



中国建筑材料科学研究总院有限公司
China Building Materials Academy Co., Ltd.



中国水泥行业碳中和路径研究

A Study on the Carbon Neutrality Pathways of China's Cement Industry

中国建筑材料科学研究总院有限公司

2023.7.17

China Building Materials Academy Co., Ltd.
July 17, 2023

关于作者

(作者姓名、单位和职务、简短介绍及联系方式(邮箱))

何捷	教授级高工	hejie2007@139.com
崔敬轩	高级工程师	cuijingxuan87@163.com
聂卿	教授级高工	nieqing@126.com
萧瑛	教授级高工	13911154918@139.com
倪亚玲	助理工程师	243876811@qq.com

ABOUT THE AUTHORS

(Name, title, organization, brief introduction and contact information (email address))

He Jie	Professor	CBMA	hejie2007@139.com
Cui Jingxuan	Senior Engineer	CBMA	cuijingxuan87@163.com
Nie Qing	Professor	CBMA	nieqing@126.com
Xiao Ying	Professor	CBMA	13911154918@139.com
Ni Yaling	Assistant Engineer	CBMA	243876811@qq.com

致谢

本研究由【中国建筑材料科学研究总院有限公司】统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

本研究是【能源基金会工业项目支持的课题，重点研究中国水泥行业碳中和路径】。

在项目研究过程中，研究团队得到了【中国水泥协会、生态环境部环境规划院、华新水泥股份有限公司、唐山冀东水泥股份有限公司、武安市新峰水泥有限责任公司】的大力支持，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下专家在项目研究过程中作出的贡献：

- 【王郁涛 中国水泥协会】
- 【范永斌 中国水泥协会】
- 【严刚 生态环境部环境规划院】
- 【陈潇君 生态环境部环境规划院】
- 【李叶青 华新水泥股份有限公司】
- 【杨宏兵 华新水泥股份有限公司】
- 【孔庆辉 唐山冀东水泥股份有限公司】
- 【李衍 唐山冀东水泥股份有限公司】
- 【田海奎 武安市新峰水泥有限责任公司】

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of [China Building Materials Academy Co., Ltd.] and is funded by Energy Foundation China.

This report is [part of the research project under Energy Foundation China's Industry Program, which is Research on Carbon Neutrality Pathways of China's Cement Industry]

The team is grateful for the generous support it received throughout this research from [China Cement Association, Chinese Academy of Environmental Planning, Huaxin Cement Co., Ltd., Tangshan Jidong Cement Co., Ltd., Wu'an Xinfeng Cement Co., Ltd].

The team would like to thank the following experts for their contribution to this research:

[Wang Yutao, China Cement Association]

[Fan Yongbin, China Cement Association]

[Yan Gang, Chinese Academy of Environmental Planning]

[Chen Xiaojun, Chinese Academy of Environmental Planning]

[Li Yeqing, Huaxin Cement Co., Ltd.]

[Yang Hongbing, Huaxin Cement Co., Ltd.]

[Kong Qinghui, Tangshan Jidong Cement Co., Ltd.]

[Li Yan, Tangshan Jidong Cement Co., Ltd.]

[Tian Haikui, Wu'an Xinfeng Cement Co., Ltd.]

目录

1. 中国水泥行业发展现状.....	1
1.1. 产量进入高位平台期.....	1
1.2. 消费集中在房地产和基础设施建设领域.....	1
1.3. 熟料进口量小幅波动.....	2
1.4. 熟料产能过剩局面仍未改变.....	3
1.5. 技术装备水平短期内不具备跨越式发展可能.....	4
2. 水泥行业碳排放现状.....	4
2.1. 工艺过程 CO ₂ 排放 (E _{过程})	4
2.2. 燃料燃烧 CO ₂ 排放 (E _{燃烧})	5
2.3. 电力消耗间接 CO ₂ 排放 (E _{间接})	5
2.4. 原材料及产品运输 CO ₂ 排放	6
2.5. 单位水泥熟料 CO ₂ 排放总量 (碳排放强度 E _{CO₂})	6
2.6. 2007 年-2022 年中国水泥行业碳排放分析.....	6
3. 水泥行业碳中和路径及关键减碳技术.....	7
3.1. 碳中和愿景下熟料与水泥需求.....	9
3.1.1. 水泥熟料消费关联因素趋势分析.....	10
1) 经济发展形势预测.....	10
2) 产业结构形势分析.....	10
3) 人口及城镇化发展形势.....	10
4) 固定资产投资趋势.....	11
3.1.2. 水泥熟料与水泥消费量预测结果.....	11
3.2. 燃料替代情景.....	12
3.2.1. 固体废物燃料.....	12
3.2.2. 生物质燃料.....	14
3.2.3. 其他新型燃料.....	14
3.2.4. 燃料替代情景下的碳减排效果.....	14

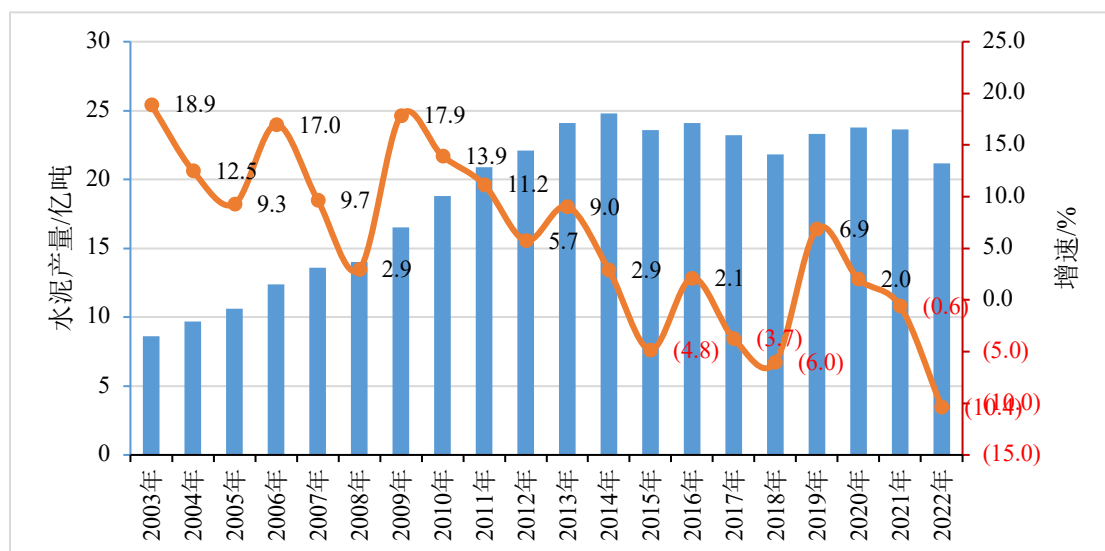
3.3. 能效提升情景.....	16
3.4. 低碳水泥情景.....	18
3.5. CCUS 技术情景	20
3.5.1. 国内外发展现状.....	20
3.5.2. CCUS 政策导向	23
3.5.3. 实现碳中和目标过程中 CCUS 作用	26
3.5.4. CCUS 技术应用预测	27
3.6. 碳中和创新技术.....	29
3.6.1. 外燃式旋窑碳捕集技术.....	30
3.6.2. 悬浮煅烧技术.....	31
3.6.3. 全氧燃烧技术.....	31
3.6.4. 跨行业联合创新颠覆性新技术.....	31
3.7. 水泥行业碳中和技术路径.....	32
4. 政策建议.....	34
4.1. 压减水泥低效、高排放产能.....	34
4.2. 促进循环经济，实现固体废物燃料的大规模生产和应用.....	35
4.3. 注重高质量发展，将效率提升做到极致.....	35
4.4. 加大水泥行业 CCUS 技术研发投入	35
4.5. 推动行业实施碳排放强度控制及碳排放权交易.....	36
4.6. 强有力的政策支持和财务激励.....	36
参考文献.....	37

1. 中国水泥行业发展现状

1.1. 产量进入高位平台期

自 1985 年以来，我国水泥产量已连续 38 年稳居世界第一，目前产量约占世界水泥总产量的 55%左右。2014 年我国水泥产量达到阶段性高点 24.8 亿吨，2015 年-2022 年，全国水泥产量基本在 22-24 亿吨波动。但是，由于近年水泥产品结构变化，高标号水泥使用比例增长，在水泥消费量进入平台期的同时，水泥熟料消费量仍有小幅增加。

受疫情和市场因素影响，2022 年全国水泥产量 21.18 亿吨，降至近十年以来的最低值，创下自 1969 年以来最大降幅，同比降幅首次达到两位数水平。但是人均水泥消费量约 1500 千克，依然远高于发达国家人均 220-500 千克的水泥消费峰值。



数据来源：国家统计局

图 1 2003-2022 年中国水泥产量及增速情况（20 年）

1.2. 消费集中在房地产和基础设施建设领域

水泥应用领域几乎涉及 20 个国民经济行业门类，房地产（40-45%）和基础设施建设（35-40%）是水泥消费的最重要领域。其中，房地产投资与水泥消费呈正相关关系，其对水泥消费的影响更加直接，甚至成为部分地区影响水泥消费需求的主导因素。

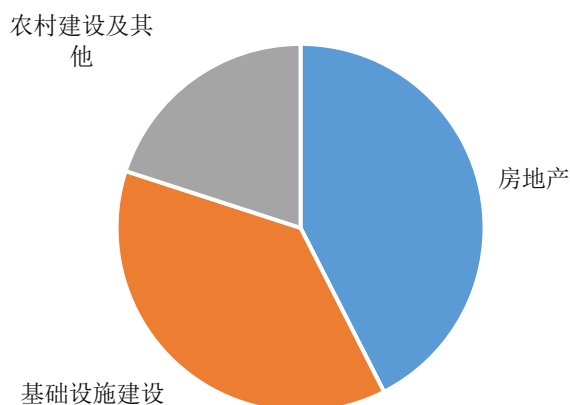


图 2 水泥消费需求构成

1.3. 熟料进口量小幅波动

中国是水泥生产与消费大国，水泥熟料的进出口量小幅波动，存在不确定性，目前总量较小，对碳排放影响有限。

2017 年以前，我国一直是水泥出口远高于进口的国家，进口量一直保持在 300 万吨以下。自 2018 年以来，水泥行业实施“错峰生产”、“停窑限产”等政策措施，造成了水泥区域性、阶段性短缺和价格高位运行，为水泥产能过剩的东南亚国家向中国出口水泥创造了契机。

2018 年，对于中国水泥贸易是个特殊的年份，作为全球最大的水泥需求市场，中国从水泥出口远高于进口的国家，转变为一个水泥进口国。2018 年进口总量为 1363 万吨，高于出口总量 459 万吨。2020 年水泥熟料进口规模达到历史最高峰，约占全国水泥熟料消费量的 2.1%。越南是我国水泥熟料进口数量最多的国家，2021 年占比最高达 80.65%。

进入 2022 年，我国水泥熟料价格持续下行，叠加海运费的大幅提高，以及主要进口来源国越南等地，以美元结算导致双向挤压，进口熟料已经无利润空间。根据海关总署统计，2022 年我国进口水泥熟料总量为 838.48 万吨，同比下降 69.75%。

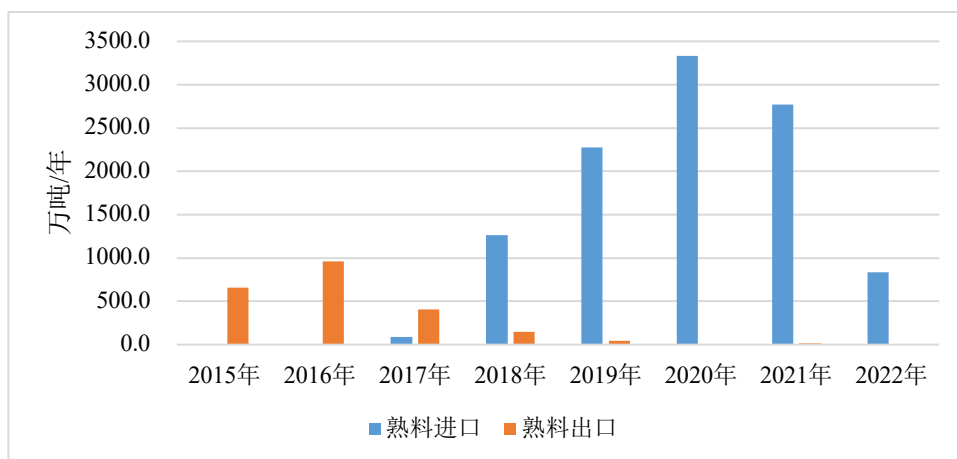


图 3 2015 年-2022 年中国水泥熟料进出口规模变化

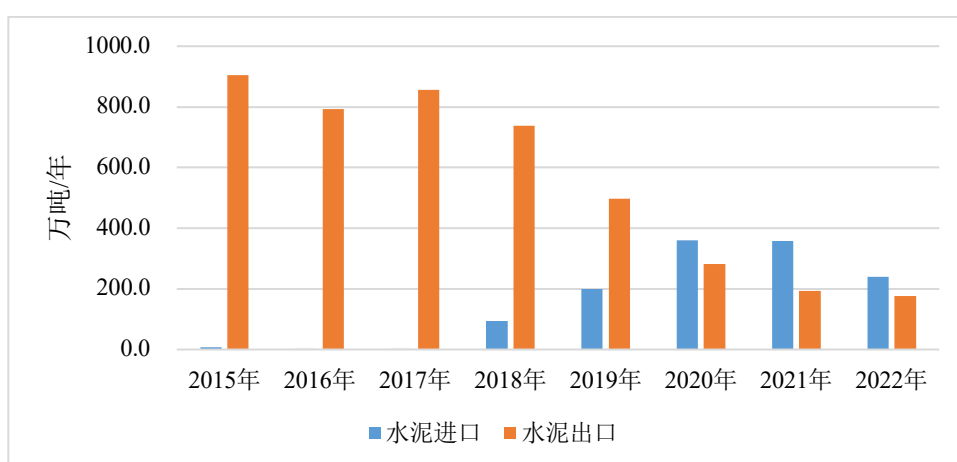
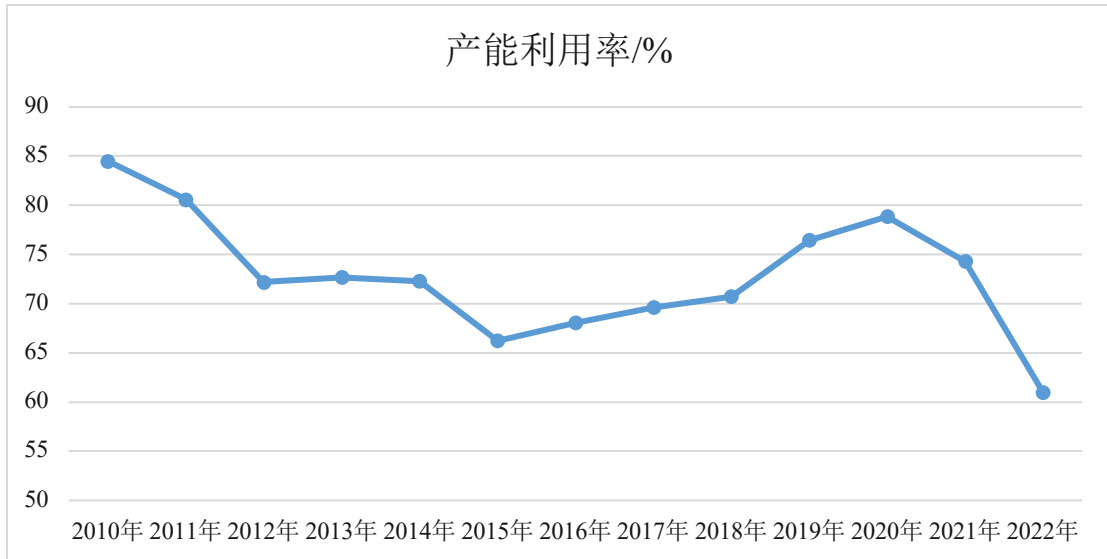


图 4 2015 年-2022 年中国水泥进出口规模变化

1.4. 熟料产能过剩局面仍未改变

截止到 2022 年底，全国新型干法水泥生产线累计共有 1572 条（注：剔除已关停和拆除生产线，不包括日产 700 吨以下规模生产线），设计熟料年产能 18.4 亿吨，实际熟料年产能超过 20 亿吨。从数据来看，新型干法熟料设计产能较 2021 年略有下降，但总量依旧处于高位。

水泥熟料产能利用率的区域差异较大，2022 年熟料产能利用率 61%，创近年来新低，其中华东、中南、西南地区产能利用率在 80%左右，而西北、华北、东北不足 50%，产能过剩局面依然没有改变。



数据来源：中国水泥协会信息研究中心

图 5 2010 年-2022 年全国水泥熟料产能利用率

1.5. 技术装备水平短期内不具备跨越式发展可能

水泥生产技术自 1824 年诞生以来，历经多次变革。从最初的间歇作业的土立窑到 1885 年的回转窑；从 1930 年德国的立波尔窑到 1950 年联邦德国洪堡公司的悬浮预热器窑；到 1971 年日本在悬浮预热技术的基础上研究成功窑外分解新型干法窑。随着新型干法水泥技术的出现，彻底改变了生产技术格局和发展进程。目前，中国水泥行业生产线近 100%采用新型干法水泥生产技术和装备，在规模、技术装备水平上已达国际先进水平，短期内再次实现跨越式发展的可能性不大。

2. 水泥行业碳排放现状

水泥生产过程排放的温室气体主要涉及 CO₂，分为直接排放和间接排放，直接排放集中在窑系统，包括能源活动排放（煤炭燃烧）和工艺过程排放（碳酸盐分解），间接排放主要是电力消耗，此外还有少量原材料及产品运输引起的 CO₂ 排放。

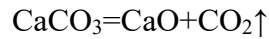
2.1. 工艺过程 CO₂ 排放 (E_{过程})

工艺过程的二氧化碳排放强度取决于原料类型及水泥品种。生产中所用原材料可分为石灰质原料、粘土质原料、辅助原料三类。考虑到可比性，本研究以熟料产量为基准计算过程碳排放。

凡是以 CaCO₃ 为主要成分的原料称为石灰质原料，如石灰石、石灰质泥灰

岩、白垩。在熟料煅烧过程中，石灰质原料受热分解，生成 CaO 放出 CO₂。石灰质原料是水泥熟料中 CaO 的主要来源，是水泥生产中使用最多的一种原料，在生料配比中约占 80%，生产 1 吨熟料约需 1.3-1.5 吨石灰质原料。石灰石中伴生的白云石是熟料中 MgO 的主要来源。

以石灰石为主要原料的硅酸盐水泥熟料中 CaO 含量约为 60-70%，碳酸盐分解公式如下：



据此计算碳酸盐分解时获得 1 吨 CaO 同时产生 0.786 吨 CO₂，因此每吨熟料排放 CO₂ 0.472-0.551 吨；MgO 含量在 1.5%-3% 区间居多，碳酸盐分解时获得 1 吨 MgO 同时产生 1.1 吨 CO₂，因此每吨熟料排放 CO₂ 0.016-0.032 吨。由此可以看出，以石灰石为主要原料生产 1 吨硅酸盐水泥熟料，CO₂ 工艺过程排放量约为 0.488-0.583 吨。

2.2. 燃料燃烧 CO₂ 排放 ($E_{\text{燃烧}}$)

目前我国水泥生产用燃料以煤为主，少量柴油用于回转窑启动时的点火，其 CO₂ 排放基本可以忽略。如果以燃烧 1 吨原煤排放 1.93 吨 CO₂，每吨熟料煤耗以 150-164 公斤原煤估算，生产 1 吨熟料燃料燃烧排放 CO₂ 约为 0.290-0.317 吨。

2.3. 电力消耗间接 CO₂ 排放 ($E_{\text{间接}}$)

水泥生产过程电力消耗造成的 CO₂ 排放强度取决于企业自身电力消耗水平和电网的 CO₂ 排放因子。2021 年 12 月，生态环境部办公厅发布的《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施（2021 年修订版）》首次对全国电网平均排放因子进行了更新，由 0.6101tCO₂/MWh (2015 年度值)调整为 0.5839tCO₂/MWh，下降约 4.3%；在 2022 年 11 月的征求意见稿中给出来最新的全国电网平均排放因子 0.5810tCO₂/MWh。这代表着我国风光等可再生电力的飞速发展以及火电机组单位供电标准煤耗持续下降。水泥熟料综合电耗按照 GB 16780 标准各阶段现有企业限值进行计算（2012 年以前为 68kWh/t，2013-2020 年为 64kWh/t，2020 年以后为 61kWh/t），电力 CO₂ 排放因子采用国家发布的全国电网二氧化碳排放因子，生产 1 吨水泥熟料电力消耗排放 CO₂ 0.035-0.042 吨。

2.4. 原材料及产品运输 CO₂ 排放

原材料及成品运输产生的 CO₂ 排放取决于运输的距离和采用的运输工具。由于各企业情况不同，差距较大，同时相对前三项 CO₂ 排放量较小，占总排放量不足 1%，在此不作具体测试与计算。

2.5. 单位水泥熟料 CO₂ 排放总量（碳排放强度 E_{CO_2} ）

每吨水泥熟料 CO₂ 排放总量为：

$E_{CO_2} = E_{\text{过程}} + E_{\text{燃烧}} + E_{\text{间接}} = (0.813-0.942)$ 吨 CO₂/吨熟料。其中，工艺过程 CO₂ 排放、燃料燃烧 CO₂ 排放、电力消耗间接 CO₂ 排放占比情况如下图所示。

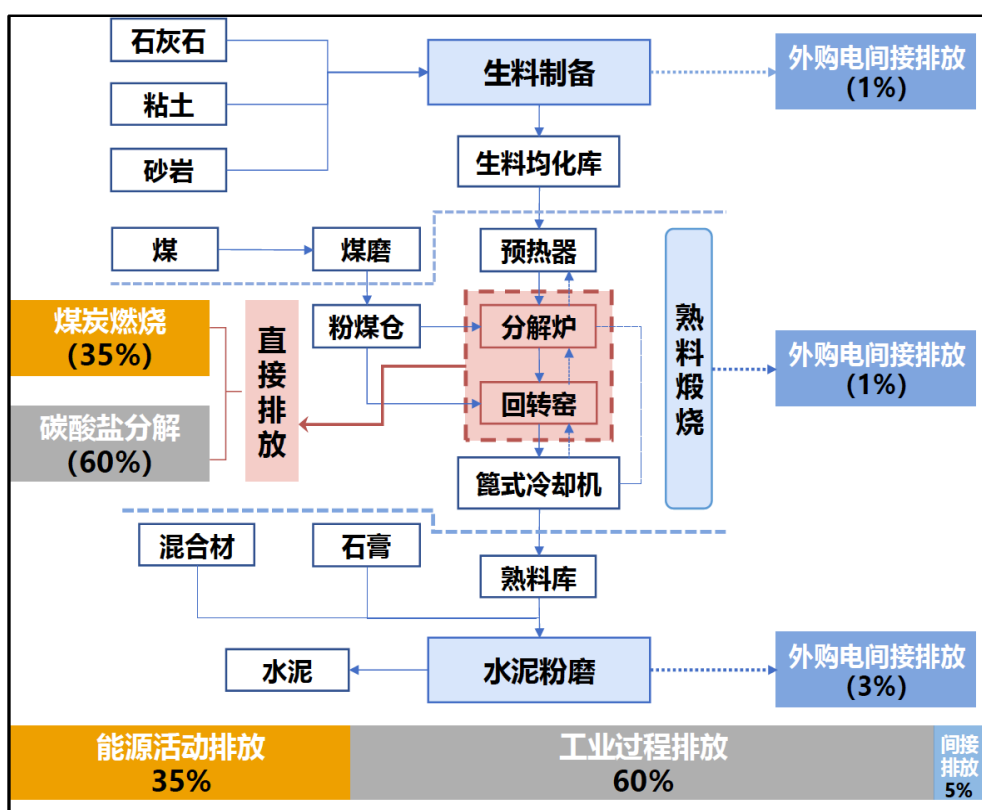


图 6 水泥行业碳排放环节示意图

2.6. 2007 年-2022 年中国水泥行业碳排放分析

根据国家统计局及中国水泥协会的公开数据，2007 年-2022 年（15 年）水泥和熟料产量及变化情况见下图。

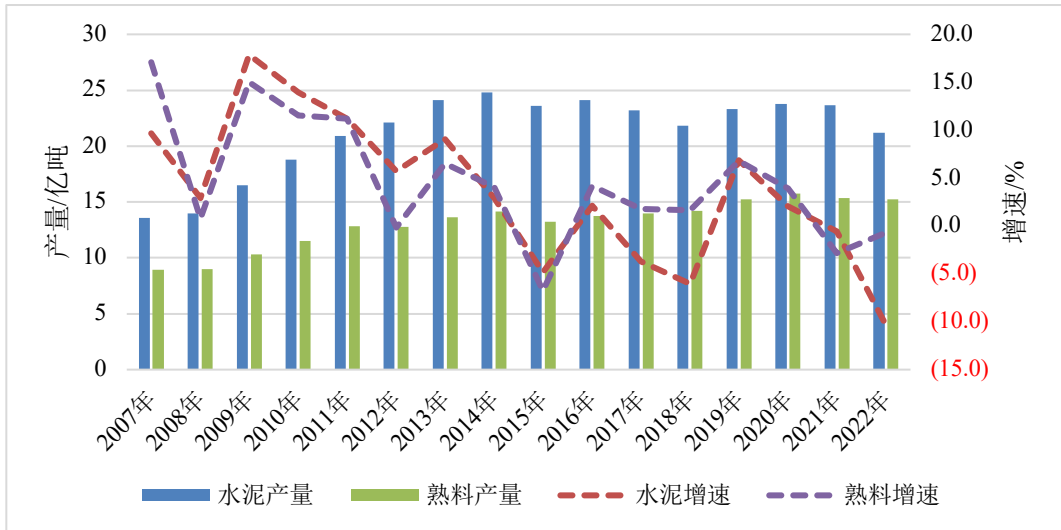


图7 2007-2022年（15年）中国水泥与水泥熟料产量

随着水泥熟料产量的增加，我国水泥行业二氧化碳排放量持续增长。2007-2011年排放量由 8.24 亿吨增加至 12.83 亿吨，年均增长 13.55%，增长较快；2011-2014年二氧化碳排放量增速放缓，期间水泥产量增加较快，熟料产量增加缓慢，由此可见，熟料的产量直接影响水泥行业碳排放量；2015-2020年二氧化碳排放量呈缓慢上升趋势，到 2020 年达到 13.79 亿吨，“十三五”时期年均增长 2.71%。近两年全国水泥市场需求明显收缩，市场持续低迷叠加供给增加，以及煤炭、石灰石等原燃料价格大幅上涨推升成本，在量价齐跌、成本高涨的双向挤压背景下，伴随行业效益下滑，二氧化碳排放下降趋势也非常明显，根据项目组测算 2022 年二氧化碳排放量较 2020 年下降 13.77%。

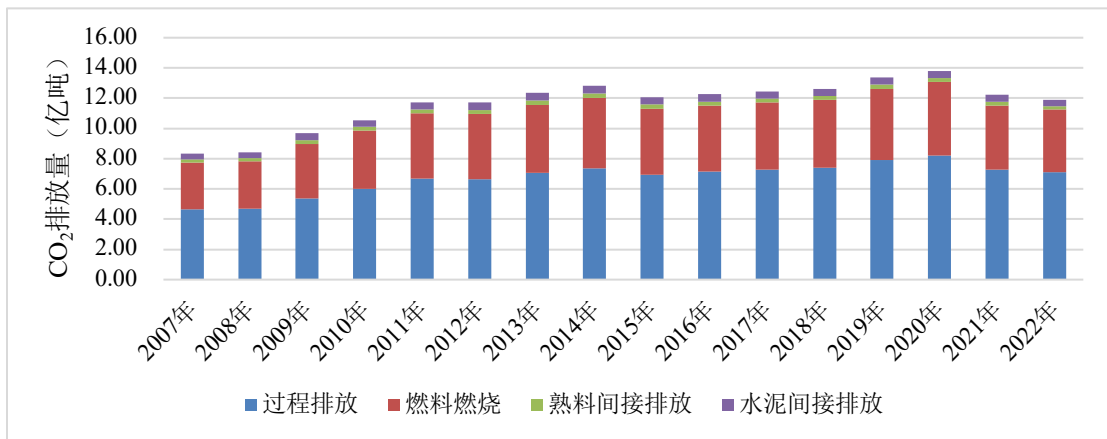


图8 2007-2022年（15年）中国水泥行业二氧化碳排放情况

3. 水泥行业碳中和路径及关键减碳技术

由行业碳排放全过程分析可知，熟料煅烧环节的碳排放占比 95%以上，

主要来自碳酸盐原料在煅烧过程中分解产生的 CO₂（过程排放）以及化石燃料燃烧（燃烧排放）（见图 6）。结合行业碳排放总量测算可知，熟料消费量变化是引起水泥行业碳排放总量变化的最大影响因素，除此之外，水泥行业减少碳排放主要的技术路径包括：1）现有工艺设备的极致能效提升；2）基于原料替代的低碳水泥技术；3）针对煅烧环节燃煤排放问题的燃料替代；以及 4）针对末端处置的碳捕集、利用与封存（CCUS）。根据水泥行业现状、技术发展前景和市场准备等条件，这四类技术发挥主力作用的时期有所不同，近期减排技术寄望于现有工艺设备极致能效提升改造，中远期技术突破寄希望于原/燃料替代和 CCUS 技术。

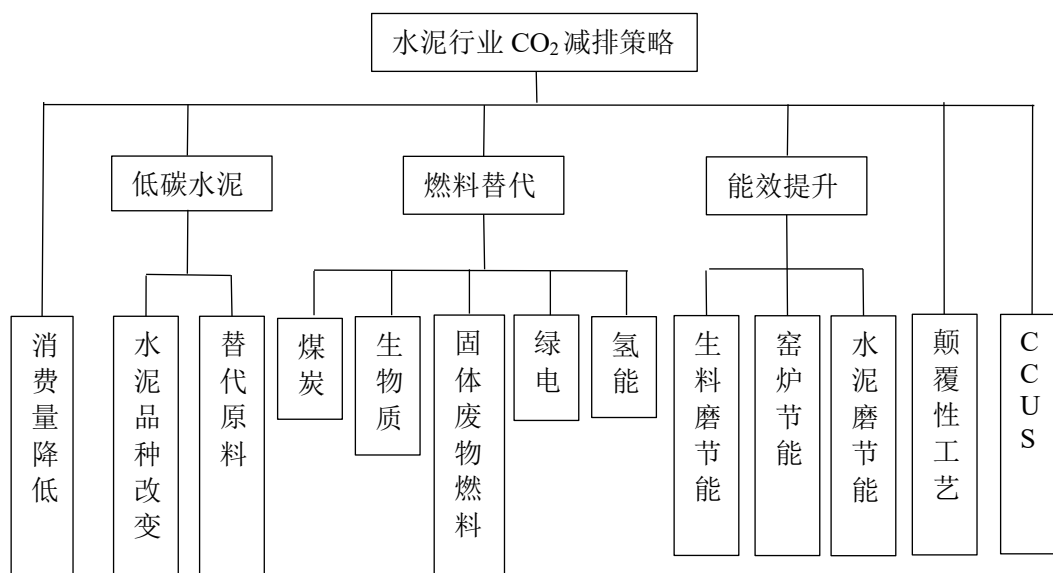


图 9 水泥行业碳减排策略框架

考虑到水泥行业是能源密集型高耗能工业行业，本研究采用基于情景分析方法的模型，结合技术发展预测水泥行业碳中和路径。为了建立能源消费需求模型，分析了水泥生产过程涉及的近 80 个独立和连续过程，使用涉及的重型机械和设备，以及热量和能源。分部门能源需求和模型如下图所示。

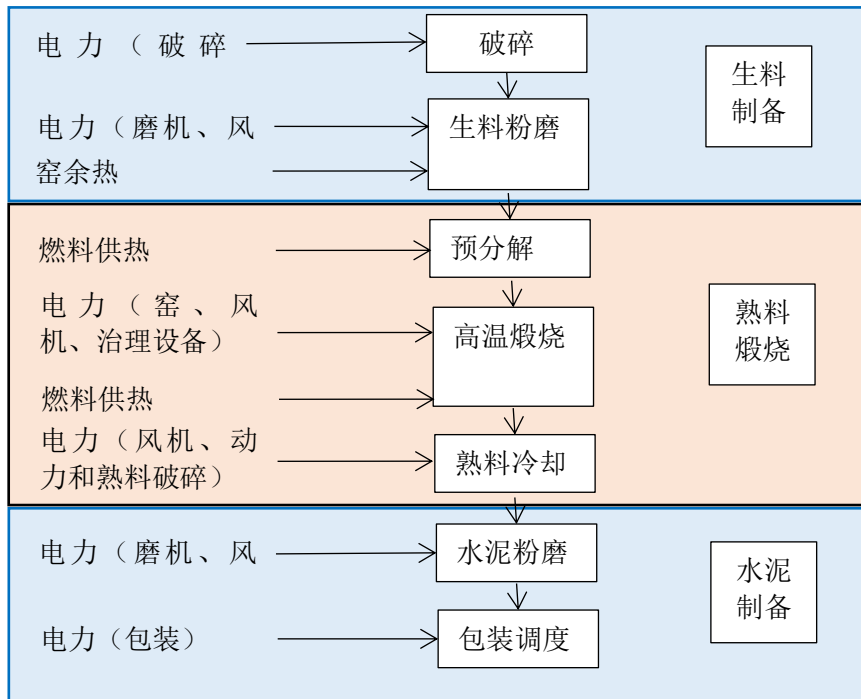


图 10 水泥生产各部门能源需求

模型中能源消费量需求模型构建如下图所示。

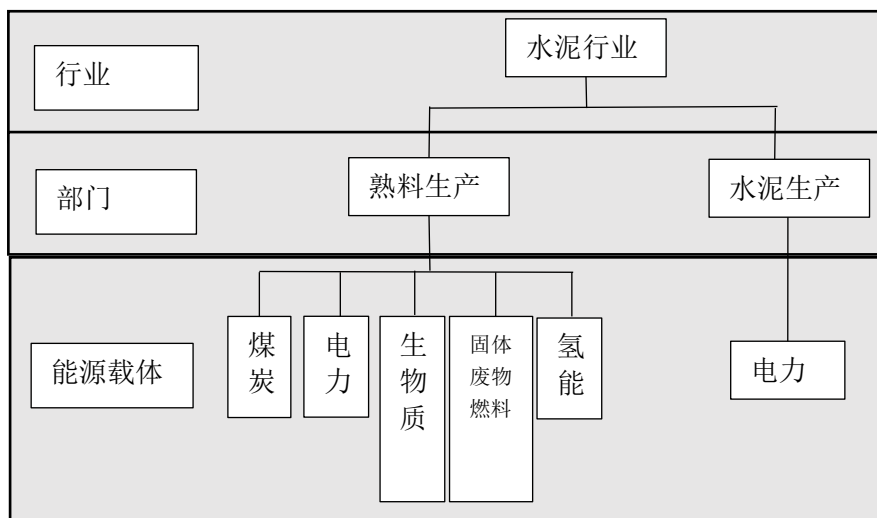


图 11 能源消费量需求模型

水泥行业产量需求采用多因素拟合分析模型进行预测，并作为比较的基础，将产量变化设为参考情景，预测能效提升技术情景、低碳水泥技术情景、燃料替代情景下，水泥行业 2021-2060 年的碳排放量。

3.1. 碳中和愿景下熟料与水泥需求

基于中国水泥行业碳排放的特点，预测水泥及熟料产量是对水泥行业的碳中和路径进行分析的基础和关键。本研究采用多因素拟合分析法预测水泥行业

熟料需求量，根据预测的熟料系数得出相应水泥需求量。

经济发展模式和结构变化对水泥产品需求会产生很大影响，主要的影响因素包括：城镇化率、人均 GDP、固定资产形成总额、三次产业结构、固定资产投资结构等。分析水泥熟料消费与上述影响因素的相关关系，以发达国家和地区水泥消费典型特征为借鉴，采用 AHP 法确定各因素在预测水泥熟料消费量时的权重，建立多因素拟合分析模型，所建立的模型如下：

$$Y = \sum_{n=1}^5 A_n f(X_n) = 0.1f(X_1) + 0.02f(X_2) + 0.09f(X_3) + 0.1f(X_4) + 0.69f(X_5)$$

式中：Y—熟料消费量；An—模型赋权；

f(X1)：熟料消费量与城镇化率的关系；

f(X2)：人均熟料消费量与人均 GDP 的关系；

f(X3)：熟料消费量与固定资本形成总额的关系；

f(X4)：熟料消费量与三次产业结构的多元线性关系；

f(X5)：熟料消费与投资结构的多元线性关系。

3.1.1. 水泥熟料消费关联因素趋势分析

1) 经济发展形势预测

结合国内外疫情防控和经济发展现状，参考国内外机构对国际和国内经济发展趋势的研究结论，2021-2030 年 GDP 增速保持 4.5%-5.5%的区间，2030-2040 年、2040-2050 年、2050-2060 年经济潜在增长率中枢呈不同下降趋势，人均 GDP 在 2050-2060 年达到 23.5-27.6 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。预计“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 2025 年三次产业结构调整为 7、38.2、54.8，到 2060 年调整为 4、15、81。

3) 人口及城镇化发展形势

综合有关机构研究，2022 年中国人口会首次出现负增长，近期到 2025 年，我国人口将保持基本平稳态势，人口数量稳定在 14.2 亿左右，预期至 2060 年，中国人口总量将下降至 11.7 亿人。

2020 年，我国常住人口城镇化率达到 64%，城镇化进程总体进入到后期阶

段。当前至 2035 年，是我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，我国常住人口城镇化率将达到 68% 左右，进入中级城市型社会；到 2050 年左右，达到 80% 左右的成熟阶段。

4) 固定资产投资趋势

水泥消费预测研究中以固定资本形成总额指标表征固定资产投资状况。虽然受投资结构优化的影响，中国经济增长中的投资拉动因素趋于弱化，但固定资本形成总额上行的趋势将保持不变，且有动力保持中等增速。预测 2030 年和 2050 年，我国固定资本形成总额（2000 年不变价）将分别达到 45.2 和 57.1 万亿元。

制造业、房地产和基础设施是固定资产投资的三大领域，其中房地产和基础设施投资与水泥消费量关联密切。在人口增长、经济发展、城市化进程、乡村振兴等政策因素推动下，“十四五”期间我国对新建房屋的刚性需求仍可支撑年均 26 亿平方米以上的建设规模，到 2025 年房地产投资占固定资产投资的比重为 19.1%。“十四五”之后，随着国家住房保障体系的逐步完善和基本住房需求的饱和，预计 2060 年房地产投资的比重将下降至 12.7%。未来基建领域投资仍将是稳定经济增长的重要举措之一，预计 2025-2060 年，我国基础设施投资占固定资产投资总额的比重将在 38%-54% 波动。

3.1.2. 水泥熟料与水泥消费量预测结果

预测结果显示，中国水泥熟料消费量在 2020 年已达到峰值，峰值为 15.77 亿吨，到 2030、2050 和 2060 年，水泥熟料需求量分别为 11.93、6.38 和 4.19 亿吨。水泥需求量由 2020 年的 24 亿吨，下降到 2060 年的 5.7 亿吨左右。

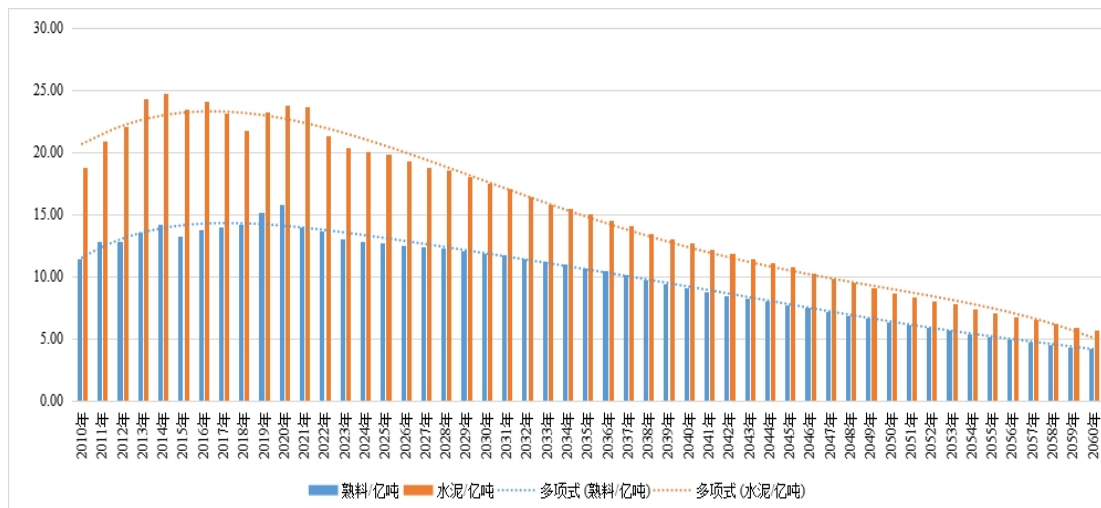


图 12 碳中和背景下熟料和水泥需求量预测

3.2. 燃料替代情景

我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，为碳减排作出贡献，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。现阶段我国替代燃料普遍为粗加工，呈现高水分、低热值、成分不稳定的特点，无法实现规模化、大掺量、高值化利用，全行业燃料平均替代率不足 2%，仅个别头部企业生产线的燃料替代率达到 40%以上，而在欧盟等国替代率普遍已达到了 39%以上，荷兰甚至达到了 85%。水泥行业替代燃料的应用仍有很长的路要走。

从目前在研发和应用的技术发展态势来看，中短期行业主要是使用固体废物燃料、生物质燃料等，中远期将有其他新型燃料如氢能、绿电等作为可选择的替代燃料。

3.2.1. 固体废物燃料

以固体废物作为替代燃料的技术方案基础较好。能作为水泥替代燃料的固体废物种类繁多，分类复杂，主要包括轮胎衍生燃料（TDF）、废电解池（SPL）、动物骨粉（MBM）、干市政污泥（DSS）、生物质、固体回收燃料（SRF）、城市固体废弃物（MSM）、废弃物衍生物（RDF）、次煤和塑料废弃物等（表 1）。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。

表 1 水泥生产固体废弃物替代燃料性能汇总¹

类别	发热量 (MJ/kg)	CO ₂ 排放	SO ₂ 排放	重金属排放	最大替代率%	对熟料质量的影响	使用成本
轮胎衍生燃料 (TDF)	35.6	减少	增加	减少	30	无	低
废电解池 (SPL)	9.29	减少	未检测到	未检测到	8	无	低

¹ 落基山研究所，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

类别	发热量 (MJ/kg)	CO ₂ 排放	SO ₂ 排放	重金属排放	最大替代率%	对熟料质量的影响	使用成本
城市固体废弃物 (MSM)	15.4	减少	增加	增加	30	小	高
动物骨粉 (MBM)	14.47	减少	减少	未检测到	40	小	中
干市政污泥 (DSS)	15.28	减少	增加	不变	5	小	高
农作物 (稻壳, 麦秆)	14~21	减少	减少	减少	20	无	低
废塑料	29~40	减少	增加	增加	-	中	中
废油和废溶剂	43~45	减少	未检测到	减少	-	小	低

国际上，水泥大集团都实现了以固体废物燃料为主的较高燃料替代率（表2）。以欧盟为例，水泥的燃料替代率平均已接近40%，对我国发展水泥替代燃料具有极强借鉴意义。

表2 世界先进水泥企业替代燃料种类及占比

工厂/公司	Holcim 集团	Cemex 集团	Heidelberg 集团	Italcement i 集团	Lafarge 集团
废油	5	3.7	8.5	22.1	
废液和废溶剂	11	4.7	21.9		
轮胎衍生燃料	10	16	11.6	14.9	19.7
废塑料	9	26.4	4.7	33.1	
工业和生活垃圾 (固体)	65	13.8			
工业废料和其他化石燃料	30				
动物骨粉	2	4	6.1	15.7	
农作物	9	10	4.2	11.1	
木屑和其他农作物	21	5	24.5	25.1	
污水污泥	2	4.2	1.7		
垃圾衍生燃料	7.8				
其他代用燃料	14.6				

来源：IFC, Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice

推广固体废物替代燃料在中国具有技术上的可行性和实际减排意义，但目

前水泥生产的燃料替代率较低，相比国外 40%以上比率（最高值可达 85%）仍有较大提升空间。

3.2.2. 生物质燃料

使用生物质燃料替代传统化石燃料不需要对水泥窑进行大规模改造，与碳捕集技术能形成负碳技术组合，目前国内已有示范应用。例如某水泥厂利用农作物秸秆，在分解炉实现部分燃煤替代，日处理秸秆废弃物 200 吨，充分证明生物质掺烧替代部分燃煤具有技术可行性。但生物质燃料在北方地区具有季节性，大量应用需要解决可获取性及收储和运输成本问题。此外，生物质燃料在多个行业中均具有适用性，双碳背景下未来生物质燃料的获得将极具竞争性。

3.2.3. 其他新型燃料

水泥企业也在探索光伏热能、氢能和电力在燃料替代方面的价值，但目前仍处于研发和试点阶段。水泥窑利用氢能需要大幅改造现有水泥窑结构和充分的绿氢供给，且氢气火焰的热力学性质及产生水蒸气使其不利于直接加热，在水泥行业中的利用仍面临一定挑战。水泥窑的工作温度较高（1300°C~1450°C），使用电力加热也需要全面改造现有窑炉结构。但不能排除未来新型能源和技术在生产低碳水泥中的潜力。

3.2.4. 燃料替代情景下的碳减排效果

燃料替代是更优先、更具成本效益的减排手段，据本研究测算，到 2060 年可推动行业约 9.2%的碳减排。

根据全球气候变化联盟预测，在全球范围内替代燃料（含氢能、生物质能和电加热等）的平均替代率将从目前的 6%增加到 2030 年的 22%，到 2050 年将会增加到 43%。借鉴以上数据，结合我国国情，对可为水泥生产供热的主要燃料逐个分析，认为固体废物依然是最可行的煤炭替代燃料。

煤炭：目前为逾 95%的水泥生产供热，是现阶段石灰石煅烧使用的主要燃料源。随着环境政策压力加剧以及新技术的研发推广，熟料生产的燃料结构将不断改善，预计在 2060 年煤炭占水泥生产所使用燃料的份额在 0-5%。

生物质：目前为不足 1%的水泥生产供热，被认为是无排放的清洁资源，并且搭配碳捕获技术可实现净负排放。但是中国生物质资源整体紧张，且多个行业均出现需求显著增长的可能，考虑到生物质供给端的不确定性，预计在 2060

年生物质将构成水泥生产所使用燃料的 6-10%。

固体废物：目前固体废物燃料替代率不足 2%，但仍被认为是较好的潜在碳减排资源。一方面有机废弃物可作为燃料，另一方面无机固体废物可代替原料，减少石灰石的使用，从而进一步减少生产过程中的碳排放。同时，为落实双碳目标，固体废物利用相关利好政策不断推出，垃圾分类状况逐步改善，且供应量相对充足，对燃料替代率的提升将起到积极的作用。预计在 2060 年固体废物构成水泥生产所使用燃料的 30-60%。

新型燃料替代技术在未来 20 年会经历技术发展与初步商业化应用期。电力和氢能在水泥行业中的应用目前尚在早期研发阶段，已有水泥集团尝试利用氢能煅烧水泥、以及利用太阳能煅烧水泥。随着传统水泥窑设备寿命终结、基于氢及电力的新型水泥窑技术的发展以及绿氢、绿电的经济性显现，在远期（2050 年之后）氢能与电力制水泥将占据更多份额，合计约可替代 40-60% 燃料。

不同能源品种在水泥行业应用情况预测：

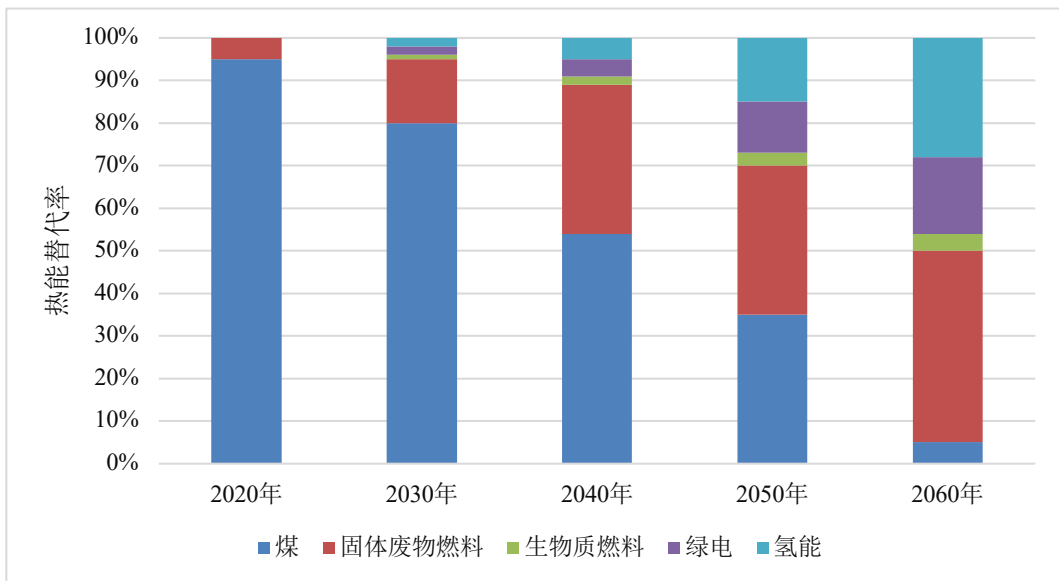


图 13 不同能源品种应用情况

根据预测，2060 年燃料替代技术路径情景下，单位熟料碳排放强度降低 292kg；水泥行业整体二氧化碳排放量减少 1.2 亿吨。

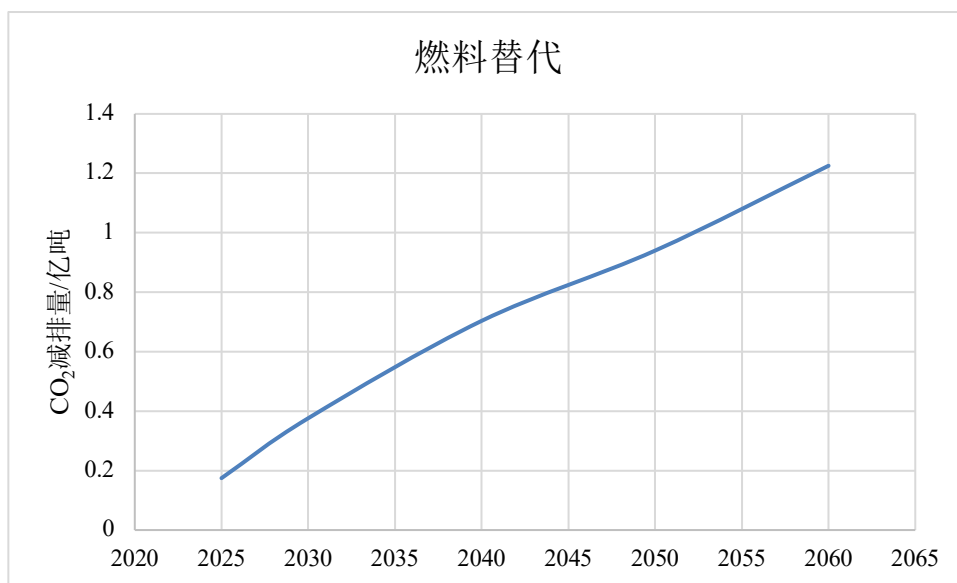


图 14 清洁能源替代技术路径情景下碳减排量

3.3. 能效提升情景

我国目前水泥生产的能效水平参差不齐，部分已经位列国际前列。水泥熟料单位产品综合能耗在 90~136kgce/t（2.6~4.0GJ/t）之间，与欧美水平持平甚至更优。根据工业和信息化部公布的能效领跑者名单，2017-2022 年共有 39 家水泥企业熟料综合能耗在 100kgce/t（2.9GJ/t）及以下，达到世界先进水平。

同时，水泥行业仍存在超过 10%以上部分能耗较高的企业达不到国家标准的限定值，急需技术改造。因此水泥行业将持续推广能效提升技术，提高行业平均能耗水平。

本研究中，水泥生产能效提升技术特指基于现行水泥生产工艺基础的改良优化技术手段，主要包括生料粉磨能效提升、熟料烧成能效提升、水泥粉磨能效提升技术三个类别。具体技术节能情况见下表：

表 3 具体技术节能情况

技术类别	具体技术名称	每类包含的技术
生料粉磨能效提升	生料磨节能技术	系统单位电耗 10~13kWh/t，一般为 25kWh/t，节能 46-58%
熟料烧成能效提升	旋风预热器改造	熟料烧成综合能耗降低 1~5kgce/t
	燃烧系统节能改造	熟料烧成综合能耗降低 1~5kgce/t
	分解炉节能改造	熟料烧成综合能耗降低 5~15kgce/t
	耐火材料整体提升	熟料烧成能耗降低 5~20kgce/t.cl
	冷却机提升技术	熟料烧成综合能耗降低 1~3kgce/t

技术类别	具体技术名称	每类包含的技术
	数字化智能化	熟料综合电耗降低 1~5kWh/t, 标准煤耗降低 1.0~5.0kgce/t
	风机能效提升技术	风机效率达到 82%~85%, 实现节能 30%~40%; 吨熟料或水泥电耗下降 3-6 度电以上
水泥粉磨能效提升	水泥磨节能技术	系统单位水泥电耗 23~26kWh/t

能效提升情景下各具体技术应用比例数据如表 4 所示。

表 4 能效提升情景下相关技术应用潜力

序号	能效提升技术	应用比例 (%)				
		2025 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
1	冷却机提升技术	35	50	70	75	80
2	分解炉节能改造	15	30	40	55	60
3	悬浮预热器节能	30	40	60	65	70
4	数字化智能化技术	30	60	95	100	100
5	水泥磨节能技术	40	50	70	80	90
6	燃烧系统节能改造	15	30	50	60	70
7	生料磨节能技术	40	50	70	80	90
8	耐火材料整体提升	30	50	65	80	90
9	风机能效提升技术	45	60	70	80	90

不考虑其他低碳技术应用的节能效果，按上表中各年度技术应用比例，各项能效提升技术对水泥行业碳减排的贡献，2025、2030、2040、2050、2060 年分别为 2073 万吨、2753 万吨、6224 万吨、8362 万吨、12098 万吨 CO₂。预计 2060 年由于能效提升实现的熟料碳强度下降 289kg/t。

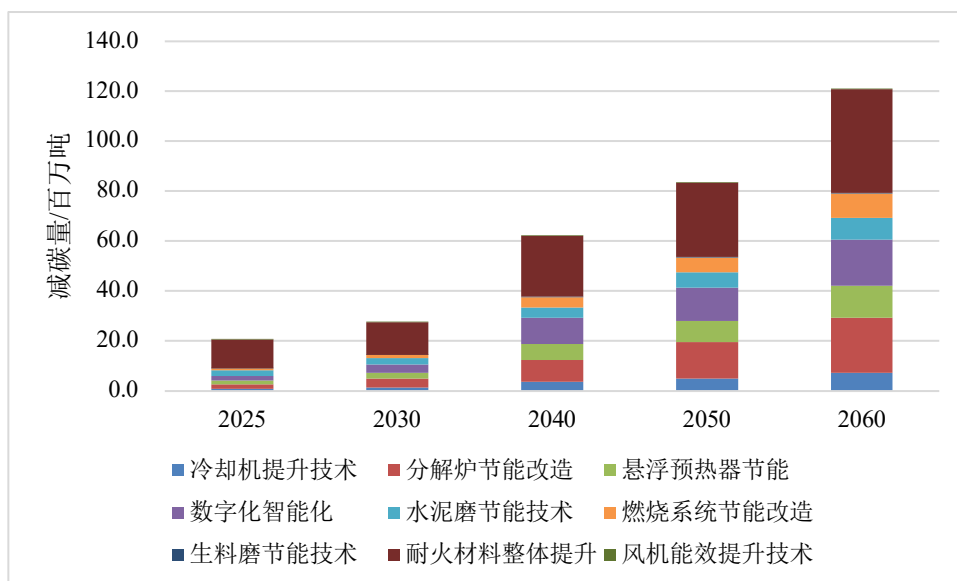


图 15 不同节能措施分阶段碳减排量

3.4. 低碳水泥情景

基于水泥生产工艺特点，降低碳酸盐分解产生的碳排放是降低行业单位产品碳排放强度的重要路径之一。低碳水泥情景就是充分考虑降低碳酸盐分解的过程排放，主要有**原料替代**、**低碳水泥熟料**、**低碳水泥复合材料**三种技术途径。

原料替代技术指利用某些天然矿物或其他工业企业产生的工业废料，如电石渣、造纸污泥、脱硫石膏、冶金渣尾矿等，主要成分包含非碳酸盐钙、镁，在水泥生产中替代传统石灰石原料，减少生料煅烧过程中因石灰石等碳酸盐矿物分解排放的 CO₂。近中期，我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。

低碳水泥熟料指生产不基于硅酸钙的新型熟料体系；主要低碳水泥熟料品种的生产工艺及减碳情况如图 16 和图 17 所示。低碳水泥熟料的典型例子主要有：高贝利特水泥熟料、硫（铁）铝酸盐水泥熟料、X-Clinker 水泥熟料、Celitement 水泥熟料、可碳化硅酸钙水泥熟料等。值得注意的是，新型水泥熟料的应用潜力尚有不确定性，主要体现在原料可获得性，水泥产品稳定性、建筑施工性能要求等方面，此外经济性也是一个非常关键的指标。但随着水泥行业减碳压力与建筑市场低碳建材需求的增长，可以预计新品种低碳水泥的市场份额占比将不断提高。

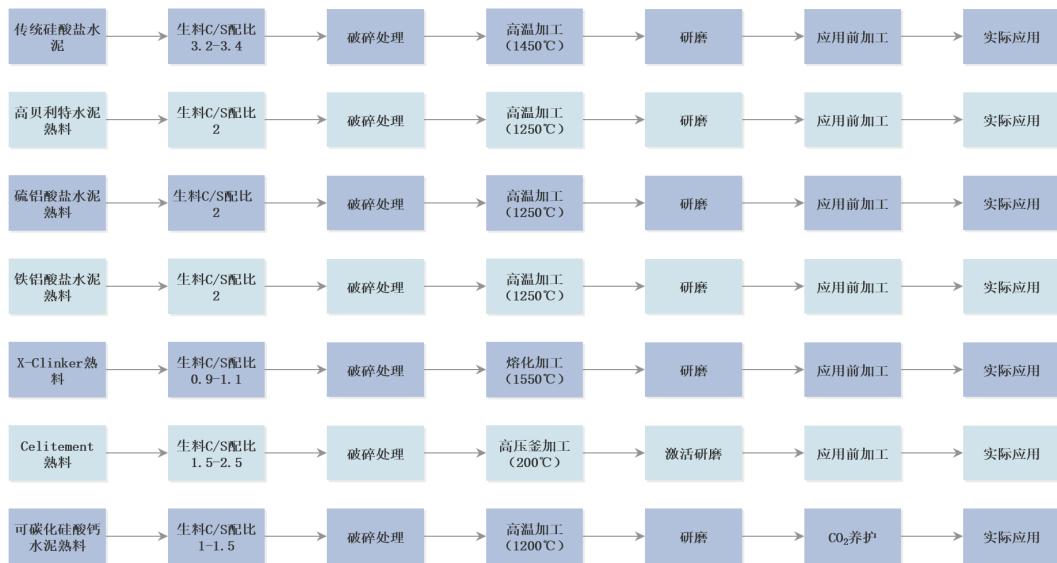


图 16 低碳水泥熟料生产主要流程示意

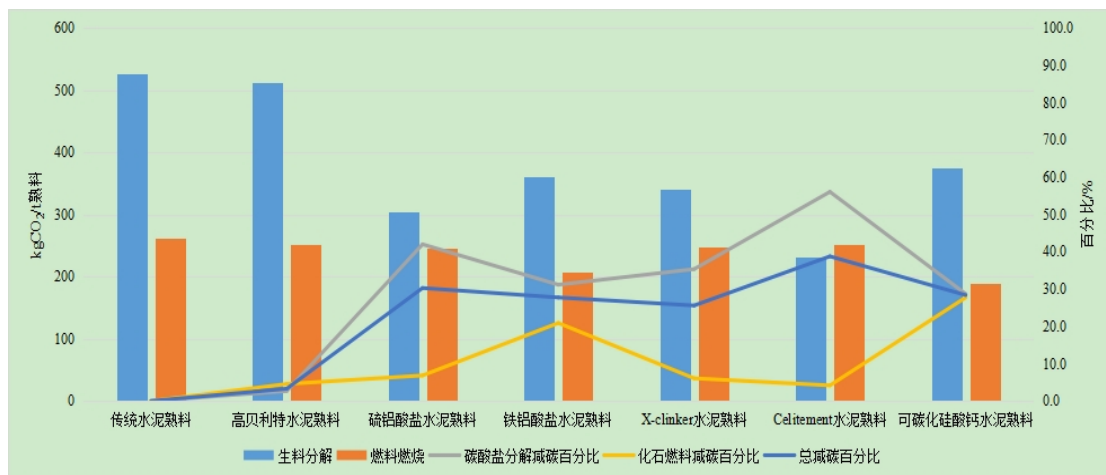


图 17 低碳水泥熟料碳排放及节碳比例

低碳水泥复合材料，即掺加矿渣、粉煤灰等工业废渣之类的低碳混合材，减少熟料在水泥产品中的使用比例。随着水泥粉磨技术的不断发展，利用矿渣和粉煤灰等混合材进行超细粉磨，充分发挥其矿物活性，在保证熟料质量前提下，可大幅降低熟料应用比例，进而降低水泥单位产品碳排放强度。目前磨细矿渣已部分实现高水平利用，粉煤灰利用受多重原因限制，有待进一步开发。需要注意的是提高混合材用量需要大量工业废渣类新型辅助胶凝材料，且要求这类辅助胶凝材料具备量大、就近易得、高活性等特征，而未来重工业整体脱碳背景下，工业废渣可用量将呈下降趋势。为应对这一趋势，行业正在研发一些新型混合材，例如煅烧粘土、碳化混凝土细粉等。

低碳水泥技术应用路线图如图 18 所示。

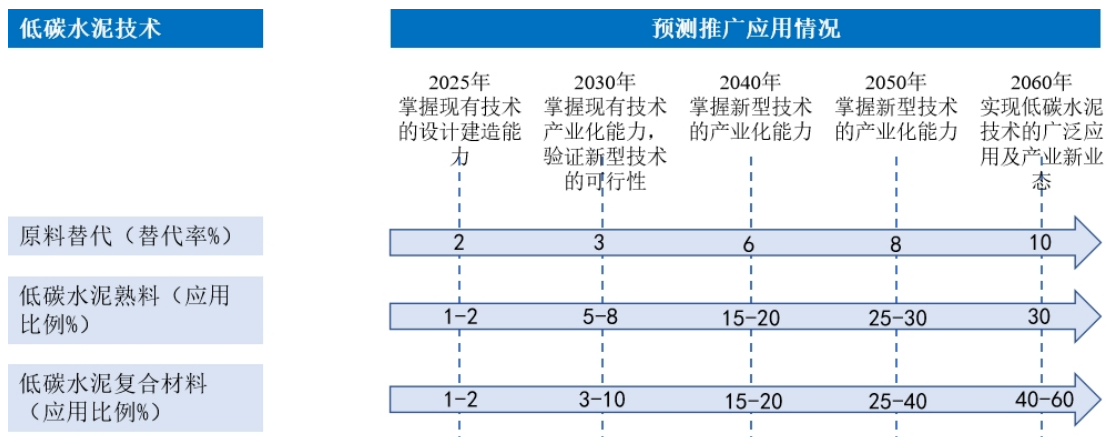


图 18 低碳水泥技术应用路线图

根据预测，低碳水泥技术路径情景下，到 2060 年吨熟料碳排放强度降低 98kg。2025 年-2060 年行业减排量见图 19。

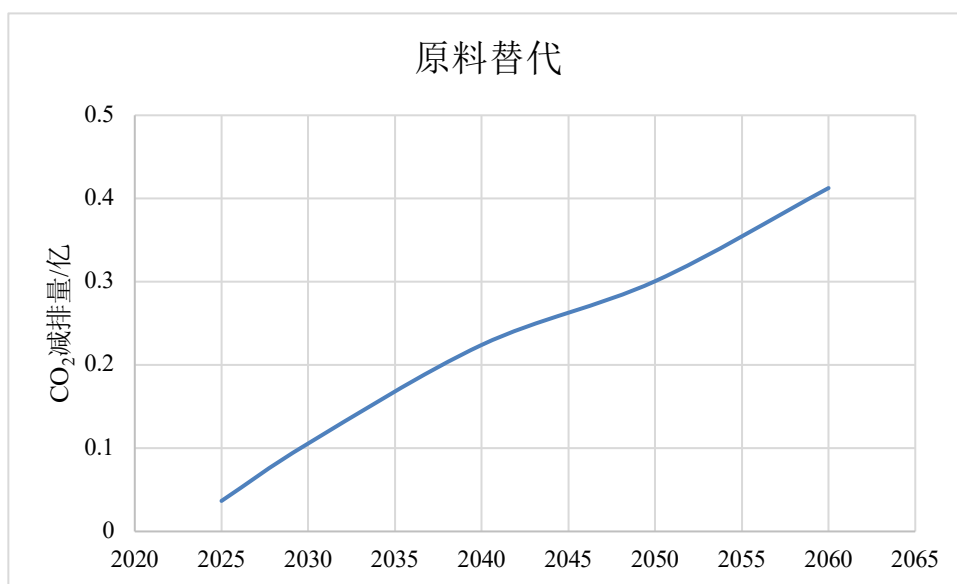


图 19 低碳技术应用情景下水泥行业碳减排量

3.5. CCUS 技术情景

水泥生产中约 60%的碳排放来自原料中碳酸盐分解，由于目前尚未看到能完全替代石灰石、免除过程排放、且能大规模应用的替代原料和工艺，碳捕集、封存与利用（CCUS）将是水泥碳中和的必要技术。

3.5.1. 国内外发展现状

IEA 2023 年 CCUS 工程数据库显示，截止 2023 年 3 月，全球范围内投入使用的所有二氧化碳捕获、运输、储存和利用项目，产能超过 10 万吨/年（或 1000 吨/年直接空气捕获设施）共有 573 个，其中水泥行业有 27 个，包括 3 个

CCUS 全链条项目，20 个捕集项目和 4 个 CCU 项目。除挪威的 Norcem Brevik 项目正在建设中外，其余均为计划建设²。水泥行业 30% 的 CO₂ 捕集量集中在美国，占比最高，其次是德国和比利时。573 个 CCUS 项目中有 503 个项目在 2017 年-2023 年期间宣布建设，目前已有 3 项已实施，8 项正在建设，其余还在前期规划和准备阶段。由此可见，在全球气候压力下，CCUS 技术作为最有希望的负碳技术，近年来研发、应用等的投入呈现爆发式增长，未来也将助力水泥等难减排行业实现深度脱碳。

CCUS 在水泥行业的最早也最为典型的示范项目于 2015 年 9 月在美国德克萨斯州的圣安东尼奥水泥厂运行，其产量超过 75000t CO₂/a。采用 SkyMine 工艺从水泥厂的一个烟气管道中捕获 90% 的 CO₂，约占该厂 CO₂ 排放总量的 15%。SkyMine 工艺利用捕获的 CO₂ 生产可销售的副产品，如小苏打、盐酸和漂白剂等。

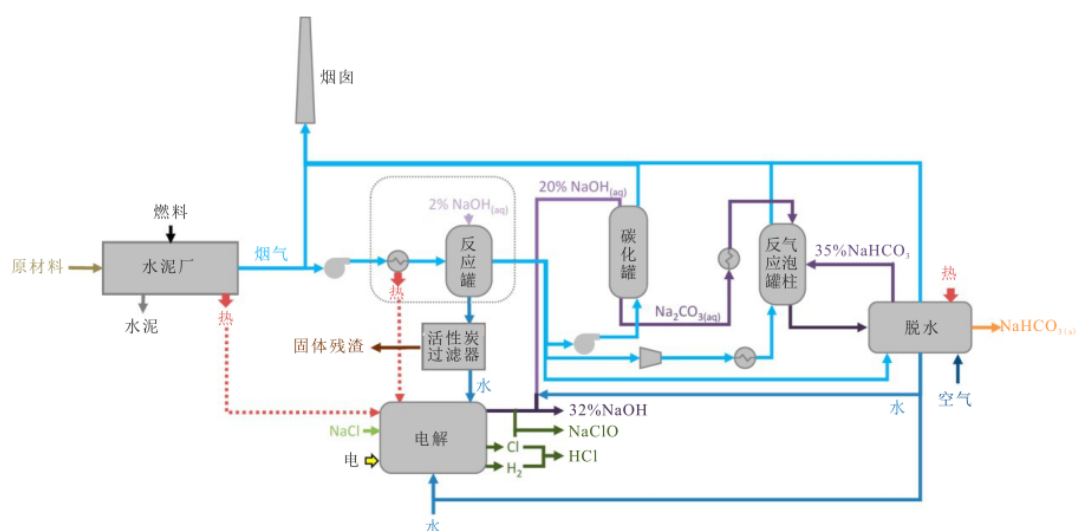


图 20 圣安东尼奥水泥厂化学吸收法碳捕获工艺流程

2018 年 10 月，我国水泥行业首条 CCUS 技术应用示范线在海螺集团芜湖白马山水泥厂投产，采用两步法生产纯度为 99.99% 以上的食品级 CO₂ 和纯度为 99.9% 以上的工业级 CO₂ 产品。其中第一步采用化学溶剂法将 CO₂ 浓度从 18% 左右提浓到 89% 以上，第二步采用吸附精馏法提纯到 99.9% 以上。该示范线填补了国内水泥行业 CCUS 技术的空白。

² 处于概念、可行性或工程研究（FEED）阶段的项目。

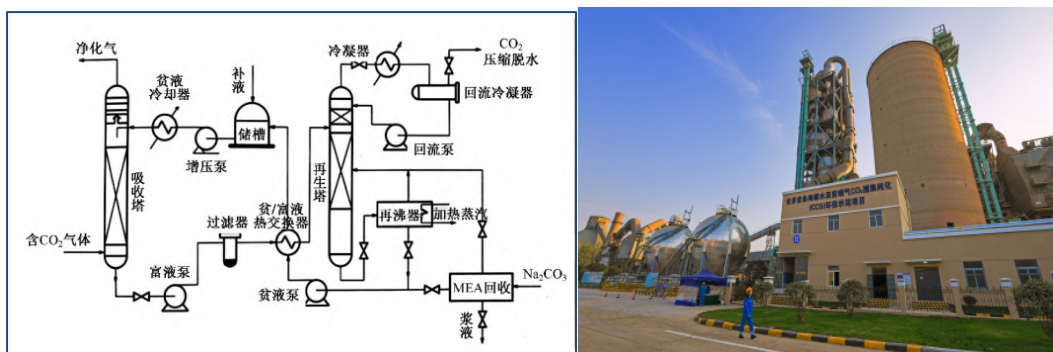


图 21 化学吸收法工艺流程及白马山水泥烟气 CO₂ 捕集纯化示范

表 5 部分 CCS/CCUS 项目一览表

项目名称	地点	捕集能力/ (万 t.a ⁻¹)	CO ₂ 来源	CO ₂ 去向	运行年份
Terrell	美国	40	天然气处理	EOR	1972
Enid	美国俄克拉荷马州	70	化肥厂	EOR	1982
Shute Creek	美国怀俄明州	700	天然气处理	EOR	1986
Sleipner	挪威	100	天然气处理	盐水层	1996
Val Venks	美国德克萨斯州	130	天然气处理	EOR	1998
Weybum	美国/加拿大	100	煤气化	EOR	2000
In Salah	阿尔及利亚	120	天然气处理	枯竭气田	2004-2011
Snohvit	挪威	70	天然气处理	盐水层	2008
Century	美国德克萨斯州	840	天然气处理	EOR	2010
Coffeyville	美国堪萨斯州	80	化肥厂	EOR	2013
Lost Cabin	美国怀俄明州	90	天然气处理	EOR	2013
Lula	巴西	70	天然气处理	EOR	2013
Air Prducts	美国德克萨斯州	100	甲烷重整	EOR	2013
Boundary Dam	加拿大	100 (110 MW)	燃煤电厂	EOR/盐水层	2014
Quset	加拿大	110	甲烷重整	盐水层	2015
Uthmaniyah	沙特阿拉伯	80	天然气处理	EOR	2015
Deatur	美国伊利诺伊州	100	乙醇	盐水层	2016
Kemper	美国密西西比州	340 (582 MW)	燃煤电厂	EOR	2016
Petra Nova	美国得克萨斯州	160 (240MW)	燃煤电厂	EOR	2016
Gorgon	澳大利亚	400	天然气处理	盐水层	2016
苫小牧 CCS 示范项目	日本	10	氢气产品	盐水层	2016

项目名称	地点	捕集能力/ (万 t.a ⁻¹)	CO ₂ 来源	CO ₂ 去向	运行年份
Abu Dhabi	阿联酋	80	钢铁厂	EOR	2016
Alberta Trunk	加拿大	30-60	化肥厂	EOR	2016
Alberta Trunk	加拿大	120-140	炼油厂	EOR	2017
卡塔尔 LNG	卡塔尔	210	其他燃料转换	专用存储	2019
中国能源金捷电力	中国	15	电厂	EOR	2021
吉林石化 CCUS (南京炼油厂)	中国	10	天然气处理	EOR	2023

EOR : Enhanced Oil Recovery 强化采油, 提高(原油)采收率

3.5.2. CCUS 政策导向

(1) 美国 45Q 税收抵免政策

在 CCUS 技术领域, 美国从早期侧重 CCUS 研发与示范 (RD&D) 逐渐过渡到 RD&D 与市场开发、基础设施建设协同促进 CCUS 的发展。

在美国, CCUS 项目可以通过联邦政府的 45Q 税收抵免政策获得财政支持, 从而大幅提升项目的经济可行性, 确保 CCUS 项目的现金流长期稳定, 降低财务风险, 使项目长期平稳运行成为可能。2018 年, 美国联邦政府对 45Q 税收抵免政策进行了修订, 二氧化碳补助金额大幅提升。其中, 二氧化碳地质封存的补贴价格由 2018 年的 25.70 美元/t 逐渐递增至 2026 年的 50.00 美元/t, 非地质封存 (主要指二氧化碳强化采油和二氧化碳利用) 的补贴价格由 2018 年的 15.29 美元/t 逐渐递增至 2026 年的 35.00 美元/t。

表 6 美国 45Q 税收抵免政策

封存方式	补贴金额								
	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年	2026 年
CO ₂ 非地质封存	15.29	17.76	20.22	22.68	25.15	27.61	30.07	32.54	35.00
CO ₂ 地质封存	25.70	28.74	31.77	34.81	37.85	40.89	43.92	46.96	50.00

(2) 欧洲碳交易和碳税机制

欧盟是 CCUS 制度化和规范化的积极倡导者。与美国不同, 欧洲的 CCUS 示范项目主要依靠欧盟碳交易市场 (EUETS) 来体现。

2020 年以前，欧盟碳交易市场的碳价较低，对 CCUS 项目的支持力度有限，随着欧盟碳配额发放进一步收紧和碳关税政策出台，2022 年欧盟市场的碳价涨已超过 100 欧元/t。此外，欧洲还是全球碳税政策应用最为成熟的地区，通过向化石燃料生产者、使用者征收碳税来减少二氧化碳排放。无论是碳交易市场还是征收碳税，都对碳排放给出了明显的价格信号，从而影响企业对 CCUS 项目的投资力度。

欧盟是低碳经济的积极倡导者，努力以政策与制度推进欧洲大陆低碳转型。欧盟委员会 2019 年 12 月正式发布《欧洲绿色协议》，2020 年 3 月提交《欧洲气候法案》，上述 2 份法案将 2050 年“净零”碳排放目标变成了政治目标和法律义务。可以预见，欧洲未来将会采取更加广泛的碳减排措施，CCUS 无疑是不可或缺的重要手段。

(3) 亚太 CCUS 政策

2020 年 1 月日本发布《环境创新战略》，将 CCUS 纳入其中；2020 年 4 月，新加坡发布低碳排放发展战略，认可了 CCUS 在实现气候目标中具备的巨大潜力；马来西亚针对高含二氧化碳气田建立了开发监管框架；澳大利亚是唯一一个拥有完整 CCUS 监管框架的亚太国家，在联邦和州的管辖范围内都制定了监管要求。此外，2020 年 5 月，澳大利亚政府对《2006 年近海石油和温室气体封存法案》进行了修订，对二氧化碳跨境注入管理进行了统一和简化。

(4) 中国

CCUS 是目前实现大规模温室气体减排的重要技术手段。短期内，中国以石油、煤炭等化石能源为主的能源结构难以改变，发展 CCUS 可促进化石能源的高效利用，加快传统高排放行业的转型发展，对中国实现“双碳”战略目标具有重要意义。近年来，中国政府高度重视应对气候变化工作，出台系列政策促进 CCUS 发展，包括推动 CCUS 示范工程建设、加强 CCUS 技术推广示范、将 CCUS 纳入绿色债券目录等。

表 7 中国关于 CCUS 技术政策

序号	时间	颁布主体	政策文件名称	主要内容
1	2019.8	发改委	《产业结构调整指导目录（2019 年本）》	鼓励 CCUS 产业发展
2	2020.7	央行、发改委、证监会	《绿色债券支持项目目录（2020 年版）》	将 CCUS 纳入绿色债券目录

序号	时间	颁布主体	政策文件名称	主要内容
3	2020.10	生态环境部、发改委等五部门	《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》（环气候[2020]57号）	气候投融资要支持开展 CCUS 试点示范
4	2021.1	生态环境部	《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》（环综合[2021]4号）	推动规模化、全链条 CUS 示范工程建设
5	2021.2	国务院	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》（国发[2021]4号）	推动能源体系绿色低碳转型，开展 CCUS 试验示范
6	2021.4	中美联合声明	《中美应对气候危机联合声明》	开展工业和电力领域脱碳的政策、措施与技术，包括 CCUS
7	2021.5	生态环境部	《加强自由贸易试验区生态环境保护推动高质量发展的指导意见》（环综合[2021]44号）	开展规模化、全链条 CUS 试验示范工程建设
8	2021.5	生态环境部	《关于加强高耗能、高排放建设项目生态环境源头防控的指导意见》（环综合[2021]45号）	鼓励有条件的地区、企业探索实施 CCUS 工程试点、示范
9	2021.9	中共中央 国务院	《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》（2021年9月22日）	推进规模化 CCUS 技术研发、示范和产业化应用，加大对 CCUS 等项目的支持力度
10	2021.10	国务院	《2030年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23号）	探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范；集中力量开展复杂大电网安全稳定运行和控制、低成本 CCUS 等技术创新
11	2021.12	发改委规划司	《国家标准化发展纲要》	研究制定 CCUS 标准
12	2022.2	发改委、国家能源局	《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》（发改能源〔2022〕206号）	完善火电领域二氧化碳捕集利用与封存技术研发和试验示范项目支持政策
13	2022.6	生态环境部、发改委等七部门	《减污降碳协同增效实施方案》（环综合〔2022〕42号）	加强 CCUS 等技术试点应用；推动 CCUS 技术在工业领域应用

对比美国税收抵免、欧洲碳税倒逼等财政政策，我国关于 CCUS 技术的鼓励政策只是列入了各规划文件、政策文件或者实施方案中，并未见具体的财务

补贴政策，目前水泥行业暂未纳入碳排放权交易体系，企业有关 CCUS 技术研发投入的动力暂未受到碳价影响。

CCUS 技术的大规模商业化应用是水泥行业最终碳中和目标实现的关键，CCUS 技术的成熟与否会直接影响未来水泥行业 CO₂ 排放水平，因此需要加强对水泥行业二氧化碳捕获试点和示范项目的资金支持，有序推进水泥 CCUS 技术示范项目建设，未来还需要更多的示范性项目累积经验。

3.5.3. 实现碳中和目标过程中 CCUS 作用

全球范围内，CCUS 技术是水泥行业碳中和技术路径中至关重要的一环。截至 2022 年底，全球各水泥行业协会已发布的 2050 年净零排放路线图的技术布局侧重点虽然有所不同，但是都极为强调未来 CCUS 贡献（图 19）。

①全球水泥和混凝土协会（GCCA）提出在 2020-2030 年，熟料替代（增加使用粉煤灰和高炉矿渣粉）仍将发挥重要作用；在 2030-2050 年间重点支持 CCUS 技术，同时绿氢和绿电的使用也将发挥重要作用。

②美国波兰特水泥协会（PCA）提出短期内用回收材料替代原材料、中期增加固体废弃物和可再生能源作为替代燃料的使用、长期使用 CCUS 技术实现碳减排。其中，重点支持燃料替代技术的研发。

③欧洲水泥协会（ECA）指出循环经济是熟料生产的核心，支持使用不可回收废物和生物质废物燃料，鼓励低碳水泥的使用，其重心为支持 CCUS 技术发展。

④英国混凝土与矿物制品协会（MPA）在路线图中确定了零碳电力、化石燃料替代、低碳水泥和 CCUS 技术的减排潜力。其中 CCUS 技术对实现净零制造至关重要，61%的 CO₂ 排放可通过该技术的应用实现。

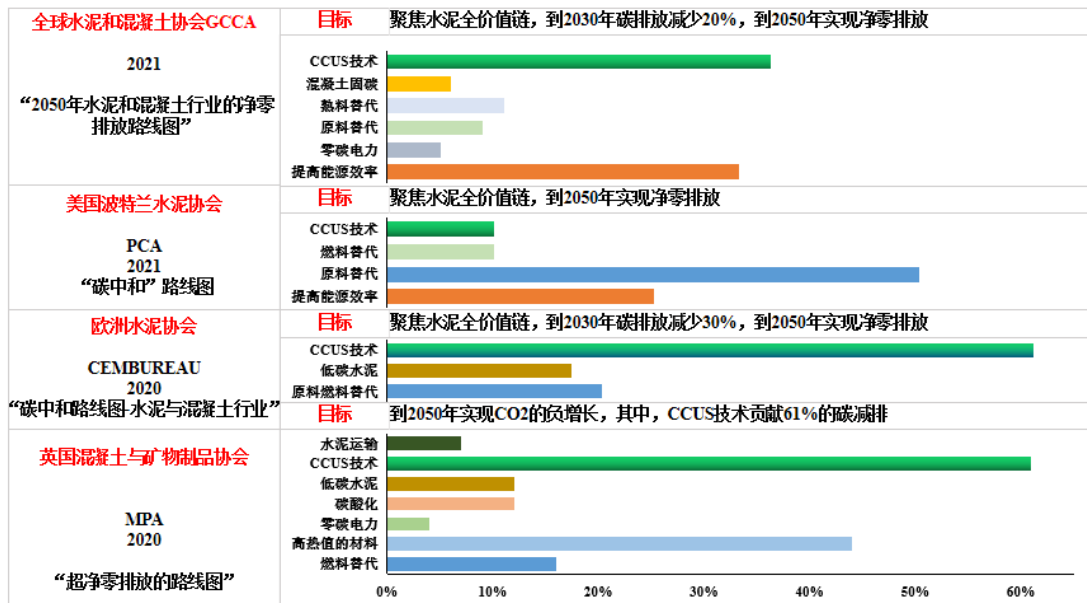


图 22 主要国家和地区水泥行业碳中和路线图中 CCUS 等技术作用情况

3.5.4. CCUS 技术应用预测

“双碳”背景下，水泥行业 CCUS 应用需逐步对各技术路线进行探索、应用示范和商业推广，详见表 8。

表 8 水泥行业 CCS 短期优先行动表

年份	2025	2030	2035	2050
液体化学吸收技术	MEA 吸收剂工艺开发和中试试验：新型吸收剂研究和试验 10 万吨以上规模中试试验	新型吸收剂工艺开发和中试试验：MEA 吸收剂工业示范和商业应用 30 万吨以上规模示范	新型吸收剂工业示范和商业应用：MEA 吸收剂大规模商业化应用 百万吨级工业示范	商业化应用：技术能耗降低、经济成本可接受 行业内逐步推广
钙循环技术	工艺开发	工艺开发和中试试验 10 万吨以上规模中试试验	工业示范级应用 30 万吨以上规模示范	商业化应用：能耗降低，装备成熟，经济成本可接受 百万吨级工业示范
膜分离技术	膜材料工艺开发	开发和中试试验：新型膜材料的研究和试验 5 万吨以上规模中试试验	工艺开发：新型膜材料的工艺开发 10 万吨以上规模示范	工业示范级应用：中试试验 30 万吨以上规模示范
富氧燃烧技术	工业级示范；第二代富氧燃	低能耗制氧技术与富氧燃烧技术的工业级示范：第二代	商业化应用：第二代富氧燃烧技术工	商业化应用：成本可接受

年份	2025	2030	2035	2050
	烧技术工艺开发	富氧燃烧技术工艺开发和中试试验 10万吨以上第二代富氧燃烧技术的中试试验	业示范和商业化应用 30万吨以上规模第二代富氧燃烧技术示范	50万吨以上规模第二代富氧燃烧技术示范
LEILAC技术	可行性研究和工艺开发	工艺开发和中试试验 5万吨以上中试试验	工艺开发和中试试验 10万吨以上中试试验	工业级示范 30万吨以上中试试验

结合上表，根据科技部社会发展科技司与中国21世纪议程管理中心于2019年联合发布的《中国碳捕集、利用与封存（CCUS）技术发展路线图研究》中制定的CCUS技术发展总体路线图和本项目对未来水泥熟料生产量预测数据，获得水泥行业CCUS技术发展路线图，详见表9，图23-24预测了CCUS技术CO₂利用与封存量及吨二氧化碳捕集成本。

表9 水泥行业CCUS技术发展路线

CCUS技术发展目标及捕集与预测		2025	2030	2040	2050	2060
		掌握现有技术的设计建造能力	掌握现有技术产业化能力，验证新型技术可行性	掌握新型技术的产业化能力	掌握CCUS项目产业化能力	实现CCUS的广泛部署和区域新业态
发展目标	CO ₂ 利用与封存量（万吨/年）	300-600	800-1100	3500-4200	12000-14000	20000-25000
	产值（亿元）	50	170-190	280-320	440-460	990-1120
捕集	单体规模（万吨/年）	10	10-30	30-50	30-50	50-100
	成本（元/吨CO ₂ ）	300-640	220-580	190-530	170-480	150-430

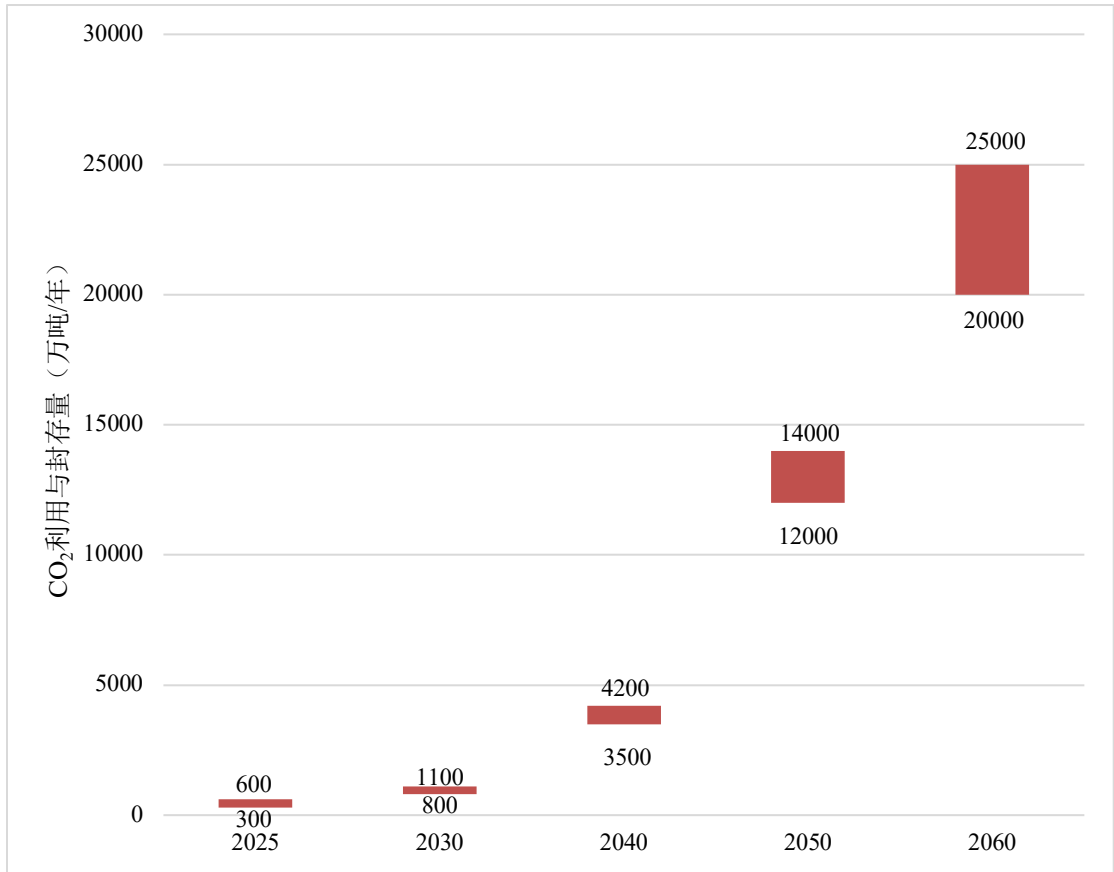


图 23 水泥行业 CCUS 技术 CO₂ 利用与封存量预测

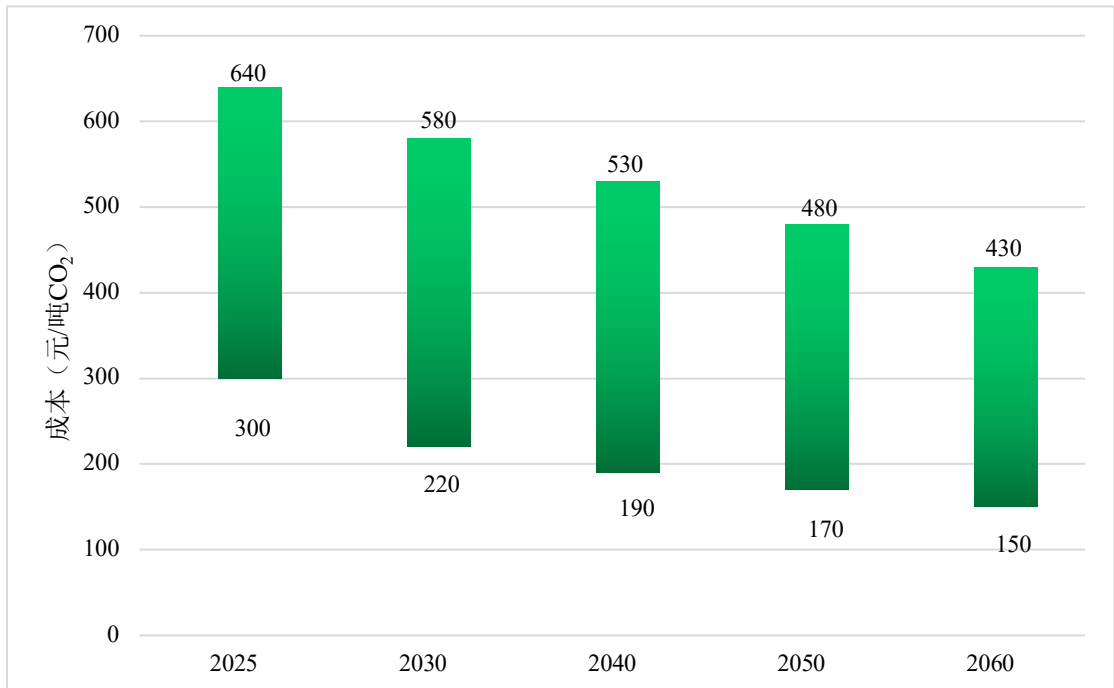


图 24 水泥行业 CCUS 技术成本预测

3.6. 碳中和创新技术

水泥行业实现碳中和离不开工艺、技术、燃烧方式等的不断创新和突破，

以下四种在研创新性低碳水泥技术，可能在未来水泥行业二氧化碳减排进程中发挥重要作用。

3.6.1. 外燃式旋窑碳捕集技术

该工艺流程如图 25 所示，主要原理是根据捕集 CO₂ 量的要求，将原本送入预热器下料管的生料，分出一定量送入外燃式高温煅烧回转窑中分解。由于采用外燃式技术，生料在回转窑内间接加热，风量小且获得 CO₂ 初始浓度高；燃料与物料不直接接触，分解出来的氧化钙活性较高，可以直接吸收原料中分解出来的 SO_x，分解出来的气体只含少量的 SO_x、NO_x、粉尘；经过换热器将高温分解气体冷却降温后送入除尘器除尘，再送入脱硫床、干燥床、精密吸附床进一步脱硫、干燥、除尘并除去氮氧化物等杂质，然后送入精馏塔精馏提纯，最后送入储存罐。燃料燃烧烟气废热和高温 CO₂ 冷却余热可用于余热锅炉，也可以用来预热燃料燃烧所需要的空气。

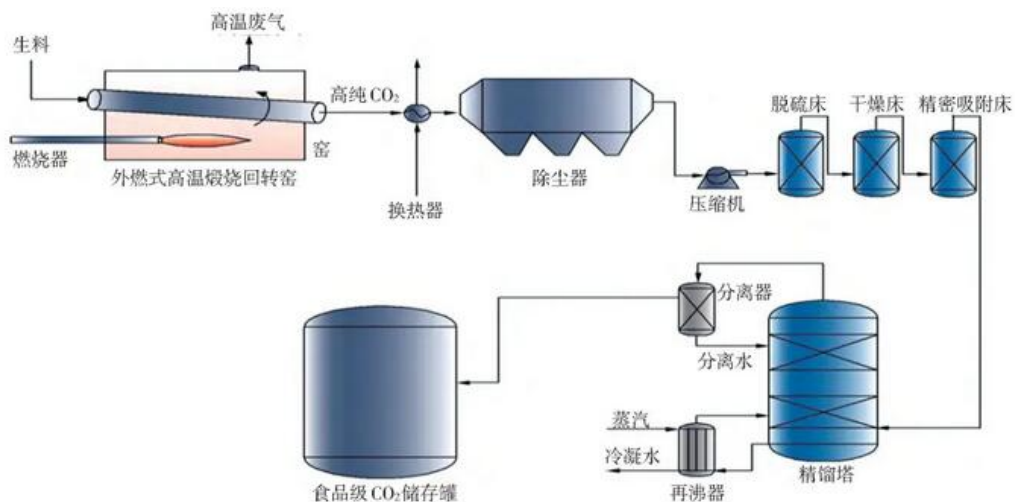


图 25 外燃式高温煅烧旋窑碳捕集工艺

该技术仅捕集原料煅烧部分产生的 CO₂，无法捕集燃料燃烧产生的 CO₂，并且该技术对生产线改动较大，仅适用于新建生产线配套建设。主要优点是工艺原理简单，工艺系统没有化学吸收法复杂，运行成本比较低；其缺点是，外燃式高温煅烧回转窑对筒体材料的耐高温特性要求非常高。目前在水泥行业还没有实际案例，但利用该项工艺及装备已建成投产了 4 条 Φ2.8 m×56 m 外燃式旋窑氧化镁粉生产线，且陆续经过了近 6 年的实际生产，加之 CaCO₃ 分解与 MgCO₃ 分解特性相近，因此，将该项工艺及装备未来有望应用于捕集纯化水泥窑 CO₂。

3.6.2. 悬浮煅烧技术

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°C，烧成的熟料粒径小于常规熟料。

由于取消了回转窑和篦冷机，采用高度的集成布局，系统阻力和散热、漏风会大幅度减小，生产能耗将大幅度降低。此外，悬浮煅烧技术还具有系统投资低、产品质量高、占地面积小的特点。

与“新型干法水泥”技术相比，预计烧成温度由 1450°C 降到 1320°C，热耗降低 100kcal/kg 熟料。理论情况下能够帮助水泥企业节电 20%左右，节煤 20%左右，CO₂减排 10-25%，NO_x减排 40%以上。此外，悬浮煅烧为静态设施，为未来电炉烧成奠定了基础；为风力、光伏、地热等绿电的零碳烧成创造了条件；也为纯氧、绿氢等零碳燃料的使用可能性提供了方便。

3.6.3. 全氧燃烧技术

全氧燃烧是把燃料与 90%~99%纯氧按照预定燃料比混合，以更精确的方式进行燃烧的技术。全氧燃烧技术优势显著，可以极大地提高燃烧效率、火焰及烟气温度，其应用主要集中在发电厂和玻璃工业，在水泥行业的尝试虽然较早（可追溯至 1920 年），但至今没有大规模的推广，主要因为制氧成本高昂及水泥窑大风量煅烧和充分热交换的特性。水泥窑采用纯氧+整体富氧+O₂/CO₂ 方式时，一般与 CCS（CO₂ Capture and Storage）技术联合使用。现阶段由于制备纯氧以及 CO₂压缩和净化的能耗太高（如深冷法制纯氧电耗为 0.5~0.8kWh/m³O₂，吨减排 CO₂成本为€40/tCO₂），限制了其大规模工业化应用。

3.6.4. 跨行业联合创新颠覆性新技术

2021 年初，德国三家享誉世界多年的企业——Enertrag 可再生能源公司，Cemex 集团的德国 Rudersdorf 水泥企业和 Sunfire 电解化学技术公司共同组建了一个技术创新研发联合体，旨在完全达到碳中和条件下，建设一套完整工业规模的可以同时生产水泥和多种化学产品的联合生产系统。该创新研发项目的名称是“Concrete Chemicals”（混凝土 化学产品），报请德国联邦环境、生态保护和核安全部（BMU）审批后，已列入 2021 年《德国工业减碳行动》规划，并获得了项目启动的资金支持。

项目的目标和科技攻关内容主要为：Enertrag 公司在其 Brandenburg 的风能和太阳能电厂为年产水泥 200 万吨的 Rudersdorf 水泥厂提供其所需要的全部电能，建设一套专门的零碳供电及储能系统。Sunfire 公司给 Rudersdorf 水泥厂提供一套 20 MW 的碱性加压电解槽装备，用于生产 5000t/a 绿氢，一套 Co-SOEC 高温电解槽装备，用于生产碳氢化合物和一氧化碳的混合物组成的合成气体（syngas）。Rudersdorf 水泥厂排出的全部 CO₂ 则分别与绿氢或合成气体经过一系列物理化学的催化反应后，生产出绿色甲醇、多种清洁化学产品和清洁燃料。

“Concrete Chemicals”（混凝土 化学产品）联合工厂可完全实现碳中和，计划 2025 年全线联动投入试生产。这将是世界上第一条工业规模验证示范生产线，不仅能实现碳中和，而且还首创水泥厂全部运用零碳电能，同时生产零碳水泥（2Mta），以及多种清洁化学产品和清洁燃料；水泥窑全部采用替代燃料和绿氢煅烧熟料，其对化石燃料（煤、油、气）的替代率 TSR=100%。该项目开拓了水泥窑 CO₂ 高效利用的新领域，实现水泥联合能源和化工行业的优势互补，协同联合创新的流程再造新技术，科技、经济与可持续发展的意义非凡。

3.7. 水泥行业碳中和技术路径

根据项目组预测，到 2060 年水泥行业碳排放量在 0.29 亿吨左右（考虑 CCUS 贡献），实现近零排放，2020 年-2060 年碳排放情况见下图。

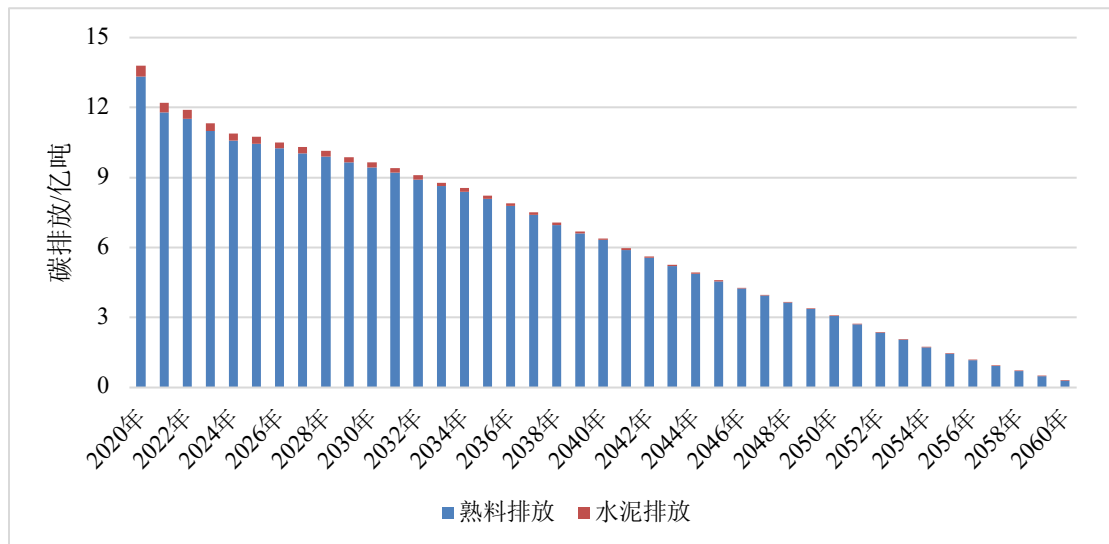


图 26 2020 年-2060 年碳排放情况

预计到 2060 年水泥和熟料的碳排放强度分别下降到 50kg/t 和 68kg/t，水泥和熟料的碳排放强度变化情况见下图：

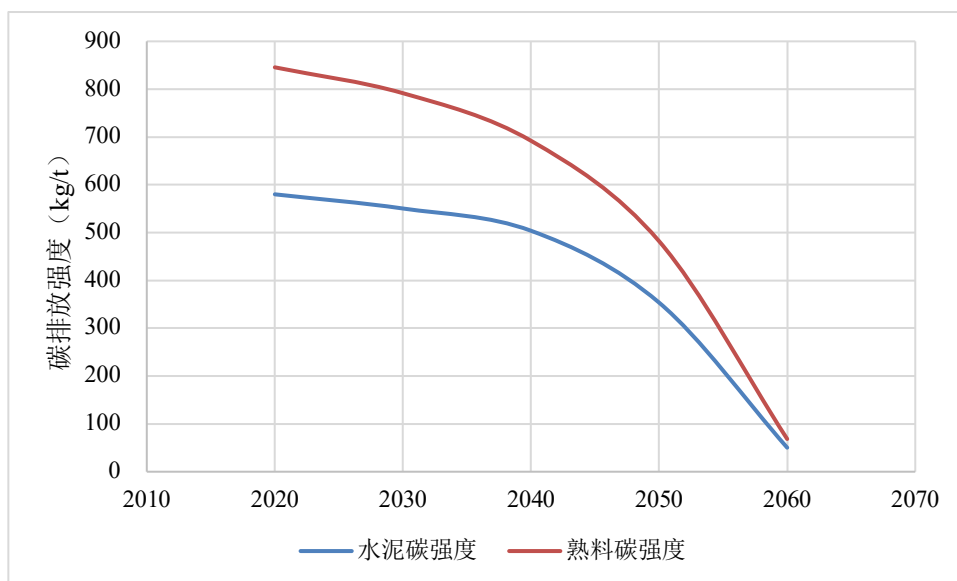


图 27 水泥及熟料碳排放强度变化

水泥行业碳减排并逐步实现碳中和的过程主要分为以下几个阶段：

2020-2030：水泥行业减碳的主要措施是极致能效提升和低效高排放产能退出。主要目标是实现水泥行业碳排放高位平台期稳定并尽早开始呈现出下降态势。固废燃料基本实现量产，替代燃料辅以全氧/富氧燃烧技术得到较多应用，降低行业对煤炭的依赖。氢能、早期 CCUS 项目开发、示范和小规模应用。预计到 2030 年，水泥行业 CCUS 技术的使用规模约 800-1100 万吨 CO₂/年。

2030-2040：水泥产量随社会发展进入较低水平，替代燃料实现全面应用，CCUS 逐步成熟。燃料替代率提升，氢能和电力制备水泥技术实现试点和示范。

2040-2050：至 2040 年大多数现有服役水泥窑将达到寿命终点，需要进行重大再投资，基于新型窑炉结构进行流程再造，包括全氧辅助、电力窑炉、氢制水泥技术等将实现更大普及率。替代燃料和 CCUS 将在减排中发挥更大作用，到 2050 年，水泥行业 CCUS 的 CO₂ 捕集规模在 12000-14000 万吨/年。水泥生产的碳排放量将下降到目前水平的约 1/5，吨水泥与吨熟料的碳强度将下降到目前的 50%左右。

2050 年以后：新型替代燃料技术如电力与氢能将成熟并实现商业化，煤炭在燃料中占比将趋于零，水泥行业 CCUS 作用进一步明显。水泥行业的 CO₂ 净排放以及水泥产品的碳强度将接近净零水平。

水泥行业实现碳中和的主要技术路径为需求量降低减碳、低碳水泥减碳、能效提升减碳、能源替代减碳、CCUS 减碳等，各技术路径最终减碳贡献度分

别为 59.9%，3.1%，9.3%，9.4%，18.3%，在典型年份的减排贡献见如下图所示。

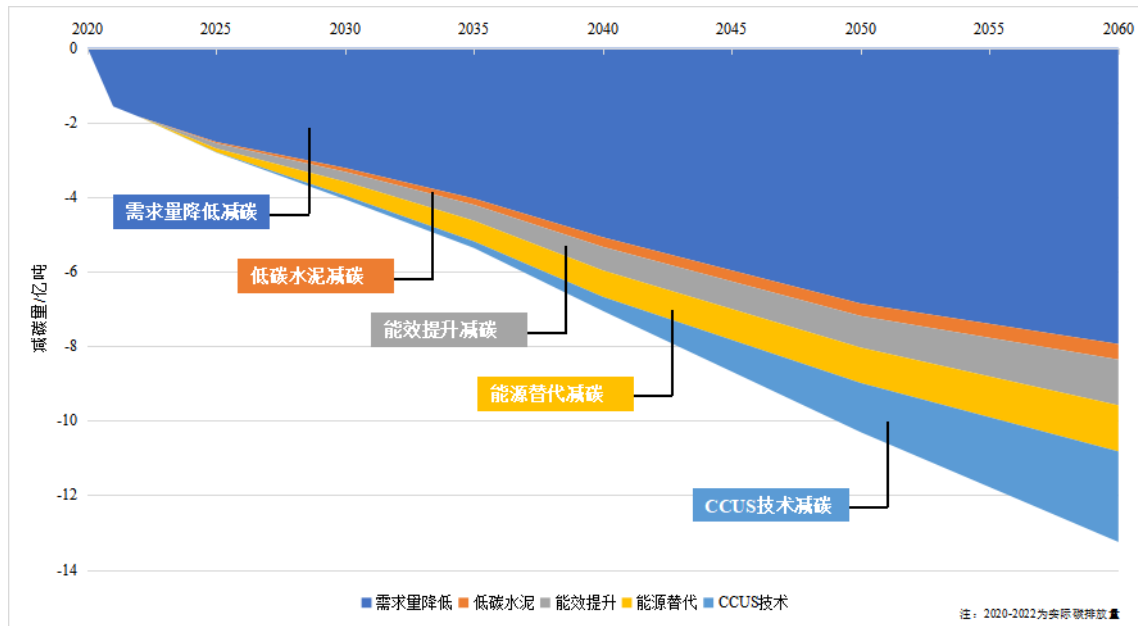


图 28 不同技术路径的减排贡献

水泥行业碳中和各技术路径及关键技术部署情况如下：



图 29 水泥行业碳中和各技术路径及关键技术部署情况

4. 政策建议

4.1. 压减水泥低效、高排放产能

减量化是水泥行业减碳最重要也是最有效的技术路径。未来，水泥行业仍需将压减水泥低效、高排放产能作为推进行业碳中和的重要举措。中国约 90% 的水泥生产设施为近 20 年以内新建，40% 的水泥厂于近 10 年内新建。以运行寿

命 30-40 年计算，未来十年到二十年将有很多生产线面临改造重整的压力，建议尽快研究修订《产业结构调整指导目录》，提高水泥熟料低效产能和过剩产能淘汰标准，明确碳排放强度指标限值，综合考虑生产线建成年限、规模、装备水平实施淘汰政策，有序退出。鼓励大型骨干水泥企业联合设立产业结构调整专项资金，通过以奖代补的方式促进水泥熟料过剩产能的退出。支持各类社会资本参与水泥企业并购重组，提升水泥产业集中度，提高企业管控水平，有效保障减碳措施的实施。

4.2. 促进循环经济，实现固体废物燃料的大规模生产和应用

固废替代燃料是水泥减排路径中的重要一环，将对未来水泥行业有深刻影响。未来几年，替代燃料在水泥行业中的应用仍然困难重重，一方面，国家“可再生能源补贴政策”虽然在退坡，但现阶段依然对废物处置方式的选择有着极大影响；另一方面，在“十三五”期间多个省市大规模建设垃圾焚烧装置，焚烧能力严重过剩，制约替代燃料进入水泥行业的可能。为应对这些问题，从政府侧看，为给大城市焚烧设施留出空间，可以考虑完善中小城市固体废物收集分类体系，鼓励中小城市固废燃料产业的建立与标准化，农村包围城市，使固废作为水泥行业替代燃料市场进一步扩大。从企业侧看，水泥企业为应对碳中和压力，应提高对固废替代燃料高质、高量要求，轻处置而重燃料替代概念，推动相关标准和产业的建立。同时，鼓励大型水泥集团、环保公司和基础建设投资基金等机构进入可燃废弃物深加工行业，生产标准化的替代燃料制品。

4.3. 注重高质量发展，将效率提升做到极致

深入理解“十四五”期间国家碳减排目标对水泥产业链的影响，主动开展生产端到消费端的碳足迹评估和减排成本曲线评估；注重高质量发展，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，在现有节能技术充分应用的基础上持续提升能效水平、降低企业的能耗和碳排放强度。引导企业通过“低碳+数字化”的运营超越竞争对手，将效率提升做到极致。

4.4. 加大水泥行业 CCUS 技术研发投入

加快技术研发，降低碳捕集能耗。加速新一代高碳容、低能耗的相变吸收

剂、催化吸收剂等捕集吸收剂与耐磨损的有机胺负载吸附剂、钙基、钠基等功能化吸附材料研发。改进工艺设备，配套多梯级热能利用技术，研制大流量、高传质效率反应器，探索 CCUS 与新能源耦合的负排放技术、氢能技术结合的新技术系统等前沿新技术。

建立健全 CCUS 相关法规、标准。目前，我国尚未出台 CCUS 相关的法律法规，也缺少相应的技术规范及标准体系。建议国家尽快完善、优化 CCUS 法律法规体系，制定科学合理的 CCUS 项目建设、运营、监管、终止标准体系，规范 CCUS 全产业链项目和活动。

研究开展 CCUS 跨行业产业化集群建设。充分利用相关基础设施共享机制，优化整合各地区、各行业、各企业已有资源，建设二氧化碳捕集、运输、利用、封存共享网络，形成新的 CCUS 产业集群。推动 CCUS 技术与不同碳排放领域及行业的耦合集成，促进行业、企业之间开展广泛的交流合作，形成 CCUS 领域新的商业模式，推动商业化步伐。

4.5. 推动行业实施碳排放强度控制及碳排放权交易

碳中和水泥生产技术应用必然导致水泥生产成本上升，而碳定价与碳交易机制将是推动水泥行业低碳转型最有力的政策保障。水泥行业碳排放量大、生产技术水平相对较高，且工艺单一，拥有良好碳排放数据核算基础，具备条件率先纳入碳交易市场。目前水泥行业除节能技术之外的各类技术总体减碳成本较高，尤其是 CCUS 等新兴技术能耗高导致成本高企，国内自愿性碳市场现有碳价难以匹配，未来国家级碳市场覆盖范围和碳定价的合理性是推动企业减排的重要因素。当前，水泥企业应做好应对纳入碳市场的准备，做好企业碳资产管理，设定碳减排目标与路线图，积极参与碳排放的监测、报告和核查，力争在转型赛道赢得先机。

4.6. 强有力的政策支持和财务激励

鉴于水泥行业碳减排技术选项少，且成熟技术（如替代燃料）和新兴技术（如 CCS）之间过渡难度大，因此水泥行业的碳减排路径亟需强有力的政策支持。

以 CCUS 为例，发展面临的最大挑战是示范项目的成本相对过高。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等。

CCUS 项目的重要贡献在于减少碳排放，但企业在投资巨额费用后，却无法实现减排收益，严重影响了企业开展 CCUS 示范项目的积极性。与新能源产业相比，CCUS 相关政策扶持力度仍需加强。建议建立商业机制如 CCUS 专项补贴、碳税和安全法规等其他支持机制为 CCUS 的部署营造良好的环境；同时可通过碳市场调节对于企业排放配额的分配和交易，对于 CCUS 项目的实际减排量计入信用在碳市场上交易。碳交易市场的建立与完善有助于将减排成本转移至制造环节，从而为上游减碳提供激励，为产业可持续发展营造良好的政策环境。

总体而言要尽快推出并落实将水泥纳入碳交易体系的政策，加强对于新兴技术的定向研发和财务激励，对先行先试的企业给予财政补贴。吸引更多资本的关注和支持，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。

参考文献

- [1]海关统计数据查询平台 <http://stats.customs.gov.cn/>
- [2]工业和信息化部 科技部 自然资源部《关于印发“十四五”原材料工业发展规划的通知》（工信部联规〔2021〕212号）。
- [3]中共中央 国务院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（2021年9月22日）。
- [4]《水泥行业碳减排技术指南》（2022版）
- [5]落基山研究所, 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]中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究—<https://www.efchina.org/Reports-zh/china-2050-high-renewable-energy-penetration-scenario-and-roadmap-study-zh>.
- [7]中华人民共和国生态环境部. 全国碳排放权交易市场第一个履约周期报告 [EB/OL]. (2022-12-30)[2023-01-08]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/>.
- [8]International Carbon Action Partnership. Emissions trading worldwide. ICAP status report 2022[EB/OL].
- [9]史伟,崔源声,武夷山.国外水泥工业低碳发展技术现状及前景展望[J].水泥,2011(03):13-16.

[10]美国波特兰水泥协会 (PCA) Sustainable Cement
<https://readymag.com/apcoworldwide/cementandconcretelifecycle/4/>.

[11]张宾,赵有强,林永权等.水泥工业二氧化碳循环利用现状[J].中国水泥,2021,No.227(04):75-81.

[12]李函珂,党成雄,杨光星等.面向二氧化碳捕集的过程强化技术进展[J].化工进展, 2020,39(12):4919-4939. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0840.

[13]IEA (2023), CCUS Projects Database, IEA, Paris, <http://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>.

[14]Global Cement and Concrete Association, GCCA. 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. 2021.
<https://gccassociation.org/concretefuture/>

[15]The Portland Cement Association, PCA. Roadmap to Carbon Neutrality. 2021.
<https://www.cement.org/sustainability/roadmap-to-carbon-neutrality>

[16]Cement Association of Canada, CAC. Concrete Zero: Canada's cement and concrete industry action plan to net-zero - Cement Association of Canada. 2022.
<https://cement.ca/sustainability/concrete-zero/>.

[17]The European Cement Association, ECA. 2020.
https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf

[18]Mineral Product Association, MPA. MPA-UKC-Roadmap-to-Beyond-Net-Zero_Oct20. 2020.
https://mineralproducts.org/MPA/media/root/Publications/2020/MPA-UKC-Roadmap-to-Beyond-Net-Zero_Oct20.pdf

[19]Japan Cement Association, JCA. カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン.2022. https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/220324_01.pdf

[20]刘含笑,吴黎明,胡运进,吴洪义,薛建仓,张壬寅,崔盈,单思珂,王乐.水泥行业 CO₂ 排放特征及治理技术研究[J].水泥, 2023(02):10-15.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2023.02.003.

[21]田桂萍,方艳欣,崔源声.我国水泥工业发展现状及前景展望[J].水泥,2023(01):6-12.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2023.01.002.

[22]王新频,宋教利,李光鑫.我国水泥工业碳达峰与碳中和前景展望[J].水泥,2021(08):1-9.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2021.08.001.

[23]夏凌风,郭珍妮,邱林,叶寒韵,范永斌.水泥行业碳减排途径及贡献度探讨[J].中国水泥,2022(11):14-19.

[24]郭涛,彭学平,刘继开,武晓萍,袁群.水泥窑富氧燃烧技术研究现状及分析[J].水泥技术,2015(01):46-48.DOI:10.19698/j.cnki.1001-6171.2015.01.009.

[25]高长明. 水泥工业颠覆性整套创新技术将在德国横空出.2021.

[26]2021 年 中 国 生 态 环 境 统 计 年 报
<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202301/W020230118392178258531.pdf>

[27] 姜雨生,刘科,张作顺.水泥窑协同处置生活垃圾模式分析及未来发展趋势[J].中国水泥,2020(01):71-75.

[28] 中国统计年鉴 - 国家统计局 <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>.

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，不代表能源基金会的观点。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。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.