

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2024.01.008

含油污泥颗粒堵剂在油藏孔隙中运移性能研究

杨洪军¹ 代超² 张丹丹³ 王多田⁴ 吕明军⁴ 于春涛⁵ 魏巍⁶ 唐宇⁷

(1. 中国石油吉林油田分公司消防支队; 2. 中国石油吉林油田分公司二氧化碳开发公司;

3. 中国石油吉林油田分公司新能源事业部; 4. 中国石油吉林油田分公司 HSE 监督站;

5. 中国石油吉林油田分公司油气工艺研究院; 6. 中国石油吉林油田分公司新民采油厂;

7. 中国石油吉林油田分公司质量安全环保处)

摘 要 针对含油污泥颗粒的特征,探索含油污泥颗粒堵剂在油藏孔隙中的运移规律,可用于注水井调剖,封堵水流通道,扩大注水波及体积,实现提高采收率的目的。物理模拟压裂缝实验结果表明,颗粒堵剂在运移过程中提高注入压力能够突破孔道向深部运动。选用不同粒径的石英砂填制人造岩心,渗透率级别 300~500 μm^2 ,注入过程中注入压力先平稳上升,上升到一定程度后突然下降,含油污泥在外力的推动下,逐步向地层深部运动,随着注入量的增加,含油污泥颗粒在地层孔隙中堆积,阻力增加,注入压力增加,这种现象说明含油污泥颗粒堵剂在孔隙中具有较好的运移性能,能够进入地层深部,实现深部封堵的目的。开展含油污泥与凝胶体系对比实验,含油污泥颗粒堵剂与常规应用调剖体系(0.2%聚合物+0.2%酚醛树脂交联剂)相比具有优势,颗粒堵剂的注入压力、提高采收率幅度优于凝胶体系,含油污泥堵剂注入压力达 1.32 MPa,采收率达到 50.9%,封堵强度对比提高了 0.42 MPa(凝胶压力 0.9 MPa,含油污泥堵剂压力 1.32 MPa)。含油污泥颗粒堵剂在裂缝性油藏具有较好的注入性能,在油藏中能够实现深部运移,进入地层深部实现油藏深部封堵孔隙的作用。

关键词 含油污泥; 颗粒粒径; 运移规律; 封堵性能

中图分类号: X741; TE39

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2024)01-0036-05

Study on the Migration Performance of Oily Sludge Particle Plugging Agent in Reservoir Pores

Yang Hongjun¹ Dai Chao² Zhang Dandan³ Wang Duotian⁴Lyu Mingjun⁴ Yu Chuntao⁵ Wei Wei⁶ Tang Yu⁷

(1. Jilin Oilfield Branch Fire Brigade; 2. Jilin Oilfield Branch Carbon Dioxide Company;

3. Jilin Oilfield Branch New Energy Business Department; 4. Jilin Oilfield Branch HSE Supervision Station;

5. Jilin Oilfield Branch Oil and Gas Engineering Research Institute; 6. Jilin Oilfield Branch Xinmin Oil Production Plant;

7. Jilin Oilfield Branch Quality, Safety and Environmental Protection Department)

ABSTRACT According to the characteristics of sludge particles, the migration law of oily sludge particle plugging agent in reservoir pores was investigated, which could be used for profile control of water injection wells, blocking water flow channels, expanding the swept volume of water injection, and achieving enhanced recovery. The experimental results shown that particle plugging agent could break-through the porous channel and move to the depth when the injection pressure was increased during migration process. The artificial core was filled with quartz sand of different particle sizes, and the permeability level was 300-500 μm^2 . During the injection process, the injection pressure rose steadily to a certain extent, and then suddenly dropped. The sludge driven by the external force gradually moved to the depth of the formation. With the increase of the injection amount, the sludge particles accumulated in the formation pores, and the resistance and the injection increased. This phenomenon indicated that the oily sludge particle plugging agent had good migration performance in pores, and could enter deep formation, achieving deep plugging. When contrast experiment between oily sludge and gel system was carried out, comparing to the conventional profile control system (0.2% polymer+0.2% phenol formaldehyde resin cross linking agent), the sludge

particle plugging agent had better advantages. and the injection pressure and enhanced oil recovery range of particle plugging agent were better than that of gel system. The injection pressure of sludge plugging agent reached to 1.32 MPa, and the oil recovery reached to 50.9%, and the plugging strength increased by 0.42 MPa (gel pressure was 0.9 MPa, sludge plugging agent pressure was 1.32 MPa). Oily sludge particle plugging agent had good injection performance in fractured reservoir, and could achieve deep migration in reservoir and the role of deep reservoir plugging pores by entering deep formation.

KEYWORDS oily sludge; particle size; migration law; plugging performance

0 引言

油气田开发过程中产生的含油污泥经过输油管道进入联合站,密度较大的固体颗粒沉积形成罐底泥,密度较轻的掺杂在油水中,严重影响油水分离等后续处理。含油污泥通常采用焚烧、生物处理、溶剂萃取及化学破乳等方式处理,经济效益差,易造成二次污染,资源回收率低,综合利用程度不高,不具备规模推广的条件。结合含油污泥的特点,依据“从哪里来到哪里去”的原则,提出利用含油污泥及固体颗粒制成含油污泥调剖剂,用于注水井调驱,封堵储层裂缝孔道,调整注水剖面,扩大注水波及面积,从而实现提高水驱采收率的目的^[1-2]。利用含油污泥调剖,既能实现含油污泥无害化处理,又能在油藏内部改善水驱效果提高采收率,进而实现双重效果,本文重点研究含油污泥不同尺寸的粒径在油藏孔隙中的运移规律,以物模实验评价为基础,研究颗粒在不同孔隙中的注入压力、封堵性能等参数^[3],明确不同粒径与油藏孔隙的匹配关系,为后期调剖选井、方案设计奠定基础。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料

采出液污泥:采油厂联合站采出液;

聚合物:分子量 1 000 万,根据悬浮污泥量筛选确定;

酚醛树脂交联剂:某油田科研单位提供;石油醚、丙酮等实验室常用试剂。

1.2 实验仪器

1.2.1 通用设备

烘箱:山东菏泽电子仪器厂生产,HD-5;BSA224 赛多利斯电子天平;LA-950 激光散射粒度分析仪;美国 Brookfield 黏度计 DV-III。

1.2.2 物理模拟设备

岩心驱替装置 LSY-111(石油大学石仪公司);岩心油水饱和装置(山东中石大石仪科技有限公司);智能型孔隙度测定仪(石油大学华东石仪公司)及其他常用玻璃器皿、搅拌器等。

1.3 实验方法

1.3.1 含油污泥基本性能分析

将所取含油污泥样品充分摇匀后,用 pH 试纸测试含油污泥的 pH 值;用烧杯取 200 mL 含油污泥,称其质量,计算含油污泥密度;用蒸馏法测其含水量,将蒸馏残余物趁热用砂芯漏斗过滤,并用石油醚和丙酮的混合溶剂反复洗涤,至残余物不含油为止,记录含油量,并分析含油污泥组分^[4]。

含油污泥粒径测试采用 LA-950 激光散射粒度分析仪,首先要设定分析条件(油藏温度 45℃),注入分散好的含油污泥混合液,启动搅拌,在加样槽中加入样品,先少量加入样品并观察红光和蓝光的透光率变化情况,继续加入样品,直到红光和蓝光的透光率稳定在设定透光率的上下限范围内^[5]。加样后观察透光率指示是否稳定,同时观察样品分布实时显示窗口中样品分布状态是否稳定,如稳定点击检测按钮进行检测,检测完成后分析检测数据。

1.3.2 物模实验评价流程

取不同粒径范围(1.0~5 mm),制作不同渗透率的人造岩心,渗透率级别约 300~1 000 μm^2 。根据实验需求,填制不同渗透率的岩心,岩心进行预处理,抽真空、饱和水、饱和油,测试原始含油饱和度($S_o = V_o/V \times 100\%$)。水驱至岩心出口含水达到 80%以上,以 0.20 mL/min 的速度注入颗粒体系^[6](配制聚合物浓度携带颗粒体系),至岩心出口不再出油为止,记录注入压差、采油量等数据。物模实验流程见图 1。

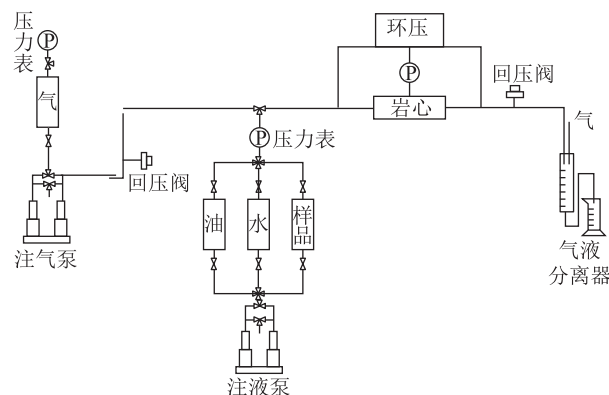


图 1 物模实验流程

2 结果与讨论

2.1 采出液含油污泥特性分析

含油污泥样品外观呈黑色黏稠状,实验室测得样品 pH 值为 7.0~7.2,基本呈中性,含油污泥密度 1.154 6~1.243 4 g/cm³,含油率 11.64%~19.47%,含水率 18.32%~37.28%,固含量 50.95%~63.41%,在常温下,不与水互溶。含油污泥特性分析见表 1。

表 1 含油污泥特性分析

样品	pH 值	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	含油率/ %	固含量/ %	
A	1 [#]	7	1.175 2	36.54	12.51	50.95
	2 [#]	7.1	1.154 6	37.28	11.64	51.08
B	1 [#]	7.2	1.234 2	18.81	19.47	61.72
	2 [#]	7.1	1.243 4	18.32	18.27	63.41

样品中泥质成分粒径为 10~300 μm 的约占 80%以上,10~50 μm 的约占 35%,50~100 μm 的约占 25%,100~300 μm 的约占 23%,较高的含泥量和含油量具备了进入地层和封堵高渗透层段的基本条件^[7]。不同含油污泥粒径占比见图 2。

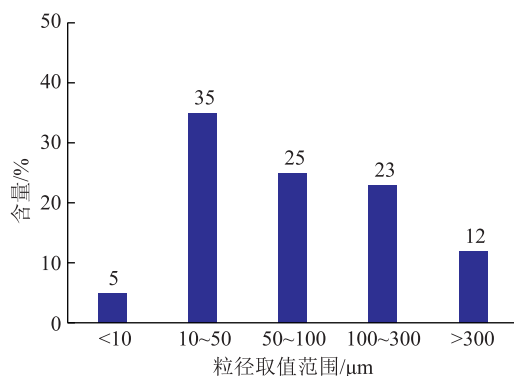


图 2 不同含油污泥粒径占比

2.2 模拟颗粒堵剂在孔板模型中的突破压力

研究含油污泥颗粒堵剂在油藏孔隙中运移性能,开展模拟人工压裂后孔隙直径分布情况,压裂砂粒径 0.9~1.25 mm。按压裂砂六角形或四方形排列计算砂粒间的孔隙范围:最小孔隙是 0.9 mm 砂,呈六角形排列,尺寸为 $D_{\text{六角}} = 0.1547D = 0.1547 \times 0.9 = 0.14$ mm;最大孔隙是 1.25 mm 砂,呈四方形排列,其尺寸为 $D_{\text{四方}} = 0.4142D = 0.4142 \times 1.25 = 0.52$ mm,参照支撑剂孔隙尺寸制作孔板模型^[8],颗粒堵剂在水中遇到喉道即发生堵塞,而发生堵塞的颗粒在压力条件下突破喉道向油层深部运移。由孔板模型剪切实

验结果看,孔板模型直径 0.2~0.5 mm,颗粒通过孔板模型的突破压力 0.7~4.5 MPa,0.5~5 mm 的颗粒堵剂在地层中经过运移能够对窜流通道起到较好的封堵作用。不同孔板模型尺寸下颗粒体系的突破压力见表 2。

表 2 不同孔板模型尺寸下颗粒体系的突破压力

孔板模型直径/mm	颗粒直径大小/mm	突破压力/MPa
0.2	0.5~1	1.8
	1~3	2.3
	3~5	4.5
0.5	0.5~1	0.7
	1~3	0.95
	3~5	1.2

2.3 含油污泥粒径在孔隙中的运移性能研究

在注入含油污泥调剖液的过程中,由于颗粒堵剂的沉积,选取 0.05%~0.1%的聚合物作为悬浮液^[9],提高悬浮性能,在注入过程中避免固体颗粒沉积,堵塞管道。含油污泥不同颗粒的粒径在孔隙中的运移性能通过人造填砂管内注入过程中的压力变化验证。选用不同粒径的石英砂填制人造岩心,渗透率级别 300~500 μm²。首先对两块岩心预处理,进行水驱,测试水相渗透率,待注入过程稳定后,开始注入含油污泥调剖剂,记录过程中压力变化及注入量的变化情况,作为下一步分析的主要依据。聚合物溶液携带颗粒注入,使用浓度 0.1%。

累计注入量与注入压差之间的关系见图 3。由图 3 可知,随着注入量(PV,孔隙体积倍数)的增加,注入压力先平稳上升,上升到一定程度后突然下降,在注入含油污泥过程中,随着段塞量的增加,压力缓慢上升,说明阻力系数较小,含油污泥在孔隙中具有较好的运移性能,适合油藏深部封堵,能够在压力作

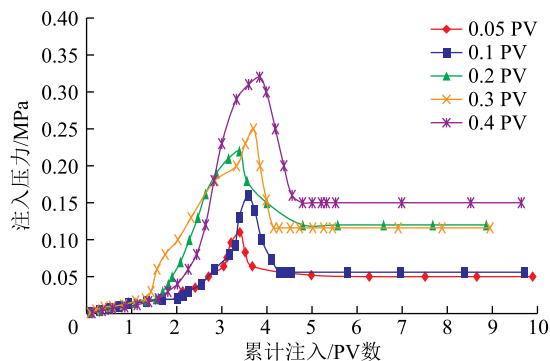


图 3 累计注入量与注入压差之间的关系

用下运移进入油藏深部,起到深部调剖封堵的作用。

2.4 含油污泥颗粒的注入性能

评价含油污泥在岩心中的封堵性能,验证调剖技术的可行性,开展含油污泥调剖液和凝胶调剖液对比评价。选用含油污泥颗粒调剖液(含油污泥 30%+0.1%聚合物混合溶液)与酚醛树脂凝胶调剖液(聚合物 0.2%+酚醛树脂交联剂 0.2%),在油藏温度 35℃条件下做对比实验。含油污泥调剖液和凝胶调剖液封堵性能对比曲线见图 4。

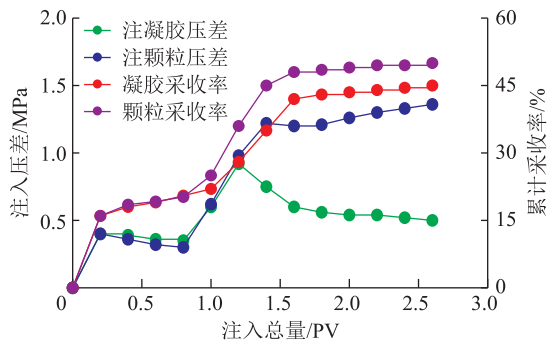


图 4 含油污泥调剖液和凝胶调剖液封堵性能对比曲线

实验表明,含油污泥调剖液注入压力、提高采收率幅度好于凝胶调剖液,颗粒堵剂注入压力达 1.32 MPa,采收率达到 50.9%,封堵强度对比提高了 0.42 MPa(凝胶调剖液注入压力 0.9 MPa,含油污泥调剖液注入压力 1.32 MPa),采收率提高 5%,这是由于含油污泥堵剂在地层条件下具有较好的运移性能,能够利用颗粒的架桥理论对孔隙结构进行封堵,扩大注水波及体积,改善水驱效果^[10]。

2.5 含油污泥调剖液的封堵能力评价

针对吉林油田的地质特点,以中高渗储层地质条件为基础,开展模拟实验。模拟实验区块油层平均埋深 740 m,油藏温度 60℃,区块综合含水 95.9%,采出程度 31.5%,油层平均孔隙度为 28.8%,渗透率 450 μm²,原始含油饱和度 66%,原油黏度为 233~337 mPa·s。记录实验过程中的压力、注入量,以渗透率及压力为基础计算岩心封堵效率(封堵率(%))=(封堵前渗透率-封堵后渗透率)/封堵前渗透率×100)。含油污泥调剖液岩心封堵性能试验见表 3。

根据实验结果看,含油污泥颗粒堵剂在不同渗透率的岩心中具有较好的封堵性能,突破压力 7.74~8.09 MPa,岩心渗透率 658.27×10⁻³~1 035.24×10⁻³ μm² 左右,下降到 35.24×10⁻³~52.68×10⁻³ μm²,封堵效率大于 90%,颗粒堵剂注入到油藏孔隙结构内,对孔隙结构封堵,改善储层的渗透性,对后续水驱

实现转向,扩大注水波及体积,改善吸水剖面,增加中、低渗储层的吸水特性,提高水驱采收率。

表 3 含油污泥调剖剂岩心封堵性能试验

污泥调剖体 系用量/PV	堵前渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	堵后渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	封堵率/ %	突破压力/ MPa
0.1	1 035.24	52.68	94.9	7.74
0.3	902.63	35.24	96.1	7.92
0.5	876.58	38.64	95.6	7.95
0.6	658.27	42.83	93.5	8.09

3 现场试验

吉林油田属于典型的低渗透油藏,初期以人工压裂投产为主,长期注水开发,形成水流优势通道,注水窜流,严重影响水驱开发效果。充分考虑含油污泥调剖液的性能特点,优选与实验评价地质特征类似的区块,开展现场实验(渗透率 450 μm²,温度 60℃)。现场实验应用井 8 口,处理含油污泥 2 800 m³,平均单井注入 350 m³,在施工过程中注入压力上升 5.8 MPa。措施后按照原方案注水,注水压力平均上升 1.1 MPa,吸水剖面改善程度达到 80%,井组产油量增加,综合含水下降 5%~10%,8 个井组累计增产 800 t,减水 3 400 m³,有效期 7.5 个月,经济创效明显,投入产出比 1:1.2。先导试验证实,不同粒径的含油污泥能够起到封堵水流优势通道的作用,起到较好的增油控水的效果,为油田处理处置含油污泥提供了途径,具有较好的应用前景。含油污泥现场试验效果统计见表 4。

表 4 含油污泥现场试验效果统计

井号	含油污泥 用量/m ³	油压/MPa			累增 油/t	累减 水/m ³	有效 期/月
		标定	措施后	压差对比			
1	450	9.9	13	3.1	120	100	5
2	238	12.8	13.4	0.6	90	1 090	4
3	346	6.7	7.5	0.8	80	589	11
4	780	7.2	8.5	1.3	140	79	9
5	182	9.6	11.1	1.5	90	89	8
6	200	9.3	9.7	0.4	80	1 420	10
7	160	5.6	6.3	0.7	120	111	6
8	450	7.5	7.8	0.3	80	250	7
合计	2 806	—	—	—	800	3 728	—
平均	—	8.6	9.7	1.1	—	—	7.5

4 结 论

1) 物理模拟压裂裂缝, 实验结果表明颗粒堵剂在运移过程中提高注入压力能够突破孔道向前运动。岩心模拟实验注入过程中注入压力先平稳上升, 上升到一定程度后突然下降, 在注入含油污泥过程中, 随着段塞量的增加, 压力缓慢上升, 说明阻力系数较小, 含油污泥在孔隙中具有较好的运移性能, 适合油藏深部封堵。

2) 含油污泥颗粒堵剂与凝胶体系对比具有较好的优势, 颗粒堵剂的注入压力、提高采收率幅度好于凝胶体系, 含油污泥堵剂注入压力达 1.32 MPa, 采收率达到 50.9%, 封堵强度对比提高了 0.42 MPa (凝胶体系压力 0.9 MPa, 含油污泥堵剂压力 1.32 MPa)。

3) 以含油污泥为基础研究形成含油污泥颗粒调剖剂, 本着“从哪里来到哪里去”的原则, 研究含油污泥颗粒堵剂回注地层的可行性, 室内模拟及现场试验均取得较好的效果, 证实含油污泥颗粒堵剂, 能够在外力作用下, 运移到地层深部, 对地层孔隙实施封堵, 达到注水井调剖的目的, 在油田开发过程中, 有较大的应用潜力。

参 考 文 献

[1] 邹正辉, 吝拥军, 李建雄, 等. 橡胶颗粒复合调剖体系在

复杂断块油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2010, 15: 60-63.

[2] 张云宝, 卢祥国, 叶成, 等. 低渗透裂缝性油藏调剖技术及应用[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(6): 49-53.

[3] 宋春红, 赵长喜, 齐宏, 等. 泌浅 10 断块蒸汽驱整体调剖堵窜技术应用研究[J]. 化学工程与装备, 2010(1): 33-37.

[4] 郭雄华, 冯其红, 李淑霞. 高含水期油田堵调综合治理方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 25(5): 35-37.

[5] 刘沛玲. 扶余油田改善高含水区块开发效果的措施[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(4): 68-71.

[6] 程运甫, 张胜传, 冯敬红, 等. 深层低渗油藏改造技术[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(增刊): 69-71.

[7] 接金利, 刘洪升, 陈丽. 高压低渗油气藏 GSB-1 型压裂支撑剂研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(2): 33-36.

[8] 才程, 赵福林, 岳湘安. 岩心中硅酸凝胶堵剂突破压力的研究[J]. 油田化学, 2003, 20(4): 316-318.

[9] 杨鹏, 黄立信, 俞理. 低渗油藏微生物运移能力研究[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 85-57.

[10] 杨立民, 侯吉瑞, 宋新民. 低温低渗透砂岩油藏窜流大孔道深部封堵技术研究[J]. 油田化学, 2006, 23(4): 337-341.

(修回日期 2023-06-20)

(录用日期 2023-08-20)

(编辑 王 薇)

(上接第 35 页)

[17] BENATTI C T, TAVARES C R G, LENZI E. Sulfate removal from waste chemicals by precipitation[J]. Journal of environmental management, 2009, 90(1): 504-511.

[18] XIAO Y, REN D, LI H, et al. Study on synthesis and property of multi-copolymer scale inhibitor[J]. Journal of polymer research, 2022, 29(11): 488.

[19] FU H, JIANG G, WANG H, et al. Solution-mediated transformation kinetics of calcium sulfate dihydrate to α -calcium sulfate hemihydrate in CaCl_2 solutions at elevated temperature[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2013, 52(48): 17134-17139.

[20] GUAN B, YANG L, WU Z. Effect of Mg^{2+} ions on the nucleation kinetics of calcium sulfate in concentrated calcium chloride solutions[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2010, 49(12): 5569-5574.

[21] 彭家惠, 楼宗汉. 钙矾石形成机理的研究[J]. 硅酸盐学报, 2000(6): 511-515.

[22] DOU W, ZHOU Z, JIANG L, et al. Sulfate removal from wastewater using ettringite precipitation: magnesium ion inhibition and process optimization[J]. Journal of environmental management, 2017, 196: 518-526.

[23] GAO Y F, NAGAI M, MASUDA Y, et al. Surface precipitation of highly porous hydrotalcite-like film on Al from a zinc aqueous solution[J]. Langmuir, 2006, 22(8): 3521-3527.

[24] 王玉东, 赵丹, 董延茂, 等. 钙矾石沉淀法去除镁剂脱硫废水中硫酸根离子研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(6): 54-57.

[25] 马丽, 孟永涛, 毕秋艳, 等. 盐湖高锂卤水中硫酸根的分离与锂的迁移[J]. 无机盐工业, 2021, 53(6): 150-155.

(修回日期 2023-08-20)

(录用日期 2023-09-21)

(编辑 王 薇)