



CO₂响应性增强泡沫体系室内试验研究

吕伟 刘笑春 白海龙 彭明兰

Laboratory Test Study of CO₂ Responsive Enhanced Foam System

LYU Wei, LIU Xiaochun, BAI Hailong, PENG Minglan

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CO₂泡沫双子表面活性剂清洁压裂液研究与试验

Research and Experiments of a Clean Fracturing Fluid System with CO₂ Foam Gemini Surfactant

石油钻探技术. 2018, 46(2): 92–97 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018021>

超低渗透油藏CO₂吞吐利用率实验研究

CO₂ Utilization Ratio Simulation during a CO₂ Huff-and-Puff Process in Ultra-Low Permeability Oil Reservoirs

石油钻探技术. 2018, 46(6): 77–81 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018147>

深水浊积岩油藏提高采收率方法研究

Study on Enhanced Oil Recovery Method in Deep-Water Turbidite Reservoirs—A Case Study of X Reservoir in Angola

石油钻探技术. 2021, 49(2): 79–89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021025>

渤海P油田层内生成CO₂调驱技术

In-Situ CO₂ Generation Technology in Bohai P Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 108–112 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020015>

草舍油田CO₂驱高气油比井举升新技术

New Lifting Technology for CO₂ Flooding Wells with High GOR in Caoshe Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(2): 87–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702014>

基于非均质大模型的特高含水油藏提高采收率方法研究

Research on Large Scale Heterogeneous Model Based EOR Methods for Ultra-High Water Cut Reservoirs

石油钻探技术. 2018, 46(5): 83–89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018078>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021119

引用格式: 吕伟, 刘笑春, 白海龙, 等. CO₂ 响应性增强泡沫体系室内试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 88-93.

LYU Wei, LIU Xiaochun, BAI Hailong, et al. Laboratory test study of CO₂ responsive enhanced foam system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 88-93.

CO₂ 响应性增强泡沫体系室内试验研究

吕 伟¹, 刘笑春¹, 白海龙², 彭明兰³

(1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018; 2. 中国石油长庆油田分公司工程技术管理部, 陕西西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃庆阳 745100)

摘 要: 为解决低渗透油藏 CO₂ 驱气体窜流影响开发效果的问题, 以泡沫综合值为评价指标, 通过搅拌法优选发泡剂, 建立了 CO₂ 响应性增强泡沫体系, 配方为 0.1% 发泡剂 AOS+4.0% 小分子胺+水。该体系在接触 CO₂ 前黏度与水接近, 与 CO₂ 作用后黏度可升高 18 倍以上。性能评价结果显示: CO₂ 响应性增强泡沫体系的泡沫综合值可达到常规泡沫体系的 11 倍以上; 具有明显的剪切稀释特性, 流变方程符合幂律流体流变模式; 比常规泡沫体系具有更强的黏弹性, 可以封堵优势渗流通道, 抑制非均质低渗透油藏 CO₂ 驱气体窜流, 提高低渗透油藏 CO₂ 驱的采收率。研究结果表明, CO₂ 响应性增强泡沫体系可以解决低渗透油藏 CO₂ 驱气体窜流问题, 提高 CO₂ 驱的开发效果。

关键词: 低渗透油藏; 二氧化碳驱; 窜流; 泡沫; 提高采收率

中图分类号: TE357.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)05-0088-06

Laboratory Test Study of CO₂ Responsive Enhanced Foam System

LYU Wei¹, LIU Xiaochun¹, BAI Hailong², PENG Minglan³

(1. Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;
2. Engineering Technology Management Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;
3. The No.2 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu, 745100, China)

Abstract: The development effect of CO₂ flooding in low permeability reservoirs is affected by the gas channeling. In response to this problem, the foam comprehensive value was used as the evaluation index to establish CO₂ responsive enhanced foam system by optimizing foaming agent with stirring method. The formula was 0.1% foaming agent AOS(alpha olefin sulfonate) adding 4.0% small molecule amine and water. Its viscosity, which was close to water viscosity before exposure to CO₂, increased by more than 18 times after reaction with CO₂. The results of performance evaluation indicated the foam comprehensive value of the proposed CO₂ responsive enhanced foam system could reach more than 11 times those of conventional foam systems, with obvious shear-thinning characteristics. The rheological equation conformed to the rheological model of power-law fluids. With stronger viscoelasticity than those of conventional foam systems, the proposed foam system could also be used to plug the dominant seepage channels to inhibit the gas channeling during CO₂ flooding in heterogeneous low permeability reservoirs and ultimately to enhance the oil recovery in such reservoirs. The research results showed that the CO₂ responsive enhanced foam system could solve the problem of gas channeling and improve the development effect of CO₂ flooding in low permeability reservoirs.

Key words: low permeability reservoir; CO₂ flooding; channeling; foam; enhanced oil recovery

近年来, 低渗透油藏开发受到越来越多的重视^[1]。于原油可降黏, 溶于水生成碳酸可溶解碳酸盐等岩石矿物, 改善储层渗透性, 在国内外注气开发油田
注气是低渗透油藏开发的重要技术^[2], 其中 CO₂ 溶

收稿日期: 2020-10-22; 改回日期: 2021-09-06。

作者简介: 吕伟 (1976—), 男, 甘肃宁县人, 1999 年毕业于西安交通大学高分子材料与工程专业, 2006 年获西安石油大学应用化学专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事提高采收率技术方面的研究工作。E-mail: lvw_cq@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“长庆低渗透砂岩油藏 CO₂ 驱油与埋存注采工艺配套”(编号: 2016ZX05056002)、中国石油重大科技专项“CO₂ 驱油与埋存注采配套技术研究”(编号: 2014E-3603)联合资助。

得到了大量应用^[3-7]。低渗透油藏 CO₂ 驱可有效补充地层能量,显著提高原油采收率。但由于存在高渗条带和天然裂缝,低渗透油藏 CO₂ 驱时,极易发生气窜,严重降低了 CO₂ 的利用率和增产效果^[8-12]。泡沫体系是常用的气窜封堵体系,可以实现深部调驱,已在胜利、长庆、大庆、大港和中原等油田成功应用。但是,常规泡沫强度不高,对裂缝及高渗条带等强窜流通道的封堵效果较差,不适于非均质严重储层的气窜控制。冻胶和聚合物可以通过增强液膜机械强度来提高泡沫强度和封堵能力,且可以通过控制聚合物和冻胶体系的浓度调节强化泡沫的强度,以满足不同非均质储层的封堵,但聚合物和冻胶泡沫体系在注入前黏度已比较高,在储层孔隙中的流动阻力大,注入性较差,深部调驱效果受限。为此,笔者研究形成了 CO₂ 响应性增强泡沫体系,利用响应体系与气窜通道中 CO₂ 作用后的增黏特性提高泡沫强度,实现了气窜通道的精准、高效封堵,提高了低渗透油藏 CO₂ 驱的开发效果。

1 CO₂ 响应性增强泡沫体系研究

通过评价油田常用发泡剂的耐温性和耐盐性优

选发泡剂,将优选出的发泡剂与小分子胺类 CO₂ 响应体系复配,形成 CO₂ 响应性增强泡沫体系。

1.1 发泡剂优选

参照石油天然气行业标准“钻井液用发泡剂评价程序”(SY/T 5350—2009),以泡沫综合值(发泡体积与半衰期的乘积)为指标,评价发泡剂的综合性性能。首先,采用去离子水配制不同质量分数的发泡剂溶液,采用搅拌法测定泡沫综合值,通过泡沫综合值优化发泡剂加量;在加量优化基础上,分别配制矿化度为 5×10^4 和 10×10^4 mg/L 的发泡剂溶液,以泡沫综合值评价发泡剂的耐盐性;配制耐盐发泡剂溶液,用高温老化罐密封后置于恒温箱(温度分别设置为 80 和 100 ℃)中老化 72 h,评价发泡剂的耐温耐盐性能,优选出发泡剂。

图 1 所示为 α -烯基磺酸钠(AOS)、脂肪酸甲酯磺酸盐(MES)、十二烷基硫酸钠(SDS)、椰油酰胺丙基二甲胺乙内酯(CAB-35)、脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠(AES)和非离子表面活性剂 ZYGK-3 等 6 种发泡剂不同加量下的泡沫综合值。从图 1 可以看出,发泡剂加量对泡沫综合值影响显著。以泡沫综合值 200 000 mL·s 为界限,根据图 1 确定 6 种发泡剂的加量范围和推荐加量,结果见表 1。

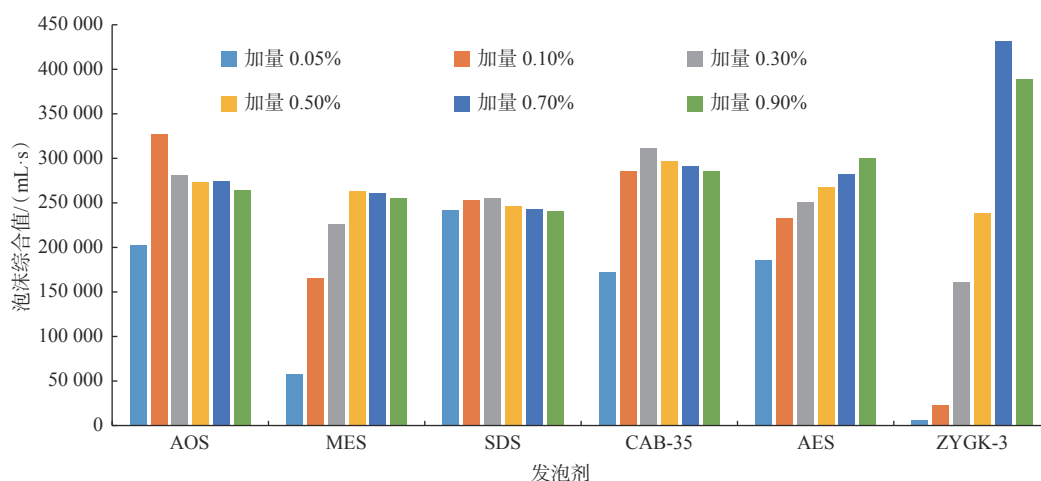


图 1 不同发泡剂在不同加量下的泡沫综合值

Fig.1 Foam comprehensive values of different foaming agents in different dosages

利用矿化度为 5×10^4 和 10×10^4 mg/L 的水,配制了 6 种发泡剂溶液(发泡剂加量采用表 1 中的推荐加量),测定其泡沫综合值,结果见图 2。由图 2 可知,CAB-35、ZYGK-3 和 AOS 等 3 种发泡剂在矿化度为 10×10^4 mg/L 时仍具有良好的发泡性能。

利用不同矿化度的模拟地层水,配制 CAB-35、ZYGK-3 和 AOS 等 3 种发泡剂的溶液(发泡剂的加

量采用表 1 中的推荐加量),密封后在 80 和 100 ℃ 温度下老化 72 h,测定泡沫综合值,结果见图 3。由图 3 可知,在高矿化度下老化后,AOS 依然具有良好的发泡能力和泡沫稳定性能。因此,发泡剂选用 AOS,加量为 0.10%。0.10%AOS 溶液在高温高盐条件下具有良好的发泡性能和泡沫稳定性,可以满足苛刻条件下 CO₂ 驱气窜封堵的需求。

表1 发泡剂加量优化结果

Table 1 Optimization result of foaming agent dosage

发泡剂	加量范围, %	推荐加量, %
AOS	0.10~0.90	0.10
MES	0.30~0.90	0.50
SDS	0.05~0.90	0.10
CAB-35	0.10~0.90	0.10
AES	0.10~0.90	0.30
ZYGK-3	0.50~0.90	0.70

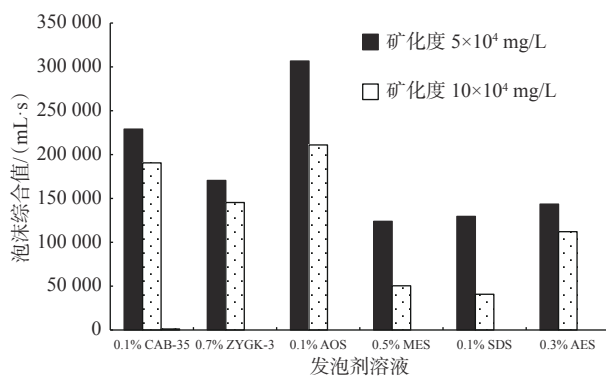


图2 不同发泡剂溶液在不同矿化度下的泡沫综合值

Fig.2 Foam comprehensive values of different foaming agent solutions at different salinities

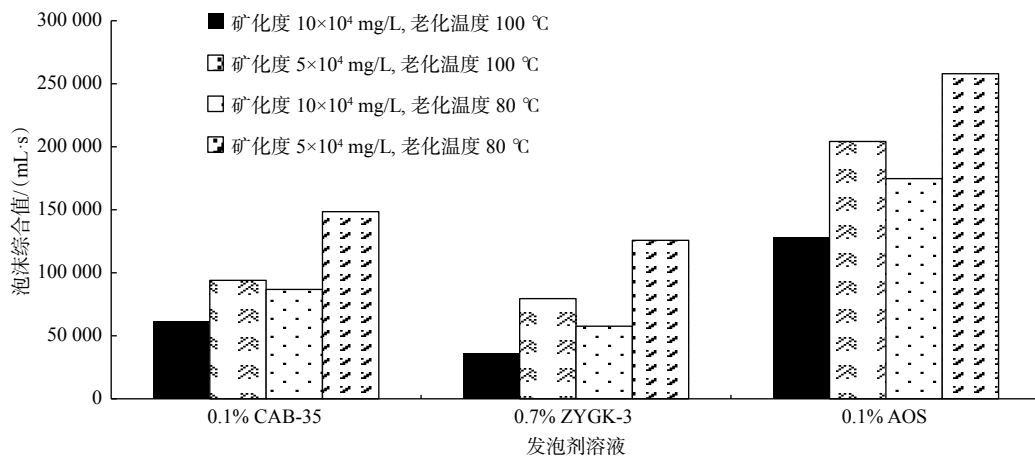


图3 不同发泡剂溶液在不同温度下的泡沫综合值

Fig.3 Foam comprehensive values of different foaming agent solutions at different temperatures

表2 CO₂ 响应性增强泡沫性能Table 2 Performance of CO₂ responsive enhanced foam system

泡沫体系	起泡体积/mL	半衰期/s	泡沫综合值/(mL·s)
常规泡沫	650	486	315 900
CO ₂ 响应性增强泡沫	495	7 160	3 544 200

1.2 CO₂ 响应性增强泡沫体系

将发泡剂 AOS、小分子胺和去离子水按比例 (0.10% AOS+4.00% 小分子胺+水) 加入到三口烧瓶中, 以转速 120 r/min 搅拌 5 min 形成均匀溶液, 静置 1 h 后除去表面泡沫, 即为 CO₂ 响应性增强泡沫体系。该体系为透明澄清液体, 在与 CO₂ 作用前, 黏度为 1.1 mPa·s, 具有优良的注入性能; 与 CO₂ 充分接触后, 黏度显著升高, 最高可达到 20.3 mPa·s。

2 CO₂ 响应性增强泡沫体系性能评价

2.1 综合性能

设计密封搅拌杯, 充入 CO₂ 气体 (纯度 99.99%), 采用 Waring Blender 法评价常规泡沫体系 (配方为 0.10% AOS+水) 和 CO₂ 响应性增强泡沫体系的泡沫综合性能, 搅拌速度 5 000 r/min, 搅拌时间 3 min, 结果见表 2。

由表 2 可知: 与常规 CO₂ 泡沫体系相比, CO₂ 响应性增强泡沫体系的起泡体积较小, 但泡沫稳定性显著增强; CO₂ 响应性增强泡沫体系的泡沫综合值可达常规泡沫体系的 11 倍以上。这说明 CO₂ 响应性增强泡沫体系具有良好的起泡能力和优异的泡沫稳定性。

2.2 流变性和黏弹性

利用安东帕 Physica MCR301 流变仪的椎板系统 (量杯半径 14.466 mm, 转子半径 13.330 mm) 在 70 °C 下测定 CO₂ 响应性增强泡沫体系的稳态流变性及动态黏弹性, 分析 CO₂ 响应性增强泡沫体系的稳定机理。测试稳态流变性时, 剪切速率为 0.01~2 000.00 s⁻¹; 测试动态黏弹性时, 先进行振幅扫描确

定线性平台区,然后在线性平台区范围内进行频率扫描,频率为 0.01~100.00 Hz。

常规 CO₂ 泡沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系的稳态流变曲线如图 4 所示。由图 4 可知,2 种泡沫体系均具有明显的剪切稀释特性,随剪切速率增大,表观黏度迅速降低。CO₂ 响应性增强泡沫体系中的小分子胺可与 CO₂ 通过可逆反应形成阳离子聚和物^[13-14],使液膜黏度急剧升高,增大了液膜中流体流动的阻力,导致低剪切速率下其表观黏度明显高于常规泡沫体系。剪切速率 7.34 s⁻¹ 下,常规沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系的表观黏度分别为 4.9 和 55.1 mPa·s。

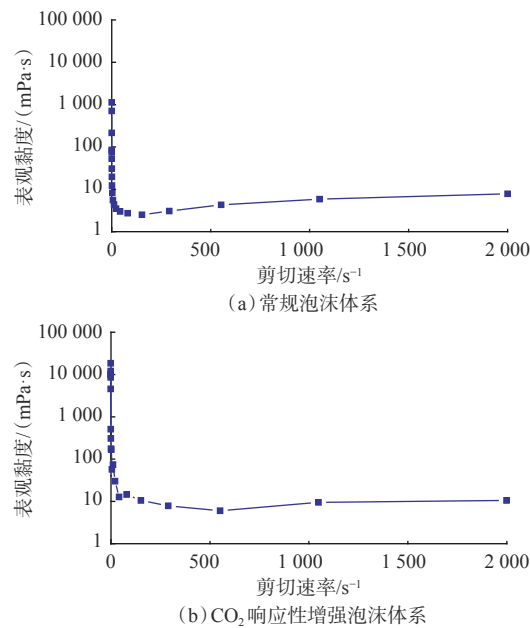


图 4 不同泡沫体系的稳态流变曲线

Fig.4 Steady-state rheological curves of different foam systems

对图 4 中的流变曲线进行拟合,流变方程均符合幂律流体流变模式^[15],相应的稠度系数 K 和流变指数 n 如表 3 所示。与常规泡沫体系相比,CO₂ 响应性增强泡沫体系的稠度系数显著增大,这与表观黏度升高一致;其流变指数减小,说明 CO₂ 响应性增强泡沫体系的剪切稀释性更强。

表 3 不同泡沫体系的稠度系数和流变指数

Table 3 Consistency coefficients and flow behavior indexes of different foam systems

温度/℃	泡沫体系	$K/(\text{mPa}\cdot\text{s}^n)$	n	相关系数
70	常规泡沫	30.20	0.56	0.88
	CO ₂ 响应性增强泡沫	520.40	0.29	0.91

图 5 所示为常规泡沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系的黏弹性能。其中,储能模量和损耗模量分

别代表泡沫体系的弹性和黏性。由图 5 可知:在低频率范围内,常规泡沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系的储能模量大于损耗模量,均以弹性为主;在高频率范围内,2 种泡沫体系的储能模量大于损耗模量,表现出明显的黏性。这是因为,泡沫是气泡的聚集体,具有独特的空间多面体结构,泡沫的黏弹性来源于相对移动分散介质的液层内摩擦、分散相气泡间的碰撞和挤压^[16-17]。低频率剪切时,分散相气泡间的碰撞和挤压作用占主导,因此,常规泡沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系表现出较强的弹性。随着剪切频率增大,泡沫单体趋于整齐排列,一部分泡沫因变形过大而破裂,导致液层内摩擦占主导,表现出明显的黏性。CO₂ 响应性增强泡沫体系由于加入了小分子胺,液相黏度升高,泡沫液膜的机械强度增强,因此 CO₂ 响应性增强泡沫体系表现出更强的黏弹性,具有更优异的泡沫稳定性能。

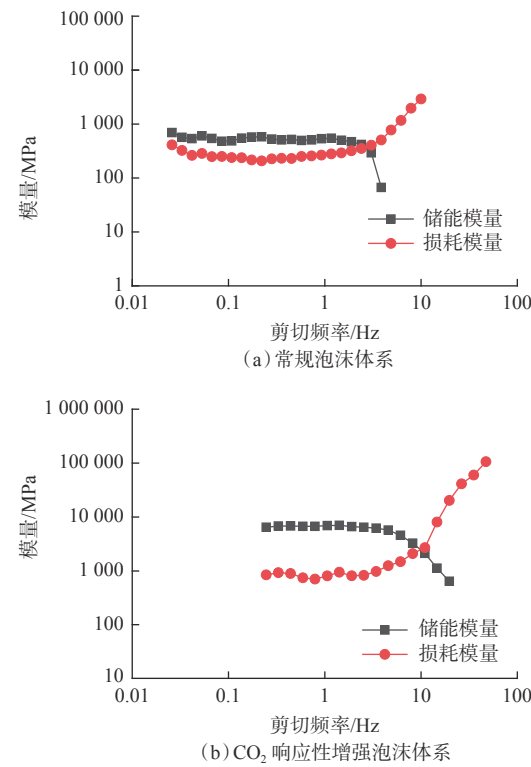


图 5 不同泡沫体系的黏弹性能

Fig.5 Viscoelastic performance of different foam systems

2.3 提高采收率性能

采用不同渗透率的长岩心($\phi 2.5\text{ cm}\times 30.0\text{ cm}$ 石英砂环氧树脂胶结岩心)组成非均质驱替模型,评价常规泡沫体系和 CO₂ 响应性增强泡沫体系对非均质储层的封堵和增产效果。试验用油为长庆油田五里湾一区原油,油气比 72 m³/t,饱和压力 7.5 MPa,黏度 1.95 mPa·s。非均质驱替模型岩心渗透率分别为 118.5 和 5.2 mD,渗

透率级差 22.8。试验温度 70 ℃, 岩心出口端回压 10 MPa, 泡沫注入方式采用液—气段塞注入(先注液后注气)方

式, 气液比 1:1, 段塞为 0.1 倍孔隙体积, 泡沫注入量为 1.0 倍孔隙体积。岩心驱替试验装置如图 6 所示。

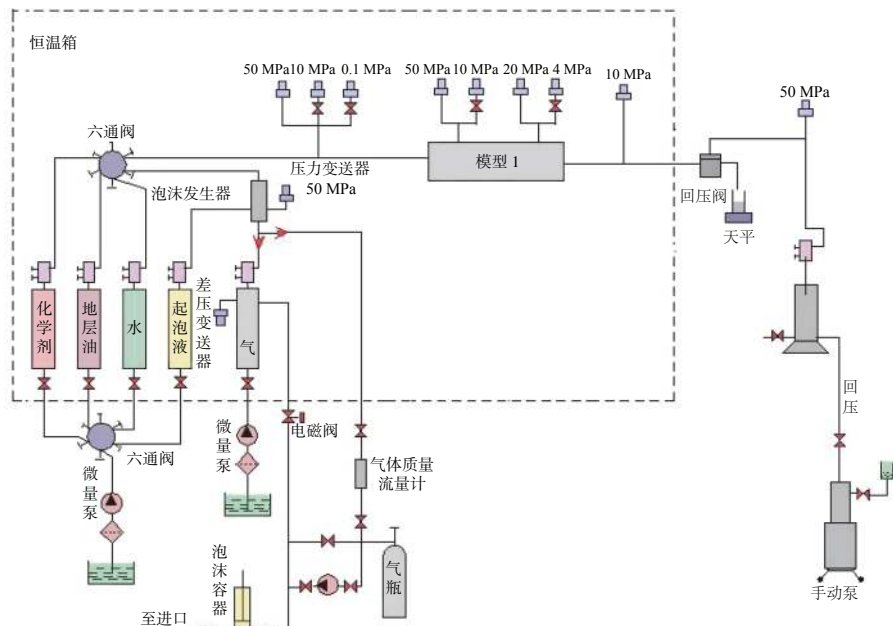


图 6 岩心驱替试验装置示意

Fig.6 Core flooding device

试验时首先以 0.15 mL/min 的速度进行 CO_2 驱, 出口端不产油后转注 1.0 倍孔隙体积的泡沫, 然后继续进行 CO_2 驱。试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出: 泡沫封堵前, CO_2 驱采收率只有 18% 左右, 且大部分原油产自高渗透岩心, 低渗透岩心基本未动用; CO_2 驱时的压差较低, 注入泡沫后压差迅速增大, 说明泡沫体系能有效增加气窜通道中的渗流阻力, 控制气体在优势通道中的窜流; CO_2 响应性增强泡沫体系的封堵阻力系数可达到 60, 远大于常规泡沫体系的封堵阻力系数(12), 说明小分子胺使泡沫体系的黏弹性增强, 可以显著提高泡沫体系的封堵能力; 在 CO_2 驱基础上, 常规泡沫封堵体系可以使采收率提高约 10 个百分点, 而 CO_2 响应性增强泡沫体系可以使采收率提高约 23 个百分点。说明 CO_2 响应性增强泡沫体系使气体在窜流通道中的流动阻力增大, 黏性力增强, 从而可以使更多的气体转向低渗透岩心中, 显著增加气驱波及体积。

3 结 论

1) 优选出了 CO_2 响应性增强泡沫体系配方: 0.1% 发泡剂 AOS+4.0% 小分子胺+水, 该泡沫体系在接触 CO_2 前, 黏度与水接近, 与 CO_2 接触后其黏

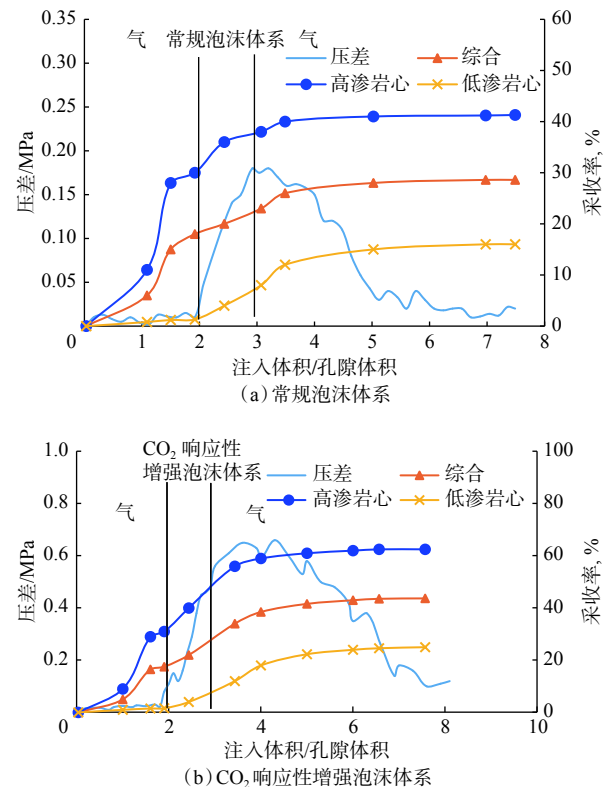


图 7 不同泡沫体系封堵驱替试验结果

Fig.7 Plugging and flooding test results of different foam systems

度可增大18倍以上。

2)CO₂响应性增强泡沫体系具有明显的剪切稀释特性,流变方程符合幂律流体流变模式。CO₂响应性增强泡沫体系比常规泡沫体系具有更强的黏弹性。

3)CO₂响应性增强泡沫体系的泡沫综合值可以达到常规泡沫体系的11倍以上,能有效抑制渗透率级差大于20强的非均质储层的气窜,提高非均质低渗透油藏的CO₂驱开发效果。

参 考 文 献

References

- [1] 郭平,李士伦,杜志敏,等.低渗透油藏注气提高采收率评价[J].西南石油学院学报,2002,24(5):46-50.
GUO Ping, LI Shilun, DU Zhimin, et al. Evaluation on IOR by gas injection in low permeability oil reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(5): 46-50.
- [2] 袁士义,王强,李军诗,等.注气提高采收率技术进展及前景展望[J].石油学报,2020,41(12):1623-1632.
YUAN Shiyi, WANG Qiang, LI Junshi, et al. Technology progress and prospects of enhanced oil recovery by gas injection[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1623-1632.
- [3] 祝春生,程林松.低渗透油藏CO₂驱提高原油采收率评价研究[J].钻采工艺,2007,30(6):55-57,60.
ZHOU Chunsheng, CHENG Linsong. Research on CO₂ flooding in low permeability reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 55-57,60.
- [4] 黄兴,倪军,李响,等.致密油藏不同微观孔隙结构储层CO₂驱动用特征及影响因素[J].石油学报,2020,41(7):853-864.
HUANG Xing, NI Jun, LI Xiang, et al. Characteristics and influencing factors of CO₂ flooding in different microscopic pore structures in tight reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 853-864.
- [5] 王千,杨胜来,拜杰,等.非均质多层储层中CO₂驱替方式对驱油效果及储层伤害的影响[J].石油学报,2020,41(7):875-884,902.
WANG Qian, YANG Shenglai, BAI Jie, et al. Influence of CO₂ flooding mode on oil displacement effect and reservoir damage in heterogeneous multi-layer reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 875-884,902.
- [6] 周佩,周志平,李琼玮,等.长庆油田CO₂驱储层溶蚀与地层水结垢规律[J].油田化学,2020,37(3):443-448.
ZHOU Pei, ZHOU Zhiping, LI Qiongwei, et al. Reservoir corrosion and formation water scaling of CO₂ flooding in Changqing Oilfield[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(3): 443-448.
- [7] 张宏录,谭均龙,易成高,等.草舍油田CO₂驱高气油比并升举新技术[J].石油钻探技术,2017,45(2):87-91.
ZHANG Honglu, TAN Junlong, YI Chenggao, et al. New lifting technology for CO₂ flooding wells with high GOR in Caoshe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 87-91.
- [8] 赵习森,石立华,王维波,等.非均质特低渗透油藏CO₂驱气窜规律研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(6):131-139.
ZHAO Xisen, SHI Lihua, WANG Weibo, et al. CO₂ channeling sealing in ultra-low-permeability reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2017, 39(6): 131-139.
- [9] 周游,李治平,张磊,等.裂缝性特低渗透油藏CO₂驱封窜技术研究[J].油田化学,2017,34(1):64-68,78.
ZHOU You, LI Zhiping, ZHANG Lei, et al. Carbon dioxide flooding channeling blocking technology in fractured low permeability reservoirs[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(1): 64-68,78.
- [10] 杨子浩,罗智忆,林梅钦,等.改善低渗透油藏二氧化碳气驱油效果的耐温泡沫凝胶体系的构建[J].油田化学,2020,37(1):86-92.
YANG Zihao, LUO Zhiyi, LIN Meiqin, et al. Preparation of temperature resistant foam gel system for improving CO₂ gas flooding effect in low permeability reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(1): 86-92.
- [11] ZHANG Kaiqiang, LI Songyan, LIU Lirong. Optimized foam-assisted CO₂ enhanced oil recovery technology in tight oil reservoirs[J]. Fuel, 2020, 267: 117099.
- [12] ZHANG Chao, WU Pingkeng, LI Zhaomin, et al. Ethanol enhanced anionic surfactant solubility in CO₂ and CO₂ foam stability: MD simulation and experimental investigations[J]. Fuel, 2020, 267: 117162.
- [13] ZHANG Yongmin, FENG Yujun, WANG Yuejiao, et al. CO₂-switchable viscoelastic fluids based on a pseudogemini surfactant[J]. Langmuir, 2013, 29(13): 4187-4192.
- [14] DAI Caili, LI Weitao, CUI Ya, et al. The effect of functional groups on the sphere-to-wormlike micellar transition in quaternary ammonium surfactant solutions[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 500: 32-39.
- [15] 祖庸,李春洲,马宝歧.泡沫流变特性研究现状及进展[J].西北大学学报(自然科学版),1993,23(6):527-532.
ZU Yong, LI Chunzhou, MA Baoqi. The development of foam rheological property studies[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 1993, 23(6): 527-532.
- [16] 李春洲,祖庸,马宝歧.泡沫流变特性研究[J].化工学报,1993,44(4):480-485.
LI Chunzhou, ZU Yong, MA Baoqi. A study on foam rheological properties[J]. CIESC Journal, 1993, 44(4): 480-485.
- [17] 敬加强,代科敏,杨露,等.水基泡沫流变特性研究进展[J].西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(1):173-178.
JING Jiaqiang, DAI Kemin, YANG Lu, et al. Investigation advances in rheological properties of water based foam[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2013, 35(1): 173-178.

[编辑 刘文臣]