

岩石非线性细观响应中温度 对岩石力学性能的影响

席道瑛, 杜 贇, 薛彦伟, 席 军

(中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 对饱和岩石随温度变化情况进行实验研究, 其结果显示: 饱和岩石随温度升高, 模量、波速减小; 随温度继续升高, 模量、波速又随温度升高而增大。这一规律是热激活弛豫波动理论模型的佐证。将这一温度效应引入隐含内力的细观 PM(Preisach-Mayergoyz)模型中, 则模型中的模量 K_i 变为与温度相关的函数 $K_i(T)$ 。温度 T 的变化同样会引起 PM 空间中滞回细观单元(HMU)特征长度和 PM 空间 HMU 密度分布的变化, 从而引起宏观模量的变化, 为此建立温度对 PM 空间非经典单元(NCU)密度影响的函数关系。在此基础上进行温度效应的细观研究, 且对循环加载滞回圈的温度效应进行模拟, 取得滞回圈随温度升高向应变增大方向移动, 滞回圈模量降低, 随温度继续升高, 滞回圈又随温度升高朝低应变方向移动, 模量增大。这一细观模拟结果与国内外相关实验结果是一致的。

关键词: 岩石力学; 模量; 波速; 细观 PM 模型; 滞后非经典单元

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3342 - 06

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK IN NONLINEAR MESOSCOPIC RESPONSE

XI Daoying, DU Yun, XUE Yanwei, XI Jun

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract: The experiments, in which the variation of mechanical properties for saturated rocks with the change of temperature had been studied, show that the moduli and wave velocities of fluid-saturated rocks decrease as temperature increases, and as temperature continues to raise, the moduli and wave velocities turn to increase. This is the temperature effect, and it proves the rationality of the wave model with thermal activated relaxation. By introducing this temperature effect into the mesoscopic PM(Preisach-Mayergoyz) model with internal bonding forces, the modulus K_i turns to be a temperature dependent variable, that is, $K_i(T)$. The change of the temperature will cause the variation of characteristic length of hysteretic mesoscopic units(HMU) in PM space and the change of the PM space density. Thus the macroscopic elastic moduli shift too. Based on these, the density distribution function, with the influence of temperature, of the non-classical units(NCU) in PM space is obtained. The temperature effect is studied in meso scale, and temperature influence to the hysteretic loops under cyclic loading is simulated. The hysteretic loops move to bigger strain area and the moduli decrease as temperature increase. While temperature continues to rise, the hysteretic loops move backward, and the moduli turn to increase. The

收稿日期: 2007 - 04 - 19; **修回日期:** 2007 - 05 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40474065)

作者简介: 席道瑛(1940 -), 女, 1962 年毕业于成都地质学院地球物理勘探专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石物理及本构模型方面的教学与研究工作。E-mail: xdy@ustc.edu.cn

simulated results are consistent with the corresponding experimental results, whether the experiments were done by domestic researchers or foreign researchers.

Key words: rock mechanics; modulus; wave velocity; mesoscopic PM model; hysteretic non-classical unit (H-NCU)

1 引言

岩石是大自然的产物,是一种天然的建筑材料。自它形成以来经受了长期地质历史的演化和多期复杂的构造运动,使岩石中存在着不同层次的随机分布的微、细、宏观结构,如微裂纹、微孔洞、矿物颗粒边界等缺陷以及缺陷中充填的液体。由于岩石特殊的微细观结构构造,当其外部环境如温度或外载发生变化时,复杂的微细结构对外部环境的响应也就随之发生变化。这些微细结构所表现出来的特有的非线性行为也不同于一般的非线性弹性材料。

R. A. Guyer 和 P. A. Johnson^[1]将砂岩这样一类其弹性性质由近乎刚性颗粒和可以产生弹性变形的黏结层决定的物质称为非线性细观弹性材料 (nonlinear mesoscopic elastic materials, NME), 从细观结构和力学行为上看,可以归入 NME 材料的还有泥土、沙子、混凝土、陶瓷以及受到损伤的复合材料等。这种 NME 除了细观结构上具有上述特征之外,其应力-应变曲线还具有高度的非线性和“离散记忆”特征^[2]。席道瑛等^[3]进行了花岗岩、大理岩和砂岩的模量和波速随温度的变化实验研究。随温度升高,岩石的模量、波速呈下降趋势。这一研究结果可作为检测核废料仓库热应力诱致岩石仓库微裂纹增长引起的岩石品质劣化的手段。波速还用来检测由地热蒸气流动或火山流动甚至热水流动所引起的油藏温度变化和油藏的运移情况^[4]。D. Y. Xi 等^[5]研究了花岗岩受热导致模量、波速下降,当温度达到石英相变点时,速度、模量下降梯度陡增,声发射在此出现高峰,以反复加热和加压来模拟岩石经历多次动力和热变质作用,使岩石内部以微裂纹为主的热损伤破裂显著增多、微细结构发生变化,最终导致岩石记忆性能丧失;同时,还在三轴仪中进行了不断升温的循环加载实验,获得平均应变随循环数和随时间变化的 2 条热蠕变曲线。也可分为 3 个蠕变阶段,其中稳态蠕变阶段是应变硬、软化的一个动态平衡调整过程。一旦硬、软化平衡丧失、随温度升高应变速率加速增长直至标本破坏。由于在岩石标本中同时存在热应力导致的热开裂和循环

加载导致的疲劳损伤,它们促使岩石标本内部微细观结构的劣化和强度降低,最终导致标本加速破坏。

从 A. Nur 等^[6]所观测的甘油饱和和 Boise 砂岩中可以看出,100%和 60%甘油饱和砂岩随温度升高,波速下降明显,而干燥砂岩的波速下降不十分明显。薛彦伟等^[7]通过对岩石非经典非线性时频效应的微观机制的研究,建立了能反映岩石的非经典非线性时频特征的理论模型,利用 J. Carmeliet 等^[8, 9]提出的研究非经典非线性的量化方法,再根据单轴循环加载实验获得岩石的应力-应变滞回曲线,然后对此进行非线性反演得到 PM 空间的密度分布函数,在此基础上提出了定量研究岩石非经典时频效应的方法,并对 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 15 Hz 的滞回曲线进行了模拟,所得结果与实验数据能够较好地吻合。同时,从时频效应的研究中还获得,岩石的非均质性会导致岩石内部的微细观结构等对外载(载荷和温度)响应存在一定的概率。席道瑛等^[10]研究了 PM 空间的滞回细观单元(HMU)对外力和温度响应的概率。HMU 对外力或温度是否响应,对某些单元来讲存在着不确定性,外载和温度不同,岩石中微细观结构参与对宏观外力和温度响应的转换概率也不同。通过单轴和三轴循环加载的温度实验和数值模拟获得:随温度升高,微细观结构对温度响应的转换概率增大,自适应调整的时间增长,滞回圈趋于不稳定。这就是自适应调整的温度效应。从 HMU 对外载频率的响应中也可获得其频率效应。J. Carmeliet 等^[8, 11, 12]研究了石灰岩、砂岩的杨氏模量随饱和度的变化,在细观尺度下分析了不同饱和和液体对岩石非线性性质的影响;同时,还以 σ - ε 理论滞回曲线为参照, σ - ε 实验曲线随饱和度增大向应变减小方向移动,模量向增大方向发展, σ - ε 实验曲线由理论曲线的右方逐渐向左方移动,这与石灰岩、砂岩在低饱和度时模量迅速下降,到高饱和度时模量增大的结果是一致的。通过对 PM 空间的经典和非经典单元分布的分析得到经典部分 ε_c 不存在滞后回线,非经典部分 ε_{nc} 存在滞后效应,且在相同压力下饱和岩石的经典和非经典应变都大于干燥岩石的相应值,饱和度对于非线性的影响只体现在 PM 空间“激活三角”中的非经典单元(NCU)上,在

PM空间对角线附近的NCU的密度决定了滞回非线性总量, 对角线附近NCU越多, 非线性越强。PM空间中的NCU随饱和度增大而增大, 从而使得非线性随饱和度增大而增强。因此, 湿样品比干燥样品激活的单元更多, 非线性更强。而饱和液体的黏性是随温度降低而升高, 非线性性增强。根据上述影响提出了固液相互作用的定量化研究方法, 对低饱和度时岩石中流体对岩石性质的影响进行了预测。本文将借上述分析方法在细观尺度下研究温度对岩石非线性性质的影响。

2 温度对岩石模量的影响

图1给出了干燥和不同液体饱和砂岩的实模量随温度的变化关系; 图2给出了局部饱和Berea砂岩波速与温度的关系^[13]。由图1可知, 无论是实验室干燥砂岩或不同液体饱和砂岩, 实模量均随温度升高先下降后又上升, 这与图2所示的波速随温度升高先下降后上升^[13]是一致的。这是由于引起模量和波速变化存在着多种因素^[14], 例如席道瑛等^[14]的热激活弛豫波动理论模型显示出的全频段S波波速和衰减随温度和频率的变化, 其中的热弛豫衰减峰与Biot衰减峰未迭加呈一个衰减峰时, 两者对模量和波速的影响恰好相反, 所以当两峰分开时, 热弛豫峰导致模量、波速随温度升高而降低, Biot峰导致模量、波速随温度升高而上升。图1, 2^[13]的实验结果就是这2种机制的典型例证, 也是热激活弛豫波动理论模型的实验佐证。在一般情况下两峰将迭加在一起成为一个衰减峰, 这时就只能观察到随

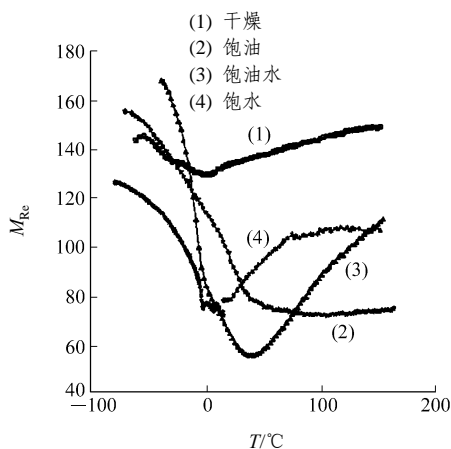


图1 干燥和不同液体饱和砂岩的实模量随温度的变化关系
Fig.1 Variation of real moduli with temperature of sandstones saturated by different fluids

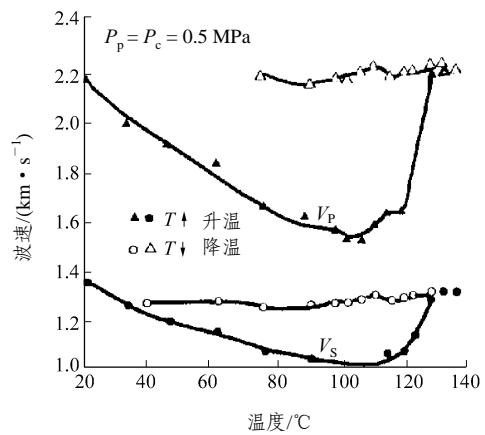


图2 局部饱和Berea砂岩波速与温度的关系^[13]
Fig.2 Wave velocity versus temperature of partly saturated Berea sandstones^[13]

温度升高模量和波速下降的情况, 图1中油饱和砂岩的模量随温度变化曲线和图3所示的石油饱和大理岩波速随温度变化关系就是很好的实验证据。

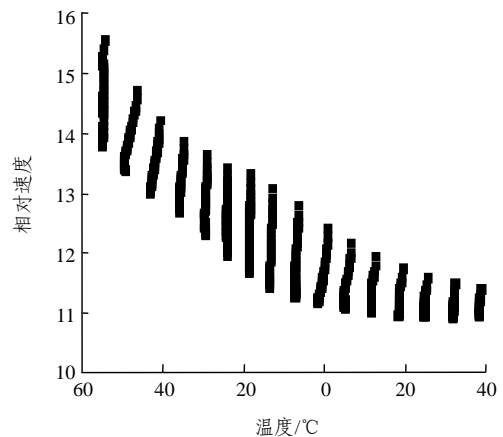


图3 石油饱和大理岩波速随温度的变化关系
Fig.3 Variation of wave velocity with temperature of petroleum saturated marbles

3 细观尺度的描述

组成岩石的各种矿物颗粒等都由它们的热膨胀系数决定其热胀冷缩程度。由于岩石是非均质材料, 加上内部大量微裂纹、微孔洞等微细观特征结构的存在, 温度变化使组成岩石材料的基本成分(颗粒、基质等)的力学性能发生变化, 同时由于其热力学效应不一致, 将引起岩石内部应力分布状态的变化, 而且会引起岩石微细结构状态的变化, 如裂纹的张开或闭合, 以及结构性质的变化。温度对岩石力学性能的影响主要体现在温度对岩石颗粒组成的骨架

力学性能的影响以及骨架与胶结物所组成的岩石力学性能的影响方面。这些性能中包括了热应力引起的颗粒与颗粒边界和颗粒与胶结物边界的热开裂、热应力引起原有微裂纹的张开或闭合以及热应力导致岩石中矿物晶体颗粒的破碎；另外，温度还会引起孔隙液体黏性的变化，这些都会影响到饱和岩石的宏观力学参数的变化，如模量、波速以及非线性特征的变化。由于岩石组成成分和结构的不同，上述因素在温度效应中的权重也不一样。虽然温度对岩石作用的微细观机制与饱和液体对岩石作用的微细观机制并不相同，但它们引起的宏观实验结果(见图 1~3)是类似的。

下面首先引进隐含内力的 PM 空间模型^[15]来说明这个问题。探讨一个由多颗粒材料组成的棒，并假定每一颗粒均具有相同的长度 l ，而且成均质的线性排列，这样的岩石样品就可以用一个一维的格子列来表示，颗粒质量为 m 的弹性部分被质量趋于 0 的裂隙、孔洞部分(PM 空间中的 HMU)所分开，获得隐含内力的方程为

$$\frac{1}{2}m\ddot{\delta}_i = r_i[Q_i P_i - r\dot{\delta}_i - K_i(\delta_i - \delta_i(0))] \quad (r_i = 0, 1) \quad (1)$$

式中： P_i 为施加在裂纹上的外力作用在节点上，内力使 HMU 处于张开或闭合两种状态，且有 $P_i = F_i^+ - F_i^-$ ； r_i 为状态变量，每一个 HMU 的状态变量 r 依赖于颗粒结构的微观特征和施加的外力 σ ； δ_i 为两节点的位移差； γ 为颗粒的衰减系数； Q_i 为描述键区域性质的模型参数($0 \leq Q_i \leq 1$)； K_i 为模量，是频率、温度和饱和度等的函数，这里假定 K_i 为温度的函数。当温度变化时，将引起 HMU 的平衡长度 $\delta_i(0)$ 及其在 PM 空间中的分布产生变化，这样在形式上为 HMU 引入了一个能受外部因素(温度)影响的内力变化因子，从而使 PM 空间唯象模型能够对外部因素变化有所响应。因此，下面就研究温度对模量 K_i 的响应。本文将借助 J. Carmeliet 等^[8, 11]的饱和岩石中饱和度的细观量化研究方法研究岩石中温度的细观响应。

在含有内力效应的 PM 空间模型中， K_i 变为与温度相关的函数 $K_i(T)$ 。温度的变化同样会引起 PM 空间中 HMU 特征长度 l 的变化和 HMU 密度分布的变化，从而引起宏观模量的变化。将含温度效应的非线性应变分为 PM 空间对角线上的经典应变和非

对角线上的非经典应变之和：

$$\varepsilon_T = \varepsilon_C + \varepsilon_{NC} = \int^{\sigma} \frac{d\sigma'}{E_C(\sigma', T)} + \varepsilon_{NC} \quad (2)$$

经典应变采用 $\int d\sigma' / E_C(\sigma', T)$ 来表示，其中， $E_C(\sigma', T)$ 为经典非线性模量，是应力和温度的函数。非经典非线性模量与非经典应变相关，非经典应变又由 PM 空间中 NCU 来表示(见图 4)。

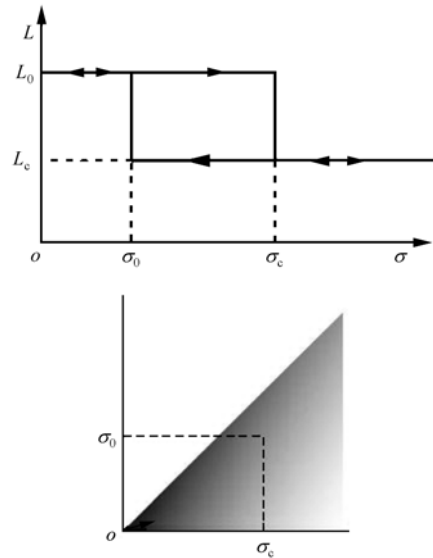


图 4 HMU 和 NCU 的示意图与 PM 密度空间^[11]

Fig.4 Sketch map of HMU and NCU, and the PM density space^[11]

NCU 作为外部压力的函数表现出可逆行为或滞后行为。每一个 NCU 与 HMU 一样，只可以处于张开或闭合状态。单个 H-NCU 最初以长度 l_0 处于张开状态，当应力由 σ_0 增加到 σ_c 时，H-NCU 突然闭合，长度变为 l_c ，当应力再继续增加时仍保持闭合状态；当应力减小至 σ_0 时，H-NCU 才张开，恢复到原长度 l_0 ，由此在 NCU 尺度上形成滞后。岩石中大量具有 (l_0, σ_0) 和 (l_c, σ_c) 参数的 NCU 能够体现微细观非均质孔隙岩石的非经典非线性模量的非线性弹性特征。假设所有的单元从张开到闭合的应变 ($\gamma = (l_0 - l_c) / l_0$) 为常数，不同 NCU 的区别仅在于具有不同的应力对 (σ_0, σ_c) ，而在以 $\sigma_0 - \sigma_c$ 为纵横坐标的 PM 空间具有不同的坐标位置。由此在 PM 空间上产生一个如图 4 所示的密度分布 ($\sigma \leq \sigma_c$)^[11]，其中深色部分密度最大。通过追踪 NCU 在 PM 空间内张开或闭合的变化，即可由以下公式计算非经典应变的贡献：

$$\varepsilon_{NC} = \gamma \int \int \rho(\sigma_0, \sigma_c, T) d\sigma_c d\sigma_0 \quad (3)$$

这里的双重积分是在给定的加载过程 h_σ 中闭

合的 NCU 部分上的积分。其中温度的影响已引入密度分布函数 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, T)$ 中。可见，在分析中已将与非经典非线性模量相关的非经典应变并入函数参数中，因此，可假定 $\gamma = 1$ 。

对于经典和非经典模量采用如下形式表示：

$$E_C = E_{C_0} - E_1 \exp(-K_1 T) + E_2 \exp(-K_2 T) \quad (4)$$

$$E_{NC} = E_{NC_0} - E_1^* \exp(-K_1^* T) + E_2^* \exp(-K_2^* T) \quad (5)$$

非对角线 NCU 在 PM 空间的分布是不确定和非唯一的。为了得到一个适定的反演问题的解，在基于以下合理假设下引入密度函数 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, T)$ 的简化形式：

(1) 对 NCU 密度采用按偏离对角线的距离衰减的函数：

$$\rho(\sigma_0, \sigma_c, T) = \rho_D(\sigma, T) \exp[-\alpha(\sigma_c - \sigma_0)] \quad (6)$$

(2) 对角线上的密度 $\rho_D(\sigma, T)$ 为随应力衰减的指数函数总和的近似。

由上面得到的经典模量的表达式 $E_C(\sigma, T)$ 和假定的 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, T)$ 的特殊形式，就限定了 PM 空间的自由参数，从而反演问题就成为适定的。

4 温度对岩石模量影响的细观模拟

假设 PM 空间中的 HMU 个体具有如图 1~3 所示的模量、波速随温度变化规律，对一个给定的 PM 空间密度分布，可得到随温度变化的 PM 空间密度分布，拟和出相应的 $\sigma-\varepsilon$ 滞回曲线(见图 5, 6)。由图 5

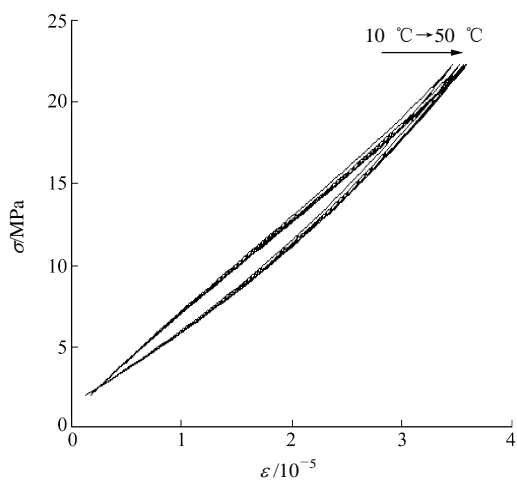


图 5 温度为 10 °C~50 °C 时的 $\sigma-\varepsilon$ 滞回曲线
Fig.5 Simulated $\sigma-\varepsilon$ curves under different temperatures (10 °C - 50 °C)

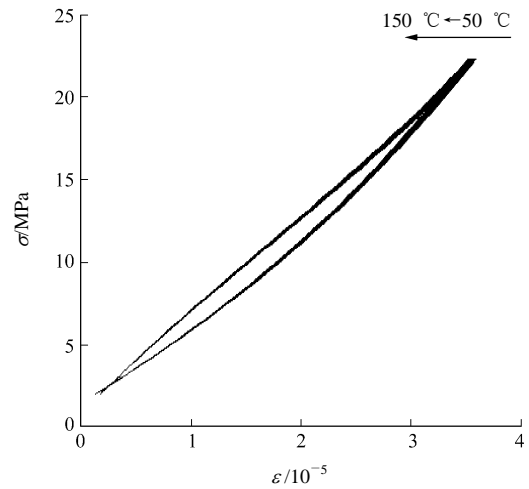


图 6 温度为 50 °C~150 °C 时的 $\sigma-\varepsilon$ 滞回曲线
Fig.6 Simulated $\sigma-\varepsilon$ curves under different temperatures (50 °C - 150 °C)

可见，当温度较低时，滞回圈随温度升高向大应力方向移动，说明滞回圈的模量随温度升高而降低；而图 6 反映了在更高温度的时候，滞回圈随温度升高向低应变方向移动，说明滞回圈的模量随温度升高在增大。由于滞回圈比较密集，重叠到了一起，故在图 5, 6 中用箭头指出升温方向。这一结果与图 1~3 的实验结果是吻合的。图 5, 6 从细观角度模拟的结果也证实了随温度升高模量下降后再上升的理论结果^[14]。

5 结论与讨论

本文根据共振实验数据总结和归纳了温度对岩石弹性模量、波速的影响规律。在温度较低时，随温度升高，模量、波速是下降的；当温度升到较高时，随温度升高，模量、波速随之升高。这一规律又证实了热激活弛豫模型的理论计算结果^[14]。借助 Carmeliet 和 Guyer 等的细观量化方法，将这一温度效应引进细观 PM 空间模型中，建立了温度对 PM 空间的影响函数，在 PM 空间中进行岩石温度效应的细观研究，并进一步对岩石循环加载过程中滞回圈的温度效应进行模拟，可以获得如下结论：低温段滞回圈随温度升高向大应变方向移动，滞回圈模量随温度升高而降低；在高温段，滞回圈向小应变方向移动，滞回圈模量随温度升高有所增大。这一模拟结果与国内外低频共振实验和三轴动态循环实验结果是一致的。

模量和波速随温度变化曲线存在低温部分随温度升高模量、波速呈下降趋势，这一规律与一般实

验结果吻合。继续升温到较高温度段时, 模量、波速又随温度上升而增大的这一规律只能在声频共振实验中见到, 但由于模量、波速下降和上升的具体温度范围与岩石种类、岩石中矿物晶体的成分和胶结物等微细结构、饱和液体的黏滞性质等复杂因素的热力学效应相关。因此, 上述任何一个因素都会影响到模量、波速下降或上升的确切温度范围。从图 1 中清晰可见饱和液体的黏性随温度变化明显地影响着饱和长石砂岩模量随温度降低和升高的确切温度值。由此可知, 要从实验结果中找到岩石模量、波速随温度变化的上述规律是不难的, 但在目前条件下要寻得统一的模量、波速随温度变化时, 降温 and 升温的确切温度值是很难的, 所以也无法模拟出一条确切的统一的模量、波速随温度变化的曲线。因此, 本文模拟采用的是 σ - ε 滞回圈随温度变化移动的规律引起的模量变化规律来达到对模量、波速的温度效应的模拟, 这样同样可达到探讨岩石温度效应的非线性特征分析和处理的目的。在宏观实验规律与微观结构之间通过细观含内力的 PM 模型建立起了初步的联系, 可以通过细观 PM 模型对宏观实验结果进行分析和预测。

参考文献(References):

- [1] GUYER R A, JOHNSON P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials[J]. *Physics Today*, 1999, 52(14): 30 - 35.
- [2] 席道瑛, 王 鑫, 陈运平. 描写岩石非线性滞后和记忆的宏观模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(13): 2 212 - 2 219.(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): 2 212 - 2 219.(in Chinese))
- [3] 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*, 1998, 17(增): 802 - 807.(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))
- [4] PLONA T J. Observation of a second bulk compression wave in a porous medium at ultrasonic frequency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, 36: 259 - 261.
- [5] XI D Y, XU S L, TAO Y Z, et al. Experimental investigations of thermal damage for rocks[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 324 - 325: 1 213 - 1 216.
- [6] NUR A, TOSAYA C, VO-THANH D. Seismic monitoring of thermal enhanced oil recovery process[C]// Paper RS6, the 54th SEG Meeting. Atlanta: [s. n.], 1984: 337 - 340.
- [7] 薛彦伟, 席道瑛, 徐松林. 岩石非经典非线性频率效应的细观研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增 1): 5 020 - 5 025.(XUE Yanwei, XI Daoying, XU Songlin. Study on non-classical nonlinear frequency effect on meso-scale in rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.1): 5 020 - 5 025.(in Chinese))
- [8] CARMELIET J, VAN DEN ABEELE K E A. Application of the Preisach-Mayergoyz space model to analyze moisture effects on the nonlinear elastic response of rock[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(7): 1 144 - 1 147.
- [9] GUYER R A, MCCALL K R, BIOTNOTT G N, et al. Quantitative implementation of Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic elastic moduli in rock[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B3): 5 281 - 5 293.
- [10] 席道瑛, 徐松林, 李 廷, 等. 岩石中微细观结构对外力和温度响应的概率研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(1): 15 - 21.(XI Daoying, XU Songlin, LI Ting, et al. Investigation on response probability of micro- and mesoscopic structures in rocks to external force and temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 15 - 21.(in Chinese))
- [11] VAN DEN ABEELE K E A, CARMELIET K J, JOHNSON P A, et al. The influence of water saturation on the nonlinear mesoscopic response of earth materials, and the implications to the mechanism of nonlinearity[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(B6): 2 121.
- [12] CARMELIET J, VAN DEN ABEELE K E A. Mesoscopic approach for modeling the nonlinear hysteretic response of damaged porous media in quasi-static and dynamic loading: effects of pressure and moisture saturation[C]// The Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Cachan, France: [s. n.], 2001: 11 - 18.
- [13] JONES T, NUR A. Velocity and attenuation in sandstone at elevated temperatures and pressures[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1983, 10(2): 148 - 151.
- [14] 席道瑛, 易良坤, 田象燕. Biot 理论的唯一修正对 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))
- [15] SCALERANDI M, DELSANTO P P, JOHNSON P A. Stress induced conditioning and thermal relaxation in the simulation of quasi-static compression experiments[J]. *J. Phys.*, 2003, 36(3): 288 - 293.