

工业技术

千吨级模块化柔性绿氨合成装置的系统集成研究

朱佳娟^{1,2}, 许山恒阳², 纪鑫辉¹, 章文扬^{2*}

(1. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002;
2. 合肥综合性国家科学中心能源研究院氨氮中心, 安徽 合肥 230001)

摘要: 依托“年产千吨级模块化绿氨示范项目”, 聚焦年产千吨级模块化绿色合成氨系统, 构建以可再生能源为核心的端到端制氨-合成氨工艺链, 集成热回收、过程控制与公用工程, 形成完整的柔性架构。柔性设计可随绿电波动宽负荷运行; 富电时, 风电光伏驱动电解水制氢, 部分供合成氨, 部分储存; 制氮同步运行, 与氢反应产氨; 储电模块将余电留存。绿电中断时, 制氨停机, 储电继续驱动制氮与合成氨工段低负荷运转, 降低储氢储能容量需求。标准化撬装预制缩短建设周期, 控制成本。验证结果表明, 该柔性生产方式有效提升了系统效率与经济性, 显著降低了碳排放, 为合成氨工业的绿色转型提供了可行的技术路径与实践参考。

关键词: 模块化合成氨; 氢能产业; 绿色能源; 柔性工艺

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0279-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.046

Research on system integration of 1 000-ton modular flexible green ammonia synthesis facility

ZHU Jia-juan^{1,2}, XU Shan-heng-yang², JI Xin-hui¹, ZHANG Wen-yang^{2*}

(1. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;
2. Hydrogen and Ammonia Center, Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230001, China)

Abstract: Based on the “Thousand-Ton-Per-Year Modular Green Ammonia Demonstration Project,” this study focuses on the 1 000-ton-scale modular green ammonia synthesis system, and constructs a renewable-energy-centric, end-to-end green ammonia process chain, integrating heat recovery, process control, and utilities to form a complete flexible architecture. The flexible design enables load-following operation adapting to green power fluctuations; when electricity is abundant, wind and photovoltaic sources drive water electrolysis for hydrogen production—partially supplied to ammonia synthesis and partially stored; nitrogen generation operates simultaneously to react with hydrogen for ammonia production; and the power storage module stores surplus electricity. During green power interruptions, hydrogen production shuts down while stored electricity continues to drive nitrogen generation and ammonia synthesis sections at reduced load, thereby lowering hydrogen storage and energy storage capacity requirements. Standardized skid-mounted prefabrication shortens construction cycles and controls costs. The validation demonstrates that this flexible production mode effectively enhances system efficiency and economics while significantly reducing carbon emissions, providing a viable technical pathway and practical reference for the green transformation of the ammonia synthesis industry.

Key words: modular ammonia synthesis; hydrogen energy industry; green energy; flexible process

以哈伯-博世法为核心的传统合成氨工业虽工艺成熟、效率较高, 但高度依赖化石燃料, 碳排放强度高, 与绿色低碳转型要求存在明显矛盾^[1-3]。一套 45 万 t/a 级装置通常需要 30~40 个月建设周期和 6 亿~8 亿美元投资, 其集中式、刚性运行模式难以与波动性的可再生电力深度耦合^[2,4]。因此, 模块化构型与柔性运行被视为破局关键路径: 例如,

Thyssenkrupp 的 20~120 MW 绿氨模块对应日产 50~300 t 氨, AmmPower 通过集装箱化预制可将工期缩短 40% 以上, 全生命周期零碳优势将在欧盟 CBAM 及国内碳市场等政策机制不断强化的背景下进一步凸显^[2,4]。

模块化把施工移至车间, 预制后现场“编号扩展”, 工期缩短 25%~40%, 缺陷率降低 30%~50%,

收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-03-07

基金项目: 智能电网国家科技重大专项(2025ZD0806103); 合肥综合性国家科学中心能源研究院自主立项项目(24kzs306)

作者简介: 朱佳娟(2001-), 女, 硕士生; 章文扬(1985-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为柔性合成氨工艺技术升级及氨裂解能效提升技术研究, 通讯联系人, zhangwy@ipp.ac.cn。

并线性放大产能、规避放大风险^[2,5]。Thyssenkrupp 的“Udde Green Ammonia”6 大功能模块 18 个月交付 50 t/d 绿氨生产能力,并可线性放大至 300 t/d,相比传统方案单位 CAPEX 降幅约 23%^[4,6]。在此基础上,柔性工艺以氢缓冲与动态负荷能力适配风电间歇性波动,减少合成氨装置固定投资与运维成本^[4]。

然而,柔性运行要求合成氨装置在宽负荷范围内保持高效稳定,显著增加了反应器结构和催化剂体系的设计难度;同时,频繁启停与负荷波动会加剧设备疲劳,对撬块及关键设备的耐久性提出了更高的要求^[2-3,7]。本研究依托千吨级模块化柔性绿氨中试装置,系统分析预制撬块、并行施工和标准化模块对缩短建设周期、降低初始投资的作用,结合宽负荷运行试验与数字孪生模型,评估绿电波动条件下的工况调节与能量利用特性,从工程实践和模型 2 方面验证模块化柔性方案的效率潜力,为合成氨工业绿色低碳转型提供技术路径和方法支撑。

1 合成氨生产技术

合成氨技术是现代化学工业重要基础工艺,产品氨广泛用于氮肥、制药等领域。自 20 世纪初哈伯-博世法工业化后,合成氨工艺不断革新以提高效率、降低能耗与环境影响。当前主要分为传统灰氨、刚性绿氨、柔性绿氨 3 类技术路线。3 类技术在能源与原料等方面差异显著。传统灰氨依赖化石燃料,灵活性与环保性差^[8-10]。刚性绿氨以可再生电力制氢为主,显著降低碳排放,但对电力稳定性和大规模储能依赖较强^[11-12]。柔性绿氨采用模块化构型,可实现宽负荷调控和多工况切换,更适应高比例可再生能源情景,被认为是未来绿色氢能系统的重要发展方向^[13-14]。

2 年产千吨级合成氨项目的模块化实践

2.1 项目背景与目标

千吨级模块化柔性绿氨项目旨在应对可再生能源波动对合成氨生产稳定性和经济性的挑战,构建一套适配波动性绿电的模块化、柔性绿氨生产系统架构。项目基于“年产千吨级模块化绿氨示范项目”,包含氨合成工艺,且涵盖热管理、过程控制及公用工程,形成完整的端到端工艺链^[15-17]。系统设计采用标准化撬装模块,具备快速部署与宽负荷(20%~110%)调控能力,通过引入氢/氮储罐,并结合数字孪生与动态响应控制,实现了哈伯-博世工

艺在多稳态下的连续运行,显著降低了储氢需求与建设成本^[18-20]。项目通过精细化优化反应压力(设计 15 MPa)等关键参数,并严格遵循工艺与安全标准,力求在保障技术先进性与环境友好性的同时,为绿色合成氨技术的工程示范与推广应用提供实践路径。

2.2 工艺流程与模块化设计

本项目旨在构建一套日产液氨 4 t,年产能可达 1 000 t 的模块化绿氨中试平台,采用哈伯-博世(Haber-Bosch)工艺路线并结合模块化设计理念,以探索其在可再生能源驱动下的柔性运行与快速部署能力^[21]。系统设计基于哈伯-博世工艺化学计量比($H_2:N_2=3:1$),总氮转化率设计值为 97%,通过 Aspen Plus 完成流程模拟与物料平衡验证。系统集成氢氮气压缩与混合、氨合成反应、氨分离与循环以及热管理等核心功能模块,采用标准化撬装结构。反应气体经压缩并加热至约 15 MPa、400℃后,在铁基催化剂作用下于合成塔内进行反应,单程转化率小于 25%。反应后气体经高温冷却器与水冷器逐级降温,在氨分离器中实现气液分离,液氨经闪蒸槽提纯后得到成品液氨,经管道输送至储罐,未充分反应的循环气及闪蒸气则经循环压缩机返回系统以提高总转化率,表 1 列出了该装置的关键运行参数。

表 1 千吨级合成氨装置关键运行参数表

描述	规格	描述	规格
氨额定年产量(TPA)	1000	负荷调整范围/%	20~110
项目总投资/万元	2000	氢气流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	250
反应压力/MPa	14.5	氮气流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	83
氨质量分数/%	>99.9		

装置采用 Aspen Plus 等工具进行流程模拟与优化,实现虚拟环境下的工艺验证与设备布置,为现场部署提供技术基础。通过模块化建模,结合 CAD 与 ASME 标准构建设备三维模型如图 1,提前测试设计方案,降低现场施工风险和成本,加快项目建设周期,并提高系统的灵活性与适应性。

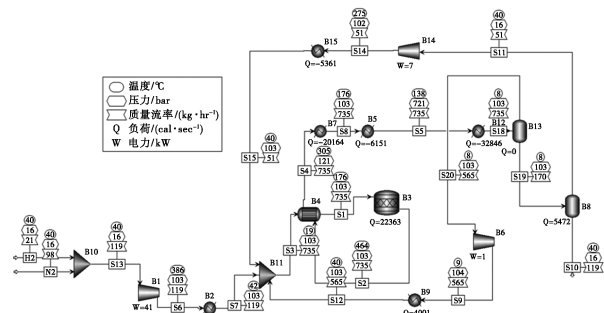




图 1 合成氨工艺流程与建模图

项目采用“工厂预制-现场集成”模式,通过模块化吊装方式将预制完成的撬装模块整体运输至现场并快速安装,减少高空作业 70%,缩短建设周期 30%~40%,显著降低人力与施工成本。系统配备数字孪生平台(图 2),集成 Aspen 动态模型、三维几何模型与 DCS 实时数据,通过 42 个关键测点实现秒级同步更新,可在绿电波动场景下进行虚拟预演与运行优化,有效提升系统鲁棒性与运维效率。



图 2 千吨级模块化柔性合成氨测试平台数字孪生系统图

模块化设计还涵盖了完整的设备体系如图 3 所示,图中编号 1~12 分别对应液氮罐、氢气车、热管理系统、缓冲罐、压缩机、水冷塔、合成塔系统、液氨罐、液氨输出系统与液氨车、电气室、控制室与实验室 12 类核心设备,形成从原料供应到产品输出的全链条集成。表 2 则提供了设备的具体规格信息。该装置已稳定运行近 300 h,验证了模块化柔性绿氨系统的工程可行性与运行稳定性,为后续放大与推广奠定基础。

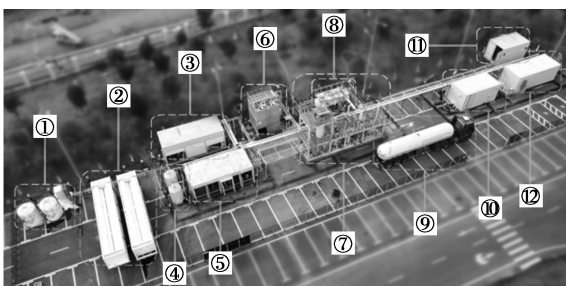


图 3 合成氨设备建成实拍图

表 2 设备规格表

描述	规格
氨产量/(t·a ⁻¹)	1000~30000
液氨压力/MPa	1.5
氨质量分数/%	>99.9
含水质量分数/%	<0.1
含油质量分数/10 ⁻⁶	<5
负载能力/%	20~110
耗电量/(kWh·t ⁻¹)	10500
防护等级	IP45
现场环境温度/℃[°F]	-5~50[23~122]

2.3 实验方案与结果分析

2.3.1 实验方案

本实验旨在验证年产千吨级模块化柔性绿氨示范装置有效性与运行效率,涵盖工艺包验证、负荷调节、氢气流量波动模拟、散热损失评估及启动时间测试,以评估系统动态工况性能与稳定性。

首先进行工艺包验证实验,在 100% 负荷下对比实际与理论值,检验模块化设计与施工准确性。接着开展多工况变负荷实验,负荷从 100% 调至 110%、90%,再降至 80%~30% 后恢复 100%,每次调整后稳定运行至少 10 min 确保数据可靠。该装置为“绿电-绿氢-绿氨”场景设计,具有模块化、标准化与智能化特点,可快速部署、低负荷运行与动态能量平衡,降低绿氢储存需求与建设成本。

之后进行氢气流量波动实验,每 0.5 h 按预设曲线调节新鲜氢气流量,模拟可再生能源波动影响,记录数据评估抗扰动能力。变负荷实验结束后,系统保压,监测合成塔内外温度变化,分析热效率与散热特性。

另外,系统停机重启至 100% 负荷标准工况,记录合成塔升温速率,评估启动性能与响应效率。实验中,利用 DCS 系统以 1 Hz 频率采集关键数据,为后续分析优化提供依据。

2.3.2 实验结果分析

通过对千吨级模块化柔性绿氨示范装置运行数据的系统分析,全面评估了其在动态工况下的性能表现。实验期间对运行负荷、合成塔进气量、系统压力及催化剂床层温度等关键参数进行了持续监测(图 4)。数据显示,系统在大部分时间内运行负荷保持稳定,但在约 130 h 处出现显著下降,推测与系统主动调节或外部输入波动有关。合成塔进气量的变化趋势与运行负荷高度同步,表明进气控制对维

持生产稳定性具有决定性作用。系统压力在实验过程中出现数次下降,与进气量减少存在关联,这可能会对氨合成反应的平衡转化率产生一定影响。催化剂

平均温度在 130 h 附近出现小幅波动,但整体控制良好,显示出系统具备有效的温度调控能力,这对维持催化剂活性、延长使用寿命至关重要。

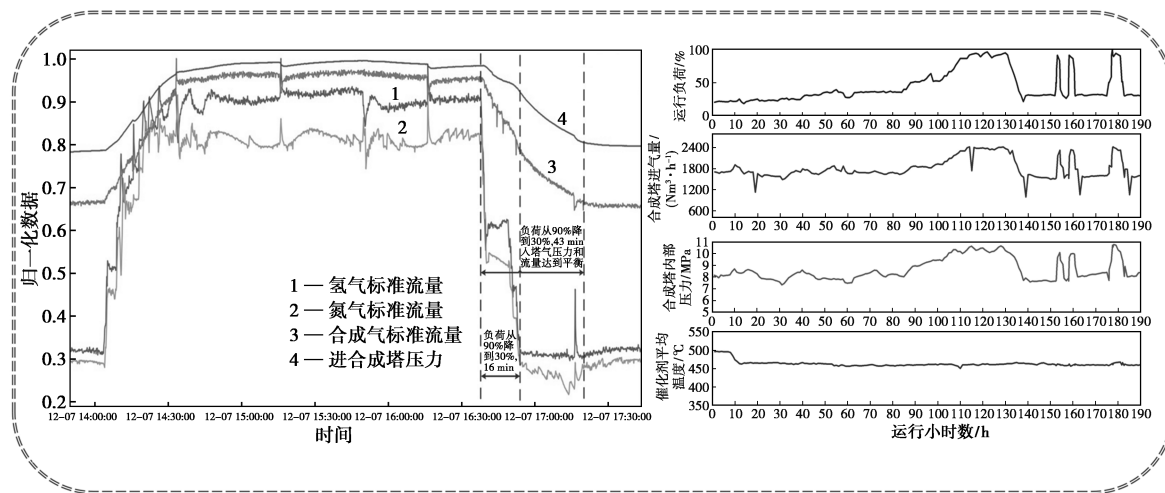


图 4 合成氨装置运行参数动态变化图

(1) 工艺包验证实验结果分析

压力与流量分析:在工艺包验证实验中,重点分析了 100% 负荷下的压力与流量参数(图 5 01:50:00—01:55:00 的实验数据)。结果表明,合成塔实际运行压力为 10.2 MPa,显著低于 14.5 MPa 的设计值。入塔气流量实测值为 2 374 m³/h,循环气流量为 1 643 m³/h,分别低于设计值 3 194 m³/h 和 2 850 m³/h。此外,各气流总和不守恒及循环比(实测 5.23~6.56,设计 8.56)偏低,提示压缩机性能与流量计精度可能存在优化空间。

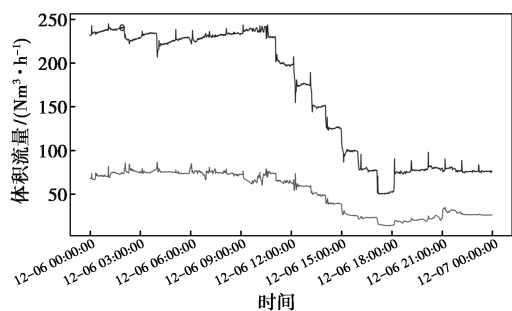


图 5 氢气与氮气流量变化曲线图

转换效率分析:转换效率分析显示,在 100% 负荷时,基于氢气消耗计算的实测效率为 10%,而基于氨产量计算则达 15%,与设计值 12% 存在差异。这种不一致性可能源于气体成分检测方法的系统误差,或受环境温度、催化剂活性及装填量等因素影响。需改进检测手段并综合考虑多种运行参数,以准确评估实际反应效率。表 3 为氨饱和蒸气压力与

温度对照表。

表 3 氨饱和蒸气压力与温度对照表

压力/ kPa	温度/ ℃	压力/ kPa	温度/ ℃	压力/ kPa	温度/ ℃	压力/ kPa	温度/ ℃
71.7	-40	190.1	-20	429.4	0	857.4	20
75.6	-39	198.7	-19	445.7	1	885.1	21
79.7	-38	207.6	-18	462.5	2	913.6	22
84.0	-37	216.8	-17	479.7	3	942.7	23
88.5	-36	226.3	-16	497.5	4	972.5	24
93.1	-35	236.2	-15	518.0	5	1003.1	25
98.0	-34	246.4	-14	534.5	6	1034.3	26
103.0	-33	257.0	-13	553.9	7	1066.4	27
108.3	-32	267.9	-12	573.7	8	1099.1	28
113.8	-31	279.1	-11	594.1	9	1132.6	29
119.5	-30	290.8	-10	615.0	10	1166.9	30
125.4	-29	302.8	-9	636.5	11	1202.0	31
131.5	-28	315.2	-8	658.6	12	1237.9	32
137.9	-27	328.0	-7	681.3	13	1274.6	33
144.6	-26	341.2	-6	704.6	14	1312.1	34
151.5	-25	354.8	-5	728.5	15	1350.4	35
158.7	-24	368.8	-4	753.0	16	1389.6	36
166.1	-23	383.3	-3	778.1	17	1429.6	37
173.8	-22	398.2	-2	803.9	18	1470.5	38
181.8	-21	413.6	-1	830.3	19	1512.2	39

(2) 宽负荷数据对比分析

宽负荷对比实验考察了装置在 30% 与 90% 负荷下的运行特性(图 6)。结果显示,90% 负荷下氢

气(约 $80 \text{ m}^3/\text{h}$)与合成气流量(近 $2400 \text{ m}^3/\text{h}$)显著高于30%负荷(氢气约 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,合成气约 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$),表明系统能根据负荷线性调节物料供应,支持更高氨合成速率。合成气组成压力在不同负荷间变化小,体现出良好的压力稳定性控制能力。不过,90%负荷下液氨流量波动加剧,说明高负荷生产时

产物输出稳定性有挑战,需优化控制策略保障液氨稳定生产。模块化合成氨装置在30%~110%宽负荷范围有良好的运行适应性与稳定性,高负荷下生产效率更高,验证了柔性运行能力。实验结果为后续万吨级放大及并网-离网双模式运行提供了关键依据与优化方向。

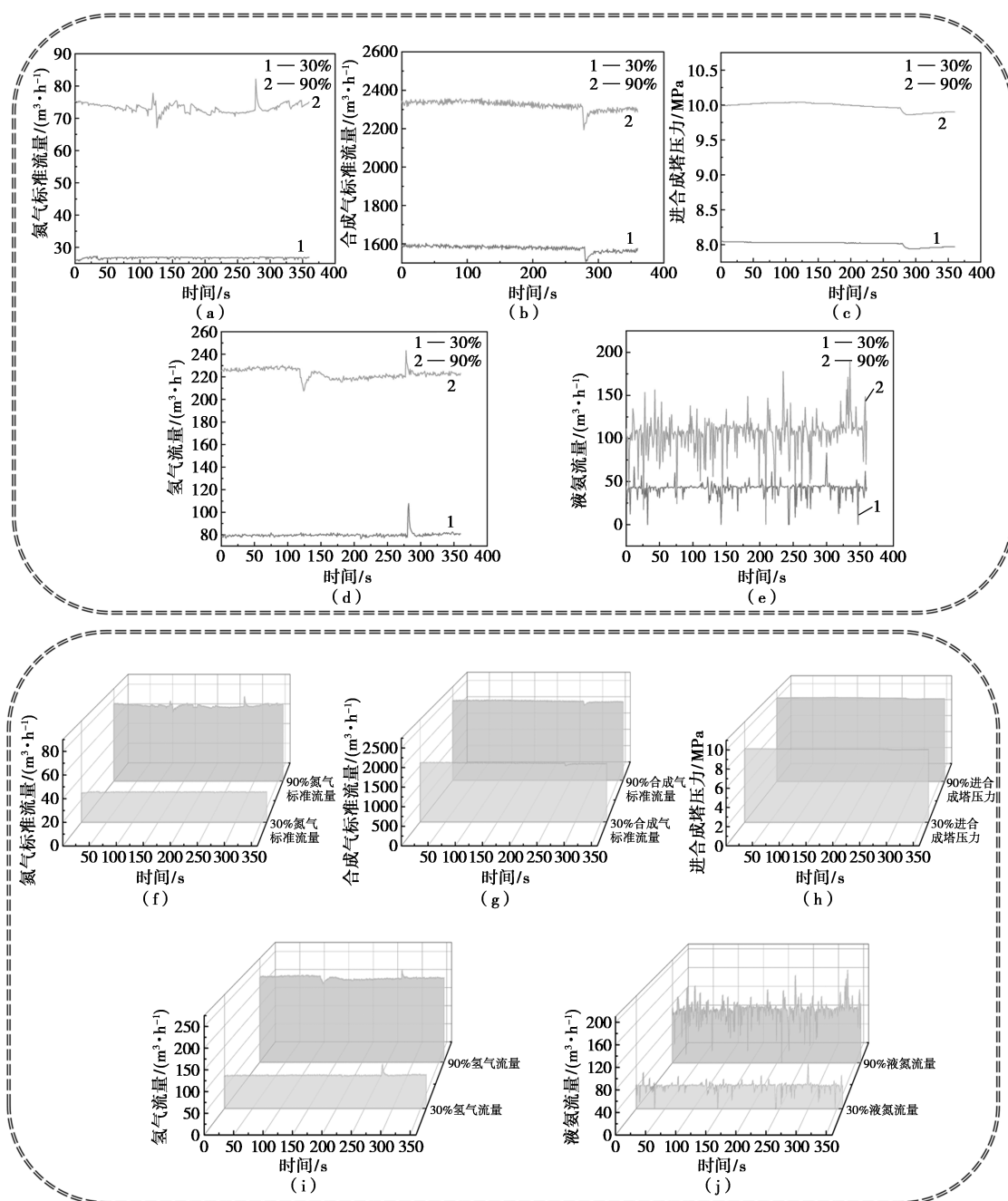


图6 数据对比图

3 结论与展望

在新能源新型电力系统背景下,柔性合成氨技术是推动可再生能源与化工行业融合的关键。研究

审视合成氨工艺技术升级机制、性能与应用,为工艺优化和系统设计奠定理论基础,主要结论如下。

(1)通过标准化撬装预制与现场快速集成,项目建设周期压缩至18个月以内,较传统装置减少

30%以上,初始投资显著降低,为绿氨技术规模化推广提供了可复制、可扩展的工程范式。

(2)系统具备 20%~110%宽负荷调节能力,在绿电中断或波动场景下可依靠储电维持合成氨工段低负荷运行,显著降低对储氢和储能系统的依赖,提升系统运行稳定性与经济性。

(3)通过构建高精度动态模型与实时优化算法,系统可在波动工况下实现多稳态运行与能效最优控制,为非计划停机预警、设备维护提供支持,显著增强系统鲁棒性与运维效率。

展望未来,面向“双碳”目标,模块化柔性绿氨技术将从千吨级中试迈向万吨级产业化。下一步围绕“规模更大、柔性更强、成本更低”攻关:多列并联快速规模化,建设周期缩至 18 个月以内;引入双时间尺度控制,有利于电网调度与为可再生能源丰富地区提供削峰填谷解决方案;依托批量效应与数字孪生运维降低标准化氨成本。同时推动绿氨多场景应用,助力“氨-氢-醇-油”多联产绿色液体燃料体系形成,为全球能源化工行业提供零碳转型路径。

参考文献

- [1] Kyriakou V, Garagounis I, Vourros A, *et al.* An electrochemical haber-bosch process[J]. *Joule*, 2020, 4(1): 142-158.
- [2] Chehade G, Dincer I. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel[J]. *Fuel*, 2021, 299: 120845.
- [3] Lee B, Winter L R, Lee H, *et al.* Pathways to a green ammonia future[J]. *ACS Energy Lett*, 2022, 7(9): 3032-3038.
- [4] Asgharian H, Lund H, Zinck Thellufsen J, *et al.* Green ammonia production in Denmark: Assessing future potentials and challenges[J]. *Fuel*, 2025, 387: 134423.
- [5] Campion N, Nami H, Swisher P R, *et al.* Techno-economic assessment of green ammonia production with different wind and solar potentials[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 173: 113057.
- [6] Fasihi M, Weiss R, Savolainen J, *et al.* Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants[J]. *Appl Energy*, 2021, 294: 116170.
- [7] Lier S, Grünewald M. Net present value analysis of modular chemical production plants[J]. *Chem Eng Technol*, 2011, 34(5): 809-816.
- [8] Ishaq H, Crawford C. Review of ammonia production and utilization: Enabling clean energy transition and net-zero climate targets[J]. *Energy Convers Manag*, 2024, 300: 117869.
- [9] Li J, Xiong Q, Mu X, *et al.* Recent advances in ammonia synthesis: From haber-bosch process to external field driven strategies[J]. *ChemSusChem*, 2024, 17(15): e202301775.
- [10] Rouwenhorst K H R, Travis A S, Lefferts L. 1921—2021: A century of renewable ammonia synthesis[J]. *Sustain Chem*, 2022, 3(2): 149-171.
- [11] Zhao H, Kamp L M, Lukszo Z. The potential of green ammonia production to reduce renewable power curtailment and encourage the energy transition in China[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2022, 47(44): 18935-18954.
- [12] Nami H, Hendriksen P V, Frandsen H L. Green ammonia production using current and emerging electrolysis technologies[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 199: 114517.
- [13] Osman O, Sgouridis S, Sleptchenko A. Scaling the production of renewable ammonia: A techno-economic optimization applied in regions with high insolation[J]. *J Clean Prod*, 2020, 271: 121627.
- [14] Smith C, Torrente-Murciano L. The importance of dynamic operation and renewable energy source on the economic feasibility of green ammonia[J]. *Joule*, 2024, 8(1): 157-174.
- [15] Ahmed H S, Yahya Z, Ali Khan W, *et al.* Sustainable pathways to ammonia: A comprehensive review of green production approaches[J]. *Clean Energy*, 2024, 8(2): 60-72.
- [16] Salmon N, Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a spatial energy vector: A review[J]. *Sustain Energy Fuels*, 2021, 5(11): 2814-2839.
- [17] Lin B, Wiesner T, Malmali M. Performance of a small-scale haber process: A techno-economic analysis[J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2020, 8(41): 15517-15531.
- [18] De La Hera G, Ruiz-Gutiérrez G, Viguri J R, *et al.* Flexible green ammonia production plants: Small-scale simulations based on energy aspects[J]. *Environments*, 2024, 11(4): 71.
- [19] Kong B, Zhang Q, Daoutidis P. Nonlinear model predictive control of flexible ammonia production[J]. *Control Eng Pract*, 2024, 148: 105946.
- [20] Armijo J, Philibert C. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2020, 45(3): 1541-1558.
- [21] Huang R, Kang L, Liu Y. Renewable synthetic methanol system design based on modular production lines[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2022, 161: 112379. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>