

煤化工变压吸附工艺技术研究

金鑫

兖矿国宏化工有限责任公司 山东 邹城 273500

摘要: 煤化工领域变压吸附工艺通过周期性压力变化实现气体分离, 具有高效、节能、环保等优势。本文系统阐述吸附剂特性、循环原理及工艺流程设计, 分析原料气预处理、吸附塔结构优化、再生工艺选择等关键环节对分离效率的影响。结合程控阀门、吸附剂装填、自动化控制等核心技术, 探讨工艺性能评估方法, 提出分离效率、能耗与经济性、稳定性优化策略。为煤化工变压吸附工艺的工业化应用与持续改进提供理论支撑与技术参考。

关键词: 煤化工; 变压吸附; 吸附剂优化; 工艺设计; 自动化控制

引言: 煤化工产业蓬勃发展, 对气体分离提纯技术提出更高要求。变压吸附工艺凭借操作灵活、能耗较低等优势, 在煤化工领域广泛应用。该工艺通过周期性压力变化实现吸附与解吸, 完成气体分离。然而, 涉及多学科知识, 涵盖吸附理论、设备设计与控制等。深入了解变压吸附工艺技术, 优化工艺流程与设备控制, 对提高煤化工生产效率、降低能耗、提升产品质量意义重大, 故开展相关研究十分必要。

1 变压吸附技术基础理论

1.1 吸附现象与吸附剂特性

吸附是物质分子在界面上富集的过程^[1]。可依据作用力性质分为物理吸附和化学吸附。物理吸附依托分子间范德华力, 吸附过程可逆, 无化学键形成; 化学吸附则通过吸附质与吸附剂表面原子形成化学键实现, 吸附过程不可逆, 且伴随能量变化。吸附剂选择需遵循特定原则。吸附容量直接决定单位质量吸附剂的处理能力, 选择性影响目标组分的分离精度, 再生性能关乎吸附剂长期使用效率, 机械强度保障吸附剂在床层填充与气流冲击下的结构稳定性。常用吸附剂包括活性炭、分子筛、硅胶、活性氧化铝等。活性炭具有发达孔隙结构, 对非极性或弱极性组分吸附能力突出; 分子筛凭借规整孔道结构与特定孔径尺寸, 展现出优异的择形吸附性能; 硅胶表面富含羟基, 对极性组分吸附选择性强; 活性氧化铝则具备良好的热稳定性与机械性能, 适用于多种气体分离场景。

1.2 变压吸附循环原理

变压吸附通过周期性压力变化实现吸附与解吸的动态平衡。高压条件下, 吸附剂对目标组分的吸附容量显著增大, 气体中杂质组分被选择性截留; 低压阶段, 吸附质从吸附剂表面脱附, 实现吸附剂再生。吸附床层内同时存在气固相传质与传热过程, 传质速率受气体流

速、吸附剂孔隙结构及组分扩散系数影响, 传热效率则决定床层温度分布与吸附平衡状态。完整变压吸附循环包含升压、吸附、降压、解吸、吹净与再生等步骤。升压阶段通过压缩气体使吸附床压力升至操作值; 吸附阶段完成目标组分富集; 降压阶段释放床层内残余气体; 解吸阶段利用低压环境促使吸附质脱附; 吹净阶段用少量产品气清除床层内残留杂质; 再生阶段通过升温或抽真空进一步恢复吸附剂活性。各步骤时序控制与压力管理直接影响分离效率与能耗水平。

2 煤化工中变压吸附工艺流程设计

2.1 原料气预处理系统

原料气预处理是保障变压吸附工艺稳定运行的关键环节, 需通过除尘、除油、干燥等步骤去除杂质组分。除尘工艺通常采用多级过滤装置, 通过惯性碰撞、拦截及扩散作用截留固体颗粒, 对于粒径大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒, 截留效率可达99%以上, 防止颗粒物堵塞吸附剂孔隙导致传质阻力增大^[2]。除油环节多选用纤维过滤或活性炭吸附技术, 去除气态烃类与液态油滴, 可使油含量从 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $0.1\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下, 避免油分在吸附剂表面形成覆盖层, 削弱吸附容量与选择性。干燥工艺则通过硅胶或分子筛吸附水分, 将原料气露点降至 -60°C 以下, 防止水分子与吸附剂表面活性位点结合, 影响目标组分吸附效率。预处理效果直接影响吸附剂使用寿命与分离纯度, 若杂质含量超标, 会导致吸附剂快速失活, 需频繁更换或再生, 增加运行成本, 例如杂质含量超标可能使吸附剂使用寿命缩短50%。

2.2 吸附塔结构设计与优化

吸附塔类型选择需结合工艺规模与场地条件。立式塔结构紧凑、占地小, 高度20-30m, 适用于大型装置, 可处理 $50000\text{Nm}^3/\text{h}$ 以上原料气; 卧式塔便于检修与吸附剂装填, 长度10-15m, 多用于中小型系统, 处理量1000-

10000Nm³/h。内部结构设计需重点优化气流分布与吸附剂装填方式,气流分布器通过多孔板或导流板实现气体均匀分布,多孔板开孔率30%-50%,避免局部流速过高引发吸附剂粉化或沟流;吸附剂采用分级或混合装填,通过不同粒径组合提升床层空隙率均匀性、降低压降梯度,可使压降降低20%-30%。吸附塔尺寸需与操作参数匹配,塔径过大易导致径向浓度不均,超过3m时需设内部隔板;塔高过高增加气体停留时间与压降,一般不超过30m。多塔联用系统通过时序控制实现吸附、再生、升压等步骤连续循环,如四塔流程两塔吸附、一塔再生、一塔升压,阀门切换确保产品气连续输出,流量波动控制在±2%以内。时序控制需精确计算各步骤时间,避免吸附前沿穿透或再生不完全,时间误差控制在±1s以内。

2.3 再生工艺选择与优化

再生工艺分为常压解吸与真空解吸。常压解吸通过降压释放吸附质,适用于吸附质分压小于0.1MPa场景,但再生周期长(30-60min)且不完全;真空解吸(VPSA)通过抽真空降低系统压力,显著提升脱附速率,再生时间缩短至10-20min,提高吸附剂利用率,但需配备50-200kW真空泵增加能耗。再生气体选择需兼顾纯度与成本,产品气作再生气可减少杂质引入,但收率降低5%-10%;冲洗气通过惰性气体或部分产品气吹扫床层加速脱附,需控制气量(床层体积3%-5%)防止过度稀释产品气。再生温度与压力影响效率显著,升温降低吸附平衡常数促进脱附,20℃升至100℃时平衡常数降低50%-70%,但温度不超过250℃以免破坏吸附剂;降压幅度越大脱附动力越强,2.0MPa降至0.01MPa时脱附速率提高3-5倍,需平衡设备耐压性与能耗。优化再生工艺需通过实验确定最佳温压组合,平衡再生效率与运行成本。

3 变压吸附工艺关键设备与控制技术

3.1 程控阀门技术

程控阀门是变压吸附工艺实现周期性切换的核心部件,类型选择需兼顾介质特性与操作条件^[3]。气动平板阀通过气缸驱动阀板平移,具有流通阻力小、密封性好特点,流通阻力比普通阀门降低30%-50%,适用于高压气体切换场景,可承受5.0MPa压力;波纹管采用金属波纹管密封结构,可有效避免阀杆泄漏,泄漏率可控制在10⁻⁶Pa·m³/s以下,在真空解吸工艺中表现突出;真空蝶阀通过旋转圆盘调节流量,具备启闭迅速、体积紧凑优势,启闭时间可控制在1-2s,常用于低压气体管路控制。阀门密封性能需满足零泄漏标准,防止气体互串导致产品气纯度下降,产品气纯度需达到99%以上;启闭速度应与工艺时序匹配,过慢会延长循环周期,过快则可能引

发水锤效应,启闭速度误差需控制在±0.1s以内。寿命要求方面,阀门需承受百万次启闭循环,关键部件如密封圈、阀杆需采用耐磨材料并经表面硬化处理,耐磨材料可使阀门寿命延长50%-100%。故障诊断通过监测启闭时间、扭矩变化及泄漏率实现,当启闭时间偏差超10%、扭矩变化超20%或泄漏率超标时判定为故障;预防性维护包括定期换密封件、润滑阀杆及校验执行机构精度,定期更换周期3-6个月,避免非计划停机。

3.2 吸附剂装填与压紧技术

吸附剂装填密度与均匀性直接影响床层传质效率与压降分布。装填过程需采用分级振实技术,通过多层筛网筛选不同粒径吸附剂,一般分为3-5种粒径级别,利用振动平台使颗粒排列紧密,减少床层空隙率偏差,空隙率偏差可控制在±5%以内。压紧装置设计需平衡压实力与吸附剂破碎风险,自动填补装置通过重力或机械推送持续补充沉降吸附剂,维持床层高度稳定,床层高度波动可控制在±10mm以内;压紧弹簧通过弹性变形提供恒定压力,适应吸附剂体积随温度与压力的变化,压力波动可控制在±5%以内。防护措施方面,吸附剂入口设滤网拦截大颗粒杂质,滤网孔径10-50μm,防机械磨损;床层顶部铺惰性瓷球缓冲气体冲击,瓷球直径10-30mm,降低粉化速率,粉化率降30%-50%;操作控制气流速度不超临界流速,临界流速0.3-0.8m/s,避免湍流致颗粒碰撞破碎。

3.3 自动化控制系统

吸附分离工艺的自动化控制系统以PLC/DCS为核心,通过分布式架构实现工艺参数的集中监控与分散控制。PLC负责现场设备信号采集与执行机构驱动,信号采集精度可达±0.1%,执行机构驱动响应时间可控制在0.1s以内;DCS完成数据整合与操作界面显示,数据更新频率可达1次/s,二者协同确保系统响应速度与可靠性。工艺流程监控采用三维动态模拟技术,实时显示吸附塔压力、温度、组分浓度等参数,压力显示精度可达±0.01MPa,温度显示精度可达±0.1℃,辅助操作人员判断工艺状态。PID回路调节针对关键变量如吸附塔压力、产品气流量进行闭环控制,通过自动调整阀门开度或压缩机转速维持参数稳定,压力控制偏差可控制在±0.05MPa以内,流量控制偏差可控制在±1%以内。故障自诊断功能基于知识库与模式识别算法,可快速定位阀门卡滞、传感器漂移等异常,定位时间可控制在1s以内,并触发报警或联锁保护动作,保障工艺安全运行。系统还具备历史数据存储与趋势分析功能,历史数据存储时间可达1年以上,为工艺优化与设备维护提供数据支持。

4 变压吸附工艺性能评估与优化

4.1 分离效率与产品纯度评估

分离效率核心取决于吸附剂对目标组分与杂质组分的分离系数，分离系数越大表明吸附剂选择性越强，分离过程越易实现。分离系数与吸附剂表面活性位点分布、孔隙结构及组分分子动力学直径密切相关，需通过吸附等温线实验测定不同组分在吸附剂上的平衡吸附量，进而计算分离系数^[4]。产品纯度与回收率的平衡优化需综合权衡工艺参数，提高吸附压力可增强吸附容量，提升产品纯度，但可能降低回收率；延长吸附时间可增加目标组分富集量，但易引发吸附前沿穿透，导致杂质混入产品气。杂质组分对分离效果的影响体现在竞争吸附与传质阻力两方面，极性杂质易与吸附剂表面发生化学吸附，占据活性位点，削弱目标组分吸附能力；大分子杂质可能堵塞吸附剂孔道，增加传质阻力，降低分离效率。

4.2 能耗与经济性分析

吸附压力与再生能耗呈正相关关系，高压吸附虽可提升分离效率，但需更高压缩功耗；真空解吸通过降低再生压力可减少能耗，但需配备真空泵增加设备投资。设备投资涵盖吸附塔、压缩机、阀门及控制系统等核心部件，运行成本包括原料气预处理费用、吸附剂更换费用及能源消耗费用。工艺流程优化对能耗降低的贡献体现在多塔联用与循环时序优化方面，通过精确计算各塔吸附、再生、升压等步骤时间，减少阀门切换频次与压缩空气消耗，可降低整体能耗。此外，采用高效吸附剂与低阻力气流分布器可减少床层压降，进一步降低压缩功耗。

4.3 工艺稳定性与可靠性研究

吸附剂寿命与再生周期直接影响工艺稳定性，吸附剂失活会导致分离效率下降，需缩短再生周期或更换吸附剂，增加非计划停机风险。设备故障率与维护周期对连续运行的影响体现在阀门卡滞、传感器漂移等故障可能引发工艺参数波动，需通过预防性维护策略降低故障率，延长设备使用寿命。工艺参数波动对分离效果的敏感性分析表明，吸附塔压力波动超过5%可能导致产品纯度下降，温度波动超过3℃可能改变吸附平衡常数，影响分离系数。为提升工艺可靠性，需建立参数监控与自动调节系统，实时修正工艺偏差，确保分离效果稳定。

结束语

煤化工变压吸附工艺技术涵盖多方面内容，从基础理论到工艺流程设计，再到关键设备与控制技术，以及工艺性能评估与优化，各环节紧密相连。合理设计工艺流程、选用关键设备并精准控制，可提升分离效率与产品纯度，降低能耗与成本，保障工艺稳定性与可靠性。在实际应用中，需综合考虑多种因素，不断优化工艺参数与设备性能，以充分发挥变压吸附工艺在煤化工领域的优势，推动煤化工产业高质量发展。

参考文献

- [1]孟凡莉.新型吸附材料在煤化工废水处理中的应用与效果评估[J].清洗世界,2024,40(3):94-96.
- [2]朱海浪,陈伟,刘章.煤化工技术发展与环境气化工工艺[J].广州化工,2025,53(8):31-33,54.
- [3]牛志军.煤化工废水处理工艺与适用性技术研究[J].山西化工,2024,44(3):229-230,234.
- [4]刘玲,高超,柳一峰.煤化工硫回收工艺技术选择探讨[J].齐鲁石油化工,2022,50(3):204-208.