



电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

“双碳”目标下加快工业领域终端 电气化 ——钢铁行业

电力圆桌项目课题组

2024年11月

电力圆桌项目

电力圆桌（全称电力可持续发展高级圆桌会议）项目于 2015 年 9 月启动，旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略，邀请业内专家和各利益方参与，共同探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。通过建立一个广泛听取各方意见的平台机制，电力圆桌将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到平台讨论，选出核心问题委托智库开展高质量研究，并将研究成果和政策建议提交到平台征求意见，从而支持相关政策的制定和落地，推动中国电力行业的改革和可持续发展，提高电力行业节能减排、应对气候变化的能力。

项目课题组



中能世通（北京）
投资咨询服务中心

中能世通（北京）投资咨询服务中心（简称“中心”）成立于 2008 年，是一家非盈利性研究机构。中心以国家能源战略思想和战略方针为主线，积极开展政策咨询、课题研究、行业分析、项目评估、技术推广、案例开发、项目对接等综合性服务，为新能源与节能减排行业的投资发展搭建一流的综合性服务平台。主要研究方向包括应对全球气候变化、减少温室气体排放、提高能源使用效率、推广节能减碳领域的技术与商业模式、提高财政资金使用效率、推动绿色投资与绿色金融等领域。

“双碳”目标下加快工业领域终端电气化 ——钢铁行业

**Promote Terminal Electrification in Industrial Sector under
Dual Carbon Goals: Steel Industry**

2024 年 11 月

目 录

执行摘要1

1. “双碳”目标下工业领域终端电气化发展分析 4

 1.1 工业领域能源需求与减碳效益分析 4

 1.2 不同行业电气化发展潜力分析 6

 1.3 推动工业电气化发展的措施 8

2. 钢铁行业电气化发展现状及路径分析 10

 2.1 钢铁行业现状：生产消费、能源消耗与低碳发展分析.....10

 2.2 国内外钢铁行业低碳发展技术路径分析..... 15

 2.3 我国钢铁行业电气化发展技术路径分析..... 17

3. 钢铁行业电气化潜力分析20

 3.1 钢铁行业电气化发展测算方法 20

 3.2 钢铁行业电气化发展关键参数设定及不确定性分析 23

 3.3 钢铁行业电气化发展综合效益 29

 3.4 钢铁行业电气化发展战略目标及实施策略 36

4. 钢铁行业电气化发展建议..... 39

参考文献 42

作者与鸣谢 43

执行摘要

实现“双碳”目标是一场从能源革命到产业革命的深刻变革。“双碳”目标下加快建设新型能源体系，能源结构将发生根本性变化，电力将逐渐成为主要的能源消费品种。作为工业发展的基础，能源结构的变革势必深刻影响工业生产体系。我国工业领域经过数十年的发展，已经形成了以化石能源为主、相对固定的生产工艺体系，而未来要更好地适应新型能源体系，工业终端必须转向以绿电为核心的新型工艺体系。

“十四五”时期，我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向的关键时期，提出从“能耗双控”逐步转向“碳排放双控”，打破了“能耗双控”对可再生能源利用的约束，也倒逼企业加快电气化发展。工业领域贯彻“节能优先”战略，加快终端电气化发展，既可以充分挖掘需求侧灵活性资源，促进新能源的消纳，也有利于实现“能-碳-电”协同优化，推动工业领域高质量发展。

钢铁行业作为传统行业的典型代表，在我国的现代化进程中承担着重要使命，但目前电气化率较工业平均水平低10个百分点以上。以长流程生产工艺为主导的生产体系也使钢铁行业成为我国碳排放量最高的制造业行业，正面临着“能-碳-电”协同优化变革的挑战。钢铁行业涉及面广、产业关联度高、消费拉动大，生产过程具有多工序、众参数等特性，先行先试促进钢铁行业电气化发展，不仅有利于钢铁行业实现可持续的高质量发展，也有利于探索构建“钢-化-建-能”一体化新型智慧生产体系，推动钢铁行业与电力、建材、石化化工、有色金属等传统行业的耦合发展，是工业电气化发展的重中之重。

为此，本研究以国家战略为引领，在剖析工业领域电气化发展现状和趋势的基础上，聚焦钢铁行业，基于钢铁生产全流程的主要用能形式和工艺，系统分析钢铁行业电气化发展可行技术，测算钢铁行业电气化发展潜力，提出不同目标、不同阶段下钢铁行业电气化发展战略和技术路径。课题组预计，通过能源替代、原料替代和综合技术应用，电炉钢、氢冶金和基于二氧化碳资源化利用的炼钢技术（简称“CO₂炼钢”）等先进工艺推广，废钢资源和铁矿石高效利用，数字化管理水平提升，电力供应清洁低碳化等措施，钢铁行业有望实现以下目标：2030 年，电气化率提升至 14%，碳排放量较 2022 年将减少 15%；2050 年，电气化率提升至 46%，碳排放量较 2022 年将减少 85%；2060 年，电气化率提升至 57%，碳排放量较 2022 年将减少 95%。

		2022年	2030年	2050年	2060年
总体发展	产量	10.18亿吨	9.5亿吨	6.5亿吨	6亿吨
	产品	以初级产品为主	高端产品供给能力增强品种和质量提档升级	高端产品供给能力持续提升	以高端产品为主
	废钢资源量	2.6亿吨	3.3亿吨	5.5亿吨	5亿吨
	铁矿石进口	对外依存度约75%	对外依存度69%	铁矿石对外依存度2%	铁矿石基本实现自给
	能源消费量	5.6亿吨	4.4亿吨	1.6亿吨	1.1亿吨
	碳排放量 (基于2022年)	18.2亿吨	降低15%	降低85%	降低95%
电气化发展	电力消费量	4749亿kWh	4903亿kWh	5952亿kWh	4936亿kWh
	电气化率	10.4%	14%	46%	57%
	需求侧响应能力	<1%	8%	18%	21%
关键技术	电炉炼钢	9.5%	20%	50%	60%
	氢冶金	<1%	4%	17%	20%
	CO ₂ 炼钢	<1%	1%	3%	5%
	CCUS	<1%	5%	15%	20%
	智能制造及智能化解决方案	关键工序数控化率72.5% 生产设备数字化率53.8%	关键工序数控化率达到 85% 生产设备数字化率达到 60% 3D 岗位机器换人率达到 45%	关键工序数控化率100% 生产设备数字化率达到 80% 3D 岗位机器换人率达到 75%	智能制造系统解决方案得到推广应用
电力供应	余热发电	56%	56%	38%	31%
	可再生能源	<1%	5%	15%	20%
	电网接入	44%	39%	47%	49%

图 1 “双碳”目标下钢铁行业电气化发展战略及技术路线图

钢铁行业电气化发展是一项复杂的系统工程，需要解决可再生能源利用不足、电能替代和能源替代技术推广力度不够、废钢管理体系不完善等问题。为打破政策引领、技术工艺、资源保障、能源保障、市场机制等方面的约束，需要政府、企业、科研机构、金融机构等多方面的协同合作。为此，课题组提出以下建议：

（1）完善钢铁行业电气化发展顶层设计及配套政策。将电气化发展纳入钢铁行业碳达峰碳中和整体规划，明确以降碳为导向的钢铁行业电气化发展短期和中长期目标及路径，制定钢铁行业电气化发展的“两图一表”，科学设定时间表、路线图、施工图，指导企业开展电气化发展行动。同时，结合不同阶段钢铁行业电气化发展重点，完善配套政策，强化对钢铁行业电气化发展的支持。

（2）加快钢铁行业电气化发展核心技术的创新研发和推广应用。对成熟的电气化技术，将其纳入转型金融支持目录，鼓励以企业为主体加快开展试点示范、产业化应用和迭代升级，创新中长期甚至超长期的金融工具支持项目落地实施。对处于研发和示范阶段的电气化技术，鼓励企业与高校、科研院所共建研发机构，加大研发投入，提高金融支持力度，加强成果转化。在具备条件的企业和园区开展试点示范，探索“钢 - 化 - 建 - 能”一体化新型智慧生产体系集成示范，形成可复制经验以点带面促进全行业电气化发展。

（3）推动钢铁行业优化能源和资源结构强化保障。完善废钢回收利用体系，加强废钢资源的规范化管理，降低废钢成本，提升电炉炼钢经济性。鼓励企业将新能源开发利用及绿电应用纳入企业低碳发展总体规划并合理推进实施。鼓励企业建立以“绿电 + 储能”为核心的智慧能源管控系统，实现智慧能源管控及源网荷储多向互动，挖掘源侧增量潜力及荷侧可调节响应能力，提升电力供应的安全性、稳定性、可靠性。为使用绿电的钢铁企业提供更多政策支持 and 经济激励，引导钢铁企业主动参与电力市场交易购买绿电。

“双碳”目标下工业领域终端电气化发展分析

为应对全球气候变化，各国相继提出碳中和行动，碳定价机制逐渐完善，绿色低碳发展正成为大国博弈的新赛道，将加快科技创新，推动产业发展，重塑全球产业链。工业是我国推进现代化进程的重要基础和关键动力，也是能源资源消费和碳排放的重点领域，节能降碳潜力巨大，是实现“双碳”目标的主战场。

“双碳”目标下加快构建新型能源体系，电力将成为主要的能源消费品种。遵循“节约优先”原则，统筹发展与安全，以终端电气化为抓手，加快推进新型工业化，从传统以化石能源为核心的工业体系向以“绿电”为核心的新型工业体系转型，不仅能解决当前工业发展面临的“能 - 碳 - 电”协同优化问题，即降低能源消费、减少碳排放以及新型能源体系下促进电力消纳，同时也有利于推动工业领域各个行业实现高质量发展，夯实中国式现代化的物质基础和产业基础。

1.1 工业领域能源需求与减碳效益分析

我国积极探索既符合国情又适应国际潮流的绿色低碳转型发展道路，在大力发展可再生能源的同时，贯彻“节能优先”战略，以绿色化、智能化、高端化为方向，加快推动终端用能的绿色低碳替代和电气化发展，促进“能 - 碳 - 电”协同优化，形成新质生产力构

建现代化产业体系，既有利于推动我国“由大转强”，深度融入全球供应链，积极应对碳贸易壁垒，也为实现社会经济高质量发展、全面推进美丽中国建设贡献积极力量。

在“双碳”目标引领下，我国积极发展非化石能源，已经建成了全球规模最大的电力供应系统和清洁发电体系，2023年可再生能源装机容量和发电量占全国的52%和32%^[1]，并提出“非化石能源消费比重到2030年达到25%左右、到2060年达到80%以上”的发展目标，终端能源消费将由化石能源转向以“电”为核心的低碳能源，推动工业生产体系从热碳驱动向电力驱动转变。新型电力系统以高比例可再生能源接入及高比例电力电子设备应用为特征，系统复杂性增强，调节和支撑能力减弱，将带来供给侧和需求侧“双波动”，需要构建新的供需平衡，需求侧灵活性将成为高价值调节资源，也对工业电气化提出新的挑战。

我国工业领域能源消费量大、碳排放高，2022年工业领域终端能源消费量达到27.4亿吨标准煤，占终端能源消费总量的68%。其中，电力消费量达到5.7万亿千瓦时，占全社会用电量（8.8万亿千瓦时）的65%，电气化率达到26%^[2]。工业过程碳排放量约为42亿吨，仅次于能源领域的51亿吨，占全国碳排放总量（约109.5亿吨）的38%^[3]。工业用电设备多、负荷基数大、调节能力强，钢铁、建材、石化化工、有色金属、纺织等部分行业蕴藏着20%，甚至30%以上的负荷调节能力^[4]，加之单体用电量大、沟通成本低、应用潜力大、电价敏感性高，是新能源电力消纳的重点领域，也是需求侧资源开发的重要来源和优先选择，是终端电气化发展的重中之重。

加快工业领域电气化发展，提升工业电气化水平，主要包括两个方向，一是“减小分母”，即减少终端能源消费，以节能和能效提升为前提，减轻工业领域对化石能源的依赖，降低碳排放；二是“增大分母”，即增加终端电力消费。应当指出的是，要促进行业“能-碳-电”协同优化，电气化发展需建立在清洁低碳电力的基础上，与新型电力系统的演进相适应，不能盲目推进，否则反而会导致更多的能源消费和碳排放。

我国经济发展仍处于中高速增长阶段，在发展过程中需要处理好经济发展、能源消费需求增长与低碳排放的关系。目前，我国传统耗能行业的能源消费逐渐趋于饱和，新兴产业用能持续增长，工业领域能源消费需求增长逐渐放缓，预计工业终端能源需求将在2030年前后达峰，到2060年降至约10~15亿吨标准煤。加快工业领域电气化发展，电

力在工业终端能源消费中的比重将从 2022 年的 26% 提升至 2060 年 60% 左右，氢能的消费比重将从 2022 年的 6% 提升至 2060 年的 20% 以上。工业生产过程的碳排放将大幅下降，预计到 2060 年将减少 60% 以上^[5]（如图 1-1 所示）。

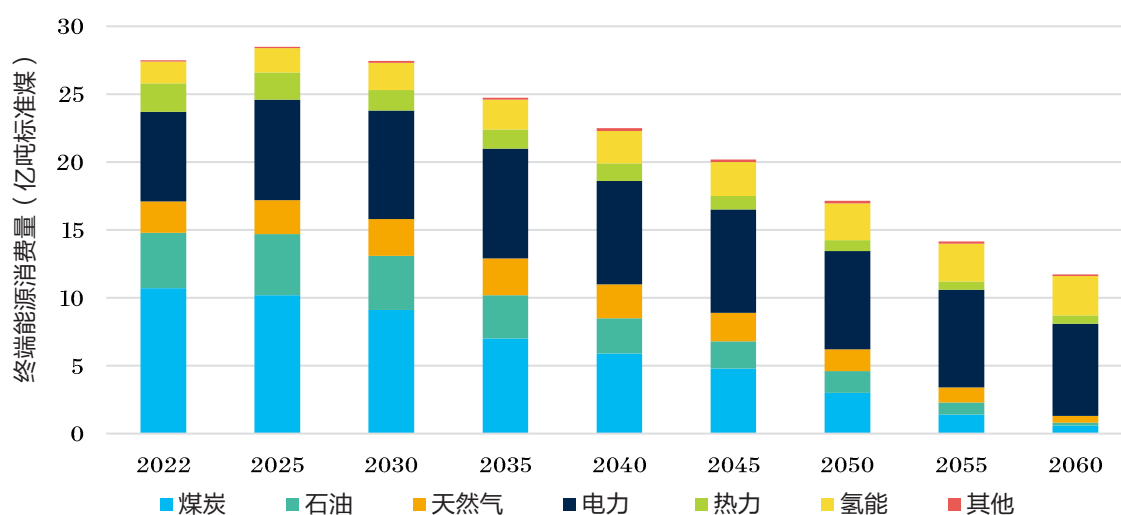


图 1-1 工业领域终端能源需求展望

资料来源：根据中国能源统计年鉴、中国宏观经济研究院、DNV、IEA 等相关资料整理。

1.2 不同行业电气化发展潜力分析

电力的广泛应用促进工业生产效率和社会生产力不断提高，工业发展又推动电力在终端能源消费中的占比提升。电力在工业终端能源消费中的比重（也称“电气化率”）是衡量工业现代化程度的重要标志。纵观全球工业电气化水平，我国工业电气化发展仍处于中等水平，近年来电气化率基本保持在 26% 左右，比世界平均水平低 2 个百分点^[6]，这是由发展阶段、资源禀赋、产业结构、工艺路线等多重因素决定的。

工业领域不同行业电气化水平差异较大，汽车制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业等新兴产业的电气化率超过 70%，而传统高耗能行业的电气化率则相对较低。2022 年，黑色金属、建材、石化化工、有色金属四大高耗能行业的电气化率分别为 11.6%、15.8%、15.2% 和 68.1%^[7]。除有色金属行业以外，黑色金属、建材、石化化工的电气化率均低于工业电气化平均水平 10 个百分点以上，加快这些行业电气化发展是提升

工业电气化水平的关键。借鉴国际国内经验，以先进用电生产工艺有序替代传统生产工艺，加快能源替代、原料替代及综合技术应用，促进技术、工艺、装备全面变革，优化生产单元配置和分工，工业领域电气化发展整体水平还有较大提升空间（如图 1-2 所示）。

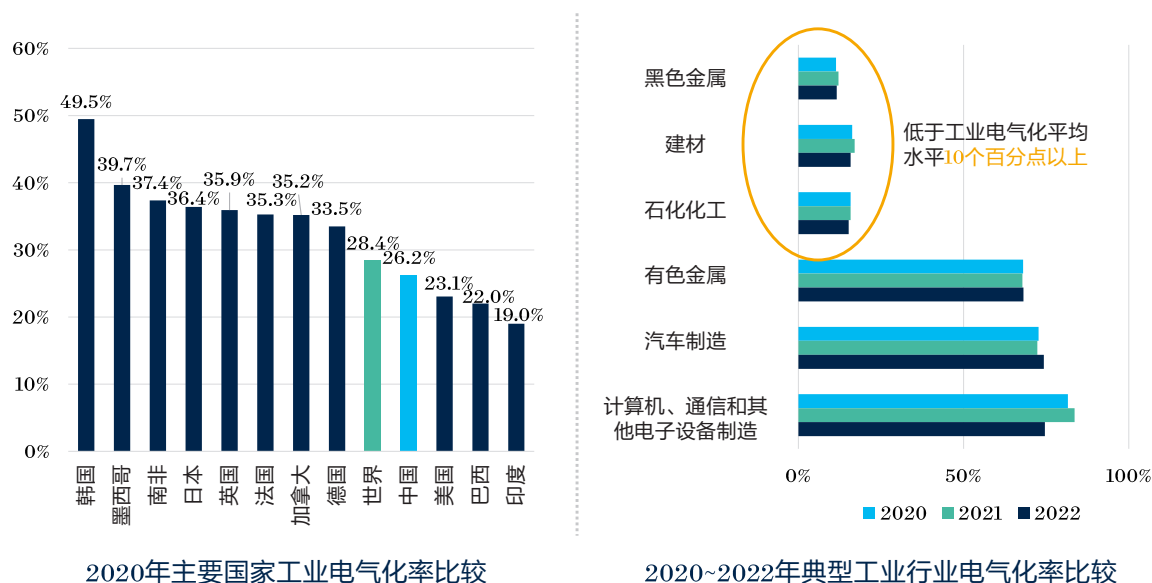


图 1-2 我国工业领域电气化发展现状

资料来源：根据中国能源统计年鉴、IEA、中国电力企业联合会、国网能源研究院等相关资料整理。

钢铁、建材、石化化工、有色金属等传统行业，增长值占工业的 70% 以上，体量庞大、吸纳就业众多，是现代化产业体系建设和制造强国建设的重要基石；这些行业在长期的实践过程中，追求数量和规模的增长，形成了对化石能源高度依赖的发展模式，能源消费量占工业的 69%，碳排放占工业的 58%，电力消费占工业的 38%，流程复杂、集成度高、工艺相对固化，是工业电气化发展的重点和难点；具有 20% 以上的负荷调节能力，展现出巨大的需求侧灵活性潜力，在加快工业电气化发展的进程中应予以重点关注。

各个行业的生产流程不同，资源依赖、发展阶段、发展水平等方面均存在差异，未来的发展需求、转型升级方向也大相径庭，必须结合行业特色，找准转型切入点和发展路径，有计划分步骤开展电气化行动。其中，有色金属行业电气化水平较高，提升空间有限，电气化发展以电能质量提升、再生资源利用以及冶炼技术突破为主，钢铁、建材、石化化工等行业的电气化发展则需要技术、工艺、装备的系统性变革（如图 1-3 所示）。

		钢铁	建材	石化化工	有色金属
发展现状	能源消费	5.6亿tce	3.8亿tce	12.1亿tce	2.9亿tce
	电力消费	4749亿kWh	4017亿kWh	5461亿kWh	7452亿kWh
	碳排放	18.2亿吨	13.7亿tce	14.5亿tce	6.7亿tce
	碳排放主要环节	- 高炉炼铁 - 焦化工序	- 熟料煅烧 - 燃烧和发电	- 原料合成 - 化学反应 - 燃料排放	- 电力生产 - 金属冶炼
电气化技术	原料替代	- 氢冶金 - CO₂-O₂/Ar - CCUS	- 低碳水泥 - CCUS	- 炼化一体化 - 绿电绿氢工艺 - CCUS	- 惰性阳极 - 离子液体 - 再生金属工艺 - CCUS
	能源替代	- 电炉炼钢 - 传统工序电能替代	- 电加热 - 氢能燃料	- 电加热 - 电驱动 - 氢能燃料	电炉冶炼工艺
	其他技术	- 智能制造 - 余热发电 - 可再生能源	- 智能制造 - 余热发电 - 可再生能源	- 智能制造 - 余热发电 - 可再生能源	- 智能制造 - 余热发电 - 可再生能源
电气化潜力	2030年	10~15%	20~25%	20~30%	70~72%
	2050年	40~50%	30~35%	45~55%	75~77%
	2060年	55~60%	35~40%	60~65%	77~80%

图 1-3 工业领域重点行业电气化发展现状、技术路径及发展潜力

资料来源：根据中国能源统计年鉴、中国电力统计年鉴、行业研究报告等相关资料整理。

1.3 推动工业电气化发展的措施

加快工业电气化发展是一项复杂的系统工程，涉及电力、电子、电器全方位的变革。工业电气化发展应与电力系统的低碳转型相辅相成，电气化发展只有基于绿色低碳的清洁发电，才能推动行业低碳转型，这是一个长期调整的过程，不可能一蹴而就。从政策引领、技术支撑、能源保障、市场机制等方面，多措并举推动工业电气化发展，统筹传统产业升级、新兴产业壮大、未来产业培育，不断促进工业电气化水平提升。

碳达峰碳中和“1+N”政策体系着力推动工业领域电气化发展。2021年10月发布的《2030年前碳达峰行动方案》即将“提升工业电气化水平”作为实现工业碳达峰的重点任务。立足生态文明建设进入以降碳为重点战略方向的关键时期，我国提出从“能耗双控”向“碳排放双控”转型，打破能耗双控对可再生能源利用的约束，为经济增长释放用能空间，以

更加鲜明、精准的低碳政策导向，引导企业加快形成减污降碳的激励约束机制，为工业电气化发展创造良好的政策环境。

科技创新成为工业领域电气化发展的重要引擎。新一代绿色低碳技术、信息技术、新能源、新材料等新兴技术的集中涌现和广泛应用，为工业电气化发展提供了必要的技术支撑。新时期更要发挥新型举国体制优势，加大研发攻关力度，解决行业绿色低碳及电气化发展的共性难题。以钢铁行业为例，对电炉炼钢等成熟电气化技术，鼓励以企业为主体加快产业化应用和迭代升级；对绿氢应用、中低温热能回收利用等处于研发和示范阶段的电气化技术，依托科研院所、高校和行业协会，联合重点企业，构建覆盖全产业链的创新生态，开展基础研究和前沿技术研究，强化技术创新对行业绿色发展的引领作用。

安全稳定的电力供应是工业领域电气化发展的关键保障。在供给侧加强调峰储能和智能化调度能力建设，在需求侧加快工业领域电气化发展，实现电气化、数字化、智能化“三化一体”，让电气化手段成为数字化、智能化发展的有效载体，充分挖掘灵活性资源，更好应对新型电力系统的不确定性，推动电力系统从发输配用“单向传输”转向“源网荷储”四要素协同发展的“多元传输”模式，夯实工业电气化发展能源支撑。

坚持电力市场化方向和体制机制改革是工业电气化发展的助推剂。工业领域，尤其是钢铁、建材、石化化工、有色金属等碳密集型传统行业属于重资产行业，负债率高，不确定性强，绿色低碳转型和电气化发展存在融资难的问题，应建立健全相应体制机制，提升创新体系整体效能。在可再生能源、储能建设等方面对传统行业给予政策倾斜，降低企业用电成本，鼓励企业更多使用清洁电力，在发展过程中实现与新型电力系统的协调匹配和良性互动。

随着重点领域电气化技术的进步发展和推广应用，以及电力基础设施、政策激励、电力服务市场机制等各个方面的逐渐完善，工业电气化水平将逐渐提升，**预计到 2030 年，我国工业电气化水平将达到 30% 左右，到 2050 年将达到 50% 左右，到 2060 年将达到 60% 左右。**

2 钢铁行业电气化发展现状及路径分析

钢铁行业作为社会经济发展的支柱性产业，是衡量一个国家综合国力和工业化程度的重要标志。我国钢铁行业发展正在由数量时期迈向高质量时期，面对产能调控和节能降碳的双重压力，以及欧盟碳边境调整机制（CBAM）和即将到来的全国碳市场扩容对产品生产成本的影响，钢铁行业更要积极“转方式、调结构、提质量、增效益”，实现绿色化、智能化、高端化发展，提高核心竞争力，把握发展的主动权。

钢铁行业涉及面广、产业关联度高、消费拉动大，与电力、热力、建材、石化化工、有色金属等行业高度关联，钢铁产品也是基础设施建设、汽车制造、装备制造等领域的主要原材料，对相关领域的绿色低碳转型具有重要的带动作用。先行先试促进行业电气化发展，不仅有利于钢铁行业解决“能 - 碳 - 电”问题，实现可持续、高质量发展，同时探索构建“钢 - 化 - 建 - 能”一体化新型智慧生产体系，促进钢铁行业与电力、建材、石化化工等传统行业的耦合发展，产业带动效应显著，是工业电气化发展的重中之重。

2.1 钢铁行业现状：生产消费、能源消耗与低碳发展分析

2022 年我国粗钢产量和成品钢表观消费量分别约 10.18 亿吨、9.43 亿吨，占全球总量的 54%、52%。其中，建筑行业钢铁消费量占消费总量的 52%，机械制造占 16%，

能源行业占 7%，汽车制造占 6%，家电、造船及其他行业分别占 2%、2%、15%^[8]（如图 2-1 所示）。

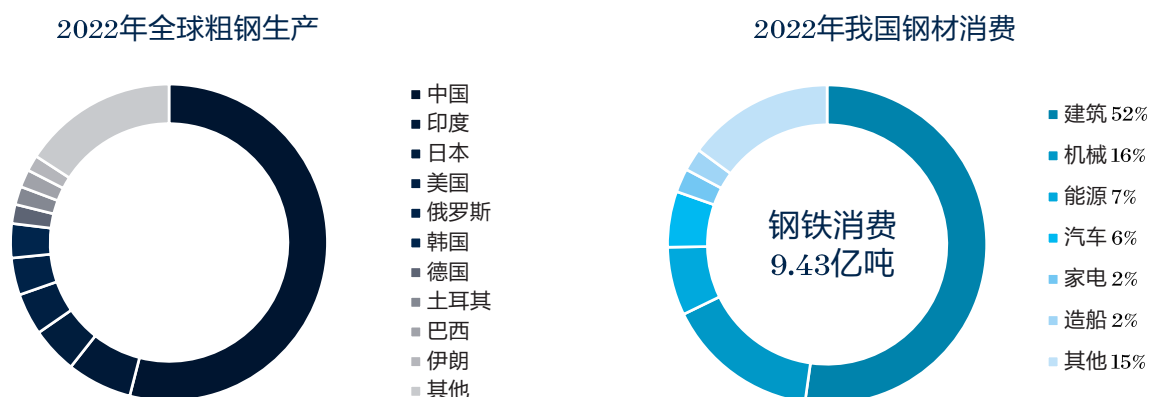


图 2-1 2022 年我国钢铁生产及消费情况

资料来源：根据《世界钢铁统计数据 2024》《钢铁市场 2022 年回顾与 2023 年展望》等资料整理。

我国钢铁生产以长流程生产工艺（即“转炉炼钢”）为主，2022 年产量占比高达 90.5%。基于废钢的短流程生产工艺（即“电炉炼钢”）仅占 9.5%，远低于美国 69%、欧盟 44% 的发展水平，也低于世界平均水平（约 28%）^[9]。长流程生产工艺对化石能源高度依赖，铁和碳深度耦合为钢铁生产工序提供还原剂、能源和工艺的支撑，流程脱碳面临“牵一发而动全身”的挑战。2022 年，我国钢铁行业能源消费量达 5.60 亿吨标准煤，约占全国能源消费总量的 10%。其中，转炉炼钢的能源消费量为 5.49 亿吨标准煤，占钢铁行业能源消费量的 98%；电炉炼钢的能源消费量为 0.11 亿吨标准煤。煤炭和焦炭占钢铁行业购入能源的 90% 以上，油气能源约占 1.7%，电力仅占 6.3%。其中，60% 以上的煤炭和焦炭转化为焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气等各种煤气使用。

电力是钢铁生产过程中必不可少的能源支撑。按照吨钢电耗 466 千瓦时计算，2022 年钢铁行业电力消费量约 4749 亿千瓦时，占钢铁行业能源消费量的 10.4%^[10]。其中，转炉炼钢的电力消费量为 4242 亿千瓦时，占钢铁行业电力消费量的 89%；电炉炼钢的电力消费量为 507 亿千瓦时。56% 的电力由钢铁余热余能自发电完成，可再生能源发电不到 1%。钢铁行业不同工序对电力的依赖程度不同，其中，电炉工序的能源消费以电力为主，占比接近 70%；轧制工序的电力消费主要用于为冷热轧机提供能源动力，电力消费占 28.3%；

而在烧结、球团、焦化、高炉、转炉等工序中，电力消费相对较低，比重不足 20%，是未来电气化发展的重点（如图 2-2 所示）。

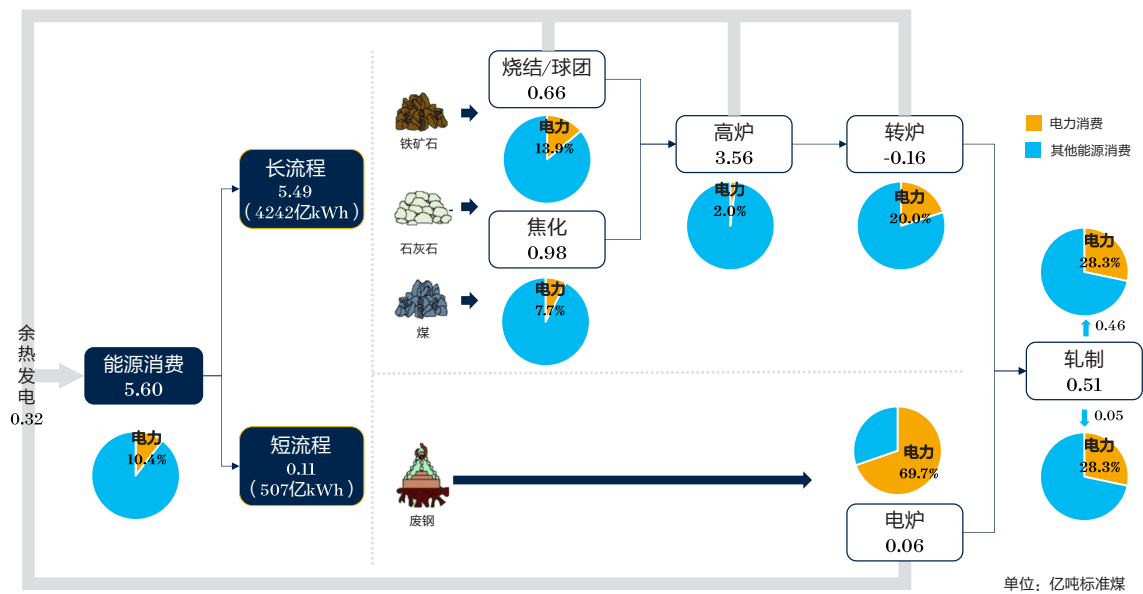


图 2-2 2022 年钢铁行业能源（电力）消费构成

资料来源：根据中国钢铁工业协会、国家统计局等资料整理。

由于大量使用化石能源，钢铁行业的碳排放不可避免。2022 年，钢铁行业碳排放量达 18.2 亿吨，约占我国碳排放总量的 17%，是仅次于发电行业的高碳排放行业，占全球钢铁碳排放总量的 60% 以上。其中，70% 以上的碳排放来自于烧结、焦化、高炉等铁前工序^[10]。在国际新型贸易壁垒和国内“双碳”目标下，钢铁行业面临着碳减排的巨大压力，电气化发展将成为推动行业技术变革和优化升级的重要动力，创新应对“能 - 碳 - 电”挑战，推动钢铁行业高质量发展。

近年来我国先后发布多项钢铁行业政策规划，以电气化发展作为低碳发展的重要抓手，部署产能结构调整、加强超低排放改造、加快用能设备更新、推动全流程余热利用、提升短流程电炉炼钢比重、加快低碳冶炼技术推广应用、提升数字化管理水平等重点任务，多管齐下促进钢铁行业向绿色化、智能化、高端化发展（见表 2-1）。在当前从“能耗双控”转向“碳排放双控”的关键时期，电气化发展的战略意义更加凸显，从国家层面统筹部署

强化引领，细化行业电气化措施，加强政策扶持力度，更好地引导钢铁行业乃至工业领域的电气化发展。

表 2-1 钢铁行业电气化及低碳发展相关政策

时间	发布单位	文件名称	主要内容
2022.01.20	工信部、发改委、生态环境部	关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见	力争到 2025 年，钢铁工业基本形成布局结构合理、资源供应稳定、技术装备先进、质量品牌突出、智能化水平高、全球竞争力强、绿色低碳可持续的高质量发展格局。工艺结构明显优化，电炉钢产量占粗钢总产量比例提升至 15% 以上。
2022.01.27	工信部等八部门	关于印发加快推动工业资源综合利用实施方案的通知	到 2025 年，钢铁、有色、化工等重点行业工业固废产生强度下降，大宗工业固废的综合利用水平显著提升，再生资源行业持续健康发展，工业资源综合利用效率明显提升。力争大宗工业固废综合利用率达到 57%，其中，冶炼渣达到 73%。主要再生资源品种利用量超过 4.8 亿，其中废钢铁 3.2 亿吨。
2022.02.12	发改委	钢铁行业节能降碳改造升级实施指南	到 2025 年，钢铁行业炼铁、炼钢工序能效标杆水平以上产能比例达到 30%，能效基准水平以下产能基本清零，行业节能降碳效果显著，绿色低碳发展能力大幅提高。
2022.06.23	工信部等六部门	关于印发工业能效提升行动计划的通知	到 2025 年，重点工业行业能效全面提升，钢铁、石化化工、有色金属、建材等行业重点产品能效达到国际先进水平，规模以上工业单位增加值能耗比 2020 年下降 13.5%。通过产能置换有序发展短流程电炉炼钢，提高废钢使用量，加快烧结烟气内循环、高炉炉顶均压煤气回收、铁水一罐到底、薄带铸轧、铸坯热装热送、副产煤气高参数机组发电、余热余压梯级综合利用、智能化能源管控等技术推广。
2022.07.07	工信部、发改委、生态环境部	工业领域碳达峰实施方案	聚焦重点行业，实施钢铁、建材、石化化工、有色金属等行业碳达峰行动。到 2025 年，废钢铁加工准入企业年加工能力超过 1.8 亿吨，短流程炼钢占比达 15% 以上。到 2030 年，富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁、碳捕集利用封存等技术取得突破应用，短流程炼钢占比达 20% 以上。
2023.08.21	工信部等七部门	钢铁行业稳增长工作方案	2023-2024 年，钢铁行业稳增长的主要目标是：2023 年，钢铁行业供需保持动态平衡，全行业固定资产投资保持稳定增长，经济效益显著提升，行业研发投入力争达到 1.5%，工业增加值增长 3.5% 左右；2024 年，行业发展环境、产业结构进一步优化，高端化、智能化、绿色化水平不断提升，工业增加值增长 4% 以上。

时间	发布单位	文件名称	主要内容
2023.09.27	工信部	钢铁行业智能制造标准体系建设指南	到 2025 年，建立较为完善的钢铁行业智能制造标准体系，累计研制 45 项以上钢铁行业智能制造领域标准，基本覆盖基础共性和装备层、车间层、工厂层、企业层、产业链协同层各层级标准，优先制定基础共性标准以及绿色低碳、产品质量、生产安全等关键应用场景标准，突出标准在先进制造技术与新一代信息技术相互融合和迭代提升过程中的引导作用。
2024.01.16	工信部等九部门	钢铁行业数字化转型实施指南	到 2026 年，钢铁行业数字化整体水平显著提升，新一代信息技术与钢铁工业深度融合，行业数字生态体系持续完善，基本实现由单点、局部向系统性、全局性的数字化发展转变。数字基础不断夯实，关键工序数控化率达到 80%，生产设备数字化率达到 55%，3D 岗位机器换人率达到 40%，突破一批工业软件和装备等关键技术，制定一批钢铁数字化转型相关标准。
2024.05.27	发改委等五部门	钢铁行业节能降碳专项行动计划	到 2025 年底，钢铁行业高炉、转炉工序单位产品能耗分别比 2023 年降低 1% 以上，电弧炉冶炼单位产品能耗比 2023 年降低 2% 以上，吨钢综合能耗比 2023 年降低 2% 以上，余热余压余能自发电率比 2023 年提高 3 个百分点以上。

资源安全是行业可持续发展的重要评价指标，也是我国从钢铁大国转向钢铁强国的必要保障。以长流程为主导的生产工艺，导致我国铁矿石的对外依存度高达 75% 左右，是全球最大的铁矿石进口国。铁矿石资源供应不足、高度依赖进口，是影响我国钢铁行业产业链供应链安全的核心问题。2023 年我国铁矿石进口量达 11.8 亿吨，占全球铁矿石贸易量的 70%，进口总额超 1339 亿美元，占当年进口总金额的 5%^[11]。80% 以上的进口铁矿石来自于澳大利亚和巴西，进口来源相对集中，战略安全问题凸显。目前我国已将铁矿石列为国家战略矿产资源，全面启动新一轮战略性矿产国内找矿行动，正式启动“基石计划”，提升资源保障能力，同时鼓励废钢替代产品应用，从源头上减少铁矿石需求。充分利用现有的 2.63 亿吨废钢资源，大力推广电炉炼钢短流程工艺，促进钢铁行业电气化水平提升，是缓解钢铁行业对外资源依赖的有效手段。

贯彻“节约优先”理念，提高能源资源使用效率，从源头上降低钢铁行业能源和资源消耗。2022 年，钢铁行业“能效标杆三年行动方案”正式启动，极致能效工程进入实质

性实施阶段，成为继产能置换、超低排放改造之后的第三大改造工程，以“双碳最佳实践能效标杆示范厂”培育为抓手，将力争实现 2024 年 1.5 亿吨至 2.0 亿吨、2025 年 2.0 亿吨至 3.0 亿吨钢铁产能达到能效标杆的水平。在钢铁行业极致能效技术清单中，与电气化发展相关的技术有二十余项，占比接近 50%，将对行业电气化发展起到一定的助推作用。

2.2 国内外钢铁行业低碳发展技术路径分析

全球钢铁行业正在积极探索绿色发展的颠覆性、变革性技术，绿色钢铁正在从理念转化为行动、从愿景转变为现实。尽管目前尚无任何国家发布钢铁行业电气化发展的专项政策，但主要钢铁国家和地区都在积极开展钢铁电气化发展技术的探索与实践，作为促进钢铁行业节能减排和绿色低碳转型的重要抓手。

(1) 国际钢铁行业低碳发展技术路径分析

在全球碳中和发展趋势下，国内外先进钢铁企业纷纷发布低碳路线图，绿电、绿氢的使用成为钢铁企业低碳转型的共同选择，绿色钢厂、绿色钢材逐步涌现，全球零碳钢铁发展大赛已起步，日本、美国、韩国、欧盟等主要钢铁生产国家和地区积极出台绿色钢铁相关政策，主要钢铁企业也在创新绿色钢铁低碳技术，在电气化发展方面进行了积极探索和布局。尽管具体工艺路线不完全相同，但总体而言，主要是通过工艺革新增加绿色能源使用从而实现降碳（见表 2-2）。

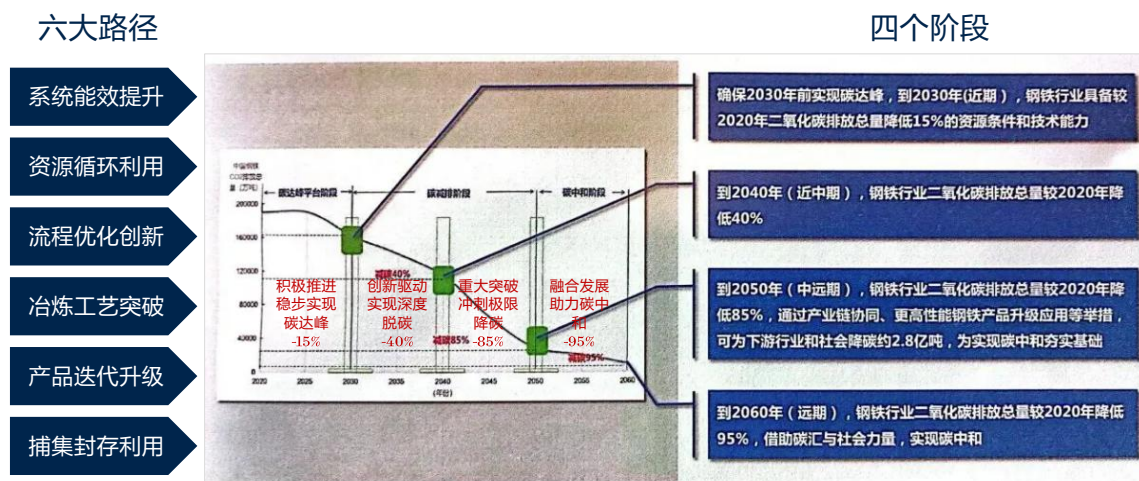
表 2-2 主要钢铁生产国家和地区钢铁行业碳中和目标及路径

国家 / 地区	碳中和目标	实施路径
美国	2050 年实现碳中和	为了实现“3550”碳中和目标,美国拜登政府计划投资 2 万亿美元用于国内基础设施、清洁能源等领域的建设。加大对储能、绿氢、核能、CCS 等前沿技术的研发力度,降低低碳成本
欧盟	2050 年实现碳中和 (欧洲钢铁工业承诺 2030 年比 2018 年减少 30% ;到 2050 年相较于 1990 年减少 80% ~ 95%)	欧盟成员国如德国钢铁企业已经将政府资金投入到低碳的钢铁产品中试项目中, 安塞乐米塔尔集团致力于在德国汉堡钢厂利用可再生能源生产的氢气生产绿色钢铁产品, 瑞典公司的 HYBRIT 项目已经向客户交付了低碳钢材
日本	2050 年实现碳中和 (日本铁钢联盟提出到 2050 年实现炼铁工序温室气体零排放,碳排放量减少 30%, 到 2100 年前实现零碳钢生产)	日本计划通过电炉生产更多的钢来实施积极的转型,并承诺将其能源经济转变为依赖带有碳捕获与封存 (CCS) 的通过化石燃料生产的氢气和基于可再生能源的氢气。
韩国	2050 年实现碳中和	韩国提出了氢冶金路线图, 以努力遏制温室气体排放。以浦项为首的韩国钢铁工业已经宣布了建设氢冶金设备的计划。
印度	2070 年实现碳中和	印度碳中和目标的实现依赖于大型钢铁企业使用氢能源, 提出并开始推进氢能路线图。

资料来源：张琦等，中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图。

(2) 国内钢铁行业低碳发展技术路径分析

2022 年 8 月，中国钢铁工业协会发布《钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图》，通过“系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级、捕集封存利用”六大路径，分四个阶段逐步实现钢铁行业碳中和。预计到 2060 年减少钢铁行业 95% 碳排放（如图 2-3 所示）。



资料来源：中国钢铁工业协会。

2022年，中国钢铁工业协会提出了“世界前沿低碳共性技术开发支持计划”，列出了需要重点发展和支持的前沿低碳共性技术清单，包括富氢或全氢气基直接还原技术、富氢碳循环高炉技术、氢基熔融还原技术、近零碳排电炉流程技术、钢铁近终型制造技术、高废钢比高效转炉技术、冶金渣显热回收及高效化资源化利用技术，以及CO₂捕集及资源化利用技术。可以看到，这些技术普遍需要电力支撑，与钢铁行业电气化发展息息相关。

在此背景下，宝武集团、河钢集团、首钢股份、宝钢股份等主要钢铁企业也提出了相应的低碳发展路线图，将技术突破作为低碳转型的重要方向，坚持前沿技术创新，在极致能源效率提升、高炉热态熔渣余热回收技术开发、富氢碳循环氧气高炉研发示范、“钢铁+氢能”结构创新、智能制造等方面进行布局，有效推动电气化技术的应用与实践，争做碳达峰、碳中和先行者，低碳转型已成为推动钢铁行业高质量发展的重要引擎。

2.3 我国钢铁行业电气化发展技术路径分析

钢铁生产过程中，化石能源既是能源，又是原料。钢铁行业绿色低碳转型的终极目标是实现行业“能-碳-电”协同优化，使得能源消费最低、碳排放最低、电气化水平不断提升。主要途径则是通过生产工艺的“碳、氢、电”耦合，有效减少钢铁生产过程对煤炭、焦炭、铁矿石的依赖，促进能源低碳化、资源绿色化。以“碳”为根本，从能源燃料向产品原材

料转型以及碳的循环利用是低碳钢铁的根本命题；以“氢”为核心，将氢作为最重要的能量载体和脱碳原材料；以“电”为驱动，构建以清洁电力为主体的能源体系，实现能源高效互补、低碳利用。

综合国际国内钢铁企业低碳发展现状及成功经验，结合行业特点，从供给侧和需求侧共同发力，钢铁行业电气化技术路径可分为三类，即原料替代、能源替代以及综合技术。其中，原料替代主要指从关键能耗工序和工段等能源消费与碳排放源头上，通过工艺、技术、材料及必要的装备等方面的创新，在钢铁生产中可考虑采用氢气或者捕集的二氧化碳（CO₂）替代焦炭等原料，尽可能减少化石能源的使用，降低碳排放，挖掘电气化发展潜力，主要支撑技术为氢冶金，以及 CCUS 和基于 CO₂ 资源化利用的炼钢技术（简称“CO₂ 炼钢”）。能源替代主要是指在钢铁生产的加热、动力及燃料等用能环节，通过电力替代减少化石能源使用，提高能源使用效率，实现生产过程电气化水平的提升，支撑技术主要包括电炉炼钢及传统工序电气化。综合技术指在促进钢铁行业绿色化、智能化、高端化发展的其他支撑技术，包括智能制造及智能化解决方案、节能技术、余热发电、可再生能源开发利用等（如图 2-4 所示）。



图 2-4 钢铁行业电气化发展技术路径及关键技术

基于当前钢铁行业工艺结构和技术水平，不同技术对钢铁行业电气化发展水平影响不同。以电炉炼钢为例，其能耗和碳排放仅为长流程生产工艺的 1/3。电力消费占生产过程能源消费的 60% 以上。以 1% 的电炉炼钢替代 1% 的长流程转炉炼钢，预计可以提高终端

电气化率约 0.1 个百分点。又比如氢冶金技术，根据氢气来源可分为氢冶金 - 灰氢和氢冶金 - 绿氢两种。现阶段我国氢冶金技术仍以灰氢为主，绿氢的应用尚面临技术经济性有待突破、连续稳定的氢能供应难以保证、资源供应与消费存在时空不匹配等问题。以 1% 的氢冶金技术替代 1% 的长流程转炉炼钢，通过降低终端能源消费提升钢铁行业电气化水平，预计可以提高终端电气化率约 0.1 个百分点，如果考虑以绿电制备绿氢，间接电气化率可提升 0.2 个百分点。此外，推广应用 CO₂ 炼钢、传统工序电气化、智能制造及智能化解决方案、节能技术等技术，可提升钢铁行业电气化率约 0.01~0.3 个百分点不等。

而从电力供给侧发力，充分利用工业生产过程中产生的废热开展余热发电，可以实现能源利用效率的最大化，减少环境污染，应视作绿色电力来源，在工业低碳转型过程中需予以优先考虑与高度重视。基于当前技术水平，在钢铁行业推广应用 1% 的余热发电，可提升行业自发电率 0.1%。而在钢铁行业开发利用可再生能源，实现能源的清洁替代，每增加 1% 的可再生能源发电，可再生能源消费占比将提高 0.1%（如图 2-5 所示）。

	技术成熟度	经济性	能-碳-电“三维”影响	对终端电气化水平影响
				基于发展现状（2022） 推广应用1%
● 氢冶金	研发阶段	较差	> 终端能源消费减少 > 碳排放减少 > 终端电力消费受氢气来源影响	+0.1%（直接） +0.2%（间接-绿氢）
● CCUS及CO ₂ 炼钢	研发阶段	较差	> 终端能源消费增加 > 碳排放减少 > 终端电力消费增加	+0.3%
● 电炉炼钢	产业阶段	较差	> 终端能源消费减少 > 碳排放减少 > 终端电力消费增加	+0.1%
● 传统工序电气化	产业化阶段	好	> 终端能源消费减少 > 碳排放减少 > 终端电力消费增加	+0.01%~0.02%
● 智能制造及智能化解决方案	产业化初期	好	> 终端能源消费减少 > 碳排放减少 > 终端电力消费增加	+0.06%
● 节能技术	产业化阶段	好	> 终端能源消费减少 > 碳排放减少 > 终端电力消费存在不确定性	+0.01%~0.02%
● 余热发电	产业化阶段	好	> 供给侧发力，提供电力支撑 > 碳排放减少	能源自给率 +0.1%
● 可再生能源	产业化阶段	好	> 供给侧发力，提供电力支撑 > 碳排放减少	可再生能源消费占比 +0.1%

图 2-5 钢铁行业电气化技术发展现状及对终端电气化水平影响

注：各技术路径对终端电气化率的影响主要基于钢铁行业 2022 年发展情况测算，仅供参考，实际变化受需求量、工艺结构、技术水平等多重因素影响。

3 钢铁行业电气化潜力分析

钢铁行业在工业领域的作用举足轻重，但行业电气化发展路径选择多样，存在较大的不确定性。结合钢铁行业的主要生产工艺及过程、主要用能环节，通过对电气化发展的重点技术路径进行研究，课题组对行业电气化发展前景进行预判，对相应的综合效益以及不确定因素进行分析，提出“双碳”目标下钢铁行业电气化发展战略和路径，助力国家既定的中长期发展战略及目标。

3.1 钢铁行业电气化发展测算方法

(1) 模型构建

依据我国工业领域及钢铁行业相关政策要求，结合当前钢铁行业发展经验，考虑经济发展、原料供应、工艺装备、技术水平、能源结构等多方面的因素，采用国内外研究报告中常见的综合评价模型定量分析方法，综合分析未来钢铁行业电气化发展前景，考虑到数据可得性和可比性^①，以 2022 年为基准年，聚焦 2030 年、2050 年、2060 年三个关键时间节点，推演钢铁行业电气化发展趋势，研判钢铁行业未来的能耗、碳排放、电气化水平及综合效益（如图 3-1 所示）。

^① 由于工业及钢铁细分领域的能源统计数据尚未完全公开，因此，选择 2022 年数据作为基准。

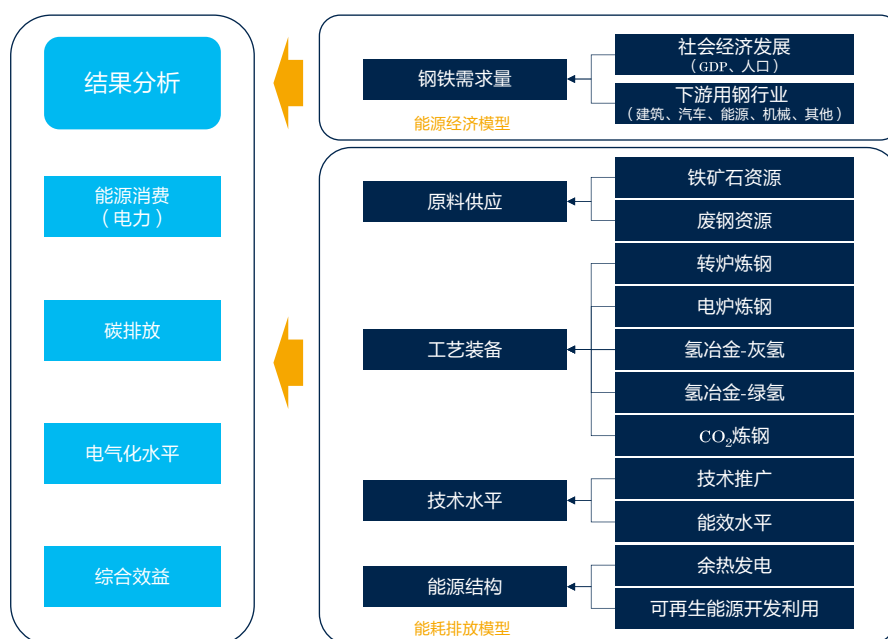


图 3-1 钢铁行业电气化发展 LEAP 模型架构

(2) 测算边界

根据《钢铁企业节能设计标准（GB/T50632-2019）》，聚焦钢铁生产过程主要工序的能耗和碳排放。对于长流程生产工艺以及 CO_2 炼钢，包括焦化、烧结、球团、高炉、转炉、轧制、CCUS 等主要工序。对于基于废钢的电炉炼钢，考虑电炉、轧制、CCUS 工序。对于氢冶金，如果基于焦炉煤气或灰氢，则包括所有铁前工序及电炉、轧制、CCUS 工序；如果基于绿氢，则包括电解水制氢、电炉、轧制工序。铁矿石、废钢、铁合金、熔剂等原辅料生产，以及钢铁成品和中间产品的周转运输产生的能耗和碳排放暂不计入（见表 3-1）。

表 3-1 钢铁行业终端电气化核算边界

工序	生产系统	辅助生产系统
球团	包括配料、原料运输、造球、焙烧、筛分等到成品球团矿皮带机离开球团工序为止的各生产环节	生产管理及调度指挥系统、机修、化验、计量、水循环系统、环保（水处理及除尘等）、余能发电、供热锅炉等设施
烧结	包括溶剂、燃料破碎、配料、原料运输、工艺过程混料、烧结机、烧结矿破碎、筛分等到成品烧结矿皮带机离开烧结工序为止的各生产环节	
焦化	包括备煤、炼焦、熄焦（含干熄焦、湿熄焦及焦处理）、煤气净化及化工产品回收、循环水、焦化污水处理、除尘等	
高炉	包括高炉本体、热风炉、喷煤、供上料及装料、出铁场及渣处理、软水密闭循环、净循环子工序、煤气净化、鼓风机站、矿焦槽除尘、出铁场除尘、TRT/BPRT 等设施	
电炉	包括炉料制备、电炉冶炼、清洁去杂、精炼调温、铸造成材等环节	
连铸	包括铁水预处理、转炉本体、连铸（或浇铸）、渣处理、钢包烘烤、炉外精炼、煤气处理等设施	
轧制	包括均热炉、加热炉、塑性成形设备（含轧制、锻造、挤压、拉拔、冲压设备等）、精整设备、焊接加工、镀涂层加工等设施	
CCUS	包括 CO ₂ 捕集和 CO ₂ 利用两大主要环节	
电解水制氢	包括电解槽、汽水分离器、洗涤器、冷却器、供水、加碱等设备	

资料来源：徐军等，钢铁企业工序碳排放核算方法研究及实例分析。

(3) 测算方法

钢铁行业直接电气化率 $\eta_{直接}$ 可采用如下公式计算得到：

$$\eta_{直接} = \frac{P_{终} \times \alpha}{E} \times 100\%$$

其中， $P_{终}$ 表示终端用电量； $E_{终}$ 表示终端能源消费总量； α 表示电热当量，标准值为 860 千卡 / 千瓦时。

终端用电量 $P_{终}$ 可通过转炉炼钢、电炉炼钢、氢冶金 - 灰氢、氢冶金 - 绿氢、CO₂ 炼钢等不同工艺的产品需求量 M_i 及单位产品电耗 p_i 计算得到，计算公式如下：

$$P_{\text{终}} = \sum_{i=1}^n M_i \times p_i$$

终端能源消费总量 $E_{\text{终}}$ 可通过转炉炼钢、电炉炼钢、氢冶金 - 灰氢、氢冶金 - 绿氢、 CO_2 炼钢等不同工艺的产品需求量 M_i 及单位产品能耗 e_i 计算得到，计算公式如下：

$$E_{\text{终}} = \sum_{i=1}^4 M_i \times e_i$$

钢铁行业间接电气化 $\eta_{\text{间接}}$ 可采用如下公式计算得到：

$$\eta_{\text{间接}} = \frac{P_X \times \alpha}{E_{\text{终}} - E_X + P_X} \times 100\%$$

其中， P_X 表示转化为热、冷、气（氢）等终端能源形式消耗的电能； E_X 表示终端消耗的通过电能制取的热、冷、气等形式能源。

3.2 钢铁行业电气化发展关键参数设定及不确定性分析

依据《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》《钢铁行业数字化转型实施指南》《钢铁行业节能降碳专项行动计划》等政策，以“技术可行、经济合理、环境友好、安全可靠”为原则，结合《面向碳中和的氢冶金发展战略研究》《中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图》《电炉短流程区域布局与发展要素适配性分析》等行业研究报告，参数设定充分考虑政策、技术、市场等因素影响，课题组提出相对合理可行的钢铁行业电气化发展情景，同时对存在的不确定因素进行了系统分析。

(1) 钢铁需求变量分析

经济发展增速对钢铁消费具有很强的拉动作用，过去 20 年我国粗钢产量快速增长的根本原因在于经济快速发展导致用钢需求大幅增加，而在当前全球经济下行的大趋势下，钢材消费量即将进入稳步下行的平台期，行业发展面临严峻选择，将重构产业发展格局。

我国钢铁行业产量自 2020 年后已经呈现下降趋势，综合考虑未来建筑、机械、能源、汽车等重点用钢行业发展趋势以及钢铁需求量变化，预计到 2030 年，我国钢铁行业的需求量将降至 9.2~9.8 亿吨；到 2050 年，钢铁行业的需求量将降至 6~7.2 亿吨左右；

到 2060 年，钢铁行业的需求量将降至 5~7 亿吨。综合考虑“双碳”目标对钢铁行业发展的刚性约束，以及钢铁行业发展的稳定性和持续性要求，2030 年、2050 年、2060 年钢铁需求量取中间值，分别为 9.5 亿吨、6.6 亿吨、6 亿吨，进行简单测算（如图 3-2 所示）。

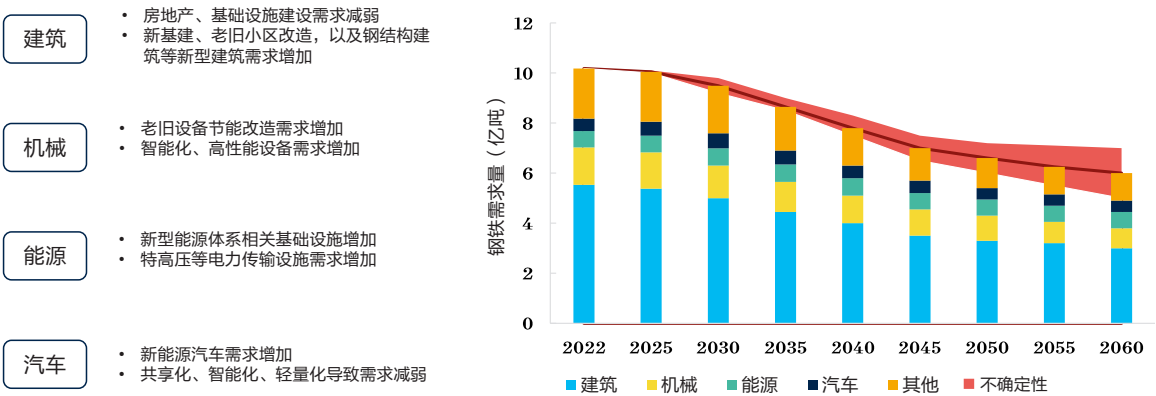


图 3-2 我国钢铁行业需求变量预测结果

资料来源：根据 BNEF、东北大学、落基山研究院、中国宏观经济研究院等相关资料整理。

(2) 废钢资源变量分析

资源保障是钢铁行业电气化转型的关键因素。我国铁矿石的对外依存度高达 75%，由于“内钢外矿”地位不对等，定价权严重缺失，铁矿石价格波动对钢铁行业影响显著，将直接影响转炉炼钢工艺的平稳运行，难以满足钢铁业快速发展的需求。废钢作为唯一可以大量代替铁矿石的再生原料和铁素资源的重要供应来源，在碳中和背景下战略意义不断提升。

近年来，随着钢铁行业的快速发展，我国粗钢积蓄量大幅提升，废钢资源总量跃居世界前列，2022 年废钢供应量达 2.63 亿吨。我国废钢的来源主要分为三大方面，即自产废钢、加工废钢、折旧废钢，分别占 15%、17%、68%^[12]。其中，自产废钢是在钢铁生产过程中产生的废钢，通常只在钢铁厂内部循环利用，不会流入市场；加工废钢和折旧废钢又称为社会废钢，来源较为广泛。在全国废钢供应量中，约有 2.15 亿吨用于钢铁冶炼，另有 0.2 亿吨左右则直接应用于机械行业铸锻（“废钢资源量”为测算值，通常会高于废钢生产量和消费量）。其中，钢铁行业 70% 的废钢资源被长流程钢厂所消耗，仅有 30% 用于短流程炼钢^[13]。

我国钢铁多数应用于建筑领域，尚未达到折旧年限，社会蓄积钢铁转化为废钢资源产出仍需要一定周期。预计到 2030 年，我国钢铁蓄积量将达到 132 亿吨，废钢资源量将达到 3~3.5 亿吨；到 2050 年，钢铁蓄积量将达到 219 亿吨，废钢资源量将达到约 5~6 亿吨；2060 年，钢铁蓄积量将达到 243 亿吨，废钢资源量将达到约 4.5~5.5 亿吨(如图 3-3 所示)。考虑到废钢从理论积蓄量向实际资源量、有效供应量的转化存在不确定性，按照保守情况取中间值，预计到 2030 年、2050 年、2060 年，我国废钢资源供应量将分别达到 3.3 亿吨、5.5 亿吨、5 亿吨。

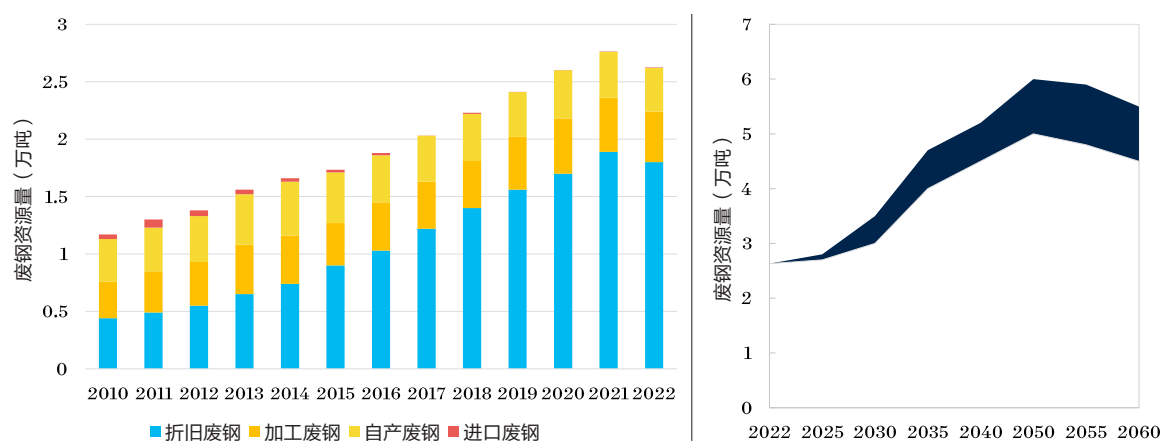


图 3-3 2010~2022 年国内废钢资源量变化以及到 2060 年废钢资源变量预测结果

资料来源：根据《2022 年中国废钢铁市场供需平衡分析》《现阶段我国废钢资源产出情况分析》《我国电炉短流程炼钢发展研究报告：现状趋势、降碳潜力、发展前景》《2022—2060 年中国废钢资源量分析预测》等资料整理。

(3) 工艺装备变量分析

作为重资产行业，工艺装备的技术经济性是影响钢铁行业发展路径的核心要素。近年来我国在清洁能源的开发利用方面已经走在世界前列，但总体来看电气化发展仍处于摸索阶段，钢铁行业电气化发展在技术推广应用、能源保障、产品低碳价值转化等方面仍存在制约。短期内转炉炼钢依然是钢铁行业的主导工艺，中远期钢铁行业降碳的关键在于冶炼工艺突破，将推动工艺装备的系统性变革。

未来我国废钢成本随着资源释放不断降低，绿电绿氢成本伴随着可再生能源的发展也不断减少，将显著提高电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等低碳生产工艺的市场竞争力，预计到 2060 年电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等技术的成本可降低 15~50% 不等(如图 3-4 所示)。

同时，储能、虚拟电厂、智能制造及智能化解决方案等技术推动钢铁行业电气化发展与新型电力系统的协同机制逐步完善，提升低碳炼钢生产过程的安全性和可靠性，促进钢铁行业加快结构调整，电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等低碳炼钢工艺将逐步替代传统的产流程转炉炼钢，加快促进钢铁行业电气化水平提升。预计转炉炼钢的市场占比将从 2022 年的 90% 降至 2030 年的 80% 以下，到 2060 年将进一步降低至 20~30%。

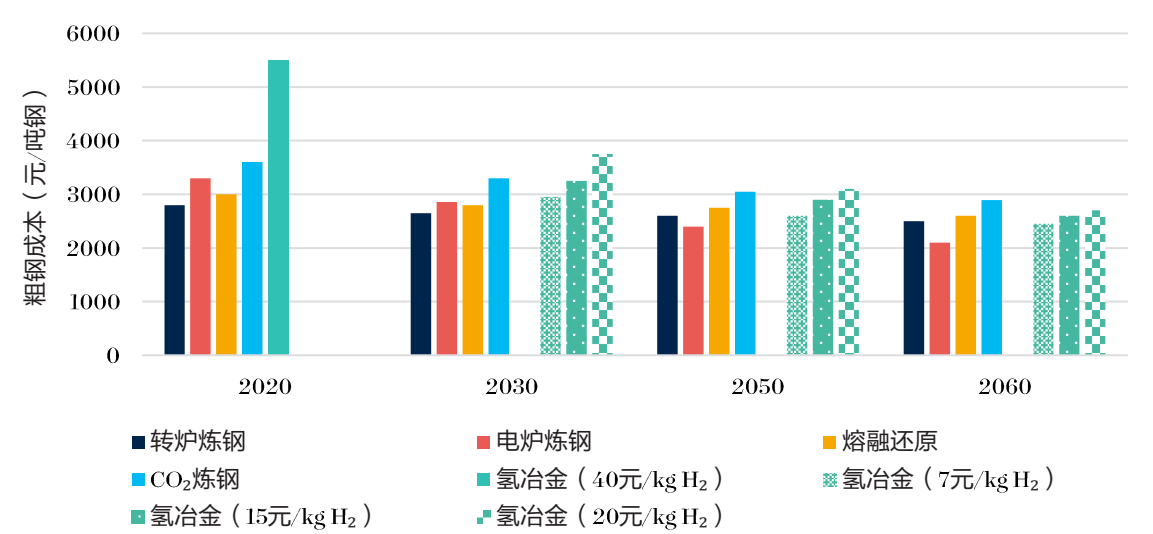


图 3-4 钢铁行业不同生产工艺成本预测

资料来源：根据《碳中和目标下的中国钢铁零碳之路》《面向碳中和的氢冶金发展战略研究》等相关资料整理。

然而，我国钢铁行业企业数量众多，产业集中度不高^[14]，绿色发展基础参差不齐，在当前经济下滑的时期，企业把生存和发展放在首位，未来是选择增加投资选择电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等成熟技术或颠覆性技术，还是从成本考虑维持当前工艺整合 CCUS、CO₂ 炼钢等技术，又或者是考虑采用能源或者原材料外采，开展分工合作创新产业低碳发展新模式，是钢铁行业阶段性电气化水平的不确定因素之一。综合考虑钢铁行业相关政策要求，以及铁矿石、废钢资源的有效利用，预计到 2030 年，转炉炼钢、电炉炼钢、氢冶金 - 灰氢、氢冶金 - 绿氢、CO₂ 炼钢的市场占比将分别达到 75%、20%、4%、<1%、1%，到 2060 年市场占比将分别达到 15%、60%、3%、17%、5%（如图 3-5 所示）。

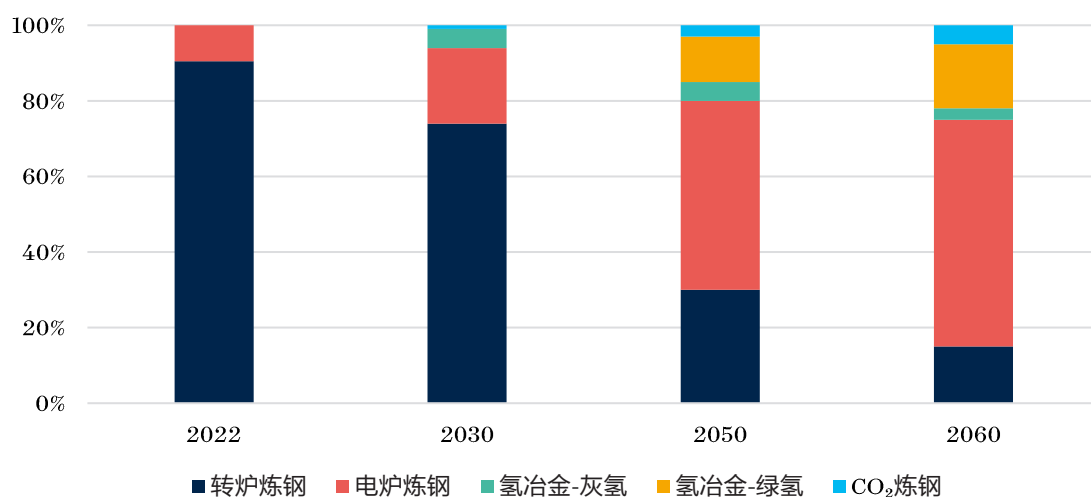


图 3-5 2022~2060 年不同技术工艺生产的钢铁产品市场占比

资料来源：根据《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》政策要求以及 IEA、BNEF、东北大学、中国宏观经济研究院等相关资料整理。

(4) 能效水平变量分析

钢铁行业生产流程复杂，能源消费结构偏煤，而 79% 的能源被转化成蒸汽、热水等形式，用于各个工序的热量消耗，而得到有效利用的可能不足 40%^[15]。采用电加热技术实现钢铁行业热能需求的电力替代，是钢铁行业电气化发展的重要举措。受工艺影响，不同工序电气化提升潜力不同。预计到 2060 年，转炉工序和电炉工序通过节能技术、智能制造及智能化解决方案等技术应用，电气化水平将小幅增长，分别达到 25% 以上和 75% 以上；烧结、球团工序通过带式焙烧以及未来的等离子烧结等先进电加热技术推广应用，电气化率将达到 45% 以上；在焦化工序采用 CO 等离子热风炉等技术，电气化率可提升至 35% 以上；高炉工序随着 CO₂ 喷吹、富氧喷吹、生物质炭喷吹等技术的推广应用，以及未来氢等离子体熔融还原等以电力为主要支撑的先进技术突破和成熟，电气化率将超过 30%；轧制工序目前正在积极探索电弧加热、感应加热等先进电加热技术的应用，力争实现轧制工序 100% 的电力使用（如图 3-6 所示）。



图 3-6 到 2060 年钢铁生产各工序电气化水平预测

资料来源：根据《2022 年我国钢铁行业能源消耗评述》《实现碳中和目标的等离子热风炉全电加热解决方案》《通过氢等离子体熔融还原法进行无碳炼钢》等相关资料整理。

近年来，我国钢铁行业加快转型升级改造，积极推动行业绿色可持续发展，节能降耗成效显著，2022 年吨钢综合能耗 551.36 千克标准煤/吨，比 2012 年降低了 8.5 个百分点。未来随着传统工序电气化技术推广应用、极致能效工程的开展、智能制造及智能化解决方案等技术的应用，以及先进节能技术和高效节能装备推广，钢铁行业的能效水平将持续提升，单位产品能耗呈现逐年下降的趋势。预计转炉炼钢、电炉炼钢、氢冶金 - 灰氢、氢冶金 - 绿氢、CO₂ 炼钢等不同工艺的单位产品能耗每年将降低 0.5~1% 不等，到 2060 年不同工艺单位产品能耗将降低 18~30% 不等，单位产品电耗将提升 14~36 个百分点不等（如图 3-7 所示）。

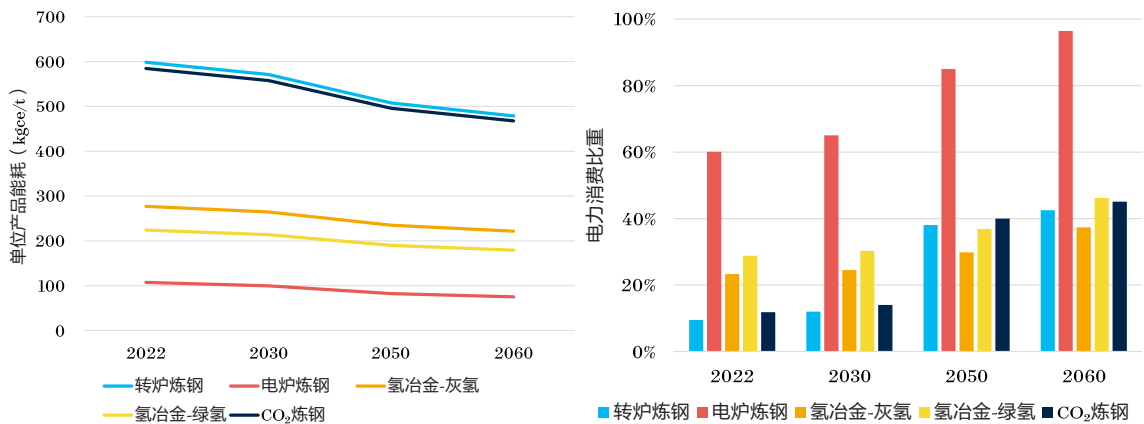


图 3-7 钢铁行业不同生产工艺单位产品能耗和单位产品电耗预测

资料来源：根据《工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023 年版）》，以及中国钢铁工业协会、东北大学、中国宏观经济研究院等相关资料整理。

(5) 能源结构变量分析

目前钢铁行业的能源消费以煤炭和焦炭为主，电力消费仅占 10.4%，钢铁行业余热发电水平达到 56%，可再生能源发电比例不足 1%。根据钢铁企业能源转换功能理论，通过余热发电技术将长流程炼钢过程中产生的余热余能转化成电力，综合自发电率将超过 60%。其中，有焦化工序的钢铁企业自发电率可达到 100% 以上，无焦化工序的钢铁企业自发电率可达到 70%^[10]。而短流程炼钢过程中，由于减少了焦化、烧结、球团、高炉等工序，产生的余热余能大幅下降，但如果充分回收利用，预计自发电率可达 10~25%。

面向“双碳”目标，未来钢铁行业在产业结构调整的同时，进一步强化余热发电水平，预计 2060 年自发电率将达到 31%。同时，随着新型电力系统的发展，钢铁行业因地制宜，积极开发可再生能源，配套完善储能等基础设施，为行业电气化发展提供必要的能源保障支撑，预计到 2060 年可再生能源发电量占 20%。另外 49% 的电力则由外部电网提供（如图 3-8 所示）。

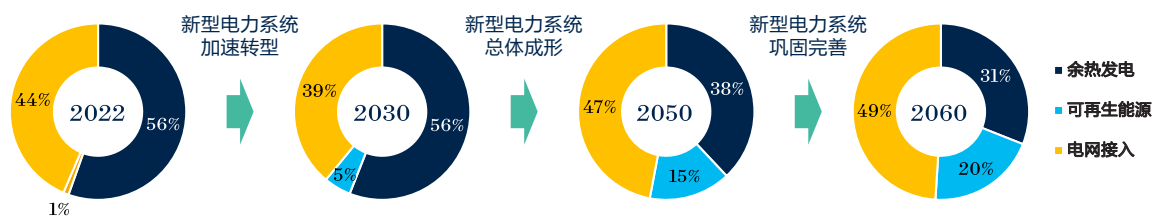


图 3-8 钢铁行业电气化发展电力结构预测

资料来源：根据《新型电力系统蓝皮书》《中国钢铁工业节能低碳发展报告（2023）》等资料整理。

3.3 钢铁行业电气化发展综合效益

(1) 电气化水平不断提升

基于上述测算方法，以及关键参数和不确定性分析，对 2030、2050、2060 年钢铁行业的能源消费量、电气化水平进行测算。随着电气化、绿色化、智能化等先进技术的应用，以及工艺结构的调整，钢铁行业能源消费总量将持续下降，预计到 2030 年将降至 4.4 亿吨标准煤，到 2050 年将降至 1.6 亿吨标准煤，到 2060 年将降至 1.1 亿吨标准煤。

2030 年之前，钢铁行业主要发展电炉炼钢、传统工序电气化等原料替代技术，以及智能制造及智能化解决方案、节能技术等综合技术，对氢冶金、CO₂ 炼钢等原料替代技术进行初期探索，扩大终端电气化消费，并加强余热发电和可再生能源开发利用，为电气化发展提供能源支撑；到 2050 年，钢铁行业将以电炉炼钢、氢冶金等先进生产工艺为电气化发展的技术重点，提高短流程产能占比，同时加快提升核心装备和关键工序数字化水平，有条件的企业配合 CCUS 及 CO₂ 炼钢技术降低碳排放，余热发电和可再生能源开发利用水平持续提升，促进行业加快实现电气化发展；到 2060 年，随着绿氢实现规模化应用，基于绿电绿氢的电炉炼钢、氢冶金等技术快速发展，CCUS 及 CO₂ 炼钢等技术应用规模持续增长，数字化智能化加速赋能，以余热资源高效利用和高比例可再生能源为支撑，电气化水平进一步提升。预计钢铁行业电气化率将从 2022 年的 10.4% 提升至 2030 年的 14%、2050 年的 46%、2060 年的 57%。如果进一步考虑电解水制绿氢，则钢铁行业的间接电气化率将从 2022 年的 10.4% 提升至 2030 年的 14%、2050 年的 51%、2060 年的 66%（如图 3-9 所示）。

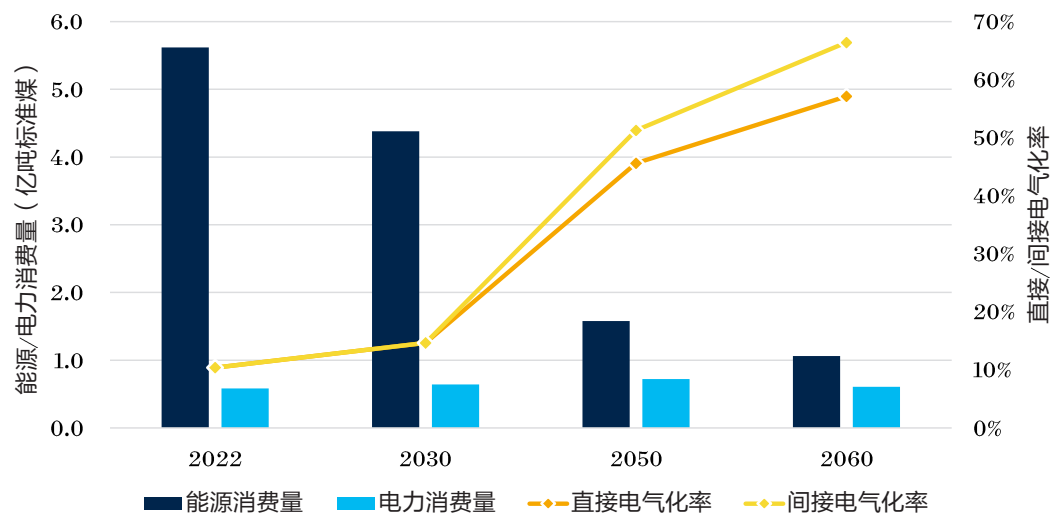


图 3-9 钢铁行业能 - 电变化示意图

(2) 节能降碳协同效益突出

钢铁行业因地制宜、因时制宜加快电气化发展，采用电炉炼钢、氢冶金、CCUS 和 CO₂ 炼钢、传统工艺电气化、智能制造及智能化解决方案、节能技术等绿色低碳技术，扩

大终端电力消费，并以余热发电、可再生能源等技术为行业电气化发展提供更加清洁低碳的能源支撑，将实现钢铁生产能效的持续提升和碳排放的下降。

到 2030 年，钢铁行业吨钢综合能耗将降至 464.37 千克标准煤 / 吨，较基准年（2022 年）下降了 16%。2022 年到 2030 年相应地形成节能能力 0.9 亿吨标准煤，相当于 2022 年钢铁行业能源消费量的 15%，相应的可减少二氧化碳排放量 2.7 亿吨 / 年。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径对节能能力的贡献度分别为 5%、69%、26%。同时，钢铁行业持续优化能源结构，预计到 2030 年 10% 的能源由余热回收、可再生能源等清洁能源提供，相应的可减少二氧化碳排放量 0.1 亿吨 / 年。合计可减少二氧化碳排放量 2.8 亿吨 / 年。

到 2050 年，钢铁行业吨钢综合能耗将降至 243.04 千克标准煤 / 吨，较 2022 年下降了 56%。从 2030 年到 2050 年相应地形成节能能力 1.5 亿吨标准煤，相应的可减少二氧化碳排放量 4.6 亿吨 / 年。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径对节能能力的贡献度分别为 20%、65%、15%。同时，钢铁行业进一步优化能源结构，预计到 2050 年 40% 的能源由余热回收、可再生能源等清洁能源提供，相应的可减少二氧化碳排放量 3.0 亿吨 / 年。合计可减少二氧化碳排放量 7.6 亿吨 / 年。

到 2060 年，钢铁行业吨钢综合能耗将降至 176.98 千克标准煤 / 吨，较 2022 年下降了 68%。从 2050 年到 2060 年相应地形成节能能力 0.4 亿吨标准煤，相应的可减少二氧化碳排放量 0.8 亿吨 / 年。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径对节能能力的贡献度分别为 25%、56%、19%。同时，钢铁行业进一步优化能源结构，预计到 2050 年 52% 的能源由余热回收、可再生能源等清洁能源提供，相应的可减少二氧化碳排放量 0.2 亿吨 / 年。合计可减少二氧化碳排放量 1.0 亿吨 / 年（如图 3-10 所示）。

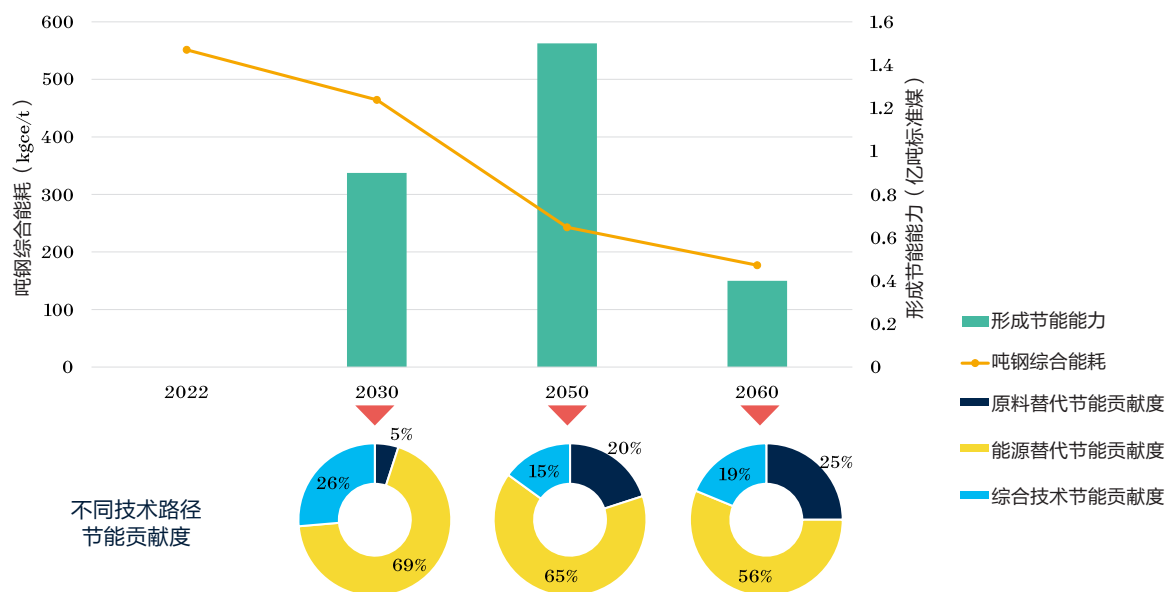


图 3-10 2022~2060 年钢铁行业电气化发展所形成节能能力分析

(3) 为钢铁行业实现“双碳”目标做出积极贡献

综合考虑中远期我国钢铁需求量变化趋势和钢铁行业发展愿景，预计到 2030 年、2050 年、2060 年，钢铁行业碳排放量将达到 15.3 亿吨、2.7 亿吨、0.9 亿吨。钢铁行业加快电气化发展，为钢铁行业实现“双碳”目标做出积极贡献，到 2030 年、2050 年、2060 年，电气化率将分别达到 14%、46%、57%，预计可分别减少碳排放 2.8 亿吨、7.6 亿吨、1.0 亿吨，累计减少碳排放 11.6 亿吨，对钢铁行业的碳减排贡献度为 63%。

不同阶段下，钢铁行业电气化发展三大路径原料替代、能源替代、综合技术对行业实现“双碳”目标贡献不同。到 2030 年，原料替代由于技术成熟度和经济性问题，对该阶段行业碳排放减少量的贡献度相对较小，仅有 5%，主要碳排放减少量来自于能源替代及综合技术，贡献度分别为 66% 和 29%。2030 年至 2050 年，随着电气化技术的成熟和发展，钢铁行业大量开展工艺变革，原料替代的贡献度增加，达到 12%，能源替代和综合技术的贡献度分别为 39% 和 49%；2050 年至 2060 年，原料替代、能源替代、综合技术对钢铁行业碳排放减少量的贡献度分别为 20%、45% 和 35%（如图 3-11 所示）。

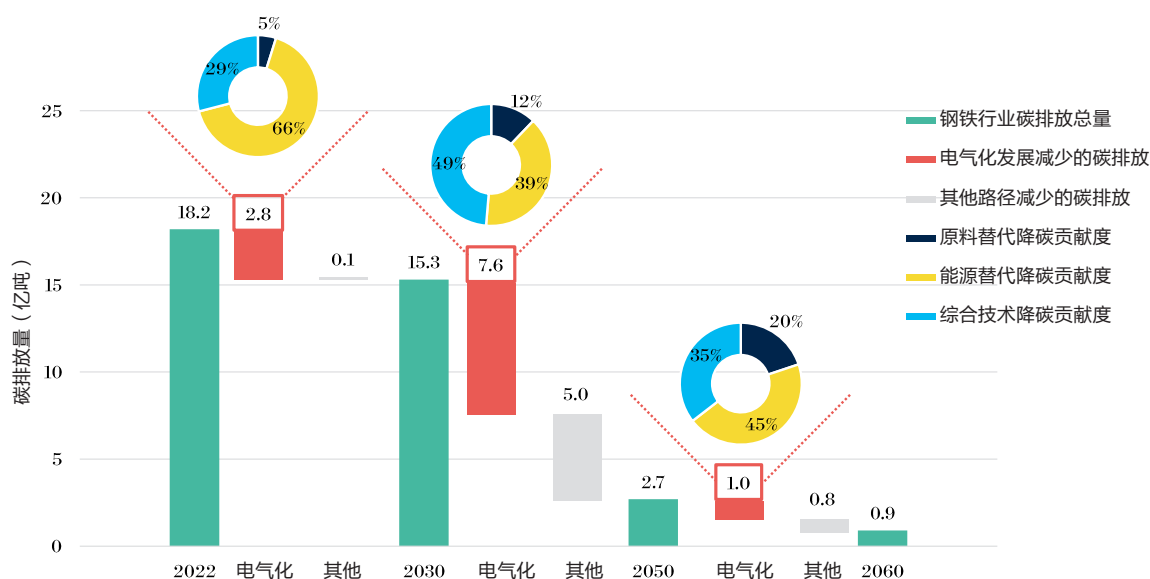


图 3-11 2022~2060 年钢铁行业电气化发展对减少碳排放的贡献

(4) 需求响应潜力持续增加

根据需求侧响应策略，钢铁行业的主要负荷可分为可调节负荷和不可调节负荷。钢铁行业连续性生产设备较多，烧结、球团、焦化、高炉、转炉等工序除检修时间外通常满负荷运行，负荷率长期维持高位，对供电的可靠性要求高，属于不可调节负荷。钢铁行业的可调节负荷主要来自电炉工序和轧制工序的冲击型负荷。其中，电炉工序由于电极与炉料之间的电位差击穿空气形成电弧导致短时间的负荷增长，具有“带状”功率的特性，可通过短时间中断、转移的方式来响应系统需求，响应时长（即调节时间）通常为 0.5~1 小时，单体可调节负荷占比为 25~50%。轧制工序设备的负荷率只有在钢坯进入轧机时处于高位，且受钢铁产品的型号影响，响应时长可达小时级，单体可调节负荷占比通常为 2~10%^[16]。

加快钢铁行业电气化发展，促进钢铁行业结构调整，充分挖掘需求侧响应潜力，提高需求侧灵活性。随着电气化水平提升，钢铁行业需求侧响应主体范围不断拓宽，需求侧响应资源池持续扩大，预计需求侧响应能力到 2030 年将提升至 8%，到 2050 年将提升至 18%，到 2060 年将提升至 21%，对于保障新型电力系统的安全、稳定、可靠具有重要意义（如图 3-12 所示）。

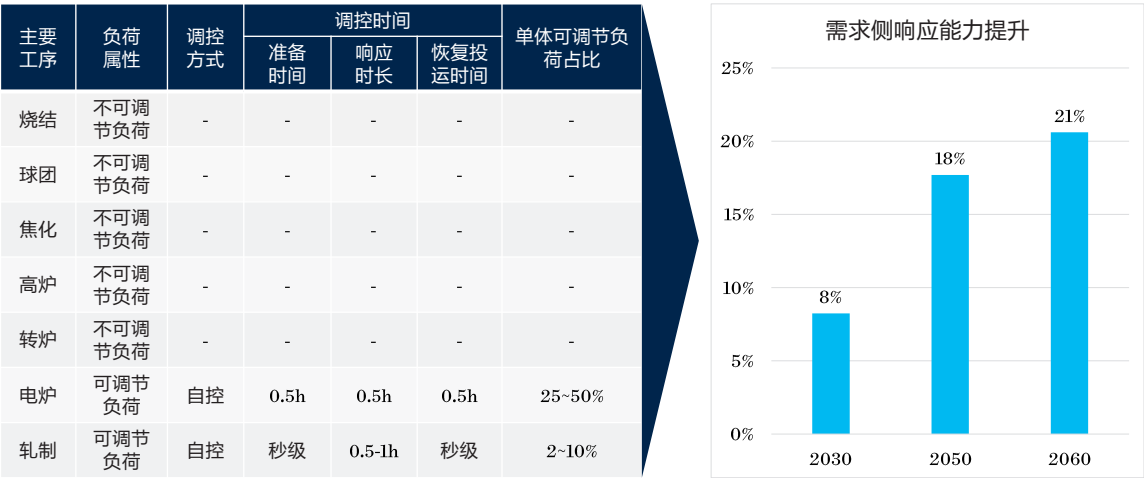


图 3-12 2022~2060 年钢铁行业电气化发展需求侧响应潜力预测

资料来源：根据落基山研究所、国网电力科学研究院有限公司、中国钢铁工业协会、东北大学、中国宏观经济研究院等相关资料整理。

(5) 有效拉动投资增长

到 2030 年，钢铁行业以碳达峰为目标，以行业节能增效为优先任务，电气化发展作为低碳发展的辅助路径进行初步探索，更关注技术成熟、投资小、见效快的电气化技术，比如传统工艺电气化、节能技术、余热发电、可再生能源开发利用等，部分资源禀赋、配套设施等条件相对完善地区的钢铁企业会向电炉炼钢转型，在氢冶金、CCUS 及 CO₂ 炼钢、智能制造及智能化解决方案等方面也积极探索。参考当前各类技术工程项目价格水平，预计投资规模将达到 7800 亿元。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径的投资比重分别为 17%、59%、24%。

2030 到 2050 年，钢铁行业深度脱碳，将以核心工艺变革加速推进电气化发展，电炉炼钢、氢冶金、CCUS 及 CO₂ 炼钢、智能制造及智能化解决方案、节能技术等相关技术、余热发电、可再生能源开发利用得到规模化应用，对应的投资规模将快速增长。参考当前各类技术工程项目价格水平，预计到 2050 年投资规模将达到 2.6 万亿元。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径的投资比重分别为 60%、26%、14%。

2050 到 2060 年，面向碳中和目标，钢铁行业继续压减产能，电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等工艺变革方面的新增投资相对减少，绿电、绿氢制备方面的投资增加，CCUS 也将发挥兜底保障作用，相应投资有所增加。参考当前各类技术工程项目价格水平，投

资规模将达到 3.2 万亿元。其中，原料替代、能源替代、综合技术路径的投资比重分别为 66%、22%、13%（如图 3-13 所示）。

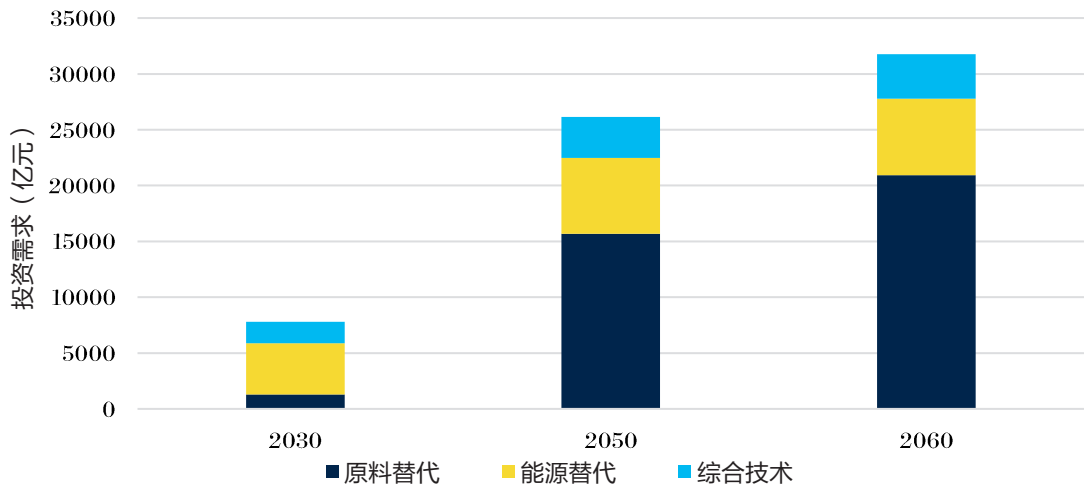


图 3-13 钢铁行业电气化发展投资规模预测

注：参考当前各类技术工程项目价格水平。

(6) 促进行业降本增收

钢铁行业电气化发展的经济效益主要包括节能效益、需求侧管理效益、低碳效益三个方面，即电气化发展形成节能能力减少的能源成本、企业挖掘需求侧响应潜力开展“避峰就谷”用电模式带来的需求侧管理效益，以及未来钢铁行业纳入碳市场后潜在的预期碳收益。

2022 年到 2030 年，钢铁行业电气化率将达到 14%，形成节能能力 0.9 亿吨标准煤，按照我国标准煤价格平均水平取 800 元 / 吨进行简单测算，产生的节能效益将达到 661 亿元；2030 年钢铁行业电力消费量将达到 4903 亿千瓦时，参照我国各省市分时电价机制按照峰谷电价差 0.2 元 / 千瓦时进行保守测算，钢铁行业充分挖掘 8% 的需求侧响应潜力开展“避峰就谷”用电模式，需求侧管理效益将达到 79 亿元；2030 年钢铁行业电气化发展将减少碳排放 2.8 亿吨，参照 2024 年全国碳市场高峰时期成交价格按照 100 元 / 吨计算，产生的低碳效益将达到 278 亿元。2022 年到 2030 年钢铁行业电气化发展的投资规模为 7800 亿元，产生的经济效益合计为 1018 亿元，投资回收期约为 7.7 年。

按照同样方法测算，2030 年到 2050 年，钢铁行业电气化率将达到 46%，将形成节能能力 1.5 亿吨标准煤，产生的节能效益将达到 1169 亿元；2050 年钢铁行业电力消费量将达到 5952 亿千瓦时，钢铁行业充分挖掘 18% 的需求侧响应潜力开展“避峰就谷”用电模式，需求侧管理效益将达到 211 亿元；将减少碳排放 7.6 亿吨，产生的低碳效益将达到 762 亿元。2030 年到 2050 年钢铁行业电气化发展的投资规模为 1.8 万亿元，产生的经济效益合计为 2142 亿元，投资回收期约为 8.6 年。

2050 年到 2060 年，钢铁行业电气化率将达到 57%，将形成节能能力 0.4 亿吨标准煤，节能效益将达到 317 亿元；2060 年钢铁行业电力消费量将达到 4936 亿千瓦时，钢铁行业充分挖掘 21% 的需求侧响应潜力开展“避峰就谷”用电模式，需求侧管理效益将达到 203 亿元；将减少碳排放 1.0 亿吨，产生的低碳效益将达到 104 亿元。2050 年到 2060 年钢铁行业电气化发展的投资规模为 5600 亿元，产生的经济效益合计为 625 亿元，投资回收期约为 9.0 年（见表 3-2）。

表 3-2 钢铁行业电气化发展综合效益

指标	2022~2030 年	2030~2050 年	2050~2060 年
电气化率	14%	46%	57%
节能能力	0.9 亿吨标准煤	1.5 亿吨标准煤	0.4 亿吨标准煤
碳排放减少量	2.8 亿吨	7.6 亿吨	1.0 亿吨
投资规模	7800 亿元	1.8 万亿元	5600 亿元
经济效益	1018 亿元	2142 亿元	625 亿元
投资回收期	7.7 年	8.6 年	9.0 年

3.4 钢铁行业电气化发展战略目标及实施策略

基于测算和分析，对钢铁行业的发展方向和主要趋势进行推演，课题组提出钢铁行业电气化发展中长期战略目标及实施策略。

钢铁行业大力发展电炉钢、氢冶金、CO₂ 炼钢等先进生产工艺，加快发展低碳冶炼新模式。到 2030 年，电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢产量占粗钢总产量比例力争提升至

20%、4%、1%；到 2050 年，电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢产量占粗钢总产量比例提升至 50%、17%、3%；到 2060 年，电炉炼钢、氢冶金、CO₂ 炼钢产量占粗钢总产量比例提升至 60%、20%、5%。

支持废钢资源高质高效利用，以及铁矿石高效开采和利用，保障钢铁行业原料安全。到 2030 年，废钢资源量达到约 3.3 亿吨，铁矿石对外依存度降低至 69% 左右；到 2050 年，废钢资源量达到约 5.5 亿吨，铁矿石对外依存度大幅降低至 3% 左右；到 2060 年，废钢资源量达到约 5 亿吨，铁矿石基本实现自给自足。

钢铁行业提升数字化管理水平，加快大数据、人工智能、互联网等信息技术与钢铁制造加工工序深度融合，实现用能设备和生产工艺智能化控制。到 2030 年，钢铁行业关键工序数控化率达到 85%；到 2050 年，钢铁行业基本实现关键工序数控化全覆盖；到 2060 年，钢铁行业智能制造系统解决方案大幅推广应用。

我国钢铁行业电气化发展应优先考虑电炉炼钢技术、传统工序电气化等能源替代技术，以及智能制造及智能化解决方案、节能技术等综合技术，并强化对氢冶金、CO₂ 炼钢等原料替代技术的研究攻关和初期探索，扩大终端电气化消费，同时，应加强余热发电和可再生能源开发利用，为电气化发展提供能源支撑，到 2030 年钢铁行业电气化率提升至 14%。钢铁行业中长期电气化发展重点将从能源替代和综合技术逐渐拓展到原料替代技术，数字化智能化技术加速赋能，电气化发展水平持续提升，钢铁行业电气化率到 2050 年提升至 46%，到 2060 年提升至 57%。

钢铁行业电气化发展的电力来源将更加清洁低碳。到 2030 年，钢铁行业余热发电水平达到 56% 左右，可再生能源发电利用达到 5%；到 2050 年，钢铁行业余热发电水平达到 38% 左右，可再生能源发电利用达到 15%；到 2060 年，钢铁行业余热发电水平达到 31% 左右，可再生能源发电利用达到 20%（如图 3-14 所示）。

		2022年	2030年	2050年	2060年
总体发展	产量	10.18亿吨	9.5亿吨	6.5亿吨	6亿吨
	产品	以初级产品为主	高端产品供给能力增强 品种和质量提档升级	高端产品供给能力 持续提升	以高端产品为主
	废钢资源量	2.6亿吨	3.3亿吨	5.5亿吨	5亿吨
	铁矿石进口	对外依存度约75%	对外依存度69%	铁矿石对外依存度2%	铁矿石基本实现自给
	能源消费量	5.6亿吨	4.4亿吨	1.6亿吨	1.1亿吨
	碳排放量 (基于2022年)	18.2亿吨	降低15%	降低85%	降低95%
电气化发展	电力消费量	4749亿kWh	4903亿kWh	5952亿kWh	4936亿kWh
	电气化率	10.4%	14%	46%	57%
	需求侧响应能力	<1%	8%	18%	21%
关键技术	电炉炼钢	9.5%	20%	50%	60%
	氢冶金	<1%	4%	17%	20%
	CO ₂ 炼钢	<1%	1%	3%	5%
	CCUS	<1%	5%	15%	20%
	智能制造及智能化解决方案	关键工序数控化率72.5% 生产设备数字化率53.8%	关键工序数控化率达到 85% 生产设备数字化率达到 60% 3D 岗位机器换人率达到 45%	关键工序数控化率100% 生产设备数字化率达到 80% 3D 岗位机器换人率达到 75%	智能制造系统解决方案得到推广应用
电力供应	余热发电	56%	56%	38%	31%
	可再生能源	<1%	5%	15%	20%
	电网接入	44%	39%	47%	49%

图 3-14 “双碳”目标下钢铁行业电气化发展战略目标及实施策略

4 钢铁行业电气化 发展建议

作为典型的强周期性行业，钢铁行业整体盈利水平与经济周期高度相关。在经济快速发展的时候，钢铁行业营收收入占工业收入的 5~6%，而当前钢铁行业正经历前所未有的结构性变革，终端需求下降，生产成本与产品售价倒挂，企业盈利能力明显不足，对电气化发展认识不足，投资审慎态度，电气化发展进程有待提速。尽管当前钢铁行业电气化发展的路径基本清晰，但在政策引领、技术工艺、资源保障、能源保障、市场机制等方面仍存在一定约束，需要政府、企业和科研机构等多方面的协同合作，未来尚有很长的路要走。为此，提出加快钢铁行业电气化发展的建议：

1、完善钢铁行业电气化发展顶层设计及配套政策

（1）将电气化发展纳入钢铁行业碳达峰碳中和整体规划，结合当前从“能耗双控”转向“碳排放双控”、鼓励大规模设备更新、加快培育新质生产力、推动新型工业化与城镇化互动发展等契机，以及未来实现现代化强国和碳中和目标，明确以降碳为导向的钢铁行业电气化发展短期和中长期目标及路径，制定钢铁行业电气化发展技术路线图和实施计划，指导企业开展电气化发展行动。

（2）根据不同阶段钢铁行业电气化发展重点，完善配套政策，短期内着力支持电炉炼钢、传统工序电气化、智能制造及智能化解决方案、余热发电、可再生能源开发利用等技术推广应用，同时鼓励钢铁行业探索布局氢冶金、CCUS 及 CO₂ 炼钢等颠覆性技术，

把握电气化发展的方向、节奏和时机，逐步淘汰高能耗、高排放产能，先立后破有序推动钢铁行业电气化发展。

（3）坚持标准引领，建立健全钢铁行业电气化发展的技术标准、操作规程、安全规范等相关标准体系。将绿电消费作为评价、认证和标识绿色产品的重要依据和内容，鼓励全社会优先使用绿色能源和采购绿色产品服务，将绿电溢价传导到钢价上，提高钢铁行业电气化发展的技术经济性，提升企业电气化发展的积极性。同时，加快出台支持钢铁行业电气化的政策措施，包括但不限于财政补贴、税收减免、绿色信贷等政策支持工具，减轻企业电气化发展的经济压力。

2、加快钢铁行业电气化发展核心技术的创新研发和推广应用

（1）对电炉钢技术、传统工序电气化、余热发电、可再生能源开发利用等成熟技术，将其纳入转型金融支持目录，完善相关标准和管理要求，加快转型金融产品和服务模式创新，同时结合钢铁行业高能耗、高排放、重资产、投资回收期长等特点，支持有条件、有意愿的金融机构运用中长期甚至超长期的金融工具，为钢铁行业电气化发展相关项目的开发实施提供低成本资金支持，实现产融结合，鼓励以企业为主体加快开展试点示范、产业化应用和迭代升级。

（2）对氢冶金、CCUS及CO₂炼钢、智能制造及智能化解决方案等处于研发和示范阶段的电气化技术，以及其他相关的颠覆性、前瞻性技术，鼓励企业与高校、科研院所共建研发机构，加大研发投入，提升电气化装备性能和安全可靠性，为钢铁行业电气化发展提供技术支撑。搭建服务于绿色技术和绿色资金的对接平台，降低信息不对称问题，鼓励创新金融产品和服务模式，为推动钢铁行业电气化发展的技术研发及应用提供投、贷、债、保联动的金融服务，促进相关科技成果加快落地转化。

（3）鼓励开展钢铁行业电气化发展试点示范，推动形成电气化程度高的标杆型钢铁企业，在具备条件的企业和园区探索“钢-化-建-能”一体化新型智慧生产体系集成示范，通过实践验证技术可行性和经济效益，总结经验，形成可复制、可推广的电气化发展模式，以点带面促进全行业电气化水平提升路径实施。

3、推动钢铁行业优化能源结构和资源结构强化保障

（1）目前我国已经成立中国资源循环集团有限公司，负责废钢等资源的回收利用，鼓励通过政策引导和市场机制，进一步推动建立覆盖面广、方便快捷的废钢回收网络，完善废钢回收加工配送体系建设。建立废钢回收利用企业的“黑白名单制度”，培育和发展废钢市场，加强对废钢资源的规范化管理。鼓励钢铁企业探索创新废钢与新钢的混合使用模式，优化钢铁生产过程的资源结构。

（2）鼓励钢铁行业将余热回收利用、新能源开发利用及绿电应用纳入企业低碳发展总体规划，利用屋顶、空地等空间因地制宜开发可再生能源，自发自用、就近消纳，开发绿色微电网，逐步替代钢铁企业原有的自备电厂，提高企业新能源使用比例，实现多能互补。同时，鼓励企业建立绿电应用管理制度体系，制定绿证绿电交易管理制度、项目绿电管理制度及相关的配套管理办法，开展绿电消费信息披露，强化对绿电应用的管理。

（3）鼓励钢铁企业建立以“绿电+储能”为核心的智慧能源管控系统，推动电气化、数字化、智能化“三化一体”，实现智慧能源管控及源网荷储多向互动，挖掘源侧增量潜力及荷侧可调节响应能力，既能解决新能源发电不确定性对电力系统的影响，充分消纳新能源发电量，同时也有利于充分利用厂区余热资源，提高热电系统的调控能力，促进“煤电+新能源”协同发展，为钢铁行业电气化发展提供更加清洁低碳、安全可靠的电力供应。

（4）鼓励钢铁企业主动参与电力市场交易购买绿电，降低跨省绿电交易门槛，简化企业绿电购买流程，推动企业与绿电供应商签订稳定的中长期购电合同锁定未来电价，降低电价波动风险对企业生产成本的影响。完善市场化机制，推动绿电交易、绿证交易、碳排放权交易有效衔接，为使用绿电的钢铁企业提供更多政策支持和经济激励。

参考文献

- [1] 国家能源局. 2023 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告 [R]. 2024.
- [2] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2023[R]. 2024.
- [3] Carbon Monitor. 全球实时碳数据 [EB/OL] 2024 05.01. <https://carbonmonitor.org/>
- [4] 落基山研究所. 电力需求侧灵活性系列: 工业灵活性潜力及发展现状 [R]. 2023.
- [5] 中国能源研究会. 碳中和目标下我国工业部门低碳发展目标和路径分析 [R]. 2024.
- [6] IEA. World Energy Balances Highlights 2022[R]. 2023.
- [7] 中国电力企业联合会. 中国电气化发展情况及趋势分析 [R]. 2024.
- [8] 宋小文等. 钢铁市场 2022 年回顾与 2023 年展望 [J]. 期货与金融衍生品. 2023(2): 50-60.
- [9] 世界钢铁协会. 世界钢铁统计数据 2023[R]. 2024.
- [10] 中国节能协会冶金工业节能专业委员会. 中国钢铁工业节能低碳发展报告 (2023) [R]. 2023.
- [11] 中国国际冶金装备工业展览会. 全球最大矿业项目将改变中国铁矿石供应格局 [EB/OL]. 2024.02.26. <https://mp.weixin.qq.com/s/vZeRk8ipkiQzeLKvIzOWYg>
- [12] My steel. 我国电炉短流程炼钢发展研究报告 [EB/OL]. 2023.09.23. <https://finance.sina.com.cn/money/future/indu/2023-09-13/doc-imzmpmzs4383915.shtml>
- [13] 冶金工业经济发展研究中心. 电炉短流程区域布局与发展要素适配性分析 [R]. 2024.
- [14] 证券之星. 宝钢股份: 目前国内钢铁行业 CR10 在 43% 左右, 与国际同行相比存在提升空间 [EB/OL]. 2023.11.21. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1783139071992283081&wfr=spider&for=pc>
- [15] 能源基金会. 中国碳中和综合报告 2022: 深度电气化助力碳中和 [R]. 2023.
- [16] 落基山研究所. 电力需求侧灵活性系列: 钢铁行业灵活性潜力概述 [R]. 2023.

作者与鸣谢

作者

中能世通（北京）投资咨询服务中心：焦健，管赵如鑫，王芳，刘蕾，米爽

联系方式

管赵如鑫 guanzrx@163.com

鸣谢

特别感谢以下专家对报告撰写提供的建议：

自然资源保护协会：王万兴，刘明明，周晓航

中国能源研究会能源经济专委会：戴彦德，桑晶

全国能源基础与管理标准化技术委员会：白荣春

能源基金会（美国）北京办事处工业项目：何平

国家节能中心：高红

国家发改委能源研究所：周伏秋，熊华文

中国钢铁工业协会：张永杰

北京科技大学：朱荣

冶金工业经济发展研究中心：陈瑜

冶金工业规划研究院：戴章艳

中国电力企业联合会：刘志强，董博，赵名锐

北京首钢国际工程技术有限公司：罗斌

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构以及项目支持方的观点。

