

引用格式: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(2):76-82.

ZHAO L Q, WANG R Y, LIU P L, et al. Numerical simulation of wormhole propagation considering natural micro-fractures[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 76-82.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.013

考虑天然微裂缝的酸蚀蚓孔扩展数值模拟研究

赵立强¹,王润宇¹,刘平礼¹,梁冲²,邹宏岚²,罗志锋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,北京 100083)

摘要:碳酸盐岩储层天然微裂缝一般较为发育,很多学者在对碳酸盐岩酸蚀蚓孔扩展进行模拟研究时,都未考虑微裂缝的分布及产状的随机性对模拟结果的影响。天然微裂缝的存在对孔隙度的改变非常小,但其对于模拟结果的影响很大。基于双重尺度蚓孔扩展模型,耦合 Monte Carlo 法产生的具有一定统计学分布规律的自然裂缝模型,建立考虑天然微裂缝存在的酸蚀蚓孔扩展数学模型。通过改变微裂缝方位角、微裂缝密度、微裂缝长度、微裂缝连通性等参数,研究了天然微裂缝的空间分布对蚓孔扩展的影响。研究发现,天然微裂缝的存在会降低酸液突破岩心孔隙体积,很大程度上影响了最佳注入速度与酸液用量的选择。高密度的天然微裂缝可以形成复杂的弥散性裂缝网络,起到增渗、增产的效果。增加微裂缝长度可以降低酸液突破孔隙体积,对污染带进行快速穿透。在微裂缝连通性较好的岩心中,蚓孔在扩展过程中会连通相邻微裂缝,增加岩心的导流能力。

关键词:碳酸盐岩储层;天然微裂缝;裂缝产状;酸蚀蚓孔;数值模拟

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Numerical simulation of wormhole propagation considering natural micro-fractures

ZHAO Liqiang¹, WANG Runyu¹, LIU Pingli¹, LIANG Chong², ZOU Honglan², LUO Zhifeng¹

(1.State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Natural micro-fractures in carbonate reservoirs are generally developed and have little effect on porosity, but has a great influence on the simulation results. In previous studies, the effect of micro-fractures on the growth of wormholes has not been studied in detail. Based on the double-scale wormhole propagation model, and the natural fracture model with a certain statistical distribution law produced by coupling of the Monte Carlo method, the acid wormhole propagation mathematical model considering the existing of natural fractures is established. By adjusting the parameters such as azimuth, density, length and connectivity of micro-fractures, the effects of its spatial distribution on wormhole propagation is studied. It is found that the existence of natural micro-fractures will reduce the pore volume of acid invasion into the cores, which greatly affects the optimal injection speed and acid-liquid dosage. Natural micro-fractures with high density can form complex dispersion fracture networks, increasing the permeability and production obviously. Increasing the length of micro-fractures can reduce the pore volume of acid invasion, and penetrate the damage zone rapidly. In the cores contain micro-fractures with better conductivity, the wormhole will connect the adjacent micro-fractures in the process of propagation, so as to increase the core's conductivity.

Key words: carbonate reservoir, natural micro-fracture, fracture geometry, wormhole propagation, numerical simulation

在低于地层破裂压裂条件下注入酸液,受到地层非均质影响,酸液沿着最小阻力方向滤失进入地层,形成蚓孔^[1]。蚓孔可以突破污染带,沟通储层,是

油气流动的高速通道。关于蚓孔扩展规律的数值模拟按照时间发展可分为:毛细管模型^[2]、网络模型^[3]、基于 Boltzmann 法的模型^[4]、双重尺度连续模型^[5]等。

收稿日期:2020-01-31。

第一作者简介:赵立强(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事酸化压裂增产技术和采油气工程的教学与科研工作。通讯地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail: zhaolq@vip.163.com

基金项目:国家科技重大专项“中亚和中东地区复杂碳酸盐岩油气藏采油采气关键技术研究与应”(2017ZX05030-005);国家自然科学基金项目“缝洞型碳酸盐岩靶向酸压复杂裂缝扩展机理及调控方法研究”(51974264)。

其中,双重尺度模型同时结合了达西尺度和孔隙尺度模型的优势,充分考虑了渗流规律和微观孔隙结构变化规律,适用性较强。

天然微裂缝表征的研究方法主要为通过对岩心扫描薄片进行观察,结合统计学方法,经过大量的样本统计,得到微裂缝的中心点坐标、缝长、缝长变化、方位角、方位角变化、密度分布等相关信息及概率分布规律^[6-10]。

李勇明等^[11]在2004年建立了考虑天然裂缝存在的酸蚀蚓孔扩展模型。该模型研究了裂缝性储层的滤失问题,得出了裂缝密度对蚓孔延伸的影响,未研究微裂缝的其他特征对蚓孔发育的影响。IZGEC等^[12]在2009年研究了孔洞对蚓孔扩展的影响,其模型主要研究重点在于孔洞空间,并未耦合微裂缝场。柳明等^[13]在2012年建立径向坐标下的蚓孔扩展模型并研究孔洞等孔隙空间对蚓孔扩展的影响。其模型中的裂缝场被简化为短曲线,无法准确描述微裂缝的分布及产状规律,仅得出定性结论。牟建业等^[14]在2014年通过真实岩心的CT扫描数据,重构了具有真实孔隙分布的数字岩心,研究了真实孔隙分布条件下蚓孔的扩展规律,但并未分析微裂缝的存在对于蚓孔扩展的影响。2015年,罗源等^[15]利用有限元法模拟了酸液在含微裂缝储层条件下的流动反应过程,分析了裂缝长度、方位角及裂缝离井距离等因素对酸蚀形态的影响,但裂缝场被简化为单一的曲线裂缝,难以描述微裂缝的分布及产状的复杂性。OLATOKUNBO等^[16]在2016年对比了二维直角坐标、二维径向坐标、三维直角坐标下溶洞对蚓孔扩展的影响,其模型并未耦合微裂缝场。李勇明等^[17]在2016年研究了天然微裂缝的长度、密度及方向对蚓孔生长的影响,但受到径向坐标网格影响,裂缝形态分布较为单一,无法很好地描述裂缝分布及产状的随机性。薛衡等^[18]利用三维双重尺度模型对蚓孔扩展开展了研究,其认为蚓孔的扩展路径受空间孔隙结构的影响,蚓孔最终沿初始高孔渗分布轨迹突破岩心,但其研究的孔隙结构并未包含微裂缝。刘飞等^[19]将双重尺度模型扩展到储层尺度进行模拟分析,认为壁面蚓孔的存在对于工作液的滤失有着很大的影响,但受到网格尺度限制,其未进行微裂缝影响研究。

在以往的碳酸盐岩储层酸化模拟研究过程中,通常将微裂缝做了等效或简化处理,难以反映出微裂缝的分布及产状的随机性对模拟结果的影响。微裂缝分布对储层中流体的流动形态具有重要的影响,是碳酸盐岩储层蚓孔扩展模拟过程中必须考虑的因素。

为了研究天然微裂缝对蚓孔扩展的影响,按微裂缝中心点位置分布及密度分布服从Poisson分布,微裂缝的产状分布服从Fisher分布,微裂缝迹长分布符合正态分布,建立产生服从该概率分布函数随机数的模型^[20-21],得到统计学意义上的微裂缝表征参数值,从而模拟一定区域内的天然微裂缝分布。将微裂缝网络模型与双重尺度连续模型进行耦合,建立考虑天然微裂缝的酸蚀蚓孔扩展数学模型,进行酸蚀蚓孔扩展数值模拟研究,这对于裂缝性碳酸盐岩储层酸化具有重要意义。

1 酸蚀蚓孔扩展数学模型

采用笛卡尔坐标系下的基于双重尺度的蚓孔扩展模型进行计算^[14,22]。结合质量守恒方程、运动方程、酸岩反应方程及一些附加方程,通过求解压力场,得到速度场及酸浓度场的变化,从而通过孔隙度场表述蚓孔的扩展过程。使用常规酸体系进行二维的酸化模拟,选取纯灰岩岩心进行模拟实验。模型示意如图1所示。

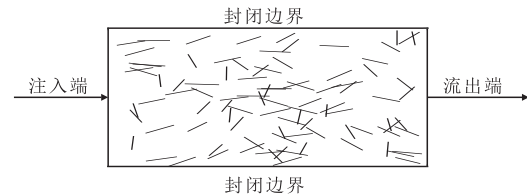


图1 模拟模型

Fig.1 Simulation model

达西尺度模型是由不可压缩流体的连续性方程及化学场方程构成。连续性方程是基于达西流动方程及物质守恒方程所建立^[23]。

$$v_i = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial i} \quad (1)$$

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

式中: $i=x$ 或 y ; v_i 为平行于 i 轴的达西流速, m/s; K 为岩心渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为酸液黏度, mPa·s; P 为压力, MPa; ϕ 为孔隙度; t 为时间, s; U 为达西流速矢量, m/s, 包含 x 、 y 两个方向上的速度。

化学场方程则描述的是化学反应及对流—扩散现象,其包含了反应平衡方程及孔隙度变化方程^[17,18]。

$$\frac{\partial(\phi C_f)}{\partial t} + \nabla(UC_f) - \nabla(\phi D \nabla C_f) = -k_c a_v (C_f - C_e) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{k_c k_s \alpha_v}{(k_c + k_s) \rho_s} C_f \quad (4)$$

式中: C_f 为孔隙内部酸液质量浓度, kmol/m³; D 为扩

散系数, m^2/s ; k_c 为传质系数, m/s ; a_v 为孔隙比表面积, m^2/m^3 ; C_s 为孔隙壁面酸液质量浓度, kmol/m^3 ; k_r 为反应速度常数, m/s ; α 为溶蚀能力数, kg/kmol ; ρ_s 为岩石密度, kg/m^3 。

式(1)一式(4)共同构成了双重尺度模型中的达西尺度模型。

通过修正 Carman-Kozeny 半经验公式, 得到渗透率、孔喉半径、比表面积与孔隙度的关系式^[24]。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\phi}{\phi_0} \left[\frac{\phi(1-\phi_0)}{\phi_0(1-\phi)} \right]^{2\beta} \quad (5)$$

$$\frac{r_p}{r_{p0}} = \sqrt{\frac{K\phi_0}{K_0\phi}} \quad (6)$$

$$\frac{a_v}{a_0} = \frac{\phi r_{p0}}{\phi_0 r_p} \quad (7)$$

式中: K_0 为初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ_0 为初始孔隙度; r_p 为原始孔喉半径, m ; β 为经验常数; r_{p0} 为原始孔隙半径, m ; a_v 为孔隙比表面积, m^2/m^3 ; a_0 为原始比表面积, m^2/m^3 。

通过 Panga 经验公式得到传质系数与有效扩散系数的关系^[25]。

$$Sh = \frac{2k_c r_p}{D_m} = Sh_\infty + 0.7m^{-1/2} Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \quad (8)$$

$$D_{ci} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_i \nu_i r_p}{\phi} \quad (9)$$

式中: Sh 为舍伍德数; D_m 为分子有效扩散系数, m^2/s ; Sh_∞ 为渐进舍伍德数; m 为孔隙长度与孔隙直径的比值; Re_p 为孔隙尺度的雷诺数; Sc 为施密特数; D_{ci} 为酸液在 i 方向的有效扩散系数; α_{os} 为取决于孔隙结构的常数; λ_i 为取决于孔隙结构的常数。

式(5)一式(9)共同构成了双重尺度模型中的孔隙尺度模型。

注入端面 and 流出端面都采用定压边界, 模型的初始条件为:

$$P|_{x,y,t=0} = P_a, C_f|_{x,y,t=0} = 0 \quad (10)$$

当 $t > 0$ 时, 岩心两侧采用封闭边界, 规定以下边界条件:

$$P|_{x=0} = P_{inj}, P|_{x=l} = P_a \quad (11)$$

$$-\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{y=0, y=n} = 0 \quad (12)$$

$$C_f|_{x=0} = C_f^0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \frac{\partial C_f}{\partial y} \Big|_{y=0, y=n} = 0 \quad (14)$$

式中: P_{inj} 为注入压力, MPa ; l 为岩心长度, m ; P_a 为标准大气压, 0.1 MPa ; n 为岩心宽度, m ; C_f^0 为孔隙内部反应液相质量浓度, kmol/m^3 。

上文推导的双重尺度的蚓孔扩展模型, 包含了关于时间变量和空间变量的连续偏导数。该文利用全隐式有限差分法来逼近控制方程的偏导数。使用 MATLAB 软件进行编程计算。其中, 空间步长用中心差分, 时间步长采用向后差分。

2 天然微裂缝的生成

碳酸盐岩储层中, 天然微裂缝并不是按照二维平面形态存在的。二维模式是对实际微裂缝形态的一种简化表征, 但是基于这种简化模型的研究和应用在实际生产过程中被证明是行之有效的^[26]。为了研究天然微裂缝对蚓孔扩展的影响, 通过 Monte Carlo 法建立二维随机天然裂缝物理模型。

对于二维天然微裂缝模型, 微裂缝分布形态参数主要为: 裂缝中心位置、裂缝长度、裂缝密度、裂缝方位角、裂缝长度变异系数、裂缝方位角变异系数等。

建模的过程为: ①设定模型的大小, 对裂缝条数、裂缝方位角、裂缝长度、裂缝方位角变异系数、裂缝长度变异系数进行赋值; ②使用随机函数生成符合泊松分布的裂缝中心点坐标; ③在裂缝中心点生成服从正态分布的裂缝迹线, 方位角服从 Fisher 分布。

建立 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的模型, 通过改变裂缝条数、裂缝迹长、裂缝迹长变异系数、裂缝方位角、裂缝方位角变异系数见表 1, 生成不同裂缝长度、不同裂缝方位角、不同裂缝密度的微裂缝迹线(图 2)。天然微裂缝的密度可以按照单位面积内的裂缝条数来进行统计分析见图 3。

在直角坐标系中, 对可以表达为线性函数的线段进行离散处理。针对裂缝系统中的每条天然微裂缝, 进行遍历验证。得到天然裂缝所经过的每个网

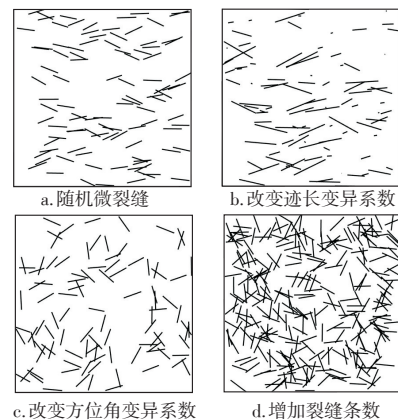


图 2 不同参数下的裂缝迹线

Fig. 2 Fracture traces under different parameters

表1 随机微裂缝基础参数
Table Parameters of random macro-fractures

编号	裂缝条数/n	迹长(L)/m	方位角/(°)	$\Delta L/m$	$\Delta a/(°)$
1	100	0.1	0	0.01	30
2	100	0.1	0	0.09	30
3	100	0.1	0	0.01	90
4	300	0.1	0	0.01	90

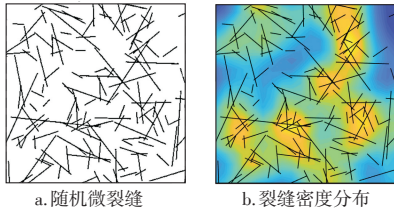


图3 随机裂缝密度分析

Fig. 3 Analysis of random fracture density

格的坐标,将该坐标节点中的孔隙度和渗透率信息进行更新。

由于在双重尺度模型中,渗透率可以表达为基于孔隙度表达的半经验公式。该文中的微裂缝表达为孔隙度为0.7的孔隙空间,如图4所示。

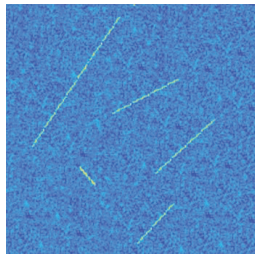


图4 离散微裂缝的孔隙度分布

Fig. 4 Porosity distribution of discrete micro-fractures

3 天然微裂缝对酸蚀蚓孔扩展规律的影响

基于双重尺度蚓孔扩展模型,采用同一个基质孔隙度分布物理场,通过耦合不同的微裂缝分布场,进行计算分析。选取的岩心为纯灰岩,宽度为4 cm,长度为10 cm,划分为80×200个网格。酸液体系选用常规盐酸体系,注入端为4 cm端,注入方向为垂直岩心表面,与注入方向平行的岩心端面封闭。基质孔隙度场采用符合正态分布的随机数生成,孔隙度平均值为0.2。表2为模拟中所使用的其他模拟参数。

通过控制单一变量法,基于同一基质孔隙度场,研究无裂缝存在及有裂缝存在的情况下,酸液突破岩心时蚓孔的扩展情况。

如图5、图6所示,基质孔隙度平均值为0.201,耦

表2 模拟参数
Table 2 Simulation parameters

参数名	数值	参数名	数值
岩石密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 710	反应速率常数/($m \cdot s^{-1}$)	2.0×10^{-3}
岩心平均孔隙度	0.2	扩散系数/($m^2 \cdot s^{-1}$)	3.6×10^{-9}
平均孔喉半径/m	1.0×10^{-6}	酸液黏度/($mPa \cdot s$)	1
平均比表面积/ m^{-1}	5 000	酸液密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1 080
酸液质量分数/%	20	酸溶解能力/($m^3 \cdot m^{-3}$)	1.372

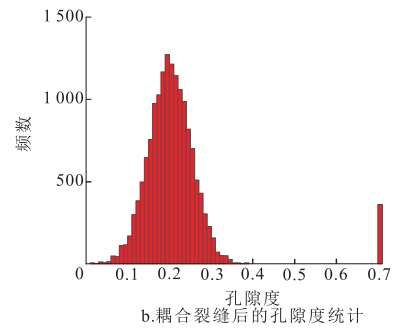
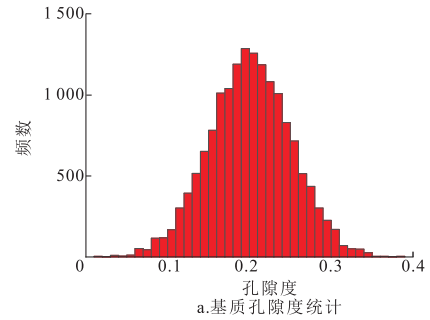


图5 孔隙度统计

Fig. 5 Histogram of porosity distribution

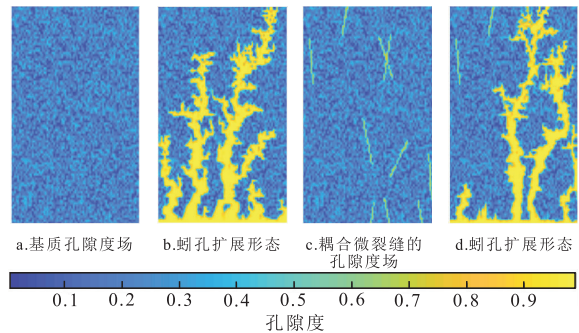


图6 微裂缝的存在对于蚓孔扩展形态的影响

Fig. 6 Effects of micro-fracture on wormhole propagation

合10条微裂缝场后孔隙度平均值为0.213。无裂缝时,酸液突破体积(PV_{BT})为1.822 6,存在10条微裂缝时,酸液突破体积(PV_{BT})为1.132。天然微裂缝场的存在,对整体孔隙度的影响很小,但其存在会减少注酸端面的溶蚀,降低酸液突破体积(PV_{BT}),能更高效地穿透岩心。

3.1 微裂缝方位角的影响

定义0°裂缝方位角为垂直于酸液注入方向。在

二维平面内,裂缝的方位角的研究范围为 0° 到 90° 。通过控制单一变量法,分别研究裂缝方位角为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 时的蚓孔生长情况。不同裂缝方位角条件下的酸液突破体积如图7所示。

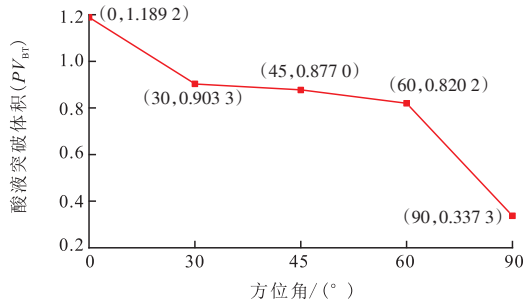


图7 微裂缝方位角与酸液突破体积 PV_{BT} 关系

Fig. 7 Relation between fracture azimuth and PV_{BT}

图8为不同微裂缝方位角情况下蚓孔扩展形态,由此可观察到,微裂缝的方位角对蚓孔的扩展有非常明显的影响。微裂缝的存在会降低 PV_{BT} 。微裂缝的方位角在 30° 至 60° 之间时,方位角对于蚓孔扩展影响较低,在低于 30° 及高于 60° 情况下,微裂缝方位角对蚓孔扩展影响明显。

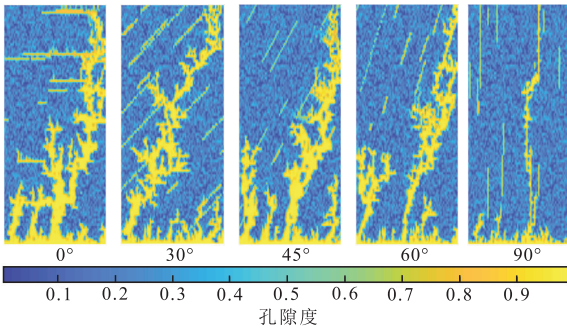


图8 不同微裂缝方位角情况下蚓孔扩展形态

Fig. 8 Wormhole propagation under different fracture azimuth

当微裂缝方位角为 0° 时,蚓孔的延伸过程受阻,酸液的穿透性差,形成分支多且宽的蚓孔。随着微裂缝的方位角增大,蚓孔形态逐渐趋于细长,使用更少的酸液可以获得穿透更远的蚓孔。当微裂缝的方位角为 90° 时,即酸液注入方向与天然裂缝平行时,酸液倾向于连续沟通天然裂缝进行穿透,蚓孔生长效率最高。

3.2 微裂缝面密度的影响

将同一基质孔隙度场与不同密度分布的微裂缝场进行耦合,进行蚓孔扩展求解分析。微裂缝条数与酸液突破体积 PV_{BT} 关系如图9所示。

不同裂缝密度情况下蚓孔扩展形态如图10所示。随着微裂缝密度的增大,蚓孔的生长整体呈现

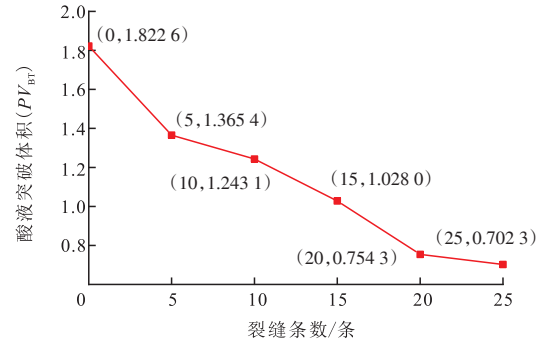


图9 裂缝条数与酸液突破体积(PV_{BT})关系

Fig. 9 Relation between number of fractures and PV_{BT}

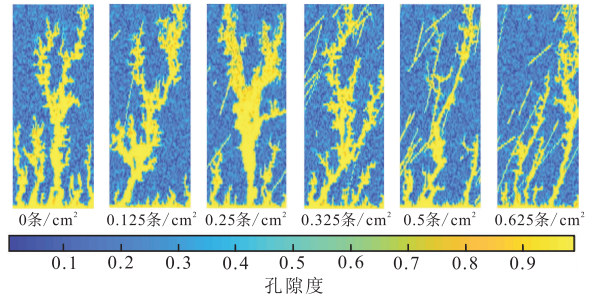


图10 不同微裂缝密度条件下蚓孔扩展形态

Fig. 10 Wormhole propagation under different number of fractures

出扩展速度增加,单条蚓孔形态变细,逐渐呈现出缝网形态的趋势。当存在5条微裂缝时,即微裂缝的面密度为 0.125 条/ cm^2 时,蚓孔的形态受到微裂缝网络的影响不是非常明显,但面密度不高的微裂缝会让酸液优先通过低阻力通道,从而迅速降低酸液突破体积(PV_{BT})。当存在20条微裂缝时,即微裂缝的面密度为 0.5 条/ cm^2 时,蚓孔的形态会极大的受到微裂缝网络的影响,形成类似于缝网的溶蚀。高密度的微裂缝会在基质空间内形成高渗通道网,蚓孔的生长会优先选择酸液注入方向,沿着裂缝生长,同时沟通微裂缝网络。

3.3 微裂缝迹长的影响

将同一基质孔隙度场与不同长度的微裂缝场耦合,进行蚓孔扩展求解分析。微裂缝迹长与酸液突破体积倍比如图11所示。

不同微裂缝迹长条件下蚓孔扩展形态如图12所示。微裂缝长度对酸蚀蚓孔形态的影响较为明显。当微裂缝长度小于 0.5 cm时,蚓孔的生长形态受到裂缝的影响较小,形成较为多分支且粗壮的蚓孔,蚓孔竞争现象较为明显。但裂缝的存在对蚓孔的生长仍然起了很大的促进作用,此时的酸液突破体积降低明显。当裂缝长度增至 1 cm时,蚓孔的扩展形态受到裂缝的影响开始明显,蚓孔会沟通部分裂缝,呈

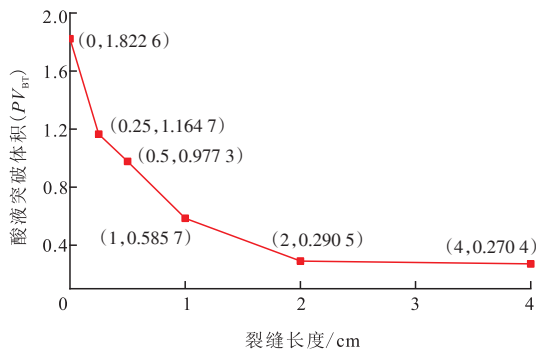


图 11 裂缝长度与酸液突破体积(PV_{BT})的关系

Fig. 11 Relation between micro-fractures length and PV_{BT}

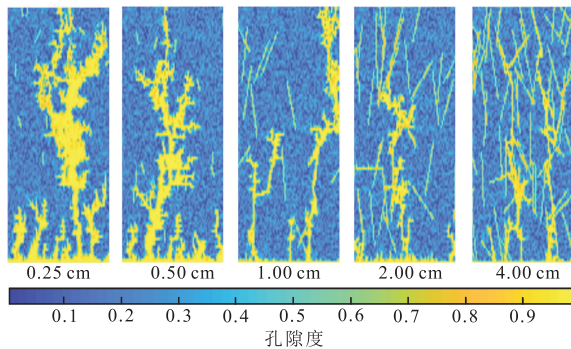


图 12 不同裂缝迹长条件下蚓孔扩展形态

Fig. 12 Wormhole propagation under different micro-fractures length

细长状;当裂缝长度增至 2 cm 后,酸液进入岩心形成类似网状溶蚀,蚓孔形态几乎完全受控于裂缝走势;当裂缝长度为 4 cm 时,酸液突破体积倍比下降非常缓慢,此时继续增加缝长对蚓孔扩展速度影响作用不明显,这说明裂缝在基质中形成了足够密度的“高渗通道”网络。

3.4 微裂缝连通性的影响

将同一基质孔隙度场与具有不同连通性的微裂缝场进行耦合,生成 A 岩心与 B 岩心,进行蚓孔扩展求解分析。A 岩心与 B 岩心的微裂缝密度、微裂缝长度分布一致。蚓孔扩展形态如图 13 所示。

微裂缝的相对连通性对蚓孔扩展形态影响同样明显。A 岩心的裂缝分布较为分散,裂缝之间的连通性差,无相交裂缝。B 岩心微裂缝分布相较于 A 岩心,微裂缝分布具有聚集性,有相交微裂缝。蚓孔生长初期,A、B 岩心都进行了一定的面溶蚀过程,随即在微裂缝存在的优势渗流空间形成主蚓孔。由于 A 岩心的微裂缝连通性及聚集性相对较差,蚓孔在竞争过程中难以沟通其他微裂缝,导致微裂缝对蚓孔生长过程贡献不大。B 岩心在蚓孔生长过程中,多次连通相邻微裂缝,增加岩心的导流能力。

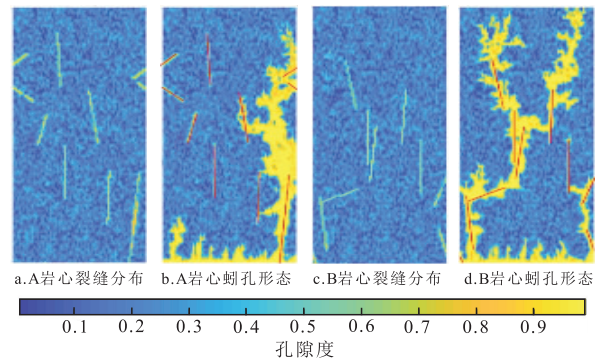


图 13 不同裂缝连通性条件下蚓孔扩展形态

Fig. 13 Wormhole propagation under different fracture connectivity

4 结论

天然微裂缝对于酸蚀蚓孔扩展规律作用明显,通过分析影响因素,得到以下结论:

1) 天然微裂缝的存在,会加快蚓孔的扩展速度,相同用酸量条件下酸液有效作用距离更长,对施工方案设计有重要的指导意义。

2) 裂缝发育方向与酸液流动方向的夹角在小于 30° 及大于 60° 情况下对于酸液突破体积的影响非常明显。

3) 微裂缝长度大于 2 cm 时对酸蚀蚓孔形态的影响较为明显,小于 0.5 cm 时,影响较小。

4) 微裂缝连通性越好,酸化后酸蚀蚓孔越发育,岩心的导流能力增加越明显。当微裂缝的密度大于 0.5 条/ cm^2 时,蚓孔的形态会极大的受到微裂缝网络的影响,蚓孔在扩展的同时会连通临近微裂缝,最终形成体积溶蚀。微裂缝密度越大时,酸化后岩心的渗透率改善越明显。

参考文献

- [1] 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(1): 59-66
- [2] GDANSKI R. A fundamentally new model of acid wormholing in carbonate[C]// paper SPE- 54719- MS presented at the SPE European Formation Damage Conference, 31 May-1 June 1999, The Hague, Netherlands.
- [3] FREDD C N, FOGLER H S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in carbonate porous media[J]. AIChE Journal, 1998, 44(9): 1933-1949.
- [4] KANG Q J, ZHANG D X, CHEN S Y, et al. Lattice Boltzmann simulation of chemical dissolution in porous media[J]. Physical Review E, 2002, 65(3): 1-8.
- [5] GOLFIER F, ZARCONI 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,

- 2001, 457: 213-254.
- [6] 李德同, 文世鹏. 储层构造裂缝的定量描述和预测方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(4): 6-10.
LI D T, WEN S P. Methods of quantitative description and prediction for structural fracture of subsurface reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1996, 20(4): 6-10.
- [7] 吕心瑞, 李红凯, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征——以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 813-821.
LYU X R, LI H K, WEI H H, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.
- [8] 刘遥, 荣元帅, 杨敏. 碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元储量精细分类评价[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 431-438.
LIU Y, RONG Y S, YANG M. Detailed classification and evaluation of reserves in fracture-cavity units for carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 431-438.
- [9] 金强, 田飞, 张宏方. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 272-279.
JIN Q, TIAN F, ZHANG H F. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 272-279.
- [10] 肖阳, 何文, 罗慎超, 等. 缝洞单元类型快速识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(6): 120-126.
XIAO Y, HE W, LUO S C, et al. A fast recognition method of fractured-vuggy unit type[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 120-126.
- [11] 李勇明, 郭建春, 赵金洲, 等. 裂缝性油藏酸液滤失模型研究[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26, (2): 50-53.
LI Y M, GUO J C, ZHAO J Z, et al. Study on acid leak-off in naturally-fractured reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(2): 50-53.
- [12] 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.
- [13] 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.
LIU M, ZHANG S C, MOU J Y. Dissolution pattern of radial wormhole model in carbonate acidizing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 106-110.
- [14] 牟建业, 李双明, 赵鑫, 等. 基于真实孔隙空间分布的酸蚀蚓孔扩展规律数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 40-46.
MOU J Y, LI S M, ZHAO X, et al. Modeling wormhole propagation behavior based on real pore spatial distributions[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(35): 40-46.
- [15] 罗源. 裂缝性碳酸盐岩酸化模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
LUO Y. Research on the simulation of acid stimulation in fissured carbonate reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [16] AKANNI O O, NASR-EL-DIN H A. Modeling of wormhole propagation during matrix acidizing of carbonate reservoirs by organic acids and chelating agents[C]// paper SPE-181348-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-28 September 2016, Dubai, UAE.
- [17] 李勇明, 廖毅, 彭瑀, 等. 非均质碳酸盐岩水平井酸化数值模拟与分析[J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(4): 53-58.
LI Y M, LIAO Y, PENG Y, et al. Numerical stimulation and analysis of horizontal well acidizing in heterogeneous carbonate rocks[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(4): 53-58.
- [18] 薛衡, 赵立强, 刘平礼, 等. 碳酸盐岩多尺度三维酸蚀蚓孔立体延伸动态模拟[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 792-798.
XUE H, ZHAO L Q, LIU P L, et al. Dynamic simulation of 3-D multiple-scale wormhole propagation in carbonate rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 792-798.
- [19] 乐宏, 刘飞, 薛衡, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组气藏转向酸化模拟及其应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(10): 46-53.
YUE H, LIU F, XUE H, et al. Numerical simulation and field application of diverting acid acidizing in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(10): 46-53.
- [20] QIN G, CHEN R, GONG B, et al. Data-driven Monte Carlo simulations in estimating the stimulated reservoir volume (SRV) hydraulic fracturing treatments[C]// paper SPE-154537-MS presented at the SPE Europec/EAGE Annual Conference, 4-7 June 2012, Copenhagen, Denmark.
- [21] 杨坚, 吕心瑞, 李江龙, 等. 裂缝性油藏离散裂缝网络随机生成及数值模拟[J]. 油气地质与采收率, 2011(6): 74-77.
YANG J, LYU X R, LI J L, et al. Study on discrete fracture network random generation and numerical simulation of fractured reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 74-77.
- [22] 薛衡, 黄祖熹, 赵立强, 等. 碳酸盐岩水平井酸化模式及工艺参数优化研究[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(3): 66-72.
XUE H, HUANG Z X, ZHAO L Q, et al. Optimization study on horizontal well acidizing modes and injection parameters in carbonate reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(3): 66-72.
- [23] 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.
- [24] CIVAN F. Scale effect on porosity and permeability: Kinetics, model, and correlation[J]. AIChE Journal, 2001, 47(2): 271-287.
- [25] 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): 1269-1286.
- [26] LI M, TANG Y B, BERNABE Y, et al. Pore connectivity, electrical conductivity, and partial water saturation: Network simulations[J]. Journal of Geophysical Research. Solid Earth, 2015, 120(6): 4055-4068.

(编辑 常燕)