煤制乙二醇加氢反应器进料配比优化及能耗降低分析

包永新

国能榆林化工有限公司　陕西　榆林　719302

摘　要：煤制乙二醇加氢单元的进料配比直接决定反应转化效率与系统能耗水平，是衔接草酸酯合成与成品提纯的核心管控节点。从加氢反应器运行特性与物料反应规律切入，梳理不同组分进料占比对反应工况、体系稳定性的作用逻辑，结合 40 万 t/年煤制乙二醇工业化固定床加氢装置长期运行实操经验与实际运行场景，搭建分层适配的配比调控体系，围绕反应热耗、物料输送、设备减负等维度构建降耗路径，优化方案无需新增设备投资，仅通过进料配比精细化调整即可实现催化剂运行周期延长、乙二醇选择性提升、加氢单元单位产品能耗稳步下降，可为同类型煤制乙二醇加氢装置现场节能优化提供落地参考，助力煤制乙二醇加氢装置实现能效提升与长周期稳定运行。

关键词：煤制乙二醇；加氢反应器；氢酯比；进料配比优化；草酸酯加氢；能耗管控

引言：乙二醇作为聚酯、防冻剂等领域的关键基础化工原料，依托我国富煤贫油的资源禀赋，煤制乙二醇技术已成为替代石油基合成路线的核心方向。加氢反应单元作为煤制乙二醇生产流程的核心转化环节，进料配比适配性不足，会造成催化剂寿命缩短、副产物占比偏高、系统能耗居高不下等生产痛点。

1 煤制乙二醇加氢反应体系基础特性

煤制乙二醇生产中，加氢反应可转化中间体得到乙二醇产品。加氢反应器借助专用催化剂，促使草酸酯中间体与氢气发生氢化加成反应。原料在设定温度、压力下接触催化剂完成定向转化，实现装置连续化生产[1]。固定床加氢反应器适配连续作业，物料分布、进料配比精度，直接决定床层反应效果与转化水平。

1.1 加氢反应物料组分反应特性

加氢体系内各物料理化性质、反应活性存在明显区别。氢气分子结构简单，活化能较低，可充分参与不饱和有机官能团的加成反应。草酸酯中间体属于核心反应原料，分子内部含有可氢化不饱和基团，是加氢转化的主要对象。该类物料对温度、压力较为敏感，工况波动会直接改变转化效率与反应进度。物料活性与理化性质的差异，要求进料配比做到差异化精准管控。配比失衡会放大物料本身的性能短板，引发反应失调、转化效率下滑等一系列生产问题。

1.2 氢酯比主导进料配比对加氢反应体系的影响机制

氢酯比指循环氢气与液相草酸酯的摩尔配比，是调控加氢反应平衡、床层温度、转化深度的第一工艺变量，影响贯穿整套加氢系统：

（1）氢酯比偏低：反应器内氢分子浓度不足，DMO 分子无法充分氢化，草酸酯单程转化率下降，出现 DMO 穿透风险，加大后续精制系统处理难度，干扰产品质量；加氢不完全会催生副反应，生成未转化草酸二甲酯（DMO）、乙醇酸甲酯（MG）两类不完全加氢产物，同时伴生甲氧基乙酸甲酯、乙二醇单甲醚、甲酸甲酯、二氧戊环等醚类、酯类中间杂质。杂质持续累积会加剧物料无效循环，抬高精馏分离负荷，加速催化剂失活，造成加氢单元能耗抬升、乙二醇产品品质不达标。

（2）氢酯比偏高：过量氢气仅充当系统内循环惰性介质，不会带来转化率提升，却会加大循环压缩机处理量，蒸汽消耗显著上涨；大量低温循环氢气进入预热器，需要消耗更多次中压蒸汽抬升至反应温度，系统热耗同步增加；高流速氢气流冲刷催化剂颗粒，加剧催化剂粉化，堵塞反应器管程与后续过滤器，抬高运维成本；同时触发深度副反应，生成乙醇、二乙二醇、三乙二醇、乙二醇二甲醚等杂质，加重后端分离能耗；局部氢匮乏区域催化剂积碳速率加快，缩短催化剂更换周期。

（3）氢酯比处于经济适配区间：反应器内部氢、酯分子匹配均衡，单程转化率稳定达标，副产物生成量少，循环物料体量降至最低；循环氢气流量落在压缩机经济负荷区间，蒸汽消耗随之降低，床层放热平缓，催化剂可长期维持优良运行工况。

1.3 加氢系统能耗构成与产生机理

结合现场公用工程统计，加氢系统能耗主要分为三类，全部和氢酯比、进料配比强耦合：

（1）透平蒸汽单耗（占加氢总能耗 60%以上）：由

循环氢气总量决定，氢酯比越高，循环气量越大，压缩机轴功率持续上升，属于核心能耗增长点。

（2）加热蒸汽能耗：用于将混合进料加热至反应起始温度，过量氢气、高占比稀释甲醇会扩大待加热物料总量，产生蒸汽无效损耗。

（3）辅助设备调控能耗：床层温度、系统压力出现波动，温控阀频繁调节，衍生额外损耗。

工业运行实践表明：稀释组分、DMO 负荷造成的能耗波动幅度有限，氢酯比偏离最优区间才是加氢单元无效能耗居高的核心诱因。

2 加氢反应器进料配比影响体系分析

2.1 氢酯比对 DMO 转化与产品品质的核心影响

固定床工业反应器压力、温度维持稳定区间时，氢酯比直接划定 DMO 单程转化上限：

（1）低负荷工况（装置负荷 60%～75%）：氢酯比控制过低，DMO 转化率下降 3～5 个百分点，未转化 DMO 混入加氢产物，破坏乙二醇产品质量；

（2）额定负荷工况（90%～100%）：氢酯比上调无法带来转化率提升，产品内部轻组分杂质小幅增多，乙二醇精馏塔回流比被迫加大，精馏蒸汽消耗上涨；

（3）满负荷超负荷工况（100%～110%）：氢酯比供给不足，床层轴向温差扩大，局部超温催生大量副产物，乙二醇紫外透光率指标变差，产品存在降级风险。

现场长期标定数据显示：稳定把控经济氢酯比区间，DMO 单程转化率可稳定维持在工艺设计值以上，副产物总量降低 20%左右，从源头削减后端分离工序能耗投入[2]。

2.2 氢气与 DMO 配比对反应工况的影响规律

（1）低负荷工况沿用高负荷氢酯比：DMO 进料量缩减，循环氢气量没有同步下调，压缩机处于低流量高负荷的非经济工况，单位产品蒸汽单耗显著抬升；

（2）高负荷工况沿用低负荷氢酯比：DMO 进料加大，氢气供给缺口显现，转化深度不足，床层热量集中释放，冷却系统负荷被迫加大。

进料配比优化核心逻辑：以装置负荷作为基准动态调整氢酯比，DMO 液相进料量与循环氢气摩尔量联动增减，保障不同负荷条件下氢酯比稳定处于经济区间。

2.3 氢酯比与温度、压力、空速工艺参数耦合关系

反应器操作温度、系统压力、DMO 空速，均要匹配对应负荷下的标准氢酯比：

（1）压力提升能够小幅压缩目标氢酯比，但升压过程加大压缩机能耗，存在明确能耗平衡点；

（2）反应温度升高，DMO 反应活性得到增强，可适度下调氢酯比，但温度超限会加速催化剂活性衰减。

氢酯比和操作参数出现错配，温度、压力自控回路持续高频动作，调节阀、循环水泵、冷却风机长期变负荷运行，形成持续性额外能耗。

3 煤制乙二醇加氢反应器进料配比优化思路

3.1 基于反应平稳性的基础进料配比调控方向

加氢反应体系稳态运行，依托基础进料配比标准化管控，规避物料参数紊乱引发的反应异常。结合 40 万 t/年煤制乙二醇装置常年运行标定结果，按照生产负荷划分三段标准化氢酯比管控区间，作为日常稳态操作基准，规避氢酯比大幅偏移：

（1）低负荷区间（60%～75%装置负荷）：选用低限值经济氢酯比，同步调低循环压缩机转速，压缩循环气量，规避氢气循环量过大带来的透平蒸汽单耗上涨；

（2）常规额定负荷（75%～100%装置负荷）：执行装置最优基准氢酯比，兼顾转化效率与压缩机能耗，实现转化效果和能耗水平相互平衡；

（3）高负荷/超负荷区间（100%～110%装置负荷）：适度抬升氢酯比上限，抑制床层热点生成，阻断副反应大规模发生。

稳态工况严格约束氢酯比波动范围，禁止操作人员随意大幅改动循环氢气量，减少工况无序扰动。

3.2 适配反应负荷变化的动态进料配比调整方式

针对上游来料波动、装置开停车、负荷升降等非稳态工况，建立 DMO 进料流量与循环氢气量联动调节逻辑：

（1）降负荷操作：先按照负荷降幅同比例下调 DMO 进料，再缩减循环氢气供给，优先保障氢酯比不超标，规避过量氢气持续循环；

（2）提负荷操作：预先小幅上调循环氢气量，匹配后续提升的 DMO 进料，保证氢酯比不低于最低控制值，规避瞬时氢匮乏造成床层超温；

（3）进料瞬时波动：依靠 DMO 进料调节阀与氢气调节阀，实时修正系统压力与循环气量，快速校正氢酯比，消除滞后调节带来的配比失衡。

3.3 长周期运行下氢酯比精细化修正方案

催化剂运行时长增加，活性会逐步衰减，固定不变的氢酯比无法适配催化剂状态变化：

（1）催化剂运行初期（0～9 个月）：活性储备充足，选用区间下限氢酯比，最大限度压缩循环气量，降

低压缩机蒸汽单耗；

（2）催化剂运行中后期（9 个月以上）：活性出现衰减，逐步小幅上调氢酯比，弥补反应活性损失，保障 DMO 转化率，规避未转化物料大量循环抬高能耗。

依托装置月度转化效率标定数据动态修正氢酯比基准，实现催化剂全生命周期节能运行。

4 基于进料配比优化的加氢系统能耗降低路径

配比失衡是无效热耗攀升的核心诱因。物料配比不合理会造成反应失衡，原料转化滞后、体系热量分配不均，迫使加热系统持续补热[3]。

4.1 优化氢酯比平衡反应热，削减加热蒸汽消耗

精准优化气液相物料配比，氢化反应稳定落在固有温度区间，依靠反应自身热效应降低外部热源补给需求。合理压缩辅助惰性组分配比，减少低温无效物料入炉带来的热量损耗，降低物料升温热耗。氢酯比偏高时，大量低温循环氢气涌入进料预热器，是加热蒸汽消耗居高的主要因素。锁定各负荷对应的经济氢酯比，控制循环氢气总体量；减少过量低温氢气进入预热系统，降低预热器换热负荷，中压蒸汽消耗量随之下降；氢酯比匹配合理，反应自身放热维持反应温度，外部补热需求减少；床层局部超温频次下降，循环冷却水调节阀开度收窄，循环水输送水泵电耗同步缩减。

4.2 控制最优氢酯比降低透平蒸汽单耗

物料输送能耗，多来自冗余物料输送、设备负荷超标与工况频繁调节。进料配比偏离最优区间，过量原料、惰性物料持续流经输送管路，泵体、氢气压缩机运行负荷抬升。落实最优进料配比体系，限定各类物料进料体量，消除无效物料输送流程，压低输送设备基础负荷。配比参数保持稳定，进料流量波动幅度收窄，输送设备调参频次下降，减少变负荷衍生能耗增量。循环氢气压缩机是加氢单元耗能首位设备，负荷和循环氢气流量呈线性关联，优化氢酯比推动压缩机经济运行；稳态额定负荷下将氢酯比控制在最优区间，剔除无反应贡献的过量循环氢气，压缩机打气量下降，透平运行功率降低；低负荷工况下调氢酯比，降低压缩机转速，规避压缩机大气量循环，单位乙二醇产品蒸汽单耗明显下降；配合系统惰性气连续排放，提升循环氢纯度，同等转化需求下总循环气量缩减，进一步压低压缩机能耗。

4.3 稳定氢酯比实现工况平稳，减少辅助设备调节能耗

进料配比紊乱，反应器温度、压力发生偏移，自控配套设备持续做功修正参数偏差，加大设备能耗。配比优化可稳定反应器内部反应状态，约束核心工况参数波动，温度波动控制在 ±2℃、压力波动控制在 ±0.05MPa 以内，温控、压控、循环设备调控频次减少。稳定反应环境维护催化剂活性，规避工况波动造成的反应低效，消除设备弥补反应缺陷产生的额外能耗，兼顾节能降耗与设备长效运维。氢酯比失衡是床层温度、系统压力频繁波动的根本诱因，精准管控氢酯比，可显著降低自控设备动作频次；削弱工况剧烈波动对催化剂的冲击，催化剂积碳、粉化得到缓解，过滤器、反应器压差上涨周期拉长，降低系统停车检修带来的能耗损耗。

4.4 全流程精细化配比管控综合降耗配套手段

加氢系统能耗分布于热补给、物料输送、设备调控多个生产环节。精细化进料配比调控能够缓解各环节能耗浪费。优化进料组分结构，稳定装置运行工况，削减设备频繁调节衍生的能耗损失[4]。以氢酯比优化为核心，配套全流程进料精细化管控，实现多环节同步节能。前端把控粗 DMO 品质，减少甲醇、轻组分杂质带入加氢系统，抑制稀释组分累积，不用被动抬高氢酯比补偿反应效率；优化 PSA 操作，提升循环氢气回收率，缩减新鲜氢气补充量，降低新氢压缩能耗；建立班组氢酯比日常考核，实时监控在线氢酯比摩尔比值，杜绝粗放操作，维持系统长期低能耗运行；定期比对不同氢酯比条件下的单产蒸汽、中压蒸汽、透平蒸汽消耗，动态更新各负荷最优氢酯比台账，持续挖掘节能潜力。

结束语

加氢反应器进料配比的优化调整，是从工艺源头挖掘煤制乙二醇装置节能潜力的关键抓手。通过稳态基础配比、动态负荷适配、多组分协同调控逐层落地，理顺加氢体系内部物料反应秩序，压缩各环节无效能耗生成空间。这套适配工业场景的调控逻辑，不产生大额设备改造投入，同步实现反应效率提升、催化剂寿命延长、单位产品能耗下降，为煤制乙二醇行业能效升级提供可复制的实操路径。

参考文献

[1] 皇甫为宗.200kt/a 煤制乙二醇装置加氢反应器优化设计 [J]. 中氮肥,2025(1):77-80.

[2] 高彩风, 尹子帆, 王志强. 煤制乙二醇加氢催化剂长周期运行存在的问题分析与改进措施 [J]. 煤化工,2026,54(2):92-94,103.

[3] 张道祥, 郭海滨.200kt/a 煤制乙二醇装置 DMO 加氢系统工艺优化改进总结 [J]. 中氮肥,2025(1):62-66.

[4] 王倩, 侯刘涛. 煤制乙二醇加氢系统稳定运行及节能优化探索 [J]. 化肥设计,2026,64(3):49-52.