

人工智能在煤基能源化工领域的 全球专利态势与战略应对

杨雪, 文成玉*

(北京低碳清洁能源研究院, 北京 100011)

摘要: 基于全球专利大数据, 综合运用专利计量、文本挖掘与社会网络分析方法, 系统剖析 2006—2025 年间人工智能在煤基能源化工领域的创新态势与竞争格局。研究发现, 中国在专利申请数量上占据主导, 但存在创新主体以高校为主、企业承接能力不足、PCT 国际布局滞后等结构性问题。细分领域分析表明, 技术热点已从基础控制转向基于神经网络的智能预测与优化, 但在工业场景中仍面临数据稀缺、模型可解释性差、产学研转化不畅等共性瓶颈。为此, 建议我国能源企业聚焦“机理+AI”融合创新, 加强高价值、国际化专利布局, 推动技术落地与产业升级。

关键词: 人工智能; 煤基能源化工; 专利分析; 数字孪生

中图分类号: G306

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0011-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.003

Global patent landscape and strategic responses for artificial intelligence in the coal-based energy and chemical industry

YANG Xue, WEN Cheng-yu*

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 100011, China)

Abstract: Based on global patent big data, this study comprehensively utilizes patent bibliometrics, text mining, and social network analysis to systematically investigate the innovation trends and competitive landscape of artificial intelligence (AI) in the coal-based energy and chemical industry from 2006 to 2025. The findings indicate that while China dominates in the sheer volume of patent applications, structural challenges persist; these include a heavy reliance on universities as primary innovation actors, insufficient technology absorption capacity among enterprises, and a lagging international patent layout via the Patent Cooperation Treaty (PCT). Sub-domain analysis reveals a shift in research hotspots from basic control systems towards neural network-based intelligent prediction and optimization. However, common bottlenecks remain in industrial applications, such as data scarcity, poor model interpretability, and inefficient technology transfer from academia to industry. Consequently, it is recommended that China's energy enterprises focus on mechanism+AI integrated innovation, strengthen the deployment of high-value and international patents, and facilitate technological implementation and industrial upgrading.

Key words: artificial intelligence; coal-based energy and chemical industry; patent analysis; digital twin

在“碳达峰、碳中和”目标与国家能源安全新战略的双重背景下, 传统煤基能源产业面临着绿色低碳转型的重大挑战^[1-2]。与此同时, 以人工智能(AI)和大数据为代表的新一代数字技术快速演进, 正在推动工业生产基础范式的重构^[3]。对于中国煤基能源化工产业而言, 如何推动人工智能技术在全产业链的深度融合与应用, 进而培育新质生产力, 已成为实现产业高质量发展的关键战略议题^[4-5]。

然而, 当前针对人工智能技术在煤基能源化工领域的研究, 仍缺乏对其应用成熟度与核心技术能力的系统性剖析, 且鲜有基于客观数据的全产业链

量化评估, 导致该领域的创新现状评估、技术演进趋势研判以及未来发展路径规划尚缺乏充分的数据支撑与理论指导。

因此, 本文中基于全球专利大数据, 综合运用专利计量学、文本挖掘与社会网络分析等方法^[6], 构建了覆盖煤基能源化工全产业链的专利检索策略与技术分类体系。研究选取煤炭开采、燃煤发电、现代煤化工及碳捕集、利用与封存(CCUS)4大核心环节, 从专利申请趋势、创新主体分布及技术主题演变等维度进行深入分析, 旨在客观揭示人工智能在该领域的创新态势、竞争格局与演进规律, 从而为相关技术发展及专利战略布局提供科学的决策依据。

收稿日期: 2026-03-18; 修回日期: 2026-06-12

作者简介: 杨雪(1992-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为人工智能、知识产权, 15201342475@163.com; 文成玉(1980-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为知识产权, 通讯联系人, 17240048@ceic.com。

1 人工智能在煤基能源化工领域的全球专利宏观态势

本研究利用智慧芽 (PatSnap) 全球专利数据库,以 2006 年 1 月—2025 年 12 月为检索时间窗口,对煤基能源化工领域的人工智能技术专利进行全景扫描。检索策略采用“关键词+分类号”的组合方式^[7-8],技术关键词涵盖“人工智能”、“深度学习”、“神经网络”、“数字孪生”等核心算法术语;应用关键词覆盖“煤炭开采”、“燃煤发电”、“煤化工”、“CCUS”等产业链关键环节;同时结合 IPC 分类号 (如 G06N、C10、E21 等) 进行限定。经同族合并去重后,共获得发明专利申请样本 26 774 项。本节将从时间演进、地域分布及创新主体 3 个维度,解析该领域的全球竞争格局与发展规律。

1.1 申请趋势与技术生命周期

基于专利申请数据的长周期追踪显示 (表 1),近 10 a 该领域的创新活动呈现显著的非线性增长特征。专利申请量从 2015 年的 169 项/a 迅速攀升至 2024 年的 6 541 项/a,同比专利申请增长率长期维持在高位。

表 1 全球煤基能源化工领域人工智能专利申请情况 (2015—2024 年)

年度	2015	2016	2017	2018	2019
年度申请量/项	169	481	710	1078	1652
同比增长率/%	49.5	184.6	47.6	51.8	53.2
年度	2020	2021	2022	2023	2024
年度申请量/项	2237	2967	3767	5011	6541
同比增长率/%	35.4	32.6	27.0	33.0	30.5

结合产业发展背景分析,2016 年深度学习技术的突破性进展^[9-10]提升了人工智能在实体经济的应用可行性,推动了相关专利申请的快速增长。2017 年,《新一代人工智能发展规划》^[11]的发布进一步加速了技术在能源领域的渗透。自 2020 年起,在能源绿色低碳转型战略与生成式 AI 等新技术^[12-13]迭代的双重驱动下,专利申请进入高速增长期。这一趋势表明,人工智能技术正深度融入煤炭开采、化工流程控制等核心生产环节,行业竞争焦点已从早期的概念验证转向关键技术的实质性布局。

依据技术生命周期理论^[14-15],当前专利族数量与申请人数量的双重快速增长表明,人工智能在煤基能源化工领域的应用正处于成长期中后段。随着技术瓶颈的突破与应用场景的拓展,预计未来 3~

5 a 该领域仍将处于核心知识产权布局的关键窗口期,随后将逐步进入以技术标准化与市场格局固化为特征的成熟期。

1.2 全球竞争格局与 PCT 国际布局

基于受理局维度的全球专利族数据统计显示,该领域的技术布局存在显著的地域不平衡性。如图 1 所示,中国作为主要的专利受理国与技术来源国,持有专利族 24 540 项,在样本总量中占据主导地位。其数量远超排名其后的美国 (1 774 项)、印度 (1 082 项)、韩国 (468 项) 和日本 (371 项),形成了以中国为核心的单极多强分布态势。这一分布格局一方面得益于中国庞大的煤基能源化工产业基础提供了丰富的工程验证场景,另一方面也反映了国家数字化转型战略的驱动效应。

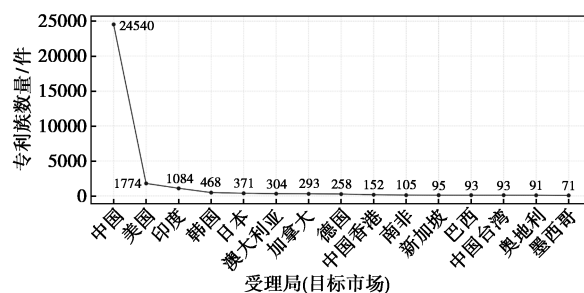


图 1 目标市场专利族数量分布

然而,在专利流向与布局策略方面,中西方存在显著差异 (表 2)。尽管中国占据了全球约 88% 的申请份额,但 PCT 国际申请仅 373 项,转化率约为 1.5%,向欧洲专利局 (EPO) 的申请量仅为 90 项。这表明我国在该领域的创新具有显著的“本土导向型”特征,缺乏成体系的海外知识产权布局。相比之下,美国虽然申请总量较少,但 PCT 申请量达 500 项 (转化率 28.2%),EPO 申请量 321 项 (占比 18.1%)。这种高国际转化率体现了其成熟的全球专利布局战略,即通过 PCT 途径在关键目标市场提前确立技术标准优势。

表 2 专利核心市场国际对比表 件

受理局	中国	美国	印度	韩国	日本
WIPO 申请数量	373	500	29	56	47
EPO 申请数量	90	321	21	13	33

1.3 创新主体结构 with 产学研特征

对专利申请人的机构类型与持证数量进行分析,我国人工智能技术在煤基能源化工领域的专利申请以高校申请为主,约占总持有量的 54.0%,大型央企和科技型企业 在个别领域展现了聚集的创新

优势。统计数据显示,国家电网有限公司以 537 项专利族数量位居全球申请人首位,技术关键词集中在电网、储能等煤基能源与新能源耦合的交叉学科。这表明在构建新型电力系统与能源互联网的战略驱动下,国家电网有限公司快速接触人工智能等先进技术,迅速布局专利市场,为企业创新和转型提供技术储备。

在排名前 10 的申请主体中(图 2),高校占据 6 席,包括中国矿业大学(353 项,排名第二)、浙江大学(227 项)、华北电力大学(217 项)及东南大学(189 项)等。与欧美国家通常由企业主导的模式不同,这种高密度的高校分布反映了我国在能源与人工智能交叉学科的基础研究较为活跃,共同构成了我国该领域的学术创新基础。

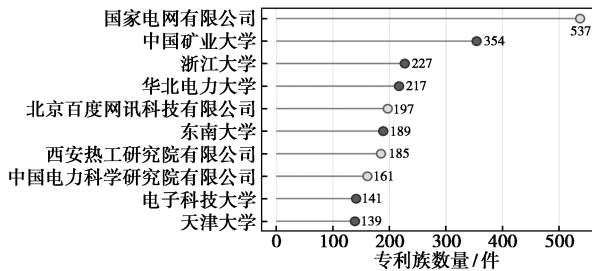


图 2 全球煤基能源化工领域人工智能专利的创新主体情况

此外,北京百度网讯科技有限公司以 197 项专利族位列第五,是前 10 名中唯一的互联网科技企业。这一现象标志着能源行业正逐步打破封闭的垂直体系,具备算法优势的信息通信技术(ICT)企业正通过将成熟的大模型与大数据技术迁移至能源管理场景,推动跨界融合并重塑行业竞争边界。

2 煤基能源化工全产业链细分领域的技术热点与竞争特征

煤基能源化工产业体系庞大,涵盖了从资源开采到转化利用的多元环节^[16-17]。鉴于不同产业链环节对人工智能技术的接纳逻辑、应用场景及技术成熟度存在显著差异,本节基于专利计量结果,重点针对煤炭开采、燃煤发电、现代煤化工及碳捕集、利用与封存(CCUS)4 个核心领域进行深入剖析。

2.1 智慧煤矿与智能开采技术

作为产业链源头,煤炭开采场景因地质环境的非结构化特征与作业过程的高风险性,人工智能技术的应用具有鲜明的垂直行业属性^[18]。专利态势显示,该领域技术创新活跃,反映了行业对于实

现少人化、无人化本质安全目标的迫切需求。

技术主题分析(图 3)显示,“神经网络”与“深度学习”是该领域的核心技术热点,专利族数量分别为 456、236 项,显著高于传统数据处理技术。结合技术-功效关联图分析,“神经网络”与“提高预测精度”、“提高稳定性”呈现强耦合关系,说明面对井下复杂多变的断层、瓦斯等地质条件,基于简单逻辑规则的传统自动化控制已触及瓶颈,行业正转向利用深度神经网络处理地震波、视频流等非结构化数据,以解决井下环境感知与设备决策中的非线性难题,从而提升综采装备的自适应截割能力。

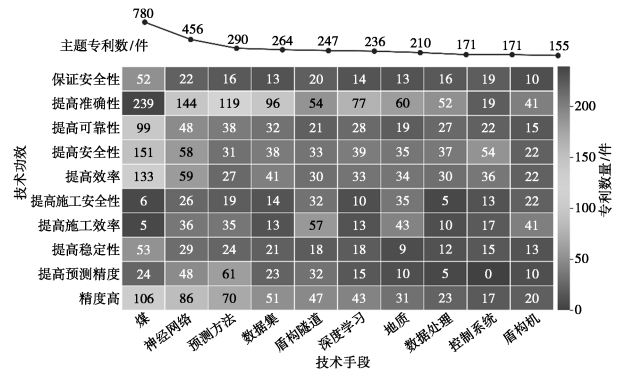


图 3 智慧煤矿与智能开采领域的技术热点与工程功效分析

在创新主体方面,该领域的专利申请仍以高校主导,中国矿业大学(193 件)、山东大学(66 件)、西安科技大学(59 件)等高校位居全球前列。相比之下,煤炭生产企业与装备制造企业的排位相对靠后。这种分布表明,当前智慧煤矿领域的 AI 技术仍处于基础算法与理论模型的密集探索期,企业端的工程化应用与技术承接能力相对滞后,产学研之间尚未形成高效的技术转化闭环。

2.2 智慧电厂与高效发电技术

燃煤发电的智能化水平直接制约着能源利用率与电网调节能力的提升。检索分析表明,燃煤发电行业的数字化转型已超越早期的分散控制系统(DCS)改造阶段,全面进入以数据驱动为核心的深度智能化时期^[19-20]。

技术路线分析(图 4)显示,“神经网络”与“特征提取”的高频出现标志着技术范式的变革,在燃烧优化与设备诊断领域的应用已确立主导地位。技术-功效分析进一步指出,“提高准确性”是该领域最为主要的技术诉求。具体而言,研发重点已从传统的机理建模转向“机理+数据”混合驱动。利用卷积神经网络(CNN)等算法对锅炉燃烧火焰图像、设

备振动频谱进行深度特征提取,构建高精度的燃烧过程软测量模型与设备健康管理的数字孪生体,从而在机组深度调峰工况下实现实时优化控制与故障预警。

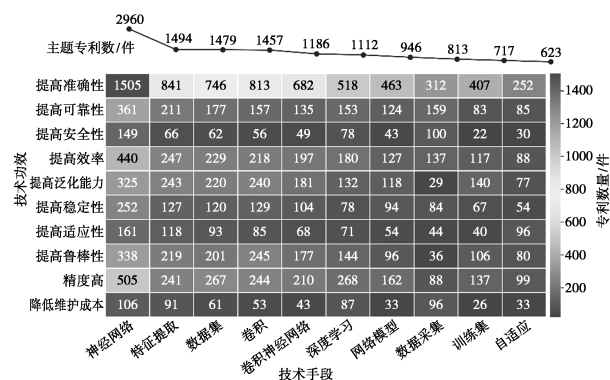


图 4 智慧电厂与高效发电领域的技术热点与工程功效分析

创新主体分布方面,除西安热工研究院以 135 项专利族位居榜首外,该领域同样呈现高校集聚特征,如西安交通大学(127 件)、南京航空航天大学(122 件)和浙江大学(120 件)紧随其后。这种分布特征反映出电力行业在长期信息化建设中积累了高质量的数据资产,使得科研院所与高校的先进算法能够较快地在工业现场找到落地场景,初步形成了产学研协同创新的良好生态。

2.3 现代煤化工技术

现代煤化工涉及煤气化、煤制油、煤制烯烃等复杂的物理化学转化过程,生产环境具有高温高压、多变量强耦合及大滞后的显著特征,智能化升级的核心在于解决复杂反应过程的精准控制问题^[21]。分析显示,该领域呈现出“外资主导底层控制、本土企业深耕工艺优化”的差异化竞争态势。

技术主题分布(图 5)表明,“控制系统”、“神经

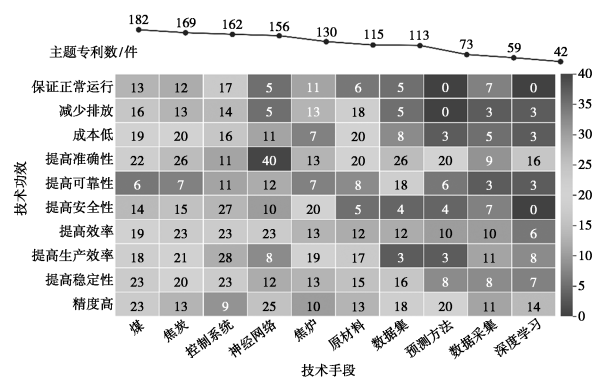


图 5 现代煤化工领域的技术热点与工程功效分析

网络”与“焦炉/气化炉”是专利布局的焦点。在技术-功效维度,“提高准确性”、“提高效率”与“提高稳定性”是核心技术目标。这反映出行业正致力于突破传统 PID 控制的局限,利用人工智能构建“软测量”模型,解决气化炉炉温、合成塔组分等关键参数不可在线实测的难题。通过引入模型预测控制(MPC)等先进策略,在逼近装置运行极限的边缘进行动态寻优,以实现“安、稳、长、满、优”的生产目标。

值得注意的是,在创新主体方面,西门子公司以 23 项专利族位居第一,显示出国际自动化巨头在底层控制算法与系统架构方面的深厚积淀。中冶焦耐(21 件)、中国石化(16 件)等本土企业虽然紧随其后,但主要集中在特定工艺段的优化应用上。这种格局提示,我国在煤化工智能工厂的建设中,面临着底层控制系统核心技术受制于人的潜在风险,亟需加强基础控制算法的原始创新。

2.4 CCUS 与碳管理技术

作为实现碳中和的关键支撑,CCUS 及碳管理领域的专利活动呈现出明显的数字化转型趋势,重心正从单纯的物理捕集技术向基于 AI 的碳汇计量与风险预测转移。

技术主题分布(图 6)显示,“碳汇”以 189 项专利族数量位居首位,远超传统的“碳捕集”与“碳封存”技术。技术-功效矩阵揭示,“提高准确性”是与“碳汇”及“神经网络”关联度最高的目标。这一现象表明,面对森林、湿地等自然碳汇以及地质封存过程的时空复杂性,传统监测手段难以满足高精度要求。行业正致力于利用 AI 技术融合卫星遥感、通量塔监测等多源异构数据,构建生态碳通量反演模型与地质封存安全性预测模型,旨在提升可监测、可报告、可核查能力,为碳资产交易提供可信的数据底座。

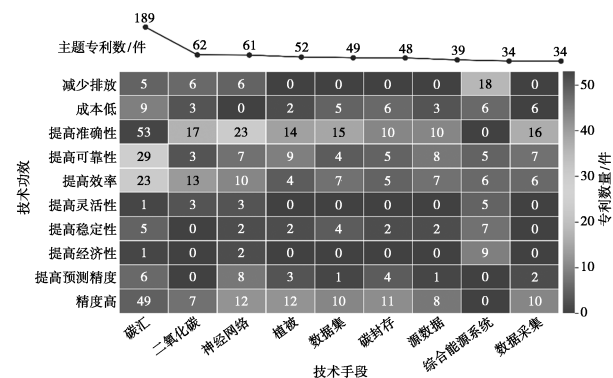


图 6 CCUS 及碳管理领域的技术热点与工程功效分析

创新主体方面,中国石油大学(华东)以 33 项专利族领跑,东南大学(23 件)、中国石化(17 件)等紧随其后。展现出石油类高校基础研究与能源央企工程示范的协同结构,反映了当前技术落地主要依赖于油气行业的二氧化碳驱油($\text{CO}_2\text{-EOR}$)与枯竭油气藏封存实践。高校侧重于攻克地下多相流模拟与运移规律预测的算法难题,而央企则承担工程化验证职能,共同推动该技术从理论模型向商业化应用跨越。

3 重点领域的共性技术瓶颈与专利布局建议

基于前文对全球专利宏观态势及细分领域的分析,本节总结了人工智能技术在煤基能源化工产业应用中面临的共性技术瓶颈,并据此提出针对性的专利布局策略,为大型能源企业构建“技术-专利-标准”协同的竞争优势提供参考。

3.1 重点领域的共性技术瓶颈

尽管人工智能技术在煤基能源化工领域发展迅速,但相较于互联网与消费电子行业,其在工业场景的深度融合仍面临以下结构性与技术性挑战。

(1)创新主体结构存在产学研脱节现象。统计数据显示,在煤炭开采、燃煤发电及 CCUS 等领域,高价值专利资源主要集中于高校及科研院所。除少数企业外,大多数能源企业的核心技术专利储备相对薄弱。这种结构性失衡表明,大量学术成果仍停留在理论模型阶段,尚未有效转化为解决工业实际问题的生产力,企业端的技术承接能力与原始创新能力亟待提升。

(2)工业场景下的高价值样本数据稀缺。虽然能源化工行业具备海量的时序数据积累,但由于工业装置长期处于安全稳定的运行状态,包含故障特征的差异化数据极为匮乏,直接导致纯数据驱动的 AI 模型在面对非稳态工况时,往往面临泛化能力不足与迁移学习困难的问题。

(3)“黑盒”模型缺乏物理可解释性与可靠性验证。煤基能源化工生产具有高温、高压及易燃易爆的特征,对系统安全性的要求极为严苛。当前,基于深度学习构建的预测模型多为缺乏物理机理约束的“黑盒”模型,即便在测试集上表现出较高的精度,但由于缺乏对工艺机理的明确解释,难以获得工程应用层面的信任,特别是在涉及闭环控制与自主决策的关键环节,存在显著的应用壁垒。

3.2 重点领域的专利布局策略建议

针对上述共性瓶颈问题及各细分领域的竞争态

势,建议中国大型能源企业采取以下专利布局策略。

(1)坚持问题导向,构建面向生产场景的应用型专利池。针对高校专利偏重算法理论而忽视工程约束的特点,能源企业应充分发挥其拥有实际生产场景与全量运行数据的优势。建议从解决具体工程痛点出发,挖掘生产实践中的技术改进点,重点布局具有明确工业应用价值的技术专利,形成与高校理论型专利互补的防御体系。

(2)聚焦技术融合,突破“机理+AI”混合建模的核心专利。鉴于纯数据驱动模型的局限性,建议企业重点布局融合工艺机理与数据驱动的数字孪生技术。基于对煤炭燃烧、气化等核心反应过程的深刻认知,开发并保护针对特定反应器(如气化炉、合成塔)的物理信息约束模型或混合建模方法。此类专利既包含算法创新,又结合了独有的工艺参数特征,具有较高的技术门槛与排他性。

(3)优化资产结构,实施高价值与国际化的专利运营战略。建议企业建立精细化的专利分级评价机制,从追求数量规模转向注重质量效益。一方面,重点提升发明专利的 PCT 国际申请比例,特别是在“一带一路”沿线资源国进行前瞻性布局,以应对国际化经营中的知识产权风险;另一方面,建立产学研协同的专利运营机制,探索对高校非活跃存量专利的收储与二次开发模式,通过工程化验证激活基础算法的商业价值。同时,在先进控制系统等关键技术领域,可利用独有的工艺数据专利与国际技术方开展交叉许可合作,构建开放共赢的创新生态。

4 结论

基于全球专利计量视角,系统剖析了人工智能在煤基能源化工全产业链的创新演进路径与战略竞争格局。研究结论如下。

(1)依托庞大的产业基础,中国在专利申请总量上已确立显著优势。然而,我国专利布局存在明显的结构性短板,主要表现为创新主体以高校为主、企业原始创新能力不足,以及 PCT 国际申请占比偏低,国际化布局滞后于产业发展需求。

(2)在煤炭开采、燃煤发电、现代煤化工及 CCUS 等细分领域,技术热点已从基础自动化控制向基于神经网络的智能预测与优化控制演进。然而,行业普遍面临高价值故障数据稀缺、纯数据驱动模型缺乏物理可解释性,以及系统控制权从“开环辅助”向“闭环接管”跨越过程中的可靠性验证难题。

(3) 面对上述挑战,建议中国大型能源企业从规模扩张转向质量提升。应确立面向生产实际、注重工艺机理融合的研发方向,重点突破“机理+AI”混合建模技术;同时,加快构建差异化、高价值且具备国际竞争力的知识产权战略体系,通过产学研深度融合与全球化专利布局,为能源化工产业的数字化与绿色化协同转型提供坚实的法律与技术保障。

参考文献

- [1] 赵君强.“双碳”视野下现代煤化工的发展前景探究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(6):147-149.
- [2] 李民,吕丰,孙保全,等.双碳目标约束下现代煤化工企业绿色低碳发展路径浅析[J].中外能源,2024,29(1):17-21.
- [3] 任怀影,刘芷若,李红阳,等.能源转型变革中数字技术的应用场景与模式研究[J].信息通信技术与政策,2024,50(10):15-20.
- [4] 王新平,肖雪,王双明,等.新质生产力驱动能源绿色低碳转型:作用机理、现实挑战与实现路径[J].技术与创新管理,2025,46(6):627-639.
- [5] 姜培学,金红光.面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究[J].科学通报,2024,69(34):5007-5015.
- [6] 韩震,沈君,曲莎莎.RFID 技术趋势及竞争态势的专利计量分析[J].科研管理,2013,34(7):11-16.
- [7] 屈琪.人工智能技术在脑机接口领域的应用研究[J].世界科技研究与发展,2026,48(1):58-68.
- [8] 王宁远,张华夏,董和煦,等.人工智能在核领域知识产权工作中的应用研究[J].中国发明与专利,2024,21(S1):141-147.
- [9] 杨婕.全球人工智能发展的趋势及挑战[J].世界电信,2017,(2):15-19.
- [10] 苏剑波,陈叶飞,马哲,等.从 AlphaGo 到 BetaGo——基于任务可完成性分析的定性人工智能的定量实现[J].控制理论与应用,2016,33(12):1572-1583.
- [11] 本刊.国务院发布《新一代人工智能发展规划》[J].中国标准化,2017,(15):28.
- [12] 陈永伟.超越 ChatGPT:生成式 AI 的机遇、风险与挑战[J].山东大学学报:哲学社会科学版,2023,(3):127-143.
- [13] 赵志宏.生成式 AI 开启生产力新范式[J].银行家,2023,(4):18-23.
- [14] 王山,谭宗颖.技术生命周期判断方法研究综述[J].现代情报,2020,40(11):144-153.
- [15] 张海锋,张卓.技术生命周期阶段特征指标构建及判定[J].技术经济,2018,37(2):108-112.
- [16] 金丽杰.能源转型背景下煤炭产业绿色低碳发展路径研究[J].知识经济,2025,(32):142-145.
- [17] 张晓华,徐丽娜,景海霞,等.技术创新视角下煤炭资源型经济转型路径[J].企业科技与发展,2025,(7):63-67.
- [18] 韦建辉,李作泉,朱事能,等.煤炭智能化开采技术现状及展望[J].煤,2025,34(8):96-100.
- [19] 赵春晖,胡赞响,郑嘉乐,等.数据驱动的燃煤发电装备运行工况监控——现状与展望[J].自动化学报,2022,48(11):2611-2633.
- [20] 李鹏,孙鹤,张健,等.电厂锅炉燃烧系统先进过程控制实验仿真平台[J].计算机与应用化学,2012,29(10):1216-1220.
- [21] 张仰敏,王振环.人工智能与 AI 大模型在现代煤化工设备管理中的应用[J].氮肥技术,2025,46(3):1-4. ■
-
- (上接第 10 页)
- [7] Bian K, Liu Y, Zhou L, *et al.* Recent advances in CO₂ solid adsorbents and application prospect in biofuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 214: 115560.
- [8] 向晟.基于量子化学的燃烧后碳捕集有机胺溶剂智能设计方法[D].大连:大连理工大学,2024.
- [9] Zhao S, Zhang Y, Li L, *et al.* Degradation of amine-functionalized adsorbents in carbon capture and direct air capture applications: Mechanism and solutions[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354(P8): 129586.
- [10] Yang Y, Liu Y, Liu S, *et al.* Experimental and theoretical investigation of amine-modified biomass-derived activated carbon for CO₂ capture: The effects of carbon chain length and types of amine[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 292: 119968.
- [11] 向晟,刘奇磊,张磊,等.基于反应动力学的计算机辅助碳捕集有机胺溶剂设计[J].清华大学学报:自然科学版,2024,64(3):520-527.
- [12] 王睿.燃烧后烟气 CO₂ 捕集吸收剂的性能研究[D].沈阳:东北大学,2023.
- [13] 杨祥富.高负载量二氧化碳吸收剂性能研究[D].北京:北京化工大学,2023.
- [14] 叶凯.基于有机胺吸收法的碳捕集工艺研究进展[J].中国资源综合利用,2021,39(9):117-119.
- [15] 孙路长,王争荣,吴冲,等.燃煤电厂万吨级碳捕集工程设计与运行优化研究[J].华电技术,2021,43(6):69-78.
- [16] Khan J, Iqbal N, Asghar A, *et al.* Novel amine functionalized metal organic framework synthesis for enhanced carbon dioxide capture[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 105539.
- [17] 李京.基于离子液体—有机胺水溶液脱碳技术的研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [18] 郭超.有机胺溶液捕集二氧化碳的研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [19] 晏水平,方梦祥,张卫风,等.烟气中 CO₂ 化学吸收法脱除技术分析进展[J].化工进展,2006,(9):1018-1024.
- [20] 方梦祥,周旭萍,王涛,等.CO₂ 化学吸收剂[J].化学进展,2015,27(12):1808-1814. ■