

页岩气压裂返排液处理效果影响因素研究

周洪涛¹ 张裕良¹ 罗凯² 蒋一欣² 刘源¹ 冀文雄¹ 吕奉章¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院; 2. 中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司西南采气厂)

摘 要 以昭通页岩气示范区的 A、B 两种类型压裂返排液为研究对象,研究和优选了适用于压裂返排液的混凝剂和促凝剂,并考察了温度、沉降时间、pH 值及表面活性剂对 SS(固体悬浮物)去除效果的影响,为工程应用提供了较好的指导。结果表明:聚合氯化铝与聚丙烯酰胺 1 600 对两种类型压裂返排液均有良好的絮凝效果,对 A 型压裂返排液:聚合氯化铝和聚丙烯酰胺 1 600 浓度分别为 400 mg/L 和 4 mg/L、温度为 25 ℃、pH 值为 6~8、沉降 30 min,SS 去除率为 98%;对 B 型压裂返排液:聚合氯化铝和聚丙烯酰胺 1 600 浓度分别为 480 mg/L 和 12 mg/L、温度为 25 ℃、pH 值为 6.5~8、沉降 30 min,SS 去除率为 97%。细菌含量对压裂返排液 SS 去除率无显著影响。4 种类型表面活性剂对絮凝效果的影响大小排序为:阴离子>非离子>两性≈阳离子。

关键词 页岩气; 压裂返排液; SS; 混凝剂; 助凝剂; 表面活性剂

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.06.007

文章编号:1005-3158(2019)06-0028-06

0 引 言

昭通国家级页岩气示范区是中国第三个在页岩气勘探、开发领域取得重大突破的地区^[1]。随着该区块页岩气开发的不断深入,产生了大量的压裂返排液^[2]。压裂返排液具有腐蚀性强、矿化度高、固体悬浮物含量高、细菌含量高等特点^[3-4],若不及时处理,将对环境造成严重污染,影响页岩气开发的正常进行。因此,研究压裂返排液的后处理问题意义重大^[5-8]。

压裂返排液作为一种油田废水,其处理过程可以借鉴油田对常规生产废水的处理过程。目前,油田主要依靠絮凝沉淀法处理生产中的各种污水^[9-13]。絮凝沉淀法处理过程中最重要的一步为絮凝过程,对絮凝过程影响最大的则是絮凝剂的优劣,因此优选效果良好的絮凝剂尤为重要^[14-15]。当前昭通示范区产生的压裂返排液固体悬浮物(SS)含量较高,水质波动较大,同时还含有大量表面活性剂,处理较为困难。因此需进行室内实验研究,确定最佳药剂种类及浓度,为现场实践提供理论依据。本实验选取 6 种混凝剂:碱式氯化铝、聚合氯化铝铁、聚合硫酸铝、聚合硫酸铝铁、聚合硅酸铝铁、聚合氯化铝和 5 种助凝剂:不同分子量的阴离子聚丙烯酰胺(600 万、1 100 万、1 600 万、1 900 万和 2 200 万),分别以该区块的两种压裂返排液:A 型、B 型作为处理对象,以 SS 去除率为评价指标,比较不同种类混凝剂和助凝剂对压裂返排液的处理效果,优选出最佳混凝剂和助凝剂,实验同时还研

究了温度、pH 值及沉降时间对絮凝效果的影响,确定了最佳絮凝条件,最后考察了细菌及不同类型表面活性剂对絮凝效果的影响。

1 实 验

1.1 废水来源及特点

实验对象:昭通示范区的压裂返排液,其压裂返排液均来自周边不同页岩气井。表 1 为当前两种压裂返排液的水质特点。

表 1 两种压裂返排液水质特点

水型	外观	矿化度/ (mg · L ⁻¹)	pH 值	细菌/ (个 · mL ⁻¹)	SS/ (mg · L ⁻¹)
A	墨黑色,泡沫较少	22 320	6.48	20 万	530
B	暗灰色,大量泡沫	20 310	7.12	110 万	156

1.2 实验仪器与试剂

实验仪器:pH 计(EST1000,深圳市伊斯特仪表有限公司)、数显控温磁力搅拌器(MPLR-702,江苏省金坛大地自动化仪器厂)、鼓风电热恒温干燥箱(DHG-9030,上海市一恒科学仪器有限公司)、电子分析天平(CP124C,常州市奥豪斯仪器有限公司)、全玻璃微孔滤膜过滤器(SPR-SF01,天津赛普瑞实验设备有限公司)、隔膜真空泵(GM-1.0A,天津市津腾实验设备有限公司)。

实验试剂:盐酸(分析纯);氢氧化钠(分析纯);6种混凝剂:碱式氯化铝(PAC,工业级)、聚合氯化铝铁(PAFC,工业级)、聚合硫酸铝(PAS,工业级)、聚合硫酸铝铁(PAFS,工业级)、聚合硅酸铝铁(PSAF,工业级)和聚合氯化铝(PAC,工业级);助凝剂为5种不同分子量的阴离子聚丙烯酰胺(PAM,工业级):600万、1100万、1600万、1900万、2200万;高效杀菌剂XJ-1(30%);阴离子表面活性剂:十二烷基苯磺酸钠(30%);阳离子表面活性剂:十六烷基三甲基溴化铵(30%);非离子表面活性剂:脂肪醇聚氧乙烯醚9(30%);两性表面活性剂:十二烷基二甲基氧化胺(30%)。其中盐酸、氢氧化钠购自国药集团化学试剂有限公司,混凝剂、助凝剂购自巩义市龙泉供水材料有限公司,表面活性剂购自山东优索化工科技有限公司。

1.3 实验方法

分析方法:依据GB 11901—1989《水质悬浮物的测定——重量法》测定页岩气压裂返排液中SS含量。

SS去除率测定方法:将体积为 V 的水样抽滤得到的滤膜在100℃烘干至恒重,记为 M_0 。取250 mL混合均匀的样品进行抽滤,使水样全部通过滤膜,以10 mL蒸馏水洗3次,将滤膜移入烘箱100℃下烘干至恒重,记为 M_1 。

SS去除率计算公式为:

$$C_0 = (M_1 - M_0) / V \quad (1)$$

$$\text{SS去除率} = C / C_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_0 为抽滤前滤膜质量,mg; M_1 为抽滤后滤膜质量,mg; V 为水样体积,L; C_0 为SS含量,mg/L; C 为添加药剂后SS含量,mg/L。

混凝剂的优选:移取250 mL压裂返排液于烧杯中,置于数显控温搅拌器上。分别加入160,240,320,400,480,560 mg/L浓度的混凝剂,转速为500 r/min,搅拌3 min,静置沉降30 min,取上层清液100 mL,测定SS含量,计算SS去除率。

助凝剂的优选:步骤同上,在加入最佳种类和浓度的混凝剂搅拌之后,立即分别加入4,8,12,16,20 mg/L浓度的助凝剂,转速为60 r/min,搅拌2 min,静置沉降30 min,取上层清液100 mL,测定SS含量,计算SS去除率。

2 结果与讨论

2.1 絮凝药剂的优选

2.1.1 混凝剂的优选

对A、B压裂返排液分别加入6种混凝剂考察对

SS去除率的影响,实验结果如图1、图2所示。

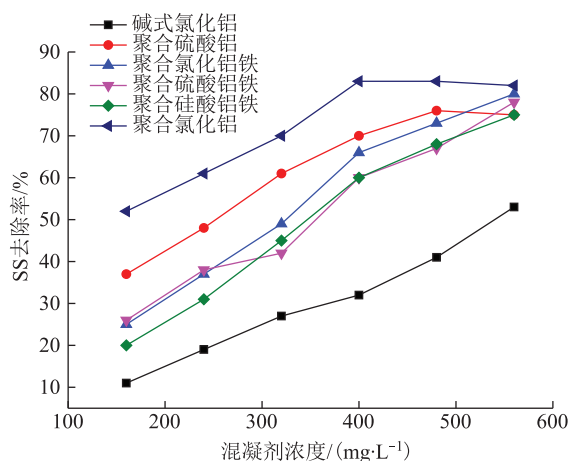


图1 不同混凝剂对A型压裂返排液SS去除率的影响

由图1可知,对A型压裂返排液,在160~560 mg/L浓度下,随着浓度的增加,6种混凝剂对SS去除率逐渐增大,其中聚合氯化铝对SS去除效果最佳,在浓度400 mg/L时混凝效果最佳,可达83%,继续增加聚合氯化铝的浓度,SS去除率无显著变化。

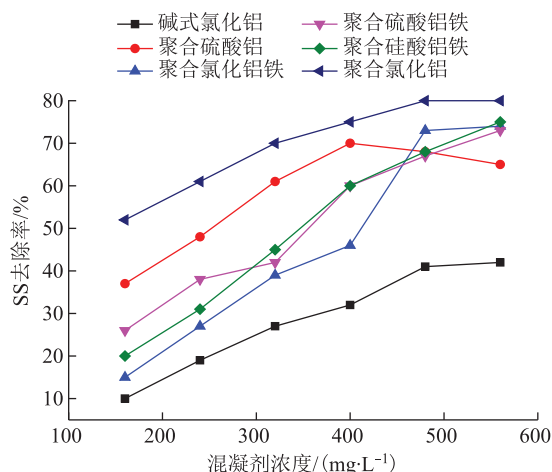


图2 不同混凝剂对B型压裂返排液SS去除率的影响

由图2可知,对B型压裂返排液,浓度为160~400 mg/L时,聚合硫酸铝的SS去除率由37%增加到70%,达到最大,继续增大聚合硫酸铝浓度,SS去除率开始下降;0~480 mg/L时,SS去除率随碱式氯化铝、聚合氯化铝铁、聚合氯化铝浓度的增大而增大,480 mg/L时SS去除率达到最大,其中聚合氯化铝的SS去除率最大达80%;SS去除率随聚合硫酸铝铁和聚合硅酸铝铁浓度的增大而增大,SS去除率分别可达73%和75%。显然聚合氯化铝的SS去除率优于其他混凝剂。

实验发现,随着聚合氯化铝的加入,水中悬浮物

微粒快速凝聚在一起,形成矾花,矾花继续凝聚形成体型更大的絮体,快速沉降。由于聚合氯化铝中 Al^{3+} 可形成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体与带负电的悬浮物相互吸附聚集,使悬浮物在短时间内快速形成矾花加速沉降。当聚合氯化铝浓度过高(A型: 400 mg/L, B型 480 mg/L)时,过多的聚合氯化铝分子同时吸附在同一个悬浮颗粒上,使悬浮颗粒被包裹起来,再次“稳定”,SS 去除率逐渐降低^[16]。

2.1.2 助凝剂的优选

在最佳聚合氯化铝浓度下,对 A、B 压裂返排液分别加入助凝剂——5 种不同分子量的阴离子 PAM,考察对 SS 去除率的影响,实验结果见图 3、图 4。

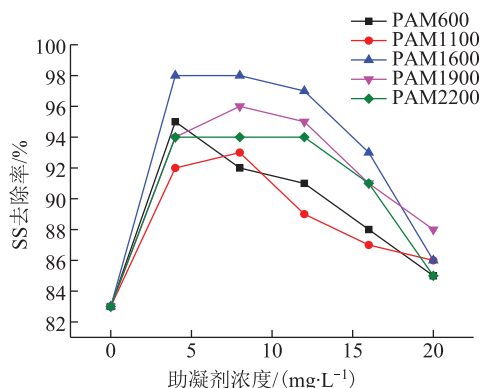


图 3 不同助凝剂对 A 型压裂返排液 SS 去除率的影响

由图 3 可知,对 A 型压裂返排液,5 种不同分子量的 PAM 在浓度为 4~8 mg/L 时,SS 去除率达到最大。其中 PAM1 600 在较低浓度 4 mg/L 时,处理效果最佳,SS 去除率达 98%。继续增加浓度,SS 去除率逐渐降低。

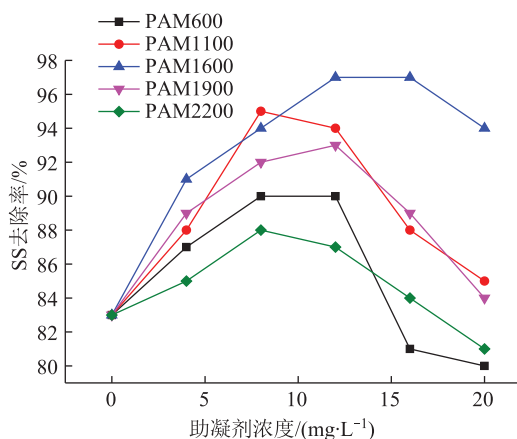


图 4 不同助凝剂对 B 型压裂返排液 SS 去除率的影响

由图 4 可知,对 B 型压裂返排液,除 PAM1 600 外其他 4 种不同分子量的 PAM 在浓度为 8~12 mg/L

时,SS 去除率达到最大,最大浓度均不超过 95%; PAM1 600 在浓度为 12~15 mg/L 时,处理效果最佳,SS 去除率达 97%。继续增加浓度,SS 去除率逐渐降低。

实验发现,PAM 加入后,水中体积较小的矾花快速凝聚在一起,体积更加紧密,沉降速度加快。PAM 兼具电性中和及架桥作用,其高分子长链可以把聚合氯化铝聚集形成的小絮体通过静电引力、范德华力及氢键力搭桥联结为更大的絮凝体,加快沉降、分离速度,当 PAM 浓度高于一定值(A型: 4 mg/L, B型: 12 mg/L)时,随着浓度的增加,胶粒表面因负荷过多的 PAM 分子而使胶粒之间斥力增大,也会出现复稳现象^[17-18]。

2.2 影响因素分析

2.2.1 温度对 SS 去除率的影响

前线生产过程全年温差较大,夏季最高温可达 30~40 °C,冬季最低温大约 0~10 °C,因此需考虑温度对 SS 去除率的影响。在最佳絮凝剂浓度下,分别设置 6 个不同的温度:10,15,25,35,45,55 °C 进行絮凝实验,实验结果见图 5。

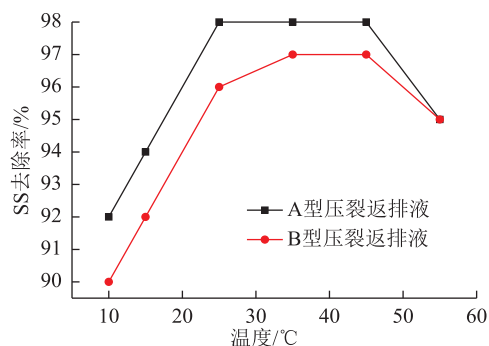


图 5 不同温度对 A、B 型压裂返排液 SS 去除率的影响

图 5 显示,温度对压裂返排液的 SS 去除率有较大影响。在 10~25 °C 时,两种压裂返排液 SS 去除率均随温度的升高而升高,两种压裂返排液在 25~45 °C 范围内保持稳定,45 °C 之后 SS 去除率逐渐降低。低温条件下,SS 热运动速度较低,随着温度的升高,热运动速度加快,碰撞聚沉的机会增多,有利于形成矾花,快速沉降。温度过高时,水中高分子链收缩,缩短了架桥长度,减弱了絮凝效果,SS 去除率降低^[19]。

2.2.2 沉降时间对 SS 去除率的影响

确定最佳沉降时间,可加快水处理效率。实验温度 25 °C,在最佳絮凝剂浓度条件下(A型:PAC, 400mg/L;PAM1 600, 4 mg/L; B型:PAC, 480 mg/L; PAM1 600, 12 mg/L),分别设置 6 个不同的沉降时

间:10,20,30,40,50,60 min 进行絮凝实验,实验结果见图 6。

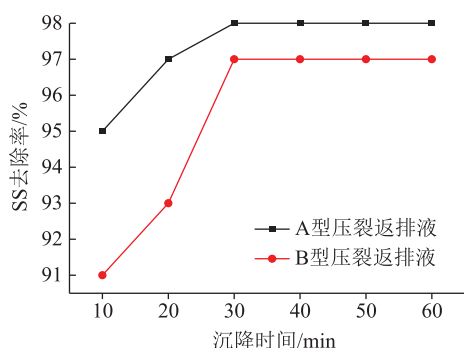


图 6 不同沉降时间对 A、B 型压裂返排液 SS 去除率的影响

图 6 结果表明,当沉降时间在 0~30 min 内,随着沉降时间的延长,A 型压裂返排液的 SS 去除率由 95% 升至 98%,B 型压裂返排液的 SS 去除率由 91% 升至 97%,30 min 后,SS 去除率基本保持不变。因此最佳沉降时间设定为 30 min。

2.2.3 pH 值对 SS 去除率的影响

溶液 pH 值影响 SS 去除率。为确定原水最佳 pH 值,在 pH 值为 5~10,每隔 0.5 进行一组实验,实验结果见图 7。

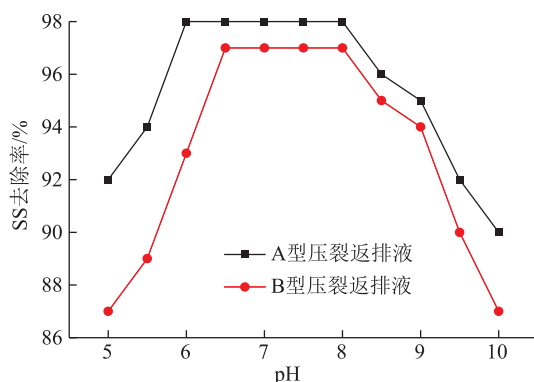


图 7 不同 pH 值对 A、B 型压裂返排液 SS 去除率的影响

由图 7 可知,对 A 型压裂返排液,pH 值为 5~6 时,随着 pH 值的升高其 SS 去除率逐渐升高,pH 值为 6~8 时,SS 去除率基本不变,pH 值大于 8 时,SS 去除率降低;对 B 型压裂返排液,pH 值为 5~6.5 时,随着 pH 值的升高,SS 去除率逐渐升高,pH 值为 6.5~8 时,SS 去除率基本不变,pH 值大于 8 时,SS 去除率逐渐降低。pH 值较低时,高浓度的 H^+ 抑制了聚丙烯酰胺中 $-COOH$ 的水解, COO^- 浓度降低,使可形成吸附架桥作用的长支链结构数量减少,SS 去除率降低;pH 值较高时,高浓度的 OH^- 抑制了聚丙烯酰胺分子中 $-NH_2$ 的水解,使具有电中和能力的

NH_4^+ 浓度降低,SS 去除率降低。根据原水 pH 值可知,无需调整 pH 值,两种压裂返排液即可达到最佳絮凝效果^[18-19]。

2.3 细菌对 SS 去除率的影响

两种压裂返排液均含大量细菌,细菌的存在可能影响水处理效果。实验通过杀菌剂来控制细菌含量,考察细菌含量对絮凝实验的影响,首先对原水分别加入不同浓度高效杀菌剂 XJ-1,控制原水的细菌含量,之后对原水进行絮凝实验,考察聚合氯化铝最佳浓度和 PAM1 600 最佳浓度的变化。实验结果见表 2 及图 8。

杀菌剂 XJ-1 对 A、B 型压裂返排液的杀菌效果见表 2。

表 2 杀菌剂 XJ-1 对 A、B 型压裂返排液的杀菌效果

杀菌剂 XJ-1 浓度/ (mg · L ⁻¹)	细菌含量/(个 · mL ⁻¹)	
	A	B
0	2.5×10^5	1.1×10^6
80	9×10^4	6×10^5
160	2.5×10^3	6×10^4
240	25	1.6×10^3
320	0	25
400	0	0

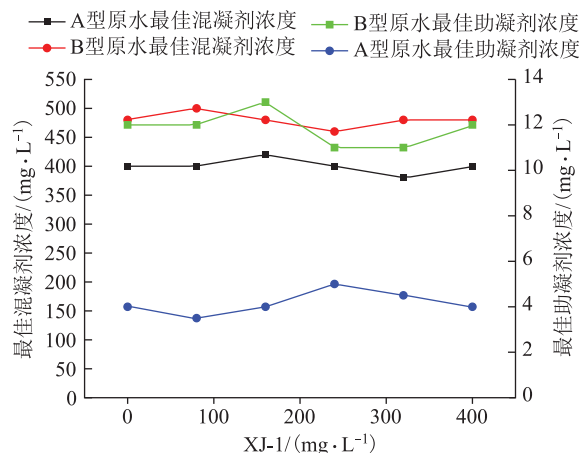


图 8 PAC+PAM1 600 絮凝体系下,添加杀菌剂控制细菌含量,对絮凝剂、助凝剂最佳处理浓度的影响

表 2 结果表明,当杀菌剂 XJ-1 浓度在 0~240 mg/L 时,A 型压裂返排液细菌含量从 2.5×10^5 个/mL 减少到 25 个/mL,当杀菌剂 XJ-1 浓度在 0~320 mg/L 时,B 型压裂返排液细菌含量从 1.1×10^6 个/mL 减少到 25 个/mL,A、B 型压裂返排液细菌含量均达到水质排放标准。当杀菌剂浓度为 400 mg/L 时,两种压裂返排液均已检测不到细菌,杀菌剂浓度可以有效控

制细菌含量。

图 8 显示了添加不同浓度杀菌剂控制细菌含量对絮凝效果的影响。随着杀菌剂浓度的不断增大,两种类型压裂返排液的最佳聚合氯化铝和 PAM1 600 浓度均不变,说明细菌含量的减少并不影响絮凝效果,细菌对 SS 去除率无显著影响。

2.4 表面活性剂对 SS 去除率的影响

历史上对含表面活性剂污水处理的研究多集中在三次采油中,即由表面活性剂驱而产生的含油污水^[20],处理温度约为 50 ℃,但对含较多表面活性剂的页岩气压裂返排液研究较少。与常规油田污水含大量原油不同,压裂返排液含油较少,常含有较高浓度的表面活性剂^[21],其表面活性剂主要来自压裂液^[22]及泡排工艺中加入的大量泡排剂^[23]。油田常用的表面活性剂主要为阴离子和非离子型^[20],压裂返排液可能含大量阴离子与非离子表面活性剂。本文研究的两种页岩气压裂返排液均含有不同浓度的表面活性剂,推测表面活性剂可能是其处理较为困难的重要原因之一。为考察不同类型表面活性剂对 SS 去除率的影响,以表面活性剂含量较少的 A 型压裂返排液为研究对象,进行絮凝实验。

不同表面活性剂对 A 型压裂返排液 SS 去除率的影响见图 9。

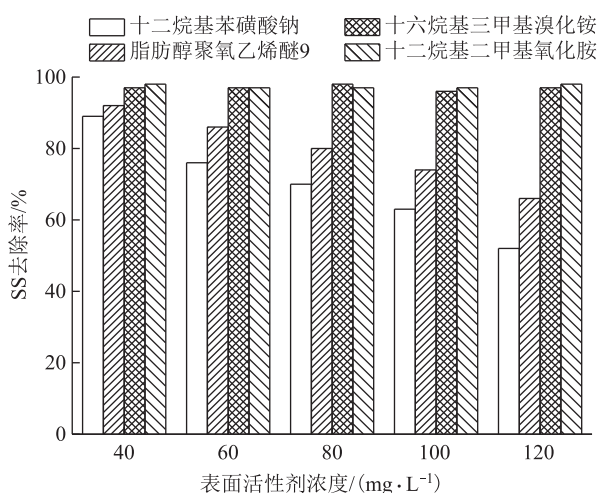


图 9 不同表面活性剂对 A 型压裂返排液 SS 去除率的影响

图 9 表明,低浓度的阴离子表面活性剂对 SS 去除率有较大影响,两性表面活性剂影响稍弱,阳离子表面活性剂及两性表面活性剂几乎无影响。表面活性剂对 SS 去除率的影响大小依次为:阴离子>非离子>两性≈阳离子。SS 颗粒表面带负电荷,阴离子表面活性剂的亲水基吸附在悬浮物表面,使其带更多负电荷,排斥位能增加,不易聚沉。同时由于吸附了

长链表面活性剂,体积增大,布朗运动减慢,碰撞机率降低,絮凝效果变差^[20]。非离子表面活性剂由于不带电荷,因此不会改变悬浮物表面的电荷分布,但由于非离子表面活性剂在悬浮物表面吸附,形成一层保护膜,阻碍悬浮物碰撞聚沉,絮凝效果变差。阳离子表面活性剂对 SS 去除率几乎无影响,当阳离子表面活性剂的亲水基吸附在悬浮物表面时,由于电中和作用,其表面电荷数降低,排斥位能降低,更易聚沉,但其表面由于吸附了长链的表面活性剂,体积增大,布朗运动减慢,碰撞聚沉机率降低,两种作用相互抵消,因此宏观上看絮凝效果几乎不受影响。两性表面活性剂在酸性条件下显阳离子性,碱性条件下显非离子性。实验条件水质 pH 值为 6~7,因此两性表面活性剂显阳离子性。从实验结果不难发现,两性表面活性剂可看作阳离子表面活性剂,对絮凝效果影响较小。

3 结 论

1)对 A 型和 B 型压裂返排液,聚合氯化铝及 PAM1 600 均为最佳的絮凝体系。对 A 型压裂返排液,聚合氯化铝浓度 400 mg/L,PAM1 600 浓度 4 mg/L,SS 去除率可达 98%。对 B 型压裂返排液,聚合氯化铝浓度 480 mg/L,PAM1 600 浓度 12 mg/L,SS 去除率可达 97%。

2)A、B 型压裂返排液最佳絮凝温度均为 25~45 ℃,最佳沉降时间为 30 min,A 型压裂返排液的最佳处理 pH 值为 6~8,B 型压裂返排液最佳处理 pH 值为 6.5~8。

3)细菌的含量对 SS 去除率无显著影响。

4)4 种类型表面活性剂对压裂返排液絮凝过程的影响大小:阴离子>非离子>两性≈阳离子。

参 考 文 献

- [1] 梁兴,王高成,张介辉,等. 昭通国家级示范区页岩气一体化高效开发模式及实践启示[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 29-37.
- [2] 魏云锦,王世彬,马倩,等. 四川盆地长宁-威远页岩气开发示范区生产废水管理[J]. 2018, 47(4): 113-119.
- [3] 杨志刚,魏彦林,吕雷,等. 页岩气压裂返排液回用处理技术研究与应用[J]. 安全与管理, 2015, 35(5): 131-137.
- [4] 吴俊奇,吴文熙,颜懿柔. 压裂返排液处理现状及难点研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(8): 12-16.
- [5] 刘文士,廖仕孟,向启贵,等. 美国页岩气压裂返排液处理技术现状及启示[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 158-162.
- [6] LOBO F L, WANG H, HUGGINS T, et al. Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC pow-

- ered electrocoagulation with biochar[J]. Journal of hazardous materials, 2016(309):180.
- [7] WEICHGREBE D, ROSENWINKEL K H. Concern and potential of flowback treatment and reuse-German approach[C]. Colorado: Conference on overcoming the technical and community challenges of hydraulic fracturing for shale gas, 2013:4-8.
- [8] 陈龙利, 何敏, 王丹, 等. 涪陵页岩气开发压裂废水的污染防治技术探讨[J]. 精细与专用化学品, 2016, 24(12): 26-31.
- [9] 丁元娜, 刘济嘉. 我国油田废水处理工艺的现状与研究进展[J]. 辽宁化工, 2014, 43(1):33-34.
- [10] 高万夫, 张华佳, 何壮. 油田污水净化处理中絮凝剂的筛选[J]. 石油石化节能与减排, 2012, 2(3):34-38.
- [11] 常启新. 涪陵页岩气钻井污水重复利用研究[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(5):95-100.
- [12] 周娟, 张海玲, 冀忠伦. 油田措施废液絮凝剂优化与应用[J]. 油气田环境保护, 2018, 28(4):26-30.
- [13] 方新磊, 李定龙, 李习伟, 等. 处理采油废水最佳絮凝剂的筛选及应用条件研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2):39-44.
- [14] 熊焕嘉, 刘峙嵘. 絮凝剂的开发及其应用进展[J]. 油气田环境保护, 2011, 21(2):30-35.
- [15] 刘振宁. 对油田污水处理絮凝剂的探究及发展[J]. 中国石油化工标准与质量, 2017, 37(6):38-39.
- [16] 杨晓凡, 孙运运, 程澍, 等. 不同水温条件下聚合氯化铝优化试验研究[J]. 吉林师范大学学报, 2018, 39(4):86-91.
- [17] 徐晓军. 化学絮凝剂作用原理[M]. 北京:科学出版社, 2005:79-82.
- [18] 张友宏, 陈萌萌, 王郑, 等. 聚合氯化铝对高浊度水源水的絮凝效果及机理研究[J]. 化工技术与开发, 2016, 45(12):39-42.
- [19] 王寅. 南阳油田含表面活性剂污水稳定性及处理方法研究[D]. 西安:西安石油大学, 2012:1-54.
- [20] 欧阳向南, 李文, 宋海巍, 等. 表面活性剂在油田污水处理中的应用及研究进展[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(1):1-4.
- [21] 张俊峰. 压裂液技术发展现状研究[J]. 化学工程与装备, 2017(9):274-275.
- [22] 杜贵君. 油田压裂返排液处理技术实验研究[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(4):55-57.
- [23] 王小彩, 姜青梅, 刘建亮, 等. 泡排采气工艺技术[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(7):49.

(收稿日期 2019-01-27)

(编辑 王薇)

(上接第27页)

5 结 论

本次应用 HJ 964—2018《环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》中推荐的预测模型, 运用 HYDRUS 软件对油田特征污染物-石油烃在包气带中的迁移建立了数学模型。通过预测可知, 在该区域内当石油烃进入包气带后, 经约 4 d 迁移至地下 34 cm(N2), 经约 20 d 达到峰值浓度; 经约 38 d 迁移至地下 450 cm(N6), 经约 140 d 达到浓度峰值。但因包气带有一定的阻滞作用, 使得石油烃进入潜水层时间较长, 油田应针对落地油落地的时间对受污染的土壤进行不同层位的垂向清理, 避免石油烃进一步污染地下水体。

该模型尚有需要进一步深入的研究方面: 未考虑植物根吸附、土壤颗粒吸附、降雨、蒸腾及自然降解等因素, 导致模拟结果为最不利情况下数据。

参 考 文 献

- [1] SHENG PENG, JIANG HUILIAN. A review on soil cover in waste and contaminant containment: design, monitoring, and modeling[J]. Earth science, 2009, 3(3): 303-311.
- [2] 汤英, 徐利岗, 张红玲, 等. HYDRUS-1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36):22390-22393.
- [3] 李玮, 何江涛, 刘丽雅, 等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评价中的应用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 639-648.
- [4] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5):853-858.
- [5] FLURY M. Experimental evidence of transport of pesticides throughfield soils-a review[J]. Journal of environmental quality, 1996, 25(1):25-45.
- [6] 汤英, 徐利岗, 张红玲, 等. HYDRUS-1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36):22390-22393.
- [7] 杨洋, 李娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12):5293-5298.
- [8] LI Y, JIRKA S, JING L, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D[J]. Agricultural water management, 2014, 142:38-46.

(收稿日期 2019-05-28)

(编辑 王蕊)