

氢冶金发展模式系列研究之二

钢铁产能与绿色能源优势的 协同释放

传统钢铁基地向绿色制造高地的转型——以河北为例





关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所 (Rocky Mountain Institute, RMI) 成立于 1982 年，是一家立足市场、独立运作的专业智库，致力于通过经济可行的市场化解决方案推动全球能源转型，构建繁荣、韧性、清洁的低碳未来。落基山研究所与企业、政策制定者、科研机构、创业者及跨领域伙伴广泛协作，推动战略性投资，以扩大清洁能源解决方案的规模化部署、减少能源浪费、并提升可负担清洁能源的可及性，在保障能源安全和经济效益的同时，携手共创可持续的美好愿景。目前，落基山研究所的研究和实践已覆盖全球 50 余个国家和地区。



关于河钢集团有限公司

河钢集团有限公司（简称“河钢”）是世界最大钢铁材料制造和服务商之一，以绿色钢铁材料推动人类文明进步为使命，坚持“高端化、智能化、绿色化、融合化、国际化”发展，纵向推进钢铁产业链条向高端制造延伸，横向推进同类业务结构性重组，加快实现“钢铁向材料、制造向服务”转型，致力于成为绿色低碳高端钢铁材料引领者，打造具有世界品牌影响力的跨国工业集团。截至 2025 年底，河钢资产总额达 5,650 亿元，营业收入 4,119 亿元。集团连续 17 年上榜世界 500 强。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所: 李抒苒, 李婷, 薛雨军, 张博雅

河钢集团: 韩星, 郝良元, 李梦龙, 刘金哲, 田京雷, 王雪琦

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

联系方式

李抒苒, sli@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 河钢集团, 钢铁产能与绿色能源优势的协同释放: 传统钢铁基地向绿色制造高地的转型——

以河北为例, 2026, <https://rmi.org.cn/insights/hebei-hydrogen-metallurgy-development-report/>

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。

鸣谢

本报告作者特别感谢以下专家对报告撰写提供的洞见与建议:

李克江 北京科技大学

上官方钦 钢铁研究总院有限公司

王新东 河钢集团

苏伟 北京科技大学

潘建 中南大学

彭天铎 清华大学

本报告所述内容不代表以上专家及其所在机构的观点。

目录

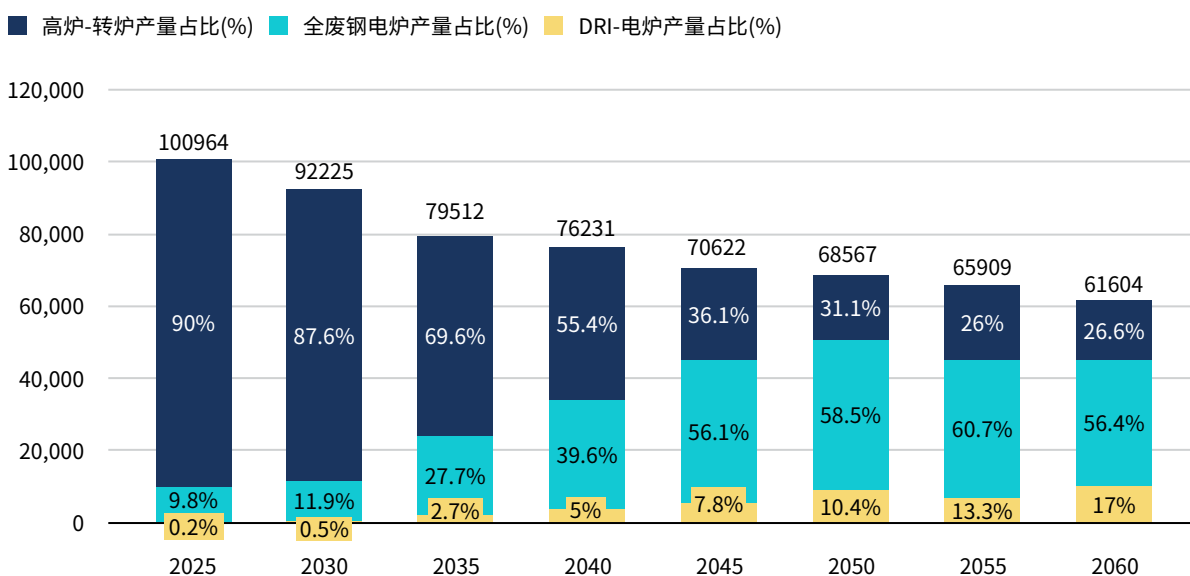
前言	5
第 1 章 河北氢冶金发展的基础条件与综合优势	9
1.1 转型压力正在重塑河北钢铁产业发展路径	9
1.2 政策支持加速氢冶金从示范走向产业化.....	10
1.3 产业、能源与市场优势协同支撑氢冶金发展	12
第 2 章 河钢集团氢冶金项目与产业链优势	14
2.1 多重区位条件支撑既有产业链转型	14
2.2 稳定运行与绿色升级逐步增强项目低碳成效	16
第 3 章 河北省氢冶金项目的经济性评估.....	21
3.1 典型氢冶金部署情景设定与经济性评估框架	21
3.2 氢源成本比较与关键影响因素	23
3.3 不同氢冶金部署情景下的吨钢成本评估	24
3.4 完备产业链优势助力低碳价值实现	25
第 4 章 主要结论和行动方向建议	27
参考文献	30

前言

钢铁行业是实现工业部门深度脱碳的关键战场，而氢冶金则是决定钢铁行业能否迈向碳中和的重要技术选项之一。对于以高炉—转炉长流程为主的中国钢铁工业而言，碳排放不仅来自能源消耗，更深度嵌入炼铁环节对煤炭和焦炭的依赖之中。这意味着，仅依靠能效提升、废钢利用和末端治理等渐进式改进措施，难以实现钢铁行业与碳中和目标相匹配的深度减排。推动铁源生产环节摆脱化石碳依赖，已成为行业转型不可避免的核心命题。在这一背景下，以氢气替代碳作为还原剂的氢冶金，正从前瞻技术逐步走向钢铁行业低碳转型的重要方向。

从长期看，氢冶金的重要性不仅体现在减排潜力，更在于其代表着钢铁生产范式的根本性变革。未来中国钢铁生产将逐步从高度依赖高炉—转炉长流程，转向高炉—转炉、全废钢电炉和直接还原铁—电炉等多种路线并存的格局（图表 1）。其中，直接还原铁—电炉路线在 2030 年前后仍处于产业化早期阶段，预计占国内粗钢产量不足 1%，但随着废钢资源持续积累、碳定价机制逐步完善、绿氢成本下降、直接还原装备技术成熟以及低碳钢需求增长，其产量占比有望在 2060 年提升至 17% 以上，较 2030 年增长超过 30 倍。尽管短期内不会成为钢铁生产的主导路线，氢冶金却有望成为未来数十年钢铁行业增速最快的低碳生产方式之一，并逐步成长为绿氢规模化应用的核心场景。对于一个年产数亿吨级钢铁规模的行业而言，这意味着氢冶金将从示范项目成长为影响全球铁矿石、电力、氢、钢材市场格局的重要生产体系。其意义不仅在于贡献减排，更在于推动钢铁生产从依赖化石碳还原向依赖清洁氢还原转变，为行业深度脱碳提供新的技术支柱。

图表 1 未来中国粗钢产量及各流程占比预测



数据来源：殷瑞钰，上官方钦；RMI 作图。¹

氢冶金技术主要包括高炉富氢冶炼、氢直接还原和氢熔融还原等路线。然而，氢冶金的发展并非单纯的技术替代问题，其商业化进程在很大程度上取决于氢源供给体系的演变。与传统高炉炼铁相比，不同氢源在成本、减排效果和资源可获得性方面存在显著差异，决定了氢冶金难以通过单一路径实现快速扩张。从焦炉煤气和工业副产氢的资源利用，到以可再生能源制氢为基础的绿氢炼铁，不同技术路线和氢源组合将在不同时期和条件下发挥各自作用。如何在保障产业竞争力的同时，推动氢源从化石能源向可再生能源逐步转型，将成为决定氢冶金能否支撑钢铁行业深度脱碳的关键命题。未来钢铁行业的氢冶金转型并非单一路径，而更可能呈现技术路线和氢源结构并

行演进的特征。本报告重点关注与未来近零碳钢铁生产关联更强的直接还原路线，同时结合国内项目实际，讨论焦炉煤气、工业副产氢和绿氢等不同氢源在不同阶段的作用。

氢冶金的发展并不存在适用于所有地区的统一模式。由于钢铁产业基础、氢源条件、可再生能源资源禀赋以及下游市场环境存在显著差异，不同地区将探索差异化的发展路径。结合当前国内实践，本系列研究将国内氢冶金发展模式归纳为三类（图表 2）：

- 既有产业链转型类：**依托成熟钢铁产业集群、完善的上下游配套体系、既有基础设施条件以及终端需求市场，推动存量钢铁产能向氢冶金升级转型，逐步提升绿氢比例，打造高端产品体系。该模式主要分布于河北等钢铁产业基础雄厚地区，项目规模较大，示范效应和行业带动作用显著。
- 副产资源过渡类：**立足当前绿氢供给尚未成熟的现实条件，以焦炉煤气等富氢副产资源作为阶段性过渡方案，加快氢冶金项目落地。该模式主要分布于山西等煤焦资源丰富地区，兼具经济性和可操作性，为氢冶金产业早期发展提供重要支撑。
- 可再生能源驱动类：**面向中长期发展的前瞻性模式。依托低成本绿电和绿氢资源优势，构建以可再生能源为基础的新型钢铁生产体系。该模式主要分布于内蒙古、新疆、吉林等新能源资源富集地区，被视为实现深度脱碳和绿色钢铁规模化发展的重要方向。

上述三类模式代表了不同地区发展氢冶金的不同起点：既有产业链转型类侧重在完备成熟的钢铁产业链基础中推动存量产能低碳改造；副产资源过渡类侧重利用焦炉煤气等近期可得氢源降低示范成本，并推动绿氢接续；可再生能源驱动类侧重依托绿电绿氢资源布局绿铁产能。

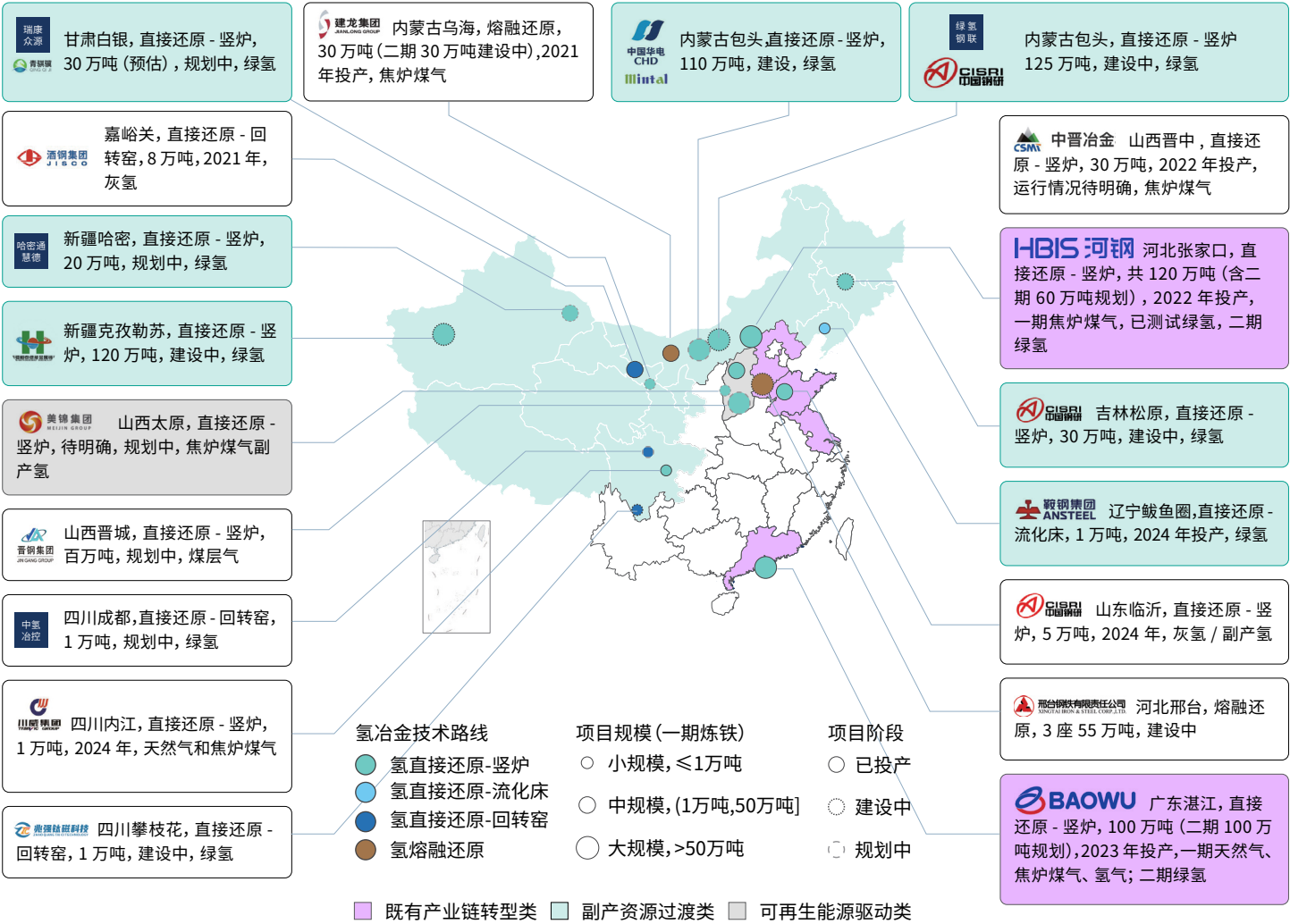
图表 2 国内氢冶金发展典型模式

模式类型		模式特征	典型项目	潜在适宜省份
1	既有产业链转型类	钢铁产能和成熟产业链条为主要驱动力, 辅以较为合适的氢能资源	 HBIS 河钢 河北张家口，直接还原-竖炉，共120万吨（含二期60万吨规划） 2022年投产，一期焦炉煤气，已测试绿氢，二期绿氢	河北:粗钢产业链 广东:特钢产业链
2	副产资源过渡类	以焦炉煤气为过渡性资源部署氢冶金项目, 未来面临副产资源不足的挑战	 美锦集团 MEIJIN GROUP 山西美锦钢铁和钢研氢冶金院签署合作框架协议，推动焦炉煤气制氢耦合纯氢冶金技术	山西:焦炉煤气资源
3	可再生能源驱动类	丰富的可再生能源推动绿电和绿氢产业链的发展, 进而驱动氢冶金项目落地	 CISRI 中国钢研 吉林松原，直接还原-竖炉，30万吨，建设中，绿氢	内蒙古、新疆、吉林等

三类模式并非相互割裂，而是在不同资源条件和产业发展阶段下形成的差异化实践。从长期来看，其发展方向均将逐步走向以绿氢为核心的低碳钢铁体系。但在当前阶段，不同模式为产业发展提供了不同的起点，也为氢冶金规模化部署创造了更多可能性。

在多元化发展模式共同推动下，中国氢冶金正加速从概念验证迈向产业化探索，进入示范项目集中布局和技术路线加快迭代的新阶段。与早期以单点技术验证为主不同，当前国内氢冶金发展已呈现出工程化规模提升、技术路线并行探索和产业链协同推进的明显特征。如图表 3 所示，当前国内项目已覆盖直接还原竖炉、流化床、回转窑，以及熔融还原等多种技术路线，规模从万吨级试验装置逐步拓展至百万吨级工业示范。同时，既有大型钢铁集团牵头的工程化项目，也有科研与技术开发机构、电力企业和地方产业平台推动的新建示范项目。整体来看，中国氢冶金发展呈现三方面趋势：一是技术路线保持多元并行，不同地区结合资源条件和产业基础探索差异化解决方案；二是氢源体系呈现渐进过渡特征，在绿氢尚未具备大规模、稳定、低成本供应能力的阶段，不少工业化项目仍采用焦炉煤气、天然气、煤层气等过渡性氢源，以降低早期成本和运行风险，并积累项目经验；三是自主创新能力持续提升，以中国钢研、航天长征等为代表的国内科研与技术开发机构与多家钢铁企业正在加快自主技术开发，在装备制造、工程建设、产业协同和规模化示范方面的能力持续提升，有望为全球氢冶金发展提供更多工程化经验和产业链支持。

图表 3 国内氢冶金项目梳理（截至 2026 年 8 月）



注：该项目统计包括直接还原和熔融还原，未包括高炉喷吹氢气。不同省份和项目描述框的底色代表与所适配的氢冶金发展模式，如绿色是“可再生能源驱动类”

基于上述框架和国内项目发展情况，RMI 陆续推出《中国氢冶金发展模式系列研究》。本报告作为系列第二篇，聚焦以河北省为典型代表的既有产业链转型模式。河北钢铁产业链完整、产能集聚度高、下游市场广泛、高端产品能力强，同时面临较大的长流程转型和减排压力。其氢冶金发展的关键不在于单一资源优势，而在于依托成熟钢铁产能和产业链基础，将本地氢源、周边绿氢资源、直接还原装备、电炉炼钢、高端产品和低碳排放钢市场需求整合起来，探索从存量产能升级到低碳价值创造的发展路径。河钢张宣科技项目为这一模式提供了工程化示范，其意义不仅在于验证氢冶金技术可行性，更在于探索成熟钢铁产业集群如何依托既有产业基础实现系统性转型，为传统钢铁基地向低碳和近零碳钢铁体系升级提供参考，为更多地区提供可借鉴的发展思路，也为全球钢铁产业深度脱碳贡献中国实践。

第 1 章 河北氢冶金发展的基础条件与综合优势

河北不仅是中国最大的钢铁生产基地，也是中国钢铁行业低碳转型最具代表性的实践场景之一。2025 年，河北省粗钢产量约 1.91 亿吨，占全国粗钢产量近 1/5，连续多年位居全国首位。² 作为河北省最重要的支柱产业，钢铁行业既支撑着区域经济发展和产业链安全，也成为实现工业部门深度脱碳的重要着力点。2023 年，河北钢铁工业增加值占全省规模以上工业的 26.45%，并带动直接就业近 40 万人。³

经过长期发展，河北已形成以唐山、邯郸等地为核心的世界级钢铁产业集群，构建起覆盖炼铁、炼钢、轧制、装备制造、物流和下游应用体系的完整产业体系。河北制造业高质量发展规划显示，前 15 家钢铁企业产能规模占全省比重已由 2015 年的 54.2% 提升至 2020 年的 76%，中高端钢材占比达 77%，家电板、商用车特钢等产品市场占有率位居全国前列。⁴ 这既说明河北具备大规模钢铁生产和产业链协同能力，也意味着其具备推动低碳冶金技术工程化示范和产业化应用的基础。这种成熟且高度集聚的产业生态，为技术验证、工程放大以及低碳价值传导提供了其他地区难以复制的条件。

在低碳转型、政策支持和资源条件共同作用下，河北具备发展氢冶金的典型性和现实基础。一方面，河北钢铁产量大、长流程占比高、排放集中，铁前工序深度减排需求突出。另一方面，国家和河北省政策持续支持氢冶金、绿电直连、低碳冶炼技术示范和氢能产业链建设，为项目落地提供了制度基础。同时，河北拥有成熟钢铁产业链、一定副产氢资源、较大的风光和绿氢发展潜力，并临近京津冀下游市场和港口物流体系，为氢冶金从工程示范走向产业化应用提供了综合支撑。

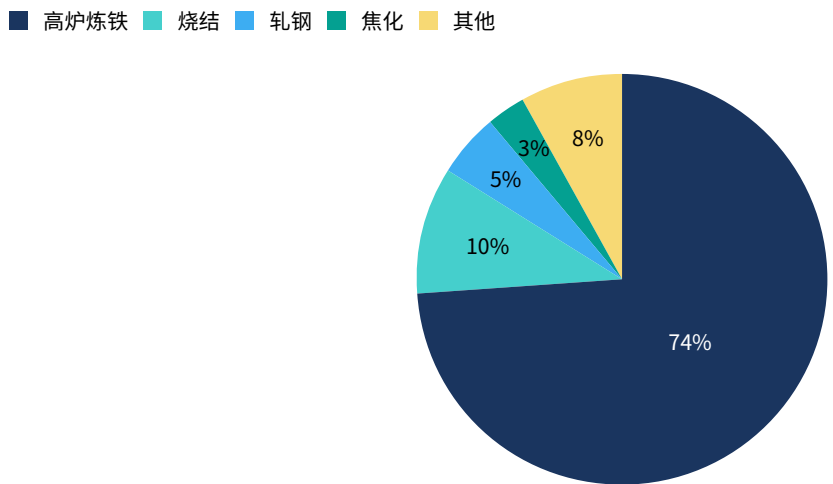
1.1 转型压力正在重塑河北钢铁产业发展路径

河北是全国钢铁产能最集中的地区之一，炼钢产能峰值一度达到 3.2 亿吨，约占全国的四分之一。河北省工信部门测算也曾显示，钢铁行业污染物排放总量占全省工业排放量约 40%。经过多年去产能和整合重组，到 2020 年底，河北炼钢产能已控制在 2 亿吨以内，钢铁冶炼企业由 123 家减少至 39 家。⁵ 但从流程结构看，河北钢铁生产流程结构仍以高炉—转炉长流程为主，电炉短流程占比仍明显偏低。截至 2024 年 10 月，河北省电炉短流程产能占比仅 3.9%，低于中国和全球的平均水平。⁶ 对河北这样粗钢产量基数大、长流程基础深、钢铁产能空间集聚度高的省份而言，低碳转型不能仅依靠单一企业的能效提升或局部技术改造，而需要在流程结构调整、氢冶金示范、电炉炼钢和下游低碳产品需求之间形成系统性协同。

从区域分布看，河北钢铁产能和排放高度集中于少数重点城市。2021 年，河北省钢铁行业碳排放约 4 亿吨，约占全省重点行业排放的 53%。其中，唐山市钢铁行业碳排放约 2.21 亿吨，占全省钢铁行业排放的 55.2%。邯郸市约 0.84 亿吨，占 21%。两市合计占全省钢铁行业碳排放的 77%，与河北钢铁产能高度集中的空间格局基本一致。这种高度集聚的产业分布，一方面意味着减排压力集中，另一方面也为围绕重点区域推动氢冶金、电炉化改造、绿氢供应和低碳产品认证提供了较明确的实施场景。

从工序结构看，河北钢铁行业碳排放主要集中在铁前环节，尤其是高炉炼铁工序。2021 年，河北省高炉炼铁工序碳排放约 2.98 亿吨，占钢铁行业排放的 74%。烧结工序约 0.41 亿吨，占 10%。河北钢铁行业的深度减排关键在于降低炼铁环节对碳基还原剂和化石能源的依赖。氢冶金尤其是直接还原铁路线，正是面向铁前工序深度减排的重要技术选择。

图表 4 河北省钢铁行业各工序碳排放情况



来源：2020 年度温室气体排放核查报告⁷

从排放强度看，河北钢铁行业吨钢排放强度与全球平均水平接近，但在中国钢铁行业内部仍有进一步下降空间。2021 年，河北吨钢二氧化碳排放约 1.875 吨，略低于全球平均水平 1.91 吨，但仍显著高于全废钢电炉和直接还原铁—电炉等低碳路线。同期，河北钢铁行业化石燃料燃烧排放约 3.87 亿吨，占总排放的 97%，表明能源和还原剂结构仍是排放强度下降的核心约束。

图表 5 2021—2023 年不同流程二氧化碳排放强度

碳排放强度 tCO ₂ /t 钢			
	2021	2022	2023
全球平均值	1.91	1.91	1.92
高炉 - 转炉流程	2.33	2.33	2.32
全废钢电炉流程	0.66	0.68	0.70
DRI 电炉流程	1.39	1.37	1.43

河北钢铁行业具有“规模大、长流程占比高、排放集中、产业链完整”的典型特征。这既意味着其承担着全国钢铁行业深度脱碳的重要任务，也使其成为检验氢冶金、电炉炼钢和低碳钢市场能否实现协同发展的关键实践场景。

1.2 政策支持加速氢冶金从示范走向产业化

在钢铁行业减排压力和流程结构转型需求下，氢冶金已成为国家和地方政策共同支持的重点低碳冶金方向。国家层面首先为氢冶金提供了方向性支持：一方面，《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》提出支持建立低碳冶金创新联盟、制定氢冶金行动方案，并加快低碳冶炼技术研发应用。⁸《工业绿色低碳发展“十五五”规划》也进一步提出了加快纯氢直接还原、融合还原等低碳冶金技术产业化应用。另一方面，《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》将氢能应用从交通领域拓展至储能、工业等多元场景，为氢能在钢铁等高耗能行业中的应用奠定了政策基础。⁹

随着氢冶金从技术研发逐步进入示范应用阶段，国家政策进一步强化了其可操作性。《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》明确提出推进氢基直接还原竖炉、纯氢竖炉、流化床直接还原炉、氢基熔融还原炉等氢冶金装置研发，并鼓励钢铁企业充分利用焦炉煤气、化工副产氢等氢源，逐步提升可再生能源制氢利用比例。¹⁰ 这意味着，政策并未要求氢冶金项目在起步阶段直接完全依赖绿氢，而是允许结合现实氢源条件形成过渡路径，同时明确长期向可再生能源制氢转型。

在河北层面，氢冶金相关政策进一步与本地钢铁产业基础和氢能资源条件相结合。《河北省氢能产业发展“十四五”规划》提出扩大氢能在钢铁、化工等领域的示范应用。《河北省支持钢铁行业创新发展的若干措施》也将氢冶炼等列为低碳前沿技术方向，支持钢铁产业向高端化、智能化、绿色化发展。¹¹ 在国家层面的方向性部署的基础上，河北政策更强调将氢冶金与钢铁产业升级、低碳技术示范和氢能产业链建设结合起来，为项目落地提供更具体的产业场景。张家口则是河北氢能和可再生能源示范的重要承载地，也是政策落地的重要试点区域。《国家碳达峰试点（张家口）实施方案》提出，加快发展氢能储运加注、燃料电池系统、整车和创新平台等，形成氢能全产业链发展格局。¹²

图表 6 梳理了国家、河北省和张家口不同层级氢冶金相关政策的演进脉络。国家政策明确技术方向和应用原则，河北政策结合钢铁大省转型需求提出产业化场景，张家口则承接氢能、可再生能源和钢铁低碳转型的试点任务。

图表 6 全国和河北省的氢冶金相关政策进展

全国	河北省
2022.01 ◆ 《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》 · 深入推进绿色低碳，支持建立低碳冶金创新联盟，制定氢冶金行动方案，加快推动低碳冶炼技术研发应用	2021.07 ◆ 《河北省氢能产业发展“十四五”规划》 · 扩大在交通、储能、钢铁、化工、天然气管道混输等领域氢能示范应用规模；探索冶金、化工领域氢能替代应用
2022.03 ◆ 《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》 · 结合国内冶金和化工行业市场环境和产业基础，探索氢能冶金示范应用	2021.12 ◆ 《河北省“十四五”工业绿色发展规划》 · 力争钢铁行业2025年前实现碳达峰 · 到2025年，省级及以上绿色工厂达到500家以上，钢铁、水泥、平板玻璃行业重点企业全部建成绿色工厂
2024.12 ◆ 《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》 · 加快氢冶金关键技术研发； · 鼓励钢铁企业充分利用焦炉煤气、化工副产氢等氢源，逐步提升可再生能源制氢的利用比例； · 推进纯氢冶金，“绿电—绿氢—纯氢冶金”产业链示范	2023.12 ◆ 《河北省加快推进钢铁产业高质量发展的若干措施》 · 加强对氢能冶炼、非高炉炼铁等低碳冶炼技术的研发应用力度，力争率先实现碳排放达峰
2025.08 ◆ 《钢铁行业稳增长工作方案（2025-2026年）》 · 2025-2026年钢铁行业绿色低碳发展水平显著提升 · 支持地方和企业围绕高端特钢、氢冶金等建设中试平台	2024.06 ◆ 《国家碳达峰试点（张家口）实施方案》 · 推广“可再生能源+氢能”模式，建设绿色制氢基地 · 推动火电、钢铁、建材等高耗能行业开展节能降碳改造 · 积极推进河钢集团宣钢公司转型升级，支持张宣科技公司氢冶金示范工程
2026.03 ◆ 《关于开展氢能综合应用试点工作的通知》 · 各城市群应优先选择具备条件的氢冶金等应用场景开展试点，给予最高3.2元/千克的用氢奖励 · 氢冶金场景试点目标为可再生能源制氢终端用氢价格不高于25元/千克，工业副产氢不高于15元/千克	2026.04 ◆ 《河北省国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》 · 鼓励企业发展氢冶炼、碳捕集封存利用等低碳冶金技术，持续拓展“河北绿钢”示范应用。
2026.04 ◆ 《钢铁行业产能置换实施办法》 · 支持企业开展氢冶金等低碳工艺技术应用，实施不同置换比例：退出高炉采用氢冶金技术，碳减排比例不低于60%的可实施等量置换，不低于30%的置换比例不低于1.25:1	
2026.07 ◆ 《工业绿色低碳发展“十五五”规划》 · 加快纯氢直接还原、融合还原等低碳冶金技术产业化应用	

1.3 产业、能源与市场优势协同支撑氢冶金发展

在产业转型需求和政策支持之外，河北发展氢冶金还具备较强的资源和区位优势。河北氢冶金的核心竞争力并不体现在单一技术或资源禀赋，而是在于将钢铁生产基础、铁矿和焦化等产业链配套、副产氢资源、绿电绿氢资源和近端市场整合为一条完整的低碳价值实现链条，形成产业、能源与市场协同支撑的系统集成优势，是既有产业链转型类氢冶金模式的代表地区。

首先，**成熟钢铁产业体系为氢冶金规模化发展提供基础**。产业体系是河北最大的优势之一。河北省钢铁产业规模连续多年位居全国第一，具有全国五分之一的钢铁产能，产业集中度高，装备水平先进。从资源基础看，2020 年河北铁矿资源保有量约 96.09 亿吨，居全国第 3 位，铁矿资源和钢铁产能主要集中在冀东、邯邢、承德、张家口等区域。¹³ 这些条件使河北形成了从铁矿采选、焦化、炼铁、炼钢到轧制加工的成熟产业链，有利于氢冶金项目与既有钢铁企业、原料供应、物流体系和下游客户协同布局。河北铁矿资源以贫矿为主，富铁资源占比较低，因此其铁矿资源优势更多体现在产业链和供应保障基础上。对于氢基直接还原所需的高品位铁素原料，仍需通过选矿提质、球团制备等原料预处理环节，或与外部高品位铁矿资源协同保障。

其次，**副产氢资源为产业化早期发展提供现实支撑**。河北是焦炭和化工大省，焦炉煤气、氯碱、合成氨、炼化等环节均可产生副产氢。2020 年河北省工业副产氢潜在能力约 94 万吨 / 年，主要集中在唐山、邯郸、沧州、邢台、定州等地。考虑既有化工产品市场和副产氢利用约束，未来实际可提纯利用的工业副产氢资源约 45 万吨 / 年。¹⁴ 这些副产氢资源与河北钢铁产能集中区域具有较高空间重合度，可在绿氢成本仍较高、供应体系尚未完全成熟的阶段，支持氢冶金项目开展工程化验证和稳定运行。

第三，**绿氢潜力为深度脱碳提供长期支撑**。从长期看，氢冶金能否真正实现近零碳发展，最终取决于绿氢供给能力。相比单纯依靠副产氢的地区，河北同时具备向绿氢体系持续演进的资源基础。河北省氢能规划测算显示，2020 年全省风电、光伏可开发资源总量约 25,575 万千瓦，年可发电潜力约 4,200 亿千瓦时，可再生能源制氢潜在能力约 152 万吨 / 年。其中，张家口地区风电、光伏可开发资源总量约 7,767 万千瓦，约占全省资源的 30%，可再生能源制氢潜在能力约 45 万吨 / 年。从装机基础看，截至 2026 年 4 月，河北省风电和光伏发电装机并网容量达到 14,343.14 万千瓦，占统调装机容量的 72.07%。¹⁵ 河北不仅具备副产氢等近期可用资源，也具备逐步提高绿氢比例、推动氢冶金从过渡示范走向深度减排的资源条件。

此外，**京津冀市场为低碳钢价值实现创造条件**。氢冶金的发展不仅取决于供给侧技术突破，也取决于低碳排放钢市场需求能否形成。河北临近京津和雄安新区，具备较强的近端市场和产业协同优势。河北毗邻京津，随着京津冀协同发展、雄安新区建设和非首都功能疏解，一批高新企业、重大项目和高端人才向河北转移集聚。对氢冶金而言，京津冀及沿海地区的汽车、装备制造、建筑和基础设施等行业有望成为低碳钢材的重要需求端，为河北探索低排放钢采购、认证和应用场景提供基础。

图表 7 河北省氢冶金发展的资源基础

铁矿资源丰富，钢铁产量全国第一，可再生资源潜力显著

金属矿产

铁矿

- 铁矿资源量全国第三，铁矿石原矿产量连续多年全国第一，2022年全省铁矿石产量全国占比44%。
- 铁矿石品位因矿产地不同存在差异，以贫矿为主，品位多为30%左右，富铁资源量仅占总量的不到1%。铁矿主要分布在唐山、邯郸、邢台、承德。

能源资源

煤炭

- 煤炭主要分布在唐山、邯郸、邢台、张家口。

碳排放

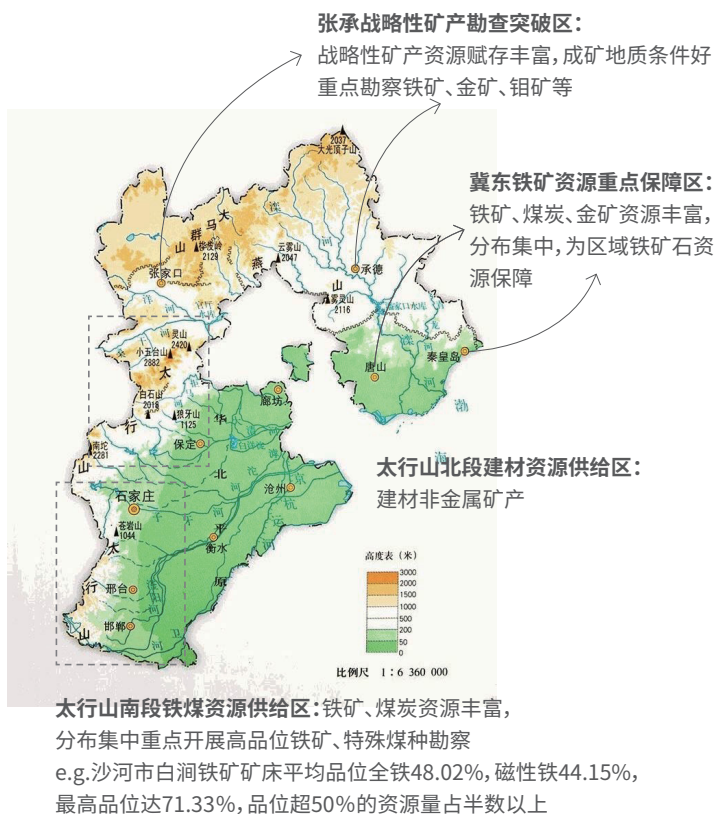
CO₂

- 2021年河北省单位GDP碳排放强度约为全国平均水平的2.5倍。河北钢铁行业碳排放约4亿吨，占全省重点行业排放的53%。

新能源

风光

- 截至2026年4月，全省风光累计并网装机1.43亿千瓦，占统调装机容量量的72%。
- 全省风光可开发资源约25575万千瓦，年可发电潜力高达4200亿度。



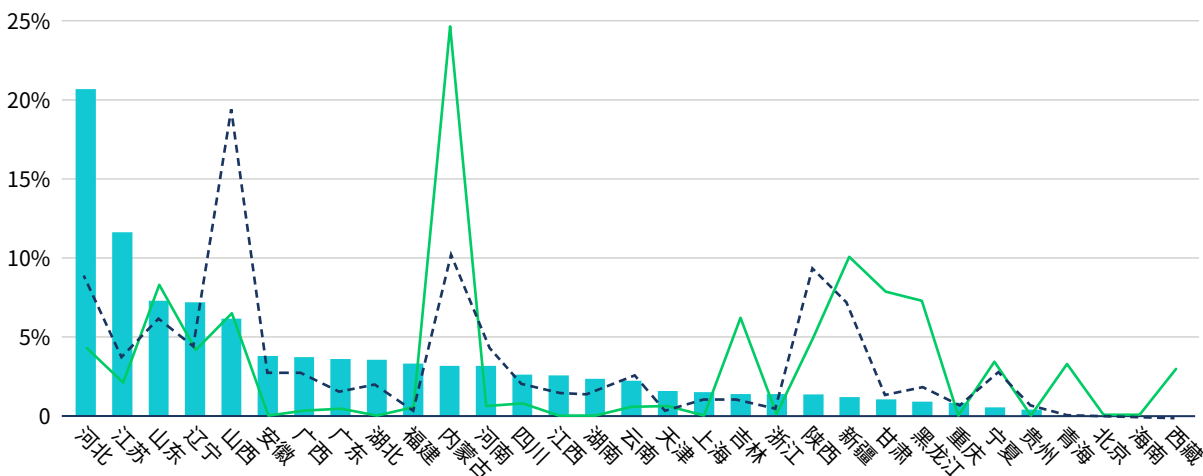
来源：河北省矿产资源总体规划（2021-2025），河北省氢能产业发展“十四五”规划，中国碳核算数据库

从省际比较看，河北的资源组合具有明显综合型特征。图表 8 对比了各省粗钢产量、焦炉煤气产量和风光资源经济可开发潜力。河北并非风光资源或焦化资源最突出的省份，但同时具备较大的钢铁终端生产基础、一定副产氢资源、较强绿氢潜力和近端下游市场。这种资源组合更适合在既有钢铁产业链中推动氢冶金示范和规模化应用。

图表 8 省际钢铁产量和氢资源对比

■ 粗钢产量(万吨, 2023) --- 焦炉煤气产量 (万吨, 2023) — 风光资源经济可开发潜力 (千瓦)

各省在全国占比(%)



数据来源：国家能源局，石化联合会，北京航空航天大学

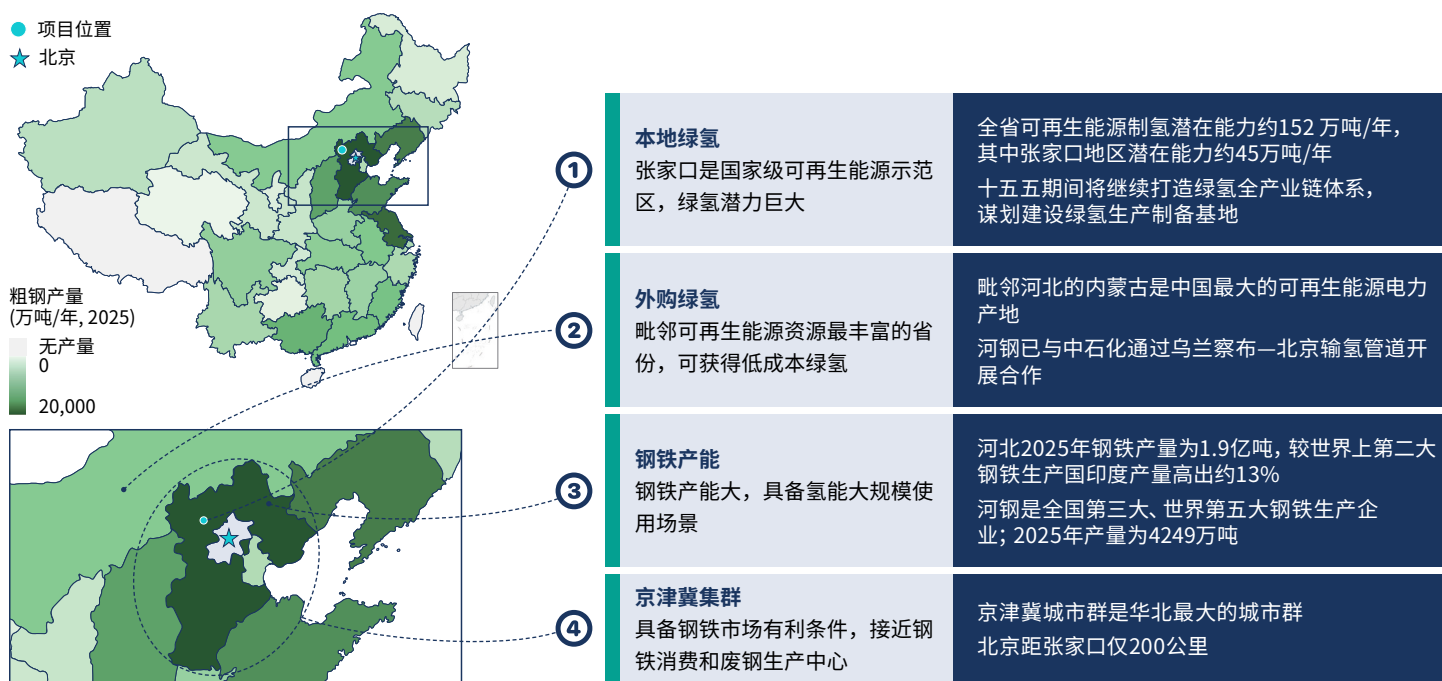
第2章 河钢集团氢冶金项目与产业链优势

2.1 多重区位条件支撑既有产业链转型

河钢集团张宣科技氢冶金项目实践是本研究中“既有产业链转型”模式的代表性案例。与依托单一资源禀赋的新建绿铁项目不同，其发展基础来源于成熟钢铁产业体系与新兴低碳要素的协同重构。项目依托传统长流程钢铁产能退出后保留的工业基础、焦化和球团配套，以及张家口本地可再生能源资源、外部绿氢供应潜力和京津冀近端市场，探索存量钢铁基地向低碳短流程和高端材料制造转型的路径。

从区位条件看，张宣项目所处区域体现出产业、能源和市场优势的高度集聚。第一，张家口本地风光资源丰富，是河北可再生能源和绿氢发展的重点区域，可为氢冶金项目中长期提高绿氢比例提供资源基础。第二，张家口毗邻内蒙古等可再生能源富集地区，具备通过外部绿氢供应或跨区域绿氢合作补充本地氢源的潜力。第三，项目所在的河北是全国最大的钢铁生产省份，具备完整的钢铁产业链、工程建设能力和钢铁产品应用基础。第四，张家口位于京津冀协同发展范围内，距离北京、天津及河北主要工业和消费市场较近，有利于低碳钢材在汽车、装备制造、基础设施和高端制造等场景中的推广应用。图表9概括了张宣科技项目所处的本地绿氢、外部绿氢、钢铁产能和京津冀产业集群等关键区位条件。张宣实践的意义并不仅在于单个示范项目的建设，而在于其探索了钢铁产能、绿氢资源、产业链配套和市场需求协同发展的可能路径。这也是既有产业链转型模式区别于资源驱动型模式的重要特征。

图表9 张宣科技氢冶金项目区位优势

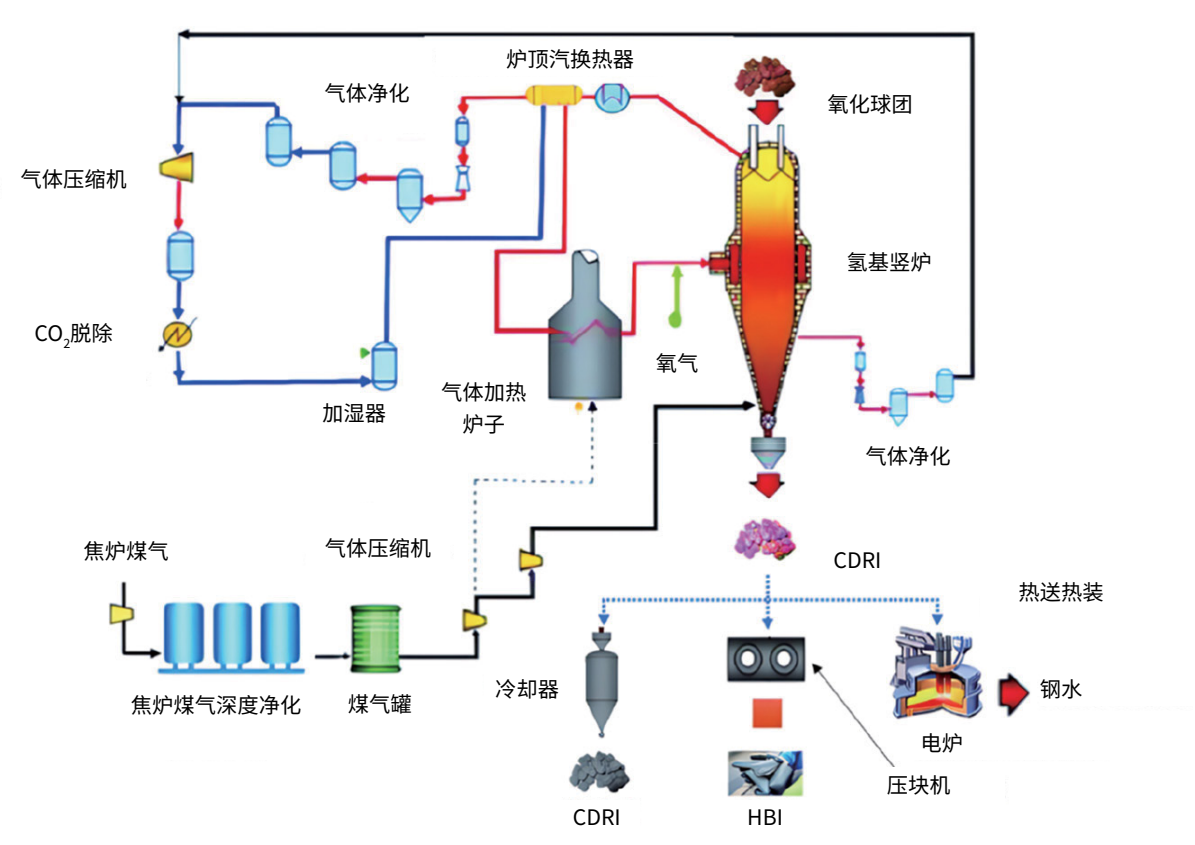


来源：国家统计局，河北省氢能产业发展“十四五”规划

张宣科技项目的形成，本质上是传统钢铁基地转型升级需求与氢冶金技术发展相结合的结果。随着宣钢长流程产能逐步退出，企业开始探索面向未来的低碳发展路径。项目规划总规模为 120 万吨 / 年直接还原铁，分两期建设，其中一期规模为 60 万吨 / 年。与单一炼铁技术示范不同，该项目将直接还原铁、电炉炼钢和高端钢材生产衔接起来，形成“氢还原—电炉—低碳产品”的短流程转型路径。

从技术路线看，张宣项目所采用的焦炉煤气零重整竖炉工艺体现了中国氢冶金发展的阶段性特征。相对流化床、回转窑等工艺，竖炉直接还原铁工艺的技术成熟度更高，且更适宜大规模的工业化生产，与过渡性的焦炉煤气较为适配，并有利于在绿氢产业链成熟后逐步转为绿氢。项目将氢基直接还原铁与后续电炉炼钢和精炼轧制工序衔接，形成完整的短流程生产体系。其基本流程为：高品位铁矿原料经造球后进入氢基竖炉，还原生成直接还原铁。直接还原铁与废钢等原料进入电炉冶炼，再经 LF 精炼、RH 精炼、连铸、轧制，生产低碳钢材和高端材料产品。与传统高炉—转炉长流程相比，这一路线将炼铁环节从以焦炭为核心的碳基还原，转向以富氢气体为核心的直接还原，并与电炉短流程相结合，为降低铁前工序排放提供了技术路径。

图表 10 张宣科技焦炉煤气零重整氢冶金工艺流程图



来源：基于富氢焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术¹⁶

该工艺的核心创新在于焦炉煤气零重整。焦炉煤气中通常含有较高比例的氢气，同时含有一氧化碳和甲烷等还原性组分。张宣科技项目不在竖炉外单独设置传统重整装置，而是在竖炉内利用直接还原铁的催化作用，使焦炉煤气中的甲烷与水蒸气、二氧化碳发生原位重整反应，生成更多氢气和一氧化碳，提高还原气体的有效还原能力。相关材料显示，该工艺采用的焦炉煤气中 H_2 含量约为 55%—65%，CO 在 5.7% 以上， CH_4 约 20%，经过竖炉内原位重整后，还原气中 H_2/CO 比可达 8 以上。

围绕焦炉煤气零重整直接还原，张宣科技还配套开发了高品位球团制备、焦炉煤气低成本协同处理、CO₂ 脱除与精制等关键工艺。高品位球团制备保障了竖炉稳定运行所需的原料质量，焦炉煤气精制处理有助于脱除苯、萘、硫、焦油等有害杂质，降低气源处理成本，CO₂ 脱除和精制则提高了工艺气体循环利用效率，并为副产二氧化碳资源化利用创造条件，成品液态食品级 CO₂ 年产约 6 万吨。

河钢张宣科技项目的代表性不只在在于单项氢冶金技术的突破，更在于其探索了一条成熟钢铁产业集群实现低碳转型的现实路径。该项目并非脱离既有产业体系另起炉灶，而是在传统长流程产能退出基础上，充分利用产业链配套设施优势，以及区域内钢铁产业链和市场基础，推动氢冶金与产业升级协同发展。通过焦炉煤气零重整降低起步阶段氢源和成本约束，通过直接还原铁—电炉短流程重构生产体系，并为提高绿氢比例预留空间，项目形成了从过渡性减排到近零碳生产逐步演进的发展框架。

从更广泛的产业意义看，张宣科技所代表的并非单一项目的发展模式，而是一种“依托产业基础、分阶段推进”的转型逻辑。对于钢铁产业基础雄厚、长流程产能占比较高的地区而言，氢冶金的发展未必需要等待大规模低成本绿氢完全成熟，而可以通过既有产业资源、过渡性氢源和新型生产工艺的协同，逐步完成向低碳钢铁体系的转型。其价值不仅在于降低技术和投资风险，更在于为中国大量成熟钢铁基地探索深度脱碳提供了具有现实可行性的参考路径。

2.2 稳定运行与绿色升级逐步增强项目低碳成效

从国内氢冶金发展进程看，项目建设只是第一步，实现持续稳定运行并形成可复制的工程经验，才是推动产业化发展的关键。河钢张宣科技氢冶金项目已在工艺运行和直接减排层面形成了较明确的示范效果。自 2023 年 5 月一期达产以来，氢冶金项目实现了稳定、连续运行，DRI 金属化率保持在 94% 以上，DRI 碳质量分数约为 3%，煤气能耗指标低于 9.4GJ/t。在企业生产流程层面，与传统高炉—转炉长流程相比，焦炉煤气竖炉炼铁—电炉炼钢的吨钢二氧化碳减排比例超过 70%，全流程能耗下降约 50%。

更重要的是，项目并未停留在技术验证阶段，而是在工业化运行过程中持续优化工艺和提升效率。如图表 11，张宣科技 HyMEX 工艺在 2023 年至 2025 年间，主要技术经济指标均有所改善：DRI 金属化率由 93.5%—94.5% 提升至 94.0%—95.0%，焦炉煤气消耗由 650—750m³/t DRI 下降至 500—550m³/t DRI，球团矿消耗由 1.37—1.40t/t DRI 下降至 1.35—1.37t/t DRI，电耗也由 250—300kWh/t DRI 下降至 200—250kWh/t DRI。这些变化表明，随着工艺调试、设备协同和运行经验积累，项目在稳定运行的基础上，向更高效率、更低能耗和更优成本控制方向优化。

图表 11 HyMEX 工艺技术经济指标

指标	设计指标	2023年	2024年	2025年
DRI 金属化率/%	≥92	93.5~94.5	94.0~95.0	94.0~94.5
焦炉煤气消耗/(m ³ /t DRI)	≤750	650~750	550~600	520~550
球团矿消耗/(m ³ /t DRI)	≤1.40	1.37~1.40	1.35~1.37	1.35~1.36
电耗/(kWh/t DRI)	/	250~300	200~250	200~230

来源：河钢集团

从项目推进过程看，河钢张宣科技氢冶金项目的绿色成果是沿着“工程贯通—稳定运行—产品应用—绿氢验证—短流程深化—绿电支撑”的路径逐步扩展。项目稳定运行以来，绿色低碳属性不断增强。一方面，张宣科技启动“氢基竖炉—近零碳排电弧炉”新型短流程项目，将氢冶金 DRI 与电炉炼钢更紧密结合，降低对传统长流程的依赖。另一方面，项目成功应用绿氢作为还原气实现稳定生产，金属化率超过 94%，验证了从焦炉煤气过渡气源向绿氢还原气源转换的技术可行性。与此同时，二氧化碳捕集和利用实现示范运行，使项目从单纯降低炼铁排放，拓展到过程碳管理和副产二氧化碳资源化利用。

绿色能源供应能力也在逐步补强。河钢集团与中石化合作的绿氢供应解决方案研究正在持续推进，意向实现约 3 万吨的绿氢消纳规模。张宣科技持续推进太阳能发电项目建设，已建成投运 19.9 MW 分布式光伏项目，年均绿色发电量超过 2,000 万 kWh。在建烟筒山 60 MW 光伏发电项目，并规划 250 MW 绿电直连项目。2026 年 3 月，张宣科技申报的绿电直连示范项目获得河北省发展改革委批复，项目建成后年可提供绿电约 4.5 亿 kWh。绿电直连项目的推进，将有助于降低电炉、制氢和相关工序的用电碳强度，并为后续提升绿氢比例和扩大低碳钢产品供给提供能源支撑。

图表 12 河钢张宣科技氢冶金项目绿色升级进展



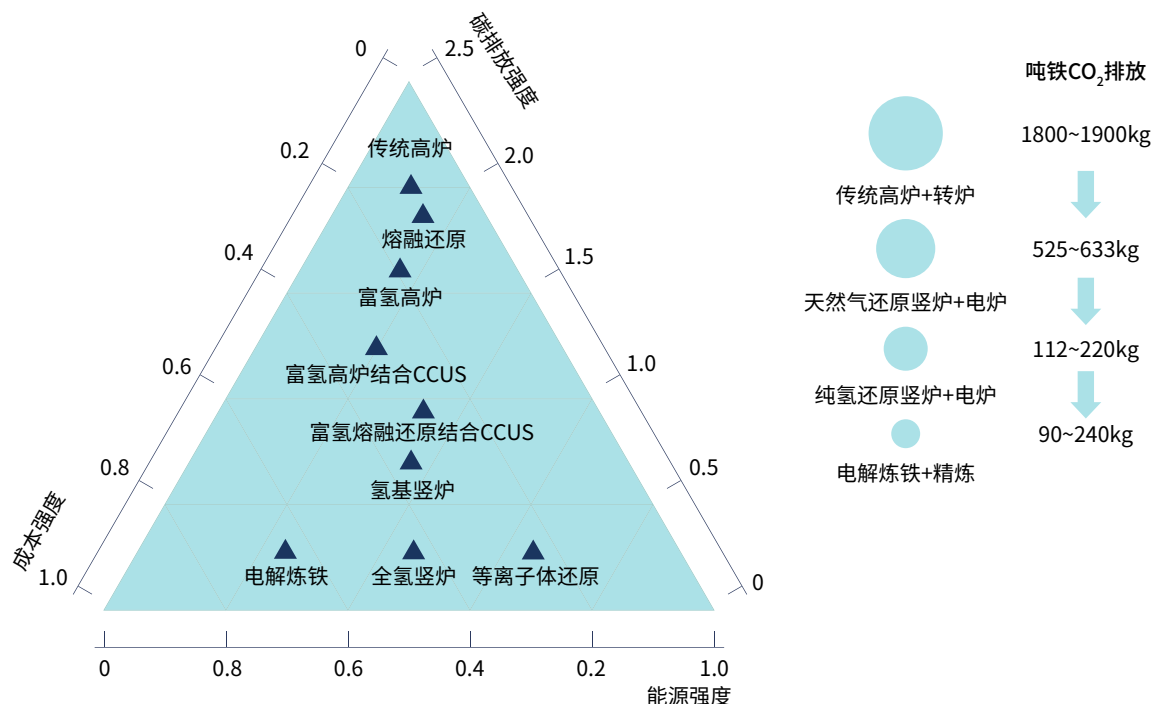
来源：河钢集团公告

河钢张宣科技氢冶金项目的转型升级实践，已经从单一氢冶金示范装置，逐步扩展为涵盖绿铁生产、电炉短流程、高端低碳产品、绿氢验证、碳捕集利用、复杂原料适配和绿电供应的系统性转型路径。

工艺竞争力与下游应用共同推动低碳价值实现

从更广泛的行业视角看，氢冶金路线的优势并不在于在所有指标上全面超越传统工艺，而在于能够在减排、能效和经济性之间提供一条具有现实可行性的发展路径。图表 13 对比了不同炼铁工艺路线的碳排放强度、能源强度和成本强度。传统高炉—转炉路线工艺成熟、成本基础稳定，但碳排放强度较高。全氢还原、电解铁、等离子体还原等路线具有更低的碳排放潜力，但现阶段仍面临能源强度、技术成熟度或成本约束。相比之下，焦炉煤气零重整竖炉氢冶金路线能够在利用现有副产气资源和既有产业基础的前提下，显著降低碳排放的同时避免了对大规模低成本绿氢的即时依赖，为产业化初期提供了更具可操作性的选择。

图表 13 冶金工艺路线的碳排、能源和成本强度



注：成本强度指的是各工艺间成本的相对大小，能源强度则代表不同工艺能耗需求的相对强度，用 0~1 表示。

来源：全球低碳炼铁新技术进展及展望¹⁷

聚焦项目的经济性，从当前测算结果看，焦炉煤气零重整路线的核心价值并不在于实现最低成本，而在于能够以接近传统炼铁成本的水平显著降低碳排放，为氢冶金产业化创造现实起点。采用焦炉煤气生产 1 吨 DRI 的竖炉工序成本约为 2400 元，与高炉铁水生产成本及轻型废钢价格基本相当，按铁品位折算后，成本较铁水高出约 150 元，仍需电熔炉对 DRI 进行熔化和渣铁分离，才可达铁水的高温洁净状态。与此同时，竖炉工序碳排放约 0.5 吨 CO₂/吨 DRI，低于未经副产气扣减的高炉工序排放。在利用现有焦炉煤气资源的条件下，氢冶金可在一定程度上达到经济性和碳排放的协同平衡。相比之下，由于较高的绿氢成本，若完全采用绿氢作为还原剂，吨 DRI 成本将显著上升。利用副产资源开展示范，有助于降低产业化初期风险，逐步优化竖炉运行，降低原料与能源消耗，为后续绿氢替代积累运行经验。

氢冶金产品的经济价值并不完全取决于炼铁环节成本，而越来越取决于低碳价值能否以低碳产品溢价、碳资产收益等形式沿产业链向下游传导。与将 DRI 作为单一商品销售不同，张宣科技将直接还原铁嵌入“DRI—电炉—精炼—轧制”的短流程体系，并进一步应用于汽车、装备制造、家电、新能源等高端产品领域。对于河北这样的成熟钢铁产业集群而言，氢冶金的价值不仅在于生产低碳铁源，更在于利用高品质 DRI 与废钢形成互补，提高高端钢材质量，并将减排优势转化为产品竞争力。

随着产品碳足迹核算、环境产品声明（EPD）、低碳排放钢认证以及绿色采购机制逐步发展，低碳属性有望成为钢铁产品差异化竞争的重要组成部分。如图表 14，张宣科技近年来在汽车、家电及海外高端市场的产品应用实践，也表明低碳价值正在从企业减排表现逐步延伸至供应链采购和市场选择。氢冶金项目不仅形成绿铁供给能力，也为既有钢铁基地向高端化、低碳化产品体系转型提供了原料和工艺基础。

图表 14 张宣科技主要产品类型和应用场景

产品类型	供应能力	主要产品	主要应用场景	下游市场
汽车板坯及汽车板用材料	绿色汽车板连铸产线，产能约150万吨/年	汽车用低碳钢、超低碳钢、低合金高强钢、双向钢等	汽车、新能源汽车	与宝马、长城等共建绿色低碳供应链；绿色汽车板连铸产线投产；绿色连铸板坯获得EPD
圆钢棒材	小棒圆钢约70万吨/年；大棒圆钢约50万吨/年	齿轮钢、轴承钢、弹簧用钢等	汽车、机械、能源装备	高端棒材产品系列化供应，覆盖汽车、能源装备等细分市场
型材	产能约70万吨/年	角钢等型材产品	特高压、工程机械	应用于国家电网特高压输变电项目及工程机械等领域
高速线材	产能约45万吨/年	焊接用钢盘条、预应力钢丝及钢绞线用盘条、胶管钢丝用盘条等	建筑、能源、橡胶制品及工业配套	支撑细分工业场景，服务建筑、能源和工业配套需求
绿色高端特材	具备2万吨以上高品质特种材料年供应能力	高温合金、耐蚀合金、精密合金、模具钢等	航空航天、石化、高端装备等	绿色高附加值材料出口增长；50余个牌号产品已实现稳定批量供货

注：供应能力主要指相关产品线或产品方向的设计产能和供给能力，并不等同于氢冶金 DRI 全部转化为对应产品的年产量。氢冶金 DRI 通常与废钢等原料共同进入电炉冶炼，并根据订单结构、钢种要求和产线排产情况进入不同下游产品体系。

从国内市场看，汽车领域是低碳钢需求最早显现的场景之一。整车企业普遍面临供应链减排压力，而汽车板和汽车零部件用钢对材料强度、轻量化和质量稳定性要求较高，能够更好体现低碳高端钢材的综合价值。河钢与宝马、长城等企业共建绿色低碳供应链，低碳排放钢正在从企业减排承诺转化为具体采购和产品应用场景。家电家居领域同样具备示范意义，河钢与海尔、海信等企业合作，有助于将低碳排放钢应用从汽车行业拓展至消费品行业。

从国际市场看，张宣科技绿色高附加值材料已经逐步获得海外客户认可。2025 年 1—10 月，张宣科技“氢冶金—电炉”短流程累计销售钢铁产品约 150 万吨，实现产值 93.72 亿元、利润 7.2 亿元，初步体现低碳转型市场溢价，其中包括与意大利客户签订 1 万吨氢冶金绿钢出口订单。2026 年以来，张宣科技绿色产品出口势头持续向好，绿色高端材料出口产品应用于海洋工程、汽车制造、机械工程等领域。一季度绿色高附加值产品出口订单量同比提升 32%，并开发多家海外新客户。绿色高附加值材料出口增长说明，低碳属性与产品质量、交付能力和客户服务相结合后，已经开始成为张宣科技参与海外高端市场竞争的重要支撑。

产品碳足迹和环境声明也正在强化低碳产品的市场识别度。2025 年，张宣科技绿色连铸板坯产品发布中钢协环境产品声明（EPD），并遵循 ISO 14025 标准。EPD 是基于生命周期评价的环境信息披露工具，有助于下游客户识别产品环境表现，并支持其开展供应链碳披露、产品碳足迹管理和绿色采购。对于面向欧盟等碳约束更强市场的客户而言，EPD 认证是产品绿色身份属性的证明，也有助于降低跨境贸易中的合规不确定性。

从这一角度看，张宣科技案例并不仅仅验证了一条氢冶金工艺路线，更展示了既有产业链转型模式的核心逻辑：短期通过焦炉煤气等过渡资源降低成本和风险，中期依靠高端产品和市场应用释放低碳价值，长期则通过绿氢和绿电比例提升进一步降低产品碳足迹，并参与更高标准的国内外低碳钢市场竞争。

总体而言，张宣科技案例表明，对于成熟钢铁产业集群而言，氢冶金的商业逻辑不仅来自生产端降本，更来自低碳价值沿产业链的持续释放。

第 3 章 河北省氢冶金项目的经济性评估

氢冶金能否实现规模化发展，最终取决于其能否在减排与成本之间建立可持续平衡。对于河北而言，氢冶金经济性需要放在氢源成本、炼铁炼钢布局、原料供给和市场方向的组合中综合判断。河北既拥有焦炉煤气等过渡性氢源，也具备持续增长的绿氢潜力；既具备成熟钢铁产业基础，也连接京津冀和国际市场需求。因此，氢冶金的竞争力并不只来自单一技术进步，而更多来源于产业链协同和资源配置优化。从这一角度看，不同氢源组合、不同空间布局以及不同市场导向所对应的经济性差异，可能比单纯的工艺路线选择更为重要。对于河北这样的成熟钢铁产业集群而言，其发展优势不仅在于降低生产成本，更在于通过产业协同和市场连接创造低碳钢的长期价值。本章将重点分析不同发展路径下的成本表现，识别河北推动氢冶金产业化发展的优势场景和适用条件。

本章重点关注 2030 年前后产业化初期阶段的经济性表现。考虑到当前氢冶金项目仍处于示范向规模化过渡阶段，不同氢源和生产组织方式的选择将对成本产生显著影响。为识别关键影响因素，本研究构建了一系列代表性情景，对制氢、炼铁和炼钢等核心环节进行比较分析，重点考察氢源类型、原料供给、空间布局以及目标市场变化对吨钢成本的影响。

需要指出的是，本研究并非针对任何具体项目开展财务测算，也不代表实际投资方案，而是以行业平均水平项目为基础进行情景分析，旨在比较不同发展路径的相对竞争力。因此，测算结果更适用于识别影响氢冶金经济性的关键变量和发展趋势，而非预测具体项目成本。为突出冶金路线和氢源结构的影响，本研究以热轧钢吨钢成本为统一口径，比较不同氢源、工艺路线和空间布局的相对经济性。模型参数按行业平均水平设定，测算结果更适用于识别不同路径的成本差异和关键影响因素，而非预测具体项目成本。为突出氢冶金路线的影响，模型默认废钢比为 20%，并设置 50% 废钢比敏感性情景，分析废钢比例变化对经济性的影响。

3.1 典型氢冶金部署情景设定与经济性评估框架

从发展路径看，河北氢冶金并不存在单一最优解，而更可能形成本地产业升级、区域资源协同和国际市场拓展并行发展的格局。不同路径在氢源获取方式、炼铁炼钢环节布局以及目标市场定位方面存在差异，也决定了其成本结构和竞争优势的不同。本研究据此构建三大类共八个典型发展情景（见图表 15），重点比较不同路径下的经济性表现，并识别河北氢冶金未来发展的潜在优势方向。其中：第一类是依托河北本地钢铁产业链，在省内完成炼铁、炼钢和产品消纳。第二类是利用内蒙古等周边地区低成本绿氢资源，通过输氢或 DRI/HBI 输入补充河北本地供给。第三类是依托河北港口区位和钢铁产业链基础，面向日本、韩国等市场出口绿铁或低碳排放钢材。

（1）本地转型：依托既有产业体系推进低碳升级

对于河北而言，本地转型是最具现实基础的发展方向。可从长流程基准逐步过渡到焦炉煤气 DRI-EAF，并在绿氢条件成熟后进一步转向绿氢 DRI-EAF。河北本地 BF-BOF 路线作为当前主流生产方式和成本比较基准。河北 COG-DRI-EAF 路线代表利用本地焦炉煤气开展富氢直接还原，并在河北完成电炉炼钢。河北绿氢 -DRI-EAF 路线代表在河北本地制取绿氢，并在本地完成直接还原和炼钢。传统 BF-BOF 路线、焦炉煤气 DRI-EAF 路线以及本地绿氢 DRI-EAF 路线，分别代表当前主流生产模式、过渡阶段发展路径和长期近零碳发展方向，以观察河北钢铁产业低碳转型过程中成本结构的演变规律。

(2) 区域协同：利用外部资源优化成本结构

考虑到河北绿氢资源潜力虽较大，但并非全国最具优势地区，区域协同有望成为未来降低氢源成本的重要补充路径。特别是内蒙古等新能源资源富集地区，具备更低成本绿氢和绿铁生产条件，与河北形成资源与产业互补关系。跨区域协同可作为河北氢冶金规模化发展的重要补充，绿氢输入和绿铁输入分别代表不同资源载体和产业环节布局。内蒙古绿氢-河北 DRI-EAF 路线代表在内蒙古利用低成本可再生能源制氢，再将绿氢运输至河北完成直接还原和炼钢。内蒙古绿氢 DRI- 河北 EAF 路线则代表在内蒙古本地利用绿氢生产 DRI/HBI，再运输至河北进行电炉炼钢。其核心问题在于比较氢气运输、绿铁运输以及钢铁产业链布局调整对整体经济性的影响，从而判断区域协同在河北氢冶金规模化发展中的潜在价值。

(3) 国际市场：面向东北亚低碳钢贸易机遇

除国内市场外，河北还拥有面向国际市场的重要区位优势。**国际市场情景主要用于评估河北参与低碳排放钢铁区域贸易的潜力**，包括进口绿铁炼钢和面向以日韩为例的市场出口绿铁或低碳排放钢材。澳大利亚 DRI- 河北 EAF 路线代表在澳大利亚皮尔巴拉或怀阿拉等地区生产 DRI/HBI，再运输至河北炼钢。河北 DRI 出口日韩 EAF 路线代表河北生产低碳 DRI/HBI 后出口至日本、韩国，由当地完成电炉炼钢。河北 DRI-EAF 出口日韩路线则代表河北在本地完成低碳排放钢材生产后出口日韩。其关注重点不仅是生产成本本身，更包括资源禀赋、物流条件和市场需求共同作用下的综合竞争力。

上述情景并非对未来项目布局的预测，而是通过统一分析框架回答一个更根本的问题：在绿氢成本仍处于下降过程中、钢铁行业面临深度脱碳约束的背景下，河北应更多依靠本地转型、区域协同，还是国际市场拓展来提升氢冶金竞争力。通过比较不同氢源、资源流向和产业链配置下的成本差异，本研究试图识别河北在焦炉煤气过渡、本地绿氢发展、跨区域协同以及东北亚低碳钢贸易中的相对优势，为既有产业链转型模式的发展路径提供参考。

图表 15 河北省典型氢冶金部署情景设定与经济性评估框架

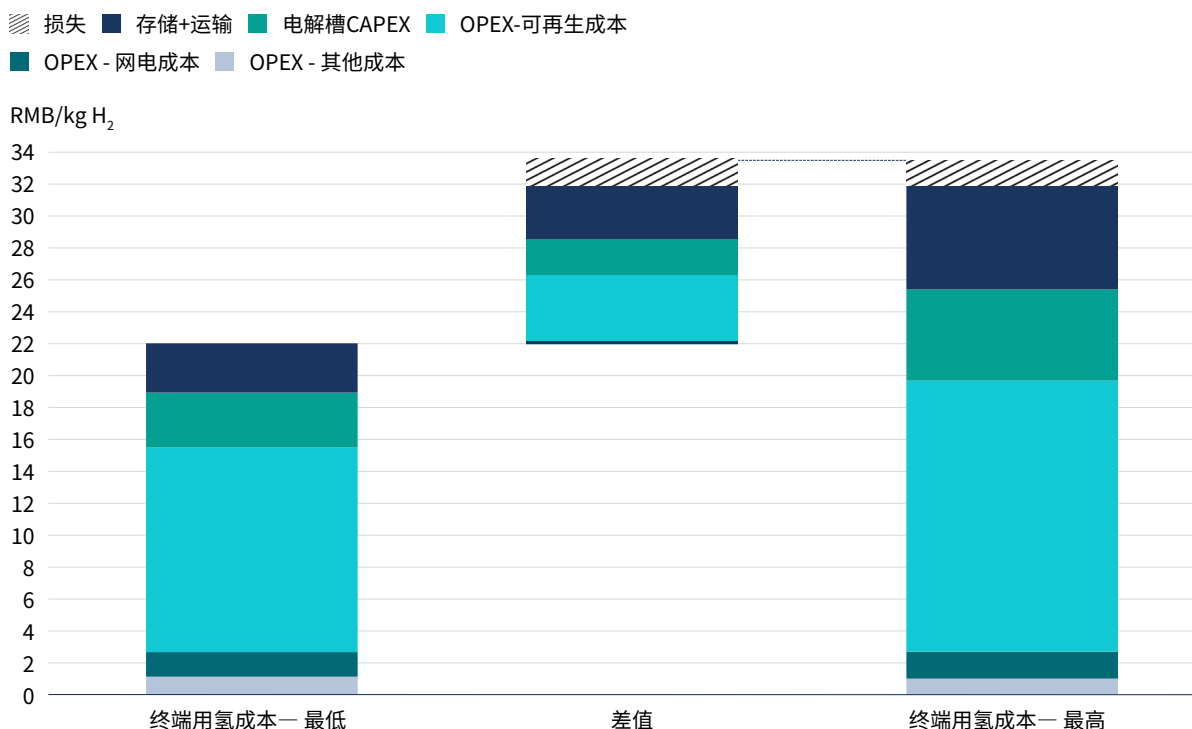
	制氢	炼铁	炼钢	情景描述
河北BF-BOF		河北		河北本地长流程
河北COG-DRI-EAF	河北焦炉	河北		河北本地焦炉煤气富氢还原
河北绿氢-DRI-EAF	河北			河北制氢，本地还原
内蒙古绿氢-河北DRI-EAF	内蒙古	河北		内蒙古制氢，运输至河北还原
内蒙古绿氢-河北DRI-EAF	内蒙古		河北	内蒙古制氢炼铁，运输DRI/HBI
澳大利亚DRI-河北EAF	澳大利亚皮尔巴拉/怀阿拉		河北	澳大利亚制氢炼铁，河北炼钢
河北DRI-出口-日韩EAF	河北		日韩	河北制氢炼铁，日韩炼钢
河北DRI-EAF-出口日韩	河北			河北制氢炼铁炼钢，出口日韩

▲ 出口日韩

3.2 氢源成本比较与关键影响因素

河北本地绿氢具备形成成本竞争力的基础，但项目选址和系统配置将显著影响最终经济性。如图表 16 所示，河北本地绿氢终端成本约为 22—33 元 /kg，低成本情景对应风光资源较好、制氢地点靠近钢铁用氢场景、输氢距离较短、电网容量约束较小的项目条件。高成本情景则对应风光资源条件相对一般、制氢与用氢地点距离更远，并面临更高储运成本和电网容量约束的项目条件。约 11 元 /kg 的成本差异表明，河北绿氢冶金的经济性不能以省级平均资源水平判断，而需要落实到具体钢铁集群、绿电来源、制氢布局和储运条件。

图表 16 河北本地绿氢终端成本区间及关键假设

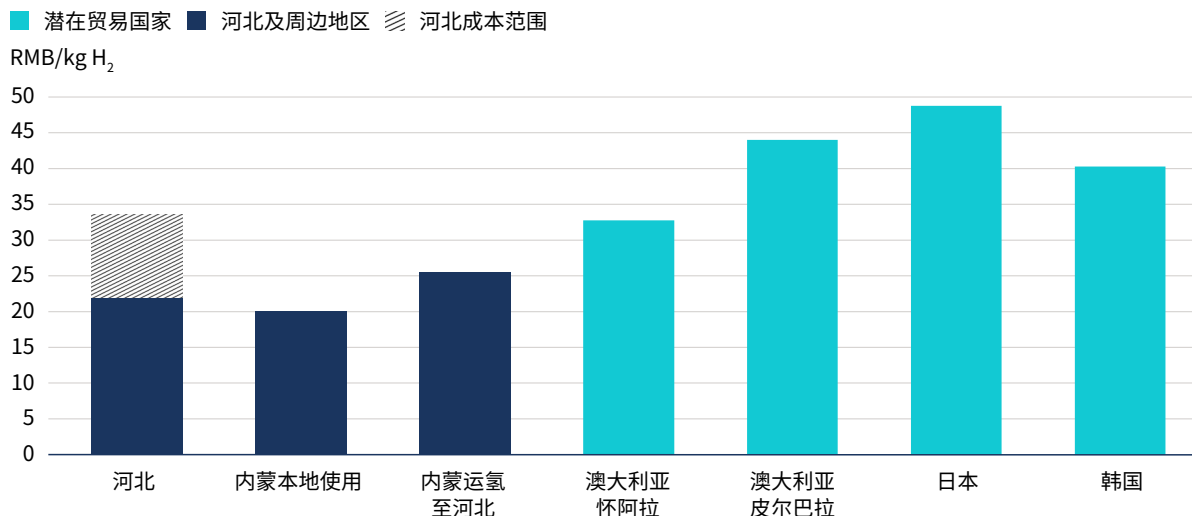


注：终端用氢成本存在较大差异，主要受当地风光资源禀赋及可再生电力成本、电解槽技术与利用率，以及储氢需求、输氢距离与运输方式等因素影响。相关成本基于近期市场价格和技术参数测算，未来随着可再生能源成本下降、电解槽技术进步及规模化应用，绿氢成本有望进一步降低。

内蒙古低成本绿氢有望成为河北氢冶金发展的重要补充资源。如图表 17 所示，内蒙古本地绿氢终端成本约为 20.0 元 /kg，是本报告测算情景中成本较低的绿氢来源，若运输至河北，终端成本约为 25.5 元 /kg，接近河北本地低成本情景。这意味着，在河北本地优质绿氢资源不足、或钢铁企业需要扩大绿氢供应规模的情况下，内蒙古绿氢可作为重要补充选项。但这一补充路径能否形成实际竞争力，仍取决于输氢距离、运输规模、管道等基础设施进展和长期稳定供给能力。

与潜在贸易国家相比，河北及周边绿氢资源具备显著成本优势。例如，日本和韩国终端绿氢成本分别约为 48.7 元 /kg 和 40.2 元 /kg，明显高于河北本地低成本情景和内蒙古输入河北情景。澳大利亚怀阿拉和皮尔巴拉等地终端用氢成本约为 32.8 元 /kg 和 44.0 元 /kg，也整体高于河北低成本情景。在本地或周边低成本绿氢资源能够稳定供应的条件下，河北在绿铁和低碳排放钢材生产上具备较好的成本基础，并有望面向东北亚市场形成竞争优势。换言之，绿氢成本优势不仅关系河北钢铁行业自身转型，也可成为其参与区域和国际低碳排放钢市场竞争的重要基础。

图表 17 河北及潜在合作地区的终端绿氢成本对比

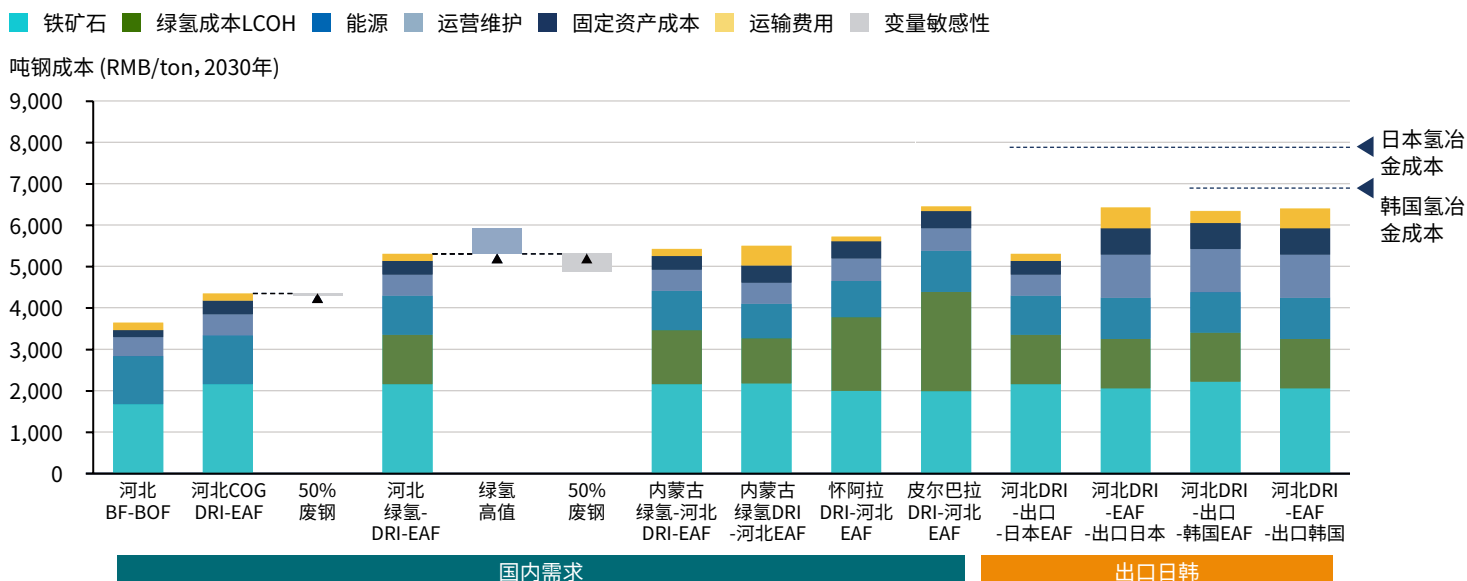


注：相关成本基于近期市场价格和技术参数测算。未来各地区绿氢成本下降幅度受资源禀赋、技术进步及基础设施等因素影响，其相对成本竞争力仍具有一定不确定性。

3.3 不同氢冶金部署情景下的吨钢成本评估

焦炉煤气优势主要来自河北既有的焦化资源和钢铁产业链基础，可在绿氢成本尚未完全下降前，为绿氢 DRI-EAF 路线积累运行经验。如图表 18 所示，河北本地高炉—转炉长流程吨钢成本约为 3,650 元 / 吨，是当前成本最低的基准路线。河北焦炉煤气直接还原—电炉路线吨钢成本约为 4,350 元 / 吨，较传统长流程有所上升，但在所有氢冶金路线中成本最低。在绿氢成本尚未显著下降、供应体系尚未成熟的阶段，焦炉煤气可作为河北推进氢冶金示范的过渡性氢源，帮助降低早期项目成本压力，并积累 DRI-EAF 路线运行经验。

图表 18 河北省冶金工艺路径的吨钢成本评估



模型假设：测算口径为热轧带钢的吨钢成本，生产流程的默认废钢比为 20%，高炉入料是 80% 烧结矿和 20% 球团矿，DRI 入料是 100% 球团矿；运输成本包括澳大利亚铁矿和 DRI/HBI 在国内的港口和厂区间的铁路运输成本；62% 铁矿粉成本 784 元 / 吨，67% 球团矿成本 1,309 人民币 / 吨，大工业电价 0.7 元 / kWh，焦炉煤气 0.8 元 / m³，天然气成本 4.3 元 / m³，废钢 2,600 元 / 吨；吨铁用氢量为 54kg H₂，内蒙古 DRI 情景需要将 DRI 转化为 HBI 运输，有一定损耗，吨钢用氢量略高于河北。

注：相关成本基于近期市场价格和技术参数测算。未来各技术路线的相对成本竞争力仍具有一定不确定性。

本地绿氢 DRI-EAF 路线在低成本绿氢情景下具备一定竞争力，但项目差异较大，依赖具体项目选址、绿电价格、储运方式和绿氢供应稳定性。河北本地绿氢 DRI-EAF 路线吨钢成本约为 5,310 元 / 吨，低于大多数跨区域和国际绿铁输入情景，若能获得较低成本绿氢，河北本地发展绿氢冶金具备一定成本优势。但若项目位于风光资源较弱、制氢与用氢距离较远，或电网容量约束较强的区域，绿氢成本上升将显著推高吨钢成本，削弱其竞争力。

废钢比是 DRI-EAF 路线的吨钢成本的重要变量，提高废钢比可改善成本经济性。在默认 20% 废钢比情景下，DRI 在吨钢成本中的作用更为突出。当废钢比提高至 50% 时，吨钢成本明显下降，河北绿氢—DRI-EAF 路线的成本可降低约 400 元 / 吨。高废钢比掺混能够提升 DRI-EAF 路线的成本竞争力，也更接近当前部分氢冶金—电炉项目的实际运行方式。但从长期看，高废钢比的可持续性仍取决于废钢资源供给、质量稳定性，以及不同钢种对原料结构和残余元素控制的要求。

内蒙古绿氢和绿铁可作为河北本地资源的重要补充，经济性取决于输入方式和基础设施条件。若内蒙古低成本绿氢运输至河北，并在河北完成直接还原和电炉炼钢，吨钢成本约为 5,430 元 / 吨，略高于河北本地低成本绿氢路线，但仍具备一定竞争力。若在内蒙古本地生产 DRI/HBI 后运输至河北电炉炼钢，吨钢成本约为 5,500 元 / 吨，高于输氢至河北路线。内蒙古资源量大、绿氢成本潜力较低，可作为河北扩大绿氢冶金规模的重要补充。从经济性看，以绿氢形式输入河北可能优于以绿铁形式输入河北，前提是跨区域输氢管道等基础设施建设能够推进并降低运输成本。

澳大利亚绿铁输入河北的经济性相对较弱，不具备现实可行性。测算显示，澳大利亚怀阿拉和皮尔巴拉 DRI 输入河北电炉炼钢的吨钢成本分别约为 5,720 元 / 吨和 6,450 元 / 吨，明显高于河北本地绿氢路线和内蒙古协同路线。这主要受到海外制氢、DRI 生产、长距离海运和国内物流等多重成本叠加影响。对于河北而言，由于本地具备较强钢铁产业链基础、绿氢潜力和港口条件，澳大利亚绿铁在河北市场的成本竞争空间十分有限，更可能在本地炼铁成本较高或绿氢资源不足的南方沿海市场中具备更强适用性。

河北具备向日本、韩国供应绿铁或低碳钢材的潜在竞争力。日本和韩国本地氢冶金成本分别约为 7,940 元 / 吨和 6,920 元 / 吨，均高于河北本地低成本绿氢—DRI-EAF 路线。若河北在本地完成绿氢直接还原和电炉炼钢后出口日韩，吨钢成本仍低于日韩当地氢冶金成本。若河北以 DRI/HBI 等绿铁形式出口至日韩、由当地完成电炉炼钢，成本还可进一步下降。河北不仅可以将氢冶金用于本地低碳钢生产，也有潜力依托港口和东北亚市场，参与绿铁和低碳钢材的区域贸易。然而这一竞争力的实现仍有赖于港口储运等基础设施配套，以及低碳产品认证和市场需求的逐步完善。

3.4 完备产业链优势助力低碳价值实现

未来五至十年，河北氢冶金经济性不仅取决于绿氢成本下降，也取决于能否把原料、能源、炼铁、炼钢、轧制、产品和市场环节协同起来，是在完整钢铁产业链、高端产品体系和近端市场共同支撑下的低碳价值实现能力。河北氢冶金项目可以利用**原料能源协同、高端产品价值和国际贸易优化**，共同提升项目经济性的条件。

原料和能源协同将促进河北氢冶金项目从示范走向规模化的节奏。短期内，焦炉煤气等现有富氢资源仍将发挥重要作用，为产业化示范和运行优化提供支撑；与此同时，提高废钢利用比例，也有助于改善 DRI-EAF 路线经济性。中长期，随着绿电和绿氢成本下降，应逐步提高绿氢在氢冶金项目中的使用比例，并将内蒙古低成本绿氢作为本地绿氢之外的补充来源。项目能否保持经济性，取决于不同阶段氢源成本、废钢资源、供应稳定性和产品质量要求之间的匹配。

高端产品体系是河北实现低碳价值的重要支撑。氢冶金生产的 DRI 残余元素含量低，可与废钢电炉路线形成互补，帮助控制铜等残余元素对钢材质量的影响，促进废钢高质量利用。依托河北完整的轧制及深加工产线，DRI 可进一步转化为面向汽车、装备制造、家电、新能源等高价值下游行业的低碳排放钢材，从而将炼铁环节的减排优势转化为产品竞争力和市场价格。

国际市场的开启则可进一步拓展河北低碳价值实现空间。日本和韩国本地氢冶金成本较高，且钢铁产业链减排需求明确，可作为河北低碳排放钢铁产品的重要潜在市场。依托本地钢铁产业链、低成本绿氢潜力和港口物流条件，河北既可探索绿铁出口，也可在本地完成电炉炼钢和高端产线加工后出口低碳排放钢材。未来，这一路径能否形成稳定市场机会，还需要配套清晰的碳足迹核算、低碳排放钢认证和跨境贸易机制，以提升低碳属性在国际市场中的可信度和价值认可。

第 4 章 主要结论和行动方向建议

前三章的分析表明，河北氢冶金发展的意义，并不只是建立若干示范项目，或验证某一条技术路线的可行性。作为中国最重要的钢铁生产基地之一，河北面对的是一个更具系统性的问题：如何在长流程产能占比高、产业链高度成熟、下游市场广泛的基础上，推动传统钢铁基地向低碳短流程和近零碳生产体系转型。

与山西等副产资源过渡型地区不同，河北模式的核心不在于依托某一类低成本氢源降低起步门槛；与内蒙古等可再生能源驱动型地区相比，河北也并非单纯依靠低成本绿氢发展新建绿铁产能。河北更具代表性的价值在于：它具备将氢源供给、直接还原、电炉炼钢、废钢利用、高端产品制造和下游市场需求连接起来的产业基础，有条件探索氢冶金从“技术减排”走向“低碳价值实现”的现实路径。

因此，河北氢冶金发展的关键，不是简单回答“哪一种氢源成本最低”或“哪一条工艺路线最优”，而是回答成熟钢铁产业集群如何在不同发展阶段实现资源、技术、市场和政策的协同。短期内，焦炉煤气等富氢副产资源可以降低示范项目成本，帮助企业积累 DRI-EAF 运行经验；中长期，绿氢比例提升将决定氢冶金能否真正支撑深度脱碳；而从商业化角度看，低碳排放钢认证、绿色采购、高端产品应用和国际市场连接，则将决定减排价值能否转化为持续的市场回报。

基于这一判断，本文认为，河北既有产业链转型模式的核心，不是寻找单一最优资源，而是构建一个能够持续创造和传导低碳价值的钢铁产业生态。围绕这一目标，本报告提出以下主要结论与行动建议。

主要结论：

一、河北模式的核心不是资源驱动，而是价值驱动。

河北发展氢冶金的基础并不主要来自单一资源优势。与新能源资源富集地区相比，河北并不具备全国最低成本的绿氢资源；与副产资源集中地区相比，焦炉煤气也并非支撑其长期深度脱碳的最终方案。河北模式真正具有代表性的地方，在于其拥有全国最完整、最成熟、最具规模的钢铁产业体系，能够将氢源供给、直接还原、电炉炼钢、轧制加工、高端产品和终端市场需求连接起来，形成从低碳炼铁到低碳价值实现的完整链条。

因此，河北氢冶金发展的核心问题并不是单纯“如何生产”，而是如何依托既有钢铁产业基础，将低碳铁源进一步转化为高品质钢材、绿色供应链能力和区域市场机会。对于成熟钢铁产业集群而言，氢冶金的意义不应停留在炼铁环节的技术替代，而应成为推动钢铁产业体系升级、产品结构优化和低碳价值创造的重要抓手。

二、焦炉煤气降低了起步门槛，但绿氢决定长期深度脱碳潜力。

河钢张宣科技项目表明，在绿氢成本仍较高、供应体系尚未成熟的阶段，焦炉煤气等富氢副产资源可以为氢冶金项目提供重要的过渡支撑。一方面，焦炉煤气与河北既有焦化和钢铁产业链高度关联，可以降低项目初期氢源获取和气体处理成本；另一方面，依托焦炉煤气开展直接还原铁和电炉短流程实践，有助于企业积累竖炉运行、电炉炼钢、原料匹配和低碳产品开发经验。

但焦炉煤气路线的价值应被准确定位。它不是河北氢冶金的长期终点，也不应成为新增化石资源依赖的理由。其真正意义在于帮助氢冶金跨过从技术示范到工程化运行的早期门槛，为未来更高比例绿氢应用创造产业基础和运行经验。从长期看，河北氢冶金仍需要沿着“焦炉煤气起步、逐步混入绿氢、提高绿氢比例、最终迈向近零碳生产”的方向演进。只有当绿氢在直接还原过程中的使用比例持续提升，氢冶金才能从相对减排路径走向深度脱碳路径。因此，焦炉煤气应服务于绿氢转型，而不是替代绿氢转型。

三、未来竞争的不只是氢源成本，而是低碳价值实现能力。

经济性分析显示，在 2030 年前后，氢冶金路线整体成本仍将高于传统高炉—转炉长流程。即使在低成本绿氢情景下，绿氢 DRI-EAF 路线仍需要面对能源、原料、废钢、电炉炼钢和运输等多重成本约束。这意味着，河北氢冶金的长期可持续性不能仅依赖生产端降本，更需要通过产品端、市场端和贸易端实现低碳价值实现。

河北的优势在于有条件将低碳炼铁进一步延伸至高端钢材生产和下游应用场景。DRI/HBI 残余元素较低，可与废钢电炉路线形成互补，有助于提高废钢利用质量，并支撑汽车、装备制造、家电、新能源等高品质钢材需求。依托成熟的轧制、冷轧、深加工和产品开发能力，河北有机会将氢冶金减排优势转化为更具市场识别度的低碳排放钢产品。

与此同时，国际市场未来可能对绿色钢材和铁源形成更明确需求。对于河北而言，低碳排放钢和绿铁出口不仅是潜在市场机会，也可能成为低碳价值实现的重要渠道。但这一机会能否转化为稳定商业回报，仍取决于碳足迹核算、低碳排放钢认证、跨境标准互认和绿色采购机制能否逐步完善。

在上述主要结论的基础上，本报告提出以下若干行动方向建议：

一、立足既有成熟产业链，推动氢冶金与废钢电炉和高端产品体系协同。

对于河北这样的成熟钢铁产业集群而言，氢冶金项目如果只停留在生产 DRI 或替代部分高炉铁水，很难充分释放其战略价值。未来项目设计应从一开始就纳入完整产业链视角，与废钢掺混、电炉短流程、高品质绿铁供给和高端钢材开发等统筹考虑、共同推进。

其中，重点行动方向可包括：第一，通过 DRI/HBI 与废钢的合理配比，可兼顾成本控制、残余元素管理和高品质钢材生产需求；第二，通过汽车板、高端棒材、特种材料等产品体系承接低碳价值，提升项目经济性和市场竞争力；第三，围绕低碳排放钢的质量稳定性、碳足迹核算和产品应用场景，建立从炼铁到终端客户的协同开发机制。

二、以焦炉煤气建立产业化能力，以绿氢支撑长期深度脱碳。

焦炉煤气路线的目标不是形成长期依赖，而是缩短河北迈向绿氢冶金的距离。河北可在唐山、邯郸等钢铁产业聚集地区，利用现有焦化资源和焦炉煤气条件，降低氢冶金示范项目早期成本，积累 DRI 竖炉、电炉短流程和低碳排放钢生产经验。焦炉煤气路线的现实意义在于帮助企业在绿氢大规模低成本供应前，先行完成关键工程能力建设和产业链协同验证。

但这一过渡路径必须设置清晰边界。焦炉煤气路线应基于既有资源高效利用，而非带动新增焦化产能。新建或改造项目应在气体系统、还原工艺和能源配套上预留绿氢切换条件，随着绿电和绿氢成本下降，逐步提高绿氢应用比例。焦炉煤气解决的是“如何起步”的问题，绿氢解决的是“如何深度脱碳”的问题。只有把两者放在分阶段演进路径中统筹设计，才能兼顾近期可行性和长期减排目标。

三、优先建设“钢铁+绿电+绿氢”协同集群，降低系统性成本。

未来决定河北氢冶金竞争力的不是单个项目成本，而是产业集群的系统效率。绿氢成本对项目选址、绿电价格、制氢方式、储运距离、电网接入和用氢负荷高度敏感。河北本地绿氢成本区间较宽，说明省级平均资源水平并不能直接决定项目经济性。真正影响氢冶金竞争力的，是钢铁用氢场景能否与绿电资源、制氢设施、储运系统和电炉炼钢布局实现高效匹配。

因此，河北应优先在具备钢铁产业基础、绿电资源条件和用氢需求集聚的区域推动集群化布局。张家口、唐山、邯郸等地区可结合自身条件，探索不同类型的钢铁低碳转型集群。例如，张家口可重点发挥可再生能源和绿氢潜力，唐山和邯郸可重点结合钢铁产能、港口物流、下游客户和产业链配套，形成各具特色的协同发展路径。

在具体机制上，可推动绿电直连、园区级制氢、共享储运基础设施、区域氢能管网和低碳工业园区协同建设。通过集群化布局降低单个企业独立投资压力，提高绿电消纳效率、用氢稳定性和基础设施利用率。对于河北而言，氢冶金规模化不是简单复制多个项目，而是构建能够降低系统成本、提高运行效率、支撑市场应用的低碳钢铁产业生态。

四、率先建立低碳价值实现机制，培育可持续需求侧市场。

低碳排放钢的商业化不仅取决于生产端减排，也取决于下游客户能否识别、采购和使用。低碳排放钢的挑战之一不是“能否生产出来”，而是“能否被市场认可并形成稳定需求”。建议推动 EPD、产品碳足迹核算、低碳排放钢评价和证书等工具应用，提升产品绿色属性的可信度，使低碳属性从企业自我声明转向可核算、可验证、可比较的市场语言。在此基础上，可围绕汽车、家电、装备制造、新能源和建筑等重点行业，探索低碳钢采购试点、需求聚合、长期认购、低碳材料目录和供应链减排合作机制。

五、提升跨区域和国际协同水平，拓展资源和市场空间。

国内层面，河北可加强与内蒙古、京津冀及港口地区协同，利用内蒙古低成本绿氢资源、河北钢铁产业链基础，以及天津、唐山等港口物流条件，探索绿氢输入和低碳排放钢材流通。国际层面看，经济性评估显示，在本地或周边低成本绿氢能够稳定供应的条件下，河北生产低碳钢和绿铁产品具备面向日本、韩国等东北亚市场的潜在成本优势。日韩钢铁产业面临较高的本地绿氢成本和较强的产业减排压力，未来可能形成对低碳排放钢材、DRI/HBI 等绿色铁源的进口需求。河北依托钢铁产业链基础、港口物流条件和周边绿氢资源，可在这一市场变化中争取主动。但国际市场机会不会自动转化为竞争优势。河北需要提前布局跨境碳足迹核算、低碳排放钢认证、标准互认、贸易合规和港口物流配套，发展绿铁贸易伙伴关系，增强低碳属性在国际市场中的可信度和可接受度，建设有利于绿铁发展的国际环境。未来，河北不仅有机会成为中国低碳钢重要生产基地，也有潜力成为东北亚乃至国际绿色钢铁供应链中的关键节点。

河北的实践表明，钢铁行业深度脱碳的竞争力不仅取决于低成本氢源获取能力，更取决于能否打通从供给到市场应用的价值链条。相较于资源驱动型模式依赖绿氢成本优势和新增低碳产能，既有产业链转型模式的核心在于依托成熟钢铁产业体系，将低碳炼铁与电炉炼钢、高端产品制造、供应链减排以及终端市场需求有效衔接，实现低碳价值在产业链各环节的持续传导。对于河北而言，氢冶金的意义不仅在于生产低碳铁源，更在于推动钢铁产业从以规模扩张为主的发展模式，逐步转向以低碳竞争力和高附加值产品为核心的发展模式。这种能力一旦形成，其价值将不仅体现在减排效果本身，更体现在未来绿色供应链和国际低碳钢市场中的战略地位。

从长期看，既有产业链转型模式所探索的并非某一项技术的替代路径，而是一种面向近零碳钢铁体系的渐进式转型逻辑。焦炉煤气等富氢副产资源能够降低产业化初期门槛，帮助企业积累工程经验和市场基础；绿氢则决定未来深度脱碳的最终高度；废钢、电炉、高端产品开发和低碳价值实现机制则共同决定产业转型能否形成可持续商业模式。因此，河北案例最重要的启示并不是证明氢冶金可以运行，而是证明成熟钢铁产业集群有可能通过分阶段演进，实现从传统长流程生产体系向近零碳钢铁生态的系统性转型。

参考文献

- 1 殷瑞钰, 上官方钦. 重视废钢流向发展电炉流程: 粗钢产出总量控制与制造流程结构交替演变展望 [J]. 资源再生, 2025(2): 20.
- 2 中国钢铁新闻网, 2025 年各省份粗钢产量出炉, 2026, http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202601/t20260127_107183.html
- 3 人民日报, 河北现代钢铁产业如何炼成 (经济聚焦), 2024, <https://cpc.people.com.cn/n1/2024/0614/c64387-40256342.html>
- 4 河北省人民政府办公厅, 关于印发河北省制造业高质量发展“十四五”规划的通知, 2022, https://www.xiongan.gov.cn/2022-02/16/c_1211574110.htm
- 5 新华网, 钢铁第一大省“绿色嬗变”记, 2022, https://www.news.cn/politics/2022-11/12/c_1129122489.htm
- 6 财经杂志, 钢铁低碳转型将减少焦炭需求, 山西焦化产业的远虑近忧, 2025, <https://finance.ifeng.com/c/8gdxdl9LGLp>
- 7 2020 年度温室气体排放核查报告, 深圳华测国际认证有限公司, 2021
- 8 工业和信息化部等三部门, 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见, 2022, https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk10/202202/t20220208_968879.html
- 9 中国发展和改革委员会, 氢能产业发展中长期规划 (2021-2035 年), 2022, https://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf
- 10 工业和信息化部等三部门, 关于印发《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》的通知, 2024, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202412/content_6995692.htm
- 11 河北省工业和信息化厅, 《河北省支持钢铁行业创新发展的若干措施》解读, 2023, <https://gxt.hebei.gov.cn/hbgyhxxht/zcfg30/zcjd17/2025042121530292886/index.html>
- 12 张家口人民政府, 国家碳达峰试点 (张家口) 实施方案, 2024, https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzyz/tdfztz/202407/t20240711_1391618.html
- 13 河北省自然资源厅, 河北省非煤矿山行业发展规划, 2023, <https://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/zcwj/zcfgk/zck/10828613396790263808.html>
- 14 河北省发改委, 关于印发《河北省氢能产业发展“十四五”规划》的通知, 2021, https://hbdrc.hebei.gov.cn/ghjh/fzgh_1230/202309/t20230906_82062.html
- 15 新华网, 河北: 推动可再生能源开发利用, 2026, <https://www.news.cn/photo/20260531/3dfd-7d880958461aab990e1a1d43d4c9/c.html>
- 16 王新东, 赵志龙, 李传民, 杨永强. 基于富氧焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术 [J]. 钢铁, 2023, 58(5): 11-19. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220689
- 17 张建良, 宗燕兵, 李克江, 等. 全球低碳炼铁新工艺技术进展及展望 [J]. 钢铁, 2024, 59(9): 45-55, <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20240339>

落基山研究所, 河钢集团, 钢铁产能与绿色能源优势的协同释放: 传统钢铁基地向绿色制造高地的转型——以河北为例, 2026, <https://rmi.org.cn/insights/shanxi-hydrogen-metallurgy-development-report/>

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/>



除特别说明, 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

© 2026年8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。