

文章编号:1000-4092(2021)02-240-07

酸岩反应非均匀刻蚀程度的精细定量表征 及其敏感性因素分析*

程利民¹, 梁玉凯¹, 袁辉¹, 齐宁², 李艺恬³

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;
3. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120)

摘要:酸压是碳酸盐岩油气藏常用的增产措施之一, 裂缝壁面的非均匀刻蚀程度对酸压后导流能力以及最终增产效果有着至关重要的影响, 为实现酸蚀裂缝壁面刻蚀形态精细定量描述, 引入非均匀刻蚀系数来表征非均匀刻蚀程度。首先采用三维激光扫描仪获取酸岩反应前后岩心切片的点云数据, 利用软件 Geomagic 和 Matlab 处理点云数据并计算表面形貌特性参数(在水平方向上选取扩展界面系数, 垂直方向上选取酸蚀高度标准差系数), 取权重相加求得非均匀刻蚀系数。非均匀刻蚀程度越高, 非均匀刻蚀系数越大。综合考虑不同因素对非均匀刻蚀系数的影响, 利用参数敏感性分析对影响因素进行重要程度排序, 得出主次影响因素的关系: 酸液浓度(59.94%) > 白云质含量(19.78%) > 转速(14.08%) > 温度(6.19%)。非均匀刻蚀系数的提出为精细定量表征酸蚀裂缝非均匀刻蚀程度提供了可能, 也为酸压设计指明了优化方向。图29参16

关键词: 三维激光扫描; 非均匀刻蚀系数; 酸压; 敏感性分析; 定量表征

中图分类号: TE357.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.02.009

0 前言

酸压是碳酸盐岩油气藏储层改造的一项重要增产措施。酸液被挤入储层后, 在储层内形成具有一定导流能力的裂缝。如果不是非均匀刻蚀, 停泵会造成裂缝闭合, 导流能力下降, 所以评价酸压措施成功与否的标准之一是能否在裂缝壁面形成非均匀刻蚀。尽管非均匀刻蚀对导流能力的提高至关重要, 但对非均匀刻蚀程度定量描述尚不能令人满意。

Ruffet 等^[1]使用接触式表面轮廓测量仪对裂缝

壁面进行了形貌描述, 但未形成完整的裂缝壁面三维图像。Gong 等^[2]采用光学成像技术描述裂缝壁面形貌, 避免了机械探针对表面形貌的损害。王德辰^[3]用伍德合金铸体法获得裂缝壁面直观形貌。郭静等^[4]通过实验发现酸蚀裂缝导流能力影响因素主次关系为: 缝宽 > 酸浓度 > 温度 > 排量, 并对酸蚀岩面形态作了简单分类, 说明了酸蚀类型也是影响导流能力的因素之一。赵仕俊等^[5]首次研制了酸刻蚀岩板三维激光扫描仪, 能形成酸刻蚀岩样壁面的点云数据重建效果图, 但不具备分析功能。Neumann^[6]使用 Rolland LPX-600 三维激光扫描仪扫描

* 收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-06-19。

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司重大科技项目“南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究”课题 1“南海西部在生产油气田提高采收率技术研究”(项目编号 CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ 01 ZJ), 国家自然科学基金“纳米 SiO₂ 改性树脂防砂体多尺度界面变形及防砂失效机理研究”(项目编号 51874336)。

作者简介: 程利民(1988—), 男, 工程师, 中国石油大学(华东)油气田开发工程硕士(2014), 主要从事采油工艺技术研究工作; 通讯地址: 524057 广东省湛江市坡头区南油二区商业楼附楼, 电话: 0759-3911351, E-mail: chenglm4@cnooc.com.cn。齐宁(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 本文通讯联系人, 中国石油大学(华东)油气田开发工程专业工学博士(2007), 主要从事采油工程及油田化学方面的教学与研究, 通讯地址: 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, E-mail: qining@upc.edu.cn。

岩样端面, 绘制了酸蚀裂缝的三维图像, 仅用线性粗糙度评价非均匀刻蚀程度。同时, 学者们没有用实验系统分析验证各个因素对裂缝壁面非均匀刻蚀程度影响的相关规律, 比如说地质因素(白云质含量)、酸液性能(浓度)、地质特征(温度)及施工参数(转速)^[7-9]。本文精细定量描述了非均匀刻蚀程度, 主要包括提取酸蚀前后岩心点云数据, 叠加数字化处理酸蚀前后模型, 计算表面形貌特性参数, 计算非均匀刻蚀系数, 引入了非均匀刻蚀系数的概念, 综合考虑水平方向和垂直方向的表面特性参数计算该系数, 并对该系数进行参数敏感性分析, 为优化酸压工艺设计提供指导作用。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

盐酸、氢氧化钠, 国药集团化学试剂有限公司; 去离子水, 自制; 实验用岩心为中区块探井取心岩石切割打磨而成的岩心切片, 尺寸 $\phi 2.54 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。

EinScan Pro 2X Plus 型三维激光扫描仪, 杭州先临三维科技股份有限公司; SYF-3 型酸岩反应旋转岩盘仪, 江苏海安石油科研仪器厂。

1.2 实验方法

(1) 岩心端面点云数据测定

①将岩心切片放入烘箱中烘干(80 °C, 12 h), 取出并使用三维激光扫描仪获取岩心切片的点云数据; ②考虑研究区块常用的酸液浓度, 分别配制 300 mL 的质量分数分别为 5%、10%、15% 和 20% 的盐酸溶液用于酸岩反应; ③使用酸岩反应旋转岩盘仪, 分别在不同酸液质量分数(5%、10%、15% 和 20%)、不同反应温度(60、75、90、100 °C) 和不同转速(100、200、350、500、900 r/min) 下开展酸岩反应实验, 反应时间 5 min, 为了避免酸岩反应产生的 CO_2 影响实验的结果, 实验过程中设定反应釜压力为 7 MPa; ④取下岩心, 洗净后放入烘箱烘干(80 °C, 12 h), 取出并使用三维激光扫描仪获取酸蚀后的岩心切片的点云数据。

(2) 非均匀刻蚀程度精细定量表征

利用酸岩反应基础理论相关原理进行室内实验测试, 获得不同因素影响下酸蚀裂缝表面形貌相关规律^[10-12]。由于岩石性质和切割条件的限制, 酸

蚀前的岩心端面也会存在凸体或者凹坑, 采用三维激光扫描仪来提取酸蚀前后的岩心三维点云数据。利用软件 Geomagic 和 Matlab 处理点云数据并计算表面形貌特性参数。表面形貌特性参数在水平方向上选取扩展界面系数, 垂直方向上选取酸蚀高度标准差系数。对于非均匀刻蚀程度而言, 水平和垂直方向上的特性参数同样重要, 所以各取权重 0.5 相加计算非均匀刻蚀系数。非均匀刻蚀程度越高, 非均匀刻蚀系数越大。

扩展界面系数可表示为:

$$S_{\text{dr}} = \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

式中, S_{dr} —扩展界面系数, 无量纲; A_0 —酸蚀前端面展开面积, mm^2 ; A_1 —酸蚀后端面展开面积, mm^2 。

酸蚀高度标准差系数可表示为:

$$V_{\sigma} = \frac{\sigma}{\bar{z}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}}{\bar{z}} \quad (2)$$

式中, V_{σ} —酸蚀高度标准差系数, 无量纲; \bar{z} —酸蚀后各位置点下降高度平均值, mm; σ —酸蚀后各位置点下降高度标准差, mm。

非均匀刻蚀系数可表示为:

$$\nu = \frac{(S_{\text{dr}} + V_{\sigma})}{2} \quad (3)$$

式中, ν —非均匀刻蚀系数, 无量纲; V_{σ} —酸蚀高度标准差系数, 无量纲; S_{dr} —扩展界面系数, 无量纲。

(3) 敏感性因素分析

非均匀刻蚀系数由表面形貌特性参数决定, 而表面形貌特性参数受诸多因素影响, 如白云质含量、酸液浓度、温度、转速等。探究这些因素对非均匀刻蚀系数的影响程度, 有助于更加经济合理地进行酸压设计。为提高分析结论的可靠程度, 借助系统分析中的敏感性分析方法来评估各参数对非均匀刻蚀系数的影响。参数敏感性分析是假设模型 Y , 主要受 n 个因素 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 影响, $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。在某一基准状态 $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ 下, $Y = Y^*$ 。若 x_k 在其可能的范围内变动^[13-16], 其他值等于基准值时则有:

$$Y = f(x_1^*, \dots, x_{k-1}^*, x_k, x_{k+1}^*, \dots, x_n^*) = \varphi_k(x_k) \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, n$

则参数 x_k 的敏感性因子为:

$$S_k = \left| \left(\frac{d\varphi_k(x_k)}{dx_k} \right)_{x_k=x_k^*} \right| \frac{x_k}{Y^*} \quad k=1,2,\dots,n \quad (5)$$

归一化处理各参数的敏感因子,就可以对各因素的敏感性进行评价。

2 结果与讨论

2.1 不同因素对非均匀刻蚀系数的影响

以白云石含量为75%的岩心切片为例,将岩心片放入质量分数为5%的盐酸中,在90℃的反应釜中以500 r/min的转速进行酸岩反应5 min。图1(a)、(b)分别为反应前后的激光扫描的岩心三维模型,可以清楚地展示酸蚀反应前后反应面的三维可视化形态。从图1(a)可看出,切割后岩心端面非常粗糙,因此岩心酸蚀端面的三维特征不能忽视反应前端面的影响。将反应前后的模型叠加数字化处理,得到岩心切片反应面的酸蚀下降深度分布图,如图1(c)所示,图1(d)是图1(c)中局部放大图。由公式(1)~(3)计算得出,酸蚀前端面展开面积 $A_0=534.2120 \text{ mm}^2$,酸蚀后端面展开面积 $A_1=554.6760 \text{ mm}^2$,扩展界面系数 $S_a=1.0383$,酸蚀后各位置点下降高度平均值 $\bar{z}=0.5856 \text{ mm}$,酸蚀后各位置点下降

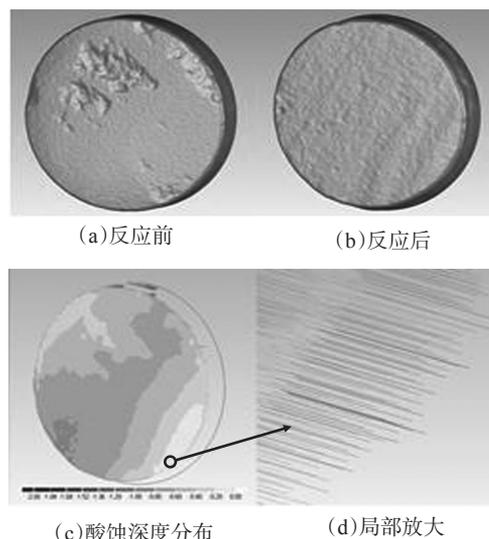


图1 岩心反应前后的三维形貌

高度标准差 $\sigma=0.2671 \text{ mm}$,酸蚀高度标准差系数 $V_\sigma=0.4561$,非均匀刻蚀系数 $v=0.7472$ 。可通过比较非均匀刻蚀系数的大小来评价岩心端面的非均匀刻蚀程度。

2.1.1 酸液浓度的影响

将分别将白云石含量为56%和75%的岩心片放入不同质量分数的盐酸中,在90℃的反应釜中以500 r/min的转速进行酸岩反应5 min,岩心端面酸蚀深度分布情况见图2。图例中的数值为端面高度

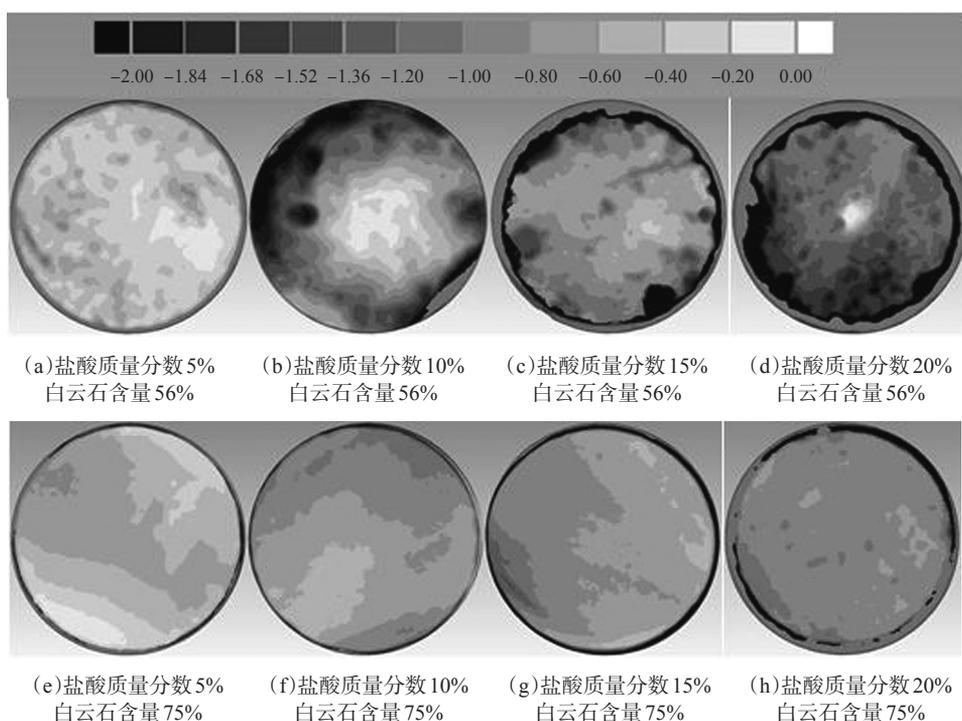


图2 不同酸液浓度下岩心酸岩反应后的酸蚀深度分布图

变化值,“-”表示高度下降。酸蚀深度越浅,颜色走向越偏白色;酸蚀深度越深,颜色走向越偏黑色。随着酸液浓度越大,白云质含量为 56% 的岩心切片形成大量孔洞,宏观上表现为非均匀刻蚀程度深。综合对比,相较于白云质含量为 56% 的岩心切片,白云质含量为 75% 的岩心切片更难刻蚀,酸蚀深度分布更加均匀,同样在酸液质量分数为 20% 时形成大量孔洞。

将每组酸蚀深度数据导出进行数理统计分析(见图 3),酸液质量分数分别为 5%、10%、15% 和 20% 时,白云石含量为 56% 的岩心切片酸蚀端面高度变化与点云个数的关系曲线基本呈多峰,酸蚀下降值分别在 0.3、0.5、0.7 和 1.2 mm 较集中;白云石含量为 75% 的岩心切片酸蚀端面高度变化与点云个数的关系曲线基本呈单峰,且尖度基本变化不大,酸蚀下降值分别在 0.4 mm 和 0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、1.2 mm 较集中。可以看出,随着酸液浓度的增加,曲线逐渐左移,即垂直方向上酸蚀深度逐渐变大;曲线逐渐上移,点云个数变多,水平方向上界面扩展越大,非均匀刻蚀程度越大。

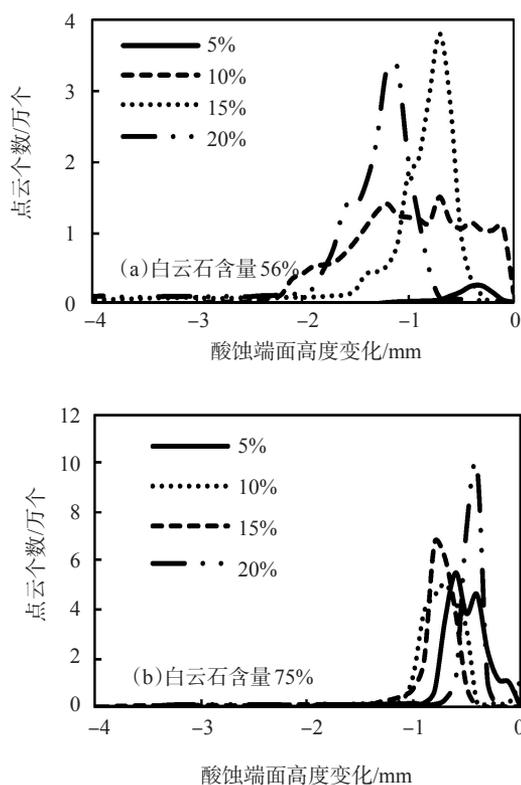


图 3 不同酸液浓度下酸岩反应后岩心各位置点下降深度分布

非均匀刻蚀系数(见图 4)随白云质含量增大表现出增加趋势。当酸液质量分数为 15% 时,非均匀刻蚀系数达到最大。非均匀刻蚀程度越大,越有利于提高导流能力。酸液质量分数增至 20% 时会造成酸液对端面的过度溶蚀,非均匀刻蚀系数反而下降,从而使裂缝导流能力增加缓慢,甚至降低。从优选该储层酸压改造方案角度讲,酸液质量分数可进一步在 15%~20% 范围内筛选。

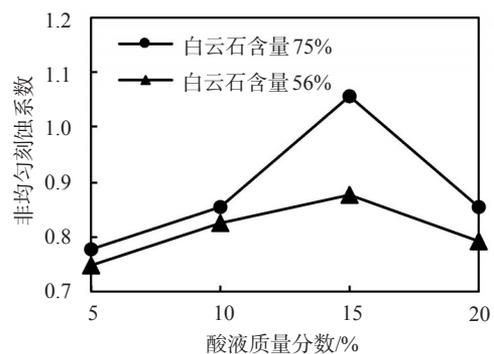


图 4 不同酸液浓度下酸岩反应后岩心的非均匀刻蚀系数

2.1.2 反应温度的影响

将白云石含量为 75% 的岩心切片放在质量分数为 20% 的酸液中,在不同温度(60、75、90、100 °C)反应釜中以 500 r/min 的转速反应 5 min,岩心端面酸蚀深度分布情况见图 5。由图 5 可见,反应温度越高,岩心表面越容易形成明显的沟槽和大量的酸蚀孔洞,越有利于提高酸蚀裂缝导流能力。温度升高到一定程度后,非均匀刻蚀程度不会明显的提升。岩样在不同温度下经质量分数为 20% 的酸液刻蚀后,酸蚀深度表现出阶梯状分布,初步考虑原因有两点:一是岩石内部成分分布不均匀;二是利用酸岩反应旋转岩盘仪时岩心未放置水平,朝某一方向倾斜。

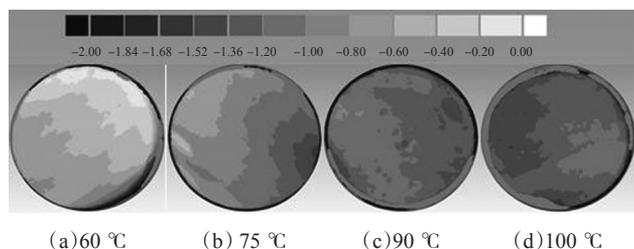


图 5 白云石含量为 75% 的岩心在不同温度下酸岩反应后的酸蚀深度分布

随温度的升高,各位置点下降深度分布曲线(见图 6)的形态基本呈单峰,分布较宽,在温度 60、

75、90、100 °C下酸蚀下降高度值分别在0.6、0.9、1.1、1.2 mm较集中。不同温度下酸岩反应后岩心的非均匀刻蚀系数见图7。在反应温度处于60~90 °C之间时,随着温度升高,酸岩反应速率增加,非均匀刻蚀系数变大,可大大提高裂缝导流能力。温度继续升高至90 °C以上时,非均匀刻蚀系数略有下降。高温下,酸液对岩石端面的酸蚀量增量,端面各矿物组分的反应速率差异减小,端面趋于均匀酸蚀。

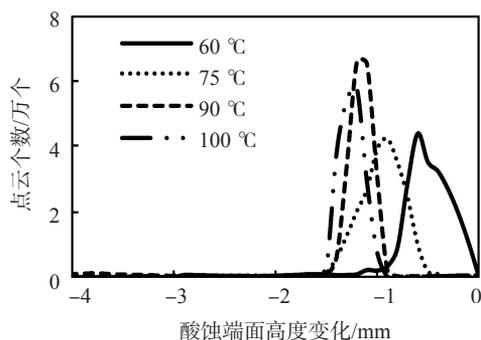


图6 不同温度下酸岩反应后岩心各位置点下降深度分布

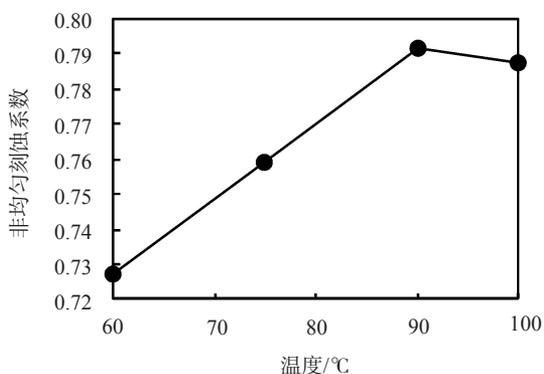
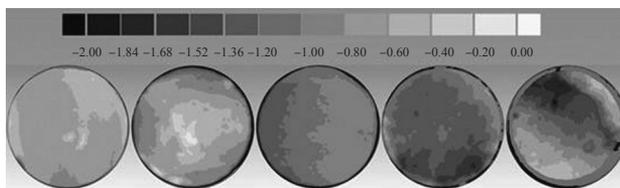


图7 不同温度下酸岩反应后岩心的非均匀刻蚀系数

2.1.3 转速的影响

将白云石含量为75%的岩心切片放在质量分数为20%的酸液中,在温度90 °C反应釜中以不同转速反应5 min,岩心端面酸蚀深度分布情况见图8。从图8可以看出,随着旋转岩盘转速的增大,形成较多的楔状酸蚀,即两边酸蚀深度浅,中间酸蚀深度深。随转速的增大,各位置点下降深度分布(见图9)的形态基本呈单峰,在转速速率分别为100、200、350、500和900 r/min下,酸蚀下降高度值分别在0.6、0.65、0.9、1.3和1.4 mm较集中。不同转速下酸岩反应后岩心的非均匀刻蚀系数见图10。转速低于500 r/min时,非均匀刻蚀系数随转速增加迅速增

加,主要表现为水平方向上点云个数迅速增加,非均匀刻蚀系数增大;转速进一步提高至900 r/min时,非均匀刻蚀系数提高不明显。



(a)100 r/min (b) 200 r/min (c) 350 r/min (d) 500 r/min (e) 900 r/min

图8 白云石含量为75%的岩心在不同转速下酸岩反应后的酸蚀深度分布

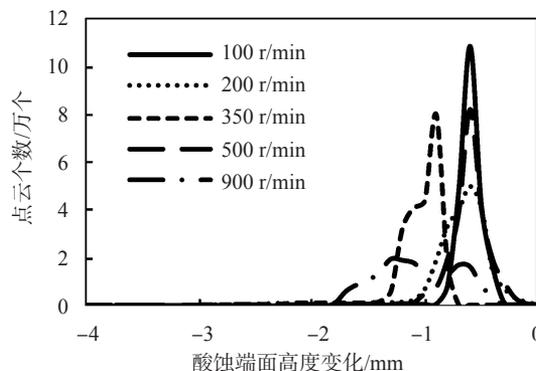


图9 不同转速下酸岩反应后岩心各位置点下降深度分布

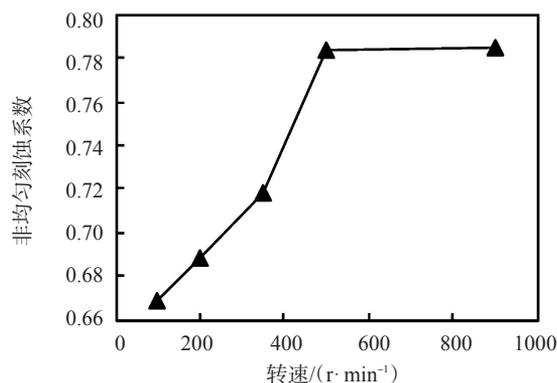


图10 不同转速下酸岩反应后岩心非均匀刻蚀系数

2.2 敏感性分析

非均匀刻蚀系数由扩展界面系数和酸蚀高度标准差系数这两个表面特性参数决定,选择基准参数即白云石含量75%、酸液质量分数20%、温度90 °C和转速500 r/min,计算参数的敏感因子分别为0.3123、0.9463、0.0978和0.2223,非均匀刻蚀系数对各参数的敏感度归一化处理见图11,各参数对非均匀刻蚀系数敏感性的大小顺序依次为:酸液浓度>白云石含量>转速>温度。

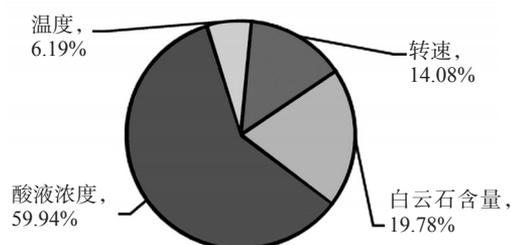


图 11 非均匀刻蚀系数对各参数的敏感度归一化处理

3 结论

基于三维激光扫描技术得到的裂缝壁面点云数据,形成三维表面特性参数计算方法。综合考虑水平方向上的扩展界面系数与垂直方向上的酸蚀高度标准差系数,提出了非均匀刻蚀系数的评价指标及其计算方法,可实现非均匀刻蚀程度精细定量描述。

基于敏感性分析评估各参数对非均匀刻蚀系数影响,影响程度的大小顺序依次为:酸液浓度>白云石含量>转速>温度。在酸压时合理控制各参数来实现裂缝壁面非均匀刻蚀,提高酸压工艺改造效果。

非均匀刻蚀程度的定量表征可用于优选酸液配方及酸压工艺,为酸压可行性分析提供依据。该精细定量描述方法不仅可用于描述酸化酸压领域的酸岩反应非均匀刻蚀程度和井下管柱腐蚀程度,也可用于描述化学防砂中树脂涂覆砂颗粒剥落表面形貌,对研究颗粒剥落过程和砂体失效机理具有十分重要的指导意义。

参考文献:

[1] RUFFET C, FERY J J, ONAISI A. Acid fracturing treatment: a surface topography analysis of acid etched fractures to determine residual conductivity[J]. SPE J, 1998, 3(2): 155-162.

[2] GONG M, LACOTE S, HILL A D. New model of acid-fracture conductivity based on deformation of surface asperities [J]. SPE J, 1999, 4(3): 206-214.

[3] 王德辰. 老君庙 M 层孔隙: 裂缝形态观察试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1992(03): 49-52.

[4] 郭静, 李力, 彭辉. 川东石炭系影响白云岩酸蚀裂缝导流能力因素的试验研究[J]. 钻采工艺, 2003, 26(3): 39-41.

[5] 赵仕俊, 陈忠革, 伊向艺, 等. 酸蚀岩板三维激光扫描仪[J]. 仪表技术与传感器, 2010(7): 26-28.

[6] NEUMANN L F, DE OLIVEIRA T J L, SOUSA J L A O, et al. Building acid frac conductivity in highly- confined carbonates [C]// SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Woodlands, Texas, USA, Feb 6-8, 2012.

[7] 吴霞, 伊向艺, 黄文强, 等. 酸蚀裂缝差异化刻蚀量化研究及影响因素探讨[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2): 250-256.

[8] 吴红军, 孔嫦娥, 伊向艺, 等. 裂缝性碳酸盐岩酸蚀孔数字化分析[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 105-108.

[9] 刘洋, 袁学芳, 王静波, 等. 大型岩板酸蚀裂缝导流能力及激光扫描物模试验[J]. 石油机械, 2017, 45(10): 103-110.

[10] 何春明, 郭建春, 刘超. 裂缝性碳酸盐岩储层蚓孔分布及刻蚀形态实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2012(06): 42-45.

[11] 张黎明, 任书泉. 酸岩反应动力学方式与酸溶蚀行为关系的模拟研究[J]. 油田化学, 1996, 13(1): 44-47.

[12] 张建利, 孙忠杰, 张泽兰. 碳酸盐岩油藏酸岩反应动力学实验研究[J]. 油田化学, 2003, 20(3): 216-219.

[13] NINO- PENALOZA A, AL- MOMIN A, ZHU D, et al. New insights about acid fracture conductivity at laboratory scale [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, Sept 28-30, 2015.

[14] YOO H, PARK J, LEE Y, et al. An experimental investigation into the effect of pore size distribution on the acid-rock reaction in carbonate acidizing [J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 180: 504-517.

[15] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. 干旱区地理, 2010(1): 12-19.

[16] 刘殿柱, 刘娜, 高天赐, 等. 应用正交试验法的 RHT 模型参数敏感性研究[J]. 北京理工大学学报, 2019(6): 558-564.

Fine Quantitative Characterization of Inhomogeneous Etch Degree of Acid Rock Reaction and Analysis of Its Sensitivity Factors

CHENG Limin¹, LIANG Yukai¹, YUAN Hui¹, QI Ning², LI Yitian³

(1. Zhanjiang Branch, CNOOC (China) Co., Ltd, Zhanjiang, Guangdong 524057, P R of China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P R of China; 3. Institute of Exploration and Development, Offshore Oil & Gas Company, Sinopec, Shanghai 200120, P R of China)

Abstract: Acid fracturing is one of the commonly used measures to increase production in carbonate reservoirs. The degree of inhomogeneous etch on fracture morphology plays an important role in the conductivity and final effect of increasing production

after acid fracturing. With the aim to describe the degree of inhomogeneous etch more comprehensively, the inhomogeneous etch coefficient was introduced to characterize the degree of inhomogeneous etch. Firstly, the point cloud data of core slices before and after acid rock reaction was obtained by three-dimensional laser scanner, and through the software Geomagic and Matlab the point cloud data was processed and the surface morphology characteristic parameters was calculated furtherly, including the extended interface coefficient in the horizontal direction and the standard deviation coefficient of acid corrosion height in the vertical direction, and the inhomogeneous etch coefficient was obtained by weighted summation. The higher the degree of inhomogeneous etch, the greater the coefficient of inhomogeneous etch. Considering the influence of different factors, the factors was sorted by parameter sensitivity analysis, and the order relationship of primary and secondary influencing factors was obtained as follows: acid concentration (59.94%) > dolomite content (19.78%) > rotating speed (14.08%) > temperature (6.19%). The proposal of inhomogeneous etch coefficient can provide a possibility for fine quantitative characterization of inhomogeneous etch degree of acid etched cracks, and also point out the optimization direction for acid fracturing design.

Keywords: *three-dimensional laser scanning; inhomogeneous etch coefficient; acid fracturing; parameter sensitivity analysis; quantitative characterization*

(上接第 239 页。continued from p.239)

[23] 严芳芳. 有机锆交联聚合物和羟丙基瓜胶压裂液及流变动力学研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 35.

on gelation process of hydrophobic amphoteric cellulose [J]. *J Dispersion Sci Technol*, 2016, 37(8): 1076-1082.

[24] MA Ming, FANG Bo, LU Yongjun, et al. Intrinsic rheo-kinetics

Rheological Properties of Quadripolymer Solution and Its Fracturing Fluid

TANG Luxin¹, ZHANG Xiaoqi¹, LUO Yansheng¹, FANG Bo¹, ZHAI Wen², LU Yongjun²

(1. *Chemical Engineering Rheology Laboratory, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, P R of China*; 2. *Langfang Filial of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, P R of China*)

Abstract: In order to enrich the gel fracturing fluid system, the new quadripolymer synthesized by methacrylic acid (MAA), 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS), *N,N*-dimethylacrylamide (DMAM) and sodium *p*-styrenesulfonate (SSS) was used as a thickener, and the organic zirconium crosslinking agent was used to crosslink it. The rheological properties of the quadripolymer solution at different concentrations and their cross-linking processes were studied. The effects of shear rate and temperature on the relationship between viscosity and time during cross-linking process were investigated. The rheological properties of polymer crosslinked gel's breaking processes were studied too. The effects of breaker dosage and temperature on the relationship between complex modulus and time during gel breaking process were investigated. The results showed that the viscosity of polymer solution increased with increasing polymer mass fraction at 170 s^{-1} . The steady-state viscosity of 0.6% polymer solution was $107.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, and the flow curve was conformed to the Cross constitutive equation. The viscosity of cross-linking system decreased with increasing shear rate and temperature. The curve of viscosity varying with time in cross-linking process could be described by 4-parameter cross-linking process model. In the experimental range, the more dosage of breaker and the higher temperature, the better effect of gel breaking process was. The rheological kinetic model of 4-parameter gel breaking process could be used to describe the curve of complex modulus varying with time in gel breaking process.

Keywords: *quadripolymer; rheology; cross-linking process; gel breaking process; fracturing fluid; thickener*