

文章编号: 1001-4888(2011)03-0316-07

饱和岩石滞弹性弛豫机理的实验研究^{*}

席军¹, 杜赞², 徐松林³, 席道瑛²

(1. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102671; 2. 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, 安徽 合肥 230026; 3. 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, 安徽 合肥 230027)

摘要: 通过 Metravib 热机械分析仪, 用正弦波加载方式, 模拟地震波的传播。实验时固定静载为 100N, 正弦波动载荷恒为 60N, 将总载荷控制在屈服点以下。在温度为 $-50^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$, 升温速率保持在 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$, 频率为 $5\text{Hz} \sim 400\text{Hz}$ 的条件下, 对饱和泵油彭山砂岩和遂宁砂岩样品进行单轴循环加载实验, 获得饱和泵油彭山砂岩和遂宁砂岩的衰减、虚模量、实模量、波速与温度和频率以及动载荷的关系。以此研究了饱和和多孔岩石的衰减和虚模量、杨氏模量和弹性波波速随温度和频率的动态响应。取得了随频率增高, 饱和和多孔岩石的衰减峰和虚模量峰的峰位向高温方向移动的热激活弛豫机制。杨氏模量和弹性波波速随温度升高而下降, 随频率增高而增大, 具有频散效应; 杨氏模量和弹性波波速随动载荷振幅的增大而降低。这些结果与低频共振的驻波实验取得了同样的热激活弛豫规律, 说明热激活弛豫规律具有一定的普适性。

关键词: 滞弹性; 弛豫机理; 饱和岩石; 波的能量衰减; 频散效应

中图分类号: TU45

文献标识码: A

0 引言

岩石是集复杂性和分散性一体的非均匀地球介质, 是极其典型的多孔材料。在这种多孔材料中赋存有各种流体(包括液体和气体), 使它具有滞弹性和粘弹性材料的性质^[1], 比如衰减、弛豫和滞后等特征^[1,2]。宛新林等^[3]在 50Hz 频率以下对饱和砂岩和大理岩获得了随频率增高、纵横波波速增大的频散效应, 饱和岩石中的微细观缺陷引起滞后导致模量增大, 模量的频散增强。Batzle 等^[4]在实验室通过超声或高振幅应力—应变方法取得了许多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、孔隙流体类型及液体活动性的复杂函数。频散可以作为流体指示剂或间接用来测量渗透率。影响地震属性的是孔隙液体类型和液体在岩石内部运动的能力。Gist^[5], Pride 等^[6]都从不同角度提出了速度的频散与岩石内部结构的非均匀性相关。液体的活动性与液体的扩散长度以及岩石的孔隙度相关, 不过, 在这方面目前被广泛采用的模型机制中, 对孔隙流体活动性有很大影响的岩石骨架特性的考虑尚不够充分, 尤其是对低频范围, 仍值得进一步研究。关于低频(几 Hz~几百 Hz)地震波衰减和速度频散的试验数据与高频的超声波试验数据相比少很多, 所以低频试验结果更受关注。Spencer^[7]对岩石和铝柱进行的应力—应变曲线试验, 确定了岩石的杨氏模量和泊松比。Batzle 等^[8]研究了在地震频段的衰减和速度色散受温度的强烈影响, 通过实验求得了流体流度改变而引起的速度变化, 由此也发现了流体流度这种特殊的机理。Batzle 等^[9]采用 Spencer 相同的装置和方法测量和计算了低频速度与频率的关系, 发表的试验结果展示了北海砂岩 P 波和 S 波在低频段($5\text{Hz} \sim 50\text{Hz}$, $2.5\text{km/s} \sim 3\text{km/s}$) 与高

^{*} 收稿日期: 2010-12-10; 修回日期: 2011-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40874093)资助

通讯作者: 席军, 男, 博士, 主要从事基础力学及岩石动力学方面的教学和研究工作。E-mail: xijun@bipt.edu.cn

频(500kHz, 3.5km/s)上速度的差别。Batzle 等^[4]在实验室进行了从地震到超声频段的地震速度色散和流体活动性的研究,利用组合强迫共振系统在地震应变振幅为 10^{-7} 时测量了 5Hz~800kHz 样品的弹性性质。采用应力—应变曲线、组合强迫共振和超声三种实验方法测量了有机玻璃的能量衰减和模量,得到了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论。Xi 等^[1,2,10-13]在更低的频率范围(0.01Hz~10Hz)进行了饱和砂岩、大理岩的低频组合强迫共振实验(应力—应变曲线实验,5Hz~50Hz)获得能量衰减、模量、波速随频率和温度的变化规律,也获得了能量衰减峰随温度或频率的升高移向高频或高温方向的热激活弛豫规律,以及模量和波速随温度升高而下降,随频率升高而上升的频散效应。

可见,上述低频实验结果主要是通过组合共振杆实验以驻波的形式获得饱和岩石的能量衰减、模量、波速与频率和温度的关系,驻波的传播速度依赖于样品的几何形状和尺寸,所取得的实验结果和实验规律存在一定的局限性,难以应用于行波的响应。本文拟采用 Metravib 热机械分析仪,进行正弦波加载来研究饱和岩石的粘弹性响应。

1 实验方法和技术

实验采用四川的彭山砂岩和安徽合肥砂岩。彭山砂岩分别加工成直径为 9.45mm~12mm、长度为 48.5mm~50mm 的样品,合肥砂岩加工成直径为 19.5mm 长度为 50.5mm 的园柱形样品;样品两端面平行度为 0.02mm,两种岩样分别为 10 块和 5 块。先将加工好的样品放入真空干燥箱进行干燥处理,在 45℃烘箱中烘 120h 后,将泵油放入真空缸中淹到样品 1/3 高度,然后抽真空直至样品表面气泡消失,再注入液体淹到样品 2/3 高度后再抽真空,到样品表面气泡消失,注入液体将样品全淹没,继续抽真空 2h,这时真空缸压力为 0.026 个大气压。对它们进行饱和和处理,以样品全淹没为准计算样品饱和时间长达两个月,作为饱和样品。实验前对样品的孔隙度、密度、渗透率进行了测试,其值见表 1。

表 1 岩石物性参数表
Tab. 1 Summary of Rock coefficients

实验样品编号	孔隙度(%)	密度(g/cm ³)	渗透率(10 ⁻³ μm ²)
彭山砂岩 2	17.20	2.1586	0.121978238
彭山砂岩 5	17.07	2.1687	
合肥砂岩 1	1.44	2.6304	

本次实验采用从法国引进的 Metravib 热机械分析仪,它可用于控制材料的力学性能和温度行为,可进行最大载荷 450N 的动态力学分析,相应的频率范围为 10^{-5} Hz~ 10^3 Hz,温度范围为 -150℃~600℃。将处理好的样品置于 Metravib 试验机的测试平台上,放在下压板中心,调整上压板使之与标本上端面接触,用正弦波加载方式对样品进行加载,选择频率范围为 5Hz~400Hz,温度范围 -50℃~90℃分别进行了温度和频率效应试验。对饱和泵油彭山砂岩、遂宁砂岩样品进行单轴循环加载实验,求取饱和泵油彭山砂岩的能量衰减、虚模量、实模量、波速随温度和频率的变化,实验时固定静载为 100N,正弦波动载荷恒为 60N,将总载荷控制在屈服点以下,升温速率为 1℃/min;同时在室温还进行了模量、波速随正弦波振幅的变化实验,以此研究饱和岩石的模量和弹性波速度对温度和频率的响应。温度控制的稳定度为 ±0.1℃,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 0.000024N。

2 实验结果

图 1 为泵油饱和彭山砂岩 5 的能量衰减随温度的变化曲线。由图可见,在 -45℃~80℃之间出现一明显不对称的衰减峰,衰减峰在低温侧随温度升高衰减曲线上升坡度较陡,高温侧随温度升高衰减曲线下下降梯度相对较缓,衰减峰的峰位在 6℃左右。

图 2 为与图 1 的能量衰减峰相对应的泵油饱和彭山砂岩模量和波速随温度的变化曲线。由图不难看出,在 -45℃~6℃之间随温度升高杨氏模量和弹性波速度曲线较陡,下降梯度较大,弹性波速度在

5km/s~2.2km/s 范围内变化;6℃~80℃ 范围内随温度升高,杨氏模量和弹性波速度曲线变化较缓,下降梯度较小,弹性波速度在 2.2km/s~1.9km/s 范围内变化,由于在 0℃ 左右静载波动增大,导致模量和波速下降速率加大,使模量和波速曲线向下凸。故此,模量和波速降到比应有值更低。在 40℃ 左右随着温度的升高,模量和波速曲线逐渐恢复正常,这才引起了常温后弹性模量与波速随温度升高反而下降很小,曲线变化特征不明显的结果。同时由于彭山砂岩孔隙度较大,结构相对疏松,所以模量和波速值均偏低,而且随温度升高杨氏模量和弹性波速度减小较少。不过,从总体来看,随温度升高杨氏模量和弹性波速度均呈下降趋势。

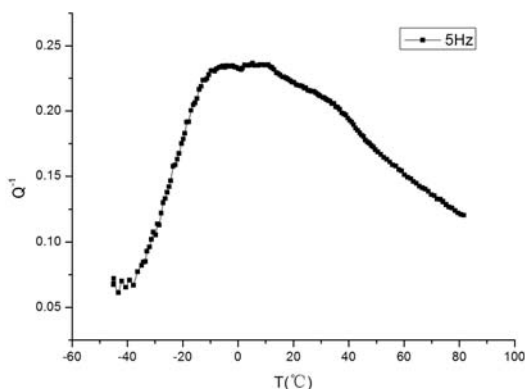
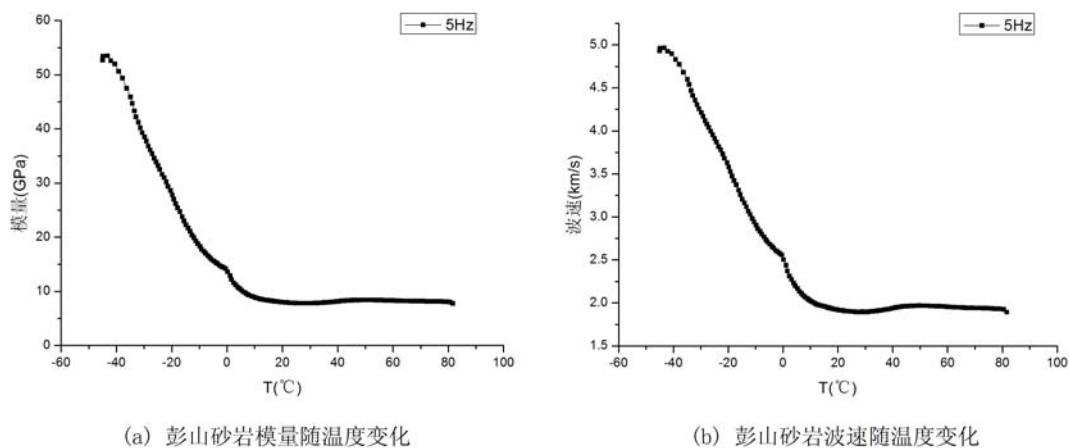


图 1 泵油饱和彭山砂岩 5 能量衰减随温度的变化

Fig. 1 Energy attenuation vs. temperature for pump-oil saturated Pengshan sandstones



(a) 彭山砂岩模量随温度变化

(b) 彭山砂岩波速随温度变化

图 2 泵油饱和彭山砂岩 5 模量和波速随温度的变化

Fig. 2 Modulus and velocity vs. temperature for pump-oil saturated Pengshan sandstones

图 3 为泵油饱和彭山砂岩虚模量随温度的变化。我们知道虚模量就是模量的亏损,实际上代表了能量的损耗。在某种意义上讲,它也可以近似作为能量的衰减来看待,所以它也具有能量衰减的行为特征。从图可见,在-50℃~90℃ 之间存在一不对称虚模量能量衰减峰,当频率为 5Hz 时,能量衰减峰的峰位在-19℃ 左右,峰值强度为 5.3GPa 左右;当频率提高到 50Hz 时,虚模量能量衰减峰的峰位已向高温方向移到-11℃ 左右,峰值强度升高到 5.7GPa 左右。可见虚模量能量衰减峰与能量衰减峰(Q^{-1})一样,随着频率的提高向高温方向移动,峰值强度增大。与能量衰减峰一样符合热激活弛豫规律,也是由热激活弛豫机制引起的。

图 4 为与图 3 的虚模量相对应的泵油饱和彭山砂岩实模量和波速随温度的变化。由图可见,在-50℃~-10℃ 之间随温度升高,杨氏模量和弹性波速度曲线下降较陡,下降梯度较大,弹性波速度在 6.5km/s~3.5km/s 范围内变化;-10℃~80℃ 之间随温度升高,杨氏模量和弹性波速度曲线变化较

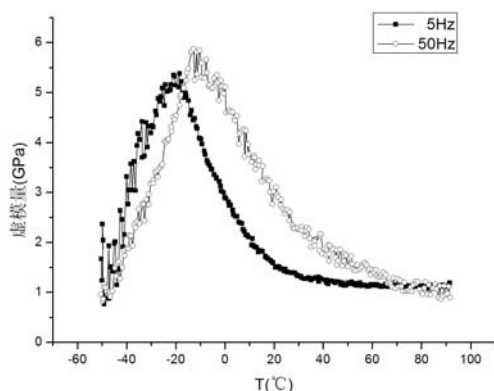


图3 泵油饱和彭山砂岩2 虚模量随温度的变化

Fig. 3 Imaginary modulus vs. temperature for pump-oil saturated Pengshan sandstones

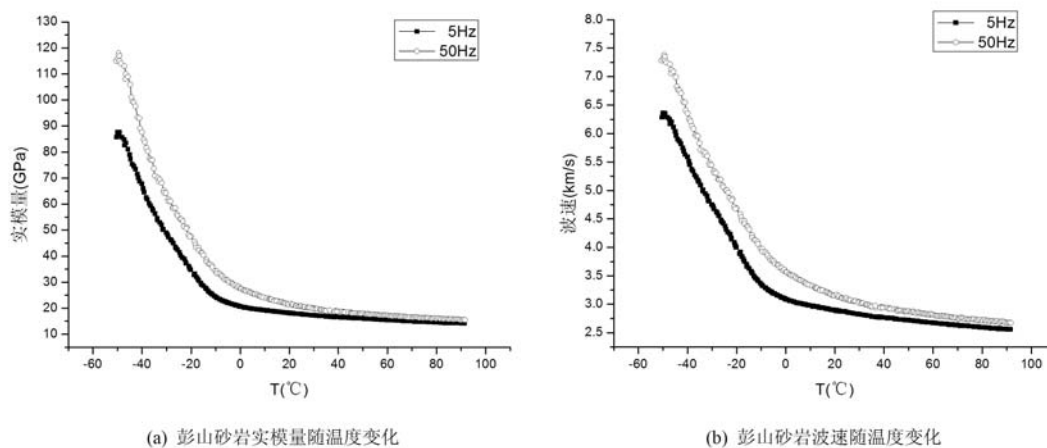


图4 泵油饱和彭山砂岩2 实模量和波速随温度的变化

Fig. 4 Real modulus and velocity vs. temperature for pump-oil saturated Pengshan sandstones

缓,下降梯度较小,弹性波速度在 3.5km/s~2.8km/s 范围内变化。从总体来看,随着温度的升高,杨氏模量和弹性波速度均呈下降趋势。随频率提高,杨氏模量和弹性波速度都增大,它们也具有频散效应。随着温度升高频散效应有减弱的趋势。

图5为泵油饱和彭山砂岩的模量和波速随频率的变化。由图5(a)可见,随着温度由 10℃升高到 60℃时,杨氏模量是下降的,随着频率由 1Hz 提高到 400Hz 时,杨氏模量逐渐增大,在 1Hz~400Hz 范围内杨氏模量也具有频散效应。超过 100Hz 频散效应有增强的趋势。由图5(b)可见,弹性波速随温度升高而下降,在 1Hz~400Hz 的频率范围内弹性波速度随频率增高而增大,同样具有频散效应,超过 100Hz 弹性波频散效应有增强的趋势。在 1Hz 时弹性波速度约 1.8km/s,当频率提高到 400Hz 时,弹性波速度增大到约 3km/s。总的来说,饱和彭山砂岩杨氏模量和弹性波速度随频率增高而增大,具有较强的频散效应。

图6为合肥砂岩杨氏模量和波速随动载荷的变化。当静载固定为 190N,正弦波动载荷由 50N 不断增大到 150N 时,观察杨氏模量随动载的变化。由图可见,随正弦波振幅的增大,杨氏实模量逐渐下降。同样随正弦波振幅的增大,弹性波速度也逐渐减小。图6中合肥砂岩与彭山砂岩相比孔隙度要小一些;而样品的直径要比彭山砂岩大一倍多,所以合肥砂岩的杨氏模量和弹性波速度也比彭山砂岩大很多。

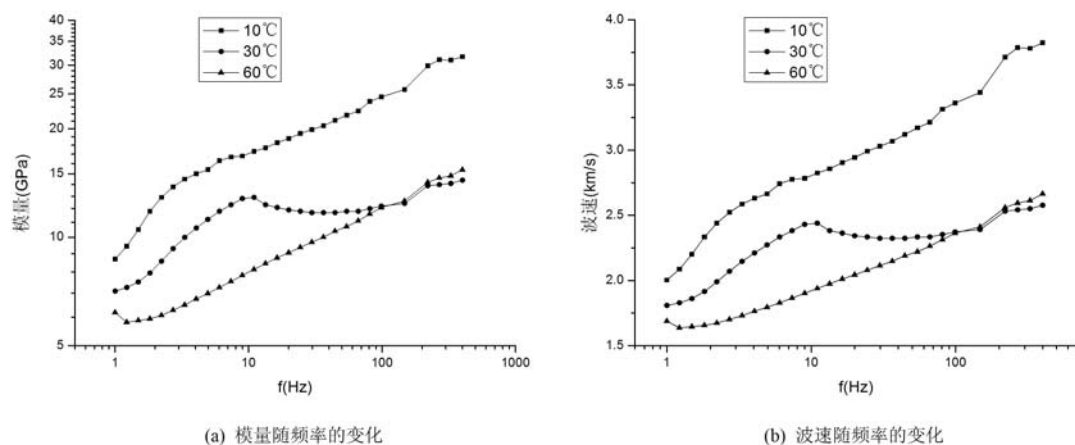


图 5 泵油饱和彭山砂岩 5 的模量和波速随频率的变化

Fig. 5 Modulus and velocity vs. frequency for pump-oil saturated Pengshan sandstones

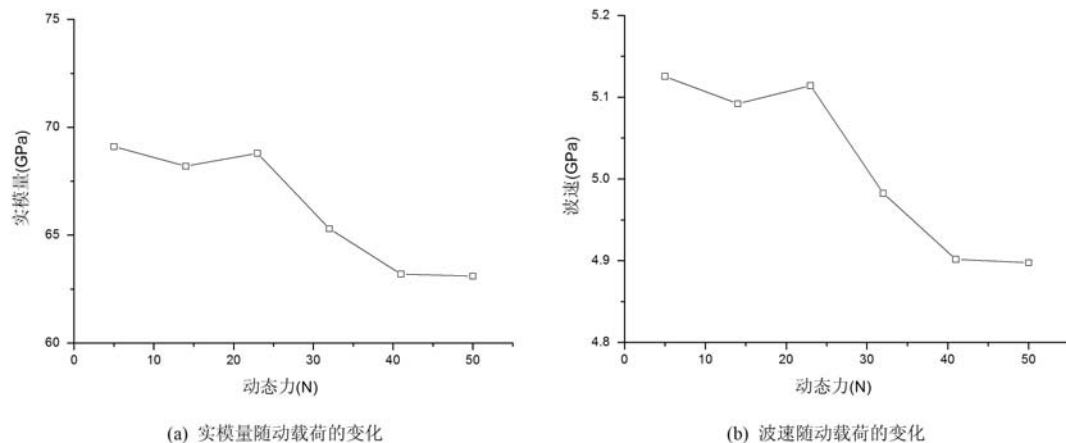


图 6 合肥砂岩实模量和波速随动载荷的变化

Fig. 6 Real modulus and velocity vs. dynamic load for saturated Hefei sandstones

3 结论和讨论

本文实验在 5Hz~400Hz 的频率范围和 $-50^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,得到了泵油饱和彭山砂岩波的能量衰减峰和虚模量峰的峰位随频率增高向高温方向移动的热激活弛豫规律,符合 Arrhenius 关系。这就证实了饱和多孔岩石是一种滞弹性或粘弹性体。这一研究结果还证实了我们的低频组合强迫共振实验的驻波所取得的热激活弛豫机制,也能在比较高频率段的应力—应变实验中获得,证实了热激活弛豫机制具有一定的普遍性。杨氏模量和弹性波速度随温度的升高而下降,随频率增高而增大,具有一定的频散效应;饱和岩石随动载振幅的增大,杨氏模量和弹性波速度降低。上述结果与我们在 10Hz 以下进行的组合强迫共振实验结果是一致的。这次实验的频段已覆盖了天然地震和垂直地震剖面的频率范围,而且这个频段的岩石物理数据十分缺乏,它是地震资料解释中难得的基础资料,所以对于地震波的解释和反演来说它弥补了这方面资料的不足,从而有可能降低地震资料解释中的多解性,达到降低勘探风险的目的。

岩石物理研究的作用,尤其在油田勘探和开发中的作用越来越重要。岩石物理技术已经深入到储层描述的具体细节,使储层描述发生了显著的变化,这就给岩石物理的研究人员提出了更高的要求,需要设计新的仪器设备,并使用新的技术方法去寻求和探索岩石物理固有的规律性及其影响因素,提高测

试精度以便适应新的油藏开发和描述的需要,使未来的岩石物理研究在储层描述中发挥更大的作用。随着这些新方法新技术的发展,完全有可能促使未来的储层描述发生质的飞跃。该项研究就是为了顺应这一发展形势,希望其实验结果能在这一发展过程中起到抛砖引玉的作用。尤其是纵横波衰减比已成为重要的碳氢指示参数之一的时候,在不断发展中的新的岩石物理技术在寻求多孔介质中粘滞流体对地震波传播速度的影响,地震波的能量衰减机制和测量方法技术的研究已成为岩石物理研究的重点对象,同时还利用岩石物理性质探讨地震振幅响应。从这里也可得出我们的这项研究具有很重要的实用价值和理论意义。

参考文献:

- [1] Xi D Y, Liu X Y, Zhang C Y. The Frequency(or time)-Temperature Equivalence of Relaxation in Saturated Rocks [J]. Pure Appl Geophys, 2007, 164(11): 2157—2173.
- [2] 席道瑛, 陈运平, 陶月赞 等. 岩石的非线性弹性滞后特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1086—1093 (XI Daoying, CHEN Yunping, TAO Yuezan, et al. Nonlinear elastic hysteric characteristics of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1086—1093(in Chinese))
- [3] 宛新林, 杜赞, 薛彦伟 等. 岩石时频效应的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(4): 305—312 (WAN Xni-lin, DU Yun, XUE Yan-wei, et al. Experimental study of frequency effect on rocks[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(4): 305—312(in Chinese))
- [4] Batzle M L, Han D H, Hofmann R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity direct measurements [J]. Geophysics, 2006, 71(1): N1—N9.
- [5] Gist G A. Interpreting laboratory velocity measurements in partially gas-saturated rocks[J]. Geophysics, 1994, 59(7): 1100—1109.
- [6] Pride S R, Harris J M, Johnson D L, et al. Permeability dependence of seismic amplitudes[J]. The Leading Edge, 2003, 22: 518—525.
- [7] Spencer J W. Stress relaxations at low frequencies in fluid saturated rocks: Attenuation and modulus dispersion[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B3): 1803—1812.
- [8] Batzle M, Wang Z. Seismic properties of pore fluids[J]. Geophysics, 1992, 57(11): 1396—1408.
- [9] Batzle M, Hofmann R, Han D H, et al. Fluids and frequency dependent seismic velocity of rocks[J]. The Leading Edge, 2001, 20(2): 168—171.
- [10] XI D Y, LIU B, LIU W, et al. The dependence of relaxation attenuation of saturation rock on time and temperature [J]. Chinese J Geophys, 2000, 43(6): 873—880.
- [11] XI D Y, LIU B, TIAN X Y. Anisotropy and nonlinear viscoelastic behavior of saturated rocks[J]. Chinese J Geophys, 2002, 45(1): 101—111.
- [12] 席道瑛, 张程远, 刘小燕. 储层砂岩的各向异性[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(2): 187—192 (XI Daoying, Zhang Chengyuan, Liu Xiaoyan. Anisotropy in reservoir sandston[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(2): 187—192(in Chinese))
- [13] 席道瑛, 谢端, 易良坤 等. 温度对岩石模量和波速的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 17(增刊): 802—807, 1998 (XI Daoying, Xie Duan, Yi Liangkun, et al. Effects of temperature on rock's modulus and wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(Supp): 802—807(in Chinese))

Experimental Research on Anelastic Mechanism of Saturated Rocks

XI Jun¹, DU Yun², XU Song-lin³, XI Dao-ying²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102671, China; 2. Mengcheng National Geophysical Observatory, School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China; 3. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Sine wave loading experiments were performed to simulate seismic wave by using Metravib Dynamic Mechanical Analyzer. Fixed 100N static load and 60N sine wave dynamic load were applied. The total loading force was controlled under the yield stress. Temperature was controlled between -50°C and 90°C ; heating speed was maintained onto 1°C per minute, and the frequency was controlled between $5\text{Hz} \sim 400\text{Hz}$. Pump-oil saturated Pengshan sandstones and Suining sandstones were tested under uniaxial cyclic loading. The variations of attenuation, imaginary modulus, real modulus and velocity with temperature and frequency were obtained. The attenuation peak and the imaginary modulus peak shift to higher temperatures when the frequency increases due to the thermal relaxation phenomena. Both Young's modulus and wave velocity decrease with the temperature increase but increase with frequency increase and with obvious frequency dispersion. Young's modulus and wave velocity decrease when the dynamic load increases. Experimental results are similar to that from low-frequency resonance standing wave experiments, which indicates that thermal relaxation regularities generally exist in saturated porous rocks.

Keywords: anelasticity; thermal relaxation mechanism; saturated sandstones; attenuation of wave energy; dispersion