

◇ 研究报告 ◇

基于斯通利波的反射源定位及裂缝宽度反演*

谈笑宇¹ 李盛清^{1,2†} 苏远大^{1,2} 唐晓明^{1,2}

(1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 青岛 266580)

(2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室 青岛 266071)

摘要: 裂缝的渗流能力影响井的产能,因此裂缝识别和描述成为油藏管理的重要方面。在声波测井中,低频反射斯通利波通常可为过井眼裂缝的定位和评价提供技术依据。为便捷有效地反演裂缝宽度,该文采用反射堆叠法对实际数据进行了反射源定位和反射系数计算,采用一维等效波数法研究了过井裂缝的理论反射系数,随后提出了基于反射斯通利波的裂缝识别和裂缝宽度反演方法,并将其用于现场实际资料。数值模拟结果表明,渗透性裂缝的反射系数随频率的增大呈下降趋势。反演结果表明,斯通利波反演裂缝宽度与电成像裂缝宽度在变化趋势上有很好的 consistency,验证了斯通利波反演方法的有效性,为无电成像资料井段的裂缝参数提取提供了新方法。

关键词: 裂缝评价;反射斯通利波;反射源定位;反射系数;裂缝宽度反演

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2024)06-1313-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.014

Reflection source positioning and fracture width inversion based on Stoneley wave

TAN Xiaoyu¹ LI Shengqing^{1,2} SU Yuanda^{1,2} TANG Xiaoming^{1,2}

(1 School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

(2 China Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The hydraulic conductivity of fractures crossing the well strongly affects well productivity, making fracture identification and description an important aspect of reservoir management. In acoustic logging, low frequency reflected Stoneley waves can provide technical support for the positioning and evaluation of the fracture crossing the well. In order to retrieve the fracture width conveniently and effectively, the reflection source position and reflection coefficient of the actual data are calculated by the reflection stacking method, and the theoretical reflection coefficient of the fracture is studied by the 1D effective wavenumber method. Then, the method of fracture identification and fracture width inversion based on the reflected Stoneleys wave is proposed, and it is applied to the actual data in the field. The numerical simulation results show that the reflection coefficient of permeability fracture decreases with the increase of frequency. The inversion results show that there is a good agreement between Stoneley wave inversion and electrical imaging fracture width

2023-06-18 收稿; 2023-08-18 定稿

*国家自然科学基金项目(42174145, 42074137), 国家重点研发计划项目(2019YFC0605504), 山东省自然科学基金项目(ZR201911120382), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX06077A)

作者简介: 谈笑宇(1998-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向: 声波测井方法。

†通信作者 E-mail: shidalishengqing@yeah.net

in the variation trend, which verifies the validity of the Stoneley wave inversion method, and provides a new method for extracting fracture parameters of well section without electrical imaging data.

Keywords: Fracture evaluation; Reflected Stoneley waves; Reflection source positioning; Reflection coefficient; Fracture width inversion

0 引言

斯通利波是一种沿充液井孔传播的基本模式波,频率低幅度大,对过井裂缝很敏感。斯通利波在地层裂缝处会产生反射和透射,声波变密度图上显示为“人”形条纹,在井径稳定的情况下,斯通利波反射系数能够很好地反映裂缝发育程度。

反射斯通利波的幅度相对直达斯通利波的幅度小很多,因此在做后续研究之前需将反射波从原始波列中分离出来。波场分离的方法较多,包括Radon变换、线性预测法、f-k滤波、中值滤波等。其中Radon变换包含多种形式,如线性Radon变换、双曲Radon变换和抛物Radon变换等。1984年, Carswell等^[1]利用基于时间-深度域和 τ - p 域的Radon变换从地震资料中分离出上行和下行的反射波。1995年, Sacchi等^[2]提出了一种重建共中心点数据的高分辨率程序,解决了传统Radon变换变换域能量收敛不明显的缺点,提高了波场分离的精度。经过国内外专家的大量研究, Radon变换已经发展为一项成熟的波场分离技术。1997年, Tang^[3]提出了线性预测法并成功分离出上行和下行的反射斯通利波。线性预测法也称之为参数估计法,该方法通过最小二乘法估算出直达波频谱,再从原始阵列频谱中减去该直达波频谱,即可得到反射波频谱^[4-5]。2008年, Hirabayashi等^[6]在线性预测法的基础上将波传播的几何扩散影响考虑进来,通过现场实际数据的应用验证了该方法的有效性。1982年, Ryu^[7]将f-k滤波应用于共深度点地震数据并成功分离出反射波。2000年, 刘继生等^[8]对理论全波波形的f-k域进行了分析,为f-k滤波法在阵列声波波场分离中的应用提供了理论基础。2011年, 王兵等^[9]用f-k滤波对模拟数据进行了波场分离,但是由于f-k滤波法在滤波器边界设计上较为困难,导致残余较强的直达波信号。

斯通利波反射系数是研究裂缝的重要参数,国内外学者对此做了大量理论与实际数据处理方面的研究。在理论反射系数方面, 1989年, Hornby

等^[10]模拟了过井眼无限延伸的水平裂缝和倾斜裂缝的反射系数。1993年, Tang等^[11]用一维等效波数法来描述斯通利波在裂缝处的透射反射,其结果与Hornby模拟结果有较好的一致性。一维等效波数法能很方便地计算各地层反射系数,但该方法只考虑了刚性地层,且只能模拟无限延伸裂缝的透射反射。1998年, Kostek等^[12-13]将反射系数解析解的研究推广到弹性地层模型中,并用有限差分验证了结果的正确性。2022年, 夏飞月等^[14]在Tang理论^[11]的基础上用有限差分法研究了不同径向延伸、渗透率、孔隙度的复杂地层对斯通利波传播的影响,弥补了一维等效波数法的不足。

在实际数据处理方面, 1989年, Hornby等^[10]提出了一种反射系数计算方法,受到其他深度点反射波的干扰,该方法计算的反射系数峰值与实际反射源位置有偏差。后许多学者如Banerjee等^[15]、黄文新等^[16]、余春昊等^[17]、杨帆等^[18]均采用Hornby的方法计算反射系数。

本文利用线性预测法对原始波形进行了波场分离,用分离后的波场进行了反射源定位并提出了反射系数计算新方法,修正了传统计算方法的偏差,最后结合一维等效波数法计算的理论反射系数进行裂缝宽度反演,并与电成像裂缝进行对比,验证了斯通利波反演结果的可靠性。

1 反射斯通利波的提取方法

1.1 数据预处理

低频段的斯通利波反射主要来自渗流性裂缝,基本可以忽略裂缝张开度增大或小井眼增大的影响^[12-13]。因此在渗透性裂缝探测中,必须激发低频声波,理想情况下应低于500 Hz。实际测井中受测量仪器性能的限制,一般选择0.2~3 kHz的斯通利波用于后续处理。另外,较大的井眼变化和冲洗带体积会影响斯通利波响应,因此有必要用井径来进行数据质量控制。

图1(a)为单一深度处8个接收器的单极波列,最小源距为3.6576 m,接收器间隔为0.1524 m,波

列中包含了纵波(P)、横波(S)和斯通利波(ST)。图1(b)为第一个接收器接收波形的频谱,对原始波形进行0.2~3 kHz带通滤波,滤除滑行纵波、滑行横波和噪声,留下斯通利波,如图1(c)所示。

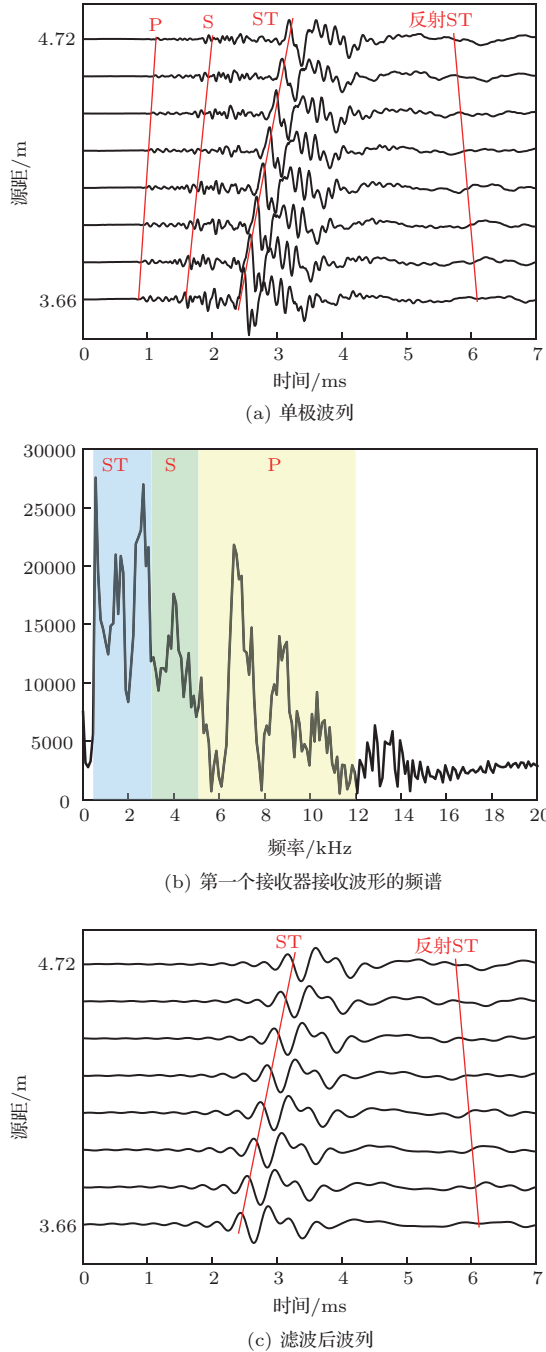


图1 波形预处理

Fig. 1 Waveform preprocessing

1.2 波场分离

波场分离方法有很多,如线性预测法、中值滤波和Radon变换等。本文采用线性预测法对直达波和下行反射波进行分离。

基于线性预测的波场分离方法由Tang^[3]在1997年提出,其基本思路为:利用实际数据提取的井筒直达波速度,用最小二乘法估算出各接收器上的直达波波形,再从各接收器实测波形中减去对应预测的直达波幅度,即可得到反射波波形。

在阵列声波数据中,假设各振型频谱可表示为 $A_r(\omega)$ ($r = 1, \dots, p$), ω 为角频率, p 为振型数。令 $E_r = \exp(-i\omega d S_r)$, d 为接收器间距。若各振型慢度 S_r 已知,则可通过式(1)估算出各振型频谱:

$$A = (\tilde{E}E)^{-1} \tilde{E}W, \quad (1)$$

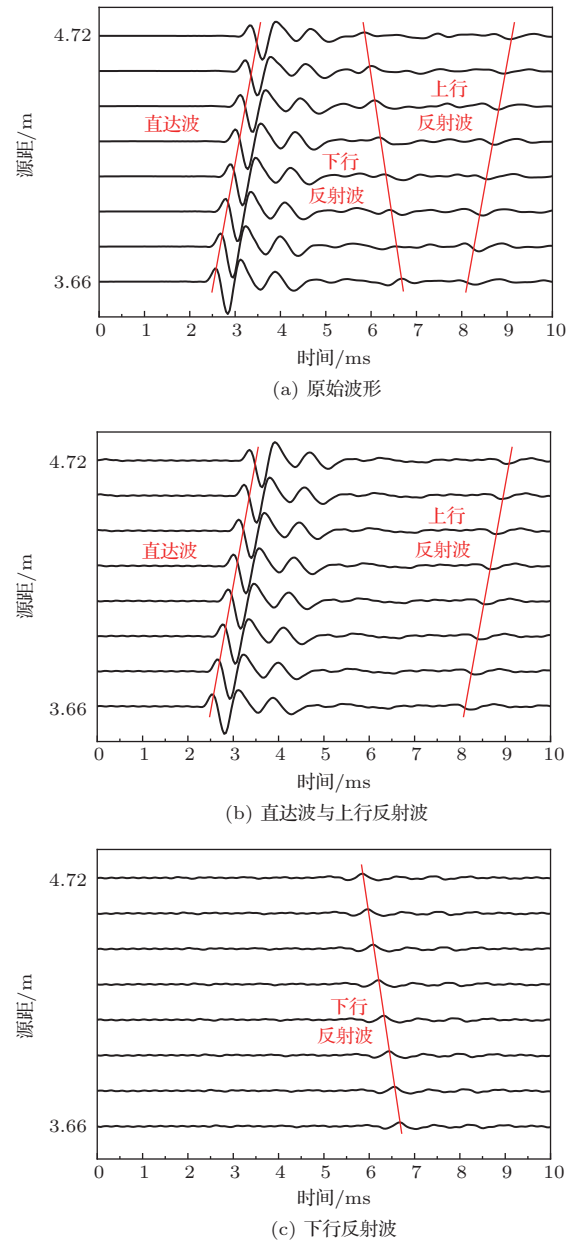


图2 波场分离

Fig. 2 Waveform separation

其中, $\mathbf{W}$ 为实际接收的阵列数据频谱, $\tilde{\mathbf{E}}$ 表示 $\mathbf{E}$ 的复共轭。将计算得到的 p 个振型的频谱 $A_r(\omega)$ ($r = 1, \dots, p$) 做傅里叶逆变换, 即可得到各振型的波列。各振型频谱之和即为直达波频谱, 将实际数据频谱减去直达波频谱即得到反射波频谱,

$$R(\omega) = W(\omega) - \sum_{r=1}^p A_r(\omega). \quad (2)$$

图2为接收器阵列(Common source gather, 简称CSG组合)的波场分离图, 图2(a)为原始波形, 包含了直达波、上行反射波和下行反射波, 图2(b)为分离后的上行波, 包含了直达波和上行反射波, 图2(c)为下行反射波。

由于上行反射斯通利波和直达波的慢度相同, 对CSG组合进行波场分离后两者仍未分离, 因此需

要对图2(b)的波形进行第二步分离。

将第一次分离后接收器阵列中央的波列(即各深度点的图2(b)、图2(c)第4道接收器的波形)按测井深度排列分别组合成两个独立的共源距或共接收器组合阵列(Common (Receiver) offset gather, 简称COG组合, 即各深度点同一接收器的波形数据): (1) 上行COG组合, 包括直达波和上行反射波; (2) 下行COG组合, 包括下行反射波。在上行COG组合中, 直达波的慢度为零, 上行反射波的慢度为CSG组合中上行波慢度的两倍, 即“2s”, 对上行COG组合进行波场分离, 即可得到直达波与上行反射波, 如图3(a)、图3(b)所示。下行COG组合中只有下行反射波, 无需再次分离, 如图3(c)所示。

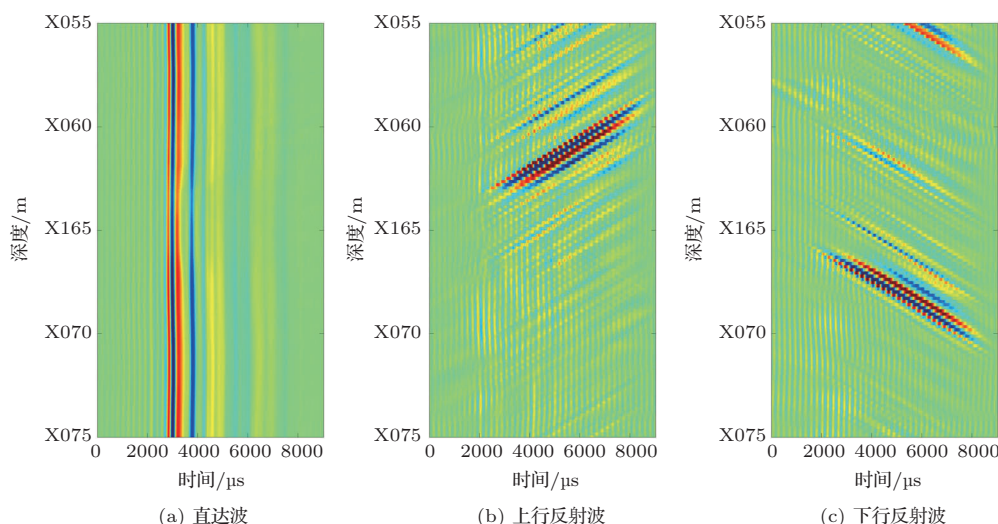


图3 井段波场分离图

Fig. 3 Wave separation of well interval

2 反射源定位及反射系数计算方法研究

2.1 反射源定位方法

在共源距(COG)组合中, 可以通过找出直达波与下行反射波的交点来确定裂缝位置, 实现反射源定位。声波测井中一般有下发上收(发射器在下, 接收器在上)和上发下收(发射器在上, 接收器在下)两种测量模式。对于下发上收模式, 当接收器位于裂缝位置时(如图4(a)位置③所示), 直达波与下行反射波同时到达接收器, 此时下行反射波与直达波交点处即为裂缝位置; 而当发射器位于裂缝位置时(如图4(a)位置②所示), 直达波与上行反射波同时

到达接收器, 此时上行反射波与直达波交点位于裂缝位置之上一倍源距处。上发下收模式则正好相反(如图4(b)所示)。因此, 对于下发上收的测量模式, 采用下行反射波来定位反射源位置(图4(a)位置③), 而上发下收模式则采用上行反射波来定位反射源位置(图4(b)位置③)。

实现反射源定位的方法有两种, 这两种方法都用到了直达斯通利波到时 TT_{ST} 。第一种方法是: 先设定一正阈值, 将低于此阈值的 TT_{ST} 处的下行反射波幅度归零, 再计算 TT_{ST} 处下行反射波幅度的平方, 并绘制成关于深度的函数, 如图5第4道所示, 本文称该方法为幅度平方法。

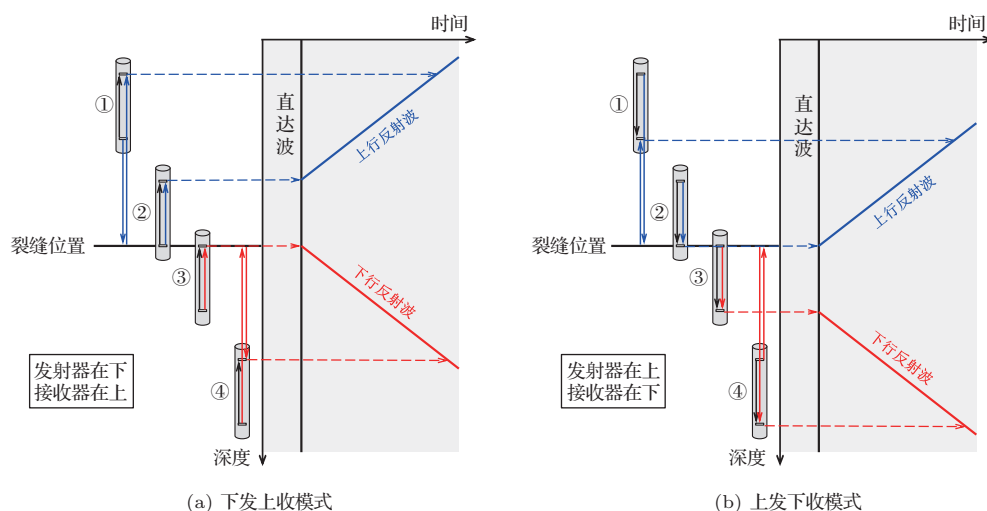


图4 不同测量方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of different measurement modes

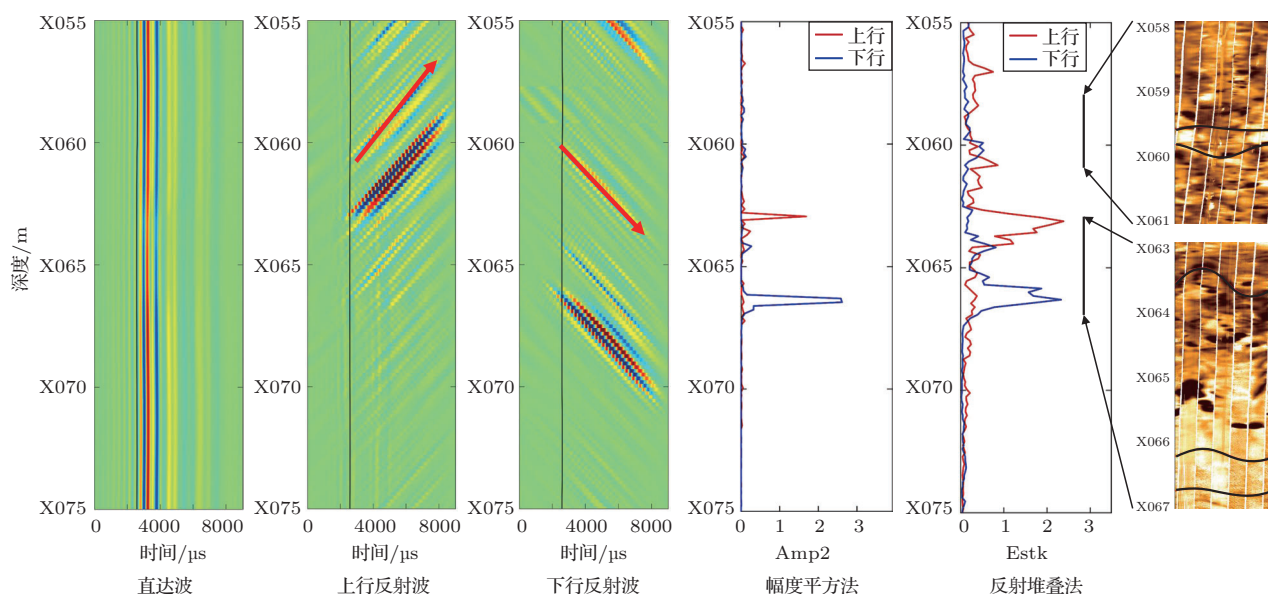


图5 不同反射源定位方法的比较

Fig. 5 Comparison of different methods for locating reflection sources

第二种方法是將反射波波形能量傾斜疊加成關於深度的函數來確定反射源的深度位置。如圖5第2道和第3道所示，左側黑色豎條線為直达波到時曲線 TT_{ST} ，將各深度到時點作為能量堆疊的起始時間點，沿著圖中斜線箭頭所指方向計算波形幅度之和。此斜線斜率由地層斯通利波慢度確定，在此慢度上下一定範圍內重複計算波形能量堆疊，取最大值作為目標深度點的最終能量堆疊值。繪製成關於深度的函數，如圖5第5道所示，本文稱該方法為能量堆疊法。

從圖5中第4和第5道可以看出，由上行波計算的反射源位置在由下行波計算的反射源位置之上約3.51 m，即相差了一個源距的距離。本文數據測量方式採用的均為下發上收模式，因此以下行反射波數據為準。從圖5中可以看出，幅度平方相較能量堆疊法有更高的分辨率，但是它受到直达波的影響，反射斯通利波在直达波到時處可能被直达波掩蓋，波場分離後幅度較弱，圖5第3道中X060~X064 m段有明显的反射波，這一段的反射都來自約X060 m處的反射源，但是在X060 m直

达波到时处的反射波幅度很小,因此用幅度平方方法计算的反射源位置图上没有明显的反射源,而能量堆叠法虽然在分辨率上没有幅度平方方法高,但是在 X060 m 处有一个明显的峰值,不会因为反射波幅度的影响而识别不出反射源。图 5 最右侧给出了 X058~X061 m 和 X063~X067 m 处的电成像结果,可以看到 X060 m、X063.5 m、X066.2 m 和 X066.8 m 处存在明显的高导缝,与反射源识别结果一致,验证了斯通利波定位反射源的有效性。

2.2 现场数据的斯通利波反射系数计算

2.2.1 传统计算方法

将波场分离后的波形进行傅里叶变换,得到直达波频谱 $D(\omega)$ 和下行反射波频谱 $R(\omega)$,则斯通利波反射系数频谱计算公式如下^[10]:

$$r(\omega) = \frac{R(\omega)}{D(\omega)}, \quad (3)$$

为了避免 $D(\omega)$ 趋近于 0 时 $r(\omega)$ 产生假峰,可将公式 (3) 修正如下^[10,19]:

$$r(\omega) = \frac{R(\omega)D^*(\omega)}{\max[D(\omega)D^*(\omega), cK]}, \quad (4)$$

式 (4) 中, $D^*(\omega)$ 为 $D(\omega)$ 的共轭频谱, K 为 $D(\omega)D^*(\omega)$ 的峰值,系数 c 一般取 .01。

2.2.2 反射堆叠法

反射系数的传统计算方法是将每个深度点的反射波频谱直接与直达波频谱相除,忽略了来自其他深度的反射波对该深度的干扰,因此利用此方法计算的反射系数峰值与实际反射源的位置有偏差。下面介绍一种新方法,根据 2.1 节定位的反射源位置来计算反射系数,可使反射系数峰值与反射源有很好的对应性,本文称之为反射堆叠法。

反射系数是反射波幅度与直达波幅度的比值。从反射源定位过程中可看出,下行反射波中,某反射源的反射波形存在于该反射源深度以下一组连续的深度中,本文称之为反射堆叠深度,例如图 6 中, X064 m 深度处反射源的反射波形存在于 X064~X068 m 之间,如图 6 中红框所示。因此在计算某深度的反射系数时,需要用到该深度点之下一组连续深度的波形数据。

在一深度段内通常会存在多个反射源,邻近反射源产生的反射波会干扰目标反射源的反射系数计算。如图 6 所示,蓝框处的反射波形来自

X060~X064 m 处的反射源,而此反射波同时也处于用于计算 X064 m 处反射系数的深度段内,影响了 X064 m 处反射系数的计算。因此,在进行反射系数计算之前,需先消除干扰波形。第一种消除干扰波形的方法为:在目标反射源深度和上方邻近反射源深度之间选择一波形作为模板波形,假设反射堆叠深度处的干扰波形为模板波形的时移和幅度缩放,通过深度-深度互相关法可以确定模板波形到目标波形的时移和幅度缩放比例。从目标波形中减去时移和缩放后的模板波形,即可消除干扰波形。另一种消除干扰波形的方法是开窗法。以反射波峰值为中心开一锥形窗口(例如 Tukey 窗),并将此窗口与反射堆叠深度内的各波形相乘,即可消除干扰波形。各深度锥形窗口位置由直达波到时和定位反射源时所用的斯通利波慢度共同决定。

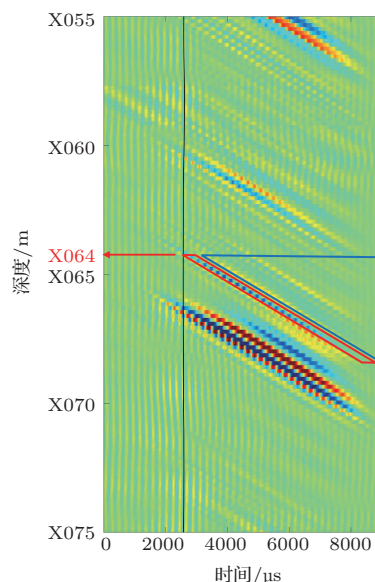


图 6 下行反射波

Fig. 6 Downgoing reflection

干扰波形消除后,将直达波和下行反射波进行傅里叶变换,并用式 (5) 计算各深度随频率变化的反射系数:

$$R_D(d_p, \omega) = \frac{1}{N_S} \sum_{n=1}^{N_S} \left| \frac{w_{\text{ref}}(d_n, \omega)}{w_{\text{dir}}(d_n, \omega)} \right|, \quad (5)$$

式 (5) 中, N_S 为反射堆叠深度中的深度点个数, d_n 为反射堆叠深度, d_p 为所求反射系数的深度, w_{ref} 和 w_{dir} 为消除干扰波形后的反射波和直达波频谱。

图 7 为用两种方法计算的实测数据反射系数对比图,第 1 道为直达波,第 2 道为下行反射波,其中

黑色曲线为直达波到时曲线,第3道为反射源位置,第4道为用传统方法计算的0.5~3 kHz范围内的平均反射系数,第5道为用新方法计算的0.5~3 kHz范围内的平均反射系数。以下行波数据为例,由于每个深度点的波形中只有直达波到时处的反射波来自该深度点,后续反射波均来自该深度点以上的反射源,因此用传统方法计算的反射系数峰值

(图7中绿色虚线所示)位于实际反射源(图7中红色虚线所示)的下方,且反射系数数值偏大,而用反射堆叠法校正后的反射系数峰值与反射源位置对应性较好。上行波数据中,传统计算方法所得的反射系数峰值则位于反射源上方。实际处理过程中,使用下行波数据还是上行波数据应根据测量方式决定。

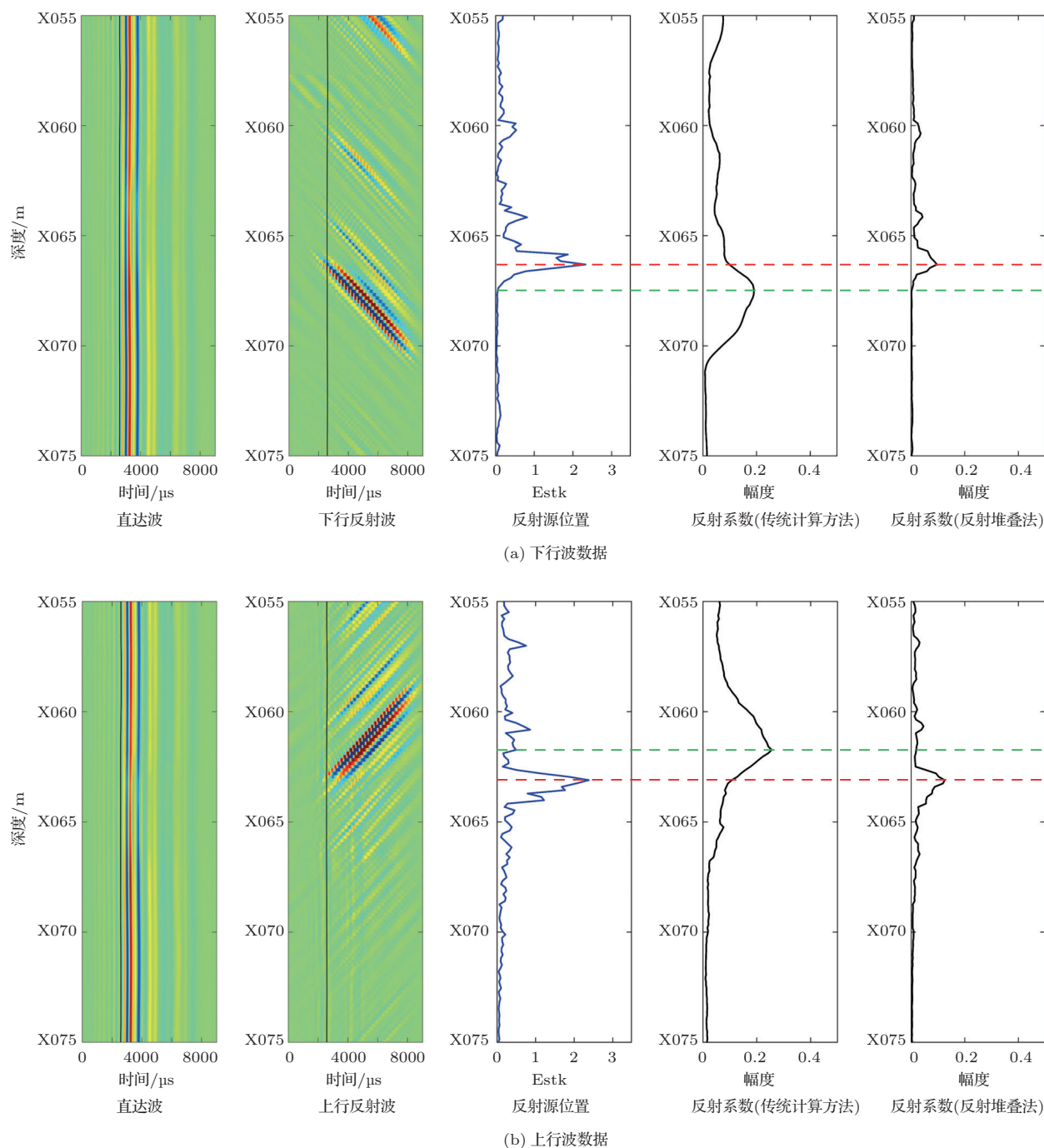


图7 实际数据反射系数计算

Fig. 7 Calculation of reflection coefficient of actual data

3 裂缝宽度反演方法

3.1 反射系数的理论模拟

假定除了斯通利波外, 声波测井频率低于其他模式波的截止频率, 即充液井孔中只存在斯通利波, 因此可以认为在测井仪和井壁之间的流体环空中流体压力是近似均匀的。斯通利波能量集中在井内, 井内流体进行轴向活塞式运动, 因此可以用一维传播理论来描述斯通利波在井中的传播特征^[11]。

由一维等效波数法可求解出过井裂缝的理论反射系数:

$$\text{Ref}(\omega) = \frac{2i(k_2^2 - k_1^2) \sin(k_2 L)}{(k_1 + k_2)^2 e^{-ik_2 L} - (k_1 - k_2)^2 e^{ik_2 L}}, \quad (6)$$

式(6)中, L 为裂缝宽度, k_1 和 k_2 分别为裂缝处和上下地层处的斯通利波波数。在刚性地层中, 上下地层的波数为 $k_1 = \omega/v_f$, 裂缝处的波数为

$$k_2 = \frac{\omega}{v_f} \sqrt{1 - \frac{2}{k_0 R} \frac{H_1^{(1)}(k_0 R)}{H_0^{(1)}(k_0 R)}}, \quad (7)$$

式(7)中, R 为井眼半径, v_f 为流体声速, $H_0^{(1)}$ 和 $H_1^{(1)}$ 分别为0阶和1阶汉克尔函数。对于刚性裂缝面, $k_0 = \omega/v_f$, 即自由流体空间波数。

图8为利用公式(6)和公式(7)计算的理论反射系数, 裂缝宽度分别为1 cm、2 cm和5 cm, 裂缝宽度越大, 反射系数越高, 且都随着频率的降低而呈上升趋势。Tang等^[20]在2011年的研究表明, 非渗透地层边界的反射系数不随频率发生变化, 因此可利用高低频反射系数的差异来区分渗透性裂缝和非渗透地层边界等其他反射体。

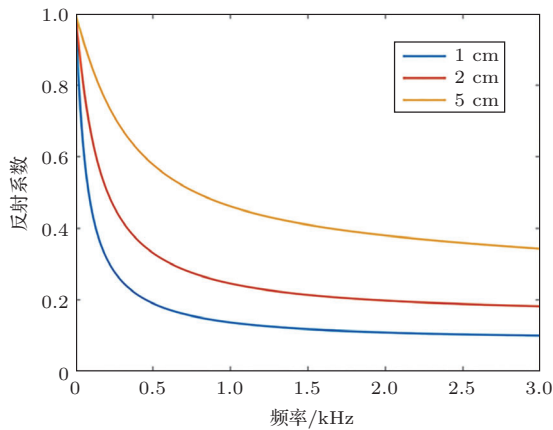


图8 理论反射系数

Fig. 8 Theoretical reflection coefficient

3.2 目标函数及反演流程

如果实测波形具有足够的低频带宽, 则可以根据实测波形数据的反射系数和理论反射系数反演裂缝宽度。理想情况下, 频率的下限越低越好, 实际测井时, 受限于声波仪器的性能, 频率下限在300~500 Hz之间, 上限通常为2~4 kHz。在反演裂缝参数时, 频率的上下限通常作为算法的输入参数, 可以根据数据质量进行动态调整。

采用数值方法进行反演, 目标函数是公式(5)给出的实际数据反射系数和公式(6)给出的理论反射系数之间的L2范数:

$$L2(L) = \sum_{\omega=\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} (R_D(\omega) - \text{Ref}(\omega, L))^2 W_R(\omega), \quad (8)$$

式(8)中, W_R 是一个与频率相关的加权函数, 其频率边界根据数据质量进行动态调整, 频率界限之内权重设为1, 频率界限外的权重设为0。图9为某深度点实际反射系数与最佳拟合理论反射系数结果, 红点为实际数据的反射系数, 蓝色实线为理论反射系数。由于波场分离中的噪声和混叠, 高频范围的反射系数通常是不准确的, 因此需要设置加权函数来去除高频部分, 如图9中绿色框线显示加权范围为0.5~3.5 kHz, 加权范围外权重设为0。图10第2道为利用上述方法反演的裂缝宽度。

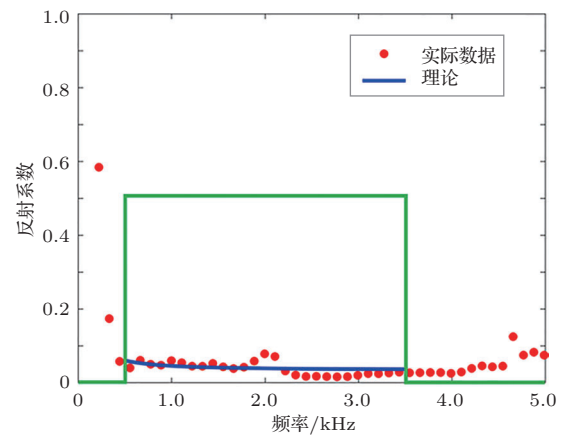


图9 实测反射系数与最佳拟合理论反射系数

Fig. 9 The measured reflection coefficient and the best fitting theoretical reflection coefficient

实际测井中, 反射波通常来自多条裂缝组成的裂缝带。Tang等^[11]在1993年的研究表明, 忽略黏滞效应, 当频率高于0.5 kHz时, 多条裂缝或裂缝体系组成的渗透带的反射系数与单个大裂缝的反射系数相当。因此利用斯通利波反演的裂缝宽度

可视为“等效宽度”，或裂缝带中裂缝的“累计宽度”，反演结果通常可达毫米级。

图 11 给出了利用理论和实际反射系数反演裂缝宽度的处理流程，处理过程总结如下：

- (1) 对单极子波列进行带通滤波，滤除纵波、横波及噪声；
- (2) 利用线性预测法对阵列波形进行波场分离，得到直达斯通利波、上行反射斯通利波和下行反射

- 斯通利波；
- (3) 采用能量堆叠法对下行反射斯通利波进行反射源定位，并确定反射斯通利波慢度；
- (4) 根据反射源定位确定的斯通利波慢度求出反射堆叠深度，并计算实际数据反射系数；
- (5) 基于一维等效波数法计算过井裂缝的理论反射系数；
- (6) 利用理论反射系数和实际反射系数建立反演目标函数，进行裂缝宽度反演。

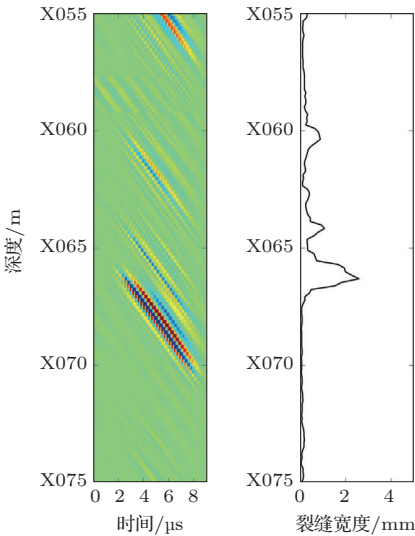


图 10 裂缝宽度反演结果

Fig. 10 Fracture width inversion results

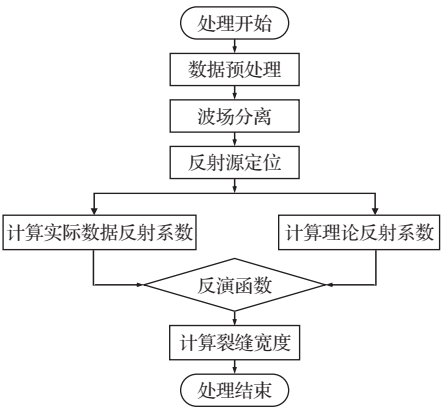


图 11 反射斯通利波反演地层裂缝宽度方法流程图

Fig. 11 Flow chart of formation fracture width inversion method based on reflected Stoneley wave

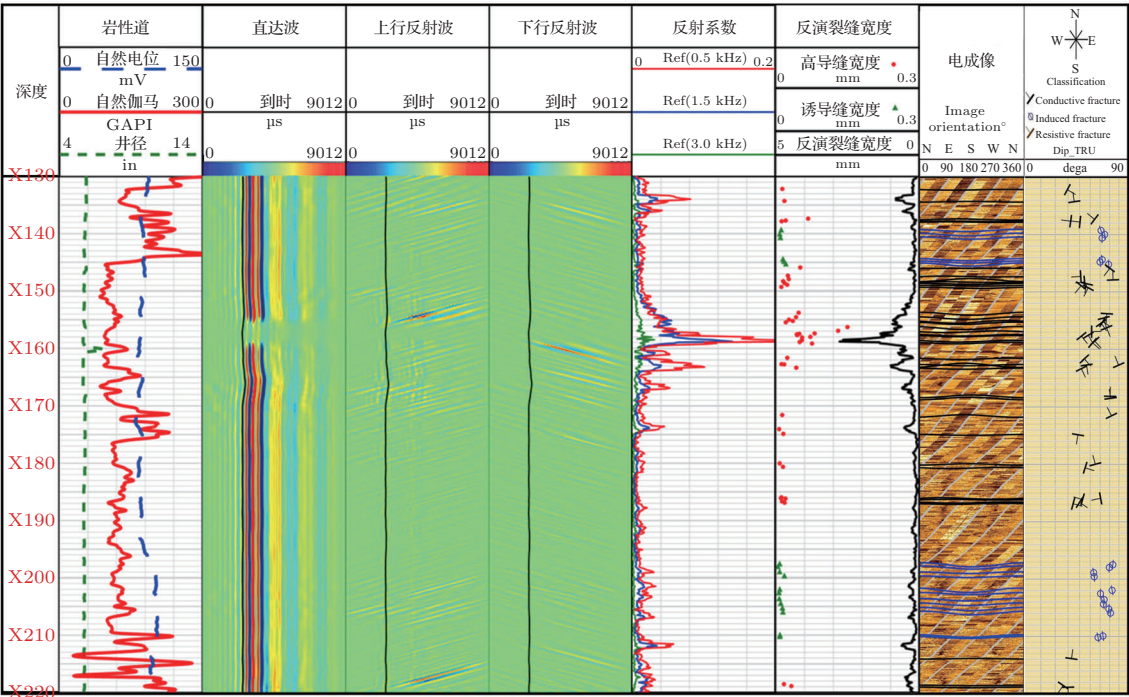


图 12 斯通利波反演裂缝宽度与电成像裂缝宽度对比图

Fig. 12 Comparison between fracture width inverted by Stoneley waves and electrical imaging results

4 现场实例

图 12 为斯通利波反演裂缝参数与电成像结果对比图。图中第 2 道为岩性道, 第 3~5 道为波场分离后的直达波斯通利波、上行和下行反射斯通利波, 第 6 道为计算的不同频率下的反射系数, 第 7 道为斯通利波反演裂缝宽度以及电成像裂缝宽度, 最右侧两道分别为电成像图和裂缝倾角图。在 X160 m 附近可看到明显的上下行反射斯通利波, 反射系数明显增大, 且低频反射系数高于高频反射系数, 电成像上有大量井壁裂缝, 初步判断该处反射系数的增大由渗透性裂缝引起, 进一步结合常规曲线发现此处发生了扩径, 反射系数的增高应为裂缝和扩径共同造成。对比斯通利波反演结果与电成像结果, 反演裂缝宽度呈现高值, 由于斯通利波反演的是裂缝的“等效宽度”, 或裂缝带中裂缝的“累计宽度”, 其结果通常达到毫米级, 比电成像结果大一个数量级, 但是整体变化趋势上斯通利波反演结果与电成像结果有很好的-致性, 这与 Hornby 等^[21]的研究结果相符。在有电成像资料的井段, 利用电成像结果对斯通利波结果进行标定, 可为无电成像资料的井段提供等效裂缝宽度。

5 结论

本文利用现场反射斯通利波数据进行了反射源定位及反射系数计算, 结合一维等效波数法计算的理论反射系数进行了裂缝宽度反演, 并与电成像结果进行了对比, 分析了斯通利波反演结果的适用性, 得到以下结论和认识:

(1) 传统反射系数计算方法未消除其他深度反射源的干扰, 导致反射系数峰值与实际反射体位置有偏差, 且幅度偏大。通过反射源定位, 新的反射系数计算方法消除了干扰波形, 反射系数峰值与反射源位置对应性较好。

(2) 渗透性裂缝宽度越大, 反射系数越高, 且随着频率的降低而呈上升趋势。通过高低频反射系数的差异可区分渗透性裂缝和非渗透地层边界等其他反射体。

(3) 利用斯通利波反演的裂缝宽度是“等效宽度”, 或裂缝带中裂缝的“累计宽度”, 反演结果通常可达毫米级, 比电成像裂缝宽度大一个量级, 但是

两者在变化趋势上具有很好的一致性, 验证了斯通利波反演结果的可靠性。斯通利波反演结果经电成像结果标定后可为无电成像的井段提供等效裂缝宽度。

参 考 文 献

- [1] Carswell A, Tang R, Dillistone C, et al. A new method of wave field separation in VSP data processing[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1984, 3(1): 856.
- [2] Sacchi M D, Ulrych T J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1169-1177.
- [3] Tang X M. Predictive processing of array acoustic waveform data[J]. Geophysics, 1997, 62(6): 1710-1714.
- [4] 唐晓明, 郑传汉, 赵晓敏. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 88-91.
- [5] Tang X M, Zheng Y, Patterson D. Processing array acoustic-logging data to image near-borehole geologic structures[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 87-97.
- [6] Hirabayashi N, Leaney W S, Haldorsen J B U. Wave-field separation for borehole acoustic reflection surveys using parametric inversion[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Society of Exploration Geophysicists, 2008: 344-348.
- [7] Ryu J V. Decomposition (DECOM) approach applied to wave field analysis with seismic reflection records[J]. Geophysics, 1982, 47(6): 869-883.
- [8] 刘继生, 王克协. 用频率-波数域分析研究声波测井全波列的各波相[J]. 测井技术, 2000, 24(3): 198-202, 238. Liu Jisheng, Wang Kexie. To study each mode of acoustic full-wavetrains using frequency-wavenumber analysis[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(3): 198-202, 238.
- [9] 王兵, 陶果, 王华, 等. 阵列声波测井中反射纵波和横波信号提取方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 57-63. Wang Bing, Tao Guo, Wang Hua, et al. Extraction method of P and S reflection waves from array acoustic logging data[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(2): 57-63.
- [10] Hornby B E, Johnson D L, Winkler K W, et al. Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals[J]. Geophysics, 1989, 54(10): 1274-1288.
- [11] Tang X M, Cheng C H. Borehole Stoneley wave propagation across permeable structures[J]. Geophysical Prospecting, 1993, 41(2): 165-187.
- [12] Kostek S, Johnson D L, Randall C J. The interaction of tube waves with borehole fractures, Part I: numerical models[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 800-808.
- [13] Kostek S, Johnson D L, Winkler K W, et al. The interaction of tube waves with borehole fractures, Part II: analytical models[J]. Geophysics, 1998, 63(3): 809-815.

- [14] 夏飞月, 苏远大, 唐晓明. 斯通利波在渗透地层和裂缝带的反射及透射: 解析和数值方法模拟对比 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(4): 1508–1518.
Xia Feiyue, Su Yuanda, Tang Xiaoming. Stoneley wave reflection and transmission across permeable formations and fractured zones: comparison of analytical and numerical modeling results[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(4): 1508–1518.
- [15] Banerjee A, Chatterjee R. Fracture analysis using Stoneley waves in a coalbed methane reservoir[J]. Near Surface Geophysics, 2021, 20(6): 710–722.
- [16] 黄文新, 历元彬. 用反射斯通利波确定地层裂缝宽度和渗透率 [J]. 江汉石油学院学报, 1994(S1): 26–31.
Huang Wenxin, Li Yuanbin. Determining fracture width and permeability of a layer from reflected Stoneley wave[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1994(S1): 26–31.
- [17] 余春昊, 李长文. 利用斯通利波信息进行裂缝评价 [J]. 测井技术, 1998, 22(4): 273–277.
Yu Chunhao, Li Changwen. Application of Stoneley waves to fracture evaluation[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(4): 273–277.
- [18] 杨帆, 章成广, 范姗姗, 等. 利用斯通利波评价裂缝性致密砂岩储层的渗透性 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(4): 88–92, 167.
Yang Fan, Zhang Chengguang, Fan Shanshan, et al. Evaluating the permeability of fractured tight sandstone reservoirs with Stoneley wave[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(4): 88–92, 167.
- [19] Dey-Sarkar S K, Wiggins R A. Source deconvolution of teleseismic P wave arrivals between 14° and 40° [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(20): 3633–3641.
- [20] Tang X M, Bolshakov A, Patterson D. Integrated acoustic evaluation of reservoir fractures: from borehole out into the formation[J]. Petrophysics-The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description, 2011, 52(3): 199–206.
- [21] Hornby B E, Luthi S M, Plumb R A. Comparison of fracture apertures computed from electrical borehole scans and reflected Stoneley waves: an integrated interpretation[J]. The Log Analyst, 1992, 33(1): SPWLA-1992-v33n1a5.