

含粘滞流体砂岩的动态力学行为*

席道瑛 胡天跃 易良坤 李 纲

(中国科学技术大学地球与空间科学系, 第三世界科学院中国科大地球和天文学高级研究中心 合肥 230026)

摘要 通过实验研究了含粘滞流体砂岩的动态力学行为, 认识到砂岩的低频衰减是一种典型的弛豫衰减, 具有粘(滞)弹性材料的性质, 也具有类似粘弹性材料的时温等效原理。这给地学中某些问题的研究带来了诸多方便。饱和岩石的衰减峰的峰高随砂岩孔隙度的增加而增加, 峰温向低温方向移动, 峰宽逐渐变窄, 衰减随砂岩孔隙度的增加成线性增长关系。

关键词 饱和砂岩, 弛豫峰, 时温等效

分类号 TV 223.1

1 前言

岩石是一种具有很多裂纹和空洞以及其他损伤和缺陷的多孔材料。尤其与储层有关的岩石是典型的双相介质。对于这种介质早在50年代Biot就提出了它的波动力学模型。多孔介质由固体的骨架和相互联通的孔隙组成。孔隙内充满可压缩的均匀各向同性的粘滞流体, 流体可相对于骨架运动, 这就是Biot的总体流动理论。后又有人提出局部流动理论^[1]。随着石油工业的发展, 促进了人们对饱和介质的衰减研究。但大多集中在超声频段(几kHz~几十kHz)波的衰减测量, 观测到很明显的衰减峰。砂岩中的衰减与粘土的含量和孔隙度成线性关系。在实验室研究了富含粘土储层砂岩地震波衰减与孔隙流体粘滞度的关系, 得出储层砂岩中存在两种主要衰减机制。在含有少量粘土的高渗透砂岩中Biot的总体流动模型起主导作用, 而在富含粘土的低渗透砂岩中, 局部流体流动起主要作用^[2]。Grant^[3]研究了砂岩中速度和衰减的流体效应, 得出超声衰减测量不能提供地震波引起的衰减信息, 这说明开展低频衰减研究是十分必要的。本文通过实验研究了含粘滞流体砂岩的动态力学行为, 认识到砂岩的低频衰减是一种典型的弛豫衰减, 具有粘(滞)弹性材料的性质, 也具有类似粘弹性材料的时温等效原理。这给地学中某些问题的研究带来了诸多方便。

2 实验原理和实验方法

扭摆是将样品的一端加固在夹具上, 另一端与惯性元件相连。当将惯性元件和样品组成的系统扭转一个角度 θ , 整个系统以一定的周期进行振动, 振动的振幅将随时间而衰减。样品的剪切模量与振动周期有关, 周期越短, 模量越大, 并以样品的形变落后于样品所受力的相位角 δ 来表征内耗, 由于样品质量比惯性元件质量小得多, 可以忽略。整个系统的运动方程变为

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + KG^* \theta = F(t) \quad (1)$$

式中: I ——体系的转动惯量; G^* ——样品的剪切复模量, $G^* = G + iG$; K ——与样品尺寸有关的常数。方程第一项是惯性力, 第二项为扭转样品所必须的力, $F(t)$ 为随时间变化的外力。当自由振动时, $F(t) = 0$, 假定 G , G 不依赖于频率, 则方程的解为

$$\theta = \theta_0 e^{-\alpha t} e^{i\omega t} \quad (2)$$

$e^{i\omega t}$ 表示运动的周期性($\omega = 2\pi f$), $e^{-\alpha t}$ 表示振幅随时间而衰减。

将式(2)代入式(1)得

$$I(\alpha^2 - \omega^2 - 2i\alpha\omega) + KG + iKG = 0 \quad (3)$$

将上式分解为

$$\text{实部: } G = \frac{I}{K}(\omega^2 - \alpha^2) \quad (4)$$

1998年6月30日收到初稿, 1998年11月28日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(49774250)资助项目。

作者 席道瑛 简介: 女, 59岁, 1962年毕业于成都地质学院地球物理勘探专业, 现任教授, 主要从事弹性力学、岩石力学、地磁地电、岩石物理及本构模型的教学和科研方面的工作。

虚部: $G = 2\alpha I\omega/K$ (5)

力学内耗通常用对数减缩 Δ 来衡量, 即为两相继振动的振幅比的自然对数:

$$\Delta = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{A_2}{A_3} = \dots \quad (6)$$

式中: A 为振幅, 相继两振幅之比也等于相继两个扭转角之比。

$$\Delta = \ln \frac{\theta_t}{\theta_{t+p}} = \ln \frac{\theta_0 e^{-\alpha t} e^{i\omega t}}{\theta_0 e^{-\alpha(t+p)} e^{i\omega(t+p)}} = \alpha p \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\Delta}{p} \quad (8)$$

$p (= \frac{2\pi}{\omega})$ 为周期, 与式(7)一同代入式(4)和(5), 得

$$G = \frac{I}{Kp^2} (4\pi^2 - \Delta^2) \quad (9)$$

$$G = \frac{4\pi I \Delta}{Kp^2} \quad (10)$$

可见, 从振动周期可以测得剪切模量的实部和虚部, 由对数减缩可测得耗散角 δ 的正切:

$$\tan \delta = \frac{G}{G} = \frac{4\pi \Delta}{4\pi^2 - \Delta^2} \quad (11)$$

$$\Delta = \pi \tan \delta \quad (\text{当 } \Delta \text{ 很小时})$$

衰减为: $Q^{-1} = \frac{\Delta}{\pi} = \tan \delta \quad (12)$

实验方法技术和测量精度请参考文[4]。

3 实验结果分析

3.1 衰减随孔隙度的变化

为了探讨衰减与孔隙度的关系, 精心挑选了成份和结构基本相同而孔隙度不同的 4 种长石砂岩, 并用成份单一的泵油饱和。其结果见图 1。由图可见, 衰减峰的峰高随长石砂岩孔隙度的增加而增高, 峰位随孔隙度的增加向低温方向移动。峰的宽度随孔隙度的增加变窄。不难看出, 衰减峰的峰高、峰位、峰的宽度等特征是饱和岩石孔隙度的函数。由图 1 的衰减峰值与孔隙度的关系拟合为图 2 的直线,

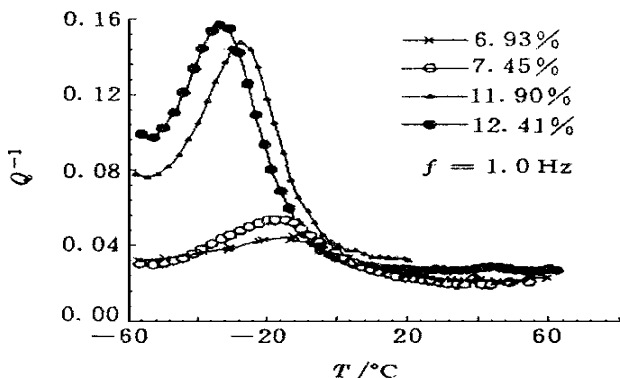


图 1 不同孔隙度泵油饱和砂岩衰减温度谱

Fig 1 The temperature spectrum of different porous sandstones saturated with pump oil

其拟合关系为

$$(Q^{-1})_{\max} = 0.0207\varphi - 0.1$$

式中: φ 为孔隙度。可见, 图 2 更为直观地揭示出衰减随砂岩孔隙度的增大成极为明显的线性增长关系。

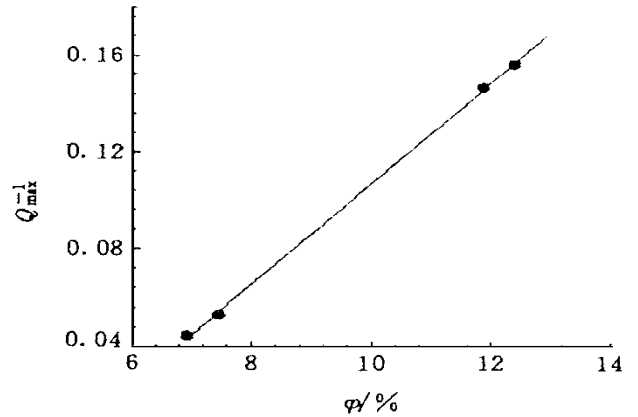


图 2 泵油饱和砂岩衰减随孔隙度的变化

Fig 2 The relationship of attenuation and porosity of pump oil-saturated sandstones

3.2 温度谱实验

图 3(a) 为衰减-温度谱曲线, 由图可见, 当温度由 10℃ 升到 70℃ 之间出现了一衰减-温度峰。当频率为 0.266 Hz 时, 峰温为 22℃。当频率增加到 0.707 Hz 时, 对应的峰温为 25.3℃, 当频率为 1.88 Hz 时, 峰温为 28.4℃。当频率增高到 5 Hz 时, 峰温升高到 35℃。显然衰减峰随着频率的增高而移向高温, 并伴随着峰的分布宽度增大, 峰的高度明显降低。这说明饱和岩石在低频振动时 $\tan \delta$ 符合热激活弛豫过程的特征。满足 Arrhenius 关系:

$$\tau = \tau_0 e^{-H/KT} \quad (13)$$

式中: H 为激活能, τ 为弛豫时间, K 为玻尔兹曼常数, τ^{-1} 为试探频率。当 $\omega\tau = 1$, 正好对应峰温 T_p , 所以有

$$\omega\tau_0 \exp(H/KT) = 1 \quad (14)$$

$$\ln \omega = \frac{H}{K T_p} - \ln \tau_0 \quad (15)$$

通过图 3(a) 改变频率的方法使弛豫峰随频率的变化而移动。由式(15)的拟合直线可求得饱和岩石的激活能 H 和试探频率 τ_0 [14]。再将 H 和 τ_0 代入式(13), 可以进一步求得衰减温度峰的峰频对应的温度响应和衰减频率峰的峰温 T_p 对应的频率响应 f 。

3.3 频率谱试验

在地球物理中, 很需要在宽广的频率范围内进行动态力学测量, 这在实验技术上是很难做到的。为了让这一实验具有普适性, 我们选择在一较窄的频带(0.1~10 Hz)上进行衰减频率谱试验, 这一试验结果可应用到更宽的频带上。

图 3(b) 为饱和砂岩的衰减-频率谱曲线。由图可

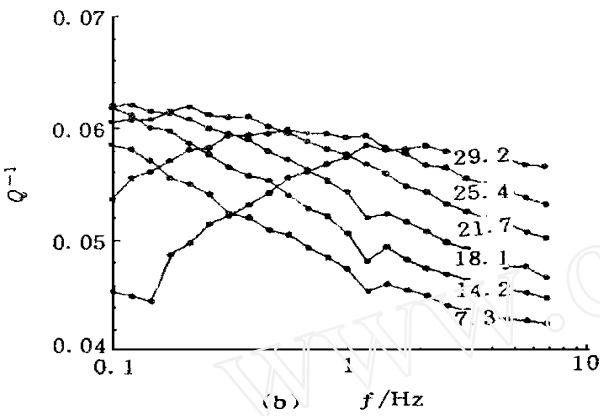
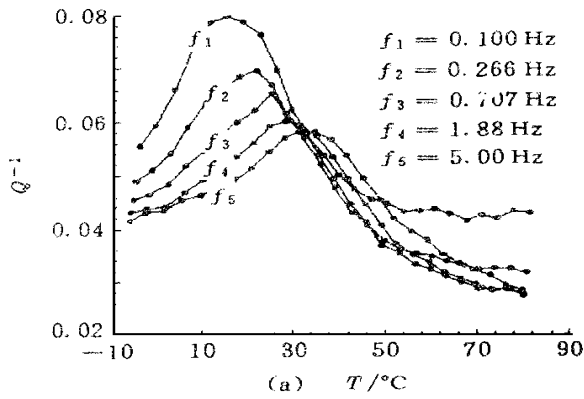


图 3 石油饱和砂岩(6.93%)衰减温度谱(a)和频率谱(b) (图中数字其单位为℃)

Fig 3 The temperature and frequency spectrum of attenuation of oil-saturated sandstones(6.93%)

见,随着测量温度的改变,衰减峰在移动,当测量温度为 21.7℃ 时,其峰频为 0.215 Hz。当测量温度提高到 25.4℃ 时,其峰频移到 0.562 Hz。当测量温度再提高到 29.2℃ 时,峰频移到了 1.212 Hz。测量温度继续升高,峰频会移到更高频率处。所以衰减-频率峰随着测量温度的升高,向高频方向移动,这一频率谱实验结果显然与图 3(a) 的温度谱试验结果,随着频率的增高衰减峰向高温方向移动是一致的。它们均反映了同一物理本质,那就是饱和岩石所具有的粘弹行为的弛豫特性。可见,这两个实验从两个不同的侧面反应了饱和岩石的固有特性,从这两个方面都证实了饱和岩石具有粘弹性材料的性能。所以随着温度和实验所选择的时间尺度(频率)的不同,同一饱和岩石可具有弹性固体和粘性液体两者的某些性质。这也是饱和岩石最重要的性质。

图 4 是孔隙度为 7.45% 的石油饱和砂岩的温度谱(a)和与之对应的频率谱(b)。

图 5 是孔隙度为 12.41% 的石油饱和砂岩的温度谱(a)和与之对应的频率谱(b)。

由图 3~ 5 同一液体饱和的 3 种孔隙度砂岩的衰减温度谱在相同频率时,衰减峰的峰高、峰位、峰的

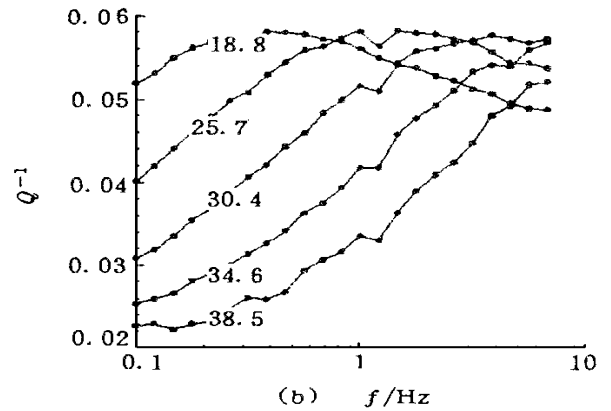
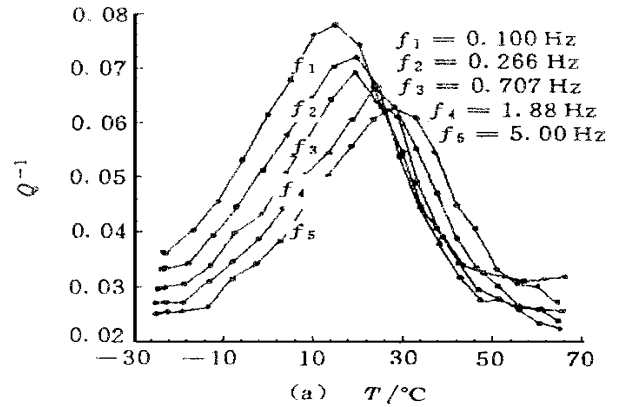


图 4 石油饱和砂岩(7.45%)衰减温度谱(a)和频率谱(b) (图中数字其单位为℃)

Fig 4 The temperature and frequency spectrum of attenuation of oil-saturated sandstones(7.45%)

对称性和峰的宽度均有所不同。同样,如果仔细研究 3 种孔隙度的石油饱和砂岩的频率谱特征也是各不相同的。可见,从石油饱和砂岩的衰减对温度和频率的依赖关系,不难得出饱和岩石的粘弹行为对温度与时间(频率)的响应存在某些等效性。温度越高,分子运动越快,饱和岩石对外力的响应也越快,其力学松弛过程所需的时间也越短。也就是说,这样的一个力学松弛过程,既可以在较高的温度用较短的作用时间来完成,也可以在较低的温度用较长的作用时间来完成。可见,延长作用时间或降低频率与升高温度是等效的。这就是说饱和岩石也可能像粘弹性材料一样具有时温等效原理。在这一原理的指导下,可用选择适当温度测量的实验曲线推算出各种温度下的饱和岩石的粘弹性性质。若根据这一原理推测地幔岩石的粘弹性性质,似乎可用常温下加长作用力时间(降低频率)而得到,当然要实现仍有一定困难,但若需要很长观测时间的饱和岩石蠕变曲线可用升高温度加快蠕变过程的方法得到。从而在短时间内测完蠕变曲线。所以,这一等效原理的研究,对地球科学也是有一定意义的。

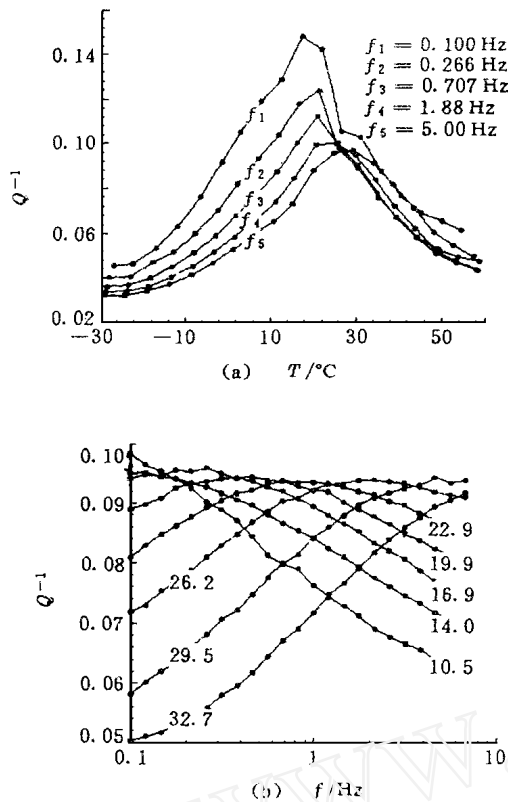


图5 石油饱和砂岩(12.41%)衰减温度谱(a)和频率谱(b) (图中数字其单位为 $^\circ\text{C}$)

Fig 5 The temperature and frequency spectrum of attenuation of oil-saturated sandstones(12.41%)

4 小 结

由含粘滞液体砂岩动态力学行为研究结果初步得出如下几点粗浅认识:

(1) 同一种液体饱和的同一种砂岩的衰减峰的峰高随砂岩孔隙度的增大而增高, 峰位向低温方向移动, 峰分布宽度变窄。衰减随砂岩孔隙度的增大成线性增长关系。

(2) 饱和砂岩存在明显的弛豫特征。不同孔隙度和浸泡的不同的饱和液体, 其动态力学弛豫响应过程也不同。并具有类似于粘弹性材料的时温等效原理, 是一种典型的滞弹性固体。

(3) 时温等效原理说明改变频率和改变温度是等效的, 在地球科学中常常需要极宽频带的仪器进行测试研究。原则上是可行的, 而实际测试条件难以达到。因此, 可以根据时温等效原理, 将衰减频率谱测量改为衰减温度谱测量, 从而获得不同衰减温度峰对应的频率响应。而且从测试技术来讲, 改变温度比改变频率容易得多。这给实验带来方便。它还将给地学的其他问题研究带来许多方便。所以对地学来说, 这一研究也是有一定意义的。

参 考 文 献

- 1 Dvorkin J, Nur A. Dynamic poro-elasticity: a unified model with the squirt and the Biot mechanisms. *Geophysics*, 1993, 58(3): 524~ 533
- 2 Best A I, McClann C. Seismic attenuation and poro-fluid viscosity in clay rich reservoir sandstone. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1386 ~ 1397
- 3 Grant A Gist. Fluid effect on velocity and attenuation in sandstones. *J. Acoust Soc. Am.*, 1994, 96(2): 1158~ 1173
- 4 席道瑛, 刘爱文, 刘卫. 低频条件下饱和液体砂岩的衰减. *地震学报*, 1995, 17(4): 477~ 481

THE DYNAMIC MECHANICAL BEHAVIOR OF VISCOSITY-FLUID-SATURATED SANDSTONE

XiDaoying Hu Tianyue YiLiangkun LiGang

(Dept of Earth & Space Sci, Univ. of Sci & Tech of China, Advanced Center for Earth & Astronomy, Univ. of Sci & Tech of China, Third World Academy of Science, Hefei 230026 China)

Abstract Testing study is made to the dynamic mechanical behavior of viscosity-fluid-saturated sandstone. The attenuation of low-frequency of sandstone is a typical relaxation. So it is of the character of visco-elastic material and the time-temperature equivalence relation like visco-elastic material. These lead some convenience to the research of earth-science. The attenuation peak increases with porosity of rock. The critical temperature moves to lower, the width of peak becomes narrow gradually. The strength of attenuation increases linearly with porosity of sandstones.

Key words saturated-sandstone, relaxation peak, time-temperature equivalence