

普光气田多级交替注入闭合酸压技术及其应用

王 栋^{1,2}, 徐心茹¹, 杨敬一¹, 李国峰², 张梅静²

(1. 华东理工大学石油加工研究所, 上海 200237; 2. 中国石化股份中原油田分公司
采油工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 由于普光气田飞仙关组、长兴组碳酸盐岩储层具有高温、高压、岩性致密、非均质性强和天然裂缝发育等特点, 常规酸压技术难以实现酸压深度改造。为此, 在分析普光气田储层特点的基础上, 建立了多级交替注入闭合酸压酸液指进程度评价模型, 开展了针对多级交替注入闭合酸压技术影响因素的实验研究。结果表明: ①交替注入的级数越多, 酸蚀裂缝导流能力越高, 但需要根据现场施工条件进行优化调整; ②稠化酸作用后的酸蚀裂缝导流能力高于普通酸; ③排量越大, 裂缝的导流能力越高; ④采用闭合酸压技术能够有效提高酸蚀裂缝导流能力。该技术在普光9井实施后, 产气量由酸压前的 $10.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $123.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 增产效果显著。截至2010年6月, 对普光气田的5口新钻井实施多级交替注入闭合酸压投产, 平均无阻流量高达 $621.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

关键词: 多级交替注入 酸压深度改造 注入级数 闭合酸化 普光气田

中图分类号: TE357.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)06-0108-03

普光气田属于海相碳酸盐岩储层, 孔隙度和渗透率较低, 需要通过酸压改造以实现增产。由于普光气田储层具有高温、高压、非均质性强等特征, 采取常规酸压技术作业时, 酸岩反应速度快且滤失量大, 导致酸蚀裂缝长度及导流能力减小, 酸压改造效果较差。多级交替注入闭合酸压技术是解决高温超深储层深度改造问题的有效手段, 一直是中外研究的热点^[1-7]。为此, 笔者针对普光气田储层特点, 开展了多级交替注入闭合酸压技术的相关研究, 并在普光气田现场成功应用。

1 酸压改造难点

普光气田飞仙关组和长兴组虽均为碳酸盐岩储层^[8], 但主力产层飞仙关组储层酸压改造存在以下4大难点: ①地层温度高(120~130℃), 酸岩反应速度快, 难以实现储层深度酸压; ②埋藏深且产层厚(100~500 m), 导致施工摩阻大, 施工排量受限, 需要综合利用多种酸液来实现对全部目标层段的有效改造; ③岩性致密, 非均质性强, 需要形成长的酸蚀裂缝, 有效沟通储层高渗透区域; ④天然裂缝及近井诱导裂缝发育, 要求酸压技术控制滤失性能好。

2 酸液指进程度评价模型

以裂缝三维延伸控制模型为基础, 建立了多级交替注入闭合酸压酸液指进程度评价模型。

在多级交替注入闭合酸压过程中, 高粘前置液和低粘酸液交替注入, 必然导致粘性指进现象, 从而影响到酸岩反应速度和裂缝中酸液浓度分布, 进而影响裂缝刻蚀形态。为此, 笔者引入宏观统计学理论建立酸液指进系数微分方程, 解决了酸液指进程度的评价问题。

将同一流动断面上酸液所占高度与总高度之比定义为酸液指进系数。假定不可压缩流体在裂缝中作一维稳定流动。根据体积平衡原理, 建立的酸液指进系数微分方程为

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} = -f_a \frac{\partial u}{\partial x} - f_a \frac{2v}{w} - u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

式中: f_a 为酸液指进系数; t 为时间, s; u 为酸液一维流动速度, m/s; x 为酸液一维方向流动距离, m; v 为滤失速度, m/s; w 为缝宽, m。

初始条件为

$$\text{当 } t = t_0 \text{ 时, } f_a = 0 \quad (2)$$

式中: t_0 为初始时刻点, s。

收稿日期: 2012-09-04。

作者简介: 王栋, 男, 高级工程师, 在读博士研究生, 从事油气田增产方面的研究。联系电话: (0393)4895991, E-mail: zyofwd@163.com。
基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX05017-003)。

边界条件为

$$\text{当 } x=0 \text{ 时, } f_a = 1 \quad (3)$$

定义酸液分流率为

$$r(f_a) = \frac{u_a f_a}{u_a f_a + u_p f_p} \quad (4)$$

式中: $r(f_a)$ 为酸液分流率; u_a 和 u_p 分别为酸液和压裂液流速, m/s; f_p 为压裂液指进系数。

采用隐式差分格式对式(1)进行离散, 求得离散化方程解为

$$f_{ai}^{(k)} = \frac{\frac{2f_{ai-1}^{(k)}}{(\Delta x_{i-1} - \Delta x_i)} + \frac{f_{ai}^{(k-1)}}{\Delta t}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{4u_{ai} - 2u_{ai-1}}{(\Delta x_{i-1} - \Delta x_i)} + \frac{2v}{w_i}} \quad (5)$$

其中

$$u_{ai} = \frac{u_i}{m + (1 - m)f_{ai}^k} \quad (6)$$

$$m = \frac{u_p}{u_a} \quad (7)$$

式中: i 为一维流动方向上的网格单元的序号; k 为时步数; Δx 为网格单元的长度, m; Δt 为时间步长, s; w_i 为第 i 网格的缝宽, m; u_i 为第 i 网格的总流速, m/s; m 为压裂液和酸液的流速比。

利用迭代法可求得式(5)的数值解, 数值解法下的初始条件和边界条件分别为

$$\text{当 } t=t_0 \text{ 时, } f_{ai}^0 = 0 \quad (8)$$

$$\text{当 } x=0 \text{ 时, } f_{ai}^{(k)} = 1 \quad (9)$$

3 酸压效果影响因素

注入级数 在不同的注入级数下, 酸蚀裂缝导流能力随闭合压力的增大而降低的程度存在差异^[9-10]。由3级注入和5级注入的酸蚀裂缝导流能力测定结果(图1)可见, 两者的导流能力均随闭合压力的增大而减小, 但后者的下降趋势相对较为平缓; 当闭合压力较高时, 5级注入的导流能力高于3级注入的。这表明, 在高闭合压力条件下, 酸压措

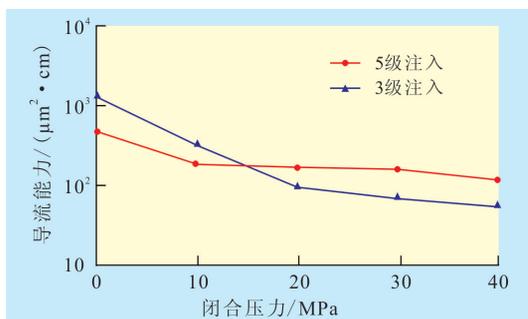


图1 多级交替注入对酸蚀裂缝导流能力的影响

施的级数越多越好, 但考虑到现场施工的复杂性以及其他因素对酸压效果的影响, 加上实际施工时采用3级注入即可获得较为满意的改造效果, 故一般选用3级注入。

酸液类型 酸液类型对多级交替注入闭合酸压技术酸蚀裂缝导流能力的影响实验结果表明: 使用普通酸酸化时, 3级注入和5级注入的酸蚀裂缝导流能力分别为0.5和5.1 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; 而使用稠化酸酸化时, 3级注入和5级注入的酸蚀裂缝导流能力分别为53.1和114.0 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。这表明, 对于多级交替注入酸压技术, 稠化酸作用后的酸蚀裂缝导流能力高于普通酸。

注酸排量 由注酸排量影响实验结果可知: 当排量为15 mL/min时, 3级和5级注入的酸蚀裂缝导流能力分别为1.5和37.7 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; 当排量为30 mL/min时, 3级和5级注入的酸蚀裂缝导流能力分别为54.9和114.2 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。这表明, 对于多级交替注入酸压技术, 排量越大, 裂缝的导流能力越高。

闭合酸化 由不同注入级数下闭合酸化前后酸蚀裂缝的导流能力可知: 3级注入时, 闭合酸化前后的酸蚀裂缝导流能力分别为52.6和109.5 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; 5级注入时, 闭合酸化前后的酸蚀裂缝导流能力分别为336.8和789.5 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。这表明, 采取闭合酸化技术能够提高裂缝的导流能力。

4 应用效果

普光9井是位于四川盆地川东断褶带黄金口构造带普光构造东南翼的1口评价井。该井酸压改造目的层埋深为5 915.8~5 993.0 m, 酸压井段长, 储层温度高(120 $^{\circ}\text{C}$), 非均质性强, 天然裂缝发育, 压裂前产量仅为 $10.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 远低于其预期产能。设计采用质量分数为20%的胶凝酸, 实施前置液胶凝酸多级交替注入与常规酸闭合酸化技术施工对储层进行增产改造。

为了寻求较优级数, 模拟分析了在酸液总量、前置液量和排量均不变的情况下, 级数变化对酸压效果的影响(表1)。结果表明: 5级注入的动态缝长、动态缝高、有效缝长、酸蚀缝宽和导流能力略

表1 3级和5级注入模拟计算结果

注入级数	动态缝长/m	动态缝高/m	有效缝长/m	酸蚀缝宽/mm	导流能力/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm})$
3	97.46	96.3	78.7	2.83	253.3
5	108.83	99.6	84.4	2.86	265.7

高于3级注入的模拟值。2种注入方式下的改造效果差异不大,考虑到现场条件,为降低施工复杂程度,采用3级注入方式较为合适。

于2009年12月20日对普光9井进行酸压施工。施工历时80 min,挤入地层总液量为401 m³,其中压裂液140 m³,胶凝酸296 m³。最高施工压力为87.2 MPa,最大施工排量为4.55 m³/min,整个施工过程非常顺利。

从普光9井的酸压施工曲线(图2)可以看出,在施工排量保持平稳的阶段,油压变化明显。当注入压裂液时,油压逐渐上升,而当注入胶凝酸时,油压逐渐下降,曲线的波动变化显示出了明显的交替注入过程。停泵时压力急剧下降,说明实施多级交替注入闭合酸压措施有效沟通了高渗透带。

普光9井酸压后增产效果明显,酸压前产气量为10.32×10⁴ m³/d,酸压后产气量为123.86×10⁴ m³/d,产能较酸压前增加约12倍。

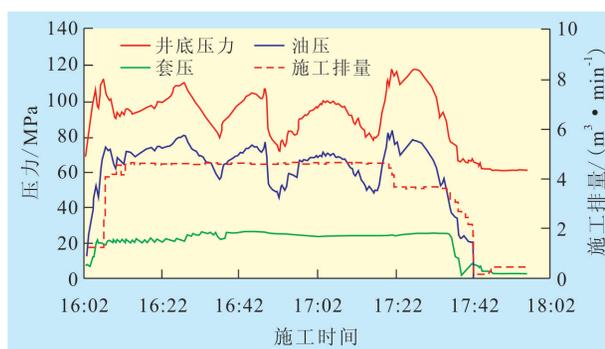


图2 普光9井5 915.8~5 993.0 m井段酸压施工曲线

截至2010年6月,对普光气田的5口新钻井实施多级交替注入闭合酸压投产,平均无阻流量高达621.8×10⁴ m³/d(表2),与未进行酸压投产的普光201-2井(无阻流量为226.38×10⁴ m³/d)相比增产效果显著。应用效果证实,多级交替注入闭合酸压技术有效克服了储层高温、高压、非均质性强、天然裂缝发育等改造难点,具有良好的增产改造能力。

表2 多级交替注入闭合酸压技术在普光气田的应用效果

井号	射孔厚度/m	破裂压力/MPa	液 体 用 量 / m ³					注入级数	酸压后无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
			前置酸	前置液	胶凝酸	闭合酸	总液量		
普光302-2	519.7	62.0	42	280	680	78	1 080	4	768
普光303-1	186.1	78.0	40	300	620	80	1 040	3	518
普光301-4	442.4	62.4	0	180	760	0	940	3	646
普光202-1	107.0	76.8	0	350	500	40	890	3	475
普光303-3	332.0	64.5	0	280	640	0	920	3	702

5 结论

以裂缝三维延伸控制模型为基础,建立了多级交替注入闭合酸压下酸液指进程度评价模型,用于模拟多级交替注入条件下酸液的指进和计算酸蚀裂缝参数。通过注入级数、酸液类型、注酸排量和闭合酸化等因素对多级交替注入闭合酸压技术效果的模拟实验分析表明,采用闭合酸压技术能够有效提高酸蚀裂缝导流能力;交替注入的级数越多,酸蚀裂缝导流能力越高,但需要根据现场施工条件进行优化调整。多级交替注入闭合酸压技术有效地解决了高温、高压、非均质性强、天然缝洞发育储层酸压改造的难点,通过在普光气田的广泛应用,取得了显著的增产效果,对类似储层的酸压改造具有指导意义。

参考文献:

[1] 龙学,曹学军,李晖,等.多级交替注入酸压技术在大湾地区的

应用[J].油气田地面工程,2010,29(12):27-28.

- [2] 王静波,赵立强,方泽本,等.多级交替注入酸压优化新方法研究[J].天然气勘探与开发,2011,34(3):41-43.
- [3] 叶俊华,邢林庄,李玉军.多级注入闭合酸化技术技术研究[J].油气田地面工程,2009,28(5):20-21.
- [4] 李勇明.缝洞型碳酸盐岩油藏酸压基础模型研究及应用[D].南充:西南石油学院,2003.
- [5] 江夏,张焯.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏深度改造技术研究与应[J].油气地质与采收率,2010,17(6):107-110.
- [6] Coulter A W, Crowe C W, Barrett N D. Alternate stages of rad fluid and acid provide improved leak-off control for fracture acidizing[C].SPE 6124.
- [7] 屈静,林立世,杨永华,等.闭合酸压技术在川东北地区海相碳酸盐岩储层开发中的研究与应用[J].油气地质与采收率,2009,16(5):97-99.
- [8] 杨福涛.普光气藏地质特征研究方法综述[J].油气地质与采收率,2010,17(3):45-47.
- [9] 牟建业,张士诚.酸压裂缝导流能力影响因素分析[J].油气地质与采收率,2011,18(2):69-71.
- [10] 胥耘.碳酸盐岩储层多级注入闭合酸压技术研究与应[J].石油钻采技术,1996,18(5):58-65.

编辑 常迎梅