

有机质含量对页岩声波传播特性的影响

康毅力,白佳佳,游利军

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

摘要:有机质是含气页岩的重要组分之一,有机质含量及类型在相当大程度上控制着页岩的孔隙度及含气性。前人工作多关注页岩矿物组分及其赋存方式所导致的声速及力学性质各向异性方面,而对有机质含量与页岩声波传播响应性的关系则很少研究。以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段富有机质页岩为研究对象,利用自行研制的 SCMS-J 型声电测试仪,采集 15 MPa 围压下页岩纵/横波传播信息,分析有机质含量对纵/横波传播速度及页岩力学性能的影响,并运用快速傅里叶变换对采集的岩样声波波形数据进行频谱分析。研究表明:①纵/横波传播速度随着有机质含量增加而减小,纵/横波波速比随着有机质含量增加而增大;②页岩动态剪切模量 G 、动态体积模量 K 和动态弹性模量 E 随着有机质含量增加而降低,而泊松比 ν 随着有机质含量增加而增大;③有机质含量越高,高频部分吸收越明显,主频向低频移动,形心频率 f_c 大小与有机质含量呈负相关。研究成果对基于声波测井信息评价页岩有机质含量及含气性具有一定的借鉴意义。

关键词:页岩;有机质;纵波;横波;岩石力学;频谱分析

中图分类号:TE357 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2017)09-1341-09

引用格式:Kang Yili, Bai Jiajia, You Lijun. Influence of organic content on acoustic wave propagation characteristic of organic-rich shale[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1341-1349. [康毅力,白佳佳,游利军.有机质含量对页岩声波传播特性的影响[J].天然气地球科学,2017,28(9):1341-1349.]

0 引言

页岩气作为一种非常规能源,其在能源结构中的比例越来越大^[1]。要达到经济高效开采页岩气藏的目的,必须有效识别页岩气藏的“地质甜点”和“工程甜点”^[2]。页岩中有机质含量、黏土矿物含量是评价页岩气储量以及岩石可钻性、可压裂性的重要指标。通过研究声波在页岩中传播的时域和频域特性,明晰页岩声波传播对有机质含量的响应特征,对页岩气藏“甜点”识别具有重要意义。

国内外学者关于声波在岩石中传播特性的研究主要从地质因素和环境因素 2 个方面展开。其中,地质因素主要包括:岩性^[3-5]、岩石组分与层

理^[6]、孔隙结构^[7]等。当岩性、组分、孔隙结构三者中的一个或多个发生变化时声波在岩石中的传播速度、衰减系数、波形以及频谱都会有不同的响应特征。影响岩石声波传播特性的环境因素主要包括:加载条件^[8,9]、实验温度^[10]、孔隙流体^[11,12]等。环境因素改变岩石声波传播特性的机理主要是有效应力改变时岩石微裂缝闭合或张开,温度或孔隙流体变化时使得岩石的孔隙结构或矿物组分发生变化等。声波在岩石中传播的波速、频谱特征变化是研究岩石力学性能、微裂缝发育程度以及岩石组分的重要依据^[13]。

目前对岩石声波传播特性的研究主要集中在大理岩、花岗岩、致密砂岩、碳酸盐岩以及煤岩等;对于

收稿日期:2017-02-26;修回日期:2017-07-07。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“富有机质页岩氧化致裂增渗加速气体传输机理研究”(编号:51674209);非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目(编号:2016TD0016)联合资助。

作者简介:康毅力(1964-),男,天津蓟县人,教授,博士,博士生导师,主要从事储层保护理论及技术、非常规天然气、油气田开发地质的研究与教学工作.E-mail:cwctkyl@163.com.

富含有机质和黏土矿物的页岩,其声学性质的研究主要集中在通过探究层理对声波传播速度的影响^[14-17],进而评价页岩力学性能的各向异性。页岩中黏土矿物、有机质的定向排列是页岩各向异性的重要原因之一^[15]。综上所述,学者们在岩石声波传播特性研究方面已经做了大量的研究,而对于富有机质页岩中有机质对声波传播波形以及频谱响应方面的研究明显不足。有机质自身的特性会改变页岩的力学性能,加强页岩中有机质对声波传播特性及力学性能影响的研究,有助于通过声波信息精确反演页岩储层中有机质含量及含气性。

本文以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段富有机质页岩为研究对象,通过开展室内实验,探讨了有机质含量对页岩纵/横波传播的速度、波形以及频谱特征的影响,为进一步利用声波测井资料估算页岩中有机质(TOC)含量和评价页岩含气性提供重要基础数据。

1 实验岩样与测试方法

1.1 实验岩样

实验样品取自鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段,沿着层理将页岩样品切割打磨成 $\varphi 2.5\text{cm} \times 3.8\text{cm}$ 的柱状。采用 He(稀有气体)测量孔隙度,用 LGPM700 超低渗透率测量仪气测样品渗透率。采用 DMX3-C 型 X-射线衍射仪和 CS230 有机碳硫分析仪分别分析页岩中黏土矿物含量和有机质含量(TOC),具体测试方法是根据 SY/T5163-2010(沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X-射线衍射方法)和 GB/T19145-2003(沉积岩中总有机碳的测定)进行。实验样品基本信息见表 1。

1.2 实验原理及测试方法

实验采用西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自研设备 SCMS-J 型声电测试仪^[18](图 1)完成,声波发射器发射纵/横波频率分别为 960kHz、620kHz,测量精度 $0.1\mu\text{s}$ 。通过 DS10522E 型示波器和计算机组成声波采集系统完成纵/横波声波波形的采集,进而通过式 1 得到纵/横波传播速度。

$$V = \frac{L(1+\epsilon)}{T - T_0} \times 10^3 \quad (1)$$

式中: V 为纵波/横波波速,km/s; T 为声波测量装置探头及岩样的延迟时间之和, μs ; T_0 为装置回路自身延迟时间, μs (该仪器的纵/横波延迟时间分别

为 $6.36\mu\text{s}$ 、 $12.16\mu\text{s}$); L 为测试样品的长度,mm; ϵ 为测试样品在围压变化过程中的应变,无量纲。

实验前将页岩样品抽真空 12h,在 65°C 烘箱中烘 24h,实验过程中将页岩样品放入 SCMS-J 型声电测试仪中,在围压 15MPa,轴压 0MPa 条件下稳定 1h,记录纵、横波传播时间并采集纵、横波波形。

表 1 页岩样品基本信息

Table 1 Basic properties of the shale samples

样品 编号	长度 /cm	直径 /cm	孔隙度 * /%	渗透率 * $(\times 10^{-3}\mu\text{m}^2)$	黏土矿物 含量/%	TOC /wt%
A-1	3.800	2.510	1.95	0.004 0	54.43	1.47
A-2	3.808	2.532	2.32	0.000 9	54.13	6.27
A-3	3.810	2.510	2.69	0.001 5	60.50	3.00
A-4	3.810	2.512	0.75	0.000 2	51.59	5.56
A-5	3.804	2.510	1.60	0.000 5	58.92	6.90
A-6	3.802	2.510	0.29	0.001 3	59.00	6.72
A-7	3.810	2.512	0.70	0.002 3	60.38	4.08
A-8	3.806	2.514	2.14	0.002 5	51.54	7.27
A-9	3.806	2.512	1.29	0.002 6	62.37	6.17
A-10	3.806	2.510	1.08	0.000 7	59.70	8.89
A-11	3.806	2.510	2.14	0.002 3	45.55	6.06

注: * 测试压力条件为 3MPa

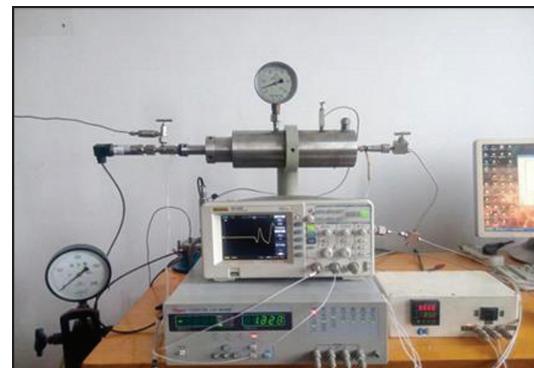


图 1 SCMS-J 型声电测试仪

Fig.1 SCMS-J Equipment for acoustics resistivity measurement

2 TOC 对页岩波速及动态力学参数的影响

运用 SPSS 软件对页岩纵/横波传播速度与 TOC 含量、黏土矿物含量进行相关性分析,采用统计学中的 Pearson 相关系数和显著性(Sig)作为指标评价纵/横波波速与 TOC 含量、黏土矿物含量之间的相关性,若 Sig 值小于 0.05 表示两变量之间具有显著性差异,Sig 值大于 0.05 时则表示两变量之间不具有显著性差异。Pearson 相关系数评价相关

性的标准见表 2。评价结果见表 3, TOC 含量与纵/横波波速的显著性(Sig)均为 0,说明 TOC 含量与纵/横波波速均具有很强的显著性,TOC 与纵/横波波速的 Pearson 相关指数分别为 -0.898、-0.925,表明 TOC 与纵/横波波速具有极强的相关性,且为负相关。黏土矿物含量与纵/横波波速的显著性(Sig)分别为 0.945、0.920,均大于 0.05,说明对于 11 块实验样品(黏土矿物含量在 45.55%~62.37% 之间,平均含量为 56.19%)黏土矿物含量与纵/横波波速间不具有显著性,黏土矿物与纵/横波波速的 Pearson 相关指数分别为 -0.023、-0.035,说明黏土矿物含量与纵/横波波速不具有相关性,黏土矿物含量对纵/横波波速没有明显的响应。表 4 给出的是页岩样品 A-1—A-11 在 15MPa 围压下的纵/横波传播速度。

表 2 Pearson 相关系数相关性评价标准^[19]Table 2 Evaluation criterion of pearson correlation^[19]

Pearson 相关系数	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
相关性	极强	强	中等	弱	无

表 3 SPSS 相关性分析结果

Table 3 Analysis result of SPSS

项目	参数	V _p /(km/s)	V _s /(km/s)
TOC 含量 /%(wt)	Pearson 相关系数	-0.898	-0.925
	Sig(2-tailed)	0	0
	N	11	11
黏土矿物 含量/%	Pearson 相关系数	-0.023	-0.035
	Sig(2-tailed)	0.945	0.920
	N	11	11

表 4 实验样品在 15MPa 围压下纵/横波波速

Table 4 V_p and V_s of the tested samples under 15MPa confining pressure

编号	V _p /(km/s)	V _s /(km/s)
A-1	4.900	2.863
A-2	4.650	2.560
A-3	4.918	2.899
A-4	4.799	2.652
A-5	4.519	2.500
A-6	4.636	2.550
A-7	4.898	2.800
A-8	4.515	2.608
A-9	4.700	2.590
A-10	4.496	2.277
A-11	4.760	2.600

2.1 纵/横波波速对 TOC 变化的响应

页岩样品在围压 15MPa 下微裂缝闭合^[20],纵/横波传播速度的差异在一定程度上反映了页岩组分的差异。实验样品纵/横波波速与 TOC 的关系如图 2 所示。

由图 2 可以看出,当 TOC 含量增加时纵/横波传播速度均呈减小的趋势。建立纵/横波波速比 V_p/V_s 与 TOC 含量的关系(图 3),波速比随着 TOC 含量增加呈增大的趋势,说明在纵/横波波速随 TOC 含量增加而下降的过程中,横波波速降低的速率比纵波更加明显,即横波波速对 TOC 含量变化更加敏感。

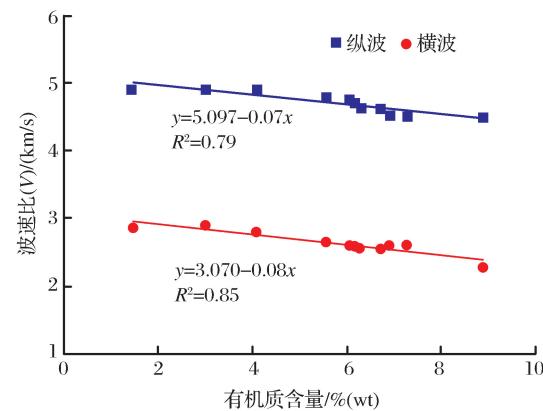


图 2 纵/横波波速随 TOC 变化关系

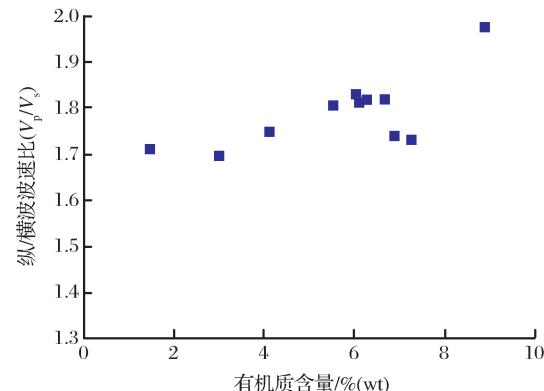
Fig.2 Ultrasonic velocity V_s organic content

图 3 纵/横波波速比随 TOC 变化关系

Fig.3 Wave velocity ratio V_s organic content

2.2 页岩动态力学参数对 TOC 变化的响应

基于页岩中纵/横波传播速度可以得到页岩的动态力学参数^[21],动态力学参数对钻井方案设计以及压裂施工各参数的优选具有重要的意义。式 2—式 5 分别是动态剪切模量 G、动态体积模量 K、动态弹性模量 E、泊松比 v 的表达式:

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (3)$$

$$E = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (4)$$

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (5)$$

式(2)—式(5)中: V_p 、 V_s 分别为页岩纵波、横波波速, km/s; ρ 为页岩密度, g/cm³。

图 4 列出了实验岩样 TOC 含量与动态力学参数 G 、 K 、 E 、 v 的关系。从图 4 中可以直观地说明页岩动态力学参数中 G 、 K 、 E 均随着 TOC 含量增大而减小, v 随 TOC 含量增大呈增大的趋势。Vernik 等^[22]指出, TOC 的存在会“软化”页岩, TOC 具有低密度($1.2\sim1.4\text{g}/\text{cm}^3$)和低模量的特点, 当 TOC 热成熟度 R_o 值为 $0.54\%\sim1.60\%$ 且孔隙度为零时, TOC 的体积模量范围 $6\sim9\text{GPa}$; 当 TOC 热成熟度高(6.36%)且孔隙度为零时, TOC 体积模量范围为 $15\sim16\text{GPa}$; 当 TOC 具有明显的孔隙度时, 体积模量低至 2GPa ^[22]。TOC 降低了页岩的力学性能, TOC 含量增加泊松比 v 增大, 说明有 TOC 含量高的页岩更容易被压缩。

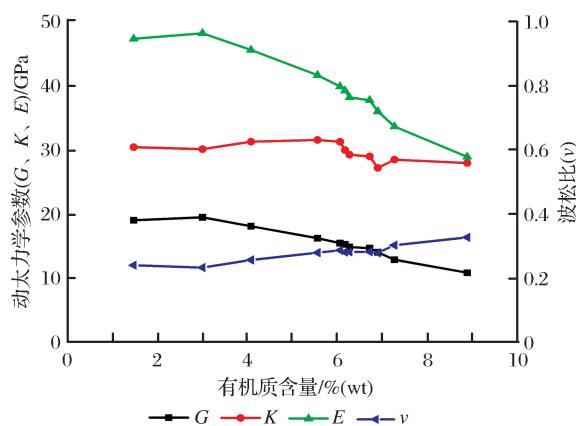


图 4 动态力学参数与 TOC 含量的关系

Fig.4 Dynamic elastic constants vs TOC contents

剪切模量 G 表示的是岩石抗剪切应变的能力, 抗剪切能力与岩石内聚力和内摩擦角有直接关系。基于 Mayer^[23]、贾建亮^[24]提出的有机质“单层被覆”假设, 即有机质以单分子层的形式均匀地覆盖于矿物表面或填充在矿物颗粒间的微孔隙中, 绘制出了图 5 所示的 TOC 含量增加时有机质在页岩中的分布示意图, 当有页岩中 TOC 含量增加时, R_1 增加到 R_2 , 有机质充填物厚度增加, 有机质的强度低于骨架颗粒的强度, 结构面的力学强度与充填

物的厚度负相关^[25]。因此, 随 TOC 含量增加, 页岩剪切强度下降。

3 TOC 对页岩声波频谱特征的影响

3.1 频谱分析方法

实验采集页岩样品的波形, 并将采集的波形进行频谱分析, 具体分析步骤为: 采集各个样品的纵/横波波形→运用编制的 MATLAB 代码进行 FFT →绘制频谱特征曲线。FFT 的原理是任何形状的信号都可以分解成无限个不同频率的正弦信号的叠加并在数学上用傅里叶序列表示出来^[26]。

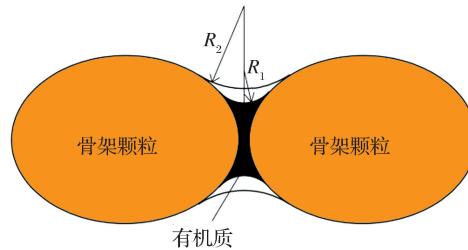


图 5 页岩中有机质分布示意

Fig.5 Illustration of organic distribute in shale

3.2 页岩波形及频谱特征分析

文中列出了 A-1、A-6、A-10 样品的纵/横波波形图(图 6, 图 7), A-1、A-6、A-10 页岩样品的 TOC 含量分别为 $1.47\%、6.72\%、8.89\%$ 。从图 6 中可以清晰的看出 A-1、A-6、A-10 的纵波波形振幅是逐渐依次减小的, 频谱图中主振幅同样是依次呈减小趋势, 并且可以看出高频部分是依次减少的。从图 7 中可以得到横波透射岩样时振幅和频谱曲线中主振幅具有相同的变化特点, 均是在 TOC 含量高的样品声波波形振幅小, 高频部分消失。

为了更加直观地描述频谱图中岩样频率的分布特征, 本文采用形心频率 f_c ^[27,28]表征岩样主频变化特点, f_c 值反映了频率的分布范围, 高频信息越丰富则频谱图中 f_c 值越大, 形心频率 f_c 定义式:

$$f_c = \frac{\sum_{i=0}^N f_i |A(f_i)| \Delta f}{\sum_{i=0}^N |A(f_i)| \Delta f} \quad (6)$$

式中: f_i 为离散化的各频率值, kHz; $A(f_i)$ 为相应各频率波的幅值, mV; Δf 为相邻频率之间的差值, kHz。

以 TOC 含量为横坐标, 页岩纵/横波形心频率为纵坐标, 作图得到图 8、图 9, 可以看出在 11 个页

岩样品中,纵/横波形心频率均随着 TOC 含量增加逐渐减小,说明纵波横波透射过页岩样品之后,高频部分被吸收。

岩石是天然的声波滤波器,不同的孔隙结构以及组分其滤波效果存在差异,有机质的存在加强了

高频部分的吸收。页岩中有机质与黏土矿物互相依存呈片状分布在骨架颗粒的表面。页岩比表面积与 TOC 含量呈显著正相关^[29],TOC 含量越高,比表面积越大。同时,有机质也是控制页岩微观孔隙结构的主要因素之一。有机质内部发育有大量的纳米级

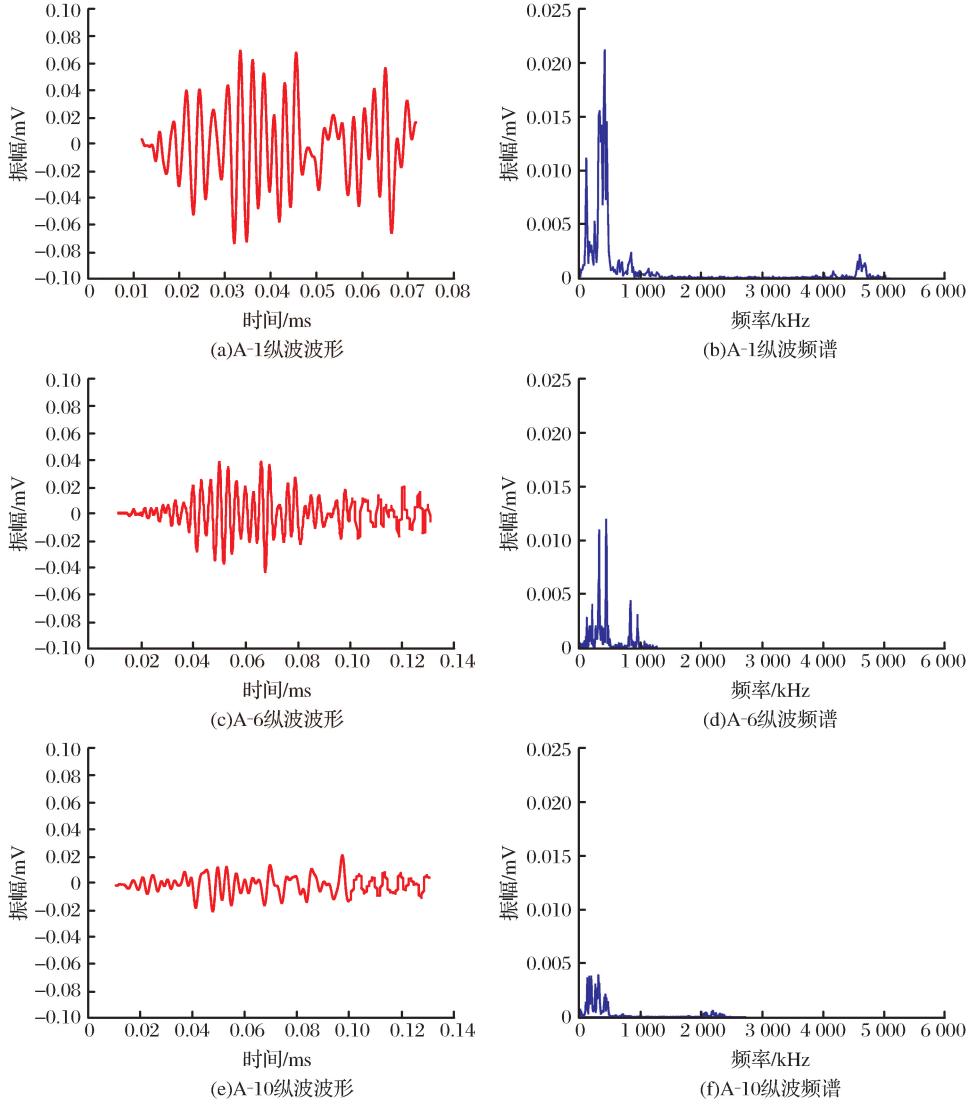


图 6 纵波波形图与频谱图

Fig.6 Longitudinal wave patterns and frequency spectrum characters

孔隙,孔面粗糙,孔间连通性差,孔隙结构十分复杂^[30,31]。声波在 TOC 含量高的页岩中传播,易发生折射、反射以及散射,加剧了声波能量的耗散,表现为时域图上声波传播振幅的减小,频谱图上高频部分被吸收。

4 讨论

页岩 TOC 含量增加,降低声波传播速度的原因分为 2 个方面:一方面,有机质力学强度低,TOC

含量越高,降低页岩整体力学性能效果越明显,力学强度降低同时表现为纵/横波传播速度降低。另一方面,声波在页岩样品中传播时,有机质增加了声波的绕射次数,声波的实际传播距离增大,TOC 含量高时传播速度降低。横波的传播方向与振动方向垂直,其受有机质的影响更加明显。因此,当 TOC 含量增大时,页岩纵/横波波速比呈增大趋势。

高 TOC 含量的页岩形心主频率变小,频谱图中主频向低频移动,说明页岩中高频部分被吸收。

形心频率 f_c 变小同样说明了页岩的强度降低^[27], 主频率不仅指示了页岩的强度, 同时也更加直观的

看出页岩岩样对频率的选择性吸收, 形心频率的这一特点可以作为辅助和波速一起作为评价指标研究

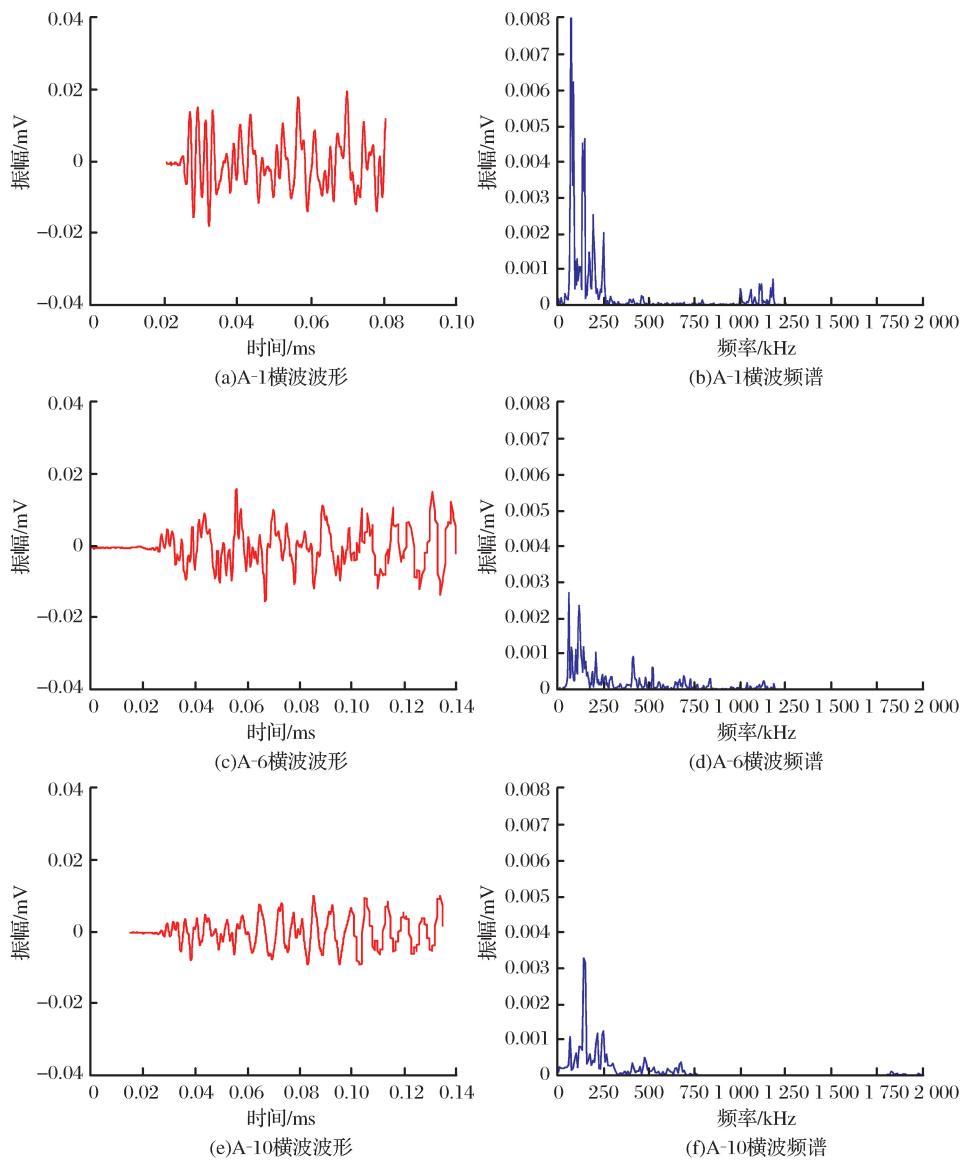


图 7 横波波形图与频谱

Fig.7 Transverse wave patterns and frequency spectrum characters

页岩的 TOC 含量。

上述研究表明, 对于特定区域和成熟度的页岩来说, TOC 是影响页岩声波传播的重要因素之一。毫无疑问, 有机质在页岩中的赋存方式同样会影响页岩的声波传播特性。因此, 有必要进一步深化有机质成熟度、类型及赋存方式对页岩声波传播的影响研究。

页岩中微纳米级孔隙结构的主控因素是 TOC^[29], TOC 含量较高的比表面积和纳米级孔隙为页岩气提供了主要赋存空间, TOC 含量越高, 页岩的吸附能力越强, 饱和吸附气量越大, 从而页岩的

含气量越大^[32], 因此, TOC 含量是评价页岩含气量的重要指标, 通过研究页岩中声波传播特性反演得到 TOC 含量对页岩含气量的评价具有重要意义。

5 结语

通过室内实验研究富有机质页岩声波传播特性, 探究了有机质含量与声波传播速度、动态力学参数以及频谱图之间的关系, 得到如下认识:

(1) 富有机质页岩的纵/横波传播速度均随着 TOC 含量的增加而降低, 并且横波受 TOC 含量的影响更加明显。

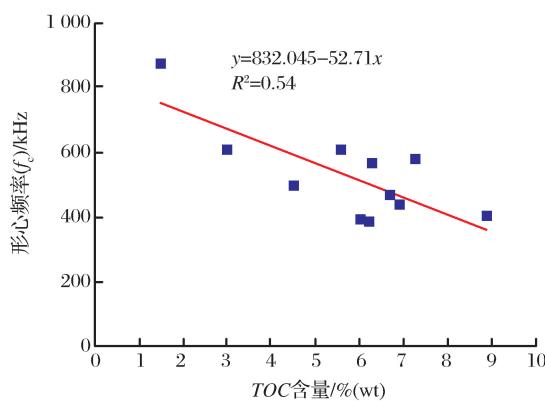
图8 纵波形心频率(f_c)随TOC含量变化

Fig.8 Longitudinal wave centroid frequency vs TOC contents

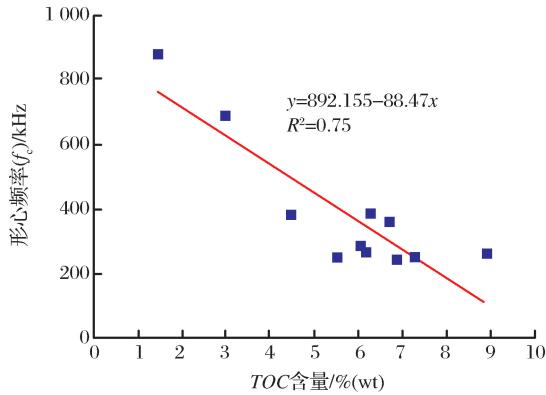
图9 横波形心频率(f_c)随TOC含量变化

Fig.9 Transverse wave centroid frequency vs TOC contents

(2) TOC含量增加,页岩力学性能变弱,岩石“变软”,动态力学参数 G 、 K 、 E 均随着TOC含量增加而降低,泊松比 ν 随着TOC含量增加而增大。

(3)页岩中有机质吸收纵/横波的高频部分,当TOC含量增加时高频部分被明显吸收,形心频率 f_c 降低。

(4)基于页岩TOC对声波波速及频谱的响应特征实验研究,有利于应用声波测井资料预测页岩的含气性。

参考文献(References)

- [1] Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399, 454. [邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399, 454.]
- [2] Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, et al. Differences and rela-

tions between unconventional and conventional oil and gas[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 1-16. [邹才能, 陶士振, 白斌, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 1-16.]

- [3] Zhang Mingming, Liang Lixi, Jiang Shaolong. Influence of different pore structures of carbonate rock on time and frequency characteristics of acoustic wave spread[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2016, 23(6): 825-828. [张明明, 梁利喜, 蒋少龙. 不同孔隙结构碳酸盐岩对声波时频特性的影响[J]. 断块油田, 2016, 23(6): 825-828.]
- [4] Zhang Shenhe, Peng Suping, Liu Yuxiang. Experimental study on properties of acoustic velocity in crack rocks of coal-bearing strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2006, 25(1): 28-31. [张慎河, 彭苏萍, 刘玉香. 含煤地层裂隙岩石声波速度特征试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2006, 25(1): 28-31.]
- [5] Meng Zhaoping, Zhang Jichang, Joachim Tiedemann. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 76-81. [孟召平, 张吉昌, Joachim Tiedemann. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1505-1510.]
- [6] Chen Qiao, Liu Xiangjun, Liu Hong, et al. An experimental study of ultrasonic penetration through bedding shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 140-144. [陈乔, 刘向君, 刘洪, 等. 层理性页岩地层超声波透射实验[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 140-144.]
- [7] Wang Guibin, Yang Cunhe, Guo Yingtong, et al. Experimental research on distribution characteristics and influential factors of P-wave velocity for rocks in northeast region of Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(supplement 1): 2834-2842. [王贵宾, 杨春和, 郭应同, 等. 川东北地区岩石纵波速度分布特征和影响因素的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2834-2842.]
- [8] Liu Xiangjun, Liu Hong, Xu Xiaolei, et al. Experimental research on acoustic wave propagation characteristic of low porosity and permeability sandstone under loading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 560-567. [刘向君, 刘洪, 徐晓雷, 等. 低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 560-567.]
- [9] Zhao Mingjie, Feng Delun. Ultrasonic velocity and attenuation of rock under uniaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 50-54. [赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 50-54.]
- [10] Wang Peng, Xu Jinyu, Liu Shi, et al. Mechanical properties and ultrasonic time-frequency characteristics of thermally damaged sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2014, 33(9): 1897-1904. [王鹏, 许金余, 刘石, 等. 热损伤砂岩力学与超声时频特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1897-1904.]
- [11] Chen Xu, Yu Jin, Li Hong, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2527-2533. [陈旭, 俞缙, 李宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2527-2533.]
- [12] Zhou Zhiguo, Zhu Hehua, Chen Wei, et al. Experimental study on acoustic wave propagation character of water saturated rock samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 911-917. [周治国, 朱合华, 陈伟, 等. 饱水岩样声波传播规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 911-917.]
- [13] Wang Yu, Li Xiao, Hu Ruilin, et al. Review of research process and application of research process and application of ultrasonic testing for rock and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 287-300. [王宇, 李晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287-300.]
- [14] Heng Shuai, Yang Chunhe, Zhang Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 609-616. [衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 610-616.]
- [15] Deng Jixin, Shi Ge, Liu Ruixun, et al. Analysis of the velocity anisotropy and its causative factors in Shales and Mudstones [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 972-979. [邓继新, 史哥, 刘瑞勋, 等. 泥岩、页岩声速各向异性及其影响因素分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 862-868.]
- [16] Xu Jingbin, Yang Chunhe, Wu Wen, et al. Experimental study of mechanics anisotropy and deformation characteristics of gas shale[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(4): 16-19. [徐敬宾, 杨春和, 吴文, 等. 页岩力学各向异性及其变形特征的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 16-19.]
- [17] Xiong Jian, Liang Lixi, Liu Xiangjun, et al. Experimental study on acoustic penetration through the Longmaxi Formation shale rock in south region of Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1071-1077. [熊健, 梁利喜, 刘向君, 等. 川南地区龙马溪组页岩岩石声波透射实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1071-1077.]
- [18] Chen Mingjun, Kang Yili, You Lijun, et al. The response of electrical parameters of saturated tight sandstone to effective stress changes[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1128-1132. [陈明君, 康毅力, 游利军, 等. 饱和水致密砂岩电学参数对有效应力变化的响应[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1128-1132.]
- [19] Huang Ying, Zhang Zhi, Lei Bin, et al. Statistical Methods and Applications [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2011: 192-193. [黄英, 张志, 雷彬, 等. 统计学方法与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2011: 192-193.]
- [20] Asef M R, Nagibi A R. The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio[J]. Geophysics, 2013, 78(3): 135-142.
- [21] Liu Bin, Wang Baoshan, Xi Daoyin, et al. The effects of water saturated cracks on seismic velocity and anisotropy in crustal rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(5): 702-710. [刘斌, 王宝善, 席道瑛, 等. 水饱和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 702-710.]
- [22] Vernik, Milovac J. Rock physics of organic shales[J]. Leading Edge, 2011, 30(3): 318-323.
- [23] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [24] Jia Jianliang. Research on the recognition and resource evaluation of the Upper Cretaceous oil shale based on geochemistry-geophysics technique in the Songliao Basin (NE, China) [D]. Changchun: Jilin University, 2012. [贾建亮. 基于地球化学—地球物理的松辽盆地上白垩统油页岩识别与资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2012.]
- [25] Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2004: 15-16. [谢和平, 陈忠辉. 岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 15-16.]
- [26] Cheng Peiqing. Digital Signal Processing Tutorial [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 97-122. [程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 97-122.]
- [27] Liu Tong, Ma Xuqing, Zhang Xiaoping, et al. Study on relationship between sound spectrum characteristics and strength of rock[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(6): 64-66. [刘彤, 马旭青, 张晓平, 等. 岩石声谱特征值与强度关系研究[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(6): 64-66.]
- [28] Wang Peng, Xu Jinyu, Liu Shi, et al. Mechanical properties and ultrasonic time-frequency characteristics of thermally damaged sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1897-1904. [王鹏, 许金余, 刘石, 等. 热损伤砂岩力学与超声时频特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1897-1904.]
- [29] Ji Wenming, Song Yan, Jiang Zhenxue, et al. Micro-nano pore structure characteristics and its control factors of shale in Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 182-195. [纪文明, 宋岩, 姜振学, 等. 四川盆地东南部龙马溪组页岩微—纳米孔隙结构特征及控制因素[J]. 石油学报, 2016, 37(02): 182-195.]
- [30] Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruoshui, et al. Characteristics and controlling factors of micropore structures of the Longmaxi Shale in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16. [郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地嘉陵江组页岩微孔隙结构特征及控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.]

- 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J].天然气工业,2014,34(6):9-16.]
- [31] Wang Shuyan, Hu Run, Ren Dongchao, et al. Genetic types and development mechanism of shale pores-with the example of shale in southeast Sichuan[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2015,34(6):9-15.[王书彦,胡润,任东超,等.页岩孔隙成因类型及其演化发育机理——以川东南地区页岩为例[J].山东科技大学学报:自然科学版,2015,34(6):9-15.]
- [32] Xue Huaqing, Wang Hongyan, Liu Honglin, et al. Adsorption capability and aperture distribution characteristics of shales: taking the Longmaxi Formation shale of Sichuan Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(5):826-832.[薛华庆,王红岩,刘洪林,等.页岩吸附性能及孔隙结构特征——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J].石油学报,2013,34(5):826-832.]

Influence of organic content on acoustic wave propagation characteristic of organic-rich shale

Kang Yi-li, Bai Jia-jia, You Li-jun

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610050, China)

Abstract: As the significant component of the gas-bearing shale, the content and type of organic control the porosity and hydrocarbon to a large degree. In the predecessors' work had been paid on the shale's velocity and mechanical properties anisotropy, caused by shale's mineral composition and arrangement anisotropy, while the research on the relationship of organic content and wave propagation characteristic of organic-rich shale was rare. The Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation organic-rich shale in Ordos Basin is the object of our research. The information of ultrasonic wave under 15 MPa confining pressure was acquired, with the assistance of the SCMS-J equipment developed in-house. The influence of organic matter content on wave propagation speed and mechanical properties of shale was analyzed. Rules of wave form and wave spectrum were researched using fast fourier transform. The following conclusions can be drawn: Firstly, Both compressional and shear wave velocities decrease as organic content increases. The impact of organic content on shear velocity was found to be more significant compared with the response with compressional velocity. Secondly, Both dynamic shear modulus (G), dynamic bulk modulus (K), dynamic Young's modulus(E) decrease as organic content increases. Poisson's ratio (ν) increases as organic content increases. The more organic content the shale "softer". Lastly, the higher organic matter content, the high frequency absorption is more obvious, the dominant frequency move to low frequency. Centroid frequency is negatively correlated with organic content. The results of this study have some guiding significance for the prediction of organic matter content by acoustic wave information.

Key words: Shale; Organic; Compressional wave; Shear wave; Rock mechanics; Frequency spectrum analysis