有高炉进行喷吹焦炉煤气这一过渡技术的基础上，于 2030 年建设竖炉并采用焦炉煤气混掺 30% 绿氢的 DRI 技术，并在五年过渡期后转为全绿氢 DRI；而路径六考虑新建使用焦炉煤气的 DRI 设施，于 2030 年对设施进行适应绿氢的改造，并使用 80% 绿氢，同样经过五年过渡期后转为全绿氢 DRI。由于路径五中从高炉转为 DRI 设施的技术难度更大，而作为路径六起始技术的焦炉煤气 DRI 已有较好的设施基础，本研究假设在 2030-2035 年的过渡期间，路径六使用了更高比例的绿氢作为还原剂。

如上所示的六种转型路径分别对应不同的资本支出和运营支出，例如设备大修和适应绿氢改造对应资本支出，使用不同种类和组合的还原剂（焦炭、焦炉煤气、绿氢等）对应运营支出等，作为关键输入进入模型。

2.3 转型成本：以近零碳为目标的项目投入测算

本研究使用 1.3 中提到的项目级别经济性模型，分别测算了上述各转型路径下，如不考虑政策、市场等外部支持，以近零碳为转型目标的典型项目^{iv}的现金流和税息折旧及摊销前利润 (EBITDA)^v 等指标，以衡量项目收入状况和盈利性。为简化对各转型路径的对比研究并尽量排除产品价格波动对项目财务表现的影响，本研究将热轧钢价格设定为使基准情景的净现值为 0 的水平，以更好地反映和对比不同转型路径的盈利水平。模型计算的结果概览如图表 9 所示：

图表 9 以近零碳为目标的转型路径中项目现金流及 EBITDA



^{iv} 假设项目产能为100万吨热轧钢/年，全废钢EAF的废钢比为100%，其余转型路径废钢比均为20%。
^v 在本研究中，现金流指的是项目在一定时期内现金流入减去现金流出的差额，用于衡量项目整体的收入情况；EBITDA 是指不考虑利息、税项、折旧及摊销的利润，用于消除不同技术路线资本设备投入对应的折旧摊销费用的影响，衡量项目的核心盈利能力。

通过对基准情景（即转型路径一）和其它五种情景的对比，可得出如下结论：

- 在不考虑政策、市场等外部支持条件的情况下，在以近零碳为目标的转型路径下，项目的财务表现大部分较不理想。整体而言，这是涉及碳减排的新建及改建相关设备的一次性资本支出和 CCS 设备运行、绿氢利用等运行支出共同影响的结果。
- 转型路径三（新建全废钢 EAF）由于建设期投入较少，其财务表现略低于基准情景，但优于其他转型路径。考虑到废钢资源有限，全废钢 EAF 无法支撑钢铁行业近零碳转型的全部需求，因此其它转型路径的发展仍然必要。
- 转型路径二（BF-BOF 配置 CCS）和转型路径三（全废钢 EAF）在经过建设期的较大投入后，现金流和盈利水平维持在相对稳定的水平，而转型路径四、五、六这些与氢冶金相关的转型路径的经济性则会随绿氢成本的下降有较快提升，但仍不足以支持项目获得盈利。
- 对于近零碳钢铁的转型路径，项目中后期应采用符合近零碳钢铁标准的终极技术。该研究中假设的六条转型路径中，转型路径三、四、五和六属于近零碳钢铁的转型路径，可以作为钢铁行业降碳的项目级方向指引。

第三章 高转型成本挑战下的综合解决方案

3.1 多方合力的综合解决方案：政策、需求侧与金融的角色

近零碳排放钢铁项目的经济性指标提升和最终投资决策的实现不仅需要作为项目运营方的钢铁企业的努力推动，还需要来自政策、需求侧、金融等相关方的共同支持（图表 10）。

图表 10 各相关方对推进近零碳钢铁项目的支持手段

相关方	支持手段	举例
生产支持	生产企业利用自有的资金和资源推动低碳项目发展	自有资金支持、低价原料和劳动力支持
		上下游资源对接、优先应用项目产品
政策支持	政府和监管机构在国家或地方层面实施的加速工业脱碳的措施	碳市场、碳税、产量补贴、设备补贴
		产能置换政策、基础设施建设规划
金融支持	金融机构对项目融资的支持,降低项目的资金成本	转型贷款、转型债券、SLB、绿色股权投资
		信用担保、转型金融联盟
需求支持	需求侧相关方支付绿色溢价以及承诺采购的意愿	低碳采购中的绿色溢价
		采购承诺和供应协定

钢铁企业作为项目运营方，可以利用自有资金和资源推动向近零碳项目的转型。在这种推动方式下，企业可充分发挥主观能动性，更有针对性地协调资源，但可能会受到自身业务范围和运营规模等的限制。

政策也是对推进近零碳钢铁项目部署的有力支持手段。约束性的政策具有执行力度更强、覆盖面更广的特点，鼓励性的政策则发挥一定的指向和激励作用。此外，碳市场、碳税、补贴和专项资金等也将直接对近零碳钢铁项目的经济性产生影响。其中，碳市场和碳税都将通过增加高碳排放生产的成本来使较低碳的生产获得优势。补贴类的政策也具有多种形式，例如，对符合一定要求的原料（如绿氢利用）、产品（如符合一定低碳标准的钢铁）等按产量发放补贴金，或针对低碳冶金关键设备（如直接还原竖炉、电解槽）等，按设备资本投资的一定比例发放的补贴。

从需求侧看，买方承诺采购低碳、近零碳钢铁并为其支付绿色溢价也可以帮助稳定低碳、近零碳钢铁的销售渠道和现金流。钢铁行业主要的下游，如建筑、汽车、机械等，可以在钢材产品性能达标的前提下，为具有较低碳排放的钢材支付额外的溢价，以认可其低碳属性。这一举措不仅贡献于买方自身供应链的碳减排，也可为推动较低碳排放钢的发展助力。目前，在国际上，绿氢冶金的溢价水平可达到 20%-30%。¹⁵除了在售价上体现认可低碳属性外，买方对低碳、近零碳钢的大规模或连续采购承诺也可以降低其库存积压风险，助力相关项目的稳定运营。

从金融的角度看，通过对符合一定低碳要求的企业、项目等提供融资支持或降低资金成本，也可帮助缓解企业自有资金不足的压力。低碳、近零碳钢铁项目的前期投资较大，回报周期较长，金融机构的支持可帮助钢铁企业建立信心、推动项目的投资决策确定和设施建设的落地。对于转型的金融支持通常包括转型贷款、转型债券、可持

续发展挂钩债券（Sustainability-linked bond, SLB）、绿色股权投资等，这些金融工具可以小幅减少企业的资本成本，提高项目经济性。在中国的金融体系下，钢铁行业由于其高排放的特点，不符合绿色贷款和绿色债券的要求，但聚焦于支持碳减排的转型贷款和转型债券可有效降低钢铁转型相关项目的融资成本。此外，以绿色参数为关键绩效指标（KPI）的SLB也逐步成为钢铁行业融资的偏好，利率与KPI挂钩的机制为资金成本降低提供了更大的空间。绿色股权投资的大体可分为财务投资和战略投资，前者以财务回报为主要目标，多是以绿色转型为主题的独立风险投资基金，而后者则以打通产业链和服务企业战略为主要目标，多是依附于大型企业的企业风险投资（Corporate venture capital, CVC），两者均可作为近零碳钢铁项目提供金融支持。

国际上看，已有一部分通过上述多方合力有效推进近零碳排放钢铁项目部署的案例。瑞典企业 Stegra（原名 H2 Green Steel）正在瑞典北部的布登市建设一个绿氢直接还原铁配套电炉炼钢项目，吨钢减排幅度可达95%，预计2025年投产。在投产前，Stegra已经与下游公司签署了超过50%初始产量的采购合同，采购方包括保时捷、奔驰等具有较大规模需求的公司。采购合同包含有长达七年的采购约定，绿色溢价也多在20%以上。^{16,17}同时，项目已获得瑞典能源局和欧盟的政府拨款支持。其中，最新的且额度较高的支持是来自欧洲复苏与韧性基金（Recovery and Resilience Facility, RRF）的2.6亿欧元。¹⁸在金融方面，在 Euler Hermes 等信用保险机构的担保下，Stegra得到了联合信贷银行、法国兴业银行的优先债，和相对小型机构的次级债。股权投资方也包括新加坡GIC、欧洲投资银行等财务投资者，以及奔驰集团、日立能源等战略投资者。¹⁹来自多方的各类支持进一步整合，放大了支持力度，例如，需求侧的长期采购合同可作为融资抵押，而瑞典国家债务办公室的支持也可作为绿色信用的担保。²⁰可见，项目的顺利立项和稳步建设不仅依靠运营方的努力，也是多利益相关方共同助力推动的成果。

3.2 我国先行实践与趋势

目前，我国钢铁行业的低碳转型方面主要由大型企业，尤其是大型央企引领。一方面，大型钢铁企业具有更雄厚的资金和资源，以投建重资产的低碳、近零碳排放钢铁项目；另一方面，大型企业尤其是央企受更强的社会责任驱动，更重视发挥引领作用。而要充分利用好这些先行实践的宝贵经验，并加速低碳、近零碳钢铁走向市场化，需要构建集政策、需求侧、金融等多方合力的综合解决方案，以加速近零排放钢铁产能的落地和规模化发展，从而形成规模经济进一步降低成本，形成良性循环。目前，我国已开始了各个层面的探索和实践，为钢铁转型进程提供了有力的推动作用（图表11）。未来，基于这些实践还可形成多方合力的解决方案，加速推进向近零碳钢铁的转型。

图表 11 我国各相关方对推进钢铁低碳转型的支持

相关方	支持手段	示例
政策	碳价	钢铁行业已纳入全国碳市场, 2025年将开始碳配额交易
	补贴、奖励	吉林省对年产绿氢100吨以上的项目, 连续三年以每公斤15/12/9元为标准补贴; 对绿氢存储设备投资补贴20%
金融	更低的利率, 降低项目的融资成本	渣打中国为河钢供应链提供首笔转型融资贷款; 宝钢股份发行低碳转型绿色债券用于湛江氢冶金, 发行利率2.68%
	其他金融工具	可持续挂钩债券、可持续挂钩贷款、绿色股权投资等
需求侧	绿色溢价	河钢集团生产近零碳绿色模具钢, 批量应用于特斯拉等新能源汽车, 较普通模具钢加价18%以上
	采购承诺	宝马集团与河钢集团签署绿色低碳钢铁供应链的合作备忘录, 宝马沈阳生产基地量产车型将逐步使用河钢的低碳汽车用钢
其他	其他可能的措施	专项资金
		大冶市矿区绿电绿氢制储加用一体化项目获得国家发改委清洁低碳氢能创新应用工程项目的中央预算内投资1.2亿元

政策方面，有关部门已在国家和地方层面计划或实施了降碳激励措施。其中，全国碳市场对钢铁行业的纳入将提升低碳排放钢铁的竞争力。根据生态环境部于 2024 年 9 月发布的《全国碳排放权交易市场覆盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案（征求意见稿）》，钢铁行业在 2024 年进入首个管控年度，并在 2025 年前完成首次履约。²¹ 在补贴方面，我国目前已有对绿氢的生产和消费进行补贴的实践，对支持氢冶金的发展可起一定作用。例如，吉林省对年产绿氢 100 吨以上的项目，连续三年依次以每公斤 15 元、12 元、9 元的标准补贴，并对绿氢存储设备的投资按 20% 补贴。²² 然而，地方政府的债务压力为补贴落实增加了不确定性。²³ 此外，现阶段尚未有特别针对钢铁用绿氢补贴政策。

金融方面，我国对新能源等的绿色金融体系相对成熟，但针对钢铁等高排放行业的转型金融体系仍在发展过程中。银行贷款是重工业企业的重要融资手段，转型贷款也发挥了重要作用，可以使转型项目获得更低利率的贷款支持。例如，渣打中国为河钢集团供应链管理有限公司提供首笔转型融资贷款。²⁴ 对数据披露和规范性运营要求较高的转型债券也正成为钢铁行业青睐的融资手段。宝钢股份发行了低碳转型绿色债券用于其位于湛江的氢冶金示范项目，发行利率为 2.68%；²⁵ 中国银行也发行了全球首笔钢铁转型金融债专项支持河北省钢铁行业转型。²⁶ 作为相对新型的融资手段，SLB 为钢铁行业转型提供了更灵活的融资方案，并通过 KPI 的设定起到激励减排的作用。例如，鞍山钢铁选取生产基地吨钢综合能耗作为 KPI 发行了 20 亿元的 SLB。²⁷ 钢铁企业和金融机构的战略合作协定也可作为具体的金融支持提供指向，如中国人民银行鞍山市分行组织辖区 15 家银行金融机构与鞍钢集团签署了《绿色金融联盟合作框架协议》。²⁸

钢铁 - 汽车产业链的协同行动是需求侧行动支持钢铁行业低碳转型的代表。受其自身碳减排目标的驱动，奔驰、宝马、沃尔沃等跨国车企低碳排放钢采购起步较早，同时长城、奇瑞等国内车企也在快速布局低碳排放钢采购。以河钢集团及其下游买方的实践为例：河钢生产的近零碳绿色模具钢将批量应用于特斯拉的新能源汽车生产，其较普通模具钢加价 18% 以上；²⁹ 宝马集团与河钢集团签署绿色低碳钢铁供应链的合作备忘录，宝马沈阳生产基地量产车型将逐步使用河钢的低碳汽车用钢。³⁰ 然而，目前整体来看，买方对绿色溢价支付意愿相对较低。这一方面是因为我国市场缺乏广泛透明的溢价标准参考，另一方面也因为低碳排放钢铁减排程度的衡量具有一定难度。2024 年 10 月，中国钢铁工业协会发布的《低碳排放钢评价方法》团体标准为实现钢铁减排程度的可比、促进低碳排放钢采购和产业链协同降碳提供了坚实基础。³¹

除了上述支持外，针对“首台套”（首台或首套先进技术装置）等的专项支持也发挥了积极作用。此类支持多为申请制，评价标准也会随着行业和技术发展而调整。例如，国家发改委的清洁低碳氢能创新应用工程项目具有一定规模的专项资金预算，该预算可为创新性低碳项目提供资金支持，大冶市矿区绿电绿氢项目获得其 1.2 亿元的支持。³² 河钢集团推出的全国首个“氢基竖炉—近零碳排放电炉新型短流程技术开发与应用项目”，被列为国家发改委核心技术攻关专项，获国家奖补专项资金 9500 万元。³³

3.3 与各转型路径匹配的综合解决方案：量化的情景分析

第二章对各低碳、近零碳钢铁生产技术路线的经济性进行了分析，并进一步给出从较高碳的技术路线逐渐过渡到近零碳技术路线的整体转型成本。在较高的转型成本下，钢铁企业的低碳转型努力还需要政策、需求侧、金融等多方合力的支持。尽管目前，国际和国内均有各类先行实践，上述各方如何配合，以实现有序而有效的转型，是亟需探索的话题。因此，本节将基于 2.3 节的六大转型路径，量化分析 3.1、3.2 节提及的多相关方支持对转型成本的影响，力求给出应对转型成本较高问题的综合解决方案，为政策制定、需求侧行动、金融机制设计等提供参考。本研究基于我国政策、需求侧和金融方面已有实践及其支持力度，合理判断其未来发展趋势，给出各影响因素随时间变化的情景假设：

政策：

- 补贴：以项目于 2026 年投产为例，按利用绿氢的量进行补贴，保守假设其幅度为 2.8 元 /kg；从 2032 年起，补贴逐步退坡并在 2037 年完全退补。此外，低碳设备投资补贴额度保持在设备总投资的 20%。^{vi}
- 碳市场：假设碳价在 2026、2030 和 2050 分别达到 100、150 和 500 元 / 吨^{vii}，长流程和短流程的配额分配基于各自的基准值，直接还原铁流程参考长流程基准值。然而，需要指出，碳价水平和配额分配方式在未来存在一定不确定性，这也可能影响本研究的量化分析结果。

需求侧：参考目前已有的国内外实践设定买家对绿色溢价的支付意愿。假设对于使用 CCS、焦炉煤气 DRI 等过渡技术的项目，买家的绿色溢价支付水平为 10%，而对纯绿氢 DRI 项目，买家的绿色溢价支付水平为 20%。在项目的中后期，随着低碳、近零碳生产的成本下降，需支付的绿色溢价逐步减少。

金融：选取转型贷款为代表性金融工具，作用于项目资本结构的债权部分，对债权的利率有 50bp 的优惠力度，以降低项目的融资成本。

图表 12 本研究模型中对项目初期各相关方支持力度的假设

相关方支持	支持类型	数值	单位
碳市场	政策支持	100	元/吨碳
绿氢补贴	政策支持	2.8	元/kg
DRI设备资本投资补贴	政策支持	20%	%
转型金融贷款利率优惠	金融支持	50	bp
绿色溢价(过渡技术)	需求支持	10%	%
绿色溢价(纯绿氢DRI)	需求支持	20%	%

各转型路径中不同阶段的技术路线、碳减排力度等的变化情况不同，相应地，上述各影响因素发生作用的阶段和力度也存在差异。例如，在转型路径五（已有高炉喷吹逐步转为纯氢 DRI）中，项目初期的技术路线为高炉喷吹，此时相应产品并没有额外的溢价支付，而当技术路线过渡到 30% 绿氢 DRI 时，买家支付 10% 绿色溢价，而当完全转到纯绿氢 DRI 技术路线时，买家支付的绿色溢价可达到 20%。

^{vi} 参考吉林省对绿氢存储设备投资的补贴力度。

^{vii} 清华大学《2060年碳中和目标下的低碳能源转型情景分析》中的2050年碳价预测为115美元/吨，Slater H.等《2022年中国碳价调查报告》中的2050年碳价预测是239元/吨，本研究取其平均值，约为500元/吨。

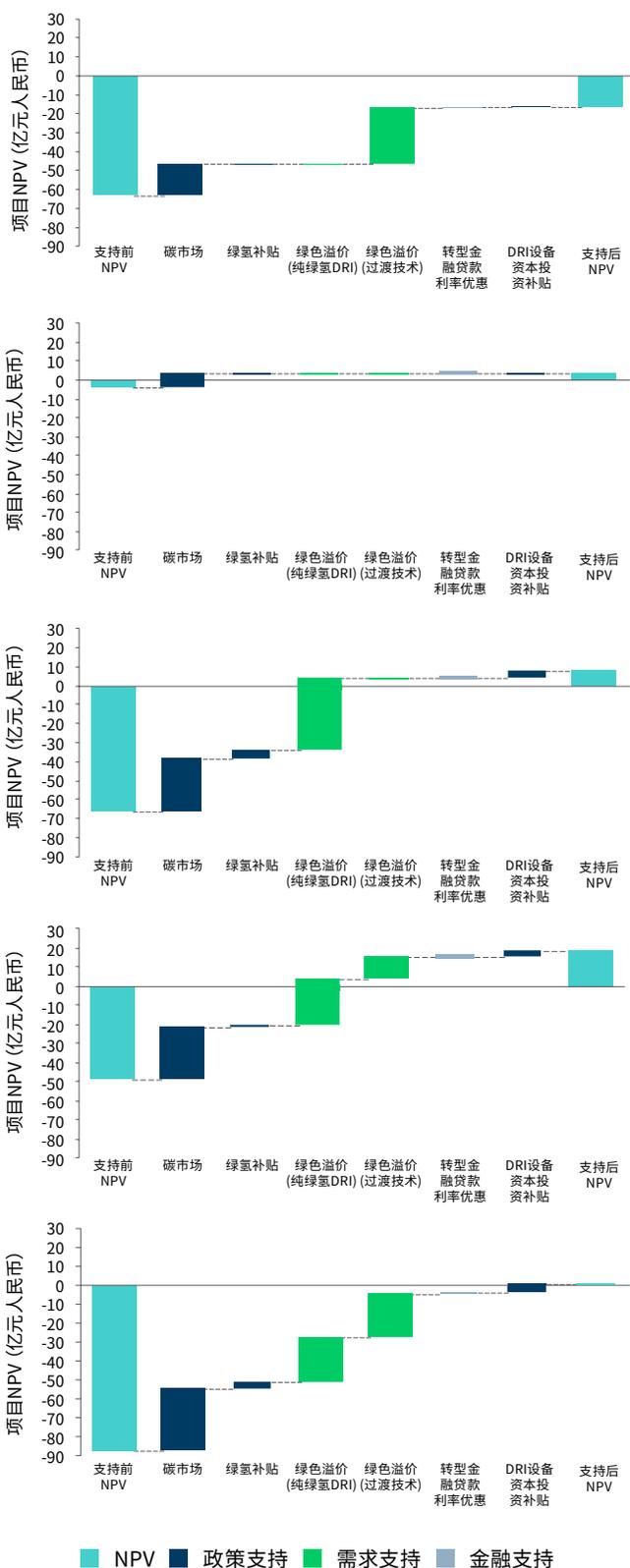
在政策、需求侧、金融等多个维度的支持下，在各转型路径中，项目的财务指标得到不同程度的改善（图表 13）：

- 转型路径二（新建 BF-BOF 配置 CCS）中，项目的 NPV 提升了 47 亿元，这主要来源于部分碳减排带来的产品绿色溢价，以及在碳交易中取得的收益。尽管 NPV 得到较大幅度的改善，但仍为负值，即与无 CCS 配置相比难以有额外收益。这是因为 CCS 是在现有路线上增加的额外装置，带来了附加成本，无法达到与原路线平价。同时，在高炉、自备电厂以外的环节，CCS 效率较低，且其下游二氧化碳运输、利用和封存产业链较长，依赖基础设施成熟度和地质资源可得性。因此，在钢铁行业低碳转型过程中，CCS 扮演的角色有限。
- 转型路径三（新建全废钢 EAF）在不需要额外支持的情况下，经济性表现仅略差于基准情景。在多方合力共同支持下，全废钢 EAF 的成本竞争力较为突出。其中，碳市场对全废钢 EAF 转型路径的项目财务表现的影响最为重要；而在现实中，这一影响将很大程度上取决于碳市场中对短流程相关配额分配方法的规则设定。
- 转型路径四（已有 BF-BOF 转为 DRI-ESF-BOF）在没有额外支持的情况下，转型成本较高。而在政策、需求侧、金融等多方支持下，项目的 NPV 可从 -66 亿元提升到 8 亿元人民币，与基准情景相比，项目从亏损变为收益，投资回报期为 12 年左右。
- 转型路径五（已有高炉喷吹逐步转为纯氢 DRI）的项目 NPV 同样在多方支持作用下转负为正，投资回报期约 12 年。除了得益于碳市场的影响外，这一转型路径在逐渐实现低碳的过程中，得到了需求侧买家不同程度的绿色溢价支付意愿的支持。买家除了为纯绿氢 DRI 产品支付绿色溢价外，在过渡时期，也为采用焦炉煤气混掺绿氢 DRI 生产的低碳产品支付了一定的溢价。
- 转型路径六（新建焦炉煤气 DRI 逐步转为纯氢 DRI）的成本挑战最大，也相应需要力度更强的措施以支持其发展。在转型前期，可实现部分碳减排的产品若可获得一定程度的溢价支付，将大大助力整体项目 NPV 的改善。例如，在技术路线为焦炉煤气 DRI 的阶段，若买家支付约 10% 的绿色溢价，项目 NPV 将得到显著提升。在多方合力支持下，这一转型路径的项目 NPV 同样可达到优于基准情景的水平，但其投资回报期比转型路径四、五更长。

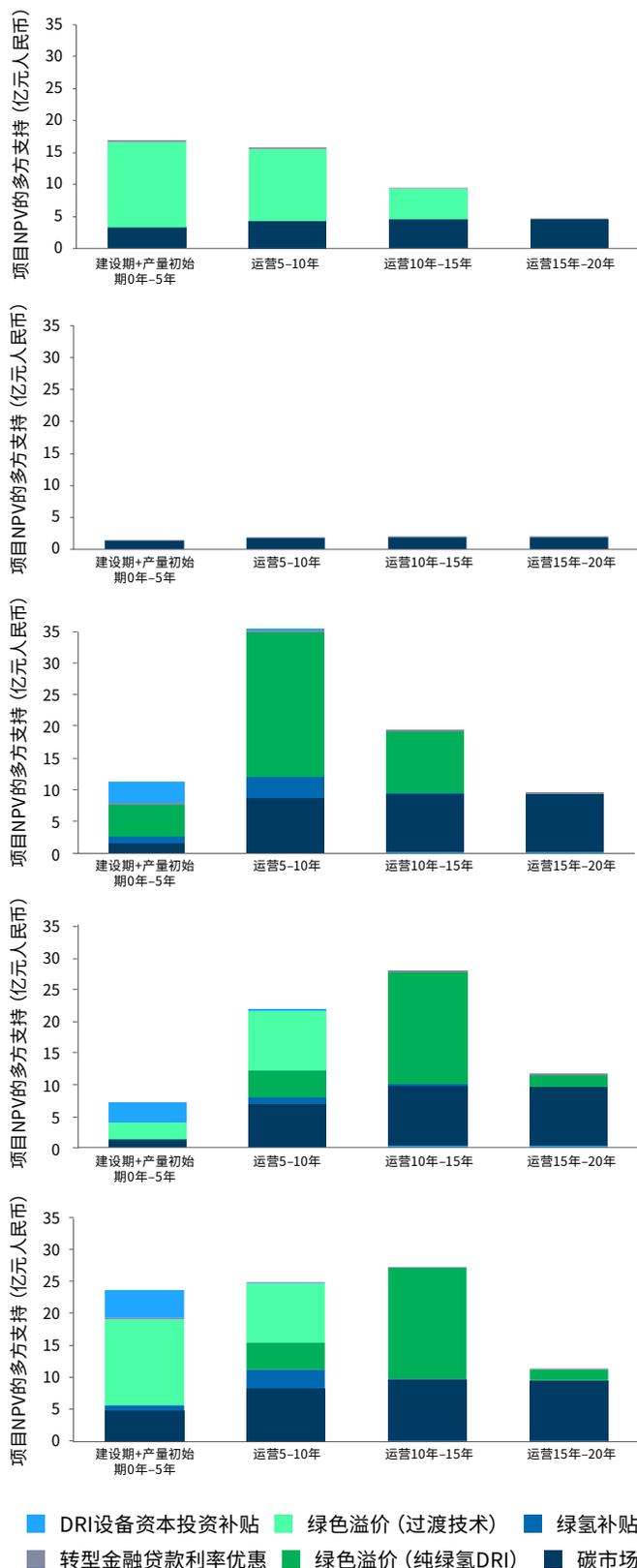
在转型的不同时期，各类支持对项目 NPV 改善的贡献存在差异。基于此，可对比得出政策、需求侧、金融等支持手段在短、中、长期的发力优先级和力度，从而形成符合行业发展阶段性特征的方案，有针对性地支持近零碳钢铁的部署。以本研究模型假设的 20 年项目周期为例，在早期阶段（前 5 年），政策、需求侧、金融等各方的支持尤其重要，需要共同发力，提供足够的激励让更多项目启动，并帮助其更好地推进到稳定运行阶段。此外，不同的支持手段在短、中、长期的角色也各有侧重。例如，部分转型路径由于需引入 DRI，需要较大的初期资本投入，此时，补贴、专项资金等政策的支持尤为重要。同时，在转型初期，买家为实现部分碳减排的产品支付较低溢价，为碳减排水平更低的产品支付更高溢价；而随着技术发展和规模经济的体现，在转型中后期，低碳、近零碳钢铁成本下降，买家仅需支付较低溢价甚至以平价、低价就可以采购到碳排放水平更低的产品。此外，随着碳排放总量要求逐渐收紧和碳价的提升，碳市场的角色在转型中后期愈发凸显。

图表 13 各类支持手段对不同转型路径项目财务表现的影响

多方支持下的项目NPV

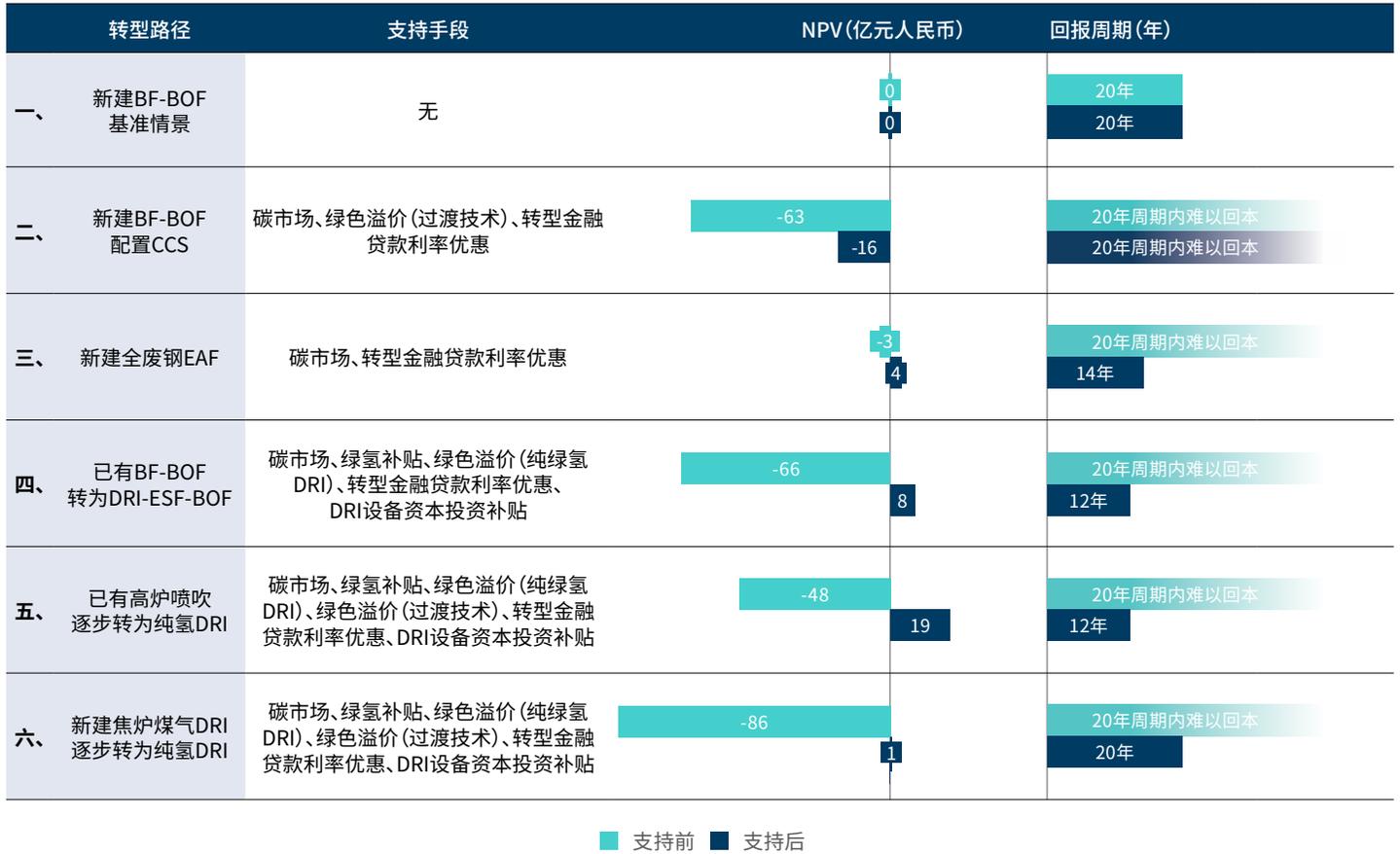


不同项目阶段的多方支持作用



注：为简化对各转型路径的对比研究，并尽量排除产品价格波动对项目财务表现的影响，本研究将热轧钢价格设定为使基准情景的NPV为0的水平，其他转型路径的NPV是与基准情景的差值，并非项目的绝对NPV。

图表 14 各转型路径在多方合力支持前、后的项目财务表现



注: 为简化对各转型路径的对比研究, 并尽量排除产品价格波动对项目财务表现的影响, 本研究将热轧钢价格设定为使基准情景的 NPV 为 0 的水平, 其他转型路径的 NPV 是与基准情景的差值, 并非项目的绝对 NPV。同理, 回报周期均以基准情景的 20 年做参照。

第四章 行动建议

钢铁行业是经济社会体系中的基础性、支柱型产业，其低碳、近零碳转型不只是本行业发展趋势，也对产业链各环节的碳减排和可持续发展有重要影响。要实现从战略到目标、从目标到路线、从路线到行动的转化，需要尽快实现第一批近零碳项目的顺利落地投产和稳定运行，作为进一步规模化的基础。而面对投入大、成本高、资金紧等问题，钢铁企业需要同时具备理性和前瞻性，在恰当的时间点部署合适的技术路线，形成循序渐进且足够积极的转型路径。与此同时，政策制定者、需求侧和金融行业等相关方也需要为钢铁行业赋能，在转型的各个阶段提供符合阶段特征的支持。

为了推动钢铁生产向低碳、近零碳的转型，加速相应项目的投资决策和落地，本报告提出以下六项行动建议：

持续深化对低碳、近零碳技术路线和转型路径的经济性研究，并落实于企业转型路线和项目规划中。中国钢铁工业协会于 2022 年发布了《钢铁行业碳中和愿景及技术路线图》，并在 2024 年更新，形成了详细的技术图谱。此外，我国已有相当部分的钢铁企业积极制定了碳减排目标和路线图。对于技术方向和部署阶段，行业已有较强共识；而对于成本经济性，尤其对于项目层面，相关研究还需要持续深化并动态调整，以帮助项目最终投资决策的落实和运行风险管理。本研究仅基于一定假设，给出针对若干转型路径的情景分析。在实际操作中，由于企业的产能基础和资源可得性不同，仍需有针对性地制定转型路径，并综合评估初始资金、回报周期、净现值等项目级经济性指标，优化已有产能向新建产能转型的节奏。

发挥优势地区的带动作用，先行先试落地低碳、近零碳钢铁项目。目前，钢铁产能多布局在沿海地区，一方面接近铁矿石资源，另一方面也更接近市场。在碳减排趋势下，可再生能源等资源的布局也将影响转型进程。同时具有钢铁工业基础和较优的脱碳资源的区域，更有可能满足各转型路径在不同阶段的资源需求，可率先形成工业脱碳集群，先行先试低碳、近零碳钢铁项目，最大程度地优化经济性。例如，钢铁产能较大的区域，可尽可能利用已有设备（如通用设备、公辅等）进行低碳、近零碳改造和部署，同时在短期内充分利用现有焦炉煤气，为直接还原铁提供过渡气源；结合当地较优的可再生能源资源，率先探索落地绿氢冶金项目，并适度超前地提升绿氢在还原气中的占比；废钢资源丰富的区域，还可加速废钢电炉钢的规模化和绿电比例提升；等等。

强化产业链各方的沟通交流，增强转型共识和探索成本共担机制。钢铁生产中，低碳、近零碳的技术路线成本较高，难以依靠本行业或单一企业的力量实现市场化。尤其在早期阶段，更需要适宜的支持机制帮助形成可行案例。同时，钢铁行业的碳减排效果也将传递下游等多相关方的气候目标实现。若钢铁行业、企业以及政策、需求侧、金融等相关方形成紧密的生态系统，将大大提升资源整合和优化效果，帮助提高钢铁转型项目的经济性表现和部署速度。在此过程中，宜探索合理的机制，以共担转型成本，共享减排收益。在转型初期，充分发挥政府的引导和支持作用以及领先企业的标杆作用，并积极引入低碳采购、碳市场、转型金融等市场化手段，带动长期良性发展。

建立和完善有针对性的政策，尤其在项目初期提供支持。行业的转型降碳离不开政策的规范和指引，政策工具应尽可能涵盖钢铁碳减排相关的各个环节，并对绿氢应用等重点环节制定针对性政策。约束性政策为企业设定标准和规范，拉动行业的整体降碳水平；鼓励性政策注重加速先行企业行动。补贴方向和力度有的放矢，并注重补贴的引入和退坡机制设计，在早期提供支持的同时，引导项目在稳定生产后更多依靠市场驱动。例如，对于直接还原铁等需要新设备投资的项目，按固定资本投入的适当比例给予支持，以缓解运营方早期投入重资产的压力；在项目稳定运行阶段，可按绿氢用量、绿铁产量、绿钢产量等动态指标进行补贴，并随着成本下降逐步退出。在此过程中，完善补贴认证方法，避免不符合标准的项目影响市场公平性。

推动低碳钢铁采购，以先行行动助力市场形成。汽车、建筑等下游行业、企业对低碳、近零碳产品的认可对于钢铁行业的转型尤为重要。在近零碳钢铁项目的早期，钢铁企业与下游企业就可进行充分交流，以求就采购意向达成一致，并用可信的评价标准筛选高质量的低碳、近零碳钢铁项目和产品。鼓励采购方为碳强度更低的产品支付一定溢价，并分别给予过渡技术和终极技术适宜的溢价幅度。例如，对高炉配备 CCS、非全绿氢直接还原、提升废钢比、非绿电或部分绿电全废钢电炉等，支付较低溢价；对绿氢直接还原支付较高溢价；对于全废钢电炉，支付较高但避免过度的溢价，以实现废钢应用的良性发展。签订采购合同时，大额的、长期的采购合同将更有利于项目现金流预期，从而降低风险。在长期采购中，随着先行市场形成和低碳、近零碳生产成本下降，溢价可逐步退出。此外，也宜鼓励下游企业直接投资低碳、近零碳钢铁项目，或鼓励钢铁企业将采购订单作为转型贷款的抵押，进一步盘活更多支持。

强化金融和钢铁行业的互信沟通，加强转型金融支持力度。钢铁行业的转型项目对投资规模有较高要求，除企业的自有资金外，贷款等融资方式也可有效支持。对于银行、基金等金融机构而言，提高对范围三排放进行管理的意识愈显重要，尤其是可通过对金融资产交易、贷款和投资活动的气候影响的评估，增强对钢铁行业的转型引导和支持。具体而言，需要激发转型金融的工具创新，扩大转型贷款、转型债券等金融工具的规模，并兼顾可持续挂钩债券等具有深度降碳激励的新型金融工具。此外，开发适用于钢铁行业融资的标准，使其与企业碳减排和低碳采购所使用的标准相协同，并兼具与宏观气候目标的一致性和实践的可操作性。

参考文献

- 1 Steel GHG Emissions Reporting Guidance, RMI, 2023, https://rmi.org/wp-content/uploads/2022/09/steel_emissions_reporting_guidance.pdf
- 2 汪旭颖, 李冰等, 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究, 环境科学研究, 2022, <http://www.hjkxyj.org.cn/cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.11>
- 3 严刚, 郑逸璇等, 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究, 环境科学研究, 2022, <http://www.hjkxyj.org.cn/cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.13>
- 4 “这场会议上, 钢铁工业低碳路线图完成重要更新”, 中国冶金报社, 2024
- 5 Unlocking The First Wave Of Breakthrough Steel Investments, Energy Transitions Commission, 2023, <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf>
- 6 严刚, 郑逸璇等, 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究, 环境科学研究, 2022, <http://www.hjkxyj.org.cn/cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.13>
- 7 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, RMI, 2021, <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2021/09/202109290950304147.pdf>
- 8 “2025年要如期实现电炉钢占比15%目标, 该如何落实?”, 中国钢铁新闻网, 2024, http://www.csteelnews.com/xwzx/hydt/202401/t20240129_84379.html
- 9 Iron and Steel Technology Roadmap, IEA, 2020, https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
- 10 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, RMI, 2021, <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2021/09/202109290950304147.pdf>
- 11 汪旭颖, 李冰等, 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究, 环境科学研究, 2022, <http://www.hjkxyj.org.cn/cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.11>
- 12 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, RMI, 2021, <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2021/09/202109290950304147.pdf>
- 13 “氢基还原低碳炼钢技术面临的严峻挑战”, 世界金属导报, 2023, http://www.jsjt.org.cn/index.php/Home/Index/art/a_id/15975.html
- 14 低碳排放钢评价方法, 中国钢铁工业协会, 2024
- 15 “H₂ Green Steel: Decarbonizing Steel Production with Green Hydrogen”, Climate Rising, 2024, <https://www.hbs.edu/environment/podcast/Pages/podcast-details.aspx?episode=1069998114>
- 16 “H₂ Green Steel secures another seven-year offtake, as lenders hint at what makes these short-term deals bankable”, Hydrogen Insight, 2024, <https://www.hydrogeninsight.com/industrial/h2-green-steel-secures-another-seven-year-offtake-as-lenders-hint-at-what-makes-these-short-term-deals-bankable/2-1-1647600>
- 17 “Mercedes-Benz and H₂ Green Steel secure supply deal”, Mercedes-Benz Group, 2024, <https://group.mercedes-benz.com/responsibility/sustainability/climate-environment/h2-green-steel.html>
- 18 “EU approves €265m for Sweden’s H₂ Green Steel plant”, Hydrogen Europe, 2024, <https://hydrogeneurope.eu/eu-approves-e265m-for-swedens-h2-green-steel-plant/>
- 19 “Five Lessons for Industrial Project Finance from H₂ Green Steel”, RMI, 2023, <https://rmi.org/five-lessons-for-industrial-project-finance-from-h2-green-steel/>
- 20 “Henrik Henriksson: Rapidly scaling a green steel start-up”, McKinsey Sustainability, 2023, <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/henrik-henriksson-rapidly-scaling-a-green-steel-start-up>

- 21 全国碳排放权交易市场覆盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案（征求意见稿），生态环境部办公厅，2024，https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202409/t20240909_1085452.html
- 22 关于印发支持氢能产业发展若干政策措施（试行）的通知，吉林省人民政府，2024，http://www.jl.gov.cn/szft/tzcj/tzcj/cyzc_143503/lxcyzzc/202402/t20240201_3036738.html
- 23 “地方政府化债，对氢能产业发展有多大利好”，香橙会研究院，2024，<https://mp.weixin.qq.com/s/He-XsDcv09zByNYhdCHWww>
- 24 “渣打中国为河钢供应链提供首笔转型融资贷款，激发钢铁行业节能降碳新活力”，经济网，2023，<https://www.ceweekly.cn/company/2023/1027/427938.html>
- 25 “5亿元，3年期，利率2.68%! 宝钢股份发行低碳转型绿色债券用于湛江氢冶金”，中国冶金报社，2022
- 26 “中国银行发行全球首笔钢铁转型金融债专项支持河北省钢铁行业转型”，人民网，2023，<http://he.people.com.cn/n2/2023/1013/c192235-40602892.html>
- 27 “20亿元! 鞍山钢铁成功发行可持续发展挂钩债券”，搜狐网，2022，https://www.sohu.com/a/519947045_121123843
- 28 “金融支持钢铁产业绿色转型发展的鞍山调查”，金融时报，2024
- 29 “引领‘绿钢’新材料——河钢集团张宣科技‘全球首例’炼成记”，中国钢铁新闻网，2023，http://www.csteelnews.com/qypd/qydt/202310/t20231011_80237.html
- 30 “河钢与宝马携手打造绿色低碳钢铁供应链”，中国钢铁新闻网，2022，http://www.csteelnews.com/qypd/jnhb/202208/t20220805_65976.html
- 31 “着眼未来，中国版“低碳排放钢”标准重磅发布”，中国钢铁新闻网，2024，http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202410/t20241020_93632.html
- 32 “1.2亿元!湖北第一个国家级氢能项目获批”，中国电力网，2024，https://www.cnenergynews.cn/huagong/2024/02/23/detail_20240223148632.html
- 33 “河钢：领跑新赛道‘氢’动新未来”，中国钢铁新闻网，2024，http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202406/t20240607_88950.html

李抒苒, 薛雨军, 闫榕等, 加速首批突破性近零碳钢铁投资与部署——中国篇, 2024, <https://rmi.org.cn/insights/unlocking-the-first-wave-of-breakthrough-steel-investments-in-china/>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2024年11月, 落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所
的注册商标。