

碳酸盐岩多尺度三维酸蚀蚓孔立体延伸动态模拟

薛衡¹,赵立强¹,刘平礼¹,崔明月²,蒋卫东²,梁冲²,叶颀泉³,徐彬¹

(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. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007; 3. 中国石油 西南油气田分公司 工程技术研究院,四川 成都 610017)

摘要:在双重尺度模型基础上建立了多尺度三维酸蚀蚓孔延伸模型并阐述了其数值求解方法。同时,利用地质建模方法建立了孔隙空间关联分布模型,成功解决了孔隙空间突变问题,使模拟结果更加真实可靠。通过模拟发现,注入速度是影响蚓孔形态的主要因素,随着注入速度的增大,溶蚀结构可分为面溶蚀、锥形结构、主蚓孔、分支结构和均匀溶蚀5类。当扩散速度与对流速度相当时会产生主蚓孔通道,越靠近注入端口的蚓孔越粗,而越接近出口端的蚓孔越细。主蚓孔在延伸过程中大致会经历以下4个阶段:蚓孔竞争发育、形成优势通道、主蚓孔突破岩心和蚓孔内径扩宽。其次,孔隙空间连通性是蚓孔扩展路径的决定因素,蚓孔最终沿初始高孔渗分布轨迹突破岩心。最后,通过现场算例验证了该模型及方法用于模拟碳酸盐岩储层酸化、酸压中蚓孔扩展的可行性与正确性,并为该研究领域的精细化模拟预测提供了新的手段。

关键词:孔隙介质;酸蚀蚓孔;三维模拟;数值模型;碳酸盐岩;提高采收率

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Dynamic simulation of 3-D multiple-scale wormhole propagation in carbonate rocks

Xue Heng¹, Zhao Liqiang¹, Liu Pingli¹, Cui Mingyue², Jiang Weidong², Liang Chong², Ye Jiexiao³, Xu Bin¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petro China, Langfang, Hebei 065007, China; 3. Engineering Technology Research Institute of Southwest Oil & Gas Field Company, Petro China, Chengdu, Sichuan 610017, China)

Abstract: Three dimensional (3-D) simulation of wormhole propagation is crucial for predicting stimulation effects of acidizing or acid fracturing in carbonate reservoirs. This paper presented a 3-D multiple-scale wormhole propagation model built based on the double-scale model, and its solving details. Meanwhile, geological modeling method was used to establish the geology model of porosity correlation distribution in 3-D space, which deals with the saltation of porosity successfully and makes the simulation results more realistic and reliable. Through the simulations, we found that the injection rate is the key factor affecting wormhole patterns. With the increase of the injection rate, five dissolving patterns may be observed, namely face dissolution, conical wormhole, dominant wormhole, ramified wormhole and uniform dissolution. When the convection and dispersion are comparable, the dominant wormhole may form with a thick root and a thin tip. The dominant wormhole propagation can be divided into the following successive four stages, including competition stage, dominant stage, breaking stage and broadening stage. Most importantly, we found that the wormhole propagation pathway is highly correlated with the spatial correlation of porosity, since the wormhole breaks the core through those large pores with well connectivity. Finally, the field simulation results verified that the models and methods proposed in this paper are feasible and reliable for wormhole simulation of acidizing and acid fracturing in carbonate reservoirs. Those works could provide theoretical support for fine simulation and prediction in the relevant research areas.

Key words: porous medium, acidizing wormhole, 3D simulation, numerical model, carbonate rock, EOR

大量实验研究表明蚓孔根据溶蚀形态的不同可以分为五种类型:端面溶蚀、锥形溶蚀、主蚓孔、分支型蚓孔和均匀溶蚀^[1]。主蚓孔溶蚀对应酸化效率最高,此时用最少的酸液便可以形成有效穿透伤害带的流动通

道,达到增产最大化的目的^[2]。然而,蚓孔的形成包括一系列复杂的物理化学反应,其中储层压力、温度和物性等不可控因素都会对该物理化学行为产生直接影响。因此在碳酸盐岩储层酸化改造中不仅要研究可控

收稿日期:2015-09-09;修订日期:2016-08-20。

第一作者简介:薛衡(1988—),男,博士研究生,压裂酸化。E-mail: xuehengbbc@gmail.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51474182)。

参数(排量与酸液的最优组合等)对蚓孔延伸的影响。同时,应兼顾考虑各种不可控参数(地层应力、温度和非均质性等)对蚓孔延伸的影响。McDuff^[3]等人开展了大尺度径向渗流条件下的酸蚀蚓孔实验研究,与以往线性流动岩心实验不同,该实验研究更符合现场实际,但实验成功率较低。由于实验往往更加注重机理研究,通过实验获得的参数往往很难甚至不能直接应用于现场。因此,为了解决实际工程问题,多种蚓孔预测数学模型相继提出。其中,Buijse^[4]和Gdansk^[5]提出的管道模型假设管状蚓孔已存在,这与实际情况符合程度有限。而Fredd和Fogler^[6]、Hoefner和Fogler^[7]提出的网络模型,其模拟结果与实验结果往往差异较大。与前两种数学模型相比,Panga^[8]等提出的双重尺度模型更好地描述了线性流条件下酸-岩反应动力学及传质控制等机理。2007年,Kalia和Balakotaiah^[9]在Panga^[8]等基础上推导了更符合现场应用的径向流($r-\theta$ 方向)双重尺度模型。

双重尺度模型在碳酸盐岩储层增产改造研究领域得到了广泛运用与延伸。例如Liu P^[10]等, Liu M^[11]等,Ratnakar^[12]等和Bulgakova^[13]等在其基础上开展了不同变粘酸体系的转向酸化规律研究;Ziauddin^[14]等,Kalia^[9,15]等,Liu M^[16-17]等和Izgec^[18]等在其基础上研究了溶洞及裂缝型碳酸盐岩介质中的酸-岩流动反应机理。然而,国内外研究目前主要集中在孔隙型介质的二维模拟上,全三维模拟鲜有报道。由于现有模型未考虑各物性参数在三维空间中的变化规律,使得其模拟结果与实际结果存在较大误差。比如蚓孔突破体积的模拟结果往往比实验结果大,蚓孔的模拟形态与实际形态差异显著等。因此本文重点研究了多尺度三维蚓孔扩展模型建模,并阐述了其数值求解方法;最后开展了三维酸蚀蚓孔立体延伸规律研究和现场算例优化。

1 多尺度三维蚓孔扩展模型建模

根据Panga^[8]等提出的双重尺度模型,推导出多尺度三维蚓孔扩展模型,假设条件如下:①酸化处理对象为孔隙介质,忽略裂缝及孔洞;②孔隙度的非均质性具有空间相关性;③岩石矿物成分为单一灰岩介质。

1.1 用于描述酸-岩流动反应的达西尺度方程

描述流体渗流的连续性方程

$$U = -\frac{K}{\mu_{\text{eff}}} \nabla p \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla U = 0 \quad (2)$$

式中: U 为速度, m/s ; K 为岩心渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_{eff} 为有效粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p 为压力, MPa ; Φ 为孔隙度,%;

t 为时间, s ; ∇ 为梯度算符。

描述酸液传质、扩散、反应的物质平衡方程

$$\frac{\partial (\Phi C_f)}{\partial t} + \nabla (UC_f) \quad (3)$$

$$= \nabla (\Phi D_{ei} \nabla C_f) - k_c a_v (C_f - C_s)$$

描述孔隙内部 H^+ 传质、反应的局部平衡方程

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

描述孔隙度变化的瞬态方程

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

式中: C_f 为孔隙内部酸液质量浓度, kmol/m^3 ; C_s 为孔隙壁面酸液质量浓度, kmol/m^3 ; D_{ei} 为酸液在 i 方向的有效扩散系数, m^2/s ; i 为下标, x, y 和 z ; k_c 为传质速度, m/s ; $R(C_s)$ 为单步不可逆反应的溶蚀速度, $R(C_s) = k_s C_s$, $\text{m} \cdot \text{kmol}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; k_s 为反应速度, m/s ; α 为酸液的溶蚀能力, kg/kmol ; ρ_s 为岩石密度, kg/m^3 ; a_v 为比表面积, m^2/m^3 。

1.2 用于描述岩石物性变化的微观尺度方程

岩石溶解导致孔隙介质中的各物理性质发生改变, Garman-Kozeny 模型给出了孔隙度、渗透率、比表面和孔道半径间的微观变化关系。

$$\begin{cases} \frac{K}{K_0} = \frac{\Phi}{\Phi_0} \left[\frac{\Phi(1-\Phi_0)}{\Phi_0(1-\Phi)} \right]^{2\beta} \\ \frac{r_p}{r_{p0}} = \sqrt{\frac{K\Phi_0}{K_0\Phi}}; \frac{a_v}{a_0} = \frac{\Phi r_{p0}}{\Phi_0 r_p} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Φ_0 为岩心原始孔隙度,%; K_0 为岩心原始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; β 为由实验获取的指数,无因次; r_p 为孔隙半径, m ; r_{p0} 为原始孔隙半径, m ; a_0 为原始比表面积, m^2/m^3 。

Panga^[8]等给出了传质速度 k_c 与舍伍德数间的关系公式和不同方向上的扩散系数方程。

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

$$D_{ei} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_i |U| r_p}{\Phi} \quad (8)$$

式中: Sh 为舍伍德数,无因次; Sh_∞ 为渐进舍伍德数,无因次; m 为孔隙长度与孔隙直径的比值,无因次; Re_p 为孔隙尺度的雷诺数,无因次; Sc 为施密特数,无因次; D_m 为分子有效扩散系数, m^2/s ; λ_i 为取决于孔隙结构的常数,无因次; α_{os} 为取决于孔隙结构的常数,无因次($\alpha_{os} = 1.0$ 表示球体填充床)。

1.3 初始条件和边界条件

$t=0$ 时的初始条件

$$p \Big|_{x,y,z} = p_a; C_f \Big|_{x,y,z} = 0 \quad (9)$$

$t>0$ 时的压力边界

$$\begin{cases} Q_{\text{inj}} = \sum_{i=0}^N Q_i; \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0, x=M} = 0 \\ p \Big|_{y=N} = p_a; \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0, z=K} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$t > 0$ 时的浓度边界

$$\begin{cases} C_f \Big|_{y=0} = C_f^0; \frac{\partial C_f}{\partial x} \Big|_{y=N} = 0 \\ \frac{\partial C_f}{\partial x} \Big|_{x=0, x=M} = 0; \frac{\partial C_f}{\partial z} \Big|_{z=0, z=K} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: p_a 为大气压力, MPa; Q_{inj} 为注酸速度, mL/min; Q_i 为岩心入口端每个网格块处的注酸速度, mL/min; C_f^0 为入口处酸液质量浓度, kmol/m³; M, N 和 K 分别为 x, y 和 z 方向上的网格数量, 无因次。

2 数值模型求解方法

首先我们利用地质建模软件建立了孔隙度具有空间关联性的三维随机分布模型(图 1)。 x, y 和 z 方向上的网格数量分别为 $60 \times 30 \times 30$, 尺寸为 $5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$, 岩心平均孔隙度和平均渗透率分别为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于全三维精细化的流化耦合数值求解是非常复杂的, 计算所需内存及耗时非常大, 我们利用隐式差分法离散了公式(2)和公式(3), 并采用优化并行算法成功进行编程求解。

公式(2)离散后的连续性方程

$$\begin{aligned} & SS_{i,j,k} P_{i,j,k-1} + AA_{i,j,k} P_{i,j-1,k} + BB_{i,j,k} P_{i-1,j,k} + \\ & CC_{i,j,k} P_{i,j,k} + DD_{i,j,k} P_{i+1,j,k} + EE_{i,j,k} P_{i,j+1,k} + \\ & WW_{i,j,k} P_{i,j,k+1} = \left(\frac{R(C_s) a_v \alpha}{\rho_s} \right)_{i,j,k} \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} SS_{i,j,k} &= \frac{K_{i,j,k-\frac{1}{2}}}{\mu \Delta z_k \Delta z_{k-\frac{1}{2}}} AA_{i,j,k} = \frac{K_{i,j-\frac{1}{2},k}}{\mu \Delta y_j \Delta y_{j-\frac{1}{2}}} \\ BB_{i,j,k} &= \frac{K_{i-\frac{1}{2},j,k}}{\mu \Delta x_i \Delta x_{i-\frac{1}{2}}} DD_{i,j,k} = \frac{K_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\mu \Delta x_i \Delta x_{i+\frac{1}{2}}} \\ EE_{i,j,k} &= \frac{K_{i,j+\frac{1}{2},k}}{\mu \Delta y_j \Delta y_{j+\frac{1}{2}}} WW_{i,j,k} = \frac{K_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\mu \Delta z_k \Delta z_{k+\frac{1}{2}}} \\ CC_{i,j,k} &= - \left(BB_{i,j,k} + SS_{i,j,k} + WW_{i,j,k} + \right. \\ & \quad \left. + EE_{i,j,k} + NN_{i,j,k} + AA_{i,j,k} \right) \end{aligned}$$

公式(3)离散后的反应方程

$$\begin{aligned} & SS_{i,j,k} C_{i,j,k-1}^{n+1} + AA_{i,j,k} C_{i,j-1,k}^{n+1} + BB_{i,j,k} C_{i-1,j,k}^{n+1} + \\ & CC_{i,j,k} C_{i,j,k}^{n+1} + DD_{i,j,k} C_{i+1,j,k}^{n+1} + EE_{i,j,k} C_{i,j+1,k}^{n+1} + \\ & WW_{i,j,k} C_{i,j,k+1}^{n+1} = \frac{\Phi_{i,j,k}}{\Delta t} C_{fi,j,k}^n \end{aligned} \quad (13)$$

其中, 方程组(13)中的系数此处从略。

每个时间步长中空间各节点的物理性质(如压力、浓度、孔隙度、渗透率等)需要结合初始条件和边界条件[公

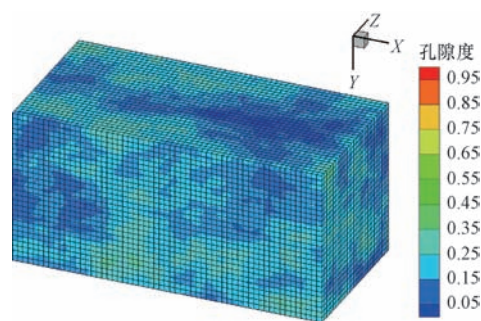


图 1 空间关联随机孔隙分布模型

Fig. 1 Spatial correlation porosity distribution model

式(9)–(11)]进行迭代求解, 其详细的求解步骤如下:

①通过地质建模软件建立初始孔隙空间分布模型, 并进行网格划分; ②通过公式(1)–(2)计算 $n+1$ 时刻的压力场和流速场; ③通过公式(7)–(8)和(14)计算当前时刻各空间节点处的反应速度, 传质速度和 H^+ 扩散速度; ④通过公式(3)–(4)计算 $n+1$ 时刻的酸浓度场; ⑤通过公式(5)–(6)依次计算出 $n+1$ 时刻的孔隙度、渗透率、比表面、孔喉半径, 并更新各空间节点的属性; ⑥判断: 如果蚓孔突破岩心则计算完毕, 否则重复步骤②。

3 三维酸蚀蚓孔立体延伸模拟及分析

温度和酸液浓度是影响酸–岩反应速度的重要因素, 用伊拉克米桑油田的碳酸盐岩(灰岩成分 $> 92\%$)进行了动力学实验研究, 并通过实验数据拟合得到了反应速度与浓度、温度间的关系公式:

$$k_s = 0.021 e^{-18616/RT} C_f^{1.0341} \quad (14)$$

式中: R 是气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 是环境温度, K。其他重要物性参数和注入参数见表 1。

以图 1 给出的三维孔隙空间分布模型作为初始条件, 将表 1 中的物性参数和注入参数代入数学模型中进行计算, 当入口端注入压力与初始注入压力的比值(下文统称为 IPR (Injection Pressure Ratio))降为 1% 时停止计算^[8]。图 2 是不同时刻岩心内部蚓孔空间结构。在驱替作用下, 流体在会优先进入高孔隙度区域, 因此注酸初期在岩心端面附近先形成了竞争发育的蚓

表 1 物性参数和注入参数

Table 1 physical and injection parameters

参数	符号	单位	数值
注入参数			
排量	Q	mL/min	0.2
岩石物性参数			
岩石密度	ρ_s	kg/m ³	2 400
平均孔喉半径	r_{t0}	m	1×10^{-6}
平均比表面	a_0	m ⁻¹	5 000
酸液物性参数			
HCl 酸浓度	C_f	kmol/m ³	4.4
酸液粘度	μ	mPa · s	3.6
H^+ 扩散系数	D_m	m ² /s	3×10^{-9}

孔(图2a)。当注酸90 min时,岩心中逐渐形成优势通道(图2b)。注酸中后期,大部分酸液进入优势通道内使其持续增长,最终形成穿透整个岩心的主蚓孔通道(图2c)。另外,越靠近注入端口的蚓孔越粗,而越接近出口端的蚓孔越细,此时最大主蚓孔直径约为0.66 cm,最小主蚓孔直径为0.25 cm。持续注酸直到IPR等于0.01,主蚓孔通道进一步变粗,而其它部位孔隙结构无显著变化(图2d),这是因为在蚓孔穿透岩心后形成无阻流动通道,大部分鲜酸都将流经主蚓孔通道并持续对蚓孔壁面进行冲刷刻蚀,最终使蚓孔直径扩宽。

Omer^[18]等和姚奕明^[19]等均发现蚓孔趋于沿大孔隙分布的地方扩展。而通过三维蚓孔模拟分析,我们进一步验证了该结论的正确性(图3)。图3a是部分孔隙初始分布剖面,这里虚线圈出了孔隙度较大的位置,并用于对比蚓孔的扩展路径。由于酸液在驱替作用下会优先进入渗流阻力较小的孔隙,因此这些大孔隙分布的位置会更先被溶蚀,最终形成图3b中的孔隙空间分布剖面。

Damkohler 数是描述扩散速度与对流速度关系的变量,也是用于判断酸岩反应溶蚀形态的重要参数。

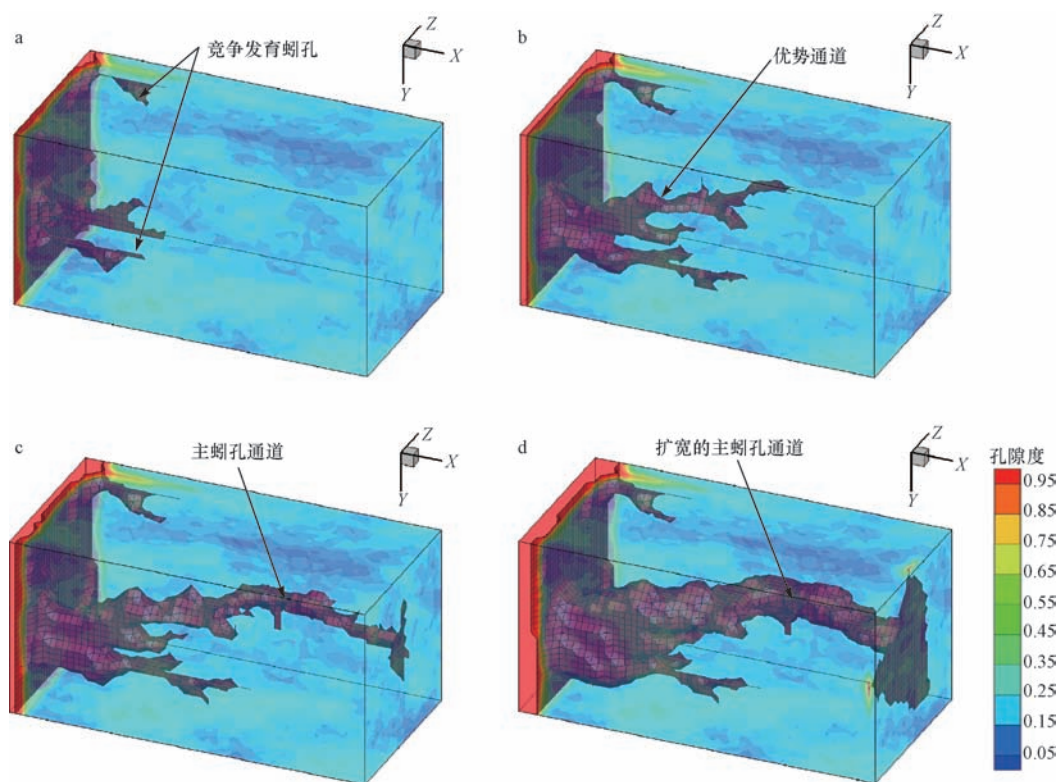


图2 注酸过程中三维蚓孔形态

Fig. 2 Wormhole patterns in different stages of acidizing

a. 45 min, IPR = 0.75; b. 90 min, IPR = 0.34; c. 145 min, IPR = 0.02; d. 299 min, IPR = 0.01

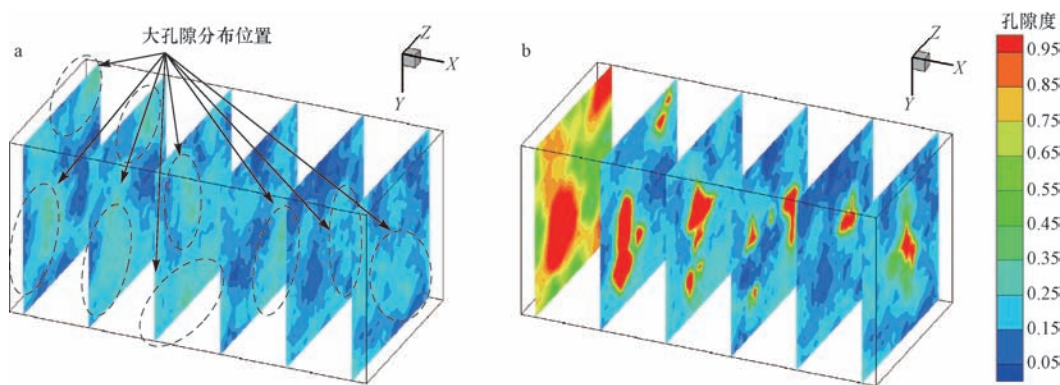


图3 酸化前后沿x方向孔隙分布剖面对比

Fig. 3 Comparison of porosity profiles in x coordinate before and after acidizing

a. 酸化前; b. 酸化后

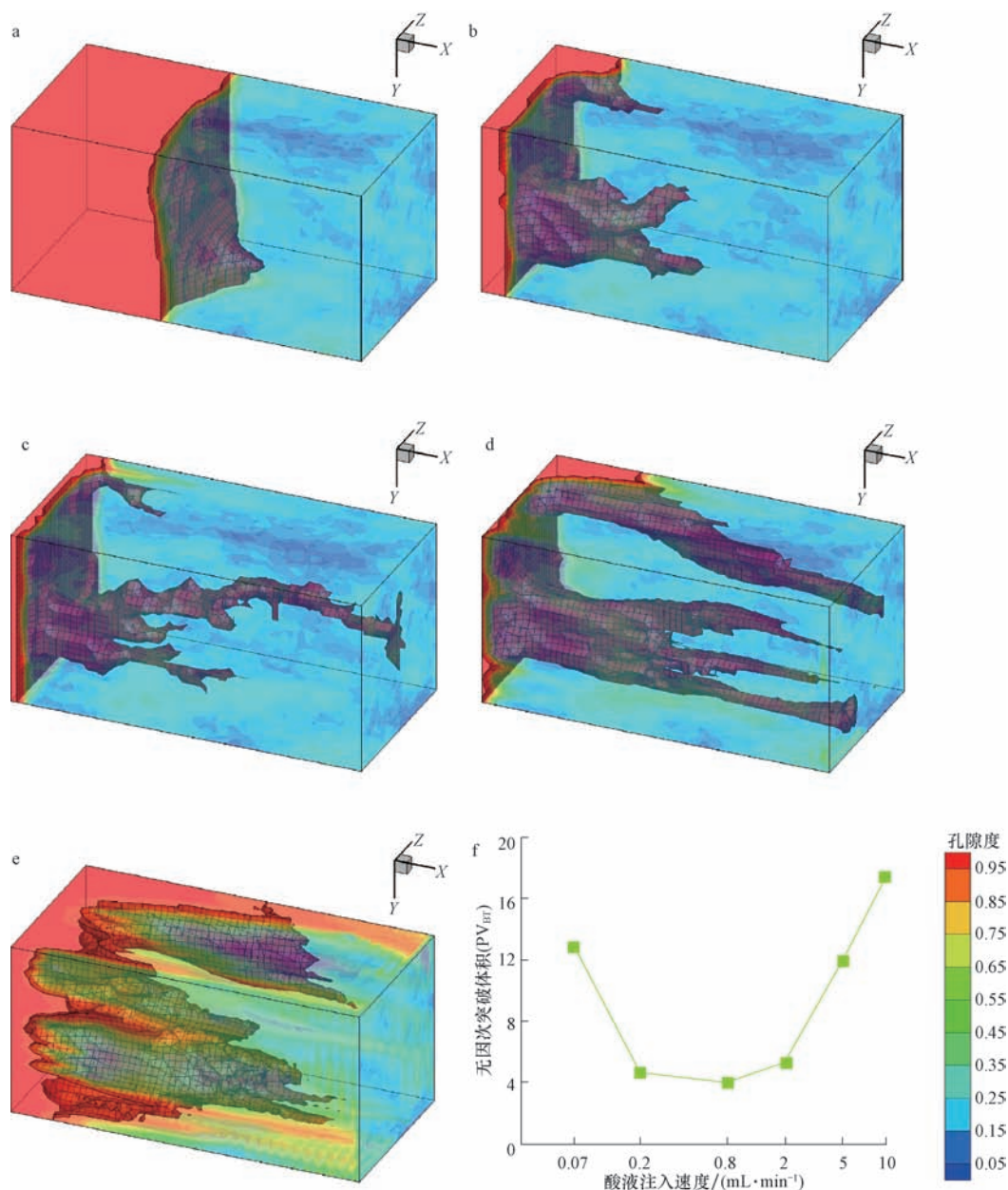


图4 不同排量下的孔隙空间溶蚀结构和注入速度与突破孔隙体积(PV_{BT})关系曲线

Fig.4 Wormhole patterns at different injection rates and curve of PV_{BT} vs. injection rate

a. $Q_{inj} = 0.02$ mL/min; b. $Q_{inj} = 0.07$ mL/min; c. $Q_{inj} = 0.2$ mL/min; d. $Q_{inj} = 5$ mL/min; e. $Q_{inj} = 50$ mL/min; f. 注入速度与突破孔隙体积关系曲线

在低注入排量下,由于对流速度较慢使得 Damkohler 数非常大,扩散速度在整个反应过程起主导,此时会形成面溶蚀结构(图 4a)。适当提高注入排量,此时扩散速度略微占主导,则会形成图 4b 的锥形溶蚀结构。当扩散速度与对流速度之间达到相当时,则会形成主蚓孔通道,此刻的酸化效率最高(图 4c)。而在大排量下,由于对流速度相对更快,岩心更容易形成多分枝结构或均匀溶蚀结构(图 4d,e)。而在锥形溶蚀结构、主蚓孔结构和多分枝结构下蚓孔延伸轨迹更易受到孔隙空间结构的影响。从图 4f 可以看出,该岩心最优注入排量约为 0.5 mL/min,对应突破孔隙体积为 3.9 PV_{BT}。

4 现场算例分析

以 1 口垂直井进行单层酸化改造为例,目标层段厚度为 10 m,储层初始平均渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,初始孔隙度为 0.2,井筒半径为 0.12 m,设计解堵半径 1.5 m。其他参数取典型值,见表 1。其中 $C_0 = 4.4$ kmol/m³对应浓度为 15%的盐酸体系。为了便于现场实施酸化设计方案,模拟排量范围取 0.1 ~ 5 m³/min。以排量为横坐标,酸液突破解堵半径($r_d = 1.5$ m)时对应的每米用酸量为纵坐标绘制关系曲线(图 5)。

从图 5 可见, Q_{inj} 为 0.5 m³/min 时对应应用酸强度

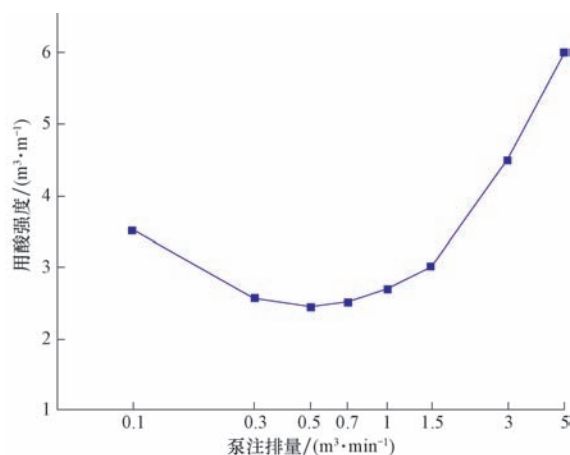


图5 排量与用酸强度关系曲线

Fig. 5 Injection strength vs. injection rate

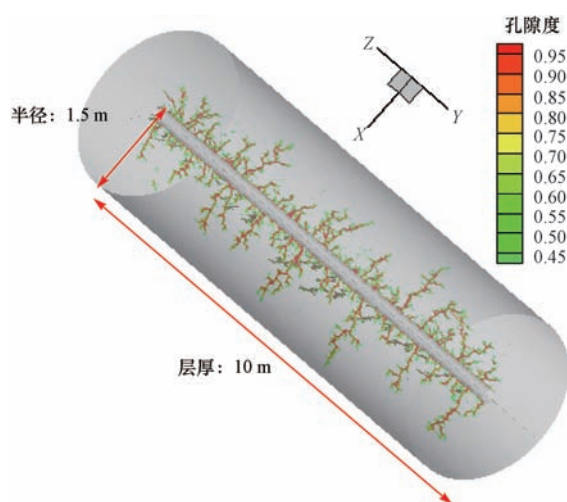


图6 最优注入排量下的近井带三维溶蚀结构

Fig. 6 Wormholes near wellbore under optimal injection rate

最小,为 $2.45 \text{ m}^3/\text{m}$ 。同时,不论增大还是降低排量,都将使用酸强度增加,从而增加施工成本。其次,排量在 $0.3 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 内,排量大小对用酸强度影响程度有限。因此在情况许可条件下应尽量提高排量(但不应超过 $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$),从而减少作业时间,降低施工安全风险。图6是最优排量下的酸蚀蚓孔扩展形态,从图中可见,井筒附近形成了多条具有高导流能力的主蚓孔通道,局部位置蚓孔长度达 1.5 m ,有效突破伤害半径,实现了碳酸盐岩储层酸化解堵的目的。

5 结论与建议

本文在双重尺度模型基础上,推导出了多尺度三维蚓孔扩展模型,并系统研究了孔隙联通性、注酸速度和酸液用量对酸蚀蚓孔形态的影响。通过现场实例计算表明,该模型及方法能够正确用于指导碳酸盐岩储层的酸化优化设计,减少施工盲目性。对于裂缝型储层的酸压改造涉及的关键技术难题^[20](如酸蚀蚓孔发育、蚓孔/天然裂缝滤失、裂缝壁面酸-岩非均匀刻蚀

等)均可结合本文相关内容开展进一步研究工作。

参 考 文 献

- [1] Fredd C N, Miller M J. Validation of carbonate matrix stimulation models[J]. SPE, 2000; 39-52.
- [2] Huang T, Hill A D, Schechter R S. Reaction rate and fluid loss: The keys to wormhole initiation and propagation in carbonate acidizing[J]. Spe Journal, 2000, 5(3): 287-292.
- [3] Meduff D, Jackson S, Shuchart C E, et al. Understanding wormholes in carbonates: Unprecedented experimental scale and 3D visualization[J]. Journal of Petroleum Technology, 2010, 62(10): 78-81.
- [4] Buijse M A. Understanding wormholing mechanisms can improve acid treatments in carbonate formations[J]. Spe Production & Facilities, 2000, 15(3): 168-175.
- [5] Gdansk R. A fundamentally new model of acid wormholing in carbonates[C]//SPE European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [6] Fredd C N, Fogler H S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media[J]. Aiche Journal, 1998, 44(9): 1933-1949.
- [7] Hoefner M L, Fogler H S. Pore evolution and channel formation during flow and reaction in porous media[J]. Aiche Journal, 1988, 34(1): 45-54.
- [8] Panga M K R, Ziauddin M, Balakotaiah V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization[J]. Aiche Journal, 2005, 51(51): 3231-3248.
- [9] 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.
- [10] Liu P, Xue H, Zhao L Q, et al. Analysis and simulation of rheological behavior and diverting mechanism of In Situ Self-Diverting acid[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 132: 39-52.
- [11] Liu M, Zhang S, Mou J, et al. Diverting mechanism of viscoelastic surfactant-based self-diverting acid and its simulation[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2013, 105(3): 91-99.
- [12] Ratnakar R R, Kalia N, Balakotaiah V. Modeling, analysis and simulation of wormhole formation in carbonate rocks with in situ cross-linked acids[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 90(10): 179-199.
- [13] Bulgakova G T, Kharisov R Y, Pestrikov A V, et al. Experimental study of a viscoelastic surfactant-based in Situ Self-Diverting acid system: Results and interpretation[J]. Energy & Fuels, 2013, 28(3): 1674-1685.
- [14] Ziauddin M, Bize E. The effect of pore scale heterogeneities on carbonate stimulation treatments[J]. Projectinnovation, 2007, 44(4): 1045-1050.
- [15] Kalia N, Balakotaiah V. Effect of medium heterogeneities on reactive dissolution of carbonates[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(2): 376-390.
- [16] Liu M, Zhang S, Mou J. Effect of normally distributed porosities on dissolution pattern in carbonate acidizing[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 94-95(5): 28-39.
- [17] Liu M, Zhang S, Mou J, et al. Wormhole propagation behavior under reservoir condition in carbonate acidizing[J]. Transport in Porous Media, 2012, 96(1): 203-220.

- [18] Izgec O, Zhu D, Hill A D. Numerical and experimental investigation of acid wormholing during acidization of vuggy carbonate rocks[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 74(1): 51–66.
- [19] 姚奕明, 李双明, 蔡鑫, 等. 孔隙空间分布规律对酸蚀蚓孔扩展规律的影响[J]. 科学技术与工程, 2014(14): 33–37.
- Yao Yiming, Li Shuangming, Cai Xin, et al. Effects of spatial distribution of pores on wormhole propagation[J]. Science Technology & Engineering, 2014(14): 33–37.
- [20] 赵立强, 刘飞, 王佩珊, 等. 复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2014(4): 562–569.
- Zhao Liqiang, Liu Fei, Wang Peishan, et al. A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 562–569.

(编辑 张亚雄)

“鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对 岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用” 获批立项国家自然科学基金委重点项目

中国石油学会石油地质专业委员会盆地分析学组副组长兼秘书、陕西省石油学会理事、西北大学博士生导师任战利研究员 2016 年申请的国家自然科学基金委重点项目“鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用”经过网评专家评审、现场答辩和专家组严格评审程序获得批准立项。

沉积盆地热演化史及盆地动力学演化对石油、天然气的形成、运移、聚集成藏及煤等矿产的形成、演化有重要的控制作用。沉积盆地热演化史的研究是地球科学研究的前沿领域,盆地深部动力学的研究是地球科学研究的热点及难点之一。华北克拉通西部鄂尔多斯、沁水盆地油气、煤资源丰富,是中国最重要的能源基地,盆地中生代晚期特别是早白垩世热异常明显,古地温记录了中生代晚期岩石圈深部动力学的信息。华北克拉通西部大型沉积盆地中生代以来地热场及岩石圈动力学的研究不仅对华北克拉通西部盆地岩石圈区域动力学演化及机制的分析具有十分重要的理论意义,而且对华北克拉通西部地区鄂尔多斯、沁水大型沉积盆地油、气、煤的成藏、成矿及富集研究有重要的现实意义。

华北克拉通西部大型盆地中生代晚期特别是早白垩世的热岩石圈厚度的恢复是研究大型盆地区域岩石圈动力学演化及判定华北克拉通西部存在改造(或破坏)的关键问题,而中生代晚期早白垩世古地温梯度、古大地热流恢复的准确性则是影响早白垩世热岩石圈厚度恢复准确性的关键因素。

项目负责人任战利研究员从事盆地热演化史研究已近 30 年,在叠合盆地热史恢复理论及方法方面有长期的研究积累和理论储备。他对鄂尔多斯、沁水盆地热演化史进行了长期、持续的研究,首次确定了中生代晚期构造-热事件的存在并对中生代晚期构造-热事件进行了持续、深入的研究,发现中生代晚期构造-热事件控制了油气的生成高峰期及成藏期。通过对中国北方沉积盆地构造-热演化史进行系统深入的研究,发现中生代晚期在阿尔金断裂以东存在一期具有区域规模的构造-热事件。这次构造-热事件对油、气、煤的成藏、成矿有重要控制作用,对中国北方沉积盆地动力学演化研究有重要意义。在对华北克拉通西部鄂尔多斯、沁水盆地中生代晚期构造-热事件多年研究的基础上,针对华北克拉通西部盆地热岩石圈厚度及热动力学演化历史研究薄弱的实际,凝练了该项目的关键问题,明确了创新思路及方向。该项目的研究为应用盆地古地温信息资料进行盆地深部热岩石圈厚度及动力学研究提供了可行的新途径,是盆地热演化史研究的进一步深化及拓展,具有明显的创新性。

该项目的目标是应用创新性思路,以多种古地温研究方法,定量恢复鄂尔多斯、沁水盆地中生代以来的热演化历史,特别是中生代晚期早白垩世的古地温梯度和古大地热流。结合盆地地学深部结构及热导率、生热率资料,确定现今及中生代晚期早白垩世鄂尔多斯、沁水盆地热岩石圈的厚度,在此基础上探讨华北克拉通西部鄂尔多斯、沁水盆地中生代晚期岩石圈演化过程及机理,明确华北克拉通西部鄂尔多斯、沁水盆地中生代晚期以来岩石圈动力学演化及其对油气生成、成藏、富集的控制作用。该项目的研究成果将为克拉通及大型沉积盆地区域动力学演化及对油气赋存的控制作用等科学问题的解决作出贡献。

围绕上述目标,该项目研究地区选择鄂尔多斯、沁水盆地开展工作,研究内容主要为:①盆地现今地温场及深部热结构研究;②中生代晚期盆地古地温场恢复及对比研究;③中生代晚期热岩石圈厚度及动力学演化研究;④沉积盆地动力学演化对油气成藏及富集控制作用。

该项目由任战利研究员负责,由 10 位不同学科的研究人员组成研究团队。研究项目直接经费 306 万元,研究时间为 5 年(2017 年 1 月—2021 年 12 月)。

(供稿 任战利)