

# 基于风光电 - 氢储能系统的煤化工多能耦合路径与工艺优化

孙希德<sup>1</sup> 张建昌<sup>2</sup> 谢瑞胜<sup>1</sup> 杜清岭<sup>1</sup>

1. 山东弘图电力科技有限公司; 2. 山东银河建筑规划设计有限公司

**摘要:** 本文研究了绿氢重构煤制甲醇工艺的系统构建与优化路径, 分析了传统煤制甲醇过程中水煤气变换与酸气脱除的能耗与碳排放问题, 通过引入绿氢调节氢碳比、开发短流程脱硫工艺、优化反应参数及能源梯级利用等措施, 实现了碳利用率提升至 95%、能效提升至 69% 的效果。研究表明, 绿氢耦合煤制甲醇不仅可有效降低碳排放和能源消耗, 还具备良好的技术经济性。

**关键词:** 风光电 - 氢储能; 煤化工耦合; 绿氢耦合

在“双碳”战略背景下, 风光电 - 氢储能系统与煤化工的多能耦合成为推动传统高碳产业绿色转型的重要路径。本文聚焦风光制氢与煤制甲醇工艺的集成优化, 构建全流程系统模型, 探讨其在能量梯级利用、碳排放控制及经济性方面的综合表现, 为多能互补与清洁能源高效利用提供技术支撑。

## 1 风光电 - 氢储能系统容量优化配置研究

### 1.1 系统构成与运行原理

风光电 - 氢系统是一种多能互补能源结构, 由风力发电、光伏发电、火电机组、蓄电池、电解槽和储氢罐等组成。风光电作为主要能源供给负载, 用蓄电池调节其波动性, 火电在风光出力不足时提供调峰补充。

系统通过“削峰填谷”机制, 在电力盈余时将多余电能用于电解水制氢, 氢气部分供工业使用, 剩余储存在储氢罐中备用。该系统实现电 - 氢能量双向转化, 有效提升风光电的消纳能力和电力系统的运行稳定性。

### 1.2 气象资源与电源输出特性

本研究选取山东某地区作为风光资源分析对象, 获取其全年逐小时风速、光辐射强度及环境温度等气象数据。该地区年平均风速为 5.79 m/s, 光伏阵列表面的年平均辐射强度约为 200 W/m<sup>2</sup>, 具备良好的风光资源基础。风速和光辐射均表现出明显的时间特性: 风速在夜间较强, 凌晨 0 点达到峰值约 8.6 m/s, 白天减弱; 而光辐射呈现出与风速相反的趋势, 自清晨 5 点开始上升, 中午 12 点达到最大值 942.06 W/m<sup>2</sup>, 19 点后降为零。典型日分析进一步揭示了风光互补特性, 有利于系统整体稳定输出。

### 1.3 系统模型建立

光伏发电模型基于实际光辐射强度与环境温度修正输出功率, 考虑组件温升效应和光电转换效率。风电模型依据风速与风切变指数推算不同高度的风速变化, 结合风机特性曲线计算输出功率如图 1 所示。制氢部分采用适用于波动电源的 PEM 电解槽模型, 考虑开路电压、极化过电势和欧姆损耗等因素。蓄电池模型通过荷电状态 (SOC) 描述电池电量变化, 储氢罐模型则通过压缩机功耗

与储气状态 (SOH) 评估氢气存储过程。系统运行以功率平衡为基础, 约束条件涵盖电源侧出力、蓄电池充放电功率、电解槽运行区间及储氢罐压力范围。

### 1.4 容量配置计算与方案比较

为探讨风光电渗透率变化对系统容量配置的影响, 分别设定火电占比 100%、风光 / 火电比为 2:1, 以及 100% 风光电三种典型装机比例场景。在日尺度下分析结果表明, 100% 火电配置下系统可稳定供电但碳排放高, 需提供全部 3060 MW·h 电能; 当风光与火电比例为 2:1 时, 风光电部分提供 2018 MW·h, 需配置 382 MW·h 蓄电池以平抑波动, 火电补充 1062 MW·h; 而在 100% 风光电情景中, 需配置 1352 MW·h 蓄电池调峰, 风光电装机容量增至 90 MW。从年尺度分析进一步扩展为四种情景, 包括低比例、中高比例及 100% 风光电, 评估不同方案下系统用电满足情况、调峰需求及余电利用效率。在 100% 风光电情景下, 全年发电量达 330 352.05 MW·h, 除供负荷外, 约 8.4 万 MW·h 余电通过电解水制氢转化, 年产氢量达 1648 t, 其中 1500 t 用于工业,

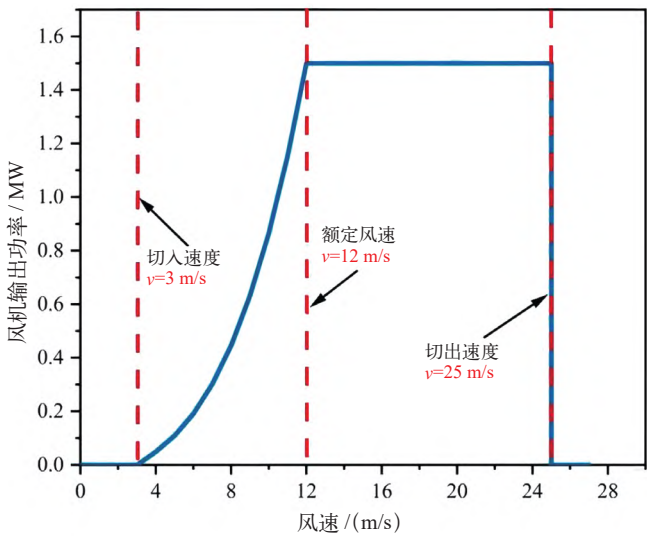


图1 风机输出功率与风速关系曲线

其余压缩后储存。制氢系统平均功率为9.6 MW，能量转化效率达65%，有效实现了余电消纳与氢能转化的协同利用。

2 长周期氢储能载体的选择研究

2.1 氢储能路径与载体选择

1) 氢储能面临的难题与工程需求：氢气属于高能量密度的清洁能源，在长周期储能中具有重要应用前景，但储运过程存在密度低、易泄漏、易脆化等技术瓶颈。高压储罐或液氢储存方案虽可实现能量密集存储，但存在设备投资高、安全风险大等问题，难以满足跨季节、跨区域储能需求。

2) 三种氢气衍生物载体：甲醇、甲烷、氨。为破解氢气储运难题，常将氢气与CO<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>反应生成液态或气态衍生物，如甲醇、甲烷和氨。这3种载体不仅是重要的工业化工品，还可作为燃料使用，具有高能量密度、运输方便、基础设施成熟等优势。甲醇广泛应用于精细化工领域，甲烷为清洁气体燃料，氨作为含氢化合物可直接燃烧或作为氢源分解使用。

3) Power-to-X 工艺总体流程设计：Power-to-X (PtX) 技术利用可再生能源电解水制氢，再与CO<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>反应合成甲醇、甲烷或氨，实现能源的高效转化

与储存。本文选取3种典型工艺路径：电制甲醇 (PtM)、电制甲烷 (PtG) 和电制氨 (PtA)，构建“电-氢-X”系统如图2所示。3种工艺均包括电解水制氢单元、CO<sub>2</sub>捕集或空分制氮单元、目标产物合成反应器及热能回收系统。以0.905 kg/s 氢气为基准，配置工艺设备容量，构建完整流程，实现余电转化、高密度氢储能及清洁能源延伸应用，推动可再生能源的多能互补和高效利用。

2.2 工艺系统构建与模型建立

1) PtM、PtG、PtA 工艺流程设

计：三种“电-氢-X”工艺流程基于可再生能源电解水制氢技术，通过与CO<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>反应实现氢能的高效转化与储存。PtM 工艺利用烟气CO<sub>2</sub>与氢气在催化剂作用下合成甲醇，包含碳捕集、甲醇合成与精馏环节；PtG 工艺采用Sabatier反应，将CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>催化生成甲烷，经冷凝分离获得产品气；PtA 工艺通过空分制氮，与氢气在高温高压条件下合成氨。3种工艺流程均涵盖电解制氢、反应合成及回收利用模块，构成闭合循环系统，实现从余电转化至高密度氢载体的全过程。

2) 单元模块建模：各工艺关键单元采用 Aspen Plus 等平台进行详细建模。碳捕集模块采用 MEA 溶剂吸收法，结合速率模式建模反应塔过程，考虑传质、反应动力学与热力学特性；空分单元采用深冷分离法，使用双塔精馏流程，模拟气体分离行为。制氢模块基于碱性电解槽，建模中考虑极化电压、电流密度及电能输入对产气量的影响。产品合成模块分别采用甲醇合成 Rplug 模型、甲烷化 Requill 模块与氨合成多段换热反应器建模，结合动力学方程与热力学参数精确描述反应行为。

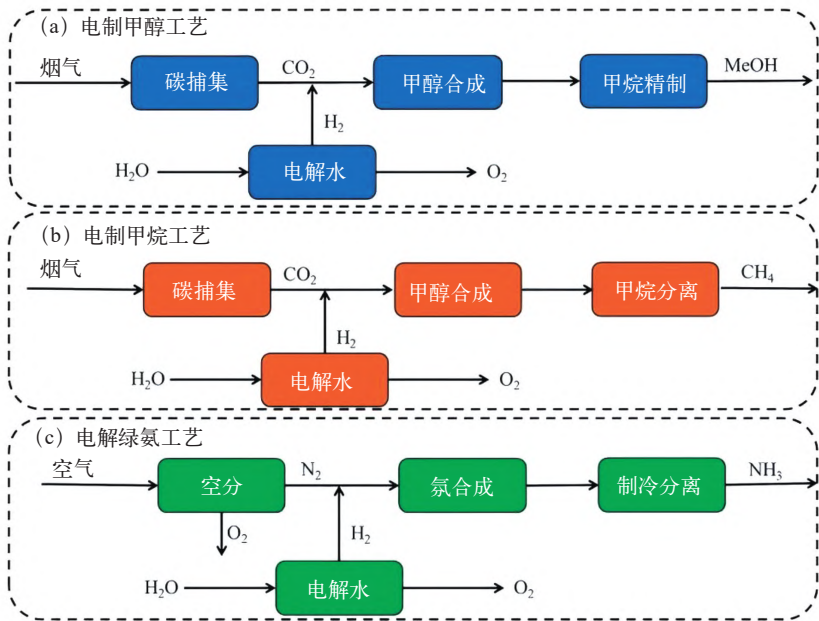


图2 “电-氢-X”流程设计框图

## 威乐工业水处理解决方案

威乐针对工业水处理系统流程提供丰富的产品及解决方案，凭借专业的技术团队支持，针对水处理各流程的不同系统需求，威乐都将为您提供定制化水泵解决方案。同时，客户可通过威乐Wilo-Select水泵选型工具或在线选型网站，获取水泵各项数据，选择最佳适配的水泵型号。



Wilo-Atmos GIGA-B  
卧式端吸离心泵



Wilo-Atmos GIGA-I  
立式管道泵



Wilo-Atmos GIGA-NX  
全新一代卧式不锈钢端吸泵



Wilo-Helix  
立式多级离心泵



Wilo-EMU-K / Wilo-EMU-D  
深井泵



Wilo-FAG  
潜水污水泵 (隔爆型)

工业水处理

垃圾渗滤液

膜处理配套

威乐(中国)水泵系统有限公司

[www.wilo.com.cn](http://www.wilo.com.cn)

Tel.: +86 10 5234 7888

Fax: +86 10 5234 7666



威乐中国官方微信



3) 热集成与能量梯级利用设计: 为提高整体能效, 3 种工艺均开展了热集成与能量梯级利用设计。利用 Aspen Energy Analyzer 软件对各流程进行焓流分析, 识别热源与热汇匹配关系。PtM 工艺中, 通过余热产生中高压蒸汽, 用于发电和再沸器供热, 但仍需外部蒸汽补充; PtG 工艺因甲烷化反应强放热, 可提供更多中低压蒸汽满足碳捕集所需热能; PtA 工艺反应放热显著, 热量回收后用于发电和系统再利用, 具备较高能量自给能力。热集成设计显著提升系统能效, 降低了电力与热力消耗成本。

### 2.3 结果分析与对比

PtA 工艺能量效率最高, 达到 52%, PtG 次之为 50%, PtM 最低为 44%。PtA 得益于氨合成过程中显著的放热特性与热能回收效率; PtG 甲烷化反应同样为强放热过程, 具备良好的热回收条件; 而 PtM 工艺中, 由于反应存在副反应、催化剂水敏感性高、碳转化率相对较低, 导致系统电力和蒸汽消耗高, 效率最低。

3 种工艺在碳、氮、氢元素利用率方面表现各异。PtM 工艺碳利用率为 94%, 氢利用率为 63%; PtG 工艺碳利用率高达 99.8%, 但氢利用率相对较低, 为 49.9%; PtA 工艺氮、氢利用率均达 98.6%。在碳排放方面, PtM 和 PtG 均表现为显著碳负排放, 单位产品净 CO<sub>2</sub> 排放量分别为 -1.15 t/t 和 -2.11 t/t, 体现出良好的碳封存潜力; 而 PtA 因未涉及 CO<sub>2</sub> 捕集, 仅通过电解氢与氮气反应, 单位产品碳排放为 0.22 t/t。整体来看, PtG 在碳利用和碳减排方面最优, PtA 在氢元素利用率上具有明显优势。

## 3 绿氢重构煤制甲醇工艺研究

### 3.1 传统煤制甲醇工艺分析

1) 煤气化与热解过程: 传统煤制甲醇工艺以粉煤为原料, 采用 GSP 气化炉进行高温气化。煤经过研磨后与 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 共同送入气化炉, 温度约为 1560 °C 在 Aspen Plus 中, 煤通过热解模型分解为 CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、Tar 以及 H<sub>2</sub> 等 10 种产物, 随后经历挥发分燃烧和气化反应, 生成粗合成气。该合成气在锅炉中进行热量回收, 再采用水激冷固化炉渣, 出口温度降至约 200 °C。该过程碳转化率超过 99%, 是甲醇合成的气源基础。

2) 水煤气变换单元设计: 为提高合成气中的氢碳比, 传统工艺设置高、低温两级水煤气变换反应器, 通过加入蒸汽使 CO 与 H<sub>2</sub>O 反应生成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>。变换气部分经过热交换与气液分离, 得到氢 / 碳比约 2.3 的气体。该单元在提升甲醇收率的同时, 也显著增加了 CO<sub>2</sub> 的生成量。

3) 酸气脱除工艺流程: 变换气含有大量的 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>S, 需经低温甲醇洗工艺净化。该工艺由酸气吸收塔、CO<sub>2</sub> 解析塔、

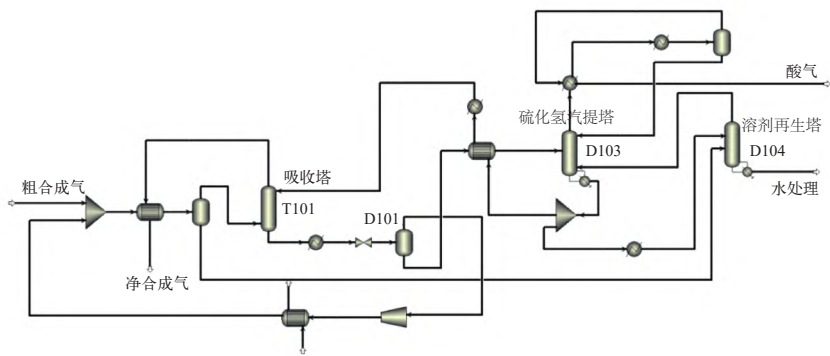


图3 短流程低温甲醇洗单元工艺流程图

H<sub>2</sub>S 富集塔与再生塔等组成，采用 -20℃ 预冷甲醇吸收酸气。其中吸收塔串联分段脱除 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>S，经解析、再生循环使用吸收剂。甲醇洗脱除效率高，可将 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 脱除率分别控制在 100% 与 96% 以上，保障下游合成催化剂不被中毒。

4) 甲醇合成与精馏系统：净合成气压缩至 8 MPa、预热至 200℃ 后进入甲醇合成反应器，催化剂为 Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，主要反应包括 CO 与 CO<sub>2</sub> 加氢生成甲醇及副反应逆水煤气变换。反应器产物冷却后，粗甲醇液相分离、气相部分循环。粗甲醇进一步经三塔双效精馏（预精馏塔、高压塔、常压塔）提纯，最终获得纯度为 99.9 wt.% 的高纯甲醇，回收率可达 99.9%。

3.2 绿氢重构煤制甲醇工艺设计

1) 短流程酸气脱除工艺开发：为适应取消变换单元后 CO<sub>2</sub> 含量降低的新工艺，开发了短流程低温甲醇洗工艺如图 3 所示，专注于脱除 H<sub>2</sub>S。工艺仅保留脱硫塔和汽提塔两个核心单元，省去了 CO<sub>2</sub> 解析和富集塔，大幅简化流程。该方案在实现 100% H<sub>2</sub>S 脱除的同时，减少了甲醇溶剂用量和再生能耗，较传统工艺甲醇用量降低 65.26%，显著提升了工艺能效与经济性。

2) 甲醇合成与精馏优化流程：改进工艺中，净合成气与电解水制得的绿氢共同压缩至 8 MPa 并预热后进入合成反应器，调节氢碳比至 SN=2.12，实现高效转化。甲醇合成仍采用 Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

催化剂体系，精馏部分沿用 Lurgi 三塔双效结构。得益于合成气配比优化与甲醇产量提高，系统热集成效率提升，产品纯度 99.9%，回收率达 99.9%。

3.3 关键参数分析

1) 氧 / 煤、蒸汽 / 煤与 CO<sub>2</sub> / 煤比优化：采用 Aspen Plus 灵敏度分析工具，优化氧、蒸汽和 CO<sub>2</sub> 投加比例。结果表明，氧 / 煤比设为 0.75 可兼顾反应温度和有效气体比例；蒸汽 / 煤比控制在 0.035 ~ 0.045 有利于氢气生成且能耗适中；CO<sub>2</sub> / 煤比最佳值为 0.5，可提升有效气比例并改善气化温度，优化整体气化性能。

2) 甲醇洗溶剂用量优化：甲醇贫液用量对酸性气脱除效果及系统能耗有显著影响。研究发现，当贫液流量为 10 113 kmol/h 时，可实现 CTM 工艺中 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>S 的有效脱除。相比之下，PCGwGH-CTM 工艺因 CO<sub>2</sub> 含量低，仅需 3513 kmol/h 溶剂，溶剂用量减少约 65%，大幅降低再生能耗与运行成本。

3) 反应器温度、压力与循环比调控：对甲醇合成反应器运行参数进行优化，CTM 工艺在 240℃、8 MPa 下甲醇产率最高，PCGwGH-CTM 工艺最佳温度为 250℃。循环比设为 0.99 可有效平衡压缩能耗与甲醇产量。过高的循环比虽可减少弛放气，但带来能耗激增。

3.4 技术经济分析

1) 碳利用率与碳排放比较：CTM 工艺碳利用率仅为 41%，CO<sub>2</sub> 排放强度高达 2.46 t/t 甲醇。而 PCGwGH-CTM 工

艺实现碳利用率 95%，CO<sub>2</sub> 排放强度仅为 0.064 t/t 甲醇，接近零排放。其通过绿氢调节氢碳比，有效抑制了变换和脱碳过程中碳损失，具有明显的减碳优势。

2) 工艺能量效率评估：考虑煤、甲醇和氢气热值后估算得出，CTM 工艺能量效率为 49%，而 PCGwGH-CTM 工艺可达 69%，提高幅度达 39%。这主要得益于热回收效率提升、CO<sub>2</sub> 分离简化以及绿氢带来的高能转化路径，展示出未来主流化工能源替代方案的潜力。

4 结语

本文系统分析了绿氢耦合煤制甲醇工艺的关键环节与参数调控策略，设计短流程脱酸与优化合成精馏系统，实现了碳利用率 95%、能效提升 39% 的显著效果。通过构建风光氢-煤化工一体化模型，验证了其在能源转化效率与碳排放控制方面的综合优势。研究表明，基于风光制氢的多能耦合路径具备较好的技术可行性，为传统煤化工的绿色低碳升级提供了示范方案。

参考文献：

[1] 王永康, 易俊, 谢晓. 风光氢氨醇一体化技术和产业综述[J]. 发电技术, 2025, 15 (04): 1-13.

[2] 吴东阳, 崔佳, 赵宇航, 等. 氢能综合能源系统的自适应最优能量调度研究[J]. 电工电能新技术, 2025, 44 (03): 9-16.

[3] 彭永伦. 氢能在能源革命中的重要作用[J]. 能源与节能, 2025 (02): 13-17.

[4] 张耀. 光伏发电系统中的数字化转型技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41 (05): 258-259.

[5] 张耀. 光伏发电效率的智能监控系统分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41 (03): 248-249.