

高温低渗油藏二氧化碳泡沫封窜工艺研究与应用

周星光, 时维才, 余晓玲

(中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对江苏油田二氧化碳注入过程中发生气窜的问题,根据油藏特点研发了无氟环保型气溶性泡沫封窜剂。通过岩心物模实验,进行泡沫封窜体系、注入速度、注入量、最佳气液比等工艺参数优化,并结合国内外CO₂驱泡沫封窜工艺矿场实践经验,对段塞组合等注入工艺进行优化,形成适合江苏油田的CO₂驱泡沫封窜工艺,在S24井成功应用,并取得阶段增油效果。

关键词:CO₂驱;泡沫封窜;高温低渗;江苏油田

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Research and application of carbon dioxide foam channeling sealing technology in high-temperature and low-permeability reservoirs

ZHOU Xingguang, SHI Weicai, YU Xiaoling

(Petroleum Engineering Technology Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Aiming at the problem of gas channeling during CO₂ injection in Jiangsu Oilfield, a fluorine-free and environmentally-friendly gas-soluble foam channeling sealing agent was developed according to the characteristics of the reservoir. Core modeling experiments optimized the process parameters such as foam sealing channeling system, injection rate, injection amount, optimal gas-liquid ratio, etc. Combined with the domestic and foreign practical experience of the CO₂ displacement foam sealing channeling process, the injection process, such as slug combination, is optimized. The CO₂ flooding foam sealing channeling technology suitable for Jiangsu Oilfield was successfully applied in well S24, and the oil increase effect was achieved at a stage.

Key words: CO₂ flooding; foam sealing channeling; high-temperature and low-permeability; Jiangsu Oilfield

引用格式:周星光,时维才,余晓玲.高温低渗油藏二氧化碳泡沫封窜工艺研究与应用[J].复杂油气藏,2024,17(1):118-122.

ZHOU Xingguang, SHI Weicai, YU Xiaoling. Research and application of carbon dioxide foam channeling sealing technology in high-temperature and low-permeability reservoirs[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 118-122.

江苏油田持续加大二氧化碳驱油技术攻关和应用,注气规模持续快速上升。但气窜问题一直是影响CO₂驱油效果的一个重要因素,它减少了CO₂波及体积,降低了驱油效率。泡沫封窜是目前研究热点之一,已在国外多个油藏成功应用。近年来,国内油田加大研究力度,目前已进入现场应用阶段。本文在封窜剂研制的基础上,借鉴其他油田经验,在气窜井S24井进行了现场实验,取得了良好的应用效果。

1 泡沫封窜剂研发及性能评价

江苏油田油藏以高温低渗为主,CO₂驱发生气窜后,水溶性表面活性封窜剂注入困难,为此研发了环保型气溶性封窜剂。常规表面活性剂亲水性

界面,不能有效稳定液膜。目前的气溶性封窜剂含氟、硅,成本高,且存在环境不友好的问题。研发的新型泡沫封窜剂在存在CO₂的环境中,能够在水中形成稳定的CO₂泡沫,成本较低,环保性能好。

1.1 泡沫封窜剂静态效果评价

首先按照GB/T7462-94改进Ross-Miles法,对水溶性及气溶性封窜剂样品的静态起泡能力及稳泡性能进行评价。按一定比例顺序分别称取不同质量的样品,加入去离子水、矿化水、模拟地层水,配制成不同浓度的起泡液500 mL,从罗氏泡沫仪顶端倒入,记录停止倾倒起泡液后泡沫最大体积和泡

收稿日期:2023-08-31;改回日期:2024-01-22。

第一作者简介:周星光(1998—),助理工程师,从事注水(注气)工艺研究应用。E-mail:53867596@qq.com。

沫的半衰期,以表征泡沫的起泡能力和泡沫的稳定性,按泡沫综合指数评价起泡剂的泡沫性能。

对W-CF系列水溶性封窜剂及G-CF气溶性封窜剂进行泡沫性能实验,实验水样为地层水,矿化度为22 662 mg/L,样品质量分数为0.15%,实验温度为100 ℃,实验压力为10 MPa,实验结果见表1。气溶性封窜剂与水溶性封窜剂起泡性能相当,气溶性封窜剂稳泡性能更佳,其中G-CF4泡沫性能最优。

表1 封窜剂高压静态泡沫性能评价

样品名称	溶解性	泡沫高度/cm	半衰期/min	泡沫综合指数
W-CF1	常温 水溶	16.6	70	871.5
W-CF2		16.3	60	733.5
W-CF3		16.5	30	371.25
W-CF4		15.5	50	581.25
G-CF1		17	100	1 275
G-CF2		16.5	140	1 733
G-CF3		17	100	1 275
G-CF4		17	150	1 913

1.2 泡沫封窜剂溶解性能评价

向起泡剂体系中加入一定质量表面活性剂,增压CO₂,计算CO₂的加入质量,使搅拌速率为500 r/min,进行控温,保持压力不超过30 MPa,观察到体系澄清、透明;打开光源,使光源完全照亮可视釜内部,进行拍照记录;保持体系恒温,逐渐降低系统压力,观察釜内体系的透光性及对应的压力,当体系开始变浑浊时的压力即为体系的浊点压力。

观察相同温度不同压力和相同压力不同温度下,封窜剂G-CF4在CO₂中溶解度的变化。结果显示,温度相同时,压力越高,溶解度越大(见图1);高压下,溶解度对温度变化不敏感(见图2)。

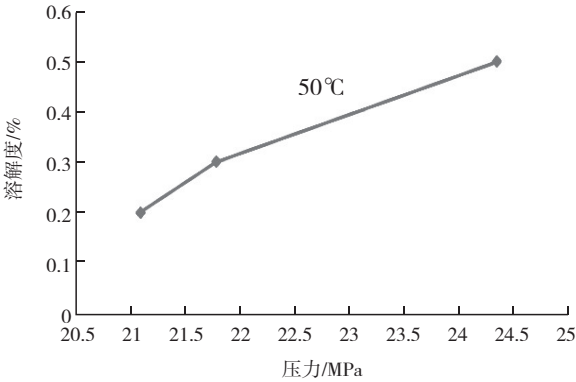


图1 压力对封窜剂溶解度的影响

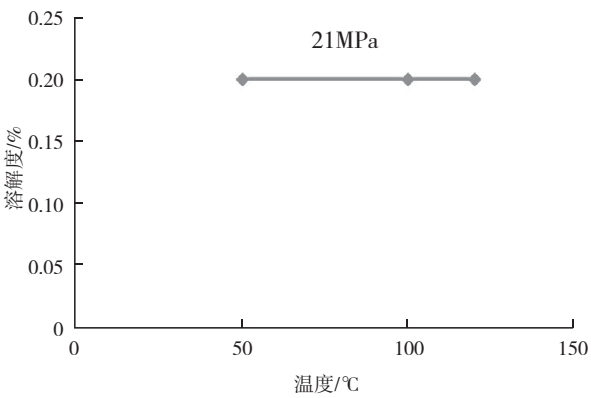


图2 高压下温度变化对封窜剂溶解度的影响

1.3 泡沫封窜剂分配系数评价

分配系数指一定温度下,处于平衡状态时,一种溶质分配在互不相溶的两种溶剂中的浓度比值。

将一定量的气溶性封窜剂与过量的CO₂加入高温高压反应釜中,在33.34 MPa,100 ℃条件下充分融合搅拌,测定不同封窜剂在CO₂中溶解性能和分配系数(见表2)。

表2 封窜剂溶液分配系数

样品编号	实验压力/MPa	分配系数(水/气)
G-CF4	33.34	4.0
	15	180.5

实验表明,在高温高压下,封窜剂在CO₂中溶解度达到0.5%以上,在水-气两相中均衡分布,在地层压力下分配系数为4.0。

1.4 油藏条件下封堵性能

选择3种不同物性岩心(见表3),在100 ℃、15 MPa条件下,向实验岩样中饱和水,获取此时的压差,注入速度0.5 mL/min、封窜剂段塞尺寸0.3 PV进行封窜实验,开展3种不同渗透率岩心条件下的封堵能力评价。

表3 实验岩心基础参数

岩心编号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²
FC19	5.72	2.51	12.7	50
FC44	6.87	2.54	25.47	127
FC23-6	4.92	2.49	14.92	6.46

随着封窜剂和CO₂的注入,不同物性岩心的阻力系数均有所增加,待CO₂突破后封堵能力下降。相同注入速度条件下,渗透率越大,阻力系数越大,封窜性能越好,表现出很好的渗透率选择性(见图3)。

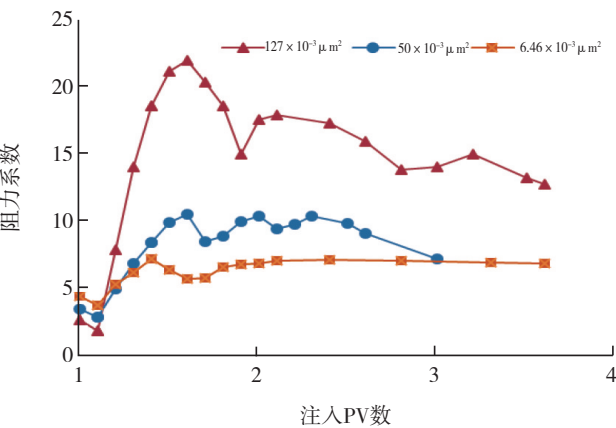


图3 不同渗透率岩心阻力系数

2 泡沫封窜工艺参数优化

2.1 注入速度优化

将天然岩心安装在岩心夹持器上,连通管线,升温至 100 ℃。为岩心施加围压(选用地层压力)。采用逐级饱和法饱和封窜剂至 15 MPa。测定此时的液测渗透率。随后采用不同的注入速度向岩心中注入封窜剂至其充分饱和,然后采用相同的注入速度注入 CO₂ 驱替,记录实验过程中的注入压差等数据(见表 4)。

表4 实验岩心基础参数

岩心编号	长度/ cm	直径/ cm	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
FC18	5.68	2.51	25.47	45.6

在 15 MPa, 100℃ 的实验条件下,对相同岩心采用 0.3 mL/min、0.5 mL/min、0.75 mL/min 和 1 mL/min 4 种注入速度对封窜剂封窜效果进行评价实验(见图 4、图 5)。

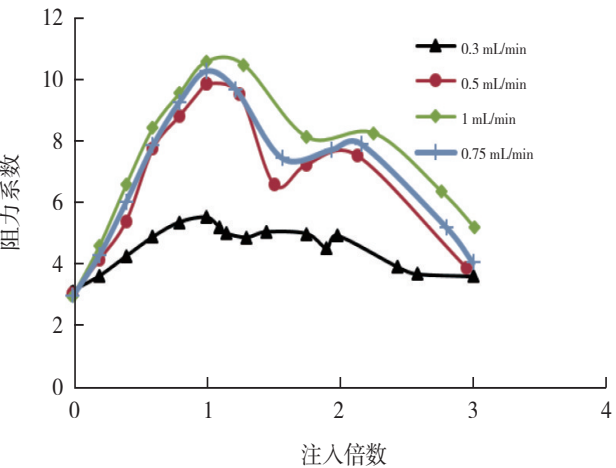


图4 不同注入速度下的阻力系数变化曲线

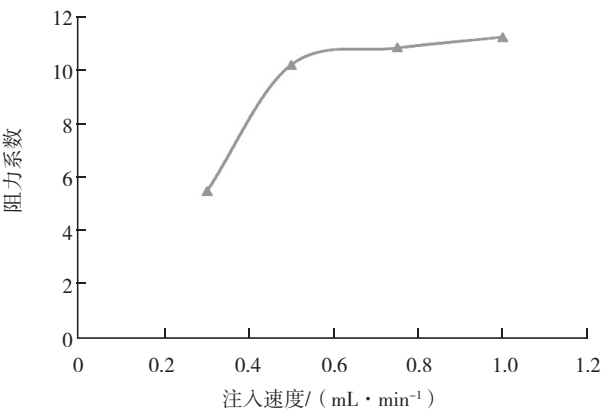


图5 注入速度与阻力系数的变化曲线

实验显示,当泡沫的注入速度为 0.3 mL/min 时压差较小,阻力因子仍然比较小,说明在该注入速度下,岩心中虽然能产生泡沫,但是泡沫的性能比较差,并不能形成有效封堵。而当注入速度达到 0.5 mL/min 时,压差增加,与相同注入速度下单注起泡剂相比,压差进一步增大,说明产生的泡沫性能进一步提高,封堵性能也有所改善。

注入速度与封窜剂的封窜效果呈正相关性,注入速度越高,封堵效果越明显,在注入速度达到 0.5 mL/min 后封堵效果增加缓慢。结合实际注入量,确定最佳注入速度为 0.5 mL/min。

2.2 注入量优化

封窜剂的注入量对封窜效果具有非常大的影响,确定封窜剂的最佳用量至关重要,利用驱油效率对比的方式,优选出最佳注入量。

在原始地层温度压力(100 ℃, 15 MPa)下,向实验岩样(渗透率取 100×10⁻³ μm²)中饱和水,在模拟地层条件下,用 CO₂ 驱油至无油流出的状态,获取此时的压差和驱油效率等参数。采用 0.5 mL/min 的注入速度向实验岩样中注入不同段塞量(0.1 PV、0.2 PV、0.3 PV、0.4 PV)的封窜剂,再继续注入 CO₂ 直至无油产出,根据驱油效率和压差等参数优化注入量。按照储层流动实验最高压力梯度标准,若实验压差梯度大于 2 MPa/cm 可停止实验。

实验岩心的基础参数见表 5;实验结果见表 6、图 6。

表5 实验岩心基础参数

岩心编号	长度/ cm	直径/ cm	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
FC1-2	7.91	2.51	18.12	122

表6 不同注入段塞下的实验数据				%
分类	不同注入段塞下的驱油效率			
	0.1PV	0.2 PV	0.3 PV	0.4 PV
CO ₂ 驱	71.43	71.43	71.43	71.43
CO ₂ 驱+封窜剂	79.29	82.86	86.43	87.86
提高采收率	7.86	11.43	15.00	16.43

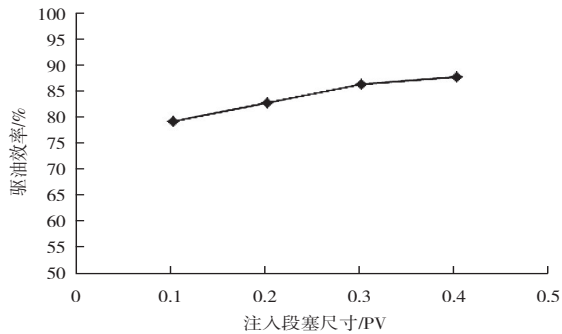


图6 不同封窜剂段塞的驱油效率对比

由图可以看出,驱油效率随注入段塞增加而增加,当注入段塞大于0.3 PV时,驱油效率增幅减小。实验发现,当注入封窜剂达到0.4 PV时,有部分封窜剂未与CO₂接触便已产出,没能发挥封窜剂的效果。分析其机理,注入流体段塞过大,可流动液体饱和度低,导致注入的气液迅速窜出,留在岩心中起作用的流体体积减小,注入段塞过大还导致气液分散不均匀。说明封堵地层的泡沫须适量,注入泡沫太少,对地层形成不了封堵,注入泡沫太多,多余的泡沫对地层封堵作用有限,综合考虑0.3 PV为最佳段塞注入量。

2.3 最佳气液比优选

气液比不仅影响泡沫的封堵能力,对泡沫驱油效果也存在很大影响。气液比过小,封窜剂不能有效发泡,阻力系数小;气液比过大,泡沫液膜变薄,气泡易破裂,阻力系数下降。

在100℃、15 MPa条件下,向实验岩样中饱和

水,然后进行不同比例的CO₂和封窜剂混合注入,获取压差变化。实验采用0.5 mL/min的注入速度,根据实验压差获取泡沫阻力系数优化出注入量。

气液比按1:1、2:1、3:1和4:1进行混注,结果显示泡沫气液比对泡沫封堵效果具有一定的影响,气液比为2:1时封窜性能最佳(见图7)。

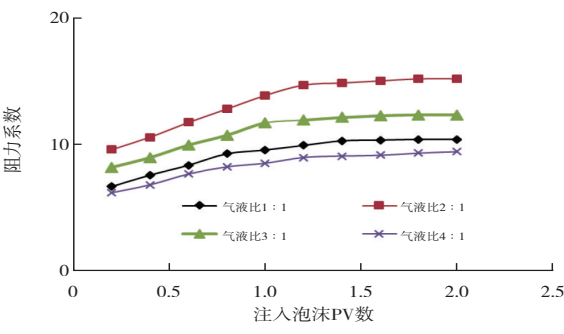


图7 不同气液比封堵效果对比

3 现场应用及评价

3.1 现场应用

根据泡沫封窜选井条件,优选了S24井作为泡沫封窜施工井,采用以下注入工艺:

- (1)多轮次、高浓度封窜剂溶液段塞与CO₂交替注入;
- (2)考虑吸附影响,封窜剂段塞高低浓度相结合;
- (3)低排量注入,防止水锁效应;
- (4)用量设计参考 $W = \pi r^2 h \varphi \beta$,其中 W 为封窜剂用量,m³; h 为封堵层段厚度,m; r 为封堵半径,m; φ 为地层孔隙度,%; β 为用量系数,取0.4。

整个工艺采用6段塞注入,所有的注气段塞注入速度均按20 t/d注入,每个封窜剂段塞含400 mg/L缓蚀阻垢一体剂,第6段塞注入完成后,按10 t/d连续注入CO₂。具体段塞设计如表7所示。

表7 封窜剂段塞设计					
第一段塞	第二段塞	第三段塞	第四段塞	第五段塞	第六段塞
1%封窜剂+0.04%缓蚀阻垢剂	CO ₂	0.5%封窜剂+0.04%缓蚀阻垢剂	CO ₂	0.5%封窜剂+0.04%缓蚀阻垢剂	CO ₂

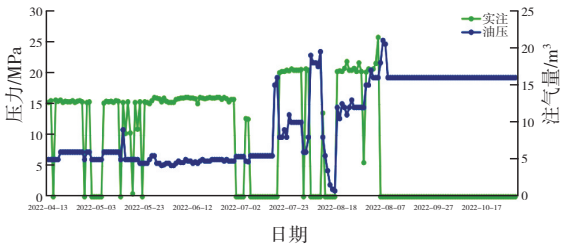


图8 S24井注气曲线

3.2 封窜效果评价

封窜后压力明显上升,注气压力由措施前的5.5 MPa(注气量12 t/d)上升至16 MPa(注气量20 t/d)。封窜后对应油井增油明显,封窜施工过程受效井S24-1日产油从1 t最高上升至3 t(见图8)。

4 结论

- (1)研发形成了无氟环保型气溶性泡沫剂,油

藏条件下对CO₂的封堵因子大于10,封堵效果较好。

(2)借鉴国内外矿场泡沫封窜经验,结合室内物模实验,形成了江苏油田泡沫封窜现场注入工艺。

(3)现场实验有效封堵气窜通道,注入后注气压力上升,对应油井增油明显。

(4)该技术是一项适合于江苏油田高温特低渗砂岩油藏注气开发的高效防窜技术,具有较好的发展前景。

参考文献:

- [1] 杨昌华,王庆,董俊艳,等.高温高盐油藏CO₂驱泡沫封堵体系研究与应用[J].石油钻采工艺,2012,34(5):95-97.
YANG Changhua, WANG Qing, DONG Junyan, et al. Research and application on foam plugged channeling system in high-temperature and high-salt reservoirs CO₂ flooding[J].Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5):95-97.
- [2] 杨昌华,邓瑞健,牛保伦,等.濮城油田沙一下油藏CO₂泡沫封堵体系研究与应用[J].断块油气田,2014,21(1):118-120,124.
YANG Changhua, DENG Ruijian, NIU Baolun, et al. CO₂ foam sealing channeling system research and application in Pucheng ES1 reservoir[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2014,21(1):118-120,124.
- [3] 金青爽,韩浩,吴纤,等.二氧化碳泡沫封堵体系筛选与评价[J].当代化工研究,2020(5):57-58.
JIN Qingshuang, HAN Hao, WU Xian, et al. Screening and evaluation of carbon dioxide foam plugging system [J]. Modern Chemical Research, 2020(5): 57-58.
- [4] 王璐,单永卓,刘花,等.低渗透油田CO₂驱泡沫封堵技术研究与应用[J].科学技术与工程,2013,13(17):4918-4921.
WANG Lu, SHAN Yongzhuo, LIU Hua, et al. Study and application of CO₂ flooding with foam channeling prevention technology for low permeability oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (17) : 4918-4921.
- [5] 周迅.CO₂泡沫封窜提高采收率实验研究[J].化工设计通讯,2017,43(9):145-146.
ZHOU Xun. Experimental study on enhanced oil recovery by CO₂ foam sealing [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(9):145-146.
- [6] 张彦庆,刘宇,钱昱.泡沫复合驱注入方式、段塞优化及矿场试验研究[J].大庆石油地质与开发,2001,20(1):46-48.
ZHANG Yanqing, LIU Yu, QIAN Yu. Injection pattern and slug optimization of foam flooding and its pilot test[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(1):46-48.
- [7] 王其伟.孤岛中二区低张力泡沫驱油体系性能研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(5):88-92.
WANG Qiwei. Performance research of ultra-low interfacial tension foam flooding system of Gudao second district [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(5):88-92.
- [8] 吴铁龙.二氧化碳驱气窜因素分析与泡沫封窜效果评价[J].内蒙古石油化工,2013(11):36-39.
WU Tielong. Analysis of gas channeling factors of carbon dioxide drive and evaluation of channeling sealing effect of foam[J].Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(11):36-39.
- [9] 李爱芬,陈凯,赵琳,等.泡沫体系注入方式优化及可视化研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(5):49-52.
LI Aifen, CHEN Kai, ZHAO Lin, et al. Optimization and visualization of injection mode of foam system [J]. Journal of Xi' an Shiyou University (Natural Science), 2011, 26 (5):49-52.

(编辑 韩 枫)