

绿电制氢—柔性合成氨示范项目工艺节能先进性研究

王冬明

新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 选取 2 万 t/a 绿电制氢—柔性合成氨示范工程作为分析案例, 围绕碱性电解制氢、PSA 制氮以及模块化撬装合成氨整套工艺开展节能工程剖析。考虑小规模化工装置普遍存在的尺度效应制约, 从单元工艺配置方案、热质集成手段、变工况协同调控模式、国产化装备落地应用等角度梳理节能实现路径。工程分析结果显示, 依托多项工艺技术协同作用, 该项目合成回路具备宽负荷运行能力, 氨净值不低于 18%, 吨氨新鲜气消耗处于国内同类示范工程较好水平, 可为分布式绿氨工艺选型、能效诊断工作提供实例参考。

[关键词] 绿电制氢; 柔性合成氨; 碱性电解水; 能效诊断

DOI: 10.64635/ja.2026.1493

中图分类号: TQ113.25

文献标识码: A

Research on the Advanced Energy-Saving Performance of the Process for a Green Power-to-Hydrogen and Flexible Ammonia Synthesis Demonstration Project

Wang Dongming

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

Abstract: A 20,000 t/a green power-to-hydrogen and flexible ammonia synthesis demonstration project is selected as the analysis case, and an energy-saving engineering analysis is carried out around the complete process of alkaline water electrolysis hydrogen production, PSA-based nitrogen generation, and modular skid-mounted ammonia synthesis. Considering the scale effect constraints commonly found in small-scale chemical plants, this paper reviews energy-saving implementation paths from the perspectives of unit process configuration, heat and mass integration, coordinated control under variable operating conditions, and the application of domestically produced equipment. The engineering analysis results show that, relying on the coordinated effect of multiple process technologies, the synthesis loop of this project has wide-load operation capability, with a net ammonia content of no less than 18%. The fresh gas consumption per ton of ammonia is at a relatively good level among similar domestic demonstration projects, providing case reference for distributed green ammonia process selection and energy efficiency diagnosis.

Keywords: green power-to-hydrogen; flexible ammonia synthesis; alkaline water electrolysis; energy efficiency diagnosis

引言

国内降碳工作持续推进背景下, 依托风光电力生产绿氨, 已经成为消化可再生能源电力、拓展零碳储能载体的可行技术方向。传统化石原料型大型合成氨装置依靠规模化生产取得较优能效表现, 但整套设备更适配稳态工况运行, 面对分布式新能源出力的波动特征, 适配能力存在明显短板。小规模撬装化绿氨项目建设部署灵活, 却会受尺度效应干扰, 散热损耗上升、变工况条件下流体机械效率下滑等问题容易造成能效表现不及预期, 给工程方案设计带来现实难题。

现有公开文献多数围绕绿氨系统仿真运算、技术经济性测算开展研究, 针对已经落地运行的示范项目, 立足工艺本身开展节能诊断类实证分析的文献仍然偏少。评判柔性绿氨装置的综合能效, 不能只参考满负荷额定工况的指标, 部分负荷下的实际运行表现同样是工艺优劣的重要评判依据。本文站在电力设计院节

能评估的工程实操角度, 对示范项目全流程工艺展开梳理分析, 找出限制系统能效的关键因素, 解析各工艺环节的节能内在逻辑, 同时探讨该项技术的适用边界, 为同类型分布式绿氨工程的方案设计、能效管控提供可借鉴的实践素材。

1 示范项目全流程工艺及系统能耗约束

1.1 项目总体工艺与关键单元概况

本示范项目设计产能 2 万 t/a 柔性合成氨, 完整工艺链条由绿电供电单元、碱性电解水制氢单元、PSA 变压吸附制氮单元、模块化撬装合成氨单元共同组成, 最终产出合格液氨产品。项目针对风光发电波动特征完成柔性化设计, 合成氨回路可实现宽区间负荷调节。核心工艺运行参数: 碱性电解装置产氢规模 6000 Nm³/h, PSA 制氮装置产能 2400 Nm³/h, 工艺系统严格将氢、氮原料气摩尔比控制为 3 : 1, 合成回路操作压力维持 12 ~ 14.5 MPaG, 产出液氨

产品纯度 $\geq 99.5\%$ 。

现阶段水电解制氢技术主要分为 ALK、PEM、SOEC 三条技术路线。其中 SOEC 技术还停留在实验室研发阶段, PEM 电解槽动态响应性能突出, 但催化剂与整套设备购置成本偏高。本项目选用技术成熟、运维投入可控的碱性电解水制氢工艺, 电解液采用质量分数 20% ~ 30% 的氢氧化钾水溶液, 电解槽工作温度控制在 $85\pm 5^\circ\text{C}$, 负荷调节区间覆盖 25% ~ 110% 设计负荷。电解制氢系统包含电解槽本体、碱液循环子系统、氢氧气液洗涤单元、除盐水补给单元、冷却单元、充氮吹扫保护单元。碱液循环回路一方面带走电解反应释放的热量, 另一方面削弱电极位置的浓差极化现象, 从工艺源头控制电解环节的电力消耗, 电解生成的氢气输送至下游合成工序, 作为副产物的氧气直接对外放空^[1]。

制氮系统选用碳分子筛变压吸附 (PSA) 工艺, 装置额定产能 $2400\text{Nm}^3/\text{h}$, 氮气出口压力设置 1.8MPa。整套工艺划分为空气预处理、双塔交替吸附-再生、氮气增压储存三个环节。利用碳分子筛对氧、氮分子扩散速率的差异, 加压阶段优先吸附氧气、水汽、二氧化碳等杂质组分, 减压条件完成吸附剂脱附再生, 两座吸附塔交替切换工作状态, 保障氮气连续稳定产出, 整套工艺放弃深度制冷路线, 以此降低制氮单元整体能耗水平。

合成氨单元采用工厂预制撬装的建设模式, 拆解为原料气混合压缩、氨合成反应、氨分离、循环回路、智能控制五大功能模块。配比达标的氢氮工艺气增压至合成压力后送入二轴一径复合结构合成塔, 合成反应释放的热量通过废热锅炉产出中压蒸汽完成回收, 反应后工艺气依次经过水冷处理、 -8°C 氨冷深冷处理, 实现氨组分冷凝液化, 尚未参与反应的 H_2 、 N_2 混合气借助循环压缩机重新送回合成塔内部; 配套弛放气水洗回收单元, 回收气相物料中夹带的氨组分; 数字孪生系统承担全装置动态监测与调控工作, 以此匹配上游绿氢气量波动, 保障柔性工况条件下生产过程稳定。

1.2 小规模系统固有能耗约束

对比百万吨级大型合成氨生产装置, 2 万 t/a 规模的小规模绿氨装置会显现较为突出的尺度效应问题。一方面设备与反应器比表面积增大, 散热损耗随之上升, 合成反应放热难以维持装置绝热运行条件, 系统热集成效率出现下滑; 另一方面压缩机、循环机这类流体机械设备, 在低流量变负荷工况运行时多变效率会明显下降, 带来额外电力消耗, 部分微型装置

内部合成回路能耗占比最高能够达到 60%, 进而出现能耗倒挂现象。

风光发电本身带有随机性与波动性特征, 电解制氢单元负荷频繁升降, 容易引发合成回路氢氮配比偏移、惰性组分不断积累、催化剂床层温度漂移等一系列问题。传统合成氨工艺是围绕化石能源稳定供给条件开发而来, 缺少大幅度负荷波动工况的适配能力。一旦工艺硬件配置、调控策略存在短板, 就会直接造成氨净值下降, 原料气出现无效损耗, 进一步拉低系统综合能效。对于依靠绿电驱动的柔性合成氨项目, 除满负荷工况能耗指标之外, 变工况条件下的能效衰减问题, 属于工艺设计阶段必须重点处理的现实痛点。在能源审计实际业务当中可以发现, 不少同类示范项目仅关注额定工况指标, 缺少对部分负荷条件下能耗变化的系统性研判, 容易造成项目整体能效评估结果出现偏差。风光出力短时间内快速升降, 会给各个工段带来连锁扰动, 不光增加系统电耗, 还会加剧设备疲劳损耗, 间接抬高装置全生命周期运行成本, 这也是分布式绿氨工程区别于传统化工项目的显著特点。

2 示范项目工艺节能先进性核心解析

2.1 制氢制氮单元节能工艺特点

碱性电解制氢单元依靠碱液强制循环及时移出电解热, 同时搅动电解槽内部电解液体系, 削弱电极表面的浓度梯度, 缓解浓差极化影响, 降低电解小室电压, 以此实现电解电耗优化。完备的氢氧洗涤除雾、除盐水精准补给系统, 能够维持电解液浓度处于合理区间, 规避电解液劣化引发的电解效率衰减问题。国产化 ALK 电解槽可实现 25% ~ 110% 区间内的宽负荷调节, 能够跟随绿电功率变化匹配制氢出力, 设备较长的服役周期也可以减少设备更换带来的间接物耗与能耗损失。受制于电解槽本体设备约束, 装置制氢最低负荷为 25%, 工况差异需要依靠后端合成回路的柔性调节能力予以消化。

PSA 制氮单元借助前端空气预处理工序脱除粉尘与水汽组分, 对碳分子筛吸附剂形成保护, 延长吸附剂使用周期, 降低吸附剂频繁更换带来的额外消耗。双塔吸附-再生交替运行模式, 能够让氮气产出量跟随合成氨负荷同步调整, 适配上游绿氢流量的波动变化, 避开深度制冷工艺带来的高能耗短板, 在满足工艺用气需求的前提下, 把制氮单元电耗控制在合理范围。

2.2 合成氨工段热质传递与热集成优势

催化与反应器选型层面, 项目选用铁基熔铁催化

剂适配绿氢原料工况；二轴一径复合合成塔优化床层内部气流分布状态，抑制壁流效应，缩小床层径向温差，提升催化剂时空收率，实现氨净值 $\geq 18\%$ ，提升单位原料气的产氨效率，从反应源头降低原料消耗水平^[2]。

能量梯级回收属于本项目核心节能手段：合成塔出口位置的高温工艺气直接对接废热锅炉产出中压蒸汽；三套管换热器回收工艺余热，对入塔原料气完成预热；取消传统方案配置的下部换热器，压缩合成回路整体压降，减少循环压缩机的电力消耗；搭配 -8°C 氨冷深冷分氨工艺，搭建起夹点换热网络，削减冷热公用工程消耗，高效回收合成反应释放的热量。这套换热网络除了在满负荷工况发挥效用，处于部分负荷状态下依旧可以保留基础热回收能力，缓解小规模装置散热损失造成的能效下滑。

针对小规模装置散热损失偏大这一痛点，项目配置高效缠绕管式换热器，提升单位体积设备的换热能力；原料气、循环气压缩机采用一开一备往复式机组，适配变工况运行需求，维持合成塔内部自热平衡，规避小尺度装置存在的反应“熄火”风险，完成尺度效应条件下的能效补偿。

2.3 柔性调控、物料回收及国产化带来的节能增益

模块化撬装方案把高压回路拆分为反应模块、冷换模块、分离模块，工厂完成预制之后再运至现场组装，减少高压管道的现场焊接工作量，缩短高压死区容积，降低启停操作、负荷扰动过程中非理想工况带来的能耗损失。

数字孪生平台完成全回路关键参数的实时采集，涵盖回路压力、惰性气体浓度、氨净值等指标；当上游电解产氢量出现波动，系统能够动态调整循环比、冷激气分配比例，稳定合成塔入口 H_2/N_2 配比^[3]。柔性调控不只是保障装置可以维持生产运行，更能够缓解风光扰动带来的氨净值下滑，减少原料气无效消耗，实现变工况条件下的节能运行，这也是本项目对比传统稳态合成氨装置的关键优势。

水洗吸收单元用来回收弛放气、闪蒸气内部夹带的氨组分，吨氨新鲜气消耗控制至 $2650 \sim 2670 \text{ Nm}^3/\text{t}$ ，达到国内同类项目先进水平；传统中小型合成氨装置该指标大多处于 $2800 \sim 3000 \text{ Nm}^3/\text{t}$ 区间。物料损耗下降可带来间接节能效果，也就是通过减少物料损耗，间接降低生产同等产品对应的电力与资源投入。项目采用国内自主 GC 型合成塔内件工艺包，摆脱国外专

利技术的约束，降低设备投资与运维成本，减少非计划停机时长，保障装置可以长期高效运行。

3 工艺综合分析及工程应用思考

3.1 工艺方案综合对比

本项目定位属于分布式柔性绿氨示范技术，并不用来替代大型集中式化石基合成氨装置。对比传统大型合成氨装置，本项目操作压力更低，负荷可调区间更大，对于风光间歇性工况具备更好适配效果，但撬装小规模装备单位造价会高于大型合成氨装置。和 PEM 电解耦合合成氨的技术路线对比，ALK 工艺具备明显投资优势，但受限于 25% 最低运行负荷，面对风光极低出力场景，适配能力弱于 PEM 路线。总体来看，依托反应器结构优化、热集成网络搭建、柔性调控多重技术协同，项目能够有效缓解小规模装置尺度效应引发的能效衰减^[4]。

3.2 技术推广约束与工程设计建议

该项工艺存在明确适用边界。碱性电解槽存在 25% 最低负荷限制，风光极低出力的时段，需要配套缓冲或者储能设施，不然系统能效会出现明显恶化；撬装小规模装备单位投资水平偏高，成本下降有赖整个产业实现规模化；装置长期频繁变工况运行，会对催化剂、压缩机组的疲劳寿命带来影响，还需要积累更长周期的示范运行数据；整套系统综合能效和绿电品质密切相关，只有在弃电或者低价绿电场景下，工艺本身的节能降碳价值才能够充分释放。

结合电力设计院能源审计、节能评估的实际工作积累，针对同类绿电-柔性合成氨项目给出工程层面参考意见。分布式绿氨项目不能直接把大型装置做等比例缩小处理，需要充分评估尺度效应造成的能效劣化，优先选用轴径向反应器、高效换热设备，依靠热集成网络补偿散热带来的能量损失^[5]。工艺选型环节兼顾设备成熟水平和柔性运行能力，电解制氢装置负荷调节范围需要匹配本地风光资源波动特征，开展节能评估、能源审计工作的时候，不能仅仅考核满负荷工况指标，要把部分负荷、变工况条件下的综合能耗纳入评价指标体系。重视弛放气等物料回收工作，物料回收属于柔性绿氨项目重要的间接节能路径；硬件工艺与数字智能调控需要同步配置，以此保障变工况条件下系统能效水平。

4 结论

通过对 2 万 t/a 绿电制氢-柔性合成氨示范项目成套工艺开展节能分析可以看到，电解系统工艺优化、合成回路热集成处理、撬装模块化集成搭配数字孪生

柔性调控的组合应用,能够一定程度抵消小规模装置尺度效应带来的能效衰减,项目物料消耗指标处于国内同类示范工程较好水平。

该工艺模式具备相应工程示范价值,但存在客观适用条件,电解设备负荷下限、储能配套条件以及绿电品质,均会对系统综合运行能效形成约束。后续还需要依托更多长周期运行实测数据,完善柔性绿氨装置能效评估手段,为该类技术工程推广提供支撑。

【参考文献】

- [1] 郑勇,邓欣,吉旭,等.适应风光波动的绿氨多稳态柔性调度方法[J].洁净煤技术,2025,31(3):128-137.
- [2] 陈渤燕,王月,钟海军,等.柔性合成氨研究进展及展望[J].现代化工,2025,45(5):100-105.
- [3] 刘婷婷,刘冬妹,张欣,等.考虑流量波动的绿氨反应器随机规划优化设计[J].工程科学与技术,2025,57(5):101-113.
- [4] 孙立,余潜跃,张玉琼,等.基于绿电转氨的综合能源生产单元经济性与碳足迹评估[J].中国电机工程学报,2025,45(7):2567-2579.
- [5] 李默,郭永坚,董晓莹.绿氢-绿氨工艺流程的多稳态模拟和动态响应[J].可再生能源,2024,42(4):433-439.

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。