

文章编号:1001-4888(2009)04-0307-06

## 岩石时频效应的实验研究<sup>\*</sup>

宛新林<sup>1</sup>, 杜贊<sup>2</sup>, 薛彦伟<sup>2</sup>, 席道瑛<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑工业学院 土木工程学院, 安徽 合肥 230022; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 对饱和泵油南京砂岩和饱水大理岩在 MTS 上进行了单轴压缩实验和正弦波加载实验, 求得两种饱和岩石的单轴抗压强度和屈服强度, 并获得随正弦波频率的提高, 饱和泵油南京砂岩的杨氏模量、纵横波速度增大, 具有较明显的频散效应。饱和岩石中的微细观缺陷在正弦波加载中引起滞后, 导致瞬时杨氏模量与应力成不对称“X”形, 获得随正弦波频率增高, “X”交点在模量轴上的位置增高, 杨氏模量增大, 模量的频散增强。本文揭示了岩石的非线性时频响应的一些物理机理, 对于岩石介质中的非线性波动研究以及地震、工程等理论研究和应用都具有重要意义。

**关键词:** 正弦波加载; 时频效应; 瞬时杨氏模量; 频散

**中图分类号:** TU453      **文献标识码:** A

### 0 引言

岩石是大自然的产物, 它由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成, 并经过上亿万年的地质演变和多期复杂的地质构造运动, 使岩石中含有不同层次、不同形状的随机分布的孔隙和裂纹。这些特征表明岩石是一种很特殊的不连续的非均质的复杂材料。它的力学属性具有非线性、各向异性和流变特性。其中矿物晶粒的刚度较大, 受到载荷时变形很小; 胶结物刚度较小, 受到载荷时变形较大, 裂纹受到载荷时会滑动, 当载荷较大时, 裂纹可能扩展, 并贯通成更大的宏观裂纹。其中胶结物和裂纹受到载荷时变形较大, 对岩石力学性质的影响最大, 可以说几乎是它们决定了岩石的力学性质<sup>[1]</sup>。砂岩中的晶粒、胶结物和裂纹尺度为百万分之一米量级, 属于岩石内部的复杂细观结构, 受到载荷作用时, 表现出了强烈的非线性特征, 这种非线性不同于一般的非线性弹性材料。

岩石特殊的非线性弹性力学性质以及它与人类生活和生产息息相关的应用价值, 吸引了众多的科学工作者对其进行实验和理论探索。在实验方面, 20 世纪 40 年代, 哈佛大学的 Birth<sup>[2]</sup>研究小组开始岩石静态非线性性质的研究, 他们主要研究岩石在低频高压下的应力—应变关系, 在地球内部的温压条件下预测矿物集合和矿相。在下地壳和地幔中, 这些研究在了解和模拟地球内部物理特征及推测其组成方面具有重要价值。到了 50 年代末 60 年代初, 为了得到矿物的高温高压动态参数, 研究者进行了大量的冲击波物理实验。早期的大量工作主要是由 McQueen 等在美国的 Los Alamos 实验室完成。70 年代初 Queensland 大学的 Stacy<sup>[3]</sup>等发表一系列岩石低应变下力学的迟滞性论文, 获得在应变为  $10^{-6}$  甚至更低的准静态实验中都存在非线性响应。80 年代初, 俄国的 Bakulin 和 Protorenja<sup>[4]</sup>开始研究地质材料中的非线性响应。特别需要指出的是从 90 年代以来, 人们对于岩石非线性的研究进入了一个新的阶段。席道瑛等<sup>[5,6]</sup>对砂岩、大理岩进行了大量的循环加载实验, 得到了不同饱和液体具有不同的应

\* 收稿日期: 2009-05-03; 修订日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(40874093)

通讯作者: 宛新林(1966—), 男, 副教授, 主要从事地球物理与岩石工程教学与研究。E-mail: wxl@aiai.edu.cn

力—应变滞回曲线特征,清晰地反映了岩石类材料特有的非线性力学行为。Tutuncu 等<sup>[7]</sup>利用单轴循环加载实验结果分析了影响沉积岩非线性弹性行为的一些主要因素,得出了应力—应变滞后曲线的特征与施加载荷的频率、应变振幅以及岩石的饱和流体特征等因素有关,并获得模量与应变成蝴蝶结状的变化规律。Daoying Xi 等<sup>[8-10]</sup>在实验和理论上进行了多孔岩石的弛豫衰减对温度和频率的依赖性研究,提出了饱和多孔岩石的弛豫衰减是热激活弛豫机制引起,从微观机理上揭示了时温等效性。席道瑛等<sup>[11]</sup>利用 PM 模型描写岩石非线性弹性滞后和记忆性特征,由于岩石中存在的晶粒边界、微裂纹、孔洞和胶结物构成的微细观缺陷在加卸载过程中的响应不是原路可逆的特性,导致在循环载荷作用下多孔饱和岩石具有非线性弹性行为和滞后与离散记忆特征,以此来描述岩石的滞后和离散记忆。以上对岩石非线性属性的研究,使人们对岩石力学本质的认识得到进一步的深化,但是在动态频率效应的研究方面还很欠缺,需要我们进一步进行探索。针对这一不足,对岩石时频效应进行了实验研究。

## 1 实验方法和技术

采用南京砂岩和云南大理的大理岩,在垂直层理方向钻成直径为 20mm、长度为 50mm 左右的圆柱形样品,样品两端面平行度为 0.02mm,两种岩样各 10 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,用泵油和水分别放入两个真空缸中淹到样品 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。南京砂岩样品浸泡的是泵油,大理岩浸泡的是自来水,对它们进行饱和处理,以样品全淹没为准计算样品饱和时间长达 12 天,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。

将处理好的样品置于 MTS810 电液伺服控制试验机,首先以  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的应变速率分别对饱和泵油南京砂岩及饱水大理岩样品进行单轴压缩实验,求取它们的应力—应变全程曲线;然后进行单轴循环加载实验。将两种饱和岩石样品放在 MTS 的下压板中心,调整上压板使之与标本上端面接触,在样品中部安装夹式引伸仪作为纵向和横向应变计,分别进行频率效应试验。实验时固定静载为 6kN,正弦波动载荷恒为 5kN,以此研究饱和岩石的模量和弹性波速度对频率的响应,其正弦波载荷频率为 0.05Hz~50Hz。将总载荷控制在屈服点以下。

## 2 实验结果及分析

图 1 为饱和岩石的全程应力—应变曲线。由(a)可确定饱和泵油南京砂岩的屈服限约为 55MPa,抗压强度为 62.57MPa;由图(b)可确定饱水大理岩的屈服限约为 120MPa,抗压强度平均为 143MPa。

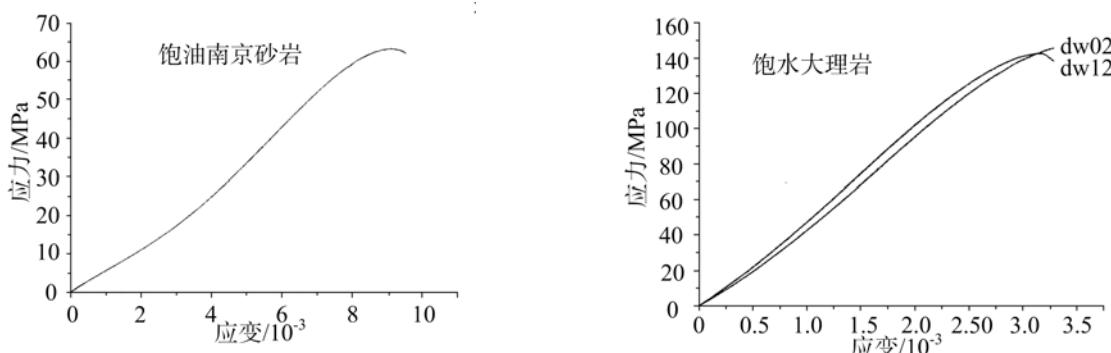


图 1 饱和岩石全程应力—应变曲线,(a)饱和泵油南京砂岩;(b)饱水大理岩。

Fig. 1 Relationship curves of  $\sigma-\epsilon$  of liquid-saturated rock,  
(a) pump-oil saturated Nanjing sandstones, (b) water saturated marbles

图 2 为饱和泵油南京砂岩升频和降频时杨氏模量随正弦波加载频率的变化。由图可见,无论是升频或降频,都随频率增高杨氏模量呈非线性增大,频率越高增长速率越快;升频时杨氏模量大于降频时的相应杨氏模量。

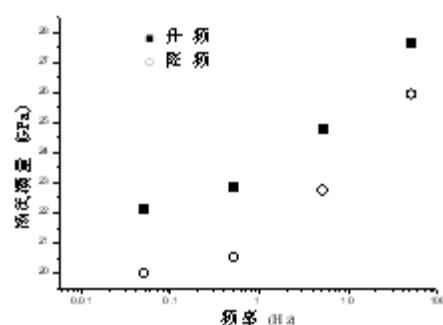


图2 饱和泵油南京砂岩杨氏模量随频率的变化  
Fig. 2 Variation of Young's modulus with frequency for pump-oil saturated Nanjing sandstones

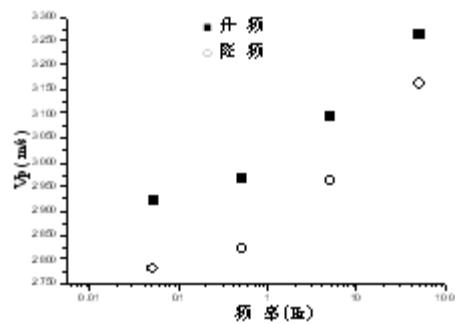


图3 饱和泵油南京砂岩纵波速度随频率的变化  
Fig. 3 Variation of longitudinal wave velocity with frequency for pump-oil saturated Nanjing sandstones

图3为饱和泵油南京砂岩纵波速度随频率的变化。由图可见,无论是升频或降频,纵波速度随频率增高而增大,存在频散效应,尤其在高频部分频散效应尤为显著。与图2的模量值相对应,升频时纵波速度大于降频时的纵波速度。

图4为饱和泵油南京砂岩的横波速度随频率的变化。由图可见,随频率的增高横波速度明显增大,与纵波速度一样,存在显著的频散效应。不同之处是,在1Hz左右频散效应最显著,在10Hz左右频散效应与1Hz左右相比频散效应的显著程度稍有下降。在升频时横波速度与图3的纵波速度同样大于降频时的速度。

由于岩石中存在许多随机分布的微细观缺陷,引起在加载和卸载过程中应力—应变曲线不会原路返回的特性,使得加载和卸载阶段模量随应变的变化趋势也各不相同,表明岩石在循环加载作用下呈现出的非线性弹性滞后特征,导致瞬时弹性模量与应变成不对称“X”形<sup>[12]</sup>。图5就是我们这次实验给出的饱水大理岩循环加载过程中一个循环圈内的瞬时杨氏模量随应力的变化。由图5(a)-(f)都可以清晰

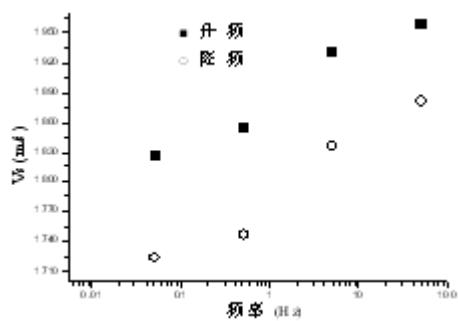
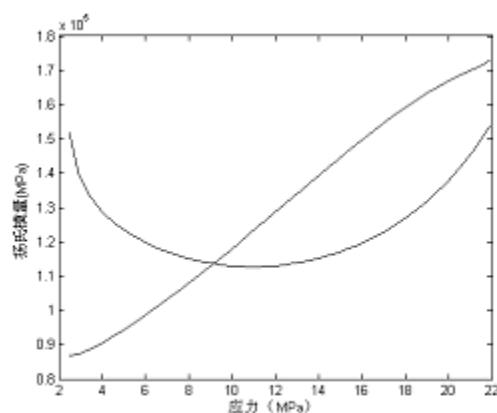
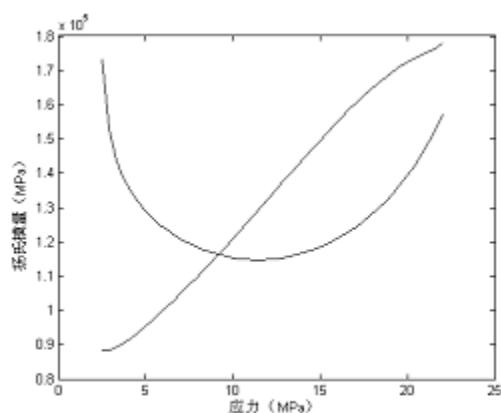


图4 饱和泵油南京砂岩横波速度随频率的变化  
Fig. 4 Variation of transverse wave velocity with frequency for pump-oil saturated Nanjing sandstones



(a) 0.1Hz 时循环圈的瞬时模量图



(b) 0.5Hz 时的循环圈的瞬时模量图

图5 饱水大理岩在不同频率载荷作用下循环圈的瞬时杨氏模量随频率的变化  
Fig. 5 Young's modulus vs. stress under different frequencies for water saturated marbles

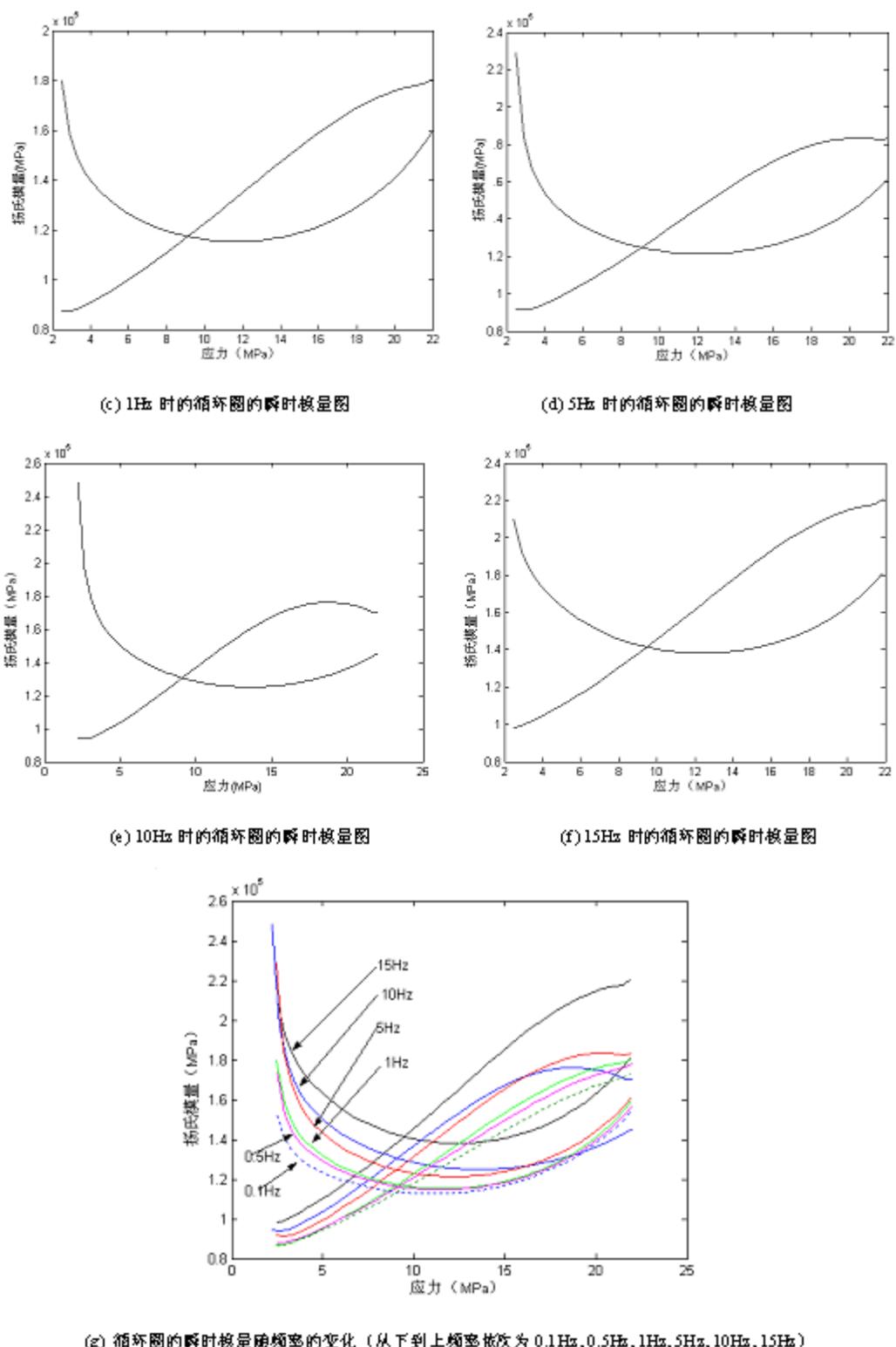


图 5(续) 饱水大理岩在不同频率载荷作用下循环圈的瞬时杨氏模量随频率的变化

Fig. 5 Young's modulus vs. stress under different frequencies for water saturated marbles

地看到,加载过程中的瞬时杨氏模量沿着两条完全不同的路径相交于一点,呈蝴蝶结状或“X”形状。这两条路径的差别显示了应力—应变曲线的滞后效应,两条曲线的差别越大滞后程度越大。为便于比较它们与频率之间的关系,特将图 5(a)-(f)绘于同一图中,即图 5(g)。可以看出,加载和卸载过程中的瞬时杨氏模量也是随频率不断增高而增大的。可见,滞后与岩石的细观结构是紧密相连的。正是由于岩

石介质中存在大量的细观结构(微裂纹、微孔洞等),才造成岩石对外力响应的滞后。而且,由不同频率进行的加载,这种微细观结构的受力时间也是不同的,从而导致其变形程度也会有所不同,这种差别造成了宏观参量(纵横波速度、平均杨氏模量、瞬时杨氏模量等)都会有所不同,这就是低频循环载荷作用下岩石的时频效应的根源。

### 3 结论

通过单轴压缩实验获得应力—应变全程曲线,取得饱和泵油南京砂岩和饱水大理岩的单轴抗压强度分别为62.57MPa和143MPa;屈服强度分别为55MPa和120MPa。

饱和泵油南京砂岩和饱水大理岩在保持总载荷不超过屈服强度下,作正弦波循环加载实验。获得了无论是随频率不断升高还是不断下降,杨氏模量、纵横波速度都随频率的增高呈非线性增长,模量和波速都存在较显著的频散效应。升频时的模量、波速都大于降频时的相应值。

饱水大理岩在正弦波载荷作用下呈现非线性弹性滞后特征。在加载与卸载阶段,杨氏模量随应力变化趋势各不相同,导致瞬时杨氏模量与应力成不对称“X”形。随正弦波频率不断增高,“X”形交点在模量轴上的位置也逐渐增高,杨氏模量逐渐增大,杨氏模量的频散增强。虽然各自的实验方法和技术不同,但本文实验结果与国内外其他频率效应的实验结果是一致的<sup>[7,8]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Guyer R A, Johnson P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials[J]. Physics Today, 1999, 52: 3036.
- [2] Birch F. In handbook of Physical Constants, edited by Clark S P. jr. (Geol. Soc. Am press, Connecticut), 1966: 97—174.
- [3] Mckavanagh B, Stacy F Phys. Planet. Int., 1974, 8: 246.
- [4] Bakulin V N, Protosenya A G. Nonlinear effects in travel of elastic waves through rocks (in Russian)[J]. J. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1982, 2: 314—316.
- [5] 席道瑛,杜贊,易良坤,宛新林. 液体对岩石非线性弹性行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4):687—696(XI Daoying, DU Yun, YI Liangkun, WAN Xinlin. Influence of fluid to nonlinear elastic behavior of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(4):687—696(in Chinese))
- [6] 刘云平,席道瑛,张程远等. 循环应力作用下大理岩砂岩的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):216—219(LIU Yunping, XI Daoying, ZHANG Chengyuan, et al. Dynamic response of marble and sandstone under rotational stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(2):216—219(in Chinese))
- [7] Tutuncu A N, Podio A L, Gregory A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part I: effect of frequency and strain amplitude[J]. Geophysics, 1998,63(3):184—194.
- [8] Daoying Xi, Xiaoyan Liu, Chengyuan Zhang. The frequency(or time)-temperature equivalence of relaxation in saturated rocks[J]. Pure Appl. Geophys., 2007, 164: 2157—2173.
- [9] 席道瑛,张程远,刘小燕,白石羽. 饱和岩石的时温等效关系[J]. 物探化探计算技术,2000,22(2):127—131(XI Daoying, ZHANG Chengyuan, LIU Xiaoyan, BAI Shiyu. Time-temperature equivalence of saturated rocks[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2000,22(2):127—131 (in Chinese))
- [10] 席道瑛,易良坤,田象燕. Biot理论的唯象修正对S波特性的影响[J]. 地球物理学报,2003,46(6):814—820(XI Daoying, YI Liangkun, TIAN Xiangyan. Influences of Phenomenological modification of Biot theory on characteristics of S-wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003,46(6):814—820 (in Chinese))
- [11] 席道瑛,王鑫,陈运平. 描写岩石非线性弹性滞后和记忆的宏观模型[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(13): 2212—2219 (XI Daoying, Wang Xin, CHEN Yunping. Macroscopic model of hysteresis and memory for the description of rock nonlinear elastic[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(13):2212—2219(in Chinese))
- [12] 席道瑛,陈运平,陶月赞,刘亚晨. 岩石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, LIU Yachen. Nonlinear elastic hysteretic characteristic of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(6):1086—1093(in Chinese))

## Experimental Study of Frequency Effect on Rocks

WAN Xin-lin<sup>1</sup>, DU Yun<sup>2</sup>, XUE Yan-wei<sup>2</sup>, XI Dao-ying<sup>2</sup>

(1. Civil Engineering School, Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui 230022, China;  
2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract:** Uniaxial compression experiments and sinusoidal loading experiments were carried out on MTS for pump-oil saturated Nanjing sandstones and water saturated Dali marbles. Uniaxial compressive strength and yield strength of both saturated rocks were obtained. Young's modulus and velocities of longitudinal wave and transverse wave increase with sinusoidal wave frequency with notable frequency dispersions. The hysteresis due to the existence of micro defects in saturated rocks in sinusoidal loading experiments results in the variation curves of instantaneous Young's modulus with stress for loading and unloading intersection, therefore an "X" shape figure is obtained. As the frequency of sinusoidal wave increases, the position of intersection point moves to higher modulus area and the modulus dispersion increases. Some physical mechanisms of nonlinear frequency response of rock are revealed. These obtained results are very important to study of nonlinear wave in rocks and theoretical analysis and application of earthquake and engineering.

**Keywords:** sinusoidal loading; frequency effect; instantaneous Young's modulus; dispersion