

纵、横波速度识别火成岩气、水层影响因素实验研究

贾俊^{1,2}, 李昌³, 王亮², 赵宁²

(1. 绵阳师范学院资源环境工程学院, 四川 绵阳 621006; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;
3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为了揭示纵、横波速度识别火成岩气、水层的物理机理与储层内在因素的联系,指导火成岩储层流体类型识别,选取准格尔盆地石炭系火成岩岩心,采用超声波脉冲法对其纵、横波速进行测量,分别获取了干燥和饱和水状态下岩心的纵、横波速度,并进一步分析了流体类型、孔隙度、密度和岩性等地质因素对纵、横波速度的影响。地层含气会引起纵波速度和纵、横波速比明显减小,而对横波速度影响较小;在低孔隙层段,气、水层的纵、横波速差异特征弱化,流体类型识别较困难;火成岩岩性复杂,纵波速度受 SiO_2 含量影响较大,应区分不同岩性进行流体识别。基于实验认识,分岩性建立 V_p/V_s-R_i 交会图对研究区测试层段进行气、水层识别,中—基性岩和酸性岩 V_p/V_s 分别为1.85和1.75时,气、水层被有效区分,但受到低孔隙度影响,气、水层响应特征差异弱化,不能区分气层与气水同层。

关键词:火成岩;纵、横波速度;物理机理;影响因素;流体识别

中图分类号:P631

文献标识码:A

Experimental study on identification of influencing factors of igneous gas and water layer by longitudinal and shear wave velocities

Jia Jun^{1,2}, Li Chang³, Wang Liang² and Zhao Ning²

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621006, China;

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

3. Hangzhou Geological Institute, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: In order to reveal the link between the physical mechanism of identifying gas and water zones in igneous rock with longitudinal and transverse waves' velocity, and the internal factors of reservoirs, and guide the identification of fluid types in igneous rock, the Carboniferous igneous rock core of the Junggar Basin was selected, and its longitudinal and transverse waves' velocities were measured via the ultrasonic pulse method. The longitudinal and transverse waves' velocities of the core in the dry state and the water-saturated state were obtained. In addition, the influence of the internal factors of reservoirs like the fluid types, porosity, density and lithology on elastic wave velocity were analyzed. The research showed that the gas-bearing state of the formation would cause the significant decrease in both the longitudinal wave velocity and the ratio of longitudinal to transversal wave velocities, but had a small impact on transversal wave velocity. In formations with low porosity, it was difficult to identify the fluid types because the difference in the characteristics of the longitudinal and transverse waves' velocities in gas and water zones was weakened. Due to the complex lithology in igneous rock and the great influence of SiO_2 content on elastic wave velocity, fluid types should be identified by different lithology. Based on the above conclusion and in order to highlight logging responses of fluids, V_p/V_s-R_i crossplots were established by different lithology to identify gas and water zones in tested formations in the research area. For intermediate-basic rock and acid rock, the V_p/V_s values are 1.85 and 1.75, respectively, which can be used to distinguish the gas zone and the water zones effectively; however, due to the influence of low porosity, it is difficult to effectively distinguish between the gas zone and the gas-water coexistence zone.

Key words: carboniferous igneous rock, longitudinal and transverse wave velocity, physical mechanism, influential factors, fluid identification

收稿日期:2017-12-13。

第一作者简介:贾俊(1982—),男,助理研究员,岩石物理分析和地球物理勘探方面的研究。

流体类型识别是发现油气富集区,认识油气藏类型的关键。针对流体类型的测井识别方法包括电法和非电法两大类。其中,非电法中的声波测井以岩石声学物理特性为基础,通过分析地层纵、横波速及速度比对气层、水层的特征差异来识别流体类型。早期的研究主要关注纵、横波速对不同流体响应特征差异,随着研究的深入,研究重点逐渐转向通过岩石物理实验,深入揭示纵、横波速影响因素及其物理机理。

纵、横波速影响因素可分为两类,一类是外因,包含温度和压力条件;另一类是岩石内在因素,包括岩石学、物性、流体饱和度等。对波速影响因素的研究是从外及里开展的。Faust通过分析实验数据,提出了纵波速度和深度的经验关系,其实质是与压力的关系^[1];Birch通过实验发现不同压力范围,波速的敏感程度存在差异^[2-4];Nur A从岩石微裂纹闭合机理出发,提出了岩石压密阶段波速随应力呈二次函数关系^[5];高龙生、沈联蒂、Meglis等相继开展了纵、横波速与压力关系的研究^[6-8]。Timur综合考虑了温度和压力对波速的影响^[9];Kern研究认为,纵、横波速度降低是由于矿物的差异热膨胀导致微裂隙张开引起^[10-11]。

随着不同岩性、物性、密度和含水饱和度岩样在实验中表现出来的差异化特征,人们逐渐意识到岩石本身也是影响纵、横波速的一个重要方面。不同矿物成分和矿物含量的岩石,纵、横波速差异明显^[4,12-13],通过收集、整合前人研究资料 and 实际数据,李庆忠绘制了不同岩石纵、横波速度规律综合图^[14];利用岩性与波速的关系,Domenico和Wilkens等开展了岩性识别研究^[15-17]。Wyllie基于实验,提出了地层中P波与孔隙度的线性关系并分析了影响因素^[18-19],但由关系式所求得的孔隙度在高孔隙度地层误差较大;Raymer提出了适用于高、低孔隙度地层的 $V_p-\varphi$ 关系式^[20]。Han、Tosaya、刘斌和史譔等围绕纵、横波速与孔隙度之间的关系也开展了相关研究^[21-24]。

前人的研究对象主要是碎屑岩和碳酸盐岩,且研究内容往往偏重于对实验结果的描述,未对实验的物理机理深入分析;对于岩性复杂的火成岩,其内在因素对纵、横波速的影响也有待深入的研究。因此,选取准格尔盆地石炭系火成岩为研究对象,采用超声波脉冲法测试纵、横波速度,对影响纵、横波速的岩石内在因素进行分析,揭示其物理形成机理,并

采用测试数据标定测井资料,开展纵、横波速度识别火成岩气、水层应用研究,以期能指导火成岩储层流体类型识别。

1 实验方法

1.1 岩心样本制备

实验岩样取自准格尔盆地石炭系地层(埋深3 600 m),包括安山岩、玄武岩、闪长玢岩、花岗斑岩等一中基性、酸性火成岩样共15块(表1,图1),岩石矿物成分均通过X衍射和薄片鉴定方法确定。岩样被加工成圆柱体($d=25\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$)。将岩样置于干燥箱中,在50℃条件下烘烤48 h,并保持真空,制备干燥样品。干燥岩心样品实验完成后,岩样被置于真空玻璃容器中,利用大气压将水压入容器内,完全淹没岩样后,浸泡48 h,制备成水饱和样品。实验时,饱水样品侧表面用塑料薄膜包裹,防止水分流失。



图1 火成岩岩心样本

Fig. 1 Igneous core sample

1.2 实验方法及设备

纵、横波速测试按照中国工程岩体试验方法标准(GB/T50266-99),采用超声脉冲法进行测定^[2]。实验采用美国GCTS公司RTR-1000岩石力学测试系统,将系统原水力压头替换为承压型声波换能器对岩样施加轴向压力,其轴向最大承压可达430 MPa。换能器纵波激发中心频率为960 kHz,横波激发中心频率为620 kHz,测量精度为0.1 μs。声波采集使用RIGOL-DS5022M示波器与计算机相联,同步采集纵、横波时差及波形,长度测量误差小于0.01 mm,数

据采集时间分辨率为 $0.02 \mu\text{s}$ 。

实验时,将承压式声波换能器放置在样品两端,通过GCTS-RTR-1000岩石力学系统对岩样施以轴向压力,使岩样与换能器紧密接触。连接方波脉冲发射—接收器后,再与数字储存示波器相连,最后与计算机连接,构成一个完整的纵、横波速测试系统(图2)。通过脉冲发射器产生高压电脉冲信号加至换能器转化为超声波。超声波经过换能器与岩样间耦合后,在岩样中传播,到达岩样另一端时,被接收端探头接收。超声脉冲发生与接收时间之差 T 被示波器和电脑存储测定,扣除在耦合层中的传播时间

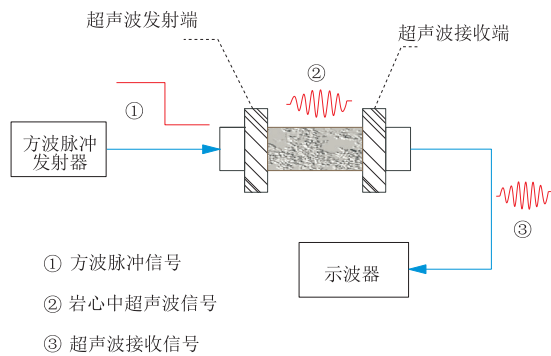


图2 超声脉冲纵、横波速试验示意图

Fig. 2 Longitudinal and transverse wave velocity test of ultrasonic pulse

T_0 后,得到超声波在岩样中的传播时间 T ,波速 V 可由岩样长度 L 与 T 之商得到,即 $V=(T-T_0)/L$ 。

2 实验结果及分析

在5 MPa的轴向压力和常温条件下,饱和水岩心的纵波速度明显大于干燥样品的 V_p (表1),饱和水前后 V_p 平均比值1.18,其中玄武岩 V_p 平均比值最高,为1.34,安山岩接近平均值,闪长玢岩和花岗斑岩 V_p 比值最小,且二者比值接近,约等于1.09。而岩样是否饱和水对横波速度影响较小,饱和水前后 V_s 趋近,比值为1.07。

基于纵、横波速测试结果,对波速及其影响因素关系进行了分析。

2.1 纵、横波速与流体类型关系

实验表明(图3),火成岩中 V_p 对气体含量敏感,干燥样品(饱和气) V_p 值显著小于饱和水岩样,少量气体可使 V_p 显著减小,而 V_s 对气体不敏感,饱和水前后岩样 V_s 变化很小。实验中个别岩样饱和水 V_s 高于干燥时的 V_s ,可能是由于实验压力较低的原因。

岩样饱和水前后纵、横波速度差异主要是由它

表1 纵、横波速测试结果

Table 1 Longitudinal and transverse wave velocity test results

序号	岩样编号	岩性	孔隙度, %	饱和样品				干燥样品				纵/横波速比	
				密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	V_p / ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_s / ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_p/V_s	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	V_p / ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_s / ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_p/V_s	$V_{p\text{饱}}/V_{p\text{干}}$	$V_{s\text{饱}}/V_{s\text{干}}$
1	00429		0.20	3.02	3.87	2.11	1.83	2.81	3.08	2.02	1.52	1.26	1.04
2	05640	玄武岩	2.10	2.85	3.36	2.11	1.59	2.66	3.19	2.33	1.37	1.05	0.91
3	16487		14.80	2.80	3.88	2.17	1.79	2.41	2.74	1.46	1.88	1.42	1.49
4	16488		13.70	2.74	4.02	2.05	1.96	2.35	2.44	1.97	1.24	1.65	1.04
5	04678		15.30	2.68	2.38	1.45	1.64	2.29	2.36	1.49	1.59	1.01	0.97
6	04673	安山岩	13.00	2.62	2.53	1.61	1.57	2.27	2.50	1.48	1.69	1.01	1.09
7	04400		1.00	2.69	4.24	2.74	1.55	2.54	3.29	2.19	1.51	1.29	1.25
8	04404		2.60	2.54	3.99	2.00	1.99	2.36	3.09	2.01	1.53	1.29	1.00
9	20321		8.00	2.74	3.02	1.89	1.59	2.46	3.17	1.75	1.82	0.95	1.08
10	05568	闪长玢岩	9.20	2.64	3.86	2.12	1.83	2.37	2.90	1.83	1.59	1.33	1.16
11	05579		9.90	2.60	3.45	1.88	1.84	2.33	2.96	1.93	1.54	1.17	0.97
12	20329		11.10	2.66	3.01	1.79	1.68	2.40	3.17	1.80	1.76	0.95	0.99
13	06103		6.80	2.62	4.20	2.53	1.66	2.39	3.79	2.46	1.54	1.11	1.03
14	06106	花岗斑岩	3.30	2.64	3.91	2.05	1.91	2.45	3.41	2.06	1.66	1.15	1.00
15	06109		8.70	2.64	2.95	1.80	1.64	2.37	2.91	1.84	1.58	1.01	0.98
	平均值		7.90	2.70	3.51	2.02	1.74	2.43	3.00	1.91	1.59	1.18	1.07

注: V_p 为纵波速度; V_s 为横波速度; V_p/V_s 纵/横波速比。

们在介质中的传播机理及气、水物理性质差异造成的。横波以正弦波形式在介质中传播,不会引起介质和孔隙的体积变化;同时,水不具有抗剪能力,根据弹性波速理论公式(式1、式2),横波不受含水饱和度的影响,总是接近于干燥岩石的波速^[25-26]。而纵波是以压缩波的形式传播,会引起介质中孔隙形状、体积的变化,受孔隙含水饱和度影响;同时,当孔隙中充满水,纵波可以通过水与岩石颗粒耦合传播,缩短了传播路径,波速远大于干燥岩样。

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

式中: K 为体积模量,无量纲; μ 为剪切模量,无量纲; ρ 为密度, g/cm^3 。

2.2 纵、横波速与孔隙度关系

纵、横波在孔隙流体中的传播速度远低于在岩石骨架中的传播速度,因此,无论是干燥样品还是饱和水样品,纵、横波速度都随孔隙度增加而减小^[27]。由于体积模量对流体类型非常敏感^[28],根据弹性波速理论公式(式1、式2),岩石孔隙中充满水会显著增大岩样的有效体积模量(K),对剪切模量影响较小。相对于干燥岩样,饱和水岩样的有效体积模量(K)增大,纵、横波速度更快(图3)。本次实验的火成岩样孔隙度较小,介于0.2%~15.3%,干燥岩样孔隙空间被气体充填,剪切模量变化较小,随着孔隙度增大,岩样密度变化可以忽略(平均值 $2.43 g/cm^3$),而体积模量会有所增加,纵、横波速比呈现缓慢增大趋势;对于饱和水岩样,体积模量较干燥岩样值大,但岩样

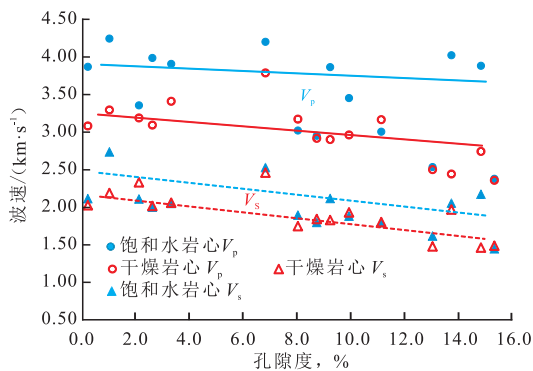


图3 纵、横波速与孔隙度关系
Fig. 3 Relation between longitudinal and transverse wave velocity and porosity

密度增大明显(平均值 $2.70 g/cm^3$),削弱了体积模量增大的影响,导致纵、横波速比增大趋势趋于平缓(图4)。前人对纵、横波速比与孔隙度关系研究^[11,13,15,22]表明,当岩石孔隙度较低时(小于20%),纵、横波波速比的增大趋势平缓;当孔隙度大于40%时,波速比随孔隙度增大呈指数递增幅度明显加快(图5)。

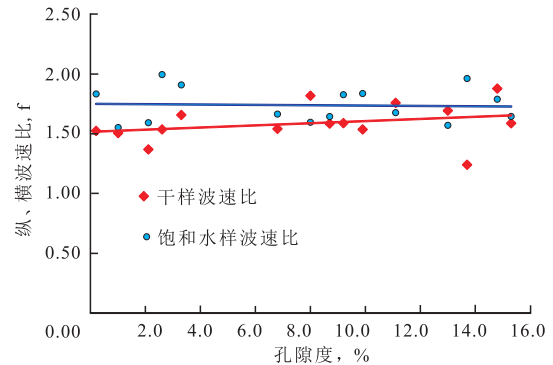


图4 纵、横波速比与孔隙度关系(实验数据)
Fig. 4 Relation between longitudinal and transverse wave velocity ratio and porosity(experimental data)

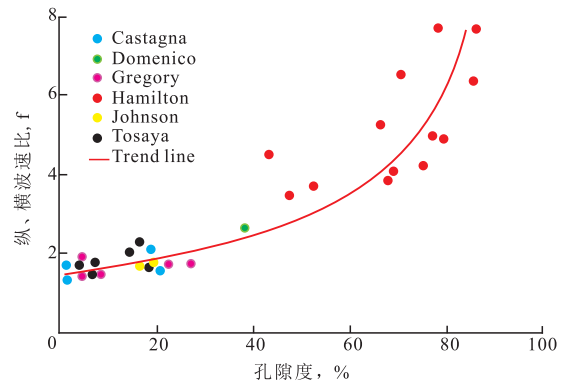


图5 纵、横波速比与孔隙度关系
(据 Castagna, Domenico 等)
Fig. 5 Relation between longitudinal and transverse wave velocity ratio and porosity(according to Castagna, Domenico, et al)

2.3 纵、横波速与岩心密度关系

岩石纵、横波速度随密度增加而增加,且纵波速度增加更显著。Birch、Castagna 和 Gardner 等采用不同数学形式获得了波速与密度的非线性关系公式^[3,13,29]。为了排除孔隙度及水的影响,研究选取干燥岩心,采用 Gardner 函数形式($\rho=cV_p^a$),分别对不同岩性样品在5 MPa 轴向压力条件下的纵、横波速度与密度关系进行了拟合(表2),纵波速度与密度符合幂函数关系,除花岗斑岩外,其它岩性相关性较好;而

表2 火成岩岩心样本纵、横波速与密度回归关系
Table 2 Relation between longitudinal and transverse wave velocities and density regression of igneous core samples

岩性	ρ 和 V_p		ρ 和 V_s	
	回归公式	相关系数	回归公式	相关系数
玄武岩	$\rho=1.349V_p^{0.608}$	0.89	$\rho=2.191V_s^{0.232}$	0.55
安山岩	$\rho=1.795V_p^{0.269}$	0.87	$\rho=2.087V_s^{0.218}$	0.89
闪长玢岩	$\rho=1.541V_p^{0.394}$	0.80	$\rho=3.251V_s^{-0.512}$	0.94
花岗斑岩	$\rho=2.269V_p^{0.049}$	0.37	$\rho=2.378V_s^{0.016}$	0.14

横波速度与密度的虽然仍符合幂函数关系,但闪长玢岩呈幂函数递减。

2.4 纵、横波速与岩性关系

火成岩中,矿物紧密结合在一起,孔隙空间很小,岩石矿物成分对纵、横波速度影响较大。相对于火成岩矿物组分,纵波在SiO₂中传播速度较慢^[30],而随着岩性由基性岩向酸性岩的过渡, SiO₂含量递增,即基性火成岩SiO₂含量介于45%~52%,中性火成岩介于52%~65%,酸性火成岩SiO₂含量大于65%。因此,纵波在SiO₂含量高的酸性岩中的传播速度小于SiO₂含量较少的中性火成岩和基性火成岩^[31]。

3 应用效果

根据上述火成岩纵、横波速度与地层影响因素关系,当地层含气时纵、横波速度比会显著减小;随着孔隙度增大,纵、横波速度比增大,此外,岩性、密度等对纵、横波速比也有影响。由于电阻率最能反映不同类型流体的测井响应特征差异,采用 V_p/V_s 与

电阻率交会,对研究区内10口井石炭系火成岩储层开展气、水层识别。为了消除岩性的影响,按中一基性岩和酸性岩分别建立判别图版。

中一基性岩 V_p/V_s-R_t 交会图(图6a)表明,当 $V_p/V_s=1.85$ 时,气层和水层能明显区分开,除个别测试层点,含气层 V_p/V_s 值均低于水层,位于1.85以下。由于火成岩孔隙发育程度较弱,受低孔隙影响,气、水层测井特征差异弱化,气水同层难以有效区分,部分气水层误入水层区间。酸性岩 V_p/V_s-R_t 交会图(图6b)与中一基性岩特征相似,只是SiO₂含量影响,纵波速度降低,区分气、水层的 V_p/V_s 值降为1.75。

4 结论及建议

基于火成岩纵、横波速实验分析,对纵、横波速度与岩石内在因素之间的关系取得了以下认识:

1) 相对于横波速度,纵波速度对气体敏感,地层含气会引起纵波速度和纵、横波速比显著减小,这是纵、横波速度识别气、水层的物理基础。

2) 纵、横波速比与孔隙度具有非线性正相关性,在低孔隙度层段气、水层的纵、横波速比变化较小,因此,在利用纵、横波速比判别储层流体类型时应考虑孔隙度的影响,尤其在低孔隙度层段。

3) 纵、横波速与密度的Gardner函数关系属于经验公式,应根据具体情况确定相关参数,建立适合本地区的回归公式。

本次实验未考虑围压、温度等外在影响因素。而压力和温度的变化均可能对岩石孔隙度、岩石矿物成分和流体饱和度等产生影响,因此,有必要对火成岩纵、横波速度与温度、压力的关系开展进一步研究。

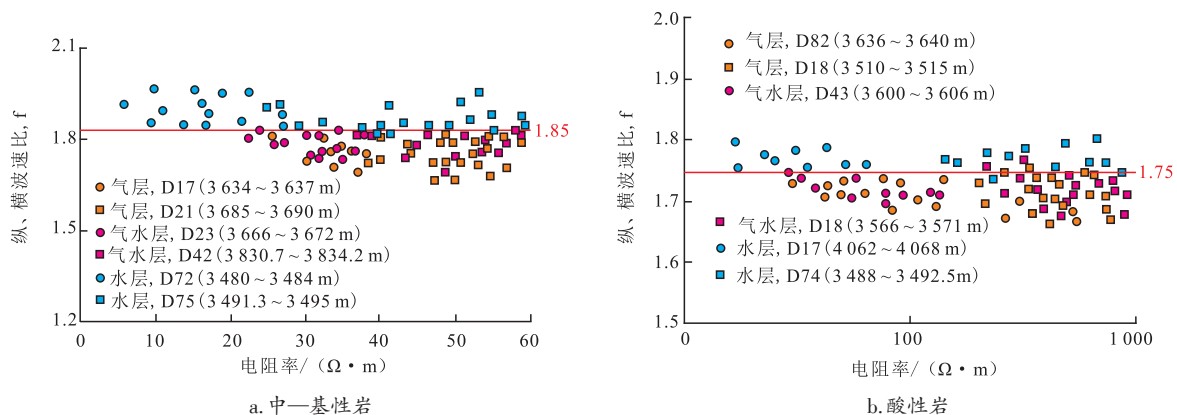


图6 中一基性和酸性火成岩 V_p/V_s-R_t 交会图

Fig. 6 V_p/V_s-R_t cross plot of neutral-base and acidic igneous rocks

参考文献

- [1] Faust L Y. A velocity function including lithologic variation[J]. *Geophysics*, 1953, 18(2): 271-287.
- [2] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kb. Part I [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1960, 65(4): 1083-1102.
- [3] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kb. Part II [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(7): 2199-2224.
- [4] Birch F. Compressibility; elastic constants in handbook of physical constants[J]. *Geological Society of America Memoirs*, 1966, 97: 97-174.
- [5] Nur A. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(8): 2022-2034.
- [6] 高龙生,葛焕称. 中国大陆岩石标本在高压下的弹性波速的初步研究[J]. *地球物理学报*, 1975, 18(1): 26-38.
- [7] 沈联蒂. 岩性、含油气性、有效覆盖压力对纵、横波速度的影响[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(3): 391-399.
- [8] Meglis I L, Greenfield R J, Engelder T. Pressure dependence of velocity and attenuation and its relationship to crack closure in crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996, 101(B8): 17523-17533.
- [9] Timur A. Temperature dependence of compressional and shear wave velocities in rocks[J]. *Geophysics*, 1977, 42(5): 950-956.
- [10] Kern H, Richter A. Temperature derivatives of compressional and shear wave velocities in crustal and mantle rocks at 6kbar confining pressure[J]. *Geophysics*, 1981, 49: 47-56.
- [11] Zhang Jincai, James Lang, William Standifird. Stress, porosity and failure-dependent compressional and shear velocity ratio and its application to wellbore stability[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 69(4): 193-202.
- [12] Pickett G R. Acoustic character logs and their application in formation evaluation[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1963, 659(6): 429-434.
- [13] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. *Geophysics*, 1985, 50(4): 571-581.
- [14] 李庆忠. 岩石的纵、横波速度规律[J]. *石油地球物理勘探*, 1992, 27(1): 1-12.
- [15] Domenico S N. Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity[J]. *Geophysics*, 1984, 49(8): 1188-1195.
- [16] Wilkens R, Simmons G, Caruso L. The ratio V_p/V_s as a discriminant of composition for siliceous limestones[J]. *Geophysics*, 1984, 15(4): 1850-1860.
- [17] Wilkens, Roy H. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of Petrophysics[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2015, 78(51): 600.
- [18] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. *Geophysics*, 1956, 21(1): 41-70.
- [19] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[J]. *Geophysics*, 1958, 23(3): 459-493.
- [20] Raymer L, Hunt E R, Gardner J S. An improved sonic transit time-to-porosity transform[C]// paper SPWLA-1980-P presented at the SPWLA 21st Annual Logging Symposium, 8-11 July 1980, Lafayette, Louisiana, USA.
- [21] Han D, Nur A, Morgan D. Effect of porosity and clay content on wave velocity in sandstones[J]. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [22] Tosaya C, Nur A. Effect of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, 9(1): 5-8.
- [23] 刘斌, Kern H, Popp T. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(4): 538-544.
- [24] 史譔, 杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2001, 37(3): 379-384.
- [25] 施行觉, 徐果明, 靳平, 等. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1995, 38增刊(1): 281-287.
- [26] 施行觉, 夏从俊, 吴永钢. 储层条件下波速的变化规律及其影响因素的实验研究[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(2): 234-240.
- [27] 胡学红, 李长文, 李新, 等. 低孔隙度低渗透率砂岩的声波特性实验研究[J]. *测井技术*, 2004, 28(4): 273-276.
- [28] 刘国强, 谭廷栋. 岩性和孔隙流体性质的弹性模量识别法[J]. *石油物探*, 1993, 32(2): 88-96.
- [29] Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphictraps[J]. *Geophysics*, 1974, 39(6): 770-780.
- [30] Simmons G. Single crystal elastic constants and calculated aggregate properties[J]. *Journal of Graduate Research Center (Southern Methodist University)*, 1965, 34: 1-269.
- [31] Schon J H. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1996.

(编辑 尹淑容)