



企业碳中和：战略选择、 行动框架及最佳实践

以重工业为例





关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所(RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与企业、政策制定者、科研机构及创业者协作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，推动全球能源系统转型，践行1.5°C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。



关于中国企业联合会企业绿色低碳发展推进工作委员会（简称“绿推委”）

中国企业联合会是1979年经国务院同意成立的第一个全国性、经济类的社会团体，是企业、企业家、企业团体的联合组织，是国务院国有资产监督管理委员会直管的协会之一。绿推委是中国企业联合会下属二级专业工作委员会，旨在通过建立企业“双碳”行动的政产学研用交流合作与服务平台，推动企业落实“双碳”目标，加快推进企业绿色转型与低碳发展。



关于中国企业管理科学基金会

中国企业管理科学基金会是由中国企业联合会发起，于1987年3月经中国人民银行批准成立，1991年作为独立法人在民政部单独登记，属于全国性公募基金会。基金会的业务主管单位是国务院国有资产监督管理委员会。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所 (RMI)

李婷

李抒苒

李威

王珮珊

薛雨军

闫榕

中国企业管理科学基金会

缪荣

刘慧媛

肖震东

胡媛媛

路镭

联系方式

王珮珊, pwang@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 中国企业联合会企业绿色低碳发展推进工作委员会, 中国企业管理科学基金会, 企业碳中和: 战略选择、行动框架及最佳实践——以重工业为例, 2023

目录

前言	5
一、全球碳中和趋势下的企业选择	6
二、评价企业碳目标与行动的PTAM框架.....	8
碳排放现状 (Performance)	9
目标和战略 (Target)	9
企业降碳行动 (Action)	9
企业碳管理机制 (Management)	10
三、PTAM框架下的重工业企业最佳案例解读	11
目标和战略	11
企业降碳行动	15
重点行业之一:钢铁	16
重点行业之二:水泥	20
重点行业之三:石化和化工	24
重点行业之四:电解铝	27
企业碳管理机制	29
四、行动建议:加速转型系统构建,发挥企业领导力	33

前言

全球净零碳转型逐渐由理念转向实践，在此趋势下，迄今已有接近140个国家提出了净零碳排放目标，覆盖全球近90%的碳排放。作为落实碳减排的重要主体之一，越来越多的企业选择主动承担起减排的责任，其中包括钢铁、水泥、石化和化工、电解铝四个重工业行业企业。此四个行业中，已宣布碳中和目标的企业碳排放量已分别覆盖全行业总排放量的30%、18%、15%和14%。自我国政府宣布“碳达峰”、“碳中和”目标之后，为指引和落实各行各业的行动方向，国家围绕“双碳”提出了“1+N”政策体系，并持续快速迭代，意味着对以央国企为代表的国内企业提出了新的要求。截至2023年5月，已有超过30个央国企提出双碳目标，其中21个明确提出碳达峰目标，15个提出了碳中和目标。

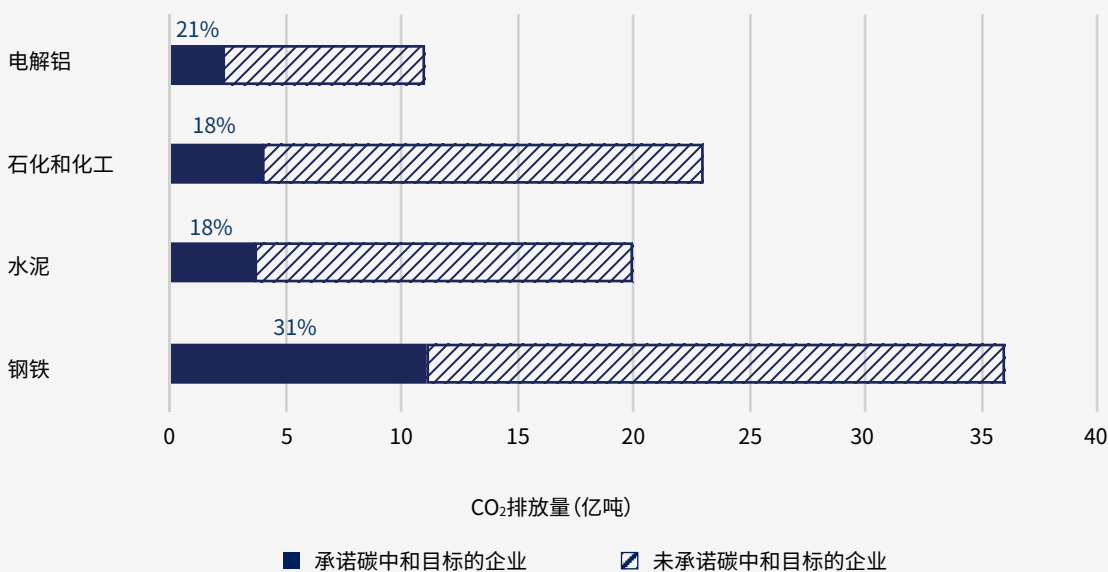
不论在全球还是各地区，企业在碳减排、碳中和方面的部署和行动落实都处于关键战略期。企业在碳相关的战略选择、资源配置、行动落实等方面，都离不开科学的方法论和最佳实践的引领。如何准确认识现状、识别弱势并发挥自身优势，是企业需要认真探索的课题。落基山研究所（RMI）、中国企业联合会企业绿色低碳发展推进工作委员会和中国企业管理科学基金会为此进行了合作研究，提出PTAM框架，从排放现状、战略目标、降碳行动、管理机制等不同维度尝试提出系统方法论，并以钢铁、水泥、石化和化工、电解铝四大重工业为例，分析具有代表性的企业行动，为企业创建和对标最佳实践提供支持，并为相关政策与行业的进一步发展提供参考。

一、全球碳中和趋势下的企业行动

近年来，全球变暖趋势加剧，极端天气事件频发，对人类经济社会造成的冲击日渐显著，从国家到行业、从政府到企业，应对气候变化的行动都在不断加强和深化。截至2023年5月，全球已有127个国家、138个地区、249个主要城市和2000家龙头企业中的915家制定了碳中和目标，该目标覆盖了全球88%的温室气体排放量、92%的经济体量以及85%的世界人口¹。

企业在推进气候行动中扮演着重要的角色，其中也不乏传统的重工业企业。工业部门减排的难点主要在于其对于化石能源的依赖性强、能耗强度高、更加需要由技术驱动转型。RMI对钢铁、石化和化工、水泥、电解铝四个重点工业领域的龙头企业碳目标进行了梳理。从排放量上看，上述四大重点行业碳排放约占全球碳排放总量的1/4；从引领性上看，全球有17家钢铁企业承诺了碳中和，约覆盖钢铁行业排放量的近31%，另有21个水泥企业、38个石化化工企业、5个电解铝企业宣布了碳中和目标，分别覆盖行业排放总量的18%、18%和21%。

图表1. 全球工业企业碳中和目标设定情况



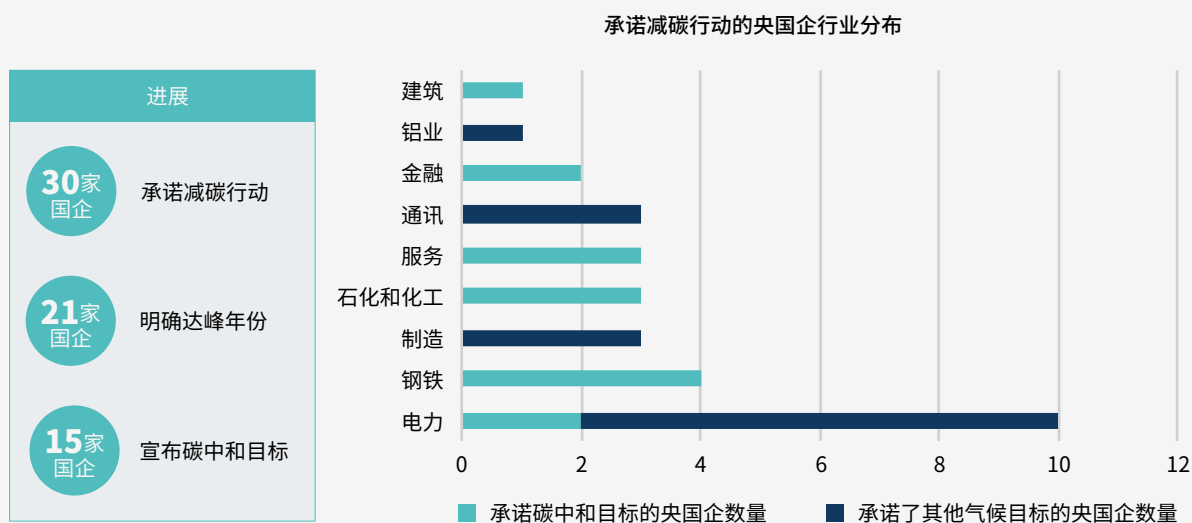
百分数表示各行业已作出碳中和承诺的企业排放占行业总排放的比例

来源：RMI (根据公开数据整理)

自我国政府提出“双碳”目标后，围绕碳达峰碳中和的“1+N”政策体系得到持续推进和完善，相关政策和目标对央企为代表的国内企业提出了新要求。在《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030年前碳达峰行动方案》中，强调了央企在制定行动方案、绿色投资、发展技术等方面的引领作用。2021年年底，由国务院国有资产监督管理委员会（国资委）印发的《关于推进中央企业高质量发展做好碳达峰碳中和工作的指导意见》不仅点明了央企在碳达峰碳中和以及能源转型中的地位，还将碳达峰碳中和工作纳入中央企业考核评价体系。国资委印发的《提高央企控股上市公司质量工作方案》，提出要推动更多央企控股公司披露ESG专项报告，力争在2023年实现相关专项报告披露“全覆盖”。此外，国资委社会责任局近日向各家中央企业征求《中央企业碳达峰行动方案编制指南（征求意见稿）》意见。

在此背景下，国内不少企业，尤其是央国企，已做出积极探索。截至2023年5月，已有超过30个央国企提出双碳目标，其中21个明确提出碳达峰目标，15个提出碳中和目标。在钢铁、水泥、化工、电解铝等高耗能行业，央国企作为国家落实双碳战略的关键抓手，其地位得到进一步突出。从排放量看，当前，上述四大重点行业碳排放占全国的44%，其中国企的排放约占46.7%。从集中度看，央国企规模大且集中，龙头标杆作用明显。以中国钢铁产量排名前10的钢企为例，其中7家是央国企，其粗钢产量占到了全国29%；而在水泥产量排名前4的企业中，央国企占比100%，其产量占全国43%。从积极性看，在钢铁和石油化工领域，已提出双碳目标的央国企排放分别覆盖了该行业央国企排放的约54%和72%。

图表2. 国内央国企碳减排承诺情况



截至2023年5月

来源:RMI (根据公开数据整理)

二、评价企业碳目标与行动的PTAM框架

在强政策导向的背景下，当前国内企业制定双碳目标和路线图正面临窗口期，亟需央国企积极引领、树立标杆。本研究提出PTAM框架，以支持企业双碳行动的国际对比。PTAM框架通过碳排放现状 (Performance, P)、目标和战略 (Target, T)、降碳行动 (Action, A) 和管理机制 (Management, M) 四个角度，系统评估企业碳排放基线情形、降碳目标与实施行动。本研究以钢铁、水泥、石化和化工、电解铝行业为重点，对比分析国内外代表性企业的碳目标与行动。

PTAM框架涵盖企业碳行动全流程，以期全面识别企业的双碳行动。企业采取的双碳行动主要包括认识现状、制定目标与计划、实施行动3个环节。在认识现状环节 (P)，企业的主要目标是了解目前碳排放与用能情况，了解企业与碳排放相关的主要指标，也能为制定合理的碳目标奠定基础。在目标与计划环节 (T)，企业的主要目标是依据国家或投资者相关要求及自身情况，制定全面、明确、透明的碳行动目标及中远期规划。在实施行动环节，企业的主要目标是依据碳目标与规划，采取技术和管理手段减碳，并阶段性地评估双碳目标的实现情况。实施环节的考察方面可以拆分为行动 (A) 与管理 (M)，即企业为实现碳目标而采取的技术措施以及支撑降碳行动的制度保障。

图表3. 企业碳行动评价框架 (PTAM)

		分类	指标
企业碳行动评价框架	现状 P Performance	总量	碳排放总量, 产量, 产值
		强度	产品单位碳强度, 碳足迹
		能源	用能总量, 单位产品/产值能耗, 新能源比例, 电气化比例
	规划 T Target	全面性	温室气体种类, 范围
		明确性	明确的碳达峰、碳中和时间, 碳排放总量与强度控制, 其他配套指标
		透明度	指标公布, 阶段性目标, 路线图、时间表、施工图
	实施 A 降碳行动	减量化	淘汰落后产能, 物料回收
		能源替代	氢能、生物质、可再生能源、电气化替代
		工艺与材料	创新工艺流程, 替代材料
		能效提升	能效提升
		固碳	CCUS, 碳汇
		M 碳管理机制	企业内部管理
企业对外管理	供应链碳排放管理, 宣传, 合作		

来源: RMI

碳排放现状 (Performance)

碳排放现状 (P) 主要用于衡量企业目前的碳排放表现，是企业基准水平的体现。基于发展阶段、产业结构、能源结构等差异，国内外企业在进行对比时需注意基准线问题，以了解企业的行动起点及其与目标的差距。

碳排放现状主要涵盖了碳排放总量、强度、能耗及可再生能源利用水平等指标。在总量层面主要关注企业碳排放情况，包括企业边界内的总碳排放和产业链的碳排放情况；企业总体经济情况如主要产品、产量、产值等。在强度层面主要关注单位产品碳强度、单位产值碳强度等生产过程碳强度指标，以及产品全生命周期的碳足迹等更全面的碳水平指标。能源与碳排放关系密切，可以作为企业碳排放情况的表征指标，包括用能总量、能耗强度、新能源占比等指标。

目标和战略 (Target)

目标和战略 (T) 维度主要用于衡量企业制定“双碳”目标的意愿与能力。目标制定是企业迈向碳中和的第一步，应符合气候科学、国家与行业的减排要求，及企业的减排雄心与能力。从国内外最佳实践来看，企业应制定明确的综合减排目标，包括整体及阶段性目标、总量与强度等控制目标、温室气体种类及范围的界定等。为实现碳目标，企业还应制定能耗、可再生能源等配套目标，以及与之匹配的路线图、时间表、施工图。

目标制定可以从“全面、明确、可操作”三个角度评价。“全面”指企业设定的碳目标应涵盖自身及产业链上各可能环节，并涵盖涉及产品生产、运输、使用的主要温室气体种类。“明确”指企业公布明确的碳达峰、碳中和时间点、碳排放总量与强度的控制指标。“可操作”要求目标制定需结合企业自身资源和条件考虑，具有可实现的能力。

企业降碳行动 (Action)

企业的降碳行动 (A) 和之后的碳管理机制 (M) 两个维度都用于衡量企业实施碳计划的能力与努力。降碳行动指的是企业为实现碳目标而采取的技术措施与具体项目，是企业实施减排的最直接体现。对比降碳行动可以判断企业的减碳技术路线差异，了解最佳技术实践、技术部署及应用情况。

重工业企业常见的降碳行动可以归类为：(1) 产能控制类，如淘汰落后和高污染高排放的产能；(2) 能效提升类，如工业锅炉改造、余热利用等技术；(3) 新能源技术类，利用风电、光伏等绿色电力及氢能、生物质等具有减排潜力的可再生能源替代传统及化石能源；(4) 工艺创新类，指改变现有工艺流程或材料、减少生产过程碳排放，例如：钢铁行业的短流程炼钢、水泥行业的新型低碳熟料、甲醇生产的P2X技术等；(5) 材料回收类，指增加产品可回收能力减少碳排放，例如再生铝及废钢回收等；(6) 碳捕集、封存与利用技术 (CCUS)；(7) 碳汇类，目前以自然碳汇项目为主。

企业碳管理机制 (Management)

碳管理机制 (M) 是企业为支撑实施降碳行动而采取的保障性制度和措施，内容涵盖了对内管理和对外管理。企业内部的碳管理包括机制建设、资金支持、创新与研发的投入、能力建设、碳信息管理等方面。企业对外部的碳管理则主要涉及供应链、企业形象、对外合作等。

企业内部碳管理的评价维度主要有：（1）机制建设，即设立气候变化或碳管理的专责部门，建立常规化的碳管理制度，并建立与碳排放挂钩的监督考核制度；（2）资金，即设立专项资金、投资绿色生产活动、拓宽外部筹资渠道等绿色投融资活动，有助于推动企业突破低碳创新中的经济性问题；（3）低碳创新，即保障低碳方面的创新投入、人才储备与研发能力；（4）能力建设，即提升员工气候意识与低碳行动能力；（5）碳信息的收集与披露，即规范、收集、评估、监测企业碳数据，定期披露减碳的关键绩效指标。

企业外部碳管理的评价维度主要有：（1）产业链碳管理，即企业对产业链上下游的碳排放进行管理并对供应商提出碳排放规定；（2）宣传，即企业将自己的碳行动向公众传播的过程，以提升企业碳行动透明度、推广低碳产品、扩大低碳产品市场；（3）合作，即企业为创新低碳技术、开拓低碳市场、形成业内共识、扩大行动影响力而开展的与外部机构的联合行动。

三、PTAM框架下的重工业企业最佳案例解读

从产业结构上看，中国主要重工业产品产量较大，其中，粗钢、水泥、主要化工产品、铝的产量或产值均占世界总产量50%左右份额。虽然当前单位产品能耗水平接近甚至优于世界平均水平，部分企业的环境指标能达到世界领先水平，但由于整体产量大、能源结构重煤等原因，工业企业的碳减排空间仍比较大。同时，重工业企业的国有资产属性较重。据RMI初步估计，在中国主要重工业行业（钢铁、化工、铝）中，央国企的碳排放占该行业的比例大约在35%~50%之间。这充分说明央国企在国家“双碳”战略中的重要地位。

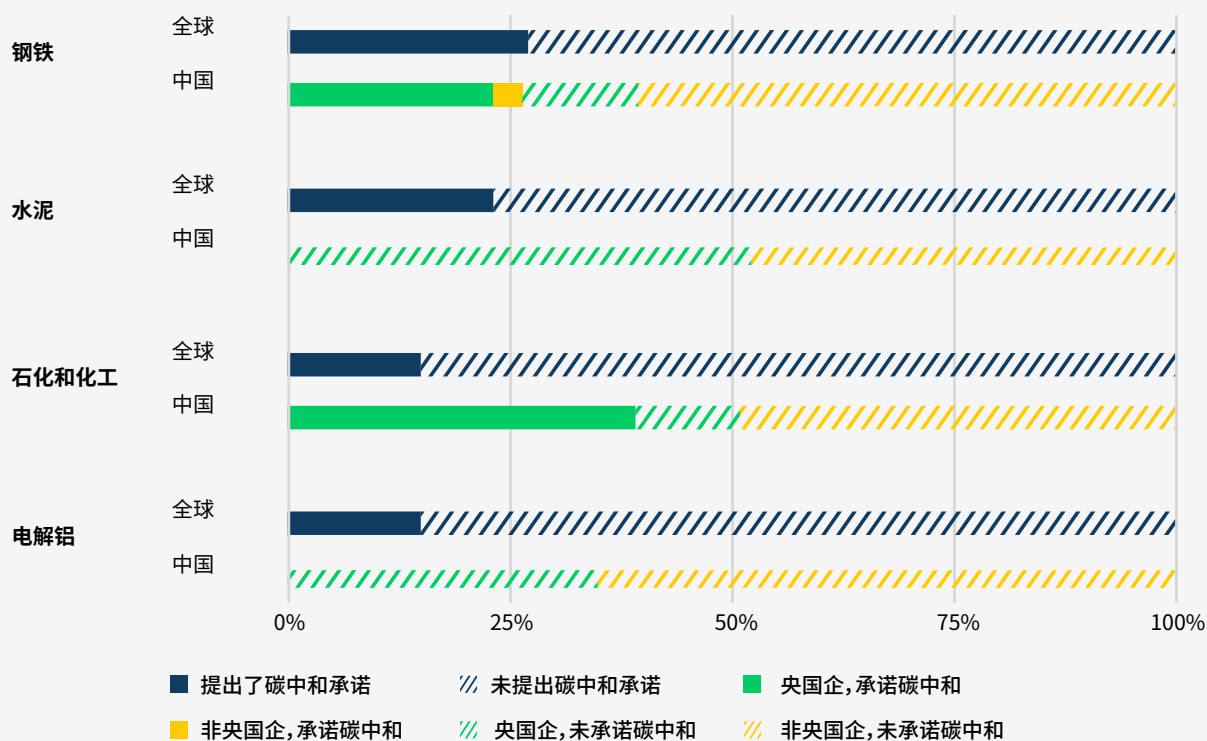
本报告选取了重工业行业国际与国内部分代表企业，聚焦于企业的目标和战略、降碳行动以及管理机制三个方面，分别使用PTAM框架进行了分析。一方面，一些领先企业对气候变化和减碳行动的关注、布局和投入较早，其相对成熟的目标、行动与管理体制将为碳中和进程中的企业提供参考。另一方面，对国内企业的行动和做法进行总结，将提供更为本地化的经验，形成具有中国特色的引领实践。

目标和战略

在PTAM框架的“T——目标和战略”维度下对比分析国内外企业碳目标制定的情况，可以直观了解到企业对减碳责任的担当和雄心，认识企业碳目标之间，以及气候承诺在行业间的差异。我国重工业行业中，包括中国宝武集团、中国石化集团等大型国有企业在内的17家钢铁企业、38家石化和化工企业、21家水泥企业和5家铝业企业宣布了碳中和/净零排放目标。据RMI估算，这些企业已承诺的碳中和/净零排放目标涵盖了每年接近20亿吨的碳排放量。

在目标覆盖范围层面，本报告对比了国内外四大重工业行业的碳中和目标所覆盖的排放占比，并在国内企业中对央国企与非央国企进行区分。如下图所示，实色部分代表被碳中和承诺覆盖的排放量，阴影部分代表未被覆盖的排放量；同时，每个行业也分别展示了全球和中国企业碳排放承诺覆盖情况。对比结果表明，中国的钢铁和石化化工企业碳中和目标覆盖情况较好，接近甚至超过世界水平，而水泥和铝行业的承诺覆盖低于世界水平；央国企在碳中和承诺中占据主要位置。

图表4. 全球及中国企业碳中和/净零排放目标承诺覆盖的碳排放占比



来源: RMI (根据公开数据整理)

截至2023年5月

在目标质量层面, 本报告采用如下标准来评价企业的碳减排相关战略和目标: 首先是目标的全面性, 即目标的核算范围上是否涵盖自身和上下游产业链, 也即范围一、范围二和范围三, 以及所包含的温室气体的种类; 其次是目标的明确性, 即是否有明确的量化目标, 在时间尺度上是否对近期和中长期目标做出区分, 以及是否对强度、总量等目标类型进行明确; 第三是总体战略和目标的可操作性, 即是否有基于现状、资源等因素可以实现的潜力。

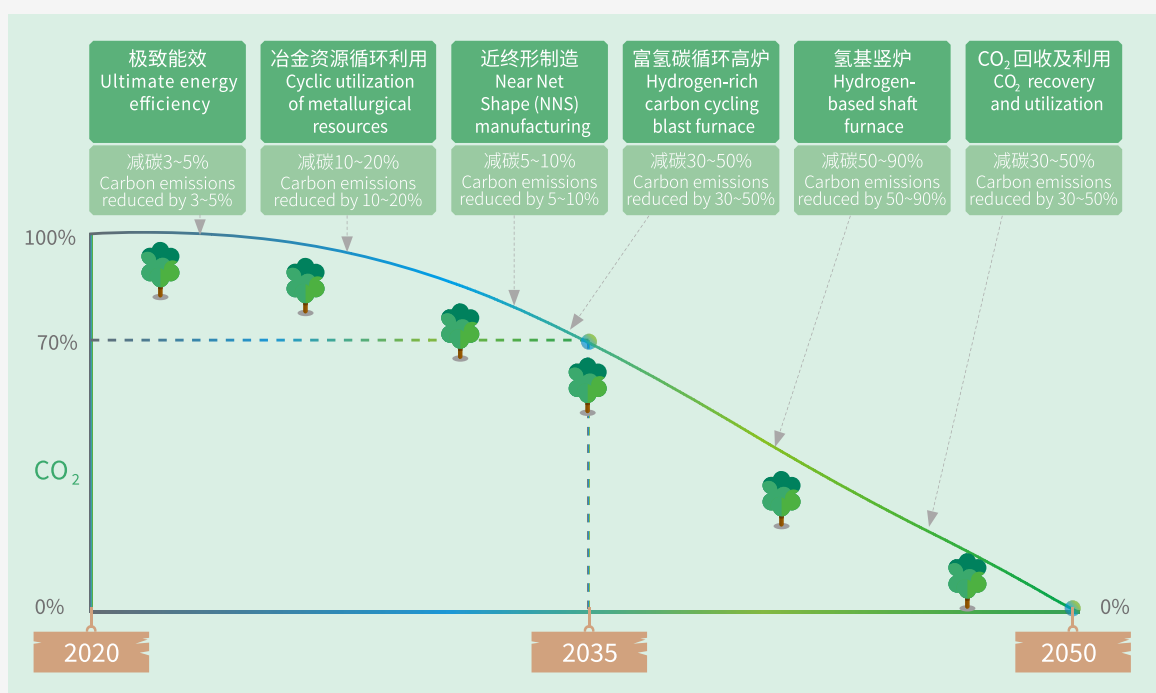
从目标全面性的角度看, 目前仅有少量企业的减排目标涵盖了范围三。例如蒂森克虏伯 (Thyssenkrupp) 提出, 到2030年将使范围三排放、尤其是产品使用阶段的排放, 在2018年的基础上降低16%; 到2050年的净零目标也包含范围三排放。就温室气体种类而言, 中石油和中石化特别指出其排放目标范围包括二氧化碳和甲烷; 也有国际企业如挪威海德鲁 (Norsk Hydro) 等的净零目标则涵盖全部温室气体。由此可以看出, 一方面目标的全面性与行业特性相关, 另一方面也反映出企业在更大范围上承担减排责任, 带动产业链减排的能力与意愿。

从目标明确性的角度看, 本报告样本中的国际企业大多将2050年作为实现净零的目标年份。设定了减排目标的央企则均保持与国家“双碳”战略的高度一致, 即将减排目标拆分为碳达峰和碳中和两个部分, 而且部分企业的目标年份早于国家层面的总体目标, 或提出行业内率先实现碳中和的目标。例如, 宝武提出“力争2023年实现碳达峰, 2050年实现碳中和”, 宝丰能源则提出“力争成为行业率先实现碳中和的企业”。此外, 在中期目标层面, 除了碳达峰与碳排放总量下降的比例目标, 也有一些企业提出更为明确的技术目标。例如, 中石化提出, 以2018年为基准年, 到2030年捕集CO₂ 50万吨/年, 回收利用甲烷 2亿立方米/年。

从战略和目标可操作性的角度, 中外企业如宝武集团和瑞士豪瑞水泥公司 (Holcim), 均结合企业自身情况, 对各降碳路径在不同阶段的减排贡献做出了详细的定量分析, 并对目标进行拆解, 通过规划具体时间表确保目标的可实现性。将碳中和目标拆解为可操作、可实现的具体行动, 充分体现了企业规划减排行动应对低碳发展趋势的战略能力。

宝武集团在2021年发布的《中国宝武碳中和行动方案》中明确了极致能效、富氢碳循环高炉、氢基竖炉、近终形制造、冶金资源循环利用和CO₂回收及利用等六大技术方向, 并对每个技术方向的减排潜力进行了预测, 以便各基地结合自身条件选择适合实施的技术。在主要技术的减排潜力和部署时间表中, 宝武还分别指明了希望能够大规模部署的时间窗口, 和实现期望减碳幅度比较合适的技术部署窗口。

图表5. 宝武集团碳中和路线图

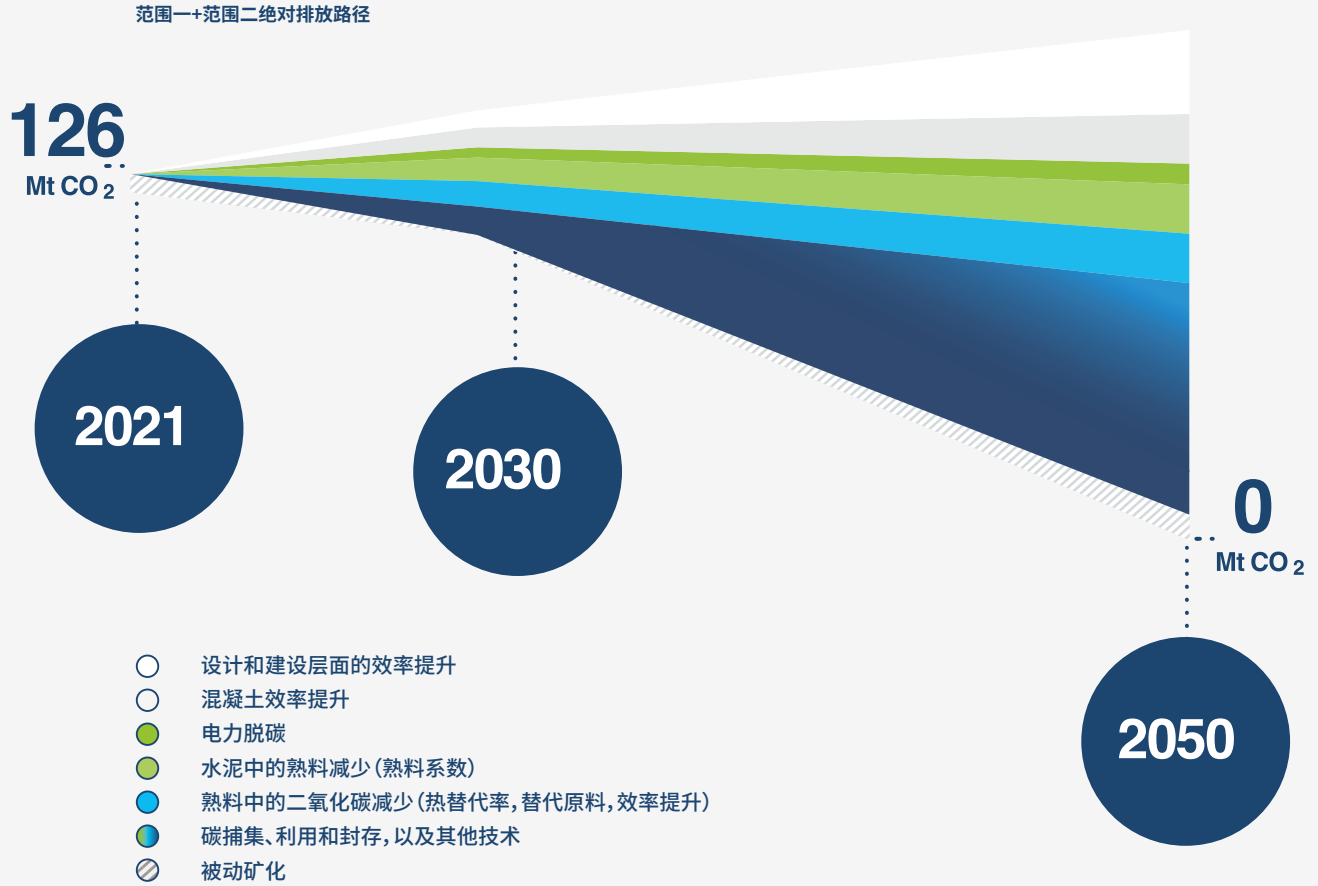


来源: 中国宝武社会责任报告

豪瑞水泥则对设计与建设效率提升、混凝土效率提升、电力脱碳、降低熟料系数、降低熟料碳排放、CCUS和其他技术, 以及再碳化作用等七种路径的减排潜力做出评估, 结合自身情况分析各个路径在实现净零承诺进程中的贡献, 证明目标的可操作性。

图表6. 瑞士豪瑞水泥公司 (Holcim) 碳中和路线图

瑞士豪瑞水泥公司 (Holcim) 的净零路径



来源: Holcim Climate Report 2022

企业降碳行动

重工业的降碳路径可以归纳为能效提升、循环利用、电气化、绿氢、生物质、碳捕集、封存与利用、碳汇和新型工艺等七个方面。由于重工业内部各行业的碳排放环节以及技术与生产工艺流程的适配程度不尽相同，这些降碳路径在不同行业内的减排潜力也存在重大差异。为了给企业降碳行动提供更有针对性的参考，本报告采用分行业的方法展开讨论。

图表7分行业列举了碳减排的重点技术与具体措施，并通过评估技术成熟度和减排量来识别各手段在行业内的减排潜力。以此为依据，本报告选取了每个行业中最重要的一项碳减排抓手，梳理和分析代表性企业的最佳实践。

图表7. 四大重工业行业的碳减排抓手

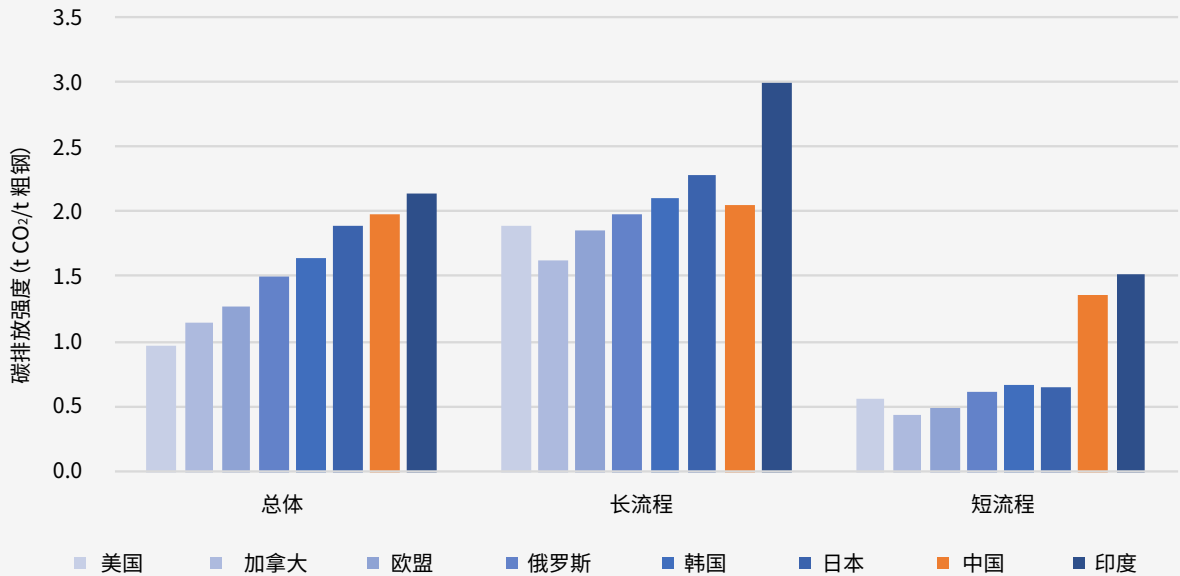
	能效提升	循环利用	零碳电气化	绿氢	生物质	CCUS	新型工艺
钢铁	<ul style="list-style-type: none"> 余热余压利用（焦炉上升管余热等） 煤气发电、产品化、回收技术 能源管控精细化技术 	废钢循环利用： <ul style="list-style-type: none"> 以废钢为原料的再生钢/电炉钢 	能源替代： <ul style="list-style-type: none"> 短流程电炉钢 新型工艺： <ul style="list-style-type: none"> 直接电解法炼铁 	作还原剂和燃料： <ul style="list-style-type: none"> 高炉富氢冶炼 直接还原铁 氢等离子体熔融还原 	作还原剂和燃料： <ul style="list-style-type: none"> 资源量较有限，优先用于无其他零碳替代技术领域 	现有高炉-转炉路径碳排放的处理	直接电解法炼铁
水泥	煅烧节能技术 粉磨系统节能技术 数字化技术	水泥与混凝土回收	电水泥窑技术	氢能煅烧	生物质替代燃料 固体废物替代燃料	液体化学吸附 第二代富氧燃烧 集成式钙循环 LEILAC CO ₂ 矿化混凝土技术	新型水泥产品
石化和化工	<ul style="list-style-type: none"> 余热回收利用 能效管理体系建设 推广节能技术应用 	<ul style="list-style-type: none"> 废弃塑料回收 工业废气回收作为原料 	电加热蒸汽裂解技术	<ul style="list-style-type: none"> 提供热源 原料替代 	<ul style="list-style-type: none"> 原料：生物基可降解材料和生物燃料 燃料：供热 	CO ₂ 回收利用： <ul style="list-style-type: none"> 作为原料制化学品 CCUS驱油 	甲烷裂解制氢技术
电解铝	<ul style="list-style-type: none"> 系统优化：使用计算机保证生产过程稳定连续 电解槽优化 湿润阴极：通过使极距和电压下降，降低耗电量 	再生铝：以废铝为原料，重新熔化提炼	现有技术即使用电力；如未来绿电比例提升用电的间接排放降低	电解铝的生产主要消耗电力，未见氢能替代	电解铝主要消耗电力，未见生物质替代	使用碳素阳极，电解过程排放的处理； 目前针对铝的CCUS项目极少	惰性阳极
	基本不适用	潜力较小	有一定潜力	潜力较大			

来源：RMI

重点行业之一：钢铁

钢铁行业的碳排放量占全球总量的约7%，占中国的约17%。钢铁生产工艺可分为长流程和短流程两大类，前者以铁矿石为原料，后者以废钢为原料。通过长流程工艺生产每吨粗钢约产生2吨碳排放，而短流程碳强度仅为长流程的1/3左右。

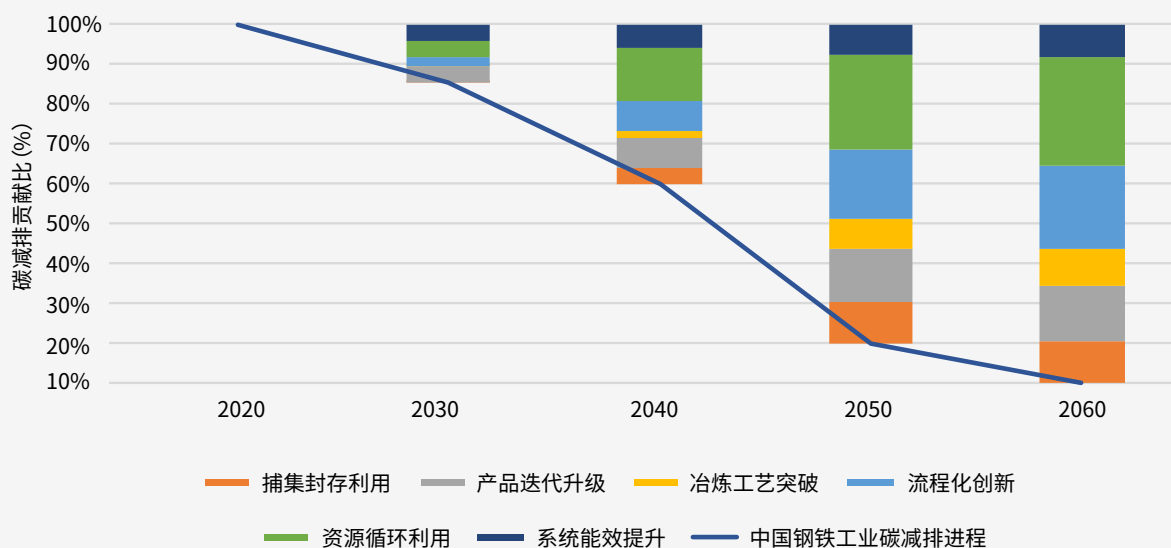
图表8. 各国钢铁生产的碳排放强度



来源：Global Efficiency Intelligence <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>

钢铁生产过程中的碳减排抓手可分为系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级和捕集封存利用。2030年前，系统能效提升将贡献30%的降碳比例，是短期内可优先发展的碳减排抓手。2040年前后，资源循环利用将发挥约40%的碳减排作用，利用废钢的短流程工艺将加速替代传统长流程工艺。而在远期的2050年至2060年，流程优化创新将与资源循环利用共同推动钢铁行业步入近零碳生产阶段。²

图表9. 中国钢铁行业碳减排路径及相应碳减排贡献



来源：中国钢铁工业协会

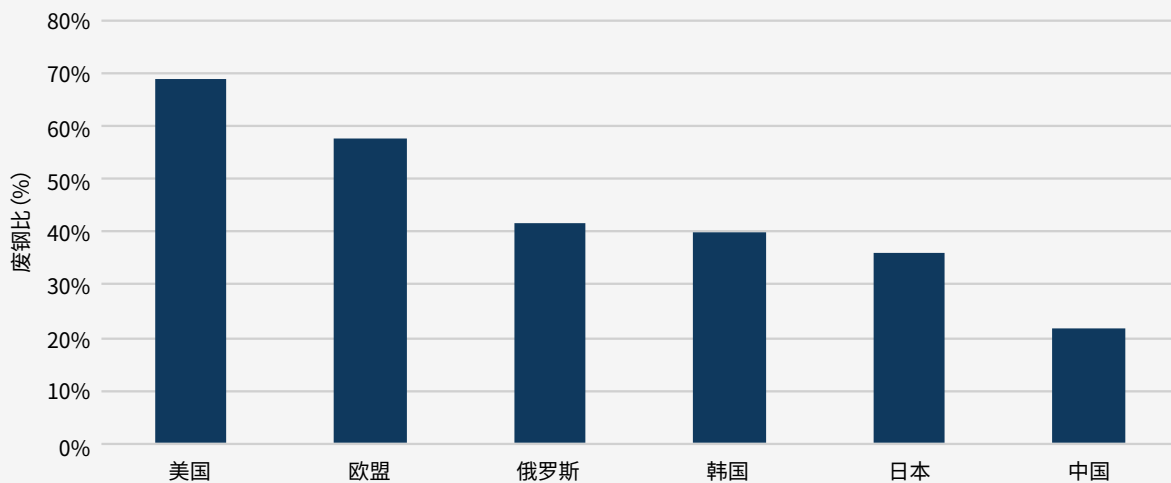
在未来40年，循环利用将贡献钢铁行业碳减排的30%，为钢铁行业最重要的降碳抓手。以基于绿氢的清洁氢冶金为代表的流程优化创新将贡献23%，仅次于循环利用。总体而言，循环利用和绿氢应用是钢铁行业碳减排的最关键抓手，也是钢铁企业转型的主要路径。尽管这两个领域的碳减排潜力在中远期才会大幅发挥，但所需的回收体系和科技创新等需要提前进行技术培育和经验积累。

循环利用

循环利用在钢铁生产中的主要体现形式是废钢的利用。目前，国内钢铁生产方式以铁矿石为原料的长流程路径为主，基于废钢的短流程路径仅占总产量的10%左右，远低于中国以外地区的平均水平50%。未来，随着国内钢铁蓄积量的积累和废钢回收体系的逐渐完善，基于废钢的短流程电炉钢生产将持续发力，并有望在2050年贡献钢铁产量的60%。³

国外钢铁行业在废钢利用方面起步较早。例如，安塞乐米塔尔公司（ArcelorMittal，简称安米公司）是世界上最大的废钢回收公司之一，每年回收约3000万吨废钢，现阶段有30%的钢铁来自废钢，且80%以上的钢铁生产工艺的边角料和副产品可被循环利用。国内情况看，钢铁企业也在废钢循环利用方面积极部署，并贡献中国废钢回收利用体系的建设。《中国宝武碳中和行动方案》明确提出“冶金资源循环利用”，将钢铁循环材料作为其中的重要举措。宝武子公司欧冶链金着力部署全国废钢的收集加工网络，成为国内市场占有率最高的废钢回收公司。

图表10. 废钢比在不同地区的差异



* 废钢比：废钢利用量与粗钢总产量的比例
来源：Bureau of International Recycling

总结国内外具有一定代表性的企业在废钢循环利用方面的实践，有以下经验可供行业、企业参考：

(1) 构建和完善针对废钢回收和循环利用的机制，包括内部的团队设置，以及外部的产业链拓展。例如，安米公司全球研发部门有专门的废钢回收团队，其在法国的Maizières研发中心致力于从含钢铁的混合废物中回收废钢的工艺研究。而在钢铁新产品研发上，安米公司也将回收属性作为重要考量因素。从产业链延伸的角度，安米公司于2022年2月完成对苏格兰金属回收公司约翰·劳里金属公司（John Lawrie Metals）的收购，以拓展其在苏格兰的废钢回收业务，作为废钢原料来源的有力补充。宝武子公司欧冶链金之于集团而言，同样是废钢作为原料重新投入钢铁生产形成闭环的有益布局。

(2) 增加配套工艺和设施的投入，为扩大废钢利用规模创造条件。例如，电炉是废钢利用的主要设备。宝武集团把高效电炉作为其规划重点，电炉产能预计从2020年的200万吨/年增加到2030年的600万吨/年以上，且重点布局对电炉冶炼汽车、硅钢用高等级薄板等新技术。在新疆巴州的绿色钢铁短流程示范项目中，宝武同时加大对绿电的部署，以更好地与废钢短流程相结合。宝武已与当地政府签订协定，建设“绿电+电炉+薄带连铸连轧”的世界首个新能源短流程“零碳工厂”示范产线。

(3) 探索钢铁生产废料的多种用途，尤其是拓展跨界的应用场景。例如，在长流程的副产品循环利用上，安米公司在法国的敦刻尔克和福斯的钢铁厂与Ecocem公司合作，将高炉铁渣作为部分替代波特兰水泥的产品，此外也在探索将铁渣用于海上风电设备的压舱物等新型应用。

绿氢

炼铁的过程需要还原剂参与反应，利用绿氢替代传统高炉-转炉长流程中的焦炭作为还原剂，可大幅降低碳排放。由于现阶段绿氢产业链尚不完善，绿氢供给不足且成本较高，国内外企业多利用工业副产氢进行氢冶金试点项目，未来将逐步过渡到基于可再生能源的绿氢应用。

目前，国内外企业均积极部署氢冶金技术实践。安米公司在其气候报告中，将绿氢直接还原铁技术作为重要的降碳路径，并且已经在西班牙、德国、法国和加拿大规划部署相关项目，其中西班牙项目将在2025年前利用绿氢和绿电生产零排放的钢铁产品。国内在氢冶金方面虽然起步相对较晚，但已有大型项目规划，预计未来将快速发展。例如，河钢集团建设年产120万吨的氢气直接还原铁示范，建成后可使二氧化碳排放量减少40%到60%。宝武集团将富氢碳循环高炉和氢基竖炉列为其碳中和行动方案中的重要举措，并预计富氢碳循环高炉将在2035年前后达到30%-50%的碳强度减排幅度，而氢基竖炉将在2040年前后达到50%-90%的碳强度减排幅度。

总结国内外具有一定代表性的企业在绿氢方面的实践，有以下经验可供行业、企业参考：

(1) 充分利用已有高炉等设备，通过设备改造培育氢气应用场景，避免资产搁浅。钢铁行业中的氢气应用方式主要有三种，高炉富氢冶炼、氢直接还原铁（氢基竖炉）和氢熔融还原铁。高炉富氢冶炼虽然减碳潜能小于氢直接还原铁和氢熔融还原铁，但可有效避免中国已有的大量高炉资产提前退役，降低钢铁企业的搁浅资产风险。以宝武集团为例，其新疆八一钢铁的富氢碳循环高炉试点工作，已达到15%的减排目标，并预计在三期试验中达到30%的减碳工艺能力。

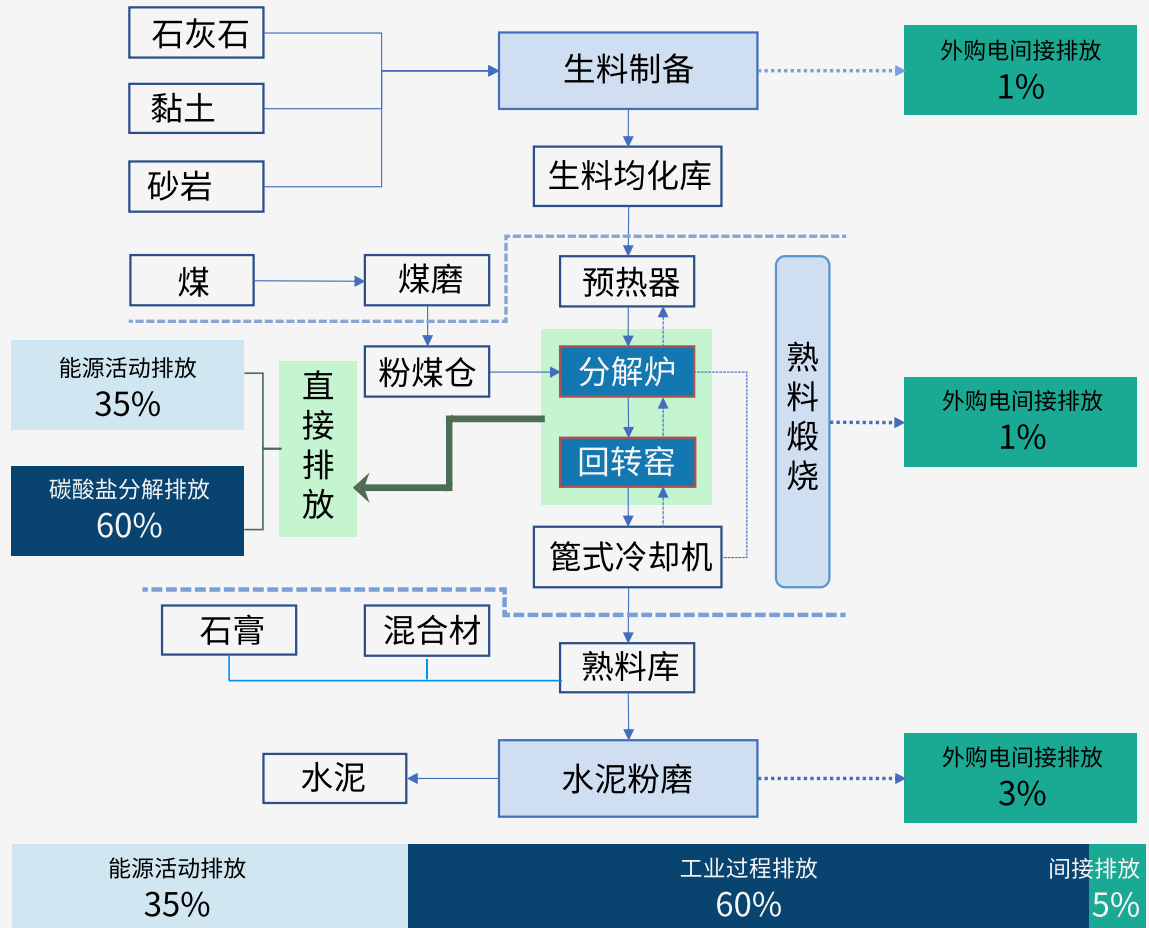
(2) 分阶段逐步增加绿氢应用，循序渐进扩大碳减排成效。河钢集团将氢冶金视为重要的低碳技术变革，根据其发布的低碳发展技术路线图，河钢氢冶金占比将在2025年、2030年和2050年分别达到7%、10%和30%。河钢将宣钢氢冶金示范工程分为两个阶段，第一阶段60万吨氢冶金项目应用基于焦炉煤气的灰氢，已于2022年末投产，而第二阶段60万吨项目将充分利用张家口当地的风电光伏优势，项目氢气来源将逐步过渡到基于可再生能源的绿氢。

(3) 参与绿氢产业的系统部署和构建，为更有效地在钢铁生产中应用绿氢做好准备。以德国的蒂森克虏伯公司（ThyssenKrupp）为例，蒂森克虏伯公司将氢能视为未来的能源载体，在绿氢的供应端和应用端双向发力。从绿氢供应端角度，蒂森克虏伯公司与壳牌公司签订了荷兰鹿特丹港的200MW大型绿氢项目的设计、采购和制造合同，该项目预计2024年投产。从绿氢应用端角度，蒂森克虏伯公司大力拓展绿氢在钢铁生产中的应用，其规划的杜伊斯堡氢直接还原铁项目将利用STEAG公司提供的绿氢冶炼钢铁，预计2025年投产。

重点行业之二: 水泥

水泥行业的碳排放占全球排放总量的约7%⁴。2020年,中国水泥行业CO₂排放量为13.7亿吨,占全国总碳排放的比例约13%,仅次于电力和钢铁行业。在水泥生产过程中,碳酸盐(主要来自石灰石)分解产生的过程排放占约60%,化石燃料燃烧及电力消耗产生的碳排放分别占约35%和5%。

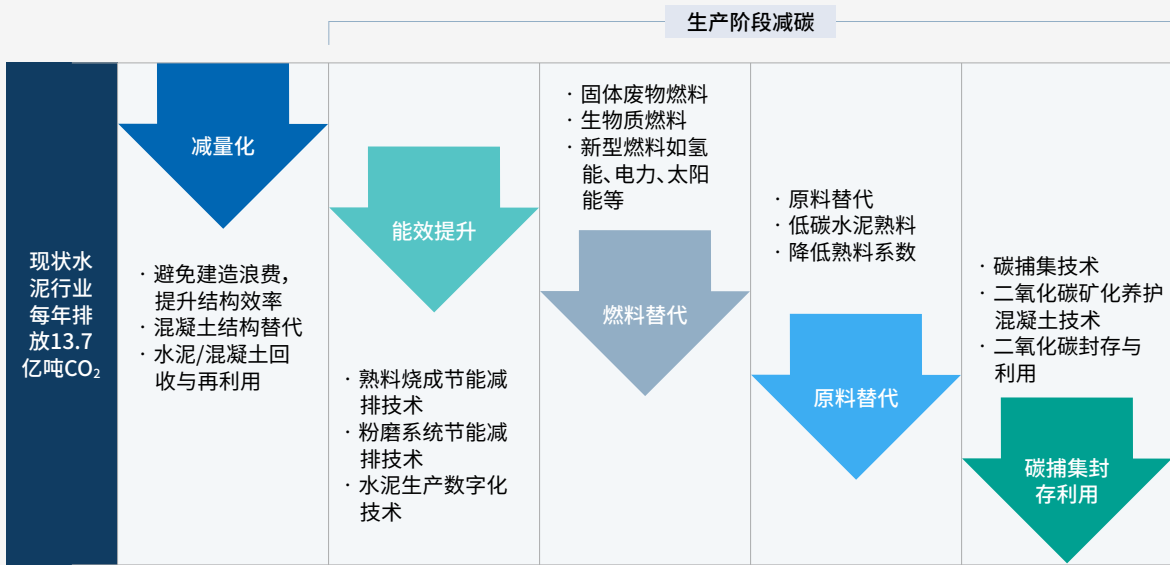
图表11. 水泥生产过程及相应碳排放



来源: 中国水泥协会, RMI

水泥生产的碳减排需要同时针对能源活动排放和生产过程排放。其中,使用低碳、零碳燃料替代化石燃料可以实现能源活动减排,而调整水泥品种结构的举措,如原料替代和降低熟料比等可以降低水泥生产的过程排放。此外,通过能效提升技术能减少燃料使用量;而CCUS技术能吸收难以通过工艺手段完全消除的CO₂排放。

图表12. 水泥生产过程的碳减排抓手

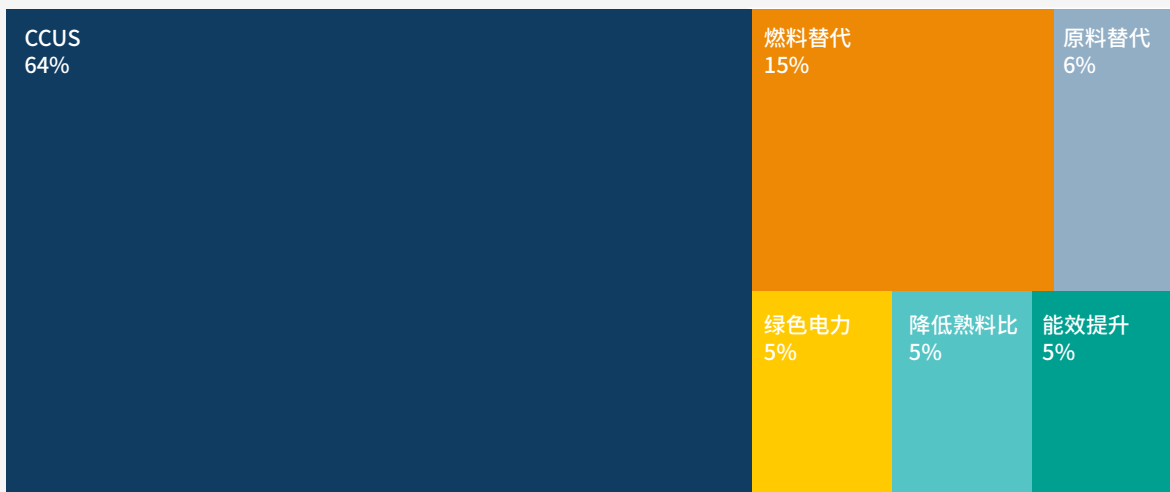


注: 箭头大小与减排潜力不成等比例关系

来源: 中国水泥协会, RMI

在燃料替代方面, 与氢能煅烧或电水泥窑等其他可用技术路径相比, 生物质和固体废弃物作为替代燃料与水泥生产过程的适配性更高, 对设备的改造要求较小, 经济成本较低, 因而前景也更为明确。此外, 水泥生产仍有约60%的碳排放来自原料中碳酸盐受热分解。由于目前尚未看到能完全替代石灰石、没有过程排放、且能大规模应用的替代工艺, 碳捕集、封存与利用 (CCUS) 是实现水泥碳中和的必要技术。从减排量的角度看, 根据RMI的测算, CCUS的减排潜力最大, 达到64%; 燃料替代次之, 减排潜力可以达到15%。

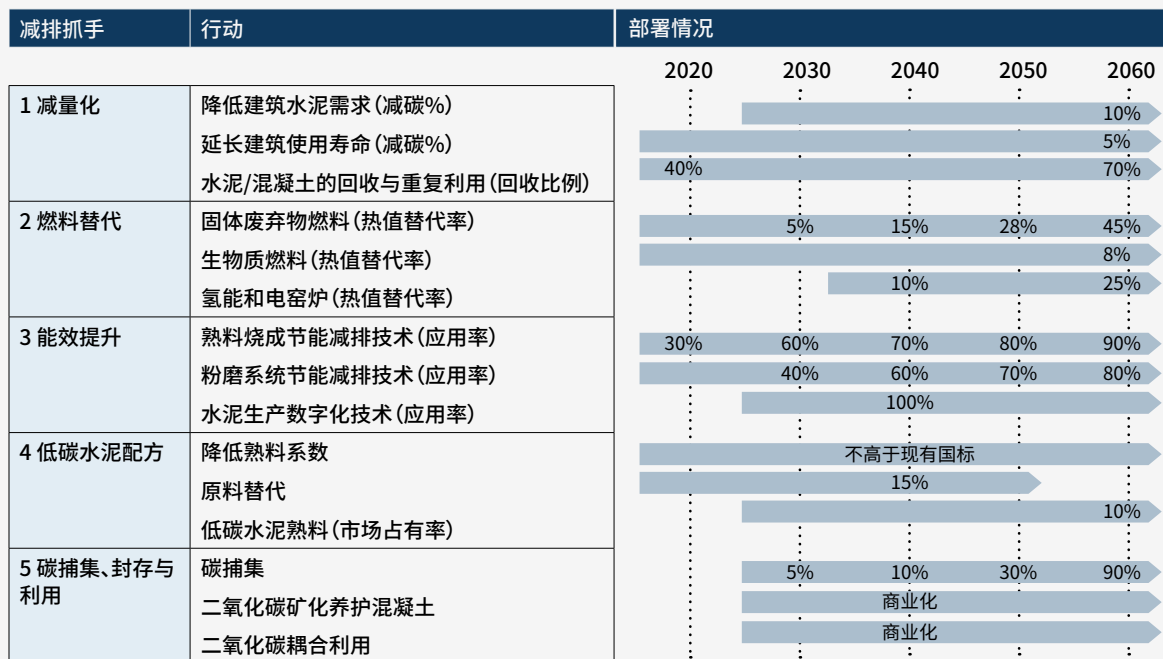
图表13. 碳中和目标下水泥行业碳减排抓手的减碳潜力



来源: RMI

从各技术路径发展预期的角度看，在近期，能效提升可以为水泥生产减碳和高质量达峰提供重要支持，而CCUS和燃料替代将在中远期发挥重要作用，其经济性也将随着技术成熟和市场机制的变化有所提升。

图表14. 中国水泥行业碳中和路线图



来源：中国水泥协会，RMI

由上述分析可以看出，无论是从减排量的角度还是技术发展预期的角度，燃料替代和CCUS都是水泥行业减排最重要的两个抓手，企业应予以充分重视。一方面，这两个技术的减排潜力最大，并分别针对燃料燃烧和过程排放环节，覆盖水泥生产排放的绝大部分；另一方面，它们作为中长期尺度上的重要技术，在当下仍需要水泥生产企业的持续投入与推进。

生物质、固体废弃物等替代燃料

在水泥生产的燃料替代方面，目前正在研发或应用的技术主要包括使用固体废物、生物质燃料、以及其他新型燃料如氢能、电力等。其中固体废物和生物质替代燃料的基础较好，在国内外均有一定实践。我国水泥工业的替代燃料发展较晚。现有技术主要是水泥窑协同处置技术，属于固体废物利用的初级阶段，为进一步开发为替代燃料奠定了基础。截止 2020 年底，我国已有约 17% 的水泥生产线配备了协同处置能力。⁵在国外尤其是欧洲，由于回收体系相对完善，发展时间较长，政策支持力度较大，水泥企业燃料替代率较高。欧盟国家水泥的燃料替代率可以达到近40%，一些领先企业可以达到近85%的替代率。从政策层面看，欧洲国家的一系列配套政策为燃料替代提供了有利条件：一方面垃圾填埋禁令催生了将废弃物转化为燃料的生产需求；另一方面替代燃料质量控制体系的建立，保证了市场中替代燃料的质量，尽可能减少了替代燃料对水泥熟料生产的影响。

例如，瑞士豪瑞水泥公司（Holcim）在全球范围内的用于产生热量的燃料替代率达到21.3%，并计划于2050年将这一比例提高至70%。再例如，豪瑞在奥地利的Retznei工厂，2021年用于产生热量的燃料替代率达到97%，86%的生产时间使用100%替代燃料。在国内，领先的水泥企业如海螺、华润和中国建材等同样在协同处置和替代燃料领域积极布局，目前已有数个项目在建或已经投产。例如，铜陵枞阳海螺水泥有限公司生物质替代燃料项目一期工程已于2020年10月建成投产。该项目是国内水泥行业首套生物质替代燃料系统，可以处理包括油菜秆、稻草等不同种类秸秆。铜陵枞阳海螺水泥有限公司生物质替代燃料项目每年利用秸秆等生物质15万吨/年，实现年节约标准煤7.3万吨。

水泥生产中的燃料替代技术本身相对成熟，目前我国主要的瓶颈在于生物质和固废等的前端回收、处理环节，以及将其制成替代燃料的相关产业链尚不成熟。结合国内外企业实践，有以下几方面经验可供行业、企业参考：

(1) 集中解决若干关键技术难点，例如处理不同品质废弃物、数字在线控制等。以瑞士豪瑞公司Retznei工厂为例，其生产设施可以处理不同品质的废弃物，以保证这些废弃物在进入系统燃烧时温度一致。协同处置中投入的全部废弃物都能得到回收或再利用，而不会产生残余。豪瑞公司也引入了智能分析系统，利用“近红外光谱技术”数字在线控制技术在进料过程中分析替代燃料的特性，并实时对燃料品质变化加以调整，以确保使用最佳燃料组合。

(2) 积极推动和参与建设替代燃料产业链系统。以铜陵市为例，包括政府、企业等在内的多参与方共同推动秸秆产业化、规模化，为生物质燃料在水泥行业的应用提供有利条件。具体措施包括：加强秸秆禁烧和综合利用的宣传，制定秸秆产业化利用奖补政策，开辟秸秆及产品的运输绿色通道；制定秸秆收储点建设、管理标准，推进农作物联合收获、捡拾打捆全程机械化，为秸秆规模化、产业化利用创造条件；制定秸秆等生物质在水泥企业燃料化应用技术标准，便于在水泥企业推广应用。⁶

(3) 为燃料替代技术的应用提供充足战略规划支持和资金投入。例如，2019年，豪瑞制定了全区域的路线图，预计到2022年在超过80个有显著减排潜力的项目上投资1.6亿瑞士法郎（12.5亿人民币）。得益于这些投资，豪瑞的欧洲工厂在燃料替代方面取得了巨大进步，欧洲工厂热值替代率达到了61%。

碳捕集、封存与利用 (CCUS)

水泥生产约 60% 的碳排放来自原料中碳酸盐受热分解。由于目前尚未有完全替代石灰石、没有过程排放且能大规模应用的替代工艺，碳捕集、封存与利用 (CCUS) 是水泥碳中和的必要技术。目前应用于水泥行业的碳捕集方法主要有富氧燃烧、钙循环、膜分离法、低碳排放强度的石灰和水泥 (Low Emission Intensity Lime and Cement, LEILAC) 等，大多处于示范和初步商业化阶段。⁷

从全球来看，水泥企业在CCUS技术上进行了广泛探索，开展诸多试点的实践。以德国的海德堡水泥为例，预计到2030年，现存CCUS项目将帮助海德堡水泥减少累计1000万吨二氧化碳排放。海德堡水泥的Brevik项目于2021年开始建设，预计2024年建成后将成为水泥行业世界上首个工业规模碳捕集设施。捕集预计将从2024年开始运行，每年捕集40万吨二氧化碳，占该生产设施排放量的50%。我国一些水泥头部企业已经开始试点CCUS 示范项目。中建材集团的青州中联水泥年产20万吨二氧化碳捕集提纯绿色减排示范项目计划投资1.98亿元，于2022年2月开工。项目将建设一条窑尾年产20万吨CO₂自富集系统和一条废气处理处置生产线，年生产8万吨工业级液体CO₂、11.5万吨食品级液体CO₂和0.5万吨干冰。

发展CCUS需要因地制宜选择技术方案，支持政策的发展也会存在地域差异。以此为基础，总结出具有共性的理念与经验，供行业与企业参考：

(1) 将碳捕集系统与水泥生产系统耦合。例如，华新水泥与湖南大学联合研发了世界首条水泥窑尾气吸碳制砖生产线，采用水泥窑尾烟气吸碳养护工艺取代传统粘土烧成制砖和混凝土灰砂砖工艺，助力水泥生产过程的碳

减排，以年产1亿块蒸养砖生产线为例，每年利用2.6万吨二氧化碳，全国推广每年减碳将达到5200万吨。⁸安徽海螺水泥白马山水泥厂则在原有碳捕集技术需要加热解吸的基础上，将水泥厂余热发电系统自产的饱和蒸汽减压降温后引入CCUS系统CO₂解吸工序，在利用余热的同时，提高其解吸效率。

(2) 积极探索与CCUS产业链上的企业的合作机会和模式。例如海德堡水泥在碳捕集技术方面与Aker碳捕集公司进行合作，在二氧化碳的运输和储存方面参与了由挪威国家石油公司（Equinor）、壳牌和道达尔能源公司正在投资的北极光项目合作，并由Equinor提供储存设备规划。

(3) 关注水泥生产中CCUS解决方案在其他应用场景的迁移。例如，海德堡水泥在Brevik项目经验的基础上进一步开展了数个可行性研究，探索100%捕集、封存水泥生产的CO₂的可能性。同时也探索这一项目经验推广至其他行业的潜力。例如，Brevik项目捕集设备的设计使其可以利用水泥生产的余热。这一技术也可以迁移到其他产生余热的工业生产中。

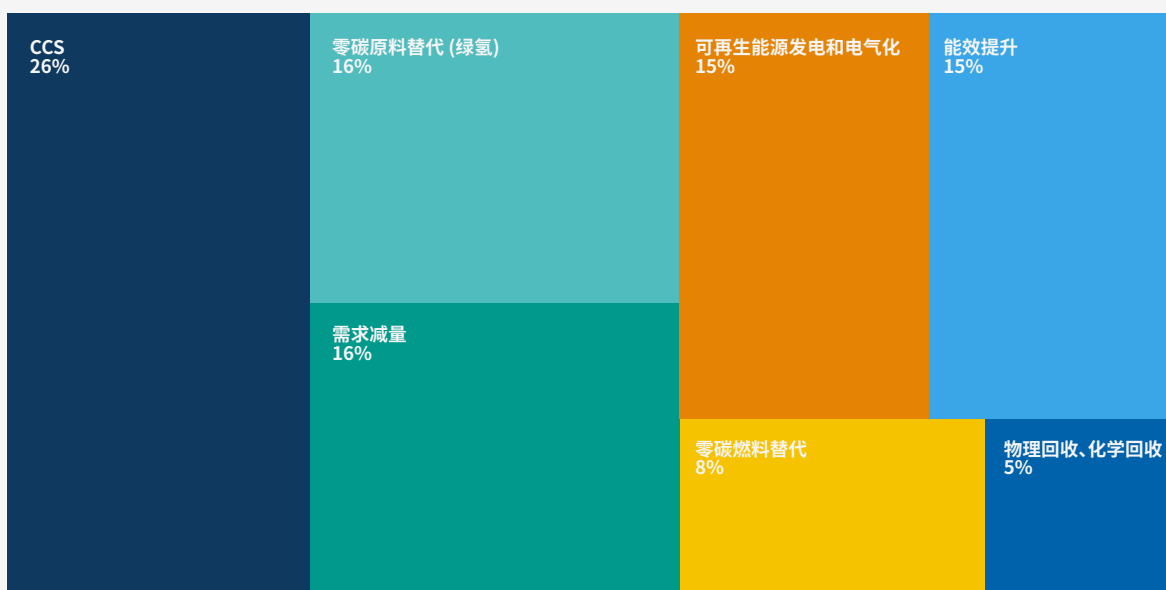
重点行业之三: 石化和化工

石化和化工行业是国民经济支柱型产业，且具备产业链条长、产品类别繁杂等特点，该行业的碳排放占全球排放总量的5.8%⁹，占中国排放总量的13%¹⁰。

实现石化和化工行业的低碳发展大体可以从供给侧和消费侧两方面展开。在供给侧，碳排放主要来自于反应过程和能源消耗，减碳路径除了传统的能效提升与节能改造之外，原料替代、燃料替代和CCUS等末端治理技术也将带来极大的减排潜力。在消费侧，减排的重点则是减少对能耗密集型产品的依赖并提升资源化利用水平，具体的减排路径包括消费减量、产品结构调整、资源循环利用等。

全球层面看，主要碳减排路径可带来的减排潜力如图表15¹¹所示，其中，基于可再生能源的减碳路径（零碳原料替代、零碳燃料替代以及可再生发电和电气化水平的提升）可贡献39%的碳减排量；消费减量和提升化学品回收率等循环经济行动将贡献近20%的碳减排量；能效提升和CCS技术将分别贡献15%和26%的碳减排量。

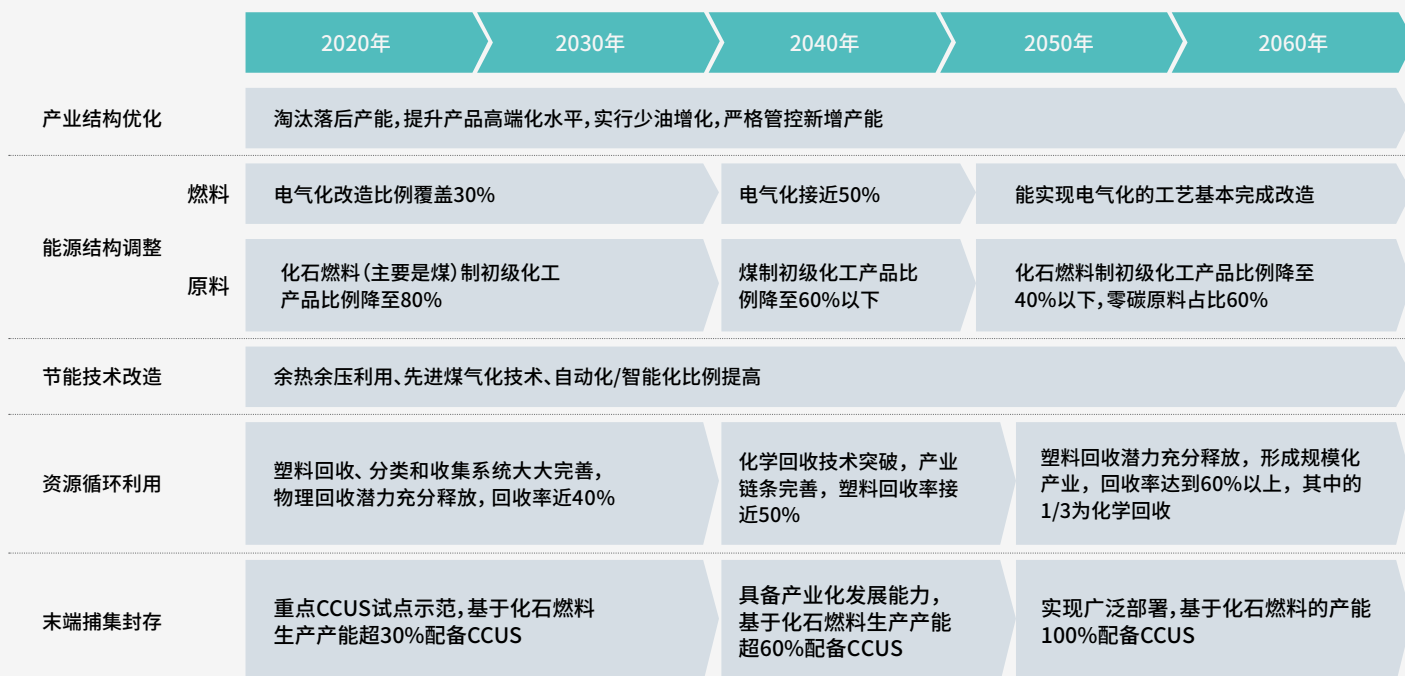
图表15. 全球石化和化工行业各碳减排抓手减碳潜力



来源: RMI

在我国，短期内，节能改造、产业结构优化与消费减量仍将是减碳的重要抓手；长期来看，能源结构调整、资源循环利用、末端捕集封存的全面推进是实现零碳发展的必要途径。到2050年，以绿氢和生物质为典型的零碳原料占比可接近60%，逐步替代现有的煤、油、气等化石原料，为生产提供清洁的碳源和氢源。余下的化石原料产能将100%配备CCUS技术，将CO₂浓度较高的工业废气回收利用或封存。资源循环利用率将显著提，更加完善的回收体系建设和化学回收技术的突破将使塑料回收率可达60%¹²。整体看，绿氢、CCUS、循环利用作为零碳转型中渗透率最高、最具减排潜力的技术将是石化和化工领域推进碳减排的重要路径。

图表16. 碳中和目标下中国石化和化工行业转型路线图¹³



来源: RMI

绿氢

石化和化工行业对氢气的需求主要来自炼油和化学品制备。根据IEA¹⁴的报告,2020年全球氢气的消耗量中有42%用于炼油、52%用于生产合成氨和甲醇,石化和化工行业的用氢量约占总需求量的94%;从氢气的供给侧看,全球仍有78%的氢气源自化石能源,而电解水制取氢气的总量仍不足氢气需求总量的1%。未来随着可再生能源成本经济性和电解水制氢技术的提升,以风电光伏为主的可再生能源制绿氢路径可为石化和化工行业带来较大的减排空间。

由于石化和化工生产是氢气既有的应用场景,只是在碳减排约束下存在绿氢等低碳、零碳氢源替代基于化石能源的氢源问题,石化和化工企业在绿氢的发展和应用上均有一定基础。从国际上看,排名前十的化工巨头均将以绿氢为终极目标的氢能发展纳入公司业务规划,以帮助实现企业碳中和目标。从国内情况看,“三桶油”均已明确推进氢能产业布局的长期战略,其中,中石化计划在加氢站建设、高纯氢提储装置、氢气储用、以及关键材料研发等方面投资逾300亿元,以推动氢能产业链的发展。

总体来看,国内外石化和化工企业在绿氢方面的部署包含了对制取、储运和应用各个环节。然而,在实际应用中,仍亟待克服短期内绿氢成本较高、工业用绿氢的规模化和连续性问题等挑战。结合国内外企业实践,有以下几方面经验可供行业、企业参考:

(1) 基于绿氢在不同应用场景中的就绪度，分阶段逐步实现规模化。例如，短期内可优先发展就绪度较高的交通通用氢场景，通过形成规模化降低绿氢成本，再过渡到后续工业应用场景中的大规模应用。以中国石化为例，公司已将氢能作为新能源业务发展的主要方向，并将在“十四五”期间大力推进氢能交通与绿氢炼化，规划建设1000座加氢站，借助其在氢气的运输、储存、加注、使用环节的基础，率先在交通领域实现产业链的贯通。同时，中石化位于新疆库车的绿氢炼化示范项目已于2021年底正式启动建设，制氢端将建设300MW的光伏电站和配套输变电设施、年产能2万吨的电解水制氢厂；储氢端将建设21万标立方的储氢球罐；输氢端将配套建设每小时2.8万标立方的输氢管线；用氢端将产出的绿氢供应塔河炼化，替代现有天然气化石能源制氢。该项目将于2023年6月建成投产，预计绿氢炼化可为石化减少48.5万吨/年的CO₂排放。

(2) 在绿氢应用发展初期，通过政府参与和产业链上下游协同，建立稳固的供需基础。以挪威的化肥生产企业雅苾（YARA）为例，该公司与法国燃气集团（ENGIE）计划于2030年在西澳大利亚共同开发并运营一座由可再生能源供电的合成氨绿色工厂，以替代对天然气制氢需求的扩张。项目前期，澳大利亚政府向该项目提供了近5000万美元的资金支持以及相应的土地许可，YARA与ENGIE将在十年间通过四期扩张逐步使绿氢和绿氨的产量规模化，为本地和亚洲市场供应生产必备的低碳原料、为发电和海运供应清洁燃料¹⁵。

(3) 发展电解水制氢技术的同时，持续研发新型制氢技术作为路径储备。可再生能源电解水制氢或许是最具潜力的氢气生产路径，然而在实际应用中，仍面临能量转换效率低、成本较高、电源供应不稳定等挑战。在研发水电解技术的同时，德国化工巨头巴斯夫（BASF）也在开发新型制氢工艺——电加热甲烷裂解技术。该技术将甲烷直接裂解为氢气和固体炭以便捕集与存储，同时该反应过程的电耗仅为电解水制氢的1/5，如果使用可再生能源为其供电，可实现二氧化碳零排放。2021年，该技术的中试反应器已在德国路德维希港建成并投入运营。

碳捕集、封存与利用（CCUS）

当前全球石化和化工行业有近六成的碳排放来自能源相关排放，近四成来自工业过程排放¹⁶。根据IEA预测，2060年全球化工行业累积碳排放的38%减排潜力可由CCUS帮助实现。其中，将工业过程中捕获的高浓度CO₂转变成反应原料将有望成为石化和化工行业脱碳的重要路径。

据全球碳捕集封存研究所¹⁷统计，截至2021年9月，全球有31个CCUS项目已投入运营和建设，CO₂捕集总量约4000万吨/年；另有102个项目处于开发阶段，建成后捕集能力可增加10700万吨/年。从技术应用方面看，大部分的CCUS部署与油气资源的开采和发电厂相结合；与化学品生产相配套的CCUS项目较少，且规模较小。中国的CCUS也在以上应用领域有了一定的基础，已投运和在建的CCUS项目以试点示范类型为主，仍处于该技术发展的早期阶段。

总体来看，对于石化和化工行业生产，CO₂排放源的较高浓度为CCUS的部署提供了较好的经济性。长期来看，随着碳减排约束力的增强，捕集、储运、应用与封存全流程经济性的优化，CCUS技术可为石化与化工行业带来较大的减排潜力。结合国内外企业实践，有以下几方面经验可供行业、企业参考：

(1) 拓宽CCUS技术在多种场景中的应用。目前，国内外企业在CCUS的应用场景上大多聚焦在成熟度较高的油气开采与发电厂尾气处理。例如，中石油已在多个油田部署二氧化碳驱油（CCUS-EOR）示范工程。其中，在大庆榆林油田开展的首个CCUS示范项目贯穿了CO₂的捕集、驱油与封存，将从天然气净化厂捕获的CO₂，经管道运输至油田进行液化，进而注入千米地下的特低渗透储层，驱出原油的同时将液态CO₂封存。未来，可进一步探索捕集的CO₂用作化工产品生产原料等方面的应用。

(2) 注重CCUS耦合基于绿氢的Power-to-X（PtX）技术发展，为化工品生产提供清洁的碳源和氢源。以冰岛碳循环国际公司（CRI）为例，该公司长期从事碳质甲醇的研发工作，已在挪威、冰岛、德国等地开展了工业捕集CO₂制甲醇的示范项目。2021年，江苏斯尔邦石化与CRI签约并将该技术引进连云港市盛虹石化产业园，该项目将利用环氧乙烷生产工艺中捕获的CO₂作为碳源，与园区内其他工艺生成的副产氢结合，生产低碳甲醇，为光伏组件中的EVA胶膜和有机玻璃提供原料。未来，氢源可逐步从副产氢转变为绿氢，从而发挥更大的碳减排潜力。

(3) 创新商业模式，协同跨行业主体形成CCUS产业集群，共享基础设施。以英国Humber工业集群为例，BP牵头Equinor、National Grid、壳牌、道达尔组成联合体，共同为园区内的碳密集型企业建设可共享的CO₂运输和封存基础设施，以帮助园内工业企业实现减排并提升基础设施投资的成本经济性。

循环利用

发展循环经济对于石化和化工行业的碳减排至关重要，产品回收再利用可有效降低对化石原料的需求。以塑料为例，尽管中国现阶段的回收利用塑料不足其消费总量的1/5，到2050年，回收利用潜力的充分发挥有望实现近40%对于初级原料乙烯需求的替代¹⁸。

从全球看，国际企业在循环利用领域的行动亮点在于对自身和供应商循环利用水平的较高要求，以及对化学回收技术的积极探索。对于国内企业，可进一步提升的领域主要为回收体系和供应链管理框架的完善。对比国内外企业所开展的行动，以下几方面经验可供行业、企业参考：

(1) 积极探索原料创新，如研发和推广可再生、可降解材料等。以中石化为例，该公司正在积极布局可再生降解材料产业的发展，并向2022年北京冬奥会提供了10万只可降解塑料袋用于赛事场馆服务和生活所需，助力“绿色冬奥”。

(2) 加速化学回收技术的研发和应用，为物理回收提供有益补充。以德国化工巨头巴斯夫（BASF）为例，2018年由BASF牵头启动了“化学循环”（ChemCycling）项目，通过化学回收的方式，将混合塑料废弃物热解转化为次级原料（例如热解废弃轮胎生产热解油），经过提纯再加工的次级原材料可被送入一体化工厂用于后续工业化学品的生产，预计回收率可达70%。

(3) 引入数字化技术，加强供应链管理。例如，巴斯夫通过其供应链管理机制，鼓励其上游企业使用生物可降解原料，并通过电子化追踪系统收集产品信息和进行废弃物管理，逐步提升其再生原料的使用率。2020年，巴斯夫开发了一套数字化解决方案，为其在售的45000款产品计算产品碳足迹（Product Carbon Footprint）。该举措在追踪并公开产品环境属性的同时，也为巴斯夫和供应商识别出持续减碳的方向和机遇。

重点行业之四：电解铝

电解铝生产的碳排放主要由电解产生的过程排放和电力使用产生的间接排放两部分组成。以2019年数据为例，中国的电解铝行业碳排放量4.1亿吨，其中自备电排放2.7亿吨、网电排放0.9亿吨、炭阳极消耗排放0.5亿吨。

铝的生产主要能源消耗为电力，因此使用绿色电力成为减排的主要抓手，占约87.8%的电力使用排放可以由使用清洁能源电力解决。要消除余下约12.2%的电解过程排放，惰性阳极的研发至关重要。此外，铝是一种具有很强可回收性的金属，而且再生铝的吨铝碳排仅为电解铝的5%，使用再生铝替代电解也将带来显著的减排效应。由于电力使用排放较大程度上依赖电力系统的清洁度，以下仅重点聚焦再生铝生产和惰性阳极技术，总结可推广的经验。

再生铝

随着技术进步，未来再生铝对电解铝的可替代性有望逐渐提升。2021年中国电解铝的吨铝碳排为12.3吨，而再生铝仅有0.68吨，为电解铝的5%。因此扩大再生铝规模可助力实现减碳目标¹⁹。

再生铝在国际和国内都有广泛布局。在我国，再生铝是铝工业重要组成部分，2019年我国生产的再生铝约占全球再生铝总量的40%左右，但仅占我国铝供应的17%左右，与美国40%、日本30%相比较小，尚有较大发展潜力²⁰。国际上领先铝企业如美铝、俄铝和海德鲁等也都给予再生铝板块积极重视。例如，CIRCAL是海德鲁的再生铝品牌，这一品牌的铝由至少75%的消费后回收再生铝制成。通过世界上最先进的铝分选技术，CIRCAL成为回收成分比例最高的铝之一。

在进一步扩大再生铝的应用方面，我们总结了以下经验和实践可供行业、企业参考：

(1) 提高再生原材料的透明性，确保其低碳来源。为了保证铝回收的透明性，海德鲁的回收过程强调区分“消费后”与“消费前”的铝。“消费后”的铝，例如窗户或饮料罐中的，其生命周期已经完成，因此碳足迹可以被认为接近于0，而对于生产过程中废弃的铝，即“消费前”的铝，则必须考虑其生产过程中的碳排放。中铝瑞闽也采取类似的策略，从原料采购前端选择绿色低碳水电铝。2021年预计采购18万吨以上有“产品碳足迹证书”的水电铝，每单位产品碳足迹仅为3.05千克二氧化碳当量。

(2) 开发先进的分拣技术。海德鲁采用了先进的回收铝的分拣与处理技术，以提高消费后回收铝的可用性。例如，在回收铝的粉碎环节使用特殊的X射线设备和其他筛选、分析方法来精确分拣不同的合金²¹；以及在熔炼炉加装分离系统及烟气处理系统，以应对废弃铝中难以处理的化学物质²²。

(3) 创新原材料回收合作模式。例如，中铝瑞闽针对不同客户群体制定了个性化的废料回收合作模式，还与国内外多家企业形成战略合作伙伴关系，回收再生其产生的铝废料、铝边角料。例如，在与东北某大型汽车业巨头合作铝废料回收项目中，三年预计回收废料近7万吨。同时，中铝瑞闽也致力于开拓国际循环经济市场，在越南、泰国等地，通过当地供应商收购废料，并将其熔铸成再生锭后销往国内，以解决我国禁止进口废料这一政策性难题²³。

惰性阳极

目前的碳素阳极工艺下，电解环节的直接碳排放约在1.47t CO₂/t Al，而采用惰性阳极可以将这一排放降至0-0.9 tCO₂/tAl。在全球范围内，惰性阳极技术起步早，但近年才出现突破性进展。2020年俄铝和Elysis惰性阳极技术基本达到工业规模，应用惰性阳极技术产出电解铝0.1775万吨²⁴。其中2018年美铝和力拓合作成立的Elysis于2021年11月宣布生产了第一批不产生直接温室气体排放的无碳铝。这批铝的生产采用了完整的工业设计，规模与目前行业中使用的小型电解槽相似。研发阶段生产的铝已经使用在奥迪和苹果的产品上，预计将在2024年进入商业化应用。

在国内，铝企业的惰性阳极技术研发起步晚，目前两家大型铝企业的试验电解槽电流强度均未达到160kA的工业规模标准，2022年4月兆丰铝业宣布在2台240kA的电解槽进行该技术试验，然而仍与Elysis的技术水平存在明显差距²⁵。

在推动惰性阳极发展方面，可参考的经验和实践包括：

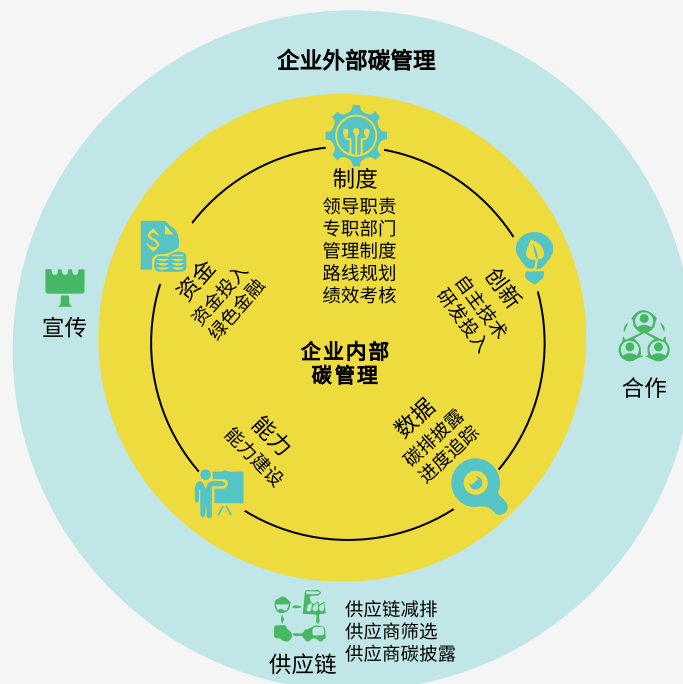
(1) 开展跨公司合作，解决关键技术瓶颈。例如，Elysis使用的技术就是建立在美铝最初开发的惰性阳极技术之上，并结合了力拓的新型电解槽设计，进行了进一步的技术迭代。

(2) 基于已有技术基础，积极推进规模化应用。例如，Elysis在积极研究更大规模电解槽惰性阳极，于2021年6月开始建设首个商业规模电解槽，争取到2023年达成商业规模的示范。电解槽可以在新建或现有冶炼厂直接替换，也可根据需要扩大规模。

企业碳管理机制

企业的碳管理机制首先包括企业对内的碳管理，包含制度建设、资金投入、创新投入、能力建设和数据管理五个维度。企业在对内做好碳管理的同时，还可以通过对外的碳管理举措进一步扩大影响力，例如管理供应链碳排放、积极宣传双碳理念和行动、延伸和建立合作伙伴关系等。

图表17. 企业碳管理机制包含的维度



来源：RMI

在企业碳管理的制度建设方面，相关行动包括：（1）领导层碳管理职责的确立：确立高层管理团队对双碳行动的责任，将双碳议题纳入最高决策层职责；（2）专职部门设置：在部门架构上设立气候变化或双碳行动的专责部门或工作小组，发挥总体统筹协调作用，加强工作推进和落实；（3）管理制度建立：建立常规化的碳管理规章制度；（4）路线规划制定：制定碳达峰与碳中和的路线图与行动方案，并且确保行动方案融入企业战略和日常运营；（5）绩效考核纳入：制定与碳排放挂钩的绩效考核制度，激励业务部门和管理团队开展减排行动。

从当前进展看，无论国内或国际头部企业都积极着手碳管理相关的制度建设。国际企业由于起步时间较早，碳管理制度建设较为普遍，同时企业ESG信息披露程度较高。国内企业开展双碳行动起步较晚，制度建设尚在探索中，但也在短时间内取得了重大进步。例如宝武集团于2022年6月发布了中国钢铁企业首份气候行动报告，详尽阐述了碳中和工作中长期目标及行动路径规划²⁶。在制度建设的5个方面中，鞍钢集团、宝武集团、中石油集团、中石化集团、中化集团、中铝集团等央企在碳管理制度和制定双碳目标2个方面均有实践，表现了企业对国家战略的积极响应和对合规性的严格要求。另一方面，国内企业在领导职责规定、专职部门设置和绩效考核纳入3个方面仍有改进空间。

案例: 中国石油集团的碳管理制度建设

中国石油集团的碳管理制度建设包含了领导职责规定、专职部门设置、管理制度建立、路线规划制定、绩效考核纳入等多个维度。集团由董事会负责制定和审核公司绿色低碳发展战略、重要行动计划、风险管理政策, 监督公司碳减排目标达成; 设立董事长牵头的新能源新材料事业发展领导小组, 加强新能源发展战略和规划制定工作。集团还成立了“战略规划和低碳管理部门”, 组织开展绿色低碳发展政策与战略研究, 分析气候风险和机遇, 结合公司低碳管理现状向公司管理层提供意见建议。2021年, 中石油下发了温室气体管理制度, 包括《集团公司关于加强温室气体排放管控工作的指导意见》《集团公司碳交易管理办法》《集团公司温室气体排放统计考核管理办法》《集团公司温室气体自愿减排项目管理办法》(简称“1+3”制度), 强化温室气体管控²⁷。路线规划方面, 集团提出2025年左右实现“碳达峰”, 2035年外供绿色零碳能源超过自身消耗的化石能源, 2050年左右实现“近零”排放的具体碳目标。同时中石油还注重双碳绩效考核, 实行碳排放总量和强度双控制度, 将总量和强度指标分解到各分子(子)公司, 把节能减排、减污降碳纳入公司管理层和各分子(子)公司主要管理人员的业绩合同。

在资金投入方面, 企业既可以设立碳行动专项资金, 用于投资绿色生产、技术研发和低碳产能扩张; 也可以拓宽外部筹资渠道, 绿色金融获得支持, 突破低碳创新中的融资问题。鼓励有条件的企业利用市场化方式设立绿色低碳产业投资基金, 推动绿色低碳产业发展。例如, 鞍钢矿业成功发行我国铁矿行业首单绿色债券, 募集资金将全部用于环保设施及技术提质改造。宝武集团组建了500亿规模的碳中和基金, 助力钢铁行业低碳冶金发展, 并发行了全国首单低碳转型债²⁸。英国安赛乐米塔尔公司向欧洲投资银行(EIB)获得2.8亿欧元的贷款, 用于为公司的去碳化目标提供研究和创新资金²⁹。德国巴斯夫(BASF)承诺投资多达40亿欧元的资金用于实现2030年的减排目标, 并在2030年后将资金承诺增加到100亿欧元³⁰。美国陶氏公司(Dow)计划每年分配约10亿美元的支出分阶段、分地点实现其全球资产的脱碳³¹。

案例: 宝武集团绿色投融资行动

宝武集团在2021年组建了500亿规模的碳中和基金, 聚焦清洁能源、绿色技术、环境保护、污染防治等方向, 为宝武实现自身及钢铁行业的低碳冶金发展助力。2021年1月, 中国宝武发布了碳达峰、碳中和时间表, 承诺2021年发布低碳冶金路线图、2023年力争实现碳达峰、2025年具备减碳30%的工艺技术能力、2035年力争减碳30%、2050年力争实现碳中和。宝武的碳中和基金是该集团实现双碳目标的重要抓手。除以上绿色技术方向外, 宝武碳中和基金还将用于参与长江经济带的转型发展, 跟踪国家清洁低碳安全高效的能源体系建设, 深度挖掘风、光等清洁能源潜在发展地区和投资市场上优质的碳中和产业项目。

2022年5月, 宝武集团还发行了全国首单低碳转型债, 发行规模5亿元, 发行期限为3年, 募集资金将全部用于子公司湛江钢铁氢基竖炉系统项目。该项目的氢基竖炉低碳冶金将用于代替常规高炉冶金流程, 远期可实现清洁能源的替代, 属于对钢铁行业碳中和具有战略意义的颠覆式技术。

创新投入可以衡量企业自主研发或获取新技术的能力, 也是企业低碳转型的必备能力。由于大多数现有技术和生产工艺无法完全满足产业脱碳需求, 企业必须投入研发新技术、新工艺、新产品、新设备, 并在转型过程中创新管理、制度和模式。国内外企业在创新投入方面已有较多实践, 例如钢铁行业中, 宝武集团、蒂森克虏伯等企业布局氢基炼钢技术; 水泥行业中, 海螺集团、冀东水泥、豪瑞(Holcim)等企业布局了替代燃料和CCUS技术; 化工行业中, 中石油、中石化等企业布局氢能和CCUS; 电解铝行业中, 中铝集团、海德鲁等企业布局了清洁能源电解铝技术。国外头部企业的创新项目类型、研发投入、技术路线、投资回报等信息较完善, 信息披露达到项目层面; 国内企业的创新披露多数处于领域层面。从创新投资额度上看, 央企代表性企业的研发投入在每年几亿元到上百亿元之间, 规模已达到国际领先水平, 但在低碳领域的创新投入仍缺少公开信息。国外企业中, 部分企业规定了将大部分研发资金用于可持续发展相关领域。例如美国陶氏公司将80%的研发项目与气候保护、循环经济和更安全的材料等可持续发展重点领域挂钩³²。

能力建设是企业增强低碳业务能力和员工低碳意识的管理手段。企业应该针对不同岗位的能力要求组织开展碳达峰碳中和相关培训，定期开展人员能力评价，建立健全碳管理专业化人才培养的机制。目前，国内企业在员工环境意识提升和技能培训方面有较好的实践。例如中铝集团会对各战略单元和下属企业进行生态环境数据报送系统专题培训；华润水泥积极开展“世界环境日”、“全国节能宣传周”、“全国低碳日”等环保主题活动，强化日常办公过程中的节能意识³³；宝武集团开展系列节能减排培训和环境经营优秀案例评选活动等³⁴。国际企业的能力建设则偏向于更有针对性的低碳业务培训。例如德国巴斯夫（BASF）负责采购的员工会接受可持续供应商管理和负责任采购的持续培训；美国陶氏公司会开展针对循环塑料网络、创新电化学氧化工艺的培训。

数据管理也是企业内部碳管理的重要基础。一方面企业应按照碳核算要求开展企业层面和产品层面的碳排放信息收集与核算，建立科学完善的监测、报告、核查（MRV）体系；另一方面企业应定期披露碳排放、产品碳足迹、双碳行动完成情况等信息，保证排放数据完整真实，接受管理部门和公众的监督，鼓励下游产业基于碳排放信息采购低碳产品。目前我国主要央企在碳排放数据披露方面普遍已有实践基础，但由于现有政策只强制纳入碳排放权交易市场配额管理的排放单位披露碳信息，因此重工业企业多属自愿披露，且披露信息范围有较大差异。2022年5月，《提高央企控股上市公司质量工作方案》提出，推动更多央企控股上市公司披露ESG专项报告，力争到2023年相关专项报告披露“全覆盖”³⁵；2022年8月，《中央企业节约能源与生态环境保护监督管理办法》也提出，中央企业应建立完善二氧化碳排放统计核算、信息披露体系。碳信息和数据的管理和披露将逐渐具备执行条件³⁶。从国际上看，多数头部企业会定期回顾碳中和目标完成情况，并在ESG报告中披露，部分国际企业还会公布配套指标的完成情况。例如瑞士豪瑞水泥公司（Holcim）不仅披露其2030年碳目标的达成情况，还会披露企业在采购低碳产品、废物回收利用、创新水泥配方、燃料替代、范围一减排、零碳试点等重点行动领域的关键绩效指标³⁷。

案例：德国巴斯夫产品碳足迹管理

德国巴斯夫集团（BASF）承诺到2030年在全球范围内企业范围一和范围二的温室气体排放量与2018年相比减少25%，同时也关注外购原材料即范围3的上游排放数据，因为该集团产品平均约70%的碳足迹来自外购原材料。自2007年以来，巴斯夫开始通过内部开发的数字解决方案，计算在全球销售的约45,000款产品的产品碳足迹。2021年，巴斯夫完成其所有销售产品的碳足迹测算，是首家向客户提供所有在售产品个别碳足迹的大型化工企业。其产品碳足迹计算基于生产网络中收集的大量排放数据以及可靠的采购原材料和购买能源的平均数据，且计算方法遵循生命周期分析的一般标准，如ISO 14044和ISO 14067以及温室气体协议产品标准。这些碳信息披露使其能够为客户提供更透明的二氧化碳排放数据³⁸。

同时巴斯夫也邀请供应商加入供应商二氧化碳管理计划，以提高外购原材料的碳排放透明度。在该计划的第一阶段，巴斯夫为供应商共享产品碳足迹评估方法及工具；在第二阶段，其将与供应商共同明确降低温室气体排放的举措和目标，以实现供应链减排。

企业对外碳管理最重要的方面是供应链碳管理。企业碳管理的内容不应限于法人边界内的碳排放，也应从全产业链角度对上下游减排进行统筹考虑，特别是对于范围二、范围三排放占主体的企业。对重工业企业而言，企业供应链碳管理的最佳实践包括纳入供应链环节碳排放核算与管理；筛选低碳供应商；指定绿色采购政策，尤其是采购绿电和低碳原材料；并要求供应商披露碳排放信息。目前我国主要央企对供应链的碳管理处于起步阶段，已有的基础包括绿色采购政策，以及基于环境认证、节能认证的供应商筛选规范等。但目前除外购电力外，供应链其他环节的碳排放并未普遍纳入企业碳排放核算范围，企业对供应商的管理中，对碳因素的考虑仍有待增强。国际企业中，已有较多企业明确规定了供应链减碳要求。钢铁企业安赛乐米塔尔、蒂森克虏伯，化工企业巴斯夫、陶氏，铝业企业海德鲁，水泥企业豪瑞等都提出了供应商碳管理要求与措施。以德国巴斯夫为例，该企业要求到2025年重新评估时，80%供应商的可持续发展绩效有所改善；要求供应商提供产品碳足迹数据，并与供应商紧密合作，收集原材料数据提高透明度³⁹。

案例：挪威海德鲁公司 (Norsk Hydro) 的供应链碳管理

挪威海德鲁公司是全球最大的铝业企业之一，其气候目标是到2030年减少30%的CO₂排放。在其气候战略中，绿色采购是重要的组成部分之一。虽然范围三排放在海德鲁的金属生产总排放量中只占一小部分，但该企业从外部供应商购买了大量的冷金属和废铝，以增加再生铝生产。海德鲁认为再生铝的碳足迹需要考虑回收铝的来源；如果在计算企业范围三碳排放时不考虑回收废料的固有碳足迹，这种核算方法是不准确的。在此基础上，海德鲁明确提出了采购低碳电力和低碳回收铝的政策，例如其挪威工厂已100%使用绿色电力，并且要求评定回收废铝边角料的来源和碳足迹，有意识地采购碳足迹较低的金属。得益于这一系列绿色采购举措，海德鲁生产的原生铝碳强度为4 kgCO₂e/kg，不到目前欧洲平均值的一半、全球平均值的四分之一，处于世界领先水平；海德鲁的范围三排放放在2018-2021年间减少了18%⁴⁰。

宣传指企业将自己的碳行动向公众传播的过程，能提高企业的公众形象、提升企业碳行动透明度和曝光度、增进行业共识；企业还可以针对消费者推广低碳产品，增强消费者信心，扩大低碳产品市场。宣传是国内外企业普遍执行较好的对外碳管理维度。国内外头部企业都积极采用官网、媒体、报告发布、消费者宣传等方式增进大众对本企业气候责任的认识。

合作指企业为创新低碳技术、开拓低碳市场、形成业内共识、扩大行动影响力而开展的与外部机构的联合行动。企业双碳合作可以在横向和纵向维度上展开。横向合作即同行业跨机构的合作，能促进产品研发、形成行业共识，具体形式有校企合作、企业联盟、国际交流等。纵向合作即连接产业链上下游的合作，能突破行业局限、优化产业布局，如能源行业、碳捕集行业与工业行业的耦合、工业共生体、基础设施共建共享等。合作也是国内外企业普遍执行较好的碳管理维度，各头部企业都积极探索了丰富的合作形式。

在企业碳管理方面，2022年9月，中国企业联合会、中关村中慧先进制造产业联盟联合发布了《企业碳达峰碳中和管理 通用要求及评价指南》（T/CECCDEA 001-2022、T/CMS 001-2022）团体标准，这也是国内首个企业碳达峰碳中和管理团体标准。该标准由中国企业管理科学基金会、中关村中慧先进制造产业联盟、中国船级社质量认证有限公司、北京鉴衡认证中心有限公司、落基山研究所、国网能源研究院有限公司、中国石油化工集团有限公司、中国华能集团有限公司能源研究院、中国海洋石油集团有限公司等54家企业机构参与起草，研究建立了一套系统科学且具有可操作性的企业双碳管理规范，以促进企业系统、科学、有效地开展双碳管理工作。该团体标准契合了《中央企业碳达峰行动方案编制指南》（征求意见稿）对央企的要求，支持企业制定出切实可行的“一企一策”行动方案。目前，根据该标准，在“完整性”、“合规性”、“科学性”、“前瞻性”和“可操作性”等维度下，已形成以国网杭州供电公司和江苏亨通高压海缆有限公司为典型的试评价案例。该标准在编制和试评价阶段，也得到了工业和信息化部、国有资产监督管理委员会等部委和各界企业的支持和指导。

四、行动建议：加速转型系统构建，发挥企业领导力

钢铁、水泥、石化和化工、电解铝属于能耗较大、排放较高的重工业行业，在国家碳达峰、碳中和进程中承担更加关键的责任。结合PTAM框架对企业排放现状、战略目标、降碳行动、管理机制等方面关键举措的梳理，以及对国际、国内具有代表性企业经验实践的分析，本研究从六个方面，提出加速转型系统构建，从而进一步发挥企业碳减排行动力的建议：

企业需制定有足够雄心且符合实际、切实可行的碳达峰和碳中和“两图一表”（路线图、施工图、时间表）。“两图一表”制定中应包括范围、步骤和重点内容等。此外，强调因地制宜，在参考借鉴国外先进经验的同时，充分考虑国内外行业差异。例如，与国外相比，中国石化和化工行业企业涉及的产业链更长，业务范围较大“两图一表”中应包含对不同产业链环节的考虑。国内石化和化工企业多有勘探开发、炼油、化工、非油气等多项业务单元，可考虑分业务线提出转型规划，以增强转型的可执行性。

统一碳排放的核算、核查和上报机制，加强数据基础等能力建设，并加速碳核算从企业层面到产品层面的延伸发展。现阶段重工业企业的碳排放核算方法、排放因子、核查机制等以地方碳市场或企业主导为主，兼容性和标准性有待提升。有关部门应尽快制定统一规范的碳排放管理体系，加速重工业企业纳入全国碳市场。对产业链相对简单的行业，提出更标准、更高效的碳核算方法，并尽早投入使用，为产业链相对复杂的行业提供充分借鉴。在数据基础能力建设方面，一方面应鼓励应用现场数据，增加数据准确性；另一方面，应增强原始数据积累，以便推行精细化的碳核算方法。此外，基于不断完善的基础数据，加速碳核算从企业层面逐步发展到产品层面，促进上下游企业对碳信息的同步掌握。

头部企业宜发挥模范带头作用，带动产业链上下游企业共同探索和形成有利于协同效应发挥的商业模式。目前，重工业深度脱碳所需的颠覆性解决方案所处阶段较早，短期内成本较高，发展条件尚不完善，需要产业链各环节企业共同形成打开早期市场的良性循环。中国的重工业头部企业多为国资背景，规模较大且资源优势较多。头部企业资源优势需被充分调动，先行试验出适应中国特色的转型路径，并带动产业链上下游相关方或与之形成紧密协同关系，推动全行业的转型进程。

行业内企业宜加速形成技术合作研发等资源整合机制，发挥合作效应，形成有效合力。推动行业内的企业对低碳、零碳发展路径形成共识迫在眉睫，一方面，要发挥行业协会或龙头企业的牵头作用，加强技术研发资源共享，形成规模效应快速部署低碳技术，避免企业间的重复工作和恶性竞争；同时，充分激活“专精特新”企业的创新活力，通过跨行业跨企业类型的合作模式，实现技术创新的优势互补。中国的重工业企业数量众多，目前仍不乏规模较小、营收较低的企业。行业内的高效合作将成为中小企业的转型加速器。

加速构建和完善碳市场等市场机制，促进传统高碳生产路径的碳成本内部化，降低低碳、零碳生产路径的相对成本。重工业相对其他行业降碳难度较大，不同碳减排抓手在不同行业中的应用优先级存在差异。对于一些碳减排手段，随着技术的进步，低碳、零碳路径有望比传统路径更具有经济性，例如绿氢炼钢之于传统的长流程炼钢、绿氢替代化石能源作为化工生产原料等。这些路径在成本条件具备时，会更自然地成为企业碳减排的选择。而对于另一些碳减排手段，可能不可避免地较传统路径成本更高，例如水泥生产中，用于消除过程碳排放的碳捕集和封存使得零碳生产路径具有较高的绿色溢价。碳市场等市场机制需发挥作用，调整低碳、零碳路径对传统路径的相对成本水平，主动引导企业选择低碳、零碳的生产路径。

注重绿氢、CCUS、再生资源利用等重点减碳抓手的全产业链培育，为各重工业行业企业落实并深化碳减排行动创造条件。尽管各行业的具体碳减排路径不尽相同，但重点减碳抓手有一定共性。例如，清洁氢冶金和化工生产零碳原料替代需要绿氢的大规模、廉价、稳定供应，再生钢铁、铝和塑料的规模化发展需要循环经济领域中完善的回收体系构建，而水泥和其他行业中CCUS的规模化发展则需要系统的二氧化碳运输和封存基础设施。对重点减碳抓手的全产业链培育需要统一、系统的设计和落实，为不同重工业脱碳应用场景提供条件。

参考文献

- 1 Net Zero Tracker. <https://zerotracker.net/>
- 2 中国钢铁工业协会, 钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图, 2022.
- 3 RMI, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 2021.
- 4 Mission Possible Partnership, Low-Carbon Concrete and Construction: A Review of Green Public Procurement Programmes, 2022, <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/06/LowCarbonConcreteandConstruction.pdf>
- 5 RMI, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022.
- 6 数字水泥, 铜陵枞阳海螺水泥项目是国内水泥业首套生物质替代燃料系统, 2021, <http://www.dcement.com/Print.aspx?id=170107>
- 7 RMI, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022.
- 8 华新水泥股份有限公司, 世界首条水泥窑尾气吸碳制砖生产线在武穴工业园成功运行, 2021, <https://www.huaxincem.com/view/4966.html>
- 9 Our World In Data, Emission by Sector, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- 10 RMI, 碳中和目标下的中国化工零碳之路, 2022.
- 11 Saygin, D.; Gielen, D. Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector. *Energies* 2021, <https://doi.org/10.3390/en14133772>
- 12 RMI, 碳中和目标下的中国化工零碳之路, 2022.
- 13 RMI, 碳中和目标下的中国化工零碳之路, 2022.
- 14 IEA, Hydrogen, 2022, <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- 15 ENGIE-YARA Renewable Hydrogen and Ammonia Deployment in Pilbara, 2020, <https://arena.gov.au/assets/2020/11/engie-yara-renewable-hydrogen-and-ammonia-deployment-in-pilbara.pdf>
- 16 Our World In Data, Emission by Sector, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- 17 Global CCS Institute, Global Status of CCS: 2021, 2021.
- 18 RMI, 碳中和目标下的中国化工零碳之路, 2022
- 19 Mission Possible Partnership, 埃森哲, 中国铝行业低碳转型技术路线, 2022
- 20 中国有色金属工业协会, 铝冶炼行业二氧化碳排放达峰方案研究报告, 2021
- 21 Hydro, Better sorting means better recycling, <https://www.hydro.com/en/media/news/2016/better-sorting-means-better-recycling/>
- 22 Nick Lazzaro, INTERVIEW: Norsk Hydro's Michigan plant poised to grow US aluminum PCS recycling: CEO, S&P Global, 2022, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/zh/market-insights/latest-news/energy-transition/042122-interview-norsk-hydro-michigan-plant-poised-to-grow-us-aluminum-pcs-recycling-ceo>
- 23 闫臣, 瑞闽之绿——中铝瑞闽股份有限公司循环经济项目建设纪实, 中国有色网, 2021, <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=429826>
- 24 Mission Possible Partnership, 埃森哲, 中国铝行业低碳转型技术路线, 2022
- 25 Mission Possible Partnership, 埃森哲, 中国铝行业低碳转型技术路线, 2022
- 26 中国钢企首份气候行动报告出炉: 宝钢从六方面推进绿色化进程 https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_18727118
- 27 中国石油天然气股份有限公司. 2021环境、社会和治理报告. <http://www.petrochina.com.cn/petrochina/xhtml/images/shyhj/2021esgcn.pdf>

- 28 中国宝武发起国内规模最大碳中和主题基金, 总规模500亿元。https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13595045
- 29 ArcelorMittal and the EIB announce €280 million of funding for research and innovation supporting the steel company's decarbonisation objectives. <https://www.eib.org/en/press/all/2021-315-arcelormittal-and-the-eib-announce-eur280m-of-funding-for-research-and-innovation-supporting-the-steel-company-s-decarbonisation-objectives>
- 30 Chemicals giant BASF, spurred on by customers, allocates up to \$4.7 billion for CO₂ cuts. <https://www.reuters.com/article/us-basf-carbon-idUSKBN2B11CK>
- 31 Dow to Invest \$1 Billion per Year to Decarbonize its Business. <https://www.esgtoday.com/dow-to-invest-1-billion-per-year-to-decarbonize-its-business/>
- 32 Dow Chemical Company. 2021 ENVIRONMENTAL, SOCIAL & GOVERNANCE REPORT. <https://corporate.dow.com/content/dam/corp/documents/about/066-00397-01-2021-esg-report.pdf>
- 33 华润水泥. 华润集团2021年度可持续发展报告. <https://www.crc.com.hk/responsibility/report/202206/P020220630590775232670.pdf>
- 34 2019中国宝武钢铁集团有限公司社会责任报告. <https://res.baowugroup.com/attach/2020/09/07/549b00d5f4a24a279176bb3d8584340d.pdf>
- 35 国资委. 提高央企控股上市公司质量工作方案. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/27/content_5692621.htm
- 36 国资委. 国务院国有资产监督管理委员会令41号. http://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5710616.htm
- 37 Holcim. Climate Report 2022. <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-04/08042022-holcim-climate-report-2022.pdf>
- 38 巴斯夫2021年企业碳足迹. <https://www.basf.com/cn/zh/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/corporate-carbon-footprint.html>
- 39 BASF. BASF Report 2021 - Supplier Management. <https://report.basf.com/2021/en/managements-report/sustainability-along-the-value-chain/responsible-procurement/supplier-management.html>
- 40 Norsk Hydro. Annual report 2021. <https://www.hydro.com/en/investors/reports-and-presentations/annual-reports/annual-report-2021/>

落基山研究所，中国企业联合会企业绿色低碳发展推进工作委员会，中国企业管理科学基金会，
企业碳中和：战略选择、行动框架及最佳实践——以重工业为例，2023

RMI 重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明，本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2023年6月，落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。