

CCUS 耦合三聚氰胺生产的绿色低碳循环工艺节能研究

王冬明

新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 以煤化工园区 CCUS-改良低压法三聚氰胺耦合循环系统为研究对象, 采用能源审计与(火用)分析手段划定核算边界, 剖析 CO₂ 原料化、荒煤气替代供热、反应尾气闭路循环、绿电协同接入的多重能量耦合机制, 测算系统理论节能量与碳减排潜力, 甄别限制系统能效提升的关键因素。分析显示该耦合模式拥有一定的节能降碳潜力, 据此提出工艺-热力-电力协同优化思路, 可为同类煤化工 CCUS 化工利用项目的能效评估提供工程参考。

[关键词] CCUS; 三聚氰胺; 荒煤气利用; 能源审计; 绿电耦合

DOI: 10.64635/ja.2026.1517

中图分类号: TQ226

文献标识码: A

Energy-Saving Study on a Green and Low-Carbon Circular Process Coupling CCUS with Melamine Production

Wang Dongming

Xinjiang Electric Power Design Institute, Urumqi, Xinjiang 830000, China

Abstract: Taking the CCUS-improved low-pressure melamine coupled circulation system in a coal chemical industrial park as the research object, this paper adopts energy auditing and exergy analysis to define the accounting boundary, analyzes the multiple energy coupling mechanisms of CO₂ raw material utilization, raw gas substitution for heat supply, closed-loop circulation of reaction tail gas, and coordinated green power integration, calculates the theoretical energy-saving amount and carbon emission reduction potential of the system, and identifies key factors limiting system energy efficiency improvement. The analysis shows that this coupling mode has certain potential for energy saving and carbon reduction. On this basis, a coordinated process-thermal-power optimization approach is proposed, which can provide engineering reference for energy efficiency evaluation of similar CCUS-based chemical utilization projects in coal chemical industries.

Keywords: CCUS; melamine; raw gas utilization; energy auditing; green power coupling

引言

煤化工工艺过程排放的二氧化碳, 是国内工业领域低碳改造过程中较难处理的一类排放源。CCUS 技术将捕集二氧化碳转化为化工产品, 为该类排放治理提供一条可选技术路径。当前国内多数 CCUS 示范项目偏向地质封存与油气驱替应用, 面向现场化工就地转化的工程实践仍然偏少, 系统层面的能耗匹配问题制约该类技术的推广落地。

三聚氰胺主流尿液合成路线具备接纳外来 CO₂ 物料的工艺条件。部分西北煤化工园区同时存在副产荒煤气闲置、风光电力消纳压力较大的现实矛盾, 将多类副产资源整合至三聚氰胺生产流程, 有机会构建资源循环化的生产模式。

现有文献多聚焦催化剂、捕集材料等单元技术开发, 较少从全系统能效视角开展耦合工艺诊断。基于此, 本文依托实际工程案例开展分析, 仅围绕系统能量特征开展研究, 不涉及产品市场与农业效益讨论,

为煤化工低碳工艺改造提供实例分析。

1 CCUS-三聚氰胺耦合循环工艺及系统边界界定

1.1 耦合系统的工程背景与研究边界

本次分析以新疆哈密伊吾工业园区煤化工示范工程为研究载体。园区内多套褐煤提质装置持续副产荒煤气, 受消纳渠道制约, 部分副产煤气未能充分利用, 造成能源浪费。区域风光新能源装机规模不断扩大, 但受特高压外送通道容量限制, 弃风弃光问题较为显著。园区氢能一期脱碳装置可产出体积分数约 95% 的高纯度 CO₂, 为 CO₂ 化工资源化利用提供气源基础。

为保证能效对比的严谨性, 本文划定明确的研究边界: 核算涵盖 CCUS 捕集净化压缩单元、改良低压法三聚氰胺合成单元、尾气物料循环回收单元、熔盐炉燃料供给-烟气余热回收单元与厂内供电系统。上游合成氨制氢设施、下游复合肥装置仅作为外部物料、能量接口, 不参与核心能效计算。选取同等产能的传

统三聚氰胺装置作为基准工况，基准装置以天然气供热、全部采用火电，工艺 CO_2 直接排放，无荒煤气回收流程，作为节能量与碳排放核算参照。

1.2 CCUS 耦合三聚氰胺工艺流程

CCUS 子系统接收上游脱碳装置高浓度 CO_2 ，完成捕集净化，依托气源余压输送，经压缩后送入尾气回收装置制备熔融尿液，作为三聚氰胺合成原料。合成工段采用改良低压催化工艺，反应压力 0.7 MPa、温度 390 $^{\circ}\text{C}$ ，熔融尿液在催化剂作用下生成三聚氰胺，副产 NH_3 与 CO_2 。物料依次经淬冷、洗涤、旋流分离、解析、过滤、结晶、干燥得到成品；尾气中的 NH_3 、 CO_2 回收再造熔融尿液返回合成工段，实现内部物料循环。相较于高压工艺、DSM 低压工艺，该工艺能耗与催化剂损耗更低，仅熔盐炉废锅排污、设备冲洗产生少量废水。

热力系统利用园区富余荒煤气作为熔盐炉燃料替代化石能源，高温熔盐供给工艺用热，同时回收烟气余热，降低外购热力介质需求。生产用电由本地风光绿电与公网火电共同供给，构建绿电-火电联合供电模式。

1.3 耦合系统物料-能量协同机制

该耦合体系形成碳-物料、燃料-热力、电力-能源结构三层协同关系。碳-物料层面，捕集的 CO_2 用于制备熔融尿液，结合尾气循环回用 NH_3 、 CO_2 ，削减新鲜原料投入，降低前端物料制备能耗。燃料-热力层面，闲置荒煤气替代化石燃料，配合烟气余热回收，实现副产能源梯级利用，减少外部热源消耗。电力-能源结构层面，风光绿电分担生产负荷，替代部分火电，把弃置的可再生资源转化为工业用能，实现能源结构侧间接节能降碳^[1]。三层机制协同，实现物料循环复用与能量梯级利用。

2 耦合工艺系统用能分析与节能机理研究

2.1 耦合系统用能结构与能量平衡

该耦合系统的输入能源主要包含三类：作为燃料消耗的荒煤气、生产用电（风光绿电+火电），还有少量辅助蒸汽；系统能量输出包含三聚氰胺产品携带化学能、回收可利用余热，同时各单元不可避免存在各类不可逆能量损失。采用能源审计统计口径梳理系统能量流向，和同等产能基准工况进行对比，该耦合系统每年综合节约能源约 7 万 tce。

各单元能耗分布差异较为明显，CCUS 捕集压缩单元属于全系统主要耗电环节， CO_2 净化、压缩工序占据厂用电较高占比；三聚氰胺合成-解析-结晶工

段属于主要热耗单元，工艺反应、物料解析、结晶处理均需要持续供给热量；熔盐炉承担整套装置供热任务，荒煤气化学能一部分转化为熔盐热能供给工艺，另一部分随烟气排出，经由余热回收装置实现能量回收；循环水泵、风机等公辅设备持续消耗电能，构成系统固定能耗部分。

2.2 耦合模式下多重节能机理解析

就近利用上游脱碳装置高浓度 CO_2 气源，依托排气余压输送，降低压缩机做功负荷，规避远距离输送的能耗与设备投入。 CO_2 直接用于熔融尿液制备，省去原料外购、运输及上游加工工序，实现间接节能。

装置尾气闭路循环回收 NH_3 、 CO_2 再造熔融尿液返回合成工段，减少新鲜原料消耗，降低前端合成工序的能量投入。园区闲置荒煤气替代天然气作为熔盐炉燃料，搭配烟气余热回收，减少外购蒸汽需求，完成废弃副产能源资源化。系统年消纳绿电 7363 万 kWh，将弃置风光电力转化为工业负荷，替代火电实现电力侧的节能降碳^[2]。

2.3 基于节能诊断的系统能效薄弱环节识别

站在节能诊断的角度对各单元开展能效排查，能够识别多处现实能效短板。CCUS 单元内部， CO_2 净化压缩属于耗电大户，气体压缩过程伴随明显的（火用）损失，是制约整体能效提升的关键节点。热力系统层面，园区荒煤气来源于多家上游生产企业，来气组分、流量均存在周期性波动，会干扰熔盐炉稳定燃烧状态，余热锅炉换热效率随之下降；三聚氰胺解析-结晶工段会产生大量低位余热，现有系统还未能实现深度回收，存在热量浪费现象。

电力侧存在源荷匹配矛盾。化工生产属于连续稳定负荷，而风光绿电具备间歇性、波动性特征，大规模直接接入会冲击装置生产稳定性，限制绿电占比进一步提高。公辅设备方面，循环水系统、大型风机水泵选型按照最大工况确定，变工况运行条件下设备运行效率偏低，仍具备节能改造空间。

3 耦合系统节能量与净碳减排核算

3.1 核算边界与核算方法

本文参照 GB/T32045-2015《节能量测量和验证技术要求》，结合化工企业温室气体排放核算相关规范完成测算，核算边界与前文划定系统边界保持一致，选取同等产能传统三聚氰胺装置作为基准情景。测算过程把节能贡献划分成工艺物料利用、燃料替代、电力替代三类分别统计，以此规避重复计算问题。需要注意，CCUS 装置自身运行会消耗电力与公用工程介质，

会带来间接碳排放，该部分排放水平受区域电网排放因子影响，因此文中给出数值均为理论减排总量；工程实际净减排结果，还需要扣减 CCUS 单元带来的间接碳排放量。

3.2 系统节能量核算结果

荒煤气替代化石燃料产生燃料侧节能量；CO₂、氨尾气循环回用，降低新鲜原料制备阶段能量投入，实现工艺侧间接节能量；绿电替代火电，结合火电供电煤耗折算得到对应的一次能源节约量。多维度节能贡献叠加之后，案例系统综合年节能量约 7 万 tce。

3.3 净 CO₂ 减排结果分析

系统理论减排可以拆解为三部分：CO₂ 作为原料固化进入三聚氰胺、复合肥产品，年资源化利用 CO₂ 规模 22 万 t；荒煤气替代天然气实现年 CO₂ 减排 12 万 t；绿电替代火电带来年 CO₂ 减排 4.6 万 t，三项相加得到年度理论减排约 38.6 万 t/a。应当明确，CCUS 压缩净化单元用电会产生间接碳排放，开展工程评估计算净减排量时，需要结合当地电网排放因子进一步扣减。

CCUS 化工资源化利用和地质封存模式存在明显区别：CO₂ 固定于化工产品内部，在产品全生命周期中存在再次释放二氧化碳的可能性。但站在工业生产端视角来看，该模式直接消纳煤化工工艺过程排放 CO₂，完成生产环节过程减排，对于煤化工聚集园区的降碳工作拥有实际应用价值^[3]。

3.4 耦合工艺的能效综合评价

同等产能条件下耦合系统与传统工艺能耗指标对比见表 1。

表 1 耦合系统与传统三聚氰胺工艺能耗及排放对比

指标	传统三聚氰胺工艺（基准工况）	CCUS 耦合循环工艺
供热燃料	天然气	园区富余荒煤气
用电结构	100% 火电	50% 火电 +50% 风光绿电
CO ₂ 处理方式	工艺 CO ₂ 直接放空	捕集 22 万 t/a 作为生产原料
年综合能源消费 /tce	E0	—
燃料年 CO ₂ 排放量 /（万 t·a ⁻¹ ）	F0	—
电力侧年 CO ₂ 排放量 /（万 t·a ⁻¹ ）	P0	—

指标	传统三聚氰胺工艺（基准工况）	CCUS 耦合循环工艺
工艺过程 CO ₂ 排放 /（万 t·a ⁻¹ ）	C0	—
年度理论 CO ₂ 总减排 /（万 t·a ⁻¹ ）	—	38.6
主要废水来源	工艺 + 冲洗排污	仅熔盐炉废锅排污、设备冲洗水

注：E₀、F₀、P₀、C₀ 分别代表同等产能传统三聚氰胺装置综合能耗、燃料碳排放、电力碳排放、工艺过程碳排放基准值；耦合工艺 CCUS 单元电耗带来的间接碳排放未在本表扣除，实际净减排需结合区域电网排放因子进一步核算。

由表 1 数据不难看出，依托副产能源利用、物料循环复用、绿电替代多重手段，耦合工艺单位产品综合能耗显著优于传统工艺。同时该模式也存在现实应用约束：项目落地高度依赖就近高浓度 CO₂ 气源，要求园区具备富余副产煤气，本地风光新能源资源也要达到一定规模；外部条件不满足时，该工艺的能效优势难以发挥。此外 CCUS 捕集装置一次性投资偏高，项目整体经济效益会受到化工产品市场行情、碳价值相关政策的明显影响^[4]。

4 CCUS 耦合三聚氰胺系统节能提升技术路径

4.1 CCUS 捕集压缩单元的电耗优化

充分挖掘上游脱碳装置排气余压资源，对压缩机级数配置开展优化，合理分配各级压缩负荷，以此降低压缩机整体功耗。在满足产品纯度指标的前提下，优化 CO₂ 净化工序流程，减少净化工段辅机设备用电消耗。针对装置变工况运行的客观现实，给压缩机、机泵配套变频调节系统，摒弃传统节流调节模式，降低变工况条件下电能损耗，从源头控制 CCUS 单元用电负荷。

4.2 热力系统能效提升

增设荒煤气稳压缓冲设施，对来气流量、组分波动起到平抑效果，保障熔盐炉燃烧工况稳定，改善余热锅炉换热效率。深度挖掘熔盐炉烟气、三聚氰胺解析工段低位余热资源，回收得到的热量用于工艺供热、介质预热，以此减少外购蒸汽输入规模。对熔盐换热网络配置加以优化，合理控制换热环节传热温差，降低换热过程的（火用）损失，提高整套热力系统能量利用水平^[5]。

4.3 电力系统与绿电负荷协同优化

针对化工连续生产与风光发电间歇性之间的矛盾，在保障生产安全底线的前提下，挖掘装置工艺侧

柔性负荷的可调潜力。配置小规模储能设备平抑风光电力波动,平滑供电曲线,以此提高绿电接入比例。开展厂用电系统能效升级,针对风机、循环水泵等高耗能公辅设备实施改造,淘汰低效设备。同时对接绿电交易相关政策机制,进一步扩大绿电消纳体量。

4.4 工艺循环系统优化

调整尾气回收工艺设备运行参数,提高 NH_3 、 CO_2 回收效率,减少物料损耗,降低物料再生过程带来的附加能耗。针对改良低压法反应-淬冷-洗涤全流程运行参数开展调试,匹配最优温度、压力操作区间,减少工艺介质损耗,进一步释放闭路循环的节能潜力。做好全装置设备保温维护工作,降低设备表面散热损失,减少系统无效能量散失。

5 结论

CCUS 与改良低压法三聚氰胺相耦合,能够实现园区副产 CO_2 与荒煤气的协同资源化,结合绿电消纳可取得相应的节能量与理论减排效果。系统运行效能受 CCUS 压缩能耗、荒煤气工况波动、源荷适配条件等多重因素制约。通过压缩工况调优、余热深度回收、荒煤气缓冲调控等方式,可进一步挖掘系统节能空间。该工艺对气源条件、副产能源供给依赖性较强,后续

可开展全生命周期评价及经济性相关研究。

【参考文献】

- [1] 张贤,许毛,徐冬,等.中国煤制氢 CCUS 技术改造的碳足迹评估[J].中国人口·资源与环境,2021,31(12):1-11.
- [2] 阳国军,刘会友.现代煤化工与绿电和绿氢耦合发展现状及展望[J].石油学报(石油加工),2022,38(4):995-1000.
- [3] 柯彦,陶怡,易学睿,等.典型煤化工项目低碳发展路径的技术经济评价[J].洁净煤技术,2022,28(6):127-134.
- [4] 孙园园,张玥,李翊宸,等.黄河流域煤化工行业降碳减污路径研究[J].环境科学研究,2025,38(11):2569-2579.
- [5] 王鑫,李晓东,李臣威,等.煤气化渣资源化利用现状及碳-灰分离技术研究进展[J].煤炭学报,2026,51(6):3705-3720.

作者简介:王冬明(1987.01—),男,汉族,新疆塔城地区沙湾市人,本科学历,职称级别:电力系统自动化中级、机械电子中级,研究方向:碳中和发展研究、节能减排。