

悬浮颗粒过滤线性解析模型研究

于晓伟¹,李洪建²,吕昀泽³,唐汉林⁴

(1.中国石化华东油气分公司,江苏南京 210000;2.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都 610500;
3.中国石化华北石油工程公司,河南郑州 450000;4.中国石化胜利油田分公司孤东采油厂,山东东营 257000)

摘要:为了研究产出水回注过程中固相颗粒与乳化油滴对吸水能力的影响,从深部过滤与外滤饼形成两个方面对悬浮颗粒过滤模型进行了研究,优化了模型参数——滤失系数 λ 与地层伤害系数 β 的求解方式。通过岩心驱替实验数据拟合求解曲线,并采用数值法求解超越方程获得模型参数,得出滤失系数 λ 、地层伤害系数 β 、阻抗斜率 m 在不同相态悬浮颗粒影响下的变化规律。通过实验数据分段拟合深部过滤与外滤饼形成阶段的阻抗,计算出岩心内的颗粒浓度在流动方向上的分布。

关键词:深部过滤;外滤饼形成;滤失系数;地层伤害系数

中图分类号:TE358

文献标识码:A

Study on linear analytical model for suspended particle filtration

Yu Xiaowei¹, Li Hongjian², Lyu Yunze³ and Tang Hanlin⁴

(1. East China Oil & Gas Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

2. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

3. North China Petroleum Engineering Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450000, China;

4. Gudong oil production plant of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: In order to study the influence of suspended particles and emulsified oil droplets on the water absorbing capacity in produced water reinjection process, we analyzed the suspended particles filtration model by the depth filtration and formation of the external filter cake, and optimized the solution of the model parameters (the filtration coefficient λ and the formation damage coefficient β). Based on the solution curves fitted by the core flooding experiment data, and by the numerical solution of the transcendental equation, we obtained the variation rule of filtration coefficient (λ), formation damage coefficient (β) and impedance slope (m) under the influence of different phase suspended particles. Then we got the impedance of the depth filtration and filter cake formation with piecewise fitting and calculated the particle concentration distribution of the core.

Key words: depth filtration, filter cake formation, filtration coefficient, formation damage coefficient

注水开发使一次采油后的原油采收率得到大幅提升,被广泛应用于国内外油田。在注水开发的中后期,地层产水量十分巨大,能够达到产油量的数十倍^[1]。原油经三相分离处理后,产出水中通常含有一些破乳剂、杀菌剂、絮凝剂等化学药剂与固相颗粒、乳化油滴等悬浮颗粒,产出水的排放不但会污染环境,也会造成大量水资源的浪费。因此,产出水回注成为减少资源浪费与环境污染,保障地层可持续供液的重要途径^[2]。

地层水在产出前已经与原油、天然气及岩石基质在地层压力、温度条件下经过了较长时间的相互作用,在流动过程中流体流速的影响下,以分散、乳化的形式扩散进入地层水的固相颗粒、乳化油滴及某些金属组分、有害气体与化学药剂等物质都会影响地层水水质,对注水井吸水能力产生损害^[3]。

因此,通过提出并完善悬浮颗粒的流动与沉积数学模型,制定相应的实验方案并找出流动与沉积规律,对正确制定产出水处理方案、维持油田可持续

收稿日期:2017-09-14。

第一作者简介:于晓伟(1991—),男,助理工程师,油气藏开发。

开发具有重要意义。本文从深部过滤与外滤饼形成两个方面对悬浮颗粒过滤模型进行研究。

1 深部过滤线性解析模型

深部过滤是指悬浮颗粒在地层孔隙内的运移、流动与捕获、沉积的过程,Sharma等人^[4]与Herzig等人^[5]建立的深部过滤模型含有2个重要参数——滤失系数 λ 、地层伤害系数 β ,可通过岩心驱替实验求得。

通过质量平衡方程表示颗粒的流动与捕获过程,悬浮颗粒的沉积速度由动量方程表示。为了简化模型,作出假设^[6]:①流体与悬浮颗粒不具有可压缩性;②流体流速恒定(一维线性流动);③流体黏度与悬浮颗粒浓度无关;④悬浮颗粒与沉积颗粒的密度相同;⑤颗粒体积相对孔隙体积很小,可忽略;⑥颗粒沉积动力学方程遵循线性规律;⑦忽略扩散作用与弥散作用。

1.1 模型方程

深部过滤线性流动解析模型包含3个控制方程:沉积颗粒与悬浮颗粒的质量平衡方程(1)、沉积动力学方程(2)、达西定律(3):

$$\phi \frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda U c \quad (2)$$

$$U = -\frac{k_0 k(\sigma)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

式中: t 为时间,s; x 为线性距离,m; c 为悬浮颗粒浓度,mg/L; ϕ 为孔隙度,%; σ 为沉积颗粒浓度,mg/L; λ 为滤失系数, m^{-1} ; k 为渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_0 为原始(地层/岩心)渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; U 为流速,m/s; p 为压力,Pa; μ 为黏度,Pa·s。

通过双曲线形式表示地层伤害函数 $k(\sigma)$:

$$k(\sigma) = \frac{1}{1 + \beta \sigma} \quad (4)$$

式中: β 为地层伤害系数,无因次。

引入无因次长度、时间:

$$X = \frac{x}{L}; T = \frac{Ut}{\phi L} \quad (5)$$

式中: T 为无因次时间,PV(孔隙体积倍数); X 为无因次距离。

控制方程的无因次形式:

$$\frac{\partial c}{\partial T} + \frac{\partial c}{\partial X} = -\lambda L c \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = \lambda L \phi c \quad (7)$$

$$U = -\frac{k_0 k(\sigma)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial X} \quad (8)$$

驱替开始前岩心孔隙内无颗粒,初始条件为:

$$T=0; c=0; \sigma=0 \quad (9)$$

驱替相中含有一定量悬浮颗粒,边界条件为:

$$X=0; c=c^0 \quad (10)$$

若滤失系数 λ 为常数,则(6)(7)(9)(10)在 $X < T$ (浓度锋面在 $X=T$ 处)时的解为:

$$\sigma(X, T) = \lambda L \phi c^0 (T - X) e^{-\lambda L X} \quad (11)$$

$$c(X, T) = c^0 e^{-\lambda L X} \quad (12)$$

阻抗指数(即无因次压降)显示了多孔介质平均渗透率在深部过滤阶段的相对变化,引入无因次阻抗:

$$J(T) = \frac{H(0)}{H(T)} = \frac{k_0 \Delta p(T)}{\mu L U(T)} = \frac{k_0}{k(T)} \quad (13)$$

对式(8)中的无因次距离 X 在 $0 < X < 1$ 范围内求积分并代入式(11),可得无因次阻抗 J (无因次吸水指数的倒数)在 $T > 1$ 时的表达式:

$$J(T) = 1 + \beta \phi c^0 \times \left(T(1 - e^{-\lambda L}) + e^{-\lambda L} + \frac{e^{-\lambda L} - 1}{\lambda L} \right) \quad (14)$$

因此,吸水指数在深部过滤阶段受2个无因次参数的影响: λL 与 $\beta \phi c^0$ 。

滤失系数 λ 仅受颗粒浓度、岩心非均质性影响,地层伤害系数 β 仅受颗粒浓度、流体流速影响,根据深部过滤线性流动模型表达式(其中滤失系数与地层伤害系数为常量),可通过岩心出口端颗粒浓度与岩心压降进行计算。

根据式(14)可知, $J(T)$ 在 $T > 1$ 时($T > 1$ 时锋面已到达岩心出口端,岩心内部已建立稳定的浓度分布, $T < 1$ 时浓度分布不稳定)呈线性增长:

$$J(T) = mT + 1 - \delta \quad (15)$$

$$m = \beta c^0 \phi (1 - e^{-\lambda L}) \quad (16)$$

$$\delta = -\beta c^0 \phi \left(e^{-\lambda L} + \frac{1 - e^{-\lambda L}}{\lambda L} \right) \quad (17)$$

式(15)中 δ 的数量级为 10^{-3} ,在 $T \geq 1$ 时几乎为零,因此在 $T \geq 1$ 时可忽略 δ 对阻抗的影响,阻抗表达式:

$$J(T) = mT + 1 \quad (18)$$

1.2 超越方程数值解求模型参数

对于模型参数的计算,P B等提出三点测试法^[7],但其中点压力并非岩心内部压力,不同岩心间的压力损耗会对实验结果造成较大误差。

由于滤失系数 λ 仅受颗粒浓度、岩心非均质性影响,地层伤害系数 β 仅受颗粒浓度、流体流速影响,因此,可采用物性参数相同的人造岩心进行驱替实验来计算。

在驱替实验中采用两块长度不同、其它物性参数基本相同的人造岩心,将入口端、出口端压差带入阻抗表达式求得阻抗值 m_1, m_2 :

$$m_1 = \beta c^0 \phi (1 - e^{-\lambda L_1}) \quad (19)$$

$$m_2 = \beta c^0 \phi (1 - e^{-\lambda L_2}) \quad (20)$$

式(19)(20)中均具有2个未知量 λ 与 β ,联立方程(19)(20),令 $y = e^{-\lambda L_1}$,将两式相除可得表达式:

$$(1-y) \frac{m_2}{m_1} = \left(1 - y^{\frac{L_2}{L_1}}\right) \quad (21)$$

式(21)为超越方程,模型参数 λ 可通过其数值解来确定。

将方程左边项设为关于 y 的多项式 f_1 ,右边项设为关于 y 的多项式 f_2 。可以发现, f_1, f_2 关于自变量 y 分别呈直线与幂函数型曲线。在同一坐标系内,两函数在点(1,0)处相交,在区间(0,1)内有且仅有一个交点,表明方程在区间(0,1)内有唯一解。

人造岩心物性参数见表1。

通过岩心压降数据拟合阻抗曲线,进而通过阻抗曲线获得阻抗斜率,连同岩心长度代入超越方程即可作图求解。图1为固相颗粒求解曲线,图2为固液颗粒求解曲线,图3为液相颗粒求解曲线。

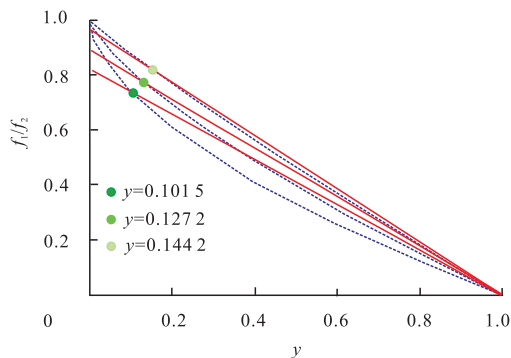


图1 固相颗粒求解曲线

Fig. 1 Solution curves of solid particle

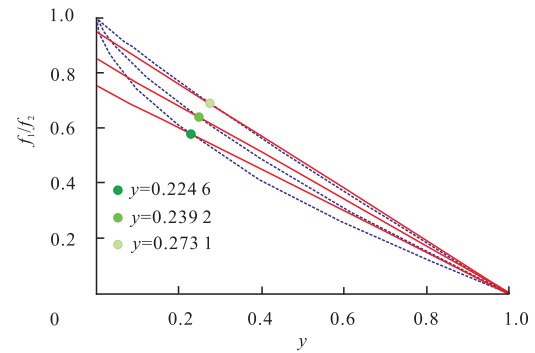


图2 固液颗粒求解曲线

Fig. 2 Solution curves of solid and liquid particle

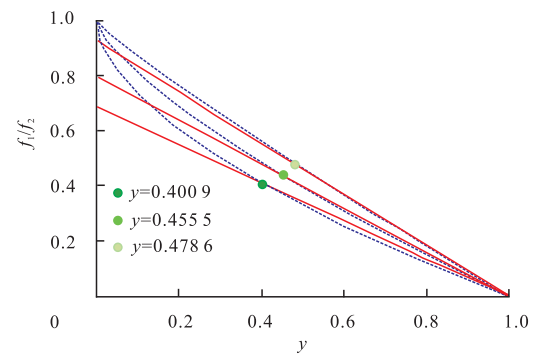


图3 液相颗粒求解曲线

Fig. 3 Solution curves of liquid particle

表1 岩心物性参数

Table 1 Core physical parameters

实验类型	岩心编号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	孔隙体积/cm ³
固相颗粒驱替实验	S1	3.5	2.54	12.94	2.29
	S2	4	2.54	12.79	2.59
	S3	4.5	2.54	13.15	3.00
	S4	5	2.54	13.08	3.31
	S5	5.5	2.54	12.89	3.59
	S6	6	2.54	13.21	4.02
固液颗粒驱替实验	M1	3.5	2.54	12.65	2.24
	M2	4	2.54	12.98	2.63
	M3	4.5	2.54	13.41	3.06
	M4	5	2.54	12.61	3.19
	M5	5.5	2.54	13.11	3.65
	M6	6	2.54	12.66	3.85
液相颗粒驱替实验	L1	3.5	2.54	12.88	2.28
	L2	4	2.54	13.31	2.70
	L3	4.5	2.54	13.28	3.03
	L4	5	2.54	12.68	3.21
	L5	5.5	2.54	12.59	3.51
	L6	6	2.54	13.08	3.98

由图可知,固相颗粒的 y 值分别为0.101 5、0.127 2、0.144 2,固液颗粒的 y 值分别为0.224 6、0.239 2、0.273 1,液相颗粒的 y 值分别为0.400 9、0.455 5、0.478 6。将岩心长度代入 y 表达式计算模型参数 λ 、 β ,计算结果见表2。

表2 模型参数计算结果

Table 2 Calculation results of model parameter

实验类型	岩心分组	颗粒含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	λ	$\bar{\lambda}$	β
固相颗粒驱替实验	S1-S6	4	38.128 3		
	S2-S5	4	37.490 8	38.116 7	3.283 0
	S3-S4	4	38.731 1		
固液颗粒驱替实验	M1-M6	2+3	24.890 6		
	M2-M5	2+3	26.008 3	25.619 1	3.035 3
	M3-M4	2+3	25.958 3		
液相颗粒驱替实验	L1-L6	6	15.234 1		
	L2-L5	6	14.297 4	14.756 4	1.743 8
	L3-L4	6	14.737 8		

由表2可知,固相颗粒引起的滤失系数 λ 值均在38左右,固液颗粒引起的滤失系数 λ 值均在25.5左右,液相颗粒引起的滤失系数 λ 值均在14.5左右,稳定性较好,取其平均值代入式(16)计算地层伤害系数 β 。

不同相态悬浮颗粒 β 值的关系为 $\beta_s > \beta_m > \beta_l$,引起这种现象的原因为:液相颗粒被挤压后发生形变可穿过孔喉,而固相颗粒被捕获后形成沉积,不再随流体运移,颗粒沉积造成的地层伤害将不断增加,所以固相颗粒造成的地层伤害较液相颗粒更为严重。

不同相态悬浮颗粒 λ 值的关系为 $\lambda_s > \lambda_m > \lambda_l$,引起这种现象的原因:固相颗粒被捕获的速率与液相颗粒相同,但部分液相颗粒被挤压后发生形变将通过孔喉随流体继续运移,因此,削弱了液相颗粒对滤失系数的影响。

不同相态悬浮颗粒的阻抗斜率 m 之间的关系应当与 λ 、 β 所表现的规律一致,因为阻抗斜率 m 反映了捕获强度与地层伤害速度的联合效应。拟合不同相态悬浮颗粒引起的阻抗值,拟合曲线见图4~图6。

由图可知,物性参数基本一致的岩心S1、M1、L1在该阶段的阻抗斜率分别为0.27、0.21、0.08,表现出的大小关系为: $m_s > m_m > m_l$,与 λ 、 β 所表现的规律一致。

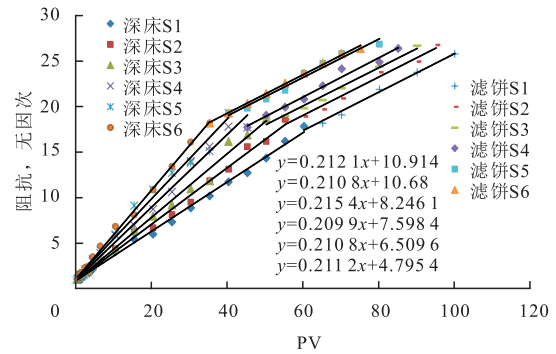


图4 固相颗粒阻抗拟合曲线

Fig. 4 Impedance spectra curves of solid particle

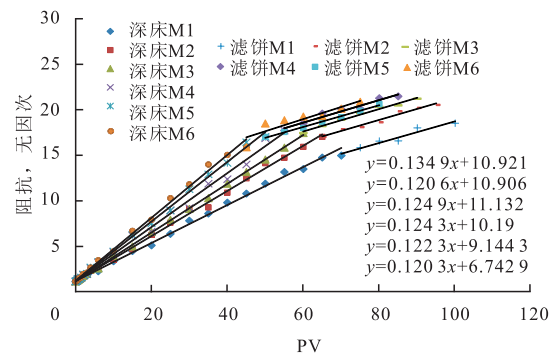


图5 固液颗粒阻抗拟合曲线

Fig. 5 Impedance spectra curves of solid and liquid particle

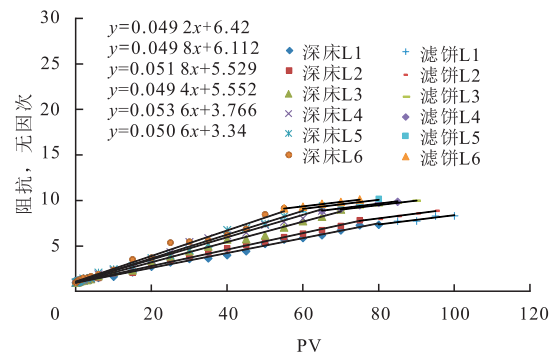


图6 液相颗粒阻抗拟合曲线

Fig. 6 Impedance spectra curves of liquid particle

1.3 颗粒浓度分布计算

在滤失系数 λ 与地层伤害系数 β 已知的情况下,为了更全面地掌握悬浮颗粒的运移与沉积规律及其对岩心造成伤害的位置,有必要继续研究悬浮颗粒与沉积颗粒在流体流动过程中的浓度变化情况。将滤失系数与岩心长度代入式(11)与式(12)可以计算沉积颗粒与悬浮颗粒在流体流动方向上的无因次浓度分布,其结果见图7。

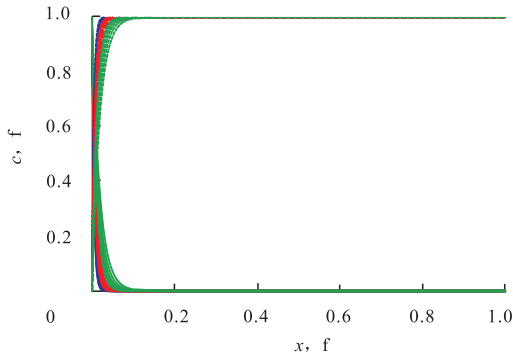


图7 不同相态颗粒浓度剖面

Fig. 7 concentration profiles of particles with different phase

图7中,蓝色、红色、绿色实线为固相、固液、液相沉积颗粒浓度分布剖面,蓝色、红色、绿色虚线为固相、固液、液相悬浮颗粒浓度分布剖面。不难看出,固相颗粒沉积深度较小,液相颗粒沉积深度较大,0.1倍岩心长度范围内的沉积较为严重。引起这种现象的原因是:部分液相颗粒受到挤压发生形变,穿过孔喉随流体继续运移,从而增大了运移深度。

2 外滤饼线性解析模型

2.1 模型方程

当悬浮颗粒的流动与沉积进行到一定程度时,岩心入口端被封堵,悬浮颗粒将不再随流体运移,而是在岩心入口端堆积从而形成外滤饼。颗粒开始堆积形成外滤饼的时刻称为临界时间 T_{tr} ,其值受沉积颗粒浓度的影响,当颗粒沉积量达到 α 倍的岩心孔隙体积时,开始形成外滤饼:

$$\sigma(T_{tr}) = \alpha\phi \quad (22)$$

驱替相中的颗粒浓度即为岩心入口端处的颗粒浓度,由沉积动力学方程可知:

$$\sigma(0, T) = \lambda L \phi c^0 T \quad (23)$$

由式(22)、(23)可得临界时间表达式:

$$T_{tr} = \frac{\alpha}{\lambda L c^0} \quad (24)$$

$T > T_{tr}$ 时,颗粒堆积并开始形成外滤饼,其质量平衡方程为:

$$(1 - \phi_c) h_c(t) = c^0 U(t - t_{tr}) \quad (25)$$

外滤饼压降与岩心压降之和即为此阶段的总压降:

$$\frac{h_c + L}{k(T)} = \frac{h_c}{k_c} + \frac{L}{k(T_{tr})} \quad (26)$$

假设 $h_c < L$,将(25)代入(26)可得 $T > T_{tr}$ 时的阻抗表达式:

$$J(T) = \frac{k_0}{k(T)} = J(T_{tr}) \left[1 + \frac{k_0}{J(T_{tr}) k_c} \frac{c^0 \phi (T - T_{tr})}{1 - \phi_c} \right] \quad (27)$$

$$m_c = \frac{k_0 c^0 \phi}{k_c (1 - \phi_c)} \quad (28)$$

滤饼渗透率可通过阻抗斜率表达式进行计算。

2.2 阻抗曲线拟合

深部过滤阶段的阻抗计算公式适用于外滤饼形成阶段,因此采用的是同一实验,使用岩心S1~S6、M1~M6、L1~L6进行悬浮颗粒驱替实验,每组岩心均驱替100PV,注入水中含有不同相态颗粒,由岩心两端压差计算岩心阻抗,阻抗曲线拟合结果见图4~图6。

由图4~图6可知:①在外滤饼形成阶段,固相、固液、液相颗粒的阻抗斜率分别为0.21、0.12、0.05;②阻抗斜率在外滤饼形成阶段大致相同,在深部过滤阶段随着岩心长度的增大而逐渐升高。原因是深部过滤阶段的阻抗斜率受岩心长度影响,而悬浮颗粒在外滤饼形成阶段并未随流体进入岩心,阻抗斜率与岩心长度无关;③固相颗粒驱替实验临界时间分别为35PV、40PV、45PV、50PV、55PV、60PV,固液颗粒驱替实验临界时间分别为45PV、50PV、55PV、60PV、65PV、70PV,液相颗粒驱替实验临界时间分别为55PV、60PV、65PV、70PV、75PV、80PV, $T_{tr} < T_{im} < T_{in}$,原因是部分液相颗粒受到挤压发生形变,从而穿过孔喉随流体继续运移,增大了其运移深度,使临界时间向后推移。

3 结论

1) 悬浮颗粒过滤模型包含两个经验参数——滤失系数 λ 、地层伤害系数 β ,通过超越方程数值解求得的参数更为准确。

2) 不同相态悬浮颗粒驱替实验的 λ 值关系为 $\lambda_s > \lambda_m > \lambda_l$, β 值关系为 $\beta_s > \beta_m > \beta_l$,阻抗斜率 m 与滤失系数、地层伤害系数表现出的规律一致。

(下转第76页)