生态环境部环境规划院
Chinese Academy of Environmental Planning
清華大學 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University
ENERGY FOUNDATION
能源基金会

中国碳中和目标下的工业低碳技术展望

Outlook on Industrial Low-carbon Technologies toward China's Carbon Neutrality Goal

生态环境部环境规划院 Chinese Academy of Environmental Planning

清华大学碳中和研究院 Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University

ENERGY FOUNDATION 能源基金会

中国碳中和目标下的工业低碳技术展望

Outlook on Industrial Low-carbon Technologies toward China's Carbon Neutrality Goal

2025年5月

摘 要

气候变化是人类面临的最严峻全球性挑战。作为负责任的大国，中国于 2020 年正式提出“双碳”战略目标，是全球从碳达峰到碳中和时间最短、减碳规模最大、降幅度速度最快的国家。工业部门作为国民经济中最重要的物质生产部门，亦是中国能源消耗和 CO_2 排放最集中的领域，其低碳转型对于实现“双碳”目标具有决定性意义。碳中和目标驱动全球产业链和生产模式的重大重构，工业碳中和技术的系统研究与战略部署，不仅关系中国工业领域脱碳进程，更关乎中国产业竞争力的重塑。唯有加快布局颠覆性与引领性的低碳技术，才能在新一轮产业变革中占据战略主动。

工业部门在生产工艺与排放结构上的高度复杂性，使其碳减排技术的发展面临巨大挑战，因此全球碳中和实现路径上的难减排领域往往都在工业部门等。钢铁、水泥、石化、化工等重点高碳工业行业减排路径差异显著，短流程工艺、氢冶金、电气化、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）等技术路线亟需系统性突破与统筹推进。推动庞大工业体系实现深度脱碳，必须在颠覆传统发展模式的同时，平衡技术演进与经济可行性，以“技术 - 路径 - 政策”为分析框架，建立关键技术的发展路线图，形成可落地的碳中和技术解决方案，助力中国以碳中和技术创新打造工业竞争新优势，加快培育新质生产力。

本报告聚焦中国工业碳中和的战略需求，联合钢铁、建材、有色、石化、煤化工、数字化等重点行业协会和研究机构，耦合自上而下的宏观评估模型与自下而上的技术优化模型（TIMES+MESSAGE），系统梳理工业碳中和转型关键技术清单，开展多轮次技术演化模拟与情景优化，综合分析不同技术的工艺特征、技术成本、应用场景与减排潜力，提出重点行业碳中和技术图谱，基于技术成熟度和成本学习曲线形成分技术应用的时间表与发展路线图，为工业低碳转型战略规划、重大工程部署和政策制定等提供决策依据。

本报告提出中国工业领域碳中和技术发展“三阶段”路径：**（1）低碳流程技术大规模应用期（2025—2035 年）：**需求侧结构调整和短流程技术（如废钢 - 电炉、再生铝）替代传统高碳路径，推动工业领域碳排放率先整体达峰，为电力、交通等部门的低碳转型和终端需求增长释放排放空间。能效提升和短流程技术发展是该阶段的核心减排手段，将贡献约 55% 的工业碳中和技术减排量。**（2）工艺颠覆性技术爆发应用期（2036—2050 年）：**该阶段是打破高碳路径依赖、推动工业体系深度重构的关键期。氢能技术、电气化耦合清洁电力替代以及 CCUS 等技术规模化部署，持续扩大在重点行业中的应用覆盖。**（3）碳移除托底技术深度应用期（2051—2060 年）：**电力、交通、建筑等部门已经基本实现净零排放，为工业领域突破关键技术瓶颈争取时间。工业部门将依托 CCUS 等技术对难减排环节进行兜底，稳步推进全行业深度碳中和。通过碳中和技术创新、供给需求侧调控和新型电力系统建设等，中国工业部门碳排放到 2060 年将减少至 4.5 亿吨，较 2025 年下降 95% 左右。2025—2060 年中国工业领域碳中和技术累计投资额将达到 42 万亿元左右。

分行业脱碳技术路径呈现显著差异化特征。钢铁行业作为当前与远期减排潜力双高领域，技术路径呈现明显阶段性特征：2035 年前将以高炉 - 转炉系统节能改造和废钢 - 电炉短流程发展为主；2035—2040 年

间，氢基直接还原炼铁有望在成本突破后进入大规模应用阶段，成为深度脱碳的核心路径；2050 年后，钢铁 CCUS 将成为实现碳中和的关键托底技术。水泥行业在 2030—2040 年进入技术结构转型期，大批旧窑系统退出，固废、生物质燃料等替代技术全面推广，绿氢、电力煅烧工艺逐步成熟；2040 年以后燃料替代率持续提升，氢能与电力煅烧工艺进入加速应用阶段。铝冶炼行业在 2025—2040 年间将以废铝再生技术为核心减排措施，惰性阳极与氯化铝电解等技术将在 2040 年后加速布局进入规模化商业应用阶段。石化和煤化工行业短期内以高效换热器等能效提升技术为主，2035 年后将依托绿氢、绿电和 CCUS 等多种技术协同应用，实现能源与工艺的系统性重构，形成复合型减排路径。

氢能替代、电气化耦合清洁电力替代、原料替代与废物回收、CCUS 四类通用性技术构成工业脱碳的核心支柱，推动低碳路径从分散的单点突破迈向系统集成与协同优化。在氢能利用领域，可再生能源发电成本的持续下降与绿氢制备技术的加速突破相互强化，推动氢能成本持续下行，预计 2035 年后，绿氢全产业链实现突破并规模化应用，五大工业行业氢能总需求量将达到 0.2 亿吨，到 2060 年，工业氢能总需求量将达到 0.58 亿吨。电气化与清洁电力替代技术经历由重点工艺环节渗透向全流程覆盖的演进路径，2035 年前工业部门以关键工艺的电力替代为主，2050 年前后实现系统集成与广泛部署。2025—2060 年，在工业需求侧产量持续走低的情况下，工业行业的用电量仍快速上升，2060 年工业部门五大行业的用电量将达到 3.8 万亿千瓦时，相较于 2025 年增长近 80%。原料替代与废物回收技术在 2035 年前将完成从政策驱动向市场驱动的商业化闭环转变，预计 2035 年废钢、水泥替代原料以及废铝的再利用量分别达到 3.3 亿吨、1.9 亿吨和 1640 万吨，2035 年后持续在工业部门的减碳过程中发挥关键作用。CCUS 作为应对难减排领域的重要技术支撑，2040 年后将陆续实现全流程工业化，2060 年减排量占工业总减排的比重提升至 24%，为实现工业碳中和提供关键托底保障。

为加速中国工业碳中和技术部署，确保在关键窗口期大规模商业化应用，有力支撑碳中和目标实施和产业高质量发展，提出如下政策建议：（1）加快规划部署工业领域碳中和关键技术一揽子重大工程。重点针对钢铁、建材、有色、石化、化工等重点工业领域减排技术成本高、示范效应不足、商业化路径不清等突出瓶颈，实施金属材料回收、工业炉窑电气化改造、原料替代及改造等一批战略性强、示范效果好、具有带动放大效应的重大工程。通过重大工程刺激技术创新，驱动成本突破临界点，助力关键技术市场化应用。（2）强化碳市场和碳金融对工业碳中和技术的激励作用。加快碳市场扩大行业覆盖范围，到 2027 年基本覆盖工业领域主要排放行业。在钢铁、水泥等行业率先开展碳排放总量控制，优化配额分配机制，推行并逐步提高有偿分配比例，利用有偿分配收入等建立专项基金用于支持氢能利用、电气化等关键碳中和技术发展，推动减排责任与技术创新良性互动。（3）设立科技专项加快碳中和共性技术的研发突破与示范推广。将氢能利用、电气化、CCUS、原料替代等颠覆性技术纳入国家重大科技专项或重点研发计划，前瞻性布局核心技术攻关与示范，推动关键环节率先突破成本瓶颈，实现环境效益与经济效率的同步提升。（4）构建有利于碳中和技术发展的财税政策支持体系。在国家层面，建议将短流程炼钢、绿氢炼化、原料替代等相关工程基础较好、可行性较高的重大工程，纳入“两重”“两新”政策支持目录，通过超长期特别国债予以支持。在地方层面，各省市结合区域产业特点、资源禀赋等，制定差异化的产业政策。综合运用财政补贴、税收减免、绿色信贷、优惠电价等政策工具，构建激活市场和社会力量的多元投入格局。

本项目由能源基金会资助支持。

关于作者

报告总召集人：

严　刚　生态环境部环境规划院

章节召集人：

李　冰　冶金工业规划研究院
何　捷　中国建筑材料科学研究总院有限公司
邵朱强　中国有色金属工业技术开发交流中心有限公司
李永亮　中国化工节能技术协会
吴立新　煤炭工业规划设计研究院有限公司
齐曙光　中国信息通信研究院

报告作者：

蔡博峰　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
朱淑瑛　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
严　妍　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
陈潇君　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
阮梓纹　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
雷　宇　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
张泽宸　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
汪旭颖　生态环境部环境规划院大气环境规划研究所
贺晋瑜　生态环境部环境规划院大气环境规划研究所
郭　静　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
马　倩　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
张　立　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
吴赟龙　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
董金池　生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心
刘　洋　清华大学地球系统科学系
蔡慈澜　清洁空气政策伙伴关系秘书处
张利娜　冶金工业规划研究院
员　晓　冶金工业规划研究院
崔敬轩　中国建筑材料科学研究总院有限公司
聂　卿　中国建筑材料科学研究总院有限公司
谢　刚　中国有色金属工业技术开发交流中心有限公司
李　淼　中国石油和化学工业联合会
翁　慧　中国石油和化学工业联合会
王紫唯　中国化工节能技术协会
贾奕宸　中国化工节能技术协会
郝成亮　煤炭工业规划设计研究院有限公司
赵路正　煤炭工业规划设计研究院有限公司
曲　洋　煤炭工业规划设计研究院有限公司
魏　涛　煤炭工业规划设计研究院有限公司
李　尚　中国信息通信研究院
王梦迪　中国信息通信研究院
叶行方　中国信息通信研究院
吴亚盼　中国信息通信研究院

顾问组：

王金南　中国工程院院士、生态环境部环境规划院名誉院长
贺克斌　中国工程院院士、清华大学碳中和研究院院长
邹　骥　能源基金会首席执行官兼中国区总裁

专家咨询组：

孙丽丽　中国工程院院士、中石化炼化工程集团董事长
李　阳　中国工程院院士、中国石化股份公司
张　强　清华大学地球系统科学系副主任、教授

傅　莎　能源基金会战略规划主任
韩　炜　能源基金会工业项目主任
何　平　能源基金会项目质量管理高级顾问
白荣春　原全国能源基础与管理标准化技术委员会顾问、国家能源专家委员会副主任
戴彦德　原国家发展和改革委员会能源研究所所长
张称意　原国家气候中心研究员
张建良　北京科技大学二级教授、中国金属学会炼铁分会主任委员
孔祥忠　中国水泥协会执行会长
顾宗勤　中国氮肥工业协会理事长
魏　然　中国信息通信研究院总工程师
戴瀚程　北京大学研究员
李文军　化工行业生产力促进中心研究员
王世兴　中国铝业公司正高级工程师
李玉昇　中国移动通信集团设计院信息能源所副所长
张　昕　国家应对气候变化战略研究和国际合作中心总经济师
刘清芝　中环联合认证中心副总经理、正高级工程师
戴永立　生态环境部环境工程评估中心研究员
崔素萍　北京工业大学教授
杨天剑　北京邮电大学教授
陈文会　北京化工大学副教授

免责声明

若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表生态环境部环境规划院和能源基金会的观点。生态环境部环境规划院和能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。

凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为生态环境部环境规划院和能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

CONTENTS
目录

第 1 章　研究背景

1.1　“双碳”目标对工业低碳转型要求 4
1.2　工业碳中和技术的重要意义 5
1.3　中国工业碳中和面临的技术挑战 7

第 2 章　钢铁行业碳中和技术展望

2.1　行业现状与趋势 10
2.2　碳中和关键技术 12
2.2.1　高炉转炉节能和能效提升技术 12
2.2.2　废钢 - 电炉技术 14
2.2.3　高炉喷吹氢气技术 16
2.2.4　CCUS 技术 17
2.2.5　氢冶金技术 19
2.3　技术展望和成本演变 21
2.3.1　技术成熟度展望 21
2.3.2　技术成本演变 21
2.3.3　技术普及度展望 22
2.3.4　技术对比分析 23
2.4　钢铁行业碳中和技术路线图 24
2.5　碳中和技术应用推广政策建议 25

第 3 章　水泥行业碳中和技术展望

3.1　行业现状与趋势 28
3.2　碳中和关键技术 30
3.2.1　以窑系统改造为主的能效提升技术 31
3.2.2　以工业废渣为主的原料替代技术 32
3.2.3　以固体废物为主的燃料替代技术 33
3.2.4　绿氢煅烧水泥熟料技术 34
3.2.5　纯电 / 电辅助煅烧水泥技术 35
3.2.6　水泥回转窑烟气 CCUS 技术 35
3.2.7　水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术 37
3.3　技术展望和成本演变 38
3.3.1　技术成熟度展望 38

3.3.2 技术成本演变 39
3.3.3 技术普及度展望 40
3.3.4 技术对比分析 41
3.4 水泥行业碳中和技术路线图 42
3.5 碳中和技术应用推广政策建议 43

第 4 章 有色行业碳中和技术展望

4.1 行业现状与趋势 46
4.2 碳中和关键技术 48
4.2.1 以电解槽改造为主的能效提升技术 48
4.2.2 惰性阳极技术 50
4.2.3 氯化铝电解法制铝技术 50
4.2.4 废铝再生技术 51
4.3 技术展望和成本演变 53
4.3.1 技术成熟度展望 53
4.3.2 技术成本演变 53
4.3.3 技术普及度展望 54
4.3.4 技术对比分析 55
4.4 铝冶炼行业碳中和技术路线图 56
4.5 碳中和技术应用推广政策建议 57

第 5 章 石化行业碳中和技术展望

5.1 行业现状与趋势 60
5.2 碳中和关键技术 63
5.2.1 以高效换热器为主的能效提升技术 63
5.2.2 乙烯电裂解炉技术 64
5.2.3 绿氢制备化学品技术 65
5.2.4 电气化改造技术 66
5.2.5 原油直接制化学品技术 67
5.2.6 CCUS 技术 67
5.3 技术展望和成本演变 70
5.3.1 技术成熟度展望 70
5.3.2 技术成本演变 71
5.3.3 技术普及度展望 72
5.3.4 技术对比分析 73
5.4 石化行业碳中和技术路线图 74
5.5 碳中和技术应用推广政策建议 75

第 6 章 煤化工行业碳中和技术展望

6.1 行业现状与趋势 78
6.2 碳中和关键技术 81
6.2.1 以优化工艺流程为主的能效提升技术 81

6.2.2 绿氢耦合技术 82
6.2.3 电机和电驱动技术 83
6.2.4 CCUS 技术 84
6.3 技术展望和成本演变 86
6.3.1 技术成熟度展望 86
6.3.2 技术成本演变 87
6.3.3 技术普及度展望 88
6.3.4 技术对比分析 89
6.4 煤化工行业碳中和路线图 90
6.5 碳中和技术应用推广政策建议 91

第 7 章 工业数字化碳中和技术展望

7.1 工业数字技术概述 94
7.1.1 工业数字技术的发展 94
7.1.2 工业数字技术推动绿色低碳发展的作用 95
7.1.3 工业数字技术发展的挑战与瓶颈 96
7.2 数字技术在重点行业的应用场景 97
7.2.1 钢铁行业 97
7.2.2 建材行业 98
7.2.3 有色行业 99
7.2.4 石化与煤化工行业 100
7.3 数字技术赋能工业领域趋势预测 102
7.4 数字技术赋能工业碳中和政策建议 103

第 8 章 工业碳中和技术路线图

8.1 工业碳中和技术应用趋势 106
8.1.1 2025—2035 年：低碳流程技术大规模应用期 106
8.1.2 2035—2050 年：工艺颠覆性技术爆发应用期 107
8.1.3 2050—2060 年：碳移除托底技术深度应用期 107
8.2 工业碳中和共性技术 109
8.2.1 电气化与清洁电力替代 110
8.2.2 氢能替代 111
8.2.3 原料替代与废物回收技术 112
8.2.4 CCUS 技术 112
8.3 工业碳中和技术应用投资需求 114
8.4 工业碳中和技术应用推广政策建议 115

参考文献

附录：研究方法和技术路线

第 1 章　研究背景

近年来，中国经济持续高速发展，综合国力显著提升，工业领域作为国家经济增长的重要支柱，实现了规模和产值的快速扩张。然而，工业化进程在带动经济发展的同时，也导致碳排放水平大幅上升，对生态环境和可持续发展构成严峻挑战。在全球应对气候变化、加快低碳转型的背景下，工业部门碳排放问题已成为亟需解决的关键课题。本章将系统梳理我国工业碳排放的现状与趋势，分析排放形成的结构性原因与典型特征。探讨实现工业碳中和对推动经济高质量发展、优化能源结构及参与全球气候治理的深远意义，识别当前面临的技术、经济和结构调整等多方面挑战。上述分析将为后续章节的技术路径、政策设计与实施策略研究提供基础支撑。

01 INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

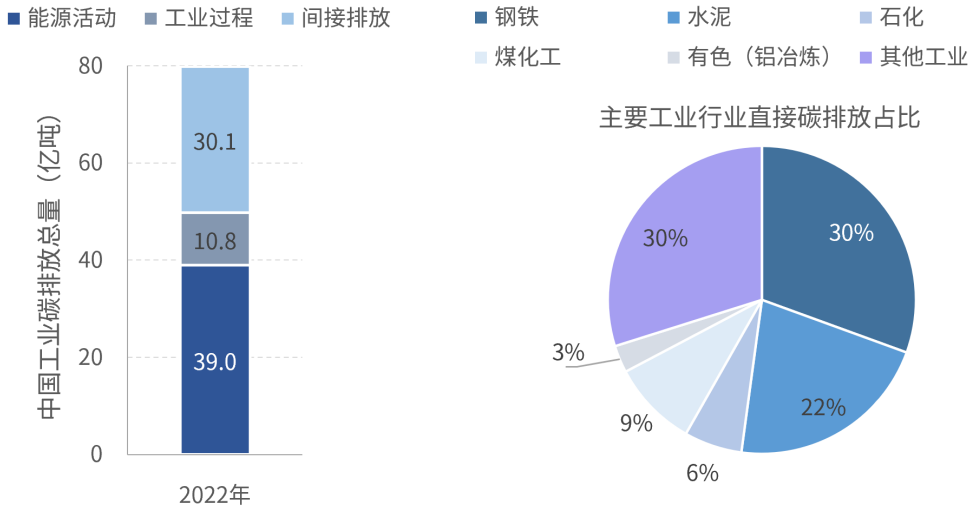
1.1 “双碳”目标对工业低碳转型要求

2015 年《巴黎协定》确立了将全球平均气温升幅控制在工业化前水平 2℃ 以内，并力争实现 1.5℃ 以内的目标。作为世界上最大的工业国，中国工业领域碳排放量占全球工业排放的 44%，中国工业减排在全球碳减排中作用显著。

中国“双碳”目标的实现高度依赖于工业领域的低碳转型。2022 年，中国工业部门二氧化碳排放总量达到 79.8 亿吨，其中由能源活动和工业过程产生的直接排放 49.7 亿吨，由工业生产消耗的电力和热力产生的间接排放 30.1 亿吨。工业部门排放量占全国总排放量的 68.5%，这凸显了工业减排对中国实现“双碳”目标的重

图 1.1　2022 年中国工业领域碳排放组成

注：工业碳排放包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。



然而，中国工业体系的庞大和复杂性为减碳目标的实现带来了前所未有的挑战。一方面，气候变化问题的日益严峻，作为全球最大的碳排放国，相比发达国家，中国实现“双碳”目标的时间窗口更为紧迫，要求在 2030 年前实现碳达峰并在 2060 年前实现碳中和，这意味着工业部门的减排幅度需达到 90% 以上。另一方面，随着新型工业化和城镇化的深入推进，工业领域的碳排放总量在短期内仍然难以显著下降，工业固有的生产结构和工艺流程的高度复杂性也使得工业部门被普遍认为是“难减排部门”，这一挑战的严峻性不仅体现在减排幅度上，更体现在其对工业技术升级的巨大需求上，需要以更为科学、系统的方法，推动全方位、深层次的变革。

在此背景下，应积极构建以高效、绿色、循环、低碳为特征的现代工业体系，这不仅是应对气候变化、履行大国责任、实现“双碳”目标的关键举措，也是提升中国工业全球竞争力、实现可持续发展的必然选择。作为全球制造业中心，中国拥有最完整的工业体系，在国际产业链中扮演着关键角色，更应充分发挥自身优势，积极推动工业低碳转型，引领全球绿色发展潮流。

1.2 工业碳中和技术的重要意义

工业低碳转型是一项复杂的系统工程，需要以技术创新作为核心驱动力。当前，全球产业链正经历深刻变革，各国都将科技创新视为竞争优势的关键来源，积极推动颠覆性技术创新，以加速碳中和进程。欧盟、美国等发达经济体相继出台了雄心勃勃的政策，旨在加大清洁能源、氢能利用、碳捕集与封存等关键技术领域的投资，以期在工业碳中和竞争中占据制高点。

2023 年 3 月，欧盟委员会出台《净零工业法案》，将电池和储能、热泵和地热能、碳捕集和封存等列为战略性净零技术，并提出到 2030 年欧盟的战略性净零技术本土制造能力将接近或达到年度部署需求的 40%。德国在碳中和技术研究方面取得了显著进展，2021 年德国资助 62 个大型氢能项目，贯穿整个氢能生产价值链，总投资达 330 亿欧元。2023 年 6 月，德国政府启动一项总额达 500 亿欧元的工业脱碳补贴计划，推动德国工业企业实现碳中和转型目标。美国在工业低碳技术创新方面推出了多项联邦和州级政策及激励措施，旨在推动工业部门的技术转型。2022 年，美国能源部发布了《工业脱碳路线图》，明确了工业部门脱碳的技术路径和优先领域，强调了能源效率提升、工艺电气化、低碳燃料替代以及 CCUS 等关键技术的研发与应用。同时，多个州推出能效升级激励计划，鼓励工业设施能源系统优化，加州的《全球变暖解决方案法案》设定了到 2045 年实现碳中和的目标，并配套制定了多项助力实现目标的措施。

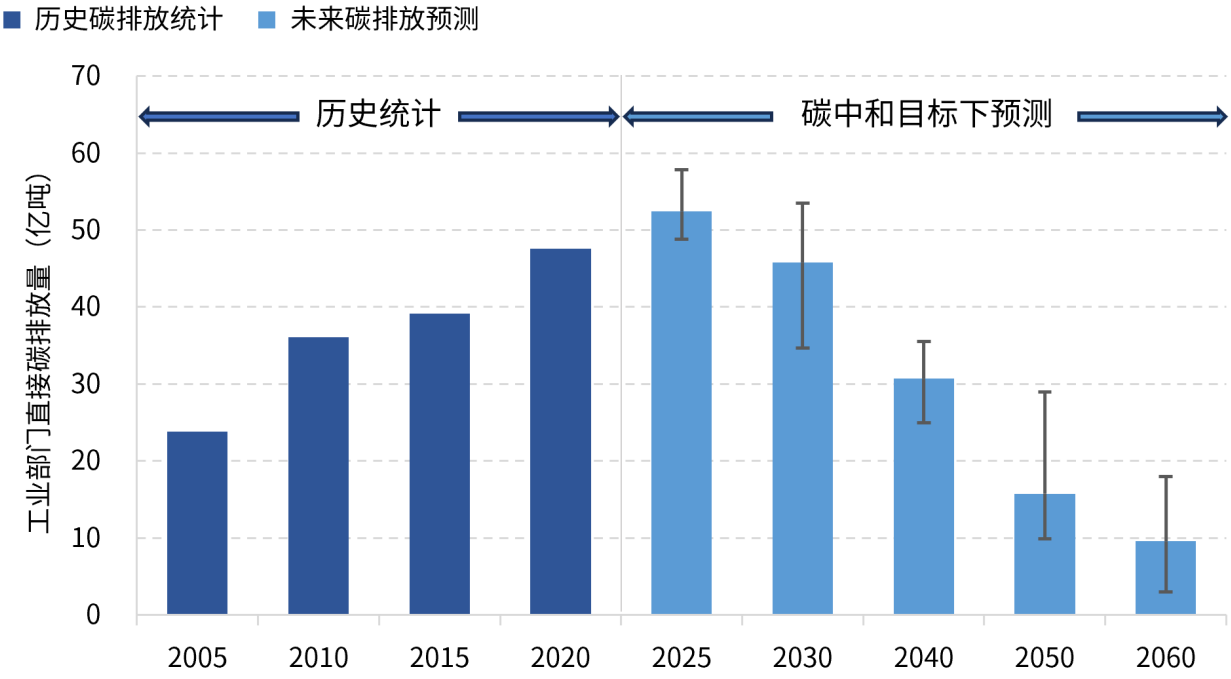
中国政府高度重视工业领域低碳转型，通过构建“1+N”政策体系，推动低碳技术创新与应用，助力实现碳中和目标。《工业领域碳达峰实施方案》提出，到 2025 年，规模以上工业单位增加值能耗比 2020 年下降 13.5%，并积极推行绿色制造，打造绿色低碳工厂和工业园区，促进生产模式绿色转型。2022 年发布的《工业能效提升行动计划》旨在通过提升能源效率，推动重点行业绿色低碳发展，该计划强调到 2025 年，工业领域电能占终端能源消费比重达到 30%。然而，鉴于中国工业体系庞大且复杂，推动低碳转型仍面临诸多挑战，需要进一步强化基础研究和前沿技术布局，制定科技支撑“双碳”行动方案，持续推进工业领域的低碳工艺革新和数字化转型，以实现可持续的低碳发展。

大量的研究分析了在碳中和目标下中国未来工业部门低碳转型发展路径及未来碳排放路径（图 1.2）。各方研究显示，中国整体的工业部门碳排放在 2025 年左右实现达峰，预计到 2060 年工业部门 CO_2 总排放降低至 3~18 亿吨。中国工程院《我国碳达峰碳中和战略及路径研究》报告显示，在低排放情景下，全国 CO_2 总排放量有望于 2027 年左右达峰。其中，工业领域的 CO_2 排放预计在 2025 年左右达峰，达峰时的直接排放约为 52.4 亿吨左右。工业部门达峰后，“十五五”期间，各行业将努力实现削峰；“十五五”以后，强化工业碳中和能力，进行全面的结构性改革和技术升级。

这些研究表明，为实现“双碳”目标，中国工业行业将重点推进包括能效提升、数字化、终端电气化改造、CCUS 等关键技术发展。然而，目前仍缺少对碳中和目标下中国工业各子部门转型技术路线的全方位研究，特别是缺少对面向碳中和的共性突破技术分析和发展蓝图描绘，需要对工艺变革的技术原理和发展潜力进行深入分析。在这一背景下，本报告针对碳中和目标下工业的发展需求，采取自下而上的方法，紧密围绕钢铁、水泥、有色、石化、煤化工等关键行业的独特技术特征，全面对其能耗、减排潜力、发展趋势、成本动态等相关参数进行总结分析和系统展望，以期最大限度地支持行业碳中和技术的发展。

图 1.2　中国“双碳”目标下工业部门的直接碳排放量

注：该图的碳排放数据包括直接排放中的能源消费与工业过程排放情况。数据来源：中国高空间分辨率（1km）排放网格数据库（China High Resolution Emission Gridded Database，CHRED）、中国碳情速报技术体系 (CCW)、CEADs《中国分部门核算碳排放清单 1997-2021》、中国工程院《我国碳达峰碳中和战略及路径研究》报告、《中国长期低碳发展战略与转型路径》综合报告、《面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择》报告、IEA《中国能源体系碳中和路线图》、《Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework》和《中国碳中和综合报告 2022- 深度电气化助力碳中和》。



1.3 中国工业碳中和面临的技术挑战

中国工业碳中和技术发展与大规模商业化应用面临来自技术成熟度、高品质清洁电力支撑、技术系统集成、政策激励和经济成本等多方面挑战，主要表现如下：

（1）中国工业行业的低碳、零碳、负碳技术发展尚不成熟，各类技术系统集成难，环节构成复杂，亟需系统性的技术创新。低碳技术往往涉及多学科交叉和前沿科技的突破，如碳捕集、利用与封存技术、高效能源转换与储存、新型材料研发等，低碳技术研发难度较大。中国工业行业的许多关键低碳技术在应用上尚未成熟，仍处于实验室阶段或小规模示范阶段，难以商业化应用于工业生产中。同时，工业行业的技术发展存在一定的锁定效应，一些行业已经形成了对高碳技术的路径依赖，新型低碳技术的推广和应用面临较大阻力。

（2）中国以煤炭为主导的能源结构显著影响了工业部门的排放情况，使得工业领域的脱碳进程高度依赖于能源结构的绿色转型。煤炭作为工业生产能源主体导致了大量的 CO_2 排放。这需要未来加速非化石能源的研发与创新，如太阳能、风能、绿氢等清洁能源的高效利用，以逐步替代煤炭等传统化石能源。随着工业电气化步伐的加速推进，电力系统正面临前所未有的挑战，亟需实现技术创新与清洁化转型，以匹配工业行业不断攀升的电力需求、确保高品质的供电服务，并助力减碳目标的达成。此外，需通过市场机制促进资源优化配置，激励更多社会资本投入清洁能源领域，形成电力、工业行业的良性循环。

（3）工业行业低碳发展的经济成本问题不仅是转型过程中的重大挑战，也是一项影响深远且不可忽视的关键制约因素。低碳技术的研发、推广和应用需要大量的资金投入，高耗能工业企业的节能减排技术改造同样需要巨大的成本支持。此外，低碳发展还可能导致企业短期内生产成本上升，影响企业的经济效益和竞争力。因此，如何在保障经济发展的同时，合理控制低碳发展的成本，是政府和企业需要共同面对的问题。政府可以通过制定税收优惠、财政补贴等政策措施，降低企业的低碳发展成本；企业则需要加强技术创新和管理优化，提高生产效率和资源利用率，降低生产成本。同时，还需要加强国际合作和交流，共同应对低碳发展的成本问题。

第 2 章　钢铁行业碳中和技术展望

钢铁行业作为中国工业最大的温室气体排放部门，其脱碳的时间表和路线图对于工业领域实现碳中和目标至关重要。本报告核算碳排放的边界包含钢铁生产过程中的直接排放和间接排放，按照国民经济行业分类对应产品代码包括炼铁（3110）、炼钢（3120）、钢压延加工（3130）。钢铁行业传统常规生产工艺为高炉 - 转炉长流程，碳中和技术包括废钢 - 电炉技术、高炉喷吹氢气技术、CCUS 技术以及氢冶金技术等。面向钢铁行业碳中和目标，加快完善废钢回收体系、推动废钢 - 电炉技术成本降低是钢铁行业实现碳排放快速下降的重要途径；强化氢冶金、CCUS 关键技术的研发与应用，是钢铁行业实现深度脱碳的主导力量。

INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

02

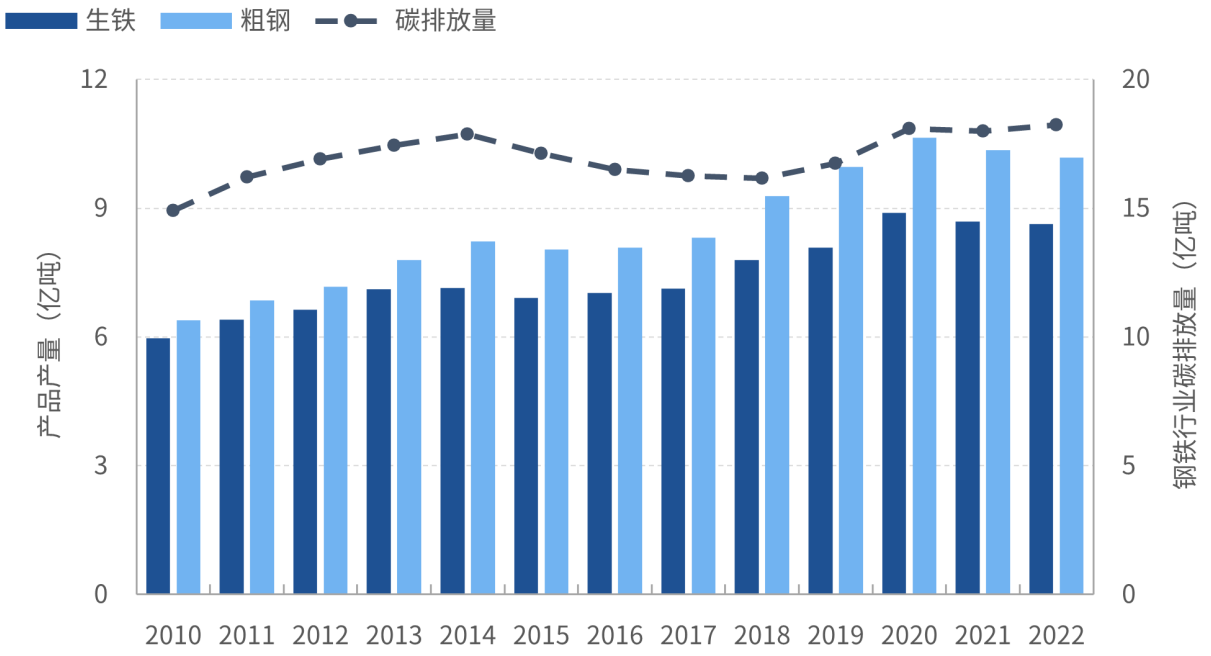
2.1 行业现状与趋势

从 2000 年开始，中国钢铁行业进入加速发展阶段，2014—2017 年，受供给侧结构性改革、价格下行的影响，粗钢产量下降，2018 年后，钢铁行业市场环境改善、优势产能充分发挥，粗钢产量回弹。2020 年后，钢铁行业产量增速放缓、绿色转型加快，行业在布局优化、产品升级、绿色环保、智能制造、联合重组等方面取得全面进步，呈现高质量发展态势。2022 年中国粗钢产量 10.18 亿吨，钢材产量 13.4 亿吨，2024 年中国粗钢产量 10.05 亿吨，占全球总产量的 55%。

钢铁行业是中国工业行业最大的 CO_2 排放源。从 2010 至 2022 年期间，中国钢铁行业 CO_2 排放维持在 14.9~18.2 亿吨之间，2022 年钢铁行业碳排放 18.2 亿吨（图 2.1）。钢铁生产对化石能源的依赖较大，属于较难减排的重工业部门，能源活动带来的直接排放占据了钢铁行业总 CO_2 排放的 78% 左右，工业过程排放占比为 4% 左右，因电力、热力消耗带来的间接排放占比为 18% 左右。

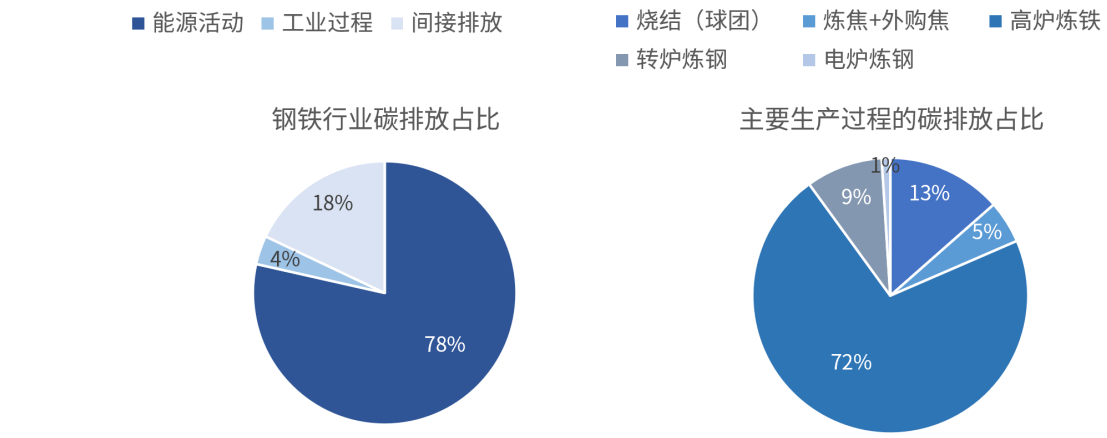
图 2.1 2010—2022 年中国钢铁行业主要产品产量和碳排放情况

注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。



钢铁行业传统的长流程工艺由烧结（球团）、焦化、高炉炼铁和转炉炼钢等环节构成，其中高炉炼铁和烧结工序是碳排放的主要来源。围绕这两个环节开展减排，是推动钢铁行业实现低碳转型的关键所在。

图 2.2 2022 年钢铁行业主要生产过程碳排放示意图

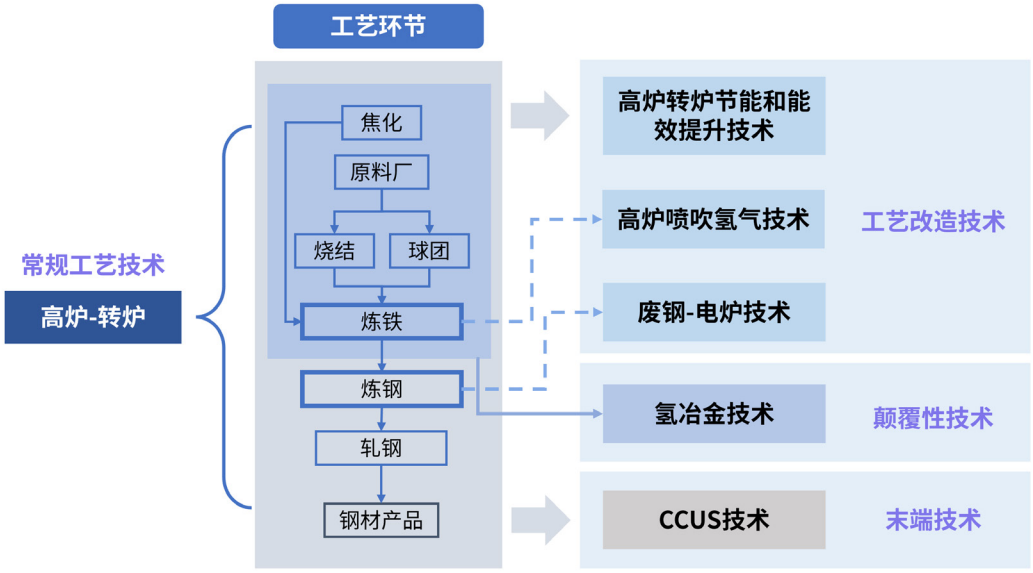


未来，中国粗钢需求将主要受宏观经济发展水平以及建筑、机械、汽车等主要下游用钢行业运行态势的共同影响，同时也受到国家宏观调控和产业政策的引导。从行业趋势来看，中远期建筑行业将持续回落，机械行业的投资驱动效应趋弱，整体消费需求呈逐步下降态势。当前中国千人汽车保有量已接近全球平均水平，随着城镇化深入、居民收入提升以及交通基础设施完善，汽车市场仍具一定增长空间。总体来看，中国粗钢需求将进入平台期并逐步回落。“十五五”期间粗钢产量仍将维持高位运行，至 2060 年预计将下降至 7 亿吨以下，并趋于稳定。

2.2 碳中和关键技术

在碳中和目标之下，中国钢铁行业将使用高炉转炉节能和能效提升技术、废钢 - 电炉炼钢技术、高炉喷吹氢气技术、氢冶金技术和 CCUS 技术实现持续降碳。其中，高炉 - 转炉冶炼工艺是钢铁行业规模化生产的常规工艺技术。在高炉 - 转炉工艺的基础上，高炉转炉节能和能效提升技术通过先进技术和工艺的集成应用实现全过程能效提升，高炉喷吹氢气技术将氢气作为还原剂注入高炉内，替代焦粉等还原剂实现进一步减排。CCUS 技术通过与高炉转炉技术结合，能够捕集末端排放的二氧化碳进行利用或者封存，从而实现零碳排放。废钢 - 电炉技术摒弃了高炉炼铁环节，以废钢为主要原料依赖电能进行熔炼，不仅减少了还原剂碳的排放，同时减少了化学反应能量消耗，可进一步大幅降低碳排放。氢冶金技术以氢气替代传统碳作为还原剂，是钢铁行业的颠覆性技术，具有显著的低碳优势。

图 2.3 钢铁行业碳中和技术体系



2.2.1 高炉转炉节能和能效提升技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

高炉转炉节能和能效提升技术是通过深度节能技术应用与装备升级改造，优化生产流程，从而实现能源精细化管控、提高能源利用效率的技术。钢铁行业正在广泛开展高炉转炉节能和能效提升技术，以实现节能降碳和绿色低碳发展的目标。

① 铁 - 钢 - 轧界面节能技术

铁 - 钢 - 轧界面铁水智能调度系统通过与企业已有信息化系统互联互通，自动采集铁水调度相关生产数据、设备运行数据和其他重要数据，应用 RFID 技术、GPS 技术及 3D 仿真建模等智能化手段，实现机车、铁水罐准确定位跟踪、铁水信息的智能

识别，根据企业实际需求开发集监控预警、调度指令、生产实绩、生产计划、数据分析、历史信息、基础配置等功能的智能管理系统，能够将炼铁 - 炼钢工序紧密衔接，及时预判铁钢界面铁水调运，实现对铁水运输过程的规范化、精细化、智能化管理。通过铁钢轧界面铁水智能调度系统，能够使铁水温降减少 38%，加热炉能耗降低 30% 以上。

② 薄带铸轧一体化技术

薄带铸轧一体化技术是一种将铸造和轧制工艺结合的钢铁生产技术，该技术采用一对相对旋转的铸辊作为结晶器，使液态金属在极短的时间内凝固并热成型，直接成为金属薄带，省去了传统钢材生产中的连铸、粗轧、热连轧及相关的加热、切头等一系列常规工序，真正实现了“一火成材”，大幅度地缩短了钢铁材料的生产工艺流程，二氧化碳排放量仅为传统热连轧工艺的约 20%~25%，此外，薄带铸轧工艺能够降低生产成本，吨钢成本可降低约 100 元，薄带铸轧技术在全球范围内得到了快速发展，在中国尚未全面市场化，未来应用潜力较大。

③ 余热回收技术

钢铁生产工序繁琐，存在复杂的能量消耗、转换、再生以及输送过程，传统长流程炼钢工艺中仅有 30% ～ 50% 的能量得到有效利用，剩余大量能量则会转化成二次能源，包括副产煤气、余热等，若无法有效回收利用，将造成巨大的能源浪费。钢铁行业的余热资源温度范围较大，按温度品位可划分为高温余热（＞ 500℃）、中温余热（150~500℃）和低温余热（＜ 150℃），其中高温余热占比最高，占全部余热的约 40%。现按品位分级统计钢铁企业余热资源如表 2.1。

表 2.1　钢铁企业余热资源统计

序号	品位	余热资源	特点	回收率	余热占比
1	高温余热	高温钢材、高温焦炭、高温烧结料、加热炉烟气、电炉烟气、转炉烟气和焦炉烟气等	回收技术相对成熟，主要采取蒸汽转化发电或热交换技术	40%~45%	40%
2	中温余热	风炉尾气初级余热回收后的烟气、烧结烟气、高炉煤气等	温度范围较广且分布分散，回收难度较大	28%~32%	26%
3	低温余热	各种低温物料、低温烟气、热水和废蒸汽	余热来源分散且波动频繁，回收难度大，随着技术的进步（如储热技术和新型换热器），回收潜力大	约 1%	34%

针对不同品位余热资源，依据梯级利用原则，企业余热的利用通常有三种方式：一是对高温介质的显热，通常是通过蒸发器进行回收，后通过汽轮机等设备转换发电；二是对中低温介质显热，通常进行换热后用于生产过程，比如供应饱和蒸汽、预热空气或煤气，富余蒸汽用于发电；三是对低温介质显热，通常进行换热后用于生产生活过程。经过长时间发展，钢铁行业中高温余热资源回收利用技术已较为成熟，低温余热回收技术回收率近约 1%，然而先进技术和理想状况回收率可达到近 60%，利用潜力巨大。中低温余热回收技术包括多种方式，其中热泵技术采用通过高效永磁同步变频直驱技术和多级压缩等关键技术，将低位热源的热量转移至高位热源，提高能源利用效率，是未来重要的减排技术。

表 2.2　长流程钢铁企业重点工序主要余热回收技术

序号	工序	余热资源	采用技术方案	推行 / 研发技术
1	焦化	焦炭显热、烟道气显热和初冷水显热等	干熄焦技术、换热器	上升管余热回收技术、循环氨水余热回收技术等
2	烧结	烧结矿和烧结烟气显热	热风点火助燃、烧结混合料干燥、余热锅炉	烧结烟气循环技术烧结环冷废气低温余热利用技术
3	炼铁	高炉渣显热、高炉冷却水显热、高炉煤气显热及热风炉烟气显热	冲渣水余热回收技术、TRT、BPRT	高炉渣干式粒化回收蒸汽
4	炼钢	钢坯显热、钢渣显热和转炉煤气显热	烟道汽化冷却、热装热送技术	转炉烟气全温域余热回收技术
5	轧钢	加热炉烟气显热和加热炉冷却水显热	蓄热式燃烧技术、换热器、汽化冷却	

从技术应用和研发情况看，未来钢铁企业高炉转炉将主要通过系统能效提升、智能化管理等措施实现节能降碳，整体能效可提升 10%~15%。此外，尽管新技术可以提高能效和环保性能，但初期的投资成本较高，如何在保证投资回报率的前提下推广这些新技术，也是一个较大的挑战。

（2）示范工程

铁 - 钢 - 轧界面智能调度系统在唐山港陆钢铁、宝钢股份等多家企业应用，实践显示，通过优化铸轧界面板坯输送路径和出入库规则，该技术成功实现铸坯动态调度系统，能够显著提升产线效率，提高铁水罐周转率，铁水入转炉温度提高 10℃ 以上，吨铁节能约 2.28 kgce，减排 5.93 kgCO_2。唐钢动态铸坯调度系统每年节省成本超过 1100 万元。

薄带铸轧一体化技术在江苏沙钢、山西宏达等企业应用或建设中。山西宏达钢铁集团与宝武集团、中钢集团紧密合作，于 2024 年启动建设全国首家国产化铸轧一体式薄带铸轧项目。薄带铸轧工艺总能耗约为传统热连轧工艺的 1/5 左右，温室气体排放量约为 1/4 左右。

表 2.3　节能和能效提升技术示范工程情况

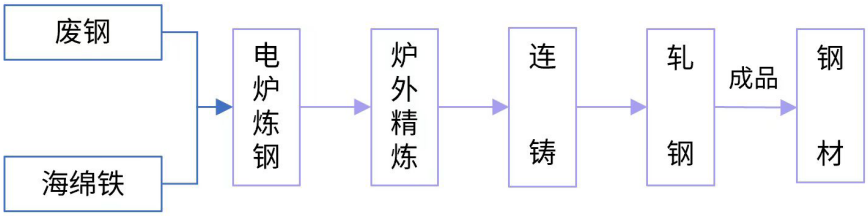
技术	时间	企业	主要内容	所处阶段
铁钢界面铁水智能调度系统	2022 年	中国宝武	开发应用 SmartHIT 系统，通过 1 号、2 号高炉实施配罐优化，实现铁水在铁钢界面的快速流转。系统实施后，“铁 - 钢界面 " 和 SmartTPC 的铁水较 2021 年温降分别减少 29.57℃、44.32℃	成熟应用
薄带铸轧一体化技术	2020 年	沙钢	建设双辊薄带连铸机及其配套设施等	早期应用

2.2.2　废钢 - 电炉技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

废钢 - 电炉技术是以废钢为主要原料，以电为主要能源、化学能为辅助能源进行冶炼的一种工艺设备，主要工艺流程包括废钢入电炉、精炼、连铸和轧钢等，因为在工艺流程上不需要焦化、烧结和炼铁工序，所以也称为短流程工艺。相比于长流程工艺，电炉短流程炼钢吨钢 CO_2 排放量能够减少 65% 以上，具有显著的低碳优势。

图 2.4 电炉短流程生产流程图



按照加料方式分类，电炉分为传统式电炉（旋开炉盖加料）和带废钢预热功能的电炉，带废钢预热功能的电炉主要分为竖炉式废钢预热电炉和水平连续加料式废钢预热电炉。传统式电炉技术成熟、故障率低、原料适应性强且应用广泛，但电耗、电极消耗等主要技术经济指标相对较差。废钢预热技术即在冶炼废钢之前将其加热到适当温度，以便后续冶炼和加工，能够提高能源利用率、降低生产成本。竖炉式废钢预热电炉的预热效果优于水平连续加料式废钢预热电炉，但其可靠性和稳定性有待进一步验证。

① 水平连续加热废钢预热技术

水平连续加料废钢预热技术在废钢铁料入炉之前，经带有磁盘的吊车不断往电炉废钢输送机上料段加料，随着输送机的周期性运动，将废钢铁料送入废钢预热段，电炉产生的一次高温烟气不断对废钢进行预热并加入炉中，废钢预热温度可达 400~500℃。在连续加料过程中，电炉炉盖始终处于关闭状态，减少了电炉热损失。水平连续加料废钢预热技术该技术解决了废钢预热温度低、废钢加料时间长等问题，在国内已经广泛应用。

② 竖炉式废钢预热技术

竖炉型废钢预热技术中竖炉直接安装在电炉上方，电炉排出烟气不经管道直接进入竖炉预热废钢，保证了排气热量的充分利用。德国锐特公司基于竖式加料理念研发的量子电炉（Quantum EAF）采用梯形竖炉设计加保持系统优化了废钢的分布和废气的流动路径，废钢预热效果好，量子电炉可以在通电情况下，装灌砂料、出钢和出钢孔修补，生产指标十分优秀，电耗可达 280 kWh/t，炼钢周期 33 分钟，电极消耗为 0.9 kg/t。由于竖式废钢预热电炉整体建设成本较高，同时故障率相较于水平连续加料电炉偏高，对于企业装备维护能力要求较高，故在国内推广速度相对迟缓。

电炉短流程炼钢已成为世界钢铁生产的两大主要流程之一。2022 年，全球电炉钢占比 28.2%，除中国以外，全球电炉钢占比达 50% 左右，美国电炉钢比例接近 70%。而中国电炉钢占全国比例仅为 10%，比例远低于全球平均水平。废钢电炉技术发展的主要制约点为电价高、废钢资源供给不足、废钢资源回收体系不够完善、废钢质量参差不齐等问题，导致电炉钢成本始终不具备优势，与高炉 - 转炉长流程钢坯成本相比，全废钢电炉钢钢坯成本高出 300~500 元 / 吨，因而钢铁企业对于电炉短流程选择的积极性不高，难以快速推广。

（2）示范工程

2017 年以前，中国 95% 的电炉为传统的开盖顶加料式电炉。2017 年以来，国内主要建设和应用的炉型为 Consteel 电炉（康斯迪水平连续加料电炉），占据了 70% 以上的电炉冶炼设备市场，同时中国陆续引进建成了 Quantum 电炉（量子电炉）、Ecoarc 电炉（环保生态电炉）、Sharc 电炉（竖井电炉）等一些新型竖炉式电炉。从实践情况来看，国内在产的水平连续加料等电炉的指标已经接近或达到世界先进水平，在高效生产方面并不逊色于同吨位的转炉水平。

表 2.4　废钢电炉技术示范工程情况

序号	电炉形式	建设时间	地点	主要建设内容
1	达涅利 ECS 水平连续加料电炉	2024 年 7 月投产	新余钢铁集团有限公司	新余钢铁新建 1 座 100 万吨（年产能）电炉，这台 ECS 水平连续加料电炉采用了达涅利先进的 Q-REG 电极调节系统，配套了固定式炉壁枪、炉门碳氧枪以及先进的自动化控制系统，是达涅利在国内成功热试的第十九台 ECS 水平连续加料电炉
2	Quantum 电炉（量子电炉）	2021 年 12 月投产	广西桂林平钢	广西桂林平钢建设一座 120 吨（单次出钢量）量子电炉，为国内第一家引进普锐特最新研发的高效、节能、环保量子电弧炉。采用创新性的废钢装料方案和高效预热系统，有效降低了电弧炉的电力需求，提高了生产效率，冶炼周期仅 31 分钟，电耗稳定保持在 300 千瓦时 / 吨以下，CO_2 排放减少约 30%
3	Sharc 电炉（竖井电炉）	2020 年 10 月投产	河钢石钢新区	石钢环保搬迁项目炼钢工程采用两台由德国西马克公司设计的 SHARC 电炉，是国内首个双竖井电炉。两台 SHARC 电炉设计年产能将超过 200 万吨钢液，出钢到出钢时间为 45 min，特别是 SHARC 电炉独特的废钢预热方法设计，能够提取利用废气中未使用的能量，可将废钢预热至 500℃以上，有效提高了能源利用效率
4	Ecoarc 电炉（环保生态电炉）	2022 年 10 月投产	本钢板材特殊钢事业部	本钢板材特殊钢事业部电炉为国内首套引进日本 SPCO 的 ECOARC 生态电炉，公称容量分别为 89 吨和 70 吨，具有先进的能量回收和环保技术。废钢在顶部连续装入到连接在炉壳上的“竖型”预热室中，高温废气直接将废钢预热至 600℃以上。钢水和电极之间通电电弧稳定，可实现电耗 275 kWh/t，电极消耗 0.85 kg/t 以下，全废钢冶炼周期 42 min/ 炉。原料不受料型和尺寸限制，随原料市场变化可选用经济的轻型废钢组织全废钢冶炼

2.2.3 高炉喷吹氢气技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

高炉炼铁是高炉 - 转炉长流程冶炼技术中 CO_2 排放量占比最大的工序，这也意味着，高炉低碳冶炼是规模化实现中国钢铁工业低碳的首要路径。高炉喷吹氢气技术是钢铁行业实现高炉低碳冶炼的重要技术手段之一，国内外高炉富氢冶炼技术的研究与实践主要是将焦炉煤气、天然气、化工尾气或水电解氢气等气体通过高炉各风口喷入高炉炉膛内，作为还原剂和热源，参与铁矿石的还原以及供热，减少焦炭和煤粉的消耗，从而实现高炉低碳冶炼。相比于长流程工艺，采用高炉喷吹氢气技术吨钢 CO_2 排放量能够减少 5%~10%。焦炉煤气是钢铁联合企业易得的富氢气体，氢气的体积分数通常在 55% 到 60% 之间，将焦炉煤气作为高炉喷吹的还原剂，可以有效降低高炉的焦比和燃料比，还能改善高炉内的反应条件，提高铁水产量。

高炉喷吹氢气技术包括供氢、喷吹和燃烧三个子系统。供氢系统负责储存和调节氢气压力，喷吹系统通过高炉风口或炉身下部将氢气喷入高炉内，燃烧系统则确保氢气在高炉内的充分燃烧。该技术主要增加氢气喷吹装置及安全控制系统，以保障氢气使用的安全性。

尽管氢气喷吹技术具有显著的减排潜力，但由于焦炭骨架作用的不可替代性，使富氢高炉冶炼的碳减排潜力受到限制，一般认为单独富氢方式氢气在高炉内的利用率只有 30%~40%，需配套炉顶煤气脱碳再循环利用，才能提高氢气利用率，且高炉富氢对炉内热平衡、焦炭质量以及稳定操作均有较大影响，氢气喷吹需要解决气体均匀分布、热量管理以及矿石熔融等问题，这些问题需要进一步的技术突破才能实现高效稳定的运行，未来仍面临较大挑战。另外高炉喷吹的焦炉煤气、天然气、氢气等

能源成本远高于传统焦炭和煤粉，因此在经济性方面还有所不足，能源利用率偏低，限制了该技术的推广。

（2）示范工程

国际上，蒂森克虏伯于 2019 年正式将氢气注入杜伊斯堡厂 9 号高炉进行氢炼铁试验，此后逐步将氢气的使用范围扩展到高炉全部 28 个风口，最终目标是在杜伊斯堡地区 3 座高炉都喷吹氢气，CO_2 减排 19%~20%。安塞乐米塔尔公司分别在德国布莱梅厂和法国敦刻尔克厂的高炉上开展了纯氢或富氢气体喷吹。

中国在高炉喷吹富氢气体方面已经开展了大量理论分析和试验研究。山西晋南钢铁集团是一家钢化联产企业，利用高炉、转炉和焦炉煤气合成乙二醇、LNG 及氢气，在高炉喷吹富氢气体方面有显著的进展和应用。山西晋南钢铁集团自主设计并建成了国内首套 1860 m^3 高炉大规模喷吹化工富氢气体工业化应用工程，开发了高炉喷氢“物理自保护 + 工艺自保护智能联锁 + 紧急自保护切断”的三重智能安全控制技术，通过喷吹氢气实现了 CO_2 减排。通过大规模喷吹富氢气体试验，山西晋南钢铁集团证明了这一技术能够显著减少碳排放。

表 2.5　高炉喷吹氢气技术示范工程情况

企业	时间	主要内容
山西晋南钢铁集团	2022 年	2 座 1860 m^3 高炉开展风口喷吹焦炉煤气和工业副产氢气的研发、设计和工业化应用，实现了吨铁焦炉煤气喷吹量为 65 Nm^3，高炉燃料比平均降低 32 kg/t，吨铁 CO_2 排放量降低 80 kg
宝武钢铁	2020—2023 年	在新疆八一钢铁有限公司采用富氢碳循环氧气高炉（HyCROF）技术，共三期，于 2022 年 7 月 6 日成功点火投运，2023 年商业化示范。2500 m^3 富氢碳循环氧气高炉商业示范项目投资 7 亿元，高炉利用系数提高 40%，固体燃料比降低 30%，铁水碳排放强度整体下降 21%，每年可减少近 100 万吨二氧化碳排放

2.2.4 CCUS 技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

CCUS 被认为是钢铁等难减排行业低碳转型的可行技术选择，中国钢铁工业协会发布的《中国钢铁工业“双碳”愿景及技术路线图》将 CCUS 列为六大技术路径之一，指出将 CO_2 从钢铁制造排放源中分离并经济高效封存、固化或者资源化利用是实现钢铁行业碳中和的重要保障。

中国钢铁厂的 CO_2 主要为中等浓度，其中，炼焦和高炉炼铁过程 CO_2 排放量最大，碳捕集潜力也最大，主流的 CCUS 技术主要在高炉和焦化等工序，将焦化和高炉炼铁尾气燃烧后捕集 CO_2，在高炉炼铁环节，除了喷吹氢气实现碳减排，未来还能够对碳排放进行捕集封存，进一步降低碳排放，这是钢铁行业开展碳捕集、利用与封存的主要方向，相比于长流程工艺，若采用 CCUS 技术，同时配合喷吹氢气，吨钢 CO_2 排放量能够减少 80% 以上。

CCUS 技术在钢铁行业面临多重挑战。首先，中国 CCUS 示范项目整体规模较小，成本较高，且技术风险较高。CCUS 的成本主要包括运行成本及固定费用两部分。据相关资料计算，以某钢铁生产基地 50 万吨 CO_2 年捕集能力的 CCUS 项目为例，封存场地距离厂区 100 km 以内，需要投资 5200 万美元，初步估算项目固定成本和运行成本，总减排成本为 65 美元 / 吨，与日本 54 美元 / 吨和澳大利亚 60~193 美元 / 吨的成本相似。其次，由于钢铁厂排放源多样且分散，捕集效率较低，导致大规

模应用困难，暂没有规模化封存 CO_2 的途径。此外，技术有待进一步突破，CCUS 捕集环节将额外增加 10%~20% 的能量消耗，效率损失很大。由于 CO_2 具有化学惰性和热稳定性，如要有效转化与利用 CO_2，必须重新投入大量能量，使得 CO_2 资源化利用受到了一定限制，需要寻找合适的催化剂体系。综上，由于成本、技术成熟度等影响，CCUS 技术在钢铁行业的应用总体还处于研发和示范的初级阶段。

（2）示范工程

尽管 CCUS 技术在理论上具有潜力，受成本和技术成熟度等的限制，CCUS 技术在钢铁行业仍处于探索阶段。美国 Al Reyadah 项目是全球首个商业化运营的钢铁行业 CCUS 项目，于 2016 年启动，每年从阿布扎比钢铁厂捕集约 80 万吨二氧化碳，并将其用于增强油田采收率（EOR），但其性能评估显示仍存在一些挑战，欧洲和亚太地区也在积极推进 CCUS 技术的应用。

中国已启动多个 CCUS 示范项目，国内最大钢铁行业超前部署的 CCUS 全产业链示范工程在包钢集团正式动工。项目拟建成“一期 50 万吨 + 二期 50 万吨 + 三期 100 万吨”共 200 万吨的 CO_2 捕集与封存利用基地，一期 50 万吨示范项目在 2022 年 6 月正式开工，2024 年 3 月底完成整体进度 70%。该示范工程系统布局了覆盖钢铁行业 CO_2 内循环与跨行业利用的研究技术与路径，将建成千吨级钢渣碳化与资源化、高炉煤气 / 热风炉碳捕集等多个示范工程项目，实现钢渣与烟气 CO_2 协同资源化，高炉煤气 CO_2 高效、高纯回收，打通 CO_2 制备菌体蛋白的高价值利用路线，为钢铁行业探索出一条科学、经济和变革性的技术发展新路径。项目形成规模化推广能力，引领和推动钢铁行业 CCUS 产业发展壮大，支撑到 2030 年形成百万吨级工程应用。

包钢 CCUS 项目将对工业废烟气中的 CO_2 进行捕集，一部分经管道输送包钢碳化法钢铁渣综合利用项目固化利用，另一部分经过压缩液化后，采用低碳运输（换电重卡）方式送至周边油气田做增产技术服务，实现 CO_2 永久地质封存。一期 50 万吨示范项目建成后，预计每年可实现 CO_2 减排约 40 万吨，相当于植树近 1900 万棵，对实现国家“双碳”目标和绿色可持续发展有重大意义。

表 2.6　国内外钢铁企业 CCUS 典型应用

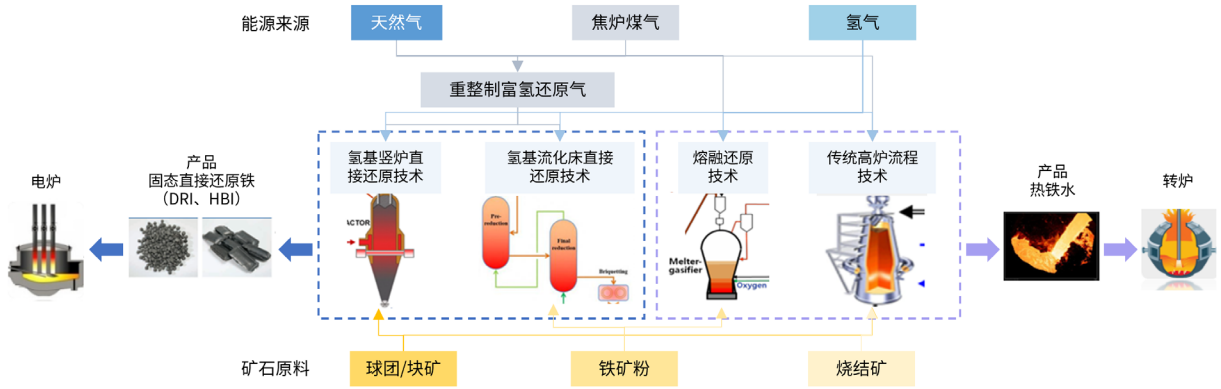
企业 / 项目名称	主要内容	CO_2 排放源
阿拉伯阿布扎比钢铁厂	每年捕集 80 万吨 CO_2，捕集后的 CO_2 被压缩和脱水后，经过 50 公里管道输送，注入陆地油田	直接还原竖炉副产气
韩国浦项钢铁厂	开展“钢铁行业 CO_2 捕集和利用技术示范项目”	高炉、转炉、FINEX 炉
日本 COURSE50 项目	计划开展高炉 CO_2 捕集，仍处于实验阶段	高炉副产煤气
欧盟 ULCOS 计划	计划开展高炉 CO_2 捕集，仍处于实验阶段	高炉副产煤气
包钢集团	拟建成 200 万吨 CO_2 捕集与封存利用基地，一期 50 万吨示范项目已奠基	石灰窑、热风炉烟气
首钢京唐公司	已投产，以转炉煤气为原料生产燃料乙醇	转炉煤气
石横特钢公司	已投产，以转炉煤气为原料合成甲酸	转炉煤气
晋南钢铁公司	已投产，以焦炉煤气、转炉煤气为原料生产乙二醇	焦炉、转炉煤气

2.2.5 氢冶金技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

氢冶金技术通过使用氢气来还原铁矿石中的氧化铁，从而显著减少二氧化碳的排放量，氢冶金技术主要包括氢基竖炉直接还原炼铁技术和氢基熔融还原炼铁技术。相比于长流程工艺，氢冶金技术是一种全新的工艺，省去了高炉、烧结、焦化等高污染、高能耗的工序，简化了生产流程，若采用氢冶金技术，CO_2 排放量能够减少 70% 以上，若采用全绿氢生产，碳减排可达 90% 以上。

图 2.5 氢冶金技术流程



① 氢基竖炉直接还原炼铁技术

氢基竖炉直接还原炼铁技术是一种利用富氢气体作为还原剂，将铁矿石直接还原为直接还原铁（DRI），并生成水蒸气作为唯一副产品的冶金工艺。氢基竖炉直接还原炼铁技术以竖炉装备为基础，采用高比例富氢或纯氢气体为还原剂，以高品位球团矿、块矿为原料，通过气 - 固直接还原方式生产固态海绵铁。由于该反应过程是 800~900℃ 下进行，未达到产品熔化温度，因此产品以固态形式排出，反应压力为 0.2~1 MPa。

氢基竖炉直接还原技术对铁矿石品位要求较高，高品位铁矿石资源作为保障要求 w(TFe) ＞ 67%，且酸性脉石质量分数低（2%~3%），基于氢基直接还原 + 电炉炼钢的近零碳流程产业化面临着高品位铁矿石资源匮乏，矿石资源保障难度大的问题。另外该技术对氢气的生产、储存和运输提出了较高要求，2030 年前受绿氢制备成本和储运成本的限制，绿氢的供应规模较小，天然气 / 焦炉煤气竖炉直接还原工艺占比约 50%~80%，2030 年后，竖炉使用纯氢 / 纯绿氢竖炉通过替代传统煤基还原剂将大幅上升。

为了保证氢气的利用率，氢基竖炉直接还原炼铁技术需要一系列专用设备，重点需要自主研发的专用材料和加热系统，包括竖炉设备、氢气制备与净化系统、煤气净化与重整系统等（焦炉煤气、天然气气源需要），氢气的制备和利用是一个重要挑战，若能够实现稳定全绿氢供应，理论上竖炉环节可以实现全氢近零碳冶炼，考虑电炉环节后的吨产品碳排放为 0.3~0.5 tCO_2。

② 氢基熔融还原炼铁技术

氢基熔融还原炼铁技术是在高温熔融状态下将铁氧化物还原为铁水的工艺，原理是用喷枪向铁浴熔融还原炉熔渣层内喷吹粒度小于 6 mm 的铁矿粉、熔剂和煤粉 / 氢气，富氧的高温热风从炉顶喷入，与熔池里逸出的 CO、H_2 进行二次燃烧，释放出热能，在强烈的渣铁喷溅搅动中完成热传递，熔化喷入的固体原料，铁矿石熔化还原得到铁水和炉

渣。该技术可以使用低品位铁矿粉，无需焦化、烧结等工序，大幅度降低碳排放。未来高比例富氢或全氢的熔融还原技术若开发成熟并实现规模化应用，可以摆脱发展氢基直接还原技术所面临的优质铁矿石资源匮乏的限制难题。

氢基熔融还原炼铁技术同样需要一系列专用设备，包括氢气制备与供应系统、熔融炉反应器、喷氢系统等，未来面临的挑战主要有解决设备在高温高压下的稳定性和耐久性问题，同时优化工艺参数以提高效率和降低能耗。

不论是氢基熔融还原炼铁技术还是氢基竖炉直接还原炼铁技术，未来氢冶金的发展一定程度上也取决于绿氢产业链的发展，大规模低成本制氢是亟需突破的技术瓶颈之一。氢气的制备成本较高，现阶段可再生能源电解水制氢的成本在 15~30 元 / kg，电解水制氢的成本主要取决于电价和设备效率，当电价降至 0.2 元 /kwh 时，电解水制氢的成本约可降至 5~15 元 /kg。

（2）示范工程

氢冶金是钢铁行业实现“双碳”目标的革命性技术，虽然氢冶金技术面临着成本高等挑战，但它仍是一项非常有前途的钢铁脱碳技术，国外钢铁企业积极推进氢基竖炉直接还原研发与示范应用，瑞典钢铁开展 HYBRIT 无化石能源炼钢项目，采用全绿氢竖炉 + 电炉的技术路线来实现零碳目标，正处于中试阶段，计划在 2026—2030 年完成商业化应用。德国萨尔茨吉特公司建设试验规模为 100 kg/h 的 μDRAL 绿氢中试示范工厂，计划 2033 年完成萨尔茨吉特工厂的低碳改造，二氧化碳总量降低约 95%。同时塔塔钢铁、日本神户制钢、蒂森钢铁也规划或正在开展氢基竖炉工程项目，逐步减少现有高碳排的传统高炉生产流程占比。对于氢基熔融还原炼铁技术，国外主要是科研机构、企业正在开展氢等离子体熔融还原技术（HPSR）的实验室研究，其中奥钢联在多纳维茨的工厂建设熔融还原试验装置来开展基础研究，暂未开展工业化示范项目建设及运营。

中国宝武、河钢集团、鞍钢集团、建龙集团等在多地进行试点示范，河钢氢冶金示范工程与同等生产规模的传统“高炉 - 转炉”长流程工艺相比，一期每年可减少 CO_2 排放 80 万吨，减排比例达到 70% 以上，且生产每吨直接还原铁可捕集 CO_2 约 125 千克。宝武湛江钢铁氢基竖炉示范工程，相对传统高炉减碳 60% 以上，在将来绿氢、绿电广泛应用后，可达到减碳 90% 的效果，每年可减少二氧化碳排放 50 万吨以上。

关于纯氢冶金技术应用，国内外钢铁行业均处于开发初期，当前氢冶金示范工程中，超过 80% 的项目以焦炉煤气为氢源（含氢量 50%~60%），其碳排放强度与绿氢（<1kg CO_2/kg H_2）差距显著，但基于天然气的竖炉直接还原技术在国外已成熟应用达 50 年，形成了近 8000 万吨的产能规模，国内基于天然气、焦炉煤气的竖炉直接还原技术规模约有 200 万吨，处于起步发展阶段。

表 2.7　国内氢冶金技术示范工程

企业名称	技术类型	应用进展	氢气来源
宝武湛江钢铁	氢基竖炉直接还原技术	建设 100 万吨氢基竖炉，2023 年 12 月 23 日成功点火投产并投运，2024 年开展多次试验，达到设计指标	焦炉煤气、天然气、氢气。提出未来利用南海可再生能源制绿氢
河钢宣钢	竖炉直接还原炼铁	120 万吨氢基竖炉装置，2023 年 5 月点火，已稳定运行 1 年多时间	焦炉煤气。计划未来开发利用可再生能源制绿氢
鞍钢集团鲅鱼圈基地	流态化氢基直接还原铁	技术开发初期，完成中试试验线的建设工作	中试线设计采用高效电解水制氢，纯氢还原铁矿粉
中国钢研	氢基竖炉直接还原技术	建成万吨级中试生产线，2024 年开展中试试验，氢还原海绵铁常态金属化率达到 96% 以上	纯氢

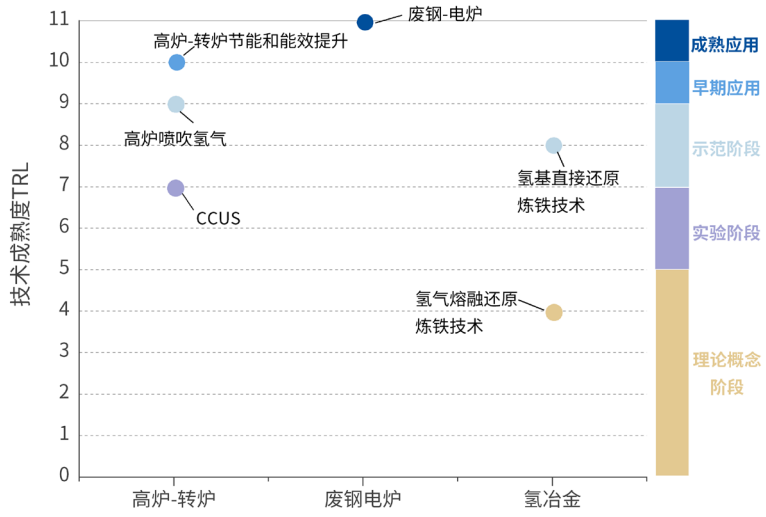
2.3 技术展望和成本演变

2.3.1 技术成熟度展望

钢铁行业高炉 - 转炉节能和能效提升技术得到了快速发展，整体处于早期应用阶段，但部分关键环节仍处于工业试验阶段，如中低温余热高效回收利用，仍存在热源分布零散，技术不稳定等技术瓶颈，挑战重点在于如何实现钢铁连续化高效生产运行与能量系统最优化利用的集成。高炉喷吹氢气技术尚处于早期应用阶段，未来需要重点解决氢气与传统炼铁过程的耦合，预计 2030 年后成熟。传统废钢电炉技术已成熟，未来随着废钢资源回收体系完善，具备成本优势后会实现大规模应用。CCUS 技术仍处于商业化前的示范阶段，碳捕集和封存填埋选址等方面还存在自然地质和技术不成熟等难点，预计 2040 年后逐渐达到成熟。氢基直接还原铁技术在中国的应用取得了显著进展，但整体仍处于示范阶段，该技术预计在 2035—2040 年达到成熟，氢基熔融还原炼铁技术仍处于实验室理论研究阶段，未来发展仍存在较大的不确定性。

图 2.6 2025 年钢铁行业技术成熟度

注：技术成熟度详细划分见附录。



2.3.2 技术成本演变

受碳价等因素影响，传统高炉转炉技术（基准技术）2025—2060 年粗钢总成本将缓慢从 3000 元 / 吨粗钢上升 3600~3700 元 / 吨粗钢，高炉转炉节能和能效提升技术相比于基准技术总成本整体高出 200~300 元 / 吨粗钢。

废钢 - 电炉炼钢技术省去了烧结、球团、高炉等工序，能够大幅降低化石燃料消耗和建设投资成本，然而，受电价较高、废钢原料收集难度以及废钢价格的影响，废钢 - 电炉炼钢技术原料成本短期仍较高，综合研判废钢 - 电炉炼钢技术的总成本 2030 年前仍小幅增长，总成本较基准技术约高出 300~500 元 / 吨粗钢，在 2030 年后，随着废钢资源回收利用体系的不断健全，废钢价格呈下降的趋势，总成本将大幅下降，并逐步与其他技术拉大差距，

到 2040 年，废钢电炉技术总成本与基准技术总成本相近，约 3500 元 / 吨粗钢，废钢电炉占比大幅上升。2060 年，废钢电炉单位减排成本将下降至 -200~-50 元 / 吨 CO_2，届时意味着相比于常规高炉 - 转炉技术，废钢电炉技术实现了既降成本又大幅减排的目标。

相比于常规高炉 - 转炉技术，高炉喷吹氢气技术和氢冶金技术均需要用氢作为原料，氢价格居高不下是钢铁行业用氢难的主要因素。2030 年前，高炉喷吹氢气技术总成本较传统高 - 转流程高 500~800 元 / 吨粗钢，氢冶金技术总成本是传统高 - 转流程的 2.3~2.5 倍。受化石燃料需求量大、氢掺烧比例限制等因素影响，高炉喷吹氢气技术单位产品减排量较低，因此单位减排成本较高，若将高炉喷吹氢气技术与 CCUS 技术结合，总成本较高，但能够使单位产品 CO_2 排放量下降约 85%~90%，单位减排成本仅次于废钢电炉技术，约 1200 元 / 吨 CO_2。

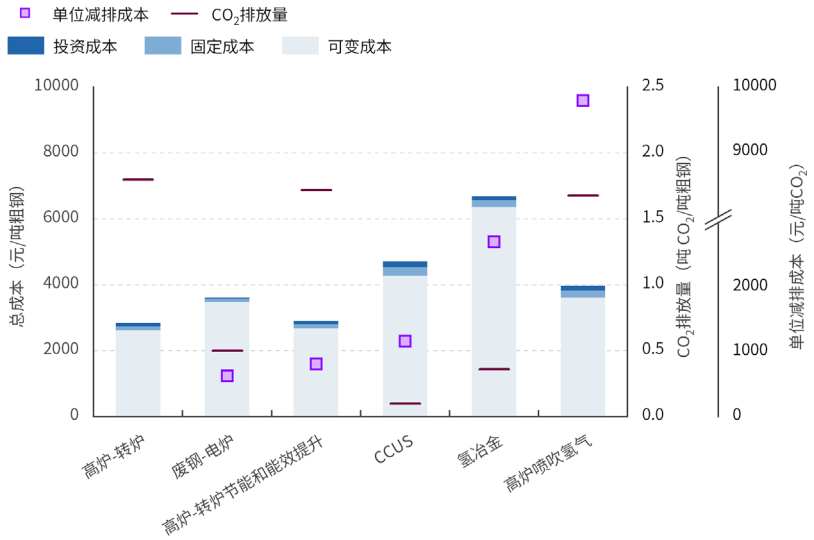
根据氢气价格预测结果，随着可再生能源的发展，电价逐渐下降，电解水制氢逐渐普及，2030 年后，氢气价格将逐步下降，届时高炉喷吹氢气技术成本将小幅下降约 200 元 / 吨粗钢，2040 年后，同时受技术成熟度的影响，氢冶金技术总成本将大幅下降，吨粗钢约下降 1500~2500 元。2040 年后，CCUS 技术逐步规模化应用，高炉节能和能效提升技术 + 高炉喷吹氢气 +CCUS 技术吨钢生产总成本将下降至约 4000 元。

图 2.7 2022 年钢铁不同技术路线的成本对比

注 1：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。总成本是指生产一单位产品的总成本，包括投资成本、固定成本和可变成本。其中，投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

注 2：图中高炉喷吹氢气技术是在传统高炉转炉技术的基础上，将富氢气体喷吹进高炉作为还原剂的技术，CCUS 技术是在传统高炉转炉技术的基础上，在高炉喷吹氢气进行还原，并叠加 CCUS 技术进行减排的技术。图 2.8 同理。

注 3：图中氢冶金技术指氢基直接还原炼铁技术。



2.3.3 技术普及度展望

随着碳中和技术的成熟发展和成本的变化，钢铁行业碳中和路径总体呈现高炉转炉向短流程和氢冶金发展的过程，预计到 2060 年，钢铁行业路线有三，一是“高炉转炉节能和能效提升技术 + 高炉喷吹氢气 + CCUS 技术”路线，普及度约 26%，二是“废钢 - 电炉技术”路线，普及度约 46%，三是“氢冶金技术”路线，普及度约 28%。

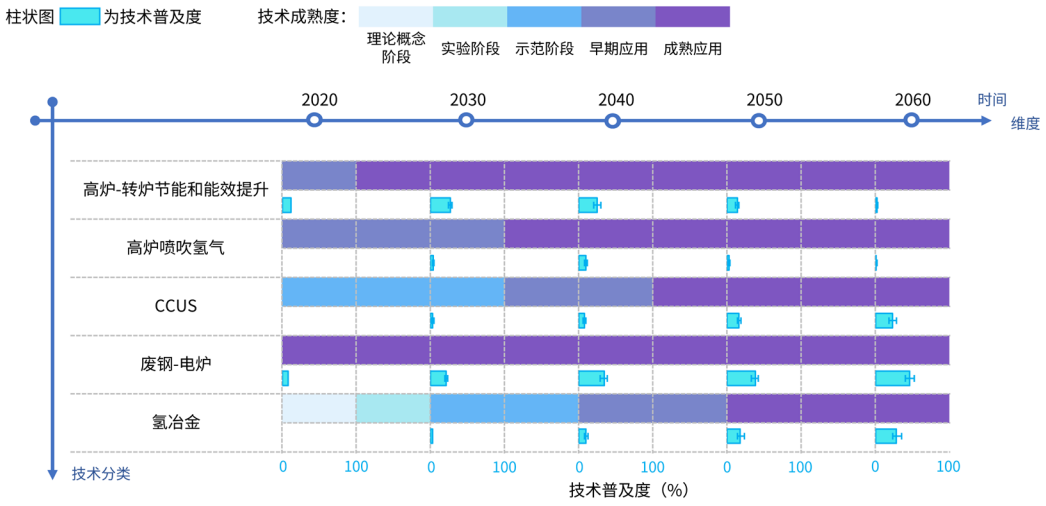
具体而言，2025 年后高炉转炉节能和能效提升

技术普及度逐年上升，到 2035 年在传统高炉 - 转炉技术的基础上节能和能效提升技术普及度约 30%。“高炉转炉节能和能效提升技术 + 高炉喷吹氢气”普及度约 5%，“高炉转炉节能和能效提升技术 + 高炉喷吹氢气 +CCUS 技术”普及度约 5%。到 2060 年，在高炉基础上仅进行能效提升的生产工艺将完全被取代，届时“高炉转炉节能和能效提升技术 + 高炉喷吹氢气 + CCUS 技术”成为长流程主要工艺路线，普及度约 23%。

废钢 - 电炉普及度逐年上升，并在 2035 年后随着成本的下降实现大规模发展，预计未来将成为主流冶炼技术。2050 年后，氢冶金技术将成熟应用，普及度到 2050 年约 19%，到 2060 年约 28%，未来氢冶金技术将以氢基直接还原炼铁技术为主，氢基熔融还原炼铁技术为辅。

图 2.8 钢铁行业技术在 2020—2060 年的普及度

注：技术普及度反映了技术从研发阶段到实际应用的推广效果。技术普及度越高，说明该技术的应用范围越广。



2.3.4 技术对比分析

钢铁行业的碳中和关键技术特征如表 2.8。

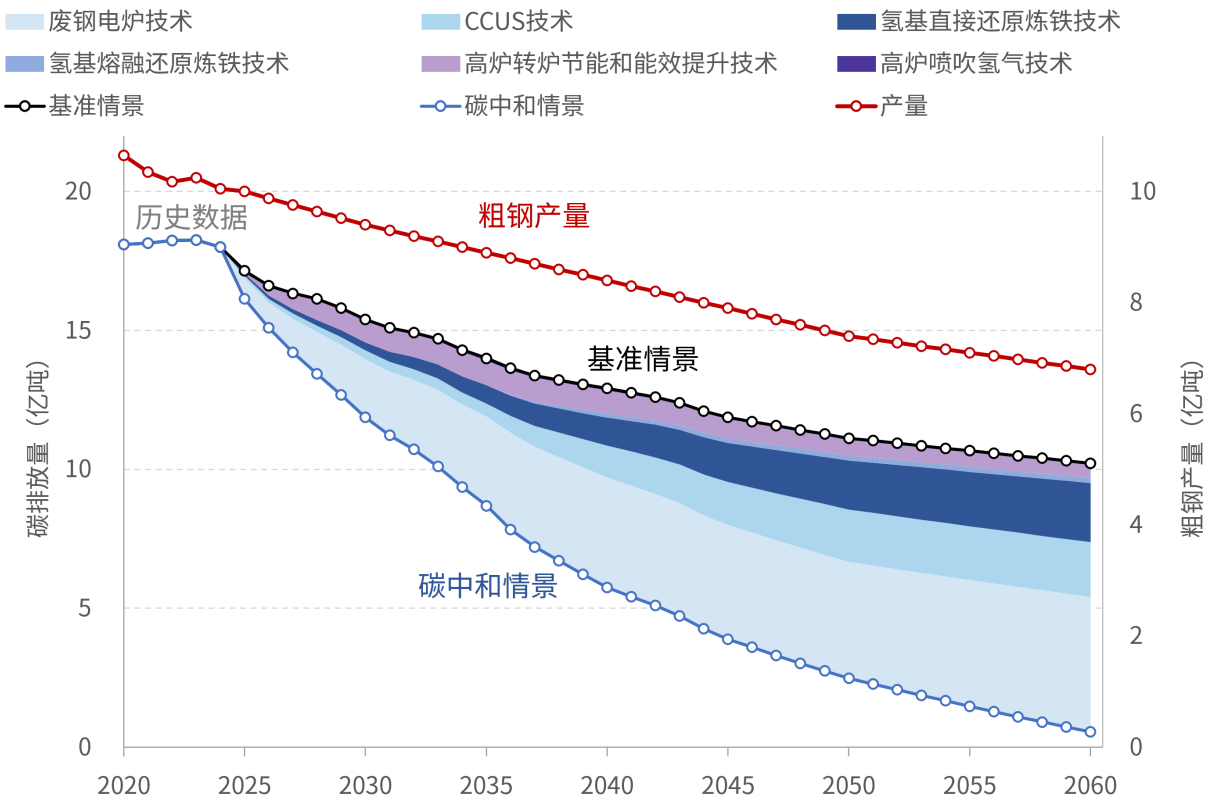
表 2.8　钢铁行业碳中和关键技术汇总

技术名称	技术原理概述	碳减排效果	技术成熟度	技术挑战
高炉转炉节能和能效提升技术	推动炼焦、烧结、球团、高炉、转炉等工序深度节能技术应用与装备升级改造	吨钢 CO_2 排放减少 5%~10%	10	经过多年持续节能降碳，挖潜空间逐渐收窄，节能降碳难度增大
高炉喷吹氢气技术	将氢气作为还原剂注入高炉内，能够替代焦粉等还原剂实现进一步减排	吨钢 CO_2 排放减少 5%~10%	9	由于焦炭骨架作用的不可替代性，使富氢高炉冶炼的碳减排潜力受到限制
CCUS 技术	将 CO_2 从钢铁制造排放源中分离，并经济高效封存、固化或者资源化利用	吨钢 CO_2 排放减少 80% 以上	7	成本较高，技术发展较不成熟，捕集率低、自然地质和技术不成熟
废钢 - 电炉技术	以废钢为主要原料，在工艺流程上不需要焦化、烧结和炼铁工序，直接采用电能加热冶炼的工艺	吨钢 CO_2 排放减少 65% 以上	11	废钢资源不足，全废钢冶炼成本较高；大部分电炉生产效率相对转炉偏低，同时原料废钢质量控制难度较大
氢冶金技术	以氢气替代传统碳作为还原剂，省去了高炉、烧结、焦化等工序，主要包括氢基竖炉直接还原炼铁和氢基熔融还原炼铁	吨钢 CO_2 排放减少 70% 以上，若采用全绿氢则减排 90% 以上	8	成本高、关键技术有待进一步突破

2.4 钢铁行业碳中和技术路线图

推动废钢 - 电炉炼钢技术、氢冶金技术、CCUS 技术等关键生产技术发展将是推动钢铁行业碳中和的最主要途径。2025—2035 年，粗钢产量是决定中国钢铁行业碳排放能否快速达峰的关键，钢铁行业以高炉 - 转炉节能和能效提升技术和废钢 - 电炉炼钢技术是钢铁行业减排的主力军。2035 年后，废钢 - 电炉炼钢技术持续发挥重要减排作用，预计 2040 年废钢 - 电炉技术在国内普及度将达到 35% 以上。氢冶金技术由于技术成熟度及成本问题，2040 年后普及度和减排量大幅上升。CCUS 技术在 2040 年后实现商业化发展。预计到 2060 年，废钢 - 电炉技术、CCUS 技术和氢冶金技术减排量分别占钢铁行业总减排量的约 50%、20% 和 24%，为实现行业碳中和贡献重要力量。

图 2.9 钢铁行业碳中和技术路线



2.5 碳中和技术应用推广政策建议

大力推动废钢 - 电炉炼钢技术应用。在重点区域控制长流程工艺产能增长，或通过差别化产能置换支持电炉短流程炼钢的发展。对电炉企业给予优惠电价支持。选择废钢资源丰富且电力资源充足的地区作为电炉炼钢的大力推广区域，打造废钢资源回收产业体系，完善回收 - 拆解 - 综合利用体系，有序培育一批有废钢资源、有市场需求、有绿电优势的电炉短流程生产基地。充分利用绿色制造、首台套保险等渠道，引导和鼓励社会资本加大对智能化、绿色化电炉短流程炼钢工艺和装备等领域的投资力度。

加快开展氢冶金技术研发与工程化示范。国家加强顶层设计与专项规划，系统谋划一揽子示范工程，建议将氢冶金技术纳入国家“两重两新”战略。加大符合中国铁矿石资源特点的氢冶金技术研发。鼓励钢铁企业利用企业内部自产富氢气体优势积极开展富氢冶炼工程示范，构建氢能与冶金上下游协同创新模式，使制氢工艺与冶金工艺能够深度融合、协同研发，最终提升氢源、核心反应装备和矿石原料资源保障能力，支撑中国钢铁行业绿色低碳转型。

利用市场机制推动碳减排。在钢铁行业尽快开展有偿分配并逐步提高有偿分配比例，有偿收入设立碳中和技术商业推广专项基金，支持 CCUS、氢冶金技术研发和示范项目的实施。

加快钢铁 CCUS 技术的示范与应用。提高钢铁行业的 CO_2 捕集效率、降低捕集成本以及研发 CO_2 的利用和封存技术，使用富氢碳循环氧气高炉的方式，采用纯氧大幅降低煤气中氮气，使碳捕集成本下降，并结合煤气循环推进氢气高效循环利用。此外，进一步开发钢化联产等新技术，实现以化固碳。

第 3 章　水泥行业碳中和技术展望

水泥行业是中国工业实现碳中和的关键行业之一。本报告核算碳排放的边界包含水泥生产过程中的直接排放和间接排放。按照国民经济行业分类产品代码为水泥制造（3011）。新型干法技术是当前水泥行业最常规的技术，碳中和技术的分类通常基于技术途径、减排机理及实施路径，涵盖从原燃料替代到末端治理的全流程，主要包括以窑系统改造为主的能效提升技术、以工业废渣为主的原料替代技术、以固体废物为主的燃料替代技术、绿氢煅烧水泥熟料技术、纯电 / 电辅助煅烧水泥技术、水泥回转窑烟气 CCUS 技术和水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术等。水泥行业约 60% 的碳排放来自于工艺过程排放，加快原料替代、基于改变燃料结构的流程再造技术，以及大力发展 CCUS 技术，是水泥行业实现低碳转型的关键技术路径。

INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

03

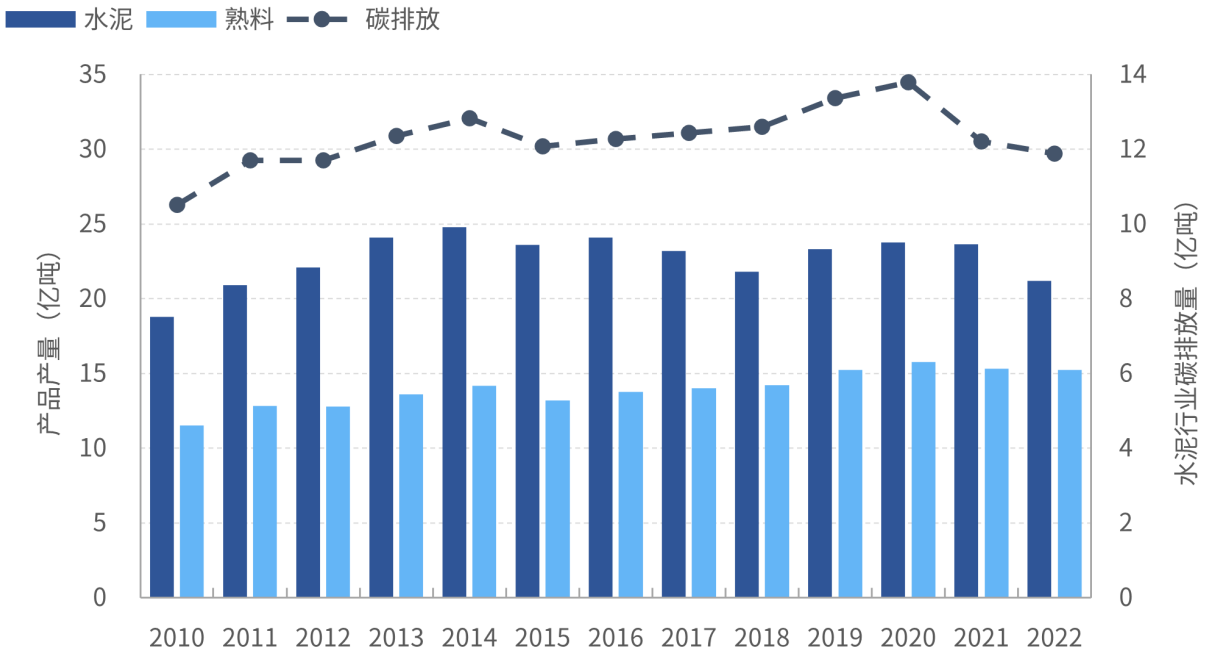
3.1 行业现状与趋势

中国水泥产量已连续 40 年居世界第一，2020 年后处于“产量达峰→需求拐点→产能出清”的关键转型期，其碳排放的刚性特征使得减排技术创新（如碳捕集、基于改变工艺及燃料结构的流程再造技术、替代胶凝材料）成为实现碳中和的关键突破口。

2014 年中国水泥产量达到阶段性高点 24.8 亿吨，2015—2020 年，全国水泥产量基本在 22~24 亿吨波动。水泥的需求主要来自建筑与基础设施建设，2020 年后，随着城镇化和住房需求逐渐饱和，全国水泥市场需求明显收缩，2022 年全国水泥产量降至近 10 年以来的最低值，较 2020 年降低 11%，达 21.2 亿吨。2022 年中国人均水泥消费量约 1500 千克，远高于发达国家人均 220~500 千克的水泥消费峰值。

图 3.1 2010—2022 年中国水泥及熟料产量及水泥行业碳排放情况

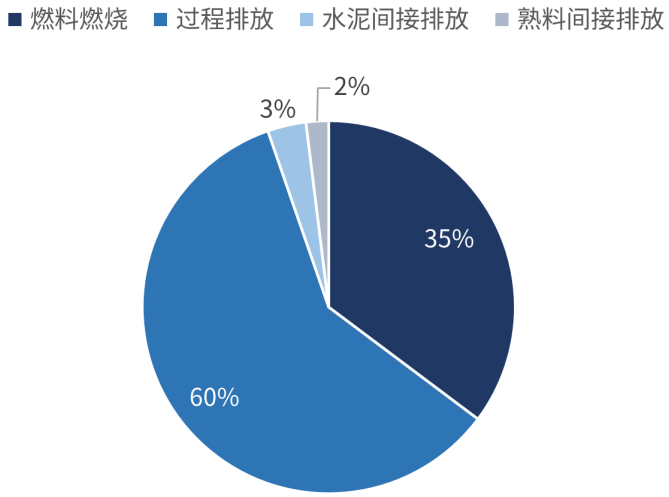
注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。



2010—2022 年中国水泥行业碳排放的总体特征可概括为“高速增长 - 高位缓升 - 达峰回落”的阶段性演变。随着水泥熟料产量的增加，2010—2020 年，随着基础设施（如铁路、公路）和房地产建设对水泥需求持续增长，中国水泥行业二氧化碳排放量快速增长，排放量由 10.5 亿吨增加至 13.8 亿吨。2020 年后，随着国家“双碳”目标的提出，作为首批重点控排行业，受市场弱需求、政策强约束和减碳技术进步等多重影响，水泥行业二氧化碳排放下降趋势明显，2022 年碳排放量下降至 11.9 亿吨。

水泥生产过程排放的二氧化碳分为直接排放和间接排放。直接排放集中在回转窑系统，包括能源活动排放（熟料生产过程中煤、油等燃料燃烧产生的 CO_2，占总排放的 35%）和工业过程排放（水泥生料中碳酸钙、镁煅烧分解产生的 CO_2，占总排放的 60%）；间接排放主要是净购入的电力、热力消耗引起的排放，占比约 5%。水泥生产过程可分为生料制备、熟料烧成和水泥粉磨生产三个主要阶段，其中熟料煅烧的碳排放占比 95% 以上，主要来自碳酸盐原料在煅烧过程中分解产生的 CO_2 和化石燃料燃烧排放。

图 3.2 中国水泥行业碳排放结构



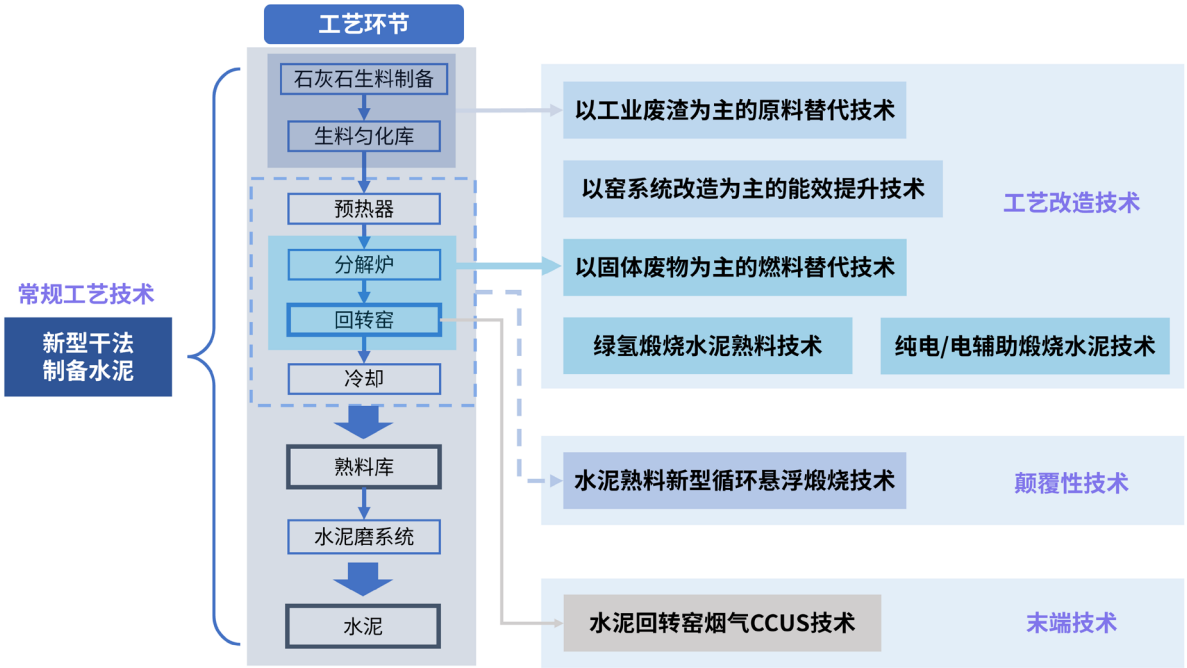
基于中国水泥行业碳排放的特点及数据可比性，报告以熟料消费量作为主要研究对象，采用多因素拟合分析法预测水泥行业熟料消费量。预测结果显示，中国水泥熟料消费量在 2020 年已达到峰值，到 2030 和 2060 年，预测水泥熟料消费量分别为 10.5 和 5.2 亿吨。

3.2 碳中和关键技术

根据各环节碳排放占比，重点锁定煅烧过程（贡献 60% 以上碳排放）和燃煤热源（贡献 35% 左右碳排放）两大核心碳减排靶点。综合考虑技术成熟度，工艺环节的分解与技术创新预测，符合水泥行业“工艺排放难削减、能源结构高碳化”特点的碳中和关键技术，分为工艺改造技术、颠覆性技术和末端技术（图 3.3）。

使用以固体废物为主的低碳燃料替代化石燃料是水泥行业碳减排的重要技术路径，可为水泥行业单一燃料来源拓宽渠道。针对煅烧环节燃煤排放，绿氢煅烧水泥熟料技术和纯电 / 电辅助煅烧水泥技术将是未来行业碳中和发展的重要方向。基于工业废渣的原料替代技术，可充分降低碳酸盐分解带来的过程排放。针对难削减的部分碳排放，还需要进行末端处理的 CCUS 捕集和封存。基于清洁能源的流程再造等颠覆性技术，如水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术，通过取消回转窑，进一步降低烧成温度，在未来风光等绿色能源快速发展下，可为零碳烧成创造有利条件。虽然技术还处于实验室阶段，但未来随着技术的快速发展与进步，未来具有一定的减排潜力。

图 3.3 水泥行业碳中和技术体系



3.2.1 以窑系统改造为主的能效提升技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

能效提升主要指针对生产线节能进行的技术改造，提升水泥窑炉的能效，降低烧成系统热耗。近年来，中国水泥行业通过推广节能技术和系统优化，能效水平取得了显著的进步，以窑系统改造为主的能效提升技术是中国水泥行业节能降碳的重要手段。

① 水泥窑炉用耐火材料整体提升技术

“双碳”目标对高温窑炉用耐火材料的保温、节能、环保功能提出了更高要求。耐火材料整体提升技术通过在预热器及篦冷机内衬采用低导热系数的纳米隔热板代替传统硅酸钙板，回转窑内衬采用低导热系数的复合砖代替传统硅莫砖及高铝砖，或采用气凝胶隔热材料等新型高效隔热材料，可降低烧成系统热耗，达到节能环保目标。通过该技术，熟料烧成能耗降低 1~3 kgce/t。

② 预热器分离效率提升及降阻优化技术

该技术需根据生产线原有设计，匹配预热器系统尺寸，定制化改造方案。通过更换原有旋风筒蜗壳部分，增大旋风筒进口面积，合理设计蜗壳结构形式，以达到提高旋风筒分离效率、减小旋风筒内切风速和降低系统阻力的目的；采用预热器控制漏风、结皮技术，优化下料管及撒料盒结构，提升物料在预热器进风管道中的分散效果，增强气固换热效率，可大幅降低预热器出口温度和阻力，使熟料烧成的综合能耗降低 1~2 kgce/t。然而，多数生产线存在非标准化设计，这增加了改造成本，单条生产线的改造费用高达 300 万至 500 万元。

③ 低能耗六级预热器技术

在土建条件允许的情况下，该技术将传统五级预热器增加一级旋风筒变为六级预热器，预热器塔架新增一层楼面，原有顶级旋风筒上移一层；通过增加一级换热及提高预热器换热效率、分离效率，从而提升预热器整体的换热效率，降低废气排放热量损失，实现水泥烧成环节的节能减碳。预期效果：熟料烧成综合能耗降低 4~5 kgce/t。六级系统需重新分配各级压损，存在热力学失衡风险。可通过引入 AI 算法（如强化学习模型）预测热工参数，升级现有 DCS（分布式控制系统）以实时优化多变量耦合，同时需提高生料易烧性，导致原料适应性变窄。

④ 纯低温余热回收技术

水泥行业传统的余热回收技术主要集中在回收水泥窑在生产过程中排放的中低温废气的热能。这些废气的温度在 350℃ 左右，通过余热发电技术转化为电能，可以有效提高能源利用效率，减少碳排放。国内中低温余热发电技术无论是热力循环系统还是设备（国产化）都已成熟可靠，总体上的技术水平已经赶上国际先进工业国家。然而，对于余热发电技术，无论是循环系统、循环工质、还是各种专用设备（余热锅炉、补燃锅炉、汽轮机、锅炉给水除氧设备等）仍然有进一步发展的余地，如何将余热发电技术与水泥熟料煅烧技术进一步结合，以开发出带低温余热发电的更加节能的新型干法水泥生产系统，还有待进一步研究。

（2）示范工程

泰安中联水泥有限公司在多途径系统节能改造方面做了积极探索，熟料单位产品综合能耗长期保持在 95 kgce 以下，低于 2021 版 GB 16780《水泥单位产品能源消耗限额》一级指标（100 kgce/t-cl）5 kgce。企业建设了 5000 t/d 的新型干法水泥低能耗示范线，配套建设了 7 MW 纯低温余热发电系统，

有效提高了能源利用率；在回转窑中，采用了富氧燃烧技术，通过改变燃烧过程中的氧气供应方式，提高了燃烧效率；采取六级旋风预热技术，通过高效低阻的六级预热器实现物料的充分换热，从而降低煤耗，比普通生产线的熟料单位产品能耗减少 6 kgce。完成六级下料管及烟室防结皮技术改造、煤磨袋式除尘器在线检测技术改造、水泥窑协同处置固危废用于生料配料的技术改造等 5 项技改方案，年可节省资金 180 余万元。采用辊压机终粉磨系统，实现吨生料电耗低于 11 kwh；采用天然气点火系统代替柴油点火节约点火用能 50% 以上。

3.2.2 以工业废渣为主的原料替代技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

在水泥生产中，采用工业固体废弃物作为替代原料是水泥工业协同处置工业固废、降低 CO_2 排放的重要手段之一。该技术措施主要针对水泥熟料生产过程中碳酸盐分解产生的过程排放。采用硫酸渣、电石渣、钢渣等工业废渣作为原料，吨熟料碳排放可以降低 30% 以上。近中期，中国有丰富的工业废渣资源可作为替代原料，但未来随着工业深度脱碳，替代原料的可用量将成为挑战。因此，原料替代更适合作为降低熟料碳强度的中短期措施。

① 硫酸渣原料替代技术

硫酸渣的物理和化学性质使其成为制备水泥的理想原料，以硫酸渣为主的原料替代技术主要是将硫酸渣等材料作为原料或辅助材料，用于生产水泥，硫酸渣通常含有较高的铝、硫等元素，这些元素在一定条件下可以与水泥生产中的其他成分发生反应，从而影响最终产品的性能。通过不断的技术创新和工艺优化，可以有效提高硫酸渣的利用率，同时降低环境影响，促进可持续发展。

② 电石渣原料替代技术

电石渣的主要化学成分是氢氧化钙（$Ca(OH)_2$），其分解温度低于石灰石中的碳酸钙（$CaCO_3$），因此在水泥生产中可以提高生料的易烧性和降低热耗。电石渣水泥生产除了可以有效减少水泥熟料的 CO_2 排放和能源消耗，还可以降低生产成本，具有显著的经济效益和环保效益。受中国电石产量的限制，中国水泥电石渣替代总量有限。

③ 工业副产石膏制硫酸联产水泥成套技术

工业副产石膏制硫酸联产水泥成套技术是一种资源循环利用的绿色工艺，通过将脱硫石膏等工业副产物作为原料，分解后同时生产硫酸和水泥，实现硫资源的高效循环与废渣减量化。要有效利用硫酸渣，需要克服一些技术和操作上的难题。例如，硫酸渣的高黏性和不稳定性可能影响其在水泥生产中的应用效果。因此，开发适合硫酸渣特性的新工艺和设备是关键。

中短期内，中国有丰富的工业废渣资源可作为替代原料，但未来随着工业深度脱碳，替代原料的可用量将成为挑战，新型水泥熟料的应用潜力尚有不确定性，主要体现在原料可用性、水泥稳定性和耐久性等特性的检验、产能与经济性等方面。但随着水泥行业降碳压力与低碳建材需求的增强，以及智能化生产系统的采用，可以预计新品种低碳水泥的市场份额占比将不断提高。预期效果：采用工业副产石膏替代天然石灰石可使 CO_2 排放量降低 10%~50%。

④ 铁铝酸盐水泥

铁铝酸盐水泥可以被视为一种采用替代原料生产的低熟料水泥。这种水泥的生产可以大量使用工业废料和副产品，如提钛尾渣、铝灰和其他含铁或含铝的材料，以及高炉矿渣等其他类型的工业废弃物。铁铝酸盐水泥的主要矿物为铁铝酸四钙及贝利特水泥，其形成过程 CO_2 排放量较硅酸三钙减少 40%，烧成温度约为 1250~1300℃，较传统硅酸盐水泥（1450℃）降低 150~200℃，理论上可减少燃料消耗 15%~20%。

（二）示范工程

铁铝酸盐水泥应用示范工程，是中国水泥行业的重大创新，是特种水泥（低碳水泥品种）的一大进步。示范项目 2022 年年底完成浇筑铁铝酸盐水泥混凝土 9 万立方米。示范工程采用的铁铝酸盐水泥，在常规低碱度硫铝酸盐基础上，根据示范要求和特殊地理条件工程需要，进行技术升级，具有快硬、高强、抗冻、抗渗和耐海水腐蚀等优良特性。通过深入开展试验研究和现场实践验证，成功解决了铁铝酸盐水泥在南方高温环境下规模化应用的难题。已取得的研究结果表明：铁铝酸盐水泥早期力学性能明显优于硅酸盐水泥混凝土，后期力学性能与之相当；耐久性能显著优于硅酸盐水泥混凝土。为铁铝酸盐水泥产业的快速发展奠定了重要基础。

目前铁铝酸盐水泥尚存在矿物活性难控制、吨产品成本较高及凝结时间不可控等产品性能局限性问题。例如，初凝时间只有 20 分钟（硅酸盐水泥为 2 小时以上），对搅拌、运输和泵送施工提出了更高的要求。尽管示范项目通过调整水泥性能和外加剂解决了这一问题，但大规模推广仍需专用设备与工艺配套。

3.2.3 以固体废物为主的燃料替代技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

中国水泥行业燃料以煤炭为主，生产过程约有 35% 的碳排放来自燃料燃烧。燃料替代既可以减少煤炭资源的消耗，也可为固废、生物质等资源的高效利用提供新途径。使用低碳燃料替代化石燃料是水泥碳减排的重要技术路径，同时还可为水泥行业单一的燃料来源拓宽渠道，为企业带来更多绿色转型的选择。水泥替代燃料的固体废物种类繁多，主要包括轮胎衍生燃料（TDF）、生物质、城市固体废弃物（MSM）、废弃物衍生物（RDF）和塑料废弃物等。其中以城市固体废物来源最广，加工为 RDF 后能使燃料品质更稳定。以固体废物为主的燃料替代技术在国内先进企业中已实现 30% 以上的替代率，该技术相比常规新型干法技术能降低 25% 的碳排放。当前该技术的挑战是用于水泥的工业废渣等资源有限，且受限于废渣成分波动性，需定制化水泥生产工艺。

① 固废基替代燃料技术

固废基替代燃料技术需要专用的生产设备和施工设备，如高性能分选、破碎设备、泵送设备等，以确保替代燃料进入窑炉以后充分燃烧。尽管固废基替代燃料技术可以带来长期的经济效益，但初期的投资成本较高。目前全行业固体废物基燃料的替代率为 5%~10%，被认为是较好的潜在碳减排资源。用有热值的垃圾或者其他固体废弃物作为燃料，可进一步减少生产过程中的碳排放。

② 生物质替代燃料技术

生物质替代燃料被视为一种清洁能源，但其在水泥行业的大规模应用仍面临多重挑战，生物质资源供给系统不完善，供给量紧张，水泥行业生物质替代燃料使用比例普遍较低，且多个行业均出现需求增长的态势。此外，生物质燃料的热值较低，导

致其燃烧效率低、热耗增加，若无补贴则无价格优势。要实现水泥行业广泛应用，还需系统性解决供给稳定性、技术经济性、政策配套等问题。

以固体废物为主的燃料替代技术主要面临投资金额较高、装置占地面积大、废弃物来源不稳定、质量波动大、供应及运营体系不完善，固废及生物质燃料利用不足的问题。由于固废成分复杂、波动大、含水率高等因素，协同处置固废对水泥窑的稳定运行仍有较大影响，易导致水泥窑运行稳定性差、生产负荷降低等。目前水泥行业协同处置固体废物燃料，应用较多的是生活垃圾、工业固废和污泥，由于各行业归口管理部门不同，造成水泥企业协同处置生产线闲置，废物来源渠道不畅通的问题，导致生活垃圾等高热值固废用于水泥窑处置的总量占比较小。中国水泥企业生物燃料替代燃煤项目实际运行替代率仅可达到理论设计值的 50% 左右。

（2）示范工程

经过多年的探索，水泥企业和相关设备制造商正在经历由水泥窑“协同处置”废物向“利用”替代燃料的转变。入窑环节实现了从“协同处置”废物阶段的人工间歇式投料向“利用”替代燃料阶段的按照入窑物料的理化特性来选择配置不同喂料系统。水泥窑运行环节，实现了从以“无害化”处置废物为主要目标进行窑系统操作，到兼顾确保熟料产量质量和污染物达标排放，保证窑系统工艺参数稳定，实现燃料节约的转变。部分水泥企业已经着手开发替代燃料使用的窑系统智能化操作系统。

华新地维公司在 2022 年成功完成试点生产线节能降碳技术改造，在水泥窑大比例替代燃料技术领域取得突破，实现了替代燃料连续、稳定、大规模应用，燃料替代率稳定在 60% 以上，水泥熟料单位产品综合能耗低于 50 kgce/t。该项目实现了中国水泥行业大比例燃料替代技术的重大突破。

3.2.4 绿氢煅烧水泥熟料技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

绿氢煅烧水泥熟料技术的核心在于使用绿氢替代传统的燃煤或天然气作为燃料，通过燃烧绿氢提供热量来完成水泥熟料的煅烧过程，绿氢燃烧的主要产物是水蒸气，可从根本上解决燃烧二氧化碳的排放。目前绿氢煅烧水泥熟料技术仍处于实验室研究阶段，已有的个别报道中氢能的燃料替代率约 40% 左右，暂未有全部使用氢能煅烧水泥熟料的报道。相比于常规新型干法技术，绿氢煅烧水泥熟料技术可降低 30% 到 40% 的碳排放，降碳效果较好。国内水泥行业由于绿氢经济性、可得性和生产装备颠覆性技术等原因，各个水泥集团及研发机构对氢能煅烧水泥熟料技术的研究尚处于起步阶段。预计在 2050—2060 年，电力与氢能制备水泥技术将成熟并实现商业化。

（2）示范工程

国际上 Heidelberg、Holcim、CEMEX 等国际知名水泥公司均把氢能技术列为重要战略方向，并在大力发展氢能技术前期研究，早在几年前就进行技术布局和研发，并且有半工业化的试验运用。研究阶段离大规模商业化应用还有较大差距，且氢能的成本高昂，吨熟料氢燃料成本约 2000~2500 元，随着制氢成本不断降低，并累加碳价影响、环境效益等因素，未来有一定的应用空间。

绿氢的生产成本相对较高，这主要是由于电解水制氢过程中的电能消耗较大，且可再生能源制氢效率有待提高。降低成本是推动绿氢技术广泛应用的关键因素。虽然已有一些研究机构和企业在探索绿氢煅烧水泥熟料技术，但该技术在工业规模应用上仍处于起步阶段，需要进一步的研究和开发以提高技术成熟度和可靠性。绿氢作为替代燃料的经济成本和环境影响，需要考虑到包括替代燃料的制备、运输和使用过程中的成本和污染控制。

3.2.5 纯电 / 电辅助煅烧水泥技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

纯电煅烧技术主要利用电加热或电 - 热耦合的方式替代传统燃料（如煤、天然气等）进行水泥熟料的煅烧。相比于常规新型干法技术，纯电 / 电辅助煅烧水泥技术可降低约 30%~40% 的碳排放。虽然电能作为一种清洁能源在水泥煅烧过程中的应用具有潜在减碳效果，但该技术在水泥行业的应用还处于探索阶段，尚未大规模商业化。电辅助煅烧水泥技术的挑战和难点包括高能耗及成本较高、设备改造复杂以及燃烧过程控制要求高等，这些因素都限制了技术的广泛应用。

未来可利用水泥厂的自然环境和地理位置，使用风电、光电技术、风光储技术，结合余热发电，改造现有水泥厂使其实现“零购电”或“近零购电”，同时耦合绿色能源技术途径减少水泥生产过程中的电力消耗，促进水泥生产的绿色能源低碳转型。

（2）示范工程

芬兰技术研究中心（VTT）开发了一种电加热回转窑，用于替代传统的燃料加热方式，从而减少水泥生产中的碳排放。该技术已在芬兰于韦斯屈莱成功完成大型原型实验，目标是实现水泥生产过程中 90% 的二氧化碳减排。2022 年，Cemex（墨西哥西麦斯集团）与芬兰 - 荷兰合资公司 Coolbrook 在电烧水泥技术方面的合作，Coolbrook 公司开发了 Roto 动态加热器（RDH）技术，技术的突破在于，仅使用电力，将窑炉加热到足够高的温度（约 1700℃）。Cemex 在其研发中心（如瑞士或西班牙的试验工厂）对 RDH 技术进行测试的初步结果显示，该技术可在水泥窑中实现稳定高温，满足熟料生产需求。尤其当由可再生能源供电时，该技术可消除 CO_2 用于工艺加热的燃料燃烧产生的排放。然而，RDH 技术的工业级示范仍在计划中。

3.2.6 水泥回转窑烟气 CCUS 技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

作为水泥熟料生产环节碳减排的“兜底”手段，CCUS 技术将是水泥行业碳减排极其重要的技术路径。根据水泥行业的工艺流程特点，水泥窑烟气中的 CO_2 浓度为 15%~25%，属于中低浓度碳源。燃烧后捕集技术中的化学吸收法被认为是现阶段水泥行业应用 CCUS 最为成熟的技术选择。此外，CCUS 技术在水泥生产中的典型应用还包括全氧 / 富氧助力水泥熟料煅烧等。水泥回转窑烟气 CCUS 技术可捕集 97% 的水泥碳排放，减排潜力巨大。预计到 2060 年，70% 熟料产量的窑线需要应用 CCUS 技术，技术应用后使得熟料碳排放因子降低到 0.068 kg/t 的水平，基本实现碳中和。水泥窑烟气成分复杂、粉尘量大且二氧化碳浓度低，导致捕集难度大、成本高，高额投资让一般企业难以承受。水泥行业 CCUS 项目的未来大规模发展需要进一步研究和应用以提高技术的可行性、稳定性。

① 化学吸收法

化学吸收法的基本原理为 CO_2 与吸收剂发生化学反应，形成不稳定的盐类，经加热，重新释放出 CO_2。较为成熟的化学吸收法工艺多基于乙醇胺类水溶液，这种方法适用于 CO_2 浓度较低且烟气量大的情况，能够有效捕获并处理烟气中的 CO_2。

② 全氧燃烧耦合低能耗碳捕集技术

采用制氧设备制造的高浓度纯氧气体与烧成系统产生的循环烟气混合再送入烧成系统中作为燃烧助燃气体使用，由此可大幅提升烧成系统排出气体中的 CO_2 浓度，干基 CO_2 浓度可达 80% 以上，大幅降低 CO_2 进一步捕集提纯的成本。

表 3.1　应用于水泥行业的主要碳捕集技术对比

技术	成熟度	优点	缺点
分体式钙循环技术	9	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；余热发电量高；电力成本为负值	反应器成本高；反应器设计难度高；解吸反应器能耗高；装置成本高
集成式钙循环技术	10	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；装置成本低；余热发电量高；电力成本低	反应器设计难度高；解吸反应器能耗高；装置成本高
化学链燃烧技术	4	捕集化石燃料燃烧的碳排放	无法捕集碳酸钙分解的碳排放
膜分离技术	8	占地面积小；总能耗低	气体分离膜需定期更换；辅助设备能耗高；装置成本高；电力消耗成本高；固定运行成本高
富氧燃烧技术	8	能耗低；装置成本较低	装置改造多
化学吸收法	10	捕集量大、选择性好、对原有设备改动较小、装备及操作灵活性大	吸收剂再生热耗较高、吸收剂损失较大、操作成本高、设备投资较大
物理吸收法	6	装置简单	能耗高
吸附法	6	装置简单	能耗高；运行成本高
LEILAC 技术	9	为可持续能源在水泥熟料生产领域的应用提供了可能；成本低；能耗低；可用可持续能源替代；能耗成本低	反应器设计难度高；仅针对分解炉内的碳捕集，需与其他技术结合使用；现阶段捕集率低

CCUS 技术在水泥行业才刚刚起步，技术推广面临着相关技术成熟度低、经验较少、成本较高、大规模商业化应用仍需进一步验证其稳定性和可靠性等难题。在现有技术条件下，安装碳捕集装置将产生额外的资本投入和运行维护成本较高，企业在投资 CCUS 项目巨额费用后，无法实现减排收益，严重影响了企业开展 CCUS 示范项目的积极性。2030 年前，CCUS 技术大多处于示范阶段，尚未达到大规模商业应用的成熟度，示范项目的化学捕集能耗约为 143 kgce/tCO_2，高出当前熟料综合能耗的 10% 左右。CCUS 技术各工艺环节均存在公用工程消耗，需要通过技术进步、能量综合利用实现能耗降低，进而降低成本。

（2）示范工程

海螺集团芜湖白马山水泥厂年产 5 万吨高品质级示范线是中国水泥行业首条 CCUS 示范工程。该项目于 2018 年建成，年碳捕集量为 5 万吨，是全球水泥行业首个水泥窑碳捕集纯化示范项目。项目采用两步法生产纯度为 99.99% 以上的食品级 CO_2 和纯度为 99.9% 以上的工业级 CO_2 产品。该示范线填补了国内水泥行业 CCUS 技术的空白。

青州中联水泥有限公司的年产 20 万吨 CO_2 全氧燃烧富集提纯示范项目是全球水泥行业全氧燃烧耦合碳捕集技术领域规模最大的项目之一，于 2024 年 1 月点火，进入试生产运行阶段。该项目投资 2.56 亿元，主体工程包括制氧系统、CO_2 自富集系统、CO_2 捕集提纯系统等，项目旨在打造成为全球全氧燃烧耦合低能耗碳捕集技术的标杆项目，推动水泥行业的绿色低碳发展。

回转窑烟气捕集到的 CO_2 可以用于多种用途，包括作为原料用于化工生产、食品级 CO_2 制造以及混凝土工业中作为固化剂使用。例如，Conch

Cement 公司已经建成了世界上第一个水泥窑烟气 CO_2 捕获和净化示范项目，年产 5 万吨工业级 CO_2 产品和 3 万吨食品级 CO_2。

3.2.7 水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

水泥熟料的悬浮煅烧是一项取消了回转窑和篦冷机的新型工艺，将“预热、分解、烧成、冷却”整个生产系统集成在一个立式塔架内，比现有的预热器高出三分之一左右，烧成温度设计为 1320℃，烧成的熟料只有小米粒大小。新型循环悬浮煅烧技术将回转窑内堆积态变为流态化，因而系统内部气固两相充分接触，换热效率提升，与现有同规模新型干法水泥熟料烧成工艺相比，热耗降低 10% 以上，电耗降低 5% 以上。该技术进一步发展面临原料要求高（需使用具有一定粒度和化学成分的物料）、设备和运行成本较高、操作和控制难度较大等难题，需要进一步攻关。

（2）示范工程

美国、日本、德国等国家的企业和研究机构研究应用悬浮沸腾煅烧熟料工艺技术取得了一定的成果。例如，美国的 Calera 公司利用该技术生产出了高质量的水泥熟料，其二氧化碳排放量比传统水泥生产方法减少了 70% 以上；日本的住友商事株式会社利用该技术生产出了高性能的冶金材料，其能源消耗量和二氧化碳排放量均比传统方法大幅降低。在国内，一些企业和研究机构也开始布局悬浮沸腾煅烧熟料工艺技术的研究和应用。例如，中国建筑材料科学研究总院成功研发出了具有自主知识产权的悬浮沸腾煅烧熟料工艺技术；中国建材装备集团牵头承担的中国建材集团第二期揭榜挂帅项目“新型内循环水泥熟料沸腾煅烧关键技术攻关及应用”于 2024 年 3 月启动，旨在突破水泥熟料煅烧新工艺。

3.3 技术展望和成本演变

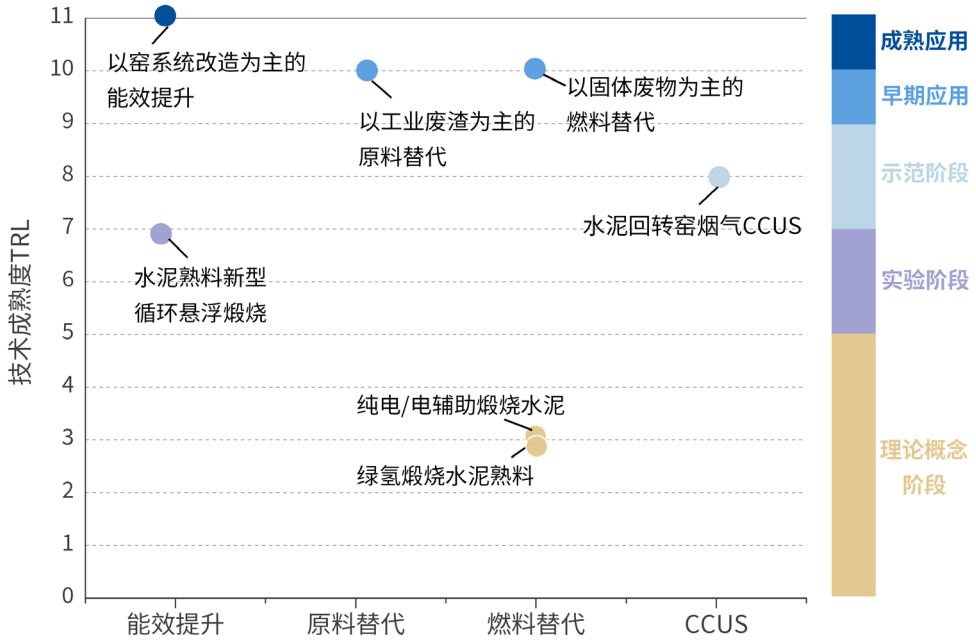
3.3.1 技术成熟度展望

水泥行业技术成熟度呈现“阶梯式”分布特征：短期减排依赖能效优化与燃料替代，长期深度脱碳则需突破电加热、绿氢等清洁能源加持下的流程再造等类颠覆性技术，其成熟节奏与可再生能源发展及政策支持强绑定，未来 30 年或迎来行业技术广泛革命。

基于新型干法水泥制备技术的窑系统能效提升技术已广泛成熟应用，通过节能、高效和自动化控制手段，显著降低了水泥熟料生产的能耗水平，短期内能够有效契合可持续发展战略的要求。与此同时，原料替代和燃料替代技术已进入早期应用阶段，国内众多企业已积极开展相关生产示范应用，积累了一定的实践经验。水泥熟料新型悬浮煅烧技术已完成实验阶段，正在开展相关工程研究以验证其技术可行性和应用潜力。然而，纯电 / 电辅助煅烧水泥技术和绿氢煅烧水泥熟料技术目前仍处于理论研究阶段，距离技术成熟和产业化应用仍有较大差距，需进一步加强研发和技术验证。末端脱碳的 CCUS 技术虽已有中试案例取得阶段性成果，但由于成本高昂以及捕集后碳产品的市场销路受限等问题，其大规模商业化推广仍面临诸多挑战。

图 3.4 2020 年水泥行业技术成熟度

注：技术成熟度详细划分见附录。



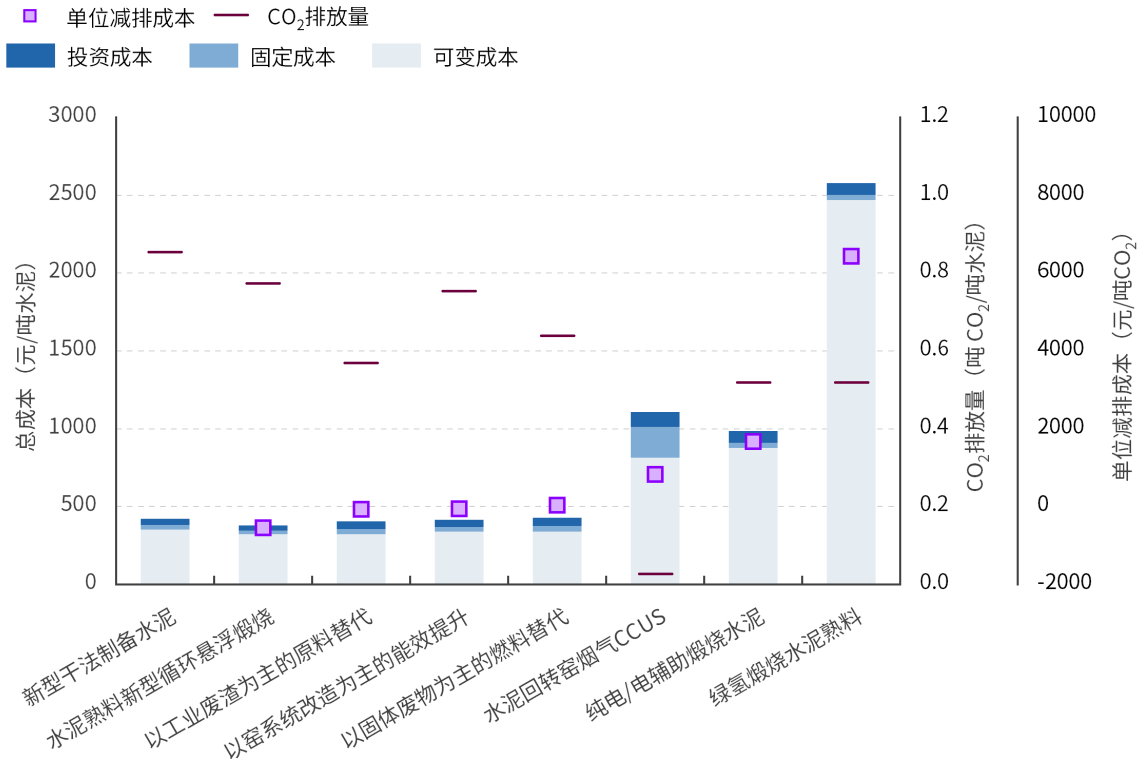
3.3.2 技术成本演变

水泥行业不同技术在成本和 CO_2 排放强度上存在显著差异（图 3.5）。总体来看，技术单位减排成本越高，技术的推广难度越大。相较于常规新型干法制备水泥技术，在短期内，水泥熟料新型悬浮煅烧技术虽然单位减排成本低，但由于其处于示范阶段，技术层面仍需进一步验证。未来在碳中和目标下，以窑系统改造为主的能效提升技术的单位减排成本约 -30 元 / 吨水泥，技术演进路径平稳，然而仅推广能效提升技术远不足以实现水泥行业碳中和，实施其他突破性技术对于实现碳中和至关重要。以固体废物为主的燃料替代技术的单位减排成本较低（约 33 元 / 吨水泥），以工业废渣为主的原料替代技术的单位减排成本为负值，能够实现在不影响生产效率的同时降低成本，技术应用可行性更高，此外，随着可再生能源发展，未来原料 / 燃料替代技术将在水泥行业的中长期脱碳路径中处于重要的地位。但由于当前废物回收体系不完善，技术应用水平较低。

绿氢煅烧水泥熟料技术的总成本较高，是常规生产技术的 6~7 倍，其中绿氢价格是成本高昂是主要原因。经预测，绿氢煅烧水泥熟料技术的总成本到 2060 年将下降到当前成本的约 25%，叠加碳价影响后可能在行业内部分推广。纯电 / 电辅助煅烧水泥技术和水泥回转窑烟气 CCUS 技术的成本也因为电价和技术成熟度不高等原因，成本优势尚未体现。水泥行业若采取 CCUS 技术，单位产品碳排放量可实现较低水平，是未来水泥行业迈向净零排放的末端兜底技术。水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术是一项颠覆性技术，目前还在实验阶段，该技术在大量减少燃料消耗的同时还能够节约成本，具有集成性特点，是一项非常有前景的能效提升技术。

图 3.5 水泥不同技术路线的单位减排成本

注：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。总成本是指生产一单位产品的总成本，包括投资成本、固定成本和可变成本。其中，投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

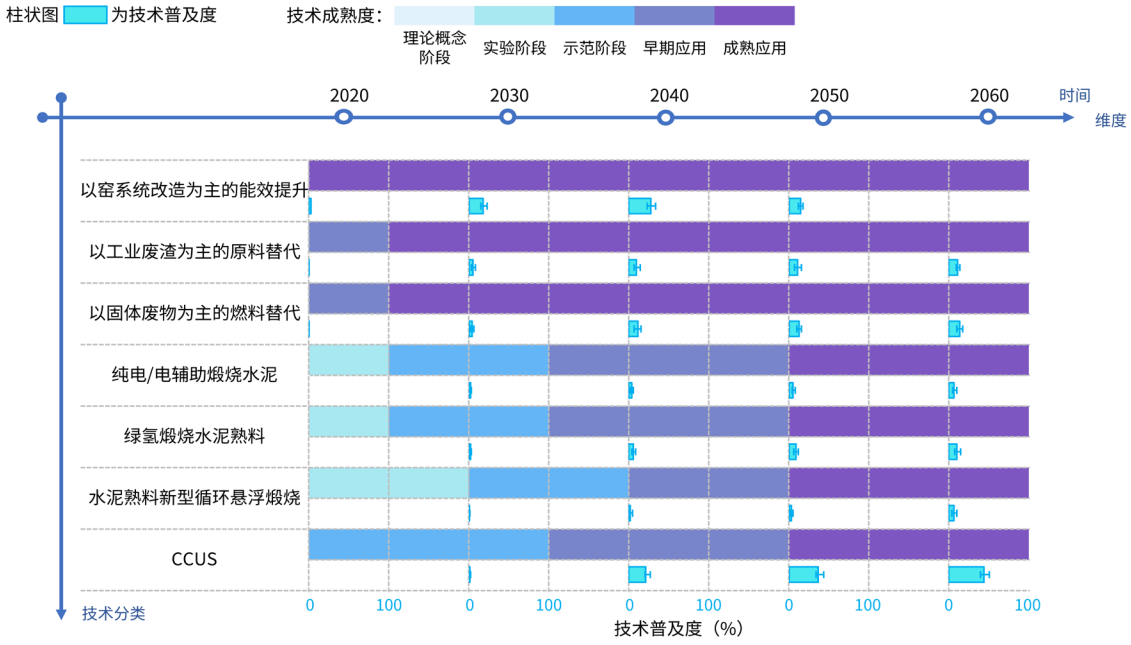


3.3.3 技术普及度展望

水泥行业在短期内的减碳主要措施是能效提升以及低效高排放产能退出。2040 年，水泥行业以窑系统改造为主的能效提升技术普及度达到 29%。2040 年后，水泥行业能效提升技术措施的扩张速度减缓，仅采用能效提升技术的工艺流程普及度逐步下降，随着材料循环体系的完善，原料 / 燃料替代以及 CCUS 等技术措施快速发展，预计到 2060 年，仅采用能效提升技术的工艺流程普及度降为 0%，以工业废渣为主的原料替代技术普及度达到 12% 左右，以固体废物为主的燃料替代技术普及度达到 15% 左右。2040 年后，CCUS 技术在水泥行业减排中发挥更大作用。到 2050 年，水泥行业 CCUS 技术的 CO_2 捕集规模在 12000~14000 万吨 / 年，在 2060 年 CCUS 技术普及度将达到 48%。绿氢煅烧水泥熟料技术、纯电 / 电辅助煅烧水泥技术和水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术在 2040~2050 年逐渐进入视野，技术普及度在 2060 年分别达到 11%、7% 和 7% 左右。

图 3.6 2020—2060 年水泥行业碳中和技术普及度

注：技术普及度反映了技术从研发阶段到实际应用的推广效果。技术普及度越高，说明该技术的应用范围越广。



3.3.4 技术对比分析

水泥行业碳中和关键技术的减碳原理、优劣势分析汇总如表 3.2 所示。

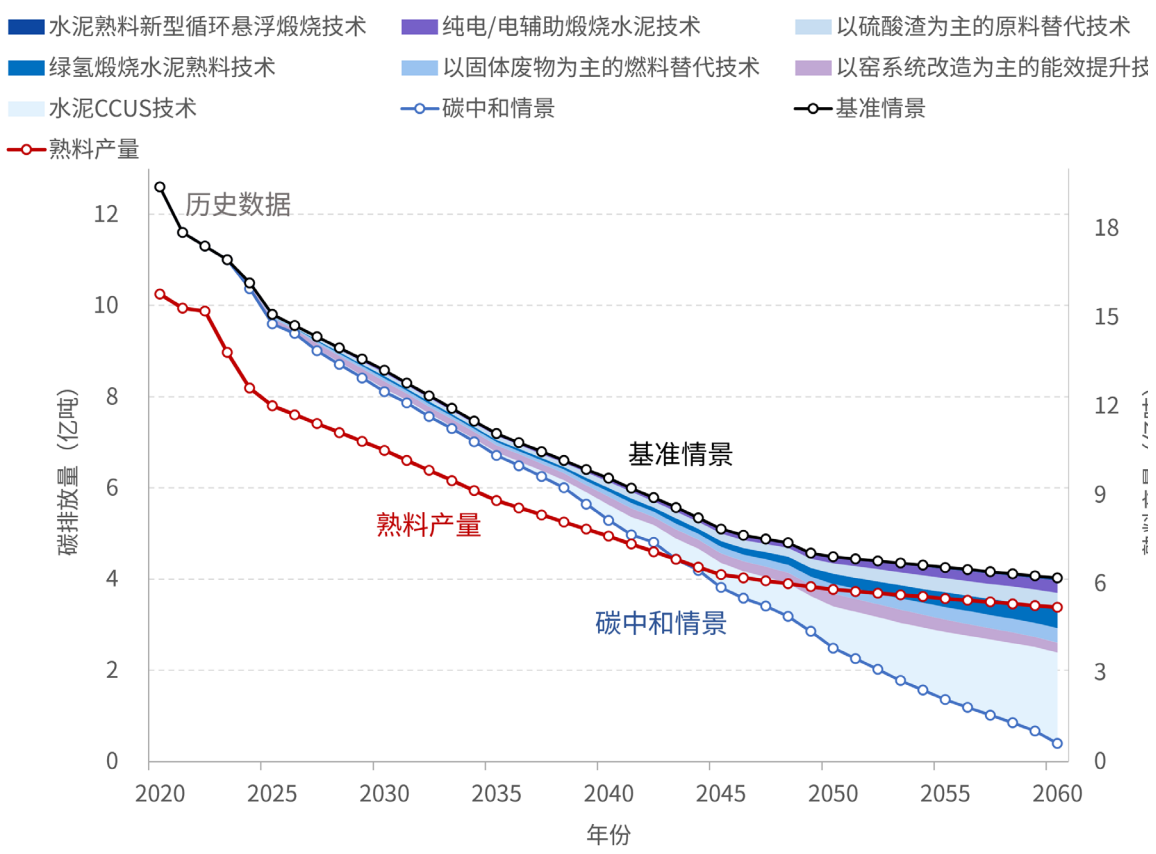
表 3.2　应用于水泥行业的碳中和主要技术

技术名称	技术原理概述	碳减排效果	技术成熟度	技术挑战
以窑系统改造为主的能效提升技术	针对生产线进行的节能技术改造，提高能源利用效率	吨熟料 CO_2 排放减少约 12%	11	老旧窑系统改造需适配新设备，可能面临停窑时间长、改造难度大的风险
以工业废渣为主的原料替代技术	采用工业固体废弃物替代石灰石原料，减少天然矿物消耗，降低 CO_2 排放	吨熟料 CO_2 排放减少约 30%	10	受限于工业废渣等资源，废渣成分波动性，需定制化工艺等约束
以固体废物为主的燃料替代技术	以具有一定热值的固体废物，包括垃圾衍生燃料（SRF/RDF）、轮胎衍生燃料（TDF）、污泥衍生燃料等，和生物质替代燃料	若替代率达到 30%，吨熟料 CO_2 排放可降低约 20%~25%	10	投资金额较高、装置占地面积大、废弃物来源不稳定、质量波动大、供应及运营体系不完善，固废及生物质燃料利用不足
绿氢煅烧水泥熟料技术	以清洁能源 - 绿氢替代燃料煤的熟料煅烧技术	吨熟料 CO_2 排放可降低约 30%~40%	3	技术不成熟、减排和维护成本高
纯电 / 电辅助煅烧水泥技术	以清洁能源 - 绿电替代燃料煤的熟料煅烧技术	若电力为绿电，理论上可实现零燃料碳排放，吨熟料 CO_2 排放可降低约 30%~40%	3	受限于电价和储能成本，且需解决高温电热转换效率、电极材料耐高温性、工艺稳定性等问题
水泥回转窑烟气 CCUS 技术	通过碳捕捉技术，将二氧化碳分离出来，再通过碳储存手段，将其利用或封存	理论上可以将烟气中的二氧化碳全部捕集，尚未有全尺寸 CCUS 项目运行	8	运输距离过长增加成本；工业级碳利用市场未成熟
水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术	使用不同于现有新型干法水泥窑的工艺生产水泥熟料	吨熟料 CO_2 排放可降低约 10%~25%	7	单条产线改造成本高；耐材更换频率加快，年维护成本增加约 8%~12%

3.4 水泥行业碳中和技术路线图

水泥行业实现碳中和可分为四个阶段：2025—2035 年为短期控碳阶段，重点通过极致能效提升、落后产能退出和固废替代减少煤炭依赖，CCUS 进入初步示范应用阶段；2035—2040 年进入结构转型期，大批旧窑退出，固废、生物质燃料等替代技术全面推广，绿氢、电力煅烧工艺逐步成熟，CCUS 在回转窑烟气中实现初步推广；2040—2050 年为深度脱碳阶段，燃料替代率持续提升，氢能与电力煅烧工艺进入试点示范，CCUS 产能占比提升至 25%~40%，但生物质等替代燃料的稳定供应仍是挑战；2050—2060 年进入碳中和冲刺阶段，以电力和氢能为核心的新型燃料体系实现商业化，煤炭基本退出，CCUS 支撑下水泥行业碳强度接近净零。

图 3.7 水泥行业碳中和技术路线图



3.5 碳中和技术应用推广政策建议

为加快推进水泥工业碳中和技术创新，创造有利于商业化应用平台和环境，激发企业在不同场景应用碳中和技术并不断降低转型成本，提升产业绿色低碳发展竞争力，提出以下政策建议：

推动以窑系统改造为主的能效提升技术发展。开展生产端到消费端的碳足迹评估和减排成本曲线评估，将数字化运营与低碳转型相结合，利用人工智能和机器学习等手段在生产过程中减少波动、提高能效，引导企业通过“低碳 + 数字化”的运营将效率提升做到极致。

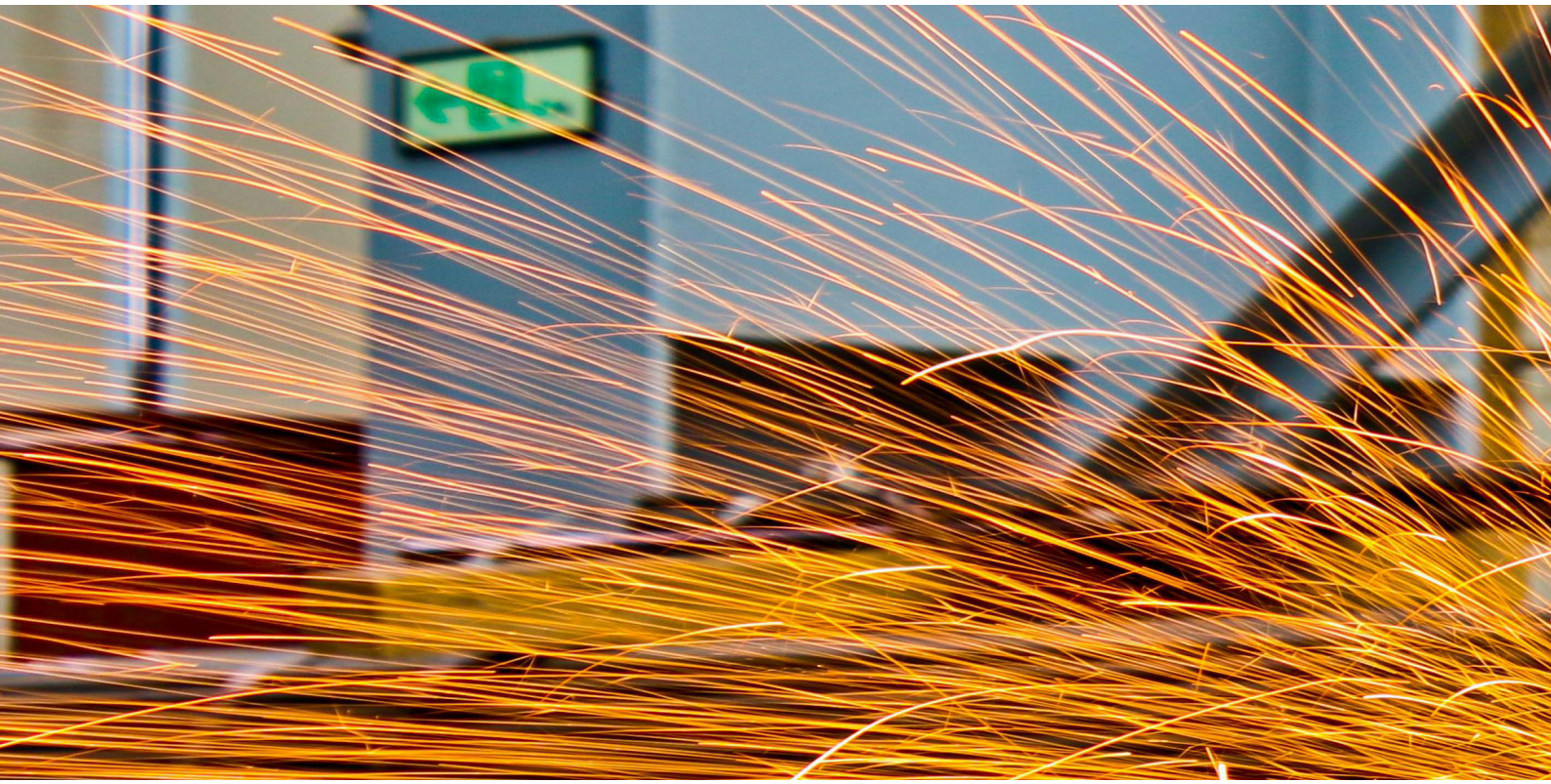
将固体燃料掺烧纳入绿色能源补贴体系。提高低碳 / 零碳替代原料的应用比例。对水泥窑协同处置生物质、生活垃圾的项目，提供与垃圾焚烧发电同等的电价补贴。设立掺烧比例阶梯补贴，减免掺烧项目的环保税、资源税，对相关设备投资实行增值税即征即退。

建立生物质燃料全产业链政策支持机制。在农林资源丰富地区布局生物质燃料加工基地，对秸秆 / 林业废料收储运环节给予每吨 50~100 元补贴。将生物质燃料纳入“绿色物流”体系，降低运输成本。要求重点区域（京津冀、长三角）水泥企业提高生物质燃料替代率标准（2030 年达 30%）。

利用市场机制推动水泥行业减排。全国碳市场经历过渡期后按照统一的基准线方法分配配额，鼓励使用电石渣、钢渣、硅钙渣等低碳 / 零碳工业废渣和副产品作为水泥生产中的替代原料。

持续加大研发投入，探索新兴技术的商业化应用。加强对于绿氢煅烧水泥熟料技术、纯电 / 电辅助煅烧水泥技术和水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术等新兴技术的定向研发和财务激励。将悬浮煅烧等技术列入《国家重点低碳技术目录》，对示范项目给予 30% 设备投资补贴。推动形成绿色水泥产业联盟，帮助水泥这一传统行业焕发新活力，支持中国碳中和旅程行稳致远。

水泥回转窑烟气 CCUS 技术。扩大示范规模，完善封存法规与跨区域合作机制。推动 CO_2-EOR 等利用场景，提升项目收益；纳入国家碳中和基础设施规划，实现捕集 - 运输 - 封存一体化。在碳交易体系设计中，对于 CCUS 项目的实际减排量计入减排信用可用于市场交易。



第 4 章　有色行业碳中和技术展望

铝冶炼行业是有色金属行业实现碳中和的关键，本章重点针对铝冶炼行业展开分析。本报告核算碳排放的边界包含铝冶炼过程的直接排放以及间接排放，按照国民经济行业分类对应产品代码为铝冶炼（3216）。传统电解铝生产工艺使用炭素作为阳极对氧化铝进行电解，碳中和技术主要包括惰性阳极技术、氯化铝电解法制铝技术以及废铝再生技术。在“双碳”目标下，综合各类技术特点，预计短期内铝冶炼行业将在以电解槽改造为主的能效提升技术基础上，利用废铝再生技术实现减排，长期将主要依赖惰性阳极技术、氯化铝电解法制铝技术和废铝再生技术（由使用化石能源转向使用清洁能源）实现碳中和。

04

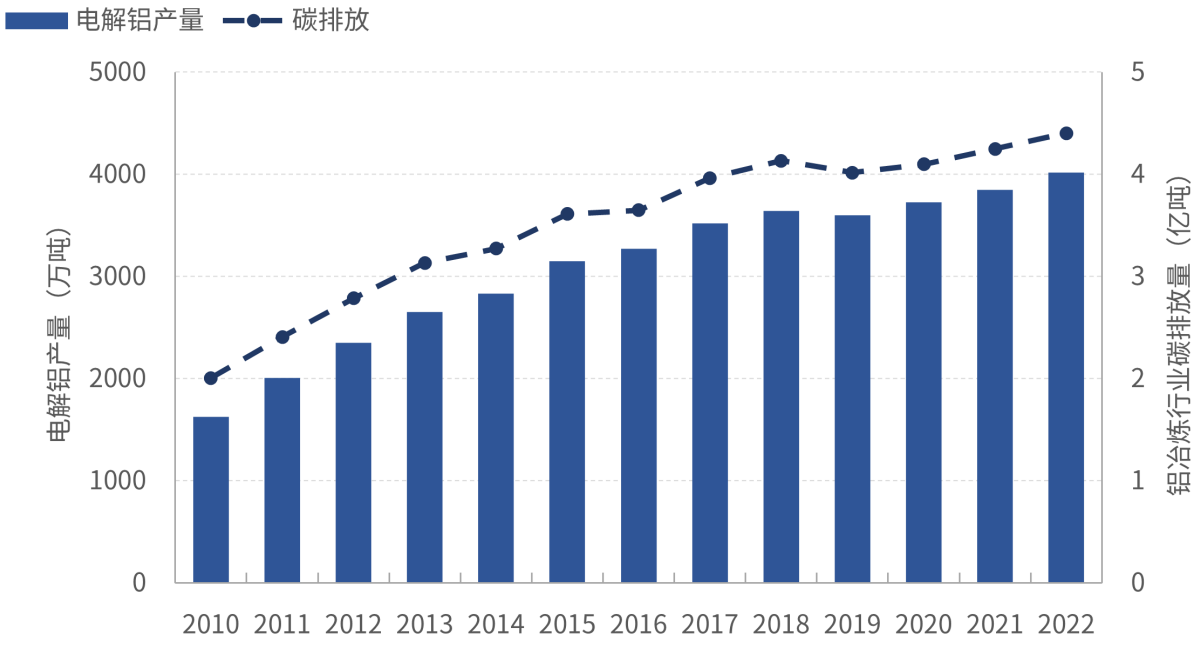
INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

4.1 行业现状与趋势

铝冶炼行业是中国有色金属行业的重要组成部分，电解铝产量占到十种有色金属产量的一半以上。在2017年之前，铝冶炼行业发展迅速，产能过剩矛盾逐渐凸显。随后国家出台了一系列调控电解铝无序扩张政策，电解铝产能在2018年至2020年期间进入平台期。2020年后，中国铝消费结构逐渐发生变化，尽管传统建筑型材、建筑模板型材消费下降，但新能源汽车型材、光伏型材增加，这一系列因素使得从2020年至2022年，国内铝冶炼产量有所增长，产能利用率明显提高，2022年电解铝产量4017万吨，占全球总产量的58%。

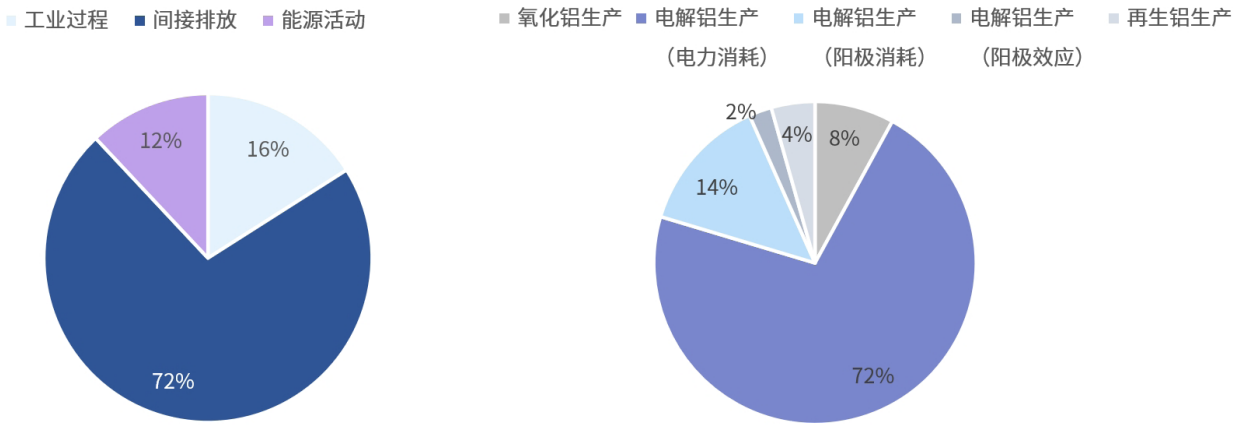
图4.1 2010—2022年电解铝产能、产量及碳排放情况

注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。



铝冶炼行业碳排放由2010年的2.0亿吨左右增长到2018年的4.1亿吨，然后进入平台期，在后续的2年中维持在4亿吨左右波动。2020年，铝冶炼行业CO_2排放量约4.1亿吨，随后开始逐渐上升，达到2022年的4.4亿吨，占有色金属行业总排放量的66.7%。铝冶炼行业电力、热力消耗产生的间接排放占比高，占行业的72%。

图 4.2 电解铝碳排放占比情况

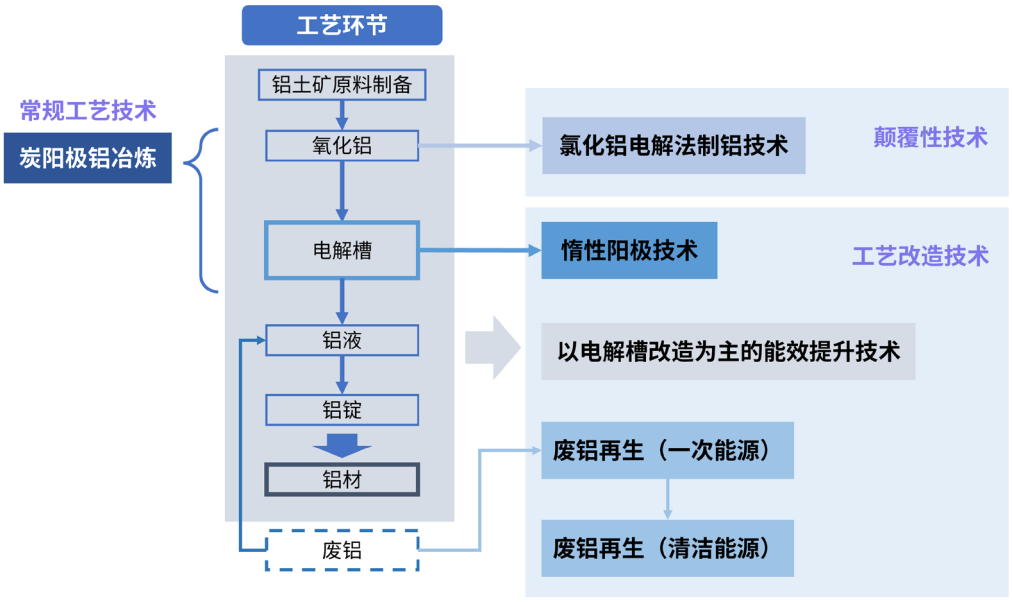


2022 年，中国铝工业体系已完整建立，部分工艺、设备达到国际先进水平，前沿技术的扩大试验与国外先进企业还存在一定差距。2024 年，中国电解铝产量达到 4400 万吨，同比增长 4.6%，延续了稳中有升的增长趋势。基于铝需求总量和再生铝产量的预测，同时结合对今后未锻轧铝及铝合金、铝材进口量和出口量的判断到 2030 年铝产量将达到 5100 万吨，随后将趋于稳定，到 2060 年维持在 5300 万吨左右。

4.2 碳中和关键技术

在碳中和目标之下，铝冶炼行业将使用电解槽改造为主的能效提升技术、废铝再生技术、惰性阳极技术和氯化铝电解法制铝技术实现持续降碳。炭阳极电解是铝冶炼行业的常规工艺技术。在炭阳极电解的基础上，铝冶炼行业通过电解槽的大型化、智能控制等电解槽改造为主的能效提升技术实现降碳。废铝再生技术通过将废旧铝制品回收、处理并重新熔炼成铝合金，能够实现废旧铝资源的高效利用，节约大量能源，减少二氧化碳排放。惰性阳极技术是近年来铝工业中的一项重要突破，使用金属陶瓷、合金阳极和金属氧化物等替代传统的炭阳极，避免了传统炭阳极在电解过程中产生的二氧化碳排放。氯化铝电解法制铝技术是一种通过电解氯化铝溶液来生产金属铝的方法，是一种颠覆性技术，该技术取消了对高质量碳基材料的需求，可以在较低的温度下进行，减少温室气体排放。

图 4.3 有色行业碳中和技术体系



4.2.1 以电解槽改造为主的能效提升技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

水电解铝工艺技术使用炭素作为阳极，对熔融状态的冰晶石和氟化盐混合物中的氧化铝进行电解。在传统工艺中，新型稳流保温铝电解槽技术、铝电解槽双端节能技术、石墨化复合阴极技术等能效提升技术经过多年研发与实践，已较为成熟。

① 新型稳流保温铝电解槽技术

该技术通过优化电解槽阴、阳极组及低阴极压降组装技术降低槽电压。此外通过优化阴、阳极组材质和规格结构降低电阻，使阴极铝液中的水平电流分量降低，进而降低铝液界面变形，释放有效极距，提高电流效率，实现吨铝节电 500kWh。新型

稳流保温铝电解槽节能技术从能量平衡的角度优化电解槽内衬材料和结构，改善防渗效果并加强保温，使之与阴、阳极区自耗能量降低相适应，进而降低电解槽无效散热，提高能量利用率。在阳极电流密度 0.74 A/cm^2 时，阴极压降可降低至 169 mV，阴极组装压降控制在 40 mV 以下，石墨化阴极电解槽的理论槽电压达到 3.70 V。

② 铝电解槽双端节能技术

该技术从铝电解槽能量流特征研究出发，以铝电解热特性（过热度和槽膛内形）优化为主要控制目标，通过仿真模型优化研究、电解质熔体界面的熔析 / 凝结机理实验研究、集热介质与集热技术即集热器模块的开发、热调控系统设计与工业试验、回收低温热能的工业应用等方面，开展了铝电解槽输入端与输出端节能全面、系统的理论研究、技术开发和工业试验。工业应用表明，在输入端，电解槽电压降低 80~100 mV，电解质过热度降低 4~5℃并稳定控制在 8~12℃范围，电流效率提升 0.7%，吨铝节电达 360 kWh；在输出端，通过热能聚集与回收利用实现吨铝节能 420 kWh。最终电解槽综合节能（热电合计）约 6%，折合吨铝总节能达 780 kWh。

③ 石墨化复合阴极技术

该技术采用石墨化阴极代替传统石墨质阴极，从阴极结构、材质与受热应力应变特性匹配关系入手，匹配阴极炭块和预热温度的关系。通过多温度带协同强化精准控制，有效降低阴极炭块在长度和高度方向的温度梯度，满足生铁浇铸组装的工艺要求。采用生铁浇铸技术连接阴极炭块与钢棒，降低 Fe-C 接触压降。采用大截面钢棒，并优化钢棒与炭块端部的连接实现阴极压降和水平电流的同时降低。阴极炭块生铁浇铸组装成功率 >99.9%，运行阴极压降 <200 mV(石墨化)、<260 mV(石墨质)，相比传统扎糊组装形式降低 50~80 mV，吨铝节电约 200 kWh。首批电解槽运行至今寿命达 2600 天，较国际领先技术槽寿命提高超过 400 天。

④ 低温高效电解槽技术

传统铝电解槽依赖 950~970℃的高温环境维持氧化铝分解反应，而该技术通过重构电解质体系（如引入低熔点冰晶石 - 氧化铝复合熔盐），将工作温度降至 880~920℃，在确保铝电解反应动力学性能的同时显著提升能效。其优势体现在三方面：一是电耗降低显著，理论节能量达 300~500 kWh/tAl；二是低温减缓炭阳极氧化速率，减少阳极消耗及配套碳排放，炭阳极氧化速率下降 20%~30%；三是电解槽内衬材料热应力下降，电解槽内衬寿命延长 10%~20%。然而，低温环境也带来技术挑战，包括电解质黏度上升导致的铝液流动性下降，需改进阳极气泡排出机制；以及电流效率损失问题，需研发新型添加剂（如稀土氧化物）优化熔盐导电性。

（2）示范工程

中国以电解槽改造为主的能效提升技术产业链具有完整自主知识产权，装备和材料完全实现国产化，在国内部分企业已开展应用或建立示范工程。

新型稳流保温铝电解槽技术先后在中国铝业股份有限公司、河南中孚铝业有限公司、林州市林丰铝电有限公司、河南永登铝业有限公司、青海西部水电有限公司、新疆生产建设兵团第八师天山铝业股份有限公司、山西兆丰铝电有限责任公司等 7 家企业完成了推广应用。自 2013 年以来，该技术累计实现节电 51.3 亿 kwh，减排二氧化碳 297.1 万吨，综合效益约 40.1 亿元。

铝电解槽双端节能技术在河南中孚铝业有限公司 4 台 400 kA 电解槽开展了示范工程。开发了铝电解槽专用特种高效集热器，开发了铝电解双端节能工业系统，实现电解铝大规模低温热能资源跨行互联与高效利用，总投资 2000 万元。项目实现了降低槽电压 80~100 mV，电流效率提高 0.7%，折合吨

铝节能 780 kwh。

石墨化复合阴极技术在广西华磊新材料有限公司应用，对全系列 300 台 500 kA 铝电解槽进行改造，优化电解槽内衬形式，大幅度降低电解槽能耗至 12700 kWh/tA1 以下，相比改造前，吨铝直流电耗降低 300 kWh 以上。

4.2.2 惰性阳极技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

惰性阳极技术是指电解过程中采用不消耗或消耗极为缓慢的阳极替代传统的炭素阳极，从而消除与炭阳极有关的排放，相比传统生产工艺，采用惰性阳极技术有望降低吨铝碳排放 15% 以上。在铝电解领域，若使用电力为清洁电力，惰性阳极技术有望实现铝电解过程的零排放。

惰性阳极技术仍处于工业化应用开发的起步阶段，许多关键材料性能问题尚未解决，特别是惰性阳极材料工程化制备及新型结构电解槽的技术研发。现有惰性阳极材料在寿命、导电性、耐蚀性、力学性能等方面尚无法满足使用工业应用的要求，兼备高导电性、低腐蚀率、长寿命特性的惰性阳极材料与宏量制备工艺尚不成熟。惰性阳极通过改变反应机理，使电解过程中无需炭阳极作为还原剂参与反应，避免了 CO_2 的直接排放。然而，没有还原剂参与反应使得电解过程电耗增加，在当前的能源结构下，生产成本和 CO_2 排放均有所增加。因此该技术仅在部分企业开展了中试试验，距离工业化应用还有较大差距。

（2）示范工程

国内外已研究的惰性阳极技术主要包括：尖晶石型（AB_2O_4）复合金属氧化物阳极、CeO_2 氧化物涂层阳极、Cu-Al 合金阳极、Ni-Fe 基合金阳极、NiF_2O_4 基金属陶瓷阳极、气体惰性阳极等。2001 年美铝（Alcoa）开展了惰性阳极试验，目标为电流效率 95%，槽电压 4.2 V，吨铝直流电耗 13200 kwh，电解温度 960℃，α- 氧化铝饱和度 33%，能耗相对节约 15%~32%。俄罗斯联合铝业公司 2021 年 10 月份对外宣称该公司已采用新一代惰性阳极电解槽试产出 99.7% Al 的原铝，是全球最先使用惰性阳极工艺批量生产原铝的公司。2024 年 11 月，俄铝首次使用惰性阳极进行铝电解槽的预热和启动。

中国的惰性阳极研发起步于 20 世纪，基本与发达国家同步发展。迄今为止，包括中国铝业、中南大学在内的诸多企业和高校均开展了惰性阳极技术的研究。如 2011 年，中南大学与中国铝业集团联合开展了金属陶瓷惰性阳极 20 kA 铝电解工程化试验，这是国内首次中长期惰性阳极铝电解试验，系统地考察了金属陶瓷惰性阳极规模铝电解的可行性，获得了翔实可靠的技术参数和丰富的操作经验。2024 年，中南大学在魏桥集团位于云南的生产线进行惰性阳极中试线试验，主要对惰性阳极的寿命、电导率以及耐腐蚀性进行考察。明泰铝业是中国第一家在其生产中测试 ALLOW INERTA™ 铝的公司，该铝采用革命性的惰性阳极技术生产，此产品后续计划用于电气工程，主要是电动汽车动力电池。然而，中国惰性阳极技术仍处于工业化应用开发的起步阶段，许多关键材料性能问题尚未解决，与发达国家的差距逐渐拉大，需进一步加强研发力度和规模。

4.2.3 氯化铝电解法制铝技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

氯化铝电解法制铝技术是指把直流电通入溶有氯化铝的碱金属和碱土金属氯化物电解质中，在电解槽阴极析出铝的一种铝电解方法。与冰晶石 - 氧化铝熔盐电解法相比，可节电 30%，此外还有占地面积小、单槽产量高、可避免强磁场等优点。氯化

铝电解法的关键是采用双极性电极多室电解槽。这种电解槽的电极有阳极、阴极和诸多双极性电极，所有电极均由石墨制成。石墨电极几乎不消耗，不需要经常更换阳极，阳极、阴极和双极可密封在电解槽中，从而可使电解操作大为简化。相比传统生产工艺，采用氯化铝电解法制铝技术吨铝碳排放有望降低约 50%。

此外，对于传统炭阳极熔盐电解法，CO_2 的直接排放相对于间接排放量非常小，且烟气量大，使烟气中的 CO_2 浓度极低，CCUS 适用性差，而对于氯化铝电解制铝技术，在碳热氯化法制备氯化铝的过程中，加入 C 作为还原剂，会产生副产物 CO_2，氯化铝电解技术不仅电耗低于传统电解铝技术，且碳热氯化法过程中产生的 CO_2 浓度较高，有望使用 CCUS 技术对 CO_2 进行捕集。

氯化铝电解法制铝技术存在氯化铝及其化合物对许多设备和材料具有高度腐蚀性的问题，且电解液的高挥发性给从烟气中回收氯化铝带来困难，其设计和运行仍然面临许多技术和经济上的挑战。

（2）示范工程

Alcoa 公司自上世纪 70 年代就开始着手氯化铝电解研究，所采用的是氯化无机熔盐体系，电解温度可以降低到 700℃，在 1973 年宣称成功进行氯化铝融盐电解，并建立了一座年产 1.5 万吨的试验厂，于 1976 年投产，使用氯化铝融盐电解法进行铝的生产。随着全球各行业降碳减排压力的不断提高，美国铝业、俄罗斯铝业等龙头铝企业均加快了研发铝电解降碳减排新技术的进程，开展了一系列半工业试验，并取得了突破性进展。海德鲁专有的以氯化铝电解的 HalZero 技术初始测试阶段的结果较为理想，现在已经准备开始深入研究，目标是到 2025 年生产首批试点产品，到 2030 年实现工业规模的试点并投入运行，其采用的电解质体系未见报道。

中国氯化铝电解法制铝技术主要集中于基础研究，尚未有工业化示范推进。中国铝业股份有限公司开发了以氯化铝替代现有氧化铝为原料的铝电解冶炼技术，完成了氯化铝冶炼电解槽设计，并开展实验室小试、中试和扩大试验，已生产出合格铝锭。

4.2.4 废铝再生技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

再生铝是由废纯铝、废铝合金或含铝废料重新熔炼得到，传统再生铝工艺技术为使用一次能源作为热源的废铝再生技术，由于铝的熔点较低，天然气作为一次能源，转化效率高、成本低，熔化废铝主要采用天然气作为能源。出于成本、效率和 CO_2 排放的考虑，电力以及其他生物质燃料未被作为再生铝熔炼的能源。随着技术进步，绿电在中国占比逐步提高，当绿电或生物质等清洁能源成本和 CO_2 排放大幅降低，未来将取代天然气作为再生铝熔炼的能源。相对于原生铝生产，再生铝吨铝碳排放量降低 90% 以上，若使用清洁电力碳排放将进一步降低。

① 废铝的连续熔炼和处理技术

废铝的熔炼及熔体的处理是保证再生铝质量的关键工序。铝熔体的变质与精炼净化，不仅可以改变铝硅合金中硅的形态、净化铝熔体，还能够大大改善铝合金的性能。铝熔体的精炼变质与净化多采用 NaC_l、NaF、KCI 及 Na_3AIF_6 等氯盐和氟盐处理，也有采用 C_{12} 或 C_2C_{16} 进行处理。低成本的连续熔炼和处理工艺，可使低品位的废杂铝升级，用于制造供铸造、压铸、轧制及合金用的再生铝锭。

② 废铝液化分离技术

该工艺装置中设有允许气体微粒通过的过滤器，在液化层，铝沉淀于底部，废铝中附着的油漆

等有机物在 450℃ 以上分解成气体、焦油和固体炭，再通过分离器内部的氧化装置完全燃烧。废铝的液化分离是回收金属铝的发展方向，它将废铝杂料的预处理与重新熔铸相结合，既缩短了工艺流程，又可以最大限度地避免空气污染，从而使再生铝的回收率大大提高。

大力推进再生铝已成为中国乃至全球铝工业低碳转型的重要路径之一，然而，废铝回收加工企业存在管理粗放、协同性差、损耗严重等问题，亟需进一步促进业务高效协同、降低损耗和优化经营管理，助力废铝再生技术取得突破。

（2）示范工程

2015 年后，随着国家对电解铝产能的限制及落后产能的淘汰，再生铝相关项目数量及规模逐渐增长。2022 年，中国再生铝产量稳步增长，达到 865 万吨，同比增长 8%，占总产量约 20%。

再生铝保级利用是指企业依据废铝原料及废料内微量元素配比，再生出与废铝型号相一致的铝合金原料，其可继续用于废铝来料的应用场景。南山铝业 10 万吨高品质再生铝保级综合利用项目 2023 年底进入试生产阶段，采用先进的废铝保级再生熔炼工艺，能够将废弃铝材经过破碎、磁选、涡旋、脱漆、熔炼等工艺流程处理后，熔炼出高品质铝水，以再生铝替代火电原铝用于下游汽车轻量化等领域深加工，在降低能耗的同时，有效减少 CO_2 排放。为了进一步提高车用铝材的保级回收利用水平，Novelis 公司与客户合作开发 6xxx 汽车内板。这种先进的合金开发理念摆脱现有 6xxx 汽车外板和 5xxx 汽车内板的合金搭配，有效减少汽车板合金种类，提高其回收效率，降低回收成本。到 2026 年，Novelis 计划将再生铝的使用比例提升至 80%；到 2050 年提升至 100%，实现企业层级碳中和。

4.3 技术展望和成本演变

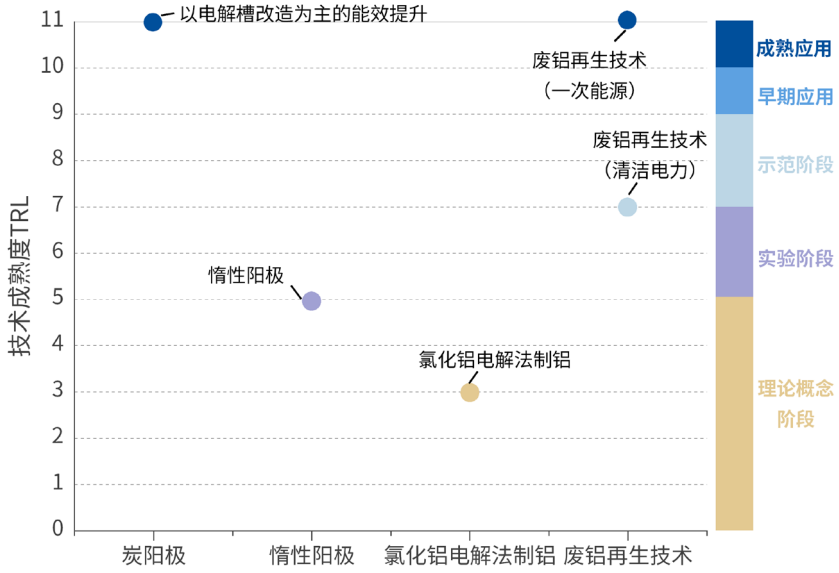
4.3.1 技术成熟度展望

使用炭素作为阳极的传统电解铝技术和使用一次能源作为燃料的废铝再生技术作为主流生产技术已在行业内稳定运行数十年，产业化成熟度非常高。对于以电解槽改造为主的能效提升技术，新型温流保温铝电解技术主要应用于中铝集团所属电解铝企业，在集团以外推广进展缓慢；铝电解槽双端节能技术由于低位余热利用场景有限，投资回报率较低，未广泛开展应用；石墨化阴极技术属于对电解槽阴极的局部改造，技术成熟、节电效果显著，现国内企业部分电解槽在大修期间已完成石墨化阴极改造，其余大部分电解槽也已列入改造计划，以电解槽改造为主的能效提升技术较为成熟。

废铝再生技术在中国已成熟应用，然而目前废铝再生技术主要是与一次能源结合，受清洁能源发展和价格的影响，尚未与清洁能源相结合，未来是进一步发展的方向。在氯化铝电解体系中，阴极材料变为金属材质，由于研发投入大、不确定因素多；惰性阳极技术材料寿命短，大型异形制造困难的问题还有待突破；当前技术发展阶段下运行成本不具有优势，因此，惰性阳极电解技术和氯化铝电解技术还停留在小型试验阶段，在国内没有进行规模化中试试验，研发不确定性强，投资回报率低，正式产业化还需漫长的周期。

图 4.4 2020 年铝冶炼行业技术成熟度

注：技术成熟度详细划分见附录。



4.3.2 技术成本演变

随着工艺设备的成熟、设计安装效率提高，铝冶炼行业碳中和技术的单位产品固定投资成本均呈缓慢下降趋势。受海外资源供给和碳价影响，传统电解铝炭阳极技术总成本在 2025—2060 年持续小幅上升。

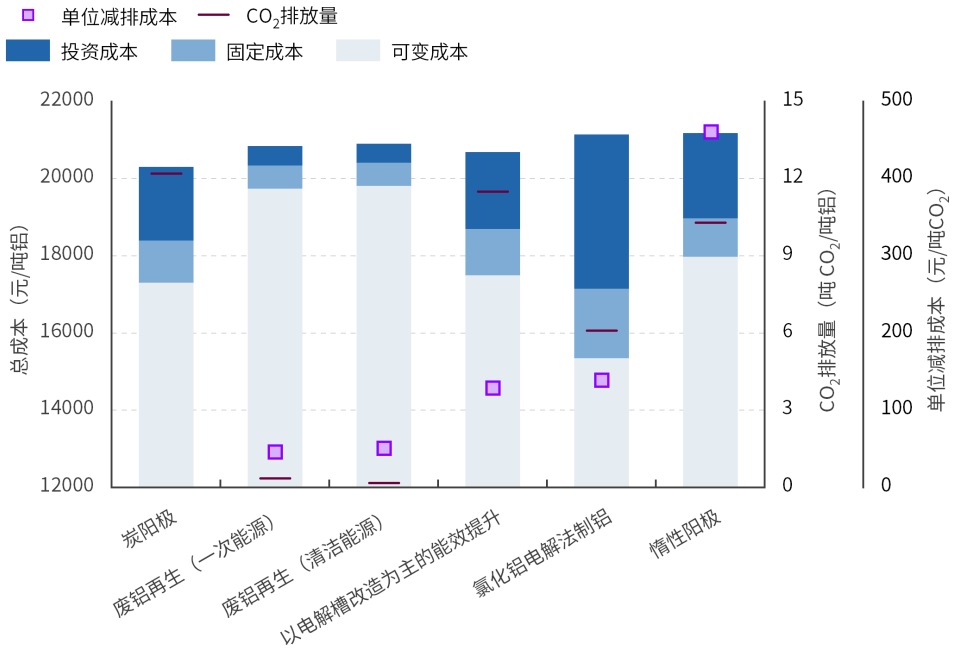
相较于铝冶炼常规工艺技术，以电解槽改造为主的能效提升技术生产总成本比常规工艺技术生产总成本吨铝高 300~500 元。废铝再生技术无论使用一次能源还是清洁电力作为再生铝生产的能量来源，设备均比较简单且固定投资接近。废铝再生技术总成本受废铝价格影响较大，2020-2030 年，受废铝资源供给紧张影响，传统使用一次能源的废铝再生技术成本将持续上升，到 2030 年，使用一次能源的废铝再生技术总成本约 22000 元 / 吨铝，比常规工艺技术总成本高约 1000 元 / 吨铝，若在生产再生铝时由使用一次能源转向使用清洁电力，生产总成本将高出约 500 元 / 吨铝。2040 年后，废铝再生技术总成本持续下降，到 2060 年使用清洁电力的废铝再生技术总成本将降至约 20000 元 / 吨 CO_2，届时成为铝冶炼行业的主要生产工艺。

传统电解铝生产需要频繁更换、回收、生产阳极，扒渣等操作，加重了工人的劳动强度，惰性阳极和氯化铝电解技术总体上大大减轻了更换电极的频率，生产过程得到简化，工人数量和劳动量大大降低，可变成本降低。然而，惰性阳极技术虽然消除了直接排放，但增加了间接排放，且受技术投资成本影响，2030 年总成本较常规工艺技术高出约 500 元 / 吨铝，在 2040 年以后，惰性阳极技术成本将持续下降并逐步低于常规工艺技术。受技术成熟度影响，氯化铝电解技术预计在 2050 年后才迎来成本的下降和推广。

图 4.5 铝冶炼不同技术路线的单位减排成本

注 1：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

注 2：图中废铝再生技术分为使用一次能源和使用清洁能源。传统再生铝工艺技术为使用一次能源作为热源的废铝再生技术，废铝再生技术（清洁能源）是使用清洁能源替代传统化石能源的废铝再生技术。



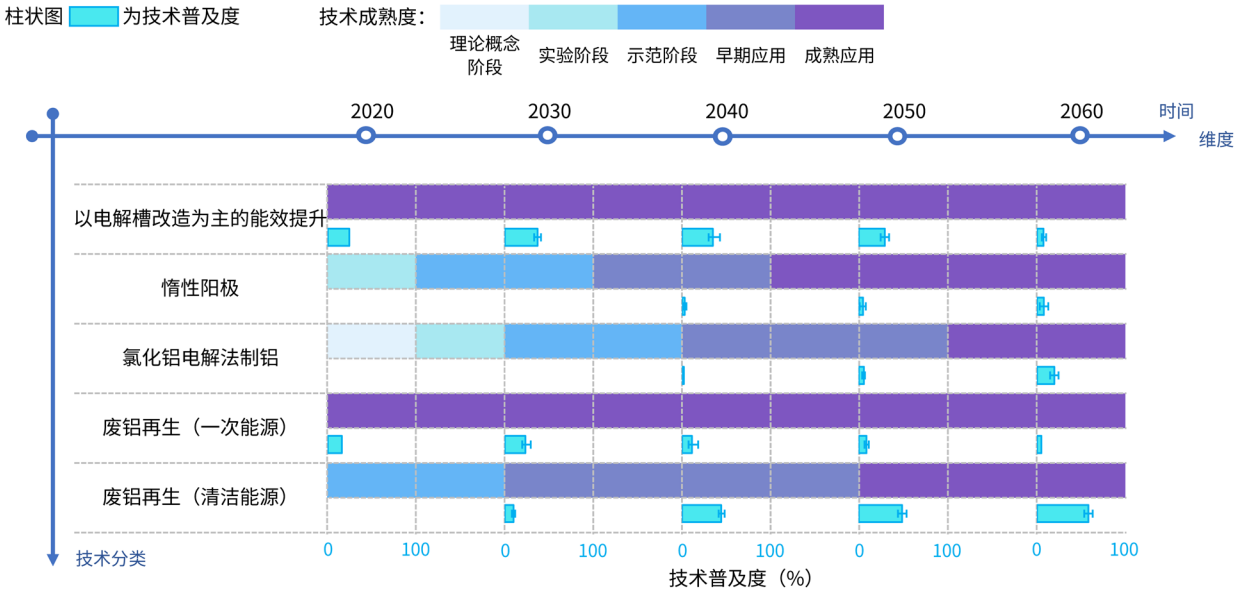
4.3.3 技术普及度展望

2030 年前，电解铝行业仍以以电解槽改造为主的能效提升技术和废铝再生技术（使用一次能源）为主，2030 年废铝再生技术占比约 34%，其中使用一次能源占比约 24%，预计从 2030 开始，随着成本下降，清洁电力相对于一次能源的环境效益优势

逐步凸显，且更容易实现电气化精准控制，废铝再生用燃料逐步由天然气向清洁电力转变，使用一次能源比例不断下降，使用清洁电力比例不断上升，废铝再生技术（使用清洁能源）在 2050 年普及度达到 50% 左右。受技术成熟度和成本制约，惰性阳极和氯化铝电解技术关键材料与装备经过 10~20 年的技术攻关，在 2040 年后开始市场应用，并逐步提高普及度。预计到 2060 年，惰性阳极和氯化铝电解技术的普及度分别达到 8% 和 20%。

图 4.6 2020—2060 年铝冶炼行业碳中和技术普及度

注：技术普及度反映了技术从研发阶段到实际应用的推广效果。技术普及度越高，说明该技术的应用范围越广。



4.3.4 技术对比分析

有色行业的碳中和关键技术主要包括以电解槽改造为主的能效提升技术、惰性阳极技术、氯化铝电解法制铝技术和废铝再生技术，总结关键技术特征如下：

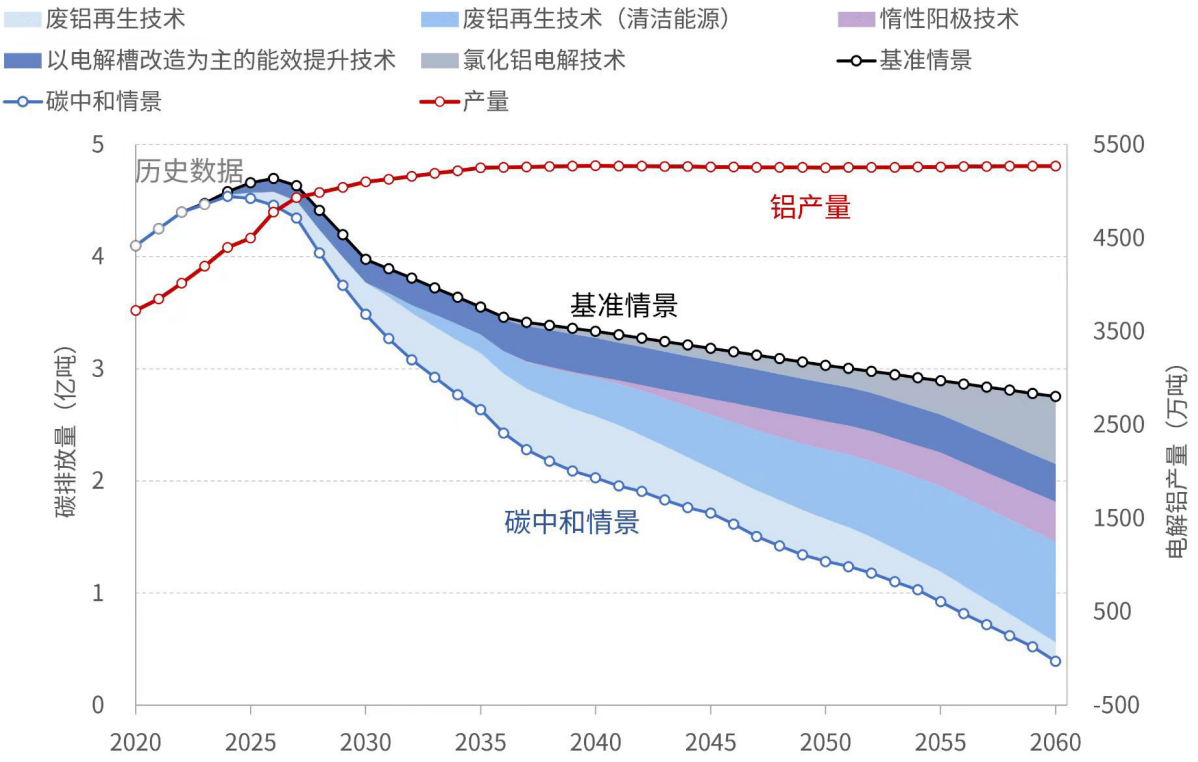
表 4.1　碳中和技术原理与优劣势

技术名称	技术原理概述	碳减排效果	技术成熟度	技术挑战
以电解槽改造为主的能效提升	通过优化电解槽结构、改进保温材料、降低电解温度以及优化电流分布等措施，减少电解过程中的热损失和电能消耗	吨铝 CO_2 排放减少约 5%	11	平均每台槽多增加投资2-8万元，铝电解槽双端节能技术更加昂贵，投资相对较大
惰性阳极技术	电解过程中采用不消耗或消耗极为缓慢的阳极替代传统的炭素阳极，从而消除与炭阳极有关的排放	吨铝 CO_2 排放减少约 15%	5	研发难度大，资金需求量大，周期长，目前阳极使用寿命无法满足工业化应用
氯化铝电解法制铝技术	直流电通入溶有氯化铝的碱金属和碱土金属氯化物电解质中，在电解槽阴极析出铝的一种铝电解方法	吨铝 CO_2 排放减少 40% 以上	3	研发难度大，生产流程增长，关键设备与材料问题尚未解决，产生有毒气体，需收集
废铝再生技术（一次能源）	再生铝是由废纯铝、废铝合金或含铝废料，经重新熔炼得到，是金属铝的一个重要来源	吨铝 CO_2 排放减少约 90%	11	废铝回收体系不完善，保级利用难度大
废铝再生技术（清洁能源）	通过优化废铝回收、预处理、熔炼和精炼工艺，结合清洁能源利用和环保技术，实现废铝的高效再生与节能减排	吨铝 CO_2 排放减少约 95% 以上	7	清洁能源成本有待降低

4.4 铝冶炼行业碳中和技术路线图

2035 年前，电解铝行业碳排放下降主要依靠以电解槽改造为主的能效提升技术和再生铝在下游使用的占比提高，二者带来的碳减排共计约 0.9 亿吨，其中，废铝再生技术减排约 70%。2035—2050 年，能效提升技术经过多年研发与实践，已较为成熟，使得电解铝单位产品电耗逐渐下降。再生铝占比上升，清洁能源的替代导致的碳排放下降较其他因素更为显著，带来碳减排约为 1 亿吨。2040 年左右，惰性阳极技术和氯化铝电解技术实现技术突破，开始在龙头企业进入产业化阶段，技术装备全方位革新升级，并且比例逐年升高。从 2045 年开始氯化铝电解技术产业化，由于在流态化氯化炉中 CO_2 浓度较高，具备碳捕集条件，氯化铝电解技术配合碳捕集技术进一步使行业碳排放降低。预计到 2060 年，废铝再生技术、惰性阳极技术和氯化铝电解技术减排量分别占铝冶炼行业总减排量的约 45%、15% 和 25%。

图 4.7 有色行业碳中和路线图



4.5 碳中和技术应用推广政策建议

结合电解槽大修实施绿色化改造工程。重点推动新型稳流保温铝电解槽节能技术、铝电解槽石墨化阴极技术、铝电解槽双端节能等技术应用，形成一批具有自主知识产权和核心竞争力的先进技术。积极发展绿色金融和转型金融产品服务，为符合条件的电解铝行业节能降碳项目提供资金支持。

加快推动清洁能源驱动的废铝再生技术。完善废铝分类回收与加工体系，建设区域性废铝回收预处理配送中心，形成布局合理、管理规范、回收率高的再生金属产业集聚区，提升废铝的保级和高值化利用水平。同时，优化铝生产企业的产能布局，引导其向可再生能源丰富地区有序转移，推动园区建设分布式能源项目，并通过电价补贴或税收减免等方式支持清洁能源使用。

加强科技投入，布局颠覆性技术研发。将惰性阳极、氯化铝电解制铝等颠覆性技术研发列入国家重大科技专项计划，充分整合利用现有科技资源，形成科技攻关的长效机制，推进产学研融合，依托科研机构、行业协会、骨干企业和产业技术创新平台等开展技术攻关，抢占未来竞争制高点。探索建设可持续发展的国际化、开放性的公共研发平台，支持行业关键共性技术及创新应用研发和产业化。

第 5 章　石化行业碳中和技术展望

石化行业是典型的高耗能、高排放行业，石化行业碳减排对于工业实现碳中和意义重大。本报告核算碳排放的边界包含原油加工和乙烯生产过程中的直接排放和间接排放，按照国民经济行业分类对应产品代码包括原油加工及石油制品制造（2511）、其他原油制造（2519）、有机化学原料制造（2614）。石化行业碳中和技术主要包括以高效换热器为主的能效提升技术、乙烯高效生产及电裂解技术、绿氢制备化学品技术、电气化改造技术、原油直接制化学品技术和 CCUS 技术，这些技术的升级与突破是石化行业实现碳中和的重要路径。石化行业需分阶段推进碳减排技术，结合产业结构调整、技术创新和政策支持，发展高端化工新材料，推进绿氢等清洁能源替代、电气化水平提升和 CCUS 规模化应用以完成碳中和目标。

05

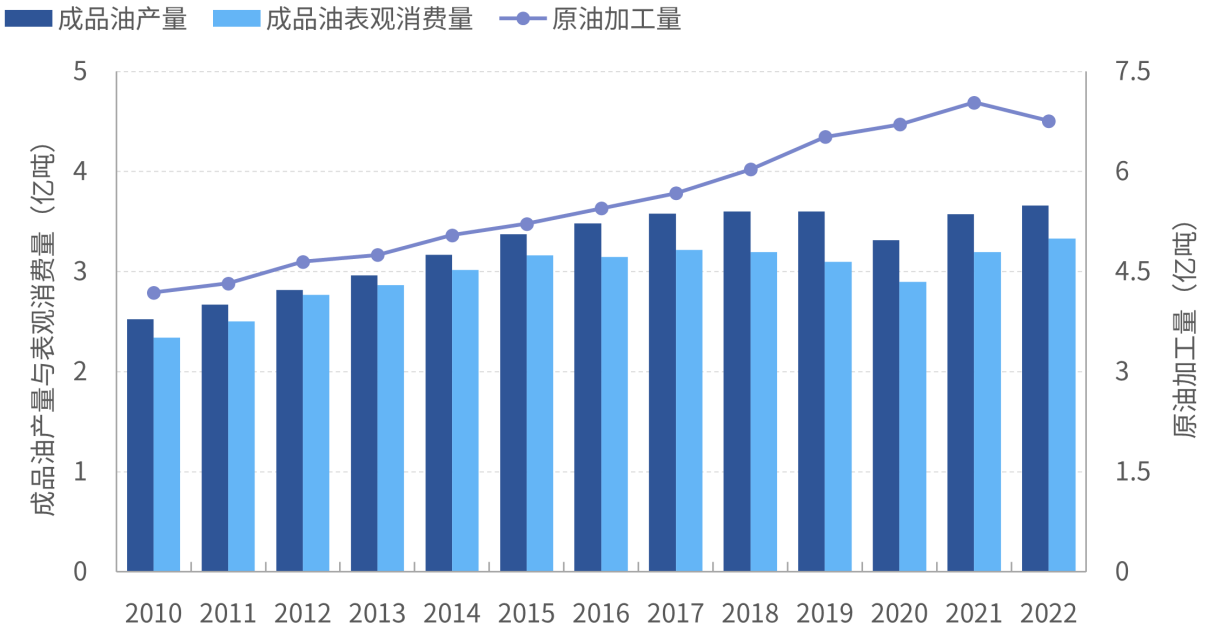
INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

5.1 行业现状与趋势

石化行业产业链上下游关系复杂。产业链上游主要是原油开采，包括油气开采和运输、炼油和石油化工产品加工制造过程；中游是重要的中间产物环节，包括对原油进行裂解，生产最重要的炼油、乙烯、丙烯、芳烃等；下游以炼油、乙烯、芳烃等基本化工原料生产多种有机化工原料及合成材料，包括合成树脂（塑料）、合成橡胶和合成纤维等。

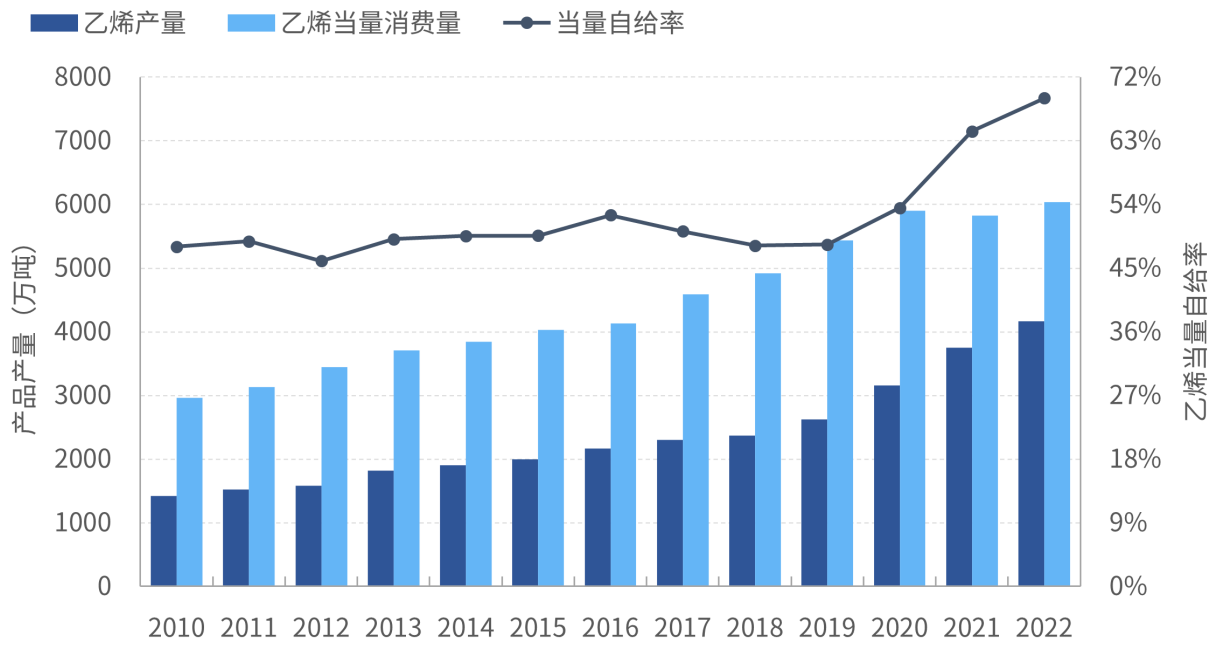
2010 年至今，中国炼油行业产量经历了高速增长、去产能与结构调整以及产能优化与过剩压力的阶段变化，整体呈现产能持续增长但增速放缓的特点。2010—2015 年是中国炼油产能的高速增长期，新增了近 2 亿吨产能。2016—2018 年中国在去落后产能的同时新增了 1.6 亿吨的一次产能，地方炼厂进口原油比例大幅上升，占据主导新增地位。2019 年以后，炼化一体化及地炼整合快速发展，中国一次炼油能力再次迎来迅猛增长。2022 年，中国原油加工能力达到 9.3 亿吨 / 年，较 2012 年 7.1 亿吨 / 年规模增长了 31%，原油加工量 6.8 亿吨，成品油产量约 3.4 亿吨，稳居世界第一大炼油生产国。

图 5.1 2010—2022 年国内原油加工量和当量消费量



2010 年至今，中国乙烯产量呈现稳步增长态势。2015—2020 年期间，乙烯当量消费量年均增速约为 6.7%。随着炼化一体化发展，2022 年，中国共有 5 套新建乙烯装置建成投产，新增产能 525 万吨 / 年，增至 4675 万吨 / 年，是 2012 年的 1700 万吨 / 年规模的 2.75 倍，产量 4168 万吨，当量消费量约为 6037 万吨。

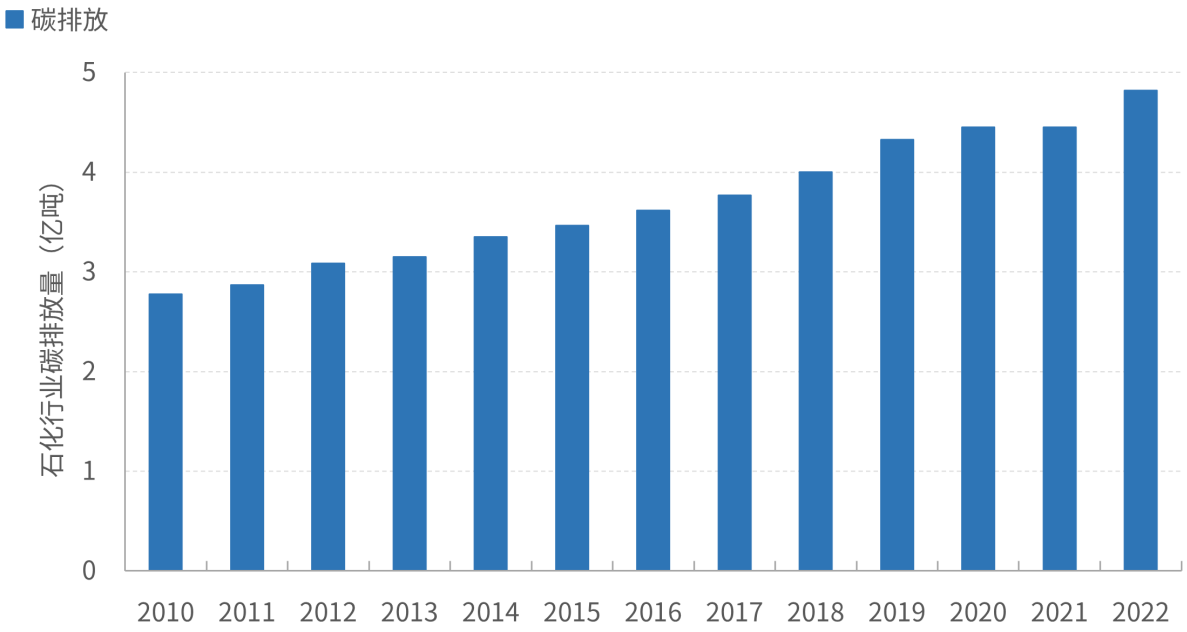
图 5.2 2012—2022 年国内乙烯产量和当量消费量



2010—2020 年，石化行业碳排放量保持上升趋势，2019—2020 年，由于大型炼化一体化项目集中投产，石化行业碳排放量随之增长较快，年均增速高达 13.19%。炼油产品在 2010—2015 和 2015—2020 年期间的碳排放量年均增速分别为 3.59% 和 4.20%；乙烯产品碳排放量也持续攀升，2010—2015 和 2015—2020 年期间年均增速分别为 14.36% 和 14.65%。2022 年，石化行业碳排放为 4.8 亿吨，其中，炼油碳排放量约为 2.6 亿吨，乙烯行业碳排放量为 0.4 亿吨，其他产业链下游碳排放 1.8 亿吨。

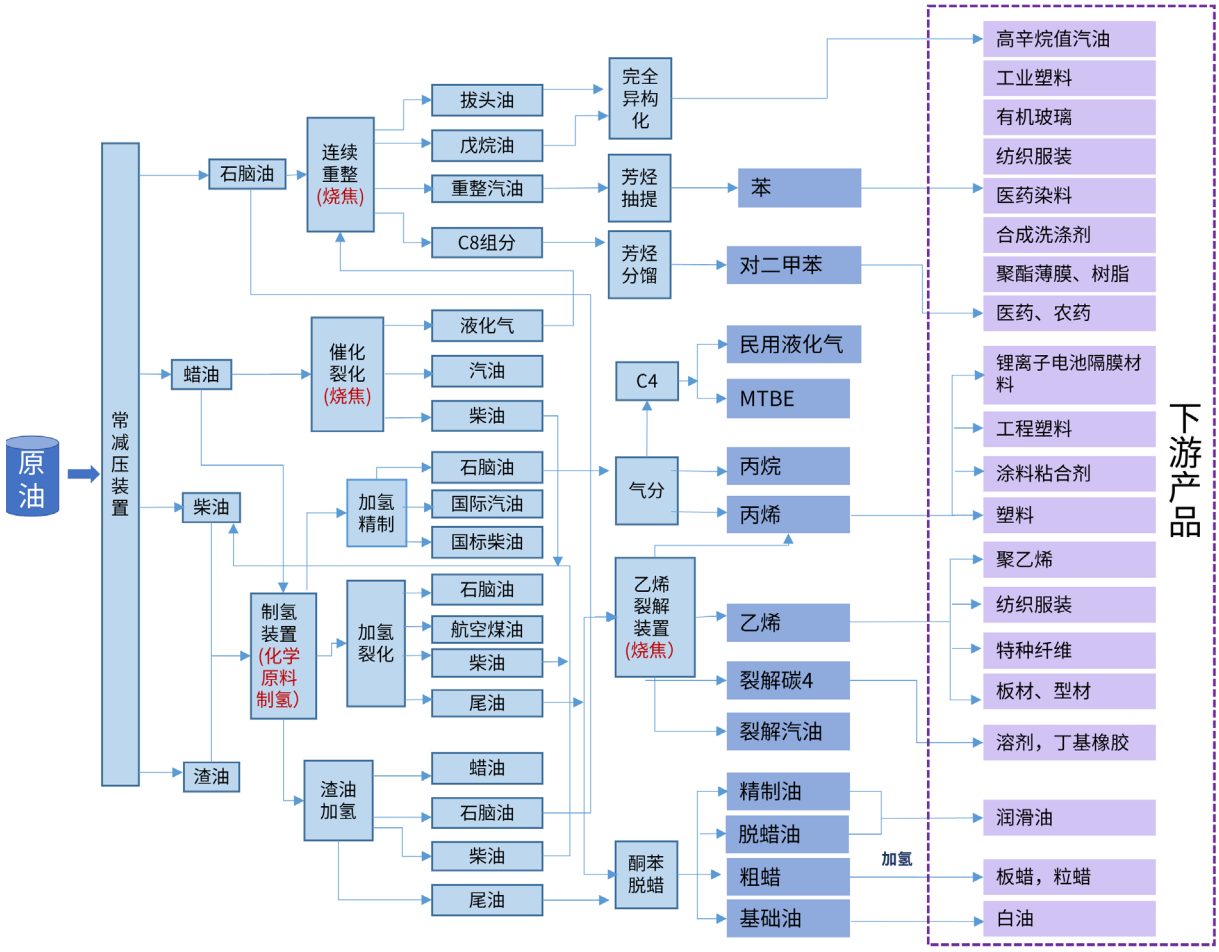
图 5.3 2010—2020 年中国石化行业历史碳排放情况

注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。



石化行业碳排放具有总量多、强度高、来源多、子行业碳排放集中的特点。石化行业碳排放来源主要包括化石燃料的直接燃烧、工业过程的排放、企业购入电力和热力造成的间接排放以及供应链排放。炼油生产过程（催化裂化催化烧焦、连续重整催化烧焦、制氢等）碳排放量约占 50%，燃料燃烧和火炬燃烧碳排放量约占 27%，净购入电力和热力隐含的碳排放量约占 23%，乙烯生产过程碳排放主要来源于乙烯裂解炉的燃料燃烧排放。

图 5.4 炼厂产业链示意图

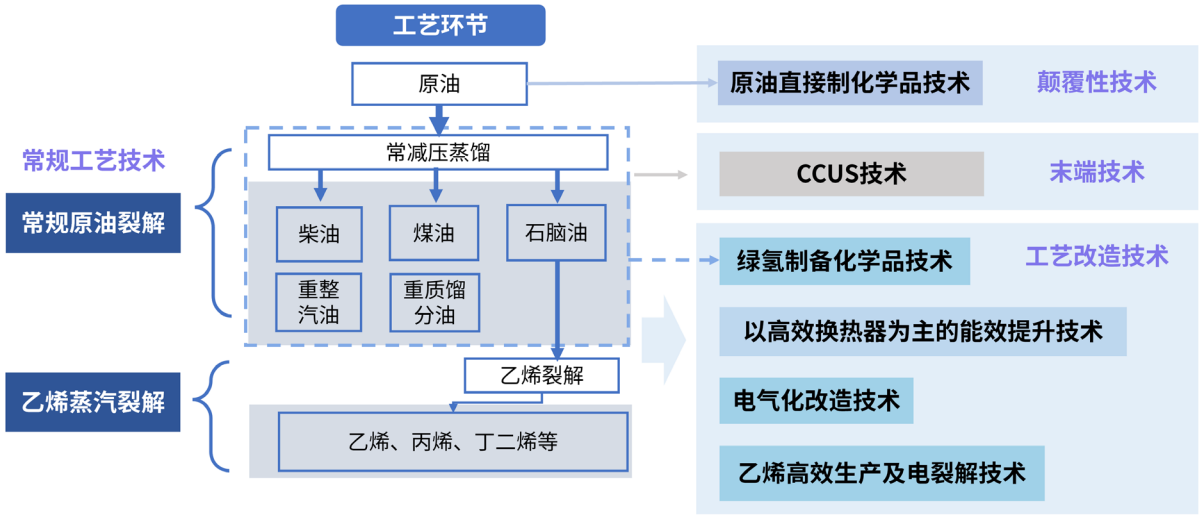


随着全球能源转型和环保要求的提高，成品油需求增长放缓甚至萎缩，炼化一体化成为炼油企业转型升级的重要方向。截至 2024 年，中国共有 29 家炼化一体化企业，累计炼油一次能力达到 42610 万吨 / 年，占中国炼油行业总能力的比例为 44.3%。发改委明文规定严禁新增 1000 万吨 / 年以下的常减压装置，因此传统独立炼厂规模偏小的扩能已经难以实现，《2030 年前碳达峰行动方案》明确 2025 年产能控制在 10 亿吨 / 年以内，根据新建项目的原油一次加工能力及投产时间，以及炼油项目获批情况、产能淘汰预测结果，同时考虑到乙烯，对二甲苯产品以及对应其下游的塑料消费水平的变化与需求量变化，预测到 2030 年，中国炼化一体化项目中成品油占比将进一步降至 30% 以下，化工品产能占比提升至 60%~70%，原油加工量将上升至 8.2 亿吨左右；2030 年后原油加工量逐步下降，到 2060 年逐步下降至 2.3 亿吨左右。预测乙烯产量预计于 2035 年达到峰值，后续陆续下降至 2060 年 6600 万吨。

5.2 碳中和关键技术

在碳中和目标下，石化行业减排技术主要分为三类：一是工艺改造技术，如以高效换热器为主的能效提升技术，电气化改造技术，乙烯电裂解炉技术、绿氢制备化学品技术等；二是颠覆性技术，如原油直接制化学品技术等，通过颠覆性工艺减少中间环节；三是末端技术，如 CO_2 资源化循环利用技术，实现碳的循环利用。这些技术兼具能效增益、工艺颠覆与循环经济属性，形成“短期提效 + 中期替代 + 长期重构”的协同减排体系，支撑石化行业从“渐进改良”向“深度脱碳”跨越。

图 5.5 石化行业碳中和技术体系



5.2.1 以高效换热器为主的能效提升技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

炼油能效提升技术在石化化工行业中占据重要地位，是推动行业绿色低碳转型的关键。中国炼油能效提升技术的产业链形成了较为完整的体系，涵盖了从原料预处理、催化裂化、加氢裂化、清洁燃料生产到能源管理等各个环节。炼油行业主要的能效提升技术如下：

① 高效换热器

在石化行业，炼油高效换热器是关键的设备之一，高效换热器如板壳式换热器、螺旋板式换热器等，采用先进的传热元件和结构设计，如波纹板片、专用板型等，其主要作用是通过热量交换提高生产效率和能源利用效率。例如，超大型板壳式换热器相比传统管壳式换热器，传热效率可提高 2~3 倍。此外，采用炉管强化传热技术、急冷油塔中间回流技术等，可以提高整体装置的换热效率。

② 蒸汽动力系统优化

开展石化企业蒸汽动力系统诊断与优化，考虑全厂实际情况的蒸汽平衡配置优化，提高蒸汽利用效率。炼油过程中，许多工艺步骤会产生高温或低温的废热，通过优化蒸汽动力系统的运行，可充分回收和利用低品位蒸汽能量。

③ 热泵技术

在石化生产的过程中，存在着丰富的余热资源，可回收率达 80%。高温热通常来源于裂解炉、加热炉等设备，而低温热则可能来自冷却水系统、工艺流体回流等。高温热泵技术是一种利用少量电能将低品位热能转换为高品位热能的装置，将直接回收的低品位工业余热转换为高品位能，并再回用于企业其他生产环节的一种突破性技术，具有显著的节能效果。

在石化行业中，热泵常应用于回收和利用生产过程中产生的低温余热，如废气、冷却水等中的热能，将其提升至可用于工艺加热或供暖的温度水平。通过热泵技术，企业可以实现热能的梯级利用，减少对传统能源的依赖，降低能源消耗和碳排放。使用双级压缩式高温热泵、单级压缩式与喷射式联合的高温热泵技术可以制取高达 160℃ 的高温蒸汽，显著提升企业的经济效益，不仅提高了能源利用率，还能够减少对传统锅炉的依赖。

总体来看，中国炼油能效提升技术的产业链已具有较高的自主性，大部分关键装备和技术已实现国产化，但在某些高端领域仍存在被卡脖子的风险，部分高端控制系统、特殊合金材料等仍需依赖进口。此外，随着国际贸易环境的变化，供应链稳定性也面临一定挑战。例如，大型管壳式换热器的传热流动特性与结构设计是关键难点之一，技术的复杂性和创新性要求高水平的技术研发能力。此外，该类技术初期投资较高，需要企业进行大规模的资金投入，推广新技术还需要考虑维护和运行成本，以及现有的老旧装置需要进行技术改造或淘汰退出，这可能会对企业产生压力。

（2）示范工程

近年来，石化行业通过研发和应用新型高效换热器，显著提升了设备的换热效率。大庆石化机械厂开发了“壳程旋流 + 异型管组合型高效换热器”，这种新型换热器具有更强的换热能力、更小的体积和更轻的重量，能够有效降低能耗并提高装置的节能水平。此外，多孔表面高通量管高效换热技术也在石油化工行业中得到广泛应用，能够有效利用低品位余热，减少换热器的数量和体积。石化企业通过技术创新不断优化换热器的性能。天津石化开发了换热器运行状态监测及可靠性保障平台，通过数据监测和智能诊断，提高了换热器的长周期可靠运行能力。青岛炼化共实施 9 个能效提升项目，其中重整装置反应进料 / 产物换热器更换为缠绕管换热器，热端温差降低 35℃，能够年节能 1 万吨标准煤。将重整、加氢、制氢等装置加热炉余热回收改造后，全厂炉效能够提升 0.5 个百分点，全厂低温余热回收及利用项目通过直接换热、制冷、发电等方式进一步“吃干榨净”全厂凝结水系统的余热，年节能量达 0.18 万吨标准煤。

5.2.2 乙烯电裂解炉技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

乙烯电裂解技术通过在电能替代化石能源进行加热裂解，传统的乙烯裂解过程通常依赖化石燃料燃烧产生的热能，而电裂解技术则通过电加热器将电能直接转化为热能，用于裂解原料烃类制取乙烯。这种技术具有以下特点：一是高效节能，电能直接转换为热能，减少了能量转换过程中的损失，提高了能量利用效率；二是低碳环保，避免了化石燃料燃烧产生的 CO_2 等温室气体排放；三是灵活可调，

电能供应相对稳定且可调，便于根据市场需求调整生产规模。

乙烯电裂解技术在未来的发展和大规模应用中面临以下制约因素：首先，乙烯电裂解炉技术的核心装备是电加热裂解炉，其设计和制造水平直接影响乙烯的生产效率和产品质量。其次是成本方面，乙烯电裂解炉的初期投资和设备成本相对较高，这对于大规模应用而言是一个挑战。降低设备成本、提高生产效率和能源利用率是推动乙烯电裂解炉经济性的关键因素。第三，乙烯电裂解炉需要相对较大的空间来容纳设备和系统，这对于现有的乙烯生产基地和工厂的布局带来限制。寻找适合的场地和合理的空间布局是乙烯电裂解炉大规模应用的考虑因素之一。最后，乙烯电裂解炉的大规模应用需要充足的电力供应，电力供应的稳定性、可靠性和可再生能源的可利用性对于乙烯电裂解炉的发展具有重要影响。大规模应用之前，需要长时间的稳定运行和工业化验证，以确保设备的性能和可靠性。

从技术经济性角度看，乙烯电裂解炉初期投资和设备成本相对较高，然而，随着技术的成熟和规模化生产，稳定的电力供应和电价的降低，成本有望逐渐降低，长期经济效益具有较大潜力。此外，随着全球对乙烯等化学品的需求不断增长和碳减排要求的日益严格，考虑到电裂解技术在节能降碳方面的优势，电裂解技术有望在未来成为乙烯生产的重要选择之一。

（2）示范工程

巴斯夫的乙烯电裂解炉示范工程是全球首座大型电加热蒸汽裂解炉，该示范装置位于德国路德维希港的巴斯夫一体化生产基地。该装置由巴斯夫、沙特基础工业公司（SABIC）与林德合作开发，旨在验证通过电加热实现烯烃的连续生产。与传统蒸汽裂解炉相比，该技术使用可再生能源发电，有望至少减少 90% 的二氧化碳排放。该示范装置整合到路德维希港现有的蒸汽裂解装置中，能够利用饱和碳氢化合物原料生产乙烯、丙烯等烯烃。示范装置测试了两种不同的加热概念：一种是直接加热，将电流直接施加到裂解管道上；另一种是利用放置在管道周围的加热元件进行辐射热间接加热。中国乙烯生产正在探索电裂解炉技术，目前仍缺少相关自主知识产权的乙烯电裂解炉，尚未普及或成为主流的生产方式。

5.2.3 绿氢制备化学品技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

石化行业利用可再生电力生产的绿氢与捕集的二氧化碳合成高附加值化学品，是推动低碳转型的核心路径之一，主要技术路径包括二氧化碳加氢制甲醇、烯烃、合成燃料等，以甲醇为例，传统工艺吨甲醇碳排放约 2 吨，而绿氢耦合 CO_2 制甲醇的吨甲醇碳排放可降至 0.5 吨以下。该技术处于从实验室迈向工业化的关键阶段，例如中科院大连化物所通过铁基催化剂将 CO_2 转化为线性 α- 烯烃（选择性超 80%），工业示范项目逐步落地。

绿氢制备化学品技术需突破成本、催化剂性能及基础设施瓶颈。CO_2 直接制烯烃的连续运转寿命仅数百小时，且需高温高压条件（200~300℃、5~10 MPa），能耗较高。此外，电解水制氢成本仍较高，质子交换膜（PEM）电解依赖贵金属催化剂（如铂），国产替代技术尚未大规模应用。

（2）示范工程

中国在绿氢制备化学品技术的关键装备上取得了显著进展，部分领域已具备自主知识产权。

新疆库车绿氢示范项目于 2023 年 6 月 30 日顺利产氢，产出的氢气可通过管道输送到中国石化塔河炼化、替代现有天然气化石能源制氢，每年可减

少二氧化碳排放 48.5 万吨。项目成功实现绿氢生产到利用全流程贯通，这也标志着中国首次实现万吨级绿氢炼化项目全产业链贯通。该项目制氢规模达到每年 2 万吨，是中国首个万吨级光伏绿氢示范项目，开创了绿氢炼化新发展路径，为国内光伏发电绿氢产业发展提供了可复制、可推广的示范案例，对炼化企业大规模利用绿氢实现碳减排具有重大示范效应，推动中国能源产业转型升级。

宁东可再生氢碳减排示范区一期项目，利用 12 万千瓦光伏供电，通过碱性电解水工艺制取氢气，总制氢规模为 1.5 万标方 / 小时，设计年产量为 3080 吨。所制氢气经纯化后通过管道输送至烯烃二公司合成氨装置，每年可减少二氧化碳排放量约 20.2 万吨，节约标准煤约 5.4 万吨。

远景科技集团和赤峰市签订战略合作协议，随后该集团在赤峰成立远景零碳技术（赤峰）有限公司，建设全球首个商业运营绿色氢氨工程，也是全球最大规模的绿色氢氨项目，即年产绿色氢氨 150 万吨项目。2024 年 3 月，该项目第一阶段 30 万吨绿色氢氨首期工程顺利投产。绿色氢氨项目主要由电解水制氢装置生产绿色氢气，通过可再生电力经由空分装置生产氮气，氢气和氮气通过合成氨工艺生产出绿色合成氨。截至 2024 年 11 月底，中国已规划绿氢项目数量超过 700 个，合计规划绿氢产能已超过 1100 万吨（部分项目含远期产能）。

5.2.4 电气化改造技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

热力供应是石化行业公用工程的重要部分，石化化工行业热力需求的主力是各种蒸汽透平机械，这部分蒸汽需求通常自备或者由园区热电厂提供。通过推动电气化，这部分需求完全可以通过电驱代替，实现石化行业热力供应的电气化，由于未来电力供应主要来自可再生能源，所以采用电驱动替代蒸汽驱动可以显著降低能耗和碳排放，同时提高系统的灵活性和可靠性。

石化化工企业进一步提高终端电气化率面临着技术和装备的可行性、安全性、经济性和现有系统改造投资高等挑战，尤其是相关技术和装备尚不成熟，如电裂解炉、电加热炉、电蒸汽锅炉、微电网、电力储能、电催化及电解等技术，仍需继续进行开发和工业验证。此外，影响电气化率提升的其他因素还包括新增电力负荷的来源、电力系统扩建方案，以及电气化改造后对企业蒸汽平衡、燃料平衡的关联影响等。未来，随着技术和装备的成熟以及电力供应的稳定性和经济性提升，电气化改造的潜力巨大，需要关注电气化改造过程中的技术和装备可行性、安全性及经济性等问题，确保电气化改造的顺利实施和长期稳定运行。

（2）示范工程

独山子石化塔里木二期乙烯项目的乙烯三机改电项目是中国石油践行绿色低碳发展的重要举措，该项目采用国内首台全电气化驱动的乙烯三机组，项目总投资 290 亿元，建设内容包括新建 120 万吨 / 年乙烯、两套 45 万吨 / 年全密度聚乙烯、30 万吨 / 年低密度聚乙烯、45 万吨 / 年聚丙烯等主要生产装置。该项目计划于 2025 年底基本建成，2026 年 6 月全面建成投产。

胜利油田应用电驱压裂推进电驱压裂规模化应用，将 110 千伏橇装式移动变电站代替传统的柴油动力，在提升功率的同时，实现了二氧化碳零排放。

中国石化首例压缩机组“燃改电”项目将 2 台燃气驱动的压缩机改造为电驱动，经过连续 18 天的现场运行验证，一次性试车成功，机组运行状态良好，整机性能得到了优化提升，降低运行成本并完全满足生产需要，达到了项目预期效果。中国石化江汉油田涪陵页岩气田成功实施了规模最大的气

田电驱压裂工程，相较于采用传统柴油驱动压裂机组效率更高、占地更少、能耗更低。

5.2.5 原油直接制化学品技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

原油直接催化裂解制化学品技术（UPC）基于分子炼油理念，利用高效催化剂提高原料转化率与产物选择性。该技术主要基于将原油直接供给裂解炉进行热裂解，而无需经过传统的炼油过程。相较于传统炼油工艺，由于减少了多个中间环节，降低了能源消耗、提高了轻质烯烃和芳烃等高价值化学品的产量、减少了低价值产品的生成，从而提高了能源利用效率，在节能降碳方面具有显著优势。生产同等规模的烯烃产品，原油资源消耗降低约 30%，能耗可降低 5%~10%。此外，通过优化催化剂和反应条件，可以减少不必要的副反应，碳排放相比传统石脑油制烯烃可降低 25%~35%。

原油直接制化学品技术具有较高的经济效益，一方面是因为提高了高价值化学品的产量，增加了产品附加值；另一方面，由于减少了能源消耗和碳排放，降低了生产成本和环保成本。但该技术初期投资较高，包括催化剂的研发和生产成本、反应器的制造和安装费用等，长期来看，随着技术的成熟和规模的扩大，投资成本有望逐渐降低。

原油直接制化学品技术成熟度相对较低，需要高温、高压和复杂的催化过程，对设备和操作技术有较高的要求，且可能有大量的废气、废水和固体废弃物产生。在技术成熟度方面，尽管原油直接裂解技术在某些国家和地区已经得到应用，但在中国的技术成熟度相对较低。中国在该领域的研发和实践相对较少，技术还需要进一步成熟和验证。

（2）示范工程

2021 年，中国石化在扬州石化进行了原油直接催化裂解技术的工业试验。试验结果表明，低碳烯烃和轻芳烃总产率提升 2 倍，高达 50% 以上，即采用该技术每加工 100 万吨原油可产出高价值化学品约 50 万吨。

山东东明石化集团有限公司与中国石油大学（华东）联合开发的 UPC 技术，以原油为原料，直接裂解生产乙烯、丙烯等化学品，由于减少了炼油环节，缩短了加工流程，能够大幅减少原油和能源消耗，具有短流程、高效率、低排放、化学品收率高等优点，经济社会效益显著，发展前景广阔，截至 2023 年底，东明石化 5 万吨 / 年 UPC 工业化试验装置已稳定运行 11 个月。

5.2.6 CCUS 技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

在石化化工行业中，捕集环节是 CCUS 技术的第一步，其主要目的是从石化化工生产过程中排放的尾气中高效捕集 CO_2。利用环节是 CCUS 技术的关键部分，其目的是将捕集到的 CO_2 转化为有价值的化学品或燃料，实现碳的循环利用。目前石化行业主要的利用方式为将 CO_2 回注油田强化采油或将 CO_2 作为化工原料通过工业反应转变为高附加值化学品，对提高碳的利用率及化石资源的高效洁净利用具有重要意义。

① 以甲烷 -CO_2 干重整为核心的转化利用技术

甲烷 -CO_2 干重整过程产生氢碳比小于 1 的合成气，可以直接作为羰基合成或费托（F-T）合成的原料，也适用合成气直接制烯烃（FTO）的路线，

弥补了甲烷水蒸气重整过程中合成气中氢碳比较高的不足。

甲烷 -CO_2 干重整制备合成气是一种极具产业化利用前景的化工过程。其主要优势为：该过程将 CH_4 和 CO_2 转化成为具有高附加值的化学品，具有巨大的经济效益；该过程同时利用了 CO_2 和 CH_4 两种温室气体，具有一定的环保效益。

② 零碳能源耦合 CO_2 转化利用技术

CO_2 是一种自然界大量存在的“碳源”化合物，若能借助零碳能源（可再生能源、核能等）电解水制得的氢气将 CO_2 转化为有用的化学品或燃料，可以同时解决大气中 CO_2 浓度增加导致的环境问题、化石燃料的过度依赖以及可再生能源的存储问题。

以核能耦合 CO_2 加氢直接制汽油为例，采用高温气冷堆驱动的高温蒸汽电解工艺为：单位氢气的生产能耗为 34 kwh/kg，以 0.3 元 /kwh 的核能发电电价为基准，所产氢气的盈亏平衡价为 13.42 元 /kg。采用 CO_2 加氢制汽油工艺生产高附加值的油品，吨油品耗氢量为 6000 m^3，其中汽油的选择性为 78.6%，扣除燃料气等副产品后，汽油生产成本为 7622 元 / 吨。

③ 二氧化碳直接转化利用技术

CO_2 直接转化利用技术采用光催化或者电催化 CO_2 转化，采用太阳能或者可再生的风电、太阳能发电或富余核电等洁净电能为能源，在常温、常压条件下将 CO_2 直接一步转化为碳氢化合物等燃料及化学品，同时实现了 CO_2 的资源化利用和洁净电能的有效存储。由于该技术仍处于实验室研究阶段，所开发的光催化剂存在太阳能利用率低、光催化材料对 CO_2 吸附性能差及碳氢化合物的产率低等问题，因此该技术在未来一段时间内都不具备经济竞争力。

CO_2 利用成本受原料价格（如氢气成本）、产品市场需求及生产工艺成熟度等因素影响，目前 CCUS 示范项目建设投资超过 10 亿元，运行成本居高不下，给相关企业造成较大压力。在尚无有效商业模式和完善碳交易市场的情况下，CO_2 排放源和封存地往往分属不同企业和行政区划，捕集 CO_2 无处消纳等现象普遍存在，导致 CCUS 项目未来收益不明确，企业积极性不高。此外，中国尚未出台 CCUS 国家层面的整体规划，法规约束性不够，CCUS 项目审批、安全监管等法规欠缺，政策激励性不足，这些都导致化学利用和能源利用的成本相对较高，但随着技术进步和市场拓展，成本有望逐步降低。

受到技术成熟度、催化剂性能及能量转换效率等多种因素影响，直接转化利用技术尚未实现商业化应用，如何提高利用环节的转化效率和产物选择性，降低生产成本是当前研究的重要课题，新工艺和催化剂的研发对于推动利用环节的技术进步具有关键作用。此外，市场需求和政策导向也将对利用环节的发展产生重要影响，随着全球对低碳、环保产品的需求增加，利用环节的市场前景将更加广阔。

（2）示范工程

中国石化在 2021 年 7 月启动建设的百万吨级 CCUS 项目，由齐鲁石化 CO_2 捕集和胜利油田 CO_2 驱油与封存两部分组成。该管道全长 109 公里，起自齐鲁石化首站，终至高青末站，后经支线输往各注入站，通过高压常温密相输送，设计压力 12 兆帕。齐鲁石化捕集提供 CO_2 运送至胜利油田进行驱油封存，实现了 CO_2 捕集、驱油与封存一体化应用，有力推进化石能源洁净化、洁净能源规模化、生产过程低碳化。该项目装备国产化率达到 100%，展示了在 CO_2 捕集与驱油封存领域的技术实力和装备自主化水平。齐鲁石化 - 胜利油田百万吨级 CCUS 项目被誉为“工业森林”，投产后每年可碳减排约 100 万吨，相当于植树近 900 万棵、近 60 万辆经济型轿车停开 1 年，可有力推进化石能源洁净化、洁净

能源规模化、生产过程低碳化，形成可复制、可推广的 CCUS 产业发展经验。

中国科学院大连化学物理研究所开发的 CO_2 重整制备合成气和甲醇技术，应用于内蒙古鄂尔多斯 10 万吨 / 年 CO_2 加氢制甲醇工业化项目，实现了 CO_2 的高附加值利用。中国科学院大连化学物理研究所与中国中煤能源集团有限公司合作进行 CO_2 重整制备合成气和甲醇的工业化应用。

利用 CO_2 合成高附加值化学品的技术正在推进产业化。例如，中石化碳产业科技股份有限公司正在跟进碳酸酯溶剂项目，该项目每年可消纳超过 10 万吨的 CO_2，并有可能实现负碳排放。

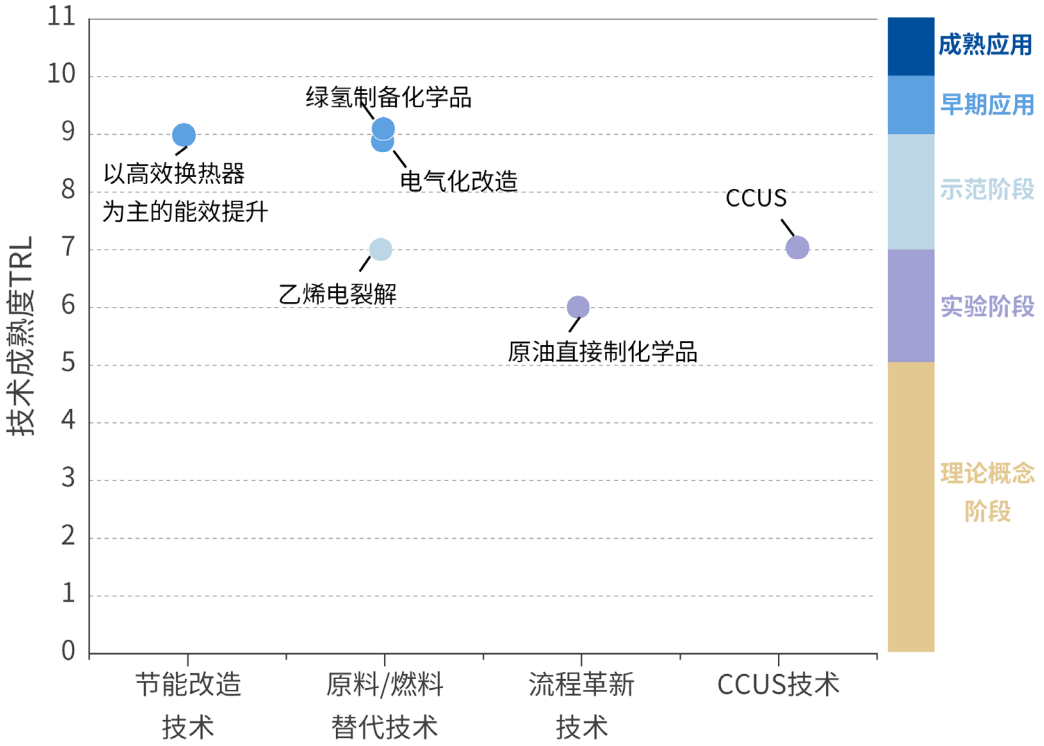
5.3 技术展望和成本演变

5.3.1 技术成熟度展望

以高效换热器为主的能效提升技术在石化行业中已经较为成熟，并且在早期应用中取得了显著成效，尤其是在炼油、乙烯裂解等高温高压工艺中，通过优化换热器设计和材料，可以有效提高能源利用效率，减少能源消耗。绿氢制备化学品技术是利用绿氢与捕集的二氧化碳合成高附加值化学品的技术，目前仍处于早期应用阶段，碱性电解水制氢技术是中国现阶段绿氢应用的首选，具有成本低、规模大等优势，质子交换膜电解水（PEM）技术也在快速发展，仍需进一步优化催化剂、反应工艺和经济性。电气化改造技术将汽驱改为电驱，受电价等因素影响，仍处于早期应用阶段。乙烯电裂解炉技术仍处于示范阶段，然而随着技术的成熟和规模化生产，成本有望逐渐降低，未来可能获得的政府支持和市场优势。CCUS 技术仍处于示范阶段，大规模的捕集、运用技术还不成熟。原油直接制化学品技术初期投资较高，包括催化剂的研发和生产成本、反应器的制造和安装费用等，仍处于实验阶段，未来发展具有不确定性。

图 5.6 2020 年石化行业技术成熟度

注：技术成熟度详细划分见附录。



5.3.2 技术成本演变

常规原油加工和乙烯生产技术已成熟，加工一吨原油和生产一吨乙烯的总成本分别约为 5500 元 / 吨原油加工量和 4400 元 / 吨乙烯。受碳价上涨等因素影响，常规原油裂解技术与以高效换热器为主的能效提升技术成本逐步上升，到 2060 年，总成本分别约为 5800~5900 元 / 吨原油加工量和 5900~6000 元 / 吨原油加工量。2030 年，绿氢制备化学品技术总成本比常规原油裂解技术高出 400~600 元 / 吨原油加工量，随着电价的下降和氢气价格的下降，2030 年后绿氢制备化学品技术成本逐渐下降，到 2045 年总成本基本与常规原油裂解技术持平。电气化改造技术总成本受电价影响较大，未来随着电力供应逐步转向可再生能源和电价的下降，采用电驱动替代蒸汽驱动不仅在节能减排方面效果显著，在成本上也逐渐占据优势。相比于常规常规原油裂解技术，原油直接制化学品技术用电量可观，单位产品减排成本较高，技术经济性尚需大幅提升，预测未来生产总成本将持续下降，2050 年后总成本将低于常规原油裂解技术。石化行业中的 CCUS 主要为 CO_2 制备化学品，大规模的捕集、运用技术还不成熟，捕集成本较高，但一旦突破技术瓶颈，CCUS 技术将成为石油石化行业碳减排最有效的手段之一。对于乙烯生产，相对于常规燃气裂解炉，采用乙烯电裂解炉技术生产总成本较高，2030 年，生产总成本高出常规燃气裂解炉 1000~1500 元 / 吨乙烯，2040 年后乙烯电裂解炉技术生产总成本持续下降，将与常规燃气裂解炉基本持平，届时将大规模发展。

图 5.7 石化原油加工不同技术路线的单位减排成本

注：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

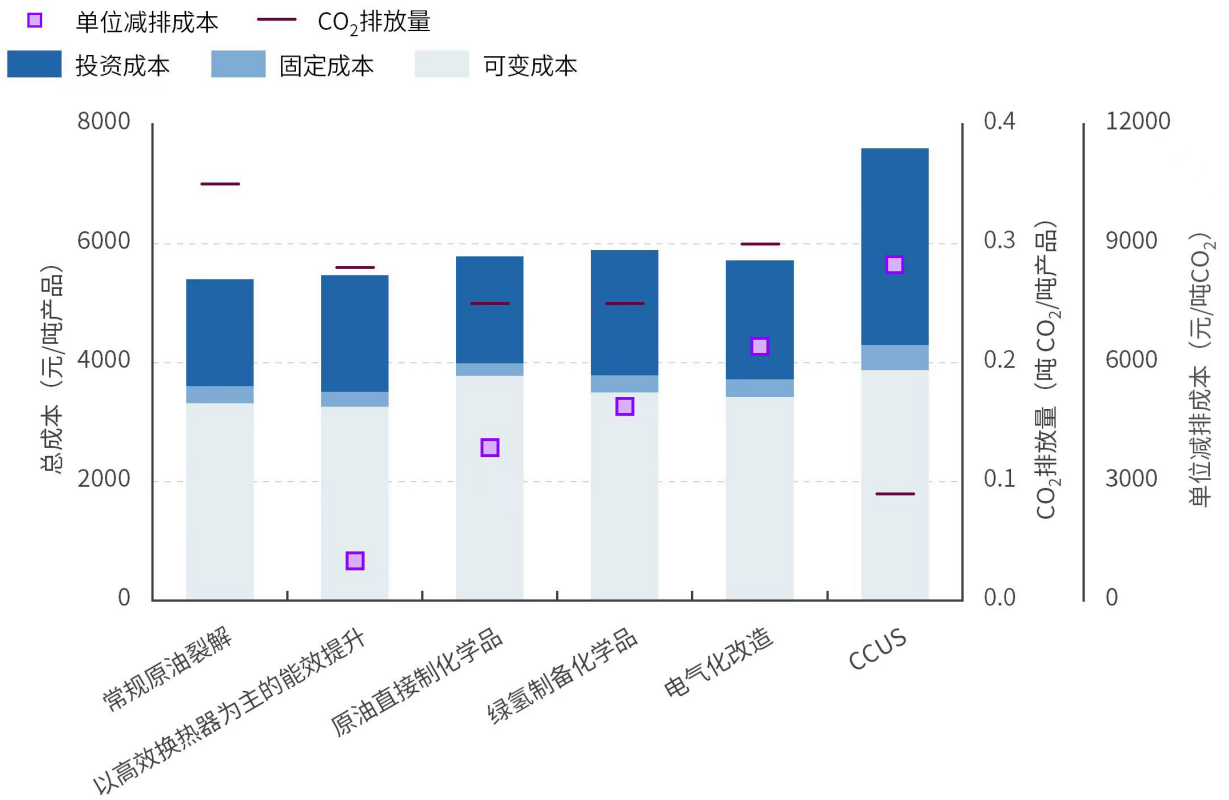
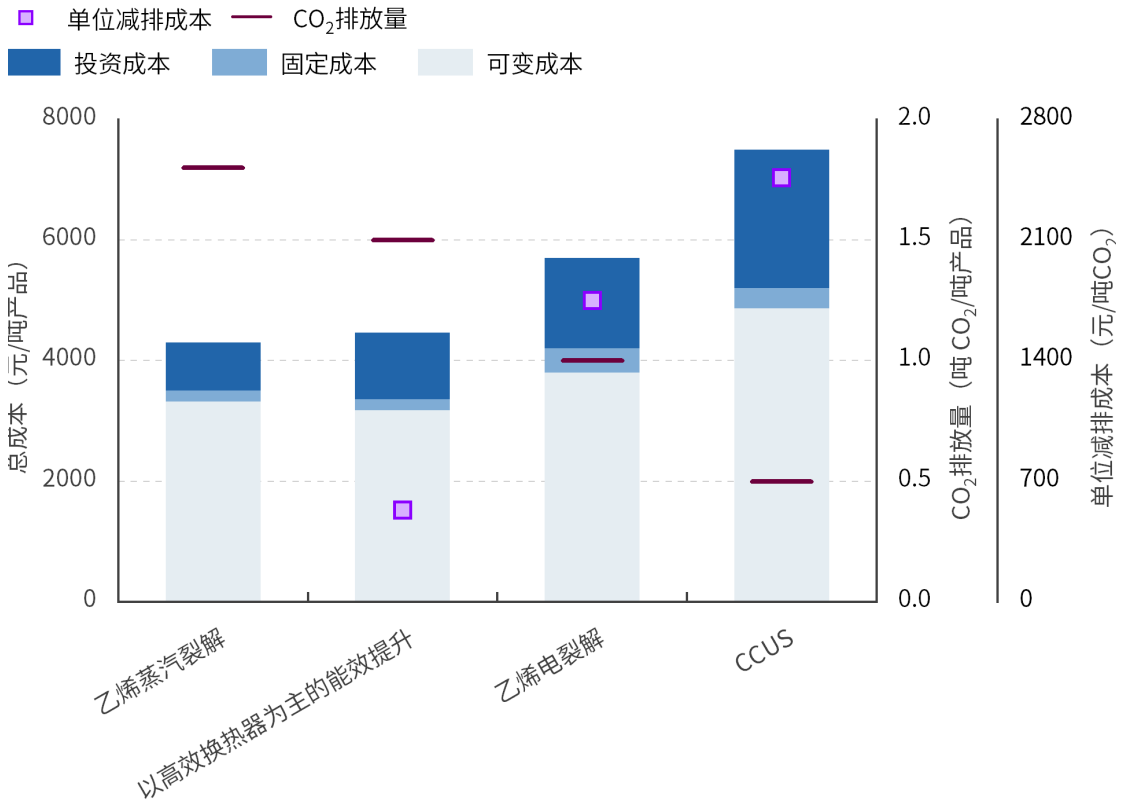


图 5.8 石化乙烯不同技术路线的单位减排成本

注：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

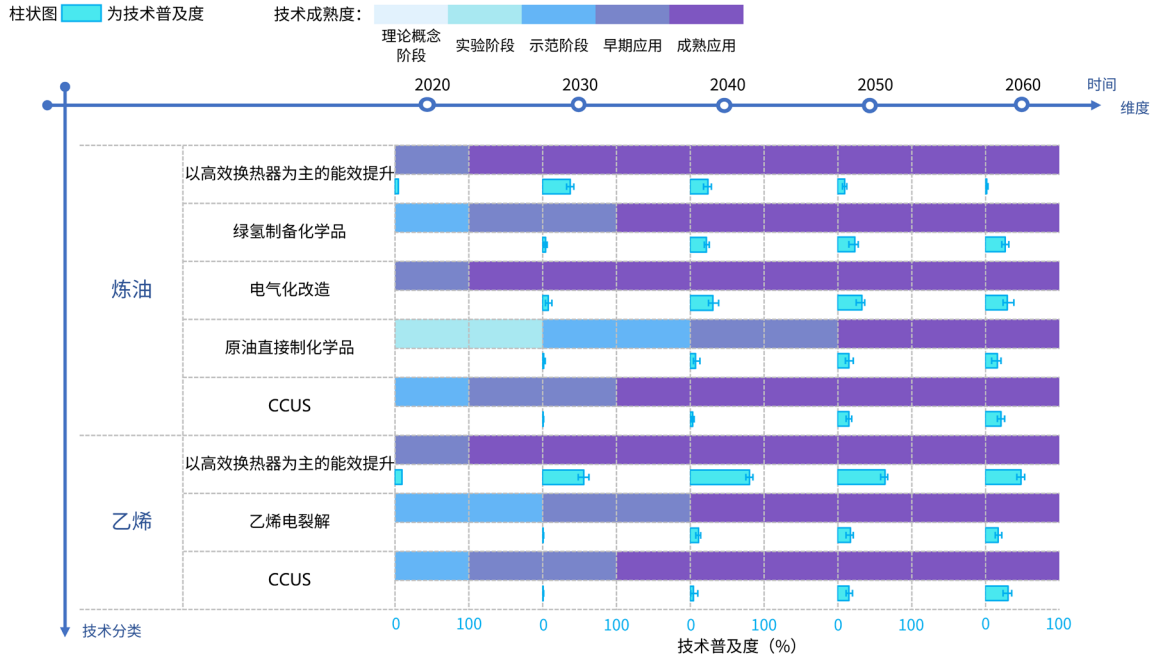


5.3.3 技术普及度展望

总体来看，石化行业低碳技术呈现从能效提升、电气化改造向颠覆性工艺逐步过渡的趋势，技术成熟度随时间推移不断提升，推动行业绿色转型。碳中和技术推广普及度与技术成熟度和成本变化彼此关联，从图 5.9 可以看出，2025 年前，石化行业常规原油裂解工艺以及石脑油蒸汽裂解制乙烯已成熟并实现大规模应用，以高效换热器为主的能效提升技术是 2035 年前节能减排的有效手段。2035 年以后，绿氢制备化学品技术和电气化改造技术逐步成熟，普及度大幅提升，2035 年普及度分别为 15% 和 20%，2050 年普及度分别达到 28% 和 31%。CCUS 技术 2035 年仍处于示范阶段，尚未大规模应用，预计 2040 年后走向早期应用，到 2050 年后大规模使用，普及度达到 16%。原油直接制备化学品技术仍处于实验阶段，2035 年后开始示范应用，2040 年后大规模开展示范和应用，预计乙烯电裂解炉技术在 2035 年后将走向成熟应用。

图 5.9 2020—2060 年石化行业碳中和技术普及度

注：技术普及度反映了技术从研发阶段到实际应用的推广效果。技术普及度越高，说明该技术的应用范围越广。



5.3.4 技术对比分析

石化行业碳中和关键技术总结如表 5.1。

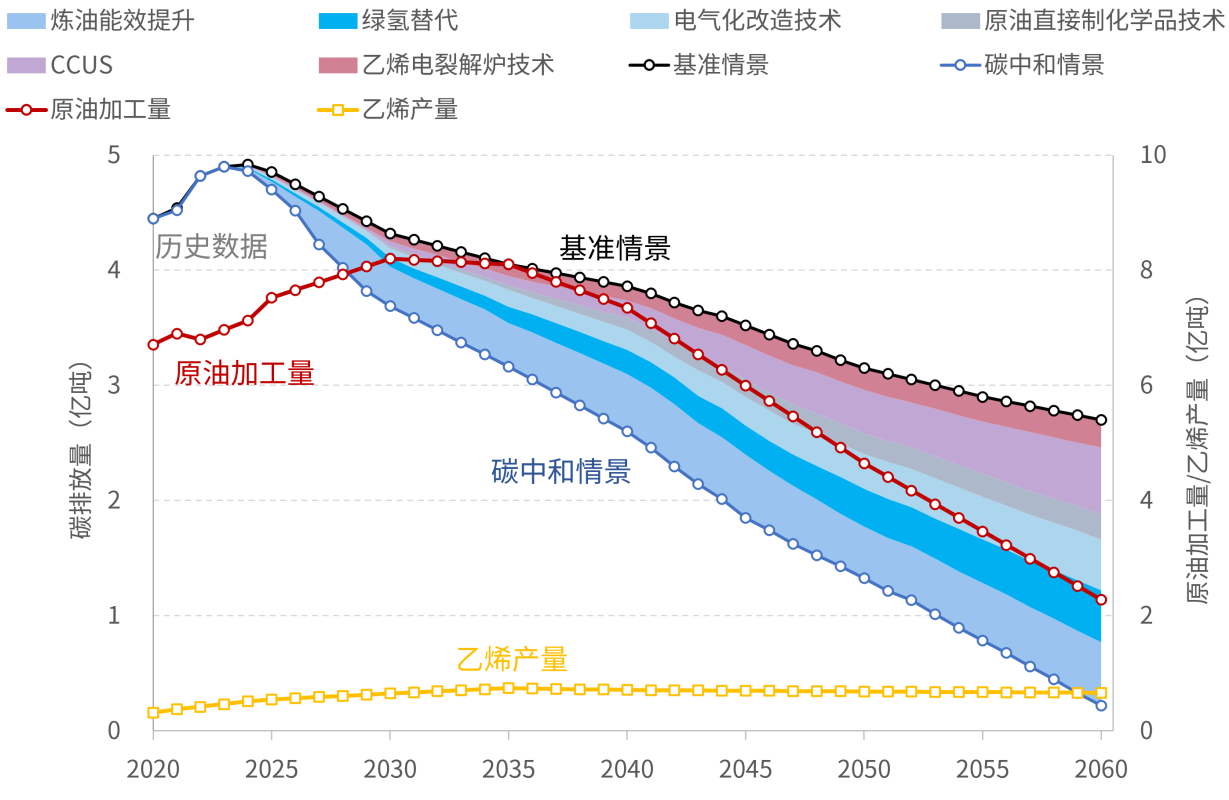
表 5.1　石化行业碳中和关键技术汇总

技术名称	技术原理概述	碳减排效果	技术成熟度	技术挑战
以高效换热器为主的能效提升技术	通过安装高效换热器，利用少量电能将低品位热能转换为高品位热能的装置	吨原油加工量 CO_2 排放减少约 20%	9	部分高端控制系统、特殊合金材料等仍需依赖进口
乙烯高效生产及电裂解技术	用电能替代化石能源进行加热裂解，电能直接转换为热能	传热效率可提高 2~3 倍，减排 40% 以上	7	未大规模开展应用，成本高
绿氢制备化学品技术	从可再生能源发电、电解水制氢、氢气储存与运输到氢气应用在石化行业的全过程	吨原油加工量 CO_2 排放减少约 25%~40%	9	绿氢的生产成本相对较高，储存和运输等技术仍然相对不成熟
电气化改造技术	通过先进的电气自动化和智能化技术比如电机驱动替代传统汽轮机实现石化行业热力供应的电气化	吨原油加工量 CO_2 排放减少约 15%~20%	9	技术尚不成熟，初期投资较高
原油直接制化学品技术	将原油直接供给裂解炉进行热裂解，而无需经过传统的炼油过程	吨原油加工量 CO_2 排放减少约 25%~35%	6	技术成熟度相对较低，对设备和操作技术有较高的要求，成本高
CO_2 资源循环利用技术	从石化化工生产过程中排放中高效捕集 CO_2，将捕集到的 CO_2 转化为有价值的化学品或燃料，实现碳的循环利用	吨原油加工量 CO_2 排放减少约 70% 以上	7	成本高，尚未实现商业化应用

5.4 石化行业碳中和技术路线图

石化行业碳中和路径呈现明显的阶段性特点：2035 年前以推广高效换热器等成熟技术和现有工艺优化为主，减排量达到 0.4 亿吨，占比 16%，炼油电气化改造、乙烯高效电裂解技术和绿氢制备化学品技术逐步发展，由于原油直接制化学品等技术需要克服一些技术和操作上的难题，发挥作用不显著；中期（2035—2050 年）逐步推进清洁能源替代和工艺革新，绿氢替代技术、电气化改造技术和 CCUS 技术取得重大突破，实现规模化应用，减排量占比 18%、16%、21%，显著提升节能减排效果；远期（2050—2060 年）石化行业已深度电气化，规模化耦合绿氢，颠覆性技术成为主流，原油直接制化学品技术减排量占比达到 9%，大规模 CCUS 等技术推动深度脱碳，CCUS 技术减排量占比达到 23%。

图 5.10 石化行业碳中和路线图



5.5 碳中和技术应用推广政策建议

石化行业作为碳排放的重要领域之一，在实现碳中和目标的过程中，面临着艰巨的政策需求与挑战。为了有效推进石化行业的碳中和进程，提出政策建议如下：

完善碳定价机制。尽快将石化行业纳入全国碳市场，建立统一的碳排放核算与核查标准，逐步推行有偿配额分配制度，并将其收入设立为专项基金，用于支持碳中和技术研发与应用，提升低碳技术的经济竞争力，缓解高成本减排技术的“绿色溢价”问题。

强化资金保障机制。设立面向石化行业低碳转型的专项基金，重点支持绿氢制备、CCUS、生物基化学品等关键技术的研发与示范；同时实施税收抵免等政策工具，建立动态技术评估机制，降低企业投资成本和技术试错风险。

推进低碳基础设施建设。加快构建绿氢制备与储运网络，探索在现有天然气管道中掺氢（比例控制在 20% 以内），并在长三角、珠三角等重点产业集群布局百公里级输氢管道，逐步扩大绿氢使用比例。推进鄂尔多斯、准噶尔等地建设“CO_2 封存中心”，配套区域捕集管网，形成产业级碳捕集与封存体系；建立跨企业碳资源共享平台，实现炼厂、电厂、化工厂间的碳资源耦合与循环利用。

健全绿色标准与认证体系。制定生物基产品、绿色化学品的认定标准，推动原料、反应介质和合成工艺的绿色化转型；完善绿色制造认证体系，引导终端消费向绿色产品倾斜，推动石化行业构建全生命周期的资源循环利用和绿色制造体系。

第 6 章　煤化工行业碳中和技术展望

煤化工行业工艺复杂、产品较多，本章重点展望了四种煤化工产品，煤制合成氨、煤制甲醇、煤焦化和煤制烯烃。按照国民经济行业分类对产品代码包括炼焦（2521）、煤制合成气生产（2522）、煤制液体燃料生产（2523）。煤炭在化工领域短期内很难被完全取代，重点在于清洁高效利用。在低效产能有序退出的前提下，煤化工行业碳中和技术主要包括以优化工艺流程为主的能效提升技术、绿氢耦合技术、电机和电驱动技术以及 CCUS 技术。为顺利实现煤化工行业碳中和，有序提高电气化率、加大绿氢绿电以及 CCUS 技术应用将贯穿整个行业减碳过程。

06

INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

6.1 行业现状与趋势

煤化工行业分为传统煤化工和现代煤化工两大类。传统煤化工包括煤制合成氨、煤焦化、煤制甲醇，主要为化肥、钢铁、有机合成等提供原料及燃料。现代煤化工包括煤直接液化、煤间接液化、煤制天然气、煤制烯烃和煤制乙二醇等，生产化工产品和清洁能源产品。

① 传统煤化工

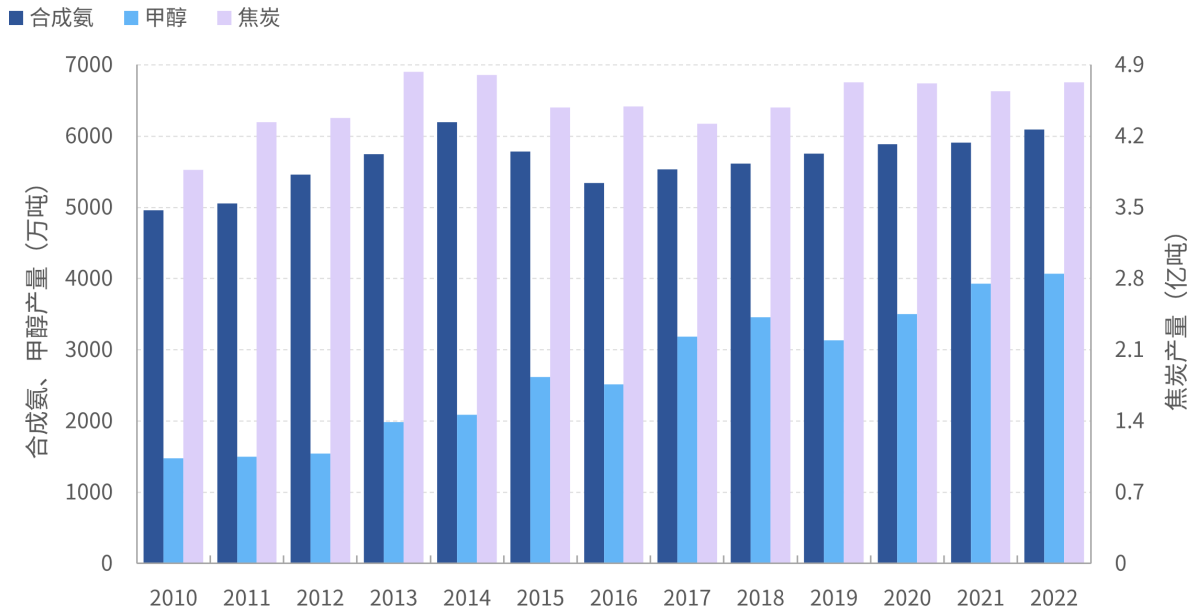
在合成氨行业，中国合成氨原料路线以煤为主、以天然气为辅，煤制合成氨的产能约占总产能的 75%，以天然气为原料的合成氨产能占 22%，其余 3% 以焦炉气为原料。合成氨产量整体上稳中微调，需求刚性显著。2016 年，合成氨产量降到 5341 万吨。随着工业合成氨需求量上升，产量也有所回升。2022 年合成氨产量为 6095 万吨。2022 年，采用先进煤气化技术，以烟煤、褐煤为原料的合成氨产量占总产能的 54%，产能利用率高达 95.7%；以无烟块煤为原料的合成氨产能占 20.3%，产能利用率不足 84%。消费市场对合成氨的需求主要来自农业和工业两大方面，工业领域主要考虑环保脱硝剂用量等因素，预计 2030 年合成氨产量约 5000 万吨。

在煤焦化行业，产量在 2014 年之前高速扩张后趋稳。2013 年的焦炭产量达到历史最高值 4.83 亿吨，焦炭产量的增长与钢铁行业的发展密切相关，钢铁需求的增加直接拉动了焦炭产量的提升。中国焦炭产量整体上呈平稳趋势，2022 年中国焦炭产量 4.73 亿吨。综合考虑下游钢铁行业对冶金焦需求量、炼铁技术进步和节能减排措施等因素，预计 2030 年焦炭产量约 4 亿吨。

在甲醇行业，化工需求驱动增长，中国甲醇产量逐渐上升。从 2010 年的 1480 万吨，逐渐上升到 2022 年全国甲醇产量 4070 万吨。中国是世界上最大的甲醇生产国和消费国，产能和产量分别占全球 70% 以上，在全球甲醇领域有举足轻重的地位和影响力。其中，以煤、焦炉气和天然气为原料的甲醇产量占总产量的比例分别为 84.7%、9% 和 6.3%。甲醇未来市场需求将保持相对稳定，考虑未来甲醇制烯烃项目需求，预计 2030 年甲醇产量约 4125 万吨。

图 6.1 2010—2022 年中国传统煤化工产量变化情况

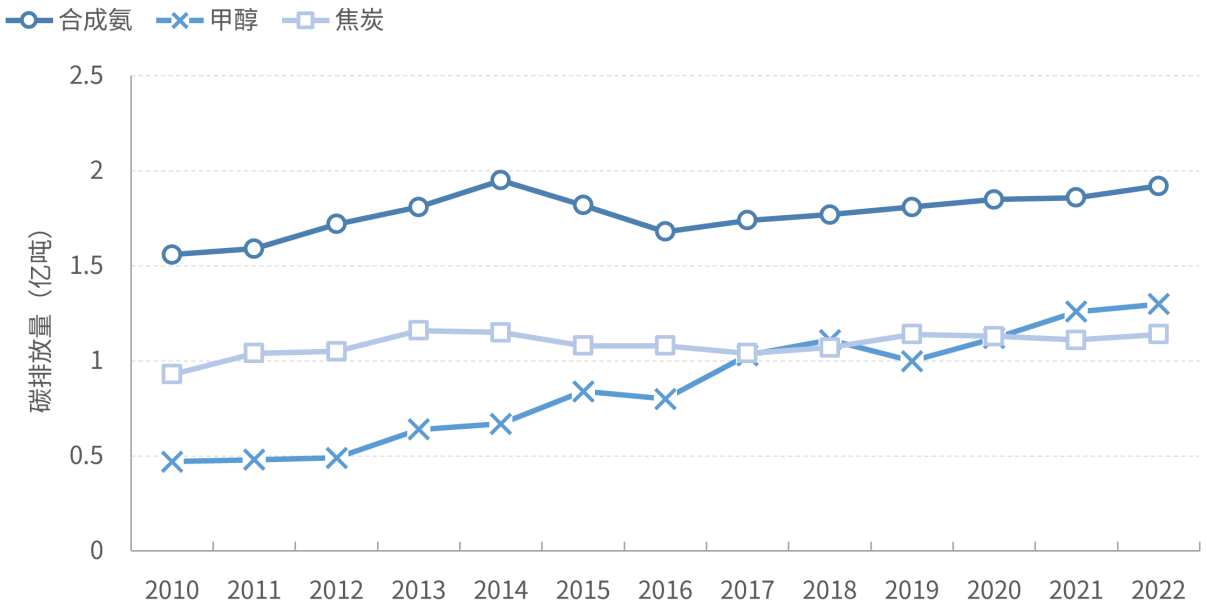
注：为统一各子行业碳排放数据，统计煤制甲醇行业产量数据时扣除煤制烯烃（CTO）生产线中甲醇产量。



随着传统煤化工产品产量的增加，煤制合成氨、煤制甲醇和焦化行业的碳排放量持续增长。2014 年煤制合成氨的碳排放量达到 1.95 亿吨，之后逐渐下降并缓慢回升。2022 年传统煤化工碳排放共 4.36 亿吨，占煤化工行业总排放量 68%，煤制合成氨、煤制甲醇、焦化的碳排放占传统煤化工比例分别为 44%、30%、26%，碳排放量分别为 1.9 亿吨、1.3 亿吨和 1.1 亿吨。合成氨产量的增长与农业和工业的发展密切相关，特别是化肥需求的增加直接拉动了合成氨产量的提升。且由于随着市场对甲醇的需求加大，生产甲醇的碳排放量上升速度相比其他煤制产品较快。

图 6.2 2010—2022 年传统煤化工各子行业 CO_2 排放量

注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。

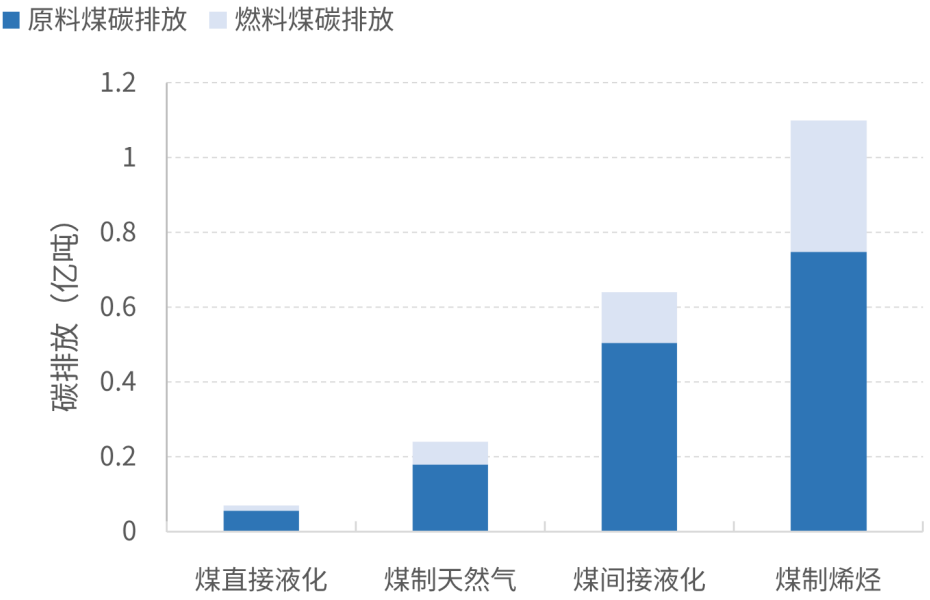


② 现代煤化工

现代煤化工自 2004 年列入国家能源中长期发展规划，经过 3 个“五年计划”和 10 余年的项目示范，中国现代煤化工产业规模稳步增加。根据中国现代煤化工已投产、试运行、在建和核准项目数量，以及相关政策影响，预计到 2030 年，煤制油、煤制天然气、煤（甲醇）制烯烃、煤制乙二醇产能分别可达 1800 万吨 / 年、160 亿立方米 / 年、1224 万吨 / 年、1500 万吨 / 年。煤制烯烃作为碳排放占比最高的子行业，在本报告中，现代煤化工主要以煤制烯烃展开研究。现代煤化工总体处于示范或示范升级阶段，产量相对较小，碳排放量占比不高，2022 年现代煤化工碳排放共 2.05 亿吨，占煤化工行业总排放量 32%。其中原料煤碳排放 1.47 亿吨，占比 72%；燃料煤碳排放 0.58 亿吨，占比 28%。碳排放量最大的子行业为煤制烯烃。煤制烯烃、煤间接液化、煤制天然气、煤制乙二醇和煤直接液化的碳排放占现代煤化工比例分别为 49%、28%、11%、9% 和 3%。

图 6.3 2022 年现代煤化工各子行业 CO_2 排放量

注：碳排放量包括能源活动、工业过程产生的直接排放和使用电力、热力产生的间接排放。

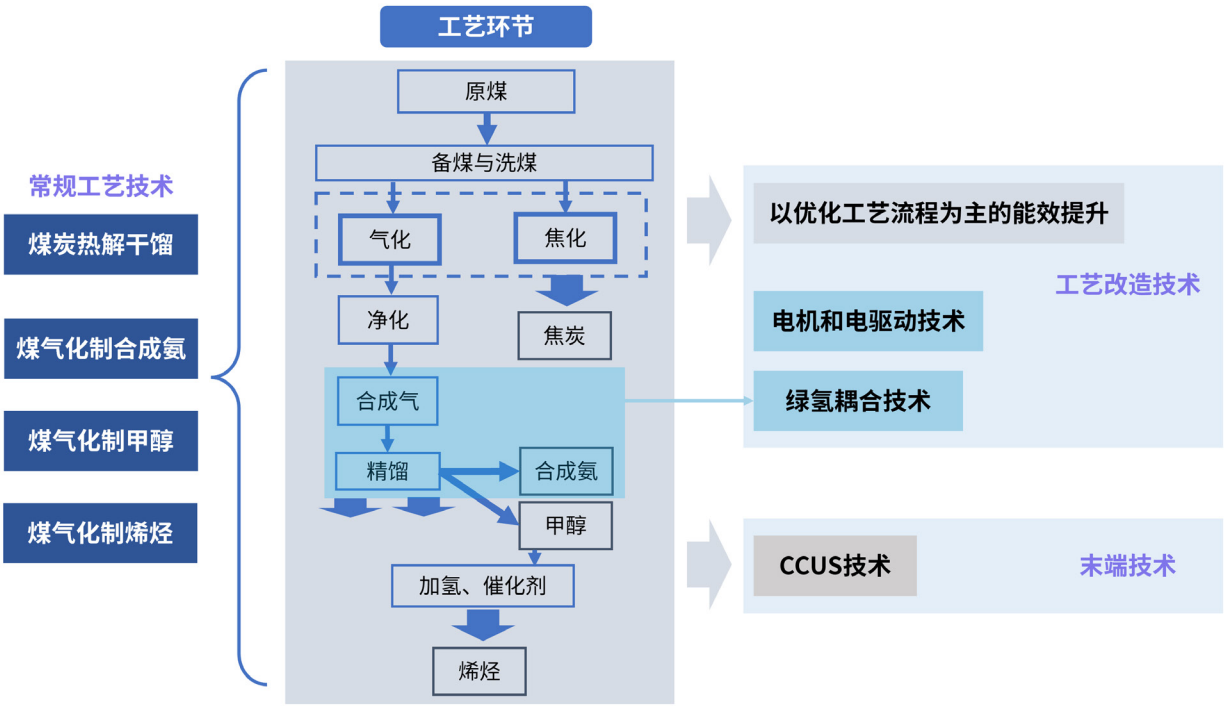


煤化工行业主要碳排放环节是工艺过程和燃烧排放，占比 88%，主要包括煤气化、液化和焦化等生产过程。煤化工行业的间接排放占 12%，主要来自用电，包括工业用电和工业蒸汽等。现代煤化工生产中的 CO_2 排放主要来自工艺过程，如煤气化和变换工序。在煤气化制甲醇和烯烃、煤液化以及煤间接液化过程中，会有大量的碳以二氧化碳的形式产生。由于原料煤的氢碳比低，下游合成要求的氢碳比高，中间变换反应使大量有效 CO 转化为无效 CO_2，形成工艺过程碳排放。

6.2 碳中和关键技术

中国煤化工行业的技术分类主要基于产品类型、工艺阶段等维度，并结合行业发展趋势与国家政策导向，具体分类如下：一是以优化工艺流程为主的能效提升技术，通过加强余热余压利用、升级关键装置、采用气化新工艺、系统优化升级等减少原料煤和燃料煤使用，降低碳排放。二是绿氢耦合技术，通过在合成气系统中补入“绿氢”，合理调节氢碳比满足下游产品生产要求，能大幅度降低气化变换过程 CO_2 排放。三是电机和电驱动技术，煤化工生产过程中最大的能源消耗来自于动力消耗，以电驱替代蒸汽驱、取消燃煤锅炉等方式减少燃料煤燃烧形成的碳排放。四是 CCUS 技术。煤化工 CO_2 排放源较集中、排放浓度较高，易富集，利用捕集的高浓度 CO_2 为原料，可进一步加工生产化学品，实现固碳。

图 6.4 煤化工行业碳中和技术体系



6.2.1 以优化工艺流程为主的能效提升技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

能效提升技术通过对工艺流程、动力方案、供热系统的优化，能够降低工艺过程和能源系统中 3%~10% 的 CO_2 排放。

① 绿色智慧化工厂技术

由于煤化工行业生产过程的高度复杂性，智能化、精细化、数字化的作用格外凸显。大力推进智能工厂建设，促进工程设计数字化和供应链管理智

能化，实现生产运行智能化，重点打造数字化生产环境、生产集成管控体系、全流程模拟和一体化优化体系、智能安全环保管理体系等，加强企业数据仓库和知识库的建设，推进知识管理和经营决策智能化。实践表明，通过数字化智能化管理，煤化工厂至少能取得 1%~2% 的节能降耗效果。

② 高效气化技术耦合半 / 全废锅流程

煤气化优先选用高效气化工艺，配套耐硫变换、低温甲醇洗、脱硫脱碳，使合成气生产效率实现最大化；提高煤气化压力，气化压力高可节省后继工艺单元合成气压缩功，将煤气化压力从 6.5 MPa 提高到 8.7 MPa，可提高能效约 0.5%；煤气化热量回收优先采用废锅流程，激冷流程优化为废锅或半废锅流程，可副产高品质蒸汽，高压蒸汽经过热后可用于驱动空分压缩机透平或发电，提高能量使用效率。实践表明，通过高效气化技术耦合半 / 全废锅流程，煤化工项目至少能取得 5%~10% 的节能降耗效果。

③ 余热回收技术

随着现代煤化工项目的大型化、一体化发展，项目规模和复杂程度远高于传统煤化工，全厂换热网络优化有很大空间。通过优化换热网络，采用热泵技术等手段，能够降低项目燃动能耗约 1%~5%，实现节能减排。

中国煤化工行业在优化工艺流程和提升能效方面面临诸多挑战。例如，中、低压蒸汽的利用与匹配性问题尚未完全解决，同时半废锅流程气化工艺的工业化运行经验不足，燃气蒸汽过热炉对全厂蒸汽系统的可靠性影响仍需通过长周期运行进行验证。此外，尽管中国煤化工行业已实现核心技术工程化示范和关键设备国产化应用，但整体系统尚未达到最优状态，能量利用水平仍有提升空间。

（2）示范工程

陕化煤化工集团有限公司是陕煤集团化工板块全资子公司，是国内具有现代化装置和国内领先技术的氮肥生产基地。陕西陕化煤化工集团有限公司能效提升重点项目气化 D 炉改造 SIS 系统（Safety Instrumented System，安全仪表系统）安装调试工作在科技发展部、气化分厂和电仪分厂技术人员的共同努力下顺利完成，为能效提升项目全面有序推进奠定了基础。当工艺生产系统出现异常时，SIS 会进行提前干预和预判，保护设备不受损伤，进而有效制止事故的扩大化。

陕化公司采用晋华炉技术，将现有多元料浆技术耐火砖气化 D 炉改造为水冷壁水煤浆气化炉。主要装置产能为年产合成氨 60 万吨、尿素 100 万吨、磷铵 25 万吨、1，4- 丁二醇 13 万吨，聚四氢呋喃 4.6 万吨。2020 年该公司提出合成氨提效改造项目，配套对气化炉进行改造，本次对 D 炉进行改造，采用晋华炉技术，将现有耐火砖水煤浆气化炉改造为水冷壁水煤浆气化炉，改造完成后气化炉连续运行时间由 60 多天提高到 120 天以上，同时省去耐火砖更换费用，预计每年可产生经济效益 1000 余万元。

6.2.2 绿氢耦合技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

发展绿电 - 电解水制绿氢，通过在合成气系统中补入“绿氢”，合理调节氢碳比满足下游产品生产要求，能大幅度降低变换过程 CO_2 排放。煤制烯烃应用该技术，预计单位产品碳排放因子能够降低到 3.2 吨 CO_2/ 吨产品，煤制甲醇应用该技术，预计单位产品碳排放因子能够降低到 1.1 吨 CO_2/ 吨产品，煤制合成氨应用该项技术，预计单位产品碳排放因子能够降低到 1.2 吨 CO_2/ 吨产品。当前绿氢耦合技术还存在绿氢与煤化工技术的匹配问题较难、绿氢制备成本高等问题，煤化工企业改造难度大，主动融合发展意愿不强。

① 绿氢取代水煤气变换技术

原料气变换是煤化工中的重要排放过程，降低变换过程排碳，最终通过“碳氢互补”实现“近零碳排放”。通过补充绿氢，需要的合成气量也会下降，从而降低煤气化装置规模，减少原料煤和燃料煤消耗。通过变换和空分的替代，相对于典型的粉煤气化 + 汽驱空分方案的煤制甲醇项目，采用碳氢互补优化工艺流程，每增加 1 亿标准 m3 电解水制绿氢及其对应的 0.5 亿标准 m^3 绿氧，可降低碳排放 35 万吨，碳减排幅度能够达到 60%。

以绿氢全部取代水煤气变换技术在煤制烯烃项目应用为例，在经济性方面，当前单位投资成本（指新能源发电 - 电解制氢等产业链的成本，不包括煤制烯烃原有成本）约 3 万元 / 吨产品，单位固定成本约 0.25 万元 / 吨产品，单位可变成本约 0.58 万元 / 吨产品，技术使用寿命（电解槽使用寿命）约 20 年。在发展潜力方面，随着技术进步，投资成本和运行成本将逐步下降，竞争力逐步增强，预期推广占比（绿氢替代原料煤占比）2030 年为 10%。绿氢直接应用于煤化工的关键技术瓶颈突破预期比较高，主要是成本问题和耦合技术突破问题。能源 / 原料可获得性取决于新能源和电解制氢的稳定性。上游技术需要进一步突破，现有单个碱性电解槽规模比较小，大规模制氢技术进展缓慢。

② 煤炭与富氢燃料耦合技术

除绿氢外，其他低碳原料主要是 CH_4，来源包括天然气、液化石油气、油田气等。引入富氢资源（天然气、焦炉气、页岩气等）与富碳合成气进行碳氢匹配，是实现源头碳减排的有效途径。以煤炭与天然气耦合技术在煤制烯烃项目应用为例，在经济性方面，单位固定成本约 0.31 万元 / 吨产品，单位可变成本约 0.24 万元 / 吨产品，技术使用寿命约 30 年。

煤化工与绿氢耦合发展存在全流程的技术工艺、设备选型、参数设计、材料选择、关键配件、各系统最优匹配等技术问题。电解水制氢技术进步和材料突破进展缓慢，大规模电解水制绿氢技术有待工业示范进一步验证和优化。“绿电”生产成本、绿电上网及调峰费用、电解水制氢成本等增加了化工产品的生产成本。

（2）示范工程

内蒙古宝丰新材料有限公司一期 260 万吨 / 年煤制烯烃和配套 40 万吨 / 年植入绿氢耦合制烯烃项目，配套建设风电、光伏发电及电解制氢（7 GW 光伏发电、1.5 GW 风电，最大补入绿氢 25.15 亿立方米 / 年），该项目在 2023 年开工建设，工程项目总投资超 478 亿元。相比于传统工艺，该项目空分装置、变换及热回收装置、甲醇制烯烃装置采用规模大型化技术，综合能耗分别减少 21.21%、47.80%、15.05%；低温甲醇洗装置规模化及减少外补冷量、降低溶液循环量的创新工艺，甲醇合成规模大型化及提高入口压力技术，蒸汽消耗量分别减少 36%、38.11%，同时采取植入风光绿电方式提供绿氢绿氧，5 年后可实现二氧化碳减排量约 217 万吨 / 年。单位产品碳排放水平分别为基础工况（纯煤工况）的 6.07 吨 CO_2/ 吨烯烃和补绿氢情景的 5.35 吨 CO_2/ 吨烯烃，均优于《现代煤化工行业碳排放基准》（T/CCECTA0104-2023）中 1 级领先水平（≤7.1 吨 CO_2/ 吨烯烃）。

6.2.3 电机和电驱动技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

煤化工项目一般采用自建热电站自产蒸汽驱动大型压缩机。在电驱压缩机技术不断成熟的前提下，利用外购电力间接排放取代燃煤锅炉直接排放，在提高能量效率的同时，随着新能源推广，利用电力绿色化发展成果降低间接碳排放，也是降低煤化工项目碳排放的重要途径。

通过电气化改造，提高电力驱动压缩机的比例，也是大型煤化工项目节能减排的重要手段。煤制烯烃应用该技术，预计单位产品碳排放因子降低到 7.2 吨 CO_2/ 吨产品的水平。煤制甲醇应用该技术，预计单位产品碳排放因子降低到 2 吨 CO_2/ 吨产品的水平。煤制合成氨应用该项技术，预计单位产品碳排放因子降低到 3 吨 CO_2/ 吨产品的水平。

① 大型电机电驱动技术

燃料动力消耗是大型煤化工项目碳排放的重要来源之一，驱动空分、冰机、合成气压缩机透平需要大量能源。从全流程能量效率看，高效电机驱动能量效率高于传统蒸汽驱动。随着光伏、风电等绿色低碳能源的快速发展，绿色电力在整个电网中的占比将不断提升，以电力作为能源产生的碳排放将逐渐下降。

② 电加热技术

电气化是替代化石能源的重要手段，化学反应中的温度压力要求大多可通过以电为能源的反应器达到。现阶段，电加热技术发展的瓶颈主要来自电网、设备、电加热效率等。

电能替代和电驱动技术存在成本、安全性、关键装备研发与工艺过程匹配等挑战，其中，成本问题是用户考虑电能替代的核心问题。

（2）示范工程

中煤陕西公司中煤榆林煤炭深加工基地项目，以煤为原料年产 220 万吨甲醇、90 万吨烯烃装置及相关配套设施，同时建设 25 万吨 / 年 LDPE/EVA 延链增链及配套工程项目，是中国温室气体排放环境影响评价试点示范项目，承担了 3000 吨级气化半废锅流程及 40 MW 超大功率电机两项应用示范任务。该项目气化炉采用节能的半废锅流程水煤浆加压气化先进工艺，副产的高压蒸汽全部利用发电，空分装置大型压缩机透平由蒸汽驱改为电驱，大幅提高电气化比例，彻底取消燃煤锅炉，使燃料煤归零，每年可减少二氧化碳排放量 53.43 万吨；建设 52 MWp 分布式光伏项目，利用可再生能源电解水制备的“绿氢”和“绿氧”作为煤化工的氢源和氧源，每年减少二氧化碳排放 6.61 万吨。低温甲醇洗高浓度二氧化碳尾气实施捕集利用，年减排二氧化碳 100 万吨。

6.2.4 CCUS 技术

（1）技术现状、瓶颈和挑战

煤化工 CO_2 排放源较集中、排放浓度较高，易富集，CCUS 成本相比水泥行业较低。中国煤化工和石化行业的一体化驱油示范项目捕集成本相对较低，在未来是实现碳减排的重要技术。针对煤化工工艺过程中排放的高浓度 CO_2，净化处理常用低温甲醇洗等物理吸收法。煤化工行业的二氧化碳资源化利用主要体现在二氧化碳制备化学品。利用捕集的高浓度 CO_2 为原料，可进一步加工生产化学品，实现固碳。煤制烯烃应用该技术，预计单位产品碳排放因子降低到 1 吨 CO_2/ 吨产品的水平。煤制甲醇应用该技术，预计单位产品碳排放因子降低到 0.2 吨 CO_2/ 吨产品的水平。煤制合成氨应用该项技术，预计单位产品碳排放因子降低到 0.5 吨 CO_2/ 吨产品的水平。煤焦化应用该项技术，预计单位产品碳排放因子降低到 0.04 吨 CO_2/ 吨产品的水平。CO_2 转化利用存在不易活化、反应路径复杂、产品选择性低等问题，亟需突破高温高压环境瓶颈、寻找合适催化剂。预计到 2050 年，煤化工行业的 CCUS 技术能达到规模化应用。CO_2 加氢制甲醇是受到广泛关注的技术路线。甲醇市场规模大，能够作为能源载体，也能够作为化工原料，与园区煤化工产业链匹配度高，是碳中和阶段大规模 CO_2 化学利用的理想载体。

煤化工行业碳捕集和封存中，现有油藏地质封存结合 CCUS 技术，通过捕集煤化工尾气中的 CO_2，将其注入油田地层实现封存并提高原油采收率。目前还有煤基固废协同充填封存技术，该技术将煤矸石、粉煤灰等固废改性为功能性充填材料，注入井下采空区形成封存空间，并通过矿化反应固定 CO_2。内蒙古、陕西等地目前正在积极推进煤化工 CCUS 示范项目。

煤化工 CCUS 存在经济性、机制和政策等挑战。煤化工项目实施碳捕集对产品经济性影响较大，碳捕集的能耗较高，这也是碳捕集成本较高的主要原因，需要通过整体优化，进一步降低碳捕集成本。欧盟、美国、澳大利亚等主要 CCUS 技术的倡导国家和地区已出台了相应的碳捕集与封存指南，中国尚处于探索阶段，缺乏相关技术标准，且相应项目未纳入法律法规监管体系。针对化工行业 CCUS 项目的能耗指标、金融、税收等激励政策有待落地。

（2）示范工程

国家能源集团神华煤制油化工有限公司深部咸水层 CO_2 地质封存示范工程是中国首个全流程煤基 CO_2 捕集和深部咸水层地质封存示范项目。该示范工程位于鄂尔多斯盆地北部，内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗东南约 40 km 处。示范工程的 CO_2 源是从煤制氢装置变换单元的尾气中截流后，经气液分离、除油、脱硫、净化、精馏等工艺，将纯度为 88.83% 的 CO_2 提纯至 99.95% 以上。然后用低温罐车将 CO_2 运至封存区，首先导入缓冲罐内，再经加压、加热后注入地下。缓冲罐、注入井、监测井内压力、温度等监测数据实时传输至综合办公楼内。示范工程于 2011 年 5 月 9 日实施注入实验，截至 2016 年年底，完成 30 万吨注入目标。

6.3 技术展望和成本演变

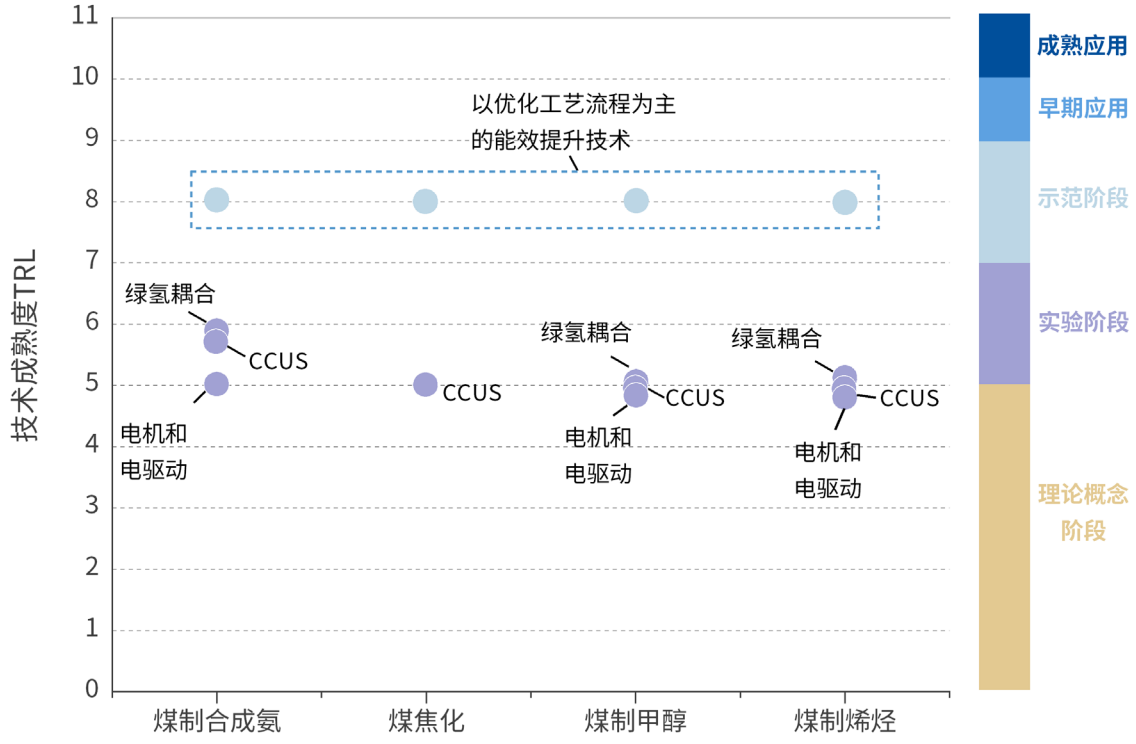
6.3.1 技术成熟度展望

煤化工行业碳减排技术主要以余热余压利用等常规节能降耗技术为主，绿氢替代、电能替代、CCUS 等面向碳中和的关键技术仍处于示范阶段，仍存在技术和经济上的挑战。以优化工艺流程为主的能效提升技术已经进入示范应用阶段。使用可再生能源参与工艺生产的绿氢耦合技术和电机电驱动技术还处于技术实验阶段，直接应用于煤化工技术难度较大，关键技术瓶颈突破预期较高。能源或原料可获得性取决于可再生能源和电解制氢的稳定性。在电能替代技术不断成熟的前提下，通过电气化改造，提高电力驱动压缩机的比例，是大型煤化工项目节能减排的重要手段。

中国煤化工行业的 CCUS 技术在示范项目和部分技术环节已取得显著进展，但整体仍处于工业化实验阶段，面临技术瓶颈、行业壁垒、高成本、政策与标准不完善等多重挑战。未来需要加强技术研发、跨行业协作、政策支持和标准体系建设，以推动 CCUS 技术的大规模应用。且在未来煤化工行业深度脱碳的进程中，巨大的碳缺口还需要 CCUS 技术填补，未来的减排潜力可观。

图 6.5 2020 年煤化工行业技术成熟度

注：技术成熟度详细划分见附录。

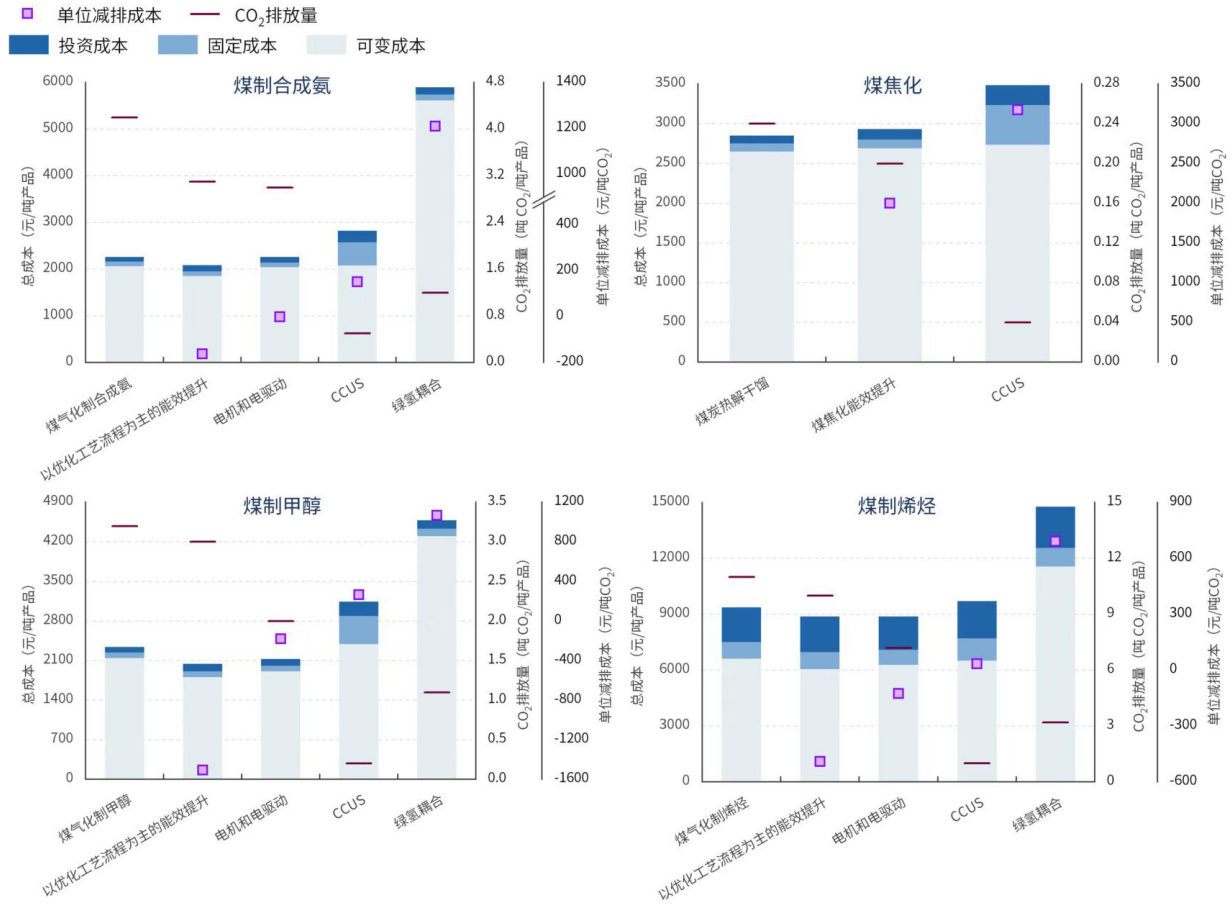


6.3.2 技术成本演变

图 6.6 展示了煤化工行业四个产品领域的各项技术的成本。绿氢耦合技术单位碳排放量在 1.1~3.2 吨 CO_2/ 吨产品，是单位减排成本最高的技术。在煤制合成氨，绿氢耦合技术的可变成本为 5615 元 / 吨产品；在煤制甲醇，绿氢耦合技术的可变成本为 4300 元 / 吨产品；在煤制烯烃，绿氢耦合技术的可变成本为 11600 元 / 吨产品。由于绿电生产成本、绿电上网及调峰费用、电解水制氢成本等增加了化工产品的生产成本，绿氢耦合技术的成本普遍较高。在未来可稳定输出低价氢源时，绿氢耦合技术将成为煤化工行业深度脱碳的主力军。预计到 2060 年，煤制合成氨和煤制甲醇的绿氢耦合技术成本在 3200~3800 元 / 吨产品之间。电机和电驱动技术的单位减排成本虽然具有优势（单位产品碳排放因子见 6.2.3 章节），但技术成熟度较低，部分电机和电驱动设备仍依赖进口，自主创新能力较弱，影响技术的快速推广。未来随着煤炭等原料的价格波动影响，煤价上涨，煤焦化工艺的原料成本会有所上升，随着环保要求的提高，煤焦化企业需要投入更多资金维护技术发展，这也增加了企业的成本。煤焦化技术随着市场竞争、煤炭资源配置和新能源补充等因素，成本在未来可能还会有所上升（到 2060 年，总成本上升约 1000 元 / 吨焦炭）。煤化工 CCUS 技术成本相较其他工业较低，长期来看能效提升将是未来煤化工行业重点推广的技术类别，同时鼓励采用“碳耦合”相关技术，开发“固碳”化工产品，推进氢能开发利用。

图 6.6 四类煤制产品不同技术路线的成本对比

注：单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。



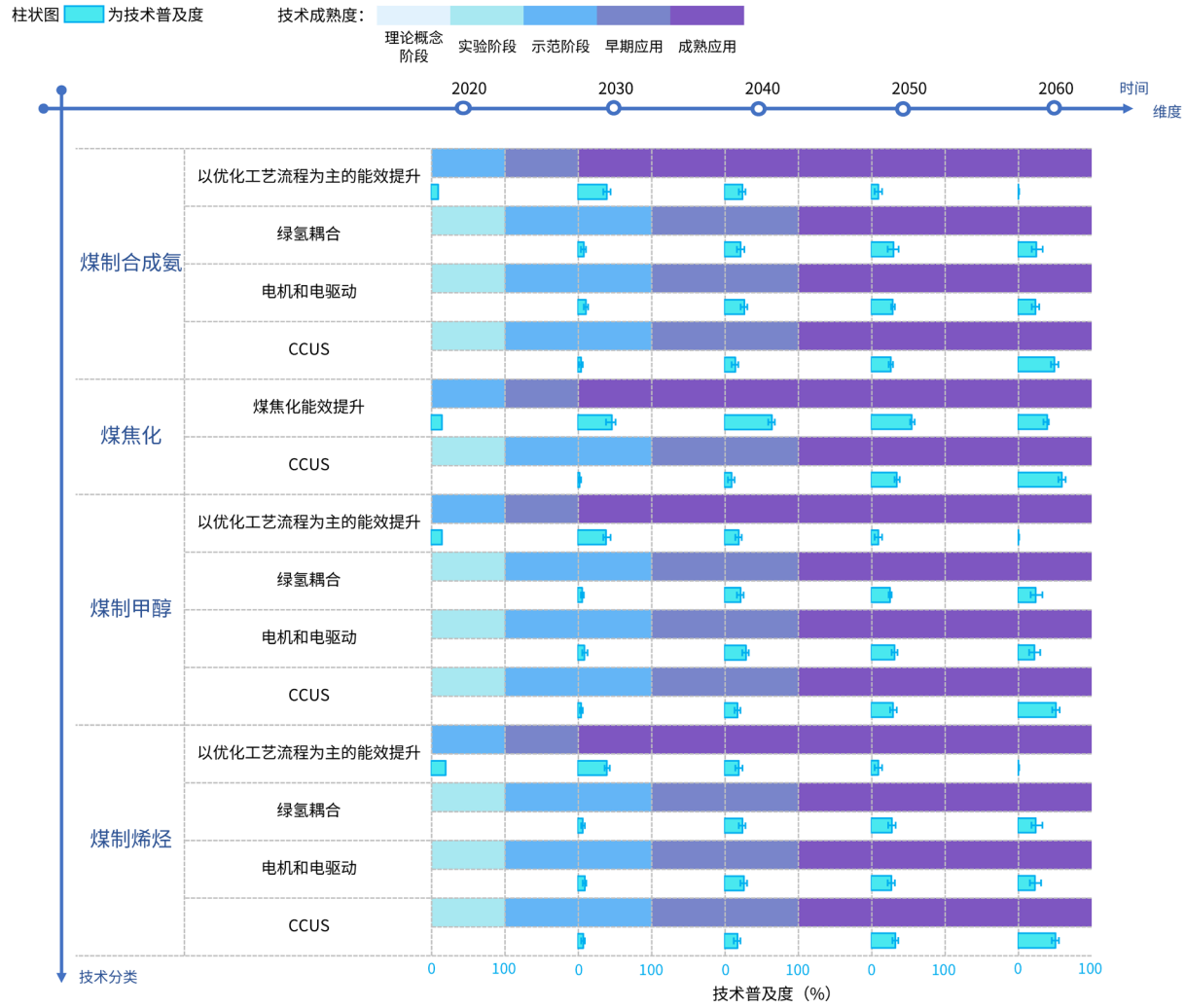
6.3.3 技术普及度展望

以优化工艺流程为主的能效提升技术的标准化程度高、投资回报周期短，2035 年前普及度达 40%~50%，成为短期减排路径的核心。该技术通过煤气化效率优化、余热回收等降低单位能耗（15%~20%），契合煤化工存量产能改造需求。2035 年后，绿氢耦合技术、电机和电驱动技术逐步普及，氢能作为煤化工行业重要的原料端，发展规模将不断扩大。电机和电驱动技术在煤化工行业目前尚处于逐步推广阶段，随着技术成熟度的不断提高，预计到 2040 年，电机和电驱动技术普及度达到 25%~30%。2050 年之后，作为解决煤化工行业碳减排“最后一里路”的抓手，绿氢耦合技术、CCUS 技术蓬勃发展，将贯穿整个煤制化学品行业减排过程，是企业不断提升碳减排水平的最具潜力技术链条。到 2060 年，CCUS 技术普及度达到 50%~60%。

煤化工行业碳中和需通过“能效优化 - 绿氢替代 - 碳循环”三个阶段技术迭代实现。绿氢耦合技术虽减排潜力显著，但其经济性高度依赖绿电成本的下降与电解效率的突破。电机与电驱动技术未来需加速国产化以释放成本优势。CCUS 技术则需结合地理与政策条件优化整体布局。

图 6.7 2020—2060 年煤化工行业碳中和技术普及度

注：技术普及度反映了技术从研发阶段到实际应用的推广效果。技术普及度越高，说明该技术的应用范围越广。



6.3.4 技术对比分析

煤化工行业碳中和关键技术汇总如表 6.1。

表 6.1　应用于煤化工行业的主要技术

技术名称	技术原理	二氧化碳减排效果	技术成熟度	成本和技术挑战
以优化工艺流程为主的能效提升技术	对工艺流程、动力方案、供热系统的优化	3%~10%	8	生产过程中的中、低压蒸汽与利用的匹配性较难，技术更新成本较高
绿氢耦合	合成气系统中补入“绿氢”，合理调节氢碳比满足下游产品生产要求，大幅度降低变换过程 CO_2 排放	55%~70%	5~6	绿氢与煤化工技术的匹配问题较难，绿氢制备成本高
电机和电驱动技术	通过电气化改造，提高电力驱动压缩机的比例，减少燃料煤碳排放	25%~30%	5	技术尚不成熟，储能与调峰技术成本较高，导致电能替代项目的经济效益难以保障
CCUS 技术	以低温甲醇洗等物理吸收法为主，煤化工 CO_2 排放具有浓度高、较集中特点，适合 CCUS 应用	80%~90%	5	产品经济性影响较大，碳捕集的能耗较高

6.4 煤化工行业碳中和路线图

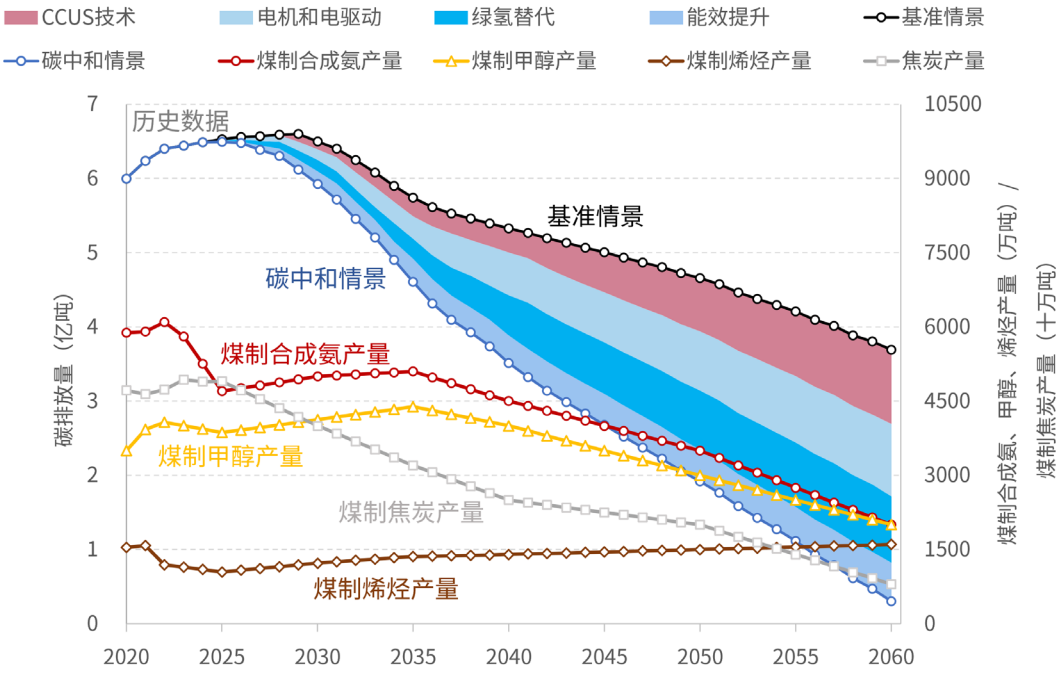
煤化工行业实现碳中和过程分为以下 4 个阶段（图 6.8）：

2025—2030 年：常规煤气化工艺仍占主导，煤化工行业先进与落后产能并存，节能降碳改造升级潜力较大。到 2030 年，煤化工行业处于达峰后缓慢下降阶段。期间煤制合成氨和煤制烯烃可通过提升工艺能效加快煤化工减碳进程。控制现代煤化工规模、优化用能结构、创新煤化工短流程、增加绿氢普及度等实现逐步降碳。

2030—2050 年：绿氢耦合技术逐步规模化，电机和电驱动技术国产化实现突破，电气化程度较高，可实现深度脱碳。麦肯锡报告指出，预计在 2050 年，80% 以上的甲醇生产需要使用 CCUS 或绿氢，才能实现 1.5℃ 温控路径下甲醇行业全面碳减排的要求。在合成氨行业中，政府通过农民教育和地方监管，积极控制化肥施用量。使用有机化肥、缓释化肥等新式化肥，进一步提高化肥使用效率。淘汰老旧固定床，使用电机和电驱动技术，提高炉窑生产能力，降低环境污染，是未来的主要趋势。随着粗钢产量的快速下降，焦炭的需求也将逐渐减少，到 2060 年还有 0.8 亿吨。通过绿电耦合、CCUS 技术突破，煤制烯烃可转型为“低碳烯烃”，且随着新能源领域的快速发展，预计煤制烯烃的终端需求在未来还会有进一步的上升空间。

2050—2060 年：CCUS、绿氢替代原料作为煤化工行业主要的减碳技术，将贯穿整个行业减碳过程。绿氢和煤化工的耦合是产业模式的创新和升级，可以大大降低碳排放。在未来，CCUS 建设运输管道及储存设施，与其他高碳产业（钢铁、石化行业等）形成产业协同，有望进一步扩大行业内应用。预计到 2060 年，煤化工行业剩余碳排放 0.3 亿吨。

图 6.8 煤化工行业碳中和路线图



6.5 碳中和技术应用推广政策建议

为加快推进煤化工碳中和技术创新，创造有利于商业化应用平台和环境，激发企业在不同场景中应用并不断降低绿色低碳转型成本，提升产业绿色低碳发展的竞争力，提出以下政策建议。

加快先进能效提升技术推广与应用。健全煤化工节能标准体系，对标国际先进能效水平，加快制定修订一批煤化工设备及技术节能标准。建立健全煤化工低碳技术和装备相关标准和评估认证机制，发布煤化工低碳技术装备推广清单，探索煤化工“低碳首台套”示范制度，推进新成果转化。建立促进煤化工低碳发展的财税支持政策，对列入低碳技术装备清单的技术装备享受有关税费减免、贷款支持等政策，引导煤化工行业加速低碳转型。

积极推进煤化工项目实施绿氢替代。鼓励企业和科研机构加大绿氢耦合煤化工技术的研发和示范力度，特别是在低成本电解水制氢、氢气安全高效储运等关键技术领域进行突破利用，打通“研发—中试—应用—产业化—市场化”关键节点。支持煤化工项目（包括存量项目）实施绿氢替代，新建煤化工企业可优先取得与用氢负荷相匹配的新能源建设规模，扩大绿氢在煤化工项目替代比例，推进煤化工 + 绿氢、煤化工 + 绿电一体化发展，对煤化工绿氢、绿电替代项目在用地等要素指标上予以支持和倾斜。

积极推进电能替代和电驱动技术应用。加深煤化工行业电气化，鼓励使用电锅炉、热泵等电能替代设备，与智能电网和大数据信息技术深度融合，支持相关技术“首台套”推广，提升电能替代设备的智能化生产和应用水平。加大对电驱动、电加热、节能材料等关键技术和设备的科研投入，通过政策保障和财政补贴等手段消除企业对于发展前沿技术风险的担忧。

部署 CCUS 示范工程。通过部署 CCUS、碳汇等措施，支持煤化工净零示范区建设。加快推动 CO_2 利用技术创新，拓展 CO_2 资源化利用途径，整合煤化工、煤制氢、瓦斯利用和可再生能源制氢等周边项目产品，利用煤化工产生 CO_2 浓度较高的特点，大力开展 CO_2 制烯烃、CO_2 加氢制甲醇、CO_2 重整甲烷制备合成气等技术的前沿性研发，为煤化工行业碳中和做准备。将 CCUS 纳入碳排放交易体系，建立完善的 CCUS 减排量核查机制、监管机制、碳价格机制等，推动核证减排额在国际、国内碳市场上交易。

第 7 章　工业数字化碳中和技术展望

在推动工业部门碳中和的征途上，工业数字化发展的作用不容忽视。数字技术与工业绿色低碳转型的深度融合，通过技术革新引领产业升级，优化市场资源配置，多维度、全方位地推动工业体系向更加高效、清洁、可持续的未来迈进。在此背景下，在鼓励和支持绿色低碳生产技术研发与应用的同时，也要发挥好工业数字化在提升能效、精准减排、优化管理等方面的巨大潜力。

07

INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

7.1 工业数字技术概述

7.1.1 工业数字技术的发展

工业革命推动了工业发展的多个关键阶段，从电力广泛应用到信息控制技术革命，再到如今的智能化时代，技术创新始终是工业进步的核心动力。随着物联网、云计算、大数据、人工智能和量子信息技术的快速发展，数字技术已经成为工业转型的主导力量，推动着工业互联网平台的深度融合。

工业数字化的核心在于通过数据驱动的智能优化闭环，实时采集、传输、处理和分析工业系统数据，结合行业知识实现复合优化，从而推动生产过程的智能化，减少人工干预，提升生产效率与灵活性。这一模式不仅优化了传统生产流程，还通过信息技术与运营技术的深度融合，实现了生产管理的高效性、精准性和灵活性，同时推动了新型商业模式和产业形态的出现。数字技术通过全面互联的生产要素（如人、机、物和工厂），深度感知并快速处理数据，实现智能控制与优化运营，从而显著提高生产效率、灵活性和供应链管理能力。此外，数字化还推动了供应链的可视化，服务模式从现场服务向远程监控和在线服务转变，极大提升了资源配置效率和设备可用性。通过数据驱动的决策，工业数字技术不仅提升了生产效率，还推动了产业链的延展和跨行业协作，助力工业从机械化、电气化，向智能化、数字化转型，为制造业的可持续发展注入新动能。

中国在推动工业数字技术发展方面采取了多项措施，取得了显著成效。国家层面出台了包括《关于深化新一代信息技术与制造业融合发展的指导意见》和《制造业数字化转型行动方案》在内的一系列政策文件，明确了工业数字化转型的方向和步骤，并推动地方政府发布相应政策，支持区域数字化转型。在数字基础设施建设方面也取得了重大进展，中国建成了全球最大的光纤和移动宽带网络，5G 基站数量和算力设施均居世界领先地位，工业互联网标识解析体系已覆盖 41 个工业大类，连接设备数超 9600 万台套。工业数字技术在生产过程中的应用不断深化，推动了企业生产管理的透明化与智能化，提升了设备管理和质量控制的数字化能力。此外，企业数字化转型加速，已培育出 421 家国家级智能制造示范工厂，生产效率和碳排放得到了显著改善。技术创新方面，人工智能、数字孪生、边缘计算等新兴技术在工业领域的应用不断扩展，同时数字化服务生态逐步完善，推动了低成本、可复用的数字化解决方案的应用和推广。通过这些政策和实践，中国的工业数字技术发展将为未来新型工业化和高质量发展注入强大动力。

与国际发达国家相比，中国在工业数字技术领域方面仍存在一些差距。首先，中国依赖进口的高端芯片、工业控制软件和核心元器件等领域存在“卡脖子”问题，且在工业软件算法设计和生态建设上与国际领先水平有差距。其次，尽管数字经济在服务业领域发展迅速，但在工业和农业领域的数字化融合仍不足，尤其在大中小企业间存在显著差异，中小企业在资金、技术和人才方面的短板使其面临数字化转型的障碍。区域和行业方面，中国的数字化转型在东部和发达行业较为深入，而中西部和传统制造业的数字化转型仍较缓慢。未来中国仍需要加强基础研究和核心技术创新，完善技术生态，推动中小企业的数字化转型，缩小区域和行业差距，以实现工业数字技术的高质量发展。

7.1.2 工业数字技术推动绿色低碳发展的作用

数字技术通过提升效率、优化资源配置和减少环境负担，推动工业生产向低碳转型，是工业行业实现碳中和的必要手段。首先，数字技术能够减少不必要的工业活动，优化高耗能功能，从而替代传统的高碳排放过程，减少环境影响。其次，通过智能化管理、实时数据采集与分析，数字技术推动资源的精确调配和高效使用，从而促进能源的节约和碳排放的减少。特别是在减碳难度较大的行业和企业中，工业数字化技术能够实现更加细致的碳管理，通过实时监控、数据分析与预测，精确识别和优化排放源，帮助企业实现精细化减排目标。此外，数字化过程涵盖绿色低碳相关信息的采集、传输、存储、处理和标准化五个环节，形成了“连接 - 挖掘 - 优化、管控 - 增效”的基本逻辑。具体而言，数字技术改变了工业的价值创造方式，使得企业能够更精准地控制生产过程，为实现工业碳中和目标提供强有力的支持。

工业数字技术在减排方面的总体思路一是赋能能耗 / 碳排放降低，二是赋能生产运营成本降低，三是赋能产能提升（图 7.1）。对于企业而言，主要途径有四，一是数据摸底与情景预测，利用数字技术开展数据采集、传输与挖掘，摸清“碳家底”，实施碳排放数据监测、统计、核算、核查，综合考虑碳排放现状、技术发展、碳减排目标等方面，搭建碳排放核算模型等；二是制定战略和明确路径，基于碳减排潜力，设计科学、系统的“双碳”顶层规划，制定可操作、可落地的碳减排路径和行动计划；三是行业层面分业施策，利用大数据、云计算等技术，深入分析行业碳排放规律，结合行业发展特点，探索分行业碳减排方案和数字技术应用场景；四是企业层面落地实施，在源头端、过程端、末端、管理端全过程实施碳减排行动。

图 7.1 工业数字化的碳减排贡献量化总结

数字技术赋能绿色化贡献范围

赋能能耗/碳排放降低成效范围	赋能生产运营成本降低成效范围	赋能产能提升成效范围
5.7%~20%	8.4%~24.7%	3.2%~17.7%

确定各场景数字技术赋能权重

绿色研发设计权重	工艺优化降碳权重	生产协同增效权重	绿色仓储配送权重	固废循环利用权重	用能设备管理权重	能源平衡调度权重	污染物监测权重	碳资产管理权重	产业资源协同权重
4.7%	13.2%	33.9%	13.2%	0.1%	16.6%	6.5%	3%	0.4%	8.2%

从不同维度估算各场景赋能价值

	绿色研发设计	工艺优化降碳	生产协同增效	绿色仓储配送	固废循环利用	用能设备管理	能源平衡调度	污染物监测	碳资产管理	产业资源协同
赋能能耗/碳排放降低价值	5%~12%	7%~12%	5%~30%	5%~17%	5%~10%	7%~16%	5%~30%	--	4%~7%	8%~10%
赋能生产成本降低价值	15%~30%	12%~22%	5%~28%	1%~15%	13%~20%	20%~35%	3%~15%	0~2%	1%~3%	9%~25%
赋能产能提升价值	3%~5%	5%~20%	3%~34%	--	3%~5%	6%~15%	--	--	--	5%~10%

解构数字技术赋能绿色应用场景

绿色研发设计	工艺优化降碳	生产协同增效	绿色仓储配送	固废循环利用	用能设备管理	能源平衡调度	污染物监测	碳资产管理	产业资源协同

7.1.3 工业数字技术发展的挑战与瓶颈

政策和市场双重驱动下，中国数字技术产业呈现出快速发展的态势，基础设施日益完善，技术创新不断涌现，数字技术赋能工业领域碳中和优势显著。工业数字化的发展仍然面临着诸多的挑战和瓶颈，具体如下。

工业技术更新与升级成本高昂。加快数字技术在工业领域应用过程中，企业可能面临大量的技术更新和系统升级的挑战。新一代数字技术的引入和应用需要企业进行全新的设备采购、设施调整以及人员培训等方面的投资，这些成本对于许多中小型企业来说可能是不可忽视的负担。

缺乏工业行业统一标准体系。数字技术在工业领域的广泛应用需要建立统一的行业标准和规范体系。然而，在数字技术应用的早期阶段，很难达成行业共识。不同企业或组织之间使用的不同平台、接口和协议等方面的差异，使得数字技术在工业领域的推广和互操作性难度不断加大。尤其是缺乏统一标准导致了数据共享和系统集成的复杂性，限制了数字技术在工业领域的全面应用。

中国工业行业的数据治理水平不高，数据透明度较差。数字技术以数据这个核心生产要素为基础，贯穿数据汇集、共享开放、分析挖掘、应用赋能的全流程，数据资源的数量和质量两个维度可以直观反映一个地区的数据治理水平。数据要素是推进各行业进行数字化减碳的关键驱动力量，目前利用数字技术进行能耗与碳相关数据治理方面的探索不足，尚未建立起完善的碳数据管理平台和体系。

工业低碳技术的产业链缺乏大规模应用。数字技术先进企业已做到协助工业领域碳排放的数据采集与系统化的展现，但能够基于碳排放数据和工业控制逻辑进行智能化控制的案例比例极低，数字技术和工业领域还未充分融合。如何进行深度融合并充分激发数字技术的节能降碳作用仍有很长的路要走。

针对工业数字化领域的兼容性人才不足。数字领域和工业领域还未深度协同和融合的最终原因在于兼容性人才不足。数字领域专家不懂得工业领域，而在工业领域深耕多年的专家对数字领域了解不深入，因此兼容领域的发展相对缓慢，面临着人才稀缺的瓶颈。

7.2 数字技术在重点行业的应用场景

数字技术在工业碳中和中的应用场景多样，工业企业生产流程、能源形式、作业方式、设施设备等均存在差异，因此数字技术赋能的着力点也各不相同。数字化赋能工业碳中和十大应用领域包括：绿色设计研发、工艺优化降碳、生产协同增效、绿色仓储配送、固废循环利用、用能设备管理、能源平衡调度、污染物在线监测与控制（减污降碳协同）、碳资产管理、产业资源协同节能。具体针对重点用能行业分析如下。

7.2.1 钢铁行业

钢铁企业的自动化、信息化、数字化、网络化和智能化水平持续提升。到 2020 年，中国钢铁工业关键工序的数控化率达到 64.6%，生产设备的数字化率为 46.9%；到 2021 年，这一比例分别提升至 70.1% 和 51.3%。在工业碳中和目标的推动下，数字技术预计可为钢铁行业贡献 10%~15% 的减碳潜力。钢铁行业数字化技术的主要应用场景包括以下几个方面：

（1）生产优化与能效提升

钢铁行业在炼焦、炼铁、炼钢和轧钢各环节，数字化应用的实施带来了不同程度的减碳效益。

智能配煤技术应用：该技术在炼焦环节能够降低 2% 以上的耗热量，高炉智能化控制技术通过优化煤气平衡减少了能耗和碳排放。焦炉自动加热控制技术在降低焦炉能耗的同时减少了氮氧化物排放，例如 1000 万吨焦炭产能项目能够带来每年节省 6.2 万吨标煤，促进 16 万吨 CO_2 的减排量。

智能管控技术应用：炼钢环节中的智能控制系统和自动化操作，如转炉冶炼过程的实时监控与精确控制，有效提升了生产效率和钢坯质量。

蒸汽回收与利用技术：通过优化炼钢蒸汽系统，可实现 4 kg/t 钢的蒸汽回收量增加。

（2）数字化碳管理与精准降碳

通过数字化技术可促进钢铁行业实现精准的碳管理，推动了钢铁产业链碳排放的实时监测、分析与优化，助力企业实现精准降碳。以河钢的 WisCarbon 碳中和数字化平台为例，该平台为钢铁及上下游行业提供了全流程的数字化解决方案，有效优化生产流程，减少能源消耗，并提升了生产效率。

在碳足迹追踪技术应用：利用大数据分析钢铁产品从原料采购到生产全流程的碳排放，确保了碳管理的精准性。

碳排放数字化管理技术应用：结合区块链和智能合约技术，数字化碳管理平台不仅增强了碳排放数据的透明度，还为碳市场交易提供了可靠支持，促进了碳资产的高效管理和流动。

（3）供应链优化助力资源循环利用

钢铁行业借助数字化技术，显著提升了供应链管理和资源循环利用的效率，实现了废钢的高效回收与再利用，优化了供应链流程。

人工智能和工业互联网技术应用：在废钢质量检验中的应用，极大地提高了检验的准确性和效率。废钢的验收准确度超过 90%，显著提升了废钢的回收和再利用效率，减少了对铁矿石的依赖，从而有效降低了碳排放。

回收利用数字化平台技术：建立推动了废钢交易的透明化和高效化，减少了供应链中的信息不对称和资源错配现象，进一步提高了企业的运营效率。钢铁行业的智能定级系统使企业能够对废钢资源进行精细化管理，优化生产工艺，提升产品质量并降低成本。

（4）安全生产与预防性维护

钢铁行业的数字化技术在安全生产和预防性维护方面不仅能够提升生产效率和安全性，还带来了可观的减碳和成本效益。

智能监控与预警技术应用：对重大危险源和有毒可燃气体进行实时监测与预警，能够有效降低了安全事故风险。自动化和机器人技术的应用，减少了工人在危险环境中的作业时间。

智能设备诊断模型技术应用：结合数据分析和现场经验，实现设备异常的提前发现与诊断，避免因设备故障导致的生产中断。

远程监控与智能调度技术应用：该技术提升了设备管理水平，实现精准控制和预测性维护，减少了设备停机时间并提高了设备利用率。

7.2.2 建材行业

麦肯锡公司（McKinsey）报告数据显示，2020 年全球建材行业的数字化渗透率大约为 30% 左右。中国物流与采购联合会报告显示，截至 2020 年底，中国建材行业中约有 20% 的企业实施了数字化转型，使用数字化手段进行生产管理、供应链协调等工作。建材行业数字技术赋能主要集中在精准研发设计以提升资源利用率，全自动控制、参数优化、能源管理等提升生产效率，以及全产业资源高效调配，数字技术预计可为水泥行业带来 5%~10% 的碳减排潜力。建材行业数字化技术的主要应用场景包括以下几个方面：

（1）智能生产与过程控制

在水泥建材行业，数字化技术的应用主要集中在智能生产与过程控制，以及智能矿山与无人驾驶等领域。

数字化管理技术应用：通过对窑炉、磨机等关键设备的实时优化控制，企业实现了生产过程的智能化管理，提升了生产效率和资源利用率，显著降低了生产煤耗及碳排放。全椒海螺全流程智能化水泥厂自投运以来，能源消耗下降超过 1%，每年减少二氧化碳排放超过 2.5 万吨。

智能矿山与无人驾驶技术应用：数字化矿山技术和矿车无人驾驶技术的应用，提高了资源开采的效率和精准度，降低了人工成本和安全风险。

（2）能源管理与碳排放监测

水泥建材行业的数字化技术在能源管理和碳排放监测的应用上，带来能源利用效率的提升和碳排放的精准管控。

能源管理技术应用：企业通过构建能源管理系统，对生产全流程的能源消耗进行实时监测与优化调配，减少能源浪费。例如，采用风电、光伏结合余热发电模式减少电力消耗，以及以电石渣替代石灰石原料，可使 CO_2 排放量降低 40%~50%。数字化技术在建材行业能源管理的推广可推动企业 3 年内碳排放强度下降 12%，水泥窑能耗降低 8%，不仅提

升了水泥行业的绿色低碳水平，也推动了其可持续发展。

碳排放管理技术应用：企业通过传感器实时采集石灰石分解、燃料燃烧、电力消耗等数据，建立碳排放关联模型，优化原材料配比，从而减少约 5% 的二氧化碳排放。

（3）设备运维与安全管理

水泥建材行业在设备运维与安全管理方面数字化技术的应用，可进一步推动行业碳减排和成本节约。

自动管控技术应用：构建高效的智能巡检体系，将视频监控、设备振动监测和油品监测等技术融合，采用全自动润滑系统和自动工单流转模式，实现设备维护的闭环管理。

自动能耗分析技术应用：能耗分析实现了自动化取数、统计、分析和异常定位，贯通质量数据和智能优化控制链路，提升了能耗分析效率及精准度。

安全数字化管理技术：通过信息化手段实现了多维度动态防控。在决策支持上，借助“APC+ 大数据 +AI 算法”，逐步实现了窑况异常识别、全局优化寻优、熟料性能预测等功能。通过优化喂煤、篦冷机风量与余热发电的经济平衡控制，显著降低了煤耗和能耗。

7.2.3 有色行业

电解铝行业普遍面临高电耗和碳排放等挑战，亟需明确技术改造方向并加强数字化应用。在推进碳中和的过程中，数字技术在有色金属行业的全生命周期管控应用，预计可为中国有色金属行业带来 13%~19% 的减碳潜力。有色行业数字化技术的主要应用场景包括以下几个方面：

（1）智能冶炼与生产优化

有色金属行业正积极推动智能冶炼与生产优化，通过数字化技术提升生产效率并降低碳排放。

智能矿山应用：采用无人机巡检、机器人巡检等设备，矿山能够实时监控设施状态，及时识别和处理潜在故障。同时，无人驾驶矿卡和自动化采矿设备的应用，使矿山作业实现无人化，不仅提高了作业效率，还减少了能源消耗。

智能制造技术应用：该技术解决了生产管控平台的不足，实现了生产过程的智能化管理。在智能冶炼与生产优化方面，企业通过数字化技术优化生产流程，提升资源利用率并降低能源消耗。例如，株冶有色金属有限公司实施智慧工厂项目，建设智慧中心，提升信息化水平，增强管理决策效率。通过生产自动化、管控一体化等措施，企业在 2022 年相较于 2021 年成功降低单位产品碳排放 6.43%，总计减少碳排放 8055.1 吨。

大数据分析和人工智能技术的应用：使得生产调度更加优化，有效提高了资源利用率并减少了能源浪费。有色金属行业在应对大规模风电、光伏等可再生能源的波动性时，具有较强的适应性和有效性，企业在生产过程中引入数字化调度优化技术，提升了对可再生能源波动性的适应能力。

（2）能源管理与碳排放监测

大数据平台和工业物联网技术应用：该技术在优化产量、能耗、物耗等关键环节，构建全生命周期数字化节能降碳解决方案。通过分析历史数据和优化工艺，推出电解槽全生命周期管理、工艺自优化、阳极管理等自研软件，有效提升生产基地的数字化运营水平。

能源管理技术应用：通过实时采集设备用能数据，结合预测模型优化风机、空压机等设备的能耗需求，确保能源供给平衡，显著降低能源浪费并提高能效。此外，行业还重点研发铝电解槽大型化技术、新型节能槽和余热回收技术，推动低碳冶炼。通过数字化技术的应用，电解铝行业已实现显著的节能降碳效果，优化能耗管理后每年减少碳排放约6%~10%。

碳排放监测技术应用：有色行业应用数字化技术进行实时监测，精确识别生产过程中碳排放源，提升了碳排放管理水平。

7.2.4 石化与煤化工行业

石化与煤化工行业在生产流程、能源管理和安全管控等方面具有较多共性，数字化技术的应用场景也存在较强的相似性。根据麦肯锡公司报告，全球化工行业的数字技术渗透率约为 20%~30% 左右。根据中国化学与物理电源协会的数据，中国化工企业中大约有 50% 的企业正在使用或考虑使用自动化设备，如机器人、传感器和自动控制系统等。根据石化与煤化工数字赋能实践显示，化工行业数字赋能主要集中在高性能材料、化工设备、化工工艺的数字化设计，工艺控制、设备诊断、能耗管理，以及基于化工行业级平台全局优化等。预计未来碳中和阶段，数字技术预计为煤化工行业带来的减排贡献达可高达 15%~18%，石化行业带来 17%~21% 的减碳空间。石化与煤化工行业数字化技术的主要应用场景包括以下几个方面：

（1）生产过程优化与能源管理

生产自动化管理技术应用：通过应用大数据、人工智能和数字孪生技术，企业能够实现工艺流程的精确优化、预测性维护和产品质量提升。例如，镇海炼化采用“数据 + 平台 + 应用”模式，成功实现了生产运营、设备管理和安全环保的智能化升级。

能源管理技术：使企业能够实时监测和优化能源使用，降低碳排放。例如，中石化通过“石化智云”平台，实现能源管理的数字化和智能化，显著降低了能耗。

（2）安全生产与风险管理

安全数字化管理技术：应用，通过智能传感器、人工智能和物联网技术，实现生产过程的实时监测、异常预警和风险防控。企业可利用智能传感器采集设备运行状态、环境参数及潜在危险源数据，并通过 AI 算法进行故障预测和预警，提升安全管理的精准性。物联网技术的广泛应用使化工企业能够构建智能化安全管理体系。

风险数字化管理技术应用：通过传感器网络和自动控制系统，企业能够实时监测温度、压力、气体浓度等关键参数，并结合大数据分析进行智能调控，优化生产过程，降低安全事故风险。

远程监控与故障诊断技术应用：使企业能够减少人员暴露在高危环境中的时间，提高作业安全性。

碳排放数字化管理与碳减排技术：数字技术有助于降低事故导致的碳排放与资源浪费。安全事故通常伴随大量有害气体泄漏、能源浪费及环境污染，而智能安全管理系统能够有效降低设备故障率和泄漏概率，从而减少不可控排放。

（3）供应链协同优化管理

供应链数字化管理技术应用：通过工业互联网平台实现供应链的可视化、协同化和优化管理。企业利用大数据、人工智能和优化算法，实现从原料采购、库存管理、生产调度到产品销售的全流程智能优化，提高供应链效率，降低成本和碳排放。例

如，基于实时数据分析，企业可动态调整采购和库存策略，减少供应链冗余，降低物流运输的能源消耗。在供应链管理中，数据分析和预测技术的应用日益广泛，企业通过大数据分析、模拟仿真和预测模型，精准预测市场需求，优化产销匹配，减少因库存积压或供应短缺导致的资源浪费。

智能物流技术应用：通过路径优化和动态调度，提高运输效率。例如，智能调度系统可降低运输过程中的空驶率 5%-10%，减少物流环节的能源消耗和碳排放。此外，区块链等技术的引入增强了供应链的透明度和可追溯性，使企业能够优化原料采购结构，减少高碳排供应商的依赖，推动供应链绿色低碳发展。

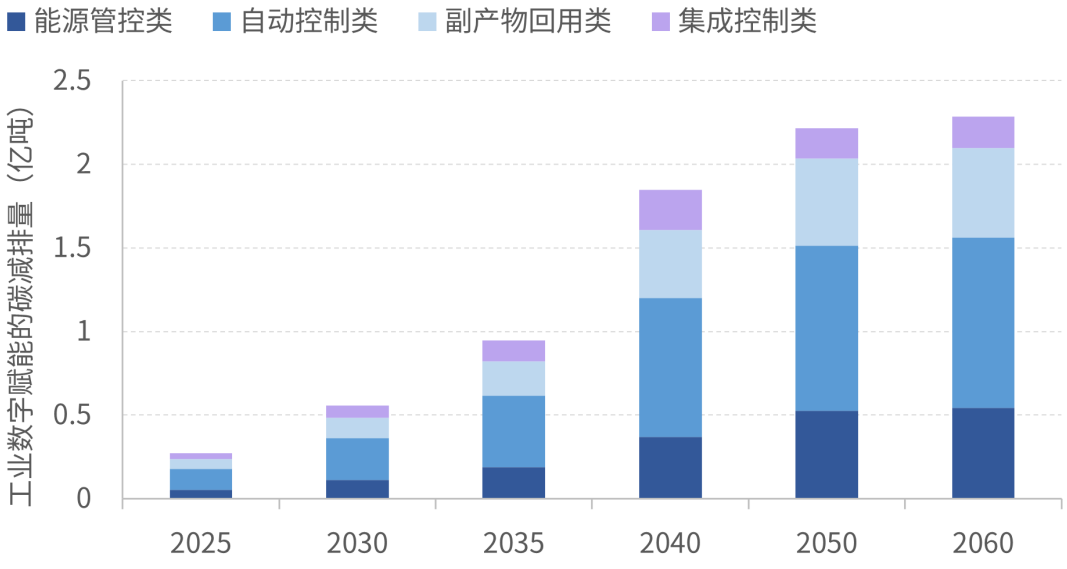
7.3 数字技术赋能工业领域趋势预测

为了科学量化数字技术在中国工业领域实现碳中和的赋能效果，同时确保计算的科学性与可操作性，本研究采用数字技术评估模型进行估算，推演未来数字技术的发展情景。根据中国信息通信研究院《中国数字经济发展研究报告（2023 年）》显示，2022 年中国第二产业数字经济渗透率已达 24%。此外，工业和信息化部发布的《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》提出多项数字化发展目标，如企业经营管理数字化普及度达 80%，数字化研发设计工具普及度达 85%，关键工序数控化率达 68%，工业互联网平台普及度达 45% 等。

基于上述模型和相关指标，以及上一节对数字技术赋能重点工业领域的分析结果，本研究对数字技术推动工业绿色低碳转型的趋势进行了初步研判：预计到 2030 年，第二产业数字经济渗透率将提升至 45% 以上，数字技术在降低工业能耗和碳排放方面的贡献为 3.8%~13.5%，在降低生产运营成本方面的贡献为 5.7%~16.7%，在提升工业产能方面的贡献为 2.2%~11.9%。到 2060 年，第二产业数字经济渗透率有望达到 90% 以上，数字技术在降低工业能耗和碳排放方面的贡献将增至 10.3%~36.0%，在降低生产运营成本方面的贡献为 15.1%~44.5%，在提升工业产能方面的贡献为 5.8%~31.9%。

通过对现有数字技术在流程制造业中的应用区分为能源管控、生产过程自动化控制、副产物回用及系统集成控制等方面进行减排测算结果显示（图 7.2），能源管控类技术到 2030 年和 2060 年分别带来 0.14 亿吨和 0.6 亿吨碳减排；自动化控制技术具有最高减排潜力，2030 年和 2060 年分别实现 0.25 亿吨和 1.1 亿吨碳减排，占数字技术总减排潜力的约 45%；副产物回用技术则分别带来 0.14 亿吨和 0.6 亿吨碳减排；集成控制技术到 2030 年和 2060 年则分别贡献 0.05 亿吨和 0.2 亿吨碳减排。

图 7.2 未来工业数字赋能对工业行业碳减排的贡献



7.4 数字技术赋能工业碳中和政策建议

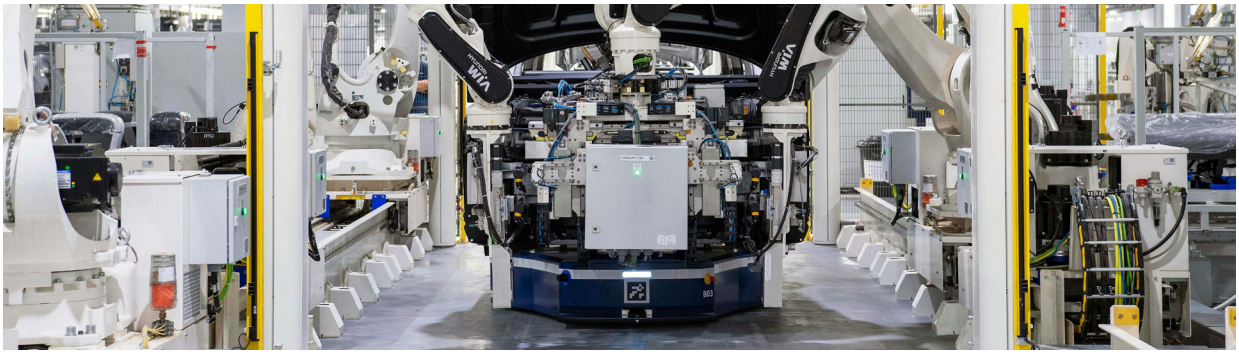
随着信息技术的飞速发展与深度融合，数字化已成为推动工业绿色转型、提升能效、优化资源配置的不可或缺力量，为工业领域实现碳中和目标提供强有力的技术支撑与保障。本节汇总了未来中国工业行业数字化发展的政策建议。

加大力度推动数字技术赋能工业领域关键技术突破。支持工业领域数字技术研发与实验室建设。支持物联网计量、工业标识解析、碳采集与监测、碳捕集与封存等技术突破。利用工业互联网标识技术实现光伏发电减排量数据可追溯性，建设标识编码、标识载体和数据管理应用设施。加快工业上云行动，持续升级云网端和边缘设备等基础设施，降低企业在数字技术赋能行动中的运行成本。

加速构建数字技术赋能工业低碳发展标准体系。加快建立健全工业行业数字化改造、数据采集、数据接口、碳监测平台建设、碳核查、碳计量等标准，形成统一的数字技术赋能工业标准体系，确保不同平台的兼容性。积极主导推动数字技术赋能工业领域国际标准，并着力促进先进标准在国内落地和实施，尽早形成国内国际标准相互促进的新格局。

加快推进数字技术赋能工业低碳发展广泛合作。加快跨行业、跨领域的协同合作，如工业领域与数字领域的深度融合，推动新一代信息通信技术如 5G/6G、大数据、人工智能、云计算、边缘计算和区块链等技术在工业领域规模化应用。与国际方面保持深度交流与合作，大力推动中国“5G+ 工业互联网”等先进技术走出去，开拓国际市场同时也引进更多国际领先技术，推动实地应用，确保工业领域的绿色低碳转型。

全面建设工业领域数字化碳管理平台及智能化预测并管控。建设覆盖原材料、装备制造、消费品等工业领域数字化管理平台，建设企业碳管理平台，实时监测企业直接和间接碳排放数据。率先连接工业领域央企、国企碳管理平台，逐步推广至民营工业企业。依托全行业数字化碳管理平台数据，为碳监测、碳核查、碳排放配额发放提供基础依据。支持企业建立企业级碳资产管理平台，助力企业实现碳资产效益最大化，为行业数字化碳管理奠定基础。与此同时，基于人工智能、大数据等技术，结合国家政策、业务发展、节能手段投资计划等战略部署，对未来能耗与碳排放进行预测，并利用 AI 分析并提出对应的智能化管控策略。



第 8 章　工业碳中和技术路线图

本章基于前面各章节不同工业行业碳中和技术精细化分析，综合评估和构建基于“成本 - 减排”的中国工业部门碳中和技术路线图，提出中国工业部门基于技术创新的“三阶段”路径。依托低碳技术梯次转化规律，揭示不同时期主导减碳技术的演变规律：从低碳流程技术大规模应用期（主导技术为能效提升技术和短流程技术，到 2035 年减排贡献占工业碳中和技术比例共达 55%），到工艺颠覆性技术爆发应用期（电气化与清洁电力替代技术和氢能替代技术深化应用，到 2050 年减排贡献占工业碳中和技术比例共达 30%），再到碳移除托底技术深度应用期（到 2060 年 CCUS 技术减排贡献占工业碳中和技术比例 24%，确保实现碳中和）的技术路径。针对工业部门 42 万亿元碳中和转型投资需求，提出工业碳中和技术政策协同推进框架，包括规划部署工业领域碳中和关键技术一揽子重大工程、强化碳市场和碳金融对工业碳中和技术的激励作用等政策设计。

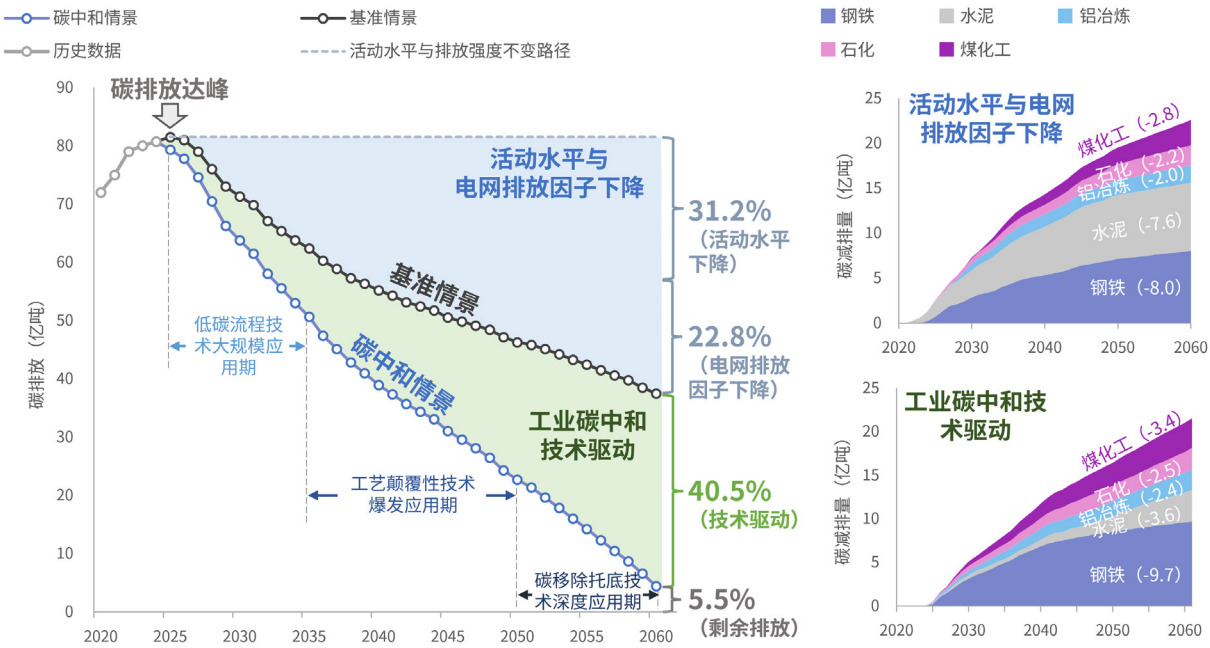
08

INDUSTRIAL LOW-CARBON TECHNOLOGIES

8.1 工业碳中和技术应用趋势

到 2060 年，在产品产量需求侧调控、工业碳中和技术和新型电力系统建设三轮驱动下，中国工业部门碳排放将减少至 4.5 亿吨，较 2025 年下降 95% 左右。按技术发展趋势，可将工业部门减排路径划分为三个阶段：2025—2035 年为低碳流程技术大规模应用期，这一阶段工业行业实现碳达峰并快速下降，传统产业仍占据主导地位，能效提升技术和短流程技术发展是该阶段的核心减排手段，将贡献约 55% 的工业碳中和技术减排量；2036—2050 年为工艺颠覆性技术爆发应用期，这一阶段是打破高碳技术锁定的关键窗口期，氢能、电气化和其他颠覆性技术在该阶段成熟并逐步开展商业化应用，工业部门全面脱碳改造将成为主攻方向；2051—2060 年是碳移除托底技术深度应用期，这一阶段是中国工业行业实现碳中和的冲刺阶段，该阶段碳中和技术实现深度融合，CCUS 作为碳减排托底技术广泛开展应用，到 2060 年 CCUS 技术减排贡献占工业碳中和技术比例 24%。图 8.1 从行业技术角度汇总了中国未来工业部门减排潜力路线图。

图 8.1 2020—2060 年中国工业碳中和技术减排潜力路线图



8.1.1 2025—2035 年：低碳流程技术大规模应用期

中国工业部门将在 2025 年左右实现碳排放达峰，并在 2026—2035 年实现碳排放的快速下降。由于现有技术体系难以在短期内实现根本性突破，2025—2035 年工业主要依托现有生产模式，在产品产量大幅下降和电网排放因子持续下降的基础上，通过大规模应用能效提升技术和短流程技术，推动工业碳排放的快速下降。其中，能效提升技术在工业碳中和技术减排中贡献约为 22%，短流程技术

中钢铁行业废钢 - 电炉技术在工业碳中和技术减排中贡献高达 27%，有色行业废铝再生技术在工业碳中和技术减排中贡献约为 6%。在部门减排中，钢铁碳中和技术占工业碳中和技术总减排量的比例最大，到 2035 年占工业碳中和技术总减排量比例约 45%，高炉 - 转炉节能和能效提升技术与废钢 - 电炉技术减排贡献最大；水泥行业碳中和技术占工业碳中和技术总减排量的比例最小，约为 4%。

2025—2035 年，氢能利用技术处于起步阶段，主要应用于石化、煤化工行业，减排量占工业碳中和技术总减排量的比例约为 13%。受技术成熟度和成本影响，CCUS 技术在这一阶段仍处于示范阶段，尚未开展大规模应用，CCUS 技术占工业碳中和技术减排比例不到 10%。

8.1.2 2036—2050 年：工艺颠覆性技术爆发应用期

该阶段是中国工业部门颠覆性碳中和技术快速发展的窗口期。在减排技术中，传统能效提升技术的减排空间逐步收窄，工业减排技术主力转向氢能利用和电气化与清洁电力替代等其他技术，在其带动下传统工艺流程开始向新兴工艺流程转变。在行业的减排贡献中，到 2050 年，钢铁行业碳中和技术占工业碳中和技术减排比例最大，约为 37%，发挥了重要的减排作用，煤化工行业次之，减排比例约为 12%。

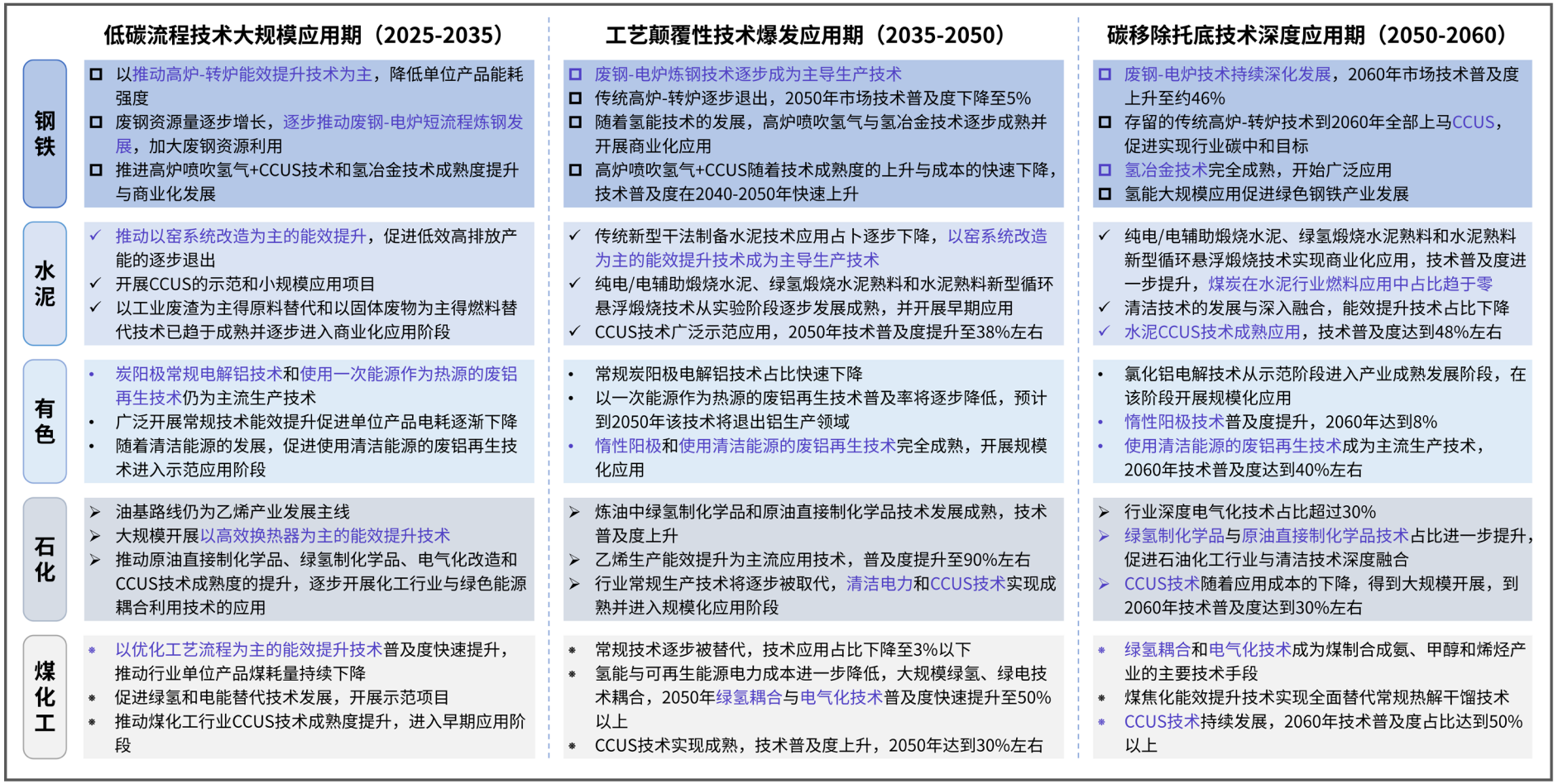
在这一阶段，氢能技术快速发展，逐步实现绿氢全产业链的突破，氢能替代技术减排量占工业碳中和技术总减排量的比例约为 18%。随着能源转型和电力碳排放因子的不断下降，电气化与清洁电力替代在这一阶段将大规模应用并加速发展，水泥行业逐步开展电加热技术在水泥窑炉中的替代应用，石化行业电气化改造技术、乙烯电裂解炉技术和煤化工电机和电驱动技术在工业碳中和技术减排中发挥重要作用，到 2050 年电气化与清洁电力替代技术占工业碳中和技术总减排量的比例约为 12%。CCUS 技术在该阶段快速发展，2040 年后市场应用规模快速增加，到 2050 年 CCUS 技术减排量占工业碳中和技术总减排量的比例上升至 22%。这一阶段中国 CCUS 项目多集中在石化、钢铁、水泥、煤化工行业，出现大规模多种技术组合的全流程工业化示范。其他新型工业技术和工艺流程实现技术突破，在这一阶段也将逐渐成熟并商业化应用，为碳中和阶段打好基础。

8.1.3 2051—2060 年：碳移除托底技术深度应用期

该阶段是中国迈向碳中和目标的关键冲刺期，工业部门将加速推进碳中和技术与行业耦合发展的深度融合。到 2060 年，钢铁行业碳中和技术占工业碳中和技术总减排量的比例最大，减排比例约占工业减排 32%；水泥行业通过大规模应用 CCUS 技术，大幅提升减排量，减排比例约 10%。煤化工、石化和有色行业工业碳中和技术总减排量的比例约为 11%、7% 和 8%。

在这一阶段，氢能产业蓬勃发展，已处于成熟阶段，氢能利用减排量占工业减排 18%。工业行业实现大规模能源转型和全面电气化，高效供热电气化、工业电炉、高温蒸汽热泵等电能装备全方位应用。CCUS 技术成熟并大规模产业化，减碳贡献直线上升，占这一阶段 CCUS 技术占工业碳中和技术总减排量的比例约 24%，助力稳步实现碳中和。

图 8.2 中国工业碳中和技术发展路径

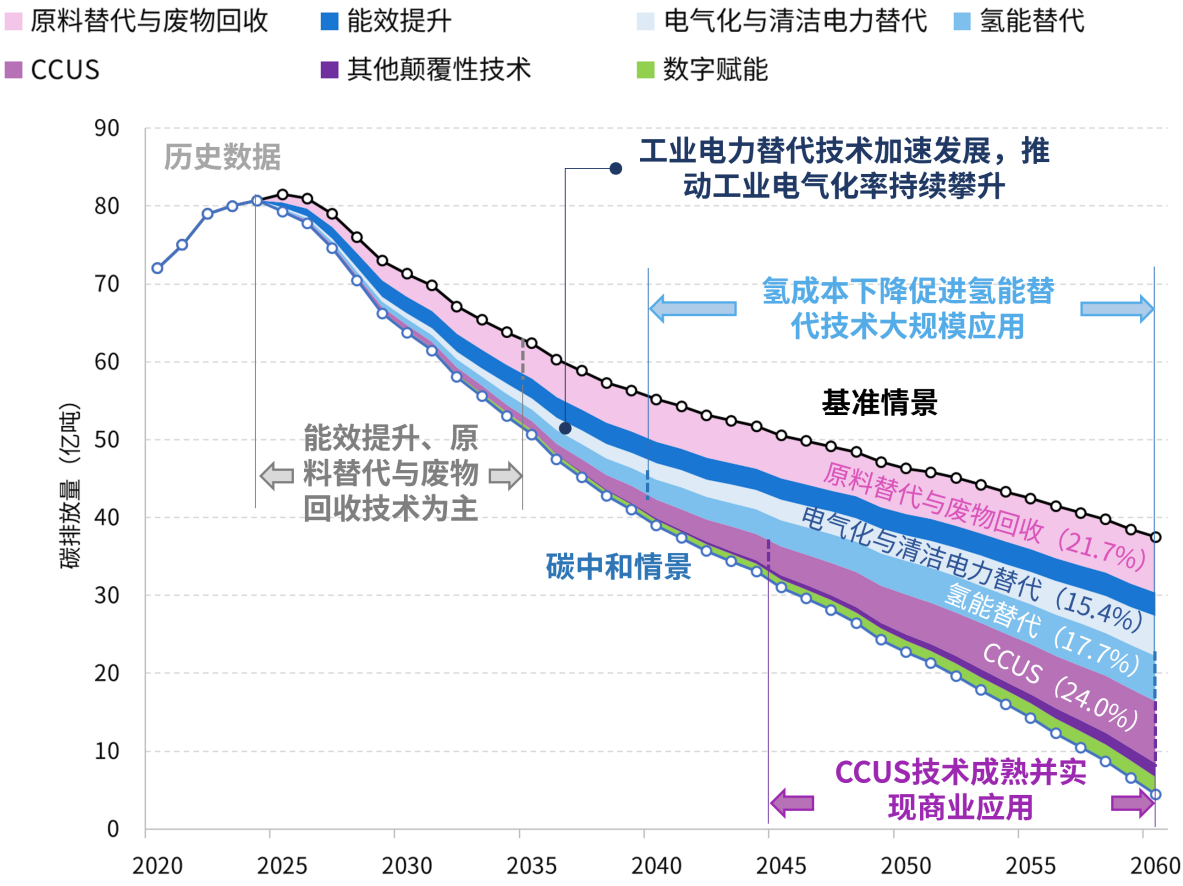


8.2 工业碳中和共性技术

分析工业实现碳中和的共性技术对于明确技术研发的方向和重点、统筹行业之间发展需求和促进跨领域技术的集成与创新具有重要意义。本节描绘了 2020—2060 年中国工业碳中和共性技术的减排技术路线图，重点围绕电气化与清洁电力替代、氢能替代、原料替代与废物回收、CCUS 技术等共性技术展开深入分析。

图 8.3 2020—2060 年中国工业碳中和共性技术减排潜力路线图

注：**能效提升技术**包括高炉转炉节能和能效提升、水泥以窑系统改造为主的能效提升、铝冶炼以电解槽改造为主的能效提升、石化以高效换热器为主的能效提升和煤化工以优化工艺流程为主的能效提升及其他工业部门能效提升技术；**原料替代与废物回收技术**包括废钢 - 电炉技术、水泥以工业废渣为主的原料替代技术、水泥以固体废物为主的燃料替代技术、废铝再生技术（一次能源）；**电气化与清洁电力替代技术**包括水泥纯电 / 电辅助煅烧水泥技术、煤化工电机和电驱动技术、有色废铝再生技术（清洁能源）技术、石化电气化改造技术、乙烯电裂解炉技术；**氢能替代技术**包括绿氢煅烧水泥熟料技术、绿氢替代技术、氢冶金技术、高炉喷吹氢气技术；**CCUS 技术**为工业所有部门开展的二氧化碳捕集、利用与封存相关的技术；**其他颠覆性技术**包括惰性阳极技术、氯化铝电解技术、水泥熟料新型循环悬浮煅烧技术、原油直接制化学品技术等。

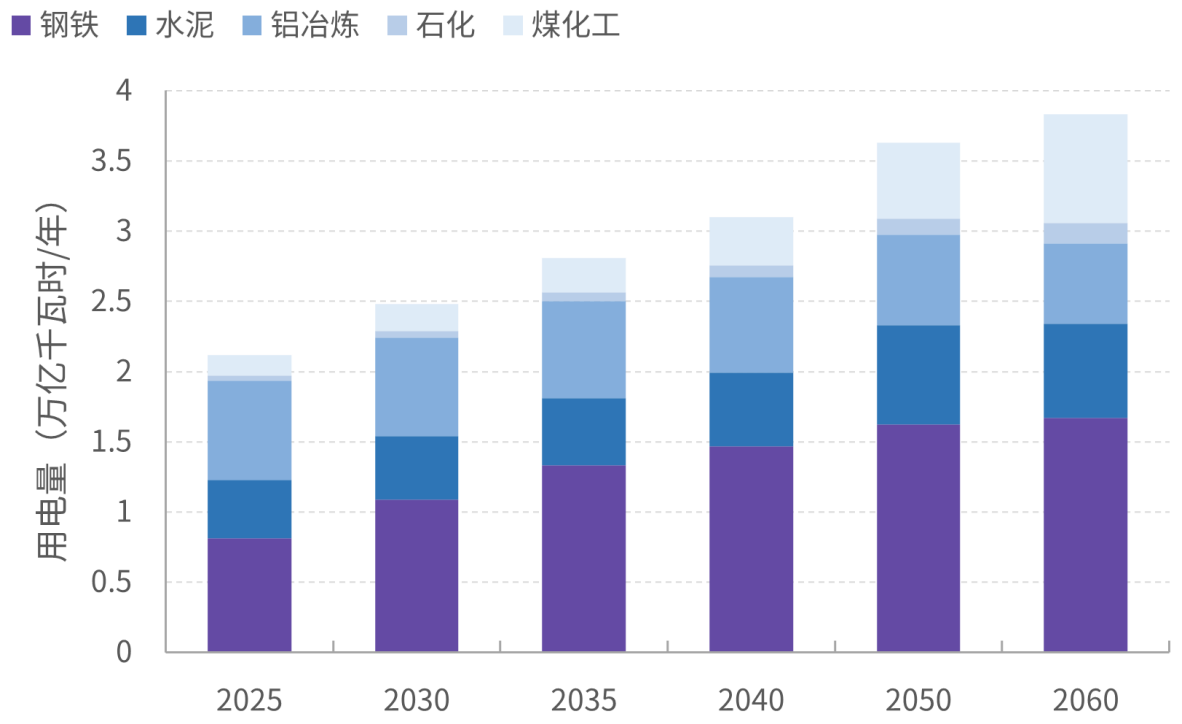


8.2.1 电气化与清洁电力替代

电气化是支撑新型能源体系建设、助力实现“双碳”目标的关键途径之一。通过发展电炉短流程炼钢、电加热水泥窑炉替代、石化煤化工大型电机电驱动技术等，加速工业电气化进程。2020 年，中国工业的电气化率约为 25%~30%。预计 2035—2050 年，随着颠覆性技术的突破和电价成本的下降，中国工业行业将大规模应用电气化技术并加速发展，电气化水平到 2050 年将达到 50%~60%。到 2060 年，中国电气化水平将进一步提升，工业行业实现大规模能源转型和全面电气化，电气化水平将达到 65%~70%。这一目标的实现将依赖于清洁能源的大规模应用，如绿氢的间接电气化以及分布式能源和储能系统的普及。

依据报告对工业碳中和路径的预测，到 2030 年，本报告所涵盖的钢铁、水泥、铝冶炼、石化和煤化工工业部门的用电量将达到 2.5 万亿千瓦时。随着工业电气化进程的进一步推进，工业部门的用电量将持续增加，预计到 2050 年，工业五大部门的用电量将增至 3.6 万亿千瓦时，到 2060 年将达到 3.8 万亿千瓦时。

图 8.4 2025—2060 年主要工业行业用电量变化



8.2.2 氢能替代

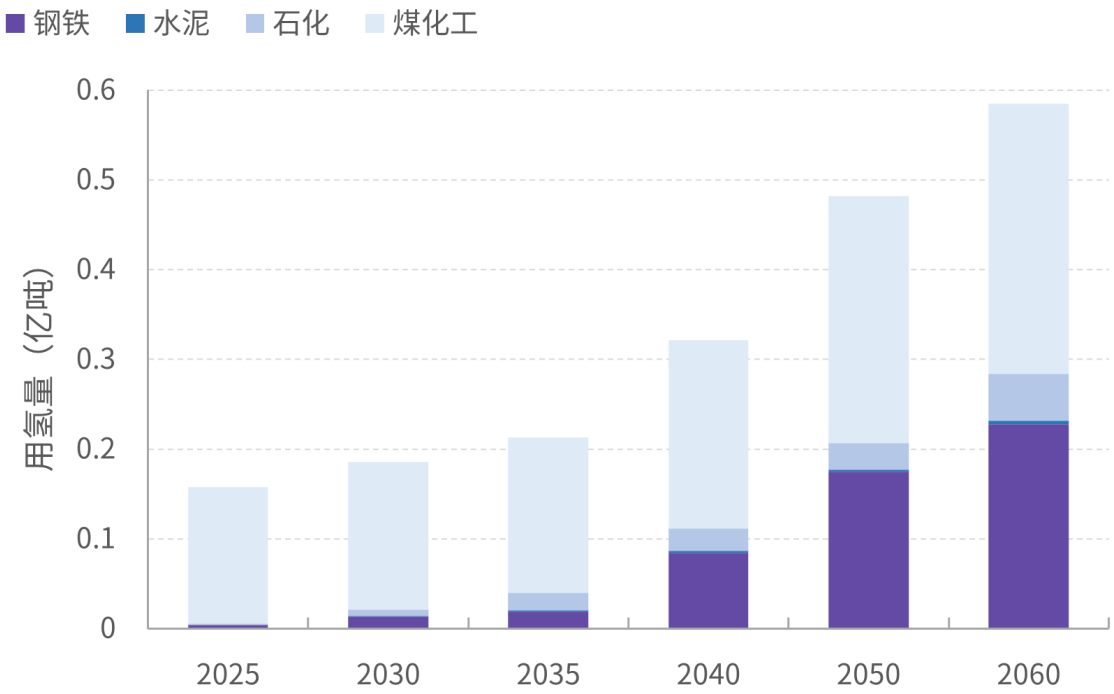
氢能利用作为一种关键共性技术，广泛渗透并融合于能源、化工、冶金、建材等重要产业领域，氢能在工业脱碳中既可作原料和燃料，也可充当催化剂，扮演多重角色。2024 年，中国氢能生产主要依赖煤炭，而通过可再生能源发电进行电解水制取的绿氢占比仅为 1%。未来，随着可再生能源的大规模开发与利用，绿氢的生产及应用将迅速扩展，这将有效减少工业部门对传统化石燃料的依赖。

在 2035 年之前，中国工业部门尚处于能源转型的初级阶段，此时氢能替代技术尚未完全成熟，规模化应用主要局限于煤化工等领域。在这一阶段，国内氢气生产仍以灰氢和蓝氢为主。化石能源制氢与碱性电解水制氢技术已达到国际领先水平，而适用于与可再生能源耦合的质子交换膜电解水制氢、加氢等产业链发展仍不够完善，绿氢生产成本较高，影响了绿氢技术大幅普及。工业副产氢在这一阶段将大力发展，既可减少碳排，又可以提高资源利用率与经济效益。

2035 年后，氢能技术逐步实现绿氢全产业链的突破，特别是在电解水制氢方面，通过可再生能源（例如太阳能、风能、核能等）发电进行电解水制氢，制氢规模快速攀升。主要技术路线包括碱性电解水、质子交换膜电解水等，制氢成本将逐渐下降，钢铁行业氢冶金技术、石化行业绿氢制备化学品技术和煤化工行业绿氢替代技术快速发展，普及度不断扩大。

据本报告研究显示，2035 年五大工业行业氢能总需求量预计达到 0.2 亿吨，相较于 2020 年增长了 52%。预计到 2035 年后，工业用氢的需求将出现显著增长。展望至 2060 年，在工业部门产业结构深度调整的背景下，工业氢能用量预计将达到 0.58 亿吨。在钢铁行业，2050 年前氢冶金技术在经济性上更具优势。如果氢气成本能够持续下降至低于 10 元 / 千克，新建项目的氢气直接还原铁的粗钢生产成本可能会低于传统长流程工艺。相比之下，钢铁 CCUS 的技术路线可能面临额外的加价改造成本。此外，合成氨生产、煤制甲醇和烯烃等化工过程对氢气的需求持续攀升，预计到 2060 年，煤化工行业的用氢量将达到 0.3 亿吨。

图 8.5　2025—2060 年主要工业行业用氢量变化

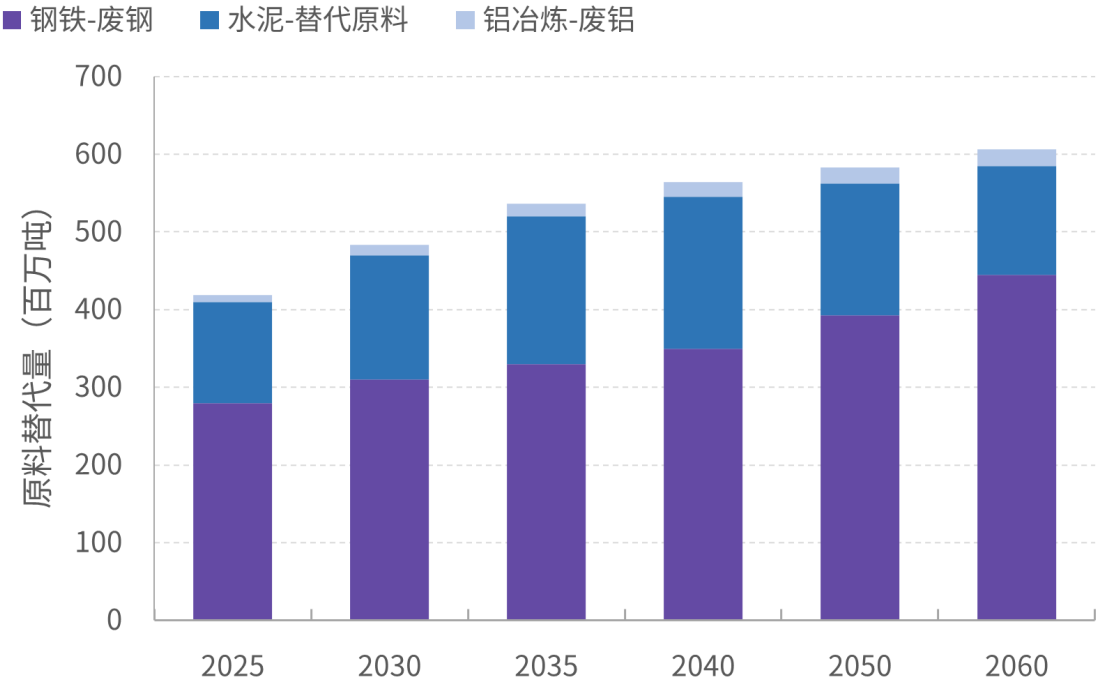


8.2.3 原料替代与废物回收

工业领域产生大量废弃物和副产品，资源回收及再利用成为低碳循环的核心要义。典型实践包括以废钢电炉技术替代传统高炉炼钢、将工业废渣等副产品用于水泥生产、回收废铝用于铝生产，以及通过裂解油技术回收废塑料等。这些举措不仅降低了对原生资源和化石燃料的依赖，还减少了工业废弃物的处理量，缓解了土地占用和环境污染问题，推动工业行业在实现低碳转型的同时促进资源循环利用和环境可持续发展。

2025—2035 年间，工业行业的原料替代与废物回收技术将在工业部门的减碳过程中发挥关键作用，预计减排量可达 25%。然而，基于废物回收的工业流程受限于可用废物的数量，影响了其扩展性。例如，由于废钢资源的分布不均与相对稀缺，废钢电炉技术的采用率目前仅为 10%~14%。铝废料回收同样面临不完善的回收系统导致资源浪费和低质利用的问题。2035 年后，随着原料替代和资源回收技术不断发展，钢铁行业废钢回收量、水泥行业替代原料替代量和铝冶炼行业废铝回收量不断上升，预计 2035 年废钢、水泥替代原料（替代石灰石）以及废铝的再利用量分别达到 3.3 亿吨、1.9 亿吨和 1640 万吨。工业行业原料替代技术及应用的提升需要政府、企业与社会的协同合作，聚焦于技术创新、政策扶持和公众参与，以提升资源利用效率和碳减排效益。

图 8.6 2025—2060 年主要工业行业原料替代量变化



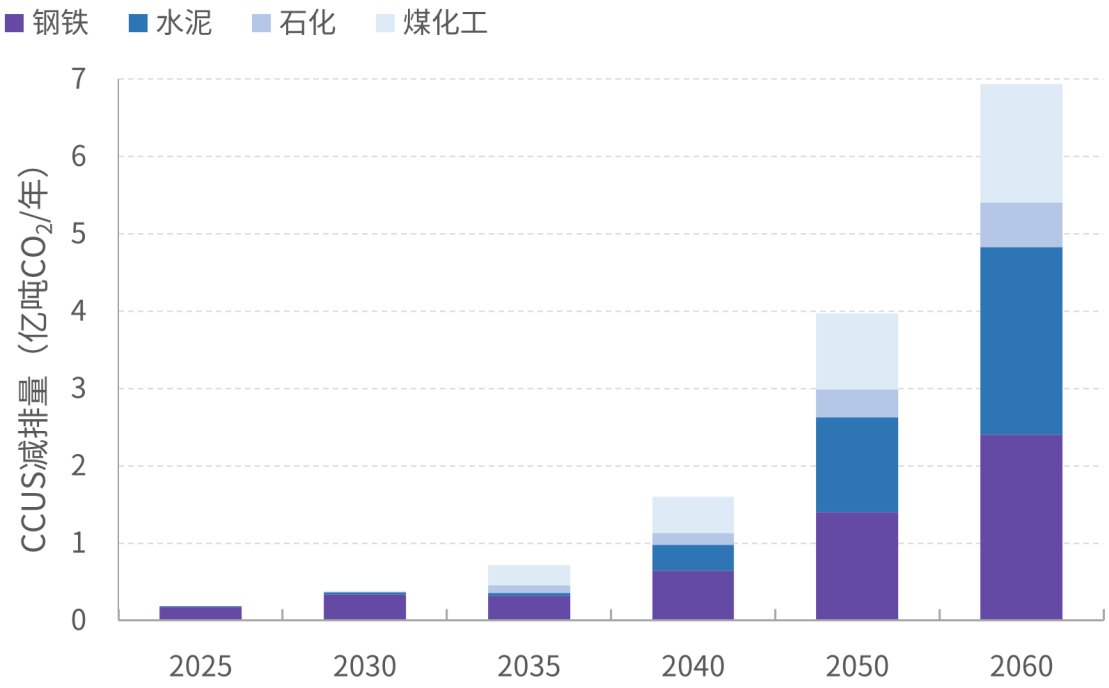
8.2.4 CCUS

CCUS 技术的发展路径已成为中国在碳中和目标约束下，研究排放路径的重要锚点。它对高排放工业行业（如钢铁、水泥等）的未来情景规划和电力结构（尤其是非化石能源发电比例）调整具有重要影响。CCUS 技术可应用于钢铁行业长链条生产深度脱碳、水泥行业石灰石分解过程中的碳排放控制，以及煤化工和石油化工中的高浓度碳排放源。

2025—2035 年，中国已投运或建设中的 CCUS 示范项目多以石油、煤化工、电力行业小规模的捕集驱油示范为主，仍缺乏大规模多种技术组合的全

流程工业化示范。这些项目规模有限，导致 CCUS 应用成本居高不下。然而，随着技术的不断成熟、应用规模的逐步扩大以及政策支持力度的加强，预计 CCUS 成本将在未来显著降低。到 2030 年中国全流程 CCUS 成本（含 250 公里运输）预计降至约 540 元 / 吨 CO_2（310~770 元 / 吨二氧化碳），至 2060 年进一步降至 275 元 / 吨 CO_2（140~410 元）。预计到 2050 年后，中国工业领域的 CCUS 技术将实现大规模应用，五大工业行业在 2060 年通过 CCUS 技术实现的减排量有望达到 7 亿吨 CO_2/ 年，为相关行业减排提供有力支持，助力中国碳中和目标的实现。

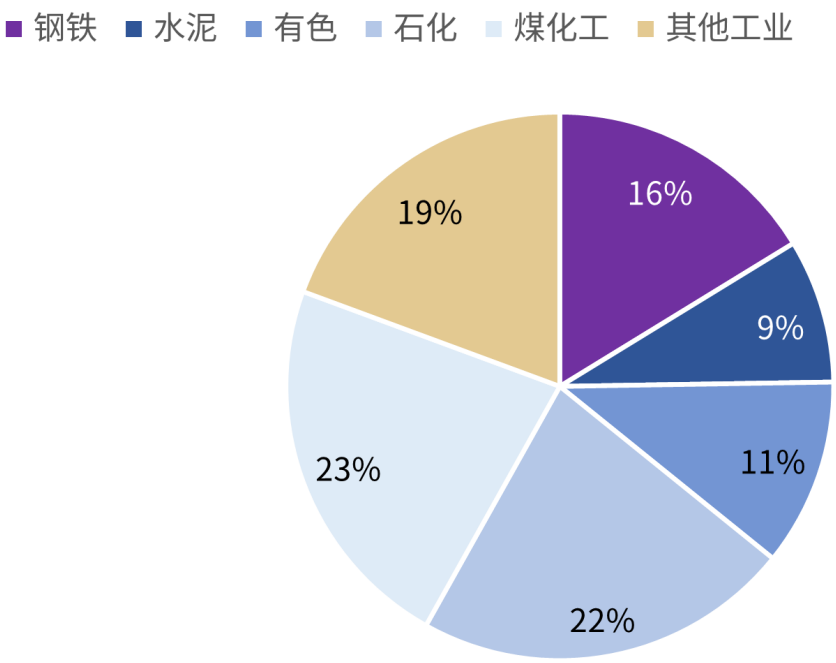
图 8.7 2025—2060 年主要工业行业 CCUS 减排量



8.3 工业碳中和技术应用投资需求

通过自下而上的技术集成和自上而下的趋势预判相结合，能够较为定量地判断各行业碳中和技术的发展关键节点，合理预估投资需求，为靶向性政策设计提供科学依据。2025—2060 年工业碳中和技术的投资额将持续快速增长，预计在 2050 年左右达到峰值，此后，随着工业产品需求的下降以及各项技术大规模布局逐步完成，行业总投资额将逐步下降。预计 2025—2060 年，中国工业领域碳中和技术的累计投资额将达到 42 万亿元左右。其中，钢铁行业碳中和技术总投资约 6.8 万亿元，水泥行业约 3.6 万亿元，有色行业约 4.6 万亿元，石化行业约 9.3 万亿元，煤化工行业约 9.4 万亿元，其他行业共约 8.1 万亿元。

图 8.8 2025—2060 年工业碳中和技术投资需求



8.4 工业碳中和技术应用推广政策建议

（1）规划部署工业领域碳中和关键技术一揽子重大工程。重点针对钢铁、建材、有色、石化、化工等重点工业领域减排技术成本高、示范效应不足、商业化路径不清等突出瓶颈，实施金属材料回收、工业炉窑电气化改造、原料替代及改造等一批战略性强、示范效果好、具有带动放大效应的重大工程。通过重大工程刺激技术创新，驱动成本突破临界点，助力关键技术市场化应用。

战略聚焦性。瞄准各行业减排潜力巨大但技术瓶颈突出的核心环节。例如，在钢铁行业，重点支持百万吨级氢基直接还原（DRI）示范工程，并与可再生能源基地协同规划，解决绿氢供应的成本与规模问题。在水泥行业，推动大型水泥熟料生产线与百万吨级 CCUS 全链条集成示范工程，探索 CCUS 多种技术路线和商业模式。在电解铝行业，支持惰性阳极技术的工业化验证和首套商业化装置的建设。对于石化和煤化工行业，推动绿氢替代灰氢（蓝氢作为过渡）的规模化应用示范。

技术集成性。鼓励跨行业、跨领域的技术集成与创新。推动“钢化联产”、“钢焦氢联产”等循环经济模式，将钢铁、焦化、化工等流程进行系统优化与能量梯级利用。同时，将数字化、智能化技术深度融入重大工程的设计、建设与运营全过程，提升能源效率和管理水平。

政策撬动性。重大工程的实施不仅是技术的验证平台，更是政策创新的试验田。中央政府设立专项资金，并引导地方政府配套资金、社会资本参与。在项目审批、土地使用、环境评价等方面给予倾斜。通过重大工程的采购需求，刺激上游装备制造业、新材料产业的技术创新和成本下降。例如，推动碳捕集设备、高温热泵、新型催化剂等关键装备和材料的国产化与规模化生产。

市场导向性。充分考虑经济可行性和商业推广前景。鼓励采用“揭榜挂帅”、产业联盟等方式组织实施，形成“技术研发 - 工程示范 - 标准制定 - 商业推广”的良性循环。通过示范工程的成功运行，积累数据、验证技术、培养人才、降低风险，从而为后续的商业化推广铺平道路，解决报告中反复提及的“技术成熟度不足”“成本高昂”“市场销路受限”等问题。

通过一揽子重大工程的实施，有效集中国家力量，解决单一企业难以独立承担的巨大研发和投资风险，加速关键低碳技术的成熟与成本下降。推动相关产业链升级，形成新经济增长点，更能为中国工业全面实现碳中和目标提供坚实的技术支撑和实践经验。

（2）强化碳市场和碳金融对工业碳中和技术的激励作用。加快碳市场扩大行业覆盖范围，到 2027 年基本覆盖工业领域主要排放行业。在钢铁、水泥等行业率先开展碳排放总量控制，优化配额分配机制，推行并逐步提高有偿分配比例。

全国碳排放权交易市场的平稳运行和逐步完善，为工业部门的低碳转型提供了重要的激励机制。多种关键低碳技术，如 CCUS、氢冶金、电煅烧等，其推广应用的主要障碍之一便是初始投资和运营成本较高，导致其在现有市场条件下缺乏经济竞争力。强化碳市场和碳金融的激励作用，对于克服这一障碍至关重要。

加快碳市场扩容与深化，强化碳价格信号。设定明确的时间表，力争在“十五五”中期将钢铁、水泥、电解铝、石化、化工等重点高耗能行业全部纳入全国碳市场。不仅扩大碳市场的减排效应，更重要的是为这些行业的低碳技术投资提供一个清晰、可预期的碳价信号。在条件成熟的行业，从目前基于强度的配额分配，探索向基于绝对总量的配额分配方式。配额分配应充分体现“激励先进、约束落后”的原则，适度收紧免费配额发放，为高效企业和早期采用低碳技术的企业创造“碳红利”。逐步提高碳排放配额的有偿分配（拍卖）比例。

大力发展碳金融，撬动社会资本。丰富碳金融产品与服务，鼓励金融机构开发与碳排放权相关的金融产品，如碳期货、碳期权、碳远期、碳基金、碳资产质押融资、碳保险等。提升碳市场的流动性和价格发现效率，为工业企业管理碳资产风险提供工具。构建绿色与转型金融标准体系，针对工业低碳转型项目，特别是原料替代、燃料替代、工艺革新等，建立清晰的绿色金融和转型金融标准与目录，引导银行信贷、债券发行、股权投资等社会资本流向真正具有减排效益和技术前景的项目。

全国碳市场不仅仅是一个合规履约的平台，更将成为驱动工业技术创新、优化资源配置、引导绿色投资的强大引擎。碳价信号将渗透到企业的投资决策和运营管理中，使低碳技术从“政策驱动”逐步转向“市场驱动”，从而加速中国工业的碳中和进程。

（3）通过科技专项加快碳中和共性技术的研发突破与示范推广。将氢能、电气化、CCUS、原料替代等颠覆性技术纳入国家重大科技专项或重点研发计划，前瞻性布局核心技术攻关与示范，推动关键环节率先突破成本瓶颈，实现环境效益与经济效率的同步提升。

设立国家级“工业碳中和共性技术”重大科技专项。整合现有分散在各部门、各领域的研发资源，形成攻坚合力。主攻方向包括氢能利用（重点突破低成本、高效率、长寿命的可再生能源电解水制氢技术，研发先进储氢、运氢材料与技术，以及氢能钢铁）、工业电气化（聚焦高温热泵、等离子体加热等先进电加热技术在工业炉窑中的应用，研发适用于工业流程的柔性用电技术和智慧能源管理系统）、CCUS（研发低能耗、低成本的新型碳捕集材料与工艺，攻克大规模 CO_2 安全运输与长期封存的关键技术）、原料替代与资源回收利用（研发大比例废原料替代等技术，开发智能分选、深度净化、保级利用等先进技术）、数字化赋能技术（研发工业互联网、大数据、人工智能、数字孪生等为工业碳中和赋能的数字共性技术）等。

构建“研发 - 示范 - 推广”一体化推进机制。既要布局前瞻性的基础研究，探索新原理、新材料、新方法，也要强化目标导向的应用研究，解决产业化面临的关键工程技术问题。建设国家级中试与示范平台，依托骨干企业、高校和科研院所，建设若干个国家级共性技术中试基地和大型综合示范区。例如，在可再生能源富

集区建设“源网荷储氢”一体化的绿氢产业示范区，在主要工业集聚区建设跨行业的 CCUS 基础设施和产业集群。

（4）构建有利于碳中和技术发展的财税政策支持体系。在国家层面，将短流程炼钢、绿氢炼化、原料替代等相关工程基础较好、可行性较高的重大工程，纳入“两重”“两新”政策支持目录，通过超长期特别国债予以支持。在地方层面，各省市结合区域产业特点、资源禀赋等，制定差异化产业政策。综合运用财政补贴、税收减免、绿色信贷、优惠电价等政策工具，构建激活市场和社会力量的多元投入格局。

实现工业碳中和是一项系统性工程，不仅需要技术创新，更需要构建一套与之相适应、能够有效激励低碳行为和技术应用的价格机制与财税支持体系。许多关键的深度脱碳技术面临较高的初始成本和投资风险，在缺乏有效政策支持的情况下，市场主体自发应用的意愿不足。一个精心设计的价格与财税体系是推动工业碳中和的“催化剂”和“稳定器”。

国家层面：顶层设计与战略引导。设立国家级“碳中和技术发展专项资金”（与前述碳市场拍卖收入联动），该资金应具有长期性和稳定性，主要用于支持战略性、前沿性、高风险但减排潜力巨大的碳中和技术的研发、中试、首台（套）示范及早期市场培育。建立长效财政激励机制。对企业在节能降碳、资源综合利用、设施升级等方面的投入，通过研发费用加计扣除、固定资产加速折旧、企业所得税减免等普惠性税收政策给予支持。对处于市场化初期的关键低碳技术（如绿氢生产与应用、CCUS 项目运营、工业余热利用等），可根据技术成熟度、成本下降曲线和减排效果，设计阶段性、与技术进步和成本下降挂钩的精准补贴或奖励政策，避免“大水漫灌”和长期依赖。完善绿色电力交易机制，鼓励工业企业直接采购绿色电力。对于采用可再生能源进行电解制氢或实施深度电气化改造的项目，研究优惠性的输配电价政策和绿电采购激励机制。

地方层面：因地制宜与政策创新。制定差异化财税政策。各地应根据自身的产业结构（如重工业占比）、能源结构（如煤炭依赖程度）、可再生能源潜力以及财政状况，制定符合地方实际的碳中和支持政策包。例如，可再生能源丰富的地区可重点支持绿电消纳和绿氢产业发展；老工业基地则应侧重支持传统产业的节能改造和低碳技术替代。鼓励地方政府设立配套的碳中和技术推广基金或补贴项目，与国家层面政策形成互补和联动。支持地方开展碳中和技术应用的先行先试，如“零碳工业园区”、“氢能示范城市”等，对成功经验和模式及时总结并在全国范围内推广。

综合运用多元化政策工具，形成政策合力。强化金融监管部门的引导作用，鼓励商业银行扩大绿色低碳信贷规模，降低绿色低碳项目融资成本。支持符合条件的企业发行绿色债券、碳中和债券、转型债券等，拓宽低碳项目融资渠道。将低碳产品、技术和服务优先纳入政府采购范围，发挥政府需求的引领作用。

通过构建多层次、多工具、目标明确、激励相容的价格与财税支持体系，有效降低工业企业采纳碳中和技术的经济壁垒，激发市场主体的创新活力，引导社会资本流向绿色低碳领域。

参考文献

Dong, B., Ma, X., Zhang, Z., et al. Carbon emissions, the industrial structure and economic growth: Evidence from heterogeneous industries in China[J]. Environmental Pollution, 2020, 262, 114322.

Gao, T., Shen, L., Shen, M., et al. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103, 160–170.

Hasanbeigi, A., Steel Climate Impact - An International Benchmarking of Energy and CO_2 Intensities[R]. Global Efficiency Intelligence. Global Efficiency Intelligence. 2022. United States. https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities

Hasanbeigi, A., Lu, H., Zhou, N. Net-Zero Roadmap for China’s Steel Industry[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory and Global Efficiency Intelligence. 2023. United States. https://www.globalefficiencyintel.com/netzero-roadmap-for-china-steel-industry

Hasanbeigi, A., Springer, C., Sibal, A. China’s Steel Transformation: From Blast Furnaces to Electric Arc Furnaces[R]. Global Efficiency Intelligence. 2025. United States. https://www.globalefficiencyintel.com/chinas-steel-transformation-from-blast-furnaces-to-electric-arc-furnaces

IEA. World Energy Outlook 2024[R]. IEA. 2024. Paris. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

IEA. Clean Energy Transitions Programme 2024[R]. IEA. 2024. Paris. https://www.iea.org/reports/clean-energy-transitions-programme-2024

IEA. Energy Technology Perspectives 2024[R]. IEA. 2024. Paris. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2024

IEA. Global Hydrogen Review 2022[R]. IEA. 2022. Paris. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022

IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 ° C Goal in Reach[R]. IEA. 2023. Paris. https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach

IEA. The Future of Heat Pumps in China[R]. IEA. 2024. Paris. https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps-in-china?language=zh

IEA. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China[R]. IEA. 2021. Paris. https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)][R]. IPCC. 2023. Geneva, Switzerland, pp. 35-115. https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle

IPCC: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)][R]. Cambridge University Press. 2022. Cambridge, UK and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

Huppmann, Daniel, et al. The MESSAGEix integrated assessment model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 112: 143-156.

Edmonds, Jae, and John Reilly. A long-term global energy-economic model of carbon dioxide release from fossil fuel use[J]. Energy Economics, 1983, 74-88.

Jiang, W., Jung, T., Dai, H., et al. Technology portfolio assessment for near-zero emission iron and steel industry in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(3), 469–478.

Liu, Z., Guan, D., Wei, W., et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565), 335–338.

Mao, Y., Li, K., Li, J., et al. Spatial Heterogeneity of Plant - Level CCUS Investment Decisions in China's Cement Industry Under Various Policy Incentives[J]. Earth's Future, 2025, 13(3), e2024EF004951.

Mu, Y., Wang, C., Cai, W. The economic impact of China's INDC: Distinguishing the roles of the renewable energy quota and the carbon market[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81, 2955–2966.

Ren, L., Zhou, S., Ou, X. The carbon reduction potential of hydrogen in the low carbon transition of the iron and steel industry: The case of China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171, 113026.

Sun, J., Na, H., Yan, T., et al. A comprehensive assessment on material, exergy and emission networks for the integrated iron and steel industry[J]. Energy, 2021, 235, 121429.

Wang, Y., Wen, Z., Xu, M., et al. Long-term transformation in China's steel sector for carbon capture and storage technology deployment. Nature Communications, 2025, 16(1), 4251.

Wang, Y., Wen, Z., Xu, M., et al. The carbon-energy-water nexus of the carbon capture, utilization, and storage technology deployment schemes: A case study in China's cement industry[J]. Applied Energy, 2024, 362, 122991.

Wang, Y., Zhang, C., Lu, A., et al. A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO_2 emissions in China[J]. Applied Energy, 2017, 190, 172–180.

Wei, J., Cen, K. Empirical assessing cement CO_2 emissions based on China's economic and social development

during 2001–2030[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653, 200–211.

Wei, Y., Chen, K., Kang, J., et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A Literature Review[J]. Engineering, 2022, 14, 52–63.

Xu, J., Fleiter, T., Eichhammer, W., et al. Energy consumption and CO_2 emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis[J]. Energy Policy, 2012, 50, 821–832.

Xu, J., Fleiter, T., Fan, Y., et al. CO_2 emissions reduction potential in China's cement industry compared to IEA's Cement Technology Roadmap up to 2050[J]. Applied Energy, 2014, 130, 592–602.

Yang, X., Pang, J., Teng, F., et al. The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136, 110438.

Yukesh Kannah, R., Kavitha, S., Preethi, Parthiba Karthikeyan, O., et al. Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review[J]. Bioresource Technology, 2021, 319, 124175.

Zhang, S., Yi, B., Worrell, E., et al. Integrated assessment of resource-energy-environment nexus in China's iron and steel industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232, 235–249.

Zhang, X., Karplus, V. J., Qi, T., et al. Carbon emissions in China: How far can new efforts bend the curve[J]? Energy Economics, 2016, 54, 388–395.

Zhang, X., Zhao, X., Jiang, Z., et al. How to achieve the 2030 CO_2 emission-reduction targets for China's industrial sector: Retrospective decomposition and prospective trajectories[J]. Global Environmental Change, 2017, 44, 83–97.

Zheng, J., Mi, Z., Coffman, D., et al. Regional development and carbon emissions in China[J]. Energy Economics, 2019, 81, 25–36.

北京大学能源研究院 . 中国石化行业碳达峰碳减排路径研究报告 [R]. 北京 : 北京大学能源研究院 ,2022.

何建坤 . 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型 [J]. 环境经济研究 ,2021,6(01),1-9.

何胜平 , 孙国玉 . 电石渣制水泥的烧成技术研究与实践 [J]. 水泥技术 ,2018,(02),91-93.

贺晋瑜 , 何捷 , 王郁涛 , 等 . 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究 ,2022,35(02),347-355.

金玲 , 郝成亮 , 吴立新等 . 中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究 ,2022,35(02),368-376.

李晋 , 谢璨阳 , 蔡闻佳 , 等 . 碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径 [J]. 中国环境管理 ,2022,14(01),48-53.

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.

落基山研究所 . 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路 [R].2021.

落基山研究所 . 中国氢能联盟研究院 . 开启绿色氢能新时代之匙 : 中国 2030 年“可再生氢 100”发展路线图 [R].2022.

麦肯锡 .“中国加速迈向碳中和”钢铁篇：钢铁行业碳减排路径 [R].2021.

麦肯锡 .“中国加速迈向碳中和”煤化工篇：煤化工行业碳减排路径 [R].2021.

能源基金会 . 中国水泥行业碳中和路径研究 [R].2023.

牛彦春 , 王永军 . 齐鲁石化高质高效建设碳捕集装置 [J]. 中国石化报 ,2022,002.

庞凌云 , 翁慧 , 常靖 , 等 . 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究 ,2022,35(02),356-367.

赛迪工业和信息化研究院 . 工业数字化转型白皮书 [R].2020.

生态环境部环境规划院 . 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究 [R].2021.

生态环境部环境规划院 . 中国风电和太阳能发电潜力评估 [R].2024.

生态环境部环境规划院 . 中国区域电网二氧化碳排放因子研究 (2023)[R].2023.

生态环境部环境规划院 . 中国区域二氧化碳地质封存经济可行性研究——中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2024)[R].2024.

王兵 , 葛皓天 , 邓凯磊 , 等 . 碳中和目标对煤炭工业可持续发展影响路径评估 [J]. 煤炭经济研究 ,2021,41(07),27-33.

王丽娟 , 邵朱强 , 熊慧 , 等 . 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究 ,2022,35(02),377-384.

温宗国 , 李会芳 . 中国工业节能减碳潜力与路线图 [J]. 财经智库 ,2018,3(06),93-106+143-144.

严刚 , 郑逸璇 , 王雪松 , 等 . 基于重点行业 / 领域的我国碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究 ,2022,35(02),309-319.

张希良，黄晓丹，张达等 . 2022. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究 [J]. 管理世界 , 38 (01): 35-66.

张贤 , 李凯 , 马乔 , 等 . 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望 [J]. 中国人口·资源与环境 ,2021,31(09),29-33.

中国 21 世纪议程管理中心 . 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)[R].2023.

中国钢铁工业协会 .2020 年中国钢铁行业经济运行报告 [R]. 2020.

中国石化集团经济技术研究院有限公司 . 中国能源展望 2060 (2025 年版)[R].2025.

中国石化石油化工科学研究院 . 迈向 2060 碳中和石化行业低碳发展白皮书 [R].2022.

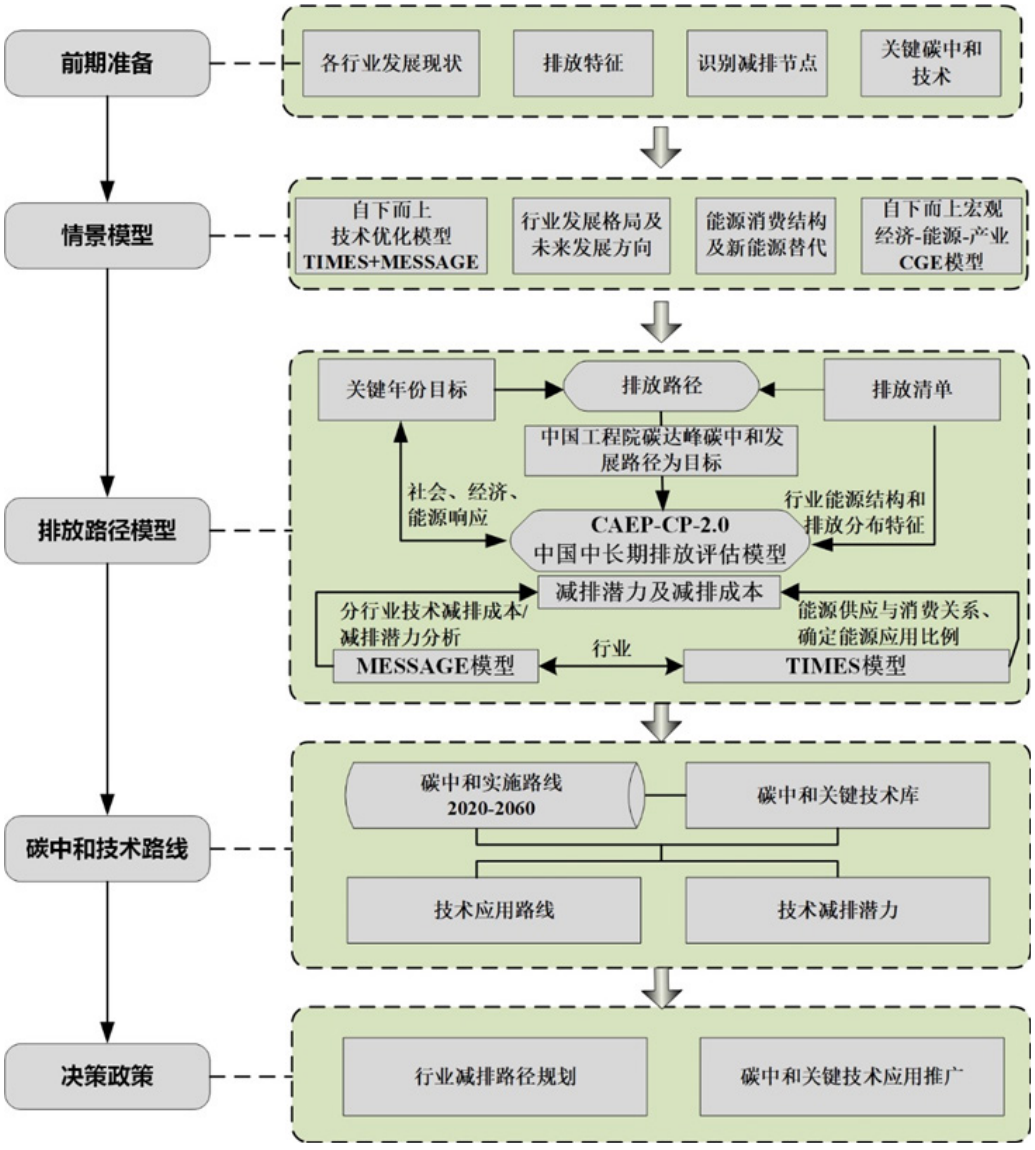
中国信息通信研究院 . 数字碳中和工业篇 [R].2024. 北京 .

附录 研究方法和技术路线

1. 技术路线

本研究分别设置钢铁、水泥、石化、有色、煤化工行业碳中和路径情景，结合当前各行业发展现状和碳排放特征，系统梳理了碳中和关键技术库及减排成效，采取自下而上模型工具，借鉴 IPCC 路径情景方法学，基于综合评估模型、排放机理模型、统计学模型等，结合文献分析、专家研判、现场调研等方法，提出各行业碳中和技术路线图以及实施路径，为各行业推进工业碳中和目标的实现、碳中和技术的推广应用提供科学参考。

图 1 技术路线图



2. 研究模型

本报告基于生态环境部环境规划院中国中长期排放综合评估模型 (CAEP-CP 3.0)，以减排技术评估模块为核心开展研究。减排技术评估模块基于 TIMES 和 MESSAGE 模型。TIMES 模型作为一个基于线性规划的能源系统分析工具，通过对能源系统进行全局优化，从资源开采、中间转换到终端用能，以供能成本最小化作为目标函数，以资源潜力、能量流动平衡、生产能力和系统动态变化速率为约束条件，在技术层面计算最优的能源生产和投资决策，通过能源供应与终端部门服务需求之间的关系，确定未来能源的应用情况；MESSAGE 模型以技术为基础建立行业间的物质流动关系，其核心特征是物质流，通过物质流动可以刻画有关自然资源、能源、排放、产品和相关技术的高精度细节，确定技术的未来发展。TIMES 模型和 MESSAGE 模型都是自下而上的能源系统优化模型，通过多种技术之间复杂的投入产出关系，考虑到能源系统发展可能的情景和限制，在总能源系统成本最小化目标下，规划未来符合能源平衡、环境排放限制的能源系统技术组合，将两套模型运行结果相互对比、迭代，最终得出工业各部门最佳减碳路径。本研究中工业碳中和范围内的能源系统优化模型的搭建包括供应部门（一次能源供应、燃料加工和转换、需求能源技术）和终端使用部门（工业、住宅、交通和商业部门，模型选择工业部门）。

图 2 碳中和技术路径研究综合模型

以 2060 年前实现碳中和为约束，以 TIMES 模型和 MESSAGE 模型为核心，构建了涵盖社会经济发展模块、碳排放核算模块、调查问卷模块、企业政府调研模块、减排技术模块、生产系统优化模块、专家评估模块共七个模块的综合评估模型框架。终端能源需求预测模块以经济社会发展为驱动，利用计量等方法对终端能源需求进行预测。工业生产系统优化模块描述覆盖一次能源供应 - 燃料加工与转换 - 终端能源使用的能源流动过程，并对能源技术相关参数进行细致刻画；其中能源技术参数可分为技术特性参数和经济特性参数，包括技术寿命、现有装机容量、固定投资成本、运行和维护成本等。碳排放核算模块参考主流方法对各行业环节碳排放量进行

核算。路径优化模块以在满足给定需求和约束下规划期内能源系统的总成本最小化为优化目标开展迭代优化，并形成最优燃料组合与技术构成。最终通过费效核算模块对减排成本及效果进行测算。研究设定 CO_2 总排放量为环境排放限制，以 5 年为一个周期，探究 2025—2060 年工业碳中和低碳发展战略最佳路径方案。

以社会经济稳步高质量发展为背景，以全国 2060 年前实现碳中和为约束，以分工业行业碳中和情景分析为基础，以技术可达性、措施和成本可行性为条件，通过反复迭代优化，最终形成重点工业行业碳中和技术路线图。工业碳中和路径研究注重行业自身发展规律与先进技术变革相统筹，在充分考虑国民经济社会发展需求、行业发展技术特点、产业链上下游供需关系、国内外进出口变化等基础上，以技术成本演变为关键参数，预测 2025—2060 年行业发展规模、先进技术发展前景、关键技术渗透率，分析行业控碳减碳技术手段和关键举措，综合研判提出分行业碳中和技术路径。

工业碳中和技术学习曲线。充分借鉴 IPCC AR6 情景数据库中的技术学习曲线数据和研究方法，通过系统整合中国工业各行业生产规模、技术研发、时间等领域知识与实证数据，识别影响技术成本的关键变量及关联机理，提炼规模效应、工艺改进、材料替代等核心驱动因子，揭示工业技术成本演化的内在规律。组织上百位行业专家参与多次专题研讨，评估不同行业技术领域的成本削减潜力和经验数据，对定量模型进行情景验证，预测技术成本的变化趋势，形成中国本土的工业行业技术学习曲线。

IPCC AR6 情景数据库中的技术学习曲线构建主要依赖综合评估模型（IAMs）与能源系统模型的耦合分析，通过整合历史数据、技术扩散规律及政策干预等多维度因素，量化技术成本随时间和规模增长的下降趋势。其模型框架涵盖全球变化评估模型（GCAM）、一般均衡模型（REMIND）、动态系统优化模型（MESSAGEix）等。在学习曲线构建过程中，还充分考量了不确定性分析、行业异质性、系统协同性等多维度因素，通过敏感性实验评估参数变化的影响，针对工业部门复杂工艺制定差异化学习曲线，并优化电力系统与终端用能的协同效应。

3. 情景设置

本研究情景设置如下：

（1）政策情景（基准情景）

确保社会经济实现平稳且持续发展的大背景下，充分考虑到满足全社会对于重点工业行业产品的广泛需求，同时对于重点工业行业的关键参数基于当前的发展趋势进行了细致的设定，这些参数包括但不限于产品需求、能源结构、能效水平、电网排放因子下降等方面，并未将额外的低碳技术纳入考虑范畴，即反映了当前的发展态势而并没有融入那些尚未普及或尚未得到广泛应用的低碳技术，构建工业部门政策情景。

（2）碳中和情景

在当前基准情景发展趋势的基础上，进一步考虑中国实现高质量碳达峰目标、能效水平显著提升、新能源快速发展等国家对于节能减排的高标准要求，充分考虑工业行业不同阶段各类技术水平、发展潜力、成本等因素，参考中国工程院排放情景（即采取积极有效控制措施实现高质量达峰，有望在 2030 年前排放稳中有降和在 2060 年实现碳中和目标），其中工业部门基于钢铁、水泥、有色、石化、煤化工等重点行业技术特点，充分考虑工业碳中和技术，以最低的技术减排成本为目标，建立碳减排与成本之间的边际减排成本关系曲线，通过反复迭代开展工业行业路径寻求，构建中国工业行业实现高质量碳达峰和碳中和目标下的中长期低碳发展情景。碳中和情景的构建综合考虑行业的特定需求、技术成熟度、经济可行性以及社会环境影响，确保政策情景的科学性、合理性和可行性。

4. 经济社会关键指标预测

（1）经济发展形势预测

结合国内外经济发展现状，参考国内外机构对国际和国内经济发展趋势的研究结论，预测 2025—2030 年、2030—3035 年经济平均增速在 4.8%~5.0%、4.5%~4.8% 左右。2024 年，中国人均 GDP 达到 9.6 万元左右，预期至 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年人均 GDP 分别在 9.7 万元、11.7 万元、14.7 万元、24.8 万元和 32.3 万元区间。

（2）产业结构形势分析

2020—2035 年是产业结构调整升级快速推进的时期。2024 年，三次产业结构调整为 6.8 : 36.5 : 56.8。结合国内外形势，“十四五”时期，传统产业尤其是传统工业加快技术改造和升级，先进制造业、高新技术产业的规模和水平持续提升，创新能力显著增强，第三产业比重继续呈稳步上升趋势，到 2035 年调整为 6.2 : 32.1 : 61.7。2035—2050 年时段，中国进入世界最发达的服务业强国行列，将成为全球高端服务业集聚中心、

主导和引导全球价值链，经济控制力显著增强，第三产业比重在 2050 年左右突破 65%，三次产业结构调整为 2050 年的 4.4 : 29.1 : 66.5 左右，2060 年三次产业结构调整为 3.8 : 24.7 : 71.5 左右。

（3）人口及城镇化发展形势

2024 年中国人口负增长，比 2022 年末减少 347 万人。预测到 2035 年，中国人口将保持基本平稳态势，人口数量稳定在 13.7~14.0 亿左右，预期至 2060 年，中国人口总量将下降至 13.3 亿人左右。人口老龄化加剧、低生育率等形势仍将持续，这导致社会负担加重，“人口红利”逐步衰减，“人力资本红利”有望持续得到释放。

2024 年，中国常住人口城镇化率达到 67%，城镇化进程总体进入到后期阶段。2025 至 2035 年，是中国城镇化由后期迈向成熟期关键阶段，城镇化仍是高质量发展的主要推力与标志。预期到 2025 年，中国常住人口城镇化率将达到 68.0% 左右，进入中级城市型社会；到 2030 年、2035 年，分别达到 72.0%、75.0% 左右的成熟阶段。到 2060 年，中国常住人口城镇化率将进一步提升至 85.0% 左右。

表 1　中长期中国主要经济社会关键指标分析预测表

注：数据来源于本项目组结合国内重要机构研究结果（中国长期低碳发展战略与转型路径研究课题组（2021）；中国工程院《我国碳达峰碳中和战略及路径研究》（2021）；《我国碳达峰碳中和若干重大问题研究》（2022）等）和国际最新权威报告（IEA (2021), An energy sector roadmap to carbon neutrality in China; IEA (2021), Net Zero by 2050, Paris; UN (2019), World Urbanization Prospects: The 2018 Revision; World Bank (2021)）研判。

关键指标	2024	2030	2035	2050	2060
人口（亿人）	14.1	13.9	13.7	13.5	13.3
城镇化率（%）	67.0	72.0	75.0	80.0	85.0
GDP（万亿元）	135	169	210	342	429
GDP 年均增速（%）	5.0	4.8	4.5	3.3	2.3
人均 GDP（万元）	9.6	11.7	14.7	24.8	32.3
三产结构	6.8：36.5：56.8	6.5：34.2：59.3	6.2：32.1：61.7	4.4：29.1：66.5	3.8：24.7：71.5
碳价格（元 / 吨）	90	130	280	650	850

5. 减排潜力及成本评估

本报告中单位减排成本是指某项技术与基准技术相比，每减少一单位 CO_2 所增加的成本。总成本是指生产一单位产品的总成本，包括投资成本、固定成本和可变成本。其中，投资成本是指单位规模的投资额（年化后），固定成本是指单位规模生产中每年固定支出的成本，如固定设备维修成本、员工工资成本等，也称运营成本；可变成本是指单位规模生产中购买原料、燃料等所需的成本。

碳中和技术现在的发展状态，以及未来的趋势如何，需从单位减排成本、技术成熟度和普及度分析各项技术的减排潜力和应用潜力。单位减排成本的核算范围包括燃料成本、原料成本、固定投资成本和运行维护

成本，单位减排成本表示该技术减排一吨二氧化碳需要的成本是多少，其计算方法如下：

$$\text{单位减排成本}=\frac{\text{技术成本}_{\text{新}}-\text{技术成本}_{\text{常规}}}{\text{技术碳排放量}_{\text{新}}-\text{技术碳排放量}_{\text{常规}}}$$

根据2020年工业用氢价格55元/千克计算单位减排成本。氢能作为原料替代和燃料替代的主要组成部分，成本竞争力将逐渐增强。2020-2060年随着可再生能源装机量的上升，未来电力价格的降低也将导致绿氢成本的大幅下降。

6. 技术成熟度等级划分

技术成熟度表示科技成果的技术水平、工艺流程、配套资源、技术生命周期等方面的产业化实用程度。技术成熟度（TRL）参考等级：理论概念阶段：1-4；实验条件阶段：5-6；商业化前示范或首次商业化：7-8；早期应用阶段：9，成熟技术：10-11。

表 2　技术成熟度与应用阶段划分

技术成熟度等级划分		
等级	**阶段**	**技术成熟度**
1	理论概念阶段	初步制定基本技术原理
2		初步验证技术原理
3		初步实验证明技术原理
4		
5	实验阶段	实验室条件下的大规模验证
6		实际条件下的试运行
7	示范阶段	商业化前的示范演示
8		首次商业化应用
9	早期应用阶段	技术已进入市场，扩大应用规模需要政策支持
10	成熟应用阶段	进一步扩大应用，且具备成本竞争性
11		技术完全成熟，已具备一定的市场规模

7. 数字技术评估模型

为了量化数字技术对中国工业领域碳中和的赋能作用和效果，同时兼顾计算的科学性和可操作性，本文采用模型进行估算，即依据不同领域数字赋能占比，以节能降碳、降本增效为目标，基于数字化不同技术应用场景所提出的能耗/碳排放、生产运营成本、产能效率等维度，测算数字技术赋能工业绿色化贡献的成效，计算公式如下：

$$f(x)=\sum_{i=1}^{10} m_i w_i$$

其中，f(x) 代表数字化助力行业绿色化成效；i 代表第 i 个数字技术助力行业绿色化领域；w 代表该领域形成的贡献价值；m 代表该领域所占的比重。

首先对数字技术应用案例进行解构分析，确定出数字技术绿色赋能的十个应用场景，具体包括：绿色设计研发、工艺优化降碳、生产协同增效、绿色仓储配送、固废循环利用、用能设备管理、能源平衡调度、污染物在线监测与控制（减污降碳协同）、碳资产管理、产业资源协同节能。以能耗 / 碳排放降低、生产运营成本降低、产能提升三个维度为目标导向，估算十个场景的赋能价值。依据中国信通院多年积累的数字化转型案例库为样本数据（700+），采用因子分析判断十个因子与具体测量项之间的关系得到相应维度，对于二级指标采用熵值法进行求取权重，一级指标由因子分析得到的相应维度进行计算权重，从而确定各领域数字技术赋能权重。根据上述计算公式得出数字技术赋能绿色化的贡献范围，结果显示赋能能耗 / 碳排放降低成效范围为 5.7%~20%，赋能生产运营成本降低成效范围为 8.4%~24.7%，赋能产能提升成效范围为 3.2%~17.7%。

由于数字技术植入的深度和广度将因工业部门、企业规模和可应用技术水平而有所不同。数字技术在工业节能降碳方面的潜力还在不断发展和拓展，未来仍有很大的机会来进一步利用数字技术降低工业碳排放。

8. 不确定性分析

通过综合评估模型、排放机理模型、统计学模型等多种工具，结合专家研判和现场调研等方法，对钢铁、水泥、石化、有色、煤化工等行业的碳中和路径进行了深入分析。尽管采用了自下而上模型工具和 IPCC 路径情景方法学来尽量准确地预测和规划各行业的碳中和技术路线图，但是仍存在一定的不确定性因素，这些因素主要源自以下几个方面：

（1）经济发展与产业结构变化的不确定性：未来全球经济波动、国际贸易关系、技术革新速度等因素的不确定性均可能影响实际增速，进而影响本报告关于能源消耗和碳排放量的预测。

（2）人口增长与城镇化进程的不确定性：虽然根据有关机构研究，我们预计到 2060 年，中国人口总量将下降至 13.3 亿人左右，城镇化率将进一步提升至 80.0% 左右，但实际人口增长率、城镇化速度及其对能源需求的影响存在不确定性。

（3）技术发展与渗透速度的不确定性：碳中和路径的实现在很大程度上依赖于关键减排技术的发展与应用。技术进步速度、成本下降幅度以及这些技术在不同行业中的普及速度都存在不确定性。

（4）政策与法规环境的不确定性：碳中和政策的制定与执行效率，包括碳定价、补贴政策、环境标准等，都将对企业和行业的碳减排策略产生影响。政策方向的改变可能会加大预测的不确定性。

（5）数字技术赋能的不确定性：尽管估算数字技术赋能绿色化的贡献范围，数字技术在节能降碳方面的应用潜力巨大，但其实际效果受到企业接受度、技术成熟度以及相关基础设施建设的影响，存在一定不确定性。

为了应对这些不确定性因素，本研究采取了多情景分析、专家座谈、调研问卷等多种方法减少预测偏差，多种情景分析能够增强模型的灵活性和适应性；不断更新数据和模型假设，以反映最新的经济、技术和政策发展情况；利用专家访谈等收集行业内外专家的意见，提高研究的准确性和可靠性。尽管如此，鉴于当前的技术和数据限制，本报告的分析结果仍然存在一定程度的不确定性。未来的研究应当更加关注这些不确定性因素的影响，通过更加精细化的数据处理，持续更新模型参数和情景假设，以提高研究的准确性和适用性。

生态环境部环境规划院
Chinese Academy of Environmental Planning

清華大學 碳中和研究院
Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University

ENERGY FOUNDATION
能源基金会

扫一扫 了解更多
Scan to learn more