

页岩气压裂返排液高效处理及资源化利用工艺优化研究

张 键¹ 李修明^(通讯作者)²

1. 任丘市阳光劳务有限公司 河北省 沧州市 062550

2. 山东省 聊城市 252429

【摘 要】：针对页岩气压裂返排液高悬浮物、高有机负荷与高盐度的复合特性，本研究构建混凝沉淀—超滤—芬顿氧化的串联工艺并开展参数优化。通过单因素试验确定预处理优选条件为 pH 约 7.5、PAC 约 200 mg/L、快速混合 250 r/min 1 min、絮凝 40 r/min 12-15 min、沉降 30 min；深度处理采用跨膜压力 0.2 MPa、通量 15 LMH 的超滤，膜产水侧实施芬顿，过氧化氢与亚铁摩尔比 10 比 1，酸性反应后中和与固液分离。以重庆涪陵焦石平台两口井返排液小试验证，优化工艺对悬浮物、化学需氧量与总溶解固体的去除率分别达 92%、88%、75%，较原工艺提升 12%、11%、15%。单方综合成本由 25 降至 21.25 元每立方米，回用率由 40% 升至 60%，稳定实现出水总溶解固体不高于 5000 mg/L 与化学需氧量不高于 100 mg/L，为压裂液稀释回用与工业循环冷却水补充提供了可操作的水质边界。

【关键词】：页岩气压裂返排液；混凝沉淀；超滤；芬顿氧化；资源化利用

0 引言

页岩气压裂返排液在返排早期与地层水和化学助剂相互叠加，呈现悬浮颗粒含量高、有机负荷大、总溶解固体高的典型特征，同时含有铁锰铝锆等金属离子与表面活性剂残留，表现出强胶体稳定性与结垢倾向。这一水质组合使传统单一工艺难以兼顾稳定达标与经济可行，混凝沉淀受离子强度影响而絮体脆弱，膜分离面临细颗粒堵塞与有机污染，生化过程受难降解组分限制，深度脱盐又受到硬度和硫酸盐碳酸盐结垢的约束。构建以固液分离、有机削减、结垢控制与金属去除为主线的耦合路径，成为提升非常规水回用水平的关键。为此，本研究围绕预处理参数的精细化控制和膜分离与高级氧化的协同，提出混凝沉淀—超滤—芬顿的串联方案，并从压裂液稀释回用和工业循环冷却水两类场景出发，探索可操作的资源化利用路径与监测控制边界，以期为平台内闭合水循环提供工艺与管理依据。

1 页岩气压裂返排液特性研究

鉴于压裂返排阶段地层水与助剂的叠加效应，返排液呈现高悬浮物、高有机负荷以及高盐度的复合特性。悬浮物 SS 指颗粒态非溶解物，常见于 500-2000 mg/L，来源包含支撑剂碎屑、地层黏土细粒以及腐蚀产物，这把后续沉降、混凝以及膜分离的负荷显著抬升，细颗粒易造成膜堵塞。化学需氧量 COD 反映可氧化有机物浓度，常处于 3000-8000 mg/L，主要来自聚丙烯酰胺、表面活性物以及交联剂残留，生物可降解性偏低，使单一生化单元难以发挥稳定去除，需要在预处理环节引入氧化或吸附来削减难降解组分。总溶解固体 TDS 常见 10000-50000 mg/L，阴离子以 Cl^- 为主，配套 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 以及 Sr^{2+} 等阳离子，高渗透压与结垢倾向把常压纳滤的可行窗口压

缩，同时诱发 CaCO_3 以及 BaSO_4 沉积。需重点关注的是重金属的种类及范围，常检出 Fe 1-30 mg/L、Mn 0.1-5 mg/L、Ba 1-50 mg/L、Sr 10-300 mg/L，还伴随 Cr、Ni、Cu 以及 Pb 合计 0.01-0.5 mg/L 的痕量存在，金属与有机配体络合会削弱氢氧化物沉淀并提高硫化物法剂耗。由此推导，工艺优化应把固液分离、有机削减、结垢控制以及金属定向去除进行串联匹配，为后续深度脱盐与回用提供边界条件。

2 页岩气压裂返排液处理工艺优化设计

2.1 预处理工艺参数优化

在返排液颗粒物负荷较高且盐度较大的背景下，预处理环节把混凝沉淀作为核心单元来构建。悬浮物指颗粒态非溶解物，胶体指粒径处于纳米至亚微米范围且因表面电荷而难以自发聚集的分散体。鉴于该水质特性，本研究借助单因素变量法对聚合氯化铝 PAC 投加量、pH 以及搅拌速度开展系统优化，使变量之间的响应关系得以被清晰识别。考虑高离子强度会把 PAC 水解形态显著改变，pH 控制在弱碱区更利于生成具有网捕效应的氢氧化铝絮体，因而把 pH 探索窗口设定为 7.0-8.0，并以 NaOH 或 HCl 实施双向调节。PAC 投加量设置 50-300 mg/L 的递增梯度，评价以出水悬浮物和浊度的同步降低以及絮体粒径稳定为依据。搅拌条件采用两段式配置，快速混合阶段运用高剪切以迅速分散药剂，絮凝阶段转为低剪切以促使絮团缓慢长大，同时把沉降时间保持一致以排除停留时间差异的干扰。由此建立参数耦合的识别路径：先锁定 pH 的优选区间，再在该区间内微调 PAC 投加量，随后对搅拌强度和时间进行组合细化，把短时高转速与长时低转速的配比分别考察。结合工艺运行的可操作性，建议把 PAC 投加量设定在约 200 mg/L，pH 维持在约 7.5，

快速混合转速约 250 r/min 持续 1 min, 絮凝转速约 40 r/min 维持 12-15 min, 沉降时长控制在 30 min; 该组合兼顾投药经济性与絮体结构稳定性, 并且与表面活性剂残留导致的胶体稳定性相适配。需同步关注碱度消耗与溶解性铝的释放风险, 把碱度与余铝监测纳入在线巡检, 并把排泥周期依据絮体累积速率动态调整, 为后续过滤与膜段提供稳定的进水边界。

2.2 深度处理工艺改进

在预处理已显著削减悬浮颗粒与胶体的基础上, 本研究把膜分离与 Fenton 高级氧化进行串联配置, 意在以低压截留与自由基降解的互补效应来推进难降解有机物的去除与膜段的稳定运行。膜段选用超滤模块, 以跨膜压力 0.2 MPa 和稳定通量 15 LMH 为控制靶值, 采用错流运行、定期反冲与化学清洗策略, 借助剪切抑制沉积并把表面活性剂造成的粘附弱化。该参数组合在高盐环境下兼顾能耗与抗污染, 且对后续氧化反应的药耗具有间接抑制作用, 因为亲水性高分子被截留后自由基成路路径更加集中。Fenton 反应器以过氧化氢与亚铁的摩尔比 10:1 作为核心剂量比, 配套投加点前置到膜产水支路, 反应 pH 调控在酸性范围以促使羟基自由基生成, 并把停留时间与混合强度设置为可调区间以响应进水波动。反应后通过中和与铁泥固液分离把铁离子与氧化副产物去除, 避免在后续单元中产生结垢与膜污染。从工艺协同角度来看, 膜段先减负使催化剂与氧化剂可被更有效地用在溶解性有机物上, 而 Fenton 把疏水性芳香族残留进一步断链, 进而为回用水的色度与 COD 目标值提供边界约束。综合设定以实现 COD 去除率 88% 的目标, 关键控制点与单元接口见图 1。

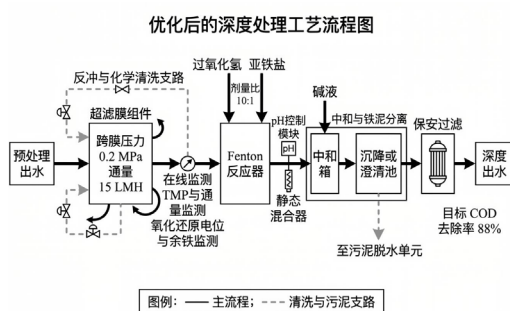


图 1 优化后的深度处理工艺流程图

2.3 资源化利用路径设计

在深度处理出水已将总溶解固体控制至不高于 5000 mg/L、COD 降至不高于 100 mg/L 的边界下, 本研究把资源化利用分为压裂液稀释回用与工业循环冷却水补充两条路径展开设计。从压裂液稀释回用的适配性来看, 滑溜水体系对盐度与二价阳离子较为敏感, 进一步观察发现, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 与 Sr^{2+} 会削弱摩阻降剂的水化并诱发硫酸盐型结垢, 需把金属离子络合

与阻垢剂投加前置于混配罐进水侧, 同时把余氧化剂清除作为进站前置环节以避免 Fenton 残留对聚丙烯酰胺造成链断。由此推导, 进站水的浊度与悬浮物还需维持在低位, 并把在线电导与 pH 联动控制纳入车载混配单元, 通过适量掺配清水把体系黏弹性窗口调至施工要求, 配合一体化精密过滤来截留细颗粒与铁泥残余, 能够把加砂段的砂比稳定性维持在设计区间。工业循环冷却水补充路径从腐蚀与结垢双重约束进行评估, 氯离子与总盐度抬升会加剧碳钢与铜合金的点蚀倾向, 因此把化学稳水方案与水力管理进行协同更为关键, 具体做法是选用含有有机膦与锌盐或钼酸盐的复合缓蚀体系来构建保护膜层, 并把钙碳酸盐饱和指数控制在微正区间以形成可控钙膜, 同时把旁滤单元与排污倍率控制联合运行以抑制泥垢累积。在高氯装置区段还需把橡胶衬里与不锈钢换热面进行分区适配, 并在补水端设置硫化物或氯胺型杀生剂的联用策略以抑制微生物增殖。结合两条路径的耦合关系, 可把冷却塔排污水回抽至压裂回用体系作为低比例掺混水源, 以此构建平台内闭合水循环, 工程上仅需在现有配水总管增设导流与在线监测模块即可完成切换, 整体技术可行性体现在药剂协同、材料适配与过程监控三方面的可操作边界上。

3 优化工艺的效果评估

3.1 处理效果的实验室验证

鉴于前述水质特性, 本研究在重庆市涪陵区焦石平台 A 两口井返排液按等体积合并, 搭建台架小试来比对原工艺与优化工艺的处理表现。为降低进水差异干扰, 把样品经 100 μm 筛网粗滤并在 24 h 内完成实验, 恒温条件控制在约 25 $^{\circ}\text{C}$ 。原工艺按照现场常规进行配置, 为 PAC 混凝沉淀接石英砂过滤; 优化工艺依照耦合路径运行, 把 pH 调整至 7.5, PAC 设定 200 mg/L, 快速混合 250 r/min 维持 1 min, 絮凝 40 r/min 运行 12-15 min, 沉降 30 min, 随后进入跨膜压力 0.2 MPa 的超滤单元并把通量稳定在 15 LMH, 同时把 Fenton 反应前置到膜产水侧, 过氧化氢与亚铁摩尔比 10 比 1, 在酸性条件反应后完成中和与铁泥分离。关键评价指标选取悬浮物 SS、化学需氧量 COD 与总溶解固体 TDS, 并同步跟踪余铝与可溶性铁以识别副产物累积, 检测方法均参照现行水质标准执行。对比结果见表 1, 优化工艺在 SS、COD 与 TDS 上的去除率分别为 92%、88% 与 75%, 相较于原工艺的增幅均超过 10%, 由此反映低压截留与自由基氧化的协同把细颗粒与难降解有机物的负荷同步压降。为控制偶发波动对结论的影响, 把全部数据取自三批平行样的算术均值, 空白与对照按同一程序运行; 同时把混凝阶段碱度与余铝进行在线记录, 并把超滤段设置定期反冲与低剂量酸洗以维持通量稳定, 从而避免运行工况变化对比较结果造成偏移。



表1 优化工艺与原工艺处理效果对比表

指标	原工艺去除率 (%)	优化工艺去除率 (%)	提升幅度 (%)
SS	80	92	12
COD	77	88	11
TDS	60	75	15

3.2 资源化利用效益分析

基于焦石平台 A 的两口井返排液水质边界与两条资源化路径的运行约束，经济与环境效益测算以药剂、能耗、膜组件清洗与污泥处置四类成本为核算单元展开。优化工艺在混凝投加量精细化、超滤稳定通量控制以及 Fenton 剂量按需投配的协同下，把单方综合处理成本由 25 元 /m³ 降至 21.25 元 /m³，降幅为 15%，成本下降的主要环节来自药剂消耗与铁泥外运量的同步降低，同时错流运行减少了高频化学清洗所致的停机折损。资源侧的回用可达性随出水盐度与色度压降而提升，把平台再生水回用率由 40% 抬升至 60%，进而在相同产水需求下压缩新鲜水购入规模，折算为年度节水量约 1200 m³，并把非常规水的波动对施工混配环节的影响通过在线电导与 pH 联动控制予以缓释。环境绩效层面，回用比例抬升直接降低外排量与氯化物、钙镁离子负荷，减轻受纳水体盐分累积与结垢风险，冷却水场景的排污倍率可在同等稳水药剂框架下维持更低水

平，从而间接削减排放监管压力与运输环节的碳排放边际量。从设备全寿命周期的角度来看，结垢与腐蚀强度的降低把换热器清洗周期拉长，非计划停机与密封件更换频次被压低，运维支出和产能损失的叠加成本得到同步缓解。总体上，成本与回用双重改善为平台构建闭合水循环提供了可操作的边界条件。

结语

研究表明，针对高盐高有机高悬浮的返排液，通过在弱碱条件下优化 PAC 混凝并配合两段搅拌与适度沉降，可有效削减颗粒和胶体负荷，为膜段稳定运行创造条件。采用低压错流超滤结合反冲与化学清洗，进一步截留亲水性高分子与细微颗粒；在膜产水侧实施芬顿氧化，使自由基作用集中于溶解性难降解有机物，显著降低色度与化学需氧量。实验验证了该耦合路径在污染物去除、能源药耗与运行成本方面的综合优势，并为压裂液稀释回用与工业循环冷却水补充提供了明确的水质门槛与投药管控要点。工程推广应加强在线电导、pH、余铝与可溶性铁的联合监测，完善阻垢与缓蚀策略，优化污泥脱水与外运，实现稳定达产与风险可控。后续工作需面向金属络合态干扰、进水波动与长期膜污染开展中试放大与全寿命评估，进一步拓展高盐非常规水的资源化利用边界。

参考文献

[1] 李延隆, 喻干, 甘玉生, 廖健, 刘小江, 田飞, 陈曦, 李颖. 页岩气开发酸化压裂返排液处理技术试验研究[J]. 油气田环境保护, 2025, 35(05):14-20.

[2] 王一迪, 石媛丽, 屈嘉琦, 斯潮湧, 刘程程, 詹亚力, 王庆宏, 陈春茂. 压裂返排液水质胶体稳定性分析及其预处理技术研究[J]. 工业水处理, 2025, 45(06):1-10.

[3] 李树国, 唱永磊, 汪大林, 王伟伟, 庞晓辰, 田婷. 深层煤层气开发压裂返排液处理工艺技术研究[J]. 给水排水, 2025, 61(02):87-91.

[4] 李连玺, 符灵韬, 李建, 迟锐, 解海邦, 杨明, 张炜. 基于电化学的压裂返排液低成本处理工艺研究[J]. 油气田地面工程, 2025, 44(09):22-27.

[5] 王雪梅, 熊颖, 陈鹏飞, 袁波, 刘文士, 胡万金. 过一硫酸盐/高铁酸盐体系处理页岩气压裂返排液实验研究[J]. 水处理技术, 2024, 50(05):35-40.

[6] 陈刚, 王伟龙, 杨水胜, 李辰, 朱锦艳, 申太志, 洪曦. 吴起油田压裂返排液回用处理技术及其应用[J]. 工业水处理, 2025, 45(02):175-183.

[7] 侯浩, 刘保录, 郑建刚, 张桓, 张复. 合水油田措施返排液回用技术研究与应[J]. 天然气与石油, 2025, 43(04):129-138.

[8] 方明清. 页岩气开采过程中压裂液安全管控与地下水环境风险防控[J]. 化工安全与环境, 2025, 38(11):93-96.

作者简介：张键（1984—），男，汉族，本科，研究方向为石油工程。