

Research of A New Method for Calculating Pollution Radius in Injection Wells

Jingsong Li¹, Xiang Li¹, Wenhui Liu¹, Hongfeng Guo¹, Kexiong Lin², Jie Wu²

¹Oilfield Optimization R & D Institute, China Oilfield Services Limited, Tianjin

²Hanc New-Technology Research Institute, Jingzhou Hubei

Email: lij5@cosl.com.cn

Received: Nov. 30th, 2016; accepted: Jan. 7th, 2017; published: Feb. 15th, 2017

Abstract

In consideration of the problems of solid suspension and oil blockage in injection wells, a new method was proposed for calculating pollution radius in injection wells. Firstly, the relationship between the formation average permeability and pollution radius after the pollution was established by deriving theoretical formula. Then it was proposed that the specific water absorption index was applied to estimate reservoir permeability at a certain moment after it was polluted for drawing the permeability relation curve of the pollution radius and pollution zone. Combined with the core displacement experiment for simulating injection water blocking rule of the near wellbore zone, a forecast model of pollution radius was established to draw the permeability retention curves of the pollution radius and pollution area, the intersection of two curves was the objective pollution radius. By taking Well-F25 of a certain block in Bohai Oilfield, the pollution radius is calculated by the method. It can be used to solve the problem of the combination of theoretical formula and field operation; it provides reference for scheme design for acidized plugging removal.

Keywords

Injection Well, Solid Suspensions, Pollution Radius, Specific Water Absorption Index

注水井污染半径计算新方法研究

李敬松¹, 李翔¹, 刘文辉¹, 郭宏峰¹, 林科雄², 吴杰²

¹中海油田服务股份有限公司油田生产研究院, 天津

²荆州市汉科新技术研究所, 湖北 荆州

作者简介: 李敬松(1966-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事于油气藏开发、稠油热采、数值模拟研究工作。

Email: lij5@cosl.com.cn

收稿日期: 2016年11月30日; 录用日期: 2017年1月7日; 发布日期: 2017年2月15日

摘要

针对注水井固相悬浮物和原油堵塞的问题, 提出了一种新的计算注水井污染半径的方法。首先通过理论公式的推导, 建立污染半径和污染区渗透率以及整个地层受污染后平均渗透率的关系; 然后提出运用比吸水指数计算某一时刻储层受污染后的渗透率, 绘出污染半径与污染区渗透率保留率的关系曲线; 再结合室内岩心驱替模拟注入水对近井带的堵塞规律, 建立污染半径的预测模型, 并绘出污染半径与污染区渗透率保留率的关系曲线, 两条曲线的交点即为所求的污染半径。以渤海某区块F25井为例, 采用该方法计算得到某一时刻注水井的污染半径。该方法解决了理论公式与现场实际相结合的问题, 为酸化解堵方案设计提供了借鉴。

关键词

注水井, 固相悬浮物, 污染半径, 比吸水指数

Copyright © 2017 by authors, 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

1. 引言

注水井由于注入水水质不合格, 注入水中固体悬浮物和原油会污染地层, 降低近井地带地层渗透率, 严重时造成堵塞, 导致注入压力升高和注水量快速下降[1] [2] [3][4]。研究注水井污染半径和地层污染区以及整个地层污染程度, 对于评价注水井的注水效果, 为酸化解堵提供参考依据非常重要。常规的计算污染半径的方法[5], 需要利用试井解释求出表皮因数、渗透率和地层压力, 且计算过程复杂, 工作量大。笔者介绍一种油藏理论与试验模拟相结合的方法, 计算注水井污染半径。该方法计算过程简单、准确, 为确定注水井的污染半径提供了有效的解决方法。

2. 注水井污染半径计算方法

2.1. 模型假设与理论公式推导

油藏在注水过程中, 注入水中的固相悬浮物和原油在井壁附近一定深度范围内形成堵塞, 而未受污染区域地层渗透率不变(这里假定注入水不造成黏土膨胀和结垢, 地层无速敏损害), 如图1所示。

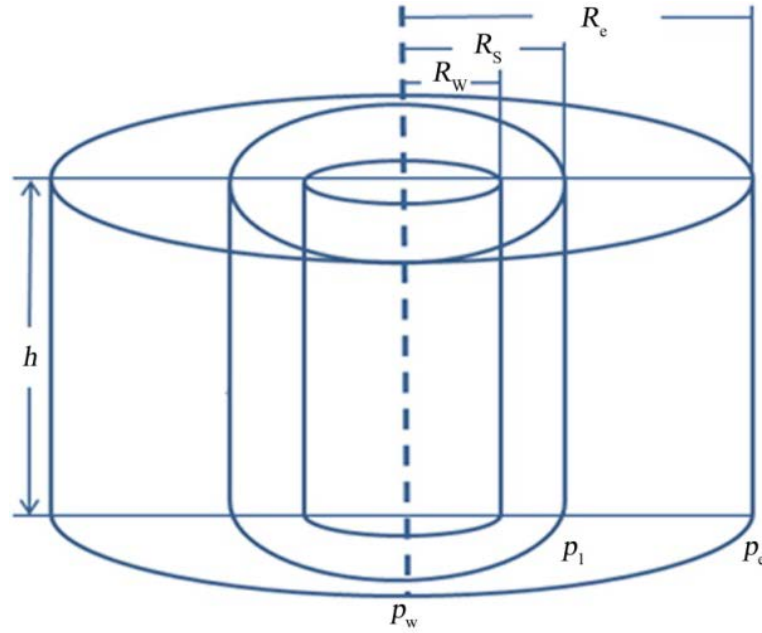


Figure 1. The schematic diagram of reservoir pollution during waterflooding
图 1. 注水时油藏污染示意图

根据平面径向流达西定律可得，地层未污染时注入量为：

$$Q_0 = \frac{2\pi K_0 h (p_w - p_e)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (1)$$

式中： Q_0 为地层未污染时注入量， cm^3/s ； h 为储层有效厚度， cm ； μ 为地层流体黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； K_0 为原始地层渗透率， mD ； p_w 为井底注入压力， MPa ； p_e 为控制半径 R_e 处地层压力， MPa ； R_e 为注水井控制地层半径， m ； R_w 为注水井井眼半径， m 。

地层污染后，地层污染区的注入量为：

$$Q_1 = \frac{2\pi K_1 h (p_w - p_1)}{\mu \ln \frac{R_s}{R_w}} \quad (2)$$

式中： Q_1 为地层污染区的注入量， cm^3/s ； K_1 为污染半径内地层平均渗透率， mD ； R_s 为注水井污染半径， m ； p_1 为污染半径 R_s 处地层压力， MPa 。

地层污染后，地层未污染区的注入量为：

$$Q_2 = \frac{2\pi K_0 h (p_1 - p_e)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_s}} \quad (3)$$

式中： Q_2 为地层未污染区的注入量， cm^3/s 。

对于整个地层污染后的注入量，用平均地层渗透率可以表示为：

$$Q_3 = \frac{2\pi K_2 h (p_w - p_e)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (4)$$

式中： Q_3 为整个地层污染区的注入量， cm^3/s ； K_2 为注水污染后地层平均渗透率， mD 。

根据连续性原理，有 $Q_1 = Q_2 = Q_3$ ，则有：

$$K_2 = \frac{\ln \frac{R_e}{R_w}}{\frac{1}{K_1} \ln \frac{R_s}{R_w} + \frac{1}{K_0} \ln \frac{R_e}{R_s}} \quad (5)$$

即得到注水污染后地层平均渗透率、地层原始平均渗透率、污染半径内平均渗透率与污染半径的关系。若已知 K_0 、 K_1 、 K_2 ，就可以求出理论上的注水井污染半径。

一般情况下，原始地层渗透率 K_0 通过油藏资料查找，地层受污染后的地层平均渗透率 K_2 通过比吸水指数计算求得。而污染区渗透率 K_1 的确定比较复杂。下面介绍污染后地层平均渗透率的确定方法。

根据平面径向流达西定律，地层未受污染时比吸水指数为：

$$J_0 = \frac{Q_0}{h(p_w - p_e)} = \frac{2\pi K_0}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (6)$$

式中： J_0 为地层未受污染时比吸水指数， $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d})$ 。

受污染后比吸水指数为：

$$J_2 = \frac{Q_3}{h(p_w - p_e)} = \frac{2\pi K_2}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (7)$$

式中： J_2 为地层受污染后的比吸水指数， $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d})$ 。

则地层污染后平均渗透率保留率为：

$$\frac{K_2}{K_0} = \frac{J_2}{J_0} \quad (8)$$

实际应用中，可以根据注水动态数据分别计算出地层未受污染时的比吸水指数 J_0 ，以及注水污染后任一时刻的比吸水指数 J_2 ；已知原始地层渗透率 K_0 ，就可以求出 K_2 。通过式(5)，在直角坐标系中，可以画出储层在一定污染程度 $\left(1 - \frac{K_2}{K_0}\right)$ 的情况下，污染半径 R_s 与污染区渗透率保留率 $\left(\frac{K_1}{K_0}\right)$ 的关系曲线a。

2.2. 室内注入水水质堵塞试验

以渤海某区块F25井注水为例，由于注入水矿化度大于地层水矿化度，忽略黏土膨胀。可以选用与储层渗透率一致的人造岩心，注入流体选取地层注入水。试验目的是为了模拟注入水中固相悬浮物（机械杂质、腐蚀产物等）和悬浮油等对近井地带的堵塞规律。

试验步骤：①选取与储层渗透率一致的人造岩心，尺寸为 $\varnothing 2.53 \text{ cm} \times 7.22 \text{ cm}$ ；②烘干、称重、抽空，并用与混合注入水矿化度相同的KCl盐水饱和岩心，老化40 h待用；③测量岩心的孔隙度，为36.0%；④用KCl盐水加热到地层温度 65°C ，测出岩心原始渗透率，为1166 mD；⑤在 65°C 时用平台注入水（混）驱替至100 PV左右，中途多次记录驱替不同PV时的渗透率。

试验结果如图2所示，随着注水PV数的增加，渗透率保留率也随之下降，且下降趋势逐渐变缓。将试验数据按指数函数进行拟合，得到渗透率保留率与注水PV数的关系式(9)，相关性为0.913，拟合较好。

$$\frac{K_1}{K_0} = e^{-0.018\tau} \quad (9)$$

式中： τ 为注水PV数，1。

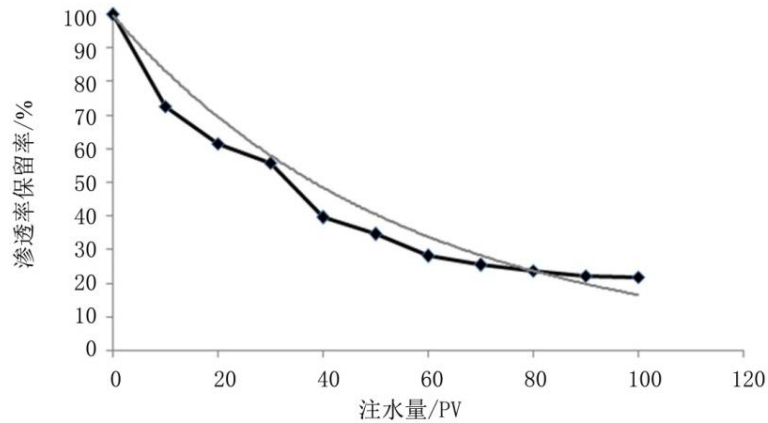


Figure 2. The evaluation of artificial core plugging by injection water
图 2. 注入水对人造岩心堵塞评价

2.3. 室内试验与油藏注水堵塞相结合确定污染半径

假定室内注入水对岩心堵塞规律与注水对近井带堵塞规律相同，即相同注入 PV 数下，岩心渗透率保留率与近井地带渗透率保留率也相同，那么通过式(9)，可以计算出在一定污染程度下，近井地带污染区累计的注水 PV 数。再根据累计注水量可以计算出储层的污染半径。

$$\sum Q = \pi R_s^2 h \phi \tau \quad (10)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\sum Q}{\pi h \phi \tau}} \quad (11)$$

式中： $\sum Q$ 为累计注水量， m^3 ； ϕ 为储层孔隙度，%。

联立式(10)和式(11)，得污染半径预测模型，在直角坐标系中，可以画出 R_s 与 K_1/K_0 的关系曲线 b。将曲线 a 和曲线 b 作在同一直角坐标系中，曲线的交点就是所求的污染半径。

$$R_s = \sqrt{\frac{-0.018 \sum Q}{\pi h \phi \ln \frac{K_1}{K_0}}} \quad (12)$$

3. 实例应用

以渤海某区块 F25 井为例，储层厚度 57.1 m，平均孔隙度 27%，原始地层平均渗透率 1210 mD，注水开始时比吸水指数 $4.27 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d})$ ，注水 20 d 后，比吸水指数降为 $2.11 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d})$ ，累计注水量 4021 m^3 ，计算目前地层的污染半径 R_s 。

首先利用公式(8)计算出目前地层的平均渗透率保留率为：

$$\frac{K_2}{K_0} = \frac{J_2}{J_0} = 0.4941 \quad (13)$$

则目前储层污染程度为：

$$1 - \frac{K_2}{K_0} = 0.5059 \quad (14)$$

然后根据理论公式(5)在坐标系中画出目前储层污染程度为 50.59% 时，污染半径与污染区渗透率的关系曲线 a (图 3)。可以看出污染半径越小，污染区渗透率保留率越小，污染越严重。

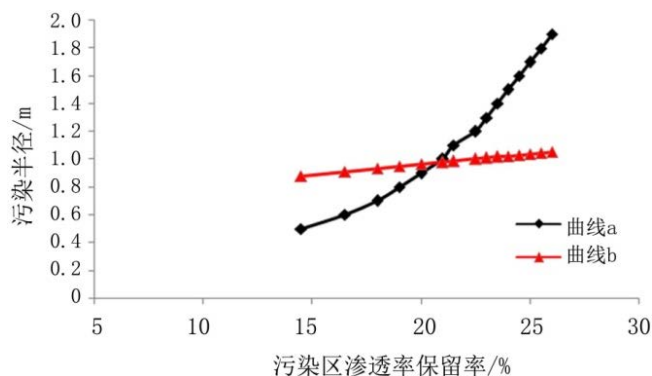


Figure 3. The relationship between pollution radius and permeability retention rate in polluted area

图 3. 污染半径与污染区渗透率保留率关系曲线

再根据室内试验建立的污染半径预测公式(12),在直角坐标系中绘出污染半径与污染区渗透率保留率的关系曲线 b (图 3)。可以看到污染半径越小,污染越严重,相对于曲线 a,曲线 b 变化较缓。

根据油藏理论方程建立的曲线 a 和基于室内试验建立的曲线 b 都反映了在一定的储层污染程度下,污染半径和污染区渗透率保留率的关系,两条曲线的交点就是所求的污染半径。因此, F25 井注水 20d 时,储层的污染程度为 55.59%,污染半径为 1 m,后期酸化解堵方案设计时,酸液用量必须大于井筒周围 1 m 的范围。

4. 结论

- 1) 推导了地层污染后平均渗透率、污染区渗透率和污染半径关系的理论公式。
- 2) 室内注水堵塞试验模拟了近井地带渗透率的变化规律,并建立了污染半径预测模型。
- 3) 利用比吸水指数定量计算任意时刻地层污染后的平均渗透率,将油藏理论方程与基于试验建立的污染半径预测方程有机结合,用作图法确定任一时刻的污染半径。
- 4) 通过该方法确定的污染半径可信度高,为后期酸化解堵方案设计提供了重要参考。

参考文献 (References)

- [1] 易飞,赵秀娟,刘文辉,等.渤海油田注水井解堵增注技术[J].石油钻采工艺,2004,26(5):53-56.
- [2] 胡书勇,刘学,黄晶,等.克拉玛依油田注水井解堵增注技术研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(4):147-151.
- [3] 杨宝泉.杏数岗油田酸化解堵工艺技术研究[D]:[硕士学位论文].杭州:浙江大学,2002.
- [4] 宋铁毅.奈曼油田油水井解堵工艺技术研究及应用[J].中外能源,2014,19(1):62-65.
- [5] SY/T 5358-2010.储层敏感性流动实验评价方法[S].

[编辑] 帅群

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