

自然资源保护协会发布国内氢冶金四步走战略

6月，自然资源保护协会发布《面向碳中和的氢冶金发展战略研究》。报告综合分析了氢冶金工艺帮助我国钢铁行业低碳转型的潜力和发展路径。报告首先预测了目前至 2060 年的钢铁需求和产量，总结了我国钢铁行业碳排放量、主要减排工艺、氢冶金工艺在国内外的发展现状。在分析影响氢冶金发展的关键因素基础上，报告提出了中国从现在到 2060 年的氢冶金发展路线图，并对发展氢冶金提出政策建议。

以下为报告执行摘要

2023 年 6 月

面向碳中和的氢冶金发展战略研究 执行摘要





自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于1970年。NRDC拥有700多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员40多名。NRDC主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>



冶金工业经济发展研究中心（简称冶金经研中心）——钢铁行业国家级智库，研究涉及产业发展内在规律、产业政策、发展环境、产业结构调整、前沿技术及工艺流程、产业链整合、环境与能源、企业发展战略及规划等专业领域，长期为政府、行业和企业提供以应用对策研究为主的跨学科系统综合的决策咨询服务。

冶金经研中心是中国钢铁行业低碳工作委员会成员单位，致力于行业低碳发展、企业低碳转型和竞争力提升，聚焦低碳政策制定与解读、低碳路径、低碳规划、低碳技术评价、绿色产品认证等行业热点、重点和难点，先后为行业主管部门、钢铁企业、研究机构、金融机构等完成多项绿色低碳相关课题研究和项目咨询工作。

免责声明

本研究报告所用数据均来源于统计年报、统计年鉴及其它公开信息。可能存在因信息收集不完善、不及时而产生偏差。研究团队、资助机构和发布机构不保证信息及数据的准确性与完整性。研究报告内容仅代表研究团队以绿氢经济稳定供应和氢冶金技术成熟为前提模式下的研究预测，不代表机构及行业立场，不构成财务、法律、投资建议、投资咨询意见或其他意见，对任何因直接或间接使用本报告涉及的信息和内容或者据此进行投资所造成的一切后果或损失，研究团队、资助机构和发布机构不承担任何法律责任。

封面图片：Photo by Adrianguh on Unsplash

研究报告

- 《面向碳中和的氢冶金发展战略研究》执行摘要
- 《山东省“十四五”重点耗煤行业减煤路径研究》
- 《双碳目标下的五大发电集团发电业务低碳转型研究》
- 《“双碳”与空气质量改善双目标下的安阳市中长期控煤路径研究》
- 《“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤路径研究报告》
- 《碳达峰与碳中和背景下山东电力行业低碳转型路径研究》执行摘要
- 《内蒙古煤炭生产和消费绿色转型研究》摘要报告
- 《霍林郭勒产业园绿色低碳发展研究》（简本）
- 《内蒙古典型城市煤炭消费与大气质量的关联分析及政策建议》
- 《内蒙古采煤沉陷区生态修复与可再生能源利用研究》
- 《“十四五”山西省非煤经济发展研究》
- 《碳达峰碳中和背景下山西煤电行业转型发展研究》
- 《碳达峰碳中和背景下山西焦化行业转型发展研究》
- 《中国典型省份煤电转型优化潜力研究》
- 《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
- 《中国典型省份煤电转型优化潜力研究执行摘要》
- 《碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究执行摘要》
- 《碳达峰碳中和目标约束下水泥行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
- 《碳达峰碳中和目标约束下电力行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
- 《碳达峰碳中和目标约束下钢铁行业的煤炭消费总量控制路线图研究》
- 《碳达峰碳中和目标约束下煤化工行业煤炭消费总量控制路线图研究》
- 《山西省“十四五”煤炭消费总量控制政策研究》
- 《“十四五”电力行业煤炭消费控制政策研究》
- 《新冠疫情后的中国电力战略路径抉择：煤电还是电力新基建》
- 《中国散煤综合治理研究报告 2020》
- 《“十三五”时期重点部门煤控中期评估及后期展望》
- 《“十三五”电力煤控中期评估与后期展望》
- 《中国煤控项目“十三五”中期评估与后期展望研究报告》
- 《中国实现全球1.5℃目标下的能源排放情景研究》
- 《持续推进电力改革 提高可再生能源消纳执行报告》
- 《2012 煤炭的真实成本》

请访问网站了解更多详情 <http://www.nrdc.cn/>

面向碳中和的氢冶金发展战略研究

执行摘要

2023 年 06 月

执行摘要

我国国民经济和社会发展目标，已经从全面建成小康社会到了开启全面建设社会主义现代化国家的新征程。在今后 30 年的新征程中，高质量发展是首要任务，这对钢铁行业发展提出了新要求，不仅要为国民经济发展提供基础原材料保障，还需要在行业运行中体现经济性、生态性和安全性。“减污降碳”是钢铁行业高质量发展、落实生态文明理念的必然选择。当前主流的长流程钢铁冶炼工艺是以煤炭作为主要能源和还原剂，生产过程中必然产生大量的二氧化碳。因此，基于当前传统工艺技术的创新改进难以实现深度脱碳。而氢冶金是替代碳还原最为可行的途径，将对钢铁行业深度脱碳乃至“净零碳”起到决定性作用。

本报告分析氢冶金工艺对我国钢铁行业低碳转型的潜力和发展路径。首先对当前至 2060 年的钢铁需求和产量进行预测，并总结我国钢铁行业碳排放量、主要减排工艺、氢冶金工艺在国内外的发展现状；在分析影响氢冶金发展的关键因素基础上，提出了中国从现在到 2060 年氢冶金发展路线图并对发展氢冶金提出政策建议。

未来钢铁需求和产量

未来钢铁生产的规模对碳排放量有很大影响，而钢铁需求主要受经济因素、工业化程度因素、城镇化因素、人口等多种因素影响。随着我国经济增长由高速转为中速、发展阶段从工业化后期逐步进入后工业化期、城镇化发展进入成熟阶段、人口老龄化问题愈加突出，预计钢铁需求的增长将停滞，并呈现缓慢波动式下降。本研究借鉴发达国家钢铁需求变化的规律性经验，以人均钢铁消费量与人均 GDP 的“S”形理论模型为基础，结合历史数据，对我国钢铁需求进行了预测（图 1）。

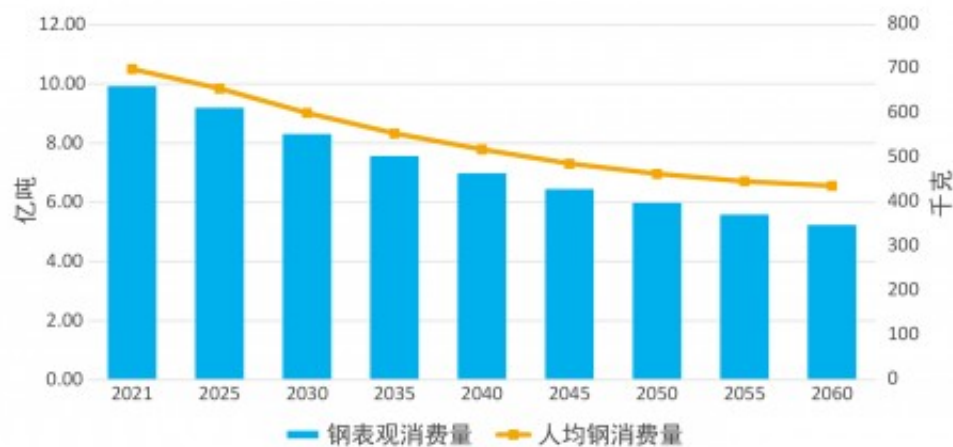


图 1：中国钢表观消费量长期预测

基于对钢铁长期需求的预测结果，并考虑到钢材净出口因素，预测我国钢产量到 2060 年实现“碳中和”时，将从 2020 年的 10.65 亿吨（“碳达峰”平台期水平）降至 5.69 亿吨。这一减量趋势将有助于减少钢铁行业的碳排放量（图 2）。

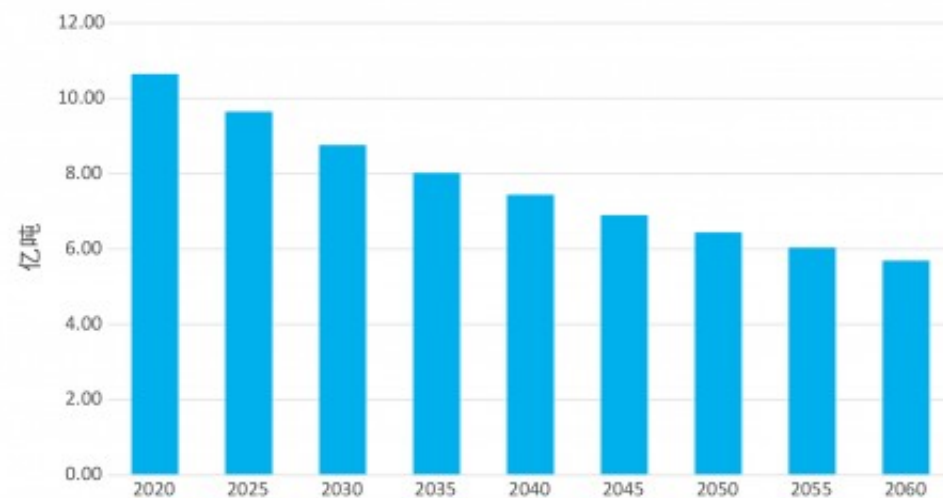


图 2：中国钢产量长期预测

钢铁行业碳排放及主要减排工艺

作为世界粗钢产量第一大国，我国钢产量占世界的一半以上，2020 年突破 10 亿吨。全国钢铁行业的碳排放量占全国排放总量的比例约为 15%。

当前，我国主流的钢铁生产工艺是高炉-转炉长流程，即铁矿石和焦炭在高炉炼铁，铁水再用转炉炼成钢。这种生产工艺流程决定了制造过程较高的碳排放强度。较低碳排放的技术包括废钢电炉冶炼短流程、高炉富氢冶炼、氢基直接还原铁 (DRI) + 电炉工艺等，其中，全废钢电炉绿电冶炼工艺、绿氢冶金 + 电炉绿电冶炼两大路径是实现近零排放的最终举措。

表 1：我国钢铁生产工艺占比及碳排放现状

工艺路线	产钢量占比	吨钢碳排放量 /t	碳排放主要工序
高炉-转炉长流程	>90%	1.8-2.5	高炉 (1.5 t CO ₂ /t-s, 占比 70%-90%)
废钢-电弧炉短流程	<10%	0.4-0.6	电弧炉 (0.19 t CO ₂ /t-s, 占比 75%)
气基竖炉 DRI-电弧炉流程	很少	约 0.96	气基竖炉 (0.5 t CO ₂ /t-s, 占比 52%)

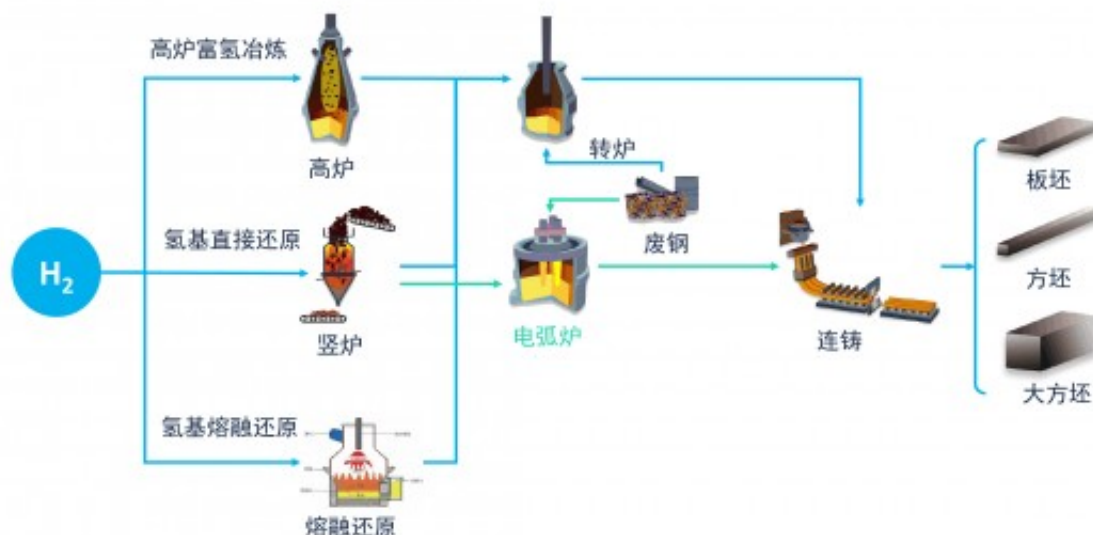


图 3：“双碳”目标下，未来钢铁制造主要工艺路线

氢冶金工艺发展现状

当前，氢冶金技术均处于探索和示范阶段，高炉富氢冶炼由于改造成本较低、富氢气体易获取，可操作性强，被认为是现阶段“碳冶金”到“氢冶金”的重要过渡。一般认为高炉富氢还原的潜在碳减排幅度为 10%~30%，碳减排潜力有限，并不能实现“近零碳排放”。目前，高炉富氢冶炼的工艺示范通常采用易获得的富氢焦炉煤气或者提纯后的氢气（所谓“灰氢”）。焦炉煤气是炼焦工序的副产气体，氢气含量 60% 以上（即富氢气体），长流程自身就可以在炼焦过程生产足够的氢气支撑其富氢冶金，不会额外增加碳排。随着绿氢（可再生能源或其他非化石能源制氢）制备规模化和成本持续降低，高炉富氢冶炼也可以逐步使用更多的绿氢。预计 2030 年之前，高炉富氢冶炼技术将取得突破性成果，具备大规模应用条件。2030 年之后，高炉富氢冶炼技术有望迅速推广。

氢基直接还原铁技术采用氢气代替一氧化碳作为氧化铁的还原剂，还原反应生成的是水而非二氧化碳，因此是最具发展潜力的低碳冶金技术。但是这一技术的劣势是，纯氢气与铁矿石反应为吸热反应，完全代替燃料煤炭后系统内热量无法互补，因此延缓还原反应。氢基直接还原技术目前尚处于研发试验阶段。综合各国研发进展，我们预计，具备大规模推广条件需要等到 2040 年之后；同时还取决于绿氢产业链的发展，包括绿色、经济、大规模氢源的获取，氢气长距离的安全储运，氢源供需的合理配置等。

本报告简要介绍了目前国内外主要氢冶炼实验示范项目。高炉富氢冶炼方面的项目有日本 2008 年启动的环境和谐型炼铁工艺技术开发项目（COURSE50）、韩国 2017 年 12 月启动的“以高炉副生煤气制备氢气实现碳减排技术”（COOLSTAR）课题、德国蒂森克虏伯钢铁公司 2019 年启动的“以氢代煤”项目、中国宝武以新疆八钢原有高炉为基础的富氢碳循环氧气高炉（HyCROF）以及兴国精密与上海大学合作开发的氢冶金低碳技术研发系统。

在氢基直接还原工艺方面，本报告介绍的项目包括日本神户制钢基于 MIDREX 工艺的氢直接还原铁项目、中国中晋冶金的竖炉项目（CSDRI）、瑞典钢铁公司的突破性氢冶炼技术（HYBRIT）竖炉项目、德国萨尔茨吉特公司（Salzgitter）的名为 SALCOS 的低碳炼钢改造项目、中国宝武的湛江氢基竖炉项目以及河钢氢冶金示范项目。

报告也介绍了两个氢基熔融还原项目，分别是奥地利联合钢铁集团的名为 H2FUTURE 的绿氢项目，以及中国建龙集团在内蒙古乌海的赛思普科技氢基熔融还原流程（CISP）项目。

中国钢铁行业对氢冶金技术进行了大量研究和探索，覆盖了高炉富氢、氢基直接还原、氢基熔融还原等主流技术，且在理论和实践上都已取得了显著进展。河钢集团 120 万吨氢冶金示范工程一期全线贯通，建成全球首套工程级别的氢基竖炉；宝武富氢碳循环氧气高炉（HyCROF）取得重大技术突破，完成了全氧冶炼工况条件的工业化试验，技术经济指标再创新高。为氢冶金技术进步乃至全球钢铁行业的低碳转型做出了突出贡献。

影响氢冶金发展的关键因素

绿色经济化制氢和安全规模化用氢是发展氢冶金的关键因素。首先，“以氢代碳”的富氢或全氢冶金，大规模经济化的氢源是基础。2022年3月，国家发展和改革委员会和国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》，并提出氢能的发展目标：到2025年，可再生能源制氢量达到10-20万吨/年；到2030年，形成较为完备的氢能产业技术创新体系、清洁能源制氢及供应体系；到2035年，形成氢能产业体系。目前我国氢气产量约为3300万吨，主要以化石能源制氢和工业副产氢为主，煤制氢和天然气制氢占比近80%，焦炉煤气、炼厂干气等工业副产氢占比约20%。通过使用可再生能源制造绿氢，例如通过多种可再生能源互补进行电解水制氢，全过程没有碳排放，是未来发展方向。但是目前成本高、技术壁垒高、仅处于示范性工程的导入阶段。近中期可以充分利用各类工业产氢，就近消纳，降低工业副产氢供给成本。远期的光伏、风能、水电等绿电电解水制氢，将可支撑中国钢铁工业的氢冶金低碳化转型。

其次，氢能规模化、安全、经济储运是另一个关键因素。目前运氢方式最为成熟的是高压长管拖车的方式，适合在城市内运输，满足短途内输氢的需求。低温液氢运输的关键设备技术已实现国产化，并逐渐走向产业化，将成为民用氢能领域的重要运氢方式。天然气掺混氢气输运方式，与新建纯氢输氢管道相比更具经济性，值得关注。未来，随着东部等发达地区氢气需求增长，利用西北地区的可再生电力资源制取氢气，掺入天然气管道，有望实现氢气的大规模远距离输送，有助于解决中国能源地域分布不平衡问题。

经济性是制约钢铁行业氢冶金推广发展的又一关键因素，而影响氢冶金经济性的可变因素主要是氢气成本及碳排放成本。当随着技术进步制氢成本逐渐降低，同时企业为碳排放支付一定费用时，氢冶金才能显示成本优势。我们按电解1000 m³绿氢需要4500度(kWh)电、电力成本占总成本70%的情况，测算碳冶金和氢冶金成本相当时的绿氢和绿电价格。例如表2显示，要达到冶炼成本平衡点为1337.2元/吨时，绿氢价格需要低于15.02元/kg、绿电价格需要低至0.208元/kWh以下，而碳排放成本需要达400元/吨。因此，碳成本越高，氢冶金越容易具备成本优势。提高碳排放成本是推动氢冶金发展的关键，碳价过低，无法为减排提供足够动力。

表 1：氢冶金的竞争性成本优势

碳冶金与氢冶金成本平衡点 元 / 吨	碳成本 元 / 吨	绿氢氢冶金 元 / kg	绿电 元 / kWh
962.2	100	10.81	0.150
1024.7	150	11.51	0.159
1087.2	200	12.22	0.169
1149.7	250	12.92	0.179
1212.2	300	13.62	0.189
1274.7	350	14.32	0.198
1337.2	400	15.02	0.208

中国氢冶金发展路线图

以国家“双碳”目标为指引，综合考虑到 2060 年钢产量变化趋势、中国钢铁协会发布的钢铁工业“双碳”愿景、国内外氢冶金技术研发进度、氢能产业发展前景、碳冶金与氢冶金生产成本，并结合我国废钢资源供给等因素，我们对我国氢冶金发展路线提出以下看法。

第一阶段：现在到 2030 年

阶段目标：积极推进稳步实现碳达峰，吨钢碳排放强度较 2020 年下降 15%。

集中攻关高炉富氢冶炼技术和纯氢基直接还原技术，以及相应的软硬件；争取高炉富氢技术取得突破性成果，开展高炉富氢冶炼技术的示范项目；有条件的钢铁企业应率先开展高炉喷氢改造，富氢高炉产能占比达到 15%；深化焦化行业供给侧结构性改革，取消焦化产能转移限制，以市场化为原则，按钢焦比 0.4，向钢铁企业配置焦化产能；新建改造焦炉增加氢制备装置，为下一步高炉富氢冶炼技术应用打下基础；有条件的氢冶金示范项目应尽量使用绿氢。

第二阶段：2030 年到 2040 年

阶段目标：创新驱动实现深度脱碳，吨钢碳排放强度较 2020 年下降 55%。

集中攻关纯氢基直接还原技术及氢基直接还原装备国产化、大型化；纯氢直接还原技术取得突破性成果，开展纯氢直接还原技术示范项目；随着国家氢能产业体系初步形成，氢源供应增长，用氢成本显著下降，大力推广高炉富氢冶炼技术，加快富氢高炉技术改造，

自产氢应用尽用，富氢高炉产能占比超过 60%；全面完成自有焦炉的氢制备装置改造，有条件的钢铁企业适度发展可再生能源发电及绿氢制备项目，尽可能增加自有氢供应量，力争绿氢在钢铁行业需氢总量占比达到 30% 以上。

第三阶段：2040 年到 2050 年

阶段目标：重大突破冲刺极限降碳，吨钢碳排放强度较 2020 年下降 85%。

大力推广纯氢基直接还原技术，加快“高炉-转炉”长流程制钢向“纯氢基竖炉+电炉”短流程制钢转型，“纯氢基竖炉+电炉”短流程制钢产能占比达到 25%；随着高炉用焦减少，焦炭产量下降，自有氢产量相应减少，需要外部大量的绿氢补充供应，绿氢供应量占钢铁产业需氢总量的 85%。钢铁企业与绿电、绿氢供应商紧密结合，共建产业链生态圈，耦合发展；全面完成富氢高炉改造；有条件的钢铁企业发展应用 CCUS 技术。

第四阶段：2050 年到 2060 年

阶段目标：融合发展助力碳中和，吨钢碳排放强度较 2020 年下降 95%。

进一步提升竖炉+绿电电炉短流程钢产量占比；最终形成纯氢基竖炉+绿电电炉短流程钢产量占比 35%，富氢高炉（广泛应用 CCUS 技术）+转炉长流程占比 15%；全废钢绿电电炉占比 50% 的生产工艺结构。届时，钢铁产业碳排放量还有约 1 亿吨/年，需要进一步推进 CCUS，或通过碳汇，实现“碳中和”目标。

图 4 显示了氢冶金发展路线图和相关发展指标；图 5 显示了以 2020 年至 2060 年三种工艺路线的钢产量预测；图 6 显示了 2020 年至 2060 年三种工艺路线生产钢的碳排放量；图 7 显示了 2030 年到 2060 年高炉富氢冶金和氢基直接还原的氢需求量。



图 4：氢冶金发展路线图

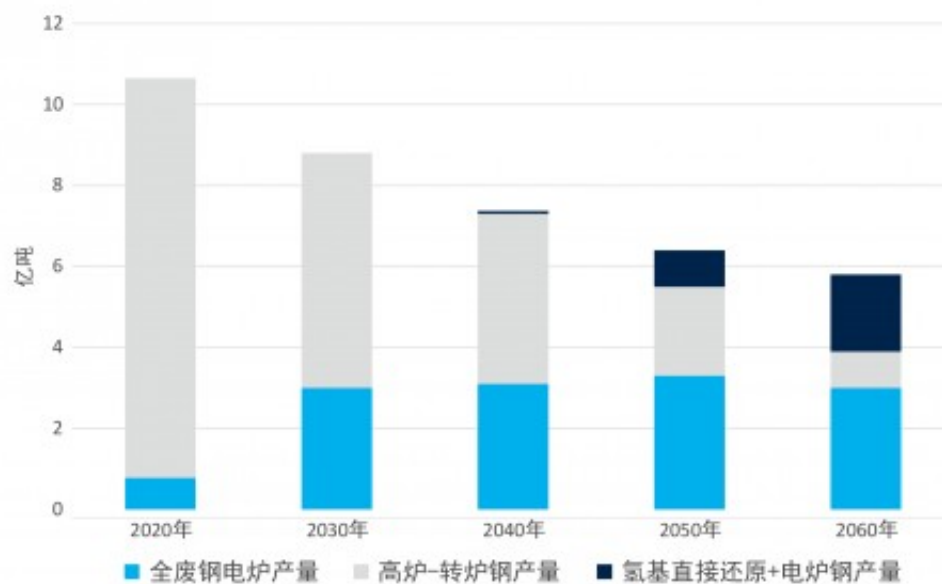


图 5：到 2060 年各时点三种工艺路线钢产量

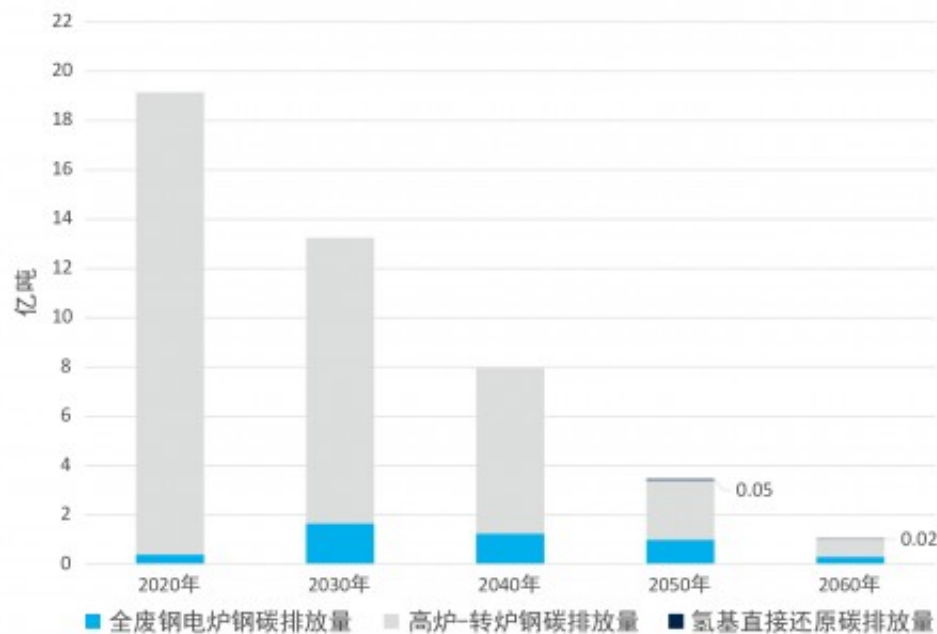


图 6：到 2060 年各时点三种工艺路线钢碳排放量

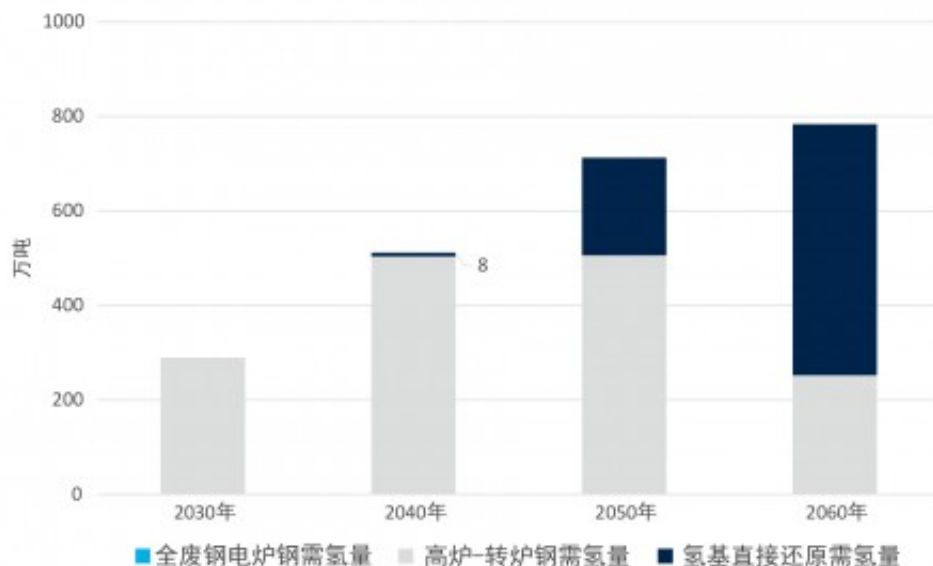


图 7：到 2060 年各时点需氢量

对发展氢冶金的建议

首先，由于氢冶金仅仅是氢能在工业、交通、电力等行业广泛应用中的一个领域，而稳定、充足、廉价的绿氢和绿电供给对钢铁行业大力发展氢冶金至关重要。因此需推动有关部门制定出台氢能领域的行动方案 and 保障措施，加强统筹衔接。

其次，建议钢铁行业纳入全国统一碳市场后，统一基准值，以行业当前的吨钢碳排放强度为基准，以各时间节点减排幅度为目标，结合行业低碳发展目标及氢冶金等战略路径，科学合理减少免费配额占比。使率先推进低碳减排、实施流程优化、技术创新的企业能够从碳交易中先获益、多获益，不断推动企业加快研发推广富氢高炉技术和氢还原技术。

第三，应充分发挥科技举国体制和国有企业优势，科学合理向宝武集团、鞍钢集团等国企龙头企业政策倾斜，有助于加大氢冶金技术研发力度。待氢冶金技术发展成熟，作为氢冶金技术策源地的龙头企业在满足自身“双碳”要求的同时，还应肩负起低成本推广氢冶金技术，推进全行业减碳的重任。

第四，我国钢铁与焦化联合流程严重失衡，从全社会角度看，不利于节能减排，也不利于氢冶金的发展。在绿氢尚未实现稳定供应之前，焦炉煤气制氢仍是钢铁产业用氢的主要来源。因此，实现钢焦一体化，才能更有力地推进钢铁全行业氢冶金的发展。应以全国能耗总量控制和各地区环境容量为前提，以建设全国统一大市场为指引，打破以行政区划为能耗和排放管控单元的管理体制，促进焦化产能跨省份、跨地区流动，加快推进“钢焦联合”工艺流程的建设。

第五，基于氢的新冶金工艺替代传统化石能源的生产工艺，所需的工艺流程开发投资十分巨大。随着绿色金融的支持范围扩展，部分钢铁企业的绿色低碳项目已获得绿色信贷等金融支持，但是金融机构对于项目的考量通常要求投资周期短、见效明显。目前氢冶金技术处于发展初期，且很多技术都处于研发攻关阶段，难以预计降碳收益。建议行业主管部门就钢铁产业脱碳发展设计专项财税政策，针对成熟技术、前沿技术分别设定考核指标，给予氢冶金及其他前沿颠覆性技术的研发和试点在信贷总量、支持方式和利率上更多支持。

第六，建议行业主管部门强化顶层设计、系统谋划，构建氢能产业链和生态圈。钢铁企业应结合自身能力和需求，制定可行的氢冶金技术路线，积极主导或者参与氢能园区、绿氢制造、氢能供给网络。建设氢能、钢铁、化工、物流运输等行业耦合的循环经济体系，打通供给侧和需求侧，促进氢能制备和应用新技术孵化，吸引氢能投资，促进绿氢成本下降和应用范围扩大。