

# 酸化实时监测与评估技术研究及应用

王树军

(吐哈石油勘探开发研究院)

**摘要** 酸化实时监测与评估技术是通过测量酸处理过程中注入排量和注入压力来分析计算井底表皮系数的变化,从而实时判断酸化效果。研究了三种用于实时监测的模型并用其编程,在吐哈油田现场应用10余井次。结果表明,该技术除可实时判断酸化效果外,还可以优化酸化设计;优选适合区域特性的酸液配方;判断惰性流体对地层的转向(暂堵)作用的成功性;对单井效果做综合评价等。实时监测技术的关键参数是井底压力和排量,由于目前没有适应井下强酸环境的压力、排量传感器,因此只有通过井口压力和排量计算井底参数。

**关键词** 实时 监测 酸化 效果 评价 应用

**作者简介** 王树军,1972年生。1993年毕业于石油大学(华东)采油工程专业,现在采油工艺室从事酸化技术研究工作。

酸化过程实时监测技术是通过酸处理过程中注入排量和注入压力的测量,计算确定出处理过程中表皮系数的演变来实时判断酸化效果。该技术以其独特的优点受到国外许多石油服务公司的重视。在调研国外模型的基础上,结合吐哈油田实际,对酸化实时监测技术进行了深入研究,编制了实时监测软件,配备了相应的硬件系统,并在吐哈油田进行了10余井次的现场试验。结果表明,酸化实时监测技术是优化酸处理的有效手段,它能够确定最佳的酸液用量,正确评价酸化效果,是一项值得推广的新技术。

## 一、实时监测原理

基于达西定律的径向流量公式为

$$q = \frac{2\pi Kh(P_e - P_{wf})}{B\mu[\ln(r_e/r_w) + S]} \quad (1)$$

从中可看出,对某一特定的油层,其渗透率  $K$ ,油层厚度  $h$  及油藏压力  $P_e$  都为已知值,体积系数  $B$ ,粘度  $\mu$  及  $r_e/r_w$  也为已知定值,因此在产量  $q$ 、井底压力  $P_{wf}$  以及表皮系数  $S$  之间存在一函数关系式

$$q = f(P_{wf}, S)$$

只要其中两个量发生变化,另外一个量也做相应变化,如果能测得其中的两个量,就可以计算出另一个量的变化情况,酸化实时监测技术的主导思想就由此而来的。即通过获得  $P_{wf}$ 、 $q$  的值来计算表皮系数  $S$ ,由  $S$  的变化判断酸化效果。但达西公式是建立在线性流基础上的,为减小非线性流的影响,国外许多学者对酸化实时监测模型进行了探讨和研究。

1. Meclod & Coulter 技术 提出根据压力不稳定分析来监测酸化过程,认为处理过程中

的每一泵注阶段和关井都可以看作是短期试井,通过分析注入液体对油气藏的瞬时压力响应来确定地层的传导能力与井眼附近的表皮系数。由于该技术采用了标准压力鉴定分析技术来确定试验时的表皮系数,只能在处理过程的个别时间进行,不能实时监测,因此很少使用。

2. Paccaloni 技术 假设酸化注入所影响的区域内形成的是稳态流,即以稳态单相流在油藏中的径向流动为基础,根据下式计算表皮系数

$$S = \frac{2\pi Kh(P_{wf} - P_c)}{qB\mu} - \ln \frac{r_b}{r_w} \quad (2)$$

$r_b$  为酸注入的有效半径或称酸带半径的随意常数,Paccaloni 建议采用 1.2m(4 英尺)。(2)式是一个关于注入排量  $q$ 、井底压力  $P_{wf}$ 和表皮系数  $S$  的方程。将(2)式中  $P_{wf}$ 通过下式用井口注入压力  $P_u$ 替换

$$P_{wf} = P_u + P_H - P_{摩阻} \quad (3)$$

(2)式即转化成  $P_u$ 、 $q$  和  $S$  之间的关系式。为监测酸化进程,先做一簇不同表皮系数时  $P_u$ 和  $q$  的关系图版为标准图版。施工时,用测得的井口压力  $P_u$ 与对应的注入排量  $q$  做图,就可从图中得出表皮系数的演变。在该图上还可做出破裂压力与注入排量的关系曲线,这样就可监测注入压力,防止在压破地层条件下施工。

图 1 为用 Paccaloni 法解释的 L7-10 井的表皮系数演变图版。图中圆点表示不同时间的注入压力和注入排量值。旁边数字表示施工时间,单位为 min。L7-10 井是丘陵油田陵 3 井区下油组的一口注水井,资料分析认为该井可能存在较严重污染,于 1996 年 4 月对该井进行了酸化处理。从图上可看出,施工开始,表皮系数较高,大约在 18 左右,

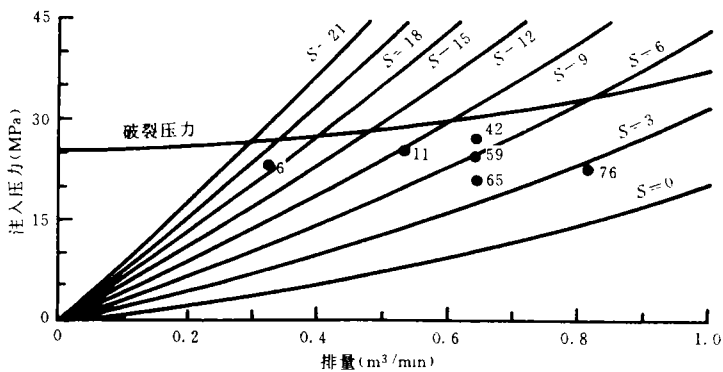


图 1 Paccaloni 法评价 L17-10 井酸化效果

随着施工的进行,酸液进入地层,表皮系数逐渐减小,施工至 42min 时,表皮系数  $S$  降至 9; 65min 时  $S=6$ ; 施工结束时  $S=3$ 。说明本次酸化起到了很好的解堵作用,酸化后的效果也证明了这一点。L7-10 井酸化前注水压力 26.5MPa,日注 74m<sup>3</sup>;酸化后注水压力 26.9MPa,日注 175m<sup>3</sup>,平均日增注水 96m<sup>3</sup>,视吸水指数提高了 2.2 倍,达到了日配注 140m<sup>3</sup> 的要求。

3. Pronuost & Economides 法 这是一种更精确的计算基质酸化过程中表皮系数变化的方法,它以注入过程的参数为基础,模拟注入速度变化而产生的瞬时压力响应(模拟压力)。处理过程中实际的井底压力与模拟压力差是由表皮系数的变化引起,可通过这个压差估算出表皮系数。表皮系数可用下式求得

$$S(t) = S_0 + \frac{Kh}{141.2qB\mu} (P_{wf} - P_{sim}) \quad (4)$$

模拟压力  $P_{sim}$  由下式求得

$$P_{sim} = P_e + \frac{141.2qB\mu}{Kh} \left( \frac{\lg t_D}{0.87} + S_0 \right) \quad (5)$$

式中

$$t_D = \frac{2.6 \times 10^{-4} Kt}{\phi\mu C_r r_w^2}$$

图2为用Economides法解释的W5-37井的监测曲线,该井是为了改善吸水剖面于1994年7月2日酸化的。从图上可看出,施工开始注入防膨液时,表皮系数曲线呈缓慢上升趋势,这时的值大致反映了初始表皮系数(14左右)。酸液进入地层后,表皮系数开始下降,施工至30min时,表皮系数降至6左右。此后表皮系数有一突然升高,这是由于排量突变而产生的,实际的表皮系数一直保持在6左右直至施工结束。本次解堵效果明显,酸化后的效果也证明了这一点。厚度动用程度从86.6%上升到96.3%,酸化前注水压力22.6MPa,注水量49m<sup>3</sup>/d;酸化后注水压力14.2MPa,注水量61m<sup>3</sup>/d,视吸水指数提高2倍,日增注水量12m<sup>3</sup>,达到了酸化调剖与增注的目的。

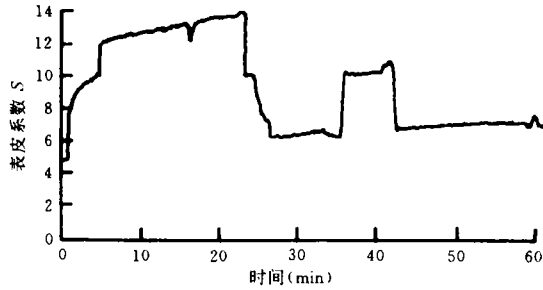


图2 W5-37井酸化施工表皮系数变化曲线

4. 注入能力倒数诊断图 此法由A. D. Hill提出,它吸取了Pacaloni和Economides方法的优点而建立。它既象Pacaloni方法那样简单,又考虑了不稳定流动的作用,可对包括使用转向剂的各种基质酸化过程进行实时监测,是一种通过用注入能力倒数与叠加时间函数的关系图来实时监测的新方法。

注入期间不稳定流动的线源解可由下式求得

$$\frac{P_e - P_{wf}}{q_N} = m' \sum_{j=1}^N \left[ \frac{(q_j - q_{j-1})}{q_N} \lg(t - t_{j-1}) \right] + b' \quad (6)$$

式中

$$m' = \frac{162.6B\mu}{Kh}$$

$$b' = m' \left[ \lg \left( \frac{K}{\phi\mu C_r r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87S \right]$$

从(6)式中可看出,只要所有参数特别是表皮系数保持恒定,注入能力倒数  $\Delta P/q_i$  与叠加时间函数的关系为一直线,其斜率为  $m'$ ,截距为  $b'$ 。叠加时间函数定义为

$$\Delta t_{sup} = \sum_{j=1}^N \frac{(q_j - q_{j-1})}{q_N} \lg(t - t_{j-1})$$

同Pacaloni法类似,在处理前先做出  $\Delta P/q_i$  在不同表皮系数时与  $\Delta t_{sup}$  的关系图版。施工时通过测量的压力与排量计算出  $\Delta P/q_i$  与  $\Delta t_{sup}$ ,用这两个数据做图,  $\Delta P/q_i$  从一条直线变至另一条直线就可监测出表皮系数的变化。

这种方法的优点在于它可对不稳定流动进行计算,而且可从曲线的变化上判断转向剂的

作用,特别适合于使用转向剂的酸化施工实时监测。

图3为某口井酸化过程中的注入能力倒数诊断图。这次处理中,采用几个含油溶性树脂

(OSR)转向剂的15% HCl的注入段将各土酸段分开,在诊断图上可以看到每个注入段的不同响应。当惰性流体和15% HCl注入时,没有多少增产效果(1~8点),表皮系数在40左右;土酸进入地层后,表皮系数有明显下降,如图中8~10,12~16,18~20和22~23这些线段。转向剂进入地层后,表皮系数大约升高20,表明转向剂起到明显的转向作用,

如图中10~12,16~18和20~22线段。最终视表皮系数68,减去因转向剂引起的三次表皮升高大约60,处理后表皮系数为8左右。

在实际使用中,将后三种模型编成软件,供现场操作人员根据具体情况选用。虽然各方法解释的表皮系数绝对值有一定差异,但总体的变化趋势是一致的。

5. 井底压力与排量的确定 实时监测技术的关键参数是井底压力和排量,由于目前还没有适应井下强酸环境的压力、排量传感器,因此只有通过记录井口的压力与排量来计算井底参数。前面介绍的几种方法中,均含有井底压力的数据,井底压力可根据垂直管流特性通过井口压力来获得。井底注入压力与井口压力 $P_{wi}$ 之间存在下述关系

$$P_{wi} = P_{it} + P_H - P_{摩阻}$$

式中, $P_{it}$ 为井口测量压力; $P_H$ 为液柱压力; $P_{摩阻}$ 为摩阻压降。

## 二、实时监测技术的用途

实时监测技术自研制成功以来,在吐哈油田进行了10余井次的现场使用,其后又对该软件的用户界面与模型原理做了修改完善,使之更科学合理。该项技术主要用途是利用测量的压力与排量,估算处理过程中表皮系数的变化,实时判断酸化效果。另外还有以下用途:

1. 分析表皮系数变化曲线,确定何时停注,以最小液量取得最佳酸化效果 实时监测技术最突出的优点在于它能实时评价效果,观察井底的表皮系数变化情况,这就有助于在适当的时候停止注入,以最少酸量取得最佳效果。图4为巴略油田巴15井监测的表皮系数变化曲线。可以看出,酸液进入地层后表皮系数一直呈下降趋势,施工至45min时,降至2左右,此后约5min表皮系数基本不变,说明此时已达到解堵目的,应该停注,而设计酸量正好如此。

2. 对于使用转向剂或暂堵剂的酸化施工,判断转向技术的成功性 实时监测技术可以评价惰性流体对地层的转向(暂堵)作用,图3已清楚地说明了这一点。此外,它还可用来评价暂堵球等分层酸化时的投球成功率。图5为B47井酸化时的表皮系数曲线,该井因层段较长,层间跨度大而采用投球暂堵酸化方式。其中13~16min处为球到达射孔段的时间,从曲线上分析看出,本次投球没有达到预期效果。

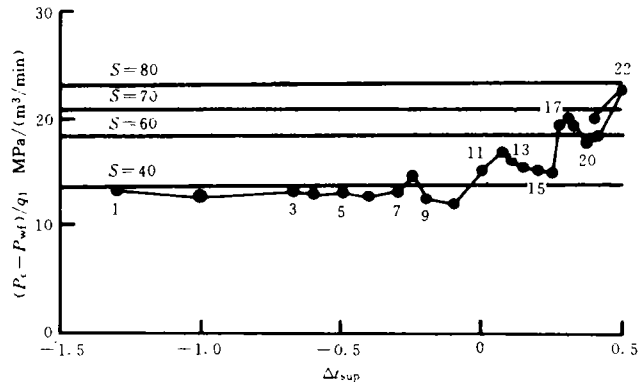


图3 注入能力倒数诊断图

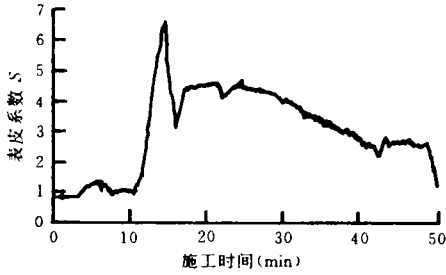


图4 B15井酸化施工表皮系数变化曲线

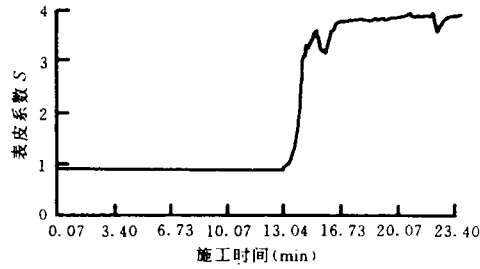


图5 B47井酸化施工表皮系数变化曲线

3. 优选适合区域特性的酸液配方,增强酸液针对性 利用实时监测资料,可对同一区域物性相似的地层进行酸液优选,找出适于本地区的酸液体系。如图4所示的表皮系数变化曲线,本次酸化采用的是磷酸缓速酸体系。从图上可看出,该酸液能有效解除堵塞,达到解堵目的,是适合于巴喀地区的酸液配方。

4. 分析监测资料,优化酸液用量 通常优化酸液用量的方法,是根据现场施工效果与实际酸液用量来统计分析得出最佳的酸液用量。这种分析方法有局限性,对于用酸量超过最佳用量的地层,统计到的酸量偏大。用实时监测资料可通过分析表皮系数变化优化酸液用量。图6为几口井施工过程中酸液用量与表皮系数的变化情况,从图中可看出,随酸量的增加,部分井的表皮系数下降,而部分井则呈污染趋势。当酸用量大于 $1.5\text{m}^3/\text{m}$ 时,表皮系数基本没有变化,因此酸量宜小于 $1.5\text{m}^3/\text{m}$ 。对于吐哈油田不同区域井层的最佳用酸量,通过对酸化井的实时监测可优化出最佳用酸量。

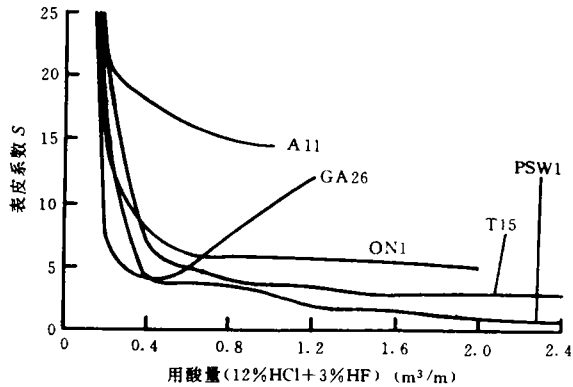


图6 利用表皮系数变化优选酸量图

5. 对单井酸化效果做综合评估 利用实时监测的表皮系数曲线及压降曲线,结合在优化设计时的参数,根据表皮系数的降低,可对酸化井进行效果预测与综合评价,并从压降曲线上分析地层的传导能力,确定放喷时间,预测有效期等参数。

### 参 考 文 献

- 1 G Paccaloni, M Tambini. Advances in Matrix Stimulation Technology. AGIP SPA, SPE 20 623
- 2 S R Heard, M J Economides 等著,王国清译.通过测定压力和排量检验基质酸化的有效性. SPE 19 409
- 3 A D Hill, D Zhu U of Texas, 韦莉译.包含转向剂作用的基质酸化的实时监测. SPE 28 548

(收稿日期 1997-03-18)

(修改稿收到日期 1997-07-02)

[编辑 郑秀娟 朱伟]

nel is perpendicular to fracture plane or minimum horizontal major stress, and increasing greatly the productivity of oil/gas well.

**Subject heading** low—permeability pools fractured pools fracture direction oriented perforating well completion

### **DERIVATION AND APPLICATIONS OF THE EQUATION FOR RHEOLOGY OF POWER LAW FLUID IN CORE**

by Jiang Ming

**Abstract** With the uninterrupted development of indoor and field tests on chemical flooding, it is necessary for technical staff to study the rheology of chemical reagent in porous media. This paper introduces a equation for rheology of power law fluid. The conclusion from qualitative analysis on the equation is the shear rate and shear stress of power law fluid have something to do with percolation flow velocity and behavior of porous media, and the shear rate has something to do with fluid behavior and the shear stress nothing with rheological index of fluid. This paper is also introduces its application in core test. In view of the effect of tensile stress, adsorption and retention on power—law fluid in porous media, this equation has certain limitation.

**Subject heading** power law fluid rheology calculation equation core testing

### **MATHEMATICAL MODEL OF MATRIX ACIDIZING FOR PERFORATED WELL IN SANDSTONE AND ITS APPLICATIONS**

by Sun Aiyin, Liu Shuzhi, Ren Shuquan

**Abstract** Wellbore is linked to formation by perforation tunnels in perforated well. The flowing pattern, pressure distribution and the flowing front of acid fluid in perforated well are different that in openhole well. But the acidizing is always designed on the basis of openhole well in China at the moment. In order to obtain more reasonable acidizing design, the pressure differential equation and acid equilibrium equation for matrix acidizing of perforated well in sandstone are established in elliptic coordinate system. Moreover, the minerals in sandstone are divided into two kinds of pseudo—mineral with different dissolution velocity taking silicate and quartz as representative respectively. The pressure distribution, acid concentration distribution, silicate or quartz concentration distribution, porosity and permeability distribution, effective operating radius and production increment multiple can be calculated and predicted by solving the basic equation group in elliptic coordinate system.

**Subject heading** sandstone perforation well matrix acidizing mathematical model equation

### **STUDY AND APPLICATION OF REAL—TIME MONITORING AND EVALUATING TECHNIQUE IN ACIDIZING**

by Wang Shujun

**Abstract** The real—time monitoring and evaluating technique in acidizing is used for analyzing and calculating the variation of skin factor and judging acidizing effectiveness in real—time by measuring discharge capacity and injection pressure of acid in acidizing treatment. This paper studies three kinds of real—time monitoring models, by which the relevant

software is developed. Application results of more than 10 wells in Tuha Oilfield show that it can be used for judging acidizing effectiveness in real-time, optimizing the acidization design, selecting the acid fluid ingredient, judging the feasibility of temporary plugging of inert gas on formation, and evaluating comprehensively the treatment results of single well. The key parameters in real-time monitoring are bottom-hole pressure and bottom-hole discharge capacity, they can be only calculated by wellhead pressure and wellhead discharge capacity because there is not pressure and flow sensor for downhole strong acid condition.

**Subject heading** real time monitoring acidizing effect evaluation application

### **STUDY AND TEST OF FRACTURING TECHNIQUE BY JET OSCILLATION**

by Sun Yingli, Li Wenyang, Rong Yao, Li Yaobin, Zhang Laibin

**Abstract** Combining the jet oscillation treatment with hydraulic fracturing, the new fracturing technique changes static fracturing into continuous dynamic sand fracturing. It can lower operation pressure, increase sanding rate, decrease fracturing fluid volume, and improving fracturing results. This paper introduces the developing history of jet oscillation fracturing technique at home and abroad. It also introduces, the technical property and structure, working theory, operation technology and field test on the jet oscillation fracturing. Testing results show that it has a wide prospect because of simple operation method and low operation cost.

**Subject heading** fluidics feedback oscillator pressure surge oscillation fracturing testing reserch

### **PRODUCTION METHOD SELECTION AND APPLICATION FOR CHENGDAO OILFIELD**

by Shen Qing, Feng Yongquan, Wang Minxuan

**Abstract** Chengdao Offshore Oilfield of Shengli is put into production in 1992. So far it has production capacity of million tones of crude oil. This oilfield faces the sea with mainland. Based on the reservoir behaviors and offshore conditions of Chengdao Oilfield, this paper discusses the principle for determining production method, analyses the adaptation level of each method for offshore production. Flowing and artificial lift, which includes the electric submersible pump and progressive cavity pump, are used as the production method of Chengdao Oilfield. The production practices of 102 wells show that the using production method is correct. It provides a success experience for development of neritic oilfield in Bohai.

**Subject heading** Chengdao Oilfield oil producing method selection flowing production artificial lift application.

### **SUCKER ROD PUMP TECHNOLOGY OF SLANT HOLE IN VISCOUS OIL RESERVOIR**

by She Meiqing, Zhu Daojun, Luo Hongyou, Shen Xiuli

**Abstract** This paper introduces the application of sucker rod pump in first group of slant holes in viscous oil reservoir in China. The beam pumping units can satisfy the need of stream injection and oil production without trip downhole tubing string. It also introduces the performance and feature of special tools used for sucker rod pump in slant hole, analyses and calculates the spacing of centralizers in slant hole and polished rod load of slant hole