

缝洞型碳酸盐岩储层酸液流动反应建模

牟建业^{1*}, 张宇¹, 牟善波², 张士诚¹, 马新仿¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 新疆正通石油天然气股份有限公司, 克拉玛依 834000

* 通信作者, moujianye@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-03-27

国家科技重大专项“靶向酸压控制因素及暂堵转向实验研究”(编号: 2016ZX05014-005-012)资助

摘要 塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩储层常采用酸化去除近井地带污染、提高单井产能, 其改造效果受酸液在储层中流动、反应、缝洞溶蚀规律影响, 但目前缝洞型储层中酸液流动反应规律还未系统研究过。针对该问题, 本文进行缝洞型碳酸盐岩储层酸化数学建模研究, 首先利用序贯高斯模拟方法生成基质孔隙、溶洞孔隙空间分布, 其次利用概率分布函数生成符合地质统计规律的天然裂缝分布, 将三者结合得到缝洞型碳酸盐岩储层的基质、溶洞、天然裂缝空间分布。然后与双重尺度蚓孔扩展模型结合形成缝洞型储层酸液流动、酸岩反应、孔缝演化数学模型, 并进行数值求解、编制模拟程序。基于数值模型, 进行了酸化模拟, 分析了孔缝演化规律、溶蚀形态以及酸液流动距离。研究表明, 天然裂缝分布对酸液流向影响显著, 酸液沿部分天然裂缝流动, 在裂缝中流动较快, 可以短时间内到达较远距离。溶洞内孔隙度、渗透率高, 当酸液遇到溶洞时, 酸液在溶洞内铺展开, 形成片状溶蚀, 降低了酸液前进速度, 溶蚀形态不同于天然裂缝或基质中形成的细长蚓孔。基质孔渗透率远远低于天然裂缝、溶洞, 酸液很少进入基质。天然裂缝分布对酸液作用距离影响较大, 文中模拟条件下预测的作用距离达到 25 m+。本文建立的模型为缝洞型储层酸化提供了优化模拟工具, 为现场施工方案设计提供了理论依据。

关键词 天然裂缝; 溶洞; 数学建模; 酸岩作用; 酸液作用距离

Modeling of acid-rock interaction in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs

MOU Jianye¹, ZHANG Yu¹, MOU Shanbo², ZHANG Shicheng¹, MA Xinfang¹

1 China University of Petroleum - Beijing, Beijing 102249, China

2 Xinjiang Zhengtong Oil & Gas Co. Ltd, Karamay 834000, China

Abstract Acidizing is often used in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs in the Tarim Basin to remove damage near the wellbore caused by drilling and improve the productivity. The stimulation performance depends on acid flow, acid-rock interaction, and rock dissolution in the reservoir. But the acid-rock interaction in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs has not been systematically studied. Aiming at this problem, this article uses numerical modeling on acidizing naturally fractured vuggy carbonate reservoirs. Firstly, we use the method of sequential Gaussian simulation to generate a spatial distribution of matrix and vugs. Then we use a probability distribution function to generate geo-statistical spatial distribution of natural fractures.

引用格式: 牟建业, 张宇, 牟善波, 张士诚, 马新仿. 缝洞型碳酸盐岩储层酸液流动反应建模. 石油科学通报, 2021, 03: 465-473

MOU Jianye, ZHANG Yu, MOU Shanbo, ZHANG Shicheng, MA Xinfang. Modeling of acid-rock interaction in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 465-473. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.037

Combining the three distributions above generates a spatial distribution of pores, vugs, and natural fractures. Then, a mathematical model of acid flow, acid-rock interaction and pore evolution is built by coupling a two-scale wormhole model with spatial distributions of pores, vugs, and natural fractures. Next the numerical model is developed. Based on the model, we conduct numerical simulation of acidizing and analyze the effects of vugs and natural fractures on the wormhole pattern as well as acid penetration distance. The results show that the natural fractures have a dominant effect on acid flow. The acid flows along some natural fractures, and the acid flows fast in the fractures so that the acid can reach a longer distance. Since the porosity and permeability in the vugs are high, when meeting a vug, the acid spreads out in the vug and forms a large area dissolution, which reduces the advance speed of the acid. The dissolution pattern in the vugs is significantly different from the thin wormholes formed in the natural fractures or matrix. Since the porosity and permeability of the matrix are much lower than those of natural fractures and vugs, little acid enters the matrix. The distribution of natural fractures has a great influence on acid penetration distance, and the predicted distance is up to 25m under the simulated conditions. The model established in this paper provides an simulation tool for the acidizing of naturally fractured vuggy reservoirs and a theoretical basis for the design of acidizing schemes.

Keywords natural fracture, vug, mathematical modeling, acid-rock interaction, acid penetration distance

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.037

0 引言

西北油田海相缝洞型碳酸盐岩油藏以裂缝和溶洞为主要储集空间,其非均质性极强,且储层超深(5300~8000 m),超高温(120~190 °C),沟通缝洞是该类油藏储层改造的重点目标^[1-3]。缝洞型碳酸盐储层改造主要采用大型酸压增产改造措施,有时也用到基质酸化。由于储层非均质性极强,物性差的地方,钻井漏失少,需要大型增产改造以沟通远井储集体;物性好的地方,井周储集体发育,钻井漏失大,漏失泥浆大幅降低储层产能,通过基质酸化去除近井地带的污染,疏通地层,起到很好的增产效果。“近井解堵+远井疏通”的酸化技术现场应用效果显著^[4],证明可解除近井地带污染,释放远井储层产能。在基质酸化中,酸液流向、溶蚀形态、活酸作用距离影响酸化改造效果,由于酸化作用尺度较大,室内实验难以模拟缝洞型储层酸液作用规律,需要建立相应的数值模拟模型进行探究。

目前,国内外学者已经对碳酸盐岩储层酸液流动规律进行了丰富的数值模拟研究,提出了毛细管模型^[5-7]、半经验模型^[8-9]、分形模型^[10-12]以及网络模型^[13]等对其进行探索。相较于这些模型,Panga等^[14]建立的双重尺度连续模型由于其计算量相对较小、酸蚀蚓孔形态描述完整而受到广泛应用,该模型结合微观变量、岩石结构以及酸液的扩散和传质描述了碳酸盐岩酸化过程中蚓孔的形成与发育。随后,Kalia等^[15]将该模型从直角坐标扩展到了径向坐标,并运用该模型研究了基质非均质性对酸蚀蚓孔形成的影响。Izgec等^[16-17]研究了孔洞对于蚓孔扩展的影响,研究表明,蚓孔在大尺度非均质储层模型中扩展效率更高。但该

研究尺度仅限于岩心大小,且其并未展示孔洞存在的岩心中的酸液流动形态。李勇明^[18]和廖毅等^[19]在该模型基础上结合等效渗流理论,分析了储层非均质性以及天然裂缝对蚓孔形态特征与注酸量的影响。赵立强等^[20]基于该模型研究了岩心尺度上天然裂缝参数(方位角、密度、长度、连通性等)对酸蚀蚓孔扩展规律的影响。调研结果表明,之前的学者大多集中于在岩心尺度上研究储层非均质性以及裂缝的存在对于酸蚀蚓孔扩展的影响,对缝洞型碳酸盐岩储层酸液流动规律并未做过系统研究。

本文建立缝洞型碳酸盐岩储层模型,首先通过序贯高斯模拟算法、概率分布函数生成孔、缝、洞孔隙空间分布,再与双重尺度酸蚀蚓孔扩展模型耦合,建立缝洞型储层酸液流动、酸岩反应、孔缝演化模型;基于该模型,进行酸化数值模拟,分析缝洞对酸蚀形态的影响,预测酸液作用距离。

1 孔缝洞空间分布建模

1.1 基质孔隙空间分布

碳酸盐岩基质部分孔隙度相对较小,常含有多种孔隙类型,且孔径大小各异,其分布常常千差万别,具有较强的非均质性;但是在碳酸盐岩储层中也确实存在一些高渗通道,使得储层流体以及酸化所用酸液在其中可以相对容易地流动,这说明碳酸盐岩储层同时具有一定的空间关联性^[21]。

针对碳酸盐岩基质孔隙空间分布的非均质性以及空间关联性,本文使用了GSLIB地质统计学软件(C.Vdeutsch和A.G.Journal)^[22]中的序贯高斯模拟算法

生成了缝洞型碳酸盐岩储层中的基质孔隙空间。序贯高斯模拟方法在克服普通克里金法产生的平滑效应的基础上，可以很好的反映出储层的非均质性，展现孔隙度在空间的分布规律，适合于碳酸盐岩储层非均质性和孔隙特征的研究^[23]。该方法的关键在于空间关联函数的使用，生成孔隙度空间分布如下：

$$\phi = \begin{cases} 0.005, \phi \leq 0.005 \\ \phi_0 + \phi_0 c_v \hat{G}(l_x, l_y), 0.005 < \phi < 1 \\ 0.99, \phi \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中， ϕ_0 为平均孔隙度； c_v 为变异函数； $\hat{G}(l_x, l_y)$ 为空间关联分布函数， (l_x, l_y) 分别为 x 和 y 方向上的无因次关联长度。关联长度为：对于空间分布物理量，在小

于关联长度的长度范围内，随着相间距离的增加，两点间的方差值也增加，当等于和大于关联长度的长度范围内，两点间的方差值达到稳定，不再随着相间距离的增加而增加，这样一个临界长度就叫做关联长度。无因次关联长度为关联长度除以总体尺寸 $l=L/2r_e$ 。

由孔隙度空间分布函数可看出，基质孔隙空间分布由变异系数 c_v 以及水平方向和垂直方向上的无因次关联长度 (l_x, l_y) 共同决定。当变异系数较小时，孔隙度集中分布在平均孔隙度 ϕ_0 周围，当变异系数较大时，孔隙度分布范围相对较大。当水平方向上的无因次关联长度 l_x 较大时，则水平方向上的孔隙度值关联性较强；同理，当垂直方向上的无因次关联长度 l_x 较

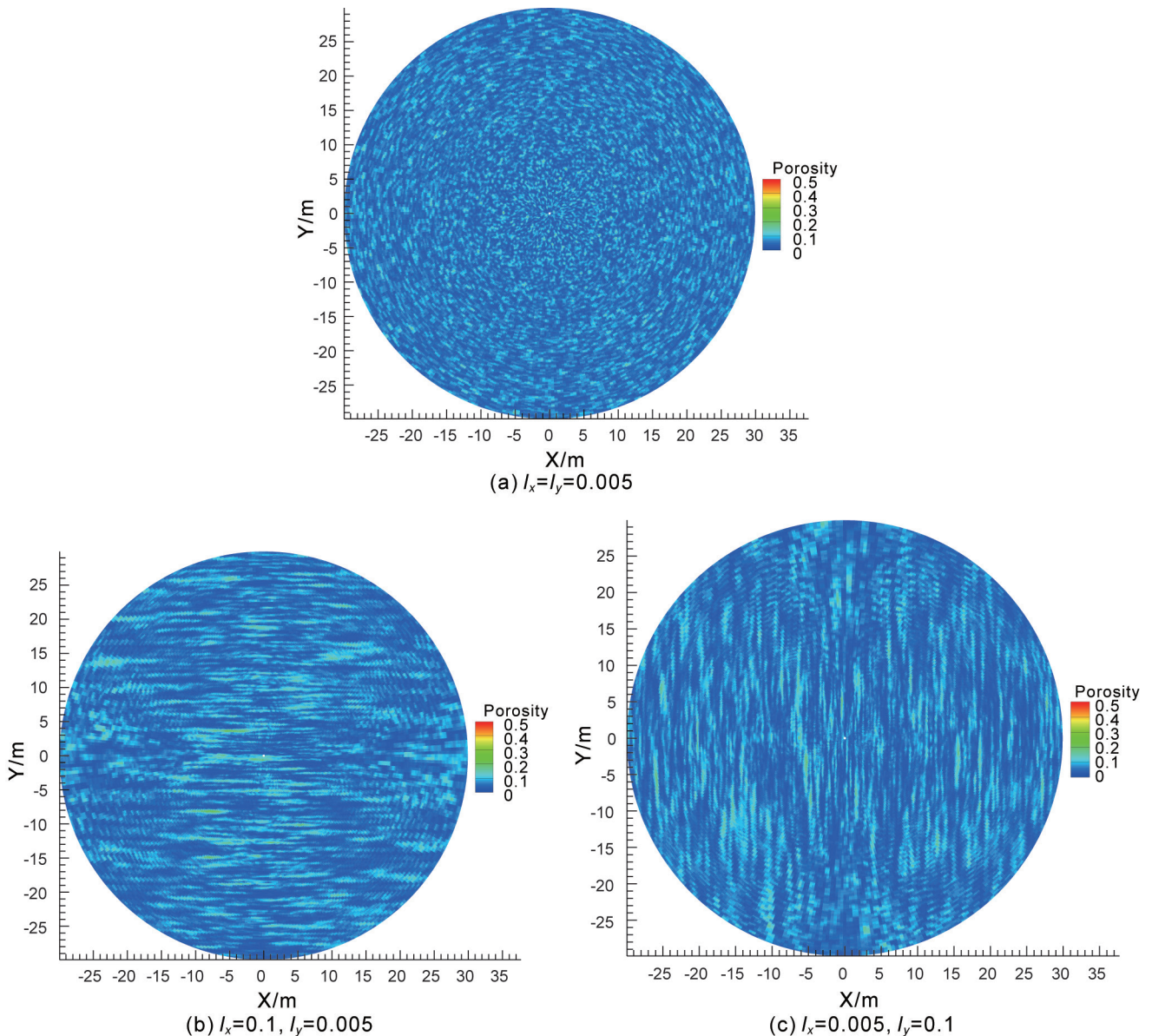


图 1 基质孔隙空间分布
Fig. 1 Matrix porosity distribution

大时,则垂直方向上的孔隙度值关联性较强。

图1为使用序贯高斯模拟方法模拟得到的不同关联长度下的碳酸盐岩基质孔隙空间分布,平均孔隙度为0.05,孔隙度变异系数为1。

1.2 溶洞空间分布

根据地质研究资料表明,碳酸盐岩储层中的溶洞多为后期地层液体岩溶作用所导致,大多分布在断裂带附近。其分布大小不一,形状大多不规则,具有一定的空间关联性。溶洞用以下几个参数表征:溶洞平均孔隙度 ϕ_{vug} 、溶洞孔隙度变异系数 c_{vug} 、溶洞所占比例 A (二维模型为面积比例)、关联长度 l_{vug} (两个方向取相同关联长度), vug 表示溶洞。在一定的溶洞面积比例下,当溶洞无因次关联长度较高时,生成的溶洞大,溶洞个数较少;当溶洞无因次关联长度较低时,生成的溶洞较小,溶洞个数较多。

根据碳酸盐岩储层溶洞的分布特征,使用序贯高斯模拟方法,采用高平均孔隙度值、大无因次关联长度方式来生成溶洞分布。溶洞生成过程如下:采用大的关联长度、高的平均孔隙度值用公式(1)生成如图2(a)所示分布,将(a)中前A部分(溶洞所占比例)的大孔道提取出来作为溶洞,投射到图1中(将溶洞所在位置的孔隙度替换掉相对应位置的基质孔隙度)得到基质和溶洞孔隙度分布,如图2(b)所示。图2中,溶洞所占比例为10%,水平方向和垂直方向上无因次关联长度均为0.5,溶洞平均孔隙度为0.6,溶洞孔隙度

变异系数为0.1。

1.3 天然裂缝空间分布

天然裂缝参数主要包括裂缝密度、中心点位置、迹长以及方位角。由于天然裂缝渗透率远远高于基质渗透率,本文不考虑裂缝宽度变化。通过裂缝中心位置、迹长以及方位角可以确定平面内的一条裂缝。本文中的裂缝密度指面密度,即单位面积内的裂缝条数。

由于在长期的地质活动作用下,缝洞型储层中的裂缝分布十分复杂,无法精确的得到该储层中每处具体的裂缝参数,因此本文采用裂缝参数服从的统计规律来对裂缝各项参数进行表征。根据前人研究结果,裂缝中心点位置服从均匀分布,方位角服从对数正态分布,迹长服从负指数分布^[24]。表1为裂缝模拟引用的概率分布函数以及随机变量的取值。

根据上述概率分布函数,在设置相应的裂缝面密度 Ω 、裂缝平均方位角 $\bar{\beta}$ 及其均方差 σ 和裂缝平均迹长 \bar{l} (为了使裂缝分布更加符合真实分布,这里设定了裂缝迹长分布范围 $l_{\text{min}}\sim l_{\text{max}}$)后,通过编程计算可以得到相应的每条裂缝的参数。通过这些参数得到裂缝两端点的位置坐标,有了裂缝端点位置坐标后,将裂缝投射图2(b)中过程如下:计算每个网格块的4条边坐标,采用向量叉积法判断裂缝是否与每条边相交,若裂缝与任意一条边相交,则裂缝穿过该网格,该网格属性值设为裂缝属性;若裂缝与四条边均不相交,则裂缝与该网格不相交;对所有网格及所有裂缝重复该

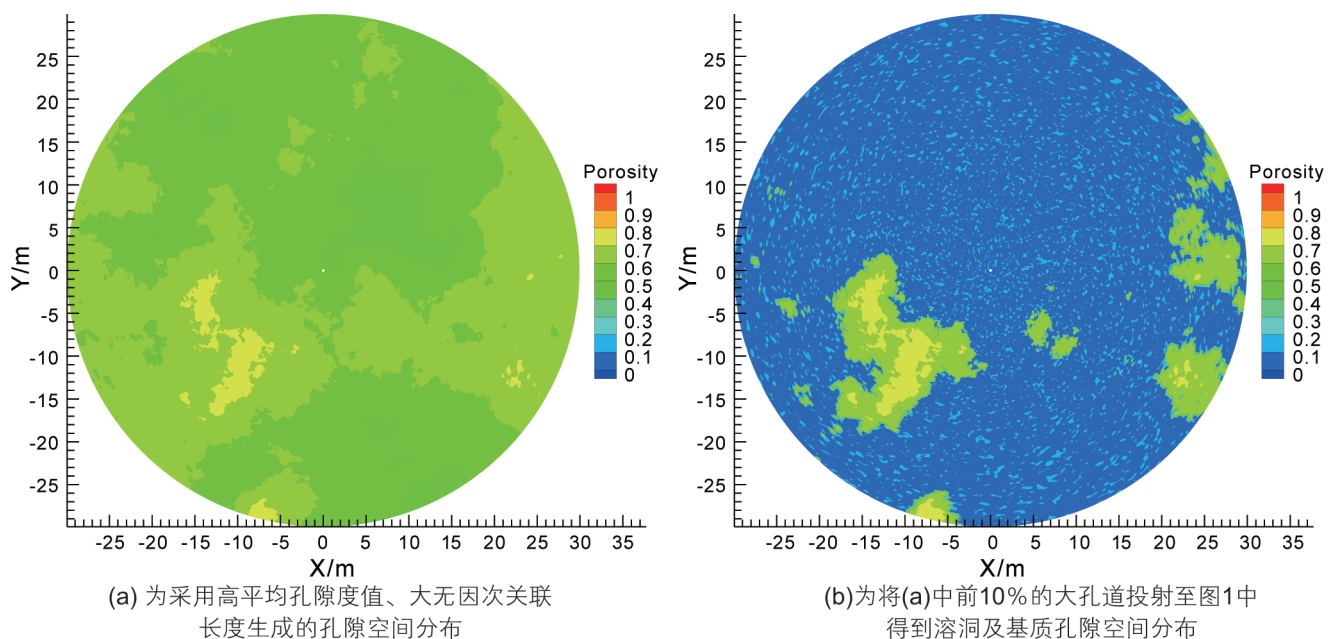


图2 溶洞空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of vugs

表 1 裂缝模拟引用的概率分布函数以及随机变量的取值

Table 1 Probability distribution functions and values of random variables for natural fractures

| 分布形式 | 概率密度函数 | 随机变量 | 注释 |
|--------|---|---|---|
| 均匀分布 | $f(x) = \frac{1}{b-a} (a \leq x \leq b)$ | $x_r = (b-a)R + a$ | R 为服从 $[0, 1]$ 分布的随机变量 |
| 对数正态分布 | $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'x} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\ln x - \mu'}{\sigma'})^2} (x > 0)$ | $x_r = e^{\sqrt{\frac{12}{n}}(\sum_{i=1}^n R_i - \frac{n}{2})\sigma + \mu}$ | μ' 为数学期望, σ' 为均方差, R_i 为服从 $[0,1]$ 分布的随机变量 |
| 负指数分布 | $f(x) = \frac{1}{\mu_c} e^{-x/\mu_c} (x > 0)$ | $x_r = -\mu_c \ln(1-R)$ | μ_c 为负指数分布的数学期望 |

过程, 则完成所有天然裂缝投射。

图 3 为将天然裂缝投射在图 2(b)中得到的基质、溶洞、天然裂缝空间分布。其中, 裂缝密度为 0.02 条/m², 裂缝平均方位角为 90°, 其均方差为 0.5, 裂缝平均迹长为 8 m, 裂缝迹长范围为 5~10 m。

2 酸蚀蚓孔扩展模型

本文采用双重尺度酸蚀蚓孔扩展模型模拟酸液流动、酸岩反应以及孔缝演化。Panga 等人^[14]对该模型进行了详细描述。与之不同的是, 在本文中使用的初始孔隙空间分布为具有空间关联性的孔、缝、洞分布, 并且使用了 Darcy-Brinkman 方程^[25]描述流动, 该方程使酸液在基质孔隙空间的流动与其在蚓孔、裂缝和溶洞中流动可以自然地过渡, 从而得到压力场和速度场。该模型假设: (1)酸液在孔隙介质中的流动为单相流; (2)溶洞、裂缝和基质中的液体流动满足

Darcy-Brinkman 方程; (3)忽略酸岩反应引起的温度变化对反应速率的影响; (4)酸岩反应生成的 CO₂ 溶解在液体中。

蚓孔扩展过程是酸液在孔隙介质中流动、酸岩反应以及岩石溶解后导致孔隙空间增大的过程。双重尺度蚓孔扩展模型包括了达西尺度模型和孔隙尺度模型。达西尺度模型包括以下基于动量及质量守恒、酸岩反应动力学得到的方程:

$$\mu k^{-1} \bar{u} + \nabla p - \mu \Delta \bar{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\phi C_f)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\bar{u} C_f) + \nabla \cdot (\phi D_e \nabla C_f) - \quad (4)$$

$$k_c a_v (C_f - C_s) = 0$$

$$k_c (C_f - C_s) = k_s C_s \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\phi)}{\partial t} = \frac{k_s C_s a_v \alpha}{\rho} \quad (6)$$

其中, $\bar{u} = (u, V, W)$ 为达西速度矢量, m/s; t 为时间, s; μ 为黏度, Pa·s; k 为渗透率, m²; p 为压力, pa; ϕ 为孔隙度, 无量纲; C_f 为液相中的活性酸浓度, kmole/m³; C_s 为固液界面的活性酸浓度, kmole/m³; D_e 为有效的酸液扩散系数, m²/s; k_c 为传质系数, m/s; a_v 为固体介质的比表面积, m²/m³; ρ 为岩石密度, kg/m³; α 为酸的溶解能力, 定义为每千摩尔酸液溶解的岩石的质量; 该处的酸岩反应定义为不可逆的反应, 有 $R(C_s) = k_s C_s$, 其中 k_s 为表面反应速度常数, m/s。

酸岩反应增加了孔隙度, 从而导致孔隙半径、孔隙比表面积等孔隙尺度的性质发生改变, 这些性质的改变会影响酸液流动以及反应速度。孔隙尺度模型可以很好地描述平均孔隙半径、比表面积、渗透率与孔隙度之间的关系。

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\phi}{\phi_0} \left(\frac{\phi(1-\phi_0)}{\phi_0(1-\phi)} \right)^{2\beta} \quad (7)$$

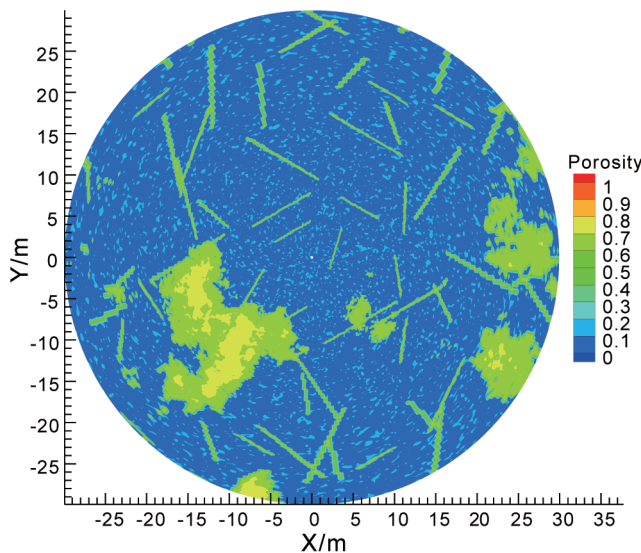


图 3 基质、溶洞、天然裂缝空间分布

Fig. 3 Distribution of matrix, vugs, and natural fractures

$$\frac{r_p}{r_0} = \sqrt{\frac{K\phi}{K_0\phi_0}} \quad (8)$$

$$\frac{a_v}{a_0} = \frac{\phi}{\phi_0} \frac{r_0}{r_p} \quad (9)$$

其中, ϕ_0 为初始平均孔隙度, 无量纲; k_0 为初始平均渗透率, m^2 ; r_0 为初始平均孔隙半径, m ; r_p 为孔隙半径, m ; a_v 为比表面积; a_0 为初始比表面积; β 为取决于孔隙介质结构的常数。

酸岩反应速度取决于酸液在孔隙中的传质速度, 这与液体流态和孔隙结构有关, 其符合以下关系^[26]:

$$Sh = \frac{2k_c r_p}{D_m} Sh_\infty + \frac{0.7}{m^{1/2}} Re_p^{1/2} Sc^{1/2} \quad (10)$$

$$D_{eR} = \alpha_{OS} D_m + \frac{2\lambda_R |\bar{u}| r_p}{\phi} \quad (11)$$

$$D_{e\theta} = \alpha_{OS} D_m + \frac{2\lambda_\theta |\bar{u}| r_p}{\phi} \quad (12)$$

其中, Sh 为舍伍德常数; Sh_∞ 为渐进舍伍德常数; $|\bar{u}|$ 为流体速度大小; $Re_p = 2r_p |\bar{u}|/\nu$, 为孔隙尺度的雷诺数; $Sc = \nu/D_m$ 为斯密特数; ν 为运动黏度, m^2/s ; m 为孔隙长度与直径的比值, 该值取决于孔隙结构和孔隙间的连通程度; α_{OS} 是取决于孔隙介质结构的常数; λ_R 、 λ_θ 是取决于介质结构的系数; 对于床钉模型, 其取值分别为 $Sh_\infty=2$, $m=1$, $\alpha_{OS}=0.5$, $\lambda_R=0.5$, $\lambda_\theta=0.1$ 。

初始条件为:

$$C_f(r, \theta, t)|_{t=0} \quad (13)$$

初始孔隙空间分布为第1节中生成的孔、缝、洞分布, 如图3所示。

边界条件为:

$$C_f(r, \theta, t)|_{r=r_w} = C_0 \quad (14)$$

$$\int_0^{2\pi} q(r, \theta, t)|_{r=r_w} d\theta = q_0 \quad (15)$$

$$p(r, \theta, t)|_{r=r_e} = p_{\text{outlet}} \quad (16)$$

其中, r_w 为井筒半径, m ; r_e 为模拟区域半径, m ; C_0 为注入酸液的浓度, kmole/m^3 ; q_0 为排量, m/s ; p_{outlet} 为外边界压力, Pa 。

3 缝洞型碳酸盐岩储层酸蚀模拟

基于上述模型, 进行了酸液流动、酸岩反应、孔隙演化模拟, 初始孔缝洞分布如图4所示。基质平均孔隙度为0.05, 水平和垂直方向上无因次关联长度均为0.005; 溶洞平均孔隙度为0.6, 水平和垂直方向上

的无因次关联长度为0.5; 裂缝密度为0.02条/ m^2 , 裂缝平均迹长为7.5 m, 迹长范围为5~10 m, 裂缝平均方位角为 90° , 均方差为0.5。排量 $0.25 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$, 酸液质量浓度20%, 酸液黏度 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 酸岩反应速度常数 $0.002 \text{ m}/\text{s}$, 氢离子扩散系数 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

酸蚀蚓孔扩展模拟结果如图5所示, 初始有6个溶洞, 天然裂缝分散分布, 未连成网络。在基质处, 酸液溶蚀形成酸蚀蚓孔, 酸蚀蚓孔向前扩展, 走向附近低渗流阻力的天然裂缝, 进而连通天然裂缝; 由于天然裂缝渗透率远远高于基质, 连通天然裂缝后, 酸液沿天然裂缝流动, 溶蚀扩宽天然裂缝急剧增加裂缝渗流能力, 酸液基本只沿天然裂缝流动, 酸液到达裂缝尖端后, 继续溶蚀基质向前扩展。酸液碰到溶洞后, 由于溶洞孔隙度、渗透率很高, 溶洞范围类孔隙相互连通, 酸液分散流动, 溶洞大部分地方得到溶蚀, 形成大面积溶蚀, 酸液向前推进缓慢。缝洞型储层中的酸液流动反应规律为: 基质处酸蚀蚓孔扩展缓慢, 蚓孔走附近渗流阻力较低的天然裂缝, 然后酸液沿天然裂缝流动, 酸液在天然裂缝中推进速度快, 酸液到达天然裂缝尖端后, 酸蚀蚓孔又在基质中缓慢扩展, 去连通下一条天然裂缝。遇到溶洞后, 酸液大面积分散溶蚀, 对整个溶洞都有溶蚀作用, 酸液往前推荐速度缓慢。天然裂缝分布对酸液走向起主导作用, 酸液在裂缝中流速快, 使酸液可到达较远距离; 一旦连通溶洞, 酸液推进速度较慢, 且形成大面积溶蚀, 溶蚀形态与孔隙型或裂缝型储层中形成的细长蚓孔差异显著。

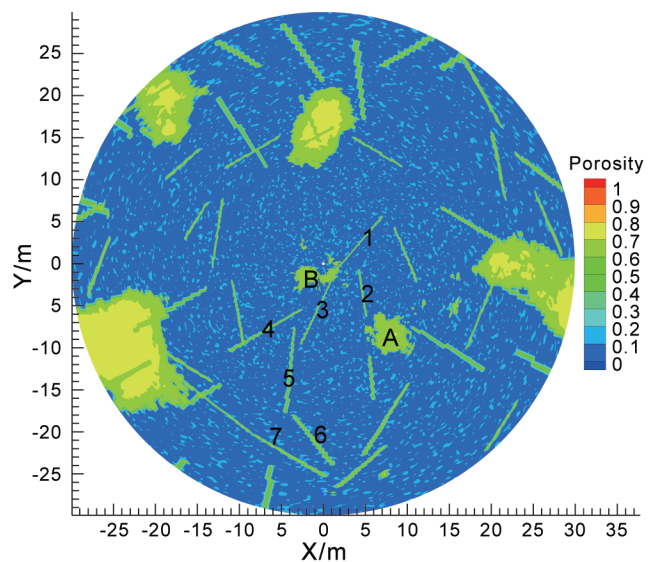


图4 孔缝洞初始分布

Fig. 4 Distribution of pore, fractures, and vugs

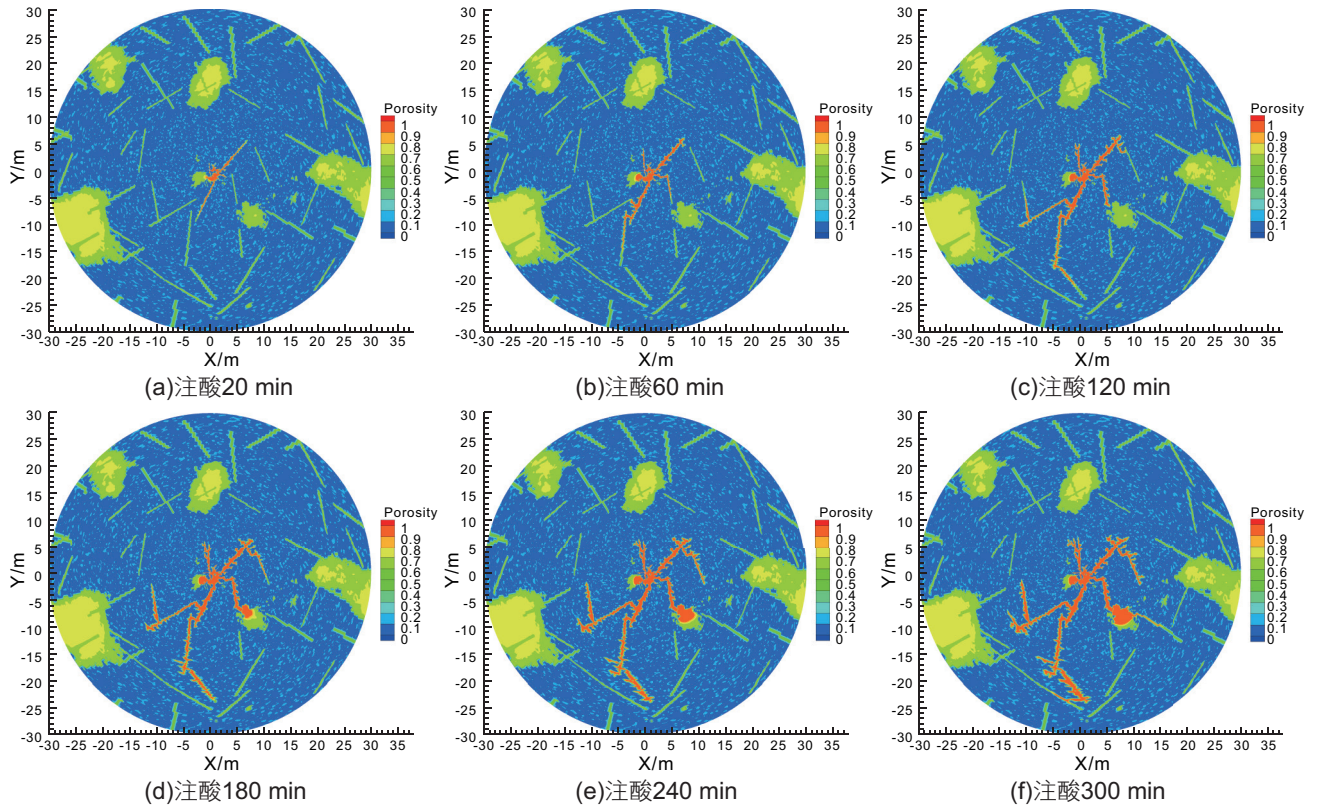


图 5 不同时间下溶蚀形态
Fig. 5 Dissolution pattern under different injection times

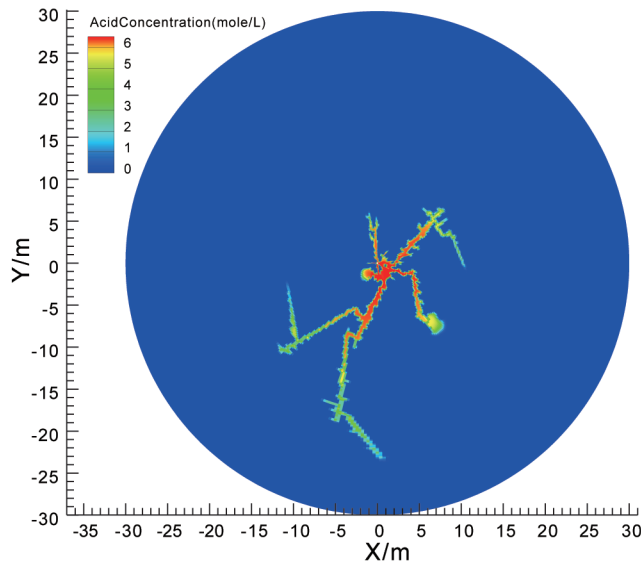


图 6 注酸 180 min 酸液浓度分布图
Fig. 6 Acid concentration distribution at 180 min

图 7 为酸液流动距离随时间的变化，该曲线可以分为如图所示的四个区域，I、II、III 区酸液推进较快，IV 区酸液向前推进很慢。结合图 5 可知，在 0~40 min 之间(I 区)，注入酸液沟通了①和③号裂缝，

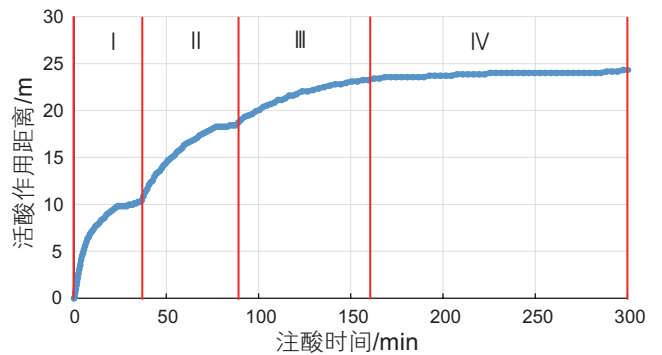


图 7 酸液作用距离随注酸时间的变化
Fig. 7 The relationship between acid penetration distance and injection time

酸液沿天然裂缝向前推进较快；在 40~90 min(II 区)和 90~160 min(III 区)之间，酸液分别沟通了⑤和⑥号裂缝，酸液在较短时间内流动到距离井筒将近 24 m 的地方。而在 160 min 之后(IV 区)，酸液通过②号天然裂缝沟通了溶洞 A，由于溶洞的孔隙度高，酸液进入溶洞后分散开，形成大片状溶蚀，使酸液前进速度大大降低。

4 结论

本文针对缝洞型碳酸盐岩储层基质酸化进行了数学建模和数值模拟研究, 研究得到以下结论:

(1)初始孔、缝、洞空间分布建模分为3个步骤:

1) 利用序贯高斯模拟方法建立基质、溶洞孔隙空间分布, 基质孔隙分布通过平均孔隙度、孔隙度变异系数、无因次关联长度三个参数控制。溶洞空间分布通过溶洞平均孔隙度、孔隙度变异系数、无因次关联长度和溶洞所占比例四个参数控制, 生成溶洞分布时采用较大关联长度, 建议0.5以上。2) 利用概率分布函数建

立天然裂缝分布, 通过天然裂缝密度、方位角、迹长参数控制; 3) 将基质、溶洞、天然裂缝分布结合在一起, 形成孔、缝洞空间分布。

(2)初始孔、缝、洞空间分布与酸蚀蚓孔扩展模型结合, 形成缝洞型储层的酸液流动、酸岩反应、孔缝演化模型。

(3)天然裂缝对酸液走向具有主导作用, 酸液在裂缝中流速较快, 有利于增加活酸液作用距离, 本文模拟条件下活酸作用距离达到25 m+。

(4)酸液沟通溶洞后分散流动, 形成大片溶蚀区域, 溶蚀形态区别于孔隙或裂缝型储层中的细长蚓孔, 酸液在溶洞中推进缓慢。

参考文献

- [1] 马乃拜, 马新平, 杜伟维, 等. 顺北一区奥陶系碳酸盐岩储层发育特征与预测[J]. 内蒙古石油化工, 2019, 45(07): 106-112. [MA N B, MA X P, DU W W, et al. Development characteristics and prediction of ordovician carbonate reservoir in No.1 Area of Shunbei[J]. Inner Mongolia petrochemical Industry, 2019, 45(07): 106-112.]
- [2] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(04): 461-469. [LU X B, YANG M, WANG Y, et al. Characteristics of strata-controlled and fault-controlled reservoirs in northern Tarim Basin: A case study of Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(04): 461-469.]
- [3] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(03): 347-355. [LU X B, HU W G, WANG Y, et al. Characteristics and development practice of carbonate fracture-solution reservoirs in Tahe area [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(03): 347-355.]
- [4] 李新勇, 李春月, 赵兵, 等. 顺北油气田主干断裂带深穿透酸化技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(02): 82-87. [LI X Y, LI C Y, ZHAO B, et al. Deep penetration acidification technology in the main fault zone of Shunbei oil and gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(02): 82-87.]
- [5] HUNG K M, Hill A D, SEPEHRNOORI K. A Mechanistic model of wormhole growth in carbonate matrix Acidizing and acid fracturing[J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(01): 59-66.
- [6] GDANSKI R. A fundamentally new model of acid wormholing in carbonates[C]. Paper SPE 54719 prepared the 1999 European Formation Damage Conference held in The Hague, The Netherlands, May 31-June 1, 1999.
- [7] BUIJSE M A. Understanding wormholing mechanisms can improve acid treatments in carbonate formations[J]. SPE Prod. & Facilities, 2000, 15(3): 168-175.
- [8] HOEFNER M L, FOGLER H S. Fluid-velocity and reaction-rate effects during carbonate acidizing: Application of Network Model[J]. SPE Production Engineering, 1989, February: 56-62.
- [9] FREDD C N, FOGLER H S. Optimum conditions for wormhole formation in carbonate porous media: Influence of Transport and Reaction[J]. SPE Journal, 1999, 4(3): 196-205.
- [10] 李英菊, 李现振, 卢美月. 碳酸盐岩储层酸蚀蚓孔形态地质建模[J]. 中国锰业, 2020, 38(02): 30-32+45. [LI Y J, LI X Z, LU M Y. Morphological geological modeling of acid etched wormhole in carbonate reservoir [J]. China Manganese Industry, 2020, 38(02): 30-32+45.]
- [11] 齐丹, 邹洪岚, 丁云宏, 等. 基于Hausdorff分形维数的碳酸盐岩酸蚀蚓孔计算模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(06): 105-109. [QI D, ZOU H L, DING Y H, et al. Calculation model of acid erosion wormhole in carbonate rock based on Hausdorff fractal dimension [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(06): 105-109.]
- [12] 张合文, 丁云宏, 邹洪岚, 等. 耦合双重分形蚓孔的表皮因子计算模型[J]. 石油学报, 2017, 38(06): 721-728. [ZHANG H W, DING Y H, ZOU H L, et al. A skin factor calculation model for coupling double fractal wormhole [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(06): 721-728.]
- [13] FATT I. The network model of porous media[J] Society of Petroleum Engineers. 1956, 10 (1) : 144-181.
- [14] PANGA M K R, ZIAUDDIN M, BALAKOTAIAH V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidiza-

- tion[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2005, 51(12): 3231–3248.
- [15] KALIA N, BALAKTIAH V. Modeling and analysis of wormhole formation in reactive dissolution of carbonate rocks[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 919–928.
- [16] IZGEC O, ZHU D, HILL A D. Models and methods for understanding of early acid breakthrough observed in acid core-floods of vuggy carbonates[C]. 8th European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [17] 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 and Engineering. 2010, 74(1): 51–66.
- [18] 李勇明, 廖毅, 赵金洲, 等. 基于双尺度等效渗流模型的复杂碳酸盐岩蚓孔扩展形态研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(01): 121–127+133. [LI Y M, LIAO Y, ZHAO J Z, et al. Study on wormhole propagation morphology of complex carbonate rock based on two-scale equivalent seepage model [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(01): 121–127+133.]
- [19] 廖毅, 李勇明, 赵金洲. 裂缝非均质碳酸盐岩酸蚀蚓孔发育规律[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(06): 64–69. [LIAO Y, LI Y M, ZHAO J Z. Development of acid-etched wormholes in fractured heterogeneous carbonate rocks [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(06): 64–69.]
- [20] 赵立强, 王润宇, 刘平礼, 等. 考虑天然微裂缝的酸蚀蚓孔扩展数值模拟研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(02): 76–82. [ZHAO L Q, WANG R Y, LIU P L, et al. Numerical simulation of acid erosion wormhole propagation considering natural microfractures [J]. Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(02): 76–82.]
- [21] 柳明, 张士诚, 牟建业, 等. 碳酸盐岩油藏非均质性对蚓孔扩展的影响[J]. 特种油气藏, 2012, 19(05): 146–150+158. [LIU M, ZHANG S C, MOU J Y, et al. Effect of heterogeneity on wormhole propagation in carbonate reservoirs [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(05): 146–150+158.]
- [22] DEUTSCH C V, JOURNAL A G. GSLIB-geostatistical software library and user' s guide [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1998.
- [23] 王勇标, 杨鹏, 李君, 等. 序贯高斯模拟方法在尼日利亚KK油田中的应用[J]. 计算机时代, 2012(05): 13–15. [WANG Y B, YANG P, LI J, et al. Application of sequential Gaussian simulation method in KK oilfield in Nigeria [J]. Computer Times, 2012(05): 13–15.]
- [24] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 等. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(09): 1814–1821. [LIU X L, WANG E Z, WANG S J, et al. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(09): 1814–1821.]
- [25] BRINKMAN H C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on dense swarm of particles. Appl. Sci. Res. 1(1), 27–34, 1947.
- [26] BLAKOTIAH V, WEST D H. Shape normalization and analysis of the mass transfer controlled regime in catalytic monolith. Chemical Engineering Science 57(8), 1269–1286, 2002.

(责任编辑 李俊键 编辑 马桂霞)