

煤制油尾气脱碳处理工艺的原理分析

马丰云 方保成 吴乐天

陕西延长石油榆林天然气化工有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘 要：本文围绕煤制油尾气脱碳处理工艺原理展开研究。分析尾气来源、组成及二氧化碳危害，阐述化学吸收、物理吸附等常见脱碳工艺原理，对比各工艺脱碳效率、能耗等指标。同时探讨新型脱碳技术研发、工艺集成优化及智能化控制等发展趋势。研究表明，合理选择及改进脱碳工艺，对降低排放、实现资源回收利用和推动煤制油行业可持续发展具有重要意义。

关键词：煤制油尾气；脱碳处理；工艺原理

1 煤制油尾气特性及脱碳必要性

1.1 煤制油尾气来源与组成

煤制油作为煤炭清洁高效利用的重要途径，在我国能源结构中占据关键地位。煤制油过程主要包括煤气化、合成气净化、费托合成等核心环节，在这些环节中均会产生大量尾气。煤气化阶段，煤炭与氧气、水蒸气反应生成合成气（主要成分是一氧化碳和氢气），此过程中会产生含二氧化碳、硫化物、氮气等杂质的尾气；费托合成阶段，未反应完全的合成气以及生成的少量轻质烃类等物质会形成尾气排放。煤制油尾气的组成复杂多样，其中二氧化碳（CO₂）是主要成分之一，含量通常在15%-40%之间，具体占比因煤种、工艺条件等因素有所不同。尾气中还含有氢气（H₂）、一氧化碳（CO）、氮气（N₂）、甲烷（CH₄）以及少量的硫化物（如H₂S）、氮氧化物（如NO_x）等。氢气和一氧化碳是具有较高利用价值的组分，可作为合成气循环利用或用于其他化工生产；而二氧化碳的大量排放不仅浪费了碳资源，还会对环境造成负面影响。

1.2 尾气中二氧化碳的危害

二氧化碳作为一种主要的温室气体，煤制油尾气中大量的二氧化碳排放会加剧全球气候变暖。随着大气中二氧化碳浓度的不断升高，地球表面吸收的太阳辐射能量无法有效散发到宇宙空间，导致地球平均气温上升，引发冰川融化、海平面上升、极端气候事件频发等一系列环境问题，对生态系统和人类社会的可持续发展构成严重威胁^[1]。从工业生产角度来看，尾气中高浓度的二氧化碳会影响后续气体的加工利用。在合成气进一步加工过程中，二氧化碳会稀释有效成分，降低合成效率，增加生产成本。二氧化碳还可能与其他物质发生反应，生成腐蚀性物质，对设备造成腐蚀，缩短设备使用寿命，增加设备维护成本和安全风险。

1.3 脱碳处理目标与要求

煤制油尾气脱碳处理的首要目标是降低二氧化碳的排放量，以满足日益严格的环保法规要求。根据相关环保标准，煤制油企业需将尾气中的二氧化碳排放浓度控制在一定范围内，减少对大气环境的污染。脱碳处理还需实现资源的有效回收利用，将分离出的二氧化碳进行资源化处理。在脱碳处理过程中，对处理工艺有着严格要求，一方面，要求脱碳工艺具有较高的脱碳效率，能够尽可能多地去除尾气中的二氧化碳；另一方面，要保证工艺的稳定性和可靠性，适应煤制油尾气成分和流量波动的特点。另外，还需考虑工艺的能耗和成本，降低运行费用，实现节能减排和经济高效的双重目标。

2 常见煤制油尾气脱碳处理工艺原理

2.1 化学吸收法

化学吸收法是常见煤制油尾气脱碳处理的关键工艺之一。其原理基于二氧化碳等酸性气体与特定化学吸收剂间的可逆化学反应。在吸收塔内，含二氧化碳的煤制油尾气自下而上流动，与从塔顶喷淋而下的化学吸收剂充分接触。吸收剂通常为醇胺类（如一乙醇胺、二乙醇胺等）或碱性盐溶液，它们对二氧化碳有较强亲和力。当尾气中的二氧化碳与吸收剂相遇时，二者迅速发生化学反应，生成相对稳定的化合物，从而使二氧化碳从尾气中被分离出来，得到净化后的气体。吸收了二氧化碳的富液进入再生塔，通过加热等方式改变反应条件，使化学反应逆向进行，二氧化碳从吸收剂中解吸出来，以高浓度气体形式排出，可进一步回收利用。而再生后的吸收剂则循环回吸收塔，继续参与脱碳反应。该工艺凭借吸收效率高、处理量大等优势，在煤制油尾气脱碳领域应用广泛。

2.2 物理吸附法

物理吸附法是基于吸附剂对二氧化碳的物理吸附作

用来实现二氧化碳分离的。常用的吸附剂有活性炭、分子筛等。活性炭具有丰富的孔隙结构和较大的比表面积,能够通过范德华力吸附二氧化碳分子。分子筛则是一种具有均匀微孔结构的硅铝酸盐晶体,其孔径大小与二氧化碳分子尺寸相近,可根据分子大小和形状选择性吸附二氧化碳。在物理吸附过程中,煤制油尾气通过吸附床,二氧化碳被吸附剂吸附,其他气体组分则通过吸附床排出。当吸附剂达到饱和后,通过降压、升温等方式使吸附的二氧化碳解吸,实现吸附剂的再生。物理吸附法的优点是操作条件温和,能耗相对较低,吸附剂可再生利用;缺点是吸附容量有限,对高浓度二氧化碳的处理效果较好,对于低浓度二氧化碳的吸附效率较低,且吸附剂的吸附选择性较差,容易受到其他气体组分的干扰。

2.3 膜分离法

膜分离法是利用不同气体分子在膜材料中渗透速率的差异来实现二氧化碳分离的技术。根据膜材料的不同,可分为有机膜和无机膜。有机膜如聚砜膜、聚酰亚胺膜等,具有柔韧性好、制备工艺简单等优点,但存在耐温性和化学稳定性较差的问题;无机膜如陶瓷膜、金属膜等,具有耐高温、耐化学腐蚀等优点,但制备成本较高^[2]。在膜分离过程中,煤制油尾气在压力驱动下通过膜组件,二氧化碳分子由于其较小的分子尺寸和较高的扩散速率,优先透过膜,从而实现与其他气体的分离。膜分离法的优点是设备简单,操作方便,无相变过程,能耗较低;缺点是膜的选择性和渗透性难以同时兼顾,膜的使用寿命较短,需要定期更换,且膜的成本较高,限制了其大规模应用。

2.4 低温甲醇洗法

低温甲醇洗法是利用低温下甲醇对酸性气体(如二氧化碳、硫化氢等)具有良好吸收能力的特点来实现二氧化碳分离的工艺。在低温(-30℃--70℃)和高压(2-7MPa)条件下,甲醇作为吸收剂,在吸收塔内与煤制油尾气逆流接触,二氧化碳和硫化氢等酸性气体被甲醇吸收,净化后的气体从塔顶排出。吸收了二氧化碳和硫化氢的富甲醇溶液通过逐级降压闪蒸和热再生,使溶解的酸性气体解吸出来,再生后的贫甲醇可循环使用。低温甲醇洗法的优点是对二氧化碳和硫化氢等酸性气体的脱除效率高,能够同时脱除多种杂质气体,净化程度高;缺点是操作温度低,对设备的保温和耐低温性能要求高,工艺流程复杂,投资成本较大。

3 不同脱碳工艺原理的比较分析

3.1 脱碳效率

在脱碳效率方面,化学吸收法表现最为突出,其脱碳效率通常可达90%以上,能够将尾气中二氧化碳浓度降至很低的水平,满足严格的环保要求。低温甲醇洗法的脱碳效率也较高,一般在85%-95%之间,可有效去除尾气中的二氧化碳和其他酸性气体。膜分离法的脱碳效率相对较低,通常在60%-80%之间,受膜材料性能和操作条件的影响较大。物理吸附法的脱碳效率因吸附剂种类和吸附条件而异,一般在50%-80%之间,对于高浓度二氧化碳的处理效果较好,但对低浓度二氧化碳的吸附效率有限。

3.2 能耗分析

从能耗角度来看,化学吸收法由于吸收剂再生需要消耗大量的热能,其能耗最高,一般在2.5-4.0GJ/tCO₂左右。低温甲醇洗法虽然操作温度低,但制冷系统和溶液再生过程也需要消耗较多能量,能耗约为2.0-3.5GJ/tCO₂。物理吸附法的能耗相对较低,一般在1.0-2.0GJ/tCO₂之间,主要能耗用于吸附剂的再生。膜分离法无相变过程,能耗最低,一般在0.5-1.5GJ/tCO₂之间,但膜的更换和维护成本会增加总体运行成本。

3.3 成本评估

在成本方面,化学吸收法由于吸收剂易降解、有腐蚀性,需要定期补充和更换,且能耗高,导致其运行成本较高,一般处理每吨二氧化碳的成本在80-120元左右。低温甲醇洗法工艺流程复杂,设备投资大,且对设备的保温和耐低温性能要求高,其投资成本和运行成本都较高,处理每吨二氧化碳的成本约为70-100元^[3]。物理吸附法的吸附剂成本和再生能耗相对较低,处理每吨二氧化碳的成本在50-80元左右。膜分离法虽然能耗低,但膜的成本较高,且使用寿命较短,需要定期更换,处理每吨二氧化碳的成本约为60-90元。

3.4 环境影响

化学吸收法使用的醇胺类吸收剂易降解,降解产物可能对环境造成污染,且吸收剂的泄漏也会对土壤和水体产生影响。低温甲醇洗法使用的甲醇是一种有毒有害物质,若发生泄漏会对环境造成污染,但其主要污染物为二氧化碳和硫化氢等酸性气体,经处理后可减少排放。物理吸附法的吸附剂一般为固体,对环境的影响较小,主要问题是吸附剂的废弃处理。膜分离法无相变过程,不产生新的污染物,但膜的废弃处理也需要考虑环保问题。

4 煤制油尾气脱碳处理工艺原理的发展趋势

4.1 新型脱碳技术的研发

随着全球对碳排放控制要求的日益严苛,以及煤制

油行业可持续发展的迫切需求,新型脱碳技术的研发已成为行业焦点。离子液体吸收法凭借独特的物理化学性质脱颖而出,这类由有机阳离子和有机或无机阴离子构成的室温熔融盐,蒸汽压低,几乎无挥发,能有效避免传统吸收剂泄漏造成的环境污染;其热稳定性良好,在较宽温度范围内可保持稳定,大幅减少了吸收剂因高温分解而带来的损耗。通过对阴阳离子结构的设计与调控,离子液体可针对二氧化碳分子实现特异性结合,显著提升脱碳效率。电化学脱碳技术则另辟蹊径,借助电极表面发生的氧化还原反应,实现二氧化碳的定向分离与转化。该技术以可再生电能为驱动,在电极/电解质界面处,二氧化碳分子得到电子发生还原反应,转化为一氧化碳、甲酸等具有高附加值的化工原料。美国斯坦福大学研究团队开发的流动电极电化学脱碳系统,能够在温和条件下连续处理高浓度二氧化碳气体,电流效率高达80%,展现出良好的工业化应用潜力。

4.2 工艺集成与优化

单一脱碳工艺在实际应用中常面临诸多瓶颈,如化学吸收法能耗高、膜分离法选择性差等,而工艺集成与优化通过优势互补,成为突破这些难题的关键路径。将膜分离法与化学吸收法集成时,膜分离单元可作为预脱碳环节,利用膜对二氧化碳的优先渗透特性,快速去除尾气中60%-80%的二氧化碳,大幅降低后续化学吸收塔的处理负荷,减少吸收剂用量和再生能耗。工艺优化还体现在对现有设备和流程的精细化改进上。通过优化吸收塔的内件结构,采用高效填料或新型塔板,可增强气液传质效率;在低温甲醇洗工艺中,改进闪蒸流程和热集成方案,能有效回收系统余热,降低制冷和加热能耗。德国鲁奇公司开发的改进型低温甲醇洗工艺,通过增加多级闪蒸和热泵系统,使甲醇再生能耗降低18%。同时将物理吸附与化学吸收相结合,利用物理吸附剂快速捕获高浓度二氧化碳,再通过化学吸收实现深度净化,可显著提升整体脱碳性能,满足不同工况下的严格排放要求。

4.3 智能化与自动化控制

智能化与自动化控制技术的深度融合,正推动煤制油尾气脱碳向高效、精准、安全的方向迈进。先进的传

感器技术可实时监测尾气流量、成分、温度、压力等关键参数,如采用可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,能快速、准确地检测二氧化碳浓度变化,响应时间达到秒级。基于大数据和人工智能算法的控制系统,可对海量运行数据进行分析,建立动态数学模型,实现对脱碳过程的精准预测与优化控制^[4]。当尾气成分发生波动时,系统可自动调整吸收剂流量、再生温度等工艺参数,确保脱碳效率稳定在90%以上。在设备管理方面,智能化控制系统通过实时采集设备振动、温度、电流等数据,结合机器学习算法进行故障诊断与预测维护。自动化控制减少了人工干预,降低了操作误差和劳动强度,在内蒙古伊泰煤制油项目中,引入智能化控制系统后,操作人员数量减少30%,系统运行稳定性提升25%,年综合运行成本降低10%以上。随着5G、物联网等技术的进一步应用,未来煤制油尾气脱碳系统将实现全流程智能化协同,达到更高的资源利用效率和环境效益。

结束语

煤制油尾气脱碳处理工艺原理研究关乎行业环保与资源利用成效。目前,传统脱碳工艺各有利弊,新型技术虽具潜力但仍需突破。未来需进一步深化新型脱碳技术研发,加强工艺集成创新,推进智能化应用,以应对严格环保要求,提升煤制油产业经济效益与环境效益,实现行业绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1]吴洲.煤制油尾气脱碳处理工艺的原理分析[J].山西化工,2023,43(10):71-72,77.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2023.10.031.
- [2]马军,蔡卫,张武,等.煤制油尾气脱碳装置运行问题分析及对策[J].石化技术与应用.2022,40(2).DOI:10.19909/j.cnki.ISSN1009-0045.2022.02.0132.
- [3]杨潇潇,张媛媛,李俊杰,等.两条煤制油与石油路线的技术环境和经济分析[J].煤炭转化.2022,45(1).DOI:10.19726/j.cnki.ebcc.202201001
- [4]马琴.煤制油尾气脱碳处理工艺的原理分析[J].百科论坛电子杂志,2021(16):917.DOI:10.12253/j.issn. 2096-3661.2021.16.902.