

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.032

利用超声尾波干涉评价页岩应力敏感性

王剑波^{1,2}, 葛洪魁^{1,2}, 王小琼^{1,2}, 汪道兵^{1,2}, 陈 浩^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京) 非常规天然气研究院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 中石油非常规油气重点试验室, 北京 102249)

摘 要: 岩石应力敏感性是岩石内部微裂隙发育的一种反映, 对于致密储层物性和成缝能力(可压性)评价具有重要作用。由于页岩油气储层基质模量高, 对应力的敏感性相对较弱, 需要寻求新的高灵敏度测试方法。尾波干涉是运用介质中的散射波来监测介质微弱变化的一种测量方法, 对岩石应力变化具有较高的敏感性。借助 GCTS RTR-1500 高温、高压三轴测试系统, 对重庆城口县下寒武统鲁家坪组露头页岩开展尾波干涉试验, 研究了页岩尾波发育规律及其对应力的响应, 分析了页岩在不同围压下的应力敏感性。结果表明: 页岩尾波应力敏感性大于直达波, S 波应力敏感性大于 P 波; 尾波波速相对变化率随应力的变化能够较好地反映页岩内部裂隙的产生, 与扩容点有很好的对应关系; 围压使部分裂隙闭合, 天然裂隙密度减小, 页岩应力敏感性系数降低。尾波干涉可作为页岩的应力敏感性和成缝能力评价的方法。

关 键 词: 页岩; 尾波干涉; 应力敏感性; 应变; 成缝能力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)11-3299-11

Using ultrasonic coda wave interferometry to evaluate shale stress sensitivity

WANG Jian-bo^{1,2}, GE Hong-kui^{1,2}, WANG Xiao-qiong^{1,2}, WANG Dao-bing^{1,2}, CHEN Hao^{1,2}

(1. Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Unconventional Petroleum and Gas, China National Petroleum Corporation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Rock stress sensitivity is a reflection of the development of microcracks in the rock, which plays an important role in the evaluation of the physical properties and the fracture forming ability of tight reservoirs. Due to the high modulus of the matrix and relatively weak sensitivity to stress of shale, a new test method of high sensitivity is required. Coda wave interferometry is a measurement method for monitoring weak variation based on scattered wave of media, and it has a high sensitivity to the change of rock stress. In this paper, coda wave interferometry tests are conducted on the Lower Cambrian Lujiaping Formation shale from Chengkou, Chongqing using GCTS RTR-1500 high temperature and pressure triaxial testing system, the development and response to stress of coda are studied, and the stress sensitivity of shale is analyzed under different confining pressures. The results show that the shale stress sensitivity to coda wave is greater than to the direct wave; S-wave stress sensitivity is greater than P-wave. The relative variation ratio of the coda wave velocity varied with the stress can reflect the generating of internal fissures, and it has a good relationship with the corresponding expansion point; confining pressure leads part of the fractures to close and natural fracture density to decrease, which results in a reduction in sensitivity coefficient of shale stress. Coda wave interferometry is available as evaluation of shale stress sensitivity and fracturability.

Keywords: shale; coda wave interferometry; stress sensitivity; strain; fracturability

1 引 言

致密油气储层(页岩、致密砂岩等)基质的渗透率极低, 需经过压裂改造后才能形成有效产层。

水力压裂是常用的改造方式, 通过向地层中泵入大量的流体和支撑剂来形成缝网。应力敏感性是指致密储层在应力作用下的变形及其性质变化, 是岩石内部微孔隙、裂隙发育的一种反映, 对于致密储层

收稿日期: 2014-12-12

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1562215), 国家自然科学基金青年基金(41304141), 中国石油大学(北京)青年创新团队 C 计划(编号 C201601), 973 课题(2015CB250903), 国家自然科学基金重大项目课题(51490652)。

This work was supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1562215), the National Natural Science Foundation of China (41304141), the Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (C201601), the National Basic Research Program of China (2015CB250903) and the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (51490652).

第一作者简介: 王剑波, 男, 1989 年生, 在读硕士研究生, 主要从事岩石物理学的研究工作。E-mail: gsggwjb@163.com

通讯作者: 葛洪魁, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事非常规油气开发、岩石物理和钻完井的研究工作。E-mail: gehongkui@163.com

物性和可压性具有重要作用。由于页岩油气储层基质模量高,对应力的敏感性相对较弱,需要寻求新的高灵敏度测试方法。尾波干涉是运用介质中的散射波来监测介质微弱变化的一种测量方法,对岩石中应力的变化具有较高的敏感性。而在压裂改造的过程中,裂缝周围介质的性质和应力敏感性发生了改变,因此,应用尾波来检测储层的应力敏感性,对于评价储层改造体积与改造效果具有潜在的可行性。

在地震学中较多地利用多次散射波研究地层特性。多次散射波也称为尾波,是由介质中存在的非均质体(如颗粒、裂隙、孔洞以及介质边界等)对弹性波的多次反射、散射而产生^[1],在波形图中显示为P波的一段波列,紧随直达波后面的一段,形象地称之为尾波。多次散射波对介质的微弱变化有较明显的响应,自1969年Aki提出尾波以来^[1],在地震预测、火山活动检测、地下岩体的动态监测以及智能油田建设等诸多方面国内外都已有应用^[2-9]。在许多应用实例中,直达波在介质中的传播路径短,变化量很小,不能用于检测介质微弱的变化。但经过多次散射重复采样而放大后易于检测到。尾波干涉是通过对比应力变化前、后的两列尾波波列来检测介质变化,尾波干涉测量对介质变化具有高度敏感性,是检测岩石介质微弱变化及应力敏感性的有效方法。

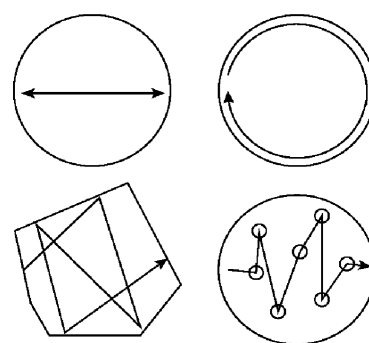
Snieder^[10]对尾波干涉方法进行了系统的阐述,详细讨论了震源、接收点、散射点位置变化和介质波速变化时的尾波响应特征,并利用尾波干涉方法定量分析了尾波波速变化。Snieder^[11]将尾波干涉理论进一步推演完善,其中就S波尾波较P波尾波更敏感这一现象进行了理论上的分析解释。

应用多次散射波的特点,国内外开展了大量的试验研究。Snieder等^[11-12]利用多次散射波测试了花岗岩和铝试样尾波波速随温度的变化,波速变化测量精度达0.02%。Gret等^[13]对Berea砂岩随单轴加载和饱和度变化的尾波响应特征进行试验研究,得出尾波的应力敏感性高,能够很好地反映岩石内部的微弱变化。Larose等^[14]也利用尾波干涉求出了水泥的应力敏感性,测量精度达 2×10^{-5} Pa。富鸿^[15]利用尾波干涉检测介质微弱变化,开展了超声波模型的试验。宋丽莉等^[16-17]对水泥和岩石样品开展了尾波干涉试验研究,分析了尾波发育规律、尾波干涉数据处理方法和应用条件,得出岩石散射体的浓度和尺度、超声波偏振方向、频率对散射波和尾波形成具有重要影响。其中观测系统的高度重复性、

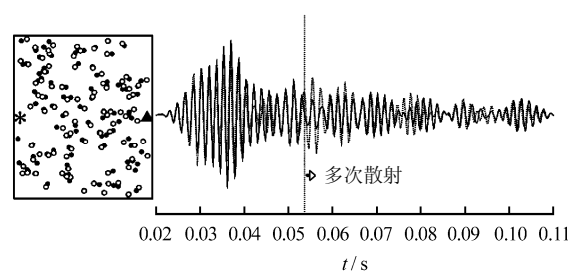
稳定性和高信噪比(SNR)尾波以及变窗口互相关扫描分析是获得高精度尾波干涉测量的关键。测试获得了水泥试件纵波、横波和尾波波速对应力变化的敏感性。尾波干涉应用的条件是介质散射强度高、尾波较为发育、观测系统重复性好^[18]。本文将高精度的尾波干涉法应用于评价页岩储层应力敏感性,从而进一步评价岩石的可改造性。

2 尾波干涉测试原理

超声波在介质传播过程中,在散射体表面或样品表面发生多次散射,如图1所示,每次的散射将会放大原有波形,多次的散射作用会使波形延后接收,即为直达波之后的尾波部分^[19]。经过散射作用,超声波对介质内部重复采样,将介质内部的微弱的变化放大后蕴含在尾波中,因此,尾波既有对微弱变化的监测能力,又能够携带丰富的信息(如图1中右图所示),因此,对于监测基质模量较高、应力敏感性差的页岩具有一定的优越性。



(a) 波在介质中可能存在的4种传播形式^[13]



(b) 直达波和经过多次散射作用的散射波^[19]

图1 尾波产生的原理示意图

Fig.1 Schematic diagrams of generation principle of coda wave

尾波的发育程度与介质中所含“颗粒”大小的配比关系直接相关^[16-17],如图2所示。左图为超声波在波长远大于颗粒直径的介质中的传播示意图,右图为两者相当时超声波的散射路径示意图,因此,选择适合于所研究介质的超声波频率是影响散射作用能否发生的重要因素。超声波在介质中多次的散

射作用，致使散射波比直达波延迟到达，尾波发育靠后。因此，必须记录足够长度的波形，也就是合理的初始超声波加载时间是检测到尾波的基础，至少应记录完整的尾波波形数十个波长，一般数十毫秒以上足够。图 3 所示为页岩的超声波波形，由于尾波发育良好，为尾波干涉测量奠定了基础。可重复性是互相关法计算每两个波形之间时移值的基础^[16]。波形的可重复性是指介质微弱的变化前、后所接收到的不同波形发育形态高度相似，仅仅存在相位和振幅的微小变化的一系列波形。要保证波形的可重复性必须保证两个条件：首先，超声波的发出和接收位置必须保持稳定；其次，对于样品引入的变量要相对单一，变化要足够微弱。两超声探头位置的固定保证了信号源与信号接收之间不引入变量，则波形之间的变化是由于所穿过介质的扰动所产生，这样就可以检测介质的变化。图 3 所示为随轴向应力加载于岩石检测到的波形，轴向应力每加

载 2 MPa 采集一次波形，图示为 38、48 MPa 轴向应力作用下的波形，具有很高的重复性，在直达波段（右上图）没有明显相位移和振幅变化，但在尾波部分（右下图）发生了变化且稳定性较好。

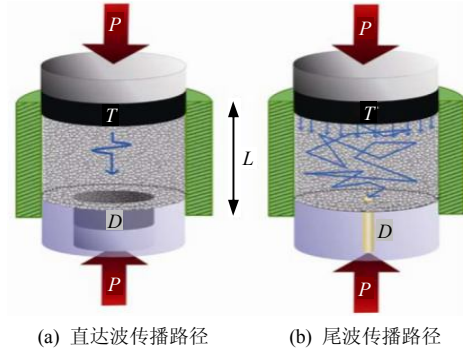


图 2 超声波频率与介质内颗粒的配比不同时的传播路径示意图^[19]

Fig.2 Schematic of propagation path for different ratios of ultrasonic frequency and particles in medium^[19]

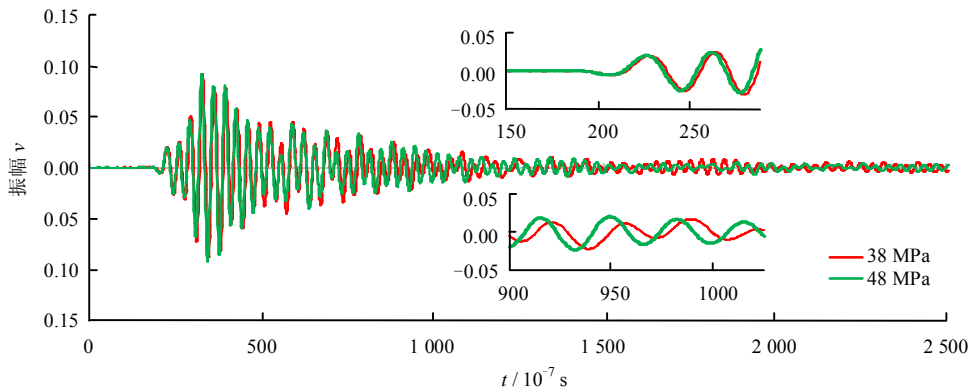


图 3 轴向应力为 38 MPa 和 48 MPa 时采集到的两列波形
Fig.3 Two waveforms for axial stresses of 38 MPa and 48 MPa

获得高信噪比的波形是尾波干涉测量的关键，既有利于获得稳定可重复性高的波形，也是尾波干涉测量的误差来源，其误差由 Cramer-Rao Lower Bound 法则进行估计^[17]：

$$\sigma_t \geq \sqrt{\frac{3}{2f_0^3 \pi^2 L(B^3 + 12B)}} \left[\frac{1}{\rho^2} \left(1 + \frac{1}{SNR} \right)^2 - 1 \right] \quad (1)$$

式中： f_0 为震源的中心频率； B 为带宽比； ρ 为震源波形的相关系数； SNR 为信噪比； L 为相关窗口的长度。

由 $B < 1$, $\rho \approx 1$, $SNR \gg 1$, 可简化为

$$\sigma_z = \sigma_x f_0 \geq \frac{1}{2\pi SNR} \sqrt{\frac{1}{f_0 L B}} \approx \frac{1}{2\pi SNR} \quad (2)$$

因此，信噪比越高，越有利于降低误差，提高精度。

综上所述，利用超声尾波研究介质状态对试验系统有以下要求：声波波长与介质所含颗粒相匹配，波形具有高度重复性、信噪比高、记录波形长度要合理。

3 试验仪器和试验方法

利用尾波测量页岩储层的应力敏感性，主要是利用应力变化前、后尾波波形的微小差异来获得波速变化。为保证尾波波形较高的信噪比和稳定性，试验中保持超声传感器位置的稳定和高度可重复的激励脉冲是本试验成功的关键。本试验用 4 块页岩进行三轴应力压缩试验，同步采集 P 波、S 波波形和应力、应变数据。

3.1 试验仪器和系统

本试验采用的 RTR-1500 高温高压三轴测试系

统,该系统主要由应力-应变系统和超声测量系统两部分构成。

3.1.1 应力-应变系统

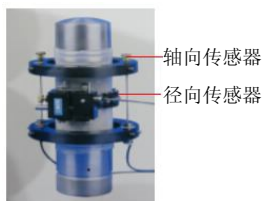
该系统由美国 GCTS 公司生产的 RTR-1500 高温高压三轴测试系统组成,如图 4 所示。采用电液闭环数字伺服控制,可提供 4 600 kN 的轴向压力,最大加载频率为 10 Hz,加载精度达到 100 kPa。围压由充入腔体的硅油液压提供,最大围压可加至 70 MPa,精度为 100 kPa。



(a) RTR-1000 高温高压三轴测试系统



(b) 波速传感器



(c) 应变传感器

图 4 RTR-1000 高温高压三轴测试系统、应变传感器以及波速传感器

Fig4 High temperature and high pressure triaxial testing system RTR-1000: a strain sensor and a velocity sensor

应变数据采集由两个轴向传感器和一个径向传感器实现,如图 4 所示。使用 LVDT 操作,径向传感器采用非延伸性链条,能够精确测量径向应变引起变化的周长平均值,相对应应变片的点式测量精度更高。

3.1.2 尾波干涉测量系统

尾波干涉测量选择美国 GCTS 公司 RTR-1500 的超声波速测试模块。该系统是数字化控制的脉冲发生器和接收器,20 MHz 采样率和 1 MHz 主频为获得高信噪比的波形提供保障。

波速传感器置于压头和底座内,如图 4 所示。采用预埋压缩和剪切晶体,主频为 1 MHz,可分别获得 P 波和 S 波,通过多次叠加减小噪音,并可滤波、频谱分析等。页岩采用 1 MHz 主频传感器时尾波发育,利用该波速测试系统,波形可重复性高,记录长度可人为设置,满足尾波干涉测量的要求。

3.2 试验样品

本次试验采用的样品取自重庆城口县鲁家坪组页岩露头,沿垂直于层面取心,试验所用 4 块岩芯均取自同一块岩体,如图 5 所示,加工制作成 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 样品,平行度误差 $< 0.05 \text{ mm}$,满足岩石力学标准,选取的页岩岩芯均无明显弱面。岩样基本参数见表 1。

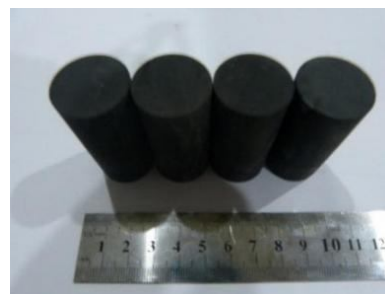


图 5 试验所用页岩样品

Fig.5 Shale samples

表 1 岩样基本参数

Table 1 Basic parameters of rock samples

编号	密度 /(g/cm ³)	$V_p(L)$ /(km/s)	$V_s(L)$ /(km/s)	ν_d	E_d
cls-1-2	2.56	4.92	3.13	0.23	53.85
cls-1-4	2.56	4.90	3.16	0.21	54.63
cls-1-5	2.56	4.93	3.16	0.20	55.80
cls-1-15	2.56	4.99	3.25	0.21	56.78

注: $V_p(L)$ 为轴向 P 波波速, $V_s(L)$ 为轴向 S 波波速, ν_d 为动态泊松比, E_d 为动态弹性模量。

3.3 试验方案

本试验主要研究页岩在加载时的尾波特征和应力敏感性,试验中对 4 块岩芯施加围压分别为 0、5、10、15 MPa 作平行对比。加载为应变控制,加载速率为 $2 \times 10^{-6} / \text{s}$,施加轴压直至试样最终破裂,无孔隙压力,加压过程中每 2 MPa 采集一次波速。

3.3.1 波形的可重复性

波形的可重复性是后续进行互相关计算的基础,因此,获得重复性高的波形至关重要。该试验中所采用的试验系统保证了探头与岩芯位置的固定以及激励脉冲信号源的可重复性。如图 6 所示,轴向应力依次为 5、7、9、11、13 MPa 时采集到的波形,在直达波部分(图 6 中左侧虚线框内部分),5 条波形基本重合,没有明显的相位移,而在尾波部分(图 6 中右侧虚线框内部分)发生较为明显的波形变化。轴压增大,波形振幅增大,能量增强,波形前移,其原因均为天然裂隙闭合而引起。页岩尾波发育,相关度好,具有很高的波形重复性。

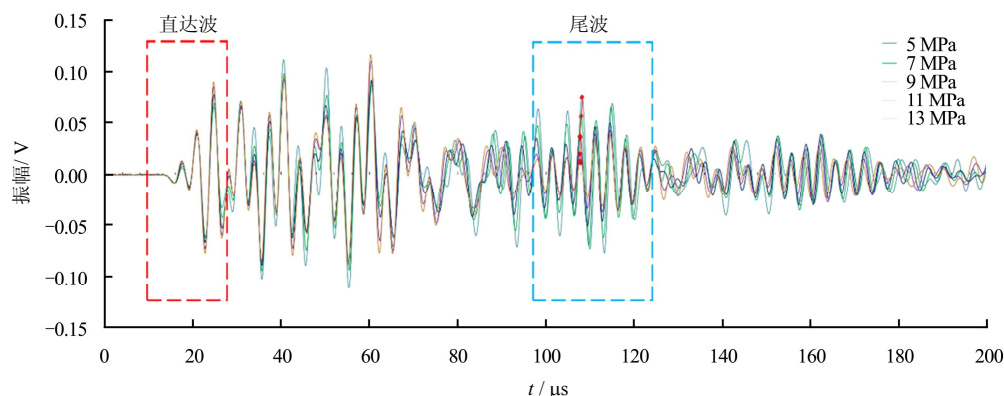


图 6 轴向应力依次为 5、7、9、11、13 MPa 时记录的波形
Fig.6 Recorded waveforms of axial stresses of 5, 7, 9, 11, 13 MPa

3.3.2 应力敏感性系数的求算

应力敏感性也称为三阶弹性参数，它与声速随应力的变化情况和波形畸变及高次谐波激发有关，是岩石固体弹性的非线性行为，反映了岩石的速度应力敏感性。为了研究页岩成缝能力，以应力-应变曲线弹性段为基础，求算波速相对变化率对应力的变化率，即为应力敏感性系数。

尾波干涉法就是利用两列散射波列的相位差来获得介质微弱性质变化的，就需要引入互相关函数^[10]，互相关函数的定义为

$$R^{(t, t_w)}(t_s) = \frac{\int_{t-t_w}^{t+t_w} u_{\text{unp}}(t') u_{\text{per}}(t' + t_s) dt'}{\left(\int_{t-t_w}^{t+t_w} u_{\text{unp}}^2(t') dt' \int_{t-t_w}^{t+t_w} u_{\text{per}}^2(t') dt' \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中： $2t_w$ 为时间窗口长度； t 为时间窗口的中心位置； t_s 为互相关中所用到的时移值； u_{unp} 为变化前的波场； u_{per} 为变化后的波场； R_{max} 为互相关函数的最大值，表示两列波的相关度即相似程度。

Snieder^[10]对尾波干涉理论做了系统阐述，尾波的传播时间为传播距离 l 与介质波速之比： $t = l/v$ 。当散射体、超声信号发射与接收均固定时，介质的波速发生均匀变化 δv ，可由下式表述为

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{-\delta t}{t} \quad (4)$$

式中： δt 为由 δv 引起的传播时间的变化。由式 (4) 可得出 $\delta v = \frac{-\delta t}{t} v$ ，走时变化随尾波窗口中心位置 t 的后移而线性增大，直线斜率为介质波速相对变化。

尾波干涉测量的核心是互相关计算，为了提高时间计算的精度，互相关时移值计算用 cosine 插值来恢复相关函数的峰值位置，在此计算过程中，窗口的选择至关重要，它直接关系到互相关计算的准确与否。窗口的选择应遵循以下原则^[17]：

(1) 窗口长度的选择。选择 4~6 个周期的波形段，以一个周期为步长，前、后取几次不同窗口长度分别计算，以获得最稳定的时移值作为最稳定的窗口长度，即为最佳窗口长度。

(2) 窗口位置的选择。首先获得整列波形每 2 MPa 的两两相邻波形的互相关系数曲线，然后，选择尾波部分互相关系数最接近 1.0 的波段，结合原则 (1) 中所得最佳窗口确定应该选择的窗口位置。

4 试验结果与分析

本试验获得不同围压下的轴向应力加载过程中的应力-应变关系 (如图 7 所示)，与声波的测试同步进行，试验中的 4 块岩芯的尾波波速相对变化率随应力变化曲线具有明显的岩石物理学意义。

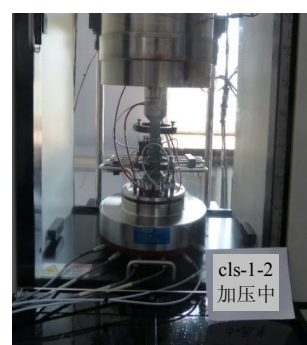


图 7 图为 cls-1-2 页岩样品正在试验
Fig.7 Sample cls-1-2 being tested

4.1 页岩超声波散射强度

尾波代表非均质 (散射) 体的发育程度，页岩属于沉积岩，非均质体主要来源于不同种类矿物的非均匀分布。在试验方案确立之前，先对样品做了相关分析。图 8 所示为 XRD 全岩分析结果，结果表明，石英、长石、方解石、白云石等硬脆性矿物与 TOC、黄铁矿、黏土等软性部分胶结，是非均质

性产生的根本原因。图 9 为分别放大 2 000 倍和 20 000 倍 SEM 结果。图 9(a)为页岩的自然新鲜断面,可清晰地看出,棱角分明的硬脆性矿物(图中暗色部分)与松散的黏土矿物(图中靠近边缘发白部分)交互分布,矿物颗粒大小约为 1~10 μm 。图 9(b)为页岩制片抛光后表面形态,可观察到发育良好的天然裂隙,隙宽达数个微米。本次试验系统超声波主频为 1 MHz,波长为 1 μm ,与矿物颗粒级别相当,有利于产生发育的尾波。如图 6 所示,直达波部分未发生明显的相位移,尾波部分已发生较大的相位移和振幅变化(图中圆点为尾波波峰),波形可重复性好,页岩超声波散射强度高,尾波发育。

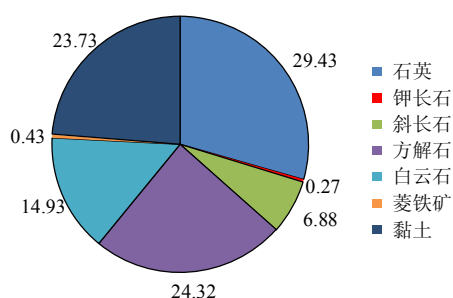
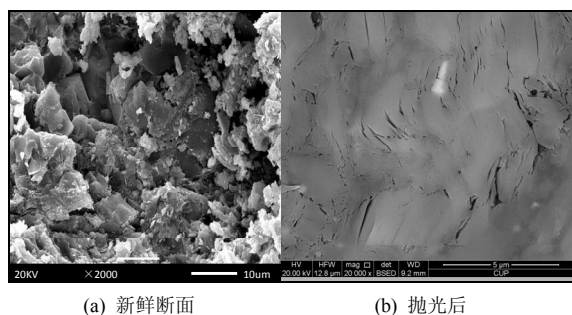


图 8 试验页岩全岩矿物成分
Fig.8 Mineralogy of shale sample



(a) 新鲜断面 (b) 抛光后

图 9 试验页岩 SEM 结果

Fig.9 SEM results of shale

4.2 尾波对岩石损伤状态的显示

试验获得页岩在不同围压下的应力-应变曲线和随偏应力加载的 P 波、S 波。S 波尾波很敏感,波速变化较大,结果较为离散,稳定性差,P 波尾波波速相对变化率相对较为稳定。将 P 波尾波互相关计算处理可得出尾波波速相对变化率随轴向应力加载的变化曲线,见图 10。

试验结果表明,页岩的 P 波尾波波速相对变化率曲线 dv/v 呈对数曲线形态,随应力呈对数式增大,曲线斜率逐渐减小,应力敏感性表观系数减小,最后趋于 0 值,在扩容点处出现拐点,波速相对变化率 dv/v 急剧减小。

4.3 尾波的敏感性

图 11 为各围压作用下 P 波直达波及其尾波、S 波直达波及其尾波波速相对变化随偏应力的演化曲线。尾波比直达波更敏感,同时,S 波直达波和尾波均较 P 波更敏感。加载初期,波速随着应力的增加而增加,到达扩容点时,开始扩容,裂缝大量产生并扩展延伸,波速迅速降低,其中 S 波尾波波速变化率下降幅度最大,表现出较强的应力敏感性。

4.4 不同围压的页岩裂隙密度

试验所用传感器主频为 1 MHz,声波波长为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$,声波对散射体尤其裂隙的辨识精度为微米级别,当裂隙被压缩至此精度以下时,则很可能对裂隙的监测失效,之后与孔隙压缩共同参与变形作用。同时该试验的样品层理与轴夹角为 72.7° ,因此,在这个试验条件和研究尺度上来说,不论是在横向还是纵向,都存在不同程度的各向异性,其中天然裂隙的发育为主要因素。

为了便于反演页岩不同围压下的天然裂隙密度,以各向同性假设为前提,由 NIA 等效介质理论^[20-21]有:

$$\text{Density}(G) = \frac{\left(\frac{G_0}{G} - 1\right)(1 + \nu)}{h \left(1 - \frac{\nu}{5}\right)} \quad (5)$$

$$h = \frac{16(1 - \nu_0^2)}{9 \left(1 - \frac{\nu_0}{2}\right)} \quad (6)$$

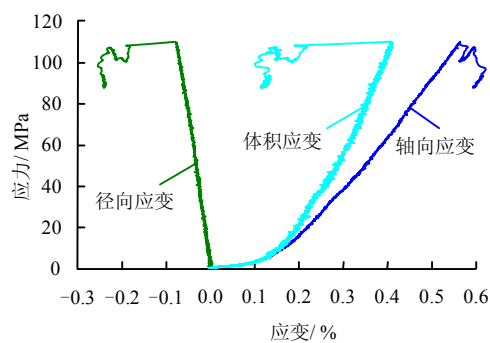
式中: ν 为初始泊松比; G 为初始体积模量; G_0 为裂缝闭合时的体积模量; ν_0 为裂缝闭合时的泊松比; h 为过程量。

依此理论对不同围压作用过程中的裂隙密度进行反演,其结果如图 12 所示,由图可知,随围压增加,页岩内部天然裂隙密度减小。

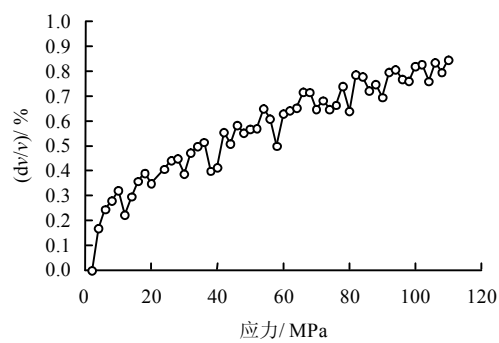
4.5 尾波干涉法监测岩石应力敏感性

试验用 4 个岩样所加围压分别为 0、5、10、15 MPa,围压的施加会引起天然裂隙的部分闭合,随围压的增加天然裂隙闭合的程度也增加。但线弹性段表现出来的应力敏感性则会降低,运用尾波计算的应力敏感系数分别为 9.6×10^{-9} 、 9.5×10^{-9} 、 8.6×10^{-9} 、 $7.3 \times 10^{-9} / \text{Pa}$,随着围压的增加,应力敏感性降低,与天然裂隙密度反演结果保持一致性(见图 13)。

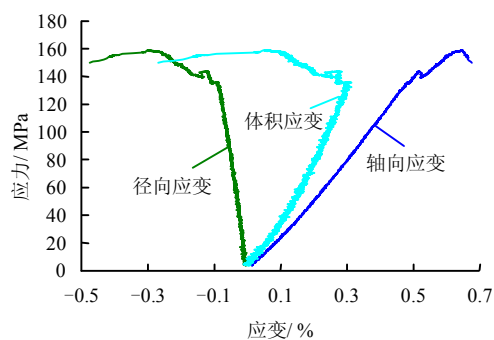
为了对页岩应力敏感性系数大小进行对比,应用本试验系统对房山大理岩进行了单轴应力加载的应力敏感性对比分析,测试方案与围压为 0 MPa 时



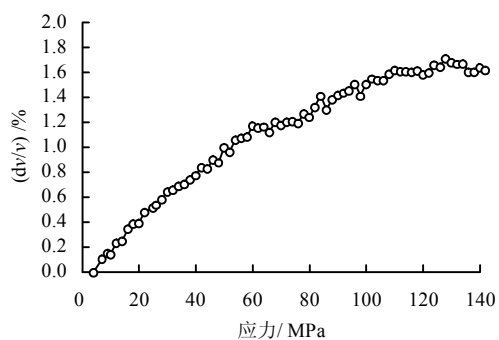
(a) 0 MPa 围压下的应力-应变曲线



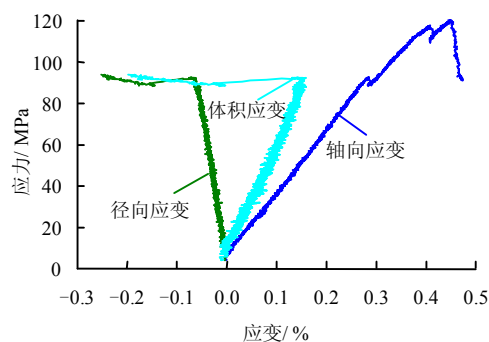
(b) 0 MPa 围压下的累积时移值-应力加载曲线



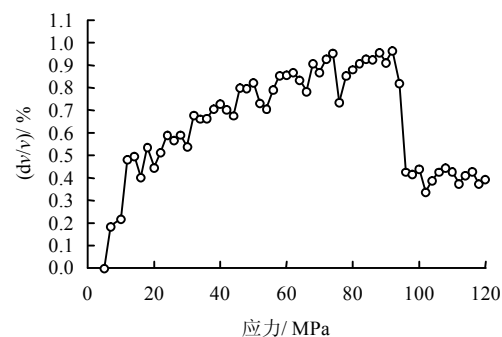
(c) 5 MPa 围压下的应力-应变曲线



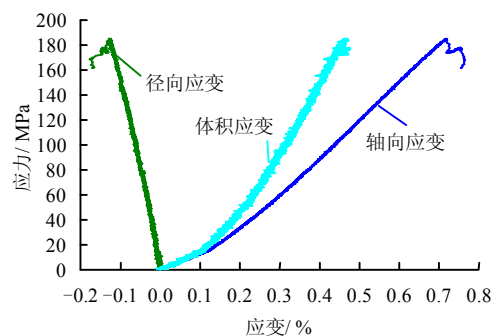
(d) 5 MPa 围压下的累积时移值-应力加载曲线



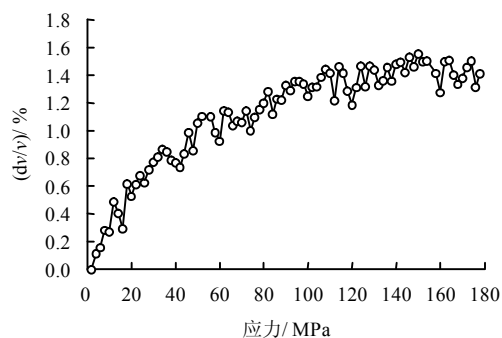
(e) 10 MPa 围压下的应力-应变曲线



(f) 10 MPa 围压下的累积时移值-应力加载曲线



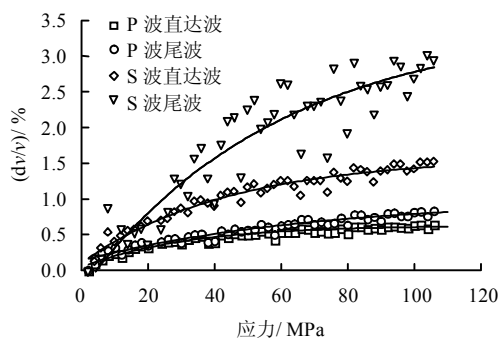
(g) 15 MPa 围压下的应力-应变曲线



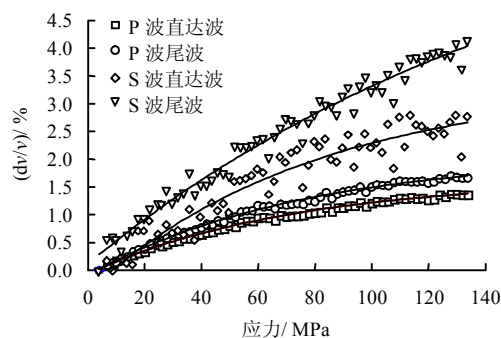
(h) 15 MPa 围压下的累积时移值-应力加载曲线

图 10 不同围压条件下应力-应变曲线和波速相对变化率

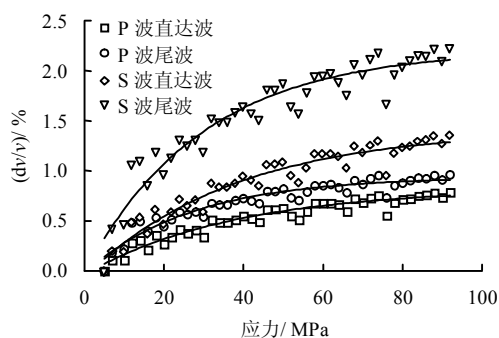
Fig.10 Stress-strain curves and relative change ratios of wave velocities under different confining pressures



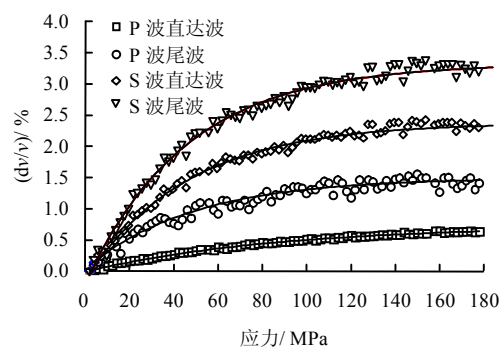
(a) 0 MPa 围压下的波速相对变化率



(b) 5 MPa 围压下的波速相对变化率



(c) 10 MPa 围压下的波速相对变化率



(d) 15 MPa 围压下的波速相对变化率

图 11 不同围压条件下的波速相对变化率

Fig.11 Relative change rate of velocity under different confining pressures

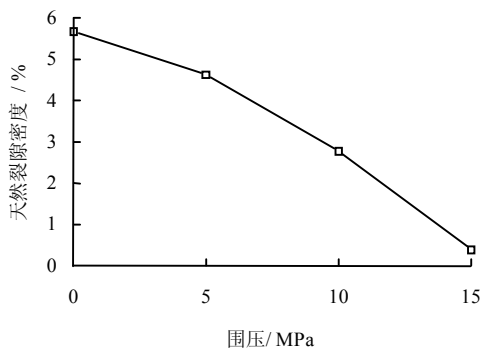


图 12 裂隙密度随围压变化曲线

Fig.12 Variation of crack density with confining pressure

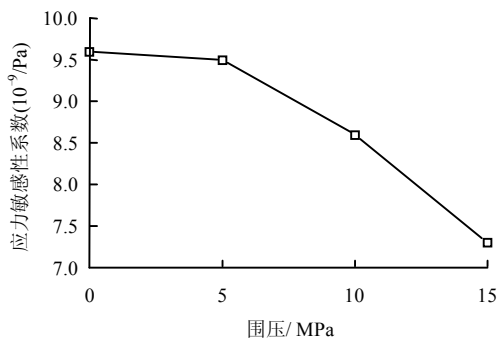


图 13 尾波应力敏感性系数-围压的关系曲线

Fig.13 Relationship between coda stress sensitivity coefficient and confining pressure

一致,共测试两块试样,编号分别为 M1、M2,轴向应力分别加至 50、80 MPa,结果见图 14。房山大理岩结构较为松散且矿物分布较为均匀,模量较低。由波速相对变化率曲线可知,与页岩相似的是其趋势亦为对数型。对此计算应力敏感性系数分别为 5.3×10^{-8} 、 9.4×10^{-8} /Pa。显然两者在量级上有很大的差异。

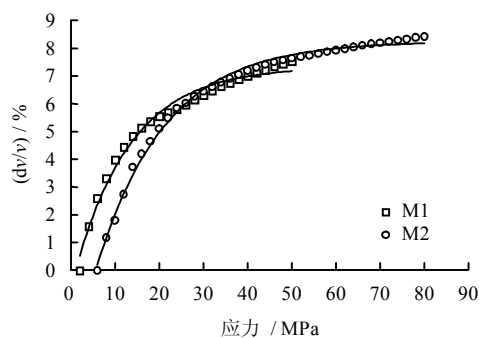


图 14 大理岩波速相对变化率-轴向应力曲线

Fig.14 Relative change rate of velocity versus axial stress of marble

5 讨论

裂缝的形成也引起地层散射强度、衰减和波速

各向异性等发生变化。储层在压裂破坏前的应力敏感性的测量比较困难, 多次散射波能够很好地反映介质内部微弱的变化, 因此, 可利用多次散射形成的超声波尾波及其强度的变化来监测水力压裂过程中储层参数的变化和裂缝的形成。

5.1 尾波波速相对变化率对页岩损伤状态的监测

尾波波速相对应力的变化率曲线蕴含了重要的信息, 能够监测岩石对应力的力学响应和岩石的损伤状态, 可动态监测页岩岩样内部损伤的过程, 并找出关键分界点。以围压为 10 MPa 的结果为例, 对试验结果进行分析, 结果如图 15、16 所示。

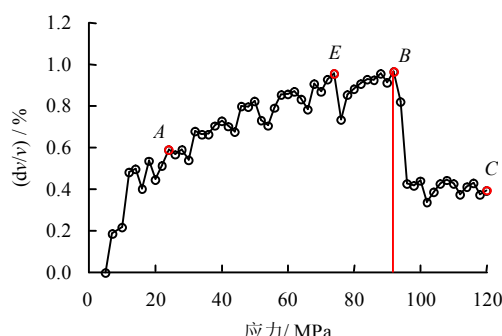


图 15 围压为 10 MPa 页岩应力-应变曲线

Fig.15 Stress-strain curve of shale under a confining pressure of 10 MPa

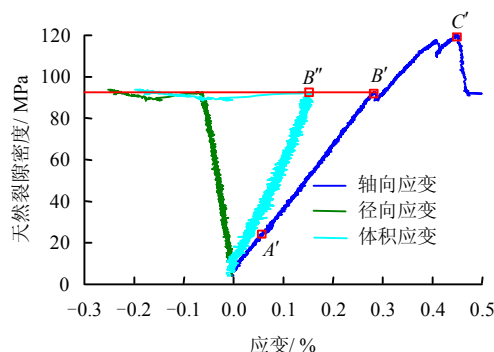


图 16 围压为 10 MPa 条件下尾波波速相对变化率随应力的变化曲线

Fig.16 Variation of relative variation ratio of coda velocity with stress under a confining pressure of 10 MPa

在应力增加的初始阶段, 波速变化率增加较快, 即在应力-应变曲线的 OA' 段, 岩石内部天然裂隙逐渐闭合, 内部散射体减少并且散射强度降低, 反映在尾波波速相对变化率曲线上 OA 段, 曲线向上凸, 斜率逐渐降低。

在应力-应变曲线的线弹性变形 $A'B'$ 段, 岩石内部天然裂隙早已闭合, 岩石内部骨架的变形在轴向应力-应变曲线上很难看到这个微弱的变化过程, 而在尾波波速相对变化率曲线上可以监测到线弹性

过程中的变化。在这个阶段初始阶段 AE 段, 随轴向应力的加载, 岩石内部颗粒间孔隙的压缩都会使散射体更“紧凑”, 散射强度减小, 尾波波速变化率曲线斜率减小。在 EB 段, 曲线斜率基本趋于 0, 也就是散射强度基本不再继续变化, 其原因为岩石的形变起主导作用的是内部颗粒骨架的压缩形变, 颗粒之间的相对位置不再发生变化, 亦即散射体稳定, 散射强度稳定, 尾波波速相对变化率基本为一定值且达到最大值。

在轴向应力-应变曲线 $B'C'$ 段, 随着应力加载达到扩容点, 即在轴向应变曲线 B' 点和体积应变曲线 B'' 点, 岩石内部微裂隙产生并继续发展, 直至形成宏观裂缝, 岩石强度达到最大值而后迅速降低。尾波干涉法敏感性高, 能够在岩石内部形成主裂缝之前检测到岩石内部的损伤, 扩容点所对应轴向应力与尾波波速相对变化率曲线上的 B 点对应, 并在该应力继续加载时, dv/v 值明显出现拐点, 该值降低幅度较大, 能够很好地预示和反映岩石的损伤状态。其机制是人工裂缝开始形成时, 散射体之间距离增加, 散射强度降低, dv/v 值迅速减小, 并随着裂缝的继续扩展延伸, 散射强度继续降低, 直至裂缝贯通, 岩体失稳, 对波形的衰减强度增大至检测不到波形。

5.2 直达波和尾波的应力敏感性

对于散射波的敏感性, Snieder^[10]进行了理论推导, 对于泊松介质, 尾波干涉测量的波速变化满足以下公式:

$$\frac{\delta v}{v} = 0.09 \frac{\delta \alpha}{\alpha} + 0.91 \frac{\delta \beta}{\beta} \quad (7)$$

式中: $\frac{\delta \alpha}{\alpha}$ 为 P 波速相对变化率; $\frac{\delta \beta}{\beta}$ 为 S 波波速相对变化率。

由于试验测试结果如图 8 所示, 各围压作用下 P 波直达波及其尾波、S 波直达波及其尾波波速相对变化率随偏应力的演化曲线。结果显示为: 尾波比直达波更敏感, 同时, S 波直达波和尾波均较 P 波更敏感。试验结果与理论吻合。

5.3 页岩应力敏感性与裂隙密度关系

页岩为细粒沉积岩, 很难区分胶结物与骨架, 软塑性矿物与硬脆性矿物交互, 基质模量高, 天然裂隙发育。因此, 页岩的微观结构很难通过量化的方法对其评价。相对比大理岩, 在数量级小 10 倍, 页岩的应力敏感性弱。尽管如此, 利用尾波具有的高敏感性, 可实现对其测量并量化。

现行的裂隙密度反演理论以各向同性假设为

前提,显然对于强非均质性的页岩不适用,尤其页岩所含天然裂隙尺度达微-纳米级别,在这个尺度下的非均质性不可忽略,各向同性假设准确性存疑。同时,反演求算需要的参数有初始体积模量、泊松比和天然裂隙闭合时的体积模量、泊松比,在不具备获得这些参数的条件下,借助于其他手段对页岩的裂隙密度进行量化非常有必要。

依据本试验中所得到的不同围压下的裂隙密度反演结果和应力敏感性系数,对这两组结果进一步拟合,可得到相关性好的曲线(如图17所示)。图中所示拟合结果为线性相关,且相关度好。应力敏感性系数本质为不同应力状态下,岩石中传播的波速变化率,反映的是内部所含矿物颗粒和天然裂隙的综合响应。在加载初期,亦即应力-应变曲线的弹性区,岩石发生弹性形变,微观上为裂隙的逐步闭合和颗粒间距的减小过程。因此,从机制上来说,两参数具有一定的“同源性”,均为反映微观结构对力学的表现,线性相关度好,可用尾波干涉测量求得应力敏感性系数来求算页岩的天然裂隙密度。

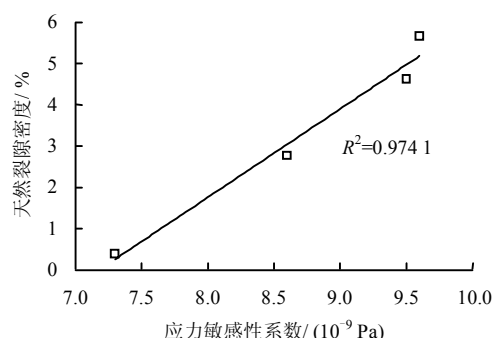


图17 裂隙密度与应力敏感性系数拟合结果图
Fig.17 Fitting results of fracture density and stress sensitivity coefficient

6 结 论

(1) 页岩尾波较为发育,说明页岩中有非均质(散射)体分布,页岩非均质体主要来源于不同种类矿物的非均质分布和非常发育的天然裂隙,具备尾波干涉测量的条件,因此,它可作为页岩应力敏感性和成缝能力的评价手段;

(2) 页岩尾波波速应力敏感性大于直达波,不论是尾波还是直达波,S波敏感性均大于P波敏感性;

(3) 波速相对变化率随轴向应力的变化,能够反映岩石内部的损伤状态。同时可将应力-应变曲线的线弹性阶段进一步划分为两个阶段,其分界点与体积应变曲线扩容点基本对应,能够较精确地监测

页岩内部裂缝开始孕育的关键点;在岩石内部裂缝开始孕育(扩容点)时,表观敏感性系数急剧减小,故可作为裂缝孕育的标志;

(4) 随围压增加,岩石内裂隙密度降低,主要机制是围压的增加使岩石内部所含天然裂隙的闭合程度增加,裂隙张开度减小甚至完全闭合,裂隙密度减小;

(5) 围压分别为0、5、10、15 MPa时,页岩尾波波速的应力敏感性系数为 $7\sim 10\times 10^{-9}/\text{Pa}$,在数量级上比大理岩小10倍。随围压增大,页岩敏感性降低。与裂隙密度有很高的相关性,可用于裂隙密度的求算。

水力压裂裂缝的形成也引起地层散射强度、衰减和波速各向异性等发生变化,因此,可利用尾波变化监测页岩水力压裂改造体积与改造效果。

参 考 文 献

- [1] AKI K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(2): 615—631.
- [2] SATO H. Temporal change in attenuation intensity before and after the eastern Yamanashi earthquake of 1983 in central Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1986, 91(B2): 2049—2061.
- [3] AKI K, FERRAZZINI V. Seismic monitoring and modeling of an active volcano for prediction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 2000, 105(B7): 16617—16640.
- [4] GRÊT A, SNIEDER R, ASTER R C, et al. Monitoring rapid temporal change in a volcano with coda wave interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6): 10—1029.
- [5] 吴如山. 地震波散射: 理论与应用[J]. *地球物理学进展*, 1989(4): 1—23.
WU Ru-shan. Seismic wave scattering: Theory and application[J]. *Progress in Geophysics*, 1989, (4): 1—23.
- [6] TOKSÖZ M N, JOHNSTON D H, TIMUR A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements[J]. *Geophysics*, 1979, 44(4): 681—690.
- [7] WANG Z. Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring: The physical basis[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1327—1330.