

# 声电转换信号的井下观测与初步分析

段文星, 鞠晓东, 卢俊强, 门百永, 车小花, 乔文孝\*

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, qiaowx@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-10-12

国家自然科学基金项目(11204380,11374371,11134011,61102102); 国家油气重大科技专项项目(2011ZX05020-009); 中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0307); 中国石油天然气集团公司项目(2014B-4011,2014D-4105,2014A-3912); 中国石油大学(北京) 科研基金项目(2462015YQ0516) 资助

**摘要** 声电测井是一种基于地层岩石的声电耦合效应探测的、特殊的井孔地球物理测井方法。自行研发的声电效应测井仪(AELT)在中国北部某油井进行了实际下井测试, 通过使用声波信号和电信号同步采集的方式得到了该井声波发射时的声电同步接收信号, 在井下观测到了声电效应测井理论所预期的伴随模式声电转换电信号和界面模式声电转换电信号。初步对比结果表明, 伴随模式声电转换信号的波形组成成分以及频率特征与声波发射—声波接收信号的特征相似; 在整个测量井段, 纵横波信号能量与由此产生的声电信号能量相对较弱; 而斯通利波信号能量与由此产生的声电信号能量相对较强, 且二者随深度的变化趋势具有很高的相关性。界面模式声电转换信号到时几乎不会随源距和地层深度的变化而改变, 其能量与常规测井数据之间具有很高的相关性。结合由声波信号转换出的电信号的相关特征, 有可能为裸眼井地层参数评价提供新的参考依据。

**关键词** 声电效应; 井下实测; 测井; 渗透率

## 0 引言

1939年, 前苏联科学家Ivanov发现了岩石的震电效应, Ivanov在不加电的情况下测量到了由地震波产生的电场, 指出这可能与双电层声电效应有关<sup>[1]</sup>。Frenkel建立了固相运动与孔隙流体运动相耦合的孔隙介质波动理论以解释此现象<sup>[2]</sup>。之后的50年由于震电效应理论研究缺乏, 电子技术的限制, 相关报道很少<sup>[3-7]</sup>。随着电子技术的发展, 1993年, Exxon Mobil公司进行了野外震电实验<sup>[8]</sup>, 测得了流体饱和沉积岩中的电磁场。随后, 多位地球物理学家针对不同的地质环境进行了现场震电效应实验, 一定程度上证明了震电效应的真实性和震电转换信号的可检测性<sup>[9-13]</sup>。同时, 震电效应相关理论也有了一定的发

展: 在Frenkel和Biot的基础上, 推导了宏观声电耦合的控制方程组, 表明孔隙介质中存在两种类型的电磁场扰动<sup>[4]</sup>。但是在现场试验中, 只能观测到来自地下300 m以上地层分界面的震电转换信号<sup>[15-17]</sup>。鉴于此, 提出利用井中垂直震电剖面(VESP)来观测震电转换信号的设想<sup>[18]</sup>, 但是VESP震源距离勘探目的层位依然很远, 地震波在遇到多个分界面时会发生多次反射和折射, 使得接收到的波形较为复杂, 不易辨别。

声电效应测井是一种井下声电探测技术, 其优点在于辐射源和接收器都在井内, 可以使下井仪距离勘探目的层位很近, 能同时获得地层的声学参数和电学参数, 有可能提高对不同性质地层的探测分辨率。前人已经在声电效应测井的实验模拟方面进行了大量工作: Zhu在小型模型井的实验中观测到了声电测井信

引用格式: 段文星, 鞠晓东, 卢俊强, 门百永, 车小花, 乔文孝. 声电转换信号的井下观测与初步分析. 石油科学通报, 2017, 01: 24-31

DUAN Wenxing, JU Xiaodong, LU Junqiang, MEN Baiyong, CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao. Field test of acoustoelectric logging signals and preliminary analysis. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 24-31. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.003

号、电声测井信号,考察了不同类型地层中波的特征以及地层裂缝对波场的影响<sup>[19]</sup>;Mikhailov通过在低频情况下测量井中伴随斯通利波的电场,指出了伴随电场与孔隙度和渗透率都有关<sup>[20]</sup>;Zhu和Toksöz通过考察井外存在水平和竖直裂隙情况下井内单极声源和偶极声源激发的震电、震磁转换信号,检测到了伴随井孔模式波的磁场<sup>[21]</sup>。Wang通过建立缩尺模型井,进行了声电效应测井的物理模拟实验<sup>[22-23]</sup>。前人也进行了大量的理论推导及数值模拟工作,Hu分析了震电全波与孔隙介质的孔隙度、渗透率等参数的关系<sup>[24]</sup>;Mikhailov通过采用简化算法,在准静态电磁场条件下,采用低频井孔斯通利波近似公式<sup>[25]</sup>,模拟计算了低频斯通利波的伴随电磁场<sup>[20]</sup>。Guan通过数值模拟方法,研究了充液井孔中的声电转换场<sup>[26]</sup>、随钻条件下的声电转换场<sup>[27]</sup>,同时还分析了声电转换场中斯通利波信号特征与地层参数之间的关系<sup>[28]</sup>。这些数值模拟结果有利于建立声电效应相关特征与岩石力学电学等参数的关系。但目前的数值模拟尚停留在简单介质的模拟层面,实验研究仍停留在缩尺模拟阶段,难以模拟不同孔渗特性的岩石,特别是不同性质岩石之间的声学电学耦合情况。已有的实验结果虽然对实际声电效应的解释及研究具有指导意义,但是对于井下复杂地质情况下的声电效应实验模拟和实际测井解释的指导作用仍有局限。

## 1 声电效应测井仪测井实例分析

### 1.1 AELT仪器的测量方式

笔者所在的团队研发了声电效应测井仪(Acoustoelectric Well Logging Tool, AELT)原型机。图1为AELT结构示意图,其中A、B为供电电极; $V_n(n=1,2,3,4)$ 为测量电极,用以测量不同位置处的电位值; $R_n(n=1,2,3)$ 为声接收换能器; $T$ 为由多个单极子发射换能器组成的相控线阵声波辐射器。当AELT

工作时,由声波辐射器 $T$ 向地层发出脉冲声波信号,声接收换能器 $R_n$ 和测量电极 $V_n$ 同时开始采集信号,同时仪器内部的差分电路将 $V_n$ 中每相邻的两个测量电极所测量得到的电位数值相减,得到3组差分电位信号 $D_n(n=1,2,3)$ , $D_n=V_n-V_{n+1}$ ;这样就得到了3种源距下的三组声波发射—声电同步接收信号(声波信号 $W_n$ 和电位差分信号 $D_n$ , $n=1,2,3$ )。该仪器使用声波发射换能器在井孔中激发声波信号,并用不同源距的3个声波接收器接收声波信号、同时用4个电极接收电位信号,实现同一地层深度下的声发射—声接收信号和声发射—电接收信号同步采集,这样设计可以保证在相同的深度点同步记录声波信号以及由声电效应产生的电信号,有利于分析声波信号和声电转换信号之间的关系以及与地层声学电学参数之间的关系<sup>[29-30]</sup>。

### 1.2 AELT实测信号展示

近期,我们在中国北部胜利油田某砂泥岩油井进行了AELT下井测试,获得了实际地质条件下的声电测井信号。图2表示了在深度 $x750\sim x880$  m井段声波接收器 $R_1$ 接收到的声波波形信号 $W_1$ 和由电极 $V_1$ 和 $V_2$ 接收到的电位差分信号 $D_1$ ,激励信号的主频16 kHz。从图2中可以看出,声波波形 $W_1$ 中模式波信号的到时随着地层深度的变化而变化,波形特征与常规声波测井信号相似,信噪比较高。电位差分接收信号 $D_1$ 在整个测量井段中均有信号响应,信噪比良好。根据波形的整体特征可以将接收信号 $D_1$ 中的信号分为两类,第一类模式的到时很早(约10  $\mu$ s),其到时基本不随地层深度而改变,可以视为电磁波速度传播的“界面模式”声电转换信号,以下简称界面模式;第二类模式的波形形态与到时等特征与声波信号 $W_1$ 非常相似,可以视为声波信号的“伴随模式”声电转换信号,以下简称伴随模式。这两种模式声电转换信号到时和波形形态特征与前人的实验及数值模拟结果之间有一定的相关性。

图3为两种不同深度下的电差分接收信号在零时

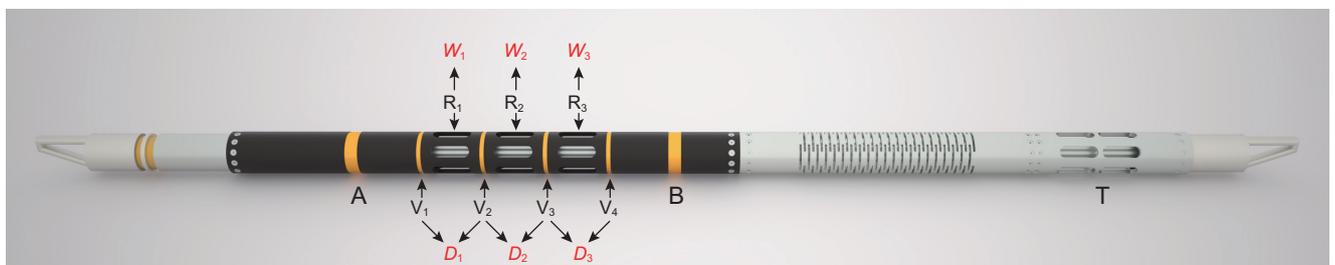


图1 AELT结构示意图

Fig. 1 The construction of AELT

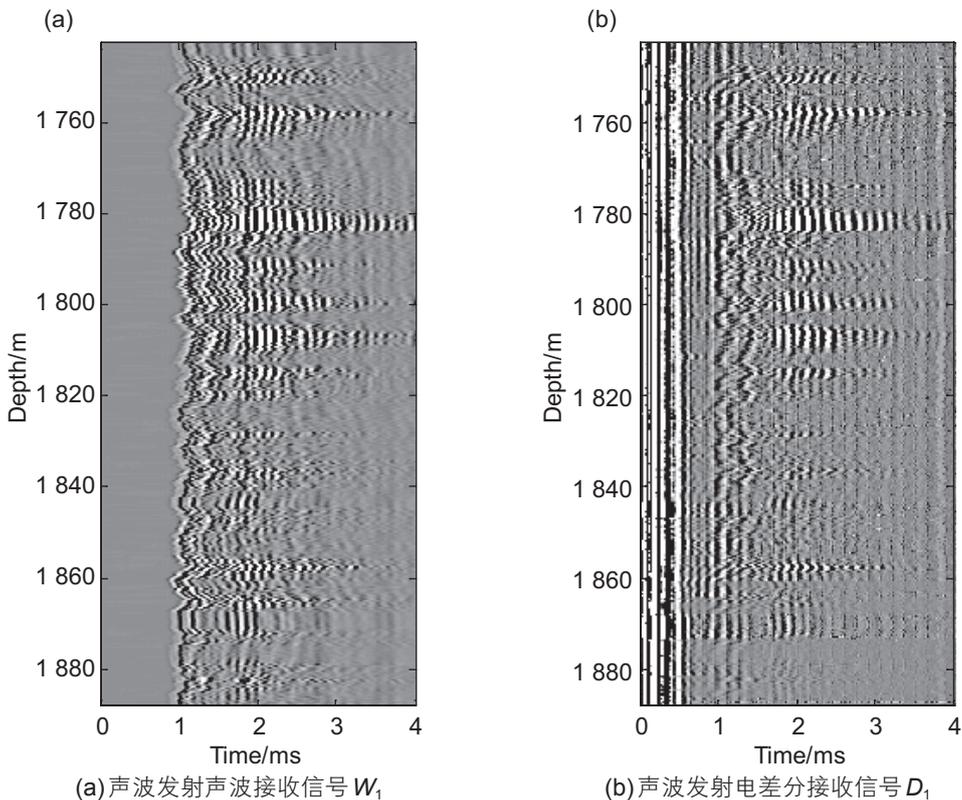


图2 声电效应测井实测信号

Fig. 2 Received signals

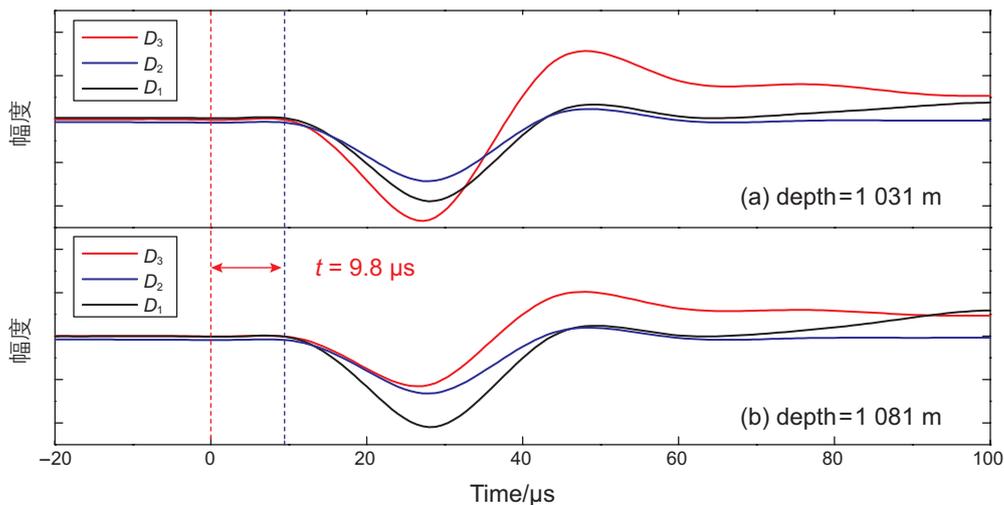


图3 不同深度下的“界面模式”声电转换信号

Fig. 3 The interface-mode acoustoelectric signals at two different depths

刻附近的波形，用以观察界面模式声电转换信号的到时特征，其中红色、蓝色和黑色曲线分别表示短源距接收信号  $D_3$ 、中源距接收信号  $D_2$  和长源距接收信号  $D_1$ 。从图3可以看出：第一，同一深度位置测量的不同源距的界面模式信号的到时不会随着源距的变化而改变。第二，结合图2可知，图3所展示的这两个深度点上

伴随模式信号的到时存在明显差异，而界面模式信号的到时则没有改变，我们统计了整个测量井段界面模式信号的到达时间均约为  $9.8 \mu s$ ，且几乎不会随地层性质的变化而改变。产生这种现象的原因可以解释为：当声波发射换能器发出的声波能量传播到井壁上时，部分声波能量立即激发起地层中骨架和孔隙流体的相

对位移，从而产生一个很强的电信号，然后该信号以电磁波的速度传播并被测量电极所接收到，因此界面模式信号的到时  $T$  由两部分组成  $T = T_1 + T_2$ ，一是声波能量由声波发射换能器辐射面到达井壁所用的时间  $T_1$ ，二是界面模式信号产生以后从井壁介质以电磁波的速度传播到测量电极所用的时间  $T_2$ 。由于电磁波传播速度远大于声波传播速度，因此  $T_1 \gg T_2$ ，所以  $T \approx T_1$ 。因此可以认为声波发射换能器辐射面与井壁之间的距离决定了  $T$  的大小，取泥浆声速为 1 500 m/s，则  $T$  所对应的距离约为 1.47 cm，这与实际测井仪器的几何尺寸比较吻合。

图 4 表示了深度为 1 760 m 处的  $R_1$  接收器接收到的声波信号  $W_1$  和  $R_1$  附近的电位差分接收信号  $D_1$  的波形对比曲线，用以对比两种信号之间的特征差异。伴随模式声电转换信号产生于声波波及的地层中，由于地层中存在离子双电层，当弹性波在这种流体饱和孔隙介质中传播时，会引起流体相对于骨架的流动，这种携带净剩电荷运移的渗流运动可引起地层电位的变化并被测量电极接收到，形成了伴随模式声电转换信号，该信号伴随着声波信号的传播而产生，只有当声波能量传播到目标地层时才能探测来自该层位的电位变化，体现在图 2 中，表现为该模式的到时随着地

层性质的变化而改变，变化趋势与声波发射—声波接收信号有相似性。从图 4 所示的时域波形中可以清楚地观察到伴随模式声电转换信号，并且伴随模式声电转换信号与同位置接收到的声发射声接收信号波形特征相似，伴随模式声电转换信号的整体到达时间要略早于  $W_1$  中相应的声波信号 (约 20  $\mu$ s)，这是由于当声波信号的扰动改变了地层内电荷的分布后，电位的扰动会立即被电位电极接收到，而声波信号则由在地层中滑行的声能量以临界折射角向井内辐射能量，然后以井液中纵波的传播速度传播并被声接收换能器接收到。伴随模式声电转换信号虽然伴随声波信号产生，但是由于测量方式的差异，导致接收到信号的时间有所差异。我们计算了  $D_1$  信号中的伴随模式声电转换信号部分 (0.8~3 ms) 的频谱，并将其与声波信号  $W_1$  的频谱进行了对比，结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，在声波测井的频段，都可以激发起声电转换信号，而且声电转换信号和声声信号的频谱非常相似。这些现象与现有的实验和理论研究结果之间有一定的相似性。

### 1.3 实测声电信号的进一步分析

由声电效应产生的伴随模式声电转换信号的强弱取决于多个方面，如滑行声波的能量、孔隙流体电学

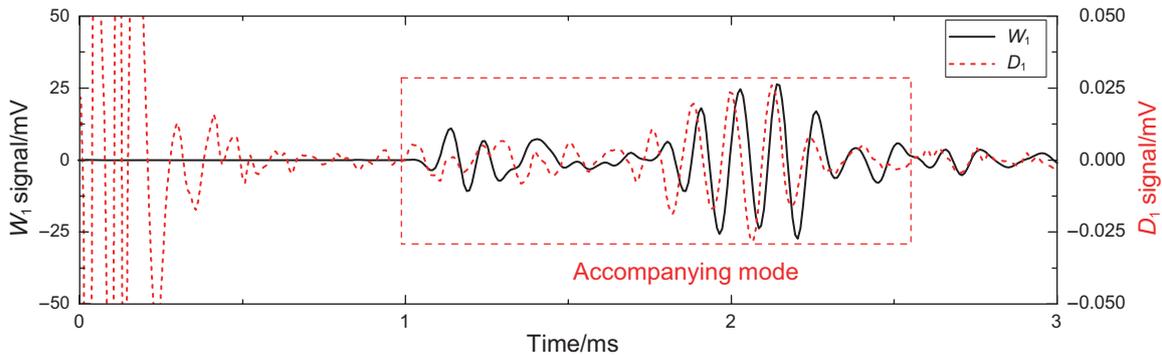


图 4 深度为 1 760 m 处的声电测井信号对比

Fig.4 Received signals from depth 1 760 m

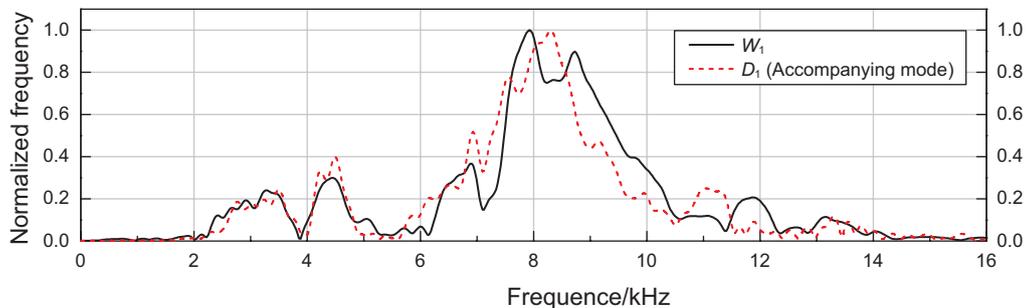


图 5 深度为 1 760 m 处的声电测井信号频谱对比

Fig. 5 Spectrum of received signals from depth 1 760 m

性质、地层孔隙的连通性质，特别是岩石的渗透率等因素。在使用声电测井仪器评价实际地层参数时，由于许多参数往往是未知的或者测不准的，这就给利用声电转换信号特征评价地层参数带来了一定的困难。因此，在进行声电效应进行地层参数评价的研究时，为了从定性的角度观察伴随模式声电转换信号幅度和声发射—声接收信号幅度之间的关系，我们按照式(1)计算声波接收信号  $W_n$  的能量 ( $E_A$ ) 以及电位差分接收信号  $D_n$  中伴随模式电信号的能量 ( $E_E$ )。在计算能量时，首先计算出声波信号首波到时，以该到时时为起点并选择适当的窗长对声声信号按式(1)进行积分，就得到了  $E_A$ ；然后将该窗内的  $W_n$  信号作为基准，利用求相关系数的方法找出  $D_n$  信号中与  $W_n$  信号相关性最高的波形区间，并对该窗内的声电信号按式(1)积分得到  $E_E$ ，式中  $t_1$  和  $t'_1$  分别为  $W_n$  信号和  $D_n$  信号的开窗起始时刻， $L$  为积分所开窗的窗长， $\Delta t$  为信号的时间采样间隔。

$$\begin{cases} E_A = \sum_{t_1}^{t_1+L} W(t)^2 \cdot \Delta t \\ E_E = \sum_{t'_1}^{t'_1+L} D(t)^2 \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

将实测数据 ( $W_1$  和  $D_1$ ) 按照式(1)进行处理得到  $E_E$

和  $E_A$ 。为了分析井中不同模式的声波信号与声电转换信号强度之间的关系，分别计算两个不同时间窗内的能量值：第一个窗口的起始值为  $t_1$ ，如图 6(a) 和 (b) 变密度图中红线所示，窗长  $L_1 = 0.5$  ms，在这个窗内的波形中主要包含滑行纵波和滑行横波成分；第二个窗口的起始值为  $t_1 + L_1$ ，窗长  $L_2 = 0.5$  ms，在这个窗内波形中主要为斯通利波部分，不同窗口内波形中信号能量的计算结果如图 5 中的 (d) 和 (e) 所示。为了使  $E_E$  和  $E_A$  能够较好地对比，图 5 中将  $E_E$  放大了固定的倍数，计算得到的具体能量数值仅表征相对大小规律。综合图 4 和图 6 可以看出：(1) 在整个测量井段均可以观察到声电转换信号；(2) 观察图 6(a) 和 (b)，在整个测量井段，声声信号的纵横波部分能量相对较弱，由此产生的声电转换信号能量也相对较弱，在部分能量较强的井段，两种能量值变化趋势吻合得很好；(3) 图 6(g) 为使用 STC 方法处理声声信号得到的测量井段首波速度，观察图 6(g)，在地层声波速度较低的地层，斯通利波幅度较强，其对应的伴随模式声电转换信号的能量也随之增强，观察图 6(c) 和 (d)，在整个测量井段，声声信号的斯通利波部分能量相对滑行纵波和滑行横波部分较强，而与声斯通利波所对应的声电转换伴随波信号也很强，在整个测量井段，两种信号能量值随地层深度的变化趋势吻合度很高；(4) 结合电阻率曲线

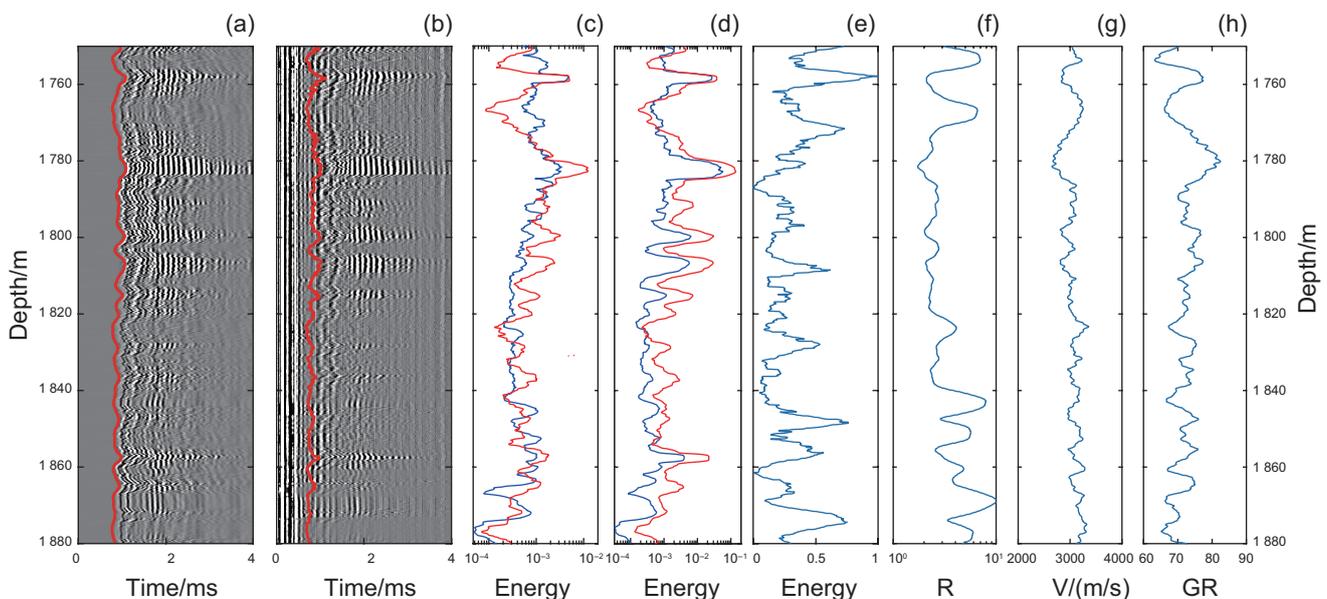


图 6 结果展示

(a)  $W_1$ ; (b)  $D_1$ ; (c) 滑行纵波和滑行横波能量 (d) 斯通利波能量; (e) 界面模式能量; (f) 电阻率; (g) 速度; (h) 自然伽马

Fig. 6 Results show

(a)  $W_1$ ; (b)  $D_1$ ; (c) Energy of gliding P/S wave; (d) Energy of Stoneley-wave; (e) Energy of interface mode; (f) Resistivity; (g) Velocity; (h) Gamma ray

(R)和自然伽马曲线(GR)可以看出, 伴随模式的能量与常规测井资料之间有一定的相关性。

这里, 我们单独分析界面模式的能量与地层性质之间的关系。由于滑行声波声扰动导致井壁纵向范围内的电位分布不均匀, 从而产生伴随模式声电转换信号, 所以伴随模式的能量受滑行声波能量的影响较强。界面模式产生于声波发射换能器附近的井壁, 由于与伴随模式的产生机理有所差异, 所以界面模式的能量更多地反映了地层的性质。结合两种模式的产生机理, 我们选择电位差发信号来计算伴随模式的能量, 而使用电位接收信号来计算界面模式的能量。图 6(e)为电位接收器  $V_4$  所接收到的电位信号中界面模式能量(窗口的起始值  $t=0$ , 窗长  $L=0.2$  ms), 结合伴随模式以及常规测井数据可以看出: 界面模式声电转换信号的能量随着地层性质的改变而改变, 在整个测量井段, 界面模式的能量值整体的变化规律与常规测井数据之间有着很高的相关性, 但是其变化的程度并不完全一致, 也就是说界面模式声电转换信号的能量可以作为新的条件引入地层渗透率评价中。

综上所述, 井孔中不同井孔模式波的声波信号都能够激发起其对应的伴随模式声电转换信号, 且声电转换信号的强弱与声波信号的强弱之间存在相关性, 同时, 界面模式的能量也与地层常规测井数据之间具有很高的相关性。这在一定程度上说明, 伴随模式和界面模式声电转换信号中包含有地层的信息, 因此结合声电信号和声发射一声接收信号有可能形成评价孔隙渗透性质的新方法。

## 2 结论

通过在胜利油田某砂泥岩油井的 AELT 下井实测, 在实际测井条件下观测到了声电转换信号。声电转换电信号由界面模式和伴随模式两部分组成。界面模式电信号在声源发出的声波能量传播到井壁时产生, 其到时几乎不会随源距和地层声波速度的变化而改变。而伴随模式波在井孔中不同模式声波在传播时产生、伴随模式的波形组成成分以及频率特征与声波发射一声接收信号的特征相似, 均可看做是由滑行纵波、滑行横波和斯通利波等井孔模式波组成。

通过对比不同类型的声发射一声接收信号能量及其对应的伴随模式声电转换信号能量, 发现伴随模式声电转换信号能量与声发射一声接收信号能量具有相关性, 特别地, 井孔声波斯通利波伴随的声电转换波信号的能量比井孔滑行纵波和滑行横波伴随的声电转换波信号的能量强得多。同时, 界面模式声电转换信号的能量与地层常规测井资料有很高的相关性。影响地层声电转换现象的因素主要有地层的电学参数、孔隙结构参数, 特别是岩石的渗透率, 目前得到的实验结果证明 AELT 可以检测到来自不同地层的声电转换信号, 且初步分析结果表明声电转换信号与地层性质之间存在一定联系, 因此研发声电测井仪器, 同步结合声波信号和电信号的相关特征, 有可能为裸眼井测井评价地层参数提供新的参考依据。

## 参考文献

- [1] IVANOV A E. Effect of electrization of earth kayers by elastic waves passing through them (in Russian)[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1939, 24: 42-45.
- [2] FRENKEL J. On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in a mosit soil[J]. Journal of Physics (Soivet), 1944, 8(4): 230-241.
- [3] MARTNER S T, SPARKS N R. The electroseismic effect[J]. Geophysics, 1959, 24(2): 297-308.
- [4] BRODING R A, BUCHANAN S D, HEARN D P. Field experiments on the electroseismic effect[J]. Geoscience Electronics, IEEE Transactions, 1963, 1(1): 23-31.
- [5] LONG L T, RIVERS W K. Field Measurement of the electroseismic response[J]. Geophysics, 1975, 40(2): 233-245.
- [6] MURTY Y S. First results on the direct detection of groundwater by seismoelectric effect - a field experiment[J]. Exploration Geophysics, 1985, 16(3): 254-255.
- [7] PARKHOMENKO E I, GASKAROV I V. Borehole and laboratory studies of the seismoelectric effect of the second kind in rocks[J]. Physics of the Solid Earth, 1971: 663-666.
- [8] THOMPSON A H, GIST G A. Geophysical applications of electrokinetic conversion[J]. The Leading Edge, 1993, 12: 1169-1173.
- [9] BEAMISH D. Characteristics of near surface electrokinetic coupling[J]. Geophysical Journal International, 1999, 137(1): 231-242.
- [10] GARAMBOIS S, DIETRICH M. Seismoelectric wave conversion in porous media: field measurements and transfer function analysis[J]. Geophysics, 2001, 66(5): 1417-1430.
- [11] KULESSA B, MURRAY T, RIPPIN D. Active seismoelectric exploration of glaciers[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7):

- L07503.
- [12] DUPUIS J C, BUTLER K E. Vertical seismoelectric profiling in a borehole penetrating glaciofluvial sediments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16301.
- [13] THOMPSON A H, HORNBOSTEL S, BURNS J, et al. Field tests of electroseismic hydrocarbon detection[J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): N1–N9.
- [14] PRIDE S R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustic of porous media[J]. *Physical Review B*, 1994, 50(21): 15678–15696.
- [15] BULTER K E, RUSSEL R D, KEPIC A W, et al. Measurement of the seismoelectric response from a shallow boundary[J]. *Geophysics*, 1996, 61(6): 1769–1778.
- [16] MIKHAILOV O V, HAARTSEN M W, TOKSÖ M N. Electrostatic investigation of the shallow subsurface: field measurements and numerical modeling[J]. *Geophysics*, 1997, 62(1): 97–105.
- [17] BEAMISH D. Characteristics of near-surface electrokinetic coupling[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 137(1): 231–242.
- [18] HAARTSEN M W. Coupled electromagnetic and acoustic wavefield modeling in poro-elastic media and its application in geophysical exploration[D]. Ph. D. Thesis, Massachusetts, MIT. 1995: 1–325.
- [19] ZHU Z Y, HAARTSEN M W, TOKSÖ M N. Experimental studies of electrokinetic conversions in fluid-saturated borehole models[J]. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1349–1356.
- [20] MIKHAILOV O V, QUEEN J, TOKSÖZ M N. Using borehole electroseismic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zones[J]. *Geophysics*, 2000, 65(1): 1098–1112.
- [21] ZHU Z Y, TOKSÖZ M N. Crosshole seismoelectric measurements in borehole models with fractures[J]. *Geophysics*, 2003, 68(5): 1519–1524.
- [22] WANG J, HU H S, GUAN W. The evaluation of rock permeability with streaming current measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(3): 1563–1573.
- [23] WANG J, HU H S, GUAN W. Experimental measurements of seismoelectric signals in borehole models[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(3): 1937–1945.
- [24] 胡恒山, 李长文, 王克协, 等. 声电效应测井模型实验研究[J]. *测井技术*, 2001, 25(2): 89–95. [HU H S, LI C W, WANG K X, et al. Experimental study on coupled acoustic and electromagnetic waves in model wells[J]. *Well Logging Technology*, 2001, 25(2): 89–95.]
- [25] TANG X M, CHENG C H, TOKSÖZ M N. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: a simplified biot-rosenbaum model[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 90(3): 1632–1646.
- [26] GUAN W, HU H S. Finite-difference modeling of the electroseismic logging in a fluid-saturated porous formation[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(11): 5633–5648.
- [27] GUAN W, HU H S, Zheng X B. Theoretical simulation of the multipole seismoelectric logging while drilling[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 201(1): 1239–1250.
- [28] GUAN W, JIN C, WANG J, et al. Theoretical study on the amplitude ratio of the seismoelectric field to the Stoneley wave and the formation tortuosity estimation from seismoelectric logs[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(3): 2277–2286.
- [29] 门百永, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 动电效应测井探测器电子系统设计[J]. *测井技术*, 2013, 37(4): 406–410. [MEN B Y, JU X D, QIAO W X, et al. Electronic system design for electrokinetic logging soude[J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(4): 406–410.]
- [30] 李丰波, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 新型动电测井仪复合式电极系分析和测试[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*. 2014, 38(4): 74–80. [LI F B, JU X D, QIAO W X, et al. Analysis and testing of a new electrokinetic logging tool composite electrode array[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(4): 74–80.]

## Field test of acoustoelectric logging signals and preliminary analysis

DUAN Wenxing, JU Xiaodong, LU Junqiang, MEN Baiyong, CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao

*State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** Acoustoelectric logging is an unconventional well-logging method based on the seismoelectric coupling effect in rocks. The acoustoelectric logging tool (AELT) developed by our team was tested in a well located at Eastern China. We received acoustic–acoustic and acoustic–electric synchronization signals via an acoustic and electric synchronous acquisition system. Theoretically expected accompany- and interface-mode acoustoelectric signals could be observed in the measured signals.

Preliminary results show that the waveform composition and frequency characteristic of accompany-mode acoustoelectric and acoustic-acoustic signals are similar. Over the entire measured well section, the energy values of acoustic P/S-waves and the accompany-mode acoustoelectric signals emitted by this wave are relatively weak, whereas the energy values of the acoustic Stoneley wave and the accompany-mode acoustoelectric signals emitted by this wave are relatively strong. A high correlation exists between the energy of the acoustic-acoustic and acoustoelectric signals in the entire measured well section. The arrival time of interface-mode acoustoelectric signals is not changed by the variation in offset and formation acoustic velocity. The energy of interface-mode is related to conventional well-logging data. Certain features of the seismoelectric transition effect are related to the permeability and porosity of a formation, and thus, AELT can potentially provide a new solution for estimating formation parameters.

**Keywords** acoustoelectric effect; measured underground; logging; permeability

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.003

(编辑 付娟娟)