

# 煤制乙二醇工艺技术及其生产装置运行研究

刘 祯 胡孝奎 张 瑜

国能榆林化工有限公司 陕西榆林 719302

**摘 要:** 乙二醇是聚酯纤维、防冻液及多种化工新材料的重要基础原料, 长期以来其生产路线以石油裂解副产物为主, 原料来源高度依赖石油资源。随着能源结构调整和石油资源约束日益凸显, 探索非石油路线制备乙二醇成为化工行业的重要发展方向。本文围绕煤制乙二醇生产装置的运行特征与技术问题, 从工艺路线和工程运行角度对煤制乙二醇技术进行了系统研究。通过分析合成气组成波动、催化剂活性衰减及精制系统杂质富集等关键运行难点, 探讨其对装置稳定性和产品质量的影响机理, 并提出相应的工艺优化与技术对策。研究结果为提升煤制乙二醇装置的稳定运行能力和运行经济性提供了技术参考。

**关键词:** 煤制乙二醇; 工艺技术; 生产装置; 运行措施

## 前言

随着能源结构调整和石油资源约束日益凸显, 探索非石油路线制备乙二醇成为化工行业的重要发展方向。目前, 国内采用的乙二醇生产工艺具有多样化特点, 其中煤基合成气制乙二醇技术是行业研究的重点。我国煤炭资源丰富, 以煤为原料的乙二醇生产工艺具有原料易于获取、生产装置运行成本较低等优势。但煤制乙二醇工艺路线面临的物料损失较大, 对能源的回收率以及废物的利用率较低, 如何对煤制乙二醇工艺进行优化是学术界目前关注的重点<sup>[1]</sup>。但当前仍面临合成气转化率低、催化剂失活快、能耗与排放高等共性问题, 制约了工艺效率与绿色发展。在我国煤炭资源相对丰富而油气资源对外依存度较高的现实条件下, 煤制乙二醇被视为实现乙二醇原料多元化和保障产业链安全的重要技术路径。相较于传统石化工艺, 煤制乙二醇需要经历煤气化、合成气净化、间接转化及精制分离等多级过程, 流程长、单元多、操作条件复杂, 对装置运行稳定性提出了更高要求<sup>[2]</sup>。

## 一、煤制乙二醇产业技术发展概况

煤制乙二醇生产过程涉及多个复杂的化学反应及能量转换过程, 面临诸多技术瓶颈亟待突破。合成气转化率是制约整个过程经济性的关键因素之一。煤制乙二醇产业的形成与发展, 本质上是煤气化技术、合成气深度净化技术以及高选择性转化工艺长期耦合演进的结果。相较于传统石油路线, 煤制乙二醇需要经历由固体煤向

气态合成气、再由气态中间体向液态精细化工产品的多级转化过程, 其技术复杂度和系统耦合程度显著提高<sup>[3]</sup>。早期煤制乙二醇受限于气化炉运行稳定性不足、合成气杂质含量高以及催化体系选择性偏低, 装置多停留在中试或示范阶段, 难以实现长期稳定运行。随着大型煤气化炉型、深冷分离以及变换技术走向成熟, 合成气组成调控能力得以提高, 为下游高选择性反应营造了基础条件。草酸酯法间接合成路线在催化剂设计、反应器结构以及操作控制等方面持续优化, 促使乙二醇收率和产品纯度逐渐靠近工业化要求。当前煤制乙二醇产业已步入规模化运行阶段, 不过整体依旧呈现出流程长、单元多、运行窗口窄的技术特性。装置运行水平在很大程度上取决于系统集成能力与精细化操作控制水平, 目前国内煤制乙二醇产能约在1020万吨左右, 主要为大中型化工企业, 其技术发展重点已从“路线可行性验证”转变为“运行稳定性与经济性提升”转变。

## 二、煤制乙二醇典型工艺路线及技术原理分析

工业化煤制乙二醇一般采用草酸二甲酯作为中间体的间接合成工艺路线, 此路线把煤气化产生的一氧化碳和氢气当作基础原料, 借助多步反应达成碳资源的定向转化。草酸酯合成单元是该工艺的核心反应部分, 其技术实质是在钨系催化剂作用下, 使一氧化碳和甲醇发生羰基化反应生成草酸二甲酯。这个过程对反应温度、压力以及CO分压极为敏感, 稍有偏差就会导致副反应比例升高。随后在加氢单元中, 草酸二甲酯在富氢环境下经选择性加氢断开C-O键, 生成乙二醇分子结构, 这个过

程需要较高的氢化活性，又要抑制过度加氢和缩合反应的出现。从整体机理来讲，煤制乙二醇工艺不是单一反应控制问题，而是合成气质量、催化剂性能与反应器热量管理协同作用的结果，其技术难点主要体现在多反应单元间物料与能量耦合对系统稳定性的放大效应上。

### 三、煤制乙二醇装置运行过程中的关键技术难点

#### (一) 合成气组成波动对乙二醇合成反应稳定性的影响

在煤制乙二醇装置里，合成气作为贯穿整个流程的基础原料，它的组成稳定性决定着下游反应单元的运行状况，不过在实际运行的时候，煤质出现波动、气化炉负荷进行调整以及气化反应区温度分布产生变化，这些情况都会致使合成气中CO、H<sub>2</sub>以及惰性气体的比例持续波动<sup>[5]</sup>。这种波动进入草酸酯合成单元之后，会打破反应体系原本的化学计量平衡，让有效反应气分压产生变化，使得目标反应速率下降，还会诱发副反应路径提高。当传递到加氢单元时，氢碳比的偏移会改变加氢反应的放热特性以及床层温度分布，增加局部过热或者反应不完全的风险。因为煤制乙二醇工艺各个单元之间是高度串联的，合成气组成的微小波动大多时候会被逐级放大，最终表现为装置运行不稳定、产品质量出现波动甚至负荷受到限制，成为制约装置长周期稳定运行的关键因素。

#### (二) 草酸酯合成与加氢单元的催化剂活性衰减

煤制乙二醇装置运行时，催化剂活性衰减是无法避开的关键技术难题，在草酸酯合成单元里，催化剂长时间处于有微量硫、氯以及重质有机杂质的反应环境中，活性中心易中毒，表面也会被覆盖，致使亚硝酸甲酯转化率渐渐降低<sup>[6]</sup>。高温高压下积碳生成，会堵塞催化剂孔道结构，加快催化剂失活。在加氢单元中，催化剂要承受较高氢分压，又要应对反应中产生的多种中间副产物。其金属活性组分容易烧结或迁移，载体结构也可能变差。催化剂活性衰减一般不是突然发生，而是以转化率慢慢下降、副产物比例上升的形式慢慢显现。一旦积累到一定程度，就会压缩装置的安全操作窗口，增加非计划停车风险。

#### (三) 脱酯脱醛与产品精制过程中杂质富集

在煤制乙二醇工艺的后处理阶段，脱酯脱醛以及精制系统肩负着提升产品纯度并保证产品指标达标的关键使命，然而此环节也面临着复杂的杂质富集难题。在上游草酸酯合成与加氢反应过程中，不可避免地会产生多

种酯类、醛类以及高沸副产物。其中部分组分在物理性质上与乙二醇相近，在常规精馏条件下进行分离存在较大难度。倘若这类杂质未能在设计位置有效排出，便容易在回流体系中逐渐累积，形成隐性的杂质富集回路，这会影响乙二醇产品的纯度，还会对塔内传质效率以及换热性能产生不利作用。随着运行周期的延长，杂质富集还可能引发设备结垢、能耗升高以及系统操作弹性下降等一系列连锁问题，成为限制装置连续稳定运行的关键技术障碍。

### 四、煤制乙二醇生产装置运行问题的工艺优化与技术对策

#### (一) 面向合成气制乙二醇工艺的组成调控与反应协同优化

在煤制乙二醇装置中，合成气组成的微小波动往往会在反应系统中被显著放大，进而对整体反应稳定性产生连锁影响。因此，工艺优化的核心应从单一反应段控制转向以“合成气质量稳定”为目标的前后端协同调控机制构建。以CO和H<sub>2</sub>为原料的合成气制乙二醇工艺对原料纯度具有极为严格的要求：在草酸酯合成反应阶段，体系需长期维持无氧、无氢、无水的高洁净条件，其中CO原料的纯度通常需稳定在99%以上，方可保障反应连续进行并维持较高的草酸二甲酯选择性。进入草酸酯加氢反应后，原料气体组成的敏感性进一步凸显，氢气纯度不足或杂质组分比例异常，均可能引发乙二醇选择性下降、催化剂活性衰减甚至中毒失效等问题，最终表现为能耗上升和生产成本的显著增加。

在反应协同方面，需要把草酸酯合成以及加氢单元当作一个完整的反应系统来进行联动优化，而不是单独去控制单元参数。比如说，要是合成气氢碳比偏高，那么可以适度降低加氢单元的进氢量，或者对循环氢比例做出调整，以此来抑制局部出现过度加氢的情况。要是CO分压呈现下降趋势，借助在短时间内把合成反应温度提升2到5℃，可在一定程度上对反应速率损失给予补偿。运行数据说明，在实施合成气组成动态调控之后，装置负荷波动幅度可从±10%降低到±3%以内，乙二醇产品质量稳定性有了明显提升，切实延长了装置连续运行周期。

#### (二) 草酸酯合成—加氢单元催化体系与操作窗口的改进

催化体系的优化是提高煤制乙二醇装置运行可靠性的关键技术手段，其主要来减缓催化剂失活速度并拓宽

安全操作范围,在草酸酯合成单元里,把硫含量控制在0.1ppm以下、氢含量控制在1000ppm以下,凭借提升原料气净化程度,可明显降低催化剂中毒的风险<sup>[8]</sup>。在反应器设计和操作方面,要加强轴向温度梯度的控制,把床层温差稳定在10℃以内,防止局部高温加快积碳的形成。实际运行的经验显示,在反应温度120~140℃、压力0.4~0.7MPa的区间内,草酸酯合成催化剂的有效运行周期可延长20%以上。

在加氢单元里,操作窗口的精细化管理有着相当关键的意义,把氢酯比控制在100至150这个范围之内,并且让反应温度稳定在180至220℃之间,这样做可在保证草酸酯完全转化的情况下,抑制乙二醇缩合或者副反应产生。针对催化剂逐渐失活的不可逆态势,装置运行的时候要结合转化率变化曲线,对催化剂活性开展阶段性评估,提前规划再生或者切换策略,防止在活性临界区间强行提高负荷运行。数据说明,在实施催化体系与操作窗口协同优化之后,加氢单元副产物生成量可大幅度降低,催化剂更换周期较大延长。

### (三) 脱酯脱醛及精制系统的流程强化与杂质控制

脱酯脱醛及精制系统里杂质富集给装置运行带来隐性风险,流程优化要围绕“削弱富集路径、强化定向排出”这两条主线来开展,在脱酯脱醛单元,合理提升反应停留时间并且优化塔釜温度控制,能让大部分低沸酯类和醛类杂质在前端充分转化并脱除。

在精制系统里,需要着重留意高沸点以及高极性杂质的累积情况,对精馏塔回流比和侧线抽取位置加以优化调节,可在不大量增加能耗的条件下,提升关键杂质的排出效率。并且在系统设计时设置专门的杂质排放或者集中处理支路,可有效切断杂质循环富集的路径。实际装置运行数据说明,在实施流程强化措施之后,乙二醇产品中高沸杂质含量可稳定控制在0.05%以下,精馏系统压降上升速度较大减缓,装置运行能耗降低了大约8%至10%。经过精制系统的针对性优化,提升了产品质量稳定性,还为装置达成长周期、低负荷波动运行提供

了关键保障。

### 结语

煤制乙二醇作为典型的煤基精细化工工艺,其技术成熟度不仅体现在反应路线的可行性上,更集中反映于生产装置在复杂工况下的稳定运行能力。围绕煤制乙二醇装置长期运行过程中暴露出的合成气波动放大效应、催化体系稳定性不足以及精制系统杂质累积等共性问题,本文从工艺机理与装置运行耦合关系出发,对相关技术瓶颈进行了系统梳理与整体审视。研究认为,煤制乙二醇并非单一单元的优化问题,而是一项涉及前端原料气质量控制、核心反应单元协同调节以及后处理流程强化的系统工程,其运行水平在很大程度上依赖于工艺参数的精细化控制与多单元之间的动态协调。

### 参考文献

- [1] 陈帅. 硝酸还原技术在煤制乙二醇工艺中的应用与研究[J]. 煤化工, 2025, 53(3): 49-52.
- [2] 黑冬梅. 煤制乙二醇工艺技术及其生产装置运行[J]. 科学技术创新, 2025(3): 1-4.
- [3] 赵龙, 周炜勇. 探析煤制甲醇与乙二醇联合生产装置的优质运行措施[J]. 数码设计(电子版), 2024(1): 0609-0611.
- [4] 南琛峰, 康开亮. 渭河彬州乙二醇项目耐硫变换催化剂日常使用维护与危害因素[J]. 煤炭与化工, 2023, 46(1): 127-130.
- [5] 郭志强. 降低煤制乙二醇合成系统阻力的优化技改小结[J]. 中氮肥, 2022, (3): 64-66.
- [6] 钱海林. 煤制乙二醇热水循环泵的优化选型研究[J]. 石油化工设计, 2020, 37(4): 7-9.
- [7] 孙冬才, 张恩光, 马磊. 200kt/a煤制乙二醇装置精馏系统节汽技改小结[J]. 中氮肥, 2023, (6): 66-68.
- [8] 钱海林, 杨林娟. 液相加氢工艺在煤制乙二醇装置中的应用[J]. 炼油技术与工程, 2020, 50(10): 10-12.