

高含盐油田污水膜分离技术的应用研究

邓焱伟

克拉玛依市三达新技术股份有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要]新疆油田在我国能源领域占据着重要地位,其在开采期间所产生的高含盐污水有着成分较为复杂以及处理起来难度颇大的特点。文章结合新疆独特的地理气候条件,全面且细致地剖析了高盐油田污水的水质相关特征以及相应的处理方面的需求,深入探讨了微滤、超滤、纳滤、反渗透还有电渗析等一系列膜分离技术的适用情况,并给出了一套集成解决方案,此方案涵盖了预处理方面的优化举措、膜组合工艺的设计思路、耐污染材料的选择考量以及智能化运维的相关内容,能够为新疆油田污水实现资源化利用给予理论层面的支持以及技术层面的可行路径。

[关键词]高盐油田污水;膜分离技术;硬度控制;盐分脱除;智能化运维

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16656

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

Application Research on Membrane Separation Technology for High Salinity Oilfield Wastewater

DENG Yanwei

Karamay Sanda New Technology Co., Ltd., Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: Xinjiang oil fields play an important role in Chinese energy sector, and the high salinity wastewater generated during their exploitation has the characteristics of complex composition and difficult treatment. The article combines the unique geographical and climatic conditions of Xinjiang to comprehensively and meticulously analyze the water quality characteristics of high salt oilfield wastewater and the corresponding treatment needs. It deeply explores the applicability of a series of membrane separation technologies such as microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, and electrodialysis, and provides an integrated solution that covers optimization measures for pretreatment, design ideas for membrane combination processes, selection considerations for pollution resistant materials, and relevant content for intelligent operation and maintenance. This solution can provide theoretical support and feasible technical paths for the resource utilization of Xinjiang oilfield wastewater.

Keywords: high salt oilfield wastewater; membrane separation technology; hardness control; salt removal; intelligent operation and maintenance

引言

新疆在我国是陆上油气资源较为富集的地区,在油田开发的过程当中会伴生出数量众多的高含盐污水。这种污水的成分呈现出复杂的态势,其处理起来的难度也远远超过了常规的工业废水。这类污水一般都含有浓度极高的溶解性盐分,还有钙镁硬度离子以及乳化油类物质。并且由于受到所在区域特殊地理气候方面的影响,长期处于干旱状态所引发的蒸发浓缩效应使得盐分不断地出现富集的情况,而那种强风沙的天气又进一步加剧了悬浮物以及硅酸盐的污染程度。在冬季的时候,低温的环境还会额外诱发管道出现结垢现象以及设备产生腐蚀问题。传统的物理化学处理工艺存在着脱盐效率比较低、抵抗冲击负荷的能力较差等一系列的缺陷,所以很难去满足油田回注水对于水质所设定的标准以及水资源需要回用的相关需求。随着环保政策变得越来越严格,而且油田可持续开发的要求也在不断提高,所以开发出高效且稳定的污水处理技术就变成了一项极为迫切的研究课题。膜分离技术依靠自身高效的分离特性、采用模块化的设计方式以及具备环境友好

的优势特点,给高盐油田污水的治理开辟出了新的路径。不过它在面对极端水质条件时,在膜污染控制、材料耐受性以及能耗优化等方面所存在的诸多问题,仍然需要结合新疆的实际工况展开系统性的相关研究,从而达成技术适配性与经济可行性两者的统一目标。

1 高含盐油田污水特性及处理需求

1.1 新疆油田污水水质特征

新疆油田所排放的污水大体上呈现出极为特殊的水质特性,其最为突出的特点在于盐度能够超出 50000mg/L,硬度更是高于 5000mg/L,并且油含量也会超过 500mg/L。如此之高的盐特性是由于在地质构造当中的蒸发岩层发生了溶解所致,而在实际的开采进程里,随着地层水不断混入其中,这无疑又进一步促使盐分不断地积累起来。地理以及气候方面的条件对于水质有着不容忽视的影响:在干旱且降雨稀少的气候环境下,污水会因为蒸发作用而逐渐浓缩,进而使得盐分的浓度持续处于上升的态势;而每当出现强风沙天气的时候,会有大量的悬浮物以及硅酸盐类物质涌入污水系统当中,由此便形成了胶体污染的情况;

到了冬季,当气温降至极端低温状态时,像碳酸钙、硫酸钙这类原本就难以溶解的盐类物质就会加速从水中析出,如此一来,管道以及相关设备出现结垢的风险也随之大幅提高。除此之外,在油田污水当中还普遍存在乳化油、溶解性有机物还有微生物群落等多种成分,这些不同成分和高盐环境相互之间产生协同作用,使得污水处理系统的复杂程度进一步加剧。

1.2 高含盐油田污水处理需求

新疆油田污水处理要达成多个目标:先是得符合《新疆油田回注水水质标准》针对悬浮物、含油量以及离子浓度所规定的限制条件,保证回注水不会把地层孔隙堵住;接着要达成水资源的高效循环利用,当把处理后的污水用于农业灌溉的时候,得对钠吸附比加以控制,避免土壤出现板结情况,要是用于油田注水,那就要着重去除硫酸盐还原菌,以此来抑制管线遭受腐蚀^[1],最后还要处理因高盐高硬度而引发的设备腐蚀以及膜污染方面的问题,借助优化工艺的方式,降低氯离子给金属材料带来的点蚀风险,并且要减少钙镁结垢物对膜通量所产生的衰减影响。

2 常用膜分离技术及其在新疆的适用性

2.1 微滤与超滤技术

微滤以及超滤技术因其具备精确的孔径控制这一特性,在油田污水预处理这个阶段起到了极为关键的作用。微滤膜能够有效地将粒径大于 $0.1\mu\text{m}$ 的悬浮颗粒、乳化油滴还有胶体物质给截留下来,超滤膜则可以进一步地去除掉大分子有机物以及部分细菌,从而为后续的深度处理工序给予水质方面的保障。在新疆那种多风沙的环境之下,这两种技术能够针对风沙所输入的硅酸盐颗粒以及油泥混合物展开有效的去除工作,不过它们对于溶解性盐分与硬度离子的脱除能力是比较有限的,所以需要和其他的膜技术联合起来使用^[2]。新疆地区昼夜温差比较大,这很容易使得膜材料出现热胀冷缩的情况,因此要选用化学稳定性比较高的聚偏氟乙烯或者聚醚砜这类材质,以此来延长膜的使用寿命。

2.2 纳滤技术

纳滤技术依靠自身的荷电效应以及纳米级别的孔径特性,具备针对二价离子的选择性截留能力,特别适合用于高硬度污水的软化处理工作,在新疆油田的具体场景当中,纳滤膜能够有效地去除污水里超过 90% 的钙镁离子,大幅度降低出现结垢的倾向,并且还允许部分单价离子透过,以此来减少渗透压能耗,这项技术对于硫酸根、碳酸根等阴离子的截留效果格外显著,有利于控制回注水里的硫酸盐还原菌活性,不过,新疆污水当中存在的高浓度氯离子有可能引发膜表面的电荷屏蔽效应,这就需要通过调节 pH 值或者添加抗污染剂的方式来维持膜分离性能。

2.3 反渗透技术

反渗透技术属于深度脱盐环节里的核心工艺范畴,其可达成 98% 及以上的盐分截留比率,此乃制备高纯度回

用水时极为关键的一项技术。就新疆那种高盐的环境状况而言,反渗透系统得经受住超出 6MPa 的操作压力,如此一来便给膜元件的机械强度以及耐压密封结构带来了不小的挑战。除此之外,污水当中所残留的硬度离子存在这样一种可能性,即会在膜的表面滋生出硫酸钙或者硅酸盐结垢,所以需要凭借化学软化预处理加上阻垢剂投加这两方面的举措来对污染起到一定的缓解作用。要契合新疆夏季高温的工况条件,不妨考虑采用那种具备宽温度耐受特性的复合膜材料,并且借助能量回收装置来使高压泵的能耗得以降低。

2.4 电渗析技术

电渗析技术借助离子交换膜所具备的选择性迁移特性来达成盐分浓缩以及淡水产出的目的,这种方法特别契合高盐污水的分质回收需求。在新疆油田盐资源化利用的具体场景下,该技术能够把污水里面的氯化钠和硫酸钠给分离出来并加以提纯,进而为工业盐的生产给予原料方面的供给。它的模块化设计是比较方便的,可以根据水质出现的波动情况灵活地去调整操作电压以及膜堆的数量,是适合用来处理那种盐度超出 80000mg/L 的极端污水的。不过得留心的是,污水当中存在的油类还有有机物是有可能污染到离子交换膜的表面的,所以需要联合运用超滤预处理的方式来确保系统的长期且稳定地运行。

3 新疆高盐油田污水膜处理工艺设计

3.1 预处理工艺优化

对于新疆油田污水所呈现出的高悬浮物以及高硬度这样的复杂特性而言,其预处理工艺有必要去构建起一个具备多维度协同作用的净化体系。其中,气浮单元在前端环节属于核心工艺部分,它借助溶气释放系统来生成微米级别的气泡,并且凭借这些气泡表面所具有的疏水特性,去吸附乳化油滴以及胶体颗粒,进而形成浮渣层,之后再依靠刮板机械将其清除掉。考虑到新疆地区风沙出现较为频繁的气候特点,气浮池应当增设防风罩,并且要对水力停留时间加以优化,以此来防止沙尘造成二次污染的情况发生。砂滤装置采用了多层介质的设计方式,其上层是石英砂,主要用于拦截大粒径的硅酸盐颗粒,而下层则是活性炭,它的作用是吸附溶解性的有机物,同时将滤速控制在每小时 $8\sim 10\text{m}$ 这样一个范围内,从而实现过滤效率和压差增长之间的平衡^[3]。在化学软化工艺方面,石灰-纯碱法的投药比例需要依据水质的具体情况来进行动态的调整,具体来讲,氢氧化钙会优先和碳酸氢根发生反应,进而生成碳酸钙沉淀,而纯碱则会和剩余的钙离子以及镁离子相结合,生成碳酸钙与氢氧化镁絮体。为了应对新疆冬季因低温而导致的沉淀速率降低这一情况,可以引入晶种强化技术,也就是通过投加微米级别的碳酸钙晶核,以此来加速结晶的过程。在氧化剂投加这个环节当中,既要考虑到安全性,也要关注氧化效率,可以采用次氯酸钠与过硫酸盐复合氧化体系,其中,次氯酸钠能够快速分解表

面活性剂,进而起到破乳的作用,而过硫酸盐则可以通过自由基链式反应,对聚合物驱油剂这类难以降解的有机物进行降解处理,在氧化反应池里面设置紫外线辅助激发装置,以便在低温环境下提升氧化效能。

3.2 膜组合工艺设计

膜工艺组合应当遵循“分级拦截、梯级脱盐”的原则,去构建能够适应新疆高盐污水特性的模块化处理链。超滤单元充当首道膜屏障,所选用的是外压式中空纤维膜组件,操作压力要维持在 $0.1\sim 0.3\text{MPa}$ 这样的范围,同时把膜面流速控制在 $2\sim 3\text{m/s}$,以此来减轻浓差极化的情况。其孔径分布被设计成 $20\sim 50\text{nm}$,如此便能够高效地截留住细菌、胶体硅以及大分子有机物,使得产水浊度稳定且低于 0.5NTU 。在纳滤环节,采用的是卷式膜元件,借助膜表面负电性所产生的道南效应,优先去排斥像硫酸根、碳酸根这类二价离子,对于钙镁离子的截留率可以达到95%以上,并且还允许30%~50%的单价氯离子透过,这样既能降低后续反渗透系统的渗透压负荷,又能避免因为过度脱盐而造成的资源浪费。反渗透单元会配置海水淡化级别的苦咸水膜,采用一级两段式的排列方式,回收率设定在60%~70%之间,操作压力依据进水盐度来进行动态调节,调节后的范围是 $5\sim 7\text{MPa}$ 。对于那些盐度超过 100000mg/L 的极端水质,在反渗透浓水侧要串联电渗析系统,依靠交替排列的阴阳离子交换膜在直流电场的作用下达成钠离子与氯离子的定向迁移,浓缩液经过蒸发结晶之后,能够回收到氯化钠与硫酸钠混合盐,淡水侧产水则会返回反渗透前端,进而进行二次提纯的操作。该组合工艺借助能级匹配方面的优化,把高压反渗透的能耗部分转移至低压纳滤与电渗析环节,整体电耗能够降低15%~20%的程度。

3.3 耐污染膜材料选择

膜材料的性能优化应当聚焦于新疆特有的污染类型以及环境应力状况。就有机污染这一方面而言,着手去开发两性离子接枝改性的聚酰胺膜,通过在膜表面引入羧酸基以及季铵基团,借助静电排斥的作用来对油类物质的黏附加以抑制,与此亲水涂层能够使得接触角降低到 30° 以下,如此一来便能减少蛋白质与多糖吸附的可能性。而对于无机结垢的问题,则运用纳米二氧化钛掺杂的技术手段,凭借其光催化特性,在紫外线照射的情况之下,对膜面所沉积的有机物予以分解,还能延缓碳酸钙晶体的生长速度。在夏季高温的工作环境下,陶瓷膜因其氧化铝基体具备的高热稳定性而成为优选的方案,它的刚性孔道结构能够避免聚合物膜出现蠕变的问题,而且其酸碱耐受性也能够契合频繁开展化学清洗的需求^[4]。除此之外,还致力于研发具有环境响应特性的智能膜材料,比如温度敏感型的聚N-异丙基丙烯酰胺共聚膜,当水温超过 32°C 的时候,膜孔会自动收缩,进而增强截留性能;pH响应型的膜则在碱性条件之下舒展分子链,以此增大通量,这类自适应

的特性在很大程度上提升了膜系统在新疆那种昼夜温差较大、水质波动较为频繁的场景之下的运行稳定性。

3.4 智能化运行与维护

戈壁油田有着特殊的地理情况,这就需要膜系统得有很强的自主运行能力。物联网监测网络会部署一些设备,像压差传感器、电导率探头以及激光颗粒计数器,每隔五分钟就会采集跨膜压差、产水水质还有悬浮物浓度的数据,然后借助LoRa无线传送到云端数据库。机器学习模型运用长短期记忆网络来分析历史数据,以此预测未来72小时膜通量衰减的曲线,要是预测的污染指数超出所设定的阈值,就会触发预警,并且生成优化清洗的方案。远程控制平台把气象局实时发布的沙尘暴预报数据整合进来,当风速超过8级的时候,它会自动提升砂滤单元的反冲洗频率,同时还将超滤运行模式切换成高错流速率,以此来应对悬浮物带来的冲击负荷。数字孪生系统依靠三维建模精准地再现膜堆内部流场分布以及浓度梯度,再结合计算流体力学仿真的方式去优化布水器的结构,让膜面流速分布的均匀性提升到90%以上。智能加药装置依据在线硬度检测得出的结果来动态调整石灰乳的投加量,误差能够控制在 $\pm 5\%$ 以内,而且通过模糊PID算法达成药剂消耗量的最小化。故障诊断专家系统里面存有2000组以上的故障案例特征谱,能够自动识别出膜丝断裂、密封圈泄漏等12类常见的故障,使得维修响应时间缩短到了传统人工巡检模式的30%。

4 结语

高含盐油田污水膜处理技术在应用时,要紧密贴合新疆特有的地质气候条件以及生产方面的需求。构建起“预处理优化-膜工艺组合-材料创新-智能运维”这样一套全流程的技术体系,能够有效地应对高盐、高硬度以及高污染负荷所造成的诸多挑战。在未来的研究当中,应当将重点放在低能耗膜过程的开发工作上,同时也要着眼于抗污染材料的改性事宜,并且还要着力于风光能源驱动系统的集成创新方面,以此来促使新疆油田污水资源化处理朝着高效化、低碳化以及智能化的方向不断向前发展。

【参考文献】

- [1]李琦.膜分离技术在油田含油污水处理中的应用分析[J].化学工程与装备,2020(7):242-243.
- [2]刘广宇.新时期关于油田水污染处理技术及利用研究[J].环境与发展,2020,32(1):74-76.
- [3]毛竹筒,廖夏露,罗云红,等.回收PET改性PEI薄膜在水分离中的应用[J].武夷学院学报,2023,42(9):53-58.
- [4]李哲,张璐,梁舒娟,等.油田采出水处理技术的研究进展[J].化学工程师,2024,38(3):59-62.

作者简介:邓焱伟(1991.12—),毕业院校:西南石油大学,所学专业:环境工程,当前就职单位名称:克拉玛依市三达新技术股份有限公司,职称级别:工程师。