

岩石非线性细观响应中孔隙液体的影响

杜 赟¹, 席道瑛¹, 徐松林², 宛新林³

(1. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027; 3. 安徽建筑工业学院 土木工程系, 安徽 合肥 230022)

摘要: 在细观尺度上对孔隙流体对岩石力学性质的影响进行量化研究。将孔隙流体带来的非线性应变的影响分为经典应变的影响和非经典弹性单元(NCU)对非经典应变的影响。分析低饱和度和高饱和度时微细观机制的作用, 以此分别讨论流体对岩石非线性力学行为和岩石介质宏观刚度的影响。为适应不同饱和度下岩石力学行为, 提出一种新的固液相互作用函数关系, 对试验数据进行非线性反演, 获得不同饱和度时的 PM 空间图像, 分析孔隙流体对 PM 空间密度(NCU 数目)的影响。首次反演杨氏模量、压缩波速度随饱和度变化完整过程。饱和度为 0%~20% 时, 由于液体的激活作用, 对于经典部分, 动态杨氏模量随饱和度增加而减小; 对于非经典部分, 随饱和度增大 PM 空间 NCU 密度增大, NCU 数目增多, 非线性增强, 杨氏模量下降。当饱和度为 20%~80% 时, 动态杨氏模量不随饱和度变化, PM 空间 NCU 密度也基本保持不变。当饱和度由 80% 以上增大到全饱和时, 杨氏模量、弹性波速度反而随饱和度增加而增大, PM 空间 NCU 数目有所减小, 非线性程度下降。饱和岩石的经典和非经典非线性应变比干燥岩石有显著的增长, 与模拟的 PM 空间 NCU 密度分布结果是一致的。这些数值分析结果与试验结果的规律性基本吻合。该项研究对于储层预测、油藏描述、斜坡附近建筑的安全性、核仓库性能及地球物理反演、资料解释都具有潜在的应用前景。

关键词: 岩石力学; 孔隙液体; 细观响应; 经典和非经典应变; 杨氏模量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)01 - 0209 - 08

INFLUENCES OF PORE FLUID ON NONLINEAR MESOSCOPIC RESPONSES OF ROCKS

DU Yun¹, XI Daoying¹, XU Songlin², WAN Xinlin³

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China; 2. Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: Quantitative studies of pore fluid influence on the mechanical properties of rocks are carried out on mesoscopic scale. The nonlinear strain is decomposed into a classical part and a nonclassical contribution which is described by nonclassical elastic units(NCU). Based on the analysis of the mechanism on mesoscopic scale, fluid influences on rock mechanical behavior and stiffness under various saturations are discussed. Introducing new forms of macroscopic solid-fluid interaction functions, Preisach-Mayergoyz(PM) space under different saturations are obtained from the inversion of experimental data; and the influences of fluid saturation on PM space density are investigated. The entire variation between Young's modulus and compressional wave velocity with saturation is studied. When saturation increases from 0% to 20%, the dynamic modulus decreases for classical part, and the PM space density increases for nonclassical part, respectively. Whereas saturation is between 20% and 80%, the dynamic modulus and PM space density barely changes. As saturation increases from 80% to 100%, the dynamic

收稿日期: 2009 - 03 - 23; **修回日期:** 2009 - 09 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40474065, 40874093)

作者简介: 杜 赟(1982 -), 男, 2004年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院地球物理专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石物理、本构模型以及孔隙介质波动理论等方面的研究工作。E-mail: duyun518@mail.ustc.edu.cn

modulus increases and the PM space density decreases, contrary to the low saturation condition. The classical and nonclassical nonlinear strains of saturated rocks are obviously larger than those of dry rocks in accord with the PM space density distribution. These numerical results are generally consistent with the experimental results. This simulation research has potential prospects for the problems such as reservoir prediction and description, safety of constructions near slope area, nuclear storehouse properties, geophysical inversion, and data interpretations.

Key words: rock mechanics; pore fluid; mesoscopic response; classical and nonclassical strain; Young's modulus

1 引言

岩石是大自然的产物,它由多种矿物晶体、胶结和各种微细观的裂纹及孔洞等组成的。由于裂纹孔洞、晶粒边界微细观结构等的影响,使岩石具有典型的经典和非经典非线性特征,它们极大地影响岩石的宏观力学性能,研究岩石的非经典非线性特征对地震工程、防护工程、地质灾害的预测和防治都具有重要意义。为此吸引了大量地学研究者来研究岩石的非线性特征。

20世纪60年代, F. Birch^[1]进行了岩石低频高压时的应力-应变关系和在地球内部温压条件下岩石的静态非线性研究,这些研究对了解和模拟地球内部物理特征及推测组成成分具有很重要的价值。20世纪70年代, B. Mckavanagh 和 F. D. Stacey^[2]在低应变条件下研究了岩石的滞回性,获得比 10^{-6} 还低的应变都具有非线性响应。20世纪80年代, V. N. Bakulin 和 A. G. Protosenya^[3]也对地球介质的非线性响应进行了研究。自20世纪90年代以来,对岩石非线性研究进入一个新阶段,席道瑛等^[4]对砂岩、大理岩进行了大量的循环加载试验,获得不同饱和和液体具有不同的滞回曲线特征,反映了岩石特有的非线性力学行为。J. Carmeliet 等^[5, 6]对此作了大量的试验研究,其结果表明砂岩和大理岩的非线性特征(衰减、波速)比线性特征更依赖于液体的存在。在理论模型方面,最早由 F. Preisach^[7]提出描述滞后现象的数学模型, I. D. Mayergoyz^[8]归纳为描述非线性滞后现象的数学模型,称之为 PM 模型。R. A. Guyer 等^[9]研究了岩石的滞后非线性动态杨氏模量,并对岩石非线性特征进行了定量研究,提出了岩石非经典非线性的描述方式。薛彦伟等^[10]通过对岩石非经典非线性时频效应微观机制的研究,建立了能反映岩石的非经典非线性时频效应的理论模型,所得结果与试验数据能较好地吻合。同时, R. A. Guyer 等^[11, 12]对岩石共振频率随振幅偏移的现象以及在最大振幅前后共振频率的变化,即慢动态效应进行了细观尺度上的研究,慢动态是由于岩石中存

在弹性迟滞性结构造成的,并提出了描述慢动态效应的唯象理论。O. O. Vakhnenko 等^[13]对饱和砂岩共振试验的慢动态机制进行研究,解释饱和和液体黏性对慢动态的影响。J. Carmeliet 等^[5, 6]通过对 PM 空间中经典和非经典单元分布的影响提出了固液相互作用的量化研究方法,为此对低饱和度岩石中流体对岩石介质的影响进行了预测。由于 J. Carmeliet 等^[5, 6]提出的定量研究饱和度影响的方法受试验资料和分析方法以及给出的数学公式的局限性,对高饱和度时不能给出满意的结果。本文拟在 J. Carmeliet 等^[5, 6]的基础上,提出一个新的固液相互作用的函数结构,同时模拟低、高饱和度时岩石的非线性力学行为。

2 PM 空间的固液相互作用

非经典单元(NCU)具有滞回性,一个滞回非经典单元(H-NCU)的力学特性由一对应力(σ_0 , σ_c)和一对平衡长度(l_0 , l_c)来定义。其中 σ_0 , σ_c 分别表示 NCU 闭合和张开时的临界应力值; l_0 , l_c 分别表示 NCU 闭合和张开时的平衡长度。PM 空间中每一个点就代表图 1(a)中的滞回非经典单元。

含内力的 PM 空间模型^[12]中的 NCU 的刚度将受到孔隙液体的影响^[5](见图 1(b), (c))。由图 1 可见,在以 σ_0 , σ_c 为坐标的 PM 空间中,由于液体的影响产生固-液相互作用,使 NCU 在 PM 空间的位置发生变化,导致 PM 空间 NCU 密度分布发生变化,并且由于刚度的变化,使同一单元对载荷响应时的单元长度也发生变化。因此,要获得 PM 空间中孔隙液体的影响,必须获得 PM 空间 NCU 密度分布的变化和单元长度的变化。

在低饱和度(饱和度低于 20%)时^[6],由于微观的固液相互作用,又因砂岩中的石英颗粒表面具有足够的负电荷足以使覆盖它的水薄膜电离,可见砂岩的孔隙表面是羟基($[\text{OH}^-]$ 原子团)化了,在具有水分子和硅烷醇离子的水与硅酸盐表面之间形成电偶层,表面羟基与水分子之间的氢键断开导致能量损耗,而自由表面能则因氢键的断裂而降低。所以

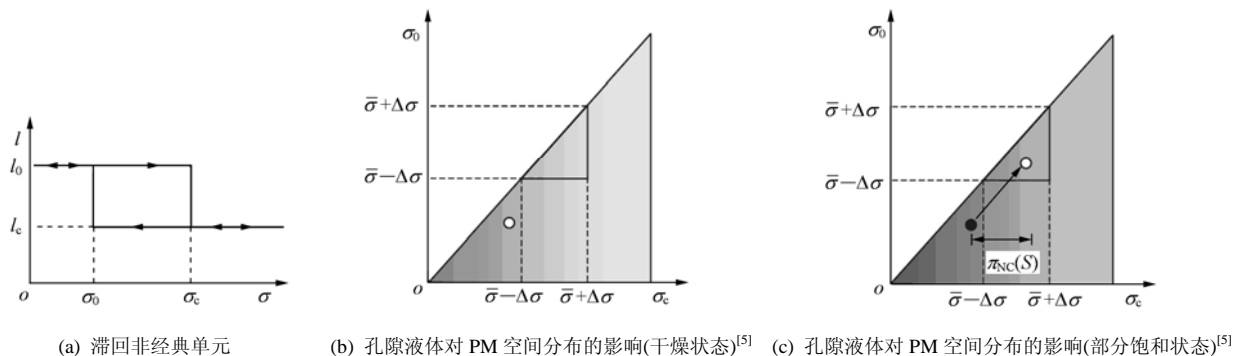


图 1 PM 空间中滞回非经典单元以及孔隙液体对 PM 空间分布的影响

Fig.1 Sketch map of hysteresis nonclassical elastic units(H-NCU), and the influence of pore fluid on PM density in PM space

吸附水在减小这种自由能时也起了显著的促进作用, 导致自由能的双重减少(电化学的和吸附的), 这意味着砂岩的刚性降低, 柔性增大, 导致弹性波速度的降低。另外, 还由于毛细管力的作用, 当饱和度很低时, 加入岩石孔隙中的水很少, 毛细管力就在颗粒之间起作用, 这时岩石骨架具有较大的刚度。液体对固体颗粒施加的这种微压应力即毛细管力随着饱和度的增大而增加; 同时随着饱和度的增大, 即孔隙中的水增加, 导致在固体颗粒上产生的微观收缩压力增加, 将抵消部分毛细管力, 所以毛细管力会减小, 甚至消失, 岩石的刚度减小, 弹性波速度也降低。同时由于部分饱和岩石的孔隙中总会有液体和气体, 在 2 种流体之间的分界面上存在的滞回细观单元改变状态的能力会提高, 这就是表面能的激活作用, 因而含水岩石比干燥岩石的滞回细观单元容易被激活(见图 1(b), (c))。这一结果将导致材料的膨胀, 甚至产生软化现象。由于分子的激活作用和表面能现象, 岩石内因饱和液体的存在会显著地增加岩石的非线性特征。图 1(b)和(c)的比较与图 2 的试验结果均说明随饱和度增加非线性程度增强。由图 2 可见, 当饱和度由 20%增大到 80%时, 杨氏模量和弹性波速度随饱和度基本不变。当饱和度再增大到 80%以上, 由于流体本身的不可压缩性, 流体渗入孔隙实际上起到增加岩石刚度的作用, 导致杨氏模量、弹性波波速上升。

3 液体存在时岩石力学行为的试验结果及分析

3.1 试验结果

由图 2 可知, 当饱和度增大到 20%时, 岩石的杨氏模量是下降的; 当饱和度达到 20%~80%时,

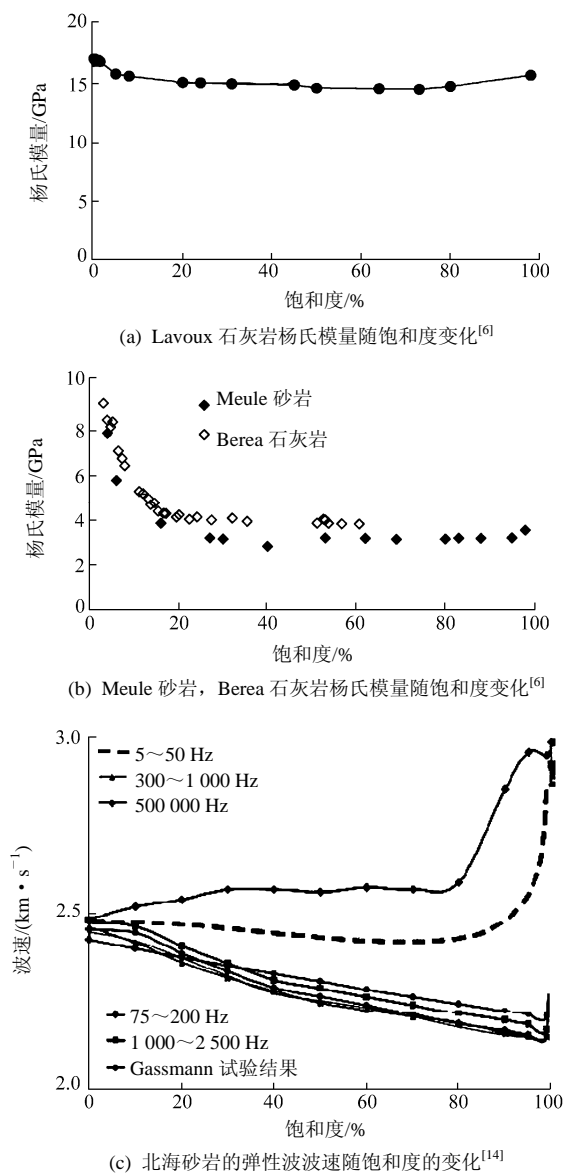


图 2 杨氏模量和波速随饱和度变化的试验结果

Fig.2 Test results of Young's moduli and velocities vs. saturations

杨氏模量与饱和度基本无关; 当饱和度继续增大, 超过 80%时, 杨氏模量开始增大。本文对饱和长石

砂岩和花岗岩的试验结果也符合这一规律^[15]。但是图 2(c)与(a), (b)的试验结果稍有不同, 因北海砂岩的孔隙度达到 35%, 速度频散效应特显著, 所以在低饱和度时超声频段比其他频段显示出更高的压缩波速度。在饱和度增加到 80%时, 超声速度和声波测井速度都戏剧性地增加, 但是地震波速由于频散效应的影响太大仍然很低。与图 2(a), (b)相比, 看不到饱和度低于 20%时随饱和度增加杨氏模量、波速下降的趋势。不过, 无论是超声频段还是地震频段, 当岩石接近全饱和时, 无论什么频段, 波速都随饱和度增加而增大, 与图 2(a), (b)的规律相同, 这一规律是不变的, 这也是本文作这一模拟的试验依据。

3.2 数据分析

为了模拟这一规律将数据模型化, 应用 PM 空间模型, 将非线性应变^[5]分解为经典部分和非经典部分:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_C + \varepsilon_{NC} = \int \frac{d\sigma}{E_C(\sigma, S_r)} + \varepsilon_{NC} \quad (1)$$

式中: ε_T 为总的应变; $E_C(\sigma, S_r)$ 为经典非线性杨氏模量, 是应力与饱和液体的函数, S_r 为饱和度; ε_{NC} 为非经典非线性应变, 由 PM 空间中的非经典弹性单元(NCU)来表示; ε_C 为经典非线性应变。

这些单元作为外部压力的函数, 具有可逆行为和滞后行为。NCU 只可以处于张开或闭合状态。单个的 NCU 起初以长度 l_0 处于张开状态, 当应力增加到 σ_c 时闭合, 长度变为 l_c , 当应力继续增加时仍然保持闭合, 直到应力减小到 σ_0 时才张开, 恢复到原长度 l_0 , 由此在 NCU 尺度上形成滞后(见图 1(a))。大量具有不同 (l_0, σ_0) 和 (l_c, σ_c) 参数的单元能够体现微观非均匀孔隙材料的非线性弹性特征。假定所有单元从张开到闭合的应变 $\delta = (l_0 - l_c)/l_0$ 为常数, 其区别仅在于具有不同的应力对 (σ_0, σ_c) , 导致它在 PM 空间中具有不同的坐标位置。因此在 PM 空间上产生一个密度分布 $(\sigma \leq \sigma_c)$ 。通过追踪所有单元(NCU)在 PM 空间内张开或闭合的变化, 即可由下面的方法计算非经典应变的贡献, 此时有

$$\varepsilon_{NC} = \delta \iint \rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r) d\sigma_c d\sigma_0 \quad (2)$$

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, 其中液体的影响已包含在密度分布函数 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r)$ 中。在分析中, δ 已并入函数参数中, 因此, 可假定 $\delta = 1$ 。

联立式(1), (2)就可对一个给定的 PM 空间分布和给定的加载路径预测岩石的滞后非线性应力 - 应

变行为。对一个较小应力偏移 $(\bar{\sigma} - \Delta\sigma$ 和 $\bar{\sigma} + \Delta\sigma)$, 可得到如下方程近似:

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} \approx \frac{1}{2\Delta\sigma} \left[\int_{\bar{\sigma}-\Delta\sigma}^{\bar{\sigma}+\Delta\sigma} \frac{d\sigma}{E_C(\sigma, S_r)} + \bar{\rho} \frac{(2\Delta\sigma)^2}{2} \right] \quad (3)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为平均应力; $\Delta\sigma$ 为应力增量; $\bar{\rho}$ 为 PM 空间中应力 $\bar{\sigma}$ 周围激活三角(是由 $\sigma_0 = \sigma_c$ 的斜线和 $\bar{\sigma} - \Delta\sigma$ 以及 $\bar{\sigma} + \Delta\sigma$ 线段所组成, 见图 1(c))内的密度平均, 设其为常数。

当 $\Delta\sigma \rightarrow 0$ 时, 式(1)中经典杨氏模量 $E_C(\sigma, S_r)$ 等于低扰动共振试验的动态杨氏模量 $E_D(\bar{\sigma}, S_r)$ 。可以用一指数衰减函数近似求得零压下动态杨氏模量对饱和度依赖的解析表达式:

$$E_C(0, S) = E_C(0, 100) + \Delta E_C^0 \exp(-C_C S_r) \quad (4)$$

式中: ΔE_C^0 为零饱和度和高饱和度下的动态杨氏模量之差, C_C 为指数衰减参数。

经典杨氏模量随应力的变化趋势可用 2 个指数函数的组合来表示, 分别表示低压下 (< 5 MPa) 的快变域(相应于超声频段, 对应于较大的衰减因子), 以及高压的慢变域(相应于低频, 对应于较小的衰减因子), 即

$$E_C(\sigma, S_r) = E_C^\infty - M_1 \exp(-C_1 \sigma) - M_2 \exp(-C_2 \sigma) \quad (5)$$

式中: E_C^∞ 为当 $\sigma \rightarrow \infty$ 时的杨氏模量; M_1, M_2, C_1 和 C_2 均为饱和度的函数。

根据饱和度 $S_r = 0\%$ 和 $S_r = 100\%$ 时的 2 组数据对比发现, 仅 M_2 随着饱和度变化, 它对饱和度的依赖可通过定义另一个函数 $\pi_C(S_r)$ 来确定:

$$M_2(S_r) \exp(-C_2 \sigma) = M_2^* \exp[-C_2(\sigma + \pi_C(S_r))] \quad (6)$$

式中: M_2^* 为将 M_2 中的饱和度部分并入指数部分后的参数。

式(4)~(6)在 $\sigma = 0$ 时的相容性条件为

$$\pi_C(S_r) = \frac{-1}{C_2} \ln \left[1 - \frac{\Delta E_C^0 \exp(-C_C S_r)}{M_2^*} \right] \approx \frac{\Delta E_C^0 \exp(-C_C S_r)}{C_2 M_2^*} \quad (7)$$

这样, 可以将 $\pi_C(S_r)$ 理解为经典非线性杨氏模量 $E_C(\sigma, S_r)$ 中液体引起的微应力变化改变了动态杨氏模量的宏观固液相互作用函数, $\pi_C(S_r)$ 是第一个宏观固液相互作用力。关于非经典应变的贡献, 将通过 NCU 的密度分布函数来体现。求解 NCU 密度分布函数实际是在求解欠定方程, 其解既不确定也

不唯一。为了得到一个适定的反演问题的解，引入简化形式的密度函数 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r)$ ，并假定非对角线 NCU 密度是随偏离对角线的距离衰减的函数：

$$\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r) = \rho_D(\sigma, S_r) \exp[-\kappa(\sigma_c - \sigma_0)] \quad (8)$$

式中： $\rho_D(\sigma, S_r)$ 为对角密度函数， κ 为和饱和度相关的衰减参数。

$\rho_D(\sigma, S_r)$ 由一些指数函数构成，随应力的增加而衰减。由于经典杨氏模量 $E_C(\sigma, S_r)$ 和 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r)$ 的特殊形式限定了 PM 空间的自由参数，从而使反演问题变为适定的。下面是如何由不同的应力 - 应变数据获得函数参数的步骤：

(1) 假定对于一个给定的饱和度 S_r ，对角密度在一个小应力扰动下为一常数 $\bar{\rho}_D$ ，然后从式(1)，(2)，(8)得到 $\bar{\rho}_D$ 表达式为

$$\bar{\rho}_D(\bar{\sigma}_k, S) = \frac{\frac{\Delta \varepsilon_k^+}{\Delta \sigma_k} - \frac{1}{\Delta \sigma_k} \int_{\sigma_{k-1}}^{\sigma_k} \frac{d\sigma}{E_D(\sigma, S_r)}}{\frac{1}{\kappa} \left[1 + \frac{\exp(-\kappa \sigma_k) - \exp(-\kappa \sigma_{k-1})}{\kappa \Delta \sigma_k} \right]} \quad (9)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_k &= (\sigma_{k-1} + \sigma_k) / 2 \\ \Delta \sigma_k &= \sigma_k - \sigma_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： $\Delta \varepsilon_k^+$ 为应力从 σ_{k-1} 增加到 σ_k 时相应的应变变化。

(2) 基于 $\bar{\rho}_D$ 在不同的应力 $\bar{\sigma}_k$ 的值，确定一个最优的三项指数拟合表达式：

$$\rho_D(\sigma, S_r) = \sum_{i=1}^3 a_i(S_r) \exp[b_i(S_r)\sigma] \quad (11)$$

式中： $a_i, b_i (i=1, 2, 3)$ 均为拟合参数(函数)。

(3) κ 值优化为准静态应力 - 应变曲线的下降分支。随着经典杨氏模量的确定，对 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r)$ 的详细分析表明：流体的影响仅由参数 a_i 来限定。所有别的参数对所有饱和度变化的影响均为常数。进一步分析 a_i 可以确定第二个宏观的固液相互作用力 $\pi_{NC}(S_r)$ ，这个参数(函数)代表 NCU 对饱和度的依赖。 $\pi_{NC}(S_r)$ 的形式确定如下：

$$a_i(S_r) \exp(-b_i \sigma) = a_i^* \exp[-b_i(\sigma + \pi_{NC}(S_r))] \quad (12)$$

$\pi_{NC}(S_r)$ 可以当作液体引起的微应力导致 PM 空间对角线密度随饱和度变化的宏观量。

3.3 模型改进

上述结果对低饱和度时流体对岩石性质的影响能进行较好地预测，但在高饱和度时由于式(6)的局限性显得无能为力，更谈不上给出满意的结果。本

文通过对高饱和度时岩石性质的研究发现，由于流体充填岩石介质的孔隙中，增加了介质的刚度，杨氏模量会随之增大。因此，在式(6)饱和度函数的基础上，根据对高饱和度岩石杨氏模量随饱和度增加而增大的结果进行了分析，并作了改进，对 2 个固液相互作用关系提出了一个新的函数形式，即

$$\left. \begin{aligned} \pi_C(S_r) &= T_1' \exp(-m_1 S_r) + T_2' \exp[m_2(S_r - m_5)] \\ \pi_{NC}(S_r) &= R_1' \exp(-n_1 S_r) + R_2' \exp[n_2(S_r - n_5)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $T_1', T_2', R_1', R_2', m_5, n_5, m_1, m_2, n_1, n_2$ 均为拟合参数。

为了模拟高饱和度时杨氏模量随饱和度变化的试验规律，在有关研究^[5]的基础上增加了一个衰减函数。在式(13)中的后一项为高饱和度时随饱和度变化的流体对岩石介质宏观性质的影响。将增加的衰减函数与式(6)结合，就可以对杨氏模量和压缩波速度随饱和度变化进行全程反演，预测杨氏模量和压缩波速度随饱和度变化的性质，这一预测对于斜坡附近建筑安全性及核废料储藏库的性能都是至关重要的，具有潜在的应用价值。由此得到 $E_C(\sigma, S_r)$ ， $\rho_D(\sigma, S_r)$ 和 $\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r)$ 的新函数形式：

$$\begin{aligned} E_C(\sigma, S_r) &= E_C^\infty - M_1 \exp(-C_1 \sigma) - \\ &M_2 \exp(-C_2 \sigma) \exp(-C_2 \pi_C(S_r)) = \\ &E_C^\infty - M_1 \exp(-C_1 \sigma) - M_2 \exp(-C_2 \sigma) \cdot \\ &\exp\{-T_1 \exp(-m_1 S_r) - T_2 \exp[m_2(S_r - m_5)]\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \rho_D(\sigma, S_r) &= a_1 \exp(-b_1 \sigma) \exp(-b_1 \pi_{NC}(S_r)) + \\ &a_2 \exp(-b_2 \sigma) + a_3 \exp(-b_3 \sigma) = a_1 \exp(-b_1 \sigma) \cdot \\ &\exp\{-R_1 \exp(-n_1 S_r) - R_2 \exp[n_2(S_r - n_5)]\} + \\ &a_2 \exp(-b_2 \sigma) + a_3 \exp(-b_3 \sigma) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\rho(\sigma_0, \sigma_c, S_r) = \rho_D(\sigma, S_r) \exp[-\kappa(\sigma_c - \sigma_0)] \quad (16)$$

式中： T_1, T_2, R_1, R_2 均为参数。

在低饱和度时，液体施加于岩石晶体颗粒上的微压应力减小，杨氏模量随饱和度的增加而减小，并趋于平缓。当高饱和度时，液体充填孔隙，增加了岩石介质的整体刚度，所以宏观杨氏模量也随饱和度和增加而增大。

4 饱和和液体影响下的 PM 空间图像

对不同饱和度下岩石的 PM 空间密度分布作了模拟。由于缺少试验数据，因此，该模拟是在有关

试验数据^[5]基础上完成的。但是由于试验数据^[5]并没有作到完全饱和，实际上只作到 80%左右的饱和度，因而没能反应出高饱和度的情况。本文在此基础上，根据图 2 随饱和度不断增大杨氏模量和波速的变化规律增加高饱和度的影响，反演得到 PM 空间图像。由图 3 可知，当饱和度由 0%增大到 20%时，杨氏模量是下降的。随饱和度增大，PM 空间中非经典单元(NCU)的密度逐渐增大，尤其在低压角和对角线附近密度最大；将图 3(a), (b)比较可知，在 5%饱和度时(在图 3(b)左下方低压角附近 NCU 密度分布集中的区域)，NCU 密度等值线 >55 的区域和 NCU 密度等值线 >45 的区域明显大于图 3(a)干燥岩石区域。其他区域二者的密度分布相比，也有所增加，但不如低压角附近显著。当饱和度由 5%再增加到 20%时，NCU 密度等值线 >55 区域比 5%饱和度时的相应区域要稍大，说明随饱和度由 0%增大到 20%，PM 空间 NCU 密度有所增加，岩石的

非线性程度随饱和度增大而增强，杨氏模量下降。随着压力的增大，随着距对角线距离的增大，密度逐渐减小；当饱和度从 20%增大至 80%时，杨氏模量与饱和度基本无关，PM 空间密度基本不发生变化。当饱和度继续增大到 80%以上，甚至到 100%时，PM 空间 H-NCU 密度与饱和度为 80%时相比又有所降低。将图 3(c), (d)进行比较可知，在低压角附近，NCU 密度等值线 >55 区域和 NCU 密度等值线 >45 区域有所减小，NCU 密度比 80%孔隙度时有所下降，非线性特征降低，刚度增大。由图 3 可见，其模拟结果与图 2 试验结果基本吻合。

5 饱和液体影响的岩石力学行为的模拟

根据图 2 和席道瑛等^[14]的规律和理论分析得到：在低饱和度时，由于微观的固液相互作用产生

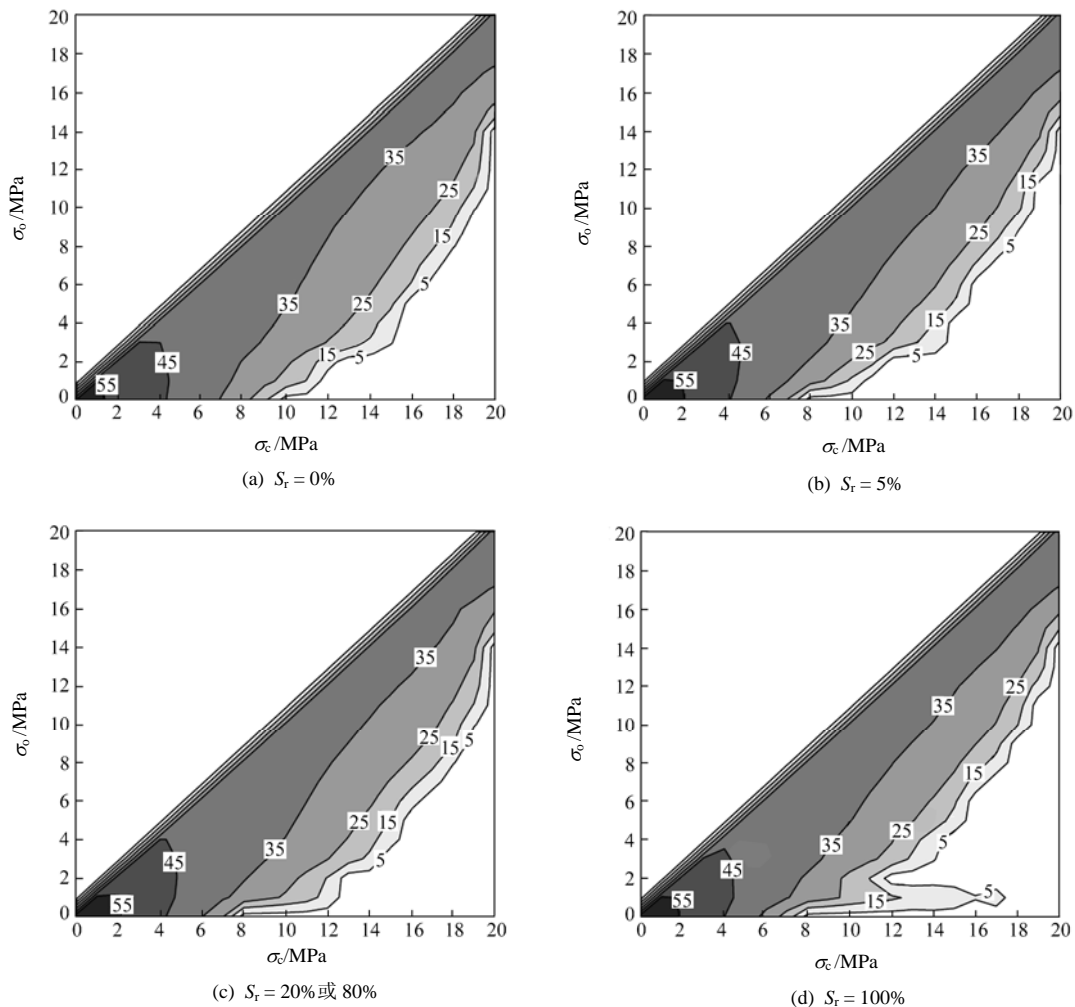


图 3 不同饱和度下的 PM 空间图像 NCU 密度等值线图
Fig.3 Contour maps of NCU density in PM space under different saturations

的压缩微应力随饱和度增加而减小, 颗粒之间的表面张力消失, 低饱和度岩石产生软化, 增强了岩石的非线性特征, 导致低饱和度岩石随饱和度增加杨氏模量减小; 而高饱和度岩石, 随饱和度增大, 液体充填在岩石的缝隙中, 增大了岩石的宏观刚度, 所以随着饱和度的增大杨氏模量增大。对式(1)的经典和非经典应变进行了数值模拟, 利用上述的分析和推导, 将液体饱和度对经典和非经典应变的影响进行了数值模拟, 经典应变由式(14)求得, 其结果见图 4。根据式(15), (16)对非经典应变进行了模拟, 其结果见图 5。图 4, 5 是在有关试验数据^[5]基础上完成的。由图 4, 5 可知, 无论是经典应变或非经典应变, 在 20% 饱和度以下, 随饱和度增大, 应力 - 应变滞回圈朝着大应变方向发展, 杨氏模量降低, 与图 2 的试验结果和图 3 的模拟结果一致。而在高

饱和度岩石(饱和度 80%~100%)的应力 - 应变滞回圈中的经典应变和非经典应变都随饱和度增加而向着小应变方向移动, 杨氏模量是增大的。这与流体的存在增加了岩石刚度的理论和图 2 的试验结果是相吻合的。说明 PM 模型在对非线性细观响应中孔隙液体的影响的分析是成功的。

表 1 列出模拟中的参数取值。其中需要说明的是, $m_s = n_s = 90$ 是根据试验数据观察经验求得; R_2 和 n_2 的取值需结合具体试验才能求得, 而这里缺乏高饱和度的试验数据^[5], 所以它们的取值是根据本文的试验数据分析而来的^[14]。由于只有干燥和饱和状态的试验数据, 部分饱和状态的试验数据是通过不同浸液时间来得到的, 所以也无法精确求得。但如果从定性上和数值模拟来说, 这些参数的取值已足够精确, 不会对结果带来影响。

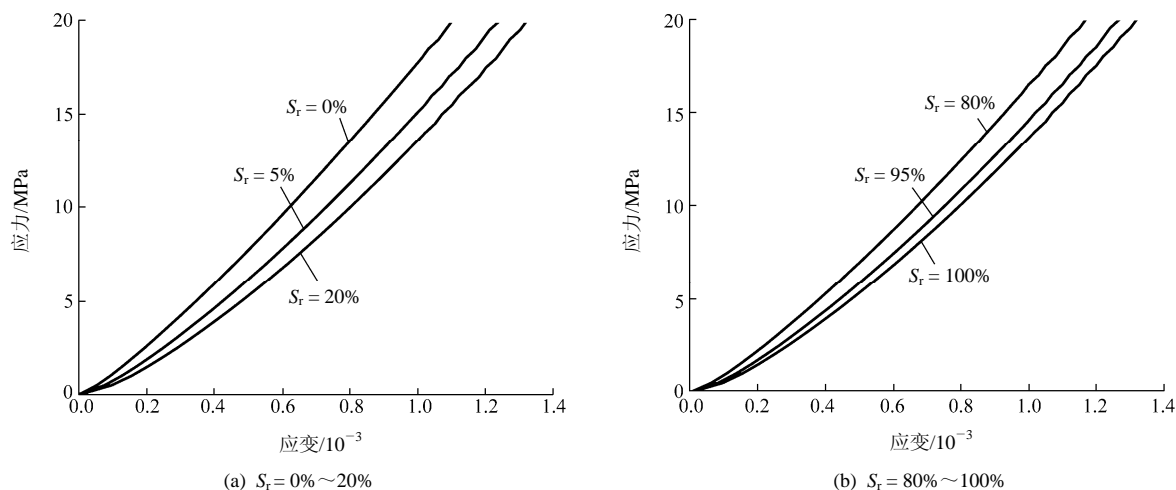


图 4 饱和度为 0%~20% 以及 80%~100% 时的应力 - 应变曲线(经典非线性)

Fig.4 Stress versus classical nonlinear strain for different saturations of $S_r = 0\% - 20\%$ and $S_r = 80\% - 100\%$

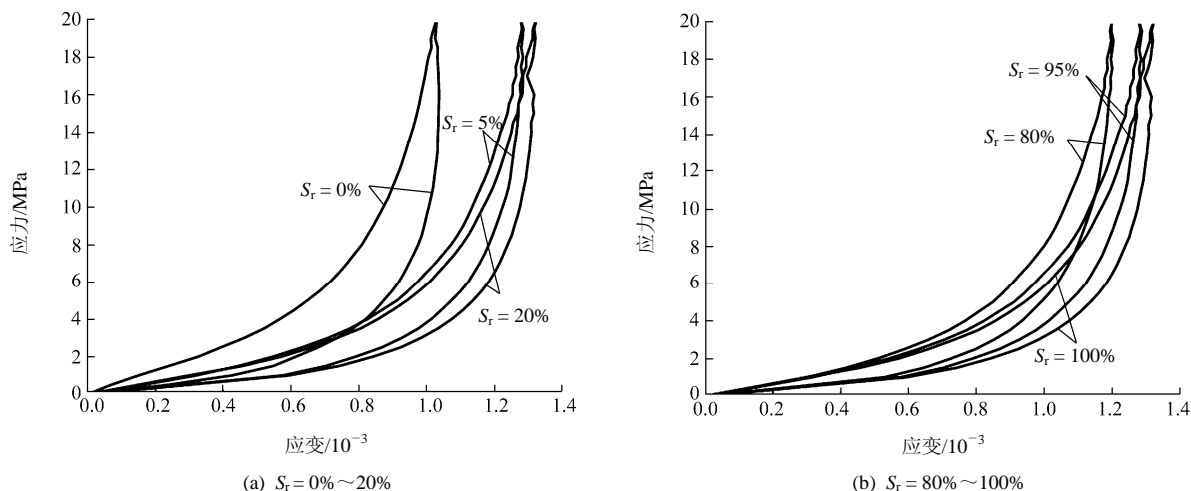


图 5 饱和度为 0%~20% 以及 80%~100% 时的应力 - 应变曲线(非经典非线性)

Fig.5 Stress versus nonclassical nonlinear strain at different saturations of $S_r = 0\% - 20\%$ and $S_r = 80\% - 100\%$

表1 模拟中的参数取值

Table 1 Parameters in procedure of simulation

T_1	M_1	T_2	m_2	m_s	R_1	n_1	R_2	n_2	n_s	C_2	b_1
5.14	0.25	0.2507	0.25	90	1.0	0.9	0.08	0.2	90	0.063	1.77

6 结 论

(1) 首先从物理上对多孔饱和介质进行分析。在低饱和度时因胶结的软化、黏土的膨胀和表面作用引起杨氏模量和波速随饱和度增加而降低；高饱和度和时因液体充填在岩石缝隙中，增加了岩石的刚度，使杨氏模量、波速随饱和度增大而增加。得出了低饱和度时流体的存在使岩石宏观杨氏模量、弹性波速减小，高饱和度时流体的存在使得岩石宏观杨氏模量和弹性波速增大的结论。

(2) 以 PM 模型为基础着重讨论了岩体内流体对岩石介质细观结构的影响，在固液相互作用的函数关系^[5]基础上提出了固液相互作用的新的函数形式，它既能模拟低饱和度时岩石的非经典非线性力学行为，又能模拟高饱和度时岩石的非线性特征。首先进行了这一杨氏模量、波速随饱和度变化的全过程模拟，无疑将研究工作向前推进了一步，使这方面的模拟研究工作得到发展和完善。并以干燥和饱和砂岩的试验数据进行反演，得到 PM 空间密度分布及经典非线性应变和非经典非线性应变的分布。

(3) 分析结果得出，随饱和度由 0% 增加到 20% 时，经典非线性应变和非经典非线性应变增大，杨氏模量下降；当饱和度由 20% 增加到 80% 时，随饱和度增加，杨氏模量、波速变化不大；当饱和度由 80% 增大到 100% 时，经典非线性应变和非经典非线性应变减小，杨氏模量增大，与模拟的 PM 空间 NCU 密度分布和试验结果吻合。

(4) 由于饱和液体对滞回细观单元的激活作用，导致饱和岩石的经典和非经典应变比干燥砂岩显著增大。这一饱和度的空间变化将引起速度频散^[16]，所以这项研究对地震波的衰减和速度频散研究是很有意义的，给地震模拟、反演和解释提供了岩石物性参数的佐证。模拟和试验结果的这种规律性变化，也就是岩石饱和度变化对岩石物理力学性质影响的这一规律性结果，可以根据现场岩石饱和的程度来指导施工过程的开挖和支护、地基处理措施等等，在工程建造方面也具有现实意义。

参考文献(References):

[1] BIRCH F. A handbook of physical constants[M]. New York: Geological Society of America Press, 1966: 97 - 174.

- [2] MCKAVANAGH B, STACEY F D. Mechanical hysteresis in rocks at low strain amplitudes and seismic frequencies[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1974, 8(3): 246 - 250.
- [3] BAKULIN V N, PROTOSENYA A G. Nonlinear effects in travel of elastic waves through rocks[R]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1982: 314 - 316.
- [4] 席道瑛, 刘 斌, 田象燕. 饱和岩石的各向异性及非线性黏弹性响应[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 101 - 111.(XI Daoying, LIU Bin, TIAN Xiangyan. Anisotropy and nonlinear viscoelastic behavior of saturated rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(1): 101 - 111.(in Chinese))
- [5] 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]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(7): 1 144 - 1 147.
- [6] VAN DEN ABEELE K EA, CARMELIET J, JOHNSON PA, et al. Influence of water saturation on the nonlinear elastic mesoscopic response in Earth materials and the implications to the mechanism of nonlinearity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B6): 2 121 - 2 131.
- [7] PREISACH F. Über die magnetische Nachwirkung[J]. *Zeitschrift für Physik a Hadrons and Nuclei*, 1935, 94(5/6): 277 - 302.
- [8] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 56(15): 1 518 - 1 521.
- [9] GUYER R A, MCCALL K R, BOITNOTT G N, et al. Quantitative implementation of Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic elastic moduli in rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5 281 - 5 293.
- [10] 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 of nonclassical 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))
- [11] GUYER R A, MCCALL K R, VAN DEN ABEELE K. Slow elastic dynamics in a resonant bar of rock[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(10): 1 585 - 1 588.
- [12] SCALERANDI M, AGOSTINI V, DELSANTO P P, et al. Local interaction simulation approach to modeling nonclassical, nonlinear elastic behavior in solids[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(6): 3 049 - 3 059.
- [13] VAKHNENKO O O, VAKHNENKO V O, SHANKLAND T J, et al. Strain-induced kinetics of intergrain defects as the mechanism of slow dynamics in the nonlinear resonant response of humid sand stone bars[J]. *Physical Review(E)*, 2004, 70(1): 1 - 4.
- [14] 席道瑛, 杜 贇, 易良坤, 等. 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, et al. Influence of fluid to nonlinear elastic behavior of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 687 - 696.(in Chinese))
- [15] BATZLE M L, HAN D H, HOFMAN R. Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity: direct measurements[J]. *Geophysics*, 2006, 71(1): 1 - 9.
- [16] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. 岩石物理手册: 孔隙介质中地震分析工具[M]. 徐海滨, 戴建春译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 171 - 175.(MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media[M]. Translated by XU Haibin, DAI Jianchun. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 171 - 175.(in Chinese))