

泥浆侵入对电阻率测井的影响

李旭译

(江汉勘探开发研究院)

摘要 岩石物理学家面临的较难的选择之一是决定选用何种电阻率测井仪。感应测井仪对于用新鲜的或非导电的泥浆钻进的低电阻率地层测井是最适合的。而对于相反的情况,最好选用侧向测井仪或电阻率测井仪。当选择测井仪时要考虑的一个重要影响是冲洗带电阻率(R_m)和真实的地层电阻率(R_t)之间的差异。当 $R_m > R_t$,侧向测井仪在估计真实地层电阻率时有难度。尽管这种影响已广为人知,但它还是足以让岩石物理学家们大吃一惊,它将导致地层分析中的严重失误。我们在本文中将通过检查同时运用感应测井仪和侧向测井仪进行测井的三个实例研究来说明潜在的问题。将实测测井仪响应与正演模拟结果相比较有助于解释测量结果。

第一个实例研究可当作泥浆侵入的典型范例。在井底温度下的泥浆电阻率是0.78欧姆·米。在含水砂岩中,深侧向测井电阻率测量结果受冲洗带电阻率较高的影响,所以其读数比深感应测井读数要高。尽管利用感应测井估计 R_t 更加容易,但侧向测井视电阻率或感应测井结果更能清楚地看出泥浆侵入因而易于发觉。在我们的第二个实例研究中要看出泥浆侵入的影响困难得多。利用新鲜泥浆对地层电阻率高达约100欧姆·米的裂缝性碳酸盐岩进行钻探。在含水层中出现的新鲜泥浆侵入导致 $R_m > R_t$,所以迄今几乎已有十年,深侧向测井视电阻率都高于深感应测井电阻率。但是,天然裂缝导致深侧向测井视电阻率读数比浅侧向测井视电阻率读数要大。这在生产层中很普遍,因而使得仅利用深探和浅探侧向测井视电阻率来监测浅部泥浆侵入成为难题。正演模拟说明:深感应测井提供了含水带 R_t 的最佳估计值,而在含油气层中得到的深侧向测井视电阻率测量结果却是最好的。最后一个实例研究显示钻井时所做的这种侧向测井视电阻率测量结果的影响。该测量结果被用于确定在注水分支井顶部停止钻井。不幸的是,新鲜的泥浆滤液和快速的泥浆初触失水现象导致冲洗带电阻率高于注水分支井中的地层电阻率。钻头处的侧向测井视电阻率(测井仪最早的测量结果)和后来的测量结果之间的比较能指示出这种影响。但是这种影响很微弱,在现场测井曲线上难以看出。利用感应数据作比较的结果很清楚地表现出在此类环境下泥浆侵入对侧向测井测量结果的影响。

引言

自从感应测井仪被采用以后,测井分析家们就一直面临选用何种电阻率测井仪进行工作的抉择。长久以来涌现一批关于此方面的推荐文章和指南。选择和解释电阻率测井曲线时需要考虑大量因素。本文的目的并非对此所有因素作评论。但是其中一个最重要的因素,也是有时被忽视的因素,是冲洗带电阻率(R_m)和地层电阻率(R_t)之间的差异。感应测量结果与电导率相对应,侧向测井测量结果则与电阻率相对应。因此,当 $R_m > R_t$ 时,侧向测井测量结果受侵入带的高度影响。正如下面的三个实例研

究所示一样,这种情况使得单独利用侧向测井测量结果来有效评价含水层是很困难的或不可能的。

实例研究 1

该井钻入一砂岩层,是用 $9\frac{7}{8}$ in. 的钻头和电阻率为0.78欧姆·米的极新鲜的泥浆系统所钻的井。所研究的砂岩层是个厚30ft的含水层,由纯净砂岩和泥质砂岩层序构成。工作时同时运用阵列感应测井仪和双侧向测井仪:在图1中示出五个感应场测井曲线、两个侧向测井曲线和一个微型柱状聚焦曲

线。从各测井仪测量得出的曲线之间的相互分离状况可以很容易地看出新鲜泥浆侵入含水砂岩相当显著的一个侵入剖面。因为深部感应电阻率值(AHT90)平均下来,几乎比深侧向测井(LLd)值小一个数量级,所以各测井仪得出的深部读数曲线之间的差异很明显。原则上,这是预期中的,理由是感应测井仪和侧向测井仪的测量结果上存在物理差异;

感应测井仪倾向于在地层中“寻找电导率”;相反,侧向测井仪则是“寻找电阻率”。所以在受电阻性泥浆滤液侵入的低电阻率含水砂岩中,感应测井仪的深部测量结果对 R_t 的响应相当强,且较少受到地层高 R_m 成分的影响,但LLd测量结果对地层高 R_m 成分的影响很敏感。

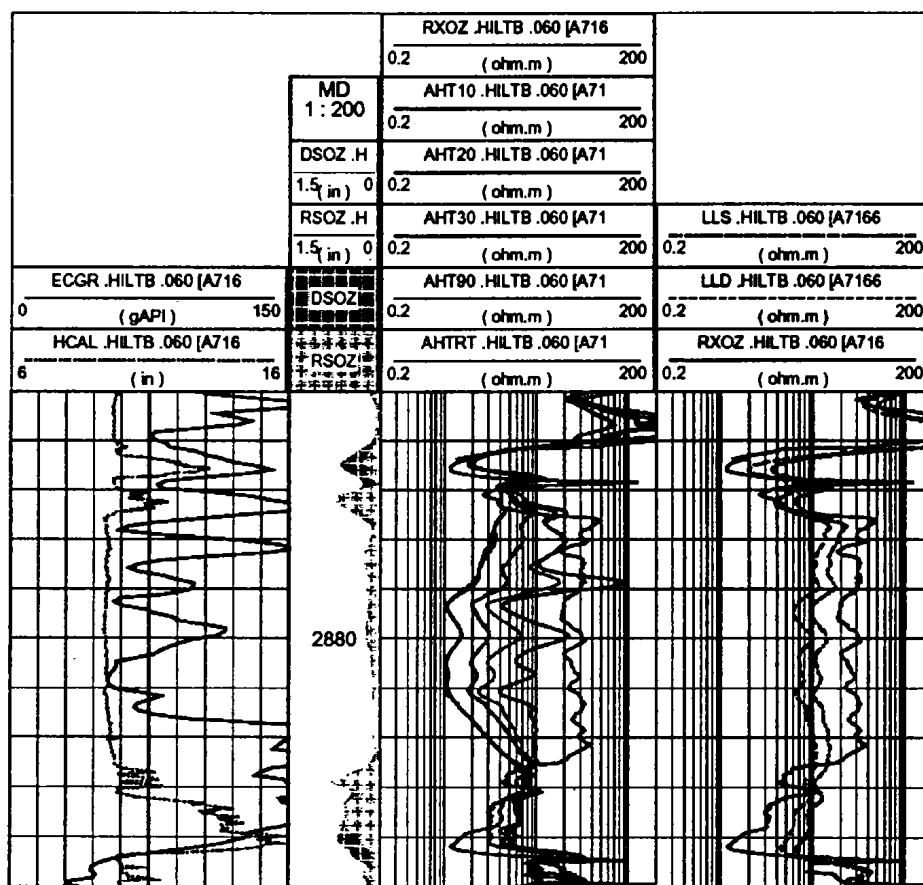


图1 实例研究1现场测井曲线图,同时展示阵列感应测井仪和双侧向测井仪、五个感应现场测曲线、两个侧向测井曲线和微型柱状聚焦曲线。

为确定 R_t 的精确值,侵入作用和砂岩体厚度可能影响各电阻率测井仪的响应,在此诸如利用合适的地质模型等手段来反演原始数据都是必要的。实际上,要实现仪器-仪器的正确比较,首先为获得 R_t 进行反演,其次作出判断——哪种测井仪器获得的数据产生最佳的估计值。

完成反演要利用一项标准,它同时考虑泥浆侵入和围岩对两种设备的影响。转换结果在图2和图3中示出。

图2示出感应测井的反演。在2道中的矩形测井曲线是程序的最终结果,代表着最终模型的 R_t ,它实现在3节中示出的合成与实际现场测井曲线的重建。要注意的关键在于:重建曲线和实际曲线相关性极好(为看清楚,只示出AHT90和AHT20曲线),而且最终的 R_t 值很接近于AHT90原始曲线上的相关值。这种相关说明原始值已对 R_t 很敏感,因而在反演过程中不必进行大量的校正来使原始数据变成最终的 R_t 。

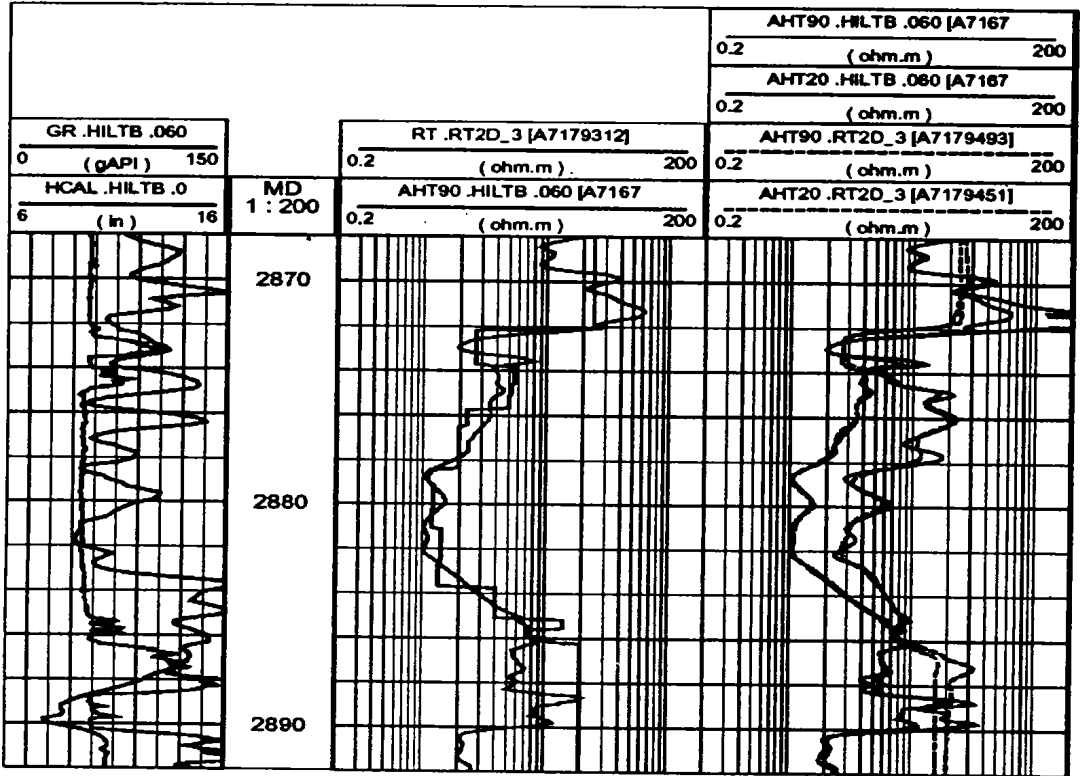


图 2 实例研究 1 感应反演结果,为清楚起见,只示出深部(AHT90)和浅部(AHT20)的反演结果。

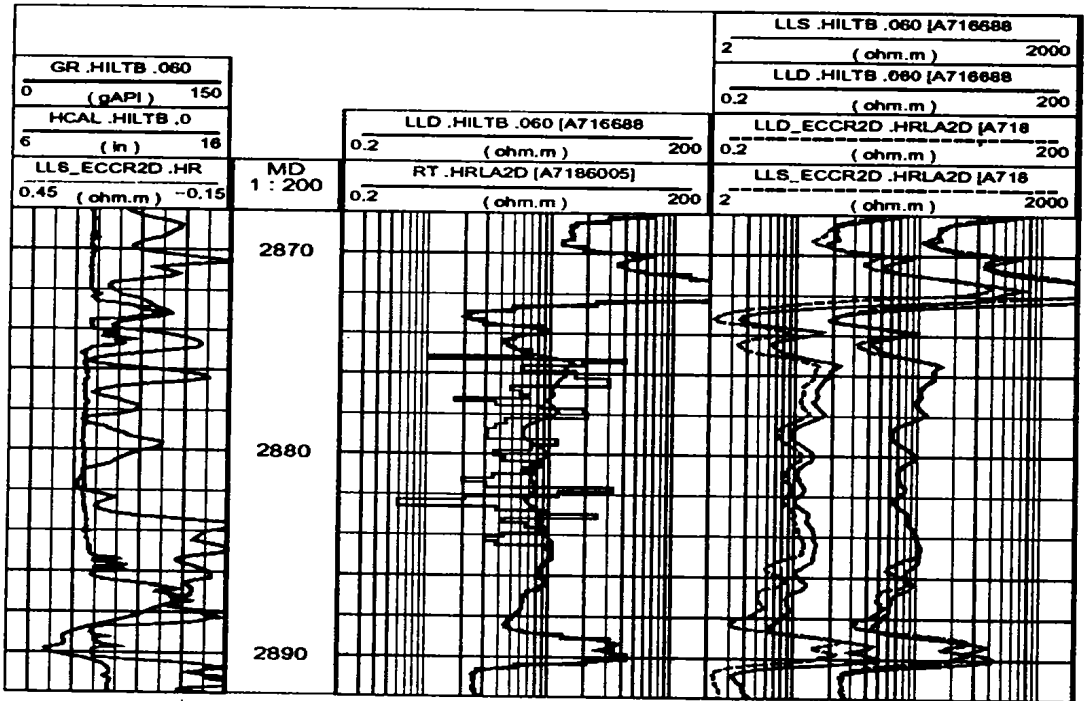


图 3 实例研究 1 侧向测井反演结果。R_h 矩形测井曲线相当不规则。LLd 曲线的重建是合理的,但浅探侧向测井(LLs)的重建却不合理(为清楚起见,比例尺作了变动)。

图3示出侧向测井数据的反演。在这种情况下,矩形测井曲线相当不规则。LLd 曲线的重建是合理的,但浅侧向测井(LLs)的重建却不合理(为清楚起见,比例尺作了变动),这表明甚至在符合反演重建准则和得出最终的 R_t 后仍存在着一个一致的偏差。此处观察的关键是最终的 R_t 矩形测井曲线和原始 LLd 现场测井曲线之间的值的差异:即使在侧向测井反演得出的 R_t 与感应测井程序得出的 R_t 相拟合的情况下,为得到最终的 R_t 所需的校正率也高达 50% 至 90%。

所以,当在此地层运用两种测井仪都可得出最终的 R_t 值时,反演程序的质量和从最深处的读数曲线得到最终的 R_t 值所要求的校正的数量都变成了找出最终答案而选用何种测井仪的判断准则。很显然,在此类大量泥浆侵入情况下对感应反演结果更具信心。

实例研究 2

实例研究展示用新鲜泥浆系统在碳酸盐岩剖面上打的一口北美井的测井数据。图4中示出双感应测井数据和双侧向测井数据。在电阻率较高的剖面中,深侧向测井和感应测量结果是相似的,这些高电阻率剖面几乎没有或没有泥浆侵入。侧向测井结果很可能更加可靠,因为在这种电阻率范围中(100 欧姆·米),感应测井仅测得极小的信号。但是,在电阻率较低的剖面中,请注意:侧向测井读数比感应测井读数要高得多。例如,在井下 2375 米处,深侧向测井测量结果(LLd)是 100 欧姆·米,而深感应测井结果却是 20 欧姆·米。这已足以区分出该地区的含油气层和非含油气层。

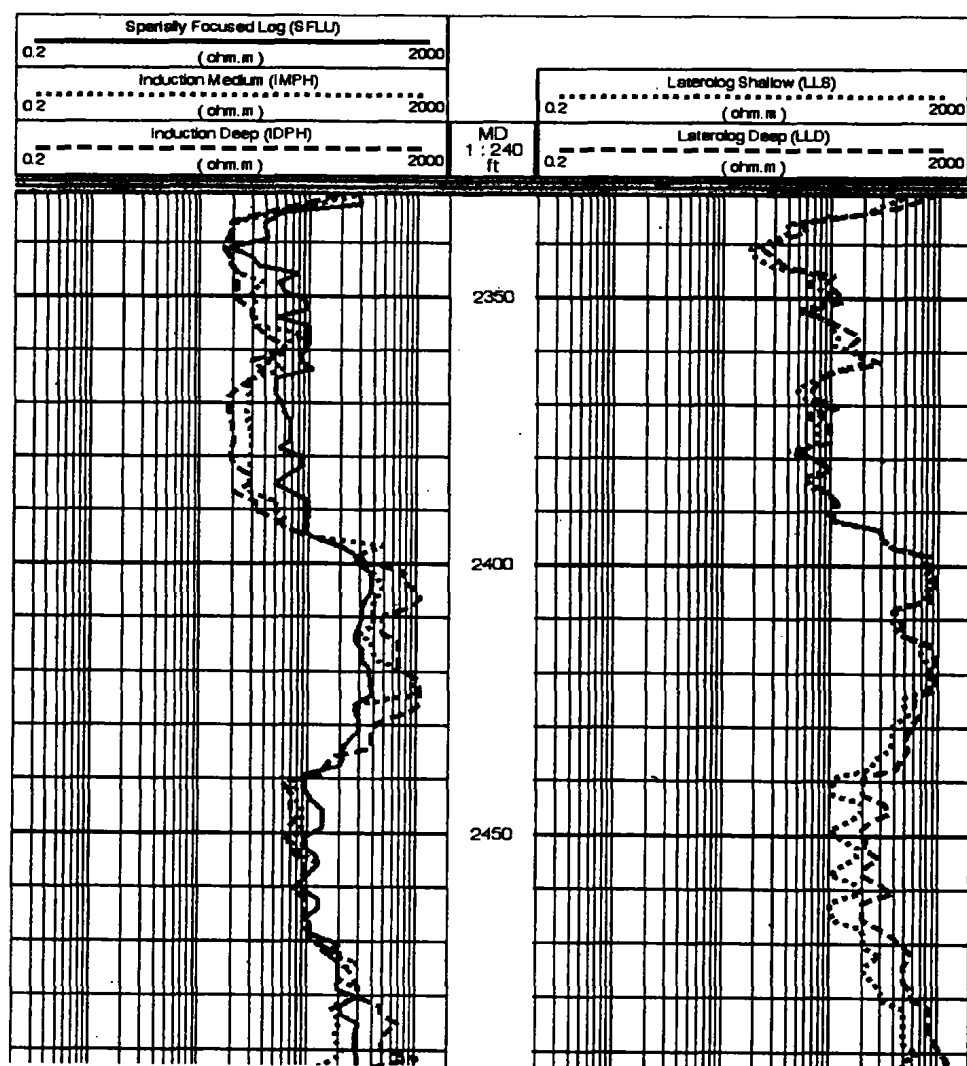


图4 实例研究2双感应测井曲线和双侧向测井曲线的比较,碳酸盐岩剖面。

从感应测井曲线上可明显看出在电阻率较低的剖面中发生了显著的泥浆侵入,且 $R_m > R_t$ 。从侧向测井测量结果中很难识别出泥浆侵入,因为 LLd 读数比 LLs 读数高。侧向测井曲线上的分离现象被解释为该段地层的垂直压裂所致。在垂直裂缝存在的情况下,即使 $R_m > R_t$, LLd 读数还是比 LLs 读数高。所以在这种情况下,单独利用侧向测井测量结果解释该地层如果不是不可能的话,也是困难的。该地层经过测试产出大量盐水,证实了这种解释。

实例研究 3

实例研究 3 是研究墨西哥湾路易斯安那海上的上中新统泥质砂岩层,它位于水下 40ft 的大陆架上。沉积环境是浅海外部陆架边缘三角洲,形成了一个坝和漫滩水渠沉积物复合系统。圈闭机理是同时受地层和断层控制。储层驱油机理属于部分水驱。因为油田已持续开采 17 年,所以生产层已部分枯竭。在钻井前认为此砂岩层全是含油的,但结果却并非如此,因而决定进行“随钻测井”(LWD)来寻找波及区。其指导思想是钻井不能太深入波及区,以免发生出水现象。

当时决定利用 LWD 电阻率测井仪来获取钻头处的数据。这些早期测量结果可以用来评价在侵入作用改变真实的地层电阻率之前的砂岩。这种特殊的测井仪把钻头当作一个测量电极,如此可提供地层电阻率最早期的测量结果(R_{bit})。测井仪同时具有 1in. 高的环状电极,置于其仪器机身(Ring)上。在该井中,井底温度下的泥浆电阻率是 0.35 欧姆·米,预计地层电阻率在 0.3 欧姆·米 ~ 40 欧姆·米之间,它取决于地层是含水还是含油气。在地层电阻率为 0.5 欧姆·米情况下(图 5),则 R_{bit} 测量结果的近似几何因子是 30in., 测井仪机身直径是 26in., 这说明为确定 R_t 所探测的深度是足够的。近似几何因子为 0.5 意味着 50% 的测量信号来自于图上示出的直径范围内,而其余的信号则来自更深的地层。图 6 示出整个生产层的 LWD 原始数据。在 12399ft 以上的泥岩中, R_{bit} 电阻率读数约为 1.6 欧姆·米,而其环形电极的电阻率读数是 1.3 欧姆·米。尽管由此提供了导电侵入剖面图($R_m < R_t$),但因为泥岩普遍未经历泥浆侵入,所以测量结果明显有误差。在此以下的砂岩,除底部 20ft (12380 ~ 12400) 之外,其测量结果同样显示了导电侵入。

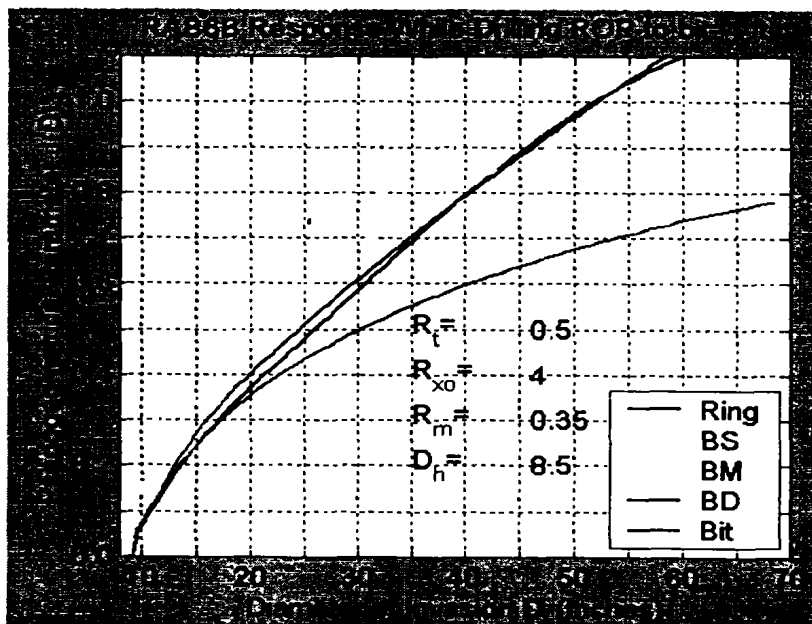


图 5 Ring 和钻头 LWD 电阻率的探测深度。在 30in. 处的 R_{bit} 近似几何因子为 0.5 意味着它的 50% 的测量信号来自于以井筒中心为圆心、直径为 30in. 的范围内。其余的信号来自于地层的更深处。因此 R_{bit} 测量结果的多数信号来自于非侵入地层,特别是当测井仪直接置于钻头上方时更是如此。Ring 测量结果的读数比钻头测量结果的读数要小。

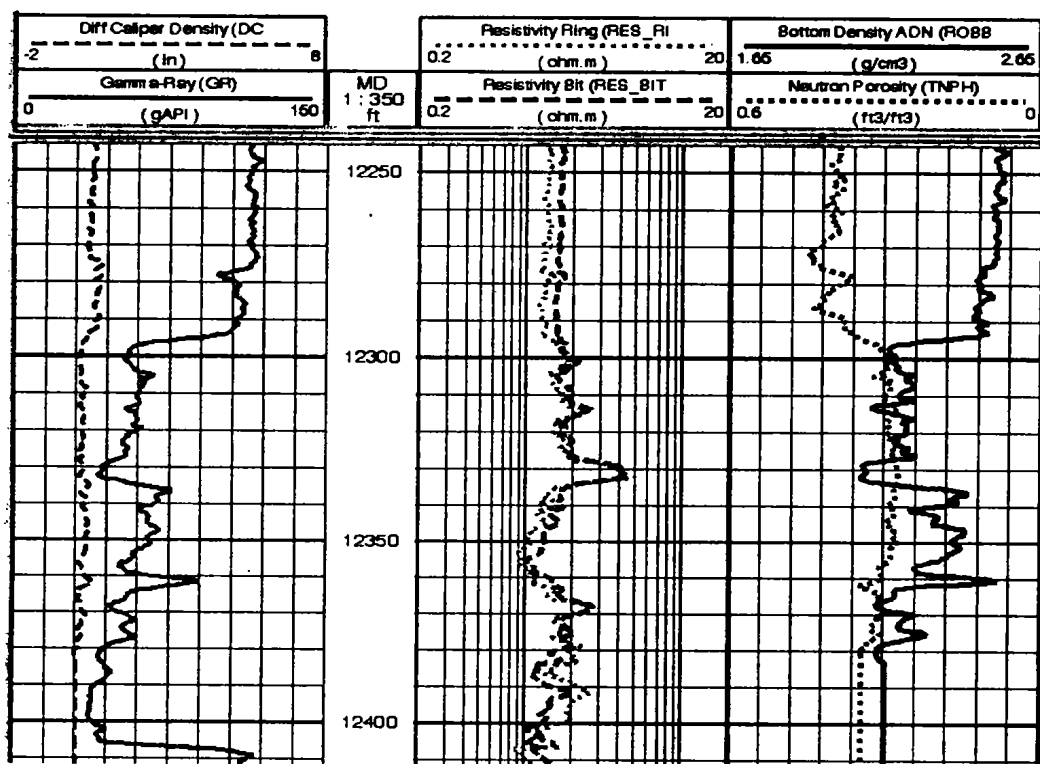


图 6 实例研究 3 来自于生产层的 LWD 电阻率和密度中子数据。注意在泥岩中的异常电阻率分离。

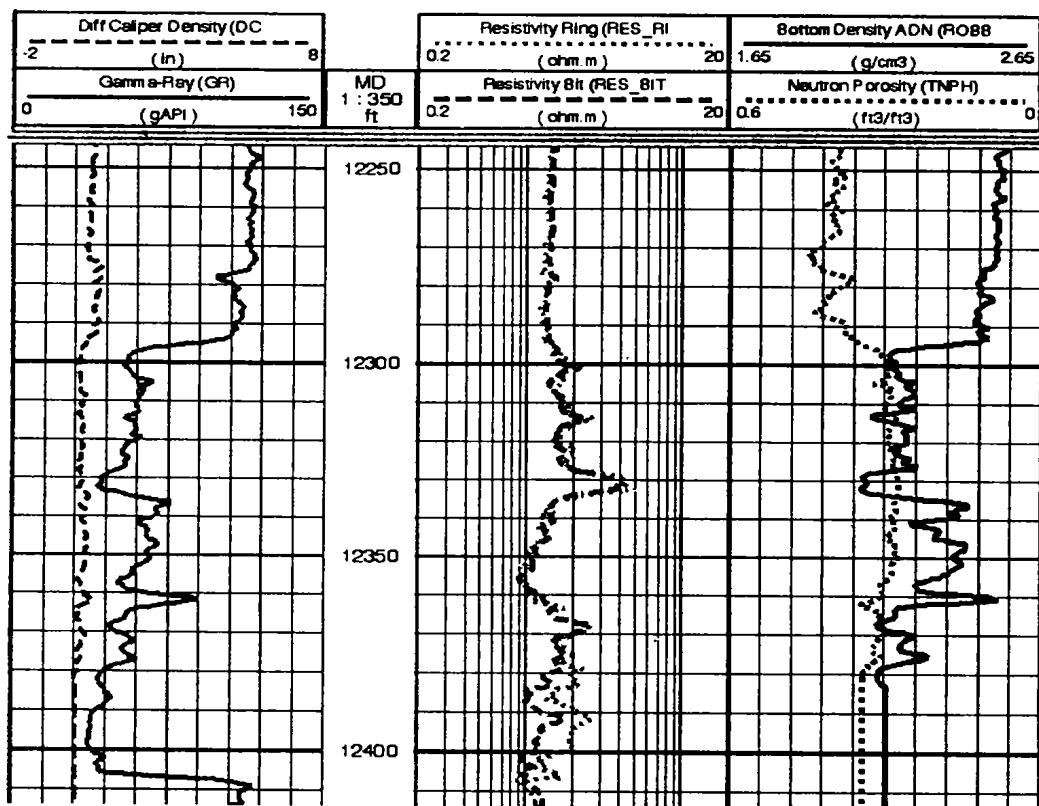


图 7 实例研究了有着合适的 K 因子时的 LWD 电阻率与中子密度数据。注意,电阻率在泥岩中如期重叠,在目的层底部则为明显的电阻率侵入剖面。(R_{so} > R_i, Ring > Rbit)

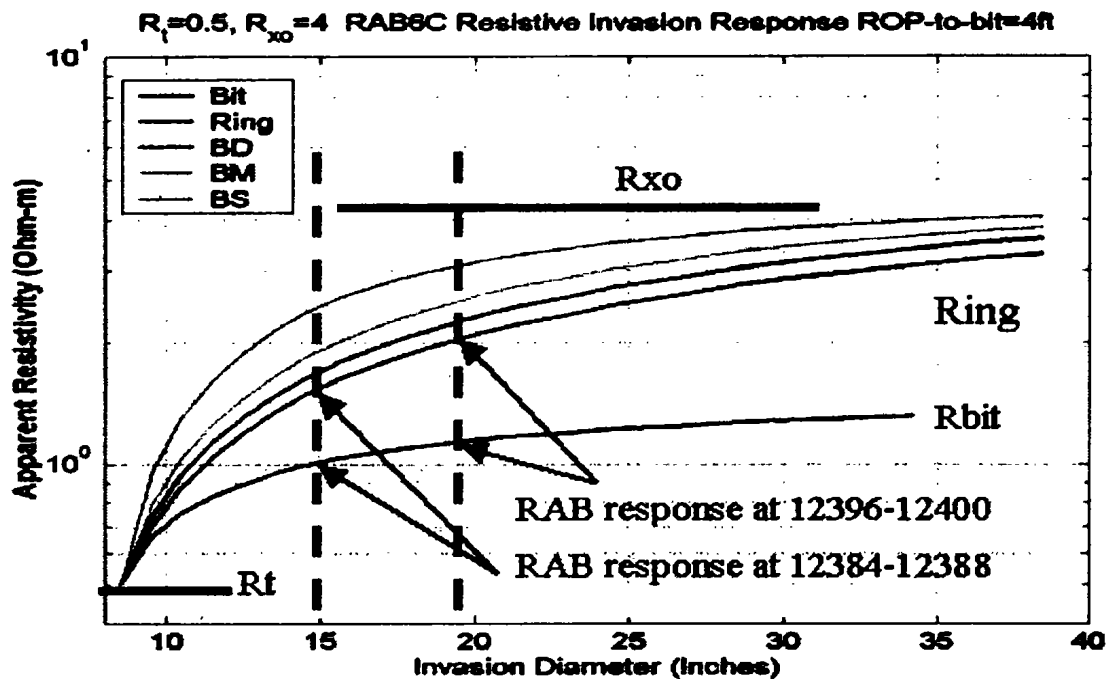


图 8 实例研究了 LWD 电阻率正演模型, R_i 为 0.5 欧姆·米, 侵入范围为 15 – 18in. BD, BM 和 BS 分别为 LWD RAB 方位电阻率传感器深、中、浅纽扣电极且安装在 RAB 仪器上, 能得到 Rbit 和 Ring 电阻率, 在这口井中没有记录这些测井值。

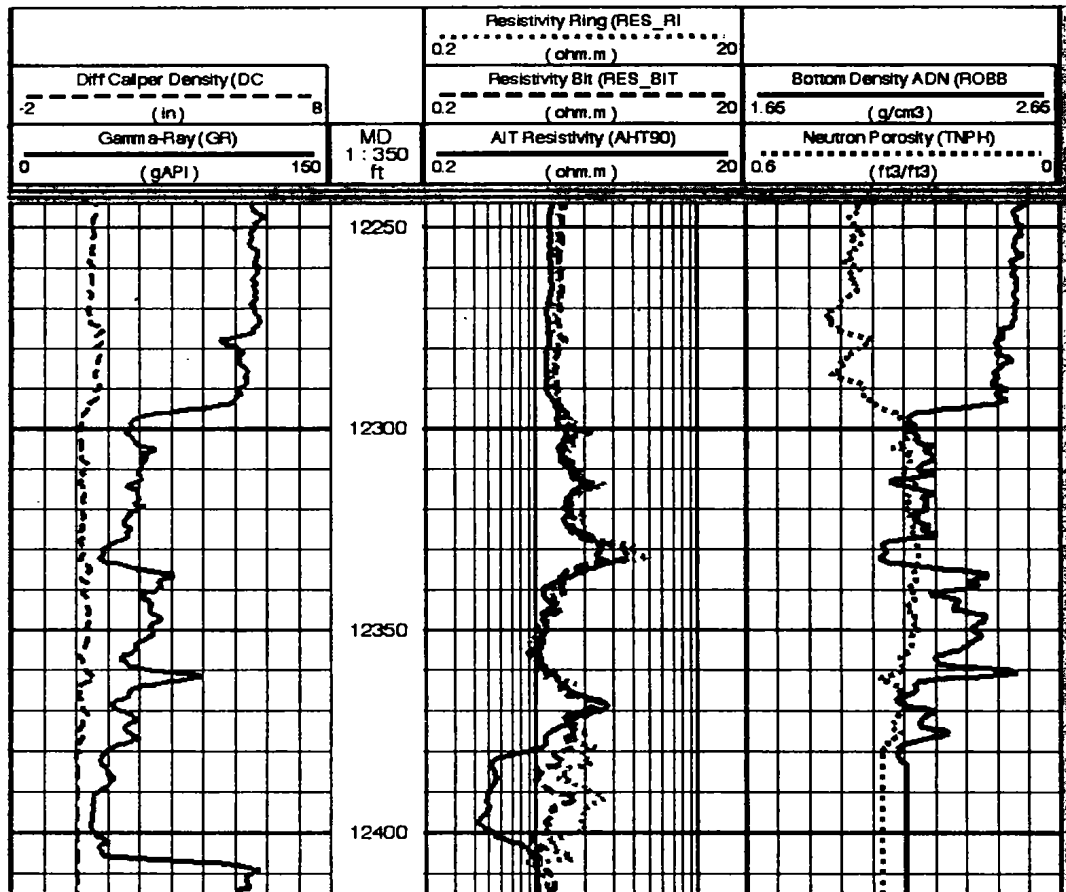


图 9 实例研究了 LWD 测量值覆盖了电缆深电阻率测量值, 证实, R_i 在砂岩底部水层明显比 Rbit 测量的电阻率要低, 此时 $R_w > R_i$, 当 $R_w < R_i$ 或 $R_w = R_i$ 时, Rbit 是测量的 R_i 值。

根据更深入的调查找出了曲线分离的原因,是由于处理软件中所规定的钻头长度不恰当。既然钻头测量利用钻头作为测量电极的一部分,钻头的长度就确定了将测量电流转换为电阻率的在响应算法中的几何因子(K)。规定的钻头长度一直为 14in.,而当时它实际上只有 9in.。这就使得 K 因子变成 0.85。当应用正确的 K 因子时,Rbit 电阻率和 Ring 电阻率将在泥岩段中相叠合(图 7),且在砂岩的下部将出现明显的泥浆侵入剖面($R_m > R_t$)。从该剖面得知 LWD 电阻率对冲洗带电阻率有响应,而且 R_t 不能直接从 R_m 取得。图 8 为一 R_t 为 0.5 欧姆·米, R_m 为 4 欧姆·米的正演模拟的 LWD 响应。从泥浆滤液电阻率(R_w)和可推测残余油饱和度的孔隙度得出 R_m ,而 R_t 值是在 0.3 - 1 欧姆·米的范围内加以调整,直到测井响应与可能的侵入直径相匹配为止而取得的。图 8 说明在 R_t 为 0.5 欧姆·米处,则有直径为 15in. 和 18in. 范围的侵入发生。 $R_t = 0.5$ 欧姆·米表明该处地层不具有原始含油饱和度,此时便决定延迟下套管,直到电缆感应测井仪能够对该段地层加以探测以证实其解释为止。如果 R_t 确实是 0.5 欧姆·米,得出的结论将是该地层已水波及,已不具有经济价值。图 9 示出电缆感应 90in. 测井仪测量结果在 LWD 测井仪叠置的测量结果之上。从 12380 到 12400ft 井段的电缆 90in. 电阻率平均值是 0.5 欧姆·米,证实了 LWD 正演模型的有效性。该井清楚地表明泥浆侵入对侧向测井测量结果的显

著影响。即使 30in. 的近似几何因子深度是 15in. 侵入深度的两倍,但 Rbit 测量仍不能直接用以测量含水层中的 R_t 。然而在此含水层之上并未出现泥浆侵入剖面的地层中,Rbit 和 Ring 则可以测量 R_t 。

如果未能发现这一波及带并且避开它,那么这口昂贵的井便会被废弃。为避免将来在 LWD 电阻率解释中出现不确定因素,团队成员之间更好的计划将有助于确保利用导电性更佳的泥浆来钻穿这一剖面。

结 论

正如这些实例研究所示,对于电缆测井和钻井中途的侧向测井而言,泥浆侵入使得侧向测井解释即便不是不可能的话,也是困难的。特别是测定泥浆侵入的含水层中的 R_t 尤为困难。在这些情况下,为估计出 R_t 的精确值,反演几乎总是必要的,在某些情况下,还可能需要进行感应测井。在多数情况下,特别是在电阻率高的地层中,为得到地层的精确评价要求同时应用两种测井方法。有许多井是用新鲜泥浆打成的,其油气层的 $R_m < R_t$ 。在这些情况下,电缆测井或 LWD 侧向测井的解释都是明确的。这对于 $R_m \leq R_w$ 的井也是同样的,从而确保在所有层段中都是 $R_m \leq R_w$ 。

(译自 SPE71708)