

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.018

致密气压裂返排液及生产水处理耦合工程优化

许 跃, 许洪祝, 周启立, 陆彩霞, 史金卓, 刘 洋
(中海油天津化工研究设计院有限公司, 天津 300131)

摘 要: 临兴中区 LX-156 水处理站处理规模为 $480\text{ m}^3/\text{d}$, 原采用“调节/涡凹气浮/多介质过滤/精细过滤”处理工艺。为满足生产建设要求及解决工艺运行不稳定等问题, 该水处理站改造后处理规模提升至 $1\,080\text{ m}^3/\text{d}$, 根据压裂返排液及生产水水质特点, 采用“预处理/一体化破胶/涡凹气浮/高密度斜管沉降/保安过滤/精细过滤”耦合工艺。该工程采用一体化撬装式设备进行原位扩容, 在破胶脱稳 30 min , 气浮处理 24 min , 高密度斜管沉降器投加 PAC 300 mg/L 、PAM 15 mg/L 、NaOH 800 mg/L 的条件下, 整个工艺稳定运行 128 d , 处理达标回注水 $125\,435\text{ m}^3$, 出水关键指标含油量 $\leq 30\text{ mg/L}$ 、悬浮物 $\leq 10\text{ mg/L}$ 、颗粒直径中值 $\leq 4\text{ }\mu\text{m}$, 满足《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 5329—2012) 的高渗透率油层回注水水质标准。

关键词: 致密气; 压裂返排液; 生产水; 技术改造; 工艺优化

中图分类号: X741 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0117-05

Optimization of Coupled Tight Gas Fracturing Flowback Fluid and Production Water Treatment Project

XU Yue, XU Hong-zhu, ZHOU Qi-li, LU Cai-xia, SHI Jin-zhuo, LIU Yang
(CNOOC Tianjin Chemical Research and Design Institute Co. Ltd., Tianjin 300131, China)

Abstract: The LX-156 water treatment station in Linxing Central District with treatment capacity of $480\text{ m}^3/\text{d}$, originally adopted the treatment process of conditioning/turbulent air flotation/multi-media filtration/fine filtration. To satisfy the production construction requirements and solve the process instability problem, the capacity of the water treatment station was increased to $1\,080\text{ m}^3/\text{d}$ after renovation. According to the characteristics of fracturing flowback fluid and production water quality, the coupled process of pretreatment/integrated rubber breaker/vortex concave air flotation/high-density sedimentation/security filtration/fine filtration was adopted. In-situ capacity is expanded using integrated skid-mounted equipment. By breaking and destabilizing for 30 min , air flotation treatment for 24 min , as well as adding PAC of 300 mg/L , PAM of 15 mg/L , and NaOH of 800 mg/L in high density sedimentation, $125\,435\text{ m}^3$ of refill water was treated up to the standard after operated stably for 128 days . The key effluent indexes include oil content $\leq 30\text{ mg/L}$, suspended solids concentration $\leq 10\text{ mg/L}$, and diameter median of suspended solids $\leq 4\text{ }\mu\text{m}$, which met the water quality standards for reinjection water from high permeability oil reservoirs in *Water Quality Standard and Practice for Analysis of Oilfield Injecting Waters in Clastic Reservoirs* (SY/T 5329-2012).

基金项目: 中海油能源发展股份有限公司资助项目(HFKJ-ZDGG-TJY-2021-04)

通信作者: 许洪祝 E-mail: 528279887@qq.com

Key words: tight gas; fracturing flowback fluid; production water; technical transformation; process optimization

鄂尔多斯盆地临兴中区块气田位于山西省临县和兴县境内,整体建产规模高达 $13.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。致密气压裂返排液是致密气水力压裂施工作业后返回至地面的一类气田采出水,具有成分复杂、黏度大、乳化程度高、有机物种类多等特点^[1-2]。在气田勘探开发和生产过程中,地层水以游离水或饱和水的形式被携带至地面工程设备中的生产水,具有高含盐、难降解等特点。压裂返排液及生产水处理的主要难点在于较高的黏度影响了处理过程中投加药剂的扩散。对上述两种废水常用的处理方法有臭氧氧化、电催化、电絮凝氧化组合及生物技术等^[3-6]。

临兴中区LX-156水处理站为临兴气田4座集气站配套水处理站之一,2021年7月完成新建工程,改造前工艺以“混凝沉淀+气浮+两级过滤”为主;2023年6月,因生产调整及工艺不稳定等问题,废水处理规模从 $480 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $1\,080 \text{ m}^3/\text{d}$,在原有占地基础上,通过技术经济比选确定最佳工艺,即“除油预处理/一体化破胶/涡凹气浮/高密度沉降/保安过滤器/精密过滤”耦合工艺,原位扩容改造于2023年8月26日完成通水运行。

1 工程概况

1.1 工艺流程

压裂返排液通过罐车运卸至软体池,生产水经集气站管道输送至软体池。生产水和压裂返排液根据水质特点分别处理,生产水经管道排入1#软体池,实现初步水质水量调节。出水经泵提升至一体化破胶反应器,在微电场、催化电极的协同作用下,实现水中高聚物、氨氮及总氮的进一步分解转化和去除。破胶反应器排水带压进入涡凹气浮装置,在纳米级微气泡和絮凝剂的协同作用下,进一步去除水中残存的胶体、悬浮物等污染物。气浮单元产水经泵提升至高密度斜管沉降器,实现胶体、悬浮物(SS)、COD、聚合物等污染物的有效去除,最终进入高密产水箱。

压裂返排液经罐车运至压裂液2#软体池,经破胶反应器处理后与生产水在高密产水箱汇合,而后经泵依次提升至保安过滤器,去除水体中的残存污

染物,以保障后续精密过滤单元的稳定、高效运行。出水进入精密过滤单元,进一步精细化处理,各项水质指标达到设计要求后可汇入回注水罐,供回注使用。

该水处理站改造后工艺流程见图1。

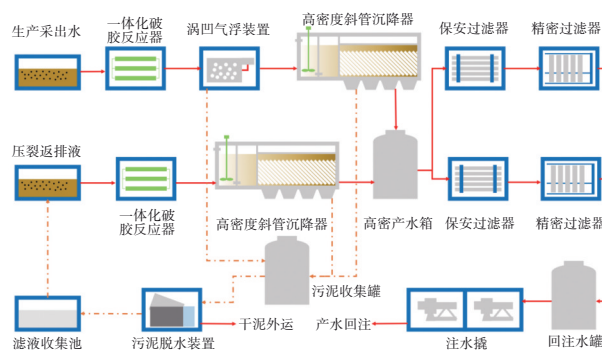


图1 临兴中区LX-156水处理站改造后工艺流程

Fig.1 Process flow after modification of LX-156 water treatment station in Linxing Central District

① 针对废水黏度高、一直处于热力学稳定状态等特点,新增一体化破胶装置,实现废水中胶类物质快速脱稳聚集。其核心为电催化反应器,内部设置阴、阳两级,其中阴极采用石墨电极,阳极采用高效DSA电极,单极式排列。

② 针对生产水和压裂返排液水质不同的情况,同时本着节省占地面积、控制成本的原则,设计将水处理工艺升级改造为两段独立工艺。压裂返排液经破胶、高密度沉降处理后进入产水箱,生产水经破胶、气浮、高密度沉降处理后与前者在高密产水箱汇合。

③ 该水处理系统采用一体化撬装设备,在达到处理规模和水质要求基础上,充分利用原有设备,缩短建设周期,力争在2个月内完成水处理站改造工作。

1.2 水质分析

该水处理站于2023年8月完成改造扩容,每日进行在线检测,提取90组水质分析数据进行平均化处理,出水水质执行《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 5329—2012)的高渗透率油层回注水水质标准。

进、出水水质见表1。

表 1 临兴中区 LX-156 水处理站进、出水水质
Tab.1 Influent and effluent quality of LX-156
water treatment station in Linxing Central District

项目	SS/ (mg·L ⁻¹)	颗粒直 径中 值/μm	含油量/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg· L ⁻¹)	氨氮/ (mg· L ⁻¹)	总氮/ (mg· L ⁻¹)	pH
设计进水	190	70	322	3 280	70	90	6~9
改造后进水	212	80	370	3 630	75	153	6~9
出水标准	≤10	≤4	≤30	<2 300	<28	<34	6~7.5

实际进水指标除 pH 外均超过设计指标值,其中 SS、含油量、COD、总氮等 4 项指标超标严重,超标率分别为 12%、15%、11%、70%。设计进水的颗粒直径中值、氨氮指标则与改造后进水指标相比变化不大。

1.3 主要处理单元设计及运行参数

主要构筑物、设备的设计及运行参数如表 2 所示。

表 2 主要构筑物、设备的设计及运行参数
Tab.2 Design parameters of main structures and equipment

工艺单元	尺寸及数量	设计参数	运行参数	类型
软体池	尺寸为 25 m× 25 m×1.7 m, 3 座	HRT=2.6 h,内衬抗腐蚀加厚环保夹层网 PVC 防渗布,两层铺设 1.2 cm 厚 PVC 土工膜,5 cm×5 cm 边框方钢及中支方钢,方钢厚度为国标 0.2 cm	容积 1 000 m ³	改造
一体化破胶反应器	尺寸为 6.5 m× 3 m×3 m,2 座	P=150 kW,输入电压 0~60 V (可调),输出电压 0~400 V(可调),输出电流 0~400 A(可调),稳压精度≤±0.5%,稳流精度≤±0.5%,调节范围:电流/电压在 0~100% 额定值内连续调节,整机效率≥92%,冷却方式:风冷,控制方式:RS485;阴极采用石墨电极,阳极采用高效 DSA 电极	处理量 25 m ³ /h,HRT=0.5 h,运行时电压 50 V、电流 200 A	新增
涡凹气浮装置	尺寸为 8 m× 1.3 m×1.3 m, 1 座	气水比 1:25,P=5.7 kW,回流比 30%;主体 Q235 材质,内衬玻璃钢,曝气机为合金钢材质,橡胶刮板,固定件材质为 SUS2205	HRT=0.4 h,速度梯度 50 L/s,刮渣机行车速度 4 m/min,PAC 为 200 mg/L,PAM 为 10 mg/L	扩容
高密度斜管沉降器	尺寸为 12.8 m× 3.5 m×5.0 m, 2 座	处理量 25 m ³ /h,斜管表面负荷 20 m ³ /(m ² ·h),斜管长度 1 m,安装角度 60°,排泥斗 4 个,重力排泥;主板 Q345 材质内衬玻璃钢,厚度≥10 mm,内部结构 SUS2205,配套泥位计和排泥电动阀	PAC 为 300 mg/L,PAM 为 15 mg/L,NaOH 为 800 mg/L	新增
保安过滤器	40 英寸(1 英寸 为 2.54 cm),2 座	处理量 25 m ³ /h,过滤形式:外压过滤;壳体玻璃钢材质,端头 ABS+PVC 材质,PP 大通量折叠滤芯	跨膜压差 0.6 MPa,过滤精度 50 μm	改造
精细过滤器	2 座	膜孔径 0.1 μm,膜元件 15 支,膜面积 20 m ² /支,外压过滤,表面流速 5~8 L/(m ² ·s),截留分子质量 200 000 u,错流运行,膜为 PVDF 材质	跨膜压差 0.2 MPa,膜通量 1.25 L/min	扩容
注水撬	尺寸为 6 m× 3 m×3 m,2 座	流量 24.84 m ³ /h,转速 422 r/min,柱塞直径 50 mm,柱塞行程 100 mm,压力 42 MPa;液力端 5 缸,立式泵头,动力端齿轮内减速传动,中间杆双向密封	运行流量 22.5 m ³ /h	新增
污泥脱水装置	尺寸为 4.12 m× 1.8 m×1.87 m, 1 座	处理能力 300 kgDS/h,碟片式过滤,整机功率 5.5 kW,进液含固率≥1%,泥饼含水率≤80%,工作时间 24 h 或间歇,螺旋轴转速变频可调,冲洗水 100 L/h;主体双相钢 2205 材质,厚度≥3.2 mm;本体支架为热镀锌型钢	PAM(阳离子)为 30 mg/L	新增

2 运行效果及分析

该水处理系统至今已稳定运行 128 d,处理规模为 1 050~1 080 m³/d。实际运行参数:一体化破胶反应器脱稳时间 30 min、电压 50 V、电流 200 A;气浮装置水力停留时间 24 min、PAC 用量 200 mg/L、PAM 用量 10 mg/L;高密度斜管沉降器停留时间 2 h,投加

PAC 300 mg/L、PAM 15 mg/L、NaOH 800 mg/L。经检测,进水 SS 为 205~215 mg/L(平均为 210 mg/L),颗粒直径中值为 72~88 μm(平均为 80 μm),含油量为 352~388 mg/L(平均为 370 mg/L),COD 为 3 510~3 750 mg/L(平均为 3 630 mg/L),氨氮为 63~87 mg/L(平均为 75 mg/L),总氮为 137~169 mg/L

(平均为 153 mg/L),pH 为 6~8(平均为 7)。

一体化破胶反应器脱稳运行 30 min 后黏度降至 1.82 mPa·s,水质关键指标平均值下降至 SS 为 153 mg/L,COD 为 2 635 mg/L,含油量为 218 mg/L,破胶反应器 SS 去除率≥80%,含油量去除率≥85%。随后在高密度斜管沉降器内,通过加入 PAC(300 mg/L)、PAM(15 mg/L)、NaOH(800 mg/L)在絮凝区形成密实、均一的矾花和颗粒絮体,出水 SS<12.3 mg/L、含油量<18.7 mg/L、颗粒直径中值<6 μm、COD<1 980 mg/L、氨氮<19 mg/L、总氮<26 mg/L,关键指标 SS、含油量、颗粒直径中值均大幅降低,实现了污染物的精准化处理。超滤膜过滤出水 SS 为 2.1~8.3 mg/L(平均为 5.2 mg/L),颗粒直径中值为 1.5~3.7 μm(平均为 2.6 μm),含油量为 7.8~11.4 mg/L(平均为 9.6 mg/L),COD 为 1 320~1 684 mg/L(平均为 1 502 mg/L),氨氮为 11.6~15.6 mg/L(平均为 13.6 mg/L),总氮为 13.2~20.8 mg/L(平均为 17 mg/L),pH 为 6.4~7.5(平均为 7)。处理达标水通过注水撬

打入 LX-156 井场。改造后实际进、出水水质见表 3。

表 3 改造后实际进、出水水质
Tab.3 Actual influent and effluent quality after modification

项目	SS/ (mg· L ⁻¹)	颗粒直 径中值/ μm	含油量/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg· L ⁻¹)	氨氮/ (mg· L ⁻¹)	总氮/ (mg· L ⁻¹)	pH
进水水质	210	80	370	3 630	75	153	7
出水水质	5.2	2.6	9.6	1 502	13.6	17	7
95%覆盖率	2.1~	1.5~3.7	7.8~11.4	1 320~	11.6~	13.2~	6.4~
出水水质	8.3			1 684	15.6	20.8	7.5
出水标准	≤10	≤4	≤30	<2 300	<28	<34	6~7.5

3 成本分析

临兴中区 LX-156 水处理站扩容改造工程总投资为 1 340 万元,其中工程费用为 997 万元。运维成本主要包括电费、药剂费、人工费、污泥处置费及其他费用。

稳定运行期间处理成本分析见表 4。

表 4 临兴中区 LX-156 水处理站运行成本分析
Tab.4 Analysis of operating costs for LX-156 water treatment station in Linxing Central District

项目	改造后费用计算依据	改造后成本/(元·m ⁻³)	改造前费用计算依据	改造前成本/(元·m ⁻³)
药剂费	NaOH、HCl、PAC、PAM(阴离子)、PAM(阳离子)、破胶剂	3.92	NaOH、HCl、PAC、PAM(阴离子)、PAM(阳离子)	2.78
污泥处置费	污泥量 3 620 kg/d	1.20	污泥量 1 737 kg/d	0.58
电费	装机运行功率 512 kW,电价 0.5 元/(kW·h)	5.69	装机运行功率 312 kW,电价 0.5 元/(kW·h)	7.8
检测费	委托第三方进行水质检测,频率为 1 次/月	0.80	委托第三方进行水质检测,频率为 1 次/月	1.8
人工费	定员 6 人,工资 8 000 元/(人·月)	1.48	定员 4 人,8 000 元/(人·月)	2.22
备品备件费	破胶装置电极配件、注水撬柱塞、滤芯、斜管填料、配件及耗材等	22.30	注水撬柱塞、滤芯、配件及耗材等	18.32
设备折旧费	BOO 项目,根据平均年限法计算固定资产折旧费(1 340 万元,3 年折旧)	11.33	BOO 项目,根据平均年限法计算固定资产折旧费(980 万元,3 年折旧)	18.64
合计		46.72		52.14

由表 4 可知,改造后设备投资、药剂投加种类,运维人员数量以及备品备件方面发生了变化,综合考虑设备折旧费和水处理站规模,煤层气生产废水(压裂返排液及生产水)富水期为 3 年,3~5 年为衰减期,5 年后为枯竭期,进而按照 3 年折旧考虑,3 年后停产整体场站迁址其他区块。处理水量从 480 m³/d 提升至 1 080 m³/d,折旧期过后,吨水成本较改造前降低 10%。国内其他气田附属水处理站处理成本

为 42.74~88.50 元/m³。综上所述,本次改造后的临兴中区 LX-156 水处理站运行成本较低,在油气田水处理方面具有一定的参考价值。

4 结论

临兴中区 LX-156 水处理站扩容改造充分考虑压裂返排液和生产水水质特点,通过经济技术比选,采用“预处理/一体化破胶/涡凹气浮/高密度沉降/保安过滤/精细过滤”耦合工艺,实现污染物精准

化处理,吨水成本平均为46.72元/m³,低于同行业其他水处理站运行成本平均水平。出水关键指标含油量≤30 mg/L,SS≤10 mg/L,颗粒直径中值≤4 μm,满足《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》(SY/T 5329—2012)的高渗透率油层回注水水质要求。该改造工程施工周期短,采用一体化撬装设备进行原位扩容,占地面积<2 500 m²,处理规模稳定在1 050~1 080 m³/d之间,共计处理回注达标水125 435 m³。该改造工程可为类似气田生产水和压裂返排液处理回注提供参考。

参考文献:

- [1] 黄伟,张弛,袁进,等.致密气采出水回注处置技术探讨[J].应用化工,2022,51(5):1413-1417.
HUANG Wei,ZHANG Chi,YUAN Jin, *et al.* Discussion on the reinjection disposal of tight gas produced water [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(5): 1413-1417 (in Chinese).
- [2] 刘建忠,朱光辉,刘彦成,等.鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探突破及未来面临的挑战与对策——以临兴—神府区块为例[J].石油学报,2023,44(11):1827-1839.
LIU Jianzhong,ZHU Guanghui,LIU Yancheng, *et al.* Breakthrough, future challenges and countermeasures of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos basin: a case study of Linxing-Shenfu block [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1827-1839 (in Chinese).
- [3] 彭杰,田永刚,马军军,等.含压裂返排液采出水处理工艺优化[J].工业水处理,2022,42(5):157-162,175.
PENG Jie, TIAN Yonggang, MA Junjun, *et al.* Optimization of produced water containing fracturing flowback fluid treatment process [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(5): 157-162, 175 (in Chinese).
- [4] 梁竞文,金鑫,姚卓迪,等.油气田压裂废液的臭氧气浮深度处理与资源化利用特性[J].给水排水,2021,47(5):78-85.
LIANG Jingwen, JIN Xin, YAO Zhuodi, *et al.* Characteristics of ozone flotation advanced treatment and resource utilization of oil and gas field fracturing wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 78-85 (in Chinese).
- [5] 苏三宝,尚红超,李春红,等.臭氧催化氧化/BAF深度处理高含硫气田采出水[J].中国给水排水,2023,39(17):106-112.
SU Sanbao, SHANG Hongchao, LI Chunhong, *et al.* Catalytic ozonation/biological aerated filter combined process for advanced treatment of effluent from high sour gas field [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 106-112 (in Chinese).
- [6] 罗臻,张晓飞,张华,等.页岩气压裂返排液电化学处理现场试验研究[J].工业水处理,2022,42(10):118-124.
LUO Zhen, ZHANG Xiaofei, ZHANG Hua, *et al.* Field test research on electrochemical treatment of shale gas fracturing flowback fluid [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(10): 118-124 (in Chinese).

作者简介:许跃(1984—),男,天津人,大学本科,中级工程师,主要研究方向为油气田生产水及压裂返排液处理。

E-mail:xuyue5@cnoc.com.cn

收稿日期:2023-12-27

修回日期:2024-02-04

(编辑:衣春敏)

全面推进美丽中国建设