

# 基于碳酸盐岩酸化溶蚀形态的酸液最优注入速度界限

齐宁<sup>1</sup>, 李柏杨<sup>1</sup>, 方明君<sup>1</sup>, 董长银<sup>1</sup>, 梁冲<sup>2</sup>, 陈国彬<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要:**成功的碳酸盐岩基质酸化是在储层中形成几条主要的酸蚀孔道(蚓孔), 穿过井筒附近污染带形成油气渗流的优势通道。储层中蚓孔的分布形态决定酸液的穿透距离及其酸化效果, 而酸液的注入速度又会直接影响到酸蚀蚓孔的扩展。选取碳酸盐岩岩心, 采用岩心驱替试验研究不同注入速度对蚓孔扩展的影响, 通过计算突破体积比寻找碳酸盐岩酸化时酸液的最优注入速度, 并通过压降曲线分析酸蚀蚓孔的生长过程。同时采用核磁共振成像技术分析酸化前后岩心端面及内部结构特征, 用于判断酸液溶蚀类型, 寻找到不同溶蚀形态所对应的酸液注入速度界限。结果表明, 盐酸质量分数为20%时, 开始形成酸蚀蚓孔时的注入速度为2 mL/min, 注入速度为3~4 mL/min时酸化效果最佳。

**关键词:** 蚓孔; 碳酸盐岩; 盐酸; 酸液注入速度; 溶蚀形态

**中图分类号:** TE 357 **文献标志码:** A

**引用格式:** 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 Ning, LI Boyang, FANG Mingjun, 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.

## Injection rate optimization for acidizing process of carbonate rocks based on dissolution morphology

QI Ning<sup>1</sup>, LI Boyang<sup>1</sup>, FANG Mingjun<sup>1</sup>, DONG Changyin<sup>1</sup>, LIANG Chong<sup>2</sup>, CHEN Guobin<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China)

**Abstract:** During acidizing process of carbonate rocks, it is important to generate several main acid dissolution paths (i. e. wormholes), which can provide favourable oil and gas flow channels through the contaminated zone near the wellbore. The distribution and characteristics of the wormholes play a critical role on acid penetration distance and acidification effect, and the development of wormholes is directly influenced by the injection rate of acid fluid. In this study, typical carbonate rock cores were used for acid injection and displacement experiments, during which the effect of injection rate on the formation of wormholes was investigated. In the experiments, the breakthrough volume ratio was used to determine the optimum injection rate of acid fluid, the pressure drop crossing the core can be used for analyzing the development process of the wormholes. Meanwhile, a nuclear magnetic resonance (NMR) imaging technique was used to analyse the surface and internal structures of the cores before and after acidification, so as to reveal the acid dissolution types and morphology of the wormholes. For the coring injection testing, the acid breakthrough volume ratios at different injection rates were calculated and compared when a hydrochloric acid solution was used (with HCl of 20%), and the experimental results show that an injection rate of 2 mL/min can initiate the formation of wormholes, and injection rate of 3-4 mL/min can result in the optimum acidification effect.

**Keywords:** wormhole; carbonate rocks; hydrochloric acid; acid injection rate; acidizing

收稿日期: 2017-03-03

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2017ZX005030005); 山东省自然科学基金项目(ZR201702180073); 中央高校基本科研业务费专项(14CX05019A)

作者简介: 齐宁(1980-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为采油工程及油田化学。E-mail: qining@upc.edu.cn.

在碳酸盐岩储层基质酸化中,由于岩石由具有不同孔隙直径的连通孔隙组成,绝大多数酸液趋于通过较大孔隙流动。盐酸与岩石反应迅速,流入孔隙的酸将有大部分被消耗,扩大孔隙尺寸。由于较大孔隙吸容更多的酸,导致较大孔隙比较小孔隙扩大的速度快得多。这种不稳定的化学反应过程将在储层中产生几条大的酸蚀孔道,称为蚓孔。这些蚓孔直径远大于天然孔隙,具有高导流能力,是地层流体的主要流动通道,对于酸化过程极为重要,在模拟碳酸盐岩储层酸化时这些蚓孔须予以考虑。酸化过程中,蚓孔的出现可以以最少的酸液消耗量达到改善储层非均质性的目的,这也是酸化施工最期望出现的结果。在酸化发展中期,发现在蚓孔形成条件下,碎屑性碳酸盐岩酸化溶蚀驱替过程中,突破体积与注入速度存在一定关系,即存在最优酸液注入速度。随后诸多学者对这一现象进行了研究,并以此为建模的依据,开始定量研究酸化溶蚀的过程,这是人们试图从定性研究向定量研究的又一次探索。尽管国内外研究者已经对蚓孔的扩展规律进行了大量的研究,但是这些研究多以经验型或半经验型为主<sup>[1-6]</sup>,对蚓孔的描述主要是通过一系列无量纲参数实现,如戴姆科勒数  $Da^{[7]}$ 、佩克莱特数  $Pe$  等,而这些理论研究并不能直接应用于指导酸化作业。同时,由于碳酸盐岩油藏岩石矿物组成和结构、酸岩反应以及酸化处理过程的复杂性和随机性,导致传统的研究方法不能很好地对其进行描述。研究者们多采用数值模拟研究酸液突破体积与注入速度之间的关系,通过物理模拟试验研究岩石酸蚀形态与酸液注入速度之间关系尚未见报道。以往的工作根据溶蚀特点进行简单的分类,并没有明确面溶蚀、蚓孔溶蚀和密集溶蚀3种形态之间的酸液注入速度界限。笔者通过酸化物理模拟试验,结合压降曲线分析及岩石孔隙结构表征,明确实现蚓孔酸化时酸液注入速度的界限,以指导酸化工艺优化设计。

## 1 蚓孔形成机制及蚓孔扩展影响因素

### 1.1 蚓孔形成机制

碳酸盐岩孔隙介质非均质性较强,酸化过程中酸液与碳酸盐岩反应迅速,使地层发生不均匀溶蚀。同时,地层孔隙的大小和形状有所不同,导致进入各个孔隙的酸液量不同,酸液进入孔隙主要靠对流作用,会优先进入阻力小的区域(如大孔隙、天然裂缝、溶洞),导致较多的酸液进入天然发育的高渗通道,促使酸岩反应加剧,溶蚀加快,渗透率更高,形成

循环并逐渐扩展,最终形成酸蚀蚓孔<sup>[8-9]</sup>。

酸化过程中一直伴随着  $H^+$  传质和酸岩表面反应两个过程,两个过程速度决定了酸化过程的溶蚀形态。当表面反应速度远大于传质速度时发生面溶蚀,此时  $H^+$  较少,注入的酸液几乎全在岩心入口端面上反应,仅对端面溶蚀;当表面反应速度远小于传质速度时发生密集溶蚀,此时岩心入口端大量堆积的  $H^+$  可以与端面所有高渗区发生反应,进而形成多个分支,最终形成密集溶蚀;当传质速度与表面反应速度接近时才会形成单一蚓孔<sup>[10]</sup>。

### 1.2 蚓孔扩展影响因素

影响蚓孔扩展的因素有多种,如面容比、温度、压力等,但主要是受酸液注入速度、酸液质量分数和酸液类型等因素的控制。

这些因素主要通过改变传质速度和表面反应速度之间的关系对蚓孔扩展产生影响。传质速度主要受酸液注入速度控制,而表面反应速度主要受酸液质量分数控制,可以推测对于一定质量分数的酸液体系,低速注入时容易形成面溶蚀而高速注入时容易形成密集溶蚀<sup>[11]</sup>。

## 2 试验

### 2.1 材料与仪器

试验材料:36%~38%盐酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)、去离子水、人造岩心(岩石取自新疆露头,碳酸钙含量75%)。其中,人造岩心使用无机胶结剂胶结,表现出亲水性,直径为2.50 cm,平均长度为5.65 cm,渗透率约为  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

试验仪器:多功能酸液流动及酸化评价系统(岩心驱替装置),海安县石油科研仪器有限公司;核磁共振设备,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;101-2A 电热鼓风干燥箱,武汉亚华电炉有限公司;BSA423S 精密电子天平,赛多利斯科学仪器有限公司;SHB-III 循环水式多用真空泵,郑州长城科工贸有限公司。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 试验方案

室温 25 °C 条件下,将已饱和去离子水的岩心(表1)放置在驱替装置的岩心夹持器中,加围压 5 MPa,同时用去离子水配制质量分数为 20% 的盐酸溶液,置于中间容器备用。开启平流泵,以 2 mL/min 的注入速度进行酸液驱替,实时记录入口端与出口端的压力,当岩心夹持器两端压差接近零时停

止试验;保持酸液质量分数不变,更换岩心,依次调整注入速度重复上述试验步骤。

表1 岩心参数

Table 1 Core parameters

序号	岩心长度/cm	岩心直径/cm	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	注入速度/ $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$
1	5.200	2.540	20.28	1.33	2.0
2	5.240	2.550	21.16	1.17	2.5
3	5.230	2.540	21.75	1.36	3.0
4	5.120	2.550	23.30	1.43	3.5
5	5.230	2.540	22.22	1.28	4.0
6	5.100	2.560	21.38	1.32	4.5
7	5.370	2.540	22.65	1.24	5.0

## 2.2.2 评价方法

不同的酸液注入速度下主要表现为3种溶蚀形态:一是在较低注入速度下易形成面溶蚀;二是在中等注入速度下可形成蚓孔体系;三是在较高注入速度下多出现密集溶蚀。通过对岩心入口端溶蚀形态的观察可以粗略判断出不同溶蚀形态形成时的注入速度界限。为准确界定这一界限,采用酸液突破体积比、压降曲线和岩心孔隙结构表征3种方法综合判定。

(1)酸液突破体积比。酸液突破体积比定义为蚓孔突破时消耗的酸液体积与岩心孔隙体积的比值<sup>[12]</sup>,最小突破体积比所对应的酸液注入速度被称为该酸液质量分数下的最优注入速度<sup>[13]</sup>。通过计算各组试验的突破体积比,可以得到酸液质量分数为20%时的最优注入速度。

(2)压降曲线。压降曲线即压差-时间关系曲线,它反映了酸化过程中岩心入口端和出口端之间压差随时间变化的情况。压降曲线可以实时反映蚓孔的发育过程,通过对压降曲线的解释可以对蚓孔的发育进行描述并获取准确的突破时间。

(3)岩心孔隙结构表征。采用核磁共振成像(MRI)进行岩心孔隙结构表征,这是利用核磁共振原理对岩心内部结构分析成像的一种研究方法<sup>[14-16]</sup>。如图1所示,图像中圆形亮色区域为岩心,周围黑色区域是底色,岩心区域中的亮度反映了岩石中含水量的多少,亮度越高代表该位置水饱和度就越高,对于酸化后的岩心,连续的含水区域即为蚓孔位置。其中,MRI图像圆周有高亮部分是因为试验中岩心放置于充满水的容器中。对沿岩心轴向方向上16个不同位置的MRI图像(图2)进行建模,可以得到岩心核磁共振成像三维图。通过对试验前后的岩心进行核磁共振成像,可以真实反映出岩心内部情况,更直观更充分地对蚓孔扩展规律进行解

释。

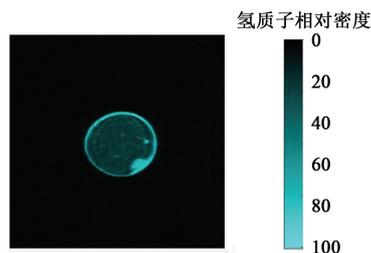


图1 MRI图像及亮度标尺

Fig. 1 MRI image and brightness scale

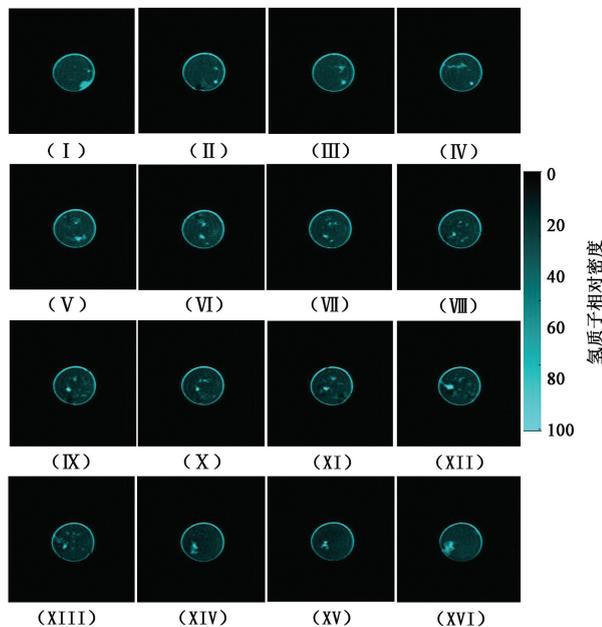


图2 岩心沿轴向方向上16个不同位置的MRI图像

Fig. 2 16 MRI images at different locations along core axis

## 3 试验结果讨论

### 3.1 酸液突破体积

根据式(1)计算出各组试验的酸液突破体积比,绘制突破体积比与注入速度的关系曲线,如图3所示。

$$V_{\text{wh}} = \frac{tQ/60}{(M_2 - M_1)/\rho} \quad (1)$$

式中, $V_{\text{wh}}$ 为酸液突破体积比; $t$ 为突破时间,s; $Q$ 为注入速度, $\text{mL}/\text{min}$ ; $M_1$ 为岩心烘干后的重量,g; $M_2$ 为岩心饱和蒸馏水后的重量,g; $\rho$ 为蒸馏水密度,取 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

由图3可以看出,最小突破体积比所对应的注入速度为3~4  $\text{mL}/\text{min}$ ,即酸液质量分数为20%时的最优注入速度为3~4  $\text{mL}/\text{min}$ ,此时蚓孔突破所消耗的酸液量最少。

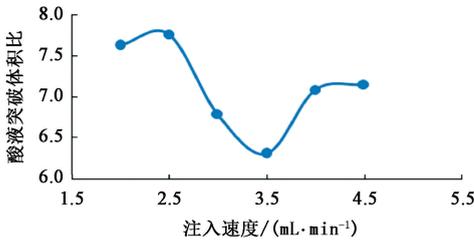


图3 酸液突破体积比与注入速度的关系曲线  
Fig.3 Relationship between acid breakthrough volume ratio and injection rate

### 3.2 压降曲线

图4为不同注入速度驱替时的压降曲线。如图

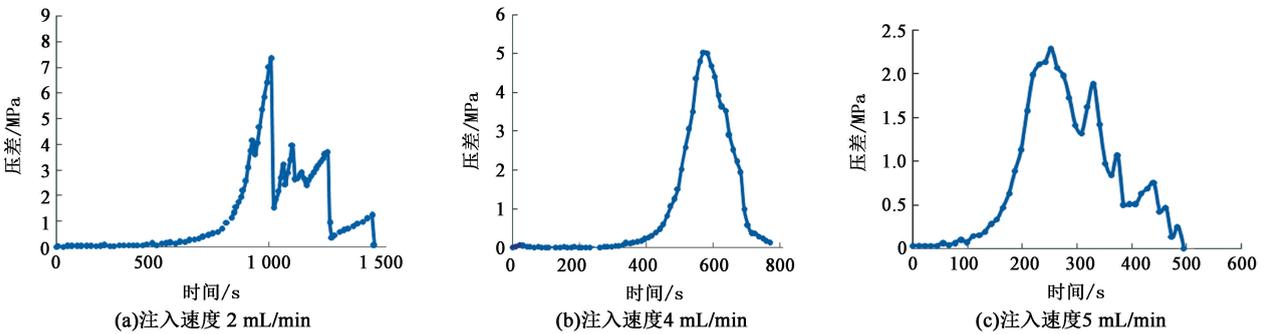


图4 不同注入速度下的压降曲线

Fig.4 Pressure drop curves under different injection rate

图4(a)和(c)的压差曲线存在波动的情况,这表明压力迅速释放但并不彻底,生成的蚓孔并非线性发育直至突破到岩心出口端,而是在扩展过程中发生转向突破到了岩心侧壁,此后蚓孔又转向回到岩心中继续生长。这一点可以通过酸化后岩心的核磁共振成像(MRI)加以证明,如图5所示。

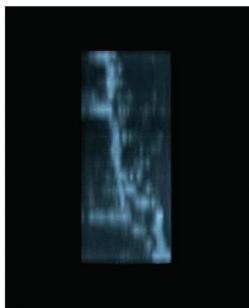


图5 酸化后岩心MRI三维合成图截图

Fig.5 A cross section of three dimensional MRI figure

图5为在3 mL/min的注入速度下酸化后岩心的MRI三维合成图的某一截面。图5中长方形亮色区域为岩心,周围黑色区域是底色,岩心区域中的亮度反映了岩石中含水量的多少,亮度越高代表该位置含水量越高,对于酸化后的岩心,图5中高亮的连续含水区域即为蚓孔,明显发现蚓孔生长轨迹并

4所示,压差整体呈现出随时间先缓慢上升后迅速下降的变化过程,这与以往文献<sup>[17]</sup>所述基本一致。试验发现,压差上升过程对应蚓孔发育过程,在这个过程中,酸蚀通道的坍塌和颗粒的运移都会堵塞部分孔隙,使岩心渗透率变低,同时反应生成的气体进入孔隙,引起贾敏效应,阻碍酸液流动。这些效应都会使酸液流动变的困难,使端面处酸液迅速堆积,入口压力不断升高。压差迅速下降则对应压力释放即蚓孔突破过程,入口端与出口端压差达到最大值时对应着蚓孔突破的瞬间,此后压差降低,最终为零。

非一条直线,而是弯曲生长,并且在蚓孔生长过程中有两次发生转向突破到了侧壁上。这种现象一方面是由于试验所用人工压制的岩心是非均质的(这一点跟碳酸盐岩储层相同),导致蚓孔总是沿着相对高渗孔隙扩展,因此蚓孔弯曲生长是一种正常现象;另一方面是由于人造岩心的强度不允许试验过程中施加过高的围压,导致了蚓孔易转向突破到岩心侧壁。

### 3.3 岩心端面

图6为不同注入速度驱替后岩心入口端面图像。

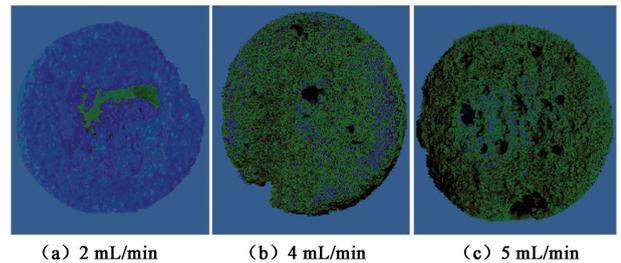


图6 驱替后岩心入口端面图像

Fig.6 Core inlet side after displacement

#### 3.3.1 2 mL/min 注入速度下的酸蚀情况

如图6(a)所示,在2 mL/min的注入速度下,试

验结束后岩心入口端面被大面积溶蚀且内部发育较为粗大的蚓孔。分析认为,试验开始时的确不会形成蚓孔,酸液始终在端面进行酸岩反应,而在溶蚀过程中伴随着岩心的坍塌,溶蚀速度小于坍塌速度,发生面溶蚀;而随着酸液的不间断注入,入口端压力不断增加,逐渐达到能使酸液在孔隙中流动所需的压差,进而形成蚓孔并最终突破。但在较长的突破时间内,伴随着蚓孔的轴向延伸,酸液中更多的  $H^+$  会扩散到蚓孔内壁,使周向反应加剧,导致蚓孔直径变大。这一点通过 MRI 得到了证实,如图 7、8 所示。由图 7 可以看出,岩心入口端面上有面积高亮区域,表明入口端被酸蚀严重,即发生面溶蚀;图 8 是由包括图 7 在内的沿岩心轴向方向上 16 个不同位置的 MRI 图像合成,可以明显观察到岩心内发育有一条相对粗大的蚓孔。

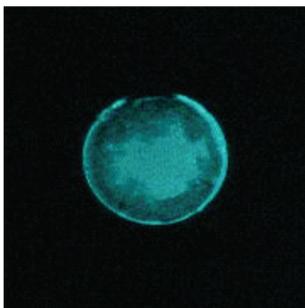


图 7 酸化后岩心入口端面 MRI 图像

Fig. 7 Core inlet side MRI image after acidification



图 8 2 mL/min 驱替后岩心 MRI 三维合成图截图

Fig. 8 A cross section of three dimensional MRI figure with injection rate of 2 mL/min

当注入速度提高到 2.5 mL/min 时,岩心中发育有正常蚓孔。由此可知,注入速度小于 2 mL/min 时多出现面溶蚀,大于 2 mL/min 时可出现蚓孔溶蚀。

### 3.3.2 5 mL/min 注入速度下的酸蚀情况

试验发现,在 5 mL/min 的注入速度下驱替后,岩心入口端蚓孔周围分布着很多密集的溶蚀小孔。将该岩心从中部切开,发现其内部只有一条主蚓孔,如图 9 所示。对该岩心进行核磁共振成像,发现岩

心内部确实仅发育有一条蚓孔,如图 10 所示。分析认为,不能将这种现象归结为文献中所述的密集溶蚀体系,而是由于高注入速度下岩心入口端有富余  $H^+$ ,从而溶蚀端面形成密集小孔。这些密集的小孔并非全部具备进一步形成蚓孔的能力,当有一条主通道出现时,酸液就会集中到渗透率较高的通道内,沿着这一条主通道扩展,最终形成一条单一蚓孔。由此可以预见,随着注入速度继续升高,溶蚀形态将完全由蚓孔转为密集溶蚀,因此可将这种密集小孔认为是一种由蚓孔向密集溶蚀过渡的溶蚀状态。由于试验设备承压能力的限制,无法进一步提高注入速度,未能通过试验确定出现密集溶蚀时的酸液注入速度界限。

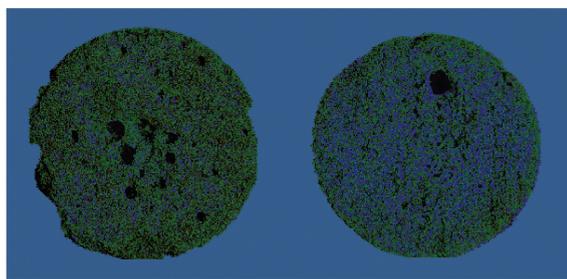


图 9 酸化后岩心入口端和中部对比

Fig. 9 Comparison of core at inlet and middle after acidification

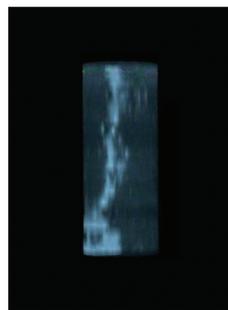


图 10 5 mL/min 驱替后岩心 MRI 三维合成图截图

Fig. 10 A cross section of three dimensional MRI figure with injection rate of 5 mL/min

岩心酸蚀类型跟传质速度和表面反应速度的相对值有关,当传质速度远大于表面反应速度时发生密集溶蚀,若降低酸液质量分数,两个速度均随之减小,但表面反应速度减小的幅度大于传质速度,试验更倾向于发生密集溶蚀。由此,建议使用低质量分数酸液更有利于观察密集溶蚀现象以及寻找蚓孔和密集溶蚀之间的界限。

## 4 结论

(1) 在试验设计的不同注入速度下,岩心驱替

试验最终都能形成蚓孔,但是低注入速度下会先发生面溶蚀,而后形成较粗的蚓孔;在高注入速度下岩心端面会产生密集的溶蚀小孔,且低质量分数酸液更有利于出现密集溶蚀。

(2) 酸液质量分数为 20% 时,注入速度小于 2 mL/min 时多出现面溶蚀,大于 2 mL/min 时可出现蚓孔溶蚀,最优注入速度为 3~4 mL/min,此时酸液突破体积比最小,酸液消耗量最少。

## 参考文献:

- [1] PANGA M K R, ZIAUDDIN M, BALAKOTAIAH V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization[J]. *Aiche Journal*, 2005, 51(12):3231-3248.
- [2] 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.
- [3] MAHESHWARI P, RATNAKAR R R, KALIA N, et al. 3-D simulation and analysis of reactive dissolution and wormhole formation in carbonate rocks[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 90:258-274.
- [4] 张楷,刘平礼,谭晓华,等. 酸蚀蚓孔发育模型综述[J]. *石油与天然气化工*, 2015, 44(2):96-100.  
ZHANG Kai, LIU Pingli, TAN Xiaohua, et al. Review of wormhole propagation model[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2015, 44(2):96-100.
- [5] DACCORD G. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(5):479-482.
- [6] 纪国法,杨兆中,李小刚,等. 考虑蚓孔的碳酸盐岩酸化产能计算新模型[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(3):90-94.  
JI Guofa, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang, et al. A novel well productivity model of carbonate reservoir matrix acidizing considering wormhole[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(3):90-94.
- [7] FREDD C N, FOGLER H S. The existence of an optimum damkohler number for matrix stimulation of carbonate formations [R]. SPE 38167, 1997.
- [8] 张汝生,卢拥军. 碳酸盐岩基质酸化/酸压裂中形成虫孔研究新进展[J]. *油田化学*, 2005, 22(3):276-278.  
ZHANG Rusheng, LU Yongjun. New development in understanding wormhole in carbonate formation during matrix acidizing/acid fracturing [J]. *Oilfield Chemistry*, 2005, 22(3):276-278.
- [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] WANG Y, HILL A D, SCHECHTER R S. The optimum injection rate for matrix acidizing of carbonate formations [R]. SPE 26578, 1993.
- [11] FREDD C N, MILLER M J. Validation of carbonate matrix stimulation models [R]. SPE 58713, 2000.
- [12] ALGHAMDI A H A. Experimental and theoretical study of surfactant-based acid diverting materials [D]. Texas; Dissertations & Theses-Gradworks, Texas A & M University, 2010.
- [13] DONG K, ZHU D, HILL A D. Theoretical and experimental study on optimal injection rates in carbonate acidizing [R]. SPE 178961, 2016.
- [14] 周科平,李杰林,许玉娟,等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构特征测定[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(12):4796-4800.  
ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, et al. Measurement of rock pore structure based on NMR technology [J]. *Journal of Central South University (Science & Technology)*, 2012, 43(12):4796-4800.
- [15] KREBS M, LUNGWITZ B, SOUZA A, et al. The first visualization of acid treatments on carbonates with 3D nuclear magnetic resonance imaging (NMRI) [R]. SPE 168198, 2015.
- [16] MAHMOUD M, AL-DUAILEIJ Y, AL-KHALDI M, et al. NMR as a characterization tool for wormholes [R]. SPE 171699, 2016.
- [17] TARDY P, LECERF B, CHRISTANTI Y. An experimentally validated wormhole model for self-diverting and conventional acids in carbonate rocks under radial flow conditions [R]. SPE 107854, 2007.

(编辑 李志芬)