

文章编号: 1004-1338(2008)01-0009-04

气体钻井中泥页岩地层声波时差的实验研究

李 荣¹, 孟英峰², 汪绪刚¹

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;

2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要: 普通声波测井的径向探测深度甚小于泥页岩的水化深度, 在水基钻井液井孔中只能测到泥页岩水化后的信息。用这种声波测井数据直接进行气体钻井原状地层的井孔稳定性分析, 存在一定偏差。因此, 有必要设法从泥页岩水化后声波时差来反求原状地层声波时差。为此, 进行了不同声波频率的高压空气泥页岩钻心室内实验研究, 分析了水化时间、水化程度与声波时差变化的关系。实验表明, 泥页岩的纵波时差随水化时间的增加而增大; 大量的微裂缝会使纵波时差在水化后变小; 频率增加会使声波时差变小。

关键词: 气体钻井; 声波时差; 泥页岩; 水化时间; 实验研究

中图分类号: P631.81; TE122.23

文献标识码: A

Experimental Study on Acoustic Slowness of Mud Shale Formation in Gas Drilling Well

LI Rong¹, MENG Ying-feng², WANG Xu-gang¹

(1. Langfang Subsidiary, China Petroleum Exploration & Development Research Institute, Langfang, Hebei 065007,

China; 2. The State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest

Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The radial investigation depth of conventional acoustic well logging tool is much less than the hydrated depth of mud shale. It is only the acoustic information of the mud shale having already hydrated which can be measured by the tool running in a borehole filling with water-base drilling fluid. If this kind of acoustic logging information is directly used in gas drilling well, there must be certain errors in well stability analysis of original mud shale stratum. So it is necessary to inversely extract the slowness of the original stratum from the slowness after the stratum having hydrated. High pressure gas drilling cores of mud shale are experimentally studied with different acoustic frequencies in lab, and relations of hydrated time and hydrated degree to changes of acoustic slowness are analyzed. Experiment shows that the compression slowness of mud shale increases with the hydrated time, abundant micro fractures might decrease the slowness of hydrated mud shale, increased frequency might cause decreased slowness.

Key words: gas drilling, acoustic slowness, hydrated time, mud shale, experimental research

0 引 言

气体钻井中泥页岩地层容易产生井壁失稳。当研究泥页岩地层井壁稳定性时需要通过测井资料得到动态的岩石力学参数, 其中声波时差是关键的测井信息。但是传统测井的声波时差探测深度浅, 一

般小于 $5\text{ cm}^{[1-3]}$, 而泥页岩地层的水化可能很快, 通过大量计算表明在欠平衡负压差情况下, 普通泥页岩地层最大的水化距离可达到 13.1 cm ; 正压差情况下最大的水化距离可达到 $19.1\text{ cm}^{[4]}$ 。邓金根等人^[5]的研究表明泥页岩水化将在井壁周围形成 1 个厚约 $20\sim 25\text{ cm}$ 的水化带。由于普通井下声波的探测深度不到 5 cm , 而泥页岩水化带达到

基金项目: 中国石油天然气集团公司“强化井壁稳定机理研究”项目(970406)

作者简介: 李 荣 男, 博士, 现主要从事海外钻井工程项目研究及现场技术支持工作。

20 cm 左右, 因此普通声波的径向探测深度将小于泥页岩的水化深度, 声波测井得到的主要是水化后的泥页岩信息。气体钻井中如果替换钻井液之后再测井, 几个小时后的水化距离已经超出了声波测井仪器的探测距离, 要探测原状地层声波信号需要采用新的途径和方法。

气体钻井的声波测井问题, 一种解决思路是直接 在气体介质中开展声波测井。我们希望能改变仪器的测量方法, 让声波仪器能贴着井壁进行测量, 采用补偿测井的方式解决声波仪器不居中的问题, 尽量避免声波在空气中的大幅度衰减, 使之能测量到地层声波信号。另一种思路是在充满钻井液的井中, 开发一种能直接测量几米以外原状地层声波信号的测井仪器。通过降低仪器频率来实现声波的深距离探测。近年来, 国外提出在井下用地震勘探类似的方法进行测井。深探测反射波测井不记录井壁附近的滑行纵波、滑行横波、瑞利波等非均匀波, 而是记录距井壁表面较远处(10~ 15 m) 声学界面上的反射波。该井下仪器的特点是声波信号的频率低, 为 6~ 9 kHz, 声学探头的发射功率大, 以使声波信号能在井壁外地层中传播较远距离^[6]。但是该技术还没有得到广泛的现场运用。

传统的声波测井探测到的是水化带的泥页岩性质。所以有必要通过对水化后的泥页岩声波进行试验研究来反演原状地层的声波信号。水化应力附加到原有应力状态上, 增加了地层的应力状态; 水化降强使岩石强度降低, 这样就显著地改变了应力状态与岩石强度的关系。这种改变往往使应力状态超过了泥页岩强度, 使泥页岩失稳。Chenevert^[7] 在 1970 年就开始注意到泥页岩吸水以后各种物理化学性质的变化。实验表明泥页岩的密度、屈服强度、吸水膨胀与吸水量之间具有一定关系。不同浓度、不同类型的无机盐溶液对页岩力学性质和声波变化规律也不相同。大量实验表明泥页岩水化使得声波时差呈现逐渐增加的规律。同时, 由于井下声波测井探头

和实验室探头频率不一致, 为了使实验结果更好的运用到气体钻井工程中, 需要进行不同频率声波探头下的实验研究。

1 水化与声波变化规律的室内实验

理论上讲, 测井响应值随着钻井液与地层接触时间增加, 声波时差测井都应呈递增趋势, 水化程度越高, 幅度差越大。定期对地层进行声波时差测井, 并将测得的曲线与初始状态下所得曲线进行对比, 可以很好地反映泥页岩地层的水化程度。因此, 通过测井曲线的变化来研究气体条件下的泥页岩井壁稳定性问题。但是, 大多数区块不采用油基钻井液钻井, 而且没有随时间推移多次测井的记录, 因此目前还只有通过实验室水化前后泥页岩声波时差数据的变化进行研究。声波、孔隙度、渗透率实验的仪器是油气藏地质及开发工程国家重点实验室自行研制的 SCMS-B2 型高温高压岩心多参数测量仪。该仪器可用于测量气体孔隙度、气体渗透率、纵横声波时差、电阻率等参数。

获取泥页岩岩心样本之后, 按规定要求进行制心、切片、打磨, 并予以妥善保存, 准备实验。泥页岩制心绝不能用水进行循环冷却, 也不能用油; 用液氮成本太高。因此, 实验采用高压压缩空气钻心。岩心制备后立即进行腊封, 冷藏保存。实验时候采用矿化度较高的地层水预先饱和泥页岩。实验前将岩心放入饱和装置, 用真空泵抽真空, 保持 0. 1 MPa 的负压 12 h, 再将抽过真空的模拟钻井液缓慢注入, 并对岩心继续抽真空, 直至岩心内无气泡排出为止。然后将岩心端面浸泡在水基钻井液中, 保持实验所需要的时间, 取出岩心进行声波测试实验。水化时间分别为 0、2、5、8、16、32、58、65、72、96 h。每次取出岩心进行声波实验之后马上放回原溶液中继续水化。实验岩心的基本参数见表 1。

获得岩心孔隙度和渗透率等基本参数可以用于地层条件下的孔隙度与声波参数关系的研究; 另外,

表 1 实验岩心的基本参数

岩心号	高度/cm	直径/cm	孔隙度/%	气体渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
D1	5.58	2.501	12.17	8.69×10^{-5}	2.23
D2	6.218	2.582	12.58	7.17×10^{-5}	2.26
D4	7.86	2.58	15.87	1.22×10^{-5}	2.23
D5	3.78	2.52	15.76	1.29×10^{-3}	2.20
D6	5.18	2.596	15.53	1.09×10^{-3}	2.17
D7	5.92	2.51	16.31	1.35×10^{-3}	2.25
D10	5.31	2.51	15.10	1.33×10^{-3}	2.21

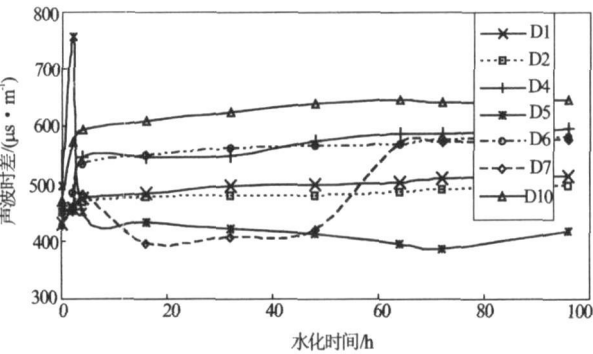


图 1 泥页岩纵波时差变化规律随水化时间的关系曲线

实验基本参数的测量可以为该实验的准确性和再重复性提供参考。实验采用的声波频率为 500 kHz, 实验总的变化规律见图 1。

从图 1 可见, 随着水化时间的增加, 泥页岩的纵波时差增大, 水化时间越长, 泥页岩的纵波时差越大。D5 与 D7 泥页岩岩心的变化规律存在相反的现象, 这与该岩心本身的裂隙和成份有一定关系。虽然宏观上总的孔隙度和渗透率相差不大, 但是扫描电镜表明 D5、D7 岩心表面存在大量的微裂缝, 并伴随有部分砾石颗粒。同时, 估计该岩心中存在死孔隙, 其中的气体不能被排出, 于是在骨架和气体的综合作用下, 其传播时间会增加, 传播速度将减小, 也会出现水化后纵波时差变小的规律。井下泥页岩岩心是非常珍贵的, 必须按照有关规定在取心后进行腊封冷藏, 防止其干裂。否则一旦泥页岩脱水后, 即使再让岩心水化, 由于泥岩岩心存在物质交换等原因, 一方面岩心很容易遇水破裂; 另一方面岩心将不能恢复到原始的状态, 影响实验效果。由于在该实验中需要对同一泥页岩岩心进行不同时间下的多次重复声波测试, 因此实验过程一旦开始便无法停止, 岩心从实验设备中取出后动作要快, 且要求轻拿轻放, 避免损坏已经部分水化的岩心。实验过程中有部分泥页岩提前破裂, 无法继续进行水化实验。

实验后先进行单个岩心回归, 再进行所有岩心的统计回归, 表 2 仅列出水化后纵波与原岩心纵波之间的统计。

实验中的相关系数不高, 这与实验条件、泥页岩成份和基本性质都有一定的关系。总之, 根据实验可进行实验室内水化前后的声波时差校正, 实验表明泥页岩岩心的平均纵波时差变化达到 36.7 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 采用同样的方法对地层的横波进行实验研究, 其变化值为 49.68 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。为了使实验结果更好地运

表 2 泥页岩纵波时差与水化泥页岩纵波时差统计表

t/h	水化前后纵波之间的关系	相关系数
2	$A C_p = 0.9558 A C_2 + 72.067$	0.2669
5	$A C_p = 1.1502 A C_5 + 11.809$	0.6258
16	$A C_p = 1.5256 A C_{16} + 188.22$	0.5759
52	$A C_p = 1.195 A C_{52} + 51.281$	0.5655
58	$A C_p = 1.0559 A C_{58} + 52.76$	0.571
65	$A C_p = 1.0558 A C_{65} + 69.159$	0.5656
72	$A C_p = 1.0695 A C_{72} + 59.85$	0.5559
96	$A C_p = 1.0985 A C_{96} + 55.665$	0.5112

用到气体钻井工程中, 需要进行不同频率声波探头下的实验研究。

2 不同频率声波探头对测井信息的影响

井下声波频率和实验室存在很大差异, 不同探测仪器的频率、探测深度等不一样^[8-10], 为检验井下常用的声波探头同实验室声波探头之间的关系, 进行了不同频率下的声波实验。在进行不同频率下声波探头对测井信息的影响实验中采用自制的声波测试设备, 该简易设备可以实现利用不同的声波探头进行泥页岩声波测试。

分别更换 25、50、100、250 kHz 和 500 kHz 的声波探头进行声波对比实验。为了验证实验的准确性, 采用了多块泥页岩岩心进行实验。图 2 是泥页岩在不同频率下的声波时差变化规律。

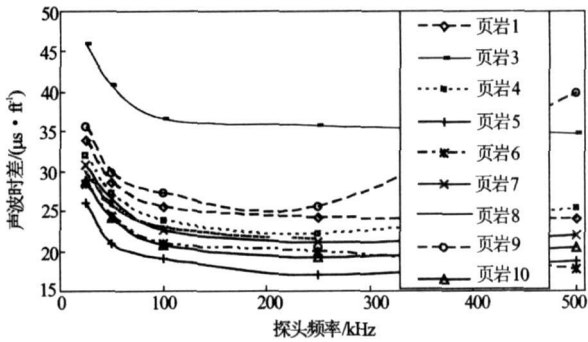


图 2 泥页岩在不同频率下声波时差的变化规律

图 2 中不同频率的探头对泥页岩测量结果不同, 随着探头频率的加大, 声波时差逐渐变小, 具有明显的声频散特性, 这与楚泽涵等人的研究规律相同^[11]。在其他条件不变的前提下, 通过大量室内实验, 在消除了探讨初值等的影响之后, 可以得出 25 kHz 频率同 500 kHz 频率 2 种常用探头之间的

* 非法定计量单位, 1 ft = 12 in = 0.3048 m, 不同
©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关系为

$$AC_{25} = 0.8545 \times AC_{500} + 2.1811 \quad (1)$$

式中, AC_{25} 为 25 kHz 探头声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; AC_{500} 为 500 kHz 探头声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

利用该实验关系就可实现实验室声波和井下声波信息之间的单因素转换。以上实验表明水化前后泥页岩声波变化在 $8 \sim 12 \mu\text{s}/\text{ft}$, 泥质砂岩在 $0 \sim 4 \mu\text{s}/\text{ft}$ 。综合考虑泥质砂岩也受到声波时差影响, 水化前后纵波时差的平均变化为 $8.03 \mu\text{s}/\text{ft}$ 。采用同样的思路对横波时差进行了研究, 泥页岩的横波变化在 $15 \sim 22 \mu\text{s}/\text{ft}$, 泥质砂岩在 $0 \sim 8 \mu\text{s}/\text{ft}$ 。

3 实验中存在问题及注意事项

影响声波测量的因素很多, 除了泥页岩本身的泥质含量外, 还有如信号变化、噪音影响和泥页岩水化。由于泥页岩含有大量吸水性的粘土矿物, 这种矿物是层状结构, 遇水后晶层之间的距离会扩大。靠近井壁的泥页岩吸水后膨胀, 改变了自身的密度和压力, 随着钻井液浸泡时间的增加, 靠近井壁的岩石发生塌落, 造成井径扩大。泥页岩由于吸收了水分造成自身密度压强等的改变, 从而造成波速降低。因此声波时差主要与泥页岩水化程度、水化时间、水化距离、测量频率等密切相关

$$AC = f(W, t, x, F) \quad (2)$$

式中, W 为含水量, %; x 为水化距离, m; F 为声波探头频率, $\mu\text{s}/\text{ft}$; t 为水化时间, h。

在实验中应该注意下面一些问题。

(1) 岩心样品与测量探头之间要紧密接触。

(2) 每次端面吸水之后, 岩心应在密闭容器中放置一段时间, 以便岩心之中的水重新均匀分布, 避免末端和界面效应带来误差(水在岩心中的分布状态对声波时差的测量有明显的影响)。

(3) 测量过程中声波仪器读值一定要等待数值稳定, 保证吸水量与吸水时间与声波值相匹配。

(4) 由于该实验仪器为新研制的, 在整个实验过程中, 仪器会出现一些问题, 如胶皮套密闭不严, 出现漏油和不能加压及加压后压力不能稳定的情况, 这会污染岩心, 使岩心声波测量不准, 此时就需要更换胶皮套和重新处理岩心; 有时压力传感器会出现问题以及气动阀门会出现松动现象, 这些问题都需要花大量时间进行检测和维修以及对仪器进行调试。为检验吸水泥页岩的含水量, 在每块岩心实验结束之后利用电子天平对岩心进行再次称重。

(5) 在实验过程中压力不能太高, 而且为了保证模拟地层水在岩心中均匀分布, 需要放置一段时间, 加上泥页岩需要重复吸水。

4 结论与建议

本文在分析气体钻井声波测井现状的基础上, 认为现有条件下进行室内水化泥页岩声波实验是目前解决泥页岩去水化问题的必然选择。由于影响声波时差变化的因素很多, 本文只提供了声波时差与泥页岩水化和测量频率之间的实验思路。

本文采用高温高压多参数测量仪器等实验设备对水化泥页岩的声学特性进行了大量实验研究, 结合多频率声波探头对不同频率下泥页岩的声波时差进行的实验分析, 为实验室模拟井下声波测井信息奠定了基础。该方法已经成功运用到气体钻井泥页岩地层井壁稳定性的评价中。

参考文献:

- [1] 吴仕荣, 陈刚, 孟英峰, 等. 气体钻井配套技术破解难题[J]. 中国石油石化, 2005, 72(4): 59.
- [2] 项德贵, 孙梦慈, 陈志学. 青西油田空气钻井井眼稳定问题的探讨[J]. 断块油气田, 2005, 12(6): 68-70.
- [3] 牛一雄, 潘和平, 王文先, 朱留方, 许东辉. 中国大陆科学钻探主孔 0 200 0 m 地球物理测井[J]. 岩石学报, 2004, 20(1).
- [4] 李荣. 气体钻井中泥页岩稳定性的评价研究[D]. 成都: 西南石油大学博士学位论文, 2007: 106-108.
- [5] 邓金根. 泥页岩井眼力学稳定理论及工程应用[D]. 北京: 中国石油大学博士学位论文, 2000.
- [6] 姜皓, 楚泽涵, 薛梅. 声波测井仪器发展及刻度井研究[J]. 特种油气藏, 2001, 8(4).
- [7] Chenevert M E. Shale Alteration by Water Adsorption[J]. JPT, Sept. 1970.
- [8] 刘祝萍, 等. 岩石声学参数测量分析系统[J]. 测井技术, 1994, 18(4): 288-298.
- [9] 楚泽涵, 徐凌堂, 彭斐. 用光纤电缆传输信号的多种频率阵列声波测井[J]. 测井技术, 2005, 29(6): 477-479.
- [10] 刘子华, 张金钟, 冯延春. 偶极子横波测井方法的实验研究[J]. 测井技术, 1996, 20(4): 157-161.
- [11] 李艳华, 楚泽涵. 含气层纵波声速与孔隙度、泥质含量和含水饱和度的关系[J]. 测井技术, 2000, 24(3): 183-187.

(收稿日期: 2007-12-05 本文编辑 余迎)