

岩心污染表皮系数的计算

王新海^{1,2} 张福祥³ 姜永⁴ 汪德刚⁵ 尹虎²

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院 2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室 3. 中国石油塔里木油田公司
4. 中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院 5. 中国石油塔里木油田公司塔中勘探开发项目经理部

王新海等. 岩心污染表皮系数的计算. 天然气工业, 2012, 32(12): 52-54.

摘要 评价岩心污染的主要方法有两种, 一是通过矿场评价获取地层污染的表皮系数; 二是通过室内岩心污染实验得到岩心渗透率分布和渗透率恢复值。目前还没有利用室内岩心污染试验结果直接计算表皮系数的方法。为了把室内评价结果与矿场评价结果挂钩, 研究了利用岩心污染试验后岩心渗透率分布或渗透率恢复值计算表皮系数的方法。在单相不可压缩流体做单向达西渗流条件下推导出了不同岩心污染模式下污染表皮系数计算方法; 揭示了均匀污染、污染区渗透率呈线性变化、污染区渗透率呈指数变化时污染表皮系数与污染深度之间的关系; 得到了岩心均匀污染时污染表皮系数与渗透率恢复值之间呈反比关系的结论。研究表明: 污染表皮系数随着污染深度的增加而增大, 入口端岩心渗透率越小, 污染表皮系数越大; 污染区渗透率与未污染时渗透率比值越小, 污染表皮系数越大。

关键词 表皮系数 地层污染 污染深度 渗透率恢复值 岩心 数学模型 计算

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.12.010

在油田钻井、完井、开发过程中, 表皮系数是评价地层污染的一项重要指标。关于表皮系数的研究^[1-9]已有许多成果, 本文参考文献[10-11]推导出了平面径向渗流时污染表皮系数与污染半径之间的关系式。目前还没有利用室内岩心污染试验结果计算表皮系数的有关报道。为了把室内评价结果与矿场评价结果挂钩, 笔者试图研究岩心污染试验后岩心渗透率分布或用渗透率恢复值计算岩心污染表皮系数。在单相不可压缩流体的岩心中做达西渗流条件下推导岩心均匀污染、渗透率呈线性变化、指数变化时污染表皮系数的计算公式; 研究岩心均匀污染时渗透率恢复值与污染表皮系数间的关系。

1 不同污染模式下的污染表皮系数

假设岩心长度为 l , 未污染地层渗透率为 K , 污染带的渗透率为 K_s , 污染深度为 l_s (图 1)。

在单相流体在岩心中做单向达西渗流, 则

$$q = -86.4A \frac{K(x)}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

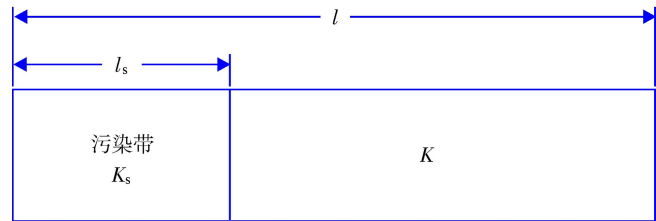


图 1 岩心污染示意图

$$\text{故} \quad dp = -\frac{q\mu}{86.4A} \frac{dx}{K(x)} \quad (2)$$

两边积分得到:

$$p_i - p_0 = \frac{q\mu}{86.4A} \int_0^l \frac{dx}{K(x)} = \frac{q\mu}{86.4A} \left[\int_0^{l_s} \frac{dx}{K_s(x)} + \frac{1}{K} (l - l_s) \right] \quad (3)$$

从而得到:

$$q = \frac{86.4AK(p_i - p_0)}{\mu \left[\frac{1}{l} \int_0^{l_s} \frac{dx}{K_s(x)} + \frac{1}{K} \left(1 - \frac{l_s}{l} \right) \right]} \quad (4)$$

式中 p 为地层压力, MPa; μ 为流体黏度, mPa · s; A 为渗流截面积, m²; $K_s(x)$ 为污染区的渗透率, D。

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2011zx05013, 2011zx05015, 2011zx05046)。

作者简介: 王新海, 1962年生, 教授, 博士生导师, 博士; 主要从事油气藏工程开发方面的研究工作。地址: (434023) 湖北省荆州市南环路1号。电话: 13908618365。E-mail: wwxhh618@126.com

1.1 岩心均匀污染

岩心渗透率分布如下:

$$K(x) = \begin{cases} K & (0 \leq x \leq l_s) \\ K & l_s < x \leq l \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)及表皮系数的定义可得污染表皮系数:

$$S_d = \left(\frac{K}{K_s} - 1 \right) \frac{l_s}{l} \quad (6)$$

当污染区内渗透率不变化时,通过式(6)可以算出在不同污染深度下的表皮系数 l 。其污染深度与污染表皮系数关系 ($l=150 \text{ cm}, K=0.1 \text{ D}$) 见图 2。从图 2 可知污染表皮系数随着污染深度的增加而增大,污染区渗透率与未污染时渗透率比值越小,污染表皮系数越大。

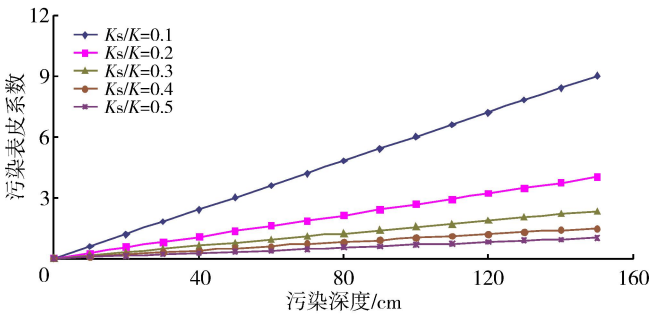


图 2 污染深度与污染表皮系数关系图
(岩心均匀污染)

1.2 污染区渗透率呈线性变化

岩心渗透率分布为:

$$K_s(x) = \begin{cases} \frac{x}{l_s} (K - K_0) + K_0 & (0 \leq x \leq l_s) \\ K & (x > l_s) \end{cases} \quad (7)$$

式中 K 为未受污染岩心渗透率, D ; K_0 为入口端渗透率, D ; l_s 为污染深度, m 。

由式(4)及表皮系数的定义可得污染表皮系数:

$$S_d = \left(\frac{K}{K - l_s} \ln \frac{K}{K_0} - 1 \right) \frac{l_s}{l} \quad (8)$$

通过式(8)可以算出在不同污染深度 l_s 下的表皮系数。其污染深度与污染表皮系数关系 ($l=150 \text{ cm}, K=0.1 \text{ D}$) 见图 3。从图 3 可知污染表皮系数随着污染深度的增加而增大,入口端岩心渗透率越小,污染表皮系数越大。

1.3 污染区渗透率满足指数关系

岩心渗透率分布为:

$$K(x) = \begin{cases} K \left(\frac{K}{K_0} \right)^{\frac{x-l_s}{l_s}} & (0 \leq x \leq l_s) \\ K & (x > l_s) \end{cases} \quad (9)$$

由式(4)及表皮系数的定义可得污染表皮系数:

$$S_d = \frac{l_s}{l} \left[\frac{1}{\ln \frac{K}{K_0}} \left(\frac{K}{K_0} - 1 \right) - 1 \right] \quad (10)$$

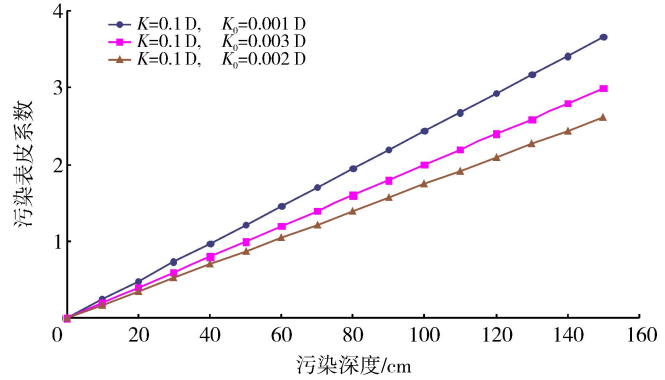


图 3 污染深度与污染表皮系数关系图
(污染区渗透率呈线性变化)

通过式(10)可以算出在不同污染深度下的表皮系数。其污染深度与污染表皮系数关系 ($l=150 \text{ cm}, K=0.1 \text{ D}$) 见图 4。从图 4 可知污染表皮系数随着污染深度的增加而增大。

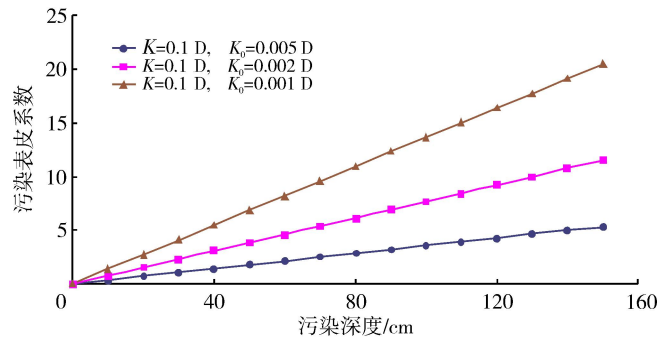


图 4 污染深度与污染表皮系数关系图
(污染区渗透率满足指数关系)

1.4 单向渗流不同污染模式下污染表皮系数的计算

单向渗流不同污染模式下污染表皮系数的计算如表 1 所示。

2 利用渗透率恢复值计算污染表皮系数

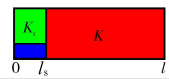
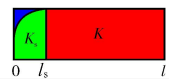


利用渗流阻力法推导得到平均渗透率计算公式:

$$\frac{\bar{K}}{l} = \frac{\frac{K_s}{l_s} \frac{K}{l-l_s}}{\frac{K_s}{l_s} + \frac{K}{l-l_s}} \quad (11)$$

即
$$\bar{K} = \frac{K_s K l}{K_s (l-l_s) + K l_s} \quad (12)$$

渗透率恢复值为:

表 1 单向渗流不同污染模式下污染表皮系数表

污染模式	污染模型	污染表皮系数
	$K_s = \text{const} (0 \leq x \leq l_s)$	$S_d = \left(\frac{K}{K_s} - 1\right) \frac{l_s}{l}$
	$K_s(x) \quad (0 \leq x \leq l_s)$	$S_d = \frac{l_s}{l} \left[\frac{K}{K_s} \int_0^{l_s} \frac{dx}{K_s(x)} - 1 \right]$
	$K_s = \frac{x}{l_s} (K - K_0) + K_0$ $(0 \leq x \leq l_s)$	$S_d = \frac{l_s}{l} \left(\frac{K}{K - K_0} \ln \frac{K}{K_0} - 1 \right)$
	$K_s(x) = K \left(\frac{K - K_0}{K} \right)^{\frac{x-l}{l_s}}$ $(0 \leq x \leq l_s)$	$S_d = \frac{l_s}{l} \left[\frac{1}{\ln \frac{K}{K_0}} \left(\frac{K}{K_0} - 1 \right) - 1 \right]$

$$vbk = \frac{\bar{K}}{K} = \frac{K l}{K_s (l - l_s) + K l_s} \quad (13)$$

当岩心均匀污染时,污染表皮系数为:

$$S_d = \left(\frac{K}{K_s} - 1 \right) \frac{l_s}{l} \quad (14)$$

从而有:

$$vbk = \frac{\bar{K}}{K} = \frac{K l}{K_s (l - l_s) + K l_s} = \frac{1}{S_d + 1} \quad (15)$$

即
$$S_d = \frac{1}{vbk} - 1 \quad (16)$$

通过式(16)可以算出在不同渗透率恢复值下的污

表 2 污染表皮系数计算结果表

vbk	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
S_d	9.00	4.00	2.33	1.50	1.00	0.67	0.43	0.25	0.11	0

染表皮系数。计算结果见表 2,污染表皮系数与渗透率恢复值关系见图 5。从图 5 可知渗透率恢复值越大,污染表皮系数越小。

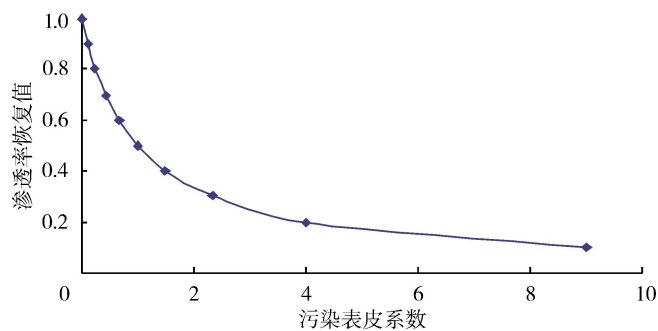


图 5 污染表皮系数与渗透率恢复值关系图

3 结论与认识

1)笔者推导出了流体单向渗流时不同岩心污染模式下污染表皮系数的计算方法,揭示了地层均匀污染、渗透率呈线性变化、渗透率指数变化时污染表皮系数与污染深度之间的关系。

2)得到了污染表皮系数随着污染深度的增加而增大,入口端岩心渗透率越小,污染表皮系数越大;污染区渗透率与未污染时渗透率比值越小,污染表皮系数越大的结论。

3)得到了利用渗透率恢复值计算污染表皮系数的方法,渗透率恢复值越大,污染表皮系数越小的结论。

参 考 文 献

- [1] 段永刚,陈伟,熊友明,等.油气层损害定量分析和评价[J].西南石油学院学报,2001,23(2):44-46.
- [2] 陈元千.气井表皮系数分解法[J].新疆石油地质,2004,25(2):160-164.
- [3] 杨满平,李允.低渗透油气储层的应力敏感性表皮系数研究[J].天然气工业,2005,25(3):141-143.
- [4] 王新海,张冬丽,江山.储层压力敏感表皮系数的计算方法[J].油气井测试,2005,14(5):3-4.
- [5] 王新海,周国隆.渗透率间断与变产量的拟表皮系数[J].油气井测试,1998,7(4):14-17.
- [6] 王新海,吉玉林,钱春江.各向异性与不渗透直线边界的拟表皮系数[J].钻采工艺,1997,20(5):32-34.
- [7] 王新海,夏位荣,郭康良.径向非均质地层调查半径与表皮系数[J].大庆石油地质与开发,1995,14(3):23-26.
- [8] 李传亮.岩心分析过程中的表皮效应[J].天然气工业,2006,26(11):38-39.
- [9] 刘建军,程林松.表皮系数分解与油气层伤害定量评价[J].新疆石油科技,2004(4):6-8.
- [10] 王新海,夏位荣,陈立生.非均匀污染得污染深度计算方法[J].钻采工艺,1994,17(1):61-63.
- [11] 王新海,夏位荣.泥浆污染半径的计算和措施的增产率预测[J].油气井测试,1992,1(4):34-37.

(修改回稿日期 2012-10-06 编辑 韩晓渝)