文章编号:1673-5005(2021)02-0096-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.011

# 关井效应对酸压裂缝刻蚀形貌与导流能力影响

刘 超<sup>1,2,3</sup>, 苟 波<sup>4</sup>, 管晨呈<sup>4</sup>, 郭建春<sup>4</sup>, 李 骁<sup>4</sup>, 王香增<sup>1,2</sup>, 魏登峰<sup>1,2</sup>. 郝世彦<sup>1,2</sup>. 申 峰<sup>1,2</sup>. 王念喜<sup>1,2</sup>

 (1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西西安 710065;2. 陕西省陆相页岩气成藏与 开发重点实验室(筹),陕西西安 710065;3. 西南石油大学博士后科研流动站,四川成都 610500;
 4. 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)

摘要:为了揭示酸压关井时酸液在酸压裂缝中的滞留对酸刻蚀形态与导流能力的影响,选取鄂尔多斯盆地延安气田 奥陶系马家沟组马五1亚段露头岩样,采用研发的装置"酸压裂缝导流能力测试系统",用粗糙岩板模拟粗糙水力裂 缝,研究不同注酸时间下,关井效应对酸刻蚀裂缝形态和导流能力的影响。结果表明:马五1亚段储层存在使导流能 力及保持水平最佳的注酸时间 60 min;当注酸时间小于等于最佳注酸时间时,关井效应可增加酸蚀裂缝面迂曲度和 平均酸蚀缝宽,导流能力也相应提高;当注酸时间大于最佳注酸时间时,关井效应使酸蚀裂缝面过度溶蚀,迂曲度和 平均酸蚀缝宽减小,高闭合压力下导流能力削弱;马五1亚段储层酸压时,根据注酸时间确定关井和返排时间,发挥 关井效应对酸蚀裂缝导流能力的有益作用,改善酸压效果。

关键词:致密碳酸盐岩;关井效应;酸蚀裂缝形貌;导流能力;返排时间;延安气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE 357.2 文献标志码:A

**引用格式**:刘超,苟波,管晨呈,等.关井效应对酸压裂缝刻蚀形貌与导流能力影响 [J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):96-103.

LIU Chao, GOU Bo, GUAN Chencheng, et al. Effect of well shut-in on acid etching morphology and conductivity[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021, 45(2):96-103.

## Effect of well shut-in on acid etching morphology and conductivity

LIU Chao<sup>1,2,3</sup>, GOU Bo<sup>4</sup>, GUAN Chencheng<sup>4</sup>, GUO Jianchun<sup>4</sup>, LI Xiao<sup>4</sup>, WANG Xiangzeng<sup>1,2</sup>, WEI Dengfeng<sup>1,2</sup>, HAO Shiyan<sup>1,2</sup>, SHEN Feng<sup>1,2</sup>, WANG Nianxi<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Company Limited, Xi'an 710065, China;

Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation (Under Planning), Xi'an 710065, China;
 Post-Doctoral Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

Chengdu 610500, China)

**Abstract**: In order to reveal the influence of acid retention time on acid-etching morphology and conductivity of acid-fractures during shut-in period, acid-etching and conductivity experiments were conducted, using a laboratory self-made device, , under different acid-injection time considering well shut-in effects. The rock samples used were from the outcrop rock samples of the Mawu-1 subsegment of the Ordovician Majiagou Formation in Yan'an gas field (Ordos Basin), which were cut into rough slabs to simulate rough hydraulic fractures. The experimental results indicate that, for the Mawu-1 subsegment reservoir, there is an optimal acid-injection time of 60 minutes, in which the conductivity can reach to the maximum and optimum level. When the acid-injection time is less than the its optimal time, the shut-in effect can increase the tortuosity of the acid-etching fracture

收稿日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51704249,51525404)

**第一作者**:刘超(1983-),男,高级工程师,博士,博士后,研究方向为油气藏增产技术与现场应用。E-mail: lcok101@ qq. com。 通信作者:苟波(1984-),男,讲师,博士,博士后,研究方向为油气藏增产理论与技术。E-mail:swpugb@163. com。 surface and the fracture-width, hence further enhancing the conductivity. When the acid-injection time is longer than the optimal acid-injection time, the shut-in effect will cause excessive dissolution of the acid-etching fracture surface, causing decrease of the tortuosity and average acid-etching fracture width and reducing the conductivity under high closure stress. The shut-in and flow back time should be determined according to the actual acid-injection time during acid fracturing, which can make full use of the shut-in effect on the acid-fracture conductivity, improving the response of acid-fracturing.

Keywords: carbonate rocks; shut-in effect; acid-etching fracture morphology; conductivity; flow back time; Yan'an gas field; Ordos Basin

酸压是碳酸盐岩油气藏实现高效勘探开发不可 或缺的手段,与物探技术、钻井技术合称为"三大" 石油工程技术<sup>[1]</sup>。酸压技术矿场实施时,主要过程 通常包括:①非反应性的压裂液造缝:②各种酸液体 系刻蚀裂缝:③非反应性的压裂液顶替井筒酸液进 入地层裂缝:④停泵关井、测压降:⑤开井放喷排液. 测试产量<sup>[2]</sup>。关井后至开井返排前,酸液在地层酸 压裂缝中滞留,此时静止的酸液仍会与裂缝壁面岩 石接触反应,从而影响酸刻蚀裂缝形态与导流能力。 室内试验是认识酸压裂缝导流能力最直接的手段, 它常用目标储层井下岩样或露头模拟酸压时酸液在 水力裂缝中的流动反应和刻蚀裂缝壁面岩石的过 程,即酸刻蚀;然后测试酸刻蚀后岩板的导流能力, 即导流能力评价。学者已通过大量的试验认识到影 响酸压裂缝导流能力的因素主要包括储层地质因素 和工程因素<sup>[3-9]</sup>。然而现有酸刻蚀导流能力试验研 究忽略了酸压停泵关井后酸液滞留效应对酸刻蚀形 态与导流能力的影响,因此试验研究关井效应对酸 刻蚀形态与导流能力影响,有利于客观评价酸压裂 缝导流能力。笔者以鄂尔多斯盆地下古生界碳酸盐 岩储层马五段为例,研究不同注酸时间条件下,关井 对酸刻蚀形态与导流能力的影响,为酸压方案设计 和返排时机选择提供依据。

# 1 试验方法

#### 1.1 试验材料

鄂尔多斯盆地下古生界马家沟组以海相碳酸盐 岩沉积为主,其中马五1亚段主要为白云岩,孔隙度 为0.25%~5.48%,渗透率为(0.00093~0.415)× 10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,储层温度为80~120℃。

试验岩样采自地质专家标定的马五1亚段露头,在矿物组成方面与井下岩心匹配较好(图1)。 增产工作液在粗糙裂隙中的流动行为较光滑裂隙更 为复杂,但也更接近储层条件下工作液在水力裂缝 中的真实情况<sup>[10]</sup>。为真实模拟酸液在水力裂缝中 的刻蚀行为,按照 API标准制成长度(140.0±0.2) mm、宽度(36.0±0.2)mm、厚度(50.0±0.2)mm 的 岩样,并采用巴西劈裂方法将岩样加工为成对的粗糙岩板,两岩板之间的间隙模拟真实水力裂缝形貌<sup>[8]</sup>。为便于裂缝形貌定量表征,建立岩板表面坐标系,标定 x 方向为岩板宽度方向,y 方向为岩板长度方向,z 方向为岩板厚度方向,且以过裂缝面上最低点且平行于水平面的平面为基准面。





试验酸液体系为 VES 酸体系:20 % HCL+5 % VES+5%缓蚀剂+1%铁离子稳定剂+1%助排剂。

#### 1.2 试验装置

试验采用西南石油大学研制的酸压裂缝导流能 力测试系统,包括酸刻蚀物理模拟装置、三维激光扫 描装置和导流能力测试装置(图 3)。酸刻蚀物理模 拟装置用于模拟酸液刻蚀裂缝的物理过程;三维激

能力。

光扫描装置可以获取裂缝表面的三维点云数据并进 行数字化重构,便于定量分析酸刻蚀裂缝形态;导流



(a) 酸刻蚀物理模拟装置





能力测试装置能够评价地层条件下的酸蚀裂缝导流

(c) 导流能力测试装置

(b) 三维激光扫描装置图 3 酸压裂缝导流能力测试系统

Fig. 3 Acid-fracture conductivity test system

#### 1.3 试验设计

1.3.1 试验排量

雷诺数相似准则,将工程尺度的注酸排量(m<sup>3</sup>/ min)转化为实验室尺度的注酸排量(mL/min)<sup>[8]</sup>:

$$q_{1} = \frac{q_{f}h_{1}}{2h_{f}} \left(\frac{w_{f}}{w_{1}}\right)^{\frac{2n-2}{2-n}}.$$
 (1)

式中, $q_1$ 为试验尺度注酸排量, $m^3/s;q_f$ 为工程尺度 注酸排量, $m^3/s;h_1$ 为岩板宽度, $m;w_f$ 为地层水力裂 缝宽度, $m;h_f$ 为地层裂缝高度,m;n为幂律指数; $w_1$ 为试验岩板形成的裂缝宽度, $m_o$ 

试验排量计算结果:施工排量为 3.0 m<sup>3</sup>/min, 地层缝高为 21.0 m,地层缝宽为 0.0027 m,流态指 数为 0.146,岩板宽度为 0.038 m,试验缝宽为 0.001 m,试验排量为 260 mL/min。

1.3.2 试验温度

试验温度的选取考虑了井筒积液影响和注入流体与井筒的热交换效应,采用非稳态井筒温度场数 值计算方法<sup>[11]</sup>获取酸压过程中裂缝入口处温度分 布曲线(图4),采用酸液体抵达裂缝入口处的温度 作为试验温度。计算条件参照延安气田研究区平均 注液排量 3.0 m<sup>3</sup>/min,平均垂深 3 500 m,目的层平 均地层温度 112 ℃。假设初始情况下井筒充满流 体,按照 3 m<sup>3</sup>/min 的排量注酸,井筒积液全部进入 地层需 4 min;故酸液从第 4 min 开始进入地层,近 似取第 4 min 时井底温度 100 ℃为试验温度。

1.3.3 试验方案

基于试验排量和注液温度确定方法,在注酸排量与温度恒定时,试验模拟不同注酸时长下关井效应对酸刻蚀裂缝形态和导流能力的影响。试验模拟注酸时长 30、60、90 与 120 min 时,关井 30 min 对酸刻蚀形态与导流能力的影响。为排除试验中岩面矿

物性质差异造成的影响,试验岩板来源于同一露头, 且选定单岩板进行对比试验,即针对 N(取值 1~4) 号岩样劈裂形成的两块岩板 N-1 与 N-2,保持注酸 时长相同,N-1 不进行关井模拟,N-2 关井 30 min 模拟,酸液体系为 VES,试验温度 100 ℃,排量为 260 mL/min。



Fig. 4 Temperature distribution at fracture inlet at 3 500 m

# 2 试验结果讨论

## 2.1 关井效应对酸刻蚀形貌的影响

2.1.1 酸刻蚀裂缝面特征

观察各组岩板刻蚀前的初始形貌发现:岩板 N-1 与 N-2 啮合,如岩板 2-1(图 5(c)左)中的高峰与低谷处同岩板 2-2(图 5(d)左)中的低谷与高峰刚好啮合。

当不关井时,各注酸时长下的裂缝形貌表明:注 酸 30 min 后,岩板 1-1(图 5(a))岩面色度云图无 明显变化,说明酸刻蚀作用对裂缝形貌影响较小;注 酸 60 min 后,岩板 2-1(图 5(c))岩面色度云图有 一定变化,红白色高峰被略微削弱,黄绿色低谷几乎 没有变化,说明此时酸刻蚀对裂缝形貌有一定影响; 注酸 90 min 后,岩板 3-1(图 5(e))岩面色度云图 由红色变为黄绿色,出现了黄绿色低谷,峰谷差距增大,局部多处出现溶蚀孔洞,说明此时酸刻蚀对裂缝形貌影响较大;注酸120 min 后,岩板4-1(图 5

(g))岩面色度云图由橘红色变为黄绿色,出现大面积的蓝绿色低谷,天然裂缝位置处出现酸溶蚀蚓孔, 说明此时酸刻蚀对裂缝形貌改变明显。



(a) 岩板1-1注酸30 min刻蚀前(左)后(右)裂缝形态



(b) 岩板1-2注酸30 min+关井30 min刻蚀前(左)后(右)裂缝形态



(f) 岩板3-2注酸90 min+关井30 min刻蚀前(左)后(右)裂缝形态



(g) 岩板4-1注酸120 min刻蚀前(左)后(右)裂缝形态



(h) 岩板4-2注酸120 min+关井30 min刻蚀前(左)后(右)裂缝形态

图 5 酸刻蚀前后裂缝形貌

#### Fig. 5 Fracture morphology before and after acidizing

关井 30 min 后,即酸液刻蚀裂缝后在裂缝中滞 留 30 min,发现关井效应对不同注酸时间下的酸刻 蚀形貌影响程度不同。如注酸 30 min 后,岩板 1-2 (图 5(b))岩面色度云图由橘黄色变为黄绿色,橘 黄色高峰被略微削弱,出现绿色低谷特征;对比岩板 1-1(图5(a))说明注酸30min时,关井效应略微增 加了裂缝表面粗糙程度。注酸60min后,岩板2-2 (图5(d))红白色高峰变化不大,低谷被加深为绿

• 99 •

色,峰谷之间的差距明显增大,对比岩板 2-1(图 5 (c)),关井效应增加了裂缝表面粗糙程度。注酸 90 min 后,岩板 3-2(图 5(f))橘黄色高峰被削弱为黄 色,黄色低谷被加深为绿色,但峰谷之间的差距减 小,对比岩板 3-1(图 5(e)),关井效应进一步增强 了溶蚀现象。注酸 120 min 后,岩板 4-2(图 5(h)) 红白色高峰被削弱为黄色,出现大面积的蓝绿色低 谷,对比岩板 4-1(图 5(g)),关井效应溶蚀现象 明显。

为进一步定量分析不同注酸时长下关井效应对 酸刻蚀裂缝形貌影响,选择裂缝面迂曲度、酸岩反应 溶蚀量、裂缝流动空间与平均缝宽3个参数表征酸 蚀裂缝形貌变化<sup>[8,12-13]</sup>。

2.1.2 裂缝面迂曲度

使用克里金插值法,以 0.2 mm 为步长划分网格,将每个网格围成的曲面近似处理为平面,计算得 到各岩板裂缝曲面面积<sup>[14]</sup>(表 1)。定义粗糙裂缝 面迂曲度[12]为

$$\tau = \frac{A_{\rm r}}{A_{\rm n}} \,. \tag{2}$$

式中, $\tau$ 为粗糙裂缝面迂曲度; $A_r$ 为粗糙裂缝面真实面积, $mm^2$ ; $A_n$ 为粗糙裂缝面名义面积,即对应同样尺度的光滑岩板面面积, $mm^2$ 。

光滑岩板的单个裂缝面积为 5 040.0 mm<sup>2</sup>,由式 (2)求取酸刻蚀前后粗糙裂缝面的迂曲度变化(表 1)。由表 1 知:岩板 N-1 与 N-2 刻蚀前曲面面积 误差均小于 0.5%,说明两岩板基本啮合。当仅有 注酸作用时,随着注酸时间增加,刻蚀后裂缝面迂曲 度逐渐增加,表明酸液对粗糙裂缝面"削峰"作用弱 于"深谷"作用<sup>[8]</sup>;当考虑 30 min 的关井效应时,酸 液在裂缝中的滞留对刻蚀裂缝面迂曲度影响差异明 显,注酸 30、60 min 时关井效应使酸蚀裂缝面迂曲 度增加,而注酸 90、120 min 时,关井效应使迂曲度 减小。

表 1 刻蚀前后岩板曲面面积和迂曲度变化

| Table 1 | Change | in | slates' | surface | area | and | tortuosity |
|---------|--------|----|---------|---------|------|-----|------------|
|---------|--------|----|---------|---------|------|-----|------------|

| 岩板  | 注酸时间/ | 关井时间/ | 岩板面积 A/mm <sup>2</sup> |         | 刻蚀前岩板  | 迂曲度 τ |       | 注酸效应引起的 | 注酸+关井效应  |
|-----|-------|-------|------------------------|---------|--------|-------|-------|---------|----------|
| 编号  | min   | min   | 酸刻蚀前                   | 酸刻蚀后    | 面积误差/% | 酸刻蚀前  | 酸刻蚀后  | 迂曲度变化   | 引起的迂曲度变化 |
| 1-1 | 30    |       | 5 359                  | 5774    | 0.42   | 1.063 | 1.146 | 0.083   |          |
| 1-2 | 30    | 30    | 5 3 37                 | 5 828   | 0.42   | 1.059 | 1.156 |         | 0.097    |
| 2-1 | 60    |       | 5 998                  | 6 800   | 0.38   | 1.190 | 1.349 | 0.159   |          |
| 2-2 | 60    | 30    | 6021                   | 7 622   | 0. 38  | 1.195 | 1.592 |         | 0.397    |
| 3-1 | 90    |       | 5 827                  | 7 801   | 0.41   | 1.156 | 1.548 | 0.392   |          |
| 3-2 | 90    | 30    | 5 851                  | 6856    | 0.41   | 1.161 | 1.301 |         | 0.14     |
| 4-1 | 120   |       | 6191                   | 8 2 2 8 | 0.20   | 1.169 | 1.633 | 0.464   |          |
| 4-2 | 120   | 30    | 6178                   | 8 0 7 9 | 0.20   | 1.166 | 1.603 |         | 0. 437   |

2.1.3 裂缝流动空间及平均缝宽

由于选用单岩板开展酸刻蚀试验,裂缝宽度即 为单岩面高程最高点(与光滑平面接触)与岩面上 任意位置高程的差值,即

$$w(x_i, y_j) = z_{\max} - z(x_i, y_j).$$
(3)
式中, w(x\_i, y\_j) 为对应坐标(x\_i, y\_j) 处的缝宽, mm;
z 为岩面高程的最大值, mm; z(x\_i, y\_j) 为任意位置

 $z_{\max}$ 为岩面高程的最大值, mm;  $z(x_i, y_j)$ 为任意位置 对应坐标 $(x_i, y_j)$ 处的高程, mm。

图 6 为酸刻蚀前后,由式(3) 计算的缝宽分 布云图。由图 6 可知,较短的酸岩反应时间(小 于等于 60 min),酸刻蚀对裂缝空间分布无明显 改善作用,如岩板 1-1、1-2 与 2-1 刻蚀前后的 裂缝流动空间几乎没有变化,平均缝宽少量增 加;酸岩接触反应时间较长(大于 60 min)时,酸 刻蚀后缝宽分布范围明显加大,如岩板 2-2、3-1、4-1 与 4-2。

粗糙裂缝平均缝宽计算式为

$$\overline{w} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} w(x_i, y_j)}{N_x N_y}.$$
 (4)

式中, $\bar{w}$  为平均对应坐标( $x_i, y_j$ )处的缝宽, mm; $N_x$  和  $N_y$  分别为 x 和 y 方向网格数。

图 7 为由式(4)计算的酸刻蚀前后平均缝宽。可知关井效应引起的酸液滞留裂缝会增加平均酸蚀缝宽,但增长幅度有差异。注酸 30 min 后,关井效应对缝宽增加的影响很小(岩板 1-2),因为 60 min 的酸岩接触时间(注酸时间 30 min+关井酸液滞留 30 min)较短,刻蚀效果不明显;注酸 120 min 后,关井效应的影响也较小,这是由于注酸时间过长(总的酸岩反应时间为 150 min),岩面已经充分溶蚀,后续关井效应对岩面非均质刻蚀改善程度有限(图 6(h));注酸 60 与 90 min 时,关井效应对缝宽增加的影响较大,因为关井有效增加了酸岩接触时间,注酸 60 min+关井 30 min 使酸液刻蚀得更充分、缝宽

增加(岩板 2-2),注酸 90 min 时关井导致岩面过度 溶蚀、酸蚀平均缝宽减小(岩板 3-2)。



(h) 岩板4-2注酸120 min+关井30 min刻蚀前(左)后(右)裂缝流动空间

(5)

图 6 酸刻蚀前后裂缝流动空间

Fig. 6 Fracture flow space before and after acidizing

#### 2.2 关井效应对导流能力的影响

F

定义某闭合压力下的无因次导流能力为该闭合 压力下的导流能力与初始闭合压力下导流能力最大 值的比值,即

$$= (kw)_i / (kw)_{max}.$$

式中,F为酸蚀裂缝无因次导流能力;(kw);为第 i 个闭合压力点下的酸蚀裂缝导流能力,μm<sup>2</sup> · cm; (kw)<sub>max</sub> 为初始酸蚀裂缝导流能力的最大 值,µm<sup>2</sup> · cm<sub>o</sub>



Fig. 7 Change in average acid-fracture width

图 8 为关井效应对酸蚀裂缝导流能力的影响。 由图 8(a)可知,中低闭合压力(10.8~27.0 MPa)阶 段,当不考虑关井效应时,导流能力的大小依次为注 酸 60、30、90、120 min。当注酸 90、120 min 时,虽然 刻蚀后初始平均缝宽增大(图 7),但由于裂缝面过 度溶蚀(图 5、6),支撑点力学强度降低,导致闭合压 力下导流能力迅速递减<sup>[15]</sup>;转向酸体系对岩石力学 强度影响建议可进一步系统研究。当考虑关井效应 时,注酸 30、60 min 导流能力改善明显,其中注酸 60 min+关井 30 min 在 10.8 MPa 时,获得最高初始导 流能力 2416.7 μm<sup>2</sup> · cm;当注酸 90 min 且考虑关 井效应时,导流能力改善优势逐渐丧失,尤其是当闭 合压力为 27.0 MPa 时,注酸效应与注酸效应+关井 效应两种情况的导流能力接近;当注酸 120 min 时, 关井效应反而削弱了导流能力。



## 图 8 关井效应对酸蚀裂缝导流能力影响 Fig. 8 Effect of well shut-in on acid-fracture conductivity

在高闭合压力(大于 27.0 MPa)阶段,不考虑关 井效应时,导流能力变化趋势与中低闭合压力阶段 较接近,特别的是当闭合压力大于 37.8 MPa,此时 注酸 90 min 时的导流能力大于注酸 30 min 时的导 流能力,说明此时长时间注酸有利于改善酸蚀裂缝 导流能力,但仍然小于注酸 60 min 时的导流能力。

由图 8(b)可知,在中低闭合压力(10.8~27.0 MPa)阶段,注酸时间小于等于 90 min 时,关井效应可以一定程度改善酸蚀裂缝导流能力,但注酸时间越长,关井效应对导流能力影响越小;在高闭合压力(大于 27.0 MPa)阶段,长时间注酸(大于 60 min)后,关井效应引起的酸液在裂缝中的滞留会降低裂缝导流能力,这是由于酸液过度溶蚀,使流动空间变小(图 5(h)、6(h))。

从关井效应对导流能力的影响可知:当注酸时 间小于等于 60 min 时,酸液在裂缝中的滞留可以提 升酸蚀裂缝导流能力,因此建议酸压施工时,短时间 注酸可以适当延长关井时间,使酸液在裂缝中滞留 进一步改善酸蚀裂缝导流能力;当注酸时间大于 60 min 时,关井引起的酸液滞留会进一步削弱酸刻蚀 裂缝非均质程度,进一步降低酸蚀裂缝导流能力,因 此建议酸压施工时,长时间大规模注酸结束时及时 开井返排,减小酸液在裂缝中的滞留。

## 3 结 论

(1)考虑关井效应时,较短时间(小于等于 60 min)注酸,酸液滞留使酸蚀裂缝面迂曲度增加,酸蚀 平均缝宽增大;较长时间(大于 60 min)注酸,酸液滞 留使酸蚀裂缝面迂曲度减小,酸蚀平均缝宽减小。

(2)不考虑关井效应时,马五1亚段储层存在一 个最佳的注酸时间 60 min,使导流能力保持较好。考 虑关井效应时,当注酸时间小于等于 60 min 时,关井 引起的酸液滞留可以强化对裂缝面的刻蚀,提高酸蚀 裂缝导流能力;当注酸时间大于 60 min 时,关井效应 引起的酸液滞留对裂缝面的过度溶蚀导致高闭合压力(大于 27.0 MPa)阶段裂缝导流能力降低。

(3)针对马五1亚段储层 VES 酸压,当注酸时 间小于等于最佳注酸时间时,建议酸压停泵后适当 关井,进一步改善酸蚀裂缝导流能力;当注酸时间大 于最佳注酸时间时,建议酸压后及时开井返排,减小 酸液滞留对裂缝面的过度溶蚀,以免削弱酸蚀裂缝 导流能力。

#### 参考文献:

[1] 侯启军,何海清,李建忠,等.中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):1-13.

HOU Qijun, HE Haiqing, LI Jianzhong, et al. Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited [J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(1):1-13.

- [2] ALI S A, KALFAYAN L J, MONTGOMERY C T. Acid stimulation[M]. TX, USA: Henry L. Doherty Series, 2016:181-199.
- [3] LI N, DAI J, LIU P, et al. Experimental study on influencing factors of acid-fracturing effect for carbonate reservoirs [J]. Petroleum, 2015,1(2):146-153.
- [4] 李沁,伊向艺,卢渊,等.储层岩石矿物成分对酸蚀裂 缝导流能力的影响[J].西南石油大学学报(自然科学 版),2013,35(2):102-108.

LI Qin, YI Xiangyi, LU Yuan, et al. Influence of reservoir mineralogical composition on acid fracture conductivity [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013,35(2):102-108.

- [5] POURNIK M, NASR-EL-DIN H. Effect of acid spending on etching and acid fracture conductivity [J]. SPE Production & Operations, 2013,28(1):46-54.
- [6] 王洋. 裂缝型储层酸液滤失可视化研究与应用[J]. 石油钻采工艺,2018,40(1):107-117.
  WANG Yang. Research on the visualization of acidizing fluid filtration in fractured reservoirs and its application [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40

(1):107-117.

237-243.

- [7] 储铭汇. 致密碳酸盐岩储层复合缝网酸压技术研究及 矿场实践:以大牛地气田下古生界马五\_5 碳酸盐岩储 层为例[J]. 石油钻采工艺,2017,39(2):237-243.
  CHU Minghui. Study on composite fracture-network acid fracturing technology for tight carbonate reservoirs and its field application: a case study on Mawu5 carbonate reservoir of Lower Paleozoic in Daniudi gas field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39 (2):
- [8] 苟波,李骁,马辉运,等.水力裂缝形貌对酸刻蚀行为

及导流能力影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):80-90.

GOU Bo, LI Xiao, MA Huiyun, et al. Effects of morphology of hydraulic fractures on acid etching behaviors and fluid diversion capacity[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019,41(3):80-90.

- [9] 姜浒,陈勉,张广清,等.碳酸盐岩储层加砂酸压支撑 裂缝短期导流能力试验[J].中国石油大学学报(自然 科学版),2009,33(4):89-92.
  JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guangqing, et al. Experiment on short-term conductivity of sand-adding acid-fracturing propping fractures in carbonate reservoir[J].
  Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(4):89-92.
- [10] 王东英,姚军,宋文辉,等.考虑变应力影响的粗糙裂缝油水两相流动能力数值模拟方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(2):100-107.
  WANG Dongying, YAO Jun, SONG Wenhui, et al. Numerical simulation of oil and water two-phase flow in fractures with rough surface considering dynamic stress effect[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2020,44(2):100-107.
- [11] 王鸿勋,李平.水力压裂过程中井筒温度的数值计算 方法[J].石油学报,1987(2):91-101.
  WANG Hongxun, LI Ping. Numerical calculation of wellbore temperature during hydraulic fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 1987(2):91-101.
- [12] 曲冠政. 粗糙裂缝结构的描述及其渗流规律研究
  [D]. 青岛:中国石油大学(华东),2016.
  QU Guanzheng. Study on rough fracture description and fluid flow in rough fracture[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016
- [13] ANTELO L F, ZHU D, HILL A D. Surface characterization and its effect on fracture conductivity in acid fracturing[R]. SPE 19743-MS, 2009.
- [14] 苟兴豪.页岩自支撑裂缝导流能力模型研究[D].成都:西南石油大学,2017.
  GOU Xinghao. Research on numerical method for unpropped fracture conductivity of shale [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [15] 何春明,郭建春.酸液对灰岩力学性质影响的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增2): 3016-3021.

HE Chunming, GUO Jianchun. Mechanism study of acid on mechanical properties of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (sup 2):3016-3021.

(编辑 李志芬)