

国际煤(生物质)循环经济及耦合利用前瞻

张 超

(山西兰花科技创业股份有限公司田悦化肥分公司)

在“双碳”目标与能源安全战略双重驱动下,煤化工产业正经历从“规模扩张”向“质量提升”的深刻转型。循环经济理念与多能耦合技术的深度融合,成为破解煤化工高碳属性、拓宽原料边界、提升产业价值的核心路径。基于第七届中国国际煤(生物质)气化大会展现的技术成果与产业趋势,本文对煤化工循环经济及耦合利用的发展前景展开系统前瞻。

一、循环经济:煤化工产业转型的核心支撑

循环经济以“减量化、再利用、资源化”为核心,通过技术创新构建“资源-产品-废弃物-再生资源”的闭环体系,已成为煤化工产业实现低碳转型与高质量发展的必由之路。

在资源高效利用层面,我国煤气化技术的自主突破为循环经济奠定了坚实基础。气流床技术作为当前主流选择,粉煤气化与水煤浆气化的高效转化能力显著提升了资源利用率——粉煤气化有效气产出率达96.71%,碳转化率99.07%,4000吨级炉年减碳超15万吨;水煤浆气化兼容15%-20%生物质掺烧,掺混后碳减排再降10%-15%,2000吨级炉年减碳超8万吨。氧气分级水煤浆气化技术通过降低喷嘴温度约200℃提升气化效率,水煤浆水冷壁技术以膜式水冷壁替代耐火砖,将年运行时间增至8000小

时,突破煤种限制的同时,减少了设备损耗与废弃物产生。

废弃物资源化利用是循环经济的关键环节。云南先锋化工的褐煤深加工项目树立了行业典范,其集成开发的煤气化废水资源化回收利用技术,实现了废水的循环复用,从源头减少了污染物排放。未来,随着CCUS(碳捕获、利用与封存)技术与煤化工产业的深度融合,气化过程中产生的二氧化碳将被捕获转化为化工原料或封存利用,进一步完善循环经济链条,推动产业向近零碳转型。

二、耦合利用:拓宽产业边界的关键路径

耦合利用通过跨领域技术融合,打破了单一能源品种的利用局限,实现了不同资源的优势互补,为煤化工产业注入新的发展动能,主要呈现三大方向:

(一)煤与生物质共气化耦合

生物质作为清洁可再生能源,与煤的共气化是当前兼顾能源安全与减排目标的现实选择。我国已形成“原料-炉型-场景”的完整适配体系,农业秸秆、林业废弃物、畜禽粪便等不同类型生物质,可根据其特性匹配循环流化床、固定床、气流床等不同炉型。掺混10%-30%生物质即可降低碳排放8%

-15%，航天炉、多喷嘴炉等主流装置已开展工业试验，内蒙古某项目以30%生物质+70%烟煤共气化，年产绿甲醇60万吨，碳减排达12%。中安联合项目更是将生物质替代煤比例提升至62.5%，彰显了该耦合路径的巨大潜力。未来，随着生物质原料预处理技术的优化与成本降低，共气化比例将进一步提高，成为煤化工低碳转型的核心抓手。

(二) 前沿气化技术与新能源耦合

超临界水气化、化学链气化等前沿技术与新能源的耦合，开辟了煤化工产业高质量发展的新赛道。西安交大团队研发的超临界水气化技术，实现生物质碳转化率 $\geq 96\%$ 、氢气占比58%，规模化后氢气成本可降至0.7元/ m^3 ，与绿电制氢技术耦合后，可替代化石能源制氢，为烯烃、乙二醇等大宗化工品生产提供清洁原料。中科院青岛能源所的化学链气化技术已完成千吨级中试，依托该技术的15万吨/年生物质绿甲醇项目在广西立项，未来与新能源制氢、绿氨技术结合，将构建“绿电-绿氢-绿化工”的耦合体系，推动产业向零碳转型。

(三) 系统智能化与产业耦合

数字孪生等智能化技术与煤化工产业的耦合，实现了生产过程的精准管控与高效运行。当前数字孪生系统精度已达98%，可提升装置稳定性50%以上，降低比煤耗1.3%。通过智能化技术与煤基多联产系统的耦合，能够实现煤炭、电力、化工、建材等多产业的协同发展，例如气化过程中产生的废渣可用于生产建材，余热可用于供暖或发电，形成跨产业的资源循环利用网络，提升产业整体竞争力。

三、产业驱动因素与未来升级方向

(一) 核心驱动因素

政策引领为产业发展提供明确方向，《煤电低碳

化改造行动方案》等政策的出台，推动了生物质掺烧、CCUS、智能化改造等技术的应用与推广。能源安全战略下，2025年鄂尔多斯等区域煤化工项目投资超3500亿元，呈现“量稳质升”特征，为循环经济与耦合利用技术提供了广阔的应用场景。市场需求持续旺盛，全球煤气化市场规模预计2029年达242.67亿美元，年复合增长率21.7%，驱动企业加大技术创新投入，推动循环经济与耦合利用模式落地。

(二) 未来升级方向

高效低碳化是核心目标，第四代气流床技术将目标锁定在比氧耗降至280-300 Nm^3/km^3 ，气化效率提升至85%-90%，进一步降低能耗与碳排放。原料多元化趋势明显，除生物质外，工业固废、城市有机废弃物等将逐步纳入煤化工原料体系，实现“变废为宝”。产品高端化成为重要突破口，煤基产品将向超清洁柴油、生物可降解材料、高端化工中间体等方向延伸，提升产品附加值。系统智能化水平持续提升，数字孪生、人工智能、大数据等技术将全面融入生产、管理、运维全流程，实现产业的精准管控与高效运行。

四、结语

煤化工循环经济及耦合利用是践行“双碳”目标、保障能源安全的重要路径，已形成“技术突破-产业应用-政策支撑”的良性发展格局。短期来看，煤与生物质共气化为核心的耦合模式将持续发力，依托自主气流床技术实现清洁高效利用；长期来看，前沿气化技术与新能源、智能化技术的深度融合，将推动煤化工产业构建近零碳排放体系。未来，随着技术的不断创新与产业生态的持续完善，煤化工循环经济及耦合利用将实现更高质量的发展，成为我国能源体系转型的核心支撑。