



加速工业深度脱碳： 中国水泥行业碳中和之路





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。



关于中国水泥协会

中国水泥协会(CCA)于1987年在北京成立，是具有独立法人资格的社会团体。中国水泥协会是由全国水泥及相关产品的生产企业、科研工程设计企业、投资咨询企业等单位自愿组成的行业性组织，具有广泛的代表性，是企业与政府联系的桥梁纽带，为企业和政府、社会做好技术与政策咨询服务。我们与企业、政府、科研设计机构及建设者共同协作，促进水泥行业绿色低碳永续发展。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所 (RMI)

李婷
李抒苒
李威
闫榕
张梦露

中国水泥协会

王郁涛
范永斌
张翼
夏凌风
赵峙杰
刘淑娟

其他作者

高旭东 中国水泥协会
郭珍妮 中存大数据
邱林 中存大数据
叶寒韵 中存大数据
贺梦蛟 中存大数据
孙盈盈 中存大数据
李晋 清华大学环境学院

联系方式

李威 wli@rmi.org

引用建议

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

鸣谢

特别感谢 Angela Wright Bennett Foundation、Bloomberg Philanthropies、ClimateWorks Foundation、Quadrature Climate Foundation、Sequoia Climate Foundation 和 The William and Flora Hewlett Foundation 对本报告的支持。

我们也向为本研究提供意见和建议的来自水泥企业和研究机构的专家们表示诚挚的感谢。

目录

前言	5
1. 中国水泥行业碳中和之路: 挑战与优势	6
中国占据全球水泥生产与消费的半壁江山, 减排意义重大	6
中国水泥行业碳中和转型的挑战	7
中国水泥行业碳中和转型的优势	8
2. 碳中和图景下水泥行业供需展望	9
城镇化与基建放缓将主导未来的水泥需求	9
2050 年水泥熟料需求将下降三分之二	10
进出口对水泥行业产量与碳排放的影响有限	11
3. 水泥行业脱碳的技术路径	12
水泥减量生产是水泥行业减排重要抓手	12
水泥生产脱碳的技术可行性	14
燃料替代对水泥脱碳发挥重要作用	14
能效提升有进一步空间	17
调整水泥品种结构以创造减碳价值	18
碳捕集、封存与利用是水泥碳中和的必要技术	19
零碳水泥的经济可行性	20
4. 中国水泥碳中和之路: 时间、空间演变和转型模式	23
中国水泥碳中和转型时间线	23
中国水泥碳中和产能地理分布	26
中国水泥碳中和转型模式	28
5. 推动中国水泥碳中和发展: 政策建议	29
推动水泥行业纳入全国碳交易市场, 发挥碳价机制促进水泥行业向碳中和转型	29
通过与碳挂钩的绿色采购政策, 促进需求方的转型。建立绿色建材市场和生态系统	29
发挥绿色金融作用, 为水泥企业绿色转型提供金融支持	29
促进循环经济, 实现固体废物燃料的大规模生产和应用	29

前言

水泥行业是中国实现碳中和的关键行业之一。中国的水泥生产与消费占据全球市场的一半以上，碳排放占全国总排放量的13%，仅次于电力与钢铁行业。水泥行业减排的难点一是减少生产过程的排放，这需要能够大规模替换现有原料的工艺技术；二是改变以煤炭为主体的燃料结构。此外，中国水泥企业的资产运行年限较短，快速转型带来的搁浅资产风险较高，同时，较低的行业集中度也对新技术的大规模应用带来一定挑战。

在双碳目标下，中国正在着力构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系，包括制订以水泥为代表的建材等重点行业的碳达峰实施方案。随着以建筑业为代表的下游产业向低碳转型，产业政策如错峰生产和减量置换等常态化，以及碳市场等市场措施的启动，水泥行业向低碳乃至碳中和转型有望不断取得进展。

本报告《加速工业深度脱碳：中国水泥行业碳中和之路》由RMI与中国水泥协会共同合作，针对水泥行业在碳中和目标下的转型路线图进行深入探讨。我们的分析表明，水泥行业实现碳中和需要在减量、燃料、品种、能效和末端处理各环节共同发力。在城镇化与基建需求放缓、淘汰落后产能以及建筑业提升材料效率等多重因素影响下，中国的水泥需求与产量将呈现明显下降趋势。在此基础上，燃料替代技术将发挥重要减排作用。与此同时，调整水泥品种可以起到降低过程排放的作用，其路径包括调整水泥的熟料系数、生产新型低碳水泥，以及替代原料技术。碳捕集、封存与利用（CCUS）是水泥行业实现碳中和的重点技术之一，能够为水泥工艺中的部分碳排放进行末端处理，对未来水泥产业的布局也将产生影响。

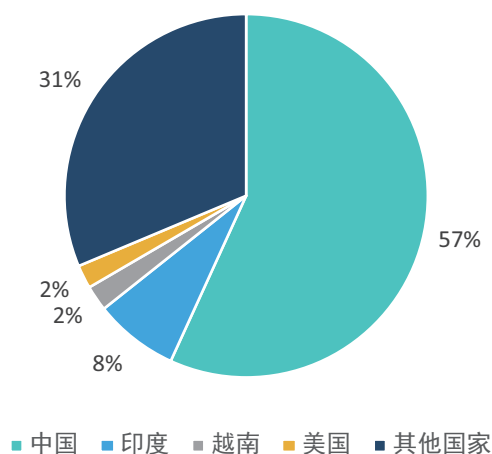
值得指出的是，水泥行业碳中和需要依靠价格机制传递正确的市场信号，以提升低碳水泥的成本优势。同时，水泥低碳转型与上下游产业关系密切，宜打破行业边界、布局综合规划。考虑到供需关系、技术发展速度、成本构成等因素的不确定性，本研究聚焦于在假设时间框架下中国水泥行业的碳中和转型趋势、短中长期安排和技术经济路线图，以期为政策制定和行业规划提供参考。

1. 中国水泥行业碳中和之路：挑战与优势

中国占据全球水泥生产与消费的半壁江山，减排意义重大

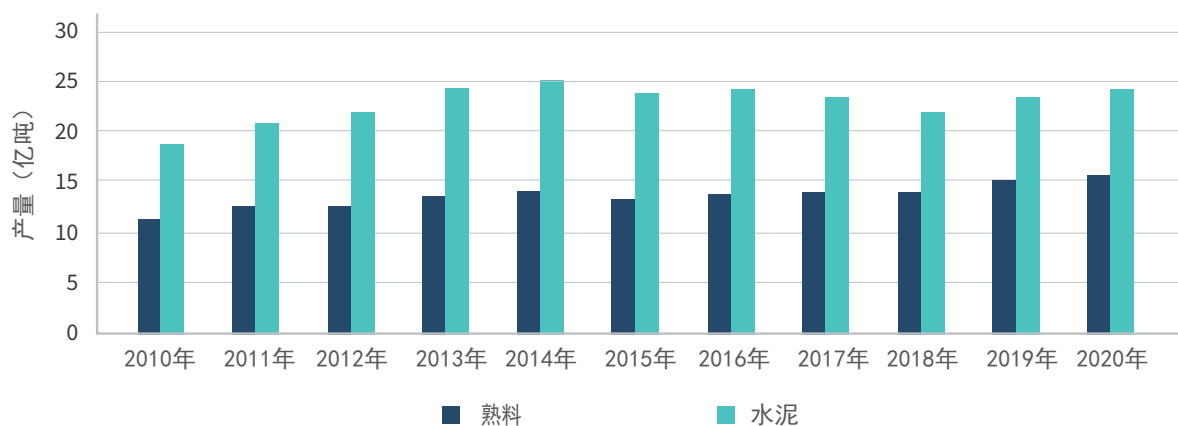
中国是全球最大的水泥生产国和消费国。2021年中国水泥生产占世界的57%(图表1),中国共生产水泥23.63亿吨(图表2);共消费水泥23.8亿吨,消费量也占全球一半以上¹。从碳排放的角度看,2020年,中国水泥行业CO₂排放量约为13.7亿吨(图表3);据不同研究,水泥行业占全国总碳排放的比例约13%,仅次于电力和钢铁行业。水泥行业的减排对实现中国碳中和至关重要。

图表1 2021年全球水泥主要生产国



来源: US Geological Survey, Cement Statistics and Information

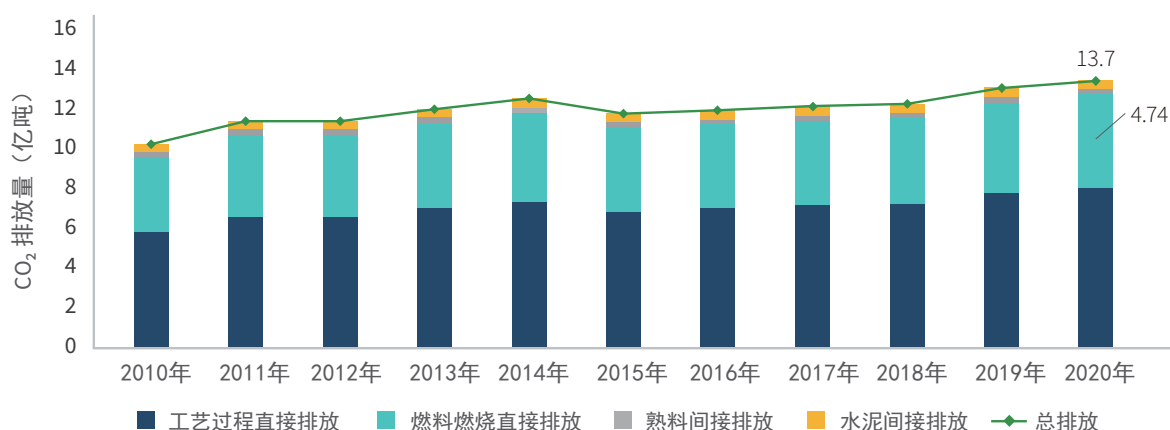
图表2 2010-2020年中国水泥与水泥熟料产量



来源: 本研究课题组

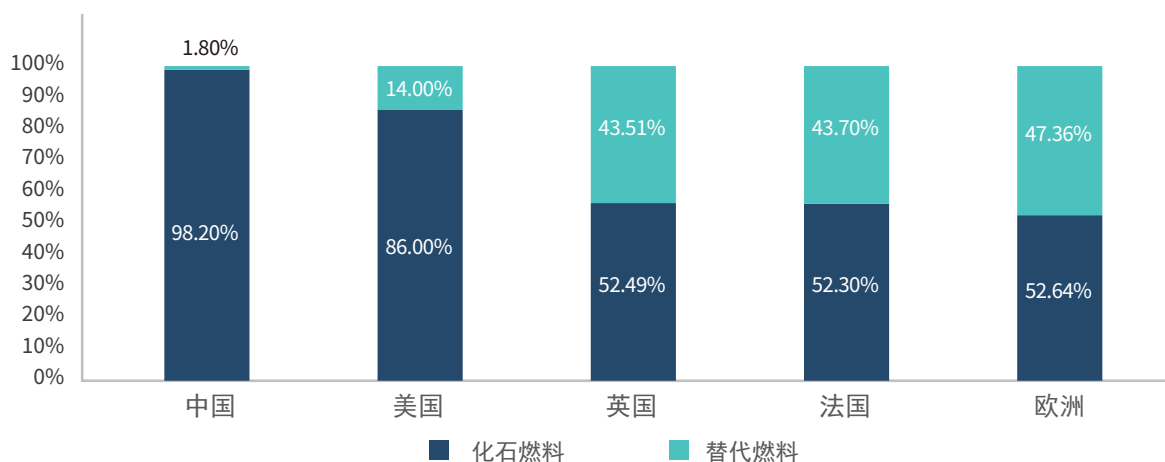
¹ 据 The Global Cement Report, 全球水泥消费量2020年达到41.4亿吨

图表 3 2010-2020 年中国水泥行业 CO₂ 排放情况



来源：中国水泥协会

图表 4 2018 年每吨熟料用于热能的能源消耗构成



来源：国际能源署（IEA），中国水泥协会

中国水泥行业碳中和转型的挑战

过程排放是水泥行业减排的最大难点

水泥生产过程中约 60% 的碳排放来自碳酸盐（主要来自石灰石）分解产生的 CO₂，即过程排放。石灰石作为水泥生产的核心原材料，具有分布广、储量大、开采易、价格低等特点。以生产 1 吨水泥需要 1.2-1.3 吨石灰石计，全国每年水泥行业消耗的石灰石重量在 20 亿吨级别。虽然目前业界在探索原料替代工艺方面取得了突破，但尚未出现能广泛替代石灰石的替代原料、生产工艺或替代性胶凝材料。因此，难以消除的大规模过程排放会成为水泥行业碳中和道路上的最大挑战。

水泥生产高度依赖化石燃料

在水泥生产过程中，化石燃料燃烧及电力消耗产生的碳排放分别全流程碳排放的约 35% 和 5%。其中化石燃料燃烧主要发生在熟料煅烧阶段，电力消耗主要用于电机驱动。中国水泥生产的能源输入以煤炭为主。相比发达国家与世界平均水平，替代能源的替代比例很低。中国每吨熟料的热能使用中，只有 2% 左右来源于非化石燃料，而欧洲国家的替代率可以达到 40% 以上（图表 4）。

目前水泥行业中较有潜力的替代燃料包括固体废弃物、生物质等。氢能、绿色电力等新型可再生能源在水泥中的应用尚处于早期验证阶段。我国替代燃料使用比例偏低，主要受限于垃圾处理体系有待完善、垃圾衍生燃料产业尚未建立、生物质资源总量及可用性问题。在水泥行业中推广使用替代燃料还需克服制度、技术、成本上的障碍。

水泥资产运行年限较短，在产业低碳转型的背景下面临较大的搁浅风险

过去 20 年中国基础设施建设的快速增长和随之而来的水泥的需求量急剧上升，大量水泥产能也是在这一时期内投建。据估计，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。而全球范围内水泥厂的运行寿命通常为 40 年。如果未来在双碳目标的约束下，部分现存的水泥生产设施成为搁浅资产的风险上升。相应地，如果对这些设施进行升级改造，由于其投入使用的年限较短，也会对企业造成较大的成本负担。

水泥行业集中度不高，不利于市场集体行动以及新技术的推广

水泥行业的全国熟料产能排名前十的企业产能集中度约为 57%，尚有提升空间。集中度不高不利于落后产能的淘汰，也不利于新技术的集中研发与大规模部署。对于碳捕集与封存等需要较大基础设施投资的新技术，水泥企业较为分散的格局也会阻碍基础设施共建共享，从而推高应用成本和难度。分散布局导致的 CO₂ 储运成本及跨行政区域的协调，也会阻碍此类技术的大规模推广。

中国水泥行业碳中和转型的优势

双碳政策、供给侧改革、需求侧变化联合发力推动水泥行业低碳转型

随着中国经济从高速增长阶段转向高质量发展阶段，水泥工业及其下游的建设行业也将实现高质量转变。经过过去 20 年的快速发展，未来中国的城镇化和基础设施趋于饱和，水泥需求将进入平台期甚至下降。同时，供给侧改革的推进，减污降碳环保政策、错峰生产和减量置换等产业政策常态化，以及双碳目标新形势下的碳市场等手段，将联合发力推动水泥行业向低碳乃至碳中和转型。

政策利好、广泛的市场和创新能力利于新能源和新技术的落地推广

中国水泥行业应用的技术和设备较为先进，生产能效在国际上处于领先水平，且拥有创新和新技术应用的经验和能力。中国拥有广泛的水泥市场基础和创新试验条件，利于水泥行业的新技术研发与推广。在国家支持下，以风电光伏为代表的新能源电力已实现对煤电的成本优势。氢能作为前沿科技和产业变革领域也明确列入国家“十四五”规划。2022 年发布的《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》中明确提出探索氢能在工业领域替代应用、扩大工业领域氢能替代化石能源应用规模。这些因素将为新能源在水泥行业转型中的应用创造技术和成本上的利好条件。

建筑业低碳意识的提升将培育壮大低碳建材市场

以建筑业为代表的水泥下游行业不断深化绿色变革、提升低碳标准，将对以水泥为代表的建材行业低碳转型带来利好，并有助培育壮大低碳建材的市场需求。2019 年，住房和城乡建设部发布《建筑碳排放计算标准》，以国标的形式将建材生产的碳排放纳入建筑碳排放计算中。2021 年，国家住房和城乡建设部规定自 2022 年 4 月 1 日起，现行工程建设将强制要求进行建筑碳排放计算。国内房地产企业也纷纷加入双碳行动中。例如，远洋集团已带头承诺 2050 年实现“碳中和”；包括万科、中国金茂等在内的 10 家房企公开承诺公司新建建筑 100% 符合绿色建筑标准。建筑业低碳意识的提升将为水泥低碳转型带来市场动力。

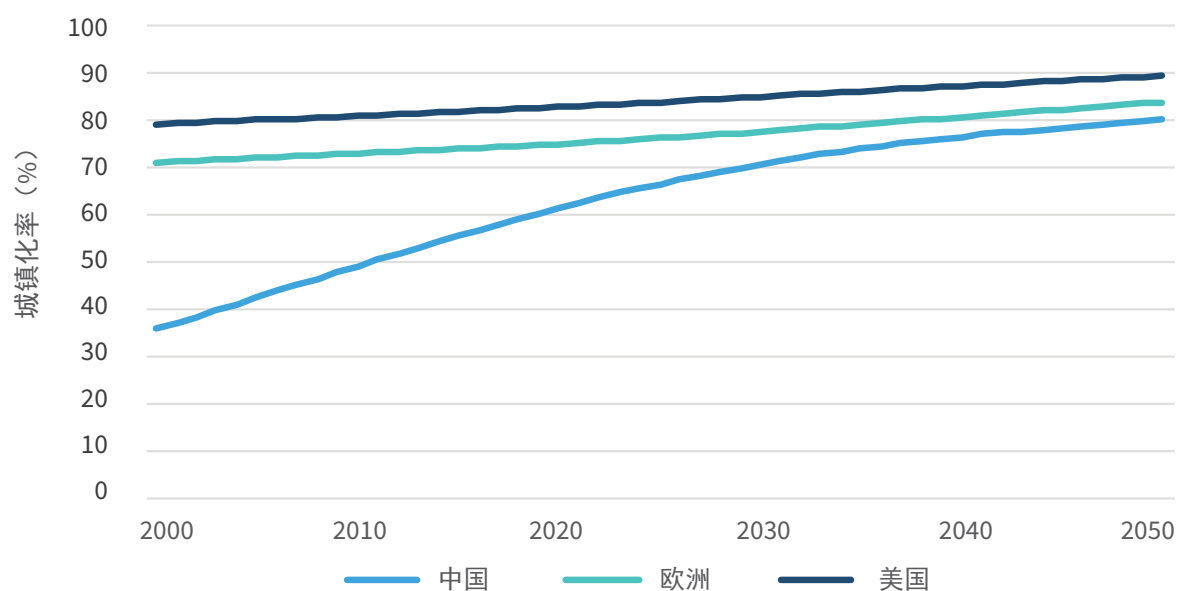
2. 碳中和图景下水泥行业供需展望

城镇化与基建放缓将主导未来的水泥需求

水泥的主要需求来自以建筑与基础设施（包括城市道路、公路、铁路等）为主的建设行业。我国人口目前已进入较低增长阶段，城镇化预计于 2035~2040 年期间达到 80% 以上的成熟水平。中长期人口总量的降低和城镇化进程的减缓（图表 5），以及多年来房地产业高速发展所累积的存量住房，都将促使未来的房屋建设量高位支撑能力不足。预计 2022~2030 年期间房屋建设量将呈稳中有降态势，2030 年之后主要集中于存量房的翻新改造，新建房屋开发规模还将继续减少。

基础设施方面，我国历经二十余年的大规模基础设施建设，当前基建水平已经相对较高，但区域性、领域性投资不平衡问题还相当突出，在较长时期内基建补短板仍是重点任务。因此，基建领域所带动的水泥消费规模仍将有至少十年以上的高位支撑能力。但基础设施建设业的发展呈现逐步放缓趋势。例如，新建公路里程在 2010 年到 2020 年间增加了 120 万公里，但 2020~2030 的 10 年将预计增长 60 万公里，即在 2030 年达到 580 万公里。铁路从 2010 年到 2020 年增长 5.6 万公里。但从 2020 到 2035 年的 15 年间计划新建 5.4 万公里，于 2035 年达到 20 万公里左右。在以建筑、公路、铁路等为主体的建设行业发展放缓背景下，水泥需求下降的趋势不可避免。

图表 5 中国、欧洲、美国城镇化率变化情况



来源：United Nations, World Urbanization Prospects 2018

2050 年水泥熟料需求将下降三分之二

基于与水泥消费量相关的宏观经济指标如 GDP、固定资产投资、人口增长与城镇化率等的预测，我们得到水泥与熟料的中长期需求预测。从 GDP 对水泥消费的拉动来看，随着中国经济发展模式的调整，投资构成中建筑工程投资比重逐渐降低，而节能环保、技术改造及科技投入等方面的投入不断加大，致使单位 GDP 和投资额拉动水泥消费的能力不断降低。在 2035 年我国经济水平按照规划目标达到中等发达国家水平后，社会建设将进入较成熟的阶段，局部地区的基建补短板 and 既有建筑的修补、翻建和升级改造将成为工程建设类型的主体，水泥消费规模还有进一步下调空间。

以固定资本形成总额为表征的固定资产投资也会在未来呈现放缓趋势。中国固定资本形成额占 GDP 的比重半世纪以来持续处于高位，尤其是 2000 年以来，其水平远在其他国家之上，说明我国在经济增长构成中投资拉动占据很重要的地位。但中国经济正从高速增长阶段转向高质量发展阶段，固定资产投资在过去的高基数基础上继续保持快速增长的空间和条件有限。我们预计当前至 2025 年中国固定资本形成额平均增长水平仍将保持高位；2026~2035 年期间转变为中速增长；2035 年后，随着国内建设水平的提高，固定资本形成额增长水平将进一步回调，转为低速增长。

从人均水泥消费量来看，中国的水泥消费量已于 2014 年达峰，达到 24.8 亿吨，人均消费量达到近 1.8 吨 / 人，远高于发达国家的峰值水平。2015~2021 年，人均水泥消费量一直在 1.6~1.7 吨 / 人水平徘徊，水泥消费量处于峰值平台期，但熟料消费量仍不断攀升。参考发达国家的经验（图表 6），人均水泥消费量在达峰后通常经历一定周期的高位波动，继而呈下降趋势，直至达到基本稳定状态。

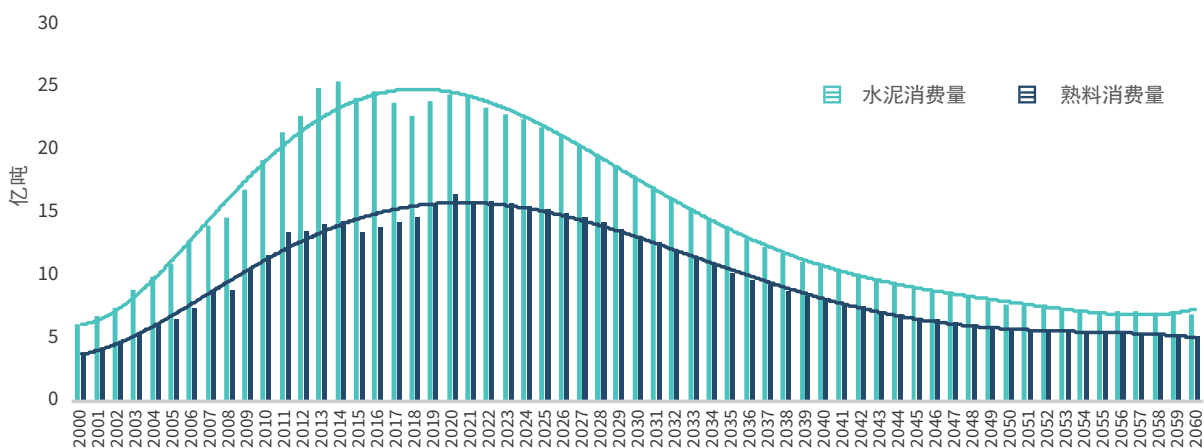
图表 6 部分国家人均消费量达峰后变化情况

国家	人均水泥消费峰值 (kg)	峰值后1-5年平均		峰值后6-10年平均	
		平均值 (kg)	为峰值的 (%)	平均值 (kg)	为峰值的 (%)
英国	357	283	79.3	243	68.1
法国	593	526	88.7	445	75.0
日本	729	657	90.1	579	79.4
韩国	1348	1027	76.2	1111	82.4

来源：本研究课题组

基于此,我们的预测认为到 2050 年,熟料需求将从 2021 年的 15.5 亿吨减少到 2050 年的 5.6 亿吨,降幅约达三分之二。在假设熟料系数上升的情景下,水泥需求将从 2021 年的 23.65 亿吨减少到 2050 年的 7.5 亿吨(图表 7)。水泥需求的减少将对水泥行业整体碳排放量产生重要影响。

图表 7 中国水泥、熟料消费历史和未来趋势预测



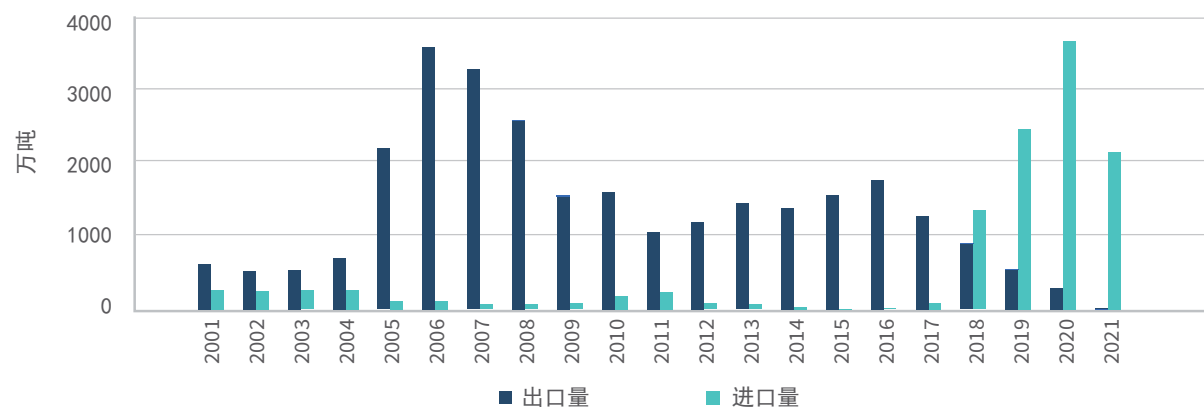
来源: 本研究课题组

进出口对水泥行业产量与碳排放的影响有限

由于对运输成本较为敏感,水泥行业具有本地生产、全国性分布的特征。传统上水泥的运输半径约为 300 千米,水泥产地靠近消费市场,集中于人口稠密和城镇化发展速度快的地区。因此传统上我国对水泥的进口依赖度较低。

但自 2018 年来,在多重因素叠加影响下,我国的水泥进口增加、出口降低(图表 8),从水泥出口国变为进口国。首先,自 2018 年开始,中国水泥行业在产能严重过剩的背景下,在供给侧结构性改革和“错峰生产”、“停窑限产”等措施多重影响下,造成了水泥区域性、阶段性短缺和价格高企。其次,以越南为主的东南亚国家水泥具有成本优势,且产能严重过剩,为向中国出口水泥创造了契机。未来,伴随着行业结构调整、环保压力加大、人员成本增高等因素,中国水泥熟料进口规模不排除进一步扩大的可能性。初步预测,未来中国熟料进口量可能保持在年均 3000~4000 万吨左右;但进口的影响仍有限,大约为每年需求量的 2~8%。

图表 8 我国 2001-2021 年水泥和熟料进出口规模

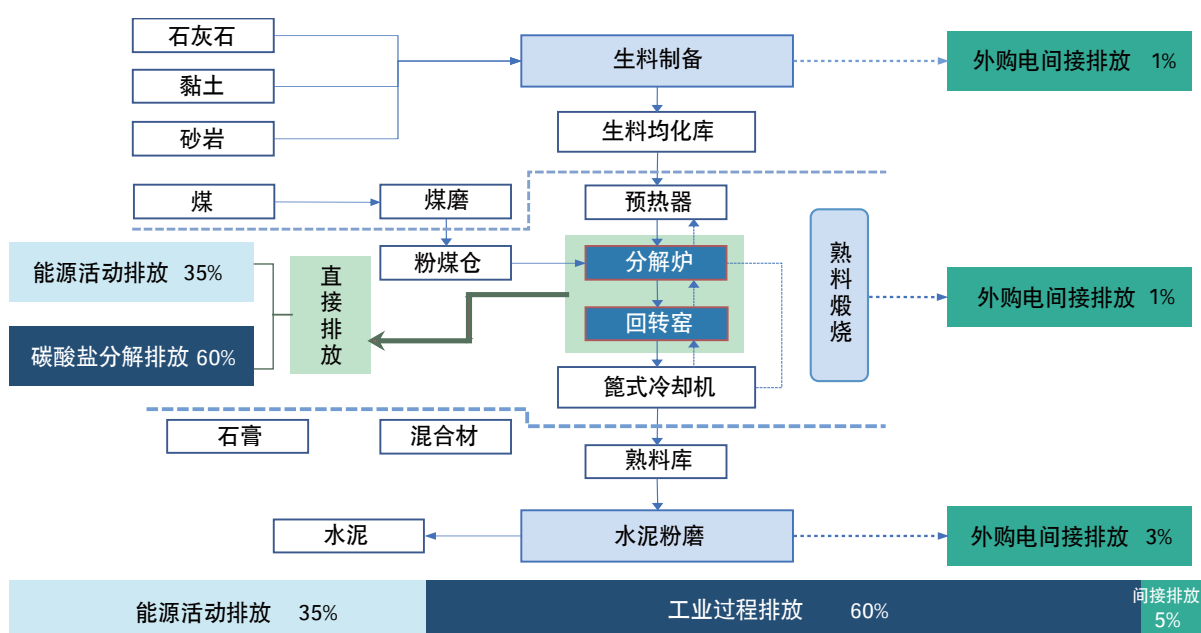


来源: 本研究课题组

3. 水泥行业脱碳的技术路径

水泥生产流程大致分为生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨三个阶段。其中，熟料煅烧环节的碳排放占比 95% 以上，主要来自化石燃料燃烧（燃烧排放）以及碳酸盐原料在煅烧过程中分解产生的 CO₂（过程排放）（图表 9）。燃烧排放大约占水泥生产碳排放的 35%，过程排放约占 60% 左右。以我国目前的水泥工艺水平，吨水泥的碳排放强度约为 0.58t CO₂，吨熟料的碳排放强度约为 0.86t CO₂。

图表 9 水泥行业 CO₂ 主要排放环节（2020 年）



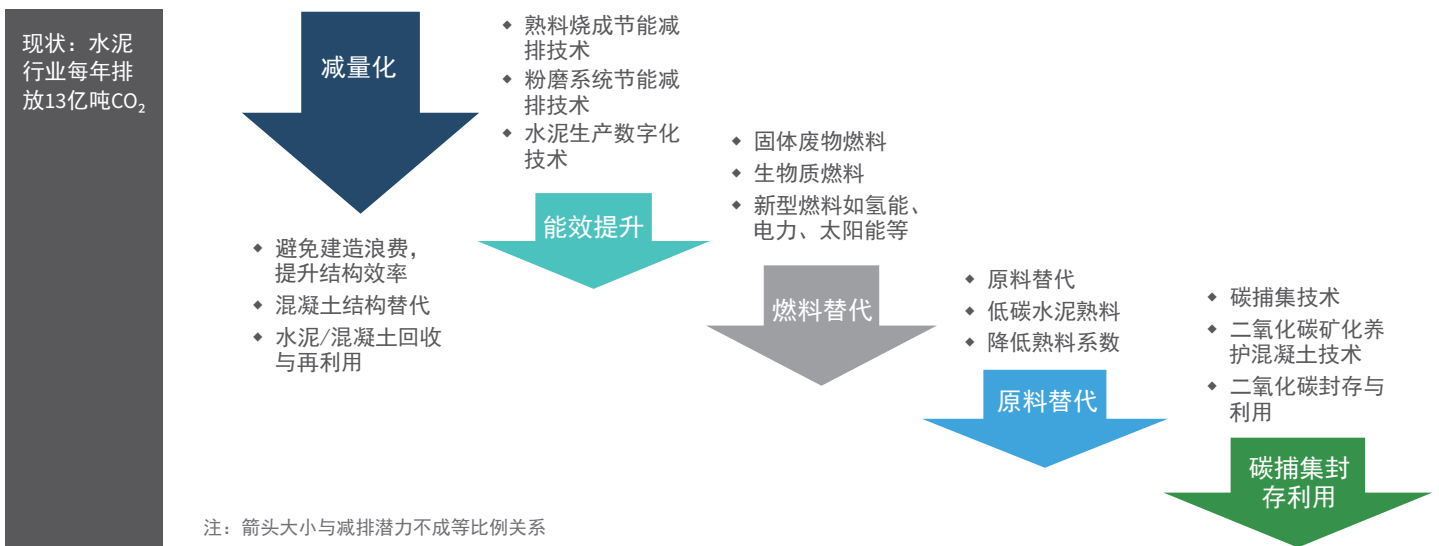
来源：本研究课题组

现阶段我国水泥的低碳生产主要通过改善原材料易烧性和易磨性、改进生产工艺及装备降低能耗等手段，虽然近期内仍能发挥减排效能，但长期来看仅依赖现有技术路径较难实现水泥行业完全脱碳的净零排放愿景。水泥行业要实现完全脱碳，必须采用变革式方法（图表 10）。从需求端降低水泥消耗、创新低碳水泥品种、加大低碳能源在燃料及电力中的替代率、调整水泥生产中的熟料及原料配比、并推广碳捕集与封存利用技术以抵消难以消除的过程排放。

水泥减量生产是水泥行业减排重要抓手

推动水泥行业碳排放总量降低的最大因素是产量的降低。按照我们的预测，到 2050 年，水泥熟料的产量将下降至每年 5.6 亿吨，约为 2020 年水平的 1/3，这将有助于减少约 67% 的碳排放。推动水泥需求与产量降低的主要因素在短期和长期略有不同。短期内，淘汰落后和过剩的水泥产能是降低水泥行业碳排放的主要手段，也能推动水泥行业尽早实现碳达峰。目前，错峰生产和产能减量置换是压缩水泥过剩产能的两大政策抓手。2020 年底，工业和信息化部、生态环境部发布《关于进一步做好水泥常态化错峰生产的通知》，要求所有水泥熟料生产线都应进行错峰生产，将错峰生产向常态化推进。缩短水泥熟料装置运转时间能有效压减过剩产能并降低水泥行业碳排放与污染物排放。

图表 10 水泥行业迈向碳中和愿景的主要措施分类



来源：本研究课题组

长期来看，城市化进程减缓和建设量减少是水泥需求下降的主要因素。在此过程中，一些重要的政策与技术因素将推动减少对传统水泥的需求，有利于水泥行业的需求端减排。

首先，城市建设应遵循合理的城市规划，避免不必要的大拆大建，提升现有建筑的使用寿命和再利用价值，从而降低不必要的水泥消耗。中国建筑的平均寿命仅 30 年，为发达国家的一半甚至 1/4，而大面积拆除是重要原因。增长建筑使用寿命将减少不必要的建材消耗。

其次，通过修改建筑设计规范、施工规范及装配式建筑产业化，以结构替代和结构优化降低对混凝土的需求。钢材、新型复合材料等可再生建材可用于替代混凝土结构，并起到减碳作用。目前，钢结构建筑在中国普及率仅有 10%，新型复合材料尚属早期应用阶段，有较大替代空间。另外，通过优化建筑结构形式可节省 70% 的混凝土楼板质量，实现节材降碳。

第三，水泥与混凝土再利用技术能起到替代部分熟料的作用。目前水泥的水化普遍被认为是不可逆过程。但混凝土中约有 30% 水泥未水化，可以进行提取再利用。废弃的混凝土经过破碎处理后，85% 能作为再生骨料重新利用于路基等建设中。发达国家建筑垃圾的再生利用率可以达到 70%-90%，我国规范处理和再利用的比例偏低，有发展的空间。

第四，新型低碳熟料与胶凝材料的出现将减少波特兰水泥的需求。国际能源署 IEA 总结了目前可作为波特兰水泥替代产品的新型凝胶材料，例如已经获得商业化可行的 Belite 熟料、CSA 熟料、碱激发无熟料水泥等。不过，这些新型凝胶材料的原料来源、减排效果和应用场景存在差异，尚不具备全面替代波特兰水泥的可能。

水泥生产脱碳的技术可行性

燃料替代对水泥脱碳发挥重要作用

水泥生产过程约有 35% 的碳排放来自燃料燃烧。使用低碳燃料替代化石燃料是水泥减排的重要技术路径。从目前研发或采用的技术来看，主要是使用固体废物、生物质燃料、以及其他新型燃料如氢能、电力等作为替代。

固体废物燃料是较有基础的燃料替代方案。能作为水泥替代燃料的固体废物燃料分类复杂，种类繁多，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)、城市固体废物 (MSM)、废弃物衍生物 (RDF)、次煤和塑料废弃物等 (图表 11)。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。

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。2020 年，我国生活垃圾产生量约为 3.1 亿吨。按照一吨生活垃圾经过预处理后的垃圾衍生可燃物热值为 300 千克标煤计算，我国生活垃圾燃烧后可替代 0.9 亿吨标煤。据预测 2060 年我国生活垃圾产生潜力峰值约为 10.05 亿吨，清运量将达到 5.86 亿吨。同年我国污泥产量已超过 6000 万吨；按每千克污泥 0.2kg 标煤热值计算，可替代约 1200 万吨标煤。固体废物对于我国水泥熟料 1.7 亿吨标煤的燃料总量而言具有巨大的替换潜力。

国际上，先进水泥企业都实现了较高的燃料替代率 (图表 12)，以固体废物燃料为主。欧盟国家将水泥的燃料替代率从较低水平大幅提到平均近 40%，对我国发展水泥替代燃料具有借鉴意义 (专栏)。

推广固体废物替代燃料具有技术上的可行性和减排意义，但目前水泥生产的热替代率较低，相比国外 50% 以上比率 (最高值可达 85%) 仍有较大提升空间。使用固废替代燃料面临若干障碍。首先，现行标准将水泥窑协同处置定位为垃圾处置，而非燃料替代；管理方式也是按垃圾而非燃料执行，造成固废跨界运输许可等管理问题，也不利于水泥窑协同作为碳减排技术在水泥行业推广。其次，我国还没有形成成熟的固体废物收集、分类、衍生燃料加工产业。生活垃圾的品质、热值、含水量参差不齐，混合利用会影响水泥窑垃圾处置及熟料生产能力，难以实现替代燃料的作用。第三，固体废物的有害组分有流入水泥产品的风险，市场对此类水泥的接受度较低，难以推动规模化生产。因此，要推动固体废物燃料替代，必须解决垃圾燃料的定位、预处理技术、水泥品质控制、市场接受度等方面问题。我们认为，在相关标准完善、技术成熟化之后，固体废物将有较大的应用潜力。

图表 11 水泥生产固体废物替代燃料性能汇总

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	35.6	减少	增加	减少	30	无	低
废电解池	9.29	减少	未检测到	未检测到	8	无	低
城市固体废物	15.4	减少	增加	增加	30	小	高
动物骨粉	14.47	减少	减少	未检测到	40	小	中
干市政污泥	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

来源：本研究课题组

图表 12 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	Italcementi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

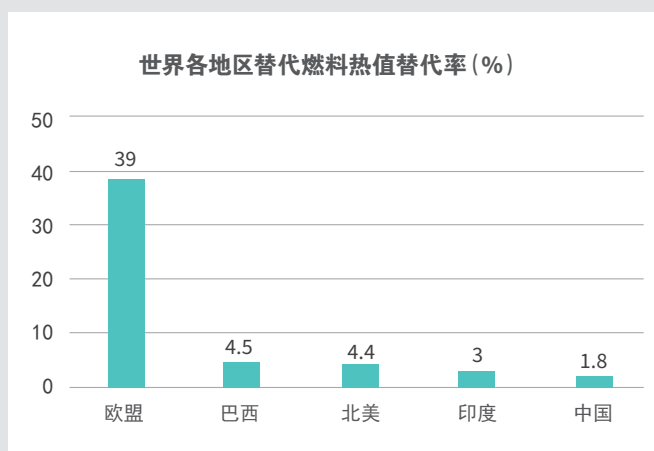
专栏：水泥行业推广替代燃料的欧洲案例

欧盟是世界上水泥产业燃料替代率最高的地区，其发展历程值得借鉴。以德国为例，1985年可燃废弃物引起了德国水泥工业相关专家的重视，相关技术的发展仍处于初级阶段，全国的热量替代率仅可达到2%，与现阶段我国可燃废弃物使用现状十分近似。1990年前后，德国水泥工业几乎每个厂都专门装配了一套可燃废弃物预处理系统，类似于我国水泥窑协同处置系统。但后续发展的过程中，这种应用方式的弊端逐渐显露：处理量低、投资高、效率极低。随着替代燃料技术的成熟及相关政策推动，德国水泥行业替代燃料热量替代率由1985年至2010年高速提升，年增长率一度可达10%以上，2017年达到了68.3%。德国水泥行业所采用的替代燃料主要为固体回收燃料和垃圾衍生燃料，且使用量逐步提升。

在这一发展过程中，有三个重要的促成因素。首先是替代燃料产业链的形成。欧盟国家在20世纪80年代开始建立了完备的垃圾回收和垃圾无害化处理产业链，不断开发完善了可燃废弃物的处理技术，实现了将可燃废弃物转化为垃圾衍生燃料和固体回收燃料。以德国为例，其替代燃料生产无需水泥企业对相关设备进行额外投资，降低了水泥生产企业在设备上的投入。替代燃料的采购与使用，与煤相差不大，但价格要比煤低，因此德国水泥企业将替代燃料视为经济燃料。

其次是多数欧洲国家实施了垃圾填埋禁令。例如自2013年起，波兰开始实施填埋禁令将替代燃料替代率从2007年的不到20%提高到2015年的50%以上，与之相伴的燃料替代技术也快速发展。

第三是国家制定的替代燃料质量控制体系。例如德国针对替代燃料设计了一系列标准，包括废弃物构架标准、工业污染物排放标准和废弃物装运标准等。该标准体系的执行，保证了市场中替代燃料符合相关产品标准，尽可能减少替代燃料对水泥熟料生产的影响。



来源：本研究课题组

使用生物质燃料替代传统燃料不需要对水泥窑进行大规模改造,与碳捕集能形成负碳技术组合,国内已有示范项目。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,证明生物质掺烧部分替代燃煤具有技术可行性。但大量采用生物质燃料替代必须解决燃料可获取性及成本问题,且生物质燃料在多种行业中的应用具有竞争性。

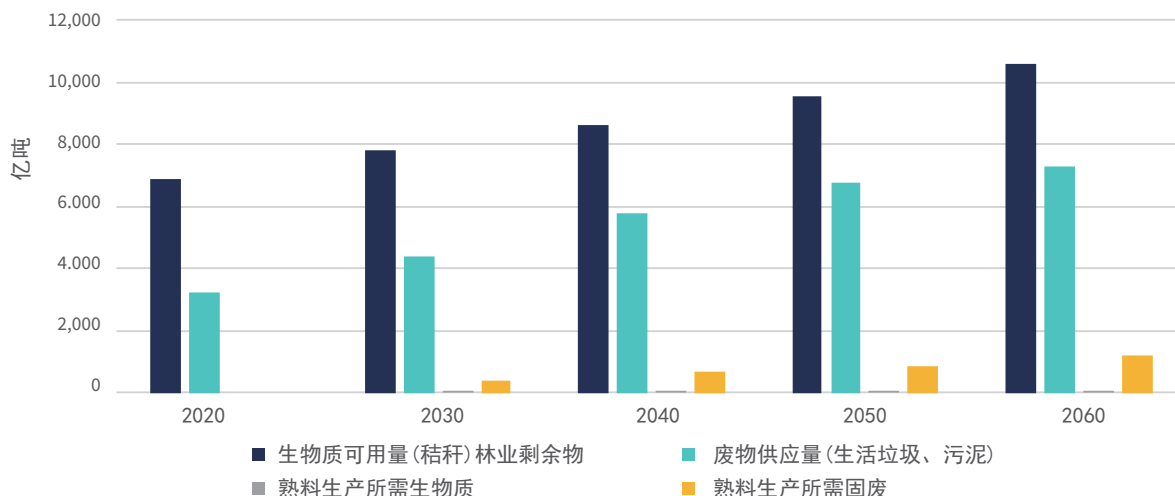
除此之外,水泥企业也在探索光伏热能、氢能和电力在燃料替代方面的价值。图表 13 列举了目前一些新型水泥窑燃料替代技术,但这些项目仍处于研发和试点的阶段。水泥窑烧氢需要大量改造现有水泥窑结构和充分的氢能供给,且氢气火焰的热力学性质及产生水蒸气使其不利于直接加热,在水泥行业中的利用仍面临一定挑战。水泥窑的工作温度较高(1300~1450°C),使用电力加热也需要全面改造现有窑炉结构。但我们不能排除新型能源和技术在生产低碳水泥中的潜力。

图表 13 水泥生产的主要替代燃料对比

	固体废弃物燃料	生物质燃料	新型能源如氢、电力、光热
潜力	<ul style="list-style-type: none"> • 每年有3.1亿吨的生活垃圾和1400万吨的污泥产生 • 到2060年,每年有10亿吨的生活垃圾 • 热值:能约节省9千万吨煤 • 减少CO₂(排放因子比煤低8%,同时减少了垃圾填埋的温室气体排放) 	<ul style="list-style-type: none"> • 秸秆:8.29亿吨,6.94亿吨可收集 • 林业残余物:960.4万吨可用于能源 • 碳中性能源,与CCUS结合时可成为负碳技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 在中国,氢能作为熟料煅烧燃料正在研发中 • 国外企业还在探索太阳能加热(SYNHELION)等技术
成熟度	<ul style="list-style-type: none"> • 废弃物协同处置技术接近成熟 • 约17%的熟料生产线拥有协同处置能力 • 但废弃物收集、分类和预处理的体系仍在发展中 • 垃圾衍生燃料RDF的生产处于早期阶段,仅有少量生产线 • 仍需进一步完善垃圾作为替代燃料的技术体系 	<ul style="list-style-type: none"> • 试点阶段 • 中国某水泥厂每天使用200吨的秸秆废料,热替代率为10%。 	<ul style="list-style-type: none"> • 研发阶段(中国)和早期示范阶段(国际) • 海德堡水泥试点在水泥生产中使用氢气以及其他行业产生的生物质成分和甘油作为燃料 • CEMEX和SYNHELION使用太阳能加热CO₂和水蒸气的混合气体煅烧熟料 • 瑞典CEMZERO项目和2018年挪威的某项目验证了水泥生产和电加热结合的技术可行性 • LEILAC技术将电加热技术纳入了后续能源替代计划
障碍	<ul style="list-style-type: none"> • 固废作为替代燃料没有正式认可的地位 • RDF产业和标准有待建立,特别是垃圾预处理产业 • 由于潜在的健康风险,垃圾生产的水泥的市场接受度低 • 焚烧厂和垃圾发电厂对废物的使用具有竞争性,补贴政策不利于垃圾作为替代燃料 	<ul style="list-style-type: none"> • 收集和运输的成本高 • 资源有限,生物质燃料的竞争使用(发电、供暖等) • 具有季节性 • 具有一定含水量,添加比例高会影响产量 	<ul style="list-style-type: none"> • 新技术在水泥行业发展和应用的不确定性 • 用于直接加热,氢气火焰特性可能不符合煅烧要求。氢气燃烧后产生水蒸气,影响熟料生产能力。

来源:本研究课题组

图表 14 生物质及固体废物总量与熟料生产所需量



来源: 3060零碳生物质能潜力蓝皮书

能效提升有进一步空间

我国目前水泥生产的能效水平已经在国际前列,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 126~130kgce/t (3.7~3.8GJ/t) 的水平持平甚至更优。2019 年有 26 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。目前常用的水泥节能技术有熟料烧成节能减排技术、粉磨系统节能减排技术、水泥生产数字化技术三种。三大类技术目前的典型示范项目及其技术经济指标如图表 15 所示。

同时,水泥行业仍存在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。因此水泥行业未来应继续普及能效提升技术,提高行业平均能耗水平。2021 年,我国发布新版《水泥单位产品能源消耗限额》(GB 16780-2021);全国约有 75% 产能的熟料生产线能达到熟料综合能耗 3 级标准,即 117kgce/t (3.4 GJ/t)。如果所有熟料生产线从现行标准的综合能耗 3 级提高到 1 级 (100kgce/t, 即 2.9GJ/t),相当于能减少约 14% 的能耗与排放。在可预测技术条件下,1 级能耗值已接近能效提升的极限。

图表 15 主要水泥节能技术及经济技术指标

技术名称	应用案例	投资额 (万元)	节能量 (tce/a)	二氧化碳减排量 (tCO ₂ /a)	该技术在行业内的推广潜力 (%)	预计二氧化碳减排能力 (万tCO ₂ /a)
熟料烧成节能减排技术						
带分级燃烧的高效低阻预热器系统	山东省某水泥企业5000t/d熟料生产线	2000	6200	16120	90	2301.6
高性能隔热保温材料技术	河南省某水泥企业5000t/d熟料生产线	443	6318	16426	90	1612.6
新型水泥熟料冷却技术	河北省某水泥企业	1100-2400	8155	22600	100	1571
富氧燃烧技术	安徽省某4500t/d熟料生产线	2300-3000	5000	13000	50	1099.6
粉磨系统节能减排技术						
水泥立磨终粉磨技术	某水泥企业(水泥产量100万吨/年)	6916	934	2428	80	1151.3
辊压机生料终粉磨技术	安徽某2500t/d熟料生产线	2600	1342	1489	90	1229.5
水泥生产数字化技术						
窑磨智能优化专家系统	西北某水泥企业窑智能优化专家系统	270-350	2223	5780	100	1548
	黑龙江省某水泥企业水泥粉磨智能优化专家系统					

来源: 本研究课题组

调整水泥品种结构以创造减碳价值

调整水泥品种结构实现水泥降碳主要有 3 条策略：熟料替代，即控制水泥中的熟料用量，降低单位水泥碳强度；原料替代，即替换原料中的部分石灰石，降低过程排放；新品种低碳水泥，即生产不基于硅酸钙的新型熟料体系。

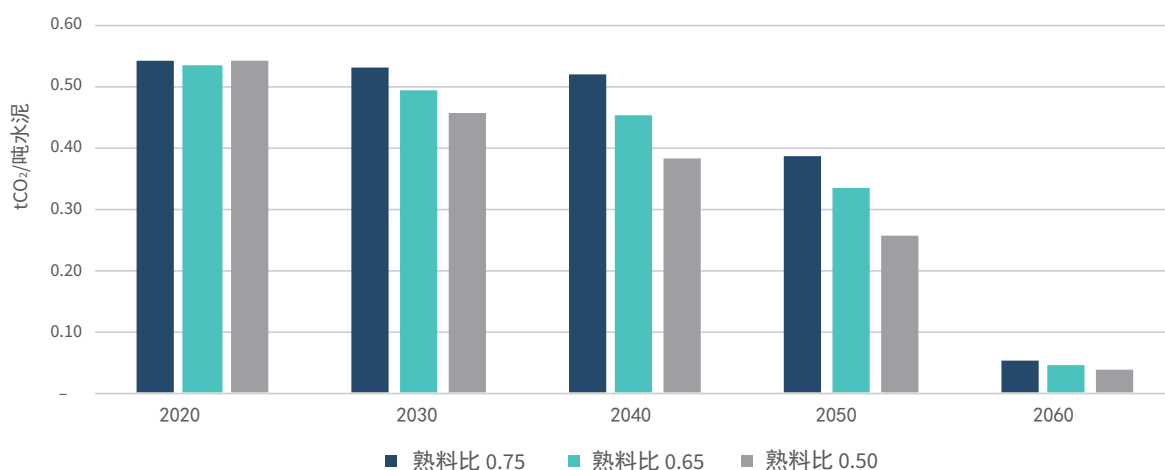
适当控制水泥的熟料比（熟料系数）可以起到降碳作用。未来 10 年间，全球水泥熟料比的平均值将呈下降趋势，从目前的 0.72 降到 0.65 水平。相比欧美的熟料系数，我国水泥熟料系数历史上一直偏低，经过水泥标号调整后有了较大的提升，于 2020 年达到约 0.65 水平。未来，水泥熟料系数的变化对于水泥的碳强度会产生一定影响（图表 16）。考虑到低熟料水泥的应用价值和减碳价值，在面临未来低碳需求时，可以针对应用场景细化水泥产品的标准，在确保水泥质量与适用性的同时保留部分低熟料系数的水泥标号。

传统上用于替代熟料的混合材主要是粉煤灰、高炉矿渣等含钙的工业废渣。降低熟料系数意味着增大混合材用量以及工业废渣的需求。但未来在重工业整体脱碳背景下，工业废渣可用量将呈下降趋势。目前一些新型混合材正在研发，例如煅烧粘土、碳化混凝土细粉等。

其次，使用低碳原料替代部分石灰石有利于降低过程排放。钢渣、电石渣、硅钙渣、粉煤灰等含钙的工业废渣可以替代一部分石灰石原料，从而降低水泥煅烧过程中石灰石分解产生的排放。原料替代对减碳的作用取决于原料替代率。近期内，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短期措施。

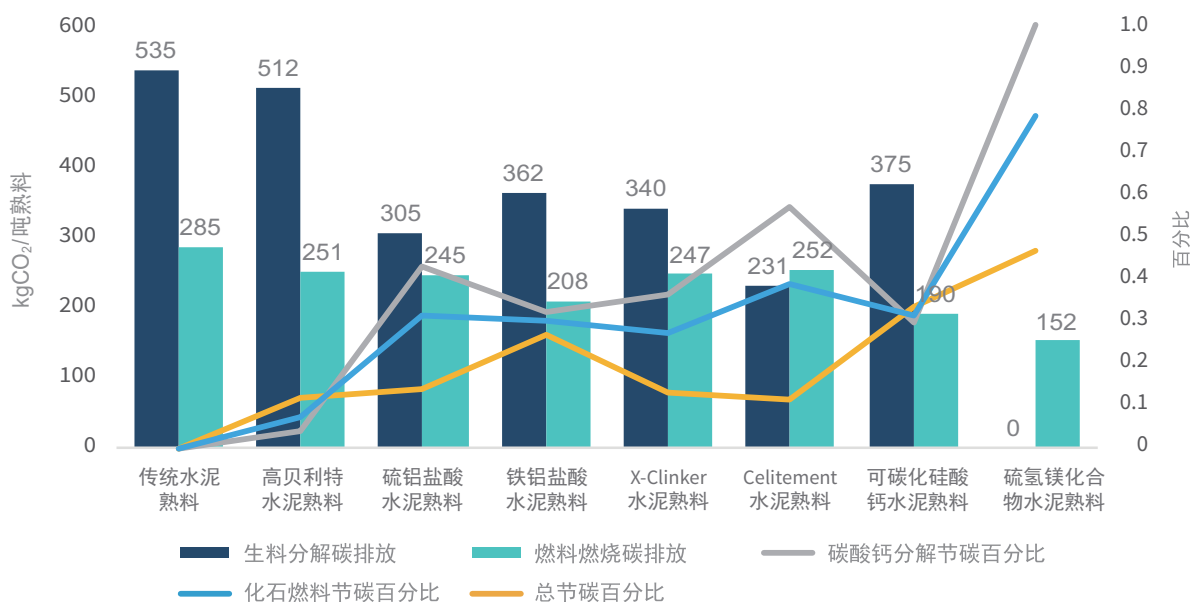
另外，新型熟料或无熟料水泥配方的研发也赋予低碳水泥更多可能性。新型低碳熟料体系不基于硅酸钙熟料，具有所需 CaO 含量低、烧成温度低、碳排放低（图表 17）的特点，低碳水泥复合材料的典型例子主要有：高贝利特水泥熟料、硫铝酸盐水泥熟料、Solidia 水泥熟料、Celitement 水泥熟料、X-Clinker 水泥熟料、硫氢镁化合物水泥熟料等。值得注意的是，新型水泥的应用潜力尚有不不确定性，主要体现在原料可用性，水泥稳定性、耐久性等特点的检验，产能与经济性等方面。但随着水泥行业降碳压力与低碳建材需求的增强，以及智能化生产系统的采用，可以预计新品种低碳水泥能占据比今天更高的市场份额。

图表 16 不同熟料比情景下的水泥碳强度



来源：本研究课题组测算

图表 17 可替代水泥复合材料碳排放及节碳百分比



来源: Antunes, M. et al. Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review.

碳捕集、封存与利用是水泥碳中和的必要技术

水泥生产中约 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) 是水泥碳中和的必要技术。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。通过对比不同碳捕集方法的适用性、能耗、成本 (图表 18),我们认为液体化学吸收技术、钙循环技术、第二代富氧燃烧和 LEILAC 技术在水泥行业中有较好的推广价值。

目前,大规模采用CCUS 还存在挑战:CCUS 的减排成本仍然很高;由于水泥厂地理分布较分散,CO₂ 的运输成本很高;水泥窑烟气中的 CO₂ 浓度通常低于 30%,不利于有效捕集,纯化后捕集的成本相较化工厂等更高。我国一些水泥头部企业已经开始试点 CCUS 示范项目,中国某水泥厂已建成世界上首条水泥窑烟气 CO₂ 捕集纯化示范项目,年产 5 万吨工业级 CO₂ 产品和 3 万吨食品级 CO₂。随着技术成熟与规模化效应展现,CCUS 的减排成本可以逐渐降低,并成为水泥行业实现碳中和的核心技术之一。

水泥窑产生的 CO₂ 还可以与下游混凝土产业结合利用。CO₂ 矿化养护混凝土技术是在新拌混凝土中注入 CO₂ 的技术,通过化学反应将 CO₂ 永久固结在混凝土中,可以减少混凝土生产过程 25% 或以上的 CO₂ 排放量,生产的混凝土相比传统混凝土强度高 10% 以上。我国的浙江大学团队、美国 Solidia Tech 公司、加拿大 CarbonCure Technologies 公司都研发了 CO₂ 矿化混凝土技术。中国某水泥企业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,可取代传统粘土烧成制砖和混凝土灰砂砖工艺,实现节能降碳。CO₂ 养护技术能实现负碳的 CO₂ 生产及高质量混凝土,对水泥行业具有减排和商业双重价值。

水泥窑产生的 CO₂ 还可在地质利用、化工利用、生物利用等领域产生利用价值。例如德国 Rudersdorf 水泥厂、Sunfire 电解公司和 Enerstrag 可再生能源公司所形成的碳中和联合体中, Sunfire 公司采用可再生电力生产氢和合成气,供应部分氢能给水泥厂煅烧熟料。水泥厂则供应 CO₂ 给 Sunfire 公司生产甲醇和其他化学产品,实现降碳和工业共生关系。

图表 18 应用于水泥行业的主要碳捕集技术对比

技术	适用性	节能评级	成本评级	优点	缺点	技术发展阶段
燃烧前捕集	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	商业应用
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	中试阶段
液体化学吸收技术	8	7	10	技术成熟；装置成本低	解吸塔能耗高；运行成本高；蒸汽成本高	商业应用
分体式钙循环技术	9	8	9	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；余热发电量大；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	中试阶段
集成式钙循环技术	10	8	9	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；装置成本低；余热发电量大；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	中试阶段
膜分离技术	8	10	7	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；	工业示范
离子液体碳捕获技术	6			吸收剂损耗小	技术不成熟	基础研究
富氧燃烧技术	8	10	10	能耗低；装置成本较低	装置改造多	工业示范
第二代富氧燃烧技术	8	9	9	能耗低；成本低		中试阶段
物理吸收法	6			装置简单	能耗高	工业示范
吸附法	6			装置简单	能耗高；运行成本高	工业示范
LEILAC技术	9	9	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	中试阶段

来源：本研究课题组

零碳水泥的经济可行性ⁱⁱ

水泥生产向碳中和转型需要考虑前期资本投资和单位熟料成本的变化。从前期投资角度看，水泥厂设备改造成本因技术路线而不同，通常在几百万到上亿元之间；对于处于早期的创新型生产设备则需要更高的研发及建造成本。因此，水泥行业的转型除需要水泥企业自身的资金投入外，也需要外部投资者的支持。

从单位熟料成本的角度看，目前水泥熟料的成本结构中以燃料成本为主体，约占比一半以上。转型的影响因素首先来自替代燃料的成本，包括生物质燃料、固废燃料、氢能和绿色电力等替代燃料的成本；其次来自对难以消除的碳排放进行捕集处理的成本；第三来自改造现有水泥厂设备的成本。由于行业集中度提高和水泥设备的发展，大产能生产线将逐渐占据主导地位，单位熟料的设备成本通常较低，约在 10 元 / 吨熟料以下。因此，燃料成本和 CCUS 成本将成为主要考虑因素。

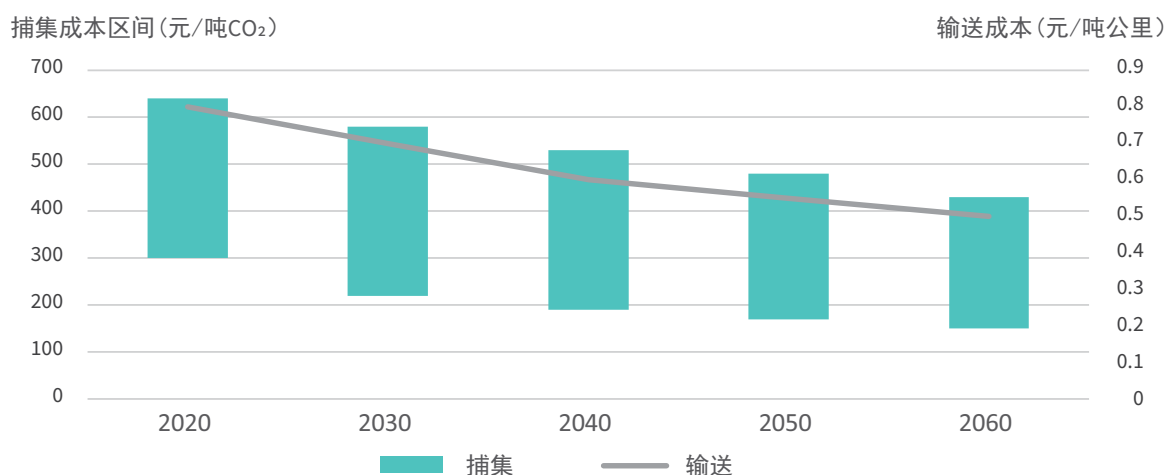
水泥减碳的技术组合较为复杂，为简化讨论，我们假设水泥基本组分不变的情况下，围绕燃料和 CCS 技术，讨论了 5 种生产零碳水泥的不同路径的成本：1) 煤 +CCS，2) 生物质 +CCS (以生物质成形燃料 BMF 为主要形式)，3) 固废 +CCS (以垃圾衍生燃料 RDF 为主要形式)，4) 氢 +CCS，5) 电气化 +CCS。

ⁱⁱ 本文使用“零碳水泥”指代碳强度接近为零的水泥。这里的碳强度指净排放，即原始排放减掉固存的碳。本文考虑水泥生产碳排放时，主要考虑范围一和范围二排放，即水泥生产的直接排放和电力排放。因核算边界尚不清晰，本文没有考虑使用 CCS 技术的排放。

CCUS 成本将对零碳水泥成本产生重要影响。未来 CCUS 成本的主要影响因素有两方面：随着技术成熟与规模化导致的 CCUS 成本下降，以及由 CO₂ 运输距离导致的成本波动。前者主要由于目前碳捕集成本相对较高，吨 CO₂ 捕集成本在 300~650 元之间。未来随着碳捕集技术成熟与产业化，应用于水泥的 CO₂ 捕集成本将下降到 2050 年的 170~480 元（图表 19），下降幅度可以达到 30~40%。后者主要取决于水泥厂与碳封存地的距离，例如当运输距离达到 200km 时，运输成本会占 CCUS 成本的一半。水泥企业如果采用就地封存或就地利用，能大幅降低 CCUS 成本。

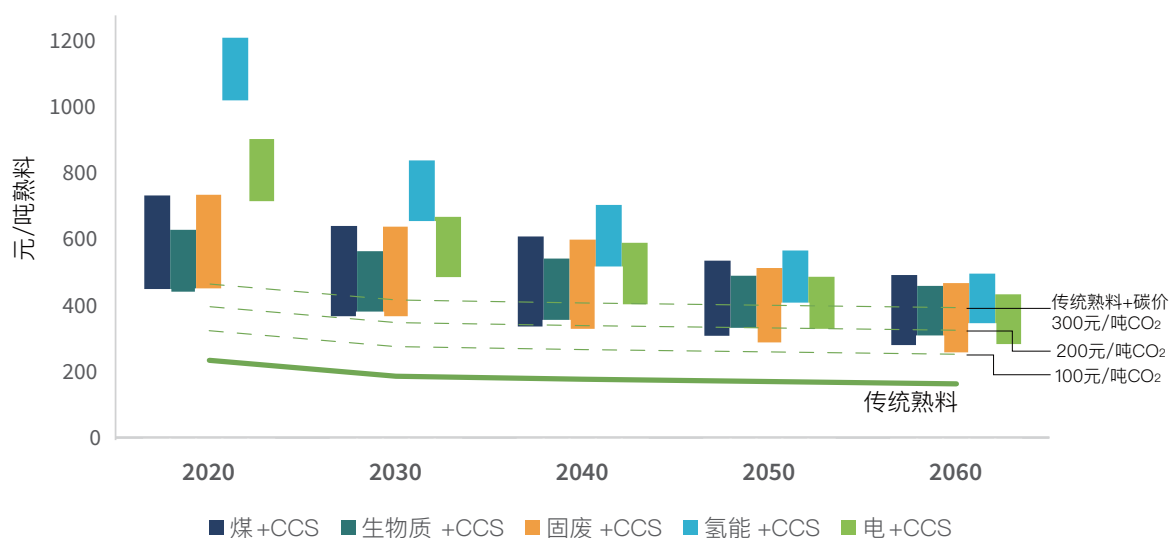
目前来看，由于替代燃料及 CCUS 技术成本高昂，生产零碳水泥约有 90~480% 的溢价（图表 20）。在假设不同燃料的水泥窑产量类似的情况下，使用氢能和绿色电力制水泥成本明显更高，溢价区间在 200~400%。使用生物质+CCS、煤+CCS 和固废+CCS 的成本类似。固体废弃物作为燃料替代有一个循序渐进的过程，在现阶段掺烧量较小的情况下，使用固废与燃煤有类似的成本结构。

图表 19 水泥行业中碳捕集与输送成本



来源：本研究课题组测算

图表 20 不同技术路径生产水泥熟料的成本ⁱⁱⁱ



来源：本研究课题组测算

ⁱⁱⁱ 本图的成本预测假设燃煤及原料成本不变，熟料基本成分不变。本文对熟料成本的预测包含了熟料主要的成本因素，未包含所有成本因素，仅用于比较。实际情况中，熟料成本因生产线不同而有差异。

煤+CCS 路径虽然短期看成本与生物质及固废燃料类似,但有两个因素需要考虑。首先,煤的成本未来随着煤控政策加强将呈上升趋势,基于煤的生产路线将逐渐失去经济优势;其次,延续使用燃煤将加大水泥生产的原始排放,将要求更高的 CCS 捕集封存量及基础设施投资,加大水泥低碳转型的成本。

到 2050 年,由于替代燃料与 CCUS 规模化发展和成本下降,以及 CO₂ 就地利用的可能性,零碳水泥的溢价可以进一步下降。随着技术进步与规模化发展,吨 CO₂ 捕集封存成本将下降 40% 左右。同时,绿氢成本在未来 30 年下降约 65%,绿色电力成本下降约 60%。这使得 2050 年的低碳水泥溢价可以降到 70~240% 左右。同时,技术进步使得不同技术路径制零碳水泥的成本差距缩小,零碳水泥成本基本降低到同一区间。当绿氢或绿电成本足够低时,氢气和电力路径将逐步显现出优势。我们推算,当绿氢价格低于 5300 元 / 吨时,氢气制水泥的路径和固废燃料路径可以平价;绿电价格低于 0.13 元 / 千瓦时,电气化生产水泥和固废路径可以平价。

尽管未来零碳水泥已经显现出接近传统水泥的成本优势,零碳水泥仍较难实现与传统水泥平价,因此碳市场与碳价是重要的转型推动力。根据全国碳市场总体设计,水泥行业由于具有较好的数据基础,具有优先纳入全国碳交易市场的条件,未来中国的全国碳市场将逐步纳入包括水泥在内的数个高耗能行业。未来,碳价将对水泥行业的减排起到重要推动作用。例如当碳价在 100 元 / 吨时,2050 年生产传统水泥的成本将上升到约 250 元 / 吨熟料,可以使固废生产的零碳水泥具有成本优势。

另外,在短期内,合理的废物处置补贴可以提高水泥厂采用固废替代燃料的积极性,降低固废路径的成本。目前,地方政府对水泥厂处理生活垃圾给予 75~140 元 / 吨的补贴。这个补贴比垃圾其他处理方式低,例如垃圾焚烧(250~350 元 / 吨)或垃圾发电(约 180 元 / 吨);仅能勉强达到收支平衡点(水泥厂的垃圾处理成本为 130~200 元 / 吨)。如果有适当的垃圾处置定价机制和补贴,固废作为替代燃料在经济上会更有吸引力。

整体来看,在技术进步、碳价、财政激励等多重因素影响下,相较传统水泥熟料生产,未来采用固废燃料、生物质、电气化、氢能路径生产水泥熟料可以呈现出经济可行性与成本优势。

4. 中国水泥碳中和之路：时间、空间演变和转型模式

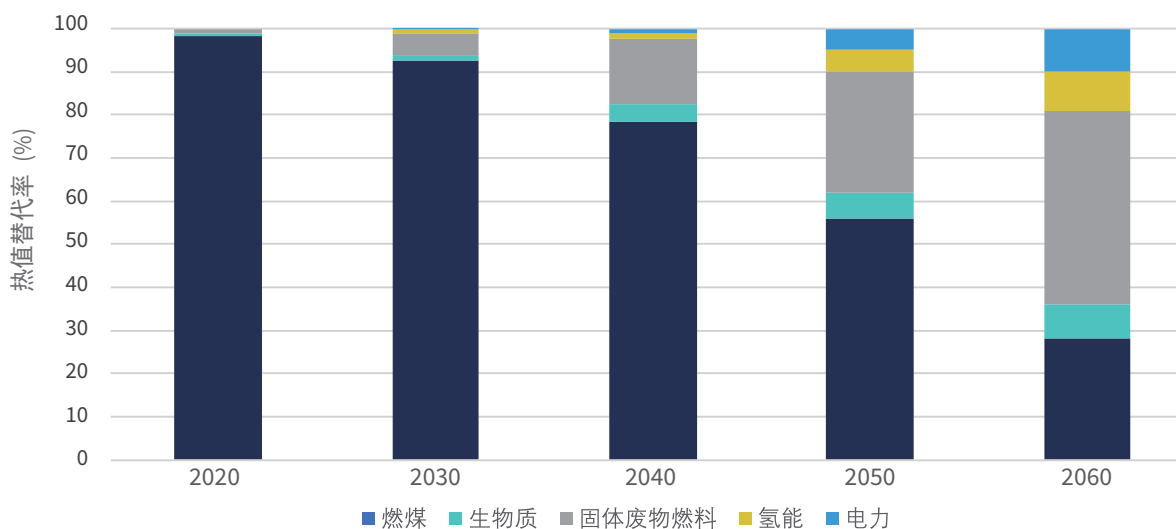
中国水泥碳中和转型时间线

在水泥行业碳中和情景下，中国水泥熟料生产的燃料结构将以煤炭为主向以替代燃料为主转变（图表 21）。目前我国水泥熟料煅烧 90% 以上能源来自于燃煤。在 2040 年以前，燃煤仍具有成本、技术等方面的优势，但使用量将稳步下降。到 2050 年替代燃料充分发展后，水泥行业的燃料替代率可以达到约 50%，在 2060 年实现约 70% 替代率。

在替代燃料发展过程中，固废燃料具有先发优势。一方面固废协同处置是现有技术，国内已有部分水泥生产线具有处置能力，在此基础上发展固废燃料替代具有技术基础；另一方面，随着废弃物管理和利用体系的建立与完善，固体废物预处理和燃料生产技术将在未来十年内成熟与标准化。在利好的政策和财政杠杆作用下，固体废物燃料（包括轮胎衍生燃料、废弃物衍生物、固体回收燃料等）由于成本、可用性等因素可以成为主要的替代燃料，在 2050 年达到近 30% 的热替代率，2060 年达到近 45% 的替代率。

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。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可以占据更多份额，合计约可替代 20~30% 燃烧热。生物质的推广则取决于其可用性。由于生物质燃料的竞争性使用以及有限的掺烧率，在水泥行业中的热替代贡献可能是有限的（约 5%）。

图表 21 碳中和情景下中国水泥熟料的燃料替代路线



来源：本研究课题组

水泥行业的碳中和转型之路大致可分为如下阶段（图表 22）。

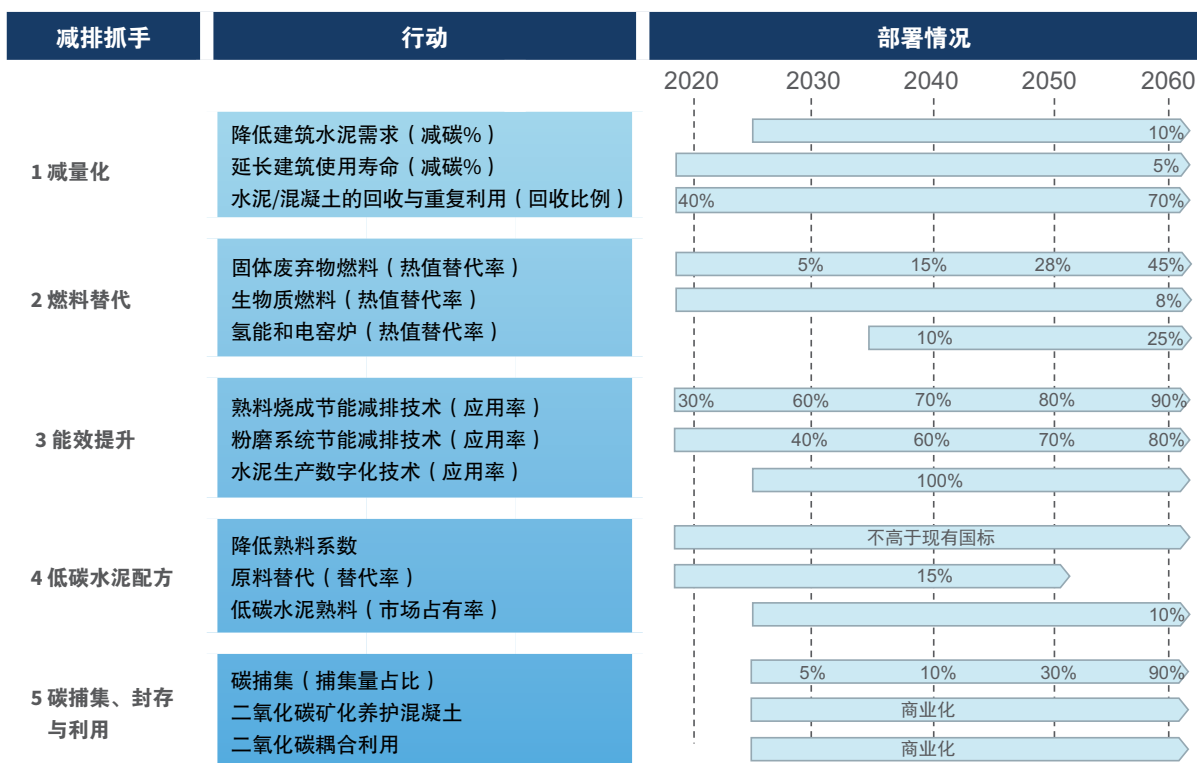
2020-2030（近期）：这一时期水泥行业减碳的主要抓手是水泥产量降低和能效提升。主要目标是实现水泥行业碳排放尽早和高质量的达峰。生物质和固废燃料可以在这一时期作为可行的替代燃料，降低对煤炭的依赖。固废技术与标准逐步完善与标准化。氢能和电力技术正在开发中。早期 CCUS 项目得到开发和示范。到 2030 年，约 5% 的水泥碳排放可使用 CCUS 捕集，清洁能源在电力能源中占比达到约 40%。

2030-2040（中期）：这一时期产量控减、替代燃料和 CCUS 将共同推动减排。CCUS 技术已逐渐成熟，能捕集约 10% 的水泥碳排放。废弃物的收集、分类和预处理实现了标准化和商业化。固废燃料在 2040 年基本实现量产。氢能和电力制水泥技术能实现试点和示范。清洁能源在电力能源中占比进一步上升到 55%。

2040-2050（远期）：替代燃料和 CCUS 将在减排中发挥更大作用。CCUS 和替代燃料体现出较强经济性。结合碳价机制，零碳水泥将显示出成本优势。到 2050 年，水泥行业将能捕集 30% 的 CO₂。到 2040 年大多数现有水泥窑将达到寿命终点，需要进行重大再投资，基于新型窑炉结构的路径如氢制水泥、电力窑、LEILAC 技术等将实现更大普及率。约 50% 的燃烧热将被可持续能源替代。水泥生产的碳排放量将下降到目前水平的约 1/6 以下，吨水泥与吨熟料的碳强度将下降到目前的一半左右。

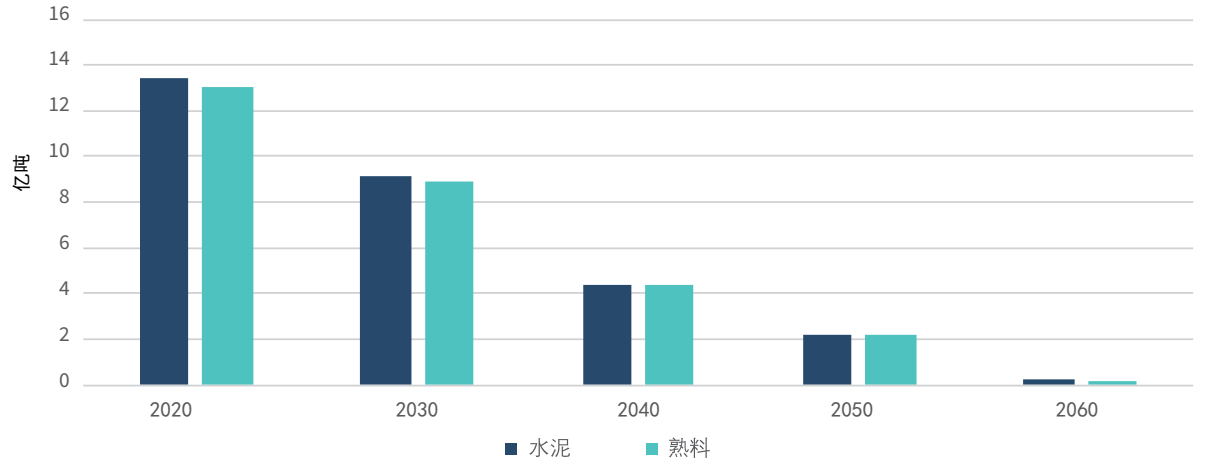
2050-2060：新型替代燃料技术如氢能与电力将成熟并实现商业化。煤炭在燃料中占比将进一步减少。燃料替代率可达 70%。水泥行业产生的 90% 的 CO₂ 可以被捕集。水泥行业的 CO₂ 净排放以及水泥产品的碳强度将接近净零水平。

图表 22 水泥碳中和之路关键技术部署路线



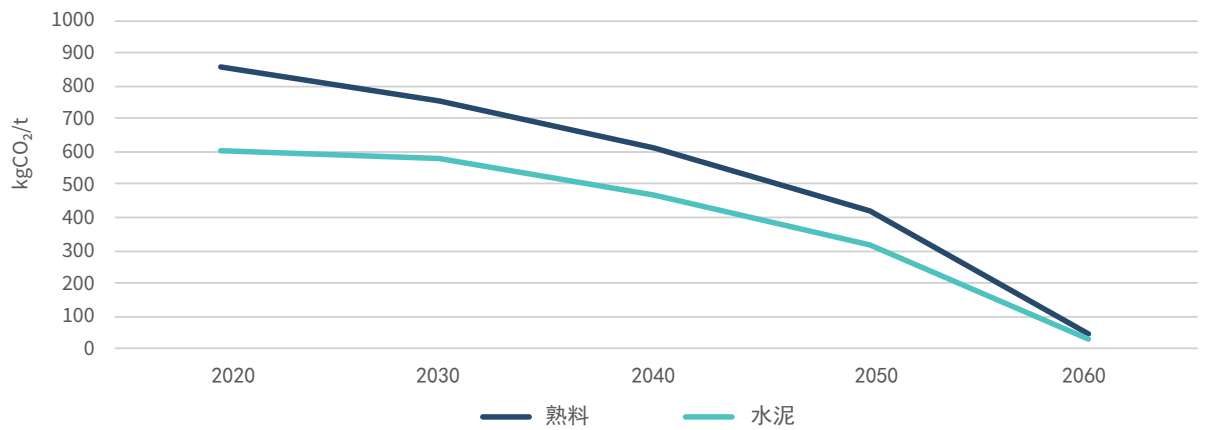
来源：本研究课题组

图表 23 全国水泥与熟料生产碳排放趋势



来源：本研究课题组测算

图表 24 水泥与熟料碳强度变化趋势



来源：本研究课题组测算

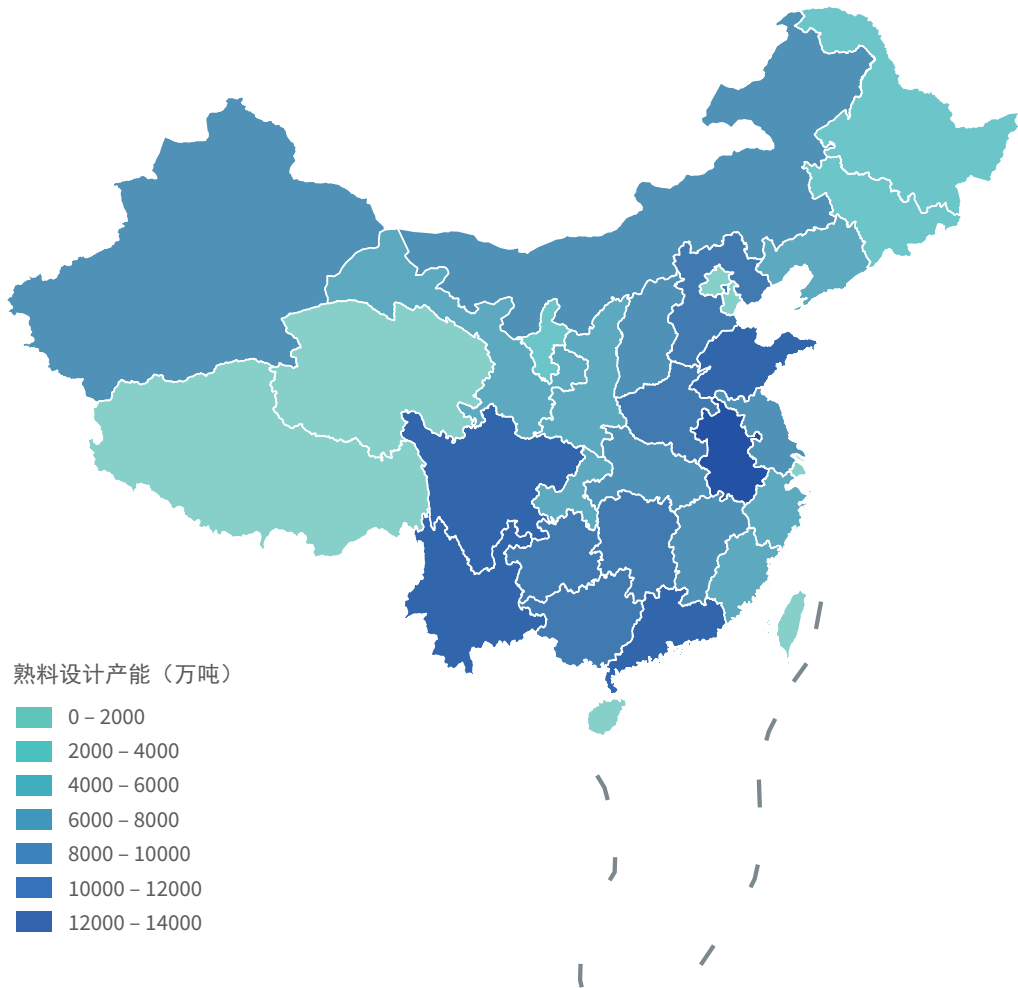
中国水泥碳中和产能地理分布

目前我国水泥产能的地理分布较平衡(图表 25),在全国各省份都有分布。主要原因是石灰石资源的全国性分布以及水泥产能靠近需求端的特点。建设量大的地区如华东和华中,特别是沿海地区和长江、黄河流域,其水泥产能也相应较高。

影响未来零碳水泥产能地理分布的主要因素将由需求市场、原材料、低碳能源可用性及碳封存地理资源等因素共同决定。特别是由于零碳水泥的技术路径发生改变,尤其是 CCUS 技术的广泛使用,使得碳封存资源将成为决定零碳水泥产能分布的一大因素。

在建设需求方面,未来我国城市化发展仍然呈现出向东部沿海聚集以及中部城市崛起的特点。“十四五”规划中提出了 19 个国家级城市群的规划,在远期形成“两横三纵”城镇化战略格局。未来我国城市与建设的主导区域仍是以东部沿海和中原地区为主。需求因素对于水泥产能的地理分布没有太大改变。

图表 25 2021 年我国主要省份熟料产能分布图

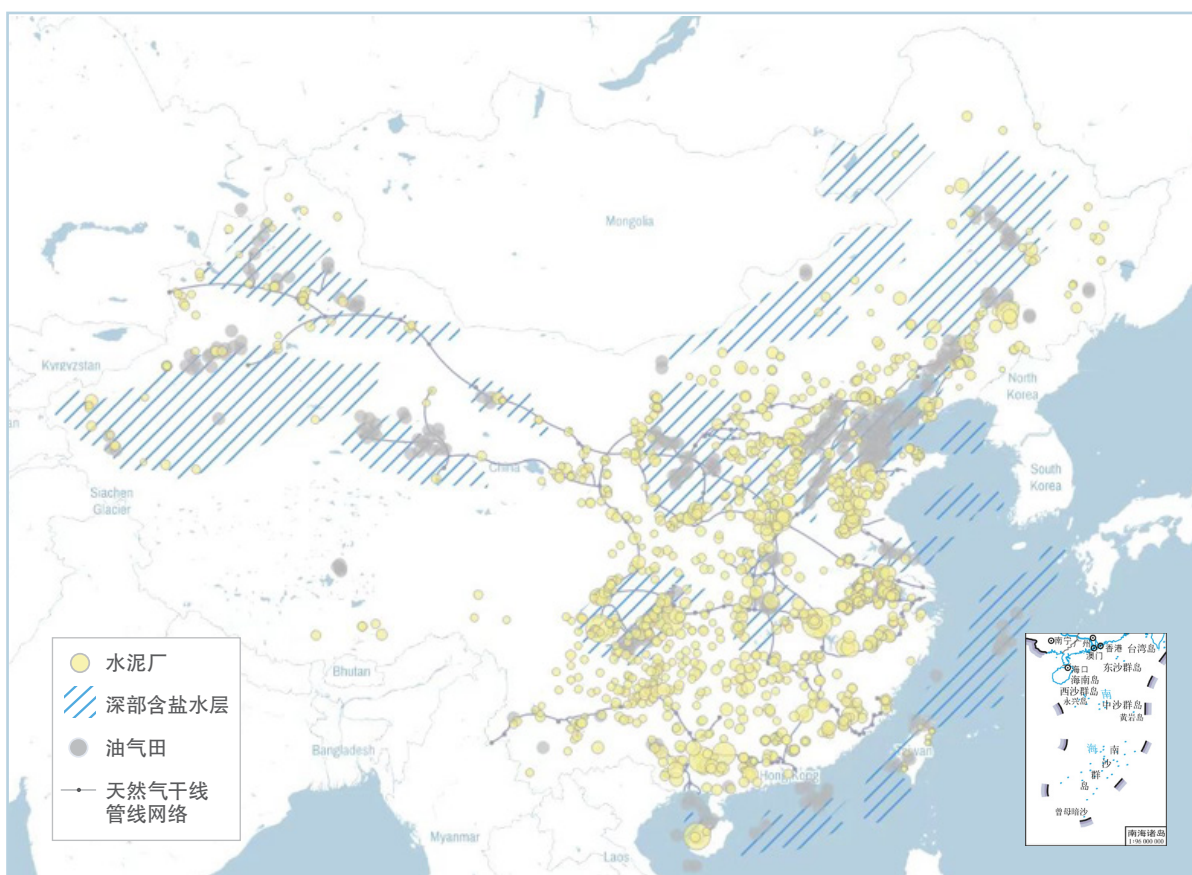


来源: 本研究课题组绘制

从碳封存地资源来看，我们目前存在 3 种主要的碳封存与利用的优势资源，即深部含盐水体、油气田、天然气干线管网（图表 26）。我国 CO₂ 封存盆地主要为鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、南海盆地、四川盆地、东海盐地以及珠江口盆地，而水泥工业主要集中于安徽省、四川省、山东省等地，分布较为分散。因此应针对不同的地理位置和地质情况，采取不同的地质封存技术。例如西北地区 and 青藏地区分布水泥生产线少，可封存 CO₂ 的地理资源丰富，可实现对 CO₂ 的有效封存。渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地聚集了大量的油气开采田，今后可逐步应用 CO₂-EOR 技术以增加 CO₂ 封存量。南方地区分布着丰富的深部含盐水体（多为海上）和海上油气开采田，除四川盆地可解决一部分内陆 CO₂ 封存需求外，未来南方沿海地区需利用海上深部含盐水体及海上油气开采田作为 CO₂ 封存地。

CO₂ 运输方面可以参考天然气管网建设 CO₂ 运输管网。CO₂ 管道干线的布置应考虑水泥厂等高碳排放工业的地理位置和地质情况，可分区建立 CO₂ 管道干线运营机构，将捕集而来的 CO₂ 汇集至主干线中以降低管道运输的建设成本。

图表 26 我国主要区域水泥厂分布及其与碳封存地及可利用设施的关系



来源：本研究课题组

从新能源资源角度看，中国北方拥有相对较好的风能和太阳能资源，西南地区则有丰富的水电资源，且这些地区有较好的政策机制降低可再生电力价格；南方生物质资源较丰富。这些地区的水泥厂可以探索绿电、绿氢、生物质生产零碳水泥的技术路径。

因此，位于华北、东北、西北的水泥生产线近期可以积极发展基于固废、生物质等的燃料替换路线和 CCS 技术，远期可以利用绿色电力发展氢能或绿电制水泥的清洁化生产路线。位于西南、华中的水泥生产线则可以积极发展固废或生物质路线，或利用水电发展；绿氢或绿电制水泥，并利用盐水层封存 CO₂。位于华东、东南、中南的水泥生产线因为较缺少有利的 CCS 资源，在考虑生物质、风电制氢等路径的同时，可以利用天然气管线进行远距离 CO₂ 输送，或 CO₂ 海上封存，或与其他产业开展就地 CO₂ 耦合利用。

中国水泥碳中和转型模式

目前，我国水泥行业的产能集中度不高：前十名头部企业熟料产能共 10.6 亿吨，占全国比例的 57%。水泥行业未来将向高产业集中度、均衡环境与经济效益、近零碳资源优先的方向发展。近期来看，水泥行业的转型以优化产能结构为突出特征。从尽可能避免搁浅资产的角度出发，投产工艺较早的水泥生产线，需要被优先考虑淘汰。从生产工艺的先进性角度来看，大规模生产线往往具有先进的生产工艺，小规模水泥生产应当优先考虑淘汰，同时能够提升行业的生产集中度。从实现减污降碳的政策需求来看，具有高耗能、高碳排放、环保未达标的水泥工厂需要优先被淘汰。从实现环境收益最大化的角度看，在资源缺乏与生态环境脆弱区淘汰水泥产能将获得更大的环境收益。

中长期来看，水泥行业转型格局主要由水泥生产线所在的零碳资源决定，包括可再生能源和 CCUS 资源等。水泥厂应用 CCUS 需要考虑 CO₂ 封存和利用点的分布。以生物质为替代燃料的水泥生产工艺需要考虑生物质的运输半径，主要在农林剩余物资源丰富的地区得到发展。具备新能源直接利用、电加热和绿氢供能等模式的水泥厂可主要在西部等风、光和土地资源丰富的地区建设。

同时，碳中和将为水泥行业创造新的商业模式与产业机会。

可能性 1: 水泥厂可以整合废物处理和废物燃料生产业务。

由于水泥厂对垃圾衍生燃料有质量和数量要求，有条件的水泥厂可以合并一定的垃圾处理产业，生产标准化的固废衍生燃料。水泥厂可以获得政府的废物处理补贴，而城市可以减少废物处理的生态足迹。

可能性 2: 水泥行业可以与混凝土行业协同发展。

CCUS 是水泥去碳的必要技术，而较有前景的利用方式之一是生产矿化混凝土。这项技术能增加混凝土强度，也可以减少对水泥的需求。两个行业的协同发展使矿化混凝土更具成本效益。

可能性 3: 水泥厂逐步转型生产新型低碳水泥。

非波特兰水泥及其他新型胶凝材料虽然目前无法大规模替代传统水泥，但将随着碳市场的影响而增加需求，在未来占据细分市场份额。发展新品种水泥可以降低过程排放，从而降低对 CCUS 的依赖度，将有利于某些不具备 CCUS 资源优势的水泥生产线转型。

可能性 4: 水泥厂与其他工业形成共生体。

共享工业基础设施（包括 CCUS 设施）能降低减碳成本，同时水泥厂产生的 CO₂ 能成为下游工业的原材料，因此水泥厂可以和其他工业形成物质流、能量流闭环的共生关系。

5. 推动中国水泥碳中和发展：政策建议

推动水泥行业纳入全国碳交易市场，发挥碳价机制促进水泥行业向碳中和转型

低碳水泥生产技术将很可能导致水泥生产成本上升，绿色溢价问题在近中期较为突出。因此，碳定价与碳交易机制将是推动水泥行业低碳转型的政策保障。水泥行业碳排放量大、拥有良好碳排放数据基础，具有条件率先纳入碳交易市场。从政府侧看，碳定价的合理性是推动企业减排的重要因素。目前水泥行业减碳成本较高，尤其是 CCUS 等新兴技术成本高企，现有碳价难以匹配。从企业侧看，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。

通过与碳挂钩的绿色采购政策，促进需求方的转型。建立绿色建材市场和生态系统

水泥的下游行业为混凝土与建筑业。水泥行业碳中和转型的重要抓手之一来自需求侧，主要体现在建造工程提高结构效率、节省建筑材料、回收可再利用的建筑垃圾、采购绿色低碳建材等方面。我国的建筑垃圾回收率较低，绿色建材采购体系尚未与碳排放挂钩，因此水泥行业的需求侧转型还有完善的空间。从近期来看，应把建材碳排放作为一种隐含碳纳入建筑碳排放核算中。到中期，低碳水泥实现产品化时，应建立水泥的碳标签制度，并建立低碳建材采购标准与政策。从政府采购项目与头部地产企业开始，鼓励低碳水泥产品采购，培育低碳水泥与建材市场，打通低碳建材产业链。

发挥绿色金融作用，为水泥企业绿色转型提供金融支持

绿色金融工具为高排放企业转型提供资金保障，能引导和激励社会资本参与低碳转型。水泥行业的技术升级改造、商业转型亟需大量资金支持，而现有绿色金融工具无法有效覆盖高碳排放产业的转型需求，因此设计、完善针对水泥行业在内的高排放工业的金融支持体系尤为重要。从政府侧看，应出台完善的转型金融制度、标准、工具体系，为实践低碳转型的企业提供资金支持的框架；从企业侧看，应为未来申请转型金融资金支持做好准备工作，例如制定切实可行的短、中、长期转型战略或行动计划，做好碳排放核算和碳信息披露等。

促进循环经济，实现固体废物燃料的大规模生产和应用

固废燃料很有潜力成为水泥减排路径中的重要替代燃料，或许对未来水泥产业有深刻影响。现行标准将水泥窑协同处置作为垃圾处置、而非替代燃料的定位限制了固体废物燃料产业的进一步发展和大规模应用。同时，城市固体废物的收集、分类、预处理、加工产业也亟需建立完善。废物处置补贴设置对水泥企业的经济激励较小。从政府侧看，应考虑完善城市固体废物收集分类体系，鼓励固废燃料产业的建立与标准化，使固废作为替代燃料具有技术和管理依据，同时应考虑水泥产业中的固废燃料前景，设置合理的激励措施；从企业侧看，水泥企业可利用其对固废燃料需求的高质、高量特点，推动相关标准和产业的建立。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。

图表 27 水泥行业碳中和发展近中远期行动（政府侧）

类别	具体政策	近期	中期	远期
强制性政策	严格的项目审批	★		
	淘汰落后产能	★		
	能耗双控和碳排放双控	★		
激励性政策	碳价政策	★	★	★
	低碳技术财税补贴		★	
	绿色金融	★	★	★
	低碳水泥产品认证、采购政策		★	
配套性支撑政策	低碳产业园		★	
	固废采收预处理与固废燃料体系	★	★	
	重要创新技术基础设施建设（氢能、固废、生物质、CCUS）		★	★
	关键技术研发示范支持	★	★	
	细化水泥标准体系 ¹	★	★	

图表 28 水泥行业碳中和发展近中远期行动（企业侧）

类别	具体政策	近期	中期	远期
制定碳中和战略与路线	提出具体明确的脱碳目标	★		
	研究脱碳路线图和时间表	★		
研发推广碳中和关键技术	能效提升行动	★		
	落后产能淘汰行动	★		
	燃料替代与可再生电力行动	★	★	★
	原料替代行动		★	
	新型胶凝材料与低碳水泥品种研发		★	
	碳汇项目	★	★	
	CCUS项目	★	★	★
加强碳排放管理与制度建设	企业碳排放管理制度建立	★	★	
	企业碳资产管理体系统建立		★	
	企业应对双碳政策机制的建立（产业链、碳市场等）	★	★	★
	外部交流合作	★	★	★
	低碳创新研发、团队培育	★	★	★

参考文献

- 1 US Geological Survey, Cement Statistics and Information, 2022
- 2 中国水泥协会, 2021 年中国水泥行业经济运行报告, 2022, <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/tzgg/202205/W020220511403031688059.pdf>
- 3 陈柏林, 2021 年中国水泥经济运行及 2022 年展望, 数字水泥网, <https://www.dcement.com/article/202201/187042.html>
- 4 CN Cement, The global cement industry: Pandemic impact and outlook to 2022, <https://www.cemnet.com/News/story/171359/the-global-cement-industry-pandemic-impact-and-outlook-to-2022.html>
- 5 中国建材报, 工业固废替代原料与水泥行业可持续发展, https://m.thepaper.cn/baijiahao_8903842
- 6 IEA, Driving energy efficiency in heavy industries, 2021, <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>
- 7 GNR PROJECT Reporting CO₂, <https://gccassociation.org/gnr/>
- 8 IEA, An energy sector roadmap to carbon neutrality in China, 2021, <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- 9 国家能源局, 国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)》, 2022, http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm
- 10 住房和城乡建设部, 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑碳排放计算标准》的公告, 2019
- 11 中国城镇供水排水协会, 住建部: 建筑碳排放计算作为强制要求, 2022 年 4 月 1 日起实施, <https://www.cuwa.org.cn/ziyuanzongheliyong/11703.html>
- 12 新浪地产, 2050 年实现“碳中和”! 远洋集团将这份承诺写进可持续发展报告, <http://news.dichan.sina.com.cn/2021/04/21/1277854.html>
- 13 华夏时报, “排碳”发力, 10 房企承诺“全绿建”, 近年房企绿建面积大幅增加, <https://www.chinatimes.net.cn/article/105414.html>
- 14 发展改革委, 交通运输部, 《国家公路网规划(2013 年 - 2030 年)》, 2013
- 15 中国国家铁路集团有限公司, 新时代交通强国铁路先行规划纲要, 2020
- 16 中国国家发展和改革委员会能源研究所, 美国劳伦斯伯克利国家实验室, 落基山研究所, 重塑能源: 中国, 2016
- 17 RMI, Profitably Decarbonizing Heavy Transport and Industrial Heat, 2021
- 18 孙振平教授课题组, 建筑废弃混凝土回收再利用技术现状与展望, <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20171114/861389-1.shtml>
- 19 武永兰, 废弃混凝土的回收再利用及主要用途, 2020
- 20 韦伯咨询, 2021 年中国建筑垃圾处理行业专题调研与深度分析报告, 2021
- 21 中国产业发展促进会生物质能产业分会、德国国际合作机构(GIZ)、生态环境部环境工程评估中心和北京松杉低碳技术研究院, 3060 零碳生物质能潜力蓝皮书, 2021
- 22 IFC, Increasing the use of alternative fuels at cement plants: International best practice, 2017
- 23 IEA, Cement, <https://www.iea.org/reports/cement>
- 24 Antunes, M. et al, Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review, 2022
- 25 Bloomberg NEF, Locking CO₂ in Concrete Is a Key Step to Greener Buildings, 2021
- 26 边文强, 水泥窑协同处置废弃物的现状分析, <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20191114/1021024.shtml>

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

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/>



封面图片由中国水泥协会提供



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org



中国水泥协会
北京市丰台区西三环南路
乙6号东侧

www.ccawz.com

© 2022年9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。