

郝召兵,秦静欣,伍向阳.地震波品质因子 Q 研究进展综述.地球物理学进展,2009,24(2):375~381,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.002.

Hao Z B, Qin J X, Wu X Y. Overview of research on the seismic wave quality factor (Q). *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2):375~381,DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.002.

地震波品质因子 Q 研究进展综述

郝召兵, 秦静欣, 伍向阳

(中国科学院地质与地球物理研究所油气综合地球物理重点实验室,北京 100029)

摘 要 研究地震波的衰减可以了解岩石的微构造及变化,以及岩石在地下所遇到的环境条件.衰减主要由岩石的微观性质—诸如岩石内部裂纹的密度、分布、构造以及所含流体的相互作用决定的,所以测量地震波的衰减对于了解岩石的物理状态非常重要.本文主要从岩石物理方面阐述了各种衰减机制、品质因子 Q 的主要影响因素及测量方法;说明了 Q 作为各种参量(频率、孔隙度、流体含量等)的函数是很有意义的观测量,对 Q 的测量在实际探测油气中有着重要意义.

关键词 Q , 品质因子, 衰减机制, 趋肤深度

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.002

中图分类号 P315

文献标识码 A

Overview of research on the seismic wave quality factor (Q)

HAO Zhao-bing, QIN Jing-xin, WU Xiang-yang

(Key Laboratory of integrative researches on geophysics for petroleum, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract By making scientific researches on seismic wave attenuation, people can clarify the microstructure and subsurface environmental conditions of rock. As attenuation is mainly affected by the rock's microscopic feature—internal crack density, distribution, structure and the interaction with its containing liquid, it is important to know the rock physical state by measuring seismic wave attenuation. This paper mainly summarizes attenuation mechanisms, the measurement and main affecting factor of quality factor Q from rock physics. It illustrates that Q is a very useful measurement as a function of many parameters (frequency, porosity, fluid content etc.). So, it is meaningful to measure Q in the actual exploration.

Keywords Q , quality factor, attenuation mechanism, skin depth

0 引 言

岩石一般是非弹性体,这使得波在岩石中传播时,会有一部分机械能转换成热能,反映了岩石本身对波的吸收特性^[1].波在岩石中的这种衰减性质通常用岩石的品质因子 Q 来表征.常常用下面的式子定义:当波传播一个波长 λ 的距离后,原来储存的能量 E 与消耗能量 ΔE 之比的 2π 倍^[1-3],即:

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E}. \quad (1)$$

品质因子对很多参量比较敏感,在石油地球物理学中有着许多应用:

(1)在低的有效应力之下,微裂隙对岩石的 Q 有着显著的作用,所以对一个井的岩心取样进行衰减观测就适合于确定微裂隙各向异性的指向,因而可提供关于储集层的断裂状态的资料或者提供现场应力的描述^[2].

(2)岩石中所含流体改变会导致 Q 值的不同,同一流体处于不同状态时也会引起 Q 值的变化,且 Q 对这种情况很敏感,所以对探测岩石所含流体的类型与物理状态(相变)方面很重要^[3].

(3)地震波可以通过地层的吸收衰减补偿得到加强,使得地震剖面上的同相轴更加一致,提高了地震资料的质量^[4~6].

(4)可以用来探测气或流体的饱和度,相的几何分布,只要知道地震波品质因子作为含气(流体)饱和度之函数和给定饱和度情形下作为这种天然气(流体)的几何分布之函数如何变化;也可以预测地层的岩性、压力和渗透率等信息^[2].

(5)随着海上石油勘探的深入,已经逐步由浅水勘探向深水勘探发展,但深水勘探常常会遇到浅水流(SWF)的问题,给勘探造成巨大的损失,横波品质因子 Q_s 探测可以帮助预测 SWF,从而降低这种风险^[7~9].

国内从实验方面对品质因子进行研究的单位主要有中国科学院地质与地球物理研究所油气综合地球物理重点实验室,他们从模拟各种储层地下条件出发,运用各种不同方法对不同类型岩石进行测试研究.当前,怎么减少不同方法间的误差、尽量实现与地下地质条件相吻合的实验条件、以及扩展品质因子在油气勘探中的应用使得对 Q 开展进一步的研究非常重要^[10].

1 地震波衰减机制

地震波传播的衰减原因基本上分为两大类,一类归结为几何因素,其中包括由于波阵面的扩展、地震波通过界面时的反射、折射以及通过不均匀介质(不均匀尺度与波长大小可以相比较)时造成的散射所引起波动振幅的衰减;另一类是物理因素,即与岩石的非完全弹性直接有关的衰减,也称固有衰减或称内摩擦^[1,3].

1.1 几何因素方面^[2,11~15]

1.1.1 波阵面的扩展

在地震波传播时,能量沿着波阵面展开.在均匀介质中,对体波来说,点震源的波前为球面,随着传播距离的增大,球面逐渐扩展,但总能量仍保持不变,而使单位面积上的能量减小,振动的振幅将随之减小,这称之为球面扩散(或波前扩散).也就是说,均匀介质中,地震波的振幅与传播距离成反比,即按 $1/r$ 的规律衰减,能量按 $1/r^2$ 衰减.对面波来说,能量按 $1/r$ 的规律衰减.实际介质虽然并非均匀介质,

波的扩散过程会产生相应的变化.

1.1.2 地震波通过界面时的反射、折射

地震波在传播中,在分界面处入射波的能量一部分将产生反射,另一部分能量将通过界面后继续传播,这就是折射.通常情况下,在 P 波入射的时,不但有折射 P 波和反射 P 波,同时还会出现折射的 S 波成分和反射的 S 波成分.这说明反射、折射情况很复杂,必将导致地震波的衰减.

1.1.3 不均匀介质(不均匀尺度与波长大小可以相比较)造成的散射

地震波的能量消失除了由于介质的吸收以外,还可能由于波的散射.若介质中存在不均匀性,地震波通过时将发生不规则的反射和折射,向不同的方向传播并彼此干涉,最后化成热能而消失或成为某种震动背景.这部分能量消耗也表现在振幅的衰减中,因而也影响 Q 值.

1.2 岩石物理方面^[16~30]

主要指的是岩石的内在耗散(摩擦、液体流动、粘性张弛),内在耗散主要与岩石中流体有关,这种衰减包括孔隙和流体之间界面上因剪切运动而引起的张弛,在一块完全饱和的岩石中,主要是由于岩石格架相对于流体夹杂物之间的相对运动而引起的损耗.总结流体引起声波在岩石中传播的能量损耗主要有如下 4 中机制:

1.2.1 Biot“全局流动”模式

Biot“全局流动”模式的特点是:岩石中的流体有粘性和惯性效应,当地震波通过时,流体和固体做整体同相运动,但流体相和固体相之间为不同相位运动,将会导致衰减和频散.这种模式机制一般考虑的频率较高,并且要求岩石孔隙连通性较好.

1.2.2 Gassmann 模式

Gassmann 模式的特点是:与 Biot“全局流动”模式相反,其不考虑频率或者说是零频率,岩石中的流体没有粘性和惯性效应,当地震波通过时,流体和固体同相运动,孔隙压力到处均匀平衡.这种模式一般认为可以用在地震的频段. Gassmann 理论应用的前提是,流体能够在孔隙空间充分自由流动,在声波到达的时候,引起的流体中的压力,能迅速在(大的尺度)空间上迅速均匀开.当不考虑频率、粘度等的影响时,一般应用这种机制.

1.2.3 “局部流动”模式

“局部流动”模式的特点是:岩石中的流体有粘性和惯性效应,当地震波通过时,存在着颗粒尺度的不同相流体运动,导致了衰减和频散,这种机制的激

励原理是外力,即孔隙空腔内流体的“喷射”。

1.2.4 “补丁”(patchy)模式

“补丁”(patchy)模式特点是:流体饱和度在岩石空间像补丁样分布不均匀,当地震波通过时,这种“补丁”尺度下流体的运动是不同相的,将导致衰减和频散。

2 Q 值的影响因素

2.1 频率

许多研究者的研究表明,对于干燥的岩石一般来说 Q 与频率无关^[31~33]。对于饱和的岩石,地震波以复杂的路线传播,由流体流动类型的机制所决定,衰减通常与频率有关。当岩石骨架被声波压缩时,会在孔隙流体中产生剪切力,其随着离开液体与固体分界面距离之增大而呈指数衰减,由于渗透率的影响,这种力使流体和流体与固体组合之间产生某种差异运动,从而引起能量的损耗,造成衰减。这种影响可以用某个趋肤深度 d_s 来表征其特征^[2],这个趋肤深度就是

$$d_s = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}, \quad (2)$$

其中, η 是流体粘滞系数, ρ 是流体密度, ω 是入射波频率。

频率影响着差异运动,当频率很低时,趋肤深度与孔隙直径相比很大,剪切力很小同时造成的衰减也很小;当频率很高时,趋肤深度与孔隙直径相比很小,剪切力发生在离分界面很小的范围内,造成的衰减也不大;当频率适中、趋肤深度与孔隙直径相比差不多时,剪切力将存在于整个孔隙,并且造成最大的衰减。Gordon 与 Davis(1968)^[2,34] 进行的观测揭示出花岗岩和石英岩内在频率从 0.6 mHz 至 50 mHz 的范围内有轻微的衰减变化,在邻近 5 kHz 至 10 kHz 的频率时观测到局部饱和与完全饱和砂岩有品质因素峰值。频率与衰减关系如图 1 所示。

2.2 粘度

从式 2.1 中可以看出,流体粘度也影响着趋肤深度,也就影响着衰减。如果流体粘度很低,波穿过岩石引起的压力梯度将会使流体迅速分散并达到平衡,从而引起的衰减很小。如果流体粘度很大,流体一般作为特殊弹性合成物而不引起衰减。据 A. Nur 测试结果,粘度与衰减关系如图 2 所示。

2.3 饱和度

当岩石中的孔隙连通性差,增加饱和度时,流体空间分布并不是一成不变的,如图 3。不同情况将会

造成不同程度的衰减。

Eddres 和 Knight^[32] 用模型研究了这种行为,有如下的结果。

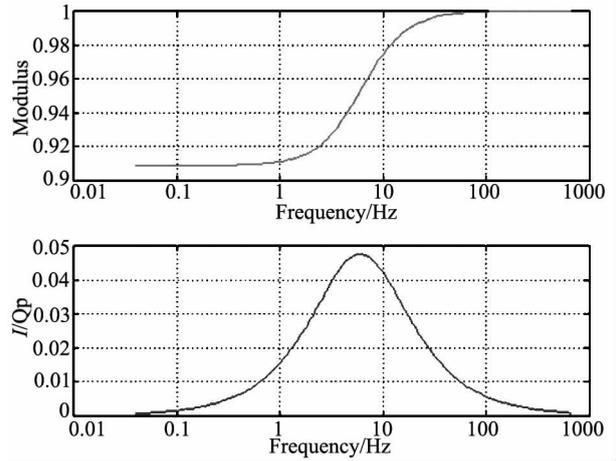


图 1 品质因子与频率关系^[35]

Fig. 1 Quality factor versus frequency^[35]

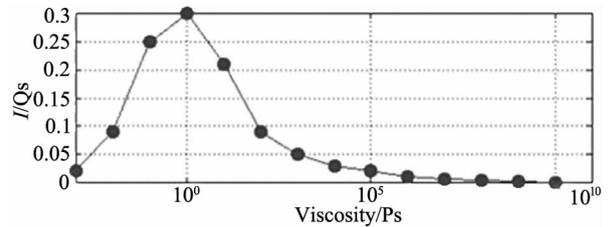


图 2 品质因子与粘度关系^[35]

Fig. 2 Quality factor versus viscosity^[35]

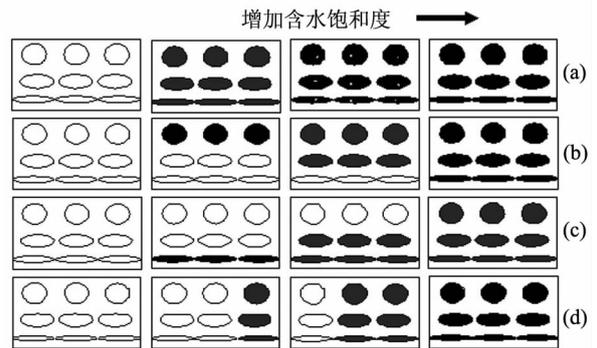


图 3 增加含水饱和度时的流体空间分布^[36]

Fig. 3 Different distributions of pore fluids when water saturation increases^[36]

当波通过时,颗粒和毛细管受到压缩而产生局部孔隙压力,该压力使流体在孔隙内部流动,流向含气领域,从而造成衰减。可以用来研究衰减对饱和度的依从关系^[2,37,38],见图 4。

从图 4 中我们看出,纵波最大的衰减出现在

80~90%含水饱和度之间,纵波衰减数值相对大,横波衰减数值相对小,并且横波衰减变化不大.综合以上衰减对频率和饱和度的关系我们可以得到图5的结论,这对应用各种机制说明衰减有很大的帮助.

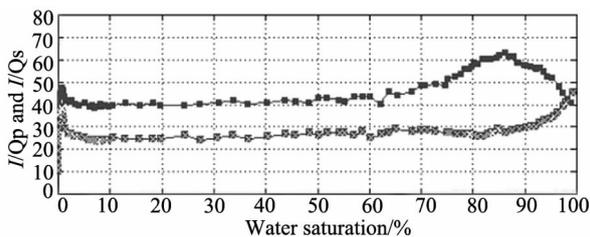


图4 品质因子和含水饱和度的关系^[36]

Fig. 4 Quality factor versus water saturation^[36]

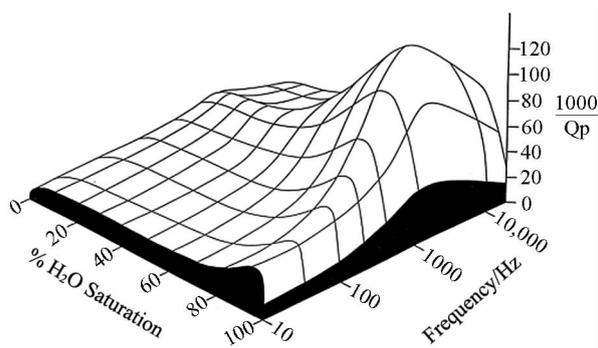


图5 品质因子和含水饱和度、频率的关系^[37]

Fig. 5 Quality factor versus water saturation and frequency^[37]

2.4 压力

岩石孔隙将随着有效应力的增大而变小,同时,压力增大后,低速高衰减的矿物也会被压实,衰减会减弱,Q值会增大,如图6所示.

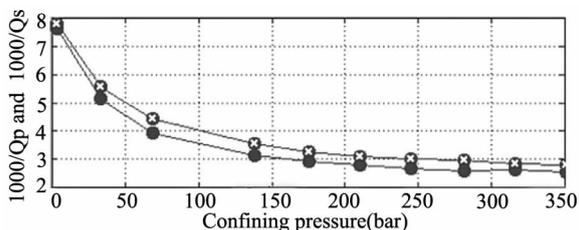


图6 干 Berea 砂岩不同围压下品质因子^[35]

Fig. 6 Quality factor for dry Berea sandstone versus confining pressure^[35]

图中实心点为纵波 Q 倒数,标有 x 的为横波 Q 倒数.可以看到,随着压力的升高,品质因子 Q 的倒

数减小,也就是说 Q 值增大,衰减减小.

由于孔隙压力与围压不是孤立的,衰减与有效压力有关,随有效压力的提高而减小.这里,颗粒接触和裂隙起一种重要作用,其存在引起巨大衰减和衰减对压力有相当大程度的依赖关系^[2].

3 实验室测定 Q 值的主要方法原理^[2,39~41]

3.1 利用驻波振动

3.1.1 单摆

实验由垂直悬挂使之经受谐波激发的岩石棒组成,岩石棒末端可能附有很高力矩的惯性质量以增大该系统(样品和惯性质量组合系统)的谐振周期.使样品按其共振频率之一振动一个短时间周期,然后在两个相继准周期上观测位移振幅衰减,给出品质因子 Q 的衰减值

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \quad (3)$$

其中, A_1 与 A_2 是两个相继振荡的信号振幅.

实验示意图如图7所示.

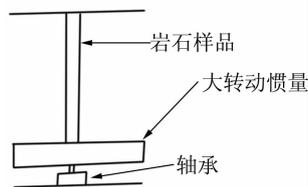


图7 单摆实验示意图^[2]

Fig. 7 Sketch of pendulum experiment^[2]

3.1.2 共振杆

这种实验技术是广泛采用的实验装置.实验由以支座或悬挂系统保持水平的岩石棒组成,使之经受谐波振动.振动可以用压电或静电元件激发,对于岩石,典型的是利用电磁激发源.可以利用自由振荡或者强迫振荡进行分析,如果利用强迫振荡获得衰减,要采用频谱扫描以便完整描述共振峰值.

$$Q = \frac{\omega}{\Delta\omega}, \quad (4)$$

其中, ω 为共振角频率, $\Delta\omega$ 为位移的共振峰值宽度,即 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 乘以该峰值极大高度值所占宽度.实验示意图

如图8所示.

3.2 利用行波传播

3.2.1 脉冲反射法

在脉冲反射法中,由粘接于样品的一个压电晶体所发射的信号在自由分界面上发生多次反射.假

设为平面波,根据两个相继的多次反射的振幅谱来确定品质因子:

$$\frac{1}{Q} = \frac{v}{L * \omega} \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \quad (5)$$

其中, v 是波速度, ω 是角频率, L 是样品长度, A_1 是某个多次反射的振幅谱, A_2 为其次一个多次反射的振幅谱。

方程(5)在品质因子 Q 不太小的情形下、而且仅对单频信号才成立。该方法假设由不同分界面上形成的损耗可以忽略不计,尤其是传感器、粘合剂与样品之间的一些分界面。一般适应有围压、低衰减的实验。实验示意图如图 9 所示。

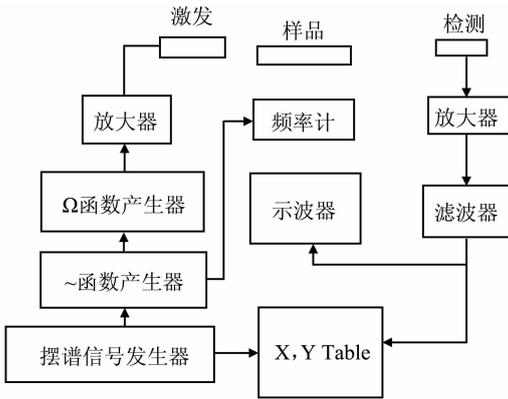


图 8 共振杆实验示意图^[2]

Fig. 8 Sketch of resonance bar experiment^[2]

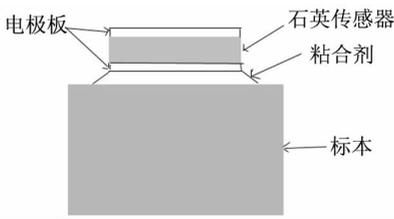


图 9 脉冲反射实验示意图^[2]

Fig. 9 Sketch of pulse reflection experiment^[2]

3.2.2 透射法

波的振幅谱可写为:

$$A(f) = G_0 A_r(f) \exp\left(-\frac{\pi f}{Q(f) V} x_0\right), \quad (6)$$

式中, G_0 为包含几何发散、透射系数及反射系数影响在内的一个系数, x_0 为旅行距离, Q 为品质因子, $A_r(f)$ 为接收器响应。

对于给定的震源,透射信号的频谱宽度相当有限,使得可以认为是与频率无关的。所以两种不同距

离上的振幅谱之比可以写为:

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = \frac{\pi}{QV}(x_2 - x_1)f + \ln\left(\frac{G_1}{G_2}\right), \quad (7)$$

由上式即可求得品质因子 Q 。

3.3 应力应变曲线法

3.3.1 $\sigma-\epsilon$ 循环

在谐波问题中,应力和应变因有一个直接与介质粘滞性有关的量 φ 而不同相。根据远离测量系统共振状态的不同加载和减载循环时的应力和应变曲线之滞后现象,可以直接测定每振荡周期的能力损耗。这种方法的使用限于扭转实验和单轴应力,为了获得可靠的数值,需要激发应力函数能达到出色的可重复性才行。

品质因子 Q 值有下述方程给出

$$Q = \frac{4\pi\gamma}{\Delta W}, \quad (8)$$

式中 γ 为一个加载周期所储存的平均能量, ΔW 为每加载周期所耗散的能量。

3.3.2 直接观测相位

前面已经提过,应力和应变因有一个直接与介质粘滞性有关的量 φ 而不同相。当频率再高一些并且应变低一些时,可以直接测定应力与应变之间的相位差 φ 。品质因子由下面的公式给出:

$$Q = \frac{1}{\tan\varphi}, \quad (9)$$

上面是实验室几种测量品质因子的方法原理,测量时需要注意频率问题,见表 1。

表 1 测量波衰减的方法^[3]

Table 1 Measurement methods for wave attenuation^[3]

100 Hz 方法	00 kHz	测量的频率范围利用驻波振动法
行波传播法		>100 kHz
应力应变曲线法		<1 Hz

4 结 论

对品质因子 Q 的研究主要领域是石油地球物理,由于衰减有许多成因,在分析其过程中可以根据实验的和理论的双重观点着手进行。 Q 可以作为联系地震属性(波速度、波阻抗、密度、反射 AVO 等)和储油藏性质(孔隙度、饱和度、压力等)的桥梁,帮助储层油藏的探测。实验是研究品质因子不可替代的一环,随着勘探的深入,勘探的难度不断增加,利用 Q 测量数据、测井数据,根据有关理论,建立有关

储层地震模型,进行正演模拟,建立储层参数与地震响应的关系,是一种从新的角度实现对油气藏识别和刻画的新手段.现在,多学科(物探、测井、地质)间的联系越来越大,这必然将使得人们更加重视品质因子 Q 的研究.

参 考 文 献 (References):

- [1] 滕吉文,张中杰,白武明.岩石圈物理学[M].北京:科学出版社,2004.
Teng J W, Zhang Z J, Bai W M. Lithosphere physics[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Bourbie T, Coussy O, Zinzner B. Acoustic of porous media [M]. Houston: Gulf Publishing, 1987.
- [3] 陈颀,黄庭芳.岩石物理学[M].北京:北京大学出版社,2001.
Chen Y, Huang T F. Rock physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2001.
- [4] 白桦,李鲲鹏.基于时频分析的地层吸收补偿[J].石油地球物理勘探,1999,34(6):642~648.
Bai H, Li K P. Stratigraphic absorption compensation based on time-frequency analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999,34(6):642~648.
- [5] 马昭军,刘洋.地震波衰减反演综述[J].地球物理学进展,2005,20(4):1074~1082.
Ma Z J, Liu Y. A summary of research on seismic attenuation [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(4): 1074~1082.
- [6] 高静怀,杨森林.利用零偏移 VSP 资料估计介质品质因子方法研究[J].地球物理学报,2007,50(4):1198~1209.
Gao J H, Yang S L. On the method of quality factors estimation from zero offset VSP data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007,50(4):1198~1082.
- [7] 刘志斌,郝召兵,伍向阳.深水钻探面临的挑战—浅水流灾害问题[J].地球物理学进展,2008,23(2):552~558.
Liu Z B, Hao Z B, Wu X Y. Shallow water flow hazard: a challenge in deepwater drilling[J]. Progress in Geophysics, 2008,23(2):552~558.
- [8] Huffman A R, Castagna J P. The petrophysical basis for shallow-water flow prediction using multicomponent seismic data[J]. The Leading Edge, September, 2001:1030~1036.
- [9] Prasad M. Acoustic measurements in unconsolidated sands at low effective pressure and overpressure detection [J]. Geophysics, 2002,67:405~412.
- [10] 伍向阳,邹勇,陈祖安,等.砂石和大理岩纵波速度及 Q 值实验研究[J].地球物理学进展,1993,8(4):187~191.
Wu X Y, Zou Y, Chen Z A, *et al.* An experimental study of compressive wave velocity and Q value of sandstone and marble[J]. Progress in Geophysics, 1993,8(4):187~191.
- [11] Reynolds J M. An introduction to applied and environmental geophysics[M]. Chichester: England Wiley, 1997,796.
- [12] Ewing W M, Jardetzky W S, Press F. Elastic waves in layered media[M]. New York: McGraw Hill, 1957.
- [13] Bourbié T. The effects of attenuation on reflections [D]. Stanford: Stanford Univ. ,1982.
- [14] Bourbié T, Nur A. Effects of attenuation on reflections: experimental test[J]. Geoph. Res. ,1984,89:6197~6202.
- [15] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb waves[M]. New York: Plenum Press, 1967.
- [16] Mavko G, Nur A. Melt squirt in the asthenosphere [J]. Geophys. Res. , 1975,80:1444~1448.
- [17] Mavko G, Nur A. Wave attenuation in partially saturated rocks[J]. Geophysics, 1979,44:161~178.
- [18] Mavko G T, Mukherji T, Dvorkin J. The rock physics handbook—tools for seismic analysis in porous media [M]. New York: Cambridge Univ. Press, 1998.
- [19] Johnston D H, Toksoz M N, Timur A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: 2. Mechanisms[J]. Geophysics, 1979,44:691~711.
- [20] Walsh J B. Seismic attenuation in rock due to friction [J]. Geophys. Res. , 1966,71:2591~2599.
- [21] Walsh J B. New analysis of attenuation in partially melted rock [J]. Geophys. Res. , 1969,74:4333~4337.
- [22] McCann C. Compressional wave attenuation in concentrated clay suspensions[J]. Acustica, 1969,22:352~356.
- [23] McCann W F, McCann D M. A theory of compressional wave attenuation in non-cohesive sediments[J]. Geophysics, 1985, 50:1311~1317.
- [24] White J E. Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation[J]. Geophysics, 1975,40:224~232.
- [25] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated, porous solid. I. Low-frequency range [J]. Acoust. Soc. Am. , 1956,28:168~178.
- [26] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. High frequency range [J]. Acoust. Soc. Am. , 1956b,28:179~191.
- [27] Winkler K. The effects of pore fluids and frictional sliding on seismic attenuation [D]. Stanford: Stanford University, 1979.
- [28] Winkler K. Frequency dependent ultrasonic properties of high porosity sandstone[J]. Geoph. Res. , 1983, 88, 9493~9499.
- [29] Winkler K, Nur A. Pore fluids and seismic attenuation in rocks[J]. Geoph. Res. , 1979,6:1~4.
- [30] Winkler K, Nur A. Seismic attenuation: effects of pore fluids and frictional sliding[J]. Geophys. , 1982,47:1~15.
- [31] Birch F, Bancroft D. Elasticity and internal friction in a long column of granite[J]. Bull. Seism. Soc. Am. , 1938,38:243~254.
- [32] Nur A, Winkler K. The role of friction and fluid flow in wave attenuation in rocks (Abst)[J]. Geophys, 1980,45:591~592.
- [33] Peselnickand L, Outerbridge W F. Internal friction in shear and shear modulus of Solenhofen limestone over a frequency range of 10 cycles per second[J]. Geoph. Res. , 1961,66: 581~588.

- [34] Gordon R B, Davis L A. Velocity and attenuation of seismic waves in imperfectly elastic rock[J]. Geoph. Res., 1968, 73: 3917~3935.
- [35] Jack Dvorkin. Link between attenuation and velocity dispersion [J]. SEG, 2005.
- [36] Rosemary K, Anthony E. The effect of rock/water interaction in modeling the dielectric response of sandstones [A]. In: Society of Professional Well Log Analysts Logging Symposium, 30th, Transactions [C], Denver, Colo., 1989, 1~20.
- [37] Murphy W F. Effects of microstructure and pore fluids on the acoustic properties of granular sedimentary materials [D]. Stanford: Stanford University, 1982.
- [38] Gardner G H F, Wyllie M R J, Droshak D M. Effect of pressure and fluid saturation on the attenuation of elastic waves in sands [J]. Pet. Tech., 1964, 189~198.
- [39] O'hara S G. Influence of pressure, temperature, and pore fluid on the frequency-dependent attenuation of elastic waves in Bera sandstone [J]. Physical review A, 1985, 32: 473~488.
- [40] Winkler K, Plona T. Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure [J]. Geoph. Res., 1982, 87: 10776~10780.
- [41] Spencer J W. Stress relaxation at low frequencies in fluid saturated rocks: attenuation and modulus dispersion [J]. Geoph. Res., 1981, 86, 1803~1812.

版 权 声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已加入“万方数据千种精品核心刊”计划,被中国核心期刊遴选数据库收录,并通过万方数据资源系统及其镜像系统等对外提供无偿或有偿信息服务,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付.本刊可免费提供作者文章引文统计分析资料.如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理.

《地球物理学进展》编辑部