

测井计算钻井泥浆侵入深度的新方法研究*

范翔宇¹ 夏宏泉¹ 陈平¹ 赵军² 闫爽² 张元泽³

(1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院 2. 塔里木油田勘探开发研究院 3. 四川石油管理局)

范翔宇等. 测井计算钻井泥浆侵入深度的新方法研究, 天然气工业, 2004; 24(5): 68~70

摘要 用测井资料计算泥浆侵入深度主要是基于电阻率径向分布特征进行的, 传统的方法主要有图版法、经验公式法。用测井资料计算泥浆侵入油气层深度是十分有效而直接的手段, 用其间接地评价钻井泥浆污染油(气)层的程度则是一项经济可行的新技术。文章在分析比较了传统的泥浆侵入校正方法的基础上, 经过理论推导和应用介绍了一种直接利用深、中、浅电阻率组合测井资料计算泥浆侵入深度的新方法。通过对研究工区 10 多口井的实际资料进行处理, 泥浆侵入深度的解释结果与测试评价基本相符, 应用表明, 该方法不但可以求出钻井泥浆侵入深度, 还可求出地层真电阻率, 它优于传统的方法, 对低侵、高侵和无侵三种情况都实用, 不失为一种计算泥浆侵入油气层深度的新方法。

主题词 测井曲线 钻井泥浆 侵入深度 地层真电阻率 几何因子

目前, 评价油气层损害的方法主要有表皮系数法、条件比法、产能比法、流动效率法、污染系数法、井底污染半径法等^[4], 利用这些方法评价油气层所受损害时都需要准确知道泥浆侵入地层的深度, 而研究泥浆侵入储层特征是测井评价泥浆污染储层的重要一环。本文介绍一种直接利用电阻率测井计算泥浆侵入深度的新方法。

我们知道, 通常在钻开储层之前, 油气藏岩石及其矿物组分和其中所含流体基本上都处于物理化学或热力学平衡状态, 在钻井泥浆滤液的浸泡下, 这种平衡会被打破, 从而可能造成地层污染。泥浆侵入地层会在泥质指示曲线(自然伽马 GR、自然电位 SP、井径 CAL)、孔隙度指示曲线(声波时差 AC、密度 DEN、中子 CNL)和三电阻率(R_d 、 R_s 、 R_{xo})等测井曲线上均有不同程度的反映。钻井泥浆滤液对地层的侵入使得电阻率测井响应偏离地层真电阻率值, 研究表明, 深浅电阻率测井的动态响应能较真实地反映实际侵入过程的复杂性, 是准确求出地层真电阻率的重要测井依据。故可用测井资料计算泥浆侵入储层深度和评价钻井泥浆污染油(气)层的程度。本文在分析泥浆侵入的测井响应特征的基础上, 对求取钻井泥浆侵入储层深度方法进行认真推导和深入研究。

泥浆侵入的测井响应特征

泥浆侵入油气储层是一个复杂的物理过程, 其侵入程度取决钻井泥浆柱压力与原始地层压力之间正压差(Δp)、泥浆特性、地层特性、钻井条件和浸泡时间等因素, 其中最重要的是 Δp 和地层孔渗特性。 Δp 越大, 泥浆滤液驱替地层孔隙中流体越多; 反之, 驱替孔隙流体越少; 当 Δp 为零时, 泥浆滤液将不能驱替地层孔隙流体, 但泥浆将会对渗透性地层进行侵蚀。由于钻井泥浆电阻率与原地层水电阻率不同, 这种侵入作用将会改变油气层电阻率的径向特征, 同时在井壁处形成环状的内滤饼和外滤饼, 地层沿径向分成了冲洗带、侵入带和原始地层带。泥浆侵入储集层会导致井筒附近岩石的电性和流体性质发生改变, 使储层的测井响应趋于复杂化。所以无论是定性分析原地层电阻率还是确定饱和度参数和识别油气水层, 都需考虑泥浆滤液侵入的测井响应特征。

泥浆矿化度与地层水矿化度的差异越大, 油(气)、水层的径向侵入剖面电性特征越明显; 储层孔渗性越好, 对钻井泥浆相对密度反映越敏感。特别是在盐水泥浆、气层和渗透性较好的地层中, 会产生较深的泥浆侵入带, 它对视电阻率曲线的影响更加

* 本研究受“油气藏地质和开发工程”国家重点实验室基金项目 PLN0133 和西南石油学院 238 项目资助。

作者简介: 范翔宇, 1975 年生, 博士; 现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

严重,造成地层视电阻率与真电阻率有明显差异。同时,因泥浆性能、储层特征的差异,泥浆的侵入会使不同探测深度的电阻率测井值产生较明显的幅度差。当泥浆电阻率超过地层水电阻率的2.5倍时,通常在储层形成水层高侵、油(气)层低侵和油气水同层无侵三种情况。随着泥浆浸泡时间的推移,电阻率测井值存在一定的变化规律:在含油气饱和度高的层段,深感应测井曲线幅度随着泥浆浸泡时间增加而缓慢下降,中感应测井曲线幅度初期下降快、随后又有会上升,最终其值比深感应高;在含油气饱和度中等的层段,双感应测井变化与含油气饱和度高的层段的大体相同,但深感应测井曲线幅度随着泥浆浸泡时间增加而下降更多,中感应测井曲线幅度随着泥浆浸泡时间增加而增加,从而形成低侵;在含油气饱和度低的层段,感应测井在泥浆侵入初期会快速下降,随后随着浸泡时间的增加又会逐渐升高;在水层,感应测井随着浸泡时间的增加会逐渐升高,其中中感应测井曲线幅度升高更多。深中侧向电阻率测井也是如此。

电阻率 R_t 和侵入带直径 D_i 的计算

虽然钻井泥浆侵入储层后在自然电位和电阻率等测井曲线上都有明显地反映,但要求取泥浆侵入深度(即泥浆侵入半径 D_m ,从井轴算起),重要的是求准侵入带直径 D_i ,最好使用电阻率组合测井资料。

1. 两种常见的求取 R_t 和 D_i 的方法

(1)谭氏方法:该方法认为对侧向测井来说,泥浆侵入校正仅取决于双侧向测井电极系数的大小和所测量地层的视电阻率高低,提出了只用深、浅双侧向视电阻率求解地层真电阻率 R_t 和侵入带直径 D_i ,而进行双侧向测井泥浆侵入校正的方法:

$$R_t = \frac{K_s}{K_s - K_d} R_d - \frac{K_d}{K_s - K_d} R_s \quad (1)$$

估算侵入带直径:

$$D_i = D_0 \exp \left[4.264 \left(\frac{R_d - R_t}{R_{xo} - R_t} \right) \right]$$

$$\text{或者: } D_i = D_0 \exp \left[2.617 \left(\frac{R_s - R_t}{R_{xo} - R_t} \right) \right] \quad (2)$$

式中: K_d 、 K_s 为深、浅侧向测井电极系数; D_i 为泥浆侵入带直径, in (1 in = 25.4 mm); D_0 为实测井径, in; R_{xo} 为冲洗带电阻率, $\Omega \cdot m$, 可以微球型聚焦电阻率测井值近似代替; R_d 、 R_s 分别为深浅侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_t 为地层真电阻率值, $\Omega \cdot m$ 。由上述公式可知,当 $R_d = R_t$ 时,有 $R_t = R_d = R_s$, 则 $D_i \approx D_0$, 表示基本无泥浆侵入或泥浆侵入很浅。

这里我们不妨对公式(2)作一改进与完善,得到如下新公式:

$$D_i = 0.6202 D_0 C \exp \left(2.9967 \frac{R_d - R_t}{R_{xo} - R_t} \right) \quad (3)$$

式中: C 为校正系数 ($C = 8/Bits$, $Bits$ 为钻头直径, in), 样更加切合客观实际。

(2)雍氏方法:该方法是根据双感应—聚焦测井泥浆侵入校正综合解释图版和几何因子理论,采用线性内插与迭代逼近法,由式(4)即可以计算出经过泥浆侵入影响校正后的地层真电阻率 R_t 和冲洗带电阻率 R_{xo} 值,并由内插与迭代的结果求得比值 R_{xo}/R_t 和公式(5)计算出中感应在侵入带的积分几何因子 G_m , 然后用线性内插法查表得泥浆侵入带直径 (D_i) 值。

$$R_t = \frac{R_{ILD} R_{xo} (1 - G_D)}{R_{xo} - G_D R_{ILD}} \quad (4)$$

$$R_{xo} = \frac{R_{FL} - (1 - G_s) R_t}{G_s}$$

$$G_m = \frac{R_{xo}/R_{ILM} - R_{xo}/R_t}{1 - R_{xo}/R_t} \quad (5)$$

式中: R_{ILD} 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{FL} 为微球形聚焦测井电阻率, $\Omega \cdot m$; G_D 为深感应在侵入带的近似几何因子; G_s 为浅聚焦在侵入带的近似几何因子。

2. 基于阵列感应测井求取 R_t 和 D_i 的方法

阵列感应测井为研究复杂的泥浆侵入剖面方法提供了有效手段。当 $R_{xo} > R_t$ (高侵) 或者 R_{xo}/R_t 不大时,根据深浅感应探测或阵列感应仪器的径向几何因子理论可以推导出计算地层真电导率 σ_t 和侵入带直径的公式:

$$\sigma = \frac{B\sigma_m - D\sigma_d + \sigma_{xo}(AD - BC)}{AD - BC + B - D} \quad (6)$$

$$\frac{[\sigma_m - C(\sigma_{xo} - \sigma_t) - \sigma_t]}{D(\sigma_{xo} - \sigma_t)}$$

$$D_i = 10 \quad (7)$$

其中系数 A 、 B 、 C 、 D 由下列方程决定:

$$\begin{cases} G_d = A + B \log D_i \\ G_m = C + D \log D_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_t 、 σ_{xo} 、 σ_d 和 σ_m 分别为地层真电导率(真电阻率 $R_t = \sigma_t^{-1}$)、冲洗带视电导率、深感应测井视电导率和中感应测井视电导率; G_d 、 G_m 分别为深、中感应测井径向几何因子; A 、 B 、 C 、 D 分别为深、浅探测(如探测深度为 120、90、60 in 和 30、20、10 in)的阵列感应测井径向几何因子与泥浆侵入深度间的回归方程中的系数。

当 $R_{xo} < R_t$ (低侵) 时,同样根据侧向测井仪器的

径向几何因子利用式(9)、(10)、(11)可以计算地层的真电阻率、侵入带直径:

$$R_t = \frac{BR_s - DR_d + R_m(AD - BC)}{AD - BC + B - D} \quad (9)$$

$$\frac{[R_d - A(R_m - R_t) - R_t]}{B(R_m - R_t)} \quad (10)$$

$$D_i = 10 \quad (10)$$

其中系数A、B、C、D由下列方程决定:

$$\begin{cases} J_d = A + B \log D_i \\ J_s = C + D \log D_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_d 、 R_s 分别为深、浅侧向测井电阻率 $\Omega \cdot m$; J_d 、 J_s 分别为深、浅侧向测井径向几何因子; A 、 B 、 C 、 D 分别为深、浅侧向测井的径向几何因子与泥浆侵入带直径的回归方程中的系数。

3. 利用多信息求取 D_i

当其他条件固定时,泥浆滤液侵入地层的深度受两个因素的控制:一是滤饼渗透率;二是地层的孔渗特性。如果滤饼渗透率是主要因素(由泥饼渗透过来的滤液无阻挡地进入地层),那么到一定时刻,通过泥饼的滤液体积为定值时,则:

$$(D_i^2 - D_0^2) \ln \left(\frac{D_i}{D_0} \right) = \frac{2K_{mc}}{\mu \phi S_{xo}} \Delta p \times t \quad (12)$$

式中: K_{mc} 为滤饼渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; μ 为泥浆滤液粘度, $mPa \cdot s$; ϕ 为地层孔隙度,小数; S_{xo} 为冲洗带含水饱和度,小数,可以根据测井资料求取; Δp 为泥浆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 。

上式表明,当其它条件一定时, D_i 与 ϕ 成负相关性,即孔隙度、渗透性好的地层, D_i 反而小;同时, D_i 与 S_{xo} 亦成负相关关系。研究认为孔隙度大于20%, D_i 随孔隙度增加而减小;孔隙度小于20%, D_i 随孔隙度增加而增加。

实例分析

利用上述方法原理处理了研究工区的10多口井的测井资料,限于篇幅,这里仅以DB1井为例进行说明。为便于对比,我们重点对5530~5799 m井段(水层段)的电阻率曲线作了泥浆侵入校正处理与结果分析。在砂岩层段经过对感应测井曲线进行泥浆侵入校正所得的深感应电阻率校正曲线(R_e)值较原深感应电阻率曲线($RILD$)值大,且接近于实测的深双侧向电阻率($RLLD$)曲线,因此将校正后的曲线 R_e 值代入 R_t 及 D_i 的计算公式来求取泥浆侵入深度和判断目的层的油气水性质,都比用实测的 $RILD$ 曲线效果

好(研究表明,用实测的 $RILD$ 曲线值计算出的 D_i 偏高),更接近于实际情况。该井产气层主要集中在5568~5620 m井段,中途用8 mm油嘴试油,折算产气量为 $6.643 \times 10^4 m^3$ 。由两段低孔低渗砂岩层段的泥浆侵入深度计算成果图分析。在泥岩井段泥浆侵入不明显,三条曲线 R_e 、 $RLLD$ 和 $RILS$ 基本重合,在砂岩井段泥浆侵入明显,侵入带直径大于泥岩层段(泥岩层段侵入很浅,侵入带直径在15 in内)。尽管在个别层段这种变化规律不甚明显。

结论与建议

(1)用测井资料计算泥浆侵入深度主要是基于电阻率径向分布特征进行的,传统方法主要有图版法、经验公式法,本文所介绍的方法既适用于常规感应测井和侧向测井,又适用于阵列感应测井。该方法不但可以求出钻井泥浆侵入深度,还可以求出地层真电阻率,它优于传统的方法,对低侵、高侵和无侵三种情况都实用,不失为一种新方法。

(2)在淡水泥浆钻井条件下,要准确计算泥浆侵入深度,最好选用感应测井,尤其是阵列感应测井。此外,需要参照使用SP曲线、CAL曲线、GR曲线和三孔隙度(AC、CNL和DEN)曲线。

(3)因泥浆侵入深度的求取在测井解释、优化射孔、储层保护、产能评价等方面有重要的指导意义。因此,进行基础性泥浆侵入模拟实验研究尤为重要,为测井准确计算泥浆侵入深度十分必要。另外,随时间推移和起下钻等因素的影响,泥浆侵入深度可能会发生变化,当所计算出的泥浆侵入深度大于测井仪器探测范围时,可认为井的情况很差,此时不宜用测井手段来求取。

参考文献

- 1 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.山东东营:石油大学出版社,1996
- 2 张绍槐,罗平亚等.保护储集层技术.北京:石油工业出版社,1993
- 3 夏宏泉等.基于神经网络的测井评价油层污染研究.西南石油学院学报,1998;(2):12~15
- 4 张晓明.用测井方法评价钻井液对油气层的损害.天然气工业,2000;(增刊):66~69
- 5 Elton Head, Darrel Cannon, David Allen, Leif Colson. Quantitative invasion description. SPWAL 33rd annual logging symposium, June 1992, B1

(收稿日期 2003-11-28 编辑 钟水清)