

防垢反相破乳剂在聚合物驱采出液处理中的应用

刘文杰^{1,2*}, 吴迪^{1,2}, 薛强¹, 乔福璐³, 古文革^{1,2}, 李颖慧¹

- (1. 大庆油田设计院有限公司, 黑龙江 大庆 163712;
2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163712;
3. 大庆油田有限责任公司第一采油厂, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:通过高效反相破乳剂和水质稳定剂的复合研制了集反相破乳、防垢、抑制新生矿物颗粒生成功能于一体的防垢反相破乳剂 FSP-2101。实验在大庆油田聚中 312 转油污水站掺水炉进水中以 11~16 mg/L 加药量, 替代现场在用的反相破乳剂、阻垢剂和絮凝剂, 在综合药剂处理费用持平的情况下, 显著改善了该站聚合物驱采出液的油水分离效果, 油岗外输水含油量和悬浮固体含量分别从实验前的 257 mg/L 和 20 mg/L 降低至 33 mg/L 和 11 mg/L, 达到了水岗滤前水的水质控制指标; 水岗沉降工艺出水含油量和悬浮固体含量分别从实验前的 28 mg/L 和 13 mg/L 降低到 10 mg/L 和 10 mg/L, 达到 20 mg/L 的含聚合物采出水回注高渗透率油藏含油量和悬浮固体含量控制指标。此外, 水岗进水水质的改善还使采出水处理过程中的污油泥产生量降低了 87%。

关键词:防垢剂; 反相破乳剂; 聚合物驱; 采出液; 采出水

中图分类号: TE869

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)06-0224-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.06.038

Application of anti-scaling reverse demulsifier in treatment of polymer flooding produced fluid

LIU Wen-jie^{1,2*}, WU Di^{1,2}, XUE Qiang¹, QIAO Fu-lu³, GU Wen-ge^{1,2}, LI Ying-hui¹

- (1. Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing 163712, China;
2. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing 163712, China;
3. No.1 Oil Extraction Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing 163712, China)

Abstract: FSP-2101, a kind of anti-scaling reverse demulsifier that integrates the functions of reverse phase demulsification, scale prevention, and inhibition of new mineral particle formation, is developed through combining high-efficiency reverse demulsifier and water quality stabilizer. In a spot experiment, FSP-2101 is added with a concentration of 11 mg/L to 16 mg/L into the water feeding heater of the JUZHONG312 station, instead of demulsifier, scale inhibitor and flocculant added before. As the treatment cost of FSP-2101 remains the same as that of the original agents, the oil/water separation effect is greatly improved. The contents of oil and suspended solids in export water at the oil post of the station decrease from 257 mg/L and 20 mg/L to 33 mg/L and 11 mg/L, respectively, meeting the standards. The contents of oil and suspended solids in export water at the water post of the station decrease from 28 mg/L and 13 mg/L to 10 mg/L and 10 mg/L, respectively, achieving the standard that the contents of oil and suspended solids in produced water for reinjection into high permeability reservoir must be lower than 20 mg/L. In addition, the improvement of the inlet water quality at the water post of the station also helps reduce the output of sludge in the produced water treatment process by 87%.

Key words: scale inhibitor; reverse demulsifier; polymer flooding; produced liquid; produced water

上世纪 90 年代聚合物驱油技术开始大规模推广应用, 成为老区油田提高采收率的主要手段, 如大庆油田截至 2023 年底, 应用第一代驱油用聚合物, 动用地质储量 11.64×10^8 t, 累计产油 2.41×10^8 t, 增油 1.53×10^8 t^[1]。与常规水驱采出液和采出水相比, 聚合物驱采出液和采出水具有水相黏度高、油水乳化严重、携带悬浮固体颗粒物能力强、油滴和悬浮

固体颗粒稳定性好、上浮或下沉阻力大、油水分离缓慢、化学处理药剂用量大等特点^[2]。

大庆油田聚合驱采出水处理工艺通常为两级沉降—一级压力过滤处理工艺或两级沉降—两级压力过滤处理工艺^[3-4]。过滤器在应用一段时间后滤料会截留大量原油、混凝絮体、固体杂质颗粒和滋生的细菌及其代谢产物^[5], 积累到一定量时严重堵塞滤

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2025-03-31

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项“中高渗油田特高含水期大幅度提高采收率技术研究”(2023ZZ22)

作者简介: 刘文杰(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事油田地面工程化学剂研究工作, 通讯联系人, liuwj_dod@petrochina.com.cn。

料,造成过滤效果下降。一般采用滤后水反冲洗掉滤料截留物使其再生,因此在过滤器反冲洗回收排水中含有大量碱土金属碳酸盐、硫化亚铁等颗粒物、细菌及其代谢产物和原油等污染物。回收的反冲洗排水一般回掺到水处理系统来水中,造成沉降罐工艺段进水水质恶化,处理负荷升高,增加了处理难度,使得沉降效果变差,过滤器进水水质恶化,滤料污染加重。通常采用加大沉降段处理药剂用量、提高反冲洗频率和温度,或者在反冲洗水中投加滤料清洗剂等手段来解决滤料污染问题,滤料严重污染时还采取更换滤料等非常规手段,在增加处理成本的同时还影响正常生产运行^[6-7]。

目前国外油田采出水处理的工艺技术致力于采出水中除油、除悬浮固体、除砂、除可溶性有机物等。物理处理工艺除常规重力沉降、水力旋流分离、气浮外,膜滤/微孔膜滤(MF)、陶瓷膜过滤、超滤(UF)、反渗透(RO)、纳滤(NF)、活性炭吸附等也有研究和应用。热力处理工艺有多级闪蒸(NSF)、多重蒸馏(MED)、蒸汽压缩蒸馏(VCD)、冻融蒸发(FTE)等;化学处理工艺有高级氧化技术、电化学方法(电絮凝、电气浮、电渗析)。此外还有微生物处理工艺等^[8]。聚合物采出液和采出水处理的化学药剂主要有破乳剂、氧化剂和絮凝剂。投加破乳剂是缩短油水分离沉降时间的有效手段,目前国内外已经研发多种针对油包水型和水包油型的破乳剂,包括无机盐类破乳剂、阳离子性破乳剂、胺类破乳剂和聚醚类破乳剂等^[9],破乳剂的研发目标往往集中于特定乳化油的分离,较少兼顾采出水中残余油和悬浮固体颗粒的去除。吴迪等^[10]研制的油水分离化学剂在浮选工艺情况下实现了针对聚合物含油污水的油水有效分离及悬浮固体颗粒的去除。氧化剂可以有效分解化学驱采出水中的复杂有机物,包括各种油类污染物和残余驱油剂;絮凝剂主要作用机理为电性中和、吸附架桥、网捕卷扫等。根据不同水质和处理需求选择一种或多种上述工艺药剂联合应用,但是存在处理成本高、装置对来水介质成分要求高或处理工艺复杂、流程长、工艺设备管理要求高等问题,阳离子絮凝剂特别是含HPAM采出水的絮凝污泥,不但污泥量大,而且脱水困难、难以降解^[11-12]。

本文针对聚合物驱采出液和采出水中含有大量难以沉降分离,且难以通过颗粒滤料滤除的细小油珠和新生矿物颗粒的特点,将高效反相破乳剂和水质稳定剂复合,研制了集反相破乳、防垢、抑制新生

矿物颗粒生成功能于一体的防垢反相破乳剂FSP-2101,替代目前聚合物驱采出液和采出水处理用的破乳剂、阻垢剂和絮凝剂。防垢反相破乳剂FSP-2101可抑制采出水中碱土金属碳酸盐微粒析出,降低采出水中难以滤除的微小悬浮固体颗粒,减少由固体颗粒稳定的油水乳状液,具有促进采出水中油滴聚并、提高油水分离的功能;同时将加药点前移到转油放水站和转油站掺水加热炉进口,充分利用采出流体集输过程管线中液体动力振荡混合,促进油滴相互聚结,实现端点药剂投加管道破乳,进一步改善采出液油水分离效果。通过改善油岗外输水水质,尽量降低采出水处理设施进水中的含油量和油水乳化程度,降低细小的新生固体颗粒物含量,从而改善水处理工艺沉降段出水水质,实现经沉降后采出水达到回注水质指标的目的^[13-15]。

1 防垢反相破乳剂室内评价

1.1 实验介质

实验介质为不含破乳剂、防垢剂的聚中312站油岗外输液和聚中312站油岗外输液分离的采出水。

1.2 评价方法

1.2.1 采出液油水分离特性评价

现场取外输液1 L(停加破乳剂和阻垢剂16 h以上),在若干个分别投加了不同剂量防垢反相破乳剂FSP-2101的150 mL配方瓶中加入100 mL外输液,上下手振100次后,在40℃水浴中沉降30 min。沉降结束后,上下颠倒2次并再次静置60 s,用注射器从配方瓶底部抽取约50 mL水样,测定其含油量。

1.2.2 采出水油水分离特性评价

用8个1 L玻璃细口瓶(分为两组,一组预先加入防垢反相破乳剂FSP-2101,另一组未加)现场接取油岗外输液(停加破乳剂和阻垢剂16 h以上)各1 L,上下手振100次后,在40℃水浴中沉降30 min,抽取同组中的4个1 L取样瓶底部的游离水共3 000 mL,转移至3 L玻璃瓶中,上下颠倒20次混合均匀。将3 L玻璃瓶置于35℃水浴中静置8 h,用注射器抽取底水约50 mL,测定其含油量;另抽取约500 mL水样,用台式颗粒滤料过滤装置进行过滤(滤柱从下向上依次填装填充6 mL粒径为0.25~0.5 mm的磁铁矿滤料+6 mL粒径为0.5~0.8 mm的石英砂滤料)^[16-17],并测试过滤后水样的含油量和悬浮固体含量。

1.2.3 采出水新生矿物颗粒抑制效果评价

取采出液样品置于室温下静置 24 h 后分离出分离采出水,将分离出的水样用平均孔径为 0.45 μm 的纤维膜过滤。取若干个 500 mL 塑料测试瓶,依次加入不同量防垢反相破乳剂和 300 mL 膜滤后的水样,手振 100 次后放入烘箱中在 55 $^{\circ}\text{C}$ 下老化 8 h。将塑料瓶置于超声波水浴中,将附着在瓶壁上的析出物振落,摇匀并测定老化后水样的悬浮固体含量。其中,空白水样在老化保温后测量的悬浮固体含量为新生矿物颗粒含量;空白水样与加药水样老化后测得的悬浮固体含量差值占前者的百分比,为评价不同药剂加药量下新生矿物颗粒的抑制率。

1.3 防垢反相破乳剂的评价结果

针对大庆油田第一采油厂聚中 312 转油污水站外输高含水采出液,室内进行了投加药剂前后的采出液和分离采出水相分离特性测试,并以此来评价药剂的处理效果。聚中 312 站油岗外输液投加不同剂量防垢反相破乳剂 FSP-2101 的油水分离效果见表 1。

表 1 FSP-2101 对聚中 312 转油污水站外输采出液的油水分离效果

加药量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0	10	15	20
30 min 水相乳化油量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2246	142	139	75

从表 1 可见,防垢破乳剂 FSP-2101 对聚中 312 站外输聚驱采出液具有良好的油水分离效果,在加药量 20 mg/L 情况下,经过 30 min 沉降后水相乳化油量由空白的 2 246 mg/L 降低至 75 mg/L 。

1.4 采出水油水分离特性评价

投加防垢反相破乳剂 FSP-2101 的聚中 312 站油岗外输液分离采出水的相分离特性结果见表 2。

表 2 FSP-2101 对聚中 312 站聚合物驱采出液分离采出水相分离特性的影响

加药情况	沉降 8 h		沉降 8 h+颗粒滤料过滤		
	含油量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	悬浮固体 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	含油量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	悬浮固体 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	滤速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
空白	612	113	109	12	7.84
加药 15 mg/L	60	26	19	11	7.59

从表 2 可见,防垢反相破乳剂 FSP-2101 对聚中 312 站聚驱采出液中分离出的采出水的相分离特

性改善效果显著。在加药量 15 mg/L 的条件下,分离采出水静置沉降 8 h 后的含油量由 612 mg/L 降低至 60 mg/L ,悬浮固体含量由 113 mg/L 降低至 26 mg/L ;加药水样再经台式深床过滤装置过滤后,含油量和悬浮固体含量均低于 20 mg/L 的含聚合物驱采出水回注高渗透率油藏的控制指标。

1.5 采出水新生矿物颗粒抑制效果评价

防垢反相破乳剂 FSP-2101 对聚中 312 站聚驱采出液分离采出水新生矿物颗粒抑制效果见表 3。

表 3 FSP-2101 对聚中 312 站聚合物驱采出液分离采出水新生矿物微粒析出的抑制效果

加药量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	悬浮固体含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	新生矿物微粒 抑制率/%
0	113.3	—
10	43.3	61.8
15	26.0	77.0
20	16.0	85.9

从表 3 可见,防垢反相破乳剂 FSP-2101 对聚中 312 聚驱采出水的的新生矿物颗粒生成抑制效果较好,在加药量 15 mg/L 的条件下,新生矿物颗粒抑制率可达 77.0%,在加药量 20 mg/L 的条件下,新生矿物颗粒抑制率可达 85.9%。

2 防垢反相破乳剂在聚中 312 转油污水站采出液和采出水处理中的应用效果

大庆油田第一采油厂聚中 312 转油污水站来液包括水驱和聚驱两部分,分别进入单独的三相分离器进行处理:水驱系统的来液量约为 3 600 m^3/d ,掺水为水驱来液三相分离器放水,约 800 m^3/d ,水驱放水外输至中 306 污水站处理;聚驱系统来液(含掺水)约为 10 300 m^3/d ,聚驱系统的掺水同样为水驱来液三相分离器放水,约 1 700 m^3/d ,聚驱系统的放水经本站转油放水岗沉降罐后进入本站水处理岗处理。采出水处理工艺为二级沉降+一级过滤,来水量约为 11 000 m^3/d ,采出水处理指标为外输水中含油量 ≤ 20 mg/L 、悬浮固体含量 ≤ 20 mg/L 。水驱和聚驱三相分离器出油合并外输至中十六联进行脱水处理。现场实验前,聚中 312 转油污水站水驱系统在掺水中投加防垢剂 12.5 kg/d ,在来液汇管处投加破乳剂 50 kg/d ;聚驱系统在来液汇管处投加破乳剂 200 kg/d ,水处理岗在沉降罐进水中投加干粉絮凝剂 5.5~10 kg/d 。现场实验期间,聚中 312 转油

污水站聚合物驱采出水中聚合物含量为 347 mg/L, 现场运行设备和工艺参数见表 4 和表 5。现场实验期间, 聚中 312 转油污水站停加现场原来应用的破乳剂、阻垢剂和絮凝剂, 仅在采出液处理系统的掺水中投加防垢反相破乳剂 FSP-2101, 初始加药量为 16 mg/L, 现场处理效果平稳后加药量优化至 11 mg/L, 现场实验期间聚中 312 转油污水站处理工艺流程图及防垢反相破乳剂加药点见图 1。

表 4 FSP-2101 现场应用期间聚中 312 站主要在用分离设备

设备	规格	数量
水驱三相分离器	φ4 m×16 m	2
聚驱三相分离器	φ4 m×18 m	3, 运行 2 台
水驱缓冲罐	φ3 m×9.6 m	1
聚驱沉降罐	φ18.21 m×12.5 m	1
一次沉降罐	φ34 m×13.74 m	2
二次沉降罐	φ24 m×13.74 m	2
一次过滤罐	φ4 m×7 m	10

表 5 防垢反相破乳剂现场应用期间聚中 312 站主要油水处理工艺参数

工艺参数	数值
平均水驱来液量/(m ³ ·d ⁻¹)	3600
平均聚驱系统来液(含掺水)/(m ³ ·d ⁻¹)	10300
平均外输液量/(m ³ ·d ⁻¹)	2358
平均水驱外输水量/(m ³ ·d ⁻¹)	849
平均聚驱外输水量/(m ³ ·d ⁻¹)	8636
平均水驱掺水量/(m ³ ·d ⁻¹)	800
平均聚驱掺水量/(m ³ ·d ⁻¹)	1700
平均掺水总量/(m ³ ·d ⁻¹)	2362
掺水温度/℃	44~57
掺水悬浮固体含量(总)/(mg·L ⁻¹)	6.0
掺水悬浮固体含量(EDTA 可溶)/(mg·L ⁻¹)	2.0
掺水悬浮固体含量(EDTA 不可溶)/(mg·L ⁻¹)	4.0
平均水岗处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	11000
平均过滤罐反冲洗水量/(m ³ ·d ⁻¹)	766

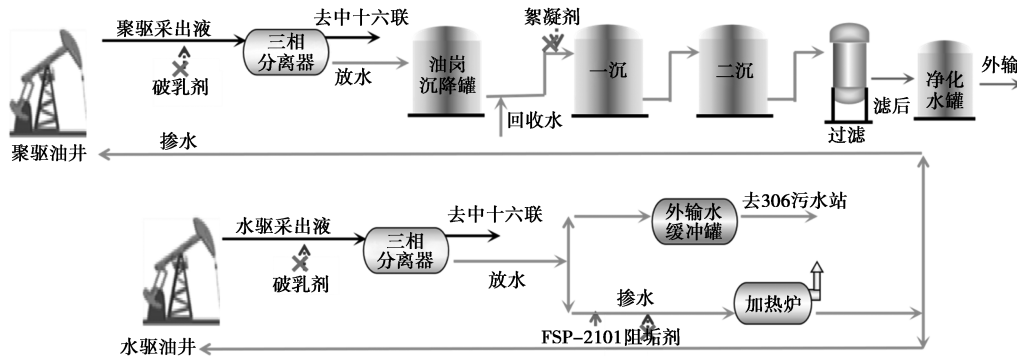


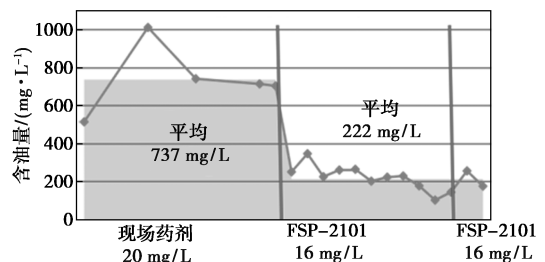
图 1 聚中 312 站现场实验期间工艺流程及防垢反相破乳剂加药点示意图

现场实验期间, 将防垢反相破乳剂加药点提前至掺水加热炉入口, 药剂随掺水送至井口, 一方面利用井口至聚中 312 站管道中的流场作用和停留时间, 充分利用药剂对采出液中油滴的聚并能力, 改善采出液的油水分离效果; 另一方面, 防垢反相破乳剂中的螯合剂成分具有抑制碱土金属碳酸盐析出、降低采出水中难以过滤去除的细小悬浮固体含量的作用, 在井口采出液汇聚前端应用防垢反相破乳剂还同时具有降低采出液中悬浮固体含量和抑制油滴表面吸附的细小悬浮固体颗粒、阻碍油珠相互聚并的功能。

油岗三相分离器放水、油岗沉降罐放水、水处理岗滤前水和外输水含油量变化见图 2; 油岗掺水、油岗沉降罐放水、水处理岗滤前水和外输水悬浮固体

含量变化见图 3。

由图 2 可见, 三相分离器放水含油量由平均 737 mg/L 降低到平均 222 mg/L, 达到 500 mg/L 的转油放水岗外输水含油量控制指标; 油岗沉降罐放水的含油量由平均 257 mg/L 降低到平均 33 mg/L, 达到 50 mg/L 的水处理岗滤前水含油量控制指标;



(a) 三相分离器放水

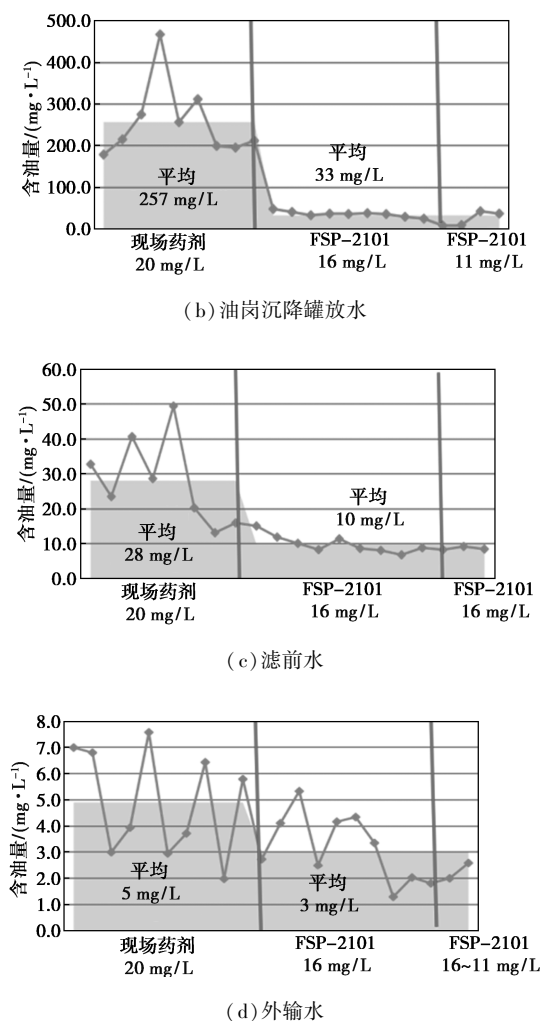


图 2 投加 FSP-2101 前后聚中 312 站各工艺点采出水含油量变化情况

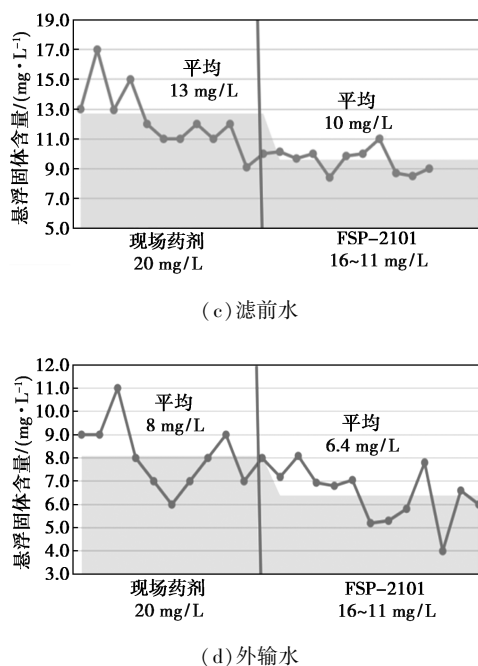
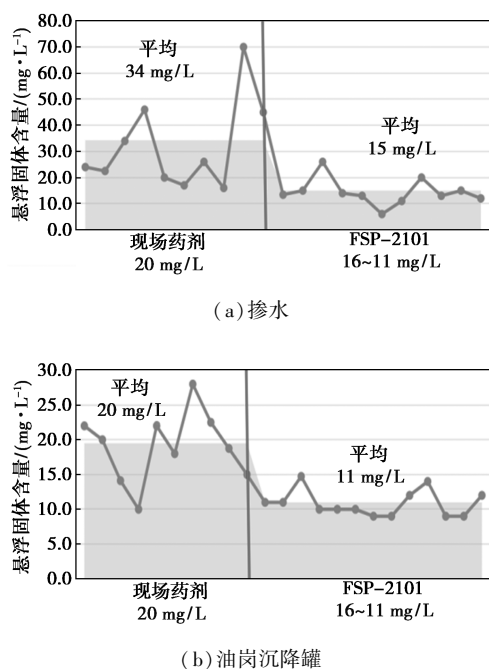


图 3 投加 FSP-2101 前后聚中 312 站各工艺点采出水悬浮固体含量变化情况

水处理岗滤前水含油量由平均 28 mg/L 降低到平均 10 mg/L, 达到 20 mg/L 的含聚合物采出水回注高渗透率油藏含油量控制指标。由图 3 可见, 转油放水岗沉降罐放水悬浮固体含量由平均 20 mg/L 降低到平均 11 mg/L, 达到含聚合物采出水回注高渗透率油藏悬浮固体含量控制指标。通过在掺水中投加防垢反相破乳剂, 采出水处理仅经过沉降工艺, 不需要过滤工艺就实现了采出水处理达标。

由于应用防垢反相破乳剂后聚中 312 转油污水站各工艺点处的采出水中含油量、悬浮固体含量均有明显下降, 水质得到有效改善, 尤其是油岗外输水含油量和悬浮固体含量的下降使得沉降和过滤工艺从采出水中分离出的油和机械杂质量也大幅度下降, 水处理过程中的油污和污泥产生量也随之大幅度下降。由油岗沉降罐和过滤器进出水含油量和悬浮固体含量差值估算的水处理过程中产生油污泥量降低情况见表 6。

由表 6 中数据可知, 聚中 312 转油污水站沉降段的进出水含油量和悬浮固体含量差值由实验前的 236 mg/L 降低至实验期间的 24 mg/L, 油污泥产生量减少接近 90%; 过滤器截留的原油及悬浮固体含量由实验前的 28 mg/L 降低至实验期间的 10 mg/L, 油污泥产生量减少了 64% 以上, 按水岗沉降工艺和过滤段进出水含油量、悬浮固体含量差值计算的油污泥产生量减少了 87%。

表6 投加 FSP-2101 前后聚中 312 转油污水站
含油量与悬浮固体含量差值

监测点	监测项目	原药剂	FSP-2101
油岗沉降	平均含油量/(mg·L ⁻¹)	257	33
	平均悬浮固体含量/(mg·L ⁻¹)	20	11
罐出水	含油量和悬浮固体减少量之和/ (mg·L ⁻¹)	277	44
	平均含油量/(mg·L ⁻¹)	28	10
滤前水	平均悬浮固体含量/(mg·L ⁻¹)	13	10
	含油量和悬浮固体减少量之和/ (mg·L ⁻¹)	41	20
	平均含油量/(mg·L ⁻¹)	5	3
滤后水	平均悬浮固体含量/(mg·L ⁻¹)	8	7
	含油量和悬浮固体减少量之和/ (mg·L ⁻¹)	13	10
	油岗放水至滤前水含油量和悬浮固体减少量/ (mg·L ⁻¹)	236	24
沉降段污油污泥减少率/%	90		
滤前至滤后水含油量和悬浮固体减少量/ (mg·L ⁻¹)	28	10	
过滤段污油污泥减少率/%	64		
水处理过程整体污油污泥减少总量/%	87		

综上所述,用防垢反相破乳剂 FSP-2101 代替聚中 312 站在用的破乳剂、防垢剂和絮凝剂,并将加药点提前至掺水加热炉入口,提高了采出水油水分离效果,使得转油放水岗沉降工艺段放水可达到水处理岗过滤前水指标,水处理岗沉降工艺段出水可达到滤后水指标。采出水处理工艺整体前移了一段,在沉降段达到采出水处理指标,为在停运过滤工艺情况下实现双“20”的聚合物驱采出水处理指标提供了技术依据。不运行过滤器,将不会产生过滤器反冲洗排水,因此可避免因回掺过滤器反冲洗排水而增大采出水处理系统来水水量,从而减小采出水处理系统负荷;此外,不运行过滤器,还可避免因运行过滤增压泵和反冲洗泵等配套设备产生的能耗和维护费用。以聚中 312 站两级沉降+一级过滤处理采出水达到双“20”指标计算,水处理运行用电量可由 0.701 元/m³ 降至 0.272 元/m³,降低幅度为 61.2%。

3 结论

应用防垢反相破乳剂降低了采出水处理系统来水的含油量和悬浮固体含量,采出水沉降段的来水水质得到改善,按水岗沉降工艺和过滤段进出水含油量、悬浮固体含量差值计算的污油泥产生量减少了 87%,实现了采出水处理绿色清洁运行。

参考文献

- [1] 伍晓林,侯兆伟,王海峰,等.大庆油田化学驱油体系研究现状及发展方向[J].大庆石油地质与开发,2024,43(8):137-144.
- [2] 吴迪.化学驱采出液破乳剂的研究和应用进展[J].精细化工,2009,26(1):82-93.
- [3] 石油工程建设专业标准化委员会设计分委.GB 50482—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [4] 陈忠喜,舒志明.大庆油田采出水处理工艺及技术[J].工业用水与废水,2014,45(1):36-40.
- [5] 吴迪,彭柏群,孟祥春,等.采出液和采出水处理设施内油污的形成和稳定机制[J].精细与专用化学品,2012,20(11):30-36.
- [6] 孔侨.浅谈油田污水处理技术发展及现状[J].化工管理,2019,(10):200-201.
- [7] 徐建,杨晓存,邓建欣.油田污水处理质量提升的滤料清洗方法创新与实践[J].石油工业技术监督,2017,33(11):57-61.
- [8] Igundu E, Chen Z G. Produced water treatment technologies[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9: 157-177.
- [9] Sousa A M, Pereira M J, Matos H A. Oil-in-water and water-in-oil emulsions formation and demulsification[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 210: 110041.
- [10] 吴迪,王瑞泉,孟祥春,等.聚合物驱采出液和含油污水油水分离化学剂的研制[J].精细化工,2002,19(8):80-82.
- [11] 陈宏,邓征宇,宫兆波,等.化学驱油田采出水处理技术的研究进展[J].环境科学与技术,2017,40(5):95-101.
- [12] Faisal W, Almomani F. A critical review of the development and demulsification processes applied for oil recovery from oil in water emulsions[J]. Chemosphere, 2022, 291: 133099.
- [13] 薛强,吴迪,赵露,等.防垢反相破乳剂的研制与应用[J].精细与专用化学品,2023,31(12):58-63.
- [14] 吴迪,李建亮.化学驱采出水回注处理工艺技术进展[J].油田化学,2009,26(2):222-226.
- [15] 杨守国.管道破乳及防腐技术现场应用研究[J].油气田地面工程,2003,22(10):4-5.
- [16] 吴迪,王狮,赵凤玲,等.石油磺酸盐表面活性剂弱碱体系三元复合驱采出水的显微结构和油水分离特性[J].精细与专用化学品,2015,23(8):27-33.
- [17] 中国石油天然气股份有限公司.一种新的油田采出水用絮凝剂评价方法及其采用的过滤装置:ZL 201710928515.1[P].2017-10-09.■