

化学分流酸化工艺试验研究

陈晓宇^{1*}, 张志全¹, 李鼎²

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430000;

2. 中石化西北油田分公司雅克拉采气厂, 新疆 库车 842017)

摘要:随着水平井技术的飞跃发展,其酸化解堵、恢复并提高油气产能的问题日趋紧迫。通过对 JS-1 暂堵剂的粒度分布、分散稳定性、油溶性以及与酸液配伍性进行试验研究,结果表明,JS-1 暂堵剂适用于中低渗透率的储层,有较好的分散稳定性和酸液配伍性,可满足现场施工要求。同时通过特制的试验装置对自转向酸性进行了试验评价,结果发现,不论是暂堵转向分流解堵工艺还是自转向酸转向分流工艺都有转向作用,达到了均匀布酸的目的,对提高水平井的开发效果意义重大。

关键词:水平井;化学分流;酸化工艺;注入分布;试验研究

中图分类号:TE357

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)08-0067-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.08.016

Experimental study on chemical diversion acidification

CHEN Xiao-yu^{1*}, ZHANG Zhi-quan¹, LI Ding²

(1. Petroleum Engineering School of Yangtze University, Wuhan 430000, China;

2. Yakela Gas Production Plant, Sinopec Northwest Branch Company, Kuche 842017, China)

Abstract: With the rapid development of horizontal well technology, the issues of the acidification, restoration and improvement of oil and gas production are becoming more urgent. The particle size distribution, dispersion stability, oil solubility and compatibility of JS-1 are evaluated in this study. The JS-1 temporary plugging agent can be used for the reservoir with low permeability. It has good dispersion stability and compatibility with acid liquid, which can meet the requirements of the construction. At the same time, the self-steering acid can be evaluated by a special test device. The results show that both the temporarily steering block-shunt plugging acidification process and self-steering shunt acidification process can play a role in the process of uniform distribution. It has great significance to improve the productivity of horizontal wells.

Key words: horizontal well; chemical diversion; acidification process; injection distribution; experimental investigation

水平井由于井眼穿过油层长度长,极大地增加了油层泄油面积,具有直井无法比拟的优势^[1]。但在水平井钻井、完井过程中,近井地层会受到钻井泥浆污染,流体在地层中的渗流阻力极大地增加,油层受到的伤害比直井更为严重^[2-3]。水平井必须酸化解堵,疏通渗流通道,恢复和提高产能。目前,油田现场应用最广泛的分流酸化技术主要有以封隔器转向为代表的机械转向技术和以泡沫转向为代表的化学转向技术^[4]。由于水平井的井段比较长,导致消耗大量酸液。为了让酸液起到最好的解堵功效以及达到降低酸液使用量的目的,对化学分流酸化工艺展开了试验和研究。

1 化学分流工艺

1.1 化学分流试验装置及方法

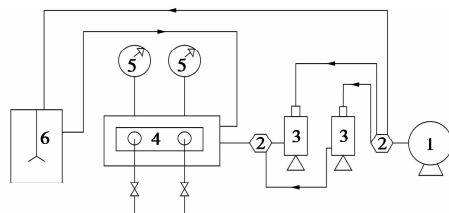
1.1.1 径向流转向分流试验装置

为了准确地评价水平井酸化时转向分流效果,根据水平井特点设计研制了1套水平井转向分流试

验装置。

工作原理:在常温、常压下,根据暂堵分流酸化施工注液顺序,将酸化工作液注入两段不同渗透率的装满天然岩芯的径向流装置中,并测定各段工作液在单位时间内流出各岩芯的液量,得到相对应各段工作液的渗透率,根据渗透率变化情况评价储层暂堵分流酸化效果。

水平井转向分流酸化试验装置如图1所示,主要包括3个储液罐、1台磁力搅拌容器、径向流装置、压力表、管线阀门等。

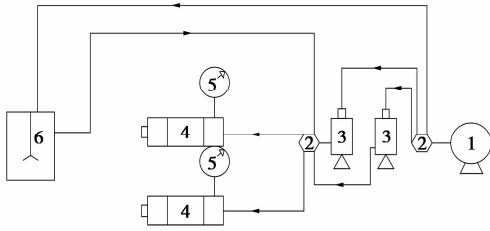


1—泵;2—六通阀;3—前置液;4—水平井径向流;
5—压力表;6—电磁搅拌机

图1 水平井转向分流酸化试验装置

1.1.2 双岩芯转向分流试验装置

双岩芯转向分流酸化试验装置如图 2 所示。



1—泵;2—六通阀;3—前置液;4—一段岩芯夹持器;
5—压力表;6—电磁搅拌器

图 2 双岩芯转向分流酸化试验装置

装置的主要功能及特点:

(1) 多个岩芯夹持器并联,进行多块岩芯的平行流动试验,模拟不同渗透率岩芯分流。

(2) 整个系统保持动态搅拌,避免暂堵剂静态下沉堵塞管线、阀门等。

1.1.3 其他主要试验材料与仪器

试验材料:HCl、缓蚀剂、铁离子稳定剂、助排剂、破乳剂、岩芯、暂堵剂和表面活性剂。

仪器:激光粒度仪、电子天平、离心机、水浴锅、电热恒温箱、干燥塔、具塞量筒、烧杯、玻璃棒、N₂ 与 N₂ 瓶、游标卡尺和温度计。

1.1.4 试验方法

采用激光粒度仪研究暂堵剂粒度分布。

采用 Q/SJX0148—2001 企业标准评价暂堵剂的油溶率。

采用 Rheostress 5500 型流变仪研究酸液黏度与酸岩反应进程的关系。

采用水平井转向分流试验装置与双岩芯转向分流试验装置研究暂堵剂的封堵率、恢复率、进液比、转向率、分流效果等。

1.2 暂堵剂性能评价

对于油井酸化目前可供选择的暂堵剂不多,采用最多的是油溶性树脂类,经过筛选,选择 JS-1 暂堵剂进行暂堵酸化试验。

1.2.1 暂堵剂的粒度分布^[5]

暂堵剂的粒径分布和与地层岩石喉道的配伍性对其产生的封堵效果影响较大。粒径过小,暂堵剂不容易在孔道内形成桥堵;粒径太大,则容易在岩石表面形成暂堵,从而不能进入孔道,暂堵效果不理想。由于不好确定每个单井孔道的半径,但单井各个小层的渗透率和孔隙度却很详细,若把油层孔隙

空间简化为平行毛细管束模型,则平均喉道半径可以由 Kozeny 公式估算:

$$r = (8K/\Phi)^{1/2} \quad (1)$$

其中: r 为毛细管半径, μm ; K 为地层渗透率, μm^2 ; Φ 为地层孔隙度, %。

根据 1/2 ~ 2/3 架桥理论,可以推导出暂堵剂粒径 r 与 K 的关系。将地层非均质性和孔隙大小差异等因素结合考虑,暂堵剂粒径分布范围应稍微扩大。采用激光粒度仪测定 JS-1 暂堵剂粒度分布,测试结果表明,JS-1 具有较宽的粒度分布范围,为 0.04 ~ 100 μm ,低于 1 μm 的特小颗粒占 10%,粒径在 1 ~ 80 μm 之间的占 60%,平均粒径为 43.34 μm ,适合在中低渗透率的储层中使用。

1.2.2 分散稳定性的评价

为确保暂堵剂能够顺利地进入油层,暂堵剂必须在水溶液中表现出有良好的分散稳定性,即在一定时间内不发生沉淀。在试验中,将 10 g 暂堵剂放入 100 mL 水中,搅拌均匀配成溶液。在常温下静置 2 h,没有观察到分层现象,这说明该暂堵剂有较好的分散稳定性,能够满足现场的施工要求。

1.2.3 暂堵剂油溶性试验

$$R = [1 - (B_2 - B_0)/(B_1 - B_0)] \times 100\% \quad (2)$$

其中: R 为油溶率, %; B_0 为已恒重的离心管质重, g; B_1 为油溶前沉淀与离心管质量之和, g; B_2 为油溶以后不溶物与离心管质量之和, g。

JS-1 暂堵剂油溶效果评价如表 1 所示。

表 1 JS-1 暂堵剂油溶效果评价

序号	B_0/g	B_1/g	B_2/g	$W(\text{不溶物})/\%$	油溶率/%
1	26.67	27.61	26.71	4.25	95.74
2	27.22	28.19	27.31	9.28	90.72
3	27.78	28.22	27.83	11.36	88.64

从表 1 中可以看出,JS-1 暂堵剂的油溶率很高,即使在油层中还有残留,一旦与油接触,也会很快被溶解掉,渗透率从而得到恢复。

1.2.4 暂堵剂与酸化液的配伍性试验

分别将 JS-1 暂堵剂加入到不同的酸液体系中,研究 JS-1 暂堵剂与各种酸液及其添加剂的配伍性。经过大量的试验分析表明:JS-1 暂堵剂具有良好的配伍性,能够保持原有酸液及添加剂的性能不变,满足现场应用要求。

1.3 自转向酸性评价

1.3.1 自转向酸配方

自转向酸配方为: HCl + 表面活性剂 + 缓蚀剂 + 碳酸盐岩 + QS-1 配合剂。

1.3.2 基液理化性能

基液的理化性能如表 2 所示。

表 2 理化性能

外观	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	剪切速率 170 s^{-1} 下 的黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
半透明棕红色的黏稠液	1.10	27

1.3.3 变黏性能

将 50 mL 样品置于 90°C 恒温水浴中, 其变黏性能如表 3 所示。

表 3 变黏性能

w (活化剂)/%	变黏性能描述
2	5 min 50 s 初交, 8 min 10 s 可挑
4	5 min 20 s 初交, 7 min 可挑

1.3.4 自转向酸液体系的黏度随酸岩反应进程的变化

表面活性剂(质量分数为 4%)的自转向酸液的黏度随酸液 pH 的变化如图 3 所示, HCl 起始质量分数为 20%。由图 3 可知, 随着酸液 pH 的逐步升高, 酸液黏度会先快速变大, 后逐渐减小, 最后趋于稳定。在 pH 为 0.47~0.85 时, 酸液的黏度升高速率最快, 由 $27\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 增大到 $380\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。当 pH 在 1.5~2 之间时, 黏度最大, 此时酸液中 HCl 剩余量不到 1%。

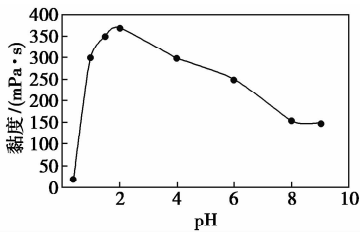


图 3 自转向酸液的黏度随 pH 变化曲线

1.4 化学分流工艺流动模拟试验

1.4.1 试验评价方法^[6]

封堵率(BG): 用于评价转向液对高渗透岩芯的封堵程度, 即转向液后岩芯渗透率下降百分率:

$$BG = (1 - Tw_1/Tw_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中: Tw_0 为岩芯封堵前的渗透率, μm^2 ; Tw_1 为岩芯封堵后的原始渗透率, μm^2 。

BG 的数值越大, 说明其封堵的功效越好。

恢复率(E): 转向液和酸化作业结束后, 岩芯渗透率的恢复百分率:

$$E = (Tw_1/Tw_0) \times 100\% \quad (4)$$

E 值越大, 效果越好, $E > 1$ 时, 酸化见效。

进液比(KV): 在酸化转向实验中, 每个阶段的高渗透率岩芯在相同时间内的进液量跟同一实验中最低渗透率岩芯的进液量的比值。进液比可以直观的反应出地层不均匀程度和进液分布情况。KV 越大, 越不均匀。

转向率(GV): 在进行转向实验时, 将低渗透岩芯的进液量作为基准, 转向高、中渗透岩芯进液量与低渗透岩芯进液量之比在转向后该进液比相比减少的百分数:

$$GV = (1 - KV_2/KV_1) \times 100\% \quad (5)$$

式中: KV_1 为转向前初始进液比; KV_2 为转向后的进液比。GV 值越大, 说明转向功效越好, 最大可以达到 100%, 此时 KV_2 为零。转向后如果进液比增大, 则 GV 值是负数, 说明没有产生功效。

1.4.2 结果与分析

(1) 转向分流液的配制

暂堵液: 分别在清水中加入 5% JS-1 与 10% JS-1 的暂堵剂, 配制 2 种浓度的暂堵液。

自转向酸: 分别在 15% HCl + 1% 缓蚀剂 + 2% QS-1 的酸液中加入 2% 与 4% 表面活性剂, 配制具有 2 种不同浓度表面活性剂的自转向酸。

(2) 转向分流液的封堵效果

利用双岩芯转向分流装置进行暂堵转向分流与自转向酸转向分流的封堵试验, 结果如表 4 所示。

表 4 2 种转向分流液的封堵试验结果

配方	Tw_0 / ($10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)	Tw_1 / ($10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)	堵率 (BG)/%	封堵 效果
5% (暂堵剂)	5.88	2.55	43.36	没堵住
10% (暂堵剂)	27.58	0.65	97.64	好
自转向酸 A 组 (2% 表面活性剂)	107.62	38.90	63.85	不好
自转向酸 B 组 (4% 表面活性剂)	14.20	0.45	96.83	好

由表 4 可知, 采用暂堵转分流酸化工艺时, 暂堵剂质量分数为 10% 时的封堵效果较好。采用自转向分流酸化工艺时, 自转向酸体系中表面活性剂的质量分数为 4% 时的封堵效果较好。由于自转向酸转向分流自身的特点, 自转向酸转向分流工艺最好是在碳酸盐质量分数较高的砂岩储层与碳酸盐岩储

层中使用。

(3) 转向分流解堵效果评价试验

利用水平井转向分流试验装置与双岩芯转向分流装置进行转向分流解堵效果评价试验,结果如表5所示。

表5 转向分流解堵效果评价试验结果

序号	$T_{w_0}/$ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	$T_{w_1}/$ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	KV_1	KV_2	$GV/\%$	$E/\%$	备注
1	14.20	13.84	23	1.6	93.1	97.46	双岩芯暂
	0.384	0.37	1	1	0	96.35	堵分流
2	27.58	26.77	9.8	0.93	90.5	97.06	双岩芯暂
	0.645	0.62	1	1	0	96.12	堵分流
3	11.82	11.89	18.6	1.05	94.35	100.6	双岩芯自
	0.673	0.73	1	1	0	108.5	转向酸分流
4	5.89	7.36	34	1.3	96.18	125	双岩芯自
	2.55	9.15	1	1	0	359	转向酸分流
5	1.65	1.59	16	0.869	95.9	96.7	水平井暂
	0.42	0.40	1	1	0	95.23	堵分流
6	0.11	0.12	11	0.95	91.36	105.4	水平井自
	0.084	0.09	1	1	0	107.5	转向酸分流

由表5可以看出,采用水平井转向分流试验装置与双岩芯转向分流装置进行暂堵分流解堵试验,无论是暂堵转向分流解堵还是自转向酸转向分流,由于转向前岩芯的渗透率相差比较大,进液比大,最高达到34.0,而转向后的进液比最大值只有1.60,一般都小于1.3,靠近1.0,高渗透岩芯的转向率可以达到90%以上。由此可以看出,2种转向分流工艺都有转向的功效,能达到均匀布酸的目的。另外,岩芯暂堵转向分流后反注煤油解堵,岩芯渗透率的恢复率可以全部达到95%以上,说明柴油解堵效果好,未对岩芯造成伤害,并且岩芯采用自转向酸转向分流工艺后,岩芯的渗透率都会有不同程度的改善。

2 现场施工应用

2.1 自转向酸的酸化施工工艺

(1) 酸液配制:将表面活性剂加入酸液中进行配制,在常温条件下黏度很小。

(2) 注入工艺^[7]:

① 单级注入:在酸蚀裂缝闭合后,通过注入一定体积的闭合酸来提高缝口的导流能力。

② 多级注入:可根据现场需要与前置液及其他

酸液进行交替多级注入。

(3) 排液:酸液反应速率比较慢且不会造成伤害,根据试验的结果,可以关井1~2 h后,再开井进行排液。

2.2 暂堵转向分流酸化施工工艺^[8-10]

(1) 施工设计要求

① 对单层非均质油层采用暂堵酸化;对多层则采用笼统暂堵酸化。

② 对施工井层进行全方面分析,根据储层物性来确定暂堵剂粒度分布。

③ 选择适宜的排酸方式。

(2) 现场配制方法

① 暂堵剂的用量及浓度根据施工性质和油层厚度来计算决定。

② 按照暂堵剂的用量在带有搅拌器或有泵循环的配制池中加入清水。

③ JS-1 暂堵剂的加入要求边加边搅拌,使其能够均匀地分散于体系中。

(3) 注入工艺

暂堵酸化现场施工工艺与常规酸化工艺相似,不同的是需要备一个 2 m^3 的池子在现场配制暂堵液,施工中按照设计来确定酸液与暂堵液的比例,分阶段混合注入地层。按设计确定压力、排量,另外应保持连续施工,并及时调整注酸压力。

2.3 现场应用效果

韦庄油田属于中孔、低渗型,根据岩芯分析得出其平均孔隙度是18.6%。对韦9平1井进行酸化工艺。该井酸化施工顺利,暂堵剂注入后注酸压力升高,说明暂堵剂起到了效果。酸化后近井带孔隙度由15%增加到30%。酸化有效半径达到0.32 m,酸化初期日产液8.9 t,日产油7.6 t。

3 结论

(1) JS-1 暂堵剂性能较好,适用于中低渗透率的储层,可以满足现场施工要求。

(2) 采用暂堵转向分流酸化工艺时,暂堵剂质量分数为10%时的封堵效果较好。采用自转向分流酸化工艺时,自转向酸体系中的表面活性剂质量分数为4%时的封堵效果较好。

(3) 由于自转向酸转向分流自身的特点,自转向酸转向分流工艺最好是在碳酸盐质量分数较高的砂岩储层与碳酸盐岩储层中使用。

(下转第72页)

2次,转入生理盐水(质量分数为0.85% NaCl)中制成菌悬液。菌悬液储存于4℃冰箱中备用,实验时稀释至相应浓度使用。原始菌悬液于一周内用完。

1.2 实验水样

实验水样为实验室模拟水样和实际水样。模拟水样采用自来水并置于储水箱中静置48 h,排除余氯的影响。向水中添加枯草芽孢杆菌和大肠杆菌模拟待消毒水中的细菌。使细菌总数满足 10^2 、 10^4 、 10^6 CFU/mL数量级。

实际水样采自某城市污水厂二沉池出水,经过颗粒活性炭(GAC)强化砂滤后用于消毒实验^[7],水质参数如表1所示。

表1 实际水样的水质参数

项目	检测值
pH	6.9~7.5
COD/(mg·L ⁻¹)	22~29
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	2.3~5.9
SS/(mg·L ⁻¹)	2.4~5.8
浊度/NTU	1.5~3.6
大肠菌群数/(CFU·L ⁻¹)	(2~8) × 10 ⁴
细菌总数/(CFU·mL ⁻¹)	(1.4~5.9) × 10 ³

1.3 实验设备

微波无极紫外消毒器结构如图1所示,该设备组装完成后可独立进行消毒实验,也可与其他水处理单元串接,安装方便,便于移动。设备总高950 mm,微波源的额定功率为800 W。设备工作时竖直放置,顶端微波激励腔内微波管连接微波源,下端与无极紫外灯连接。无极紫外灯直径为25 mm,长为780 mm,内充Hg 20 mg, Ar 266.644 Pa。消毒

器下半部分消毒腔直径为120 mm,长为700 mm,有效容积为6.5 L。消毒腔内的部分无极灯套有石英套管,套管直径为50 mm。实验开始前,接通微波源电源,激励腔内的微波管点亮无极灯。待发光稳定后,可由消毒器底部进水口泵入待消毒液体。水样由下至上流经消毒腔接受紫外消毒,最后从消毒腔上端出水口流出,消毒流程如图2所示。

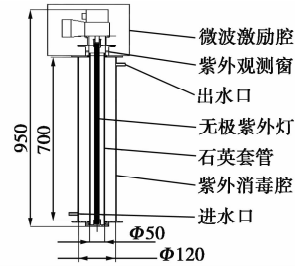
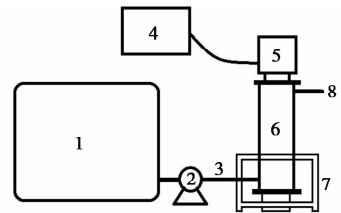


图1 无极紫外消毒器示意图



1—储水箱;2—离心泵;3—进水管路;4—微波源;
5—微波激励腔;6—消毒腔;7—固定支架;8—出水管路

图2 无极紫外水消毒工艺流程

1.4 实验方法

1.4.1 水样消毒实验

模拟水样消毒实验:将细菌总数调配为3级生物负荷:低生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^2$ CFU/mL;中生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^4$ CFU/mL;高生物负荷为 $(3\sim4)\times 10^6$ CFU/mL。实验开始前,通过离心泵调整进

(上接第70页)

(4)无论是暂堵转向分流解堵工艺还是自转向酸转向分流工艺,均达到了均匀布酸的目的。建议机械分段酸化工艺与化学分流转向工艺相结合,可以提高每段的酸液合理分布。

参考文献

- [1] 张迎春,赵春明,刘歆,等.水平分支井技术在渤海稠油油田开发中的应用[J].岩性油气藏,2011,23(1):118-122.
- [2] Robert S. Schechter.油井增产技术[M].刘德铸,译.北京:石油工业出版社,2003:97-98.
- [3] 袁淋,李晓平.水平井酸化后产能公式推导及应用[J].岩性油气藏,2014,26(1):127-130.
- [4] 赵增迎,杨贤友,周福建,等.转向酸化技术现状与发展趋势

[J].大庆石油地质与开发,2006,25(2):68-71.

- [5] 黄菊,程宇辉,黄一汉,等.油井屏蔽暂堵热洗工艺技术与应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2004,19(1):49-51,58.
- [6] 胡三清.油水井转向酸化技术的实验研究[J].大庆石油地质与开发,2000,19(4):36-38.
- [7] 赵俊生,何治,谭茂军,等.清洁转向酸在磨溪嘉二高压气藏水平井完井酸化中的应用[J].钻采工艺,2007,30(1):72-74.
- [8] 张学锋,欧天雄,赵延平,等.暂堵酸化工艺技术实验研究及应用[J].大庆石油地质与开发,2000,19(1):44-46.
- [9] 罗跃,张煜,杨祖国,等.长庆低渗油藏暂堵酸化技术研究[J].钻井液与完井液,2008,25(2):48-50.
- [10] 程宇辉,黄一汉,景步宏,等.抽油机井暂堵热洗工艺初探[J].钻采工艺,2004,27(2):84-86. ■