

文章编号: 1001-1986(2010)06-0075-04

基于电缆地层测试的储层径向有效渗透率计算新方法

关富佳^{1,2}, 李相方², 安小平³

- (1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023;
2. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;
3. 长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 试井方法是求取地层径向有效渗透率最直接有效的方法, 但其测试费用较高。提出了基于电缆地层测试结合核磁共振测井获得地层径向有效渗透率的新方法。应用电缆地层测试仪器求取地层纵向有限测试点的有效渗透率水平分量, 进而应用各测试点有效渗透率水平分量对核磁共振渗透率进行刻度, 计算刻度后的核磁测井渗透率平均值, 可获得既能反映测井表现的地层纵向非均质, 又能表现电缆地层测试渗透率的有效性。该方法应用于现场测试, 与 DST(钻柱地层测试)测试结果对比具有较高的计算精度, 同时可以节省大量的测试费用。

关键词: 电缆地层测试(WFT); 渗透率刻度; 径向渗透率

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.06.016

A new method for estimation formation radial effective permeability based on wireline formation testing

GUAN Fujia^{1,2}, LI Xiangfang², AN Xiaoping³

- (1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Ministry of Education, Jingzhou 434023, China; 2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield, Xi'an 710021, China)

Abstract: Testing interpreting is the most directly method to get formation radial effective permeability, but its testing cost is relatively expensive. The paper proposed a new method to get the permeability by combining wireline formation testing (WFT) to nuclear magnetic resonance (NMR) logging, based on the new method, permeability from NMR logging is calibrated by several point horizontal permeability from WFT, and then, the average permeability can be obtained by calculating average scaled NMR logging permeability. The average permeability shows both formation vertical heterogeneity and WFT effectiveness. The method had been applied in field testing, and the permeability from the method has higher precision than DST test, as well as, its cost is very low.

Key words: wireline formation testing(WFT); permeability calibration; radial permeability

电缆地层测试器是一种新型测井仪器, 与常规测井不同的是, 电缆地层测试器能够在抽吸地层流体的同时记录探头压力与时间的变化关系, 而不是沿井深的地层岩性纵向变化。这就使得通过电缆地层测试压力、时间、流量数据求取的渗透率具有了动态特征, 能够反映流体的有效渗透特性。

核磁共振测井是一种较先进的测井方法, 能够根据测得的横、纵向弛豫时间数据, 直接求取地层纵向连续变化的渗透率, 唯一的缺陷在于求取的渗透率为静态参数。

整个储层厚度上的平面径向有效渗透率是单井产能评价的重要参数, 既要反映储层纵向连续变化,

又要反映储层平面径向的有效性。DST 测试和试井分析是求取整个储层厚度上的平面径向有效渗透率的直接手段, 但测试费用很高, 尤其在海上油田, 要产生高昂的测试费用。鉴于此, 本文提出应用电缆地层测试纵向有限点的渗透率水平分量, 刻度核磁共振渗透率, 求取整个储层厚度上的平面径向有效渗透率方法, 为正确评价油井产能提供准确的地层参数。

1 测试点动态渗透率水平分量求取

地层特征测试器(Formation Character Tester- FCT)是国产新一代泵抽式电缆地层测试器^[1-2], 由国家高

收稿日期: 2010-03-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(JSKF2004YJ38)

作者简介: 关富佳(1978—), 男, 黑龙江兰西人, 博士, 从事油气田开发方面的教学和科研工作。

新技术发展计划资助, 中海石油服务股份有限公司承担研制成功。仪器见图 1。目前 FCT 只针对单抽吸探头开发了渗透率解释模型, 通过大量的室内实

验和油田现场下井测试, 验证了仪器的各项功能和性能指标, 仪器整体性能达到了国外同类仪器的先进水平。



图 1 新型国产电缆地层测试器 FCT

Fig.1 New home-made wireline formation tester FCT

1—— 电缆线路短节; 2—— 液压动力系统短节; 3—— 双探测器短节; 4—— 高精度高温高压流体数字泵短节; 5—— 流体光谱分析短节; 6—— PVT 取样短节; 7、8—— 出口控制短节

1.1 FCT 测试压降解释模型

FCT 抽吸探头抽吸地层流体时, 为球面径向渗流, 因此渗流模型及边界条件^[1-2]如下:

$$\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dp}{dr} = 0, \quad (1)$$

$P|_{r=r_p} = P_p$ 内边界条件,

$P|_{r=r_e} = P_e$ 外边界条件,

式中 r_p 为探头半径, m; r_e 为供给边界半径, m; P_p 为探头压力, Pa; P_e 为供给边界压力, Pa。

应用换元法求解方程^[1-2], 并考虑到 $1/r_e$ 比 $1/r_p$ 小得多, 可以忽略不计, 得到如下关系式:

$$P_e - P_p = \frac{q\mu}{2\pi K_d r_p}, \quad (2)$$

式中 K_d 为压降渗透率, m^2 ; q 为流量, m^3/s ; μ 为流体粘度, Pa·s;

将式(2)变形可以得到球形流压降渗透率解释模型为:

$$K_d = C \frac{q\mu}{2\pi r_p \Delta p}, \quad (3)$$

式中 C 为流动形状因子, 无量纲; Δp 为探头处的压力降, Pa。

对于国产泵抽式电缆地层测试器 FCT, 结合其探头直径尺寸, 在 8 英寸井眼中, 可以通过数值模拟方法^[2-3]得到其流动形状因子为 0.654, 因此, 式(3)变形得到 FCT 测试压降解释模型:

$$K_d = 8.31 \frac{q\mu}{(P_i - (P_{wf})_{\min})}. \quad (4)$$

式中 P_i 为地层压力, Pa; $(P_{wf})_{\min}$ 为探头处的最小流动压力, Pa。

1.2 FCT 测试球形流压恢解释模型

FCT 抽吸探头停止抽吸地层流体时, 地层压力开始恢复, 恢复过程为球面径向非稳定渗流, 因此渗流模型^[1-2]及边界条件如下:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (5)$$

$P|_{t=0} = P_i(t=0)$, 初始条件,

$r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{q\mu}{2\pi K_s}$, 内边界条件,

$P|_{r=r_e} = P_e$, 外边界条件,

式中 K_s 为球形流压恢渗透率, m^2 ; η 为导压系数 $\eta = K_s / \phi \mu c_t$, m^2/s ; ϕ 为地层孔隙度, 小数; c_t 为地层总压缩系数, Pa^{-1} 。

由拉普拉斯变换方法求解式(5), 得到距离抽吸探头任意半径 r 处, 任意时间 t 时的压力 $P(t)$ 为:

$$P(t) = P_i - \frac{q\mu}{2\pi K_s r} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{\eta t}}\right). \quad (6)$$

式中 $\operatorname{erfc}(x)$ 为余误差函数^[1-4], 是一个积分函数, 按幂级数展开并取线性组合近似得:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - 2x / \sqrt{\pi}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得:

$$P(t) = P_i - \frac{q\mu}{2\pi K_s r} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{\pi \eta t}}\right). \quad (8)$$

由不稳定渗流的压降叠加原理^[5]可得, 探头以恒定流量 q 抽吸 T 时间后, 瞬时停止抽吸, 探头处压力开始恢复 Δt 时间时, 探头处压力变化 $\Delta P_p(t)$ 表达式为:

$$\Delta P_p(t) = \frac{q\mu}{2\pi^{1.5} K_s \sqrt{\eta}} \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta t}} - \frac{1}{\sqrt{T + \Delta t}} \right). \quad (9)$$

令 $m_s = \frac{q\mu}{2\pi^{1.5} K_s \sqrt{\eta}}$, $f_s(t) = \frac{1}{\sqrt{\Delta t}} - \frac{1}{\sqrt{T + \Delta t}}$, 则式(9)

变形为:

$$\Delta P_p(t) = m_s f_s(t), \quad (10)$$

式中 m_s 为直线斜率; $f_s(t)$ 为球形流时间函数; $t^{-0.5}$ 。

显然, 在直角坐标系中, 以 $f_s(t)$ 为横坐标, 以 $\Delta P_p(t)$ 为纵坐标图形为直线, 通过作图可得到直线斜率 m_s , 则球形流压恢渗透率解释模型为:

$$K_s = \frac{q\mu}{2\pi^{1.5} m_s \sqrt{\phi \mu c_t}}. \quad (11)$$

1.3 FCT 测试渗透率各向异性解释方法

对于单探头的电缆地层测试器, 无法直接得到储层的各向异性。笔者在压降渗透率和压恢渗透率解释方法基础上, 借鉴参考文献[6]详细论述了国产 FCT 测试渗透率各向异性评价方法。

对于同一次压降-压恢序列测试, 应用压降法得到的渗透率为 K_d , 解释模型见式(4); 用压恢法得到的渗透率为 K_s , 解释模型见式(11), 参照文献[6]得到 FCT 测试渗透率各向异性解释图板(图 2)。应用此图板结合球形流压降和压恢渗透率解释方法可以进行储层渗透率各向异性评价。

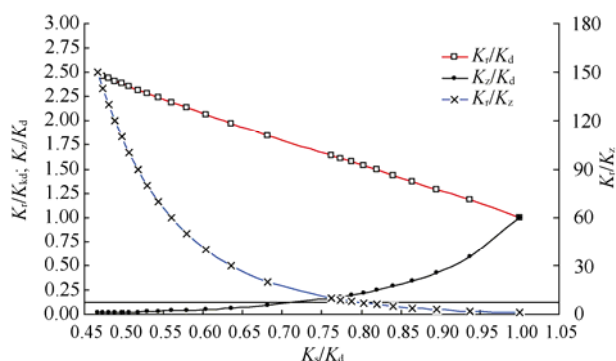


图 2 单探头各向异性解释图板

Fig. 2 Interpretation chart for heterogeneity from single probe
 K_r ——测试点水平渗透率; K_z ——测试点垂直水平渗透率

根据 FCT 测试压力数据, 由式(4)和式(11)得到 K_d 和 K_s , 再由解释图板图 1 得到对应的测试点的水平渗透率, 如果采用多流量测试, 可以应用叠加原理对测试流量和压力数据进行分析。

2 地层径向动态渗透率平均值求取

经过以上分析, 可以通过 FCT 在某一测试点, 应用同一个压降-压恢测试序列, 应用相应的压降、压恢解释模型和渗透率各向异性解释图板, 求取测试点的水平动态渗透率。为了得到整个地层厚度上的径向动态渗透率平均值, 这里提出了应用 FCT 测试点的水平动态渗透率刻度核磁共振测井渗透率的计算方法。

设($k_1, k_2, \dots, k_n$)为电缆地层测试对应各点的水平渗透率, ($K_1, K_2, \dots, K_n$)为测井对应各点的渗透率值, 通过最小二乘法^[2], 回归得到两者之间的线性关系 $K=ak+b$, 然后应用系数 a 和 b 去刻度测井渗透率的所有值 K_i , 得到刻度后的每个点的测井渗透率 $\hat{K}_i$, 进而得到储层的渗透率平均值:

$$\bar{K} = \frac{1}{h} \left(\sum_{i=1}^m \hat{K}_i h_i \right), \quad (12)$$

式中 h_i 为测井渗透率记录点间的距离, m。

3 新方法计算实例

某海上油田 X 井 3 601.0~3 634.0 m 为测井油层显示, 在油层上的 3 点 3 608 m、3 615 m、3 632 m 进行了 RCI(一种电缆地层测试器, 探头半径与国产 FCT 相同)测试。从核磁共振测井得到孔隙度 $\phi=12\%$, 从流体取样分析得到流体粘度 $\mu=2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 原油体积系数 $B_o=1.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 总压缩系数 $C_t=0.00006 \text{ psi}^{-1}$, 地层压力 $P_i=35.48 \text{ MPa}$, 取供液半径为 500 m, 井眼半径为 0.1 m。此层段同时进行了 DST 测试, DST 测试数据见表 1。

表 1 X 井 DST 测试数据表
Table 1 DST test data of well X

射孔井段 /m	原始地层压力 /MPa	井底流压 P_{wf} /MPa	流量 Q_0 / m^3d^{-1}
3 603-3 634	35.48	20.703	253.2
		16.225	329.0
		14.135	362.5

由 DST 测试数据作图(图 3), 回归采油指数为 $J=17.051 \text{ m}^3/(\text{MPa}\cdot\text{d})$, 由稳定试井理论可得 DST 测试动态水平渗透率平均值为 $14.91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

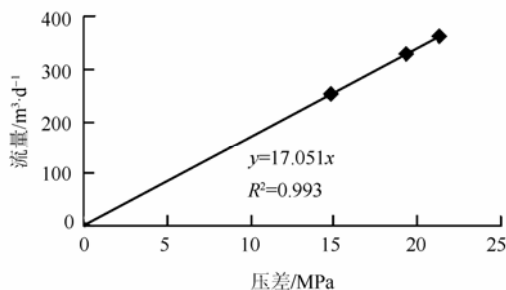


图 3 稳定试井曲线

Fig. 3 Curve of stable well testing

另一方面, 由 FCT 渗透率压降解释模型式(4)和压恢解释模型式(10), 可得各测试点的压降渗透率及压恢渗透率, 进而可以计算出对应的 k_s/k_d 值, 由图 3 可查出对应的 k_r/k_d , 进而得到测试点的水平渗透率 K_r , 详细结果见表 2。

表 2 X 井渗透率解释结果
Table 2 Result of permeability interpretation of well X

深度 /m	k_s / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	k_d / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	k_s/k_d	k_r/k_d	k_r / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
3 608	17.850	21.131	0.845	1.4204	30.014
3 615	31.590	37.059	0.852	1.4012	51.927
3 632	18.250	21.687	0.842	1.4286	30.982

用这 3 点的球形流渗透率和水平渗透率分别对核磁共振测井渗透率进行刻度, 通过相应程序^[1-2]计算得到刻度后的平均渗透率分别为 $K_0=11.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $K_h=14.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 见图 4。

由计算结果可知, 应用 FCT 测试球形渗透率和水平渗透率分别刻度核磁测井渗透率, 得到的整个地层的平均动态有效渗透率的结果有所不同, 经过与 DST 测试结果对比表明, 这里提出的新方法具有更高的计算精度, 渗透率计算及对比结果见表 3。

4 结 论

应用电缆地层测试渗透率刻度核磁共振测井渗透率, 是在未执行 DST 测试情况下, 求取地层平均有效渗透率的有效方法。笔者在前人研究的基础上, 提出了应用电缆地层测试测试点水平渗透率刻度核磁测井渗透率, 得到的渗透率能够充分体现地层实际生产时的精细径向流动特征, 更符合实际情况。应用国产大排量电缆地层测试器 FCT 测试解释渗透率对核磁测井渗透率刻度实践表明, 将原方法和新的渗透率刻度方法, 与 DST 测试解释的渗透率相比具有较高的精度, 误差在 5% 左右, 完全可以满足现场工程需要。

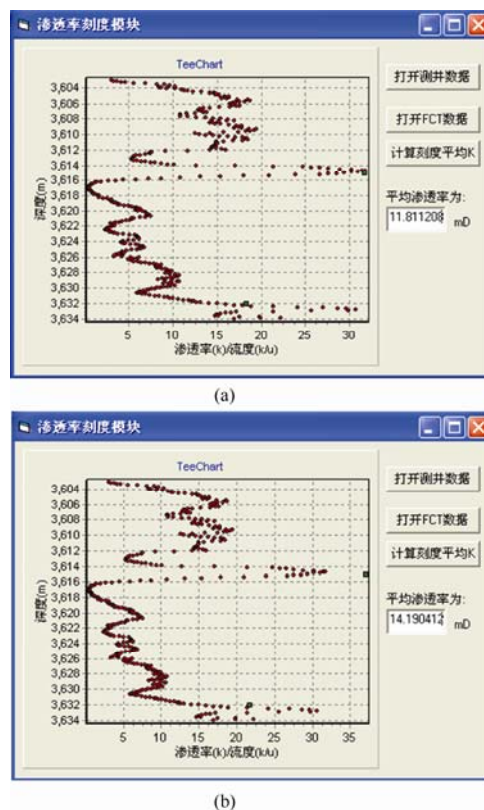


图 4 不同性质 FCT 渗透率刻度测井渗透率示意图

Fig. 4 Permeability from different FCT calibration logging

a——测试点球形渗透率刻度测井渗透率;

b——测试点水平渗透率刻度测井渗透率

表 3 X 井 FCT 不同性质渗透率刻度测井渗透率结果对比表
Table 3 Comparison of permeability from different FCT calibration logging

深度 /m	DST 渗透率 $K/10^{-3} \mu\text{m}^2$	球形渗透率 $k_s/10^{-3} \mu\text{m}^2$	原方法刻度结果 $K_0/10^{-3} \mu\text{m}^2$	误差 $E_{RW}/\%$	水平渗透率 $k_h/10^{-3} \mu\text{m}^2$	新方法刻度结果 $K_h/10^{-3} \mu\text{m}^2$	误差 $E_{RW}/\%$
3 608		17.850			30.014		
3 615	14.91	31.590	11.81	20.79	51.927	14.19	4.83
3 632		18.250			30.982		

参考文献

- [1] XU Hanbin, LI Xiangfang, GUAN Fujia. A new method on deliverability forecasting of wireline formation testing (WFT) with multi-well parameter[R]. USA: SPE114631, 2008.
- [2] 安小平. 泵抽式电缆地层测试压力分析与产能预测理论研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2004.
- [3] DE ANDRE C, LOW S. Rigorous approach for viscous-oil productivity forecast before well completion[R]. USA: SPE94837, 2005.
- [4] 林梁. 电缆地层测试器资料解释理论与地质应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [5] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
- [6] DUSSAN V, SHARMA Y. An analysis of the pressure response of a single-probe formation tester[R]. USA: SPE16801, 1967.