

引用格式:杨兆中,邓庄,于梦男,等.碳酸盐岩基质酸化蚓孔生长机理实验研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):24-29.

YANG Z Z, DENG Z, YU M N, et al. Experimental research on growth mechanism of acid wormhole in carbonate matrix[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 24-29.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.004

碳酸盐岩基质酸化蚓孔生长机理实验研究

杨兆中¹, 邓庄², 于梦男³, 李小刚¹, 何睿¹, 黄河²

(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.中国石油西南油气田公司川中油气矿,四川遂宁629000;3.中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁盘锦124010)

摘要:基质酸化是碳酸盐岩增产改造的重要措施之一,酸蚀蚓孔的形成规律及其影响因素研究是碳酸盐岩基质酸化的基础理论问题。设计了考虑酸液浓度、反应温度以及注酸排量三个影响因素的正交实验方案,并对取自A油田某碳酸盐岩储层的岩心进行酸液驱替实验,以分形维数及多重分形谱宽度为表征参数研究了各因素对酸蚀蚓孔形态的影响规律。优化目标是在获得最大分形维数的同时,尽量保证多重分形谱宽度最小。研究得出,在因素水平取值范围内,最优蚓孔形态对应的实验参数组合为:酸液浓度20%,温度50~70℃,注酸排量2 cm³/min。各因素对分形维数及多重分形谱宽度影响程度从大到小依次为:注酸排量、酸液浓度及反应温度。设计基质酸化施工参数时应当着重考虑注酸排量的优化。

关键词:碳酸盐岩; 蚓孔; 驱替实验; X光扫描; 分形

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Experimental research on growth mechanism of acid wormhole in carbonate matrix

YANG Zhaozhong¹, DENG Zhuang², YU Mengnan³, LI Xiaogang¹, HE Rui¹, HUANG He²

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Middle Sichuan Oil and gas Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Suining, Sichuan 629000, China; 3.Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: Matrix acidification is one of the important measures for the stimulation of carbonate reservoirs. The studies on its formation regularity and influencing factors of acid wormhole are the basic theories of carbonate matrix acidification. An orthogonal experimental scheme considering three factors of acid injection rate, acid concentration and reaction temperature was designed. Acid displacement experiments were carried out on the cores taken from a carbonate reservoir in oilfield A. The influence of the factors on wormhole shape was studied by fractal dimension and multi-fractal spectrum width used as the target parameters. The optimization goal is to try to ensure the minimum width of multifractal spectrum while obtaining the maximum fractal dimension. The results showed that in the range of factor values, the optimal combination of experimental parameters for wormhole shape was when the acid concentration was 20%, the temperature was 50~70 °C, and the acid injection rate was 2 cm³/min. The factors affecting the fractal dimension and multi-fractal spectrum width were in a descending order as: acid injection rate, acid concentration and reaction temperature. Therefore, the optimization of the acid injection displacement should be emphasized in the design of the construction parameters of carbonate matrix acidification.

Key words: carbonate rock, wormhole, core flow test, X-Ray scan, fractal

基质酸化是碳酸盐岩油气藏增产改造的重要措施之一^[1-2],酸液与碳酸盐岩矿物能够充分发生反应,溶蚀并沟通天然裂缝系统,从而大幅提高油气产能。碳酸盐岩储层非均质性较强,因此当酸液注入

储层后会形成形状类似蚯蚓的不规则孔道,称为“酸蚀蚓孔”^[3-4]。酸蚀蚓孔的形态和空间展布将影响近井筒地带流体的流动特征,并直接影响酸化效果。酸蚀蚓孔生长及其形态的确定,是碳酸盐岩增产领

收稿日期:2019-04-10。

第一作者简介:杨兆中(1969—),男,博士,教授,从事低渗透油气藏增产改造与油气藏数值模拟研究。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: yzyc1@vip.sina.com

基金项目:国家自然科学基金“碳酸盐岩基质酸化中蚓孔生长的三维扩散限制凝聚模型研究”(51204138)。

域研究的重要基础问题。

物理模拟是研究基质酸化酸蚀蚓孔形态的重要手段,梳理了近几十年来在物理模拟方面的研究进展。物理模拟以岩心流动实验(驱替实验)为主,LUND等^[5]较早通过岩心流动实验分析了酸液在灰岩和白云岩中的流动状态;DACCORD^[6]通过实验观测到酸蚀蚓孔具有分形特征;FRICK等^[7]首次将CT成像技术引入蚓孔研究领域;MOSTOFIZADEH等^[8]首次指出酸岩反应中可能出现的多种溶蚀形态,包括:面部溶蚀、锥形蚓孔(或主蚓孔)、分枝蚓孔和均匀溶蚀(或分散型溶蚀);FREDD及FOGLER^[9]探索了不同酸液体系、岩性、温度等条件下最优排量与酸突破孔隙体积倍数之间的关系;何春明等^[10]通过改变注入排量、反应温度及酸液类型发现,致密碳酸盐岩储层基质酸化形成蚓孔的可能性较小,主要产生均匀溶蚀;张合文^[11]结合岩心驱替及CT扫描实验,得出酸蚀蚓孔溶蚀模式以主蚓孔和均匀溶蚀为主,最优排量的分形维数大约在1.6~1.67。综上所述,之前的研究还未充分揭示基质酸化室内驱替实验参数与现场施工参数之间的转化关系,且鲜有利用正交实验手段来研究多因素对于酸蚀蚓孔生长形态的影响。

基于相似准则建立了基质酸化注酸排量室内实验值与现场施工参数的转换关系,基于正交实验理论进行了考虑酸液浓度、反应温度以及注酸排量的三因素三水平实验,并将医学X光扫描技术应用到蚓孔形态观测,以分形维数和多重分形谱宽度为表征参数分析了影响基质酸化酸蚀蚓孔生长形态的主控因素。

1 蚓孔生长影响因素

最理想的碳酸盐岩基质酸化效果是使用最少的酸液实现最佳的蚓孔穿透效果^[12]。涂洁^[13]提出可以通过对注酸排量进行优化,以实现在提高酸液利用效率的同时改善酸液穿透效果。事实上,影响蚓孔生长效果的因素较多,不能只考虑排量的影响,还需综合考虑其他因素。可将影响酸蚀蚓孔生长形态的因素分为地层因素和工程因素,地层因素包括孔渗非均质性、矿物组分、矿物分布等,工程因素包括注酸排量(速度)、酸液类型、酸液浓度、反应温度等。现场一般使用盐酸对碳酸盐岩进行改造,因此实验中将酸液类型定为盐酸,另外,选择物性相近的岩心进行实验,可排除地层性质的影响。着重考察注酸排量、酸液浓度以及酸岩反应温度三个因素对基质酸化酸蚀蚓孔生长形态的共同影响。

2 实验方案

2.1 实验岩心

采用岩心流动实验装置展开岩心盐酸驱替实验。为排除岩样差异对实验结果的干扰,选取来自伊拉克A油田碳酸盐岩储层A-13井某层位的9块物性相近的岩心,孔渗测试结果见表1。可以看出,孔隙度为0.217~0.242,渗透率为 $(18.0\sim 21.4)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。另外,对岩心进行了XRD矿物成分检测,结果显示,目的层的方解石(CaCO_3)含量占95%以上,并含极少量的石英、黏土及黄铁矿。

表1 实验岩心气测孔隙度及渗透率

Table 1 Porosity and permeability of experimental cores by gas logging

岩心编号	直径/mm	长度/mm	孔隙度	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
1-1	25.1	30.2	0.233	19.5
1-2	25.0	30.0	0.217	21.1
1-3	25.0	30.4	0.221	21.2
1-4	24.9	29.8	0.223	20.4
1-5	25.0	29.8	0.219	21.4
1-6	24.8	30.1	0.242	18.0
1-7	25.0	30.3	0.240	18.5
1-8	24.9	30.3	0.239	18.3
1-9	25.1	30.5	0.226	20.5

2.2 正交实验设计

正交实验设计是从全面实验中挑选出有代表性的点进行实验,这些点具有“均匀分散,齐整可比”的特点^[14],从而实现只需要较少的实验次数得出近似的规律结果。

2.2.1 因素及水平

根据前文分析,选择酸液浓度、反应温度(实验温度)以及注酸排量三个不具有交互性的因素,每个因素对应3个水平,根据正交实验原理,只需要完成9次实验就可以近似达到27次实验相同的效果。实验因素及水平的选择依据如下:

1) 酸液浓度

现场基质酸化施工常用的盐酸浓度为15%~20%,酸液浓度现场值与实验值一致,同时为考虑低浓度酸液对蚓孔生长规律的影响,最终确定酸液浓度的水平分别为:10%、15%、20%。

2) 反应温度

考虑酸液驱替实验的实验温度与现场施工实际酸岩反应温度一致。BAZIN等^[15]研究得出,酸岩反应

温度为20~90℃时,温度对蚓孔穿透效果影响较为明显。再考虑到本文研究的目的层位储层温度为70℃,最终确定反应温度的水平分别为:50℃、70℃、90℃。

3) 驱替注酸排量

酸液在岩心中的流动具有运动相似和几何相似,对现场注酸排量和实验室注酸排量进行参数转化^[6],可以依据注酸速率相等来推导。

驱替实验中注酸速率表示为:

$$V_a = \frac{Q_a}{A_a} = \frac{4Q_a}{\varphi_a \pi D^2} \quad (1)$$

式中: V_a 为实验室注酸速率,cm/min; Q_a 为实验室注酸排量,cm³/min; A_a 为岩心渗流截面积,cm²; φ_a 为岩心孔隙度; D 为岩心直径,cm。

现场注酸速率表示为:

$$V_c = \frac{Q_c}{A_c} = \frac{Q_c}{2\varphi_c \pi R_w H} = \frac{q_c}{2\varphi_c \pi R_w t} \quad (2)$$

式中: V_c 为现场注酸速率,m/min; Q_c 为现场注酸排量,m³/min; q_c 为储层用酸强度,m³/m; φ_c 为储层孔隙度; R_w 为井筒半径,m; H 为储层厚度,m; t 为注酸施工时间,min。

令驱替实验注酸速率等于现场注酸速率,岩心孔隙度与储层孔隙度相等,经单位转换后,联立式(1)和式(2)可依据现场施工参数转换得到实验室注酸排量:

$$Q_a = \frac{25q_c D^2}{2R_w t} \quad (3)$$

根据现场实践经验,每米用酸强度 q_c 一般为0.3~0.5 m³/m,其他参数取值如下: $D=2.5$ cm, $R_w=0.1$ m,施工时间3 h($t=180$ min)。由式(3)可以计算得到,实验室注酸排量为1.3~2.2 cm³/min。考虑到低注酸速率对蚓孔的影响,最终确定实验注酸排量的水平分别为:0.5 cm³/min、1.0 cm³/min、2.0 cm³/min。

正交实验考察的因素及水平见表2,制定注酸岩心驱替实验的正交实验方案,见表3。

2.2.2 表征参数

之前采用了不同的参数来描述酸蚀蚓孔的生长效果,包括主蚓孔长度、主蚓孔宽度、突破孔隙体积数、蚓孔分支数、分形维数、多重分形谱宽度等。而

表2 正交实验考察的因素及水平

序号	酸液浓度/%	反应温度/℃	注酸排量/(cm ³ ·min ⁻¹)
水平1	20	90	2.0
水平2	15	70	1.0
水平3	10	50	0.5

表3 正交实验方案设计

岩心编号	酸液浓度/%	反应温度/℃	注酸排量/(cm ³ ·min ⁻¹)
1-1	15	70	2.0
1-2	10	90	1.0
1-3	15	90	0.5
1-4	10	50	2.0
1-5	20	50	0.5
1-6	10	70	0.5
1-7	20	90	2.0
1-8	15	50	1.0
1-9	20	70	1.0

随着实验分析技术的发展,越来越多的学者倾向于使用分形理论,该方法具有独特的优势,既能描述蚓孔的发育特征,又能表征蚓孔的不规则程度^[17]。

1) 分形维数

分形维数能够表征蚓孔在岩心空间中分布的程度以及其复杂性、无序性。分形维数越大,酸蚀蚓孔越发育(空间充填程度越高),分布越复杂。计盒维数是获取分形维数的一种常用的方法(图1),其原理为针对二值化的二维酸蚀蚓孔图像,采用二分法将网格从大到小逐步进行划分,查看覆盖蚓孔的网格数目的变化,从而计算出计盒维数:

$$D = -\frac{\ln N_{\delta_k}}{\ln \delta_k} \quad (4)$$

式中: D 为酸蚀蚓孔计盒维数; k 为第 k 步网格划分; δ_k 为第 k 步单元网格长度; N_{δ_k} 为第 k 步单元网格覆盖裂缝轮廓线的盒子个数。

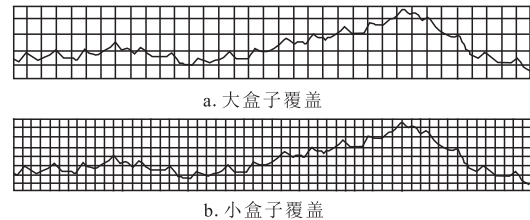


图1 计盒维数法覆盖裂缝轮廓^[18]

Fig. 1 Contours of fractures covered by box-counting dimension method

网格尺寸越小,计盒维数越接近真实的分形维数,故酸蚀蚓孔的分形维数可由下式计算:

$$D_B = \lim_{k \rightarrow \infty} -\frac{\ln N_{\delta_k}}{\ln \delta_k} \quad (5)$$

实际上,不可能将网格无限划分,只能划分尽可能多的次数,故一般通过曲线拟合的方法求得分形维数,通过做出 N_{δ_k} 与 δ_k 的双对数散点图,拟合得到曲线的斜率负数即为酸蚀蚓孔的分形维数。

2) 多重分形谱宽度

多重分形也称为“多标度分形”,描述多重分形的参数为奇异谱 $f(\alpha)$, α 表示分形体小区域内的奇异指数,不同奇异指数所组成的无穷序列构成不同的奇异谱,二者的关系曲线称为多重分形谱。多重分形谱是分形理论中的一个重要参数,不仅可以表示子矩阵中是否含有像素点,且可表示每个子矩阵中像素点的数量。因此多重分形谱的细节信息比分形维数更加丰富。多重分形谱宽度代表最大奇异指数与最小奇异指数的差值,该参数可以较好地表征研究对象在整个分形集团中的不均匀程度^[13]。即多重分形谱宽度越大,岩心中蚓孔形态的不均匀程度越大,这时蚓孔主要以多分支状存在,酸液滤失较大,主蚓孔未能充分生长。

各子矩阵中含有像素点的单元占像素点总单元数的概率测度:

$$P_i(\delta_k) = \frac{N_i(\delta_k)}{\sum_{i=1}^n N_i(\delta_k)} \quad (6)$$

奇异指数表示为:

$$\alpha_i = \lim_{\delta_k \rightarrow 0} \frac{\ln(P_i(\delta_k))}{\ln(\delta_k/l)} \quad (7)$$

其中: $l = \min\{\text{像素矩阵行数}, \text{像素矩阵列数}\}$ 。

奇异指数为 α_i 对应的分形维数:

$$f(\alpha_i) = \lim_{\delta_k \rightarrow 0} \frac{\ln(N_{\alpha_i}(\delta_k))}{-\ln(\delta_k/l)} \quad (8)$$

多重分形谱宽度:

$$W_q = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \quad (9)$$

式中: α_{\max} 为最大奇异指数; α_{\min} 为最小奇异指数。

3 蚓孔形态特征分析

为进一步分析岩心内部酸蚀蚓孔形态,对驱替实验结束后的岩心采用医学X光进行扫描,获得蚓孔发育形态的黑白图^[9],结果见图2所示。可见酸液

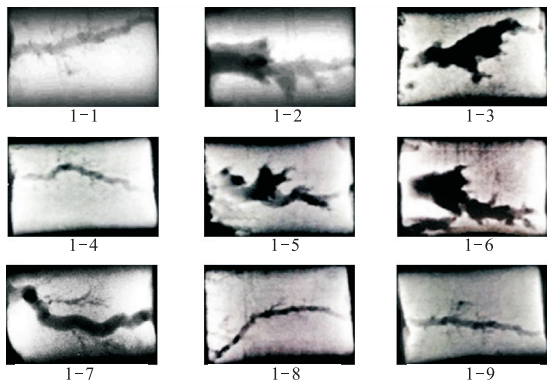


图2 实验岩心X光扫描

Fig. 2 X-ray scan of experimental cores

驱替实验后基本上都形成了酸蚀蚓孔,但是蚓孔的发育及分布情况各异。为进一步对最终酸蚀蚓孔形态进行表征,根据分形理论,利用计盒维数法^[20]来计算酸蚀蚓孔的分形维数和多重分形谱宽度(式4~式9),结果见表4。一般来讲,分形维数越大,多重分形谱宽度越小,对应的酸蚀蚓孔形态更佳。

表4 计算得到的分形维数和多重分形谱宽度
Table 4 Calculated fractal dimension and multi-fractal spectrum width

岩心 编号	酸液 浓度/%	反应温 度/°C	注酸排量/ (cm ³ ·min ⁻¹)	表征参数	
				分形维数	多重分形谱宽度
1-1	15	70	2.0	1.294	0.495
1-2	10	90	1.0	1.215	0.563
1-3	15	90	0.5	1.116	0.592
1-4	10	50	2.0	1.325	0.517
1-5	20	50	0.5	1.267	0.514
1-6	10	70	0.5	1.203	0.582
1-7	20	90	2.0	1.312	0.516
1-8	15	50	1.0	1.277	0.489
1-9	20	70	1.0	1.381	0.471

3.1 分形维数

由表4可知,酸蚀蚓孔的分形维数为1.116~1.381。对各因素、各水平对应的分形维数求取平均值,可做出分形维数直观分析表,见图3。可以看出,随着排量增加,分形维数增加,即蚓孔在岩心中越发育;随着反应温度增加,分形维数先增大后减小,分析认为,这是因为高温虽然提高了酸岩反应能力,但酸液大部分消耗在蚓孔表面,并没有形成较好的穿透效果;随着酸液浓度增加,分形维数先减小后增大,这说明酸浓度要足够高才能够获取最优的蚓孔充填效果。

根据正交实验理论,最大分形维数对应的参数组合为:酸液浓度20%、反应温度70℃、注酸排量2 cm³/min。此外,可以求得各因素的分形维数极差大小,见图4。由于极差大小决定因素对优化目标的

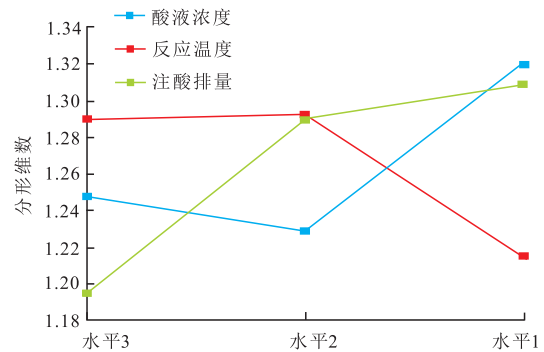


图3 分形维数直观分析曲线

Fig. 3 Intuitionistic analysis curves of fractal dimension

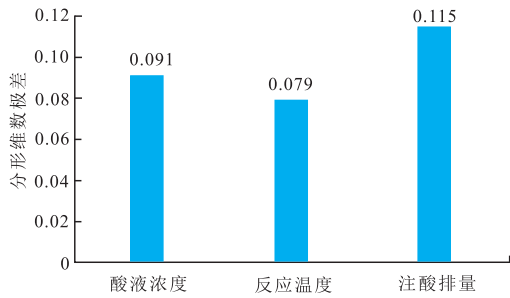


图4 各因素分形维数极差分析

Fig. 4 Range analysis of fractal dimension of each factor

影响程度,由此可知各因素对分形维数影响程度从大到小依次为:注酸排量、酸液浓度以及反应温度。

3.2 多重分形谱宽度

从表4可以看出,酸蚀蚓孔的多重分形谱宽度值为0.471~0.592。对各因素、各水平对应的多重分形谱宽度求取平均值,可做出多重分形谱宽度直观分析表,见图5。可以看出,随着排量增加,多重分形谱宽度值呈降低趋势,即酸蚀蚓孔的非均匀程度越低,这是因为排量越大,蚓孔穿透效率越高,不易产生分支蚓孔,有利于主蚓孔扩展;随着酸液浓度增加,多重分形谱宽度值呈直线下降,这是由于酸液大量溶蚀蚓孔壁面,阻碍了酸液沿其他路径的流动。随着反应温度增加,多重分形谱宽度值增大,即酸蚀蚓孔分支缝数量增加,这与FREDD等^[21]的研究结论不同。主要由于温度受到排量的影响,如岩心1-2和1-3,实验排量分别为0.5 cm³/min、1 cm³/min,在这种较低排量下,酸液未能穿透岩石,加上目标区块碳酸盐岩非均质性较强,促使了分支蚓孔的产生。

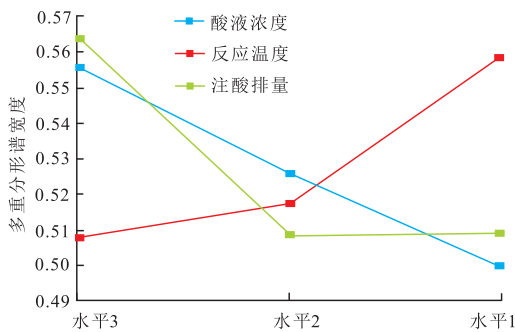


图5 多重分形谱宽度直观分析曲线

Fig. 5 Intuitionistic analysis curves of multi-fractal spectrum width

根据正交实验理论,最小多重分形谱宽度对应的参数组合为:酸液浓度20%、反应温度50℃、注酸排量1~2 cm³/min。此外,可以求得各因素的多重分形谱宽度极差大小,见图6。由此可知各因素对多重分形谱宽度影响程度从大到小依次为:注酸排量、酸

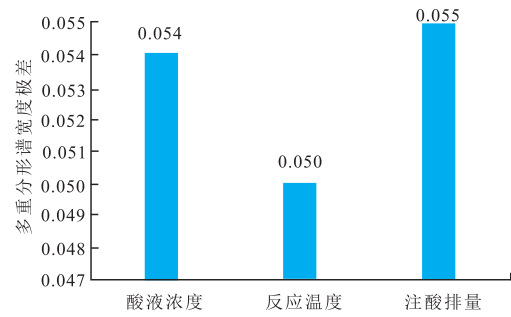


图6 各因素多重分形谱宽度极差分析

Fig. 6 Range analysis of multi-fractal spectrum width

液浓度以及反应温度,与对分形维数的影响规律一致。因此,现场施工优化时因首先着重考虑注酸排量的优化,以获得最优的酸蚀蚓孔形态。

综合以上分析结果,在因素水平取值范围内,最优酸蚀蚓孔形态对应的实验参数组合为:酸液浓度20%,温度50~70℃,注酸排量2 cm³/min。推广来讲,要获得更优的酸蚀蚓孔形态,需要较高浓度酸液、中等反应温度以及较高的注酸排量。事实上,反应温度会受到排量的影响,储层温度条件下(70℃),通过较高排量注入酸液,在一定程度上会降低井筒附近的温度,但通常情况下温度不会骤降至50℃以下,因此在一定程度上提升注液排量有利于获得较好的蚓孔形态。当然,随着水平梯度的改变,实验结果可能会有不同,但以上实验研究得出的变化趋势是值得借鉴的。在实验条件允许的情况下,可扩大因素水平取值范围,增加实验组数,从而获得更为准确的结果。

4 结论

1) 基质酸化是碳酸盐岩增产改造的重要措施,酸液注入过程中会产生酸蚀蚓孔,其生长形态会直接关系到储层改造效果。为得到最佳的蚓孔穿透效果,需要综合考虑多方面因素的影响对工程参数进行优化。

2) 选取酸液浓度、反应温度和注酸排量三个因素作为考察对象,设计并完成了三因素三水平的正交实验。采用X光对驱替后的岩心进行扫描,基于分形理论,以分形维数和多重分形谱宽度为表征参数对蚓孔生长发育特征进行描述。

3) 在因素水平取值范围内,最优酸蚀蚓孔形态对应的实验参数组合为:酸液浓度20%,温度50~70℃,注酸排量2 cm³/min。推广来讲,要获得更优的酸蚀蚓孔形态,需要较高浓度酸液、中等反应温度以及较高的注酸排量。各因素对分形维数及多重分形谱宽

度影响程度从大到小依次为:注酸排量、酸液浓度以及反应温度,故在基质酸化施工设计时应当着重考虑注酸排量的优化。

参考文献

- [1] 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. Numerical stimulation and analysis of horizontal well acidizing in heterogeneous carbonate rocks[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(4): 53-58.
- [2] 赵立强,高俞佳,袁学芳,等.高温碳酸盐岩储层酸蚀裂缝导流能力研究[J].油气藏评价与开发,2017,7(1):20-26.
ZHAO L Q, GAO Y J, YUAN X F, et al. Research on flow conductivity of acid etched fracture of carbonate reservoir under high temperature[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(1): 20-26.
- [3] 柳明,张士诚,牟建业.酸蚀蚓孔的分形性和酸液类型对蚓孔的影响[J].石油勘探与开发,2012,39(5):591-596.
LIU M, ZHANG S C, MOU J Y. Fractal nature of acid-etched wormholes and the influence of acid type on wormholes[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 591-596.
- [4] 李小刚,陈雨松,邓庄,等.碳酸盐岩基质酸化中酸蚀蚓孔模拟回顾与展望[J].新疆石油地质,2017,38(4):492-497.
LI X G, CHEN Y S, DENG Z, et al. Review and prospect of acid wormhole modeling during matrix acidizing in carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 492-497.
- [5] LUND K, FOGLER H S, MCCUNE C C, et al. Acidization—II. The dissolution of calcite in hydrochloric acid[J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(8): 825-835.
- [6] DACCORD G. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(5): 479-482.
- [7] FRICK T P, MOSTOFIZADEH B, ECONOMIDES M J. Analysis of radial core experiments for hydrochloric acid interaction with limestones[C]// paper SPE-27402-MS presented at the SPE Formation Damage Control Symposium, 7-10 February 1994, Lafayette, Louisiana, USA.
- [8] MOSTOFIZADEH B, ECONOMIDES M J. Optimum injection rate from radial acidizing experiments[C]// paper SPE-28547-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September 1994, New Orleans, Louisiana, USA.
- [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] 何春明,郭建春,王文耀,等.致密碳酸盐岩酸蚀蚓孔研究[J].断块油气田,2010,17(2):235-238.
HE C M, GUO J C, WANG W Y, et al. Study on acidizing wormhole of tight carbonate reservoir[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2010, 17(2): 235-238.
- [11] 张合文.碳酸盐岩酸蚀蚓孔实验模拟及分形模型研究[D].廊坊:中国科学院大学,2015.
ZHANG H W. Experimental simulation and fractal model study on acid-etched pore of carbonate rock[D]. Langfang: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [12] 齐宁,李柏杨,方明君,等.基于碳酸盐岩酸化溶蚀形态的酸液最优注入速度界限[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):117-122.
QI N, LI B Y, FANG M J, et al. Injection rate optimization for acidizing process of carbonate rocks based on dissolution morphology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science): 2017, 41(5): 117-122.
- [13] 涂洁.碳酸盐岩基质酸化中酸蚀蚓孔三维扩散限制凝聚模拟研究[D].成都:西南石油大学,2013.
TU J. Study on 3D diffusion constriction coagulation simulation of acid-etched wormholes in carbonate matrix acidification[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [14] 彭鹏,杨兆中,梅永贵,等.煤层气体体积压裂施工参数优化[J].油气藏评价与开发,2015,5(6):68-72.
PENG P, YANG Z Z, MEI Y G, et al. Construction parameter optimization of coalbed methane volume fracturing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(6): 68-72.
- [15] BAZIN B, ROQUE C, BOUTECA M. A laboratory evaluation of acid propagation in relation to acid fracturing: Results and interpretation[C]// paper SPE-30085-MS presented at the SPE European Formation Damage Conference, 15-16 May 1995, Hague, the Netherlands.
- [16] 敖坤,刘月田,秦冬雨.微裂缝岩心不同应力下的速敏效应[J].东北石油大学学报,2010,34(6):64-67.
AO K, LIU Y T, QIN D Y. Speed sensitive effect on micro fracture rocks under different stress[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(6): 64-67.
- [17] 张合文,邹洪岚,鄢雪梅,等.碳酸盐岩酸蚀蚓孔分形模型及酸化参数优化[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(2):105-110.
ZHANG H W, ZOU H L, YAN X M, et al. Fractal model of carbonate acidized wormhole and acidizing parameter optimization[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(2): 105-110.
- [18] 刘鹏.砂砾岩水压致裂机理的实验与数值模拟研究[D].北京:中国矿业大学,2017.
LIU P. Experimental and numerical simulation study on hydraulic fracturing mechanism of gravel sandstone[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.
- [19] SAFARI A, DOWLATABAD M M, HASSANI A, et al. Numerical simulation and X-ray imaging validation of wormhole propagation during acid core-flood experiments in a carbonate gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 30: 539-547.
- [20] SUI L L, JU Y, YANG Y M, et al. A quantification method for shale fracability based on analytic hierarchy process[J]. Energy, 2016, 115(1): 637-645.
- [21] FREDD C, FOGLER H. Influence of transport and reaction on wormhole formation in carbonate porous media[J]. AIChE Journal, 1998, 44(9): 1933-1949.

(编辑 黄颖)