

# 间接液化尾气组成特性及其对脱碳工艺选择的影响

朱 峰

国家能源集团哈密能源化工有限公司 新疆 哈密 839000

**摘要:** 煤炭间接液化作为我国能源安全战略的重要组成部分,其核心环节——费托合成(Fischer-Tropsch Synthesis, FTS)在生产高价值液态烃类产品的同时,也产生了大量富含氢气、一氧化碳及二氧化碳的尾气。该尾气的组成特性复杂且直接影响着后续脱碳工艺的选择与优化。本文系统分析了间接液化尾气的典型组分构成,特别是CO<sub>2</sub>的来源、浓度范围及其物理化学性质。在此基础上,深入探讨了尾气脱碳的多重目的,包括保障深冷分离单元稳定运行、提升费托合成反应效率以及满足日益严格的碳减排要求。针对不同脱碳目标,本文详细对比了当前主流的脱碳技术路线,如化学吸收法(MDEA、热钾碱法)、物理吸收法(NHD)及深冷分离法,并结合尾气的具体组成特性,构建了一个多维度的脱碳工艺选择决策框架。研究表明,对于以循环利用有效气(H<sub>2</sub>+CO)为主要目的的场景,应优先选择高选择性、低能耗的MDEA法;而对于旨在实现尾气资源化(如制LNG)的项目,则需采用深冷分离等能同时回收多种组分的集成工艺。本研究为煤间接液化项目的工艺优化与低碳转型提供了理论依据和技术路径。

**关键词:** 间接液化;费托合成尾气;尾气组成;脱碳工艺;MDEA;NHD;深冷分离

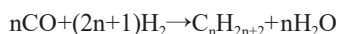
## 引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标下,煤炭清洁高效利用成我国能源领域重大课题。煤炭间接液化技术经“煤气化-净化-费托合成”将煤转化为清洁燃料与高附加值化学品,缓解了我国资源矛盾,为煤炭产业绿色升级开辟新路径。但该技术工业化面临关键挑战,即如何高效、经济处理费托合成产生的大量尾气。费托合成尾气是宝贵二次资源,含未反应合成气及多种轻烃与微量杂质,其中CO<sub>2</sub>既是资源利用障碍,也是碳排放主要来源。深冷分离回收有用成分时,CO<sub>2</sub>会冻结堵塞设备;循环回反应器,过高CO<sub>2</sub>浓度会抑制主反应,降低催化剂活性与目标产物选择性。所以,精准高效脱碳是间接液化项目实现效益最大化的核心<sup>[1]</sup>。脱碳工艺选择高度依赖尾气组成特性,不同催化剂体系、操作条件、产品方案会使尾气组分比例显著变化,如铁基催化剂因副反应,尾气CO<sub>2</sub>含量远高于钴基催化剂体系,这决定了不同脱碳技术的适用性与经济性。本文将剖析间接液化尾气组成特性,明确脱碳目标,比选主流脱碳工艺技术经济性,构建脱碳工艺选择决策模型,指导工程实践。

## 1 间接液化尾气组成特性分析

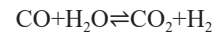
### 1.1 尾气的主要来源与生成机理

间接液化尾气主要源自费托合成反应器的出口物流。在理想状态下,费托合成的主反应可表示为:



然而,在实际工业运行中,反应过程远比此复杂。除了生成目标产物(长链烷烃、烯烃等)外,还伴随着

一系列副反应,其中最关键的是水煤气变换(Water-Gas Shift, WGS)反应:



该反应在铁基催化剂上尤为活跃,是尾气中CO<sub>2</sub>的主要来源。此外,甲烷化、醇类生成等副反应也会产生少量CH<sub>4</sub>、C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>醇等组分。因此,离开反应器的粗产品混合物经过冷凝分离出液态烃后,剩余的不凝气即构成了我们所讨论的“费托合成尾气”。

### 1.2 典型尾气组成及关键参数

尾气的具体组成受催化剂类型和工艺条件影响极大,但其基本构成具有共性。以目前我国主流的铁基低温费托合成工艺为例,其典型尾气干基组成(体积分数)大致如下:

氢气(H<sub>2</sub>): 40% - 55%

一氧化碳(CO): 20% - 35%

二氧化碳(CO<sub>2</sub>): 25% - 35%

甲烷(CH<sub>4</sub>): 5% - 10%

C<sub>2</sub>+轻烃(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>等): 2% - 8%

从上述数据可见,尾气中有效气(H<sub>2</sub>+CO)占比高达60%-90%,具有极高的回收利用价值。而CO<sub>2</sub>作为最主要的杂质,其高浓度(普遍>25%)是脱碳工艺必须面对的核心挑战<sup>[2]</sup>。相比之下,采用钴基催化剂的工艺,由于其WGS活性极低,尾气中CO<sub>2</sub>含量通常可控制在5%以下,脱碳需求和难度显著降低。

### 1.3 尾气物化性质对脱碳的影响

尾气的物理化学性质是选择脱碳工艺的关键输入参

数。(1) 压力: 间接液化装置通常在2.0-4.0 MPa的高压下运行, 尾气压力较高。这有利于物理吸收法(如NHD)和变压吸附(PSA)等依赖压力驱动的工艺, 可以减少压缩功耗。(2) 温度: 尾气离开反应器后经换热冷却, 进入脱碳单元的温度通常在40°C左右, 属于常温范围, 适合大多数溶剂吸收工艺。(3) 气体组分间的相互作用: 尾气中H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>等组分与CO<sub>2</sub>在溶剂中的溶解度存在竞争关系。理想的脱碳溶剂应具备高选择性, 即对CO<sub>2</sub>有强亲和力, 而对H<sub>2</sub>、CO等有效气的溶解度极低, 以最大限度地减少有效气的损失。

## 2 脱碳目的与多重需求

对间接液化尾气进行脱碳, 并非单一目标驱动, 而是服务于整个工艺系统的多重需求。

### 2.1 保障下游深冷分离单元的稳定运行

这是最直接、最迫切的技术需求。当尾气被规划用于深冷分离以生产高纯度H<sub>2</sub>、CO或LNG时, 必须将CO<sub>2</sub>深度脱除至极低水平(通常要求 < 50 ppmv)。因为在-100°C以下的深冷环境中, CO<sub>2</sub>会凝固成干冰, 造成换热器、精馏塔、阀门等关键设备的严重堵塞, 导致装置非计划停车, 带来巨大的经济损失和安全风险。因此, 脱碳是深冷分离工艺不可或缺的前置步骤。

### 2.2 提升费托合成反应效率与经济性

将部分脱碳后的尾气循环回费托合成反应器入口, 是提高合成气单程转化率、降低新鲜合成气消耗的有效手段。然而, 循环气中积累的CO<sub>2</sub>会不断稀释反应物(H<sub>2</sub>和CO)的分压, 根据化学平衡原理, 这会抑制费托合成主反应的进行, 导致催化剂活性下降、目标产物收率降低<sup>[3]</sup>。通过脱除循环气中的CO<sub>2</sub>, 可以维持反应器内较高的有效气分压, 从而优化反应动力学, 提升整体工艺的经济性。

### 2.3 满足国家“双碳”战略与环保法规要求

随着全球对气候变化问题的关注日益加深, 我国已明确提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的宏伟目标。煤化工行业作为碳排放大户, 面临着巨大的减排压力。对费托合成尾气进行集中脱碳, 捕集高浓度的CO<sub>2</sub>流, 为后续的地质封存(CCS)或资源化利用(CCUS)创造了条件, 是煤间接液化项目实现绿色低碳转型、履行社会责任、并可能获得碳交易收益的关键举措。

## 3 主流脱碳工艺技术对比与选择

针对间接液化尾气的特点和多元化的脱碳需求, 业界发展了多种技术路线。以下对几种主流工艺进行详细对比。

### 3.1 化学吸收法

该方法利用碱性溶液与酸性气体CO<sub>2</sub>发生可逆化学反应来实现吸收与解吸。

#### 3.1.1 MDEA (N-甲基二乙醇胺) 法

MDEA是一种叔胺类溶剂, 其脱碳机理兼具物理溶解和化学反应。其最大优势在于高选择性, 即在吸收CO<sub>2</sub>的同时, 几乎不吸收H<sub>2</sub>和CO, 有效气损失率极低(< 0.5%)。此外, MDEA溶液再生能耗相对较低, 化学性质稳定, 对设备腐蚀性小。因此, MDEA法特别适用于以循环利用有效气为主要目的的场景, 能够高效地将CO<sub>2</sub>浓度从30%左右降至1%-2%, 满足循环气的要求。然而, 若要达到深冷分离所需的ppm级净化度, 则需要多级或特殊配方的活性MDEA, 成本会显著增加。

#### 3.1.2 热钾碱法(如Catacarb, Benfield)

该法以碳酸钾(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)水溶液为基础, 加入活化剂(如二乙醇胺DEA)以加速反应速率。热钾碱法对CO<sub>2</sub>的吸收容量大, 尤其适合处理高浓度、大流量的CO<sub>2</sub>气体。在大型煤化工项目中应用历史悠久, 技术成熟可靠。其缺点是再生能耗非常高, 因为需要将溶液加热到110-120°C才能完成解吸<sup>[4]</sup>。对于有效气价值极高的间接液化尾气, 其对H<sub>2</sub>、CO也有一定的共吸现象, 导致有效气损失较大。因此, 该工艺更适用于对有效气回收率要求不高, 但需要大规模捕集CO<sub>2</sub>的场合。

### 3.2 物理吸收法

该方法依赖于CO<sub>2</sub>在特定有机溶剂中的高物理溶解度, 吸收过程无化学反应, 解吸仅通过降压闪蒸即可完成, 能耗极低。

#### 3.2.1 NHD (聚乙二醇二甲醚) 法

NHD是一种性能优良的物理吸收溶剂, 具有蒸汽压低、热稳定性好、无毒无腐蚀等优点。其对CO<sub>2</sub>的溶解度随压力升高而显著增大, 非常适合在高压下操作的间接液化尾气。NHD法的最大优势是能耗低, 再生过程无需蒸汽加热, 主要依靠能量回收。然而, 其选择性不如MDEA, 在吸收CO<sub>2</sub>的同时, 也会溶解相当一部分CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>+轻烃, 造成这部分高价值组分的损失。因此, NHD法更适用于尾气中轻烃含量不高, 且对能耗敏感的项目。

### 3.3 深冷分离法

严格来说, 深冷分离本身不是一种独立的脱碳工艺, 而是一种集成化的资源回收方案。它利用尾气中各组分沸点的显著差异, 在深度冷冻(-160°C以下)条件下, 通过多级精馏, 将H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>+ (LNG/LPG)以及CO<sub>2</sub>逐一分离。该方法能够一次性、高纯度地回收所有有价值的组分, 实现尾气的完全资源化利用, 经济价值最高。宁夏煤业400万吨/年煤间接液化项目配套的LNG

示范工程即采用了此路线，每年可增产LNG 16.93万吨，并副产富氢气等产品，同时实现约20万吨/年的碳减排。其缺点是投资巨大、流程复杂、操作难度高，且对原料气的预处理（如脱水、脱汞）要求极为苛刻。

#### 4 基于尾气特性的脱碳工艺选择决策框架

综合以上分析，脱碳工艺的选择应是一个系统工程决策，需构建一个多维度的评估框架。

##### 4.1 脱碳目标导向的工艺路线初选

脱碳工艺的选择必须首先明确核心目标。若旨在保障尾气循环利用，以提升费托合成效率，则工艺的高选择性是首要考量。MDEA法因其对CO<sub>2</sub>的强吸收能力与对H<sub>2</sub>、CO等有效气的极低溶解度，能经济地将CO<sub>2</sub>降至1%-2%，成为此场景下的最优解。若项目战略聚焦于大规模碳捕集以满足“双碳”要求，则可容忍一定的有效气损失，此时处理能力大、技术成熟的热钾碱法更具优势。而对于追求极致经济效益、希望实现尾气全组分价值的项目，深冷分离法虽投资巨大，但能同步产出氢气、CO、LNG及液态CO<sub>2</sub>，是资源化利用的终极方案。

##### 4.2 尾气组成特性对技术可行性的约束

具体尾气组成是验证技术适用性的关键。CO<sub>2</sub>浓度直接影响物理吸收法（如NHD）的效率，在高压高浓度工况下其低能耗优势方能显现。轻烃含量则是另一重要变量。NHD等物理溶剂会大量溶解C<sub>2</sub>+轻烃，造成高价值组分损失；而MDEA法则基本不吸收轻烃，能将其完整保留，为后续回收创造条件。因此，对于轻烃含量丰富的铁基FT尾气，在非深冷路线中，MDEA在保护整体资源价值上优于NHD。

##### 4.3 全生命周期视角下的综合经济性评估

最终决策需依托严谨的全生命周期成本（LCC）分析。不仅要比较资本支出（CAPEX）（深冷分离远高

于溶剂法），更要精细核算运营支出（OPEX），包括能耗、溶剂损耗及最关键的有效气损失折价。例如，MDEA蒸汽消耗低但溶剂贵，NHD无蒸汽消耗却可能因轻烃损失导致更大隐性成本。此外，成功捕集的CO<sub>2</sub>在碳交易市场中可转化为收益，这部分外部性价值必须量化纳入评估。唯有通过这种多维度、精细化的综合比选，方能确定契合项目特定需求的最优脱碳路径。

#### 5 结语

间接液化尾气的组成特性，特别是其高浓度的CO<sub>2</sub>和高价值的有效气共存，决定了脱碳工艺选择的复杂性与重要性。本文通过系统分析尾气来源、典型组成及物化性质，明确了脱碳服务于深冷分离、循环利用和碳减排的三大核心目标。在此基础上，对MDEA、热钾碱、NHD及深冷分离等主流技术进行了全面的技术经济性对比。研究结论表明，不存在放之四海而皆准的“最优”工艺，必须基于具体的项目目标、尾气组成和经济边界条件进行定制化选择。未来，随着催化技术的革命性突破和CCUS产业链的完善，间接液化尾气的处理将朝着更高效、更经济、更绿色的方向持续演进。

#### 参考文献

- [1]马芳伟,赵用明,卜亿峰.煤间接液化系统能效优化研究[J].当代化工研究,2025,(17):137-139.
- [2]马芳伟,杜冰.煤间接液化工业示范装置改造方案及分析[J].广州化工,2025,53(15):143-146.
- [3]张林民.煤与煤间接液化残渣共气化过程中灰渣流动行为及机制研究[D].宁夏大学,2023.DOI:10.27257/d.cnki.gnxhc.2023.000012.
- [4]康凯,刘天霞,王建,等.煤间接液化柴油碳烟特性研究[J].河南大学学报(自然科学版),2021,51(01):75-82.