

文章编号:1673-5005(2008)05-0077-06

泡沫分流酸化数学模型的建立及应用

李松岩¹, 李兆敏¹, 林日亿², 陈月飞³, 郭 强⁴

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061;
3. 中国海洋油田服务股份有限公司, 天津 300451; 4. 辽河油田 欢喜岭采油厂, 辽宁 盘锦 124114)

摘要:泡沫分流酸化能有效解决常规酸化中由于地层渗透率差异而导致的小层进酸不均的问题。基于泡沫圈闭理论和质量守恒原理,建立了泡沫分流酸化的数学模型并进行了求解,同时确定了泡沫分流酸化工艺的设计原则。结果表明:地层表皮系数随着酸化过程逐渐减小,井口和井底压力随泡沫的注入逐渐增大,随酸液的注入逐渐减小;泡沫的注入使高渗层的流量逐渐降低,低渗层的流量逐渐增高,实现后续酸液转向低渗层;在相同的地层条件下,泡沫酸化比泡沫段塞分流酸化的分流效果要好,但是作业时间长,井口和井底注入压力较高。现场应用表明泡沫分流酸化能有效封堵高渗层,恢复产能,动用低渗层,适于非均质油藏油气井、重复酸化老井的解堵增产增注。

关键词:泡沫段塞; 分流酸化; 非均质; 数学模型

中图分类号:TE 357.46; TE 359 **文献标识码:**A

Mathematical model building for foam diversion acidizing and its application

LI Song-yan¹, LI Zhao-min¹, LIN Ri-yi², CHEN Yue-fei³, GUO Qiang⁴

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
3. China Ocean Oilfield Services Limited Corporation, Tianjin 300451, China;
4. Huanxiling Oil Production Plant of Liaohe Oilfield, Panjin 124114, China)

Abstract: Foam diversion can effectively solve the problem that acid distribution among layers of different permeability is uneven during matrix acidizing. Based on gas trapping theory and mass conservation equation, mathematical models for foam diversion acidizing were established. Design methods for foam diversion acidizing were given. The mathematical model was solved by computer program. The results show that initial formation skin factor decreases during acidizing process. Wellhead and bottomhole pressure increase with foam injection, and decrease with acid injection. Flux of high-permeable layer decreases, and flux of low-permeable layer increases during foam injection, which can divert acid into low-permeable layer from high-permeable layer. Under the same formation situation, effect of foam-acid acidizing is better than that of foam slug diversion acidizing. In foam-acid acidizing, operation time is longer, and wellhead and bottomhole pressure are higher. Field application shows that foam-acid acidizing can effectively block high-permeable layer, and improve oil production. It is fit to heterogenous formation and old well with acidizing for many times.

Key words: foam slug; diversion acidizing; heterogeneity; mathematical model

砂岩或碳酸盐岩地层基质酸化技术是有效解除地层伤害的一种增产措施^[1-2],对于非均质地层,常规酸化时遵循自然选择原则,酸液优先进入高渗透层,使得低渗层不能得到有效改善,动用程度低。泡

沫分流酸化技术能有效地解决这一问题。泡沫流体具有暂堵分流特性,可以部分地封堵高渗层,把后续酸液转入低渗层;不含固相,易清除;低密度泡沫具有助排作用且不会造成地层污染。因此,泡沫流体

收稿日期:2008-01-10

基金项目:国家自然科学基金(50876115);山东省自然科学基金(Y2007F14)

作者简介:李松岩(1980-),男(汉族),河北保定人,博士研究生,从事泡沫流体相关理论及其在石油工程中的应用研究。

可以作为非均质地层基质酸化的分流剂^[3,4]。笔者基于泡沫圈闭理论和质量守恒原理建立泡沫分流酸化的数学模型,给出泡沫酸化的设计方法,比较两种酸化工艺的特点,并进行现场应用。

1 泡沫分流机理及酸化工艺

泡沫暂堵分流的机理国内外学者已经作了很多的研究,根据已有的研究成果可知,泡沫并不直接改变水相的粘度,也不改变水相的相对渗透率和含水饱和度之间的关系^[5-10],但泡沫可以直接降低气相流度^[11-14]、含水饱和度和相对渗透率。由于低渗层的毛细管压力大,泡沫在低渗层中是不稳定的^[15-16],因此在注泡沫段有可能使大部分泡沫进入高渗层。泡沫分流成功的关键是注酸段保持气体的有效圈闭^[15],实验证明只要措施得当,后续注酸时仍可以圈闭80%~99%的气体^[10,17],并在后续注酸段保持稳定。在高渗层中大量泡沫的存在使得含水饱和度保持很低值,在低渗层只有少量不稳定的泡沫存在,所以能够把酸液转向低渗层。

泡沫酸化技术有两种施工工艺:泡沫段塞分流酸化和泡沫酸化。泡沫段塞分流酸化是在常规酸化过程中注入几个泡沫段塞,封堵高渗层,从而把酸液转向低渗层;泡沫酸化是在常规酸中加入起泡剂和气体,制成泡沫酸,连续注入地层,利用泡沫酸的分流特性实现酸液分流。

2 泡沫段塞分流酸化的数学模型

对于泡沫分流酸化,泡沫后酸液的流动是关键。泡沫能够降低层间差异,如果注泡沫和泡沫后注酸时能确保泡沫在多孔介质中的圈闭,那么分流就能取得成功。考虑了泡沫圈闭理论和质量守恒原理,以封闭非均质油藏为例,建立了泡沫段塞分流酸化的数学模型,作如下假设:①在注泡沫时,地层中泡沫流动受临界压力控制,泡沫段含水饱和度保持为束缚水饱和度 S_{wc} ;②在泡沫后注酸时,地层中泡沫段含水饱和度逐渐上升,气体保持稳定圈闭状态。

2.1 注泡沫段

泡沫前沿半径为

$$R_f(t) = \left\{ \frac{\int_0^t q_{fi}(t) \Gamma(t) dt}{\pi H_i \varphi_i (1 - S_{wc})} + R_w^2 \right\}^{1/2};$$

气相圈闭拟表皮系数为

$$S_{pi}(t) = \left(\frac{k_i}{k_{fi}} - 1 \right) \ln \frac{R_f(t)}{R_w};$$

各小层的吸液能力为

$$q_{fi}(t) = \frac{2\pi H_i k_i [p_w(t) - p_e]}{\mu_f \left[\ln \frac{R_e}{R_w} + S_i + S_{pi}(t) \right]}; \quad (1)$$

泡沫总流量为

$$\sum_{i=1}^n q_{fi}(t) = q_l + q_g(t);$$

气体体积流量为

$$q_g(t) = \frac{T_e}{p_w(t)} \frac{z q_{gsc} p_{gsc}}{T_{gsc}};$$

泡沫干度为

$$\Gamma(t) = \frac{q_g(t)}{q_l + q_g(t)};$$

各小层的分流率为

$$f_i(t) = \frac{q_{fi}(t)}{q_l + q_g(t)}.$$

初始条件:初始时刻井底压力等于油藏压力,并底泡沫质量取0.6~0.8, $t=0, p_w = p_e, \Gamma = 0.8$ 。

约束条件:泡沫流体中的液体体积流量为定值,气体在标准状态下的体积流量为定值,井底压力小于地层破裂压力,即 $q_l = \text{const}, q_{gsc} = \text{const}, p_w(t) <$

$$p_{frac} \left(p_{frac} = p_e + \left(\frac{v}{1-v} \right) \sigma \right).$$

式中, i 为第 i 个小层; n 为总层数; R_f 为泡沫前沿半径,m; q_f 为进入小层的泡沫流量, m^3/s ; t 为注泡沫时间,s; Γ 为泡沫干度,小数; H 为小层厚度,m; φ 为地层孔隙度,小数; R_w 为井眼半径,m; S_p 为气相圈闭拟表皮系数,无量纲; k, k_f 分别为地层原始渗透率和地层注入泡沫后渗透率, $\mu\text{m}^2/k/k_f$ 对于不同渗透率的小层取不同的值^[18],反映了泡沫的稳定性,可由实验确定; p_w, p_e 分别为泡沫在井底和地层的压力,MPa; μ_f 为泡沫流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_e 为油井泄油边缘半径,m; S 为地层初始表皮系数,无量纲; q_l, q_g 分别为泡沫中液体和气体体积流量, m^3/s ; T_e 为地层温度,K; z 为气体压缩因子,无量纲; q_{gsc} 为泡沫中气体在标准状态下的体积流量, m^3/s ; p_{gsc} 为标准状态下的压力,0.1 MPa; T_{gsc} 为标准状态下的温度,273.15 K; f 为各小层的分流率,小数; p_{frac} 为地层破裂压力,MPa; v 为岩石的泊松比,小数,如果没有实验数据时可以取0.25; σ 为地层垂直应力,MPa。

2.2 注酸段

泡沫前沿半径为

$$R_f(t) = \left\{ \frac{\pi (R_{fi}^2 - R_w^2) H_i \varphi_i + \int_0^t q_{ai}(t) dt}{\pi H_i \varphi_i [1 - S_{wi}(t)]} + R_w^2 \right\}^{1/2};$$

含水饱和度为

$$S_{wi}(t) = 1 - \frac{\pi(R_{fi}^2 - R_w^2)H_i\varphi_i\Gamma(t)}{\pi(R_{fi}^2 - R_w^2)H_i\varphi_i + \int_0^t q_{ai}t}$$

各小层注酸后的渗透率为

$$k_{ai}(t) = k_i k_r(S_{wi}) ;$$

气相圈闭拟表皮系数为

$$S_{pi}(t) = \left[\frac{k_i}{k_{ai}(t)} - 1 \right] \ln \frac{R_{fi}(t)}{R_w} ;$$

各层的吸液能力为

$$q_{ai}(t) = \frac{2\pi H_i k_i [p_w(t) - p_e]}{\mu_a \left[\ln \frac{R_{ci}}{R_w} + S_i + S_{pi}(t) + S_{ai}(t) \right]} ;$$

酸液总流量为

$$q_a = \sum q_{ai}(t) ;$$

各层的分流率为

$$f_i(t) = \frac{q_{ai}(t)}{q_a} ;$$

酸化表皮系数为

$$S_{ai}(t) = \begin{cases} -c \int_0^t q_{ai}t, & \int_0^t q_{ai}t < Q_n ; \\ -S_i, & \int_0^t q_{ai}t \geq Q_n. \end{cases}$$

式中, R_f 为注泡沫段塞结束时泡沫前沿半径, m; S_w 为注酸时泡沫段含水饱和度, 小数; q_a 为注酸总流量, m^3/s ; μ_a 为酸液粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_a 为酸化表皮系数, 无量纲; Q_n 为酸化去掉地层原始表皮系数所需要的酸量, m^3 。

初始条件: 初始时刻井底压力等于注泡沫结束时的井底压力, 即 $t = 0$ 时, $p_w = p_r$ 。

约束条件: 酸液的体积流量为定值, 井底压力小于地层破裂压力, 即

$$q_a = \text{const}, p_w < p_{frac}.$$

2.3 泡沫段塞分流酸化数学模型的求解

由于气相圈闭拟表皮因子与小层注入泡沫量有关, 小层注入泡沫量又受拟表皮因子影响, 故不能靠解析的方法来计算各小层的分流量, 只能采用数值方法计算。确定井底压力随时间的变化关系后, 可以利用井筒管流计算得到井口的压力和流量随时间的变化关系, 最终确定泡沫酸化施工参数。

2.4 泡沫段塞分流酸化的设计原则

为了达到较好的酸液分流效果, 根据国外学者的室内实验研究以及现场施工经验提出以下设计原

则:

(1) 在井底注入压力和温度条件下, 要达到较好的泡沫分流, 要求泡沫干度介于 60% ~ 80%^[19,20];

(2) 在井底注入压力和温度条件下, 泡沫段塞体积为储层裸眼段容积的 1.5 ~ 2 倍^[21];

(3) 在前置液和酸液中要含起泡剂, 这样有利于泡沫在地层中的稳定^[22];

(4) 为了使酸化施工过程不会过于复杂, 泡沫段塞分流酸化一般不超过 4 级^[21]。

3 泡沫酸酸化的数学模型

注泡沫酸的过程相当于泡沫段塞分流酸化中的注泡沫段, 数学模型基本相同, 不同的是泡沫酸中含有酸, 注入过程中会产生酸化表皮系数, 将式(1) 改写成如下形式:

$$q_{fi}(t) = \frac{2\pi H_i k_i [p_w(t) - p_e]}{\mu_f \left[\ln \frac{R_{ci}}{R_w} + S_i + S_{pi}(t) + S_{ai}(t) \right]}.$$

泡沫酸酸化数学模型的求解过程与泡沫段塞分流酸化中的注泡沫段采用相同的方法。

4 计算实例分析

4.1 泡沫段塞分流酸化设计

某一口泡沫段塞分流酸化井, 油井参数和施工参数如下: 井眼直径 R_w 为 0.278 m, 油管内径 R_{ti} 为 0.078 m, 地层压力 p_e 为 20.0 MPa, 地层温度 T_e 为 75 °C, 地温梯度 g_T 为 3.0 °C/100 m, 油层中深 z 为 2000 m, 岩石破裂压力 p_{frac} 为 30.0 MPa, 井底泡沫干度 Γ 为 0.7, 氮气注入速度 Q_N 为 600 m^3/h , 注酸速度 Q_a 为 30 m^3/h 。小层基本数据如表 1 所示。该井有 5 个小层, 各小层的渗透率差别较大。酸化过程中表皮系数、井底井口压力以及各层分流量随时间的变化关系如图 1 ~ 3 所示。泡沫段塞分流酸化设计结果、酸分流结果如下: 注入总氮气体量为 2 682 m^3 (标准状态下), 注入总酸量 Q_{an} 为 40.1 m^3 , 3 个段塞, 最高井口压力 p_{max} 为 18.2 MPa, 总作业时间 t 为 5.8 h。第 1 ~ 5 小层进酸量分别为 8.07, 8.52, 8.59, 7.46, 6.37 m^3 。第 1 ~ 3 级处理液泵入顺序均为: 注氮气 894 m^3 (标准状态下) + 液体 1.82 m^3 , 注酸 13.4 m^3 。

表 1 小层基本数据

Table 1 Basic well parameters

小层号	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 φ	泄油半径 R_w/m	厚度 H/m	束缚水饱和度 S_{wr}	表皮系数 S
1	900	0.26	200	10	0.29	20
2	600	0.26	200	10	0.29	18
3	400	0.26	200	10	0.29	17
4	200	0.26	200	10	0.29	15
5	150	0.26	200	10	0.29	15

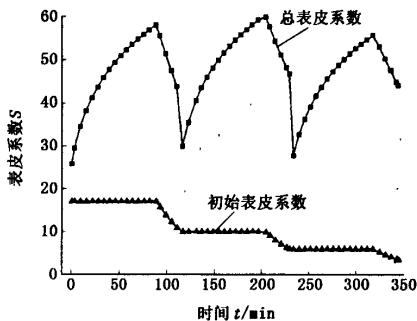


图 1 表皮系数随时间的变化

Fig. 1 Evolution of skin factor with time

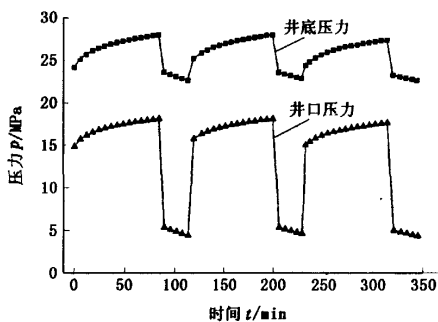


图 2 井口、井底压力随时间的变化

Fig. 2 Evolution of wellhead and bottomhole pressure with time

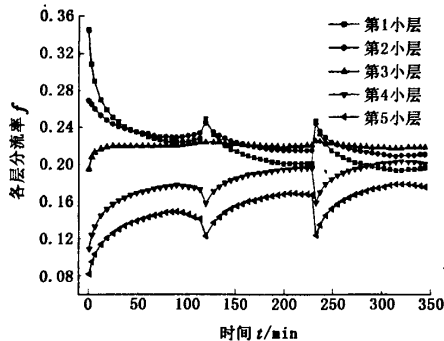


图 3 各层分流率随时间的变化

Fig. 3 Relative injection rate into each layer with time changing

通过泡沫段塞分流酸化计算实例可以看出,由于泡沫对地层具有封堵能力,在注泡沫段,地层总表皮系数(包括气相圈闭拟表皮系数,酸化后可以被清除)会逐渐增大,地层初始表皮系数保持不变,井底和井口压力逐渐升高;在注酸段,由于酸液对地层泡沫的冲刷和酸液对地层堵塞物的溶蚀,总表皮系数会逐渐减小,地层初始表皮系数逐渐减小,注入压力逐渐降低,注酸段井底和井口压力要远低于注泡沫段井底和井口压力。在注泡沫段,随着泡沫的注入,由于低渗层的拟表皮系数增加速度小于高渗层的拟表皮系数增加速度,使得高渗层的流量逐渐降低,低渗层的流量逐渐增高;在注酸段,由于酸液对泡沫的冲刷,泡沫对高渗层的封堵能力逐渐减弱,从而使得高渗层的流量逐渐增大,低渗层的流量逐渐减小。井口和井底最高注入压力出现在注泡沫段塞结束时刻,在现场施工过程中泵的额定压力要大于此时刻的井口压力。

4.2 泡沫酸化设计

为了比较两种酸化工艺的区别,对同一口井进行了泡沫酸化设计。酸化过程中表皮系数、井底井口压力以及各层分流率随时间的变化关系如图 4 ~ 6 所示。泡沫酸化设计结果以及酸分流结果如下:注入总氮气体量为 7 482 m³ (标准状态下),注入总酸量为 40.1 m³,最高井口压力 $p_{\max}$ 为 22.4 MPa,总作业时间为 13.4 h。第 1 ~ 5 小层进酸量分别为 7.29, 7.95, 8.44, 8.46, 7.96 m³。

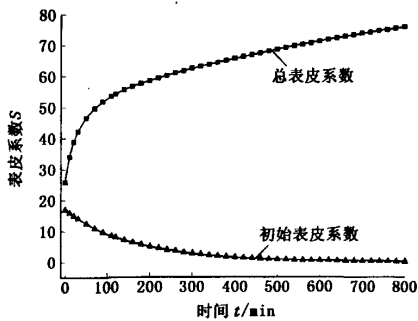


图 4 泡沫酸化工艺表皮系数随时间的变化

Fig. 4 Evolution of skin factor with time during operation of foam acid diversion acidizing

通过泡沫酸化计算实例可以看出:由于泡沫对地层具有封堵能力,地层总表皮系数会逐渐增大,地层初始表皮系数逐渐减小,井底和井口压力都会逐渐升高;开始注泡沫酸阶段(1 h 内)压力上升很快,随后压力上升会变得缓慢;随着泡沫的注入,高渗层的流量逐渐降低,低渗层的流量逐渐增高,最后

达到高低渗层均匀进酸;井口和井底最高注入压力出现在注泡沫酸结束时刻。

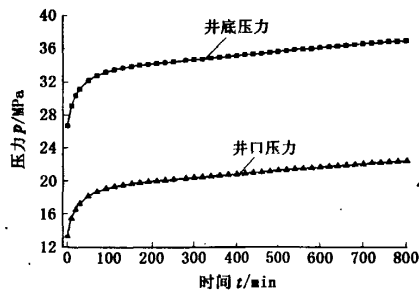


图 5 泡沫酸化工艺井口、井底压力随时间的变化
Fig. 5 Evolution of wellhead and bottomhole pressure with time during operation of foam acid diversion acidizing

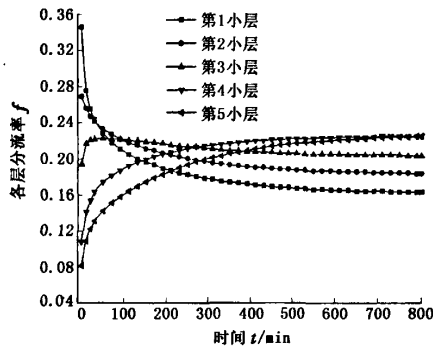


图 6 泡沫酸化工艺各层分流率随时间的变化
Fig. 6 Relative injection rate into each layer with time changing during operation of foam acid diversion acidizing

4.3 不同酸化工艺分流效果对比

常规酸化和泡沫分流酸化的酸分流结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出泡沫段塞分流酸化和泡沫酸酸化都达到了较好的分流效果。在相同的地层条件下,

泡沫酸酸化比泡沫段塞分流酸化的分流效果要好,泡沫酸酸化过程不同渗透率的小层进酸更均匀。但是,泡沫酸酸化过程中需要一直注氮气,使得酸液流量减小,导致总作业时间延长。由于泡沫酸酸化时总表皮系数一直在增加,井底压力也一直在增加,井底注入压力很容易超过地层破裂压力。国内有的油田采用了泡沫酸酸化工艺,原因可能是为了简化设计和操作,另外泡沫酸具有缓速作用,加上泡沫酸总体积大,更利于深部酸化。

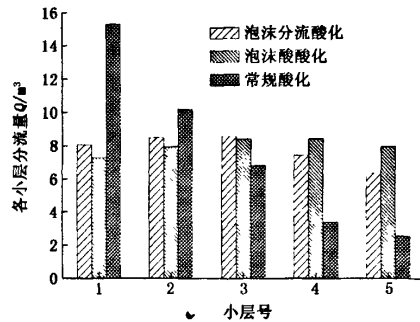


图 7 不同酸化工艺的分流结果对比
Fig. 7 Results of different diversion methods

5 泡沫酸酸化工艺的现场应用

泡沫酸化主要应用于 3 种类型的地层:对于油层厚度大、渗透率差异大的地层,利用泡沫选择性封堵高渗层;对于重复酸化的地层,利用泡沫选择性封堵溶蚀通道;对于油水同层的地层,利用泡沫选择性封堵含水层,避免酸化后出现高含水。

利用泡沫酸酸化工艺在胜利油田桩西采油厂进行了现场施工,几口井的具体施工情况如表 2 所示。由表 2 可以看出,酸化后油井产量大幅度增加,油井含水率下降,这说明泡沫有效封堵了高渗层和含水层,改善了低渗层,实现各小层均匀进酸。

表 2 泡沫酸酸化结果

			措施前			措施后			日增油 $\Delta Q_o / (m^3 \cdot d^{-1})$	累积增油 $Q_o / (m^3 \cdot d^{-1})$
井号	生产层位	酸化日期	日产液 $Q_{l1} / (m^3 \cdot d^{-1})$	日产油 $Q_{o1} / (m^3 \cdot d^{-1})$	含水率 $f_{w1} / \%$	日产液 $Q_{l2} / (m^3 \cdot d^{-1})$	日产油 $Q_{o2} / (m^3 \cdot d^{-1})$	含水率 $f_{w2} / \%$		
WHH121-2	S1-2	2005. 11. 01	5. 2	1. 7	68	18. 6	7. 6	59	5. 9	598
CTH1-27	Ng	2006. 07. 30	8. 0	0. 5	93. 8	185. 0	12. 0	93. 5	11. 5	567
LH1061322	Ng ³¹⁺²	2006. 01. 08	16. 0	2. 2	86. 3	19. 7	7	64. 5	4. 8	679
LH1061516	Ng ³²	2006. 08. 03	12. 2	0. 9	92. 6	29. 1	6. 3	78. 4	5. 4	456
WHH62-9	S2	2006. 04. 15	6. 2	4. 7	23. 5	24. 4	20. 8	14. 6	16. 1	2269
WHH702-2	S2	2006. 08. 20	16. 0	2. 2	86. 3	19. 7	5. 1	74. 1	2. 9	356

WHH121-2 井从 1996 至 2002 年先后实施 3 次酸化,日增油分别为 14,7,4 t,酸化效果逐渐变差。分

析认为前 3 次常规酸化形成了溶蚀通道,地层存在较强的非均质性,在该井实施泡沫酸试验,利用泡沫

的选择性封堵作用,一定程度上封堵前3次酸化溶蚀通道,使酸液进入低渗条带,同时利用泡沫酸缓速性增加酸化半径。酸化处理液采用 10% HCl + 3% HF + 1% HY-2 共 30 m³,酸化开始时泡沫干度为 0.6,酸化过程中井口压力变化关系如图 8 所示。井口压力变化情况与理论计算结果(图 5)有相同的趋势,酸化开始时压力上升较快,随后压力上升变得缓慢。酸化取得了良好的效果,日增油 5.9 m³,累积增油 598 m³。

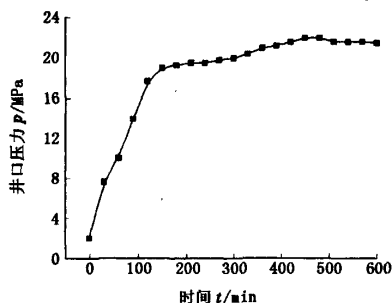


图 8 泡沫酸化过程中井口压力变化

Fig. 8 Evolution of wellhead pressure during operation of foam acid diversion acidizing

6 结 论

(1)在泡沫段塞分流酸化过程中,注泡沫段地层总表皮系数逐渐增大,井底和井口压力逐渐升高;在注酸段总表皮系数逐渐减小。泡沫的注入使得高渗层的流量逐渐降低,低渗层的流量逐渐增加,并能将后续酸液转向低渗层。

(2)在相同的地层条件下,泡沫酸酸化比泡沫段塞分流酸化的分流效果要好,不同渗透率小层进酸更均匀,但是泡沫酸酸化总作业时间长,井口注入压力高。

(3)泡沫分流酸化能有效封堵高渗层,恢复产能,动用低渗层,适于非均质油藏油气井、重复酸化老井的解堵增产增注。

参考文献:

- [1] 伦纳德·卡尔法亚. 酸化增产技术[M]. 吴奇, 邹洪岚, 张汝生, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 2004: 3-8.
- [2] 威廉斯, 吉德里, 谢克特. 油井酸化原理[M]. 罗景齐, 译. 北京: 石油工业出版社, 1983: 9-11.
- [3] MOHAMMED Zerhoub, KAMEL Ben-Naceur, TOUBOU Eric, et al. Matrix acidizing: a novel approach to foam diversion [J]. SPE Production & Facilities, 1994, 9 (2): 121-126.

- [4] CHENG L, KAM S I, DELSHAD M, et al. Simulation of dynamic foam-acid diversion processes [R]. SPE 68916, 2001.
- [5] BERNARD G G, HOLM L W, JACOBS W L. Effective of foam on trapped gas saturation and on permeability of porous media to water [R]. SPE 1204, 1965.
- [6] FRIEDMANN Jensen F J A. Some parameters influencing the formation and propagation of foams in porous media [R]. SPE 15087, 1986.
- [7] HUH D G, HANDY L L. Comparison of steady and unsteady-state flow of gas and foaming solution in porous media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1989, 4(1): 77-84.
- [8] SANCHEZ J M, SCHECHTER R S. Surfactant effects on the two-phase flow of steam-water and nitrogen-water through permeable media [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 1989, 3(1): 185-199.
- [9] de VRIES A S, WIT K. Rheology of gas/water foam in the quality range relevant to steam foam [J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(2): 185-192.
- [10] FRIEDMANN F, CHEN W H, GAUGLITZ P A. Experimental and simulation study of high-temperature foam displacement in porous media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(1): 37-45.
- [11] BRETHERTON F P. The motion of long bubbles in tubes [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1961: 166-188.
- [12] HIRASAKI G J, LAWSON J B. Mechanisms of foam flow in porous media: apparent viscosity in smooth capillaries [J]. SPE AIME, 1985, 25(2): 176-190.
- [13] FALLS A H, HIRASAKI G J, PATZEK T W, et al. Development of a mechanistic foam simulator: the population balance and generation by snap-off [J]. SPE Reservoir Engineering, 1988, 3(3): 884-892.
- [14] ROSSEN W R. Theory of mobilization pressure gradient of flowing foams in porous media I: incompressible foam [J]. J Colloid Interface Sci, 1990: 1-53.
- [15] HIRASAKI G J. The steam foam process [J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(5): 449-456.
- [16] PRUD'HOMME R K, KHAN S. Foams in enhanced oil recovery [M]. New York: Marcel Dekker, 1996: 413-464.
- [17] GILLIS J V, RADKE C J. A dual-gas tracer technique for determining trapped gas saturation during steady foam flow in porous media [R]. SPE 20519, 1990.
- [18] HILL A D, ROSSEN W R. Fluid placement and diversion in matrix acidizing [R]. SPE 27982, 1997.

(下转第 91 页)

- XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. *Journal of Seismology*, 2003, 23(4): 1-9.
- [5] 谢和平. 脆性材料裂纹扩展分形运动学[J]. *力学学报*, 1994, 26(6): 757-762.
- XIE He-ping. Fractal kinematics of crack propagation in brittle materials[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1994, 26(6): 757-762.
- [6] BOWIE O L, FREEZE C E. Elastic analysis for a radial crack in a circular ring[J]. *Eng Frac Mech*, 1972, 4(2): 315-321.
- [7] CLIFTON R J, SIMONSON E R, JONE A H, et al. Determination of the critical stress intensity factor K_{IC} from internally pressured thick-walled vessels[J]. *Experimental Mechanics*, 1976: 233-238.
- [8] 刘洪, 符兆荣, 黄桢, 等. 水力压裂力学机理新探索[J]. *钻采工艺*, 2006, 29(3): 36-40.
- LIU Hong, FU Zhao-rong, HUANG Zhen, et al. Study on hydraulic fracturing mechanics[J]. *Drilling & Production Technology*, 2006, 29(3): 36-40.
- [9] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman, 1982.
- [10] 李传亮, 孔详言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究[J]. *石油钻采工艺*, 2000, 22(2): 54-57.
- LI Chuan-liang, KONG Xiang-yan. A theoretical study on rock breakdown pressure calculation equations of fracturing process[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2000, 22(2): 54-57.
- [11] 阳友奎, 肖长富, 邱贤德, 等. 水力压裂裂缝形态与缝内压力分布[J]. *重庆大学学报*, 1995, 18(3): 20-26.
- YANG You-kui, XIAO Chang-fu, QIU Xian-de, et al. Fracture geometry and pressure distribution in fracture for hydrofracturing[J]. *Journal of Chongqing University*, 1995, 18(3): 20-26.
- [12] 吴立, 阎天俊. 岩体爆破破碎过程中的分形效应[J]. *凿岩机械气动工具*, 2002(3): 6-9.
- WU Li, YAN Tian-jun. Fractal effect of crack spreading in rock blasting[J]. *Zhaoyan Jixie Qidong Gongju*, 2002(3): 6-9.

(编辑 李志芬)

(上接第82页)

- [19] GDANSKI R D. Experience and research show best designs for foam-diverted acidizing[J]. *Oil & Gas Journal*, 1993: 85-89.
- [20] JOSE M Alvarez, HERCILIO Rivas, GEIDY Navarro, et al. An optional foam quality for diversion in matrix-acidizing projects[R]. SPE 58711, 2000.
- [21] MORPHY P H, GREENGALD K G. Operational experience with foam-diverted acid jobs in the Gulf of Mexico[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1998, 50(3): 44-45.
- [22] ZHOU Z H, ROSSEN W R. Applying fractional-flow theory to foams for diversion in matrix acidization[J]. *SPE Production & Facilities*, 1994, 9(1): 29-35.

(编辑 沈玉英)

(上接第86页)

- [15] KRUG J A, et al. Charts help find volume, pressure needed for foam drilling[J]. *Oil and Gas*, 1982: 61-64.
- [16] 陈家琅, 刘永建, 等. 钻井液流动原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [17] 宫敬, 严大凡. 非牛顿管流摩阻计算方法的比较[J]. *石油规划设计*, 1994, 5(3): 28-32.
- GONG Jing, YAN Da-fan. Comparison of calculation method of frictional loss for non-Newtonian fluid flowing in pipe[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 1994, 5(3): 28-32.
- [18] 王弥康. 注蒸汽井筒热传递的定量计算[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1994, 18(4): 77-81.
- WANG Mi-kang. Quantitative calculation of wellbore heat transfer for steam injection wells[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1994, 18(4): 77-81.

(编辑 沈玉英)