

钻井液固相侵入深度的计算方法研究^{*}

范翔宇¹ 夏宏泉¹ 陈 平¹ 赵 军² 唐雪萍³ 刘 彬⁴ 罗永中³
(1.西南石油大学 2.中国石油塔里木油田勘探开发研究院 3.四川石油管理局 4.西南油气田分公司)

范翔宇等.钻井液固相侵入深度的计算方法研究.天然气工业,2006,26(3):75-77.

摘 要 钻井液固相侵入储层后,往往不可避免地在喉道处发生沉积和架桥现象,从而造成堵塞和地层损害。文章根据物质平衡理论,在对钻井液固相侵入微观物理模型分析的基础上,综合利用钻井参数、地层物性参数、测井参数和钻井液浸泡时间等多参数实现了钻井液滤液侵入深度的计算,为钻井液固相侵入深度的计算打下了基础。同时引入了钻井液颗粒进入系数,并找到了其与储层孔隙度之间的基本关系。最终建立了定量计算钻井液固相侵入深度的数学模型。对塔中地区志留系 6 口井的资料进行处理,所计算的钻井液固相侵入深度与实验室岩心污染实验所测到的固相侵入深度吻合程度高。研究表明,该方法能为钻井过程中油气层的保护以及更好地为射孔和增产措施的科学决策提供重要依据。

主题词 钻井液 固相 侵入深度 物质平衡 测井

在钻井过程中,地层原有的平衡被打破,在正压差的作用下,钻井液中的固相和液相不可避免地侵入地层,改变井筒附近储层流体分布的原始状态。其中固相颗粒往往会造成孔喉堵塞,而由于液相常常与油气层岩石的不配伍,结果会诱发油气层五敏反应等地层损害。对于各类固相颗粒而言,有的是工作液的必要组成,有的是有害固相而没有被除去,它们侵入油气层后必然会在储层的喉道处发生沉积和架桥,从而造成堵塞,这种堵塞可以造成油气层的 10%~100% 的损害^[4],所以定量地计算钻井液固相侵入深度对油气井钻探工程和储层保护有着极其重要的意义。本文将在对钻井液颗粒侵入微观模型的分析和对滤液侵入深度的测井计算基础上,重点讨论基于物质平衡法计算钻井液固相侵入深度的问题,并建立钻井液固相侵入高低孔渗油气层深度的数学定量计算模型。

一、模型建立

1. 储层钻井液固相侵入微观物理模型

根据油气田地质分析资料,当钻井液失水小时,钻井液将带着固相颗粒在钻井液柱压力大于地层孔隙压力时进入储层孔隙,此时进入较深。相反,当钻

井液失水大时,钻井液在侵入过程中固相因失去束缚水、密度增大将在井壁附近沉降并堵塞孔喉,阻止了钻井液的固相和滤液的进一步侵入,此时固相侵入较浅,当然这在一定程度上也会使液相的侵入深度减小,如图 1 和图 2 所示。

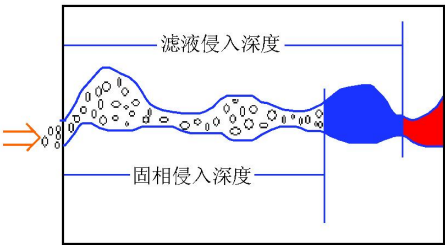


图 1 钻井液失水小时的中孔储层固相颗粒侵入储层微观模型

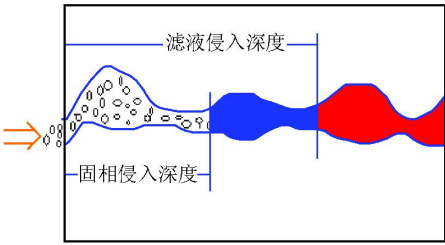


图 2 钻井液失水大时的低孔储层固相颗粒侵入储层微观模型

^{*} 本文系四川省高校“工程测井重点实验室”·西南石油大学新石工 902 项目(部级)资助。
作者简介: 范翔宇,1975 年生,博士;从事测井新技术在石油地质和石油工程中的应用研究。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)88113680。E-mail:swpi_fxy.student@sina.com

2. 钻井液液相侵入储层深度计算模型

(1) 计算模型

对于钻井液滤液侵入深度的计算,除了用电阻率组合测井资料来计算^[1]外,我们可以根据近井地层的钻井液滤液侵入的物理模型,综合利用钻井参数、地层物性参数、测井参数以及滤饼渗透率和钻井液浸泡时间等多参数来计算钻井液滤液侵入深度。假设在其它条件相对固定的情况下,钻井液液相侵入地层的深度主要受滤饼渗透率和地层孔渗特性两大因素的控制,并且由滤饼渗透过来的滤液能无阻挡地进入地层,那么由物质平衡理论可以得到在一定时刻,通过滤饼的滤液体积应该为定值,即:

$$(d_i^2 - d_o^2)(\ln d_i - \ln d_o) = \frac{2tK_{mc}\Delta p}{\mu\phi S_w} \sqrt{\frac{R_{so} R_w}{R_{mf} R_i}} \quad (1)$$

式中: K_{mc} 为滤饼渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为钻井液滤液粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ϕ 为地层孔隙度,小数; S_w 为地层含水饱和度,%; R_{mf} 、 R_{so} 、 R_i 和 R_w 分别为钻井液滤液电阻率、冲洗带电阻率、原状地层电阻率和地层水电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; Δp 为钻井液液柱压力与原始地层压力之间的侵入压差(正压差), MPa ; t 为浸泡时间,d; d_o 为井径,in(1 in=25.4 mm)。

(2) 主要参数的求取

1) 钻井液滤液电阻率(R_{mf})的求取。设地层温度下的钻井液电阻率为 R_m ,则:

$$R_{mf} = \epsilon R_m^{1.07} \quad (2)$$

其中系数(ϵ)与钻井液密度(ρ_m)有密切关系,可以由表1查值来确定,也可以用式3和式4计算而得到:

$$\text{对均质地层: } \epsilon = 0.7657 \rho_m^2 - 3.0708 \rho_m + 3.423 \quad (3)$$

$$\text{对非均质地层: } \epsilon = 1.0693 \rho_m^{-1.5896} \quad (4)$$

表1 钻井液密度与 ϵ 值的参照表^[2]

钻井液密度 (g/cm^3)	1.20	1.25	1.32	1.44	1.56	1.68	1.92	2.16
ϵ	0.847	0.778	0.708	0.584	0.488	0.412	0.38	0.35

2) 钻井液电阻率为 R_m 的求取。研究发现 R_m 是一个随地温变化的变量,设地面温度为 T_0 ($^{\circ}\text{C}$),则在井中任意深度 H 处的地温 T ($^{\circ}\text{C}$)为:

$$T = T_0 + 2.5 \times \frac{H}{100} \quad (5)$$

则有:

$$R_m = 71.4 \times R_{mT_0} / (1.8T + 39) \quad (6)$$

式中: R_{mT_0} 为地面温度下钻井液电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

3) 正压差(Δp)的求取。 Δp 为钻井液液柱压力与地层孔隙压力之间的侵入压差。根据 Jorden 提出的等效深度法得到地层孔隙压力 p_p 为:

$$p_p = G_o H - (G_o - G_n) H_e \quad (7)$$

$$\text{则: } \Delta p = p_m - p_p \quad (8)$$

式中: p_m 为钻井液液柱产生的液柱压力, MPa ; G_o 、 G_n 分别为上覆岩层压力梯度和静水柱压力梯度, MPa/m ; H 、 H_e 分别为地层埋藏深度和相应的等效深度,m; H_e 可以由下式求得:

$$H_e = (\ln \Delta t_o - \ln \Delta t) C^{-1} \quad (9)$$

其中: C 为正常压实趋势线的斜率; Δt 、 Δt_o 分别为地层埋深为 H 时的声波时差值与地层埋深为零时的声波时差值, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

4) 选取地层水电阻率(R_w)的原则。若本井或邻井有可靠的水分析资料,则应首先采用水分析资料计算 R_w ;如有分区分层位的准确的 R_w 资料,而本井的电阻率和 SP 曲线又无异常显示,则可采用分区分层位选用的 R_w 数据;否则,应该用多种方法计算,选择其中合适的值(一般是最小的)作为 R_w ,这样才能更好地使最终计算结果与地质情况及测井显示相符。

3. 钻井液固相侵入储层深度计算模型

根据固相物质平衡理论,对于高孔渗储层,可以假定钻井液 100% 侵入储层,井壁无外滤饼存在,钻井液在侵入过程中被储层孔隙过滤,在井壁附近形成内滤饼,其厚度为 h_{mc} 、密度为 ρ_{mc} ;在内滤饼前端为钻井液滤液,滤液侵入深度为 d_i ,密度假定为 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,则相应的固相物质平衡方程为:

$$(\rho_{nd} - 1)[(d_i + r_w)^2 - r_w^2] = (\rho_{mc} - 1) \times [(h_{mc} + r_w)^2 - r_w^2] \quad (10)$$

然而对于中低孔渗储层,钻井液不可能 100% 地侵入储层,根据实际情况,我们引入钻井液颗粒进入系数 α ($\alpha < 1$),则相应的固相物质平衡方程改写为:

$$\alpha(\rho_{nd} - 1)[(d_i + r_w)^2 - r_w^2] = (\rho_{mc} - 1) \times [(h_{mc} + r_w)^2 - r_w^2] \quad (11)$$

式中: α 为颗粒进入系数,无因次; ρ_{nd} 为钻井液密度, g/cm^3 ; d_i 为滤液侵入深度,m; r_w 为井半径,m; ρ_{mc} 为内滤饼密度, g/cm^3 ; h_{mc} 为内滤饼厚度,m。

式(11)中的颗粒进入系数(α)一般由储层孔隙压汞资料统计得出,计算公式为:

$$\alpha = \frac{\sum k_i r_i^3 - k_{\max} r_{\max}^3}{\sum k_i r_i^3} \quad (12)$$

式中:($\sum k_i r_i^3 - k_{\max} r_{\max}^3$)为小于最大孔半径颗粒体

积之和; $\sum k_n r_n^3$ 为全部颗粒体积之和; n 为钻井液颗粒半径, μm ; k_n 为钻井液颗粒分布概率。

研究发现,颗粒进入系数(α)与地层孔隙度存在较为固定的关系(地层没有裂缝): $\alpha=\lambda\varphi^\tau$ (φ 为孔隙度, $\%$),其中 λ 、 τ 为待定系数。另外,内滤饼密度 ρ_{mc} 可考虑为钻井液失水后浓缩的结果,为钻井液密度(ρ_{nd})加上一个密度增量 $\Delta\rho$:

$$\begin{aligned}\rho_{mc} &= \rho_{nd} + \Delta\rho \\ \Delta\rho &= (3.5 - 10\rho_{nd}/LOSS)\beta\end{aligned}\tag{13}$$

式中: $LOSS$ 为钻井液失水量, mL ; β 为校正系数,其值可根据最大滤饼密度调整,同时结合研究井区的储层类型来决定(高孔渗储层取 $0.4\sim0.5$;中孔渗储层取 $0.2\sim0.3$;低渗储层取 $0.05\sim0.2$)。

二、实例分析

这里将基于测井、储层和钻井等参数建立的钻井液固相计算模型进行了编程实现,并以塔里木油田塔中志留系为例进行了实际资料处理。该层系属于低孔渗储层,表 2 是塔中部分井储层段钻井液固相侵入深度程序处理结果,在计算钻井液固相侵入深度时,采取了适合研究井区实际的钻井液颗粒进入系数的计算模型,即 $\alpha=0.0000005\varphi^{5.0284}$ 。从计算结果可以看出钻井液液相侵入深度范围为 $26.0\sim120.0\text{ cm}$,平均为 62 cm ;钻井液固相侵入深度范围为 $1.5\sim6.8\text{ cm}$,平均为 4.0 cm ,与实验室岩心污染分析结果吻合较好。

表 2 研究工区部分井储层段钻井液固相侵入深度计算结果

井 名	储层段(m)	钻井液密度 (g/cm ³)	钻井液失水 (mL)	测井孔隙度 (%)	井径 (cm)	钻井液液相 侵入深度 (cm)	钻井液固相 侵入深度 (cm)
TZ11	4417.0~4420.0	1.23	4.5	12.00	21.65	26.0	2.01
	4424.0~4435.0					45.7	2.40
TZ47	4400.0~4410.0	1.23	4.0	11.94	24.47	69.5	6.75
	4978.0~4986.5	1.25	4.0	10.30	25.40	55.7	3.52
TZ111	4357.5~4371.0	1.18	4.0	12.50	21.60	55.6	5.07
TZ117	4402.0~4436.5	1.25	4.0	11.68	22.86	49.8	1.47
TZ62	4053.5~4055.0	1.24	4.0	10.93	31.50	61.0	2.72
	4074.0~4074.5					120.0	10.2
TZ169	4107.5~4114.5	1.25	4.0	11.25	18.16	29.0	4.05
	4116.0~4121.5					116.8	9.75
	4128.5~4130.5					60.1	3.05
	4145.5~4147.5					53.3	5.32

三、结论与建议

(1)研究发现固相侵入深度与钻井液密度、粘度、失水、钻井液颗粒半径以及钻压和地层本身的物性参数(渗透率、孔隙度和含水饱和度等)等密切相关。根据物质平衡理论建立起钻井液固液两相侵入深度的关系模型,将测井信息有效地用到该模型的计算与实际中,为储层损害评价以及为射孔和增产措施的科学决策提供了一项经济而有效的手段。

(2)对于渗透性砂岩剖面,固相侵入深度通常为 $1.5\sim7.0\text{ cm}$,个别地层侵入深度也可达到 10 cm ,侵入深度越大对储层的伤害就越大。由于所研究的计算模型没有考虑地层微裂缝的影响,所以当地层存在微裂缝时,所计算的钻井液固相侵入深度比实际侵入深度偏小,而对缝洞发育的储层(如碳酸盐岩地

层),文中的计算模型需做很大的修正才能使用,否则计算结果误差极大。

参 考 文 献

[1] 范翔宇,夏宏泉,等.测井计算钻井液侵入深度的新方法研究[J].天然气工业,2004,24(5).

[2] 雍世和,等.测井数据处理与综合解释[J].山东东营:石油大学出版社,1996.

[3] 张绍槐,罗平亚,等.保护储集层技术[J].北京:石油工业出版社,1993.

[4] 刘伟,等.浅谈钻井过程中油气层的损害与保护[J].西部探矿工程,2001.

[5] 曾时田.四川天然气井钻井压力控制[J].天然气工业,2003,23(4).

(收稿日期 2005-09-11 编辑 钟水清)