中国科学: 地球科学 2016 年 第 46 卷 第 1 期: 118 ~ 126
SCIENTIA SINICA Terrae earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

井孔声场中的弹性波散射效应及其应用

黑创[①②], 唐晓明[①②*], 李振[①②], 苏远大[①②]

① 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;
② COSL-UPC 声学测井联合实验室, 青岛 266580
* 通讯作者, E-mail: tangxiam@aliyun.com

收稿日期: 2015-05-29; 接受日期: 2015-09-06; 网络版发表日期: 2015-12-21
国家自然科学基金项目(批准号: 41474101)和山东省自然科学基金项目(编号: ZR2014DL009)资助

摘要 地下岩石普遍存在着非均匀性, 当井孔周围岩石的非均匀体的尺度(如压裂产生的裂缝系统)与声波波长相当时, 会产生很强的散射波, 因此可以通过声波测井的散射效应评价地层的非均匀性. 文章基于弹性介质散射体在统计意义上的分布规律, 建立了三维井孔非均匀介质模型, 数值模拟了非均匀地层偶极声波测井的散射效应, 并分析了散射波的衰减特性. 模拟结果表明: 与均匀介质相比, 井孔周围非均匀体产生了明显的散射, 一个显著的特征是在直达波之后出现了较强的尾波, 且尾波的频率随着时间逐渐降低. 在此基础之上, 根据尾波的衰减特性提出了一种利用散射效应评价地层非均匀性的方法, 并将该方法应用于致密储层的压裂效果评价. 应用结果表明压裂后偶极声波测井散射效应产生的尾波预示着井孔周围岩石的体积改造, 可以用来评价致密储层压裂效果, 这为今后利用声波测井资料评价非常规储层(如页岩储层)的压裂效果提供了一条新的思路.

关键词 散射波, 声波测井, 非均匀性, 非常规储层, 压裂效果

1 引言

地球从地壳、地幔到地核, 普遍存在横向非均匀性(Aki和Richards, 1980). 不同性质的非均匀性对地震波有不同的影响. 速度和密度的非均匀性可引起波形变化、相位(或走时)和振幅的起伏以及直达波的视衰减, 并导致尾波和前驱波. 例如: 岩石层的非均匀性会产生纵波(P)和横波(S)尾波, 以及二者之间转换波的尾波(Wu和Aki, 1985a). 当地下介质存在裂缝、溶孔(如缝洞型碳酸盐岩储层)等非均匀地质体时, 也会对地震波传播产生散射(Burns等, 2007). 不同尺度和不同组成的非均匀体会引起不同形式和不同强度的声波散射, 因此可以从散射波场中判断介质的非均匀性并推断非均匀体的分布和性质. 而非均匀性往往意味着地质构造运动以及油气和矿产资源的存在(李灿萍等, 2013). 利用散射波还可以有效地识别流体性质(印兴耀等, 2013, 2015). 因此, 利用复杂非均匀介质中的散射理论进行相关的非均匀体探测具有十分重要的学术和应用价值.

迄今为止, 有关地球物理问题的弹性波散射研究主要集中在大尺度传播的地震波研究方面, 而在井孔声场的研究中却鲜有报道. 在声波测井常规数

中文引用格式: 黑创, 唐晓明, 李振, 苏远大. 2016. 井孔声场中的弹性波散射效应及其应用研究. 中国科学: 地球科学, 46: 118–126, doi: 10.1360/N072015-00032
英文引用格式: Hei C, Tang X M, Li Z, Su Y D. 2016. Elastic wave scattering and application in the borehole environment (in Chinese). Sci Sin Terrae, 46: 118−126, doi: 10.1360/N072015-00032

© 2015《中国科学》杂志社 www.scichina.com

据处理中, 散射波和尾波往往被视为噪声而加以压制. 本文的研究工作将指出井孔声场中的弹性波散射效应及其包含的井孔周围地层非均匀体的重要信息, 并根据声波测井的散射效应来评价地层的非均匀性.

现代声波测井仪器已广泛应用于油气勘探, 采集了大量包括单极、偶极和正交偶极的阵列声波测井数据. 如果能从声波测井数据正确分析和提取弹性波的散射效应, 将会提供很有价值的地层信息, 并为声波测井的处理和解释开辟新的应用前景. 由此可见, 开展声波测井散射效应研究具有重要意义.

声波测井中较常见的一种非均匀性是岩石的层状沉积. 井孔声波时差数据已被用于此种非均匀性的评价(Leary, 1991; Shiomi等, 1997; Sato等, 2012). Tang和Burns(1992)及Tang等(1993)针对这种非均匀性建立了一维随机介质模型, 模拟了层状沉积对井孔单极子测井声波波形的影响. 研究结果表明非均匀性对声波到时、幅度波形及频谱等产生显著影响, 一个比较有趣的现象是散射引起的速度频散与幅度衰减之间满足Kramers-Kronig (K-K)关系(Tang和Burns, 1992). Sato等(2012)的研究成果表明K-K关系同样适用于三维弹性波散射.

近来发展起来的单井声波反射成像(Hornby, 1993; Esmersoy等, 1997), 特别是偶极横波反射成像(Tang, 2004; Tang和Patterson, 2009; 唐晓明和魏周拓, 2012; Tang等, 2014)极大地提高了声波测井的探测范围, 测量范围已延伸至井外数十米. 声反射成像的进展促发了对井外非均匀体产生的弹性波反射和散射的研究(Wang等, 2013; Tang等, 2014). 这些非均匀体不仅包括裂缝、碳酸盐地层中的溶洞和孔洞、火成岩中的矿体包裹、沉积岩中的砾石等天然地质体, 还包括由人工压裂形成的复杂裂隙网络及其伴随的岩石性质变化. 目前, 人工压裂作为一种增产手段被广泛应用于非常规油气(如页岩气)的开采. 对于页岩等非常规储层, 为了增加产能, 压裂裂缝的设计往往呈网状分布(Bunger等, 2013), 目的是形成井孔周围岩石的体积改造, 而不是仅仅形成一或数条主缝. 由于水压致裂是非常规油气开采的主要增产手段, 对压裂效果的评估十分重要. 目前, 微地震技术被广泛用于水压致裂效果监测. 在油田测井中, 压裂前、后的正交偶极各向异性测井(Tang等, 2001; 唐晓明和郑传汉, 2004; 高艳玲等, 2012)也成为该行业的标准技术, 但该方法只能评估压裂在井筒方向产生的效果, 而不能探测压裂在地层深处产生的效果. 针对目前井筒探测技术的局限性, 本文利用非常规储层压裂后在井周岩石中产生的体积压裂改造对弹性波的散射效应来对评价储层压裂效果.

本文基于非均匀介质岩石物性参数在空间分布的随机性, 建立了服从Von Karman分布的三维随机介质模型, 利用有限差分数值模拟了井外非均质体对偶极声波测井的影响, 分析了由非均质体引起的横波散射效应, 首次将分析得到的散射规律应用于致密储层水压致裂的效果评估, 提出了一种利用偶极声波测井数据评价压裂效果的新方法, 应用结果进一步表明声波测井的散射效应可用于非常规储层压裂效果评估.

2 三维井孔非均匀模型中声场的散射效应

由于岩石圈中岩石的成分、密度、相态和缝洞中流体的组成、温度和压力等的不均匀性, 实际地层介质弹性参数, 如弹性模量、速度和泊松比等, 在空间分布上往往是非均匀的(Frankel和Clayton, 1986; Sato等, 2012). 随机介质模型被广泛用于描述岩石中的非均匀起伏变化(Frankel和Clayton, 1984), 为了描述随机介质的空间分布, 设有一个有限集合

$$m(x,y,z)=\left\{m_1(x,y,z),m_2(x,y,z),m_3(x,y,z),\ldots\right\}, \quad (1)$$

用来描述弹性介质的各种参数, 如纵波速度$m_1(x, y, z)=V_p(x, y, z)$、横波速度$m_2(x, y, z)=V_s(x, y, z)$和密度$m_3(x, y, z)=\rho(x, y, z)$. 将非均匀随机介质定义为以下形式:

$$m(x,y,z)=m_0(x,y,z)+\sigma(x,y,z), \quad (2)$$

式中, $m(x, y, z)$为上述弹性参数之一, $m_0(x, y, z)$为描述该参数的大尺度变化特性, 它对应模型在该尺度上的均值, 为常数或者随空间坐标(x, y, z)缓慢变化; $\sigma(x, y, z)$为小尺度非均匀特性, 即大尺度$m_0(x, y, z)$背景下的小尺度随机扰动. 在二阶平稳假设下, $\sigma(x, y, z)$可以分解为如下形式:

$$\sigma(x,y,z)=\delta(x,y,z)\cdot f(x,y,z), \quad (3)$$

式中, $\delta(x, y, z)$对应模型局部的标准差; $f(x, y, z)$为具有均值为0、标准差为1、并且空间分布特征服从自相

关函数$R(x, y, z)$三维空间随机序列. 由于Von Karman型相关函数具有空间多尺度、自相似的特性, 本文采用此函数刻画实际地层的非均匀性. 三维Von Karman型相关函数表达式为

$$R(x,y,z)=\varepsilon^2\frac{2^{1-\kappa}}{\Gamma(\kappa)}\left(\sqrt{\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}}\right)^{\kappa}K_{\kappa}\left(\sqrt{\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}}\right),\quad 0\leqslant\kappa\leqslant 1, \tag{4}$$

式中, κ为赫斯特数; $\Gamma(\kappa)$为伽马函数; K_{κ}为第二类κ阶贝塞尔函数; ε为扰动量; a, b和c分别为三个方向的自相关距离.

在井孔环境下, 选取合适的κ和相关距离, 根据Wiener-Khintchine定理(顾元, 2013), 利用式(4)构建服从随机分布的三维非均匀模型, 图1(a)给出了三维非均匀介质模型横波速度空间分布切片显示, 其中相关距离a=b=c, 具体模型参数由表1给出, 表中的纵波、横波速度及密度为均匀模型的弹性参数. 图1(b)给出了距井孔1 m处的某方向切片横波速度的统计分布直方图, 从图中可以看到井外介质的横波速度围绕背景均匀介质横波速度(2300 m/s)呈随机扰动变化, 反映了地层介质参数空间分布的非均匀性.

给定地层介质的非均匀模型后, 我们来考察该地层模型中的测井声波的传播特征. 电缆多极子声波测井主要有单极子和偶极子两种类型的声源(唐晓明和郑传汉, 2004). 单极子声源向地层辐射纵波和横波(SV-型横波), 同时还激发沿井孔传播的地层纵波、横波(如果地层横波速度大于井孔流体速度)和斯通利波. 然而单极子声波测井的散射波成分比较复杂, 包含纵波、横波及它们之间的转换波, 不利于散射波(特别是尾波)的分析. 与之相比, 偶极子声源井外辐射能量以SH横波为主(唐晓明等, 2013; Tang等, 2014), 散射波以S-S散射波为主要成分(Aki和Richards, 1980; Wu和Aki, 1985b), 形态单一, 特征明显. 因此, 偶极子声源更便于散射效应的分析. 本文的分析将以偶极声源辐射的横波及其散射波为研究的主要对象.

针对充液井孔三维非均匀模型, 本文采用三维时域有限差分(Cheng等, 1995)数值模拟了声波测井偶极声场的散射效应. 模拟中声源的主频为3 kHz. 图2给出了非均匀介质模型SH横波在3 ms时刻的声场快照, 作为对比也给出了均匀模型相同时刻的声场快照. 与均匀介质相比, 非均匀介质井孔周围产生了明显的散射, 声场的空间分布特征证明了SH波的

表 1　模型参数

参数	纵波速度(m/s)	横波速度(m/s)	密度(kg/m^3)	井径(m)	a (m)	κ	ε
井内流体	1500	–	1000	0.2	–	–	–
地层	4000	2300	2500	–	0.1	1.0	15%

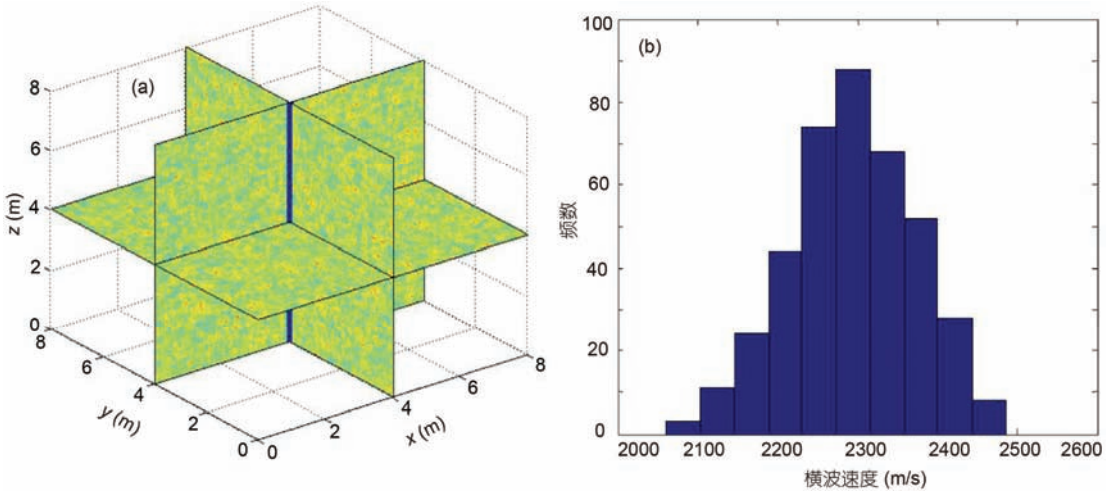

图 1　非均匀介质模型切片及横波速度统计分布直方图

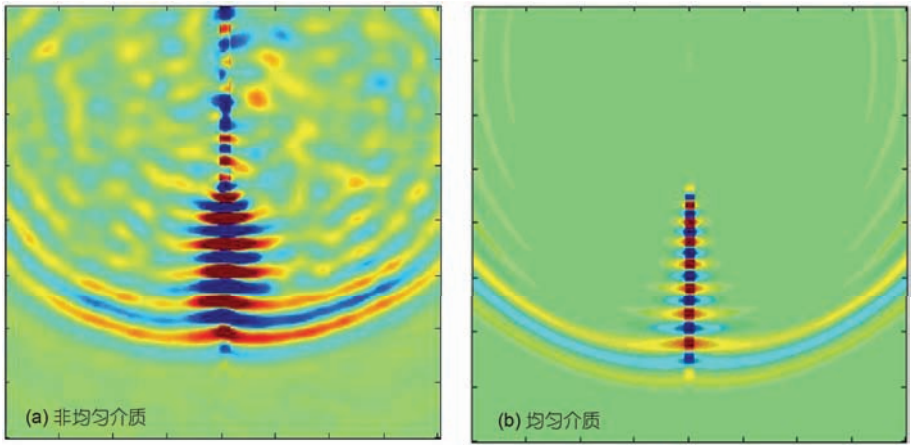

图 2　均匀介质与非均匀介质模型声场快照

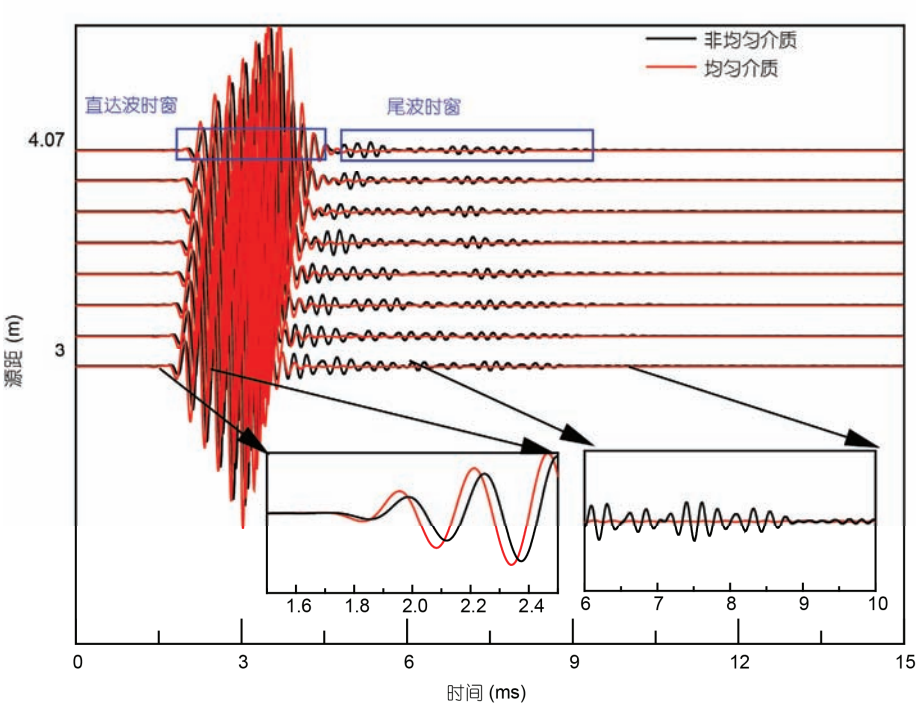

图 3　非均匀地层偶极子声波测井散射效应

散射以S-S型散射为主的结论(Aki和Richards, 1980). (如果存在较强的S-P或P-S散射波的话, 这些波会在图中横波波阵面之前出现, 与模拟结果相悖). 图3给出了声源主频3 kHz, 源距3 m, 接收间距0.1524 m的井孔阵列波形, 从图中可以看到, 非均匀介质模型(黑色线)与均匀介质(红色线)相比, 直达波的到时和幅度均有明显差异, 一个显著的特征是直达波之后出现了较强的尾波. 特别值得指出的是这些尾波来自于地层中的散射, 而不是井筒传播方向的非均匀散射, 这从这些波在阵列中相位分布的随机性可以看出. 对于后一种散射, 散射波在阵列中的相位是相关的(Tang和Burns, 1992; Tang等, 1993).

在井孔声波测井常规数据的处理中, 图3中的散射波(特别是尾波)往往被视为噪声而加以压制, 虽然尾波的相位看起来有很大的随机性, 但事实上尾波的激发与声源密切相关. 图4给出了图3中直达波和图中矩形窗内尾波的频谱对比. 从图中可以清楚的看到, 尾波的振幅谱与直达波振幅谱相关, 都受声源

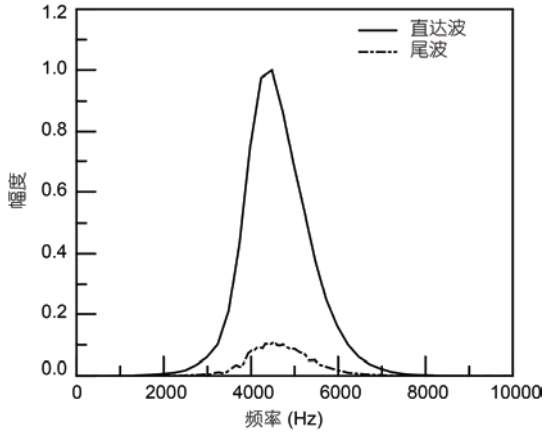

图 4　直达波和尾波的频谱对比

信号的控制，非同于一般的噪声. 综合图3和4的数值结果表明：偶极声波数据中的尾波主要由声源辐射到地层的SH横波的散射波构成，分析这种单一形态的尾波及其随时间的变化可以避免或减少弹性散射中(P-S或S-P)波形转换产生的影响. 下面我们用时频分析方法来研究产生散射波的地层非均匀性.

本文选用短时窗傅里叶变换(*STFT*)作为分析尾波的工具，给定声波信号$x(t)\in L^2(R)$，选取窗函数g，*STFT*定义为

$$\begin{aligned} STFT(t,\omega) &= \int x(\tau)g^*_{t,\omega}(\tau)\mathrm{d}\tau \\ &= \int x(\tau)g^*(\tau-t)\mathrm{e}^{-j\omega t}\mathrm{d}\tau \\ &= < x(\tau)\ g(\tau-t)\mathrm{e}^{j\omega t} >, \end{aligned} \tag{5}$$

由此定义的二维*STFT*函数给出了以t时为中心的时窗g内信号x的傅里叶振幅谱. 图3中非均匀模型偶极测井声波的*STFT*结果(第一道波形)由图5(b)给出，作为对比也给出了相应的均匀介质模型的*STFT*结果(图5(a)). 图中横坐标为时间，纵坐标为频率，颜色代表波幅能量. 从图中我们可以看出在2~4 ms的直达波部分，均匀介质模型与非均匀模型相似，而在4 ms之后，非均匀模型有较强的尾波存在. 一个比较有趣的现象是尾波的幅度和频率随着时间的增加逐渐减小，这与天然地震所观测得到的规律一致(Aki, 1969). 图5所示的*STFT*的时频变化比图4的频谱能更好地显示散射波的传播和衰减特征. 最为重要的是，偶极横波散射尾波的衰减特征为利用偶极声波测井评价地层非均匀性提供了一个新的思路和方法.

3　井孔声场中的弹性波散射效应在致密储层压裂效果评估中的应用

正交偶极声波测井被广泛用于非常规油气资源勘探，压裂前、后测得的声波数据为偶极声波散射效应的应用提供了可能. 水压致裂作为一种增产手段被广泛应用于非常规储层(如页岩储层)的开采，由于压裂与油气开采成本密切相关，压裂效果的评价至关重要(例如，微地震技术被广泛应用于压裂监测和压裂效果评价). 目前，正交偶极声波各向异性技术(Tang等，2001)是评价压裂效果的有效手段之一. 但该技术利用的是直达波前几个周期的信息，只能评价井壁附近的压裂效果. 在非常规储层的压裂中，压裂裂缝在井外延伸数十米甚至更远，且往往以网状缝的形态存在，形成压裂体积改造带(Bunger等，2013). 井外岩石体积改造可以产生明显的弹性散射波并被声波测井仪器接收，我们可以利用声波测井

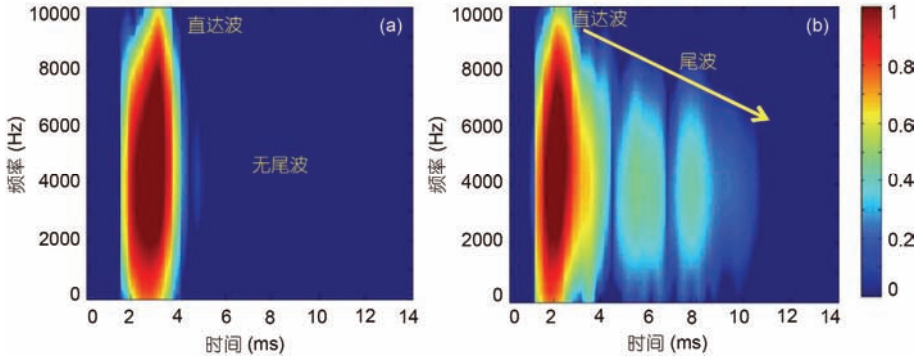

图 5　理论模拟数据时频分析

(a) 均匀介质; (b) 非均匀介质. 时窗长度取 0.35 ms

接收到的散射波信息来识别井外岩石的体积改造并评估压裂效果. 下面我们给出应用本文提出的声波测井散射效应评价井外压裂效果的实例.

图6(a)给出了X940 m处压裂前、后的正交偶极波形, 图6(b)给出了X966 m处压裂前、后的正交偶极波形, 可以看出非压裂区域压裂前、后的波形呈现高度的相似性, 而压裂区域压裂前、后波形虽然在直达波部分相似, 但随着时间的增加, 压裂后的波形有明显尾波出现(绿色方框). 如前述对图1~5的数值模拟和理论分析所示, 测井偶极声波中尾波的产生是由地层非均匀性造成的, 而压裂前、后的波形对比说明这种非均匀性是压裂造成的.

在实际测井波形数据的分析和处理中, 地层背景介质的非均匀散射和数据测量中的噪声干扰会在波形数据和处理中产生一些基底噪声(如图6(b)的波形包络线分析中的黑色曲线), 不利于对压裂产生的尾波分析. 为了更好的评价压裂效果, 我们首先需要排除这种基底数据噪声的干扰. 图7给出了图6(b)中波形的包络线对数显示, 从图中可以看到, 压裂前、后的包络线存在明显的差异. 采用类似于Sato等(2012)的分析方法, 将压裂前的尾部包络线设定为背景散射基准线(图中绿色线), 蓝色线为数据噪声基准线. 在这两条基准线之上的部分认为是压裂体积改造引起的非均匀散射, 在基准线之下认为是数据的基底噪声. 我们将上述分析方法用于井段处理, 下面给出井段偶极声波数据*STFT*分析的具体处理流程:

(1) 利用式(5)计算每个深度点上的时频函数*STFT*(*depth*, *t*, *ω*);

(2) 利用*STFT*(*t*, *ω*)计算每个深度点波形数据在移动时窗内波谱的中心频率f_0(*depth*, *t*)(唐晓明和郑传汉, 2004), 并计算该深度点的包络线*ENV*(*depth*, *t*)=*STFT*(*depth*, *t*, ω_0), 并选取包络基准线;

(3) 将每个深度点的包络线*ENV*(*depth*, *t*)在基准线以上部分的值及中心频率f_0(*depth*, *t*)联合显示, 具体的做法就是将该值的大小用变密度亮条形式填充f_0(*depth*, *t*)以下的低频区间得到井段的联合时频谱.

我们用图6(b)的波形数据来说明以上处理流程及其结果. 与图5中理论数值模拟分析类似, 图8给出了图6(b)时频分析的变密度显示. 从图8中可以看出, 压裂前的波幅能量仅仅存在于直达波, 而压裂后的波幅能量、频率随着时间逐渐降低, 这与图5(b)的理论数据分析结果相似, 对应着由非均匀散射引起的尾波的衰减, 表明水压致裂产生了明显的非均匀性, 形成了对井外地层岩石的体积改造. 从图8中还可以看出实际数据的尾波频率随时间下降速率要大于数值模拟的速率(图5(b)), 这是由实际地层岩石中的非弹性衰减引起的, 而本文的数值模拟未考虑非弹性衰减.

虽然上述的*STFT*时频谱可以很好地显示单个深度点数据中的尾波的大小和衰减, 但是用该图不能同时显示尾波幅值随时间的衰减和随深度的变化. 采用井段处理步骤(3)的联合时频谱可以较好地解决这个问题. 图9给出了压裂前、后的联合时频谱, 谱的形状代表着中心频率随时间的变化, 填充的颜色代表波幅的能量. 联合时频谱方法将二维*STFT*时频谱

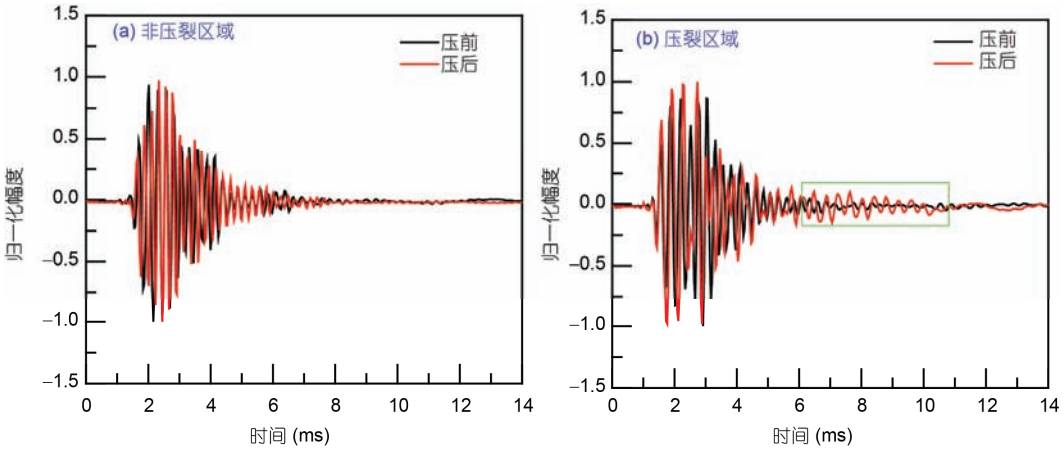

图 6　压前和压后波形对比图

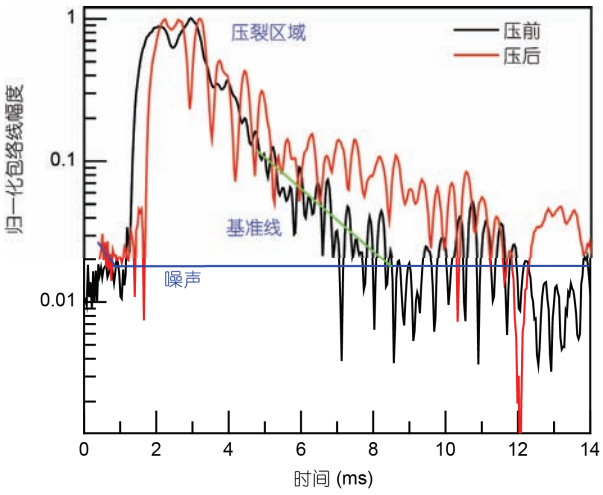

图 7　压裂区域压前和压后包络线对比

的频谱用中心频率和幅值(变密度色彩/亮度)来表示, 得到的联合时频谱降维为一维函数. 从图9中可以清楚的看到, 在压裂区域, 压裂前、后的联合时频谱有明显的差异. 压裂前时频谱的中心频率较高, 随时间增加很快下降, 但这时谱值很低(充填的色彩很暗), 表明尾波不发育, 仅有的少量散射波是由前述的基底噪声产生的. 压裂后时频谱的中心频率明显降低, 且在直达波之后(6~11 ms)有明显的尾波能量(充填的色彩较亮), 对应着压裂产生的非均匀散射. 对比图8的*STFT*时频谱可以看出, 联合时频谱较好地显示了尾波的大小及其随时间的衰减.

将随时间变化的一维联合时频谱沿着井深以变密度图的形式给出, 可以分析散射波或尾波在井段中的变化, 并以此来评估压裂效果. 图10给出了致密砂岩储层井段压裂效果的综合评价, 第一框图给出了井径(CAL)和自然伽马(GR)曲线, 第二框图给出了压裂前、后的横波时差. 值得注意的是, 压裂后的横波时差与压裂前的时差在压裂层段(设计压裂层位为X960 m~X970 m)有明显的差异, 呈类似于图1分布的

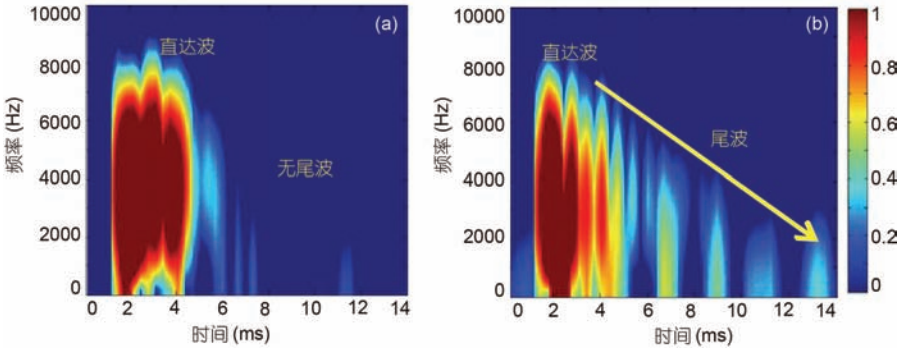

图 8　压裂前(a)和压裂后(b)时频对比

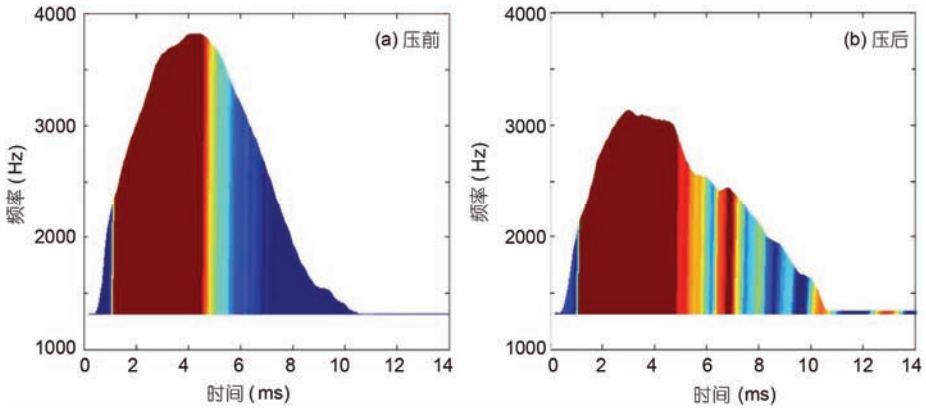

图 9　压裂区域压前和压后联合时频谱对比

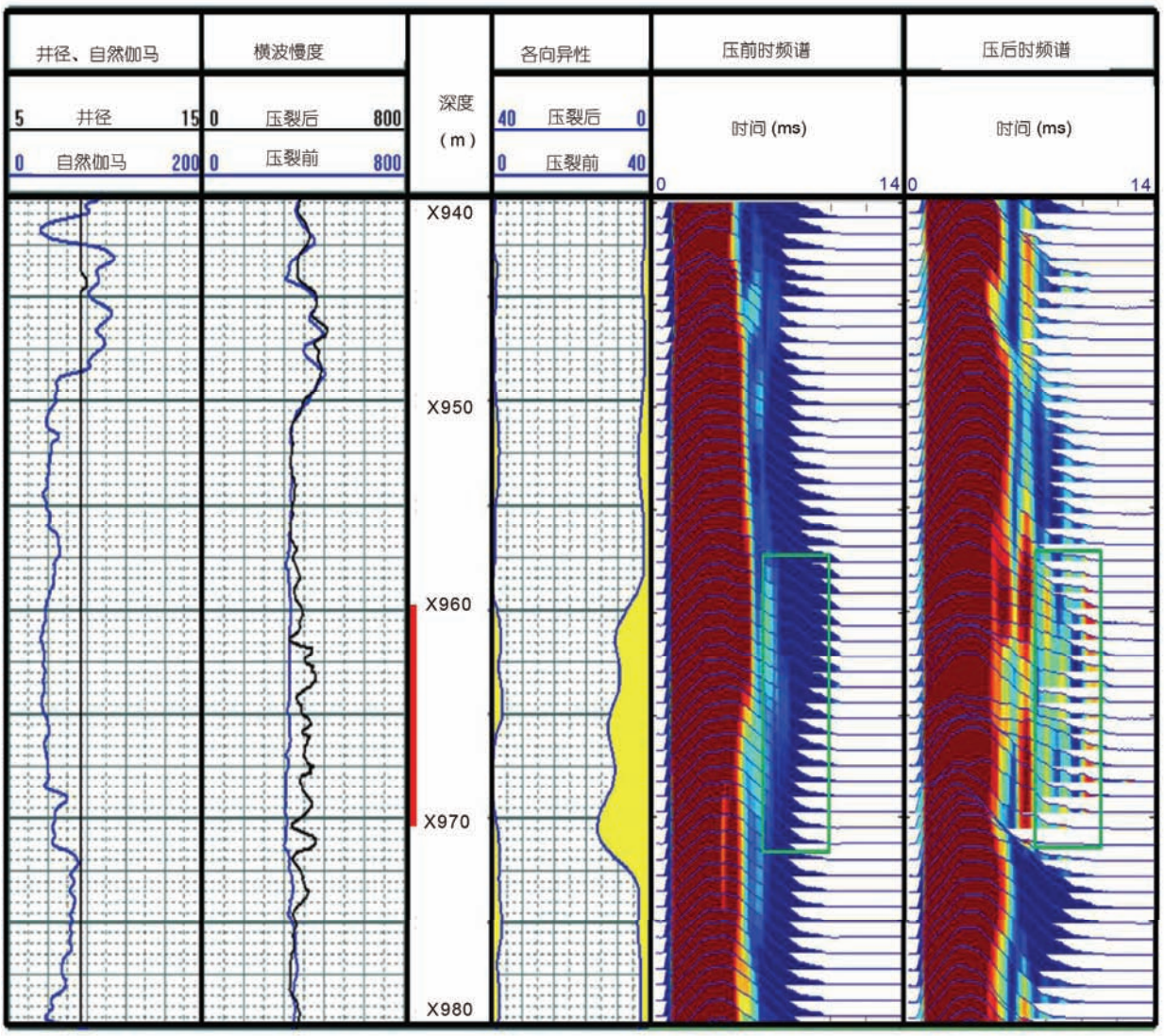

图 10　致密储层压裂效果综合评价

随机变化的形态. 第四框图给出了压裂前、后的正交偶极各向异性, 用来评估压裂在井筒方向产生的效果(Tang等, 2001). 与压裂前几乎为零的各向异性(左曲线)相比, 压裂后压裂层段井壁附近的岩石呈现较强的各向异性(右曲线), 这是压裂后井壁附近形成的裂缝引起的. 第五和第六框图分别给出了该致密储层压前、压后的联合时频谱处理结果. 从图中可以清楚的看到, 与压前的时频谱对比, 压后的时频谱在压裂层段有明显的差异, 在绿色框标注的6~11 ms时段, 时频谱的色彩较亮, 有较强的尾波, 其中心频率呈降低趋势, 由尾波发育的井段判断出压裂高度约为12 m, 与正交各向异性的结果基本一致. 根据尾波延续的时段和反射横波的双程旅行时间和估算, 产生尾波的非均匀散射区至少延伸到井外13 m的范围. 换言之, 压裂在此范围内产生了明显的压裂体积改造. 该致密层段在压裂前有少量气泡产生, 压裂后日产气3000余方. 本文提出的压裂评价方法与微地震压裂检测技术相比, 不需要监测井位, 可以大大节约油气开采时间和经济成本, 为今后非常规油气藏压裂评价提供了新的思路和方法.

4 结论

在偶极声波测井弹性波散射效应数值模拟的基础之上, 本文将分析得到的散射规律首次应用于水压致裂引起地层的非均匀性评价, 得出以下结论和认识: 地层的非均匀引起井孔偶极声波散射效应, 散射以S-S型散射为主, 产生较强的SH型散射尾波, 尾波的频率随着时间的增加逐渐减小, 尾波的产生和衰减可以作为识别地层非均匀性的依据, 利用尾波的时频特性可以有效评价水压致裂引起的非均匀性, 这为声波测井压裂效果评价提供了一个新的思路和方法.

本文的声波测井散射效应研究工作为今后复杂介质声波测井数据的处理和解释提供了一定的理论参考. 特别的是, 首次将声波的散射效应应用于致密储层的水压致裂效果评估, 取得良好的应用效果, 这为今后非常规油气的压裂评估和声波测井技术提供了新的应用前景.

致谢 感谢主编以及审稿人对本文提出的宝贵意见和建设性的建议, 这些意见和建议对论文的修改有很大的帮助.

参考文献

李灿苹, 刘学伟, 勾丽敏, 王祥春, 尹军杰, 谢城亮. 2013. 冷泉活动区天然气水合物上覆水体中气泡羽状流的数值模拟. 中国科学: 地球科学, 43: 391–399

高艳玲, 沈继斌, 陈华勇, 蔺敬旗, 王志强. 2012. 偶极声波测井技术在检测压裂缝高度中的应用. 长江大学学报(自然科学版), 9: 58–64

顾元. 2013. 三维非平稳随机介质建模与参数估计. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–85

唐晓明, 郑传汉. 2004. 定量测井声学. 北京: 石油工业出版社

唐晓明, 魏周拓. 2012. 利用井中偶极声源远场辐射特性的远探测测井. 地球物理学报, 55: 2798–2807

唐晓明, 曹景记, 魏周拓. 2013. 裸眼和套管井中偶极声场的辐射和接收. 中国石油大学学报(自然版), 37: 57–64

印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 2013. 非均匀介质孔隙流体参数地震散射波反演. 中国科学: 地球科学, 43: 1934–1942

印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 2015. 岩石物理驱动下地震流体识别研究. 中国科学: 地球科学, 45: 8–21

Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Method. San Francisco: W H Freeman

Aki K. 1969. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. J Geophys Res, 74: 615–631

Bunger A P, McLennan J, Jeffrey R. 2013. Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. Hong Kong: In Tech

Burns D R, Willis M E, Toksoz M N, Laura V. 2007. Fracture properties from seismic scattering. Leading Edge, 26: 1186–1196

Cheng N Y, Cheng C H, Toksöz M N. 1995. Borehole wave propagation in three dimensions. J Acoustic Soc Am, 97: 3483–3493

Esmersoy C, Chang C, Kane M R, Coates R T, Dodds K, Foreman J. 1997. Sonic imaging: A tool for high resolution reservoir description. SEG 67th Annual Meeting and Exposition, Expanded Abstract. 278–281

Frankel A, Clayton R W. 1984. A finite-difference simulations of wave progation in two-dimensional random media. Bull Seismol Soc Amer, 74: 2167–2186

Frankel A, Clayton R W. 1986. Finite-difference simulations of seismic scattering implications for the propagation of short-period seismic waves in the crust and models of crustal heterogeneity. J Geophys Res, 91: 6465–648

Hornby B E. 1993. Tomographic reconstruction of near-borehole slowness using refracted borehole sonic arrivals, Geophysics, 58: 1726–1738

Shiomi K, Sato H, Ohtake M. 1997. Broad-band power-law spectra of well-log data in Japan. Geophys J Int, 130: 57–364

Leary P C. 1991. Deep borehole log evidence for fractal distribution of fractures in crystalline rock. Geophys J Int, 107: 615–627

Sato H, Fehler M, Maeda T. 2012. Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth. 2nd Ed. New York: Springer

Tang X M. 2004. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement. Geophysics, 69: 1378–1386

Tang X M, Burns D R. 1992. Seismic scattering and velocity dispersion due to heterogeneous lithology. SEG 62nd Annual International Meeting and Exposition, Expanded Abstract. 824–827

Tang X M, Cheng N Y, Cheng C H, Toksöz M N. 1993. Acoustic Logging in Randomly Stratified Formations. SEG 63rd Annual International Meeting and Exposition, Expanded Abstract. 72–75

Tang X M, Patterson D, Hinds M. 2001. Evaluating hydraulic fracturing in cased holes with cross-dipole acoustic technology. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 4: 281–288

Tang X M, Patterson D J. 2009. Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data. Geophysics, 74: WCA212–WCA223

Tang X M, Cao J J, Wei Z T. 2014. Shear-wave radiation, reception, and reciprocity of a borehole dipole source: With application to modeling of shear-wave reflection survey. Geophysics, 79: 43–50

Wang H, Tao G, Zhang K. 2013. Borehole Acoustic Reflection logging by FDM and FEM Simulations and Data Analysis. SEG 83rd Annual International Meeting and Exposition, Expanded Abstract. 621–625

Wu R S, Aki K. 1985a. Elastic wave scattering by a random medium and the small scale inhomogeneities in the lithosphere. J Geophys Res, 90: 10261–10273

Wu R S, Aki K. 1985b. Scattering Characteristics of Elastic Waves by an Elastic Heterogeneity. Geophysics, 50: 582–595