

文章编号:1673-5005(2012)03-0069-07

塔南凝灰质火山碎屑岩储层岩石物理试验研究

韩学辉¹, 李来林², 杨 龙³, 赵海波², 成德安², 仇吉亮⁴

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712;
3. 新疆油田重油开发公司, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 大庆钻探工程公司钻井一公司, 黑龙江 大庆 163411)

摘要:在模拟地层温度、压力条件下,试验观测塔南白垩系南屯组、铜钵庙组的凝灰质砾岩、凝灰质岩屑砂岩储层的纵、横波速度,考察岩性、矿物含量、胶结方式和接触类型、密度、孔隙度、泥质含量、含水饱和度对火山碎屑岩声波速度的影响。在试验考查的范围内,发现:①致密凝灰质砾岩的声速明显高于储油物性较好的凝灰质砾岩和凝灰质岩屑砂岩的声速;②纵、横波速度随岩浆岩屑含量的增加而增大,随石英、长石含量的增大而减小;③相同孔隙度条件下,孔隙式胶结、线性接触岩石的纵、横波速度最大,基底式胶结、不接触-点接触岩石的纵、横波速度最小,纵波速度较横波速度对胶结类型、接触方式更敏感一些;④纵、横波速度随密度增大而增大,凝灰质岩屑砂岩的声波速度与密度存在较好的幂函数关系,纵横波速度随孔隙度、泥质含量增大而减小,凝灰质岩屑砂岩的声速与孔隙度和泥质含量有很好的负线性函数关系,但泥质(主要为凝灰质)的影响仅为孔隙度影响的1/5~1/10,可以忽略不计;⑤随着含水饱和度增加,纵波速度对流体变化比横波速度更为敏感,且声速变化幅度与孔隙度存在正相关关系。

关键词:凝灰质火山碎屑岩; 声波速度; 胶结类型; 接触方式; 岩石物理性质

中图分类号:P 584

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.011

Petrophysical experimental research in Tanan tuffaceous pyroclastic rock reservoir

HAN Xue-hui¹, LI Lai-lin², YANG Long³, ZHAO Hai-bo², CHENG De-an², QIU Ji-liang⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China;

3. Heavy Oil Development Company of Xinjiang Oilfield, Karamay 834000, China;

4. Drilling Company No. 1, Daqing Drilling and Prospecting Engineering Company, Daqing 163411, China)

Abstract: Under the condition of simulated formation temperature and pressure, the compression and shear wave velocity of the tuffaceous conglomerates and rock-fragment sandstones of the reservoirs in K1t, K1n group of Cretaceous system in Tanan were measured. The effects of lithology, mineral content, cementation type and particle contact mode, density, porosity, shale content, and water saturation on the acoustic velocity of the tuffaceous pyroclastic rock were studied. Within the observation limits, some rules are found: ①The acoustic velocity of the fine tuffaceous conglomerates is remarkably greater than that of the tuffaceous rock-fragment sandstones with good physical property. ②The acoustic velocity increases with fragment content increasing, and decreases with quartz and feldspar content increasing. ③In the same porosity, the velocity of porous cementation and lineal contact rock is the biggest, the velocity of basal cementation and matrix-support-point contact rock is the smallest and the compression velocity is more sensitive to the cementation type and particle contact mode than shear wave velocity. ④The acoustic velocity increases with density increasing, and the velocity of tuffaceous rock-fragment sandstones keeps a good relation with density in form of power function. The acoustic velocity decreases with porosity and shale content increasing, the velocity of the tuffaceous rock-fragment sandstones keeps a good relation with porosity and shale content in form of negative linear function, but effect of shale (be made of tuffaceous) content is only 5-10 times as small as that of the

收稿日期:2011-11-22

基金项目:山东省自然科学基金项目(Y2008F08);国家油气专项课题(2011ZX05009-003)

作者简介:韩学辉(1974-),男(汉族),辽宁盘锦人,副教授,博士,博士后,从事储层岩石物理研究。

porosity, hence can be neglected. ⑤ With porosity increasing, compression wave velocity is relatively sensitive to fluid alteration, and the range in which velocity varies keeps positive correlation with porosity.

Key words: tuffaceous pyroclastic rock; acoustic velocity; cementation type; particle contact mode; petrophysical property

海塔盆地白垩系下统扎赉诺尔群铜钵庙组、南屯组发育有大量含油致密凝灰质砾岩和中孔低渗的凝灰质岩屑砂岩储层,具有很大的勘探潜力^[1]。自Wyllie^[2]提出时间平均公式以来,前人针对沉积岩储层声速特征及其影响因素(岩性、物性、流体性质、密度及环境因素)已进行了大量的研究^[2-20],而有关凝灰质岩屑砂岩储层的声学性质鲜见文献报道。笔者通过试验测量塔南砾岩和凝灰质岩屑砂岩的纵、横波速度,分析岩性、矿物含量、胶结方式和接触类型、密度、孔隙度、泥质含量、流体饱和度对岩石纵、横波速度的影响规律,为应用地震、测井资料开展海塔盆地火山碎屑岩的岩性预测、孔隙度估算、流体性质识别的方法研究提供依据。

1 塔南火山碎屑岩储层地质特征

塔南白垩系南屯组、铜钵庙组层段岩心的薄片资料分析结果表明该区样品类型属于凝灰质砾岩、凝灰质岩屑砂岩及凝灰岩。岩石组分以石英、长石、岩浆岩岩屑为主,填隙物主要是凝灰质杂基。颗粒分选度为较差、差,长石风化程度为中、深,磨圆度多以次棱角、次棱角-次圆为主,杂基、颗粒支撑,颗粒间以不接触-点接触、点-线接触,孔隙类型属于原生粒间孔隙和粒间扩大孔隙,胶结类型主要为孔隙式胶结。其中,凝灰质岩屑砂岩物性较好(孔隙度平均值为9.96%、渗透率平均值为 $28.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、泥质含量最低),是该地区主要的储层;物性较好的凝灰质砾岩也可以作为有利储层。

2 试验方法

2.1 样品的制备

对塔南白垩系南屯组、铜钵庙组的凝灰质砾岩、凝灰质岩屑砂岩及凝灰岩,试验中主要制作了3种测试样品:铸体薄片、颗粒样(3 g)和柱塞岩样(直径25.4 mm)。铸体薄片主要用于薄片鉴定,颗粒样用于激光粒度分析,柱塞样品用于密度、孔隙度、渗透率、声波速度的测试。柱塞样品的清洗、切割、端面抛光、烘干等制作是严格按照标准SY/T5336-2006实施的。对于需要饱和度控制的岩样,试验中采取了二氧化碳置换氧气、氮气的抽真空加压饱和和技

术来确保样品的近完全饱和。该技术主要利用二氧化碳更容易吸附于岩样颗粒表面、在盐水中溶解度极高的特点,在常规的抽真空(真空度-0.095 MPa)加压(28 MPa)饱和技术外,加入了二氧化碳置换氧气、氮气的环节。在样品含水饱和度的控制中,采用了非稳态相对渗透率测量中的油(气)驱水技术。

2.2 孔隙度、渗透率、泥质含量、密度测量

样品孔隙度、渗透率的测量采用美国CORE-LAB公司的CMS300测量仪。在模拟地层压力条件(有效压力25 MPa)下,样品的孔隙度分布在0.02%~21.19%,平均值为6.21%;渗透率分布在 $(0.01 \sim 793) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $12.61 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。泥质含量采用MASTERSIZER-2000激光粒度分析仪测定,泥质含量分布在14.2%~38.6%,平均值为24.18%。岩样的密度 ρ 由岩样的质量 m 与CMS300测量仪测定的骨架体积 V_k 和孔隙体积 V_{por} 得到:

$$\rho = m / (V_k + V_{\text{por}}). \quad (1)$$

2.3 声波速度测量

2.3.1 测量装置和测量方法

岩样声波速度的测量使用中国石油大学(华东)研制的高温高压多参数测量仪(图1(a))。该仪器的声波速度测试系统由液压泵、温度控制单元、岩样长度计量(由微位移传感器承担)和声波测试单元4部分构成(图1(b)),可在模拟地层温度($\leq 150^\circ\text{C}$)、压力(围压、轴压、有效压力小于70 MPa)条件下测量岩样的声波速度。其中,声波测试单元由PANAMETRICS公司的5800型脉冲发生器、AGILENT公司的DSO6032A型数字示波器、PANAMETRICS公司的声学探头和信号传输线组成。纵、横波晶片频率为1.2、0.6 MHz,探头纵、横波频率为0.25、0.12 MHz。

纵、横波速度的测定采用超声脉冲透射法。介质的声波速度是由声波在介质中传播的距离 L 与声波到时 t 减去系统零时 t_0 的比值确定,即

$$v = L / (t - t_0). \quad (2)$$

式中, v 为声波速度,m/s; L 为岩样长度,m; t 为声波到时,s; t_0 为系统零时,s。

岩样的纵、横波速度总体上随石英含量、长石含量的增加而减小,随着岩浆岩岩屑含量的增加而增大,与凝灰质杂基含量关系不明显。该结论与 Schön^[3]统计的大量火成岩声波速度试验数据规律一致。其中,致密凝灰质砾岩的声速明显高于物性较好的凝灰质砾岩和凝灰质岩屑砂岩样品的声波速度,分析认为是由其较低的石英含量($\leq 10\%$)和较高的岩浆岩岩屑含量($\geq 60\%$)决定的。有一些样本点的数据变化趋势不符合上述趋势,推断与这些矿物在岩石中的几何表现、分布状况、胶结情况以及

矿物颗粒之间的孔隙度有关^[16]。

3.2 胶结类型和颗粒接触方式

图3是不同胶结类型和颗粒接触类型岩样的纵横波速度与孔隙度的交会图。可见,相同孔隙度条件下,孔隙式胶结、线性接触岩样纵、横波速度最大,基底式胶结、不接触-点接触岩样的纵横波速度最小,接触式胶结、点接触-线接触岩样的纵横波速度居中。相对横波速度,不同胶结类型、接触方式岩样的纵波速度相差更大一些,表明纵波速度对胶结类型、接触方式要更为敏感一些。

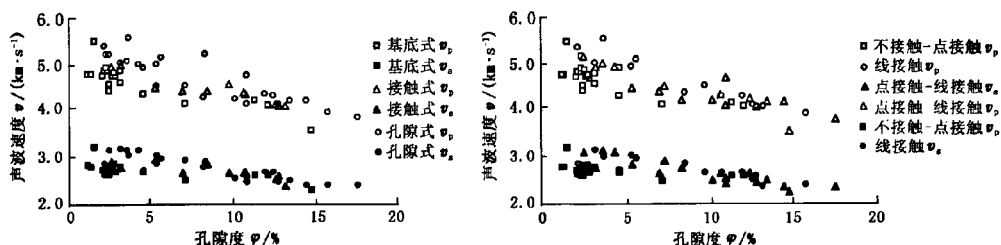


图3 纵横波速度随孔隙度、胶结类型、颗粒接触类型的变化

Fig.3 Variation of compressional and shear wave velocities with porosity on cementation type and particle contact mode

机制分析认为:基底式胶结代表碎屑和胶结物同时沉积,是快速堆积的产物,颗粒在杂基中大多彼此不接触而呈漂浮状孤立分布,岩样的刚度小,体积模量小,声波在岩样中的传播速度较小;孔隙式胶结一般是碎屑先沉积,颗粒之间相互以线或其他方式紧密堆积,颗粒孔隙中的胶结物是成岩期孔隙溶液的化学沉淀,当岩样的胶结物被溶解时,所造成的孔隙再次被次生胶结物填充,岩样的刚度大,体积模量大,声波在岩样中的传播速度较大;接触式胶结形成于成岩一后生阶段,有些原来的胶结物被淋滤掉而没有新的次生胶结,声波在岩样中的传播速度居中。因此,存在应用声波速度特别是纵波速度研究成岩作用的可能,有进一步研究的必要。

3.3 岩样密度

Simmons^[4]认为岩石声波速度与岩石组分和密

度之间存在广义线性关系;Gardner^[5]提出了声速与密度的幂函数关系式;在此基础上,马中高等^[6]采用最小二乘法将纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 和密度 ρ 结合在一起进一步提出了广义的 Gardner 公式。表2为凝灰质岩屑砂岩的密度 ρ 与声波速度的拟合关系。结果表明,采用广义 Gardner 公式得到的拟合公式相关系数与 Gardner 一般形式相比变化不大,仅仅略有提高,在缺少横波速度的情况下,仅仅采用纵波速度反演得到的密度 ρ 的方法也较为可靠。该结论与马中高、解吉高(2005)结果^[6]类似。

图4为样品密度 ρ 与纵、横波速度交会图。由图看出,岩样的纵波速度、横波速度随着岩样密度的增加而增大。纵、横波速度较高的数据点为凝灰质砾岩(位于图4右上方椭圆内),大体上可用 $v_p \geq 5.3 \text{ km/s}$ 将其与凝灰质岩屑砂岩区分开。

表2 声波速度与密度的拟合关系

Table 2 Fitting equation between density and compressional or shear wave velocities

岩样	拟合公式(v_p)	相关系数	拟合公式(v_s)	相关系数	广义 Gardner 拟合公式	相关系数
干岩样	$\rho = 1.095 v_p^{0.537}$	$R = 0.86$	$\rho = 1.506 v_s^{0.482}$	$R = 0.85$	$\rho = 1.218 v_p^{0.318} v_s^{0.222}$	$R = 0.88$
饱和水样	$\rho = 1.332 v_p^{0.408}$	$R = 0.81$	$\rho = 1.995 v_s^{0.246}$	$R = 0.82$	$\rho = 1.697 v_p^{0.157} v_s^{0.158}$	$R = 0.87$
饱和油样	$\rho = 1.314 v_p^{0.418}$	$R = 0.87$	$\rho = 1.839 v_s^{0.314}$	$R = 0.82$	$\rho = 1.306 v_p^{0.427} v_s^{0.006}$	$R = 0.87$

注:声波速度 v_p 、 v_s 单位为千米每秒(km/s),岩样密度 ρ 单位为克每立方厘米(g/cm^3)。

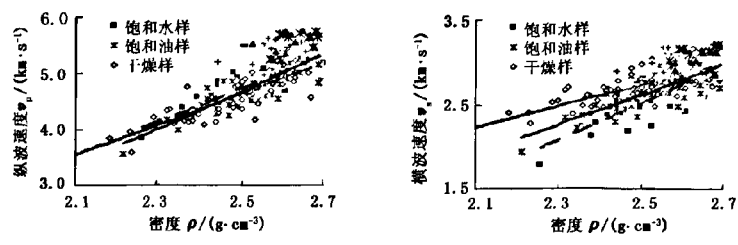


图 4 密度与声波速度交会图

Fig. 4 Compressional wave and shear wave velocities versus density

3.4 孔隙度、泥质含量

针对沉积碎屑岩孔隙度、泥质含量对声波速度的影响规律, Han、Nur、Alberto、Klimentos、史诒等^[7-16]曾做过大量的研究。结果表明:岩样的纵、横波速度随着孔隙度的增加而减小;泥质含量对声波速度的影响较为复杂,在固结较好砂岩中,声波速度随着黏土含量的增加有减小的趋势,但在固结较差的岩样中,黏土的增加会使岩石轻微变硬,纵、横波速度有增大的趋势;总的来说泥质含量是造成砂岩试验结果在声波速度-孔隙度交会图中出现离散的重要原因。

根据 Han^[7]给出的线性函数经验关系式 $v=a+b\varphi+cv_{sh}$ (V_{sh} 为泥质含量),对凝灰质岩屑砂岩纵、横波速度和孔隙度-泥质含量进行了回归,结果见表 3。

表 3 声波速度与孔隙度、泥质含量的关系

Table 3 Relation of compressional and shear wave velocities, porosity and clay content

岩样	表达式	相关系数
干岩样	$v_p=5.12-6.98\varphi-0.4V_{sh}$	$R=-0.86$
	$v_s=3.33-4.91\varphi-0.82V_{sh}$	$R=-0.87$
饱和水样	$v_p=5.45-6.12\varphi-0.5V_{sh}$	$R=-0.87$
	$v_s=3.28-5.7\varphi-0.75V_{sh}$	$R=-0.89$
饱和油样	$v_p=5.46-7.18\varphi-0.65V_{sh}$	$R=-0.90$
	$v_s=3.31-5.1\varphi-0.83V_{sh}$	$R=-0.88$

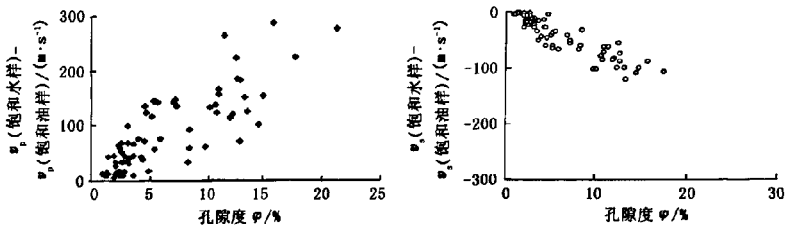


图 5 饱和水样和饱和油样纵、横波速度之差与孔隙度交会图

Fig. 5 Difference in compressional wave and shear wave velocities between brine-bearing and oil-bearing one versus porosity

可见,饱和油样与饱和水样纵、横波速度之差的绝对值与样品孔隙度呈正相关关系,饱和水样的纵波速度大于饱和油样的纵波速度,绝对变化率分布在 0 ~ 300 m/s,相对变化率(相对饱和油样纵波速

结果表明,凝灰质岩屑砂岩纵波速度、横波速度与孔隙度、泥质含量存在明显的负线性相关关系($R=-0.89\sim-0.85$),泥质含量对纵、横波速度的影响仅为孔隙度影响的 1/5 ~ 1/10,因此泥质含量对声波速度的影响很弱,可以忽略不计。这与 Han 针对墨西哥湾 75 块泥质砂岩测试数据得出泥质(黏土)含量对声波速度的影响仅为孔隙度影响的 1/3 左右的结论有较大差异。分析认为:本次研究的火山碎屑岩的泥质主要是以杂基形式存在的凝灰质,其主要成分是火山岩岩屑,声速远大于黏土矿物的声速而与骨架矿物的声速接近,因此在一定程度上弱化了泥质含量对声速的影响。目前,还只有海塔盆地白垩系凝灰质岩屑砂岩的试验结果,这一认识是否具有普遍意义还有待于进一步研究。

3.5 孔隙流体

孔隙流体对声波速度的影响主要体现在流体替换分析,其核心是 Biot^[17]理论和 Gassmann^[18]方程,以及建立在此基础上的其他的相关理论(如射流公式等^[19-20])。图 5 为塔南火山碎屑岩饱和油样和饱和水样纵、横波速度差与孔隙度交会图。

度)最大约为 6%,流体替换响应较为敏感。饱和水样的横波速度略小于饱和油样的横波速度,绝对变化率分布在 0 ~ 120 m/s,相对变化率较小,流体替换响应不明显。

根据 Biot 理论和 Cassmann 方程,流体替换后岩样纵波速度变化较大主要是由于流体体积模量的差异造成的,水的体积模量大于油的体积模量,所以饱水样纵波速度大于饱和油样的纵波速度。对于横波速度的变化,Wang 和 Nur 认为:由于流体替换时岩样的剪切模量基本不变,横波速度的变化主要是由流体替换时岩样密度和流体黏度的变化造成的,横波速度随着岩样密度的增加而减小,随着流体黏度的增加而增大。试验结果与前人的认识是一致的。

4 结 论

(1)纵、横波速度随岩浆岩岩屑含量的增加而增大,随石英、长石含量的增加而减小,这是由岩浆岩岩屑与石英、长石的密度和弹性模量差异造成的。

(2)相同孔隙度条件下,孔隙式胶结、线性接触岩样纵、横波速度最大,基底式胶结、不接触-点接触岩样的纵、横波速度最小,孔隙式胶结、点接触-线接触岩样的纵横波速度居中。相对横波速度,纵波速度对胶结类型、接触方式更敏感。

(3)凝灰质砾岩石英含量较低($\leq 10\%$),岩浆岩岩屑含量较高($\geq 60\%$),声波速度明显高于物性较好的凝灰质岩屑砂岩,可大致用 $v_p \geq 5.3 \text{ km/s}$ 作为致密凝灰质砾岩的速度下限将二者区分开。

(4)纵、横波速度随密度的增大而增大,凝灰质岩屑砂岩的声波速度与密度存在较好的幂函数关系。

(5)凝灰质岩屑砂岩的纵、横波速度与孔隙度、泥质含量有很好的负线性函数关系,但泥质对声速的影响仅为孔隙度影响的 $1/5 \sim 1/10$,推断与泥质主要是由凝灰质构成有关。应用声速计算海塔盆地白垩系储层孔隙度时,可以忽略泥质的影响。

(6)随着含水饱和度增加,纵波速度增大,横波速度略有减小。声波速度的变化量与孔隙度存在正相关关系,但最大变化幅度不超过 6% 。因此,若地震和测井提取的纵横波速度的不确定度较小,存在应用地震和测井资料识别物性好的油水层的可能性。

致谢 感谢中国石油大学(华东)地球科学与技术学院的孙国忠老师为本次研究制作了薄片,以及鄢继华博士做了薄片鉴定工作!

参考文献:

[1] 伍英,陈均亮,张莹. 海拉尔-塔木察格盆地构造带与油气关系[J]. 大庆石油学院学报,2009,33(3):31-

35.

WU Ying, CHEN Jun-liang, ZHANG Ying. Relationships between different types of structural zones and hydrocarbons in Hailaer-Tamtsag Basin [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009,33(3):31-35.

[2] WYLLIE M R J, GREGORY A R, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956,21:41-70.

[3] SCHÖN J H. Physical properties of rock: fundamentals and principles of petrophysics [J]. Ultrasonic, 1996(26):311-317.

[4] SIMMONS G. Velocity of compressional waves in various minerals at pressure to 10 kbars [J]. J Geophys, 1964,69(6):1117-1121.

[5] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density-the diagnostic basics for stratigraphic traps [J]. Geophysics, 1974,39(6):770-780.

[6] 马中高,解吉高. 岩石的纵、横波速度与密度的规律研究[J]. 地球物理学进展,2005,20(4):905-910.

MA Zhong-gao, XIE Ji-gao. Relationship among compressional wave, shear wave velocities and density of rocks [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005,20(4):905-910.

[7] HAN De-hua. Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments [D]. California: Dept of Geophysics, Stanford University, 1987.

[8] HAN De-hua, NUR A, MORGAN D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. Geophysics, 1986,51(11):2093-2107.

[9] NUR A. Critical porosity and the seismic velocity in rocks [J]. EOS Trans Am Geophys Union, 1992,73(1):43-66.

[10] KHATCHIKIAN A. Log evaluation of oil-bearing igneous rocks [C]// Society of Professional Well Log Analysts. Transactions of the SPWLA 23rd Annual Logging Symposium, July 6-9, 1982, Corpus Christi Bayfront Plaza, Corpus Christi, Texas. Houston:SPWLA, 1982, Paper AA, 35pp.

[11] KLIMENTOS T. The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves [J]. Geophysics, 1991,56(12):1930-1939.

[12] 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.

SHI Ge, YANG Dong-quan. The regression analysis study on velocity and porosity and clay content of rocks

- [J]. Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium), 2001, 37(3): 379-384.
- [13] 甘利灯. 四维地震技术及其在水驱油藏监测中的应用[D]. 北京: 中国地质大学能源学院, 2002.
- GAN Li-deng. 4D seismic and it's application to the monitoring of water flooding reservoir[D]. Beijing: School of Energy Resources, China University of Geosciences, 2002.
- [14] 马中高, 伍向阳. 有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 183-186.
- MA Zhong-gao, WU Xiang-yang. Effects of effective pressure on wave velocities on rocks[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 183-186.
- [15] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 208-210.
- [16] 王炳章. 地震岩石物理学及其应用研究[D]. 成都: 成都理工大学信息工程学院, 2008.
- WANG Bing-zhang. Seismic rock physics and its applied research [D]. Chengdu: College of Information Engineering, Chengdu University of Science and Technology, 2008.
- [17] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I: low frequency range, and II: higher-frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28: 168-196.
- [18] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 16: 673-685.
- [19] MACKO G, JIZBAD D. Estimating grain-scale fluid effects on velocity dispersion in rock [J]. Geophysics, 1991, 56: 1940-1949.
- [20] DVORKIN J, MAVKO G, NUR A. Squirt flow in fully saturated rocks [J]. Geophysics, 1995, 60: 97-107.

(编辑 修荣荣)

(上接第68页)

- [2] GASSMANN F. Über die Elastizität poroser Medien [J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1951, 96(2): 1-23.
- [3] BATZLE M L, HAN D, HOFMANN R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity-direct measurements [J]. Geophysics, 2006, 71(6): N1-N9.
- [4] 李增学, 韩美莲, 魏久传, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序划分与煤聚积规律分析 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 5-11.
- LI Zeng-xue, HAN Mei-lian, WEI Jiu-chuan, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation law of upper Paleozoic earthen in Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(1): 5-11.
- [5] HALE D. An inverse Q-filter [R/OL]. SEP Report 1981, 26: 231-243 [1981-10-26]. http://sepwww.stanford.edu/theses/sep26/26_22_abs.html.
- [6] BICKEL S H, NATARAJAN R R. Plane-wave Q deconvolution [J]. Geophysics, 1985, 50(9): 1426-1439.
- [7] HARGREAVES N D, CALVERT A J. Inverse Q filtering by Fourier transform [J]. Geophysics, 1991, 56(4): 519-527.
- [8] BANO M. Q-phase compensation of seismic records in the frequency domain [J]. Bull Seis Soc Am, 1996, 86(4): 1179-1186.
- [9] WANG Y H. A stable and efficient approach of inverse Q filtering [J]. Geophysics, 2002, 67(2): 657-663.
- [10] WANG Y H. Quantifying the effectiveness of stabilized inverse Q filtering [J]. Geophysics, 2003, 68(1): 337-345.
- [11] WANG Y H. Inverse Q filter for seismic resolution enhancement [J]. Geophysics 2006, 71(3): V51-60.
- [12] CHEN S Q, WANG Y H. Inverse Q filtering in 3D P-P and P-SV seismic data: a case study from Sichuan Basin, China [C/OL]. 70th EAGE Conference & Exhibition, In session "Attenuation / Velocity Model Building". 2008. P171 [2008-06-11]. <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=10116>.
- [13] TONN R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: a comparison of different computational methods [J]. Geophys Prosp, 1991, 39(3): 1-28.
- [14] CLAERBOUT J F. Fundamentals of geophysical data processing [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1976.
- [15] KOISKY H. The propagation of stress pulses in viscoelastic solids [J]. Phil Mag, 1956, 8(1): 673-710.
- [16] KJARTANSSON E. Constant Q wave propagation and attenuation [J]. J Geophys Res, 1979, 84(2): 4737-4748.
- [17] WANG Y, GUO J. Modified Kolsky model for seismic attenuation and dispersion [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2004, 1(2): 187-196.

(编辑 修荣荣)