

# 碳酸盐岩酸化径向蚓孔扩展形态研究

柳明, 张士诚, 牟建业

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**针对碳酸盐岩酸化过程中存在的酸蚀蚓孔扩展问题,建立了一种适用于径向的达西尺度和孔隙尺度的双重尺度模型,并利用该模型研究了径向上酸蚀溶解的形态特征和主要影响因素,分析了蚓孔形成的条件。结果表明:新建模型与前人的实验结果非常吻合,能够用于研究径向蚓孔扩展;注入速度越大或扩散系数越小时,对流作用起主导作用,易于形成均一溶蚀;扩散系数越大或注入速度越小时,扩散作用起主导作用,易于形成面溶蚀;蚓孔是在对流作用与扩散作用相当条件下形成的,它既能提供足够高的渗透率,又能最大限度地降低酸液用量;当扩散作用过大时,靠近井筒的一定区域内容易形成面溶蚀,在此区域外形成蚓孔突破;非均质程度存在一最优值,小于该值时,随着非均质程度的增强,蚓孔密度和突破体积均呈下降趋势,大于该值时,蚓孔密度和突破体积对非均质程度不敏感。

**关键词:**碳酸盐岩 酸化 蚓孔 径向模型 突破体积 非均质程度

**中图分类号:** TE344

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2012)02-0106-05

在碳酸盐岩油藏开发过程中,普遍存在近井筒地带地层伤害问题,它严重影响了采油效率,通常采用酸化解决该问题<sup>[1-2]</sup>。在酸化过程中,酸液通过溶蚀岩石产生称为蚓孔的流动通道,从而增加了近井筒地带的渗透率,达到提高产能的目的。盐酸是处理碳酸盐岩地层最常用的酸,其与碳酸盐岩反应生成CaCl<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。然而,经Daccord等<sup>[3-4]</sup>研究发现,酸化的效果与注入条件密切相关。当注入速度较低时,酸液一接触到岩石立刻完全反应,酸蚀的范围仅限于井筒附近;当注入速度较高时,酸液在没有与岩石充分反应之前向前流动,酸蚀穿透距离较深,但无法达到预定的渗透率增量;当注入速度适中时,能够形成理想的蚓孔,不但能达到预定的渗透率增量,而且酸液用量最少。

国外学者建立的蚓孔扩展预测模型主要有毛细管模型<sup>[5-8]</sup>、网络模型<sup>[9-10]</sup>和平均化模型<sup>[11-12]</sup>,而中国在这方面的研究尚为空白。毛细管模型主要考虑液体滤失和反应动力学对蚓孔扩展的影响,而忽略了蚓孔形成的条件(假设蚓孔已经存在)和溶解形态(假设蚓孔为圆柱体)。网络模型通过管径表示酸与管壁的反应,成功模拟了溶解形态,但计算结果与实验结果相差较大。平均化模型利用孔隙尺度上的数据在达西尺度上描述溶解,孔隙尺度模型的

预测结果又依赖于受酸蚀溶解作用影响而随时间变化的孔隙结构,使得2种尺度上模型之间的数据连续地交换,这种模型能够模拟反应和传质机理、介质的几何尺寸和非均质性等对蚓孔扩展的影响。Panga等<sup>[13]</sup>建立了线性平均化模型,其模拟结果与实验结果较为吻合。为此,笔者在线性平均化模型的基础上,推导了径向蚓孔扩展模型,并分析了蚓孔扩展的影响因素。

## 1 数学模型

利用坐标转换法,将线性平均化模型转换到极坐标上,得到达西尺度上的模型,共包括5个方程式

$$(u_r, v_\theta) = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial r}, \frac{1}{r} \times \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\phi C_f)}{\partial t} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r}(ru_r C_f) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial \theta}(v_\theta C_f) = \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left( r\phi D_{er} \frac{\partial C_f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\phi D_{e\theta}}{r} \times \frac{\partial C_f}{\partial \theta} \right) - k_c a_v (C_f - C_s) \quad (3)$$

$$k_c (C_f - C_s) = R(C_s) \quad (4)$$

收稿日期: 2012-01-12。

作者简介: 柳明,男,在读博士研究生,从事油藏数值模拟和增产改造技术研究。联系电话: (010) 89734959, E-mail: lmlm1985@163.com。  
基金项目: 国家科技重大专项子课题“酸液滤失模式和蚓孔发育模拟模型研究”(2008ZX05017-003-02-01HZ)。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{R(C_s) a_v \alpha}{\rho_s} \quad (5)$$

式中:  $u_r$  为  $r$  方向上的速度  $\mu/s$ ;  $r$  为径向距离,  $m$ ;  $v_\theta$  为  $\theta$  方向上的速度  $\mu/s$ ;  $\theta$  为极角;  $K$  为地层渗透率  $\mu m^2$ ;  $\mu$  为地层流体粘度  $mPa \cdot s$ ;  $p$  为压力,  $MPa$ ;  $\phi$  为孔隙度;  $t$  为时间  $s$ ;  $C_f$  为孔隙中心酸液的物质的量浓度  $mol/L$ ;  $D_{er}$  为  $r$  方向上的有效扩散张量  $m^2/s$ ;  $D_{e\theta}$  为  $\theta$  方向上的有效扩散张量  $m^2/s$ ;  $k_c$  为传质系数  $\mu/s$ ;  $a_v$  为比表面积  $m^{-1}$ ;  $C_s$  为液固表面酸液的物质的量浓度  $mol/L$ ;  $R(C_s)$  为反应动力,  $10^6 g/(s \cdot m^2)$  对于不可逆反应, 一级近似为  $k_s C_s$ , 其中  $k_s$  为表面反应常数  $\mu/s$ ;  $\alpha$  为酸的溶解能力  $g/mol$ ;  $\rho_s$  为固相(岩石)密度  $g/cm^3$ 。

初始条件为

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时 } C_f = 0 \quad \phi = \phi_0 + \hat{U} \quad (6)$$

式中:  $\phi_0$  为初始平均孔隙度;  $\hat{U}$  为非均质程度的随机范围  $\hat{U} \in [-\Delta\phi_0, \Delta\phi_0]$ ;  $\Delta\phi_0$  为非均质程度。

边界条件为

$$\text{当 } r = r_0 \text{ 时 } u_r = u_0 \quad C_f = C_s \quad (7)$$

$$\text{当 } r = r_e \text{ 时 } p = p_e \quad \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \theta = 0 \text{ 时 } p(r, \theta) &= p(r, \theta + 2\pi) \quad , \\ C_f(r, \theta) &= C_f(r, \theta + 2\pi) \quad (9) \end{aligned}$$

式中:  $r_0$  为入口半径  $m$ ;  $u_0$  为入口处的速度, 即注入速度  $\mu/s$ ;  $r_e$  为出口半径  $m$ ;  $p_e$  为出口处的压力  $MPa$ 。

为了求解式(1)一式(5), 需要得到地层渗透率、 $r$  方向上的有效扩散张量、 $\theta$  方向上的有效扩散张量、传质系数和比表面积等孔隙尺度上的参数, 可通过孔隙尺度模型获得。

酸液溶蚀岩石后, 孔隙度和孔径均会不同程度的增大, 同时比表面积减小, 这些改变需要通过渗透率反映出来, 这些参数之间的关系式为

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\phi}{\phi_0} \left[ \frac{\phi}{\phi_0} \left( \frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right) \right]^{2\beta} \quad (10)$$

$$\frac{r_p}{r_{p0}} = \sqrt{\frac{K\phi_0}{\phi K_0}} \quad (11)$$

$$\frac{a_v}{a_0} = \frac{\phi r_{p0}}{\phi_0 r_p} \quad (12)$$

式中:  $K_0$  为初始平均渗透率  $\mu m^2$ ;  $\beta$  为表示渗透率与孔隙度关系的指数, 可通过实验获得;  $r_p$  为孔隙半径  $m$ ;  $r_{p0}$  为初始平均孔隙半径  $m$ ;  $a_0$  为初始比表面积  $m^{-1}$ 。

传质系数受孔隙结构和反应速度等因素的影响, Gupta 等<sup>[14-15]</sup>详细研究了这些因素对传质系数的影响, 其表达式为

$$Sh = Sh_\infty + \frac{0.7}{m^{1/2}} Re^{1/2} S_c^{1/3} \quad (13)$$

式中:  $Sh$  为舍伍德数;  $Sh_\infty$  为渐进舍伍德数;  $m$  为孔隙长度与直径之比;  $Re$  为雷诺数;  $S_c$  为斯密特数。

$r$  和  $\theta$  方向上的有效扩散张量计算式分别为

$$D_{er} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_r r_p \sqrt{u_r^2 + v_\theta^2}}{\phi} \quad (14)$$

$$D_{e\theta} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_\theta r_p \sqrt{u_r^2 + v_\theta^2}}{\phi} \quad (15)$$

式中:  $\alpha_{os}$ ,  $\lambda_r$  和  $\lambda_\theta$  均为与孔隙几何尺寸相关的常数;  $D_m$  为分子扩散系数  $m^2/s$ 。

## 2 影响因素

对于极坐标而言, 不同极径上控制单元的体积不等, 为保证单元间的质量和动量守恒, 采用有限差分法进行离散时需要对极径进行处理, 得到的差分方程非常复杂。而有限容积法的优点就是差分离散的结果直接满足不同单元体之间的质量和动量守恒, 因此, 利用有限容积法对式(1)一式(5)进行差分离散。模型参数包括: 初始平均渗透率为  $0.01 \mu m^2$ , 初始平均孔隙度为  $0.12$ , 非均质程度为  $0.1$ , 地层流体粘度为  $10 mPa \cdot s$ , 出口半径为  $0.12 m$ , 入口半径为  $0.02 m$ , 渗透率与孔隙度关系指数为  $1$ , 表面反应常数为  $2 \times 10^{-3} m/s$ , 分子扩散系数为  $3 \times 10^{-9} m^2/s$ , 初始平均孔隙半径为  $6 \times 10^{-6} m$ , 初始比表面积为  $50 cm^{-1}$ , 酸的溶解能力为  $50 g/mol$ , 固相密度为  $2.2 g/cm^3$ 。

### 2.1 注入速度

由不同注入速度下模拟得到的二维径向溶解孔隙度(图1)可知, 注入速度对溶解形态影响较大。当注入速度较大时, 形成均一溶蚀, 虽然大部分区域都被溶蚀, 但是无法得到足够大的渗透率; 当注入速度较小时, 形成面溶蚀, 溶蚀所需酸量大; 当注入速度适当时, 形成蚓孔(图1)。该结果与 Frick 等<sup>[16]</sup>所得实验结果相吻合。

蚓孔突破标志着注入酸穿透了污染区域, 使井筒与未污染的地层相连, 蚓孔成为高渗透通道。当入口压力下降到初始入口压力的  $1\%$  时, 认为蚓孔

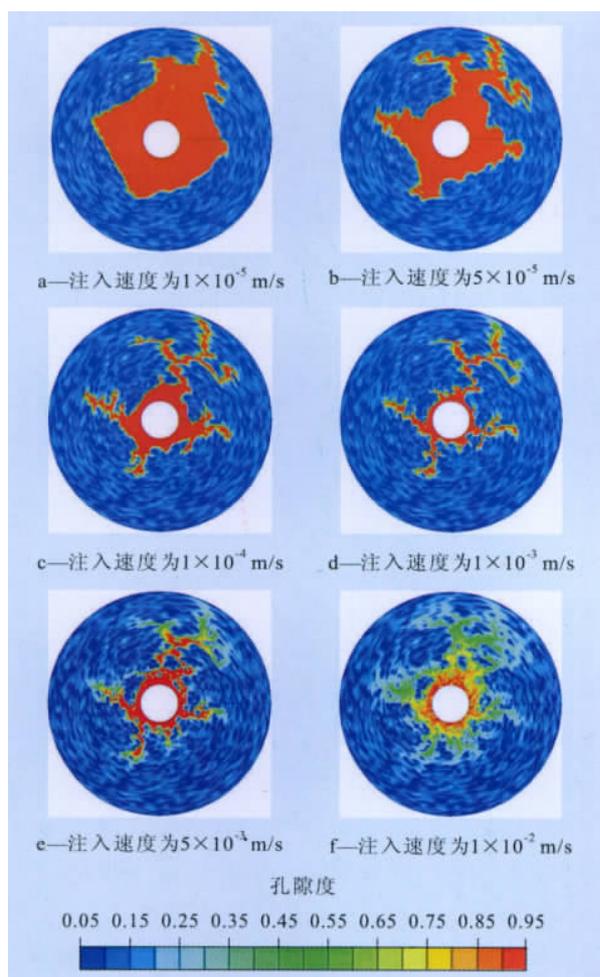


图 1 不同注入速度下径向酸蚀溶解孔隙度

已经突破,定义蚓孔突破时注入的酸量与原始孔隙体积之比为突破体积,分析注入速度与突破体积的关系(图2)发现,随着注入速度的增加,突破体积呈先减小后增加的趋势,在注入速度为  $1 \times 10^{-3}$  m/s 附近达到最小值。从对流扩散机理分析,注入速度越大对流作用越强,反之越弱。在相对较强的对流作用影响下,大部分酸液在反应之前向前流动,形成一溶蚀;在相对较弱的对流作用影响下,大量的酸液流向液固表面参与反应,形成面溶蚀;这2种情况消

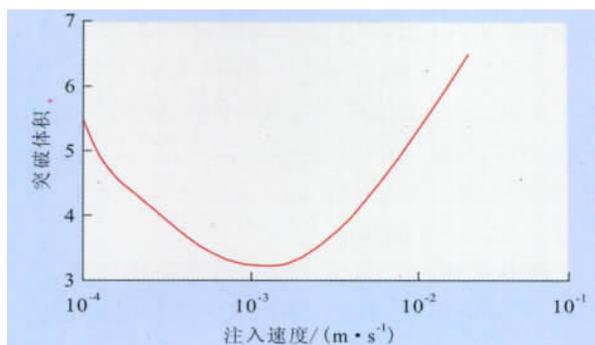


图 2 突破体积与注入速度的关系

耗的酸量均较多。只有当对流作用与扩散作用相当时,才比较容易形成蚓孔,且此时用最少的酸量就能得到预定的渗透率增量。

### 2.2 扩散系数

当注入速度较低时,扩散作用在蚓孔扩展过程中起主导作用。为了研究扩散作用对蚓孔扩展的影响,模拟了不同注入速度条件下,扩散系数对突破体积的影响。

从图3可以看出:当注入速度小于  $1 \times 10^{-4}$  m/s 时,扩散系数越大,突破体积也越大,说明扩散系数的增大使得更多的酸液因扩散作用而流向液固表面,导致酸岩反应更加充分,更易产生面溶蚀;当注入速度大于  $1 \times 10^{-2}$  m/s 时,不同扩散系数时的突破体积非常接近,这是因为对流作用起了主导作用,扩散作用对蚓孔扩展的影响很小。

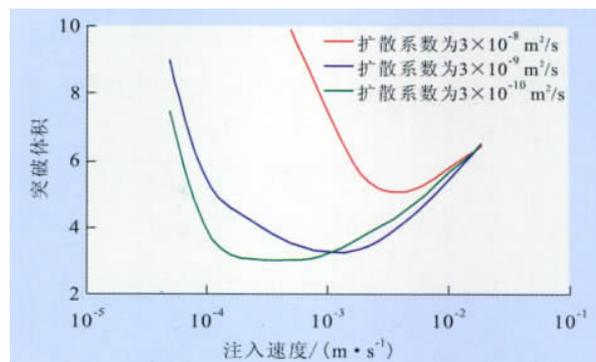


图 3 不同扩散系数时注入速度与突破体积的关系

由于蚓孔是在对流作用与扩散作用相当的情况下形成的,因此在注入速度相同的条件下,不同的扩散系数会导致不同的溶解形态,产生最小突破体积所对应的最优注入速度也会发生改变。当扩散作用较小时,酸液仅在流速很小的情况下才能形成蚓孔(图3)。当扩散系数为  $3 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s 时,注入速度为  $2 \times 10^{-4}$  m/s 附近的突破体积值最小,此时形成蚓孔;但当扩散作用很大时,酸液受到强烈的扩散作用的影响,会首先产生轻度的面溶蚀,之后才形成蚓孔。将扩散系数为  $3 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s 时的蚓孔形态(图1d)与扩散系数分别为  $3 \times 10^{-10}$  和  $3 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s 时的蚓孔形态(图4)对比可知,当扩散系数为  $3 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s 时,蚓孔形态变化不大;当扩散系数为  $3 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s 时,井筒附近出现了面溶蚀,在稍远离井筒的地方才形成蚓孔。

### 2.3 非均质程度

由于毛细管模型和网络模型都无法考虑非均质性,又无法通过实验手段进行系统的研究,这就导致

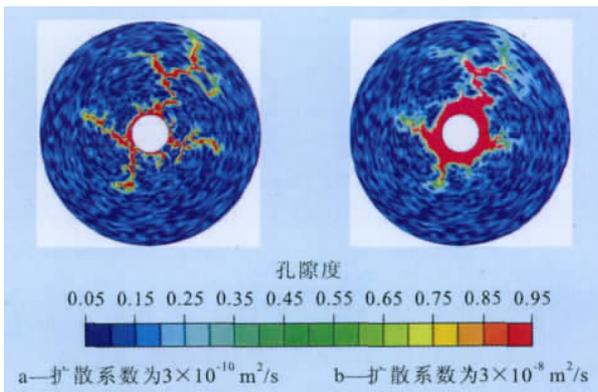


图 4 不同扩散系数条件下突破体积最小时的酸蚀溶解孔隙度

非均质程度对蚓孔扩展的影响虽备受关注,但一直没有被详细的研究,Panga<sup>[17]</sup>也只对线性蚓孔扩展受非均质程度的影响进行了粗略地研究。因此,笔者通过径向蚓孔扩展模型,研究了不同非均质程度,即初始孔隙度的不同随机分布程度对溶解形态的影响。

当非均质程度的随机范围分别取  $[-0.01, 0.01]$ ,  $[-0.04, 0.04]$  和  $[-0.07, 0.07]$  时,分析最优注入速度下的酸蚀溶解孔隙度(图 5)可知,随着非均质程度的增加,蚓孔密度呈下降趋势。这是因为:非均质程度越弱,相邻孔隙的孔隙度变化越小,蚓孔的扩展过程受非均质程度的影响越小,产生均匀竞争的蚓孔,导致蚓孔的数量多且形状规则;反之,非均质程度越强,蚓孔越易受非均质程度的影响,产生不均匀竞争的蚓孔,导致蚓孔的形状不规则,且蚓孔密度小并逐渐趋于稳定。

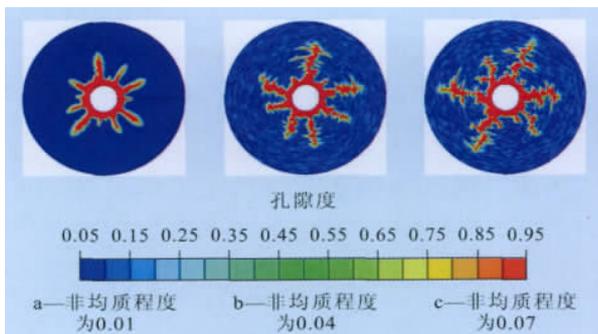


图 5 不同非均质程度的酸蚀溶解孔隙度

由不同非均质程度对突破体积的影响(图 6)可见,非均质程度对突破体积的影响可以分为 2 个区域。当非均质程度位于  $(0, 0.07)$  或  $(0.085, 0.11)$  时,其变化对突破体积的影响不大;当非均质程度位于  $(0.07, 0.085)$  时,其对突破体积非常敏感,微小的变化就会导致突破体积发生很大的变化。因此,

笔者认为存在一个使得突破体积最小的最优非均质程度,对于本例最优非均质程度为 0.085。

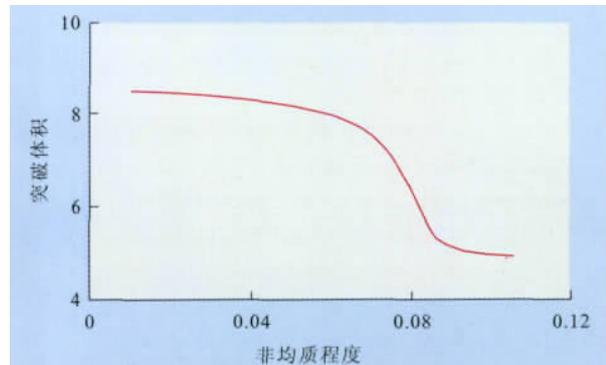


图 6 非均质程度与最小突破体积的关系

由此可见,非均质程度对蚓孔密度和突破体积的影响有一定的规律。当非均质程度小于其最优值时,随着非均质程度的增强,蚓孔密度减少,突破体积也减少;当非均质程度大于其最优值时,随着非均质程度的增强,蚓孔密度和突破体积均基本达到最小值。

### 3 结论

推导的适用于预测径向蚓孔扩展的双尺寸模型与前人的实验结果非常吻合。

随着注入速度的增加,酸蚀溶解形态逐渐从面溶蚀变为蚓孔,再变为均一溶蚀。蚓孔是在对流作用与扩散作用相当时形成的,对流作用占优将产生均一溶蚀,扩散作用占优将产生面溶蚀。强烈的扩散作用容易产生面溶蚀和蚓孔同时存在的情况。非均质程度对于蚓孔密度和突破体积的影响存在一个最优值,小于该值,随着非均质程度的增强,蚓孔密度和突破体积均呈减小的趋势;大于该值,蚓孔密度和突破体积均基本保持稳定。

#### 参考文献:

- [1] 史雪枝,陈琛,杨永华.川西及川东北气田完井技术应用现状及展望[J].油气地质与采收率,2011,18(3):103-105.
- [2] 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用[J].油气地质与采收率,2010,17(6):107-110.
- [3] Daccord G, Lenormand R, Lietaud O. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid - 1. model for the "wormholing" phenomenon[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(1): 169-178.
- [4] Daccord G, Lenormand R, Lietaud O. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid - 2. convection vs reaction behavior

- diagram[J]. Chemical Engineering Science ,1993 ,48( 1) : 179 – 186.
- [5] Huang T ,Hill A D ,Schechter R. Reaction rate and fluid loss: the keys to wormhole initiation and propagation in carbonate acidizing [C]. SPE 37312 ,1997.
- [6] Huang T ,Zhu D ,Hill A D. Prediction of wormhole population density in carbonate matrix acidizing [C]. SPE European Formation Damage Conference ,The Hague ,Netherlands ,1999.
- [7] Buijse M A. Understanding wormholing mechanisms can improve acid treatments in carbonate formations[J]. SPE Production & Facilities 2000 ,15( 3) : 168 – 175.
- [8] Rick G. A fundamentally new model of acid wormholing in carbonates [C]. SPE European Formation Damage Conference ,Netherlands ,1999.
- [9] Hoefner M L ,Fogler H S. Pore evolution and channel formation during flow and reaction in porous media[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal ,1988 ,34( 1) : 45 – 54.
- [10] Fredd C N ,Fogler H S. Optimum conditions for wormholes formation in carbonate porous media: influence of transport and reaction [J]. SPEJ ,1999 ,4( 3) : 196 – 205.
- [11] Liu X ,Ormond A ,Barko K ,et al. A geochemical reaction – transport simulator for matrix acidizing analysis and design [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering ,1997 ,17( 1/2) : 181 – 196.
- [12] Golfier F ,Zarcone C ,Bazin B ,et al. On the ability of a darcy – scale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium [J]. Journal of Fluid Mechanics 2002 (457) : 213 – 254.
- [13] Panga M K R ,Balakotaiah V ,Murtaza Z. Modeling ,simulation and comparison of models for wormhole formation during matrix stimulation of carbonates [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition ,San Antonio ,Texas 2002.
- [14] Gupta N ,Balakotaiah V. Heat and mass transfer coefficients in catalytic monoliths [J]. Chemical Engineering Science ,2001 ,56( 16) : 4 771 – 4 786.
- [15] Balakotaiah V ,West D H. Shape normalization and analysis of the mass transfer controlled regime in catalytic monoliths [J]. Chemical Engineering Science 2002 ,57( 8) : 1 269 – 1 286.
- [16] Frick T P ,Behdokht M ,Economides M J. Analysis of radial core experiments for hydrochloric acid interaction with limestones [C]. SPE International Symposium on Formation Damage Control ,Lafayette ,Louisiana ,1994.
- [17] Panga M K R. Multiscale transport and reaction: Two Case Studies [D]. Houston: University of Houston 2003.

编辑 常迎梅

( 上接第 97 页)

## 6 结束语

夏 463 井沙三段下亚段低渗透井段的酸化评价和改造结果表明 ,基于储层微观结构和成分分析而提出的低渗透储层改造方案 ,达到了对特定低渗透储层本质的准确把握 ,充分利用低渗透储层的天然能量进行开采 ,使得低渗透油层稳产能力大大提高 ,为低渗透储层难动用现状的改善提供了成功经验。通过明确低渗透碎屑岩储层孔喉特点和含烃酸性流体的浸入效应 ,真正把握储层本质特征 ,有利于改善目前低渗透难动用的现状 ,并且能大幅提高低渗透碎屑岩储层的稳产能力和采收率。

### 参考文献:

- [1] 李品道. 低渗油田高效开发决策论 [M]. 北京: 石油工业出版社 2003.
- [2] 曲占庆 ,齐宁 ,王在强 ,等. 低渗透油层酸化改造新进展 [J]. 油气地质与采收率 2006 ,13( 6) : 93 – 96.
- [3] 张守鹏. 低渗透储层成岩伤害与改造方法探索 [J]. 油气地质与采收率 2010 ,17( 5) : 80 – 82.
- [4] 刘青 ,郭兴午 ,刘长龙 ,等. 影响砂岩酸化措施成败的主要因素分析 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版 2010 ,12( 1) : 18 – 20.
- [5] 杨晓萍 ,赵文智 ,邹才能 ,等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布 [J]. 石油学报 2007 ,28( 4) : 57 – 61.
- [6] 王多云 ,郑希民 ,李风杰 ,等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题 [J]. 天然气地球科学 2003 ,14( 2) : 87 – 91.
- [7] 蒋凌志 ,顾家裕 ,郭斌程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理 [J]. 沉积学报 2004 ,22( 1) : 13 – 18.
- [8] 曾大乾 ,李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及地质特征 [J]. 石油学报 ,1994 ,15( 1) : 38 – 45.
- [9] 宋新民 ,罗凯. 储集层表征新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社 2002: 12 – 45.
- [10] 王健 ,操应长 ,刘惠民 ,等. 东营凹陷南坡沙四段上亚段滩坝砂岩储层孔喉结构特征及有效性 [J]. 油气地质与采收率 2011 ,18( 4) : 21 – 24 ,34.
- [11] 张守鹏 ,张林晔 ,王伟庆 ,等. 含油气盆地地层水演化过程中含烃酸性流体的浸入效应——以东营凹陷胜坨油田为例 [J]. 油气地质与采收率 2011 ,18( 4) : 10 – 12 ,20.

编辑 常迎梅

application of each method; we also discuss key problems in decline method such as selection of decline mode, original point, decline rate and production unit, determining of stable production period and abandoned point, and the reasons for using of 2-stage-prediction method and decline method. These skills can provide important reference for SEC reserves evaluation and analysis, domestic reserves calculation and recoverable reserves calibration, and provide the proof of oilfield stable production.

**Key words:** reserve; dynamic evaluation; decline analysis; decline rate; reserve estimation method

**Wang Shuhua**, Exploration and Development Department, SINOPEC, Beijing City, 100728, China

**Zhang Shoupeng, Teng Jianbin. Acidification technology and implementation of substep elutriation for low permeability reservoir—case of Xia 463 well in Linnan depression. *PGRE*, 2012, 19(2):95–97.**

**Abstract:** After stimulation, different well achieves different productivity for the low permeability sandstone reservoir. The key is that the stimulation scheme is not formulated based on the reservoir characteristics. Using the rock sections, cast sections, X diffraction analysis and mineral dissolution experiment techniques, we can accurately understand the characteristics of reservoir rock minerals, and then formulating the corresponding acidification techniques of sub-step elutriation. Using this technique for the low permeability reservoir of Xia 463 well herein, the microcosmic test content and methods for low permeability reservoir are discussed on how to correctly formulate process of acidification technique, as well as the field surveillance. Acidification scheme is proved successful by field operation. It is proved that this technique is not only important for production maintenance, but also for the control of water saturation in low permeability reservoir over a long period of time.

**Key words:** low permeable sand reservoir; matrix acidification; sub-step elutriation; interparticle material; compatibility

**Zhang Shoupeng**, Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China

**Wang Shihu, Zhang Zhiang, Wang Lei et al. MATLAB hydraulic fracture propagation simulation technique. *PGRE*, 2012, 19(2):98–101.**

**Abstract:** Hydraulic fracture simulation technique plays an important role in fracture design and evaluation. It has been developed for many years, however, it is mainly paying more attention to time efficiency and so on, petroleum engineers usually choose 2D or p-3D model for simulation. As we all know, with low accuracy step by step, finite difference method can not satisfy the requirement. What we want to do in this paper is just trying to establish a real 3D hydraulic fracture simulation technique in MATLAB with finite element method. And, then we compare it with the results of the mature commercial software such as GOHFER to improve the accuracy of the simulation and give more reference.

**Key words:** hydraulic fracture; finite element method; real 3D model; fracture propagation; numerical simulation

**Wang Shihu**, Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257000, China

**Xue Shifeng, Wang Feifei, Wang Haijing. Numerical study of productivity ratio and factors of perforated well. *PGRE*, 2012, 19(2):102–105.**

**Abstract:** Perforated completion is widely used, in order to study the effect of perforation factors on perforation productivity ratio and get better perforation process selection, 3D finite element models with factors of perforation parameters (perforation depth, diameter, density and phase), compaction and damage for productivity ratio (PR) calculation in perforation completion are established in this paper. The code connecting software COMSOL and MATLAB are used to simulate and analyze 290 different models with their specific parameters. The effect of perforation depth, diameter, density, phase and compaction on perforation productivity ratio is obtained, and the flow pattern near perforation can be observed by the model. Considering oilfield practice, a simple method of PR calculation and the relationship of well PR and model PR are provided, which will be useful for evaluation of productivity and optimizing perforation completion design.

**Key words:** perforation completion; productivity ratio; influence factors; finite element model; perforation parameters

**Xue Shifeng**, College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

**Liu Ming, Zhang Shicheng, Mou Jianye. Dissolution pattern of radial wormhole model in carbonate acidizing. *PGRE*, 2012, 19(2):106–110.**

**Abstract:** In response to the questions of wormholing during carbonate acidizing, this paper derives a radial two-scale continuum model based on former researches, and studies the dissolving pattern and the effect of some key factors on it, and gets the conditions of the occurrence of wormholes. The results show that: the conclusions got from the models accord well with the experiments conducted by former researchers perfectly; with the rise of diffusion efficiency and decrease of injection rate, the diffusion effect becomes stronger relatively and it is easier to form face dissolution; with the decrease of diffusion efficiency and increase of injection rate, the convection effect becomes more apparent relatively, and it is easier to form uniform dissolution; the wormhole, which can provide adequate permeability and minimize the injection volume of acid at most, is formed when the effect of convection and diffusion is equivalent; the magnitude of heterogeneity has an optimal value, below which the wormhole density and breakthrough volume decrease under more heterogeneity, above which the wormhole density and breakthrough volume become insensitive to the heterogeneity.

**Key words:** carbonate; acidizing; wormhole; radial model; breakthrough volume; heterogeneity

**Liu Ming**, MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China