

闭合泡沫酸化技术在牛心坨油田的应用

王德盛

(中油辽河油田公司高升采油厂工艺研究所 辽宁 盘锦 124010)

DOI:10.12238/jpm.v3i3.4752

[摘要]针对牛心坨油田的储层特点和流体性质,开展闭合裂缝泡沫酸化技术研究与应用,形成了闭合泡沫酸化配方体系。在此基础上,开展配方的耐温、耐盐及抗油污染性评价和岩心驱替室内实验,进一步验证了优化后配方的合理性。并研究确定了牛心坨油田闭合泡沫酸化的泡沫参数、施工工艺和施工参数,为现场实施提供了技术支持。

[关键词]泡沫酸化; 闭合酸化; 解堵; 研究; 牛心坨

Application of closed foam acidizing technology in Niuxintuo Oilfield

Wang Desheng

(Technology Research Institute of Gaosheng oil production plant of PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, Liaoning)

[Abstract] according to the reservoir characteristics and fluid properties of Niuxintuo oilfield, the closed fracture foam acidizing technology was studied and applied, and a closed FOAM ACIDIZING formula system was formed. On this basis, the evaluation of temperature resistance, salt resistance and oil pollution resistance of the formula and the indoor experiment of core displacement were carried out to further verify the rationality of the optimized formula. The closed foam acidification parameters, construction technology and construction parameters of Niuxintuo oilfield are studied and determined, which provides technical support for field implementation.

[Key words] foam acidification; Closed acidification; Unblocking; Research; Niu Xintuo

前言

牛心坨油田位于辽河断陷西部凹陷北端,具有储层物性差、纵向上差异大、非均质性强等特点,采用常规酸化技术无法实现均匀改造,而且容易返排不彻底导致二次污染,使酸化效果下降。基于以上存在的问题开展闭合泡沫酸化工艺技术的研究,该技术不仅有助于溶蚀沟通裂缝通道,利于残酸液返排,而且安全高效。

1. 闭合泡沫酸化技术原理

闭合泡沫酸化技术为闭合酸化和泡沫酸化的复合技术,主要应用于压裂后低产低效油井^[1],对以往压裂形成的裂缝通道进行溶蚀恢复,达到闭合酸化的功能^[2];泡沫酸化可以调整酸化剖面实现均匀酸化,利用泡沫酸化作用距离远的特性,可以提高酸化处理半径;而且泡沫流体遇水稳定、遇油消泡,在酸化过程中泡沫液的贾敏作用对水层进行暂堵,使酸液进入油层实现泡沫分流酸化,避免高含水井酸化后出水加剧;利用氮气增能,提高返排效率。

2. 室内研究

2.1 主要污染因素

牛心坨油田主要污染因素多为钻井液、固井液水泥浆进入地层引起地层损害;射孔时射孔弹的碎屑堵塞孔道;原油开采过程中,油层砂粒运移,粘土膨胀,无机物沉淀以及石蜡、沥青在井底附近沉积,造成的堵塞;上述原因造成井筒附近地层的伤害降低了该地层的渗透能力,流体流动阻力增大,井筒附近的压力损耗也相应增大,因而使油井产量下降。针对不同类型的地层伤害,堵塞物、岩石及胶结物,通过室内实验优选出酸液配方。

2.2 酸液配方体系优选

2.2.1 主要用酸液类型及含量的确定

针对牛心坨油田的储层特点和流体性质,在酸液前端设计有机预处理段塞,在溶解清除近井地带有机堵塞物的同时,还可形成隔离段塞,再用泡沫顶替液进行顶替,即可保证酸液处理效果,又可促进残酸返排,减轻酸化二次伤害。

选取牛心坨油田不同层段的岩心,考察岩芯在不同浓度盐酸的溶蚀率。实验温度设为油藏温度 40℃,称取一定量 100 目岩屑与酸液按质量比 1:20 进行混合,在 40℃下恒温 4h,冲洗过滤干燥后,根据反应前后岩屑量计算溶蚀率^[3]。

实验结果表明,HCl 对碳酸盐岩的溶蚀率较好,最高可以达到 47.8%。随着盐酸浓度的增加,溶蚀率逐渐增大,但当盐酸浓度超过 10.0%以后,再增加盐酸的用量,溶蚀率增加幅度下降。为了使经济效益达到最大化,降本增效,通过配方优选,针对碳酸盐岩的酸液选择使用 HCl,用量 10.0%。

表 1 不同浓度配比(HF:HCl)对储层岩芯的溶蚀率(40℃、4h)

岩屑样品	不同浓度配比(HF:HCl)时的溶蚀率(%)			
	1.5% 13.5%	3%:15%	5%:15%	5%:10%
T32-34-1	17.9	21.4	16.0	21.6
T33-29-1	42.9	42.3	24.1	22.2
T33-29-2	20.0	13.6	9.2	9.4
T33-29-3	38.4	35.5	24.0	29.4
T32-34-2	48.0	31.1	23.5	18.2

由表 1 可知,HF 与 HCl 浓度分别为 1.5%、13.5%和 3%、15%时,不同砂岩层段岩芯溶蚀率均较高。其中,采用 1.5%HF:13.5%HCl 时,最高溶蚀率可达 48.0%。而且,由于地层岩性的复杂性,其中含有大量的 Ca²⁺、Na⁺、K⁺离子以及不同

程度地含有钙长石、钠长石、钾长石,胶结物中含有钙质矿物,它们遇 HF 酸易生成 CaF_2 、 Na_2SiF_6 、 K_2SiF_6 沉淀,造成二次污染。一旦 HF 酸的用量过高,由于二次沉淀物大量沉积,反而使得溶蚀效果较差。这一点由表中数据可以看出,当 HF 酸含量为 5.0% 时,不同层段的岩心溶蚀率总体呈现出不同程度的下降。因此,针对砂岩层段的酸液选择使用 HF 与 HCl 使用浓度分别为 1.5~3%、13.5~15%。

2.2.2 酸液动态溶蚀率的评价

酸液对储集层岩石的溶蚀速度取决于储集层岩石性质和地层温度,也与酸液添加剂有关。在动态实验方法中,采用动态溶蚀率来评价酸液的溶蚀性。动态溶蚀率的数值等于岩心酸化前后的干重之差与岩心酸化前的干重的比值。实验结果数据见表 2。

表 2 溶蚀率实验结果数据表

岩心编号	实验用酸	反应时间 (h)	酸化前干重 (g)	酸化后干重 (g)	溶蚀率 (%)
S-4	泡沫酸	2			33.84
T-4					46.03
S-2	4	4			45.37
T-2					31.56

S-4	泡沫酸	2			33.84	33.31	1.57
T-4					46.03	45.08	2.06
S-2	4	4			45.37	44.62	1.65
T-2					31.56	30.85	2.25

由表 2 数据可知,反应时间是 2h,岩心 S-4 的溶蚀率是 1.57%,岩心 T-4 的溶蚀率是 2.06%;反应时间是 4h,岩心 S-2 的溶蚀率是 1.65%,岩心 T-2 的溶蚀率是 2.25%。

可以看出,泡沫酸对岩心有一定的溶蚀性,可以增大岩心的溶蚀孔道,使岩心的渗透率提高,从而达到酸化的目的。

2.2.3 缓蚀剂优选

由于酸液对施工车辆、管线、井下设备腐蚀严重,会生成大量铁离子随着酸液被注入地层,在残酸返排过程中,由于 pH 值不断升高,可能会出现 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀,对地层造成二次伤害,影响酸化效果^[4]。按照 SY/T5405-1996 “酸化缓蚀剂评价指标和实验方法”,对缓蚀剂在酸液中的缓蚀性能进行了评价。

表 3 60℃下酸化缓蚀实验

缓蚀剂类型	实验前挂片品质 (g)	实验后挂片品质 (g)	挂片失量 (g)	腐蚀速率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均腐蚀速率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	缓蚀率 (%)
HS-1 (2.0%)	10.2407	9.6285	0.6122	54.66	54.73	96.7
	10.2416	9.6278	0.6138	54.80		
CH_2O (2.0%)	10.2728	9.1052	1.1676	104.25	104.61	93.7
	10.2754	9.0966	1.1758	104.98		

从以上数据可以看出,在 60℃ 下缓蚀剂 HS-1 的缓蚀效果优于缓蚀剂甲醛,并且受温度影响不大。因此,考虑到甲醛具有毒性、刺激性气味等缺点以及地层复杂温度变化等因素后建议使用缓蚀剂 HS-1。

2.2.4 铁离子稳定剂优选

表 4 不同类型铁离子剂稳定能力比较 (40℃)

铁稳定剂种类	V_1 (ml)	V_2 (ml)	pH=3.6 时现象	煮沸显现	稳定能力 (mg/l)
TW-1	6.0	2.0	澄清不透明	沉淀	1500
草酸	8.0	0.5	澄清不透明	沉淀	800
葡萄糖	6.0	3.0	澄清不透明	沉淀	1000

实验结果表明,采用 TW-1 作为铁离子稳定剂效果较好。

2.2.5 粘土稳定剂优选

酸化过程中,酸液或残酸与白云岩中粘土矿物接触时,除发生化学反应外,还存在粘土矿物的水化膨胀。酸液中需加入粘土稳定剂,抑制白云岩中粘土矿物水化膨胀,防止水敏伤害表 5 两种粘土稳定剂的防膨率

为防止酸液中 3 价铁离子形成二次沉淀,在加入缓蚀剂的同时需要加入铁离子稳定剂。按照 SY/T6571-2003 “酸化用铁离子稳定剂性能评价方法” 优选铁离子稳定剂。

根据地层条件,考虑成本与性能,通过初步筛选,铁离子稳定剂主要选用草酸、TW-1 和葡萄糖。实验结果见表 4。

储层。按照 SY/T5762-1995 “压裂酸化用粘土稳定剂性能测定方法” 优选粘土稳定剂。

根据地层条件,考虑成本与性能,通过初步筛选,粘土稳定剂主要选用具有代表性的 KCl 以及 FP-1,并对两种粘土稳定剂进行评价,评价结果如下:

温度	粘土稳定剂	在水中的膨胀体积平均值 (ml)	在粘土稳定剂溶液中的膨胀体积平均值 (ml)	在煤油中的体积平均值 (ml)	防膨率 (%)
室温	KCl	4.75	1.17	0.80	90.64
	FP-1	4.75	1.28	0.80	87.85
40℃	KCl	4.87	1.35	0.77	85.85
	FP-1	4.87	1.30	0.77	86.07
60℃	KCl	5.00	1.65	0.48	74.11
	FP-1	5.00	1.47	0.48	78.10

由以上数据可知,相对于防膨剂 KCl,虽然在常温下防膨剂 FP-1 防膨效果没有 KCl 好;但是在 40~60℃ 温度下防膨剂

FP-1 防膨效果要优于 KCl,随着温度越来越高,FP-1 的效果越来越显著,故综合考虑经济因素与性能,在 40~60℃ 温度下选

用粘土稳定剂为防膨剂 FP-1。

2.3 配方体系评价及室内实验

2.3.1 配方耐温性能评价

按配方配制酸液，共 100ml；高速搅拌（4000r/min）5min 后，通过发泡体积 V（ml）与半衰期 $T_{1/2}$ （min）对其耐温性能进行评价。

实验结果表明，随着温度升高，泡沫发泡体积和半衰期均有下降趋势，但是，依然能维持在一个可以接受的范围内。在 60℃ 下，发泡体积 440ml，半衰期 89min，可以满足现场施工要求。

2.3.2 配方耐盐及抗油污染性能评价

按配方配制酸液，共 100ml；高速搅拌（4000r/min）5min 后，通过发泡体积 V（ml）与半衰期 $T_{1/2}$ （min）对其耐盐及抗油污染性能进行评价。实验结果见下表。

表 6 矿化度对配方体系泡沫性能的影响（40℃）

矿化度 (g/l)	0	10	20	40	60	80
V (ml)	460	460	450	430	360	270
$t_{1/2}$ (min)	106	97	82	71	45	31

表 7 配方体系泡沫性能（40℃）

原油加量 (%)		0	2	6	10	15	20
加入原油后起 泡时	V (ml)	460	460	430	420	450	450
	$t_{1/2}$ (min)	106	92	89	70	90	96
起 泡 后 加入原油时	V (ml)	460	460	460	460	460	460
	$t_{1/2}$ (min)	106	92	83	70	61	49

由表 6 可以看出，矿化度低于 40g/l 时泡沫较稳定，发泡体积大于 430ml、半衰期大于 71min，满足现场施工要求；由表 7 可看出，40℃ 下，20% 以内的原油对泡沫体系稍有影响而半衰期随原油加量的增加而稍有增加。这主要是因为高速搅拌器的强力搅拌下，对油有很好的乳化作用，被乳化后的油对泡沫有稳定作用；少量的原油对泡沫酸体系泡沫稳定性的影响不大，但随着原油加量的增加，泡沫的稳定性就会下降。这是因为油对泡沫有抑制和破坏的作用，无论用何种起泡剂配制的泡沫，接触油类后稳定性将降低。

综上所述，可见酸液配方效果良好。证明了配方耐温、耐盐和耐油性能优良。

2.3.3 岩心驱替实验

用液体驱替岩心，记录岩心两端压差、岩心出口端流量，可以根据达西定律计算测得岩心的渗透率。

表 8 酸化实验结果

实验方案		砂岩 泡沫酸	灰岩 泡沫酸	白云岩 泡沫酸
岩心编号		S-1	S-2	T-2
酸化前	干重 m_1 (g)	78.87	45.37	31.56
	孔隙度 ϕ_1 (%)	18.25	20.02	2.93
	气测渗透率 K_{g1} ($10^{-3} \mu m^2$)	81	97	3.56
	水测渗透率 K_{w1} ($10^{-3} \mu m^2$)	24.68	34.0	0.76

酸化后	干重 m_2 (g)	77.47	44.62	30.85
	孔隙度 ϕ_2 (%)	21.32	22.13	3.10
	气测渗透率 K_{g2} ($10^{-3} \mu m^2$)	101.52	128.23	4.62
	水测渗透率 K_{w2} ($10^{-3} \mu m^2$)	29.57	43.6	0.94

由以上数据分析可知，优化后的酸液配方体系具有较好的溶蚀效果，改善了岩心的渗透率，孔隙度。酸液对储层堵塞物及矿物的溶蚀会提高储层的渗透率，改善注入能力，达到酸化的目的。

因此，对于牛心坨油田，闭合泡沫酸化从渗透率和孔隙度变化率指标来看，所筛选的配方体系均达到较好的效果。

2.3.4 酸液返排率的评价

一般来说，返排应当无水反驱的过程。因此本次实验设计在酸化注酸结束时保持注酸时的压力，关闭岩心出口，等待酸岩反应，待反应结束后，打开注酸时的入口，利用岩心中的压力将岩心中残酸排除，模拟返排过程。计量返排酸液量，计算返排率。

从实验结果数据可以发现，对于砂岩泡沫酸，岩心的返排率是 88%；对于碳酸盐泡沫酸，岩心的返排率是 85%。实验数据显示，返排效果较好。渗透率大的岩心，返排率大，这是由于在泡沫酸流动过程中，由于泡沫的变形特点，孔隙大小参数对其流动性能的影响非常大。渗透率大，相应的孔隙越大，泡沫的流动性强，返排率高。

综上所述，岩心的渗透率高，相应的孔隙大，酸的流动性强，返排能力也强，酸液对岩心的溶蚀效果就好，达到酸化的目的。

2.4 施工工艺参数确定

2.4.1 气液比

泡沫酸一般气相占 60%~80%，要使泡沫稳定连续，泡沫相必须大于 60%，小于 80%^[5]。

结合牛心坨油田的实际情况，地层温度约在 60~70 摄氏度之间，考虑到牛心坨西部灰岩动用程度不均，非均质性强，因此，用低气液比，提高酸液溶蚀能力，设计泡沫气相占 60%，气液比选择 3:2。

2.4.2 酸液用量

药剂用量计算公式：为了沟通远井压裂裂缝，处理半径 r
 $V = \pi r^2 h \phi$ 。（按照气相占 60%，气液比为 3:2，地面施工压力 20MPa 计算）

根据理想气体状态方程计算可得地面标态下氮气的量。

2.4.3 注入工艺参数

(1) 注氮工艺

氮气气源采用车载制氮设备制取，氮气浓度 98%，单套制氮能力最大 1200m³/h，额定注气压力 25MPa。

(2) 发泡工艺

泡沫发生器最高耐压可达 70MPa，材质为白钢和钛填充材料，氮气和酸液在泡沫发生器中进行充分混合发泡，可得到较为稳定的泡沫酸液。

图 1 酸化用泡沫发生器

(3) 注入速度

目前制氮设备排量 900~1200m³/h, 标态下, 氮气排量 15~20m³/min, 酸液排量为 0.5~1m³/min。

(4) 注入压力

酸化必须在低于破裂压力下注液。因为超破裂压力注液, 酸液可沿裂缝滤失, 注完液, 压力下降, 裂缝闭合, 则近井地带

带渗透率并未得到提高。

3.现场实施效果

2016 年以来, 闭合泡沫酸化技术在牛心坨油田已实施 9 井次, 措施后平均单井增油 1165.3t, 累增油 1.05×10⁴t, 平均综合含水由 67.8%降至 61.1%, 控水效果显著。且截止 2020 年 10 月其中 7 口井仍有效, 取得了较好的措施效果。

表 9 闭合泡沫酸化效果统计表

序号	井号	措前产量			措后平均日产			累增油 t	是否有效
		液 t	油 t	含水%	液 t	油 t	含水%		
1	T34-034	7.6	1.8	76	12.6	3.7	69	1088	
2	T33-37C	0.2	0.1	32	5.2	2.3	53	2630.7	仍然有效
3	T30-30	1.6	0.8	50	6.2	3.3	48	3357.7	仍然有效
4	T35-029	10.3	1.8	83	16.8	2.9	81	1039.1	仍然有效
5	T27-31	2.7	1.6	62	5.4	2.2	44	313.9	
6	T-ArH105	2.9	1.8	60	5.2	3.7	26	956	仍然有效
7	T40-34	9.6	1.1	77	11.8	2.1	68	392.8	仍然有效
8	T30-036C	1.8	0.4	80	11.4	2.7	75	584.9	仍然有效
9	T32-34	10.3	1.1	90	16.2	2.1	86	124.2	仍然有效
合计								10487.3	

4.结论

(1) 针对牛心坨储层非均质性严重、酸敏性强等特点, 室内研制出一种具良好耐温、耐盐和耐油性的泡沫酸体系。

(2) 通过现场试验, 闭合泡沫酸化在牛心坨油田取得了较好的试验效果, 免了常规酸化解堵措施作用时间短、处理半径小、在非均质地层中无法均匀布酸而引起油井含水上升等问题, 为类似的油藏提供了一条新的技术手段, 具有很好的推广应用前景。

参考文献

[1] 蒋建方, 肖丹凤, 王贤君, 于景波. 大庆高台子油层闭合酸化技术[J]. 石油钻采工艺, 2003, 01.

[2] 赵立强, 缪尉杰, 罗志锋, 龚云蕾, 汪鹏, 李屹洋. 闭

合酸蚀裂缝导流能力模拟研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 02.

[3] 李国. 泡沫酸配方优选及其配伍性评价[J]. 化工设计通讯, 2017, 07.

[4] 谢梦春, 杜卫刚, 陈肖帆, 高祥涛, 杨力. 一种泡沫酸体系优选评价及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 11.

[5] 沈文敏. 泡沫酸化技术在曙光油田的应用[J]. 精细石油化工进展, 2015, 03.

[6] 关富佳, 姚光庆, 刘建民. 泡沫酸性能影响因素及其应用[J]. 西南石油学院学报, 2004, 01.