

# 岩石矿物分析和酸化体系研究及经济效益分析

苗 鑫 葛立武 吴昊洋 刘婉清 杨国良 (中国石化胜利油田河口采油厂, 山东 东营 257200)

**摘 要:** 本研究通过对胜利油田河口采油厂储层的岩石矿物分析与酸化技术的优化, 旨在提高油田的采油效率并降低作业成本。研究采用 XRD 技术分析岩石矿物组成, 结果表明储层岩石中石英、长石和碳酸盐矿物的含量较高, 且粘土矿物含量较低。基于岩石矿物特性, 本研究设计了不同的配比的盐酸、土酸酸化体系并开展溶蚀实验, 明确了该类储层适用 HF 浓度范围及前置盐酸的重要作用。经济效益分析表明, 通过优化酸化技术, 每年可为油田带来约 200 万元/年的产值增长, 同时减少 15%-20% 的酸化作业成本, 预计节省设备维护费用 500 万元/年。整体来看, 本研究的酸化优化方案为油田提供了显著的技术和经济效益, 具有一定的推广意义。

**关键词:** 岩石矿物分析; 酸化体系; 渗透率恢复; 经济效益; 油田酸化

## 1 引言

在油田开采过程中, 储层的渗透率和孔隙结构直接影响油气的开采效率, 而通过酸化处理改善渗透率, 已成为提升油田产能的常用方法。因此, 开展岩石矿物分析、优化酸化技术对提高油田的整体经济效益和资源利用效率具有重要的意义。

## 2 岩石矿物分析

区块油层温度 110℃ ~ 120℃, 岩石平均空气渗透率  $27.8 \times 10^{-3} \text{um}^2$ , 孔隙度 16.6%, 岩石具有强亲水性, 岩石矿物 XRD 分析结果见表 1。

从表 1 可以看出, 石英一般含量在 30 ~ 34% 之间, 长石含量在 29 ~ 48% 之间, 同时碳酸岩含量在 21 ~ 39% 之间, 粘土矿物在 7 ~ 8% 之间。上述结果说明, 该储层相对于一般砂岩储层较特殊, 石英含量较低, 长石和碳酸盐岩含量较高。

## 3 酸化体系研究

### 3.1 酸液设计原则

从岩心组成看, 适应该地区的酸液应以盐酸或含

有低 HF 的土酸为主。

### 3.2 酸液与储层岩石的溶蚀性研究

针对表 1 所示三个小层的岩粉, 设计了盐酸 (含 10%HCl)、低氟土酸 (含 9%HCl、0.5%~3%HF) 两组试验, 测试不同酸液对岩心粉末的酸蚀效果。设计实验温度 90℃, 溶蚀时间 2h。

#### 3.2.1 岩粉与盐酸的溶蚀试验

9-7 井 S<sub>2</sub><sup>5</sup> 层岩粉、6-14 井 S<sub>2</sub><sup>6</sup> 层岩粉和 9-15 井 S<sub>2</sub><sup>9</sup> 层盐酸溶蚀率结果见表 2 所示。

从表 2 可知, 储层盐酸可溶物均很高, 都超过 20% 以上, 说明该区岩石碳酸盐含量高。三口井中, 以 9-15 井 S<sub>2</sub><sup>9</sup> 层溶蚀率最高, 达 34% 左右, 9-7 井 S<sub>2</sub><sup>5</sup> 层和 6-14 井 S<sub>2</sub><sup>6</sup> 溶蚀率相当。与 X 衍射分析得出的岩心组成结果一致。

#### 3.2.2 岩粉与土酸的溶蚀试验

9-7 井 S<sub>2</sub><sup>5</sup> 层岩粉、6-14 井 S<sub>2</sub><sup>6</sup> 层岩粉和 9-15 井 S<sub>2</sub><sup>9</sup> 层岩粉与土酸溶蚀率实验结果见表 3。

由表中数据可见, 储层土酸溶蚀率均超过 30%,

表 1 岩芯 XRD 分析结果 (全岩分析)

序号	岩样	粘土矿物 绝对含量	非粘土矿物各组分相对含量 (%)				
			石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石
1	9-7 井 S <sub>2</sub> <sup>5</sup> 层	7.80	30.38	16.63	31.79	21.19	0.00
2	6-14 井 S <sub>2</sub> <sup>6</sup> 层	6.47	34.76	16.95	27.28	21.02	0.00
3	9-15 井 S <sub>2</sub> <sup>9</sup> 层	8.50	30.86	5.49	24.57	4.90	34.19

表 2 岩粉与盐酸溶蚀结果

序号	井号	酸液浓度	滤纸重 (g)	岩粉重 (g)	反应后滤纸 + 岩粉重 (g)	岩粉失重 (g)	溶蚀率 (%)
1	9-7	10%HCl	1.0170	4.9988	4.6834	1.3324	26.65
2	9-7	15%HCl	0.9902	5.0020	4.6371	1.3551	27.09
3	6-14	10%HCl	1.0000	4.9952	4.6984	1.2968	25.96
4	6-14	15%HCl	1.0052	5.0028	4.6694	1.3386	26.76
5	9-15	10%HCl	1.0258	4.9943	4.4137	1.6064	32.16
6	9-15	15%HCl	1.0462	5.0049	4.3014	1.7497	34.96

表 3 岩粉与土酸溶蚀结果

序号	序号	酸液浓度	滤纸重 (g)	岩粉重 (g)	反应后滤纸 + 岩粉重 (g)	岩粉失重 (g)	溶蚀率 (%)
1	9-7	0.5%HF	1.0303	5.0013	4.4632	1.5684	31.36
2	9-7	1.0%HF	0.9879	4.9984	4.2982	1.6881	33.77
3	6-14	0.5%HF	1.0316	4.9958	4.3994	1.6280	32.59
4	6-14	1.0%HF	1.0382	5.0034	4.1354	1.9062	38.10
5	9-15	0.5%HF	1.0042	4.9957	4.0470	1.9529	39.09
6	9-15	1.0%HF	1.0035	5.0045	3.8626	2.1454	42.87

9-7 井 S<sub>2</sub><sup>5</sup> 层和 6-14 井 S<sub>2</sub><sup>6</sup> 层岩粉溶蚀率相差不大，而 9-15 井 S<sub>2</sub><sup>9</sup> 层岩芯的溶蚀率最高，且 0.5%HF 即可满足溶蚀，因此建议体系氢氟酸浓度为 0.5-1%。

3.3 岩心酸化流动实验

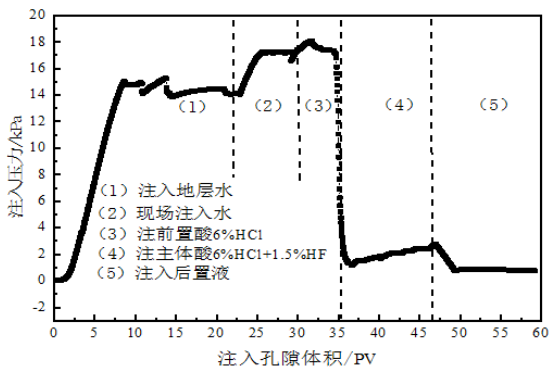


图 1 S-3 岩心酸化实验

选取该区天然岩心，参数见表 4，设计了盐酸（10%HCl）、低氟土酸（含 10%HCl、1%HF）两种体系。

流动实验曲线如图 1 所示。可以看出，前置盐酸对该储层溶蚀效果明显。而从表 5 中可得，当注入前置酸 10%HCl 体系的量为 2PV 时，后续再注主体土酸体系，注入压力并不会发生很大的降低，酸化效果不如 S-3 岩心。可见对于碳酸岩（方解石、白云石）含量大于 20% 的岩心来说，前置盐酸用量越高，酸化效果越好。

3.4 岩石酸化前后 SEM 分析

为了对比酸化前后，岩心端面孔隙的变化，将岩心端面切片进行 SEM 扫描电镜分析，观察电镜下岩心孔隙结构和矿物的变化，探究酸化解堵是否增加了岩心的渗流能力。

取岩心 S-7 作为空白样品，不进行任何处理，所得电镜照片如图 2 所示。而酸化处理效果较好的 S-3 岩心的端面照片如图 3。可以看出酸化前的岩屑较致密，孔隙较小，并且可以明显观察到大量方解石，而

表 4 所用岩心的基本参数

岩心号	孔隙体积 /cm <sup>3</sup>	长度 /cm	注水压 /kPa	渗透率 /mD
S-3	1.765	4.614	14.40	12
S-4	2.154	5.615	15.09	12.6
S-5	2.957	7.430	14.44	17.4

表 5 岩心酸化解堵结果总结

岩心号		S-3	S-4	S-5
注地层水压力 /kPa		14.40	15.09	14.44
现场水注压力 /kPa		17.27	17.42	16.02
前置酸	盐酸浓度	6%	6%	6%
	注入量 /PV	7	2	3
	注后压力 /kPa	4.76	16.84	15.23
主体酸	体系	土酸	土酸	土酸
	注入量 /PV	10	15	15
	注后压力 /kPa	2.59	16.27	16.33
后置液压力 /kPa		0.75	12.52	3.03
渗透率恢复倍数		22.03	1.39	4.33

酸化后可以看出经过盐酸的溶蚀作用, 填充在孔隙中的钙质胶结矿物得到有效地去除, 岩石呈现多孔状, 晶间孔隙增大。反应出岩心的渗透率增加, 对流体的导流能力增强。另外, 图 3 中并未出现明显的胶状沉淀物。

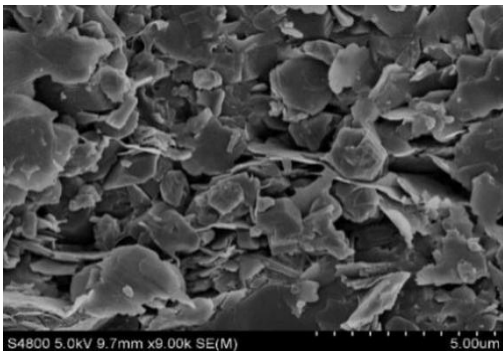


图 2 S-7 岩心 SEM 图像

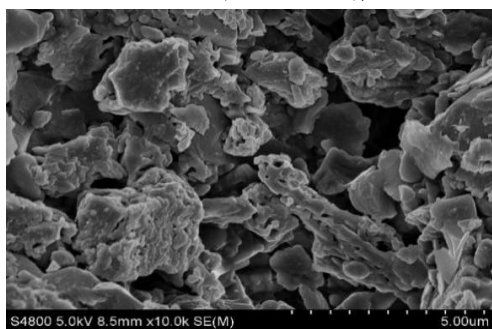


图 3 S-3 岩心 SEM 图像

前置盐酸用量不大的 S-4 岩心端面照片如图 4 所示。可以看出, 孔隙内岩屑表面存在胶状沉淀物, 根据苇莉等在研究中指出的, 土酸酸化产生的氟化物的形态为冻胶状的白色沉淀, 同时空白样照片中并没有出现该类沉淀, 可以说明该沉淀是酸化后产生的二次污染物。从微观角度反应出当前置盐酸用量不足时, 将导致存在酸化剩余的方解石矿物与后续注入的 HF 反应, 产生二次污染影响酸化效果。

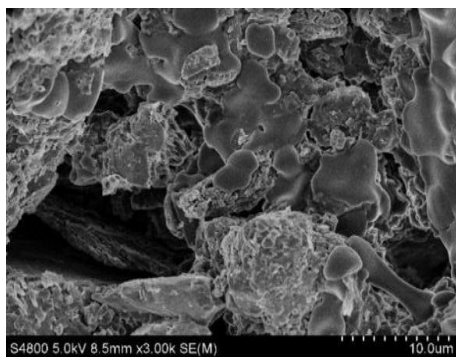


图 4 S-4 岩心 SEM 图像

#### 4 经济效益分析

本研究表明, 通过对酸化技术的优化和应用, 能

够显著提高油田储层的渗透率和产能, 从而带来较为明显的经济效益。具体分析如下:

##### 4.1 渗透率恢复与产量提升

根据流动实验结果, 经过酸化处理后, S-3 岩心的渗透率恢复倍数达到 22.03 倍, S-4 和 S-5 岩心分别恢复至 1.39 倍和 4.33 倍。根据油田的实际渗透率和产量模型计算, 渗透率的恢复可直接提升油井的采油效率, 进而增加日产量。假设每增加 1 倍的渗透率恢复, 可为油田带来额外的油气产值约为 200 万元/年。考虑到该技术可以应用于多个油井, 预计该技术在油田的整体应用将带来每年数千万元的增产效益。

##### 4.2 酸化作业成本控制

实验中采用的低氟土酸体系和前置酸体系相比传统的高浓度酸液体系, 能够显著减少酸化过程中化学剂的过量使用, 从而降低了作业成本。在实际应用中, 通过优化酸液浓度和减少酸液使用量, 每次酸化作业可节省约 15%-20% 的化学剂费用。此外, 优化酸液配比还可以减少由于过量酸液造成的设备损害和二次沉淀的风险, 从而避免高昂的设备维修和清理成本, 预计每年可节省约 500 万元的设备维护费用。

##### 4.3 二次污染与后期维护成本降低

通过合理的酸化设计, 本研究有效避免了二次污染物的生成。例如, 在酸化过程中, 前置酸的合理注入可以最大程度地去除岩心中的钙质胶结物, 减少氟化物的沉淀, 避免由于二次沉淀引起的孔隙堵塞。在传统酸化作业中, 二次污染物和孔隙堵塞往往会导致额外的修复成本, 通常占总成本的 10%-15%。通过本研究的酸化方法, 二次污染的风险大幅降低, 预计可减少后期维护费用约 300 万元/年。

##### 参考文献:

- [1] 李国馨. 对地质岩石检测中矿物分析测试技术要点的分析 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(05): 28-29.
- [2] 郭云峰, 黄嘉琦. 低渗油田储层酸化解堵技术应用 [J]. 辽宁化工, 2017, 46(11): 1132-1134.
- [3] 汪绪刚, 邹洪岚, 程兴生, 等. 砂岩基质酸化技术研究与应用 [C]// 北京石油学会第三届青年学术年会. 中国石油学会, 2000.
- [4] 程俊, 裴金贵. 砂岩酸化应注意的问题分析与探讨 [J]. 化工管理, 2015(34): 1.
- [5] 崔刚, 陈华兴, 黄小琼, 等. 酸化体系中石英的稳定性实验研究 [J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(5): 470-474.