

主要工业行业节能低碳技术 研究与评估：钢铁和水泥

安能翼科（北京）能源咨询发展中心（CCEEE）
2022.07

China Council for an Energy Efficient Economy (CCEEE)
July, 2022

致谢

本研究由安能翼科（北京）能源咨询发展中心（CCEEE）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/工作组下的课题。

研究团队感谢以下专家在项目研究过程中做出的贡献：

辛 升 国家发改委能源研究所
袁宝荣 中节能咨询有限公司
谢晓敏 上海交通大学
范永斌 中国水泥协会
郦秀萍 中国钢研科技集团有限公司
李林军 深圳国家高技术产业创新中心

关于项目单位

安能翼科（北京）能源咨询发展中心（CCEEE）是植根于中国的一家专注于能效经济发展、推动节能减排、应对全球气候变化的非营利机构。CCEEE 以“推动能效持续发展，促进经济繁荣增长”为宗旨，着力整合相关领域的国际国内资源，促进政策、管理、技术、投融资和最佳实践等方面的多维度交流及深度协同合作，助力中国积极应对全球气候变化，推动实现 2060 碳中和目标。CCEEE 坚持放眼全球，服务中国，以“独立研究评估，企业支持服务，能力培育建设，国际交流合作”为业务核心。

目 录

引言：“双碳”目标下主要工业行业的挑战与前景	1
第一部分：钢铁行业.....	5
一、行业概况及“双碳”挑战.....	5
1. 行业概况：碳排放最高的制造业行业	5
2. “双碳”挑战：能源密集的长流程工艺	6
二、技术发展现状及前景	10
1. 生产工艺简介	10
2. 节能低碳技术概述	12
3. 现有技术推广的挑战	14
三、关键技术分析	15
1. 超高温超高压干熄焦发电技术	15
2. 烧结废气余热循环利用工艺技术.....	19
3. 炼铁高炉鼓风除湿节能技术	23
4. 转炉高效复吹熔炼装备及技术.....	27
5. 白灰窑尾气 CO ₂ 回收用于 CO ₂ -O ₂ 混合喷吹炼钢工艺技术.....	30
6. DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备	35
四、国内外节能低碳技术清单.....	38
第二部分：水泥行业.....	104
一、行业概况及“双碳”挑战.....	104
1. 行业概况：产量高位平台期和工艺过程排放大	104
2. “双碳”挑战：固有的过程排放和煤炭为主的能源结构	105
二、技术发展现状及前景	108
1. 生产工艺简介	108

2. 节能低碳技术概述	109
3. 目前技术推广的挑战	112
三、关键技术分析	113
1. 高效烧成技术（高效烧成系统改造）	114
2. 熟料煅烧过程智能优化控制系统	122
3. 辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术	131
四、国内外节能低碳技术清单	134
第三部分：政策建议	169
一、优化节能低碳技术遴选-推广-评估-激励体系	169
1. 拓展技术收录方式，加强技术申报和应用激励	169
2. 持续追踪收录技术的发展演变	169
3. 提供技术成本效益核算工具包	170
4. 加强对集成和系统技术的关注	170
5. 开发针对数字化、智能化技术的有效评估体系	171
6. 注重技术展示、意识提升和能力培训	171
二、识别先进技术最优作用阶段，高效推进行业达峰中和	172
1. 钢铁行业	172
2. 水泥行业	173
参考文献	176
附录：重点行业绿色低碳发展及节能低碳技术相关主要现行政策名录	179

引言：“双碳”目标下主要工业行业的挑战与前景

2020年9月22日，我国首次面向国际社会承诺二氧化碳排放力争2030年前达峰，并努力争取2060年前实现碳中和。随后在同年12月和2021年4月，我国先后两次在国际性高级别会议上重申了“双碳”目标，并公布了细化目标和相应的实施计划，进一步表明了中国作为《巴黎协定》重要缔约国及全球碳排放最高的三大经济体之一，当仁不让地承担应对气候变化责任、积极推动形成全球应对气候变化合力的立场。

这是我国首次向国际明确长期低碳发展目标，在疫情后全球经济重建、气候领导力不足的背景下，受到了全球各国的广泛欢迎和积极关注，但与此同时，国际社会也对中国更加详细的行动路径和具体的实施方案表达了强烈期待（经济日报，2021）。

为了履行“双碳”承诺，落实“双碳”行动，回应国际关切，我国加速构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系，即碳达峰、碳中和顶层设计文件（“1”）和2030年前碳达峰行动方案及分领域分行业实施方案（“N”）。

在做出“双碳”承诺一周年之际，我国政府正式发布《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》（下简称《意见》），作为“1+N”政策体系中提纲挈领的“1”。《意见》明确了“双碳”工作“全国统筹、节约优先、双轮驱动、内外畅通、防范风险”的原则，设立了能源强度和碳排放强度在2025年分别较2020年下降13.5%和18%、重点耗能行业能效水平大幅提升逐渐达到国际先进水平等目标，并强调了推进经济社会发展全面绿色转型、深度调整产业结构、加强绿色低碳重大科技攻关和推广应用等工作方向（新华社，2021）。

随后各部门又陆续发布了《2030年前碳达峰行动方案》（下简称《方案》）《促进绿色消费实施方案》《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》等重要文件，充实“N”的构成，“1+N”政策体系正加快建立完善——在《意见》的顶层设计框架下，逐步形成各领域各行业的碳达峰、碳中和政策合力，从经济社会的方方面面加快推进节能减排¹、应对气候变化。

其中，《意见》《方案》等综合性文件对电力、钢铁、有色金属、石化化工、建材等高耗能高排放行业的节能降碳和产能升级予以重点关注。这些行业因自身固有特性或现有工艺水平及设备的限制，能耗高、碳排放量大——2018年能耗和碳排放总量分别占全国总量的38%和42%（王庆一，2019），并且在短期内难以彻底改变。以水泥行业为例，目前水泥产品大多以硅酸钙矿物为主要成分，而钙元素在自然界中最常见的矿藏形式为石灰石（碳酸钙），因此水泥生产中煅烧石灰石、提取钙质的过程势必

¹ 如无特别说明，本报告中的“节能减排”特指碳排放，和“节能降碳”“节能减碳”同义使用。

伴随着大量的二氧化碳排放，但水泥中硅酸钙的含量又直接影响着水泥性能，因此短期内无法通过简单替换或降低含量的方式减少水泥生产的过程排放。另一类典型问题则以钢铁行业为代表：目前我国钢铁生产以基于铁矿石的初级生产即“长流程”生产为主，该工艺一方面流程长，涵盖烧结、球团、炼焦、炼铁等能源密集型环节，另一方面以焦炭作为主要还原剂和燃料，两相作用，共同造成我国钢铁生产能耗高、碳排放高的问题；但我国现役的高炉等“长流程”生产设备和基础设施普遍较新，按照正常使用期限预计还需要 15~20 年才能完成更新和替换，如果盲目快速更换为短流程设备可能反而会造成全生命周期的碳排放升高，从总体上并不一定能实现减碳的效果。

与此同时，这些重点行业本身的经济贡献大、承担了大量就业，更是关系能源、建筑、交通、家电、航空航天、机械等国计民生领域的基础行业，在我国工业化、城镇化、现代化发展进程中举足轻重，牵一发而动全身，难以通过简单关停或减产的方式实现节能减排和碳中和、碳达峰。相反，**对这些重点行业而言，节能降碳尤其不能以伤害合规产能和经济发展为代价，而是要尽力实现行业生产力和节能降碳能力的协同提升**，这些都是重点行业在“双碳”目标下面临的严峻挑战。

《意见》发布以来，各部门又陆续出台了《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》（发改产业〔2021〕1464 号）、《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）、《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》（工信部联原〔2022〕6 号）、《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022 年版）》（发改产业〔2022〕200 号）等多项政策文件，对重点行业开展“双碳”工作、实现绿色发展提出了严格要求和殷切希望。重重压力之下，各个重点行业也在紧锣密鼓地制定行业碳达峰、碳中和路线图，探索行业实现“双碳”目标的最佳路径。纵观节能减碳的各种方法，大致可以归纳为结构调整、管理改进和技术提升三大类。

- 结构调整主要包括能源结构调整和产业结构调整，但无论哪一种都无法一蹴而就，同时还需要兼顾经济效益并协调好社会各方利益，需要长期、持续性的调整来完成经济社会向清洁用能、高质量发展的变革，投入大、难度高，难以立竿见影，因此在完全实现理想中的彻底变革前，还需要其他手段加以配合。
- 管理改进强调在现有能源、产业结构和技术水平等“硬性”条件之外，从顶层设计和规划、资源人员配置、各环节配合、流程优化、相关方协调等“软性”要素着手，寻求管理方法改进，从而帮助社会经济系统整体实现在既定技术条件下的最优能效和最低碳排放水平。然而管理改进毕竟受制于总体能源、产业结构和技术水平的“天花板”，可以发挥的作用虽重要但有限，通常配合其他手段、起辅助作用。

- 技术提升的核心在于提高效率——对生产而言，好的技术应该提高生产效率；对节能减排而言，好的技术应该在不影响生产效率的前提下实现节能减排效果，甚至促进生产效率进一步提高。对技术的定向选择不但不会使节能减排、应对气候变化站在经济社会发展的对立面，反而使两者协同发展成为可能，配合结构调整和管理改进，有望实现可观的节能减排效果。节能低碳技术包括渐进式技术和颠覆性技术两类。前者致力于在不改变现有工艺流程的情况下实现节能降碳，因此应用成本和门槛相对较低，适用于近中期；而颠覆性技术会部分或完全改变现有工艺流程、带来全新的生产方式，往往涉及大型设备、基础设施甚至生产线替换，因而成本、门槛较高，但带来的节能减排效益也更好，适用于远期。因此从协调气候变化问题和经济社会发展、适应不同时期需要，以及节能减排效果等各方面而言，节能低碳技术都将对我国尤其是重点行业在“双碳”目标下的绿色发展发挥关键的核心作用。

通过先进适用技术的推广应用促进节能降碳一直是全社会尤其是工业部门和重点工业行业的工作重点之一，国家和地方政府对此也给予了持续性的政策支持，主要体现在相关技术目录的遴选、收录、发布和推广。以国家发展改革委《国家重点节能低碳技术推广目录》（原《国家重点节能技术推广目录》）为例，从2008年至今已发布共十批、累计数百项技术，也对先进技术的推广应用做出了值得肯定的贡献，但如何在现有的以技术目录为主的方式基础上，更有效地收录技术、更好地连通技术目录和生产实践、进一步提高企事业单位技术应用甚至研发的积极性，这些问题都还存在很大的探讨空间。

而对真正处于节能降碳一线的重点行业和企业而言，在“双碳”目标提出之后，已有的技术目录和市面上可用的先进技术中，哪些优中选优的关键技术最适应行业、企业的具体情况，能够最快最好地帮行业、企业减轻“双碳”压力、完成“双碳”任务，什么情况、什么阶段适用什么技术，都是重点行业和企业最关心的问题。在此基础上，包括技术目录在内的技术推广政策如何进行调整，从而更好地反映和适应我国应对气候变化新阶段、新战略的需求，支持企业、行业、各部门乃至整个经济体实现转型升级和绿色发展目标，也是近期技术工作应该优先考虑的焦点。

基于上述考虑，本报告从钢铁、水泥两个典型的高能耗、高排放重点行业入手，对国内外节能低碳技术开展研究与评估，探讨我国重点工业行业尤其是钢铁、水泥行业如何通过技术手段助力行业绿色发展和“双碳”目标的实现，以及节能低碳技术的推广工作如何在“双碳”背景下更好地发挥作用。报告正文分为钢铁、水泥和政策建议三大部分：在行业部分对行业概况、行业节能低碳技术现状进行概括和描述，选取典型适用技术做深入分析，并提出分阶段的行业推荐技术清单；在政策建议部分则分别针对“促进重点行业节能低碳技术应用”和“钢铁水泥行业在‘双碳’目标下不同

阶段的适用技术”提出建议²。报告附录对影响重点行业节能低碳技术推广应用的现行政策进行整理汇编。

² 由于钢铁、水泥行业都是流程工业，虽然在供应链、生产流程、服务链（“两链一流”）的各个环节都存在节能减排潜力，但绝大多数能耗和碳排放都来自生产流程，因此本报告讨论的技术重点聚焦于生产流程中的技术。

第一部分：钢铁行业

一、行业概况及“双碳”挑战

1. 行业概况：碳排放最高的制造业行业

钢铁行业是国民经济的重要基础产业，对于满足工业化、城镇化与现代化需求有着不可替代的作用，为建筑、交通、机械、能源等国民经济关键部门提供了其所需的绝大部分钢铁材料。改革开放以来，我国钢铁行业发展迅速，已建成全球范围内产业链最完整的钢铁工业体系，成为全球钢铁生产、消费总量及人均消费量第一大国。2020 年中国粗钢产量为 10.53 亿吨，占全球总量近 60%，较 2010 年年均增长 5.0%（北京科技大学等，2021）；2021 年我国粗钢产量与 2020 年基本持平，为 10.35 亿吨（国家统计局，2022）。

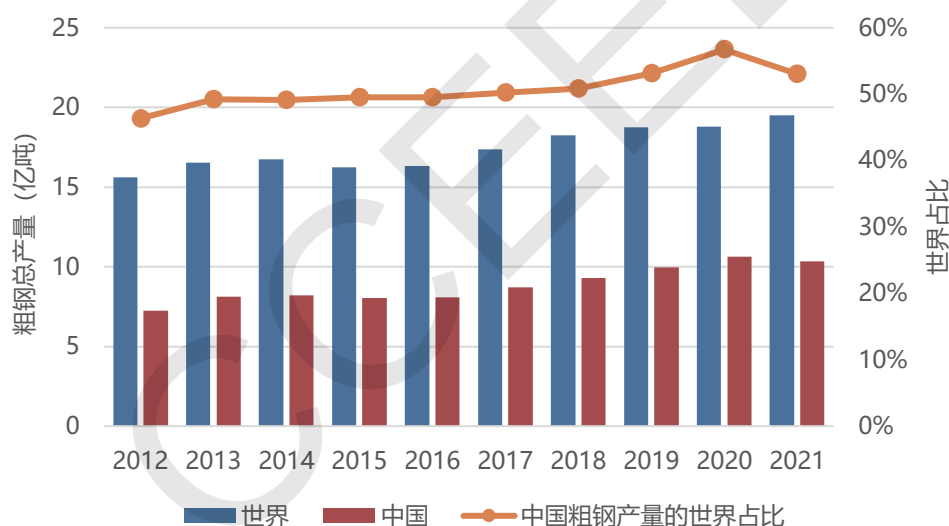


图 1 我国及全球粗钢产量（2012-2021）

数据来源：世界钢铁协会、国家统计局

与此同时，我国钢铁行业也面临生产工艺与产品结构落后、产业布局不合理、高耗能、高污染等重大挑战。其中，高能耗、高碳排放的问题更是成为“双碳”目标提出后，我国钢铁行业发展中最棘手的问题。据统计，钢铁行业碳排放量约占全国碳排放总量的 15%，是我国碳排放最高的制造业行业（北京科技大学等，2021）。因此钢铁碳减排至关重要，是我国实现碳达峰、碳中和目标的重要抓手。

居高不下的碳排放主要来自以长流程为主的生产工艺所带来的高能耗——这也是我国钢铁行业与国际先进生产水平的差距所在；具体而言，长流程生产方式约占我国当前粗钢工艺结构的 90%，造成钢铁行业（黑色金属冶炼及压延工业）占全国能耗总量高达 16.3%（北京科技大学等，2021）。钢铁行业碳排放高的另一个原因是以煤炭为主的能源结构：钢铁行业一次能源消耗以煤炭、石油、天然气、一次电力（水电、核电等）为主，其中煤炭占比约 70%（马骥涛、黄桂田，2018）。

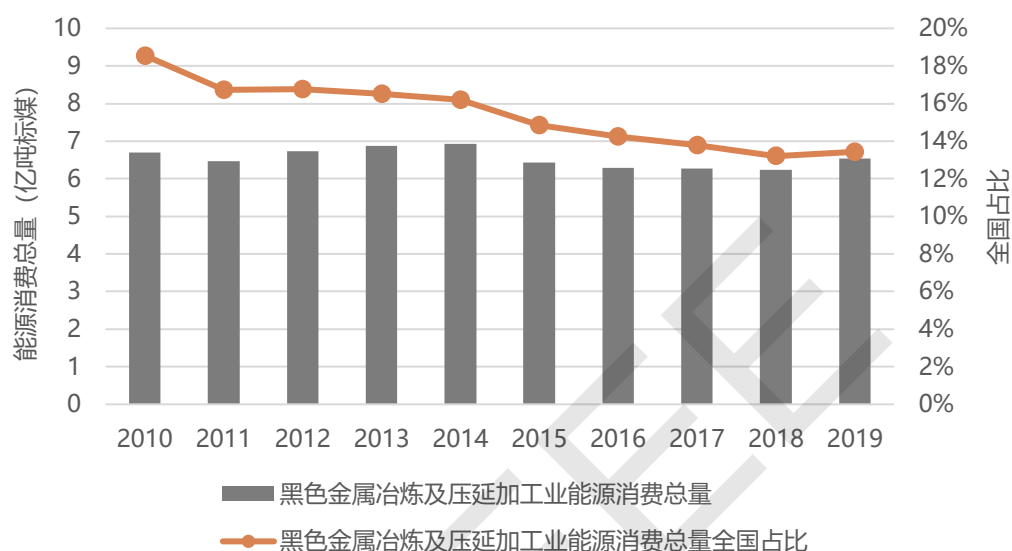


图 2 我国钢铁行业能耗及全国占比（2010-2019）

数据来源：国家统计局

综合图 1、图 2 可知，我国粗钢产量以年均 4% 左右的速度保持增长，但同期钢铁行业能耗基本维持稳定，钢铁行业占全国能耗比重也在不断下降。这反映出我国钢铁行业在过去十年间无论是从产能提升还是节能降耗方面，都实现了显著的进步，并且在很大程度上推动了全国能源消费结构的优化。

然而“双碳”目标的提出为钢铁行业带来了更大的挑战和机遇，原有的升级速度和强度都已经无法满足碳达峰、碳中和的高要求，未来发展方向应更多地聚焦在落后产能控制和产业升级，实现钢铁生产由“规模大”到“质量高”的转变；推广短流程生产工艺，推进废钢资源应用和钢材生产电气化；以及从高能耗、高污染向绿色低碳发展转型等方面。

2. “双碳”挑战：能源密集的长流程工艺

政策压力

钢铁行业作为全国碳排放最高的制造业行业以及最主要的耗能行业之一，因其现阶段的能耗、碳排放特点以及行业本身的重要性，在国家层面的“双碳”目标提出以

来倍感压力。《意见》和《“十四五”工业绿色发展规划》要求钢铁等行业“深度调整产业结构”并制定行业碳达峰实施方案，《方案》更是明确提出“推动钢铁碳达峰”，作为“工业领域碳达峰行动”的重要组成部分。除此以外，国家发改委、工信部、生态环境部等部门相继发布《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见——冶金、建材重点行业严格能效约束推动节能降碳行动方案（2021-2025 年）》《“十四五”原材料工业发展规划》《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》《钢铁行业节能降碳改造升级实施指南》等多个政策文件，为钢铁行业节能降碳、绿色发展进一步提出明确的量化目标。这些目标均着眼于 **2025 年**，主要聚焦以下方面：

- **吨钢综合能耗降低 2%**（工业和信息化部、科学技术部、自然资源部，2021）；

2020 年中国钢铁行业吨钢综合能耗为 545.3 千克标准煤/吨粗钢（kgce/t）（王维兴，2021），较 2015 年减少近 5%（工业和信息化部、科学技术部、自然资源部，2021），即约 28.7 kgce/t。

到 2025 年吨钢综合能耗降低 2%，即是要在 2020 年基础上再减少近 11 kgce/t，达到 534.4 kgce/t。

- **能效基准水平以下产能基本清零**（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）；

以转炉工序为例，截至 2020 年底，中国钢铁行业转炉工序能效低于基准水平的产能约占 30%（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）；按 2020 年粗钢产能 10.86 亿吨（中国节能协会冶金工业节能专业委员会、冶金工业规划研究院，2020）、转炉占比 90%（北京科技大学等，2021）粗略估计，实现 2025 基准水平以下产能清零目标意味着要在五年内完成约 2.9 亿吨转炉产能的升级或淘汰，而这仅仅是转炉炼钢这一项工序的目标任务。

- **达到标杆水平的产能比例要超过 30%**（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2021）（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）；

中国黑色金属冶炼和压延加工业各类工序 2021 年能效基准水平与对应标杆水平大多存在 15%~30% 的差距，个别工序差距甚至高达 67%³。以高炉和转炉两道核心工序为例，截至 2020 年底，标杆水平以上（含）的产能分别仅占 6% 和 4%（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）。要在四年时间内（2021-2025）缩短差距，并且将达到标杆水平的产能占比提升 25 个百分点左右，钢铁行业开展大规模能效提升工作迫在眉睫。

³ 根据《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》中相应数据估算所得。

表 1 《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》钢铁行业产能对比

	高炉工序 单位产品能耗	转炉工序 单位产品能耗	电炉冶炼	
			30~50t 单位产品能耗	≥50t 单位产品能耗
标杆水平 kgce/t	361	-30	67	61
基准水平 kgce/t	435	-10	86	72
差距*	20.5%	66.7%	28.4%	18.0%

数据来源：国家发展和改革委员会；*差距基于标杆水平和基准水平计算得出。

- 电炉钢产量占粗钢总产量比例提升至 15%以上，钢铁工业利用废钢资源量达到 3 亿吨以上（工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部，2022）。

2020 年中国粗钢产量约为 10.5 亿吨，其中电炉钢仅占约 11.7%，同期世界平均水平约为 30%，美国和日本分别为 70%和 25%（北京科技大学等，2021）。2025 年电炉钢占比提升至 15%以上意味着较 2020 年提高 3.3 个百分点。即使在粗钢产量保持不变的情况下，电炉钢产量也要达到近 1.6 亿吨；而即使实现这一目标，我国电炉钢占比也仍然与世界平均和先进水平存在较大差距。

电炉钢多以废钢为原料进行短流程生产——2020 年中国钢铁工业废钢资源利用量约为 2.3 亿吨（央广网，2021），与 2025 年目标的 3 亿吨差距尚存。

上述目标虽然各具难度，但大都针对产能问题，旨在推动钢铁产能升级——包括能效水平提升和电气化等，集中反映出我国钢铁行业在“双碳”时代亟需克服的最大挑战：以“长流程”为主的现有工艺结构，与该工艺能源、碳排放密集程度高之间的矛盾。

长流程和短流程

钢铁生产工艺主要包括长流程工艺和短流程工艺（详见二、技术发展现状及前景）：长流程炼钢是指从铁矿石开始，经历炼铁、炼钢、连铸、轧制等工艺环节，最终制成钢材的生产流程，又称“初级钢生产”；与之相对的短流程炼钢则以废钢作为原料，跳过炼铁相关各道工序，直接经过炼钢及后续环节产出钢材，又称“次级钢生产”。

与短流程相比，长流程炼钢的能源和碳排放密集程度都非常高。一方面，后者的生产流程更长，多出的每道工序都会产生额外的能耗和碳排放，在产出不变的情况下整体能耗和碳排放更高，因此能源密集程度（吨钢综合能耗）和碳排放密集程度都更高。另一方面，烧结、球团、炼焦（合称“铁前系统”）和高炉炼铁是长流程炼钢所独有的高耗能工艺环节，共同占到我国吨钢能耗的 90%以上（王志伟，2014），是中国钢铁工业目前最主要的耗能环节；而在长流程工艺中，高炉炼铁环节的能耗约占 60%左右，其次是 9%~12%的烧结环节⁴。此外，长流程工艺还以焦炭作为炼铁的主要还原剂和燃料，造成生产过程中的碳排放进一步增加，炼铁环节的直接碳排放占钢铁工业碳排放总量的 60%以上⁵。也正因如此，目前国际上普遍认为短流程工艺代表着更加先进的钢铁生产水平，是我国钢铁产能与国际先进水平的主要差距和长期转型方向所在。

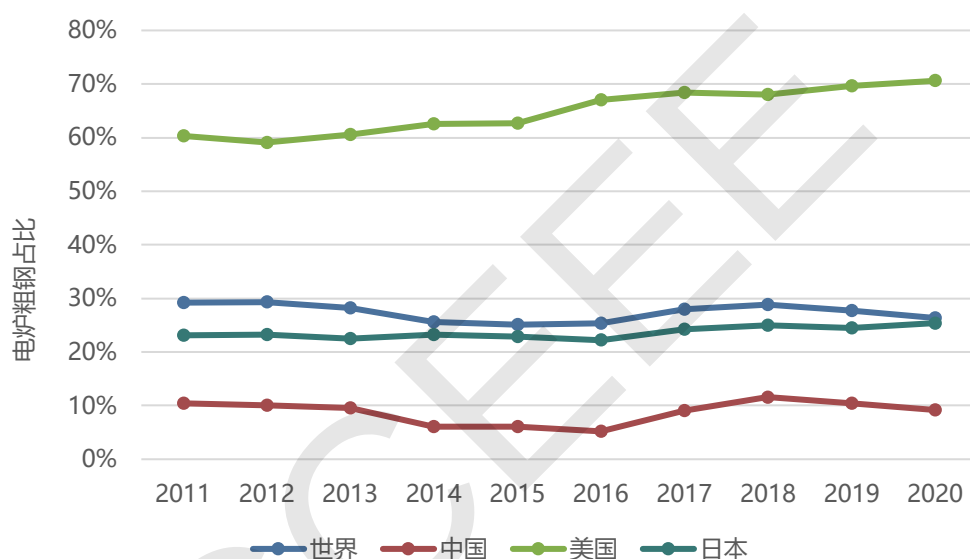


图 3 我国与典型国家电炉钢占比（2011-2020）

数据来源：张龙强，2021.

⁴ 咨询行业专家的观点。

⁵ 同上。

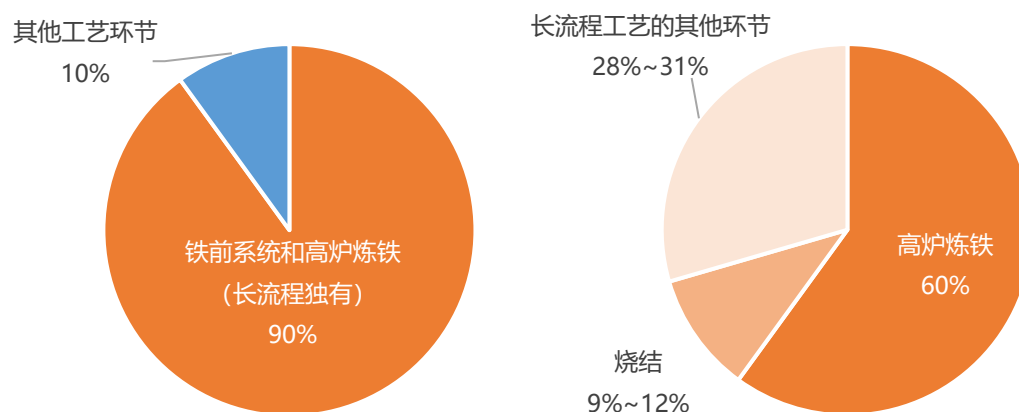


图 4 我国吨钢能耗中长流程工艺独有环节占比（左）及长流程各工艺环节能耗占比（右）

数据来源：王志伟（2014），《钢铁行业工序能耗分析及节能发展方向探讨》；咨询行业专家。

要解决长流程炼钢能耗和碳排放高的问题，目前主要存在两种思路：一是提高现有生产工艺、尤其是铁前系统和高炉炼铁的能效水平，二是用短流程工艺替代长流程工艺。两种思路各有利弊：短流程代表了更先进的产能升级方向，能够帮助钢铁行业更彻底地节能降碳，但受种种现实因素限制，包括设备替换和改造成本高、现有的长流程基础设施仍在有效使用年限内、废钢资源不足等，难以在短期内大规模应用；相反，提高现有工艺水平虽然相对而言成本更低、现实阻力和实施难度更小，但节能降碳潜力有限，治标不治本，无法从根本上解决长流程生产能源和碳排放密集程度高的属性。

下节将从钢铁生产的具体工艺流程、节能低碳技术现状及目前技术推广方式存在的问题几个方面入手，探索钢铁行业在“双碳”目标下依靠技术手段实现进一步节能降碳的潜在出路。

二、技术发展现状及前景

1. 生产工艺简介

从全生命周期来看，包括钢铁工业在内许多制造业的总体流程都可以概括为“两链一流”，即供应链、生产流程和服务链（图 5）。



图 5 制造业“两链一流”示意图

以钢铁行业为例，供应链是指将铁矿石与/或废钢、煤矿等原料和其他物质运输到钢厂的过程，具体包括运输、转运、预处理等环节；生产流程则是铁矿石与/或废钢经由特定生产工序被加工成为钢材的过程；制成的钢材产品被运往消费端则属于服务链的范畴，具体包括包装、储存、运输、转运等。其中，生产流程关系着钢铁产能和产品的能效和碳排放水平，是钢铁企业和整个行业主要的用能过程和碳排放源，是目前我国产业政策及“双碳”相关文件重点关注的领域，也是本报告对钢铁节能低碳技术进行分析评估的重点聚焦领域。

钢铁生产流程的工艺环节主要包括烧结、球团、炼焦、炼铁、炼钢、连铸、轧制等（图6）。

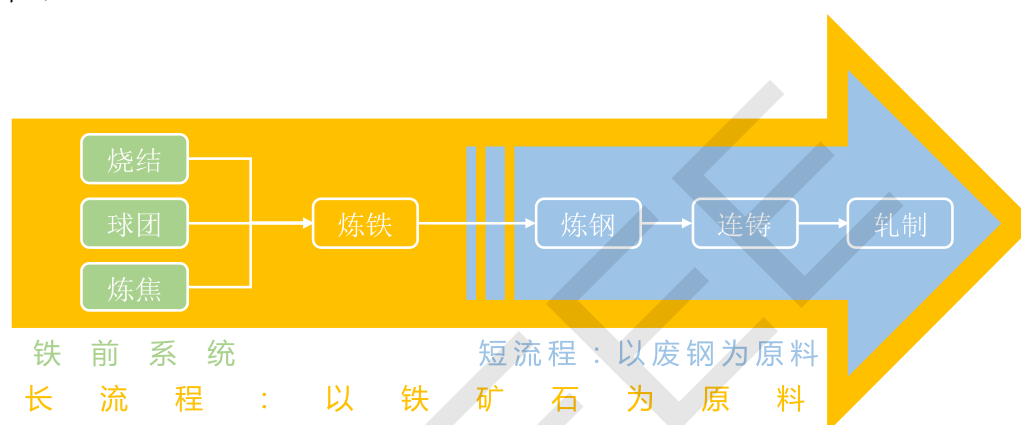


图6 钢铁生产工艺示意图

如上一节所述，钢铁生产基于原料不同，分为长流程和短流程两种工艺。**长流程**又称初级生产，从铁矿石开始，经历烧结或球团，同时利用焦煤炼焦形成的焦炭作为还原剂和燃料，送入高炉炼制生铁⁶，铁水进入转炉、吹入氧气进行炼钢，再经连铸和轧制形成钢材。**短流程**又称次级生产，从废钢开始，经电炉炼钢、连铸、轧制形成钢材；电炉炼钢过程中，有时还会加入一定比例的精铁粉或氧化铁，与废钢共同作为原料，通过直接还原铁法提高电炉炼钢的出钢品质。

对比而言，长流程和短流程炼钢的区别主要体现在以下几个方面：

- 原料不同——长流程以铁矿石、焦炭、氧气等为主要原料，短流程则以废钢、精铁矿等为主要原料；

⁶ 目前国际上也出现了一些利用氢气等其他还原剂替代焦炭炼铁的技术，以及直接熔融炼铁法等不经过烧结、球团等工序也不利用高炉设备进行炼铁的技术，但这些技术因成本、原料制备存储等问题，在中国还没有得到大规模应用，因此此处仍将焦炭作为还原剂的高炉炼铁法作为中国目前主流的钢铁生产工艺。除特殊说明外，下文不再逐一解释。

- 设备不同——长流程的核心设备为高炉（用于炼铁）和转炉（用于炼钢），短流程的核心设备则为电炉；
- 燃料不同——长流程利用焦炭同时作为燃料和主要的还原剂原料，短流程则主要依靠电力；
- 工序不同——长流程比短流程多出了烧结、球团、炼焦（即铁前系统）和高炉炼铁等工序，是我国钢铁企业和产品绝大部分能耗及碳排放所在⁷。

2. 节能低碳技术概述

铁前系统和高炉炼铁：渐进式技术和颠覆性技术

我国钢铁行业节能降碳，核心是铁前系统和高炉炼铁节能降碳。

正如“‘双碳’挑战”一节所述，铁前系统和高炉炼铁节能降碳有两种思路：一是在不改变现有长流程生产工艺的前提下，对具体的环节和设备等进行改进，即利用**渐进式技术**实现节能降碳；二是促进钢铁生产电气化，缩短现有工艺的流程长度——将长流程工艺替换为短流程或减少长流程工艺的环节，即通过**颠覆性技术**避免铁前系统和高炉炼铁能耗和碳排放高的问题。

具体而言，致力于促进铁前系统和高炉炼铁节能减排的典型渐进式技术包括用于炼焦环节的焦炉炭化室荒气回收和压力自动调节技术、用于烧结环节的烧结与热量回收驱动技术（SHRT）、用于高炉炼铁环节的炼铁高炉鼓风除湿节能技术等（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。**渐进式技术**虽然无法彻底改变长流程工艺尤其是铁前系统和高炉炼铁能源和碳排放密集程度高的属性，但成本往往相对较低、不涉及对现有工艺设备的大规模更换，新技术和设备对相关工作人员的能力要求往往也更低，因此**推广应用难度通常较低**，在达到现有工艺系统的最优能效和碳排放水平前能够发挥较好的节能降碳效果，**将是近中期内钢铁行业节能降碳的主要技术力量**。

用于缩短现有工艺流程的典型颠覆性技术包括省去了烧结、球团、炼焦等环节的直接熔融还原炼铁技术，省去炼焦等环节的氢冶金技术，以及省去整个铁前系统和高炉炼铁环节的废钢预热连续加料输送成套设备等（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。**颠覆性技术**中还有相当一部分处于概念或试验阶段，或因为具体的技术难点、

⁷ 虽然短流程工艺在钢铁生产过程的能效水平更高，但因其使用的电力属于二次能源，短流程工艺在全生命周期（考虑发电）的能效水平还要受到电力结构、发电效率、输配电损失等因素的影响，并不能断言一定优于使用一次能源的长流程工艺。如无特殊说明，本报告中涉及的所有能耗和碳排放均不考虑发电和输配电部分。

居高不下的成本、安全隐患等现实原因，在短期内尚不具备大规模市场化应用的条件。

以电炉炼钢相关技术为例，目前这些技术都面临至少三个问题：一是现存高炉等长流程工艺的设备和基础设施普遍较新，高炉炉役期通常在 15~20 年，还远不到报废期限，而一旦将高炉替换为电炉，与之衔接的转炉等其他设备可能也需要进行相应替换或改造；二是电炉炼钢以废钢为原料，但中国废钢资源较少，还有一部分用于出口。2020 年粗钢产量约 10.5 亿吨（北京科技大学等，2021），同年废钢资源总量为 2.6 亿吨，其中炼钢用废钢消耗量约 2.3 亿吨，全年炼钢用废钢比为 21.8%（中国废钢铁应用协会，2021），差距明显；三是电炉炼钢以电力为主要能源，但中国工业电价无论是与本国煤价还是国际工业电价相比，均不具备优势。因此无论是从系统整体全生命周期的效益而言，还是站在原料获取和能源成本的角度，电炉炼钢在短期内都不具备大规模市场应用的基础。

尽管如此，短流程工艺等颠覆性技术却能够从根本上解决长流程高能耗、高碳排放的固有属性所带来的种种问题，帮助钢铁行业突破渐进式技术受制于长流程工艺自身的节能降碳“天花板”，是钢铁行业在“双碳”背景下产能升级的大势所趋。目前我国也从提高钢铁行业废钢资源利用量等方面着手，逐步为钢铁生产的全面电气化打好基础，因此以短流程炼钢为代表的一系列颠覆性技术非常有望在中远期发挥更重要的节能降碳作用。

在关注铁前系统和高炉炼铁能耗和碳排放水平的同时，对现有长流程工艺的转炉炼钢环节，以及后续的连铸、轧制等环节也有一系列节能低碳的渐进式技术值得关注（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。

“界面”技术

“界面”技术作为另一大类值得重点关注的流程技术，是指在钢铁生产流程的炼铁、炼钢、铸坯、轧钢等主体工序之间（铁-钢界面、钢-铸界面、铸-轧界面等）进行衔接-匹配和协调-缓冲的一系列技术、装置设备和工艺生产技术组合（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。界面技术旨在优化整个钢铁生产流程，改变了传统钢铁生产中各工序简单堆砌、无法有序协调和集成的弊病，有助于维持生产流程整体的稳定、连续、高效和协调运行，无论对于长流程还是短流程工艺而言，都能够促进整个生产系统接近其最优可行的生产效率（袁晴棠，殷瑞钰，曹湘洪，刘佩成，2020）。

此外，在核心生产流程以外的供应链和服务链（图 5）也可以通过创新的包装和运输等技术提高能效水平、降低碳排放（详见 四、国内外节能低碳技术清单），不但能够降低钢铁企业自身的能耗和碳排放，还有助于带动钢铁行业上下游从全生命周期上整体节能减排。

3. 现有技术推广的挑战

目前我国主要依靠定期发布全国、行业和地方性的节能低碳技术目录来促进相关先进技术在行业和企业的应用。以国家发改委《国家重点节能低碳技术推广目录》为例，该目录每年收录不同行业共计数十项节能低碳技术，覆盖信息包括技术的名称、适用领域/行业、技术内容简介、节能降碳效果、在典型项目中的技术应用条件和效果、目前推广比例、推广预测等，另附《技术简介》对各项技术进行详细介绍，通过国家发改委的公开发布，形成对入选技术的推广效应。当前这种技术推广模式存在以下问题或挑战：

促进技术应用的激励政策缺位

能够入选目录，对于技术供应商而言是非常高的认可，但在落地激励政策缺位的情况下，潜在的技术应用单位、尤其是企业，可能会缺乏采取行动、切实应用这些技术的动力。

目录对收录技术的持续关注和追踪不足

技术是在不断发展演变中的，实施难度和效果也可能会随着时间推移和技术的发展而发生变化；技术目录虽然定期更新和发布，但对具体技术的推广情况及实施效果缺乏持续性的关注和追踪，容易造成目录时效性不佳和对实际工作的指导作用不足的结果。

例如钢铁行业的炼铁高炉鼓风除湿节能技术（详见 三、关键技术分析）自 2009 年起，就不断入选历年《国家重点节能技术推广目录》（后《国家重点节能低碳技术推广目录》，但每年的预计推广比例和预计节能效果数据基本维持不变，这一方面反映出技术目录缺乏对同一技术的连续追踪，另一方面也说明该技术虽然节能效果好、推广意义大，但可能因为推广不力、信息缺失等原因一直未能达到理想的推广效果。

技术成本效益分析的普适性不高

成本效益是潜在的技术应用单位在考虑是否应用一项新的先进节能低碳技术时的重要考量因素。各类目录对技术经济效益的展现，通常从典型案例的经济效益角度出发，经济性数据详实具体，但普适性不高。潜在的技术应用单位在进行决策前的成本-效益分析时，可能还需要从目录中获取更多更有针对性的信息。

现有体系难以体现单体技术集成后的协同效应

具体到钢铁行业，许多先进的节能低碳技术往往是一系列单体技术的集成系统，例如转炉高效复吹熔炼装备及技术、DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备等（详见 三、关键技术分析 和 四、国内外节能低碳技术清单）；但目前我国的技术目录大多

以单体技术作为收录单元，从而使潜在的技术应用单位容易忽略技术之间相互协同的节能降碳效应，或是错失一些可行度性好、成本效益高的集成技术方案。

三、关键技术分析

经过对钢铁行业国内外节能低碳技术的搜集和梳理，本节基于以下六项条件选取关键技术进行深入分析：

- 技术成熟度高，在中国钢铁行业市场具备充分的应用条件；
- 技术所处的工艺环节能耗或碳排放占比高，或是节能降碳潜力大；
- 技术的节能降碳效果好；
- 技术应用后的成本效益好；
- 技术的适用范围广、市场推广前景佳；
- 技术相关信息较完备。

在上述标准基础上，尽可能全面覆盖钢铁生产的各个主要环节，兼顾技术自身的创新性，最终选取六项关键的具有代表性的钢铁行业节能低碳技术，包括：

- 炼焦环节-超高温超高压干熄焦发电技术；
- 烧结环节-烧结废气余热循环利用工艺技术；
- 高炉炼铁环节-炼铁高炉鼓风除湿节能技术；
- 转炉炼钢环节-转炉高效复吹熔炼装备及技术；
- 长流程 CCUS-白灰窑尾气 CO₂ 回收用于 CO₂-O₂ 混合喷吹炼钢工艺技术；
- 电炉炼钢-DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备。

这六项关键技术兼顾了钢铁生产的长流程和短流程工艺，并且覆盖了长流程炼钢中炼焦、烧结、高炉炼铁、转炉炼钢及 CCUS 等关键耗能和碳排放环节，其中不乏多次入选国家级技术目录、获得行业重大技术奖项和入选地方示范项目的优秀技术；部分技术节能减排潜力大、推广应用意义大，但尚未达到应有的推广水平，其推广应用有望为推动钢铁行业实现碳达峰并最终实现碳中和作出重要贡献。

1. 超高温超高压干熄焦发电技术

技术所属行业及生产环节

超高温超高压干熄焦发电技术用于钢铁生产的炼焦环节。

炼焦工序作为钢铁工业的重要工序，生产过程中会产生大量的余热，主要包括：高温红焦带出的显热约占焦化工序的 37%，高温荒煤气带出的显热约占 36%，焦炉烟道气显热约占 17%，焦炉散热约占 10%；如果不对这些余热加以回收利用，将带来大量不必要的能源浪费。

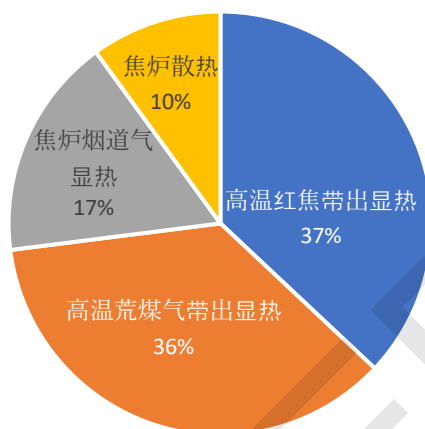


图 7 炼焦余热构成

余热余能是钢铁企业重要的二次能源；合理地应用二次能源，能够有效减低企业总能耗和总碳排放。炼焦工序中，采用干熄焦技术能够对红焦的显热进行较好地回收；同时随着余热技术的发展，传统用于回收干熄焦余热的锅炉汽机由原来的中温中压机组，向高温高压机组转变，进而到超高温超高压机组。

超高温超高压干熄焦发电技术在高温高压干熄焦发电技术的基础上发展而来，通过提高锅炉出口主蒸汽温度和压力，同时增加一次中间再热，使焦炭的余热得到充分利用，提高机组的热效率。

技术原理

干熄焦发电技术的实质是，在干熄焦工艺过程中，红焦从干熄炉顶部装入，低温惰性气体由循环风机鼓入干熄炉冷却段红焦层内，吸收红焦显热，冷却后的焦炭从干熄炉底部排出，而从干熄炉环形烟道出来的高温惰性气体流经干熄焦工艺锅炉进行热交换，锅炉产生蒸汽，推动汽轮机做功，带动发电机发电；冷却后的惰性气体由循环风机重新鼓入干熄炉，在封闭的系统内循环使用。

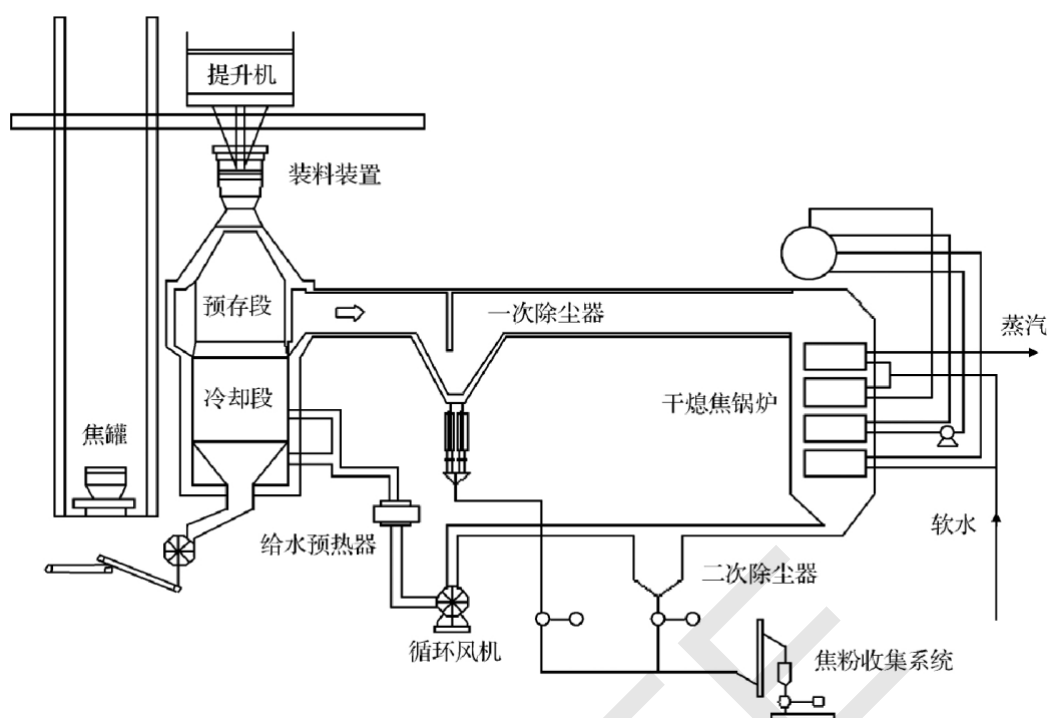


图 8 干熄焦余热回收与利用系统的工艺流程

常规的中温中压发电技术的锅炉主蒸汽参数为 $P=3.8\text{ MPa}$, $T=450^{\circ}\text{C}$; 高温高压发电技术为 $P=9.8\text{ MPa}$, $T=540^{\circ}\text{C}$; 超高温超高压发电技术为 $P=13.7\text{ MPa}$, $T=571^{\circ}\text{C}$ 。在保持汽轮机排汽温度和压力不变的条件下, 随着进汽温度和进汽压力的提高, 主蒸汽的焓值有所提高, 汽轮机的焓降也会相应提高, 因此提高汽轮机的进汽温度和压力可以提高机组的热效率。同时, 随着干熄焦锅炉主蒸汽参数的提高, 锅炉蒸发量相应减少, 汽轮机按照纯凝机组考虑, 其排汽量减少, 汽轮机的冷源损失大幅度降低, 循环水泵站的能力及循环水泵的耗电量均会减少。

目前, 中温中压和高温高压干熄焦发电技术均无再热系统, 蒸汽在汽轮机内做功后, 直接进入冷凝器中冷凝, 蒸汽中的大部分热量将会以汽化潜热的形式通过冷凝器和冷却塔最终排入大气, 造成大量的冷源损失。超高温超高压干熄焦发电技术增加了一次中间再热。即蒸汽在汽轮机高压缸内做功后排出, 随后重新回到锅炉再热器进行加热, 加热至额定温度后再进入汽轮机的低压缸做功, 做功后的乏汽排入凝汽器冷凝, 可降低蒸汽的排气湿度, 减少汽轮机湿度损失, 进而提高机组的热效率。

技术应用条件

该技术通过提高干熄焦锅炉排汽温度和排汽压力, 使焦炭余热得到充分利用, 同时增加的再热系统, 使蒸汽的能量得到进一步利用。超高温超高压干熄焦发电技术与目前的高温高压发电技术相比, 干熄焦本体装置完全一致, 只有热力系统有所改变。

目前国内应用较少，但是技术相对已经较为成熟，只需在现有设备系统的基础上进行管道和相关设备的改造，应用难度和成本都相对较低，具备较好的推广潜力。

典型应用案例

某公司 223.5 t/h 干熄焦项目技术参数如下：

表 2 某 223.5 t/h 干熄焦项目发电技术主要参数

参数	中温中压	高温高压	超高温超高压
干熄焦锅炉压力/MPa	3.82	9.81	13.7
干熄焦锅炉温度力/℃	450	540	571
干熄焦锅炉能力/(t·h ⁻¹)	132	125	105
中间再热系统	无	无	一次中间再热
锅炉给水泵流量/(m ³ ·h ⁻¹)	152	145	120
锅炉给水泵扬程/MPa	6.8	14.3	18.3
汽轮机额定能力/MW	30	35	40
发电机额定能力/MW	30	35	40
汽轮机进汽压力/MPa(a)	3.43	8.83	13.2
汽轮机进汽温度/℃	435	535	566
汽轮机额定转速/(r·min ⁻¹)	3000	3000	5000
纯凝小时发电量/kWh	28900	33300	38700
年运行小时数/h	8400	8400	8400
纯凝年发电量/kWh	242.8×10 ⁶	279.7×10 ⁶	325.08×10 ⁶
凝汽循环水量/(m ³ ·h ⁻¹)	9500	9000	7500
吨焦发电量/(kWh·t ⁻¹)	129	149	173

超高温超高压干熄焦发电技术的汽轮机主蒸汽参数提高，汽轮机由单汽缸变为双气缸，气缸的长度增加，站内增加高压旁路装置、低压旁路装置、三级减温减压装置、低温再热蒸汽管道、高温再热蒸汽管道及其他管路和部件，同时汽轮发电站的占地也会相应增加。

超高温超高压干熄焦发电技术与目前的高温高压发电技术相比，建设成本会增加 4000 万，每年发电量约能增加 45.36×10^6 kWh，按电价 0.4 元/kWh 计算，约三年可以回收多投资部分费用。

推广示范意义

超高温超高压干熄焦发电技术能够进一步回收炼焦工序中焦炭的余热能源，同时提高的锅炉及汽机参数能够提高机组的热效率，增加发电量，减少外购电成本。同时焦炭经干熄焦处理后，质量能够得到改善，从而有助于高炉工序减少环境污染和实现节能减碳目标。

2. 烧结废气余热循环利用工艺技术

技术所属行业及生产环节

烧结废气余热循环利用工艺技术适用于钢铁生产的烧结环节。

在该环节中，烧结机生产的 700~800℃ 烧结矿，从烧结机尾部落下经过单辊破碎后，落到冷却机台车上；冷却空气经烧结矿料层下部箅板穿过，垂直吹入料层，与烧结矿料层换热提取烧结矿显热后，从料层上部进入集气罩或人形罩。

钢铁工业作为能源密集型企业，能源消耗占全国能源消耗总量 16% 左右。烧结工序占钢铁生产总能耗的 9%~12%，仅次于炼铁环节，并且其中一半的热能消耗在烧结烟气和冷却机的废气显热上，并没有得到很好的回收和利用。目前，国内大部分钢厂采用双压余热锅炉及补气式蒸汽轮机发电方式回收利用环冷机一段和二段 280℃ 以上中高温废气，而环冷机第三段的 150℃ 以上低温废气余热，除北方部分的钢铁企业用于冬季采暖外，大部分钢铁企业将其直接排入大气，对低温废气余热利用率低。因此，对烧结余热资源尤其是低温废气余热的高效回收利用是烧结工序能效提升的重要措施。

技术原理

烧结废气余热循环利用工艺技术将自烧结支管风箱或环冷机排出后的烧结低温废气再次引入至烧结机中，废气通过烧结料层时，因热交换及烧结料层的自动蓄热作用，可以将其中的低温显热供给烧结混合料，与此同时热废气中的二噁英、PAHs、VOC 等有机污染物在通过烧结料层中高达 1200℃ 以上的烧结带时被激烈分解，NO_x 在通过高温烧结带时亦能够通过热分解被部分破坏。该技术可以显著减少有机污染物的排放，并大幅度削减废气排放总量。

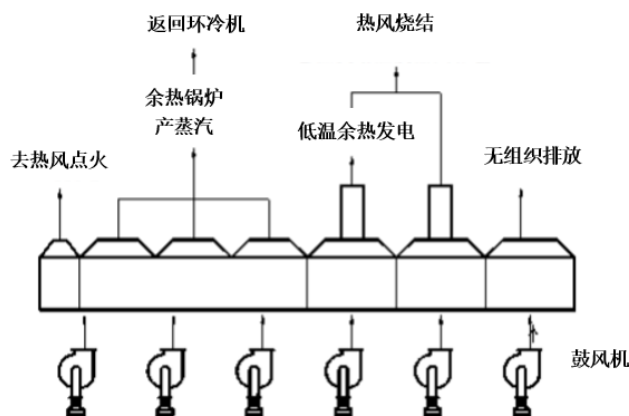


图 9 环冷机废气利用示意图

在节能方面：1) 烧结烟气温度约 150℃，某些特定风箱的烟气温度可达 350℃或更高，循环烟气中的显热可以得到利用；2) 烧结烟气中 CO 平均体积浓度为 0.4%～1.0%，此外，还有一定数量的其它可燃有机物，这部分物质的潜热可以得到利用；3) 虽然烟气循环过程中使用的风机和电机将消耗部分电能，但这部分烟气如果不循环就要通过脱硫设施和高烟囱排放，届时将消耗更多的电能，因此烟气循环可以通过减少电耗实现节能；4) 最终排放烟气量可减少 25%～35%，电除尘及脱硫设备等规模投资和运行能耗可明显降低；5) 总能耗可降低 3%以上，从而实现能源相关碳排放的削减。

在污染物减排方面：1) SO₂：由于排放烟气量的减少和 SO₂ 浓度的富集，脱硫效率将有所提高，达到进一步减污的效果；2) NO_x：循环烟气中的 NO_x 绝大部分被烧结机料床分解；3) 颗粒物：由于排放烟气量减少，其排放量可减少高达 45%；4) CO：循环烟气中的 CO 绝大部分可以在烧结机料床上充分燃烧，最终排放烟气中的 CO 可大幅减少；5) 二噁英：循环烟气中的 PCDD / F 绝大部分可以在烧结机料床上燃烧，其最终排放量减排数量明显，烧结废气余热循环利用工艺技术在我国 PCDD / F 减排技术中的综合优势是其它任何技术（活性碳吸附、催化分解等）所无法比拟的；6) HCl、HF：烧结工序是钢铁联合企业最大的 HCl 和 HF 排放源，由于烟气量的减少、污染物浓度的富集，脱硫设施对 HCl、HF 的脱除效果也将明显提高；7) 其它污染：对 PCB、PAH、VOCs 等，也具有明显的减排效果。

表 3 烧结废气余热循环利用工艺技术节能减污情况

项目		节能减污情况
节能	循环烟气	显热得到利用
	烧结烟气 CO 等可燃物	潜热得到利用
	电除尘、脱硫设备等	运行能耗降低、投资减少

	总能耗	降低 3%以上
减污	烟气	减少 25%~35%
	SO ₂	脱除效率提高
	NO _x	绝大部分被分解
	颗粒物	减少 45%
	CO	绝大部分燃烧，排放大幅减少
	二噁英	绝大部分燃烧，减排数量明显
	HCl、HF	脱除效果明显提高

技术应用条件

该技术已实现市场推广应用，适用于烧结环冷三、四段低温废气余热，温度为 100℃~220℃。

典型应用案例

案例一

国内首个烧结废气余热循环利用项目于 2013 年在宁波某公司建成投运，填补了国内大型烧结机废气循环利用和多种污染物深度净化空白。其设备为两台 400 多 m² 的烧结机对应两座 2500 m³ 高炉，其控制系统运行稳定、仪表反馈良好，与烧结工艺大生产、电除尘器和烧结烟气脱硫装置的运行耦合良好，表明该公司烧结废气循环工艺技术改造和应用已取得了初步成功。

烧结废气余热循环利用、可节省烧结能耗 5% 以上，减少烧结 CO₂ 排放以及废气排放总量 20% 以上。该公司 2# 烧结机废气循环示范工程项目总投资 4500 万元，建设期为 12 个月，项目年节能量 8173 tce，碳减排量约 18000 tCO₂，年节能经济效益 1936 万元，投资回收期约 2.5 年。

案例二

江西某钢铁厂 6#、7# 烧结机烧结面积均为 360 m²，分别在 2008 年和 2009 年建成投产。两套设备新建时均配套了一套无动力热风烧结系统，取风点设于环冷机一段进料处，依靠环冷机的鼓风余压、主抽风机的负压和热压差将环冷机上的高温废气送入烧结机密封罩内进行烧结，但由于鼓风余压、主抽风负压和热压差不足，回收的烟气量有限，烟气作用时间较短，使用效果并不理想。

为了满足国家环保要求，同时结合钢厂自身烧结工序降耗需求，该钢铁厂针对烧结低温废气开发了烧结合能循环工艺并用于 6#、7# 烧结机。在环冷机的高温烟气通过

余热锅炉产生蒸汽用于发电的情况下，将原本向外界排放的环冷机的低温烟气收集，经多管除尘器降尘后，通过回热风机、烟气分配器循环至烧结机料面参与热风烧结。该工艺设计采用梯级取风和均匀送风的方式实现对烟气温度的控制，通过一同开启两个梯级取风或单独开启一个梯级取风来控制风温；采用烟气分配器实现均匀送风至烧结机循环烟气罩内；通过控制烧结机烟气循环罩长度控制热风作用时间；通过在回热风机前设多管除尘器控制热风中的粉尘含量⁸。

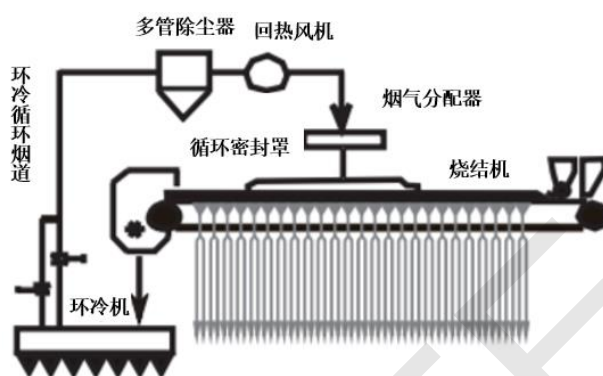


图 10 江西某钢铁厂烧结余能循环工艺示意图

6#、7#烧结机实施烧结余能循环系统后，烟气温度保持在 $250^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ ，烟气作用时间占总烧结时间的一半左右，烟气中粉尘含量在 200 mg/m^3 以下，实现了固体燃耗下降 $2.33 \sim 2.35 \text{ kg/t}$ 烧结矿、转鼓强度提高 $0.50\% \sim 0.54\%$ 、筛分指数降低 $0.12\% \sim 0.14\%$ 、FeO 质量分数降低 $0.32\% \sim 0.34\%$ 。此外，每台烧结机每年可减少环冷机热废气排放量约 25800 万 m^3 。

烧结余能循环系统提高了烧结生产技术经济指标，又减少含热烟气对环境的污染，解决了低温区环冷热废气利用难度大、成本高的问题。

推广示范意义

针对烧结低温废气显热回收的烧结废气余热循环利用工艺技术降低了烟气排放总量，末端烟气治理（ NO_x 和 SO_2 的脱除）量也大为减少，有利于节能减排、降低工厂的运营成本；同时在增加循环风机后，还可取得明显提高烧结矿产量的作用。

若该技术在钢铁行业烧结工艺中的推广比例能够达到 30%，则可形成年节能能力 42 万 tce，年碳减排能力 92 万 tCO_2 。

目前该技术已入选《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》。

⁸ 该工艺属于热风烧结的一部分，与烧结废气余热循环利用不完全是同一种技术但存在相关性。此处提供本案例以作参考。

3. 炼铁高炉鼓风除湿节能技术

技术所属行业及生产环节

该技术适用于钢铁长流程生产中的高炉炼铁环节。

在长流程炼铁生产中，高炉炼铁工序是 CO₂ 排放和能源消耗的主要环节，能源消耗量约占总耗量的 60%，直接 CO₂ 排放占到钢铁工业的 60% 以上。

在高炉生产中，鼓风的湿度影响着高炉的稳定生产，第一，高炉鼓风中的湿分含量直接影响高炉的理论燃烧温度，温度的波动将影响高炉生产炉况；第二，鼓风空气湿度波动会导致高炉热制度的不稳定。炼铁高炉鼓风除湿节能技术通过减少高炉鼓风中的湿度，提高炉内运行平稳度，同时高炉鼓风除湿技术能够降低高炉的能耗以及炼铁焦比，从而降低高炉生产中的能源使用成本。

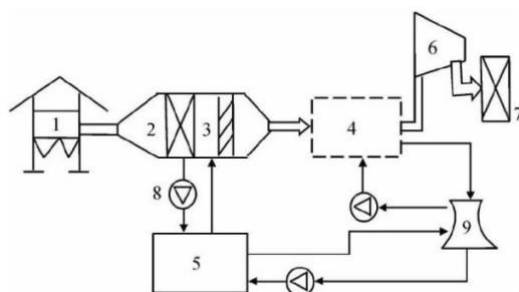
技术原理

该技术采用冷凝法除湿，即热风炉的空气采用脱湿技术，进入鼓风机前空气先行预冷，将湿空气进行冷却使其中的水分凝结析出，再经过除水器排出，使得空气含湿量降低，具体流程包括：

（1）空气流程。空气经过过滤器进入脱湿器，与冷冻水进行热交换，降温后的空气经过除雾器除湿。若要深度除湿，则增加蒸汽压缩式制冷系统，利用蒸发器冷却脱湿空气，随后空气经鼓风机进入热风炉，最后进入高炉。

（2）冷冻水系统流程。吸收式制冷机组制备的冷冻水进入脱湿器，与空气进行热交换，随后由水泵输送到制冷机组，重新蒸发冷却降低温度，再循环使用。

（3）冷却水系统流程，冷却水进入制冷机组内，在冷冻机器内进行热交换升温回到外部冷却塔降温，再由循环水泵输送回制冷机组。



1-空气过滤器；2-脱湿冷却器；3-除雾器；4-蒸汽压缩式制冷机组；

5-吸收式制冷机组；6-鼓风机；7-热风炉；8-水泵；9-冷却塔。

图 11 高炉鼓风冷却脱湿工艺流程

技术应用条件

高炉鼓风脱湿技术在上世纪初就被美、日、英等国家先后应用在高炉上，均取得了不错的成果，已经拥有了成熟的市场应用条件。近十年来，随着脱湿技术在国内的推广和发展，该技术已经逐渐在国内钢厂得到应用。我国部分企业在上世纪八十年代从国外引进该技术，而后研究改进形成了国内自主研制的鼓风脱湿装置，该技术成熟，并逐渐在很多企业部署应用，如 1999 年马钢 2500 m³ 高炉的冷冻脱湿技术、2004 年湘钢 1#高炉、2007 年唐山中厚板材 1580 m³ 高炉和 2011 年杭钢 3#高炉等。

高炉鼓风脱湿技术在我国钢铁企业中应用较广，但是主要集中在我国南方城市，这是由于南方空气环境湿度较大，使用该技术能形成更大的经济效应；同时北方沿海城市也有部分应用，属于因地制宜的高炉鼓风脱湿改进技术。

典型应用案例

案例一

河北某公司在 2007 年开始在 1580 m³ 高炉上对脱湿鼓风技术进行尝试，并取得了一定的经济效益。厂区位于渤海湾的沿海区域，自然环境特点是湿度大，昼夜温差变化大，高炉生产的客观条件出现变化，月相对湿度最高达到 80%。长期以来，脱湿鼓风技术作为南方地区的改进高炉冶炼的有效手段，在北方高炉的应用尚属空白。为了探讨脱湿鼓风的技术在北方企业应用的可行性，该公司将相对湿度较大的 6-8 月作为暂定脱湿期，脱湿效益预测如下表：

表 4 鼓风脱湿预测效益表

月份	产铁量/t	吨铁风量/m ³	脱湿前含水量 (g/m ³)	脱湿后含水量 (g/m ³)	节焦量/t
6	140000	1300	13.36	10	629.87
7	140000	1300	20.88	10	2039.56
8	140000	1300	20.88	10	2039.57
合计	420000		55.12	30	4709.00

该高炉采用鼓风脱湿带来的实际节能降耗情况如下：

(1) 入炉焦比和喷煤比效果如表 5 所示，入炉焦比降低 4.61 kg/t、入炉喷煤比增加 11.4 kg/t，按照 2008 年 7、8 两月累计产铁 24.69 万 t 计算，节省焦炭 1138.02t。

(2) 为了测试鼓风脱湿技术的应用效果, 将风机保持风量为 $3700 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压 343 kPa 的条件下进行了测定, 具体据表 6 所示, 风机功率下降 1644 kW , 节电 10.71% , 脱湿期内 (以 6、7、8 三个月计算) 节电 355.1 万 kWh 。

(3) 由于脱湿鼓风改善了高炉炉况, 使高炉运行平稳, 产量增加 4% 左右, 按照该公司 2008 年 6-8 月脱湿期产量计算增加铁产量 37 万 t 计算, 可多产铁 1.48 万 t 。

表 5 焦比与喷煤对比表

统计时间	工况	入炉焦比(kg/t)	入炉喷煤比(kg/t)
2007. 7. 1-8. 31	未投入脱湿器	411. 98	127. 27
2008. 7. 1-7. 31	投入脱湿器	407. 37	138. 67
	比较值	-4. 61	+11. 40

表 6 风机效率对比表

项目	风量 $/(\text{m}^3/\text{min})$	风压/kPa	入口风温/ $^{\circ}\text{C}$	入口温度 $/(\text{g}/\text{m}^3)$	风机功率/kW
不脱湿工况	3700	343	26	15. 32	15344
脱湿工况	3700	343	10. 3	9. 4	13700
比较差值	不变	不变	15. 7	5. 92	1644
比较百分数/%	-	-	-	-	10. 71

该公司位于北方沿海区域, 面对沿海企业的夏季高湿度的气候环境, 做出了高炉鼓风技术的尝试, 实际结果证明, 该技术对于企业的高炉炼铁节能降耗卓有成效。该案例实现了北方沿海钢铁企业应用高炉鼓风技术的重要突破, 开创了鼓风脱湿技术在北方高炉上应用的先河。

案例二

2013 年 12 月, 广东某公司在 7 号高炉 (2500 m^3) 采用冷回收鼓风脱湿技术改造, 为满足 7 号高炉生产鼓风含湿量 $10 \text{ g}/\text{m}^3$ 的需要, 在原有电制冷鼓风的基础上进行改造, 采用冷回收鼓风脱湿技术, 改造完成后节能效果明显。根据广东当地的气象条件, 该公司选取了每年的 4~10 月份为工作时间, 以国家产业政策提出的鼓励采用鼓风脱

湿技术和公司内部高炉生产降成本的需求为背景，根据设计情况要求的制冷量，改进工艺设备以达到鼓风脱湿的目的。该项目投资估算为 2333.45 万元，改造周期约 4 个月，为韶钢 7 号高炉年创经济效益约 1732.2 万元，项目内部收益率较高，投资回收期短⁹，经济效益好。

7 号高炉采用鼓风脱湿之后节能降成本情况如下：

(1) 高炉鼓风含湿量每降低 1 g/m³，综合焦比降低 0.7 kg/tFe，折合 0.68 kgce/tFe，脱湿期按 7 个月计算，则年因综合焦比降低节能量约 1.07 万 tce。

(2) 高炉鼓风含湿量每降低 1 g/m³，增加喷煤 2.23 kg/tFe，炼铁综合焦比降低 0.7 kg/tFe，因而焦比相应降低，降低量为 2.48 kg/tFe，则可计算 7 号高炉在脱湿期需要增加喷煤约 3.5 万 t，降低焦炭量约 3.89 万 t，根据当时焦炭煤粉价格，年降成本约 1732.2 万元。

(3) 高炉鼓风含湿量每降低 1 g/m³，高炉顺行增加产能约 0.1%~0.5%，以 7 号在脱湿期因顺行增加产能约 0.3%进行计算，则年可增加铁产量约 5.5 万 t，从而带来相关的经济收益¹⁰。

(4) 鼓风脱湿装置的脱湿水年回收 1.95 万 t，按 0.0857 kgce/t 水折算，回收能源为 1.67 tce/a。

该公司在 2500 m³ 的 7 号高炉改进的鼓风脱湿技术，为其他地处南方的钢铁公司做出了启示，同时该案例中高炉鼓风脱湿技术的应用在目前节能降耗、推广节能技术的趋势下发挥了重要作用，响应了国家号召，同时也极大推动了企业降本增效、增强竞争力。

推广示范意义

高炉鼓风除湿节能技术对于高炉炼铁生产具有积极作用，有直接节焦量的节能减排效应，以及保持高炉稳定正常生产等能力，同时该技术能够带来较好的经济效益。

在 2009 年 12 月国家发展改革委印发的《国家重点节能技术推广目录（第二批）》中，明确提出了钢铁行业要重点推广高炉鼓风除湿节能等技术，鼓励企业使用该技术进行节能减排；随后该技术陆续入选后续的国家级节能目录。目前该技术已经应用到我国部分企业中，取得了不错的节能和经济效益，同时基于该技术的资金投入少、成

⁹ 因缺乏前期投资、流动资金成本等方面的相关数据，投资回收期的具体数字较难估算。

¹⁰ 因生铁价格在不同年份之间的波动较大，此处具体经济收益数字难以估算。

本回收期短等特点，各地尤其是南方和沿海城市的相关钢铁企业可根据当地湿度情况和高炉生产情况考虑应用到钢铁生产中。

节能减排效应

应用炼铁高炉鼓风除湿技术后，鼓风含湿量每降低 1 g/m³，综合焦比降低 0.7 kg/tFe, 折合 0.68 kgce/tFe，可使高炉炼铁环节能耗降低。鼓风脱湿对高炉、热风炉和鼓风机形成不同的节能影响，节能情况模拟如图所示。

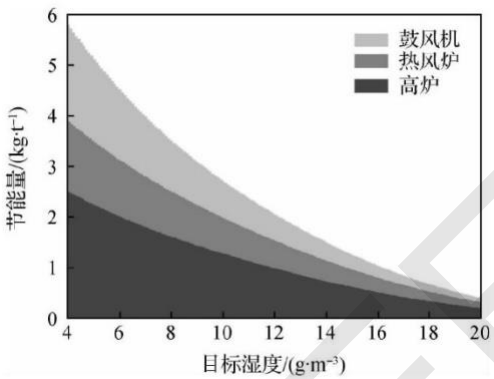


图 12 不同湿度下高炉冶炼过程节能变化曲线

随着目标湿度减少，高炉、热风炉、鼓风机的节能量均不断增加，但增加幅度不同，高炉节能量所占比例最大，约为 44%。目标湿度为 4 g/m³ 时，高炉节能量最大，为 2.54 kgce/t，热风炉和鼓风机节能量分别为 1.40 kgce/t 和 1.84 kgce/t；但随着目标湿度的增加，各设备节能量也随之减少。

经济效益

炼铁高炉鼓风除湿节能技术前期建设成本不大，主要为搭建冷凝机组，资金成本约为 2000-3000 万元，成本根据高炉规格和鼓风量要求变化，机组制冷量需满足高炉生产设计鼓风脱湿需求，建成后年节能收益约为 1000-3000 万元，具体节能收益可根据设备脱湿率等进行详细计算，成本回收期约为 1-2 年。

4. 转炉高效复吹熔炼装备及技术

技术所属行业及生产环节

该技术用于钢铁生产的转炉炼钢环节。

转炉尤其是大型转炉，其冶炼效率、洁净度水平直接影响了冶炼流程的成本、效率、洁净度、产品质量稳定性及节能环保状况。目前大多转炉被迫采用较低复吹强度：顶吹强度 3.5 Nm³/t.min 以内，底吹强度 0.06 Nm³/t.min 以内，冶炼时间长，冶炼终

点氧含量高，炉渣氧化性和渣量大，有效复吹寿命小于 4000 炉，不能实现高洁净钢的稳定高效生产，已经成为钢铁冶炼技术进一步发展的限制性环节。

转炉复吹熔炼的目的在于转炉底部吹入氧气、氩气、氮气等气体，配合顶吹氧枪，加强搅拌能力，脱除铁水中的硫、磷、硅等杂质，控制碳含量。同时加入废钢，生产各种牌号的钢水，钢水收得率超过 95%。氧气复吹熔炼装备及技术可用于炼钢和有色冶炼领域，用于炼钢时具有高效、节能、环保等显著优点，能够大幅提升钢铁冶炼的整体技术水平。

技术原理

转炉高强度长寿命复合吹炼装备及控制模型

该装备可形成大流量低喷溅复吹技术，既满足了高供氧强度的需求，又解决了因流量增加导致的金属喷溅、产生过多烟尘、冲击炉衬等副作用。大流量长寿命底吹环缝式供气元件，具有阻损小、动能大、不易堵塞、调节范围大（20 倍调节范围）等特点，且与维护技术易形成透气性能良好的冷却保护层保护，能够适应高复吹及洁净钢长炉役稳定生产的要求。

环缝式供气元件与其他形式元件对比的优势较为突出：（1）气路单支路单独控制，易控制，透气性能和维护能够保证；（2）透气当量直径大，阻力损失小，冲击动能大；（3）便于维护：缝隙小，气流对元件的反作用冲击小，不易侵蚀，冷却能强，维护工艺成熟，易形成透气性能良好的冷却保护层；（4）底吹流量调节范围大（ $0.02\text{--}0.4\text{ Nm}^3/\text{t}\cdot\text{min}$ ），全炉役 20 倍大范围调节。

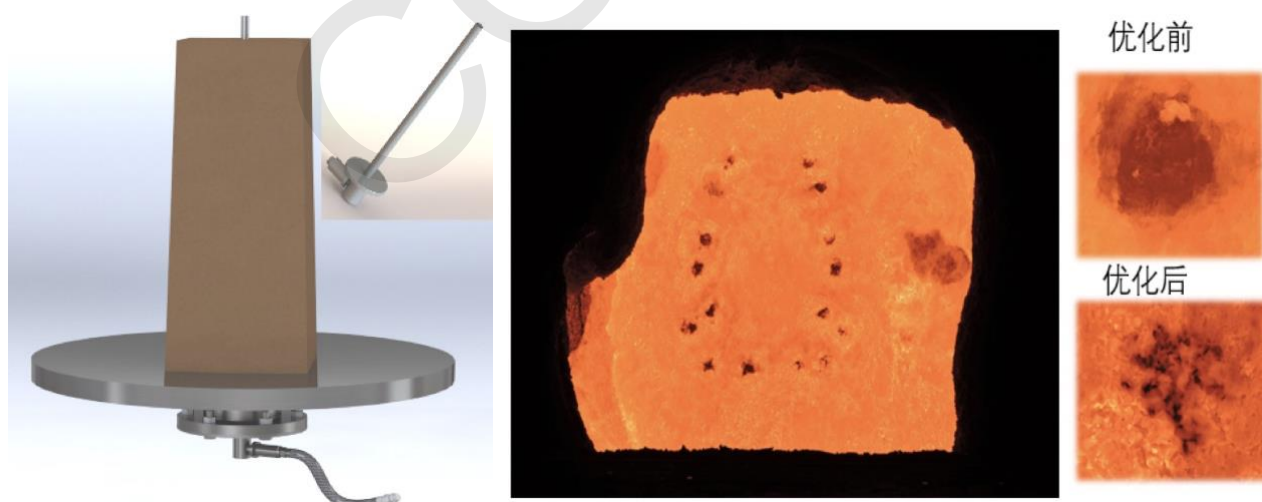


图 13 新一代高强度长寿命环缝底吹元件（左）和 300 吨转炉在 6000 炉时炉底底吹元件效果（右）

底吹智能控制系统

为了保证底吹在整个冶炼过程中精确大范围调节，保证长炉役服役的要求，新一代底吹智能控制系统实现了底吹工艺在全炉役期间精确智能的控制，既保证了全程有效复吹，又有效延长了底吹寿命。



图 14 新一代智能底吹集成供气系统及控制模型

高强度、长寿命复合吹炼工艺

针对大型复吹转炉高底吹强度与底吹寿命相矛盾的世界性难题，我国自主研发了高强度、长寿命复合吹炼工艺，有效提高了供氧强度 11%，缩短吹氧时间 14%，冶炼终点底吹强度提高到 $0.20 \text{ Nm}^3/\text{t} \cdot \text{min}^{-1}$ ，实现了全炉役 100%复吹比，全炉役平均碳氧积降至 0.00133 的世界领先水平。

大型转炉高效率脱磷机理模型

高效脱磷工艺和自动化炼钢控制技术在较低渣量和较低氧化铁的条件下能够实现高效率脱磷。

技术应用条件

该技术解决了高洁净钢冶炼过程效率低、耗散大、不稳定、转炉有效复吹寿命低等世界难题，建立了转炉洁净钢高效、绿色、低成本、长寿、稳定生产的多目标高效协同体系。其中环缝式供气元件和新一代底吹供气集成系统及控制模型已逐步替代传统技术，获得 90 多家大型钢铁企业的认可。

典型应用案例

环缝式供气元件和新一代底吹供气集成系统及控制模型逐步替代传统的技术，逐步获得了宝武、鞍钢、首钢等大型国企、优特钢企业及其他优秀钢企 90 多个厂家的认可，在 400 多座转炉获得良好效果。

推广示范意义

高强度复吹技术应用后，炉底侵蚀速率降低 60%以上，300 吨转炉有效提高复吹炉龄 90%，炉役使得转炉终点碳氧积大幅降低，有效复吹比 100%。

由于实现了在长炉役条件下的高强度顶底复合吹炼，有效降低了冶炼过程及终点的平衡状况，冶炼终点钢水碳氧积显著降低，平均降低到 0.00133，炉渣氧化性降低 18%，达到 16%以内。而基于高效率脱磷机理模型的脱磷工艺和自动控制技术的应用，实现了在较低渣量和较低氧化铁条件下的高效率脱磷：炉渣 T.Fe 含量降低 18%，渣量降低 20%。大幅促进了钢渣反应平衡，冶炼终点 Lp 显著提高，大幅提高脱磷效率，实现 100%不等样出钢。通过技术集成应用，冶炼效率大幅提升，实现了高效率冶炼，吹氧时间缩短 14%，溅渣时间缩短 20%，出钢时间缩短 48.7%，各工序生产周期已经明显缩短，生产效率提高 18%。

大型转炉复吹冶炼技术的节能减排效果显著：钢铁料消耗降低 5 kg/t 以上，炉渣减少 20%，减少补炉耐材消耗降幅达 50%，同时减少辅料及合金消耗。转炉工序能耗达到-32.01 kgce/t，间接减少 CO₂排放 11.37 kg/t 以上。

该技术获得了 2020 年冶金技术特等奖。

5. 白灰窑尾气 CO₂回收用于 CO₂-O₂混合喷吹炼钢工艺技术

技术所属行业及生产环节

该技术适用于回收石灰窑尾气中的二氧化碳，并将回收后的二氧化碳用于转炉炼钢。

石灰窑是钢铁厂为炼钢、烧结烧制其工艺所需石灰的工艺装置。烧制石灰的基本原理是借助高温，把石灰石中的碳酸钙分解成氧化钙（生石灰）和二氧化碳，因此尾气中 CO₂含量较高。

钢铁行业是我国重要的 CO₂排放源之一，约占全国 CO₂排放总量的 15%。“双碳”目标提出以来，中国钢铁行业加速产品结构、能耗结构和生产工艺结构调整；根据中国钢铁协会统计数据显示，2020 年我国钢铁企业吨钢能耗为 545.27 kgce/t，较 2015 年下降 4.9%。

目前我国以长流程炼钢为主，CO₂源包括石灰窑尾气、焦炉煤气、烧结烟气、高炉煤气、转炉煤气等。从 CO₂捕获成本方面看，烟气中 CO₂体积分数越高，捕获成本越低。石灰窑每生产 1t 石灰排放 2t 左右的 CO₂，其中石灰窑尾气中的 CO₂体积分数普遍在 10%-40%，具有较高的回收利用价值。

技术原理

工艺流程：

石灰窑尾气 CO_2 回收用于 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ 混合喷吹炼钢工艺技术，主要是从石灰窑烟囱回收尾气经过高精度除尘装置除尘、鼓风机升压、冷却器降温后进入 TSA 深度净化塔脱去水分、 NO_x 和 SO_2 ，净化后的气体进入（12 个）变压吸附装置进行 CO_2 提纯，得到浓度为 94% 左右的 CO_2 ，之后将 CO_2 进一步液化提纯以达到炼钢浓度（99.8% 以上），液化后的 CO_2 经过汽化后存储在 2 个 100 m^3 的储罐内，通过管道输送到炼钢车间进行 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ 混合喷吹炼钢。

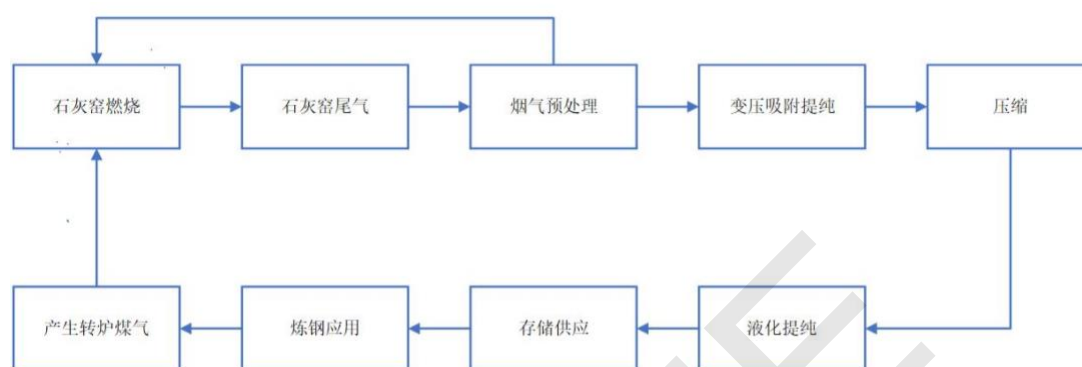


图 15 从石灰窑回收 CO_2 用于炼钢的循环工艺流程图

从石灰窑回收 CO_2 的关键技术：

（1） 烟气预处理：

石灰窑排放的烟气一般为 150°C 左右，含有 10 mg/m^3 的粉尘、 15 mg/m^3 的 SO_2 和 50 mg/m^3 的 NO_x 以及 3%（体积分数）的 H_2O 。由于粉尘和高温烟气会对后续的物理变压吸附等环节产生影响，因此需对烟气进行降温和精除尘处理。此外在高温下 SO_2 、 NO_x 被氧化后和水蒸气反应生成硫酸蒸汽和硝酸，当烟气被冷却至酸露点时， SO_2 和 H_2O 形成的硫酸蒸汽会凝结为硫酸， SO_2 与 NO_2 也会相互催化转化，从而对回收设备造成低温腐蚀，因此需对烟气进行预处理。

（2） 物理变压吸附提纯技术

变压吸附提纯技术利用吸附质与吸附剂之间的相互作用实现气体的分离。该技术主要利用吸附剂对不同气体在吸附量、吸附速率、吸附力等方面的差异以及吸附剂的吸附容量随压力改变的特性：加压时实现气体分离，减压完成吸附剂的再生。该过程所用的主要能源是电，适用于 CO_2 体积分数为 20%–90% 的气源。物理变压吸附分离石灰窑烟气的工艺关键是分离 N_2 与 CO_2 ，因此选用硅胶作为吸附剂。

以河北某公司采用变压吸附法回收石灰窑尾气为例（图 16）。经增压风机增压后的粗 CO_2 通过缓冲罐、压缩机、进入汽水分离器去除游离水；后经过 PSA、除湿器、吸附净化器、再沸器、预冷器和冷凝器得到净 CO_2 ；最后进入提纯器中进行液化提纯得到食品级 CO_2 。

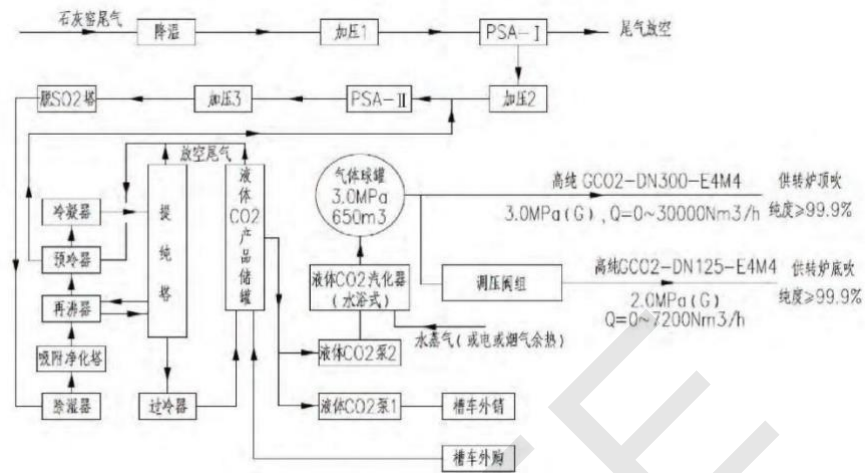


图 16 CO_2 回收工艺流程简图

（3） 液化提纯技术

由于物理变压吸附无法获得较高纯度，因此需结合液化提纯法。液化提纯法主要利用不同气体的液化温度不同来提纯 CO_2 ，常见气体的液化温度如下表。由于氨存在泄露爆炸的危险，故选择环保型氟利昂冷却剂。液化处理后，可将回收的 CO_2 浓度提高至 99.8% 以上，且 CO_2 中的水分降至 0.001% 以下，避免了碳酸腐蚀的问题。

表 7 常见气体沸点

CO_2	H_2	N_2	CH_4	CO
194.75K	20.38K	77.35K	111.70K	81.65K

CO_2 用于炼钢的关键技术

（1） O_2 - CO_2 混合顶喷吹炼钢工艺

a. CO_2 - O_2 混合顶吹炼钢降尘技术

炼钢过程中的烟气是由于钢液熔池的局部高温区域的金属铁蒸发，扩散进入炉气形成的。而在炼钢温度下， CO_2 可与多种元素发生反应，如下表。

表 8 相关化学反应热力学数据表

物质	化学反应	1773K	
		ΔG^0 (J/mol)	ΔH^0 (kJ/kg)
CO ₂	CO _{2(g)} +C=2CO _(g)	-20294.35	11602.67
	CO _{2(g)} +Fe _(l) =FeO+CO _(g)	-5708.16	720.91
	2CO _{2(g)} +Si=SiO ₂ +2CO _(g)	-2944527.29	-9299.21
	CO _{2(g)} +Mn=MnO+CO _(g)	-132247.26	-1512.40
	1/2O _{2(g)} +C=CO _(g)	-185051.67	-11639
O ₂	O _{2(g)} +C=CO _{2(g)}	-239004.93	-34834
	1/2O _{2(g)} +Fe _(l) =FeO	-304351.15	-4250
	O _{2(g)} +Si=SiO ₂	-596482.10	-29202
	1/2O _{2(g)} +Mn=MnO+	-499556.39	-6594

CO₂与C和Fe的反应为吸热反应，与Mn、Si的反应虽为放热反应，但放热量仅为与O₂反应的30%。因此将少量二氧化碳掺入氧气中进行混合喷吹，可降低火点区温度，限制金属铁的挥发，总而减少烟尘的存在。但是，在CO₂混合比例为15%时，转炉温度较常规冶炼时降低10℃左右。因此在转炉热量不充足的情况中，CO₂混合比例不应超过15%。

b. CO₂控温高效脱磷技术

转炉熔池内的脱磷反应原理如下：



$$\lg K_p=40067/T-15.06 \quad (2)$$

由脱磷反应原理可知，降低反应温度可提高脱磷率。CO₂与其他元素如C、Fe、Si、Mn反应的冷却效应，可有效控制转炉炼钢熔池的温度，从而提高脱磷率。此外，CO₂+C=2CO反应可使顶吹总气量增加，熔池的搅拌能力增强，为脱磷反应创造了良好的动力学条件。

(2) CO₂底吹工艺技术

底吹 CO_2 可降低钢水氮的质量分数，且铁水中 CO_2 的吸热反应可降低底吹的温度，从而增强搅拌能力，提高 CO 的回收率，降低生产成本。

技术应用条件

该技术目前我国市场已经实现了较为成熟的市场应用。适用烟气温度为 120–175℃， SO_2 和 NO_x 浓度应分别低于 30 mg/m^3 和 100 mg/m^3 。

典型应用案例

河北某公司 CO_2 – O_2 混合喷吹炼钢工艺技术及装备示范如下图。

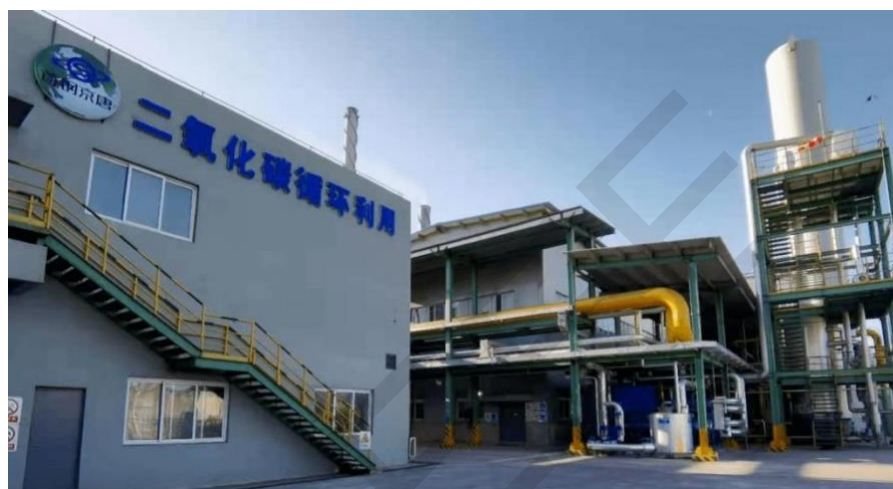


图 17 河北某公司示范项目现场图

该项目位于河北省某钢铁电力园区。 CO_2 在钢铁行业的应用在 20 世纪 70–80 年代就有研究，但未曾大规模应用。北京科技大学研究了 CO_2 – O_2 混合喷吹技术，发现当炼钢顶吹氧枪混合喷吹 O_2 – CO_2 时，既可降低火点区温度，减少铁损，又可增加煤气回收量。钢铁厂有多种碳源，石灰窑尾气可作为碳源之一。

该项目以白灰窑作为 CO_2 回收气源；在炼钢部脱磷、脱碳转炉增建顶底吹阀门室，增建二氧化碳捕集和炼钢车间之间的 CO_2 输送管线。同时该公司对一级自动化控制、二级自动化炼钢模型及接口进行调整和改造；对 3#110KV 变电站进行改造，增加相应的设备设施；配套建设循环水泵站；在炼钢车间及厂区配套敷设供电电缆，配套建设 CO_2 、压缩空气、蒸汽、给排水、采暖热水等综合管网。

该项目主要设备包括高精度除尘器、窑气冷却器、烟气深度净化塔、PSA 提浓塔、压缩机、 CO_2 净化塔、冰机、 CO_2 液化塔、成品储罐、 CO_2 – O_2 混合顶吹阀门室、 CO_2 底吹阀门室等。

CCUS 技术是减少钢铁行业碳排放有力措施之一，该公司与北京科技大学开展合作，在 CO₂ 冶炼钢铁技术的基础上，共同研发从石灰窑回收 CO₂ 并用于炼钢冶炼方面的研究，设计建设了年回收二氧化碳量 5 万吨的生产线¹¹。

推广示范意义

该技术将碳捕集利用技术与炼钢工艺相结合，实现了钢铁冶炼过程碳的循环利用。将 CO₂ 通入至转炉中，利用 CO₂ 反应的综合冷却能力以及强化熔池搅拌能力，实现了炼钢降尘，高效脱磷、脱氮，提高了炼钢水平。该技术回收 CO₂ 并将其再利用，减少了碳排放的同时，提高了冶炼水平，符合国家高质量发展及绿色发展战略。中国金属学会专家委员会认为，该冶炼技术达到了国际领先水平，开创了 CO₂ 在钢铁行业内高质化利用的先河，促进了我国绿色低碳炼钢技术的发展。

目前该技术仅在河北某公司建设有一条示范生产线，其推广比例不到 10%，但是其中的洁净化冶炼技术已应用到天津天管、西宁特钢等多家企业，带来了显著的经济及社会效益。预计到 2025 年，该技术预期推广比例可达到 30%，预计总投资额将达到 13.44 亿元，届时可形成的年碳减排潜力约为 150 万 tCO₂/a。目前该技术获得国家授权发明专利 4 项，实用新型专利 2 项，入选了《河北省低碳技术推广目录(2020 年)》，同时上文介绍的河北某公司应用该技术的示范项目在 2021 年 5 月 13 日被纳入河北省第一批二氧化碳捕集利用封存试点项目（冀气候领办〔2021〕8 号）。

6. DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备

技术所属行业及生产环节

本技术属于钢铁行业的短流程电炉生产环节。

电炉短流程主要以废钢为原料，无烧结炼焦等工序。与转炉流程相比，电炉生产同样重量粗钢水的 CO₂ 排放量仅有 25%~40%，固废排放量仅为 1/30；使用电炉每生产 1 吨钢的能耗相当于 280 kgce，而高转流程为 560 kgce，吨钢节能约 50%。

传统电炉的常规操作是开盖分批加料，其方式为开启炉盖分 2~3 批加入冷金属料，开盖期间烟尘大，能量损耗也大，造成废钢的加热熔化周期长，导致电炉能耗偏高且生产率低。这种加料方式使物料余热无法得到充分利用。

¹¹ 由于该项目尚在建设期，因此基于案例的节能减排效应和经济效益数据尚不清晰。

DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备利用高温废气对运送加料过程中的炉料进行连续预热，实现了烟气流物理化学余热和废钢物质流的充分热交换，另有除尘系统兼顾对高温烟气的过滤，减少烟尘排放。该技术的出现，使电炉能够实现全废钢预热、连续加料、不开盖、平熔池、低噪音、少烟尘的目标，具有效率高、成本低、稳定可靠的优势。连续加料设备预热输送槽内的废钢，能够节约电能和化学能，并且没有料篮加料过程中产生的二次烟尘。连续式加料的电炉冶炼熔池平稳，和料篮加料的电炉相比，显著降低了对电网产生的冲击。该套设备和其它炉型相比，能够降低车间内噪音，减小和降低电炉、变电所、布袋除尘及冶炼设备的投资，提高了整个车间的效率。

技术原理

DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备使电炉能够实现水平连续加料和预热废钢。该设备充分利用高温烟气的物理化学余热，实现对废钢的预热，其除尘系统兼顾对高温烟气的过滤、降温。设备能连续将废钢送到炉内，改变了高温烟气在废钢预热通道内的流动方向，使高温烟气与废钢的热交换形式由辐射传热变为对流与辐射相结合的传热方式。进入预热段的废钢和电炉烟气逆向相遇，烟气的余热和 CO 的燃烧热共同预热了废钢，连续预热后的废钢加入电炉内冶炼。电炉在连续加料的同时，利用炉子产生的高温废气对运送过程中的炉料进行连续预热，可使废钢入炉前的温度高达 600℃ 以上，而预热后的废气经燃烧室进入回收系统。该工艺的运用，使得留在炉内的钢水直接熔化废钢，电能用来加热钢液，而不是像传统式的顶装料工艺用电弧直接熔化废钢。

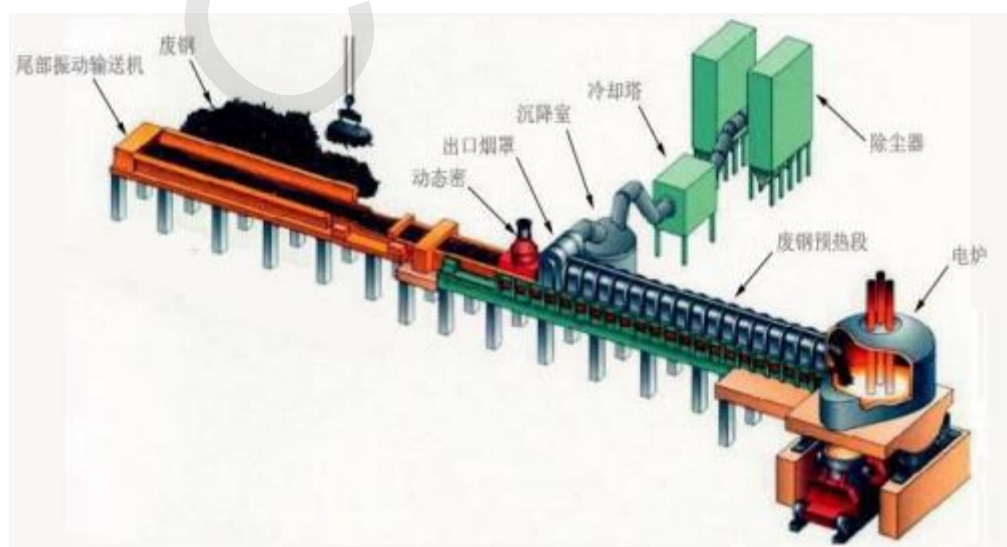


图 18 DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备

DP 系列废钢预热连续加料设备主要由尾部振动输送机、小车振动输送机、预热段、输送机、动态封密系统、液压和水冷却系统、电气设备等组成。其中机械设备包括烟罩和出口烟罩、支撑架平台、振动給料装置、尾部输送机、气体动态密封装置、装料裙边及支架、水冷系统、液压系统等硬件。

由于 DP 系列的设备特点，连续式加料电炉冶炼熔池平稳，极大减小了顶装料工艺存在的电压波动和闪烁，交流电炉配连续式加料系统比直流电炉采用顶装料工艺的电压波动还小，维护费用低。该技术的应用实现了废钢连续预热、连续加料、连续熔化，提高了生产率，改善了车间内外的环保条件，降低了电耗和电极消耗等。

技术应用条件

目前该技术已实现市场应用，主要为本土应用，少量出口越南；并已入选《国家工业节能技术应用指南与案例（2021）》钢铁行业节能提效技术。

该技术应用可以取得如下技术经济指标：1）产量提高 30%；2）冶炼周期缩短 15～25 min；3）废钢预热温度可达 300～600℃；4）烟气二噁英 < 0.5 ng-TEQ/m³；5）电极消耗降低 0.5～0.8 kg/t。

典型应用案例

案例一

河南某公司提供 DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备技术，在青海某公司改造开盖多次加废钢的电炉。在原设备基础上新建 DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备，实施周期 1 个月。改造后，系统冶炼电耗降低 100 kWh/t，年产钢 85 万吨，年节约标准煤 2.64 万吨，年减排 CO₂ 量 7.31 万吨。投资回收期 3.5 个月。

案例二

四川某公司某基地 70 吨废钢预热连续加料电弧炉，配套设备有水平连续加料机一套，产品为钒钛高强度建筑用钢。连续加料设备給料能力 250 t/h，給料速度 4.5 m/min，设备布置总长度 58 m，料槽尺寸 2×1.8×1 m。通过对标国内废钢预热连续加料电炉的先进指标，开展攻关优化指标，取得了良好效果。2019 年电炉电耗 345 kWh/t，降低 35 kWh/t；电炉电极消耗 1.1 kg/t，降低 0.63 kg/t；电炉石灰消耗 31 kg/t，降低 11 kg/t；氧气消耗 34 Nm³/t，降低 4 Nm³/t；天然气消耗 1.1 Nm³/t，降低 0.7 Nm³/t。年产钢 60 万吨，年节约标准煤 2.1 万吨，年减排 CO₂ 量 5.8 万吨。

推广示范意义

在全废钢条件下，采用 DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备后，电炉能实现 30 min 左右的冶炼周期，和同容量的转炉相当，极大地提高了电炉的竞争力；可以达到

金属收得率 90~92%、电耗 300 kWh/t 以下、电极消耗 1.0 kg/t 以下、单位公称容量年产量 10000 t 钢/t 以上的技术经济指标。

连续加料实现废钢预热利用了烟气中的余热，废钢预热温度到 400℃~500℃，可节约电能 20~30 kWh/t，即节能 6.7~10 kgce/t 产品。按此估算，可直接减少 CO₂ 排放 19~28 kgCO₂/t 钢；同时，由于效率的提升以及节约电耗和电极消耗等措施，该技术还可间接减少 CO₂ 排放 85 kg/t 钢。一个百万吨电炉钢厂通过此技术可实现 85 万吨 CO₂ 的减排量。

2017 年前全国 90%以上的电炉为顶加料式，2017 年后企业所订的电炉设备中，85%为连续水平加料系统，其中国产电炉水平加料设备占比达到 90%左右，绝大多数用来生产建筑钢。截至 2020 年，中国有 30t 以上电炉 420 座左右，全废钢连续加料电炉占比约 60%，有 250 条产线以上，分布在山东墨龙、清远圣力、粤北联合、贵钢、贵州长乐、云南创鑫、西宁钢厂、河北冀钢、湖北华鑫特钢、芜湖新兴铸管、四川冶金控股等多个电炉产线。

四、国内外节能低碳技术清单

本报告经过对国际能源署（IEA）《能源技术展望 2020 清洁能源技术指南》、世界自然基金会（WWF）《气候创行者创新方案》、国家发展和改革委员会《国家重点节能低碳技术推广目录》（原《国家重点节能技术推广目录》）、国家工业和信息化部《国家工业节能技术装备推荐目录》等 20 个国内外主要节能低碳技术清单和目录历年发布的技术，以及其他公开、可靠信息的深入梳理，整理遴选出适用于中国钢铁行业在“双碳”目标下进行绿色低碳发展的国内外节能低碳技术共 63 项，包括高炉炼铁环节 13 项，炼焦、烧结环节各 8 项，铸、轧环节共 7 项，转炉炼钢环节 4 项，熔融还原和氢冶金共 3 项，原料、运输、包装环节共 3 项，电炉炼钢环节 1 项，炼铁-炼钢界面技术 1 项，能源管理等综合技术共 15 项。

参考上述 20 个国内外主要节能低碳技术清单和目录总体思路和框架结构，结合“双碳”目标下钢铁行业技术节能减排的实际需求，本报告将上述 63 项钢铁行业节能低碳技术按照如下框架进行分类归纳整理（表 9），并独创性地增加“适用阶段”和“国际化”两项参数。

其中“技术内容”对技术基本原理进行简要介绍；“适用行业”和“适用范围”分别为技术划定适用行业和在行业价值链中所处的具体环节；“功能”指技术通过何种方式实现节能减排，如设备提效、工艺改进等；“节能减排效应”和“经济效益”分别对技术的节能减排效果和成本效益等经济性信息进行描述，采取定量（如有）和定性相结合、项目层面和全国层面（如有）相结合的方式；“成熟度”指技术在我国

的发展阶段和应用准备，包括概念、初试、中试、终试、试点应用、市场应用等；

“**适用阶段**”是本报告基于技术目前发展情况，分析评估得出的技术在钢铁行业实现“双碳”目标进程中的适用阶段，包括达峰（行业碳达峰）、中和（行业碳中和）和过渡（行业碳达峰后、中和前）；“**国际化**”用于描述技术的自主研发、引进或“走出去”情况，包括国外应用（国外研发但尚未引进）、国外引进（国外研发并引进应用）、本土应用（本土研发但尚未输出海外）、国际输出（本土研发并输出海外）；“**政策认可**”主要展示技术被国家或地方技术目录及相关政策文件收录或鼓励应用，以及获得国家或地方政府奖项认可的情况。

表 9 钢铁行业国内外节能低碳技术清单

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
1	21 世纪新焦炉制造技术 SCOPE21	“SCOPE21”工艺是面向 21 世纪，以有效利用煤炭资源来提高生产率以及实现环境 / 节能技术革新的新型工艺。 该工艺首先将原料煤干燥分级，粗粒度煤粒与细颗粒煤粉分别被快速加热到 350 ~ 400℃，细颗粒煤粉经压制成型后与粗粒煤粉相混合，以改善弱黏结煤的黏结性，实现生产率的大幅度提高及节约能源。预热后的煤粉采用无烟输送的方式被装入室式焦炉，该焦炉由高热传导率的薄壁耐火砖砌筑，在低于通常干馏温度的温度下（中低温干馏）出炉，送入 CDQ 干熄焦的改质燃烧室内进行再加热，以获得所需的焦炭质量，实现生产效率的提高以及环境的改善。	钢铁	炼焦	工艺改进	“SCOPE21”工艺通过提高装入煤堆密度、急速加热、装入均匀化，实现了 50%弱粘煤的配入；与现代工艺相比，生产效率可以提高 2.4 倍，能耗降低约 20%。	“SCOPE21”工艺与现代工艺相比焦炭生产的总成本（流动费+固定费）约降低 18%。	市场应用	达峰	国际引进	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
2	焦炉炭化室荒气回收和压力自动调节技术	该技术根据每孔炭化室煤气发生量变化，实时调节桥管水封阀盘的开度，实现整个结焦周期内炭化室压力调节，避免在装煤和结焦初期因炭化室压力过大产生煤气及烟尘外泄，并大量减少炭化室内荒煤气窜漏至燃烧室，实现装煤烟尘治理和焦炉压力稳定。	钢铁	炼焦	工艺改进	山东某公司焦炉炭化室压力自动调节煤气增收技术项目，技改 2×60 孔 6m 顶装焦炉，每年可实现节能量 1436 tce，减排 3799 tCO ₂ 。未来 5 年，该技术的推广比例将达到 20%，预计到 2020 年投入资金 6.5 亿元，预计形成的节能能力约 10 万 tce/a，减排约 26 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	山东某公司焦炉炭化室压力自动调节煤气增收技术项目，项目投资额约 900 万元，建设期为 12 个月，投产后每年的经济效益 383 万元，项目的静态投资回收期为 2.35 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》
3	介质浴盘管式焦炉上升管荒煤气余热回收技术	该技术突破了现有的各种焦炉上升管荒煤气分布式余热回收模式的约束，改变了传统间壁式换热器的结构模式和传热方式，采用复合间壁式结构、中间介质螺旋盘管内循环流动的间接取热方法，在有限的焦炉上升管高度及径向空间内，对焦炉上升管内的荒煤气进行余热回收，降温幅度达 200℃，解决了	钢铁	炼焦	工艺改进	该技术可产生≥2.5 MPa 的饱和水蒸汽（或≥260℃高温导热油；或≥400℃过热蒸汽），同等条件下吨焦产汽量比水夹套技术增加 20%以上。减少 20%焦炉上升管荒煤气冷却降温的喷氨量，降低了喷氨	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《绿色技术推广目录（2020 年）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		焦炉上升管荒煤气余热回收利用过程中存在的介质泄漏、承压低、焦油蒸气凝结等关键技术难题。				成本，减少了污染物排放。 该技术有助于焦化行业节省10~15%的能耗。					
4	高温高压干熄焦装置	目前中温中压和高温高压干熄焦发电技术均无再热系统，蒸汽在汽轮机内做功后，直接进入冷凝器中冷凝，蒸汽中的大部分热量将会以汽化潜热的形式通过冷凝器和冷却塔最终排入大气，造成大量的冷源损失。 该技术通过以下方式缓解这一问题：首先，装满红焦的焦罐台车由电机车牵引至焦罐提升井架下，经焦罐提升机将焦罐提升并送到干熄炉顶，通过干熄槽顶部的装入装置将焦炭装入干熄槽；在干熄槽中焦炭与循环气体进行热交换，将红焦冷却至 200℃ 以下，冷	钢铁	炼焦	设备提效	河北某公司 260 t/h 干熄焦项目，每年回收能源折合标煤 101956 t，平均吨焦回收能源折合标煤 51.338 kg，比基准情景的干熄焦高出 6.7%。处理后的焦炭，高炉焦比降低至少 20 kg/t。 预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 20%，预计总投入 100500 万元，预计节能能力 51 万 tce/a，减排能	河北某公司 260 t/h 干熄焦项目，单位节能量投资额为 0.1971 万元，较基准情景的单位节能量投资额减少 25%。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		却后的焦炭经排焦装置卸至胶带上，送到焦炉的运焦系统。冷却焦炭的循环气体由循环风机通过干熄槽底部的鼓风装置鼓入干熄槽，与红焦炭进行换热将循环气体加热到约为 900℃；热的循环气体经一次除尘器除尘后进入余热锅炉换热，锅炉产生蒸汽，循环气体的温度降至约 170℃。最后，循环气体由锅炉出来，再经二次除尘后再由循环风机加压后，经给水预热器冷却至≤130℃进入干熄槽循环使用。				力 125 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）					
5	超高温超高压干熄焦发电技术	该技术在高温高压干熄焦装置的基础上，增加了一次中间再热。蒸汽在汽轮机高压缸内做功后排出，再重新回锅炉再热器进行加热，加热至额定温度后再进入汽轮机的低压缸做功，做功后的乏汽排入凝汽器冷凝，可降低蒸汽的排气湿度，减少汽轮机湿度损	钢铁	炼焦	设备提效	超高温超高压一次再热发电技术与现有的高温高压发电技术相比，可多发电约 10%～15%。 以 223.5 t/h 干熄焦项目发电项目为例，从高温高压参数提	以 223.5 t/h 干熄焦项目发电项目为例，从高温高压参数提高至超高温超高压参数，每年可以多发电约 4536	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		失，进而提高机组的热效率。该技术的主要优势是提高干熄焦装置的发电量，对于发电自用的企业和外供电价较高的企业，增加经济效益尤为明显。				高至超高温超高压参数，每年可以多发电约 4536 万 kWh。	万 kWh，建设投资增加约 4000 万，电价按照 0.4 元/kWh 计算，约 3 年时间可收回增加投资的费用。 山西某公司国内首套超高温超高压干熄焦余热锅炉发电项目投产后，年发电量可达 3.08 亿 kWh，年外供电量可达 2.8 亿 kWh，可为其创造更大的经济效益。				

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
6	炼焦煤调湿风选技术	该技术通过改变传统流化床结构，使煤料在设备内处于流化状态并呈螺旋线前进，尽最大可能延长煤料在设备内与热风接触的时间，提高热效率，从而完成粒度分级及适度干燥处理的工艺过程，并保持处理后的煤料水分基本恒定（也可对煤料只进行适度干燥处理，具体由业主选择确定）。设备排出的气体经由保温管道送入除尘地面站进行粉尘捕集处理，净化后的气体达标排放。 该技术既可与工厂同步建设，也可老厂增建。	钢铁	炼焦	设备提效	河北某公司焦化厂建设采用以焦炉烟道气为热源的炼焦煤调湿装置（每系设备处理能力 195 t/h），每年可节省能源 36116 tce。 目前该技术可实现节能量 20 万 tce/a，减排约 53 万 tCO₂/a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 50%，节能能力 200 万 tce/a，减排能力 528 万 tCO₂/a。（以 2017 年为始）	河北某公司焦化厂建设 2 系以焦炉烟道气为热源的炼焦煤调湿装置（每系设备处理能力 195 t/h），节能改造投资额 13000 万元，每年可创效益 5016 万元，静态投资回收期 6.38 年。	市场应用	达峰	国际引进	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
7	大型焦炉用新型高导热高致密硅砖节能技术	该技术采用高导热硅砖替代传统的硅砖耐火材料，将焦炉炭化室用硅质材料导热率由传统的 1.85-1.90 W/(m·K) 提高到 2.33 W/(m·K) 以上，焦炉燃烧室的热量通过硅砖炉墙传导到炭化室中，在相同触煤面面积和时间内、燃烧室火焰温度不变的情况下，增加高导热硅质材料传递的热量，降低炼成吨焦所需燃料量，起到节能效果。 同时，改变焦炉炉门传统用粘土砖尺寸，将单块小砖逐块砌筑改成采用耐磨隔热耐火材料整体预制成型，有效降低热辐射，减少热量损失。 此外，该技术可显著提高焦炉的密封性，减少排放到大气中的 NO_x 气体，在节能的同时也起到了环保的作用。	钢铁	炼焦	设备提效	上海某公司 1 座 7m 焦炉改造项目，由于节省焦炉煤气，实现年节能量 4.81 万 tce，年碳减排量 12.7 万 tCO₂。 目前该技术可实现节能量 19 万 tce/a，减排约 50 万 tCO₂/a。预计未来 5 年，该技术在全国推广比例可达 15%，项目总投资额 3.6 亿元，可形成的年节能能力 96 万 tce，年碳减排能力 253 万 tCO₂。（以 2017 年为始）	上海某公司 1 座 7m 焦炉改造项目，技改投资额 1800 万元，建设期 5 个月，年节能经济效益 4138 万元，投资回收期约 5 个月。	市场应用	达峰	国际输出	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
8	焦炉荒煤气显热回收利用技术	该技术通过对上升管换热器结构设计，采用纳米导热材料起导热作用，并防止荒煤气腐蚀和焦油附着，采用耐高温耐腐蚀合金材料最大限度地适应了荒煤气运行的恶劣工况。采用特殊的几何态构体结构，合理地将换热和稳定运行有机结合，将焦炉荒煤气利用上升管换热器和除盐水进行热交换，产生饱和蒸汽，将荒煤气的部分显热回收利用，实现节能。	钢铁	炼焦	余热利用	河北某公司技改2×45孔6m焦炉，年产0.6 MPa饱和蒸汽9.08万吨，每年可节能约8569 tce，减排22625 tCO ₂ 。未来5年，预计焦化行业推广比例可达50%，项目总投资为50亿元，可形成的年节能能力达185万 tce，年碳减排潜力488万 tCO ₂ 。（以2017年为始）	河北某公司项目，技改2×45孔6m焦炉，节能技改投资额为2800万元，建设期12个月，年节能经济效益为800万元，投资回收期约3.5年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
9	烧结余热能量回收驱动技术（SHRT 技术）	该技术将烧结余热能量回收发电技术与电动机拖动的烧结主抽风机驱动系统集成配置，使得烧结余热汽轮机、烧结主抽风机以及同步电动机同轴串联布置，形成烧结余热与烧结主抽风机能量回收三机组（SHRT）。 SHRT 技术改变了冶金行业用户机组的传统能量转换方式，有效避免了炼铁流程中的能量转换损失环节，提高了余热回收的效率，节能环保效果显著。	钢铁	烧结	工艺改进	江苏某公司项目，220 m² 冶金烧结等低品位热能回收及烧结主抽风机投运后，降低电动机功率约 62%，年节约标准煤 10240 t，年碳减排量 27033 tCO₂。 目前该技术可实现节能量 6 万 tce/a，减排约 16 万 tCO₂/a。 预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 20%，预计投资总额 20 亿元，年节能能力 40 万 tce/a，二氧化碳减排能力 293 万 tCO₂/a。（以 2017 年为始）	江苏某公司项目，投资额 5000 万元，项目建设期 1.5 年，投资回收期约 1 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
10	转臂式液密封环冷机	该技术以高刚度模块化回转体单元为核心运行部件，以水作为密封介质，台车栏板及环冷罩采用全密封全保温技术，并配备完善的运行安全检测及控制系统，解决了传统环冷机运行跑偏及密封效果差造成的漏风漏料的问题。	钢铁	烧结	设备提效	该技术可实现设备系统漏风率 $\leq 5\%$ ，冷却风机总装机容量降低 50%以上，余热利用效率提高 10%以上。 该技术目前推广比例 20%，未来三年预计推广比例 60%，节能能力 81.8 万 tce/a。（以 2021 年为始）	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术推荐目录（2021）》
11	环冷机液密封技术	该技术是在高速气流的条件下，以水作密封介质构造液密封环冷机密封系统。 该技术采用最新的复合液密封及端部密封技术，漏风率可由传统的 40%~50%降至 5%以下。采用全平面回转框架及台车技术，单位面积处理能力有效提升，鼓风压力降低 25%以上。采用完善的栏板及环冷罩保温密封技术，设备运行热辐射大幅降低，从而使余热利用效率提升明显。	钢铁	烧结	设备提效	广西某公司 360 m ² 环冷机改造后，用电量节约 76.5%，每小时蒸汽量提高 5-6 吨，运行过程中无粉尘外溢，栏板温度小于 50 度，周边无热辐射。 目前该技术可实现节能量 3 万 tce/a，减排约 8 万 tCO ₂ /a。 预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 10%，预计投资总额 10 亿元，年节能	从已完成的项目情况与广西某公司项目的相关核算来看，一般一年左右便可回收投资成本。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						能力 10 万 tce/a，二氧化碳减排能力 26 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）					
12	钢铁行业重点工序多污染物超低排放控制耦合技术	该技术据烧结风箱烟气排放特征差异，在不影响烧结矿质量前提下，选择特定风箱段烟气循环回烧结合车表面，用于热风烧结。剩余烟气首先通过脱硫区进行 SO ₂ 吸附及氧化，然后与喷入的氨气混合进入脱硝区发生脱硝反应。活性炭法吸附的 SO ₂ 经脱附、氧化等过程制备硫酸副产品。	钢铁	烧结	烟气循环利用	该技术可实现烟气中常规污染物及二噁英超低排放，其中颗粒物浓度 ≤10 mg/m ³ 、SO ₂ 浓度 ≤15 mg/m ³ 、NO _x 浓度 ≤50 mg/m ³ 、二噁英 0.021 ng-TEQ，实现吨矿烟气量减少 21.5%-25%、CO 减排 1.72-4.4 kg/t，实现烟气循环率 >25%。同时，该技术可降低固体燃耗	该技术综合治理成本为 12-15 元/t。	试点应用	过渡	本土应用	《绿色技术推广目录（2020 年）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						6.3%~10.8%，使烧结矿提产3.2%~6.2%。					
13	烧结废气余热循环利用工艺技术	该技术将自烧结支管风箱/环冷机排出后的烧结低温废气再次引入，废气通过烧结料层时，因热交换和烧结料层的自动蓄热作用，可以将其中的低温显热供给烧结混合料，与此同时热废气中的二噁英、PAHs、VOC 等有机污染物在通过烧结料层中高达 1200℃ 以上的烧结带时被激烈分解，NO _x 在通过高温烧结带时亦能够通过热分解被部分破坏。该技术	钢铁	烧结	余热利用烟气处理	烧结废气余热循环利用可节省烧结能耗 5% 以上，减少烧结 CO ₂ 排放以及废气排放总量 20% 以上。宁波某公司烧结机废气循环示范工程，项目年节能量 8173 tce，减排量约 18000 tCO ₂ 。 预计未来 5 年，该技术在钢铁行业烧结工艺中的推广比例可	宁波某公司烧结机废气循环示范工程，项目总投资 4500 万元，建设期为 12 个月，年节能经济效益 1936 万元，投资回收期约 2.5 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		可以显著减少有机污染物的排放，并大幅度削减废气排放总量。				达 30%，可形成年节能能力为 42 万 tce，年碳减排能力 92 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）					
14	钢铁行业 烧结烟气 选择性循环净化与 余热利用 技术	该技术根据烧结风箱烟气排放特征（温度、含氧量、烟气量、污染物浓度等）的差异，在不影响烧结矿质量的前提下，选择特定风箱段的烟气循环回烧结合车表面，用于热风烧结。循环烟气由烧结机风箱引出，经除尘系统、循环主抽风机、烟气混合器后通过密封罩，引入烧结料层，重新参与烧结过程。烟气显热全部供给烧结混合料进行热风烧结，降低了烧结固体燃料消耗，改善了表层烧结矿质量，提高了烧结矿料层温度均匀性和破碎强度等理化指标。	钢铁	烧结	余热利用 烟气处理	该技术可降低污染物排放，其中颗粒物浓度≤10 mg/m ³ 、SO ₂ 浓度≤15 mg/m ³ 、NO _x 浓度≤50 mg/m ³ 、二噁英 0.021 ng-TEQ，实现吨矿烟气量减少 21.5%-25%，烟气循环率>25%。同时，该技术可降低固体燃耗 6.3%-10.8%，使烧结矿提产 3.2%-6.2%。 河北某公司 2×435 m ² 烧结机烟气选择性循环净化与余热利	河北某公司 2×435m ² 烧结机烟气选择性循环净化与余热利用技术示范工程，项目总投资 6680 万元，建设期为 0.8 年，项目投资回收期约 1.67 年。	市场应用	达峰	本土应用	《河北省 低碳技术 推广目录 （2020 年）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						用技术示范工程，项目年减排量约 11.94 万 tCO ₂ 。该技术目前在河钢集团内推广率 90%，全国范围内推广比例约 2%，2025 年，预期推广比例为 25%，预计总投资约 30.45 亿元，年碳减排潜力约 443 万 tCO ₂ /a。（以 2020 年为始）					

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
15	烧结（球团）多污染物干式协同净化技术	该技术以循环流化床反应器为核心，通过反应器内激烈湍动颗粒床层吸收吸附双重净化、细微颗粒物凝并功效，并有机结合选择性催化还原（SCR）、循环氧化吸收（COA）和超滤布袋除尘技术以及智能化检测与控制系统，高效脱除 SO ₂ 、NO _x 、SO ₃ 、HCl、HF 等酸性气体、重金属（铅、砷、镉、铬、汞等）、二噁英及颗粒物（含 PM _{2.5} ）等多组份污染物。具有净化效率高、节能节水、占地小、投资少及运行维护费用低等优点。	钢铁	烧结	烟气处理	该技术可实现出口 SO ₂ 浓度 ≤35 mg/Nm ³ ，NO _x 浓度 ≤50 mg/Nm ³ ，烟尘浓度 ≤5 mg/Nm ³ ，SO ₃ （硫酸雾）浓度 ≤5 mg/Nm ³ ，重金属汞浓度 ≤3 μg/Nm ³ ，二噁英浓度 ≤0.1 ng-TEQ/Nm ³ 。 该技术无有色烟羽排放，可减小占地面积约 50%，耗水量节约 30%，无废水排放。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《绿色技术推广目录（2020 年）》
16	钢铁行业烟气多污染物超低排放智能化高效控制技术及其成套装备	该技术成果研发的技术装备主要包括脱硫系统、脱硝系统和深度净化除尘系统，核心技术有烟气调质技术、喷氨与热风分布均布一体化技术、多相传质和静电凝聚强化的一体化污染物高效协同脱除技术以及智能化管控技术等。处理烧结烟气依次通过 SCR 脱硝、	钢铁	烧结	智能化烟气处理	本套装备可实现烧结烟气 NO _x 浓度 <50 mg/m ³ ，SO ₂ 浓度 <35 mg/m ³ ，PM 浓度 <10 mg/m ³ ，VOCs 浓度 <5 mg/m ³ ，铅及其化合物浓度 <0.5 mg/m ³ ，二噁英类浓度 <0.1 ng-TEQ/m ³ 的超低排放指标（含氧量 16% 基	本套装备经过模块化设计、工程化加工、定型预制、现场拼装等工序，占地面积小，适用于现有有烧结机改造项目，相较于干法	市场应用	达峰	本土应用	《2021 年山东省绿色低碳技术成果目录》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		石灰石-石膏湿法脱硫、湿式静电除尘处理从而达到超低排放要求。				准），效果显著优于钢铁行业超低排放要求。	吸附工艺，同等条件下建设费用可减少约 1.2 亿元，直接运行费用节约 4 元/吨矿，经济效益明显。				
17	热风炉优化控制技术	该技术通过采集处理温度、流量、压力和阀位等工艺参数，建立各热风炉工艺特点数据库；适时判断不同的参数变化和烧炉情况，利用模糊控制、人工智能和专家系统等控制技术，自动计算出最佳空燃比，配合人机界面和数据库对烧炉控制参数进行修改维护，实现烧炉全过程（强化燃烧、蓄热期和减烧期）自动优化控制。	钢铁	高炉炼铁	智能化工艺改进	山东某公司高炉热风炉增加热风炉优化控制系统，更换后可实现综合节能 4710 tce/a，减排 SO ₂ 77.7 t/a，CO ₂ 11775 t/a，NO _x 73.5 t/a。	山东某公司高炉热风炉优化控制系统技术改造项目，投资额 150 万，建设期 1 个月，投资回收期 2.2 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2017）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
18	炼铁高炉鼓风除湿节能技术	该技术采用冷凝法除湿，入热风炉的空气采用脱湿技术工艺，将进入鼓风机之前的湿空气先行预冷，接着将预冷后的湿空气通过表冷器冷却，使其温度降低到空气含湿量对应的饱和温度以下，湿空气中的多余饱和量的水份凝结析出，再经过除水器排出，使空气含水量降低。高炉鼓风含湿量每降低 1 g/m ³ ，综合焦比降低 0.7 kg/tFe，折合 0.68 kgce/tFe，增加喷煤 2.23 kg/tFe，由于高炉顺行增加产能约 0.1%–0.5%。	钢铁	高炉炼铁	工艺改进	江苏某公司高炉鼓风机组技改项目，年节能 60000 tce。目前该技术可实现节能量 38 万 tce/a，减排约 100 万 tCO ₂ /a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 10%，预计投资总额 15 亿元，节能能力 75 万 tce/a，减排能力 183 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	江苏某公司高炉鼓风机组技改项目，节能技改投资额 6000 万元，建设期 12 个月，取得节能经济效益 3000 万–4000 万元，投资回收期 2 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》
19	基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术	该技术在传统高炉炼铁流程基础上优化升级，通过基于炉腹煤气量指数为理论基础的工艺设计，采用高准确率智能化控制模型，在精料的基础上合理优化煤气流分布，上部调剂采用“平台+漏斗”的布料模式，下部调剂采用适当高的鼓风动能保证吹透中心，获得以中心气流为主、边缘气流适度发展的两道气流，使高炉软熔带形状、位置合	钢铁	高炉炼铁	智能化工艺改进	上海某公司位于湛江的 2×5050 m ³ 特大型高炉工程项目，每年可实现节能量 39.6 万 tce，减少碳排放 104.5 万 tCO ₂ 。该技术可使燃料比降低至 500 kg/t 以下，工序能耗降低至 390 kgce/t 以下，吨铁碳排放	上海某公司位于湛江的 2×5050 m ³ 特大型高炉工程项目，投资额约 35 亿元，建设期 30 个月，年节能经济效益约 3.2 亿元，铁水年利润效益	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		理，增大上部间接还原空间，从而提高煤气利用率，降低高炉燃料比，实现节能。				量约为 1100 kgCO ₂ 。预计未来 5 年，该技术可推广比例将达到 23%，项目总投资为 340 亿元，可形成的年节能潜力 324 万 tce，年碳减排能力为 855 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）	3.2 亿元，项目年总效益 6.4 亿。				
20	现代高炉最佳镁铝比冶炼技术	该技术构建了高炉渣最佳镁铝比冶炼控制理论，确定了不同条件下的适宜镁铝比，MgO 的添加量和添加方式，达到了优化高炉渣冶金性能和降低炼铁成本的目的。 该技术是国际上首次针对现代高炉最佳镁铝比该如何确定的问题展开研究，探索高炉渣系的黄金分割点，运用热力学相图原理和动力学建模计算破解了高 Al₂O₃ 炉渣的低能耗冶炼的世界性难题。	钢铁	高炉炼铁	工艺改进	上海某公司炼铁厂采用该技术后，炉渣镁铝比已从 2013 年的年平均 0.51 降至 2017 年的年平均 0.43，同时高炉渣比降低约 3~4%。 目前该技术在辽宁省本行业或领域中的推广比例约为 15%。 预计到 2025 年底，该技术在辽宁省的推广比例可达 30% 以上；总投入约 500 万元，平均年节能量 10.8 万 tce（燃	上海某公司炼铁厂采用该技术后，每年获得经济效益 8100 余万元。	市场应用	达峰	本土应用	《辽宁省重点节能减排技术目录（增补）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						料），年二氧化碳减排量 34 万 t。（以 2020 年为始）					
21	氧气高炉工艺	氧气高炉工艺使用纯氧气代替热鼓风，与传统高炉相比，二氧化碳排放量明显降低。同时，由于氧气高炉在无氮环境下运行，其生产效率也可实现大幅提升。	钢铁	高炉炼铁	工艺改进	改造后氧气高炉可减少碳排放 40% 以上，产能提升 40% 左右。	N/A	试点应用	过渡	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
22	特大型高炉鼓风高效节能装置技术	该装置采用叶型优化、多级动静叶匹配、轴向进气结构等设计技术，对鼓风机组性能进行了综合优化，提高了调节范围和效率；开发应用了高炉鼓风机防阻塞技术、微压控制保持技术、急速减压系统技术、动态双坐标修正的防喘振保护与最高压力限制保护技术，提高了大型高炉鼓风机组运行可靠性。	钢铁	高炉炼铁	设备提效	上海某公司位于湛江的 5050 m ³ 高炉配套 AV100-17 鼓风机组项目，相较于传统鼓风机组，年节约标准煤 1.08 万吨，年减排 CO ₂ 2.99 万吨。未来三年预计推广比例 80%，节能能力 49.6 万 tce/a。（以 2021 年为始）	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术推荐目录（2021）》
23	旋切式高风温顶燃热风炉节能技术	该技术采用旋切顶燃式热风炉，使热风的风温提高近 100℃，降低高炉冶炼焦比，增加喷煤比。同时，采用余热回收方式，使助燃空气预热到 180-600℃，煤气预热到 200℃，提高热风炉的理论燃烧温度和送风温度，降低烟气中热量的浪费。采用顶燃式热风炉散热面积小，废气排放温度低于 150℃，系统热效率相应提高 10%左右，大大降低热损失，节能效果明显。	钢铁	高炉炼铁	设备提效	江苏某公司 3200 m ³ 高炉技改项目，每年可节能 21000 tce。目前该技术可实现节能量 74 万 tce/a，减排约 195 万 tCO ₂ /a。我国 1000 m ³ 以上高炉中还有近 100 座高炉可以推广实施旋切式顶燃热风炉技术改造，预计未来 5 年，该技术在行业内	江苏某公司 3200 m ³ 高炉技改项目，节能技改投资额 14600 万元，建设期 11 个月，年节能经济效益为 6491 万元，投资回收期约 2 年。	市场应用	达峰	国际输出	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						的推广潜力可达到 80%，预计投资总额 108 亿元，年节能能力 118 万 tce/a，二氧化碳减排能力 312 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）					
24	液态熔渣高效热回收与资源化利用技术	该技术成功实现了用离心粒化法高效回收熔融高炉渣余热的全工艺流程，该技术出渣品质高，余热回收率高且无需用水，可谓一举三得，这在世界上属于首次。 基本原理是利用高速旋转的粒化器，使得液态熔渣在离心力作用下被粒化成小液滴，并与空气或水进行直接或间接的高效换热。离心粒化后的高炉渣，玻璃体含量高的渣可以作为水泥掺混料用于生产硅酸盐水泥、混凝土，很有经济价值。高炉渣除了可以做水泥原料，还蕴含丰富的余热资源。该技术理论上可获得小粒径渣粒且玻璃体含量高，熔渣	钢铁	高炉	废物回收利用	该技术能够为我国钢铁行业每年节能 1400 万吨标煤，减排二氧化碳 3640 万吨，减排氮氧化物 37 万吨，减排粉尘 2852 万吨。 按照 1000 万吨规模钢铁厂测算，采用该技术，年节能 15 万吨标准煤，节水 240 万吨，减少硫化物排放 15 吨，减少二氧化碳排放 112 万吨。	按照 1000 万吨规模钢铁厂测算，采用该技术，年经济收益约 1.3 亿元。	中试	中和	本土应用	国家重点研发计划项目

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		的余热回收率在 90%以上。此外，相比水淬渣，离心粒化法还可以节约干燥水渣的能量消耗，节能更显著。									
25	干式高炉煤气能量回收透平装置技术	该技术利用高炉炉顶煤气的余压余热，采用干式煤气透平技术，把煤气导入透平膨胀机，充分利用高炉煤气原有的热能和压力能，驱动发电机发电，最大限度地利用煤气的余压余热进行发电。	钢铁	高炉炼铁	余热余压利用	上海某公司位于湛江的 5050 m ³ 高炉干式煤气余压余热能量回收透平机组（TRT）项目，建成后可实现节能 7.68 万 tce/a。	上海某公司位于湛江的 5050 m ³ 高炉干式煤气余压余热能量回收透平机组（TRT）项目，总投资 3915 万元，投资回收期 5 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2017）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
26	煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT 技术）	高炉鼓风机组是为高炉冶炼提供动力风源的核心机组，高炉煤气能量回收发电机组（TRT）是回收高炉煤气余压、余热的能量回收机组，早期国内外将这两类机组安装在不同厂房，独立配置，自成系统。 该技术创新性地提出了煤气透平和高炉鼓风机同轴的技术解决方案。由于煤气透平和高炉鼓风机都是旋转机械，用煤气透平直接驱动高炉鼓风机，将两台旋转机械装置组合成一台机组，既能向高炉供风，又能回收煤气余压、余热。BPRT 机组兼备两套机组的功能，又使原有的庞大系统简化合并，取消发电机，合并自控、润滑油、动力油系统等，并将回收的能量直接补充到轴系上，避免能量转换的损失，可提高装置效率，减少环境污染和能量浪费，稳定炉顶压力，改善高炉生产条件，降低产品成本。	钢铁	高炉炼铁	余热余压利用	河北某公司 1060 m³ 高炉技改项目，每年按 8000 小时运行时间计算，年可回收电能 6720 万 kWh，年节约 27149 tce，年减排量 67682 tCO₂/a。 目前该技术可实现节能量 54 万 tce/a，减排约 143 万 tCO₂/a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 50%，预计投资总额 18 亿元，年节能能力 90 万 tce/a，二氧化碳减排能力 288 万 tCO₂/a。 （以 2017 年为始）	河北某公司 1060 m ³ 高炉技改项目，投资额约 3000 万元，建设期 2 年，年节能经济效益 3360 万元，投资回收期约 1 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
27	高炉冲渣水直接换热回收余热技术	高炉炼铁冲渣水含有大量 60-90℃ 低品位热量，该技术采用专用冲渣水换热器，冲渣水无需过滤直接进入换热器与采暖水换热，加热采暖水，用于采暖或发电，从而减少燃煤消耗并减少污染物的排放，达到节能减排的目的。冷却后的冲渣水继续循环冲渣，对于带有冷却塔的因巴等冲渣工艺，可以关闭冷却塔进一步节约电能消耗；而对于没有冷却塔的冲渣工艺，冲渣水降温后减少了冲渣水蒸发量，进一步减少水消耗。 采用该技术，无需过滤，工艺流程短，运行及维护成本低，取热过程仅仅取走渣水热量，不影响高炉正常运行，无次生污染，整体运行可靠，适宜于长周期运行。	钢铁	高炉炼铁	余热利用	山西某公司高炉冲渣水余热供暖项目，年节能量 2.85 万 tce，年减排量 7.53 万 tCO₂。 该技术自 2013 年推广至今，已实施 26 座高炉，总供暖面积达 1400 多万平米，实现节能量 20 万 tce/a，CO₂ 减排约 52 万 t/a。预计未来 5 年，该技术的推广比例可达 10%，项目总投资 5200 万元，可形成的年节能能力为 143 万 tce，年碳减排能力为 378 万 tCO₂。 （以 2017 年为始）	山西某公司高炉冲渣水余热供暖项目，节能投资额 5200 万元，建设期 6 个月，年节能经济效益为 1207 万元，投资回收期约 4 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》
28	高炉富氢冶炼	富氢还原高炉是指以纯氢/富氢还原气部分代替煤或焦炭，通过风口喷吹入高炉，增加炉内煤气含氢量，强化氢在炉中上部参与间接还原，减少 CO ₂ 排放，实现低碳炼铁。	钢铁	高炉炼铁	燃料替代	氢气部分代替煤或焦炭，减少 CO ₂ 排放	N/A	试点应用	过渡	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
					原料替代						
29	日本环境和谐型炼铁工艺技术开发项目 COURSE50	2008 年日本启动“COURSE50”低碳炼铁项目，其核心技术是氢还原炼铁法，即用氢置换部分煤粉和焦炭，以减少高炉CO₂排放，以及使用化学吸收法和物理吸附法将高炉煤气中的 CO₂ 进行分离和回收的技术。项目目标是：使用氢还原炼铁法减排 10%，通过从高炉煤气中分离回收 CO₂ 技术减排 20%，从而达到整体减排 30%的目标。 日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）委托日本制铁、JFE、神户制钢、日新制钢、新日铁工程公司等 5 家公司进行实验，预计 2030 年实现 1 号机组工业生产，2050 年普及到日本国内所有高炉。	钢铁	高炉炼铁	燃料替代 原料替代 CCUS	研发目标是 2050 年日本钢铁工业吨钢 CO ₂ 排放量减少 30%，届时日本吨钢 CO ₂ 排放将从 1.64 吨减到 1.15 吨。	N/A	中试	中和	国外应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
30	蓄热式转底炉处理冶金粉尘回收铁锌技术	该技术将蓄热式燃烧技术应用于转底炉直接还原工艺，并对该工艺进行优化改进，达到对冶金粉尘中的锌、铁资源回收利用，同时实现节能降耗的目的。冶金粉尘等固废被制成含碳球团，在转底炉内 1200-1300℃ 的还原区被还原为金属化球团，球团中被还原的 Zn 高温下挥发进入烟气被脱除，Zn 蒸气在烟气中再氧化成 ZnO，通过对烟尘的收集得到富含 ZnO 的二次粉尘。	钢铁	非高炉炼铁（DR I）	废物回收利用	江苏某公司年处理 30 万 t 钢铁厂含锌粉尘示范工程采用该技术，转底炉的工序能耗为 209.3 kgce/t 金属化球团，与回转窑工艺能耗（279.8 kgce/t 金属化球团）相比，每吨产品约节约 70 kgce，每年可减少 CO ₂ 排放 3.7 万 t，减少 SO ₂ 排放 238 t。目前该技术可实现节能量 16 万 tce/a，减排约 42 万 tCO ₂ /a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 80%，预计投资总额 50 亿元，年节能能力 22 万 tce/a，减排能力 59 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	江苏某公司年处理 30 万 t 钢铁厂含锌粉尘示范工程采用该技术，与回转窑工艺能耗相比，每吨产品约节约 70 kgce，折算成每吨产品成本下降约 42 元。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
31	氢冶炼工艺	氢冶金即使用氢气直接还原炼铁，采用气基直接还原竖炉，用氢气取代碳作为还原剂和能量源，还原产物为水，可实现零碳排放（基本反应式为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 = 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$ ，还原剂为氢气，产物为铁和水）。	钢铁	非高炉炼铁（DR I）	燃料替代原料替代	还原产物为水，可实现零碳排放。	N/A	试点应用	过渡	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
32	ML-HISmelt 熔融还原技术	HISmelt 是一种直接熔融还原的炼铁工艺，该工艺可直接熔炼经预热处理的铁矿粉和其他适合的含铁原料，并喷吹煤粉作为系统的还原剂及热量来源。相对传统的高炉炼铁工艺，HISmelt 熔融还原炼铁工艺省去了烧结及焦化两个环节，在同样产能下节省了大量的投资及运行成本，且这种工艺在生产过程中产生的大量蒸汽及富余煤气均可以用于发电，使其生产系统的能源利用效率很高，应用前景广阔。 HISmelt 工艺设施包括矿粉预热及喷吹系统、煤粉制备及喷吹系统、熔融还原炉（SRV 炉）、热风炉、出铁场、渣处理及湿法除尘等系统，除矿粉预热、热矿喷吹系统与 SRV 炉体部分同传统高炉不同外，其他部分类似于传统高炉。 ML-HISmelt 技术是基于澳大利亚 HISmelt 工艺商业化成功的基础上引进建设的，但是在	钢铁	非高炉炼铁（熔融还原）	工艺改进	该技术通过变革性的工艺创新，取消了焦炉、烧结工序，极大的降低了 SO₂ 和 NO_x 的产生、基本遏制了二恶英、焦油和酚的污染排放，环保优势明显；与传统高炉相比洁净度大幅提升，该技术生产的生铁具有低 Si，低 P，低五害（Pb 铅，Sn 锡，As 砷，Sb 锑，Bi 铋）的优势，因此可进行少渣炼钢，降低炼钢成本；可直接喷吹传统高炉烧不宜使用的低品位含铁物料，利用低成本的烟煤和无烟煤代替优质炼焦煤作为原燃料进行冶炼，原料物料范围广。同时该技术可利用钢铁企业氧化铁皮、钢铁厂尘	该技术取消高能耗的烧结与炼焦工艺，不用焦炭和造块，直接用低成本的烟煤和无烟煤代替优质炼焦煤，用低品质含铁物料代替烧结矿球团矿，因此无需大型原料混匀场、焦化厂、烧结厂，极大降低了工厂的占地面积和建造成本。同时工厂布置简单，操作简单，原料价格便宜，人力成本低，因此显著降低企业运营成本。	市场应用	过渡	国际引进	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		引进过程中结合原澳大利亚的生产实践，对工艺路线、部分技术方案进行了优化改进和部分设备的国产化设计。				泥等各种二次资源，具有更大的原料灵活性。	以山东某公司的HIsmelt 工厂为例，总投资项目成本低，占地面积小，仅是 1080 m ³ 高炉占地面积的 1/3，成本相比于高炉低 200 元/t 左右。				

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
33	铁水智能调运系统 (炼铁-炼钢界面 “一罐到底”技术)	该系统采用汽运方式运输铁水，将高炉铁水的承接、运输、缓冲贮存、铁水预处理、转炉兑铁水等功能集为一体，在一个铁水罐内完成，取消了炼钢车间倒罐坑和铁水倒罐作业，缩短了工艺流程，减少了温降、铁损、烟尘排放点。 该系统同时利用“物联网+”技术、信息技术、无线通信、智能识别、自动跟踪等技术，实现了铁水车连续无死角、准确定位跟踪，将钢铁工艺紧密衔接。通过生产管理系统之间的互联互通，形成集成的数据共享平台，优化各类生产、运输作业计划，对上下游的工序进行同步协调，使铁、钢包运输更加透明。实时查看整个铁水包运输路径中铁水包的实时位置和生产实绩，建立快速、准确、可共享的铁水包档案信息，最终实现铁钢作业无缝对接，达到出铁控制、车辆调	钢铁	炼铁-炼钢	智能化 流程运行优化 工序协调优化	该系统显著降低了铁水温降，较传统工艺减少了 42℃～120℃，降低了生产能耗，并且过程不折铁，减少了烟尘排放。	该系统由于减少温降和铁水罐的投入，吨铁效益在 1.2 元左右。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		度、铁包调度管理、行车调度管理等的协调统一，使得生产组织可控有序。									
34	转炉煤气干法回收技术	该技术通过蒸发冷却把约 1000℃的烟气降温到约 250℃并对烟气进行粗除尘，然后通过防爆型静电除尘器对烟气进行精除尘，然后通过引风设备进入煤气切换站，合格的煤气经进一步冷却之后进入回收系统，不合格的煤气经放散塔点火放散。	钢铁	转炉炼钢	烟气循环利用	河南某公司 3 台 65t 转炉技改项目，与传统湿法相比吨钢节能约 5 kgce。 预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 60%，预计投资总额 20 亿元，年节能能力 25 万 tce/a，减排能力	河南某公司 3 台 65t 转炉技改项目，节能技改投资额约 5300 万，建设期约 24 个月，年节能经济效益不低于 1200 万元，	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						66 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	投资回收期不到 5 年。				
35	转炉高效复吹熔炼装备及技术	该技术解决了转炉在高炉龄条件下，由于采用低底吹搅拌强度和溅渣护炉工艺导致的转炉实际底吹效果难以保证的问题。关键工艺包括：底吹风口布置与熔池流场优化、溅渣护炉条件下的底吹风口裸露技术、底吹风口长寿命技术等，并开展了底吹模式优化，实现了转炉全炉役底吹效果稳定控制。	钢铁	转炉炼钢	工艺改进	该技术应用后，转炉终点碳氧积基本不随炉龄的上升而增加，在炉龄达到 6500 炉次以上的条件下，即使在炉役中后期时，碳氧积依旧能够稳定控制在 0.0020 以下，实现了稳定、有效的底吹效果。生产低碳、超低碳钢（终点碳质量分数为 0.025%~0.050%），吹炼终点钢水氧质量分数较前工艺平均降低 0.025%以上，终渣 TFe 质量分数降低 4%以上，	该技术可实现转炉复吹效果的改善，加强钢水搅拌，降低钢水的氧化性，提高钢水质量，提高转炉脱磷效率以及缩短溅渣时间，降低冶炼成本；同时可降低溅渣护炉成本、补炉料成本。	市场应用	达峰	本土应用	2020 年冶金技术特等奖

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						提高钢水质量。同时，降低了溅渣料和补炉料的使用量。	补炉料消耗平均降低 0.57 kg/t，降低幅度达 37.2%； 溅渣料包括白云石、轻烧白云石和镁碳球等平均降低 2.9 kg/t，降低幅度达到 65.9%。 河北某公司 1 号转炉应用该技术，在运行 384 天、冶炼 6543 炉后，实现了全炉役复吹比 100%，碳氧积平均 0.0021，降低生产成本 600 多万元。				

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
36	白灰窑尾气 CO ₂ 回收用于 CO ₂ -O ₂ 混合喷吹炼钢工艺技术	该技术利用不同气体在变压情况下吸附剂吸附气体量不同及 CO ₂ 加压容易液化的原理对 CO ₂ 气体进行提纯，当转炉冶炼时通过管道输送 CO ₂ 到炼钢车间供转炉进行 CO ₂ -O ₂ 混合喷吹炼钢，利用 CO ₂ 和铁水中 C 反应可生成 CO 的原理增加冶金搅拌动能，降低炉渣铁含量，提高煤气质量，同时 CO ₂ 和铁水中 C 反应生成 CO 时吸热，可以降低火点区温度，减少粉尘的产生。	钢铁	转炉炼钢	烟气循环利用 CCUS	目前已推广比例不到 10%，2025 年预期推广比例达到 30%，2025 年该技术预计总投资额达 13.44 亿元。2025 年预计可形成的年碳减排潜力约 150 万 tCO ₂ /a。（以 2020 年为始）	河北某公司 CO ₂ -O ₂ 混合喷吹炼钢工艺技术及装备示范项目，总投资 9000 多万元，建设期为 1 年。碳减排单位成本为 120 元/tCO ₂ 。年产生经济效益约为 2000 万元，项目投资回收期约 5 年。	市场应用	达峰	本土应用	《河北省低碳技术推广目录（2020 年）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
37	新一代转炉“一键炼钢”技术	该技术包括基于副枪系统的转炉全自动冶炼技术，采用副枪系统收集入炉铁水、废钢、熔剂等原料条件，于吹氧过程中在线测定钢水温度、碳含量、氧含量、液位，结合取样分析结果，利用智能的静态和动态算法模型，确定转炉吹氧、加料、合金化等操作制度，通过采集声呐信号，辅助监测造渣过程。采用转炉全自动出钢技术，通过角度、距离等多种传感器精确检测和摄像系统监测，控制系统自动调整转炉倾角，钢包车、渣罐车、合金加料、转炉底吹、钢包底吹、出钢检测及挡渣控制等多系统耦合、精准联动，实现转炉从下枪吹炼至出钢结束的全程动态无人干预自动控制。 该技术是实现转炉全流程智能化炼钢的核心技术，将“一键式操作”由原来的冶炼环节扩展至了出钢环节。以智能控制模型为核心，依托可靠的副枪、机器视觉、红外测	钢铁	转炉炼钢	智能化	该技术可实现减少吨钢钢铁料消耗 2 kg/t，减少石灰消耗 3 kg/t，减少铁合金消耗 0.2 kg/t，降低氧气消耗 1.0 m³/t，减少钢水温度损失约 15℃，缩短冶炼周期约 3 分钟。	该技术可实现无人干预的自动控制，减少了操作人员和失误，提高生产稳定性及效率，为企业带来显著效益。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		量、声呐信号等监测系统完成数据采集，借助生产大数据及人工智能算法技术进行模型自学习和自优化，自主动态指导顶吹、底吹、造渣、终点预判和出钢合金化，完成由冶炼到出钢的自主感知、自主决策和自主执行的闭环智能化控制，最终实现转炉冶炼的稳定化、高效化、无人化和高品质低成本的动态有序生产。									

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
38	DP 系列废钢预热连续加料输送成套设备	目前，国内的绝大多数电弧炼钢炉都是采取移开炉盖、炉料从炉顶分批投入、用电弧直接加热炉料的方法炼钢。这样电炉打开炉盖装料时不但废钢及渣料会产生大量扬尘，粉尘扩散，污染电炉周边环境，同时还会造成大量的热能流失。 该设备为具有对流加热功能的振动输送和高效物料预热输送装备，通过改变电炉高温烟气在废钢预热通道内的流动方向，形成对流与辐射相结合的传热方式预热废钢。同时，可以实现不用打开炉盖在电炉侧面连续加入炉料，废钢通过预热输送带被连续并自动地运至电炉。在出钢时，炉内会保持 1/3~1/2 的留钢量，出钢后即刻连续送入炉料，废钢由钢液持续熔化，继续下一次的冶炼。 该装备实现了电弧炉冶炼过程连续加料、连续预热、连续熔化和连续冶炼，大幅度降低了炼钢能耗，缩短了电炉冶炼周期，减少了	钢铁	电炉炼钢（铁次级生产）	设备流程优化	该设备可实现出钢量提高 10% 以上，冶炼周期缩短 10-15 分钟；每吨钢节电 80-100 kWh，电极消耗减少 0.5-0.8%，耐火材料消耗减少 5%，吨钢释放的 CO₂ 量减少 20-30%；生产现场含尘量小于 10 mg/m³，吨钢烟尘产生量由 17-20 kg 降低到 11 kg。 青海某公司改造示范项目，改造后系统冶金电耗降低 100 kWh/t，年节约标准煤 2.64 万吨，年减排 CO₂ 7.31 万吨。 该设备未来三年预计推广比例 30%，节能能力 175 万 tce/a。 （以 2021 年为始）	该设备可实现每吨钢耗电减少 80-100 kWh，按目前工业用电 0.5 元 kWh，吨钢成本下降 50 元，以 100t 电炉年产钢 125 万吨计算，总成本降低 6250 万元。同时，废钢在输送过程中进行预热，提高了料温，缩短了冶炼时间，一天可多出 3 炉钢，日增产 300 吨，月增产 9000 吨，每年可提高产量 10 万吨左右。每吨钢还能节	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术推荐目录（2021）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		烟气排放。 (该设备为河南某公司消化吸收国外技术装备 (consteel) 研制开发的国家专利高新技术产品)					省电极 0.5-0.8 kg, 年产钢 125 万吨的企业每年可节省电极 6250-10000 吨左右, 年节约资金 1-1.6 亿元。				
39	钢水真空循环脱气工艺干式(机械)真空系统应用技术	钢水真空循环脱气系统工艺 (RH 工艺) 是一种重要的钢水炉外精炼方法, 具有脱气、脱碳、温度补偿、均匀钢水温度及成分、去除钢中夹杂物等功能。 由于钢水真空循环脱气系统工艺要求的真空度高、废气量大, 因此本技术采用两级罗茨	钢铁	炉外精炼	工艺改进	重庆某公司干式机械真空系统技改项目, 每年可节能 20539 tce。 目前该技术可实现节能量 1 万 tce/a, 减排约 3 万 tCO ₂ /a。 预计未来 5 年, 该技术在行业	重庆某公司干式机械真空系统技改项目, 节能技改投资额与传统的蒸汽喷射式真空系统相比增加 1750 万元,	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录 (2017 年

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		泵串联之后再与干式螺杆泵串联，组成真空泵组。该泵组是一种将罗茨泵与干式泵相结合的机械真空泵系统，利用罗茨泵的超高抽气能力对 RH 工艺废气“增压”来满足高抽气量的要求，利用干式螺杆泵的高压缩比将工艺废气“压缩”至大气压之上后排至大气，并满足快速抽真空的要求。				内的推广潜力可达到 10%，预计投资总额 6.6 亿元，年节能能力 8 万 tce/a，二氧化碳减排能力 21 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	建设期 8 个月，年节能经济效益为 1703 万元，投资回收期 1 年。				本，节能部分）》
40	连铸凝固末端重压下技术	该技术充分利用铸坯“内热外冷”高达 500℃温差的固有特点，在连铸机的凝固末端，厚度方向实施 10%以上的大变形压下，从而消除偏析提升均质度，焊合缩孔提升致密度，全面提升大断面铸坯的心部质量，从根本上解决了高端大规格钢材产品无法大批量稳定生产的难题。	钢铁	连铸	工艺改进	该技术实施后，产品质量指标优于国外产线。生产的 75 kg/m 长尺重载钢轨组织性能更加均匀稳定，服役寿命提升了 60%，并形成 100m 长尺重载钢轨生产能力。	该技术近 3 年为企业创直接利润 11.74 亿元。（以 2021 年为准） 目前已在宝武、鞍钢、韩国现代钢铁等国内外钢企的近 20 条产线推广应用，年创经济效益超 4 亿元，实现了	市场应用	达峰	国际输出	2020 年度国家科学技术进步奖二等奖

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
							重大连铸技术的国际领跑。				
41	薄板坯连铸连轧	薄板坯连铸连轧是将传统钢铁制造流程中相对独立分散的连铸、加热、轧制等工序融为一体。薄板坯连铸连轧生产线经过第一代单坯轧制、第二代半无头轧制之后，目前已发展进入第三代无头轧制阶段，国内主要包括 ESP、MCCR 和 DSCCR。	钢铁	连铸连轧	工艺改进流程优化	ESP 产线的工序能耗一般为 26-28 kgce/t。与传统热轧比较，虽然 ESP 电耗增加，但减少了燃气的消耗，能耗节约 74%，可减少碳排放 55 kgCO₂/t；ESP 避免了再加热的烧损、减少切头尾的损失，提高了成材率，如只考虑热轧过程能耗，可节约 1.5 kgce/t。 另外，ESP 生产的薄规格钢板可替代部分冷轧板（即以热代	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						冷），进一步降低轧钢工序能耗和碳排放。					
42	薄带连铸连轧	薄带连铸连轧也称超薄带技术（如 Castrip）是一种直接铸轧出尺寸及质量特性满足最终产品要求的近终成形技术。该技术具有流程短、能耗低、绿色环保等优势。 江苏某公司超薄带产线长度不到 50m，不足传统热连轧产线的十分之一。	钢铁	连铸连轧	工艺改进	Castrip 产线的工序能耗约为 7.5 kgce/t。有资料显示，与传统热轧和薄板坯连铸连轧相比，Castrip 吨钢能耗是传统热轧的 17%，是薄板坯连铸连轧（如 CSP）的 33%。Castrip 吨钢碳排放量是传统热轧的 26%，是薄板坯连铸连轧的 46%；如果产品“以热代冷”，Castrip 吨钢能耗为传	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						统热轧+冷轧退火产品的 13%，为薄板坯连铸连轧+冷轧退火产品的 17%。Castrip 吨钢碳排放为传统热轧+冷轧退火产品的 18%，为薄板坯连铸连轧+冷轧退火产品的 24%。 据报道，江苏某公司 Castrip 产线的总能耗和碳排放分别仅为传统热轧产线的 16% 和 25%。					

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
43	高延性冷轧带肋钢筋盘螺生产技术	该技术以 Q235 普碳钢为原材料，利用冷塑性变形强化与在线再结晶热处理工艺，提升钢筋强度，同时消除残余应力，修复微观组织缺陷，提高钢筋延性。相对于传统热轧工艺，因生产过程不需添加合金，减少合金生产制造过程的相关能耗，从而实现间接二氧化碳减排。 我国钢筋产量约 2.2 亿 t，其中 400 MPa 级及以上钢筋占比约 80%，500 MPa 级以上钢筋占比仅约 8%。钢筋强度每提高 100 MPa，使用时可节约钢材约 10%。	钢铁	轧钢	工艺改进	按全国年钢筋产量计算，500 MPa 级高强钢筋使用量每提高 1%，可减少矿石消耗 300 多万 t，减少二氧化碳排放 400 多万 t，减少污水排放 400 多万 t，具有良好的环境和社会效益。 河南某公司建设 3 条高延性冷轧带肋钢筋盘螺生产线，项目年碳减排量约 6390 tCO₂。预计未来 5 年，全国高延性冷轧带肋钢筋推广使用量预期可达市场总量的 35%，项目总投资 60 亿元，可形成的年碳减排能力 64 万 tCO₂。（以 2017 年为始）	河南某公司建设 3 条高延性冷轧带肋钢筋盘螺生产线。主要设备投资为 4500 万元，项目总投资 6000 万元，建设期 8 个月，碳减排成本约 100~200 元/tCO₂。项目实施后，每年生产 30 万 tCRB600H 高强钢筋，直接产生经济效益 0.6 亿元，投资回收期约 3 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，低碳部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
44	钢材热轧过程氧化行为控制技术	该技术可生产出免酸洗、易酸洗及氧化皮耐腐蚀等新品种钢材，而且实现了热轧氧化调控由经验试错向数字化、智能化控制的转型。主要成果和创新点包括多因素强耦合热轧氧化理论、热轧流程氧化界面与相组成控制技术、钢材热轧氧化行为在线软测量数学模型与工艺智能优化方法。	钢铁	轧钢	智能化工艺改进流程优化	该技术应用于河北某公司薄板坯连铸连轧，除鳞不净缺陷发生率由 90%降低至 2%以下。可使氧化铁皮界面弯曲度较常规工艺降低 25%以上，冷加工过程氧化铁皮掉粉量由传统生产的 100 mg/dm ² 降至 3 mg/dm ² 以下，并且实现了氧化铁皮厚度动态软测量与智能控制，厚度较常规工艺稳定减薄 20%以上使酸洗耗酸量吨钢降低 3.15kg。	N/A	市场应用	达峰	国际输出	2020 年度国家科学技术进步奖二等奖
45	加热炉黑体技术强化辐射节能技术	该技术根据红外物理的黑体理论及燃料炉炉膛传热数学模型，制成集“增大炉膛面积、提高炉膛发射率和增加辐照度”三项功能于一体的工业标准黑体——黑体元件，将众多的黑体元件安装于炉膛内壁适当部位，与炉膛共同构成红外加热系统；既可增大传热面	钢铁	轧钢	设备提效	河北某公司 135 万 t 热轧带钢加热炉项目，每年可节能 6650 tce。目前该技术可实现节能量 83 万 tce/a，减排约 219 万 tCO ₂ /a。预计未来 5 年，该技	河北某公司 135 万 t 热轧带钢加热炉项目，节能技改投资额 380 万元，建设期 9 天。每年可节能 6650 tce，年	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		积，又可提高炉膛的发射率到 0.95（1002℃），同时能对炉膛内的热射线进行有效调控，使之从漫射的无序状态调控到有序，直接射向钢坯，从而提高炉膛对钢坯辐射换热效率，取得较好的节能效果。				术在行业内的推广潜力可达到 40%，预计投资总额 12 亿元，节能能力 220 万 tce/a，减排能力 581 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	节能经济效益 465.7 万元，投资回收期约 10 个月。				本，节能部分）》
46	冷轧智能工厂生产线	该生产线通过工艺、设备、信息系统的智能化提升，在工艺流程全过程的关键部位，应用机器人、无人天车、智能检测、智能磨辊等智能装备和智能制造单元，打通设备端到端的连接，应用新一代工艺控制模型提高生产控制水平，使全流程生产稳定性及效率得以提升。在应用层面对智能工厂进一步细分，构建以产品智能设计与工厂柔性化制造和营销服务为核心，由能源、质量、设备、绿色安全进行支撑的智能工厂应用体系，提升冷轧工厂生产的柔性化、稳定性、高效	钢铁	轧钢	智能化生产控制	河北某公司硅钢-冷轧智能工厂项目的实施可使能源利用率提高 10%以上。	河北某公司硅钢-冷轧智能工厂项目的实施可使产品研发转化周期缩短 30%以上，产品不良品率降低 30%以上，生产效率整体提高 20%以上，工厂运营成本降低 20%以上。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		性，降低制造成本，节约能源，提升产品质量。									

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
47	燃气轮机值班燃料替代技术	燃气-蒸汽联合循环发电机组（CCPP）对燃料热值及质量要求较高，不能单独使用低热值的高炉煤气作为燃料，必须掺烧热值相对较高焦炉煤气或转炉煤气等。 该技术通过对焦炉煤气（COG）及高炉煤气（BFG）联动逻辑系统研究，将值班燃料切换过程中及切换后的燃烧波动偏差控制在合理范围之内，实现对热值范围的相应修改，增强燃气轮机对燃料的适应性，增加高炉煤气用量，提高联合循环发电机组出力。同时对燃气轮机燃烧室流体预混、扩散燃烧进行研究，建立燃烧计算模型，模拟燃烧室工况，调整过量空气系数，按《燃气轮机排放标准》计算燃料更改后燃烧室燃烧温度，确保最佳过量空气系数，降低燃烧温度以及NO_x、SO₂的生成。	钢铁	综合（供、热、生产、控制）	工艺改进	按单套 50 MW 联合循环 CCPP 计算：联合循环效率提高 0.5%，增加发电量 1200 万 kWh；提高了燃气轮机燃料热值允许范围，从 3090-3650 kJ/Nm³-Wet 改为 2890-3770 kJ/Nm³-Wet；减少氮气消耗 1600 万 m³；平均减少燃气轮机非计划停机 60 次/年，年利用小时数超过 8000 小时；减少厂用电消耗 568 万 kWh。 湖南某公司燃气-蒸汽联合循环发电项目，年节能量 19605 tce/a，年减排量 51757 tCO₂/a。目前该技术可实现节能量 3 万 tce/a，减排约 8 万 tCO₂/a。预计未来 5 年，该技术预期推广比例可达 40%，可	湖南某公司燃气-蒸汽联合循环发电项目，技改投资额 1080 万元，建设期 2 个月，年增加发电经济效益 2566 万元，投资回收期约 4 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						形成年节能能力 20 万 tce，碳减排潜力约 53 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）					
48	高温工业窑炉红外节能涂料技术	该技术通过增加基体表面黑度，形成高发射率辐射层，从而减少热量流失，达到炉窑节能效果。涂层可改变传热区内热辐射的波谱分布，将热源发出的间断式波谱转变成连续波谱，从而促进被加热物体吸收热量，强化	钢铁	综合（材	设备提效	山东某公司型钢厂改造项目，轧钢车间内一台年产 25 万吨型钢加热炉的加热段、均热段喷涂上红外节能涂料，有效面积 145 平方米，年节约标准煤	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术推荐目录

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		了炉内热交换过程，提高了窑炉能源利用率。		料)		0.30 万 t，年减排二氧化碳 0.83 万 t。 未来三年预计推广比例 5%， 节能能力 149.4 万 tce/a。 (以 2021 年为始)					(2021)》
49	烟气磁化熔融炉处理钢铁尘泥及有价元素回收技术	该技术以钢铁行业烧结、炼铁、炼钢和轧制工序含锌、铁尘泥等固体废物为原料，通过热熔造块和熔融炉高温还原工艺回收尘泥中的铁、锌、钾、钠、银、铟等有价金属元素，主要产品为再生生铁、硫酸锌、氯化钾、氯化钠、再生金/银/锌原料、硅酸盐炉渣及熔融炉法氧化锌粉。	钢铁	综合	废物回收利用	该技术可回收尘泥中多种有价金属元素，比转底炉工艺减碳约 15.98%、比回转窑工艺减碳约 19.59%。 河北某公司年处理 100 万吨废料综合利用项目，年减排量约 188484 tCO ₂ 。 预计未来 5 年内，冶金固废处理项目可达到 8 家，预计总投资 240000 万元，推广比例为 7.3%，2025 年预计可形成 730 万吨固体废弃物处理能力，年	河北某公司年处理 100 万吨废料综合利用项目，总投资 58000 万元；建设期 2 年。项目年减排量约 188484 tCO ₂ ，碳减排单位成本 366.3 元/tCO ₂ 。	市场应用	达峰	本土应用	《河北省低碳技术推广目录（2020 年）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						碳减排潜力有 137.59 tCO ₂ /a。（以 2020 年为始）					
50	钢铁行业 烧结 （等）余热发电技术	该技术利用钢铁行业烧结、热风炉、炼钢、加热炉等设备产生的废烟气，通过高效低温余热锅炉产生蒸汽，带动汽轮发电机组进行发电。同时通过分级利用余热，使得余热锅炉能最大限度的利用 200-400℃ 的低温余热。	钢铁	综合	余热利用	安徽某公司投资 1.7 亿元人民币安装低温余热锅炉及汽轮发电机组，年发电量达 1.4 亿 kWh。 未来 5 年，预计推广到 40%，总投入 17 亿元，节能能力可达 15 万 tce/a，减排能力 41 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	安徽某公司投资 1.7 亿元人民币安装低温余热锅炉及汽轮发电机组，年发电量达 1.4 亿 kWh，年取得经济效益 7000 万元人民币，投资回收期 2.5 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
51	钢铁窑炉烟尘细颗粒物超低排放预荷电袋滤技术	该技术可使烟气中细颗粒物预荷电，荷电后的粉尘在直通式袋滤器滤袋表面形成多孔、疏松的海绵状粉饼，可强化过滤时细颗粒物的布朗扩散和静电作用，提高碰触几率和吸附凝并效应，从而提高细颗粒物净化效率；超细纤维面层滤料可实现表面过滤，减少细颗粒物进入滤料内部，防止 PM2.5 穿透逃逸，稳定实现超低排放。	钢铁	综合	烟气处理	该技术可实现颗粒物排放浓度 $<10 \text{ mg/m}^3$ ，PM2.5 捕集效率 $>99\%$ ，设备阻力 700-1000 Pa，设备漏风率 $<1.5\%$ 。 该技术与传统袋式除尘技术相比，预荷电袋滤器颗粒物排放浓度下降 30%-50%，环保效益显著；运行阻力能耗降低 40% 以上，节能效益显著；占地减少 35%，单位产品钢耗量降低 25%。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《绿色技术推广目录（2020 年）》 环境保护科学技术二等奖

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
52	禧德®干法固定床烟气脱硫技术	该技术是利用中晶环境自主研发的 M®系列脱硫脱硝剂对烟气进行脱硫脱硝治理并且对 VOCs、二噁英、汞、氟等多种污染物可协同治理的综合烟气治理技术。先将吸收剂用吨包输送到脱硫塔塔顶，再通过电动葫芦将吨袋送至每个仓室顶部，人工打开吨袋后，使吸收剂自动通过仓顶的进料口填充在脱硫塔内；来自热风炉、燃气锅炉的烟气进入脱硫塔后，水平/垂直穿过吸收剂，吸收剂中的碱基与 SO ₂ 发生化学反应，进而脱除掉 SO ₂ ；净化后的烟气从脱硫塔侧面向上运动，后再次穿过吸收剂进行二次脱硫，然后通过引风机进入烟囱排放，吸收剂则由底部排出，此时上部存留的新鲜脱硫剂补充至仓室内，使吸收剂始终充满仓室，保证烟气穿过吸收剂。	钢铁	综合	烟气处理	该技术采用特制 M®系列脱硫剂，脱除效率可达 95%以上，并且脱硫副产物可回收用于建材制作。M®系列脱硫剂由多孔吸附+催化剂材料复合制备而成，制备过程无碳排，相较传统脱硫剂，它在治理过程及副产物处置过程中也都几乎无碳排。同时该技术采用干法脱硫，不产生废水，温降小，无白色烟羽现象。	该技术设备数量少，模块化组合、灵活布置，现场可做到无人值守，运行成本和设备维护成本低。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
53	富含一氧化碳（CO）的气态二次能源综合利用技术	该技术将富含一氧化碳的工业尾气，例如高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气等，利用新型高效 CO 专用吸附剂和变压吸附分离技术，通过吸附、降压、置换冲洗、解吸等步骤，把富含 CO 的气态二次能源中 CO 有效分离提纯出来，最后进行化工合成生产甲醇、乙醇、乙二醇等化工产品，实现固碳。该技术可将气态二次能源中的 CO 完全回收并用作化工原料，大幅度减少 CO ₂ 排放量，节约一次化石能源，具有较好的经济和社会效益。	钢铁	综合	烟气循环利用	湖南某公司提纯低燃值高炉尾气综合利用工程，年减排量约 8 万 tCO ₂ ，碳减排成本为-200~-100 元/tCO ₂ 。预计未来 5 年，该技术预期推广比例可达 10%，项目总投资约 375 亿元，可形成的年碳减排能力约 390 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）	湖南某公司提纯低燃值高炉尾气综合利用工程，项目总投资 13000 万元，建设期为 12 个月，年经济效益 6500 万元，投资回收期约 2 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，低碳部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
54	钢铁行业多工序多污染物协同控制技术	该技术针对钢铁行业烧结、焦化、球团、高炉、铁合金多工序污染排放特征及控制需求，解决了非常规污染物协同控制效果差、催化/吸附材料易中毒失活、装备难以匹配等难题，实现了“基于高炉炉料结构优化的变革性减排技术”“契合工序特征的末端超低排放关键技术”“钢铁行业超低排放系统性解决方案”等重要科技创新。 焦炉烟气活性炭多污染物协同控制技术体系基于焦炉烟气低硫高氮的排放特征与多污染物协同控制的理念，通过关键技术和装备创新，为焦炉烟气的治理提供了系统解决方案。 钢铁球团烟气多污染物超低排放技术体系基于污染控制与生产工艺深度融合的理念，研发了“低氮燃烧+SNCR+梯级氧化”嵌入式全过程脱硝技术、基于半干法强化吸收原理的多污染物协同控制技术、高湿高碱性球团烟	钢铁	综合	污染物处理	技术体系中的低排放、低能耗镁质熔剂性球团焙烧技术，实现烟气 SO₂ 生成量比酸性球团降低 18.4%，能耗降低 2 kg/t，SO₂、NO_x 生成量比烧结矿分别降低 74.3%、53.2%。 高比例球团高炉冶炼集成技术，在国内首次实现 80%球团比例的高炉工业生产，燃料比降低 11 kg/t，吨铁成本降低 28.3 元。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	2020 年度国家科学技术进步奖二等奖

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		气颗粒物的静电凝并耦合布袋强化捕集技术，通过关键技术和装备创新，为球团烟气的低能耗高效治理提供了系统解决方案。 基于镁质熔剂性球团替代烧结矿的炼铁污染物源头和过程削减技术体系则针对我国钢铁行业炼铁流程污染物和能耗高的现状，立足国内矿粉资源特点。									

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
55	钢铁行业能源管控技术	该技术通过建设能源管控平台，借助于完善的数据采集网络获取管控需要的过程数据，经过处理、分析、预测和结合生产工艺过程的评价，在线提供能源系统平衡信息或调整决策方案，使平衡调整过程建立在科学的数据基础上，保证了能源系统平衡调整的及时性和合理性，使钢铁联合企业生产工序用能实现优化分配及供应，从而保证生产及动力工艺系统的稳定和经济、提高二次能源利用水平，并最终实现提高整体能源效率的目的。	钢铁	综合	能源管理	河北某公司采用该技术后，每年可节约 10000-50000 tce。目前该技术可实现节能量 180 万 tce/a，减排约 475 万 tCO ₂ /a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广潜力可达到 60%，预计投资总额 10 亿元，节能能力 270 万 tce/a，减排能力 713 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	河北某公司采用该技术，节能改造投资额 3000 万-8000 万元，项目实施后，累积取得经济效益 4708.4 万元/年，该项目按设计方案的总投资为 9000 万元，投资回收期为 2.5 年。（以 2017 年为始）	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》
56	钢铁企业智慧能源管控系统	该系统运用新一代数字化技术、大数据能源预测和调度模型技术，构建钢铁工业智慧能源管控系统，动态预测企业能源平衡和负荷变化，实现了钢铁企业水、电、风、气的一体化、高效化、无人化管理，有效提高能源循环利用和自给比例。	钢铁	综合	智能化能源	河南某公司智慧能源管控系统改造项目，应用该系统，吨钢平均用煤量减少 3kg，年节约标煤 1.2 万 t，减排二氧化碳 3.33 万 t/a。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
					管理						
57	基于工业互联网钢铁企业智慧能源管控系统	该技术采用大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术，对能源生产全过程进行能耗能效评价分析、平衡预测分析和耦合优化分析，对能源产生量、消耗量进行精准预测，通过与数据共享、协同，建立能源流、铁素流、价值流及设备状态的动态平衡优化体系，有效降低能源损失，提高能源转化效率，可降低综合能耗。	钢铁	综合	智能化能源管理	辽宁某公司智慧能源集控项目，系统年节约标煤 4.05 万吨，减排二氧化碳 11.2 万吨/a。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
58	智慧集控中心	该系统将物联网、移动互联、大数据、云计算在传统流程工业进行集中化、规模化应用，实现钢铁企业跨工序、跨区域大规模远程集控、无边界协同和大数据决策。集控范围包括铁区原料、烧结、焦化、高炉、铁水运输、TRT 除尘 6 大工序 24 个系统，以及能介的煤气、蒸汽、发电、鼓风等 6 大系统的 18 个单元，实现了 5 公里以上跨工序、跨区域、远距离、大规模集控。通过顶层规划、系统集成和智能制造核心技术，实现管控一体化、操作集约化，开创炼铁生产新模式。精简作业区，实现组织的扁平化管理。将分散的中控室优化为 1 个集控中心统一控制，实现无边界生产协同，操作人员从重大危险区域撤离，安全得到本质化提升。利用大数据技术，结合机器学习算法，对全厂的生产运行进行智能感知、智能分析、智能预测和智能决策。	钢铁	综合	智能化生产控制	该系统可使高炉燃料比降低 5-20 kg/t，操作人事效率提升 30%-40%。	广东某公司智慧集控中心项目投产后，吨铁成本降低 25 元，平均日产量提升 500 吨，作业区数量下降 60%，人事效率提升 40%，总体劳动生产率提升近 40%。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
59	钢铁厂全厂可视化平台	全厂可视化平台包括煤气安全总线系统、液态金属安全总线系统、高炉数字孪生系统、循环水可视化系统、员工动态可视化系统等5个子系统。该平台实现了地理信息技术与钢铁运营技术的深度集成，利用地理信息三维可视化技术为展现手段，以能源动态管控系统和经营管控系统为数据支撑，结合现有视频监控技术、北斗定位技术、热红外测温技术，以直观高效的方式实现对钢厂能介管网的可视化管控，包括全厂煤气等能介管网可视化展现、液态金属安全可视化动态监测和煤气作业安全管理。 在煤气、液态金属本质安全的智慧技术应用上取得重大突破，属国内首创，实现了对煤气总线和液态金属总线及其他重大危险源的状态监控、智能分析和实时预警，提高了企业的风险管控能力，降低了生产成本，有利于推动企业的可持续发展。	钢铁	综合	智能化生产控制	该平台把钢铁生产设备、生产线和员工紧密地融合起来，使钢铁制造业形成跨设备、跨系统、跨厂区的互联互通，从而提高生产效率。	该平台可实现生产的安全高效，实现风险管控，降低企业生产成本和人力成本。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
60	钢铁全流程数字化工厂	全流程数字化工厂指通过数字化平台进行钢铁工厂总图、公辅管线以及各工艺单元的三维设计，以数字化设计为源头，同时充分结合 BIM、GIS、AR/VR、数字化交付等技术，建设的全流程虚拟钢铁工厂。 全流程数字化工厂可实现全生命周期的数字化综合管控，打造集综合调度管控、数字化资产管理、全流程生产仿真、智能设备运维、管网安全监控、应急演练于一体的数字化平台，全面整合钢铁工厂的生产、设备、能源、物流等业务数据，从而为工厂提供基于数字化的全方位服务，全面贯通数字化设计和数字化运维的全过程。同时，为工厂建立起统一的智能管控中心，实现基于大数据和人工智能的工厂智能分析决策。 全流程数字化工厂通过数据流、信息流与工作流的数字化，可实现工厂更高效的运营与管理模式，使工厂效能得到全面提升。	钢铁	综合	智能化生产控制	提供基于数字化的全方位服务，生产管控效率可提高5%。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
61	智能环保原料场技术	原料场是钢铁厂一个占地广、易污染、劳动强度大的工艺单元，该技术实现了原料场生产的自动化、智能化和管控一体化。 该技术应用智能物流系统，根据起点和终点信息自动生成起点和终点间的所有输送线路，按照成本、能耗、时间、线路长度、生产计划策略，并综合考虑各流程和设备的状态属性，实现流程的自动筛分排序，实现流程线路的自动最优选择。在此基础上，还采用激光扫描仪对实际料场进行三维扫描，通过数据过滤和拼接生成数字化料场图，自动盘库模型分析，云数据自动输出库存信息报表。 该系统将料场和料堆的信息反馈给智能化系统，实现料场的数字化管理和无人化作业，通过精准实时管理，大幅提高了作业质量。 原料场只需要操作工远程监控，有效提高劳动生产率、原料场利用率和盘库效率。	钢铁	原料	智能化物流	上海某公司智能环保原料场项目，每年可节约电能约 500 万千瓦时。	上海某公司智能环保原料场项目，可提升 20%的作业效率，降低 70%的人力成本。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
62	全自动智能包装技术	该技术推行包装材料集成一体化业务，从包装代码设计、产品包装效果验证、产品现场包装作业等方面做到了高度融合。	钢铁	包装	流程优化	N/A	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A
63	台架式卷钢集装箱	该技术创新研发了一种台架式集装箱，在集装箱内部设置“V”型鞍座用于放置卷钢，实现台架式集装箱运输，解决了传统卷钢运输过程中不易安放的问题，且更易于堆垛及存储。该项技术不仅填补了国内 10 吨以上卷钢集装箱运输的技术空白，也为国内钢铁企业开展钢铁产品集装箱化运输提供了全新的技术支持。	钢铁	运输	设备提效	目前，该技术已在辽宁某钢铁公司的铁路运输、海陆运输广泛使用，每年运输量达 130 万吨，按照国家减排标准计算，每年可降低二氧化碳排放量 4600 吨。（以 2019 年为准）	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《交通运输行业重点节能低碳技术推广目录（2019 年度）》

说明：

适用范围——技术在钢铁行业价值链中所处的具体环节；

功能——技术实现节能降碳的方式；

节能减排效应——技术在项目层面与/或全国层面的定性或定量节能减排效果（基于公开信息）；

经济效益——技术在项目层面与/或全国层面的经济性（基于公开信息）；

成熟度——技术在我国的应用条件，包括概念、初试、中试、终试、试点应用、市场应用等；

适用阶段——本报告基于技术目前发展情况，分析评估得出的技术在钢铁行业实现“双碳”目标进程中的适用阶段，包括达峰（行业碳达峰）、中和（行业碳中和）和过渡（行业达峰后、中和前）；

国际化——技术的自主研发、引进或“走出去”情况，包括国外应用（国外研发但尚未引进）、国外引进（国外研发并引进应用）、本土应用（本土研发但尚未输出海外）、国际输出（本土研发并输出海外）；

政策认可——技术被国家或地方技术目录及相关政策文件收录或鼓励应用，以及获得国家或地方政府奖项认可的情况。

本报告从公开渠道搜集梳理钢铁行业节能低碳技术共 63 项，基于技术目前发展情况，划分为适用于行业达峰阶段的技术 56 项、过渡阶段 5 项、中和阶段 2 项。钢铁行业从先进技术推广应用角度，已经为行业碳达峰做出了比较充分的准备，但面对随后即将到来的行业碳中和目标，还需进一步加快技术研发，推广技术普及，深化技术应用。

本次收录的 63 项技术中，适用于高炉炼铁环节的技术最多（13 项），其次为炼焦、烧结（各 8 项），与我国目前长流程为主的生产工艺中重要环节的能耗占比大小关系基本一致——炼铁最高（60%），烧结次之（9%~12%）；体现出这些环节节能潜力较大，并正在通过先进技术的进一步推广应用得到较好的挖掘和开发。

与此同时，关于前文分析中提到具备较大节能减排潜力、前景看好的电炉炼钢和界面技术（各 1 项），目前可从公开渠道获取的信息及相关应用案例较少。这意味着目前这两类技术可能尚处于深入研发阶段，并有望为钢铁行业节能减排在未来的过渡或中和阶段发挥更大的作用。

第二部分：水泥行业

一、行业概况及“双碳”挑战

1. 行业概况：产量高位平台期和工艺过程排放大

水泥行业为国家建设提供了重要的原材料保障，在我国工业化、城镇化、现代化的进程中发挥了重要作用，是关系到国计民生的重要基础行业。2020 年中国水泥产量为 23.8 亿吨，约占全球总产量的 57%。1985-2020 年，中国水泥产量连续 36 年成为世界第一；其中 2014 年产量为阶段性高点 24.8 亿吨，2015-2020 年产量基本在 22~24 亿吨之间进行波动，进入高位平台期，预计还将持续一段时间。2020 年我国水泥消费量也居全球第一，人均消费量约为 1700 千克，是发达国家人均水平的两倍以上（中国水泥协会等，2021）。

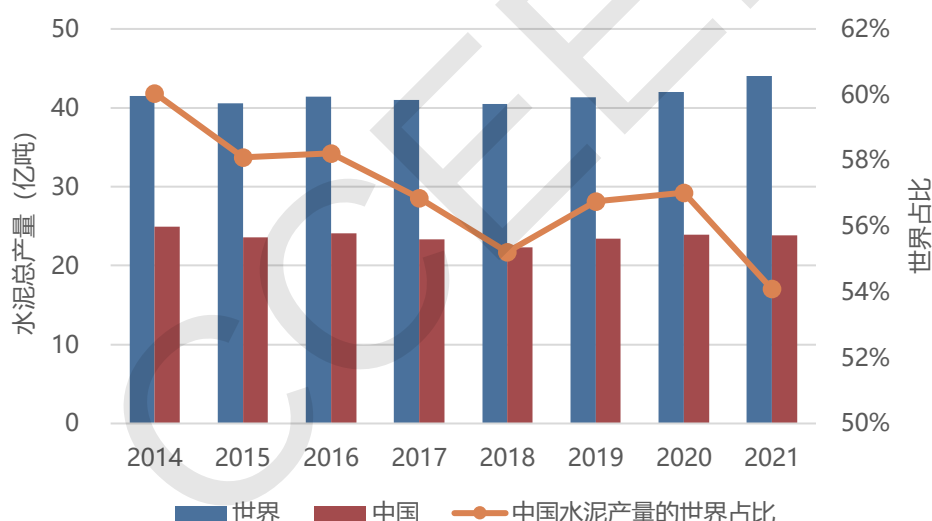


图 19 我国及全球水泥产量（2014-2021）

数据来源：国家统计局、美国地质调查局

水泥行业是我国二氧化碳排放的重点行业之一。2020 年中国水泥行业二氧化碳排放量为 13.7 亿吨，占全国总量约 13%（何捷，2021）。其中，以熟料煅烧工序为主工业过程排放占比约 60%，这是硅酸盐水泥的生产特性所决定的：硅酸盐水泥熟料以氧化钙作为主要的化学成分之一，因此水泥熟料配料的生产需要通过煅烧自然界中的石灰石（碳酸钙）来提供氧化钙，而碳酸钙的受热分解会产生大量的二氧化碳，这是水泥行业在现有工艺下呈现出的固有高碳排放属性；余下 40% 的排放主要来自熟料煅烧用

煤等化石燃料的能源活动（35%）和粉磨用电等外购电力等间接排放（5%）（详见 二、技术发展现状及前景）（中国水泥协会等，2021）。

另一方面，水泥行业年能源消耗总量超 2 亿吨标准煤，占全国工业总能耗的 7.5% 和建材行业总能耗约 73%，是建材行业中的主要能源使用产业（中国建筑材料科学研究总院有限公司，2021）。水泥行业的能源消耗主要包括熟料煅烧环节的煤炭消耗和各环节的电能消耗两部分，能源结构以化石燃料（煤炭）为主，煤炭在水泥生产能源消耗中占比高达 80%~85%。从能效水平而言，该行业的单位产品能源消耗指标——单位熟料产品综合能耗在 98~136 kgce/t，国内大部分产能距离 100 kgce/tcl 的国际先进水平仍有较大差距，亟需对生产线进行改造升级（中国水泥协会等，2021）。

“双碳”目标提出后，我国水泥行业迫切需要优化水泥生产的能源结构，开发替代燃料，加强燃料替代，促进减煤降碳；推广创新技术提升行业能效，实现水泥生产节能降碳；推进原料替代、减少过程碳排放；加快碳捕集利用与封存（CCUS）技术的示范应用，推动碳排放的末端治理，努力实现行业协会锚定的“2023 年碳达峰、2030 年前减排 2 亿吨”的行业目标（中国水泥协会等，2021）。

2. “双碳”挑战：固有的过程排放和煤炭为主的能源结构

水泥行业因其居高不下的碳排放和能耗、尤其是过程排放和以煤炭为主的能源结构而成为中国节能降碳工作一直以来的攻坚领域；“双碳”目标正式提出以来，该行业面临的压力更是全方位升级。《意见》《方案》和《“十四五”工业绿色发展规划》先后提出，要促进水泥等高耗能项目产能置换、严控水泥等高碳项目，提高清洁能源在水泥等行业的使用比重。随后，国家发改委、工信部、生态环境部、科技部等部门先后出台了《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见——冶金、建材重点行业严格能效约束推动节能降碳行动方案（2021-2025 年）》《“十四五”原材料工业发展规划》《水泥行业节能降碳改造升级实施指南》等针对水泥行业的细化文件，对水泥行业未来、尤其是直到 2025 年的绿色低碳发展指明了方向，具体要求包括：到 2025 年，

- **水泥产品单位熟料能耗水平降低 3.7%**（工业和信息化部、科学技术部、自然资源部，2021）；

根据 2021 年发布并将在 2022 年 11 月实施的 GB 16780-2021《水泥单位产品能源消耗限额》，目前我国熟料单位产品综合能耗的基准水平为 117 kgce/t（天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等，2021），以基准水平估计，2025 年之前降低 3.7%即是在四年内降低 4.3 kgce/t，年均下降 0.9%，2025 年达到 112.7 kgce/t；该标准上一次修订发生在 2012 年，规定的

基准水平为 120 kgce/t（天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等，2012），即在节能工作大幅推进的 2012-2021 年这九年间，熟料单位产品综合能耗基准水平下降了 3 kgce/t，降幅 2.5%，年均下降 0.3%。

要完成 2025 年单位熟料能耗水平降低 3.7% 的目标，需要在 2021-2025 年期间，以 2012-2021 期间 3.3 倍的速率进行能效提升，用四年时间完成以往九年时间 1.4 倍的单位产品能耗绝对值下降。水泥行业节能减排面对巨大压力。

- **能效基准水平以下熟料产能基本清零**（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）；

按照即将执行的《水泥单位产品能源消耗限额》，水泥熟料能效基准水平为 117 kgce/t（天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等，2012）。2020 年我国水泥熟料产能约 18.5 亿吨（中国水泥网，2021）；同时按照电热当量算法，截至 2020 年底约有 24% 熟料产能的能效在基准水平以下（高于 117 千克标准煤/吨）（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）。

按照 2025 年能效基准水平以下熟料产能基本清零目标的要求，将有超过 4.4 亿吨熟料产能必须在 2025 年前完成改造升级或淘汰、单位产品综合能耗降至 117 kgce/t。

- **水泥行业标杆以上的熟料产能比例达到 30%**（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2021）（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）。

截至 2020 年底，全国约 18.5 亿吨的水泥熟料产能（中国水泥网，2021）中，按照电热当量算法，其中约有 5%（国家发展和改革委员会、工业和信息化部等，2022）即不到 1 亿吨熟料产能的能效优于标杆水平。

要在 2025 年实现 30% 的标杆能效占比，即是要在五年时间内将优于标杆能效产能的占比提高 25 个百分点，使 5.6 亿吨产能的单位熟料综合能耗低于 100 kgce/t（天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等，2012），与国际先进水平接轨。

上述目标从**单位产品能耗、基准产能和标杆产能**三方面入手，督促水泥行业在 2025 年前提高能效水平，进而推动实现行业节能。这不仅关系到水泥行业总体能耗下降，还能够减少碳排放，从而有助于行业实现“双碳”目标——水泥行业 40% 碳排放来自能源相关的直接和间接排放（燃煤 35%，外购电力间接排放 5%）（中国水泥协会等，2021），而这部分碳排放中大部分都来自熟料煅烧阶段，**通过提高烧成系统能效的**

手段来实现降碳目的还有相当大的潜力可挖，这也是现阶段水泥行业碳减排的主要行动方向。

与此同时，水泥行业的能源结构以煤炭为主，占比高达 80%~85%（中国水泥协会等，2021）。相比电力及其他一些清洁能源，燃煤的碳排放系数显然更高。因此要控制能源相关的碳排放，除了上述节能、降低能耗总量的方式外，还可以考虑通过燃料替代实现减煤、控煤。目前水泥行业采用较多的方式是废弃物协同处置，即在对城市生活垃圾等固体废弃物进行燃烧处置的同时，利用燃烧产生的热能为熟料煅烧等生产流程供热，从而减少对燃料煤的使用。但由于中国对城市生活垃圾以及一些危险废弃物的预处理还不够精细，水泥行业对废弃物的协同处置更多站在垃圾处理而非水泥生产的立场进行规划设计，容易出现废弃物作为燃料的供应不够稳定、燃烧热值不够等问题，因此该方法目前在中国的水泥行业还只是作为辅助供热手段，要想全面发挥燃料替代的作用还需要尽快转换思路、精细化管理。而水泥行业对氢气等其他一些替代性清洁能源的使用，还存在成本、运输、安全性等方面的顾虑，近中期内大规模使用的可能性较小。

尽管水泥行业能源相关的碳排放存在各种成熟或探索中的方式加以控制，但还有更多的碳排放来自工艺过程（60%）（中国水泥协会等，2021）。从占比上来看，**过程排放或许才是水泥行业在更长时间尺度上节能降碳、实现“双碳”目标所需要解决的主要矛盾，而解决水泥生产的过程排放，在理论上主要依靠原料替代。**水泥熟料是水泥的重要组成部分¹²；而目前作为市场主流的硅酸盐水泥熟料又以氧化钙作为主要成分之一。因此目前市面上主流的水泥生产工艺都不得不通过煅烧石灰石（碳酸钙）来提供氧化钙，同时分解释放大量二氧化碳，这是现有水泥生产工艺所固有的高碳排放属性。要从根本上解决这一问题，目前包括中国在内的全球水泥行业主要进行了两方面的尝试：一是降低熟料中钙的含量，例如减少硅酸三钙（C3S）、增加硅酸二钙（C2S）的比例，或是寻求其他的新型胶凝材料来替代熟料作为水泥中的粘合剂；二是降低最终产品中的熟料系数¹³。但这两种做法都会影响水泥产品的性能，尤其是核心的胶凝性能，因此大部分相关技术都还需要经历长时间的试验才能得到市场化应用，即使是少部分已经投入使用的成熟技术，也主要适用于特种水泥市场，目前无法大规模铺开。

对中国水泥行业而言，无论是以煤炭为主的能源结构，还是熟料煅烧所固有的过程排放，都难以在短期之内发生彻底的转变，因此人们将一部分目光转向了碳排放捕

¹² 水泥是一种粉末状水硬性胶凝材料，加水拌和成塑性浆体，能胶结砂、石等材料，既能在空气中硬化，又能在水中硬化。水泥由水泥熟料作为主要粘合剂，加入石膏、混合材料等多种组分混合而成；根据加入的组分及各自含量的不同，被分为不同类型的水泥，具备不同的功能特性。

¹³ 水泥中熟料的质量占比，通常用1以内的小数表示。

集利用与封存（CCUS）技术，寄望通过末端处置为水泥行业碳排放“兜底”。不仅在水泥行业，CCUS 在全球范围内的各个高碳排放领域和行业都被寄予厚望。但 CCUS 技术成本高、封存难，目前多为试点示范项目，水泥企业应用的积极性还不高。

下节将从水泥生产的具体工艺流程、节能低碳技术现状及目前技术推广方式存在的问题几个方面入手，探索水泥行业在“双碳”目标下依靠技术手段实现低碳发展的潜在出路。

二、技术发展现状及前景

1. 生产工艺简介

不同于钢铁工业复杂的生产流程，水泥生产的核心流程可以较为清晰地概括为“两磨一烧”，即生料制备/粉磨（和煤粉制备）、熟料煅烧和水泥粉磨（图 20）。



图 21 水泥生产工艺及各环节主要能源、碳排放源示意图

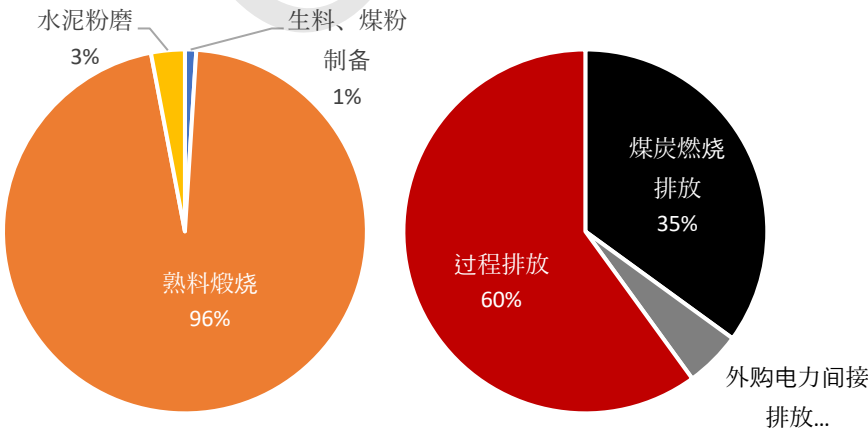


图 20 水泥生产碳排放，按工艺环节（左）和碳排放源（右）

- **生料、煤粉制备环节**碳排放全部来自外购电力间接排放，占水泥生产碳排放的 1%；
- **熟料煅烧环节**碳排放来自过程排放、煤炭燃烧排放、外购电力间接排放，占比分别为 60%、35%、1%；
- **水泥粉磨环节**碳排放全部来自外购电力排放，占比为 3%。

- **生料和煤粉制备：**水泥生产从石灰石、粘土质等原料开始，经破碎后按一定的比例调和，分配成成分合适、质量均匀的生料；同时煤炭经煤磨形成煤粉。这一阶段主要使用电力，碳排放主要为外购电力相关的间接排放。
- **熟料煅烧：**以煤粉作为燃料，将生料送入水泥分解炉和回转窑内煅烧，生料中的石灰石（碳酸钙）在分解炉内分解为生石灰（氧化钙）和二氧化碳（化学方程式 1），生石灰和生料中的其他成分在回转窑内煅烧至部分熔融并发生一系列复杂化学反应，得到以硅酸钙（C3S、C2S、铝酸三钙 C3A、铁铝酸四钙 C4AF 等）为主要成分的水泥熟料。这一阶段使用燃煤作为主要能源，碳排放主要为过程排放，其次是煤炭燃烧排放，并有少量外购电力相关的间接排放。



化学方程式 1 石灰石分解反应

- **水泥粉磨：**对煅烧所得的颗粒状或块状熟料进行粉磨，并加入适量的石膏、混合材等其他组分，共同粉磨均匀，成为水泥。这一阶段主要使用电力，碳排放主要为外购电力相关的间接排放（中国水泥网信息中心，2019）。

水泥与钢铁行业同属制造业，因此水泥产品在全生命周期上也遵循“两链一流”的总体流程（图 5），在供应链和服务链上的各个环节与钢铁行业类似，此处不再赘述。

2. 节能低碳技术概述

正如“‘双碳’挑战”一节所讨论的那样，水泥行业要减少碳排放，主要技术突破方向包括：1）主要针对能效提升的现有工艺设备改造升级；2）主要针对煅烧环节过程排放问题的原料替代；3）主要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、技术发展情况和市场准备等条件，这四个技术突破方向发挥主力作用的时期有所不同。

远期技术突破寄望于原燃料替代和 CCUS

正如“‘双碳’挑战”一节所讨论的那样，长远来看，要解决水泥行业碳排放高的问题，主要的技术突破方向将集中在 1）解决煅烧环节过程排放问题的原料替代，改变熟料成分与/或含量；2）解决煅烧环节燃煤排放问题的燃料替代，减煤控煤；和 3）用于末端处置的 CCUS。但这些技术创新方向目前各自都存在一些具体的限制，难以在短时间内大规模市场应用。

在针对煅烧环节过程排放问题的原料替代方面，改变熟料成分与/或含量的熟料替代技术路径，由于会引起水泥产品性能的变化，因此所有的改变都必须经过长时间的

试验探索；在针对煅烧环节燃煤排放问题的燃料替代方向，利用煤炭这种一次能源来燃烧供热，比使用电能等二级能源进行供热的成本更低、能源利用效率更高（考虑发电的能源消费消耗和损失），而目前考虑的废弃物协同处置和氢气等替代性能源，又各自存在供应不稳定、欠缺精细化分类和管理、成本高昂、运输和储存容易出现安全隐患等问题，还需要进一步的科学研究论证和管理；而 CCUS 技术也需要解决成本、运输、利用方式、封存场所、安全性、企业激励等一系列问题之后，才能逐步从目前的试点示范扩展到市场应用。

近期技术减排寄望于现有工艺设备升级改造

基于以上考虑，在长期技术方向取得重大突破之前，**短期内对水泥行业而言最实用的就是紧抓 40%的能源相关碳排放——即 35%的煅烧环节燃煤直接排放和 5%的全过程外购电力间接排放，通过对现有工艺设备进行升级改造，提高熟料煅烧、粉磨等各环节的能源利用效率，来实现节能降碳，这也与各政策规定水泥行业在 2025 年前需要实现的一系列量化节能减排目标不谋而合。**

熟料煅烧以煤炭为主要能源，燃煤产生的碳排放约占水泥行业碳排放总量的 35%，另有部分外购电力产生的间接排放，**是水泥行业节能低碳技术聚焦的最主要环节。**常见的改造升级手段包括高效烧成系统改造、水泥窑富氧燃烧技术等（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。值得注意的是，高效烧成系统的改造是多种单体节能技术的集成，包括 1）采用五级甚至六级预热预分解系统，提高预热器预热效率，降低废气温度和熟料烧成的热耗；2）分解炉采用分级燃烧技术，提高碳酸钙的分解效率，降低尾气脱硝成本；3）通过高效冷却机和余热回收，提高回收热效率；4）降低冷却机中风机的阻力，减少风机电耗；5）使用高性能保温隔热材料，减少散热损失等。这些单体技术的节能降碳作用加成在一起，以 110 kgce/t 熟料产能的水泥窑为例，将能实现 3%~5%的节能率¹⁴。对于其中的余热回收而言，余热发电是我国水泥厂比较常见的余热利用方式，所产生的电力通常供水泥厂自用。

¹⁴ 参考水泥行业专业访谈所得信息。

与此同时，在外购电力产生的 5%间接排放中，（生料、煤粉、水泥等）粉磨用电占到约 80%，60%来自水泥粉磨¹⁵（图 22）。尽可能地使用绿电，可能是降低这部分碳排放的一个可行选项；而从技术角度出发，使用高效的粉磨系统有助于降低电耗，从而减少水泥行业外购电力产生的间接排放。

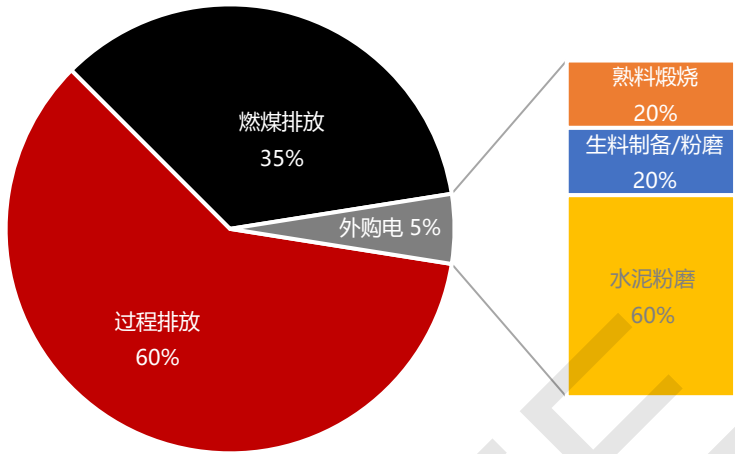


图 22 水泥行业碳排放构成（按排放源，电力细分）

水泥行业常用的粉磨设备包括球磨机（球磨）、立式磨（立磨）和辊压机等（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。三种设备各具优缺点，适用于不同的应用场景。

- **球磨机**使用一定数量的钢球作为研磨介质，对物料进行碰撞破碎等机械碾磨，故此得名；可以进行干式或湿式粉磨。利用球磨机进行粉磨的生料和水泥，其颗粒接近球形，有助于进行熟料煅烧和水泥水化硬化，因此一度广泛地应用于水泥行业；但其占地大、电耗也大，有被其他粉磨设备或技术替代的趋势（桂林鸿程矿山设备制造有限公司，2020）。
- **立式磨**是集烘干、粉磨、分级、输送为一体的高效粉磨设备，利用中心的磨辊碾压粉碎物料，外形为树立站姿形态，因此称为“立磨”。立磨占地小、效率高，相同条件下能耗比球磨机低 40%~50%，在水泥行业的应用因而正在逐步增加；但其并不具备球磨机在生产颗粒形态上的独特优势（桂林鸿程矿山设备制造有限公司，2020）。
- **辊压机**利用两根磨辊对物料进行挤压，受到挤压的物料形成密实的料床，并在颗粒内部产生强大应力，进而产生裂纹和粉碎，成为强度很低的料饼（常州优力，2015）。目前**辊压机+球磨机的联合粉磨**是水泥行业比较理想的粉磨解决方

¹⁵ 根据《水泥行业碳排放现状与达峰路径》中相关数据计算得出。

案，利用辊压机对物料进行预粉磨后再送入球磨机，在保留生产颗粒球形优势的同时，能耗又较单纯使用球磨机有所降低（详见 三、关键技术分析）。

与此同时，**数字化、智能化制造生产也是水泥行业转型升级的重要方向**。通过智能化控制提高粉磨、煅烧环节能效，以及智慧化能源管理系统等数字化技术的应用，都有助于从整体上提高水泥行业的能效、降低能耗和碳排放（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。

此外，水泥行业与钢铁行业同属制造业，因此从供应链和服务链上的包装、运输、储存等环节入手，也可以寻求更多可行性高的节能低碳技术，降低行业全价值链的整体能耗和碳排放，减少产品全生命周期的能源和碳足迹（详见 四、国内外节能低碳技术清单）。

3. 目前技术推广的挑战

水泥行业与钢铁行业同为各级节能低碳技术目录重点关注的行业，在技术推广方面遇到了一些共性问题，例如激励政策缺位、企业缺乏采用新技术的动力，目录对技术的长期发展演变追踪不足、经济性数据普适性不高、缺少对集成技术和系统技术的关注等（详见 第一部分：钢铁行业 相关章节）。深入水泥行业，节能低碳技术的推广还遇到了一些行业特异性的问题：

目录对技术收录不全面

一些节能降碳效果好、成本效益高的技术已经在市场上得到了很好的推广应用，但并没有被收录在相关的技术目录当中，例如高能效烧成技术¹⁶、熟料煅烧过程智能优化控制系统等（详见 三、关键技术分析 和 四、国内外节能低碳技术清单）——一方面容易造成基于技术目录的部分技术研究分析与现实存在一定程度的脱节，另一方面也使部分未被收录的先进技术得不到应有程度的政策支持，影响政策实施效率。这一现象在钢铁等其他行业也有发生，但在水泥行业尤为明显。这是因为现有目录对技术的收录主要依靠技术供应商（多为企业）的自主申报，但水泥行业作为一个市场化程度较高的行业，先进技术即使不通过相关目录的推广也能获得很好的市场认可，因此在激励政策不足的情况下，拥有先进技术的企业并没有动力进行申报。

部分技术缺乏适当的政策引导

一些技术在推广之初的出发点是好的，但往往由于缺乏适当的管理出现“反效果”。例如，水泥行业的余热发电技术本意在于回收利用系统热能，提高总体能源利

¹⁶ 集成技术，其中大部分单体技术已收录在相关技术目录中，但对作为整体的集成技术并未明确收录。

用效率；但水泥企业利用燃煤余热发电自用的成本远远低于外购电力的成本，从追求经济效益最大化的立场出发，一些水泥企业为了多利用余热发电、减少外购电力，往往会在水泥生产过程中投入比实际所需更多的煤炭，反而造成总体能耗和碳排放增加，与推广余热发电技术的初衷背道而驰。如果采取适当的政策加以引导和管理，例如规定余热发电量不能超过水泥生产总能耗的特定占比，情况可能就会有所好转。

现有体系不适用于评估数字化智慧化技术效果

数字化、智慧化作为目前及未来的重要技术变革领域，正在对各个领域和行业产生重大影响，水泥行业也是数字化智能制造发力的关键行业之一。在“双碳”目标的时代背景下，数字化、智慧化节能降碳更是大有可为。但这类技术往往通过与其他技术或系统的叠加和集成发挥作用，是一类“赋能”技术，即在原有基础技术和基础系统之上做一些额外的优化和提升，例如智慧化能源管理平台对能源管理系统的加成作用、数字化水泥熟料煅烧控制系统对熟料煅烧环节的精准控制作用等。这些赋能的数字化技术无法离开原本的能源管理系统、熟料煅烧工艺等技术而单独存在，因此人们也无法对数字化、智慧化技术的节能降碳效果和成本效益做出单独的量化评估。随着数字化技术的更广泛应用，相关技术目录越来越多地收录数字化、智慧化节能降碳技术将是顺势而为，但**现有目录对技术的评估大多围绕节能降碳效果、典型项目中的技术应用条件和效果、目前推广比例、推广预测等参数，并不适用于数字化、智慧化技术这样的赋能技术，难以单独界定其节能减排和经济效益。**

三、关键技术分析

经过对水泥行业国内外节能低碳技术的搜集和梳理，本节基于以下六项条件选取关键技术进行深入分析：

- 技术成熟度高，在中国水泥行业市场具备充分的应用条件；
- 技术所处的工艺环节能耗或碳排放占比高，或是节能降碳潜力大；
- 技术的节能降碳效果好；
- 技术应用后的成本效益好；
- 技术的适用范围广、市场推广前景佳；
- 技术相关信息较完备。

在上述标准基础上，尽可能全面覆盖水泥生产的各个主要环节，兼顾技术自身的创新性，最终选取三项关键的具有代表性的水泥行业节能低碳技术，包括：

- 熟料煅烧环节设备升级改造，高能效烧成技术；
- 熟料煅烧环节智能化，熟料煅烧过程智能优化控制系统；
- 水泥粉磨环节，辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术。

这三项关键技术覆盖了水泥生产中熟料煅烧和水泥粉磨两大关键环节，其中熟料煅烧环节是水泥行业碳排放的最主要环节，而水泥粉磨是水泥生产过程中耗电量最高的环节。这三项技术均为集成/系统技术而非单体技术，因此大部分并未明确被收录在以单体技术为主的国家和地方技术目录中，但无一例外都是经过了实践检验、市场认可的优秀技术，其推广应用有望为推动水泥行业碳达峰、努力实现行业碳中和作出重要贡献。

1. 高能效烧成技术（高能效烧成系统改造）

技术简介

水泥熟料的烧成包括窑尾预分解、回转窑煅烧，以及窑头熟料冷却、排出、入库等几个工序，需要消耗大量的煤和电。

窑尾预分解系统由预热器旋风筒和分解炉构成。生料从最上一级旋风筒进入预热器，自上而下地与预热器内自下而上的热气体在悬浮状态下进行热交换，至五级旋风筒后入分解炉，在炉内进一步热交换，大部分碳酸盐分解后，再进入六级旋风筒，经窑尾烟室喂入回转窑。

入窑系统的物料经过回转窑过渡带和烧成带进行高温煅烧，发生固液相反应，形成高温熟料，出窑高温熟料入篦式冷却机冷却。窑头煤粉燃烧后，生成的高温气体通过烟室从分解炉底部入炉。在分解炉内，煤粉燃烧和生料分解过程同时进行。

出分解炉的气、料经六级旋风筒分离后，物料入窑，废气经过各级旋风筒，自下而上与生料悬浮换热降温，最后从第一级旋风筒排出，窑尾高温废气一部分进入生料磨和煤磨预热原燃料，其余进入废气处理系统。熟料在篦冷机篦床的推动下，向出料方向缓慢移动，同时与鼓入的冷空气进行热交换，形成的高温热空气一部分作为二次风入窑供煤粉燃烧，一部分作为三次风入分解炉，其余部分排出，经过窑头电收尘器净化后再次排入大气。冷却后的熟料经篦冷机末端破碎机破碎后入槽式输送机。

高能效烧成技术是指用于水泥熟料煅烧制备的一系列高能效技术集合，由于这些技术往往通过对上述烧成系统的改造实现节能减排，又称高能效烧成系统改造。该技术的关键包括新型高效低压损的六级预热预分解系统、第四代篦式冷却机、高效低氮燃烧器以及高性能保温无铬温耐火材料技术装备等。

技术所属行业及生产环节

该技术适用于水泥生产中的熟料煅烧环节。

当前水泥行业由于自身工艺的特点，化石燃料燃烧及电力消耗产生的碳排放分别占全厂碳排放中的约 35%和 5%，而生产过程中碳酸盐分解产生的碳排放占全厂碳排放的 60%左右。熟料煅烧是水泥生产最主要的耗能和碳排放环节，涉及的生产过程排放、煤炭燃烧等能源活动排放、外购电力间接排放分别占水泥生产碳排放总量约 60%、35%和 1%；高效烧成技术主要针对其中的化石燃料燃烧及电力消耗产生直接影响。

熟料煅烧环节的热耗和电耗具体分布如下。

表 10 熟料煅烧环节热耗基本分布

工序	热耗 (kcal/kgcl)	影响因素
熟料理论热耗	415	原料配料、产品类型、生料控制等
系统散热	65	保温材料选型及设计
废气携带	130	系统控制（拉风大小等、换热效率、分离效率）
熟料携带	30	冷却机热回收效率、熟料结粒、系统控制
余风携带	85	系统控制
环境带入	-10	系统控制
小计	715±85	N/A

表 11 熟料煅烧环节电耗基本分布

工序	电耗 (kWh/tcl)	影响因素
原料破碎与输送	3.7	易碎性和粒度控制、破碎机形式、输送距离等
原料预均化堆场与配料	0.8+0.7	物料粘性、堆取料设备、输送距离
生料粉磨与均化	18+0.5	易磨性、磨机类型、库型等
煤粉制备与输送	3.8	磨机类型、原煤性质、输送距离等

熟料煅烧与冷却	24	系统设计、风机效率、机械效率等
小计	51.5±8	N/A

技术原理

新型高效低压损的六级预热预分解系统

新型高效低压损的六级预热预分解系统通过悬浮态气固两相间的多级换热、悬浮态气固分离，实现高效利用余热将生料加热，并利用部分燃料热将生料分解。

预分解系统作为烧成系统的核心，必须具备四个方面的特点：1) 低动力消耗；2) 低系统能耗；3) 对原燃料及生产操作控制过程要有较宽的适应性；4) 较高的自脱硝效率。除此之外，对于燃烧替代燃料的烧成系统，还必须针对替代燃料的具体情况进行特殊设计，以适应系统的工况变化。

新型预热预分解系统主要通过改善各级旋风筒连接管道内的气固换热、提高各级旋风筒的分离效率等一系列技术措施，来提高其热效率。此外，该系统还通过控制进入系统的空气（冷风）、控制系统表面散热等烧成系统配套技术的优化，来提高系统的固气比及热效率。

表 12 5000 t/d 新型预热预分解系统规格

六级双系列旋风预热器带分解炉	型号、规格性能
C1 旋风筒	4-Φ 5200 mm
C2 旋风筒	2-Φ 6900 mm
C3 旋风筒	2-Φ 6900 mm
C4 旋风筒	2-Φ 7200 mm
C5 旋风筒	2-Φ 7400 mm
C6 旋风筒	2-Φ 7400 mm
在线分解炉	Φ 7500mm×49000mm

第四代步进式高效篦冷机

第四代步进式高效篦冷机冷却的目的在于，回收熟料带走的余热，预热二次、三次空气，提高窑的热效率；迅速冷却熟料以改善熟料质量与易磨性；降低熟料温度，便于熟料的运输、贮存与粉磨。

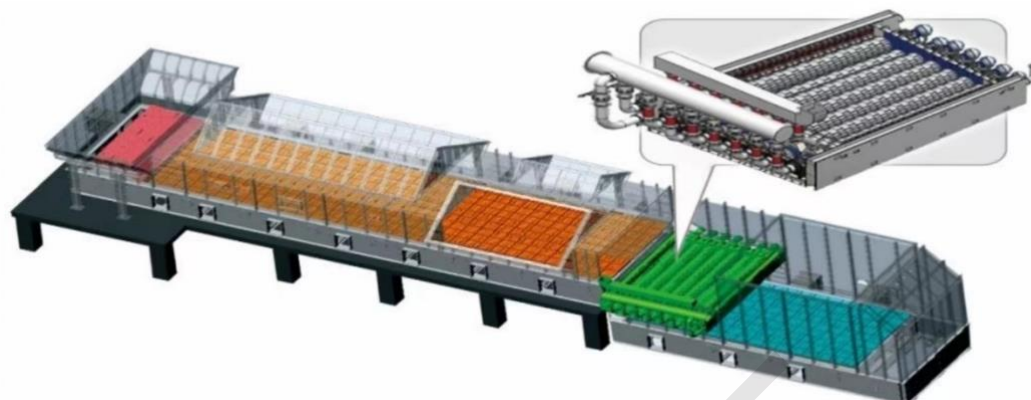


图 23 第四代步进式高效篦冷机各段篦室示意图

熟料的冷却并不是简单的温度降低，而是伴随着一系列的物理化学变化，如液相凝固、相变等；冷却的方法、速度不同，则发生的物理化学变化过程不一样，对熟料的质量、易磨性的影响也不一样。

在水泥生产中，一般均采用快冷，其作用有：

(1) 提高熟料质量。

- a. 快冷阻止或减少 β - C_2S 向 γ - C_2S ¹⁷转变，防止熟料粉化。
- b. 阻止或减少 $C_3S \rightarrow C_2S + f-CaO$ ¹⁸。

快速越过 C_3S 的分解温度，使 C_3S 来不及分解而呈介稳状态保存下来；

急冷使 C_3S 晶体细小，可提高熟料质量。

- c. 避免或减少 MgO 结晶成方镁石；冷却速度越慢，结晶越粗大，膨胀越大；即改善了水泥的安定性。
- d. 急冷使熟料中 C_3A 结晶体减少。可增强水泥的抗硫酸盐性能；另外，结晶型的 C_3A 水化后易使水泥浆快凝，而非结晶的 C_3A 水化后，不会使水泥浆快凝，因而容易掌握其凝结时间。

¹⁷ β -和 γ -指 C_2S 的两种不同晶型。

¹⁸ f- CaO 指游离氧化钙。

（2）改善熟料的易磨性

- a. 快冷熟料玻璃体含量高，同时造成熟料产生内应力，缺陷多，易破碎；
- b. 快冷使熟料矿物晶体保持细小，易磨。

（3）余热回收

熟料进入冷却机时尚有 1300℃ 以上高温，可用二、三次风来回收，有利窑内燃料煅烧，提高窑的热效率；同时能够保证入窑头锅炉气体温度，提高余热发电量。

高效低氮燃烧器

高效低氮燃烧器主要是由内部的旋流通道、中间的煤粉输煤流通道、外部的轴流通道等结构构成。



图 24 高效低氮燃烧器中煤粉的多种扰动混合

煤粉从多通道燃烧器喷出燃烧，除了空气输送煤粉本身即煤粉与风的预混合外，还要经过与直流风、旋流风、二次风之间的三次扰动、混合，这三次扰动与混合。这些扰动混合都是由于气流的速度、方向和压力的不同造成的，从而使风煤混合更均匀。二次空气的回流又及时补充煤粉燃烧所需要的新鲜空气，使煤粉完全燃烧。通过改变风机流量及内外流风的比例，就可以改变直流风与旋流风动量，从而达到调节火焰形状的目的。

高效低氮燃烧器通过精确结构参数，保证了端部出口的大推力、强涡流，既能使煤粉混合更加激烈，又能够有足够动量控制火焰的形状。

集成模块化窑衬节能技术

窑衬通常指耐火材料。在水泥行业，耐火站和浇注料的涂红部分都属于高温区域，均需要窑衬。

集成模块化窑衬节能技术主要用于烧成系统保温隔热，包括水泥预热器、分解炉、三次风管、窑头罩、篦冷机等。技术研发单位通过原位反应技术，开发以微气孔为主、气孔孔径可控的合成原料，以合成原料为基础，通过生产工艺控制，开发轻量化窑衬产品，在减轻材料重量的同时，提高了耐火材料强度、耐侵蚀性和抗热震性能，将轻量化耐火制品、纳米微孔绝热材料分层组合在一起，巧妙地利用不同材料的导热系数，将各层材料固化在其各自能够承受的温度范围内，保证使用效果和安全稳定性。

技术应用条件

以高效低压损的六级预热预分解系统、第四代行进稳流式篦式冷却机、高效低氮燃烧器以及高性能保温无铬温耐火材料技术装备等技术为代表的高能效烧成技术体系目前已被国内新建企业广泛采用。伴随着企业节能减排和“双碳”压力的与日俱增，还有部分企业也在推进技改。

上述单体技术均可以实现国产化，部分元器件需要国际引进。伴随着“一带一路”倡议的持续推进，中国也帮助带路沿线国家成功建设了数百条配套上述技术的生产线。

该系列技术不受季节/气候限制，但建设规模受产业政策和地方政府政策影响，并且与各地地方经济发展水平也存在较大相关性。

典型应用案例

案例一：高效低压损的六级预热预分解系统

山东某企业开展高效低压损的六级预热预分解系统改造，项目投资约 2000 万元。改造完成后烧成系统煤耗为吨熟料标煤耗 95kg，预热器系统单位熟料可节电 1.5 kWh/t，生产线年可节标煤 6200 吨。按年产 155 万吨熟料计算，该预热器系统年可节电 232.5 万 kWh；按电费 0.6 元/kWh 计算，每年可节约电费 139.5 万元；按每吨标煤 600 元估算，每年可节约煤炭费用 372 万元。共计可实现 511.5 万元/年的经济收益，投资回收期 3.9 年。

表 13 山东某企业高效低压损的六级预热预分解系统节能减排情况和经济效益

指标		改造前	改造后
年产量		155 万 tcl	
节煤	烧成系统煤耗	99 kgce/tcl*	95 kgce/tcl
	节煤量	N/A	6200 tce
	煤价	600 元/tce	

	节约煤炭费用	N/A	372 万元
节电	预热器电耗	N/A	减少 1.5 kWh/tcl
	节电量	N/A	232.5 万 kWh
	电价		0.6 元/kWh
	节约电费	N/A	139.5 万元
经济效益（节煤+节电）		N/A	511.5 万元/年
项目投资		2000 万元	
投资回收期		3.9 年	

*改造前烧成系统煤耗为根据节煤量推算的数据。

案例二：第四代步进式高效篦冷机

河北某企业烧成系统原使用推料棒式第四代篦冷机，热回收效率低、故障率高、熟料冷却电耗高、备品备件更换频繁；后将原篦冷机篦床、尾置锤式破碎机及两台冷却风机拆除，安装新型步进式第四代冷却机和尾置辊式破碎机，重新布置冷却风机及配套的工艺非标管道，安装液压传动系统。改造施工周期 1 个月，总投入 1140 万元，改造后的节能减排和经济效益如下。

改造完成后据电表统计，吨熟料工序电耗下降 2.57 kWh，每年可节电 370 万 kWh，折合标煤 1202.5 t；工序标煤耗下降 2.81 kg/tcl，每年可节约 5100 tce；余热发电年增加发电量 570 万 kWh，折合标煤 1852.5 t。综合年节约标煤 8155 t，年减排 CO₂ 2.26 万 t。该项目综合年效益合计为 571 万元，投资回收期约 2 年。

表 14 河北某企业第四代步进式高效篦冷机节能减排情况和经济效益

	指标	改造前	改造后
节煤	工序煤耗	N/A	减少 2.81 kgce/tcl
	节煤量	N/A	5100 tce
节电	工序电耗	N/A	减少 2.57 kWh/tcl
	节电量	N/A	370 万 kWh
余热发电	新增发电量	N/A	570 万 kWh
经济效益（节煤+节电+余热发电）		N/A	571 万元/年
项目投资		1140 万元	
投资回收期		2 年	

案例三：节能低氮燃烧器

某 5000 t/d 水泥窑燃烧器改造前后，窑台时产量同比提高 5 t/h，相当于单线每年多生产熟料约 4 万吨，实现净利润约 320 万元；熟料煤耗同比下降 2.5 kg/t，相当于每年节约用煤 4365 吨。按煤价 600 元/吨计算，每年节约资金 262 万元；熟料综合电耗同比下降 2.1 度/吨，每年节约电费约 83 万元。上述三项综合，日产 5000 吨的熟料生产线每年共计可节约资金 665 万元，节能及经济效益十分显著。

同时，使用低氮节煤燃烧器以后氮氧化物排放值下降至 318 mg/m³ 左右，脱硝效果也十分明显，可降低热力 NO₂ 排放约 20% 以上。

表 15 某水泥窑节能低氮燃烧器节能减排情况和经济效益

指标		改造前	改造后
产量		5000 tcl/d	单线增加 4 万 tcl/年
节煤	熟料煤耗	N/A	减少 2.5 kgce/tcl
	节煤量	N/A	4365 tce
	煤价	600 元/tce	
	节约煤炭费用	N/A	262 万元
节电	熟料综合电耗	N/A	(同比) 下降 2.1 kWh/tcl
	节约电费	N/A	83 万元
产能提升	窑台产量	N/A	提高 5 tcl/h
	单线产量	N/A	增加 4 万 tcl/年
	净利润	N/A	增加 320 万元
经济效益 (节煤+节电+产能提升)		N/A	665 万元/年

案例四：集成模块化窑衬节能技术

河南某公司 5000 t/d 水泥窑改造项目，全窑采用集成模块化窑衬节能技术改造，并对包括水泥预热器、分解炉、三次风管、窑头罩、篦冷机在内的水泥生产线其他部分采用集成模块化窑衬节能技术进行了系统改造，改造施工周期 8 个月，总投入 443 万元。

改造完成后，相比原来内衬总重量减轻 122 t 即 18.7%，过渡带和烧成带筒体温度下降 100~130℃，回转窑主机电流下降了 250~300 A，熟料综合电耗降低 1.5 kWh/t、标煤耗降低了 3 kg/t。

以年产 180 万吨水泥熟料产能计算，改造后每年可节约电费 175.5 万元、燃煤费 351 万元，年节约标煤 6318 吨，综合年节能效益 526.5 万元，投资回收期为 11 个月。

表 16 河南某公司集成模块化窑衬节能技术节能减排情况和经济效益

指标		改造前	改造后
年产量		180 万 tcl	
节煤	熟料煤耗	N/A	减少 3 kgce/tcl
	节煤量	N/A	6318 tce
	节约煤炭费用	N/A	351 万元
节电	熟料综合电耗	N/A	减少 1.5 kWh/tcl
	节约电费	N/A	175.5 万元
经济效益（节煤+节电）		N/A	526.5 万元/年
项目投资		443 万元	
投资回收期		11 个月	

推广示范意义

以高效低压损的六级预热预分解系统、第四代行进稳流式篦式冷却机、高效低氮燃烧器以及高性能保温无铬温耐火材料技术装备等技术为代表的高能效烧成技术体系目前已被国内新建企业广泛采用。对于既有项目节能改造，应视每家企业具体情况而定。

上述各项单体技术在具体的案例应用中均实现了较好的节能减排效果和经济效益，企业可以根据自身建设时期、设计理念等具体情况，在考虑投资收益的情况下，结合自身切实需求，选择其中的一项或多项技术进行新建或改造，在投入产出更为优化的情况下实现节能增效。

2. 熟料煅烧过程智能优化控制系统

技术简介

熟料煅烧作为水泥生产的主要耗煤环节，其部分关键工艺参数难以在线测量；生产条件变化频繁、原燃料波动、工况复杂多变，非线性、多变量强耦合导致优化控制异常困难。煅烧工况判别和过程控制主要依靠运行工程师凭经验知识处理，智能自动化水平较低，导致煅烧过程往往处于非优化运行状态，熟料生产难以稳定高效运行。

熟料煅烧过程智能优化控制系统围绕生产线相关信息及煅烧单元，从煅烧机理、参数检测、模型构建、工况识别等着手，根据多目标一体化优化的结果，分析各环节协同关系，集成模糊神经控制、预测控制、优化控制等技术，给出熟料煅烧智能控制技术。熟料煅烧优化系统方案面向水泥熟料煅烧过程，以稳定热工制度为核心，提出了关键工艺参数信息融合策略，发明了熟料烧成工况综合识别方法，设计了多模态智能控制器，保证了热工制度稳定，实现了水泥熟料的高质量、智能化生产。该系统的优化控制目标如下：

- 针对系统生产过程参数滞后大、非线性及时变性严重状况，通过大数据分析实现对各系统关键参数的相关性分析、关键参数的预测，并采用先进控制技术，控制主要工艺设备，达到更稳定的工况，提高水泥生产线运行的平稳性和安全性；
- 通过提高系统参量的控制精度、生产系统的稳定性与连续性，稳定及提高台时产量，稳定产品质量，降低质量的标准偏差；
- 实现水泥生产的智能优化操作，消除操作员思维差异导致的操作偏差及窑况波动，以保障生产指标的一致性；
- 实现智能稳定控制，实现操作人员劳动强度最小化的同时，降低单位产品能耗。

技术所属行业及生产环节

该技术主要适用于在水泥生产中的熟料煅烧工序（参见上文 1. 高能效烧成技术中对熟料煅烧工序的介绍），主要针对熟料煅烧全过程的高效运行进行总体优化，从而实现熟料煅烧过程的节能减排。

技术原理

熟料烧成工况复杂多变，并导致其生产过程表现出强非线性特点。对此，熟料煅烧优化系统利用软测量技术在线预测关键质量参数，结合基础自动化和化验室数据构建专家系统，准确辨识煅烧工况。在此基础上，该系统采用智能搜索策略确定分解炉温度、烧成带温度、篦冷机压力等关键参数的优化设定值。窑专家智能优化控制系统¹⁹组织机制如图所示：

¹⁹ “专家智能优化控制系统”由针对生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨三个工序的智能控制系统组成，其中熟料煅烧工序简称“窑工序”，因此针对熟料煅烧的专家智能优化控制系统又称“窑专家智能优化控制系统”。

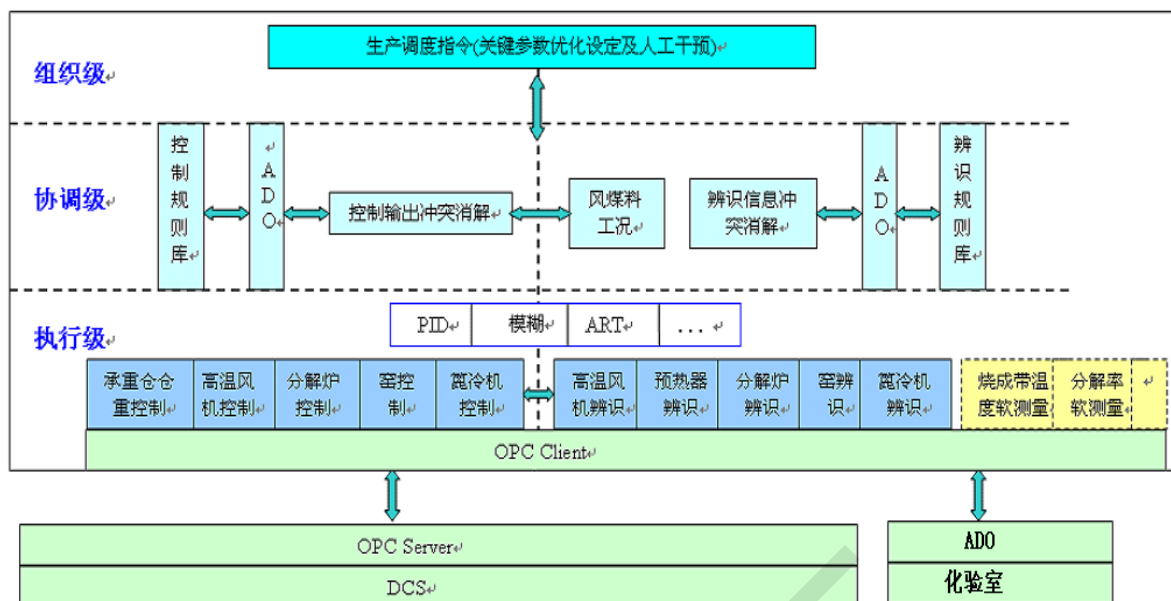


图 25 窑专家智能控制系统组织机制

该系统的控制因子参照因素包括：

高温风机控制

高温风机控制目的为稳定系统风量，保证系统含氧量在最佳区间。

参考因素：预热器出口温度、预热器出口压力、高温风机出口压力、高温风机电流、CO 浓度、氧含量等。

小仓仓重控制

小仓仓重控制目的为稳定均化库底缓冲仓仓重，为生料入窑的稳定性提供保障。

参考因素：内部物料重量、生料喂料量等。

入窑生料喂料控制

入窑生料喂料控制目的为根据窑况及生料易烧性变化做好及时调整，以利于窑系统持续稳定运行。

参考因素：提升机电流、系统温度、含氧量、熟料质量等。

尾煤²⁰控制

²⁰ 水泥窑用煤分为头煤和尾煤。头煤在窑头喷入，尾煤在分解炉喷入。

尾煤在窑尾分解炉喷入；对分解炉出口温度的控制，可以表征尾煤的燃烧情况。分解炉温度控制目的为稳定分解炉出口温度，使预分解有稳定的煅烧温度，为熟料质量以及系统稳定提供保障。

参考因素：分解炉出口温度、C5 下料管温度、生料喂料量、提升机电流、喷煤压力、三次风温、烟室温度等。

头煤控制

头煤控制目的为稳定烧成带温度、稳定窑电流，为熟料稳定性及合格率提供保障。

参考因素：入窑生料喂料量、窑电流、烧成系统温度、二次风温、烟室温度等。

窑速控制

窑速控制目的为根据系统喂料量变化及时调整窑速，遇到特殊工况如掉大窑皮、塌料等能及时调整，以预防窑况变差。

参考因素：窑主机电流、生料喂料量等。

篦速控制

篦冷机控制目的为稳定料层厚度，体现为篦冷机压力的波动状态。篦速控制使料层厚度均匀，在保证二次风温稳定的同时保证风量，为系统的热回收及熟料冷却提供保障；可使篦冷机压力波动范围减小 40%及以上。

参考因素：风室风压、窑电流、油压、二次风温、生料下料量等。

篦冷机风机风量控制

篦冷机风机风量控制目的为稳定篦冷机上风量，防止过高热损，利于系统供风量快速平衡。

参考因素：生料喂料量、风室压力、窑头罩压力、窑电流、熟料温度等。

窑头负压控制

窑头负压控制目的为稳定窑头罩压力，保证窑系统的通风量稳定。

参考因素：窑头罩压力、风室压力、头排风机电流等。

一次风机控制

一次风机控制目的为稳定一次风压，保证头煤送风稳定，为头煤燃烧提供较好的基础条件。

参考因素：一次风压、风机电流等。

脱硝系统 NO_x 控制

脱硝系统 NO_x 控制的主要目的为根据窑况变化实时调整氨水用量，提高 NO_x 控制精度，在确保不超标的同时，节省氨水用量。

参考因素：生料下料量、分解炉温度、头尾煤用量、烟室温度、一次风风量、二次风温、NO_x 浓度、氧含量等。

游离钙预测

游离钙预测的目的是提前预测游离钙的走势，为操作员及时调整控制指标的策略提供更多的参考依据，进一步提高熟料的合格率。

参考因素：入窑生料喂料量、预热系统温度、分解炉温度、C5 下料口温度、烟室温度、窑电流、系统用煤量、二次风温等。

技术应用条件

熟料煅烧过程智能优化控制系统目前已被国内多家企业投产使用。

该系统目前已经可以实现国产化，部分元器件需从国际引进。跨国公司占有一定份额的国内市场，国内技术供应商基于对本土市场的熟悉以及优质服务也占据了一定份额，并还在积极开发和拓展市场。

该系统的应用与全国各地政策扶持力度和地方经济发展水平存在较大相关性。

推广示范意义

如上文所述，西门子、史密斯和 ABB 等跨国公司占有一定份额的国内市场。国内技术供应商如各大水泥设计院、传统建材类的高校及部分建材服务公司也占有一定市场份额，并还在积极开发和拓展市场，其中部分国内企业曾因此在地方上获奖。但鉴于针对智能化技术节能效果的评估在现有体系下难以取得多方认可、达成一致意见，部分拟应用该系统的项目无疾而终。

随着近年来水泥行业节能减排压力日益加大，企业不得不寻求转型升级，并在近年来逐步开始主动采取措施，从单一技术节能，逐步向管理节能和系统节能迈进，为熟料煅烧过程智能优化控制系统这样的智能化控制系统发挥节能减排作用提供了更多的机遇。相信在不远的将来，该系统会在经历市场的角力平稳后，逐步受到市场的广泛认可和采用。

节能减排效应

窑专家优化智能控制系统的应用，提高了各控制因子的精度及可靠性，使系统运行更加稳定，从而有助于实现系统节能减排。以下展示部分控制效果：

(1) 小仓仓重



图 26 小仓仓重控制示例

系统原有 DCS 自动控制仓重，值域为 $[60, 70]$ ，波动幅度为 10 吨；现自动控制值域为 $[65, 70]$ ，波动幅度为 5 吨。现控制方式较之前波动范围减小约 50%。

(2) 尾煤

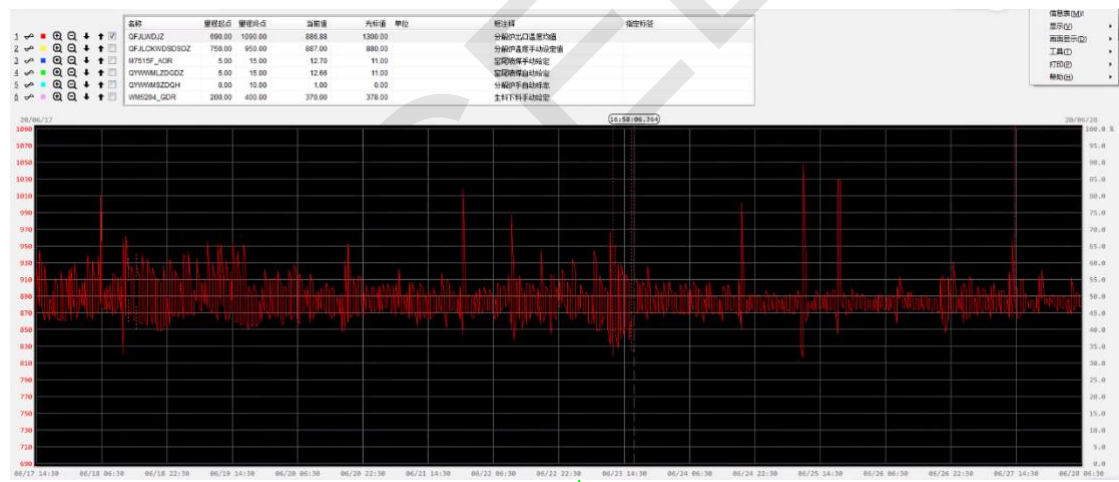


图 27 尾煤控制示例

尾煤手动控制模式下，分解炉温度值域大致为 $[860, 900]$ ，波动幅度约为 40 度；自动模式下，分解炉温度值域大致为 $[870, 890]$ ，波动幅度约为 20 度。自动控制较手动模式下，分解炉温度波动范围减小约 50%。

(3) 篦冷机

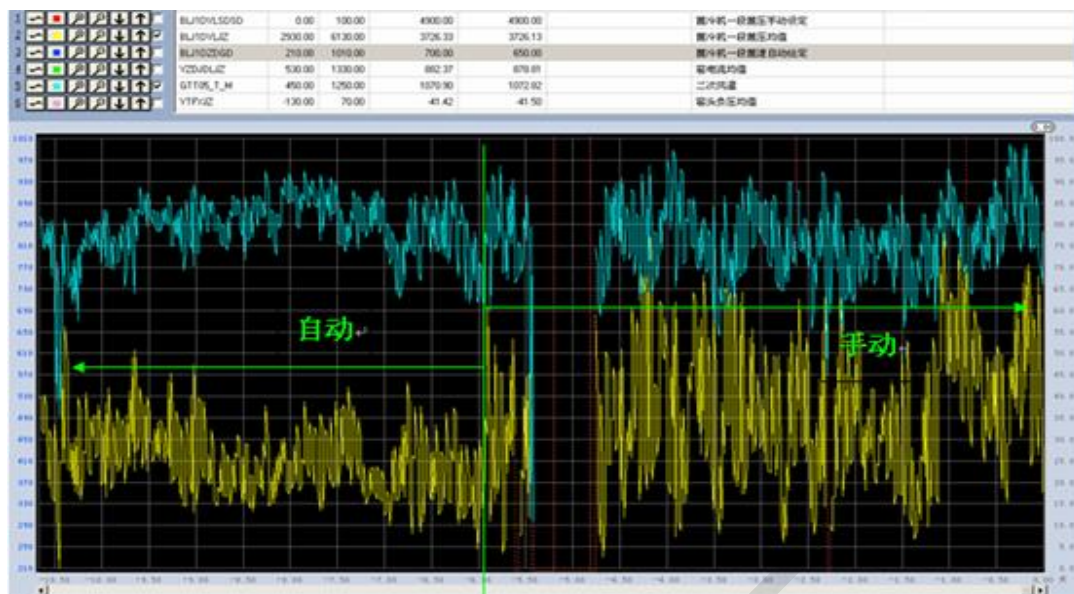


图 28 篦冷机篦速控制手自动对比

优化控制篦速能够稳定篦压，从而使二次风温稳定，进而使整个窑系统更加稳定。人工控制篦压的范围约在 3500-4400 pa（波动范围约 900 pa），自动控制篦压的范围约在 3700-4200（波动 500 pa）。人工控制下二次风温波动范围约为 1020-1120，自动控制下，二次风温波动范围约为 1080-1150。

(4) 窑头负压

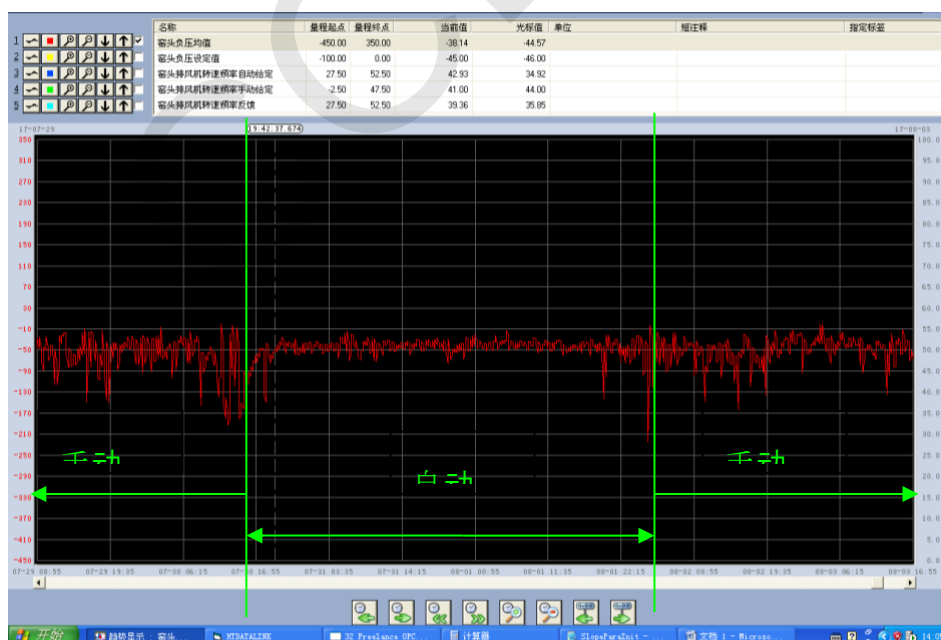


图 29 窑头负压手自动控制下对比曲线

图为窑头负压手自动控制下对比曲线，红色曲线为窑头负压趋势。自动控制下窑头负压波动约为正负 20 Pa；手动控制下窑头负压波动约为正负 40 Pa，波动范围减小约 50%。

(5) 头煤



图 30 头煤控制示例（窑电流）

由上图可以看出，头煤自动模式下，窑电流较手动模式更加平稳，侧面表明回转窑的煅烧状态较之前有所好转。

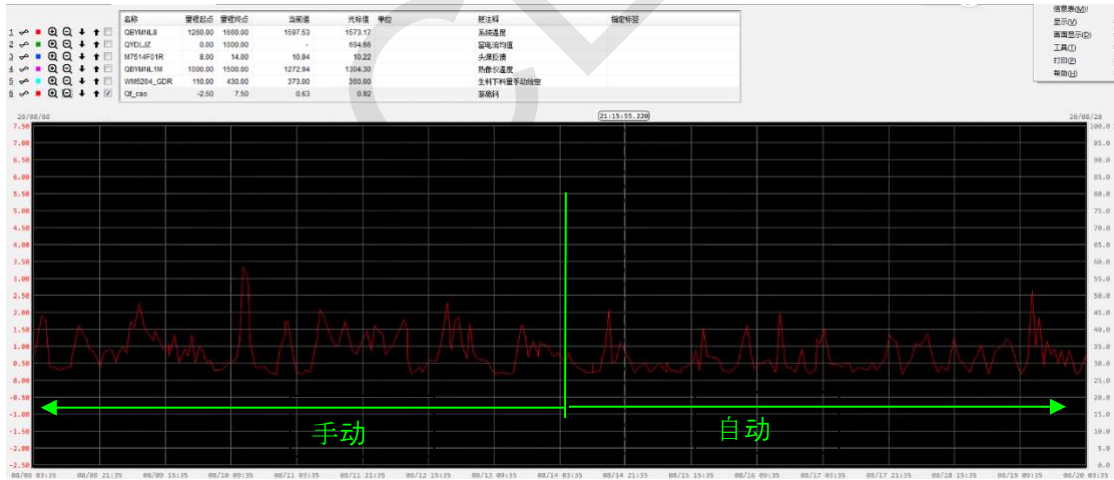


图 31 头煤控制示例（游离钙）

由以上两图的对比可以看出，在窑电流转为平稳状态下，熟料 f-CaO 的离散度减小，说明头煤自动控制的纳入有助于熟料质量的提升。

(7) 游离钙预测



图 32 游离钙预测示例

上图绿色曲线为游离钙走势预测，红色曲线为化验室游离钙实测值的输入值。化验室约在每小时的半点取样，整点左右报中控室输入；游离钙的预测值为每小时半点出结果，即化验室取样时游离钙预测出结果，可为中控操作人员及时调整指标做好准备。

因原料的化验室数据还未纳入大数据集中，目前游离钙的预测方式为两种：趋势预测和值预测。趋势预测根据系统温度、系统用煤量、系统喂料量来判断；值预测依据上个点化验室游离钙的数据，加减游离钙预测值的偏差给出。若后续生料化验室数据可获取，这两种预测模式的精确度与可靠性有望进一步提高。

(8) 煤磨温度控制

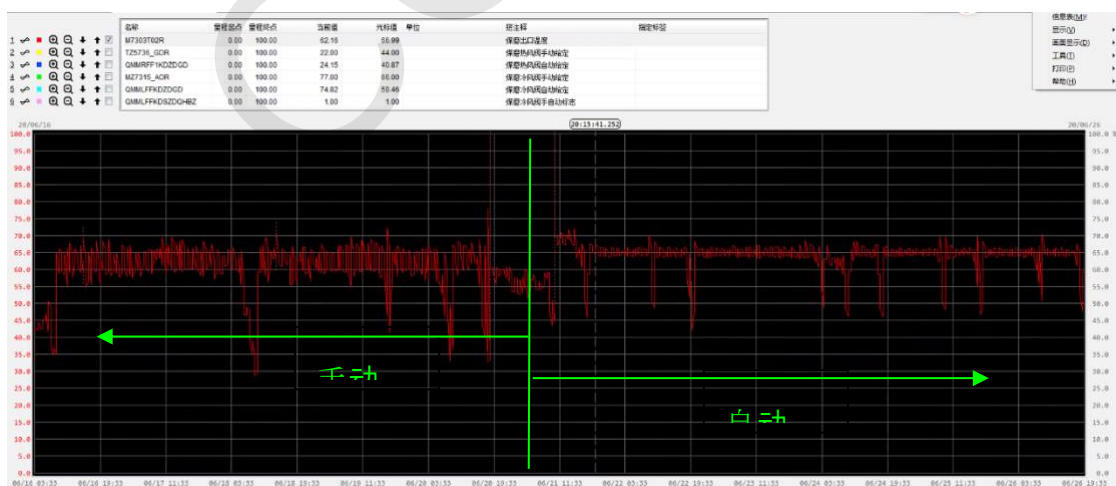


图 33 煤磨温度控制示例

手动模式下，煤磨出口温度阈值大致为[58, 68]，波动范围约为 10℃；自动模式下煤磨出口温度阈值大致为[63, 66]，波动范围约为 3℃。自动控制较手动模式下，煤磨出口温度波动范围约减小 70%。

经济效益

调研发现，国内应用熟料煅烧过程智能优化控制系统的水泥生产项目，单个项目总投资投入约为 800~1600 万元，熟料煅烧工序标煤耗下降约 2~4 kg/tcl，综合年节约标煤约 3000 t，年减排 CO₂ 8314 t，综合年效益合计约为 540 万元，投资回收期约 2~3 年。

3. 辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术

技术简介

目前在我国的水泥粉磨领域，采用水泥辊压机与球磨机配套组成的联合粉磨系统已经成为主流；而随着辊压机装备技术的不断成熟以及工艺系统的不断创新，作为水泥预粉磨装备的辊压机大型化已成发展趋势，形成了大辊压机配小磨机、大辊压机配大磨机等多种配置形式。

目前国内采用大辊压机的水泥联合粉磨系统，其粉磨工序电耗（针对 P·042.5R 水泥，下同）大都在 30-32 kWh/t；近年来兴起的水泥辊压机半终粉磨系统，由于会从辊压机系统中选出一部分成品，较联合粉磨系统而言，产量得到了相应的提升，因此其粉磨工序电耗一般在 27-30 kWh/t，个别先进指标可达到 25 kWh/t 左右。但水泥半终粉磨系统，是将辊压机预粉磨系统产生的符合水泥细度要求的细粉提前选出，直接加入到成品中，虽能起到提产降耗作用，但由于辊压机直接选出成品的颗粒形貌、级配及颗粒内部特性（微裂纹等）等因素，导致其水泥产品需水量偏高。因此，在国内大部分水泥半终粉磨生产线中，生产复合硅酸盐水泥（P·C）品种时多使用半终粉磨系统，而在生产普通硅酸盐水泥（P·O）时则切换为联合粉磨系统。

技术所属行业及生产环节

该技术主要适用于水泥生产中的水泥粉磨工序。水泥粉磨是水泥生产中的主要耗电环节，占水泥行业综合电耗约 60%，降低水泥粉磨电耗一直是水泥行业技术人员研究的重要课题。辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术主要针对水泥粉磨的电力消耗产生影响。

技术原理

水泥辊压机与球磨机联合粉磨系统是指，经辊压机辊压后的物料，通过风选设备分成粗、细两部分，细的部分进入球磨机继续粉磨至成品，粗的部分返回辊压机被再

次辊压。该联合粉磨系统下，由于水泥成品全部经过球磨机粉磨，成品粒度分布较宽，水泥性能稳定。

采用水泥辊压机配套球磨机形成的水泥联合粉磨系统，既充分发挥了辊压机高效粉磨的优势，又保留了球磨机对成品水泥性能控制与优化。而对系统设计选型及设备的精心优化，创造了水泥辊压机联合粉磨系统电耗的新低。

为充分考虑未来产品品种和性能，该系统还设计了多种粉磨工艺可切换的工艺系统，供水泥企业根据物料的易磨性指数和成品所需性能来进行选取，包括双圈流联合粉磨系统、双圈流半终粉磨系统、单圈流联合粉磨系统（球磨机开路）以及单圈流半终粉磨系统（球磨机开路）。辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨系统工艺流程如图所示。

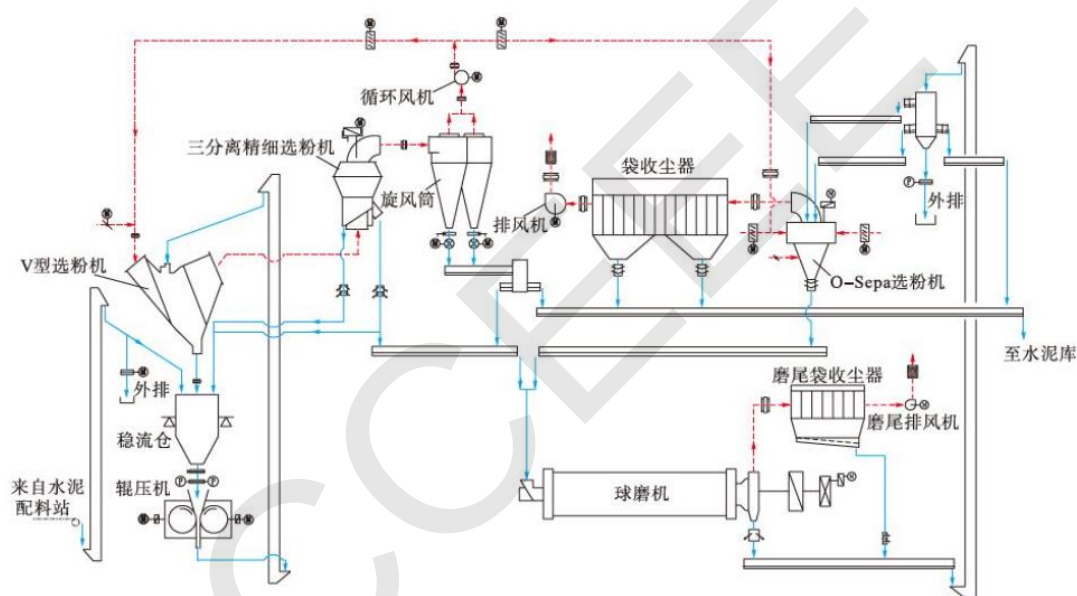


图 34 辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨系统工艺流程

辊压机

辊压机应结合项目方提出的产量指标，综合考虑球磨机的规格，在辊压机的选型上选择大辊压机，加大预粉磨装备的型号规格，以期在粉磨过程中，增加辊压机的吸收功率。此外，应适当增加辊压机的实际操作投影压力，以增加辊压机的粉磨效率。辊压机的实际运行投影压力较目前大多数水泥辊压机高，且实现了高效挤压。

球磨机

为了延长物料在球磨机内的研磨时间，延长物料在磨内停留时间，应提高进出球磨机物料的比表面积增加值，从而降低球磨机系统的循环负荷，使选粉机的处理量降

低，在相同的选粉用风风量下，降低选粉的喂料浓度，优化选粉机的工况，提高选粉效率。

在球磨机磨内结构优化上，该系统采用防堵型、中心料风分离及物料流速可调的隔仓板，其主要特点是：

- 隔仓板的篅缝采用线切割工艺及低磨损材质，加工精度高，磨损小，篅缝不变形，研磨体不易堵塞篅缝；
- 强制过料型隔仓板，物料从隔仓板的下沿出料孔卸料至二仓，避免了常规的从上沿出料孔出料导致物料被中心风带走而造成的“吹料”现象，有效地将研磨长度最大化；
- 隔仓板的物料通道装置可以调节，实现对物料流速的控制与调节。

此外，由于球磨机前配置了大型的预粉磨设备，入球磨机的物料细度大幅降低，研磨体平均球径减小。因此，该系统在磨内结构件的设计上，采用减薄型的磨内衬板和活化装置，在减轻衬板和活化装置重量、降低磨机基础功耗的同时，增加了球磨机的有效容积。

选粉系统

在预粉磨选粉系统的选型优化上，应按照辊压机通过量与选粉机的喂料浓度进行选型。V 型选粉机的分选效率与喂料浓度、喂料均匀性相关，对具有一定喂料浓度的 V 型选粉机，其喂料均匀程度对选粉效率影响较大。在设计时，通常将 V 型选粉机的进料口划分为三部分，进料溜子设计成 3 个，实现物料分区域进料，避免了物料进 V 型选粉机时集中在某一个区域，提高料幕的均匀性。

技术应用条件

目前，辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术已在国内多家企业投产使用。

从该技术的供应角度来说，前期一些跨国公司占得先机，德国的洪堡和丹麦的史密斯等跨国公司占有一定份额的国内市场。但近 10 余年，我国合肥水泥设计院磨机异军突起，受到国内水泥行业的青睐，占据了国内该领域的大部分市场，也出口到海外很多国家；随着合肥水泥设计院的技术力量逐步升级，该技术的本土化程度日益提升。

该联合粉磨系统的应用不受季节和气候限制。

推广示范意义

辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨技术在 2011 年获得国家科学技术进步二等奖，也入选了工信部推荐目录。

该项技术的持续推进应用，势必会降低水泥制造过程中、尤其是水泥粉磨环节的电力消耗；同时随着水泥颗粒形貌、级配及颗粒内部特性等方面的进一步优化，该技术对提高水泥中混合材掺量也有助力效果。

节能减排效应和经济效益

对比国内几个典型辊压机水泥粉磨系统的装备配置和生产指标发现，根据使用原材料配比及易磨性、生产工艺（联合粉磨系统或半终粉磨系统）以及装备选型配置等的不同，水泥粉磨电耗和水泥产品的性能具有较大的差异。但总体上，水泥辊压机联合粉磨系统的粉磨电耗在 30~32 kWh/t 范围内，水泥产品需水量较低；采用水泥辊压机半终粉磨系统的粉磨电耗为 25~30 kWh/t，但水泥产品的需水量偏高。

而辊压机+V 选粉机+球磨机联合粉磨系统通过在装备及工艺方面的优化设计，在水泥粉磨电耗和水泥需水量等方面均能够取得较好的技术指标。经调研，应用该技术的生产线粉磨工序电耗可低至 23.6 kWh/t，低于国内的水泥辊压机联合粉磨和半终粉磨系统。

经调研，国内此类技术实施项目，单个项目总投资投入约为 980 万元，水泥制备工序电耗下降 3~5 kWh/tcl，综合年节约电力约 1000 万 kWh，年减排 CO₂ 约 8314 t，综合年效益合计约为 500 万元，投资回收期约 2 年。

四、国内外节能低碳技术清单

本报告经过对国际能源署（IEA）《能源技术展望 2020 清洁能源技术指南》、世界自然基金会（WWF）《气候创行者创新方案》、国家发展和改革委员会《国家重点节能低碳技术推广目录》（原《国家重点节能技术推广目录》）、国家工业和信息化部《国家工业节能技术装备推荐目录》等 20 个国内外主要节能低碳技术清单和目录历年发布的技术，以及其他公开、可靠信息的深入梳理，整理遴选出适用于中国水泥行业在“双碳”目标下进行绿色低碳发展的国内外节能低碳技术共 37 项，包括熟料煅烧环节 23 项，（生料、煤、水泥）粉磨环节共 11 项，能源管理等综合技术共 3 项。

参考上述 20 个国内外主要节能低碳技术清单和目录总体思路和框架结构，结合“双碳”目标下水泥行业技术节能减排的实际需求，本报告将上述 37 项水泥行业节能低碳技术按照如下框架进行分类归纳整理（表 17），并独创性地增加“适用阶段”和“国际化”两项参数。

其中“技术内容”对技术基本原理进行简要介绍；“适用行业”和“适用范围”分别为技术划定适用行业和在行业价值链中所处的具体环节；“功能”指技术通过何种方式实现节能减排，如设备提效、工艺改进等；“节能减排效应”和“经济效益”

分别对技术的节能减排效果和成本效益等经济性信息进行描述，采取定量（如有）和定性相结合、项目层面和全国层面（如有）相结合的方式；“成熟度”指技术在我国的发展阶段和应用准备，包括概念、初试、中试、终试、试点应用、市场应用等；“适用阶段”是本报告基于技术目前发展情况，分析评估得出的技术在水泥行业实现“双碳”目标进程中的适用阶段，包括达峰（行业碳达峰）、中和（行业碳中和）和过渡（行业达峰后、中和前）；“国际化”用于描述技术的自主研发、引进或“走出去”情况，包括国外应用（国外研发但尚未引进）、国外引进（国外研发并引进应用）、本土应用（本土研发但尚未输出海外）、国际输出（本土研发并输出海外）；“政策认可”主要展示技术被国家或地方技术目录及相关政策文件收录或鼓励应用，以及获得国家或地方政府奖项认可的情况。

表 17 水泥行业国内外节能低碳技术清单

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
1	外循环生料立磨节能技术	该技术采用外循环立磨系统工艺，将立磨的研磨和分选功能分开，物料在外循环立磨中经过研磨后全部排到磨机外，经过提升机进入组合式选粉机进行分选，分选后的成品进入旋风收尘器收集、粗颗粒物料回到立磨进行再次研磨。 所有的物料均通过机械提升，能源利用效率大幅提升，系统气体阻力降低 5000 Pa，降低了通风能耗和电耗，能源利用效率大幅提升。	水泥	粉磨（生料）	工艺改进	湖北某水泥有限公司改造项目，系统产量提升约 10%，系统电耗降低 4.47 kWh/t，年节约电量约 756 万 kWh，折合年节约标煤 2457 t，减排二氧化碳 6812 t/a。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》
2	生料辊压机终粉磨技术	辊压机终粉磨属于“料床粉碎”的粉磨设备，该技术采用辊压机高压挤压粉碎料层，提高粉磨效率，相比立磨粉末系统更加节电。	水泥	粉磨（生料）	设备提效	该技术相对立磨系统平均降低电耗 5 kWh/t 左右。	山东某公司辊压机生料终粉磨系统，按照全年生产 200 万吨熟料，采用该工艺相对立磨系统而言平均降低电耗	市场应用	达峰	国际引进	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
							5 kWh/t 左右，年可节电 1500 万 kWh，以电价 0.60 元/kWh，节电效益达 900 万元。				
3	生料粉磨效率优化控制系统	该系统基于智能控制算法设计控制器，通过在线自适应调节喂料量、喷水量实现生料立磨稳定运行，保证生料粒度合格，提高粉磨效率，降低电耗。	水泥	粉磨（生料）	智能化生产控制	该系统已在多家企业应用，投运率 90%以上，台时产量增加 1%~3%，生料粉磨电耗降低 2%~5%。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A
4	生料成分动态监测与智能控制系统	该系统根据生料制备的控制要求，以生料质量稳定优化控制和节能降耗为目标，借助近红外光谱分析仪实现生料成分的在线检测，提出基于矩阵半张量积的规则剔除方法实现专家知识库优化。该系统研发多模态智能控制技术实现水泥生料质量的稳	水泥	粉磨（生料）	智能化生产	山东某水泥厂二线采用该系统，与该厂一线（未使用该系统）进行比较，在熟料立升重方面，二线比一线标准差低 0.02，合格率高 6.02%，在熟料饱和比方	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		定优化控制，实现了生料成分实时、安全、可靠在线检测，运行状态的准确辨识，知识经验自动优化生料制备优化运行。			控制	面，二线比一线标准差低0.005，合格率高0.94%。					
5	水泥窑大温差交叉料流预热预分解系统	该系统根据预热器系统废气和物料温度不同的特点，通过旋风筒下料管对物料进行再分配，形成比原换热单元更大的气固温差，实现大温差高效换热。 同时，分解炉采用多次料气喷旋叠加和出料再循环技术，提高煤粉燃烧和生料分解效能，提升预热预分解系统整体效率。	水泥	熟料煅烧	工艺改进	甘肃某公司2000 t/d熟料生产线节能改造项目，技术改造后，熟料产量提高了398 t/d；熟料强度增加4.5 MPa；标准煤耗降低了20.1 kgce/t，综合电耗降低了4.6 kWh/t，年可节约标煤7891 t。	甘肃某公司2000 t/d熟料生产线节能改造项目，投资回收期约8个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2018）》
6	带分级燃烧的高效低阻预热器系统	该系统通过窑尾烟气在预热器系统对生料进行换热预热，在分解炉对预热后的生料进行碳酸钙分解，减轻回转窑负担，提高系统产量；通过撒料台、预热器结构优化设计，提高预热器换热效率，降低预热器	水泥	熟料煅烧	工艺改进	山东某公司5000 t/d新型干法水泥工程，应用该系统，生产线可节约标煤4 kg/t，预热器系统可节电1.5 kWh/t。按年产155万吨熟料	山东某公司5000 t/d新型干法水泥工程，按年产155万吨熟料，标煤600元/t、电价	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2019）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		阻力；通过多级换热，提高热回收效率；通过分解炉分级燃烧技术设计，降低窑尾烟气氮氧化物排放；通过集成创新，实现物料分散、气流速度降低、多级预热、分级燃烧，实现预热器系统的高效低阻，进而降低熟料烧成系统煤耗与电耗。				计算，生产线年可节约标煤 6200 t，预热器系统年可节电 232.5 万 kWh。	0.6 元/kWh 计算，生产线年可节约标煤 6200 t，节约煤炭费用 372 万元，预热器系统年可节电 232.5 万 kWh，可节约电费 139.5 万元，整体可实现 511.5 万元的经济收益。该项目投资约 2000 万元，投资回收期 3.9 年。				

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
7	高固气比水泥悬浮预热分解技术	该技术的核心是通过增加物料换热器和反应器中的固气比，强化气、固两相的换热传质和反应，使换热器和反应器的效率大大提高，达到提高系统热效率、增强系统热稳定性的效果。 该技术将预热器的系统设置为 2-2-2-2-1 组合式五级旋风预热器的多级串联，出五级旋风筒的气体均等地通过平行设置的双系列各级预热器，而全部粉体从一个系列到另一个系列交替逐级喂入各预热器，各旋风预热器内的固气比提高到2.0左右，从而大幅提高预热器系统的换热效率，降低出预热器的废气温度。换热后的烟气温度可降至 260℃左右，由高温风机抽出，送至原料制备车间，用作原料烘干热源。	水泥	熟料煅烧	工艺改进	陕西某公司高固气比水泥熟料生产线（2500 t/d 级），每年可节能 19500 tce，年碳减排能力 48000 tCO₂。 目前该技术可实现节能量 18 万 tce/a，减排约 48 万 tCO₂/a。预计未来 5 年，该技术在行业内的推广比例可达到 5%，投资总额 55 万元，节能能力 90 万 tce/a，减排能力 238 万 tCO₂/a。（以 2017 年为始）	陕西某公司高固气比水泥熟料生产线（2500 t/d 级），建设投资额 3500 万元，建设期 1 年，投资回收期约 1 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
8	水泥熟料烧成系统优化技术	水泥熟料烧成系统优化技术是一系列单体技术的集合，通过提高预热器、冷却机的换热效率和分解炉、回转窑内煤粉的燃烧效率以及降低废气、熟料带出热量来降低熟料烧成热耗。 该系列技术主要针对预分解系统、冷却机、燃烧器以及配套工艺进行研究：优化设计预热器、分解炉的结构；优化配置旋风筒、分解炉、换热管道系统，改善了燃烧及换热状况，改进了撒料装置和锁风阀，提高了换热效率，采用高效冷却机，提高了熟料冷却效率；利用旋喷结合、二次喷腾的分解炉技术，提高了分解炉容积利用率，使炉内燃烧更充分，物料分解更完全。	水泥	熟料煅烧	工艺改进	陕西某公司 5000 t/d 新型干法水泥生产线新建项目，每年可节能 41468 tce，减排 107816 tCO₂。 预计未来 5 年，该技术在水泥行业的推广比例将达到 30%，形成的年节能能力约为 240 万 tce，年碳减排能力约 630 万 tCO₂。（以 2017 年为始）	陕西某公司 5000 t/d 新型干法水泥生产线新建项目，节能技改投资额 1200 万元（增量投资），建设期 18 个月，年节能经济效益 1500 万元，投资回收期约 10 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
9	高能效烧成技术 (高效烧成系统改造)	高能效烧成技术是一系列单体技术的集合，关键包括新型高效低压损的五级预热预分解系统、第四代行进稳流式篦式冷却机、高效低氮燃烧器以及高性能保温无铬温耐火材料技术装备等。 该技术通过提高预热器系统的换热效果，大幅度降低预热器出口废气温度以降低熟料烧成热耗；同时分解炉采用分级燃烧技术，可大幅度降低水泥熟料生产过程中的NO_x排放浓度，大大降低水泥窑尾烟气脱硝装置（SNCR）的脱硝成本；采用第四代高效熟料冷却技术装备，可大幅度提高冷却机的热回收效率和熟料冷却效率，大大降低了熟料烧成热耗。另一方面，采用节能环保高效换热系统和高效熟料冷却和热回收等技术装备，也可以大幅度降低熟料煅烧过程的电耗。	水泥	熟料煅烧	工艺改进	以河北某公司日产 5500 t 水泥熟料生产线为例，熟料烧成热耗可降低 4 kgce/t 以上，熟料烧成系统电耗降低约 3 kWh/t，按每年运转 320 天考虑，则年节约标煤 8730 t，减排 24000 tCO ₂ 。	采用该技术其单位投资（以日产 5000 t 熟料线为例）约为 4500 万元/条，投资回收期约 1.5 年。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
10	水泥窑富氧燃烧技术	该技术采用变压吸附制氧工艺，制成氧含量在 30%~40%左右的富氧空气，通过水泥窑头和分解炉进入窑炉进行辅助燃烧，同时在生产中根据实际工况情况，可调整使用不同含氧浓度的富氧空气进行助燃。 该技术有效改善回转窑、分解炉内燃烧工况，提高燃料的燃烧效率、燃尽率及窑炉内温度，减少预热器结皮，稳定系统工况，有效提高水泥窑的产量和质量，达到节能降耗的目的。同时，该技术还能有效提高二次风温，增加余热锅炉发电量，还能充分利用低热值的劣质煤或无烟煤，也适用于水泥窑协同处置废弃物。	水泥	熟料煅烧	工艺改进	该技术可实现煤耗降低 5%以上，二氧化碳、氮氧化物及烟气排放量降低 5%以上。 辽宁某公司 4000 t/d 熟料线，富氧投入后降低实物煤耗 10.90 kg/t，下降幅度 7.85%；电耗降低 3.23 kWh/t，下降 4.2%；余热发电量提高 4.61 kWh/t，增加 14.7%。	该技术可实现产量提高 10%以上，熟料强度提高 1 MPa 以上，企业综合效益可提高 5 元/t 以上。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
11	新型水泥熟料冷却技术及装备	该技术是一系列单体技术的集合，包括新型前吹高效篦板、高效急冷斜坡、高温区细分供风、新型高温耐磨材料、智能化“自动驾驶”、新型流量调节阀等技术。 高温熟料通过风冷可实现对熟料的冷却并完成热量的交换和回收，中置辊式破碎机将熟料破碎至<25mm 粒度，同时步进式结构的篦床将熟料输送至下一道工序，热回收效率高、输送运转率高、磨损低，可有效降低电耗。	水泥	熟料煅烧	工艺改进 设备提效 智能化	河北某公司篦冷机改造项目，吨熟料工序电耗下降 2.57 kWh，每年可节电 370 万 kWh，折合标煤 1202.5 t；工序标煤耗下降 2.81 kg/tcl，每年可节约 5100 tce，余热发电年增加发电量 570 万 kWh，折合标煤 1852.5 t。综合年节约标煤 8155 t，减排二氧化碳 2.26 万 t/a。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》
12	稳流步进式熟料冷却机技术	该技术主要用于对熟料进行冷却和输送，采用液压模块传动，利用冷风和熟料进行热交换，同时设备可将熟料所含热量回收，用于辅助上一工序的熟料煅烧，有效提升熟料冷却效率，并提高热回收效率实现节能降耗。 技术关键包括冷却风流量自动控制调节	水泥	熟料煅烧	设备提效	较之第三代篦冷机有明显进步，可使水泥熟料的热耗下降 10%~18%，电耗降低 20%，土建投资节省 25%，维修费用节省 70%~80%，节能效益显著。 预计 2015 年可在行业推广到	河北某公司节能技改投资额约 1000 万元，建设期 3 个月。年节能 5330 tce，年节能经济效益约 370 万元，投资回收期 3 年。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能技术推广目录（第二批）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		阀、冷却设备篦床的运动支撑装置、标准化模块设计、步进式行走篦床、一种冷却设备篦床的在线检修装置和颗粒物料均匀卸料装置。				42 % ~ 45 % , 形成约 90 tce/a 的节能能力。					
13	高效低氮燃烧器技术	该技术采用新型窑头煤粉燃烧器,减少一次供风量,将传统燃烧器的“大推力”的用风特点改为“相对高动量”的原理,利用“高风速、低风量”来抑制氮氧化合物的生成,有效提高窑头煤粉燃烧效率。	水泥	熟料煅烧	设备提效	技术改造后,熟料煤耗同比下降 2.5 kg/t,综合电耗同比下降 2.1 kWh/t,可降低热力 NO ₂ 排放约 20%以上。	以某水泥有限公司 5000 t/d 新型干法水泥生产线为例,改造前后,窑台时产量同比提高 5 t/h,相当于单线每年多生产熟料约 4 万吨,实现净利润约 320 万元;熟料煤耗同比下降 2.5 kg/t,相当于每年节约用煤 4365	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
							吨，煤价按 600 元/吨计算，则每年节约资金 262 万元；熟料综合电耗同比下降 2.1 度/吨，则每年节约电费约 83 万元，三项综合每年可节约资金 665 万元，节能及经济效益十分显著。				
14	水泥窑无铬耐火材料综合保温技术	该技术实现水泥窑系统耐火保温材料无铬化，去除六价铬对环境的污染；同时提升窑系统隔热保温性能，有效降低散热损失，提高窑系统能效水平，实现节能减排。	水泥	熟料煅烧	设备提效	提高窑保温性能，降低热损失，提高热效率，从而有助于节能减排；同时新型无铬化材料可避免铬对环境的污染。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
15	水泥窑用系列低导热莫来石砖	该技术采用锆莫来石砖、莫来石砖和单晶相莫来石砖代替硅莫砖、硅莫红砖以及镁铝尖晶石砖，应用于水泥窑过渡带、预热带、安全带等区域，克服了多层复合结构缺陷，降低了筒体温度 50℃以上，降低了筒体载荷 10%，提高了能源利用效率及水泥窑运行安全性。	水泥	熟料煅烧	设备提效	甘肃某公司采用低导热多层复合莫来石砖替代硅莫砖，实现筒体表面温度降低 50-80℃，年节省原煤约 1336 t，可减少二氧化碳排放约 2700 t，二氧化硫约 14.2 t，氮氧化物约 6 t。未来三年预计推广比例 5%，节能能力1.5万 tce/a。（以2021 年为始）	甘肃某公司采用低导热多层复合莫来石砖替代硅莫砖，年节省原煤约 1336 t，按煤价 540 元/吨计算，年节约费用约 72.14 万元。	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术推荐目录（2021）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
16	大推力多通道燃烧节能技术	该技术采用大推力多通道燃烧器，该燃烧器是由内部的旋流通道、中间的煤流通道、外部的轴流通道以及最外部的冷却风通道构成。煤粉从多通道燃烧器喷出燃烧，除空气输送煤粉本身就是煤粉与风的预混合外，还要经过多次扰动、混合。外部的轴流风通道将高压空气从通道中送出，使局部的出口空气风速接近风速，在如此高速气流的卷吸作用下，大量二次风进入燃烧区域，极大地提高了煤粉的燃烧速度和温度。在较小的一次风量条件下获得更高的火焰温度，从而达到节能降耗的目的，同时对不同煤质的适应性也大大提升，能使用 4200 kcal/kg 的低热值无烟煤。另一方面在轴流风外侧布置冷却风道对设备运行进行技术保护，延长设备使用寿命。	水泥	熟料煅烧	设备提效	该燃烧器与目前国内一般的燃烧器相比，吨熟料烧成热耗降低 3.5 kgce 以上，可实现节能 23 万 tce/a，减排约 61 万 tCO ₂ /a。 河北某公司 5500 t/d 水泥生产线，改造后熟料产量由 5700 t/d 提高到 6150 t/d，吨熟料热耗降低 3.6 kgce。预计 5 年内该技术可在行业推广到 40%，形成约 45 万 tce/a 的节能能力，减排能力约 119 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）	河北某公司 5500 t/d 水泥生产线，节能技改投资额约 120 万元，建设期 6 天，年节能 6160 tce，年节能经济效益约 620 万元，投资回收期 2.3 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
17	带中段辊破的列进式冷却机	该设备采用区域供风急冷技术并在冷却机中段设置了高温辊式破碎机，经过辊式破碎机，大块红料得到充分破碎，落入到第二段篦床的大部分熟料颗粒已经基本控制在 25mm 以下，经过第二段篦床的再次冷却后，以较低的温度排出，热回收效率高，可降低烧成系统热耗，平均节约标煤 2 kg/t 熟料。	水泥	熟料煅烧	设备提效	山东某公司 5000 t/d 新型干法水泥工程项目，年节约标煤 4108 t，减排二氧化碳 1.14 万 t/a。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》
18	水泥窑协同处置固体废物技术	该技术首先对固体废物进行分析检测，再根据固体废物的检测数据及状态，对多种类、成分复杂固体废物进行筛分、破碎、以及混合配伍等预处理，从而生产出大批量的、性质稳定的、可满足水泥厂使用的替代原料和替代燃料。将预处理后的替代原料和替代燃料通过水泥窑的高温焚烧及水熟料矿物化高温烧结过程，实现固体废物中的有机物彻底焚烧分解、重金属固化在水泥熟料晶格中、有效成分（硅、铝、	水泥	熟料煅烧	燃料替代	通过该技术，水泥窑协同处置 1 t 替代燃料，可减少焚烧处置 1 t 危险废物，减少 0.2 t 的飞灰和 0.22 t 的炉渣产生，总计减少 0.42 t 安全填埋场填埋量，并节省水泥厂煤 0.23 t 的使用量；协同处置 1 t 替代原料，减少 1 t 安全填埋场填埋量，并减少水泥厂矿山资源（硅石	利用新建或已建水泥生产线协同处置垃圾，其投资比建一套同等处理规模的垃圾焚烧发电厂投资低约 1/3-1/4。 安徽某公司垃圾处置项目，项目工程总投资 1.6 亿元左	市场应用	过渡	本土应用	《辽宁省重点节能减排技术目录（增补）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		钙、铁等）制成水泥熟料产品等目的的固体废物处置技术手段，从而解决了大宗工业固体废物无法稳定、规模化水泥窑协同处置的行业难题。				粉）的使用量 0.6 t。 目前，本技术在辽宁省本行业的推广比例约为 10%。预计到 2025 年底，本技术在辽宁省的推广比例可达 20%，总投入约为 8000 万元，年削减污泥 7 万 t，废催化剂 20 万 t，废油漆渣 3 万 t。（以 2020 年为始）	右，每吨垃圾处理总成本约 200 元，每吨可获得当地政府补贴 190 元。				

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
19	水泥窑协同处置污泥技术	该技术利用水泥窑生产产生的余热干化污泥（直接干化技术或间接干化技术，含水 80%的污泥干燥至含水 30-40%）或未经干化（含水 80%的污泥），送入水泥窑尾烟室焚烧，可替代部分燃料，同时污泥中的重金属随焚烧灰渣作为原料通过煅烧进入水泥熟料而达到固化，节省部分原料使用。 近年来，中国形成了以北京水泥厂、广州越堡水泥公司、华新宜昌水泥公司为典型的三种具有知识产权的污泥处置技术。北水模式：利用窑尾热烟气经导热油换热器间接干化污泥，再将干污泥送入窑尾系统进行焚烧；越堡模式：该技术利用窑尾热烟气直接烘干污泥，再将干污泥送入窑尾系统进行焚烧；宜昌模式：该技术较为简单，利用现有水泥生产线进行局部改造，加装污泥泵送系统、污泥直接入窑焚烧，其处置能力较小（一般处置规模约 150	水泥	熟料煅烧	燃料替代	广东某公司处置污泥项目，经热工标定，处置能力达 736 t/d，实测每吨湿污泥可节省原煤 170 kg。经检测，系统 NO_x 排放值 230 mg/Nm³(10%O₂)；污泥协同处置过程中二噁英的排放量 0.026 ngTEQ/Nm³，优于欧洲标准要求。	污泥干化后可替代燃料和作为脱硝材料使用。广东某公司处置污泥项目，年处理量 23.98 万吨，单位投资仅为 408 元/t 湿污泥，远低于 800~1000 元/t（湿污泥的国际常规污泥干化焚烧处置工程的建设费用）。	市场应用	过渡	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		t/d)，适于污泥产生量少的地区，具有投资低，建设周期短，易操作等特点。									
20	水泥窑纯低温余热发电技术	该技术利用窑头和窑尾余热锅炉生产的主蒸汽及低压蒸汽，进入汽轮机做功，做功后的蒸汽被冷却凝结成水并除氧，之后由给水泵输送给窑头和窑尾余热锅炉生产蒸汽。由汽轮机做功带动发电机发电，最后电量输送到工厂总降压站。最终达到节能降耗和降低水泥生产成本的目的。	水泥	熟料煅烧	余热利用	湖北某公司 10 MW 纯低温余热发电项目，据估算，可节约标煤 25838 吨，减少 CO ₂ 排放 56844 吨，SO ₂ 排放 300.7 吨，NO _x 排放 381.8 吨。	湖北某公司 10 MW 纯低温余热发电项目，据估算，年发电量可达 7530 万 kWh，实现销售收入 3200 万元。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
21	水泥窑窑头窑尾大型高效袋式除尘器技术	该技术利用高性能滤料和自动控制，实现水泥窑窑头、窑尾采用大型布袋收尘器系统，可实现窑头、窑尾粉尘超低排放和没有事故排放。	水泥	熟料煅烧	烟气处理	该技术相比电除尘器，窑尾烟尘排放浓度显著降低。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A
22	窑尾烟气 SNCR 高效脱硝技术	该技术为控制减少氮氧化物的排放，在分解炉内喷入尿素（氨水），实现氮氧化物生成，实现减少氮氧化物排放。	水泥	熟料煅烧	烟气处理	某大型水泥厂 12000 t/d 熟料生产线烟气技改脱硝工程，实现氮氧化物去除效率 60%以上。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A
23	水泥工业高温烟尘趋零排放用滤料制备成套技术	该技术通过除尘器的优化设计及关键材料的研制实现智能化除尘系统烟尘的趋零排放目标。主要技术内容包括水泥窑用高效低阻覆膜滤料制备、智能化袋式除尘系统及装备研究。本技术成果主要研制出了渐扩式结构 PTFE 薄膜，发明了表面凸点结构针刺毡基材制备技术，设计热固性合成纤维微氟处理剂配方；研发了核心装备和成	水泥	熟料煅烧	烟气处理	该技术成功实现水泥行业烟尘的趋零排放，实现了水泥窑烟尘排放浓度由 20-30 mg/Nm ³ 降至 5 mg/Nm ³ 以下，运行阻力小于 800 Pa，年均减排粉尘量 17.3 万吨，可节能 9.28 亿元。	该技术可使相关产业满足国家相关环保法规标准的严苛要求，符合国家“绿色发展”规划，带来较高的经济效益，降低了人力成本、治污成本。	市场应用	达峰	国际输出	《2021 年山东省绿色低碳技术成果目录》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		套工艺技术，发明了智能清灰控制、预警、袋笼自纠偏及应急处理技术。									
24	水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术	该技术使水泥窑烟气去除粉尘等杂质后，到达吸收塔内被吸附剂吸收形成富液，再通过加热析出 95%纯度的二氧化碳，最后精馏到 99.9%工业级纯度和 99.99%食品级纯度的二氧化碳产品，从而完成碳捕捉，控制碳排放。生产出来的二氧化碳产品可广泛应用于焊接、食品保鲜、干冰生产、激光、医药等领域。	水泥	熟料煅烧	CCS	安徽某公司水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化项目，年产 5 万吨液态二氧化碳（其中食品级 3 万吨，工业级两万吨）。	N/A	市场应用	中和	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
25	NO _x 专家智能优化控制系统	水泥生产过程中为控制氮氧化物排放，普遍采用氨水进行脱硝处理。该系统依据现场工况变化建立 NO_x 动态模型，实施改变氨水给定策略，在满足环保要求的前提下降低 NO_x 波动范围，并进一步降低氨水用量。 该系统相关性参数包括生料下料量、分解炉温度、头尾煤用量、烟室温度、一次风风量、二次风温、NO_x 浓度、氧含量等。系统指标为：1）在满足环保要求的前提下，降低 NO_x 波动范围 50%及以上；2）在满足环保要求的前提下，降低氨水用量（每天节省氨水用量约 20%）；3）现场不需改动硬件设备，设备无故障前提下，脱硝系统实现无人值守。	水泥	熟料煅烧	智能化烟气处理控制	该系统的应用可减小 NO _x 波动范围约 60%，降低氨水用量约 20%。5000 吨生产线每天约节省氨水 3.5 吨，2500 吨生产线每天约节省氨水 2 吨。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
26	新型干法水泥窑生产运行节能监控优化系统技术	该技术利用气体采样装置采集水泥窑炉废气，根据废气成分计算燃烧状态和能源消耗并利用专家系统提供操作指导。集成 3G、SHDSL、ZigBee 等通信技术，构建包括生产现场、中控室、数据中心和数据用户的大规模节能减排监测网络，将采样原始数据和分析结果发布到网络上；以多种形式的媒体承载信息，使企业技术和管理人员能够用计算机、掌上电脑和移动电话等各种终端装置随时、随地、随身获取所需要的最新信息，并根据这些信息调控生产工艺参数。	水泥	熟料煅烧	智能化节能减排监控	运用该技术的 2500 t/d 以上新型干法水泥窑熟料的平均烧成热耗可降低 70 kcal/kgcl。 某项目 4500 t/d 新型干法水泥生产线，每年可节能 13500 tce。目前该技术可实现节能量 8 万 tce/a，减排约 21 万 tCO ₂ /a。预计未来 5 年，该技术可在全国的新型干法生产线上推广达 10%，约可应用于 100 条 4000 t/d 新型干法水泥生产线，形成的年节能能力可达 50 万 tce，年减排能力约 132 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	某项目 4500 t/d 新型干法水泥生产线，节能技改投资额 98 万元，建设期 1 个月，年节能经济效益为 800 万元，投资回收期 2 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
27	熟料煅烧过程智能优化控制系统	该系统面向水泥熟料煅烧过程，将人工智能与流程工业过程控制深度融合，集成以烧成带关键信息测量为核心的煅烧工况智能感知技术、以大数据存储与挖掘为核心的煅烧知识自动获取技术、以人工智能与云计算为核心的煅烧过程优化控制技术，构建水泥熟料煅烧过程智能控制系统平台，实现水泥熟料的高质量、智能化生产。 该系统可显著提高水泥熟料生产过程中运行的稳定性和安全性，改变长期处于人工操作、轮班带来的生产波动，使游离氧化钙（F-CAO）接近最佳值，提高熟料质量，延长窑炉的连续运行周期，提高产能，实现分解炉温度、烧成带温度、篦冷机篦压稳定控制。	水泥	熟料煅烧	智能化生产控制	该系统投运率 98%以上，可使熟料标准煤耗下降 1%~3%以上。	山东某公司使用该系统，熟料生产吨煤耗降低 2 千克，并且稳定了烧成系统工况，提高了熟料的产量和质量，给企业带来了巨大的经济效益。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
28	辊压机+V选粉机+球磨机联合粉磨技术	该技术在球磨机的基础上增加辊压机和V型选粉机预粉磨系统，即在物料在进入球磨机终粉前，先经过以辊压机作为主要设备的预粉磨系统，然后通过风选设备，分成粗、细两部分，细的部分进入球磨机继续粉磨至成品，粗的部分返回辊压机被再次辊压，可提高粉磨系统的整体效率，提高产量和成品质量。	水泥	粉磨	工艺改进	该技术采用多种设备协作，提高整体效率，实现系统节能。 湖南某公司 5000 t/d 生产线采用合肥水泥研究设计院设计的联合粉磨方案，实现系统产量 180 t/h 以上，系统单产电耗 28 kWh/t。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A
29	高效优化粉磨节能技术	该技术利用 HT 高效优化粉磨机与球磨机组成联合粉磨系统，实现粉磨系统“分段粉磨”，从而达到整个粉磨系统优质、高产、低消耗的目的。采用高效冲击、挤压、碾压粉碎物料原理，配合适当的分级设备，使入球磨机物料粒度控制在 2mm 以下，改善物料的易磨性；使入磨物料同时具备“粒度效应”及“裂纹效应”；并优化球磨机内部构造和研磨体级配方案。	水泥	粉磨	工艺改进	采用增加预粉碎系统后，吨水泥粉磨电耗可达到 30 kWh/t 以下，节能效果显著。 安徽某公司 $\Phi 3.2 \times 13$ m 水泥球磨机粉磨生产线高效优化粉磨节能技术节能改造项目，每年节电节能量达 1575 tce。目前该技术可实现节能量 12 万 tce/a，减排约 33	安徽某公司 $\Phi 3.2 \times 13$ m 水泥球磨机粉磨生产线高效优化粉磨节能技术节能改造项目，项目技改投资 200 万元，建设期 1 个月。每年节电节能量达 1575 tce，年节电节能	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						万 tCO ₂ /a。 预计未来 5 年，该技术在行业内的推广比例可达到 10%，形成的年节能能力约为 123 万 tce，年减排能力约 325 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）	产生经济效益 292.5 万元以上，项目投资回收期为 8 个月。				
30	立式磨粉磨技术	该技术使用电动机带动磨盘旋转，使原料在离心力场的作用下被甩向磨盘的周边并受到磨辊的反复碾压而粉碎。立式磨属于“料床粉碎”的粉磨设备，相较球磨机无需添加研磨介质，效率更高，能耗更低。	水泥	粉磨	设备提效	该技术电耗低，和球磨机相比减少了 20～30% 的耗电量。	该技术运行成本低，粉磨效率高，建设费用低，立式磨和球磨系统相比占地面积可减少约 50%，建设费用减少约 70%。	市场应用	达峰	国际引进	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
31	球磨机高效球磨综合节能技术	该技术根据物料特性、球磨机参数、制粉参数（磨矿细度参数），设计球磨机衬板的台阶个数、台阶宽度、台阶角度，控制球磨机钢球的提升数量、提升高度、钢球落点、抛落与泻落的钢球数量的比例，大幅度提高球磨机的破碎和研磨效率，大幅度降低球磨机电耗的效果；根据物料特性、球磨机衬板参数、制粉参数（磨矿细度参数）、物料的粒度分布，把不同直径的钢球按其作用划分为粗碎、细碎、粗磨、细磨四个组群，合理设计各组群钢球的平均直径及重量比例，大幅减少非关键直径钢球的数量（从而大幅度减少低功效钢球的数量），进一步提高球磨机的破碎和研磨效率，降低球磨机电耗。采用铬锰钨复合碳化物细化材料的碳化物晶粒，使材料磨损的均匀性及耐磨性得到显著改	水泥	粉磨	设备提效	湖南某公司 1 号机组 60 t/h 磨煤机节能改造项目，每年可节能 1260 tce，减排 2746 tCO ₂ 。预计未来 5 年，形成的年节能能力约为 250 万 tce，碳减排能力 550 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）	湖南某公司 1 号机组 60 t/h 磨煤机节能改造项目，节能技改投资额 145 万元（其中钢球费用 100 万元），建设期 10 天，年节能经济效益 165.4 万元，投资回收期约 6 个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		善，从而降低钢球的失圆率、稳定钢球级配、提高小直径钢球的利用率。									
32	新型水泥预粉磨系统节能技术	该技术采用料床粉磨原理，利用施加于磨辊的辊动及运行产生的剪切力，对料床中的物料产生高效碾磨，再通过后续的粗粉分级机进行分级，使得进球磨机粒径控制在2mm以下，并对球磨机内部衬板、隔仓及分仓长度和研磨体级配进行了优化改进，从而有效降低系统粉磨电耗。	水泥	粉磨（水泥）	工艺改进	贵州某公司项目，年节能量4200 tce，年减排量11088 tCO ₂ 。 目前该技术可实现节能量1万 tce/a，减排约3万 tCO ₂ /a。预计未来5年，可在建材行业球磨系统改造领域推广10%，形成的年节能能力为8万 tce；年碳减排	贵州某公司项目，技改投资额650万元，投资回收期6个月。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
						能力 22 万 tCO ₂ 。（以 2017 年为始）					
33	高压力料床粉碎技术	该技术采用先筛选后风选的高压力粉磨系统及其配套的组合式分级机、骑辊式进料装置，来解决入料中细粉含量较多时辊压机料床稳定性的问题，以增加辊压机的工作压力，保证通过的物料都受到充分挤压，降低了系统能耗，同时也解决了边缘漏料和辊子端面磨损问题。 同时通过对设备和系统的在线监测以及智能化控制保障设备和系统按照既定方式运行，实现水泥粉磨的高效率、低能耗、高品质的智能化生产。	水泥	粉磨（水泥）	工艺改进智能化	安徽某公司两条 120 万吨水泥粉磨生产线，技术改造后，平均单产电耗 24.1 kWh/t，较改造前下降 2.28 kWh/t。自 2017 年 1 月至 2018 年 12 月期间，两条生产线共生产 P042.5 水泥 200 万吨，年节电量 456 万 kWh，折合标煤约 1550.4 t。	安徽某公司两条 120 万吨水泥粉磨生产线，技术改造投资约 200 万元。 自 2017 年 1 月至 2018 年 12 月期间，两条生产线共生产 P042.5 水泥 200 万吨，年节电量 456 万 kWh，折合标煤约 1550.4 t，按每吨标煤 600	市场应用	达峰	本土应用	《国家工业节能技术装备推荐目录（2019）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
							元估算，每年可节约煤炭费用 93.1 万元，同时去除节省熟料的费用，投资回收期约 6 个月。				
34	水泥联合粉磨质量与效率优化控制系统	水泥联合粉磨由配料、预粉磨、终粉磨组成，是一个多变量、强耦合的复杂系统。该系统基于自动化控制，针对水泥联合粉磨，采用粒度分析仪检测水泥粒度，通过对数据进行处理，智能识别工况，优化控制磨机等设备，提高粉磨质量与效率。	水泥	（水泥）	智能化生产控制	该系统已在多家水泥企业应用，3d 强度标准差降低 50.5%、28d 强度标准差降低 29%、比表面积合格率提高 9.4%、水泥粉磨电耗降低 5.3%。	N/A	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
35	水泥企业可视化能源管理系统	水泥企业可视化能源管理系统由可视化数据采集系统、可视化能效分析系统、可视化能效考核管理系统组成。其技术核心是基于水泥生产工艺系统的可视化能效分析。通过对生产全过程各工艺、重点用能设备能耗数据的实时监测，结合生产工艺参数及产能参数，通过可视化能效分析系统进行能效分析，挖掘节能空间，制定运行改善措施；通过可视化能效考核管理系统，实现企业能源的精细化考核，以提高企业的能源利用效率及能源管理水平。	水泥	综合	智能化能源管理	以 2 条 2000 t/d 的水泥熟料生产线为例，应用该技术可实现节能量 2429 tce/a，减排量 13774 tCO ₂ /a。 北京某公司能源管理中心建设项目，年节电量为 1976.17 万 kWh，约合 2186 tce，减排 4765 tCO ₂ 。 预计未来 5 年内，该技术在行业内的推广比例达到 5%，总投入 7.4 亿元，按单个项目年节能量 2400 tce，年减排 14000 tCO ₂ 估算，该技术可实现节能量 28 万 tce/a，减排量 61 万 tCO ₂ /a。（以 2017 年为始）	北京某公司能源管理中心建设项目，项目总投资 672 万元，节能经济效益 1383.3 万元。	市场应用	达峰	本土应用	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
36	智能协同控制及优化控制系统	该系统旨在提高水泥企业生产运转率、应急响应能力、风险防范能力和科学决策能力。该系统采用人工智能分析技术，解析生产过程中关键参数（如各原料量、喂料量、选粉机转速、分解炉喂煤量、窑头喂煤量、三次风阀开度、篦速等）与相应水泥智能制造的多个目标（企业经济效益、生产质量、产量、能源消耗、污染物排放等）之间的关联关系，采用大数据分析技术建立融合机理与经验的全流程协同关系动态模型，并进行多目标优化，研发集神经网络、预测控制、模糊控制、Bang-Bang控制等先进控制策略于一体的智能协同控制方法，实现水泥生产的智能优化控制，达到稳产提质、降本增效、节能减排目的。	水泥	综合	智能化生产控制	该系统智能优化投运率 95% 以上，企业综合煤耗降低 1.5% 以上，质量标准偏差减少 20% 以上。	江苏某公司项目，经初步测算，可使单位熟料能耗降低约 3~4 千克原煤，带来的经济年收益可观。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
37	水泥企业智能信息系统	该系统研究物联网技术，大数据采集、传输、挖掘、融合技术和仿真技术，开发集过程监控、生产调度指挥、能源平衡决算等管控功能于一体的智慧信息平台。技术特点包括：多源实时数据采集、传输、处理、存储与融合技术；ERP/MES、DCS/PCS接口技术，管控集成技术；产品质量、工艺参数与能耗关系分析，能效建模技术；可视化的设备状态分析，在线诊断技术；故障检测、综合报警、智能预警技术；数据抽取及数据建模技术，企业绩效评价技术；数据挖掘技术，创新、发现平台。 该系统可实时掌控生产过程中关键装备运行状态、核心工艺参数、质量、物料等信息，采用高效协同、灵活调度的生产模式，对能源（水、电、煤等）消耗实施监控与优化控制，实现节能、降耗、提质、增效，同时可以通过浏览器、客户端、移	水泥	综合	智能化能源管理	该系统已在多家水泥企业应用，2016 年熟料生产节约标煤 11.447 万吨，水泥生产（含熟料电耗）节约标煤 7.039 万吨，总计节约标煤 15.197 万吨。	该系统 2016 年总计节约标煤 15.197 万吨，降低成本 11567 万元。	市场应用	达峰	本土应用	N/A

序号	技术名称	技术内容	适用行业	适用范围	功能	节能减排效应	经济效益	成熟度	适用阶段	国际化	政策认可
		动终端等方式让各层生产和管理人员实时、随地查看生产运行状况。									

说明：

适用范围——技术在水泥行业价值链中所处的具体环节；

功能——技术实现节能降碳的方式；

节能减排效应——技术在项目层面与/或全国层面的定性或定量节能减排效果（基于公开信息）；

经济效益——技术在项目层面与/或全国层面的经济性（基于公开信息）；

成熟度——技术在我国的应用条件，包括概念、初试、中试、终试、试点应用、市场应用等；

适用阶段——本报告基于技术目前发展情况，分析评估得出的技术在水泥行业实现“双碳”目标进程中的适用阶段，包括达峰（行业碳达峰）、中和（行业碳中和）和过渡（行业达峰后、中和前）；

国际化——技术的自主研发、引进或“走出去”情况，包括国外应用（国外研发但尚未引进）、国外引进（国外研发并引进应用）、本土应用（本土研发但尚未输出海外）、国际输出（本土研发并输出海外）；

政策认可——技术被国家或地方技术目录及相关政策文件收录或鼓励应用，以及获得国家或地方政府奖项认可的情况。

本报告从公开渠道搜集梳理水泥行业节能低碳技术共 37 项，显著少于前文收录的钢铁行业节能低碳技术，这一方面是由于水泥生产的工序较钢铁生产而言相对简单。另一方面，结合 37 项技术中仅有不足半数获得政策认可的情况（钢铁技术中约 2/3 都曾获得政策认可），也可能反映出在市场化程度较高的水泥行业，技术供应商对自主申报技术、入选技术目录的积极性不高；而即使是在获得政策认可的技术中，也有个别技术²¹在市场实践中因为种种原因并未很好地应用和推广，反映出该行业技术收录情况和市场实践在一定程度上存在脱节。

基于各项技术目前发展和应用情况，本报告将上述 37 项技术分为适用于行业达峰阶段、过渡阶段、中和阶段的三类，其中绝大多数（34 项）为适用于达峰阶段的技术，这在一定程度上呼应了水泥行业市场化程度较高的特点，同时也可能意味着一些研发中、更加前沿的水泥行业节能低碳技术集中在技术研发单位手中，信息公开披露较少，从而容易导致相关的技术研究和推广工作与现实脱节。

本次收录的 37 项技术中，适用于熟料煅烧环节的技术最多（23 项），其次为粉磨（11 项），另有若干能源管理等综合性技术，与我国水泥生产各环节的能耗和碳排放占比大小关系基本一致；也体现出熟料煅烧环节节能潜力较大，并正在通过先进技术的进一步推广应用得到较好的挖掘和开发。

²¹ 据专家反映，如水泥窑大温差交叉料流余热预分解系统、高固气比水泥悬浮余热分解技术等。

第三部分：政策建议

一、优化节能低碳技术遴选-推广-评估-激励体系

综合前文的分析总结，本报告以钢铁、水泥行业作为切入点，发现目前我国在促进重点行业节能低碳技术应用、通过技术推动“双碳”目标实现的过程中，现行的以技术目录为主的节能低碳技术推广方式作用不足，还应该探讨改进和优化目前的节能低碳技术遴选-推广-评估-激励体系。

1. 拓展技术收录方式，加强技术申报和应用激励

目前节能低碳技术相关的国家、行业和地方目录对技术的收录大多依靠技术供应商（多为企业）自主申报，并且通过相关部门公开发布目录的方式鼓励收录技术的推广应用。在缺乏相应激励政策的情况下，这种“自主申报+荣誉激励”的方式不易激发企业申报技术的积极性，尤其是在水泥这种市场化程度较高的行业，部分技术供应商因所持有技术的市场和用户认可度高，不缺乏市场，因此并不热衷于申报。而这种情况可能导致收录技术和基于目录开展的技术研究评估工作与市场中实际技术应用情况脱节，还可能造成部分先进技术因未被收录而无法得到相匹配的政策认可和支持，间接影响政策公平和执行效率。

鉴于上述原因，相关目录的编制、发布机构可以考虑适当拓展技术的收录方式，如自主申报和工厂、研发实验室等场所的抽样调研相结合，使各级目录收录的技术更加真实地反映行业需求和技术研发情况。

各级目录主管部门也可以考虑出台补贴、税费优惠等更加切实和有吸引力的激励措施，充分鼓励企业申报和应用先进的节能低碳技术。这一做法还有可能间接促进企业加大对新技术的研发投入力度。

2. 持续追踪收录技术的发展演变

随着时间推移，技术会不断发展演变、迭代更新；一项技术在投入使用之初和大规模成熟应用之后，在节能降碳效果、成本效益、最佳使用条件等各方面的特性都可能发生变化。以《国家重点节能低碳技术推广目录》为代表的许多技术目录都是逐年或定期发布的，新的目录可能会继续收录或移除上一版目录中的技术，也会对继续收录的技术进行相关参数的更新，但缺乏对技术具体演变过程的持续、连贯追踪和显性的梳理总结，因此无法让重点行业、企业等目标受众迅速、清晰地捕捉到特定技术的

发展进步，影响受众对适用技术的及时应用或更新，也不利于相关研究分析工作的开展。

目录的编制和发布机构可以考虑在目录的节能减排效益、推广比例、实施成本等关键参数下，对各项技术在关键时间节点的历史指标和最新指标进行持续、连贯的如实记录和定期更新，以便目录受众对技术的发展进步形成直观的观察和判断，为企业和行业进行相关的技术应用或更新决策提供科学的信息依据，也便于行业和技术专家更加及时、敏锐地把握相关技术动态。

3. 提供技术成本效益核算工具包

对潜在技术应用单位或企业而言，技术的成本效益是最重要的决策因素之一，甚至在很多情况下是企业的第一考量因素。但现有技术目录等先进节能低碳技术的收录和评估体系对技术经济效益的呈现绝大多数体现为具体案例的实际经济数据，非常详实具体，但对自身条件和外部环境各异的潜在技术应用单位或企业而言针对性不足，因此参考价值有限，从而使潜在技术应用单位缺乏对技术成本和效益的深入理解，错失技术推广应用机会。

在原有来自具体案例的经济数据基础上，各级目录主管部门可以考虑制作技术成本效益核算工具包，并随技术目录一并提供给潜在的技术应用单位。在该工具包中，目录主管部门可以简要介绍各项技术的成本主要来自哪些方面、与产线产能等参数存在怎样的关系、如何计算，技术的经济效益囊括哪些内容、如何折算，以及投资回收期的计算等，并可以以具体案例为例进行演示计算。这样一来，潜在的技术应用单位和企业不仅能够在考虑技术成本和效益的过程中，建立起较为完整、全面的思路，更加方便地计算出科学的成本效益和投资回收期，把握住每一次成本效益高的技术升级机会，还有助于积累起各项技术在标准化方法学下的经济效益数据，有助于长期技术研究和评估工作的开展。

4. 加强对集成和系统技术的关注

和钢铁、水泥行业的情况一样，对许多重点行业而言，相当一部分节能低碳技术并不是单独发挥作用，而是通过集成和协同、以一整套系统的形式去实现节能降碳。现有的各类技术目录大多以单体技术为收录单元，虽然有利于清楚地展示每一项单体技术的具体信息，但也容易让不熟悉相关技术的潜在技术应用单位或企业无法充分了解集成技术的节能减排特性和成本效益，从而错失应用集成化的技术解决方案开展节能降碳工作的机会。

未来单体技术集成、发挥1+1>2的作用是大势所趋。为了适应这一趋势和实际节能降碳工作的需求，目录编写和发布单位可以现行的以单体技术为最小收录单元的基础上，考虑针对通过集成发挥作用的单体技术，补充说明能够与其集成发挥作用的其他技术，并在节能减排效应、经济效益、典型案例等相关参数下增加对集成后技术体系的相关说明。

5. 开发针对数字化、智能化技术的有效评估体系

不同于其他一些节能低碳技术，数字化、智能化技术大多通过为其他技术和系统赋能来帮助这些技术和系统实现总体更优的节能降碳效果，因此很难脱离这些基础技术和系统对数字化、智能化技术进行单独的节能减排效果、成本效益等评估。然而目前各类技术目录对收录技术的评估大多围绕节能降碳效果、目前推广比例、推广预测等针对某一项技术的具体参数展开，在现有的技术目录评估框架下，很难界定数字化、智慧化技术的节能减排效果和在经济等其他方面的效益。

在全球和中国数字化进程逐步加快的背景下，同时考虑到数字化、智慧化技术对实现“双碳”目标和水泥等重点行业节能降碳的潜在贡献，目录的编写和发布单位可以考虑在现有技术评估框架体系下进行调整和改进，例如区别于其他技术将技术应用/改造前后的能耗、排放、经济效益进行量化比较的方式，将数字化、智能化技术的应用效果与行业同类工艺的基准水平进行定量或定性比较，并增加关于技术节能减排效果和经济效益的定性描述和不同应用场景下的分类讨论。

6. 注重技术展示、意识提升和能力培训

对先进节能低碳技术的全面推广和深入应用需要建立在技术展示、意识提升和能力培训的基础上。国家和地方相关部门可以通过建立技术展示馆，通过人工智能、数字化技术等手段，对节能低碳技术的应用效果加以展示，这将有助于潜在的技术应用单位和社会大众对先进技术的节能降碳和其他应用效果拥有全面、切实的体验并树立起正确的认识，从而推动他们更加积极、主动地应用和推广先进节能低碳技术。在意识提升方面，应该让更多的企业和行业尽快认识到节能低碳技术的应用与提高生产力、创造效益并不矛盾，甚至在大多数情况下还能够促进生产效率提高、产生更多的收益，这样一来企业和行业才不会将节能降碳和相关技术应用当成阻碍企业发展又不得不完成的任务，而会主动寻求对新技术的应用甚至研发。另一方面，相关单位也应加强对企业和行业一线工人、设备操作人员、智能平台等系统管理人员的技能培训，使技术实际应用人员的技能随技术同步更新，才能打通节能低碳技术应用从上到下的各个关节，确保节能降碳效果落实到位。

二、识别先进技术最优作用阶段，高效推进行业达峰中和

自“双碳”目标提出以来，工业行业尤其是钢铁、水泥等重点行业的碳达峰、碳中和也被提上议程。正如本报告开篇所述，从协调气候变化问题和经济社会发展、适应不同时期需要，以及节能减排效果等各方面而言，节能低碳技术都将对我国工业行业尤其是重点行业在“双碳”目标下的绿色发展发挥关键的核心作用。但由于行业自身条件和“双碳”准备的参差，不同行业实现行业碳达峰、碳中和的难度和时间都存在差异；而即使在同一行业内部，实现行业碳达峰和碳中和对技术的需求也不同。

具体而言，实现行业碳达峰通常需要现阶段已经发展得较为成熟、经济适用的技术，这类技术的主要目的是在现有工艺基本维持不变的情况下对能耗和碳排放进行“查漏补缺”，实现现有生产工艺下的最优可达能效和碳排放水平；而实现行业碳中和则需要一些更加“突破”的技术，能够在现有水平基础上大幅削减行业能耗和碳排放，甚至产生负碳排放（如 CCUS 等），这类技术目前可能尚在研发阶段，或因为成本、适用条件上的种种限制还在进行进一步试验和优化，但它们势必具备极大的节能降碳潜力，而且往往要求现有生产工艺做出颠覆性的改变。

基于前文搜集梳理的 63 项钢铁节能低碳技术和 37 项水泥节能低碳技术，结合这些技术目前的发展和应用情况，本报告按照这些技术在行业碳达峰、碳中和过程中能够发挥最优作用的时机，将其划分为达峰、中和、过渡三类，分别代表该技术最适用于行业碳达峰阶段、碳中和阶段，以及达峰后、中和前的过渡阶段。

具体到钢铁、水泥两个行业，本报告经过对共计 100 项行业节能低碳技术的逐一评估分析，为两个行业识别达峰、过渡、中和三个阶段最优的适用技术，并通过这些技术的大规模应用推动实现行业碳达峰、碳中和，分别提出以下建议。

1. 钢铁行业

- **达峰阶段：**

根据“十四五”相关的行业预判，我国钢铁行业具备条件、有望在“十四五”期间实现率先达峰；而由于钢铁行业是需求拉动产业，因此该行业实现碳达峰的关键是需求达峰，目前已达到或接近峰值平台期。从节能低碳技术推动达峰层面来说，这一阶段的主要工作内容是重点技术推广。

在本报告搜集梳理的 63 项钢铁节能低碳技术中，适用于达峰阶段的共有 57 项，囊括了炼焦、烧结、高炉、转炉、连铸、轧钢等各个工艺环节，主要聚焦长流程生产工艺，并以能耗最高的高炉、烧结等环节技术为主。各主要环节代表性的达峰技术举例如下（详见表 9）：

- 高炉：炼铁高炉鼓风除湿节能技术、基于炉腹煤气量指数优化的智能化大型高炉节能技术、煤气透平与电动机同轴驱动高炉鼓风机技术（BPRT技术）等共9项；
- 炼焦：超高温超高压干熄焦发电技术、炼焦煤调湿风选技术、焦炉荒煤气显热回收利用技术等共8项；
- 烧结：烧结余热能量回收驱动技术（SHRT技术）、钢铁行业烧结烟气选择性循环净化与余热利用技术、钢铁行业烟气多污染物超低排放智能化高效控制技术及其成套装备等共7项。
- **过渡阶段：**

在钢铁行业实现碳达峰后、碳中和前的过渡阶段，节能低碳技术推广应用的工作重点主要是完善推广技术——

这些技术目前大多已经在市场中有了分散的试点应用，具备较好的市场应用条件，但还没有大面积铺开。本报告从搜集梳理的63项钢铁节能低碳技术中，识别了4项过渡技术，包括：

 - 用于烧结环节的钢铁行业重点工序多污染物超低排放控制耦合技术；
 - 用于高炉炼铁环节的氧气高炉工艺技术和高炉富氢冶炼技术；
 - 用于非高炉炼铁的氢冶炼工艺。
- **中和阶段：**

对钢铁行业而言，行业碳中和是一个具备现实意义和可行性较高的目标，而在中和阶段，节能低碳技术推广应用的工作重点在于推广应用目前可能尚在研发或概念阶段的突破性前沿技术，在本报告搜集梳理的63项钢铁技术中，包括液态熔渣高效热回收与资源化利用技术和日本环境和谐型炼铁工艺技术（COURSE50）2项。

2. 水泥行业

- **达峰阶段：**

我国水泥产量短期内仍将处于高位平台期。面对中国水泥协会锚定的“2023年碳达峰”行业目标，水泥节能低碳技术在相对紧张的行业碳达峰阶段，应该集中力量提升现有工艺尤其是熟料煅烧阶段的能效水平，通过节能实现减排，在现有工艺短期内基本不变的情况下实现系统最低能耗和碳排放。

本报告搜集梳理的37项水泥节能低碳技术中，34项为达峰技术，囊括熟料煅烧、粉磨等环节，以及智能化生产控制和能源管理等综合性领域。熟料煅烧和粉磨环节代表性达峰技术举例如下（详见表17）：

- 熟料煅烧：高能效烧成技术（高效烧成系统改造）、水泥窑富氧燃烧技术、熟料煅烧过程智能优化控制系统等共20项；
- 粉磨（生料和水泥）：外循环生料立磨节能技术、辊压机+V选粉机+球磨机联合粉磨技术、水泥联合粉磨质量与效率优化控制系统等共11项。

- **过渡阶段：**

中国水泥协会提出，2023年行业碳达峰后，要在2030年前减排2亿吨二氧化碳当量。这一阶段是水泥行业实现碳达峰后碳排放进一步下降的攻关阶段，也是节能低碳技术推广应用的吃劲阶段。适用于该阶段的技术目前应该基本具备或初步具备市场应用条件，并且在广泛铺开后能实现较好的节能降碳效果。

本报告在37项水泥节能低碳技术中，将2项识别为过渡技术，即熟料煅烧环节的水泥窑协同处置固体废物技术和水泥窑协同处置污泥技术，集中在垃圾协同处置，是水泥行业进行燃料替代的技术发展方向之一²²。这类技术具备较大的节能降碳潜力，但当务之急是尽快转变水泥企业思路，不仅仅将其作为垃圾处理手段和水泥企业增收途径，而要视作燃料替代、减煤控煤的重要机遇，同时加强垃圾进入水泥厂焚烧前的精细分类和专业化管理，提高垃圾作为燃料供应的稳定性和燃烧效率。

- **中和阶段：**

水泥行业因其生产工艺的固有特性，过程排放居高不下，因此实现行业碳中和任务艰巨。如果未来水泥技术研发仍然难以在降低水泥含钙量和维持水泥性能之间取得平衡，行业碳中和可能要更多地寄望于碳捕集、利用与封存（CCUS）技术。但后者目前因成本、储存、运输等原因，在水泥企业中受欢迎程度不高，因此还需要进一步优化。

报告在37项水泥节能低碳技术中，仅将水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术一项识别为中和技术。

²² 专家提出，在燃料替代方面，还应重视垃圾衍生燃料（RDF）/固体替代燃料（SRF）和生物质燃料等技术的研发推广，但由于这些技术属于通用的燃料替代技术，而本报告聚焦行业特性技术，因此未作相关收录。

值得特别指出的是，无论对钢铁还是水泥行业，本报告从公开渠道搜集梳理数十项节能低碳技术中，绝大多数为达峰技术，仅有少量过渡和中和技术，这与报告对三个不同阶段所需技术呈现出的特点是相符的，即达峰技术多为成熟技术，过渡、中和技术目前大都在试点、试验或研发、概念阶段。

中国对先进节能低碳技术的自主研发和国际引进从未停止，也在不断地筛选技术中的佼佼者向行业和企业进行推广。这些技术分别适应我国工业行业尤其是重点行业在实现碳达峰、碳中和目标过程中的不同阶段，其中大多也已经具备了较好的推广应用基础。未来随着技术推广和激励方式不断改进、成熟技术全面推广和深入应用、新型技术的经济适用性逐渐提高，节能低碳技术将有望为中国工业部门乃至整个经济社会绿色转型、实现“双碳”目标和可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

新华社, 2021. 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. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm

王庆一, 2019. 2018 能源数据, 北京: 能源基金会.

北京科技大学等, 2021. 我国钢铁行业绿色低碳发展战略研究, 北京: 能源基金会.

马骥涛、黄桂田, 2018. 中国钢铁行业完全能源消耗研究. 价格理论与实践, Issue 4.

国家发展和改革委员会、工业和信息化部等, 2021. 国家发展改革委、工业和信息化部等部门关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见.

https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/wjfb/art/2021/art_04301dd125b64848becf97eb3054b3f0.html

国家发展和改革委员会、工业和信息化部等, 2021. 高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平 (2021 年版). <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/16/5651180/files/5632debedf6d4a32af66ad76709b54d1.pdf>

王维兴, 2021. 2020 年中钢协会会员单位能源消耗评述.

https://www.sohu.com/a/457106510_313737

工业和信息化部、科学技术部、自然资源部, 2021. 关于印发“十四五”原材料工业发展规划的通知.

https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/ghzc/art/2021/art_99157af8425f44e3854ba6f119dbe320.html

工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部, 2022. 三部门关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见.

https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gt/art/2022/art_368elaae99704e9281a618dc73c046f7.html

央广网, 2021. 2021 年我国废钢资源利用总量预计将在 2.7 到 2.75 亿吨.

<http://www.cbcie.com/news/1066437.html>

国家发展和改革委员会、工业和信息化部等, 2022. 四部门关于发布《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南 (2022 年版)》的通知.

https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2022/art_4e67f71221864ddd9db9d59fda97858f.html

中国节能协会冶金工业节能专业委员会、冶金工业规划研究院, 2020. 中国钢铁工业节能低碳发展报告(2020), 北京: 冶金工业规划研究院.

王志伟, 2014. 钢铁行业工序能耗分析及节能发展方向探讨. 科技创新导报, Issue 16, p. 2.

中国水泥协会等, 2021. 水泥行业碳排放现状与达峰路径, 北京: 中国水泥协会.

何捷, 2021. 中国水泥行业碳中和路径和协同处置试点示范研究. 北京, 中国建筑材料科学研究总院有限公司.

中国建筑材料科学研究总院有限公司, 2021. 中国水泥行业减煤技术与政策研究报告, 北京: 中国建筑材料科学研究总院有限公司.

天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等, 2012. GB 16780-2012 水泥单位产品能源消耗限额, 北京: 国家标准化管理委员会.

天津水泥工业设计研究院有限公司、中材装备集团有限公司等, 2021. GB 16780-2021 水泥单位产品能源消耗限额, 北京: 国家标准化管理委员会.

中国水泥网, 2021. 2020 中国熟料水泥产能百强榜.

<https://www.ccement.com/project/paihang2020/>

中国水泥网信息中心, 2019. 水泥生产工艺、技术概述.

<https://www.ccement.com/news/content/979074147474425001.html>

袁晴棠, 殷瑞钰, 曹湘洪, 刘佩成, 2020. 面向 2035 的流程制造业智能化目标、特征和路径战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 148-156.

桂林鸿程矿山设备制造有限公司, 2020. 球磨与立磨优缺点对比.

https://www.cnpowder.com.cn/ns11549/article_26655.html

常州优力, 2015. 辊压机工作原理. <http://www.youlyjd.com/nd.jsp?id=18>

中国废钢铁应用协会, 2021. 废钢铁“十四五”规划(全文).

<https://www.163.com/dy/article/GK4C8D910518W4HN.html>

中外对话, 2020. 中国承诺“碳中和”对全球气候行动意味着什么? .

<https://chinadialogue.org.cn/zh/3/67248/>

经济日报, 2021. 中国将在全球气候治理中作出表率——访联合国气候问题战略顾问兼气候、人类、自然发展项目伙伴爱丽丝·巴克勒.

http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/25/content_5588710.htm

国家统计局，2022. 国家数据. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>

CCFEE

附录：重点行业绿色低碳发展及节能低碳技术相关主要现行政策名录

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
1	《钢铁、石油和化工、建材、有色金属、轻工行业企业能源管理中心建设实施方案》 (工信部节〔2015〕13号)	2015	工业和信息化部	行业-钢铁 行业-石化 行业-建材 行业-有色 行业-轻工	企业	《方案》提出，2020年前，在五大行业建设和改造完善655个企业能源管理中心，其中钢铁行业100个，石油和化工行业200个，建材行业200个，有色金属行业80个，轻工行业75个。
2	《2015年工业绿色发展专项行动实施方案》 (工信部节〔2015〕61号)	2015	工业和信息化部	综合	综合	1、提升重点区域重点行业煤炭清洁高效利用水平，到2015年底，减少煤炭消耗400万吨以上。指导京津冀及周边地区、长三角等重点工业企业实施清洁生产技术改造，预计全年削减二氧化硫7万吨、氮氧化物6万吨、工业烟(粉)尘4万吨、挥发性有机物2万吨。 2、建立覆盖2000家以上重点用能企业的全国工业节能监测分析平台，实现对试点地区工业能耗数据的动态监控及预警预测。推进企业能源管理中心建设，完成钢铁、建材、石化等200家企业能源管理中心项目验收工作，新启动100家项目建设。在通信、金融、电力等部门启动30家绿色数据中心试点建设。 3、初步建立京津冀及周边地区工业资源综合利用协同发展机

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						制，完善产业链。实现京津冀及周边地区尾矿、冶炼渣等工业固废综合利用量约 6000 万吨/年。
3	公开征求《钢铁产业调整政策（2015 年修订）（征求意见稿）》的意见	2015	工业和信息化部产业政策司	行业-钢铁	产业	贯彻《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》关于强化节能节地节水、环境、技术、安全等市场准入标准，建立健全防范和化解产能过剩长效机制的精神，落实《国务院关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见》关于修订完善钢铁产业政策的要求，推动钢铁产能过剩矛盾化解，促进钢铁产业调整升级。
4	《关于组织开展国家重点节能技术征集和更新工作的通知》 （发改办环资〔2015〕1862 号）	2015	国家发展改革委办公厅	综合-技术	技术	加快重点节能技术的推广普及，引导用能单位应用先进适用的节能新技术、新设备和新工艺，促进能源资源节约集约利用，减少碳排放，缓解资源环境压力。
5	《关于推荐 2015—2016 年工业节能与绿色发展重点项目的通知》 （工信厅联节函〔2015〕584 号）	2015	工业和信息化部办公厅 国家开发银行办公厅	综合	综合	重点支持企业应用能效信贷等投融资机制，开展节能节水改造，加强能源管理信息化建设，开展清洁生产、生态设计和资源综合利用工作，培育壮大节能环保产业，推动工业绿色发展和转型升级。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
6	《关于同意国家低碳工业园区试点实施方案的批复》 (工信部联函〔2015〕450号)	2015	工业和信息化部 国家发展改革委	园区	园区	原则同意天津经济技术开发区等 39 家国家低碳工业园区试点实施方案，试点期为 3 年。
7	《促进绿色建材生产和应用行动方案》 (工信部联原〔2015〕309号)	2015	工业和信息化部 住房城乡建设部	综合	综合	到 2018 年，绿色建材生产比重明显提升，发展质量明显改善。绿色建材在行业主营业务收入中占比提高到 20%，品种质量较好满足绿色建筑需要，与 2015 年相比，建材工业单位增加值能耗下降 8%，氮氧化物和粉尘排放总量削减 8%；绿色建材应用占比稳步提高。新建建筑中绿色建材应用比例达到 30%，绿色建筑应用比例达到 50%，试点示范工程应用比例达到 70%，既有建筑改造应用比例提高到 80%。
8	《节能机电设备(产品)推荐目录(第六批)》 (工信部公告 2015 年 72 号)	2015	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《节能机电设备(产品)推荐目录(第六批)》
9	《“能效之星”产品目录(2015 年)》 (工信部公告 2015 年 71 号)	2015	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”产品目录(2015 年)》
10	《高耗能行业能效“领跑者”制度实施细则》 (工信部联函〔2015〕407号)	2015	工业和信息化部 国家发展改革委 质检总局	综合	行业	贯彻落实《中国制造 2025》，推进工业绿色发展和转型升级，持续提升能源利用效率。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
11	《国家重点推广的低碳技术目录（第二批）》 （国家发展改革委公告 2015 年第 31 号）	2015	国家发展改革委	综合-技术	行业	加快低碳技术的推广应用，促进我国控制温室气体行动目标的实现。
12	《国际“双十佳”最佳节能技术和实践清单》和《中国“双十佳”最佳节能技术和实践清单》 （国家发展改革委公告 2015 年第 32 号）	2015	国家发展改革委	综合-技术	技术	推广普及先进的节能技术和实践，推动全球能效提升。
13	《国家生态工业示范园区管理办法》 （环发〔2015〕167 号）	2015	环境保护部 商务部 科学技术部	园区	综合	进一步规范国家生态工业示范园区的申报、创建、验收、命名、监督等管理工作
14	《国家重点节能低碳技术推广目录（2015 年本，节能部分）》 （国家发展改革委公告 2015 年第 35 号）	2015	国家发展改革委	综合-技术	技术	加快节能技术进步和推广，引导用能单位采用先进适用的节能新技术、新装备、新工艺，促进能源资源节约集约利用，缓解资源环境压力。
15	《关于水泥企业用电实行阶梯电价政策有关问题的通知》 （发改价格〔2016〕75 号）	2016	国家发展改革委 工业和信息化部	行业-水泥	企业	对水泥生产企业生产用电实行基于可比熟料（水泥）综合电耗水平标准的阶梯电价政策

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
16	《关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》 (国发〔2016〕6号)	2016	国务院	行业-钢铁	行业	在近年来淘汰落后钢铁产能的基础上,从2016年开始,用5年时间再压减粗钢产能1亿—1.5亿吨。
17	《工业节能管理办法》 (中华人民共和国工业和信息化部令第33号)	2016	工业和信息化部	综合	综合	加强工业节能管理,健全工业节能管理体系,持续提高能源利用效率,推动绿色低碳循环发展,促进生态文明建设。
18	《关于开展国家重大工业节能专项监察的通知》 (工信厅节函〔2016〕350号)	2016	工业和信息化部办公厅	综合	监察部门	贯彻落实国家有关节能法规、强制性标准及重大政策要求,强化重点行业、重点企业及重点耗能设备的节能监管,逐步完善工业节能监察体制机制。
19	《关于组织开展国家重点节能技术征集和更新工作的通知》 (发改办环资〔2016〕1350号)	2016	国家发展改革委办公厅	综合-技术	技术	加快重点节能技术的推广普及,引导用能单位应用先进适用的节能新技术、新设备和新工艺,促进能源资源节约集约利用,减少碳排放,缓解资源环境压力。
20	《关于开展钢铁行业能耗专项检查的通知》 (工信厅联节函〔2016〕386号)	2016	工业和信息化部办公厅 国家发展改革委办公厅	行业-钢铁	行业	认真贯彻落实国务院关于钢铁行业化解过剩产能工作部署,开展钢铁行业能耗执法专项行动,全面调查全国钢铁企业能耗情况,对钢铁行业强制性能耗限额标准执行情况进行专项监察。
21	《关于营造良好市场环境促进有色金属工业调结构促转型增效益的指导意	2016	国务院办公厅	行业-有色	行业	优化有色金属工业产业结构,重点品种供需实现基本平衡,电解铝产能利用率保持在80%以上,铜、铝等品种矿产资源保障能力明显增强,稀有金属资源开发利用水平进一步提升,再生

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
	见》 (国办发〔2016〕42号)					有色金属使用比重稳步提高，重点工艺技术装备取得突破，航空、汽车、建筑、电子、包装等领域有色金属材料消费量进一步增加，重大国际产能合作项目取得实质性进展，有色金属工业发展质量和效益明显提升。
22	《工业绿色发展规划（2016—2020年）》 (工信部规〔2016〕225号)	2016	工业和信息化部	综合	综合	到2020年，绿色发展理念成为工业全领域全过程的普遍要求，工业绿色发展推进机制基本形成，绿色制造产业成为经济增长新引擎和国际竞争新优势，工业绿色发展整体水平显著提升。能源利用效率显著提升；资源利用水平明显提高；清洁生产水平大幅提升；绿色制造产业快速发展；绿色制造体系初步建立
23	《关于公布2016年度能效“领跑者”企业名单公告》 (工业和信息化部公告2016年第39号)	2016	工业和信息化部 国家发展改革委 质检总局	综合	企业	公布2016年度能效“领跑者”企业名单
24	《高效节能环保工业锅炉产业化实施方案》 (工信厅节函〔2016〕492号)	2016	工业和信息化部 办公厅	综合-技术	产业	到2020年底，攻克一批高效节能环保工业锅炉关键共性技术，培育一批高效节能环保工业锅炉制造基地，推广一批高效节能环保工业锅炉产品，制定一批相关国家标准，探索建立研发、工程应用与技术服务于一体的高效节能环保工业锅炉系统创新中心和专业化运行服务新模式。高效节能环保工业锅炉市场占有率达60%以上，累计推广高效节能环保工业锅炉100万蒸吨。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
25	《工业领域电力需求侧管理专项行动计划（2016—2020 年）》 （工信厅运行函〔2016〕560 号）	2016	工业和信息化部办公厅	综合	企业	通过五年的时间，组织全国万家工业企业参与专项行动，千家企业贯彻实施电力需求侧管理工作指南，打造百家电力需求侧管理示范企业，进一步优化电力资源配置，提升工业能源消费效率，到 2020 年，实现参与行动的工业企业单位增加值电耗平均水平下降 10%以上。
26	《关于开展绿色制造体系建设的通知》 （工信厅节函〔2016〕586 号）	2016	工业和信息化部办公厅	综合	综合	全面统筹推进绿色制造体系建设，到 2020 年，绿色制造体系初步建立，绿色制造相关标准体系和评价体系基本建成，在重点行业出台 100 项绿色设计产品评价标准、10—20 项绿色工厂标准，建立绿色园区、绿色供应链标准，发布绿色制造第三方评价实施规则、程序，制定第三方评价机构管理办法，遴选一批第三方评价机构，建设百家绿色园区和千家绿色工厂，开发万种绿色产品，创建绿色供应链，绿色制造市场化推进机制基本完成，逐步建立集信息交流传递、示范案例宣传等为一体的线上绿色制造公共服务平台，培育一批具有特色的专业化绿色制造服务机构。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
27	《绿色制造工程实施指南（2016-2020 年）》	2016	工业和信息化部	综合	综合	到 2020 年，绿色制造水平明显提升，绿色制造体系初步建立。企业和各级政府的绿色发展理念显著增强，与 2015 年相比，传统制造业物耗、能耗、水耗、污染物和碳排放强度显著下降，重点行业主要污染物排放强度下降 20%，工业固体废物综合利用率达到 73%，部分重化工业资源消耗和排放达到峰值。规模以上单位工业增加值能耗下降 18%，吨钢综合能耗降到 0.57 吨标准煤，吨氧化铝综合能耗降到 0.38 吨标准煤，吨合成氨综合能耗降到 1300 千克标准煤，吨水泥综合能耗降到 85 千克标准煤，电机、锅炉系统运行效率提高 5 个百分点，高效配电变压器在网运行比例提高 20%。单位工业增加值二氧化碳排放量、用水量分别下降 22%、23%。节能环保产业大幅增长，初步形成经济增长新引擎和国民经济新支柱。绿色制造能力稳步提高，一大批绿色制造关键共性技术实现产业化应用，形成一批具有核心竞争力的骨干企业，初步建成较为完善的绿色制造相关评价标准体系和认证机制，创建百家绿色工业园区、千家绿色示范工厂，推广万种绿色产品，绿色制造市场化推进机制基本形成。制造业发展对资源环境的影响初步缓解。
28	《节能机电设备(产品)推荐目录(第七批)》 (工信部公告 2016 年 58 号)	2016	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《节能机电设备(产品)推荐目录(第七批)》

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
29	《“能效之星”产品目录（2016年）》 （工信部公告 2016 年 59 号）	2016	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”产品目录（2016 年）》
30	《关于组织开展绿色制造系统集成工作的通知》 （财建〔2016〕797 号）	2016	财政部 工业和信息化部	综合	综合	2016—2018 年，围绕中国制造 2025 战略部署，重点解决机械、电子、食品、纺织、化工、家电等行业绿色设计能力不强、工艺流程绿色化覆盖度不高、上下游协作不充分等问题，支持企业组成联合体实施覆盖全部工艺流程和供需环节系统集成改造。通过几年持续推进，建设 100 个左右绿色设计平台和 200 个左右典型示范联合体，打造 150 家左右绿色制造水平国内一流、国际先进的绿色工厂，建立 100 项左右绿色制造行业标准，形成绿色增长、参与国际竞争和实现发展动能接续转换的领军力量，带动制造业绿色升级。支持重点领域及方式将结合中央有关要求和部署适时作出调整。
31	《关于开展 2016 年绿色制造系统集成工作的通知》 （工信厅联函〔2016〕755 号）	2016	工业和信息化部 办公厅 财政部办公厅	综合	综合	2016—2018 年，围绕中国制造 2025 战略部署，重点解决机械、电子、食品、纺织、化工、家电等行业绿色设计能力不强、工艺流程绿色化覆盖度不高、上下游协作不充分等问题，支持企业组成联合体实施覆盖全部工艺流程和供需环节系统集成改造。通过几年持续推进，建设 100 个左右绿色设计平台和 200 个左右典型示范联合体，打造 150 家左右绿色制造水平国内一流、国际先进的绿色工厂，建立 100 项左右绿色制造行业标

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						准，形成绿色增长、参与国际竞争和实现发展动能接续转换的领军力量，带动制造业绿色升级。支持重点领域及方式将结合中央有关要求和部署适时作出调整。
32	《关于完善用电政策促进有色金属工业调结构促转型增效益有关工作的通知》 (发改能源〔2016〕2462 号)	2016	国家发展改革委 工业和信息化部 国家能源局	行业-有色	行业	贯彻落实《国务院办公厅关于营造良好市场环境促进有色金属工业调结构促转型增效益的指导意见》（国办发〔2016〕42 号）有关要求，推动完善有色金属行业参与电力直接交易有关政策。
33	《“十三五”节能减排综合工作方案》 (国发〔2016〕74 号)	2016	国务院	综合	综合	到 2020 年，全国万元国内生产总值能耗比 2015 年下降 15%，能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤以内。全国化学需氧量、氨氮、二氧化硫、氮氧化物排放总量分别控制在 2001 万吨、207 万吨、1580 万吨、1574 万吨以内，比 2015 年分别下降 10%、10%、15%和 15%。全国挥发性有机物排放总量比 2015 年下降 10% 以上。
34	《关于加快推进再生资源产业发展的指导意见》 (工信部联节〔2016〕440 号)	2016	工业和信息化部 商务部 科技部	综合	综合	到 2020 年，基本建成管理制度健全、技术装备先进、产业贡献突出、抵御风险能力强、健康有序发展的再生资源产业体系，再生资源回收利用量达到 3.5 亿吨。建立较为完善的标准规

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						范，产业发展关键核心技术取得新的突破，培育一批具有市场竞争力的示范企业，再生资源产业进一步壮大。
35	《关于运用价格手段促进钢铁行业供给侧结构性改革有关事项的通知》 (发改价格〔2016〕2803 号)	2016	国家发展改革委 工业和信息化部	行业-钢铁	行业	落实《国务院关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》(国发〔2016〕6 号)有关要求，促进钢铁行业技术进步，提高能源资源利用效率，改善环境，决定运用价格手段促进钢铁行业供给侧结构性改革，化解过剩产能。
36	《国家重点节能低碳技术推广目录 (2016 年本，节能部分)》 (国家发展改革委公告 2016 年第 30 号)	2016	国家发展改革委	综合-技术	技术	加快节能技术进步和推广普及，引导用能单位采用先进适用的节能新技术、新装备、新工艺，促进能源资源节约集约利用，缓解资源环境压力。
37	《关于促进开发区改革和创新发展的 若干意见》 (国办发〔2017〕7 号)	2017	国务院办公厅	园区	综合	促进开发区改革和创新发展
38	《国家重点节能低碳技术推广目录 (2017 年本，低碳部分)》 (国家发展改革委公告 2017 年第 3 号)	2017	国家发展改革委	综合-技术	技术	加快低碳技术的推广应用，促进我国控制温室气体行动目标的实现。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
39	《关于组织开展国家重点节能技术和最佳节能实践征集和更新工作的通知》 (发改办环资〔2017〕662号)	2017	国家发展改革委办公厅	综合-技术	技术	加快重点节能技术和节能实践的推广应用，提高能源利用效率，促进绿色发展。
40	《国家高新技术产业开发区“十三五”发展规划》 (国科发高〔2017〕90号)	2017	科技部	园区	综合	到“十三五”末，国家自创区建设成为构筑国家先发优势的示范样板，国家高新区数量达到240家左右。实现“四个率先”：率先形成有利于“大众创业、万众创新”的创新创业生态和高效率的创新体系；率先形成具有全球竞争力的创新型产业格局；率先形成绿色协调发展的科技产业新城；率先形成开放共享、深度融入全球经济体系的发展平台。
41	《关于深入推进工业产品生态（绿色）设计示范企业创建工作的通知》 (工信厅节函〔2017〕243号)	2017	工业和信息化部办公厅	综合	企业	深入推进生态（绿色）设计企业试点工作，完成百家绿色设计示范企业创建目标任务。
42	《工业节能与绿色标准化行动计划（2017—2019）》 (工信部节〔2017〕110号)	2017	工业和信息化部	综合	综合	到2020年，在单位产品能耗水耗限额、产品能效水效、节能节水评价、再生资源利用、绿色制造等领域制修订300项重点标准，基本建立工业节能与绿色标准体系；强化标准实施监督，完善节能监察、对标达标、阶梯电价政策；加强基础能力建设，组织工业节能管理人员和节能监察人员贯标培训2000人次；培育一批节能与绿色标准化支撑机构和评价机构。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
43	《关于加强长江经济带工业绿色发展的指导意见》 (工信部联节〔2017〕178号)	2017	工业和信息化部 国家发展和改革委员会 科学技术部 财政部 环境保护部	综合	综合	到 2020 年，长江经济带绿色制造水平明显提升，产业结构和布局更加合理，传统制造业能耗、水耗、污染物排放强度显著下降，清洁生产水平进一步提高，绿色制造体系初步建立。与 2015 年相比，规模以上企业单位工业增加值能耗下降 18%，重点行业主要污染物排放强度下降 20%，单位工业增加值用水量下降 25%，重点行业水循环利用率明显提升。全面完成长江经济带危险化学品搬迁改造重点项目。一批关键共性绿色制造技术实现产业化应用，打造和培育 500 家绿色示范工厂、50 家绿色示范园区，推广 5000 种以上绿色产品，绿色制造产业产值达到 5 万亿元。
44	《关于发布 2017 年第一批绿色制造示范名单的通知》 (工信厅节函〔2017〕491号)	2017	工信部办公厅	综合	综合	发布 2017 年第一批绿色制造示范名单
45	《国家工业资源综合利用先进适用技术装备目录》 (工信部公告 2017 年第 40 号)	2017	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《国家工业资源综合利用先进适用技术装备目录》
46	《关于开展重点用能单位“百千万”行动有关事项的通知》 (发改环资〔2017〕1909号)	2017	国家发展改革委	综合	综合	开展好重点用能单位“百千万”行动

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
47	《“能效之星”产品目录（2017）》 （工信部公告 2017 年第 49 号）	2017	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”产品目录（2017）》
48	《国家工业节能技术装备推荐目录（2017）》 （工信部公告 2017 年第 50 号）	2017	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《国家工业节能技术装备推荐目录（2017）》
49	《关于推进农业高新技术产业示范区建设发展的指导意见》 （国办发〔2018〕4 号）	2018	国务院办公厅	园区	综合	到 2025 年，布局建设一批国家农业高新技术产业示范区，打造具有国际影响力的现代农业创新高地、人才高地、产业高地。探索农业创新驱动发展路径，显著提高示范区土地产出率、劳动生产率和绿色发展水平。坚持一区一主题，依靠科技创新，着力解决制约我国农业发展的突出问题，形成可复制、可推广的模式，提升农业可持续发展水平，推动农业全面升级、农村全面进步、农民全面发展。
50	《国家重点节能低碳技术推广目录（2017 年本，节能部分）》 国家发展改革委公告 2018 年第 3 号）	2018	国家发展改革委	综合-技术	技术	加快节能技术进步，引导用能单位采用先进适用的节能新技术、新装备、新工艺，促进能源资源节约集约利用，促进绿色发展。
51	《关于公布第二批绿色制造名单的通知》 （工信厅节函〔2018〕60 号）	2018	工信部办公厅	综合	综合	公布第二批绿色制造名单

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
52	《重点用能单位节能管理办法》 (国家发展改革委 2018 年第 15 号令)	2018	国家发展改革委 科技部 中国人民银行 国资委 质检总局 统计局 证监会	综合	综合	加强重点用能单位的节能管理，提高能源利用效率，控制能源消费总量，促进生态文明建设。
53	《关于公布 2017 年度能效“领跑者”企业名单公告》 (工业和信息化部公告 2018 年第 32 号)	2018	工业和信息化部 国家市场监管总局	综合	企业	公布 2017 年度能效“领跑者”企业名单
54	《坚决打好工业和通信业污染防治攻坚战三年行动计划》 (工信部节〔2018〕136 号)	2018	工业和信息化部	综合	综合	到 2020 年，规模以上企业单位工业增加值能耗比 2015 年下降 18%，单位工业增加值用水量比 2015 年下降 23%，绿色制造和高技术产业占比大幅提高，重点区域和重点流域（具体范围见附件）重化工业比重明显下降，产业布局更加优化，结构更加合理，工业绿色发展整体水平显著提升，绿色发展推进机制基本形成。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
55	《国家工业节能技术装备推荐目录（2018）》 （工信部公告 2018 年第 55 号）	2018	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《国家工业节能技术装备推荐目录（2018）》
56	《“能效之星”产品目录（2018）》 （工信部公告 2018 年第 56 号）	2018	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”产品目录（2018）》
57	《关于公布第三批绿色制造名单的通知》 （工信厅节函〔2018〕341 号）	2018	工业和信息化部 办公厅	综合	综合	公布第三批绿色制造名单
58	《关于加快推进工业节能与绿色发展的通知》 （工信厅联节〔2019〕16 号）	2019	工业和信息化部 办公厅 国家开发银行办 公厅	综合	综合	服务国家生态文明建设战略，推动工业高质量发展，充分借助绿色金融措施，大力支持工业节能降耗、降本增效，实现绿色发展。
59	《关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》 （国发〔2019〕11 号）	2019	国务院	园区	综合	着力构建国家级经济技术开发区开放发展新体制，发展更高层次的开放型经济，加快形成国际竞争新优势，充分发挥产业优势和制度优势，带动地区经济发展。
60	《工业领域电力需求侧管理工作指南》 （工信部运行〔2019〕145 号）	2019	工业和信息化部	综合	综合	保障工业领域电力需求侧管理工作有序开展，系统指导各地工业和信息化主管部门、工业领域用能单位和电能服务机构通过电力需求侧管理提高能源管理水平、优化资源配置。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
61	《关于深入推进园区环境污染第三方治理的通知》 (发改办环资〔2019〕785号)	2019	国家发展改革委办公厅 生态环境部办公厅	园区	综合	提升园区污染治理水平，培育壮大节能环保产业，推动美丽中国建设，选择一批园区（含经济技术开发区）深入推进环境污染第三方治理。
62	《关于公布第四批绿色制造名单的通知》 (工信厅节函〔2019〕196号)	2019	工业和信息化部办公厅	综合	综合	公布第四批绿色制造名单
63	《国家工业节能技术装备推荐目录（2019）》 (工信部公告 2019 年第 55 号)	2019	工业和信息化部	综合-技术	综合	加快高效节能技术装备的推广应用，引导绿色生产和消费
64	《“能效之星”产品目录（2019）》 (工信部公告 2019 年第 53 号)	2019	工业和信息化部	综合-技术	综合	加快高效节能产品的推广应用，引导绿色生产和消费
65	《2019 年重点用能行业能效“领跑者”企业名单》 (工信部公告 2019 年第 63 号)	2019	工业和信息化部 国家市场监管总局	综合	企业	公布 2019 年度能效“领跑者”企业名单
66	《关于加快建立绿色生产和消费法规政策体系的意见》 (发改环资〔2020〕379号)	2020	国家发展改革委 司法部	综合	综合	到 2025 年，绿色生产和消费相关的法规、标准、政策进一步健全，激励约束到位的制度框架基本建立，绿色生产和消费方式在重点领域、重点行业、重点环节全面推行，我国绿色发展水平实现总体提升。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
67	《关于组织开展绿色产业示范基地建设的通知》 (发改办环资〔2020〕519号)	2020	国家发展改革委办公厅	园区	综合	到 2025 年，绿色产业示范基地建设取得阶段性进展，培育一批绿色产业龙头企业，基地绿色产业集聚度和综合竞争力明显提高，绿色产业链有效构建，绿色技术创新体系基本建立，基础设施和服务平台智能高效，绿色产业发展的体制机制更加健全，对全国绿色产业发展的引领作用初步显现。
68	《国务院关于促进国家高新技术产业开发区高质量发展的若干意见》 (国发〔2020〕7号)	2020	国务院	园区	综合	到 2025 年，国家高新区布局更加优化，自主创新能力明显增强，体制机制持续创新，创新创业环境明显改善，高新技术产业体系基本形成，建立高新技术成果产出、转化和产业化机制，攻克一批支撑产业和区域发展的关键核心技术，形成一批自主可控、国际领先的产品，涌现一批具有国际竞争力的创新型企业 and 产业集群，建成若干具有世界影响力的高科技园区和一批创新型特色园区。到 2035 年，建成一大批具有全球影响力的高科技园区，主要产业进入全球价值链中高端，实现园区治理体系和治理能力现代化。
69	《关于公布第五批绿色制造名单的通知》 (工信厅节函〔2020〕246号)	2020	工业和信息化部办公厅	综合	综合	公布第五批绿色制造名单

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
70	《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》 （工信部公告（2020 年第 40 号））	2020	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《国家工业节能技术装备推荐目录（2020）》
71	《“能效之星”产品目录（2020）》 （工信部公告（2020 年第 40 号））	2020	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”产品目录（2020）》
72	《2020 年重点用能行业能效“领跑者”企业名单》 （工信部公告 2020 年第 56 号）	2020	工业和信息化部 国家市场监管总局	综合	企业	公布 2020 年度能效“领跑者”企业名单
73	《绿色技术推广目录（2020 年）》 （发改办环资〔2020〕990 号）	2020	国家发展改革委 办公厅 科技部办公厅 工业和信息化部 办公厅 自然资源部办公厅	综合-技术	综合	加快先进绿色技术推广应用

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
74	《国家高新区绿色发展专项行动实施方案》 (国科发火〔2021〕28号)	2021	科学技术部	园区	综合	在国家高新区内全面深入践行绿色发展理念、执行绿色政策法规标准、创新绿色发展机制，实现园区污染物排放和能耗大幅下降，绿色技术创新能力不断增强，绿色制造体系进一步完善，绿色产业不断壮大，自然生态和谐、环境友好和绿色低碳生活方式不断强化，可持续的绿色生态发展体系基本形成，培育一批具有全国乃至全球影响力的绿色发展示范园区和一批绿色技术领先企业，在国家高新区率先实现联合国 2030 年可持续发展议程、工业废水近零排放、碳达峰、园区绿色发展治理能力现代化等目标，部分高新区率先实现碳中和。到 2025 年，国家高新区单位工业增加值综合能耗降至 0.4 吨标准煤/万元以下，其中 50%的国家高新区单位工业增加值综合能耗低于 0.3 吨标准煤/万元；单位工业增加值二氧化碳排放量年均削减率 4% 以上，部分高新区实现碳达峰。
75	《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)	2021	国务院	综合	综合	到 2025 年，产业结构、能源结构、运输结构明显优化，绿色产业比重显著提升，基础设施绿色化水平不断提高，清洁生产水平持续提高，生产生活方式绿色转型成效显著，能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高，主要污染物排放总量持续减少，碳排放强度明显降低，生态环境持续改善，市场导向的绿色技术创新体系更加完善，法律法规政策体系更加有效，绿色低碳循环发展的生产体系、流通体系、消费体系初步形成。到

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						2035 年，绿色发展内生动力显著增强，绿色产业规模迈上新台阶，重点行业、重点产品能源资源利用效率达到国际先进水平，广泛形成绿色生产生活方式，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，美丽中国建设目标基本实现。
76	《关于依托现有各类园区加强返乡入乡创业园建设的意见》 (发改就业〔2021〕399 号)	2021	国家发展改革委 科技部 工业和信息化部 财政部 人力资源社会保障部 自然资源部 住房城乡建设部 商务部 文化和旅游部 人民银行 税务总局 市场监管总局	园区	综合	破解制约返乡入乡创业高质量发展的痛点、堵点问题，强化农民工等人员返乡入乡创业平台支撑。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
			银保监会 证监会			
77	《关于编制国家高新区绿色发展五年行动方案的通知》 (国科火字〔2021〕62号)	2021	科技部火炬中心	园区	综合	切实提升国家高新区绿色发展水平，做好国家高新区绿色发展专项行动。
78	《“十四五”循环经济发展规划》 (发改环资〔2021〕969号)	2021	国家发展改革委	综合	综合	到 2025 年，循环型生产方式全面推行，绿色设计和清洁生产普遍推广，资源综合利用能力显著提升，资源循环型产业体系基本建立。废旧物资回收网络更加完善，再生资源循环利用能力进一步提升，覆盖全社会的资源循环利用体系基本建成。资源利用效率大幅提高，再生资源对原生资源的替代比例进一步提高，循环经济对资源安全的支撑保障作用进一步凸显。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						到 2025 年，主要资源产出率比 2020 年提高约 20%，单位 GDP 能源消耗、用水量比 2020 年分别降低 13.5%、16%左右，农作物秸秆综合利用率保持在 86%以上，大宗固废综合利用率达到 60%，建筑垃圾综合利用率达到 60%，废纸利用量达到 6000 万吨，废钢利用量达到 3.2 亿吨，再生有色金属产量达到 2000 万吨，其中再生铜、再生铝和再生铅产量分别达到 400 万吨、1150 万吨、290 万吨，资源循环利用产业产值达到 5 万亿元。
79	《关于推进国家生态工业示范园区碳达峰碳中和相关工作的通知》 (科财函〔2021〕159 号)	2021	国家生态工业示范园区建设协调领导小组办公室	园区	综合	以习近平生态文明思想为指引，将碳达峰、碳中和作为示范园区建设的重要内容，通过践行绿色低碳理念、强化减污降碳协同增效、培育低碳新业态、提升绿色影响力等措施，以产业优化、技术创新、平台建设、宣传推广、项目示范为抓手，在“一园一特色，一园一主题”的基础上，形成碳达峰碳中和工作方案和实施路径，分阶段、有步骤地推动示范园区先于全社会在 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。
80	《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》 (工信部联财〔2021〕159 号)	2021	工业和信息化部 中国人民银行 中国银行保险监督管理委员会 中国证券监督管理委员会	综合	综合	到 2025 年，推动工业绿色发展的产融合作机制基本成熟，符合工业特色和需求的绿色金融标准体系更加完善，工业企业绿色信息披露机制更加健全，产融合作平台服务进一步优化，支持工业绿色发展的金融产品和服务更加丰富，各类要素资源向绿色低碳领域不断聚集，力争金融重点支持的工业企业成为碳减排标杆，有力支撑实现碳达峰、碳中和目标，保障产业与金融

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						共享绿色发展成果、人民共享工业文明与生态文明和谐共生的美好生活。
81	《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	中共中央 国务院	综合	综合	到 2025 年，绿色低碳循环发展的经济体系初步形成，重点行业能源利用效率大幅提升。单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%；非化石能源消费比重达到 20%左右；森林覆盖率达到 24.1%，森林蓄积量达到 180 亿立方米，为实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础。 到 2030 年，经济社会发展全面绿色转型取得显著成效，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平。单位国内生产总值能耗大幅下降；单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65%以上；非化石能源消费比重达到 25%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上；森林覆盖率达到 25%左右，森林蓄积量达到 190 亿立方米，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。 到 2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						石能源消费比重达到 80%以上，碳中和目标顺利实现，生态文明建设取得丰硕成果，开创人与自然和谐共生新境界。
82	《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》 (发改产业〔2021〕1464 号)	2021	国家发展改革委 工业和信息化部 生态环境部 市场监管总局 国家能源局	综合	综合	到 2025 年，通过实施节能降碳行动，钢铁、电解铝、水泥、平板玻璃、炼油、乙烯、合成氨、电石等重点行业 and 数据中心达到标杆水平的产能比例超过 30%，行业整体能效水平明显提升，碳排放强度明显下降，绿色低碳发展能力显著增强。 到 2030 年，重点行业能效基准水平和标杆水平进一步提高，达到标杆水平企业比例大幅提升，行业整体能效水平和碳排放强度达到国际先进水平，为如期实现碳达峰目标提供有力支撑。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
83	《2030 年前碳达峰行动方案》 (国发〔2021〕23 号)	2021	国务院	综合	综合	“十四五”期间，产业结构和能源结构调整优化取得明显进展，重点行业能源利用效率大幅提升，煤炭消费增长得到严格控制，新型电力系统加快构建，绿色低碳技术研发和推广应用取得新进展，绿色生产生活方式得到普遍推行，有利于绿色低碳循环发展的政策体系进一步完善。到 2025 年，非化石能源消费比重达到 20%左右，单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，为实现碳达峰奠定坚实基础。 “十五五”期间，产业结构调整取得重大进展，清洁低碳安全高效的能源体系初步建立，重点领域低碳发展模式基本形成，重点耗能行业能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重进一步提高，煤炭消费逐步减少，绿色低碳技术取得关键突破，绿色生活方式成为公众自觉选择，绿色低碳循环发展政策体系基本健全。到 2030 年，非化石能源消费比重达到 25%左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65%以上，顺利实现 2030 年前碳达峰目标。
84	《国家工业节能技术装备推荐目录 (2021)》 (工信部公告 2021 年第 30 号)	2021	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《国家工业节能技术装备推荐目录(2021)》

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
85	《“能效之星”装备产品目录（2021）》 （工信部公告 2021 年第 30 号）	2021	工业和信息化部	综合-技术	综合	公布《“能效之星”装备产品目录（2021）》
86	《“十四五”全国清洁生产推行方案》 （发改环资〔2021〕1524 号）	2021	国家发展改革委 生态环境部 工业和信息化部 科技部 财政部 住房和城乡建设部 交通运输部 农业农村部 商务部 市场监管总局	综合	综合	到 2025 年，清洁生产推行制度体系基本建立，工业领域清洁生产全面推行，农业、服务业、建筑业、交通运输业等领域清洁生产进一步深化，清洁生产整体水平大幅提升，能源资源利用效率显著提高，重点行业主要污染物和二氧化碳排放强度明显降低，清洁生产产业不断壮大。 到 2025 年，工业能效、水效较 2020 年大幅提升，新增高效节水灌溉面积 6000 万亩。化学需氧量、氨氮、氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）排放总量比 2020 年分别下降 8%、8%、10%、10% 以上。全国废旧农膜回收率达 85%，秸秆综合利用率稳定在 86% 以上，畜禽粪污综合利用率达到 80% 以上。城镇新建建筑全面达到绿色建筑标准。
87	《国家级经济技术开发区综合发展水平考核评价办法（2021 年版）》 （商资发〔2021〕188 号）	2021	商务部	园区	综合	旨在引导国家级经开区进一步明确发展定位，充分调动地方和国家级经开区推进创新提升的积极性，大力发展开放型经济，强化国家级经开区高质量发展导向，并为各级管理部门提供决策参考。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
88	《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》 （发改产业〔2021〕1609 号）	2021	国家发展改革委 工业和信息化部 生态环境部 市场监管总局 国家能源局	综合	行业	指导各地科学有序做好高耗能行业节能降碳技术改造，有效遏制“两高”项目盲目发展。
89	《“十四五”工业绿色发展规划》 （工信部规〔2021〕178 号）	2021	工业和信息化部	综合	综合	到 2025 年，工业产业结构、生产方式绿色低碳转型取得显著成效，绿色低碳技术装备广泛应用，能源资源利用效率大幅提高，绿色制造水平全面提升，为 2030 年工业领域碳达峰奠定坚实基础。其中，碳排放强度持续下降，单位工业增加值二氧化碳排放降低 18%。 到 2025 年，我国能源效率稳步提升，规模以上工业单位增加值能耗降低 13.5%。资源利用水平明显提高，大宗工业固废综合利用率达到 57%，主要再生资源回收利用量达到 4.8 亿吨，单位工业增加值用水量降低 16%。污染物排放强度显著下降，重点行业主要污染物排放强度降低 10%。绿色制造体系日趋完善，重点行业和重点区域绿色制造体系基本建成，绿色环保产业产值达到 11 万亿元。
90	《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录（2021 年版）》 （工信部公告 2021 年第 32 号）	2021	工业和信息化部 国家发展改革委	综合-技术	综合	发布《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录（2021 年版）》

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
			科学技术部 生态环境部			
91	《关于振作工业经济运行 推动工业高质量发展的实施方案的通知》 (发改产业〔2021〕1780号)	2021	国家发展改革委 工业和信息化部	综合	综合	打通堵点卡点，确保工业经济循环畅通；挖掘需求潜力，拓展工业经济市场空间；强化政策扶持，健全工业经济保障措施；优化发展环境，促进工业经济行稳致远。
92	《关于做好“十四五”园区循环化改造工作有关事项的通知》 (发改办环资〔2021〕1004号)	2021	国家发展改革委 办公厅 工业和信息化部 办公厅	园区	综合	到 2025 年底，具备条件的省级以上园区（包括经济技术开发区、高新技术产业开发区、出口加工区等各类产业园区）全部实施循环化改造，显著提升园区绿色低碳循环发展水平。通过循环化改造，实现园区的能源、水、土地等资源利用效率大幅提升，二氧化碳、固体废物、废水、主要大气污染物排放量大幅降低。
93	《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)	2021	工业和信息化部 科学技术部 自然资源部	综合	综合	到 2025 年，原材料工业保障和引领制造业高质量发展的能力明显增强；增加值增速保持合理水平，在制造业中比重基本稳定；新材料产业规模持续提升，占原材料工业比重明显提高；初步形成更高质量、更好效益、更优布局、更加绿色、更为安全的产业发展格局。
94	《“十四五”节能减排综合工作方案》 (国发〔2021〕33号)	2021	国务院	综合	综合	到 2025 年，全国单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，能源消费总量得到合理控制，化学需氧量、氨氮、氮氧化物、挥发性有机物排放总量比 2020 年分别下降 8%、8%、10%

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
						以上、10%以上。节能减排政策机制更加健全，重点行业能源利用效率和主要污染物排放控制水平基本达到国际先进水平，经济社会发展绿色转型取得显著成效。
95	《关于公布 2021 年度绿色制造名单的通知》 (工信厅节函〔2022〕7 号)	2022	工业和信息化部办公厅	综合	综合	公布 2021 年度绿色制造名单
96	《2021 年重点用能行业能效“领跑者”企业名单》 (工信部公告 2022 年第 3 号)	2022	工业和信息化部 国家市场监管总局	综合	企业	公布 2021 年度能效“领跑者”企业名单
97	《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》 (工信部联原〔2022〕6 号)	2022	工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部	行业-钢铁	行业	更好地促进钢铁工业高质量发展
98	《“十四五”现代能源体系规划》 (发改能源〔2022〕210 号)	2022	国家发展改革委 国家能源局	综合	综合	能源保障更加安全有力，能源低碳转型成效显著，能源系统效率大幅提高，创新发展能力显著增强，普遍服务水平持续提升。展望 2035 年，能源高质量发展取得决定性进展，基本建成现代能源体系。能源安全保障能力大幅提升，绿色生产和消费模式广泛形成，非化石能源消费比重在 2030 年达到 25%的基础上进一步大幅提高，可再生能源发电成为主体电源，新型电力系统建设取得实质性成效，碳排放总量达峰后稳中有降。

序号	政策名称	发布时间	发布部门	行业/领域	适用对象	政策目标
99	《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)	2022	国家发展改革委 国家能源局	综合	综合	“十四五”时期，基本建立推进能源绿色低碳发展的制度框架，形成比较完善的政策、标准、市场和监管体系，构建以能耗“双控”和非化石能源目标制度为引领的能源绿色低碳转型推进机制。到2030年，基本建立完整的能源绿色低碳发展基本制度和政策体系，形成非化石能源既基本满足能源需求增量又规模化替代化石能源存量、能源安全保障能力得到全面增强的能源生产消费格局。
100	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》 (发改产业〔2022〕200号)	2022	国家发展改革委 工业和信息化部 生态环境部 国家能源局	综合	行业	推动各有关方面科学做好重点领域节能降碳改造升级

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.