

## 饱和砂岩的滞弹性弛豫衰减特征及微观机理的探索\*

席道瑛<sup>1)†</sup> 徐松林<sup>2)†</sup> 刘永贵<sup>2)</sup> 杜赞<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学蒙城地球物理国家野外观测站, 地球和空间科学学院, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230027)

(2011 年 11 月 6 日收到; 2011 年 12 月 9 日收到修改稿)

应用 Metravib 热机械分析仪, 以饱和岩石进行正弦波加载的方式, 分别对三种不同孔隙度的泵油饱和彭山砂岩、泵油和甘油饱和自贡长石砂岩进行了衰减实验研究, 得到衰减的热弛豫规律. 据此规律求得它们的激活能和原子振动频率, 其激活能和原子的振动频率比间隙原子的激活能和振动的频率低, 此现象用饱和砂岩中产生的缺陷原子簇的整体振动比单个或孤立的原子的振动频率低做出了解释. 在饱和岩石的晶粒间界缺陷处参与扩散的是固体原子、液体及气体原子. 并得出随孔隙度和黏滞系数增大, 衰减强度和激活能增大, 原子的振动频率增高, 弛豫时间减小的结论. 在正弦波应力作用下, 由多种矿物晶体胶结而成的饱和砂岩是一种多晶、多相的固体, 由于内部结构复杂、缺陷广布, 产生弛豫衰减是普遍现象. 砂岩中存在点缺陷、位错、晶界及孪晶界面等许多缺陷及缺陷间的相互作用都可以产生弛豫型衰减峰. 用饱和砂岩中特有的饱和液体及砂岩内部结构的复杂性解释了饱和砂岩的衰减机理, 很自然地将其宏观衰减特征与微观结构紧密连在一起. 饱和砂岩中的各种缺陷、相界等会导致多重弛豫, 使它们的弛豫衰减峰变宽, 分布参数增大. 这项研究既具有理论意义, 也具有实用价值.

关键词: 饱和岩石, 滞弹性, 衰减机理, 多重弛豫

PACS: 91.60.Qr, 91.60.Hg

## 1 引言

在地壳上部, 地震波衰减的主要机制是局部流体的流动<sup>[1]</sup>. 衰减是由于岩石的滞弹性把地震能量转化为热的一种过程<sup>[2]</sup>. 在地震衰减研究中, 人们越来越感到需要更好地了解地震能量吸收的物理过程<sup>[1]</sup>.

很多文献都发现衰减比速度对岩石性质变化要敏感得多. 地震波引起的地球介质变形在  $10^{-7}$  量级, 这样的小变形能引起的速度变化很小, 而引起的衰减变化是波速的 5 倍. 用衰减  $Q_s/Q_p$  的比值指示部分饱和度比用速度  $V_p/V_s$  的比值要好得多<sup>[1]</sup>, 可见, 用  $Q_s/Q_p$  比用  $V_p/V_s$  对饱和度检测灵敏度要高得多. 另外, 衰减特性比波速对介质的内部结构变化更为敏感, 这正是我们感兴趣的内在

成因的衰减. 衰减随温度升高而减小, 在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间衰减变化达 5 倍, 这种衰减减小比速度减小的程度大得多<sup>[3]</sup>. 所以, 在波速与衰减研究中, 衰减对地震波的反应比波速灵敏得多, 因此, 衰减的研究对地球物理勘探具有特殊的意义, 对勘探地热蒸汽库或天然气库是很有实用价值的, 衰减与热水、油气储存关系的研究也就成了热门的研究课题.

地壳岩石实际上是极典型的非均匀的多孔材料. 组成岩石的矿物颗粒本身还包含颗粒晶体的缺陷、颗粒间的接触、微裂纹、孔洞等, 它们之间由胶结物黏结而成为岩石材料. 在地球上, 所有的岩石看起来好像都是含水的, 这种多孔材料中赋存有各种流体 (包括液体和气体), 由于岩石内部结构构造十分复杂, 受到长时间的载荷作用时, 表现出强烈的非线性特征, 将这种岩石称为滞弹性或黏弹性

\* 国家自然科学基金 (批准号: 40874093) 资助的课题.

† E-mail: xdy@ustc.edu.cn; slxu99@ustc.edu.cn

体<sup>[4]</sup>. 由于岩石特殊的微观结构, 对其施加周期性载荷时, 它的非线性弹性关系就体现在应变滞后于应力一个相位, 所以, 这种非线性不同于一般的非线性弹性材料, 它还包含滞后和弛豫<sup>[4-9]</sup>.

由波动方程可以推出波传播过程分为两个部分: 一是非滞回线性部分, 另一为滞回非线性部分, 二者相位差  $90^\circ$ . 可以认为滞回是非线性衰减的原因, 因为无论是波的传播还是自然界岩石受力状态大部分是在弹性范围内, 所以研究滞回非线性这一衰减是十分有意义的<sup>[10]</sup>.

内耗或衰减技术主要用于固体的缺陷与结构的研究. 当岩石含有自由流体相时, 衰减与流体饱和度有很大的关系<sup>[1]</sup>, 在包含流体的岩石中衰减要比干燥岩石中的衰减大得多. 这表明, 衰减机制主要决定于孔隙流体和岩石骨架的关系, 而不是决定于岩石骨架的衰减或流体的衰减. 近年来对岩石中包含的液体引起的岩石非线性研究越来越受到重视, 研究岩石中的液体引起的弛豫衰减的影响既具有挑战性又具有实际意义, 令地学研究者十分感兴趣<sup>[11-14]</sup>. 实验室研究对理解弹性波在特殊岩石中传播的物理机制是非常重要的, 如果了解了物理机制, 恰当的理论应用就有根据, 并且这种结合(实验室研究的物理机制与理论相结合)有助于我们加强理解所要解释的现象<sup>[15]</sup>.

我们的结果意味着在地壳的上部孔隙流体主导着衰减. 孔隙流体的热弛豫引起的衰减也可能超过黏性弛豫引起的衰减<sup>[1]</sup>.

在我们的实验条件下, 在部分饱和岩石中 P 波衰减比 S 波衰减要强, 而在完全饱和岩石中正好相反. Mavko 和 Nur<sup>[16]</sup> 根据局部流动模型计算了在一定理想孔隙形状和纵横比范围内的一些特殊的衰减值, 发现模型中所用的纵横比最小的孔隙 ( $10^{-4}$ ) 在衰减中起主要作用, 即使这些孔隙在总孔隙中所占的百分比很小, 它们的作用却是很大的. O'Connell<sup>[17]</sup> 的研究表明, 孔隙的纵横比应在  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  之间. 尽管这些研究结果有很大差别, 但看起来好像绝大多数的衰减都是由纵横比大约为  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  的孔隙引起的<sup>[2]</sup>. 根据模型中所用的纵横比解释这些观测, 看来最好的机制是纹间流动<sup>[1]</sup>, 纹间流动是比 Biot 型流动更重要的地震衰减来源. 可以认为: 在我们对全饱和砂岩所做的实验中, 纹间流动是主要的衰减机制. 当然, 这一看法得到公认还需要做相当多的理论工作<sup>[1]</sup>. 为此

文献 [16—20] 还进行了弛豫衰减的理论模型研究. Mavko 和 Nur<sup>[16]</sup> 认为, 当每一条裂纹都是部分饱和, 同时液相湿润了裂纹表面, 且液相积累在裂纹末端或沿裂纹长度方向收缩的地方时, 裂纹被压缩使液体流动到气体占据的区域, 引起黏性能量损耗, 体积的压缩引起每一条裂纹压缩而产生衰减. 因为这个理论对微观结构细节极为敏感, 在我们不太了解饱和岩石的微观结构细节时, 不能用它定量预计衰减的大小. 从 Mavko 和 Nur<sup>[16]</sup> 的计算看出, 用这种机制算出的能量损失与我们的观测类似. 更可靠的预计是  $Q_s/Q_p$  比值近似为 2, 这与我们的观测相当一致.

Zinszner 等<sup>[21]</sup> 和 Abeele 等<sup>[11]</sup> 以及席道瑛等<sup>[22,23]</sup> 通过大量实验研究获得砂岩和大理岩的非线性特征(波速、衰减)比线性特征更依赖于液体的存在.

Vo-Thanh<sup>[24]</sup> 研究了饱和砂岩中流体黏度对波的衰减和速度的影响. Batzle 等<sup>[25]</sup> 在实验室通过超声或高振幅应力-应变方法取得了许多基础性的岩石压缩和剪切波特性的数据, 得到速度频散是岩石的非均匀性、孔隙流体性质及液体流动性的复杂函数. 频散可以作为流体指示剂使用或间接用来测量渗透率. 地震属性不仅仅受到孔隙流体种类的影响, 也受液体在岩石内部运动能力的影响, 因此定义流体活动性与渗透率成正比, 与液体黏性成反比. 通过地震到超声频段的地震速度频散和流体活动性的影响, 利用共振系统在地震应变振幅为  $10^{-7}$  时测量了 5 Hz—800 kHz 的弹性性质. 采用应力-应变、共振和超声三种实验方法测量了有机玻璃的衰减和模量, 获得衰减峰随温度升高向高频方移动, 模量随温度升高而降低、随频率增高而增大的结果. Batzle 等<sup>[26]</sup> 通过实验求出了流体流度改变而引起的速度变化.

岩石内部的微细结构对温度、孔隙流体的属性和应力是十分敏感的, 因此正是岩石的微细结构的响应使其具有非线性和滞后性. 岩石微细结构中的流体对非线性响应的贡献特别显著, 但是微细结构以及孔隙流体究竟是如何影响非线性响应的, 目前还不十分清楚. 我们的主要兴趣在于地震能转化为热能的机制, 而不在于影响地震振幅的任何其他过程<sup>[27]</sup>. 本文研究的衰减不是与岩层几何形态有关的外在成因衰减(散射、层内多次波、几何发散等), 而是介质的内在成因衰减, 即与波和孔隙介

质及其饱和流体之间相互作用有关的衰减. 为了揭示这些关系, 特采用 Metravib 热机械分析仪对饱和岩石进行正弦波加载实验, 借衰减或内耗对固体材料内部缺陷和结构特敏感的特点, 试图从衰减机理方面来探索这个问题.

## 2 实验方法与技术

采用四川彭山砂岩和自贡长石砂岩, 加工成直径为 9.4 mm, 长度为 50 mm 的圆柱形样品, 样品的准备可参见文献 [8]. 实验前对样品的孔隙度、密度、渗透率进行了测试.

实验采用从法国引进的 Metravib 热机械分析仪, 最大力值可达 450 N, 频率为  $10^{-5}$ — $10^3$  Hz, 温度范围为  $-150$  °C— $600$  °C 的动态力学分析. 本实验主要选择力和位移作为控制参数, 分别进行温度谱和频率谱试验. 实验时固定静载为 100 N, 正弦波动载荷恒为 60 N, 将总载荷控制在屈服点以下. 升温速率为  $1$  °C/min, 以此研究饱和岩石的衰减和耗散角、模量和弹性波速度对温度和频率的响应. 设备相关精度如下: 温度控制的稳定度为  $\pm 0.1$  °C; 耗散因子的分辨率为  $10^{-5}$ ; 频率的分辨率为 0.01%; 力的分辨率为 0.000024 N; 位移的分辨率为 3 nm.

## 3 实验结果与分析

下面以泵油饱和和砂岩的实验结果来具体分析衰减的微观机理.

图 1 为泵油饱和彭山砂岩 PI-10 (16.08%) 的衰减温度谱. 由图中不难看出, 当频率为 5 Hz 时, 衰减峰峰位在  $-9$  °C; 当频率为 100 Hz 时, 衰减峰峰位在  $28$  °C 左右; 当频率继续提高到 200 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $44$  °C; 当频率再提高到 400 Hz 时, 衰减峰峰位向高温方向移到了  $60$  °C 左右. 可见, 泵油饱和彭山砂岩不但存在明显的衰减峰, 而且随着测量频率的提高, 衰减峰的峰位是向高温方向移动的, 符合热激活弛豫规律.

图 3 为泵油饱和彭山砂岩 PI-15 (17.2%) 的衰减温度谱. 由图不难看出, 当频率为 5 Hz 时, 衰减峰峰位在  $-11$  °C; 当频率为 50 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $7$  °C; 当频率为 100 Hz 时, 衰减峰峰位在  $18$  °C 左右; 当频率继续提高到 200 Hz 时, 衰减峰峰位向

高温方向移到了  $30$  °C, 当频率继续提高到 300 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $53$  °C; 当频率再提高到 400 Hz 时, 衰减峰峰位向高温方向移到了  $56$  °C 左右. 可见, 泵油饱和彭山砂岩不但存在明显的衰减峰, 而且随着测量频率的提高, 衰减峰的峰位也是向高温方向移动的, 符合热激活弛豫规律. 由衰减峰的峰形可见, 随着振动频率的提高, 衰减峰值强度降低, 峰变缓变宽, 分布参数增大. 图 1 的衰减峰的峰形特征也符合这一规律.

图 5 为泵油饱和和自贡长石砂岩的衰减温度谱. 由图不难看出, 当频率为 5 Hz 时, 衰减峰峰位在  $-14$  °C; 当频率为 10 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $-6$  °C; 当频率继续提高到 100 Hz 时, 衰减峰峰位向高温方向移到了  $20$  °C 左右. 可见, 泵油饱和彭山砂岩不但存在明显的衰减峰, 而且随着测量频率的提高, 衰减峰的峰位是向高温方向移动的, 符合热激活弛豫规律. 同时也可看到, 泵油饱和和自贡长石砂岩衰减峰的形态特征与图 1 和图 3 也是类似的.

图 7 为甘油饱和和自贡长石砂岩的衰减温度谱. 由图不难看出, 当频率为 50 Hz 时, 衰减峰峰位在  $50$  °C; 当频率为 200 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $65$  °C; 当频率为 250 Hz 时, 衰减峰峰位在  $67$  °C; 当频率继续提高到 300 Hz 时, 衰减峰峰位移动到  $87$  °C; 当频率再提高到 400 Hz 时, 衰减峰峰位向高温方向移到了  $100$  °C 左右. 可见, 泵油饱和和彭山砂岩不但存在明显的衰减峰, 而且随着测量频率的提高, 衰减峰的峰位是向高温方向移动的, 符合热激活弛豫规律. 从衰减峰的峰形特征可见, 甘油饱和和自贡长石砂岩的衰减峰峰形特征与泵油饱和的三种砂岩衰减峰的峰形特征有显著的不同. 衰减峰的低温侧与上述三种饱和砂岩低温侧曲线基本相符, 高温侧衰减曲线尾缩, 不过它仍然符合随频率增高, 衰减峰峰宽增大、峰变缓的特点.

由于激活能  $H$  是描述弛豫过程的一个极为重要的参数, 它与  $\tau_0$  结合可以直接反映弛豫的微观机理. 若弛豫过程是通过原子扩散来进行的, 则弛豫时间  $\tau$  和温度  $T$  的关系遵循 Arrhenius 方程:

$$\tau = \tau_0 e^{H/kT}, \quad (1)$$

式中  $\tau_0$  是频率因子,  $H$  是激活能,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度. 该关系把饱和岩石的黏弹行为与具有一定激活能的分子速度过程联系起来, 可以通过这一关系求出激活能  $H$ .

当应变弛豫迟后于应力的变化时, 将导致滞后角  $\delta$  的产生, 才会引起衰减. 当  $\omega\tau = 1$  时, 衰减达到极大值, 其  $\omega = 2\pi f$ , 由 (1) 式可得

$$2\pi f\tau_0 e^{H/kT} = 1. \quad (2)$$

因此, 可以通过改变频率的方法来求取激活能. 设在  $f_1$  频率下测到的衰减峰峰温为  $T_1$ ,  $f_2$  频率下测到的衰减峰峰温为  $T_2$ , 当频率由  $f_1$  变到  $f_2$  时, 峰温由  $T_1$  变到  $T_2$ ,

$$\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = \frac{H}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right), \quad (3)$$

由此可拟合得到  $\ln f$  和弛豫衰减峰的峰温的倒数 ( $1000/T$ ) 成直线关系 (见图 2, 4, 6, 8). 图 2, 4, 6, 8 是与图 1, 3, 5, 7 相对应的弛豫衰减峰的峰温与频率的 Arrhenius 关系 ( $\ln f-1000/T$ ) 图. 它们的拟合关系分别如下:

$$\begin{aligned} \ln f &= 23.79441 - 5.81068 \times 1000/T, \\ \ln f &= 25.66048 - 6.27561 \times 1000/T, \\ \ln f &= 27.10532 - 6.63833 \times 1000/T, \\ \ln f &= 28.34966 - 7.08432 \times 1000/T, \end{aligned} \quad (4)$$

由拟合直线的截距可求弛豫时间  $\tau_0$ , 直线的斜率可求激活能  $H$ . 求得泵油饱和彭山砂岩 (16.08%) 的衰减峰的激活能  $H$  约为 0.5 eV, 弛豫时间  $\tau_0$  约为  $0.46 \times 10^{-10}$  s 和泵油饱和彭山砂岩 (孔隙度为 17.2%) 弛豫衰减峰的激活能  $H$  约为 0.54 eV, 弛豫时间  $\tau_0$  约为  $0.717 \times 10^{-11}$  s.

以类似的方法我们求得甘油饱和的长石砂岩 G-A-1 (12.84%) 和泵油饱和的长石砂岩的弛豫衰减峰的激活能  $H$  分别约为 0.61 eV 和 0.57 eV, 弛豫时间  $\tau_0$  分别约为  $0.49 \times 10^{-12}$  和  $0.17 \times 10^{-11}$  s.

由图 5 的 100 Hz 时峰温在 20 °C, 图 7 的 50 Hz 时峰温已达 20 °C, 可以想见, 图 7 的 100 Hz 时峰温应高于 20 °C, 说明甘油饱和长石砂岩的峰温比泵油饱和长石砂岩的峰温要高. 由此结果可见, 甘油饱和的自贡长石砂岩的激活能都大于泵油饱和的自贡长石砂岩的激活能, 原子的振动频率比泵油饱和和自贡长石砂岩提高, 弛豫时间自然比泵油饱和的自贡长石砂岩缩短. 另外一个更为重要的因素是甘油比泵油黏滞系数大, 所以甘油饱和的长石砂岩比泵油饱和的长石砂岩的衰减要大 (图 5 泵油饱和的自贡长石砂岩平均衰减峰值约 0.13, 而图 7 甘油饱和的长石砂岩平均衰减峰值约 0.25), 激活能就会增

大, 原子或分子的振动频率增高, 振动速率加快, 弛豫时间自然要缩短. 图 1 的泵油饱和彭山砂岩的孔隙度 (16.08%) 比图 2 的泵油饱和彭山砂岩的孔隙度 (17.2%) 小, 衰减强度也比大孔隙度的泵油饱和彭山砂小, 激活能也小, 原子的振动频率降低, 弛豫时间增长.

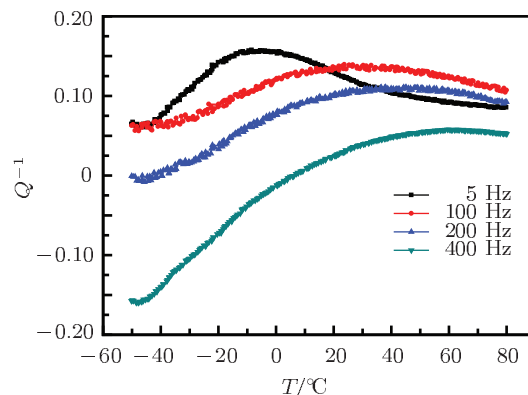


图 1 泵油饱和彭山砂岩 P-I-10 (16.08%) 的衰减温度谱

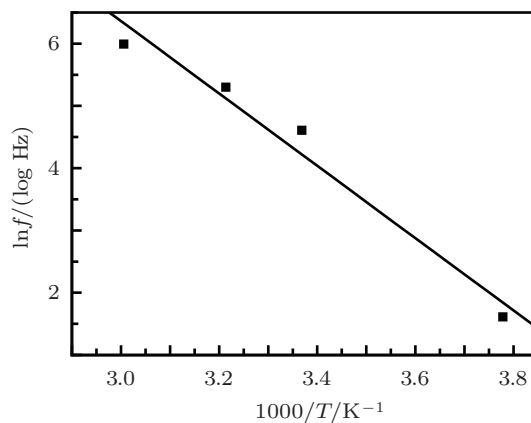


图 2 与图 1 相对应的泵油饱和彭山砂岩的  $\ln f-1000/T$  关系

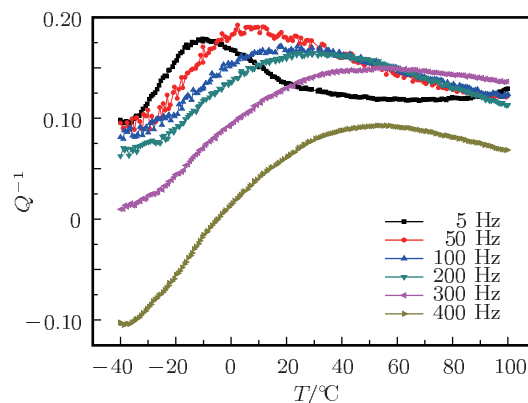


图 3 泵油饱和彭山砂岩 P-II-15 (17.2%) 的衰减温度谱

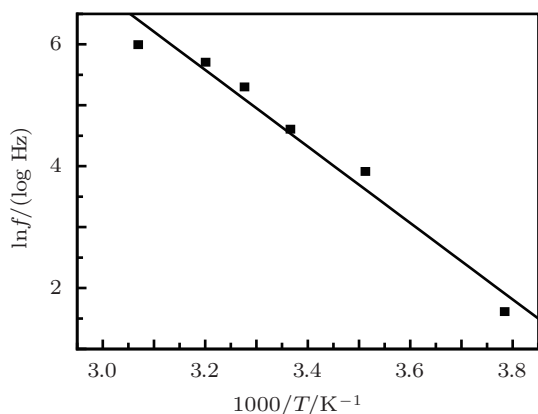


图4 与图3相对应的泵油饱和和彭山砂岩的  $\ln f-1000/T$  关系

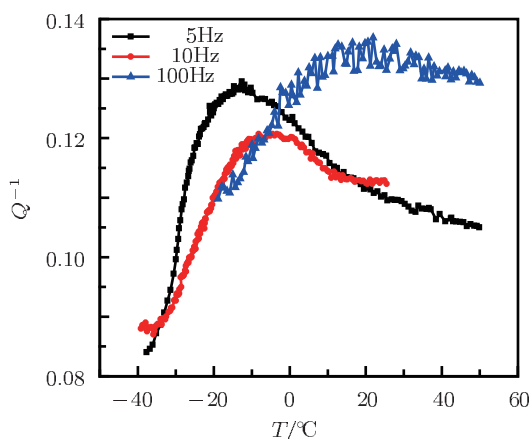


图5 泵油饱和和自贡长石砂岩 (12.84%) 的衰减温度谱

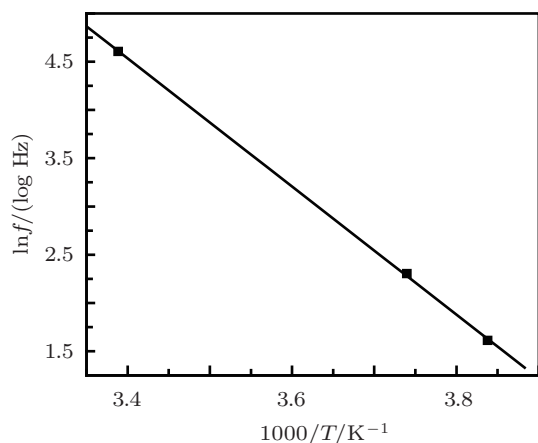


图6 与图5相对应的泵油饱和和自贡长石砂岩的  $\ln f-1000/T$  关系

两种泵油饱和和彭山砂岩的弛豫衰减峰的激活能  $H$  分别为 0.5 eV 和 0.54 eV, 相差 0.04, 泵油饱和和长石砂岩和甘油饱和和长石砂岩的弛豫衰减峰的激活能  $H$  分别为 0.57 eV 和 0.61 eV, 也相差 0.04, 这四种不同情况的饱和砂岩激活能虽有不同, 但都处在同一量级. 按图的顺序, 原子或分子的振动频率分

别为  $2.16 \times 10^{10}$  Hz,  $1.394 \times 10^{11}$  Hz,  $5.91 \times 10^{11}$  Hz,  $2.05 \times 10^{12}$  Hz, 由这些数据分析可见, 除甘油饱和和长石砂岩外, 其他三种泵油饱和和砂岩的原子或分子的振动频率都低于间隙原子的振动频率, 很有可能是饱和岩石中的缺陷 (包括位错等), 导致缺陷附近的原子簇振动, 才会引起原子的振动频率降低. 由此可见, 在饱和岩石的缺陷处, 参与扩散的是固体原子, 也有可能是饱和液体原子或残留在孔隙中的气体原子. 由以上数据比较可见, 相同的泵油饱和和彭山砂岩孔隙度大的比孔隙度小的原子或分子的振动频率高一个量级; 而相同孔隙度的同一种自贡长石砂岩饱和不同黏滞系数的液体时, 黏滞系数大的甘油饱和和自贡长石砂岩比黏滞系数小的泵油饱和和自贡长石砂岩的原子或分子的振动频率高一个量级. 从上述结果不难得出, 随饱和岩石的孔隙度增大, 衰减和激活能增大, 原子或分子的振动频率增高, 振动速度加快, 弛豫时间缩短; 随饱和液体的黏滞系数增大, 衰减和激活能增大, 原子或分子的振动频率增高, 振动速度加快, 弛豫时间也缩短.

岩石是由许多性质不同的矿物小晶体胶结而成, 在这种多晶的固体材料的晶体中, 原子虽然基本上固定于各格点附近, 相对比较稳定, 但在本实验 100 °C 的较高温度下, 它们也可能通过所谓“扩散”的方式在晶体的微观缺陷中移动. 晶粒间界是晶体的主要缺陷, 原子可以比较容易地沿着晶粒间界扩散, 所以外界的原子可以渗入并分布于晶粒间界处, 内部的杂质原子或夹杂物往往也容易集中在晶粒间界处, 这些都可以使晶粒间界具有复杂的动性和物理力学性质, 并产生各种影响 [28].

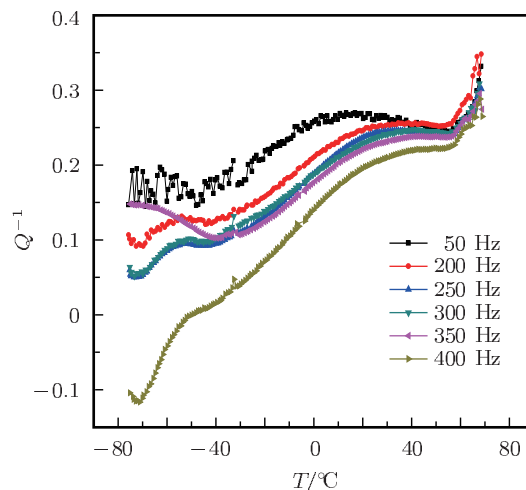
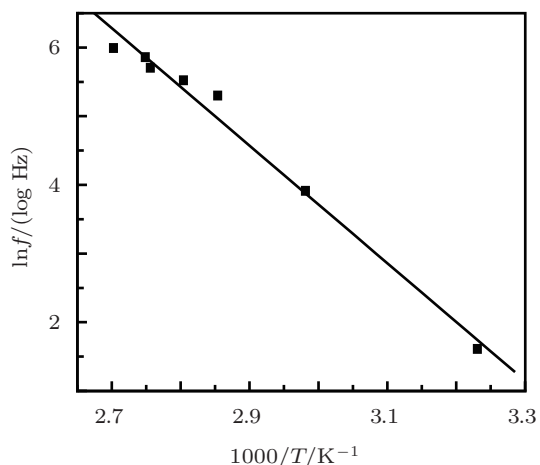


图7 甘油饱和和自贡长石砂岩 G-A-1 (12.84%) 的衰减温度谱

图8 与图7对应的  $\ln f$ - $1000/T$  关系

#### 4 结论和讨论

在地震勘探中衰减检测能够提供岩石内部微观缺陷的信息,而且比波速测量的灵敏度高得多,对地震波的反应比波速更敏感,因此,研究衰减及其机理对地球物理尤其是地球物理勘探具有特殊意义.本文对不同孔隙度的泵油饱和彭山砂岩和以不同黏滞系数的甘油和泵油饱和的自贡长石砂岩进行正弦波单轴加载实验,研究它们的弛豫衰减峰移动的滞弹性特点,探索衰减的机理,很自然地将弛豫衰减的宏观现象与饱和砂岩的微观结构紧密地连在一起.

我们在频率 5—400 Hz, 温度范围  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  的实验中,获得了泵油饱和彭山砂岩和泵油及甘油饱和长石砂岩的衰减峰的峰位随振动频率提高向高温方向移动的弛豫规律,取得了产生弛豫衰减峰的激活能和振动频率,实验结果与 10 Hz 以下的共振实验所取得的热弛豫规律相符<sup>[9]</sup>,证实了弛豫机制在地壳饱和岩石中是普遍存在的,这给地球物理勘探的资料解释和岩石物理理论模型的研究<sup>[20,21]</sup>提供了实验基础和新的机理.

其中泵油饱和彭山砂岩的激活能和原子的振动频率比间隙原子振动的频率低,这种情况很可能是饱和砂岩中产生的缺陷(也包括位错)的原子簇的振动,这种原子簇的整体振动比单个或孤立的原子的振动频率低,导致泵油饱和彭山砂岩的振动频率降低.其次因激活能低,也会导致原子振动频率降低,这样会使弛豫时间增长,并且弛豫过程还受晶界上原子扩散的控制.在岩石这种固体材料的

晶体中,原子虽然处于相对稳定状态,但当样品处于相对较高的温度时,原子也会通过扩散在晶体中移动,而且原子比较容易沿着晶粒间界这种缺陷扩散.其实在饱和岩石中晶粒间界就如矿物颗粒之间的胶结处,可以容纳外界的原子和内部的杂质原子或夹杂物,导致晶粒间界具有复杂的性质,并影响材料的宏观性能.由此可见,在饱和彭山砂岩和自贡长石砂岩的缺陷处参与沿着晶粒间界扩散的是原子,也包括液体和气体原子.甘油饱和长石砂岩是三种砂岩中激活能和原子的振动频率最高的,它的振动频率正处在间隙原子的振动频率范围,所以在甘油饱和自贡长石砂岩中参与扩散的也是原子,由于它的振动频率最高,所以弛豫时间最短.从这里不难得出,衰减主要反映饱和岩石内部的微观结构变化,而且每一种微观结构的作用都有其特定的  $Q^{-1}$  对温度和频率的响应.因此,衰减研究是具有科学意义的一个新领域.我们研究的目的是希望在地球物理勘探技术的发展中能助一臂之力.从上述结果可以看出此项研究具有重要的科学意义和实用背景.

相同孔隙度的同一种长石砂岩饱和不同黏滞系数的液体(甘油和泵油),由于衰减对饱和液体的黏滞性高度敏感,可观察到因黏滞度变化引起的衰减峰.甘油的黏滞系数比泵油的黏滞系数大,所以甘油饱和比泵油饱和和长石砂岩衰减大,激活能也大,原子的振动频率高一个量级,相应的弛豫时间也缩短了一个量级;由不同孔隙度的彭山砂岩饱和相同黏滞系数的泵油与相同孔隙度的长石砂岩饱和不同黏滞系数的液体的实验结果可见,随孔隙度和黏滞系数增大,衰减增大、激活能也增大、原子的振动频率提高、弛豫时间缩短.

在饱和砂岩这种多晶、多相的胶结固体材料上,进行 5—400 Hz 的正弦波交变应力作用时,晶体颗粒可以相互摩擦滑动产生颗粒边界的弛豫,引起弛豫型衰减峰.在砂岩中必然存在许多缺陷,如点缺陷、位错、晶界及孪晶界面也可以产生弛豫型衰减峰,这些缺陷之间的相互作用也可以产生弛豫型衰减峰.根据弛豫衰减峰的峰形特征结合饱和砂岩内部结构以及缺陷、损伤的复杂性的特征分析,饱和岩石中的点缺陷、晶界及孪晶界面等以及饱和液体与岩石骨架之间都可以产生弛豫型衰减峰.还因饱和彭山砂岩和甘油饱和自贡长石砂岩中的各种缺陷、相界等会导致多重弛豫,使它们的弛豫

衰减峰变宽, 分布参数增大.

地震波的衰减机制和测量方法技术的研究正处在起步阶段, 它是岩石物理研究的前沿课题, 它的研究结果可以排除地震资料解释中的非唯一性, 减少不确定性因素. 衰减机理的研究可为实际地震

响应分析和属性反演提供依据, 有助于地震资料的解释, 也给理论模型的改进和发展提供了新的思路. 可见, 这一规律性的实验结果不但给理论模型研究奠定了实验基础, 更重要的是拓展了岩石物理理论模型的发展空间和应用前景.

- [1] Winkler K W, Nur A 1982 *Geophysics* **47** 1
- [2] Jones T D 1986 *Geophysics* **51** 1939
- [3] Jones T, Nur A 1983 *Geophys. Res. Lett.* **10** 140
- [4] Xi D Y, Liu X Y, Zhang C Y 2007 *Pure. Appl. Geophys.* **164** 2157
- [5] Guyer R A, TenCate J, Johnson P 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3280
- [6] Johnson P A, McCall K R 1994 *Geophys. Res. Lett.* **21** 97
- [7] Xi D Y, Chen Y P, Tao Y Z, Liu Y C 2006 *Chinese J. Rock Mech. Engng.* **25** 1086 (in Chinese) [席道瑛, 陈运平, 陶月赞, 刘亚晨 2006 岩石力学与工程学报 **25** 1086]
- [8] Xi D Y, Xu S L, Xi J, Yi L K, Du Y 2011 *Chinese J. Geophys.* **54** 2302 (in Chinese) [席道瑛, 徐松林, 席军, 易良坤, 杜赟 2011 地球物理学报 **54** 2302]
- [9] Tutuncu A N, Podio A L, Gregory A R 1998 *Geophysics* **63** 195
- [10] McCall K R, Guyer R A 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 23887
- [11] van Den Abeele K E A, Carmeliet J, Johnson P A, Zinszner B 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 2121
- [12] Carmeliet J, van Den Abeele K E A 2001 *Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures* Cachan, France, 28 May 2011 pp11–18
- [13] Carmeliet J, Koen E A, van Den Abeele K E A 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 1144
- [14] Xi D Y, Du Y, Yi L K, Wan X L 2009 *Chinese J. Rock Mech. Engng.* **28** 687 (in Chinese) [席道瑛, 杜赟, 易良坤, 宛新林 2009 岩石力学与工程学报 **28** 687]
- [15] Pennington W D 1997 *The Leading EDGE* **16** 241
- [16] Mavko G M, Nur A 1979 *Geophysics* **44** 161
- [17] O'Connell R J 1983 *Am. Inst. Phys. Conference on Physics and Chemistry of Porous Media, Schlumberger-Doll Research, Johnson D L, Sen P N (Ed.) Am. Inst. Phys:* pp166–176
- [18] Xi D Y, Yi L K, Tian X Y 2003 *Chinese J. Geophysics* **46** 814
- [19] Xi D Y, Xu S L, Du Y, Yi L K 2011 *J. Appl. Geophys.* **71** 289
- [20] Du Y, Xi D Y, Xu S L 2009 *Chinese J. Geophys.* **52** 3051 (in Chinese) [杜赟, 席道瑛, 徐松林 2009 地球物理学报 **52** 3051]
- [21] Zinszner B, Johnson P A, Rasolofosaon P N J 1997 *J. Geophys. Res.* **101** 8105
- [22] Xi D Y, Liu B, Yi L K 2000 *Chinese J. Geophys.* **43** 873
- [23] Xi D Y, Liu B, Tian X Y 2002 *Chinese J. Geophys.* **45** 101
- [24] Vo-Thanh D 1995 *Geophys. J. Int.* **121** 737
- [25] Batzle M L, Han D H, Hofmann R 2006 *Geophysics* **71** N1
- [26] Batzle M, Han D, Castagna J 1996 *Soc. Expl. Geoph. Expanded Abstracts* 1687
- [27] O'Doherty R F, Anstey N A 1971 *Geophys. Prospecting* **19** 430
- [28] Huang K 1979 *Solid Physics* (Beijing: People's Education Press) pp66–67 (in Chinese) [黄昆 1979 固体物理学 (北京: 人民教育出版社) 第 66–67 页]

# Viscoelastic relaxation attenuation property for saturated sandstones and corresponding investigation of micro-scale mechanism\*

Xi Dao-Ying<sup>1)†</sup> Xu Song-Lin<sup>2)†</sup> Liu Yong-Gui<sup>2)</sup> Du Yun<sup>1)</sup>

1) (*Mengcheng National Geophysical Observatory, School of Earth and Space Science,*

*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials,*

*University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

(Received 6 November 2011; revised manuscript received 9 December 2011)

## Abstract

Attenuation experiments are performed by Metravib dynamic mechanical analyzer with sine wave loading style to study the viscoelastic relaxation property of pump-oil saturated and glycerol saturated Pengshan sandstone and Zigong arkoses with three kinds of porosities. Based on the thermal relaxation regularities, the activation energies and the atomic vibration frequencies of relaxation attenuation peaks for three kinds of saturated sandstones are evaluated. The results show that activation energies and atomic vibrations frequencies of sandstone samples are lower than those of interstitial atoms. The overall vibration behavior of atomic cluster with defects can be used to explain why vibration frequencies are low in samples. Besides the solid atoms, the gas and liquid atoms filled in defects contribute greatly to overall vibration of sample. Saturated sandstone, cemented by a combination of mineral crystals, is a polycrystalline, multiphase solid with internal complex structure and widespread defects, and it easily takes on thermal relaxation property under sine wave loading. Such flaws and defects as point defects, dislocation and grain boundary in samples and their interaction interaction can produce relaxation attenuation peak. To explain the relaxation mechanism by saturated liquid and internal structure of the sandstone, it is natural to relate the attenuation characteristics to its macro-meso-structure. It is notable that when taking the defects, multiple phase boundary into consideration, a new interesting phenomenon appears, there produces multi relaxation with broader peak and more widely distributed parameter. This investigation is helpful to study theoretical model and seismic data interpretation.

**Keywords:** saturated rock, viscoelastic, attenuation mechanism, multi relaxation

**PACS:** 91.60.Qr, 91.60.Hg

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40874093).

† E-mail: xdy@ustc.edu.cn; slxu99@ustc.edu.cn