

不同注入条件下地层酸蚀蚓孔扩展规律

柳明, 张士诚, 牟建业, 方百会

(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:在碳酸盐岩酸化中,地层条件下酸液流动引起的蚓孔扩展情况与实验室条件下的不同,因此有必要对地层条件下的蚓孔扩展规律进行研究。应用1种二维双重尺度连续模型并耦合1个压缩区模型进行了研究,结果表明:与实验室条件相比,地层条件下的蚓孔扩展速度较慢;定压条件下,地层流体的压缩系数越小,蚓孔扩展速度越慢,反之亦然;定流量条件下,地层流体的压缩系数越小,入口压力下降越慢,出口压力上升越快,反之亦然;由于压缩区和施工条件的影响,地层条件下的蚓孔长度存在最大值;建立表皮系数模型,通过实例分析发现,蚓孔未突破污染区域之前,定流量条件下的蚓孔扩展速度和表皮系数下降速度均大于定压条件下的结果,蚓孔突破污染区域之后,二者几乎没有差异,且注酸量存在最优值。

关键词:碳酸盐岩 酸化 蚓孔扩展 地层条件 表皮系数

中图分类号: TE344

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)03-0102-05

多年来,虽然酸化一直是清除碳酸盐岩油藏近井筒区域污染的有效措施^[1-4],但由于其受注入条件、储层物性、压力等多方面的影响,致使地层条件下的酸蚀蚓孔扩展规律还没有得到充分的认识。

实验中,通常将酸液以恒定的速度注入到2.5 cm×15 cm的岩心中,当酸液突破岩心后停止实验,通过CT扫描观察酸蚀溶解形态并分析注入速度的影响^[5-8]。实验发现,当注入速度增大时,形成的酸蚀溶解形态分别为面溶蚀、蚓孔和均一溶蚀。形成蚓孔是酸化措施最为理想的结果,不但消耗的酸液量最少,且能够提供足以改善污染区域的导流能力。然而,地层条件下的酸液流动和蚓孔扩展规律与实验室不同。首先,酸液在地层条件下作径向流动;其次,酸液无法“突破”岩心,在酸液流动前缘存在压缩区,注入的酸液把地层流体挤入这个区域,造成此区域的压力不断升高,并最终对蚓孔扩展产生不可忽略的影响。

因此,笔者对地层条件下的酸蚀蚓孔扩展规律进行了探讨。首先,引入1个用于侵入区的二维双重尺度连续模型并耦合1个压缩区模型;然后,对模型设置定压和定流量2种注入条件(即边界条件),研究不同边界条件对压力场和蚓孔扩展形态的影响;最后,利用表皮系数模型对实例结果进行量化分

析,说明不同边界条件下酸液对地层的改善效果。

1 数学模型

酸液由井筒注入地层,鲜酸与岩石发生反应溶解岩石后,丧失反应能力的残酸在压差的作用下流入地层,地层中的流体则被压缩,以致地层压力升高。酸液(包括鲜酸和残酸)所在的区域为侵入区,酸液未到达的区域为压缩区^[9](图1)。由于蚓孔前缘存在1个残酸区,所以侵入区半径一般大于蚓孔径向长度。

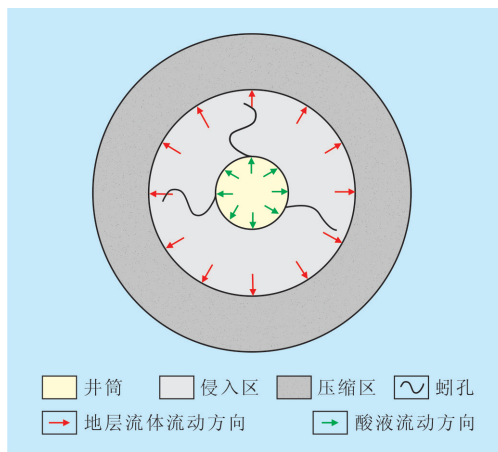


图1 近井筒地带蚓孔扩展示意

收稿日期:2013-03-15。

作者简介:柳明,男,在读博士研究生,从事油藏数值模拟和储层改造研究。联系电话:(010)89734593,E-mail:lmlm1985@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”子课题“酸液滤失模式和蚓孔发育模拟模型研究”(2008ZX05017-003-02-01HZ),国家自然科学基金“复杂介质条件下粘弹性表面活性剂自转向酸化转向机理研究”(51274213)。

用于描述侵入区蚓孔扩展的模型为1种基于双重尺度(达西尺度和孔隙尺度)的连续模型,其中达西尺度在微米和厘米数量级之间,孔隙尺度为微米数量级。模型考虑了酸岩反应、对流扩散传质和地层非均质性,利用达西尺度模型描述酸岩反应溶解,溶解的结果导致孔隙尺寸的变化,继而又反过来影响着酸岩反应溶解,模拟结果与实验观察符合度高。Panga等首次推导了双重尺度连续模型^[10-11],并研究了注入速度和非均质对酸蚀溶解形态的影响;Kalia等将该模型推广到极坐标系统^[12-13],分析了模拟区域的压力响应和非均质对径向酸蚀溶解形态的影响。但是,二者的模型只局限于实验室条件,无法应用于地层条件。笔者通过将双重尺度连续模型与压缩区模型进行耦合来模拟地层条件下的蚓孔扩展形态。

1.1 侵入区模型

达西尺度模型由连续性方程、酸液的对流扩散方程和孔隙度变化方程组成,其表达式分别为

$$\frac{\mu_a}{K} \times \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \times \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi C_f)}{\partial t} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} (ru C_f) + \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial \theta} (v C_f) = \\ & \frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \phi D_{er} \frac{\partial C_f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \times \\ & \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\phi D_{e\theta}}{r} \times \frac{\partial C_f}{\partial \theta} \right) - k_c a_v (C_f - C_s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{k_c (C_f - C_s) a_v \alpha}{\rho_s} \quad (3)$$

式中: μ_a 为酸液粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; K 为地层渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度; t 为时间, s ; r 为极坐标系径向坐标轴; p 为侵入区地层压力, MPa ; θ 为极坐标系周向坐标轴; C_f 为酸在液相中的浓度, mol/L ; u 为 r 方向流体的流动速度, m/s ; v 为 θ 方向流体的流动速度, m/s ; D_{er} 为 r 方向的有效扩散张量, m^2/s ; $D_{e\theta}$ 为 θ 方向的有效扩散张量, m^2/s ; k_c 为酸液的传质速度, m/s ; a_v 为比表面积, m^{-1} ; C_s 为酸在液固表面上的浓度, mol/L ; α 为酸的溶解能力, g/mol ; ρ_s 为岩石的密度, kg/m^3 。

孔隙尺度模型为

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\phi}{\phi_0} \left[\frac{\phi}{\phi_0} \left(\frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right) \right]^{2\beta} \quad (4)$$

$$\frac{r_p}{r_{p0}} = \sqrt{\frac{K\phi_0}{\phi K_0}} \quad (5)$$

$$\frac{a_v}{\alpha_0} = \frac{\phi r_{p0}}{\phi_0 r_p} \quad (6)$$

$$Sh = \frac{2k_c r_p}{D_m} = Sh_\infty + \frac{0.7}{m^{\frac{1}{2}}} Re_p^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$D_{er} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_r |U| r_p}{\phi} \quad (8)$$

$$D_{e\theta} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_\theta |U| r_p}{\phi} \quad (9)$$

式中: K_0 为渗透率的初始平均值, μm^2 ; ϕ_0 为孔隙度的初始平均值; β 为实验测得的参数, 一般设为 1.0; r_p 为岩石孔隙半径, m ; r_{p0} 为岩石孔隙半径的初始平均值, m ; α_0 为比表面积的初始平均值, m^{-1} ; Sh 为舍伍德数; D_m 为分子扩散系数, m^2/s ; Sh_∞ 为渐进舍伍德数; m 为孔隙长度与直径之比; Re_p 为孔隙的雷诺数; Sc 为斯密特数; $|U|$ 为速度 u 和 v 的模, m/s ; α_{os} , λ_r 和 λ_θ 均为与孔隙尺寸相关的常数。

式(4)~式(6)为表征岩石物性与岩石结构关系方程;式(7)为传质系数计算方程;式(8)和式(9)分别为 r 方向和 θ 方向的酸液扩散系数计算方程。

1.2 压缩区模型

压缩区模型为

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_r}{\partial r} \right) = \frac{\phi \mu_f C_l}{K} \times \frac{\partial p_r}{\partial t} \quad (10)$$

式中: p_r 为压缩区地层压力, MPa ; μ_f 为地层流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; C_l 为地层流体压缩系数, MPa^{-1} 。

1.3 边界与初始条件

侵入区边界条件包括

$$\text{当 } r=r_0 \text{ 时, } p=p_{bh}, C_f=C_0 \quad (11)$$

$$\text{当 } r=r_0 \text{ 时, } u=-\frac{K}{\mu} \times \frac{\partial p}{\partial r} = u_0, C_f=C_0 \quad (12)$$

$$\text{当 } r=r_{inv} \text{ 时, } p=p_1, \frac{\partial C_f}{\partial r}=0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \text{当 } \theta=0 \text{ 时, } p(r, \theta)=p(r, 2\pi), \\ & C_f(r, \theta)=C_f(r, 2\pi) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: r_0 为井筒半径, m ; p_{bh} 为井底压力(以下称入口压力), MPa ; C_0 为初始酸液浓度, mol/L ; u_0 为酸液注入速度, m/s ; r_{inv} 为侵入区半径, m ; p_1 为侵入区与压缩区交界面的压力(以下称出口压力), MPa 。

式(11)为定压边界条件,式(12)为定流量边界条件,模拟计算时只选择其中之一。

侵入区初始条件为

$$\text{当 } t=0 \text{ 时, } C_f=0, \phi=\phi_0+\phi_0\sigma G \quad (15)$$

式中: σ 为孔隙度分布的标准差; G 为通过地质统计学软件 GSLIB 生成的一组符合正态分布的随机值, 受标准差、关联长度的影响。

由式(15)可知, 初始孔隙度分布符合正态分布规律, 这是对 Panga 和 Kalia 在模型中假设孔隙度均匀分布的巨大改进, 且更符合实际情况。

压缩区边界条件为

$$\text{当 } r=r_{\text{inv}} \text{ 时, } p_r=p_l \quad (16)$$

$$\text{当 } r=r_e \text{ 时, } p_r=p_e \quad (17)$$

式中: r_e 为压缩区半径, m; p_e 为压缩区外边界压力, 亦即原始地层压力, MPa。

由于把压缩区考虑为一维, 所以没有周向上的边界条件。

压缩区初始条件为

$$\text{当 } t=0 \text{ 时, } p_r=p_e \quad (18)$$

对于极坐标系, 随着极径的增加, 微元体积增大, 用有限差分法无法保证微元之间的物质和动量守恒, 因此采用有限体积法对式(1)~(3)和式(10)进行离散。如不特别说明, 模拟参数主要包括: 初始平均渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 初始平均孔隙度为 0.15, 地层流体粘度为 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 酸液粘度为 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 侵入区半径为 0.5 m, 入口半径为 0.1 m, 酸液浓度为 4.4 mol/L , 原始地层压力为 30 MPa, 表面反应常数为 $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 分子扩散系数为 $3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2 定压边界

定压边界是指保持入口压力不变, 酸液在压差作用下自行流入地层进行酸蚀。为分析压缩区的影响, 模拟了压缩区存在与否的蚓孔扩展情况, 由于压缩区远大于侵入区, 为了增加图形的可读性, 此处只显示侵入区。从图2中可见, 压缩区的存在

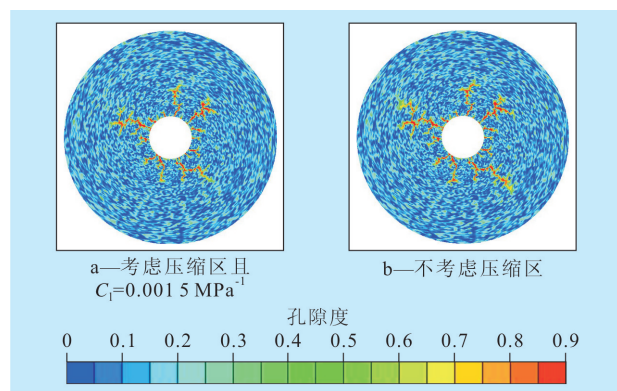


图2 注酸 50 min 后的侵入区酸蚀溶解孔隙度

减缓了蚓孔扩展的速度, 注酸 50 min 后的蚓孔长度小于不考虑压缩区的情况。为便于表达, 定义无因次压力为

$$p_D = \frac{p - p_e}{\frac{\mu_a u_0 r_{\text{inv}}}{K_0}} \quad (19)$$

由注酸 50 min 后侵入区无因次压力分布(图3)可知, 虽然 2 种情况的入口压力非常接近, 但出口压力相差很大。与不考虑压缩区相比, 当考虑压缩区时, 不断注入的酸液把地层流体挤入压缩区, 使区域内压力增大, 出入口压差减小, 导致注入的酸液量降低, 蚓孔扩展速度变慢。当侵入区足够大时, 随着出入口压差的降低, 蚓孔长度将保持不变。若要突破侵入区, 需增大注入压力, 然而注入压力受到施工条件的限制, 因此地层条件下的蚓孔不可能无限制增长, 而是存在 1 个最大值。

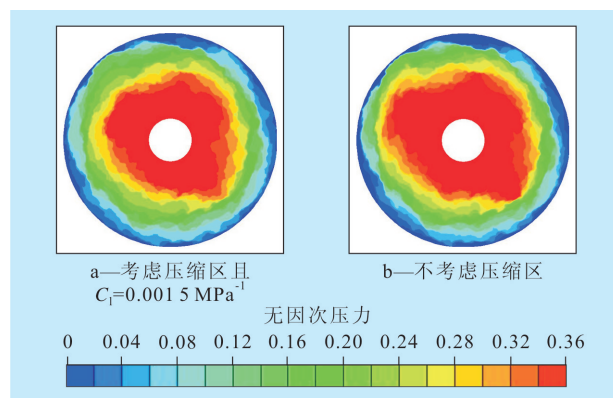


图3 注酸 50 min 后侵入区的无因次压力分布

由式(10)可知, 对于一定的地层, 不同流体对蚓孔扩展的影响不同。为了研究这一影响, 假设油藏 ($C_1=0.0015 \text{ MPa}^{-1}$) 和气藏 ($C_1=0.015 \text{ MPa}^{-1}$) 2 种情况, 从蚓孔长度与注酸时间的关系(图4)可见, 注酸 30 min 之前, 气藏与油藏的蚓孔扩展速度相差不多, 说明此时被酸液挤入压缩区的流体还没有导致压缩区的压力明显升高; 注酸 30 min 之后, 气藏的蚓孔扩展速度快于油藏, 这显然是由压缩系数大造

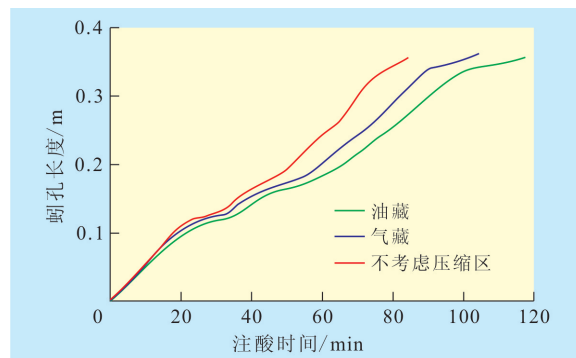


图4 不同条件下的蚓孔长度与注酸时间的关系

成的。压缩系数越大,流体受到压缩后所释放的空间越大,一定区域内承载的流体更多,压力上升更慢。由图4还可知,不考虑压缩区的蚓孔扩展情况可视为实验室条件下得到的结果,经过对比可见,实验室条件下得到的蚓孔扩展速度明显快于地层条件。

3 定流量边界

定流量边界是指保持注入速度不变,酸液在恒定的流速下进入地层进行酸蚀,这是现场施工中常用的注酸方式。由于注入速度一定,所以不同条件下蚓孔扩展的速度几乎完全相同,所不同的是出入口压力的变化。由侵入区无因次出入口压力随注酸体积的变化(图5)可见,随着酸液的注入,蚓孔前缘与出口的距离缩短,由于可以把蚓孔当作无限导流能力的通道而忽略压降,则一定流量下的无因次入口压力会随着时间增加而降低。当压缩区的流体压缩系数较小时,无因次出口压力上升较快,保持一定流量的无因次入口压力下降较慢;当压缩区的流体压缩系数较大时,无因次出口压力上升较慢,保持一定流量的无因次入口压力下降较快;当不考虑油藏模型时,由于出口压力始终为油藏压力,即无因次出口压力为零,无因次入口压力下降最快。同样可以预见,当出入口压差无法满足既定的流量时,蚓孔将停止扩展。由于排量受到施工条件和蚓孔形成机理(排量只有在一定范围内才能形成蚓孔)的影响,对于一定的地层不可能浮动很大,这就使得地层条件下一定的排量只能形成一定长度的蚓孔。

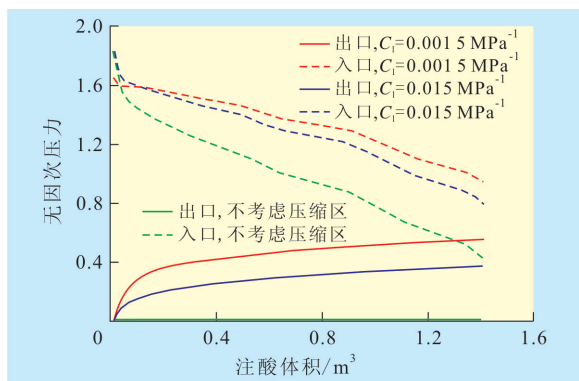


图5 侵入区无因次入口和出口压力与注酸体积的关系

4 表皮系数模型

与受污染的地层相比,蚓孔的渗透率为无限

大,则表皮系数模型为

$$S = \frac{K_0}{K_d} \ln \frac{r_d + r_0}{r_{wh} + r_0} + \ln \frac{r_0}{r_d + r_0} \quad r_{wh} < r_d \quad (20)$$

$$S = \ln \frac{r_0}{r_{wh} + r_0} \quad r_{wh} > r_d \quad (21)$$

式中: S 为表皮系数; K_d 为污染区域渗透率, μm^2 ; r_d 为从井壁算起的污染区域半径, m ; r_{wh} 为蚓孔从井壁算起的径向长度, m 。

由式(20)和式(21)可以看出,对于一定的地层,在蚓孔突破污染区域之前,表皮系数与污染后的渗透率、污染区域半径和蚓孔长度有关;在蚓孔突破污染区域之后,表皮系数只与蚓孔长度有关。

5 实例应用

某碳酸盐岩油藏中的1口污染井,污染半径为0.2 m,污染区域渗透率为0.001 μm^2 ,地层原油压缩系数为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$,利用所建模型分析注酸过程中蚓孔长度和表皮系数的变化。

随着酸液的注入,定压条件下的蚓孔扩展速度慢于定流量条件(图6)。这是因为,定压注入酸液时,注入速度会逐渐减小,即蚓孔中的对流作用逐渐降低,酸液向蚓孔壁面的扩散作用逐渐增强,导致相同的酸液量形成的蚓孔长度较短。这种趋势一直持续到蚓孔突破污染区域,即蚓孔长度达到0.2 m时。此后,2种边界条件下的蚓孔扩展速度相当,这是由于地层渗透率的增大降低了渗流阻力,蚓孔中对流作用大于扩散作用,大部分注入酸液用来产生蚓孔。从表皮系数的变化来看(图6),蚓孔长度直接影响着表皮系数的变化,蚓孔长则表皮系数小,蚓孔短则表皮系数大。当蚓孔突破污染区域后,蚓孔长度的增加无法大幅度降低表皮系数,说明此后注入的酸液对地层的改造效果不大,应停止注酸。

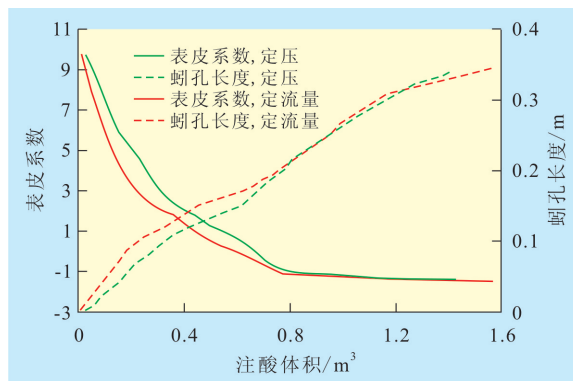


图6 不同注入条件下表皮系数和蚓孔长度与注酸体积的关系

6 结论

在地层条件下,碳酸盐岩的酸液蚓孔扩展规律与实验结果存在很大差异,基于定压和定流量2种边界条件,研究了地层条件下的蚓孔扩展规律,认为:①被酸液挤压的地层流体提高了压缩区的压力,导致蚓孔扩展的速度慢于不考虑压缩区的情况。②定压条件下,蚓孔扩展的速度受地层流体的压缩系数的影响很大,压缩系数越小,蚓孔扩展速度越慢,不考虑压缩区的蚓孔扩展速度最快。③定流量条件下,压缩系数越小,出口压力上升越快,入口压力下降越慢;压缩系数越大,出口压力上升越慢,入口压力下降越快;当不考虑压缩区时,入口压力下降最快。④对于一定的地层,由于压缩区的存在和施工条件的限制,不同注入条件下的蚓孔均存在在一个最大值。⑤通过实例分析发现,在蚓孔未突破污染区域之前,定流量的蚓孔扩展速度和表皮系数下降速度均大于定压的情况,在蚓孔突破污染区域之后,二者差异很小,且注酸量存在一个最优值。

参考文献:

- [1] 米卡尔 J 埃克诺米德斯,肯尼斯 G 诺尔特.油藏增产技术[M].张保平,蒋圆,刘立云,等,译.北京:石油工业出版社,2002:609-610.
- [2] 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.
- [3] 张琪.采油工程原理与设计[M].北京:石油工业出版社,2006:294-296.
- [4] 柳明,张士诚,牟建业.碳酸盐岩酸化径向蚓孔扩展形态研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):106-110.
- [5] Frick T P, Mostofizadeh B, Economides M J. Analysis of radial core experiments for hydrochloric acid interaction with limestones [C]. SPE 27402, 1994.
- [6] 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.
- [7] Buijse M A. Understanding wormholing mechanisms can improve acid treatments in carbonate formations [J]. SPE Production & Facilities, 2000, 15(3): 168-175.
- [8] 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.
- [9] Schechter R S. Oil well stimulation [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991: 277-285.
- [10] Panga M K R, Ziauddin M, Balakotaiah V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2005, 51(12): 3 231-3 248.
- [11] Panga M K R. Multiscale transport and reaction: Two case studies [D]. Houston: University of Houston, 2003.
- [12] Kalia N, Balakotaiah V. Modeling and analysis of wormhole formation in reactive dissolution of carbonate rocks [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 919-928.
- [13] Kalia N. Modeling and analysis of reactive dissolution of carbonate rocks [D]. Houston: University of Houston, 2008.

编辑 刘北羿

欢迎订阅《油气地质与采收率》