

单轴受荷条件下岩石的声学特性模型与实验研究

Ultrasonic properties of rock under loading and unloading:

Theoretical model and experimental research

赵明阶

(重庆交通学院河海建筑工程系, 重庆, 400074)

吴德伦

(重庆建筑大学建工学院, 重庆, 400045)

文 摘 从岩石的变形特性出发, 通过等效裂纹模型的建立, 给出了岩石在单轴加载、卸载和重加载过程中岩石声学特性的理论模型; 对大理岩、灰岩和玄武岩三种岩石进行了单轴循环加载过程中的超声波测试实验, 实验结果与理论计算基本吻合。

关键词 岩石, 声学特性, 单轴加载, 卸载

中图法分类号 TV 223.1

作者简介 赵明阶, 男, 1967年生, 博士。现在重庆交通学院从事岩土动力学及地震工程教学与科研工作。

Zhao Mingjie

(Dept. of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong Institute of Communication, Chongqing, 400074)

Wu Delun

(Institute of Architecture and Engineering, Chongqing Jianzhu University, Chongqing, 400045)

Abstract This paper gives a theoretical model for ultrasonic properties of rock with microcrack under uniaxial loading, unloading and reloading, on the basis of analyzing microcrack deformations by fracture mechanical theory and setting microcrack equivalent model. The experiment of ultrasonic measurement of marble, limestone and basalt under uniaxial cycle loading has been performed. In general, the experimental results have a good agreement with the theoretical predictions.

Key words rock, ultrasonic properties, uniaxial loading, unloading

1 引 言*

在裂隙岩石中传播的超声波除与岩石母体的弹性参数有关外, 而且与岩石中微裂隙的分布密切相关。已有实验成果表明^[1~5], 具有随机分布微裂隙的岩石在等围压下, 岩石中的微裂隙发生闭合, 岩石表现为各向同性体, 岩石声速随着围压的增加而增大, 当微裂隙完全闭合后, 岩石的声速不再增加。在单轴加载条件下, 岩石中的微裂隙将发生闭合和扩展, 岩石表现为横观各向同性体。岩石中的声速在压密过程中随荷载增加而增加, 在扩展阶段随荷载的增大而减小。由此可见, 在不同荷载下声波在岩石中的传播特性能直观地反映出岩石中的微裂隙变化规律及其力学特性。目前在声波测试技术文献中, 还没有一个适当的理论模型, 从而使得声波测试技术还难以解决与岩石力学特性相关的一些复杂问题。为此, 本文对含微裂隙岩石在受荷条件下的声学特性的理论模型进行了研究, 并通过实验进行了验证。

岩石薄片分析表明^[6], 岩石中的裂隙主要由晶间裂缝、矿物解理和洞缝组成, 晶间裂缝及洞缝具有随机分布。矿物的解理细观上具有方向性, 但在岩石中, 因矿物的随机分布, 因而在总体上仍可视解理为随机分布。为了对岩石的声学特性进行分析, 对岩石的微裂

隙及岩石母体(矿物成分构成)作如下假定: ①岩石内部的缺陷用椭球形微裂纹模拟, 因这些微裂纹呈大规模随机分布, 岩石样本可视为各向同性体; ②假设微裂纹具有相同的形状, 其平均半长轴为 a_0 、半开度为 b_0 形状比用 $\alpha = b_0/a_0$ 表示, 且微裂纹的平均线密度为 ϵ ; ③假设岩石母质是线弹性体, 其弹性参数由杨氏模量 E_0 、泊松比 ν_0 或剪切模量 G_0 构成; ④岩石的断裂韧度为 K_{IC} , 微裂纹面的内摩擦角为 φ 。

2 单轴受荷条件下岩石的声学特性理论模型

岩石的超声波速及衰减参数主要取决于岩石的弹性参数。根据前述假设, 岩石在单轴受荷条件下, 岩石母体的变形是线弹性的, 其弹性常数保持不变, 因而它对岩石的声学特性不产生影响; 而微裂隙在单轴受荷后的变形(闭合、张开、扩展等)将引起岩石的弹性常数的改变, 因而它是改变岩石声学特性的主要因素。为了从理论上模拟岩石在单轴受荷条件下的声学特性的变化规律, 本文首先采用断裂力学理论对微裂隙岩石的变形特性进行分析, 然后通过微裂纹等效模型对微

裂隙变形引起的岩石声学特性的变化进行理论分析, 从而建立单轴受荷条件下岩石的声学特性理论模型。

2.1 单轴受荷条件下岩石的变形特性

将岩石的变形分解为岩石母体的变形和微裂隙的变形之和。在单轴加载过程中, 岩石的变形由岩石母体的线弹性变形和微裂隙的闭合变形及扩展变形组成; 在单轴卸载过程中, 岩石的变形由岩石母体的线弹性恢复变形和微裂隙的张开变形及扩展裂纹的反滑移变形组成; 在单轴重加载过程中, 岩石的变形由岩石母体的线弹性变形和微裂隙的闭合变形及扩展裂纹的正向滑移变形组成。下面分别对岩石在单轴加载、单轴卸载及重加载过程中的变形特性进行分析。

(1) 单轴加载过程中岩石的变形特性

岩石在单轴加载过程中, 其变形可表示为

$$\varepsilon(\sigma_1) = \varepsilon_i^e + \varepsilon_i^c + \varepsilon_i^f \quad (1)$$

式中 ε 总变形; ε_i^e 为裂隙闭合引起的变形; ε_i^c 为裂隙扩展引起的变形; ε_i^f 为岩石母体的线弹性变形; $i=1, 2$ 分别表示纵向和横向。在适当的假设下运用断裂力学理论通过复杂的数理推导可求得 ε_i^e 和 ε_i^c , 其表达式为^[6]

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^e &= \frac{2}{\pi} \epsilon_{a0} \left| \int_0^{\gamma_c} \alpha \sec^2 \gamma (\sin \gamma \cos \beta_1 + 2 \sin \beta_1 \cos \gamma) d\gamma + \right. \\ &\quad \left. \frac{k+1}{4G_0} \sigma_1 \int_{\gamma_c}^{\pi/2} (\sin \gamma \cos \beta_1 + 2 \sin \beta_1 \cos \gamma) d\gamma \right| \\ \varepsilon_2^e &= \frac{2}{\pi} \epsilon_{a0} \left| \int_0^{\gamma_c} \alpha \sec \gamma \cos \beta_2 d\gamma + \right. \\ &\quad \left. \frac{k+1}{4G_0} \sigma_1 \int_{\gamma_c}^{\pi/2} (\cos \beta_2 \cos \gamma d\gamma \right| \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^f &= \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_1(\gamma) \tan \gamma d\gamma \\ \varepsilon_2^f &= - \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_1(\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \xi &= 512 \epsilon^3 / \pi^4 E_0 K_{1c}^6 \\ h_1(\gamma) &= \sqrt{2} T^7 + 4 T^9 / \pi K_{1c}^2 \alpha_0 \sin \gamma \end{aligned}$$

$$T = \alpha_0 (\sigma_1 \cos^2 \gamma - \frac{4G_0}{k+1} \alpha) (\sin \gamma - \cos \gamma \tan \varphi)$$

$$\gamma_1 = \arccos \left| \frac{1 - 2AB + \sqrt{1 - 4AB - 4A^2}}{2(B^2 + 1)} \right|^{1/2}$$

$$\gamma_2 = \arccos \left| \frac{1 - 2AB - \sqrt{1 - 4AB - 4A^2}}{2(B^2 + 1)} \right|^{1/2}$$

$$A = \left(\frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi} \alpha_0} - \frac{4G_0}{k+1} \alpha \tan \varphi \right) / \sigma_1, B = \tan \varphi$$

$$\gamma_c = \frac{1}{2} \arccos \left| \left(\frac{8G_0}{k+1} \alpha - \sigma_1 \right) / \sigma_1 \right|$$

(2) 岩石在单轴卸荷过程中的变形特性

岩石在单轴卸荷过程中, 除了岩石母质本身的弹性恢复引起的变形 $\Delta \varepsilon_i^e$ 外, 原生闭合裂纹将重新张开, 引起张开变形 $\Delta \varepsilon_i^c$; 扩展的次生裂纹将发生闭合, 在滑移裂纹模型中表现为原生裂纹的反向滑移变形 $\Delta \varepsilon_i^a$ 。这些变形的总和构成了岩石在卸荷过程中的变形特性。总轴向和横向变形可表示为

$$\varepsilon_i(\sigma_1) = \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^c + \Delta \varepsilon_i^a + \Delta \varepsilon_{im} \quad (4)$$

式中 σ_{im} 为卸荷起点应力; ε_{im} 为卸荷起点应变; $i=1, 2$ 分别表示纵向和横向。

裂纹张开变形可由下式计算^[6]:

$$\Delta \varepsilon_i^c = \Delta U_i^I + \Delta U_i^{II} \quad (5)$$

式中 $\Delta U_1, \Delta U_2 (j=I, II)$ 由下式确定:

$$\Delta U_1 = \frac{2}{\pi} \epsilon_{\frac{k+1}{4G_0}} a_0 \int_{\beta_j} q_j \sin \gamma \cos \beta_1 + 2 \sin \beta_1 \cos \gamma d\gamma$$

$$\Delta U_2 = - \frac{2}{\pi} \epsilon_{\frac{k+1}{4G_0}} a_0 \int_{\beta_j} q_j \cos \beta_2 \cos \gamma d\gamma$$

其中

$$R_I = [\gamma_b, \gamma_1^m], R_{II} = [\gamma_c^m, \pi/2]$$

$$q_I = (\sigma_1 - \sigma_{1c}), q_{II} = (\sigma_1 - \sigma_{1m})$$

$$\gamma_c^m = \frac{1}{2} \arccos \left[\left(\frac{8G_0}{k+1} \alpha - \sigma_{1m} \right) / \sigma_{1m} \right]$$

$$\gamma_b = \frac{1}{2} \arccos \left[\left(\frac{8G_0}{k+1} \alpha - \sigma_1 \right) / \sigma_1 \right]$$

扩展裂纹的反滑移变形如下^[6]:

$$\sigma_{a2} \leq \sigma_1 < \sigma_{a1}$$

$$\Delta \varepsilon_1^a = \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_2(\gamma) \Delta T \tan \gamma d\gamma \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_2^a = - \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_2(\gamma) \Delta T d\gamma$$

$$\sigma_{b2} \leq \sigma_1 < \sigma_{a2}$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_1^a &= \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \left| \int_{\gamma_1}^{\gamma_b} h_2(\gamma) \Delta T \tan \gamma d\gamma - \right. \\ &\quad \left. \int_{\gamma_b}^{\gamma_2} h_2(\gamma) T_m \tan \gamma d\gamma \right| \\ \Delta \varepsilon_2^a &= - \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \left| \int_{\gamma_1}^{\gamma_b} h_2(\gamma) \Delta T d\gamma - \int_{\gamma_b}^{\gamma_2} h_2(\gamma) T_m d\gamma \right| \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_1 < \sigma_{b2}$$

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_1^a &= \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_2(\gamma) T_m \tan \gamma d\gamma \\ \Delta \varepsilon_2^a &= - \frac{2}{\pi} \epsilon_{\xi} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} h_2(\gamma) T_m d\gamma \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$h_2(\gamma) = \sqrt{2T_m^6 + 4T_m^8/\pi K_1^2 C a_0 \sin \gamma}$$

$$T_m = a_0(\sigma_{lm} \cos^2 \gamma - \frac{4G_0}{k+1} \alpha)(\sin \gamma - \cos \gamma \tan \varphi)$$

$$\Delta T = a_0[\sigma_1 \cos^2 \gamma (\sin \gamma + \cos \gamma \tan \varphi) - \sigma_{lm} \cos^2 \gamma (\sin \gamma - \cos \gamma \tan \varphi)]$$

$$\gamma_1^b = \max(\gamma_1^U, \gamma_1^m)$$

$$\gamma_1^U = \arccos \left| \frac{A_0^2 + 2B_0 C_0 + \sqrt{A_0^4 + 4A_0^2 B_0 C_0 - 4A_0^2 C_0^2}}{2(A_0^2 + B_0^2)} \right|^{1/2}$$

$$A_0 = \sigma_1 - \sigma_{lm}, B_0 = (\sigma_1 - \sigma_{lm}) \tan \varphi, C_0 = \frac{8G_0}{k+1} \alpha \tan \varphi$$

$$\sigma_{a2} = \frac{8G_0}{k+1} \alpha / 2 \cos^2 \gamma_2^m, \sigma_{b2} = \frac{8G_0}{k+1} \alpha / 2 \cos^2 \gamma_1^m$$

$$\sigma_{a1} = [\sigma_{lm} \cos \gamma_2^m (\sin \gamma_2^m - \cos \gamma_2^m \tan \varphi) +$$

$$\frac{8G_0}{k+1} \alpha \tan \varphi] / \cos \gamma_2^m (\sin \gamma_2^m + \cos \gamma_2^m \tan \varphi)$$

$$\sigma_{b1} = [\sigma_{lm} \cos \gamma_1^m (\sin \gamma_1^m - \cos \gamma_1^m \tan \varphi) +$$

$$\frac{8G_0}{k+1} \alpha \tan \varphi] / \cos \gamma_1^m (\sin \gamma_1^m + \cos \gamma_1^m \tan \varphi)$$

(3) 岩石在重加载过程中的变形特性

在荷载从卸荷终点 σ_{lm} 加至卸荷起点 σ_{lm} 这一过程中, 无新裂纹产生, 岩石的变形由岩石母体的变形 $\Delta \epsilon_i^e$ 与裂纹变形构成。对裂纹变形又由张开裂纹的闭合变形 $\Delta \epsilon_i^e$ 和扩展裂纹的正向滑移变形 $\Delta \epsilon_i^e$ 组成。岩石的总变形为

$$\epsilon_i(\sigma_1) = \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_{in} \quad (9)$$

式中 $i=1, 2$ 分别表示纵向和横向; ϵ_{in} 为卸荷终点的变形。

原生裂纹的闭合变形^[6]为

$$\Delta \epsilon_i^e = \Delta U_i^I + \Delta U_i^{II} \quad (10)$$

式中 $\Delta U_1, \Delta U_2 (j=I, II)$ 由下式确定:

$$\Delta U_1 = \frac{2}{\pi} \epsilon^{k+1} a_0 \int_{\gamma_j} q_j \sin \gamma \cos \beta_1 + 2 \sin \beta_1 \cos \gamma d \gamma$$

$$\Delta U_2 = - \frac{2}{\pi} \epsilon^{k+1} a_0 \int_{\gamma_j} q_j \cos \beta_2 \cos \gamma d \gamma$$

$$R_I = [\gamma_c^n, \gamma_c^r], R_{II} = [\gamma_c^r, \pi/2]$$

$$q_I = \sigma_{lc} - \sigma_{lm}, q_{II} = \sigma_1 - \sigma_{lm}$$

$$\gamma_c^n = \frac{1}{2} \arccos \left| \frac{8G_0}{k+1} \alpha - \sigma_{lm} \right| / \sigma_{lm}$$

$$\gamma_c^r = \frac{1}{2} \arccos \left| \frac{8G_0}{k+1} \alpha - \sigma_1 \right| / \sigma_1$$

扩展裂纹的正向滑移变形如下^[6]:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_1^e &= \frac{2}{\pi} \epsilon \int_{\gamma_1^m}^{\gamma_s} h_2(\gamma) \Delta T_1 \tan \gamma d \gamma \\ \Delta \epsilon_2^e &= - \frac{2}{\pi} \epsilon \int_{\gamma_1^m}^{\gamma_s} h_2(\gamma) \Delta T_1 d \gamma \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$h_2(\gamma) = \sqrt{2T_m^6 + 4T_m^8/\pi K_1^2 C a_0 \sin \gamma}$$

$$\gamma_s = \max(\gamma_c^r, \gamma_2^m)$$

$$\Delta T = a_0[(\sigma_1 - \sigma_{lm}) \cos^2 \gamma - \sigma_{lc} \cos^2 \gamma] (\sin \gamma - \cos \gamma \tan \varphi)$$

综上所述, 由式(1)、式(4)和式(9)便可求得岩石在一个循环加荷过程中的不同应力状态下的应变。

2.2 岩石的孔隙率及其等效弹性参数

按岩石孔隙率的定义, 当岩石中包含的所有微裂隙均完全闭合时, 由微裂隙的闭合所引起的裂隙体积应变便可视为岩石的孔隙率^[7]。对岩石进行等围压加载可求得微裂纹完全闭合时的体积变形, 即岩石的孔隙率如下:

$$\epsilon_v^e = \frac{12}{\pi} \epsilon a_0 \int_0^{\pi/2} (\alpha \sin \gamma \cos \beta_1 + \sin \beta_1 \cos \gamma) d \gamma \quad (12)$$

设岩石在未加载时的等效弹性参数为 $\bar{E}, \bar{\nu}$; 采用修正的自恰方法(1984, Zimmerman)^[8]可以求出岩石孔隙率 ϵ_v^e 与等效弹性参数的关系如下:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{9\bar{K}\bar{G}}{3\bar{K} + \bar{G}}, \bar{G} = G_0 \exp \left| - \frac{15K_0 + 20G_0}{9K_0 + 8G_0} \epsilon_v^e \right| \\ \bar{\nu} &= \frac{3\bar{K} - 2\bar{G}}{2(3\bar{K} + \bar{G})}, \bar{K} = K_0 \exp \left| - \frac{3K_0 + 4G_0}{4G_0} \epsilon_v^e \right| \end{aligned} \quad (13)$$

式中 K_0, G_0 为岩石母体的体积模量和剪切模量。由此可求得岩石在未加载时的超声慢度(声速的倒数)及等效裂纹密度参数 x 如下:

$$\begin{aligned} \frac{S_{P0}}{S_{Pm}} &= \left| \frac{\bar{E}(1 - \bar{\nu})(1 + \nu_0)(1 - 2\nu_0)}{E_0(1 - \nu_0)(1 + \bar{\nu})(1 - 2\bar{\nu})(1 - \epsilon_v^e)} \right|^{-1/2} \\ x &= (E_0 - \bar{E}) / (E_0 - \bar{E}\nu_0^2) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 S_{P0} 为岩石在未加载时的声慢度; S_{Pm} 为岩石母体的声慢度。

2.3 单轴受荷条件下岩石的声学特性

从前面的变形分析可看出, 裂纹的轴向闭合(或张开)变形远大于侧向闭合(或张开)变形, 因而侧向闭合(或张开)变形对裂隙体积变形的贡献可忽略不计; 裂隙在轴向上的扩展滑移(或反向滑移)变形远小于侧向上的变形, 因而轴向上的扩展滑移(或反向滑移)变形对裂隙体积变形的贡献可忽略不计。由此, 我们对岩石的声学特性作如下等效模型: 将原生微裂纹的闭合(或张开)体积变形引起的声速(或声慢度)改变等效为一组水平(垂直于轴向)裂纹引起的声速(或声慢度)改变; 而将微裂纹扩展滑移或反滑移体积变形引起的声速(或声慢度)改变等效为一组垂直(平行于轴向)裂纹引起的声速(或声慢度)改变。设裂纹闭合(或张开)体积变形的等效裂纹密度参数为 x_1 , 裂纹扩展滑移(或

反滑移) 体积变形的等效裂纹密度参数为 x_2 , 岩石未加载时的声速为 V_{p0} , 声慢度为 S_{p0} 。因 x_1 引起的声慢度改变量为 ΔS_{pi}^1 , x_2 引起的声慢度改变量为 ΔS_{pi}^2 , 则岩石在单轴受载过程中任一应力状态时的声慢度 S_{pi} 可表示为

$$S_{pi} = S_{p0} + \Delta S_{pi}^1 + \Delta S_{pi}^2$$

式中 $i = 1, 2$ 分别表示为纵、横方向。

(1) 单轴加载

单轴加载过程中, 裂纹的闭合体积应变 ϵ_v^f 和扩展体积应变 ϵ_v^e 分别由式(2)和式(3)求得, 由前述分析, 等效裂纹的密度参数 x_1 和 x_2 可用近似关系 $x_1 = x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 和 $x_2 = x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 计算, 由 x_1 和 x_2 求得等效裂纹模型的弹性参数 E_1 和 E_2 后, 经过繁琐的数理推导可获得岩石在单轴加载过程中因裂隙闭合和扩展变形所引起的声慢度改变量 ΔS_{pi}^c , ΔS_{pi}^f 如下:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S_{pi}^c}{S_{p0}} &= \left| \frac{(1 - \epsilon_v^f) \bar{E} (1 - \bar{\nu}) / E_0 (1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 E_1 / \bar{E}}{E_1 E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)} \right|^{1/2} - \\ &\quad \left| \frac{\bar{E} (1 - \bar{\nu}) (1 + \nu_0) (1 - 2\nu_0)}{E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)} \right|^{1/2} \\ \frac{\Delta S_{pi}^f}{S_{p0}} &= \left| \frac{(E_0 - \nu_0^2 E_1) E_0 (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)}{(1 - \epsilon_v^f) \bar{E} (1 - \bar{\nu}) (1 + \nu_0) [E_0 (1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 E_1]} \right|^{-1/2} - \\ &\quad \left| \frac{\bar{E} (1 - \bar{\nu}) (1 + \nu_0) (1 - 2\nu_0)}{E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)} \right|^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S_{pi}^f}{S_{p0}} &= \left| \frac{E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)}{\bar{E} (1 + \nu_0) (1 - 2\nu_0) (1 - \bar{\nu})} \right|^{1/2} - \\ &\quad \left| \frac{E_0 (E_0 - \nu_0^2 E_2) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)}{\bar{E} [E_0 (1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 E_2] (1 + \nu_0) (1 - \bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)} \right|^{1/2} \\ \frac{\Delta S_{pi}^f}{S_{p0}} &= \left| \frac{E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)}{\bar{E} (1 + \nu_0) (1 - 2\nu_0) (1 - \bar{\nu})} \right|^{1/2} - \\ &\quad \left| \frac{E_2 E_0 (1 - \nu_0) (1 + \bar{\nu}) (1 - 2\bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)}{\bar{E} [E_0 (1 - \nu_0) - 2\nu_0^2 E_2] (1 - \bar{\nu}) (1 - \epsilon_v^f)} \right|^{1/2} \end{aligned} \quad (16)$$

在加载过程中, 任一应力状态 σ_1 时的超声波速 V_{pi} 和衰减系数 α_{pi} 如下:

$$\begin{aligned} V_{pi} / V_{p0} &= (1 - \Delta S_{pi}^c / S_{p0} + \Delta S_{pi}^f / S_{p0})^{-1} \\ \alpha_{pi} / \alpha_{p0} &= (1 - \epsilon_v^f) / (1 - \epsilon_v^f + \epsilon_v^f + \epsilon_v^f) (V_{p0} / V_{pi})^3 \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $i = 1, 2$ 分别表示为纵、横方向; V_{p0} , α_{p0} 为岩石在未加载时的声速和衰减系数。

(2) 单轴卸载

设岩石在卸荷起点的声慢度为 S_p^m , 在单轴卸荷过程中, 裂纹张开体积应变 ϵ_v^e 和反滑移体积应变 ϵ_v^f 由式(5)和式(6)~(8)求得, 相应的等效裂纹密度参数 x_1 和 x_2 分别为 $x_1 = -x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 和 $x_2 = x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 。按与加载过程相同的处理方法可求得因裂纹张开和裂纹的反

滑移引起的声慢度改变量 $\Delta S_{pi}^o / S_{p0}$, $\Delta S_{pi}^a / S_{p0}$ ($i = 1$ 表示纵向, $i = 2$ 表示横向)。在卸荷过程中任一点 σ_1 时的超声波速 V_{pi} 和衰减系数 α_{pi} 为

$$\begin{aligned} V_{pi} / V_{p0} &= (S_{pi}^m / S_{p0} + \Delta S_{pi}^o / S_{p0} - \Delta S_{pi}^a / S_{p0})^{-1} \\ \alpha_{pi} / \alpha_{p0} &= (V_{p0} / V_{pi})^3 (1 - \epsilon_v^f) / (1 - \epsilon_v^f + \epsilon_v^f + \epsilon_v^f + \epsilon_v^f) \end{aligned} \quad (18)$$

式中 ϵ_v^f 为卸荷起点时微裂纹总的体积变形。

(3) 单轴重加载

如果设岩石在卸荷终点的声慢度为 S_p^n , 在重加载过程中裂纹闭合体积应变 ϵ_v^f 和次生裂纹张开体积应变 ϵ_v^e 由式(10)和式(11)求得, 相应的等效裂纹密度参数 x_1 和 x_2 分别为 $x_1 = x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 和 $x_2 = -x\epsilon_v^f / \epsilon_v^e$ 。同理, 由 x_1 , x_2 可求得声慢度增量 $\Delta S_{pi}^c / S_{p0}$, $\Delta S_{pi}^s / S_{p0}$ ($i = 1$ 表示纵向, $i = 2$ 表示横向)。此时, 在重加载过程中任一应力状态 σ_1 下的超声波速 V_{pi} 和衰减系数 α_{pi} 为

$$\begin{aligned} V_{pi} / V_{p0} &= (S_{pi}^n / S_{p0} - \Delta S_{pi}^c / S_{p0} + \Delta S_{pi}^s / S_{p0})^{-1} \\ \alpha_{pi} / \alpha_{p0} &= (V_{p0} / V_{pi})^3 (1 - \epsilon_v^f) / (1 - \epsilon_v^f + \epsilon_v^f + \epsilon_v^f + \epsilon_v^f) \end{aligned} \quad (19)$$

式中 ϵ_v^f 是卸荷终点的裂纹总体积变形。

综上所述, 从理论上完成了对单轴加荷、卸荷及重加荷一个完整循环加荷过程中的岩石的超声波速及衰减计算的详细推导。

3 单轴受荷条件下岩石声学特性实验研究

为了验证前述提出的理论模型, 笔者对多种岩石进行了单轴加卸荷实验, 实验主要进行岩石试件单轴加卸荷条件下的声波测试实验, 单轴实验系统及测试系统如图1所示。

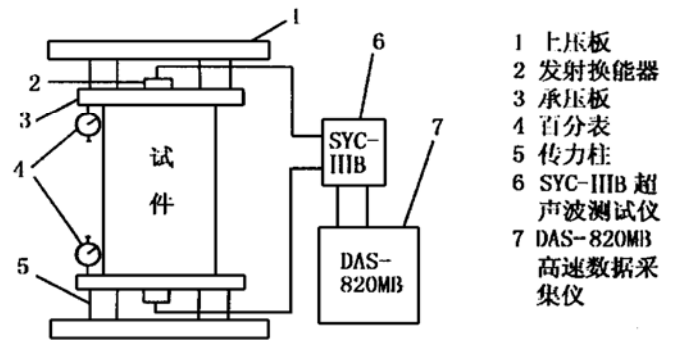


图1 声波测试实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of ultrasonic test device

加载采用压力试验机进行(最大荷载 2MN), 应变测试采用百分表进行测量, 声波数据采集由 SYC-III B 型声波仪及 DAS820MB 高速数据采集系统组成, 声波

仪完成声波信号的发射和接收, 高速数据采集仪完成对接收波形的采样和存盘。试样均加工成圆柱形试件 (直径为 30 mm, 高度为 60 mm)。对每个岩石试件, 先加载至破坏点附近, 然后卸荷至零应力, 再重新加荷至岩石破坏, 每一级荷载对声波及变形进行一次测量。在实验过程中, 平均加载速率为 10 N/s, 平均卸载速率为 5N/s, 声波测量采样率 0.1μs, 采样长度为 10 kB, 采用一次内触发方式。表 1 给出三种岩石的力学参数; 图 2~ 4 分别为三种岩石的实验结果, 图中直线表示理论计算结果, “•”表示加载实测结果, “□”表示卸载

实测结果, “Δ”表示重加载实测结果。

从图 2~ 图 4 中可以看出, 岩石在单轴加荷过程中, 轴向声速在压密阶段明显增大, 衰减系数明显减小; 随后声速几乎呈线性缓慢增加, 而衰减系数则缓慢减小; 当应力达到约 90% 左右的破坏强度时, 大理岩的声速有较明显的下降, 衰减系数略有上升, 而灰岩和玄武岩的实验结果几乎无此现象, 并且, 下降幅度远小于压密阶段。这说明了岩石在单轴加载过程中, 微裂隙的闭合是影响岩石轴向声学特性的主要因素。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rocks

岩 石	E_0/GPa	ν_0	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$\varphi/(\circ)$	a_0/mm	α	ϵ/mm^{-1}
大理岩	17.7	0.26	0.64	32	0.40	2.4×10^{-4}	14.0
灰 岩	34.2	0.23	0.66	36	0.15	2.3×10^{-4}	10.5
玄武岩	43.9	0.18	1.24	39	0.17	1.8×10^{-4}	12.0

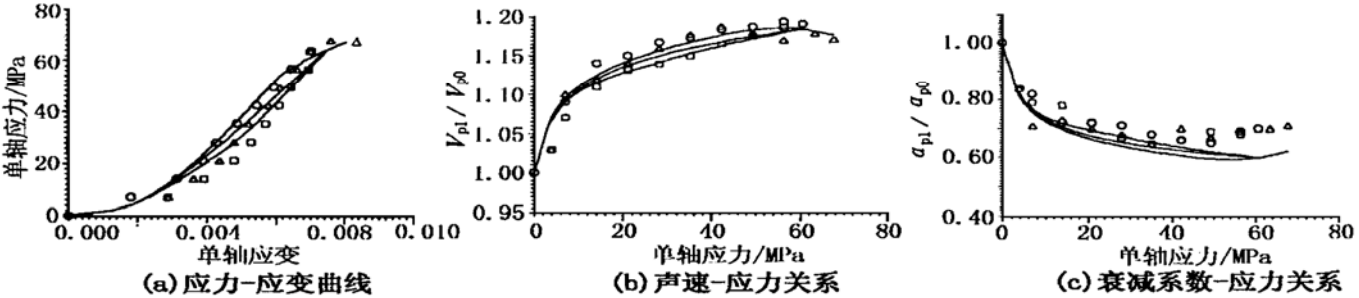


图 2 大理岩单轴实验结果

Fig. 2 Experimental results of the marble

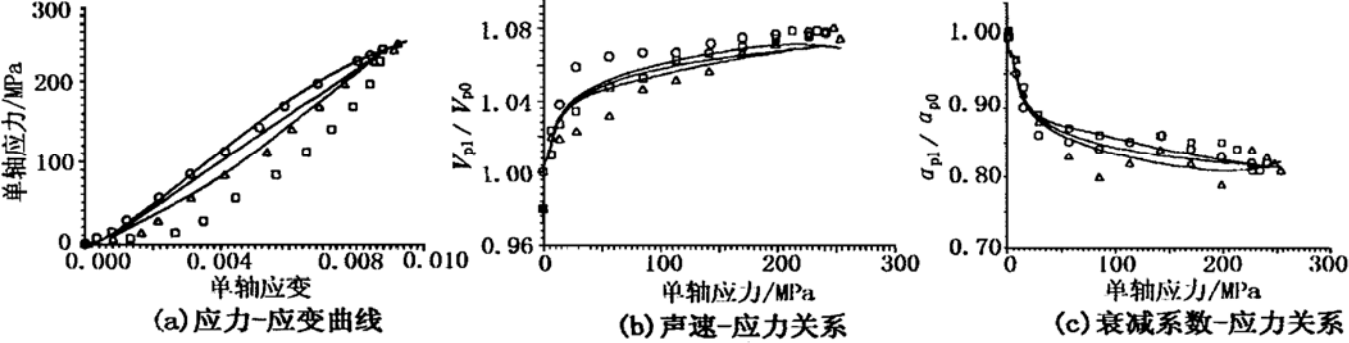


图 3 灰岩单轴实验结果

Fig. 3 Experimental results of the limestone

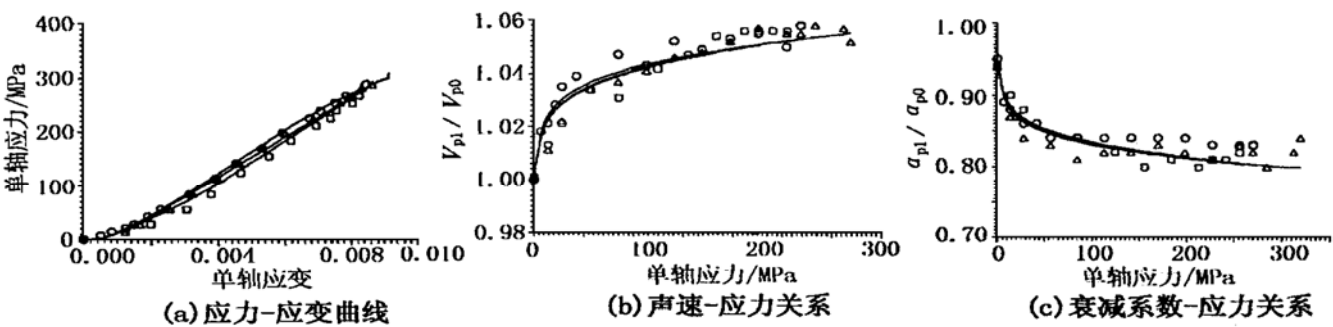


图 4 玄武岩单轴实验结果

Fig. 4 Exnerimental results of the basalt

在卸荷过程中, 岩石的轴向声速及衰减参数的变化几乎近于加载的逆过程, 但声速在数值上明显小于加载过程, 而衰减系数则相反。这表明在单轴卸荷过程中, 微裂隙的张开是影响岩石轴向声学特性的主要因素。

上述图 2~ 图 4 中实验数据与理论计算基本吻合, 说明本文提出的理论模型在一定程度上可以模拟岩石在单轴受荷条件下的声学特性。

4 结 语

岩石在受荷条件下的声学特性是当今岩石声学领域研究的一个热点, 由于岩石本身的复杂性从而增大了该课题在理论研究上的难度, 目前国内外的研究成果还没有一个完善的理论模型。本文初步尝试了从岩石的变形特性出发, 通过建立等效模型对岩石在单轴受荷条件下的声学特性进行理论分析, 通过实验验证, 本文提出的理论模型在一定程度上可以模拟岩石在单轴受荷条件下的声学特性。但这只是一个相当近似的模

型, 如何在理论上更准确地描述岩石在单轴受荷条件下的声学特性还有待作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Walsh J B. The elastic of cracks on the compressibility of rock. JGR, 1965, **70**(20): 381~ 411
- 2 Singh B. The behaviour of rocks under pressure. Investigations Using Ultrasonic, 1960, **201**(10): 719~ 724
- 3 Nur A, Simmons G. Stress-induced velocity anisotropy in rock: an experimental study. JGR, 1969, **74**(27): 6667~ 6674
- 4 Nur A. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. JGR, 1971, **76**(8): 2022~ 2034
- 5 Walsh J B, Brace W F, England A W. The effect of porosity on compressibility of glass. J Am Ceram Soc, 1965, **48**(8): 605~ 608
- 6 赵明阶. 裂隙岩体在受荷条件下的声学特性研究: [博士学位论文]. 重庆: 重庆建筑大学, 1998
- 7 Walsh J B, Brace W F. Cracks and pores in rocks. Int Congress on Rock Mech, Lisbon, 1966
- 8 Zimmerman R W. The effect of microcracks on the elastic moduli of brittle materials. J Mater Sci Cett, 1985, **13**(1): 56~ 61