



氢冶金发展模式系列研究之一

从焦炉煤气到绿氢：山西氢冶金发展路径探索

副产氢资源驱动的过渡与升级





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。

作者与鸣谢

作者

洪予欣, 李抒苒, 李婷, 薛雨军, 张博雅

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

除非另有说明, 所有作者均来自落基山研究所。

联系方式

李抒苒, sli@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 从焦炉煤气到绿氢: 山西氢冶金发展路径探索——副产氢资源驱动的过渡与升级, 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:

陈 剑 冶金工业信息标准研究院

何 泓 山西科城能源环境创新研究院

寇静娜 太原理工大学

李 飞 绿行太行

苗茂谦 中国石油化工联合会煤化工专委会

张 琦 东北大学

赵志龙 中冶京诚工程技术有限公司

周和敏 北京钢研氢冶金技术研究院有限公司

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 从资源禀赋到发展路径：山西氢冶金的模式选择	7
1.1 产业条件与政策导向奠定发展基础	7
1.2 副产氢资源支撑早期部署阶段	9
1.3 多元绿氢供给支撑长期转型路径	11
第 2 章 焦炉煤气副产氢资源潜力与利用路径	12
2.1 副产氢资源为氢冶金发展创造窗口期机遇	12
2.2 多元技术路径正在验证副产资源过渡模式	14
2.3 资源约束与需求增长将推动绿氢接续	15
第 3 章 山西省氢冶金项目的经济性评估	17
3.1 典型氢冶金部署情景设定与经济性评估框架	17
3.2 不同氢源成本比较与关键影响因素	18
3.3 不同氢源情景下的吨钢成本比较	19
3.4 未来五至十年是绿氢冶金部署的关键窗口	20
第 4 章 主要结论与行动方向建议：把握副产氢过渡窗口，推动绿氢接续	22
参考文献	24

前言

在全球钢铁行业深度脱碳进程中，氢冶金正从技术探索逐步走向产业实践。作为少数具备近零排放潜力的炼铁路径之一，氢冶金被广泛视为未来钢铁工业转型的重要方向，预计可帮助全球钢铁行业每年降低 12-15 亿吨碳排放，约占当前行业总排放的 27%-34%。¹ 对于我国而言，在“双碳”目标持续推进、钢铁行业面临长期减排压力的背景下，推动氢冶金发展不仅关乎技术创新，也关系到未来绿色工业的塑造。根据中国钢铁工业协会评估，冶金工艺突破技术可贡献 20%-25% 的行业减碳潜力，其中氢冶金是重点技术之一。² 国家层面已在《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》《工业领域碳达峰实施方案》《钢铁行业节能降碳专项行动计划》等公开政策文件中，持续支持氢冶金等低碳冶炼技术研发、示范与推广应用。

当前，氢冶金的发展正逐渐经历从“技术验证”向“模式验证”的迭代。过去几年，国内氢冶金项目建设明显提速。随着第一批示范项目相继落地或启动建设，产业界对氢冶金的关注正从“技术是否可行”逐步转向“如何实现规模化发展”。然而，氢冶金的发展进程并不会沿着单一路径展开。中国地域广阔，不同地区在资源禀赋、产业基础、能源结构和发展阶段上存在显著差异。对于同样的氢冶金技术，不同地区往往会形成不同的发展逻辑和部署路径。例如，有的地区依托成熟钢铁产业基础推动既有产能转型；有的地区利用焦炉煤气等副产氢资源降低初期成本、加快项目落地；还有的地区则依托丰富的风光资源，探索以绿氢为核心的新型钢铁生产体系。这些路径均服务于钢铁行业低碳转型，但其资源依赖、经济性基础、建设顺序以及产业协同模式均存在显著差异。

随着产业化进程持续推进，发展模式正成为影响氢冶金规模化部署的关键因素。决定产业能否实现持续发展和广泛复制的关键，已不再局限于单一技术突破，而在于能否形成与不同资源禀赋和产业条件相匹配的发展路径。相比单个项目的技术方案，发展模式决定了项目为何能够在特定地区形成、依靠哪些关键条件获得比较优势，以及其经验能否被更多地区借鉴和推广。从示范走向规模化，本质上不仅是技术扩散的过程，也是发展模式不断验证与复制的过程。

基于这一考虑，本系列研究尝试将研究视角从单个项目扩展至更加宏观的发展模式层面。希望通过梳理不同地区的资源条件、产业基础和项目实践，识别驱动氢冶金发展的关键要素，总结具有代表性的发展路径，并分析其适用条件、阶段价值和未来演进方向，为地方政府、产业投资方和行业企业提供参考。

结合当前国内实践，本系列研究将中国氢冶金发展路径归纳为三类典型模式：

- **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以及既有基础设施条件，推动存量钢铁产能向氢冶金升级转型。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。

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。

图表 1 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	 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	 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	 吉林松原, 直接还原-竖炉, 25万吨, 建设中, 绿氢	内蒙古、新疆、吉林等

* 本篇研究侧重的氢冶金发展模式

基于上述框架，RMI 将陆续推出《中国氢冶金发展模式系列研究》。本报告作为系列首篇，聚焦山西省典型的副产资源过渡类模式。作为全国重要的煤焦产业基地，山西拥有丰富的焦炉煤气资源和“煤—焦—钢”产业基础，为氢冶金项目提供了独特的发展条件。通过研究山西实践，我们希望探讨副产氢资源如何支撑氢冶金率先实现产业化部署，以及这一过渡路径如何逐步向绿氢冶金演进，为更多地区提供可借鉴的发展思路。

第 1 章 从资源禀赋到发展路径：山西氢冶金的模式选择

山西省拥有全国最丰富的焦炉煤气副产氢资源，为氢冶金发展提供了独特的战略机遇。在当前绿氢仍面临成本、供给规模和供应稳定性等现实约束的背景下，副产氢资源能够提供较大规模、稳定、相对低成本的氢气来源，为氢冶金项目率先落地创造有利条件。从推动产业起步和培育市场的角度看，这一优势使山西有望成为我国氢冶金规模化发展的重要先行地区。

然而，副产氢资源的价值更多体现在“过渡”而非“终局”。焦炉煤气副产氢的排放强度虽然显著低于煤制氢，并能够支撑氢冶金较传统长流程实现约 60% 的碳减排，但其本质上仍建立在化石能源产业体系之上，难以满足钢铁行业深度脱碳的长期要求。从长期看，以绿氢为核心的氢冶金体系仍是行业演进的主要方向。

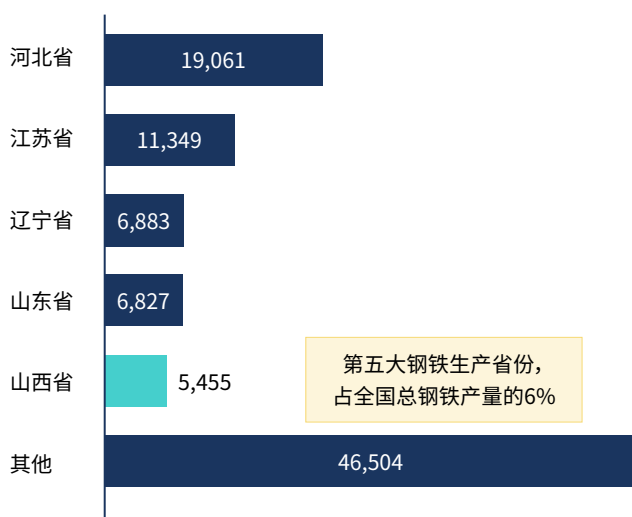
因此，对于山西而言，关键不在于是否利用副产氢资源发展氢冶金，而在于如何利用这一窗口期优势加快产业培育，并同步构建向绿氢转型的条件与能力。副产资源应被视为推动产业起步的过渡路径，而非固化的发展终点。如何把握过渡方案的部署规模、应用边界和退出节奏，在发挥近期竞争力的同时避免形成长期路径锁定，将成为山西氢冶金发展的核心课题。

1.1 产业条件与政策导向奠定发展基础

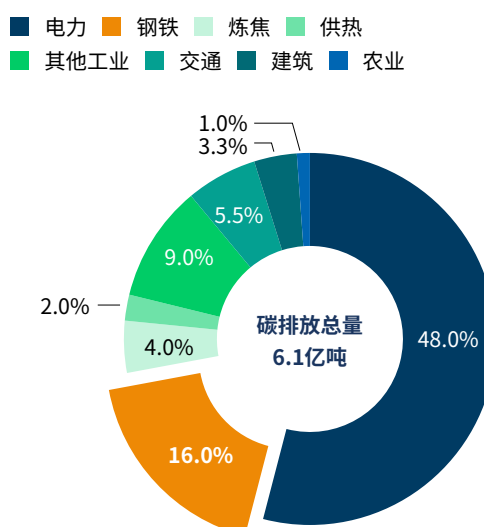
钢铁产业是山西省重要的支柱产业之一，对全省工业增长和地方经济发展具有重要支撑作用。2025 年，山西粗钢产量约 5455.75 万吨，是全国第五大钢铁生产省份³。从技术结构看，山西钢铁产业长流程产能占比超过 95%，对煤焦资源依赖较高，产业结构转型任务较重。与此同时，部分产能仍存在布局分散、技术落后的问题，需要进一步整合升级。短流程炼钢、氢冶金等低碳冶炼路径目前尚未形成大规模发展格局。钢铁行业也是山西最主要的高耗能行业和碳排放来源之一，2020 年钢铁行业在山西二氧化碳排放中占比 16%，是其第二大碳排放工业行业⁴。

图表 2 山西钢铁产量规模与碳排放水平

2025年山西省粗钢产量（万吨）



山西省碳排放总量及结构（2020年）

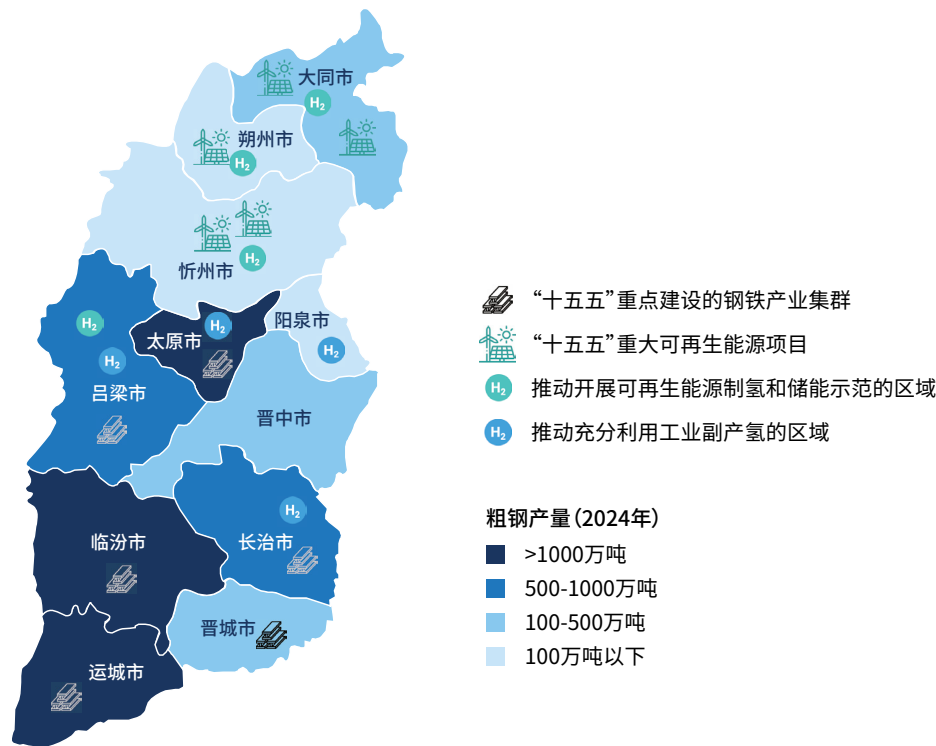


数据来源：国家统计局，财新智库

在钢铁行业“总量控制、结构优化”的政策框架和工业领域碳达峰目标下，山西钢铁产业近年来面临较强的低碳转型压力，氢冶金逐步成为政策鼓励和企业探索的重要方向之一。一方面，山西持续加强对氢冶金技术的政策引导。《山西省氢能产业发展中长期规划（2022—2035 年）》提出，探索并逐步推广以氢作为还原剂的氢冶金技术规模化应用，率先打造氢能冶金示范应用试点；《山西省加快经济社会发展全面绿色转型行动方案》也明确鼓励有条件的长流程企业适度发展氢冶金。另一方面，钢铁产能调控政策也为氢冶金技术发展提供了制度空间。2026 年 5 月，工业和信息化部正式印发《钢铁行业产能置换实施办法》，在全国炼铁、炼钢项目原则上执行不低于 1.5:1 减量置换的基础上，对氢冶金等低碳炼铁项目设置差异化安排：退出现有高炉、采用氢冶金等低碳工艺技术建设炼铁项目，且碳减排比例不低于高炉工艺 60% 的，可实施炼铁产能等量置换。在落地层面，山西通过“链长制”推动氢能在钢铁企业中的探索应用，以晋南钢铁为代表的链主企业依托焦化—钢铁协同发展的产业基础，在富氢冶炼和工业副产氢综合利用等方向开展探索，积累了应用经验。

未来，随着山西钢铁、清洁能源和氢能产业的进一步发展，氢冶金应用将具备更加有利的资源和产业条件。如图表 3 所示，根据山西“十五五”规划，未来五年将重点建设太原、长治、晋城、吕梁、临汾、运城六大钢铁产业集群⁵，钢铁产能布局在省内中南部的区域集聚特征将更加明显，有利于资源要素的高效集中利用。与此同时，山西持续推进晋北清洁能源基地建设，并加快氢能产业布局，也将为钢铁行业低碳转型提供更加稳定的能源保障。在此基础上，产业间高效协同和基础设施建设将成为氢冶金等低碳技术规模化发展的关键。尽快围绕钢铁产业布局构建规模化、稳定、可持续的氢源保障体系，将有助于提升企业推进氢冶金试点的积极性，为相关示范项目落地创造更有利条件。

图表 3 山西省粗钢产量、重点钢铁产业集群与可再生能源项目空间分布

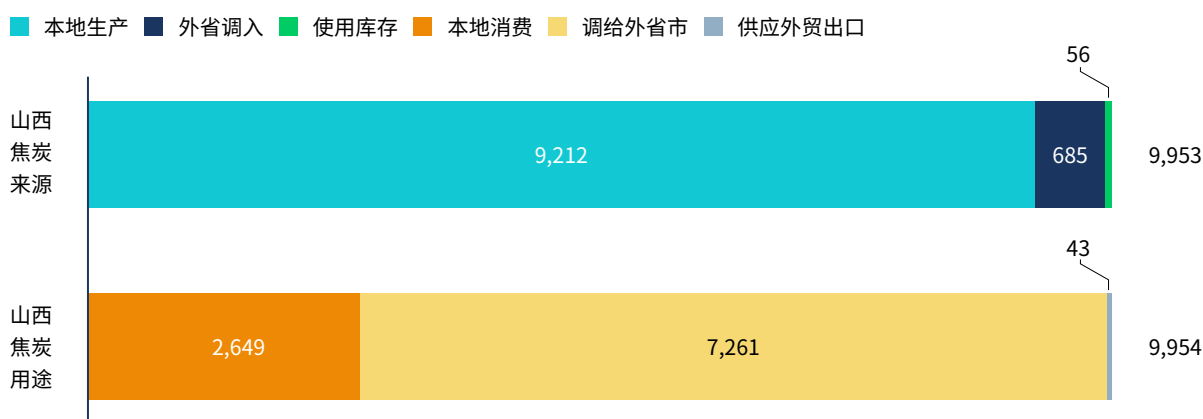


来源：山西省及各市统计局，《山西省国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》，《山西省氢能产业发展中长期规划（2022-2035 年）》

1.2 副产氢资源支撑早期部署阶段

山西是我国最重要的煤炭生产基地之一，原煤产量占全国总产量的近 30%⁶。其中，炼焦煤资源优势尤为突出，约占全国炼焦煤资源总量的一半⁷，资源与产量高度集中于晋中及中西部煤炭基地，长期支撑了焦化和钢铁等高耗能产业的发展。在炼焦煤资源基础上，山西逐步发展成为全国焦化产业规模最大、集中度最高的省份。全省焦化总产能约 1.4 亿吨，2025 年焦炭产量约 10197.4 万吨，占全国焦炭总产量的 20.2%，居全国首位⁸。焦化行业在产业链上与钢铁行业高度绑定，约 90% 的焦炭用于冶金⁹，而煤炭与焦炭合计占钢铁行业购入能源的 90% 以上¹⁰。山西焦化产业具有显著的外向型特征，70% 以上的焦炭产品外送至河北、江苏等钢铁生产集中省份¹¹，在全国煤—焦—钢产业链体系中承担重要角色。

图表 4 山西焦炭来源及用途（2024 年，万吨）

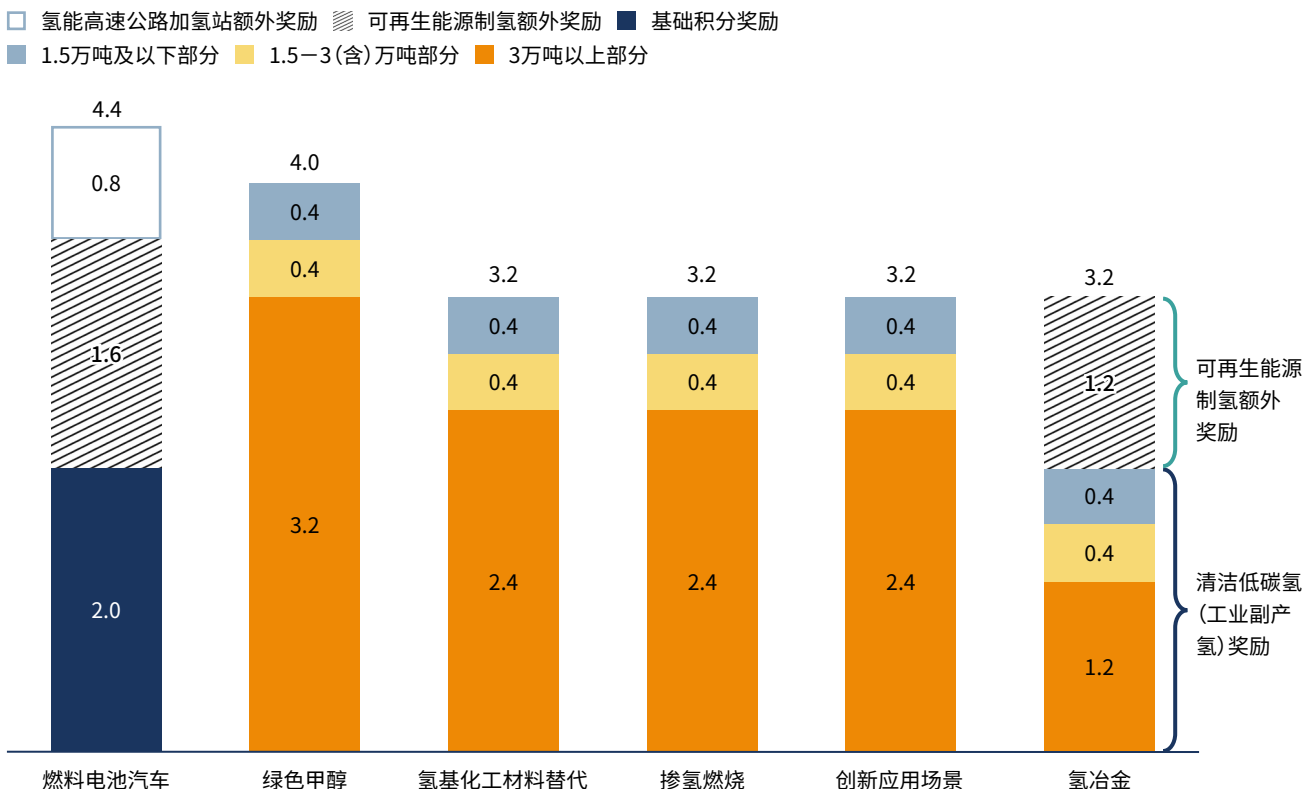


数据来源：山西省统计局

在焦炭生产过程中，山西焦化行业同时形成了规模可观的焦炉煤气副产资源。焦炉煤气作为气态副产品难以随焦炭同步外运，通常以就地消纳为主，因此在焦化产能高度集中的地区形成了稳定、规模化的工业副产气体资源。依托庞大的焦化产业规模，山西焦化行业每年可副产约 280 亿立方米焦炉煤气，折算可直接分离得到 150 万吨副产氢，且成本与碳排放相对较低，是短期内较好的氢气来源。

当前我国氢冶金相关政策已逐步形成清晰的发展导向：在近期充分利用工业副产氢推动项目落地，同时逐步提升可再生能源制氢比例，最终构建以绿氢为核心的绿色低碳氢体系。根据 2024 年 12 月工业和信息化部等三部门联合印发的《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》，钢铁企业被鼓励“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”。在此基础上，2026 年 3 月工业和信息化部、财政部、国家发展改革委联合印发《关于开展氢能综合应用试点工作的通知》，将氢冶金纳入氢能综合应用试点的重点工业场景。根据其配套申报要求，如图表 5，**氢冶金是工业领域中唯一明确将工业副产氢纳入过渡性支持的场景**：试点项目可结合场景需求，就近利用工业副产氢和可再生能源制氢等清洁低碳氢资源。这一政策安排表明对产业发展阶段性的现实判断：在绿氢尚未实现大规模、稳定、低成本供应之前，副产氢能够帮助降低示范成本、推动项目落地并加快产业培育；但从长期看，以绿氢为核心的氢冶金体系仍是行业发展的主要方向。

图表 5 氢能综合应用试点资金支持力度（第一年度，单位：元 / 千克氢气）



*城市群奖励从第二年度至第四年度，每年下降0.4元/千克氢气

数据来源：RMI 根据《关于开展氢能综合应用试点工作的通知》整理测算

山西省的政策布局与上述导向高度一致。**焦炉煤气副产氢的高效利用是山西氢能产业发展的重点方向之一。**《山西省碳达峰实施方案》中提出，充分发挥山西焦炉煤气富氢优势，鼓励就近消纳，降低工业副产氢供给成本，逐步推动构建清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系。《山西省氢能产业发展中长期规划（2022-2035 年）》中进一步明确了，近期在太原、吕梁、阳泉、长治等工业园区（矿区）集聚区域，以不新增碳排放为前提，充分利用工业副产氢。山西“十五五”规划提出，以具备资源条件优势的工业园区、新能源基地为重点，形成以工业副产制氢和可再生能源制氢为主的氢能供应体系。与此同时，省级氢能产业链年度行动方案及吕梁等焦化产业集聚地市的专项规划，也将焦炉煤气副产氢作为近期重要氢源，推动其在钢铁、化工等工业场景中的示范应用。

对于山西而言，焦炉煤气副产氢最大的价值不在于提供最终解决方案，而在于争取时间窗口。其作用是帮助项目率先启动、培育产业链能力、积累运营经验，并为未来绿氢规模化应用创造市场和基础设施条件。因此，副产资源路径的关键并非“是否利用副产氢”，而是“如何利用副产氢”。只有将其置于明确的绿氢转型框架下，建立可验证的转型时间表和供氢替代路线，才能在发挥近期经济性的同时，避免形成新的高碳路径依赖。

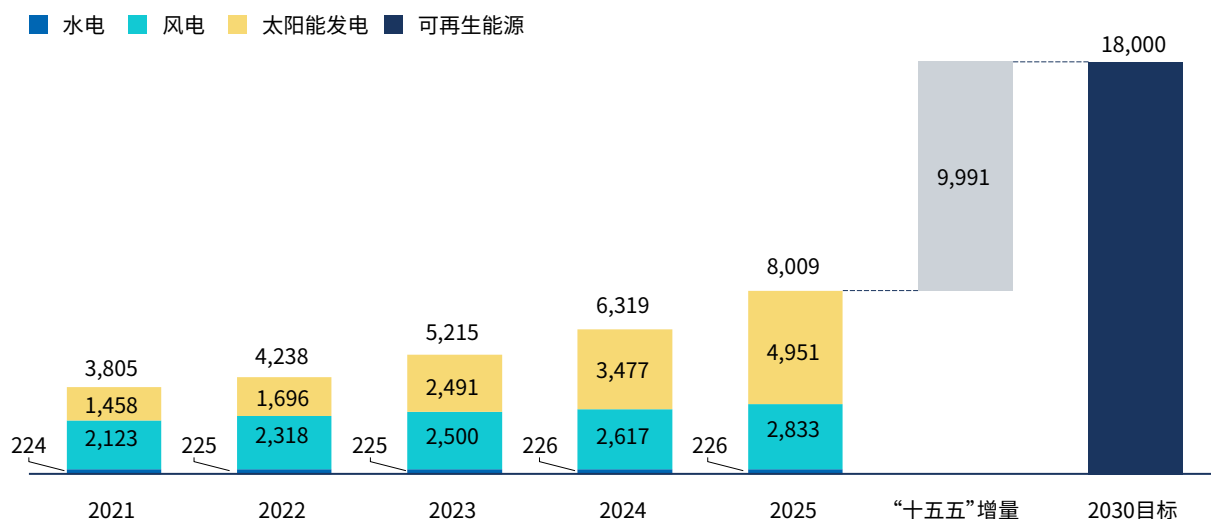
美锦钢铁与中国钢研规划建设的纯氢直接还原铁项目，正体现了这一发展思路。美锦钢铁与中国钢研签订氢冶金合作框架，计划利用美锦集团焦炉煤气提纯副产氢部署纯氢直接还原铁项目：该路径可在近中期利用副产氢实现项目先行落地，并在绿氢稳定供应后以较低改造难度转向绿氢，但前提仍是形成详尽且可检验的绿氢转型规划。若项目顺利落地，有望为山西省副产资源过渡类氢冶金发展提供示范性引导。

总体来看，尽管焦炉煤气副产氢并非近零碳氢源，但在当前供给充足、经济可行、排放强度相对较低，可以在短期内作为山西探索氢冶金技术路径的氢源之一。

1.3 多元绿氢供给支撑长期转型路径

在资源禀赋上，山西北部地区的风光资源较为突出。在太阳能方面，晋北的大同、朔州、忻州、阳泉四市属于我国太阳能二类资源区，具备规模化开发条件。在风能方面，晋北大同、朔州等部分地区的风能资源条件达到我国优质风资源区域的水平，局部区域的风功率密度可达到 300 W/m^2 ¹²，为集中式风电开发提供了良好基础。在资源条件支撑下，山西近年来加快推进可再生能源开发。山西“十五五”规划纲要提出，在 2025 年底可再生能源装机规模约 8000 万千瓦的基础上，到 2030 年全省可再生能源装机规模预期达到 1.8 亿千瓦，在现有基础上大幅增长 125%（见图表 6）。

图表 6 2021–2025 年山西省可再生能源装机规模及 2030 年规划目标（万千瓦）



数据来源：山西省及各市统计局，《山西省国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》

丰富的绿电资源也使山西具备规模化发展绿氢制取产业的潜力。省级氢能顶层规划《山西省氢能产业发展中长期规划（2022—2035 年）》明确提出：近期在大同、朔州、忻州、吕梁等风光资源丰富地区开展可再生能源制氢和储能示范；中期在试点示范基础上推进可再生能源耦合电解水制氢的商业化；远期大规模推动可再生能源制氢，持续降低制氢成本，形成清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系。

从项目落地情况看，当前山西省内电解水制氢项目仍以示范与在建项目为主，尚未形成规模化的绿氢供给。目前，省内已投产项目主要为园区型电解水制氢示范，如鹏飞集团焦化干熄焦余热发电配套 $3 \times 500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 水电解制绿氢项目，于 2023 年 8 月正式投运，是山西焦化行业将电解水制绿氢引入工业体系的早期实践。与此同时，在晋北可再生能源资源条件较为优越的区域，开始出现多个面向规模化发展的风光氢一体化项目，但整体仍处于相对前期阶段。例如中煤平朔采煤沉陷区 60 万千瓦离网式可再生能源制氢一期项目，制氢规模约为 2800 吨 / 年，在 2026 年 1 月进入实质性建设阶段。

此外，山西北部毗邻内蒙古大型风光资源富集区，内蒙古已布局一批氢能大基地并具备规模化制氢潜力。尽管在现阶段，受制于跨区域氢能运输成本较高，内蒙古绿氢尚难以实现对山西的规模化输入，但在中远期，随着输氢管道等基础设施逐步规划和建设，跨区域氢能输送成本有望显著下降，山西将有条件承接内蒙古绿氢资源，支撑氢冶金等本地大规模氢能应用。除跨区域输氢外，内蒙古丰富的绿电资源也可通过特高压等输电通道送入山西，在山西本地直接用电或转化为绿氢，以支撑钢铁行业转型。

依托省内持续扩张的新能源装机规模，以及内蒙古风光资源区的潜在输氢管道布局，山西在中长期具备获得相对稳定、低成本氢能供给的条件，可为氢冶金规模化发展提供重要支撑。

第 2 章 焦炉煤气副产氢资源潜力与利用路径

2.1 副产氢资源为氢冶金发展创造窗口期机遇

氢源选择是氢冶金发展的关键前提。氢气既是氢冶金还原反应中的核心原料，也是影响项目经济性的主要成本构成部分；同时，氢冶金对氢气需求量大、供应稳定性要求高，以年产 100 万吨的 DRI 钢铁厂为例，其氢气需求量可达 6 万吨 / 年，且需要连续稳定输入。更重要的是，氢冶金技术本身并不自动等同于低碳冶金，其减排逻辑是将炼铁环节中的还原剂由含碳还原剂替换为氢气，从而降低了炼铁环节的直接排放，但其降碳重点也因此被前移至制氢环节，其深度减排成效取决于氢源的碳排放强度。**因此，对山西氢冶金发展而言，当前阶段应优先选择兼具成本经济性、资源可获得性、供应稳定性和一定减排效益的氢源。**在各类氢源中，焦炉煤气副产氢具备低成本、相对低碳、资源规模大、产出稳定、与钢铁产业耦合度高等优势，是山西近期发展氢冶金最现实、最可行的过渡性氢源。

副产氢是低成本且相对低碳的氢源。图表 7 对比了常见氢源的成本与碳排放水平。副产氢碳排放相对较低，受到来源和核算方法不同影响，碳排放约在 2-9kg CO₂/kg H₂ 之间，同时作为副产气体成本低廉，接近煤制氢成本，是当前阶段成本相对较低且可实现部分减排的可行氢源。与之相比，可再生电力电解水制氢虽可实现近零碳排放，是最理想的氢源，但现阶段其成本仍然高昂，钢铁企业使用绿氢的成本可达到 30 元 / 千克以上，在 DRI-EAF 生产路线中使用绿氢将使钢铁生产成本较长流程上升 27%。而尽管煤制氢是目前成本最低的制氢方式，约 10 元 / kg，但其碳排放高达约 20kg CO₂/kg H₂，使用该氢源生产钢铁将无法带来显著的减排效益。相比之下，作为过渡性技术，副产氢能够在帮氢冶金降低成本压力的同时，为未来扩大绿氢应用奠定基础。

图表 7 不同氢源的成本区间和碳排放

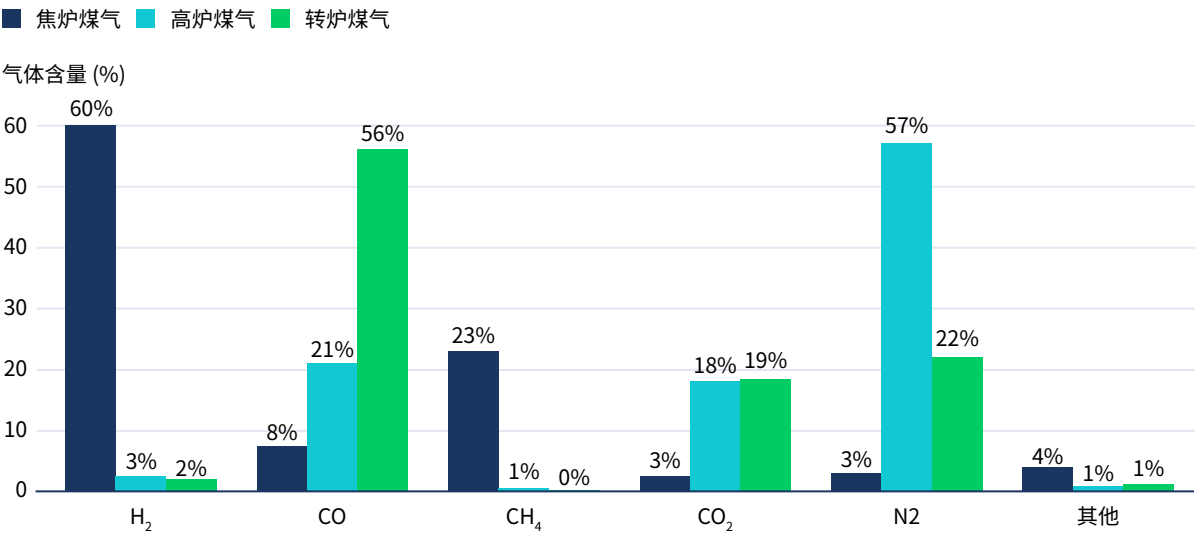
类别	成本(元 / kg H ₂)	碳排放(kgCO ₂ /kgH ₂)
绿氢(全国)	18-50	0
绿氢(山西)	21-37	0
灰氢	9-15	(天然气制氢) 19(煤制氢)
焦炉煤气副产氢	9-15	2.69(质量分配法) 8.01(热值分配法) 9(系统扩展法*)

* 系统扩展方法受到副产氢在扩展系统中被假定替代燃料的影响。在工业燃烧的假定场景中，天然气被设定为默认的替代燃料。

数据来源：RMI根据自愿减排项目方法学、石化联合会等数据整理

焦炉煤气含氢量高，可作为优质的副产氢源。在钢铁行业中，除了焦炉煤气，还有高炉煤气、转炉煤气可以作为副产气资源，但仅有焦炉煤气是有效的氢源。如图表 8，焦炉煤气的氢气含量高达 60%，显著高于高炉煤气、转炉煤气等其他钢铁行业副产气。既可以直接作为富氢气体在氢冶金中投入使用，也可以进一步分离、重整，制取纯氢，再利用纯氢冶金，利用方式灵活、应用潜力突出。

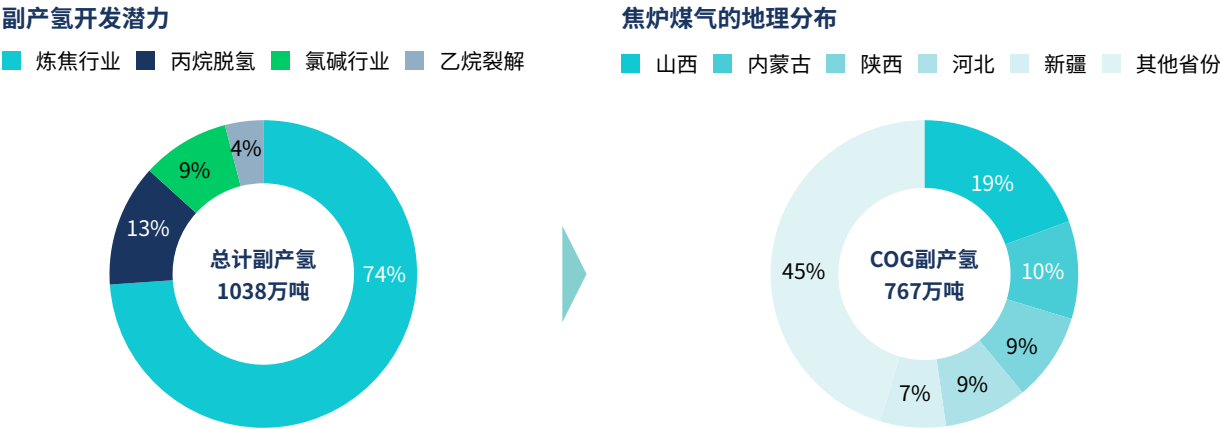
图表 8 钢铁行业副产气主要成分对比



数据来源：RMI 根据冶金工程、科技导报数据整理

在副产氢源中，焦炉煤气副产氢资源量最大、产出稳定。焦炉煤气是我国规模最大的副产氢来源，其所有副产氢中的占比高达 74%（如图表 9 所示），远高于化工行业的乙烷裂解、丙烷脱氢以及氯碱行业等其他副产氢来源。且焦炉煤气副产氢的分布高度集中，尤其在山西形成了显著的资源富集，占全国焦炉煤气副产氢的 19%。同时，焦炉煤气来源于焦化环节，与钢铁生产流程天然耦合，具备就近获取、就地利用和与现有工艺衔接便利等优势。

图表 9 副产氢来源及焦炉煤气区域分布（2023 年）



数据来源：石化联合会

此外，焦炉煤气应用不需要大规模新增固定资产投资，因此相对不易造成长期路径依赖和碳锁定。随着未来全国钢铁产业转型、焦化行业产能逐步收缩，焦炉煤气供应将逐步下降，从而为氢冶金在未来平稳过渡至绿氢创造空间。

2.2 多元技术路径正在验证副产资源过渡模式

在讨论焦炉煤气副产氢对氢冶金发展的支撑作用时，有必要区分两种不同的利用方式。广义上，焦炉煤气副产氢既包括焦化过程中产生的焦炉煤气富氢混合气，也包括焦炉煤气经分离、转化和提纯后获得的高纯度氢气。二者均可作为氢冶金的潜在氢源，但对应的技术路线和发展定位有所不同。

一类路径是直接利用焦炉煤气作为富氢还原气。焦炉煤气本身含有氢气、一氧化碳、甲烷等可参与还原反应的组分。其中，氢气和一氧化碳可直接作为还原剂，甲烷则可通过外部重整或竖炉内重整进一步转化为氢气和一氧化碳。因此，在经过净化、脱硫、重整和气体比例调节后，焦炉煤气可用于高炉富氢喷吹或富氢直接还原铁工艺。该路径对气体提纯要求相对较低，更有利于充分利用现有副产气资源，具备较好的近期经济性。

另一类路径则是将焦炉煤气进一步分离和提纯，获得高纯度氢气用于纯氢还原。纯氢还原对压力、温度、气体循环和水蒸气控制要求更高，但其工艺体系与未来绿氢直接还原路线更为接近。随着绿氢供给逐步成熟，企业可在原有富氢或纯氢还原系统基础上逐步提高绿氢掺混比例，并最终实现从副产氢向绿氢的切换。因此，该路径更有利于提前形成面向未来的绿氢就绪能力ⁱ。

从产业发展视角看，两条路径并非相互替代，而是对应不同阶段的发展需求。富氢还原更适合作为充分利用副产资源、推动产业起步的近期方案；纯氢还原则更有利于衔接未来绿氢规模化应用，为深度脱碳创造条件。对于山西而言，焦炉煤气资源的价值不仅在于提供具有竞争力的近期氢源，更在于为富氢还原、纯氢还原以及未来绿氢冶金之间搭建过渡桥梁。

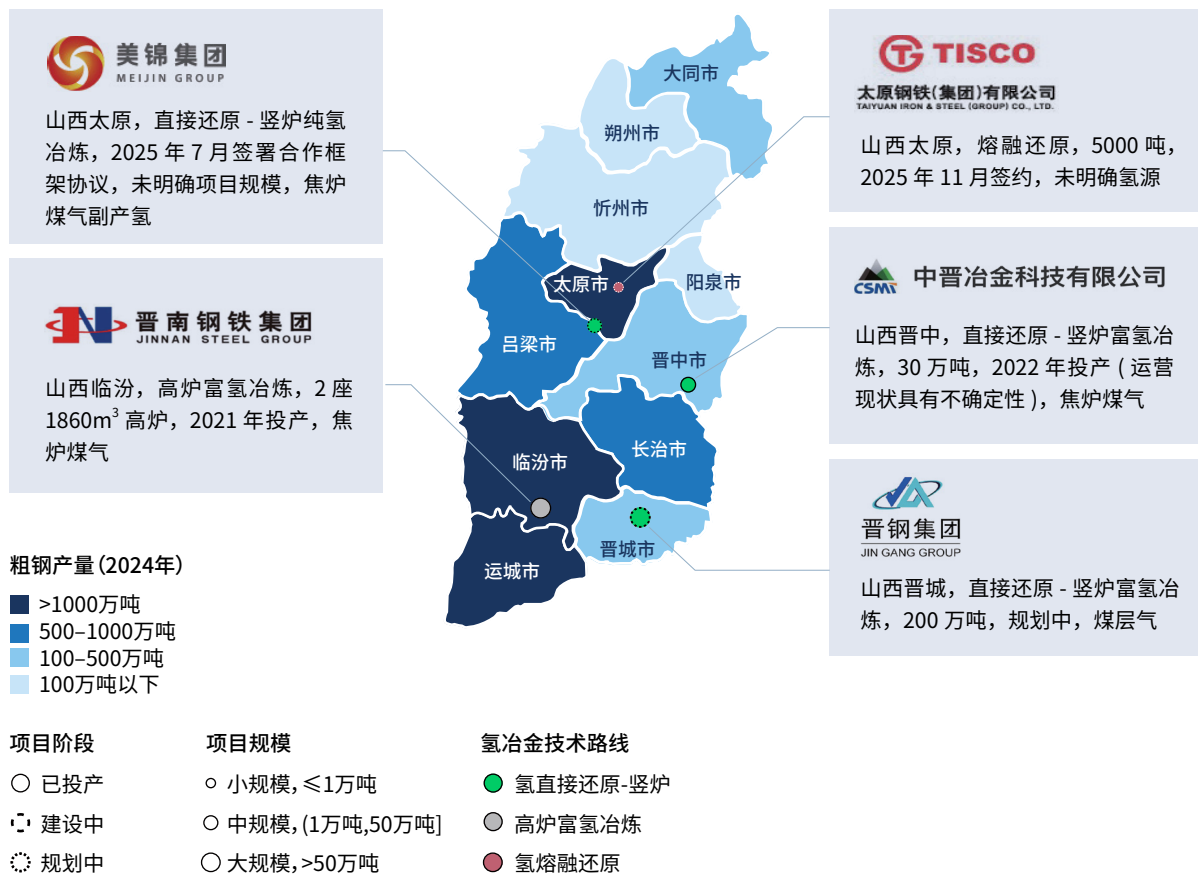
目前，从项目布局看，山西已成为国内副产资源过渡类氢冶金实践最活跃的地区之一。虽然已建成项目数量和规模仍相对有限，但已基本覆盖高炉富氢冶金、富氢直接还原铁（DRI）以及纯氢冶金等不同技术方向（见图表 10）。在高炉富氢冶金方面，晋南钢铁早在 2021 年就开展了大型高炉富氢喷吹实践，利用焦炉煤气提纯副产氢，为我国高炉富氢喷吹技术的工程化应用积累了重要实践经验¹³。在氢基 DRI 路线中，中晋冶金与晋城钢铁分别以焦炉煤气和煤层气为气源，开展了富氢 DRI 工业化试验。其中，中晋冶金焦炉煤气制合成气生产 30 万吨 / 年直接还原铁工业化试验装置已于 2021 年投产，是全球首套实现规模化试生产、以 100% 焦炉煤气作为还原气源的氢基竖炉直接还原铁工艺¹⁴，但投产后面临多方面风险，运营现状具有较高不确定性。晋城钢铁则与中冶京诚合作，于 2023 年启动了以煤层气为原料的氢基直接还原工业试验，并计划在此基础上进一步扩展建设 200 万吨氢冶金及硅钢新材料项目¹⁵，该项目已被纳入山西省 2026 年省级重点工程项目名单¹⁶。

除已建成项目外，山西省内还有多个氢冶金项目处于前期筹备阶段，这些项目在现有实践基础上更进一步，技术路径更加前沿。美锦钢铁与中国钢研于 2025 年 7 月签署合作框架协议¹⁷，拟采用焦炉煤气非催化氧化制氢，并与纯氢冶金工艺相衔接，开展该技术路线的首次工业化集成示范。相较于富氢冶金，纯氢冶金可为未来向纯绿氢冶金平稳过渡奠定更为坚实的基础。此外，太钢于 2025 年 11 月与福德士河集团签署合作协议¹⁸，共同推进氢基等离子体强化钢铁冶金的工业试验，探索技术成熟度更低的前沿冶金路径。

总体来看，山西省氢冶金项目主要分布于东南部多个地市，项目多由本地钢铁企业联合国内领先技术提供方共同推进。现阶段氢源以本地富集的富氢气体为主，包括焦炉煤气、煤层气等，尚未出现采用绿氢的实践案例。技术路径覆盖广泛，但多数项目仍处于试验装置或示范阶段，尚未形成具备稳定盈利能力和可复制性的成熟商业模式。

ⁱ “绿氢就绪能力”，指现有还原工艺和装备体系具备逐步提高绿氢 / 纯氢掺混比例，并在绿氢供给成熟后向更高比例绿氢还原切换的技术适配潜力。

图表 10 山西主要氢冶金项目



2.3 资源约束与需求增长将推动绿氢接续

焦炉煤气副产氢能够为山西氢冶金发展提供重要的近期支撑，但难以成为长期主导氢源。一方面，当前焦炉煤气主要用于轧钢加热、发电及化工等场景，氢冶金用氢将面临既有用途和其他新增场景的竞争；另一方面，随着全国钢铁行业低碳转型推进，长流程炼钢比例下降将带动焦炭需求和焦炉煤气产量同步收缩。在这一背景下，副产氢资源能够支撑氢冶金发展多久，以及何时需要由绿氢逐步接续，将成为判断副产资源过渡模式可行性的关键问题。

在近期，依托庞大的焦化产业基础，山西焦炉煤气副产氢资源潜力较大。2025 年山西焦炉煤气总制氢规模潜力约为 90 万吨 / 年（如图表 11 所示），显著高于近期全省氢冶金总需氢量。不过，资源总量优势并不完全等同于实际可利用能力。山西省内存在大量独立焦化企业，部分焦化厂与钢铁厂距离较远，其焦炉煤气副产氢难以直接就地利用，面临氢储运挑战。近期应优先推动焦化—钢铁联产企业开展焦炉煤气就近利用，以降低氢源获取成本并提高副产氢利用效率。

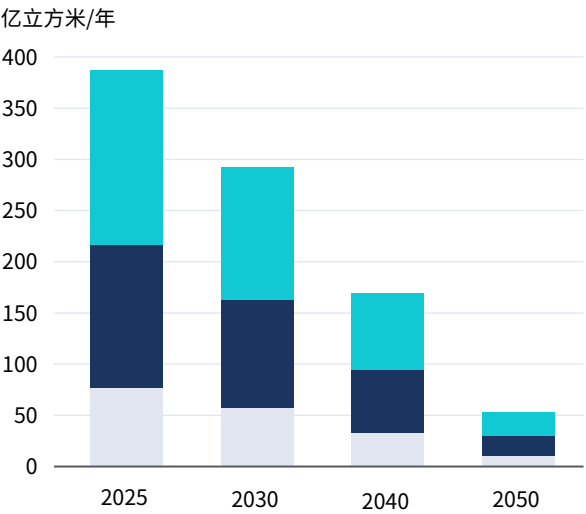
预计在 2035–2040 年间，山西省内可用于氢冶金的焦炉煤气副产氢将转为短缺。随着钢铁行业低碳转型推进，长流程炼钢比例下降将带动焦炭需求和焦炉煤气产量持续收缩，山西省焦炉煤气副产氢供给量呈加速递减趋势，而氢冶金用氢需求则将随技术推广不断增长，如图表 11 所示。考虑到焦炉煤气及副产氢在需求侧还将面临化工、发电、氢能重卡等多个领域的竞争分流，实际可供氢冶金使用的副产氢规模将低于理论供给量，从而加快供需缺口的出现。

副产资源路径能否成功，关键不在于其能够持续多久，而在于能否为绿氢接续创造条件。绿氢产业链和配套基础设施从规划到投运需要较长时间，而钢铁、焦化等资产一旦建成，便会持续影响后续工艺选择。若氢冶金项目长期依赖焦炉煤气副产氢，且缺乏向绿氢切换的前瞻布局，副产氢路线可能从过渡方案演变为新的碳锁定路径。因此，山西应在利用焦炉煤气副产氢支撑近期示范的同时，同步规划绿氢替代路径和配套基础设施，为氢冶金长期深度脱碳奠定基础。

图表 11 山西焦炉煤气的供需量展望

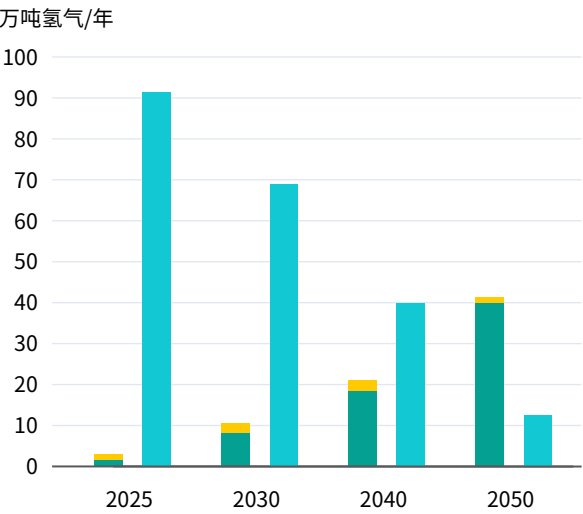
山西焦炉煤气潜在规模与用途

■ 外部利用 ■ 回炉加热利用 ■ 难以收集利用



氢冶金需氢规模与焦炉煤气副产氢供给对比

■ 高炉喷吹需氢量 ■ DRI需氢量 ■ 山西焦炉煤气副产氢最大潜力



注：测算基于以下关键参数与假设：宏观钢铁与焦化演变：假设全国粗钢产量至 2050 年逐步回落至 6.2 亿吨，其中高炉 - 转炉长流程占比由 2025 年的 90% 降至 2050 年的 21%。宏观钢焦比取 0.415，钢铁行业焦炭消费占全国总量的 85%，山西焦化产量占全国比重 20%；副产氢供给潜力：按照吨焦产生焦炉煤气 420 立方米计算，假设 45% 用于回炉加热，55% 可用于提氢，其中 80% 可被有效收集；氢冶金需求测算：假设山西粗钢产量降幅与全国趋势保持一致。其中，高炉富氢喷吹比例从 2025 年的 5% 逐步提升至 2050 年的 30%，吨钢耗氢量约为 5.6kg；直接还原铁 (DRI) 产量占比从 2025 年的 0.55% 提升至 2050 年的 19%，吨钢耗氢量约 60 kg。

第 3 章 山西省氢冶金项目的经济性评估

对于山西而言，焦炉煤气副产氢是推动氢冶金发展的重要起点，但未必是最终答案。一方面，副产氢为山西提供了当前全国范围内最具竞争力的工业氢源之一，使氢冶金能够在绿氢尚未成熟的条件下率先启动；另一方面，随着焦化行业规模收缩和氢冶金需求增长，副产氢资源的长期供给能力将逐步受到约束。与此同时，绿氢成本正在持续下降，并有望在未来十年成为支撑钢铁行业深度脱碳的核心氢源。因此，山西氢冶金发展的关键并非在副产氢与绿氢之间作出二元选择，而是在保障近期经济性的同时，为未来绿氢接续创造条件。本章将从成本视角出发，对不同氢源和冶金路径进行系统比较，识别山西氢冶金在近期、中期和长期可能的最优发展路径，并探讨从副产氢向绿氢转型的关键时间窗口。

3.1 典型氢冶金部署情景设定与经济性评估框架

山西氢冶金可形成多种部署路径，并在不同发展阶段发挥互补作用。对于不同路径的经济性，本报告围绕氢源选择、直接还原与炼钢环节布局以及运输方式，设置本地一体化、跨区域输氢和跨区域运输 DRI/HBI 等 6 种代表性情景，如图表 12。

省内资源开发与一体化布局是山西省钢铁行业转型的主要模式，以强化本地资源的最大化利用。山西本地高炉—转炉路线代表当前主流生产方式，作为成本比较的基准；山西 COG-DRI-EAF 路线利用经处理的本地焦炉煤气开展富氢直接还原；山西副产氢 -DRI-EAF 路线则先从焦炉煤气中提纯氢气，再用于直接还原；山西绿氢 -DRI-EAF 路线将制氢、直接还原和炼钢环节均布局在省内。上述情景分别反映山西依托本地资源发展氢冶金的不同工艺选择。

除省内一体化布局外，**跨区域协同也为山西提供了可行的氢冶金部署方式。**内蒙古绿氢—山西 DRI-EAF 路线将制氢环节布局在内蒙古，并将绿氢运输至山西完成直接还原和炼钢ⁱⁱ；内蒙古绿氢 DRI/HBI—山西 EAF 路线则进一步将直接还原环节布局在内蒙古，再将 DRI 或 HBI 运输至山西进行电炉炼钢。两类路线分别代表跨区域输氢和跨区域运输绿铁，可用于比较不同运输载体及产业环节布局对经济性的影响。

多元化的部署路径覆盖了山西氢冶金发展的主要技术与空间组合，为后续经济性评估提供了统一的比较框架。这些情景并非对未来项目布局的确定性预测，而是通过比较不同氢源、工艺路线和跨区域协同方式，识别各类路径的成本特征及竞争力变化，并为判断不同路线在山西氢冶金转型不同阶段中的适用性提供依据。

ⁱⁱ 鉴于当前尚未建设内蒙 - 山西长距离输氢管道，未来五年跨省绿氢输送路径的落地可能性较低；但中长期内蒙古绿氢外送方案仍存在讨论空间，因此本报告将该情景设定为假设性对比情景，主要用于评估在输氢管道等基础设施具备条件下，内蒙古绿氢输入山西冶金的潜在成本边界。

图表12 山西冶金经济性评估的路线情景

	制氢	炼铁	炼钢	情景描述
山西BF-BOF		山西		山西本地长流程
山西COG-DRI-EAF	山西焦炉	山西		山西本地焦炉煤气富氢还原
山西副产氢-DRI-EAF	山西焦炉提纯	山西		本地焦炉煤气提纯全氢还原
山西绿氢-DRI-EAF		山西		山西制氢, 本地还原
内蒙古绿氢-山西DRI-EAF	内蒙古	山西		内蒙古制氢, 运输至山西还原
内蒙古绿氢DRI/HBI-山西EAF	内蒙古		山西	内蒙古制氢并炼铁, 运输DRI/HBI

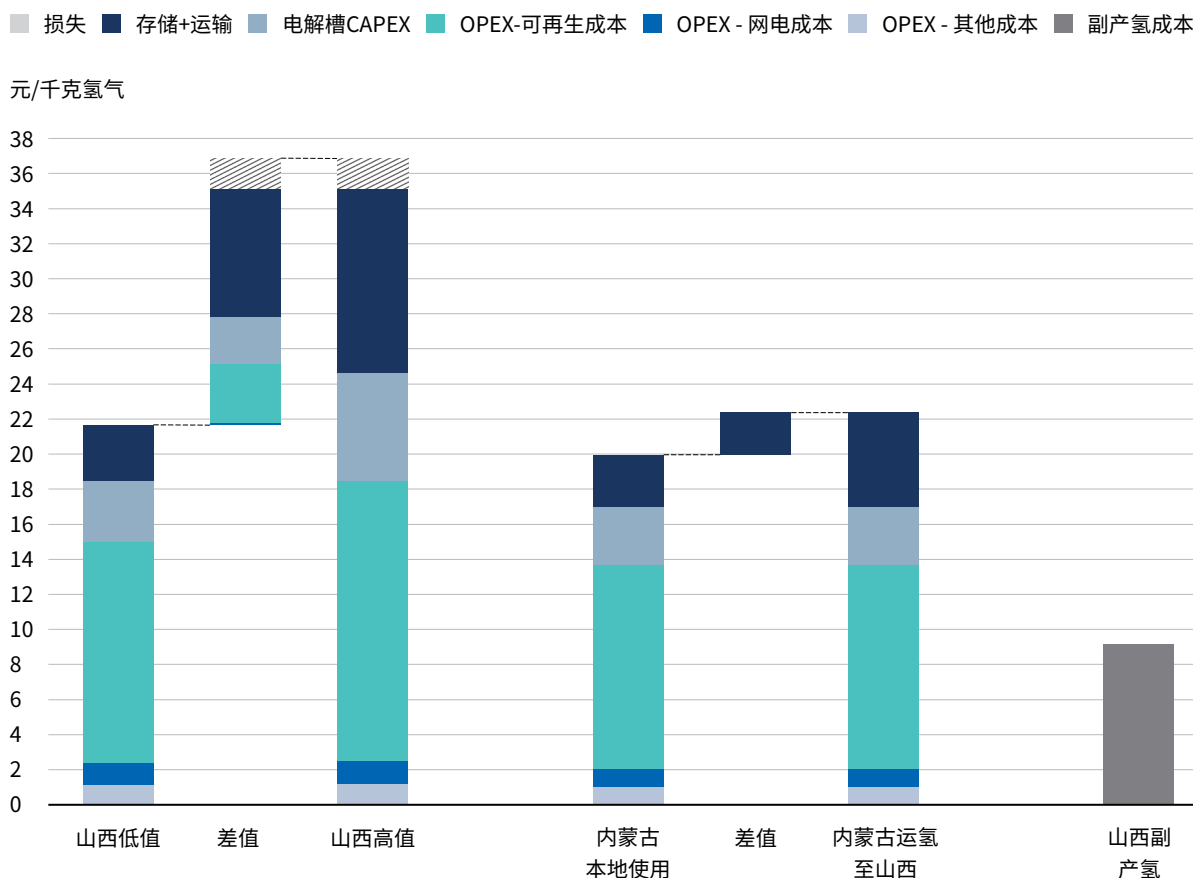
3.2 不同氢源成本比较与关键影响因素

山西本地绿氢的终端成本区间较宽，资源条件和项目配置是决定经济性的关键。如图表 13 所示，综合考虑制氢和储运环节后，山西本地绿氢终端用氢成本约为 22-37 元 / 千克。绿氢成本低值对应钢铁产能周边风光资源较好、输氢距离较短、电网容量约束较小的项目条件；绿氢成本高值则对应风光资源相对一般、制氢与用氢地点距离较远，并面临更高储运成本和一定氢气损耗的项目条件。较大的成本区间表明，风光资源禀赋、制氢与用氢的空间匹配、运输方式、电网容量以及电解槽配置，均会显著影响山西绿氢项目的经济性。

内蒙古低成本绿氢在跨区域储运成本可控、基础设施条件具备时，可形成具有竞争力的补充来源。内蒙古依托更优的风光资源，本地绿氢成本约为 20 元 / 千克；叠加输送至山西钢铁用氢场景的储运成本后，终端用氢成本略高于 22 元 / 千克，仍接近山西本地绿氢低成本情景，并显著低于其高成本情景。这说明，跨区域输入并不必然削弱绿氢的成本竞争力，但其实际可行性高度依赖输氢距离、运输规模、管道等基础设施建设以及稳定供给能力。

焦炉煤气副产氢当前仍具有明显成本优势，可为近期氢冶金项目提供相对可控的用氢成本。山西焦炉煤气副产氢成本约为 9 元 / 千克，不足山西本地绿氢低成本情景的一半。当前绿氢成本仍存在较大不确定性的情况下，副产氢可降低氢冶金示范项目的初期成本压力；但其阶段性作用及向绿氢转型的要求，将在后续吨钢成本和转型窗口分析中进一步讨论。

图表13 山西本地、内蒙古输入及副产氢终端用氢成本对比



3.3 不同氢源情景下的吨钢成本比较

焦炉煤气直接还原路线在当前成本条件下具有显著的近期经济性优势。如图表 14，山西传统 BF-BOF 路线吨钢成本约为 3,700 元；山西 COG-DRI-EAF 路线吨钢成本约为 4,280 元，较传统长流程增加约 16%；将焦炉煤气提纯后使用的副产氢 -DRI-EAF 路线吨钢成本约为 4,560 元，增幅约 23%。ⁱⁱⁱ 基于焦炉煤气的氢冶金路径，尽管成本仍高于传统长流程，但在钢铁行业低碳约束逐步增强的背景下，成本竞争力仍高于绿氢冶金路线，可显著降低氢冶金项目在发展初期的成本压力。

绿氢价格差异会直接传导至钢铁生产端，能否获得低成本绿氢将直接决定绿氢冶金项目的可行性。在山西本地绿氢情景下，氢气支出约占吨钢成本的三分之一。受此影响，山西本地绿氢 -DRI-EAF 路线的吨钢成本约为 5,340—6,170 元，不同项目之间可相差近 800 元 / 吨。绿氢路线的经济性不能仅依据全省平均水平判断，低成本绿氢的可获得性将成为绿氢冶金项目部署发展的决定性因素之一。

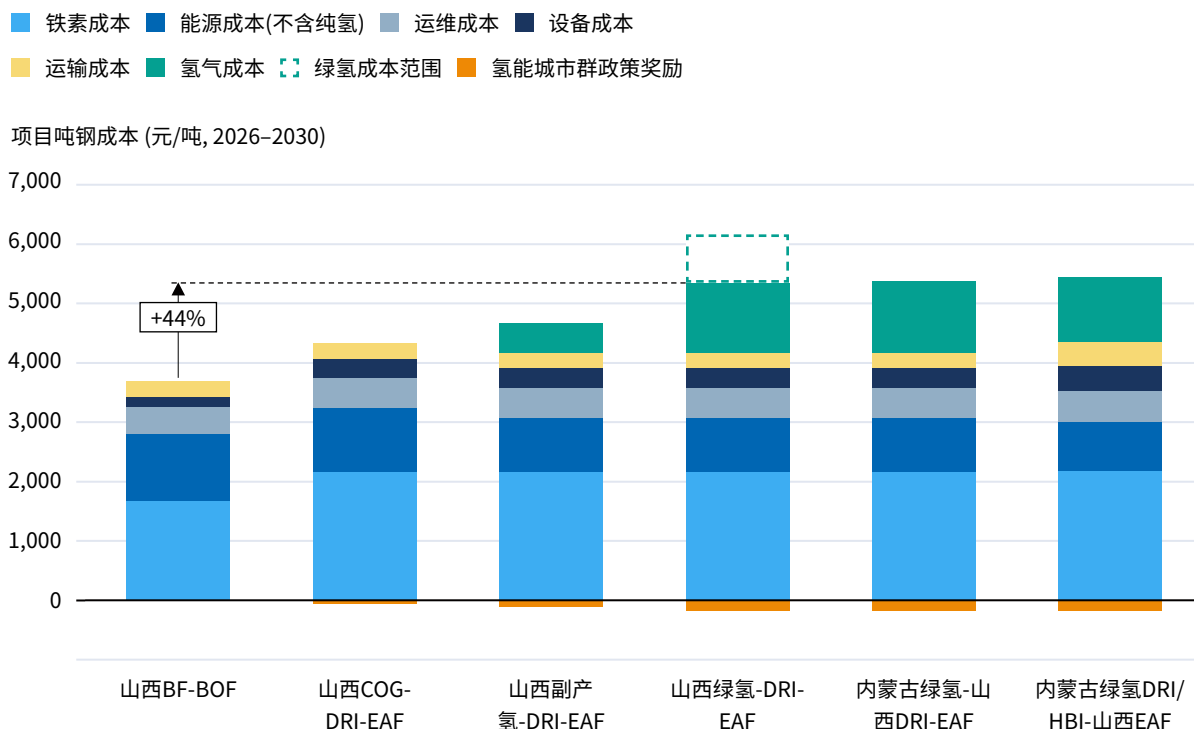
跨区域的绿氢和绿铁协同具备一定成本竞争力，但受限于储运设施发展等系统性限制。利用内蒙古低成本绿氢并运输至山西完成直接还原和炼钢，吨钢成本约为 5,210 元；若在内蒙古完成绿氢制备及 DRI/HBI 生产，再运输至山西进行电炉炼钢，吨钢成本约为 5,260 元。两类路线均具备一定成本竞争力，表明在资源成本优势能够覆盖

ⁱⁱⁱ 本节测算主要是在当前可获得的技术、能源价格和投资成本参数基础上，对 2030 年新建项目吨钢成本进行的情景评估。由于碳市场覆盖工艺（暂时只有长流程，尚未纳入 DRI 和短流程）、配额分配方式、碳价水平以及转型金融支持力度等仍存在较高不确定性，测算暂未纳入上述机制对项目全周期经济性的潜在影响。此外，潜在绿色采购溢价虽不改变生产成本，但可能通过成本传导和需求稳定性改善氢冶金项目的商业可行性。

跨区域储运成本的前提下，输入绿氢或绿铁均可改善绿氢冶金的经济性。不过，两者的竞争力仍取决于运输距离、项目规模、基础设施利用率和稳定供应能力。

氢能城市群等奖励政策可部分降低绿氢路线的吨钢成本，增强其示范阶段的经济可行性。按照现有城市群奖励机制，绿氢和焦炉煤气路线均可获得政策补贴，而绿氢补贴力度更大，可缩小与焦炉煤气路线之间的差距，缓解绿氢冶金示范项目在初期运行阶段面临的成本压力，并为绿氢冶金项目的启动和放大创造更有利条件。但现有奖补通常受到适用范围、支持额度和实施周期等限制，尚不足以完全抵消绿氢路线的成本劣势。因此，政策奖励更适合作为早期项目跨越成本门槛的辅助工具，而非绿氢路线形成长期竞争力的主要来源。

图表 14 山西省冶金工艺路径的经济性评估



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 1309 人民币 / 吨，大工业电价 0.6 元 / kWh，焦炉煤气 0.7 元 / m³，天然气成本 3.4 元 / m³，废钢 2548 元 / 吨；补贴幅度参考氢能城市群，副产氢补贴 2 元 / kg，绿氢 3.2 元 / kg，COG-DRI-EAF 路径焦炉煤气的氢气含量为 60%；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，吨钢用氢量略高于山西。

3.4 未来五至十年是绿氢冶金部署的关键窗口

绿氢经济性改善与副产氢资源趋紧的时间窗口逐步重合，使 2030—2035 年成为山西氢冶金从焦炉煤气转向绿氢的关键阶段。当前焦炉煤气及副产氢路线具备成本优势，但这一优势并非长期稳定。随着可再生能源成本下降、电解槽技术迭代及规模化应用推进，2030—2035 年绿氢成本有望逐步接近当前副产氢的价格区间；与此同时，山西可用于氢冶金的焦炉煤气副产氢将在 2035 年后由相对充裕转向短缺。两类趋势叠加，意味着未来五至十年将是由副产资源驱动向绿氢驱动转型的重要窗口。

从绿氢角度，2030 年之后，绿氢成本持续下降将直接缩小其与焦炉煤气路线之间的吨钢成本差距。氢气是 DRI-EAF 路线的重要成本组成，对氢冶金成本影响极大。绿电价格、电解槽投资、储运成本和设备利用率的改善，均会显著提升绿氢冶金路线的竞争力，预计 2030-2035 年绿氢成本有望降至副产氢约 9—15 元 / 千克的价格区间，

实现平价。随着低成本绿氢供应扩大，山西本地绿氢和跨区域绿氢路线有望逐步从示范性选择转变为更具经济性的规模化方案。

此外，政策支持、碳市场、转型金融和绿色采购将从成本与收益端改善绿氢项目的全周期经济性。氢能城市群、钢铁产能置换、自愿减排机制等多维政策支持可通过直接或间接的方式，推动钢铁行业的绿氢成本在近中期进一步下降；随着碳市场机制逐步进入深化完善阶段，钢铁行业的氢冶金路线有望进入碳市场，通过碳配额盈余，改善其相对于传统长流程的竞争力；转型金融则可通过降低融资成本、延长融资期限和加速审批流程等方式，缓解绿氢项目资本投入较高的问题。绿色采购溢价虽不直接降低生产成本，但可通过绿色溢价和稳定、优先采购，将低碳价值转化为项目收入，提高投资确定性和商业可行性。

从焦炉煤气的角度，其供给收缩和机会成本上升，也将逐步削弱副产氢路线的长期经济优势。焦炉煤气和副产氢路线凭借较低的终端用氢成本，在近期更具竞争力，且副产氢的绿氢切换难度更低。如第二章的资源量展望，未来随着粗钢产量下降和长流程占比降低，焦炭需求及焦炉煤气产量还将同步收缩，其资源约束、储运成本和机会成本也可能逐步上升。对于山西而言，在利用副产氢推动项目率先落地的同时，提前布局绿氢供应、绿氢长期采购机制以及绿氢就绪装备体系，逐步提升绿氢掺混比例，避免过渡路径演变为碳锁定风险。

第 4 章 主要结论与行动方向建议：把握副产氢过渡窗口，推动绿氢接续

山西具备依托焦炉煤气副产氢推动氢冶金早期示范的现实条件。丰富的焦炉煤气资源、较完整的煤—焦—钢产业体系以及持续强化的政策导向，使焦炉煤气和副产氢能够在未来五到十年内为氢冶金示范提供相对低成本、可获得、可部署的氢源支撑。经济性测算也表明，在当前成本条件下，焦炉煤气和副产氢路线明显优于绿氢路线，是山西推动氢冶金项目起步、积累 DRI 竖炉运行经验、探索富氢 / 纯氢还原工艺和培育低碳钢产业链的重要过渡方案。

但这一优势具有明确的阶段性。随着焦化资源逐步收缩、碳约束持续增强、绿氢成本不断下降以及跨区域绿电、绿氢供应体系逐步完善，副产氢应明确定位为过渡氢源。山西氢冶金发展的核心任务，不是最大化利用焦炉煤气，而是利用焦炉煤气为绿氢冶金争取时间、降低早期成本、建设产业能力，并在 2030—2035 年前后形成从副产氢向绿氢接续的能力。

基于上述判断，本报告提出以下五项行动方向建议。

一、明确副产氢的过渡定位，避免从“低成本起步”演变为“长期路径锁定”。

焦炉煤气可作为近期支持氢冶金示范的重要氢源，但不宜被视为长期主导路线。焦炉煤气副产氢能够降低近期氢冶金项目的用氢成本，帮助企业在绿氢尚未实现大规模、稳定、低成本供应之前开展示范探索。但其本质上仍依托化石能源产业体系，难以支撑钢铁行业实现深度脱碳目标。因此，副产氢路线的合理价值在于“启动产业”，而不是“固化路径”。建议山西在规划和新建氢冶金项目时，将“绿氢就绪”作为重要设计原则。利用焦炉煤气和副产氢的项目，应在还原工艺、气体输送系统、储氢设施、燃烧及加热系统、DRI 竖炉设计等环节预留绿氢接入和替代条件，并明确绿氢掺混、替代和最终切换的阶段安排。对于缺乏绿氢切换方案、仅以消纳焦炉煤气为主要目标的项目，应审慎扩大规模，避免围绕副产氢形成新的设备锁定、基础设施锁定和供应链锁定。副产氢路线越早被纳入绿氢转型框架，其过渡价值越大；如果缺乏退出和切换机制，则可能削弱氢冶金面向长期深度脱碳的战略价值。

二、优化政策支持机制，从支持“副产氢利用”逐步转向支持“绿氢接续能力”。

在氢冶金发展早期，适度支持焦炉煤气和副产氢路线具有现实必要性，以降低示范项目成本、提升 DRI 技术成熟度。但政策支持的重点宜从一开始就避免停留在“扩大副产氢消纳”本身，而是将绿氢替代条件纳入政策支持和项目评估体系，对具备明确绿氢切换计划、绿氢掺混能力、低碳电力配套和可验证减排路径的项目给予优先支持。同时，提前设计副产氢支持政策的退坡机制。随着绿氢成本下降和碳约束增强，政策资源逐步强化转向至绿氢替代和应用。政策的目标不是延长副产氢路径的生命周期，而是帮助企业以更低成本完成从副产氢到绿氢的过渡。

三、推动煤焦钢协同转型，放大氢冶金的系统减排价值。

山西氢冶金不应仅作为单一钢铁企业的工艺改造项目，而应纳入煤焦钢产业链协同转型框架。山西发展氢冶金的特殊性在于，其资源基础并不只是钢铁产能，也包括焦化副产气、煤焦产业链、工业园区和能源基础设施。焦炉煤气副产氢能够为氢冶金起步提供条件，但如果仅以单个钢厂项目为单位推进，容易出现氢源利用效率不高、资源空间错配、基础设施重复建设和转型路径分散等问题。建议以焦炉煤气高值化利用为切入点，推动焦化、钢铁和绿电制氢环节协同布局，在降低钢铁行业碳排放的同时，减少传统煤焦产业对高碳路径的长期依赖，带动山西煤基产业体系向低碳工业体系转型。

四、立足本地资源、适时开展跨区域协同，形成多元互补的绿氢和绿铁供给体系。

从资源条件看，山西具备一定可再生能源开发基础，但本地绿氢成本和供给规模受风光资源条件、土地空间、电网接入、制氢地点与用氢场景距离等因素影响。与此同时，内蒙古等周边地区具备更强的低成本绿电和绿氢资源潜力，未来可能成为山西氢冶金绿氢或绿铁供应的重要补充来源。需要强调的是，跨区域协同应作为本地资源开发的补充，而不是简单替代。在挖掘省内焦炉煤气副产氢资源的基础上，提高本地可再生能源利用能力和绿氢就绪能力，推动具备条件的园区开展绿电制氢和绿氢冶金示范。在本地资源开发基础上，可适时评估与内蒙古等周边资源优势地区在绿电、绿氢及 DRI/HBI 供应方面的协同可行性，作为补充性选项。同时，应做好风险识别与管控，审慎评估跨区域资源输入的经济性、稳定性及对本地产业的影响。

五、完善低碳排放钢标准、绿色采购和金融工具，用市场机制引导绿氢替代。

当前氢冶金项目投入较高，单靠企业自主投资和短期补贴难以支撑规模化发展。要推动山西氢冶金从示范走向商业化，需要将项目建设与低碳排放钢标准、产品碳足迹核算、绿色采购、绿色金融和产能政策等制度工具协同起来，形成稳定的市场预期和投资回报机制。建议将氢冶金项目与钢铁行业产能置换、低碳排放钢标准、产品碳足迹核算、绿色采购和绿色金融标准等制度工具相衔接，对采用焦炉煤气副产氢但具备绿氢切换计划的项目给予阶段性支持。同时，应通过更明确的碳排放核算和低碳钢分级标准，区分副产氢、绿氢掺混和纯绿氢路线的减排水平，引导焦炉煤气氢冶金在合理规模内有序部署，并逐步向更高比例绿氢和近零碳钢生产过渡。

山西的实践表明，副产资源过渡类模式能够有效降低氢冶金产业化初期的成本和风险，是资源条件适宜地区推动氢冶金发展的重要选择。对于焦化资源丰富、具备产业协同基础的地区而言，副产氢能够发挥桥梁作用，在推动项目率先落地的同时，为未来绿氢规模化应用创造条件。

然而，副产资源并不能替代绿氢所承载的深度脱碳价值。从长期看，副产资源过渡类模式的核心任务不是延长副产氢的生命周期，而是加快构建向绿氢过渡的能力。只有将近期资源优势转化为长期转型优势，副产资源过渡类模式才能真正成为通往绿氢冶金的重要路径，而非新的路径依赖。副产氢决定产业能否更早起步，绿氢则决定产业最终能走多远。

参考文献

- 1 MPP, Making Net-Zero Steel Possible, 2022, <https://3stepsolutions.s3-accelerate.amazonaws.com/assets/custom/010856/downloads/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>
- 2 中国钢铁工业协会, 中国钢铁工业“双碳”愿景及技术路线图, 2022, <http://lvsefazhan.cn/index.php/guozijianguan/534.html>
- 3 中国工业报, 打好降碳攻坚战 山西钢铁供给侧改革进入“窗口期”, 2025, <https://www.cinn.cn/yc/2025/10-09/gD70xgaD.html>
- 4 财新智库, 山西的绿色转型: 双碳背景下传统能源大省的实践及经验总结, 2024, <https://index.caixin.com/2024-05-28/102200729.html>
- 5 山西省人民政府, 山西省人民政府关于印发山西省国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要的通知, 2026, <http://www.sxhhy.com/uploadfile/file/20260415/d5bead5e2.pdf>
- 6 中国煤炭报, 目前山西省煤炭产能达 14.65 亿吨 / 年, 2025, https://www.cpn.cn/news/mt/202511/t20251111_1845484.html
- 7 信达证券, 我国炼焦煤供给总量与结构深度研究, 2023, https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202305101586441288_1.pdf?1683729855000.pdf
- 8 山西省统计局, 山西省 2025 年国民经济和社会发展统计公报, 2026, https://tjj.shanxi.gov.cn/tjsj/sjxx/202603/t20260325_10086694.shtml
- 9 平安证券, 煤焦专题: 供需格局偏紧, 价格中枢抬升, 2019, https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201907171339283336_1.pdf
- 10 中国能源报, 钢铁行业电气化迫在眉睫, 2024, https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202412/02/content_30033835.html
- 11 中国能源报, 减污降碳如何实现区域协同?, 2025, https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202507/07/content_30085944.html
- 12 中国气象局风能太阳能中心, 中国气象局能源气象重点开发实验室, 中国风能太阳能资源年景公报 (2024 年), 2025, <https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202502/W020250211353621904936.pdf>
- 13 高建军, 朱利, 克俊超, 霍旭丰, 齐渊洪. 晋南钢铁高炉喷吹富氢气体工业化实践 [J]. 钢铁, 2022, 57(9): 42-48. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220075
- 14 赵英杰, 易群, 王涛, 韩建超, 崔阳, 刘倩, 任忠凯, 刘元铭, 黄庆学. 煤 - 焦 - 氢 - 铁产业链发展关键技术与战略思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 103-115 DOI:10.15302/J-SSCAE-2021.05.014
- 15 中国能源产业发展网, 晋钢拟建设百万吨氢冶金项目, 2023, https://www.ccedia.com/energy_detail/c_detailId%3D1681596780596301824.html
- 16 山西经济日报, 我省 2026 年省级重点工程项目名单发布, 2026, https://www.shanxi.gov.cn/ywdt/sxyw/202601/t20260108_10034280.shtml
- 17 山西美锦钢铁有限公司, 全球首个焦炉煤气制氢耦合纯氢冶金技术工业化落地山西美锦钢铁, 2025, <https://www.tsteels.com/flagship/425/newsDetail?id=9733>
- 18 Fortescue, Fortescue and TISCO join forces on green ironmaking technology trial, 2025, <https://www.fortescue.com/en/articles/fortescue-and-tisco-join-forces-on-green-ironmaking-technology-trial>

落基山研究所，从焦炉煤气到绿氢：山西氢冶金发展路径探索——副产氢资源驱动的过渡与升级，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。