

Application and Development of Industrial Energy-Saving and Emission-Reduction Technologies under the Carbon Neutrality Goal

Zuoqiong Xie

Hangzhou Ningwang Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd

Abstract

Faced with the global urgency of climate change and greenhouse gas mitigation, China has committed to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. As the largest energy consumer and emitter, the industrial sector is critical to meeting these targets. This paper systematically reviews the current application status and development trends of industrial energy-saving and emission-reduction technologies, including process optimization, waste heat recovery, intelligent monitoring, as well as green low-carbon technologies such as carbon capture, utilization and storage (CCUS), hydrogen energy, and renewable energy substitution. Through case studies in key industries like steel, chemical, and building materials, it identifies barriers such as financing, standards, talent, and market mechanisms that hinder large-scale deployment. Corresponding countermeasures, including innovative financing models, improved standard systems, and strengthened policy incentives, are proposed to provide comprehensive decision-making support for achieving carbon neutrality in the industrial sector.

Keywords: Carbon Neutrality; Industrial Energy Saving; Emission Reduction Technologies; Carbon Capture and Storage; Green Low-Carbon Energy

碳中和目标下工业节能减排技术的应用与发展

谢作琼

杭州宁旺节能环保科技有限公司, 310011

摘要: 全球气候变化和温室气体减排的国际压力推动中国提出了“2030 碳达峰、2060 碳中和”目标，工业部门作为能源消耗和碳排放的主力军，节能减排成为实现“双碳”目标的关键。本文系统梳理了工业节能减排技术的应用现状与发展趋势，涵盖工艺优化、余热回收、智能监控等能效提升技术，以及碳捕集利用与封存（CCUS）、氢能和可再生能源替代等绿色低碳技术。通过钢铁、化工和建材等行业案例，分析技术推广中的资金、标准、人才和市场机制等瓶颈，提出创新投融资、完善标准体系和强化政策激励等对策建议，为推动工业部门实现碳中和目标提供决策参考。

关键词: 碳中和；工业节能；减排技术；碳捕集与封存；绿色低碳能源

1 引言

全球气候变化带来的极端天气和生态风险日益加剧，温室气体减排已成为国际共识。中国政府于 2020 年提出“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”目标，要求重点行业实现清洁低碳转型。工业部门因其能源消耗量和碳排放量高居各行各业之首（约占全国能耗的 65%、碳排放的 70%），成为实现“双碳”目标的关键战场。近年来，工艺优化、余热回收、智能化监控等节能技术，以及碳捕集利用与封存、氢能和可再生能源替代等绿色低碳技术，在部分重点企业中取得了显著效果，但其经济性、适用性和规模化推广仍面临挑战。本文首先回顾了工业节能减排技术的分类与应用现状，随后结合钢铁、水泥和化工等行业案例，深入剖析技

术推广的瓶颈与成效。最后，基于政策与市场环境的演变，提出完善投融资、标准体系与激励机制的对策建议，为我国工业低碳转型提供系统性的决策参考。

2 碳中和目标与工业节能减排的背景

2.1 碳中和概述

碳中和是指通过优化能源结构、提升能效、推广清洁能源及碳捕集利用等手段，实现单位期间内二氧化碳等温室气体的净排放量为零。2020 年 9 月，中国在第 75 届联合国大会上提出“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”目标，明确了能源消费和产业升级的时间表。为支撑这一目标，国家相继发布了《“十四五”节能减排综合方案》《碳达峰行动方案》《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》等规划文件，涵盖能源、电力、钢铁、化工等重点领域，强调源头减排与技术创新并重，为工业节能减排技术的发展提供了政策与资金保障^[1]。

2.2 工业能源消耗与排放现状

在我国，工业部门长期位居能源消费与碳排放的首位。2023 年，全国社会能源消费总量约 52 亿吨标准煤，工业部门消耗约 34 亿吨，约占 65%；同年全国二氧化碳排放量约 110 亿吨，工业排放贡献率接近 70%。分行业来看：钢铁行业：2023 年产量约 10.3 亿吨，单位产量碳排放约 2.1 tCO₂/t，能源结构中煤炭仍占比超过 70%；化工行业：由于化工反应本底排放与高能耗并存，单位产值碳排放约 0.85 tCO₂/万元；建材行业（主要为水泥与平板玻璃）：使用高温煅烧工艺，平均碳排放强度在 0.8 tCO₂/t 左右；有色金属与石化行业：产值能耗与排放强度高于设备制造，碳排放集中度高。区域分布上，河北、山东、江苏、山西等省份因重化工业集聚，呈现高能耗—高排放格局；西南和东北部分省区虽总量相对较低，但因技术装备老化、能源结构单一，节能潜力同样巨大。总体来看，我国工业部门仍以煤炭为主体能源，能源利用效率亟待提升，不同行业 and 地区在技术水平、管理模式及资金投入方面差异显著，这为后续节能减排技术的推广应用提出了既有挑战也有广阔空间^[2]。

3 工业节能减排技术的应用

3.1 能源利用效率提升技术

在我国工业领域，提高能源利用效率是降低碳排放的最为直接且经济的手段。首先，通过工艺流程的系统优化与热量集成，可以在源头上降低能耗。以捏合分析为基础的热集成设计，将各工序间的余热和余压进行精确匹配，不仅显著减少对外部热源的依赖，还能在钢铁、化工、水泥等高温工艺中大幅提升全厂能源利用率。结合热电联产系统，余热在满足生产蒸汽需求的同时还可用于发电，整体能源转化效率可突破 80%^[3]。其次，对设备及关键部件的升级改造同样至关重要。应用 IE3 及以上级高效电机并配合变频调速技术，使风机、泵和压缩机等核心负荷设备能够根据实际需求灵活调节运行状态，从而在大部分生产模式下平均减少 20% 左右的电能消耗。在锅炉系统中，推广低氮燃烧器和再循环燃烧技术，并引入精细化燃烧管理平台，可以让燃烧效率稳步提升 1~3 个百分点。此外，改良机械密封和轴封结构、采用先进润滑材料，也能有效减少能量损失，延长设备运行寿命。

随着数字化转型的深入，智能化监测与能源管理系统已成为提高能效的有力工具。企业可通过部署物联网传感网络，实时采集产线关键节点的温度、压力、流量和电力数据，并借助大数据与模型预测控制，实现对生产过程的精准调节。配合内部微电网和储能装置，响应电价信号动态调整负荷分配，不仅降低了能源采购成本，也优化了整体系统的经济运行。最后，健全的能效诊断与持续改进机制对于巩固节能成果不可或缺。开展定期的能源审计与专项诊断，结合绩效考核与内部碳定价，通过量化的能耗与碳排放指标激励各部门持续优化。同时，通过多层次的培训与宣贯，营造全员参与的节能文化氛围，将技术改造与管理约束相结合，

形成“技术驱动—管理保障—文化引导”相互促进的闭环，从而实现能源利用效率的不断提升。

3.2 绿色低碳技术的应用

在工业领域推进绿色低碳技术，首先在于对传统高碳排放环节的深度改造与替代。一方面，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术已在化工、钢铁和电力等行业实现示范性应用。通过在高温烟气或工艺尾气中捕捉二氧化碳，并经净化压缩后注入地下储层或用于制取化工原料，CCUS 能将单吨级以上的碳排放量固化或循环利用，显著降低企业总排放量。实践证明，在大型钢铁联合厂和煤电机组中集成 CCUS 系统后，单机组碳减排率可达 85% 以上^[4]。与此同时，氢能的应用开始从少量试点向规模化推广迈进。在炼化和化工行业，以灰氢或蓝氢替代天然气作为高温燃料，不仅可降低燃烧产生的二氧化碳排放，还能为合成氨、甲醇等化工产品提供清洁氢源。更为长远的是，绿色制氢—利用可再生电力电解水制氢—已在多个省市开展产业示范，未来有望成为工业部门甚至重型运输的零碳燃料。此外，大规模可再生能源与工业用能的深度耦合是实现低碳转型的关键路径。通过在企业厂区内或近邻建设光伏、风电项目并联网至工业园区微电网，不仅能够直接替代燃煤或天然气发电，还可结合储能系统平滑出力，满足高峰负荷需求。若再叠加智能调度平台，工业用电可根据可再生能源出力和电价信号动态调整，进一步提高可再生能源消纳率。在部分示范园区中，光伏+储能的部署已使可再生能源利用率提升 20% 以上，为实现工业领域的碳中和目标奠定了坚实基础。

3.3 节能减排技术的行业应用案例

为验证节能减排技术的实际效益，以下选取钢铁、化工和建材三大传统高耗行业中的典型企业进行案例分析，重点考察技术实施路径、经济与环境效益以及推广经验。

在钢铁行业，某大型钢铁集团通过热集成与余热发电系统改造，实现了能效和减排的双重提升。该公司在高炉—转炉—连铸一体化生产线上，采用捏合分析方法对全厂热流网络进行重构，并在原有余热锅炉基础上增设背压汽轮机组，将废气余热转化为电能。改造后，全厂年均发电量增加约 3.5 亿千瓦时，折合标准煤节约 1.2 万吨，碳排放量每年减少约 3.5 万吨，同时降低了 2% 的生产成本。更重要的是，该项目通过废热资源化利用，显著减少了烟气中颗粒物和有害气体的排放，降低了区域大气污染负荷，改善了周边环境质量。该项目的成功推广，为其他钢企提供了“工艺优化+余热发电”一体化改造模式，有助于行业整体能效的跃升及环境保护水平的提升。

在化工行业，某石化龙头企业率先将膜分离与碳捕集技术结合应用于甲醇合成尾气治理。该装置通过多级膜预分离大幅提高 CO₂ 浓度，然后利用胺洗吸收技术捕集并压缩封存，部分 CO₂ 用于车间制冷剂生产，剩余部分封存于深层盐穴。自试点投入运行以来，年处理尾气量超过 50 万吨，CO₂ 捕集率稳定在 90% 以上，单位产量碳排放强度下降约 0.3 tCO₂/吨，同时该装置的运行费用仅占新增产值的 5%。此外，尾气中硫氧化物和氮氧化物含量得到有效控制，极大减少了有害大气污染物的排放，显著降低了生产过程对周边生态环境的影响。该案例体现了“膜分离+CCUS”技术在化工行业的可行性与经济性，为大规模推广提供了可靠示范^[5]。

在建材行业，某水泥企业对传统回转窑生产线进行了预热器—预分解器升级及替代燃料替换试点。通过优化预热器气固分离设计，提升了生料热交换效率，并在预分解器中引入脱硫石膏等工业副产物作为部分替代燃料，降低煤炭用量。经改造后，单位熟料能耗由原来的 790 kg 标准煤/吨下降至 720 kg 标准煤/吨，碳排放强度降低约 8%，同时有效减少了工业固废的堆存和处置成本，降低了潜在的二次污染风险。该项目不仅优化了资源循环利用路径，还减少了有害物质的排放，促进了建材行业的绿色生产和环境友好型发展。该项目的成功经验已在下游多家水泥厂进行复制，推动了建材行业节能减排技术的批量化应用。

以上案例表明，通过因地制宜地选择并集成合适的节能减排技术，传统高耗行业不仅能够实现显著的能源与碳减排效益，还能有效提升环保绩效，减少大气污染物和工业固废排放，提高资源综合利用效率，为我国工业领域的绿色低碳转型和生态环境保护提供了可复制、可推广的模式。

4 工业节能减排技术的发展趋势与挑战

4.1 技术发展趋势

在“双碳”目标驱动下，工业节能减排技术正向系统集成、智能优化和低碳替代方向演进。传统以单体设备节能或局部工艺改造为主的手段，逐渐让位于全流程能源系统优化和生产工艺重构。新一代信息技术在工业节能中的应用日益广泛，尤其是工业互联网、人工智能和数字孪生技术，为能源系统的动态监测、预测性维护和精细化调控提供了强有力支撑。通过构建全厂级能源管理平台，企业可以实现用能单元的实时感知与智能调度，提升能源利用效率的同时减少无效排放。与此同时，绿色低碳替代技术加速突破并趋于产业化。以 CCUS 为代表的碳减排路径，在钢铁、水泥、化工等高排放行业中实现了从示范到应用的跃迁，捕集效率与经济性持续提升，并逐渐探索与资源化利用的深度融合。氢能技术尤其在高温热源替代、冶金还原等场景中展现出巨大潜力，随着可再生能源制氢成本的下降和基础设施建设的推进，氢能正逐步嵌入工业能源结构。同时，可再生能源在工业园区的本地化部署成为重要趋势，风光互补、储能与微电网协同发展，正在构建以绿色电力为主的清洁能源供给体系。

4.2 面临的挑战

尽管技术进步显著，但工业节能减排的推广应用仍面临多方面制约。首要挑战是成本压力，特别是系统性改造往往涉及高额初期投入，而多数中小企业缺乏相应的资金能力。其次，技术集成和适配难度较大，不同行业、不同工况下的能效优化路径差异显著，通用性技术难以直接迁移，导致大规模复制难度较高。此外，碳减排与生产稳定之间在一些行业中仍存在一定的矛盾，部分节能技术可能对产线连续性、工艺质量造成冲击，从而降低企业采纳意愿。同时，标准体系和评价机制尚不健全也是制约因素之一。目前行业间在节能评估、碳排核算、数据共享等方面缺乏统一规范，阻碍了先进经验的推广应用。碳市场机制尚不完善，碳价格波动大、交易规则不清晰，使得节能减排的经济激励作用未能充分释放。此外，复合型人才短缺问题突出，特别是在低碳技术与工业自动化融合的关键环节，技术人才供给难以满足产业转型升级的迫切需求。

4.3 应对策略与发展方向

为破解上述困境，需从政策、市场和技术三方面统筹推进。政策层面，应通过财政补贴、绿色信贷、碳基金等手段加大对节能改造项目的支持，降低企业准入门槛，并通过强制标准与绩效考核机制引导企业加快低碳转型。市场层面，需完善碳交易体系，建立更加清晰和稳定的碳定价机制，提升节能减排项目的投资回报可预期性，激发企业主动参与绿色投资的动力。技术层面，应加强跨领域协同创新，推动节能设备、智能控制系统与产业工艺深度融合，提高技术集成度和适用性。同时，应加快构建绿色低碳人才培养体系，推动高等院校与企业共建产学研平台，提升工程技术人才对前沿节能减排技术的掌握与转化能力。总之，工业节能减排技术的未来发展，将不再局限于某一项技术的突破，而是朝向多路径协同、多技术融合的系统性方向演进。实现高效、清洁、智能的工业能源系统，既需要政策机制的引导，也依赖市场活力的激发与技术创新的持续推动。

5 结语

本文系统梳理了工业领域节能减排技术的应用现状与发展趋势，表明工艺流程优化、余热回收与智能化监控等技术已在多行业取得显著能效提升，CCUS、氢能与可再生能源替代等绿色低碳技术则为进一步减排提供了突破口。典型案例显示，技术集成与规模化推广可实现单位产品能耗和碳排放双降，同时提升经济效益。未来，应在完善投融资机制和技术标准、强化人才培养与管理、优化碳市场与绿色金融激励的基础上，推动数字化赋能与跨行业协同，构建“技术驱动—政策支撑—市场引导”相互配合的工业低碳发展体系，为实现 2030 碳达峰和 2060 碳中和目标奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 刘洋,杨东平.碳达峰碳中和背景下我国能源绿色低碳转型典型案例解析[J].中华环境,2025,(04):36-39.
- [2] 周云柯,吴建国.中国碳排放影响因素分析与碳中和路径探寻[J].中国国土资源经济,2025,38(04):12-24.
- [3] 金宇翔,侯雪伟,洪蕾,等.碳中和情景下我国 CO₂ 与 O₃ 前体物协同减排特征分析[J].中国环境科学,2025,45(04):2230-2239.
- [4] 陈红芳,贺珊珊,马民,等.污水厂碳排放影响因素及碳中和潜力分析[J].净水技术,2025,44(04):98-107+158.
- [5] 孙呈祥,李姗姗.“双碳”战略下煤炭工业节能减排技术评估[J].现代工业经济和信息化,2024,14(09):1-6.

【作者简介】

谢作琮（1996-），男，汉族；浙江温州人，本科。研究方向为节能减排、低碳环保咨询。