

SPWLA Logging Symposium Transactions

测井分析家协会 第三十二届年会论文集

测井分析家协会 编

石油工业出版社



登录号	087342
分类号	P631-53
种次号	005:32

测井分析家协会 第三十二届年会论文集

测井分析家协会 编

2400/52



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书主要从随钻测量、生产测井、测井方法和解释方法新的突破及改进等方面选译了SPWLA第三十二届年会中80篇论文,本书反映了近年来测井领域的最新成果和研究方向,适合于我国测井、地质、钻井和开发工作者参考。

Transactions of the SPWLA Thirty—Second

Annual Logging Symposium

Volume I, I

SPWLA, 1991

*

测井分析家协会

第三十二届年会论文集

测井分析家协会 编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 25印张 632千字 印1—1.000

1993年10月北京第1版 1993年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0916-1/TE·855

定价: 19.00元

目 录

一、侵入流体在水平井中的垂向运移 (A)	(1)
二、钻水平井时使用电阻率探头确定地层边界 (B)	(13)
三、线圈型随钻测量电阻率传感器的探测深度 (C)	(19)
四、一种随钻测量用的中子孔隙度仪的理论、响应和刻度 (F)	(28)
五、水的电导率和饱和度对泥质砂岩介电响应的影响 (G)	(40)
六、利用X射线断层照像和电测井资料定量确定地层次生孔隙度(J)	(49)
七、储层条件下解释泥质砂岩电导率的一种改进的WAXMAN—SMITS模型 (K)	(62)
八、倾斜管道中气水流动剖面的确定 (M)	(78)
九、双侧向测井围岩影响自动校正的新方法 (Q)	(89)
十、通过直接反滤波实现侧向测井快速反褶积 (R)	(101)
十一、感应测井各向异性校正 (T)	(108)
十二、利用地层倾角测井资料成功地描述得克萨斯东部Paluxy储层 (V)	(119)
十三、新一代核测井系统 (Y)	(131)
十四、一种利用能谱密度测井仪确定补偿密度和 P_e 值的新方法 (Z)	(148)
十五、应用定向伽马测井仪确定水力压裂裂缝方位的方法 (AA)	(166)
十六、检测生产井和注水井中水流的氧活化测井解释 (BB)	(174)
十七、新核磁共振成像测井的研究 (DD)	(192)
十八、沉积岩石中 v_p 和 v_s 的物理意义 (FF)	(204)
十九、经过渗透性原始裂缝的井眼斯通利波传播的模拟 (GG)	(216)
二十、用于井周声波扫描成像仪的动态聚焦换能器 (HH)	(229)
二十一、超声波高分辨率水泥胶结和套管腐蚀成像 (KK)	(247)
二十二、采用锗酸铋闪烁晶体的次生伽马能谱测井仪的响应特征 (LL)	(267)
二十三、一种在生产井中使用的新的过油管补偿碳氧比仪器 (MM)	(279)
二十四、含气(汽)饱和度对脉冲中子俘获计数率的影响 (NN)	(294)
二十五、实验室条件下各种脉冲中子俘获测井仪的评价 (OO)	(311)
二十六、得克萨斯Hockley县Slaughter油田东Mallet单元CO ₂ 驱的监视测井 (PP)	(320)
二十七、电缆测井资料对Judy Creek油田烃混相驱试验的评价 (RR)	(339)
二十八、薄夹层油藏的地层评价 (VV)	(354)
二十九、测井仪器的几何特性：新标准的要求 (YY)	(370)
三十、利用综合工作站人机联作解释致密含气砂岩 (BBB)	(384)

一、侵入流体在水平井中的垂向运移 (A)

R. Woodhouse等

杜智文 译

摘要 多年来,在常规钻井中一直观察到有水及油基泥浆滤液的垂向运移现象,本文研究了在水平井中的这类现象,在水平井中,侵入流体的垂向运移不是沿着井轴,而是垂直并远离井筒进行。

在中到高渗透率且 K_v/K_h 比高的地层,在泥浆滤液及地层流体之间密度差的推动下,侵入滤液将垂直运移。在水平井中,这一过程起着推动水基泥浆向下并远离井的作用,使原来存在于地层中的烃类向后运移到井筒,密度差同样影响着油基泥浆滤液的运移,这种泥浆滤液在含水地层中升高,在含气地层下降。取一理论井模型的横截面,用一系列增加的地层暴露时间来说明预计的流体运移模式。

中子及其他地层评价随钻测井(FEWD)的现场实例证实了用我们的模型预测的流体饱和度变化的结论。正如所预料的那样,油柱中油基泥浆滤液侵入并没有改变过渡带之上的储层流体饱和度,也没有重力分异效应。在含气地层,靠近井筒,由于滤液的侵入,气饱和度开始时是降低的,之后随着油或水基泥浆滤液由水平井筒落下,气饱和度逐渐增加,通过时间延迟MWD测井,可以发现这种动态现象。

引 言

泥浆侵入过程及其对岩石物理测定结果的影响一直是研究的主要课题。早在1955年,H. G. Doll就讨论过侵入泥浆滤液在靠近井筒地带的垂向运移及其对电阻率测定结果的影响。J. Tittman等人及R. P. Alger等人以及其他作者讨论了气驱替对孔隙度测定结果的一般影响。多年来,人们做了很多努力,想从由测井得到的侵入剖面推导出渗透率资料,并确认其他储集层性质。

定量解释一般要假设非常静止的条件,并且在大多数情况下,是在侵入达到其最完全程度的环境下。评价不同探测深度测井曲线的响应,可以确定侵入带的属性特征。这项技术承认这样的事实,即“时间”是一个变量,不可做一般考虑。电缆测井一般通过侵入地层进行,并且,测井分析家一般无法直接测定在侵入过程中发生的变化速度,持续时间或变化大小。自从20世纪80年代初期引入了定量MWD测井技术后,对侵入带几何形态的短期变化的认识也变得清楚了。

FEWD方法比传统电缆方法的优越性在于它能在发生严重的泥浆滤液侵入之前,做基线测量。由于在以后的钻头行程过程中,井筒可被反复测量多次,最初的FEWD(其后为钻进过程中做的一次或多次测量)可用来证明在一定时间内地层中发生的动态变化。虽然解释这些变化的基本方法在文献中已有过很好的论述,但是,钻井技术不断发展为深入认识井筒附近流体的动态提供了机会。

侵入过程

许多研究者描述了泥浆滤液的侵入过程。这项研究说明，泥浆柱与地层之间的正压差是泥浆滤液侵入后的主要驱动力。不同时间侵入的滤液体积是这个压差的函数，但是受泥浆物理性质及钻井活动的影响。至少，储集层岩石性质，诸如孔隙度、渗透率、毛管压力和相对渗透率关系，以及扩散、自动吸入及重力分异在这一过程中也起一定作用。在适宜的条件下，任何这类小的因素都会产生很大的影响，但是泥饼渗透率，只要比地层渗透率小几个数量级，就一直是控制滤液侵入的主要因素。泥浆的渗透性过大，不仅会导致产层的地层损坏及井的不稳定，而且还容易形成厚泥饼，使有效井筒直径减小，造成过大的扭矩、阻力及卡钻。在水平井中，这些钻井问题尤为严重。因此，钻井泥浆尽量设计成稀释和不渗透的，特别是钻水平井用的泥浆。

即使是设计很好的泥浆系统，由于下列三种滤液作用，也会导致失水：初触失水、静失水及动失水。初始滤液或“初触失水”是紧紧围绕钻头周围发生的，或者在形成任何泥饼之前沿井筒壁发生的。这个过程主要是由相对滤液渗透率控制的，但是靠近钻头，还受钻速、泥饼类型、压差、注水效率、井底温度及井眼大小的影响。据研究，初触失水主要受地层压实作用及钻头前的孔喉充填控制，即使在这个区域没有泥饼形成以及通过井筒壁的失水量较小，持续仅仅几秒钟，也会如此。因此，静失水及动失水是造成失水的主要过程。

在没有泥浆循环情况下，发生“静”失水。在这些情况下，在井筒壁及靠近井筒壁的地层内，泥饼的生长相对不受扰动，使静失水率稳定下降。由于静失水而引起的液体向地层的损失量与时间的平方根成正比，并且对于最典型的渗透率范围，失水率是由泥饼的性质控制的，而不是地层渗透率。

“动”失水是在循环或循环与钻进时发生的。这些腐蚀性活动限制了泥饼的发育，造成较长一段时间的持续失水。一旦泥饼沉淀及腐蚀达到平衡，则建立了平衡条件，在这种条件下，动失水率由达西定律控制。因此，动失水率开始时高，但是10~15h后开始下降，至基本稳定。由于动失水过程一般作用的时间要比静失水长得多，所以，在一个垂直井孔中，有高达95%的失水体积是由动失水造成的。其他研究证明，如果使用油基泥浆（OBM），这个百分比还会进一步增加，并且，如果采用油基泥浆，失水率可增加2倍。但是，在阿拉斯加，作业公司研制出的油基泥浆表现出极低的失水特征。

BHA及暴露时间

由于FEWD技术的广泛应用，时间延迟测井分析已成为日趋重要的评价手段，在广泛采用水平钻井或侧延钻井的阿拉斯加，情况尤为如此。这些井常常只根据FEWD曲线进行评价。

用于测井的第一批FEWD传感器放在钢制钻铤内。后来，这些仪器没有放在靠近MWD定向传感器外，以免受这些大磁体的影响。对于垂直的或中等斜井，这种作业局限性的影响不大。在一个典型的井底装置中，FEWD传感器只简单地放在钻头后面，这样在钻遇地层后，可马上进行测量。这样较短的地层暴露时间可以保证除了初触失水外，在测量时，地层未遭侵入。随着对非常规钻井兴趣的日益增加，定向要求开始主宰对井底装置（BHA）

的设计。在一个典型的非常规BHA中，记忆 neutron-密度-电阻率-自然伽马传感器通常放置在钻头以上45~76m处（图1）。在穿透速度（ROP）为12m/h的情况下，在初次FEWD测量之前，要延迟6h或更长点时间。在孔隙性和渗透性地层中，这些时间足以使滤液侵入前缘扩展超过许多传感器的探测半径。

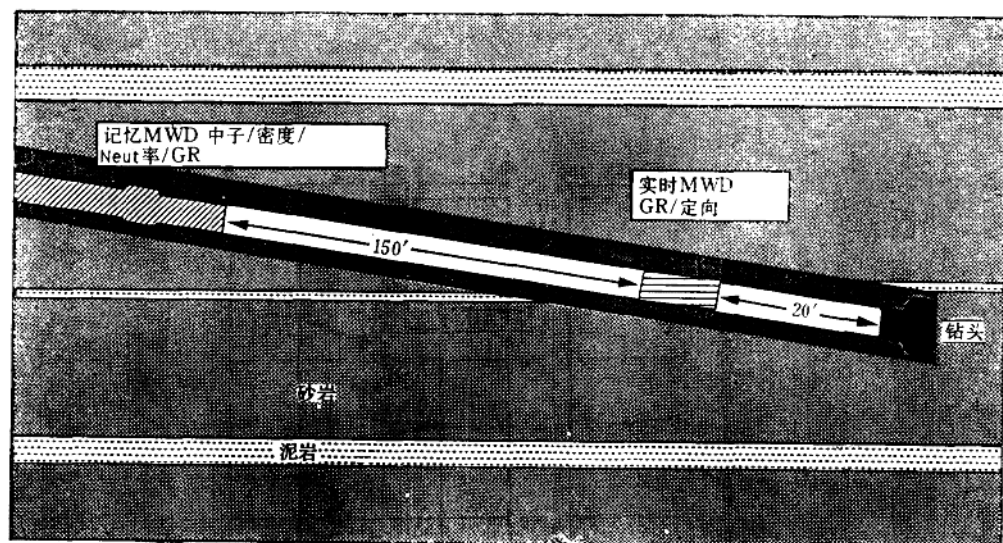


图 1 阿拉斯加非常规井用的典型BHA

在这种BHA中，记忆MWD传感器放置在钻头以上45~76m处，地层长时间的暴露，使其在测井作业前就遭到严重侵入

在遇到侵入地层的情况下，假定以后通过水平井段的重复测量（FEAD）都将是简单地重复最初的结果，理由是，在该井段被测之前，就已经发生了由于滤液侵入而引起的动态变化，但是经证实，这个假设是不对的！几口水平井的FEWD曲线与后来测的FEAD曲线的比较结果说明，在含气层段，动态变化会持续数日。几口阿拉斯加非常规井的中子响应反常情况特别能说明这种情况。在阿拉斯加地区的井中，视中子孔隙度随时间增长而降低，不是像在常规井观察到的那样，随时间而增加。对这些动态变化进行评价，可以使我们开发出一种模型来说明一定的侵入液在水平井中的运移。

水平井现场观察结果

在常规井中，含气层段的时间延迟中子曲线一般表现出视孔隙度随时间增加。如图2所示，这一点与这样的事实相一致，即紧放在钻头之后的FEWD传感器可以探测到具有较低含氢指数（HI）的气充填孔隙空间。但是，后来的FEAD测井，根据相对地层暴露时间，测到的却是已经部分地到几乎全部被泥浆滤液充填了的孔隙空间。当对FEWD及FEAD计算后，假定HI等于1时，由侵入的油或水的滤液引起的HI的增加会导致较高的视中子孔隙度。如所预料的那样，测井曲线表现出在油柱有很好的吻合，证实了传感器的刻度，并且在气柱

观察到的变化也是有意义的。

在非常规井中，由于BHA配置造成的地层暴露时间长，我们预料滤液的侵入已经扩展超过了中子传感器较浅的探测深度范围。在这种情况下，重复FEAD中子测井曲线会与在钻进过程中产生的FEWD中子孔隙度相重叠。

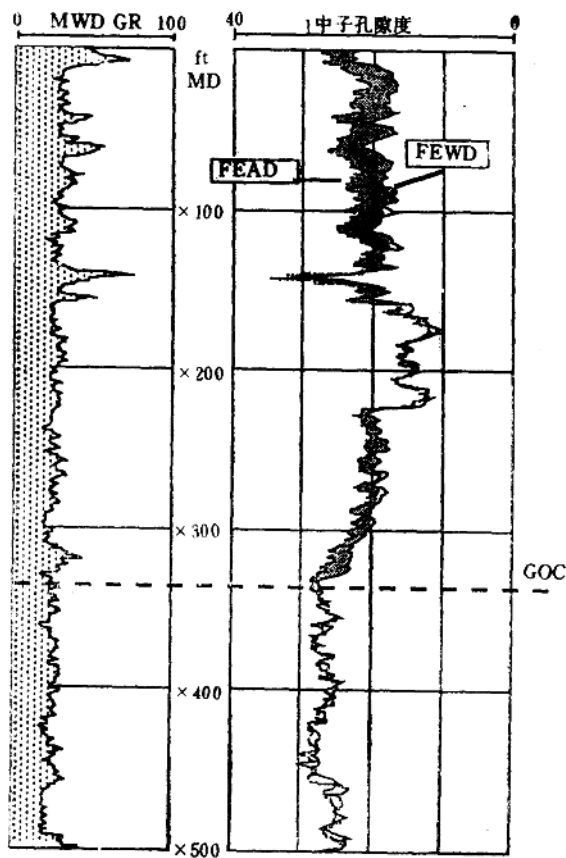


图 2 常规井中子响应

在常规井中，紧在钻头之后的FEWD传感器探测到具有低HI的气充填孔隙，因此产生低视孔隙度。之后进行的FEAD测井探测到了HI接近1.0的滤液侵入的孔隙空间

两口水平井的FEWD及FEAD中子曲线（图3，图4）证实这个假设是不正确的。由较高视孔隙度向较低视孔隙度的相对移动说明在水平井段钻成后，持续几天发生了动态变化。

氢指数下降，视孔隙度降低，这一事实说明气体已经运移回井筒，重新充填了以前曾经由油基泥浆滤液占据的孔隙空间。在垂直井中，静止条件下或者在套管井，这种状况已被广泛承认。

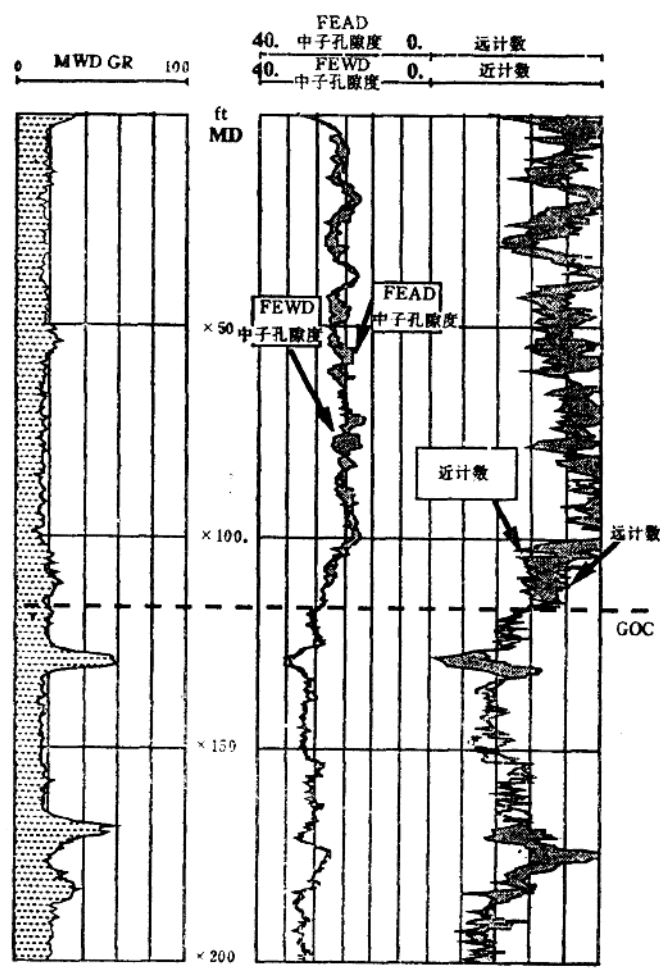


图 3 油基泥浆情况下，水平井的中子测井响应
例1中的气/油界面的时间延迟中子孔隙度变化 (CN ϕ) 图中还示出了归一到油柱的中子近、远探测器计数，显示近、远中子探测器计数是为了确认对气/油界面的选择

鉴于有95%侵入流体体积是由动失水造成的，曾做了一些室内研究，以确定作为时间函数的代表性流速及侵入深度。

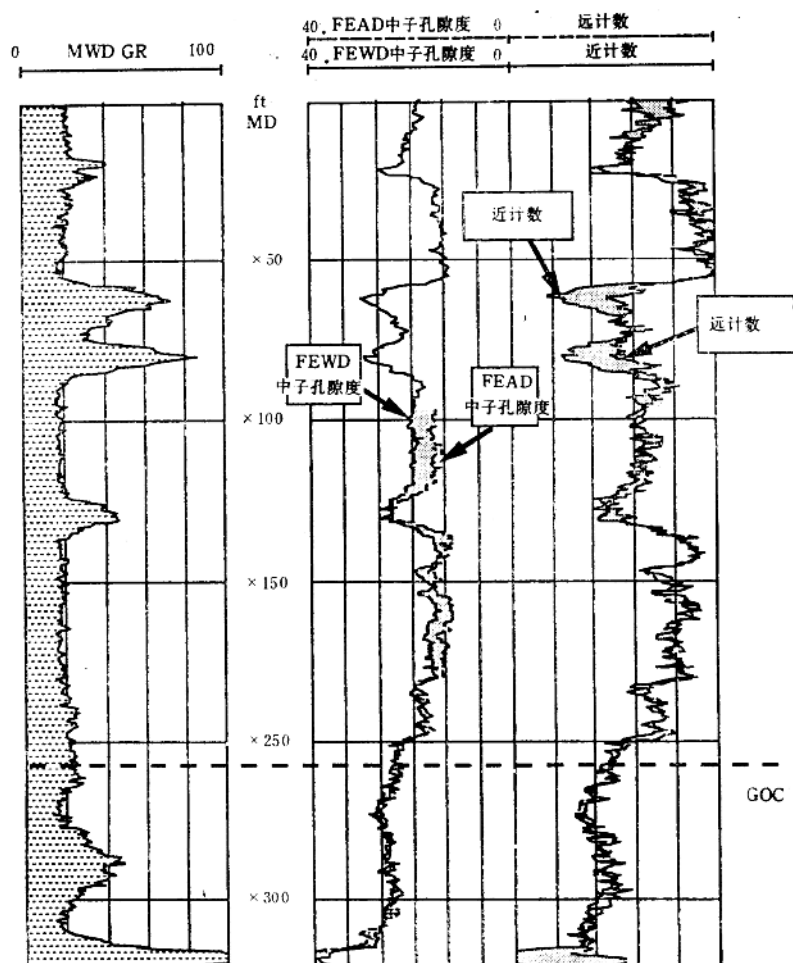


图 4 油基泥浆情况下水平井的中子测井响应
例2中的气/油界面的时间延迟中子孔隙度变化(CN Φ)。图中还示出了归一到油柱的中子近、远探测器计数，显示近、远中子探测器计数是为了确认对气/油界面的选择

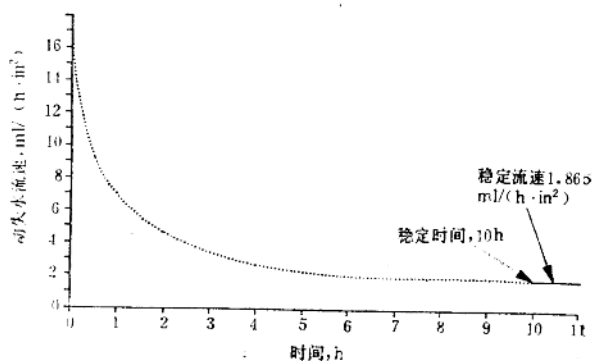


图 5 井下动失水流速与时间的关系曲线

图5示出了类似油基泥浆的动失水流速，该泥浆的粘度校正到典型的井底温度。这些结果说明了由其他研究者所描述的较高的初始流速，之后流速稳定，10h后，约为初始流速的12%。

图6综合了这些资料以说明失水体积与时间的函数关系。

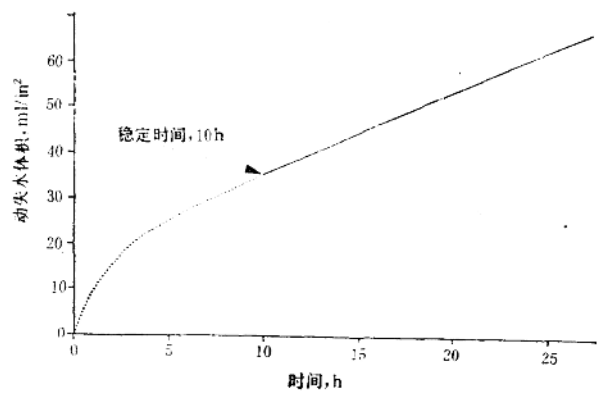


图 6 井下动失水体积与时间的关系曲线

如果按给定的失水率及体积，我们无法找出这样一种合理的模式，即与液相压力梯度及滤液补给流相反，在向前推进的油基泥浆滤液前缘周围，气体会非混相存在。因此，如果在水平井观察到的中子响应以及对这些响应的解释是正确的，那么，就是其他因素影响着我们井中油基泥浆滤液的状态和流动性。

侵入带的几何形态

“垂直井中径向延伸的滤液前缘呈圆形”已被广泛接受。比较阿拉斯加和北海的FEWD测井及FEAD测井曲线，结果说明，在厚的储集层段，这个圆形体变为锥形。之所以产生这种形状，是因为储集层段顶部地层暴露时间要比底部时间长得多。

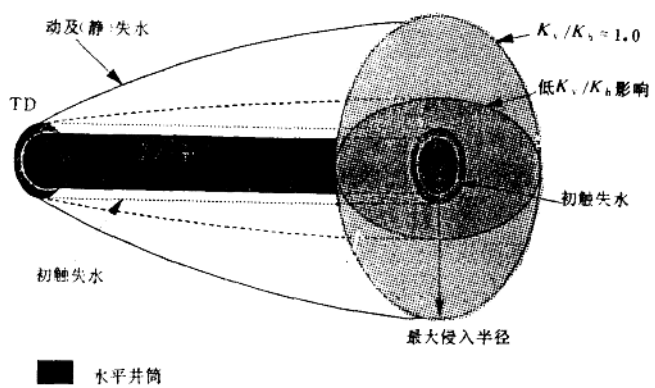


图 7 水平井油层中侵入带的形状

由图7可见,这种基本的几何形态一直到水平平面,仍呈圆形,其滤液锥体逐渐变细,在钻头处为零点。在这个水平模型的垂直剖面,侵入带在井附近开始为圆形(井筒)体,但是从理论上,在径向延伸过程中,会变得愈来愈呈椭圆形(为地层 K_v/K_h 比的函数)。如果把影响定量化,我们发现,在24in (0.61m) 半径内, K_v/K_h 不足0.001,对一口水平井的侵入带的圆形几何形态并无明显影响(图8)。由于水平井中 K_v/K_h 比一般大于0.1,侵入带的原始形态不可能对观察到的测井响应起任何作用。

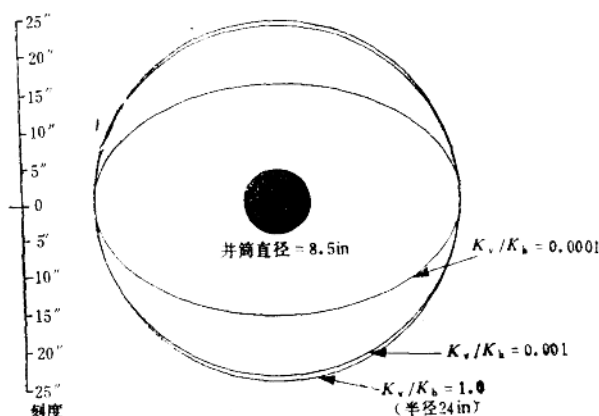


图8 侵入带—水平井—垂直剖面

重力分异模型

在很大范围内,人们广泛地讨论了储集层流体的重力分异及由此而产生的气、凝析气、油、重质油/焦油及水的分布。这一过程要经历千百万年才造成聚集情况各异的局面。在一段短得多的时间内(几周至几个月),重力分异作用可以促使“环形”带散逸并使垂直井中的储层流体运移回到侵入带。但是,在我们所列举的FEAD曲线中,滤液却是在几天内扩散的。如果重力是侵入带扩散的驱动力,那么,这个影响的程度要远远大于在常规井中观察到的影响。

为了评价水平井中的重力流体分异作用,用达西公式,对模型的一个垂直切面做了一系列估计,对于油基泥浆滤液侵入,流量(Q)和侵入深度与 K ,及由于滤液的运动(Δp_{ie})而引起的侵入带的压力降成正比。在这个计算中,对气, K 值减少25%,以考虑到在经油基泥浆滤液驱替后,存在有残余气饱和度。用流体密度差,也可以确定由于重力而引起的压力降(Δp_g)。为了确定油基泥浆滤液在气和水中的驱替作用,用计算得到的油层侵入半径乘以重力驱替校正系数($\Delta p_g/\Delta p_{ie}$),这是为适应 K_v/K_h 比计算的。

图9示出了计算的结果。在含油地层,很少或没有重力分异作用发生,因为这两种流体有相似的密度,并且是可混相的。但是,在含气层段,油基泥浆滤液将远离井筒沉降,而在含水层段,滤液则会浮起并远离井筒。在这两种情况下,运动着的油基泥浆会遗留少许残余油,并且由流动的滤液所腾出的孔隙空间会部分地被原始储层流体(气或水)重新占据。

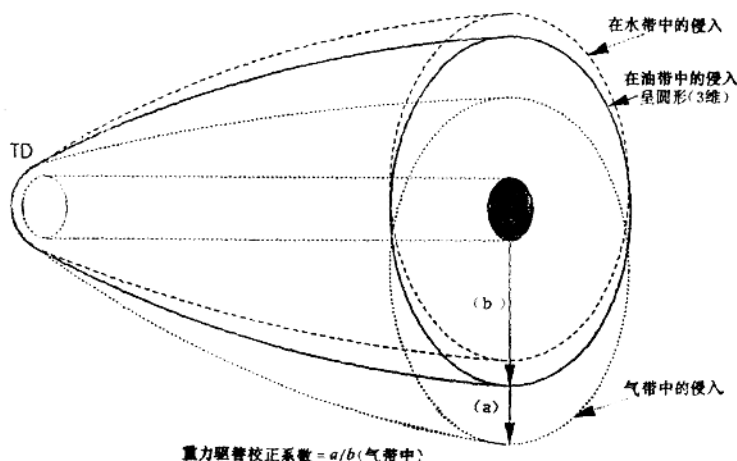


图 9 重力对侵入带形状的影响

我们用达西公式计算了某一给定侵入半径(可不计重力)的侵入带中的压力降(p_{ie})。用流体密度差,可计算由于重力影响(p_g)、水柱及气柱中的压力降。重力驱替校正系数 $GDCF = p_g/p_{ie}$ 。为确定由水或气引起的驱替调整(a),用油柱中的侵入半径b乘以重力驱替校正系数,因此: $GDCF \cdot b = a$

敏感性计算结果表明, $K_v/K_h < 0.001$ 时,可不考虑相对驱替速度。在我们的例子中, $K_v/K_h = 1$, 计算结果说明,在泥饼密封有效后仅八天之内,气段中油基泥浆侵入带会下降 12.9ft (3.93m)。在水层,在相同时间内,同样体积却会上升约 6ft (1.83m)。

概念模型及现场观察结果的匹配

在本研究中,我们假设在侵入带为活塞式驱替,产生了原生水+残余气+油基泥浆滤液的三组分系统。模拟结果指出,这个侵入带在含油层基本上呈圆形,但是在含气层,一旦由泥饼建立了有效的渗透率遮挡,则会因重力而向下移。从实践来看,泥饼会很快起到遮挡作用。根据水平井模型结果(图10),仅在8~10h内,就可以得到动失水率范围的稳定流。对于阿拉斯加所用的油基泥浆,计算结果证明,在典型的井底温度及稳定的动失水条件下,泥饼渗透率的范围为0.00006~0.00013mD,极大地降低了原始失水率。

在现场,FEWD曲线(图3,4)是在钻遇地层约5h和7h得到的。根据模型计算,在这段时间内,侵入半径达10in以上,远远超过了中子仪的探测深度。因此,传感器探测到了一个由油基泥浆滤液+原生水+残余气组成的三组分系统,氢指数接近1.0。根据这些曲线得出的平均层段孔隙度仅略低于根据岩心资料现场绘图预测的值。三天、五天,用FEAD重测了两口水平井的含气层段,中子仪又一次探测到了一个三组分系统,但此次三组分系统包括气+残余油基泥浆滤液+原生水。降低的氢指数导致了较低的视中子孔隙度。

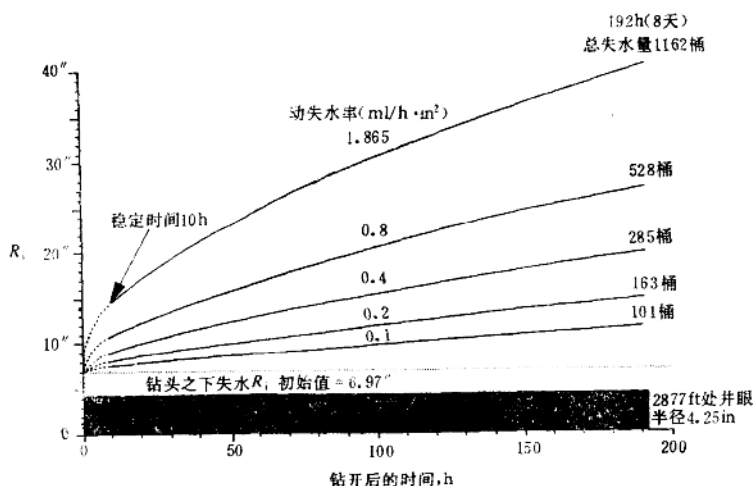


图 10 侵入半径与时间及总失水体积的关系
在失水率范围内，油基泥浆滤液侵入半径为时间的函数。这些资料说明，流动的稳定性与失水率关系不大

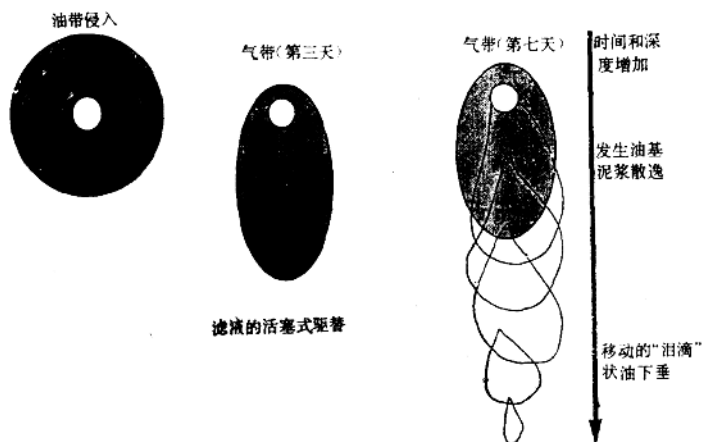


图 11 非常规井中油基泥浆滤液图形

图11说明了我们认为对所观察到的测井响应有影响的一些因素的顺序。在稳定的（稳定状态）动失水过程中，油柱侵入基本呈圆形，但是在气柱中，由于重力，产生了一个椭圆形形体，其体积等于油柱侵入带的体积。在静止条件下，某些点失水率非常低，或者当关井，停止失水时，模拟说明流动的油基泥浆滤液实际上会离开井筒，像泪滴一样落下。下落的“泪滴”会遗留下少量的残余油基泥浆滤液，并继续下降，直至“泪滴”体积扩展。当然，这是均质储层的理想情况。在一个实际储集层，这个下降体的前缘会呈锯齿状，并且理想的“泪滴”形状也会因 K_v/K_h 比的变化及其他非均质性质（如泥岩遮挡、断层、裂缝、硬条带夹层等等）而遭到严重破坏。图12说明了在水平井中，这一过程随时间的变化情况。

结论及建议

本文的目的是研究在两口水平井的气柱中观察到的中子测井响应的反常情况,这种情况用传统的侵入过程解释方法无法恰当地解释。这就使我们考虑其他一些通常认为是很小的影响的情况,并得出结论:重力对侵入流体在水平井中的流动性有很大的影响。为了计算这些井中重力分异作用的影响,我们使用了一个简化的模型,在这个模型中,没有考虑到复杂的近井筒地带的流动型式、过渡带的影响、储集层非均质性及许许多多较小的,但是又需要极精确处理才能完全模拟的影响。尽管如此,模拟结果还是支持了含气水平井中侵入型式的概念模型,而这个模型结果与现场观察结果很一致。

在这个研究的基础上,我们提出FEWD中子测井,通过较大的钻头与传感器之间的距离,达到时间延迟。结果观察到了一个由油基泥浆滤液+原生水+残余气组成的三组分侵入带,其氢指数达1.0。这种流体分布给出的层内视中子孔隙度平均值仅略低于实际地层孔隙度平均值。在建立了有效的泥饼之后,在重力的影响下,侵入带下垂,在理想情况下,形成一个椭圆形体。这个体积最后要离开井筒,像“泪滴”一样滴下,留下了一个由气+残余油基泥浆滤液+原生水组成的三组分流尾巴。在较低的含氢指数情况下,重复中子测井得到较低的视孔隙度。

计算和室内研究支持了本文的研究成果。它表明,不考虑重力作用,油基泥浆侵入带的形状在 K_r/K_b 比值小于0.001之前大体上仍属圆形。我们的资料还说明,当储集层的 K_r/K_b 比值大于0.01时,重力对于滤液的流动性及分异作用起着很重要作用。这些影响在垂直井是不大容易观察到的,因为在垂直井,流体将平行于井筒运移,不像在非规范井那样下垂,垂直于井筒。

为了更完全地描述非常规井中的重力分异作用过程,还要做另外一些工作。我们尚未确定出形成“泪滴”的临界失水速度。现场观察表明,对于 $K_r/K_b > 0.1$ 的井,在低速动失水期间,会发生重力分异作用。在旋转和循环的情况下,进行了FEWD测井,观察到视中子孔隙度减少很大。这说明,可能有这样一个临界失水速度,低于该速度,重力则成为促使

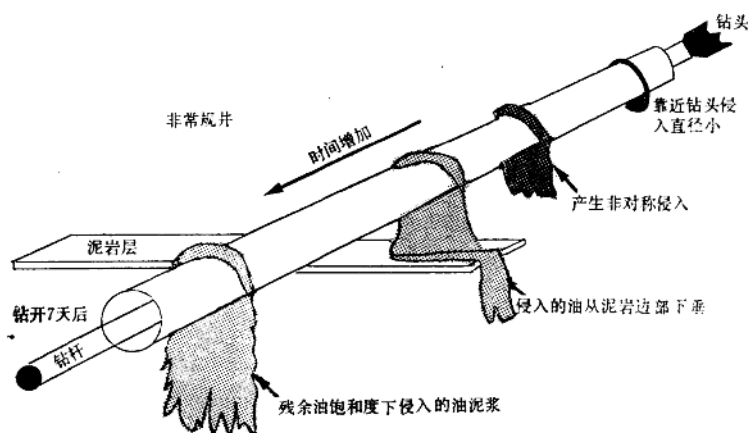


图 12 含气非常规井中液体侵入图形与时间关系

“泪滴”形成的主要力。在评价凝析油或过渡带中侵入型式及状态方面,我们没做什么工作。

最后,通过研究,我们对非常规井中的其他测井及其他滤液的状态的解释,有了一些想法。可以肯定,水基泥浆滤液向气柱的侵入的状态会与本文所描述的油基泥浆滤液类似。在这种情况下,感应测井会测到一种复杂的径向响应,即在井下有一个地层段是由水基泥浆滤液饱和的。侧向测井受这个下垂水相(形成了一个大的低电阻率体积)的影响要比感应测井大得多。找出对称读出的FEWD传感器的响应与那些非对称极板式或聚焦电缆装置的响应(可能要通过TCP—钻杆传输技术得到)之间的差别,我们可以改进对这种非对称侵入现象特征的描述。最后,有一些FEWD仪器具有快速采样能力,因此,钻杆柱每转一圈,可进行许多测量。按照时间,对这类资料做详细的分析,将是非常有益的。

二、钻水平井时使用电阻率 探头确定地层边界 (B)

Jian-qun Wu, M. M. Wisler, W. C. Barnett

赵冬梅 译 张 镇 校

引 言

自然形成的地质地层边界不一定呈水平状态,也不一定刚好处于平面内。预先设计的井眼轨迹并不能确保钻出的井眼处于产层内。因此,在钻水平井时,最重要的技术问题之一是如何尽可能早地探知地层边界,以便使井眼处于油气层内。

在这篇文章中,我们研究了在水平井或近水平井中利用2MHz双电阻率读数测定地层边界的方法。电阻率仪由一个发射天线和两个接收天线组成。发射天线与两个接收天线之间的距离分别是27.5in和34.5in。图1是该仪器的示意图。

下面,我们首先检验仪器在大倾角地层边界处理论响应情况。讨论其中可用于测定地层边界的特征。然后,分析两口水平井测井记录,对模型响应和实际测井情况进行定量的对比。

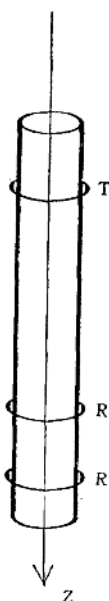


图 1 MWD电阻率仪器简图

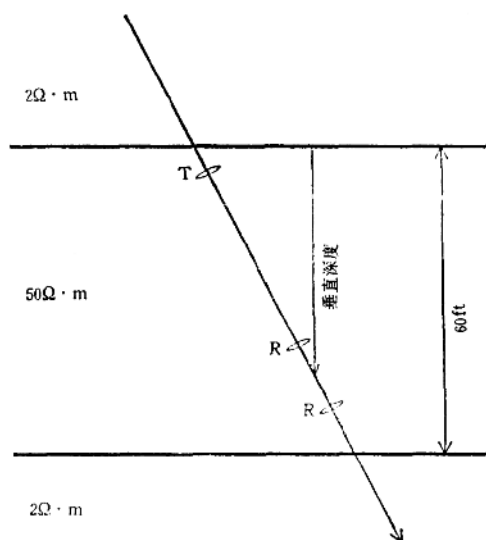


图 2 处于倾斜产层模型和地层中的电阻率测量仪器