

# 费托合成尾气中二氧化碳膜分离技术应用研究

米耀文

宁夏源众人力资源服务有限公司 宁夏 银川 750000

**【摘要】**：费托合成尾气成分复杂，二氧化碳含量较高，直接影响尾气循环利用效率及后续净化处理效果。二氧化碳膜分离技术具有能耗低、操作连续、设备紧凑和适应性强等优势，可在费托合成尾气处理中实现 CO<sub>2</sub> 选择性分离。围绕膜材料选择、分离机理、工艺流程优化及工业应用效果展开分析，探讨该技术在提升尾气利用率、降低碳排放和促进煤化工绿色转型中的应用价值，为费托合成尾气高效处理提供技术参考。

**【关键词】**：费托合成尾气；二氧化碳；膜分离技术；尾气资源化；碳减排

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.079

## 1 费托合成尾气中二氧化碳富集对循环利用的影响

### 1.1 尾气组分复杂化对循环气品质的影响

费托合成尾气通常由氢气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氮气以及少量轻质烃类共同组成，不同组分在循环利用过程中会对气体品质产生差异化影响。氢气和一氧化碳属于可继续参与合成反应的有效组分，其比例直接关系到合成气利用效率；甲烷、氮气等惰性或低反应活性气体在循环系统中不断富集，会稀释有效反应气体浓度，使进入反应器的循环气反应活性下降。二氧化碳虽然具有一定转化潜力，但在常规费托合成条件下并非主要目标反应气体，含量升高后会改变循环气的总体组成结构，影响氢碳比调控精度。尾气中还可能夹带微量水蒸气、硫化物、含氧化合物及重烃组分，这些杂质进入循环压缩、换热和分离单元后，容易造成设备负荷增加、管路冷凝堵塞或膜材料污染。循环气品质并不单纯取决于单一组分含量，而是受有效气体比例、惰性气体积累、酸性气体浓度和微量杂质共同影响。

### 1.2 二氧化碳累积对反应系统稳定性的影响

二氧化碳在费托合成尾气循环过程中若未得到有效脱除，容易在系统内形成持续累积，进而影响反应器运行状态。循环气中二氧化碳浓度升高后，会降低氢气和一氧化碳的分压，使单位体积气体中的有效反应组分减少，催化剂表面可参与链增长反应的活性物种供给受到影响。反应气分压变化还会干扰原有工艺设定下的氢碳比平衡，导致合成反应选择性发生偏移，轻烃、甲烷及含氧副产物比例可能随之变化<sup>[1]</sup>。二氧化碳属于酸性气体，在高温、高压及水蒸气共存条件下，会加重设备腐蚀风险，对换热器、压缩机、管线及分离装置的长期安全运行形成不利影响。部分催化体系中，过量二氧化碳还可能通过竞争吸附占据催化剂表面活性位点，降低一氧化碳吸附和活化效率，使反应速率出现波动。循环系统为保持目标转化率，往往需要提高压缩功率或调整补充气比例，由此增加能耗和控制难度。

## 1.3 尾气脱碳需求与低碳化工目标的关联

费托合成尾气脱碳需求与煤化工低碳转型方向密切相关。煤基费托合成以含碳原料为基础，生产过程中不可避免地产生较高比例的二氧化碳，若尾气直接排放或仅进行简单燃烧处理，会增加装置整体碳排放强度，不利于能源化工产业向清洁化、集约化方向发展。尾气脱碳的核心价值在于将二氧化碳从循环气或排放气中高效分离，使氢气、一氧化碳及轻烃等可利用组分得到进一步回收，减少有效碳资源损失。膜分离技术依靠不同气体透过膜材料的速率差异实现选择性分离，设备结构相对紧凑，运行过程无需大量化学吸收剂，能够降低溶剂再生、废液处理和二次污染压力。与传统吸收法相比，膜分离更适合连续化气体处理场景，可根据尾气压力、二氧化碳浓度和处理规模进行模块化配置。费托合成尾气脱碳不仅服务于单一装置的净化需求，也关系到碳捕集、尾气回用和能源梯级利用体系的构建。

## 2 二氧化碳膜分离技术应用中的关键制约因素

### 2.1 膜材料选择性与渗透通量的匹配不足

膜材料性能是影响费托合成尾气二氧化碳分离效果的核心因素。理想膜材料需要同时具备较高二氧化碳选择性和较大渗透通量，但在实际应用中，两者往往难以兼顾。选择性较高的膜材料能够强化二氧化碳与氢气、一氧化碳、甲烷等组分之间的分离差异，提高产气纯度，但膜层结构通常较为致密，气体透过速率受到限制，容易导致处理能力不足。渗透通量较高的膜材料可提升单位膜面积处理量，适应费托合成尾气连续排放和大流量处理需求，但若选择性不足，二氧化碳与其他小分子气体容易共同透过，造成有效组分损失。费托合成尾气中氢气、一氧化碳和二氧化碳分子尺寸接近，部分气体在膜中的扩散行为差异有限，使分离过程对膜材料的溶解选择性和扩散选择性提出更高要求。聚合物膜具备加工便利、成本较低等特点，但耐高温、抗塑化和长期稳定性存在短板；无机膜热稳定性较强，制备成本和组件密封要求较高。

## 2.2 尾气杂质对膜组件运行性能的干扰

费托合成尾气并非单一气体体系,其中夹带的水蒸气、轻质烃、含氧有机物、硫化物以及微量油雾会对膜组件运行形成明显干扰。水蒸气在温度降低或压力变化条件下容易发生冷凝,冷凝液附着于膜表面或进入膜孔结构后,会改变气体传质通道,造成局部传质阻力增大。重烃和油性组分具有较强吸附性,长期接触膜表面可能形成污染层,使二氧化碳渗透路径受阻,并降低膜材料原有的气体选择透过能力<sup>[2]</sup>。硫化物、酸性微量组分及含氧化合物还可能与膜材料发生物理吸附或化学作用,引起膜层溶胀、老化或结构松弛,进而削弱膜组件稳定性。杂质进入膜分离单元后,不仅影响膜本身性能,也会增加前处理系统、过滤器和冷凝分离设备的运行负担。若预处理深度不足,膜组件压降会逐步升高,单位时间处理量下降,清洗和更换频率增加,运行成本随之上升。费托合成尾气杂质含量受反应负荷、冷凝分离效果和上游操作条件影响较大,杂质波动会使膜组件长期处于不稳定工作状态,对工业化连续运行形成约束。

## 2.3 工艺参数波动对分离效率的影响

膜分离过程对压力、温度、进料流量、二氧化碳浓度和膜两侧压差具有较强依赖性,费托合成尾气工况波动会直接改变气体在膜中的传质行为。进料压力升高通常能够增大膜两侧推动力,提高二氧化碳透过速率,但压力过高可能引发聚合物膜压实、塑化或密封部位泄漏,使长期分离性能下降。温度升高会加快气体扩散速率,但可能降低二氧化碳在膜材料中的溶解度,使渗透选择性出现变化。进料流量过大时,气体在膜组件内停留时间缩短,二氧化碳未能充分透过膜层,脱除率下降;流量过低则会造成设备利用率不足,难以匹配工业尾气连续处理需求。尾气中二氧化碳浓度变化还会影响透过侧气体组成,当浓度降低时,分离推动力减弱,膜面积需求增加;当浓度升高时,局部浓差极化现象加重,膜表面有效传质效率下降。费托合成装置在负荷调整、开停车和催化剂活性变化阶段容易出现气体组成与流量波动,若膜分离系统缺乏弹性调节能力,产气纯度、回收率和能耗水平都会发生明显变化。

# 3 费托合成尾气膜分离工艺的优化路径

## 3.1 高选择性膜材料的适配与改性

高选择性膜材料的适配应围绕费托合成尾气中二氧化碳与氢气、一氧化碳、甲烷等组分的分离差异展开。二氧化碳具有较强的溶解性和极性特征,可通过提高膜材料中亲二氧化碳基团含量来增强其优先透过能力。在聚合物膜中引入醚氧基、胺基或含氟结构,可强化二氧化碳在膜内的溶解扩散优势,使其与非极性气体之间形成更明显的传质差别。针对常规聚合物膜耐温性和抗塑化能力不足的问题,可采用交联改性、无机纳米填料掺杂或混合基质膜制备方式,提高膜层结构稳定性。分

子筛、石墨烯氧化物、金属有机骨架材料等填料能够调节膜内微孔通道,使二氧化碳在扩散过程中获得更适宜的传输路径。膜材料适配还需结合尾气压力、温度和处理规模进行选择,低压尾气可侧重提高渗透通量,高压循环尾气则应加强抗压密封和抗溶胀性能。材料改性不能单纯追求实验室分离系数,还应考虑膜片成膜质量、组件封装稳定性、长期运行衰减幅度和更换成本,使膜材料性能与费托合成尾气连续脱碳需求保持一致。

## 3.2 多级膜分离流程的组合设计

多级膜分离流程能够弥补单级膜系统在纯度、回收率和处理能力之间难以平衡的不足。费托合成尾气中二氧化碳浓度、有效气体比例及惰性组分含量存在一定波动,单级膜分离通常只能完成初步脱碳,若直接追求较高二氧化碳脱除率,容易造成氢气和一氧化碳等有效组分随透过气损失。多级流程可将不同膜组件按分离目标分段布置,前段承担大通量粗分离任务,快速降低进料气中二氧化碳负荷;后段承担深度提纯任务,使循环气中二氧化碳含量进一步下降。对于透过气中夹带的有效组分,可设置回流或再分离单元,将氢气、一氧化碳重新送回循环系统,提高碳氢资源利用率<sup>[3]</sup>。流程设计中还应根据膜两侧压差变化合理配置压缩、减压和换热环节,避免因重复增压导致能耗升高。串联模式有利于提高脱碳深度,并联模式适合扩大处理量,串并联结合方式可在大型费托装置中提高运行弹性。

## 3.3 膜分离与吸收吸附工艺的协同配置

膜分离与吸收、吸附工艺的协同配置可提高费托合成尾气二氧化碳处理的适应性。膜分离具有连续运行、设备紧凑和启停灵活等特点,适合承担前端富集或初步脱碳任务;化学吸收对二氧化碳具有较强捕集能力,适用于需要较高脱除深度的尾气净化环节;变压吸附则可利用不同气体在吸附剂表面吸附能力差异,实现尾气中特定组分的进一步分离。将膜分离置于吸收或吸附之前,可先降低气体处理量或提高二氧化碳浓度,使后续单元运行负荷下降,减少吸收剂循环量和吸附床再生频率。对于二氧化碳含量较高且压力条件较好的尾气,可利用膜分离完成浓缩,再将富二氧化碳气体送入吸收单元进行深度捕集;对于有效组分回收要求较高的场景,可在膜分离后设置吸附精制单元,降低氢气、一氧化碳损失。协同配置还需重视前处理环节,通过冷凝、过滤、脱硫和除雾控制水分、重烃及酸性杂质进入膜组件和吸附床。不同工艺之间的连接方式应根据二氧化碳浓度、尾气流量、目标产品气品质和能耗指标进行匹配,使脱碳效率、资源回收和运行成本形成较优组合。

# 4 二氧化碳膜分离技术的工程应用成效

## 4.1 尾气循环利用率提升的工程表现

膜分离技术应用于费托合成尾气脱碳环节后,工程运行效

果主要体现在循环气有效组分保留与回用比例提高方面。费托尾气中氢气、一氧化碳及部分轻烃仍具有较高利用价值,若二氧化碳和惰性组分未被有效分离,循环气会因无效气体占比过高而降低反应利用效率。膜分离系统通过选择性透过二氧化碳,可使保留侧气体中可反应组分浓度得到提升,循环气返回反应系统后,单位体积气体的反应贡献率随之增加。工程运行中,膜组件可根据尾气流量采用模块化并联布置,适应装置负荷变化,避免大量可用气体被直接排放或燃烧处理。与单纯依靠放空控制循环系统组成的方式相比,膜分离能够减少有效碳氢资源损失,使尾气利用由粗放排放转向分级回收。透过侧富二氧化碳气体还可进入后续捕集、压缩或资源化利用环节,保留侧气体则用于合成循环或燃料气调配,形成较清晰的气流分配路径。循环气品质改善后,反应器进料组成更稳定,补充新鲜合成气需求降低,装置原料利用率和运行连续性均得到改善。

#### 4.2 净化能耗与运行成本降低的体现

二氧化碳膜分离技术在费托合成尾气净化中的经济优势,主要来源于流程简化、能量消耗降低和辅助材料用量减少。传统化学吸收工艺通常需要吸收、解吸、溶剂循环、再沸加热和冷却等环节,热能消耗较大,并伴随吸收剂降解、腐蚀控制及废水处理成本。膜分离依靠膜两侧分压差完成气体传质,运行过程中不需要大量再生热源,也不依赖复杂的化学反应过程,设备结构更紧凑,操作环节更少<sup>[4-5]</sup>。在具备一定尾气压力的费托合成系统中,膜分离可直接利用原有压力作为分离推动力,减少额外增压需求。膜组件采用模块化安装方式,占地面积较小,检修时可分组切换,降低全系统停车风险。运行成本还体现在维护频率和药剂消耗方面,膜分离过程无大量溶剂循环,减少了溶剂补充、设备防腐和再生塔运行费用。通过前端除雾、脱水、过滤等处理保持膜组件稳定运行后,单位气量处理成本

可得到有效控制。对于中高浓度二氧化碳尾气,膜分离可承担预浓缩和脱碳任务,降低后续深度净化单元负荷,使整体净化系统的能耗结构更加合理。

#### 4.3 碳排放控制与煤化工绿色转型的推进

费托合成尾气二氧化碳膜分离技术的应用,有助于将煤化工过程中的碳排放由末端排放管理转向过程控制和资源回收。煤基费托合成具有碳转化链条长、气体副产物多和二氧化碳排放强度较高等特点,尾气中二氧化碳若缺乏高效分离路径,排放量会直接反映在装置碳强度指标中。膜分离系统能够在尾气进入放空、燃烧或深度处理环节前实现二氧化碳富集,使碳捕集边界前移,提高碳管理的主动性。富集后的二氧化碳可根据纯度和压力条件进入封存、化学转化、合成气调配或工业利用流程,为后续碳资源化提供稳定气源。对于煤化工企业而言,尾气脱碳不仅关系到排放达标,也影响单位产品碳足迹、能源消耗指标和装置绿色评价水平。膜分离技术可与余热利用、氢气回收、轻烃分离和碳捕集系统形成配套,使费托合成尾气处理从单一净化功能向综合利用方向延伸。伴随膜材料耐温性、抗污染能力和大型膜组件制造水平提升,尾气脱碳系统的稳定性和工程适用范围将进一步扩大,为煤制油及相关化工装置低碳运行提供技术支撑。

### 5 结语

费托合成尾气中二氧化碳膜分离技术的应用,能够改善循环气组成,提高氢气、一氧化碳及轻烃等有效组分的回收利用水平。针对膜材料选择性与渗透通量匹配不足、尾气杂质干扰及工艺参数波动等问题,需要从膜材料改性、多级流程设计和组合净化工艺等方面优化。工程应用表明,该技术可降低尾气净化能耗和运行成本,增强二氧化碳捕集与资源化利用能力。随着膜材料性能提升和系统集成水平提高,费托合成尾气处理将更加高效、稳定、低碳。

#### 参考文献:

- [1] 谌红艳.新型膜分离技术在化工分离过程中的创新应用[J].当代化工,2025,54(09):2154-2158.
- [2] 张直维,潘勇,陈驰,等.二氧化碳捕集技术进展[J].应用化工,2025,54(09):2422-2426.
- [3] 宋昆朋,高扬乐,李莹,等.费托合成详细产物分析方法及产物分布自动生成策略[J].低碳化学与化工,2024,49(04):31-43.
- [4] 陈祺.煤基费托蜡制备氧化蜡的工艺研究[D].北京化工大学,2023.
- [5] 方林勇,吕金强,何金学.探究费托合成装置氢气对反应过程的影响[J].广州化工,2023,51(05):185-187.