

降低液压支架机修废水铁离子含量

薄 蕾

国能神东煤炭集团矿业服务公司 内蒙古 鄂尔多斯 017209

摘 要：液压支架机修废水成分复杂，铁离子浓度远超标准限值，且具有“三高两复杂”特性，去除难度大。其铁离子主要来自机修工艺和辅助过程。通过实验筛选，发现单一技术难以满足处理要求，需构建组合工艺。研究提出了“破乳-化学沉淀-过滤”和“电化学氧化-混凝沉淀-吸附”两种工艺，并详细阐述了各工艺流程、单元功能与参数优化。经实践验证，两种工艺均能有效降低铁离子含量，满足不同回用水质要求。

关键词：液压支架；机修废水；铁离子；废水处理；环境保护

引言：液压支架作为煤矿开采的关键设备，其机修过程会产生大量废水。此类废水成分复杂，铁离子含量高，若未经有效处理直接排放，会对环境造成严重污染，同时浪费水资源。当前，环保要求日益严格，如何高效降低液压支架机修废水中的铁离子含量，实现废水回用，成为煤矿企业亟待解决的问题。本文深入分析废水组成与特性，探究铁离子来源，筛选适配处理技术，旨在为解决这一问题提供科学依据与实践方案。

1 液压支架机修废水的组成与特性

1.1 废水主要成分

液压支架机修废水是典型的复杂多组分工业废水，其成分与机修工艺直接相关，核心污染物包括铁离子、油脂、悬浮固体及各类辅助化学物质。其中，铁离子以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 两种形态存在，浓度最高可达 35.6mg/L ，平均值达 22.3mg/L ，远超环评批复《城市污水再生利用·工业用水水质》（GB/T19923-2005）中 $\leq 0.3\text{mg/L}$ 的标准限值。油脂类污染物涵盖液压油、齿轮油、润滑油等，以浮油、乳化油（油包水、水包油）、分散油三种形态分布，占废水总量的5%-8%。浮油密度较小，漂浮于水面形成油膜；乳化油因表面活性剂作用稳定分散于水中，粒径多在 $0.1\text{-}10\mu\text{m}$ 之间；分散油则以微小油滴形式悬浮，三者共同包裹大量铁离子，形成“油-铁”复合污染物。悬浮固体浓度可达 $200\text{-}800\text{mg/L}$ ，主要包括金属碎屑、焊渣、喷砂除锈产生的铁砂颗粒及泥沙，这些固体颗粒表面易吸附铁离子与油脂，进一步增加废水处理难度。此外，废水中还含有酸洗或碱性清洗液残留的表面活性剂、pH调节剂等，导致水体呈弱酸性（ $\text{pH}5.0\text{-}6.5$ ），且化学需氧量（COD）高达 $1.32\times 10^4\text{mg/L}$ ，生物降解难度大^[1]。

1.2 废水核心特性

液压支架机修废水具有“三高两复杂”的核心特

性，给铁离子去除带来显著挑战。“三高”即铁离子浓度高、悬浮物含量高、乳化程度高：铁离子浓度远超常规工业废水，且 Fe^{2+} 占比超60%，需氧化为 Fe^{3+} 才能有效沉淀；悬浮物颗粒细小且与铁离子、油脂相互吸附，形成稳定的“固-液-油”三相体系；乳化油稳定性强，常规药剂难以破乳，导致包裹的铁离子无法释放。

“两复杂”体现在成分复杂与工况复杂：废水中油脂、表面活性剂、重金属离子等多种污染物相互作用，干扰铁离子去除反应；废水排放量与成分随机修任务波动，如拆解旺季废水日产量可达 380m^3 ，且铁离子浓度骤升，给处理系统带来冲击负荷。此外，废水水温受机修工艺影响波动较大（ $15\text{-}40^\circ\text{C}$ ），低温时 Fe^{2+} 氧化速率下降，高温则可能导致药剂失效，进一步增加处理难度。

2 液压支架机修废水铁离子的主要来源

2.1 机修工艺过程来源

机修工艺是铁离子的主要产生渠道，贯穿液压支架拆解、清洗、修复、涂装全流程。拆解阶段，液压支架立柱、千斤顶等金属构件表面的锈蚀层在拆卸外力作用下脱落，随清洗水进入废水系统，这部分铁锈以 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 形式存在，遇水后部分溶解为 Fe^{3+} ，占铁离子总量的25%-30%。清洗阶段是铁离子溶出的关键环节：为去除构件表面的顽固锈迹，机修车间常采用酸洗（如盐酸、硫酸溶液）或碱性清洗液（如氢氧化钠溶液），酸洗过程中酸液与金属氧化物反应，生成可溶性铁盐（如 FeCl_2 、 FeSO_4 ），使 Fe^{2+} 浓度大幅升高；碱性清洗液虽以除油为主，但会加速金属基体的轻微腐蚀，也会贡献部分铁离子，该阶段产生的铁离子占总量的40%-45%。焊接与修复阶段，焊接过程中产生的铁屑、焊渣随冷却水流进入废水，同时补焊、打磨作业会产生大量铁粉尘，这些固体含铁杂质占铁离子总量的15%-20%。涂装阶段的喷砂除锈工艺，会产生直径 $0.1\text{-}0.5\text{mm}$ 的铁砂颗

粒，部分细颗粒随废水排放，成为铁离子的补充来源^[2]。

2.2 辅助过程来源

除核心机修工艺外，辅助过程产生的铁离子占比约10%-15%，对废水铁离子含量也有不可忽视的影响。机修车间地面因日常作业，如金属构件的拆解、焊接、打磨等，会散落大量铁屑、铁锈。在地面冲洗时，这些杂质会随冲洗水进入废水收集系统。尤其是在拆解工位和焊接区域，由于作业频繁，铁杂质积累较多，冲洗水中铁离子浓度可达15-25mg/L，成为铁离子的一个重要来源；废水循环水箱也是易被忽视的铁离子产生点。水箱多为碳钢材质，而液压支架机修废水常呈弱酸性（pH5.0-6.5）。长期储存这样的废水，会导致水箱内壁锈蚀，溶解的Fe²⁺持续进入废水。经检测，循环水箱出口废水铁离子浓度较入口平均升高5-8mg/L。废油回收过程中，若操作不当，也会增加铁离子浓度。含油废水在与油污收集罐底部沉积的含铁杂质混合时，会使铁离子进入废水。特别是在废油静置分离不彻底的情况下，该问题更为突出，进一步加重了废水处理的负担。

3 铁离子去除技术筛选与适配性实验

3.1 常用技术原理与初步筛选

液压支架机修废水成分复杂，含有大量的铁离子以及油脂、悬浮物等其他污染物。这些铁离子若未经有效处理直接排放，不仅会对水体生态环境造成严重破坏，影响水生生物的生存，还会在管道和设备中沉积结垢，降低设备的使用寿命和运行效率。结果如表1所示。

技术类型	核心药剂/设备	铁离子去除率	处理成本（元/吨水）	适配性评价
化学沉淀法	PAC+氢氧化钙	48%	0.8-1.2	需解决破乳问题
电化学氧化法	钛基二氧化铅电极	85%	2.2-2.5	成本高，电极易钝化
吸附法	柱状活性炭	52%	1.5-1.8	吸附容量有限

实验表明，单一技术难以满足处理要求：化学沉淀法因乳化油包裹铁离子，去除率不足50%；电化学氧化法虽效率较高，但设备投资与运行成本过高；吸附法仅适用于低浓度铁离子深度处理^[3]。

3.2 破乳技术优化实验

在液压支架机修废水处理中，乳化油的存在犹如一层顽固的“屏障”，紧紧包裹着铁离子，极大地阻碍了铁离子的有效去除。为了攻克这一难题，精心选取了三种破乳方案开展对比实验，力求找到最为高效、可行的破乳技术。实验条件经过严格设定：选取150mL具有代表性的废水样本，其中铁离子浓度为22.3mg/L、油脂浓度为65mg/L；在常温环境下进行操作，以保证实验条件的一

致性和可重复性；先以适当的速度搅拌30s，使投加的药剂与废水充分混合，模拟实际处理中的混合过程；随后静置15min，让破乳反应充分进行，使油滴有足够的时间上浮或凝聚。实验结果详细记录于表2中。

结果如表2所示。

破乳方案	破乳率	铁离子释放率	上清液铁离子浓度（mg/L）
PAM（20mg/L）	15%	18%	18.3
PAC（100mg/L）+破乳剂（50mg/L）	45%	48%	11.6
复合试剂（200mg/L）+PAC（120mg/L）	90%	95%	1.1

实验证实，复合试剂（主要成分为脂肪酸甲酯磺酸钠）与PAC协同作用可有效破除乳化油：复合试剂破坏油滴双电层，PAC吸附分散油与铁离子形成絮体，破乳率达90%，铁离子释放率超95%，为后续化学沉淀创造条件。

4 降低液压支架机修废水铁离子含量的工艺集成与参数优化

4.1 “破乳-化学沉淀-过滤”工艺集成

围绕液压支架机修废水“油-铁”复合污染，“破乳-化学沉淀-过滤”工艺构建“预处理-核心反应-深度净化”三级体系，流程为废水收集→格栅过滤→破乳反应池→化学沉淀池→斜管沉淀池→砂滤罐→出水回用，各单元功能与参数经优化，确保铁离子高效去除；格栅过滤单元为工艺首端预处理，采用304不锈钢格栅，孔径5mm，自动捞渣。运行数据显示，可截留80%以上粒径≥5mm悬浮物，使后续进水悬浮物浓度降至150-200mg/L，防止管道堵塞和杂质吸附铁离子；破乳反应池是核心解离单元，采用“复合试剂+PAC”协同破乳。复合试剂投加量200mg/L，PAC投加量120mg/L，在线pH计稳定水体pH在6.0-7.0，搅拌系统两段式控制。经检测，破乳率达90%，油含量降至6.5mg/L，铁离子释放率超95%；化学沉淀池聚焦铁离子深度沉淀，用氢氧化钙与PAM组合投加。氢氧化钙动态调整投加量，控制pH稳定在9.0，同步投加0.1%浓度PAM助凝，搅拌参数“快-慢-静”三段式设计；斜管沉淀池采用六角形蜂窝斜管组件，材质UPVC，倾角60°，表面负荷1.5m³/(m²·h)，沉淀效率提升3倍。设置定期反冲洗系统，保障长期稳定运行；砂滤罐为深度净化单元，填充双层滤料，滤速10m/h，可截留微小颗粒与悬浮物，出水铁离子浓度稳定在0.06-0.08mg/L，满足回用标准。反冲洗系统采用气水联合反冲模式，反冲后滤料截留能力快速恢复^[4]。

4.2 “电化学氧化-混凝沉淀-吸附”工艺集成

针对回用水质要求极高的场景（如精密部件清洗），

“电化学氧化-混凝沉淀-吸附”工艺以“强化氧化、深度净化”为目标,构建“均质调节-氧化转化-混凝分离-吸附精制”流程,具体为废水收集→调节池→电化学氧化槽→混凝沉淀池→活性炭吸附塔→精密过滤→回用,各单元参数经优化确保出水品质稳定。调节池为矩形钢筋混凝土结构,有效容积 50m^3 ,水力停留时间 2h ,设潜水搅拌机(转速 600r/min)实现废水均质均量。通过液位传感器与进水阀门联动控制,避免水量冲击;安装在线pH计与ORP计实时监测水质,为氧化槽参数调整提供依据。现场运行表明,进水铁离子浓度波动时,调节池出水波动可控制在 $\pm 2\text{mg/L}$,保障氧化槽稳定运行;电化学氧化槽采用单室矩形结构,电极组为钛基二氧化铅阳极(涂层厚度 $50\mu\text{m}$)与304不锈钢阴极,电极间距 5cm ,总极板面积 10m^2 。运行参数经优化:电流密度 20mA/cm^2 ,电解时间 20min , Fe^{2+} 氧化率达 98% ;水温控制在 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 。采用间歇式电解模式,每运行 30min 停机 5min ,每月用 5% 盐酸溶液循环清洗电极1次,延长电极寿命至1年以上。该单元除氧化 Fe^{2+} 外,还可降解部分COD与油脂,减轻后续处理负荷;混凝沉淀池采用辐流式结构,直径 8m ,有效水深 4m 。PAC投加量 100mg/L ,同步投加 0.1% 浓度PAM促进絮体沉降。沉淀时间 40min ,池底设刮泥机定期排泥。经检测,该单元出水悬浮物浓度 $\leq 20\text{mg/L}$,铁离子浓度 $\leq 0.5\text{mg/L}$;活性炭吸附塔采用固定床结构,填充粒径 $3\sim 5\text{mm}$ 的煤质柱状活性炭,接触时间 30min ,可有效吸附残余铁离子与小分子有机物。设置预处理过滤器防止悬浮物堵塞活性炭孔隙;活性炭饱和

后采用高温蒸汽再生,可重复使用 $3\sim 4$ 次;精密过滤单元采用孔径 $0.22\mu\text{m}$ 的聚丙烯折叠滤膜,材质为食品级PP,可截留活性炭粉末与微小 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 颗粒。滤膜组件采用错流过滤模式,最终出水铁离子浓度 $\leq 0.1\text{mg/L}$,COD $\leq 300\text{mg/L}$,满足清洗用水要求。但该工艺设备投资较高, $50\text{m}^3/\text{d}$ 处理规模设备总投资约 35 万元,运行成本 2.2 元/吨水,适用于对回用水质要求严苛的场景。

结束语

本文围绕降低液压支架机修废水铁离子含量展开研究,通过对废水特性与铁离子来源的剖析,筛选并优化了处理技术,构建了两针对性工艺。实践表明,“破乳-化学沉淀-过滤”工艺成本较低、适用性广;“电化学氧化-混凝沉淀-吸附”工艺出水品质高,但成本较高。企业可根据自身回用水质要求与经济状况,合理选择处理工艺,实现废水达标回用,既减少环境污染,又降低生产成本,推动煤矿行业的可持续发展。

参考文献

- [1]姬伟.采煤机与液压支架协同控制系统的应用[J].晋控科学技术,2025(4): 42-45.
- [2]刘明明.综采面液压支架液压系统优化分析[J].能源与节能,2020(04):74-75.
- [3]王真,唐浩.液压支架液压系统优化研究与应用[J].今日制造与升级,2023(03): 52-54.
- [4]王选泽.液压支架技术体系研究与实践[J].科技传播,2022,5(22):186+188.