

文章编号:1673-5005(2012)02-0097-08

## 斯通利波影响因素分析及渗透率反演

许孝凯<sup>1,2</sup>, 陈雪莲<sup>1,2</sup>, 范宜仁<sup>1,2</sup>, 李霞<sup>3</sup>, 刘美杰<sup>4</sup>, 胡海川<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛266580; 2. 中国石油大学CNPC测井重点实验室, 山东青岛266580; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京100083; 4. 胜利石油管理局测井公司, 山东东营257096)

**摘要:**基于孔隙介质声学理论,对斯通利波影响因素进行研究,系统分析各因素对斯通利波相速度和衰减的影响程度。在利用正演模型进行灵敏度分析后,提出并孔内流体声速标定的方法,并对不同井径条件下斯通利波传播的正演模型传递矩阵进行重新推导,得出以测井间隔长度为变量的传播矩阵。在此基础上,结合利用斯通利波振幅和相位计算渗透率的方法,通过模拟退火算法实现地层渗透率的反演。反演结果表明:渗透率基值越大,反演结果越可靠;用斯通利波反演的渗透率曲线与岩心和常规曲线反映的储层性质以及砂泥岩剖面吻合好,其结果能满足现场工程的应用。

**关键词:**声波测井; 渗透率; 灵敏度; 斯通利波; 模拟退火

中图分类号:TE 19 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.016

### Influence factors of Stoneley wave and permeability inversion of formation

XU Xiao-kai<sup>1,2</sup>, CHEN Xue-lian<sup>1,2</sup>, FAN Yi-ren<sup>1,2</sup>, LI Xia<sup>3</sup>, LIU Mei-jie<sup>4</sup>, HU Hai-chuan<sup>3</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNPC Key Laboratory for Well Logging in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

4. Shengli Well Logging Company, Dongying 257096, China)

**Abstract:** The influence factors of Stoneley wave were researched based on the theory of porous media acoustics. The effect of different factors on the phase velocity and attenuation of Stoneley wave was analysed systematically. After the sensitivity analysis using forward modeling, a method of borehole fluid calibration was proposed. Through a new derivation of the transfer matrix of Stoneley wave forward simulation under different borehole diameter conditions, the transfer matrix was established as a function of logging interval length. On this basis, combining with the permeability calculation methods through the amplitude and phase of Stoneley wave, the permeability of formation was calculated with the simulated annealing algorithm. It can be seen that the larger permeability, the more reliable the results. The results agree well with the core data, the conventional data and the mudstone profile, and can meet the requirements of field application.

**Key words:** acoustic log; permeability; sensitivity; Stoneley wave; simulated annealing

随着勘探开发的深入,地层渗透率的求取显得越来越重要和迫切。目前,各油田拥有丰富的声波资料,利用阵列声波中的斯通利波可估算出随地层深度连续变化的渗透率曲线,为进一步的产能预测

提供了方便。利用斯通利波反演渗透率,从20世纪80年代已经开始,Williams等<sup>[1]</sup>最早指明地层渗透率与测量得到的斯通利波波速和振幅存在相关性,王乃星等<sup>[2]</sup>对利用斯通利波衰减计算渗透率进行

收稿日期:2011-10-20

基金项目:国家青年自然科学基金项目(40804020);中国石油天然气集团公司项目(2008A-2704);国家科技重大专项课题(2008ZX05020-001);国家科技重大专项课题(2008ZX05007-02);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(10CX04007A)

作者简介:许孝凯(1985-),男(汉族),山东垦利人,博士研究生,主要从事声波岩石物理与声波测井研究。

了研究, Hornby<sup>[3]</sup>提出了利用斯通利波慢度求地层渗透率的方法, 伍先运等提出了斯通利波反演渗透率时的井径与泥质校正<sup>[4]</sup> 以及利用斯通利波衰减曲线反演渗透率的方法<sup>[5]</sup>, Tang 等<sup>[6]</sup>提出了利用斯通利波中心频率移动以及中心时间滞后来反演渗透率的方法, Brie 等<sup>[7]</sup>通过将泥饼考虑成弹性膜的方法利用斯通利波反演渗透率, 苏华<sup>[8]</sup>利用 Tang 的反演方法对实际地层情况进行了分析, 伍先运等<sup>[9]</sup>建立了径向分层模型, 用斯通利波衰减曲线进行了渗透率反演, 高坤等<sup>[10]</sup>和 杨雪冰<sup>[11]</sup>分别对 Tang 等提出的利用斯通利波中心频率移动以及中心时间滞后来反演渗透率的方法进行了实现。笔者在利用振幅和相位联合反演渗透率<sup>[12]</sup>的基础上, 针对现场中井孔流体声速对斯通利波影响较大且不好确定等难题, 提出利用非渗透层对井孔流体声速进行标定的方法。

### 1 斯通利波影响因素

#### 1.1 地层参数

利用 Biot 理论建立孔隙介质井孔声波模型<sup>[13-14]</sup>, 可以计算出相应的频散和衰减信息, 灵敏度可以用来观察某参数在不同频率下对模式波的相速度(或衰减系数)的影响程度。本文中用到的模式波相速度、衰减系数以及相速度和衰减系数对井孔和地层参数  $p$  的灵敏度定义如下<sup>[15-16]</sup>:

$$v(\omega) = \frac{\omega}{\text{Re}(\kappa(\omega))}, Q^{-1}(\omega) = 2 \frac{\text{Im}(\kappa(\omega))}{\text{Re}(\kappa(\omega))}, \quad (1)$$

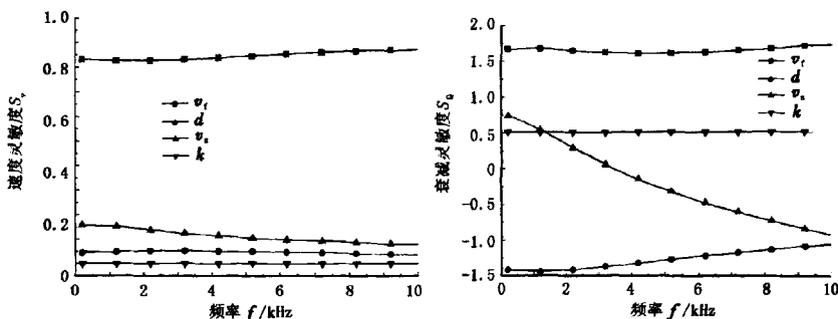


图1 硬地层斯通利波速度与衰减对不同参数的灵敏度

Fig.1 Sensitivity of Stoneley wave velocity and attenuation to different factors for hard formation

由图可见, 斯通利波相速度对井孔内流体声速的灵敏度最大, 对井径、地层横波速度以及渗透率灵敏度相对较小; 斯通利波的衰减对井孔内流体声速的灵敏度也最大, 对地层渗透率的灵敏度也较高, 且对频率的依赖性较低, 可见在较准确求得了井孔流体声速、井径以及地层横波速度的基础上, 利用斯通

$$S(p) = \left(\frac{p}{v}\right) \frac{\partial v}{\partial p}, S(Q^{-1}) = \left(\frac{p}{Q^{-1}}\right) \frac{\partial Q^{-1}}{\partial p}. \quad (2)$$

式中,  $v$  为相速度;  $Q^{-1}$  为衰减系数;  $S$  为灵敏度系数;  $\kappa$  为波数;  $\omega$  为圆频率;  $p$  代表井孔或地层的某参数值。对灵敏度定义式变形, 知

$$S(p) = \left(\frac{p}{v}\right) \frac{\partial v}{\partial p} = \frac{\partial v/v}{\partial p/p},$$

$$S(Q^{-1}) = \left(\frac{p}{Q^{-1}}\right) \frac{\partial Q^{-1}}{\partial p} = \frac{\partial Q^{-1}/Q^{-1}}{\partial p/p}.$$

相速度对地层参数  $p$  的灵敏度为地层参数  $p$  的单位变化引起的相速度的相对变化量, 而衰减系数对地层参数  $p$  的灵敏度为地层参数  $p$  的单位变化引起的衰减  $Q^{-1}$  的相对变化量。它描述了每个模型参数对应的应变能在总应变能中的比重。

相速度或者衰减系数的灵敏度大于 0 和小于 0 分别代表随着地层参数  $p$  的增大, 相速度和衰减系数增大和减小。

分析斯通利波相速度和衰减对各参数的灵敏度时用到的地层参数如下: 纵波速度 4.5 km/s, 横波速度 2.5 km/s, 孔隙度 10%, 岩石密度 2600 kg/m<sup>3</sup>, 渗透率 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 井眼半径 0.11 m, 仪器半径 0.049 275 m, 井孔流体声速 1.5 km/s, 井孔流体密度 1000 kg/m<sup>3</sup>, 井孔流体黏度 1 mPa·s, 骨架纵横波速度取为 5.0、3.0 km/s。图 1 为硬地层斯通利波相速度和衰减对井孔内流体声速  $v_r$ 、井径  $d$ 、地层横波速度  $v_s$  以及地层渗透率  $k$  的灵敏度曲线。

利波的衰减反演地层的渗透率效果更可靠。图 2 为不同渗透率基值下的斯通利波相速度和衰减对渗透率的灵敏度曲线。由图可见, 随着渗透率基值的增加, 斯通利波对渗透率灵敏度变大, 因此地层的渗透性越好, 越有利于斯通利波估算地层渗透率。

将纵横波速度、岩石密度替换为软地层参数, 分

别为 2.3 km/s、1.0 km/s 和 2300 kg/m<sup>3</sup>。软地层下斯通利波的相速度和衰减对并孔流体声速、并眼尺寸、地层横波速度以及渗透率的灵敏度曲线见图 3。软硬地层对比可见,随着地层变软,斯通利波的相速度和衰减对各参数的灵敏度绝对值均变大,且斯通利波的相速度和衰减对地层横波速度的灵敏度较硬地层显著增大,因此在软地层横波速度的准确性直接影响到斯通利波反演渗透率的结果。同时,斯通利波衰减对并孔内流体以及并径的灵敏度相对也较

大,在利用斯通利波反演渗透率时,需要将这些因素的影响消除。相对于硬地层而言,软地层斯通利波速度和衰减对渗透率的灵敏度相对变差。

图 4 为软地层下斯通利波速度与衰减对不同渗透率基值的灵敏度。随着渗透率的增大,斯通利波速度和衰减对渗透率灵敏度在低频段均有一定程度的增大,可知在渗透性越好的储层,反演的渗透率越可靠。

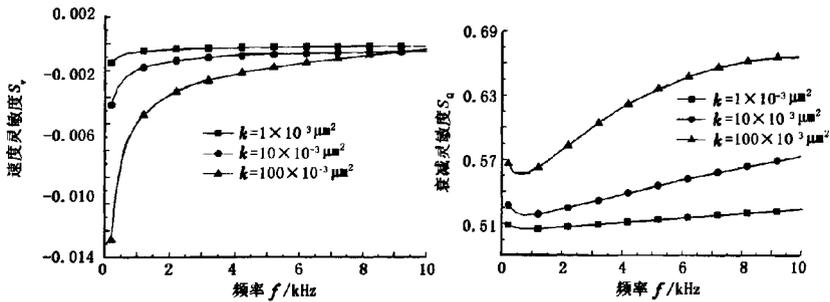


图 2 硬地层斯通利波速度与衰减对不同渗透率的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity of Stoneley wave velocity and attenuation to permeability for hard formation

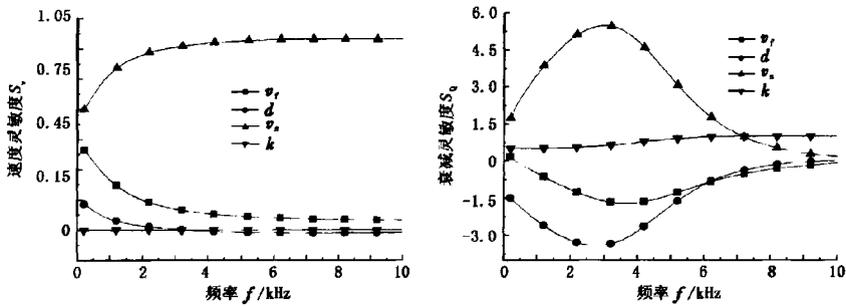


图 3 软地层斯通利波速度与衰减对不同参数的灵敏度

Fig. 3 Sensitivity of Stoneley wave velocity and attenuation to different factors for soft formation

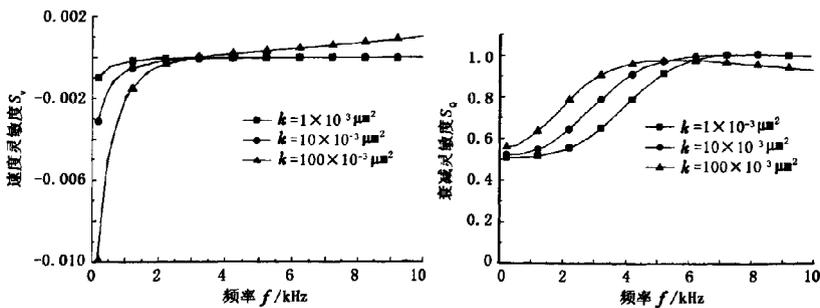


图 4 软地层斯通利波速度与衰减对不同渗透率的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity of Stoneley wave velocity and attenuation to permeability for soft formation

### 1.2 不同频率下渗透率与斯通利波相速度和衰减的关系

图5为不同地层孔隙度基值下的斯通利波衰减和相速度随渗透率的变化规律。由图可见,斯通利波在低频时随着渗透率的增大,相速度逐渐减小,近似

呈线性关系;衰减逐渐增大,近似呈指数关系。频率越低,衰减和相速度随频率以及渗透率变化越明显。因此,用较低频的斯通利波进行渗透率反演会取得更好的效果。斯通利波相速度和衰减随渗透率及频率变化曲线为斯通利波渗透率的刻度提供了依据。

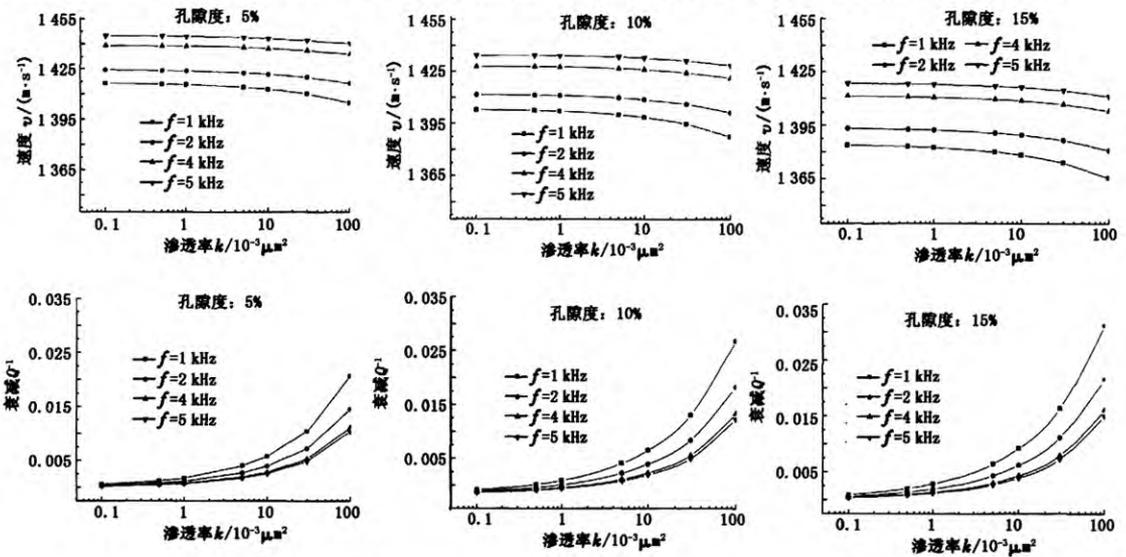


图5 斯通利波相速度和衰减随渗透率及频率的变化

Fig.5 Variations of Stoneley wave velocity and attenuation with frequency and permeability

## 2 利用斯通利波反演渗透率的步骤

### 2.1 波形处理

斯通利波是低频波,与纵横波以及伪瑞利波频段明显不同,因而可以用低频滤波器把斯通利波从全波列测井信息中提取出来。图6(a)显示了低频滤波后的斯通利波波形。

经过低通滤波后的波形既有直达斯通利波,又有反射斯通利波,因而需要对滤波后斯通利波进行波场分离,得到纯净的上行波、下行波与直达波,最终得到直达斯通利波信息用于渗透率反演。本文中采用唐晓明提出的波场分离方法<sup>[12]</sup>,结果如图6(b)、(c)和(d)所示。

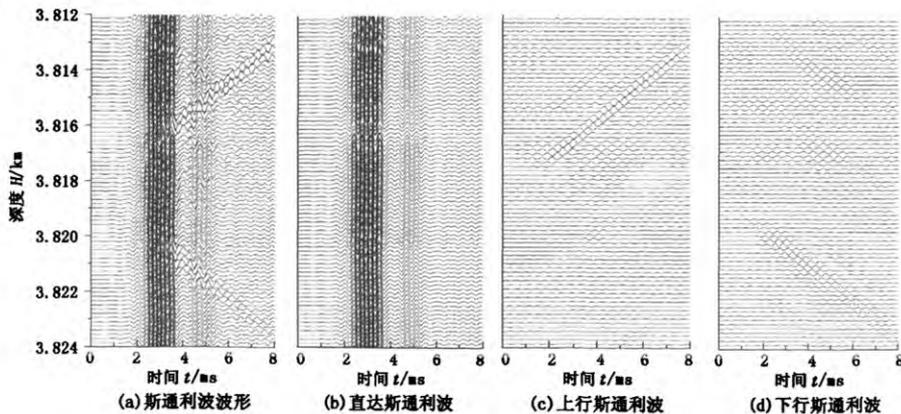


图6 低频滤波及波场分离效果

Fig.6 Effect of low frequency filtering and wave field separation

### 2.2 井孔流体标定

用慢度时间相关法提取的频散波慢度与其频散性质之间存在一种转换关系<sup>[12]</sup>。这种关系可以用下式(频谱加权平均慢度定理)来描述:

$$S_{ST}^* = \frac{\int_{\Omega} S_{ST}(\omega, v_f) \omega^2 A^2(\omega) d\omega}{\int_{\Omega} \omega^2 A^2(\omega) d\omega} \quad (3)$$

式中,  $S_{ST}^*$  为用非频散阵列波形处理方法(这里为慢度时间相关法)得到的斯通利波的慢度;  $S_{ST}(\omega, v_f)$  为井孔声波弹性理论计算的斯通利波慢度频散曲线;  $A(\omega)$  为斯通利波的振幅谱。方程中的积分是对  $A(\omega)$  涵盖的整个(低频)波谱区间  $\Omega$  进行的。

因而,可以寻找一非渗透层,通过理论模型慢度与慢度时间相关法提取慢度对比来标定井孔内流体声速。

### 2.3 合成直达斯通利波

用传播矩阵方法模拟斯通利波在上述离散化的地层和井径模型中的传播。模拟过程中,先把地层离散化,分成一系列薄层,薄层模型中有一个形状不规则的井,测井仪器位于井的中心。矩阵元素表达了穿过不同井径及地层的斯通利波在传播时所受的影响。用矢量  $\begin{pmatrix} b^+ \\ b^- \end{pmatrix}^T$  来表示上行“+”和下行“-”斯通利波的振幅系数。下面的方程给出了该系数矢量从井内一个深度  $z_1$  到另一个深度  $z_2$  的传播:

$$\begin{pmatrix} b^+ \\ b^- \end{pmatrix}_{z_2} = \left( \prod_{i=1}^L G_i \right) \begin{pmatrix} b^+ \\ b^- \end{pmatrix}_{z_1} \quad (4)$$

式中,  $L$  为  $z_1$  到  $z_2$  之间的层数。Tang 和 Tezuka 等<sup>[17]</sup>研究了这个问题并导出了第  $l$  层的传播矩阵的一般形式,本文中对其进行了重新推导,得出如下利用相邻两道间隔进行传递矩阵:

$$G_l = \begin{bmatrix} \frac{a_i \kappa_i + a_{i+1} \kappa_{i+1}}{2a_i \kappa_i} e^{+j\kappa_{i+1}(z_i - z_{i+1})} & \frac{a_i \kappa_i - a_{i+1} \kappa_{i+1}}{2a_i \kappa_i} e^{-j\kappa_{i+1}(z_i - z_{i+1})} \\ \frac{a_i \kappa_i - a_{i+1} \kappa_{i+1}}{2a_i \kappa_i} e^{+j\kappa_{i+1}(z_i - z_{i+1})} & \frac{a_i \kappa_i + a_{i+1} \kappa_{i+1}}{2a_i \kappa_i} e^{-j\kappa_{i+1}(z_i - z_{i+1})} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\kappa_i$  为第  $i$  层的轴向波数;  $a_i$  为第  $i$  层井孔截面积;  $z_i$  为第  $i$  层的深度。图 7 为实际测量斯通利波与合成直达斯通利波波波形。

### 2.4 斯通利波反演渗透率

#### 2.4.1 孔隙介质理论

根据简化 Biot-Rosenbaum 理论<sup>[12]</sup>,斯通利波波数表达式为

$$\kappa = \sqrt{\kappa_c^2 + \frac{2i\varphi_{pf}\omega\kappa(\omega)R\sqrt{-i\omega/D+\kappa_c^2}K_1(R\sqrt{-i\omega/D+\kappa_c^2})}{\eta(R^2-a^2)1+C^{(v_f/v_f)}}} \quad (6)$$

修正后的扩散率  $D$  及动态渗透率  $k(\omega)$  为

$$D = \frac{k(\omega)K_{pf}}{\varphi\eta} \left\{ 1 + \frac{K_{pf}}{\varphi(\lambda+2\mu)} \left[ 1 + \frac{4\alpha\mu/3 - K_d - \varphi(\lambda+2\mu)}{K_s} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$k(\omega) = \frac{k_0}{[1 - 4i\tau^2 k_0^2 \rho_{pf}\omega / (\eta\Lambda^2 \varphi^2)]^{1/2} - i\tau k_0 \rho_{pf}\omega / (\eta\varphi)}$$

其中

$$\lambda = (1-\varphi)\lambda_s, \quad \mu = (1-\varphi)\mu_s, \quad \alpha = 1 - K_d/K_s.$$

式中,  $\kappa_c$  为等效弹性地层中斯通利波的纵向波数;  $\rho_{pf}$  为孔隙流体密度;  $R$  为井眼半径;  $\eta$  为孔隙流体黏度;  $a$  为仪器半径;  $C = f_c R \frac{I_1(f_c R)}{I_0(f_c R)}$  为对软地层影响的校正;  $I_n (n=0, 1, \dots)$  为第一类变形贝塞尔函数;  $f_c = (\kappa_c^2 - \kappa_f^2)^{1/2}$  为相应的等效地层中斯通利波的径向波数;  $\kappa_f$  和  $v_f$  为井孔流体波数和速度;  $v_s$  为地层横波速度;  $K_{pf}$  为孔隙流体弹性模量;  $\varphi$  为孔隙度;  $K_s, \lambda_s, \mu_s$  分别表示固体骨架的体积模量和两个拉梅常数;  $K_d$  为干燥岩石弹性模量;  $\tau$  为结构因子;  $k_0$  为静态渗透率;  $\Lambda = (8\tau k_0/\varphi)^{1/2}$  为孔隙尺寸。

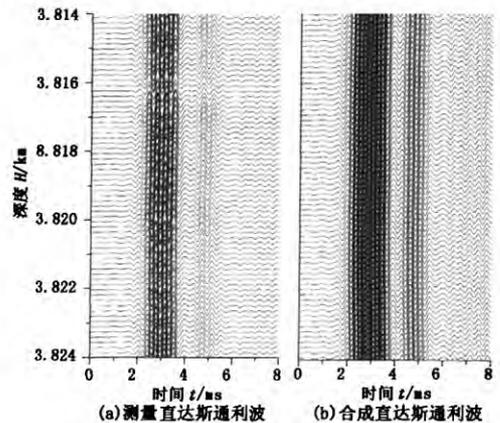


图 7 测量斯通利波直达波与合成直达斯通利波对比

Fig. 7 Comparison of measured and synthesized Stoneley waves

#### 2.4.2 反演目标函数的建立

渗透率对斯通利波传播有两个直接影响,一是波速的降低,二是波的衰减增大,分别表现为到时滞后与中心频率移动。因而,可以用斯通利波时滞和频移通过以上简化 Biot-Rosenbaum 理论计算渗透率。目标函数为

$$E(k_0, Q^{-1}) = (\Delta t_c^{mad} - \Delta t_c^{theo})^2 / \sigma_{syn}^2 + 2\pi\sigma_{syn}^2 (\Delta T_c^{mad} -$$

$$T_c^{theo})^2 + \alpha(\sigma_{syn}^2 - \sigma_{theo}^2). \quad (8)$$

其中,测量波形的时滞  $\Delta T_c^{msd}$  与频移  $\Delta f_c^{msd}$  为

$$\begin{cases} \Delta T_c^{msd} = T_c^{msd} - T_c^{syn}, \\ \Delta f_c^{msd} = f_c^{syn} - f_c^{msd}; \end{cases} \quad (9)$$

理论时滞  $\Delta T_c^{theo}$  与频移  $\Delta f_c^{theo}$  为

$$\begin{cases} \Delta T_c^{theo} = \int (kd/\omega - k_c d/\omega) [\omega W^{syn}(f)]^2 df \div \\ \int [\omega W^{syn}(f)]^2 df, \\ \Delta f_c^{theo} = f_c^{syn} - f_c^{theo}. \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $f$  为角频率;  $W^{syn}(f)$  为理论模拟完全弹性地层波谱。

对于理论合成完全弹性波谱  $W^{syn}(f)$  与实测波谱  $W^{msd}(f)$ , 其中心频率  $f_c^{syn}$ 、 $f_c^{msd}$  及其方差  $\sigma_{syn}^2$  由其对应的波谱  $W(f)$  计算:

$$\begin{cases} f_c = \int fW(f) df / \int W(f) df, \\ \sigma^2 = \int (f - f_c)^2 W(f) df / \int W(f) df. \end{cases} \quad (11)$$

包括渗透率影响的理论波谱  $W^{theo}(f)$ , 其中心频率及方差由其对应的波谱  $W^{theo}(f)$  计算:

$$\begin{cases} f_c^{theo} = \int P W^{syn}(f) |e^{ikd}| df / \int P W^{syn}(f) |e^{ikd}| df, \\ \sigma_{theo}^2 = \int (f - f_c^{theo})^2 P W^{syn}(f) |e^{ikd}| df / \int P W^{syn}(f) |e^{ikd}| df. \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P$  为渗透率造成的波谱振幅的损失,  $P = \kappa_e / \kappa$ ;  $d$  为波的传播距离;  $|e^{ikd}|$  是渗透率及内耗散造成的波沿传播路径上的振幅衰减。

对于实测波形  $W^{msd}(t)$  与合成完全弹性波形  $W^{syn}(t)$ , 波中心时间  $T_c^{msd}$  与  $T_c^{syn}$  由其对应波形  $W(t)$  计算, 公式如下:

$$T_c = \int t [W(t)]^2 dt / \int [W(t)]^2 dt. \quad (13)$$

### 2.4.3 反演算法

本文采用极快速模拟退火算法进行反演处理<sup>[18]</sup>。极快速模拟退火算法的新解产生及冷却进度表准则如下:

$$x_{k+1}^i = x_k^i + y^i (B_i - A_i), \quad (14)$$

$$y^i = \text{sgn}(u^i - 0.5) T_i [(1 + 1/T_i)^{|2u^i - 1|} - 1], \quad (15)$$

$$T_i(K) = T_0 e^{-cK^D}. \quad (16)$$

式中,  $u^i$  为 0 ~ 1 分布产生的随机数, 上标  $i$  代表第  $i$  个变量;  $A_i$  和  $B_i$  分别为变量  $i$  的下限和上限;  $K$  为当前迭代的次数;  $D$  为参数空间的维数;  $T_0$  为初始温

度;  $c$  为常数;  $\text{sgn}$  为符号函数;  $x$  为自变量;  $y$  为目标函数。可以看出极快速模拟退火的冷却进度是按指数下降的, 收敛速度较快, 而且其新解更换是一次全部更新, 参数全部更新后计算一次目标函数。

### 2.4.4 孔隙流体参数的标定

首先选定至少两个以上已知渗透率(可从岩心测量、MDT 测量和核磁共振中获得)的深度, 选取其中的一个深度用式(7)模拟其他深度上的声波理论地震图。对所有选定的深度重复这一过程, 即参考深度的选择和其他深度上理论地震图的计算, 然后将理论数据(即频移和时滞)和实测数据进行比较得到一目标函数, 可以通过对该函数求最小值的方法来估计  $\eta K_{pf}$ , 其中  $\eta$ 、 $K_{pf}$  分别为孔隙流体黏度和弹性模量。求极小值的目标函数为

$$F(\eta K_{pf}) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i \neq j)}}^n \{ (\Delta f_c^{msd} - \Delta f_c^{theo})^2 / \sigma_{syn}^2 + 2\pi\sigma_{syn}^2 (\Delta T_c^{msd} - \Delta T_c^{theo})^2 \}. \quad (17)$$

式中,  $n$  为所选择的全部深度的数目;  $i$  是参考深度,  $j$  是与  $i$  进行比较的深度 ( $j = 1, \dots, n; i \neq j$ )。在求极小值的过程中, 标定深度上给定的渗透率作为以上参数组合中的一个已知参数。只有  $\eta K_{pf}$  未知, 需要进行确定。

## 3 反演实例

X1 井斯通利波反演的渗透率结果及其与岩心结果的比较见图 8。可见, 第 6 道的反演斯通利波渗透率与岩心渗透率符合较好, 且与砂泥岩剖面吻合较好。该井 2 号段孔隙性较好, 多为 10% ~ 20%, 孔径无较大突变, 第 1 道自然伽马值有一定程度的减小, 自然电位负异常(淡水钻井液), 第 4 道电阻率曲线为 12 ~ 14  $\Omega \cdot m$  的高值, 均显示本段有较好的渗透性。综合地层解释孔隙度数据(第 3 道)可知, 反演结果较好。从第 7 道岩性剖面可见, 1 号层为薄互层, 第 9 道显示了该层反射现象明显, 反演过程中需要进行波场分离, 反演渗透率与伽马曲线及岩性也有较好的一致性。

X2 井斯通利波反演的渗透率结果见图 9。可见, 第 5 道的斯通利波渗透率与解释渗透率一致性较好。该段中大部分层段孔隙度为 10% ~ 20%, 孔径没有较大突变。渗透率大的层段, 自然伽马较低, 为 60 API 左右, 自然电位曲线正异常(盐水钻井液), 电阻率多为低值(4  $\Omega \cdot m$  左右), 渗透率与常规曲线反映的储层性质也有较好的对应关系。

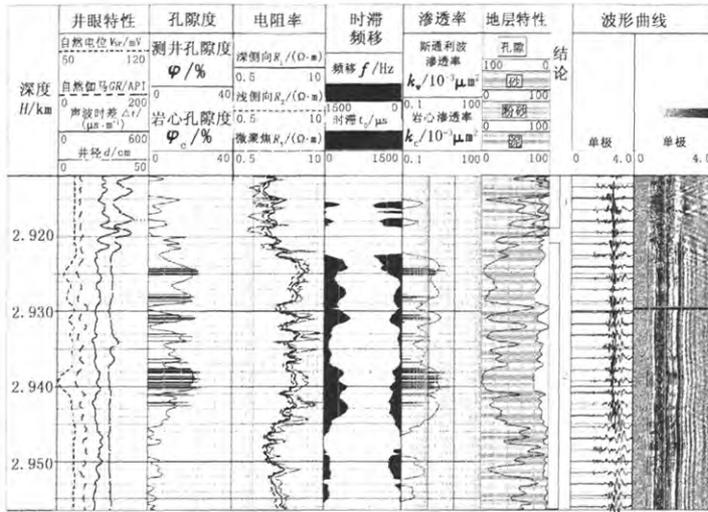


图8 X1井斯通利波反演渗透率与岩心渗透率对比图

Fig. 8 Comparison diagram of permeability derived from Stoneley waves and from cores for well X1

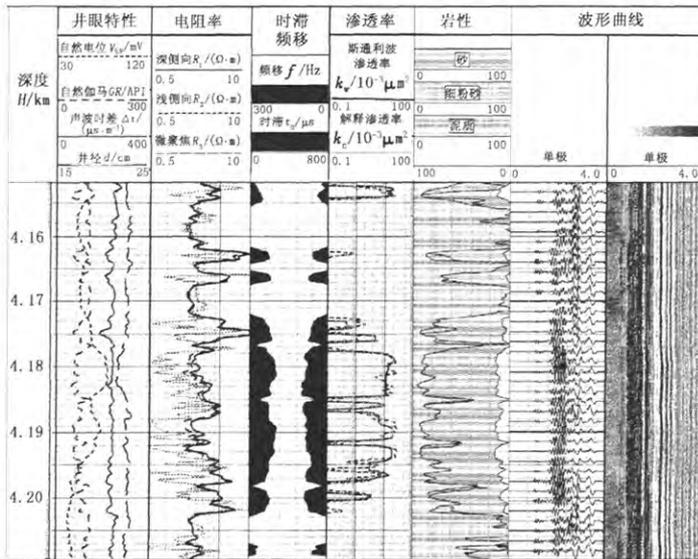


图9 X2井斯通利波反演渗透率与岩心渗透率对比

Fig. 9 Comparison diagram of permeability derived from Stoneley waves and from cores for well X2

### 4 结论

(1) 斯通利波的衰减和相速度均对地层的渗透率敏感, 衰减比相速度对渗透率的灵敏度大。软地层斯通利波的相速度和衰减对地层横波速度的灵敏度较硬地层显著增大, 因此软地层横波速度的准确性直接影响到斯通利波反演渗透率的结果。井孔内流体声速对斯通利波声速以及衰减影响较大, 通过井孔内流体声速标定, 可以减弱井孔内流体声速的影响。

(2) 渗透率基值越大, 斯通利波的相速度和衰

减对渗透率的灵敏度越大, 地层渗透性越好, 反演结果越准确。在低孔低渗储层, 因为声源深度段选取等因素影响, 时滞频移会偏大, 通过标定, 可以纠正影响, 能满足现场工程的应用。

(3) 斯通利波相速度和衰减与渗透率的关系曲线为渗透率刻度提供了理论基础。

(4) 斯通利波反演的渗透率曲线与岩心和常规曲线反映的储层性质以及砂泥岩剖面吻合较好。

致谢 感谢中石油勘探院周灿灿所长、中国石油大学唐晓明教授、ExxonMobil 伍先运研究员提供

的支持和宝贵意见。

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS D M, ZEMANEK J, ANGONA F A, et al. The long spaced acoustic logging tool [C/CD]. SPWLA. SPWLA 25th Annual Logging Symposium, New Orleans, USA, Paper T, June 1984.
- [2] 王乃星, 杜斌, 杜刚. 根据斯通利波衰减计算地层渗透率的研究[J]. 测井技术, 1987, 11(4): 26-33.  
WANG Nai-xing, DU Bin, DU Gang. The research of calculating formation permeability using attenuation of stoneley wave [J]. Well Logging Technology, 1987, 11(4): 26-33.
- [3] HORNBY. Method for determining formation permeability by comparing measured tube waves with formation and borehole parameters. Compiler; US, 4797859 [P/OL]. 1989-01-10 [1989-01-10]. <http://www.patentgenius.com/patent/4797859.html>.
- [4] 伍先运, 郭立, 王克协. 井径变化及泥质含量对斯通利波反演渗透率的影响校正[C]//中国地球物理学会. 1995年中国地球物理学会第十一届学术年会论文集. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [5] WU Xian-yun, WANG Ke-xie. Estimation of permeability from attenuation of the Stoneley wave in a borehole [J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 1996, 15: 174-177 [2010-12-12]. <http://library.seg.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=SEGEAB000015000001000174000001&idtype=cvips&gifs=yes>.
- [6] TANG Xiao-ming, GELINSKY S, CHUNDURU R K, et al. Method for estimating permeability of earth formations by processing Stoneley waves from an acoustic wellbore logging instrument. Compiler; US, 5784333 [P/OL]. 1998-06-21 [1998-06-21]. <http://www.patentstorm.us/patents/5784333.html>.
- [7] BRIE A, ENDO T, JOHNSON D L, et al. Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves [J]. SPE Reservoir Eval Eng, 2000, 3(2): 109-117.
- [8] 苏华, 田洪. 利用斯通利波估算地层渗透率[J]. 测井技术, 2002, 26(4): 298-301.  
SU Hua, TIAN Hong. Estimation of formation permeability using Stoneley wave [J]. Well Logging Technology, 2002, 26(4): 298-301.
- [9] WU Xian-yun, YIN He-zhu. Method for determining reservoir permeability form borehole stoneley wave attenuation using Biot's poroelastic theory. Compiler; US, 7830744 [P/OL]. 2010-11-09 [2010-11-09]. <http://www.freepatentsonline.com/y2009/0145600.html>.
- [10] 高坤, 陶果, 王兵. 利用斯通利波计算地层渗透率的方法及应用[J]. 测井技术, 2005, 29(6): 507-510.
- [11] 杨雪冰. 斯通利波反演储层渗透率的方法研究[D]. 杭州: 浙江大学理学院, 2008.  
YANG Xue-bing. Research on inversion method to reservoir permeability by Stoneley wave [D]. Hangzhou: College of Science, Zhejiang University, 2008.
- [12] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [13] 陈雪莲, 邓少贵, 苏远大. 用 Biot 地层孔隙介质模型进行井中多极声场储层参数灵敏度分析[J]. 测井技术, 2007, 31(6): 519-523.  
CHEN Xue-lian, DENG Shao-gui, SU Yuan-da. Sensitivity analysis of multipole acoustic field to reservoir parameter with Biot theoretical model [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(6): 519-523.
- [14] 陈雪莲, 王瑞甲. 多极子声波测井在低孔低渗气层中的数值研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1836-1840.  
CHEN Xue-lian, WANG Rui-jia. Numerical study on a-coustic multipole logging in the gas-bearing reservoir with low porosity and permeability [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1836-1840.
- [15] PAILLET F L, CHENG C H. Acoustic waves in boreholes [M]. Florida: CRC Press, 1991.
- [16] 陈雪莲, 王瑞甲. 径向分层 TI 孔隙介质井孔中激发的模式波的数值研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1270-1277.  
CHEN Xue-lian, WANG Rui-jia. A numerical study on the mode waves excited by multipole sources in the fluid-filled borehole in radially layered transversely isotropic porous medium [J]. Chinese J Geophys (in Chinese) 2008, 51(4): 1270-1277.
- [17] TEZUKA K, CHENG C H, TANG X M. Modeling of low frequency Stoneley wave propagation in an irregular borehole [J/OL]. SEG Expanded Abstracts, 1994, 13: 24-27 [2010-12-01]. <http://library.seg.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=SEGEAB000013000001000024000001&idtype=cvips&gifs=yes>.
- [18] 王才志, 石广仁, 张丽君. 基于极快速模拟退火算法的地层横波各向异性反演[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 71-76.  
WANG Cai-zhi, SHI Guang-ren, ZHANG Li-jun. Computing method of shear wave anisotropy of formation based on very fast simulated reannealing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 71-76.

(修荣荣)