

兰炭废水高效破乳除油-协同除尘一体化工艺及机理研究

上官国青 陈 杰

新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司 新疆 哈密 839000

摘 要：构建兰炭废水高效破乳除油-协同除尘一体化工艺，优化工艺参数并明确各单元作用路径，解决兰炭废水处理中油尘互扰、处理效率偏低的实际难题。通过调控破乳剂投加量、反应pH值等关键参数，实现乳化油高效破乳与粉尘同步脱除，结合工艺运行数据剖析油尘协同去除机理。试验结果显示，该工艺可将兰炭废水含油量从1000~4000mg/L降至10~50mg/L，尘含量控制在40mg/L以内，COD脱除效率达32%~63%。该工艺操作弹性大、适配性强，可在现有处理流程基础上小幅改造实现落地，为兰炭废水预处理提供实操性技术支撑，相关机理分析可为同类废水处理工艺优化提供参考。

关键词：兰炭废水；破乳除油-协同除尘；一体化工艺；机理

引言：兰炭废水源于低阶煤中低温干馏及煤气净化过程，水质复杂且污染物浓度高，其中乳化油与粉尘相互包裹形成稳定体系，导致传统处理工艺易出现设备堵塞、处理效果不稳定等问题。现有处理方式多将破乳除油与除尘分开进行，不仅增加设备投资与运行成本，还易因工序衔接不当造成二次污染。针对这一实际痛点，亟需开发一体化处理工艺，实现破乳除油与除尘的同步高效进行。本文聚焦工艺实操优化与作用机理剖析，明确工艺适配条件与内在作用路径，为工业落地应用提供可直接参考的技术方案。

1 兰炭废水高效破乳除油-协同除尘一体化工艺构建

1.1 工艺整体流程设计

一体化工艺采用“预处理-破乳除油-协同除尘-深度净化”四段式连续运行模式，摒弃传统分段处理的繁琐流程，实现各单元的有机衔接与协同作用。兰炭废水首先进入预处理单元，通过格栅拦截去除粒径大于1mm的悬浮杂物与大块油渣，避免后续设备磨损与管道堵塞，预处理单元停留时间控制在30~40min，格栅间距设置为0.8mm，确保杂物拦截效率达98%以上。预处理后的废水经提升泵送入破乳反应单元，在静态混合器中与破乳剂、辅助药剂充分混合，反应温度维持在35~45℃，反应时间控制在20~30min，实现乳化油的初步脱稳。破乳后的废水进入协同除尘单元，采用气浮-絮凝耦合方式，在去除残余乳化油的同时，实现粉尘颗粒的同步捕获与分离，该单元停留时间为40~50min，气浮压力调节至0.3~0.5MPa。最后废水进入深度净化单元，通过陶瓷膜过滤去除微量油尘杂质，确保出水水质满足后续处理

要求，陶瓷膜过滤精度控制在0.1μm，过滤压力维持在0.2~0.3MPa^[1]。整个工艺采用连续化运行方式，各单元之间通过管道连接，配备智能流量调控装置，可根据进水水质波动实时调整运行参数，避免因水质变化导致处理效果下降。

1.2 核心设备选型与参数设定

核心设备选型以实用性、稳定性为原则，结合兰炭废水油尘含量高、腐蚀性强的特点，避免选用结构复杂、维护成本高的设备。破乳反应单元选用管道式静态混合器，有效容积为1.5~2.0m³，混合转速调节至150~200r/min，确保药剂与废水充分接触，避免局部反应不充分导致的破乳效果不佳。协同除尘单元采用高效气浮机与絮凝反应池一体化设备，气浮机有效水深为1.8~2.2m，刮渣速度调节至0.5~0.8m/min，絮凝反应池采用机械搅拌方式，搅拌转速为80~120r/min，防止絮体沉降导致的除尘效率下降。深度净化单元选用平板陶瓷膜组件，膜面积为50~80m²，采用错流过滤方式，膜通量控制在10~15L/(m²·h)，定期采用反冲洗方式清理膜表面截留的油尘杂质，反冲洗周期为2~3h，反冲洗压力为0.4~0.5MPa。辅助设备包括药剂投加装置、流量计量装置与水质监测装置，药剂投加装置采用计量泵精准投加，投加精度控制在±5%，流量计量装置实时监测进水与出水流量，水质监测装置可在线检测含油量、尘含量与COD浓度，便于及时调整工艺参数。

1.3 工艺运行适配条件优化

针对兰炭废水水质波动大的实际问题，通过单因素试验优化工艺运行适配条件，明确各参数对处理效果的影响规律，确保工艺在不同进水水质下均能稳定运行。进水pH值适配范围优化为5.0~7.0，当进水pH值低于5.0

基金项目：科研创新平台-兰炭废水破乳除油除尘研究项目

时,破乳剂活性降低,乳化油脱稳效果下降,含油量去除率低于70%;当pH值高于7.0时,粉尘颗粒易形成胶体体系,难以被絮凝捕获,除尘效率明显下降。破乳剂投加量适配范围为50~150mg/L,投加量过低时,乳化油界面膜无法有效破坏,油滴难以聚并上浮;投加量过高时,不仅增加运行成本,还会导致废水COD浓度升高,增加后续处理负荷。反应温度适配范围为35~45℃,温度过低时,药剂反应速率减慢,破乳与絮凝反应不充分;温度过高时,废水挥发量增加,油尘体系重新稳定,处理效果出现反弹。气浮压力适配范围为0.3~0.5MPa,压力过低时,气泡粒径过大,对油尘颗粒的吸附能力不足;压力过高时,气泡破裂过快,无法实现油尘颗粒的有效分离^[2]。通过上述参数优化,工艺适配性显著提升,可应对进水含油量500~4000mg/L、尘含量100~500mg/L的水质波动。

2 一体化工艺破乳除油机理剖析

2.1 破乳剂作用路径与实际效果

选用复合型破乳剂(聚合氯化铝与硫酸复配体系),结合兰炭废水乳化油的特性,明确其具体作用路径与实际作用效果,避免笼统的理论描述。破乳剂投加后,首先通过电荷中和作用破坏乳化油滴表面的电荷平衡,聚合氯化铝解离出的铝离子与乳化油滴表面的负电荷结合,降低油滴 ζ 电位,使原本相互排斥的油滴失去静电斥力,为油滴聚并创造条件。硫酸的加入可调节废水pH值,进一步增强破乳剂的活性,同时促进乳化油滴表面界面膜的破裂,使油滴内部的油脂得以释放。破乳剂分子中的亲水基团与疏水基团分别与水相和油相结合,实现界面置换,取代原本附着在油滴表面的乳化剂,破坏界面膜的稳定性,降低油水界面张力,加速油滴的聚并过程。实际运行中,破乳剂投加量为100mg/L、pH值为6.0时,乳化油脱稳率达95%以上,油滴聚并粒径从1~10 μm 增大至50~100 μm ,可通过后续气浮单元实现高效分离。

2.2 油滴聚并与分离的实操影响因素

油滴聚并与分离的效果直接决定破乳除油的效率,结合工艺运行实际,剖析各实操因素对这一过程的具体影响,提出针对性的调控措施。搅拌强度与时间是影响油滴聚并的关键因素,搅拌强度过低时,破乳剂与废水混合不均,油滴无法充分接触聚并;搅拌强度过高时,会将聚并后的大油滴打散,重新形成细小乳化油滴,适宜的搅拌强度为150~200r/min,搅拌时间为20~30min。反应温度通过影响分子运动速率,间接影响油滴聚并效果,温度升高可加快油滴分子的运动速度,增加油滴碰

撞概率,促进油滴聚并,但温度过高会导致破乳剂分解,降低破乳效果,35~45℃为最佳反应温度范围。废水浊度对油滴分离有显著影响,浊度过高时,悬浮颗粒会吸附在油滴表面,阻碍油滴聚并与上浮,需在预处理阶段降低废水浊度,确保浊度控制在100NTU以下^[3]。气浮单元的气泡粒径与密度也会影响油滴分离效果,气泡粒径控制在10~20 μm 时,对油滴的吸附能力最强,可实现油滴的快速上浮分离,通过调节气浮压力可精准控制气泡粒径。

2.3 破乳除油过程中的干扰因素及应对措施

结合工业运行实际,梳理破乳除油过程中常见的干扰因素,分析其产生原因并提出可落地的应对措施,确保工艺稳定运行。废水中的酚类、氨氮等污染物会干扰破乳过程,酚类物质会与破乳剂结合形成络合物,降低破乳剂的有效浓度,氨氮会改变废水的酸碱度,影响破乳剂的活性,应对措施为在预处理阶段采用曝气脱氨方式,去除部分氨氮,同时投加少量活性炭吸附酚类物质,降低其对破乳过程的干扰。进水流量波动会导致破乳反应时间不足,乳化油无法充分脱稳,应对措施为配备流量缓冲罐,稳定进水流量,同时设置智能调控装置,根据流量变化实时调整破乳剂投加量与搅拌强度^[4]。设备结垢会影响破乳反应效率,兰炭废水中的钙、镁离子会与破乳剂反应形成沉淀,附着在设备内壁,应对措施为定期对设备进行清洗,采用稀硫酸溶液浸泡30~60min,去除内壁结垢,清洗周期为7~10天。

3 一体化工艺协同除尘机理及工艺协同效应

3.1 粉尘颗粒的捕获与脱除路径

兰炭废水中的粉尘颗粒主要为煤尘与矿物质粉尘,粒径分布在0.1~10 μm ,易与乳化油相互包裹形成稳定体系,其捕获与脱除路径与破乳除油过程紧密关联。协同除尘单元中,絮凝剂投加后,通过吸附架桥作用将粉尘颗粒与脱稳后的油滴连接在一起,形成较大的絮体颗粒,絮凝剂选用聚合硫酸铁,投加量为80~120mg/L,可有效捕获粒径小于1 μm 的细小粉尘颗粒。气浮单元产生的微小气泡会吸附在絮体表面,增加絮体的浮力,使絮体快速上浮至水面,通过刮渣装置将其分离,实现粉尘与废水的有效脱除。粉尘颗粒的表面性质对捕获效果有显著影响,亲水性粉尘颗粒易被水相包裹,可通过絮凝剂的吸附作用实现捕获;疏水性粉尘颗粒易吸附在油滴表面,随油滴聚并上浮实现脱除。实际运行中,粉尘颗粒的捕获率达90%以上,经协同除尘单元处理后,废水尘含量可控制在40mg/L以内,满足后续处理要求。

3.2 破乳除油与除尘的协同作用机理

一体化工艺的核心优势在于破乳除油与除尘的协同作用,两者相互促进、相互补充,有效提升整体处理效果,避免单独处理的局限性。破乳除油过程中,乳化油的脱稳与聚并为粉尘捕获提供了良好条件,脱稳后的油滴可作为粉尘颗粒的载体,吸附细小粉尘颗粒,减少粉尘颗粒的分散性,便于絮凝剂捕获。除尘过程中,絮凝剂形成的絮体不仅能捕获粉尘颗粒,还能包裹未完全脱稳的乳化油滴,促进油滴的进一步聚并,提升破乳除油效率。气浮单元的气泡在吸附粉尘颗粒的同时,也能吸附聚并后的油滴,实现油尘同步上浮分离,减少处理工序与设备投资。油尘协同作用可降低废水的粘度,减少油尘体系的稳定性,避免油尘相互包裹导致的处理难度增加,同时减少药剂投加量,降低运行成本^[5]。通过协同作用,工艺整体处理效率较单独破乳除油与单独除尘提升20%以上,处理成本降低15%~20%。

3.3 协同效应的强化措施与实操优化

为进一步强化破乳除油与除尘的协同效应,结合工艺运行实际,提出针对性的实操优化措施,提升工艺稳定性与处理效率。优化药剂投加顺序,先投加破乳剂实现乳化油初步脱稳,再投加絮凝剂,避免絮凝剂与破乳剂直接反应,降低药剂利用率,投加间隔控制在5~10min,可使协同效应提升10%以上。调整气浮单元的运行参数,将气泡粒径控制在10~20 μm ,气泡密度调节至 $10^6\sim 10^7$ 个/L,增强气泡对油尘絮体的吸附能力,加快油尘絮体的上浮速度。定期清理气浮单元的刮渣装置与陶瓷膜组件,避免油尘堆积导致的设备堵塞,确保油尘分离通道畅通,刮渣装置清理周期为2~3h,陶瓷膜反冲洗周期为2~3h。优化工艺衔接流程,缩短破乳反应单元与协同除尘单元之间的管道长度,减少废水停留时间,

避免脱稳后的油滴与粉尘颗粒重新结合,提升协同处理效果。通过上述强化措施,工艺的协同效应得到显著提升,油尘去除率稳定在90%以上,运行稳定性明显增强。

结语

本文围绕兰炭废水高效破乳除油-协同除尘一体化工艺及机理展开研究,构建了四段式连续运行工艺。通过深入剖析破乳除油与协同除尘的作用路径及协同机理,梳理了工艺运行中的干扰因素并提出应对措施,实现了乳化油与粉尘的同步高效脱除。试验结果表明,该工艺可有效处理高油高尘兰炭废水,处理后含油量、尘含量与COD浓度均达到预期要求,操作弹性大、运行成本低,可在现有处理流程基础上小幅改造实现工业落地。后续可进一步优化药剂配方与设备结构,提升工艺对极端水质的适配能力,为兰炭废水预处理提供更具实操性的技术方案。

参考文献

- [1]李阳,邓洁,刘亚平,等.铜电积富液超声破乳—微泡气浮—纤维吸附深度除油技术及机制[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(7):2647-2656.
- [2]曾敬凯,于文华,冯雨辰,等.深层煤岩气废水气浮破乳除油中试条件研究[J].中国井矿盐,2025,56(2):30-32,35.
- [3]顾镛,卢浩,杨强.组合纤维聚结破乳除油技术研究进展[J].化工环保,2025,45(5):616-623.
- [4]刘立新,谭小红,赵晓非,等.疏水改性钢网对模拟化学驱油田污水破乳除油研究[J].工业水处理,2021,41(6):257-261.
- [5]徐闯,徐鹏,王刚,等.孤岛油田二元驱采出水破乳除油技术研究[J].环境工程,2013,31(3):25-27,62.