

水泥行业供热系统低碳化 转型：技术路径与实践

Decarbonizing Cement Industry Thermal Systems:
Technological Pathways and Practices



2026年3月

关于绿色创新发展研究院 (iGDP)

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP) , 2014 年成立于北京, 是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。iGDP 自成立以来, 根植我国绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 服务决策者、实践者、投资者, 通过跨学科、系统性、实证性的研究, 推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化, 与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通, 提供有国际视野和前瞻思考的解决方案及公共知识产品, 为全球可持续发展做出贡献。

报告作者

杨 鹏 绿色创新发展研究院 副主任 / 高级项目总监 / 高级分析师

刘雪野 绿色创新发展研究院 项目主任 / 高级分析师

刘晶宁 绿色创新发展研究院 分析师

洪佳玲 绿色创新发展研究院 高级分析师

联系方式

绿色创新发展研究院 (iGDP) : igdpoffice@igdp.cn

致 谢

本报告部分观点和内容形成过程中, 参考并吸收了好思汇相关研讨活动中的讨论成果, 感谢各位参会专家的分享与交流。同时, 感谢评审专家对本报告提出的宝贵意见和建议。受时间和研究条件所限, 报告尚未能充分吸纳各位专家的全部建议, 相关不足之处将在后续研究中持续修改和完善, 恳请批评指正。

免责声明

本报告内容和观点仅代表作者的个人理解和观点, 旨在加强相关领域的讨论交流, 不代表支持方、作者所属机构、调研专家学者的立场和观点。本报告内容采用数据和信息均来自公开的信息和渠道, 我们力求准确和完整, 但难免偶有疏漏, 敬请谅解并指正。

引用建议

绿色创新发展研究院. 工业领域低碳供热减排潜力及实施路线图系列报告之一: 水泥行业供热系统低碳化转型: 技术路径与实践. 2026. 报告. 北京: 绿色创新发展研究院.

目 录

执行摘要	1
1.1 引言	3
1.2 顶层设计与政策驱动	4
1.3 水泥供热低碳化核心技术路径与实践	5
1.4 结论、挑战及建议	12
参考文献	15



执行摘要

中国水泥行业作为国民经济的基石和主要的碳排放源，其核心生产环节——熟料煅烧的供热系统低碳化转型，已成为实现国家“双碳”目标的战略关键。本报告系统性梳理和分析了这一转型过程中的核心技术路径、标杆实践与未来方向，旨在为行业决策者提供清晰的参考框架。

报告提炼出三大核心技术方向。**首先是余热高效利用的广度与深度拓展**，即从传统的内部发电转向解决低品位余热浪费，并向跨产业协同（如供暖、农业用能）和多源梯级利用升级。**其次是替代燃料的规模化应用**，这是当前阶段深度脱碳的“核心抓手”，头部企业通过供应链创新、系统性技改等方式，已将热量替代率（TSR）提升至60%以上，远超行业约5%的平均水平。**最后是面向未来的前瞻性技术探索**，涵盖了氢能煅烧、全氧燃烧耦合碳捕集（CCUS）以及电加热等颠覆性技术，这些技术虽多处于中试阶段，但代表了行业实现终极零碳的希望。

报告发现，水泥行业的低碳转型已进入技术路径明晰、多元化探索的起步阶段，头部企业的突破性实践证明了技术的可行性。然而，转型仍面临严峻挑战，主要包括：**高昂的初始投资**（如长距离供热管网、设备改造）、**不成熟的供应链体系**（如替代燃料收储运成本高、标准缺失）、**复杂的技术集成难度**（如大比例替代燃料对窑炉稳定性的影响），以及政策协同不足等障碍。

为应对挑战，本报告提出，行业转型需构建**分阶段、差异化的转型路径**，根据不同区域的资源禀赋制定定制化策略。同时，必须**强化政策协同与市场激励机制**，政府层面应完善顶层设计、替代燃料标准与碳市场体系，企业层面则需建立内部碳定价机制、提升碳资产管理能力，并通过商业模式创新分散投资风险，共同支持水泥行业向绿色、低碳的未来稳步迈进。



Executive Summary:

China's cement industry is both a pillar of the national economy and one of the most significant sources of its industrial CO₂ emissions. Decarbonizing the most energy-intensive stage of cement production—the thermal systems in clinker calcination—is essential if China is to meet its "dual carbon" targets (peak emissions before 2030 and carbon neutrality by 2060). This report provides a systematic analysis of core technological pathways, benchmark practices, and future trajectories of clinker calcination thermal systems, offering a clear decision-making framework for industry stakeholders.

The report identifies three primary technical pillars driving their decarbonization:

- **Waste Heat Recovery (WHR) and Cascading Utilization:** Moving beyond conventional internal power generation, the focus is shifting toward the comprehensive use of low-grade waste heat through cross-sectoral synergies, such as district heating and agricultural energy integration.
- **Scaling Alternative Fuels:** This remains the primary lever for deep decarbonization in the near term. While the industry average Thermal Substitution Rate (TSR) stands at a modest 5%, leading enterprises have demonstrated the feasibility of TSRs above 60% through supply chain innovation and systemic kiln retrofits.
- **Frontier Technological Exploration:** The report examines game-changing "zero-carbon" solutions, including hydrogen-based calcination, oxy-fuel combustion coupled with CCUS, and industrial electric heating. Though currently at pilot or demonstration stages, these technologies represent the ultimate hope for a net-zero industrial future.

The transition has entered an initial phase: technological pathways are clear, and experimentation is diversifying. Nevertheless, significant headwinds persist:

- **Financial Barriers:** High upfront capital expenditures (CAPEX) for equipment retrofits and long-distance thermal networks.
- **Immature Supply Chains:** High costs and a lack of standardized systems for the collection, storage, and transport of alternative fuels.
- **Technical Complexity:** Integration challenges, such as maintaining kiln stability under high TSR conditions.
- **Policy Gaps:** Insufficient institutional alignment and market-based incentives.

To navigate these challenges, the report proposes a phased and differentiated transition strategy tailored to regional resource endowments. Governments must refine top-level designs, establish standards for alternative fuels, and expand the Emissions Trading System (ETS) to incentivize low-carbon investment. Enterprises should adopt internal carbon pricing, enhance carbon asset management, and utilize innovative business models to mitigate investment risks.

Together, these coordinated efforts can facilitate the cement industry's transition toward a more secure, affordable, and sustainable low-carbon future.

1.1 引言

水泥行业作为国民经济的基础性原材料工业，是维系地方税收和稳定就业的重要支柱，同时又是消耗工业废弃物和城市垃圾贡献最大的行业之一。与此同时，水泥行业是我国碳排放量最大的工业部门之一。2020年中国水泥行业碳排放量达到峰值 12.3 亿吨^[1]，占全国碳排放总量的 10% 左右，对我国实现“双碳”目标发挥着举足轻重的影响。

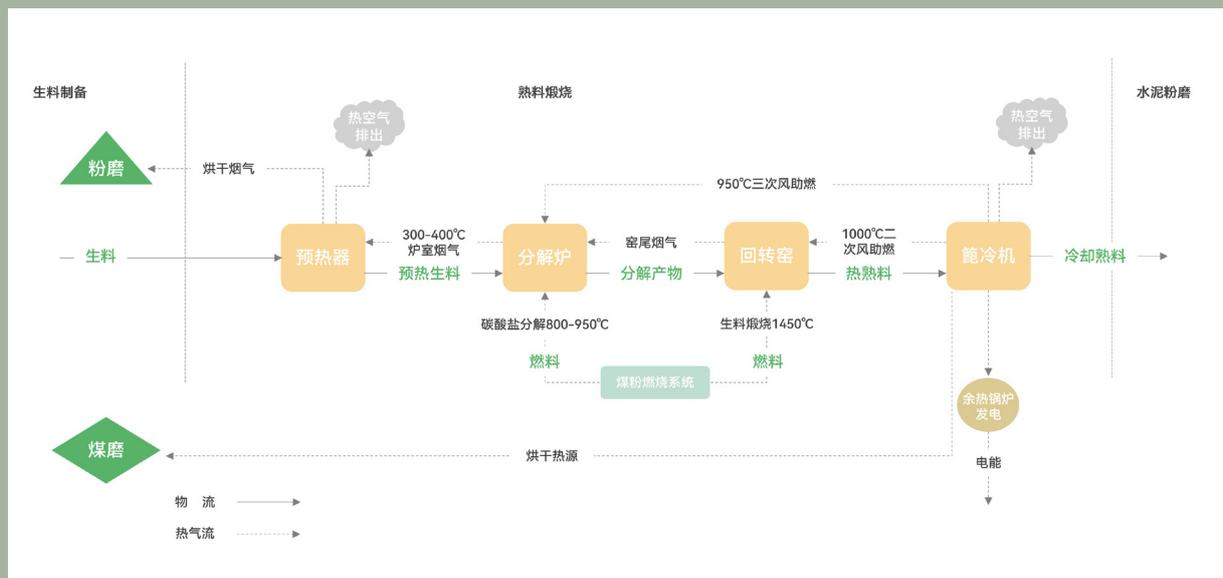
在市场需求持续低迷以及全国环保和降碳刚性约束的双重压力下，水泥行业正进入新一轮结构性调整阶段。这一阶段不仅表现为低效产能的自然出清，更核心的特征是以减碳技术为驱动，推动生产工艺和技术设备的全面升级。

水泥熟料煅烧作为新型干法水泥生产技术的核心环节，是典型的高温、高能耗过程，系统运行需持续稳定供给且能源密度高的热源。我国目前还主要依赖于煤炭作为高热值燃料。这也就导致水泥行业碳排放主要集中在熟料煅烧环节，其中约 35% 来自于燃料燃烧，约 60% 则来自碳酸盐原料分解^[1]。这一结构决定了水泥熟料煅烧热力系统的低碳化是行业转型的关键所在。无论是通过提升能源效率、替代化石燃料，还是捕集过程排放，都离不开对供热系统的深度变革。

本报告旨在系统梳理水泥行业供热低碳化的核心技术路径，并结合实践案例和前沿研究，深入分析转型过程中面临的挑战，并提出相应的转型建议，为行业的可持续发展提供决策参考。

水泥熟料煅烧是一个典型的高温、高能耗过程，整个系统需要持续稳定的高温热源，且能量密度高。该环节由三大核心主机设备构成：首先，分解炉中通过煤粉燃烧产物、窑尾烟气和三次风助燃气提供混合热量，在约为 900°C 高温环境下使生料发生化学分解。随后，进入回转窑，这是熟料烧成的核心热工设备，分解产物在煤粉燃烧产物和二次风助燃气的作用下烧结形成熟料，火焰温度可达 1800°C 至 2000°C，物料温度约 1450°C，需要高热值燃料支撑。最后，篦冷机将约 1400°C 的高温熟料快速冷却到 100°C 以下，同时，回收余热，为回转窑及分解炉提供二次风（约 1050°C）和三次风（约 950°C），提高燃烧效率并用于余热发电。这一过程不仅要求极高的温度，还需要稳定的热量供应。

图 1 水泥行业热力系统——核心热力设备及工作原理



注：作者制作，参考来源^[2]

1.2 顶层设计与政策驱动

在国家“双碳”战略的指引下，近些年出台的一系列政策文件为水泥行业的低碳转型设定了明确的目标和方向（如下图所示）。这些政策的核心导向可以概括为以下几个方面：

量化目标要求

到2025年底，水泥窑使用替代燃料技术的生产线比例应达到30%，替代燃料消费比例力争达到10%。“十五五”期间，实现燃料替代率的大幅提高。工信部2025年7月工信部发布的《建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录（2025年本）（征求意见稿）》明确提出，水泥窑协同处置技术的热值替代率应不低于40%，释放出未来进一步提高目标的政策信号。

能源结构调整

行业加快能源结构调整，稳妥、有序推进煤炭减量，尤其是在大气污染防治重点区域。新建项目原则上不再新增自备燃煤机组；既有机组则鼓励实施清洁能源替代。

替代燃料推广

鼓励企业积极使用生物质燃料、垃圾衍生燃料（RDF）、污泥等可燃废弃物替代煤炭，并推动这些替代燃料向高热值、标准化、低成本方向发展。

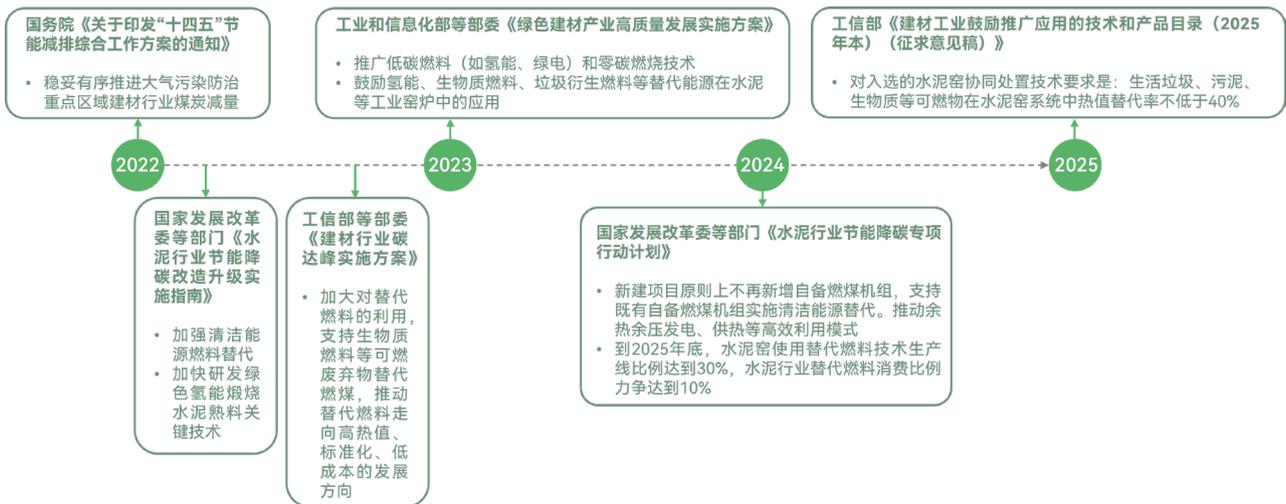
提升企业能源自给能力

支持企业利用自有设施和场地，开展余热余压利用、替代燃料应用及分布式发电等，增强能源保障能力。

技术创新示范与激励

加快绿色氢能煅烧水泥熟料关键技术的研发，拓展更高端、更清洁的深度减排技术。通过“揭榜挂帅”机制，开展技术攻关和节能降碳技术集成应用，建设“六零”试点工厂，即零外购电、零化石能源、零一次资源、零碳排放、零废弃物排放、零一线员工，通过示范引领行业绿色转型。

图2 近年相关关键政策文件及核心内容梳理



来源：作者根据公开信息整理

1.3 水泥供热低碳化核心技术路径与实践

1.3.1 余热高效利用的广度和深度拓展

余热利用是水泥行业最成熟、应用最广泛的节能低碳技术，但当前发展重点正在发生改变。过去，余热利用主要集中在生产线内部的低温余热发电，这项技术已非常成熟，几乎覆盖所有生产线。然而，仍有大量低品位余热被浪费，例如发电系统循环冷却水余热、回转窑筒体辐射热以及空压机冷却器热量等^[3]。以回转窑为例，回转窑筒体外壁在运行中会释放大量辐射热（320~420℃），这部分散热占整个熟料系统表面散热的34%~56%^[4]，以往大多自然排放到大气中。而今，行业正积极探索低品位能源多源协同回收及梯级利用和跨产业协同利用，对水泥余热利用进行广度与深度的拓展。

水泥余热跨产业利用模式的核心在将水泥生产过程中产生的大量中低品位余热资源，通过技术手段转化为其他产业所需的有效能源，构建区域性的低碳供热网络。该模式的典型应用场景包括农业温室供暖、城乡清洁供热、工业园区热能共享等。

案例：华沃（山东）水泥的多源余热回收供农业用能

华沃（山东）水泥有限公司利用其两条2500t/d生产线的余热资源，为旗下距离2公里、占地25万平方米的智慧农业产业园（亚洲最大单体连栋智能玻璃温室）提供稳定的供暖与制冷，解决了农业冬季作为生长供热能耗排放大的问题，构建“工业余热 - 农业用能”模式。



这个项目并未局限于传统的窑头窑尾废气余热，而是创新性整合了三大热源：循环冷却水余热（32~45℃）、回转窑筒体辐射热（250~350℃）和空压机冷却器余热（80~110℃），通过采用蒸汽驱动溴化锂吸收式热泵、集热罩、换热器、循环水泵等回收技术将进行余热全链条回收，通过换热站将三种热源耦合，铺设供热管网6公里，项目实现了对多源、不同品位余热的全链条回收与高效耦合，为农业产业园提供了稳定的70℃热水（供暖）和7℃冷水（制冷）。

此案例的创新价值在于，它不仅展示了多源余热耦合利用的技术可行性，更通过“工业反哺农业”的模式，创造了可观的经济与社会效益（见下表）。

表1 项目投资与效益分析

投资及收益	指标
投资构成	总投资5000万元，其中设备购置（44.80%）和换热站和供热管道建设（33.73%）为主要支出。
能源效益	年回收热量约480,206GJ，相当于节能1.6万吨，项目所需电力完全由厂区自发电满足。
减碳效益	水泥厂年减排4.3万吨CO ₂ ，农业产业园替代燃煤供暖年减排16.6万吨CO ₂ ，总计减排超20万吨。
经济效益	水泥生产错峰运行，冬季不停窑提升了产能利用率与经济效益；农业年产值约1.5亿元。
社会效益	新增就业岗位200余个，带动周边配套产业发展，显著提升了区域农业的现代化水平。

资料来源：^{[5][3]}

该案例在余热利用技术上实现了从单点回收向多源余热的耦合和提质利用的探索，采用“高温辐射热直接回收 + 低温冷却水热泵提质”的先进组合方案，确保稳定的热源供应，将水泥生产的节能减碳与农业的低碳供暖深度结合，构建“余热回收 - 农业增值 - 就业带动”新型产业链。项目入选山东省“工业余热农业利用”示范项目，响应了国家《余热暖民工程实施方案》以及“双碳”政策，为其他面临转型压力的水泥企业提供了可复制、可推广的技术路径。

与大规模的跨产业供热相比，回收回转窑筒体自然散失的辐射热是一种更为轻量化、精准化的余热利用方式。该技术通过在窑体表面加装换热罩，回收占熟料系统总能耗 3.1%~6.6% 的辐射热^[4]。

案例：回转窑筒体余热回收供生活取暖

河南某 5000t/d 生产线与山东某 2500t/d 生产线采用了专用的“窑筒体换热（集热）装置”，精准包裹高温运行的筒体表面（260~390℃），在不影响水泥主工艺流程的前提下，将散失的辐射热转化为稳定热能，用于厂内生活化保障或者周边社区供暖。整个回收过程无需额外消耗化石燃料或电力（除泵送外），通过自然散发的废热直接替代燃煤锅炉，实现供热系统的低碳化。下表展示该技术在不同规模生产线上的应用成效。

表 2 不同规模生产线上的应用成效

类别	案例一：河南省某 5000t/d 熟料生产线	案例二：山东省某 2500t/d 熟料生产线
技术核心	模块化单元组合换热罩	基于实际供暖需求设计的热能回收装置和供暖系统
供热能力	570kW	190kW
供暖面积	10,000m ²	1,769m ²
服务对象	厂区内部生活供热	厂区及周边小学、村委会等
年节能量	相当于约 500 吨标准煤	相当于约 168 吨标准煤

图 4 水泥回转窑筒体表面余热利用项目



图 5 安装取热器前窑筒体图



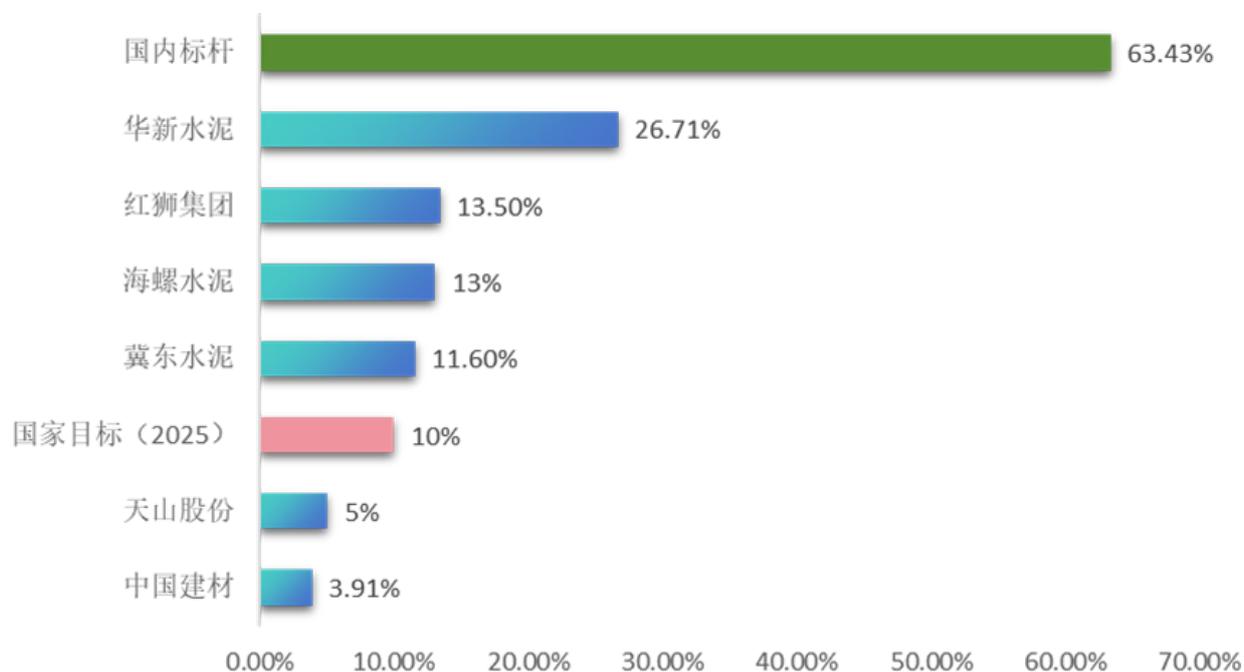
资料来源：^{[4][6]}

1.3.2 燃料替代的规模利用

燃料替代是实现水泥熟料煅烧环节深度脱碳的核心抓手，其关键在于通过技术创新，规模化应用低碳或零碳燃料¹²，以减少甚至摆脱对煤炭的依赖。热量替代率（TSR）——即替代燃料所提供的热量占入窑总热量（化石燃料和替代燃料）之和的比例——是衡量这一路径成效的关键指标。

目前，中国水泥行业的燃料替代整体仍处于起步阶段。目前 TSR 替代率约在 5%^{[7][8]}。然而，大型水泥集团（以海螺水泥、天山材料、金隅冀东、红狮水泥、华润水泥等为代表）已率先布局，并取得显著成效，部分标杆工厂的 TSR 已突破 60%（见下图）。

图 6 大型水泥集团替代燃料热值替代率水平（2024 年）



资料来源：^{[9][10][11][12][13]} 注：海螺为 2023 年数据

从实践路径来看，中国燃料替代进入技术路径清晰，多元探索同时进行的阶段，包括现有设施的增量改进（如利用垃圾协同处理系统掺烧 RDF），替代燃料加工供应一体化，核心热力系统升级改造支持大比例替代燃料或生物质燃料替代等，这些探索为不同条件的企业提供差异化参考的样本。

¹ 主要来源为城市固体废物、工业废物及副产物、生物质等，包括但不限于废油、废轮胎、塑料、废溶剂、废皮革、废玻璃钢、生活垃圾预处理可燃物（CMSW）、生物质燃料等

² 非生物质碳含量为零仅有污泥、生物质两类替代燃料；其他燃料的非生物质碳含量介于 20%-100% 之间，来自于生态环境部 2023 年出台的《企业温室气体排放核算与报告填报说明水泥熟料生产》

技术模式一：替代燃料供应链一体化创新

在煤价高企、碳约束趋紧的背景下，针对替代燃料供应链分散的痛点，水泥企业向替代燃料上游延伸，构建覆盖“收、储、制、运、用”全流程的一体化业务体系替代燃料供应链。这不仅保障了替代燃料供应的质量和稳定性，也催生了新的商业模式。

案例：中材环境替代燃料产业链平台

中材环境致力于打造专业的替代燃料产业链平台，已建成 14 个替代燃料加工中心，近 50 家水泥工厂供货定制化的替代燃料。在商业模式方面，中材环境的创新在于根据客户需求提供定制化解决方案，形成多样化合作模式，包括能源合同管理、技术服务和工程总承包等。公司通过激励机制和利益共享机制，推动替代燃料的规模化应用并实现稳定收益。

例如，在合肥南方水泥有限公司 6000t/d 水泥熟料生产线替代燃料利用技改项目中，中材环境采用合同能源管理模式，与合肥南方开展深度合作，全面承担项目的投资、建设、供料和运营工作，负责从替代燃料的前端收集与加工处理，到后端水泥窑线协同处置的全流程落地。

资料来源：^{[14][15]}

技术模式二：利用现有生活垃圾处置系统掺烧 RDF

该技术利用水泥厂现有的生活垃圾处置系统通道，将 RDF 与生活垃圾混合后协同燃烧。这种方式以极小的改造成本，应对 RDF 单独投料产生的技术难题。

案例：广东某水泥企业的 CKK 系统优化

该企业针对 12000t/d 窑配套建设有 8 万吨 / 年的替代燃料处置项目，利用现有的 CKK 系统（水泥窑协同处置生活垃圾系统）³ 进行工艺优化，解决了传统处置模式下的多项技术瓶颈。原有模式将 RDF 直接投放至分解炉，存在使用量受限、不完全燃烧以及氯离子富集导致预热器结皮堵料等问题，严重影响窑况稳定和成本控制。

企业将 RDF 投加位置调整至 CKK 系统气化炉通道，实现与生活垃圾协同掺烧，并采用科学配比（RDF 与生活垃圾比例 1:2）及精准温控，将气化炉出口温度控制在 560~610℃，有效降低氯离子循环富集，减缓结皮滋生。优化后，RDF 使用量平均增加约 60t/d，熟料标准煤耗降低约 1.3kg/t，炉秤平均减煤量增加 1.5t/h，熟料生产成本下降约 1.1 元 /t，每年节约成本约 200 万元，同时系统运行更稳定，气化炉出口温度提升 70~80℃，燃烧效率显著提高。

尽管成效显著，RDF 掺用量仍受城市生活垃圾处置任务限制，未来研究将聚焦于解决分解炉直投燃料的充分燃烧问题，以进一步降低有害成分对系统的影响。

资料来源：^[16]

³ CKK 技术核心是将生活垃圾等通过气化炉转化为可燃气体（主要成分为 CO、H₂），再送入水泥窑分解炉（温度约 850-900℃）燃烧，替代部分传统化石燃料（如原煤）

技术模式三：大比例替代燃料技术集成应用

实现高 TSR 的提升是一项复杂的系统工程，涵盖燃料管理（燃料均质性与系统稳定性）、燃烧系统（如分解炉实现“零尾煤”、窑头多组分燃料混烧）、污染控制（如旁路放风系统）等多个环节全面、协同的升级改造。

案例：华新水泥地维工厂（TSR>60%）

作为国家级试点，华新地维水泥工厂在其窑龄近 20 年的 2500t/d 的新型干法水泥熟料生产线，突破老旧生产线热工系统适配性差、替代燃料热值波动大等行业共性痛点，通过系统性技改验证大比例替代燃料技术的可行性，成功实现了超过 60% 的燃料替代率。



项目的成功在于系统性集成了四大技术体系：一是高效的固废预处理、储存与喂料系统，确保替代燃料的质量和热值稳定。二是升级的分解炉和窑头燃烧系统，分解炉采用 100% 替代燃料适配技术，并配备智能控制系统，提升燃烧稳定性与自动化水平。三是窑头自主研发的多组分燃料混烧燃烧器，实现劣质煤与替代燃料的协同燃烧。四是配套的水洗提盐污染控制技术，以及稳定的替代燃料供应链，依托区域固废产业集群，建立可靠的 RDF/ SRF 替代燃料供应体系。

该项目总投资 8680 万元，在减碳与节能方面取得了突破性成果：整体热值替代率提升至 60% 以上；其中窑尾化石燃料替代率超过 95%，窑头替代率超过 20%，日化石燃料消耗下降了 60%。熟料单位综合能耗由 115kgce/t 降至 47.98kgce/t，下降幅度达 46.56%，远优于国家一级能效指标（100kgce/t）。单位熟料碳排放强度下降 17.8%，折合年减排 CO₂ 约 8.52 万吨。华新地维工厂的成功为占行业比例超过 21% 的 2500t/d 及以下老旧生产线提供了可复制的技改方案。

资料来源：^{[17][18][19]}

案例：水泥窑炉低碳燃烧工艺及装备的关键技术研发及产业化

在我国水泥行业平均 TSR 仅为 5% 左右的背景下，中材国际（南京）承担的推进江苏省重大科技成果转化项目，聚焦于水泥窑炉低碳燃烧工艺及装备的关键技术研发与产业化，目标是替代 40% 化石燃料。

此项目的核心突破在于解决垃圾衍生燃料（RDF）无法直接在分解炉悬浮燃烧的技术瓶颈。通过研发创新，形成涡流燃烧装置、流化床低温气化技术和高温除尘除氯技术等三项核心技术，与全部采用化石燃料相比，实现水泥生产 CO₂ 总排放量减少 10% 以上。

该项目的意义不仅在于实现替代燃料比例的大幅提升，更在于通过通用技术和装备的研发与制造，支持水泥行业核心热力设备的系统性重构。工信部 2025 年发布的推广目录明确提出，水泥窑协同处置技术的热值替代率应不低于 40%。该案例的研发指标符合政策导向，具有长期推广价值。同时，获得江苏省 1500 万元的专项资金支持，显著降低了产业化早期的投资风险。

资料来源：^{[14][14]}

技术模式四：生物质燃料替代

生物质燃料替代是指利用农林废弃物（如秸秆、稻壳、废菌棒等）作为水泥熟料煅烧过程中的热源，补充甚至取代传统化石燃料（煤炭）。生物质具有可再生性，被视为水泥行业实现源头减碳的关键路径。该模式面临收储运和预处理成本高（尤其是破碎能耗）、燃料均一性差、热值波动大等难题。此外，生物质与煤粉的燃烧特性差异较大，容易引发热工系统不稳定、灰分结皮以及熟料质量波动等风险。

案例：枞阳海螺生物质替代燃料项目

枞阳海螺生物质替代燃料项目是中国水泥行业在生物质燃料规模化应用方面的重要实践，被称为国内水泥行业首套生物质替代燃料系统。



铜陵枞阳海螺水泥有限公司生物质替代燃料项目

该项目是中国水泥行业首套生物质替代燃料系统，项目总投资达 1.2 亿元。项目分两期建设，涵盖 5000t/d 和 10000t/d 生产线，年处理秸秆能力达 30 万吨，规划热量替代率（TSR）超过 40%。

项目成功的核心在于构建了覆盖全铜陵市的标准化秸秆收储运体系，实现了 100% 的收储网络覆盖。通过 21 个标准化收储站、115 个转运点以及加装定位系统的机械设备，确保了燃料来源的稳定性

和可控性。在窑炉端建设了包括破碎、干燥、除氯冷却在内的关键工艺系统，显著提升生物质燃料的适配性。同时，对水泥窑燃烧系统进行了深度优化，支持高比例生物质燃料与煤粉的稳定耦合燃烧。

项目每年资源化利用秸秆 30 万吨，节省原煤约 10 万吨，降低了碳排放强度。项目入选安徽省重点科技专项和“无废城市”建设项目，并获得高新技术企业认定，享受 15% 的所得税优惠。

参考资料：^{[20][21][22]}

1.3.3 面向未来的前瞻技术探索

在“双碳”目标的终极愿景下，中国及国际水泥行业已开始前瞻性地布局氢能煅烧、CCUS 以及电加热等颠覆性技术。这些探索虽大多处于中试阶段，但它们代表了行业实现深度脱碳的终极技术方向。

技术模式一：氢能煅烧

氢能作为一种潜在的零碳燃料，其在水泥行业的应用已从概念走向实践。国家多部委政策明确鼓励窑炉氢煅烧等关键技术研发方向，力争在 2030 年前取得实质性进展。中国建筑材料联合会提出到 2040 年实现绿氢等新技术的商业化推广，到 2050 年实现规模化绿氢深度脱碳的技术路线图。此外，在首批全国建材行业“揭榜挂帅”重大科技攻关项目中，“绿色氢煅烧水泥熟料关键技术”被列为九项重点技术之一，已设定了“氢替代化石燃料的比例不低于 20%”的具体攻关目标。

案例：水泥窑炉零碳燃料掺烧中试试验平台

为推动技术落地，部分龙头水泥企业正在探索建设水泥窑炉零碳燃料掺烧中试试验平台，开展关键技术研发与燃烧装备研制。

表 3 水泥窑炉氢能掺烧中试试验平台

研发主体	项目 / 平台名称	核心进展与特色
天津水泥院	多源燃料耦合燃烧中试平台	氢气、稻壳粉、油、煤粉等多源燃料的耦合燃烧，已成功实现氢能热值替代率 21% 的试验研究，并验证了氢能与替代燃料耦合应用的技术优势。
海螺水泥	掺氢燃烧工业试验 平凉制氢项目	掺氢燃烧完成了替代分解炉 5% 用煤的工业试验，发现可显著降低 NO _x 排放；平凉制氢项目同时向上游布局，建设甘肃平凉制氢储运一体化项目。
金隅集团	北水混氢（氢）煤掺烧中试平台	与清华工研院合作，已建成并投运中试平台，承接国家重点研发计划，探索混氢 / 氢燃烧技术。

资料来源：[23][24][25]

当前技术发展仍受制于窑炉设备适配性、燃料成本以及燃烧稳定性等因素，但随着设备更新换代的推进，以及绿电与氢燃料价格逐步具备竞争力，相关技术的经济性和可行性有望显著提升。有乐观的研究认为，随着技术不断迭代成熟和成本大幅降低，2035 年以后，氢能源有望成为水泥行业的主题能源，支撑水泥行业深度脱碳^[26]。

技术模式二：全氧燃烧耦合碳捕集

全氧燃烧技术，即用纯氧替代空气进行燃料燃烧，不仅显著提高了燃烧效率，从源头上改变了烟气的组分。它不仅能避免产生大量的氮氧化物，更能使烟气中的 CO₂ 浓度大幅提升，从而使后续的碳捕集 (CCUS) 能耗和成本显著降低。

案例：青州中联全氧燃烧碳捕集示范项目

青州中联水泥年产 20 万吨二氧化碳全氧燃烧耦合碳捕集示范项目由天津水泥院采用自主原创技术总承包，是全球水泥行业规模最大的全氧燃烧耦合碳捕集示范工程项目。

该项目的技术突破和核心指标体现在通过“窑炉全氧燃烧 + 两段变压吸附提浓 + 深冷精馏提纯耦合”技术实现高效 CO₂ 捕集。通过全氧燃烧，预热器出口烟气的 CO₂ 干基浓度提升至 80%~85%，是常规空气燃烧技术的 3 倍，再利用变压吸附方法将 CO₂ 浓度提高至 95%，再经过低温精馏将 CO₂ 液化提纯到 99.9% 以上，达到工业级和食品级国家标准。采用耦合技术，单位产品的捕集综合能耗国际上首次降至 1.6GJ/tCO₂ 以内，较常规化学吸收法 (MEA) 降低 40% 以上。单位 CO₂ 产品生产升本较常规后捕集技术降低约 100 元 /t。项目充分利用地理优势，将捕集的 CO₂ 产品用于周边胜利油田的驱油、青岛的冷链运输以及寿光的生态农业，展示了一条从“碳捕捉”到“碳利用”的完整商业闭环。

资料来源：[27][28][29][30]

技术模式三：电加热

案例：ELECTRA 等离子加热水泥窑项目⁴

由欧盟“地平线欧洲”计划资助的 ELECTRA 项目，提出了一项革命性的理念：用可再生电力驱动的等离子体直接加热物料，从根本上替代化石燃料燃烧。这一技术不仅能消除燃料燃烧产生的 CO₂，还能产生浓度高达 99% 的 CO₂ 气流，极易于后续捕集（CCUS）。

瑞典海德堡材料 Slite 工厂成功运行了一台 300 千瓦的等离子加热窑示范装置，证明了其技术可行性^[2]。然而，其规模化应用仍面临四大工程挑战。一是窑炉密封与过压。传统回转窑并非完全密封，需改造为可在微正压下运行的气密系统。二是等离子发生器容量。商业化等离子发生器容量有限，万吨级水泥厂需多台设备并联运行。三是设备耐用性。等离子射流对窑炉耐火材料的侵蚀和损耗是巨大的技术考验。四是高昂的投资成本。工业级等离子设备及配套的大规模可再生电力设施投资巨大。

1.4 结论、挑战及建议

1.4.1 主要结论——供热低碳化技术路线

水泥行业供热低碳化呈现出“组合策略”特征，不依赖单一技术，而是通过多层技术协同推进。整体路径包括三个核心方向：低碳余热利用正向跨产业协同升级；替代燃料作为核心抓手，头部企业已取得突破性进展；氢能、CCUS 等前瞻性技术已进入中试示范，为深度脱碳奠定基础（如表 4）。

首先，传统余热利用的升级趋势明显。过去主要集中在水泥生产线内部余热发电，近年来行业实践已突破单一产业界限，向跨产业协同利用（如余热供暖、工业供汽）和多源余热回收（如窑头窑尾废气、冷却机余热等多节点回收）转型，部分企业已实现规模化应用。

第二，燃料替代是熟料煅烧环节低碳化的核心抓手。当前行业整体替代率仍处低位，但头部企业已通过技术创新取得突破。例如，生物质燃料和固废衍生燃料（SRF/RDF）应用逐步推进，标杆企业实现高比例替代，为行业提供可复制的经验。

第三，氢能和 CCUS 等零碳燃料技术已进入中试和示范阶段。多家企业已布局富氧燃烧捕集技术路线，部分项目实现全球领先的示范规模。同时，氢能煅烧平台建设加快，国外企业探索电加热路径，为行业深度脱碳提供新的方向。

表 4 水泥行业供热低碳技术、应用阶段与核心挑战

技术方向	关键技术及模式	应用阶段
余热高效利用	跨产业余热供暖 / 供汽、多源余热梯级回收	部分企业规模化应用
燃料替代	大比例生物质燃料、固废衍生燃料（SRF/RDF）应用	行业起步，标杆突破
零碳燃料与 CCUS	氢能煅烧、全氧燃烧	中试 / 示范阶段

标杆企业实践显示，行业热力系统低碳转型路径呈现“成熟——核心——前沿”过程的路线图。余热利用作为成熟技术，已从厂内发电扩展到跨产业能源共享，形成能源梯级利用模式。该技术成熟度高，经济性突出，投资回报模型较为清晰，是当前最具性价比的减碳选项。

⁴ 具体介绍见国际案例报告

替代燃料在当前阶段是实现深度减排的关键路径，标杆企业通过系统性技改和供应链实现高比例替代率，验证了技术可行性并推动规模化商业化应用。该技术仍处于快速学习阶段，企业通过在实践中不断积累经验，提升效率，降低成本，每一次成功的规模化应用都在加速这一过程。

氢能煅烧、全氧燃烧及 CCUS 构成行业实现零碳目标的战略储备。虽然这些技术仍处于中试或示范阶段，但布局已加速。当前面临高昂的设备和运营成本，但随着政策支持、技术创新和规模化部署推进，成本下降趋势明确，未来具备商业化潜力。

1.4.2 核心挑战——技术及市场障碍

尽管路径清晰，但水泥行业供热低碳化技术落地仍面临多重挑战。这些挑战包括技术集成、基础设施、供应链与市场机制等。

规模化与稳定性挑战。试点成功到稳定的大规模商业化之间存在显著难度，核心在规模化与产品化的能力。以高比例替代燃料为例，热值波动对窑内的燃烧温度有影响，进而带来熟料质量稳定性的风险；氯、碱等有害元素可能在预热器系统富集，导致结皮与堵塞，严重时引发停产；燃料特性差异要求更高的过程控制水平，传统依赖经验的操作模式难以适应，增加系统失稳概率。

基础设施与供应链的结构性缺口。技术规模化依赖外部基础设施与供应链的支撑，但现阶段存在明显缺口。跨产业余热利用模式的复制须依赖长距离供热管网，投资额大，且需跨工业、住建、农业等部门协同，审批周期长、实施难度高，成为推广瓶颈。替代燃料的“收、储、制、运、用”全链条尚不完善，物流与预处理成本较高，缺乏统一的质量分级与基于热值的定价标准，同时高热值废弃物面临跨行业竞争，形成规模化发展的关键短板。

供应链与市场体系挑战。替代燃料（RDF、生物质）的收储运及预处理环节投入巨大，导致其经济性优势在部分地区并不明显。行业内尚未建立统一的替代燃料质量标准和基于热值的结算体系，制约了其市场化流通。此外，随着资源回收行业兴起，高热值废弃物资源竞争日益加剧。

经济性与投资意愿挑战。经济层面的不确定性压制企业投资意愿。首先，长距离供热管网与高比例替代所需的窑炉系统改造需要较大资本支出，与行业利润下滑的现实相冲突。其次，全国碳市场的配额分配与 MRV 体系仍在完善，碳价缺乏稳定的长期信号，企业难以将碳资产收益准确纳入 IRR 测算，从而倾向观望。最后，技术推广存在关键时间窗口，过早或过晚都可能失败。绿氢与 CCUS 等前沿技术何时达到与传统技术竞争的成本拐点不确定，使投资决策风险显著。

1.4.3 战略性建议：构建加速低碳化的政策和市场环境

应对上述挑战，水泥行业供热低碳化需要从项目与单一技术支持基础上构建覆盖政策激励、市场机制和企业战略协同的生态系统建设，系统性地降低风险、提升收益，推动先进技术加速普及。

顶层设计：分阶段、因地制宜的技术推广路线图

地方政府应制定清晰、务实的路线图，提供稳定预期与具体指引：

短中期（至 2030 年）的重点是全面推广跨产业余热利用，推动替代燃料规模化应用，重点完善 RDF 和生物质燃料的区域性供应链。

中期（2030-2040 年）是在工业园区及城市周边实现工业余热“应用尽用”，推动替代燃料基本替代窑尾化石燃料，并积极开展氢能掺烧的工业化示范并验证经济性。

长期（2040-2050年）是推动绿氢成为水泥供热的主要能源之一，实现CCUS技术的产业化应用，最终达成行业的深度脱碳目标。

路线图需要因地制宜，结合当地资源与市场条件，避免“一刀切”。在长三角、珠三角等工业与城市密集的地区，可以优先发展工业与市场固废的RDF，构建废弃物资源化利用网络。在东北、西南等农业资源丰富地区：重点推广生物质燃料，构建“县域收集+集中处理”的供应链模式。在新疆、甘肃等风光资源丰富的地区，前瞻布局“风光制氢-水泥窑掺烧”一体化项目。

政策协同：以标准、碳市场与金融形成合力

加强顶层设计与跨部门统筹。政策体系应为市场铺路并提供资金支持。

首先，政府与行业协会应立即着手组织制定并推行替代燃料的产品质量分级标准、协同处置技术规范以及基于热值的公平结算体系。

同时，建立跨部门协调机制，疏通供热余热跨产业利用、替代燃料供应链等在规划、审批、建设等各个环节的堵点，培育规则清晰、公平和稳定的政策环境，吸引长期投资。

此外，强化碳市场的长期收紧路径，形成可预期的碳价信号，推动企业将碳市场的外部约束内化为长期投资决策的核心考量，从而主动进行前瞻性的技术布局与改造。发展绿色金融，通过专项转型基金、与减排绩效挂钩的可持续贷款与绿色信贷等工具，分担前沿技术与示范项目的初始投资风险，跨越商业化“死亡之谷”。

企业行动：激发内生动力与创新活力

企业应将供热低碳化作为提升长期竞争力的战略性投资，提前布局相关技术和项目。更重要的是，企业应将“碳价预期”正式纳入投资决策的核心逻辑。在评估项目时，除了传统的经济效益测算，还需将未来预期的碳资产收益或碳排放成本计入模型，从而更科学、准确地评估项目的内部收益率（IRR），做出更符合长期利益的投资判断。

围绕商业模式的创新，积极采用合同能源管理（EMC）等方式，引入专业第三方能分担初始投资、建设与运营风险，水泥企业无需承担高额的初期资本开支和技术风险。项目产生的节能与减碳收益（如节约的燃料成本、获得的碳资产收益等）由双方共享，缓解水泥企业的现金流压力。

建立专业的碳资产管理能力。随着碳市场的不断成熟。节能以及燃料替代项目将为企业带来可观的碳资产，这不仅是成本，更是一个潜力巨大的利润。因此，企业必须将碳资产管理提升至战略高度，建立一套专业的碳资产管理体系，配备专业人员和工具，将碳资产作为可交易、可增值的资源进行精细化管理，把合规压力转化为盈利增长点与核心竞争力。

参考文献

- [1] 生态环境部.《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 通用硅酸盐水泥(征求意见稿)》编制说明[EB/OL]. (2025-03)[2025-12-31]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202503/W020250328550114310159.pdf>.
- [2] 于海斌等. 一种水泥熟料烧成过程清洁生产的建模优化方法[EB/OL]. (2013). <https://patents.google.com/patent/CN103400196A/zh>.
- [3] 甘胜滕等. 枣庄某水泥生产线余热农业高效利用实例分析[J]. 建筑节能, 2023, 51(5): 91-96.
- [4] 董红岩. 水泥回转窑筒体表面余热利用方案的工程设计[J]. 中国水泥, 2023(3): 72-75.
- [5] 山东省发展和改革委员会. 水泥产业“链”上智慧农业[EB/OL]. (2023-05-08)[2025-11-04]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2023/5/8/art_91540_10397058.html.
- [6] 温彩霞等. 水泥回转窑筒体表面余热回收供暖系统的设计[J]. 水泥技术, 2020, 2.
- [7] 卢耀刚等. 中国水泥行业替代燃料产业现状与发展综述[J]. 中国水泥, 2025(4): 9-13.
- [8] 夏凌风等. 关于水泥行业燃料替代技术发展的几点思考[J]. 2024(05): 26-30.
- [9] 华新水泥股份有限公司. 华新水泥股份有限公司 2024 年年度报告[R/OL]. (2025-03-26). https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0326/2025032601566_c.pdf.
- [10] 中国建材股份有限公司. 2024 中国建材股份有限公司 ESG 报告[R/OL]. (2025-03-27). https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0327/2025032702184_c.pdf.
- [11] 安徽海螺水泥股份有限公司. 安徽海螺水泥股份有限公司 ESG 报告[R/OL]. (2025-03-24). https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0324/2025032401327_c.pdf.
- [12] 中诚信国际. 红狮控股集团有限公司 2024 年度跟踪评级报告[R/OL]. (2024-10-11). https://static.sse.com.cn/disclosure/bond/announcement/company/c/new/2024-10-11/241745_20241011_4WYJ.pdf.
- [13] 北京金隅集团股份有限公司. 2024 北京金隅集团股份有限公司 ESG 报告[R/OL]. (2025-03-30). https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2025/0330/2025033000773_c.pdf.
- [14] 中国中材国际工程股份有限公司. 2024 环境、社会与管治报告[R/OL]. (2025-03). https://file.finance.sina.com.cn/211.154.219.97:9494/MRGG/CNESH_STOCK/2025/2025-3/2025-03-26/10807826.PDF.
- [15] 中材环境. 聚焦替代燃料打造环保新质生产力[J]. 中国建材, 2025(3): 58-61.
- [16] 李利民, 李贵超. 利用 CKK 系统掺用 RDF 替代燃料的实践[J]. 水泥, 2025(2): 26-27.
- [17] 国建联信. 建材行业首张熟料生产替代燃料项目减排量核查证书颁发[EB/OL]. (2024-05-20). <http://www.cbminfo.com/mobile/470523/1576858/1577186/>
- [18] 华新地维公司. 大比例替代化石燃料技术是怎样炼成的[J]. 中国建材, 2024(6): 40-42.
- [19] 汪宣乾等. 建材行业“六零工厂”项目水泥熟料生产零化石燃料消耗阶段性探索与实践[J]. 水泥, 2024(2): 1-4.
- [20] 铜陵市人民政府. 铜陵市“无废城市”建设试点工作总结报告[R/OL]. (2020). <https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/2020/wfcsjssdgz/sdjz/ldms/202110/P020211012371618615643.pdf>.
- [21] 朱邦银. 枞阳海螺国内首条生物质替代燃料系统试生产[EB/OL]. (2020). http://www.aqzyzx.com/zongyang/202208/t20220803_6270934.html.
- [22] 铜陵市枞阳县生态环境分局. 关于安徽枞阳海螺水泥股份有限公司生物质燃料改造项目环境影响报告表审批意见的函[EB/OL]. (2023-12-26). <https://www.zongyang.gov.cn/openness/OpennessContent/show/973600.html>.
- [23] 马娇媚, 彭学平, 范道荣等. 氢能耦合替代燃料悬浮煅烧水泥技术研究[J]. 水泥技术, 2024(6): 7-14.
- [24] 吴义国等. 氢气替代分解炉 5% 燃料的工业试验[J]. 新世纪水泥导报, 2025(1): 1-3.
- [25] 平凉市融媒体中心. 国电投宣化风储氢项目、平凉首个制氢储运项目开工[EB/OL]. (2023-08-31). <https://h2.solarbe.com/news/20230831/1227.html>.
- [26] 王文杰. 氢能源煅烧在水泥行业中的应用[J]. 中国水泥, 2025(6): 16-18.
- [27] 金周政等. 水泥工业 CCUS 技术研究进展与工程应用示范[J]. 水泥技术, 2025(1): 2-8.
- [28] 刘秀枝. 全球首套水泥全氧燃烧耦合碳捕集技术[J]. 2024(32-38).
- [29] 彭学平. 水泥行业双碳体系下全氧燃烧碳减排技术装备研发及示范应用[J]. 水泥技术, 2024(5): 11-16.
- [30] 荣亚坤等. 先进热工技术装备及其在万吨水泥生产线的应用[J]. 水泥技术, 2024(6): 31-35.

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress), 简称: 研究院 (iGDP), 是专注绿色低碳发展的战略咨询平台, 2014 年成立于北京, 旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践, 面向全球应对气候变化进程, 为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

联系方式:

电话: 86-10-8532 3096

邮箱: igdpoffice@igdp.cn

网站: www.igdp.cn

地址: 中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

