

减氧空气泡沫驱油藏方案优化设计探究

满娟 吴俊杰

中国石油吐哈油田分公司鲁克沁采油管理区 新疆哈密 839000

摘要: 随着油田开发进程加快, 油田开发面临的矛盾也逐渐加剧, 主要体现两个方面, 一是储层非均质严重, 原油粘度大, 含水上升快; 二是常规水驱采收率低。为超深超稠油田开发探索有效的能量补充方式, 开展减氧空气泡沫驱油藏方案优化设计具有重要意义。下面本文就对此展开探讨。

关键词: 减氧空气泡沫; 驱油藏方案; 优化设计

Study on Optimal design of air foam flooding reservoir

Juan Man Junjie Wu

Lukeqin Oil Production Management Area, Tuha Oilfield Company, petrochina, Hami 839000, China

Abstract: As the pace of oil field development accelerates, the contradictions faced in oil field development are gradually intensifying, primarily manifested in two aspects. Firstly, there is severe reservoir heterogeneity, high crude oil viscosity, and rapid increase in water content. Secondly, the conventional water flooding method has a low recovery rate. This calls for the exploration of effective energy supplementation methods and the optimization of the oxygen-depleted air foam flooding scheme for the development of ultra-deep and ultra-heavy oil fields. In the following sections, this paper will delve into this discussion.

Keywords: deoxygenated air foam; Reservoir drive scheme; Optimization design

一、研究背景

1.1 储层非均质严重, 原油粘度大, 含水上升快

岩心分析表明, 鲁克沁油田渗透率级差一般在 80 以上, 变异系数大于 0.7, 突进系数大于 3, 表现为严重非均质性 (如表 1, 所示)。

表 1, 所示岩心分析非均质性参数统计表

井号	层位	渗透率 (md)						评价
		最大	最小	平均	级差	变异系数	突进系数	
YD1	k ₂ II	814	10	182.2	81.4	0.957	4.47	严重非均质型
YD10 1	k ₂ II	1560	12.2	437.1	127.9	0.76	3.57	严重非均质型
YDP1	k ₂ II	2050	12.5	533.3	164	0.98	3.84	严重非均质型
YD20 1X	k ₂ II	913	23.1	304.5	39.5	1	3	严重非均质型
YD2	k ₂ II	1918	12.1	485.7	158.5	0.97	3.95	严重非均质型
YD20 2	k ₂ II	1650	10.2	203.8	161.8	1.47	8.1	严重非均质型
YD3	k ₂ II	904	14.3	254.9	63.2	0.67	3.55	严重非均质型
Y1	k ₂ II	529	6.51	127.1	81.3	0.77	4.16	严重非均质型
Y2	k ₂ II	810	6.12	184.2	132.4	0.87	4.4	严重非均质型
Y101	k ₂ II	45.5	3.03	10.9	15	0.91	4.17	严重非均质型

地层油水粘度比较大, 在 635~1168 之间。在储层严重非均质性和油水粘度比大双重因素影响下, 油田含水上升快,

采出程度不足 4%, 综合含水已达 68%左右。

1.2 水驱采收率低

通过室内水驱油、数值模拟、经验公式及统计规律多种方法预测得到中区水驱采收率为 13.5-15.8%, 比较低 (如图 1, 所示), 迫切需要探索有效提高中区采收率的技术手段。

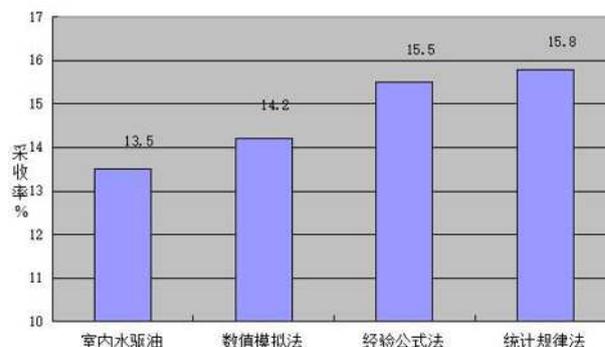


图 1 室内水驱油、数值模拟、经验公式及统计表

二、油藏数值模型建立

鲁克沁油藏属于高温(80℃)高盐(矿化度 100252mg/L~174925mg/L)高粘油藏, 使用常规数值模拟软件 Eclipse 不能准确的模拟地层开发情况, 根据油藏条件及拥有的相关资料分析, 确定使用 CMG (2005 版) 软件中的 STARS 进行鲁克沁稠油泡沫驱数值模拟计算 (如表 2, 所示)。

通过对目标油藏精细地质模型进行粗化和调整, 砂岩油藏 X 方向划分 71 个网格, Y 方向 77 个网格, Z 方向为 12 层 (10 个有效层和 2 个隔层), 有效网格节点总数为 65604

个。

表 2 数值模拟层与地质层对应表及其物性初始数据

平均值 模拟层		物性	孔隙度 /%	X 方向渗透率 / $10^{-3}\mu\text{m}^2$
全 区			19.3	343
隔 层	第 1 模拟层		—	—
$T_2k_2^{2-1-1}$	第 2 模拟层		20.8	551
$T_2k_2^{2-1-2}$	第 3 模拟层		20.6	618
$T_2k_2^{2-1-3}$	第 4 模拟层		19.4	361
隔层	第 5 模拟层		—	—
$T_2k_2^{2-2-1}$	第 6 模拟层		19.7	456
$T_2k_2^{2-2-2}$	第 7 模拟层		18.7	710
$T_2k_2^{2-2-3}$	第 8 模拟层		21.2	600
$T_2k_2^{2-2-4}$	第 9 模拟层		21.1	552
$T_2k_2^{2-3-1}$	第 10 模拟层		20.8	87
$T_2k_2^{2-3-2}$	第 11 模拟层		19.4	60
$T_2k_2^{2-3-3}$	第 12 模拟层		17.6	26

三、注入参数优化研究

结合国内外实施减氧空气泡沫驱实践,基于 CMG(2005 版)软件中的 STARS 泡沫驱油藏数值模拟软件机理研究结果,并综合考虑井区开发现状,确定使用起泡剂 XHY-4 有效浓度 0.1% (1000mg/L),注入气为减氧空气,氧浓度低于 5%。

3.1 注入方式

根据不同发泡方式填砂管驱替实验结果及气液比采用 1.2:1,在 10MPa 回压条件下交替注入岩心实验压力变化确定鲁克沁中区泡沫驱采用气液交替注入方式(如图,3-4 所示)。

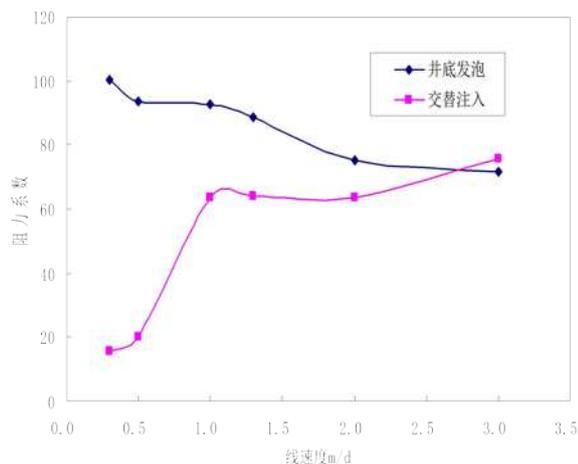


图 3 不同发泡方式对阻力系数影响

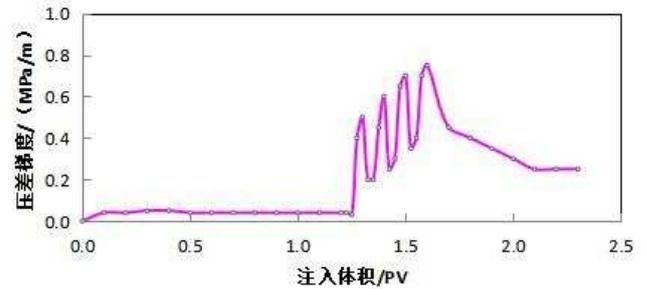


图 4 交替注入岩心实验压力曲线

3.2 注入速度设计

泡沫驱总段塞为 0.45PV、起泡剂有效浓度为 0.1%、气/液比为 1.0/1.0 及交替周期为 15d 条件下,分别开展了注采速度为目前注采速度 1 倍、1.2 倍、1.5 倍、2 倍、2.5 倍及 3 倍时的模拟计算。根据实验结果及油田生产实际,确定鲁克沁泡沫驱的注入速度为目前注水速度的 1.5 倍(如图,5 所示)。

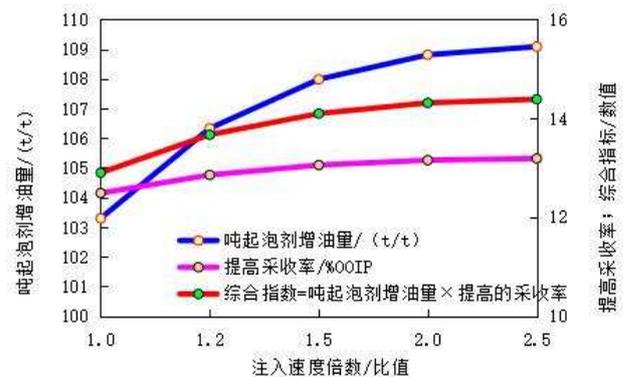


图 5 泡沫注入速度(目前水驱注入速度倍数)对泡沫驱油效果的影响

3.2.1 总段塞大小的优化设计

泡沫体系段塞大小是决定泡沫驱提高采收率大小和经济效益好坏的一个重要参数,它确定的是否合理,将直接影响到泡沫驱的总体效果。总段塞为 0.1% (1000mg/L,有效浓度) XHY-4。气/液比为 1.2:1.0,交替周期 60d 条件下,泡沫段塞注入结束后,继续进行后续水驱,直至试验区综合含水达到 90% (如表 3, 所示)。

表 3 总段塞大小对泡沫驱油效果的影响

主段塞 /PV	泡沫地下体积 / 10^4m^3	起泡剂用量 /t	提高采收率 /%OIP	增油量 / 10^4t	吨起泡剂增油量 / (t/t)	综合指标
0.05	26.28	403.35	2.56	7.68	190.40	5.56

0.09	47.3	726.07	5.72	17.19	236.75	15.48
0.15	78.84	1210.13	7.85	23.58	194.86	16.74
0.18	94.6	1452.14	8.26	24.81	170.85	15.46
0.27	141.91	2178.21	8.58	25.76	118.26	11.09
0.31	165.56	2541.21	10.01	30.07	118.33	12.97
0.36	189.21	2904.25	11.28	33.88	116.66	14.41
0.45	236.52	3630.32	13.40	40.23	110.82	16.23
0.495	260.17	3993.36	14.49	43.51	108.96	17.26
0.54	283.82	4356.39	15.05	45.2	103.76	17.08
0.58	307.48	4719.43	15.23	45.74	96.92	16.15

结果表明：随着泡沫注入量（段塞）的增加，泡沫比水驱提高的采收率值增大，吨起剂增油量降低，而综合指标曲线为两个开口向下的抛物线，即先增加后下降再增加。

3.2.2 前置段塞大小及浓度的优化设计

由于岩石对起泡剂的吸附滞留作用、地层水对起泡剂的稀释作用，使得先期注入的起泡剂大量损耗，甚至导致起泡剂浓度急剧下降到最低起泡浓度，使得前沿无法起泡，最终导致驱油效果变差。因此，优化确定鲁克沁泡沫驱的前置段塞，包括段塞大小及起泡剂浓度，具有重要意义。

当总段塞为 0.45PV 时，前置段塞起泡剂有效浓度对大段塞条件下泡沫的驱油效果几乎没有影响。前置段塞起泡剂 XHY-4 的有效浓度分别为 0.2%、0.3%及 0.4%时，泡沫驱的增油量相同。但由于起泡剂浓度增大、起泡剂用量增加，所以吨起剂增油量下降、综合指标下降（如表 4，所示）。

表 4 总段塞 0.45PV 时前置段塞对泡沫驱油效果的影响

前置段塞		起 泡 剂 用 量 /t	提 高 采 收 率 /%OOIP	增 油 量 /10 ⁴ t	吨起剂增油量 / (t/t)	综 合 指 标
浓 度 /%	段 塞 /PV					
0.2	0.009	3680	13.14	39.43	107.15	14.08
	0.018	3752	13.49	40.51	107.97	14.56
	0.036	3894	13.89	41.70	107.09	14.87

0.3	0.009	3701	13.14	39.43	106.54	14.00
	0.018	3794	13.49	40.51	106.76	14.40
	0.036	3978	13.89	41.70	104.81	14.56
0.4	0.009	3722	13.14	39.43	105.94	13.92
	0.018	3837	13.49	40.51	105.57	14.24
	0.036	4063	13.89	41.70	102.62	14.25

可以看出，当前置段塞起泡剂浓度为 0.2%时，随着前置段塞的增大，采收率由 0.005PV 时的 13.14%OOIP 增加到 0.02PV 时的 13.89%OOIP，增加了 0.75 个百分点。此外，由该图还可以看出，随着前置段塞的增大，吨起剂增油量曲线为开口向下的抛物线，即先上升、后下降，存在一个最大值。有效浓度为 0.2%、段塞为 0.018PV 时起剂吨增油量、提高的采收率值最大。

3.2.3 气/液比优化

在总段塞为 0.45PV、XHY-4 浓度为 0.1%及交替周期 10d 条件下，进一步开展了气/液比分别为 0.5/1、0.75/1、1/1、1.2/1、1.5/1、1.75/1 和 2/1 条件下，气/液比对鲁克沁泡沫驱油效果的影响（如表 5，所示）。

表 5 气/液比对泡沫驱油效果的影响

气/液比 /比值	泡 沫 体 积 /10 ⁴ m ³	起 泡 剂 用 量 /t	提 高 采 收 率 /%OOIP	增 油 量 /10 ⁴ t	吨起剂增油量 / (t/t)	综 合 指 标
0.50	236.52	3156	12.5	34.1	108.02	13.50
0.75	236.52	3369	13.06	37.3	110.70	14.46
1.00	236.52	3528	13.41	39.8	112.79	15.12
1.20	236.52	3630	13.51	41.6	114.59	15.48
1.35	236.52	3695	13.46	41.8	113.12	15.23
1.50	236.52	3752	13.38	41.3	110.07	14.73
1.75	236.52	3833	13.25	41.2	107.48	14.24
2.00	236.52	39005	12.92	40.9	104.85	13.55

考虑到实际应用的需要，确定鲁克沁油田泡沫驱的气/

液比为 1.0:1.0。其与室内岩心驱替试验确定的 1.0:1.0~1.2/1.0 范围基本一致。此时,提高采收率 13.41%OOIP,增产原油 $39.8 \times 10^4 \text{t}$ (如表 6, 所示)。

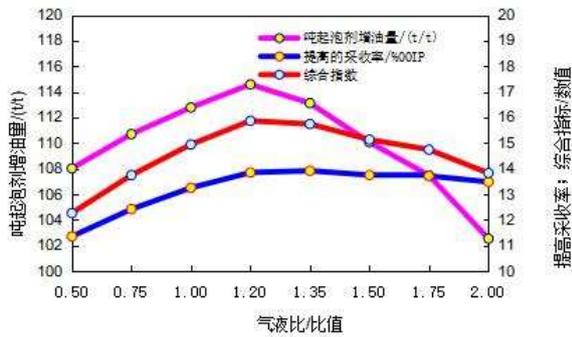


图 6 气/液比对鲁克沁泡沫驱油效果的影响

3.2.4 交替周期优化设计

在泡沫驱过程中,通常采用气液交替注入,但气液交替周期及频率,影响泡沫参数,例如起泡能力、泡沫半衰期 $t_{1/2}$ 、析液半衰期 $t_{1/2}$ 以及泡沫视粘度等,进而影响泡沫驱的驱油效果。

总段塞为 0.45PV、起泡剂 XHY-4 的有效浓度仍然为 0.1%、气/液比 1.0/1.0 条件下,分别开展了交替周期分别为 3d、5d、10d、15d、20d、30d、40d 和 50d 的模拟计算。

结果表明,在 3d~50d 的范围内,泡沫驱采收率、吨起泡剂增油量以及泡沫综合指标曲线均呈开口向下的抛物线。

当气液交替周期从 3d 增加至 10d 时,采收率先急剧地由 3d 时的 12.25%OOIP 增加至 10d 时的 13.69%OOIP,增加 1.43 个百分点,吨起泡剂增油量也由 101.37t 增加至 113.21t。进一步增大气液交替周期,在 10d~50d 的范围内,随着交替周期的增大,泡沫驱采收率逐渐降低,由 13.69%OOIP 降至 11.12%OOIP,降低 2.56 个百分点。考虑到鲁克沁油田实际操作,10d 的交替周期太短,无法完成气液交替操作,故确定鲁克沁油田泡沫驱的交替周期为 15d (如表 7, 所示)。

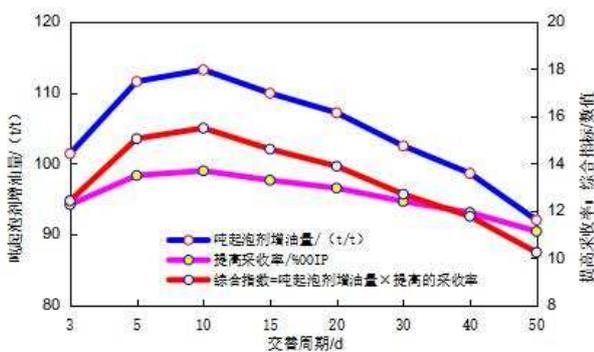


图 7 气液交替周期对泡沫驱油效果的影响

四、效果预测

应用数值模型对上述注采参数条件下的试验井组方案进行指标预测,试验区 15 年开发指标累计地面注气 $1412 \times 10^4 \text{m}^3$, 累计注液 $8.37 \times 10^4 \text{m}^3$, 累积产油 $59.91 \times 10^4 \text{t}$, 增油量 $32.98 \times 10^4 \text{t}$, 吨起泡剂增油量为 166.77t。15 年阶段产出程度可达到 19.5%。与水驱开发相比,提高采收率 6.8%,经济效益较好。实施减氧空气泡沫驱方案后,全区综合含水明显低于水驱开发方案,且含水上升平稳。

五、结论

通过数值模拟优化研究得到如下优化注入参数: 1) 泡沫驱总段塞尺寸: 0.45PV; 2) 段塞组成: 段塞组成: 0.005PV 前置段塞×起泡剂浓度 0.7%;0.445PV 主体段塞×起泡剂浓度 0.35%; 3) 初期设计气/液比为 1:1 (地下体积比); 4) 气液交替注入周期为 15d; 5) 注入速度: 目前注水速度的 1.5 倍,即 0.015PV/a。该研究成果在试验井组应用,预测能取得较好的经济效益,为深化减氧空气泡沫驱应用研究,提高稠油油藏的采收率奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] 李海波,侯吉瑞,李巍,等.碳酸盐岩缝洞型油藏氮气泡沫驱提高采收率机理可视化研究[J].油气地质与采收率,2014,21(04):193-196.
- [2] 夏威,蔡潇,丁安徐,等.南川地区栖霞-茅口组碳酸盐岩储集空间研究[J].油气藏评价与开发,2019,11(02):197-203.
- [3] 乐宏,刘飞,张华礼,等.强非均质性碳酸盐岩气藏水平井精准分段酸压技术——以四川盆地中部高石梯-磨溪震旦系灯四段气藏为例[J].天然气工业,2019,41(04):151-160.
- [4] 桑林翔,吕柏林,卢迎波,等.新疆风城 Z32 稠油油藏注气辅助蒸汽驱实验研究及矿场应用[J].油气藏评价与开发,2019,11(02):241-247.
- [5] 苑登御,侯吉瑞,王志兴,等.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气及注泡沫提高采收率研究[J].地质与勘探,2016,52(04):791-798.