

煤气化技术的研究现状与发展趋势

郭 騫 景少龙

陕西渭河彬州化工有限公司 陕西 咸阳 713599

摘 要：在“双碳”目标与能源结构转型背景下，煤气化作为煤炭清洁高效利用的核心技术，是现代煤化工、能源保供与工业减排的关键支撑。本文系统梳理煤气化技术的发展历程与分类体系，聚焦固定床、流化床、气流床三大主流气化技术的国内外研究与应用现状，总结当前煤种适配、过程强化、余热利用、智能调控四大核心研究方向。研究旨在明晰煤气化技术的现存技术瓶颈与升级路径，为大型气化装置优化、新型气化工艺研发及煤化工产业绿色低碳转型提供理论参考与实践依据，助力煤炭资源高效、低碳、资源化利用。

关键词：煤气化；气流床；流化床；煤化工；发展趋势

引言：煤炭是我国主体能源，在能源安全保供体系中占据核心地位，传统直接燃烧模式存在能效低、污染重、碳排放高等突出问题，难以适配绿色低碳发展要求。煤气化技术可将固态煤炭转化为清洁合成气，实现煤炭从燃料向原料的资源化转型，是现代煤化工产业的核心基础工艺。经过数十年迭代发展，我国煤气化技术已实现从跟跑到领跑的跨越，各类气化工艺在工业场景中规模化应用。基于此，本文系统梳理煤气化技术发展现状、核心研究方向，预判未来技术发展趋势，为煤化工产业高质量、低碳化、智能化升级提供支撑。

1 煤气化技术发展历程与分类

1.1 煤气化技术发展历程

煤气化技术的发展历经传统粗放应用、技术引进消化、自主创新突破、绿色智能升级四个核心阶段，逐步实现产业化、大型化、清洁化迭代。早期煤气化技术以常压固定床工艺为主，设备结构简单、操作便捷，但存在能效低、污染排放量大、煤种利用率低等缺陷，仅适用于小型民用与基础化工场景。改革开放后，我国大规模引进国外 Shell、GE 等先进气化技术，完成大型气化装置的工业化落地，积累了丰富的工程应用经验。21 世纪以来，国内高校与科研院所持续攻关，成功研发多喷嘴对置式、航天炉、SE 东方炉等自主核心技术，实现关键设备国产化替代。现阶段，行业进入低碳智能升级阶段，技术研发聚焦能效提升、碳减排、智能调控与多元耦合，适配双碳背景下煤炭清洁利用的产业需求，整体技术水平稳居全球前列。

1.2 煤气化技术分类体系

根据反应器炉型、物料运动状态与气化工艺特征，

行业通用分类将煤气化技术划分为固定床、流化床、气流床三大主流类型，三类工艺的反应原理、运行参数、适配煤种与应用场景差异显著。固定床气化技术为传统静态气化工艺，煤炭物料静止堆积，气化剂缓慢渗透反应，设备成本低、操作简单，适配块状无烟煤与焦炭。流化床气化技术依托高速气流使煤粒悬浮流化，气固接触充分，反应均匀，适配褐煤、次烟煤等劣质煤^[1]。气流床气化技术为现代高端工艺，煤粉与气化剂高速对冲混合，高温高压快速反应，具备碳转化率高、合成气品质优、装置大型化的优势，是当前大型煤化工项目的主流选择。三类技术互补适配不同工业场景，构成了我国完备的煤气化工艺体系。

2 主流煤气化技术研究现状

2.1 气流床气化技术

气流床气化技术是目前工业化应用最广、技术最成熟的高端气化工艺，也是国内大型煤制油、煤制气、煤制烯烃项目的核心首选技术。该技术采用高温高压气化条件，温度可达 1400~1700℃，煤粉与气化剂瞬间混合反应，碳转化率可达 99% 以上，合成气纯度高、杂质含量低。当前国内自主技术迭代成果显著，多喷嘴对置式气化技术、航天粉煤加压气化技术、SE 东方炉技术已实现规模化推广，国内投运装置数量稳居全球首位，打破国外技术垄断。现阶段研究重点聚焦装置大型化、能耗优化与长周期稳定运行，单台气化炉日处理煤量突破 3000 吨。但该技术仍存在设备造价高、高温部件损耗快、启停能耗大的问题，对设备材料与运维工艺提出了更高优化需求。

2.2 流化床气化技术

流化床气化技术以高效利用劣质煤为核心优势,凭借温和的反应条件、良好的气固传质效果,成为中小规模煤化工与煤炭综合利用的关键工艺。该技术气化温度控制在 850~1050℃,反应温度均匀,可有效规避高温结渣问题,适配高灰分、高水分的褐煤、劣质烟煤等低品质煤种,煤炭资源利用率显著提升。目前循环流化床气化技术已实现工业化成熟应用,CGAS 等新型流化床技术完成工艺优化,实现低能耗、低排放运行。当前研究主要围绕流场优化、颗粒分级调控、炉膛结构改造展开,着力解决传统流化床灰灰含碳量高、合成气夹杂杂质多、负荷调节稳定性差等短板。整体来看,该技术在劣质煤资源化利用领域具备不可替代的应用优势与发展潜力^[2]。

2.3 固定床气化技术

固定床气化技术是发展历史最悠久、工艺最简单的气化技术,凭借设备投资低、运维便捷、能耗可控的特点,仍广泛应用于中小型化工、燃气供应等场景。该技术采用块状煤炭静态气化,反应分层进行,可实现稳定连续运行,操作门槛低,适配中小企业生产需求。经过多年技术改良,现代固定床气化技术已完成环保升级,配套完善的烟气净化、废水处理系统,有效解决传统工艺污染严重的问题。但该技术固有短板较为突出,存在煤种适配范围窄、主要适配块状无烟煤、碳转化率偏低、规模化扩容受限等问题,无法适配大型现代煤化工项目需求。当前相关研究多聚焦环保改造、余热回收与小型装置智能化升级,重点优化排放指标与运行能效,维持其细分领域的应用价值。

3 煤气化技术关键研究方向

3.1 煤种适应性拓宽研究

我国煤炭资源品类复杂,褐煤、高硫煤、高灰煤等劣质煤占比极高,优质动力煤资源稀缺,拓宽煤气化技术煤种适应性是提升煤炭资源利用率的核心研究方向。当前主流气化技术均存在一定煤种限制,气流床对煤的灰熔点、煤粉细度要求严苛,流化床适配劣质煤但对粘结性煤适配性差,固定床仅适配块状精煤。现阶段研究重点围绕煤质改性预处理、气化工工艺参数优化、炉膛结构适配改造等方面展开,通过配煤气化、煤质调质、反应氛围调控等技术手段,突破单一工艺的煤种限制。同时科研团队持续探索劣质煤、煤矸石、半焦等固废资源化气化路径,最大化盘活低品位煤炭资源,降低优质煤消耗,提升煤化工产业资源利用的经济性与稳定性。

3.2 气化过程强化与放大研究

气化过程强化与装置大型化放大是提升煤化工产业能效、降低单位生产成本的关键路径,也是当前行业核心攻关方向。传统中小型气化装置存在单产低、能耗高、占地大、运维成本高的问题,难以适配规模化产业发展需求。当前研究主要聚焦气化反应动力学优化、气固传质传热强化、反应器结构创新等核心领域,通过优化喷嘴布局、改进炉膛流场、调控反应温度压力,强化气化反应效率,缩短反应周期、提升碳转化率。针对大型气化装置放大过程中出现的流场不均、温度偏差、负荷波动等工程难题,开展数值模拟与工业试验验证,优化大型炉型结构与运行参数,攻克大型化、规模化、高效化的技术瓶颈,推动气化装置集约化升级。

3.3 高效余热回收与能量集成研究

煤气化过程伴随大量高温烟气、粗合成气与固态灰渣余热,传统工艺余热回收利用率偏低,系统能量损耗严重,是制约煤化工能效提升的主要短板。高效余热回收与能量集成技术,成为降低装置能耗、实现节能降碳的重要研究方向。当前研究重点围绕全流程余热梯级利用体系构建,针对高温合成气显热、烟气余热、灰渣潜热,研发适配的余热回收设备与工艺,实现高温产汽、低温供暖、余热发电的梯级利用^[3]。同时,推进气化系统与变换、净化、合成等后续工艺的能量集成,优化全流程能量匹配,减少无效能耗损耗。通过工艺耦合与系统优化,有效提升整体能源利用效率,降低装置运行能耗与生产成本,助力产业节能增效。

3.4 气化过程智能化研究

随着数字技术与传统工业深度融合,煤气化过程智能化调控成为行业转型升级的核心研究热点。传统气化装置依赖人工操作,存在参数调控滞后、工况波动大、故障预判能力弱、运行稳定性不足等问题,极易造成能耗浪费与安全隐患。当前智能化研究聚焦三大核心方向,一是基于大数据的工况实时监测与精准调控,实现温度、压力、气固配比等参数动态优化;二是构建故障预警与智能诊断系统,提前预判设备磨损、工况异常等问题,保障装置长周期稳定运行;三是依托仿真模拟技术,优化启停、负荷调整等特殊工况运行方案。数字化、智能化技术的应用,有效弥补传统人工调控短板,大幅提升气化装置的稳定性、安全性与经济性。

4 煤气化技术发展趋势

4.1 低碳化趋势: 气化与碳捕集耦合

双碳目标下,低碳化成为煤气化技术迭代升级的核心导向,气化工工艺与碳捕集、利用与封存(CCUS)技术

深度耦合是未来主流发展趋势。传统煤化工碳排放强度高,碳减排压力巨大,单纯依靠工艺优化难以实现深度降碳。通过将煤气化系统与碳捕集技术耦合,可精准捕获合成气变换、烟气排放过程中的二氧化碳,实现规模化碳封存与资源化利用。当前已有多项示范项目落地运行,验证了耦合工艺的可行性与稳定性。未来行业将持续优化低成本碳捕集工艺,简化耦合系统流程、降低设备投资与运行能耗,推动 CCUS 技术从示范应用走向规模化普及,彻底破解煤化工高碳瓶颈,实现煤气化产业低碳可持续发展。

4.2 绿色化趋势:与氢能/可再生能源协同

煤气化技术与氢能、可再生能源协同耦合,是实现产业绿色升级的重要路径,可有效平衡化石能源利用与绿色低碳发展的矛盾。传统煤气化制氢是工业氢能的主要来源,成本优势显著,但存在碳排放偏高的问题,每公斤氢气约排放 18-20 公斤二氧化碳,在双碳背景下面临严峻挑战。未来通过光伏、风电等可再生能源发电制绿氢、绿氧,替代传统空分制气工艺中的灰氢、灰氧,可有效降低气化过程化石能源消耗与碳排放。推进煤气化耦合绿氢联产工艺,利用绿氢调节合成气氢碳比,减少变换单元 CO₂ 产生量;利用绿氧替代部分空分氧气,降低空分系统电耗,实现煤炭与氢能的协同制备、能源梯级利用,显著提升终端产品的绿色属性。该协同模式可充分发挥煤炭能源稳定保供优势与新能源清洁低碳优势,以煤化工装置作为电网的柔性负荷,在新能源出力高峰时增加电解负荷、低谷时减少电解负荷,有效弥补可再生能源间歇性、不稳定性短板,构建“化石能源兜底、新能源赋能”的绿色能源化工体系^[4]。

4.3 智能化趋势:数字孪生与智慧气化

数字孪生、大数据、人工智能等数字技术的深度融入,推动煤气化产业从传统工业化生产向智慧化、数字化模式转型。未来智慧气化将依托数字孪生技术,构建气化炉全尺寸虚拟仿真模型,实现设备运行状态实时映射、工况动态模拟、参数精准预判。通过全流程数据采集、分析与迭代优化,自动匹配最优运行参数,实现装置自适应调控、无人值守运行。搭建智能化运维管理平台,整合设备监测、能耗统计、故障预警、生产调度等功能,实现生产全流程数字化管控。智能化技术的全面落地,可有效降低人工干预强度、减少工况波动频次、提升能源利用率与装置运行安全性,推动煤气化产业实

现数字化、智慧化的高质量转型升级。

4.4 原料多元化趋势:煤炭分级转化与共气化

原料多元化、资源化利用是煤气化技术降本增效、盘活固废资源的重要发展趋势。传统单一煤炭气化模式对煤质要求严格、原料成本高、资源利用率有限,难以适配产业低成本、绿色化发展的长期需求。未来行业将重点推进煤炭分级转化与多元共气化技术,依托分级转化理念,将煤的热解、气化、提质等环节分步实施、梯级利用,先提取煤中高价值的焦油和芳烃组分,剩余半焦再进行气化制合成气,从而最大化挖掘煤炭资源价值,提升单位煤炭的经济产出。同时,积极开展煤炭与生物质、煤矸石、废塑料、工业有机固废等多元物料的共气化技术研究与应用验证。共气化技术可拓宽原料来源,减少优质煤炭消耗,实现固废的资源化处置和能源化利用。以生物质与煤炭共气化为例,生物质中的碱金属对煤气化反应具有催化作用,可提高气化反应速率,同时生物质来源的 CO₂ 不计入碳排放,有助于降低产品的碳足迹。多元共气化工艺可有效降低原料采购成本,减少固废堆积带来的环境污染,兼具显著的经济效益与环保效益,正逐步成为未来煤气化技术创新的重要突破口和发展方向。

结束语

煤气化技术作为煤炭清洁高效利用与现代煤化工的核心支撑,历经长期迭代已形成完备的技术体系,三大主流气化工艺各有优势、互补适配,广泛应用于能源化工多个领域。未来,煤气化技术将持续向低碳耦合、绿能协同、数字智能、原料多元四大方向升级,实现从规模扩张向绿色高效、智能集约的高质量转型。持续推进技术创新与工艺耦合,能够进一步提升煤炭资源利用率、降低产业碳排放,为我国能源安全保供、双碳目标落地与煤化工产业可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 何丽君. 煤气化渣资源化利用与规模化处置技术研究现状 [J]. 低碳世界, 2025, 15(2):1-3.
- [2] 栾运加. 煤气化技术的现状及发展趋势研究 [J]. 化工管理, 2023(16):75-77.
- [3] 王清臣. 煤气化技术及其发展趋势探讨 [J]. 化工管理, 2021(18):113-114.
- [4] 王栋, 姚彬, 张国辉, 等. 煤气化灰渣资源化利用技术的研究现状 [J]. 应用化工, 2024, 53(8):1967-1970.