

煤制乙二醇项目 CO 和 H₂ 制备工艺路线选择及经济性分析

徐水晶 (新疆中昆新材料有限公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 煤制乙二醇的核心原料为 CO 与 H₂, 其制备工艺直接决定项目技术可行性与经济性。本文聚焦当前主流工艺路线, 煤基合成气制备与焦炉煤气提纯, 从技术特性、案例数据及经济性展开对比。通过构建技术-经济双维度评价体系, 结合煤价波动敏感性分析, 结果表明水煤浆气化适用于煤资源丰富的中小规模项目, 粉煤气化在大规模项目中更具成本优势, 焦炉煤气提纯在焦化园区配套项目中经济性最优。本文为煤制乙二醇项目原料制备工艺选型提供数据支撑与决策参考。

关键词: 煤制乙二醇; CO/H₂ 制备; 水煤浆气化; 粉煤气化

中图分类号: TQ53

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 033-0073-03

Selection of CO and H₂ Preparation Process routes and economic Analysis for coal-to-ethylene glycol projects

Xu Shuijing (Xinjiang Zhongkun New Materials Co., LTD., Korla City Xinjiang 841000, China)

Abstract: The core raw materials of coal-to-ethylene glycol are CO and H₂, and its preparation process directly determines the technical feasibility and economy of the project. This article focuses on the current mainstream process routes, the preparation of coal-based syngas and the purification of coke oven gas, and conducts a comparison from the aspects of technical characteristics, case data and economy. By constructing a dual-dimensional evaluation system of technology and economy and combining with the sensitivity analysis of coal price fluctuations, the results show that water-coal slurry gasification is suitable for medium and small-scale projects with abundant coal resources, pulverized coal gasification has more cost advantages in large-scale projects, and the purification of coke oven gas is the most economically viable among the supporting projects in coking industrial parks. This article provides data support and decision-making reference for the selection of raw material preparation processes in coal-to-ethylene glycol projects.

Key words: Coal-based ethylene glycol; Preparation of CO/H₂; Coal water slurry gasification; Pulverized coal gasification

乙二醇 (EG) 作为聚酯、防冻液等领域的关键原料, 我国对外依存度长期超 50%^[1]。依托富煤贫油少气的能源结构, 煤制乙二醇技术已成为保障供应链安全的核心路径, 2023 年我国煤制乙二醇产能占比达 42%^[2]。CO 与 H₂ 是煤制乙二醇的原料心脏, 草酸酯偶联反应需高纯度 CO, 加氢反应需 H₂, 二者的制备成本占项目总投资的 35%-45%, 有效气 (CO+H₂) 产率直接影响乙二醇总收率。当前 CO/H₂ 制备存在三类主流工艺^[3]: ①水煤浆气化; ②粉煤气化; ③焦炉煤气提纯 (PSA 法), 三类工艺在原料要求、能耗、投资及成本上差异显著, 需结合项目资源禀赋、规模及环保要求精准选型。本文以工业化案例为依托, 通过技术参数对比、经济性核算及原料价格敏感性分析, 系统剖析各工艺的适用场景, 为煤制乙二醇项目原料端工艺决策提供技术与经济双重依据。

1 CO 和 H₂ 制备主流工艺路线技术特性及案例分析

1.1 煤基合成气制备工艺

煤基合成气工艺以烟煤/褐煤为原料, 通过气化

反应 ($C+H_2O \rightarrow CO+H_2-Q$) 生成粗合成气, 再经变换、脱硫脱碳提纯得到高纯度 CO 与 H₂, 是独立煤制乙二醇项目的主流选择。

其一, 水煤浆气化工艺: 原料为洗精煤制浆, 气化温度 1300-1400℃、压力 6.5-8.0MPa, 粗合成气中有效气 (CO+H₂) 体积分数 80%-85%, 需经耐硫变换→低温甲醇洗→PSA 提纯流程, 最终 CO 纯度 ≥ 98.5%、H₂ 纯度 ≥ 99.9%。河南某 60 万 t/a 煤制乙二醇项目, 采用多喷嘴水煤浆气化技术, 原料为河南永城烟煤, 实际运行数据: ①煤耗 550kg/t 有效气; ②吨有效气能耗 (标煤) 320kg; ③有效气产率 72%; ④年操作时间 8000h, 可满足 60 万 t/a 乙二醇对 CO (18 万 t/a) 与 H₂ (9 万 t/a) 的需求。

其二, 粉煤气化工艺 (壳牌 SCGP 技术): 原料为干燥煤粉, 气化温度 1500-1600℃、压力 4.0-6.0MPa, 粗合成气有效气体积分数 88%-92%, 因气化温度高、碳转化率高, 后续提纯流程能耗更低, CO 纯度可达 99.0%、H₂ 纯度 99.95%。陕西某 100 万 t/a 煤制乙二

醇项目，采用壳牌粉煤气化技术，原料为陕西榆林烟煤，实际运行数据：①煤耗 510kg/t 有效气；②吨有效气能耗（标煤）270kg；③有效气产率 78%；④配套 4 台气化炉（3 开 1 备），年有效气产量 45 万 t，支撑 100 万 t/a 乙二醇生产^[4]。

1.2 焦炉煤气提纯工艺（PSA 变压吸附技术）

焦炉煤气提纯工艺以焦化企业副产焦炉煤气为原料，通过 PSA 吸附脱除 N₂、CH₄、CO₂ 等杂质，直接分离提纯 CO 与 H₂，适合焦化园区配套煤制乙二醇项目。

焦炉煤气先经预处理→PSA-H₂ 提纯→PSA-CO 提纯，无需气化环节，流程短、投资低。山西某 30 万 t/a 焦炉煤气制乙二醇项目（2021 年投产），配套某 1000 万 t/a 焦化厂，焦炉煤气供应量 12 万 Nm³/h，实际运行数据：①焦炉煤气耗量 420Nm³/t 有效气；②吨有效气能耗（标煤）180kg；③有效气回收率 85%；④因原料为副产物，成本优势显著。

2 CO 和 H₂ 制备工艺路线选择的核心影响因素

2.1 煤种适应性

粒径与形态：块煤优先选择固定床，粉煤需匹配流化床或气流床，若项目所在地块煤资源丰富，固定床可降低原料预处理成本；若仅能获取粉煤，则需选择流化床或气流床，避免块煤破碎的额外能耗。

灰分与灰熔点：高灰分煤不适用于气流床，可选择固定床；高灰熔点煤需通过添加助熔剂降低灰熔点，否则气流床易发生结渣，此时流化床更具优势。

反应活性：低活性煤需高温环境促进反应，气流床可实现高效转化，而固定床碳转化率不足 85%，会增加煤耗成本。

2.2 产物气组成匹配性

煤制乙二醇主流的草酸酯路线对合成气有明确要求： $n(\text{CO}) : n(\text{H}_2) \approx 1 : 2$ ，不同工艺的产物气需通过后续工序调整。

固定床产物气： $n(\text{CO}) : n(\text{H}_2) \approx 1 : 1.2-1.4$ ，H₂ 过量，需通过 CO₂ 脱除或 CO 补充调整比例，额外增

加能耗。

流化床产物气： $n(\text{CO}) : n(\text{H}_2) \approx 1 : 0.8-1.2$ ，CO 略过量，需通过变换反应（ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ）补充 H₂，变换反应能耗较低，适配草酸酯路线需求。

气流床产物气： $n(\text{CO}) : n(\text{H}_2) \approx 1 : 0.8-1.0$ ，CO 过量，可通过低温变换精准调整 H₂ 量，且产物气洁净，无需复杂预处理，是大规模草酸酯路线的最优选择。

2.3 能耗与环保

能耗对比：气流床碳转化率最高，单位煤耗最低，但氧耗最高，空分能耗占比达 30%-40%；固定床煤耗最高，但氧耗最低，综合能耗（煤+电）与气流床接近；流化床能耗介于二者之间，但灰渣含碳量高，存在隐性能耗损失。

环保成本：固定床产生的焦油、酚类需深度处理，环保成本约 50-80 元/t(CO+H₂)；气流床无焦油，灰渣可制建材，环保成本仅 20-30 元/t；流化床虽无焦油，但灰灰需高效除尘，环保成本约 30-50 元/t。

3 CO 和 H₂ 制备工艺经济性分析

3.1 经济性核算核心参数

固定资产投资：水煤浆气化单位投资 2500 元/t 有效气，粉煤气化因设备复杂度高，单位投资 3000 元/t 有效气，焦炉煤气提纯单位投资 1800 元/t 有效气，均按 15 年折旧（残值 5%），年折旧成本 = 单位投资 × (1-5%) / 15。

原料成本：水煤浆气化煤耗 550kg/t 有效气，成本 = 550 × 900/1000 = 495 元；粉煤气化煤耗 510kg/t，成本 = 510 × 900/1000 = 459 元；焦炉煤气耗量 420Nm³/t，成本 = 420 × 0.4 = 168 元。

能耗成本：水煤浆气化吨有效气耗电 280kWh、耗蒸汽 1.2t（蒸汽价 200 元/t），成本 = 280 × 0.55 + 1.2 × 200 = 154 + 240 = 394 元；粉煤气化耗电 250kWh、耗蒸汽 1.0t，成本 = 250 × 0.55 + 1.0 × 200 = 137.5 + 200 = 337.5 元；焦炉煤气提纯耗电 120kWh，成本 = 120 × 0.55 = 66 元。

表 1 CO 和 H₂ 制备主流工艺技术参数对比表

工艺指标	水煤浆气化（多喷嘴）	粉煤气化（壳牌）	焦炉煤气提纯（PSA）	数据来源 / 备注
原料类型	烟煤（洗精煤）	烟煤 / 褐煤（煤粉）	焦化副产焦炉煤气	工业案例实际数据
原料要求（收到基）	灰分 ≤ 15%，硫分 ≤ 1.0%	灰分 ≤ 10%，硫分 ≤ 0.8%	H ₂ 55%-60%，CO6%-8%	粉煤气化对原料纯度要求更高
气化 / 提纯温度	1300-1400℃	1500-1600℃	常温（PSA）	粉煤气化需高温空气分离制氧
粗气有效气（CO+H ₂ ）含量	80%-85%（体积分数）	88%-92%	-（直接提纯）	粉煤气化有效气浓度更高
最终 CO 纯度	≥ 98.5%	≥ 99.0%	≥ 98.0%	均满足草酸酯偶联反应要求
最终 H ₂ 纯度	≥ 99.9%	≥ 99.95%	≥ 99.9%	均满足加氢反应要求
吨有效气能耗（标煤）	320kg	270kg	180kg	焦炉煤气工艺能耗最低
碳转化率	96%-97%	99% 以上	-（原料为燃气）	粉煤气化碳利用率最高
环保指标（吨有效气）	固废（灰渣）80kg	固废（灰渣）50kg	无固废	粉煤气化固废排放量更低

表 2 CO 和 H₂ 制备工艺吨有效气经济性核算表 (单位: 元/t)

成本构成	水煤浆气化 (60 万 t/a)	粉煤气化 (100 万 t/a)	焦炉煤气提纯 (30 万 t/a)	备注
固定资产折旧 (15 年)	158	190	114	粉煤气化投资高, 折旧成本高
原料成本	495	459	168	焦炉煤气为副产物, 成本最低
能耗成本 (电 + 蒸汽)	394	337.5	66	焦炉煤气无需气化, 能耗成本低
运维成本	75	90	54	按投资 3% 计
总成本	1122	1076.5	402	焦炉煤气工艺成本优势显著
单位投资 (元/t 有效气)	2500	3000	1800	规模越大, 单位投资略有下降
对应乙二醇吨成本贡献	3366	3230	1206	乙二醇需 3t 有效气/t 产品

运维成本: 含人工、检修、药剂等, 按固定资产投资 3% 计, 水煤浆气化 75 元/t、粉煤气化 90 元/t、焦炉煤气提纯 54 元/t。

3.2 原料价格敏感性分析

煤价是煤基工艺成本的核心变量, 以水煤浆气化为例, 当煤价从 700 元/t 升至 1100 元/t 时, 吨有效气原料成本从 385 元增至 605 元, 总成本从 912 元升至 1332 元; 粉煤气化因煤耗低, 成本涨幅略低。焦炉煤气工艺因原料为焦化副产物, 价格波动小, 在 0.3–0.5 元/Nm³ 以内, 成本稳定性更强。

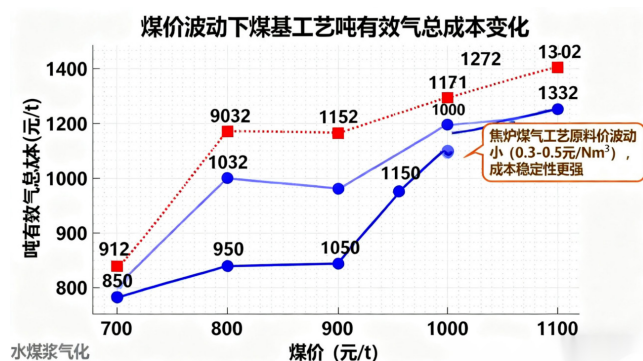


图 1 煤价波动下煤基工艺吨有效气总成本变化图

基于图 1 可知, 随煤价上涨, 两类工艺成本均线性上升, 水煤浆气化成本始终高于粉煤气化; 当煤价 > 1000 元/t 时, 水煤浆气化总成本超 1300 元/t, 粉煤气化超 1200 元/t, 此时煤制乙二醇项目需通过技术优化或产品提价维持盈利^[5]。

4 工艺路线选择影响因素及案例决策

4.1 原料可得性

煤炭主产区陕西、内蒙古: 优先选择煤基工艺, 如陕西榆林某 100 万 t/a 项目, 周边烟煤储量丰富, 坑口价 850 元/t, 选用粉煤气化, 有效气产率高, 适合大规模生产, 吨有效气成本 1076 元, 乙二醇吨成本 3230 元, 低于石油基乙二醇成本, 4500 元/t, 2023 年均价。

焦化产业集中区山西、河北: 优先选择焦炉煤气提纯, 如山西吕梁某 30 万 t/a 项目, 配套本地 1000 万 t/a 焦化厂, 焦炉煤气采购价 0.38 元/Nm³, 吨有效气成本 402 元, 乙二醇吨成本仅 1206 元, 经济性远超煤基工艺。

4.2 项目规模

中小规模项目 ≤ 50 万 t/a 乙二醇: 水煤浆气化更优, 如河南某 40 万 t/a 项目, 水煤浆气化单位投资 2500 元/t, 低于粉煤气化的 3000 元/t, 虽吨有效气成本高 45 元, 但总投资低 2.5 亿元, 适合资金有限的项目。

大规模项目, ≥ 60 万 t/a 乙二醇: 粉煤气化更优, 如陕西某 100 万 t/a 项目, 粉煤气化因规模效应, 4 台气化炉, 单位投资降至 2900 元/t, 吨有效气成本比水煤浆低 45.5 元, 年节约成本 2.05 亿元, 按年有效气 45 万 t 计。

4.3 环保要求

粉煤气化碳转化率 > 99%、固废排放量, 50kg/t 有效气低于水煤浆 80kg/t, 更适合环保要求严格的地区。例如江苏某 50 万 t/a 项目, 因当地固废处置费高达 300 元/t, 选用粉煤气化, 年减少固废处置成本 450 万元 ((80–50) × 15 万 t × 1000 元/t), 抵消部分投资溢价。

5 结束语

综上, 煤制乙二醇项目 CO 和 H₂ 制备工艺的选择, 本质是资源禀赋–技术特性–经济性的匹配过程: ①技术层面: 粉煤气化以高有效气产率、低能耗、高环保性成为技术优选, 但对原料纯度与项目规模要求高; 水煤浆气化适应性强, 适合中小规模项目; 焦炉煤气提纯流程短、能耗低, 是焦化园区循环经济的最佳选择; ②经济层面: 当前市场条件下, 焦炉煤气提纯成本仅为煤基工艺的 37%–38%, 但依赖焦化配套; 煤基工艺中, 粉煤气化在规模 > 60 万 t/a 时成本低于水煤浆, 规模效应显著。

参考文献:

- [1] 仇登可. 煤制天然气联产甲醇、乙二醇工艺路线及经济性探索与分析[J]. 化肥设计, 2022, 60(2): 31–35.
- [2] 巩伟锋, 郭泽华. 从工艺路线出发分析煤制乙二醇企业未来发展[J]. 山西化工, 2022, 42(3): 45–46, 67.
- [3] 王亚龙, 李永亭, 翟勇. 煤制天然气装置过剩粉煤综合利用可行性及产品路线探讨[J]. 中氮肥, 2024(5): 5–9.
- [4] 王媛, 宋智丽, 李成科, 等. 煤制乙二醇中挥发性有机气体回收系统设计[J]. 化工管理, 2023(12): 52–55.
- [5] 陈有刚, 朱朝霞. 20 万 t/a 某煤制乙二醇企业能耗初步分析[J]. 煤化工, 2025, 53(4): 52–55.