

闭合酸蚀裂缝导流能力模拟研究

赵立强¹, 缪尉杰¹, 罗志锋¹, 龚云蕾², 汪鹏³, 李屹洋⁴

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中海石油湛江分公司, 广东 湛江 524057; 3. 中国石油新疆油田公司第一采油厂, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油新疆油田公司重油开发公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 酸蚀裂缝导流能力是影响酸压改造效果的关键所在。由于岩石性质、刻蚀形态及闭合压力等因素影响, 很难对酸蚀裂缝导流能力进行准确的预测。目前, 对于酸蚀裂缝几何形态和酸穿距离的计算模型较多, 而就酸蚀裂缝导流能力的计算模型研究较少。为此, 基于自仿射分形理论建立裂缝酸压模型, 进行酸压模拟, 利用局部立方规律(LCL)对闭合酸蚀裂缝导流能力进行预测, 对影响闭合酸蚀裂缝导流能力的主要因素进行了正交模拟计算。结果表明, 影响闭合酸蚀裂缝导流能力主要因素的影响程度从大到小依次为: 闭合压力>分形维数>注酸时间>地层基质渗透率>注酸排量>标准偏差>地层基质孔隙度。

关键词: 分形理论; 酸蚀裂缝; 酸压模拟; 导流能力

中图分类号: TE357.2

文献标识码: A

Simulation study on conductivity of closed acid cracks

Zhao Liqiang¹, Miao Weijie¹, Luo Zhifeng¹, Gong Yunlei², Wang Peng³ and Li Qiyang⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Zhanjiang Branch of CNOOC(China), Zhanjiang, Guangdong 524057, China; 3. No. 1 Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Heavy Oil Development Company, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: The conductivity of acid cracks was the key to the transformation effects of acid fracturing. Due to the influences of rock properties, etching morphology and closing pressure, it was difficult to accurately predict the conductivity of acid fractures. Currently, there were many computational models for acid fractures geometry and acid penetration distance, but there were few researches on the computational model of flow capacity. For this reason, we built the acid fracturing model of cracks based on the improved self-affine fractal theory and applied it to the fractal fractures. And then, by the local cubic law (LCL), we built the acid fracture conductivity calculation model and applied the quadrature analysis to the main factors which affected the conductivity of the acid fracture after closure. The results showed that the influencing degree of those factors which affected the acid fracture conductivity were as follows: closure stress>fractal dimension>injection time>matrix permeability>injection rate>standard deviation>matrix porosity.

Key words: fractal theory, acid cracks, acid fracturing simulation, conductivity

酸压已成为低渗透碳酸盐岩油气藏实现增产改造的重要措施。酸压改造成功的关键在于酸蚀裂缝趋于闭合后仍具有一定导流能力的裂缝。影响酸蚀裂缝导流能力的主要因素有: 岩石类型、地层基质渗透率、地层基质孔隙度、酸液滤失情况、酸液类型及浓度、注酸排量、注酸时间、闭合压力等^[1]。目前, 对酸蚀裂缝导流能力的实验方法、计算模型较多, 但针

对闭合酸蚀裂缝导流能力的计算模型及相关模拟却十分少见。

裂缝的宽度和渗透率决定其导流能力, 而酸蚀裂缝壁面几何形态符合分形特征^[2], 利用分形理论可以对酸蚀裂缝壁面的几何形态进行更加准确的描述。该理论最早应用于裂缝表面酸-岩反应模型的研究^[2], 随后应用于地层中酸液滤失情况的研究^[3], 识

收稿日期: 2017-11-17。

第一作者简介: 赵立强(1957—), 男, 博士生导师, 油气藏增产改造理论与技术、采油气工程。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发——四川盆地大型碳酸盐岩气田开发示范工程”(2016ZX05052)。

别地层中的裂缝^[4]及对地层中裂缝宽度的变化情况进行描述^[5]等方面。在表征渗透率上,Dong^[7]提出了针对碳酸盐岩储层中天然裂缝的酸化模型;Sarkar^[8]等用斯托克斯方程对平行板裂缝中流体的流动状态进行了模拟计算;Coakley^[8]等将不规则的裂缝内流体流动状态进行了模拟计算,并求出了裂缝的等效渗透率;A D Hill^[9]等提出了一个考虑酸蚀蚓孔影响的滤失模型。酸蚀裂缝闭合模型最早是由Gangi^[11]提出的“钉床”模型;Hopkins^[11]改进锥体“钉床”并计算缝宽方向上的变形量;J Deng等^{[11][10]}对Myer模型^[11]进行了改进,用多个椭圆来表征裂缝中未闭合的区域。在计算导流能力方面,Tsang和Witherspoon^{[11][12][13]}模型、Gong^{[12][13]}模型、JianyeMou^{[12][13]}模型、J Deng^[10]模型都能应用于酸蚀裂缝导流能力的模拟计算。

在前人的研究基础上,利用优化分形插值方法来建立粗糙裂缝壁面,求解酸压模型,针对缝宽特征描述对Myer模型进行改进,计算出闭合酸蚀裂缝导流能力,通过正交分析,对各影响因素影响程度大小进行了排序。

1 分形裂缝的建立

1.1 粗糙壁面的生成

用改进自仿射分形插值^[14],进行局部邻域划分和选择合适的压缩比,就能插出比较精确的粗糙裂缝壁面。运用地质统计学中的变差函数理论^[15],划分局部邻域,实验变差函数的计算公式为:

$$\gamma^*(h_j) = \frac{1}{2N(h_j)} \sum_{i=1}^{N(h_j)} [z(x_i + h_j) - z(x_i)]^2 \quad (1)$$

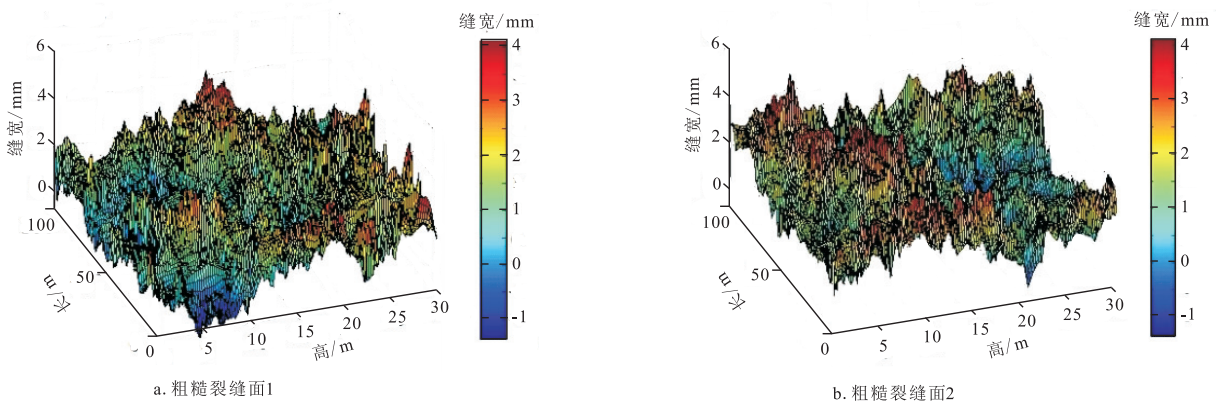


图1 数值生成的粗糙裂缝壁面

Fig. 1 Rough fracture wall generated by numerical value

式中: $\gamma^*(h_j)$ 为实验变差函数; $z(x_i)$ 为在点 x_i 处的裂缝粗糙壁面高度, m ; h_j 为两观测点间的距离, m ; $N(h_j)$ 为间隔为 h_j 的数据对数目。

将计算出的实验变差函数值,在 $h \sim \gamma^*(h_j)$ 坐标系中描出散点,再用最小二乘法理论拟合变差函数曲线从而求得变程 $a=a1$,块金值 $c0=c1$,基台值 c ,总基台值 $c2=c0+c$ 。取 $a1$ 为局部矩形邻域的边长,进行局部邻域的划分。

在矩形区域的分形插值中,规则网格点数据的表示形式为 $\{x_n, y_m, z_{n,m}\}$ ($n=0, 1, \dots, N$; $m=0, 1, \dots, M$)。类似地,将趋势值、偏差值分别表示为 $\hat{z}_{n,m}$ 和 $e_{n,m}$ 。

则压缩比 $s_{n,m}$ 为:

$$s_{n,m} = \frac{e_{n,m}}{e}, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

采用改进自仿射分形插值理论数值生成长100 m、高30 m、分形维数2.5、标准偏差0.000 016 m的粗糙分形裂缝壁面(图1)。

1.2 分形裂缝生成

在分形维数2.5、标准偏差0.000 016 m的条件下数值生成的两个粗糙裂缝壁面进行合成,形成一条具有一定宽度的裂缝,该裂缝平均缝宽为0.003 6 m,最大缝宽为0.007 4 m(图2)。

2 分形裂缝酸压模型

为模拟酸压对裂缝几何形态的影响,基于碳酸盐岩储层的裂缝酸压物理模型,根据酸液质量守恒、酸液传质平衡和裂缝宽度变化方程建立了分形裂缝的酸压模型。

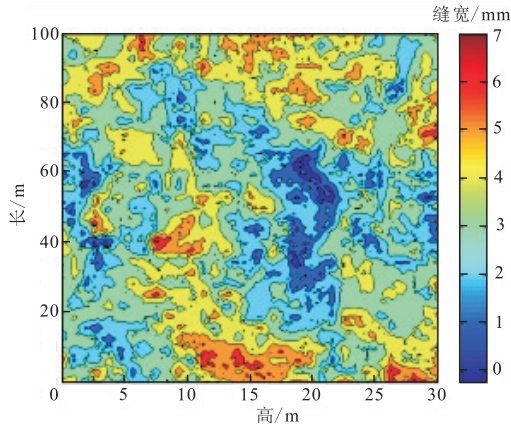


图2 合成的分形裂缝宽度分布

Fig. 2 Width distribution of synthetic fractal fractures

2.1 假设条件数学模型的建立

为简化计算过程,建立的方程需满足以下假设条件:

- 1) 酸液是不可压缩的,密度恒定;
- 2) 酸液在裂缝中的流型为层流;
- 3) 模拟过程中不考虑蚓孔对酸液滤失的影响;
- 4) 酸-岩反应速度受传质控制。

2.2 数学模型的建立

在假设条件下,把酸化前裂缝壁面的酸液浓度视为0,得到酸液传质平衡方程为:

$$\frac{1}{12\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{C} b^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{12\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{C} b^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) - 2\bar{C} \frac{k}{\mu} \frac{p - p_e}{w_m} - 2\bar{C} k_g = \frac{\partial(\bar{C}b)}{\partial t} \quad (3)$$

式中: μ 为酸液黏度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$; b 为裂缝宽度, m ; k 为岩心基质渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; p 为点 (x,y) 处的压力, MPa ; p_e 为地层压力, MPa ; w_m 为滤失酸液的穿透深度, m ; \bar{C} 为裂缝内点 (x,y,z) 处的平均酸液浓度, kg/m^3 。

在单位时间内,酸-岩反应引起的单元体的体积变化量等于溶解的岩石体积,可得裂缝宽度变化方程为:

$$\frac{\beta}{\rho(1-\phi)} \left(2\eta \frac{k}{\mu} \frac{p - p_e}{w_m} \bar{C} + 2k_g \bar{C} \right) = \frac{\partial b}{\partial t} \quad (4)$$

式中: η 为滤失酸液中与缝壁岩石发生反应的酸液占滤失酸液的百分数,小数,大多数情况下 $\eta \approx 0$; β 为酸液的质量溶解能力,表示被溶解的岩石质量与反应的酸液质量之比, $\text{kg}(\text{岩石})/\text{kg}(\text{酸})$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; ϕ 为岩石孔隙度,小数。

2.3 模型求解

酸压前裂缝内各点的酸液浓度为0,已知分形裂缝宽度及粗糙度数据,从裂缝入口端(即 $y=0$ 处)向裂缝和基质岩石注入酸液。在酸压过程中,注酸排量恒定,裂缝顶部和底部(即 $x=0$ 和 $x=l$ 处)无酸液流动,裂缝出口端(即 $y=h$ 处)的压力为地层压力,裂缝入口端的酸液浓度为 C_0 。式(5)和式(6)分别为分形裂缝酸压数学模型的初始条件和边界条件。

初始条件:

$$\begin{cases} p(x,y) = 0, \forall x,y,t = 0 \\ \bar{C}(x,y) = 0, \forall x,y,t = 0 \\ b(x,y) = B_{in}(x,y), \forall x,y,t = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $B_{in}(x,y)$ 为分形裂缝的初始宽度分布, m 。

边界条件:

$$\begin{cases} \int_0^h \frac{b^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} dy = q_{inj}, t > 0 \\ p(l,y) = p_e, \forall y,t > 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \forall x,t > 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \forall x,t > 0 \\ \bar{C}(0,y) = C_0, \forall y,t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $q_{inj}(x,y)$ 为注酸排量, m^3/min 。

在已知初始裂缝宽度 b 和酸液流量恒定的情况下,对式(3)和式(4)修正,以压力 p 和酸液浓度 C 为初始迭代计算步,运用 Gauss-Seidel 方法^[16]进行求解。按照表1所示参数进行模拟得到如图3所示的分形裂缝酸压模拟结果。分形裂缝酸压前的平均缝宽如图2所示,为 0.0036 m ,最大缝宽为 0.0074 m ;分形裂缝酸压后的平均缝宽如图3所示,为 0.0054 m ,

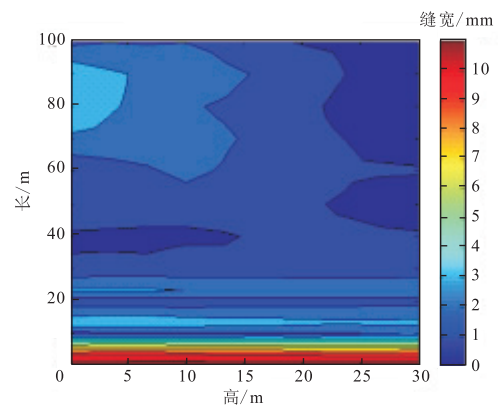


图3 分形裂缝酸压模拟结果

Fig. 3 Fractal fracture acidification simulation results

表1 裂缝酸压参数
Table 1 Parameters of acidification of fracture

参数	数值	参数	数值
分形维数	2.5	酸液黏度/(mPa·s)	3
标准偏差/m	0.000 016	酸液密度/(kg·m ³)	1 070
裂缝尺寸	30 m×100 m	酸液溶解能力	0.082 m ³ (岩石)/m ³ (酸液)
岩石密度/(kg·m ³)	2 710	酸岩反应速度常数/(m·s ⁻¹)	1.0×10 ⁻⁵
地层压力/MPa	45	有效传质系数/(m ² ·s ⁻¹)	1.0×10 ⁻⁹
地层基质渗透率/10 ⁻³ μm ²	10	注酸排量/(m ³ ·min ⁻¹)	3.5
地层基质孔隙度,%	5	注酸时间/min	40
酸液类型	15 %HCl		

最大缝宽为0.011 8 m。

3 酸蚀裂缝闭合模型

在闭合压力的作用下,酸蚀裂缝会逐渐闭合,裂缝壁面上的粗糙颗粒相互接触后会发生变形。在模拟过程中,沿裂缝长度方向将裂缝分为若干剖面,分别对每个剖面在闭合压力作用下的闭合特征进行研究。利用若干椭圆的Myer模型替代Airy应力函数和复变函数理论^[1],对椭圆的变形情况进行分析计算,对各裂缝剖面的闭合特征进行描述。

Myer推导了计算多个椭圆闭合量的解析解的求解方法^[1]。他用多个椭圆表征未闭合的裂纹,并对裂纹的闭合特征进行分析,得到考虑了接触比影响的裂纹平均闭合量为^[10]:

$$\overline{\Delta w} = \frac{4\sigma_c \bar{a}}{\pi G} \frac{v-1}{(1-\alpha_c)^2} \left\{ \ln \left[\cos \frac{(1-\alpha_c)\pi}{2} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: $\overline{\Delta w}$ 为椭圆的平均闭合量,m; α_c 为裂缝剖面的

接触比,无因次; G 为剪切模量,MPa; ν 为泊松比,无因次。

将裂缝的最小宽度与式(7)计算的裂纹平均闭合量进行比较。若裂纹平均闭合量大于最小缝宽,即($\overline{\Delta w} > w_{\min}$),就会有更多的粗糙颗粒相互接触。进一步计算各个裂缝宽度与最小缝宽间的差值($w_i - w_{\min}$),为下一步的计算求得新的缝宽剖面。随着裂缝进一步闭合,用于表征未闭合裂纹的椭圆变得越来越小。若计算的裂纹变形量大于用于表征裂纹的椭圆的最大宽度,裂纹就会完全闭合。与此同时,随着两个粗糙壁面的接触比的增大,裂纹的变形量会急剧降低。重复上述过程直到裂缝不再闭合为止。图4给出了裂缝的闭合过程。

在闭合压力的作用下,一些宽度较大的裂纹不会完全闭合。此时,由式(7)求得的裂纹闭合量小于裂缝的最小宽度($\overline{\Delta w} < w_{\min}$)。那么,就可以求得最终的裂缝宽度剖面,即为($w_i - \overline{\Delta w}$)。

在闭合压力为70 MPa情况下模拟缝宽分布(图5)。

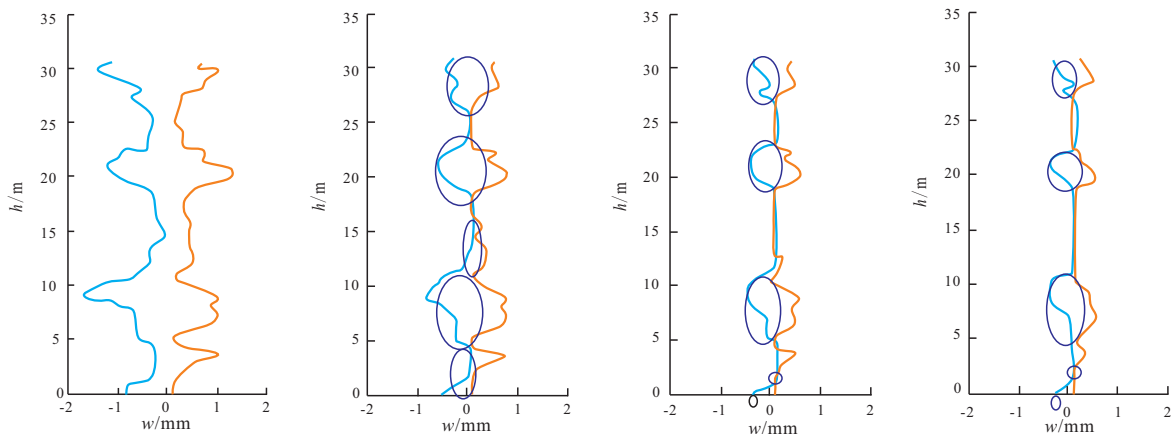


图4 裂缝的闭合过程

Fig. 4 Process of fracture closure

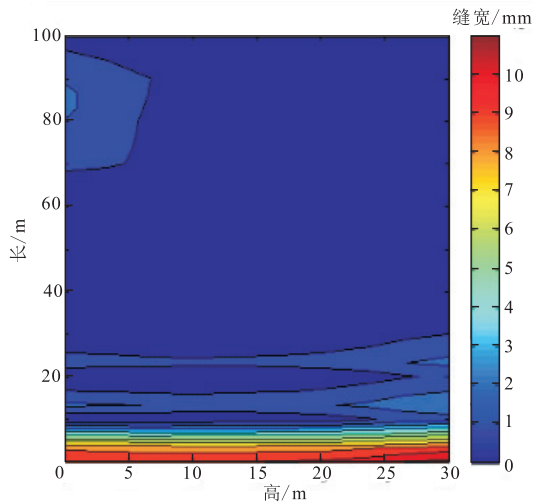


图5 闭合压力为70 MPa的条件下,闭合酸蚀裂缝的缝宽分布

Fig. 5 Distribution of width closed acid corrosion fractures with the closed pressure of 70 MPa

4 闭合酸蚀裂缝导流能力影响因素分析

4.1 导流能力计算

Zimmerman 和 Bodvarsson^[1]对稳态 Navier-Stokes 方程进行了求解。假设裂缝是由两块平行板构成,裂缝导流能力为:

$$C_f = \frac{w^3}{12} \times 10^{-1} \quad (8)$$

式中: w 为裂缝宽度, m; C_f 为裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

若将裂缝划分成若干个很小的网格单元,那么就可以将网格内的裂缝壁面近似为两块平行板,就可以利用立方规律对其导流能力进行计算,这就是局部立方规律(LCL)。Brush 和 Tomson^[1]合成了一个粗糙裂缝,模拟流体在该裂缝中的流动情况。他们将 Navier-Stokes 方程、Stokes 方程及 LCL 方程的计算

结果进行对比后发现,LCL 方程可以近似代替 Navier-Stokes 方程。所以,采用 LCL 方程计算闭合酸蚀裂缝导流能力。

由于裂缝宽度比裂缝长度和裂缝高度都要小得多,所以忽略流体在垂直于裂缝表面方向上的流动,将速度场式(9)、式(10)带入可以得到二维质量平衡方程得到式(11)。

$$q_x = \frac{k_f w h_x}{\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{w^3 h_x}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (9)$$

$$q_y = \frac{k_f w h_y}{\mu} \frac{dp}{dy} = \frac{w^3 h_y}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(w^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(w^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$$

求得的闭合酸蚀裂缝宽度分布剖面的基础上,对式(11)进行离散并求出其数值解,求出裂缝中的压力分布。然后结合式(9)、式(10)中速度场分布可计算出闭合酸蚀裂缝导流能力:

$$C_f = \frac{q \mu x_f}{h_f \Delta p} \quad (12)$$

式中: C_f 为裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$; q 为流速, m^3/s ; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; x_f 为裂缝长度, m; h_f 为裂缝高度, m; Δp 为裂缝两端的压差, MPa。

在求解闭合酸蚀裂缝导流能力的过程中,忽略裂缝剖面间的相互影响和裂缝中某些闭合区域的影响是不合理的。酸蚀裂缝壁面上的粗糙颗粒能让酸蚀裂缝在闭合压力的作用下不会完全闭合,刻蚀沟槽的形成有助于提高闭合酸蚀裂缝的导流能力^[17,18]。

4.2 正交试验方案

影响闭合酸蚀裂缝导流能力的参数有很多,若要对所有参数的所有组合都进行分析是很困难的。因此,采用正交分析法选取影响闭合酸蚀裂缝导流能力的代表性参数组合进行分析。各影响因素的取值见表2。不考虑各个影响因素之间的相互作用,模

表2 闭合酸蚀裂缝导流能力模拟影响因素及因素水平

Table 2 Influence factors and factor levels of conductivity of closed acid fractures

水平数	影响因素						
	分形维数	标准偏差/ m	岩石基质渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	岩石基质孔隙度, %	注酸排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	注酸时间/ min	闭合压力/ MPa
1	2.0	0.000 010	5	5	2.0	10	55
2	2.25	0.000 012	10	7.5	2.5	20	60
3	2.5	0.000 014	15	10	3.0	30	65
4	2.7	0.000 016	20	12.5	3.5	40	70
5	2.8	0.000 018	25	15	4.0	50	75
6	2.9	0.000 020	30	17.5	4.5	60	80

拟次序及试验结果如表3所示。

4.3 试验结果分析

在正交实验设计理论中,各因素的极差大小反映该因素对闭合酸蚀裂缝导流能力的重要程度。从表4分析可知,分形维数、标准偏差、岩石基质渗透

率、岩石基质孔隙度、注酸排量、注酸时间和闭合压力对闭合酸蚀裂缝导流能力的影响程度排序为:闭合压力>分形维数>注酸时间>地层基质渗透率>注酸排量>标准偏差>地层基质孔隙度。

通过以上分析可知,闭合压力是影响酸蚀裂缝导流能力最为重要的因素,前期对地质油藏的掌握,

表3 正交试验次序及试验结果
Table 3 Orthogonal test order and results

水平数	影响因素							闭合酸蚀裂缝导流能力/ ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$)
	分形维数	标准偏差/ m	岩石基质渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	岩石基质孔隙度, %	注酸排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	注酸时间/ min	闭合压力/ MPa	
1	2.0	0.000 010	5	5	2.0	10	55	28.82
2	2.0	0.000 012	10	7.5	2.5	20	60	12.84
3	2.0	0.000 014	15	10	3.0	30	65	40.49
4	2.0	0.000 016	20	12.5	3.5	40	70	33.50
5	2.0	0.000 018	25	15	4.0	50	75	63.24
6	2.0	0.000 020	30	17.5	4.5	60	80	82.92
7	2.25	0.000 010	10	10	3.5	50	80	11.51
8	2.25	0.000 012	15	12.5	4.0	60	55	8.36
9	2.25	0.000 014	20	15	4.5	10	60	15.35
10	2.25	0.000 016	25	17.5	2.0	20	65	28.24
11	2.25	0.000 018	30	5	2.5	30	70	4.89
12	2.25	0.000 020	5	7.5	3.0	40	75	88.50
13	2.5	0.000 010	15	12.5	4.0	60	55	6.99
14	2.5	0.000 012	20	15	4.5	10	60	6.11
15	2.5	0.000 014	25	17.5	2.0	20	65	12.12
16	2.5	0.000 016	30	5	2.5	30	70	26.22
17	2.5	0.000 018	5	7.5	3.0	40	75	47.69
18	2.5	0.000 020	10	10	3.5	50	80	69.20
19	2.7	0.000 010	20	15	4.5	10	60	2.82
20	2.7	0.000 012	25	17.5	2.0	20	65	3.94
21	2.7	0.000 014	30	5	2.5	30	70	10.28
22	2.7	0.000 016	5	7.5	3.0	40	75	22.84
23	2.7	0.000 018	10	10	3.5	50	80	29.76
24	2.7	0.000 020	15	12.5	4.0	60	55	47.38
25	2.8	0.000 010	25	17.5	2.0	20	65	1.19
26	2.8	0.000 012	30	5	2.5	30	70	2.71
27	2.8	0.000 014	5	7.5	3.0	40	75	10.06
28	2.8	0.000 016	10	10	3.5	50	80	15.20
29	2.8	0.000 018	15	12.5	4.0	60	55	17.90
30	2.8	0.000 020	20	15	4.5	10	60	1.36
31	2.9	0.000 010	30	5	2.5	30	70	55.86
32	2.9	0.000 012	5	7.5	3.0	40	75	62.28
33	2.9	0.000 014	10	10	3.5	50	80	42.83
34	2.9	0.000 016	15	12.5	4.0	60	55	3.98
35	2.9	0.000 018	20	15	4.5	10	60	2.70
36	2.9	0.000 020	25	17.5	2.0	20	65	1.08

表4 试验结果分析
Table 4 Analysis of test results

水平数	影响因素						
	分形维数	标准偏差/ m	岩石基质渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	岩石基质孔隙度, %	注酸排量/ ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	注酸时间/ min	闭合压力/ MPa
K1	261.81	107.18	260.20	128.99	75.394	57.156	113.42
K2	156.86	96.443	181.34	244.22	113.01	59.410	41.17
K3	168.32	131.13	125.09	208.99	271.86	140.65	87.06
K4	117.02	189.98	61.833	118.10	202.00	264.88	133.67
K5	48.628	166.18	109.81	91.57	147.84	231.74	294.61
K6	168.73	290.44	183.09	129.49	111.25	251.42	251.42
k1	43.635	17.864	43.367	21.498	12.566	9.5259	18.90
k2	26.143	16.074	30.224	40.703	18.834	9.9017	6.86
k3	28.053	21.854	20.848	34.832	45.311	23.422	14.51
k4	19.503	21.664	10.305	19.683	33.667	44.146	22.28
k5	8.1047	27.697	18.301	15.262	24.640	38.624	49.10
k6	28.122	48.407	30.514	21.582	18.542	41.904	41.90
极差R	35.530	32.333	33.061	25.441	32.745	34.620	42.24
主次顺序	G>A>F>C>E>B>D						

特别是裂缝闭合压力是准确预测导流能力指导施工的基础,分形维数也是制约导流能力的关键,在渗透率和孔隙度二者之间应该着重选择渗透率较高的层段作为施工层段。落实到工程上来看,注酸时间比注酸排量对导流能力的影响更大,在施工时严格把控时间,保持排量的稳定是获得高导流能力的必要条件与手段。

5 结论

1) 目前对于酸蚀裂缝几何形态和酸穿距离的计算模型较多,就酸蚀裂缝导流能力的计算模型研究较少。基于分形理论、流体力学方程和Myer闭合模型,模拟酸蚀裂缝闭合后的导流能力。

2) 闭合酸蚀裂缝导流能力受闭合压力、基质渗透率、分形维数、注酸时间等多个参数的影响,利用正交分析法得到了影响闭合酸蚀裂缝导流能力主要因素的影响程度的排序:闭合压力>分形维数>注酸

时间>地层基质渗透率>注酸排量>标准偏差>地层基质孔隙度。

3) 通过前期地质认识,掌握闭合压力能很大程度上验证酸蚀裂缝导流能力预测的准确性,施工过程中注酸时间与注酸排量的保证是获得高导流能力的必要条件与手段。

参考文献

- [1] Jiayao Deng. Mechanical behavior of small-scale channels in acid-etched fractures[D]. Texas A&M University, 2010.
- [2] R A Beier, H H Hardy. Comparison of 2D and 3D fractal distributions in reservoir simulations[J]. SPE Reservoir Engineering, 1994, 9(3): 195-200.
- [3] 张黎明,任书泉. 岩矿颗粒酸溶蚀反应分形模型初探[J]. 石油钻采工艺, 1996, (1): 59-65+107.
- [4] 蒲洪江. 新场气田复杂砂岩气藏平衡酸压闭合酸化工艺及模拟技术研究[D]. 西南石油学院博士学位论文. 2007.
- [5] 徐学成. 裂缝性砂岩油藏储层表征研究[D]. 西南石油学院博士学位论文. 2003
- [6] 胡泽根,王永清,陈晖. 砂岩储层裂缝宽度预测新方法[J]. 内蒙古石油化工. 2009, (1): 127-130

- [7] Chengli Dong. Acidizing of naturally- fractured carbonate formations[D]. The University of Texas at Austin, 2001.
- [8] Jianye Mou. Modeling acid transport and non-uniform etching in a stochastic domain in acid fracturing[D]. Texas A&M University, 2009.
- [9] A D Hill, Ding Zhu, Y Wang. The effect of wormholing on the fluid loss coefficient in acid fracturing[J]. SPE Production & Facilities, 1995, 10(4): 257-264.
- [10] J Deng, A D Hill, D Zhu. A theoretical study of acid-fracture conductivity under closure stress[J]. SPE Production & Operations, 2011, 26(1): 9-17.
- [11] L J Pyrak-Nolte, L R Myer, D D Nolte. Fractures: Finite-size scaling and multifractals[J]. Pure & Applied Geophysics, 1992, 138(4): 679-706.
- [12] Ming Gong. Mechanical and hydraulic behavior of acid fractures- experimental studies and mathematical modeling[D]. The University of Texas at Austin, 1997.
- [13] 李年银, 赵立强, 张倩, 等. 酸压过程中酸蚀裂缝导流能力研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(6): 59-62.
- [14] 孙洪泉, 谢和平. 断层粗糙表面的分形模拟. 中国矿业大学学报. 1999, 5(29): 433-436
- [15] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 中国矿业大学出版社, 1990
- [16] 韩大匡, 陈钦雷, 闫存章. 油藏数值模拟基础[M]. 石油工业出版社, 1993
- [17] 赵立强, 高俞佳, 袁学芳, 等. 高温碳酸盐岩储层酸蚀裂缝导流能力研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(1): 20-26.
- [18] 罗志锋, 张楠林, 赵立强, 等. 前置液酸压缝内酸液指进数值模拟[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 5(7): 26-31.

(编辑 常燕)

《油气藏评价与开发》2019年专刊征稿启事

为了进一步促进油气勘探开发技术水平的提高,《油气藏评价与开发》在刊载石油和天然气勘探与开发技术和成果的同时,突出华东油气三大技术特色,2019年筹划出版CO₂驱油提高采收率、页岩气、煤层气三期主题专刊。欢迎从事以上主题研究的广大作者和读者撰写相关高质量论文按照征稿时间及时投稿。

内容要求:CO₂驱油提高采收率技术、页岩气和煤层气等非常规油气勘探开发技术,以及配套工程工艺技术研究的最新成果、创新技术。

论文要求:论文格式参见官网投稿指南,基金项目支持的论文优先录用。

投稿要求:请登陆期刊官方网站投稿。

网址:<http://red.magtech.org.cn>

联系人:李颖洁

联系电话:15895894582

专刊征稿时间

专刊主题	论文提交截止时间
CO ₂ 驱油提高采收率	2019年1月31日
页岩气	2019年4月30日
煤层气	2019年5月31日

《油气藏评价与开发》编辑部

2018年12月8日