

Mathematical Model of Acid Rock Reaction in the Process of CO₂ Huff and Puff Stimulation of Horizontal Wells in High Water Cut

Sen Lin

School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei
Email: 757327642@qq.com

Received: Dec. 1st, 2015; accepted: Jan. 18th, 2016; published: Sep. 15th, 2016

Copyright © 2016 by author, Yangtze University and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Mathematical model of corrosion of CO₂ on the wellbore radial in the process of CO₂ huff and puff of horizontal wells in high water cut is established to study the effect CO₂ stimulation to the reservoir and the effect of injection rate, injection, soaking time, time of huff and puff, pressure of reservoir and temperature of reservoir to corrosion. Simulation results show that the effective distance of acid is short, which is less than 0.2 m; with the increase of injection rate, acid range increases, the degree of reservoir reconstruction decreases; as the injection, formation temperature and formation pressure increase, modification extent increase; soak time will have little impact on the reservoir reconstruction; with the increase of throughput times, the degree of reservoir reconstruction become greater, but the degree of each stage and reformation decreases.

Keywords

High Water Cut, Horizontal Wells, CO₂ Huff and Puff, Mathematical Model, Reservoir Reconstruction, Impact Parameters

高含水水平井注CO₂酸岩反应数学模型

林 森

长江大学石油工程学院, 湖北 武汉

作者简介: 林森(1991-), 男, 硕士生, 主要从事油气田开发工程方面的研究工作。

Email: 757327642@qq.com

收稿日期: 2015年12月1日; 录用日期: 2016年1月18日; 发布日期: 2016年9月15日

摘 要

高含水水平井进行CO₂吞吐时, 就酸液在井筒径向上对储层的改造作用建立数学模型, 机理性研究CO₂吞吐对储层的影响以及注入速度、注入量、焖井时间、吞吐次数、地层压力和地层温度对改造作用的影响, 采用塔河9区实际油田参数后的结果表明, 吞吐过程中酸液的有效作用距离很短, 小于0.2 m; 随着注入速度的增加, 酸液作用距离增加, 储层改造的程度下降; 随着注入量、地层温度和地层压力的增加, 改造程度增加; 焖井时间对储层改造的影响很小; 随着吞吐次数的增加, 储层改造的程度越大, 但是每阶段吞吐改造的程度变小。

关键词

高含水率, 水平井, CO₂吞吐, 数学模型, 储层改造, 影响参数

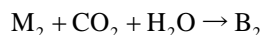
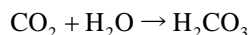
1. 引言

在CO₂吞吐时, 在地层条件下CO₂分子会很快溶解到地层水中形成碳酸溶液, 进而对储层中的碳酸盐矿物和硅酸盐矿物产生腐蚀, 生成新矿物和可溶性离子, 最终改变储层特征。受1994年Bryant提出的“两酸三矿物”模型[1]的启发, 建立酸液沿井筒径向流动和焖井时候的数学模型, 并且进行数值求解, 研究了施工工艺和相应的地层条件对碳酸与矿物反应的影响, 用于预测CO₂吞吐对储层的改造情况和评价其对储层的解堵效果。

2. 数学模型的建立

根据质量守恒原理, 建立现场实际形成的碳酸溶液沿井筒径向流动和焖井时候的数学模型[1]-[3], 假设条件如下: ①形成的酸液在储层中沿径向流动; ②注酸阶段井壁处的酸液质量浓度不发生变化; ③反应的岩石矿物分为碳酸盐矿物和硅酸盐矿物, 反应依据各自的动力学方程进行; ④忽略酸液中的分子扩散运动; ⑤如图1所示, 注入的CO₂与井筒中的地层水接触时, 井筒中的地层水立刻饱和CO₂形成酸液; ⑥在酸液与岩石反应过程中, 因为反应或者由于化学反应平衡变化所生成的矿物会随着原油的反向流动而排出储层外, 所以不考虑其对孔隙度变化的影响。

碳酸主要与岩石中的硅酸盐矿物和碳酸盐矿物反应, 反应方程式如下:



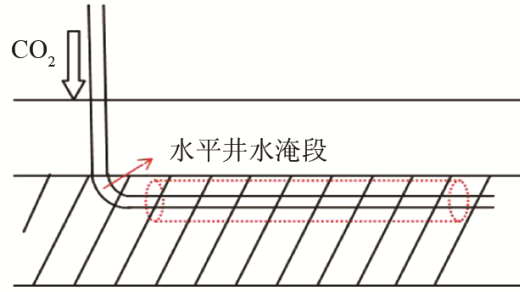


Figure 1. Diagram of CO₂ huff and puff
图 1. CO₂ 吞吐图示

其中， M_1 为硅酸盐矿物； M_2 为碳酸盐矿物； M_3 为新生矿物； B_1 和 B_2 为可溶性盐类。

2.1. 注酸阶段数学模型

开始注酸时，井筒中形成的酸液质量浓度[4]：

$$S(p, t, M) = 29.25405 + 0.21188p + 0.00016p^2 - 0.07848t + 0.00014t^2 - 0.0002M \\ + 1.61 \times 10^{-6} pM - 1.3 \times 10^{-8} p^2 M, R^2 = 0.9978$$

式中： S 为 CO₂ 的溶解度， m^3/m^3 ； p 为压强，MPa； t 为温度， $^{\circ}C$ ； M 为地层水的矿化度，g/L。

H₂CO₃ 质量浓度方程为：

$$\frac{\partial(\phi C_{H_2CO_3})}{\partial t} + \frac{q_r}{2\pi r} \cdot \frac{\partial C_{H_2CO_3}}{\partial r} = -R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_1} - R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_2}$$

硅酸盐类矿物 M_1 的质量分数方程：

$$\frac{\partial[(1-\phi)C_{M_1}]}{\partial t} = -R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_1} \frac{\beta_1}{\rho_1}$$

碳酸盐岩矿物 M_2 的质量分数方程：

$$\frac{\partial[(1-\phi)C_{M_2}]}{\partial t} = -R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_2} \frac{\beta_2}{\rho_2}$$

新生成矿物 M_3 的质量分数方程：

$$\frac{\partial(\phi C_{M_3})}{\partial t} + \frac{q_r}{2\pi r} \cdot \frac{\partial C_{M_3}}{\partial r} = R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_1} \beta_1$$

孔隙度方程：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_1} \frac{\beta_1}{\rho_1} + R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_{H_2CO_3} C_{M_2} \frac{\beta_2}{\rho_2}$$

边界条件：

$$t \geq 0, C_{H_2CO_3}(r_0, t) = C_{H_2CO_3,0}$$

初始条件：

$$r > r_0, C_{H_2CO_3}(r, 0) = 0; r \geq r_0, C_{M_1}(r, 0) = C_{M_1,0} \\ r \geq r_0, C_{M_2}(r, 0) = C_{M_2,0}; r \geq r_0, C_{M_3}(r, 0) = C_{M_3,0} \\ r \geq r_0, \phi(r, 0) = \phi_0$$

2.2. 焖井阶段反应的数学模型

H_2CO_3 质量浓度方程:

$$\frac{\partial(\varphi C_{\text{H}_2\text{CO}_3})}{\partial t} = -R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{\text{H}_2\text{CO}_3} C_{\text{M}_1} - R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_{\text{H}_2\text{CO}_3} C_{\text{M}_2}$$

硅酸盐矿物 M_1 的质量分数方程、碳酸盐矿物 M_2 的质量分数方程、孔隙度方程均与注酸阶段相同。初始条件和边界条件为注 CO_2 结束时地层中酸液质量浓度和对应矿物质量分数的分布情况。

2.3. 数学模型的离散

对时间项采用显式差分格式, 对空间项采用向后差分格式, 对以上方程进行差分, 得到差分方程式。对于关井阶段的数学模型可以采用相同的方法, 取 j 为时间上第 j 个分量, i 为井筒径向上第 i 个空间分量, 在模拟中取单位时间步长为 1 min, 单位空间步长为 0.01 m。

H_2CO_3 质量浓度差分方程:

$$C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^{j+1} = C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j - C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j \left(\frac{\varphi_i^{j+1}}{\varphi_i^j} - 1 \right) - \frac{q_r}{2\pi r_i} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta r \varphi_i^j} (C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j - C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i-1}^j) - \frac{\Delta t C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j}{\varphi_i^j} \left(R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{\text{M}_1,i}^j + R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) C_{\text{M}_2,i}^j \right)$$

硅酸盐矿物 M_1 的质量分数差分方程:

$$C_{\text{M}_1,i}^{j+1} = C_{\text{M}_1,i}^j - \frac{\Delta t}{(1 - \varphi_i^j)} R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \frac{\beta_1}{\rho_1} C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j C_{\text{M}_1,i}^j$$

碳酸盐矿物 M_2 的质量分数差分方程:

$$C_{\text{M}_2,i}^{j+1} = C_{\text{M}_2,i}^j - \frac{\Delta t}{(1 - \varphi_i^j)} R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \frac{\beta_2}{\rho_2} C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j C_{\text{M}_2,i}^j$$

新生矿物 M_3 的质量分数差分方程:

$$C_{\text{M}_3,i}^{j+1} = C_{\text{M}_3,i}^j - C_{\text{M}_3,i}^j \left(\frac{\varphi_i^{j+1}}{\varphi_i^j} - 1 \right) - \frac{q_r}{2\pi r_i} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta r \varphi_i^j} (C_{\text{M}_3,i}^j - C_{\text{M}_3,i-1}^j) + \frac{\Delta t C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j}{\varphi_i^j} R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) C_{\text{M}_1,i}^j \beta_1$$

孔隙度差分方程:

$$\varphi_i^{j+1} = \varphi_i^j + R_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \frac{\beta_1}{\rho_1} C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j C_{\text{M}_1,i}^j \Delta t + R_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \frac{\beta_2}{\rho_2} C_{\text{H}_2\text{CO}_3,i}^j C_{\text{M}_2,i}^j \Delta t$$

式中: $C_{\text{H}_2\text{CO}_3}$ 为 H_2CO_3 质量浓度, kg/m^3 ; C_{M_1} 、 C_{M_2} 、 C_{M_3} 分别为硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、新生成矿物的质量分数, 1; t 为 CO_2 注入时间, min; r 为地层径向距井壁的距离, m; q_r 为注酸液速度, $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; T 为地层温度, K; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; R_1 、 R_2 分别为 H_2CO_3 和硅酸盐矿物、碳酸盐矿物的反应常数, s^{-1} ; E_1 、 E_2 分别为 H_2CO_3 和硅酸盐矿物、碳酸盐矿物的反应活化能, J/mol ; φ 为地层孔隙度, 1; β_1 、 β_2 分别为 H_2CO_3 对硅酸盐矿物和碳酸盐矿物的溶解能力, kg/kg ; ρ_1 、 ρ_2 分别为硅酸盐矿物和碳酸盐矿物的密度, kg/m^3 ; $C_{\text{M}_1,0}$ 和 $C_{\text{M}_2,0}$ 分别为硅酸盐矿物和碳酸盐矿物初始的质量分数, 1; $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0}$

是最开始注酸时井壁处 H₂CO₃ 质量浓度, kg/m³; φ_0 为地层初始孔隙度, 1; r_0 为井筒半径, m; 数值收敛的条件: $q_r \Delta t / (2\pi r \Delta r_i \varphi_i^j) < 1$ 。

2.4. 求解方法

先求出某一时间步下酸液质量浓度在径向上的分布, 再利用硅酸盐矿物和碳酸盐矿物质量分数差分方程求解出该时间步下的径向质量分数的分布, 把这个时间步的结果作为下个时间步的初值, 进行下一步求解, 整个过程就利用 Excel 中的 VBA 按如此循环计算进行编程, 就可以得到碳酸溶液在地层中的溶蚀和渗流特征。

3. 计算实例

地层矿物和注 CO₂ 工艺的相应参数选取塔河 9 区 TK907 井的基础数据(如表 1 所示), 同时酸岩反应参数来自于文献[5]和文献[6], 通过求解以上数学模型就能模拟真实注 CO₂ 对基质的酸化作用。在这里我们研究不同注气速度、注气量、焖井时间、CO₂ 吞吐次数、地层温度和地层压力下 H₂CO₃ 对基质的改造程度, 以及新生成矿物的分布。在塔河 9 区实际储层条件下, 通过计算表明酸液与硅酸盐矿物之间的反应强度很弱, 生成新矿物的质量分数特别小, 酸液主要和碳酸盐矿物反应。

3.1. 注气速度的影响

设定注气速度分别为 900、1350、1800 m³/d, 注气量 900 m³, 焖井时间 1 d, 吞吐 1 轮, 地层温度 110℃, 地层压力 50.18 MPa。由酸液质量浓度公式计算得 $C_{H_2CO_3,0} = 92.256$ kg/m³, 计算结果如图 2、图 3 所示。结果表明, 随着注入速度的增加, 酸液作用的距离越远, 储层改造的程度越低。

3.2. 注气量的影响

设定注气速度分别为 900 m³/d, 注气量 900、1800、2700 m³, 焖井时间 1 d, 吞吐 1 轮, 地层温度

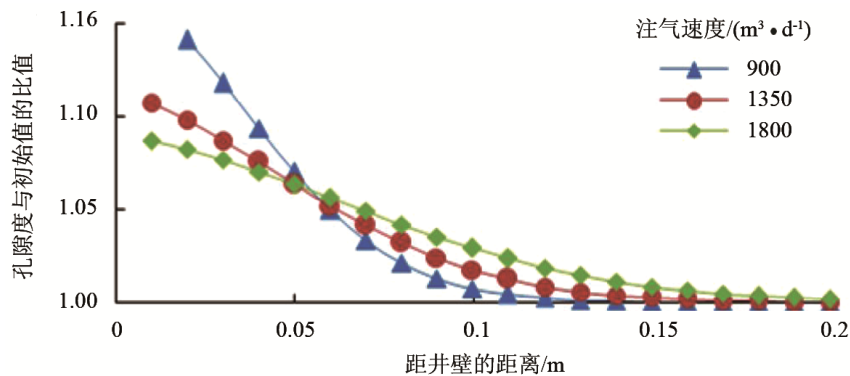


Figure 2. The influence of gas injection rate on the porosity
图 2. 注气速度对孔隙度的影响

Table 1. The parameters of mineral and process of injecting H₂CO₃

表 1. 地层矿物参数和注 H₂CO₃ 工艺参数

初始孔隙度/ θ	岩石密度/(kg·m ⁻³)	反应活化能 E_1 /(J·mol ⁻¹)	反应活化能 E_2 /(J·mol ⁻¹)	β_1	β_2	硅酸盐矿物质量分数 $C_{M1,0}/1$	碳酸盐矿物质量分数 $C_{M2,0}/1$	水平段长度/m	井筒半径 r_0 /m	地层水矿化度/(g·L ⁻¹)
0.151	2800	58,350	36,100	0.233	0.532	0.1126	0.2454	700	0.2	4.37

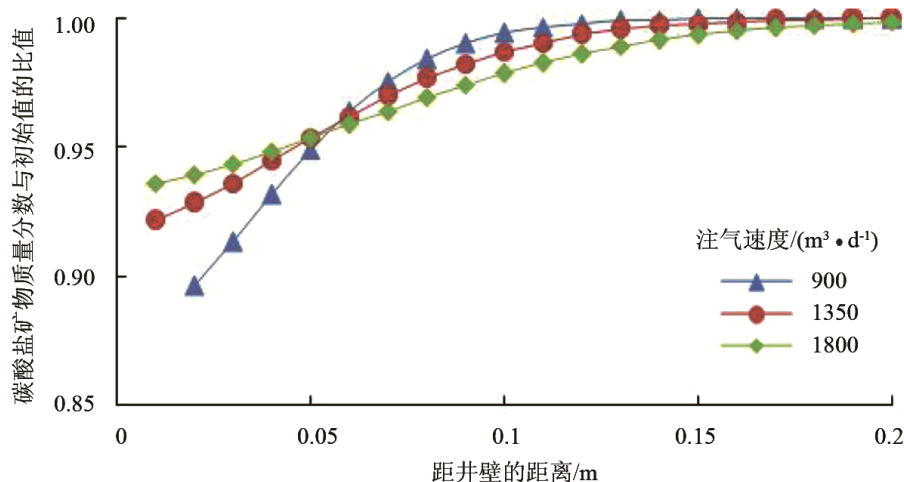


Figure 3. The influence of gas injection rate on the carbonate minerals
图 3. 注气速度对碳酸盐矿物的影响

110℃，地层压力 50.18 MPa。由酸液质量浓度计算得 $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0} = 92.256 \text{ kg/m}^3$ ，计算结果如图 4、图 5 所示。结果表明，随着注气量的增加，储层改造的程度越大。

3.3. 焖井时间的影响

设定注气速度为 900 m³/d，注气量 900 m³，焖井时间分别为 1、2、3 d，吞吐 1 轮，地层温度 110℃，地层压力 50.18 MPa。由酸液质量浓度计算得 $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0} = 92.256 \text{ kg/m}^3$ ，计算结果如图 6、图 7 所示。结果表明焖井时间对酸液与储层的反应几乎没有影响。

3.4. CO₂ 吞吐次数的影响

设定注气速度为 900 m³/d，每次吞吐的注气量为 900 m³，分别进行 1、2、3 次吞吐，地层温度 110℃，地层压力 50.18 MPa。由酸液质量浓度计算得 $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0} = 92.256 \text{ kg/m}^3$ 计算结果如图 8、图 9 所示。结果表明，随着 CO₂ 吞吐次数的增加，酸液对储层改造的程度越大，但是改造程度越来越低。

3.5. 地层温度

设定注气速度为 900 m³/d，注气量 900 m³，焖井时间 1 d，吞吐 1 次，取地层温度分别为 110℃、120℃、130℃，地层压力 50.18 MPa。由酸液质量浓度公式计算出不同温度依次对应的 $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0} = 92.256$ 、91.026、89.822 kg/m³，计算结果如图 10、图 11 所示。结果表明，随着地层温度上升，碳酸溶液对储层的改造程度越大。

3.6. 地层压力

设定注气速度为 900 m³/d，注气量 900 m³，焖井时间 1 d，吞吐 1 轮，地层温度 110℃，地层压力为 50、60、70 MPa。由酸液质量浓度公式计算出对应的 $C_{\text{H}_2\text{CO}_3,0} = 92.256$ 、98.545、104.519 kg/m³，计算结果如图 12、图 13 所示。结果表明，随着地层压力上升，碳酸溶液对储层的改造程度越大。

4. 结论

1) 酸岩反应在很多方面具有共通性，在具体研究时可以相互借鉴，并且具有很强的指导意义。以“两酸三矿物”砂岩酸化模型为借鉴，建立了实际现场高含水水平井 CO₂ 吞吐时，形成的酸液沿井筒径向流

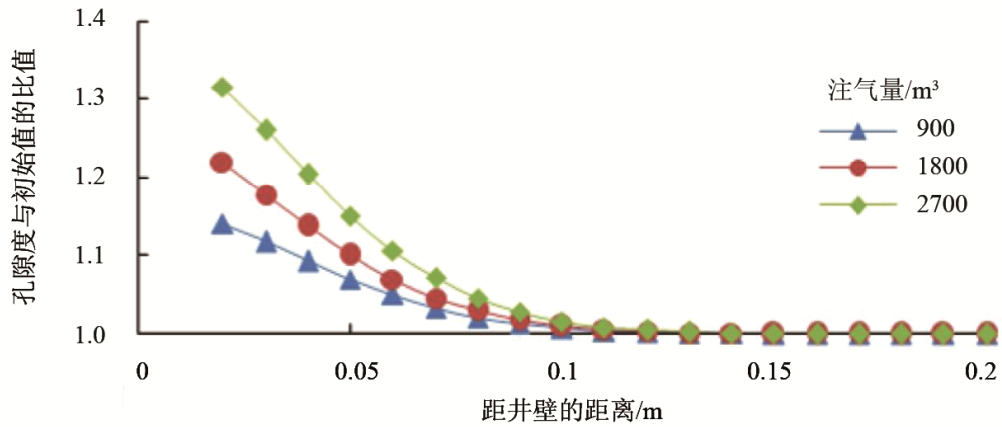


Figure 4. The influence of injection volume on the porosity
 图 4. 注气量对孔隙度的影响

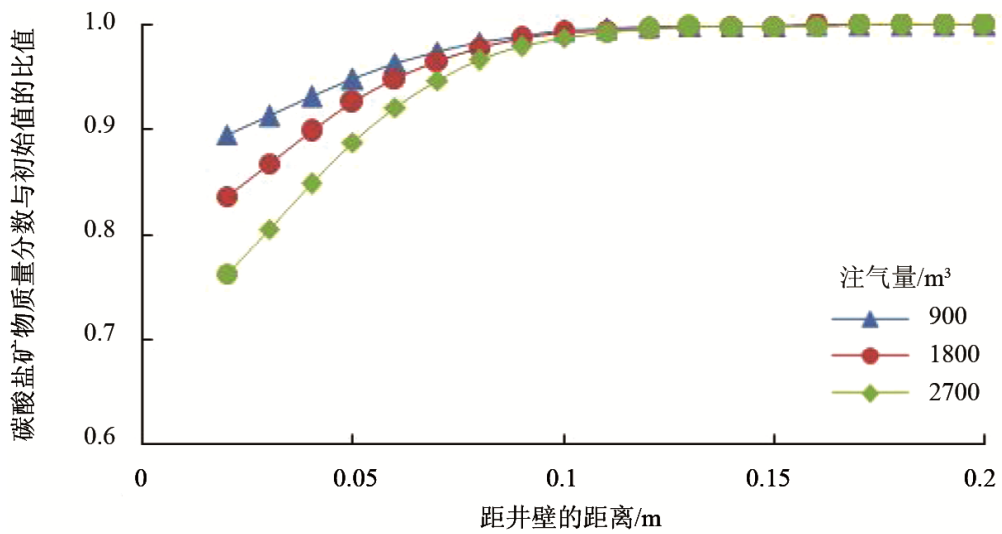


Figure 5. The influence of injection volume on carbonate minerals
 图 5. 注气量对碳酸盐矿物的影响

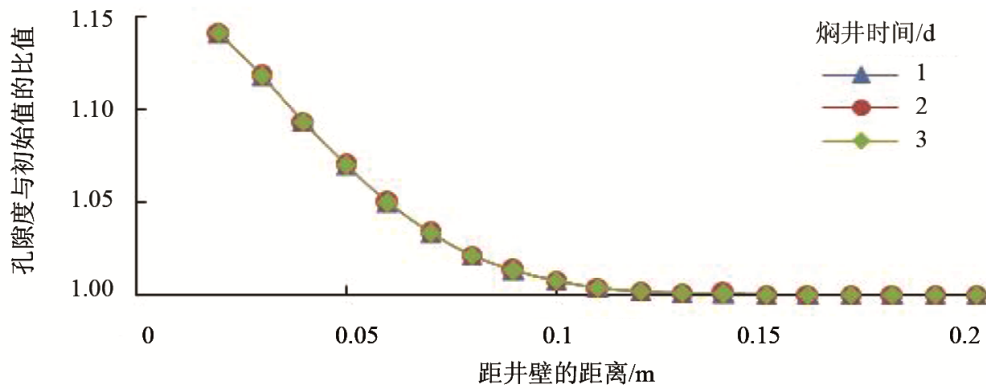


Figure 6. The influence of soak time on the porosity
 图 6. 焖井时间对孔隙度的影响

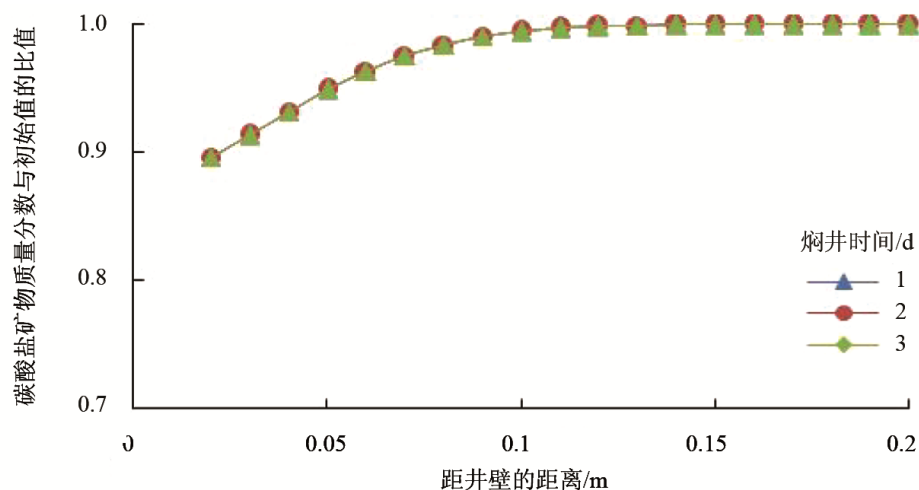


Figure 7. The influence of soak time on the carbonate minerals
图 7. 焖井时间对碳酸盐矿物的影响

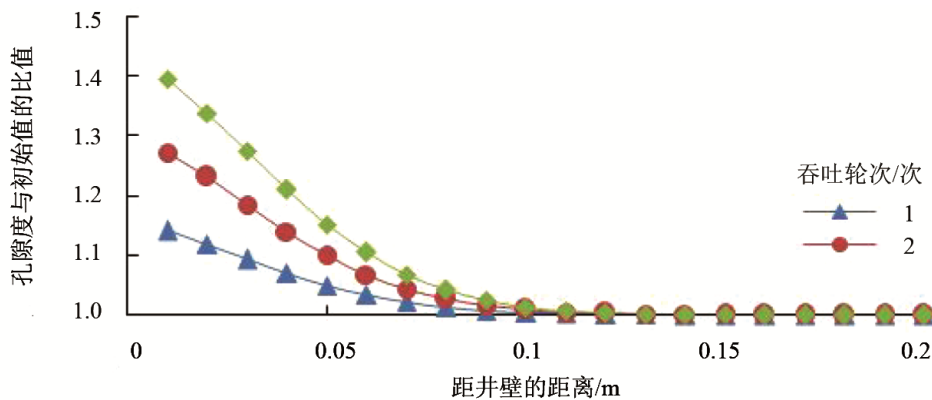


Figure 8. The influence of CO₂ huff and puff times on the porosity
图 8. CO₂吞吐次数对孔隙度的影响

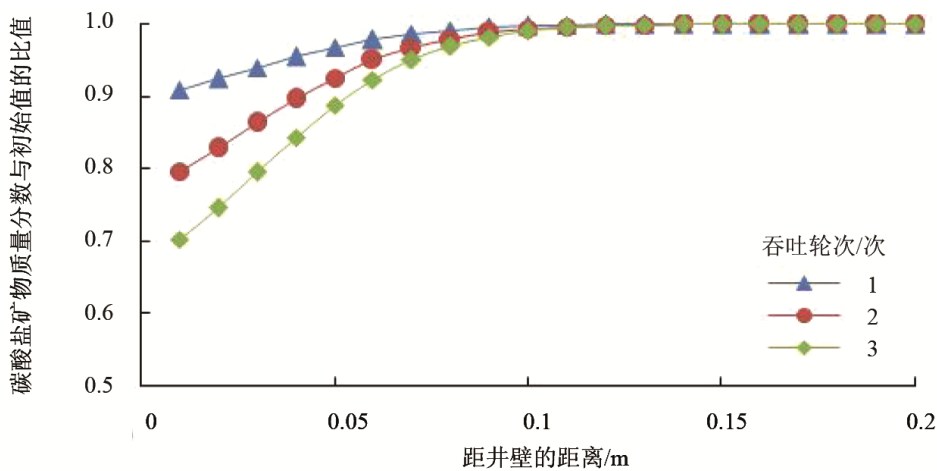


Figure 9. The influence of CO₂ huff and puff times on the carbonate minerals
图 9. CO₂吞吐次数对碳酸盐矿物的影响

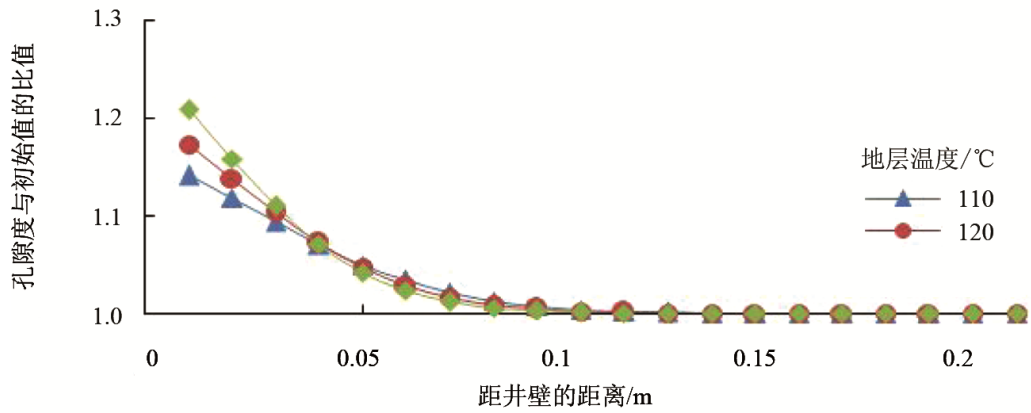


Figure 10. The influence of formation temperature on the porosity
 图 10. 地层温度对孔隙度的影响

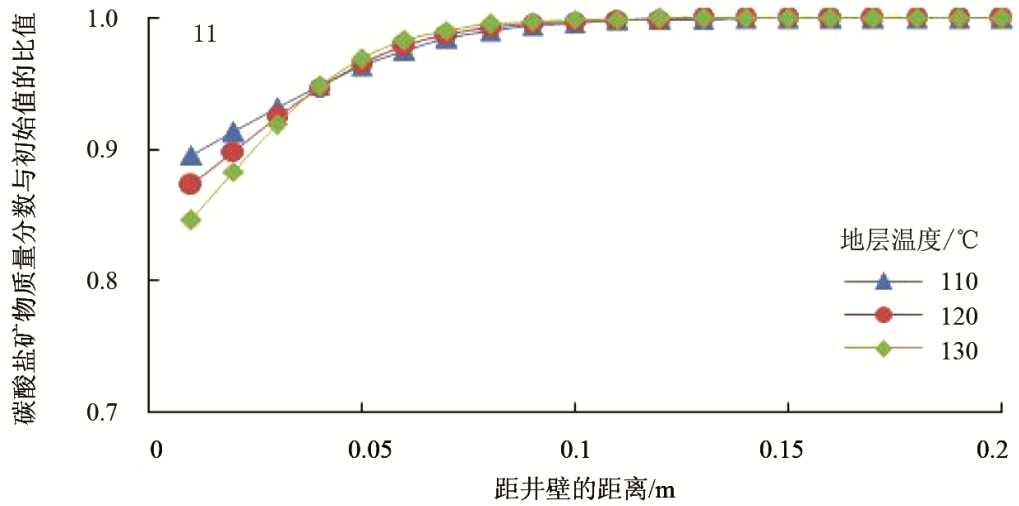


Figure 11. The influence of formation temperature on the carbonate minerals
 图 11. 地层温度对碳酸盐矿物的影响

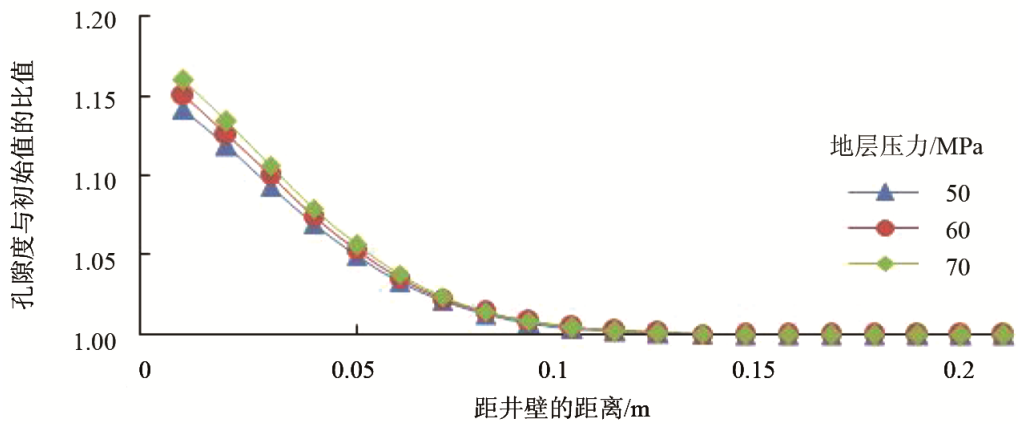


Figure 12. The influence of formation press on the porosity
 图 12. 地层压力对孔隙度的影响

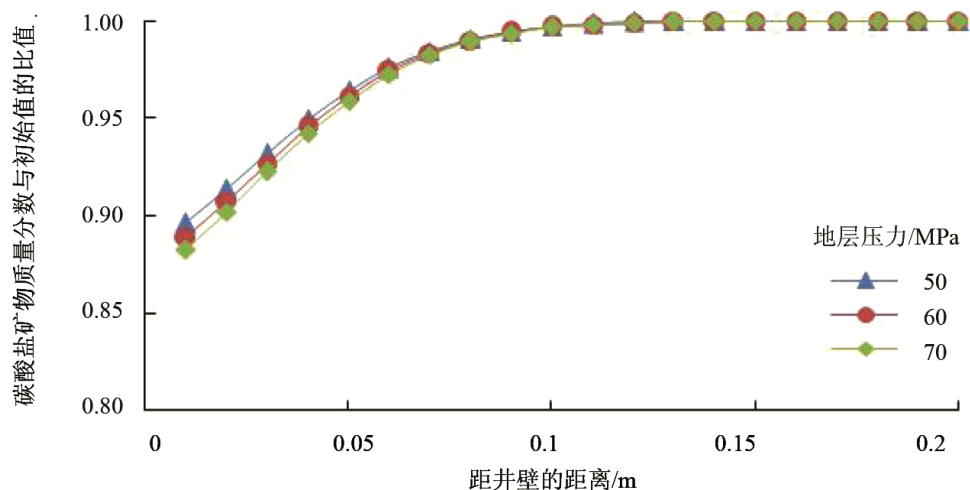


Figure 13. The influence of formation press on the carbonate minerals
图 13. 地层压力对碳酸盐矿物的影响

动和焖井时候的数学模型，并且考虑各种工艺参数和地层参数对反应的影响，进行了数值求解，可对储层改造情况进行预测。

2) 在实际塔河油田的参数下，碳酸溶液的作用距离很短，只能有效地作用于距井壁 0.2 m 范围内的储层。而且酸液主要消耗在距井壁 0.1 m 的范围内。

3) CO₂ 吞吐对储层有很好的解堵作用，建议在施工过程中增加注气速度和注气量，增加改造范围和改造程度，更有利于吐阶段的反向流动。

4) 地层温度越高，酸液消耗速度越快，酸液作用距离越短，在具体施工中，可以适当增加注气速度，增加酸化穿透深度，以便更好地解堵。

基金项目

国家科技重大专项(2011ZX05010-002)。

参考文献 (References)

- [1] da Motta, E.P., Plavnlk, B., Schechter, R.S., *et al.* (1993) Accounting for Silica Precipitation in the Design of Sandstone Acidizing. SPE-23802-PA, Society of Petroleum Engineers.
- [2] 李松岩, 李兆敏, 李宾飞. 砂岩基质酸化中酸岩反应数学模型[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 236-241.
- [3] 李松岩, 李兆敏, 林日亿, 等. 泡沫分流酸化数学模型的建立及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 77-82.
- [4] 范泓澈, 黄志龙, 袁剑, 等. 高温高压条件下甲烷和二氧化碳溶解度试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 6-11.
- [5] 周琳淞. CO₂ 驱水 - 气 - 岩反应对疏松砂岩储层物性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [6] 张超, 李兆敏, 张东. 超临界 CO₂ 驱对储层物性影响的实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 94-98.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org