

文章编号:1673-5005(2021)01-0110-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.01.013

# 白云岩储层酸岩反应控制模式界限

赫安乐<sup>1</sup>, 齐宁<sup>2,3</sup>, 崔明月<sup>1</sup>, 潘林<sup>3</sup>, 晏军<sup>1</sup>, 李艺恬<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 非常规油气开发教育部重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东青岛 266580; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**为明确白云岩储层酸岩反应控制模式界限,以中亚某区块白云岩储层岩心为对象,开展酸岩反应动力学试验和数值模拟研究,并通过扫描电镜对比分析灰岩与白云岩酸蚀机制的差异;建立不同因素控制下的白云岩酸岩反应动力学方程,明确温度 90 ℃、转速 500 r/min 为表面反应控制模式、表面反应和传质共同控制模式的界限。结果表明:相同试验条件下,随着白云质体积分数的升高,酸岩反应速度迅速降低;当白云质体积分数超过 75%时,酸岩反应速度降到最低并趋于稳定;白云岩储层的酸压改造方向应区别于灰岩储层,在允许范围内可以适当提高酸岩反应速度,以改善裂缝壁面的非均匀刻蚀程度,增大酸蚀裂缝的导流能力。

**关键词:**酸压; 酸岩反应动力学; 白云岩; 反应控制模式; 非均匀刻蚀

**中图分类号:** TE 357.2 **文献标志码:** A

**引用格式:** 赫安乐, 齐宁, 崔明月, 等. 白云岩储层酸岩反应控制模式界限[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 110-116.

HE Anle, QI Ning, CUI Mingyue, et al. Limitation on acid-rock reaction and its control mode in dolomite formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 110-116.

## Limitation on acid-rock reaction and its control mode in dolomite formation

HE Anle<sup>1</sup>, QI Ning<sup>2,3</sup>, CUI Mingyue<sup>1</sup>, PAN Lin<sup>3</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, LI Yitian<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;  
2. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development (China University of Petroleum (East China)), Ministry of Education, Qingdao 266580, China;  
3. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** In order to define the limitation of acid-rock reaction and its control mode of dolomite reservoirs, the kinetics experiments of acid-rock reaction and numerical simulation were carried out, using rock cores from a dolomite reservoir in Central Asia. The difference of acid erosion mechanisms on limestone and dolomite was analyzed by scanning electron microscope. An acid-rock reaction kinetics model in dolomite cores under different conditions was established. The limits of surface reaction and mass transfer control mode were defined at 90 ℃, with stirring rate of 500 r/min. The results show that, under the same testing conditions and with the increase of the dolomite content, the acid-rock reaction rate decreases rapidly. When the dolomite content exceeds 75%, the acid-rock reaction rate decreases to a lowest level and tends to be stable. Therefore, the acid fracturing transformation direction in dolomite reservoirs should be different from that in limestone reservoirs, and acid-rock reaction rate can be appropriately increased within an allowable range in order to enhance the uneven erosion on the fracture wall and increase the conductivity of acid eroded fractures.

**Keywords:** acid fracturing; acid-rock reaction kinetics; dolomite; reaction control mode; inhomogeneous erosion

收稿日期: 2020-02-15

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2017ZX005030005); 中央高校基本科研业务费专项(19CX02067A)

第一作者: 赫安乐(1963-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为储层改造领域的理论研究和现场技术服务。E-mail: hal69@petrochina.

碳酸盐岩储层油气资源储量丰富,约占世界油气储量的50%,该类储层常采用酸化酸压增产措施以达到高效开发的目的。与砂岩相比<sup>[1]</sup>,碳酸盐岩储层非均质性强,与酸反应剧烈,在基质酸化过程中容易形成非均匀刻蚀,酸蚀裂缝导流能力较高。早期学者们对碳酸盐岩酸岩反应动力学研究就已区分白云石和方解石<sup>[2]</sup>,主要采用旋转岩盘试验研究二者在盐酸中的溶解与扩散过程<sup>[3]</sup>。为揭示酸岩反应和增产改造机制,以蚓孔为研究对象分别建立了毛细管、半经验、双尺度连续数学模型以及极坐标推广应用<sup>[4-8]</sup>,研究了不同影响因素下酸蚀蚓孔形态和扩展规律<sup>[9-10]</sup>。Sayed等<sup>[11]</sup>研究了白云岩与乳化酸之间的酸岩反应,提出了乳化酸浓度的酸岩反应控制模式界限;Qiu等<sup>[12]</sup>针对石灰岩和大理岩采用旋转岩盘酸岩反应试验,通过改变转速和乏酸浓度,研究了反应产物对酸岩反应的影响;Dong等<sup>[13]</sup>研究了温度对白云岩酸岩反应的影响;Hyunsang等<sup>[14]</sup>研究了乏酸对白云岩酸岩反应动力学规律的影响。国内外酸岩反应动力学研究多集中在灰岩和砂岩储层<sup>[15]</sup>,针对白云岩的相关研究较少<sup>[16]</sup>,尚未见到从岩石晶体结构及微观角度阐述白云岩酸岩反应机制的相关报道,白云岩酸岩反应控制模式界限认识不明确。在酸化酸压改造过程中,白云岩储层较灰岩储层更难形成非均匀刻蚀<sup>[17]</sup>,导流能力普遍较差<sup>[18]</sup>。例如,中亚某区块油藏埋深2 100~3 200 m,储层温度61~85℃,储层岩石组分中白云岩体积分数为15%~86.5%。目前使用的酸液体系是基于灰岩组分95%以上储层进行研制的,应用于该类储层时,改造后无明显增产效果。笔者以中亚某区块白云岩为研究对象,对比分析纯白云岩与纯灰岩的酸岩反应动力学规律差异,同时改变温度、转速、白云质体积分数等因素,研究白云岩储层酸岩反应控制模式界限,为白云岩储层的定量酸压工艺优化设计提供理论指导。

## 1 试验

### 1.1 试验材料与仪器

(1)试验材料:白云岩岩心片(岩石取自中亚某区块储层);纯灰岩岩心片(岩石取自新疆露头,碳酸钙体积分数94%);纯白云岩岩心片(岩石取自河北露头,白云质体积分数96%);质量分数为36%~38%的盐酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),去离子水。

(2)试验仪器:SYF-3型酸岩反应旋转岩盘仪,

海安县石油科研仪器有限公司;ZDJ-4A型自动电位滴定仪,上海仪电科学仪器股份有限公司;HADY-6A型全自动洗油仪,海安华达石油仪器有限公司;扫描电镜EM-30 Plus,韩国COXEM公司。

### 1.2 试验方法

通过酸岩反应速度测定以及白云岩酸蚀前后扫描电镜观测,分析酸液质量分数、温度、 $H^+$ 传质系数、白云质体积分数等各因素对白云岩酸岩反应速度的影响,寻找白云岩储层酸岩反应控制模式界限。

#### 1.2.1 试验条件

(1)酸液质量分数。酸岩反应过程会受同离子效应影响,为此在配制酸液时加入反应物,以评价模拟地层条件下不同质量分数(5%、10%、15%、20%)余酸对酸岩反应速度的影响。

(2)压力。为避免压力对酸岩反应速度产生影响,控制试验压力大于7 MPa。

(3)温度。未明确白云岩储层酸岩反应控制模式界限,综合考虑地质矿物学及目标区块温度条件,将试验温度设定为60、75、90、100℃四个温度点。

(4)白云质体积分数。白云质体积分数会影响白云岩储层的物性和白云岩酸岩反应速度及其酸压效果,为此分别选取中亚某区块白云质体积分数为7%、56%、75%、90%的现场岩心进行酸岩反应试验。

#### 1.2.2 评价方法

(1)酸岩反应动力学方程的获取。酸岩反应动力学方程表达式为

$$J = KC^m \quad (1)$$

式中, $J$ 为酸岩反应速度, $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ;  $C$ 为酸液浓度, $\text{mol}/\text{L}$ ;  $m$ 为反应级数; $K$ 为反应速度常数, $(\text{mol}/\text{L})^{-m} \cdot \text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

在双对数坐标下以斜率为 $m$ 、截距为 $\lg K$ 绘制 $\lg J \sim \lg C$ 的直线关系图。通过最小二乘法进行线性回归处理,求得常数 $m$ 和 $K$ ,从而得出酸岩反应动力学方程。

(2)酸岩反应活化能的求取。根据Arrhenius理论方程,在给定温度下由酸岩反应动力学方程得到:

$$J = K_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) C^m \quad (2)$$

式中, $K_0$ 为频率因子 $(\text{mol}/\text{L})^{-m} \cdot \text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ;  $E_a$ 为酸岩反应活化能, $\text{J}/\text{mol}$ ;  $R$ 为通用气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为系统温度, $\text{K}$ 。

在确定酸液浓度的情况下,在半对数坐标中绘制 $\lg J$ 与 $1/T$ 直线关系图,根据相应的斜率和截距,求得常数反应活化能 $E_a$ 和频率因子 $K_0$ 。

(3)  $H^+$ 有效传质系数的确定。酸岩反应过程中,  $H^+$ 的传递过程是对流扩散过程。通过对流扩散的微分方程, 可知  $H^+$ 有效传质系数为

$$D_e = (1.6129v^{1/6}\omega^{1/2}C_1^{-1}J)^{3/2} \quad (3)$$

式中,  $D_e$  为  $H^+$ 有效传质系数,  $cm^2/s$ ;  $v$  为酸液平均运动黏度,  $cm^2/s$ ;  $\omega$  为旋转角速度,  $s^{-1}$ ;  $C_1$  为  $t$ 时刻的酸液浓度,  $mol/L$ 。

通过  $H^+$ 有效传质系数, 利用传质速度的计算公式, 计算出不同转速下的传质速度, 与酸岩反应速度对比, 借此可以判断出反应控制模式界限。

通过控制岩心圆盘旋转模拟酸液在裂缝中的流动过程, 其雷诺数为

$$Re = \omega R^2 / \nu \quad (4)$$

式中,  $Re$  为旋转雷诺数;  $r$  为岩盘半径,  $cm$ 。

$H^+$ 有效传质系数可以反映酸液流态的关系, 通过传质速度及反应速度与  $Re$  的关系曲线, 确定不同酸液流态和反应速度以及传质速度的关系。

## 2 试验结果讨论

### 2.1 纯白云岩与纯灰岩酸岩反应对比

试验用酸液为质量分数分别为 5%、10%、15%、20% 的盐酸余酸。在 4 个酸液质量分数梯度下分别测量纯白云岩、纯灰岩酸岩反应速度, 并绘制酸岩反应速度双对数曲线, 如图 1 所示。

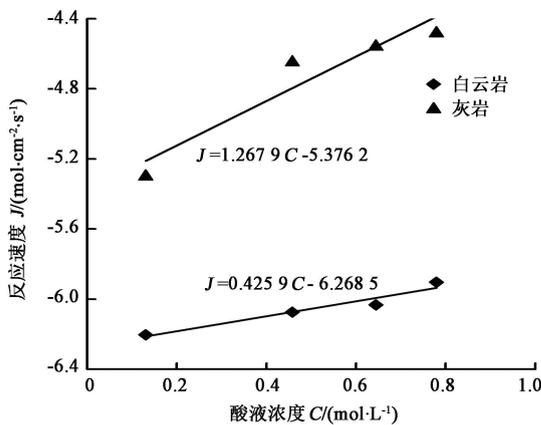


图 1 纯白云岩和纯灰岩酸岩反应速度随酸液浓度的变化

Fig. 1 Variation of reaction velocity with concentration of pure dolomite and pure limestone acid rock

由图 1 可知, 在  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $500\text{ r/min}$  的条件下, 纯白云岩反应级数  $m=0.705$ , 截距  $\lg K=-6.4841$ 。反应速度常数  $K=3.279 \times 10^{-7} (\text{mol/L})^{-0.705} \cdot \text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 酸岩反应动力学方程为

$$J = 3.279 \times 10^{-7} C^{0.705} \quad (5)$$

在  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $500\text{ r/min}$  的条件下, 纯灰岩反应级数  $m=2.217$ , 截距  $\lg K=-6.1208$ 。即反应速度常数  $K=7.569 \times 10^{-7} (\text{mol/L})^{-2.217} \cdot \text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 酸岩反应动力学方程为

$$J = 7.569 \times 10^{-7} C^{2.217} \quad (6)$$

由试验数据可知, 盐酸质量分数为 15% 时, 纯白云岩的酸岩反应速度为  $1.04 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 纯灰岩的酸岩反应速度为  $2.82 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 两者相差一个数量级, 在不同的酸液浓度下也具有相同的规律, 即相同条件下纯白云岩的酸岩反应速度均远小于纯灰岩的酸岩反应速度。酸岩反应动力学试验证明了相同反应条件下白云岩的酸岩反应速度远小于灰岩, 同时对反应产物端面观测发现酸蚀后的纯灰岩表面刻蚀明显。相比之下, 纯白云岩表面酸蚀后无明显刻蚀迹象, 表面平整, 酸蚀后产物端面见图 2。通过扫描电镜试验可以发现, 灰岩表面刻蚀明显, 溶蚀为面溶蚀; 白云岩酸蚀过程中酸液主要沿着白云岩构造的节理面向纵深溶蚀, 由于白云岩晶间力最弱处为节理面交汇处, 且节理面的矿物填充物主要为方解石, 易于溶蚀, 故表面无明显刻蚀迹象, 整体酸蚀效果不佳。灰岩与白云岩酸岩反应前后岩心表面的扫描电镜照片见图 3、4。

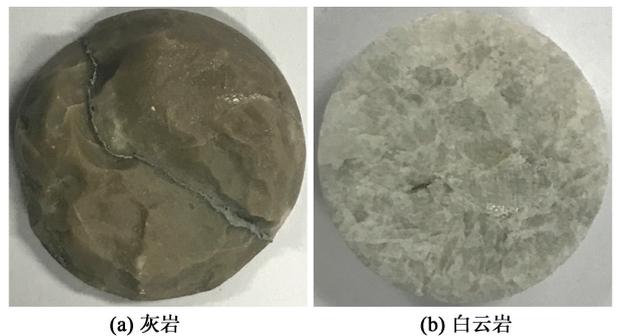


图 2 反应后岩石端面

Fig. 2 End face of rock after reaction

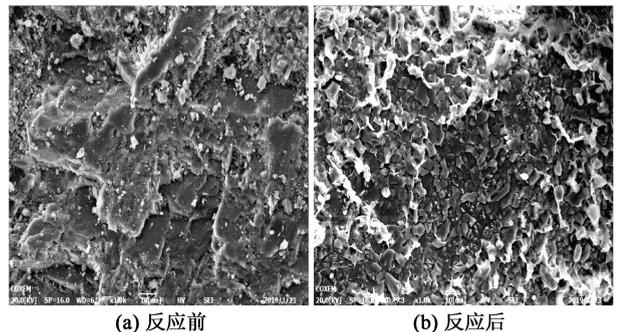
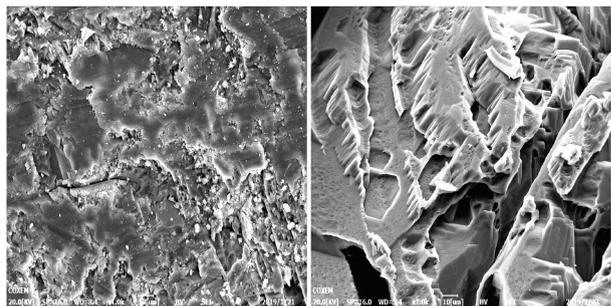


图 3 灰岩酸岩反应前后扫描电镜图( $\times 1000$ )

Fig. 3 SEM figures of limestone before and after acid rock reaction ( $\times 1000$ )



(a) 反应前 (b) 反应后

图 4 白云岩酸岩反应前后扫描电镜图(×1000)

Fig. 4 SEM figures of dolomite before and after acid rock reaction(×1000)

为解释上述现象,通过改进酸化领域常用的双尺度连续模型,模拟岩盘在酸液中旋转、反应的过程,研究岩盘酸蚀形态与酸岩反应速度之间的关系(图 5)。

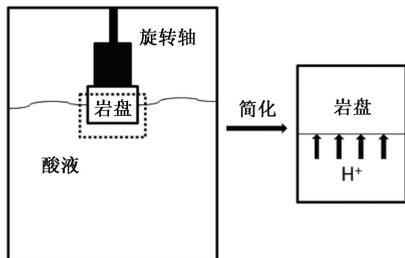


图 5 旋转岩盘示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rotating rock disk

如图 5 所示,岩盘在反应釜中旋转,实际上只接触图中虚线框内的这部分酸液,氢离子从固液界面传质到岩盘内部与白云石和方解石发生反应。酸液在岩盘中的流动由达西定律和连续性方程控制:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\frac{k}{\mu} \nabla p \right) = 0. \quad (7)$$

式中, $k$  为地层渗透率,  $m^2$ ;  $\mu$  为酸液黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $p$  为酸液压力,  $Pa$ ;  $\varphi$  为地层孔隙度;  $t$  为反应时间,  $s$ 。

氢离子在流体中的传质由对流扩散方程控制:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi C_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (UC_f) - \nabla \cdot (\varphi D_e \cdot \nabla C_f) = \\ -k_c a_{CaMg} (C_f - C_{sCaMg}) \cdot (V_{CaMg} > 0) - k_c a_{Ca} (C_f - C_{sCa}) \cdot (V_{Ca} > 0). \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $U$  为达西速度矢量,  $m/s$ ;  $C_f$  为岩石孔隙中的酸液浓度,  $mol/m^3$ ;  $D_e$  为氢离子的扩散张量,  $m^2/s$ ;  $k_c$  为氢离子的传质系数,  $m/s$ ;  $a_{CaMg}$  为单位体积白云石的孔隙面积,  $m^2/m^3$ ;  $C_{sCaMg}$  为白云石表面的酸液浓度,  $mol/m^3$ ;  $V_{CaMg}$  为白云石的体积分数,  $V_{CaMg} > 0$  为逻辑判断表达式,表达式成立时,其值为 1;  $a_{Ca}$  为单位体积方解石的孔隙面积,  $m^2/m^3$ ;  $C_{sCa}$  为方解石

表面的酸液浓度,  $mol/m^3$ ;  $V_{Ca}$  为方解石的体积分数,  $V_{Ca} > 0$  为逻辑判断表达式,表达式成立时,其值为 1。

白云石和方解石的体积分数变化分别为

$$\frac{dV_{CaMg}}{dt} = \frac{k_c a_{CaMg} (C_f - C_{sCaMg}) \alpha_{CaMg}}{\rho_{sCaMg}}, \quad (9)$$

$$\frac{dV_{Ca}}{dt} = \frac{k_c a_{Ca} (C_f - C_{sCa}) \alpha_{Ca}}{\rho_{sCa}}. \quad (10)$$

式中, $\alpha_{CaMg}$  为单位摩尔的酸液所能溶蚀的白云石质量,  $kg/mol$ ;  $\rho_{sCaMg}$  为白云石的密度,  $kg/m^3$ ;  $\alpha_{Ca}$  为单位摩尔的酸液所能溶蚀的方解石质量,  $kg/mol$ ;  $\rho_{sCa}$  为方解石的密度,  $kg/m^3$ 。

在对流扩散方程中,表征氢离子消耗速度的关键是源项:

$$S = k_c a (C_f - C_s) = k_s a C_s^m. \quad (11)$$

式中, $S$  为源项,  $mol/(L \cdot s)$ ;  $k_s$  为表面反应速度常数,  $(mol/L)^{-m} \cdot mol/(cm^2 \cdot s)$ 。

为了计算岩石孔隙表面的氢离子浓度,双尺度连续模型假定酸岩反应为一级反应。当反应级数  $m = 1$  时,氢离子的消耗速度为

$$S = k_s a C_s = a C_f k_c \frac{1}{1 + \frac{k_c}{k_s}} = a C_f K. \quad (12)$$

表面反应速度常数  $k_s$  与传质系数  $k_c$  的比值表示反应速度与传质速度的相对强弱,一般作为酸岩反应控制模式的判断依据。酸岩反应速度半对数曲线如图 6 所示。

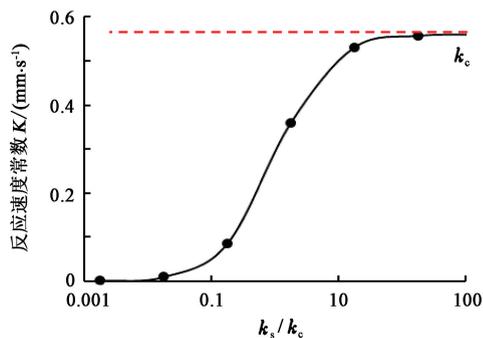


图 6 酸岩反应速度半对数曲线

Fig. 6 Semilogarithmic curve of acid rock reaction rate

从图 6 可以看出,当  $k_s/k_c < 0.1$  时,酸岩反应速度常数  $K$  随  $k_s$  线性变化,即  $K \approx k_s$ ,说明此时的酸岩反应由表面反应控制;当  $k_s/k_c > 10$  时,酸岩反应速度常数逐渐逼近传质系数,即  $K \approx k_c$ ,说明此时的酸岩反应由传质控制。在相同条件下,两种模式的酸岩反应速度至少相差 11 倍,这可以作为大致判断控

制模式的标准。

根据图1的数据可求得,当反应级数  $m = 1$  时,灰岩的酸岩反应速度常数  $K_{Ca} = 63.9 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ ,处于传质控制模式;白云岩  $K_{CaMg} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ ,两者相差 26.6 倍,可以推断出白云岩处于表面反应控制模式。

为模拟白云岩和灰岩岩盘的酸蚀形态,将岩盘的白云质体积分数分别设为 90% 和 7%,反应时间设为 5 min。图 7 和 8 表明,尽管岩盘中的白云石和

方解石体积分数差异悬殊,由于方解石的酸岩反应速度比白云石快得多,酸液总是优先与方解石反应。这表现为方解石几乎全部被溶蚀,出现酸蚀沟槽(图 7、8 中蓝色区域),白云石被轻微溶蚀,形成相对高渗带(图 7、8 中黄色区域)。白云岩地层中,方解石倾向于在岩石节理面和微裂缝中填充,因此白云岩岩盘表面平整,局部区域出现酸蚀沟槽(图 2(a)、图 3);灰岩岩盘则酸蚀明显,形成面溶蚀的形态(图 2(b)、图 4)。

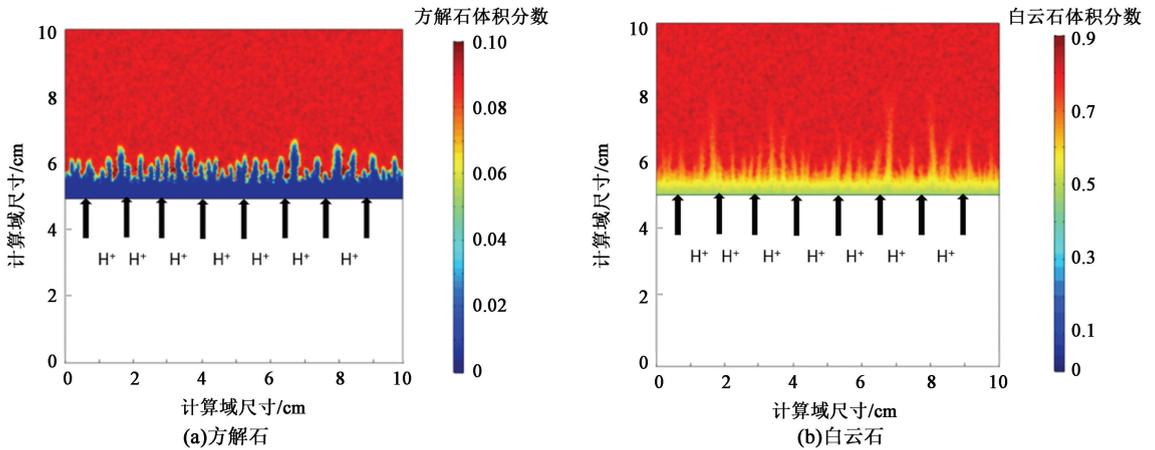


图 7 白云岩岩盘模拟结果

Fig. 7 Simulation results of dolomite disk

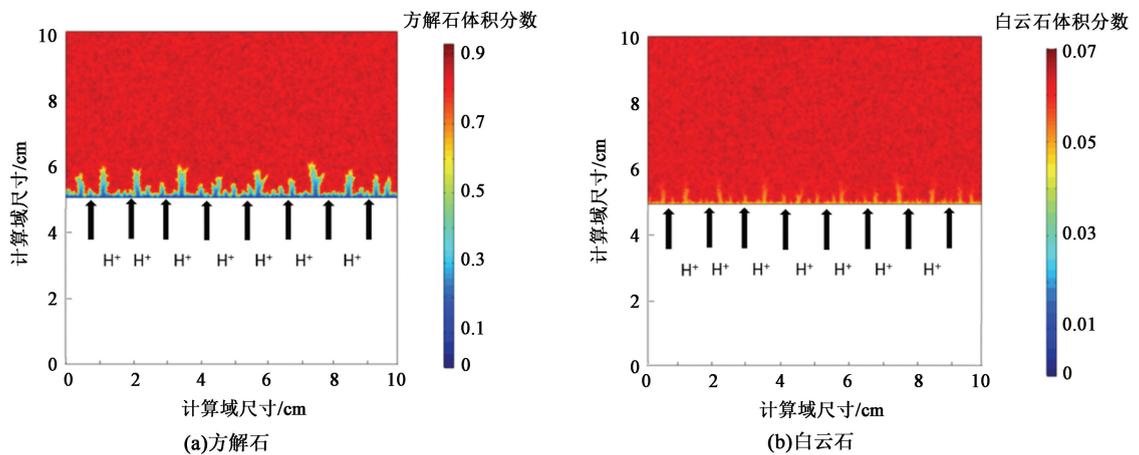


图 8 灰岩岩盘模拟结果

Fig. 8 Simulation results of limestone disk

### 2.2 不同因素控制下的白云岩酸岩反应

#### 2.2.1 温度

在盐酸质量分数为 20%、白云质体积分数为 75%、旋转岩盘仪转速为 500 r/min 的条件下,分别进行温度为 60、75、90、100 °C 下的酸岩反应试验。根据试验结果,绘制酸岩反应速度随温度的变化曲线见图 9。

根据 Arrhenius 理论方程,通过线性回归曲线可

以得到变温条件下盐酸与岩心的反应动力学方程为

$$J = 2.797 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-7806.098}{RT}\right) C^{0.8543} \quad (13)$$

依据矿物的选择性溶蚀理论可知,反应温度升高,矿物晶格的离子内能增大,破坏晶格所需的能量随之降低。所以,在一定范围内提高温度,可以有效提高白云岩与酸液的反应速度,加深白云岩酸蚀程度。

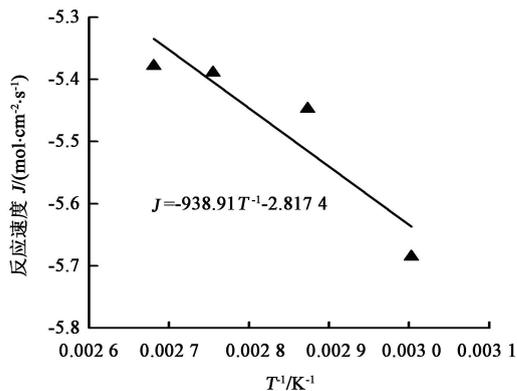


图 9 不同温度下的酸岩反应动力学方程

Fig. 9 Kinetic equations of acid rock reaction at different temperatures

### 2.2.2 H<sup>+</sup>有效传质系数

选取中亚某区块 75% 白云质体积分数的白云石,测定不同转速下的酸岩反应速度和 H<sup>+</sup>传质系数,结果见图 10。

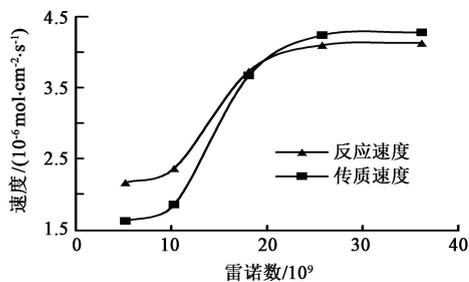


图 10 白云岩酸岩反应速度、H<sup>+</sup>传质速度与雷诺数的关系

Fig. 10 Relationship between Reynolds number and reaction velocity, H<sup>+</sup> mass transfer velocity of dolomite acid rock

由试验结果可知,固定酸液浓度,白云岩酸岩反应速度与 H<sup>+</sup>传质系数成正相关,但随着 H<sup>+</sup>传质系数的增大,白云岩酸岩反应速度增幅较小。同时由图 10 可以看出,传质速度和反应速度曲线的交点介于雷诺数  $1.81 \times 10^{10}$  (转速 350 r/min) 与  $2.58 \times 10^{10}$  (转速 500 r/min) 之间。酸岩反应控制模式由传质速度和表面反应速度中较慢的一方决定,据此可以判断:在温度为 90 ℃、白云质体积分数为 75%、酸质量分数为 20%、转速为 500 r/min 的条件下,白云岩的酸岩反应控制模式为表面反应控制,也就是说继续提高酸液质量分数和转速对增大酸岩反应速度没有意义。这意味着与灰岩相比,同条件的白云岩刻蚀程度更低,酸化过程中更难形成非均匀刻蚀。

### 2.2.3 白云质体积分数

选取不同白云质体积分数的中亚某区块白云石

岩心,试验温度为 90 ℃,压力为 7 MPa,转速为 500 r/min,盐酸质量分数为 20%,测定结果如图 11 所示。

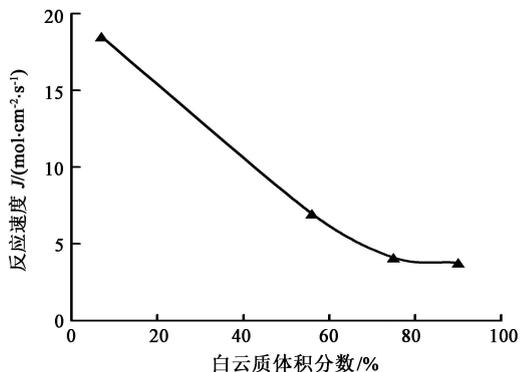


图 11 不同白云质体积分数下的酸岩反应速度变化曲线

Fig. 11 Variation curve of acid rock reaction rate under different dolomite content

表 1 不同白云质体积分数白云岩酸岩反应刻蚀形态对比  
Table 1 Comparison of reaction etching morphology of dolomite acid rocks with different dolomite content

白云石体积分数/%	反应前	反应后
7		
56		
75		
90		

从图 11 可以看出,碳酸盐岩在酸岩反应过程中,随着白云质体积分数的升高,酸岩反应速度降低,当白云质体积分数超过 75% 时,其酸岩反应速度变化趋于水平。白云质体积分数对酸岩反应速度影响很大,且存在影响界限。这一界限受温度、岩性、酸液类型等条件的影响。在试验条件下,白云质体积分数 75% 即为酸岩反应速度的界限。

## 3 结 论

(1) 灰岩酸岩反应速度快,酸蚀程度高,表面刻蚀明显,溶蚀为面溶蚀,酸压改造易形成非均匀刻蚀;白云岩酸蚀过程中酸液主要沿着构造的节理面向纵深溶蚀,节理面的矿物填充物主要为方解石,易于溶蚀,而白云石酸岩反应速度慢,表面无明显刻蚀

迹象,酸压改造难形成非均匀刻蚀,这是白云岩酸压效果比灰岩差的主要原因。

(2)纯灰岩的酸岩反应速度远大于纯白云岩,至少高出纯白云岩1个数量级;随白云质体积分数升高,酸岩反应速度逐渐降低;当白云质体积分数高于75%时,酸岩反应速度随白云质体积分数的升高降幅变缓。

(3)当温度超过90℃时,白云岩酸岩反应速度随温度升高增幅不明显;白云岩酸岩反应速度与 $H^+$ 传质系数成正相关,但随 $H^+$ 传质系数增大,白云岩酸岩反应速度增幅较小;酸岩反应速度随着白云质体积分数的升高而迅速降低,当白云质体积分数超过75%时,其酸岩反应速度变化趋于水平。这说明90℃下白云质体积分数75%、酸质量分数20%、转速500 r/min时,白云岩酸蚀受表面反应控制,其刻蚀程度较低,酸化过程中较难形成非均匀刻蚀。

#### 参考文献:

- [1] 李侠清,张贵才,葛际江,等. 砂岩油藏海水基酸液二次伤害的影响因素分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):161-168.  
LI Xiaqing, ZHANG Guicai, GE Jijiang, et al. Analysis on the influencing factors of secondary damage of seawater-based acid on sandstone reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(3):161-168.
- [2] LUND K, FOGLER H S, MCCUNE C C. Acidization—I: the dissolution of dolomite in hydrochloric acid[J]. Chemical Engineering Science, 1973,28(3):691-700.
- [3] 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.
- [4] HOWFNER M L, FOGLER H S. Role of acid diffusion in matrix acidizing of carbonates[R]. SPE 13564, 1987.
- [5] DACCORD G. Chemical dissolution of a porous medium by a reactive fluid[J]. Chemical Engineering Science, 1993,48(5):479-482.
- [6] BUIJSE M A, GLASBERGEN G. A semi-empirical model to calculate wormhole growth in carbonate acidizing[R]. SPE 96892, 2005.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] CUI X, LINES L R, KREBES E S. Numerical modeling fractures and fractal network feature-wormhole of CHOPS[R]. Houston, Texas; Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [10] QI Ning, CHEN Guobin, FANG Mingjun, et al. Damköhler number-based research on dividing dissolution patterns in carbonate acidizing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018(170):922-931.
- [11] SAYED M A I, NASER-EL-DIN H A. Reaction rate of emulsified acids and dolomite[R]. SPE 151815, 2012.
- [12] QIU X, ZHAO W, CHANG F, et al. Quantitative modeling of acid wormholing in carbonates-what are the gaps to bridge[R]. SPE 164245, 2013.
- [13] DONG K, ZHU D, HILL A D. The role of temperature on optimal conditions in dolomite acidizing: an experimental study and its applications[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018(165):736-742.
- [14] HYUNSANG Y, YOUNGMIN K, WONSUK L, et al. An experimental study on acid-rock reaction kinetics using dolomite in carbonate acidizing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018(168):478-494.
- [15] KHALIDM A, SULTAN A, QIU X. Revisiting reaction kinetics and diffusion rate of dolomitic rock with HCl[R]. SPE 175832, 2015.
- [16] GHOMMEM M, ZHAO W, DYER S, et al. Carbonate acidizing: modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015(131):18-33.
- [17] 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.
- [18] MUMALLAH N A. Hydrochloric acid diffusion coefficients at acid-fracturing conditions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996,15(2/3/4):361-374.